

MANUAL

TRANSFERENCIA Y DIFUSIÓN DE TIEMPO Y FRECUENCIA POR SATÉLITE



Edición de 2010
Oficina de Radiocomunicaciones



MANUAL

TRANSFERENCIA Y DIFUSIÓN DE TIEMPO Y FRECUENCIA POR SATÉLITE



EL SECTOR DE RADIOCOMUNICACIONES DE LA UIT

El Sector de Radiocomunicaciones tiene por objeto garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas en todos los servicios de radiocomunicaciones, comprendidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación alguna en cuanto a las gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, desempeñan las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Para cualquier consulta sobre cuestiones de radiocomunicaciones

Diríjase a:

UIT
Oficina de Radiocomunicaciones
Place des Nations
CH -1211 Ginebra 20
Suiza

Teléfono: +41 22 730 5800
Fax: +41 22 730 5785
Correo-e: brmail@itu.int
Web: www.itu.int/itu-r

Para solicitar publicaciones de la UIT

No se admiten pedidos por teléfono. Sírvase tramitarlos por telefax o correo electrónico.

UIT
División de ventas y comercialización
Place des Nations
CH -1211 Ginebra 20
Suiza

Fax: +41 22 730 5194
Correo-e: sales@itu.int

Librería electrónica de la UIT: www.itu.int/publications

PREFACIO

El desarrollo tecnológico en general, y el de las aplicaciones y tecnologías de la información y la comunicación en particular, requiere cada vez mayor precisión en la cronometría y sincronización de los diferentes dispositivos electrónicos.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones estudia y prepara normas internacionales sobre escalas de tiempo pertinentes y su utilización en las redes de telecomunicaciones y de computadores, en los sistemas electrónicos de navegación, etc.

En 1974, el Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR – *Comité Consultatif International des Radiocommunications*), en cooperación con la Conferencia General de Pesas y Medidas y la Oficina Internacional de la Hora, crearon el tiempo universal coordinado (UTC).

En 1978, el CCIR aprobó la utilización del UTC «para designar el tiempo en todas las actividades de telecomunicaciones internacionales y en todos los documentos oficiales de la Unión Internacional de Telecomunicaciones». El CCIR también dispuso que el UTC «se utilice como la referencia fundamental para las emisiones de frecuencias patrón».

La Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones (CAMR-79) de la UIT incorporó el UTC en el Reglamento de Radiocomunicaciones, con categoría de tratado internacional, y desde entonces el UTC se viene utilizando como la principal escala de tiempo para las redes de telecomunicaciones (alámbricas e inalámbricas) y para otras aplicaciones relacionadas con el tiempo.

Los sistemas modernos de satélite difunden señales horarias y frecuencias patrón a través de trayectos despejados y sin obstáculos, con un retardo fácil de modelizar, y constituyen la fuente principal y exacta de tiempo y frecuencia, tan esencial para los servicios marítimos y aeronáuticos, los sistemas de navegación y de determinación de la posición y para el correcto funcionamiento de las redes de telecomunicaciones y de computadores.

Este es el primer manual de la UIT que facilita información detallada sobre los métodos prácticos, las tecnologías, los algoritmos, las estructuras de datos y la utilización práctica de señales horarias y frecuencias que suministran los sistemas de satélite.

Se presta especial atención a los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) que pertenecen al servicio de radionavegación por satélite. El GNSS suministra señales horarias y frecuencias a cualquier lugar de la Tierra y actualmente representa de hecho la fuente primaria de señales horarias precisas para aplicaciones gubernamentales, comerciales, de transporte y científicas.

Dr. Valery TIMOFEEV
Director
Oficina de Radiocomunicaciones

ÍNDICE

	<i>Página</i>
PREFACIO.....	iii
PREÁMBULO	vii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	xi
CAPÍTULO 1 – SATÉLITES Y TRANSFERENCIA Y DIFUSIÓN DE TIEMPO Y FRECUENCIAS	1
CAPÍTULO 2 – SISTEMA MUNDIAL DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN	7
CAPÍTULO 3 – SISTEMAS DE AUMENTO POR SATÉLITE PARA GPS.....	21
CAPÍTULO 4 – TIEMPO DEL SISTEMA GPS	47
CAPÍTULO 5 – SISTEMA DE SATÉLITES DE NAVEGACIÓN GLONASS	53
CAPÍTULO 6 – SISTEMAS DE SATÉLITES DE COMUNICACIÓN	69
CAPÍTULO 7 – ESCALAS DE TIEMPO	77
CAPÍTULO 8 – CENTROS NACIONALES DE CRONOMETRÍA	93
CAPÍTULO 9 – EFECTOS RELATIVISTAS EN LA TRANSFERENCIA Y DIFUSIÓN DE TIEMPO Y FRECUENCIA POR SATÉLITE.....	99
CAPÍTULO 10 – ORIENTACIÓN DE LA TIERRA Y SISTEMA GEODÉSICO.....	127
CAPÍTULO 11 – PROPAGACIÓN Y FACTORES AMBIENTALES.....	137
CAPÍTULO 12 – SISTEMAS MUNDIALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE COMO HERRAMIENTA PRIMARIA PARA LA TRANSFERENCIA DE TIEMPO.....	147
CAPÍTULO 13 – TÉCNICAS GEODÉSICAS UTILIZANDO MEDICIONES DE FASE Y CÓDIGO GPS	163
CAPÍTULO 14 – TRANSFERENCIA BIDIRECCIONAL POR SATÉLITE DE TIEMPO Y FRECUENCIA (TWSTFT).....	193
CAPÍTULO 15 – RESUMEN DE LA DIFUSIÓN DEL TIEMPO Y LA FRECUENCIA	205

PREÁMBULO

La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones relativa a servicios científicos (SG 7) se creó tras la reorganización estructural en 1990 en la Asamblea Plenaria del CCIR en Düsseldorf. En aquel tiempo, la Comisión de Estudio 2 «Servicios de investigación espacial y de radioastronomía» (CE 2) se fusionó con la Comisión de Estudio 7 «Frecuencias patrón y señales horarias» (CE 7) para constituir una nueva Comisión de Estudio 7 sobre servicios científicos.

Muchas de las actividades de la Comisión de Estudio sobre servicios científicos están relacionadas con los adelantos tecnológicos en la utilización del espectro radioeléctrico para fines científicos. A este respecto, la comunidad dedicada a patrones de tiempo y de frecuencias colabora desde hace mucho tiempo con la Unión Internacional de Telecomunicaciones con el fin de preparar Recomendaciones sobre la utilización del espectro radioeléctrico para facilitar la difusión de referencias de tiempo exactas y normalizar los métodos de difusión. En consecuencia, se especifican también patrones de frecuencias precisos y técnicas para su aplicación.

La CE 7 del Sector de Radiocomunicaciones (servicios científicos) consta de cuatro Grupos de Trabajo de (GT) que se ocupan de asuntos técnicos relativos a disciplinas específicas del ámbito de los servicios científicos. El Grupo de Trabajo 7A (Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias) se encarga de la generación y difusión de señales horarias y frecuencias por los servicios de radiocomunicaciones espaciales y terrenales. En los últimos 15 a 20 años los sistemas de satélite, sobre todo los satélites de navegación, que proporcionan los servicios de tiempo y frecuencia precisos, se han convertido en los medios primarios de difusión, y las capacidades de esos servicios han aumentado considerablemente. Este aumento de la capacidad y el desarrollo de estos sistemas de satélite han dificultado mantener el ritmo de su desarrollo, su efecto en la comunidad de cronometría y frecuencias patrón y las comunidades de radiocomunicaciones y telecomunicaciones en general.

El presente Manual facilita información técnica y operativa exhaustiva sobre los sistemas de satélites actuales utilizados para difundir las señales horarias y de frecuencias precisas.

Como Presidente de la CE 7, tengo el gran placer de presentar este Manual a las mencionadas comunidades de usuarios y no me cabe duda de que les servirá de importante herramienta de referencia en su trabajo.

El presente Manual es el fruto de diversos años de preparación y trabajos para tratar de recopilar el desarrollo de las tecnologías de satélite y el aumento de la capacidad que éstas han generado. El Manual no hubiera podido terminarse sin las contribuciones de muchas administraciones que participan en la CE 7 y el GT 7A. Deseo dar las gracias especialmente al Sr. Ronald BEARD, Presidente del GT 7A, que ha dirigido este proyecto. También extendemos nuestro agradecimiento especial al Sr. A. VASSILIEV de la Oficina de Radiocomunicaciones que ha desempeñado un papel importante en la preparación, edición y publicación del Manual.

AGRADECIMIENTOS

Los Relatores de las diferentes secciones del Manual han realizado una labor extraordinaria y deseamos manifestar nuestro reconocimiento por sus contribuciones, así como a muchos otros que han invertido tiempo y esfuerzos en este Manual.

Sistemas de Satélite:

AXELRAD, P.
KLEPCZYNSKI, W. J.
BRUNET, M.
IMAE, M.
BARTENEV, V.
KLIMOV, V.
KOSSENKO, V.
KRASILSCHKOV, M.
REVNIVYKH, S.
REINHARDT, V.
VASSILIEV, A.

Escalas de tiempo, señales horarias y sistemas de referencia:

CORDARA, F.
McCARTHY, D.
NELSON, R.
ARIAS, E.
BAUCH, A.

Técnicas:

LEWANDOWSKI, W. y AZOUBIB, J.
KLEPCZYNSKI, W. J.
KIRCHNER, D.
De JONG, G.
RAY, J.
SENIOR, K.

Propagación y factores ambientales:

KLOBUCHAR, John A.

Deseamos dar las gracias especialmente al Sr. Ronald BEARD, Presidente del GT 7A, por haber dirigido este proyecto, por su contribución al presente Manual y por su edición, así como al Sr. Alexandre VASSILIEV, Consejero de la CE 7, de la Oficina de Radiocomunicaciones, por haber facilitado textos adicionales, y por la edición y preparación de la publicación.

Vincent MEENS
Presidente de la Comisión de Estudio 7
de Radiocomunicaciones

INTRODUCCIÓN

Un poco de historia ...

Hace muchísimos años el transcurso del tiempo se medía mediante el movimiento del Sol y otros astros, las fases de la Luna, los cambios de estación y el paso de generaciones. Para medir intervalos de tiempo se ha recurrido a relojes de arena, de agua y dispositivos mecánicos. Las frecuencias de los instrumentos musicales se sintonizan comparando el sonido de un diapason.

Ha habido a lo largo de la historia ingeniosos ejemplos de medida de tiempo, intervalos de tiempo y frecuencia. Un dispositivo egipcio que data del año 1500 a.C., de forma similar a una T inclinada, servía para medir el paso del tiempo a partir de la sombra proyectada por su travesaño en una regla no lineal. La T se orientaba al este en la mañana. A mediodía, se daba la vuelta al dispositivo de modo que proyectara su sombra en la dirección del atardecer.

Ya en el año 1000 a.C., los chinos construyeron frecuencias patrón contando el número de semillas que llenaban el tubo de un instrumento de viento. En el caso de tubos del mismo diámetro, la frecuencia (tono) se especificaba por el número de semillas necesarias para rellenar el tubo.

En el siglo XIII, en España, se medían intervalos de tiempo quemando velas situadas en los brazos de una palanca que iban perdiendo peso a medida que se consumían; el brazo se desplazaba indicando así el paso del tiempo.

Los chinos quemaban relojes de incienso que marcaban el tiempo con los cambios en las cenizas emitidas por las capas de incienso que estaban impregnadas de aceites diferentes. Las tablas de Cassini que predecían eclipses de las lunas de Júpiter se utilizaron para suministrar medidas del tiempo independientes de la posición, con una exactitud de algunos minutos, para crear el mapa de Francia en 1679. El cronómetro de Harrison, perfeccionado en 1759, permitió mantener la hora a bordo de un barco con una exactitud del orden de 10 segundos durante periodos de semanas [Dana and Penrod, 1990].

Ya en 1450 los astrónomos pensaban que la longitud podía determinarse a partir del ángulo que forman las estrellas fijas con la Luna, pero las tablas eran imprecisas. En 1675 el Rey Carlos II hizo construir el Observatorio de Greenwich, y así se creó el meridiano de Greenwich. Se tardaron 100 años para preparar el primer almanaque náutico. En este momento de la historia, el comercio con el nuevo mundo era extremadamente importante.

La importancia crítica de determinar la longitud adquirió importancia al producirse en 1707 una tragedia en la que una flota al mando del Almirante Sir Cloudsley Shovel chocó contra las Islas de Sicilia, que se saldó con la pérdida de cuatro barcos y 2 000 hombres. La Corona Británica respondió ofreciendo £ 20 000 (unos 2 millones USD en dinero de hoy) para un cronómetro lo suficientemente bueno como para determinar la longitud con una exactitud de 30 millas.

A sus 21 años, John Harrison, de Yorkshire, decidió dedicar su vida a la construcción de cronómetros de madera y metal. Fabricó uno con engranaje de madera que no variaba más de un segundo al mes durante un periodo de 14 años. Navegó de Plymouth a Madeira llevando su cronómetro N° 4 y logró obtener una exactitud de posición de 1 milla aproximadamente. El astrónomo real dudó el resultado. Cuando tenía 70 años se embarcó en otro viaje, esta vez a Barbados. Después de cinco meses en el mar, su cronómetro N° 4 predijo la posición de Barbados con un margen de error de 10 millas. Le tomó otros 10 años de penosas reclamaciones para recabar el dinero de la recompensa, que nunca recibió en su totalidad.

Si bien se registraron considerables adelantos en los cronómetros de navegación después del trabajo de investigación de Harrison, la siguiente gran etapa no se produciría hasta los años de 1920. En esta década se descubrieron y desarrollaron los osciladores de cristal de cuarzo, que culminó con la aparición de relojes de cuarzo que podían detectar las inestabilidades en la velocidad de rotación de la Tierra, UT1. Estos relojes supusieron un gran avance en todos los ámbitos de la cronometría, tanto para la navegación como para otras aplicaciones [Allan, 1995].

El desarrollo del radar y de las radiocomunicaciones de alta frecuencia en los años 30 y 40 hizo posible generar el tipo de ondas electromagnéticas (microondas) necesarias para interactuar con átomos. La investigación en el campo de los relojes atómicos se centró primeramente en las resonancias de microondas de la molécula de amoníaco.

El primer reloj atómico basado en amoníaco fue creado en 1948 y presentado en 1949. Sin embargo, su fidelidad (de unos 1×10^{-10}) no era mucho mayor que los patrones existentes, por lo que la investigación pasó inmediatamente al campo más prometedor de los dispositivos de haz atómico basados en la resonancia del átomo de cesio. La primera frecuencia patrón práctica basada en el átomo de cesio fue creada por el Laboratorio Nacional de Física en Inglaterra el año 1955. Desde entonces se mantiene el tiempo atómico.

En el Manual del UIT-R titulado «Selección y utilización de sistemas precisos de frecuencias patrón y señales horarias» se describen las frecuencias patrón y señales horarias precisas que se utilizan actualmente, las fuentes y sus características, las escalas de tiempo, las metodologías, los sistemas existentes y la experiencia operativa.

Importancia de la precisión de tiempo y frecuencia y de la sincronización horaria

La frecuencia y el tiempo exactos se han convertido en el fundamento de muchos procesos tecnológicos y de la vida cotidiana. La cronometría de precisión se utiliza ahora en:

- todos los sistemas de comunicaciones;
- la mayoría de los sistemas de navegación;
- los sistemas de telecomunicaciones e informáticos, así como en sus redes;
- los sistemas bancarios y de contabilidad;
- los sistemas de control de tráfico marítimo y aeronáutico;
- gran parte de la investigación científica;
- detección de averías y control de la eficiencia de las redes de distribución eléctrica;
- la mayoría de los sistemas militares;
- la investigación y exploración espacial;
- la detección de terremotos y en la tectónica de placas mundial;
- detección del medio ambiente;
- medidas del nivel del océano y de la corriente oceánica; sistemas anticolidión de aviones y de aterrizaje de precisión;
- rastreo de flota de camiones;
- cartografía de carreteras.

Cada año se fabrican más de dos millones de resonadores de cuarzo y actualmente se utilizan casi cien mil relojes atómicos.

La calidad de los relojes, aunque es una cuestión importante, no es el único factor que contribuye a la exactitud de la medida del tiempo. Otro importante factor es la calidad de los enlaces horarios utilizados para comparar y sincronizar relojes. Un ejemplo son las redes de telecomunicaciones/computadores. La mayoría de las redes de telecomunicaciones y de computadores emplean relojes. Cuando éstos no están sincronizados, surgen consecuencias negativas, entre las que cabe destacar:

- error de funcionamiento debido a la inadecuada secuencia de eventos iniciada por el software correspondiente (protocolos), datos de copia de seguridad, etc.;
- pérdida de datos – la datación incorrecta puede iniciar la modificación errónea de bases de datos, de modo que algunas aplicaciones pueden funcionar incorrectamente o incluso fallar;
- problemas de seguridad – dado que los registros de acceso del servidor son una compilación de información procedente de diferentes computadores, es fundamental que la datación sea correcta. Una cronometría errónea puede poner en peligro la seguridad del servidor, dado que los ficheros registro son inexactos, y, por tanto, los administradores no pueden rastrear las actividades de pirateo.

Sistemas de satélite para la difusión exacta de tiempo y frecuencia

Las ondas radioeléctricas se utilizaban para la transferencia de señales horarias y su difusión desde principios del siglo XX. Ahora bien, desde el principio se sabía que las señales horarias radioeléctricas sufrían retardos en el trayecto desde el transmisor terrestre hasta el receptor terrestre, y que la exactitud de la señal horaria no podía mejorarse más que sabiendo el retardo en el trayecto. El retardo en el trayecto de las señales emitidas desde un transmisor en tierra es muy difícil de estimar, dado que el retardo cambia continuamente debido a las condiciones ionosféricas variables. Algunos de estos problemas se reducen utilizando señales de visibilidad directa con zona de cobertura pequeña.

En cambio, el retardo en un trayecto sin obstáculos entre un transmisor de satélite y un receptor en tierra es más estable y puede determinarse con mayor exactitud que el retardo entre estaciones en tierra. Esta es una importante ventaja, porque la exactitud de cualquier método de distribución casi siempre está limitada por la incertidumbre del método utilizado para compensar el tiempo que tarda la señal en llegar del origen al destino.

Toda señal horaria que se transmita desde una altura elevada sobre la Tierra, por un trayecto despejado y sin obstáculos entre el transmisor y el receptor, es normalmente más exacta que cualquier señal emitida desde tierra. Además, las señales emitidas desde un satélite pueden recibirse en zonas más amplias, de modo que los sistemas de satélite pueden realizar la distribución de tiempo y frecuencia a regiones más grandes y con mayor facilidad que los sistemas terrenales. Por otra parte, el retardo en el trayecto entre un transmisor de satélite y un receptor en tierra puede modelizarse con mayor exactitud que el correspondiente retardo entre estaciones exclusivamente terrestres.

El presente Manual se ha concebido a modo de introducción al campo de la transferencia y difusión de tiempo y frecuencia por satélite. En los primeros capítulos se presenta una descripción general de los sistemas de satélite utilizados para la difusión de señales horarias y frecuencias patrón. Dada preeminencia y enorme influencia de los sistemas mundiales de navegación por satélite, tales como el sistema mundial de determinación de la posición (GPS), el sistema mundial de satélites de navegación (GLONASS) y los satélites de comunicaciones, en la difusión del tiempo, se incluyen capítulos que describen su generación y su relación con la escala de tiempo internacional. Una vez descritos los sistemas de satélite, se da una introducción a la generación y mantenimiento de la escala de tiempo internacional, el tiempo universal coordinado (UTC). Esta escala de tiempo se genera a partir de la contribución de numerosos centros y laboratorios nacionales de cronometría. Por ese motivo, se dedica un capítulo a describir la estructura y funcionamiento de estos centros nacionales de cronometría que contribuyen a la generación y difusión de la escala de tiempo. La transferencia y divulgación de tiempo entre estos centros de cronometría y cada usuario se realiza mediante transmisiones radioeléctricas. Los efectos relativistas y de propagación sobre estas transmisiones se analizan antes de los últimos capítulos, que describen los principales métodos en vigor de transferencia de tiempo y frecuencia.

Referencias

- ALLAN, D. W. [5-7 June 1995] The Impact of Precise Time in Our Lives, 50th Anniversary Annual Meeting, Institute of Navigation, Colorado Springs, Colorado, United States of America, (<http://www.ALLANstime.com/Publications/DWA/PDF/95jungps.pdf>).
- DANA, P. and PENROD, B. [July-August, 1990] The Role of GPS in Precise Time and Frequency Dissemination, GPS World, (http://www.pdana.com/PHDWWW_files/gpsrole.pdf).
- ITU-R [1997] Handbook on Selection and Use of Precise Frequency and Time Systems. Geneva Switzerland, (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-31/en>).

CAPÍTULO 1

SATÉLITES Y TRANSFERENCIA Y DIFUSIÓN DE TIEMPO Y FRECUENCIAS

	<i>Página</i>
1.1 Introducción.....	2
1.2 Servicios de radiocomunicación espaciales y sistemas de satélite para la transferencia y difusión de tiempo y frecuencia.....	2
1.2.1 Servicio de frecuencias patrón y señales horarias	2
1.2.2 Sistema mundial de navegación por satélite	4
Referencias	5

1.1 Introducción

Durante las últimas décadas, los relojes atómicos han pasado a ser de una novedad de laboratorio a un instrumento de utilización a gran escala. Los adelantos tecnológicos en osciladores de cuarzo y en sistemas de cronometría por satélite han mejorado notablemente los relojes atómicos. Los sistemas de navegación, de comunicaciones y de producción de energía se han beneficiado considerablemente con estos adelantos. La cronometría de precisión ya no es una novedad sino una necesidad. Muchas aplicaciones dependen, por tanto, de esta cronometría exacta.

La Recomendación UIT-R TF.686 – Glosario y definiciones de términos de tiempo y frecuencia, contiene un glosario y las definiciones de los términos de tiempo y frecuencia que se utilizan en el presente Manual.

1.2 Servicios de radiocomunicación espaciales y sistemas de satélite para la transferencia y difusión de tiempo y frecuencia

La era espacial comenzó con el lanzamiento del satélite ruso *Sputnik 1* el mes de octubre de 1957, seguido por el lanzamiento del primer satélite americano, el *Explorer 1*, sólo cuatro meses después. Los primeros satélites se utilizaron para estudiar el sistema solar y la atmósfera, pero rápidamente comenzaron a utilizarse para telecomunicaciones. El satélite de retransmisión pasivo *Echo 1*, lanzado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) en agosto de 1960, sirvió de «espejo» que reflejaba las señales radioeléctricas hacia la Tierra [Whalen, 2002]. Los primeros estudios sobre la propagación realizados gracias a *Echo 1* en 1960 [Jakes Jr, 1961] se consideran a veces como los primeros experimentos de cronometría por satélite. El primer experimento de cronometría de precisión fue probablemente el realizado con la ayuda del satélite de retransmisión activo *Telstar 1* el mes de agosto de 1962. Este experimento permitió a United States Naval Observatory (USNO), al National Physical Laboratory (NPL) del Reino Unido y al Royal Greenwich Observatory (RGO) comparar relojes trasatlánticos utilizando una nueva técnica denominada transferencia bidireccional de tiempo por satélite.

Todos los sistemas de satélite que pertenecen a los diferentes servicios de radiocomunicaciones espaciales (radiodifusión, fijo, móvil por satélite, etc.) tienen que utilizar, de un modo u otro, la capacidad de transferencia de tiempo y frecuencia [Lowe *et al.*, 2007]. Esta transferencia de tiempo se necesita en la telemetría, en los sistemas de rastreo e instrucciones, en la determinación de la distancia y en la datación. Ahora bien, la precisión de frecuencia y tiempo que requieren muchos satélites de comunicación (especialmente los comerciales) se limita en general a la necesaria para mantener la banda de radiofrecuencia asignada y realizar las funciones mencionadas. Algunos sistemas de comunicaciones, por ejemplo los que emplean sistemas de acceso múltiple en el dominio del tiempo (TDMA), requieren mayor exactitud de tiempo a los efectos de la comunicación.

Los sistemas de meteorología y de exploración de la tierra por satélite precisan de una función de cronometría para medir los diferentes parámetros ambientales (por ejemplo, el nivel del mar) y han venido utilizándose desde hace mucho tiempo para la difusión exacta del tiempo [Lombardi and Hanson, 2005; EUMETSAT Satellite Jason-2, 2008].

Algunos sistemas, especialmente los del servicio de radionavegación por satélite [Reglamento de Radiocomunicaciones, 2008], son importantísimos para la difusión exacta de tiempo y frecuencia. La transferencia de tiempo y frecuencia resulta fundamental para el funcionamiento de estos sistemas, cuya principal finalidad es ofrecer un servicio eficaz de posición, velocidad y hora en todo el planeta. Estos sistemas contienen fuentes exactas de tiempo/frecuencia a bordo de los satélites, así como segmentos eficaces en tierra para supervisar el funcionamiento de estos satélites y mantener la exactitud de las fuentes de tiempo/frecuencia de a bordo.

El Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) de la UIT designa un servicio especial de radiocomunicaciones espaciales para la difusión de señales horarias y frecuencia exactas por todo el mundo denominado servicio de frecuencias patrón y señales horarias.

1.2.1 Servicio de frecuencias patrón y señales horarias

Reconociendo la importancia que revisten las frecuencia patrón y las señales horarias para muchas industrias, organizaciones científicas y de telecomunicaciones de emergencia, la Unión Internacional de Telecomunicaciones incluyó definiciones [Reglamento de Radiocomunicaciones, 2008] del *servicio de*

frecuencias patrón y señales horarias y de las estaciones de radiocomunicación conexas en su RR, que tiene categoría de tratado internacional. A continuación se reproducen las definiciones que figuran en la edición de 2008 del RR:

1.53 *servicio de frecuencias patrón y de señales horarias:* Servicio de radiocomunicación para la transmisión de frecuencias especificadas, de señales horarias, o de ambas, de reconocida y elevada precisión, para fines científicos, técnicos y de otras clases, destinadas a la recepción general.

1.54 *servicio de frecuencias patrón y de señales horarias por satélite:* Servicio de radiocomunicación que utiliza estaciones espaciales situadas en satélites de la Tierra para los mismos fines que el servicio de frecuencias patrón y de señales horarias.

Este servicio puede incluir también los *enlaces de conexión* necesarios para su explotación.

1.95 *estación de frecuencias patrón y de señales horarias:* Estación del servicio de frecuencias patrón y de señales horarias.»

Las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR) atribuyen parte del espectro de radiofrecuencias al servicio de frecuencias patrón y de señales horarias. En el Cuadro 1-1 se reproduce un extracto del Cuadro de atribución de bandas de frecuencia del RR en el que se indican las bandas de frecuencia atribuidas a dicho servicio.

CUADRO 1-1

**Bandas de frecuencia atribuidas al servicio de frecuencias patrón y de señales horarias
(Reglamento de Radiocomunicaciones, edición de 2008)**

Banda de frecuencias	Atribución	Categoría	Observaciones
400,05-400,15 MHz		Primaria	N ^{os} 5.261 y 5.262 del RR
4 202 ± 2 MHz	espacio-Tierra		Autorizado por el N ^o 5.440 del RR, a reserva de obtener el acuerdo indicado en el número 9.21
6 427 ± 2 MHz	Tierra-espacio		Autorizado por el N ^o 5.440 del RR, a reserva de obtener el acuerdo indicado en el número 9.21
13,4-13,75 GHz	Tierra-espacio	secundaria	
13,75-14 GHz	Tierra-espacio	secundaria	
20,2-21,2 GHz	espacio-Tierra	secundaria	
25,25-25,5 GHz	Tierra-espacio	secundaria	
30-31 GHz	espacio-Tierra	secundaria	
31-31,3 GHz	espacio-Tierra	secundaria	N ^o 5.149 del RR

En el Artículo 26 del RR (véase el texto precedente de la edición de 2008 del RR que se reproduce a continuación) se pide a los Estados Miembros de la UIT que colaboren para facilitar el buen funcionamiento de los sistemas de frecuencias patrón y señales horarias (comprendidos los sistemas por satélite) y proteger estos sistemas contra interferencia perjudicial.

ARTÍCULO 26

Servicio de frecuencias patrón y de señales horarias

26.1 § 1 1) Para facilitar una utilización más eficaz del espectro de frecuencias radioeléctricas y prestar asistencia a otras actividades de carácter técnico y científico, las administraciones que proporcionen o se propongan proporcionar un servicio de frecuencias patrón y de señales horarias, coordinarán de conformidad con las disposiciones de este Artículo, el establecimiento y la explotación de este servicio en el plano mundial. Se prestará especial atención a la posibilidad de extender este servicio a las zonas del mundo que estén insuficientemente servidas.

26.2 2) Con este fin, las administraciones tomarán las medidas necesarias para coordinar, con el concurso de la Oficina, toda nueva emisión de frecuencias patrón o de señales horarias o toda modificación en las emisiones existentes en las bandas de frecuencias patrón, facilitando, a este efecto, la información oportuna. La Oficina, consultará en estas cuestiones con cuantas organizaciones internacionales tengan un interés directo y concreto en esta cuestión.

26.3 3) En la medida de lo posible, hasta que se haya efectuado dicha coordinación, no se asignará ninguna nueva frecuencia a una estación que se destine a trabajar en las bandas del servicio de frecuencias patrón, ni tampoco se comunicará a la Oficina.

26.4 § 2 Las administraciones colaborarán entre sí para reducir las interferencias en las bandas de frecuencias atribuidas al servicio de frecuencias y de señales horarias.

26.5 § 3 Las administraciones que efectúen este servicio colaborarán, por intermedio de la Oficina, en la recopilación y distribución de los resultados de las mediciones de frecuencias patrón y de señales horarias, señalando los detalles de los reajustes.

26.6 § 4 Para la selección de las características técnicas de sus emisiones de frecuencias patrón y señales horarias, las administraciones se inspirarán en las Recomendaciones UIT-R pertinentes.

Cabe destacar que no existe ningún sistema de satélite dedicado exclusivamente a la difusión de frecuencias patrón y señales horarias. Como ya se ha señalado, los equipos dedicados a esta función se utilizan también para otras aplicaciones a bordo del mismo satélite.

Algunos países no disponen de asignaciones en el *servicio de frecuencias patrón y de señales horarias*, porque utilizan como fuente de cronometría y frecuencias sistemas de satélite que pertenecen a otros servicios de radiocomunicación espacial y que son capaces de transferir con mucha exactitud el tiempo a cualquier lugar de la Tierra (por ejemplo, el GNSS).

1.2.2 Sistema mundial de navegación por satélite

Actualmente (2010), los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) que pertenecen al *servicio de radionavegación por satélite* (SRNS) [Reglamento de Radiocomunicaciones, 2008] son, en la práctica, instrumentos primarios para la transferencia mundial de tiempo y frecuencia con exactitud.

Hay dos sistemas GNSS operativos y tres sistemas de aumento por satélite (SBAS):

- Sistema mundial de determinación de la posición (GPS) de EE.UU., que ofrece cobertura mundial;
- Sistema mundial de navegación por satélite (GLONASS) de Rusia, que ofrece cobertura casi mundial.

Los sistemas SBAS que ofrecen cobertura local de navegación son:

- Sistema de aumento de zona amplia (WAAS), que proporciona señales GNSS adicionales utilizando un satélite geostacionario de Inmarsat para aumentar la cobertura en Estados Unidos de América;
- Servicio europeo de navegación geostacionario (EGNOS), que ofrece señales adicionales al GNSS utilizando el satélite Inmarsat para aumentar la cobertura en Europa;
- Sistema multifuncional de aumento por satélite (MSAS), que utiliza satélites MSAS especiales para ofrecer señales GNSS adicionales en Japón y los países asiáticos de su alrededor.

En los capítulos siguientes se describen en detalle los sistemas GPS, GLONASS y SBAS.

Se están diseñando y desarrollando otros sistemas nacionales e internacionales, tales como COMPASS (China), Galileo (Agencia Espacial Europea), el Sistema Regional de Navegación por Satélite de la India (IRNSS) (India) y QZSS (Japón).

En la Recomendación UIT-R M.1787 – Descripción de sistemas y redes del servicio de radionavegación por satélite (espacio-Tierra y espacio-espacio) y características técnicas de estaciones espaciales transmisoras que funcionan en las bandas 1 164-1 215 MHz, 1 215-1 300 MHz y 1 559-1 610 MHz, se describen brevemente los sistemas antes mencionados y las características técnicas fundamentales de sus segmentos espaciales.

Referencias

- JAKES Jr, W.C. [1961] Participation of Bell Telephone Laboratories in Project Echo, Bell System Technical. Journal, 40, 975-1028.
- LOMBARDI, M. A., HANSON D. W., [March-April 2005] The GOES Time Code Service, 1974-2004: A Retrospective. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 11, 2, (<http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/110/2/j110-2lom.pdf>).
- Low Earth Orbiting (LEO) satellite Jason-2 Space segment, the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), 2006, (http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/Jason/SpaceSegment/?l=en).
- LOWE, J., HEIDECKER, J., SWIDAN, M., HISHAM, A., SAMUEL, A. S. [2007] Standard time and frequency dissemination via egyptian digital satellite. 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Long Beach, California, USA, (<http://tf.nist.gov/timefreq/general/pdf/2274.pdf>).
- WHALEN, D. J. [2002] The origins of Satellite Communications: 1945-1965. Smithsonian History of Aviation and Spaceflight Series, Smithsonian Books.

Textos del UIT-R

- Reglamento de Radiocomunicaciones, edición de 2008, Volumen 1, Artículo 1 – Términos y definiciones, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2008, (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>).
- Recomendación UIT-R TF.686-2 – Glosario y definiciones de términos de tiempo y frecuencia, (<http://web.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/en>).
- Recomendación UIT-R M.1787 – Descripción de sistemas y redes del servicio de radionavegación por satélite (espacio-Tierra y espacio-espacio) y características técnicas de estaciones espaciales transmisoras que funcionan en las bandas 1 164-1 215 MHz, 1 215-1 300 MHz y 1 559-1 610 MHz, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-I/en>).

CAPÍTULO 2

SISTEMA MUNDIAL DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN

	<i>Página</i>
2.1 Descripción general y principios de funcionamiento	8
2.2 Fundamentos del GPS.....	8
2.2.1 Códigos PRN para CDMA y medición de distancias	9
2.2.2 Espectro del GPS	10
2.2.3 Mensaje navegación.....	11
2.3 Segmentos GPS	12
2.3.1 Segmento espacial	12
2.3.2 Segmento de control	13
2.3.3 Segmento de usuario.....	13
2.4 Función de cronometría y sincronización en modo operativo	14
2.4.1 Medición de distancia y factores de fidelidad	14
2.4.2 Estabilidad del reloj del satélite y predicción	15
2.5 Evaluación de la fidelidad del reloj del satélite GPS.....	15
2.5.1 Retardos en el trayecto del satélite	17
2.5.2 Relatividad.....	17
2.6 Contribuciones del reloj del receptor.....	17
2.6.1 Reloj del receptor de navegación.....	18
2.6.2 Reloj del receptor de cronometría.....	19
2.7 Determinación y mantenimiento de la cronometría.....	19
2.7.1 Operaciones del segmento de control	19
2.7.2 Ajuste del tiempo GPS.....	20
Referencias	20

La transferencia de tiempo y frecuencia es fundamental para el funcionamiento del sistema mundial de determinación de la posición (GPS) y, a su vez, ha mejorado sobremanera gracias a su aceptación mundial. En este capítulo se destaca la función de los relojes, del tiempo y de la frecuencia en el funcionamiento del GPS y las capacidades y limitaciones del GPS en cuanto mecanismo para su difusión.

2.1 Descripción general y principios de funcionamiento

El GPS proporciona infraestructura para la determinación mundial de la posición, la velocidad y el tiempo (PVT) y sirve de base para otras aplicaciones derivadas de estas capacidades básicas. El sistema consta de tres segmentos, el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario.

El más conocido es el segmento espacial, integrado por una constelación nominal de 24 satélites en órbitas semisíncronas (11 h 58 min) que transmiten sin cesar señales de espectro ensanchado hacia la Tierra. Todos los satélites transmiten en las mismas frecuencias (alrededor de 1,5 GHz (Banda L)) moduladas por diversos códigos de ruido semialeatorio de identificación.

El segmento de control sirve para controlar la robustez, el estado y la fidelidad de los satélites, generar un mensaje de datos que difunden los satélites e informar y solucionar cualquier anomalía en los mismos. El segmento de usuario consta de receptores militares y civiles de alcance mundial. Los satélites del GPS transportan una referencia de rubidio o cesio (o ambos) que utilizan para generar la gama de señales que transmiten.

2.2 Fundamentos del GPS

En el Cuadro 2-1 se resumen muchas de las principales características del GPS. Cada satélite del GPS transmite dos (o más) señales portadoras en la banda L moduladas por dos o más códigos de ruido pseudoaleatorio (PRN) y un tren de datos binario. Los códigos PRN son esenciales para el acceso múltiple por división de código que permite a todos los satélites utilizar las mismas frecuencias con un mínimo de interferencia. Los códigos también permiten efectuar mediciones de alcance unidireccional con elevada precisión. Para ello, el receptor genera una copia local del código del satélite que espera ver y busca la alineación correcta de la señal duplicada teniendo en cuenta el retardo y el efecto Doppler. El mensaje de datos, conocido como «NAV-MSG» proporciona información sobre el reloj del satélite, la posición exacta del satélite, un almanaque de la constelación de satélites, datos sobre la robustez y el estado, etc. Existen varias referencias excelentes sobre el GPS que describen el funcionamiento básico en mayor detalle que en el presente documento. En particular los libros de texto de Misra y Enge [Misra and Enge, 2001] y de Kaplan [Kaplan and Hegarty, 2006] describen en detalle y de manera divulgativa todos los aspectos del GPS. Para un tratamiento más exhaustivo, véase Parkinson, *et al.* [Parkinson, *et al.*, 1996], donde se analizan en profundidad las aplicaciones y los principios de funcionamiento. Aquí sólo figura una breve descripción general con el fin de sentar las bases para examinar la función de la cronometría en este importante sistema.

CUADRO 2-1

Sistema GPS

Frecuencia de la señal	Códigos de espectro ensanchado	Velocidad de código
L1 1575,42 MHz	Clear Acquisition – C/A	1,023 MHz
	Precisión – Código P	10,23 MHz
	Código Y (señal militar)	10,23 MHz
	NAV-MSG (datos de satélite)	50 bits/s
L2 1227,60 MHz	Precisión – Código P	10,23 MHz
	Código Y (señal militar)	10,23 MHz
	NAV-MSG (datos de satélite)	50 bits/s

El sistema GPS se diseñó a principios de los años 70 con el objetivo principal de facilitar un servicio efectivo de posición, velocidad y hora para los usuarios del Departamento de Defensa (DoD) de EE.UU. y sus aliados. Los requisitos que definen la arquitectura original del sistema se obtuvieron casi en su totalidad de las misiones del DoD. No obstante, desde entonces el GPS se ha convertido en un sistema distintivo de «doble uso». Según las estimaciones, en 2002 el GPS daba servicio a aproximadamente 300 000 usuarios del DoD y 4 000 000 usuarios civiles y comerciales en EE.UU. solamente. La utilización por parte de usuarios civiles no ha pasado desapercibida y actualmente controlan el sistema una oficina de programa mixta con representación del DoD, de la OTAN y del Departamento de Transporte, que es responsable de las aplicaciones civiles.

El Gobierno de EE.UU. ha reconocido la importancia de este doble uso del sistema hasta el punto que ha creado un grupo de dirección ejecutiva para coordinar y orientar dicha doble utilización del sistema. El Comité Ejecutivo PNT (Position Navigation and Time) está copresidido por los dos diputados principales de defensa y transporte con representantes de otros órganos gubernamentales. La oficina de coordinación presta apoyo al Comité Ejecutivo en la supervisión de la dirección del programa afectado.

2.2.1 Códigos PRN para CDMA y medición de distancias

El sistema GPS utiliza los códigos pseudoaleatorios (PRN) para la medición de distancias y el acceso múltiple en una frecuencia común. Los dos códigos GPS originales son el Precise Code (P) y el Coarse Acquisition (C/A). Los códigos GPS C/A se seleccionan a partir de una familia de Gold Codes, de 1 023 bits de longitud que se generan en el satélite a una velocidad de 1,023 MHz.

Cada satélite GPS transmite un código C/A exclusivo, de modo que el receptor del usuario puede distinguirlo fácilmente. La breve duración (1 ms) del código C/A facilita la adquisición rápida pero lo hace más vulnerable a interferencia. La duración de cada bit del código C/A es de aproximadamente 900 ns o 300 m. El bucle de rastreo de códigos del receptor de usuario suele medir la alineación del código con una precisión de 1/100 a 1/1 000 de bit.

El código P es mucho más largo y se genera a 10,23 MHz. El código entero, a esa velocidad, tardaría 37 semanas en completarse. A cada satélite del GPS se le asigna un segmento de 1 semana del código P que empieza a transmitir al comienzo de cada semana, a medianoche del sábado al domingo.

Normalmente el código P no se transmite, sino que mediante un procedimiento denominado «A/S» o antisuplantación (anti-spoofing), se sustituye por un código P encriptado de propiedades similares, denominado código Y. Este componente de la señal se suele representar como P(Y). La señal P(Y) es muchísimo más resistente a interferencia que la C/A y como la duración de bit es más corta permite realizar mediciones con mayor precisión.

Los códigos C/A y P(Y) se seleccionaron por sus propiedades de transcorrelación y autocorrelación. La reducida transcorrelación entre los códigos de la familia reduce la interferencia por acceso múltiple de todos los satélites que transmiten simultáneamente.

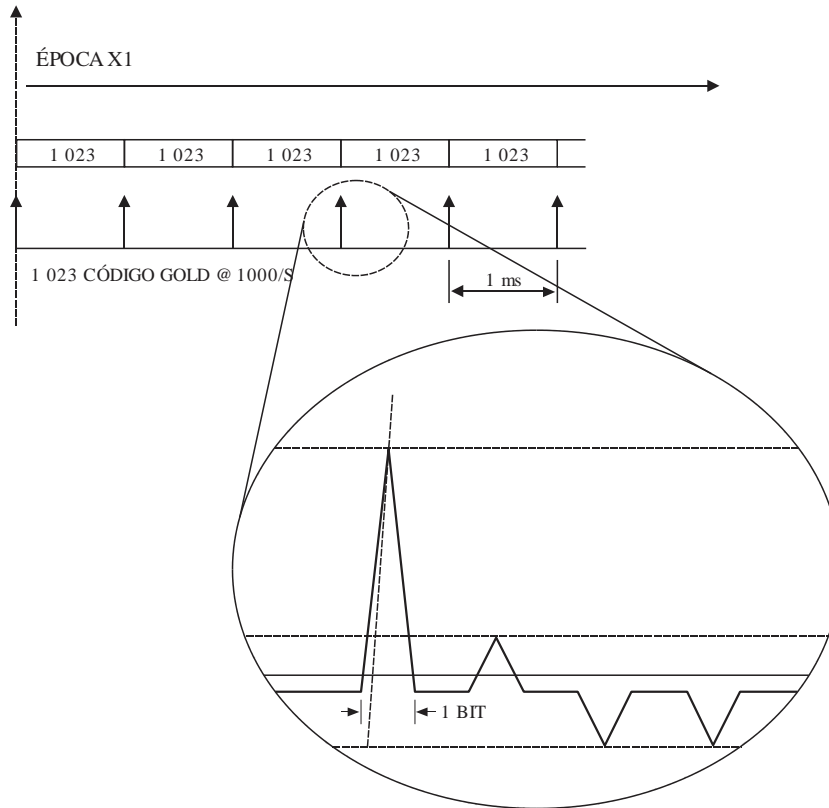
Las propiedades de autocorrelación de los códigos PRN son similares a las del ruido blanco gaussiano. Para retardos mayores que cero, el código no concuerda consigo mismo. Este aspecto es importante dado que permite al receptor alinear con exactitud y sin ambigüedad su copia de la señal con la señal GPS recibida. En la Figura 2-1 se ilustran las propiedades de correlación de los códigos GPS C/A.

Se están definiendo y utilizando nuevas series de códigos para la próxima generación de satélites GPS. Se han añadido nuevos códigos civiles a la frecuencia L2, conocidos como L2C, y una frecuencia completamente nueva, 1 176,45 MHz, denominada L5, así como un nuevo conjunto de códigos militares denominados códigos M.

Los nuevos códigos aprovechan los adelantos en la codificación, la corrección de errores y el procesamiento digital de señales que se han producido desde los años 70. Cabe esperar que estos nuevos códigos comenzarán a utilizarse cuando se lance el nuevo bloque de satélites, denominado bloque de satélites IIF, y que finalmente lo transmitirán toda la constelación cuando se implante la nueva generación de satélites GPS, denominada GPS III.

FIGURA 2-1

Propiedad de correlación del código GPS C/A



Sat time freq-02-01

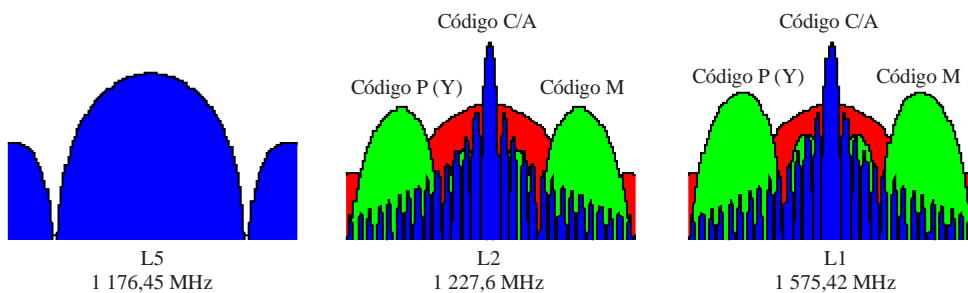
2.2.2 Espectro del GPS

En la Figura 2-2 se ilustra el espectro actual y moderno de la señal GPS. Todas las frecuencias a bordo de los satélites del GPS se obtienen a partir de una frecuencia patrón atómica de 10,23 MHz, conocida con el nombre de relojes atómicos. Las dos señales portadoras tradicionales son la L1 en 1575,42 MHz y L2 en 1227,6 MHz.

En 2002, la señal L2 sólo transportaba el código P(Y) a 10,23 MHz, mientras que la L1 transportaba el P(Y) y el C/A en cuadratura de fase.

FIGURA 2-2

Espectro de la señal GPS



Sat_time_freq-02-01

Hoy en día, la mayoría de los receptores de bajo coste sólo rastrean las señales de código L1 C/A. Los receptores del Departamento de Defensa pueden rastrear fácilmente el P(Y) en las dos frecuencias L1 y L2. Existen receptores comerciales de gran fidelidad, concebidos para aplicaciones científicas y otras que requieren gran precisión, que también pueden rastrear ambas señales utilizando diversas técnicas para acceder a las señales RF subyacentes, aunque con una reducción considerable de la relación señal-ruido [Misra and Enge, 2001].

El espectro GPS modernizado añadirá dos señales civiles PRN distintas de banda estrecha a la L2, creando así la señal L2C y una versión actualizada del mensaje navegación denominada CNAV. El espectro dividido de código M se añadirá tanto a L1 como a L2. La nueva señal civil L5C es una señal de seguridad de la vida y se ha previsto que estará disponible en el lanzamiento del primer GPS IIF (2010) [Kaplan and Hegarty, 2006]. En L5 se transmiten dos códigos PRN de medición de distancias: el código en fase (designado código I5); y el código de fase en cuadratura (designado código Q5). Los dos códigos tienen una longitud de 10,230 bits, que se transmiten a 10,23 MHz con una tasa de repetición de 1 ms. El tren I5 se modula con un código Neuman-Hofman de 10 bits a una frecuencia de reloj de 1 kHz y el código Q5 también se modula con un código Neuman-Hofman de 20 bits y una frecuencia de reloj de 1 kHz.

Además de las ventajas de disponer de una frecuencia adicional, la estructura de la señal y los códigos se han diseñado con el fin de:

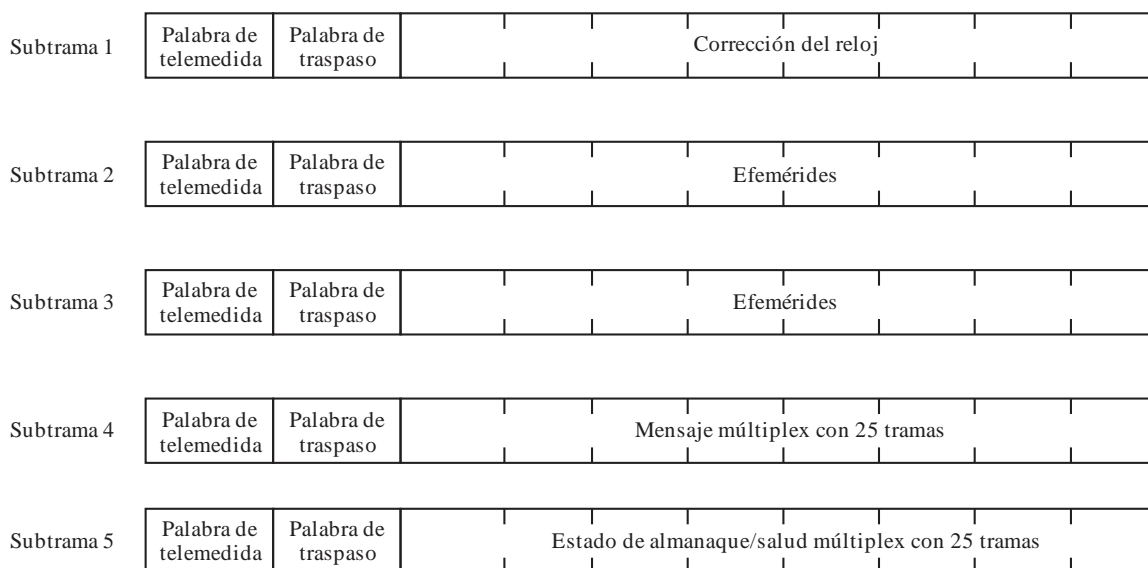
- mejorar la estructura de la señal para una mayor fidelidad;
- aumentar la potencia en unos 3 dB;
- soportar una ganancia de procesamiento de 10 x gracias al mayor ancho de banda.

2.2.3 Mensaje navegación

El mensaje navegación (NAV-MSG) comprende todos los datos que requiere el receptor para reconstruir la posición, la velocidad y el tiempo a partir de las pseudodistancias y/o señales Doppler observadas [IS-GPS-200 rev D, 2006]. En la Figura 2-3 se ilustran los elementos del NAV-MSG. Consiste en una trama de 1 500 bits compuesta de 5 subtramas de 300 bits cada una. A una velocidad de transmisión de 50 bit/s cada subtrama tarda unos 6 s en completarse. Ahora bien, las subtramas 4 y 5 combinadas son 1/25 de todo el almanaque de la constelación de satélites. Esto significa que para transmitir todo el almanaque se tarda unos 12,5 min.

FIGURA 2-3

Mensaje navegación



Al principio de cada subtrama figura la palabra traspaso o HOW. Esta palabra HOW contiene información esencial de cronometría que requieren los receptores del sistema de determinación exacta de la posición (PPS) para «traspasar» del código C/A al código P(Y). La palabra HOW contiene el tiempo (la hora) absoluta de la semana correspondiente al principio de la siguiente subtrama en unidades de 1,5 s. Así, todo receptor que haya decodificado la palabra HOW puede configurar su hora interna sin ambigüedad a partir de este valor.

La primera de las dos subtramas contiene información específica para el satélite transmisor. Estos datos, conocidos globalmente como efemérides, comprenden parámetros orbitales y predicciones de error del reloj. La subtrama 1 consta de 3 parámetros de reloj que parametrizan la desviación del reloj del satélite respecto de la hora GPS mediante un polinomio cuadrático. El término af_0 corresponde a la diferencia de tiempo en segundos respecto del tiempo de referencia (toc); el término af_1 es el error de frecuencia expresada en seg/seg en el tiempo de referencia; y el término af_2 es la deriva de frecuencia expresada en seg/seg².

El término de cronometría adicional incluido en la subtrama 4 del mensaje navegación es la corrección UTC-GPS. El tiempo (hora) UTC puede calcularse a partir del GPS y estos parámetros. Este tiempo también se parametriza mediante un incremento y una deriva. En caso de que se ajuste el UTC con segundos intercalares UTC, esta subtrama indica en qué semana se produce y cuándo se aplicará el segundo intercalar a la hora resultante.

Cuando L2C y L5 estén disponibles transmitirán una versión actualizada del NAV-MSG denominada mensaje CNAV. Cada una de estas señales consistirá realmente en un conjunto de modulaciones de la frecuencia portadora. En algunos casos se transmitirá, junto con la señal de datos, una herramienta de adquisición sin datos, denominada portadora piloto. Esta señal sin datos se ha concebido para que sea más fácil su adquisición que los datos codificados y, una vez adquirida, puede ayudar a adquirir la señal de datos.

Esta técnica mejora la adquisición de la señal GPS y aumenta los niveles de potencia en el correlacionador. El mensaje CNAV estará en la señal de datos e incluirá la misma información que el mensaje tradicional en un formato de paquetes de mensajes de 300 bits y 12 s en lugar de en la estructura de trama. Utilizará la corrección de errores en recepción con un código de convolución de 1/2. El tren de datos resultante de 100 símbolos por segundo se añade luego a la portadora de la señal en fase para generar la señal de datos. Así, la portadora de fase en cuadratura no contendrá datos y será una señal piloto sin datos.

2.3 Segmentos GPS

Por lo general, el GPS se describe mediante tres segmentos – satélites, control y usuarios. La tarea de generar las señales se divide entre los satélites y el segmento de control.

2.3.1 Segmento espacial

La constelación nominal u operativa del sistema GPS consta de 24 satélites en órbitas semisíncronas. Los satélites se despliegan en 6 planos orbitales con una inclinación de 55°, 4 satélites por plano. La constelación actual rebasa el requisito nominal de 24 satélites operativos y se ilustra en la Figura 2-4.

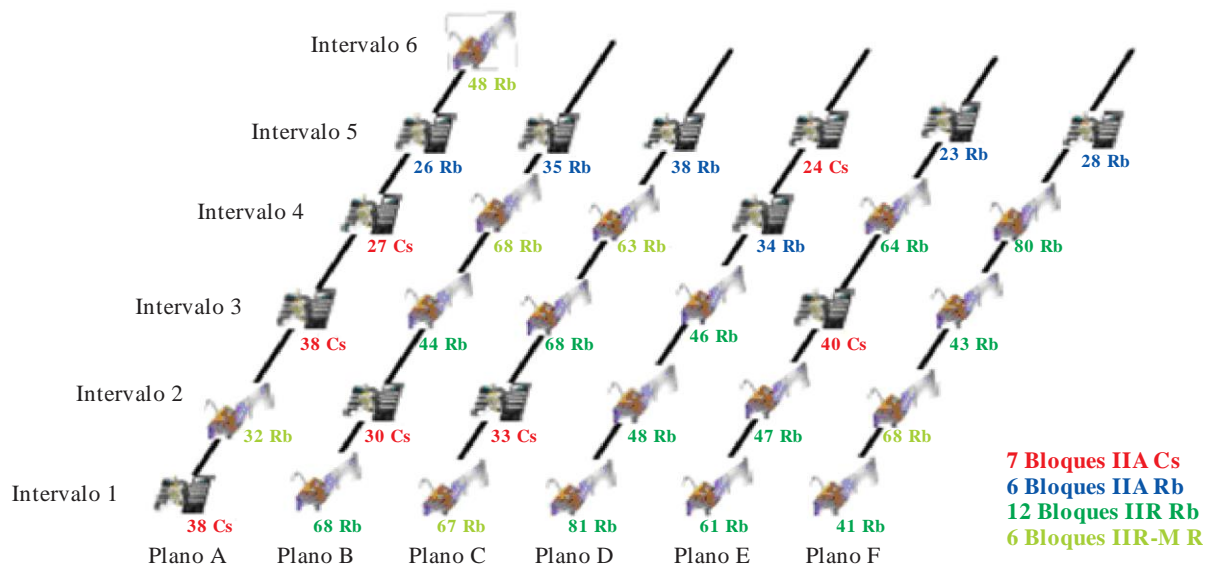
Los satélites están estabilizados en tres ejes para orientar el sistema de antenas transmisoras hacia la Tierra y los paneles solares hacia el Sol. Se han desarrollado varios «bloques» de satélites, comenzando con el prototipo de Bloque I, hasta los recientes satélites del Bloque IIF. La próxima generación de satélites del Bloque III se encuentra en fase de diseño.

Las señales GPS se transmiten mediante un sistema de 12 antenas helicoidales diseñadas para generar un diagrama orientado hacia la Tierra con una potencia de la señal recibida casi constante en la superficie de la Tierra. La razón era minimizar la interferencia entre satélites y mejorar la fidelidad para el usuario. La carga útil de navegación GPS consiste en 3 ó 4 relojes atómicos y electrónica para generar señales de espectro ensanchado a partir del reloj. La utilización de relojes atómicos era necesaria para permitir mejorar la predicción orbital y aumentar el funcionamiento autónomo del satélite en caso de que el segmento de control en tierra quede averiado. Así, a diferencia de un satélite de comunicaciones convencional que simplemente reenvía las señales generadas por una estación en tierra, los satélites del GPS producen señales de referencia a bordo. La Figura 2-4 muestra los tipos de relojes a bordo de cada satélite en la constelación en el año 2008. A la sazón, sólo se utilizaba uno de los relojes y los demás se mantenían en modo latente hasta que fallara el reloj

o produjera una degradación del mismo. El reloj de a bordo sirve de frecuencia de referencia para producir los códigos C/A y P(Y) y las señales portadoras L1 y L2.

FIGURA 2-4

Satélites y relojes del GPS, al mes de diciembre de 2008



Sat_time_freq-02-04

2.3.2 Segmento de control

El segmento de control consta de una estación de control principal (MCS) en la base de las fuerzas aéreas Schriever, situada a las afueras de Colorado Springs, y de estaciones de comprobación técnica especiales del Departamento de Defensa situadas en Hawaii, Ascensión, Diego García y Kwajelein. La Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) dispone también de emplazamientos de comprobación técnica adicionales que realizan mediciones del GPS para el segmento de control del GPS para mejorar las efemérides y la precisión del reloj. Estas estaciones de comprobación técnica disponen de receptores GPS con capacidad PPS conectados a antenas de alta ganancia que rastrean los satélites del GPS en el espacio. Estos receptores registran sin cesar mediciones de pseudodistancias, Doppler y de fase de portadora en L1 y L2 a intervalos de 1,5 s.

La estación MCS se encarga de analizar los datos recabados por las estaciones de comprobación técnica con el fin de determinar el estado y la fidelidad de las cargas útiles de navegación de los satélites del GPS. El MCS también procesa las mediciones de las estaciones de comprobación técnica para determinar errores en el reloj o en las órbitas de los satélites del GPS. Las efemérides y los parámetros del reloj en el mensaje navegación se calculan a partir de las predicciones de las órbitas y relojes para las siguientes 24 h. Los mensajes de navegación se suelen telecargar una o dos veces al día.

2.3.3 Segmento de usuario

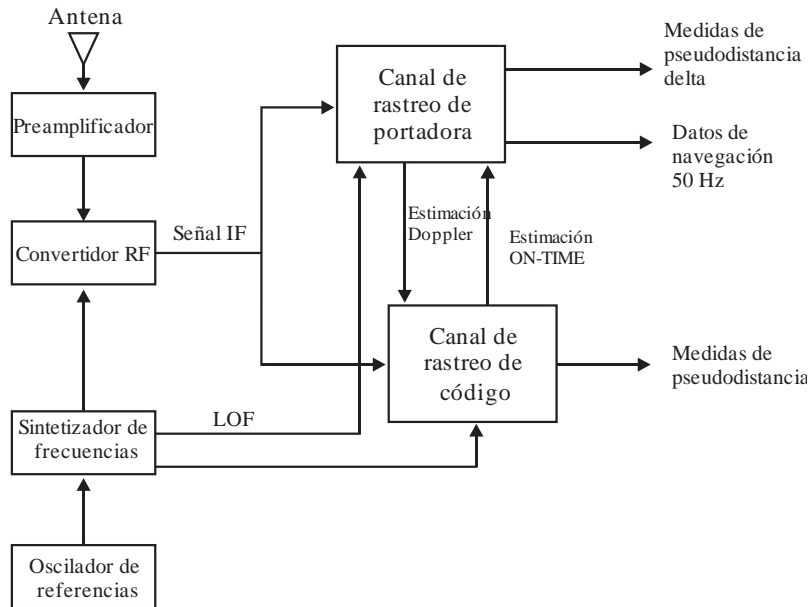
Los equipos de usuario para GPS están concebidos para rastrear y adquirir pasivamente las señales GPS. La Figura 2-5 ilustra los principales elementos del receptor GPS: la antena, el oscilador y el sintetizador de frecuencias, el convertidor reductor y el convertidor analógico-digital (A/D), los procesadores de señales o canales y el procesador de navegación.

En un receptor de navegación característico, la referencia de frecuencias es un oscilador de cuarzo; mientras que en un receptor de transferencia de tiempo, se puede suministrar un oscilador de referencia externo. Las antenas son generalmente hemisféricas, aunque algunas instalaciones utilizan las denominadas antenas de anillo obturador para reducir los reflejos de las señales en las superficies próximas [Misra and Enge, 2001]. La

conversión reductora y el muestreo producen muestras IF del espectro GPS donde predomina el ruido. Mediante la correlación de las muestras recibidas con las copias locales de los códigos GPS, el receptor es capaz de adquirir y realizar mediciones de distancia de cada uno de los satélites visibles.

FIGURA 2-5

Diagrama de bloques genérico del receptor del GPS



Sat_time_freq-02-05

2.4 Función de cronometría y sincronización en modo operativo

En esta sección se describe el importante papel que desempeña la cronometría en el funcionamiento normal del GPS para la navegación y otras aplicaciones.

2.4.1 Medición de distancia y factores de fidelidad

La medición del retardo unidireccional y del efecto Doppler son fundamentales en el GPS. La pseudodistancia es una medida del retardo entre el tiempo de llegada percibido de una señal en el receptor y el tiempo de transmisión de la señal desde el satélite GPS.

Se expresa mediante la ecuación:

$$PR = c(t_R - t_T) \tag{2-1}$$

La pseudodistancia está relacionada con la posición del receptor y viene dada por:

$$PR = R + b_R - b_T + I + T + MP + \epsilon \tag{2-2}$$

Así, los factores que contribuyen al error en la medición de la pseudodistancia son los errores en el tiempo de transmisión hipotético de la señal debido a distorsiones de cronometría en el satélite del GPS (b_T), errores en el tiempo de recepción de la señal debido a distorsiones de cronometría en el receptor (b_R), retardos ionosféricos (I), retardos troposféricos (T), multitrayecto y errores en el receptor (γ). Todos los receptores GPS disponen de modelos para corregir los retardos de propagación. Los errores de rastreo en el receptor (ϵ) suelen ser de alta frecuencia y su contribución puede reducirse promediando en el tiempo. En el Cuadro 2-2 se desglosa el error global atribuido a la predicción del reloj del satélite [Parkinson *et al.*, 1996].

La contribución del reloj del receptor al error es básicamente ilimitada, dado que no se exige que sea un oscilador atómico. Por consiguiente, este parámetro debe estimarse en el sistema de navegación del receptor o bien eliminarse mediante doble diferenciación en el sistema de red.

CUADRO 2-2
Error global del sistema GPS

Fuentes de error	Espacio (m)	Control (m)	Usuario (m)	Sistema (m)
Estabilidad del subsistema de navegación y del reloj	2,7	2,7	–	2,7
Predicción de perturbación del satélite	1,0	1,0	–	1,0
Otros	0,5	0,5	–	0,5
Predicción del reloj y de efemérides	–	2,5	–	2,5
Compensación del retardo ionosférico	–	–	2,3	2,3
Retardo troposférico	–	–	2,0	2,0
Resolución y ruido en el receptor	–	–	1,5	1,5
Multitrayecto	–	–	1,2	1,2
Otros	–	–	0,5	0,5
RSS	3,0	3,8	3,6	
Error de sistema (1σ)				5,3

2.4.2 Estabilidad del reloj del satélite y predicción

El reloj del satélite GPS es la referencia con la que se generan todas las señales transmitidas. Como se describe en § 2.3.1, cada satélite transporta tres o cuatro relojes atómicos redundantes, pero sólo uno funciona en cada instante. La previsibilidad de este reloj determina la contribución al error en cuanto la exactitud de transferencia de tiempo absoluto y de determinación de distancia que puede obtener un usuario autónomo, y la velocidad con la que se requiere actualizar el mensaje navegación.

2.5 Evaluación de la fidelidad del reloj del satélite GPS

El Naval Center for Space Technology del Naval Research Laboratory (NCST/NRL) supervisa la fidelidad de los relojes de los satélites GPS e informa trimestralmente al respecto. Un aspecto importante del programa general ha sido la evaluación de la fidelidad en la órbita de los relojes atómicos a bordo del vehículo espacial a fin de dar soporte a los nuevos y mejorados relojes atómicos espaciales, evaluar los conceptos operativos del sistema y medir la fidelidad del mismo. La capacidad de evaluar con exactitud la fidelidad del subsistema del GPS se consigue gracias a una base de datos exhaustiva en línea de datos de pseudodistancia observados NAVSTAR SV y MS.

La base de datos integra datos continuos sobre la vida de cada NAVSTAR SV lanzado. Los datos del segmento de control operativo (OCS) del GPS y de las estaciones de supervisión NGA, así como las efemérides NGA postprocesadas con exactitud se utilizan para obtener las señales del reloj a partir de cada reloj atómico operativo en el sistema.

Estas actividades surgieron durante el seguimiento conjunto del Bloque I de NAVSTAR por NCST/NRL y el GPS Joint Program Office (JPO) de dos satélites de tecnología de navegación y satélites de demostración del Bloque I que funcionaban en el segmento de control provisional. Se ha ampliado a los satélites operativos del Bloque II/IIA e IIR y al funcionamiento del segmento OCS.

En 2004, NRL comenzó a producir estimaciones de reloj a partir de las observaciones de la fase de la portadora y de efemérides exactas procedentes del servicio internacional GNSS (IGS). El servicio IGS consiste en una federación de más de 200 organismos nacionales, universidades e institutos de investigación de más de 80 países.

Cada participante contribuye a diversos productos de análisis y adquisición de datos GPS. Estas contribuciones culminan en los mejores modelos, técnicas de análisis y datos disponibles que, a su vez, redundan en beneficio de cada organismo. El servicio IGS mantiene más de 350 estaciones de rastreo GPS funcionando sin cesar y de manera permanente, que utilizan receptores de rastreo de portadora y código multicanales y de doble frecuencia.

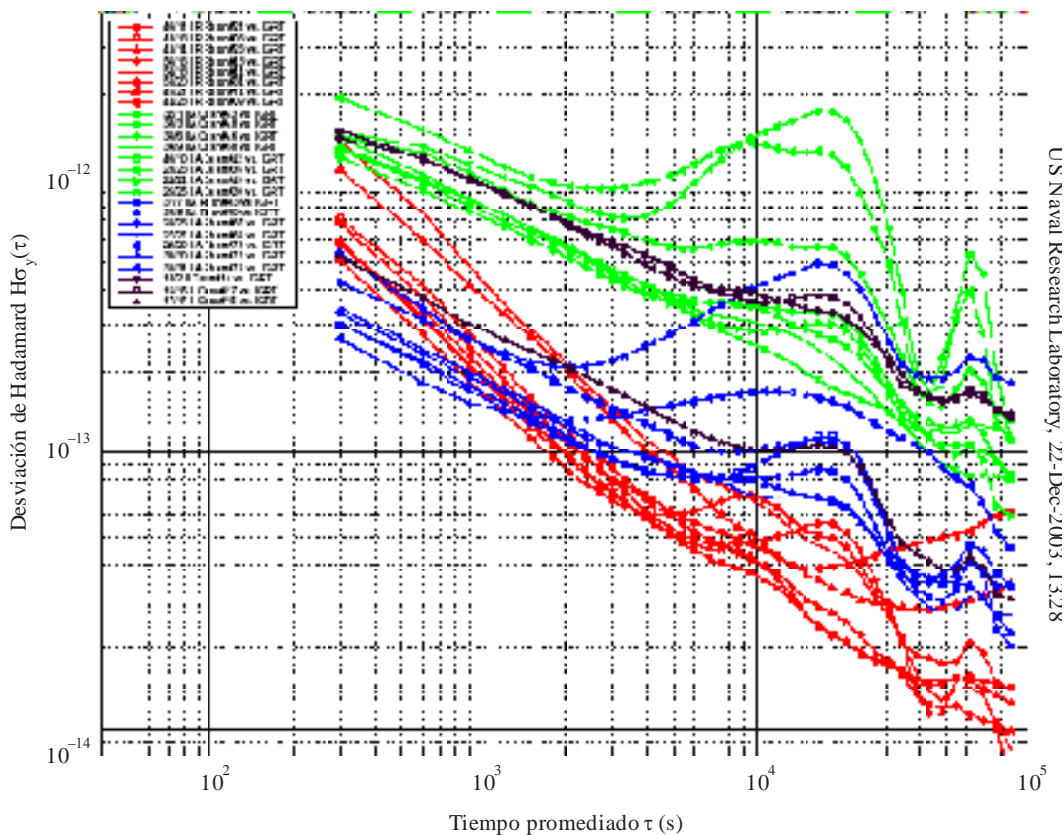
Se han elaborado y aceptado normas comunes para el almacenamiento e intercambio de datos. Entre los resultados cronométricos del servicio IGS se cuentan estimaciones de relojes GPS y de relojes de estaciones de tierra para obtener resultados rápidos y finales. Las escalas de tiempo distribuidas de IGS (IGRT e IGST) se producen en NCST/NRL y sirven de referencia estable para analizar los datos del reloj GPS que es independiente del reloj exclusivo de la estación de tierra.

La estabilidad de frecuencia de cada reloj atómico SV y MS operativo se calcula a partir de los datos que figuran en la base de datos en órbita y se evalúa a partir de una serie continua de datos. Este análisis es independiente y complementario de los análisis que realizan otros organismos. La comparación con otros análisis se suele coordinar de manera oficiosa en la forma de una métrica de prueba para mantener la independencia. La fidelidad nominal se notifica en informes trimestrales y se realiza un análisis detallado de las observaciones que muestran un comportamiento anómalo o inusual. El archivo en línea de los datos en la órbita que figuran en la base de datos GPS se puede utilizar para analizar la fidelidad anterior del reloj normal o anómalo. Esta base de datos en línea permite calcular la estabilidad de frecuencia a partir de grupos de datos continuos con tiempos medios que oscilan de 5 min a años con referencia a una norma común.

La Figura 2-6 ilustra la estabilidad de frecuencia de los relojes de satélite en la constelación GPS.

FIGURA 2-6

Estabilidad de los relojes atómicos de los satélites GPS



2.5.1 Retardos en el trayecto del satélite

Además de la variación de la carga útil de cronometría, los retardos en el trayecto o las diferencias dentro del satélite GPS también pueden introducir errores de cronometría en el sistema de transferencia de tiempo del usuario final. Cabe tener en cuenta, en particular, las diferencias en el retardo entre los trayectos de las señales L1 y L2, las diferencias en el retardo de fase y código, y las variaciones del centro de fase de la antena.

Las correcciones del reloj a_0 y a_1 que se transmiten en el mensaje navegación se calculan para un receptor con capacidad de código P(Y) de doble frecuencia, debido a que la solución se basa en observaciones de doble frecuencia procedentes de estaciones de comprobación técnica del segmento de control del GPS. Así, la corrección incluye el efecto de las diferencias en el trayecto de la señal sobre la combinación sin ionosfera de P1 y P2. Los usuarios monofrecuencia deben aplicar una corrección a los valores del reloj difundidos, denominado retardo de grupo de cronometría (tgd). Hubo un momento en que se utilizaba un solo valor tgd para todos los satélites. Sin embargo, se medía el retardo de grupo para cada satélite, que ahora se incluye en el mensaje difusión.

Hasta hace poco, los errores inferiores a un ciclo de portadora (0,6 ns) no se consideraban significativos para la transferencia de tiempo. Ahora bien, con el advenimiento de soluciones de transferencia de tiempo basadas en la fase de la portadora [Larson and Levine, 1999], ha aumentado el interés en las variaciones del centro de fase en las antenas GPS. Dado que la antena tiene polarización circular dextrógira, si el vehículo espacial tuviera que dar una vuelta completa alrededor de la dirección del nadir, la fase de la portadora terminaría aumentado un ciclo entero (19,04 cm o 0,6 ns). Análogamente, el usuario que recibe transmisiones GPS en diferentes partes de la Tierra verá diferentes valores de la fase de la señal diferencia. Existe ahora una corrección para estos desplazamientos para aplicaciones de alta precisión [Larson *et al.*, 2000].

2.5.2 Relatividad

La relatividad desempeña un papel importante en la cronometría del GPS y hay muchos artículos y capítulos de libros dedicados a este tema. Este importante asunto se trata con mayor detalle en otro capítulo. En éste sólo se mencionan los aspectos más importantes.

Al estar situado a 20 000 km de altitud respecto del geoide, el reloj a bordo del satélite GPS se ve afectado por dos efectos relativistas que modifican la frecuencia que éste genera. La dilatación del tiempo y el desplazamiento gravitacional de la frecuencia combinados hacen que los relojes del satélite GPS vayan 38,59 μ s/día más rápido que un reloj equivalente situado en el geoide.

Para que los satélites produzcan las frecuencias de la señal requerida con mayor precisión desde la perspectiva del geoide, los osciladores a bordo de aeronaves se ajustan para que funcionen 38,59 μ s/día más lentos, de modo que las frecuencias de la señal recibida sean correctas con respecto al tiempo coordinado en el geoide. Por otra parte, se produce un segundo desplazamiento relativista de la frecuencia debido a que las órbitas de los satélites no son exactamente circulares. El error resultante de este desplazamiento viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a e \sin E} = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (2-3)$$

siendo:

\mathbf{r} y \mathbf{v} : la posición y velocidad del satélite; Δt_r se corrige en el procesamiento del receptor del GPS utilizando la información sobre la excentricidad que figura en el mensaje navegación de difusión.

La magnitud del error de cronometría causado por la excentricidad de la órbita del sistema GPS es del orden de decenas de nanosegundos y es idéntico para todos los receptores que rastrean un determinado satélite del GPS.

2.6 Contribuciones del reloj del receptor

Al igual que en los satélites GPS, toda la cronometría en el receptor del GPS se obtiene a partir de un oscilador. Sin embargo, en la mayoría de los receptores comerciales y militares esta referencia es de cuarzo en lugar de

rubidio o cesio. Los errores de frecuencia en el oscilador del receptor y las inestabilidades en la sección de síntesis de frecuencia del receptor se manifiestan al medir el efecto Doppler y el Doppler acumulado o la fase de la portadora. Los errores de distorsión del reloj del receptor o los incrementos de tiempo y los retardos en el trayecto en el receptor desde la antena hasta el convertidor A/D aparecen al medir la pseudodistancia y la fase de la portadora, y en la datación de las observaciones y las soluciones de posicionamiento. Si las mediciones de todos los satélites se efectúan simultáneamente, en todas aparecen los mismos errores de distorsión y frecuencia.

Se suelen tomar varias medidas para establecer el tiempo en el receptor GPS. Esta base de tiempo se denomina tiempo del receptor o tiempo local. Al encender en el modo de arranque en caliente, el receptor establece su tiempo a partir de los valores almacenados en una memoria no volátil. Dependiendo del receptor particular, es probable que tenga una precisión de un segundo o incluso peor. En el caso de arranque en frío, el receptor no sabrá el tiempo y lo establecerá de manera arbitraria.

Al decodificar el primer mensaje de efemérides del satélite, el tiempo local puede establecerse en 1-10 ms, a partir del instante de la semana (TOW) contenida en el mensaje navegación. La exactitud de este tiempo inicial determina el resto del sistema de relojes que debe corregirse ulteriormente. El tiempo local en el momento de la interrupción correspondiente a la siguiente época de medición se fija igual a la TOW de transmisión, más el tiempo estimado necesario para que la señal viaje desde el satélite en el tiempo de transmisión al lugar donde está situado el receptor en el tiempo de recepción. Una exactitud estimada de posición dentro de 100 km es suficiente para ajustar este valor correctamente dentro de 1 ms. (En el caso de un receptor sobre la superficie de la Tierra el tiempo de transmisión oscila entre 67 ms para un transmisor de satélite GPS situado directamente encima a unos 85 ms para un transmisor situado en el horizonte.)

Una vez establecido el tiempo local con precisión de 1 ms, se calcula la distorsión del reloj como parte del procesamiento de aplicaciones. En algunos receptores, se mantiene la distorsión, es decir no se efectúa ningún ajuste físico para reducirla (método conocido como corrección del reloj sobre papel), pero se supervisa y notifica este valor. En algunos receptores, la cronometría de medición se ajusta para compensar esta distorsión, de modo que las mediciones se efectúan realmente en las épocas de 1s del GPS. Esto resulta especialmente importante para los receptores geodésicos, donde las mediciones de varios receptores se coordinan con el fin de lograr una cinemática de elevada precisión o determinación de la posición relativa estática. Por último, algunos receptores no ajustan el tiempo real en que se efectúan las mediciones, pero corrigen la distorsión en las etiquetas del tiempo notificadas y las mediciones.

2.6.1 Reloj del receptor de navegación

Para la mayoría de las aplicaciones de navegación, el valor real de la distorsión del reloj no es muy significativo. La sincronización de mediciones con épocas temporales GPS sólo es necesaria si se ha de realizar la coordinación con las mediciones de otros receptores y, aun así, sólo resulta esencial para aplicaciones que requieren una precisión de centímetros a milímetros. La correcta datación de mediciones y soluciones de navegación es importante para plataformas que se desplazan rápidamente, tales como aeronaves de alta velocidad y satélites. Un aspecto delicado en la cronometría de satélites cerca de la Tierra es que un error de datación de 1 ms produce errores de posicionamiento a lo largo del trayecto del orden de 7 m. Errores de marcación similares también pueden producir errores de posicionamiento del orden de un metro en otras plataformas muy dinámicas.

Las distorsiones en la pseudodistancia y los errores de frecuencia debidos a la distorsión del reloj del receptor pueden resolverse de manera fiable en el propio sistema de posición y velocidad de navegación. Estos valores no suelen tener interés en las aplicaciones de navegación. Una técnica muy popular en aplicaciones de inspección y navegación relativas consiste en utilizar la doble resta de la fase de la portadora [Misra and Enge, 2001]. Este método elimina de la solución el parámetro de distorsión del reloj, restando pares de observaciones simultáneas de dos receptores y dos satélites. Si las correlaciones de medición se tratan debidamente, las soluciones de punto de doble resta son equivalentes a las soluciones de posición relativa para las que el reloj se soluciona.

2.6.2 Reloj del receptor de cronometría

2.6.2.1 Relatividad

En un receptor diseñado específicamente para transferencia de tiempo, el oscilador interno se suele cortocircuitar u omitir y, en su lugar, se recurre a un oscilador externo de referencia y una señal de referencia 1 PPS (un pulso por segundo). Es necesario efectuar correcciones relativistas para corregir los desplazamientos de frecuencia y cronometría de los relojes del satélite GPS. Efectos relativistas similares se producen en el reloj del receptor de plataformas muy dinámicas. Estos desplazamientos son comunes a todas las mediciones, por lo que no afectan a la precisión de la solución de navegación. En el caso de transferencia de tiempo a una plataforma que se mueva rápidamente, debe compensarse los desplazamientos relativistas del oscilador de referencia.

2.6.2.2 Correcciones del reloj en papel

Como se indicó más arriba, muchos receptores GPS no modifican la cronometría interna para corregir los errores de reloj estimados. Los errores se calculan y se apuntan como correcciones del «reloj en papel». En algunos casos, las correcciones se aplican a los tiempos mostrados y notificados, así como a las mediciones notificadas.

2.6.2.3 Relojes de salida corregidos – frecuencia y 1 PPS

Todo receptor de cronometría que haya de generar a la salida una frecuencia corregida y una señal 1 PPS debe aplicar internamente correcciones del reloj para producir esas salidas sincronizadas. Para ello se podría recurrir a un ajuste en bucle cerrado del oscilador interno o de la sección de síntesis de frecuencia del receptor, o bien a un circuito separado en bucle abierto para generar las señales corregidas. Si se efectúa en bucle cerrado, el control debe realizarse de manera que no perturbe las funciones de rastreo de señales.

2.7 Determinación y mantenimiento de la cronometría

Todas las mediciones del GPS se basan en el denominado tiempo (GPST). El GPST es una base de tiempo continua establecida en la época GPS, 00:00 UTC del 6 de enero de 1980. El GPST está relacionado con la escala de tiempo internacional, el tiempo universal coordinado (UTC) por medio del UTC (USNO) [ICD–GPS–202B Navstar, 2001]. Ahora bien, a diferencia de la escala de tiempo UTC, el GPST no aplica segundos intercalares y, por consiguiente, sigue a la deriva del UTC con un desplazamiento que actualmente es de 14 s. El segmento de control se encarga del mantenimiento del GPST a partir de la información procedente de USNO y supervisa la fidelidad de la cronometría de cada satélite GPS. Las transmisiones por satélite están vinculadas al GPST y, mediante mediciones de los satélites GPS, el receptor puede ajustar su hora local al GPST y posteriormente al UTC (USNO).

2.7.1 Operaciones del segmento de control

Desde el 17 de junio de 1990, el tiempo GPST se define por un conjunto o grupo de frecuencias patrón atómicas en la MCS (estación de control principal), en las estaciones de comprobación técnica del GPS y en los relojes a bordo de los satélites. El tiempo GPST real no lo mantiene físicamente ningún reloj del sistema, sino que se calcula implícitamente mediante un filtro Kalman que forma parte del análisis MCS y la función de predicción. Las mediciones a partir de cada una de las frecuencias patrón se ponderan con arreglo a su estabilidad durante el intervalo de estimación.

Así, el GPST consiste en un promedio ponderado de un conjunto de relojes atómicos. Las correcciones del reloj en papel para cada frecuencia patrón también se calculan con las correcciones del reloj del satélite GPS que constituyen la base para los parámetros que se transmiten en el mensaje difusión.

La estación MCS utiliza las mediciones realizadas por las estaciones de comprobación técnica para calcular las órbitas y los relojes de los satélites GPS, verificar errores en el reloj de la estación y otros parámetros. El estimador MCS divide las mediciones y los estados en varias «particiones», cada una de las cuales procesa un subconjunto de los satélites del GPS y las estaciones de comprobación técnica. Esta división en particiones tiene su origen en las limitaciones de cálculo que presentaban los primeros computadores MCS, pero luego se ha mantenido para reducir la carga de cálculo y ayudar a aislar problemas de satélites individuales

[Hutsell, 1994]. Cada partición comprende estados de hasta seis satélites y cinco estaciones de comprobación técnica GPS. Un algoritmo independiente de «conciliación de particiones» se encarga de ajustar los estados de MS en aras de la coherencia entre particiones.

Finalmente se facilita a la estación MCS un «promedio general» de las particiones, que ofrece la mejor estimación de las desviaciones del GPST de los relojes del satélite y de las estaciones de comprobación técnica del GPST.

El Observatorio Naval de EE.UU. (USNO) es responsable de mantener una referencia de tiempo física para el Departamento de Defensa (DoD) de EE.UU. El UTC (USNO) es la materialización en tiempo real del UTC para el DoD. El USNO también mantiene el reloj principal alternativo de USNO (USNO/AMC) en la estación GPS MCS de Schriever AFB.

El USNO supervisa el servicio de determinación de la posición normalizado de los satélites GPS (SPS) y las transmisiones PPS utilizando receptores de cronometría especiales, situados en Washington D.C. Las mediciones de cada uno de los satélites se toman a intervalos de 6 s durante recorridos de 13 min. Los recorridos de todos los satélites se utilizan para realizar un ajuste lineal de 2 días a fin de calcular los parámetros a_0 y a_1 de corrección del GPS-UTC (USNO). El valor eficaz resultante de los 13 min es del orden de 15-20 ns. Cada una de las observaciones de los satélites y los ajustes lineales se facilitan a la estación MCS y se introducen manualmente en el software de la MCS a fin de mantener el sistema GPS como un sistema cerrado sin entradas externas.

2.7.2 Ajuste del tiempo GPS

El documento de control de interfaz dispone que el GPST debe mantenerse dentro de $\pm 1 \mu\text{s}$ del UTC (USNO) con la excepción de las compensaciones de segundos intercalares [ICD-GPS-202B Navstar, 2001]. Por consiguiente, el GPST se ajusta para armonizarlo con el UTC (USNO) a fin de cumplir este requisito. El ajuste se efectúa mediante análisis de las estimaciones diarias de la deriva GPS-UTC (USNO), y se determina si es necesario ajustarlo al día siguiente a fin de mantener el desplazamiento del GPS-UTC (USNO) dentro de los valores especificados.

El ajuste consiste en una compensación fija positiva o negativa acorde con la deriva en el GPST durante un día. Antes del 18 de marzo de 1994 se utilizaba un valor fijo de la deriva de $\pm 2 \times 10^{-19} \text{ s/s}^2$, pero desde entonces se viene utilizando un valor de $\pm 1 \times 10^{-19} \text{ s/s}^2$. El ajuste consiste en introducir las correcciones del reloj de los satélites de difusión y las correcciones del GPS-UTC, de manera transparente para el usuario [Hutsell, 1994]. Si se aplicara un ajuste innecesario, los usuarios del GPS lo percibirían como una inestabilidad en el GPST.

Referencias

- HUTSELL, S.T. [Sep 20-23, 1994] Recent MCS Improvements to GPS Timing. Proc. ION GPS-94, Salt Lake City, UT, p. 261-273.
- KAPLAN, E.D. and HEGARTY, C.J., Editors [2006] Understanding GPS: Principles and applications. 2ed., Artech House, Inc., 685 Canton Street, Norwood, MA 02062.
- LARSON, K.M., *et al.* [March 2000] Assessment of GPS Carrier-Phase Stability for Time-Transfer Applications. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47, 2, p. 484-494.
- LARSON, K.M., and LEVINE, J. [July 1999] Carrier-Phase Time Transfer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 46, 4, p. 1001-1012.
- MISRA, P. and ENGE, P. [2001] Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press.
- Naval Observatory Time Transfer Interfaces ICD-GPS-202B [31 October, 2001] Navstar GPS Control Segment/U.S.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006] Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- PARKINSON, B.W., *et al.*, Editors [1996] Global Positioning System: Theory and Applications, AIAA Press.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE AUMENTO POR SATÉLITE PARA GPS

	<i>Página</i>	
3.1	Introducción.....	22
3.2	Descripción de los sistemas SBAS	22
3.3	Descripción del WAAS (Estados Unidos de América)	22
3.4	Descripción del MSAS (Japón)	24
3.4.1	Generalidades	24
3.4.2	Función de ruido pseudoaleatorio dual.....	25
3.4.3	Control de la potencia del enlace ascendente	26
3.5	Descripción de EGNOS (Europa).....	26
3.5.1	Descripción general del segmento terrestre de EGNOS	27
3.5.2	Descripción del sistema EGNOS en relación con el tiempo.....	27
3.5.3	Sincronización del reloj de las estaciones RIMS y generación del tiempo ENT.....	27
3.5.4	Ajuste del ENT al tiempo GPS	28
3.5.5	Correcciones del reloj del satélite.....	28
3.5.6	Difusión de ENT por satélites en órbita geoestacionaria (GEO).....	29
3.5.7	Cálculo de la diferencia entre las escalas de tiempo ENT y UTC	29
3.5.8	SBAS y el tiempo	30
3.5.9	Tiempo y los satélites GEO	31
3.5.10	SBAS y transferencia de tiempo	39
3.5.11	Transferencia de tiempo entre dos laboratorios	40
3.5.12	Transferencia de tiempo entre 2 sistemas SBAS	42
	Referencias	44
	Apéndice A – Breve descripción del contenido del mensaje SBAS	45

3.1 Introducción

Tradicionalmente los sistemas de navegación dependían del tiempo. Este hecho quedó claramente demostrado por el cronómetro de Harrison en la travesía a bordo del HMS *Deptford* el año 1761, cuando por primera vez este instrumento permitió a los navegantes determinar con precisión y fiabilidad la longitud. Dada esta relación entre la navegación y el tiempo, la comunidad de cronometría se ha mantenido muy interesada en la utilización de los sistemas de navegación para la *difusión* del tiempo. Incluso hoy en día, el núcleo del GPS se basa en la avanzadísima tecnología de reloj. A diferencia de los navegantes, que necesitan cuatro satélites GPS para determinar su posición, cuando se conoce la posición sólo se necesita un satélite para determinar el tiempo. Las observaciones con un solo satélite permiten sincronizar a distancia los relojes en todo el mundo.

3.2 Descripción de los sistemas SBAS

Los sistemas de aumento por satélite (SBAS) son uno de los descubrimientos más recientes en la evolución de los sistemas de navegación. Aunque conceptualmente son similares a los sistemas GPS diferenciales (DGPS), el SBAS ofrece un mayor nivel de fidelidad a las administraciones nacionales de aviación civil y de navegación aérea que los DGPS. Los métodos de aumento utilizados por el SBAS, además de mayor precisión, también mejoran la disponibilidad, integridad y continuidad del servicio. Para ello supervisan continuamente las transmisiones GPS desde las estaciones de referencia y transmiten un mensaje de aumento desde los satélites de comunicaciones geostacionarios (GEO). La señal procedente del GEO utiliza la misma frecuencia que la señal L1 del GPS, pero con diferentes formato y velocidad de bits.

El contenido del mensaje procedente de los GEO ofrece al usuario información que no sólo mejora la precisión de la posición del usuario determinada por las señales GPS, sino que además le informa sobre la fiabilidad de dicha posición. La señal procedente de los GEO también puede utilizarse como otra fuente de determinación de distancia para la navegación. Pero para ello, es indispensable que las señales estén sincronizadas con el tiempo GPS.

Por consiguiente, las señales procedentes de los GEO también pueden emplearse para la distribución y transferencia de tiempo. Los estudios en curso sobre la utilización del SBAS para estas funciones de cronometría indican que ya están al nivel del sistema de determinación de la posición exacta (PPS) del GPS. Cabe esperar razonablemente que los niveles de precisión y exactitud mejoren a medida que estos sistemas se vayan consolidando.

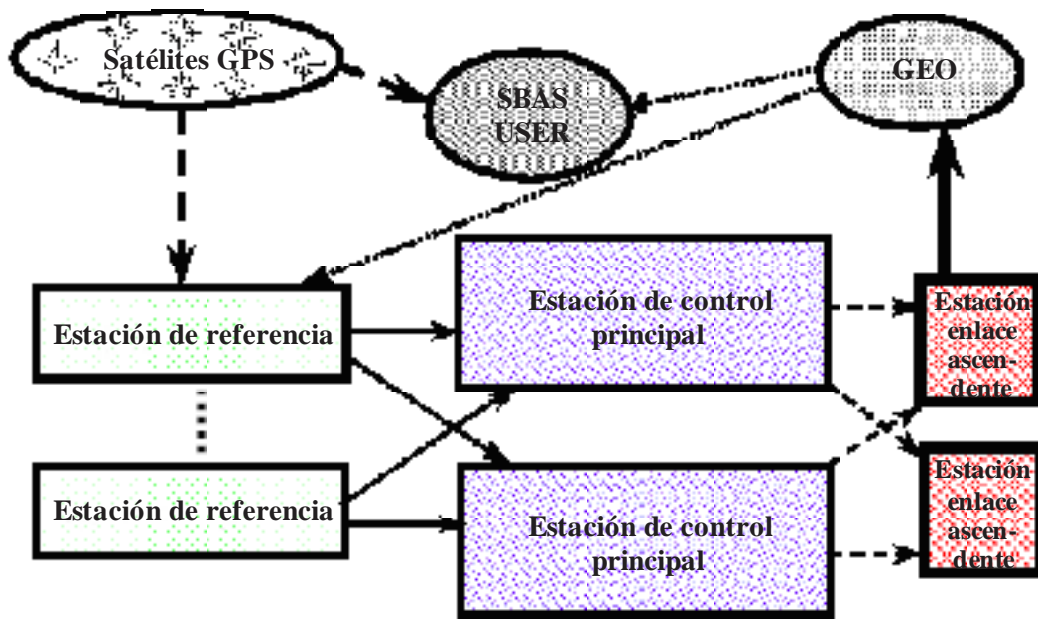
3.3 Descripción del WAAS (Estados Unidos de América)

En la Figura 3-1 se ilustra un esquema del sistema de aumento de área extensa (WAAS). La unidad básica es la estación de referencia del WAAS (WRS). La estación de referencia dispone de equipo que consiste en frecuencias patrón de haz de cesio redundante u otros tipos de relojes atómicos, varios receptores bifrecuencia de 12 canales, y receptores GPS especial de rastreo de fase de banda estrecha y ancha. Cada estación de referencia rastrea continuamente tantos satélites del GPS y GEO como pueda observar y adquirir.

Cada estación WRS realiza las funciones de recopilación de datos, verificación de razonabilidad y procesamiento, registro y transferencia de datos. Cada estación WRS consta de tres módulos de equipo de la estación de referencia de área extensa (WRE) que recaban conjuntos de datos independientes, en particular datos observables de los satélites GPS y GEO y transmite los datos a cada estación principal del WAAS (WMS) del sistema. La independencia de cada conjunto de datos se garantiza con la recopilación de parámetros observables mediante seis equipos físicos independientes que son necesarios para la función de verificación que desempeña la estación WMS. Los datos se recopilan a una velocidad compatible con el nivel previsto de variación; por ejemplo, en el caso de condiciones atmosféricas que varían lentamente se pueden recabar los datos con menos frecuencia que los de los satélites del GPS. Antes de transmitir los datos al WMS, cada WRE verifica si estos datos recabados son razonables. De lo contrario, los datos se marcan como que no han superado la prueba de razonabilidad y se reenvía luego a las estaciones WMS. A fin de garantizar la disponibilidad de datos en cada estación WMS, las estaciones WRS transmiten datos a cada WMS a través de dos nodos medulares independientes del subsistema de comunicaciones terrenales (TCS).

FIGURA 3-1

Descripción sencilla a grandes rasgos del sistema SBAS



Sat_time_freq-03-01

Cada estación WMS realiza las funciones de corrección, determinación de la órbita del satélite, determinación de la integridad, verificación, validación y generación de mensajes WAAS. La estación recopila una vez por segundo los datos recibidos de todas las estaciones WRS y los procesa para poder realizar las funciones antes enumeradas. Este procesamiento se aplica a todos los datos WRS disponibles y los resultados se transmiten en un mensaje WAAS de 250 bits una vez por segundo. Estos mensajes WAAS se envían a todos los subsistemas geoestacionarios del enlace ascendente (GUS).

La cronometría del procesamiento en la estación WMS se programa para difundir el mensaje WAAS resultante desde el satélite GEO de forma que coincida con la siguiente época del código C/A (adquisición aproximada) GPS 1-s [Peck *et al.*, 1997]. El sistema WAAS valida la señal en el espacio (SIS), para lo cual comprueba los mensajes en el enlace descendente a fin de garantizar que son idénticas a las transmitidas a los satélites GEO y compara las soluciones de la posición de navegación obtenidas del WAAS/GPS con las posiciones de las estaciones WRS controladas. Cada estación WMS incluye una consola de operación y mantenimiento (O&M) desde la que se controla la WAAS por medio de una interfaz usuario-computador. A fin de evitar conflictos, en un instante dado sólo hay una estación WMS de la estación WAAS designada para controlar la estación WMS (consola activa O&M).

Cada sistema de comunicaciones geoestacionario (GCS) realiza las funciones de difusión y determinación de distancia. Cada sistema WAAS GCS consta de dos subsistemas generadores de señales (SGS), dos subsistemas RF de enlace ascendente (RFU) y un satélite en órbita terrestre geoestacionaria (GEO). La combinación de un SGS y un RFU se denomina estación de enlace ascendente GEO (GUS). La función de difusión del sistema GCS comienza cuando éste recibe los mensajes WAAS de 250 bits, a una velocidad de un mensaje por segundo procedentes de cada estación WMS del sistema. A fin de mejorar la disponibilidad de los mensajes WAAS, cada GUS se conecta a dos nodos troncales del WAAS del subsistema TCS. El subsistema GUS selecciona una estación WMS como origen de mensajes y codifica el mensaje recibido utilizando un código convolucional con correcciones de errores en recepción a velocidad 1/2. El mensaje resultante de 500 bits se modula en una señal de tipo GPS y se transmite por el enlace ascendente hacia el satélite GEO. Dos subsistemas GUS dan servicio a cada satélite GEO:

- uno que actúa como enlace ascendente primario; y
- otro que opera como enlace latente.

Los dos GUS que dan servicio a cada satélite GEO funcionan de manera independiente y están situados en diversas estaciones terrenas en tierra (GES) separadas 300 millas como mínimo. La estación GES consta de uno o varios subsistemas GUS, y le ofrece a éstas refugio, alimentación eléctrica y servicios de operaciones y mantenimiento. El transpondedor de «guiaondas» del satélite GEO desplaza la frecuencia de la señal y la difunde a los usuarios WAAS. La transición entre los subsistemas GUS primarios y auxiliares se inicia, de ser necesario, para mantener la disponibilidad de la señal en el espacio del sistema WAAS.

La función de determinación de la posición GCS se realiza mediante la transmisión de una señal a los usuarios en la frecuencia GPS L1 con la siguiente información:

- 1 un código de ruido (PRN) con cronometría exacta para cada satélite del GEO;
- 2 una efemérides exacta contenida en el mensaje navegación del satélite GEO que envía periódicamente la función difusión.

Esta estructura de la señal es similar a la del GPS, salvo que la cronometría exacta del código PRN se transporta en tierra en lugar de en los satélites GEO. Esta función permite a los usuarios emplear los satélites GEO como satélite GPS, aumentando así la disponibilidad general del sistema.

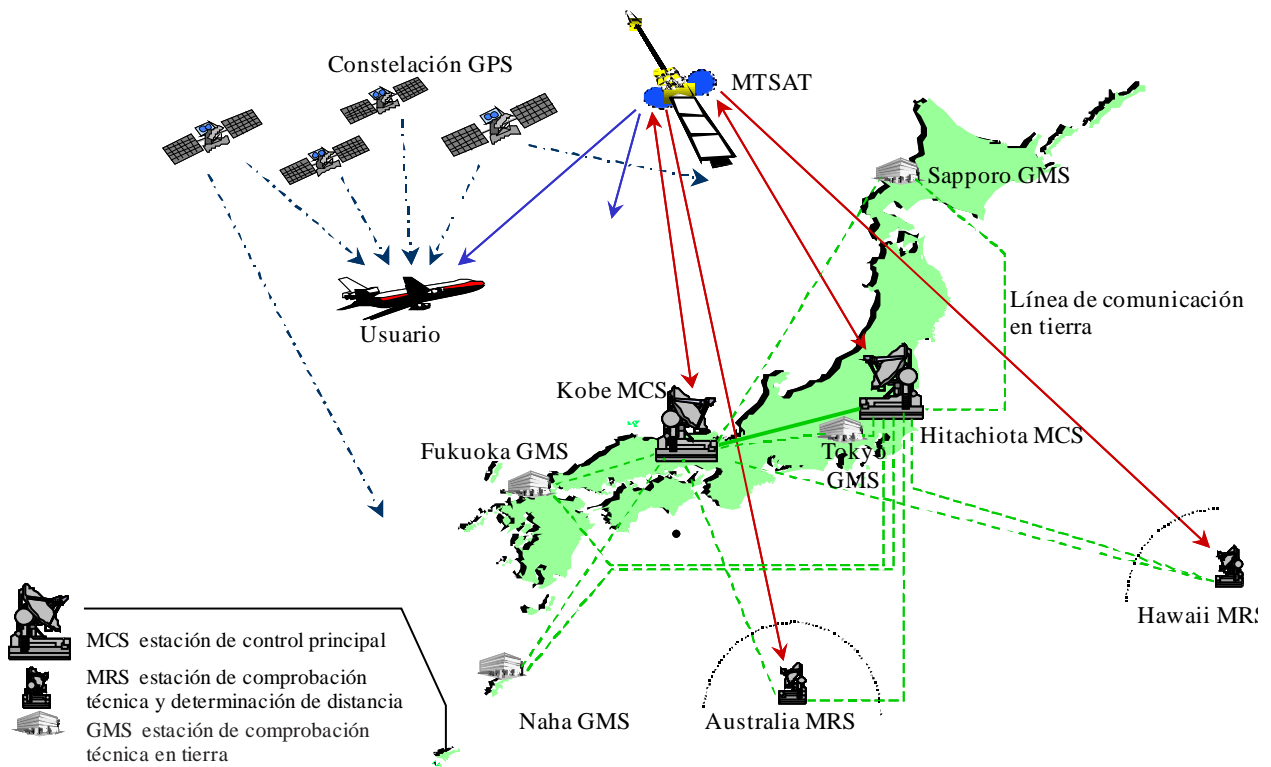
3.4 Descripción del MSAS (Japón)

3.4.1 Generalidades

El MSAS, es decir, el sistema de aumento por satélites de transporte multifunción (MTSAT), está configurado como se muestra en la Figura 3-2. Los datos del satélite GPS se reciben en las estaciones e comprobación técnica en tierra (GMS) instaladas en cuatro lugares en Japón; Sapporo, Tokio, Fukuoka y Naha. Los datos del satélite GPS y la señal del satélite geoestacionario MTSAT también los reciben las estaciones de comprobación técnica y de determinación de la distancia (MRS) instaladas en otros cuatro lugares: Kobe, Hitachiota, Hawaii y Australia. Los datos recibidos se envían a las estaciones de control principales (MCS) instaladas en dos lugares de Japón: Kobe e Hitachiota.

FIGURA 3-2

Configuración del MSAS



Sat_time_freq-03-01

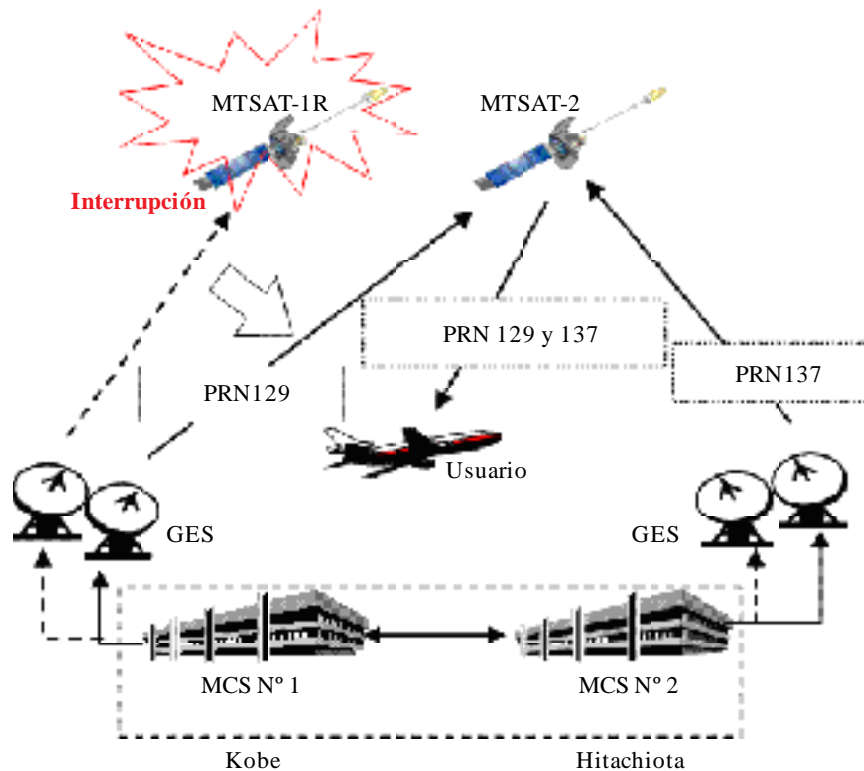
En la estación MCS, el subsistema de procesamiento central (CPF) calcula las correcciones para los satélites y los puntos en la ionosfera (IGP), predefinidos en el sistema MSAS, y verifica la integridad. El tiempo en la red MSAS (MNT), que es un tiempo de red interno del sistema MSAS, se mantiene de forma que su desviación respecto del tiempo GPS esté acotada dentro de un determinado límite. El subsistema de la estación terrena de navegación (NES) genera mensajes MSAS utilizando datos procedentes del subsistema CPF y los modula en la banda Ku. Los mensajes MSAS se transmiten por el enlace ascendente al satélite MTSAT desde la estación terrena (GES) en tierra situada en el mismo lugar, después de haberla amplificado mediante un amplificador de alta potencia (HPA). Además, el subsistema de comunicaciones de red (NCS) gestiona la comunicación entre los equipos en tierra.

Los equipos en tierra del MSAS tienen muchas características en común con el WAAS. Por otra parte, el sistema MSAS tiene características propias, es decir, la función PRN dual con dos tipos de ruido PRN para un mismo satélite geostacionario y control de potencia del enlace ascendente (UPC) a fin de compensar la atenuación debida a la lluvia en la banda Ku.

3.4.2 Función de ruido pseudoaleatorio dual

El sistema MSAS funciona normalmente con dos satélites geostacionarios MTSAT (MTSAT-1R, MTSAT-2), como se ilustra en la Figura 3-3. Diferentes códigos pseudoaleatorios (PRN) se transmiten a dos satélites MTSAT por separado. Aun cuando ninguna de las dos estaciones MCS esté disponible debido a un fallo en el equipo en tierra o a lluvia intensa, uno de los PRN sigue distribuyéndose al usuario, dado que éste puede recibir más de dos canales de señales procedentes de satélites geostacionarios MTSAT, con el fin de impedir la degradación de la continuidad y la disponibilidad. Si uno de los satélites geostacionarios del MTSAT falla, el MSAS conmuta automáticamente al modo PRN dual.

FIGURA 3-3

Modo PRN dual

Sat time freq-03-03

En el modo PRN dual, se transmiten diferentes códigos PRN desde dos estaciones MCS hacia un solo satélite geoestacionario. La interrupción del enlace ascendente por causa de la atenuación debida a la lluvia son pequeños factores que contribuyen a la degradación de la continuidad en el sistema MSAS. En el modo PRN dual, aun cuando la atenuación de la banda Ku debida a lluvia intensa rebasa la compensación que realiza el control UPC en cualquiera de las estaciones MCS, el funcionamiento continúa con el código PRN que se transmite desde otra estación MCS, sin tener que conmutar entre varias MCS.

3.4.3 Control de la potencia del enlace ascendente

Cuando llueve, el sistema MSAS controla la potencia del enlace ascendente mediante un control en bucle cerrado para compensar la atenuación debida a la lluvia de la señal ascendente en la banda Ku y estabilizar así el enlace entre los satélites geoestacionarios del sistema MTSAT y las estaciones GES. El control de la potencia del enlace ascendente (UPC) utiliza datos $L1-C/N_0$ de los satélites geoestacionarios MTSAT obtenidos del receptor UPC instalado en el amplificador HPA. El control del bucle cerrado se ejerce sobre el atenuador del HPA en función del valor medio de $L1-C/N_0$ y el valor predefinido de C/N_0 .

Además, para garantizar el control, también se utiliza C/N_0 en la banda Ku.

3.5 Descripción de EGNOS (Europa)

El EGNOS está compuesto de cuatro segmentos: segmento tierra, espacio, usuario y sistemas de apoyo similares a los segmentos descritos para los sistemas WAAS y MSAS.

- 1 El segmento espacial EGNOS está compuesto de transpondedores a bordo de satélites GEO.
- 2 El segmento de usuario EGNOS consta de receptores normalizados GNSS conformes a RTCA MOPS DO-229.

- 3 El segmento de apoyo EGNOS comprende equipos necesarios para el desarrollo, explotación y calificación del sistema.

Por último, el segmento en tierra de EGNOS se describe en § 3.5.1.

3.5.1 Descripción general del segmento terrestre de EGNOS

El segmento en tierra de EGNOS consta de estaciones de comprobación técnica de la integridad y determinación de distancia (RIMS), que están conectadas a un conjunto de equipos de procesamiento y control redundantes denominado centro de control de misiones (MCC). El MCC determina la integridad, las efemérides y las correcciones diferenciales del reloj de cada satélite controlado, los retardos ionosféricos, y genera las efemérides del satélite GEO. Esta información se envía en un mensaje a la estación terrena de navegación en tierra (NLES), que se retransmitirá junto con la señal de determinación de distancia GEO a los satélites GEO. Estos satélites GEO envían estos datos por el enlace descendente en la frecuencia GPS Link 1 (L1) con una modulación y codificación similar a las del GPS uno. Todos los componentes del segmento en tierra están interconectados mediante una red de comunicaciones de zona extensa de EGNOS (EWAN).

3.5.2 Descripción del sistema EGNOS en relación con el tiempo

En las siguientes secciones se ofrece la respuesta a los requisitos, una descripción de cada una de las funciones de tiempo y la fidelidad esperadas, con arreglo al análisis y los experimentos.

Tanto el GPS como el GLONASS utilizan de base la diferencia de tiempos de llegada (TDOA) para realizar las mediciones de distancia receptor-satélite. Por consiguiente, la precisión de los relojes del receptor y del satélite afectan directamente a la exactitud de la medición de la distancia. Tanto los satélites del GPS como los del GLONASS ofrecen información en sus mensajes navegación de difusión que permite a los usuarios corregir los errores de los relojes del satélite; es decir, la compensación de los relojes de cada satélite respecto de la escala de tiempos del sistema nominal del satélite. Estas correcciones tienen una precisión de unos cuantos ns.

Ahora bien, en el caso del GPS, no tienen en cuenta la oscilación de la disponibilidad selectiva (SA), y si no se calcula y elimina, se degradará la fidelidad de la determinación de la posición del usuario. Además, para aplicación de mayor integridad convendría producir cálculos independientes de los errores del reloj del satélite con el fin de controlar las correcciones de difusión.

A fin de calcular con elevada precisión los errores del reloj del satélite y distribuirlos a los usuarios del sistema, el sistema EGNOS realiza tres funciones de reloj básicas situadas en el equipo de procesamiento central:

- Sincronización del reloj RIMS y generación del tiempo de red EGNOS (ENT).
- Ajuste del ENT al tiempo GPS.
- Determinación de la compensación del reloj del satélite a partir de ENT.
- Estimación de la diferencia entre ENT y UTC.

3.5.3 Sincronización del reloj de las estaciones RIMS y generación del tiempo ENT

La sincronización del reloj de las estaciones RIMS se efectúa utilizando la técnica de *reloj compuesto*. Según esta técnica, el tiempo ENT se define como el mecanismo global implícito de todos los relojes RIMS y el proceso de sincronización genera estimaciones de la compensación y deriva de cada reloj RIMS respecto del mismo. Estas estimaciones pueden utilizarse para hacer referencia a todas las mediciones de pseudodistancia de las estaciones RIMS respecto al ENT. Este proceso de sincronización es necesario para poder combinar mediciones de pseudodistancia observadas simultáneamente de varias RIMS en la función que calcula los errores del reloj del satélite.

Otra técnica de sincronización más sencilla es la del *reloj principal*, en la que se designa un reloj RIMS para proporcionar el tiempo de red con el que se sincronizan todos los demás relojes RIMS. El método de reloj compuesto presenta dos ventajas importantes respecto de éste. En primer lugar, el método de reloj principal presenta un elemento de fallo crítico; si el reloj principal se pierde, el ENT también se pierde. Por el contrario, en el método del reloj compuesto el ENT se mantiene siempre que haya dos relojes en el conjunto. En segundo lugar, la estabilidad del ENT que ofrece el método del reloj principal está obviamente condicionada a la estabilidad del propio reloj. En cambio, en la técnica del reloj compuesto la estabilidad del ENT viene dada

por el mecanismo global implícito de todos los relojes RIMS. Suponiendo que un conjunto de n relojes idénticos e independientes, se obtiene una mejora de \sqrt{n} en la estabilidad. Esta última característica del reloj compuesto tiene un efecto secundario importante de aumentar la capacidad del sistema para detectar y aislar fallos del reloj.

El algoritmo del reloj compuesto se ejecuta mediante un filtro Kalman. Los datos de medición del filtro constan de un conjunto linealmente independiente de observaciones *comunes* con una varianza a priori mínima. La observación común para un par de estaciones RIMS se realiza restando las mediciones de pseudodistancia observadas simultáneamente para un mismo satélite. Antes de restar, las pseudodistancias se *preprocesan* para suprimir las distancias geométricas entre la antena de la RIMS y la antena del satélite y reducir los errores no deseados, como los retardos multitrayecto y el ruido térmico. Las observaciones comunes resultantes representan mediciones directas de los incrementos del reloj RIMS más los errores residuales.

Los estados del filtro constan de diferencias y derivas de cada reloj de las RIMS relativos a la escala de tiempo *ideal* hipotética. La consecuencia de esta formulación es que el filtro proporciona estimaciones de las diferencias y derivas relativas al promedio ponderado *implícito* de todos los relojes de las estaciones RIMS. Esta media global implícita define básicamente la escala de tiempo EGNOS, ENT. La ponderación relativa de los relojes utilizados dentro del filtro depende de varios factores, pero queda determinada sobre todo por los modelos de ruido del proceso relacionado con cada uno de los relojes. Estos modelos caracterizan la estabilidad del reloj del RIMS.

Dado que el filtro sólo dispone de valores de la diferencia de relojes, el modelo del filtro tiene componentes no observables que causan tendencias de crecimiento indefinido en las matrices de covarianza del error de estado. Se debe recurrir a mediciones especiales para suprimir estas tendencias, de lo contrario se producirá al final inestabilidad numérica dentro del filtro. Puede observarse que, una vez se han suprimido de la matriz de covarianza las tendencias de crecimiento indefinido debido a los componentes no observables del modelo del sistema, la covarianza resultante describe los errores en el estado del filtro relativos a la media global implícita, y *no* a la escala de tiempo ideal.

3.5.4 Ajuste del ENT al tiempo GPS

A fin de limitar la gama dinámica de las correcciones del reloj del satélite, reduciendo así el tamaño del mensaje reloj WAD y mejorando la eficiencia del proceso de difusión del mensaje, es necesario ajustar el ENT a la escala de tiempo GPS. Este ajuste se realiza utilizando un filtro digital paso bajo de segundo orden. La señal de entrada de ajuste es una estimación instantánea de la diferencia entre el ENT y la escala de tiempo GPS. Se calcula a partir de las diferencias estimadas del reloj del satélite entre el ENT y las correcciones del reloj de satélite difundidas GPS, que son estimaciones de las diferencias del reloj del satélite respecto de la escala de tiempo GPS. La frecuencia de corte del filtro se elige para obtener la mejor reducción de la disponibilidad selectiva (SA) y, a su vez, evitar retrasos debidos a la deriva relativa del ENT respecto de la escala de tiempo GPS. Cuanto más estable sea el ENT, menor será la frecuencia de corte seleccionada y mayor la reducción de la SA.

El sistema EGNOS básico cumple fácilmente el requisito de que el ajuste del ENT a la escala de tiempo GPS sea < 50 ns. Todos los casos de cesio examinados demuestran que puede lograrse una precisión de ajuste < 3 ns. Estos resultados deben tomarse con precaución, puesto que se basan en series de datos sintéticos obtenidas de modelos ideales de SA y relojes RIMS. No obstante, los resultados son coherentes con otras conclusiones, como las citadas en [Benedicto *et al.*, 1998].

Con una precisión de ajuste de < 3 ns se lograría que los ENT de diferentes subsistemas CPF se sincronizaran automáticamente, sin necesidad de una función de sincronización especial ENT-A a ENT-B. Ahora bien, si dicha función fuera necesaria, los experimentos con datos reales y sintéticos demuestran que es fácil sincronizar diferentes ENT con mayor precisión que 3 ns (2σ). Este es el requisito del sistema impuesto para efectuar conmutación CPF de manera transparente para los usuarios del EGNOS.

3.5.5 Correcciones del reloj del satélite

Las correcciones del reloj del satélite y las velocidades de corrección se calculan utilizando todas las mediciones de pseudodistancia y Doppler a partir de la función de preprocesamiento. Las mediciones se

referencian a ENT utilizando los parámetros de sincronización RIMS y luego recopilándolas en grupos por satélite. Para cada satélite, se efectúa un ajuste ponderado de mínimos cuadrados de las diferencias del reloj y de la velocidad de cambio respecto del ENT. Luego se aplica a las diferencias un filtrado de paso bajo, similar al utilizado en la función de ajuste ENT, en las componentes lentas y rápidas que constituyen los mensajes de corrección del reloj del satélite. Las estimaciones de la velocidad de cambio se utilizan para prever con antelación las correcciones en función de la latencia del sistema esperada.

3.5.6 Difusión de ENT por satélites en órbita geostacionaria (GEO)

Las correcciones rápidas y lentas del reloj del satélite se distribuyen a los usuarios de EGNOS por satélite GEO en un mensaje separado. El receptor de usuario EGNOS decodifica estos mensajes y reconstituye las diferencias combinadas de reloj de satélite respecto del ENT para cada satélite que rastrea y las aplica a sus pseudodistancias, junto con otras correcciones WAD que suministra EGNOS. De este modo, la escala de tiempo ENT sustituye la del GPS o GLONASS en el sistema de navegación del receptor. Por consiguiente, el receptor no sólo calcula un valor mejorado de la posición, sino que, gracias a las correcciones WAD, también calcula el valor de la diferencia de reloj del receptor interno respecto del tiempo ENT.

Una vez está disponible en tierra, el ENT tiene que transferirse con precisión a bordo de los satélites GEO. De hecho, el tiempo GEO se define a la salida de la carga útil GEO, precisamente en el centro de fase de la antena L1. Esta función se garantiza mediante el denominado bucle largo, un mecanismo de servocontrol, basado en la casi simetría entre los enlaces ascendente y descendente desde la estación NLES al satélite GEO.

3.5.7 Cálculo de la diferencia entre las escalas de tiempo ENT y UTC

Como el UTC es un promedio teórico de muchos relojes del mundo, resulta imposible establecer una relación directa entre el ENT y el UTC. Es necesario, en cambio, utilizar un reloj físico que participe en la elaboración del UTC.

Por consiguiente, la diferencia de tiempo entre el ENT y el UTC se puede desglosar en 2 términos:

$$\text{ENT} - \text{UTC} = [\text{ENT} - \text{UTC}(k)] + [\text{UTC}(k) - \text{UTC}] \quad (3-1)$$

siendo:

k cualquier laboratorio europeo que participa en la elaboración del UTC.

3.5.7.1 UTC(k) – UTC

Las diferencias de tiempo (UTC – UTC(k)) las publica cada mes BIPM a través de la circular T, pero queda fuera del alcance de EGNOS.

La fidelidad de la diferencia de tiempo (UTC – UTC(k)) es la siguiente:

- IUT y CCDS recomiendan mantener la diferencia (UTC – UTC(k)) dentro de 100 ns (1σ).
- La incertidumbre estimada para las diferencias (UTC – UTC(k)) está actualmente en torno a 10 ns (1σ), que se facilita en diferido mediante la *Circular T*.
- La incertidumbre estimada de la predicción de la diferencia de tiempos (UTC – UTC(k)) depende del periodo de predicción y podría situarse en la gama de 20 ns (1σ).

3.5.7.2 ENT – UTC(k)

A fin de sincronizar el ENT y el UTC(OP), se sitúa una estación EGNOS RIMS en el mismo lugar que el laboratorio SYRTE, situado en el Observatorio de París y se conecta físicamente a su reloj atómico (con interfaces a 10 MHz y niveles 1pps). El módulo de sincronización EGNOS RIMS calcula directamente la diferencia de tiempo entre el ENT y la estación RIMS(OP) con una incertidumbre inferior a 3 ns (2σ). La diferencia de tiempos se difunde en el mensaje de tipo 12, con la incertidumbre mencionada. En el Apéndice A se describe sucintamente el contenido del mensaje SBAS que transmite el satélite geostacionario SBAS.

3.5.8 SBAS y el tiempo

La principal ventaja de utilizar un sistema SBAS para cronometría es que utiliza un satélite geostacionario como satélite de determinación de la distancia complementario al del GPS. Las especificaciones para los SBAS se realizan de manera que las señales procedentes del GEO estarán sincronizadas con el tiempo GPS con un margen de 50 ns. Dado que el satélite GEO permanece en el mismo punto en el cielo, el laboratorio de cronometría podrá utilizar una antena fija muy directiva, de bocina o parabólica, para seguir el satélite. Este tipo de antena proporciona una gran relación señal ruido y también contribuye a reducir los efectos debidos a los trayectos múltiples (multitrayecto). Además, ayudan a reducir la interferencia. Por otra parte, es posible seguir el satélite GEO constantemente por la noche cuando la actividad ionosférica es mínima, especialmente en las regiones de latitud media donde el centelleo es reducido.

Existen muy diferentes tipos de experimentos de cronometría a los que podría contribuir el sistema SBAS, tales como experimentos de calibración, de reducción del multitrayecto, de comparación entre laboratorios de cronometría y de comparación entre diferentes SBAS.

La calibración, o medición de los retardos a través de un sistema, es un motivo de especial preocupación en el ámbito de la cronometría. Calcular el retardo a través de un sistema de cronometría es fundamental para determinar con exactitud la diferencia entre dos relojes. Los experimentos de referencia cero (zero-baseline) [Brown, 1991] han adquirido mucha importancia en este proceso. Dado su constante disponibilidad, los sistemas SBAS pueden servir de plataforma para la medición a largo plazo en este ámbito.

3.5.8.1 Tiempo y estaciones de referencia

El registro del instante de las observaciones es un campo que reviste especial interés para los sistemas SBAS. Todas las observaciones se efectúan en estaciones de referencia SBAS (SRS) independientes. A fin de garantizar una base de tiempo uniforme en cada SRS, se utiliza como referencia un reloj basado en el tiempo GPS.

Cada estación SRS suele contener una serie de derivaciones independientes denominadas equipo de estación de referencia (RSE). Estas derivaciones son necesarias para añadir redundancia suficiente a efectos de proporcionar datos a la estación principal del SBAS (SMS) en el caso de se produzca un fallo aislado en la SRS. Además de otros componentes comerciales disponibles (COTS), el equipo SER suele disponer de un patrón de frecuencia de haz de cesio (reloj atómico).

La frecuencia patrón debe cumplir ciertas especificaciones para poder emplearse en la arquitectura SBAS. Los requisitos funcionales son:

- precisión;
- programable;
- estabilidad;
- ruido de fase en la banda lateral única;
- tiempo de calentamiento.

La precisión debe ser de al menos 2×10^{-12} sin degradación durante la vida útil del tubo de cesio, de modo que pueda sintonizarse a la frecuencia especificada. El patrón de frecuencia ofrece a cada receptor de la estación de referencia una señal sinusoidal de referencia de 10 MHz con una estabilidad mínima de 2×10^{-13} en 24 h, para poder comparar con exactitud las señales GEO con el tiempo GPS. La frecuencia patrón de la estación SRS debe disponer de una interfaz de comunicación para poder consultarla y ajustar sus parámetros.

La salida de 10 MHz de la frecuencia patrón de cesio se conecta a veces al receptor GPS que genera una salida de 1 PPS que se utiliza como época para las observaciones. El reloj del receptor se ajusta al tiempo GPS al principio. Así, los receptores SRS están sincronizados aproximadamente a nivel de varios microsegundos. El flujo de datos a la salida de cada receptor SRS contiene un parámetro que corresponde a la diferencia de la señal 1 PPS del receptor respecto del tiempo GPS. A continuación, la salida 1 PPS se controla mediante la velocidad del reloj de cesio de entrada. Básicamente, la salida del receptor SRS es un reloj autónomo, lo cual es necesario para obtener una escala de tiempo independiente.

3.5.8.2 Tiempo y la estación principal

La estación SMS dispone del equipo de procesamiento necesario para generar las correcciones transmitidas por el GEO y verificarlas. Asimismo, realiza funciones de operaciones y mantenimiento (O&M) y contiene un reloj GPS para la sincronización con el sistema GPS.

La estación SMS realiza varias funciones. Las relacionadas directa o indirectamente con el tiempo son las siguientes:

- a) determina las órbitas de los satélites GPS/GEO;
- b) supervisa la fidelidad de la señal en el espacio (SIS);
- c) genera el tiempo SNT;
- d) genera el mensaje de diferencia SNT/UTC; y
- e) genera los mensajes SBAS.

Los datos procedentes del equipo de la estación de referencia para cada SRS se envían al procesador de correcciones de la estación SMS y se comparan los datos de cada una de las SRS. Los relojes se comparan entre sí para determinar si uno está funcionando «mal», es decir, registra una diferencia significativa. Este procedimiento constituye la base para la formación del tiempo de red SBAS (SNT) que se describe en § 3.5.8.3.

3.5.8.3 Tiempo de red SBAS

A fin de que la señal SBAS pueda complementar las señales de navegación GPS, es preciso sincronizar las transmisiones SBAS con dichas señales, es decir, con el tiempo GPS. Para ello se crea el tiempo de referencia SNT (tiempo de red SBAS) para el sistema SBAS. El SNT se ajusta al tiempo GPS. Las mediciones realizadas por todas las estaciones de referencia en todas las SRS se envían a cada estación principal, donde se aplica un algoritmo para calcular la escala de tiempo SNT independiente a partir de los datos recibidos de las estaciones de referencia. Todos los «relojes buenos» que intervienen en mediciones de la estación de referencia que recibe una estación principal se utilizan para constituir la escala de tiempo SNT. Esta escala se ajusta luego al GPS con el mismo algoritmo. Cada estación principal aplica el algoritmo SNT descrito antes esquemáticamente.

Los mensajes SBAS incluyen correcciones rápidas y lentas que transmite el GEO. Las correcciones rápidas se determinarán para cada vehículo del satélite (SV) GPS. Para ello se recurre al mensaje de corrección a largo plazo que difunde cada GEO a fin de suprimir los relojes a largo plazo de la corrección rápida extrapolada. Obsérvese que el total de correcciones a largo plazo y rápidas deben sumarse juntas.

Se estima que un ajuste por día quizá no sea suficiente para mantener el SNT próximo al tiempo GPS. Por consiguiente, el ajuste por hardware debe complementarse con mensajes de corrección dentro de los mensajes de navegación SBAS. Habrán mensajes de corrección lenta (mensaje de tipo 9) y un mensaje de corrección rápida (mensaje de tipo 2-5) que transmitirá el GEO. La corrección lenta se actualizará al menos cada dos minutos y constituirá la mayor parte de la corrección. Las correcciones rápidas se expedirán como mínimo una vez por minuto.

3.5.9 Tiempo y los satélites GEO

La manera en que el tiempo es importante en los satélites GEO se ilustra utilizando el sistema WASS como ejemplo. El reloj de cesio en el subsistema GUS se sincronizará con el SNT. Una vez al día, la estación SMS envía instrucciones para ajustar el reloj GUS a fin de reducir cualquier deriva respecto del tiempo GPS. El reloj GUS controla la sincronización del mensaje navegación WAAS procedente del GEO.

El sistema de comunicaciones geoestacionario (GCS) consta del subsistema de generación de señales (SGS), el enlace RFU y el satélite geoestacionario. El subsistema SGS proporciona al RFU un código de ruido pseudoaleatorio (PRN) C/A y una señal de mensaje WAAS a una frecuencia intermedia (IF) de 70 MHz. El RFU convierte la IF en la frecuencia del enlace ascendente RF (6 455,42 MHz), la amplifica y transmite la señal hacia el satélite GEO INMARSAT-3.

El satélite GEO recibe la señal del enlace ascendente de la banda C y la traduce a a los enlaces descendentes de la banda C y L1, que se difunden a los usuarios y al RFU mediante haces de cobertura planetaria con polarización circular dextrógira (RHCP). El RFU recibe las señales L1 y de banda C del enlace descendente

procedentes del satélite GEO INMARSAT-3. Las señales se amplifican y la banda C se convierte a L2. El RFU proporciona las señales L1 y L2 al sistema SGS.

El receptor GUS acepta las señales de código C/A PRN en las frecuencias L1 y L2 procedente del RFU. El receptor GUS mide los datos de pseudodistancia de la portadora y el código a partir de las dos señales recibidas. Esta información se envía a los procesadores y al generador de señales, que disponen de algoritmos y hardware para procesar el tiempo, la frecuencia y las señales de corrección de fase. El procesador también codifica con FEC el mensaje WAAS.

Estas señales de corrección ajustan el tiempo, la frecuencia y la fase de la señal de código C/A PRN a fin de eliminar los efectos ionosféricos, de la distancia del enlace ascendente y de velocidad de variación de la distancia. El generador de señales también combina los datos del mensaje WAAS codificados con FEC con el código C/A PRN corregido para el enlace ascendente, que se suministra como una señal IF al RFU. La frecuencia patrón ofrece referencias de frecuencia precisas y estables a todos los convertidores, generadores de señal y receptores en el RFU y el subsistema SGS.

La variación de frecuencia de la salida a 5 y 10 MHz deberá ser configurable en una gama de $\pm 1 \times 10^{-9}$. Este requisito de ser configurable sólo se aplica a la frecuencia patrón en el subsistema SGS, dado que debe ser capaz de compensar cualquier deriva que se produzca en el oscilador de traducción local de los satélites GEO.

El subsistema RF del enlace ascendente transmite señales hacia el satélite GEO desde el subsistema SGS que contiene los datos de integridad y corrección, junto con la señal de determinación de la distancia similar al GPS. El enlace ascendente RF recibe señales de los satélites GEO en las frecuencias de las bandas C y L. En la dirección del SGS, el RFU controla los niveles de potencia del enlace ascendente para proteger contra interferencia en el enlace ascendente y las variaciones en las pérdidas de transmisión. El RFU también efectúa la traducción de frecuencias de la señal ascendente a la banda C y la traducción de la señal descendente en la banda C a la frecuencia L2.

El subsistema de satélites GEO es un satélite en órbita espacial geostacionaria, el satélite INMARSAT-3 AOR-E situado en 15,5°O de longitud. El segmento espacial de INMARSAT-3 tiene capacidad para transmitir señales de navegación con un ancho de banda de 2,2 MHz centrado en 1 575,42 MHz.

3.5.9.1 SBAS y distribución horaria (de tiempo)

El sistema SBAS suele tener el cometido secundario de distribución de tiempo. La referencia normalizada de tiempo para el SBAS es normalmente el tiempo universal coordinado (UTC), mantenido por una institución nacional o internacional. Para la distribución horaria se facilita a los usuarios la diferencia de tiempos entre el tiempo de red SBAS (SNT) y el UTC en un mensaje de tipo 12 (MT12). Esta diferencia se determina en diversos laboratorios nacionales de cronometría. Los laboratorios supervisan los satélites geostacionarios SBAS a la vista. Calculan la diferencia de tiempos entre el tiempo de la época en que comienza el mensaje SBAS y el 1 PPS del laboratorio que es la realización física del UTC (lab). A continuación se transfieren estos datos a las estaciones principales del SBAS (SMS) a través de algún tipo de interfaz. Las SMS recaban el incremento del SNT/UTC y crean un mensaje MT12 que luego se transmite a la estación del enlace ascendente geostacionaria (GUS), que a su vez la transmite hacia el satélite GEO. La finalidad del mensaje MT12 es proporcionar al usuario una fuente de tiempo exacta respecto del UTC.

El SBAS promete ser la próxima generación de sistema de transferencia mundial. Muchas características del SBAS apuntan en ese sentido. Los satélites geostacionarios están siempre a la vista, lo que ofrece la posibilidad de disponer de varias observaciones con «acoplamiento de fase» permanente, acopladas a una señal de satélite común. Las transmisiones desde un satélite geostacionario permiten utilizar antenas direccionales de gran ganancia, que son capaces de ofrecer señales más claras y menos susceptibles a interferencia y deslizamientos de ciclo. Las señales de satélites geostacionarios se generan y controlan mediante una red de receptores GPS de cesio que ofrecen una referencia bastante estable. Además, el mensaje SBAS procedente de los satélites geostacionarios también ofrece estimaciones en tiempo real del retardo de las señales GPS que se produce al atravesar la ionosfera, gracias a un modelo basado en observaciones en tiempo real de los satélites GPS.

Los sistemas de navegación distribuyen su escala de tiempos y, a veces, su relación con otras escalas de tiempo. Por ejemplo, el GPS distribuye el denominado «tiempo GPS» y su relación con el tiempo universal coordinado

que mantiene el observatorio naval de EE.UU. (UTC (USNO)). Mediante el GPS, el usuario puede ajustar un reloj local al UTC (USNO) y, supervisando continuamente el GPS, el usuario puede conocer cómo funciona su reloj respecto al UTC (USNO). Actualmente el tiempo GPS difiere del UTC en 15 s, debido a los segundos intercalares.

El tiempo de red WAAS (WNT), el tiempo de red EGNOS (ENT) y el tiempo de red MSAS (MNT) son estimaciones del tiempo GPS realizadas por el sistema SBAS. El usuario debería ser capaz de compensar su referencia de tiempo local a partir del WNT o el ENT. En su configuración operativa final, cada sistema SBAS ofrece al usuario una estimación de la diferencia entre su SNT y el UTC. El WAAS y el EGNOS transmiten correcciones que mostrarán la diferencia entre el WNT o el ENT y el UTC. El usuario puede utilizar esta información para sincronizar un reloj con el UTC. No obstante, esta información quizá no siempre esté disponible en las primeras fases de desarrollo.

3.5.9.2 Formato CGGTTS para la distribución de datos de cronometría

Mediante un grupo de trabajo *ad hoc* denominado CGGTTS, la comunidad de cronometría ha creado un formato para facilitar el intercambio de datos de cronometría GPS entre los usuarios interesados en la transferencia de tiempo de elevada precisión. Los principales usuarios son los laboratorios de cronometría del mundo. Sin entrar en detalles acerca del formato, baste señalar que consta de dos columnas con los datos importantes para la cronometría, como se muestra en el Cuadro 3-1. La primera fila es el encabezamiento de las columnas y la segunda los datos correspondientes a cada columna. El término «Lab MC» se refiere al reloj principal del laboratorio que toma las medidas e informa al respecto. SVN se refiere al reloj de un determinado satélite, cuyo número SVN también se incluye en el formato del mensaje. El tiempo GPS se refiere al tiempo del sistema GPS.

CUADRO 3-1

Datos pertinentes para la cronometría

REFSV	REFSYS
Lab MC – SVN (para el satélite GPS)	Lab MC – Tiempo GPS

Dado que el formato del mensaje y los datos procedentes de los satélites WAAS son diferentes del de los satélites del GPS, es preciso modificar el formato normalizado del mensaje de cronometría CGGTTS. Actualmente el CGGTTS inspecciona el mensaje modificado, propuesto por NovAtel. La modificación propuesta consiste en añadir una tercera columna al Cuadro 3-2, titulada GAT, donde G significa satélite geoestacionario, A sistema WAAS (en el caso de EGNOS sería B), y T por tiempo. Este formato se propuso para mantener la continuidad con el convenio adoptado anteriormente y tener además en cuenta la singularidad del mensaje de navegación WAAS y la manera en que se aplican las correcciones a las pseudodistancias observadas (medidas). En el Cuadro 3-2 se muestra la interpretación que debería darse a los datos en el formato revisado propuesto CGGTTS cuando se aplica a un satélite del SBAS.

En el formato CGGTTS propuesto, la columna titulada REFSV contiene el incremento del reloj local respecto del tiempo de transmisión de la señal desde el satélite geoestacionario. Es similar al del satélite GPS. En lo que respecta al Cuadro 3-1, la primera columna de la segunda fila del Cuadro 3-2 se denomina Lab MC-Geo. Sin embargo, «Geo» no es el tiempo de red SBAS (SNT). Al aplicar las correcciones lentas del reloj contenidas en el mensaje de tipo 9, se obtiene un resultado más próximo al SNT. La segunda columna se denomina ahora Lab MC-SBAS. El «SBAS» tampoco es el SNT, por lo que se denomina tiempo SBAS, y es similar al tiempo GPS. Después de aplicar las correcciones rápidas que figuran en el mensaje de tipo 2 a 5, se obtiene finalmente la diferencia del reloj local respecto del SNT.

CUADRO 3-2

Datos en el formato CGGTTS revisado propuesto

REFSV	REFSYS	GAT
Lab MC – Geo	Lab MC – SBAS	Lab MC – SNT
PSR medida + Iono + Tropo + órbita	Correcciones lentas de reloj	Correcciones rápidas del reloj y orbitales
Órbita Geo de MT9	Reloj de MT9	MT2 (correcciones rápidas)

Las transmisiones WAAS se han supervisado en USNO utilizando el sistema de correlación de banda estrecha de NovAtel. Los datos se procesan a diario utilizando un programa que produce datos de salida de acuerdo con el formato CGGTTS revisado propuesto.

El resultado del procesamiento es la diferencia del reloj principal de USNO respecto de WNT. Estos datos se utilizarán en definitiva para la preparación de un mensaje MT12 que transmite el WAAS. Los satélites geoestacionarios del SBAS transmitirán el mensaje MT12 a fin de que los usuarios puedan obtener la diferencia entre el SNT y el UTC (Lab). Cabe destacar que el reloj principal de USNO, el cual proporciona el tiempo al dispositivo de correlación de banda estrecha de WAAS utilizado para medir, es un cálculo en tiempo real del UTC (USNO).

A los efectos de este análisis, se eligió un periodo de datos de cuarenta días (día juliano modificado (MJD) 52167 a MJD 52207). No se trata de una serie de datos continuos. Para facilitar la transferencia de datos desde el USNO a otro computador por módem telefónico, se transmitieron varios subconjuntos de datos durante las horas de menor utilización.

Como el receptor utilizado en este experimento no se había calibrado en términos absolutos, es decir, los retrasos medidos a través de todos los componentes del sistema, los valores obtenidos para el tiempo USNO MC – GPS en el receptor WAAS, se compararon con los valores obtenidos con los receptores calibrados de USNO. Se obtuvo un valor promedio de las diferencias a lo largo de un día. Este promedio se utilizó para estimar las diferencias sistemáticas entre el receptor NovAtel y el receptor USNO utilizado para comunicar los datos GPS a la estación de control principal del GPS.

En la Figura 3-4 se ilustran los datos contenidos en la columna REFSV que se genera siguiendo el formato CGGTTS revisado. La figura muestra la diferencia entre el USNO MC y el tiempo procedente del satélite geoestacionario WAAS una vez aplicadas las correcciones de los retrasos introducidos por la ionosfera, la troposfera y las correcciones a la órbita del satélite geoestacionario contenido en el mensaje MT9 a las pseudodistancias medidas.

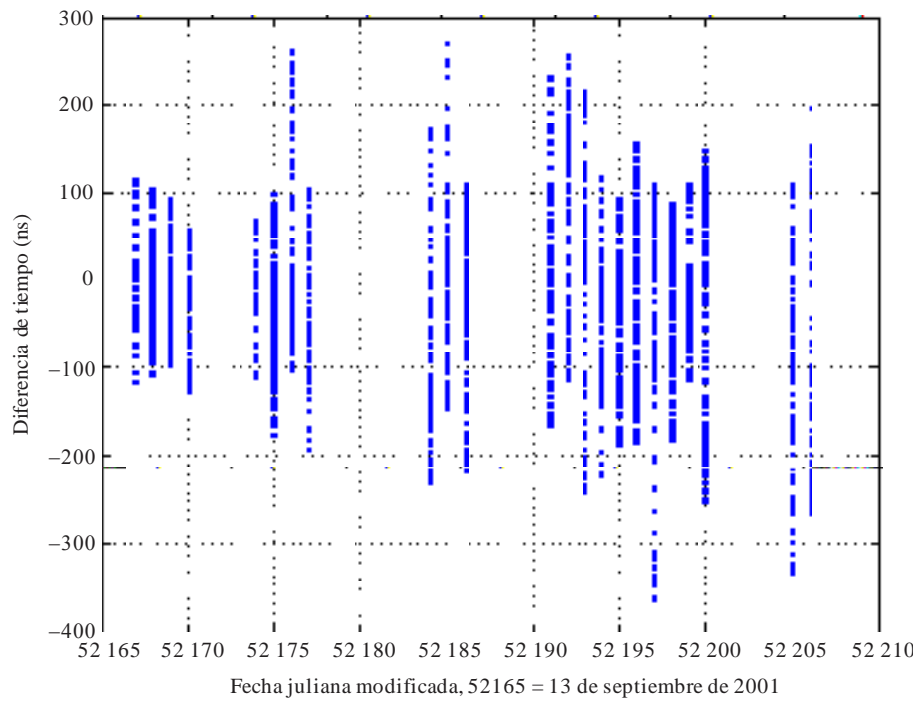
Las correcciones del reloj contenidas en MT9 se aplicaron luego a los datos y los resultados se muestran en la Figura 3-5. Como puede observarse, las diferencias se reducen sobremanera. Ahora bien, sigue habiendo una diferencia relativamente grande que comienza alrededor de MJD 52198, debido a la distorsión bastante grande producida hacia el 13 de octubre de 2001.

La aplicación de las correcciones rápidas contenidas en el MT2-5 mejora aún más el resultado, como se ilustra en la Figura 3-6.

Aunque los valores de UTC (USNO)–WNT se reducen a niveles que están comprendidos dentro de la especificación WAAS, la diferencia sigue siendo demasiado grande para la distribución de tiempo cuando se compara con los valores similares obtenidos utilizando el GPS. En la Figura 3-7 se muestran los promedios diarios realizados desde los puntos concretos representados en la Figura 3-6. Hay una dispersión de unos 40 ns en los valores, debida probablemente a la variación en los procedimientos operativos aplicados durante las primeras fases de la instalación del WAAS.

FIGURA 3-4

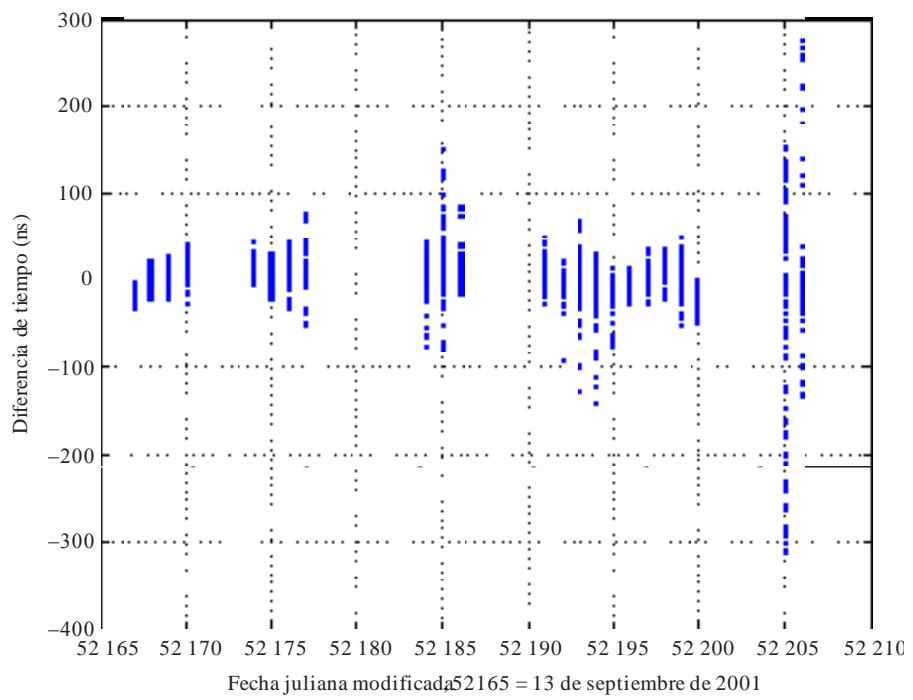
UTC (USNO) – GEO



Sat_time_freq-03-0.

FIGURA 3-5

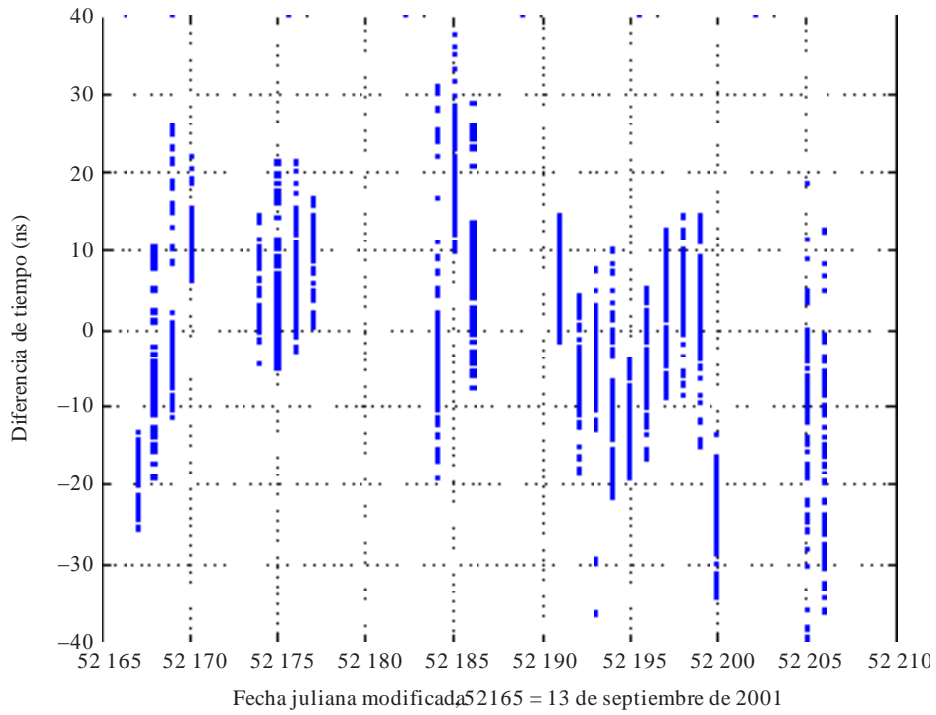
UTC (USNO) – WAAS



Sat_time_freq-03-0.

FIGURA 3-6

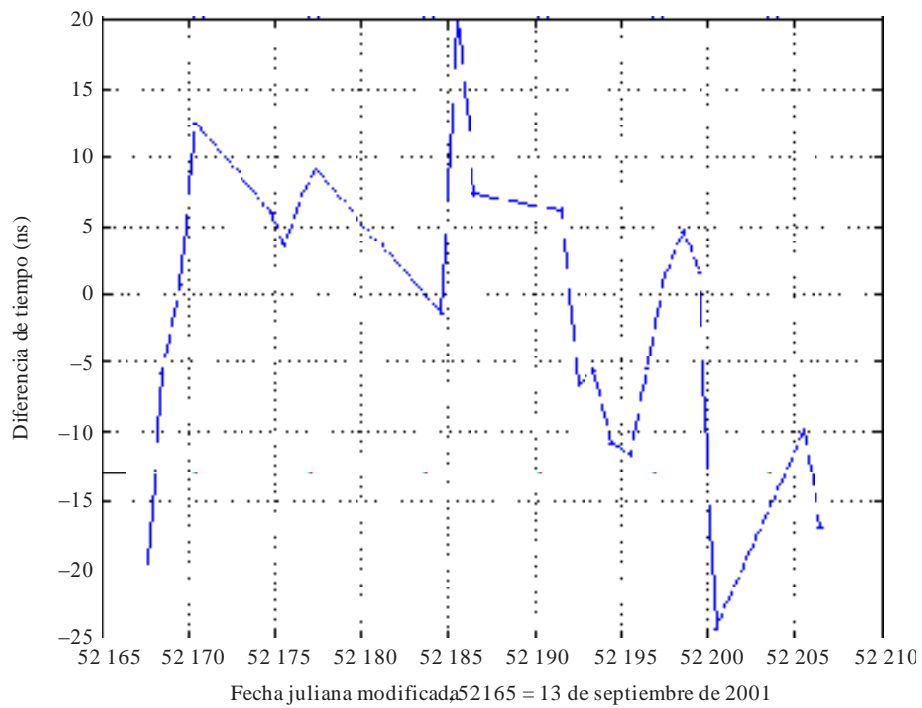
UTC (USNO) – WNT



Sat_time_freq-03-0'

FIGURA 3-7

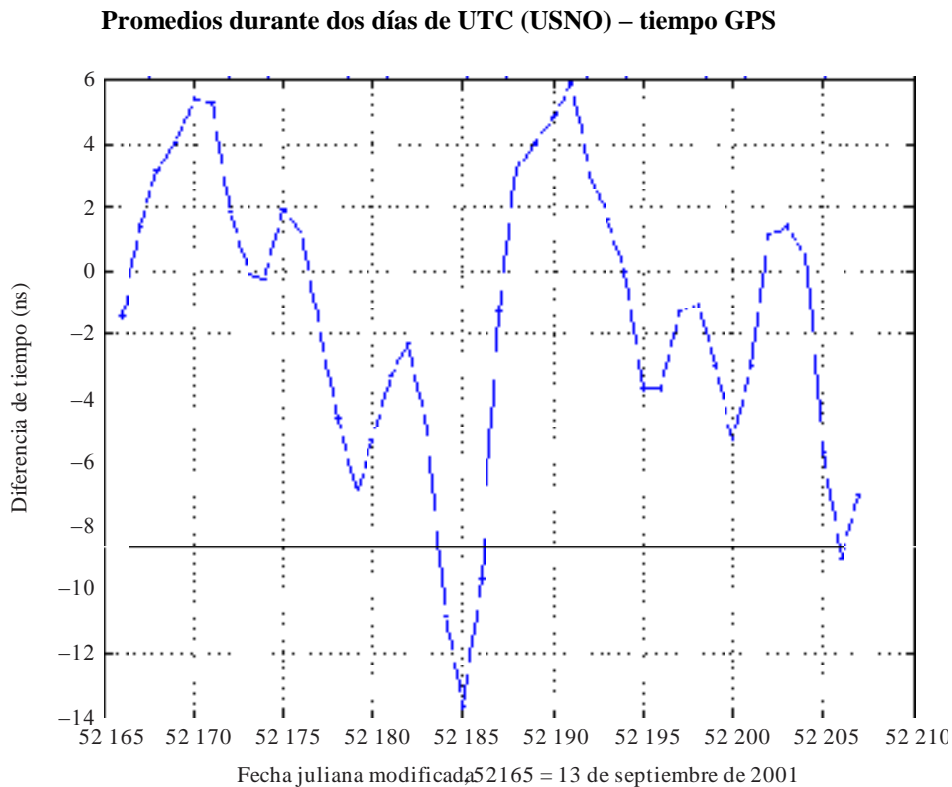
Promedios diarios de UTC (USNO) – WNT



Sat_time_freq-03-0'

La Figura 3-8 muestra los promedios durante dos días de los valores de UTC (USNO) – tiempo del GPS. La dispersión en este caso es de unos 20 ns.

FIGURA 3-8



Sat_time_freq-03-0

3.5.9.3 SBAS y distribución de frecuencias

La transferencia de tiempo utilizando satélites GPS se ha utilizado ampliamente durante muchos años a los efectos de la comparación internacional entre laboratorios de cronometría y para el cálculo del tiempo atómico internacional (TAI). Gracias a un satélite visible desde dos estaciones y a la adquisición de cada estación de los parámetros observables GPS, es posible determinar simplemente restando la diferencia de tiempo absoluta entre los relojes que alimentan los receptores GPS. Para ello es necesario conocer los retardos internos en cada estación (antena, cables, receptor, etc.). Suponiendo estos retardos constantes, se puede realizar una transferencia de frecuencia entre las dos estaciones, lo que permite conocer las variaciones en la diferencia de tiempo entre los dos relojes y, por tanto, la estabilidad de los mismos.

Los receptores GPS geodésicos son capaces de gestionar varios canales (de modo que se pueden observar varios satélites a la vez) y dos frecuencias (lo que permite suprimir el retraso ionosférico). Así, utilizando todas las mediciones de código, es posible ampliar la técnica clásica para obtener resultados más exactos. Por otra parte, estos receptores son capaces de registrar el código y los parámetros observables de la fase de la portadora. Es bien sabido que estos últimos ofrecen perspectivas prometedoras en lo que respecta a la transferencia de frecuencias exactas para tiempos de integración de varias horas y días.

Algunos receptores GPS también pueden seguir las señales GEO, esto es, el mensaje similar al GPS procedente de la carga útil de navegación en la banda L de los satélites geoestacionarios. Estas señales adicionales presentan una importante ventaja para la transferencia de tiempo/frecuencia. Por definición, el satélite GEO siempre está a la vista, por lo que debería ofrecer la oportunidad de estar constantemente enganchado en fase a su señal. Esta capacidad de observación permanente también debería permitir simplificar el procesamiento

de las señales. Por otra parte, la señal GEO no está sujeta a una degradación deliberada, como la disponibilidad selectiva.

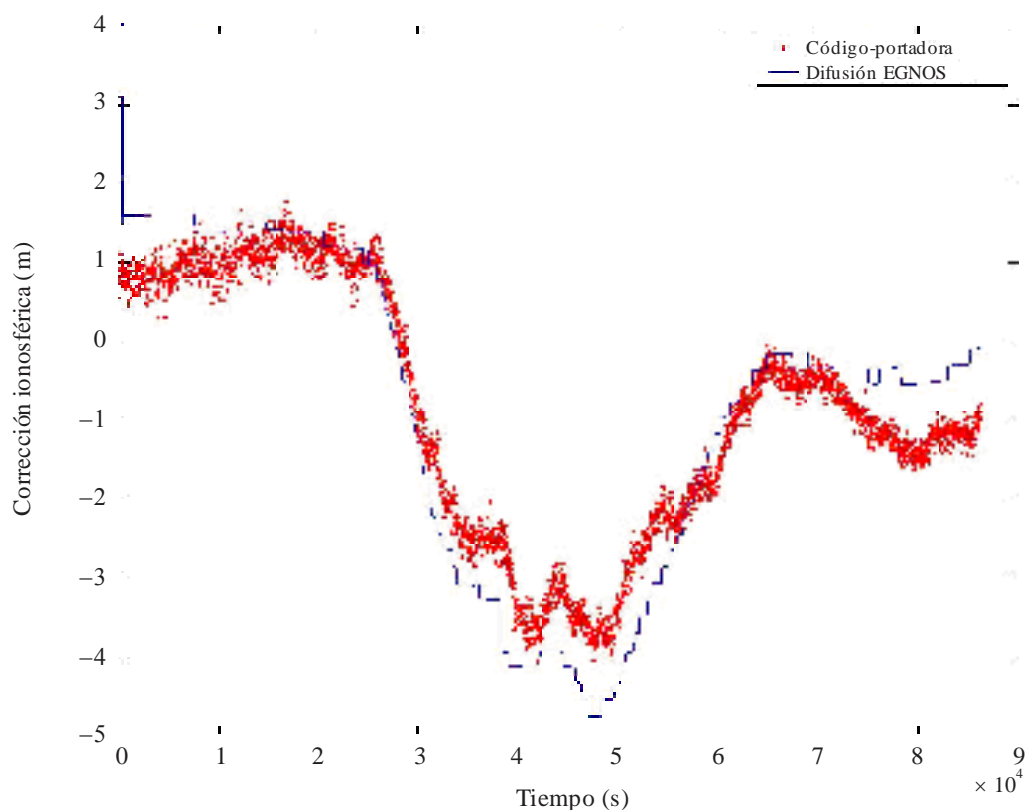
No obstante, la utilización de satélites GEO también conlleva problemas específicos. En primer lugar, transmiten a una sola frecuencia, lo que impide recurrir a la conocida combinación ionosfera-libre. El efecto de la ionosfera puede corregirse recurriendo a la información que difunde el SBAS o calculando la diferencia de código/fase. De hecho, la ionosfera distorsiona por igual el código y la fase, pero con un signo diferente, por lo que la corrección ionosférica puede calcularse sencillamente como la mitad de la diferencia código/fase.

En la Figura 3-9 se muestran los resultados obtenidos en una referencia BIPM/CNES (unos 600 km) con una antena parabólica, ambas apuntando a INMARSAT AOR-E (EGNOS):

En primer lugar, se compara la corrección ionosférica calculada en una estación a partir de la diferencia código-portadora respecto de la difundida por EGNOS.

FIGURA 3-9

Correcciones ionosféricas mediante la diferencia código/fase y la información difundida

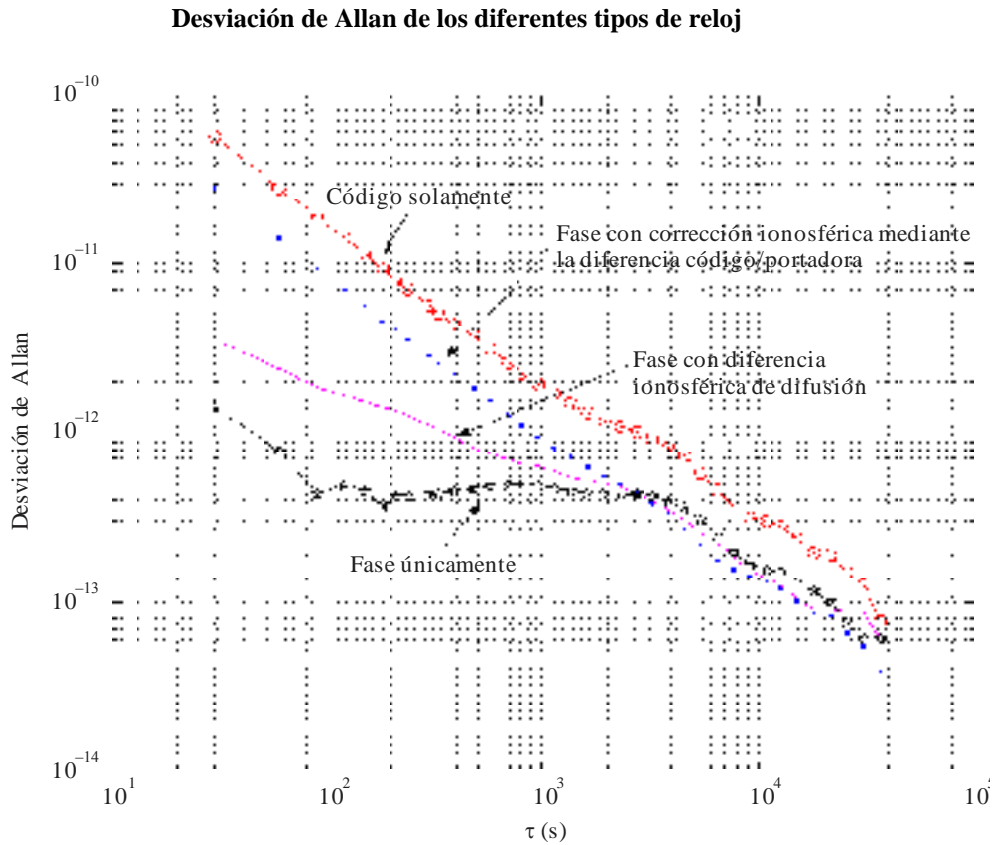


Sat_time_freq-03-0'

La corrección ionosférica calculada a partir de la diferencia código-portadora es obviamente más ruidosa pero continua, a diferencia de la difusión EGNOS que presenta varias etapas.

La Figura 3-10 compara la estabilidad de la solución del reloj con la corrección ionosférica (los dos métodos) y sin dicha corrección.

FIGURA 3-10



Sat_time_freq-03-10

La solución del reloj que utiliza la fase no corregida es obviamente la mejor a corto plazo, pero carece de la corrección ionosférica que afecta a la estabilidad a medio plazo. La solución del reloj que utiliza la fase con corrección ionosférica mediante la diferencia código/portadora es muy ruidosa a corto plazo, debido al ruido que introduce el código. Después de un tiempo de integración de alrededor una hora, la fase no corregida y la fase corregida son muy similares.

Por consiguiente, un aspecto importante es la relación señal-ruido. La utilización de una antena orientable grande mejora los resultados, lo que debería suponer una gran ventaja para el acoplamiento de fase continuo (reducción del número de deslizamientos de ciclo) y para la corrección ionosférica mediante la diferencia código/fase.

3.5.10 SBAS y transferencia de tiempo

Los usuarios quizá deseen configurar un reloj a distancia para que funcione con arreglo a un escala de tiempo predefinida o sencillamente deseen conocer la diferencia entre un reloj local y uno remoto. Para ello se puede recurrir a una técnica denominada vista común. Esta técnica consiste en utilizar dos estaciones que observan simultáneamente el mismo satélite. Cada uno de los usuarios de las dos estaciones debe registrar la diferencia entre su reloj local o la referencia de tiempo local en el mismo instante de tiempo y utilizando el mismo satélite. Por lo general se utiliza un receptor de transferencia de tiempo GPS. Sin embargo, como la mayoría de los receptores modernos integran esa función, es posible recurrir a uno de estos receptores avanzados.

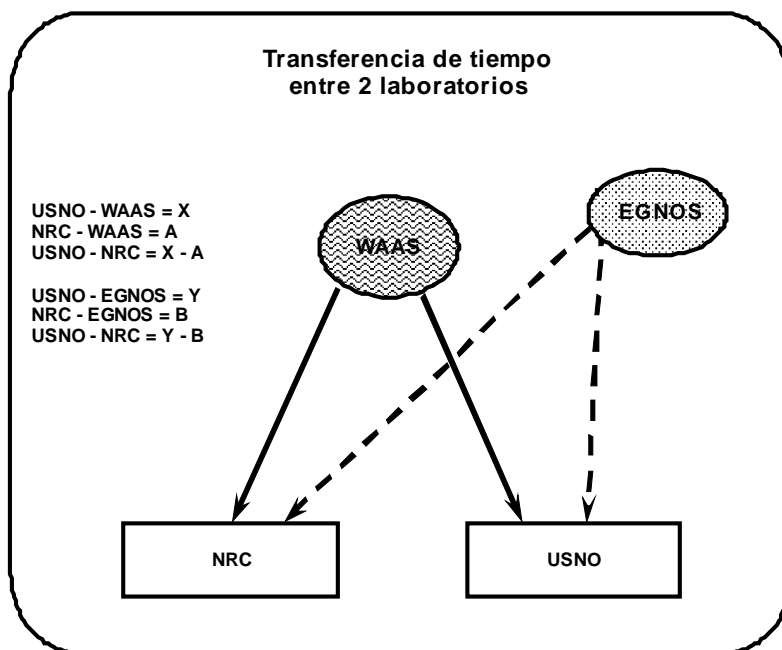
La utilización del SBAS para la transferencia de tiempo requiere dos usuarios. A fin de obtener resultados óptimos, deben observar el mismo satélite al mismo tiempo y utilizar técnicas de reducción de datos idénticas al calcular la diferencia entre sus relojes locales y el SNT. Este método tiene la ventaja de que reduce considerablemente los efectos de las fuentes de error comunes.

3.5.11 Transferencia de tiempo entre dos laboratorios

Actualmente, los dos sistemas SBAS son observables desde una amplia región del planeta. En el caso de la transferencia de tiempo, esta característica ofrece prestaciones añadidas. En la Figura 3-11 se representa esquemáticamente cómo los dos laboratorios utilizan los dos SBAS para comparar sus relojes. Cada laboratorio puede observar los dos SBAS. Los resultados de un SBAS pueden servir para verificar el otro.

FIGURA 3-11

Diagrama de la transferencia de tiempo entre dos laboratorios de cronometría que utilizan dos SBAS para obtener la diferencia de tiempo entre los dos laboratorios



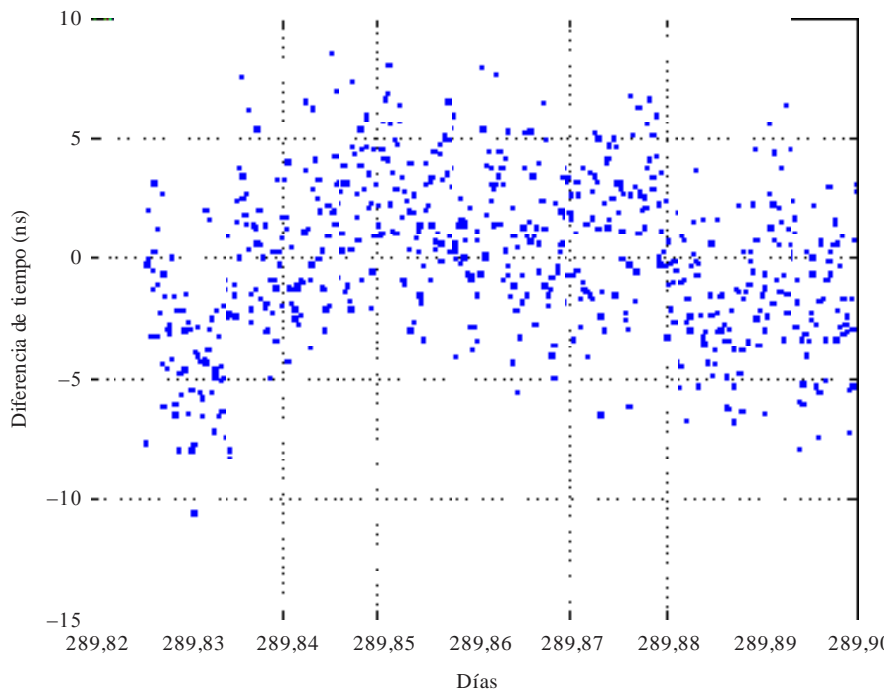
Sat_time_freq-03-11

En este ejemplo, las observaciones se realizan en el USNO de Washington D.C. y en NRC de Ottawa, (Canadá), utilizando como satélites de transferencia de tiempo el WAAS GEO y el ESTB GEO. La Figura 3-12 muestra la diferencia entre los relojes principales USNO y NRC utilizando el WAAS GEO y la Figura 3-13 la misma diferencia utilizando ESTB GEO. Dado que los receptores utilizados en este experimento no se habían calibrado, se ha suprimido el punto cero arbitrario.

Por consiguiente, este ejemplo sólo sirve para dar una indicación de la exactitud que se puede lograr con esta técnica. Al aplicar una regresión lineal a cada conjunto de datos se obtiene un error típico de 1,3 ns y 2,1 ns, respectivamente.

FIGURA 3-12

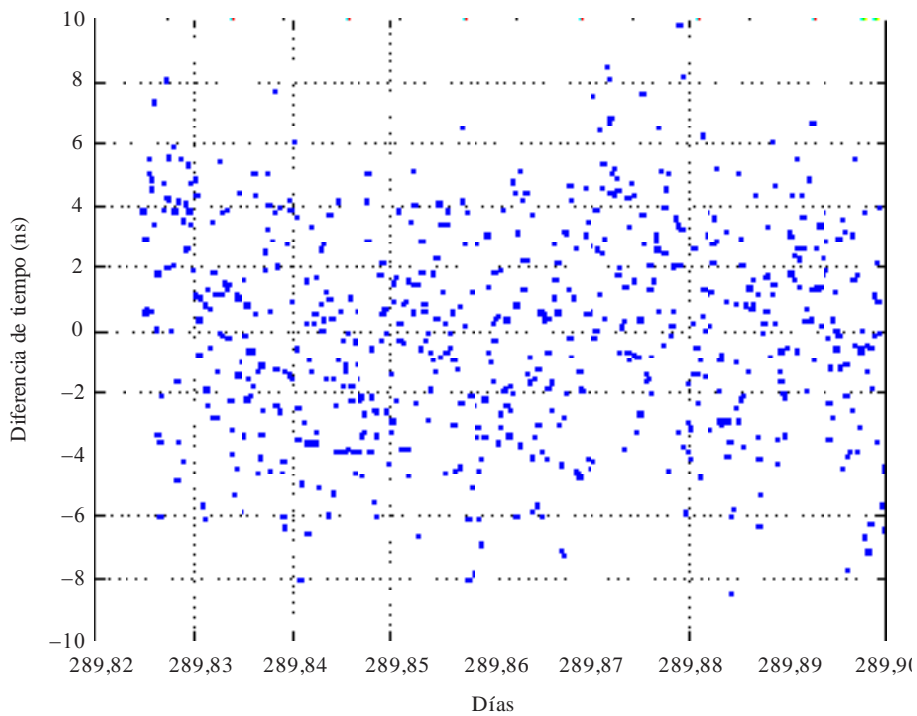
Diferencia entre USNO y NRC utilizando el WAAS GEO
El error típico es de 1,3 ns



Sat_time_freq-03-11

FIGURA 3-13

Diferencia entre el USNO y NRC utilizando el EGNOS GEO
El error típico es de 2,1 ns



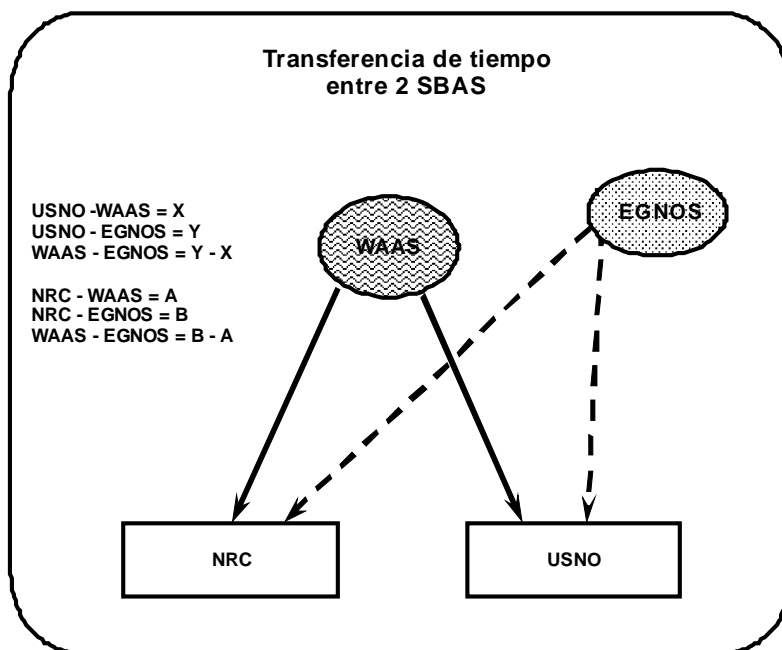
Sat_time_freq-03-11

3.5.12 Transferencia de tiempo entre 2 sistemas SBAS

En la Figura 3-14 se representa esquemáticamente cómo dos laboratorios pueden comparar la diferencia de tiempo entre dos sistemas SBAS. Cada laboratorio permite verificar el otro.

FIGURA 3-14

Diagrama de la transferencia de tiempo entre dos laboratorios de cronometría que utilizan dos SBAS para obtener la diferencia de tiempo entre ambos



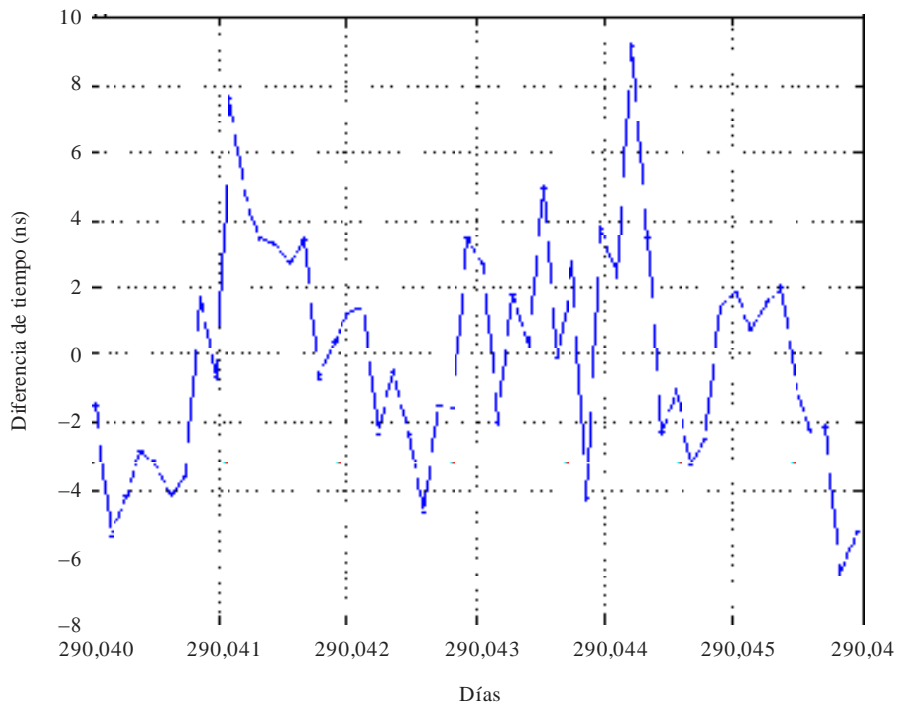
Sat_time_freq-03-14

La Figura 3-15 muestra la diferencia entre los tiempos WNT y ENT obtenidos en USNO después de efectuar una regresión lineal para ajustar las observaciones. Nuevamente, como los receptores no se habían calibrado, el gráfico indica la exactitud que puede conseguirse con esta técnica. El error típico de la regresión lineal con estos datos es de 1,2 ns.

La Figura 3-16 muestra la diferencia entre WNT y ENT obtenida en NRC. El error típico de una regresión lineal de estos datos es prácticamente idéntico al obtenido en USNO, a saber, 1,0 ns.

FIGURA 3-15

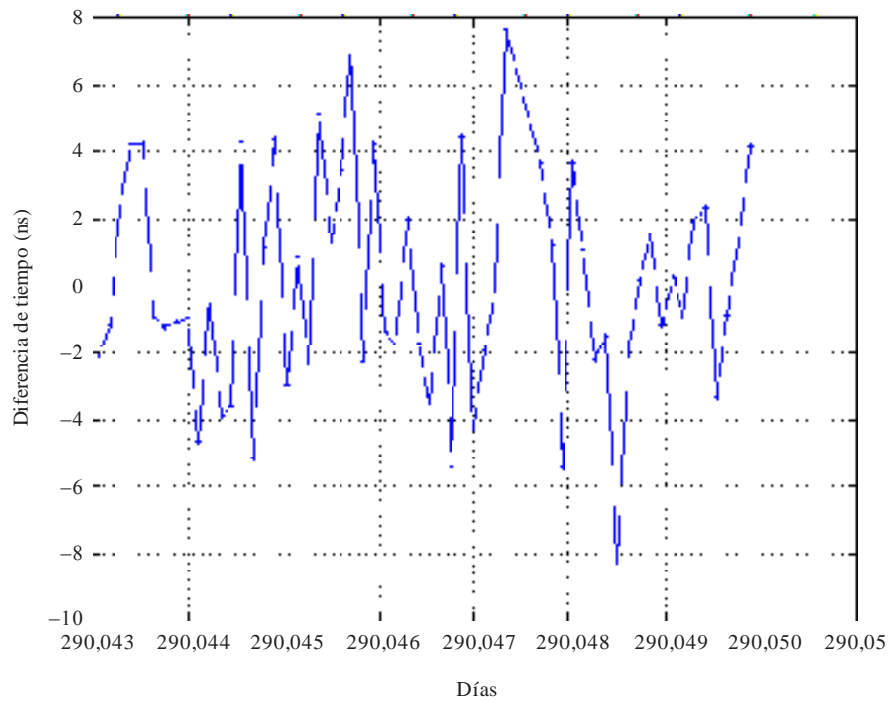
Diferencia entre WAAS y EGNOS utilizando los datos de USNO
El error típico es de 1,2 ns



Sat_time_freq-03-15

FIGURA 3-16

Diferencia entre WAAS y EGNOS utilizando los datos de NRC
El error típico es de 1,0 ns



Sat_time_freq-03-16

3.5.12.1 SBAS y la comunidad de cronometría

El SBAS puede proporcionar y proporcionará el tiempo a escala mundial para el registro de todo tipo de eventos. También ofrecerá una señal horaria muy estable para la comunidad de cronometría. No se verá afectado por SA. La fuente permanece aproximadamente en el mismo punto del cielo. Así, puede utilizarse una antena de alta ganancia para proporcionar una muy buena señal al usuario estacionario. La diferencia entre el tiempo SNT y el UTC se transmite en el mensaje navegación del sistema SBAS. La señal estará disponible constantemente.

Este tipo de señal proporciona algunas capacidades excepcionales a la comunidad de cronometría. Debería permitir el *desarrollo de sistemas de cronometría más económicos* que utilizan estas señales. Ahora se pueden utilizar en los sistemas cristales más baratos que se basan en patrones atómicos y que a su vez integran el tiempo GPS para eliminar los efectos de la disponibilidad selectiva. Como no habrá disponibilidad selectiva, será posible *detectar casi instantáneamente cualquier comportamiento patológico* del sistema que suministra el tiempo. En el GPS es necesario esperar para ver si los transitorios se deben a la disponibilidad selectiva o a un comportamiento anómalo del reloj. Dentro de la huella de dos satélites transmisores del sistema SBAS, se realiza una *verificación inmediata de la redundancia*, que puede servir de verificación muy robusta para muchos sistemas que emplean el tiempo.

Referencias

- BENEDICTO, J. *et al.*, [1998] EGNOS: the European Satellite Based Augmentation to GPS and GLONASS. Proc. GNSS98.
- BROWN, K.R. [1991] The theory of the GPS composite clock. Proc. ION GPS-91, p. 223-241 and GOUNI, Ph. *et al.* [1997] Time and Frequency aspects in EURIDIS, EFTF 1997.
- BRUNET M. *et al.* [1998] The role of time and frequency in EGNOS. PTTI 1998.
- FLAMENT, D. *et al.* [1998] EGNOS: the European Based Augmentation to GPS and GLONASS-mission and system architecture. Proc. GNSS98.
- PECK, S. *et al.* [1997] WAAS network time performance and validation, Proc. ION GPS97, p. 1123-1131.
- PIEPLU, J-M. *et al.* [1998] EGNOS algorithms performances status and experiment activities. Proc. GNSS98.

APÉNDICE A

Breve descripción del contenido del mensaje SBAS

Tipo	Contenido
0	No utilice este satélite GEO para nada (para pruebas WAAS)
1	Asignaciones de máscara PRN, configurado para 51 de 210 bits
2 a 5	Correcciones rápidas
6	Información de integridad
7	Factor de degradación de correcciones rápidas
8	Reservado para futuros mensajes
9	Mensaje navegación GEO (X, Y, Z, tiempo, etc.)
10	Parámetros de degradación
11	Reservado para futuros mensajes
12	Parámetros de diferencia tiempo de red SBAS / UTC
13 a 16	Reservado para futuros mensajes
17	Almanaques del satélite GEO
18	Máscaras de puntos en la cuadrícula ionosférica
19 a 23	Reservado para futuros mensajes
24	Correcciones rápidas /correcciones de error del satélite a largo plazo combinadas
25	Corrección de error del satélite a largo plazo
26	Correcciones del retardo ionosférico
27	Mensaje del servicio SBAS
28	Matriz de covarianza de efemérides del reloj
29 a 61	Reservado para futuros mensajes
62	Mensaje de prueba interna
63	Mensaje nulo

CAPÍTULO 4

TIEMPO DEL SISTEMA GPS

	<i>Página</i>
4.1 Introducción.....	48
4.2 Mediciones del reloj de seguimiento y determinación de las efemérides.....	48
4.3 Tiempo GPS	49
4.3.1 Realización del reloj compuesto.....	50
4.3.2 Reducción de la covarianza	50
4.3.3 Conciliación de particiones.....	51
4.4 UTC (USNO) a partir del GPS	51
Referencias	51

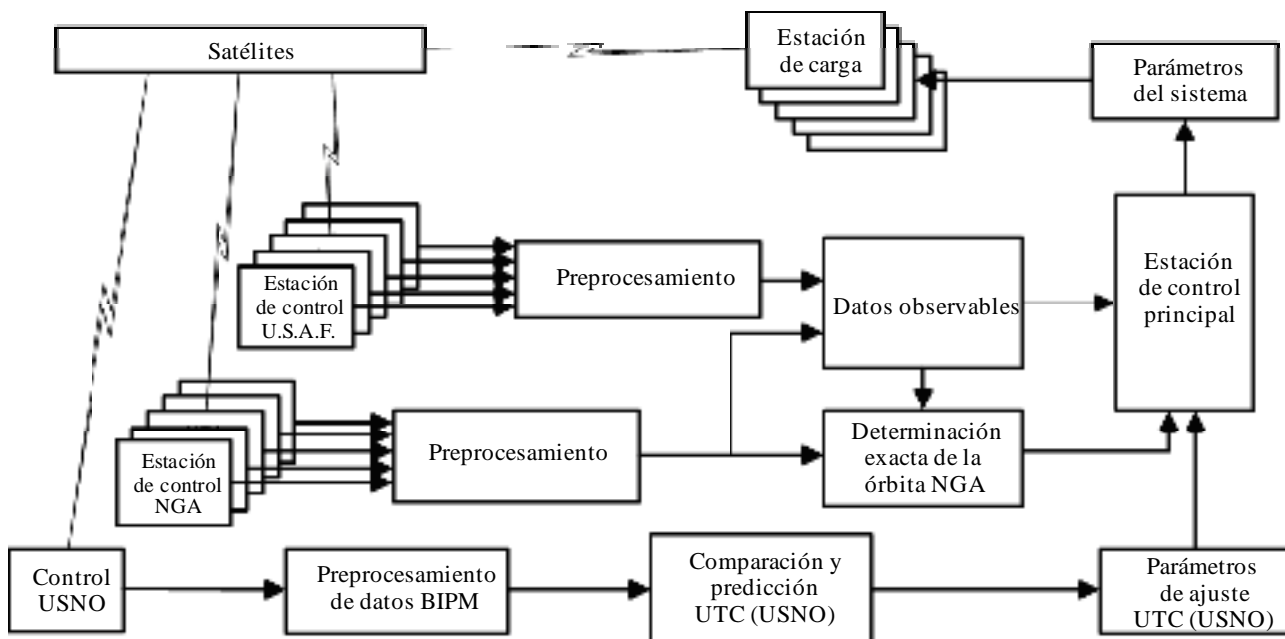
4.1 Introducción

El GPS funciona con información pronosticada en tiempo real. Las cinco estaciones de comprobación técnica de las Fuerzas Aéreas de EE.UU. mantienen enlaces continuos en tiempo real con la estación MCS, de modo que la información de estado y de seguimiento actuales puedan combinarse con la obtenida de las estaciones de comprobación técnica adicionales creadas por la National Intelligence and Geophysical Agency (NGA) a fin de proporcionar cobertura adicional a la constelación de satélites del GPS. Los datos de observaciones adicionales sirven luego para predecir nuevas variables del sistema. Estas predicciones de la fidelidad del sistema se envían posteriormente a las memorias situadas a bordo de los satélites para la transmisión en los mensajes navegación del satélite. Los errores en este proceso se consideran aleatorios, una vez eliminados los errores sistemáticos dominantes (desviaciones).

El flujo de datos del segmento de control del GPS se ilustra en la Figura 4-1. Cada satélite operativo del Bloque II/IIA GPS transporta dos relojes atómicos de cesio (Cs) y dos de rubidio (Rb). Cada satélite del Bloque IIR transporta tres relojes Rb. La frecuencia fundamental del reloj es 10,23 MHz. Los relojes de los satélites y los de las estaciones de comprobación técnica contribuyen a la creación estadística de un tiempo del sistema continuo conocido como Tiempo GPS, que se especifica como 1 μ s de UTC, pero no se insertan los segundos intercalares. Después de efectuar diversas correcciones para eliminar los efectos de la propagación en la ionosfera y la troposfera, de la relatividad y del hardware, el GPS puede ofrecer una referencia de tiempo con una precisión de ≤ 25 ns. Ahora bien, en la práctica la previsión puede ser de 10 ns o incluso mejor.

FIGURA 4-1

Flujo de datos del segmento de control



Sat_time_freq-04-01

4.2 Mediciones del reloj de seguimiento y determinación de las efemérides

Actualmente (2009), las mediciones básicas en el GPS constan de las pseudodistancias y la fase de las pseudoportadoras entre los relojes del satélite y de las estaciones de comprobación técnica. El segmento de control operativo (OCS) consta de cinco estaciones de comprobación técnica, en particular la estación de control principal situada en Colorado Springs, Co. que gestiona las Fuerzas Aéreas de EE.UU. El OCS se ha aumentado con la creación de nuevos enlaces directos con las ocho estaciones de comprobación técnica que administra la NGA. Las pseudodistancias medidas por las estaciones de comprobación técnica de todos los

satélites se procesan cada 15 min mediante un filtro Kalman que contiene las constantes y los modelos de las coordenadas de las estaciones de comprobación técnica, la determinación de las órbitas y las características de los relojes. El filtro Kalman predice el tiempo del sistema global (tiempo GPS), la diferencia de reloj de cada satélite y estación de comprobación técnica respecto del tiempo GPS, y los elementos orbitales de cada satélite respecto del marco de coordenadas geodésicas WGS84.

Los errores de medición se distribuyen entre los estados Kalman. Los relojes de los satélites y las estaciones de comprobación técnica se calculan con arreglo a un modelo de reloj y los errores se expresan en una matriz de covarianza del modelo.

Para determinar la órbita del GPS es indispensable conocer la diferencia entre el UT1 y el UTC con el fin de determinar la orientación inicial de la órbita respecto del sistema de referencia inercial centrado en la Tierra (ECI). Las ecuaciones del movimiento se integran en el sistema de referencia ECI. Estas coordenadas se transforman al sistema de referencia fijo y centrado en la Tierra (ECEF) por medio de cuatro matrices de rotación que representan el movimiento polar de la Tierra, la rotación variable, la nutación y la precesión. Los datos recabados con las estaciones de seguimiento se datan utilizando el tiempo GPS. El filtro Kalman de la MCS utiliza los datos MS para generar cálculos actualizados de los datos de posición y del reloj y predice dichos valores con una antelación de 14 días. A continuación, se da formato a estos datos y se envían a los satélites para su transmisión a los usuarios en el mensaje NAV-MSG junto con las señales de determinación de la distancia. Normalmente se envían al satélite cada 24 h, pero podría aumentarse la frecuencia en función de los datos y la dinámica del sistema. El NAV-MSG contiene las efemérides del satélite, los datos del reloj, el estado del sistema y otros datos que precisa el usuario [IS-GPS-2002 rev D, 2006]. La predicción de las posiciones exactas del satélite y la diferencia del reloj de cada satélite respecto de la base de tiempo común es una función esencial que ofrece el segmento de control y que permite al sistema GPS funcionar como lo hace.

4.3 Tiempo GPS

La época del tiempo GPS comenzó la medianoche del 5 al 6 de enero de 1980. Por consiguiente, el tiempo GPS está retrasado un valor constante de 19 s respecto del TAI (tiempo atómico internacional) y, al mes de junio de 2009, el tiempo GPS estaba adelantado 15 s respecto del UTC. La diferencia respecto del UTC cambia cada vez que se inserta un segundo intercalar en el UTC.

El concepto original de sincronización de los componentes del sistema cuando se desarrollaba el GPS se basaba en un reloj maestro que se había utilizado corrientemente en sistemas de telecomunicaciones. Todos los relojes del sistema tenían como referencia el mismo reloj de una de las estaciones de comprobación técnica (MS). El requisito primario de un sistema de navegación por satélite es que sea un sistema uniforme de tiempo sin saltos ni discontinuidades, de modo que la sincronización de los elementos del sistema sea coherente. El servicio de navegación resultante proporcionará así posicionamiento exacto y no se producirán interrupciones. En el método inicial del reloj principal que utilizaba el GPS, todos los relojes del sistema tenían como referencia el mismo reloj situado en la estación de control principal (MCS) de Colorado Springs. A fin de garantizar la disponibilidad del reloj principal en caso de fallo, el software del sistema podía designar cualquier reloj de las estaciones de comprobación técnica para actuar de reloj principal de referencia en cualquier instante. Esta capacidad dio lugar a cambios considerables en la fidelidad general de la navegación cuando se producía esta conmutación. Como la referencia principal se consideraba perfecta, las diferencias entre los relojes dieron lugar a un cambio general del sistema que menoscabó la fidelidad de la navegación. En consecuencia, se desarrolló un método basado en relojes compuestos que se incorporó en el filtro Kalman del sistema.

Este método de reloj compuesto es similar al concepto de conjunto de relojes tradicionales que se emplea para producir un «reloj de papel» que no depende de ningún dispositivo en concreto [Stein and Filler, 1988]. La técnica de conjunto de relojes es muy conocida para la cronometría a largo plazo, pero en el caso del reloj compuesto, se utiliza la técnica del cálculo Kalman para determinar un tiempo de referencia común que represente el valor medio de las diferencias de reloj dentro del sistema, obteniéndose así un tiempo de sistema sincronizado a corto plazo (menos de 10^5 s). Una sincronización coherente a corto plazo es justo lo que se necesita para el servicio de navegación. La base de tiempo interna común se denomina tiempo GPS y constituye la referencia para la sincronización de todos los relojes en los segmentos GPS especialmente los equipos de usuario.

La técnica de cálculo del filtro Kalman concebida para calcular los parámetros del sistema para el GPS se diseñó originalmente como un filtro dividido en particiones. Los motivos por los que se recurrió a este diseño tienen que ver con la potencia de cálculo, pero también con la fiabilidad de los resultados. Cada partición del filtro calcula un subconjunto de relojes de los satélites y de los relojes de las estaciones de comprobación técnica. Cuando se incluyó en el filtro el reloj compuesto, se añadió un estado adicional a fin de poder diferenciar cada reloj de la media implícita de las mediciones. Obviamente la media propiamente dicha produce un valor residual igual a cero. Los resultados calculados de los estados reales de los relojes producidos eran estables y se comportaban según lo previsto, aunque la covarianza de la solución aumenta linealmente sin límite que es el resultado de la inobservabilidad fundamental del sistema. Además, si se produce una deriva en el estado del reloj, los resultados siguen siendo los mismos. Por consiguiente, se añadió una pseudomedición que limitaría el crecimiento de la covarianza sin influir en los resultados calculados. Sin embargo, las diferentes particiones del filtro no llegan todas en el mismo instante común calculado, por lo que fue necesario conciliar los cálculos a partir de las particiones para garantizar que el tiempo GPS sea coherente en toda la constelación de satélites.

4.3.1 Realización del reloj compuesto

Cuando se añaden estados adicionales al filtro Kalman en lugar del reloj MS principal, el sistema GPS deviene inobservable. La razón estriba en que un incremento constante en todos los estados de los relojes no afectaría a la pseudodistancia y, por consiguiente, sería inobservable para el filtro. La existencia de este componente de estado inobservable produce un aumento lineal de la covarianza de fase del reloj, aun cuando el sistema sea totalmente estable con las ganancias del filtro bien definidas. En Brown [Brown, 1991] se analizan con mayor detalle estas características. Dado que una matriz de covarianza creciente acabará por causar problemas numéricos, se recurrió a un método para reducir la matriz de covarianza sin degradar la fidelidad del filtro. El método elegido fue la reducción mediante la actualización de las pseudodistancias [Satin and Leondes, 1990].

4.3.2 Reducción de la covarianza

La actualización de las pseudodistancias se expresa como una forma de Kalman estándar:

$$P' = P - [PH^T (HPH^T + R)^{-1}]HP \quad (4-1)$$

siendo:

- P': la matriz de covarianza resultante de la actualización (es decir, la matriz de covarianza reducida);
- R: la variación del ruido de la pseudomedición;
- H: la matriz de medición que relaciona la medición con el parámetro de estado.

La matriz P en esta ecuación es la matriz de covarianza $n \times n$ completa de n efemérides y estados de reloj para los satélites y las estaciones de comprobación técnica en una determinada partición. Todas las particiones del filtro experimentan reducciones de la covarianza independientes en cada ciclo de actualización del filtro. El vector columna $n \times 1$ H^T se construye insertando cada elemento en un vector columna $m \times 1$ \hat{H}^T en la posición correspondiente de un vector $n \times 1$ de ceros.

\hat{H}^T viene dado por:

$$\hat{H}^T = \frac{B^{-1}u}{u^{-1}Bu} \quad (4-2)$$

siendo:

- B: la submatriz $m \times m$ de P que corresponde a los estados de la fase del reloj sólo del vector columna $m \times 1$ de todo ceros
- u: el vector columna $m \times 1$ de todo unos.

Cada reloj en la partición tendrá un coeficiente de ponderación en el vector columna H (en el mismo orden que P), de modo que el estado de cada efemérides tenga un coeficiente de ponderación igual a uno. La suma de los elementos en H se normaliza a uno. La expresión para \hat{H}^T asigna luego a cada reloj un conjunto

normalizado de coeficientes de ponderación de fase y frecuencia que es inversamente proporcional a la magnitud de la varianza del error calculado, las diagonales de B. Ahora bien, dada la forma particular en H^T , la expresión de la corrección actualizada dará como resultado algunos estados de efemérides distintos de cero. Por consiguiente, esta técnica de corrección no es completamente transparente a los cálculos de las efemérides. No obstante, en la práctica la diferencia parece ser mínima.

4.3.3 Conciliación de particiones

Era necesario conciliar las particiones para garantizar que el tiempo del reloj compuesto de cada partición del filtro era coherente. La divergencia del tiempo de solución en las particiones crearía un error de pseudodistancia directo. El tiempo de referencia en cada partición tendrá una deriva diferente que podría estimarse a partir de los valores del reloj de la estación de comprobación técnica en cada partición. La mejor solución al problema numérico causado por las particiones era utilizar un filtro de solo una partición, de modo que todos los cálculos se efectuaban de la misma manera. El sistema GPS adoptó un filtro de una sola partición. Esta técnica del reloj compuesto para determinar el tiempo GPS todavía se sigue utilizando.

4.4 UTC (USNO) a partir del GPS

Los relojes atómicos de los satélites GPS funcionan de manera autónoma y su sincronización con el tiempo GPS se realiza mediante la corrección de datos. El tiempo GPS no se conoce dentro del sistema, en el sentido de que no hay un reloj físico que mantenga el tiempo GPS como referencia. El tiempo GPS se conoce a la salida de los receptores GPS y, por tanto, lo supervisa USNO. Comparan estos datos con su realización del UTC, UTC (USNO), y predicen a partir de estos datos los parámetros que se envían de vuelta a la estación principal GPS para su transmisión en el mensaje NAV-MSG del satélite [McKenzie *et al.*, 1989]. La diferencia pronosticada en tiempo real del UTC, realizada en USNO, con respecto al tiempo GPS está disponible a partir de la subtrama 4, página 18 del mensaje NAV-MSG.

Referencias

- BROWN, K. [September 1991] The theory of the GPS composite clock. *Proc. Of ION GPS-91*, p. 223–241.
- McKENZIE, C.H., *et al.* [28-30 November 1989] GPS-UTC Time Synchronization. *Proc. of the 21st Annual PTTI Applications and Planning Meeting*.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006] Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- SATIN, A.L. and LEONDES, C.T. [January 1990] Ensembling Clocks of the Global Positioning System (GPS). *IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, 1.
- STEIN, S. and FILLER, R. [June 1988] Kalman filter analysis for real time applications of clocks and oscillators. *Proc. of the 42nd Annual Symposium on Frequency Control*, p. 447-452.

CAPÍTULO 5

SISTEMA DE SATÉLITES DE NAVEGACIÓN GLONASS

	<i>Página</i>
5.1 Introducción.....	54
5.2 Descripción general y principios de funcionamiento	54
5.3 Arquitectura y desarrollo de GLONASS	54
5.3.1 Segmento espacial	55
5.3.2 Segmento de control	59
5.3.3 Segmento de usuario.....	60
5.4 Tiempo GLONASS	60
5.5 Determinación de la órbita y sincronización del tiempo (OD&TS) del sistema GLONASS ..	62
5.6 Señales GLONASS y espectro de radiofrecuencia.....	63
5.6.1 Requisitos de frecuencia	63
5.6.2 Potencia y espectro de las señales	65
5.7 Utilización conjunta de GLONASS y GPS	66
5.8 Conclusión.....	67
Referencias	68

5.1 Introducción

El Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS) es un sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) gubernamental diseñado para proporcionar a un número ilimitado de usuarios aeronáuticos, marítimos, terrestres y espaciales, en cualesquiera condiciones climáticas, información de cronometría y de posición fija con gran exactitud en cualquier punto de la Tierra y del espacio exterior en las proximidades de la Tierra.

El sistema GLONASS es una infraestructura espacial de doble finalidad para resolver problemas científicos, industriales, económicos y sociales, así como de defensa, seguridad y de otra índole. La Agencia Espacial de la Federación de Rusia (Roscosmos) y el Ministerio de Defensa de Rusia son clientes del sistema GLONASS en pie de igualdad [Glotov *et al.*, 2006].

NOTA 1 – El acrónimo de GLONASS en ruso es **GLO**bal'naya **NA**vigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema, o sea, Sistema Mundial de Navegación por Satélite.

5.2 Descripción general y principios de funcionamiento

El sistema GLONASS totalmente desplegado consta de 24 satélites girando en 3 planos orbitales. Los planos orbitales están separados 120° (longitud). Cada plano orbital contiene 8 satélites equidistantes en 45° (en fase). Además, los planos propiamente dichos están desplazados entre sí por 15° .

El periodo nominal de la órbita del satélite es 11 h 15 min 44 s, que corresponde a una altitud de órbita circular de 19 100 km. Este periodo garantiza la recurrencia del trayecto del satélite sobre la superficie de la Tierra cada 17 órbitas. El periodo se seleccionó para reducir los efectos del campo gravitatorio resonante sobre el movimiento del satélite y evitar así las maniobras de control de la órbita del satélite durante toda su vida útil. La inclinación orbital nominal es de $64,8^\circ$. La separación de los satélites permite ofrecer cobertura mundial y continua de la superficie terrestre y el espacio cercano a la Tierra [GLONASS, 2008] y (Recomendación UIT-R M.1787).

El sistema funciona según el principio de triangulación pasiva. El equipo de usuario del sistema GLONASS mide las pseudodistancias y las pseudovelocidades radiales desde todos los satélites visibles y recibe información sobre las efemérides de los satélites y los parámetros de reloj. Basándose en estos datos, se calculan las tres coordenadas del emplazamiento del usuario y las tres componentes del vector velocidad; asimismo se corrige la frecuencia y el reloj del usuario (Recomendación UIT-R M.1787).

Cada satélite transmite señales de navegación en una (GLONASS), dos (GLONASS-M) o tres (GLONASS-K) bandas de frecuencia: L1 (1,6 GHz), L2 (1,2 GHz) y L3 (1,1 GHz) [Dvorking *et al.*, 2009] y (Recomendación UIT-R M.1787).

Una característica singular del satélite GLONASS es la disponibilidad de un sistema óptico retroreflector a bordo que permite la medición de distancias con láser por satélite. Se utilizan para la determinación exacta de la órbita y la investigación geodésica [Dvorking *et al.*, 2009].

5.3 Arquitectura y desarrollo de GLONASS

A fin de facilitar las funciones necesarias, se han incluido en el sistema GLONASS los subsistemas/elementos representados en la Figura 5-1 [Polischuk *et al.*, 2002].

FIGURA 5-1

Arquitectura GLONASS



Sat time freq-05-0

El sistema GLONASS está formado por los siguientes segmentos:

- Constelación orbital de satélites GLONASS (segmento espacial).
- Sistema de control en tierra.
- Equipo de usuario (segmento de usuario).

El despliegue y mantenimiento de la constelación orbital se efectúa mediante dos sistemas de cohetes espaciales: uno mediante la lanzadera «Proton» y el otro con la lanzadera «Soyuz» desde el lugar de lanzamiento BAYKONOUR o PLESETSK.

5.3.1 Segmento espacial

En la variante ordinaria, la constelación orbital GLONASS (segmento espacial) consta de 24 equipos espaciales operativos en órbitas prácticamente circulares de 19 100 km con un ángulo de inclinación de 64,8° respecto del ecuador y un periodo orbital de unas 11 h 15 min. Están equitativamente distribuidos en 3 planos orbitales (separados 120° en longitud del nodo ascendente), cada plano contiene 8 satélites (con idénticos incrementos de latitud de 45°). Los satélites de navegación en los planos orbitales adyacentes tienen un incremento de latitud de 15°. Esta estructura geométrica de la constelación orbital garantiza la cobertura mundial y continua de la superficie de la Tierra con el campo de navegación, de modo que en todo momento el consumidor pueda ver como mínimo 4 satélites desde cualquier punto de la Tierra (la mejor configuración es cuando un satélite está en el cénit y los otros 3 satélites cerca del horizonte) [Dvorking *et al.*, 2009].

El primer satélite GLONASS se puso en órbita en 1982. En 1993, el sistema constaba de 12 y se declaró operativo.

El sistema GLONASS se realizó en 3 fases [Polischuk *et al.*, 2002]:

- Fase 1 (1983-1985): Prueba experimental. Perfeccionamiento del concepto del sistema. Constelación orbital de 4-6 satélites.
- Fase 2 (1986-1993): Constelación orbital de 12 satélites. Terminación de la prueba de vuelo. Inicio del funcionamiento del sistema.
- Fase 3 (1993-1995): Despliegue de la constelación orbital nominal de 24 satélites. Sistema operativo.

En marzo de 1995, el Gobierno de la Federación de Rusia promulgó una resolución con el fin de ofrecer el sistema de navegación por satélite GLONASS para uso civil por las organizaciones internacionales OACI y OMI.

En 1995 se terminó de desplegar íntegramente el sistema. Sin embargo, por falta de financiación el sistema GLONASS no se pudo reponer durante el periodo comprendido entre 1995 y 1998. Y desde 1998, el sistema se ha ido reponiendo a un limitado ritmo de un lanzamiento de 3 satélites por año.

El estado de la constelación orbital al 4 de agosto de 2010 es de 21 satélites operativos (según el Centro de Información Analítica de la Agencia Espacial Rusa GLONASS,

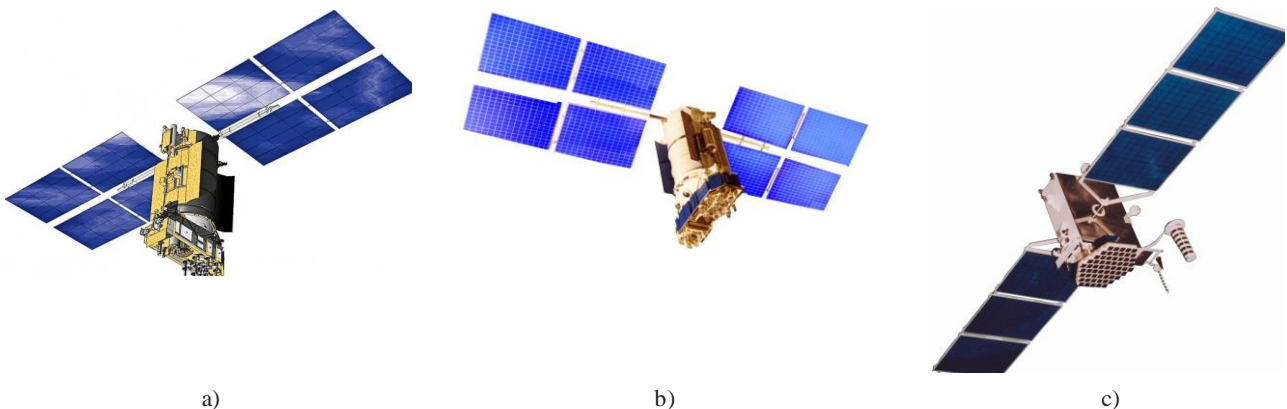
<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:1:9296521002007641687>).

Desde finales de los años 70 la empresa fabricante de satélites GLONASS JSC «Information Satellite Systems» Reshetnev Company, ha diseñado 3 generaciones de satélites GLONASS: GLONASS, GLONASS-M y GLONASS-K.

En la Figura 5-2 se ilustran estos satélites.

FIGURA 5-2

**Las tres generaciones de satélites GLONASS:
a) GLONASS, b) GLONASS-M, c) GLONASS-K**



En el Cuadro 5.1 se presentan las características técnicas de los satélites GLONASS.

CUADRO 5-1
Fidelidad comparativa de los satélites del sistema GLONASS

	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS-K
Primer lanzamiento	1982	2003	Programado para 2010
Vida útil (años)	3	7	10–12
Masa (kg)	1 415	1 415	750
Masa de la carga útil de navegación (kg)	180	250	260
Nº de satélites por lanzamiento:			
– PROTON	3	3	6
– SOYUZ	–	1	2
Fuente de alimentación (W)	1 000	1 450	1 270
Consumo de potencia por la carga útil de navegación (W)	600	580	750
Precisión vertical de navegación en tiempo real (95%) (m)	60	30	5–8 (40–60 cm, utilizando el sistema diferencial mundial)
Nº de señales civiles	1	3	3
Nº de señales especiales	2	2	3
Estabilidad de los relojes a bordo	5×10^{-13}	1×10^{-13}	1×10^{-13}
Error cuadrático medio de sincronización mutua de las señales de navegación (ns)	15	8	3–4
Funciones complementarias			Señal de integridad Diferentes correcciones Búsqueda y rescate

El diseño del satélite GLONASS-K se basa en una caja de equipos sin precintado dividida físicamente en un módulo de plataforma y un módulo de carga útil.

Los satélites de tipo GLONASS-M sustituyen los satélites GLONASS. Este satélite ofrece mejor fidelidad y capacidad.

Los principales objetivos del nivel de fidelidad del satélite de tipo M son los siguientes:

- Utilizar una nueva banda de frecuencias gracias a la señal de navegación modernizada:
 - La banda de frecuencia se ha desplazado a la izquierda (en lugar de las letras de frecuencia $K = 0 - 12$ se utilizarán otras $K = -7...+6$).
 - Los bytes antes reservados se utilizan para información adicional, por ejemplo la divergencia de las escalas de tiempo entre el GPS y el GLONASS, el indicador de autenticidad del marco de navegación (validez), la edad de los datos de navegación.
 - Se han instalado filtros para reducir las emisiones fuera de la banda.
 - Se transmiten señales duales, en ambas frecuencias L1 y L2, que contienen datos digitales y códigos de distancias para las medidas de pseudodistancias.
- Introducir un radioenlace entre satélites para medir distancias e intercambiar datos entre los satélites en órbita, tanto en el mismo plano orbital como en planos orbitales diferentes.
- Mejorar la estabilidad de la señal de navegación hasta 1×10^{-13} , gracias a la estabilización de temperatura exacta de los relojes de Cs.

- Reducir la incertidumbre de la presión solar, gracias a una mayor precisión de puntería de las células solares.
- Aumentar la vida útil del satélite hasta 7 años.

El satélite GLONASS-M puede lanzarse en un lanzamiento en tándem (3 satélites simultáneamente desde el lugar de lanzamiento BAYKONOUR mediante una lanzadera Proton-M con impulsor Breeze-M) y un solo lanzamiento (desde el lugar de lanzamiento PLESETSK mediante una lanzadera Soyuz-2 con impulsor Fregat).

La parte principal de la estructura del satélite GLONASS-M es un contenedor sellado, dentro del cual se mantiene una temperatura adecuada en la gama 0-40°C. En la parte donde están situadas las frecuencias patrón la estabilidad de temperatura es de $\pm 1^\circ\text{C}$.

En el modo nominal, el eje longitudinal del satélite apunta constantemente a la Tierra con una exactitud de $0,5^\circ$, y el eje lateral del satélite coincide con el plano Sol-satélite-Tierra con una precisión de $0,5^\circ$, las células solares apuntan al Sol con una precisión de $\pm 2^\circ$. La puntería del satélite se controla mediante ruedas de reacción que se desaturan periódicamente mediante unidades magnéticas eléctricas.

El subsistema de propulsión consta de propulsores de hidracina (amidol) que genera torques de control en los modos iniciales del satélite y el control de la órbita.

Es muy importante que la maniobra de control de la órbita se realice solamente durante el posicionamiento del satélite en su posición orbital designada. El control de los parámetros de la órbita con gran precisión durante las primeras fases de la órbita y la utilización de órbitas no resonantes para la constelación orbital evita el tener que efectuar maniobras de control de la órbita durante toda la vida útil de la misión del satélite.

El subsistema de energía eléctrica utiliza baterías de Ni-H y células solares de silicio. El primer satélite de GLONASS-M, fabricado por NPO PM, se lanzó en diciembre de 2003.

El futuro desarrollo del sistema GLONASS queda determinado por el Programa GLONASS Federal (orientado a misiones) aprobado por el Gobierno de la Federación de Rusia el 20 de agosto de 2001. El programa de modernización estuvo motivado por:

- la necesidad (para usuarios civiles) de mejorar la precisión, disponibilidad e integridad del sistema con el fin de aumentar su competitividad en el mercado mundial de los servicios de navegación;
- reducción (para los clientes) de los gastos de mantenimiento de la constelación en órbita gracias al aumento de la vida útil de los satélites y al número de satélites por lanzamiento, así como la reducción del segmento de control en tierra gracias a la automatización;
- compatibilidad e interoperatividad GLONASS/GPS (para la cooperación internacional).

El programa abarca el periodo comprendido entre 2002 y 2011, y sus principales tareas son:

- Creación y desarrollo de infraestructura terrestre y del segmento espacial para el sistema de navegación por satélite.
- Reposición y mantenimiento de la constelación de modo que se ofrezcan soluciones de navegación en beneficio de los diferentes usuarios.
- Desarrollo de cooperación internacional en SATNAV.
- Desarrollo y fabricación de equipos de usuarios en Rusia.

Según el Programa Federal (orientado a misiones), además del mantenimiento del sistema utilizando satélites GLONASS-M, se tiene previsto desarrollar una nueva generación de satélites de tipo GLONASS-K.

Las características distintivas del satélite GLONASS-K respecto de los satélites GLONASS-M son, entre otras, las siguientes:

- a) una tercera frecuencia en la banda L para mejorar la fiabilidad y precisión de las soluciones de navegación del usuario;
- b) la vida útil del satélite se aumentó hasta 10 años;
- c) la masa del satélite se ha reducido en un factor 2;
- d) se ha incorporado a bordo del satélite una carga útil de búsqueda y rescate.

En 2010 NPO PM había terminado la fase B y comenzado la fase C. Los satélites del GLONASS-K pueden lanzarse con arreglo a uno de los siguientes planes de lanzamiento en tándem:

- 6 satélites simultáneamente desde el lugar de lanzamiento BAYKONOUR mediante una lanzadera Proton-M con impulsor Breeze-M.
- 2 satélites simultáneamente desde el lugar de lanzamiento PLESETSK mediante una lanzadera Soyuz-2 con impulsor Fregat.

El diseño del satélite GLONASS-K consiste en una caja de equipos sin sellar dividido físicamente en un módulo de plataforma y un módulo de carga útil. En el modo nominal, el eje longitudinal del satélite apunta a la Tierra con una precisión de $\pm 5^\circ$, las células solares apuntan al Sol con una precisión de 1° .

Las frecuencias patrón están estabilizadas térmica y localmente en la gama $\pm 0,5^\circ\text{C}$. El resto del equipo se mantiene a una temperatura entre -10 y $+50^\circ\text{C}$.

5.3.2 Segmento de control

El segmento de control consta de:

- Centro de control del sistema (SCC);
- estaciones de telemida, seguimiento y control UT & C;
- estaciones de comprobación técnica unidireccionales;
- estaciones de determinación de distancia con láser por satélite.

En la Figura 5-3 se ilustran los sistemas de control en tierra de GLONASS [Kosenko, 2009].

FIGURA 5-3
Segmento de control de GLONASS



Sat time freq-05-0

SSC	- Centro de control del sistema	MS	- Estación de medición y comprobación técnica
TT+C	- Estación de telemida, seguimiento e instrucciones	CC	- Reloj central
ULS	- Estación de telecarga	SLR	- Estación de seguimiento por láser
	- Nueva estación (desde 2010)		- Estación operativa

Las estaciones de comprobación técnica miden los parámetros orbitales del satélite y el incremento del reloj respecto del reloj del sistema principal. Estos datos se transmiten al centro de control del sistema. Este centro calcula las efemérides y los parámetros de corrección del reloj y luego envía diariamente los mensajes a los satélites a través de las estaciones de comprobación técnica.

5.3.3 Segmento de usuario

El segmento de usuario consta de numerosos terminales de diferentes tipos. Cada terminal de usuario consiste en una antena, un receptor, un procesador y un dispositivo de entrada/salida. Este equipo puede combinarse con otros dispositivos de navegación para aumentar la precisión y exactitud de la navegación. Esta combinación puede ser especialmente útil para plataformas muy dinámicas.

Los equipos de usuarios realizan mediciones pasivas de pseudodistancias y pseudovelocidades de 4 (3) satélites GLONASS y además recibe y procesa mensajes de navegación contenidos en las señales de navegación de los satélites. El mensaje navegación describe la posición de los satélites en el espacio y en el tiempo. El procesamiento combinado de las mediciones y los mensajes de navegación de los 4 (3) satélites GLONASS permiten al usuario determinar 3 (2) coordenadas de posición, 3 (2) componentes del vector velocidad y la diferencia de la escala de tiempo del usuario respecto de la referencia nacional del tiempo universal coordinado (UTC). En el mensaje navegación se transmiten asimismo los datos que garantizan la planificación de sesiones para las determinaciones de navegación, la selección de la «constelación» nominal de SV y la detección de las señales radioeléctricas que transmiten.

Las funciones de estos dispositivos se incorporan en GLONASS, de igual modo que los teléfonos móviles y terminales de usuario se incorporan en los sistemas de telecomunicaciones. La producción a gran escala de dispositivos de navegación del consumidor (CND) para GPS comenzó a finales de los años 80; hoy en día, se producen en serie, incluidos receptores de sistema dual GPS/GLONASS, con más de 100 empresas produciendo 500 tipos de receptores normalizados. Obsérvese que el objetivo de las empresas privadas es el desarrollo y producción de CND para usuarios no gubernamentales, sobre todo porque al día de hoy las ventas anuales de productos y servicios en este sector rebasan los 10 000 millones USD. No obstante, el gobierno apoya el desarrollo del núcleo básico necesario para crear modelos CND competitivos [GLONASS, 2008].

5.4 Tiempo GLONASS

Cada satélite dispone a bordo de patrones de tiempo y frecuencia de cesio integrados en el sistema del dispositivo de sincronización a bordo utilizado para dar formato, almacenar y generar la escala de tiempo de a bordo y señales de navegación muy estables en la gama de 1 600 MHz y 1 250 MHz. En 2010, se ha previsto lanzar una nueva generación de satélites GLONASS-K (Figura 5-1c) con características mejoradas. Su vida útil garantizada será de 10 años. Incluirá además una tercera señal para usos civiles en la gama de frecuencia L3 (1 198–1 212 MHz). Los patrones de tiempo y frecuencia son los dispositivos de sincronización de a bordo que determinan en gran medida la vida útil de los satélites de navegación [GLONASS, 2008; Dvorking *et al.*, 2009].

El tiempo GLONASS se basa en una escala de tiempo atómica similar al GPS. Se trata de la escala de tiempo UTC mantenida por Rusia (UTC (SU)). A diferencia del GPS, la escala de tiempo GLONASS no es continua y debe ajustarse a los segundos intercalares periódicos. Los segundos intercalares se aplican a todas las referencias de tiempo UTC como se especifica por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS). Los segundos intercalares se utilizan para mantener el UTC próximo al tiempo solar medio. El tiempo solar medio, basado en la rotación de la Tierra sobre su eje, no es uniforme y su velocidad varía paulatinamente debido al rozamiento de las mareas y otros factores tales como el movimiento de fluido en el núcleo de la Tierra.

El tiempo GLONASS se mantiene dentro de 1 ms, y normalmente mejor que 1 μ s, del UTC (SU) mediante el segmento de control y la porción restante de la diferencia se difunde en el mensaje navegación. Además, Moscú desplaza del tiempo GLONASS respecto del UTC (SU) en más de tres horas. El registro GLOCLOCK -véase el manual de referencia del software del fabricante de la familia OEMV- contiene la información de la diferencia entre el tiempo GPS y el GLONASS.

Los satélites del GLONASS están equipados con relojes (patrones de tiempo/frecuencia) cuya inestabilidad diaria es inferior a 5×10^{-13} y 1×10^{-13} para los satélites GLONASS-M. La exactitud de sincronización mutua de las escalas de tiempo de los satélites es como mínimo de 20 ns (1σ) para los satélites del GLONASS y de 8 ns (1σ) para los satélites del GLONASS-M.

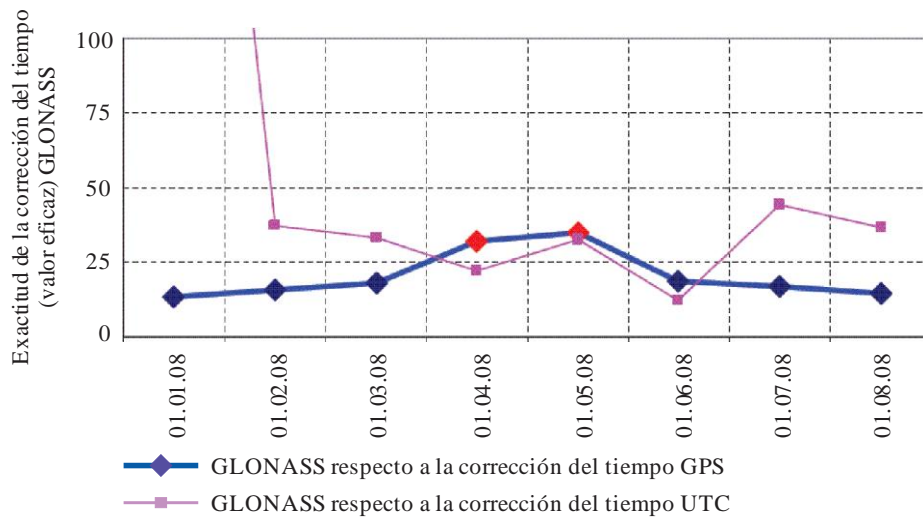
El tiempo GLONASS se genera a partir del tiempo del sincronizador central del GLONASS (CS). La inestabilidad diaria de los relojes de hidrógeno del sincronizador central es inferior a 2×10^{-15} .

Las escalas de tiempo de los satélites GLONASS se comparan periódicamente con la escala de tiempo CS. Las correcciones de cada escala de tiempo a bordo relativa al tiempo GLONASS y UTC (SU) se calculan y se transmiten hacia los satélites dos veces al día por medio del segmento de control. El error de todo sistema que utilice la escala de tiempo GLONASS UTC (SU) no debería rebasar 1 μ s.

La escala de tiempo GLONASS se corrige periódicamente a un número entero de segundos al mismo tiempo que se corrige el UTC de acuerdo con la notificación de BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) (corrección de segundos intercalares), véase la Figura 5-3. Normalmente, todos los usuarios de UTC realizan simultáneamente estas correcciones (± 1 segundo) una vez al año (o cada año y medio) a medianoche del 31 de diciembre al 1 de enero en primer trimestre (o del 31 de marzo al 1 de abril el segundo trimestre o del 30 de junio al 1 de julio el tercer trimestre o del 30 de septiembre al 1 de octubre el cuarto trimestre) a las 00 horas 00 minutos 00 segundos UTC.

FIGURA 5-4

Exactitud de la corrección del tiempo GLONASS respecto al tiempo UTC y GPS [Kosenko, 2009]



Sat_time_freq-05-04

Se avisa a los usuarios de GLONASS con antelación (por lo menos tres meses antes) de las correcciones previstas de segundo intercalar (incluido su valor y signo) a través de los correspondientes boletines, notificaciones, etc. Los mensajes de navegación por satélite de GLONASS no incluyen ningún dato acerca de la corrección de segundo intercalar de UTC. Ahora bien, el mensaje navegación de los satélites prevé la notificación por adelantado a los usuarios sobre las próximas correcciones de segundos intercalares UTC, su valor y su signo (véase § 4.5 de [GLONASS, 2008]).

Debido a las correcciones periódicas de segundo intercalar, no existe diferencia de segundo entero entre el tiempo GLONASS y el UTC (SU). No obstante, existe una diferencia constante de tres horas entre las dos escalas de tiempo debido a las características específicas del segmento de control de GLONASS:

$$t_{\text{GLONASS}} = t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ h } 00 \text{ min} \tag{5-1}$$

siendo:

t_{GLONASS} : tiempo GLONASS;

$t_{\text{UTC (SU)}}$: la escala nacional del tiempo universal coordinado (UTC (SU)).

Para recalcular las efemérides de los satélites en el instante de medir el UTC (SU) se utilizará la siguiente ecuación:

$$t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ h } 00 \text{ min} = t + \tau_c + \tau_n(t_b) - \gamma_n(t_b) (t - t_b) \quad (5-2)$$

siendo:

t : el tiempo de transmisión de la señal de navegación en la escala de tiempo de a bordo;

$\tau_c, \tau_n, \gamma_n, t_b$: los parámetros de efemérides y almanaque (dados en §§ 4.4 y 4.5).

Los satélites GLONASS-M también transmiten coeficientes especiales B1 y B2 para determinar la diferencia entre el tiempo universal UT1 y el tiempo universal coordinado (UTC), así como la corrección del GPS respecto al tiempo GPS relativo al tiempo GLONASS que no deberá rebasar los 30 ns (σ) [GLONASS, 2008].

5.5 Determinación de la órbita y sincronización del tiempo (OD&TS) del sistema GLONASS

En el modo nominal del sistema GLONASS, las correcciones de tiempo y los parámetros orbitales se corrigen por separado. Las correcciones del tiempo se determinan dos veces al día para cada satélite utilizando mediciones unidireccionales y bidireccionales. La comparación de gamas calculadas utilizando mediciones unidireccionales y bidireccionales permite definir fácilmente las correcciones de tiempo de los relojes de a bordo. Para determinar las efemérides sólo se utilizan mediciones bidireccionales.

El sistema de frecuencia-tiempo comprende estaciones de medición radioeléctrica sin consulta (NMS) y con consulta (QMS) y el sincronizador central del sistema (Shchelkovo en la región Óblast de Moscú). Las mediciones de pseudodistancia al satélite de navegación utilizando NMS y las mediciones de distancia utilizando QMS producen los valores de las diferencias de escala de tiempo a bordo respecto la escala de tiempo del sistema. El sincronizador central, que consta de varias frecuencia patrón de hidrógeno muy estables, con una inestabilidad diaria inferior a 5×10^{-14} , actúa de hecho como reloj del sistema, respecto del cual todos los relojes de los satélites se sincronizan y con el que el consumidor compara su reloj.

Por otra parte, la escala de tiempo del sistema GLONASS se sincroniza con la escala del Patrón Nacional de Tiempo y Frecuencia (Mendeleev, Óblast), UTC (SU), que es una de las realizaciones del tiempo universal coordinado (UTC). La corrección de la escala de tiempo del sistema GLONASS respecto al tiempo universal (UT1) se determina con arreglo a los datos de radiointerferometría con líneas de base muy largas y se transmite al consumidor en el mensaje navegación [Dvorking *et al.*, 2009].

Al día de hoy (2010), gracias a la creación de sistemas de medida unidireccionales y a la terminación de las actividades del campo gravitatorio terrestre, se ha iniciado la validación de la tecnología de determinación de efemérides y de correcciones de tiempo simultáneas basada exclusivamente en mediciones unidireccionales.

La efemérides transmitida por los satélites del sistema GLONASS describe la posición de los satélites en el sistema de referencia geocéntrico PZ-90. Para la utilización conjunta de los sistemas GLONASS y GPS, se pueden convertir las coordenadas de los satélites en el sistema WGS-84, para lo cual existe una matriz. El error de conversión de las coordenadas es inferior a 1,5 m (1σ) a lo largo de cada eje.

Algunas tareas de OD&TS para los satélites GLONASS-K se resuelven ahora mediante el software de a bordo, lo que aumenta considerablemente la autonomía de los satélites. Las principales tareas de OD&TS que se efectúan a bordo son las siguientes:

- generación de supertramas de navegación y su envío al transmisor de navegación;
- procesamiento preliminar de mediciones de distancia entre satélites;
- reajuste de las efemérides de referencia de los satélites utilizando mediciones de distancia entre satélites;
- cálculo de correcciones de tiempo respecto a la escala de tiempo del grupo;

- propagación de datos de tiempo y efemérides.

En lo que respecta al reajuste de las efemérides de referencia utilizando mediciones entre satélites, se han examinado tres métodos:

- El método de visión ortogonal cuando sólo se reajustan las componentes longitudinales utilizando mediciones mutuas con visibilidad directa ortogonal al movimiento del satélite.
- El método basado en el «usuario» principal, donde las efemérides de referencia de cada satélite se reajustan suponiendo que las de los demás satélites se conocen con exactitud.
- El método de reajuste de los parámetros de órbita plana, que consiste en reajustar las componentes longitudinales y radiales. Las efemérides de cada satélite y de todos los demás satélites visibles se reajustan a bordo.

El tercer método parece ser el más óptimo. Las efemérides de referencia y las correcciones del tiempo utilizando medidas entre satélites se reajustan a bordo por separado. Los errores (RMS) de las efemérides transmitidas en la trama de navegación son las siguientes:

- para los satélites GLONASS: longitudinal – 20 m, binormal – 10 m, radial – 5 m;
- para los satélites GLONASS-M: longitudinal – 7 m, binormal – 7 m, radial – 1,5 m.

Desde 1999, por Decreto del Gobierno de Rusia, el sistema GLONASS se utiliza con una doble finalidad, a saber, para usuarios civiles y militares. Además, el sistema GLONASS está abierto a la cooperación internacional para crear un sistema de navegación internacional y está previsto que lo utilicen la OACI y la OMI. La utilización conjunta de los sistemas GPS y GLONASS ofrecerá a los usuarios un servicio de navegación fiable con mayor precisión y disponibilidad, y fomentará el desarrollo del mercado mundial de servicios de navegación.

5.6 Señales GLONASS y espectro de radiofrecuencia

A diferencia del sistema GPS, que se aplica a las señales con división de canales codificados en la que todos los satélites de navegación emiten señales al mismo tiempo y en la misma frecuencia portadora, el sistema GLONASS aplica la división de frecuencia, de modo que cada satélite emite la señal de navegación a una frecuencia portadora propia. Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes. En particular, la utilización de división de canales codificados simplifica sobremanera la creación de dispositivos destinados al consumo de masas y permite aumentar sin límites el número de satélites. Por consiguiente, a fin de lograr un desarrollo equilibrado de GLONASS y aumentar la cantidad y calidad de los servicios de navegación, se ha previsto introducir en los satélites GLONASS-K nuevas señales de navegación basadas tanto en frecuencia como en división de fase.

5.6.1 Requisitos de frecuencia

Los requisitos de frecuencia para el sistema GLONASS se basaron en la transparencia de la ionosfera, el balance del enlace radioeléctrico, la sencillez de las antenas de usuario, la supresión del multitrayecto, el coste de los equipos y las disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). Las frecuencias portadoras varían un múltiplo entero de 0,5625 MHz en la banda L1, de 0,4375 MHz en la banda L2 y de 0,423 MHz en la banda L3.

Desde el 2006 nuevos satélites del sistema GLONASS utilizan de 14 a 20 frecuencias portadoras en distintas bandas. En la banda L1 se emplean frecuencias portadoras de 1 598,0625 MHz (la más baja) a 1 605,3750 MHz (la más alta), en la banda L2 frecuencias portadoras de 1 242,9375 MHz (la más baja) a 1 248,6250 MHz (la más alta) y en la banda L3 frecuencias portadoras de 1201,7430 MHz (la más baja) a 1209,7800 MHz (la más alta). En el Cuadro 5-1 figuran los valores nominales de las frecuencias portadoras de las señales de navegación utilizadas en el sistema GLONASS (Recomendación UIT-R M.1787).

CUADRO 5-1

**Valores nominales de frecuencias portadoras de las señales
de radionavegación en el sistema GLONASS**

K (N° de frecuencia portadora)	F_K^{L1} (MHz)	F_K^{L2} (MHz)	F_K^{L3} (MHz)
12	–	–	1 209,7800
11	–	–	1 209,3570
10	–	–	1 208,9340
09	–	–	1 208,5110
08	–	–	1 208,0880
07	–	–	1 207,6650
06	1 605,3750	1 248,6250	1 207,2420
05	1 604,8125	1 248,1875	1 206,8190
04	1 604,2500	1 247,7500	1 206,3960
03	1 603,6875	1 247,3125	1 205,9730
02	1 603,1250	1 246,8750	1 205,5500
01	1 602,5625	1 246,4375	1 205,1270
00	1 602,0000	1 246,0000	1 204,7040
–01	1 601,4375	1 245,5625	1 204,2810
–02	1 600,8750	1 245,1250	1 203,8580
–03	1 600,3125	1 244,6875	1 203,4350
–04	1 599,7500	1 244,2500	1 203,0120
–05	1 599,1875	1 243,8125	1 202,5890
–06	1 598,6250	1 243,3750	1 202,1660
–07	1 598,0625	1 242,9375	1 201,7430

En cada portadora de frecuencia se transmiten dos señales de navegación por incremento de fase (180° de fase) desplazadas 90° (en cuadratura). Son la señal de exactitud normal (SA) y la de exactitud elevada (HA).

Cada satélite (GLONASS y GLONASS-M) transmite señales de navegación en dos gamas de frecuencia L1 (1,6 GHz) y L2 (1,2 GHz) utilizando diferentes portadoras. Estas mismas portadoras las utilizan los satélites situados en las antípodas en el mismo plano. Las portadoras nominales en las bandas de frecuencia L1 y L2 se definen mediante las siguientes expresiones:

$$f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1 \quad (5-3)$$

$$f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2 \quad (5-4)$$

siendo:

K: N° de la portadora

f_{01} = 1 602 MHz

Δf_1 = 562,5 kHz

f_{02} = 1 246 MHz

Δf_2 = 437,5 kHz.

Antes de 2005, K tomaba valores enteros de 0 a 13, después de 2005, de –7...+6.

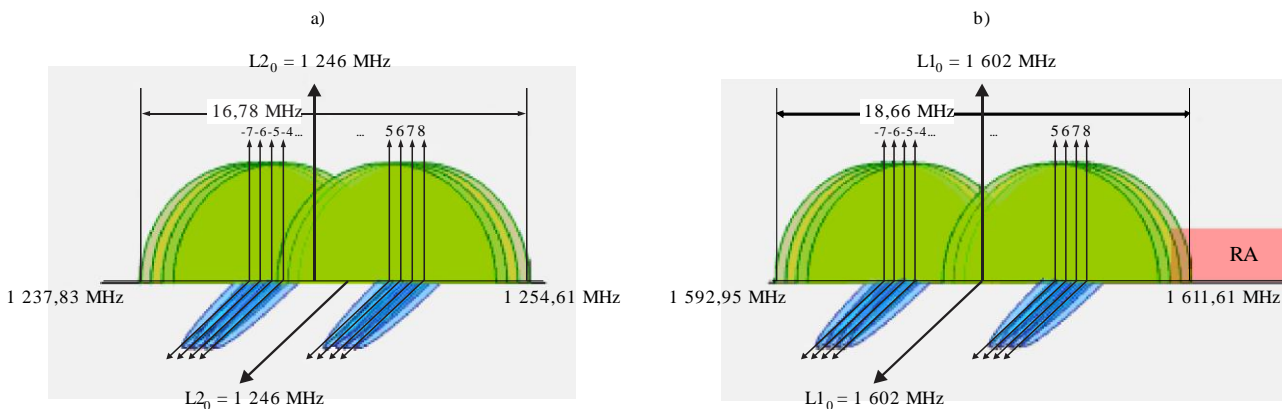
Se ha incorporado una tercera frecuencia L3 para los satélites de GLONASS-K.

5.6.2 Potencia y espectro de las señales

En la Figura 5-5 se muestra el espectro de las señales GLONASS en las bandas L1 y L2, y en la Figura 5-6 se muestra el espectro de la señal del satélite GLONASS-K en la banda L3 [Revnivkyh, 2005].

FIGURA 5-5

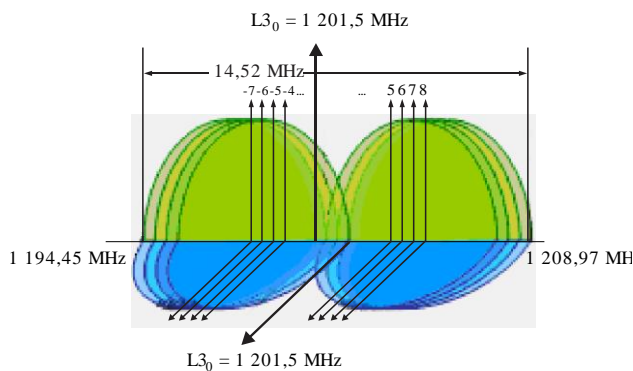
Espectro de GLONASS: b) banda L1, a) banda L2



Sat_time_freq-05-0

FIGURA 5-6

Espectro de GLONASS: señal L3 (GLONASS-K)



Sat_time_freq-05-06

Las señales transmitidas tienen una polarización dextrógira elíptica con un factor de excentricidad no peor de 0,7 para las bandas L1, L2 y L3. La mínima potencia garantizada de una señal a la entrada de un receptor (suponiendo una ganancia de antena de 0 dBi) es de -161 dBW (-131 dBm) para las señales SA y HA en las bandas L1, L2 y L3 (Recomendación UIT-R M.1787).

En el sistema GLONASS se utilizan tres clases de emisiones: 8M19G7X, 1M02G7X, 10M2G7X. En el Cuadro 5-2 figuran las características de estas señales.

CUADRO 5-2

Características de las señales GLONASS

Gama de frecuencias	Clases de emisión ⁽¹⁾	Ancho de banda Tx (MHz)	Máxima potencia de cresta de la emisión (dBW)	Máxima densidad espectral de potencia (dB(W/Hz))	Ganancia de la antena (dB)
L1	10M2G7X	10,2	15	-52	11
	1M02G7X	1,02	15	-42	
L2	10M2G7X	10,2	14	-53	10
	1M02G7X	1,02	14	-43	
L3 ⁽²⁾	8M19G7X	8,2	15	-52,1	12
	8M19G7X	8,2	15	-52,1	

⁽¹⁾ Reglamento de Radiocomunicaciones, edición de 2008. Volumen 2, Apéndice 1.

⁽²⁾ Dos señales GLONASS L3 están desplazadas una con respecto a otra 90° (en cuadratura).

La envolvente del espectro de potencia de la señal de navegación se describe mediante la función $(\sin x/x)^2$, donde:

$$x = \pi(f - f_c) / f_t \quad (5-5)$$

siendo:

f : frecuencia considerada;

f_c : frecuencia portadora de la señal;

f_t : velocidad de chip de la señal.

El lóbulo principal del espectro constituye el espectro operacional de la señal. Ocupa una anchura de banda igual a $2f_t$. Los lóbulos tienen una anchura igual a f_t .

5.7 Utilización conjunta de GLONASS y GPS

Es evidente que la combinación de GPS y GLONASS producirá en última instancia un sistema de 48 satélites. En este sistema, el bloque de satélites será un factor menos limitante, permitiendo así aumentar la redundancia de medición.

Los métodos modernos de procesamiento digital de señales permiten procesar las señales GPS y GLONASS utilizando la misma arquitectura del receptor, pese a las diferencias entre los dos sistemas. Las gamas de frecuencias de los sistemas GPS y GLONASS están próximas, por lo que puede utilizarse una combinación de antena y preamplificador de entrada común en el equipo de usuario. Con un diseño óptimo y software adecuado para el procesamiento de las señales se podría construir un receptor combinado a un precio apenas superior al de un receptor GPS o GLONASS. Las diferencias en la información de efemérides y la representación de almanaque de los sistemas GPS y GLONASS no suponen un obstáculo para el funcionamiento del equipo de usuario. El software del procesador de navegación introduce las correcciones pertinentes y permite el procesamiento de ambos flujos de datos.

El equipo de usuario, la parte más flexible de todo el sistema, se sigue mejorando continuamente. En el momento actual, la mayoría de los receptores son multicanal, capaces del seguimiento simultáneo de las pseudodistancias y pseudovelocidades de cierto número de satélites visibles. Por consiguiente, estos equipos proporcionan la máxima precisión e integridad a las observaciones de navegación. Los adelantos tecnológicos en el campo del procesamiento digital de señales han generado un grado de integración muy elevado, que ya permite la conversión discreta y el tratamiento digital de las señales de satélite en una etapa próxima a la entrada del preamplificador.

La utilización conjunta de los sistemas GLONASS y GPS ofrece notables ventajas con respecto a la utilización separada de cada uno de ellos.

Aumento de la disponibilidad: Cuando se ha de funcionar con obstrucciones tales como terrenos montañosos o «desfiladeros» urbanos, la duplicación del número de satélites disponibles suele constituir una solución válida frente a la carencia de soluciones propia de los receptores exclusivos de GPS o de GLONASS.

Mejora de la precisión: El mayor número de satélites normalmente da lugar a una mejor disposición geométrica de usuario a satélite (PDOP).

Arranque en frío más rápido: Cuando el receptor carece en absoluto de información sobre posición y tiempo, la probabilidad de adquisición de un satélite aumenta al crecer el número de satélites visibles, reduciendo por tanto el tiempo de adquisición.

Sólida integridad del sistema: La capacidad de detectar y aislar un satélite de funcionamiento anómalo se refuerza considerablemente al haber un mayor número de satélites visibles. Además, la confianza en dos sistemas independientes proporciona un nivel suplementario de integridad frente a una anomalía funcional del sistema entero.

Hay en el mercado equipos que utilizan simultáneamente las señales de los satélites de navegación de los sistemas GPS y GLONASS para exámenes topográficos y geodésicos en tierra, mar y aire. Cuando funcionan en un modo diferencial, estos equipos garantizan el posicionamiento geodésico de las estaciones terrenas con una precisión de $1\text{-}3\text{ cm} + 10^{-6} L$ ($L = 1\ 000\text{ km}$), siendo L la distancia entre estaciones geodésicas, coches, aviones o barcos [ITU-R Handbook, 2002].

Habida cuenta de las mencionadas ventajas de GPS–GLONASS, los días 9 y 10 de diciembre de 2004 se reunieron en Washington D.C. las delegaciones de Estados Unidos de América y de la Federación de Rusia, y crearon grupos de trabajo para tratar asuntos de desarrollo y utilización del GPS y el GLONASS. Uno de los primeros objetivos de la cooperación es mantener la compatibilidad de frecuencias radioeléctricas entre las señales de cronometría y navegación por satélite entre los dos sistemas. Las dos partes reiteraron su compromiso en continuar estas charlas y su intención de seguir ofreciendo señales civiles de GPS y GLONASS para aplicaciones comerciales, científicas y de seguridad de la vida de manera continua y mundial, y sin tasas directas al usuario. Desde entonces el Grupo de Trabajo GPS-GLONASS se reúne periódicamente.

5.8 Conclusión

Habida cuenta de la información anterior, cabe destacar la siguiente:

- GLONASS es un sistema mundial de navegación por satélite (2010) que ofrece cobertura casi mundial (se completará en unos cuantos años).
- El sistema GLONASS es un sistema de doble uso (civil y militar).
- GLONASS está coordinado por la agencia civil ROSCOSMOS (Agencia Espacial Federal de Rusia).
- La utilización de GLONASS junto con el GPS aumenta la calidad de la navegación y de los servicios de difusión del tiempo exacto.
- GLONASS está abierto a la cooperación internacional.

Referencias

- DVORKING, V. V., NOSENKO, YU. I., URLICHICH, YU. M., FINKEL'STEIN, A. M. [2009] The Russian Global Navigation, Satellite Program. Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk. Vol. 79, 1, (<http://www.springerlink.com/content/180m3184w46747u5/fulltext.pdf>).
- GLOTOV, V. D., REVNIVYKH, S. G., MITRIKAS, V. V. [October 2006] GLONASS status update. MCC activity in GLONASS program. 15th International Workshop on Laser Ranging, Canberra, Australia, (<http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw15/docs/papers/GLONASS%20Status%20Update%20and%20MCC%20Activity%20in%20GLONASS%20Program.pdf>).
- KOSENKO V. [3-9 May, 2009] Satellite System GLONASS Status and Plans. Proceedings of European Navigation Conference - Global Navigation Satellite Systems (ENC-GNSS), Naples, Italy, (http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/04_Kosenko.pdf).
- POLISCHUK G., M., KOZLOV, V. I., ILITCHOV, V. V., KOZLOV, A. G., BARTENEV V. A., KOSENKO, V. E., ANPHIMOV, N. A., REVNIVYKH, S. G., PISAREV, S. B., TYULYAKOV, A. E. [2002] Global navigation satellite system GLONASS: development and usage in the 21st century. 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Reston, Virginia, USA, (<http://tycho.usno.navy.mil/ptti/ptti2002/paper13.pdf>).
- REILLY, J. P. [2004] A review of the evolution of the Russian GLONASS system, (http://www.topconpositioning.com/uploads/tx_topconfilearchive/POB_Magazine_takes_an_in-depth_look_at_GLONASS_-_Click_here_for_article.pdf).
- REVNIVYKH, S. G. [14-15 March, 2005] GLONASS: Status and Perspectives. Civil GPS Service Interface Committee International Information Subcommittee, Prague, Check Republic, (<http://radio.feld.cvut.cz/satnav/CGSIC/>).
- RISDE [2008] Global Navigation Satellite System GLONASS Interface Control Document Navigational radio signals in bands L1, L2, Ed. 5.1, Russian Institute of Space Device Engineering (RISDE), (<http://mii.kp.ru/en/pages/about/publ/ikd51en.pdf>).

Textos del UIT-R

- Manual sobre Comprobación técnica del Espectro del UIT-R, edición de 2002, (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-23/en>).
- Reglamento de Radiocomunicaciones, edición de 2008, volumen 2, Apéndice 1 – Clasificación de emisiones y anchuras de banda necesarias, (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>).
- Recomendación UIT-R M.1787 – Descripción de sistemas y redes del servicio de radionavegación por satélite (espacio-Tierra y espacio-espacio) y características técnicas de estaciones espaciales transmisoras que funcionan en las bandas 1 164-1 215 MHz, 1 215-1 300 MHz y 1 559-1 610 MHz, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-1/en>).

CAPÍTULO 6

SISTEMAS DE SATÉLITES DE COMUNICACIÓN

	<i>Página</i>
6.1 Introducción.....	70
6.2 Carga útil de comunicación	70
6.2.1 Arquitectura acodada analógica.....	70
6.2.2 Arquitectura regenerativa	72
6.2.3 Procesamiento digital.....	72
6.2.4 Sistema de seguimiento, telemetría y telemando	72
6.3 Cronometría y sincronización para el funcionamiento del satélite	72
6.4 Efecto del ruido del enlace y de las imperfecciones del satélite en las cargas útiles acodadas	73
6.4.1 Contribución del ruido blanco	73
6.5 Ruido de fase y errores sistemáticos del satélite.....	74
6.6 Conclusión.....	74
Referencias	75

6.1 Introducción

La principal función de los satélites de comunicación es transferir señales RF para comunicaciones. Por consiguiente, la transferencia de tiempo y frecuencia por satélites de comunicación se suele llevar a cabo aprovechando dichas funciones de comunicación. Algunos sistemas de satélites, especialmente los que utilizan sistemas de acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA), requieren conocer el tiempo exacto para sus funciones de comunicación [ITU-R Handbook, 2002; Ha, 1990]. En la mayoría de los casos de TDMA, el satélite no hace sino transferir las señales horarias exactas procedentes de tierra, dado que su carga útil no requiere conocer el tiempo con exactitud para su funcionamiento. La capacidad de transferencia de tiempo es necesaria en los sistemas de bus por satélite de seguimiento, teledirigido y telemando para la determinación de la distancia y la datación. Ahora bien, esta parte del sistema de satélites no suele estar disponible para el usuario arrendatario. Los requisitos de precisión y estabilidad de frecuencia para los satélites comerciales están en general limitados a los necesarios para explotar las atribuciones de bandas y realizar funciones de determinación de distancia. Los satélites de comunicaciones gubernamentales suelen disponer de fuentes de frecuencia a bordo más precisas, porque también se utilizan para la navegación y otros fines que requieren conocer el tiempo con exactitud.

Para transferir el tiempo se pueden recurrir a dos partes del satélite de comunicación, a saber, la carga útil de comunicaciones y el sistema bus de seguimiento, teledirigido y telemando (TT&C). En las siguientes secciones se describen los principios de funcionamiento de cada uno de estos sistemas, en particular los aspectos relativos a la transferencia de tiempo.

La estructura y las principales características técnicas y operativas de los satélites de comunicación se describen en [ITU-R Handbook, 2002].

6.2 Carga útil de comunicación

Los satélites de comunicación se utilizan para diversos servicios de comunicaciones. Las bandas de frecuencia de los enlaces ascendente y descendente se utilizan para la comunicación a través de la carga útil del satélite. Estas bandas se suelen dividir en subbandas, a menudo denominadas canales. El objetivo de la carga útil de comunicación es recibir las señales procedentes de las bandas o canales del enlace ascendente, convertir las señales a nuevas frecuencias y procesarlas, y luego retransmitir las señales procesadas en las bandas o canales del enlace descendente.

Las bandas o canales del satélite las utiliza un solo usuario en modo acceso único (SA), como en el caso de una aplicación de radiodifusión, o varios usuarios en diversos modos de acceso múltiple (MA). Los diversos modos MA son acceso múltiple en el dominio del espacio (SDMA), acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA), acceso múltiple por división de código (CDMA), acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) y acceso múltiple aleatorio (RMA).

Estos modos MA se utilizan a menudo combinados a fin de ampliar la capacidad de la banda o el canal.

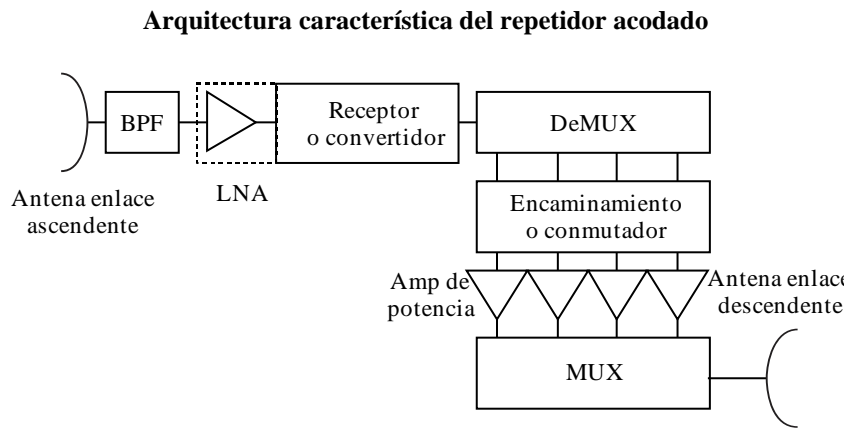
Las cargas útiles de comunicaciones consisten en dos tipos generales de arquitecturas acodadas o regenerativas, y dos tipos de realizaciones, analógico o digital. Estas arquitecturas y realizaciones se examinan en las siguientes secciones.

6.2.1 Arquitectura acodada analógica

Esta es la arquitectura de carga útil más corriente. Consiste sencillamente en varios transpondedores acodados que traducen una o varias señales en la banda de frecuencias del enlace ascendente a la banda de frecuencias del enlace descendente y luego retransmiten la señal combinada en la banda del enlace descendente. Este tipo de arquitectura es la más útil para la transferencia de tiempo, dado que el trayecto de la señal es relativamente sencillo. Los satélites comerciales que utilizan esta arquitectura suelen emplear osciladores locales autónomos (OL) para traducir las bandas de frecuencia. Los satélites gubernamentales que recurren a esta arquitectura suelen emplear osciladores OL que se obtienen coherentemente a partir de un mismo oscilador principal (MO) a bordo del satélite. En algunos casos, el MO está enganchado en fase a una referencia en tierra en la estación de control del satélite. Las características de error de fase de los osciladores OL que se utilizan para realizar esa traducción de frecuencia constituyen una importante limitación para las aplicaciones de transferencia de tiempo.

En la Figura 6-1 se muestra el diagrama de bloques de una arquitectura acodada característica [ITU-R Handbook, 2002; Ha, 1990]. En el diagrama se observa una antena del enlace ascendente, seguida por un filtro de banda ancha (BPF) y un amplificador de bajo ruido (LNA) para determinar la relación entre la ganancia de la antena del enlace ascendente y la temperatura de ruido (G/T) que es el principal parámetro del satélite para el enlace ascendente. La señal recibida se amplifica luego y se traduce a la banda del enlace descendente mediante un receptor o un convertidor (que a veces integra el amplificador LNA). La señal recibida se amplifica luego y se traduce a la banda del enlace descendente mediante un receptor o un convertidor (que a veces integra el amplificador LNA).

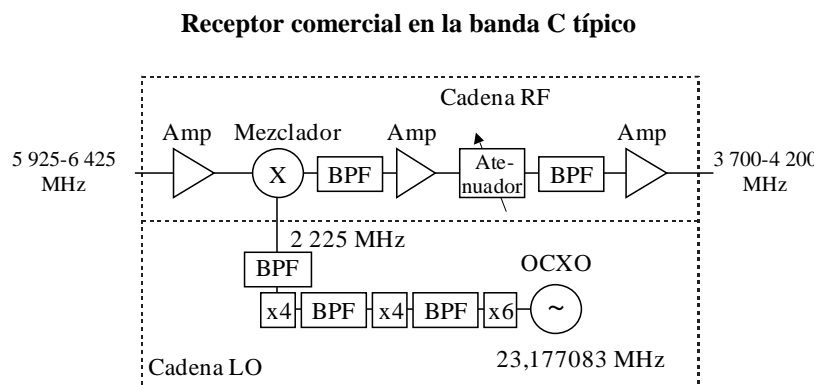
FIGURA 6-1



Sat_time_freq-06-01

Según se ha mencionado, los receptores o convertidores comerciales suelen utilizar como OL osciladores de cristal autónomos en coherencia de fase con un mismo MO. La Figura 6-2 muestra un receptor comercial típico [Ha, 1990]. Obsérvese la cadena del multiplicador LO que se obtiene a partir del oscilador de cristal autónomo a temperatura controlada.

FIGURA 6-2



Sat_time_freq-06-02

Como se observa en la Figura 6-1, después del convertidor hay un demultiplexor (DEMUX), que separa la banda completa del enlace ascendente en diferentes bandas o canales. En algunas cargas útiles, el convertidor realiza también la demultiplexión utilizando osciladores LO sintetizados lo que permite seleccionar cada conversación de frecuencia de canal. Cada canal pasa luego por amplificadores de potencia de salida y a veces se utiliza un conmutador para seleccionar los trayectos de encaminamiento. Las señales de cada amplificador

se combinan en el multiplexor (MUX) de salida para su retransmisión mediante la antena del enlace descendente.

La mayoría de las cargas útiles acodadas no necesitan un tiempo exacto para su funcionamiento y la exactitud y estabilidad de frecuencia se limitan a la necesaria para explotar las atribuciones de bandas. También es así en el caso de la conmutación TDMA mediante estaciones en tierra o terrestres [ITU-R Handbook, 2002]. La excepción es la TDMA conmutada por satélite (SS-TDMA), donde se utiliza un conmutador entre el DEMUX y el MUX que intervienen en las operaciones TDMA. En este caso, el requisito de cronometría para el conmutador puede estar por debajo del microsegundo [Ha, 1990].

En cargas útiles que se utilizan para la determinación de la distancia entre satélites y las señales de comunicación, se requiere mayor exactitud y estabilidad de frecuencia. Estas cargas útiles utilizan a menudo osciladores LO sintetizados enganchados al oscilador principal.

6.2.2 Arquitectura regenerativa

Las arquitecturas de carga útil regenerativa demodulan las señales del enlace ascendente para producir datos en la banda de base y vuelven a modular estos datos en las portadoras del enlace descendente. Dado que no hay un trayecto directo entre el enlace ascendente y el descendente, la transferencia de tiempo a través de estas cargas útiles debe tener en cuenta las latencias de datos a través del sistema de procesamiento digital del satélite.

6.2.3 Procesamiento digital

Algunos sistemas de satélites nuevos utilizan procesamiento digital aun cuando son del tipo acodado. La transferencia de tiempo en estos sistemas también debe tener en cuenta las latencias digitales. Resulta difícil dar una descripción general de las características de transferencia de tiempo de estas cargas útiles, dado que a menudo los detalles están patentados. Se invita al lector a remitirse al fabricante concreto de la carga útil.

6.2.4 Sistema de seguimiento, teled medida y telemando

El sistema de seguimiento, teled medida y telemando (TT&C) en un satélite es parte del sistema bus de mantenimiento y los detalles del funcionamiento suelen estar patentados. El sistema utiliza los códigos de tiempo, pero esta capacidad suele limitarse a la exactitud requerida para la datación de diagnósticos a no ser que se utilice TDMA conmutado por satélite u otros requisitos como la navegación. El sistema de seguimiento está diseñado para determinar la posición y orientación del satélite. Consiste en sistemas de seguimiento angular para determinar la orientación y sistemas de determinación de la distancia para determinar la posición. Los sistemas de determinación de distancia pueden utilizarse para la transferencia de tiempo. Estos sistemas utilizan señales moduladas por códigos o tonos laterales coherentes para medir el retraso de ida o ida y vuelta desde la estación terrena hasta el satélite de manera similar a la utilizada en los sistemas GPS (determinación de la distancia unidireccional). Los datos de determinación de la distancia se datan con suficiente precisión como para hacer cálculos de órbita y, por consiguiente, con exactitud suficiente para transferencia de tiempo.

6.3 Cronometría y sincronización para el funcionamiento del satélite

La cronometría y sincronización en satélites de comunicaciones comerciales suele ser un aspecto sencillo. Los osciladores principales se suelen ajustar manualmente para mantenerlos dentro de una tolerancia de frecuencias o se dejan funcionar de manera autónoma durante toda la misión. Los OL de transpondedor independiente utilizados en satélites comerciales no se controlan por frecuencia, sino que están diseñados para tener una determinada exactitud en la atribución de bandas durante la vida útil del satélite. En caso necesario, los sistemas de cronometría se actualizan manualmente mediante instrucciones desde tierra. Los satélites gubernamentales pueden utilizar sistemas de cronometría más sofisticados para la navegación u otras aplicaciones. Los osciladores principales gubernamentales a veces están enganchados a referencias en tierra y otras funcionan de manera autónoma, con ajustes mediante actualizaciones de frecuencia.

6.4 Efecto del ruido del enlace y de las imperfecciones del satélite en las cargas útiles acodadas

El ruido y las imperfecciones del enlace a través de cargas útiles acodadas afectan a la capacidad de realizar transferencias de tiempo por satélite. Las contribuciones al ruido y las imperfecciones son el ruido blanco, el ruido de fase y las variaciones sistémicas de fase.

6.4.1 Contribución del ruido blanco

La expresión general de la contribución del ruido blanco al error de transferencia de tiempo por satélite puede obtenerse a partir de las siguientes ecuaciones básicas de ruido del enlace del satélite. Suponiendo que para la transferencia de tiempo se utiliza una señal de frecuencia angular ω (rad/s), el error de lectura del reloj x de la transferencia de tiempo (segundos) está relacionado con el error de fase ϕ de la señal (en radianes) mediante la conocida ecuación:

$$x = \phi/\omega \quad (6-1)$$

Esta señal de transferencia de tiempo puede ser la señal portadora propiamente dicha o diversos componentes de modulación que residen en la portadora. En el caso del ruido blanco, la varianza típica de ϕ (para una sola medición de fase) viene dada por:

$$\sigma_{\phi}^2 = P_{noise} / P_{signal} \quad (6-2)$$

siendo:

$P_{señal}$: potencia de la señal recibida;

P_{ruido} : potencia de ruido recibida.

Utilizando las ecuaciones (6-1) y (6-2), la varianza típica de x (para una sola medición) es:

$$\sigma_{x-std}^2 = P_{noise} / (P_{signal}\omega^2) \quad (6-3)$$

Utilizando las ecuaciones publicadas del ruido blanco y del enlace [ITU-R Handbook, 2002], se puede obtener la siguiente expresión de la relación entre la señal recibida y el ruido blanco (ya sea el enlace ascendente o descendente) en función de los parámetros básicos del enlace:

$$P_{noise} / P_{signal} = kB(2r\omega_{car} / (c\omega))^2 / P_{eirp}(G/T) \quad (6-4)$$

siendo:

P_{pire} : potencia eficaz radiada isotrópica de transmisión;

G/T : relación de la ganancia relativa respecto de la temperatura;

B : ancho de banda limitado (más pequeño) del enlace;

ω_{car} : frecuencia angular portadora del enlace;

k : constante de Boltzman; r distancia; y c velocidad de la luz.

Así, para cada enlace:

$$\sigma_{x-std}^2 = kB(2r\omega_{car} / (c\omega))^2 / P_{eirp}(G/T) \quad (6-5)$$

Dado que las contribuciones del ruido blanco generadas por el enlace ascendente y descendente son estadísticamente independientes, la varianza combinada para los dos enlaces es:

$$\sigma_{x-std-tot}^2 = 4 kB(\omega_{car} / (c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})] \quad (6-6)$$

donde:

B : ancho de banda limitado para el enlace completo.

La ecuación (6-6) representa el error de lectura del reloj para una sola medición de fase. La frecuencia relativa en un tiempo medio τ se puede calcular restando las dos lecturas del reloj y dividiendo por τ . La varianza típica o varianza de Allan (lo mismo para el ruido blanco) del cálculo de la frecuencia relativa para este tiempo medio τ viene dado por:

$$\sigma_y^2 = 8kB(\omega_{car}/(c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})] \quad (6-7)$$

La varianza de la diferencia de segundos de error de lectura del reloj durante el tiempo τ es:

$$\sigma_X^2 = \tau^2 \sigma_y^2 \quad (6-8)$$

y por consiguiente:

$$\sigma_x^2 = 8kB(\omega_{car}/(c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})] \quad (6-9)$$

Las ecuaciones (6-7) y (6-9) se aplican a la transferencia de tiempo por satélite unidireccional y bidireccional (para cada transferencia), dado que el ruido blanco no se anula en los sistemas bidireccionales. Así, las ecuaciones anteriores representan el caso óptimo para un enlace por satélite. Obsérvese que la transferencia de tiempo que utiliza la portadora tiene fluctuaciones de tiempo menores que cuando se utiliza la modulación, dado que la frecuencia de modulación siempre es inferior a ω_{car} .

6.5 Ruido de fase y errores sistemáticos del satélite

Los osciladores locales (OL) en los convertidores de frecuencia añaden ruido de fase a la señal de comunicaciones. El ruido de fase y la deriva de frecuencia de los OL contribuyen directamente a la inestabilidad de fase de la modulación y de la portadora de la señal del transpondedor. El ruido casi en fase y las derivas son generalmente mayores en los transpondedores comerciales que utilizan osciladores de cristal separados. El retardo de grupo y de fase y las variaciones del retardo de los filtros y los componentes activos del sistema afectan tanto a la fase de la portadora como a la modulación, aunque estas inestabilidades están acotadas. La fuente principal de estas inestabilidades son los cambios con la temperatura, las tensiones del bus y los niveles de potencia a través de los enlaces del canal. Para valores concretos, se ha de contactar al proveedor del servicio de satélite.

En las transferencias bidireccionales a través del mismo transpondedor, las derivas del OL y las variaciones del retardo se anulan en gran medida. En el caso de transferencia de tiempo bidireccional simultánea utilizando dos frecuencias diferentes, el problema principal radica en la variación del retardo a través de la banda del canal, debido a la dispersión de frecuencia. En el caso de transferencia de tiempo bidireccional secuencial, el principal problema es el cambio de fase en los osciladores locales durante el tiempo entre transferencias.

6.6 Conclusión

A fin de utilizar adecuadamente los sistemas de comunicación por satélite para la transferencia de tiempo, es importante comprender la estructura, el funcionamiento y las limitaciones del sistema que se esté utilizando. La transferencia de tiempo a través de diversos tipos de sistemas de comunicación por satélite se ha llevado a cabo satisfactoriamente mediante métodos que aprovechan las ventajas de cada sistema y minimizan los efectos de sus puntos débiles.

Referencias

HA, T. T. [1990] Digital Satellite Communications. McGraw-Hill, 1990.

ITU-R [2002] Handbook on Satellite Communications, Third Edition, International Telecommunication Union, Wiley & Sons, Inc.

MORGAN, W. L. and GORDON, G. D. [1989] Communications Satellite Handbook. Wiley & Sons, Inc.

CAPÍTULO 7

ESCALAS DE TIEMPO

	<i>Página</i>
7.1 Introducción.....	78
7.2 Tiempo universal	78
7.3 Tiempo efemérides	78
7.4 Tiempo atómico.....	79
7.5 Escalas de tiempo relativistas	79
7.5.1 Tiempo terrestre.....	80
7.5.2 Tiempo coordinado geocéntrico	80
7.5.3 Tiempo coordinado baricéntrico.....	80
7.5.4 Tiempo dinámico baricéntrico	82
7.6 Escalas de tiempo internacionales	83
7.6.1 Tiempo atómico internacional	83
7.6.2 Tiempo universal coordinado	87
Referencias	91

7.1 Introducción

Se han utilizado tres métodos principales para medir el tiempo, a saber:

- 1 tiempo basado en la rotación de la Tierra;
- 2 tiempo basado en los movimientos celestes de la Tierra, la Luna y los planetas;
- 3 tiempo basado en la mecánica cuántica del átomo.

Cada uno de estos métodos se ha ido perfeccionando a medida que mejoraba la exactitud y sofisticación de los métodos de medición.

En la Recomendación UIT-R TF.686-2, Glosario y definiciones de términos de tiempo y frecuencia, se definen las escalas de tiempo y los términos conexos.

7.2 Tiempo universal

El tiempo medido mediante la rotación de la Tierra se denomina tiempo solar medio. Cuando se cuenta desde medianoche en el meridiano Greenwich se denomina tiempo universal (UT). El día solar medio se define nominalmente como el intervalo de tiempo entre dos pasadas consecutivas del sol medio ficticio por un determinado meridiano. El segundo solar medio se define como 1/86400 del día solar medio.

La medición real del ángulo de rotación de la Tierra respecto del sistema de referencia celeste es un caso concreto de UT denominado UT1. En la práctica, el UT1 no se determina por la posición del sol, sino por el movimiento diurno del equinoccio vernal en la esfera celeste con arreglo a una relación convencional que especifica UT1 en función del tiempo sidéreo medio de Greenwich (GMST). Anteriormente el UT1 se medía con el paso de las estrellas. Hoy en día, se mide mediante interferometría con línea de base muy larga (VLBI) de determinadas fuentes puntuales radioeléctricas compactas, satélites de determinación de la distancia por láser (SLR) y mediante el seguimiento de satélites GPS.

La fórmula que relaciona el UT1 con el GMST es [Aoki *et al.*, 1982]:

$$\text{GMST} = 24\,110.\text{"}548\,41 + 8640184.\text{"}812\,866\,T + 0.\text{"}093\,104\,T^2 - 0.\text{"}000\,0062\,T^3 \quad (7-1)$$

donde:

T : tiempo universal transcurrido desde el 1 de enero de 2000, 12 h UT medido en siglos julianos de 36 525 días.

El sistema de referencia celeste convencional adoptado por la Unión Astronómica Internacional (IAU) [General Assembly, 1997] basado en las posiciones de objetos extragalácticos observados con VLBI ha cambiado los fundamentos del UT1 y eliminado la necesidad de recurrir al equinoccio.

Debido a las irregularidades en la rotación de la Tierra, el UT1 no es uniforme. Son tres las fuentes de variación: un aumento constante de la longitud del día debido a las fuerzas de la marea, la variación estacional periódica y las fluctuaciones aleatorias. El UT2 es el UT1 corregido por la variación estacional y vienen dado en segundos por la siguiente expresión [Seidelmann, 1992]:

$$\text{UT2} = \text{UT1} + 0.\text{"}022 \sin 2\pi t - 0.\text{"}012 \cos 2\pi t - 0.\text{"}006 \sin 4\pi t + 0.\text{"}007 \cos 4\pi t \quad (7-2)$$

donde:

t : fracción del año besseliano.

Sin embargo, el UT2 ya no se utiliza en la práctica.

7.3 Tiempo efemérides

El tiempo efemérides (ET) es una escala de tiempo uniforme definida por la teoría de la gravitación de Newton sobre el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, representado mediante las *tablas solares* de Newcomb. Según Newcomb, la longitud media geométrica del sol para la época 1900 vienen dada por [NewComb, 1895]:

$$L = 279^{\circ}41'48.''04 + 129\,602\,768.''13 T + 1.''089 T^2 \quad (7-3)$$

siendo:

T : el tiempo efemérides medido en siglos desde el año 1900.

El coeficiente lineal de esta expresión define el segundo de efemérides. Así, el año tropical de 1900 contenía $[360 \times 60 \times 60 / 129\,602\,768,13] \times 36\,525 \times 86\,400 = 31\,556\,925,9747$ s.

En 1956, el Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM) definió el segundo de ET como $1/31\,556\,925,9747$ del año tropical 1900 enero 0 12 h ET.

Esta definición fue ratificada por la Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) en 1960.

La referencia al año 1900 no implica que sea la época del día solar medio de 86 400 s, sino que es la época de un año tropical de 31 556 925,9747 s.

Aunque el ET se definió partiendo de la posición del Sol, se creó indirectamente mediante la observación de la Luna. El ET puede definirse como una variable independiente que ajusta las posiciones de los cuerpos astronómicos construida mediante las leyes del movimiento de la dinámica newtoniana a las observaciones. Por consiguiente, se basa exclusivamente en la mecánica newtoniana, en la que se supone un tiempo universal coordinado y no se tiene en cuenta la relatividad.

El ET sustituyó el UT1 para las efemérides astronómicas en 1960.

7.4 Tiempo atómico

El primer patrón atómico de haz de cesio comenzó a utilizarse en el Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido en 1955. Las escalas de tiempo atómico se crearon en el Observatorio Naval de EE.UU. y la Oficina Nacional de Normas en 1956, que pronto fue seguido por otros observatorios y laboratorios. Tan solo siete años después de la adopción del segundo efemérides en 1960, la Conferencia CGPM adoptó el segundo atómico como unidad fundamental de tiempo en el Sistema Internacional de Unidades (SI). Se definió un segundo como «la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación emitida en la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133». El valor se determinó comparando el ET basado en las observaciones de la Luna con la escala de tiempo atómico.

El tiempo atómico se ha convertido en la referencia de todas las escalas de tiempo modernas y diversos laboratorios lo mantienen desde 1955, aunque no se adoptó oficialmente como escala de tiempo internacional hasta 1971. Desde la creación de la *Bureau International de l'Heure* (BIH) en 1920 en el Observatorio de París (OP), las escalas de tiempo internacional se basaban totalmente en observaciones astronómicas. La unidad de tiempo era el segundo y también se basaba en observaciones astronómicas. El advenimiento de los patrones del átomo de cesio en los años 50 y de los sistemas de difusión como LORAN que permitieron la comparación internacional con exactitud de estos patrones, culminaron en una forma inicial del tiempo atómico (AT).

La creación del tiempo atómico internacional (TAI) fue recomendada por la Unión Internacional Astronómica (IAU) en 1967, por la Unión Científica Internacional de Radiocomunicaciones (URSI) en 1969 y el Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR) de la UIT en 1970. La 14ª Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) aprobó la creación del TAI en 1971, como una escala de tiempo coordinado cuyo intervalo de unidades era el segundo del Sistema Internacional de Unidades (SI) basado en el geoide de rotación.

En § 7.6.1 se incluye más información sobre la realización del tiempo atómico internacional (TAI).

7.5 Escalas de tiempo relativistas

El tiempo efemérides (ET) era una escala de tiempo definida por las leyes del movimiento de la dinámica newtoniana. Ahora bien, no hacía distinción entre las escalas de tiempo dinámica definidas respecto de la superficie de la Tierra, del centro de la Tierra o del centro del sistema solar. Por consiguiente, se necesitan definiciones más precisas para las escalas de tiempo relativistas derivadas históricamente del ET. Estas escalas de tiempo adicionales son los argumentos de las efemérides relativistas utilizadas en astronomía y en la

mecánica celeste. En el Capítulo 9 se analizan los efectos relativistas en la transferencia y difusión de tiempo y frecuencia.

En 1976 la IAU adoptó escalas de tiempo para efemérides relativistas, de modo que difieren del TAI solamente en términos periódicos [Muller *et al.* 1977]. En 1979 estas escalas de tiempo recibieron los nombres de tiempo dinámico terrestre (TDT) y tiempo dinámico baricéntrico (TDB). En 1991 el TDT pasó a denominarse simplemente tiempo terrestre (TT). Además, la IAU adoptó nuevas escalas de tiempo, todas con unidad el segundo SI. El tiempo coordinado geocéntrico (TCG) y el tiempo coordinado baricéntrico (TCB) son escalas de tiempo de sistemas coordinados que tiene su origen en el centro de la Tierra y en el baricentro del sistema solar, respectivamente [Bergeron, 1992]. Estas escalas de tiempo se acabaron de definir en las resoluciones adoptadas por la IAU el año 2000.

7.5.1 Tiempo terrestre

El tiempo terrestre (TT) es el tiempo coordinado que viene representado por las lecturas del tiempo propio de los relojes sobre el geoide. En la práctica el TT viene dado en función del tiempo atómico internacional (TAI), cuya unidad es el segundo del Sistema Internacional de Unidades (SI). El TT puede considerarse equivalente al TDT, que tiene su origen el 1 de enero de 1977 a las 0 h TAI y que mantiene continuidad con el tiempo efeméride (ET). El TDT sustituyó al ET en 1984 en cuanto argumento tabular de las efemérides geocéntricas fundamentales.

Dado que el TT es una escala de tiempos uniforme teórica, mientras que el TAI es una escala de tiempo atómica obtenida por estadística, el TT y el TAI no son estrictamente idénticos. Ahora bien, su diferencia es constante con una tolerancia de unos $\pm 10 \mu\text{s}$. En la práctica TT viene dado por:

$$\text{TT} = \text{TAI} + 32.184 \text{ s} \quad (7-4)$$

La constante es un valor estimado de la diferencia entre el ET y el UT1 en la época que define el TAI el 1 de enero de 1958. El TT puede considerarse como una forma teórica del TAI.

7.5.2 Tiempo coordinado geocéntrico

El tiempo coordinado geocéntrico (TCG) es la escala de tiempo coordinado para las efemérides con respecto al centro de la Tierra, cuya unidad es el segundo SI. El tiempo coordinado Δt en el geocentro TCG está relacionado con el tiempo propio $\Delta\tau$ en el geoide (TT) por:

$$\Delta t = (1 + W_0 / c^2) \Delta\tau.$$

Así, el TCG difiere del TT por un factor de escala:

$$\text{TCG} - \text{TT} = L_G \Delta T \quad (7-5)$$

siendo:

$$L_G = W_0 / c^2 = 6,969\,290\,134 \times 10^{-10} \text{ (aproximadamente } 60,2 \mu\text{s/d)}$$

$$\Delta T: \text{ tiempo transcurrido desde el 1 de enero de 1977 a las 0 h TAI (JD 244 3144.5)}$$

En 2000, la IAU redefinió el TT de modo que su diferencia respecto del TCG fuera una frecuencia constante $d\text{TT} / d\text{TCG} = 1 - L_G$. El valor de L_G era la estimación más exacta de (W_0 / c^2) en 2000, pero hoy en día se considera una constante definida que no se prevé revisar en el futuro [Rickmand, 2001].

7.5.3 Tiempo coordinado baricéntrico

El tiempo coordinado baricéntrico (TCB) es la escala de tiempo coordinado para las efemérides respecto del centro del sistema solar cuya unidad es el segundo SI. El tiempo coordinado Δt_B en un sistema de coordenadas baricéntrico que corresponde al tiempo propio $\Delta\tau$ de un reloj sobre el geoide es:

$$\Delta t_B = \int_{\tau_0}^{\tau} \left(1 + \frac{1}{c^2} U(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau \quad (7-6)$$

siendo:

- \mathbf{r} y \mathbf{v} : la posición y la velocidad baricéntricas del reloj;
- $U(\mathbf{r})$: el potencial gravitatorio de todos los cuerpos del sistema solar (la Tierra inclusive) calculado en el geoide.

El tiempo coordinado t_B se identifica con el TCB y el tiempo propio τ con el TT.

La integral depende de la posición y la velocidad del reloj en el sistema de coordenadas baricéntrico. Por tanto, conviene separar la parte dependiente del reloj de la parte independiente.

En esta aproximación, se puede expresar \mathbf{r} y \mathbf{v} como:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_E + \mathbf{R} \quad \text{y} \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_E + \dot{\mathbf{R}}$$

siendo:

\mathbf{r}_E y \mathbf{v}_E : la posición y la velocidad baricéntricas del centro de masa de la Tierra

\mathbf{R} y $\dot{\mathbf{R}} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$: la posición y velocidad geocéntricas del reloj.

El potencial total viene dado por:

$$U(\mathbf{r}) = U_E(\mathbf{r}) + U_{ext}(\mathbf{r})$$

donde:

- U_E : potencial gravitatorio newtoniano de la Tierra;
- U_{ext} : el potencia gravitatorio newtoniano de todos los cuerpos del sistema solar, salvo la Tierra.

Así, $U_{ext}(\mathbf{r}) \approx U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \nabla U_{ext} \cdot \mathbf{R}$ y $\mathbf{v}_E \cdot \dot{\mathbf{R}} = (d/dt_B)(\mathbf{v}_E \cdot \mathbf{R}) - \mathbf{a}_E \cdot \mathbf{R}$

siendo:

$\mathbf{a}_E = \nabla U_{ext}$ la aceleración de la Tierra.

Por consiguiente [Thomas, 1975; Moyer 1971 and 1981]:

$$\Delta t_B \approx \Delta\tau + \frac{1}{c^2} \int_{t_{B0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} W_0 \Delta\tau + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \quad (7-7)$$

donde:

- el primer término es el tiempo propio medido por un reloj en el geoide;
- el segundo término representa los efectos combinados del corrimiento al rojo y la dilatación del tiempo en el centro de la Tierra respecto del baricentro, y es independiente del reloj;
- el tercer término es la diferencia de tiempo entre un reloj en el geocentro y un reloj en el geoide;
- el cuarto término depende de la ubicación del reloj.

En el límite del espacio-tiempo plano, las correcciones de sincronización del reloj vienen dadas por la relatividad especial en el marco de referencia geocéntrico en movimiento observado desde el sistema de coordenadas baricéntrico. En el caso de un reloj en el geoide, varía durante el día con una amplitud de 2,1 μs . La eliminación de los dos términos de aceleración es una manifestación del *Principio de equivalencia* entre sistemas de referencia en caída libre.

La integral puede calcularse por integración numérica de las efemérides planetarias y lunares o expresarse por medio de una fórmula analítica. Se expresa como la suma de un término secular $L_C \Delta T$ y el resto de términos periódicos P .

Así la relación entre el TCB y el TT viene dada por la expresión (Recomendación UIT-R TF.686-2):

$$\begin{aligned} \text{TCB} - \text{TT} &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \end{aligned} \quad (7-8)$$

La relación entre el TCB y TCG es:

$$\text{TCB} - \text{TCG} = (\text{TCB} - \text{TT}) - (\text{TCG} - \text{TT})$$

Por consiguiente:

$$\text{TCB} - \text{TCG} = \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) = L_C \Delta T + P + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) \quad (7-9)$$

siendo:

$$L_C = 1,480\,826\,867\,41 \times 10^{-8} \text{ (aproximadamente } 1,28 \text{ ms/d) [Irwin and Fukushima, 1999].}$$

Para lograr una precisión de 100 ns debe incluirse más de cien términos periódicos [Fairhead *et al.*, 1998]. En una aproximación de primer orden:

$$\frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B \approx \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_S}{a_E} \Delta T + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM_S a_E} e \sin E \quad (7-10)$$

siendo:

GM_S : la constante gravitatoria del Sol;

a_E y e : el eje semimayor y la excentricidad de la órbita de la Tierra.

El primer término es una aproximación a $L_C \Delta T$. El segundo término es el periodo principal P , cuya amplitud es de 1,7 ms.

7.5.4 Tiempo dinámico baricéntrico

El tiempo dinámico baricéntrico (TDB) es también un tiempo coordinado baricéntrico. Sin embargo, según la resolución de la IAU de 1976, la diferencia entre el TDB y el TT (entonces denominado TDT) debe contener exclusivamente términos periódicos. Por consiguiente, la frecuencia del tiempo coordinado se convierte en:

$$\Delta t'_B = (1 - L_B) \Delta t_B$$

donde:

$\Delta t'_B$: corresponde al TDB;

Δt_B : corresponde al TCB.

La diferencia entre TCB y TDT es:

$$\text{TCB} - \text{TDB} = L_B \Delta T \quad (7-11)$$

La relación entre el TDB y el TT es $TDB - TT = (TCB - TT) - (TCB - TDB)$. Por tanto:

$$\begin{aligned} TDB - TT &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) - L_B \Delta T \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) - L_B \Delta T \end{aligned} \quad (7-12)$$

que contiene términos no seculares si $L_B \approx L_C + L_G$. JPL [Standish, 1998] utiliza otra escala de tiempo para las efemérides relativistas, denominadas T_{eph} , y es parecida al TDB. Si la integral se calcula utilizando efemérides planetarias expresadas en términos de T_{eph} como argumento, debería dividirse por el factor $1 - L_B$.

La relación del TDB respecto del TCB es:

$$\left\langle \frac{dTDB}{dTDB} \right\rangle = \left\langle \frac{dTDB}{dTDB} \right\rangle \frac{dTDB}{dTDB} \left\langle \frac{dTDB}{dTDB} \right\rangle \quad (7-13)$$

siendo:

- < > el promedio a largo plazo en el geocentro;
- el valor de L_B se obtiene mediante la relación:

$$1 - L_B = (1 - L_G)(1 - L_C)$$

dado que $\langle dTDB/dTCB \rangle = 1 - L_B$

$$dTDB/dTCG = 1 - L_G$$

$$\langle dTCG/dTCB \rangle = 1 - L_C$$

$$\langle dTDB/dTT \rangle = 1.$$

Por consiguiente: $L_B = 1,550\ 519\ 767\ 72 \times 10^{-8}$ (1,34 ms/d aproximadamente).

El factor $1 - L_B$ guarda relación con las unidades de tiempo efemérides y la distancia expresada en términos de TDB con las correspondientes unidades SI.

7.6 Escalas de tiempo internacionales

El desarrollo de las telecomunicaciones internacionales, las redes de computadores y, especialmente los sistemas electrónicos mundiales de navegación requieren escalas de tiempo internacionales sincronizadas de elevada precisión. Así, las organizaciones internacionales pertinentes han desarrollado y aprobado las siguientes escalas de tiempo internacionales:

- el tiempo atómico internacional (TAI);
- el tiempo universal coordinado (UTC).

7.6.1 Tiempo atómico internacional

La época del tiempo atómico internacional (TAI) es el 1 de enero de 1958. El TAI se define como la escala de tiempo atómica establecida por el BIPM a partir de la lectura de unos 400 relojes atómicos instalados en 60 laboratorios aproximadamente. Se especifica además [BIPM, 1981] como una escala de tiempo coordinado definido en un sistema de referencia geocéntrico cuya unidad de escala es el segundo SI en el geoide de rotación. El TAI era una extensión de la escala de tiempo atómico mantenido por BIH cuya existencia se remonta a 1955.

La creación del TAI fue recomendada por la Unión Astronómica Internacional (IAU) en 1967, la Unión Científica Internacional de Radiocomunicaciones (URSI) en 1969 y el Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR) de la UIT en 1970. La 14ª Conferencia General sobre Pesos y Medidas (CGPM) aprobó la creación del TAI en 1971.

El TAI es la escala de tiempo real creada a partir de los datos de comparación de relojes suministrados a BIPM por los laboratorios participantes, utilizando un algoritmo concreto denominado ALGOS. El TAI también se

ha definido como una escala de tiempo coordinado en un sistema de referencia geocéntrico cuya unidad de escala es el segundo internacional obtenido en el geode de rotación. El hecho de que el TAI sea una escala de tiempo coordinado fue determinado por el Comité Consultivo para la Definición del Segundo (CCDS) en 1980. En 1997 el CCDS pasó a denominarse Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia (CCTF). El CCDS también facilitó la información de corrección necesaria para la creación del TAI en términos relativistas y para su utilización en marcos de referencia no terrestres. La exactitud del TAI es el principal objetivo en el mantenimiento del segundo SI y en el suministro de una escala fiable a largo plazo. La optimización de la estabilidad a largo plazo se realiza a expensas de la accesibilidad a corto plazo. El cálculo del TAI utiliza datos obtenidos durante un periodo prolongado. Los datos del reloj se suministran a BIPM los días cuya fecha juliana modificada terminan en 4 y 9.

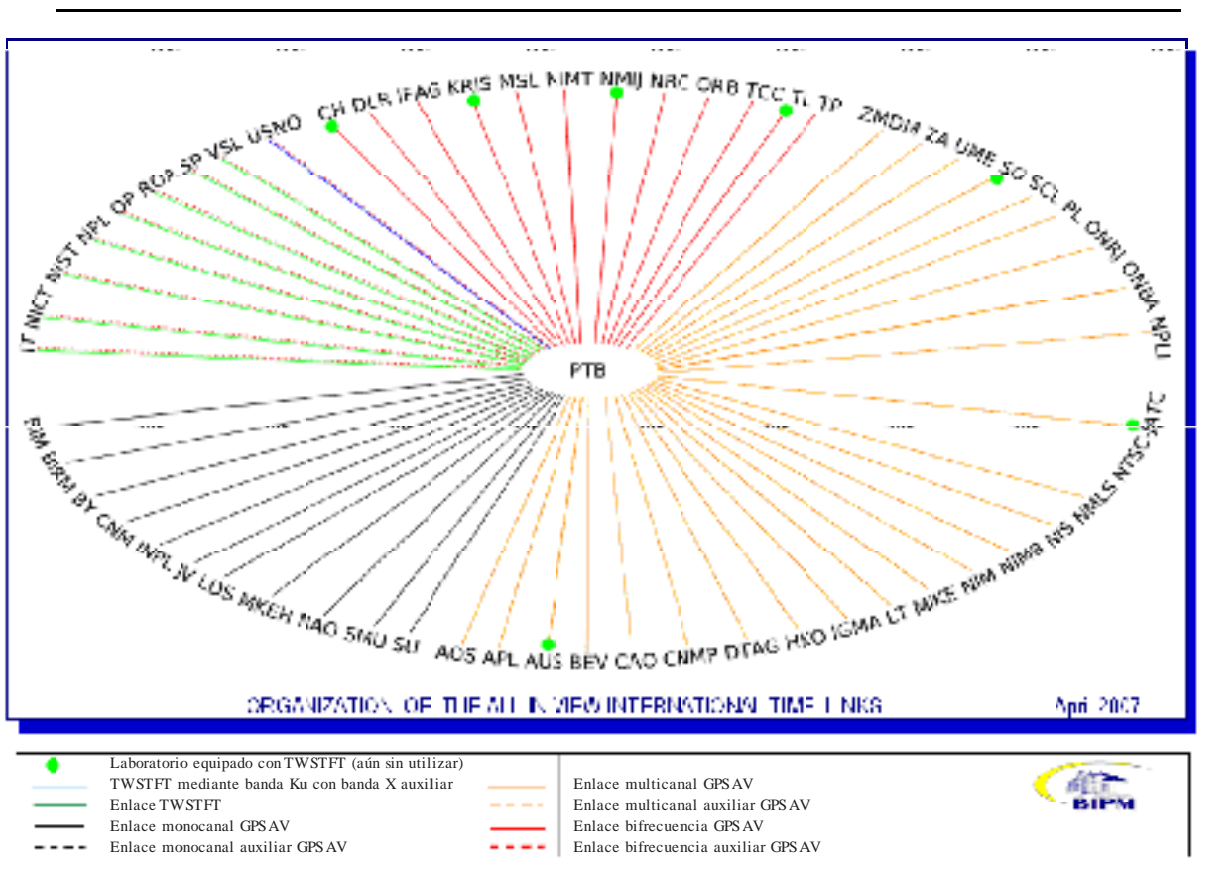
Para la comparación de relojes se utilizan dos técnicas de transferencia de tiempo:

- a) comparación mediante el seguimiento del satélite GPS entre el UTC local y el tiempo GPS; o
- b) comparación de dos UTC locales (§ 7.6.2) a través de TWSTFT.

El BIPM organiza los enlaces de tiempo para la comparación de relojes como se indica en el esquema de la Figura 7-1. Para calcular la escala se utilizan bloques de datos que abarcan 30 días. Se eligió un periodo de 30 días para que el tiempo de integración efectivo de la escala en la transición entre el ruido de centelleo y la modulación de frecuencia de paseo aleatorio de los relojes de cesio. Por consiguiente la estabilidad no se mejoraría con un tiempo de integración más largo. El periodo de 30 días es suficiente para eliminar el ruido generado por los enlaces de tiempo y el ruido blanco de modulación de frecuencia de los relojes.

FIGURA 7-1

Enlaces de tiempo internacional entre centros participantes



La determinación del TAI se realiza en 3 pasos:

Paso 1: Cálculo utilizando un postprocesamiento, procedimiento iterativo de una escala intermedia, conocida como escala atómica libre (echelle atomique libre, EAL), utilizando datos de comparación de relojes y ALGOS.

Paso 2: Cálculo de la duración de la unidad de escala de la EAL utilizando datos procedentes de frecuencias patrón primarias y un filtro óptimo.

Paso 3: Producción de TAI a partir de la EAL aplicando, en caso necesario, una corrección al intervalo de escala de la EAL con el fin de dar el valor más próximo posible al segundo SI. La corrección de la unidad de la escala se denomina «ajuste de frecuencia» y se realiza, en caso necesario, cada mes aplicando una corrección variable con el tamaño máximo del paso de un mes a otro de 7×10^{-16} o inferior.

A continuación se describe brevemente cómo se establece el TAI. Para más información, véase [Azoubib, *et al.*, 1977].

1) *Estructura del TAI:* El tiempo, t , de la EAL $f(t)$ se define en términos de lecturas $h_i(t)$ de un grupo de N relojes, H_i , del modo siguiente:

$$EAL(t) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i [h_i(t) + h'_i(t)]}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad (7-14)$$

donde:

p_i : peso estadístico asignado al reloj H_i :

$h'_i(t)$: corrección del tiempo diseñado para garantizar la continuidad de la escala de tiempo y frecuencia cuando varía la ponderación de cada reloj o el número total de relojes.

Esta expresión no puede utilizarse directamente porque las cantidades medidas que ofrecen los datos básicos no son lecturas de relojes particulares sino el resultado de comparaciones entre pares de relojes. En el instante t , las diferencias que varían lentamente $\zeta_{ij}(t)$ entre las lecturas de los relojes H_i y H_j vienen dadas por:

$$\zeta_{ij}(t) = h_i(t) - h_j(t) \quad (7-15)$$

El resultado de la EAL es, por tanto, un conjunto de N valores de las diferencias $x_i(t)$ definidas por:

$$x_i(t) = EAL(t) - h_i(t) \quad (7-16)$$

donde:

x_i : diferencias entre las lecturas de cada reloj y el tiempo definido por EAL.

La diferencia puede expresarse como:

$$x_i(t) - x_j(t) = -\zeta_{ij}(t) \quad (7-17)$$

y la ecuación (7-14) se puede transformar en:

$$\sum_{i=1}^N p_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N p_i h'_i(t) \quad (7-18)$$

En la práctica se recurre a un sistema no redundante de $N - 1$ enlaces de tiempo para resolver estas dos últimas expresiones.

2) *Procedimiento de ponderación:* El peso asignado a cada reloj se calcula de modo que favorezca la estabilidad a largo plazo de la escala resultante y minimice las fluctuaciones anuales y la deriva de frecuencia respecto de los patrones de frecuencia primarios. Una característica importante de ALGOS es que la ponderación del reloj, aunque se basa en datos que abarcan todo un año, se calcula teniendo en cuenta los 30 días de datos para los cuales se calcula la EAL. Por consiguiente es posible juzgar el funcionamiento real de los relojes durante el intervalo de tiempo con el que se establece la EAL. También es posible tener en cuenta todo comportamiento anómalo observado en un determinado reloj ajustando su coeficiente de ponderación, incluso a cero si fuese necesario, lo que ha resultado útil en muchas ocasiones.

La ponderación se basa normalmente en la varianza $\sigma^2(\delta, \tau)$ de la velocidad media [Thomas and Azoubib, 1996] respecto al EAL calculado con las muestras de un mes. Se ha seleccionado esta varianza, en lugar de la habitual varianza par, porque ofrece mayor reducción en la ponderación de relojes que presentan una deriva de frecuencia. Los coeficientes de ponderación se obtienen directamente de:

$$p_i = \frac{1000}{\sigma_i^2(\delta, \tau)} \quad (7-19)$$

(σ_i se expresa en ns/día) siempre que el actual periodo de 30 días no presente un comportamiento anómalo. En caso de comportamiento anómalo se le asigna un coeficiente de ponderación igual a cero. Se ha fijado un coeficiente máximo de $2,5/N$ (siendo N el número de relojes considerados en el mes de cálculo). Este coeficiente máximo se ha elegido para garantizar que en la escala tengan muchísimo más peso los mejores relojes, pero sin dejar que ninguno de ellos sea predominante [Thomas and Azoubib, 1996].

3) *Predicción de frecuencia:* El término de corrección de tiempo $h'_i(t)$ consta de dos componentes:

$$h'_i(t) = a_i(t_0) + B_{ip}(t)(t - t_0) \quad (7-20)$$

donde:

$a_i(t_0)$: es sencillamente la diferencia de tiempo entre el reloj H_i y la EAL en el instante t_0 , que constituye el principio del periodo de 30 días;

$B_{ip}(t)$: la diferencia de frecuencia predicha entre H_i y la EAL para el periodo comprendido entre t_0 y t , donde la frecuencia del reloj H_i se define como:

$$\text{rate} = \frac{a_i(t_0 - t) - a_i(t_0)}{(t - t_0)} \quad (7-21)$$

El valor de $B_{ip}(t)$ se obtiene mediante predicción lineal de un paso basada en el valor anterior, dado que el ruido de reloj dominante durante el periodo de 30 días es el paseo aleatorio, cuyo valor estimado más probable en el siguiente periodo es simplemente el correspondiente al periodo precedente.

Una vez determinado el valor estimado óptimo de EAL se procede a la transformación a TAI, para lo cual se determina si la frecuencia de EAL difiere suficientemente respecto de los mejores patrones primarios y, por ende, se justifica un «ajuste». Entre 2005 y 2008 se aplicaron casi cada mes cambios de frecuencia de un valor máximo de $0,6 \times 10^{-15}$.

Por último, el resultado de estos cálculos se publica mensualmente en la *Circular T*, que se distribuye a los laboratorios participantes. En la Figura 7-2 se muestra un extracto. Los valores de [UTC-UTC(k)] para cada laboratorio contribuyente k se publican cada cinco días, junto con la respectiva incertidumbre, cuyos valores permanecen constantes durante un mes de cálculo.

7.6.2 Tiempo universal coordinado

La medición del tiempo universal basada en el segundo SI definido automáticamente se denomina UTC. La tarea de coordinar las escalas del tiempo atómico internacionales fue asignada a BIH en 1961. En 1988, esta responsabilidad se transfirió de BIH al BIPM.

Inicialmente, se aplicaban incrementos de frecuencia y ajustes discretos periódicos a la difusión de las señales horarias a fin de mantener el UTC dentro de un margen de 0,1 s respecto de UT2. La forma actual del UTC se adoptó en 1972, fecha en que se abandonaron los incrementos de frecuencia y se comenzó a aplicar «segundos intercalares» enteros en lugar de ajustes discretos de 100 ms o 200 ms, por cuanto éstos eran demasiado frecuentes y muy pequeños [Nelson, 2001]. El UTC tiene una frecuencia idéntica al TAI, pero difiere en un número entero de segundos, de modo que siempre está dentro de 0,9 s del UT1.

FIGURA 7-2

Extracto de la Circular T de BIPM

CIRCULAR T 208
2005 MAY 12, 17h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)].
From 1999 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 32 s.

Date 2005	0h UTC	MAR 30	APR 4	APR 9	APR 14	APR 19	APR 24	APR 29	Uncertainty/ns			
MJD		53459	53464	53469	53474	53479	53484	53489	uA	uB	u	(1)
Laboratory k		[UTC-UTC(k)]/ns										
AOS (Borowiec)		8.2	12.1	17.1	22.7	19.0	16.0	16.8	1.6	5.2	5.4	
APL (Laurel)		-18.6	-23.3	-13.6	-2.0	4.6	39.3	26.5	1.6	5.3	5.5	(2)
AUS (Sydney)		-541.1	-547.9	-556.5	-561.7	-574.0	-590.8	-608.2	3.2	6.4	7.2	
BEV (Wien)		97.8	88.7	80.6	70.6	63.0	58.2	46.3	1.6	5.2	5.4	
BIRM (Beijing)		-145.0	-170.1	-192.3	-217.0	-238.1	-260.8	-288.4	2.8	20.4	20.6	
CAO (Cagliari)		-2890.4	-2883.7	-2871.8	-2865.4	-2845.1	-2819.2	-2794.1	1.6	7.2	7.4	
CH (Bern)		-21.7	-24.4	-24.6	-21.4	-14.6	-9.4	-0.7	0.8	5.2	5.3	
CNM (Queretaro)		36.7	44.2	47.2	52.2	52.6	59.5	78.3	5.0	20.3	20.9	
CNMP (Panama)		-2514.2	-2543.1	-2584.6	-2629.9	-2655.4	-2690.8	-2721.4	4.0	7.2	8.2	
CSIR (Pretoria)		-3393.0	-3468.5	-3548.2	-3628.6	-3718.2	-3800.9	-3891.4	3.0	20.1	20.3	
DLR (Oberpfaffenhofen)		-40.4	-46.1	-44.7	-46.1	-62.1	-62.9	-71.4	0.8	5.2	5.3	
DTAG (Darmstadt)		254.6	274.3	283.9	273.2	267.7	271.2	273.3	3.0	10.1	10.5	
HKO (Hong Kong)		93.7	71.6	68.9	55.1	45.9	45.2	51.0	3.2	6.4	7.2	
IEN (Torino)		-116.2	-116.2	-109.3	-104.5	-99.3	-98.1	-100.5	0.7	1.9	2.0	
IFAG (Wetzell)		-348.7	-340.9	-340.6	-340.4	-332.8	-324.9	-314.8	0.8	5.2	5.3	
IGMA (Buenos Aires)		351.7	353.5	346.2	354.1	361.3	366.9	367.4	5.0	19.9	20.5	
INPL (Jerusalem)		-264.7	-311.1	-347.5	-387.4	-432.2	-478.0	-523.6	4.0	10.1	10.9	
JATC (Lintong)		-10237.5	-10227.2	-10209.8	-10197.3	-10180.0	-10167.2	-10155.8	2.7	21.0	21.2	
JV (Kjeller)		-6316.2	-6310.2	-6252.7	-6243.4	-6219.6	-6173.5	-6177.2	5.0	20.1	20.7	
KRIS (Daejeon)		-3.8	-4.2	0.9	2.5	3.4	5.7	6.0	2.8	6.4	7.0	

Sat_time_freq-07-02

Por consiguiente, las señales horarias ofrecen ahora, en la misma emisión, el intervalo unitario del segundo SI y una aproximación al UT1. La corrección adicional DUT1, que consta de múltiplos enteros de 0,1 s, puede integrarse en una señal horaria de difusión por medio de tics o impulsos dobles, de modo que, cuando se suman al UTC, se obtiene una mejor aproximación al UT1. El UTC se reconoce como la base del tiempo civil, y así se especifica en las resoluciones de diversas organizaciones vinculantes y uniones científicas, por ejemplo CGPM, la UIT y la IAU, y en muchas normativas nacionales.

El segundo SI, definido ahora en función del periodo de la transición de cesio, se seleccionó para que estuviera en consonancia con el segundo efemérides dentro de los límites de la incertidumbre experimental. Ahora bien, los estudios basados en los registros de antiguos eclipses y las observaciones con telescopios modernos indican que la longitud del día ha ido aumentando lentamente. En los últimos 1000 años ha aumentado a un ritmo de

1,4 ms por día cada siglo. Así, el segundo efemérides, basado en las tablas solares de Newcomb, era en efecto igual al segundo solar medio promediado en los siglos XVIII y XIX.

Según la tendencia a largo plazo, el segundo solar medio era igual al segundo SI alrededor de 1820 [Stephenson, 1997]. Esta fecha es también la época media aproximada de los datos analizados por Newcomb, que cubre el periodo de 1750 a 1892. Desde 1820, la longitud del día se ha incrementado aproximadamente en 2,5 ms. Por consiguiente, el día solar medio es actualmente de 86 400,0025 s, superior al día civil definido exactamente en 86 400 s. En un año la diferencia de 0,0025 segundos se acumula a casi un segundo completo, que se compensan insertando un segundo intercalar. Ahora bien, debido a las fluctuaciones aleatorias de la rotación de la Tierra, el segundo intercalar no puede predecirse con antelación, y la frecuencia con la que se produce es variable.

El UTC fue creado por el CCIR de la UIT (CCIR se fusionó con la IFRB y pasó a denominarse UIT-R), que recomendó su creación en 1972 como escala de tiempo intermedia entre UT y TAI. Esta escala de tiempo sirve para coordinar el tiempo local que mantienen diversos países y centros de cronometría y constituye un acuerdo bastante próximo al UT1. La coordinación era necesaria debido al desarrollo de sistemas de navegación electrónicos, como Loran, que podrían proporcionar medidas de cronometría razonables a distancias planetarias. La definición específica del UTC figura en la Recomendación UIT-R TF.460 – Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias. Desde que se adoptara el UTC, su utilización ha aumentado considerablemente en la comunidad de radiocomunicaciones y telecomunicaciones a la par con el crecimiento de los sistemas de comunicación y navegación electrónica, a fin de proporcionar medidas de cronometría muy precisas en todo el mundo y, a su vez, satisfacer la necesidad de un tiempo coordinado muy exacto (Recomendaciones UIT-R TF.535-2 y UIT-R TF.767-2).

El UTC se ha reconocido como la referencia de tiempo internacional en las resoluciones de diversas uniones científicas y organizaciones vinculantes, como la IAU, la UIT, URSI, CGPM y organismos de normalización como la ISO. En 1978 el CCIR aprobó una nueva versión de la Recomendación CCIR 486 (ahora Recomendación UIT-R TF.486-2 – Utilización de la frecuencia asociada al UTC como referencia en las emisiones de frecuencias patrón y señales horarias) y la CAMR-79 decidió utilizar el UTC para designar el tiempo de todas las actividades de telecomunicaciones internacionales [Actas finales, 1980].

El RR (edición de 2008) define el UTC del modo siguiente:

«**1.14** *Tiempo universal coordinado (UTC)*: escala de tiempo basada en el segundo (SI), definido en la Recomendación UIT-R TF.460-6. (WRC-03)

Para la mayoría de los fines prácticos asociados con el Reglamento de Radiocomunicaciones, el UTC es equivalente a la hora solar media en el meridiano origen (0° de longitud), anteriormente expresada en GMT.»

La referencia generalmente aceptada para aplicaciones de tiempo y frecuencia por satélite es el UTC.

7.6.2.1 Realización del tiempo universal coordinado

El UTC es una versión del TAI ajustada con la adición o sustracción de un determinado número de segundos, denominados segundos intercalares. A fin de mantener una estrecha relación entre el UTC y el UT1, como ilustra la Figura 7-3, se difunde o comunica junto con el UTC un ajuste denominado DUT1. DUT1 era el valor *predicho* de la diferencia UT1 – UTC en múltiples enteros de 0,1 s. Así, los usuarios del UT1 podían ajustar el valor difundido de UTC al UT1 con una precisión < 0,1 s. El UT1 es una versión del tiempo universal corregida para el movimiento polar, seguido de la rotación irregular de la Tierra. El UT1 se determinaba antes mediante el tiempo de tránsito de las estrellas, corregido para tener en cuenta las variaciones entre estaciones. Hoy en día el UT1 se determina mediante técnicas de satélites espaciales y constituye una medida de la velocidad de rotación de la Tierra y relaciona la orientación de la Tierra con la hora UT1 del día. Para más información sobre la historia y el desarrollo de las escalas de tiempo examinadas en esta publicación, véase *The Leap Second: Its History and Possible Future* [Nelson et al., 2001].

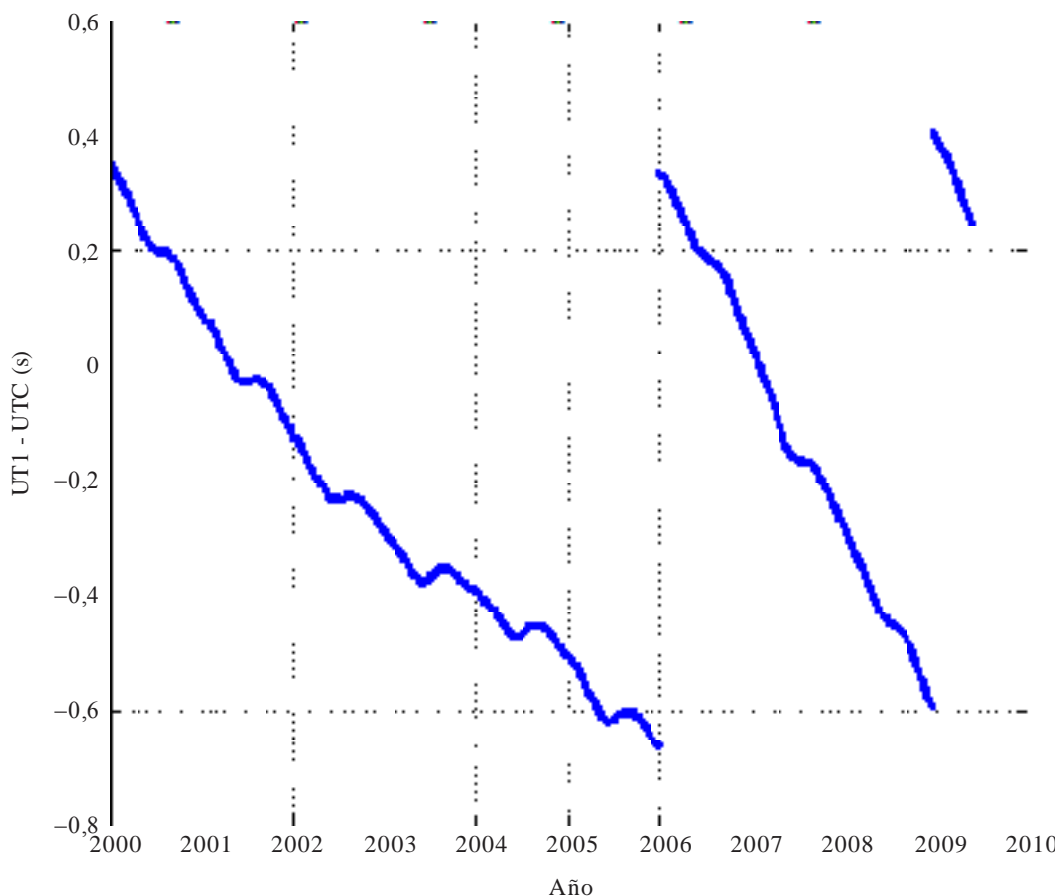
Por consiguiente, el UTC es una escala de tiempo atómica cuya velocidad está en consonancia con TAI, pero que difiere en un número entero de segundos. Al mes de junio de 2008, el UTC estaba retrasado 33 s respecto del TAI. La decisión de insertar segundos intercalares radica en la variación de la velocidad de rotación de la Tierra, de modo que acumula un error de casi 0,9 s. El Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y

Sistemas de Referencia (IERS) supervisa la rotación de la Tierra, determina cuándo se rebasará el umbral y asesora a BIPM que se encarga de mantener el UTC desde que se transfiriera la responsabilidad del TAI a BIH en 1988. En la Figura 7-3 se ilustra la desviación del UTC respecto del UT1 en los últimos 10 años. Obsérvese asimismo la inserción de segundos intercalares a finales de 2005 y 2008, respectivamente.

La forma inicial del UTC adoptada antes de 1972 consistía en mantenerlo cerca del UT1 ajustando el incremento de frecuencia y las fracciones de segundo necesarias para que la difusión de las señales de tiempo atómico concordara con la rotación de la Tierra. El ajuste con la rotación de la Tierra se consideró necesario para ayudar en la navegación celeste, pero en este sistema resultaba difícil coordinar las estaciones de difusión y ofrecer una referencia de tiempo exacta y uniforme. El actual sistema UTC de segundos intercalares sin referencia a incrementos de frecuencia fue adoptado con el fin de ofrecer en una misma escala una aproximación a la época UT1 y al intervalo del segundo SI.

FIGURA 7-3

Diferencia UT1 – UTC en el periodo 2000 a 2009



Sat time freq-07-0.

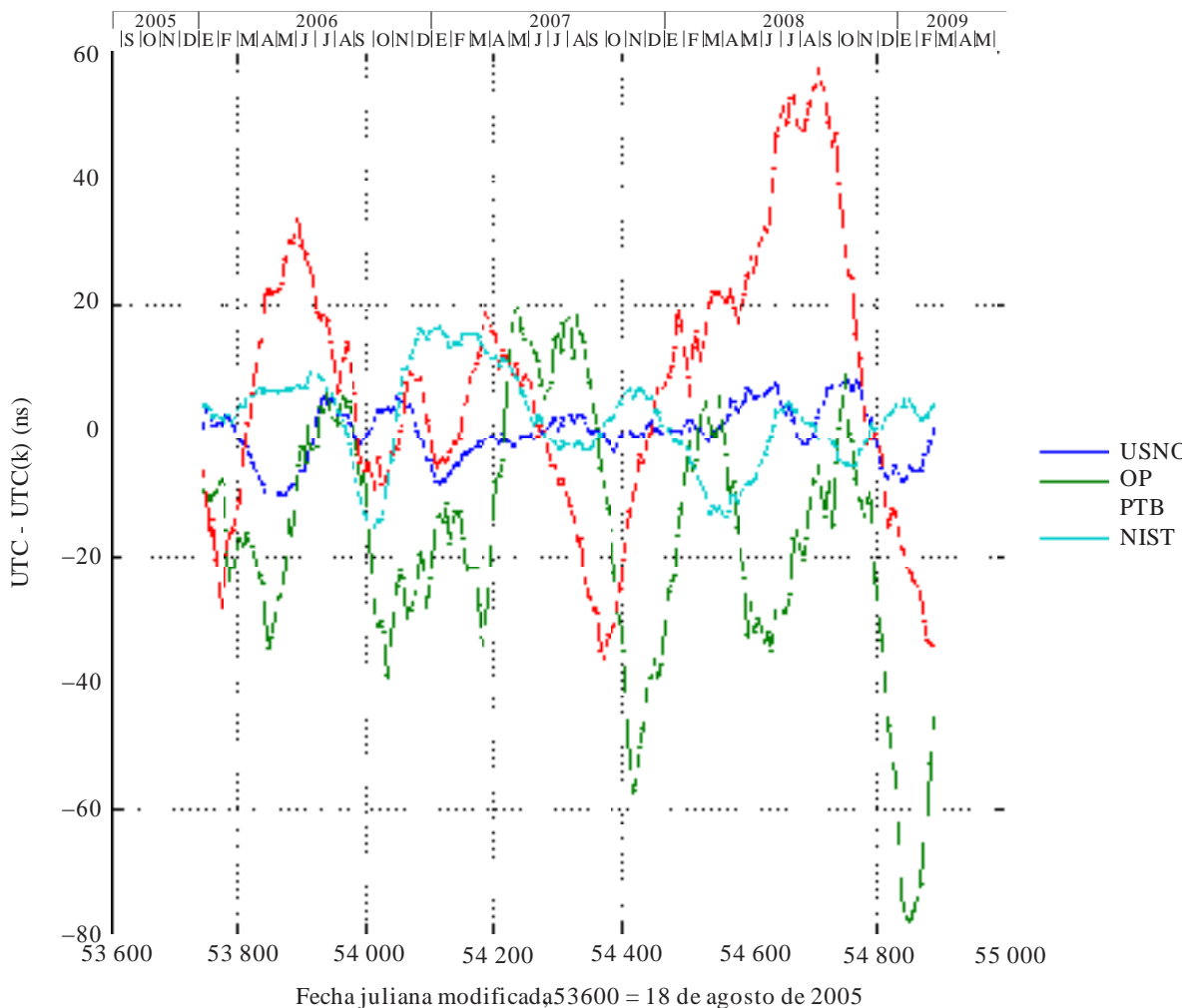
Como los servicios de difusión requieren la generación y transmisión de señales procedentes de los mismos relojes y osciladores que producen las señales de cronometría, se necesita disponer de una escala de tiempo en «tiempo real» o inmediata. Para ello, el centro de cronometría puede producir una representación local del UTC siempre y cuando las mediciones de las señales del reloj se notifiquen a BIPM y se tengan en cuenta al determinar la escala de tiempo internacional. Se utiliza la notación UTC(k) para esta aproximación local al UTC en el laboratorio k que aporta datos para la formación del TAI y del UTC en BIPM. Por ejemplo, UTC

(USNO) es la predicción en tiempo real del UTC que suministra y mantiene actualizado el Observatorio Naval de EE.UU.

Realizaciones similares en tiempo real de otros centros de cronometría, tales como el Observatorio de París (OP), el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) y el Instituto Nacional de Normas y Tecnología de EE.UU. (NIST), contribuyen a los datos de medición de reloj ponderados que utiliza el BIPM [Quinn, 1991]. El UTC empleado sin paréntesis identifica la referencia al valor internacional final determinado por BIPM. Estos procedimientos y definiciones se describen en la Recomendación UIT-R TF.536-2 – Notación de las escalas de tiempo. La determinación definitiva del UTC no dispone de una salida física y está disponible después de dos a cuatro semanas en la forma de un incremento respecto de las representaciones mantenidas por los laboratorios participantes. Los valores de TAI y de UTC se distribuyen en una publicación mensual de BIPM denominada *Circular T*. Las diferencias entre los valores de UTC(k) de los institutos antes mencionados y el UTC se notifican en la Circular T de BIPM como ilustra la Figura 7-4.

FIGURA 7-4

Diferencia UTC - UTC(k) notificada en la Circular T de BIPM (valores diarios)



Referencias

- AOKI, S., GUINOT, B., KAPLAN, G. H., KINISHITA, H., MCCARTHY, D. D. and SEIDELMANN, P. K. [1982] The New Definition of Universal Time. *Astron. Astrophys.* 105, p. 359-361.
- AZOUBIB, J. [2001] A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation. *Report to the 15th meeting of the CCTF*, available on request to the BIPM.
- AZOUBIB, J., GRANVEAUD, M., GUINOT, B. [1977] Estimation of the scale unit duration of time scales. *Metrologia*, Vol. 13, p. 87-93.
- BERGERON, J. (editor) [1992], *Trans. Int. Astron. Union*, Vol. XXIB, Proc. 21st General Assembly, Buenos Aires, 1991, Reidel, Dordrecht, p. 41-52.
- BIPM *Com. Cons. Déf. Seconde* 9, 15 (1980), *Metrologia* 17, 70, 1981.
- FAIRHEAD, L., BRETAGNON, P. and LESTRADE, J.-F. [1998] The Time Transformation TB – TT: An Analytical Formula and Related Problem of Convention, in *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geophysics*, edited by A. K. Babcock and G. A. Wilkins, Kluwer, Dordrecht, p. 419-426.
- FUKUSHIMA, T. [1995] Time Ephemeris. *Astron. Astrophys.* 294, p. 895-906.
- IRWIN, A. W. AND FUKUSHIMA, T. [1999] A Numerical Time Ephemeris of the Earth. *Astron. Astrophys.* 348, p. 642-652.
- MOYER, T. D. [1971/1981] Transformation from Proper Time on Earth to Coordinate Time in Solar System Barycentric Space-Time Frame of Reference. *Celestial Mech.* 23, p. 33-68.
- MULLER, E. A. and JAPPEL, A. (editors) [1977], *Trans. Int. Astron. Union*, Vol. XVIB, Proc. 16th General Assembly, Grenoble, 1976, Reidel, Dordrecht, p. 60.
- NELSON, R. A., MCCARTHY, D. D., MALYS, S., LEVINE, J., GUINOT, B., FLIEGEL, H. F., BEARD, R. L. and BARTHOLOMEW, T. R. [2001] The Leap Second: Its History and Possible Future. *Metrologia* 38, p. 509-529.
- NEWCOMB, S. [1895] *Astronomical Papers Prepared for the Use of the American Ephemeris and Nautical Almanac*. Vol. VI, Part I: *Tables of the Sun*, U. S. Govt. Printing Office, Washington, D.C, p. 9.
- QUINN, T. J. [July 1991] The BIPM and the Accurate Measurement of Time. *Proc. IEEE*, 79(7), p. 894-905.
- RICKMAND, H. (editor) [2001], *Trans. Int. Astron. Union*, Vol. XXIVB, Proc. 24th General Assembly, Manchester, 2000, Astron. Soc. Pacific, San Francisco, p. 37-49.
- SEIDELMANN P. K. (editor) [1992] *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. University Science Books, Mill Valley, CA.
- STANDISH, E. M. [1998] Time Scales in the JPL and CfA Ephemerides. *Astron. Astrophys.* 336, p. 381-384.
- STEPHENSON, F. R. [1997] *Historical Eclipses and Earth's Rotation*. Cambridge, New York, p. 28.
- The XXIIIrd International Astronomical Union General Assembly [1997] Resolution B2 On the International Celestial Reference System (ICRS). Kyoto, Japan.
- THOMAS, C. and AZOUBIB, J. [1996] TAI computation: study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights. *Metrologia*, 33, p. 227-240.
- THOMAS, J. B. [1975] Reformulation of the Relativistic Conversion between Coordinate Time and Atomic Time. *Ap. J.* 80, p. 405-411.

Textos del UIT-R

- ITU-R [1979] *Actas Finales de la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones (CAMR-79)*, Ginebra. Reglamento de Radiocomunicaciones, edición de 2008, volumen 1, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2008, (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>).
- Recomendación UIT-R TF.458-3 – Comparaciones internacionales de escalas de tiempo atómico, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.458-3-199802-I/en>).
- Recomendación UIT-R TF.460-6 – Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.460-6-200202-I/en>).

Recomendación UIT-R TF.486-2 – Utilización de la frecuencia asociada al UTC como referencia en las emisiones de frecuencias patrón y señales horarias, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.486-2-199802-I/en>).

Recomendación UIT-R TF.535-2 – Utilización del término UTC, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.535-2-199802-I/en>).

Recomendación UIT-R TF.536-2 – Notaciones de las escalas de tiempo,
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.536-2-200305-I/en>).

Recomendación UIT-R TF.686-2 – Glosario y definiciones de términos de tiempo y frecuencia,
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/en>).

Recomendación UIT-R TF.767-2 – Utilización de los sistemas globales de navegación por satélite para la transferencia de señales horarias de gran precisión, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.767-2-200103-I/en>).

CAPÍTULO 8

CENTROS NACIONALES DE CRONOMETRÍA

	<i>Página</i>
8.1 Introducción.....	94
8.2 Estructura del laboratorio de cronometría	94
8.3 Sistema de medición local	96
8.4 Trazabilidad internacional	96
8.5 Servicios de difusión de tiempo.....	97
Referencias	97

8.1 Introducción

Como se describió antes, el UTC se calcula en BIPM mediante el postprocesamiento de datos procedentes de unas 350 frecuencias patrón atómicas de alrededor de 60 laboratorios de cronometría distribuidos en todo el mundo. Estos laboratorios forman parte en muchos casos de Institutos Nacionales de Metrología (NMI) y además de la realización local de la escala de tiempo UTC, reconocida normalmente como la referencia de tiempo nacional, también desempeñan actividades en varios, si no todos, de los siguientes campos:

- desarrollo de relojes y frecuencias patrón primarias;
- participación en experimentos internacionales de sincronización;
- difusión de señales horarias y frecuencias patrón;
- desarrollo de técnicas de transferencia de tiempo y frecuencia con exactitud;
- investigación en algoritmos de escala de tiempo y caracterización de relojes;
- calibración de equipos de cronometría y frecuencia.

Al menos dos de estas actividades, a saber, la participación en enlaces de sincronización y la difusión pueden encontrarse en todos los institutos NMI que han firmado desde 1999 el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de CIPM (CIPM MRA) para cumplir con los requisitos relacionados con la creación del grado de equivalencia de normas nacionales, mediante la participación de comparaciones fundamentales (KC), y el reconocimiento mutuo de certificados de calibración y medición expedidos [CIPM/BIPM/OIML, 1999].

La primera tarea de cada laboratorio nacional de metrología que contribuye con datos horarios a la formación del UTC en la BIPM es mantener la representación local en tiempo real del UTC, denominado UTC(k), en estrecho acuerdo con el UTC que puede basarse en la lectura de un solo reloj principal o un conjunto de relojes. En segundo lugar, cada laboratorio de cronometría capaz de participar en la formación del UTC y en comparaciones fundamentales identificadas por CCTF [CCTF Report, 2001; CCTF Report, 2006] debe operar en al menos un sistema de sincronización, principalmente el GPS, para suministrar periódicamente a BIPM los datos [UTC(k) – tiempo GPS] que se utilizarán en la realización de las referencias internacionales de frecuencia y tiempo (TAI y UTC); En la Circular T se suministran mensualmente los valores de [UTC- UTC(k)] que publica el BIPM en la base de datos de comparación fundamentales para la equivalencia de normas internacionales. Un importante problema que conlleva esta tarea es el de evaluar la exactitud de la incertidumbre de los enlaces de sincronización utilizados, para lo cual circulan periódicamente equipos calibrados de GPS, GLONASS o TWSTFT. La BIPM organiza regularmente campañas de calibración de equipos GPS en los laboratorios participantes.

Aparte del equipo necesario para estas actividades principales, los laboratorios de referencia de tiempo y frecuencia deberán disponer de dispositivos dedicados a la generación y supervisión de señales horarias y frecuencias patrón que se distribuirán localmente o a usuarios distantes por diferentes medios, tales como transmisiones LF, HF y de TV, líneas telefónicas o redes de computadores. Estas características, junto con la instrumentación adecuada para calibrar los dispositivos de cronometría y frecuencia en lo que respecta a sus especificaciones (tiempo, frecuencia y deriva, estabilidad de frecuencia) completan la cadena de trazabilidad prevista en el acuerdo CIPM MRA.

En los países donde se ha creado un sistema de laboratorios de calibración acreditados, el laboratorio NMI también ofrece su experiencia al organismo de acreditación y puede participar en la organización de comparaciones nacionales e internacionales entre laboratorios, que resultan fundamentales a la hora de evaluar las capacidades de laboratorios de calibración secundarios, que constituyen el último nivel de la trazabilidad prevista por el Acuerdo MRA de CIPM.

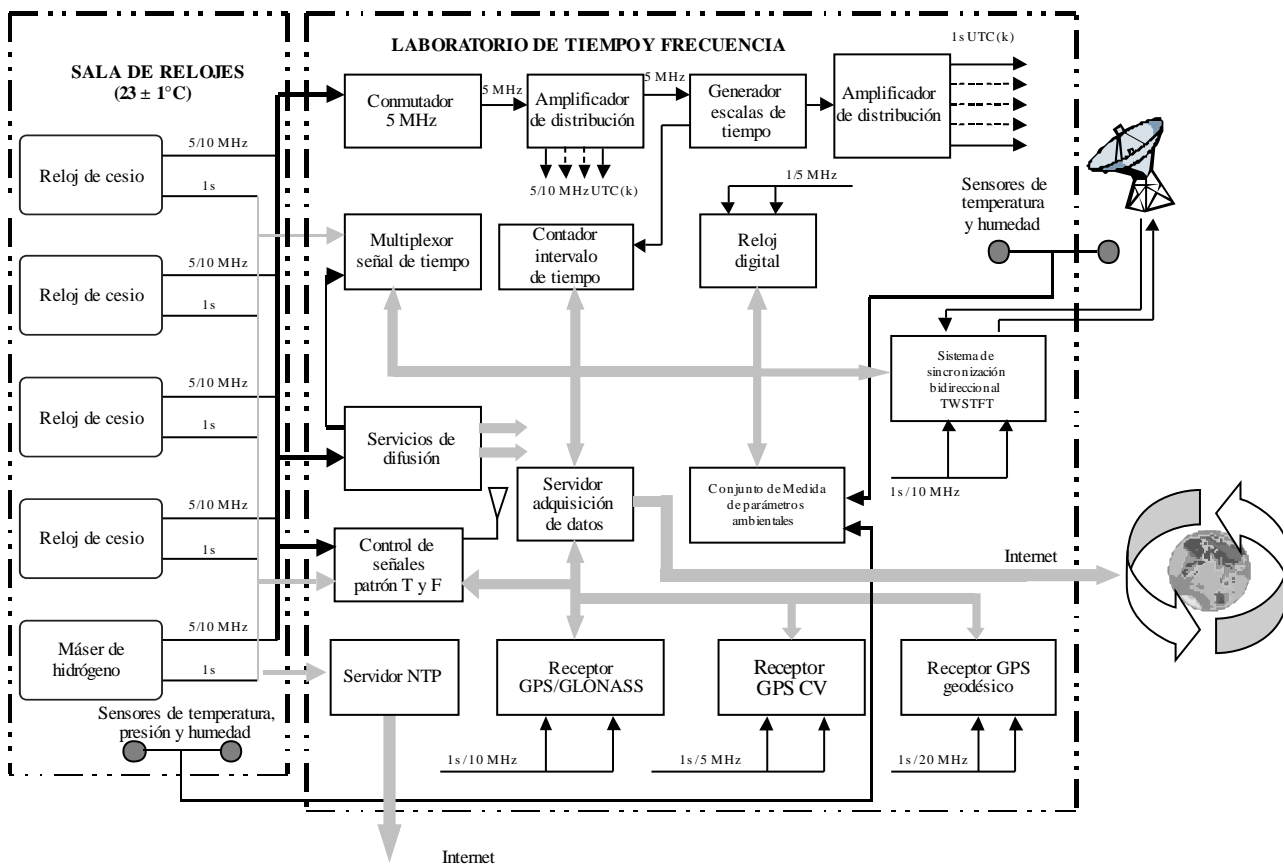
8.2 Estructura del laboratorio de cronometría

En la Figura 8-1 se ilustra un ejemplo característico de las principales actividades descritas, aparte del equipo dedicado a la investigación de fuentes de frecuencias patrón, patrones de cesio e instrumentos de calibración. Todos los equipos, salvo las antenas receptoras de los sistemas de sincronización, se instalan en salas de temperatura y humedad controladas y se conectan a un sistema de alimentación eléctrica ininterrumpida y redundante, que no aparece en la figura; este sistema es muy importante para la fiabilidad de las actividades metrológicas.

En la parte izquierda de la figura puede verse una sala separada para el conjunto de relojes, normalmente a una temperatura regulada de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$; se recomienda esta solución cuando se precisa obtener el máximo rendimiento de los relojes de cesio respecto de los cambios ambientales, aunque se pueden obtener resultados aún mejores manteniendo los relojes en cámaras pequeñas con control estricto de humedad y temperatura ($\pm 0,1^\circ\text{C}$). Esta solución resulta especialmente adecuada en caso de utilizar un máser de hidrógeno para lograr la mayor estabilidad de frecuencia en la generación de escala de tiempo o cuando se utiliza como oscilador local para un patrón de cesio primario.

FIGURA 8-1

Estructura característica de un centro de cronometría



Sat time freq-08-01

En esta arquitectura propuesta, se proponen al menos 4 relojes atómicos para que el UTC local sea robusto; esta configuración también permite generar una escala de tiempo de papel que mejora el comportamiento a largo plazo de la escala de tiempo y su fiabilidad. En cualquier caso, el método más común es seleccionar un solo reloj del conjunto, a tenor de su exactitud y estabilidad, que se utiliza como reloj principal para generar el UTC(k) en tiempo real. A los efectos de mejorar la fiabilidad en la generación de la escala de tiempos, se puede insertar un conmutador automático (por ejemplo, de 5 MHz) entre los relojes de cesio y el generador de la escala de tiempos (TSG), que recibe en sus entradas todas las frecuencias patrón disponibles y verifica sus cambios de amplitud y fase para detectar cualquier anomalía en el sistema, evitando así discontinuidades en la escala de tiempo.

La información sobre posibles anomalías entrantes puede obtenerse de la observación de algunos parámetros físicos cuyos valores están disponibles en los puertos serie de los relojes de cesio; por consiguiente conviene controlar constantemente algunos parámetros del servidor del laboratorio.

A los efectos de cumplir con las recomendaciones del Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia, CCTF (que sugiere una desviación máxima de 100 ns de toda realización local del UTC (Informe CCDS, 1993 del UTC), debería insertarse un adaptador de microfase entre el reloj principal y el generador TSG para ajustar su frecuencia al UTC, de conformidad con las correcciones publicadas por BIPM en la Circular T a una evaluación precisa respecto de la norma primaria del laboratorio. Algunos tipos de patrones de cesio integran la función de microadaptador, por lo que no se requiere un dispositivo adicional en el trayecto de generación de la escala de tiempos.

Las señales patrón suministradas por los relojes de referencia se distribuyen en el laboratorio de cronometría y frecuencia por cables coaxiales de gran calidad o por fibra óptica.

También se necesitan amplificadores de distribución de las frecuencias patrón UTC(k) y señales de 1s a fin de realizar mediciones rastreables dentro del laboratorio.

8.3 Sistema de medición local

Los laboratorios de cronometría y frecuencia disponen de equipos destinados a la generación de escalas de tiempo y a la comparación de relojes, los servicios de divulgación, los receptores de satélites, los sistemas de adquisición de datos y el equipo de control auxiliar.

La configuración y utilización del sistema local de medición dentro del laboratorio tiene por objetivo suministrar datos del reloj para calcular la escala de tiempo y para comparar el tiempo y la frecuencia internos entre el UTC(k) y todos los relojes y frecuencias patrón que mantiene el laboratorio. Normalmente se necesitan sistemas de medición especiales para realizar mediciones rutinarias en los satélites del GPS u otros sistemas de sincronización prescritos por la trazabilidad internacional.

El sistema de medición local consta de un contador de intervalos de tiempo (TIC) de gran resolución que mide en un momento adecuado las diferencias de reloj con una tasa de repetición de 1s y repite el ciclo cada hora. La solución óptima en lo que respecta a la tasa de medición depende sobremedida de las actividades que desempeña el laboratorio. Como la exactitud de la medición está relacionada con la base de tiempos, se suministra al contador TIC la frecuencia de referencia externa UTC(k). Otros factores que contribuyen a la incertidumbre en la comparación de relojes son el instante de disparo, el error de cuantificación y el retardo diferencial de los canales de inicio y fin. Por consiguiente, es necesario efectuar periódica y meticulosamente una calibración para evaluar la estabilidad del sistema de medición. Todas las medidas tomadas mediante el contador TIC tienen que tener de referencia al UTC(k), mientras que las señales «stop» que proceden de diversos relojes se envían a través de un multiplexor de señales de tiempo. El reloj digital permite etiquetar el instante a cada medición. Los ciclos de medición se controlan por computador, el cual recibe todos los resultados del contador TIC, de los sistemas de sincronización y de los sistemas de control ambiental. La conexión externa con el BIPM y otros NMI puede también gestionarse mediante un servidor de red especial que disponga de acceso seguro a Internet.

8.4 Trazabilidad internacional

Los enlaces de comparación de tiempo que suelen utilizarse corrientemente en los laboratorios de cronometría para establecer la trazabilidad del UTC(k) respecto de las referencias internacionales de frecuencia y tiempo UTC y TAI, se basan en receptores GPS utilizados con arreglo a lo estipulado por BIPM y en la transferencia bidireccional de tiempo y frecuencia por satélite (TWSTFT) mediante satélites de comunicación. El mismo enlace de medición permite que los relojes atómicos mantenidos en cada laboratorio contribuyan al cálculo de dichas referencias. El equipo de transferencia de tiempo se ha actualizado en muchos laboratorios, y el GPS básico se está sustituyendo por otras técnicas de sincronización, como por ejemplo la recepción de satélites GPS y GLONASS con receptores multicanal, muchos de los cuales con recepción de bifrecuencia, el mayor rendimiento de las mediciones de fase de portadora TWSTFT o GPS con receptores geodésicos. Estas dos últimas técnicas resultan especialmente importantes en el caso de requisitos más estrictos en la comparación de frecuencia y tiempo, también para referencias intercontinentales. Todos estos instrumentos han de recibir las referencias de tiempo y frecuencia UTC(k) externas y se debe seleccionar concienzudamente el lugar donde instalar sus sistemas de antenas y la realización de las conexiones de señales con el laboratorio de cronometría y frecuencia.

En el caso de dispositivos GPS y GLONASS, los datos medidos se suelen almacenar dentro de los receptores y luego se transmiten automáticamente al sistema de adquisición de datos, aunque en el caso de TWSTFT pudiera ser necesario un sistema de medición auxiliar.

A fin de evaluar la exactitud de todo enlace de sincronización, el receptor de referencia de un laboratorio de cronometría debería participar en las campañas de calibración periódicas que organiza BIPM u otras organizaciones regionales de metrología, mediante la circulación de un receptor GPS calibrado, a fin de comprobar la estabilidad con el transcurso del tiempo del retardo del receptor utilizado en el laboratorio. En el caso de TWSTFT, se podría recurrir a una estación VSAT portátil y a un simulador de satélite. La caracterización íntegra de la incertidumbre de los enlaces utilizados en la construcción del UTC, así como la información sobre sus calibraciones, se publican den la Circular T de BIPM; en la Figura 7-2 de la sección anterior se muestra un extracto del cuadro que proporciona esta información. Al día de hoy, el nivel de incertidumbre que puede alcanzarse en la región es de unos cuantos nanosegundos.

8.5 Servicios de difusión de tiempo

A fin de satisfacer las necesidades de los usuarios científicos e industriales y poner a disposición de la comunidad nacional la información horaria legal, el centro nacional de cronometría puede ofrecer diversos servicios de cronometría y difusión de señales horarias basados en bandas específicas VLF, LF, HF y de TV, en satélites, en redes telefónicas y en Internet.

El Manual del UIT-R «Selección y utilización de sistemas precisos de frecuencias patrón y señales horarias» contiene información detallada sobre las técnicas utilizadas y los niveles de incertidumbre para los usuarios, mientras que en las Recomendaciones UIT-R de la serie TF se publica una lista actualizada de las emisiones de señales horarias y de frecuencia (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF/en>). Asimismo, en el Informe Anual sobre actividades de cronometría del BIPM se describen los servicios de señales horarias y difusión del tiempo.

Este tipo de actividad se representa en el diagrama de bloques de la Figura 8-1 mediante dos recuadros, a saber «Servicios de difusión» y «Servidor NTP»; a fin de documentar la trazabilidad del UTC(k) de estos servicios para los usuarios, el laboratorio debe implantar algunos sistemas de control y se ha de publicar periódicamente, en papel o en formato electrónico, las desviaciones de frecuencia y la incertidumbre de las señales horarias y de frecuencia.

La trazabilidad de un patrón nacional también la puede suministrar el centro de cronometría mediante la publicación de los resultados de las medidas tomadas en el GPS, que puede considerarse una transferencia patrón, a fin de permitir a los laboratorios secundarios remitir sus patrones locales, principalmente osciladores controlados por GPS, a las referencias de tiempo internacionales.

Referencias

BIPM Annual Report on Time Activities, Bureau International des Poids et Mesures, Available upon request from the BIPM.

CCDS – Report on the 14th Meeting, 1993.

CCTF – Report of the 15th Meeting, June 2001, (<http://www.bipm.org/cc/AllowedDocuments.jsp>).

CCTF – Report of the 17th Meeting, 2006, (<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CCTF17.pdf>).

CIPM/BIPM/OIML – Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes. Paris, October 1999.

CAPÍTULO 9

EFFECTOS RELATIVISTAS EN LA TRANSFERENCIA Y DIFUSIÓN DE TIEMPO Y FRECUENCIA POR SATÉLITE

	<i>Página</i>
9.1 El intervalo espacio-tiempo	100
9.2 El principio de relatividad	100
9.2.1 El tensor métrico.....	101
9.2.2 Potencial gravitatorio de la Tierra	103
9.2.3 Dilatación del tiempo.....	105
9.2.4 Corrimiento al rojo gravitatorio.....	106
9.2.5 Transferencia de tiempo mediante el transporte de relojes.....	107
9.2.6 Sistema de coordenadas inercial con origen en la Tierra.....	108
9.2.7 Sistema de coordenadas fijo con origen en la Tierra	109
9.3 Reloj a bordo de un satélite	112
9.4 Transferencia de tiempo mediante una señal electromagnética.....	115
9.4.1 Sistema de coordenadas inercial con origen en la Tierra.....	117
9.4.2 Sistema de coordenadas fijo con origen en la Tierra	119
9.4.3 Enlace entre satélites.....	121
9.4.4 Efecto Doppler relativista	122
9.5 Conclusión.....	124
Referencias	124

9.1 El intervalo espacio-tiempo

La teoría del espacio, el tiempo y la gravitación, de acuerdo con la teoría general de la relatividad, se basa en el concepto de la invariancia del intervalo espacio-tiempo de Riemann definido como:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j \quad (9-1)$$

donde:

el índice griego toma valores 0, 1, 2, 3;

el índice latino toma valores 1, 2, 3.

Los índices repetidos (uno en la posición de superíndice y otro en la de subíndice) implican la suma sobre dicho índice. El objeto matemático fundamental es el tensor métrico $g_{\mu\nu}$, cuyas componentes son función de las coordenadas $x^\alpha = (c t, x^i)$ y es simétrico respecto de los índices μ, ν (es decir, $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$). El tensor métrico recíproco $g^{\mu\nu}$ se define de modo que $g^{\mu\alpha} g_{\alpha\nu} = \delta^\mu_\nu$, siendo δ^μ_ν la delta de Kronecker ($\delta^\mu_\nu = 1$ si $\mu = \nu$, 0 en otros casos). La convención de signos adoptada en este documento es, $-g_{00} > 0$.

Al medir la longitud y el tiempo, la unidad fundamental es el tiempo; la longitud es un concepto derivado. Por consiguiente, los relojes y las señales de la luz son los únicos instrumentos fundamentales de medición. Existen dos métodos distintos de transferencia de tiempo entre dos relojes distantes:

- 1 el transporte de un reloj portátil intermedio;
- 2 una señal electromagnética.

Para la transferencia del tiempo relativista es preciso distinguir entre el tiempo coordenado y el tiempo propio. El tiempo coordenado t de un evento es el mismo en cualquier lugar del sistema de coordenadas espacio-tiempo. El tiempo propio τ es el medido por un reloj en su propio marco de referencia en reposo. El tiempo propio depende del estado de movimiento del reloj y de su posición en el potencial gravitatorio. Para el reloj transportado, el intervalo espacio-tiempo es:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \equiv -c^2 d\tau^2 \quad (9-2)$$

En el caso de una señal electromagnética, el intervalo espacio-tiempo cumple la siguiente condición:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = 0 \quad (9-3)$$

9.2 El principio de relatividad

Según la teoría especial de la relatividad, formulada por Einstein en 1905, las leyes de la física deberían adoptar una forma idéntica en cualquier marco de referencia inercial. Este postulado se conoce como principio de relatividad. Así, además de las leyes de la mecánica, las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo deberían ser válidas en todo marco inercial. Una de las predicciones fundamentales de las ecuaciones de Maxwell es la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan en el vacío a la velocidad de la luz, definida inequívocamente mediante la expresión:

$$c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

siendo:

μ_0 y ϵ_0 : las constantes eléctricas que representan la permeabilidad y la permitividad del espacio libre, respectivamente.

Por consiguiente, la velocidad de la luz c debe ser la misma en todo marco inercial.

En 1908 Minkowski reconoció que esta propiedad puede expresarse mediante la invariancia de un intervalo espacio-tiempo cuatridimensional:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = -c^2 dt'^2 + dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 \quad (9-4)$$

de modo que para la señal de la luz la ecuación $ds^2 = 0$ representa un frente de onda esférico en expansión en el marco inercial $S(ct, x, y, z)$ o en el marco inercial $S'(ct', x', y', z')$. Los coeficientes de las diferenciales de las coordenadas vienen dados por la métrica de Minkowski, $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} \equiv \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$.

La transformación de coordenadas que preserva la invariancia de esta expresión se denomina transformación de Lorentz. Si S' se desplaza a velocidad V a lo largo del eje x de S , la transformación de Lorentz es:

$$x = \gamma(x' + V t'); \quad y = y'; \quad z = z' \quad (9-5)$$

$$t = \gamma(t' + V x' / c^2)$$

siendo:

$$\gamma \equiv (1 - V^2 / c^2)^{-1/2}$$

Dos eventos son simultáneos si sus tiempos coordenados son idénticos. Así, el segundo término de la transformación del tiempo coordenado implica que la simultaneidad es relativa: eventos que son simultáneos en S no lo son necesariamente en S' .

Un postulado fundamental de la relatividad general, formulado por Einstein en 1916, es que «las leyes de la física deben ser de una naturaleza tal que conserven la misma forma en los sistemas de referencia cualquier que sea el movimiento». Por consiguiente, en la relatividad general la transformación de coordenadas entre dos marcos de referencia es arbitraria y el intervalo espacio-tiempo adopta una forma diferencial cuadrática cuyas componentes métricas son función de las coordenadas. Dada su invariancia respecto a cualquier transformación arbitraria de coordenadas $x^\alpha \rightarrow x^\alpha(x'^0, x'^1, x'^2, x'^3)$, el intervalo espacio-tiempo es:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g'_{\alpha\beta} dx'^\alpha dx'^\beta \quad (9-6)$$

La transformación de las diferenciales de las coordenadas es:

$$dx^\mu = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} dx'^\alpha \quad (9-7)$$

Sustituyendo esta expresión en ds^2 , la transformación de la métrica viene dada por:

$$g'_{\alpha\beta} = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\beta} g_{\mu\nu} \quad (9-8)$$

Las diferenciales de las coordenadas y la métrica son ejemplos de ciertas cantidades denominadas «tensores». Un tensor en cualquier sistema de coordenadas se caracteriza por su ley de transformación a un nuevo sistema de coordenadas. La transformación es lineal y homogénea, de modo que si la ecuación del tensor es válida en un sistema de coordenadas, también es válida en cualquier otro sistema de coordenadas. Por consiguiente, en la relatividad general la invariancia de las leyes de la física respecto del sistema de coordenadas se expresa en las ecuaciones mediante tensores.

9.2.1 El tensor métrico

Las propiedades geométricas del espacio-tiempo vienen determinadas mediante el tensor de Riemann $R^\alpha_{\beta\gamma\delta}$, que se construye totalmente a partir del tensor métrico y su primera y segunda derivadas. Una transformación de coordenadas que convierte un determinado tensor métrico $g_{\mu\nu}$ en la forma de la métrica de Minkowski $\eta_{\mu\nu}$ de la relatividad especial existe si, y solamente si, el tensor de Riemann es igual a cero. En tal caso, el

espacio-tiempo es plano. En presencia de materia, el espacio-tiempo es curvo y la métrica no puede reducirse a la métrica de Minkowski en todo el espacio-tiempo mediante cualquier transformación de coordenadas. No obstante, siempre es posible encontrar un sistema de coordenadas, representado mediante un sistema de referencia en caída libre, en el que las primeras derivadas de la métrica sean cero en un determinado punto y la métrica se exprese mediante la métrica de Minkowski en las proximidades de dicho punto. Esta propiedad constituye el *Principio de equivalencia*, según el cual todo marco de referencia en caída libre es localmente equivalente a un marco de referencia inercial en ausencia de gravitación. Otra formulación es que todo marco de referencia no inercial es localmente indistinguible de un sistema de referencia en reposo en un campo gravitatorio. El *Principio de equivalencia* se basa en la observación experimental de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración, con independencia de su composición o estructura interna, que en la teoría newtoniana de la gravitación se expresa mediante la equivalencia de masa inercial y gravitatoria.

Dada una distribución de materia, el tensor métrico se determina mediante la ecuación del campo de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (9-9)$$

siendo:

- $R_{\mu\nu} = R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu}$: el tensor de Ricci, obtenido por contracción (suma) del tensor de Riemann sobre los índices primero y tercero;
- $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$: la curvatura escalar P ;
- $T_{\mu\nu}$: el tensor de energía-momento, y G la constante newtoniana de la gravedad. En el espacio libre, la ecuación de campo se reduce a $R_{\mu\nu} = 0$.

Ahora bien, esta ecuación no implica la condición más estricta $R^{\alpha}_{\beta\gamma\delta} = 0$, es decir que el espacio-tiempo sea plano.

En primera aproximación, del orden $1/c^2$, la ecuación del campo de Einstein se reduce a la ecuación de Poisson, $\nabla^2 U = -4\pi G \rho$, donde U es el potencial gravitatorio newtoniano y ρ la densidad de la materia.

En el espacio libre, la ecuación del campo se convierte en la ecuación de Laplace, $\nabla^2 U = 0$.

A los efectos de analizar el transporte de relojes en esta aproximación, la métrica en un marco de referencia inercial con origen en la Tierra (ECI) es:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = \delta_{ij} \quad (9-10)$$

siendo:

- δ_{ij} : la delta de Kronecker.

Mediante una transformación de coordenadas, la métrica en un marco de referencia fijo con origen en la Tierra (ECEF) adopta la forma:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = \delta_{ij} \quad (9-11)$$

siendo:

- $\boldsymbol{\omega}$: la velocidad angular de rotación de la Tierra;

$W \equiv U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2$: el geopotencial de la Tierra.

A fin de analizar las señales de luz es necesario incluir términos en g_{ij} del mismo orden que los términos en g_{00} . Así, las señales luminosas en un sistema de referencia inercial:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij} \quad (9-12)$$

y en un sistema de referencia en rotación:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij} \quad (9-13)$$

Estas aproximaciones para las componentes del tensor métrico son suficientes para resolver los problemas prácticos de relojes y señales luminosas.

NOTA 1 – Según recomienda la IAU, el signo del potencial gravitatorio newtoniano es positivo.

9.2.2 Potencial gravitatorio de la Tierra

El potencial gravitatorio de la Tierra U a una distancia radial r , con latitud geocéntrica ϕ y longitud λ es una solución de la ecuación de Laplace, $\nabla^2 U = 0$, que puede expresarse mediante la siguiente serie de armónicos esféricos:

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^n P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right\}$$

$$= \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{R}{r}\right)^n P_n(\sin \phi) - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left(\frac{R}{r}\right)^n P_{nm}(\sin \phi) (J_{mn} \cos m\lambda + K_{mn} \sin m\lambda) \right\} \quad (9-14)$$

siendo:

G : la constante gravitatoria;

M : la masa de la Tierra;

R : el radio de la Tierra en el ecuador;

$P_n(\sin \phi)$: los polinomios de Legendre de grado n ;

$P_{nm}(\sin \phi)$: las correspondientes funciones de Legendre de grado n y orden m .

El primer término es el potencial correspondiente a una Tierra esférica. Los términos del sumatorio sencillo se denominan armónicos zonales y corresponden al achatamiento de la Tierra. Los términos del doble sumatorio se denominan armónicos tesaerales y guardan relación con la forma elíptica del ecuador de la Tierra. Cuando resulte suficiente tener en cuenta solamente el primer armónico de achatamiento, el potencial gravitatorio puede aproximarse mediante la expresión:

$$U(r, \phi) = \frac{GM}{r} \left[1 + \frac{1}{2} J_2 \left(\frac{R}{r}\right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] \quad (9-15)$$

donde:

J_2 : es el coeficiente de achatamiento de menor grado

$$P_2(x) = \frac{1}{2} (3x^2 - 1).$$

En las medidas terrestres es necesario tener presente el potencial gravitatorio de la Tierra y su rotación. El geopotencial es la suma del potencial gravitatorio U y el potencial rotacional $\frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi$:

$$W = U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 = U + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi \quad (9-16)$$

que es una solución de la ecuación $\nabla^2 W = -4\pi G \rho + 2\omega^2$, siendo ω la velocidad angular de rotación de la Tierra. Si se mantiene únicamente la primera corrección de achatamiento, el geopotencial puede expresarse así:

$$W(r, \phi) \approx \frac{GM}{r} \left[1 + \frac{1}{2} J_2 \left(\frac{R}{r} \right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi \quad (9-17)$$

La superficie de geopotencial constante se denomina geode, y el nivel medio del mar es una buena aproximación. Dado que el geopotencial W_0 en la superficie del geode es constante, puede calcularse en el ecuador y su valor viene dado por:

$$W_0 \equiv U_0 + \frac{1}{2} (\omega \times \mathbf{R})^2 \approx \frac{GM}{R} \left(1 + \frac{1}{2} J_2 \right) + \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \quad (9-18)$$

siendo:

U_0 : el potencial gravitatorio newtoniano sobre el geode en la posición \mathbf{R} .

Según el modelo WGS-84 de la Tierra (Informe técnico NIMA, 1997), la constante gravitatoria de la Tierra es:

$$GM = 3,986\,004\,418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

El radio en el ecuador de la Tierra es $R = 6\,378\,137,0$ m y

la velocidad angular de rotación de la Tierra es $\omega = 7,292\,1150 \times 10^{-5}$ rad/s.

Por otra parte, la velocidad de la luz es exactamente 299 792 458 m/s.

NOTA 1 – Este valor define el metro en el Sistema Internacional de Unidades (SI). La permitividad del espacio libre es $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$, mientras que la permeabilidad del espacio libre es $\mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ según la definición del amperio. Así, como se trata de dos constantes definidas, c y ϵ_0 ya no están sujetas a medición experimental.

El coeficiente de achatamiento de la Tierra de segundo grado es aproximadamente $J_2 = 0,001\,0826$.

Así: $W_0 = 6,2637 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y $W_0 / c^2 = 6,9693 \times 10^{-10}$ aproximadamente.

La aceleración local de la gravedad \mathbf{g} es el gradiente del geopotencial. Por tanto:

$$\mathbf{g} = \nabla W = \nabla U - \omega \times (\omega \times \mathbf{r}) \quad (9-19)$$

La diferencia de geopotencial respecto de la altura h es aproximadamente $\Delta W \approx \mathbf{g} \cdot \Delta \mathbf{r} = -g h$.

La magnitud de la aceleración de la gravedad en una Tierra achatada en rotación puede expresarse mediante la fórmula de la gravedad de Somigliana [Heiskanen and Moritz, 1967]:

$$g = g_0 \frac{1 + k \sin^2 \phi'}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi'}} \quad (9-20)$$

siendo:

ϕ' : la latitud geodética;

$e^2 = 2f - f^2$: el cuadrado de la primera excentricidad;

f : el achatamiento;

g_0 : el valor de g en el ecuador.

La latitud geodética ϕ' y la latitud geocéntrica ϕ están relacionadas por la ecuación exacta:

$$\tan \phi = (1 - f)^2 \tan \phi' = (1 - e^2) \tan \phi'.$$

Según el modelo WGS-84 de la Tierra:

- $k = 0,001\ 931\ 852\ 652\ 41$
- $f = 1/298,257\ 223\ 563$
- $e^2 = 0,006\ 694\ 379\ 990\ 14$, y
- $g_0 = 9,780\ 325\ 3359\ \text{m/s}^2$.

NOTA 1 – Por convenio, ΔW es negativa cuando el reloj está por encima del geoide.

9.2.3 Dilatación del tiempo

En la relatividad especial, el intervalo espacio-tiempo para un reloj que se desplaza a una velocidad v respecto a un marco de referencia inercial viene dado por:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 (1 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2 \quad (9-21)$$

siendo:

$$v^2 = \delta_{ij} (dx^i/dt)(dx^j/dt).$$

Para dos relojes a velocidades v_1 y v_2

$$d\tau_1 = \sqrt{1 - v_1^2/c^2} dt \quad (9-22)$$

y

$$d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} dt \quad (9-23)$$

Dado que los intervalos de tiempo propio $d\tau_1$ y $d\tau_2$ corresponden al mismo intervalo de tiempo coordenado dt :

$$\frac{d\tau_2}{d\tau_1} = \sqrt{\frac{1 - v_2^2/c^2}{1 - v_1^2/c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (9-24)$$

Por consiguiente, un reloj que se desplace a una velocidad superior a la del marco de referencia marchará más lentamente que otro que se desplace a velocidad inferior a la del marco de referencia inercial.

Si $v_1 = 0$, entonces $d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} d\tau_1$ e inversamente $d\tau_1 = d\tau_2 / \sqrt{1 - v_2^2/c^2}$.

Así, el intervalo de tiempo propio $d\tau_1$ registrado por el reloj estacionario es mayor que el $d\tau_2$ registrado por el reloj en movimiento. Esta propiedad se conoce como dilatación del tiempo.

El efecto de la dilatación del tiempo se ha comprobado exhaustivamente al medir la desintegración de partículas elementales. Por ejemplo, los muones a alta velocidad producidos por los rayos cósmicos en la capa superior de la atmósfera parecen tardar más en desintegrarse, según se observa en las longitudes de los trayectos antes de su desintegración, que el tiempo propio de desintegración de los muones medido en reposo en el laboratorio [Frish and Smith, 1963].

La dilatación del tiempo también se observa en el transporte de relojes. Considérese la diferencia entre el tiempo propio τ_2 registrado por un reloj que gira a una velocidad relativa v' alrededor del ecuador de la Tierra y el tiempo propio τ_1 de un reloj de referencia que permanece fijo en una posición sobre el ecuador. Respecto de un marco de referencia inercial, la velocidad del reloj de referencia es:

$$v_1 = \omega R, \text{ y}$$

la velocidad del reloj transportado es:

$$v_2 = \omega R + v'$$

siendo:

ω : la velocidad angular de rotación de la Tierra;

R : el radio de la Tierra en el ecuador.

La diferencia entre los tiempos propios (reloj transportado – reloj de referencia) es aproximadamente:

$$\tau_2 - \tau_1 \approx -\frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \tau_1 = -\frac{1}{c^2} \left(\frac{1}{2} v'^2 + \omega R v' \right) \tau_1 = -\frac{2\pi R}{c^2} \left(\frac{1}{2} |v'| \pm \omega R \right) \quad (9-25)$$

En el caso de un desplazamiento hacia el este, la velocidad relativa v' es positiva y los dos términos se suman, pero en el caso de un desplazamiento hacia el oeste la velocidad relativa es negativa y los dos términos se anulan. En el sistema que gira alrededor de la Tierra, el segundo término de la derecha representa el efecto Sagnac. En 1971, los físicos Joseph Hafele y Richard Keating [Pound and Rebka, 1960] demostraron por primera vez la dilatación del tiempo con relojes atómicos macroscópicos. Transportaron un conjunto de cuatro relojes de cesio alrededor de la Tierra en un avión a reacción comercial, una vez en dirección este y otra en dirección oeste, y verificaron cuantitativamente la asimetría de las diferencias de reloj entre los vuelos hacia el este y hacia el oeste.

9.2.4 Corrimiento al rojo gravitatorio

En la relatividad general, el intervalo espacio-tiempo de un reloj viene dado por:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2 \quad (9-26)$$

En el caso especial de un reloj en reposo, $dx^i = 0$ y $d\tau = \sqrt{-g_{00}} dt$.

Para dos relojes A y B en reposo en un potencial gravitatorio en los puntos x_A y x_B , los intervalos de tiempo propio son:

$$d\tau_A = \sqrt{-g_{00}(x_A)} dt \quad (9-27)$$

y

$$d\tau_B = \sqrt{-g_{00}(x_B)} dt \quad (9-28)$$

Dado que los intervalos de tiempo propio $d\tau_A$ y $d\tau_B$ corresponden al mismo intervalo de tiempo coordinado dt :

$$\frac{d\tau_B}{d\tau_A} = \frac{\sqrt{-g_{00}(x_B)}}{\sqrt{-g_{00}(x_A)}} \quad (9-29)$$

Si los relojes están separados por una altura $h = r_B - r_A$ en el potencial gravitatorio de la Tierra en rotación, se obtiene:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2 \text{ y} \quad (9-30)$$

$$\frac{d\tau_B}{d\tau_A} \approx \frac{1 - W_B/c^2}{1 - W_A/c^2} \approx 1 - \frac{1}{c^2} (W_B - W_A) = 1 - \frac{\Delta W}{c^2} \approx 1 + \frac{gh}{c^2} \quad (9-31)$$

siendo:

$$W: \quad \text{el geopotencial, } g \text{ la aceleración local de la gravedad;} \\ \Delta W \approx -g h.$$

Así, la diferencia entre las lecturas del tiempo propio del reloj:

$$\tau_B - \tau_A = -\frac{1}{c^2} \Delta W \quad \tau_A \approx \frac{1}{c^2} g h \tau_A \quad (9-32)$$

Por consiguiente, debido a la diferencia de potencial gravitatorio, el tiempo propio registrado por el reloj B a mayor elevación (es decir, a un potencial gravitatorio inferior) será mayor que el registrado por el reloj A a menor elevación (es decir, a un potencial gravitatorio superior). Si el reloj A transmite una señal periódica hacia arriba que recibe el reloj B , la diferencia relativa de frecuencias es:

$$\frac{f_B - f_A}{f_A} = \frac{f_B}{f_A} - 1 = \frac{d\tau_A}{d\tau_B} - 1 = -\frac{gh}{c^2} \quad (9-33)$$

La frecuencia recibida f_B medida por el reloj B es, por tanto, inferior a la frecuencia transmitida f_A medida por el reloj A . Es decir, el mismo número de impulsos de señal se observa en un intervalo de tiempo propio más largo. Este efecto se denomina corrimiento al rojo gravitatorio. (En la práctica, el término «corrimiento al rojo» es genérico y se aplica a cualquier cambio en frecuencia, independientemente del signo.)

El corrimiento al rojo gravitatorio se midió directamente por vez primera en 1960 en el experimento de Robert Pound y Glen Rebka [Pound and Rebka, 1960] de la Universidad de Harvard. Midieron con exactitud el extremadamente pequeño cambio fraccional en la frecuencia de los fotones de rayos gamma que se elevaban o caían una distancia vertical conocida. En el experimento, el emisor Fe^{57} se desplazaba lentamente para producir un efecto Doppler que compensara exactamente el corrimiento al rojo gravitatorio a fin de permitir la absorción resonante a lo largo de una pequeña gama de frecuencia mediante un Fe^{57} de absorción estacionaria. La exactitud fue posible gracias al efecto Mössbauer descubierto recientemente, un fenómeno de absorción y emisión sin retroceso que se produce cuando el isótopo está integrado en un cristal adecuado.

En 1975, un grupo de investigación dirigido por Carroll Alley [Alley, 1983] de la Universidad de Maryland realizó una serie de experimentos con relojes atómicos en aeronaves diseñados específicamente para comprobar el corrimiento al rojo gravitatorio en tres altitudes diferentes y los resultados corroboran íntegramente la teoría. El efecto del potencial gravitatorio de la Tierra también se midió en 1971 en el marco del experimento mundial con relojes atómicos de Hafele-Keating.

El experimento más exacto del corrimiento al rojo hasta la fecha fue el realizado por Robert Vessot [Vessot and Levine, *et al.*, 1980] del Observatorio de Astrofísica de Smithsonian en 1976 utilizando un máser de hidrógeno a una altitud de 10 000 km mediante un cohete Scout D. El experimento consistía en mezclar una señal bidireccional transportada a través de la carga útil de comunicaciones del cohete con una señal unidireccional para obtener la variación de frecuencia relativista. El efecto gravitatorio se anula exactamente en el enlace ascendente y descendente, de modo que la señal transportada experimenta un doble desplazamiento Doppler, pero la señal unidireccional se ve afectada por los efectos Doppler y gravitatorio. Los resultados del experimento concordaron con la teoría en un 0,01%.

NOTA 1 – Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, la energía cinética de un fotón es $E = hf$, donde h es la constante de Planck. Cuando el fotón se eleva, pierde energía cinética y la frecuencia observada disminuye.

9.2.5 Transferencia de tiempo mediante el transporte de relojes

Para un reloj transportado, el intervalo espacio-tiempo es:

$$ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 + 2g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2 \quad (9-34)$$

El tiempo coordenado viene dado por el tiempo propio de un reloj en reposo situado en el infinito, dado que:

$$\text{si } dx^i = 0 \text{ y } -g_{00} = 1 \text{ entonces } dt = d\tau.$$

Se trata de una ecuación algebraica cuadrática para dt .

Así, el tiempo coordenado transcurrido durante el transporte de un reloj correspondiente al tiempo propio medido es:

$$\Delta t = \pm \int_{\text{path}} \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{1 + \frac{1}{c^2} \left(g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right) \frac{dx^i}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau}} d\tau + \frac{1}{c} \int_{\text{path}} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} \frac{dx^j}{d\tau} d\tau \quad (9-35)$$

Por tanto, al transferir el tiempo del punto A al punto B por medio de un reloj portátil intermediario, el tiempo coordenado transcurrido en primera aproximación es:

$$\Delta t = \int_A^B \left[1 - \frac{1}{2}(-g_{00} - 1) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} g_{ij} \frac{dx^i}{dt} \frac{dx^j}{dt} \right] d\tau + \frac{1}{c} \int_A^B g_{0j} \frac{dx^j}{dt} d\tau \quad (9-36)$$

El segundo término representa el efecto Sagnac del reloj transportado. En un sistema de referencia, $g_{0j} = 0$ y este término se anula.

9.2.6 Sistema de coordenadas inercial con origen en la Tierra

Mediante términos del orden $1/c^2$, las componentes del tensor métrico en el sistema de coordenada ECI son:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{y } g_{ij} = \delta_{ij}.$$

A este orden, el intervalo espacio-tiempo es:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2U}{c^2} \right) c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 \left(1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{1}{c^2} v^2 \right) dt^2 = -c^2 d\tau^2 \quad (9-37)$$

donde:

- U : el potencial gravitatorio en la posición del reloj
- v : la velocidad del reloj respecto del sistema de referencia inercial.

Por consiguiente, el tiempo coordenado transcurrido durante el movimiento del reloj es:

$$\Delta t = \int_A^B \left(1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau \quad (9-38)$$

Las correcciones en la integral son los efectos del corrimiento al rojo gravitatorio debido al potencial de la Tierra y la dilatación del tiempo debido a la velocidad del reloj. El tiempo coordenado t representado por esta expresión es el tiempo coordenado geocéntrico (TCG), que es la escala de tiempo coordenado geocéntrico realizado con respecto al sistema de coordenadas ECI cuya unidad es el segundo SI.

En el caso de un reloj en reposo en la posición \mathbf{R} sobre el geoide en rotación bajo un potencial gravitatorio U_0 y con una velocidad $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$ respecto del sistema de referencia ECI, el tiempo coordinado transcurrido es:

$$\Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} U_0 + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R})^2 \right\} d\tau = (1 + W_0/c^2) \Delta\tau \quad (9-39)$$

donde:

- W_0 : es el geopotencial en la superficie del geoide.

Dado que W_0 es una constante, mientras que el tiempo coordenado t es una coordenada global, los relojes en cualquier punto del geode tienen el mismo tiempo propio $\Delta\tau$. El tiempo coordinado puede ser igual al tiempo propio de un reloj sobre el geode aplicando el siguiente cambio de escala al tiempo coordinado:

$$\Delta t' \equiv \left(1 - W_0/c^2\right) \Delta t = \Delta\tau \quad (9-40)$$

Por consiguiente, el tiempo coordinado transcurrido, medido por el tiempo propio de un reloj de referencia situado en el geode, que corresponde al tiempo propio de un reloj bajo un potencial U con velocidad v respecto del sistema de coordenadas ECI es:

$$\Delta t' = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2}(U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right\} d\tau \quad (9-41)$$

Obsérvese que W_0 comprende el efecto de la rotación de la Tierra, pero U no. Esta ecuación puede utilizarse tanto para relojes cerca de la superficie de la Tierra como para relojes a bordo de satélites hasta la altitud de la órbita de los satélites geoestacionarios (35 786 km). El tiempo coordinado t' representado por esta expresión es TT, definido como la escala de tiempo coordinado determinada por relojes en el geode de rotación cuya unidad es el segundo.

Por consiguiente, $t' \equiv TT$ difiere de $t \equiv TCG$ en sólo una velocidad constante, es decir $dTT / dTCG = 1 - L_G$; siendo:

$$L_G \equiv W_0 / c^2 = 6,969\ 290\ 134 \times 10^{-10} \text{ (60,2 } \mu\text{s/d aproximadamente).}$$

TT es una forma ideal de TAI.

9.2.7 Sistema de coordenadas fijo con origen en la Tierra

Hasta términos del orden de $1/c^2$, las componentes del tensor métrico en el sistema de coordenadas fijo con origen en la Tierra (ECEF) son:

$$-g_{00} = 1 - 2 U / c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 = 1 - 2 W / c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c \quad \text{y} \quad g_{ij} = \delta_{ij}.$$

Hasta este orden, el intervalo espacio-tiempo es:

$$ds^2 = - \left[1 - 2 \frac{1}{c^2} U - \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 \right] c^2 dt^2 + 2 (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j dx^j c dt + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2 \quad (9-42)$$

Por tanto, el tiempo coordinado transcurrido:

$$\Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + U/c^2 + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' / c + \frac{1}{2} v'^2 / c^2 \right\} d\tau \quad (9-43)$$

siendo:

\mathbf{v}' : la velocidad del reloj respecto de la Tierra en rotación. Estos resultados también se obtienen a partir de la ecuación de Δt respecto del sistema inercial sustituyendo $\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$ en la misma aproximación.

Para que este tiempo coordinado corresponda al tiempo propio registrado por un reloj en el geode, basta multiplicar por el factor de cambio de escala $1 - W_0 / c^2$, obteniéndose:

$$\Delta t' = \left(1 - \frac{1}{c^2} W_0\right) \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} \left[U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0 \right] + \frac{1}{2} v'^2 \right\} d\tau + \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau \quad (9-44)$$

El término entre corchetes en la primera integral puede expresarse así:

$$U + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0 = W - W_0 = \Delta W = -g h \quad (9-45)$$

donde:

- W : el geopotencial a la altura h ;
- W_0 : el geopotencial en la superficie del geoide;
- g : la aceleración local de la gravedad.

Así, el tiempo coordenado es:

$$\Delta t' = \int_A^B \left(1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) d\tau + \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau \quad (9-46)$$

La segunda integral corresponde al efecto Sagnac para el reloj transportado. El efecto Sagnac es una propiedad cinemática intrínseca al marco de referencia en rotación. Este término puede expresarse así:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\omega A}{c^2} \quad (9-47)$$

siendo:

- A : la superficie que barre el vector de posición respecto al centro de la Tierra proyectado sobre el plano ecuatorial (positivo para el sentido hacia el este y negativo hacia el oeste).

El efecto Sagnac también puede expresarse como:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\omega R \cos \phi)(v' \cos \theta) d\tau \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda \quad (9-48)$$

donde:

- R : radio de la Tierra, ϕ la latitud;
- λ : longitud;
- $v' \cos \theta$: componente oriental de la velocidad. La punta θ , medida respecto al este, es el complemento del acimut Az , medido respecto al norte, de modo que $\cos \theta = \sin Az$.

La corrección Sagnac al tiempo coordenado transcurrido es positiva para un reloj que se desplaza hacia el este y negativa cuando se desplaza hacia el oeste; hacia el norte o hacia el sur, la corrección es cero.

Por consiguiente, al transferir tiempo desde el punto A al punto B mediante un reloj portátil, el tiempo coordenado es:

$$\Delta t' = \int_A^B \left(1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) d\tau + \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda \quad (9-49)$$

Según esta fórmula, hay que tomar en consideración tres efectos relativistas. Las correcciones en la primera integral son el corrimiento al rojo y la dilatación del tiempo. La corrección en la segunda integral es el efecto Sagnac. En general, el tiempo coordinado debe integrarse numéricamente en el trayecto especificado.

En el caso de un reloj que se transporta completamente alrededor del ecuador en el sentido hacia el este y vuelve al punto de partida, la corrección de Sagnac es 207,4 ns.

En el caso de un trayecto cerrado que forma una pequeña superficie S sobre la superficie de la Tierra:

$$A \approx S \sin \bar{\phi}, \text{ siendo } \bar{\phi} \text{ la latitud media desde el centro de } S.$$

Si el reloj se transporta de ida y vuelta entre dos puntos por el mismo trayecto, las correcciones de Sagnac se anulan y el efecto Sagnac neto es nulo.

Si el trayecto es un círculo grande, entonces $\cos \phi \cos \theta = \cos i$, que es una constante, donde i es la inclinación del plano circular grande respecto del ecuador.

La superficie proyectada es $A = \frac{1}{2} R^2 \gamma \cos i$, siendo γ el arco del círculo grande desde el punto 1 al punto 2 en el principio y fin del trayecto.

Así, la corrección de Sagnac es:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\omega A}{c^2} = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i \quad (9-50)$$

Recurriendo a la trigonometría esférica, γ viene dado por:

$$\cos \gamma = \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (9-51)$$

siendo:

ϕ y λ : la latitud y longitud de cada punto.

La inclinación del plano circular grande viene dada por:

$$\tan i = \begin{cases} \tan \phi_1 \csc \beta, & \beta \neq 0, \phi_1 \neq 0 \\ \tan \phi_2 \csc(\lambda_2 - \lambda_1), & \beta = \phi_1 = 0 \end{cases} \quad (9-52)$$

de modo que el punto 1 quede al oeste del punto 2. El ángulo β es la diferencia en longitud entre el punto de intersección del círculo grande con el ecuador y el punto 1 viene dado por:

$$\cot \beta = \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} \csc(\lambda_2 - \lambda_1) - \cot(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (9-53)$$

En cualquier punto del círculo grande, la latitud puede expresarse en función de la longitud así:

$$\tan \phi = \tan i \sin(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) \quad (9-54)$$

Utilizando esta expresión y la identidad $\cos^2 \phi = 1 / (1 + \tan^2 \phi)$, y teniendo en cuenta que $\tan(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) = \cos i \tan(\gamma + \psi)$ y $\tan \beta = \cos i \tan \psi$, siendo ψ el arco del círculo desde el punto de intersección con el ecuador hasta el punto 1, se llega a la siguiente expresión:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi \, d\lambda = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i \quad (9-55)$$

igual a la anterior.

A título de ejemplo, considérese una medición de la transferencia de tiempo entre el laboratorio nacional de física y el Observatorio Naval de EE.UU. mediante un reloj atómico transportado. Supóngase que el reloj se transporta en una aeronave por una ruta circular grande de Londres a Washington D.C. a una altitud media de 10 000 m y una velocidad media de 220 m/s con un tiempo de vuelo de aproximadamente 7,5 h. El intervalo de tiempo propio registrado por el reloj en vuelo es $\Delta \tau$ y el registrado por el reloj de referencia en el geoide es $\Delta \tau' = \Delta t'$. Así, la diferencia entre tiempos propios $\Delta \tau - \Delta \tau'$ (reloj en vuelo – reloj de referencia) es + 29 ns debido al corrimiento al rojo gravitatorio y -7 ns debido a la dilatación del tiempo. En caso de un vuelo hacia el oeste, el efecto Sagnac es + 18 ns. El reloj en vuelo marcaría un total de 40 ns más que el reloj de referencia.

Por otra parte, en el caso de un vuelo hacia el este desde Washington D.C. a Londres, el efecto Sagnac es de -18 ns y el reloj en vuelo ganaría sólo 4 ns en total. En el viaje de ida y vuelta, las correcciones de Sagnac se anulan si los trayectos de vuelo son idénticos y el resultado neto sería de $+44$ ns ($= 2 \times 29$ ns $- 2 \times 7$ ns), debido exclusivamente a los efectos del corrimiento al rojo gravitatorio y la dilatación del tiempo.

9.3 Reloj a bordo de un satélite

En el caso de un reloj a bordo de un satélite, el tiempo coordinado respecto al sistema de referencia ECI es:

$$\Delta t = \int_A^B \left(1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau \quad (9-56)$$

Si el satélite está en una órbita kepleriana sin perturbaciones, el potencial gravitatorio es:

$$U = \frac{GM}{r} \quad (9-57)$$

y la velocidad del satélite viene dada por la ley de conservación de la energía E (por unidad de masa):

$$E = \frac{1}{2} v^2 - U = \frac{1}{2} v^2 - \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{2a} \quad (9-58)$$

siendo:

a : el eje semimayor de la órbita.

Por consiguiente, el tiempo coordinado transcurrido es:

$$\Delta t = \int_{orbit} \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} + \frac{1}{c^2} \frac{2GM}{r} \right) d\tau = \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} \right) \Delta\tau + \frac{2GM}{c^2} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} d\tau \quad (9-59)$$

En una órbita kepleriana, la distancia radial es:

$$r = a (1 - e \cos E)$$

siendo:

e : la excentricidad de la órbita;

E : la anomalía de la excentricidad.

Por otra parte, la ecuación de Kepler:

$$M \equiv n (\tau - \tau_0) = E - e \sin E$$

siendo:

M : la anomalía media;

$n \equiv 2\pi/T = \sqrt{GM/a^3}$: el movimiento medio;

T : el periodo orbital;

τ_0 : el instante del perigeo.

Así, la integral es:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} d\tau = \frac{1}{na} E = \frac{1}{a} \Delta\tau + \sqrt{\frac{a}{GM}} e \sin E \quad (9-60)$$

donde:

$$\Delta\tau = \tau - \tau_0.$$

Por tanto:

$$\Delta t = \left(1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} \right) \Delta \tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E \quad (9-61)$$

Conviene aplicar un cambio de escala:

$$\Delta t' = \left(1 - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} (U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right\} d\tau \quad (9-62)$$

de modo que el tiempo coordenado corresponda al tiempo propio registrado por los relojes en el geode. Por consiguiente, un reloj en el geode se convierte en un reloj coordenado. Así, el tiempo coordenado es:

$$\Delta t' = \left(1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta \tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E \quad (9-63)$$

El primer término representa un desfase de la velocidad constante entre el reloj del satélite y el reloj en el geode. La corrección para el intervalo de tiempo propio del reloj del satélite es:

$$k \equiv 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 = \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{R} \left(1 + \frac{1}{2} J_2 \right) - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2 \quad (9-64)$$

El valor de k es cero para un eje semimayor de unos 9 545 km.

A esta distancia, los efectos del corrimiento al rojo gravitatorio y de la dilatación del tiempo se anulan. En el caso de una órbita más baja, la dilatación del tiempo es mayor y k es positivo, mientras que en una órbita más alta el corrimiento al rojo es mayor y k negativo.

El segundo término es una pequeña corrección periódica relativista debida a la excentricidad de la órbita y se puede aproximar por:

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (9-65)$$

siendo:

\mathbf{r} y \mathbf{v} : la posición y velocidad del satélite.

Dado que $\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$ es un escalar, podría calcularse en el sistema de coordenadas ECI o en el ECEF. Por consiguiente, el intervalo de tiempo coordenado puede expresarse en la forma:

$$\Delta t' = (1 + k) \Delta \tau + \Delta t_r .$$

El tiempo propio del reloj del satélite es:

$$\Delta \tau = (1 - k) \Delta t' + \Delta \tau_r$$

donde:

la corrección del tiempo propio es idéntica a la del tiempo coordenado, pero negativa $\Delta \tau_r \equiv - \Delta t_r$.

Ajustando la velocidad del reloj del satélite mediante $\Delta \tau' = (1 + k) \Delta \tau$, se puede lograr que el reloj del satélite tenga la misma velocidad media que el reloj en el geode. Por consiguiente, el tiempo propio es:

$$\Delta \tau' = \Delta t' + \Delta \tau_r .$$

Por consiguiente, aparte de una pequeña corrección periódica, el reloj del satélite también se convierte en un reloj coordenado.

En el caso de un satélite del GPS con un eje orbital semimayor de 26 562 km, el desfase de velocidad secular es:

$$k = -4,464\ 733 \times 10^{-10} = -38,575\ 293 \text{ } \mu\text{s/d.}$$

Así, el reloj de un satélite del GPS avanza unos 38 $\mu\text{s/día}$ más rápido que un reloj en el geoide, comprendidos los 45 $\mu\text{s/día}$ debido a la diferencia de potencial gravitatorio y 7 $\mu\text{s/día}$ más lento debido a la diferencia de velocidad.

Este efecto es considerable comparado con la precisión nominal del reloj de 10 ns en unas cuantas horas. Para compensar esta diferencia de velocidad, se añade al reloj del satélite del GPS un desfase fraccional de antes de su lanzamiento de $\Delta f/f = -4,464\ 733 \times 10^{-10}$, que equivale a un cambio en los 10,23 MHz de la velocidad del reloj de $\Delta f = -0,004\ 5674 \text{ Hz}$.

La frecuencia resultante es igual a 10 229 999,995 4326 Hz, de modo que, para un observador en el geoide, la frecuencia no varía. Si la máxima excentricidad de la órbita es 0,02, el término periódico $\Delta\tau_r$ tiene una amplitud de 46 ns para un periodo orbital de 11,967 horas. Esta corrección relativista se aplica en el receptor del usuario.

La diferencia de frecuencia se midió al principio en señales recibidas del satélite prototipo NTS-2 del GPS en 1977, y los resultados concuerdan con lo previsto por la relatividad general en un 0,7% [Buisson, *et al.*, 1977]. También se han observado saltos de frecuencia relativista durante las maniobras de reposicionamiento en órbita [Epstein, *et al.*, 2001]. La amplitud del término periódico puede ser considerable en el caso de una órbita muy elíptica. Por ejemplo, en la órbita Molniya de 12 horas cuya excentricidad es 0,722, la amplitud es de 1,7 μs .

Estas correcciones relativistas son suficientes para medir el tiempo con una precisión de nanosegundos. Si se requiere mayor precisión, el siguiente factor más importante es la contribución al corrimiento al rojo gravitatorio debido a los efectos del achatamiento J_2 de la Tierra en el potencial $U(r, \phi)$ antes indicado. El eje semimayor perturbado a y la distancia radial r son [Kozai, 1959]:

$$a = \bar{a} \left[1 + \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right] \quad (9-66)$$

y

$$r = \bar{a} \left[1 - e \cos E + \frac{1}{4} J_2 \left(\frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right] \quad (9-67)$$

siendo:

- \bar{a} : eje semimayor medio;
- e : excentricidad (se supone pequeña);
- E : anomalía de la excentricidad;
- i : inclinación;
- u : argumento de la latitud.

El eje semimayor perturbado a es por tanto una función periódica de u . La energía total E (que puede considerarse como definitoria de a) es:

$$E = \frac{1}{2} v^2 - U(r, \phi) = \left(\frac{GM}{r} - \frac{GM}{2a} \right) - U(r, \phi) = -\frac{GM}{2\bar{a}} \left[1 + J_2 \left(\frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \right] \quad (9-68)$$

y es una constante, como se requiere.

Por consiguiente, sustituyendo $\frac{1}{2} v^2$ y $U(r, \phi)$ en la expresión del tiempo coordenado transcurrido $\Delta t'$, y sabiendo que $\sin \phi = \sin i \sin u$ y que $u \approx n \Delta \tau$, donde $\Delta \tau$ es el tiempo propio desde el nodo ascendente medido por el reloj en el satélite, se obtiene (NIMA Technical Report, 1997):

$$\Delta t_{oblateness} = \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} J_2 \left(\frac{R}{a} \right)^2 \left[\left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \Delta \tau + \frac{\sin^2 i}{n} \sin(2n \Delta \tau) \right] \quad (9-69)$$

En el caso de una órbita GPS con una inclinación de 55° , el término periódico tiene una amplitud de 24 ps.

Según el *Principio de equivalencia*, los potenciales gravitatorios de la Luna y el Sol no afectan directamente al reloj a bordo de un satélite en órbita alrededor de la Tierra, dado que ésta constituye un sistema de coordenadas en caída libre para dichos potenciales.

Así, aparecen en la forma de efectos de la marea. El potencial de las mareas debido a un tercer cuerpo viene dado aproximadamente por la expresión:

$$U_{tidal} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_{ext}}{\partial x^i \partial x^j} x^i x^j \approx \frac{GM_{ext}}{r_E^3} (r_S - r_E)^2 \quad (9-70)$$

siendo:

r_S y r_E : las distancias del tercer cuerpo respecto del satélite y la Tierra, respectivamente.

$$r_S - r_E \approx r \cos i \sin(n \Delta \tau)$$

donde:

r : el radio de la órbita;

i : la inclinación orbital respecto al tercer cuerpo, que es variable.

Por tanto, la corrección del intervalo de tiempo coordenado es:

$$\Delta t_{tidal} \approx \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_{ext}}{r_E} \left(\frac{r}{r_E} \right)^2 \cos^2 i \left[\Delta \tau - \frac{1}{2n} \sin(2n \Delta \tau) \right] \quad (9-71)$$

Los efectos de la marea en un reloj GPS son reducidos. Aparte del factor de inclinación, para la Luna la velocidad de deriva secular es de 15 ps por revolución y la amplitud del término periódico es 1 ps. En el caso del Sol estos valores son 7 ps por revolución y 0,5 ps, respectivamente. Aunque la masa del Sol es 30 millones de veces la de la Luna, está 400 millones de veces más lejos. Dado que el potencial de la marea varía inversamente con el cubo de la distancia, el efecto de la marea debido al Sol es la mitad aproximadamente que el de la Luna.

9.4 Transferencia de tiempo mediante una señal electromagnética

En la relatividad especial, la ecuación de propagación de la luz en un sistema de referencia inercial es:

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = 0 \quad (9-72)$$

donde:

$\eta_{\mu\nu}$: la métrica de Minkowski.

El tiempo de propagación entre dos puntos A y B es sencillamente:

$$\Delta t_{AB} = \Delta t_{BA} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (9-73)$$

La prescripción de Einstein es un convenio en la relatividad especial utilizado para sincronizar relojes en un marco de referencia inercial mediante una señal electromagnética, como un impulso de luz o un impulso de

radar. Supóngase que se transmite una señal desde el punto A al punto B , y luego vuelve al receptor del punto A . Si los tiempos coordenados de transmisión, reflexión y recepción medidos por los relojes en A y B son respectivamente t_1 , t_2 y t_3 , por definición los relojes están sincronizados si $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$. Dado que $\Delta t_{AB} = t_2 - t_1$ y $\Delta t_{BA} = t_3 - t_2$, entonces:

$$t_2 \equiv \frac{1}{2} [(t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA})] = \frac{1}{2}(t_1 + t_3) \quad (9-74)$$

Así, el tiempo coordenado de reflexión t_2 se identifica con el punto medio en el tiempo entre t_1 y t_3 . El reloj A tiene asignado los tiempos propios $\tau_1 = t_1$ y $\tau_3 = t_3$, mientras que el tiempo propio del reloj B es $\tau_2 = t_2$. Con este método se puede crear una escala de tiempo coordenado dada por la lectura de una red distribuida en el espacio de relojes normalizados. Si el reloj A se sincroniza con el reloj B y el B con el reloj C , entonces el reloj A también estará sincronizado con el reloj C .

En la relatividad general, la ecuación de propagación de la luz es:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{ij} dx^i dx^j + 2g_{0j} dx^j c dt + g_{00} c^2 dt^2 = 0 \quad (9-75)$$

Se trata de una ecuación cuadrática del incremento de tiempo coordenado dt . Por tanto, el tiempo coordenado de propagación es:

$$\Delta t = \pm \frac{1}{c} \int_{path} \frac{1}{-g_{00}} \sqrt{(-g_{00} g_{ij} + g_{0i} g_{0j}) dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-76)$$

Las dos raíces corresponden a la propagación de la luz en las direcciones de ida y vuelta. Por consiguiente, si se define Δt_{AB} y Δt_{BA} como los tiempos de propagación en cada dirección (con límites de integración de A a B y de B a A , respectivamente), se obtiene:

$$\Delta t_{AB} = \frac{1}{c} \int_A^B \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}}\right) dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-77)$$

y

$$\Delta t_{BA} = -\frac{1}{c} \int_B^A \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}}\right) dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_B^A \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-78)$$

El primer término es el tiempo de propagación a lo largo del trayecto con un intervalo espacial $dp^2 \equiv \gamma_{ij} dx^i dx^j$, donde $\gamma_{ij} \equiv g_{ij} + g_{0i} g_{0j}/(-g_{00})$ es la métrica tridimensional. El segundo término es el efecto Sagnac.

Supóngase que se envía un impulso desde un reloj de referencia situado en el punto A en el instante t_1 , que luego se refleja en el reloj distante situado en el punto B en el instante t_2 , y lo recibe el reloj de referencia en el punto A en el instante t_3 . El tiempo coordenado de reflexión en el punto B es:

$$t_2 = \frac{1}{2} [(t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA})] = \frac{1}{2}(t_1 + t_3) + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-79)$$

En general, el tiempo coordenado de reflexión dependerá de las componentes métricas g_{0j} y $-g_{00}$ y en el trayecto de luz de A a B . Por consiguiente, cuando g_{0j} sea distinto de cero, no es posible sincronizar los relojes en el sentido de Einstein exclusivamente. Este caso correspondería a un sistema de referencia en rotación, en el que el segundo término corresponde al efecto Sagnac.

9.4.1 Sistema de coordenadas inercial con origen en la Tierra

En primera aproximación se puede despreciar el potencial gravitatorio. Así, en un sistema de coordenadas ECI la métrica es $-g_{00} \approx 1$, $g_{0j} = 0$, y $g_{ij} \approx \delta_{ij}$.

Integrando la ecuación $ds^2 = 0$ a lo largo del trayecto, se obtiene el tiempo de propagación de la señal:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{path} \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{\rho}{c} \quad (9-80)$$

siendo:

ρ : la longitud del trayecto de propagación en el sistema ECI.

Se trata sencillamente del tiempo de propagación no relativista a lo largo del trayecto para un intervalo espacial euclídeo $d\rho^2 \approx \delta_{ij} dx^i dx^j$.

Si se transmite una señal desde un satélite en el instante coordenado t_T a un receptor en movimiento en el instante coordenado t_R , el tiempo coordenado transcurrido a lo largo de la longitud del trayecto en el sistema ECI es:

$$\Delta t = \frac{\rho}{c} = \frac{1}{c} |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| = \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r} + \mathbf{v}_R (t_R - t_T)| \approx \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r}| + \frac{1}{c^2} \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R \quad (9-81)$$

siendo:

$\Delta \mathbf{r} \equiv \mathbf{r}_R(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$: la diferencia entre la posición del receptor y el satélite en el tiempo coordenado de transmisión t_T y \mathbf{v}_R la velocidad del receptor en el sistema ECI.

Así, la corrección del tiempo coordenado debido a la velocidad del receptor es:

$$\Delta t_v \approx \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R / c^2 \quad (9-82)$$

Si la posición del receptor es \mathbf{R} y su velocidad relativa al geoide de rotación \mathbf{v}'_R , $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$ y $\mathbf{v}_R = \mathbf{v}'_R + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$.

Por tanto, la corrección de velocidad del receptor es la suma de ambos términos:

$$\Delta t_v = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + \boldsymbol{\omega} \cdot [\mathbf{r}_T(t_T) \times \mathbf{R}(t_T)] / c^2 = |\Delta \mathbf{r}| v'_R \cos \theta / c^2 + 2\omega A / c^2 \quad (9-83)$$

donde:

$|\Delta \mathbf{r}|$: la distancia;

θ : el ángulo entre la velocidad del receptor y la línea que une el satélite y el receptor; A es la superficie del triángulo cuyos vértices son el satélite, el receptor y el centro de la Tierra proyectado en el plano ecuatorial en el tiempo coordenado de transmisión t_T .

En el sistema de referencia en rotación de la Tierra, el primer término es la variación de la distancia, o desplazamiento Doppler integrado, mientras que el segundo término es el efecto Sagnac.

El tiempo de propagación Δt es el tiempo medido por un reloj normalizado en reposo situado en el infinito. A fin de determinar el tiempo de propagación respecto de un reloj en la superficie de la Tierra, debe incluirse el efecto del geopotencial. Por tanto, aplicando un cambio de escala $\Delta t' = (1 - W_0 / c^2) \Delta t$, el tiempo de propagación resulta

$$\Delta t' = (1 - W_0 / c^2) \rho / c.$$

Para un satélite GPS, el tiempo de propagación máximo de la señal es de 86 ms y la corrección de -60 ps.

A fin de considerar el efecto del potencial gravitatorio U sobre la señal de luz, es necesario incluir el potencial tanto en la parte espacial como temporal de la métrica. Las componentes del tensor métrico son:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{y } g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij}.$$

Por tanto, mediante la ecuación $ds^2 = 0$, el tiempo coordenado de propagación, medido por un reloj situado en el infinito es:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{path} \sqrt{\frac{g_{ij}}{-g_{00}}} dx^i dx^j \approx \frac{1}{c} \int_{path} (1 + 2U/c^2) \sqrt{\delta_{ij}} dx^i dx^j = \frac{\rho}{c} + \frac{2}{c^3} \int_{path} U d\rho \quad (9-84)$$

donde:

$$U = GM/r : \text{ es el potencial gravitatorio.}$$

El primer término es el tiempo de propagación euclídeo y el segundo es el retardo gravitatorio Δt_{delay} . En el caso de un trayecto rectilíneo en la dirección radial, se obtiene:

$$\Delta t_{delay} = \frac{2}{c^3} \int_R^r \frac{GM}{r} dr = \frac{2GM}{c^3} \ln \frac{r}{R} \quad (9-85)$$

No obstante, en general la distancia ρ , el ángulo de elevación θ y la distancia radial r están relacionados por la ley de los cosenos: $r^2 = R^2 + \rho^2 + 2R\rho \sin \theta$.

La distancia puede expresarse en función del ángulo de elevación:

$$\rho = \sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} - R \sin \theta$$

Por tanto, el retardo gravitatorio es:

$$\Delta t_{delay} = \frac{2}{c^3} \int_0^\rho \frac{GM}{\sqrt{R^2 + \rho^2 + 2R\rho \sin \theta}} d\rho = \frac{2GM}{c^3} \ln \left[\frac{r + \sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2}}{R(1 + \sin \theta)} \right] \quad (9-86)$$

Puede obtenerse una fórmula alternativa en la que las distancias r , R y ρ sean simétricas. Dado que $\sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} = \rho + R \sin \theta$ y $R \sin \theta = (r^2 - R^2 - \rho^2) / 2\rho$, el argumento del logaritmo es:

$$\frac{2r\rho + \rho^2 + r^2 - R^2}{2R\rho + r^2 - R^2 - \rho^2} = \frac{(r+\rho)^2 - R^2}{r^2 - (\rho - R)^2} = \frac{(r+\rho+R)(r+\rho-R)}{(r+\rho-R)(r-\rho+R)} = \frac{R+r+\rho}{R+r-\rho} \quad (9-87)$$

Por tanto, el retardo gravitatorio respecto de un reloj en el infinito puede expresarse así:

$$\Delta t_{delay} = \frac{2GM}{c^3} \ln \left(\frac{R+r+\rho}{R+r-\rho} \right) \quad (9-88)$$

Cuando $\rho = r - R$, esta ecuación se reduce al retardo de un trayecto rectilíneo.

La corrección relativista total respecto a un reloj en el geoide es, por ende:

$$\Delta t'_{delay} = -\frac{W_0 \rho}{c^3} + \frac{2GM}{c^3} \ln \left(\frac{R+r+\rho}{R+r-\rho} \right) \quad (9-89)$$

El primer término es la contribución del geopotencial debida al cambio de escala y el segundo el retardo gravitatorio. Estos términos tienden a anularse en las proximidades de la Tierra.

El retardo gravitatorio predicho fue verificado por Irwin Shapiro [Shapiro, 1980] en 1967 y 1971 utilizando la determinación por radar de la distancia a los planetas Mercurio y Venus. Los retardos de ida y vuelta en conjunción superior son aproximadamente 240 μ s y 180 μ s, respectivamente. La determinación de distancia más precisa al aterrizador Viking en Marte en conjunción superior tiene un retardo gravitatorio de aproximadamente 250 μ s.

En el caso de un satélite GPS con radio orbital 26 562 km y ángulo de elevación de 40°, el retardo relativista en el trayecto es de 48 ps respecto a un reloj en el infinito y -3 ps respecto a un reloj en el geoide. Para un satélite LAGEOS, con un radio orbital de 12 270 km, el retardo máximo es de 38 ps respecto a un reloj en el infinito y 14 ps respecto a un reloj en el geoide. En el caso de una señal transmitida desde el ecuador hasta un satélite geoestacionario con radio orbital de 42 164 km, la corrección es de 56 ps respecto de un reloj en el infinito y -27 ps respecto a un reloj en el geoide.

9.4.2 Sistema de coordenadas fijo con origen en la Tierra

En el Sistema de coordenadas ECEF en rotación, el tiempo coordinado de propagación de una señal electromagnética es:

$$\Delta t = \frac{\rho'}{c} + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^i \quad (9-90)$$

donde:

ρ' : es la longitud del trayecto de propagación en el sistema ECEF.

Si el receptor tiene una velocidad \mathbf{v}'_R , entonces $\rho' = |\mathbf{R}(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| \approx |\Delta \mathbf{r}| + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c$ y hay una corrección de la variación de la distancia $\Delta t_{v'} = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2$, donde $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$.

El término con la integral en la ecuación de Δt es el efecto Sagnac.

Las componentes de la métrica son:

$$-g_{00} \approx 1, g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c, \text{ y } g_{ij} \approx \delta_{ij}$$

Por tanto, el efecto Sagnac es:

$$\Delta t_{Sagnac} \approx \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{A}}{c^2} \quad (9-91)$$

siendo:

A: la proyección perpendicular de la superficie formada por el centro de rotación y los puntos extremos del trayecto de luz.

El trayecto, visto desde el sistema de coordenadas en rotación es aproximadamente una línea recta. Para los puntos extremo (x_A, y_A) y (x_B, y_B) , el efecto Sagnac puede expresarse así:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{A}}{c^2} = \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r}_A \times \mathbf{r}_B) = \frac{\omega}{c^2} (x_A y_B - y_A x_B) \quad (9-92)$$

En el caso de un receptor en reposo sobre la Tierra, el observador en el marco ECEF considera que el receptor está estacionario y aplica una corrección Sagnac, mientras que el observador en el sistema ECI considera que el receptor se ha movido debido a la rotación de la Tierra y en su lugar aplica una corrección de velocidad. El tiempo de propagación total es:

$$\Delta t = |\Delta \mathbf{r}| / c + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + 2 \omega A / c^2 = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| / c$$

NOTA 1 – El término «efecto Sagnac» forma parte del vocabulario del observador en el sistema de referencia en rotación solamente. La correspondiente corrección aplicada por el observador inercial debería denominarse una «corrección de velocidad».

Como se especifica en la documentación GPS [Navstar GPS, 2000], la corrección del tiempo de propagación total para una señal GPS se aplica en el receptor del usuario. El máximo efecto Sagnac es de 133 ns, que se produce cuando el receptor está en el ecuador y el satélite en el horizonte. Desde el punto de vista de un observador inercial, esta corrección se debe al movimiento del receptor con una velocidad de 465 m/s respecto al sistema de referencia ECI durante los 86 ms del tiempo de propagación de la señal. Ha quedado demostrada la coherencia de esta corrección mediante la comparación de medidas GPS simultáneas de vista común entre pares de centros de cronometría distribuidos por el mundo [Allen *et al.*, 1985].

El efecto Sagnac también se ha de tener en cuenta para la transferencia de tiempo mediante una señal electromagnética a través de un satélite geostacionario. Esta propiedad se ha confirmado habitualmente comparando la sincronización mediante el transporte de relojes [Saburi, 1976]. Suponiendo que la Tierra es una esfera de radio R y que la órbita del satélite es perfectamente circular con radio r en el plano ecuatorial, las coordenadas de una estación terrena con latitud ϕ_E y longitud este λ_E son:

$$x_E = R \cos \phi_E \cos \lambda_E \text{ e } y_E = R \cos \phi_E \sin \lambda_E$$

siendo:

$$R = 6\,371 \text{ km el radio medio de la Tierra.}$$

Las coordenadas del satélite son:

$$x_S = r \cos \lambda_S \text{ e } y_S = r \sin \lambda_S$$

siendo:

$$r = 42\,164 \text{ km el radio de la órbita geostacionaria.}$$

Así, para un trayecto de señal ascendente en el sentido hacia el este desde la estación A en la Tierra hasta el satélite:

$$\Delta t_1 = \frac{\omega}{c^2} (x_{EA} y_S - y_{EA} x_S) = \frac{\omega}{c^2} R r \cos \phi_{EA} \sin(\lambda_S - \lambda_{EA}) \quad (9-93)$$

Análogamente, en el caso de una señal descendente en el sentido hacia el este desde el satélite hasta la estación B en tierra:

$$\Delta t_2 = \frac{\omega}{c^2} (x_S y_{EB} - y_S x_{EB}) = \frac{\omega}{c^2} R r \cos \phi_{EB} \sin(\lambda_{EB} - \lambda_S) \quad (9-94)$$

La corrección de Sagnac total es la suma de estos dos términos, $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$. Para un trayecto de señal en el sentido hacia el oeste, la corrección tiene la misma magnitud pero signo opuesto.

Por ejemplo, considérese una medición de transferencia de tiempo por satélite bidireccional (TWSTT) realizada por el National Institute of Standards and Technology en Boulder, Colorado (latitud $40,0^\circ$, longitud $105,3^\circ$ W) al Observatorio Naval de EE.UU. en Washington D.C. (latitud $38,9^\circ$, longitud $77,1^\circ$ W) mediante un satélite geostacionario en $97,0^\circ$ W. Las correcciones de Sagnac son $24,1$ ns para el enlace ascendente y $57,7$ ns para el descendente y la corrección total es de $81,8$ ns. En el caso de un trayecto de señal en el sentido contrario, la corrección es de $-81,8$ ns.

Sin embargo, en la práctica, la Tierra no es una esfera perfecta. Además, la órbita del satélite acusa perturbaciones, de modo que no es perfectamente circular ni se encuentra exactamente en el plano ecuatorial. El error en la corrección de Sagnac es de 0,1 ns para un error de 300 m en la posición de la estación en la Tierra, un error de 1° en la longitud del satélite, o un error de 0,2° en la latitud del satélite. Para realizar cálculos más precisos, es necesario calcular las coordenadas de la estación en la Tierra y del satélite teniendo en cuenta la forma de la Tierra y los elementos orbitales del satélite.

9.4.3 Enlace entre satélites

El análisis de las señales electromagnéticas utilizadas en la determinación de la distancia entre enlaces, la transferencia de tiempo entre satélites y estaciones en tierra, y la interoperatividad entre constelaciones de satélites implica tres pasos:

- 1 una transformación relativista desde el tiempo propio del reloj en el transmisor al tiempo coordinado de transmisión en el sistema de coordenadas adoptado;
- 2 el cálculo del tiempo coordinado de propagación de la señal, comprendidos los efectos relativistas y no relativistas;
- 3 una transformación relativista del tiempo coordinado de recepción en el sistema de coordenadas adoptado al tiempo propio del reloj en el receptor.

Además, todos los tiempos propios deben corregirse para los efectos del «hardware», como el ruido de procesamiento y el entorno del reloj.

Considérese la transferencia de tiempo relativista entre los relojes atómicos *A* y *B* a bordo de dos satélites por medio de un enlace entre satélites. Supóngase que el tiempo propio τ de cada reloj se ha ajustado con la fórmula $\Delta\tau' = (1 + k) \Delta\tau$, de modo que el tiempo propio resultante τ' es en promedio igual al tiempo coordinado t' realizado por los relojes atómicos en el geoide. Si la posición y velocidad de cada reloj son \mathbf{r} y \mathbf{v} en un sistema de coordenadas ECI, entonces $\Delta\tau' = \Delta t' + \Delta t_r$, donde la corrección relativista viene dada por:

$$\Delta t_r = -2 \frac{1}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = -\frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (9-95)$$

Así, el tiempo propio del reloj *A* en el tiempo coordinado de transmisión es:

$$\tau'_T = t'_T - 2 \mathbf{r}_T \cdot \mathbf{v}_T / c^2$$

y el tiempo propio del reloj *B* en el tiempo coordinado de recepción es:

$$\tau'_R = t'_R - 2 \mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R / c^2 + \Delta\tau_R$$

siendo:

$\Delta\tau_R$: el incremento de sincronización del reloj *B* respecto del reloj *A*.

El tiempo coordinado de propagación de la señal, medido por un reloj en el infinito es:

$$t_R - t_T = \frac{\rho}{c} + \Delta t_{delay} \quad (9-96)$$

donde:

ρ : la distancia del trayecto desde el primer satélite en el instante de transmisión hasta el segundo satélite en el momento de recepción;

Δt_{delay} : el retardo gravitatorio.

La distancia del trayecto es:

$$\rho = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| = |\Delta\mathbf{r} + \mathbf{v}_R (t_R - t_T)| \approx |\Delta\mathbf{r}| + \frac{1}{c} \Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R \quad (9-97)$$

siendo:

$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T$: la separación de los dos satélites en el tiempo coordinado de transmisión.

El retardo gravitatorio es:

$$\Delta t_{delay} = \frac{2GM}{c^3} \ln \left(\frac{r_T + r_R + \rho}{r_T + r_R - \rho} \right) \quad (9-98)$$

El tiempo coordinado de propagación de la señal, medido por los relojes en el geoide, es:

$$t'_R - t'_T = (1 - W_0/c^2)(t_R - t_T)$$

Por consiguiente, la diferencia de tiempos propios es:

$$\tau'_R - \tau'_T = \Delta \tau_R + \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{c} + \frac{\Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} - \frac{2 \mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} + \frac{2 \mathbf{r}_T \cdot \mathbf{v}_T}{c^2} - \frac{W_0 |\Delta \mathbf{r}|}{c^3} + \frac{2GM}{c^3} \ln \left(\frac{r_T + r_R + \rho}{r_T + r_R - \rho} \right) \quad (9-99)$$

Las lecturas reales de los relojes son tiempos propios «hardware» afectados por el ruido y el entorno. También pudiera haber un retardo no relativista en el trayecto debido a la atmósfera residual.

9.4.4 Efecto Doppler relativista

Considérese un transmisor en la posición \mathbf{r}_T y la velocidad \mathbf{v}_T que transmite una señal electromagnética en el tiempo coordinado t_T y una estación en la Tierra con posición \mathbf{r}_R y velocidad \mathbf{v}_R que recibe la señal en el tiempo coordinado t_R respecto al sistema de coordenadas ECI. La relación de la frecuencia propia f_T de la señal transmitida respecto la frecuencia propia f_R de la señal recibida es inversamente proporcional a la relación de los periodos propios.

Por tanto:

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{d\tau_T}{d\tau_R} \quad (9-100)$$

Esta expresión puede escribirse en función de los incrementos del tiempo coordinado:

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{(dt_R/d\tau_R) dt_T}{(dt_T/d\tau_T) dt_R} \quad (9-101)$$

La distancia del transmisor al receptor es:

$$\boldsymbol{\rho} \equiv \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)$$

La diferencia en los tiempos coordinados de recepción y transmisión es:

$$t_R - t_T = \rho / c = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| / c$$

Diferenciando ambos lados respecto de t_R , se obtiene:

$$1 - \frac{dt_T}{dt_R} = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t_R} + \frac{\partial \rho}{\partial t_T} \frac{dt_T}{dt_R} \right) = \frac{1}{c} \left(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \frac{dt_T}{dt_R} \right) \quad (9-102)$$

donde la unidad normal en la dirección de propagación del transmisor al receptor es:

$$\mathbf{n} \equiv \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\rho} = \frac{\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T}{|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T|} \quad (9-103)$$

Por consiguiente:

$$\frac{dt_T}{dt_R} = \frac{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R / c}{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T / c} \quad (9-104)$$

Para medidas analizadas en el marco de referencia ECI con un potencial gravitatorio U , las componentes del tensor métrico son:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{y } g_{ij} = \delta_{ij}$$

y el intervalo espacio tiempo es:

$$ds^2 = -c^2 (1 - 2U/c^2 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2.$$

Por consiguiente:

$$\frac{dt_R}{d\tau_R} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \quad (9-105)$$

y

$$\frac{dt_T}{d\tau_T} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_T/c^2 - v_T^2/c^2}} \quad (9-106)$$

Así

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{\sqrt{1 - 2U_T/c^2 - v_T^2/c^2}}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \frac{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R / c)}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T / c)} \quad (9-107)$$

Esta es la ecuación del efecto Doppler relativista. El primer factor es la corrección relativista y el segundo es el efecto Doppler clásico. Expandiendo los términos hasta el orden v^2/c^2 , se obtiene:

$$\frac{\Delta f}{f_T} = \frac{1}{c} \left(1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \right) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_T - \mathbf{v}_R)] + \frac{1}{c^2} (U_R - U_T) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_R^2 - v_T^2) \quad (9-108)$$

donde:

$$\Delta f \equiv f_R - f_T$$

Se debe tomar nota de dos propiedades de esta ecuación. En primer lugar, hay el término del orden v^2/c^2 de origen no relativista. En segundo lugar, no hay términos mixtos del tipo $\mathbf{v}_T \cdot \mathbf{v}_R / c^2$.

Un caso de interés especial es cuando el transmisor está a bordo del satélite y el receptor en la Tierra en rotación. La velocidad del satélite respecto del sistema ECI viene dada por la ecuación de conservación de la energía orbital y la coordenada radial:

$$r = a (1 - e^2) / (1 + e \cos \nu)$$

siendo:

a y e el eje semimayor orbital y la excentricidad, y

ν la anomalía real.

Así, la velocidad del receptor en la latitud ϕ_R es:

$$v_R = \omega R \cos \phi_R.$$

El potencial gravitatorio en el transmisor del satélite es: $U_T = GM / r$ y en el receptor de la estación es:

$$U_R = GM / R.$$

Por tanto, despreciando los términos del orden de e^2 :

$$\frac{\Delta f}{f_T} = \frac{1}{c} \left(1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \right) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_T - \mathbf{v}_R)] + \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{R} - \frac{3}{2a} \right) - \frac{2GM}{c^2 a} e \cos v + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2 \cos^2 \phi_R \quad (9-109)$$

El primer término es el desplazamiento Doppler clásico. El segundo es la parte secular de los efectos combinados de la dilatación del tiempo y el corrimiento al rojo. El tercer término es un efecto periódico relativista residual. Este efecto fue demostrado por vez primera por R. E. Jenkins [Jenkins, 1969] en 1969. El cuarto término se debe a la velocidad de la estación en tierra. En el caso de un satélite del GPS en órbita de excentricidad 0,02, la amplitud del efecto periódico es $6,7 \times 10^{-12}$. Esto implica que la frecuencia portadora L1 del GPS 1,57542 GHz experimentará una modulación debida a la relatividad de amplitud 0,011 Hz y periodo igual al periodo orbital del satélite de 11,967 h.

9.5 Conclusión

La teoría general de la relatividad sienta las bases de los conceptos modernos de espacio, tiempo y gravedad. En las últimas cuatro décadas se ha confirmado en muy diversos experimentos muchas y variadas predicciones. La relatividad se ha convertido en una consideración práctica importante para sistemas de cronometría de precisión en ingeniería, física y astronomía.

Los tres principales efectos son la dilatación del tiempo, el corrimiento al rojo gravitatorio y el efecto Sagnac. Un ejemplo de sistema en el que estos efectos son importantes es el sistema global de determinación de la posición. El efecto combinado de la dilatación del tiempo y el corrimiento al rojo producen un incremento de la frecuencia secular de 38 μ s por día y una variación periódica residual de hasta 46 ns de amplitud, mientras que el efecto Sagnac suele ser del orden de 100 ns. El GPS ha servido de laboratorio para medir el tiempo relativista a nivel de nanosegundos de uno a diez. La correcta aplicación de la relatividad a la medición de la posición y el tiempo GPS ha quedado demostrada por la precisión del sistema en la práctica y por numerosos experimentos diseñados para probar estos efectos por separado en muy diversas condiciones. Para medir el tiempo con relojes en el espacio con una precisión de picosegundos, es preciso tomar en consideración otros efectos, en particular el corrimiento al rojo debido al achatamiento de la Tierra, los potenciales de la marea del Sol y la Luna, así como el efecto de la gravedad sobre la velocidad de propagación de la luz.

Además del interés teórico y científico, las correcciones que impone la relatividad general son necesarias para medir y divulgar el tiempo de manera coherente y con exactitud mediante relojes atómicos terrestres y a bordo de vehículos espaciales.

Referencias

- ALLEY, C.O. [1983] Proper Time Experiments in Gravitational Fields With Atomic Clocks, Aircraft, and Laser Light Pulses. Quantum Optics, Experimental Gravitation, and Measurement Theory, edited by P. Meystre and M. O. Scully, Plenum, New York, p. 363-427.
- ALLEN, D. W., WEISS, M. A. and ASHBY, N. [1985] Around-the-World Relativistic Sagnac Experiment. *Science* **228**, p. 69-70.
- ASHBY, N. [2001] Relativistic Effects on SV Clocks Due to Orbit Changes, and Due to Earth's Oblateness. Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 509-524.
- BUISSON, J. A., EASTON, R. L. and MCCASKILL, T. B. [1977] Initial Results of the Navstar GPS NTS-2 Satellite. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 177-200.
- DEPARTMENT of DEFENSE WGS 84 [1997] NIMA Tech. Rep.TR8350.2, 3rd edition. National Imagery and Mapping Agency, Bethesda, MD.

- EPSTEIN, M., STOLL, E. and FINE, J. [2001] Observable Relativistic Frequency Steps Induced by GPS Orbit Changes. Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 493-508.
- FRISCH, D. H. and SMITH, J. H. [1963] Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons. *Am. J. Phys.* **31**, p. 342-355.
- HAFELE, J. C. and KEATING, R. E. [1972] Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains; Observed Relativistic Time Gains. *Science* **177**, p. 166-170.
- HEISKANEN, W. A. and MORITZ, H. [1967] Physical Geodesy. Freeman, San Francisco, p. 70.
- JENKINS, R. E. [1969] A Satellite Observation of the Relativistic Doppler Shift. *Astron. J.* **74**, p. 960-963.
- KOZAI, Y. [1959] The Motion of a Close Earth Satellite. *Astron. J.* **64**, p. 367-377.
- NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, ICD-GPS-200C-004 [2000] Arinc Research Corporation, El Segundo, CA.
- POUND, R. V. and REBKA, Jr .G. A. [1960] Apparent Weight of Photons. *Phys. Rev. Lett.* **4**, 337-341.
- SABURI, Y. [1976] Observed Time Discontinuity of Clock Synchronization in Rotating Frame of the Earth. *J. Radio Research Laboratories* **23**, p. 255-265.
- SHAPIRO, I. I. [1980] Experimental Tests of General Relativity, in *General Relativity and Gravitation*, edited by A. Held, Plenum, New York, , Vol. II, p. 469-489.
- VESSOT, R. F. C. and LEVINE, M. W. *et al.* [1980] Tests of Relativistic Gravitation With a Space-Borne Hydrogen Maser. *Phys. Rev. Lett.* **45**, p. 2081-2084.

CAPÍTULO 10

ORIENTACIÓN DE LA TIERRA Y SISTEMA GEODÉSICO

	<i>Página</i>
10.1 Introducción.....	128
10.2 Orientación de la Tierra.....	128
10.2.1 Precesión/nutación.....	129
10.2.2 Movimiento polar.....	130
10.3 Tiempo universal (UT).....	131
10.4 Sistemas geodésicos.....	131
10.5 Superficies de referencia.....	132
10.5.1 Geoide.....	132
10.5.2 Elipsoide.....	132
10.5.3 Tipos de coordenadas.....	132
Referencias.....	135

10.1 Introducción

Los sistemas de referencia constan de:

- 1 un origen determinado;
- 2 las direcciones de los ejes fundamentales;
- 3 una serie de procedimientos y modelos convencionales utilizados para realizar el sistema.

Así, un marco de referencia es, por tanto, la realización de dicho sistema mediante una lista de coordenadas concretas de los elementos que lo definen. Por orientación de la Tierra se entiende los procedimientos y modelos utilizados para relacionar un sistema de coordenadas geodésico terrestre con un sistema celeste.

Los detalles se describen con rigor en los convenios del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) disponible en: <http://www.iers.org/iers/products/conv/>.

Los astrónomos son quienes especifican los sistemas de referencia celestes. Los sistemas más modernos suelen tener su origen en el baricentro del sistema solar y sus ejes polares guardan relación con los ejes de la Tierra. Así, el tercer eje reside en el plano ecuatorial perpendicular al eje polar y dirigido hacia el punto fiduciario en ese plano. La lista de puntos y posibles movimientos de los objetos astronómicos comprende los correspondientes marcos de referencia celestes. La Unión Astronómica Internacional ha designado un sistema y un marco de referencia celestes normalizados, denominados respectivamente Sistema Internacional de Referencia Celeste (ICRS) y Marco Internacional de Referencia Celeste (ICRF). El ICRF está constituido por posiciones designadas de fuentes radioeléctricas distantes.

Análogamente, los sistemas de referencia terrestres tienen su origen generalmente en el centro de masa de la Tierra, con los ejes polares en las direcciones de un eje fijo respecto de la corteza terrestre. El origen de las longitudes en el plano ecuatorial constituye la tercera dirección. Al igual que en los marcos celestes, los marcos terrestres constan de una lista de coordenadas y posibles movimientos. Los sistemas normalizados a escala internacional son el Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS) y el Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF), administrados por el IERS.

10.2 Orientación de la Tierra

La orientación de la Tierra se especifica mediante cinco ángulos. Normalmente bastaría con tres, pero se emplean cinco para describir los procesos físicos que intervienen y facilitar la aplicación de las transformaciones.

Se utilizan dos ángulos para modelizar el cambio de dirección del eje de la Tierra en un sistema celeste convencional. Este eje se denomina Polo Intermedio Celeste (CIP) y su movimiento se debe a la precesión y nutación de la Tierra. Estos fenómenos son causados por la atracción gravitatoria que ejercen sobre la Tierra no esférica los cuerpos del sistema solar, principalmente el sol y la luna. La precesión es la parte aperiódica del movimiento, mientras que la nutación es la parte periódica. Ambos movimientos dependen de las posiciones de los cuerpos del sistema solar y de la estructura interna de la Tierra, pero se pueden modelizar matemáticamente con precisión razonable.

Se utilizan otros dos ángulos para describir el movimiento del CIP sobre la corteza de la Tierra. Este movimiento se denomina «movimiento polar» y depende de las variaciones geofísicas de la Tierra y las meteorológicas de su atmósfera. Los principales componentes son una deriva lineal y dos movimientos periódicos de 365 y 435 días. El movimiento polar es difícil de modelizar porque resulta difícil predecir las fuerzas que lo generan. Por tanto, estos ángulos deben obtenerse mediante observaciones astronómicas y notificarse periódicamente a los usuarios.

El CIP es un polo definido por convenio que separa el movimiento del polo del sistema de referencia terrestre (TRS) en el sistema de referencia celeste (CRS) en un movimiento celeste del CIP (precesión/nutación), en particular todos los términos con periodos mayores que 2 días en el CRS (frecuencias entre -0,5 ciclos por día sideral (cpsd) ((en la comunidad T+F – y la UIT la utilización de valores de frecuencia negativos es poco convencional y debería explicarse)) y +0,5 cpsd), y el movimiento terrestre del CIP (movimiento polar), en particular todos los términos fuera de la banda diurna de regresión en el TRS (frecuencias inferiores a -1,5 cpsd o mayores que -0,5 cpsd).

El último de los cinco ángulos caracteriza el ángulo de rotación de la Tierra y se expresa en la forma de diferencia de tiempos [UT1 - UTC], donde UT1 es un tiempo astronómico determinado por observaciones de fuentes radioeléctricas distantes y UTC es la escala de tiempo uniforme, el tiempo universal coordinado. Las principales variaciones en la velocidad de rotación de la Tierra son una desaceleración constante debida a la desaceleración de la marea y la desglaciación, las variaciones decenales debidas a los cambios en la estructura interna de la masa de la Tierra, las variaciones debidas a grandes cambios meteorológicos y estacionales y las variaciones periódicas causadas por la marea. En cuanto al movimiento polar, la diferencia UT1 - UTC resulta difícil de modelar y predecir, por lo que debe obtenerse mediante observaciones astronómicas y notificarse periódicamente a los usuarios.

En la Resolución B1.8, adoptada por la XXIV Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional el mes de agosto de 2000, se recomienda utilizar el «origen sin rotación» [Guinot, 1979] tanto en el sistema de referencia celeste geocéntrico (GCRS) como en el ITRS y que estos orígenes se designen como origen efemérides celeste (CEO) y origen efemérides terrestre (TEO). El *ángulo de rotación de la Tierra* se define como el ángulo medido a lo largo del ecuador del CIP que forman el CEO y el TEO. En esta Resolución se recomienda además que el UT1 sea linealmente proporcional al ángulo de rotación de la Tierra y que la transformación entre el ITRS y el GCRS se especifique mediante la posición del CIP en el GCRS, la posición del CIP en el ITRS, y el ángulo de rotación de la Tierra.

Esta transformación de TRS a CRS en la época t se puede expresar matemáticamente así:

$$[CRS(t)] = Q(t) R(t) W(t) [TRS(t)] \quad (10-1)$$

siendo $Q(t)$, $R(t)$ y $W(t)$ las matrices de transformación que describen el movimiento del polo celeste en el sistema celeste (precesión/nutación), la rotación de la Tierra alrededor del eje polar, y el movimiento polar, respectivamente. El parámetro t , utilizado en esta expresión y en las siguientes, se define mediante:

$$t = [TT - 2000 \text{ January } 1, 12\text{h TT} - \text{in days}] / 36525 \quad (10-2)$$

Obsérvese que enero de 2000 1,5 TT = fecha juliana 2451545,0 TT.

En los cálculos siguientes de las matrices de rotación que se han de utilizar en las transformaciones, se utilizan la notación R_1 , R_2 y R_3 para indicar las rotaciones alrededor de los ejes x, y, z del sistema de referencia, respectivamente. Es decir:

$$R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10-3)$$

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10-4)$$

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10-5)$$

10.2.1 Precesión/nutación

Las fuerzas gravitatorias que ejercen los cuerpos del sistema solar sobre la Tierra no esférica causan una variación de su dirección en el sistema de referencia celeste. En 26 000 años el movimiento del eje traza un cono en el espacio. Este movimiento se llama precesión. La nutación causa una oscilación periódica mucho menor del eje que se suma al movimiento de precesión. El periodo principal del movimiento de nutación es de 18,6 años. La IAU recomienda que para describir este movimiento, a partir del 1 de enero de 2003, se utilice el modelo de precesión-nutación IAU 2000A, o una versión más breve IAU 2000B para quienes necesiten un modelo con una precisión del orden de 1 miliarcosegundo (mas).

Utilizando la ecuación (10-1) la matriz de precesión/nutación $Q(t)$ puede escribirse en la forma:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{bmatrix} \bullet R_3(s) \quad (10-6)$$

con

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X^2 + Y^2)$$

siendo:

X e Y : las «coordenadas» del CIP en el CRS, procedentes de los modelos convencionales IAU 2000A o IAU 2000B, basados en la teoría geofísica y astronómica.

Esta formulación sirve de modelo del movimiento del polo debido a los movimientos planetarios y de la luna y el sol. No incluye la denominada «precesión planetaria» en la literatura, que es el movimiento de la eclíptica (el trayecto del movimiento orbital de la Tierra) causado por la gravedad planetaria. Antes de que la IAU adoptara este procedimiento el año 2000 para describir la precesión y nutación de la Tierra, se recurría a la eclíptica como plano de referencia fundamental y su movimiento se describía mediante una expresión convencional basada en la teoría astronómica. La combinación de la precesión/nutación del polo de la Tierra y la eclíptica se suele denominar precesión general.

El valor s especifica la posición del origen efemérides celeste en el ecuador del polo intermedio celeste, y viene dado por:

$$s = -XY/2 + \sum_{i=0}^{i=3} c_i t^i + \sum_k C_k \sin \alpha_k + 1.71t \sin \Omega + 3.57t \cos 2\Omega \\ + 743.53t^2 \sin \Omega + 56.91t^2 \sin(2F - 2D + 2\Omega) + 9.84t^2 \sin(2F + 2\Omega) - 8.85t^2 \sin 2\Omega \quad (10-7)$$

En los Convenios IERS [McCarthy and Petit, 2003] pueden consultarse cuadros y software para crear el algoritmo descrito por la expresión anterior.

10.2.2 Movimiento polar

El polo CIP también se mueve en el marco TRF, pero no es posible modelizar dicho movimiento. Por tanto, este movimiento debe observarse y tenerse debidamente en cuenta en la transformación entre sistemas de coordenadas. El movimiento se representa mediante las coordenadas polares x e y expresadas en unidades angulares. Así, x es la dirección a lo largo de la longitud 0° e y a lo largo de la longitud 90° oeste. El sistema de longitud queda definido implícitamente por las posiciones adoptadas de los emplazamientos en el TRF.

El movimiento polar consiste principalmente en una deriva aproximadamente lineal más dos términos periódicos. El primero es un movimiento libre del polo denominado bamboleo Chandler, en honor a su descubridor, Seth C. Chandler. Su periodo es de 435 días y corresponde al movimiento libre de una Tierra no rígida que fue predicho originalmente por L. Euler para una Tierra rígida en 1758. El segundo componente principal del movimiento polar es el movimiento anual debido a la redistribución estacional de la masa atmosférica de la Tierra.

Aunque la magnitud de estos movimientos es pequeña, son muy significativos para las transformaciones entre marcos de referencia. La deriva lineal es de unos cuantos centímetros al año en la dirección longitud 75° W. Los movimientos periódicos consisten en desplazamientos del CIP con una amplitud de unas pocas decenas de metros.

Nuevamente, a partir de la ecuación (10-1), esta rotación puede expresarse matemáticamente del modo siguiente:

$$W(t) = R_3(-s')R_1(y)R_2(x) \quad (10-8)$$

La información de coordenadas polares debe obtenerse por observación y notificarse. Los datos están disponibles en el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS). Este servicio facilita una serie de ficheros que contienen los datos y predicciones más recientes para el futuro. Véase <http://www.iers.org/iers/products>.

En el siglo XXI, s' se puede aproximar en función del tiempo mediante la expresión:

$$s' = -47 \mu\text{s } t \quad (10-9)$$

10.3 Tiempo universal (UT)

El tiempo solar se basa en la rotación de la Tierra respecto del sol. El tiempo solar medio se concibió para eliminar las irregularidades en el tiempo solar causadas por la oblicuidad de la eclíptica y la variación de la velocidad de la Tierra en su órbita alrededor del sol. Es el ángulo horario de un punto ficticio que se mueve uniformemente a lo largo del ecuador celeste a la misma velocidad que la velocidad media del sol a lo largo de la eclíptica. En la práctica, se trata de intervalos de tiempo sideral que se obtienen directamente por observación astronómica y que luego se convierten en intervalos de tiempo solar medio dividiendo por 1,00273790935.

El tiempo solar medio determinado por el meridiano de longitud 0° se denomina UT1. Se realizan observaciones astronómicas para determinar la diferencia entre este tiempo y el tiempo universal coordinado (UTC). Las observaciones directas del tiempo se denominan UT0 y deben corregirse para el movimiento polar de la Tierra a fin de obtener el UT1. El efecto del movimiento polar puede ascender a varias centésimas de segundo. El IERS recibe estos datos y mantiene una escala de tiempo UT1.

Estas observaciones muestran que la Tierra acusa variaciones en la velocidad rotacional que pueden clasificarse en tres tipos: seculares, irregulares y periódicas. La variación secular de la velocidad de rotación se refiere al aumento lineal aparente de la duración del día debido principalmente a las fuerzas de la marea. Este efecto causa una disminución de la velocidad rotacional de la Tierra que resulta en un alargamiento del día en unos 0,0005 a 0,0035 s/siglo. Los cambios irregulares en la velocidad parecen ser el resultado de aceleraciones aleatorias, pero pueden guardar una correlación con los procesos físicos que se producen en la Tierra o en su interior. Estos cambios son, entre otros, las fluctuaciones decenales con periodos característicos de 5 – 10 años y otras variaciones que se producen a menor escala de tiempo.

Las variaciones periódicas guardan relación con los procesos físicos periódicos que afectan a la Tierra. Las mareas que se producen en la Tierra sólida debido a la luna y el sol producen variaciones periódicas en la longitud del día del orden de 0,0005 s con periodos de 1 año, 1/2 año, 27,55 días y 13,66 días.

De la ecuación (10-1) se desprende nuevamente que esta rotación es:

$$R(t) = R_3(-\theta) \quad (10-10)$$

siendo θ el ángulo de rotación de la Tierra entre el CEO y el TEO en la fecha t sobre el ecuador del CIP. Se obtiene de la relación convencional con UT1 [Capitaine *et al.*, 2000]:

$$\theta(T_u) = 2\pi(0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u) \quad (10-11)$$

siendo:

$T_u = (\text{fecha UT1 juliana} - 2451545,0)$, y $UT1 = UTC + (UT1 - UTC)$, o equivalente

$$\theta(T_u) = 2\pi(UT1 \text{ Julian Days elapsed since } 2451545.0 + 0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u)$$

NOTA 1 – Véase información más detallada en el Capítulo 7 – Escalas de tiempo.

10.4 Sistemas geodésicos

Como se explicó antes, los sistemas de referencia terrestres tiene su origen en el centro de masas de la Tierra con sus ejes polares relativos a la dirección de un eje fijo con respecto a la corteza de la Tierra. El origen de las longitudes en el plano ecuatorial constituye la tercera dirección. Los marcos de referencia terrestres están constituidos por una lista de coordenadas de posiciones y posibles movimientos. Estas coordenadas pueden

expresarse como un conjunto de coordenadas cartesianas (x, y, z) del punto. A menudo se describen mediante la latitud, longitud y altura de la ubicación por encima de alguna superficie de referencia. Esta superficie puede ser un elipsoide de referencia o una superficie geopotencial.

10.5 Superficies de referencia

10.5.1 Geoide

Puede considerarse que la Tierra está formada por una serie de superficies, cada una con el mismo potencial de gravedad, que comprende no solo el potencial gravitatorio, sino también el potencial debido a la fuerza centrífuga. Estas superficies se denominan geopotenciales, y se denomina geoide la superficie que se asemeja a la superficie media del mar. Es una superficie de referencia natural, porque la línea de plomada es perpendicular a esta superficie y resulta fácil medir las alturas con este instrumento. El geoide es la superficie a la que se suele remitir como el nivel medio del mar. Se define describiendo su altura por encima de un elipsoide de referencia, denominado ondulación del geoide, junto con la línea perpendicular al elipsoide.

La altura de la topografía del suelo sobre el geoide medido con la plomada se denomina altura del nivel medio del mar o altura ortométrica.

10.5.2 Elipsoide

Se utiliza un elipsoide de referencia para describir la forma aproximada de la Tierra a efectos de referencia. Se especifica mediante el eje semimayor (radio ecuatorial) y la elipticidad (la relación entre el radio ecuatorial y el polar). La elipticidad (o achatamiento) se define como:

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (10-12)$$

siendo:

a y b: los radios ecuatorial y polar, respectivamente.

La altura de la topografía del suelo por encima del elipsoide a lo largo de la línea perpendicular a éste se denomina altura elipsoidal. Por ejemplo, para el elipsoide WGS 84, $a = 6378137,0$ m y $f = 1,0/298,2572235630$.

10.5.3 Tipos de coordenadas

10.5.3.1 Coordenadas geocéntricas

Las coordenadas geocéntricas tienen su origen en el centro de la Tierra. Se pueden expresar en forma de vector, es decir, las coordenadas cartesianas (x, y, z) de un punto, o como latitud ϕ' y longitud λ geocéntricas. La relación entre los dos viene dada por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \phi' \cos \lambda \\ \cos \phi' \sin \lambda \\ \sin \phi' \end{bmatrix} \quad (10-13)$$

La latitud geocéntrica de un punto se refiere al ángulo que forma el ecuador del elipsoide de referencia y una línea que va desde el centro del elipsoide hasta dicho punto. La longitud geocéntrica es el ángulo entre el meridiano de referencia del elipsoide y el meridiano del punto.

10.5.3.2 Coordenadas geodésicas

Las coordenadas geodésicas se determinan con referencia a un elipsoide de referencia. Por lo general se expresan mediante la latitud ϕ y la longitud λ geodésicas. La latitud geodésica es el ángulo que forma el ecuador elipsoidal con la normal al elipsoide que pasa a través del punto. En la Figura 10-1 se ilustra la diferencia entre la latitud geocéntrica y la geodésica. La longitud geodésica es el ángulo entre el meridiano de referencia del elipsoide y el meridiano del emplazamiento. Es idéntico a la longitud geocéntrica cuando el

elipsoide de referencia en cada caso tiene los mismos ejes y meridianos de referencia. La relación entre las coordenadas cartesianas geocéntricas y las coordenadas geodésicas puede expresarse así:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} (N_\phi + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N_\phi + h) \cos \phi \sin \lambda \\ \left[(1 - e^2) N_\phi + h \right] \sin \phi' \end{bmatrix} \quad (10-14)$$

siendo:

- h : la altura elipsoidal
- e : la excentricidad del elipsoide, que viene dada por:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{2f - f^2}$$

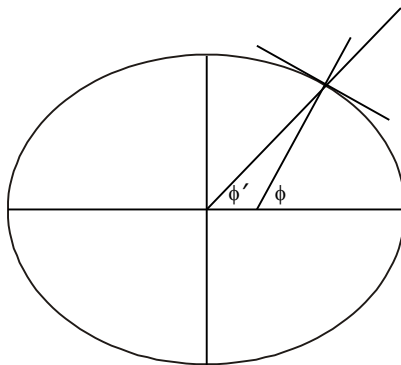
- N_ϕ : el radio elipsoidal de curvatura en el meridiano, que viene dado por:

$$N_\phi = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (10-15)$$

La altura se especifica mediante la altura elipsoidal, h , que es la distancia del punto por encima del elipsoide de referencia a lo largo de la línea que pasa por el punto perpendicular al elipsoide.

FIGURA 10-1

Diferencia entre la latitud geocéntrica ϕ' y la latitud geodésica ϕ



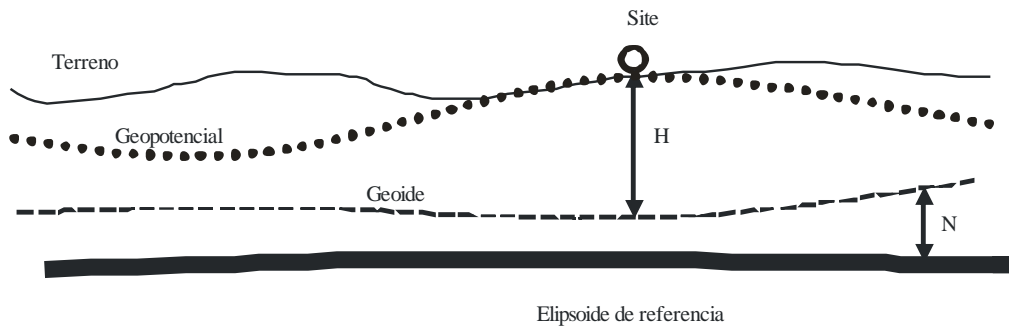
Sat_time_freq-10-01

10.5.3.3 Coordenadas astronómicas

Las coordenadas astronómicas se miden con referencia a la dirección de la vertical local o línea de plomada. La vertical local es perpendicular a la superficie equipotencial gravitatoria en el punto. Estas superficies se denominan geopotenciales, y se denomina geoides al geopotencial correspondiente al potencial de la Tierra a nivel del mar. Así, la latitud astronómica es el ángulo entre la dirección de la vertical y el plano del ecuador de la Tierra. La longitud astronómica es el ángulo entre el plano que contiene la vertical y el plano del meridiano de referencia. La divergencia respecto de la vertical es el ángulo entre la normal elipsoidal y la vertical y se especifica mediante los componentes angulares en la dirección norte-sur y este-oeste. La altura del punto por encima del geoides se denomina altura del nivel medio del mar o altura ortométrica, H . Se mide en la dirección de la vertical. La altura del geoides por encima de la elipsoide de referencia se denomina ondulación del geoides, N , y se mide a lo largo de la normal al elipsoide.

FIGURA 10-2

Superficies de referencia geodésicas



Sat_time_freq-10-02

10.5.3.4 Puntos de referencia (datums) geodésicos

Los puntos de referencia geodésicos se utilizan para proporcionar un modelo geodésico general de la Tierra y tradicionalmente se define mediante un elipsoide de referencia y la especificación de un punto inicial. La geodesia espacial moderna permite hoy en día definir un sistema de referencia directamente relacionado con el centro de la Tierra, sin utilizar un elipsoide de referencia. Estas observaciones se suelen utilizar para ofrecer un punto de referencia que consta de una serie de parámetros y que definen las coordenadas del punto que pueden utilizarse para ampliar el sistema mediante medidas diferenciales con respecto a los puntos definitorios. Las transformaciones entre puntos de referencia vienen dadas por la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1 - \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1 \tag{10-16}$$

donde:

los parámetros de translación (T_1, T_2, T_3), los parámetros de rotación (R_1, R_2, R_3) y el parámetro de escala se determinan empíricamente comparando las coordenadas de puntos en dos puntos de referencia diferentes.

10.5.3.5 Marco de referencia internacional terrestre

El Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) ofrece como norma internacional el sistema de referencia internacional (ITRS). El origen del sistema es el geocentro de la masa de la Tierra, océanos y atmósfera inclusive, y se define de modo que no tenga rotación residual global respecto de los movimientos horizontales sobre la superficie de la Tierra. La unidad de longitud es el metro (SI), que ofrece una escala coherente con la coordenada de tiempo TCG para un marco local geocéntrico, de acuerdo con las recomendaciones internacionales.

La realización del ITRS producida por el IERS ITRS Product Center se denomina Marco de referencia internacional terrestre (ITRF). Se obtiene por observaciones geodésicas espaciales. Actualmente, las soluciones ITRF se publican casi anualmente por el ITRS-PC en las IERS Technical Notes. Los números (yy) seguidos de las letras «ITRF» especifican el último año en que se utilizaron los datos para la constitución del marco. Así, ITRF97 indica el marco de posiciones y velocidades de la estación constituidos en 1999 utilizando todos los datos IERS disponibles hasta 1998.

El Informe del Grupo de Trabajo ITRF sobre puntos de referencia ITRF [Ray *et al.*, 1999], contiene información útil sobre la historia de la definición de estos puntos. También se detallan efectos técnicos específicos sobre algunos parámetros utilizados en la definición de puntos de referencia, en particular el origen y la escala.

Referencias

- CAPITAINE, N., GUINOT, B. and MCCARTHY, D. D. [2000] *Astronomy & Astrophysics*. p. 355-398.
- GUINOT, B. [1979] *Time and the Earths Rotation*, IAU Symp. 82, ed. D. D. McCarthy & J. D. H. Pilkington, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 7.
- MCCARTHY, D. D. and PETIT, G. (editors) [2003] *IERS Conventions (2003)*, *IERS Technical Note 32*, International Earth Rotation Service.
- RAY, J. , BLEWITT, G., BOUCHER, C., EANES, R., FEISSEL, M., HEFLIN, M., HERRING, T., KOUBA, J., MA, C., MONTAG, H., WILLIS, P., ALTAMIMI, Z., EUBANKS, T. M., D. GAMBIS, PETIT, G. , RIES, J., SCHERNECK, H. G., SILLARD, P. and P. [1999] *Report of the Working Group on ITRF Datum*.

CAPÍTULO 11

PROPAGACIÓN Y FACTORES AMBIENTALES

	<i>Página</i>
11.1 Introducción.....	138
11.2 Comparación del retardo de distancia entre la troposfera de la Tierra y la ionosfera.....	138
11.3 Modelización del retardo de distancia en la troposfera de la Tierra	139
11.3.1 Variabilidad del retardo de distancia ionosférico y troposférico	140
11.4 Retardo de tiempo en la ionosfera: comportamiento mundial, variabilidad diaria y variabilidad del ciclo solar.....	140
11.4.1 Métodos para corregir el retardo de tiempo ionosférico, modelos de media mensual, modelos actualizados, utilización de datos ionosféricos en tiempo real SBAS/WAAS/IGS, correcciones bifrecuencia	143
11.4.2 Efectos ionosféricos de mayor orden sobre el retardo de tiempo	144
11.4.3 Efectos del centelleo	144
11.5 Conclusión.....	145
Referencias	146

11.1 Introducción

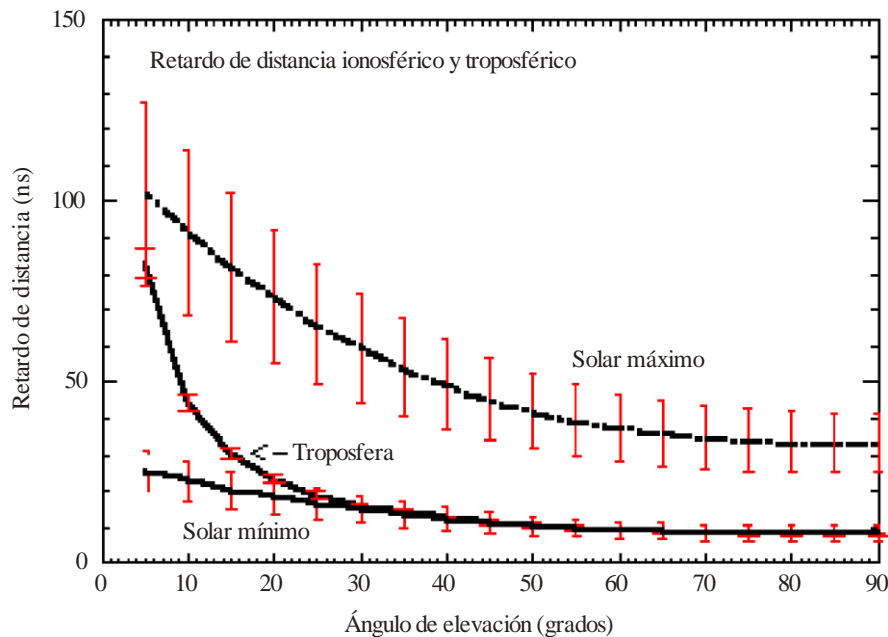
La principal fuente de error en la transferencia de tiempo exacto por satélite es el retardo de propagación que se produce en la atmósfera neutra de la Tierra y en la ionosfera. En esta sección se resumen los diferentes retardos en la determinación de la distancia y se presentan y describen diversas técnicas de compensación. Los retardos de distancia en la troposfera y la ionosfera difieren en varios aspectos importantes. El retardo de distancia que se produce en la troposfera de la Tierra no es dispersivo, es decir, no es función de la frecuencia, al menos en la gama de frecuencias que se emplea normalmente para la determinación de distancia de satélites artificiales de la Tierra. En cambio, en la ionosfera el retardo de distancia es dispersivo, es decir, varía inversamente con la frecuencia. Así, al medir el retardo de distancia relativo en dos frecuencias debidamente separadas se puede calcular directamente el retardo absoluto en el trayecto satélite-usuario. El retardo de distancia en la troposfera de la Tierra no se puede medir directamente, pero se puede recurrir a varios modelos o técnicas de medición indirecta que permiten deducir la contribución del retardo de tiempo troposférico a la transferencia de tiempo por medio de satélites de elevada exactitud.

11.2 Comparación del retardo de distancia entre la troposfera de la Tierra y la ionosfera

En la Figura 11-1 se ilustran los valores típicos del retardo en la determinación de la distancia respecto del ángulo de elevación para la troposfera de la Tierra y para la ionosfera a latitud media en la frecuencia L1 del GPS, en diferentes condiciones de actividad solar. Hay varios aspectos importantes que destacar en la Figura 11-1. En primer lugar, el retardo troposférico a ángulos de elevación elevados es similar al que se produce en la ionosfera a latitud media cuando la actividad solar es mínima. En segundo lugar, la variación del retardo de distancia con el ángulo de elevación, desde el cenit a una elevación de 5°, varía aproximadamente en un factor de 3 para la ionosfera, pero en un factor superior a 10 en el caso de la troposfera. Es decir, debido a que, obviamente, la troposfera está mucho más cerca de la superficie de la Tierra que la ionosfera, y que a ángulos de elevación pequeños el punto de vista es más oblicuo que visto desde la ionosfera, que está más alta.

FIGURA 11-1

Comparación del retardo de distancia entre la troposfera y la ionosfera a latitud media respecto del ángulo de elevación



Por último, obsérvese que las barras de error de 1σ aproximadamente en la Figura 11-1. Los errores del retardo de distancia ionosférico medio son de aproximadamente $\pm 25\%$ en todas las condiciones de actividad solar, mientras que las barras de error de 1σ en la troposfera son inferiores a $\pm 5\%$ aproximadamente. Además, el retardo de distancia debido a la troposfera de la Tierra es mucho más constante y varía en menos del 20% en toda la Tierra. La razón es que aproximadamente el 90% del retardo de distancia troposférico se debe al denominado «componente seco» de la troposfera de la Tierra, proporcional a la presión y temperatura absolutas, que, afortunadamente para nosotros los habitantes de la Tierra, no varía más de un pequeño porcentaje de sus valores nominales. Dado que el retardo de distancia en la troposfera se debe en su mayor parte al «componente seco», resulta más fácil de modelizar que el retardo en la ionosfera de la Tierra.

11.3 Modelización del retardo de distancia en la troposfera de la Tierra

Existen muchos modelos de la troposfera de la Tierra, algunos de los cuales han sido examinados por Spilker [1996]. La mayoría de los modelos troposféricos se basan simplemente en una función del ángulo de elevación que relaciona el retardo de distancia en el cénit con el retardo a menores ángulos de elevación. Aunque cada una de estas funciones es diferente, la mayoría exigen solamente que se especifique el retardo en el cénit, que luego se multiplica por un número que es función del ángulo de elevación para obtener el retardo equivalente en el ángulo de elevación del satélite observado. Hay métodos climatológicos de especificar el retardo vertical y métodos de determinar el retardo vertical real mediante mediciones en tiempo casi real, utilizando datos exactos bifrecuencia procedentes de varios satélites del GPS a diferentes ángulos de elevación, y luego realizando un ajuste del retardo a la función del ángulo de elevación que más se ajusta en el tiempo. Utilizando esta técnica de ajuste de curvas se logran precisiones de aproximadamente 1-2 cm en la corrección del retardo de distancia.

El retardo de distancia vertical debido a la troposfera viene dado aproximadamente por la expresión:

$$\Delta r = 10^{-6} c \int N(h) dl \tag{11-1}$$

siendo:

c : la velocidad de la luz en m/s:

$N(h)dl$: la refracción total de la troposfera, en unidades de refracción.

Una de las muchas formas del retardo de distancia en el cénit, que separa el término seco o hidrostático del término «húmedo» y en la que puede tomarse en consideración la temperatura, la presión y el vapor de agua locales, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta r_{Vtotal} = \Delta r_{Dry} + \Delta r_{Wet} \tag{11-2}$$

$$\Delta r_{dry} = \frac{0.62 \times P_{millibars}}{T_{Kelvin}} \tag{m} \tag{11-3}$$

siendo:

P : la presión total, en milibares.

$$\Delta r_{wet} = \frac{8.3 \times 10^2 \times P_{WV}}{T^2} \tag{m} \tag{11-4}$$

donde:

P_{WV} : la presión parcial de vapor de agua.

Utilizando valores característicos de la presión (1 013 milibares) y la temperatura (15° C o 288° K) y una presión parcial de vapor de agua equivalente a 8,5 milibares, que corresponde a una humedad relativa de 50%, el retardo de distancia total vertical en la troposfera resulta:

$$\Delta r_{Vtotal} = 2.18 + 0.08 = 2.26 \tag{m} \tag{11-5}$$

Para este caso característico, el componente «húmedo» debido al vapor de agua en la atmósfera es de sólo $0,08/2,26 = 3,5\%$ del retardo vertical de distancia total en la troposfera.

Los usuarios que necesitan solamente un retardo troposférico medio para diversas latitudes pueden recurrir al valor constante mundial, que viene dado aproximadamente por la expresión:

$$\Delta r = \frac{2.47}{\sin E + 0.0121} \quad (\text{m}) \quad (11-6)$$

siendo:

E : el ángulo de elevación.

Una función de correspondencia simplificada es:

$$m(E) = \frac{1.0121}{\sin E + 0.0121} \quad (11-7)$$

Collins y Langley [Collins and Langley, 1999] crearon un modelo climatológico de retardo de distancia troposférico que se ha probado ampliamente con radiosondas reales de muchas estaciones en Norteamérica. Los resultados se midieron mediante desviaciones de la normal, o gaussianas, residuales. Su modelo, denominado UNB3, se ajusta bastante a una distribución gaussiana de aproximadamente de -5σ a $+4\sigma$ puntos, y tiene magnífica fiabilidad tratándose de un modelo climatológico sin entradas en tiempo real. Los factores que limitan el modelo se han descrito en [Collins and Langley, 1996].

11.3.1 Variabilidad del retardo de distancia ionosférico y troposférico

Como se mostró anteriormente, la variabilidad del retardo troposférico se debe principalmente al contenido de vapor de agua en la atmósfera. Ahora bien, la magnitud absoluta causada por el retardo en el cénit debido al vapor de agua es sólo del orden de unos pocos centímetros, e incluso a pequeños ángulos de elevación, quizá no sea un factor importante en el error global de determinación de la distancia. La variabilidad absoluta del retardo en la ionosfera de la Tierra es mucho mayor, pero puede eliminarse casi totalmente utilizando un receptor GPS bifrecuencia, como se describe a continuación.

Quienes necesiten correcciones de mayor precisión tanto para el retardo ionosférico como para el troposférico deberían utilizar una corrección bifrecuencia a fin de eliminar el retardo ionosférico de primer orden, y luego considerar la posibilidad de recurrir a funciones «de ajuste» a los errores de distancia residuales respecto del ángulo de elevación, y así determinar de manera independiente el retardo troposférico. Si solo se dispone de un receptor GPS monofrecuencia, el retardo de distancia ionosférico residual seguirá siendo probablemente más grande que el de la troposfera, aun después de recurrir a métodos de corrección ionosférica, aunque se recurra a un modelo climatológico del retardo de distancia, como el modelo UNB3.

11.4 Retardo de tiempo en la ionosfera: comportamiento mundial, variabilidad diaria y variabilidad del ciclo solar

El retardo de distancia que se produce en la ionosfera es dispersivo, es decir, varía inversamente con la frecuencia, según la expresión:

$$\Delta t = \frac{40.3}{cf^2} \int_0^{Sat.} Ndl \quad (\text{s}) \quad (11-8)$$

siendo:

$\int_0^{Sat.} Ndl$: Número integrado de electrones libres a lo largo del trayecto de ondas radioeléctricas desde el punto de medición en tierra hasta el satélite, denominado comúnmente contenido total de electrones (TEC) a lo largo de este trayecto

c : velocidad de la luz en m/s

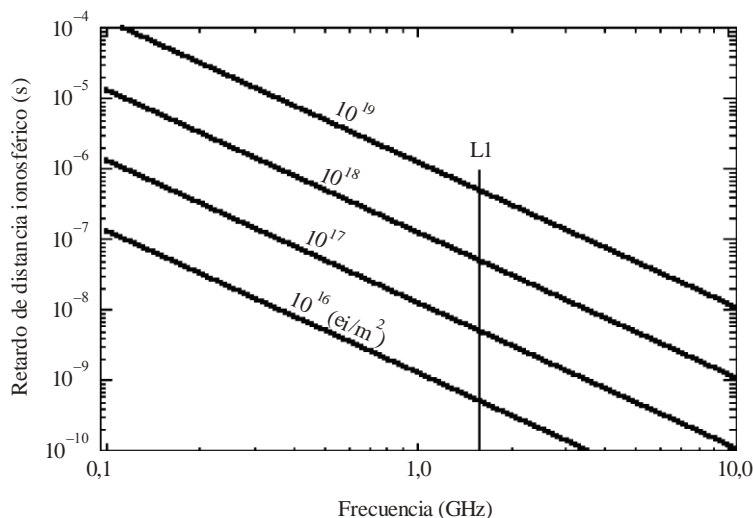
f : frecuencia operativa del sistema (Hz).

Dado que el retardo de distancia ionosférico es función de la frecuencia, el mejor método para medirlo y corregir sus efectos sobre la transferencia de tiempo es utilizar dos frecuencias suficientemente separadas y, así, medir el retardo de tiempo ionosférico directamente. Otros métodos son menos directos y, necesariamente, son menos precisos.

Los valores típicos del TEC de la ionosfera de la Tierra oscilan entre 10^{16} y 10^{19} el/m² columna. En la Figura 11-2 se representan los valores del retardo de tiempo ionosférico unidireccional respecto de la frecuencia para valores TEC comprendidos entre 10^{16} y 10^{19} el/m² columna. La frecuencia L1 del GPS de 1,57542 GHz se muestra mediante una línea vertical en la Figura 11-2. La mayor variación del TEC, de aproximadamente 3 órdenes de magnitud, se debe a muchos factores, entre los que cabe citar la hora del día, la estación del año, la posición de la estación y el flujo solar ultravioleta ionizante.

FIGURA 11-2

Retardo de distancia ionosférico unidireccional en función de la frecuencia para diversos valores de TEC de 10^{16} a 10^{19} el/m² columna. La frecuencia L1 del GPS se indica mediante una línea vertical a 1,575 GHz



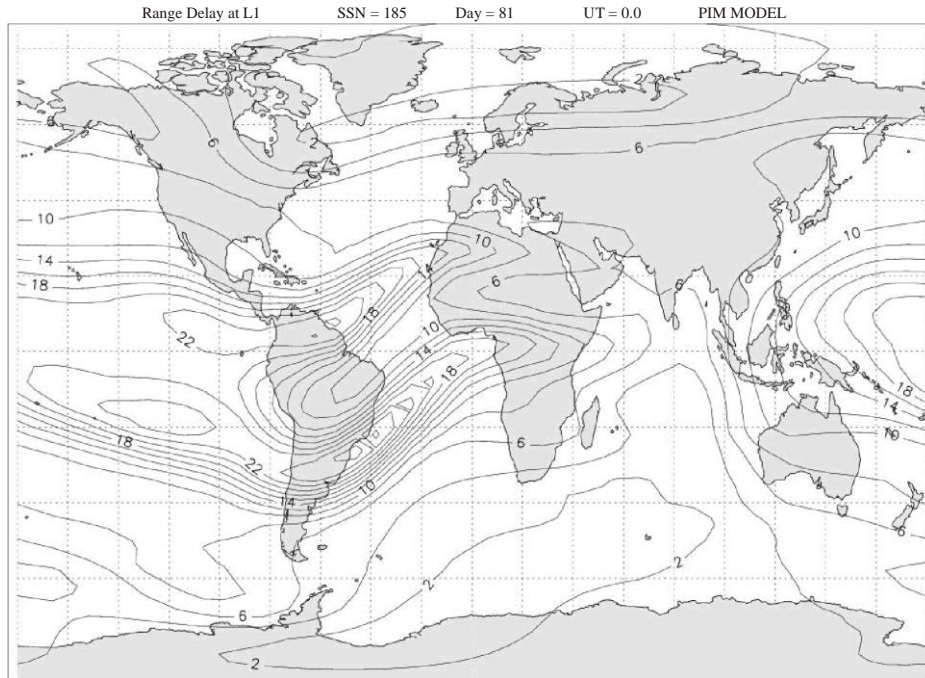
Sat_time_freq-11-02

La Figura 11-3 ilustra el retardo de distancia vertical ionosférica medio mensual en todo el mundo, expresado en metros, a la frecuencia L1 del GPS y en condiciones de máximo equinoccio solar. Obsérvese que el retardo de distancia máximo no se produce en el ecuador geográfico, sino a latitudes de aproximadamente $\pm 15^\circ$ en cada lado del ecuador magnético. Aunque esta representación modelo de las condiciones medias alcanza sus valores máximos de sólo 24 m a L1, los valores absolutos pueden ser mucho mayores y la variabilidad diaria también es normalmente elevada.

La Figura 11-4 ilustra la variabilidad diaria, estacional y del ciclo solar en la ionosfera norte a latitud media, mediante un representación gráfica de los valores del retardo de distancia para cada día de los cuatros meses de enero, marzo, junio y septiembre entre los años 1986 a 1990, correspondiente a una estación situada cerca de Boston, Massachusetts, periodo éste de actividad solar creciente en el ciclo solar que alcanzó su máximo entre 1989-90. Obsérvese la gran variabilidad diaria en las curvas del retardo de distancia diurno dentro un determinado mes, así como los efectos de las estaciones con los meses equinociales que tiene valores absolutos más grandes que los de los meses del solsticio, con valores especialmente bajos en el mes de junio. Obsérvese los grandes cambios en el retardo absoluto con el aumento del ciclo solar de 1986 a 1989 y 1990. De los modelos de retardo de distancia ionosférico que no se actualizan con mediciones cercanas oportunas solo se puede esperar que reproduzcan el retardo medio mensual, dejando por tanto sin corregir la variabilidad diaria residual de aproximadamente 25% de valor eficaz en el retardo ionosférico.

FIGURA 11-3

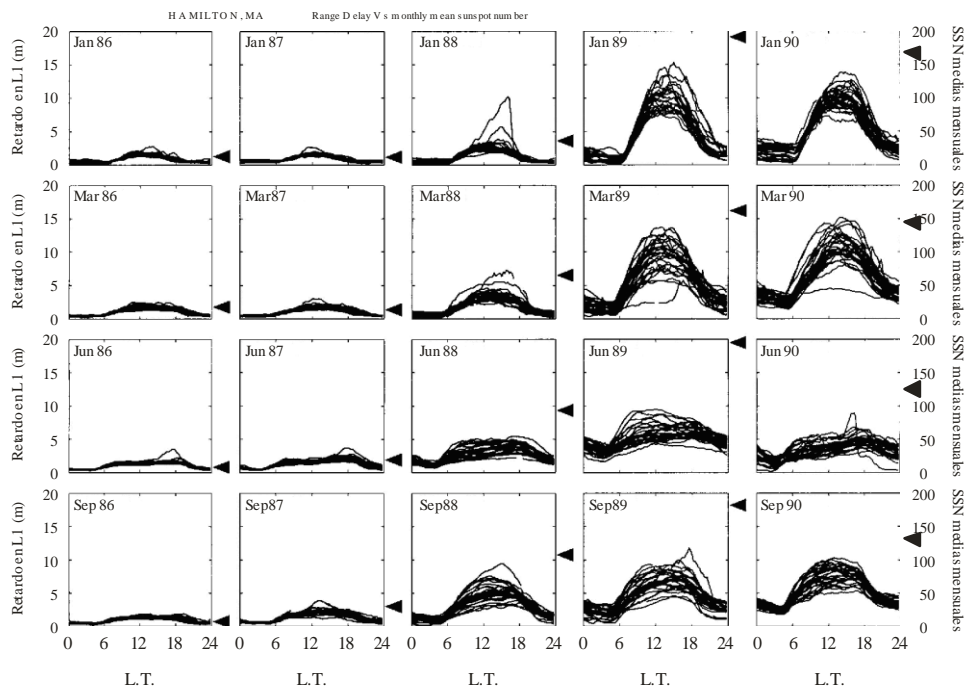
Retardo de distancia ionosférico medio en el mundo, en metros, a la frecuencia L1 del GPS y en condiciones de máximo equinoccio solar



Sat_time_freq-11-03

FIGURA 11-4

Gráfico mensual de curvas diurnas del retardo de distancia vertical equivalente a la frecuencia GPS L1 de cuatro meses durante cinco años de actividad solar creciente. El número medio de manchas solares mensuales para cada mes (SSN) se indica con flechas grandes a la derecha de cada gráfico



Sat_time_freq-11-04

11.4.1 Métodos para corregir el retardo de tiempo ionosférico, modelos de media mensual, modelos actualizados, utilización de datos ionosféricos en tiempo real SBAS/WAAS/IGS, correcciones bifrecuencia

Si no se corrigen, los errores característicos de pseudodistancia vertical GPS debido al TEC pueden resultar del orden de 10-25 m. De hecho, el retardo de distancia ionosférico *vertical* al sur de la parte más meridional de Estados Unidos continental llegó a ser de hasta 40 m durante dos grandes tormentas recientes, una región donde los valores medios mensuales de dicho retardo son normalmente de solo 10 m. Afortunadamente, hay varios métodos de corregir los efectos de la ionosfera en la transferencia de tiempo, que se describen a continuación. En primer lugar se describe el caso (trivial) de no efectuar corrección alguna y se avanza progresivamente hacia describir la corrección bifrecuencia, que es la técnica más eficaz y que con solo un aumento moderado del coste del equipo inicial, elimina totalmente los efectos de la ionosfera, al menos hasta una precisión de unos pocos centímetros.

Existen como mínimo cinco métodos diferentes de corregir los efectos del retardo de distancia ionosférico. A continuación se da una descripción de cada uno de estos métodos, junto con su dificultad relativa en la aplicación de la corrección. Estos métodos se basan en las siguientes correcciones aproximadas:

- 0% – No corregir el retardo de distancia ionosférico. Es el caso trivial, pero se incluye para contemplar todos los casos. Incluso con una corrección «constante» para cada «estación» y ubicación, sin dependencia diurna, se mejoraría considerablemente los resultados comparado con este caso de «no hacer nada».
- 50% – Utilización del algoritmo de corrección ionosférico (ICA) designado para corregir aproximadamente una mitad (valor eficaz), del retardo de distancia ionosférico. Esta es la corrección más corriente utilizada prácticamente por todos los receptores GPS monofrecuencia. Los coeficientes del algoritmo ICA se transmiten dentro del mensaje del satélite y se actualizan al menos una vez cada diez días mediante el sistema de control principal del GPS, o incluso más a menudo si hubiera cambios considerables en el flujo medio de radiación solar de cinco días durante dicho periodo de diez días. El algoritmo ICA se limita a solo 8 coeficientes debido a las limitaciones de longitud del mensaje GPS [Klobuchar, 1987].
- 75% – Utilizar un modelo ionosférico moderno, que requiere miles de coeficientes, pero que se ajusta al comportamiento medio mensual del retardo de distancia ionosférico con un error sistemático residual de aproximadamente 10%. Los modelos típicos son la ionosfera de referencia internacional (IRI) [Bilitza, 2000] y el modelo Bent. Los dos modelos están disponibles por Internet. Aunque recurra a dichos modelos, el usuario aún tiene que resolver la variabilidad diaria restante de aproximadamente 20-25%, y el consecuente error σ de 22-27%, cuando se incluye el error sistemático de la media mensual. Obsérvese que este nivel de corrección no utiliza ninguna de las entradas en tiempo casi real, sino que se basa solamente en el modelo para describir con mayor exactitud el comportamiento ionosférico medio mensual que el algoritmo ICA, en el que sólo se emplean 8 coeficientes. Así, aumentando el número de coeficientes de 8 a varios miles la mejora pasa de aproximadamente un 50% a un 75%, en valor eficaz.
- 90% – Recurrir a correcciones ionosféricas basadas en sistemas de aumento espaciales (SBAS) que se transmiten en los mensajes de aumento del SBAS. Estos mensajes los facilita, por ejemplo WAAS y EGNOS, como se describió en el Capítulo 2 relativo a sistemas de aumento. De este modo se mejoran sustancialmente los datos del retardo de distancia ionosférico en tiempo casi real obtenidos de una red de estaciones de referencia de SBAS, que se utiliza para generar una retícula de correcciones del retardo de distancia ionosférico equivalente en puntos 5° de latitud por 5° de longitud sobre la región de cobertura. Obviamente, esta técnica de corrección solo puede utilizarse cuando existe un SBAS y se dispone de estaciones de referencia en tierra adecuadas para medir los retardos de distancia ionosféricos. La mejora que se consigue utilizando datos ionosféricos reales en tiempo casi real tiene el coste de emplear un receptor GPS monofrecuencia que también sea capaz recibir el mensaje SBAS. La corrección estimada de sólo el 90% utilizando, por ejemplo, WAAS, aun cuando se empleen datos de retardo de distancia en tiempo casi real, se debe a la necesidad de interpolar los valores de la retícula de 5° por 5° del retardo de distancia ionosférico vertical suministrados por WAAS a los

retardos de distancia oblicuos equivalentes a lo largo de la línea de visibilidad directa de cada satélite GPS que observa el usuario.

- 99%** – Utilizar un receptor bifrecuencia como se describe en el Capítulo 1 sobre GPS y en los capítulos relativos a la transferencia de tiempo para suprimir prácticamente todo el retardo de distancia ionosférico a lo largo del trayecto hacia cada satélite GPS controlado. Este método consiste en medir directamente la línea de visibilidad directa del retardo de distancia oblicua ionosférico a lo largo del trayecto del satélite del GPS, y no implica cálculos según un modelo, ni tampoco interpolación a partir de los valores del retardo de distancia medidos en otros trayectos. Es, con diferencia, la mejor técnica de corrección que puede emplearse y debería ser la norma para todos los usuarios civiles del GPS cuando la nueva frecuencia L5 se adopte plenamente en los futuros satélites GPS y Galileo, probablemente a principios de la segunda década del siglo XXI.

Cada uno de los porcentajes de nivel de corrección conlleva algún tipo de inconveniente. La corrección nula, obviamente, tiene el inconveniente de presentar los mayores errores, mientras que la corrección del 99% tiene el inconveniente innegable de implicar mayores costes al tener que emplear un receptor GPS bifrecuencia. La utilización del algoritmo ICA para corregir aproximadamente el 50% en valor eficaz del error del retardo de distancia ionosférico solo tiene un pequeño inconveniente, dado que las ecuaciones de dicho algoritmo figuran en el documento de control de interfaz ICD-200, y se trata de un procedimiento habitual utilizado en receptores de usuario GPS monofrecuencia.

11.4.2 Efectos ionosféricos de mayor orden sobre el retardo de tiempo

La ecuación 11-1 sobre el retardo de tiempo ionosférico para aplicaciones TEC utiliza la aproximación de primer orden del índice de refracción de la ionosfera. La forma completa del índice de refracción, despreciando términos cuya magnitud es inferior a 10^{-9} [Brunner and Gu, 1991], consta de diversos términos adicionales que comprende:

$$n = 1 - (X/2) \pm (XY/2) \cos\theta - (X^2/8) \quad (11-9)$$

siendo:

- 1: término correspondiente al espacio libre
- X/2: término de primer orden, proporcional a $1/f^2$
- XY/2 cos θ : proporcional a $1/f^3$
- X²/8: proporcional a $1/f^4$

Denominando a estos términos A, B y C, respectivamente, la magnitud de los términos de mayor orden a frecuencias del GPS, para condiciones ionosféricas máximas en el mundo es:

$$B \approx 2 \times 10^{-4}, C \approx 2 \times 10^{-7}, D \approx 2 \times 10^{-8}$$

La relación entre los términos de mayor orden, C y D, y el término de primer orden B, en las condiciones ionosféricas más desfavorables es:

$$C/B \approx 10^{-3}, D \approx 10^{-4}$$

Así, estos términos de mayor orden son 0,1% y 0,01% del término de primer orden en las frecuencias GPS, incluso para la parte extremadamente alta de la ionosfera aquí considerada. Ioannides y Strangeways [Ioannides and Strangeways, 2002] también han llegado a conclusiones similares, según las cuales la contribución más grande a los términos de mayor orden era de sólo unos cuantos cm.

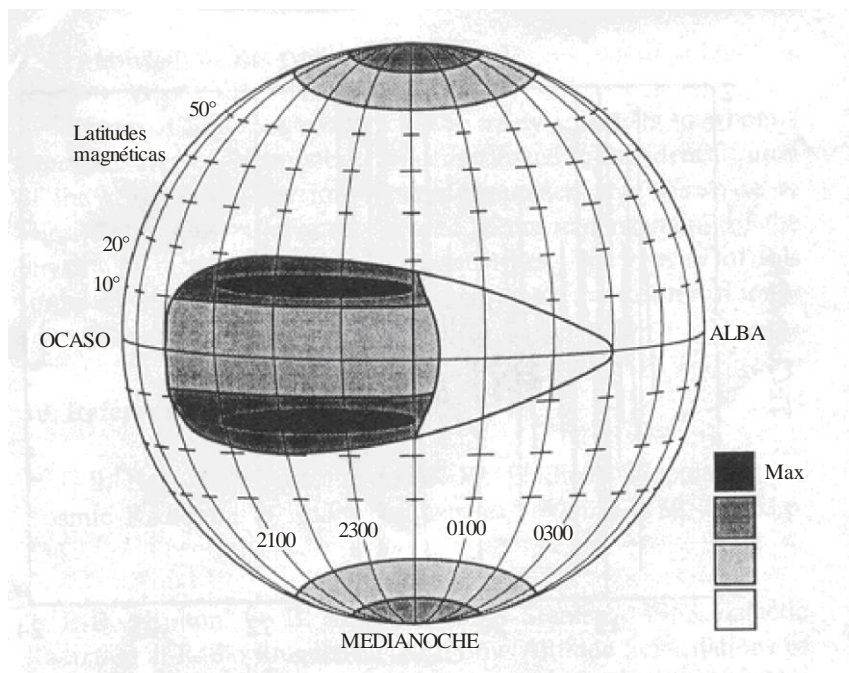
11.4.3 Efectos del centelleo

La amplitud y la fase del centelleo pueden afectar a la fidelidad a corto plazo de diversos receptores GPS. Sin embargo, en las regiones de latitud media son pequeños los efectos del desvanecimiento y la fluctuación de fase debidos al centelleo. Incluso en la región cerca del ecuador, donde a veces se suele promediar en el tiempo la señal, los efectos de centelleo no deberían en principio suponer problema alguno. En la región ecuatorial los efectos del desvanecimiento profundo de amplitud se producen generalmente solo entre la puesta del sol y la

medianoche, hora local, y luego sólo durante los meses equinocciales de años con actividad solar relativamente alta. La Figura 11-5 representa una imagen de las horas y las regiones del mundo que presentan distintos niveles de centelleo. Existen diversos estudios sobre los efectos del centelleo, entre los que cabe destacar el de Goodman y Aarons [Goodman and Aarons, 1990], que describen la morfología del centelleo de amplitud para diversas frecuencias comúnmente utilizadas en la transferencia de tiempo y las comunicaciones por satélite. El centelleo puede limitar la exactitud de la transferencia de tiempo, pero sus efectos se pueden minimizar fácilmente con sólo evitar las horas y los periodos del día en los que normalmente se produce. Por ejemplo, aunque el desvanecimiento profundo de amplitud que puede producir interrupciones de la señal en las frecuencias del GPS es poco frecuente en las latitudes aurales, se puede evitar la transferencia de tiempo durante periodo de perturbaciones magnéticas. Análogamente, también se podría evitar la transferencia de tiempo después de la puesta del sol en las regiones próximas al ecuador, especialmente en años de gran actividad solar. Lo mejor, en definitiva, es supervisar la relación de densidad portador-ruido C/N_0 en tiempo real para cada satélite GPS a fin de disponer en todo momento de un método fiable de determinar si el centelleo profundo de amplitud puede afectar a la señal recibida.

FIGURA 11-5

Mapa del mundo en coordenadas magnéticas y hora local, en las regiones donde normalmente se produce el centello



Sat_time_freq-11-05

11.5 Conclusión

El mejor consejo que se puede dar a la comunidad de transferencia de tiempo, en lo que concierne a los efectos del retardo ionosférico sobre la transferencia de tiempo, es que se consigan cuanto antes un receptor GPS bifrecuencia para cada extremo del enlace de transferencia de tiempo por satélite. Utilizar este tipo de receptores es simplemente el mejor método de garantizar la eliminación de más del 99% del retardo de distancia ionosférico en todos los trayectos por satélite. Si resulta imposible utilizar un receptor GPS bifrecuencia, se puede recurrir a las correcciones ionosféricas del SBAS (WAAS, EGNOS) para obtener los valores del retardo de tiempo ionosférico, en caso de que dichas correcciones estén disponibles en las regiones del mundo donde se desea realizar la transferencia de tiempo. Si no se dispone de dichas correcciones ionosféricas del SBAS, los valores TEC de la estación IGS más cercana deberían ofrecer mejor corrección que cualquier otro modelo ionosférico no actualizado.

Referencias

- BILITZA, D. [2001] The International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, Vol. 236, p. 261-275.
- BRUNNER, F. K. and GU, M. [1991] An Improved Model for the Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations. *Manuscripta Geodaetica*, Vol.16, p. 205-214.
- COLLINS, P. and LANGLEY, R. B. [July 1999] Tropospheric Delay Prediction for the WAAS User. *GPS World*, p. 52-58.
- COLLINS, P., LANGLEY, R. and LAMANCE, J. [19th-21 June, 1996] Limiting Factors in Tropospheric Propagation Delay Error Modelling for GPS Airborne Navigation. Presented at The Institute of Navigation 52nd Annual Meeting, Cambridge, Massachusetts, USA.
- GOODMAN, J. M. and AARONS, J. [1990] Ionospheric Effects on Modern Electronic Systems. *Proc. of the IEEE*, Vol. 78, p. 512-528.
- IOANNIDES, R. T. and STRANGWAYS, H. J. [August 2002] Improved Ionospheric Correction for Dual Frequency GPS. *Proceedings of the XXVIIth General Assembly of URSI*, Maastricht, Netherlands.
- KLOBUCHAR, J. A. [May 1987] Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 3, p. 325-331.
- SPIPKER, Jr. J. J. [1996] Tropospheric Effects on GPS. Chapter 12 in *Global Positioning System: Theory and Applications*. Edited by B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., publ. by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ,Washington, DC. Vol. 1, p. 517-546.

CAPÍTULO 12

**SISTEMAS MUNDIALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE COMO
HERRAMIENTA PRIMARIA PARA LA TRANSFERENCIA DE TIEMPO**

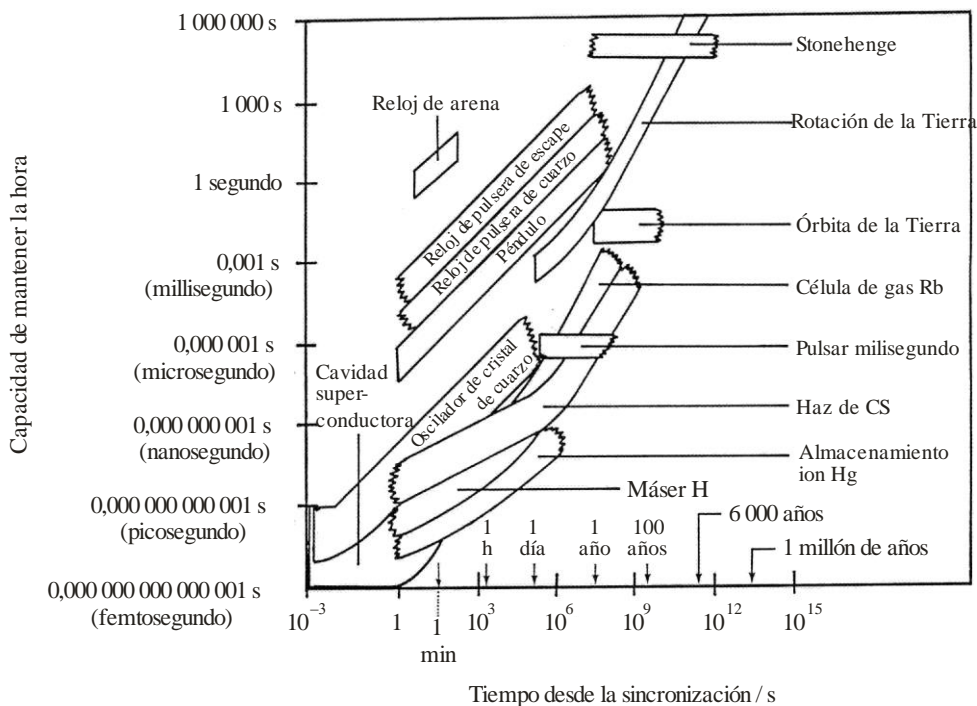
	<i>Página</i>
12.1 Introducción.....	148
12.2 GPS y tiempo.....	149
12.2.1 Cómo el GPS distribuye el tiempo	149
12.2.2 Cómo sincroniza el GPS los relojes a largas distancias.....	150
12.3 Aplicaciones de la transferencia del tiempo GPS	150
12.3.1 Transferencia de tiempo GPS en vista común monocanal con código C/A	152
12.3.2 Comparaciones en un mismo lugar (distancia cero).....	152
12.3.3 Calibración diferencial GPS	153
12.3.4 Circunvalación del mundo.....	153
12.4 Comparación del GPS con otras técnicas de transferencia de tiempo	154
12.4.1 Comparación con la transferencia bidireccional por satélite de tiempo y frecuencia.....	154
12.4.2 Comparación con la transferencia de tiempo por láser.....	155
12.5 Últimos adelantos en la transferencia de tiempo GPS.....	155
12.5.1 Transferencia de tiempo GPS multicanal de visión común	155
12.5.2 Antenas a temperatura estabilizada.....	158
12.5.3 Utilización de la fase de la portadora GPS	159
12.6 Utilización de GLONASS	159
12.7 Conclusión.....	160
Referencias	161

12.1 Introducción

Con el transcurso de los años, los relojes que utilizamos para medir el tiempo son cada vez más precisos y también más exactos. En la Figura 12-1 se muestran los niveles de fidelidad de las diferentes formas de relojes a lo largo de una amplia gama de intervalos de tiempo. Están ordenados de arriba a abajo y de menor a mayor exactitud. La parte inferior del gráfico representa el periodo más reciente. Hoy en día, estamos en vísperas de utilizar relojes con una exactitud de frecuencia de 1×10^{-16} . Esto corresponde a un reloj capaz de funcionar con un nivel de fidelidad equivalente a 10 ps/día.

FIGURA 12-1

Capacidad de mantenimiento de la hora
(Esta Figura es cortesía de D. W. Allan)



Sat_time_freq-12-01

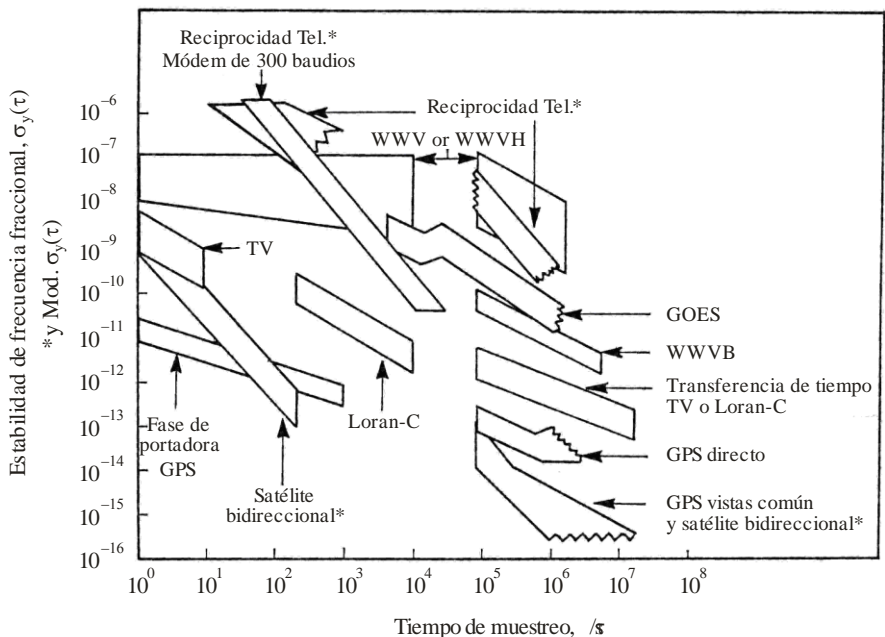
Con el transcurso de los años, la comunidad de cronometría ha recurrido a muy diversas técnicas y sistemas para ayudarles en la tarea de sincronizar relojes o transferir el tiempo. En la Figura 12-2 se muestra el nivel de fidelidad de estos sistemas, que utilizan entre otras cosas:

- sistemas de comunicaciones terrenales, como televisión y teléfonos (MODEMS);
- radiodifusión directa (WWV y WWVH);
- sistemas de navegación, como Loran-C y GPS;
- sistemas de comunicaciones por satélite, como la transferencia bidireccional por satélite de tiempo y frecuencia (TWSTT).

A medida que los relojes son cada vez más exactos y precisos, la comunidad de cronometría ha tratado de encontrar sistemas más precisos y estables que contribuyan a la sincronización. Para esta comunidad, la contribución del GPS a la resolución de los problemas tradicionales en este ámbito ha sido muy importante. Se trata de una fuente y un sistema de transferencia de tiempo fiable.

FIGURA 12-2

**Fidelidad de las diferentes técnicas de transferencia de tiempo
(Esta Figura es cortesía de D. W. Allan)**



Sat_time_freq-12-02

12.2 GPS y tiempo

El GPS es un sistema de navegación que ha demostrado ser una fuente fiable de determinación de la posición tanto para las comunidades militares como las civiles. No obstante, es poco conocido el hecho de que el GPS ha demostrado ser también un instrumento valioso para la comunidad de cronometría [Klepczynski *et al.*, 1996]. El GPS es una herramienta versátil y mundial que puede utilizarse tanto para la distribución del tiempo a cualquier número de usuario como para sincronizar relojes a largas distancias con un grado de precisión y exactitud elevado. En este documento se debate brevemente cómo utiliza la comunidad de cronometría el GPS para tales fines y se destacan los últimos adelantos en este campo.

12.2.1 Cómo el GPS distribuye el tiempo

En cuanto sistema de navegación, el computador contenido en el receptor GPS puede determinar la diferencia entre el reloj integrado en el receptor de usuario y el tiempo GPS o el tiempo de referencia para el GPS, esto es UTC(USNO), es decir, el UTC determinado por el Observatorio Naval de EEUU. El reloj contenido en el receptor GPS del usuario suele ser un reloj de cristal de cuarzo. Ahora bien, en algunos casos, el receptor GPS puede utilizar un reloj externo, como una frecuencia patrón de rubidio o de cesio. El receptor local puede programarse para visualizar el UTC(USNO), difundido por el GPS, o el tiempo GPS dado que el sistema de navegación ofrece la diferencia entre el reloj del receptor local y el tiempo GPS. Cabe destacar que el UTC(USNO) se ajusta al UTC conforme a lo determinado por BIPM. El UTC(USNO) se suele mantener dentro de unos 10 ns del UTC.

Una de las ventajas que tiene la comunidad de cronometría sobre la comunidad de navegación es el número de satélites del GPS que necesita. Los navegadores necesitan cuatro satélites para determinar su posición; tres para obtener su posición y uno para determinar la diferencia horaria del reloj local respecto del tiempo GPS. Dado que las centrales de cronometría están situadas en ubicaciones fijas conocidas, solo requieren un satélite GPS para determinar la diferencia entre su reloj local y el tiempo GPS. Por consiguiente, han modificado los algoritmos en sus receptores de cronometría para sacar provecho de este hecho.

En cuanto sistema de navegación, el computador integrado en el receptor GPS puede determinar la diferencia entre el tiempo GPS o el tiempo de referencia para el GPS (el UTC(USNO)), y el reloj integrado en el receptor de usuario. Este último suele ser de cristal de cuarzo. No obstante, en algunos casos, el receptor GPS puede disponer de un reloj externo, como una frecuencia patrón de rubidio o de cesio. El receptor local puede programarse para visualizar el UTC dado que el sistema de navegación ofrece la diferencia entre el reloj del receptor local y el tiempo GPS.

Una de las ventajas que tiene la comunidad de cronometría sobre la comunidad de navegación es el número de satélites del GPS que necesita. Los navegadores necesitan cuatro satélites para determinar su posición; tres para obtener su posición y uno para determinar la diferencia de la hora del reloj local respecto del tiempo GPS. Dado que las centrales de cronometría están situadas en ubicaciones fijas conocidas, solo requieren un satélite GPS para determinar la diferencia entre su reloj local y el tiempo GPS. Por consiguiente, han modificado los algoritmos en sus receptores de cronometría para sacar provecho de este hecho.

12.2.2 Cómo sincroniza el GPS los relojes a largas distancias

El GPS recurre a una técnica denominada visión común GPS, que consiste en observar simultáneamente el mismo satélite GPS desde dos estaciones. Cada uno de los usuarios en las dos estaciones debe registrar la diferencia entre su reloj local (T) o la referencia horaria local y el tiempo GPS en el mismo instante utilizando el mismo satélite, mediante un receptor GPS conocido como unidad de transferencia horaria GPS (TTU). La unidad GPS TTU es un receptor GPS especial programado para calcular y visualizar aspectos de interés para la comunidad de cronometría.

$$\text{El usuario A observa: } A = T_a - \text{tiempo GPS} \quad (12-1a)$$

$$\text{El usuario B observa: } B = T_b - \text{tiempo GPS} \quad (12-1b)$$

Es fundamental que los dos usuarios observen el mismo satélite en el mismo instante para minimizar los efectos de algunos errores [Allan and Weiss, 1980]. Al calcular la diferencia entre las dos series de números:

$$A - B = (T_a - \text{tiempo GPS}) - (T_b - \text{tiempo GPS}) = T_a - T_b \quad (12-2)$$

se obtiene fácilmente las diferencias entre los dos relojes locales, dado que los relojes GPS comunes se eliminan. Se trata de un proceso muy sencillo pero eficaz dado que no depende del tiempo GPS.

Con el transcurso de los años se ha avanzado considerablemente en la precisión y exactitud de la distribución horaria y las capacidades de sincronización de relojes mediante el GPS. Hoy en día, se ha logrado una precisión de 10-25 ns en la distribución horaria unidireccional con un receptor de código C/A y de 2-15 ns en la sincronización horaria. Se da una gama de valores para estas estimaciones a fin de demostrar que, según la experiencia, el nivel de precisión alcanzable depende del usuario y del lugar específico. Estos valores son representativos de los resultados que obtienen hoy en día los usuarios en diferentes campos, tales como las telecomunicaciones y la metrología.

12.3 Aplicaciones de la transferencia del tiempo GPS

En una red de telecomunicaciones, los nodos principales deben sincronizarse [Butterline, 1993]. Esta sincronización puede hacerse internamente (mediante impulsos síncronos) o externamente (mediante sincronización). El sistema GPS permite efectuar fácilmente la sincronización externa de relojes en los nodos principales dentro de una red con una precisión mínima de 100 ns de tiempo y 1×10^{-13} de frecuencia. En el ámbito de la industria de telecomunicaciones, esta precisión cumple los requisitos del estrato I, que exigen una exactitud de 1 ms de tiempo y 1×10^{-11} de frecuencia.

En algunas redes de *telecomunicaciones*, el tiempo y especialmente la frecuencia se mantienen mediante un conjunto de relojes atómicos, como las frecuencias patrón de rubidio, que se sincronizan con la hora UTC mediante el sistema GPS. Por lo general, la velocidad de cada reloj de rubidio de ese conjunto, respecto del UTC, se determina promediando las observaciones GPS en un intervalo de tiempo. El intervalo seleccionado depende de los requisitos del sistema particular del caso. Es indispensable conocer la diferencia entre la frecuencia de cada reloj de rubidio y el UTC con la mayor precisión y exactitud posible a fin de garantizar que si por alguna razón se pierde contacto con el sistema GPS, la variación de frecuencia del reloj de rubidio respecto del UTC pueda extrapolarse utilizando los últimos valores observados hasta que se reestablezca

contacto con el GPS. La pérdida de contacto no tiene por qué significar un problema inmediato para el sistema de telecomunicaciones en cuestión. Todo dependerá de cuánto tiempo tarde en deteriorarse la sincronización entre los nodos hasta el punto en que ya no puedan seguir comunicándose coherentemente entre sí. Este tiempo puede oscilar entre 1 h y varias semanas, dependiendo del sistema concreto.

La *industria de energía eléctrica* se basa cada vez más en el GPS para registrar la hora. Las empresas eléctricas utilizan ahora el sistema GPS para sincronizar los relojes en sus estaciones de control a fin de localizar averías en el servicio eléctrico dentro de la zona correspondiente. Efectúan una triangulación para localizar el origen de la avería (interrupción en la línea de distribución eléctrica), es decir, sabiendo el instante en que se produjo en tres estaciones cuyos relojes están sincronizados. La industria de energía también necesita sincronizar los relojes de diferentes proveedores de servicio regionales. La sincronización es importante si se desea transferir energía eléctrica de una red de distribución a otra, dado que si la transferencia ocurre fuera de fase se reduce la energía total disponible.

La *metrología horaria* comenzó a utilizar las señales GPS hace 15 años en la National Bureau of Standards (NBS, ahora National Institute of Standards and Technology, NIST). Se propuso un sistema basado en observaciones CV de satélites GPS para la transferencia de tiempo y frecuencia con exactitud [Allan and Weiss, 1980]. Los primeros receptores para este sistema se fabricaron en la NBS y luego en varias empresas comerciales. Se trataba de receptores de código monofrecuencia y monocanal capaces de rastrear un solo satélite a la vez. Para utilizarlos era esencial publicar calendarios de observaciones CV. El método CV era ingenioso y completo: no solo reducía ciertas incertidumbres de origen físico sino que además anulaba la degradación deliberada del tiempo GPS introducida en 1990 con el nombre de disponibilidad selectiva (SA) [Lewandowski and Thomas, 1991].

La introducción del GPS supuso una mejora considerable en la transferencia de tiempo y frecuencia. Con una incertidumbre que oscilaba entre 10 y 20 ns para la comparación horaria en las primeras fases de utilización del GPS, por vez primera fue posible comparar los mejores patrones atómicos del planeta a su máximo nivel de fidelidad utilizando tiempos de integración de unos diez días. Desde entonces se han ido perfeccionando mediante, por ejemplo, coordenadas de antena ultraexactas, efemérides precisas y mediciones de la ionosfera [Lewandowski and Thomas, 1991]. Este proceso culminó a principios de 1990, año en que se consiguió comparar el tiempo con una incertidumbre de unos 3 ns. A su vez, los patrones atómicos mejoraron en un orden de magnitud, lo que hizo posible comparar los nuevos relojes (por ejemplo, frecuencias patrón del haz de cesio HP5071A) a su máximo nivel de fidelidad para tiempos de integración de varios días.

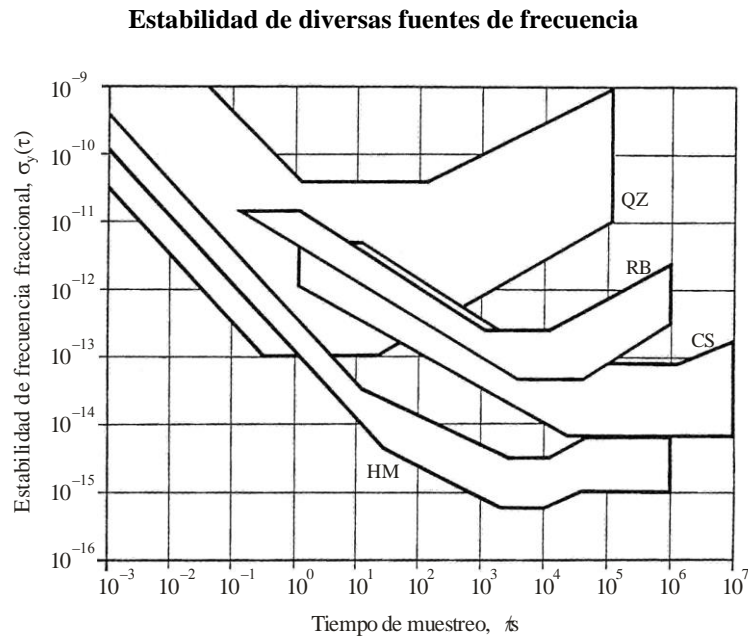
En el ámbito de la metrología está apareciendo hoy en día una serie de frecuencias patrón nuevas e innovadoras. Al parecer, estos dispositivos están llegando a una exactitud de 1×10^{-15} con una inestabilidad a corto plazo de 1×10^{-16} . La fidelidad de una frecuencia patrón se suele describir por la oscilación de sus variaciones de frecuencia en intervalos de tiempo que varían entre 1 segundo y varios meses. Existen muchas formulaciones matemáticas diferentes de estas estadísticas que describen la fidelidad de un reloj. En la Figura 12-3 se muestra una de estas formulaciones: $\sigma_y^2(\tau)$, a veces denominada varianza Allan [1987], para diversos tipos distintos de frecuencias patrón, a saber, cuarzo, rubidio, cesio y máser de hidrógeno. Esta representación gráfica de la fidelidad de una frecuencia patrón presenta diferentes características que son función de los procesos de ruido que se producen en su interior. De hecho, la pendiente de la curva puede utilizarse para determinar el tipo de ruido. Una pendiente nula, es decir una curva paralela al eje de ordenadas, indica que se ha alcanzado el límite de estabilidad de la frecuencia patrón (ruido de parpadeo). El tipo de ruido identificado en este proceso es la modulación de frecuencia de parpadeo.

Dado que los dispositivos más recientes no son transportables y no funcionan en régimen continuo, es importante compararlos en un periodo razonable a fin de determinar la existencia de diferencias sistemáticas entre ellos. Una medición con una precisión de 1 ns durante un periodo de 24 horas corresponde a 1×10^{-14} en frecuencia. Por tanto, a los niveles de hoy en día se necesitarían semanas para comparar dos de estos dispositivos. Por eso es importante desarrollar y mejorar los métodos de transferencia de tiempo que permitan realizar estas comparaciones dentro de periodo de tiempo razonable.

Las escalas de tiempo, TAI y UTC, se basan en datos obtenidos de unos 220 relojes atómicos distribuidos por todo el mundo en unos 50 laboratorios de cronometría. La sección de la BIPM dedicada a cronometría calcula estas escalas de tiempo. La única forma operativa de comparar estos relojes es la técnica GPS CV basada en mediciones monocanal de código C/A. Por ese motivo, la comunidad de cronometría está comprometida en el

desarrollo de nuevos métodos de comparación de tiempo y frecuencia. Entre estas técnicas cabe citar las basadas en mediciones de código C/A GPS multicanal, mediciones de la fase de la portadora GPS, antenas con temperatura estabilizada, y normalización del software del receptor. Otro recurso adicional es recurrir a mediciones de código C/A y código P de GLONASS. Este documento se concentra en los progresos logrados gracias a la utilización de observaciones multicanal del GPS y especialmente a antenas del receptor protegidas. También se destacan algunas dificultades experimentadas con otras técnicas actuales. Describe las inestabilidades del retardo de los actuales receptores de cronometría GPS, y compara la transferencia de tiempo basada en código GPS C/A con otras técnicas de transferencia de tiempo por satélite.

FIGURA 12-3



Sat_time_freq-12-03

12.3.1 Transferencia de tiempo GPS en vista común monocanal con código C/A

A fin de sincronizar relojes muchos usuarios emplean receptores monofrecuencia (código C/A), los cuales sólo rastrean un satélite (monocanal) mediante la técnica OPS CV. En los últimos 15 años, la transferencia de tiempo GPS en CV con código C/A ha mejorado en un orden de magnitud. En la actualidad, la incertidumbre estimada de la transferencia de tiempo GPS monocanal con código C/A es de unos 7 ns en el caso de una sola observación CV y de unos 3 ns para el promedio diario, que corresponde a unas pocas partes en 10^{14} en términos de transferencia de frecuencia. Ahora bien, esta fidelidad es apenas suficiente para la comparación de los actuales relojes atómicos y es preciso mejorarla sin dilación para que pueda utilizarse con los relojes modernos. En los últimos 45 años los relojes atómicos han mejorado en promedio un orden de magnitud cada siete años. La estabilidad de TAI y UTC, que son escalas de tiempo de referencia internacional, es actualmente de dos partes en 10^{15} en un periodo de unas pocas semanas. Así, es razonable predecir que en el año 2005 la estabilidad de TAI y UTC alcanzará unas cuantas partes en 10^{16} .

12.3.2 Comparaciones en un mismo lugar (distancia cero)

Las comparaciones en un mismo lugar son las que calculan CV entre dos sistemas receptores de tiempo GPS situados en el mismo lugar, conectados al mismo reloj y con antenas separadas sólo unos metros. Las comparaciones a distancias más cortas permiten anular los errores comunes del reloj y de otro tipo. Si los receptores que se comparan utilizan software idéntico, no se producirán errores debidos a efemérides de difusión por satélite, a las coordenadas de antena o a la modelización imperfecta de la ionosfera y la troposfera. Toda diferencia constante medida se debe a las variaciones del retardo entre los dos equipos comparados,

comprendido el receptor propiamente dicho, la antena, los cables, etc. Se dispone de datos considerables en los que se describen dichas comparaciones [Kirchner *et al.*, 1993; Buisson *et al.*, 1985]. Todos muestran un comportamiento similar: a corto plazo (un día) y a veces a largo plazo (una estación) hay una dependencia respecto de la temperatura externa. La variación diurna suele ser de unos cuantos nanosegundos, mientras que la estacional es de unos 10 ns. Cabe destacar que el fenómeno observado es un efecto diferencial, de modo que las variaciones reales del retardo debido a la dependencia con la temperatura podrían ser incluso mayores.

12.3.3 Calibración diferencial GPS

La calibración diferencial de equipos de cronometría GPS, basada en la técnica de un solo lugar antes descrita, ha evolucionado en estos últimos años. En este caso, uno de los dos receptores que se comparan es local. El otro es un receptor portátil, que se transporta de un lugar a otro para su calibración. Suponiendo que los retardos del receptor del equipo móvil de cronometría GPS (incluidos cables y antenas) son constantes, se puede calcular la corrección de tiempo diferencial para cada uno de los emplazamientos comparados. La incertidumbre esperada de esta calibración diferencial, si se lleva a cabo en condiciones ideales, es de unos 2 ns. La calibración diferencial del equipo de cronometría GPS permite comparar con exactitud relojes atómicos distantes. La exactitud está limitada por la incertidumbre en la calibración diferencial y el límite del enlace CV.

En los últimos 15 años la BIPM ha realizado varias calibraciones diferenciales [Lewandowski, 1996]. El equipo de cronometría GPS situado en NIST y el Observatorio de París (OP) se han comparado unas diez veces; las correcciones de tiempo diferencial determinadas durante estas calibraciones sólo difieren en unos cuantos nanosegundos. Esto da una idea de las posibilidades de reproducción que pueden obtenerse cuando la calibración se realiza en condiciones ideales, en laboratorios donde el equipo de cronometría GPS, cables inclusive, se gestionan meticulosamente. También da una idea acerca de la estabilidad a largo plazo del equipo de cronometría GPS. Cabe destacar, nuevamente, que aunque la comparación se haga en un mismo lugar, se trata de comparaciones diferenciales. Los efectos estacionales podrían haberse suprimido si los dos receptores estuviesen estado en el hemisferio norte. Hoy en día no se llevan a cabo calibraciones reiteradas entre lugares situados en el hemisferio norte y en el sur.

No se ha logrado obtener una coherencia clara entre calibraciones reiteradas para todos los emplazamientos. En algunos casos las discrepancias fueron de unos 10 ns, atribuibles quizá a que los receptores comparados responden diferentemente a los cambios estacionales de temperatura o a trayectos múltiples desconocidos. En otros casos la discrepancia fue mayor, a veces del orden de decenas de nanosegundos; estos cambios se deben probablemente a cambios no registrados, ya sea de manera deliberada o no, en el equipo de cronometría GPS.

12.3.4 Circunvalación del mundo

Como se mencionó anteriormente, las transferencias de tiempo CV GPS se producen entre pares de estaciones. En algunos casos, resulta posible circundar el planeta, en un sentido, con varios pares de estaciones. Para ello es necesario anular todos los errores de los relojes y en el caso ideal con enlaces horarios sin ruido, se obtendría cero. Se han realizado varias pruebas en el pasado. Una de ellas, realizada durante un periodo de un año con datos de NIST, OP y del Communications Research Laboratory (CRL), utilizó mediciones de efemérides e ionosféricas con postprocesamiento y obtuvo una diferencia de varios nanosegundos que variaba con el tiempo [Lewandowski, 1993]. Como los retardos de hardware también se anulan por el hecho de cerrar el círculo, el resto de fuentes de incertidumbre están vinculadas exclusivamente al trayecto de la señal GPS a través del espacio o a trayectos múltiples. Al parecer las desviaciones observadas pueden ser el resultado de la limitada exactitud de las mediciones ionosféricas. Parte de estas diferencias también pueden deberse a un error en las coordenadas de la antena de uno de los laboratorios participantes. La variación de la diferencia con el tiempo también indica que estas mediciones ionosféricas pueden verse afectadas por las condiciones variables entre el día y la noche, a medida que las órbitas siderales GPS se «mueven» 4 min cada día a lo largo del año. La corrección troposférica también puede afectar en parte a la variación del retardo observada.

La circunvalación del mundo parece ser una buena forma de conocer la exactitud con la que puede calcularse la refracción atmosférica, dado que la visión común de esas líneas de base largas sólo puede realizarse a elevaciones muy pequeñas.

12.4 Comparación del GPS con otras técnicas de transferencia de tiempo

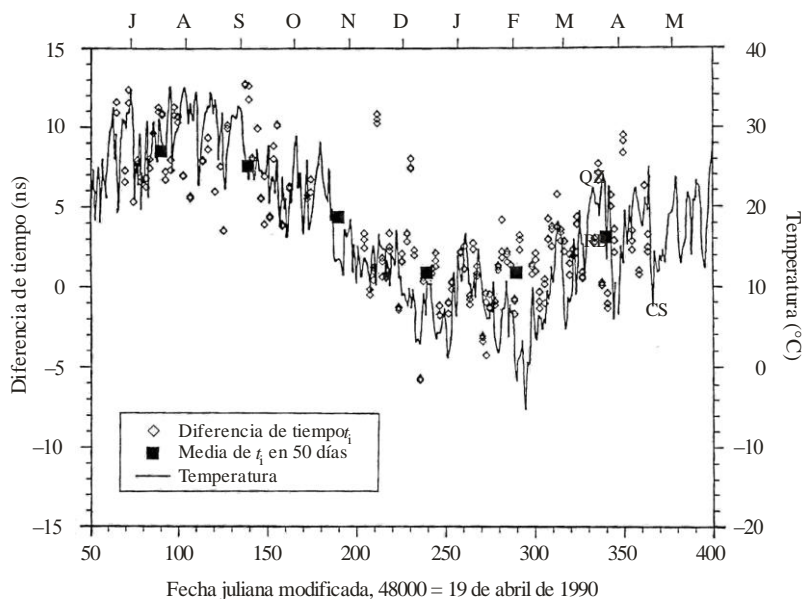
12.4.1 Comparación con la transferencia bidireccional por satélite de tiempo y frecuencia

La transferencia bidireccional por satélite de tiempo y frecuencia (TWSTFT) consiste en utilizar satélites de telecomunicaciones geostacionarios para la transferencia de tiempo con una precisión de varios cientos de picosegundos. En esta técnica, cada una de las dos estaciones, A y B, envían simultáneamente una señal codificada a la otra y ambas reciben una. El inicio de la señal codificada A se sincroniza con el reloj local A, de frecuencia 1-Hz A. La señal codificada B también se sincroniza con un reloj local B. La señal recibida, que está codificada, se utiliza para detener el contador de intervalos de tiempo que se inició por el reloj local del usuario. Antes de calcular la diferencia entre los dos relojes locales, es necesario juntar las dos lecturas de los contadores de las estaciones A y B. Normalmente, se tarda unos 2 min en obtener datos suficientes para calcular un valor promedio, dados los procesos de ruido inherentes. Estas sesiones de dos minutos se suelen llevar a cabo tres veces por semana. En 1991 se compararon durante casi un año las escalas de tiempo del Observatoire de la Cote d'Azur (OCA) y de la Technical University of Graz (TUG), distantes unos 800 km, mediante GPS CV I y TWSTT [Kirchner *et al.*, 1993]. La incertidumbre estipulada del enlace GPS es de 3 ns.

Los datos presentados en la Figura 12-4 muestran las diferencias entre los valores de [UTC(TUG)-Reloj(OCA)] obtenidas con las medidas tomadas por TWSTT y GPS CV. Los enlaces se calibraron de manera independiente al final del experimento midiendo los retardos diferenciales de los receptores GPS y las estaciones en Tierra por satélite, para lo cual se transportó un receptor GPS y un terminal de satélite de un lugar al otro. Dado que las diferencias entre los valores de TWSTT y GPS CV muestran una variación sistemática (estacional) aparente, el valor medio y la desviación típica de las diferencias (3,6 y 3,9 ns, respectivamente) no son mediciones adecuadas con las que describir la coherencia de las dos técnicas durante el periodo de comparación. La varianza modificada de Allan de las diferencias muestra una PM de ruido blanco de hasta un periodo promedio de unos 50 días, por lo que el cálculo de valores medios y las correspondientes desviaciones típicas se justifican para intervalos de datos de hasta este valor. Durante el periodo de comparación, el promedio de 50 días es de 3,2 ns y la desviación típica de 2,6 ns. La diferencia máxima del promedio es de 8 ns y corresponde a un efecto estacional que, nuevamente, es probable que sea el resultado de retardos dependientes de la temperatura en el equipo receptor GPS utilizado (Figura 12-4).

FIGURA 12-4

Diferencias entre (UTC(TUG)-Reloj(OCA)) obtenidas por TWSTT, diferencias entre (UTC(TUG)-Reloj(OCA)) obtenidas por vista común GPS y temperatura exterior en TUG



La técnica TWSTT se emplea en ocho laboratorios europeos y dos estadounidenses y aún no está totalmente operativa. Los resultados del experimento realizado en 1997, muestran la misma dependencia con la temperatura de las diferencias entre las medidas tomadas por TWSTT y por GPS CV que la del experimento de 1991.

12.4.2 Comparación con la transferencia de tiempo por láser

La sincronización por láser desde órbita estacionaria (LASSO) era una técnica que permitía comparar relojes atómicos distantes con una incertidumbre de unos 100 ps. Durante un experimento que abarcaba el periodo del 8 de diciembre de 1992 al 28 de enero de 1993, se compararon dos relojes atómicos, uno situado en el McDonald Observatory, TX, y el otro en OCA, Francia (distantes 8000 km) utilizando para ello LASSO y GPS CV [Friedelance, 1994; Baumont *et al.*, 1993]. Debido a las pésimas condiciones climáticas sólo se llevaron a cabo cinco sesiones LASSO. El enlace GPS CV se calculó sin aplicar mediciones precisas de bifrecuencia ionosféricas o de efemérides, por lo que se estimó una incertidumbre de 10 ns.

El enlace GPS se calibró por medio de un receptor portátil: el enlace LASSO tenía una incertidumbre estimada inferior a 100 ps, pero no se calibró. Esta comparación de la transferencia de tiempo GPS CV y LASSO es coherente en lo que respecta a las incertidumbres de cada caso y con una deriva de unos 192 ns. Las medidas tomadas de las diferencias entre los dos métodos alcanzan discrepancias de hasta unos 15 ns. El error cuadrático medio (valor eficaz) de los valores residuales respecto de la media es de 6 ns.

En los últimos años ha surgido una nueva generación de transferencia de tiempo por láser, por ejemplo T2L2 (transferencia de tiempo por enlace láser, cuya incertidumbre esperada es de 30 ps) o LTT (transferencia de tiempo por láser). Estos dos experimentos se encuentran a bordo de los satélites Jason 2 y Compass, respectivamente, desde 2008. Asimismo, cabe esperar que el European laser timing (ELT) se integrará a bordo de la ISS en el marco de la misión ACES de la ESA.

Si bien estos sistemas son inherentemente inadecuados para funciones operativas, debido a su sensibilidad a las condiciones climáticas, no cabe duda de que son excelentes herramientas para evaluar la exactitud de las transferencias de tiempo GNSS y TWSTT. Por otra parte, como estos sistemas realizan transferencias de tiempo extremadamente precisas entre relojes en tierra de última generación, también pueden emplearse en experimentos de física fundamental.

12.5 Últimos adelantos en la transferencia de tiempo GPS

12.5.1 Transferencia de tiempo GPS multicanal de visión común

La transferencia de tiempo GPS ha resurgido últimamente gracias al desarrollo y disponibilidad de receptores de cronometría multicanal, resultantes de completar la constelación GPS, de las reducciones en el precio de los receptores y de la demanda por parte de la comunidad de cronometría. En los 15 años la transferencia de tiempo internacional se realizaba mediante receptores GPS monocanal de código C/A y el calendario de CV internacional de trayectorias de 13 minutos estándar [Allan and Weiss, 1980].

Como los receptores antiguos tienen memoria reducida, no podrían programarse más de 48 trayectorias por día; en la práctica este número es incluso menor. Se eligió una sola observación por satélite con un periodo de integración de 13 min en razón de la velocidad de transmisión del mensaje navegación GPS. La transmisión de un mensaje completo (25 páginas) puede tardar hasta 12,5 min. Al integrar en 13 min se garantiza que todas las medidas CV tomadas contienen los mismos datos. En los primeros días del GPS, se observaron discontinuidades considerables entre mensajes de navegación consecutivos. Esto ya no es así, por lo que quizá podrían reducirse el periodo de integración.

Los receptores de código C/A multicanal aquí considerados observan los satélites GPS a su vista y utilizan trayectorias estándar de 13 min cada 16 min en determinados patrones horarios. Los datos salida multicanal se almacenan en un solo fichero de formato normalizado [Allan and Thomas, 1994; Lewandowski, *et al.*, 1996]. Los patrones horarios se modifican diariamente en 4 min para seguir las órbitas siderales del GPS.

Los patrones horarios tienen como referencia el 1 de octubre de 1997, fecha adoptada por convenio [Report on GPS and GLONASS standardization, 1997]. El calendario internacional de seguimiento CV monocanal de la BIPM utiliza estos mismos patrones horarios, que se publican cada seis meses. Los instrumentos que utiliza

el procedimiento «todo en vista» también observan el calendario monocanal internacional. De este modo se simplifica enormemente su introducción en paralelo con el actual sistema de observaciones monocanal. Parece probable que las observaciones monocanal pronto dejarán de existir, y no habrá necesidad del calendario periódico de la BIPM.

Aunque en teoría pueden observarse simultáneamente hasta 12 satélites GPS, en un emplazamiento urbano normal sólo se observan unos cinco satélites por encima de 15° (y por tanto revisten interés para la transferencia de tiempo). Como hay 89 periodos útiles de 16 minutos en un día, pueden observarse 89 trayectorias en cada canal. Utilizando todas las observaciones disponibles por encima de 15° (unos 5 por periodo de 16 minutos), es posible observar unas 445 trayectorias al día. Todas estas trayectorias pueden utilizarse para los enlaces regionales CV. Para distancias muy grandes, entre continentes, se puede disponer de unas 100 trayectorias CV utilizando un método multicanal.

El aumento en un factor diez del número de CV en el modo multicanal GPS respecto del modo monocanal, debería proporcionar una mejora consecuente en la calidad de la transferencia de tiempo y frecuencia. En teoría cabe esperar una ganancia en estabilidad de $(10)^{1/2} = 3,2$ para el promediado de tiempos, donde el ruido de fase blanco es preponderante [Lewandowski *et al.*, 1997].

Ahora bien, las observaciones multicanal pueden estar sujetas a variaciones sistemáticas, debidas principalmente a los efectos ambientales sobre la antena. Estas variaciones deberían afectar a todos los canales de manera análoga a la descrita anteriormente para receptores monocanal, excepto en el caso de los efectos causados por trayectos múltiples. La ganancia obtenida mediante observaciones multicanal, y los efectos sistemáticos, se ilustran mediante comparaciones de ensayos que se describen a continuación.

En el experimento de comparación se tomó como enlace de tiempo entre la BIPM y el laboratorio NMI Van-Swinden Laboratorium (VSL), Delft (Países Bajos), dado que están distanciados unos 400 km [Lewandowski *et al.*, 1997]. Los dos laboratorios están equipados con receptores GPS multicanal y las coordenadas de sus antenas en tierra se expresan en el marco ITRF con una incertidumbre de 0,3 m.

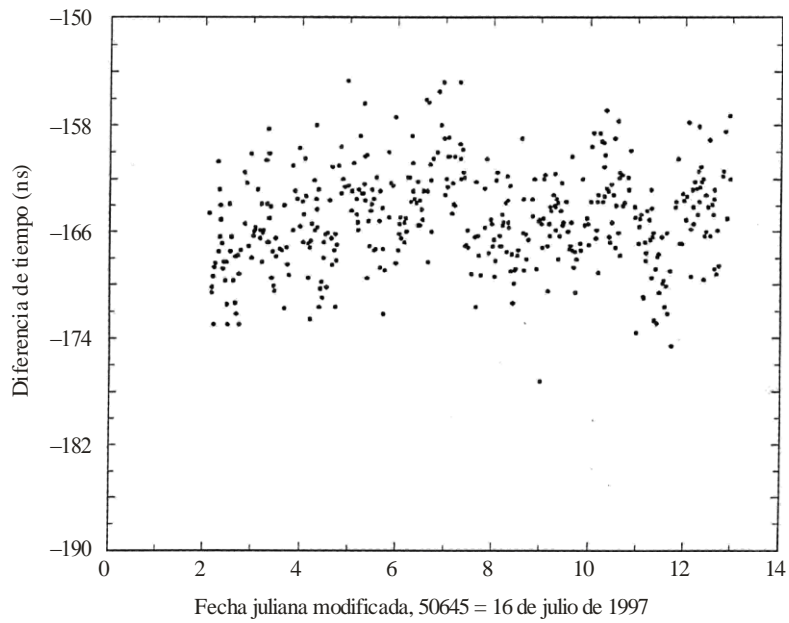
En los dos laboratorios se conectaron los receptores a relojes HP5071A. Los dos receptores se calibraron utilizando un receptor portátil. Se utilizaron los mismos receptores (durante el mismo periodo de 10 días), para la transferencia de tiempo en modo monocanal y multicanal. Se obtuvieron unas 38 observaciones útiles por día en el modo monocanal y unas 350 en el modo multicanal (Figuras 12-5 y 12-6). El nivel de ruido de unos 3 ns es similar en ambos enlaces.

Considérese la ventaja de aumentar el número de CV diario de 38 a 350. La ganancia teórica en estabilidad es $(350/38)^{1/2} = 3,0$. Esta ganancia puede observarse en las curvas para tiempos promedios inferiores a 10^4 s y en transferencias de tiempo superiores a 400 km, y también en la comparación en un mismo lugar efectuada por la BIPM. Las curvas de estabilidad para la comparación en un mismo lugar se recogen en la Figura 12-7. La comparación multicanal se ve afectada por un efecto sistemático que se observa claramente a unos 3×10^4 s (curva 2).

Este efecto se reduce cuando se activan las antenas con temperatura estabilizada (curva 3) (§ 12.5.2). Los efectos sistemáticos son invisibles en la comparación monocanal (curva 1) al quedar sin duda ocultos por el nivel de ruido más grande. Así, la ventaja de las observaciones multicanal se ve gravemente limitada por la inestabilidad de los retardos del receptor y apenas permite comparar las unidades HP5071A a su máxima fidelidad con tiempos de integración de cinco días, intervalo que se considera habitual para calcular el TAI.

FIGURA 12-5

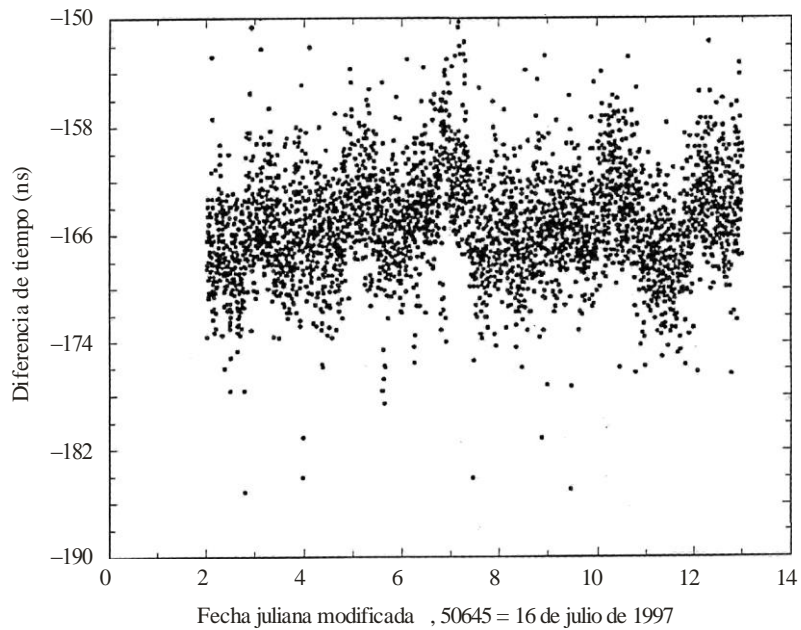
(reloj BIPM – reloj VSL) mediante vista común GPS monocanal



Sat_time_freq-12-05

FIGURA 12-6

(reloj BIPM – reloj VSL) mediante vista común GPS multicanal



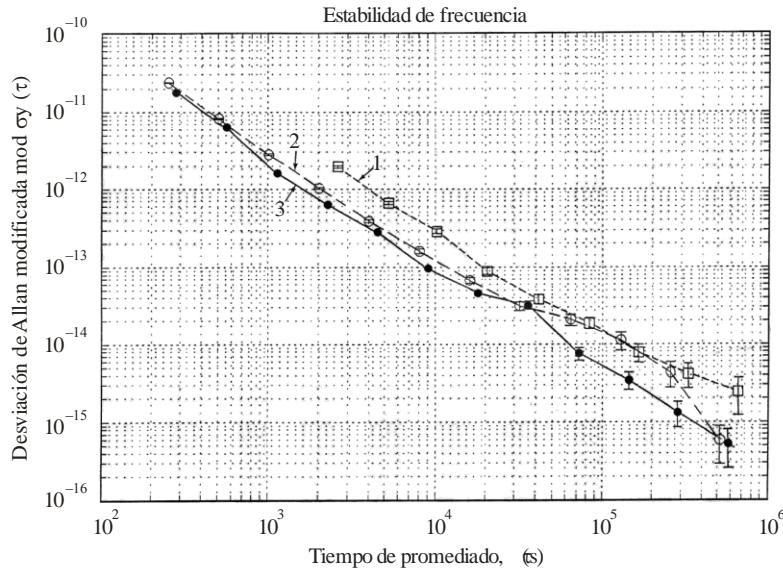
Sat_time_freq-12-06

FIGURA 12-7

Comparación en un mismo lugar de dos receptores de tiempo GPS en la BIPM (dos antenas separadas en un mismo lugar).

Desviación de Allan modificada:

- a) comparación monocanal sin estabilización de temperatura de la antena;
- b) comparación multicanal sin estabilización de temperatura de la antena;
- c) comparación multicanal con estabilización de temperatura de la antena



Sat_time_freq-12-07

12.5.2 Antenas a temperatura estabilizada

Está generalmente admitido y bien documentado que los equipos receptores del tiempo GPS, y más concretamente sus antenas, son sensibles a las condiciones ambientales [Lewandowski and Tourde, 1990]. En el caso de un sistema receptor de tiempo GPS convencional, esta sensibilidad podría expresarse mediante un coeficiente de unos 0,2 ns/°C y puede aproximarse a 2 ns/°C. Este era uno de los mayores impedimentos, y lo fue, para el objetivo de lograr una exactitud de 1 ns anunciado para la transferencia de tiempo GPS. La Figura 12-4 muestra que al comparar la GPS CV con dos transferencias bidireccionales por satélite de tiempo durante un periodo de un año aproximadamente se observa un efecto estacional de cresta a cresta de 8 ns, que se atribuye a la inestabilidad del equipo de cronometría GPS. La solución a este problema no se encontró inmediatamente, e incluso hoy en día casi la totalidad de los equipos de cronometría GPS utilizados en los laboratorios de cronometría se ven afectados por dicha inestabilidad. Y lo que es aún más importante, la ventaja resultante de las recientes observaciones multicanal «todo a la vista» se ve gravemente limitada por esta inestabilidad de los retardos del receptor.

Como no existe una solución práctica para resolver el problema con electrónica, se propuso otro método [Lewandowski, *et al.*, 1997]: proteger la antena con un horno a temperatura estabilizada. El principal objetivo de la estabilización de la temperatura de la antena es mantener los componentes esenciales a temperatura constante.

Los primeros prototipos de hornos se fabricaron en la BIPM. Poco después apareció una versión comercial, denominada antena a temperatura estabilizada (TSA). Una comparación preliminar en un mismo lugar de dos receptores multicanal GPS equipados con antenas TSA en la BIPM muestra la eliminación de la inestabilidad sistemática, y una estabilidad de frecuencia fraccional de unas cuantas partes de 10¹⁵ para periodos de promediado de un día aproximadamente, Figura 12-7. Esta mejora permitió aprovechar plenamente las ventajas de la transferencia multicanal y alcanzar la fidelidad esperada al utilizar la fase de portadora GPS.

12.5.3 Utilización de la fase de la portadora GPS

El servicio GPS internacional (IGS), creado para mejorar las aplicaciones geodésicas del GPS, ha desempeñado una función importante en los últimos adelantos en la transferencia de tiempo GPS. Los actuales receptores de transferencia de tiempo suelen descartar la fase de la portadora y los datos de pseudodistancia una vez ejecutado el algoritmo de transferencia de tiempo. Si estos datos se mantienen, se puede efectuar un postprocesamiento con algoritmos más sofisticados a fin de lograr una transferencia de tiempo y frecuencia más precisa. Estos datos ya se utilizan en geodesia para la determinación de la posición diferencial. El enganche con la fase de la portadora reduce los efectos causados por trayectos múltiples. Gracias a los receptores multicanal hoy disponibles y a las técnicas de doble diferenciación CV muy utilizadas en geodesia, es posible mantener una misma fase de portadora en dos emplazamientos distintos. Si se utilizan retardos ionosféricos medidos junto con correcciones de la troposfera compensadas, se puede lograr una estabilidad de frecuencia de una parte en 10^{15} con tiempos de integración del orden de un día [Schildknecht *et al.*, 1990; Overney *et al.*, 1998]. Esta precisión es más o menos la necesaria para comparar las actuales frecuencias patrón. Para lograr esta precisión es preciso realizar mediciones continuas en lugar de medir una vez al día.

Las ventajas de utilizar mediciones de fase de portadora para comparar frecuencias ha quedado demostrado en varios experimentos [Overney *et al.*, 1998; Petit *et al.*, 1996]. Un formato conveniente para registrar los datos de pseudodistancia y la fase de la portadora GPS y GLONASS es el RINEX (formato de intercambio independiente del receptor) [Gurtner, 1994]. Si el receptor de cronometría dispone de capacidad para ello, se recomienda generar un fichero de datos de pseudodistancia y fase de portadora en formato RINEX cada 15s para todos los satélites a la vista. Este fichero de datos puede luego utilizarse para el postprocesamiento de datos precisos de tiempo y frecuencia.

Los metrologos y geodestas de cronometría, que conocen con mayor profundidad las señales de fase de la portadora GPS, han comenzado recientemente a colaborar en el marco de una iniciativa importante denominada «Proyecto piloto IGS/BIPM». El objetivo de este Proyecto es estudiar comparaciones de tiempo y frecuencia exactas utilizando mediciones de código y fase GPS. Uno de los principales problemas es resolver las ambigüedades de fase en las aplicaciones de cronometría que limitan la exactitud de la técnica.

Es importante señalar que la fase de la portadora también se ve afectada por las inestabilidades del retardo causado por el hardware. También en este caso, a fin de poder aprovechar al máximo esta prometedora tecnología, es preciso estabilizar y medir los retardos introducidos por las diversas partes del equipo receptor.

12.6 Utilización de GLONASS

El sistema GLONASS [Gouzhva *et al.*, 1992] es muy similar al GPS en muchos aspectos, pero hasta hace poco la comunidad internacional de metrología raramente lo utilizaba debido a que no se disponía de receptores comerciales adecuados. Esta situación está cambiando y ya se han creado los primeros enlaces horarios internacionales permanentes. Los receptores de cronometría GLONASS ya están disponibles y son conformes con las mismas normas que los receptores de cronometría GPS. Se han realizado varios estudios para comparar la fidelidad de las mediciones monocanal con código C/A GPS y GLONASS [Lewandowski *et al.*, 1993]. Todos estos estudios muestran que los dos sistemas tienen una fidelidad similar para enlaces regionales. Asimismo, las antenas receptoras del GLONASS muestran una dependencia con la temperatura similar a la de las antenas GPS. En el caso de enlaces intercontinentales, es necesario recurrir a efemérides GLONASS precisas postprocesadas.

Algunos estudios recientes demuestran la viabilidad de la transferencia de tiempo multicanal de código C/A GPS+GLONASS [Lewandowski *et al.*, 1997]. Los receptores multicódigo y multicanal de sistema dual funcionan satisfactoriamente sin problemas de software. Utilizan un software y un formato estándar [Lewandowski *et al.*, 1996]. Se ha comprobado su calidad metrológica por comparación con otros receptores de cronometría GPS. La utilización conjunta de GPS y GLONASS en modo multicanal casi duplica el número de observaciones (la constelación GLONASS está incompleta). La ganancia en estabilidad de la transferencia de tiempo multicanal GPS+GLONASS respecto de las mediciones GPS monocanal es de cuatro aproximadamente. El GPS multicanal por sí mismo ofrece una ganancia en estabilidad de tres aproximadamente.

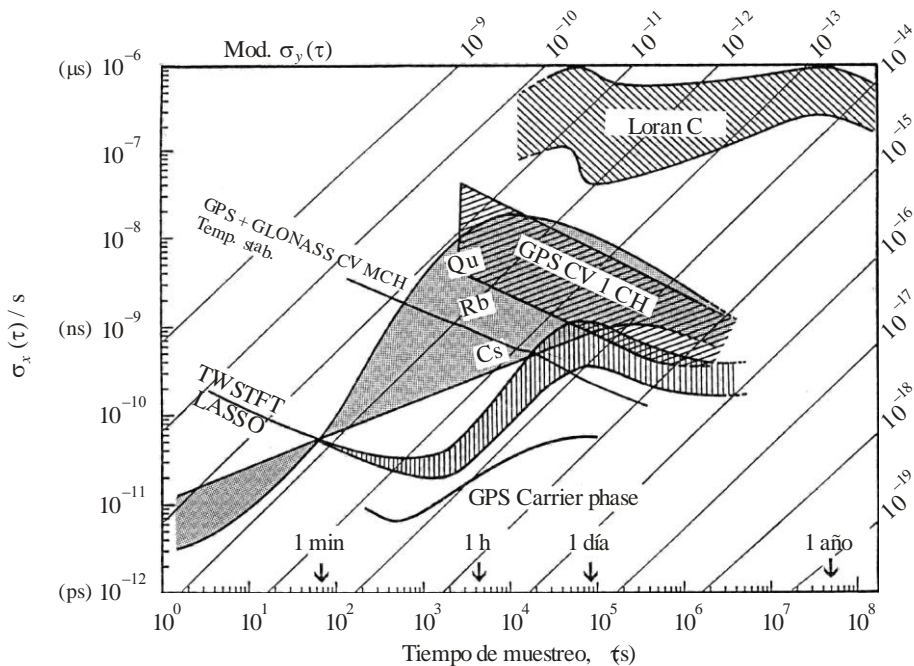
La utilización del código P de GLONASS presenta una ventaja obvia, a saber, menor ruido en las medidas de código básico denominada pseudodistancia. La precisión al medir pseudodistancia es del orden de 1/100 de la longitud de onda del código considerado. Es decir, la precisión de las pseudodistancias medidas con código P GLONASS es de 1 ns (longitud de onda del código P de GLONASS es de 30 pulgadas o unos 100 ns), mientras que el código C/A GLONASS permite una precisión al medir pseudodistancias de sólo 10 ns (la longitud de onda del código C/A de GLONASS es de 300 pulgadas o unos 1 000 ns). Recientemente se han realizado algunos experimentos utilizando receptores de cronometría de código P GLONASS de nueva generación. Pese a las dificultades debidas a la diferencia en las frecuencias GLONASS, lo que causa distintos retardos debidos al hardware, los primeros resultados son muy prometedores [Azoubib *et al.*, 1998].

12.7 Conclusión

El GPS se ha convertido en un sistema esencial para la comunidad de cronometría. Es una fuente de tiempo que puede emplearse para comparar relojes. Actualmente, el GPS se está convirtiendo en un sistema de transferencia de tiempo con una precisión próxima a ns/día. En la Figura 12-8 se comparan las técnicas más recientes GPS con la técnica habitual CV GPS y otras técnicas. Ahora bien, se están avanzando en nuevas técnicas que mejorarán enormemente ese número.

FIGURA 12-8

Comparación de algunas de las más recientes técnicas de transferencia de tiempo con la transferencia clásica de visión común monocal del GPS. (Los datos de reloj y Loran-C, TWSTFT y datos de la fase de la portadora GPS son cortesía de D. W. Allan.)



Sat_time_freq-12-08

La transferencia de tiempo GPS con código C/A, tal como se utiliza hoy en día, se ve limitada principalmente por las inestabilidades del hardware y, a largas distancias, por la incertidumbre en la determinación de retardos ionosféricos. La incertidumbre de comparaciones monocal es de 3-4 ns para periodos de integración de un día, a veces mayor. Esto es apenas suficiente para comparar relojes comerciales de gama media HP5071A, por lo que resulta obviamente insuficiente para comparar frecuencias patrón de laboratorios de alta fidelidad. La fase de la portadora GPS ofrece grandes posibilidades para efectuar la comparación de frecuencias, dada su

elevada precisión. Una vez esté operativa, se utilizará para comparar patrones de frecuencia de laboratorios de alta fidelidad y podría servir para evaluar otras técnicas de transferencia de tiempo y frecuencia. También debería alcanzar estabilidad del orden de 100 ps/día, e incluso mejor. Si pudieran resolverse las ambigüedades de la fase de portadora GPS, esta técnica podría utilizarse no sólo para la transferencia de frecuencia sino también para la transferencia de tiempo.

También se está produciendo una evolución del GPS propiamente dicho. El programa de «modernización del GPS» utilizará una segunda y tercera señales civiles codificadas, lo que se traducirá en progresos considerables, por cuanto la disponibilidad de un mayor número de frecuencias civiles permitirá tomar medidas de la ionosfera con mayor exactitud y supondrá una solución más eficaz para resolver las ambigüedades de la fase de la portadora GPS. Por otra parte, la futura constelación GPS podría contener más satélites y sus señales podrían ser más potentes. De conformidad con la Directiva Presidencial de marzo de 1996, SA se puso a cero. De esta forma se ha mejorado sobremanera la difusión de tiempo por GPS.

Una de las etapas más importantes para mejorar la exactitud del receptor es el desarrollo de un sistema de calibración integrado para los receptores de cronometría. Esta sería la mejor forma de resolver las actuales dificultades relacionadas con la inestabilidad del retardo en los equipos de cronometría GPS. Hasta tanto no se disponga comúnmente de sistemas de calibración integrados, debe estabilizarse la temperatura de los componentes electrónicos de la antena y de todo amplificador de línea en exterior. La utilización de recintos a temperatura estable debería mejorar no solamente la divulgación de tiempo y la transferencia de tiempo CV de código C/A, sino también la comparación de frecuencias mediante la medición de la fase de la portadora.

La combinación de tomar medidas con código GPS y GLONASS en los receptores de equipos de cronometría parece presentar sin duda ventajas adicionales para la comparación de tiempo a escala internacional. En el caso de GLONASS, la posibilidad de acceder a códigos precisos en dos frecuencias constituye un mecanismo para medir retardos ionosféricos. Por otra parte, las señales GLONASS se difunden en 48 frecuencias (en el futuro serán 24) a diferencia con el GPS que difunde en dos. De este modo se obtiene un sistema de radiodifusión robusto más resistente a interferencia. Ahora bien, GLONASS tiene que mejorar su fiabilidad y garantizar la continuidad de sus operaciones.

¿Qué se espera en el futuro? En los últimos 45 años la fidelidad de las frecuencias patrón atómicas ha mejorado en promedio un orden de magnitud cada siete años. La necesidad de compararlas a grandes distancias en el futuro exigirá realizar adecuados progresos en la transferencia de hora y frecuencia. De la información detallada que figura en el presente documento se desprende que estas dificultades se superarán gracias a las técnicas de transferencia de tiempo GPS.

Referencias

- ALLAN, D. W. [November, 1987] Time and frequency (time-domain) characterization, estimation and prediction of precision clocks and oscillators. *IEEE Trans. Ultrasonics., Ferroelectrics., Fre. Contr.*, UFFC-34, p. 647-654.
- ALLAN, D. W. and LEPEK, A. [1993] Trends in international timing. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 221-227.
- ALLAN, D. W. and THOMAS, C. [1994] Technical directives for standardization of GPS time receiver software. *Metrologia*, Vol. 31, 1, p. 69-79.
- ALLAN, D. W. and WEISS, M. M. [1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. *Proc. 1980 Frequency Control Symp.*, p. 334-336.
- AZOUBIB, J., LEWANDOWSKI, W. and DE JONG, G., [1998] A new approach to international time transfer: multi-channel multi-code GPS+GLONASS common-view observations. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*, 1998, p. 87-93.
- BAERISWYL, P., T. SCHILDKNECHT, J. UTZINGER, and G. BEUTLER, [1995] Frequency and time transfer with geodetic GPS receivers: First results. *Proc. 9th European Frequency and Time Forum*, p. 46-51.

- BAUMONT, F., FRIEDELANCE, P., GRUDLER, P., VEILLET, C., WIAN, L., LEWANDOWSKI, W. and G. PETIT [1993] Preliminary report on the comparison of LASSO and GPS time transfers. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 641-643.
- BIPM [1997] Report of the open forum on GPS and GLONASS standardization. Presented at 6th CGGTTS Meeting, 1997 (available, on request from).
- BUISSON, J. A., OAKS, O. J. and LISTER, M. J. [1985] Remote calibration and time synchronization (R-CATS) between major European time observatories and the US Naval Observatory using GPS. *Proc. 17th Annual. P7TI Meeting*, p. 201-222.
- BUTTERLINE, E. [January, 1993] Reach out and time someone. *GPS World*, p. 32-40.
- FRIEDELANCE, P. [1994] L'expérience LASSO. Ph. D. dissertation, Université de Paris 6, Paris, France.
- GOUZHVA, J. *et al.* [July/August, 1992] High-precision time and frequency dissemination with GLONASS. *GPS World*, p. 40-49.
- GURTNER, W. [1994] RINEX: The receiver independent exchange format version 2. Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., GRUDLER, P., BAUMONT, F., VEILLET, C., LEWANDOWSKI, W., HANSON, W., KLEPCZYNSKI, W. and UHRICH, P. [September, 1993] Comparison of GPS common-view and two-way satellite time transfer over a baseline of 800 km. *Metrologia*, Vol. 30, 3, p. 183-192.
- KLEPCZYNSKI, W. J., [1996] GPS for precise time and time interval measurement. *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol.11. B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., Eds. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, chapter 17, p. 483-500.
- LEWANDOWSKI, W. [1996] Determination of the differential time correction between GPS time equipment located at the Observatoire de Paris, Paris, France, and the United States Naval Observatory, Washington, DC, USA. BIPM, Rep. BIPM-96/10.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., DE JONG, G., NAWROCKI, J. and DANAHER, J.[...] A new approach to international time and frequency comparisons: "All-in-view" multi-channel GPS+GLONASS observations. *Proc. ION GPS97*, p. 1085-1091.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., GEVORKYAN, A. G., BOGDANOV, P. P., KLEPCZYNSKI, W. J., MIRANIAN, M., DANAHER, J., KOSHELYAEVSKY, N. B. and ALLAN, D. W. [1996] A contribution to the standardization of GPS and GLONASS time transfers. *Proc. 27th P7TI Meeting*, p. 367-383.
- LEWANDOWSKI, W., MOUSSAY, P., CHERENKOV, G. T., KOSHELYAEVSKY, N. B. and PUSHKIN, S. B. [1993] GLONASS common-view time transfer. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 147-151.
- LEWANDOWSKI, W., MOUSSAY, P., DANAHER, J., GERLACH, R. and LEVASSEUR, E. [1997] Temperature-protected antennas for satellite time transfer receivers. *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 498-503.
- LEWANDOWSKI, W., PETIT, G. and THOMAS, C. [April 1993] Precision and accuracy of GPS time transfer. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 42, p. 474-478.
- LEWANDOWSKI, W. and THOMAS, C. [July 1991] GPS time transfer. *Proc. IEEE*, Vol. 79, 7, p. 991-1000.
- LEWANDOWSKI, W. and TOURDE, R. [1990] Sensitivity to the external temperature of some GPS timing receivers. *Proc. 22nd P7TI Meeting*, p. 307-316.
- OVERNEY, F., PROST, L., DUDLE, D., SCHILDKNECHT, T., BEUTLER, G., DAVIS, J. A., FURLONG, J. M. and HETZEL, P. [1998] GPS time transfer using geodetic receivers (GeTT): Results on European baselines. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*.
- PETIT, G., MOUSSAY, P. and THOMAS, C. [1996] GPS time transfer using carrier-phase and P-code measurements. *Proc. 10th European Frequency and Time Forum*, p. 279-285.
- SCHILDKNECHT, T., BEUTLER, G., GURTNER, W. and ROTHACHER, M. M. [1990] Toward sub-nanosecond GPS time transfer with geodetic GPS receivers: First results. *Proc. 4th European Frequency and Time Forum*, p. 335-346.

CAPÍTULO 13

**TÉCNICAS GEODÉSICAS UTILIZANDO MEDICIONES DE FASE
Y CÓDIGO GPS**

	<i>Página</i>
13.1 Introducción.....	164
13.2 Consideraciones sobre instrumentos y hardware.....	164
13.2.1 Componentes del satélite GPS.....	165
13.2.2 Instalaciones de antena de rastreo GPS.....	166
13.2.3 Cables y conexiones de antena.....	168
13.2.4 Receptores GPS.....	168
13.2.5 Evaluación de los efectos multitrayecto y pruebas del sistema.....	169
13.2.6 Calibración del retardo de la estación de rastreo.....	169
13.3 Estrategias de análisis de datos.....	170
13.3.1 Ecuación de observación GPS.....	171
13.3.2 Métodos para soluciones globales.....	172
13.3.3 Marcos y modelos de referencia para los términos de corrección.....	173
13.3.4 Posicionamiento de punto preciso.....	174
13.3.5 Efectos de los errores en las soluciones cronométricas.....	175
13.4 Escalas de tiempo y resultados cronométricos IGS.....	176
13.4.1 Resultados disponibles.....	176
13.4.2 Escalas de tiempo IGS.....	178
13.5 Evaluación de la fidelidad mediante el análisis de la discontinuidad en el intervalo día.....	181
13.6 Comparaciones con resultados independientes de transferencia de tiempo bidireccional.....	185
13.7 Evaluación de la fidelidad de la transferencia de tiempo.....	187
13.8 Futuras tendencias.....	188
Referencias.....	189

13.1 Introducción

Durante más de dos décadas, los métodos GPS han servido de base para transferencias de tiempo y frecuencia más exactas. El mantenimiento del Tiempo universal coordinado (UTC) ha dependido habitualmente de análisis de datos de pseudodistancia monofrecuencia (código C/A) y de datos de visión común simples (CV) que asumen la cancelación de la mayoría de errores sistemáticos [Allan y Weiss, 1980]. Gracias a la sustitución generalizada de los receptores monocanal por unidades multicanal se ha mejorado la obtención de datos, lo que permite efectuar comparaciones CV intercontinentales con incertidumbres de unos pocos ns mediadas en intervalos de cinco días [Lewandowski *et al.*, 1997]. Por el contrario, la evolución paralela de los métodos geodésicos de gran precisión que utilizan observaciones de fase portadora GPS de doble frecuencia han demostrado repetibilidades de posicionamiento a nivel centimétrico en integraciones de un día [Zumberge *et al.*, 1997]. Suponiendo que esos resultados de posicionamiento también pueden representarse como equivalentes de tiempo de viaje luz (~33 ps), resulta evidente que las técnicas geodésicas basadas en la fase portadora GPS permitirán realizar comparaciones de tiempo global a niveles inferiores al ns, como se reconoció generalmente en la década de 1990. De hecho, ha quedado demostrado que este método tiene una precisión cercana a ~100 ps por época en los casos favorables para arcos de análisis de un día [Ray y Senior, 2003]. No obstante, la capacidad absoluta de transferencia de tiempo sigue estando limitada a >1 ns a causa de las incertidumbres de calibración instrumental [Petit *et al.*, 2001]. Además de una mayor precisión (equivalente a la estabilidad de frecuencia) el método geodésico se presta fácilmente a la difusión mundial de tiempo y frecuencia, lo que es coherente con el diseño operativo básico del GPS (aunque sustituyendo el mensaje de radiodifusión GPS por información más precisa), contrariamente a la naturaleza punto a punto de CV, que además se degrada a medida que aumenta la distancia de base.

Los ingredientes esenciales del método geodésico son la disponibilidad de observaciones GPS de doble frecuencia, tanto de la fase portadora como de la pseudodistancia (generalmente código P «sin código»), registradas normalmente cada 30 s, y un modelo analítico global de la propagación de la señal unidireccional no diferenciada, con una precisión de nivel milimétrico. Los errores típicos de las mediciones de fase y código son del orden de 1 cm y 1 m, respectivamente, en cada frecuencia. En ambos casos, se considera que los errores multitrayecto son más importantes que el ruido térmico [Langley *et al.*, 1996]. Los datos de fase son imprescindibles para las aplicaciones geodésicas modernas por su alto grado de precisión, por lo que es necesario realizar un muestreo continuo a fin de garantizar con fiabilidad la continuidad de fase a lo largo de todo el paso del satélite. En el caso del posicionamiento relativo, donde se emplean habitualmente algoritmos de doble diferenciación para eliminar todos los efectos de tipo reloj de los satélites y los receptores de rastreo, no suelen utilizarse datos de código porque su peso es muy bajo. Sin embargo, para analizar datos indiferenciados y extraer estimaciones cronométricas, es necesario añadir los datos de código a fin de separar los parámetros de desfase cronométrico y ambigüedad de ciclo de fase, que de otro modo no se podrían distinguir. Esta combinación de fenómenos observados simplifica efectivamente los datos de código ruidosos aprovechando las fases mucho más precisas. Para cada par receptor-satélite, la calidad de las estimaciones cronométricas se maximiza cuando las cadenas de datos de fase continua sin lapsus de ciclo son lo más largas posibles, minimizándose así el número de parámetros de ambigüedad. Los receptores geodésicos modernos rastrean 12 o más satélites simultáneamente, durando el paso de cada uno de ellos unas 4 h. A la hora de efectuar el rastreo, aparte de los obstáculos a la visibilidad, se suelen encontrar más problemas cuando los ángulos de elevación son bajos, pues la intensidad de la señal es más débil y el retardo de trayecto atmosférico y los efectos multitrayecto son más importantes y variables.

En este capítulo se hace un repaso del método de transferencia de tiempo geodésico GPS y se da cuenta de los últimos adelantos. En principio, es posible utilizar los mismos métodos con otros sistemas de navegación mundial por satélite (GNSS). Aunque la constelación GLONASS no se ha explotado a gran escala para este fin, se prevé que el sistema europeo GALILEO mejore notablemente las capacidades actuales.

13.2 Consideraciones sobre instrumentos y hardware

Cualquier componente del trayecto de la señal GPS (y, en ocasiones, incluso componentes cercanos) puede afectar a la fidelidad de tiempo y frecuencia. En lo que respecta a la transferencia de tiempo, las consideraciones sobre hardware que se aplican a la instalación geodésica básicamente son normas de sentido común, idénticas a las aplicables a cualquier otra instalación de temporización. La configuración general del equipo receptor debe ser lo más simple posible, prestando la mayor atención posible a la estabilidad de los

componentes del sistema y a su entorno. En la medida de lo posible se deberán probar a fondo todos los nuevos componentes antes de ponerlos en funcionamiento. Cuando se hayan de efectuar modificaciones, cambiar un único componente a la vez permitirá realizar una evaluación más clara de las consecuencias.

13.2.1 Componentes del satélite GPS

La información básica necesaria para utilizar el GPS se encuentra en el documento de control de interfaz ICD-GPS-200 o en la más reciente especificación de interfaz IS-GPS-200. Se difunde la posición de los satélites a fin de poder centrar efectivamente la fase de los sistemas de antenas transmisoras. Sin embargo, a nivel interno, el sistema GPS calcula órbitas dinámicas para centrar el punto de masa de cada satélite y transformar los resultados en centros de fase. Los desplazamientos de vector utilizados para ello no se comunican oficialmente, pues el usuario ICD no los necesita.

No obstante, la Agencia de Inteligencia Geoespacial de Estados Unidos (NGA) publica estos desplazamientos en su página web (earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/).

Los usuarios que calculan sus propias efemérides de satélite y valores cronométricos deben también asumir algún conjunto de desplazamientos de centro de fase de antena. Al comparar los valores cronométricos de satélite de distintas fuentes, es necesario tener en cuenta cualquier discrepancia de los componentes radiales de los desplazamientos de centro de fase supuestos, pues éstos se manifestarán como desviaciones en los relojes de satélite. La situación se complica con la dificultad que supone medir precisamente los desplazamientos de antena reales [Mader and Czopek, 2002], lo que ha hecho que se utilicen distintos conjuntos de valores.

Contrariamente al mensaje de radiodifusión GPS, las órbitas exactas del servicio GPS internacional (IGS) están referenciadas con respecto a los centros de masa de los satélites. Cuando se lanzó el primer satélite Block IIR en 1997, se vio que su desplazamiento en dirección a la Tierra difería del de la nave espacial anterior. Para garantizar que las determinaciones de los relojes de satélite de los diversos centros de análisis IGS pueden compararse y combinarse de manera coherente, IGS adoptó un conjunto común de valores para los vectores de desplazamiento de centro de fase de antena, que empezó a utilizarse el 29 de noviembre de 1998:

Blocks II & IIA	dx = 0,279 m	dy = 0,000 m	dz = 1,023 m	[IGS]
Block IIR	dx = 0,000 m	dy = 0,000 m	dz = 0,000 m	[IGS]

Se aplica el sistema de coordenadas fijas de satélite habitual, donde el eje z va del centro de masa del satélite al centro de la Tierra, el eje y está alineado con los paneles solares, y el eje x es ortogonal. Mader y Czopek [Mader and Czopek, 2002] determinaron un desplazamiento dz de 1,66 m un sistema de antena Block IIA en tierra no utilizado. Los desplazamientos utilizados por el sistema GPS operativo son semejantes a los del IGS para Block II y Block IIA:

Blocks II & IIA	dx = 0,2794 m	dy = 0,0000 m	dz = 0,9519 m	[GPS]
-----------------	---------------	---------------	---------------	-------

pero difieren notablemente y son distintos para cada nave espacial Block IIR, con un dz de entre 1,5 m y 1,6 m. Si el usuario desea comparar los valores cronométricos de satélite IGS con otros resultados utilizando distintos desplazamientos de antena, las correcciones se han de efectuar con la siguiente ecuación:

$$C_i(\text{usuario}) = C_i(\text{IGS}) - \{ [dz_i(\text{usuario}) - dz_i(\text{IGS})] / c \} \tag{13-1}$$

donde:

- dz_i(IGS): el valor IGS del dz para el satélite PRN_i
- dz_i(usuario): el valor del usuario del dz para el satélite PRN_i
- C_i(IGS): el valor cronométrico IGS para PRN_i
- C_i(usuario): el valor cronométrico del usuario para PRN_i
- c: la velocidad de la luz (299792458 m/s).

Las radiodifusiones GPS se efectúan en la actualidad por dos bandas L con las siguientes frecuencias centrales nominales:

$$L_1 = 154 \cdot 10,23 = 1575,42 \text{ MHz y } L_2 = 120 \cdot 10,23 = 1227,60 \text{ MHz.}$$

La banda L₁ contiene una modulación de código C/A de 1,023 MHz, además de un código encriptado P1(Y) (10,23 MHz) y un código de mensaje de 50 bit/s.

En L₂ sólo se modula hoy en día un código P2(Y) (10,23 MHz) preciso, aunque en breve se añadirá un segundo código civil.

Aunque nominalmente están en fase, inevitablemente las distintas modulaciones GPS tienen desviaciones distintas de cero importantes unas respecto de otras. La más importante de ellas es la desviación de pseudodistancia entre las modulaciones P1 y P2. La dispersión cresta a cresta de la desviación P1-P2 es superior a 10 ns. Dado que los relojes de radiodifusión están diseñados para la combinación lineal P1/P2 sin propagación ionosférica (véase *infra*), los usuarios monofrecuencia deben compensar la desviación P1-P2 utilizando los valores T_{GD} del mensaje de navegación (véase ICD-GPS-200). Al generar sus mapas ionosféricos, el IGS también comunica sus desviaciones P1-P2 observadas, conocidas como desviaciones de código diferencial (DCB). La relación nominal entre los valores T_{GD} radiodifundidos y las DCB IGS viene dada por la expresión:

$$DCB = [1 - (77/60)^2] * T_{GD} \quad (+ \text{desplazamiento de escala}) \quad (13-2)$$

para cada satélite, excepto que las dos escalas tienen un desplazamiento de tiempo variable, porque el valor medio de la DCB está fijado por IGS por convenio a cero, mientras que los valores T_{GD} radiodifundidos toman como referencia una desviación instrumental absoluta empírica. La diferencia de escala, en unidades T_{GD} , ha ido reduciéndose gradualmente de -4,3 ns al principio en 2000 hasta -7,1 ns a mediados de 2004. Los valores T_{GD} radiodifundidos se examinan y actualizan trimestralmente, mientras que IGS supervisa y comunica su DCB continuamente a intervalos diarios.

El procedimiento de corrección de T_{GD} asume que la desviación P1-P2 es adecuada para los usuarios monofrecuencia del código C/A, igual que para P1. En realidad, esto no es estrictamente cierto a causa de las desviaciones P1-C/A, que tienen una gama cresta a cresta de unos 5 ns. Aunque no se da cuenta de ello en ICD-GPS-200, IGS tiene en cuenta tales desviaciones desde 1999, lo que es necesario porque algunos receptores geodésicos rastrean C/A en lugar de P1, y algunos dan cuenta de [C/A + (P2-P1)] en lugar del verdadero P2, que tienen desviaciones distintas [Ray *et al.*, 2000]. Para evitar mezclar los datos con distintas desviaciones de satélite, lo que degradaría los resultados cronométricos de satélite IGS (y el posicionamiento preciso obtenido al utilizarlos), IGS utiliza procedimientos para el tratamiento y el análisis de los distintos conjuntos de datos GPS a fin de mantener la coherencia. A medida que se vayan añadiendo nuevas modulaciones a las señales GPS, se prevé la adición de valores de calibración para otras desviaciones entre señales en los mensajes de navegación radiodifundidos y controlados por IGS.

Otra complicación de las señales de transmisión del satélite es el diagrama de fase del haz. Si bien se suele suponer que es perfectamente hemisférico, hay pruebas sólidas de que no es así [Schmid and Rothacher, 2003]. En el caso de los satélites o antenas de rastreo (véase *infra*), no tener en cuenta los diagramas de fase no ideales causa sobre todo errores en la escala de trama GPS (es decir, la dirección radial) del orden de entre 10 ppb y 15 ppb. Aunque resulta importante para muchas aplicaciones geodésicas, este efecto probablemente no es importante para la mayoría de comparaciones de tiempo, por lo menos no lo será hasta que las calibraciones instrumentales no alcancen una precisión por debajo de ns.

Lo último que cabe decir sobre los relojes de satélite GPS es que la degradación voluntaria de las señales cronométricas GPS mediante disponibilidad selectiva (SA) dejó de utilizarse a las 04.00 UTC del 2 de mayo de 2000. Antes de ese momento, las variaciones cronométricas RMS a lo largo de un día eran de unos 80 ns. Desde entonces, la estabilidad cronométrica es la intrínseca al sistema de temporización de cada satélite, que es mejor en más de un orden de magnitud. Además de permitir el acceso civil a determinaciones de posicionamiento y temporización GPS mucho mejores, todos los usuarios, en particular los que se benefician de resultados IGS mucho más exactos, pueden ahora interpolar los valores cronométricos GPS tabulados con muchos menos errores que antes.

13.2.2 Instalaciones de antena de rastreo GPS

Una instalación geodésica suele construirse sobre estructuras ultraestables que ofrecen una base física para las mediciones muy precisas a largo plazo. Las estructuras más utilizadas son pilares de hormigón, estructuras

metálicas arriostradas y mástiles de acero, aunque también se utilizan edificios, sobre todo para las aplicaciones de temporización.

Puede encontrarse más información sobre las diversas estructuras en: igsb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html.

Incrustado de manera permanente y segura dentro de la estructura se encuentra el marcador geodésico con un punto inscrito que sirve de referencia para las coordenadas de la estación. Lo mejor es crear también una red de control geodésico local de alta precisión para controlar los movimientos relativos de la estación GPS primaria.

A fin de distinguir los desplazamientos muy locales de la estructura con efectos a mayor escala, la red de control ha de incluir marcadores permanentes en distancias desde ~10-100 m hasta unos 10 km. La red local ha de revisarse periódicamente para que resulte útil y puede estar parcialmente compuesta por otras estaciones GPS continuamente operativas. La antena GPS misma debe estar bien anclada directamente al marcador geodésico, de manera que su posición sea fija y la excentricidad entre el punto de referencia del marcador y el punto de referencia de la antena (ARP) pueda medirse con una precisión de <1 mm.

IGS ha designado un ARP convencional para cada modelo de antena. Tiene que ser un punto físicamente accesible, contrariamente a los centros de fase eléctrica L1 y L2, a fin de poder realizar mediciones rutinarias locales. Para la mayor parte de antenas con anillo de choque, el ARP es un punto en la base del preamplificador en la parte de abajo de la unidad. Las dimensiones físicas del ARP y los centros de fase de la señal, así como los diagramas de fase de frente de onda medidos, se conservan en ficheros que pueden obtenerse de IGS. La información sobre la excentricidad del marcador y las dimensiones de la antena es necesaria para analizar los datos de las observaciones y reducir los resultados a las coordenadas de la estación de referencia.

Cuando no es necesaria una fidelidad geodésica de la mayor calidad, como ocurre con muchas instalaciones de temporización, no es necesario utilizar la estructura geodésica y el marcado. En tal caso, las coordenadas de la estación se referencian directamente al ARP (o, en ocasiones, al centro de fase). Aunque resulta más rápido, por lo general en este modo las coordenadas de la estación cambiarán cada vez que se cambie de modelo de antena. Es preferible seguir las directrices geodésicas normalizadas, siempre que resulte posible.

Las aplicaciones geodésicas, incluida la transferencia de tiempo de alta precisión, necesitan antenas de doble frecuencia y alta calidad. Los diseños más comunes contienen una serie de anillos de choque concéntricos, y pueden conseguirse de varios fabricantes, aunque con ligeras diferencias en las dimensiones internas. Se trata de un diseño realizado precisamente para la recepción en doble frecuencia con señales muy atenuantes cerca del horizonte y por debajo de éste, donde suelen ser peores las reflexiones multirrayecto [Schupler and Clark, 2001]. Para las aplicaciones de transferencia de tiempo, en particular, es fundamental que la antena esté situada de manera que se minimicen las señales multirrayecto, en particular las multirrayecto de código. Por lo general, esto implica mantener un horizonte claro en todas las direcciones y evitar la ubicación de objetos reflectantes cerca de la antena. La señal L2 es particularmente sensible a las reflexiones de retorno que llegan por detrás de la antena [Byun *et al.*, 2002] por lo que, si la antena no puede situarse directamente contra una superficie no reflectante, suele ser mejor a la mayor altitud posible con respecto al entorno (habida cuenta de los requisitos de estabilidad y acceso). En cualquier caso, debe evitarse a todo precio que el espacio entre el centro de fase de la antena y la superficie posterior sea múltiplo de la mitad de la longitud de onda de la banda L, sobre todo en el campo cercano de la antena [Elosegui *et al.*, 1995]. Se necesita una vista despejada del cielo hasta, al menos, 10° de elevación, y preferiblemente 5°, para poder determinar geodésicamente con seguridad la posición de la antena.

Se ha dicho, sin muchas pruebas que lo sostengan, que los cambios de temperatura causan fuertes variaciones en las estimaciones cronométricas geodésicas de algunas antenas GPS y se ha recomendado utilizar unidades con estabilización de temperatura. Aunque puede ser posible en ciertas unidades monofrecuencia de baja calidad, las pruebas directas efectuadas en una antena con anillo de choque AOA Dorne Margolin normalizada no han logrado detectar sensibilidad alguna de las estimaciones cronométricas a las variaciones de temperatura de la antena. Ray y Senior [2001] fijaron un límite superior de 2 ps/°C para la sensibilidad a la temperatura a corto plazo (diurna) y posteriormente lo ampliaron a <10,1 ps/°C para todo componente a largo plazo [Ray and Senior, 2003]. [Rieck *et al.*, 2003] determinaron sensibilidades todavía más bajas, iguales o inferiores a 0,17 ps/°C, para un modelo de anillo de choque Ashtech.

Al igual que con las antenas transmisoras de satélite, como ya se ha dicho antes, los diagramas de haz de las antenas de rastreo GPS se alejan del ideal perfectamente hemisférico [Schupler *et al.*, 1994]. Efectivamente, esto implica que el centro de fase de la antena y, por tanto, el punto de referencia geodésico, dependerá de la dirección de la señal desde un satélite concreto. Tradicionalmente se han ignorado las variaciones azimutales y sólo se ha tenido en cuenta la dependencia elevación-ángulo, aunque probablemente esto deje de ser así en el futuro. IGS ha elaborado una serie de correcciones de fase para su aplicación en el análisis de datos de cada modelo de antena concreto. Dejar de lado estos efectos puede causar errores sistemáticos en la determinación de la altura de la estación de hasta ~10 cm. El método actualmente utilizado por IGS emplea correcciones de fase diferenciales utilizando la antena con anillo de choque AOA Dorne Margolin T como referencia normalizada, y la mayoría de los valores medidos siguen la metodología de Mader [1998], descrita en el siguiente sitio web (www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/).

Se han ignorado los diagramas de fase de los transmisores de satélite. IGS ha pasado a utilizar diagramas de antena absolutos para los satélites y las estaciones de rastreo [Schmid and Rothacher, 2003].

Muchas antenas GPS permanentes se han dotado con una cúpula para evitar que los elementos del anillo de choque se llenen de nieve o de desechos varios, que inevitablemente afectarán al rendimiento del sistema GPS, distorsionando las fases del frente de onda, lo que puede dar la impresión de que cambia la posición de la estación, sobre todo en altura. Las diferencias de posición, con y sin cúpula, pueden ser de hasta varios cm. Las pruebas realizadas han demostrado que las cúpulas cónicas suelen ser las más problemáticas, mientras que algunos tipos de cúpulas hemisféricas parecen causar efectos mínimos. En la actualidad, IGS no tiene en cuenta la presencia de cúpulas en sus cuadros de centro de fase de antena publicados: se considera que todas las antenas carecen de cúpula incluso cuando se han medido las correcciones de centro de fase para la presencia de cúpulas. En general lo mejor es evitar la instalación de cúpulas, a menos que sea absolutamente necesario. En ese caso, se habrá de escoger una cúpula hemisférica cuyo efecto se haya medido y se considere insignificante.

13.2.3 Cables y conexiones de antena

El cable que va de la antena GPS al receptor debe ser lo más corto posible y constar de un solo segmento continuo. No deben insertarse divisores de señal ni otros componentes para garantizar la mejor correspondencia posible entre potencia e impedancia. Aunque hay pocas pruebas específicamente destinadas a evaluar los efectos de los divisores u otros elementos sobre el rendimiento del reloj, se han constatado en la práctica degradaciones cuando se han añadido elementos de este tipo. [Rieck *et al.*, 2003] dan cuenta de los resultados de sensibilidad a la temperatura, pero no estudiaron los efectos multitrayecto o de otro tipo. Los conectores deben estar bien sellados contra la humedad y la exposición al aire libre. Se ha de elegir el tipo de cable de manera que tenga buenas propiedades fase-estabilidad, baja sensibilidad a la temperatura ($< 0,1$ ps/°C/m) y baja pérdida. Es mejor tender el cable por un conducto cerrado que dejarlo en contacto directo con el suelo. Por lo general, es conveniente hacer todo lo posible por evitar las influencias medioambientales.

13.2.4 Receptores GPS

Los receptores GPS geodésicos deben dar cuenta de los fenómenos observables de pseudodistancia y fase portadora en las dos frecuencias, L1 y L2. Para efectuar comparaciones de tiempo, el receptor también debe poder aceptar una frecuencia de referencia e informaciones 1 PPS de una fuente externa, y utilizarlas fielmente para sus funciones de temporización internas. Estas características suelen ser opcionales en los equipos geodésicos normalizados. En L1, la mayoría de los receptores de la red IGS rastrean el código P1 por un código C/A más estrecho, por lo que la experiencia con modelos sólo C/A es limitada. No se conocen comparaciones paralelas de rendimiento cronométrico para los distintos tipos de rastreo de código. Por otra parte, no se han visto diferencias evidentes en los pocos modelos que se utilizan habitualmente [Ray and Senior, 2003]. El requisito fundamental es que la susceptibilidad multitrayecto del código sea baja.

Diversos estudios han demostrado los efectos negativos de las variaciones de temperatura en la estabilidad en frecuencia de los receptores GPS [Rieck *et al.*, 2003], [Overney *et al.*, 1997], [Petit *et al.*, 1998], [Bruyninx and Defraigne, 1999], [Schildknecht and Dudle, 2000]. La sensibilidad típica es del orden de ± 100 ps/°C con grandes variaciones de una unidad a otra, incluso del mismo modelo. Por consiguiente, para las aplicaciones de tiempo y frecuencia de alta fidelidad, es fundamental que el equipo receptor GPS se mantenga en un entorno con control ambiental, cuyas fluctuaciones térmicas no sean superiores a $\sim 0,1$ °C, de preferencia.

En muchos receptores, los usuarios pueden escoger la configuración de distintas funciones, como la activación de la uniformidad de código a bordo o la definición del reloj receptor interno al tiempo GPS. Esta última función ha de inhabilitarse para poder efectuar comparaciones de tiempo útiles. También es aconsejable inhabilitar la uniformidad de código, pues resulta más fácil de manejar en los análisis de datos subsiguientes.

Como ocurre con cualquier sistema de distribución de tiempo y frecuencia, es fundamental que la frecuencia de referencia de entrada y las señales 1 PPS sean coherentes entre ellas y estén bien aisladas de las fuentes de interferencia. Se ha de prestar una atención especial a la generación de frecuencias de entrada secundarias, si procede. Además, los tics 1 PPS deben mantenerse normalmente dentro de una pequeña tolerancia del tiempo GPS, por ejemplo < 30 ms, para que el receptor funcione adecuadamente.

Los datos de las observaciones GNSS se transmiten universalmente utilizando el formato RINEX (intercambio independiente de receptor), que se describe en: (<ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/data/format/rinex210.txt>). En esos documentos se encuentran asimismo especificaciones de formato para mensajes de navegación, datos meteorológicos e información conexas. Por lo general, conviene archivar los ficheros de datos nativos brutos del receptor, además de los ficheros RINEX, por si se descubre posteriormente un problema de traducción. Los usuarios de temporización pueden derivar los tipos de ficheros utilizados para CV («formato CCGTTS») de los ficheros RINEX utilizando una herramienta creada en el Observatorio Real de Bélgica [Defraigne *et al.*, 2001].

13.2.5 Evaluación de los efectos multitrayecto y pruebas del sistema

Una vez construida la estación geodésica, se ha de evaluar detalladamente la calidad de los datos antes de ponerla en funcionamiento. De haber problemas, éstos se han de reducir lo más posible. El University Navstar Consortium (UNAVCO) ha creado un sitio web con mucha información (www.unavco.org/facility/facility.html), que contiene consejos valiosos e informes de pruebas de equipos para estaciones GPS de funcionamiento continuo. También se ocupa de toda una gama de herramientas de software. Concretamente, la herramienta «teqc» es indispensable para el tratamiento y examen de los datos GPS brutos, incluida la traducción a ficheros RINEX, la edición de datos y la verificación de la calidad [Estey and Meertens, 1999]. Con teqc se pueden detectar los problemas más importantes que afectan a la calidad de los datos, como los deslizamientos de ciclo excesivos, la captura de datos incompletos, los bloqueos en la cobertura celeste, etc. Los diagnósticos MP1 y MP2 de teqc miden las variaciones RMS del multitrayecto de código en L1 y L2, respectivamente, suponiendo que los efectos del multitrayecto de fase son insignificantes. Para cada paso de satélite se define una desviación desconocida, por lo que estas mediciones multitrayecto son insensibles a las señales de periodo largo que pueden ser importantes para la temporización. Del mismo modo, dado que los distintos tipos de receptores tienen comportamientos intrínsecamente diferentes, las mediciones MP_i suelen carecer de significado absoluto y no resulta fácil comparar las de un emplazamiento con las de otro. Sin embargo, variaciones multitrayecto inesperadamente grandes con ángulo de elevación a lo largo del tiempo pueden indicar problemas de emplazamiento o configuración. Al menos en un caso, se vio que las variaciones MP2 estaban estrechamente correlacionadas con cambios en el rendimiento del reloj geodésico [Ray and Senior, 2003].

Si se pueden generar soluciones de posicionamiento precisas (véase *infra*) para el comportamiento cronométrico del receptor utilizando resultados cronométricos de órbita y satélite de IGS, la comparación entre una solución sólo de código y una solución código+fase puede revelar problemas inesperados en los datos de pseudodistancia. Otro diagnóstico útil es el nivel de discontinuidad en las estimaciones cronométricas entre análisis consecutivos de arcos de 1 día [Ray and Senior, 2003], donde se reflejan mejor las variaciones de ruido multitrayecto pseudodistancia (véase *infra*). Otros métodos de estudio de los errores multitrayecto, como la distribución ionosférica de residuos de reajustes de una solución geodésica o las variaciones de alta frecuencia en las relaciones señal/ruido GPS, suelen centrarse en los efectos de fase, en lugar de los efectos pseudodistancia. La prueba clásica, no obstante, es la repetición de un patrón de error concreto de un día al siguiente con un periodo nominal de un día sideral, 23 h 56 min 4 s, lo que corresponde aproximadamente a una repetición de ciclo de la geometría de suelo del satélite.

13.2.6 Calibración del retardo de la estación de rastreo

Para comparar las lecturas cronométricas de una estación con las de otra, utilizando cualquier sistema participante, se necesita conocer precisamente el retardo interno de todo el hardware instrumental. El proceso

que se sigue para ello se conoce como calibración. Por lo general, se puede considerar que hay dos tipos de métodos de calibración: las determinaciones absolutas, donde se efectúa una serie de mediciones de desviaciones de extremo a extremo utilizando un simulador de señal GPS, que debe estar a su vez precisamente calibrado; y las determinaciones diferenciales, donde se efectúa una comparación paralela con un sistema similar que se toma como referencia normalizada. En la práctica se utilizan ambos métodos. Pocos receptores geodésicos se han calibrado con el método absoluto, pero son los que posteriormente se trasladan para calibrar diferencialmente un número mucho mayor de receptores operativos [Petit *et al.*, 2001].

Un tipo de receptor GPS geodésico se ha calibrado de manera absoluta, el Ashtech Z-XII3T, utilizando un simulador en el Laboratorio de Investigación Naval de Estados Unidos [White *et al.*, 2001], [Petit *et al.*, 2001], [Plumb *et al.*, 2005]. Los resultados absolutos coinciden con las incertidumbres de unos 3,5 ns obtenidas mediante una medición diferencial con respecto a un receptor de temporización CV clásico previamente calibrado [Petit *et al.*, 2000]. Se cree que la principal fuente de error en el procedimiento de calibración absoluta es el simulador GPS mismo [Plumb and Larson, 2005]. Las posteriores calibraciones diferenciales con respecto a una norma absoluta pueden efectuarse con incertidumbres de unos 1,6 ns [G. Petit, comunicación privada].

Para comodidad de los usuarios, los datos GPS de un receptor calibrado pueden ajustarse para eliminar la desviación instrumental en el proceso de generación de ficheros de intercambio RINEX. Esto se hace específicamente escribiendo la corrección de derivación cronométrica, dT , en un campo reservado en cada registro de época de observación y modificar los resultados de la observación comunicados en función de las siguientes relaciones, a fin de conservar una coherencia estricta:

$$\text{Tiempo}(\text{corregido}) = \text{Tiempo} - Dt \quad (13-3)$$

$$\text{PR}(\text{corregido}) = \text{PR} - (dT * c) \quad (13-4)$$

$$\text{fase}(\text{corregida}) = \text{fase} - (dT * \text{frec}) \quad (13-5)$$

donde:

Tiempo: la época de observación

PR: la pseudodistancia

fase: la fase portadora para la frecuencia «frec».

Contar con el valor de corrección de derivación cronométrica de cada época de observación permite la reconstrucción de las observaciones originales, de ser necesario. Sin embargo, esta característica de RINEX está limitada por la especificación del formato a valores de derivación cronométrica truncados al ns más próximo. Si se aplica una corrección de calibración cronométrica por debajo de ns sin utilizar el campo derivación cronométrica RINEX, el valor de la corrección cronométrica deberá consignarse como observación en el encabezamiento del fichero RINEX.

13.3 Estrategias de análisis de datos

Suele atribuirse a Counselman y Shapiro el descubrimiento de que podía utilizarse el GPS para lograr una exactitud geodésica superior en varios órdenes de magnitud a lo que se suponía en origen [Counselman and Shapiro, 1979]. Al aplicar técnicas astronómicas elaboradas para la interferometría con línea de base muy larga (VLBI), propusieron utilizar la fase portadora como principal elemento observable del GPS en lugar de la pseudodistancia. Se demostró que rastreando muy detalladamente los cambios de la fase de la señal GPS se podían efectuar determinaciones de posición relativas a nivel de cm en lugar de decenas de metros. Poco después, Bossler *et al.* [1980] describieron métodos para resolver las ambigüedades de fase entera de la señal portadora. A partir de entonces, la evolución fue muy rápida, basándose principalmente en los métodos y modelos VLBI, que en su mayoría también son aplicables directamente al GPS. Las principales diferencias analíticas son los parámetros orbitales adicionales del GPS y las ponderaciones relativas de los fenómenos de retardo de grupo observables (fundamentales para VLBI, pero no para GPS, excepto para las soluciones cronométricas) y los fenómenos de fase observables (fundamentales para GPS, que suelen incluirse únicamente como derivados de tiempo menores en VLBI).

13.3.1 Ecuación de observación GPS

En ICD-GPS-200 y en numerosas publicaciones posteriores se exponen los pasos básicos para reducir las observaciones GPS. Para un par satélite/estación de rastreo determinado, la ecuación de observación de pseudodistancia para cada frecuencia de observación, i , puede expresarse como:

$$P_i = R + c(C_r - C_s) + I_i + T + e_i \quad (i = 1, 2) \quad (13-6)$$

donde:

- $i =$ 1, 2 corresponde a las dos frecuencias L_1 y L_2
- R : distancia entre los centros de fase del satélite y del receptor
- c : velocidad de la luz en el vacío
- C_r : error de sincronización cronométrica de la estación de rastreo en el momento de recepción de la señal (incluidos todos los componentes de retardo interno)
- C_s : error cronométrico del satélite transmisor en el momento de la emisión
- I_i : retardo ionosférico
- T : retardo debido a la atmósfera neutral (sobre todo la troposfera)
- e_i : error de medición (incluido tanto el ruido térmico como otras fuentes, como el multitrayecto).

El ruido térmico en la antena y el receptor fija un límite inferior teórico a la magnitud de los errores de medición, que en cierta medida depende de la tecnología de rastreo utilizada por el receptor. Los experimentos realizados con línea de base cero, en los que pueden eliminarse la mayoría de efectos externos como el multitrayecto, demuestran que la RMS de la pseudodistancia C/A y los ruidos de medición de la fase portadora L_1 son de 4 cm y 0,2 mm, respectivamente, para un par de receptores Ashtech Z-12 [Langley, 1996]. Sin embargo, los efectos ambientales locales siempre son más importantes que el ruido de medición real. Los valores *a priori* normalizados para el procesamiento geodésico rondan 1 m y 1 cm para la fase portadora y pseudodistancia y los errores, respectivamente, de acuerdo con los residuos de reajustes observados [Lichten and Border, 1987], [Zumberge *et al.*, 1997].

La ionosfera es dispersiva (el retardo es aproximadamente proporcional a la inversa de la frecuencia al cuadrado) y opuesta en signo a la pseudodistancia y la fase. La combinación de dos frecuencias:

$$P_3 = 2.5457 * P_1 - 1.5457 * P_2 \quad (13-7)$$

está, en primer orden, libre de efectos ionosféricos (pero véase en [Kedar *et al.*, 2003] un estudio de los efectos de segundo orden). Así:

$$P_3 = R + c(C_r - C_s) + T + e \quad (13-8)$$

donde:

- e : errores combinados de P_1 y P_2 .

La ecuación de observación de los fenómenos observables de fase es idéntica (expresada en unidades de distancia), añadiéndose un término de ambigüedad ($N_i \cdot \lambda_i$) para un número desconocido de ciclos de fase en cada frecuencia portadora. La gama, R , se expresa en términos de las coordenadas geocéntricas del satélite (X, Y, Z) y de los centros de fase de la antena del receptor (x, y, z), de la siguiente manera:

$$R = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2} \quad (13-9)$$

Cuando se utilizan las coordenadas del centro de masa del satélite o del marcador geodésico receptor, en lugar de los centros de fase, se han de aplicar las excentricidades correspondientes, de acuerdo con mediciones externas. En el mensaje de radiodifusión GPS se encuentran los valores de posición de cada satélite (centro de

fase) y la lectura del reloj como función de tiempo, con un margen de exactitud de unos pocos metros. Con observaciones simultáneas de, al menos, cuatro satélites distintos y un modelo crudo del retardo troposférico, pueden determinarse la posición y la lectura cronométrica de un usuario receptor con un margen de < 10 m en cada época. Si se conoce *a priori* la posición del receptor y sólo se desconoce el reloj, únicamente es necesaria una observación de satélite.

Las comparaciones cronométricas de visión común se realizan diferenciando los datos simultáneos de dos receptores con coordenadas conocidas. Posteriormente se elimina el error del reloj de satélite junto con gran parte del error de posición del satélite y el retardo troposférico. Para las mediciones CV convencionales, que solo utilizan pseudodistancias C/A monofrecuencia, los errores de modelización ionosférica suelen limitar la exactitud de las determinaciones de diferencias cronométricas distantes. Este parámetro puede mejorarse significativamente utilizando la combinación lineal de observaciones P1 y P2 sin código, como se hace en el método P3 CV [Defraigne *et al.*, 2001]. Por norma general, la exactitud de las comparaciones cronométricas CV empeoran al aumentar la distancia entre receptores, porque la cancelación en modo común de los términos no considerados pierde progresivamente efectividad. Para atenuar estos efectos, en los últimos años se ha modificado el método CV para UTC. Ahora se utilizan los muy precisos mapas orbitales e ionosféricos de IGS (igscb.jpl.nasa.gov) para calcular las correcciones de estos efectos [G. Petit, comunicación privada]. Es posible aportar otras mejoras, como una mejor modelización troposférica y la consideración de los movimientos geofísicos (por ejemplo, desplazamientos mareométricos). No obstante, tales modificaciones incrementales no pueden aprovecharse de la precisión inherente de los fenómenos de fase observables, por lo que los resultados de temporización CV no pueden alcanzar el nivel de la técnica geodésica completa, sobre todo en intervalos inferiores a 1 d.

En los análisis geodésicos, la información de navegación radiodifundida no se utiliza, excepto posiblemente para el primer nivel de criba de datos y edición. Los modelos *a priori* de mayor calidad se evalúan para todos los efectos geofísicos conocidos y las incógnitas restantes se ajustan a partir de los datos utilizando parametrizaciones físicamente plausibles. En la mayoría de los casos, conviene fijar el reloj del satélite y los valores orbitales a las muy precisas determinaciones publicadas por IGS pues es poco probable que el usuario GPS común pueda alcanzar tal exactitud. De este modo se simplifica mucho la estimación de los relojes receptores, siempre y cuando se respeten estrictamente los modelos y convenciones de IGS.

13.3.2 Métodos para soluciones globales

Cuando se han de determinar órbitas y relojes de satélite, en lugar de recurrir a una fuente externa, en primer lugar consideramos procedimientos como los que utilizan los Centros de Análisis IGS, donde los datos de una red de rastreo mundial se reducen en grandes ajustes simultáneos. Se necesita una red globalmente bien distribuida de receptores para determinar los relojes y órbitas de satélite. Los arcos de análisis suelen dividirse en segmentos de 24 horas, coincidiendo con los ficheros diarios RINEX normalizados, que normalmente contienen las observaciones realizadas entre las 00:00:00 y las 23:59:30. (Téngase en cuenta que el convenio IGS utiliza el tiempo GPS para las etiquetas de tiempo en todos sus ficheros de datos. Para algunas soluciones, pueden formarse arcos de análisis de varios días vinculando varios arcos de un día sucesivos. El primer paso del procesamiento es la criba de ficheros de datos de cada estación. Esta fase es necesaria para verificar y editar los datos potencialmente problemáticos, reparar o marcar los deslices en las fases portadoras, ajustar pequeños desvíos de las etiquetas de tiempo en algunos tipos de receptor y corregir las desviaciones de pseudodistancia cuando no se dispone de P1 y P2. Los datos cribados suelen reformatearse en ficheros de acceso directo adecuados al sistema de análisis escogido.

Todos los métodos de ajuste geodésico suponen que se dispone *a priori* de información suficientemente precisa de que la estimación de parámetros es lineal y que, por tanto, se puede aplicar el método de los mínimos cuadrados generalizado. El mensaje de navegación radiodifundido puede utilizarse, si no se dispone de una fuente mejor. De ser necesario, como en el caso de una nueva estación, puede recurrirse a la iteración para satisfacer la condición de linealidad. Las órbitas de satélite *a priori* se rotan de un marco fijo en la superficie de la Tierra (utilizado para las órbitas distribuidas en el mensaje radiodifundido, así como por IGS) a un marco inercial geocéntrico (ECI) utilizando un conjunto predeterminado de valores de parámetros de orientación de la Tierra (EOP). Normalmente, los EOP son los producidos por IGS o por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS); véase el sitio web: (www.iers.org). En el marco ECI pueden adaptarse las órbitas de satélite para adaptarlas a modelos parametrizados de movimiento dinámico e

integrarlas en ellos. Este paso es necesario para generar derivativos parciales de parámetros, si las órbitas van a adaptarse en el siguiente ajuste de datos. Se han elaborado varias formas de descripción de los movimientos de un satélite GPS, desde el método de elemento finito de Fliegel *et al.* [1992] al modelo empírico de Beutler *et al.* [1994]. Aunque podría suponerse que un mejor modelo físico de comportamiento de los satélites tendría que ser superior a un método puramente empírico, la experiencia deja pensar que toda posible ganancia es insignificante, porque, en el caso de las aplicaciones geodésicas de alta precisión, la parametrización de la órbita ha de ser lo suficientemente sólida para detectar movimientos de cm, lo que es excesivamente difícil de lograr para satélites reales sin utilizar al menos algunos parámetros empíricos. Los movimientos se complican con variaciones de aceleración, pues la exposición a la radiación solar modifica la presión y, en particular, por los microempujes que se utilizan para mantener la actitud de algunos satélites antiguos.

La ecuación de observación se evalúa para cada punto de datos, utilizando las coordenadas de la estación *a priori* también rotadas al marco ECI. Además de los efectos básicos ya mencionados, también se ha de incluir la influencia de una serie de efectos más pequeños (véase la cláusula siguiente). Los parámetros se ajustan para adaptarse a las observaciones minimizando los residuos, utilizando métodos normalizados como los mínimos cuadrados por segmentos, los mínimos cuadrados secuenciales o un filtro Kalman. Los filtros Kalman y otros filtros conexos se adecúan particularmente al tratamiento de parámetros cronométricos, pues acomodan fácilmente procesos de ruido estocástico adecuados para las variaciones cronométricas realistas. Para una red global de unas decenas de estaciones de rastreo, los parámetros que suelen ajustarse son:

- hasta tres coordenadas geocéntricas para cada estación (previa especificación del punto de referencia terrenal, como las limitaciones de posición de ciertas estaciones de referencia);
- parámetros cronométricos del receptor variables en el tiempo (que deben bastar para permitir variaciones entre una época y otra casi arbitrariamente amplias);
- parámetros orbitales de cada satélite (al menos los seis elementos de Kepler, o sus equivalentes, más una desviación Y y otros términos empíricos);
- relojes de satélite variables en el tiempo;
- retardos troposféricos cenitales variables en el tiempo (así como los posibles gradientes acimutales); desvíos EOP y relaciones de movimiento polar y duración del día; y
- ambigüedades de la fase portadora.

En ocasiones, se incluyen otros parámetros menores como las variaciones de la actitud del satélite o los desvíos netos del origen de la red de rastreo con respecto al centro de masa de la Tierra. El conjunto de parámetros cronométricos tienen una deficiencia de rango uno, pues no se dispone de información absoluta sobre ninguna época cronométrica. Los análisis geodésicos normalizados resuelven el defecto escogiendo que se no se ajuste un reloj específico (generalmente un reloj en tierra muy estable) como referencia en el proceso de estimación. Las estimaciones de todos los demás relojes se determinan entonces con relación al reloj fijo. Otra posibilidad es especificar el punto de referencia del reloj determinando que la combinación lineal de los relojes disponibles sea igual a cero (o a cualquier otro valor especificado, como el tiempo GPS).

Para obtener resultados de la mayor calidad, es conveniente «determinar» al menos algunos de los parámetros de ambigüedad de fase. Dado lo enormemente difícil que resulta hacer esto con observaciones unidireccionales indiferenciadas, el procedimiento normal consiste en aplicar limitaciones estrictas en los valores enteros de las ambigüedades doblemente diferenciadas para los pares de estaciones seleccionados. Lograr determinar una gran parte de los parámetros de ambigüedad estabiliza en gran medida la solución global. En la mayoría de los casos, la iteración de la solución puede aumentar el número de parámetros de ambigüedad adecuadamente determinados y mejorar la edición de los datos.

13.3.3 Marcos y modelos de referencia para los términos de corrección

Al evaluar la ecuación de observación GPS básica, también se han de tener en cuenta algunos efectos menores, si se esperan resultados a nivel centimétrico. La mayoría de estos efectos están documentados en los Convenios IERS [McCarthy and Petit, 2003]. El sistema de coordenadas geocéntrico utilizado para los puntos fijados a la superficie de la Tierra es el marco de referencia terrenal internacional (ITRF) [Altamimi *et al.*, 2002]. La transformación del marco ITRF al marco ECI tiene en cuenta los movimientos del polo en marco de la Tierra y la rotación alrededor del polo. En ocasiones se ignora o se trata sólo aproximadamente el movimiento del

polo en el espacio inercial (es decir, la nutación [Altamimi *et al.*, 2002]), pues los satélites cerca de la Tierra no son muy sensibles a este efecto. Así, el marco ECI no siempre está alineado con precisión al marco de referencia celeste internacional (ICRF), un sistema casi inercial formado por las posiciones VLBI de fuentes radioeléctricas extragalácticas y cuyo origen es el baricentro del sistema solar.

Los términos de corrección para los satélites son los desvíos previamente descritos entre los centros de masa y los centros de fase de antena, y la rotación de fase de la polarización del satélite debida a los cambios de perspectiva. Este último efecto, conocido en astronomía como ángulo paraláctico, surge porque la señal GPS tiene una polarización circular derecho. Como la geometría de visualización entre el receptor y el satélite varía, parece que la fase de polarización se modifica en consecuencia. Se ha de aplicar una corrección al evaluar las observaciones de fase portadora, pero no las pseudodistancias, como se indica en Wu *et al.* [1993].

Las correcciones de posición del receptor son mucho más diversas y complejas debido a los efectos geofísicos [McCarthy and Petit, 2003]. Los movimientos sobre todo verticales de los puntos de la superficie debidos a las mareas terrestres pueden ser de hasta unos pocos decímetros en latitudes medias y deben modelizarse detalladamente. Los movimientos de la corteza terrestre debidos a las mareas oceánicas son prácticamente un orden de magnitud menores en casi todas partes, pero pueden amplificarse en algunas zonas costeras. Al estimar las órbitas GPS, se han de incluir en las integraciones orbitales *a priori* las variaciones del geopotencial debidas a las mareas terrestres y oceánicas. La corrección de marea polar tiene en cuenta la gran deformación rotacional debida a variaciones en la posición del polo con respecto a la corteza terrestre. El movimiento del polo mismo, así como la velocidad de rotación, sufren modulaciones diurnas y semidiurnas de gran amplitud debidas a las mareas oceánicas. Las correcciones de estos grandes movimientos del marco de la Tierra se han de aplicar cuando los satélites GPS se expresan en un marco inercial. Las órbitas IGS, en un marco terrestre fijo, ya comprenden las variaciones EOP subdiarias, por lo que no hay un efecto neto para el observador terrenal. McCarthy y Petit han realizado modelos precisos de todos estos efectos [McCarthy and Petit, 2003]. Además, los usuarios deben aplicar las correcciones de centro de fase específicas de cada antena recomendadas por IGS y que se han descrito anteriormente.

Aunque las asociaciones científicas internacionales abogan por la utilización del tiempo de coordenada geocéntrica (TCG) para el análisis de los datos de satélites cercanos a la Tierra, casi todos (si no todos) los grupos de análisis siguen utilizando el tiempo terrenal (TT), que difiere del UTC y TAI sólo en una desviación. Por otra parte, TCG difiere en velocidad (frecuencia) del TT debido a efectos relativistas generales. Por consiguiente, las frecuencias cronométricas de IGS y otros grupos de análisis GPS deben poder compararse directamente con los medidos en los laboratorios de cronometría. Algunas constantes físicas, como el resultados de masa gravitacional constante de la Tierra, GM, dependen de la elección del marco de referencia relativista, por lo que se ha de tener cuidado de utilizar los valores adecuados.

En el procesamiento GPS suelen aplicarse tres tipos de correcciones relativistas:

- 1 El cambio de frecuencia de primer orden, con respecto al TT, debido a la dilación temporal y la diferencia del potencial gravitacional, ya ha sido aplicado por el sistema GPS fijando los desvíos del oscilador en la nave espacial, suponiendo elementos orbitales nominales. La corrección de segundo orden para las órbitas GPS no circulares ha de ser aplicada por el usuario; (véase ICD-GPS-200).
- 2 En los Convenios IERS se da una corrección «dinámica» de la aceleración de los satélites cercanos a la Tierra [McCarthy and Petit, 2003].
- 3 El tiempo coordenada de propagación, incluido el retardo gravitacional, también se encuentra en los Convenios IERS (pero no suele tenerse en cuenta).

(Véanse en Kouba [2004] más detalles al respecto).

13.3.4 Posicionamiento de punto preciso

En lugar de crear grandes soluciones GPS de red globales, para la mayoría de aplicaciones resulta mucho más económico y eficaz analizar los datos de cada estación en modo posicionamiento de punto preciso (PPP) [Zumberge *et al.*, 1997]. De este modo, se extraen órbitas y relojes de satélite precisos de una fuente previa y se aplican sin ajustes. (En algunas variantes del método PPP, se permite una relajación parcial de las órbitas y los relojes). Al aplicar todos los modelos indicados anteriormente, el usuario puede determinar coordenadas, variaciones cronométricas y retardos troposféricos de un único receptor aislado [Kouba and Heroux, 2000]. La

calidad de los resultados dependerá directamente de la precisión y coherencia de la información de satélite *a priori*. El marco de referencia y el punto de referencia de los relojes y órbitas supuestos repercutirán en los resultados PPP, por lo que es importante que estén bien definidos y sean estables. Los resultados IGS (véase a continuación) están expresamente destinados para este fin. Kouba [2004] ofrece una guía para utilizar adecuadamente los resultados IGS en los análisis PPP. Para arcos de solución de un día, las repetibilidades de posición típicas deben situarse a un nivel de unos 10 mm en la vertical y entre 3 mm y 5 mm en la horizontal. Los resultados del reloj receptor PPP deben ser precisos a un nivel semejante, < 100 ps, pero la exactitud (excluida la incertidumbre de calibración) normalmente será mayor (véase a continuación). La escala temporal PPP será la de los relojes de satélite *a priori*.

13.3.5 Efectos de los errores en las soluciones cronométricas

Los errores en los modelos de análisis, la información *a priori* o los datos observados influirán en las estimaciones cronométricas GPS. Dach *et al.* [2003] han utilizado simulaciones para examinar las firmas de los diversos tipos de errores de entrada. Por ejemplo, un error en la altura de la estación causará un desvío de frecuencia en las líneas de base este-oeste largas. En el dominio del tiempo, este error introduce una discontinuidad en la frontera entre arcos de procesamiento. Los errores de órbitas de satélites pueden tener efectos similares. En la práctica, estos efectos de error probablemente no sean muy importantes en los resultados IGS, pues las posiciones de las estaciones y los satélites se ajustan con las de los relojes. Probablemente es más importante la confirmación obtenida por Dach *et al.* de que un ruido de pseudodistancia a un nivel de 0,5 m, aun suponiéndose que tiene una distribución de ruido blanco, causará desvíos entre arcos de procesamiento de 1 día discretos a niveles visibles en los resultados cronométricos reales (véase a continuación). El ruido de pseudodistancia cromático posiblemente tiene un efecto más pronunciado en los saltos de reloj entre arcos.

Se supone que utilizar más datos de pseudodistancia (velocidades de muestreo superiores y/o arcos más largos) aumentará la exactitud del reloj. Las velocidades de muestreo superiores sólo serán eficaces cuando la longitud de onda multitrayecto dominante sea más corta que el periodo de muestreo. En caso contrario, los errores cronométricos no se reducirán con la adición de más datos. Como demostraron Senior *et al.* [1999] para las incertidumbres cronométricas formales, con arcos de análisis más largos se deberían mediar a la baja los efectos del ruido de código, aunque con una eficacia menor a \sqrt{N} . Sin embargo, esto no ha quedado demostrado para los resultados cronométricos reales, sino sólo para sus errores formales. Tampoco se ha determinado si los arcos más largos difieren sólo en una desviación cronométrica neta o si el contenido de frecuencia también se modifica (mejora). Si los arcos más largos ofrecen una exactitud cronométrica mejor sólo en cuanto a la desviación, los demás métodos de análisis deberían ofrecer resultados prácticamente equivalentes, como con un filtrado posterior al análisis adecuado de los resultados de arcos más cortos. Este último método puede ser más económico o conveniente para algunas aplicaciones.

Las discontinuidades entre arcos de análisis independientes son naturales y previsibles para todos los parámetros geodésicos, incluidas las órbitas, los retardos troposféricos y los relojes. Los desvíos deben reflejar la calidad inherente de los datos GPS y los métodos de análisis. La magnitud de los saltos de reloj tiende a ser superior que la de la mayoría de los demás parámetros, porque sólo los datos de código la alimentan, aunque adecuadamente mediada en todo el arco de análisis. Se han estudiado varios métodos para minimizar las discontinuidades cronométricas en la frontera diaria. El método evidente consiste en evitar los segmentos de análisis discreto y utilizar algún tipo de procesamiento continuo [Petit *et al.*, 1999; Senior *et al.*, 1999].

Sin embargo, esto resulta difícil de realizar en la práctica y puede causar la acumulación de algunos efectos de error [Senior *et al.*, 1999]. Los arcos de análisis largos también harán que las estimaciones cronométricas estén correlacionadas en los mismos periodos (estadísticas de tipo recorrido aleatorio), lo que podría limitar la estabilidad que se obtendría probablemente utilizando arcos de análisis independientes (comportamiento de ruido blanco). Un método alternativo para eliminar las discontinuidades del análisis es concatenar las series temporales utilizando arcos solapantes para determinar los desvíos [Bruyninx y Defraigne, 1999], [Larson *et al.*, 2000]. Aun cuando los saltos de reloj en las fronteras de arco obedecen a una distribución de ruido blanco [Ray and Senior, 2003], el efecto en las series concatenadas será la adición de un componente de ruido de recorrido aleatorio. Dicho de otro modo, el proceso de concatenación también causa correlaciones cronométricas a largo plazo y puede limitar la estabilidad a largo plazo que se podría obtener de otra manera. Dach *et al.* [Dach *et al.*, 2006] han considerado métodos más sofisticados de generar resultados cronométricos

casi continuos dentro del proceso de estimación mismo trasladando la información de un arco al siguiente. Esto se parece mucho al comportamiento de un filtro/fluidificador para mejorar la estabilidad de transferencia de tiempo a corto plazo con escaso efecto en intervalos más largos.

Resulta difícil de entender la obsesión que tienen muchos de suprimir los saltos de reloj en las fronteras del arco, en particular cuando son pequeños (del orden de 100 ps a 200 ps). Utilizar métodos que introducen correlaciones a largo plazo en las series cronométricas (como la concatenación) parecía particularmente contraproducente. Si realmente se necesita eliminar las discontinuidades, probablemente es preferible utilizar un filtro/fluidificador para evitar el problema de las series cronométricas correlacionadas, aunque de este modo se puede distorsionar el comportamiento del reloj a corto plazo. Por otra parte, las discontinuidades mismas son una información de diagnóstico valiosa sobre la calidad de la instalación de la estación (véase a continuación). Si los saltos son mayores que el nivel de ruido normalizado de unos 120 ps [Ray and Senior, 2003], se han de identificar y mejorar las causas subyacentes, no ocultarlas mediante manipulaciones posteriores al análisis.

13.4 Escalas de tiempo y resultados cronométricos IGS

Desde su concepción en 1994, IGS ha facilitado diariamente ficheros de posiciones de satélite y lecturas cronométricas precisas, tabuladas a intervalos de 15 min. Desde entonces, de cuando en cuando se añaden resultados nuevos o se modifican los existentes. Todos los resultados IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>) están formados por la media ponderada de las soluciones presentadas por hasta ocho centros de análisis participantes. Si bien los conjuntos de datos utilizados por cada grupo suelen solaparse, los efectos de las distintas estrategias de análisis, modelizaciones y software son ampliamente independientes. Así, la adecuada combinación ponderada de los resultados individuales suele ser superior a una única solución. De este modo, los resultados IGS probablemente son mejores en cuanto a precisión y exactitud, pero son ciertamente superiores en estabilidad, fiabilidad y robustez, comparados a los resultados de cualquiera de los grupos de análisis por separado.

13.4.1 Resultados disponibles

Los resultados cronométricos IGS «clásicos» se modificaron el 5 de noviembre de 2000 (Semana GPS 1087), cuando se aplicó un nuevo algoritmo de combinación y los resultados cronométricos se ampliaron para incluir muchos de los receptores de la red de rastreo, además de los satélites [Kouba and Springer, 2001]. El intervalo de tabulación de los nuevos relojes (satélites y estaciones de rastreo) se redujo a 5 min, en comparación con el anterior muestreo de 15 min de los relojes de satélite.

A partir de la latencia de datos se generan tres líneas de resultados:

- 1 los resultados ultrarrápidos (con relojes de satélite, pero no receptores) destinados a los usuarios en tiempo real;
- 2 los resultados rápidos, publicados unas 17 h después del final de cada día;
- 3 los resultados finales definitivos, publicados unos 13 días después del final de cada semana.

En el Cuadro 13-1 se resumen los resultados orbitales y cronométricos de IGS, las latencias y las exactitudes estimadas. (Además de los que se muestran en el cuadro, IGS ofrece mapas ionosféricos, retardos de trayecto cenital troposférico, parámetros de orientación terrestre, etc.) Todos los resultados pueden obtenerse de los centros de datos o de la Oficina Central de IGS (igsb.jpl.nasa.gov). La utilización de los resultados rápidos o finales de IGS, en lugar de la información radiodifundida, permite efectuar determinaciones PPP a nivel centimétrico en arcos de 24 horas.

La red de rastreo IGS está formada por más de 350 instalaciones receptoras distribuidas por todo el mundo. Todas las estaciones funcionan continuamente y rinden (como mínimo) diariamente ficheros de observación RINEX con muestras de 30 s. La mayoría de las estaciones utilizan osciladores de cristal internos, guiados por sus propias observaciones de rastreo de tiempo GPS, pero más de 100 estaciones IGS están equipadas con normas de frecuencia externas. En la Figura 13-1 se muestran la distribución y tipo de normas externas de la red IGS (en noviembre de 2004). Unas 51 utilizan normas de máser H, 28 emplean relojes C y 27 utilizan relojes Rb. De éstas últimas, unas 20 están coubicadas con laboratorios de cronometría.

CUADRO 13-1

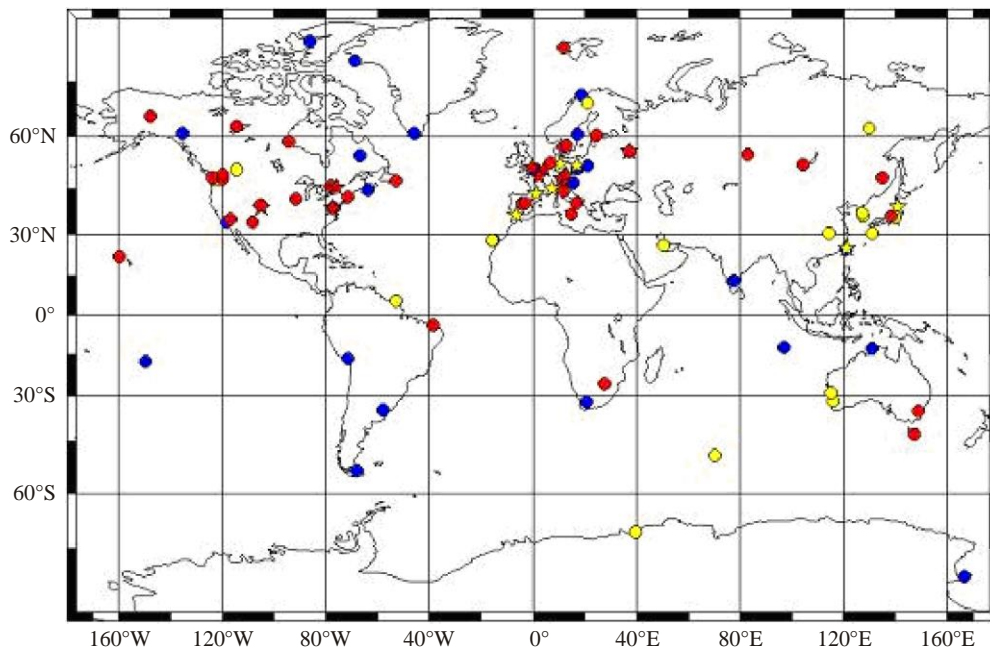
Resultados orbitales y cronométricos combinados IGS y sus características, en comparación con los valores radiodifundidos

Efemérides de satélite GPS y relojes de satélite/estación		Exactitud estimada	Latencia	Intervalos de actualización	Intervalo de muestra
Radiodifusión	Órbitas	~200 cm	Tiempo real	--	Diario
	Relojes de satélite	~7 ns			
Ultrarrápidos (media predicción)	Órbitas	~ 10 cm	Tiempo real	Cuatro veces al día	15 min
	Relojes de satélite	~ 5 ns			
Ultrarrápidos (media observación)	Órbitas	< 5 cm	3 h	Cuatro veces al día	15 min
	Relojes de satélite	~ 0,2 ns			
Rápidos	Órbitas	< 5 cm	17 h	Diario	15 min
	Relojes de satélite y estación	~ 0,1 ns			5 min
Finales	Órbitas	< 5 cm	~ 13 días	Semanal	15 min
	Relojes de satélite y estación	~ 0,1 ns			5 min

Las estimaciones de exactitud orbital, excepto en el caso de las órbitas predichas, se basan en comparaciones con resultados de telemetría por láser independientes. Las precisiones son mejores que las exactitudes indicadas. Los ficheros de resultados corresponden a periodos de 24 horas, excepto los ultrarrápidos, que abarcan 48 horas. Los datos cronométricos de 5 min están disponibles en ficheros de formato «clock RINEX», mientras que las muestras cronométricas de 15 min pueden obtenerse en ficheros de formato SP3 junto con las efemérides de los satélites.

FIGURA 13-1

Mapa donde se muestra la distribución de estaciones IGS que utilizan normas de frecuencias externas (en noviembre de 2004). Los colores indican el tipo de norma: rojo para máser H, amarillo para cesio y azul para rubidio. Las estaciones IGS coubicadas con laboratorios de cronometría se señalan con una estrella



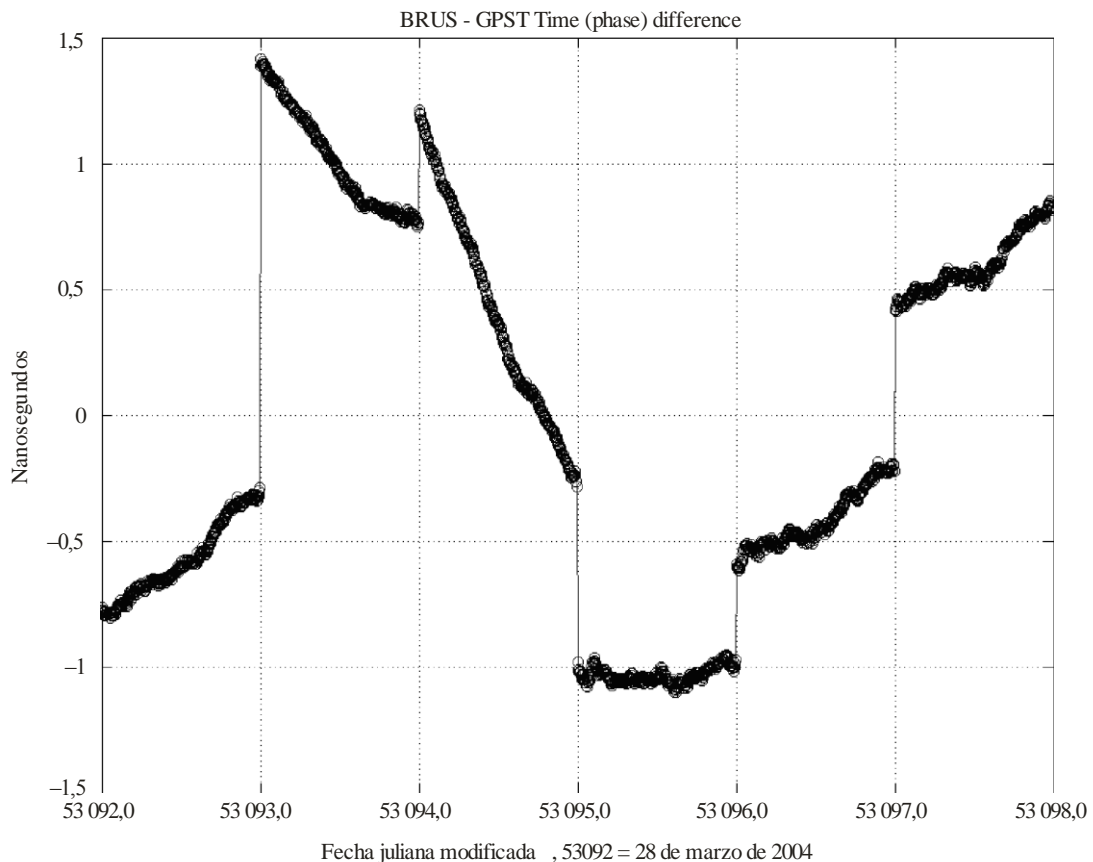
13.4.2 Escalas de tiempo IGS

No hay requisitos específicos para la escala de tiempos subyacente de los resultados cronométricos cuando se utilizan para aplicaciones geodésicas de determinación de la posición, excepto que la escala debe ser razonablemente próxima al tiempo GPS. Una de las grandes ventajas de la geodesia GPS es que no depende, en aproximación de primer orden, de la estabilidad o la exactitud de la escala de tiempo, por cuanto los efectos de los relojes pueden eliminarse mediante doble diferenciación. Sin embargo, resulta conveniente que la escala de tiempo de referencia posea otras propiedades, como una elevada estabilidad y que pueda relacionarse con el UTC con exactitud. Estas cualidades hacen que los resultados cronométricos del servicio IGS también sirvan para otras aplicaciones, aparte de las puramente geodésicas, especialmente para cronometría.

A fin de difundir el tiempo GPS, el servicio IGS utilizaba inicialmente de referencia para sus relojes una simple armonización lineal diaria de los relojes de los satélites observados. Ahora bien, la inestabilidad del tiempo GPS es grande en términos comparativos, de unos 2×10^{-14} al día, que supone como mínimo un orden de magnitud peor que la inestabilidad de las mejores frecuencias patrón en la red IGS. Es más, algunos de los satélites de Bloque IIR más recientes disponen de relojes que son más estables que el tiempo GPS en su conjunto, debido, en parte, al algoritmo de ajuste bang-bang utilizado para mantener armonizada la escala de tiempo difundida con el UTC (mediante la realización que mantiene el Observatorio Naval de EEUU). El antiguo procedimiento de IGS de armonizar sus relojes cada día con el tiempo GPS producía discontinuidades diarias en tiempo y frecuencia (Figura 13-2). Este procedimiento no tiene efecto alguno en la utilidad de los resultados para la determinación de la posición con exactitud, pero sí limita su utilidad para la difusión de tiempo y frecuencia.

FIGURA 13-2

Cálculos de la transferencia de tiempo geodésico GPS para la estación BRUS en Bruselas, entre el 28 de marzo y el 2 de abril de 2004



Los cálculos de la transferencia de tiempo en la Figura 13-2 se basan en una armonización lineal diaria con respecto al tiempo GPS. La inestabilidad BRUS se debe principalmente a la armonización lineal diaria de la escala de tiempos para la difusión del tiempo GPS, que es la causante de grandes discontinuidades en tiempo y frecuencia. En el gráfico se ha eliminado la tendencia lineal.

A fin de mejorar la inestabilidad de sus resultados cronométricos rápidos y finales, el IGS ha desarrollado nuevas escalas de tiempo internas. Estas nuevas escalas se crean a partir de conjuntos ponderados de los relojes incluidos, tanto para estaciones como para satélites. El algoritmo se describe en detalle en Senior *et al.* [Senior *et al.*, 2003].

Cada escala de tiempo («IGRT» para resultados rápidos y para resultados finales «IGST») se basa principalmente en los máseres de hidrógeno disponibles, aunque en menor medida también pueden contribuir relojes, en particular relojes de rubidio a bordo de satélites del bloque IIR.

El algoritmo es un filtro Kalman con un modelo de polinomio sencillo para cada reloj, seguido de un algoritmo cuadrático lineal (LQG) para un ligero ajuste de las escalas de tiempo al tiempo GPS.

El coeficiente de ponderación para cada reloj se determina por iteración y se basa dinámicamente en la inestabilidad observada a diversos intervalos de promediado inferiores a 1 día. Se impone un límite superior a cada reloj para evitar que uno de ellos pueda preponderar en las escalas de tiempo [Thomas and Azoubib, 1996].

El algoritmo de ajuste LQG se ve amortiguado esencialmente por una constante de tiempo de unos 30 – 40 días. Los resultados son escalas de tiempo con una inestabilidad generalmente mejor que 1×10^{-15} al día, aunque siguen estando limitadas a medio y largo plazo por el ajuste al tiempo GPS. No obstante, hay periodos en los que la inestabilidad de las escalas de tiempo puede degradarse un poco, por ejemplo cuando el número de estaciones de máser de hidrógeno utilizadas para obtener los resultados cronométricos es extraordinariamente pequeño.

En la Figura 13-3 se muestra la fidelidad del reloj BRUS después de modificar la referencia a las escalas de tiempo finales de IGS, IGST. La información cronométrica entre estaciones es idéntica a la de la Figura 2; solo las escalas de tiempo subyacentes son diferentes. Es obvia la mucha mayor estabilidad que se obtiene al utilizar la escala de tiempo IGS. El resto de pequeñas discontinuidades en algunos intervalos día se debe principalmente a la calidad de los datos BRUS locales.

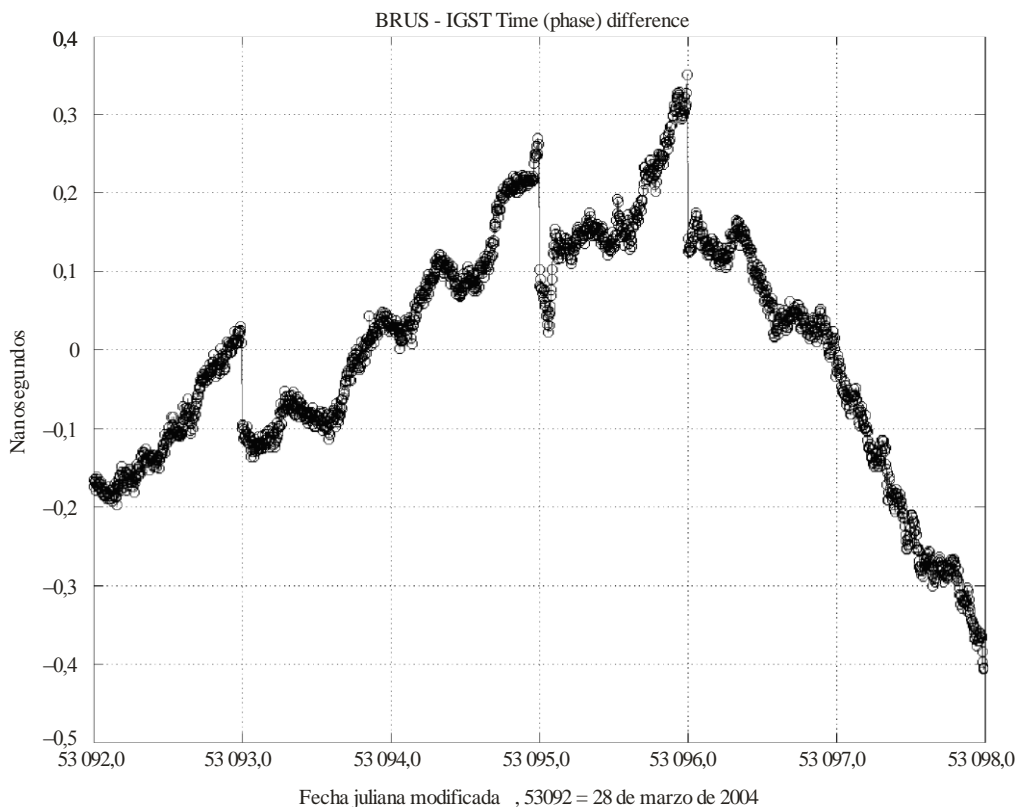
Es posible que algunos efectos de cada reloj, comprendidos los saltos en los intervalos día, puedan afectar negativamente a las escalas de tiempo en su conjunto, debido por ejemplo a problemas desapercibidos de edición de datos. No obstante, la experiencia indica que tales limitaciones son menores y que las escalas de tiempo en conjunto son superiores a cualquier reloj concreto de los que contribuyen.

Las nuevas escalas de tiempo IGS se emplearon en los resultados oficiales de principios de marzo de 2004 (véase IGS Mail No. 4875 en: igscb.jpl.nasa.gov).

Los resultados cronométricos armonizados a la misma escala de tiempo interna están disponibles desde el mes de noviembre de 2000 en la siguiente dirección: (<https://goby.nrl.navy.mil/IGStime>).

FIGURA 13-3

Los mismos datos cronométricos de BRUS que en la Figura 13-2, excepto que se basan en la escala de tiempo final de IGS, IGST. En el gráfico se ha eliminado la tendencia lineal



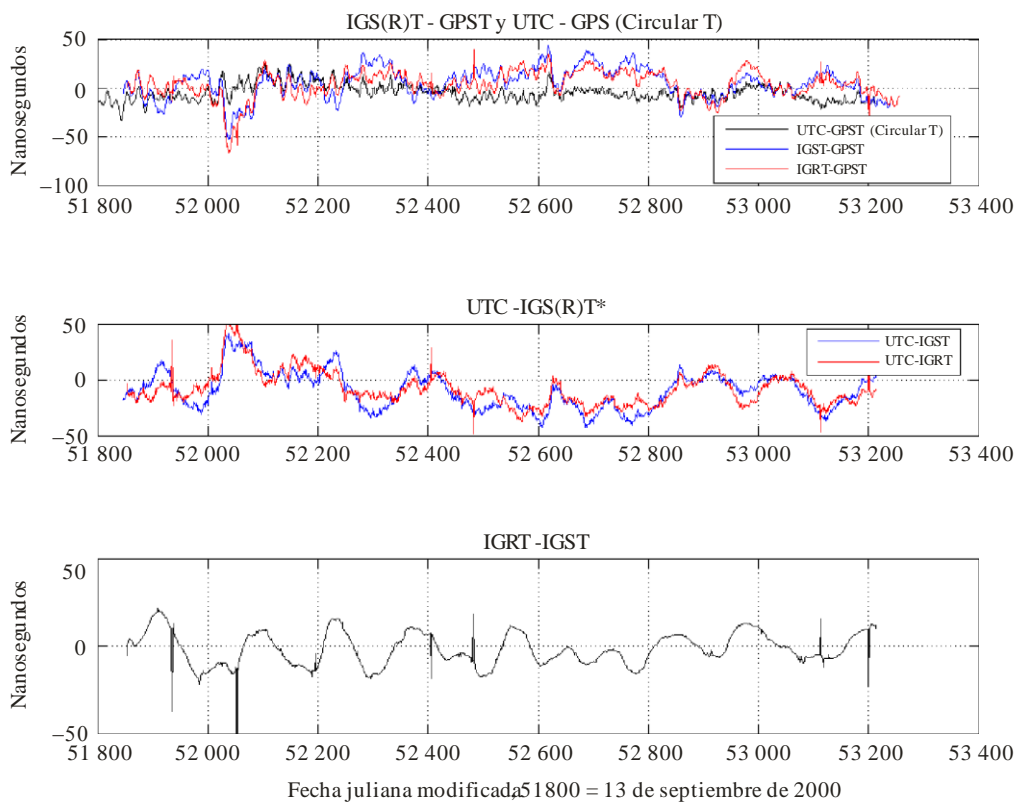
Sat_time_freq-13-03

En la Figura 13-4 se representa la variación a largo plazo de cada escala de tiempo IGS respecto del tiempo GPS y el UTC (aproximadamente). Aunque la inestabilidad diaria e inferior al día de las escalas de tiempo IGS es mucho mejor que el tiempo GPS, la inestabilidad a largo plazo es similar debido a que se siguen basando en el tiempo GPS. Se está tratando de vincular las escalas de tiempo IGS al UTC de manera más exacta utilizando datos procedentes de la BIPM y aprovechando las estaciones del IGS coubicadas en laboratorios de cronometría [Senior *et al.*, 2004].

El diagrama superior de la Figura 13-4 muestra el UTC menos el GPST publicado en las Circulares T de la BIPM Circular T y las escalas de tiempo IGST e IGRT del IGS menos el GPST. Las realizaciones del GPST por el IGS y la BIPM pueden variar algunos ns debido a que utilizan estrategias diferentes de observación y análisis [Senior *et al.*, 2004]. El gráfico de en medio muestra el UTC-IGST y el UTC-IGRT obtenido al restar series de tiempo del gráfico superior, partiendo del supuesto de que el GPST de la Circular T y el del IGS son equivalentes. Los efectos de esta hipótesis son responsables de una pequeña parte de las diferencias representadas, especialmente a altas frecuencias. Por último, el diagrama de abajo muestra el IGRT menos el IGST, suponiendo que cada uno observa el GPST de manera equivalente. Los picos ocasionales se deben a errores infrecuentes de armonización de los resultados rápidos IGS con el GPST y no se incluyen realmente en ninguna de las escalas de tiempo.

FIGURA 13-4

Comparación de las escalas de tiempo IGST e IGRT del servicio IGS respecto del tiempo GPS (GPST) y del UTC (módulo de segundos intercalares) del 5 de noviembre de 2000 al 28 de junio de 2004



Sat_time_freq-13-04

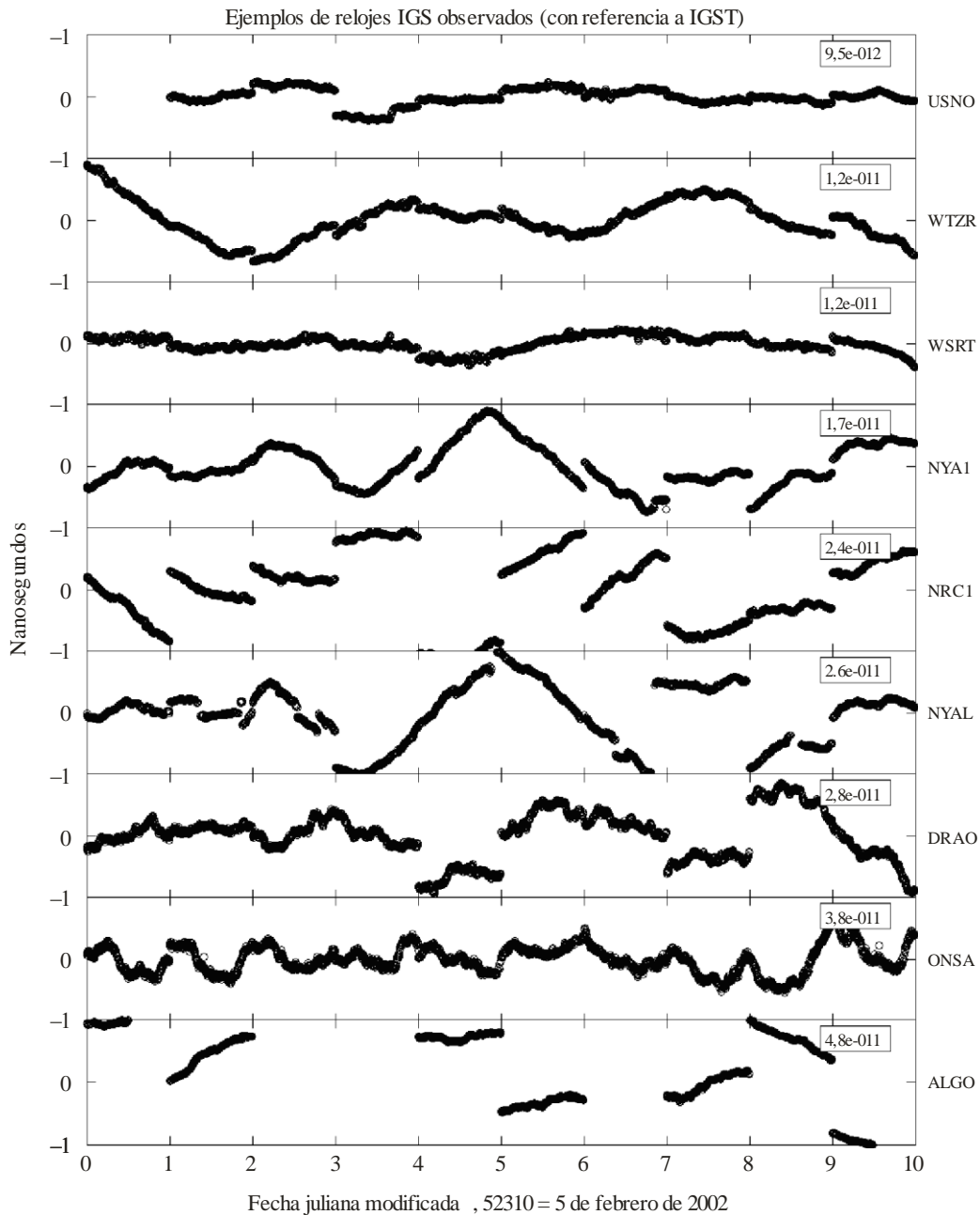
13.5 Evaluación de la fidelidad mediante el análisis de la discontinuidad en el intervalo día

La exactitud «absoluta» de las estimaciones cronométricas basadas en el GPS (módulo de error de calibración) queda determinado completamente por los datos de pseudodistancia, promediados a lo largo del intervalo de análisis, normalmente 24 h. Al analizar arcos de un día de datos mundiales muestreados a intervalos de 5 minutos, las estimaciones de error oficiales suelen ser de unos 120 ps, suponiendo que cada observación de pseudodistancia tiene una incertidumbre de 1 m. Puede realizarse una prueba más realista de la exactitud real de la medida comparando las estimaciones cronométricas en los límites entre arcos de análisis independientes para receptores equipados con osciladores muy estables. (También pueden probarse relojes menos estables si se solapan los arcos de análisis a fin de eliminar errores de interpolación, pero las estimaciones cronométricas adyacentes ya no serán independientes.) Esta prueba es análoga a la prueba de repetitividad geodésica clásica para series de tiempo de determinación de la posición.

Los saltos cronométricos en el intervalo día pueden analizarse para sistemas básicos o redes en los que se ha mantenido como referencia fija un mismo reloj de estación. No obstante, los resultados pueden ser difíciles de interpretar, dado que los efectos en las dos estaciones estarán covolucionados en cada serie temporal. Un método superior para realizar este análisis consiste en utilizar los resultados cronométricos del IGS, con la nueva escala de tiempos que es muy estable [Senior *et al.*, 2003]. Al desacoplar pares de relojes, era imposible aislar los comportamientos observados en cada estación. La Figura 13-5 ilustra un ejemplo de series temporales simultáneas de estimaciones cronométricas IGS para ocho estaciones de máser de hidrógeno. Obsérvese que la variabilidad en las discontinuidades entre estaciones es independiente de la estabilidad de cada reloj, dado que algunos lugares experimentan grandes saltos pero tiene una muy buena estabilidad subdiaria y viceversa. Las distribuciones de las diferencias del intervalo día estudiadas por Ray y Senior eran de media cero y gaussianas, pero con variaciones en valor eficaz que dependían sobremanera del lugar del caso.

FIGURA 13-5

**Estimaciones cronométricas de nuevos lugares IGS con máseres de hidrógeno H,
entre el 5 y el 15 de febrero de 2002**



Sat_time_freq-13-05

En el gráfico de la Figura 13-5 se ha eliminado la tendencia cuadrática de cada reloj. El valor que figura dentro de los recuadros de cada fila contiene la desviación de Allan a 300 s, despreciando los saltos del reloj en los intervalos día. La magnitud de los saltos en los intervalos día varía sobremanera en cada estación y es independiente de la estabilidad del reloj subsidiaria.

El análisis previo de los saltos del reloj IGS se ha actualizado y ampliado en el Cuadro 13-2. Se examinó un total de 1 310 días entre octubre de 2000 y junio de 2004, procedentes de los resultados cronométricos rápidos y finales del servicio IGS.

Los criterios de edición y procesamiento eran los mismos que utilizaron Ray y Senior [Senior *et al.*, 2003]. La laguna de datos máxima en el intervalo día es de 30 min (normalmente 5 min), por lo que el ruido de interpolación debido a inestabilidades en el máser de hidrógeno debería ser despreciable. Dado que las estadísticas corresponden al valor eficaz para las diferencias entre pares de días independientes, cada estimación de exactitud diaria debería reducirse en $\sqrt{2}$. Cabe observar la gran dispersión en la fidelidad en valor eficaz entre las estaciones, casi de un orden de magnitud. Esta dispersión se debe probablemente a la gran variedad de fiabilidad de código entre estas estaciones y, a su vez, muestra la gran variación en los entornos multitrayecto, externos a la antena, así como internos a los instrumentos del GPS. En algunos casos la fiabilidad varía sobremanera con el tiempo, y a veces está correlacionada con cambios registrados en los registros del lugar. También se han encontrado en unos pocos casos variaciones estacionales. Se había demostrado previamente que las variaciones del valor eficaz eran independientes del receptor seleccionado o de los modelos de antena, e incluso de la utilización de radomos.

CUADRO 13-2

**Resumen de las estadísticas de discontinuidad cronométrica en el intervalo día para
38 estaciones del servicio IGS con frecuencias patrón de máseres de hidrógeno**

Lugar del IGS	Salto del reloj en valor eficaz (ps)	Observaciones
ONSA	149	Excelente
BREW	152	Excelente
OPMT (TL)	158	Nueva estación, así que se dispone de pocos datos
BRUS (TL)	165	Tras los cambios realizados en el verano de 2003, mejoró a 118 ps
MAD2	170	Muy pocos datos disponibles, por lo que el valor eficaz no es fiable
WTZR (TL)	189	
GODE	205	
USN1 (TL)	225	Estación sustituida por USN3 en julio de 2004
WSRT	227	Leve degradación desde el verano de 2003
KHAJ	233	Datos limitados
CRO1	236	El máser ya no se utiliza
USUD	266	El máser ya no se utiliza
NPLD (TL)	268	
TID*	269	Parece haber mejorado desde el verano de 2003
YEBE	271	
GOL2	271	Datos muy limitados, por lo que el valor eficaz no es fiable
AMC2 (TL)	283	Mejorado tras modificar la antena/receptor en junio de 2002
SPT0 (TL)	286	
WES2	296	
PIE1	305	Mejorado desde que se modificó el receptor en octubre de 2002
STJO	334	
USNO (TL)	354	Parece haber empeorado desde la primavera de 2003
IRKT	359	
NYAL	363	Mucho mejor que NYA1 en 2004

CUADRO 13-2 (fin)

Lugar del IGS	Salto del reloj en valor eficaz (ps)	Observaciones
NLIB	368	
MATE	389	Variaciones temporales considerables; mejor en 2004
KOKB	460	Gran degradación antes de que se modificara la antena/cable en mayor de 2004
FAIR	478	Ha mejorado algo desde el verano de 2003
DRAO	522	
YELL	564	Grandes variaciones estacionales, mucho peor en invierno
ALBH	587	Desde diciembre de 2003 ha mejorado mucho hasta llegar a 97 ps
HOB2	631	Variaciones correlacionadas con los cambios de estación
MEDI	703	
FORT	706	
NYA1	750	Gran degradación desde el verano de 2003
ALGO	877	Grandes variaciones estacionales, mucho peor en invierno
NRC1 (TL)	936	Grandes variaciones estacionales, mucho peor en invierno
METS	1 065	El máser ya no se utiliza

Se han utilizado los resultados cronológicos rápidos y finales del servicio IGS de octubre de 2000 a junio de 2004. Las estaciones situadas en laboratorios de cronometría se indican con (TL).

La estación IGS con mayor fidelidad a largo plazo de entre las estudiadas es ONSA (Onsala, Suecia), con una exactitud cronométrica diaria de $(149/\sqrt{2}) = 105$ ps.

Las estaciones de BREW (Brewster, WA, Estados Unidos de América), OPMT (París, Francia), BRUS (Bruselas, Bélgica), MAD2 (Madrid, España), WTZR (Wetzell, Alemania) y GODE (Greenbelt, MD, Estados Unidos de América) sólo tiene unos pequeños errores diarios, entre 107 y 145 ps.

Hay una progresión continua de otras estaciones con peor fiabilidad, de 620 a 753 ps para ALGO (Algonquin, ON, Canadá), NRC1 (Ottawa, ON, Canadá), and METS (Metsahovi, Finlandia).

El orden de magnitud de la exactitud del reloj responde a las variaciones de las condiciones locales, y no a un fallo en la escala de tiempo IGS, por ejemplo. Las razones de peso que explican esta conclusión son los cambios temporales que experimentan varias estaciones.

Los cambios abruptos suelen corresponder a cambios en la configuración o en el equipo. (Lamentablemente, no todos los cambios en las estaciones se hacen públicos.) Algunas estaciones experimentan grandes variaciones estacionales, especialmente las tres estaciones canadienses YELL, ALGO y NRC1 (Figura 13-6).

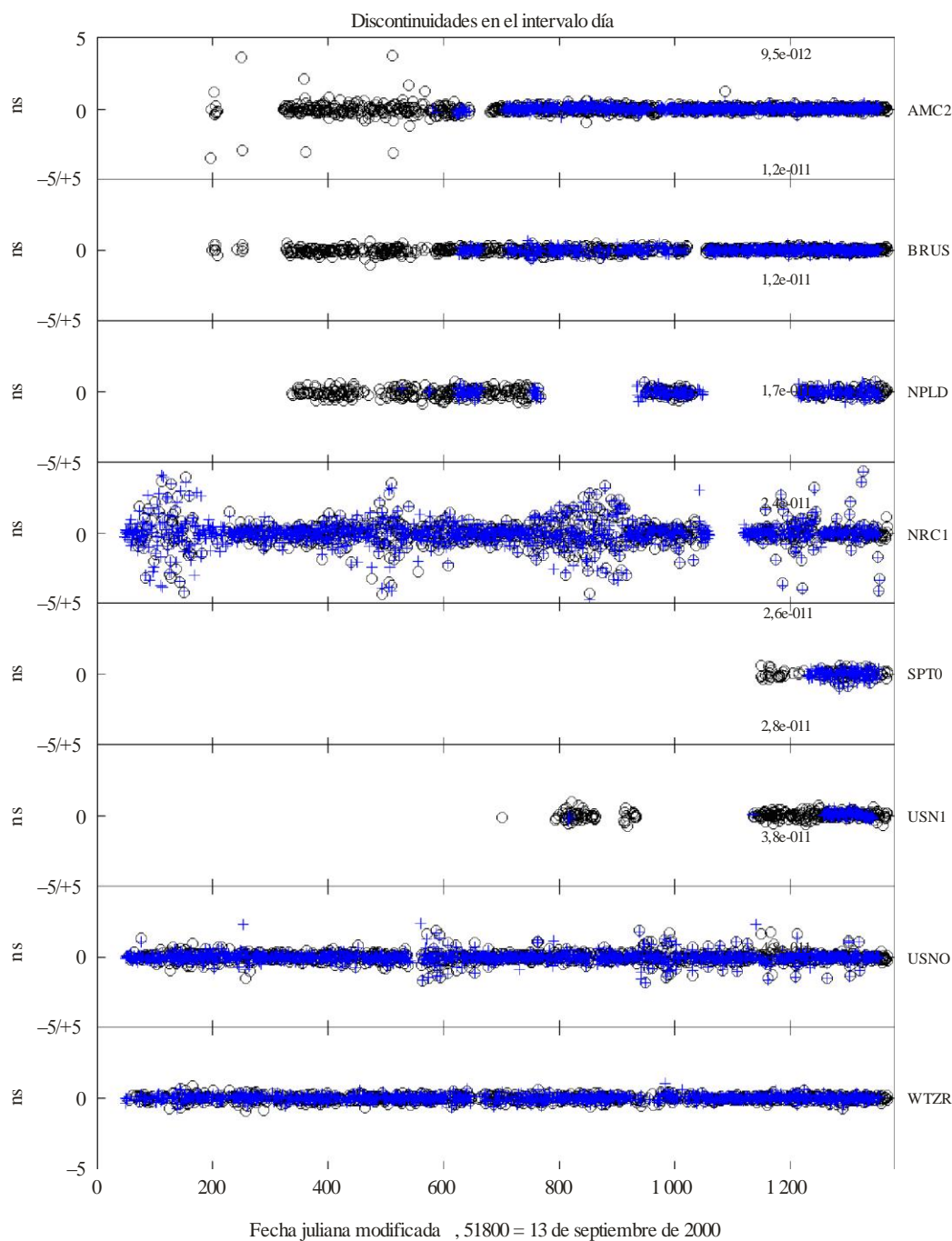
Se especulaba que el gran incremento de saltos de reloj durante el invierno en esos lugares era causado por la aparición de nieve y hielo en superficies debajo y cerca de las antenas.

La Figura 13-6 muestra los saltos del reloj en el intervalo día para esas estaciones IGS en laboratorios de cronometría equipados con másers de hidrógeno (indicados en el Cuadro 13-2 mediante TL). El OPMT se ha omitido debido a la gran dispersión de sus datos. La estación BRUS, especialmente desde el verano de 2003, debería considerarse ejemplar y un modelo para los demás laboratorios de cronometría.

El periodo de estudio representado en la Figura 13-6 es de octubre de 2000 a junio de 2004. Los resultados cronométricos rápidos del IGS se muestran en círculos negros, mientras que los finales aparecen en símbolos «+» de color azul.

FIGURA 13-6

Variaciones temporales de los relojes en el intervalo día para ocho estaciones con máser de hidrógeno de IGS en laboratorios de cronometría



Sat_time_freq-13-06

13.6 Comparaciones con resultados independientes de transferencia de tiempo bidireccional

Además de las evaluaciones internas antes examinadas, es importante comparar las estimaciones cronométricas geodésicas con las de sistemas independientes. Pese a que se emplea de manera generalizada en los laboratorios de cronometría, la visión común (CV) convencional no ofrece una exactitud suficiente como para efectuar comparaciones meritorias, salvo quizá para intervalos de promediado muy largos. Resultan mucho más prometedores los métodos P3 CV y TWSTT. Algunos de los mejores resultados a distancias

internacionales demuestran coherencia entre los relojes geodésicos de unos 0,5 ns en valor eficaz o de unos 0,3 ns TDEV para tiempos de promediado de hasta unos cuantos meses [Plumb *et al.*, 2005; Petit *et al.*, 2004].

En el cuadro 13-3 se resumen los resultados de estudios comparativos recientes de gran calidad.

CUADRO 13-3

Resumen de las comparaciones publicadas entre los métodos P3 CV o TWSTT para una serie de enlaces de diversas longitudes

Enlace	Distancia	Método/estadística/valor	Periodo	Fuente
NPL-PTB	749 km	P3 / RMS / 0,48 ns TW / RMS / 0,57 ns	5 meses 4 meses	Petit & Jiang, 2004
IEN-PTB	835 km	P3 / RMS / 0,49 ns TW / RMS / 0,64 ns	2 meses 2 meses	Petit & Jiang, 2004
TL-CRL	2 112 km	P3 / RMS / 0,58 ns TW / RMS / 1,27 ns	8 meses 8 meses	Petit & Jiang, 2004
USNO-NPL	5 695 km	P3 / RMS / 0,48 ns TW / RMS / 0,59 ns	5 meses 3 meses	Petit & Jiang, 2004
USNO-PTB	6 275 km	P3 / RMS / 0,45 ns TW / RMS / 0,49 ns	5 meses 5 meses	Petit & Jiang, 2004
USNO-AMC ⁽¹⁾	2 361 km	TW / Diferencia \pm RMS / -2,10 \pm 0,69 ns (cal. acordado) TW / TDEV / < 0,1 ns, $300 \leq \tau \leq 2\,000$ s < 0,34 ns, $2\,000 \leq \tau \leq 7 \times 10^6$ s TDEV / 0,34 ns en 7×10^6 s	7 meses	Plumb & Larson, 2004
USNO-NIST	2 405 km	TW / RMS / 0,83 ns TW / TDEV / < 0,3 ns, $3\,600 \leq \tau \leq 6 \times 10^6$ s < 0,72 ns, $6 \times 10^6 \leq \tau \leq 7,4 \times 10^6$ s TDEV / 0,72 ns en $7,4 \times 10^6$ s	5,5 meses	Plumb & Larson, 2004
PTB-NIST	7 532 km	TW / RMS / 0,79 ns TW / TDEV / < 0,5 ns, $2 \times 10^5 \leq \tau \leq 7,5 \times 10^6$ s TDEV / 0,24 ns en $7,5 \times 10^6$ s	7 meses	Plumb & Larson, 2004
USNO-PTB	6 275 km	RMS / 2 ns	2 años	Dach <i>et al.</i> , 2002

⁽¹⁾ Los enlaces geodésicos y TW se calibraron por separado para tener en cuenta los retardos instrumentales.

Las mediciones TWSTT son relativamente dispersas comparadas con los datos continuos del GPS, unas cuatro veces al día en los últimos años. Las diferencias se calculan por interpolación de los datos geodésicos y de P3 CV a las épocas TWSTT. En las reducciones de datos P3 CV se han utilizado órbitas precisas IGS y mapas de la ionosfera, así como la aplicación de desplazamientos modelo para movimientos de la marea de la Tierra sólida. También se ha aplicado la suavización Vondrak a los resultados P3, equivalente a un filtro de paso bajo con un periodo de corte de unos 0,4 días. Según observaron Petit y Jiang [Petit and Jiang, 2004], las diferencias entre series temporales simultáneas deberían ser una constante para cada par de relojes (equivalente a un error de calibración).

Así, la desviación típica debería medir la inestabilidad relativa a largo plazo de los dos métodos de transferencia de tiempo. Los datos geodésicos y datos P3 proceden a menudo del mismo receptor GPS, por lo que cabe esperar que algunos de los errores debidos al receptor y a la antena sean comunes y sus diferencias no sean

evidentes (como a los efectos de la temperatura). De modo que sólo las comparaciones con TWSTT son totalmente independientes. Para las tres largas distancias estudiadas por Plumb y Larson [Plumb and Larson, 2005], las desviaciones de Allan de las diferencias de reloj entre TW-geodésicas se debían principalmente a inestabilidades TWSTT hasta intervalos de 10^5 a 10^6 s. A intervalos más largos, las inestabilidades del reloj predominaban sobre las del ruido de transferencia en ambos métodos.

Según las comparaciones TWSTT publicadas, la exactitud de los resultados de transferencia de tiempo geodésico es aparentemente de al menos $(0,5 \text{ ns} / \sqrt{2}) = 0,35 \text{ ns}$ (valor eficaz), suponiendo que cada método contribuye por igual a las diferencias observadas. Este valor es bastante más grande que los errores oficiales geodésicos correspondientes a los análisis de 1 día, de unos 0,12 ns, pero está dentro de la gama de fiabilidad de algunas de las peores estaciones GPS (Cuadro 13-2). Habida cuenta de que además las comparaciones siempre presentan mayor estabilidad para los relojes geodésicos de hasta intervalos de varios días, el ruido real en valor eficaz del TWSTT es casi seguro más grande y la exactitud geodésica normal es mejor que 0,35 ns.

13.7 Evaluación de la fidelidad de la transferencia de tiempo

La Figura 13-7 muestra la base de estabilidad para determinaciones cronométricas geodésicas de 24 h, según dedujeron Ray y Senior [Ray and Senior, 2003] al analizar los saltos del intervalo día de los relojes IGS. El resultado no difiere considerablemente de $\tau^{-0.5}$, de conformidad con el proceso de ruido aleatorio. Para un tiempo de promediado de 1 día, la inestabilidad deducida es de $1,4 \times 10^{-15}$.

Algunas de las mejores estaciones IGS consiguen este nivel de fidelidad, pero, como hemos visto, otras son mucho peores. Aparte del intervalo de análisis de 1-día, las estimaciones cronométricas deberían ser casi independientes y se prevé que el comportamiento sea parecido al de un proceso con ruido blanco, τ^{-1} , como ilustra la Figura 13-7.

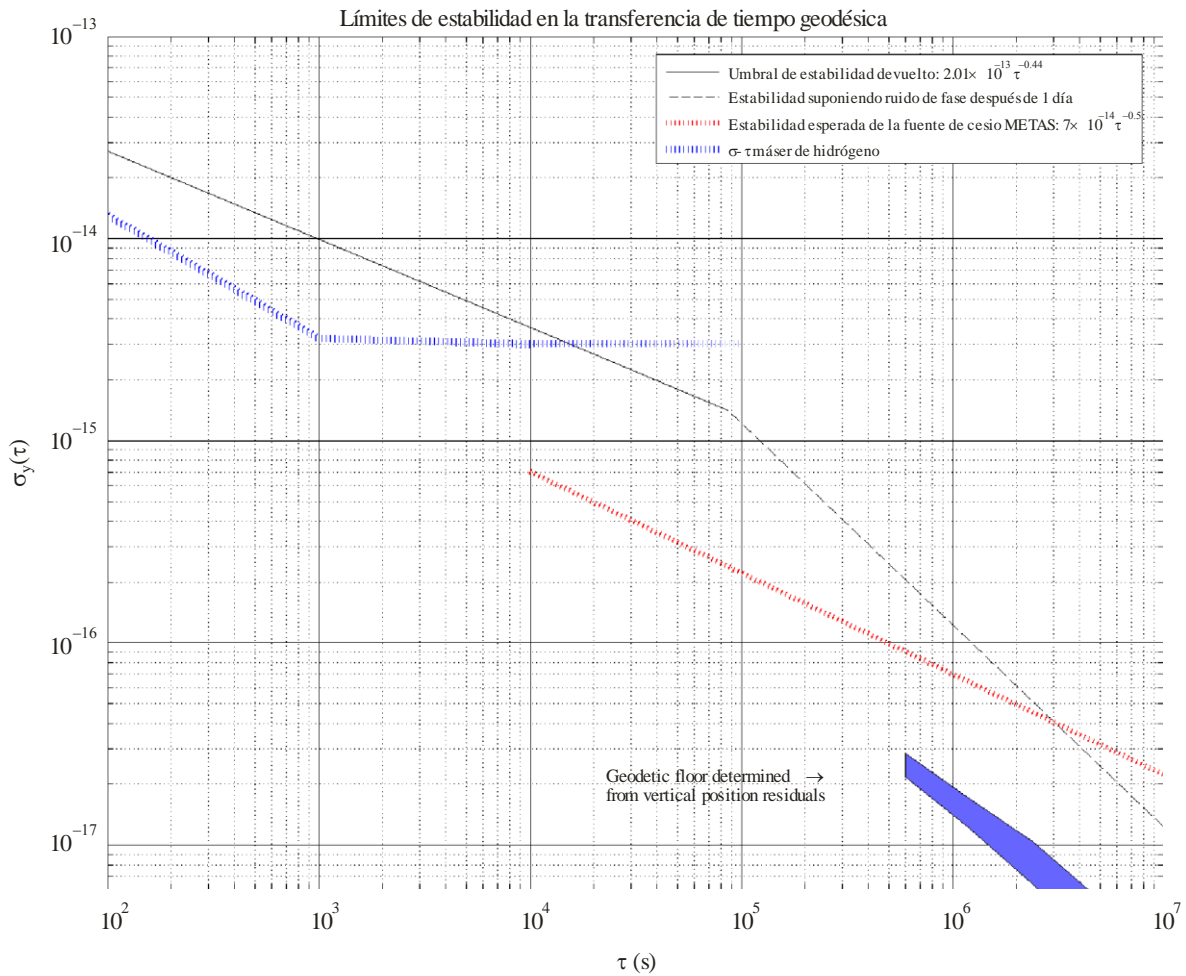
Sin embargo, todavía no ha sido posible estudiar este dominio en profundidad debido a las inestabilidades de las frecuencias patrón que se emplean corrientemente. Cuando se disponga con mayor facilidad de datos de fuentes de cesio, se podrá saber la estabilidad de los relojes geodésicos en intervalos superiores a 1 día. Por ejemplo, en la Figura 13-7 se representa el objetivo de diseño para la fuente METAS Cs [Dudle *et al.*, 2001].

Si los arcos de análisis se amplían más allá de 24 h, la base de inestabilidad será probablemente menor que el nivel aquí mostrado, aunque esto todavía no ha sido demostrado. Por otra parte, al hacerlo se ampliará sin duda el paseo aleatorio de los relojes geodésicos en los mismos intervalos más largos, lo que podría poner en peligro conseguir mayor estabilidad en tiempos más largos utilizando arcos de 1 día independientes.

En la Figura 13-7 también se observa la estabilidad especificada (probablemente conservativa) del máser de hidrógeno activo MHM2010 de Symmetricon (sucesos del antiguo máser H de Sigma Tau). De ahí se desprende que el método geodésico no tiene por qué ser una limitación al comparar relojes de gran fidelidad en intervalos de 1 día, aunque el ruido de transferencia de tiempo sea probablemente dominante sobre las inestabilidades del reloj para intervalos inferiores a unos 14 000 s. La dispersión en las estabilidades de 1 día que se observan en las estaciones de máser de hidrógeno del servicio IGS – desde el umbral de la inestabilidad deducida hasta unos 10^{-14} – es probablemente una combinación de la inestabilidad inherente de la frecuencia patrón (algunos dispositivos son antiguos y otros no aplican un control ambiental estricto) y de los efectos de trayectos múltiples de la pseudodistancia local.

FIGURA 13-7

Umbral de estabilidad de la desviación de Allan para transferencias de tiempo geodésico, dibujada en línea continua de color negro



Sat_time_freq-13-07

El comportamiento del límite en la Figura 13-7 está en consonancia con el proceso de ruido aleatorio hasta intervalos de 1 día. A partir de ahí, cabe esperar que las estimaciones del reloj diarias independientes tengan errores con una distribución similar a la del ruido blanco y obedezcan a una desviación de Allan τ , representada con una línea discontinua de color negro. A efectos comparativos, la curva en color rojo indica el objetivo de diseño de la fuente METAS Cs y la de color azul corresponde al máser de hidrógeno $\sigma \tau$ (de Symmetricron). El límite geodésico fundamental se representa mediante una banda azul en la parte inferior, basado en la reproducibilidad de las medidas de altura de la estación.

13.8 Futuras tendencias

La aplicación de métodos geodésicos a la transferencia mundial de tiempo y frecuencia aún se encuentra en sus albores. La comunidad de cronometría todavía no los utiliza extensamente. Cabe esperar que en el futuro haya una mayor adopción de esta técnica para la comparación de tiempo y frecuencia a escala internacional, especialmente a tenor de su elevado rendimiento y su coste moderado. No cabe duda de que la instalación de laboratorios de frecuencias patrón nuevos y más estables impulsará esta tendencia. El mayor obstáculo a su generalización ha sido probablemente el análisis más complejo de los datos que exige el método geodésico. Si bien existe una serie de paquetes de software que utilizan corrientemente la comunidad de determinación de la posición, estos son menos conocidos en el ámbito de la cronometría. Es casi seguro que el desarrollo de

herramientas simples genéricas para soluciones de reloj PPP facilitará sobremanera la mayor utilización de estimaciones de reloj geodésicas.

Dado que la fidelidad de la cronometría geodésica está limitada por la calidad de los datos de pseudodistancia, especialmente por los efectos debidos a trayectos múltiples, toda mejora en esta técnica reducirá probablemente los errores debidos a trayectos múltiples y de pseudodistancias. Las mejoras en la tecnología de rastreo en los receptores GPS y en el diseño de las antenas geodésicas también resultará positivo. Igualmente útil resulta la buena selección del lugar de la instalación de los equipos. Probablemente los mayores logros se obtendrán gracias a los nuevos diseños de modulación y señales de difusión GNSS. Algunos de los diseños de señal propuestos para GALILEO, por ejemplo, presenta la ventaja de reducir sobremanera los errores debidos a trayectos múltiples [Hein and Pany, 2002]. Por lo general, las estructuras de señal propuestas que desplazan la potencia hacia los extremos de la banda, en particular algunas nuevas modulaciones GPS, prometen mejorar considerablemente la mitigación de los efectos debidos a trayectos múltiples [Weill, 2003].

En cuanto a las comparaciones cronométricas utilizando cualquiera de los métodos existentes, el error absoluto dominante se debe a la incertidumbre en la calibración del hardware. Los errores de calibración son como mínimo un orden de magnitud mayores que los errores característicos de las estimaciones cronométricas basadas en métodos geodésicos. Las perspectivas de mejorar considerablemente la calibración en el futuro son inciertas.

Referencias

- ALLAN, D. and WEISS, M. [1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite, *Proc. 1980 IEEE Freq. Contr. Symp.*, Philadelphia, PA, p. 334-356.
- ALTAMIMI, Z., SILLARD, P. and BOUCHER, C. [2000] ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science application. *J. Geophys. Res.*, **107**(B10), 2214, doi: 10.1029/2001-JB000561, 2002.
- BEUTLER, G., BROCKMANN, E., GURTNER, W., HUGENTOBLER, U., MERVART, L. and ROTHACHER, M. [1994] Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and initial results. *Manuscripta Geodaetica*, **19**, p. 367-386.
- BOSSLER, J.D., GOAD, C.C. and BENDER, P.L. [1980] Using the Global Positioning System (GPS) for geodetic positioning. *Bull. Geod.*, **54**, p. 553-563.
- BRUYNINX, C. and DEFRAIGNE, P. [1999] Frequency transfer using GPS codes and phases: Short- and long-term stability. *Proc. 31st Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC: The U.S. Naval Observatory, p. 471-480.
- BYUN, S.H., HAJJ, G.A. and YOUNG, L.E. [2002] GPS signal multipath: A software simulator. *GPS World*, **July 13**(7), p. 40-49.
- COUNSELMAN, C.C. and SHAPIRO, I.I. [1979] Miniature interferometric terminals for Earth surveying. *Bull. Geod.*, **53**, p. 139-163.
- DACH, R., BEUTLER, G., HUGENTOBLER, U., SCHAER, S., SCHILDKNECHT, T., SPRINGER, T., DUDLE, G. and PROST, L. [2003] Time transfer using GPS carrier phase: Error propagation and results. *J. Geodesy*, **77**, doi 10.1007/s00190-002-0296-z, p. 1-14.
- DACH, R., SCHILDKNECHT, T., HUGENTOBLER, U., BERNIER, L.G. and DUDLE, G. [2006] Continuous Geodetic Time Transfer Analysis Methods. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **53**(7), p. 1250-1259.
- DEFRAIGNE, P., PETIT, G., and BRUYNINX, C. [2001] Use of geodetic receivers for TAI, *Proc. 33rd Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC: The U.S. Naval Observatory, p. 341-348.
- DUDLE, G., JOYET, A., BERTHOUD, P., MILETI, G. and THOMANN, P. [2001] First results with a cold cesium continuous fountain resonator. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **50**(2).

- ELOSEGUI, P., J.L. DAVIS, R.T.K. JALDEHAG, J.M. JOHANSSON, A.E. NIELL, and I.I. SHAPIRO [1995] Geodesy using the Global Positioning System: The effects of signal scattering on estimates of site positions. *J. Geophys. Res.*, **100**, p. 9921-9934.
- ESTEY, L.H. and MEERTENS, C.M. [1999] TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, **3**(1), p. 42-49.
- FLIEGEL, H., T. GALLINI, and SWIFT, E. [1992] Global Positioning System radiation force model for geodetic applications. *J. Geophys. Res.*, **97**(B1), p. 559-568.
- HEIN, G. W. and PANY, T. [December, 2002] Architecture and signal design of the European satellite navigation system Galileo – Status . *J. Global Positioning Systems*, **1**(2), 2002, p. 73-84.
- KEDAR, S., HAJJ, G.A., WILSON, B.D. and HEFLIN, M.B. [2003] The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(16), 1829, doi:10.1029/2003 GL017639.
- KOUBA, J. [2004] Improved relativistic transformations in GPS. *GPS Solutions*.
- KOUBA, J. and P. HEROUX, [2000] Precise point positioning using IGS orbit products . *GPS Solutions*, **5**(2), p. 12-28.
- KOUBA, J. and SPRINGER, T. [2001] New IGS station and satellite clock combination. *GPS Solutions*, **4**(4), p. 31-36.
- LANGLEY, R. B. [1996] GPS receivers and the observables. *GPS for Geodesy*, Teunissen, P.J.G. and A. Kleusberg (editors), Berlin: Springer-Verlag, p. 141-173.
- LARSON, K.M., LEVINE, J., NELSON, L.M., T.E. and PARKER [2000] Assessment of GPS carrier-phase stability for time-transfer applications. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **47**(2), p. 484-494.
- LEWANDOWSKI, W., AZOUBIB, J., De JONG, G., NAWROCKI, J. and DANAHER, J. [1997] A new approach to international time and frequency comparisons: All-in-view multi-channel GPS+GLONASS observations. *Proc. Institute of Navigation GPS97*, p. 1085-1091.
- LICHTEN, S. and BORDER, J. [1987] Strategies for high precision GPS orbit determination. *J. Geophys. Res.*, **92**, 1987, p. 12751-12762.
- MADER, G.L. [1998] GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*, **3**(1), p. 50-58.
- MADER, G.L. and CZOPEK, F. [2002] Calibrating antenna phase centers. *GPS World*, **13**(5), p. 40-46.
- MCCARTHY, D. D. and PETIT, G. [2003] IERS Conventions 2003, IERS Technical Note 32, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2003.
- OVERNEY, F., Th. SCHILDKNECHT, G. BEUTLER, L. PROST, and U. FELLER, [1997] GPS Time transfer using geodetic receivers: Middle-term stability and temperature dependence of the signal delays. *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 504-508.
- PETIT, G. and JIANG, Z. [28 May 2004 and 16 July 2004] Study of time transfer methods: II. TWSTT vs. geodetic clock comparisons, internal BIPM reports.
- PETIT, G., JIANG, Z., MOUSSAY, P., WHITE, J., POWERS, E., DUDLE, G. and UHRICH, P. [2001] Progresses in the calibration of “geodetic like” GPS receivers for accurate time comparisons. *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 164-166.
- PETIT, G., JIANG, Z., TARIS, T., UHRICH, P., BARILLET, R. and HAMOUDA, F. [1999] Processing strategies for accurate frequency comparison using GPS carrier phase. *Proc. 1999 Joint European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 235-238.
- PETIT, G., JIANG, Z., UHRICH, P. and TARIS, F. [2000] Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons. *Proc. 14th European Frequency and Time Forum*, p. 40-44.
- PETIT, G., JIANG, Z., WHITE, Z., J., BEARD, R. and POWERS, E. [2001] Absolute calibration of an Ashtech Z12-T GPS receiver. *GPS Solutions*, **4**(4), p. 41-46.
- PETIT, G., THOMAS, C., JIANG, Z., UHRICH, P. and TARIS, F. [1998] Use of GPS Ashtech Z12T receivers for accurate time and frequency comparisons. *Proc. 1998 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 306-314.
- PLUMB, J. and LARSON, K. [2005] Long-Term Comparisons Between Two-Way Satellite and Geodetic Time Transfer Systems. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1912-1918.

- PLUMB, J., LARSON, K., WHITE, J. and POWERS, E. [2005] Absolute Calibration of a Geodetic Time Transfer System. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1904-1911.
- RAY, J. R., DRAGERT, H. and KOUBA, J. [2000] Recommendations for handling non-Rogue data. *IGS 1999 Technical Reports*, Jet Propulsion Laboratory Publication, Pasadena, California, p. 445-451.
- RAY, J.R. and SENIOR, K. [2001] Temperature sensitivity of timing measurements using Dorne Margolin antennas. *GPS Solutions*, **5**(1), p. 24-30.
- RAY, J. R., and SENIOR, K. [2003] IGS/BIPM Pilot Project: GPS carrier phase for time/frequency transfer and time scale formation. *Metrologia*, **40**(3), p. S270-S288.
- RIECK, C., JARLEMARK, P., JALDEHAG, K. and JOHANSSON, J. [2003] Thermal influence on the receiver chain of GPS carrier phase equipment for time and frequency transfer. *Proc. 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum*, p. 326-331.
- SCHILDKNECHT, Th. and DUDLE, G. [2000] Time and frequency transfer: High precision using GPS phase measurements. *GPS World*, 2000 **11**(2), 2000, p. 48-52.
- SCHMID, R. and ROTHACHER, M. [2003] Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *J. Geodesy*, **77**, doi: 10.1007/s00190-003-0339-0, p. 440-446.
- SCHUPLER, B.R., ALLSHOUSE, R.L. and CLARK, T.A. [1994] Signal characteristics of GPS user antennas. *J. Inst. Navigation*, **41**, p. 277-295.
- SCHUPLER, B.R. and CLARK, T.A. [2001] Characterizing the behavior of geodetic GPS antennas. *GPS World*, **12**(2), p. 48-55.
- SENIOR, K., KOPPANG, P. and RAY, J. [2003] Developing an IGS time scale, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **50**(6), p. 585-593.
- SENIOR, K., MATSAKIS, D. and POWERS, E. [1999] Attenuating day-boundary discontinuities in GPS carrier-phase time transfer. *Proc. 31st Precise Time and Time Interval Meeting*, p. 481-489.
- SENIOR, K., RAY, J. and PETIT, G. [2004] Comparison of instrumental and empirical station timing biases for a set of Ashtech GPS receivers, *Proc. 2004 European Frequency and Time Forum*.
- THOMAS, C. and AZOUBIB, J. [1996] TAI computation: Study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights. *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- WEILL, L. R. [2003] How good can it get with new signals? Multipath mitigation. *GPS World*, **14**(6), p. 106-113.
- WHITE, J., BEARD, R., LANDIS, G., PETIT, G. and POWERS, E. [2001] Dual frequency absolute calibration of a geodetic GPS receiver for time transfer. *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 167-172.
- WU, J.T., WU, S.C., HAJJ, G.A., BERTIGER, W.I. and LICHTEN, S.M. [1993] Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, **18**, p. 91-98.
- ZUMBERGE, J.F., HEFLIN, M.B., JEFFERSON, D.C., WATKINS, M.M. and WEBB, F.H. [1997] Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, **102**(B3), p. 5005-5017.

CAPÍTULO 14

TRANSFERENCIA BIDIRECCIONAL POR SATÉLITE DE TIEMPO Y FRECUENCIA (TWSTFT)

	<i>Página</i>	
14.1	Introducción.....	194
14.2	Descripción de la técnica TWSTFT.....	194
14.3	Mediciones de TWSTFT	196
14.4	Equipo del laboratorio de la estación.....	197
14.4.1	Módem de espectro ensanchado	197
14.4.2	Contador de intervalo de tiempo.....	197
14.5	Mediciones dependientes del enlace (trayecto y equipos).....	197
14.5.1	El efecto Sagnac	198
14.5.2	Corrección relativista de segundo orden del efecto Sagnac.....	198
14.5.3	Diferencia en las frecuencias del enlace ascendente y el enlace descendente	198
14.6	Métodos de calibración.....	198
14.6.1	Calibración de estaciones utilizando un simulador de satélite.....	199
14.6.2	Calibración de una estación utilizando una estación terrena transportable	199
14.6.3	Campañas de calibración de 1993 y 1998	200
14.6.4	Campaña de calibración en la banda X.....	200
14.7	Problemas que surgen cuando se utilizan transpondedores de satélite distintos	200
14.8	Problemas que surgen cuando se utilizan diferentes transpondedores de satélite	200
14.9	Estabilidad a largo plazo de la TWSTFT.....	202
14.9.1	Comparaciones a largo plazo entre GPS y TWSTFT	202
14.10	Conclusión.....	203
	Referencias	204

14.1 Introducción

En la transferencia de tiempo uno de los objetivos primarios es comparar relojes y/o frecuencias patrón a grandes distancias. Existen muchas razones para hacer estas comparaciones. El interés puede radicar simplemente en realizar mediciones instantáneas de relojes muy distantes entre sí para supervisar el comportamiento de las escalas de tiempo por medio de los relojes comparados. También puede haber interés en comparar frecuencias patrón avanzadas tales como fuentes de cesio y/o verificar la estabilidad a largo plazo de estos patrones. La precisión y exactitud que pueden lograrse en estas mediciones es de interés para la metrología.

La técnica conocida como Transferencia Bidireccional por Satélite de Tiempo y Frecuencia (TWSTFT) es un método mediante el cual se obtiene una estimación de las diferencias de reloj entre dos estaciones a través del intercambio activo de señales de temporización mediante satélites de comunicaciones geoestacionarios [Kirchner, 1991]. La 11ª reunión del Comité Consultivo para la Definición del Segundo (CCDS), actualmente Comité Consultivo de Tiempos y Frecuencias (CCTF) emitió una declaración en 1989 (1989/1) alentando la utilización de TWSTFT y sugiriendo la creación por la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM) de un Grupo de Trabajo *ad hoc* sobre TWSTFT.

Tras la decisión de la 12ª reunión del CCDS en 1993, el Grupo *ad hoc* se convirtió en un Grupo de Trabajo del CCTF permanente, cuyos principales logros han sido:

- el desarrollo de un formato normalizado;
- la organización de enlaces temporales TWSTFT;
- la elección de módems;
- el calendario de observaciones;
- la duración de las observaciones;
- el intercambio de datos;
- la negociación para el uso de satélites;
- la evaluación de los enlaces TWSTFT;
- la comparación con otras técnicas de transferencia de señales horarias.

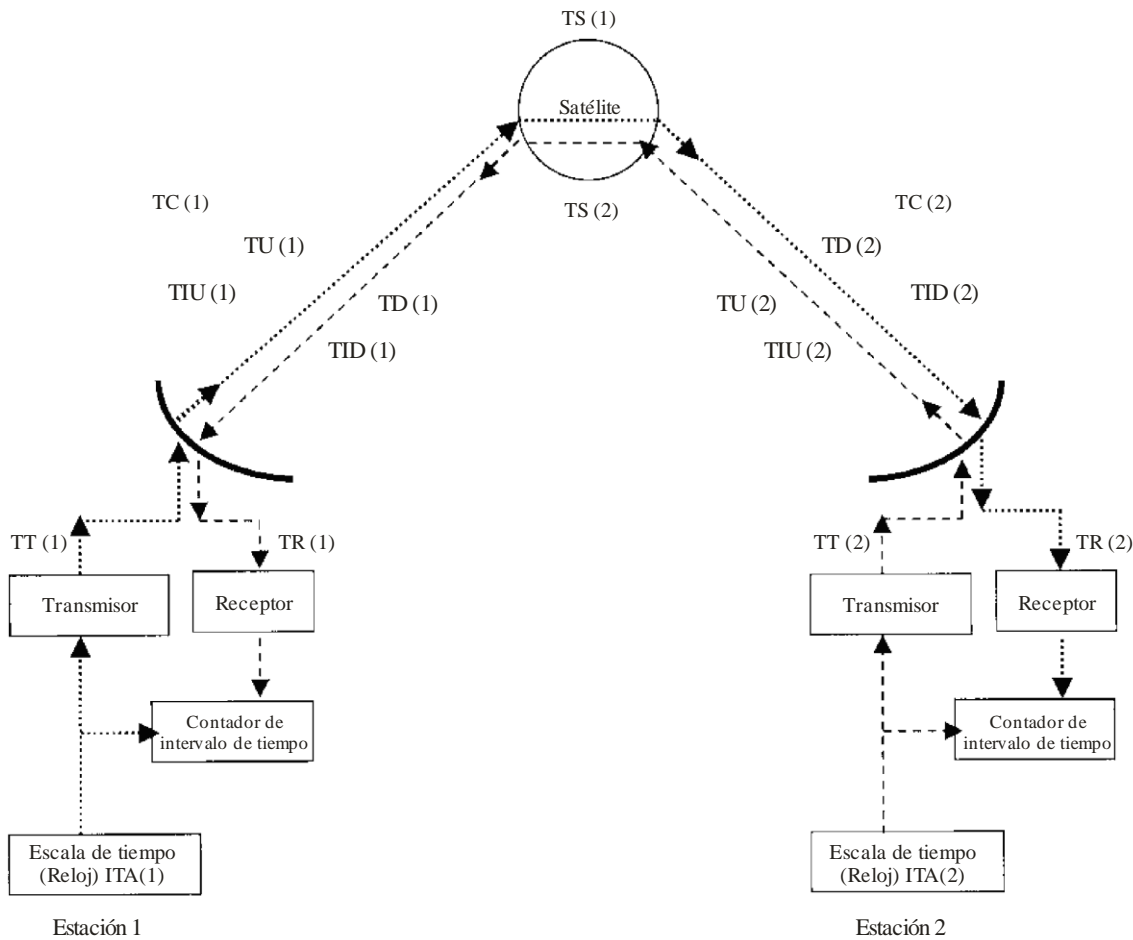
El método ha aumentado su popularidad como medio de obtener comparaciones de alta precisión entre laboratorios de temporización. La BIPM utiliza actualmente información sobre relojes que contribuye al Tiempo Atómico Internacional (TAI) obtenido con esta técnica (véase el 20º Informe BIPM TWSTFT).

14.2 Descripción de la técnica TWSTFT

Para aplicar la TWSTFT los laboratorios deben trabajar de forma emparejada (Figura 14-1). Ambos laboratorios requieren estaciones de recepción/transmisión y módems de espectro ensanchado para intercambiar información de temporización a través de los satélites de comunicaciones utilizando señales codificadas de pseudoruido (PN) y acceso múltiple por división de código (AMDC). En el emplazamiento de transmisión, mediante el módem se modula una señal de un impulso por segundo (1 PPS) en la FI de la estación, normalmente a 70 MHz. A continuación, se realiza una conversión ascendente de la señal a la radiofrecuencia (RF), se amplifica y se transmite al satélite. En el transpondedor del satélite se amplifica, se desplaza en frecuencia mediante la frecuencia de traslación del satélite, se amplifica nuevamente y se retransmite. En el emplazamiento de recepción, la señal de RF se amplifica, se le aplica una conversión descendente a la FI y se demodula mediante el módem para producir 1 PPS recibido. La medición consta de mediciones de intervalo de tiempo simultáneas en ambos emplazamientos. El 1 PPS generado por el reloj local arranca el contador de intervalo de tiempo local y tras su transmisión por satélite, detiene el contador de intervalo de tiempo remoto.

FIGURA 14-1

Principio de comparación de la técnica de transferencia bidireccional por satélite de tiempo y frecuencia



Sat_time_freq-14-01

En la Figura 14-1 aparecen los siguientes parámetros para la Estación 1 y la Estación 2 ($k = 1,2$):

- TA(k): Reloj o escala de tiempo en la estación k
- TI(k): Lectura del contador de intervalo de tiempo
- TT(k): Retardo introducido por el transmisor
- TR(k): Retardo introducido por el receptor
- TU(k): Retardo del enlace ascendente a través de la atmósfera
- TD(k): Retardo del enlace descendente a través de la atmósfera
- TS(k): Retardo de propagación a través del transpondedor del satélite
- TC(k): Corrección por efectos relativistas
- TIU(k): Retardo ionosférico ascendente
- TID(k): Retardo ionosférico descendente

La diferencia entre los relojes ubicados en las Estaciones 1 y 2 viene dada por:

$$TA(1)-TA(2)$$

siendo:

TA(1) relacionado TI(1) con:

$$TI(1) = TA(1) - TA(2) + TT(2) + T_U(2) + TS(2) + T_D(1) + TR(1) + TC(1) + TI_U(1) + TI_D(1) \quad (14-1)$$

y TA(2) relacionado TI(2) con:

$$TI(2) = TA(2) - TA(1) + TT(1) + T_U(1) + TS(1) + T_D(2) + TR(2) + TC(2) + TI_U(2) + TI_D(2) \quad (14-2)$$

La diferencia entre estas dos expresiones es:

$$TI(1) - TI(2) = 2 [TA(1) - TA(2) + TT(2) - TT(1) + T_U(2) - T_U(1) + TS(2) - TS(1) + T_D(1) - T_D(2) + TR(1) - TR(2) + TC(1) - TC(2) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)] \quad (14-3)$$

Esta expresión puede escribirse como sigue:

$$TA(1) - TA(2) = \frac{1}{2} [TI(1) - TI(2) + TT(1) - TT(2) + T_U(1) - T_U(2) + TS(1) - TS(2) + T_D(2) - T_D(1) + TR(2) - TR(1) + TC(2) - TC(1) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)] \quad (14-4)$$

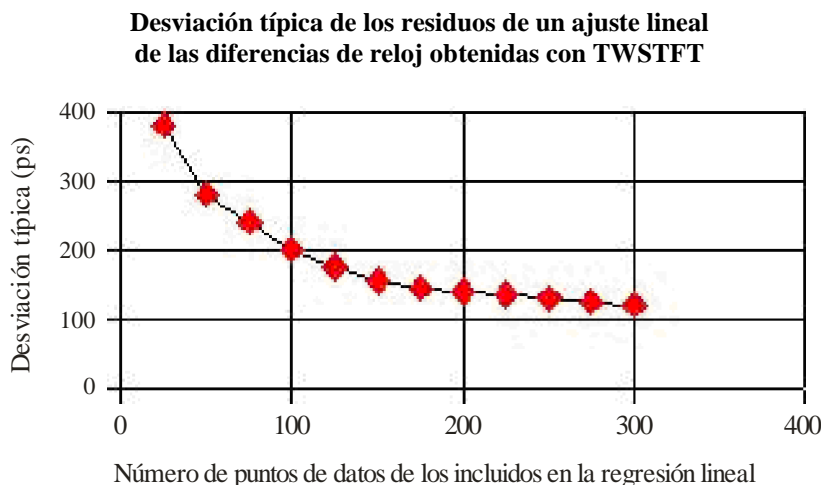
Si las señales pasan a través del mismo transpondedor en el satélite, TS(1) es igual a TS(2) y se cancelan sus retardos. Si el satélite no se desplaza demasiado deprisa, $T_U(1)$ es igual a $T_D(1)$ y $T_U(2)$ es igual a $T_D(2)$ y se cancelan sus retardos. TC(1) y TC(2) pueden calcularse pero sujetas a la incertidumbre de saber con qué estación coordinan. Si las estaciones están próximas entre sí, entonces $TI_U(1) = TI_U(2)$ y $TI_D(1) = TI_D(2)$.

14.3 Mediciones de TWSTFT

La medición fundamental realizada con TWSTFT es una estimación de la diferencia entre dos relojes. Uno puede calcular la desviación típica de los residuos de las diferencias medidas entre dos relojes obtenidos con TWSTFT. Realizando hipótesis razonables de comportamiento normal del reloj presentando ruido blanco puede esperarse que la desviación típica de una regresión lineal con las diferencias de reloj se aproximará de manera asintótica a un límite, a medida que se incluyan más mediciones en la regresión.

La Figura 14-2 muestra la desviación típica en función del número de puntos de datos de un segundo en el intervalo de ajuste de la curva [Klepczynski, 1995]. Tras unos 300 s de tiempo de observación, se aproxima a un límite de unos 125 ps.

FIGURA 14-2



14.4 Equipo del laboratorio de la estación

Se han realizado muchas investigaciones sobre las incertidumbres en los equipos de TWSTFT utilizados en tierra. Aparecen resumidas por Kirchner [Kirchner, 1999]. Las fuentes primarias de incertidumbre en esta área son:

- el módem de espectro ensanchado utilizado para generar 1 PPS que transmite una estación y recibe la otra;
- un contador de intervalo de tiempo utilizado para medir la diferencia entre un reloj local y el impulso de temporización reconstruido por el módem de espectro ensanchado;

incertidumbre causada por las variaciones en la relación portadora/densidad de ruido (C/N_0) en el módem de espectro ensanchado utilizado.

14.4.1 Módem de espectro ensanchado

El módem MITREX fue el primer módem de espectro ensanchado disponible comercializado que se diseñó para mediciones de distancia y transferencia de tiempo punto a punto de alta precisión y exactitud, haciendo uso de satélites de comunicaciones geoestacionarios [Hartl *et al.*, 1983]. Utiliza la denominada técnica de secuencia directa o PN. A la portadora se le aplica la modulación por desplazamiento de fase binaria (MDP-2). La resolución de un sistema que emplea códigos PN depende de la longitud de un elemento de código (longitud de segmento) y la anchura de banda necesaria viene determinada por su valor recíproco, la velocidad de segmento (f_c). Haciendo uso de códigos con baja correlación cruzada pueden transmitirse varios códigos por el mismo canal (AMDC) sin que se interfieran entre sí. El MITREX utiliza una velocidad de segmento de 2,5 MHz y dependiendo del filtrado de la señal y del servicio por satélite utilizado requiere un canal de satélite con una anchura de banda normalmente de 3,5 MHz [Veenstra, 1990].

Actualmente, están disponibles en el comercio dos tipos de módems: el ATLANTIS, fabricado por Allen Osborne Associates, EE.UU., y el SATRE, fabricado por Time Tech GmbH, Alemania. El módem SATRE es totalmente compatible con el módem MITREX, pero el ATLANTIS utiliza su propia norma (velocidad de segmento ligeramente distinta, otros códigos) por lo que no es compatible. Un módem desarrollado en el Communication Research Laboratory (CRL), Japón, no es compatible con el módem MITREX.

14.4.2 Contador de intervalo de tiempo

Además, para mayor seguridad, las estaciones emplean un contador externo cuando hacen uso de un módem con capacidad de medición de intervalo de tiempo interna. Normalmente se precisa de un contador externo para realizar las mediciones auxiliares.

14.4.2.1 Relación portadora/densidad de ruido (C/N_0)

En las estaciones TWSTFT sus parámetros operacionales quedan determinados por la relación portadora/densidad de ruido, C/N_0 del módem y por el satélite (potencia isotrópica radiada equivalente, p.i.r.e., y factor de mérito, G/T, del terminal del satélite). Los últimos parámetros se calculan mediante un balance del enlace. La relación portadora/densidad de ruido, C/N_0 es necesaria para conseguir la precisión adecuada en las mediciones.

14.5 Mediciones dependientes del enlace (trayecto y equipos)

Las fuentes primarias de incertidumbre implicadas en esta área son:

- un efecto debido al movimiento en torno al eje de rotación de la Tierra, de las estaciones participantes y del satélite durante la propagación de la señal dirigida al satélite y procedente del mismo (efecto Sagnac);
- un efecto debido al movimiento del satélite geoestacionario con respecto a la superficie de la Tierra;
- un efecto debido a la diferencia en el retardo ionosférico de la señal en las frecuencias del enlace ascendente y el enlace descendente utilizadas para transmitir señales por el usuario y el satélite.

14.5.1 El efecto Sagnac

El efecto Sagnac se deriva del movimiento en torno al eje de rotación de la Tierra, tanto de las estaciones terrenas como del satélite, durante la propagación de una señal dirigida al satélite y procedente del mismo, [Ashby and Allan, 1979]. El efecto es proporcional a la proyección ecuatorial del área del cuadrilátero, cuyos vértices son el centro de la Tierra y las posiciones de las estaciones situadas sobre la superficie de la Tierra, y la posición del satélite con respecto a la superficie de la Tierra. Por tanto, es función de las posiciones de las estaciones 1 y 2 y del satélite. El caso extremo es unos 420 ns para las estaciones 1 y 2 en el ecuador, cada una con un ángulo de elevación de 6° , causado por una máxima separación en longitud (unos 150°). Para calcular el efecto Sagnac, los requisitos de precisión en la posición son algunos órdenes de magnitud inferiores a los que se necesitan para calcular el retardo de la señal, para métodos unidireccionales como el GPS. Las estimaciones de la incertidumbre provocada por errores en las coordenadas de la estación para el efecto Sagnac entre TUG-USNO son de 150 ps y entre TUG-OCA son de 16 ps.

14.5.2 Corrección relativista de segundo orden del efecto Sagnac

Una corrección de segundo orden, debida al movimiento del satélite con respecto a la superficie de la Tierra, es función de la velocidad del satélite y de las elevaciones del satélite desde las Estaciones 1 y 2 [Petit and Wolf, 1993]. El caso extremo se presenta cuando una estación tiene un ángulo de elevación de 6° y la otra de 90° . La diferencia en los tiempos de llegada (TOA) de señales transmitidas simultáneamente por el satélite sería entonces de unos 17 ms. Si se supone una elevada velocidad radial del satélite de 3 m/s el error resultante es de unos 170 ps. Eligiendo un satélite observado por ambas estaciones con el mismo ángulo de elevación, el efecto puede minimizarse. También puede eliminarse completamente desplazando los instantes de transmisión. Los efectos estimados por experimentos llevados a cabo entre el Observatorio Naval de EE.UU. (USNO) y la Universidad Técnica de Graz (TUG) son del orden de 100 ps. Entre el Observatorio de la Costa Azul (OCA) y la Universidad Técnica de Graz (TUG) son del orden de 10 ps.

14.5.3 Diferencia en las frecuencias del enlace ascendente y el enlace descendente

El retardo ionosférico en exceso de una señal penetrando en la ionosfera depende de la frecuencia (proporcional a $1/f^2$), el Contenido Electrónico Total (TEC) y la elevación [Flock *et al.*, 1982; Jespersen, 1989]. El TEC es el contenido de electrones total de una columna vertical con una área transversal de 1 m^2 , expresado en electrones/ m^2 . Utilizando una función de correspondencia, puede calcularse el contenido electrónico total a lo largo de un trayecto inclinado. La incertidumbre debida a la ionosfera es función de las frecuencias del enlace ascendente y el enlace descendente de las Estaciones 1 y 2, de los TEC para las Estaciones 1 y 2 y de las elevaciones de las Estaciones 1 y 2. La incertidumbre sin reciprocidad es de unos 150 ps en el caso extremo:

- con un ángulo de elevación de un satélite de 90° y el otro ángulo de elevación de 6° ;
- frecuencia del enlace ascendente y del enlace descendente de 14 GHz y 12 GHz, y de 14 GHz y 11 GHz;
- TEC de 10^{17} electrones/ m^2 y 10^{18} electrones/ m^2 (suponiendo una estación en horas nocturnas y la otra estación en horas diurnas).

Evidentemente, para las frecuencias de la banda C (6/4 GHz) el efecto es notablemente superior. El efecto puede minimizarse eligiendo un satélite para el cual ambos ángulos de elevación sean aproximadamente iguales y con el mismo TEC y las mismas frecuencias de enlace ascendente y enlace descendente en ambos emplazamientos, o utilizando frecuencias incluso más elevadas (banda Ka: 30/20 GHz).

Un efecto que se desprecia es el retardo troposférico. Es independiente de la frecuencia (despreciable) en las frecuencias empleadas por las comunicaciones por satélite.

14.6 Métodos de calibración

Algunas incertidumbres no pueden medirse o estimarse estadísticamente. Deben evaluarse mediante un proceso denominado a menudo *calibración*. En algunos casos, ello significa medir los retardos a través de componentes individuales del sistema utilizado para realizar las mediciones o medir el retardo a través de todo el sistema. También puede calibrarse tomando como referencia un sistema que presenta una estabilidad

razonable o un sistema que ha sido calibrado. Esto se denomina a veces calibración relativa. En algunos casos, pueden hacer incluso comparaciones a través de un sistema completamente distinto.

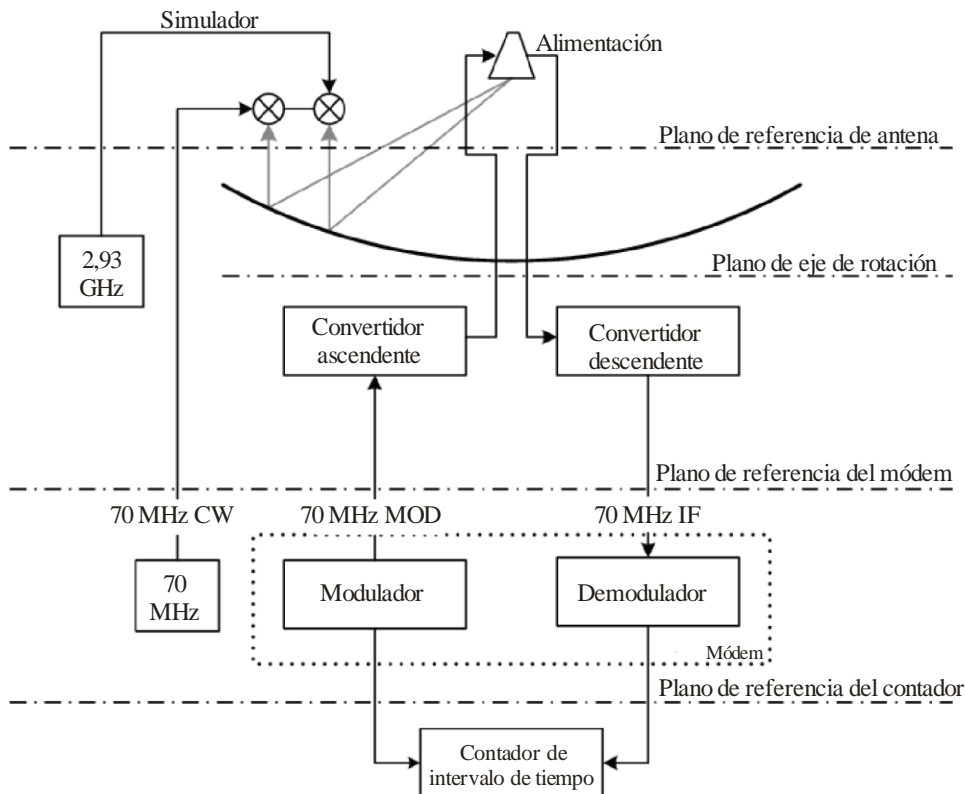
14.6.1 Calibración de estaciones utilizando un simulador de satélite

Si bien los retardos de algunos componentes individuales de un sistema pueden medirse, la incertidumbre total del sistema no puede estimarse de manera sencilla debido a las trayectorias complicadas que puede atravesar las señales dentro del mismo. A tal efecto, puede hacerse uso de dos métodos. Uno de ellos puede medir la diferencia de los retardos de las Estaciones 1 y 2 o medir los retardos de ambas estaciones por separado.

En el primer método, los retardos a través de los componentes individuales del sistema se determinarían inyectando una señal a través de un simulador de satélite cuyas características se conocen perfectamente [De Jong and Polderman, 1994; De Jong and Van Bemmelen, 2001]. El sistema de calibración está automatizado y se realizó una campaña de mediciones junto con un terminal de satélite aerotransportable (FAST) [De Jong *et al.*, 1995]. Dicho simulador de satélite también puede utilizarse para medir permanentemente la variación de los retardos de una estación, dando una estabilidad a largo plazo de la estación. La Figura 14-3 representa esquemáticamente un simulador de satélite VSL utilizado para realizar esas mediciones.

FIGURA 14-3

Esquema de un simulador de satélite VSL para medir los retardos a través de una estación terrena TWSTFT



Sat_time_freq-14-03

14.6.2 Calibración de una estación utilizando una estación terrena transportable

El segundo método puede aplicarse colocando una estación terrena en dos estaciones participantes o utilizando una tercera estación como patrón de transferencia. Se realizaron campañas de medición en 1993 y 1998 utilizando esta técnica.

14.6.3 Campañas de calibración de 1993 y 1998

En la primera campaña, se transportó una Estación TWSTFT entre el Observatorio de la Costa Azul, Grasse, Francia (OCA) y la Universidad Técnica de Graz, Austria (TUG), que están a una distancia de unos 800 km [Kirchner *et al.*, 1993]. Las desviaciones típicas formales de las mediciones realizadas durante el transporte fueron de 1 ns aproximadamente. Se discutió la manera de mejorar este experimento y se llevó a cabo una segunda campaña [Kirchner *et al.*, 1998]. Durante esta campaña, las desviaciones típicas formales fueron del orden de 200 ps, lo que supone una mejora significativa respecto al primer experimento. Durante ambas campañas, se hicieron comparaciones con GPS de visión común y se observaron diferencias sistemáticas entre los dos métodos. En ambos enfoques de calibración externa, las mediciones se realizaron continuamente, lo que permitió establecer un historial estadístico de la incertidumbre.

14.6.4 Campaña de calibración en la banda X

Se llevó a cabo un experimento que utiliza una estación transportable en banda X entre el Observatorio Naval de EE.UU. (USNO), Washington DC, y el Laboratorio Nacional de Física (NPL), Teddington, Inglaterra.

14.7 Problemas que surgen cuando se utilizan transpondedores de satélite distintos

A menos que las mediciones de los retardos a través de los diferentes transpondedores del satélite se hayan realizado antes de que se lanzara el satélite, es muy difícil obtener estimaciones de la incertidumbre de los retardos a través de ellos. Solo puede efectuarse mediante la calibración relativa transportando un sistema calibrado a las estaciones participantes. Tales mediciones deben repetirse lo más frecuentemente posible. Deben efectuarse utilizando diferentes técnicas independientes para verificar de la mejor manera posible los resultados obtenidos con otras técnicas. El problema principal es que las técnicas empleadas para verificar otras técnicas puede que no presenten la misma incertidumbre que la técnica primaria. Deben tomarse todas las precauciones necesarias cuando se evalúa la incertidumbre de esta forma.

El sistema independiente calibrado también puede ser un sistema TWSTFT si, para este sistema, no existe el problema de retardos diferenciales del satélite desconocidos. Si se conoce el retardo diferencial del satélite (por ejemplo, gracias a mediciones realizadas antes del lanzamiento del satélite) pueden usarse los métodos indicados en los puntos anteriores para calibrar los retardos de la estación.

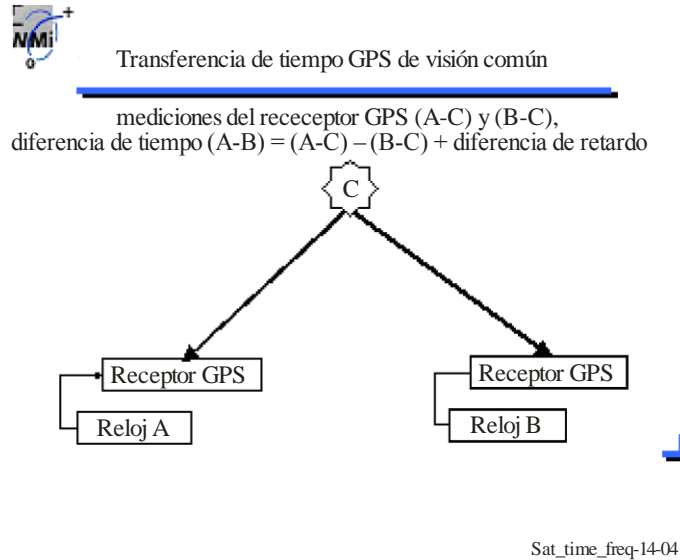
14.8 Problemas que surgen cuando se utilizan diferentes transpondedores de satélite

Además de los dos sistemas antes mencionados, pueden utilizarse otros métodos tales como el GPS. Evidentemente, la precisión obtenida no puede superar a la precisión del propio GPS.

En la Figura 14-4 se representa un montaje de medición para GPS C-V. Las señales procedentes de los satélites de navegación (C) llegan a los receptores y se miden con las escalas de tiempo del reloj A y el reloj B ubicados en A y B. Los valores medidos (A-C) y (B-C) se sustraen y el resultado es la diferencia de las escalas de tiempo (A-B).

FIGURA 14-4

GPS de visión común



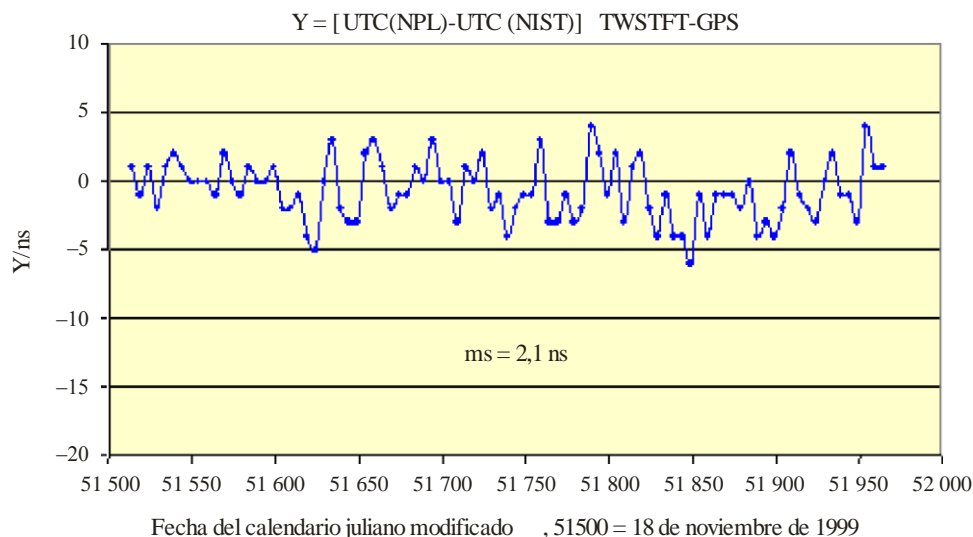
Los retos comunes en el satélite y en su reloj se cancelan. Las diferencias de retardo en exceso en la ionosfera y en la troposfera deben seguir teniendo en cuenta. Los retardos en la antena, el cable de antena, el cable del reloj y el receptor en cada emplazamiento deben conocerse (calibrarse) de manera que el resultado pueda corregirse para diferencias de retardo en los equipos en A y B. Estos retardos deben ser estables con las condiciones medioambientales.

En primer lugar, se envía a las estaciones participantes una unidad de transferencia de tiempo (TTU) GPS calibrada de manera que las mediciones básicas puedan realizarse al inicio del periodo de calibración en una GPS TTU que se presentarán a las estaciones participantes en el transcurso del periodo de evaluación. A continuación, durante los siguientes intervalos, el receptor calibrado se envía nuevamente a las estaciones participantes.

En la Figura 14-5 aparecen los resultados de estas comparaciones realizadas a lo largo de amplios periodos de tiempo.

FIGURA 14-5

Diferencias entre la TWSTFT y el código GPS C/A de visión común para el enlace NPL/NIST



Sat_time_freq-14-05

14.9 Estabilidad a largo plazo de la TWSTFT

Para las comparaciones de frecuencia, 150 ps es probablemente una buena estimación de la incertidumbre asociada a las mediciones efectuadas con TWSTFT.

14.9.1 Comparaciones a largo plazo entre GPS y TWSTFT

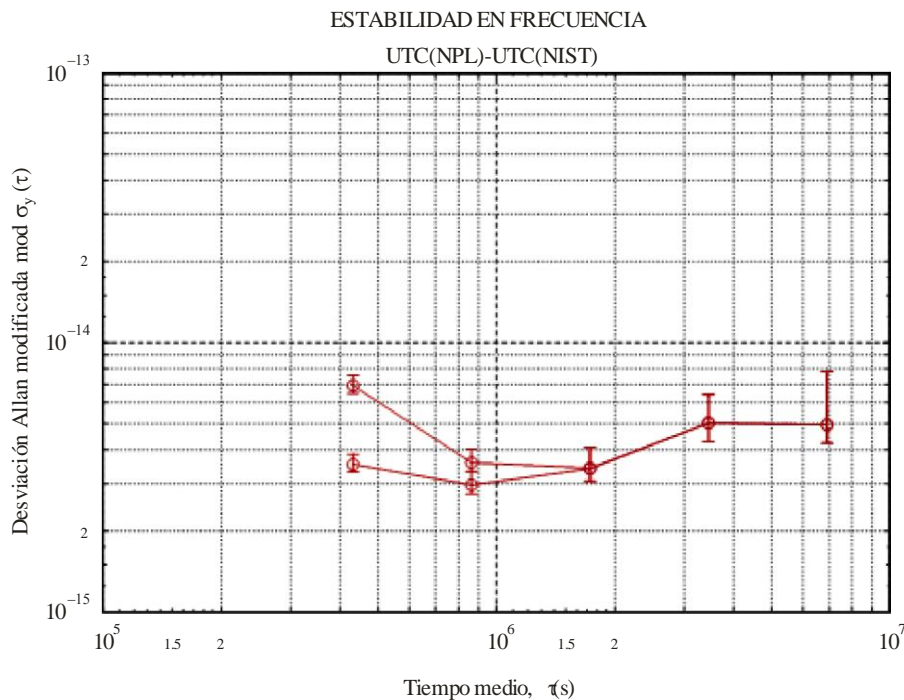
En septiembre de 2002 hay doce enlaces TWSTFT operacionales en Europa, América del Norte y la Dorsal del Pacífico. Diez de ellas se utilizan para la construcción del TAI. Todos estos enlaces TWSTFT se comparan con GPS de visión común y se publican en los Informes de BIPM TWSTFT. Esta permanente supervisión proporciona una información muy valiosa sobre la estabilidad a largo plazo de los dos métodos: algunos de estos enlaces son operacionales desde hace 3 años. En la Figura 14-5 se representa una comparación típica para una distancia NPL/NIST de unos 8 000 km para el periodo de día del calendario juliano modificado 51 510-51 970. El enlace NPL/NIST TWSTFT se calibró con un GPS.

Los datos de TWSTFT recopilados durante tres sesiones semanales, los lunes, miércoles y viernes, se interpolaron linealmente para las fechas normalizadas TAI (día del calendario juliano modificado terminado en 4 y 9). Los GPS de visión común se calcularon utilizando efemérides precisas del Servicio GNSS International (IGS) y mapas ionosféricos IGS y a continuación se ajustaron e interpolaron para las fechas normalizadas. Durante el periodo de comparación no se observó ninguna desviación o efecto estacional. El valor eficaz de las diferencias entre dos métodos para el periodo de comparación es de 2,1 ns.

La incertidumbre estimada del enlace TWSTFT está por debajo de 1 ns y la del GPS es de 2,5 ns, razón por la cual se cree que la mayoría del ruido observado en las diferencias entre los dos métodos se debe al GPS de visión común. Esto viene confirmado por el análisis de la estabilidad de frecuencia de [UTC(NPL) - UTC(NIST)] representado en la Figura 14-6.

FIGURA 14-6

La desviación Allan modificada indica la estabilidad en frecuencia de los dos técnicas, GPS de visión común (curva superior) y TWSTFT (curva inferior)



Sat_time_freq-14-06

Los datos del GPS de visión común presentan un ruido blanco de fase debido al método de comparación en el que se hace una promediación de 20 días. Los datos de TWSTFT presentan un ruido blanco de frecuencia debido al comportamiento de los relojes promediados durante 5 días. Ello significa que para un tiempo de promediación de 5 días no hay ningún ruido procedente de TWSTFT. En otras palabras, dos relojes situados en el NPL y el NIST a una distancia de 8 000 km se comparan por TWSTFT sin ruido de transferencia de tiempo para tiempos de promediación de 5 días. Los datos del GPS indican el ruido de la técnica. TWSTFT muestra el ruido del reloj.

14.10 Conclusión

Los datos obtenidos parecen apoyar el uso de TWSTFT como un reloj de alta precisión y técnica de comparación de frecuencias. Si bien los costes de establecer una capacidad de TWSTFT son inicialmente elevados, la facilidad de reducción de los datos también hace que sea una alternativa a otras técnicas atractiva. Debido a las posibilidades de esta técnica se está empezando a ampliar para que incluya experimentos tales como el seguimiento de fase de portadora, la técnica TWSTFT promete proporcionar capacidades mejoradas en el futuro.

Referencias

- ASHBY N. and ALLAN, D. W. [1979] Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale. *Radio Science*, **14**, p. 649-669.
- 20th BIPM TWSTFT Report, (http://www.bipm.fr/pdf/cctf/wg_twstft.html).
- De JONG, G. *et al.* [1995] Results of the Calibration of the Delays of Earth Stations for TWSTFT using the VSL Satellite Simulator Method. Proceedings of the 27th Annual PTTI Meeting, p. 359-372.
- De JONG, G. and POLDERMAN, M. C. [1994] Automated Delay Measurement System for an Earth Station for Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer. Proceedings of the 26th Annual PTTI Meeting, December 6-8, Reston, Virginia, USA, p. 305-317.
- De JONG, G. and VAN BEMMELEN, R. [2001] Evaluation and Improvement of the Calibration of a TWSTFT Station Using SATSIM. Proceedings of the 33rd Annual PTTI Meeting, p. 256-262.
- FLOCK, W. L., SLOBIN, S. D. and SMITH, E. K. [1982] Propagation effects on radio range and noise in earth-space telecommunications. *Radio Science*, **17**, No. 6, 1982, p. 1411.
- HARTL, Ph., GIESCHEN, N., MOSENER, K. M., SCHAFER, W. and WENDE, C. M. [1983] High Accuracy Global Time Transfer via Geosynchronous Telecommunication Satellites with MITREX. *Journal of Flight Sciences and Space Research*, **7**, p. 335-342.
- JESPERSEN, J. [May 31-June 2, 1989] Impact of Atmospheric Non-reciprocity on Satellite Two-Way Time Transfers. Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control, Denver, Colorado, USA, p. 186-192.
- KIRCHNER, D. [1991] Two-Way Time Transfer via Communication Satellites, Proceedings of the IEEE (Special Issue on Time and Frequency), **79**, p. 186-192.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., GRUDLER, P., BAUMONT, F., VEILLET, Ch., LEWANDOWSKI, W., HANSON, W., KLEPCZYNSKI, W. and UHRICH, P. [1993] Comparison of GPS Common-View and Two-Way Satellite Time Transfer over a Baseline of 800 km.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., HETZEL, P., SORING, A. and LEWANDOWSKI, W. [1998] Calibration of Three European TWSTFT Stations using a Portable Station and Comparison of TWSTFT and GPS Common-View Measurement Results. Proceedings of the 30th PTTI Meeting, p. 365-375.
- KIRCHNER, D. [1999] Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT): Principle, Implementation and Current Performance. Review of Radio Science 1996-1999, Oxford University Press.
- KLEPCZYNSKI, W. [1995] Two Way Satellite Time Transfer", Tutorial at PTTI Meeting.
- PETIT, G. and WOLF, P. [1993] Relativistic Theory for Picosecond Time Transfer in the Vicinity of the Earth. Proceedings of the 25th Annual PTTI Meeting, p. 205-214.
- VEENSTRA, L. B. [1990] International Two-Way Satellite Time Transfers Using INTELSAT Space Segments and Small Earth Stations. Proceedings of the 22nd Annual PTTI Meeting, December 4-6, 1990, Vienna, Virginia, USA, p. 383-398.

CAPÍTULO 15

RESUMEN DE LA DIFUSIÓN DEL TIEMPO Y LA FRECUENCIA

El tiempo y la frecuencia pueden transferirse mediante un cierto número de técnicas dependiendo de la precisión requerida. El medio principal para lograr una transferencia de tiempo precisa es la utilización del sistema mundial de determinación de la posición (GPS) que hace uso de una constelación de satélites cada uno de los cuales contiene un reloj atómico. Estos relojes atómicos a bordo de un vehículo espacial, combinados con las normas de cesio de la estación de comprobación técnica establecen el tiempo GPS que es el tiempo de sincronización del sistema. La utilización del GPS para la difusión del tiempo y la frecuencia se basa en la estabilidad y precisión del tiempo GPS para el posicionamiento. La recepción pasiva simultánea de múltiples satélites GPS requiere que estos tengan una sincronización precisa entre sí con un error inferior al esperado en la medición de pseudodistancia de cada satélite con el receptor de usuario. La estabilidad de los relojes de los distintos satélites entre las actualizaciones o la resincronización con el tiempo GPS determina el error de sincronización del sistema. La propagación de las señales GPS, la instrumentación del receptor, la incertidumbre en la posición del usuario y el desplazamiento del mensaje de corrección del satélite UTC (USNO) son los otros factores que determinan la precisión de transferencia de tiempo pasiva a los usuarios. La transferencia de tiempo GPS toma dos formas:

- 1 transferencia de tiempo pasiva, utilizada predominantemente por los usuarios de radiocomunicaciones;
- 2 visión común y transferencia de tiempo y de fase de portadora utilizado para fines científicos y operaciones de escala de tiempo internacional.

El funcionamiento pasivo es el modo primario de transferencia de tiempo para la amplia mayoría de usuarios. Como servicio pasivo, la difusión de GPS está disponible en una amplia zona independientemente de la posición del usuario para la recepción. La información de temporización se determina junto con la posición y la velocidad en los cálculos del usuario durante el vuelo u otras operaciones móviles. En consecuencia, las estimaciones de la precisión de la transferencia de tiempo dependen de la incertidumbre del emplazamiento del usuario en el proceso de navegación. Para emplazamientos fijos con un conocimiento preciso de la posición, pueden esperarse resultados casi óptimos inferiores a 10 ns, 1σ . El uso efectivo de esta capacidad en plataformas móviles depende de la instrumentación y la capacidad del usuario para utilizar información de temporización de alta precisión.

La transferencia de tiempo GPS entre los centros de temporización en todo el mundo y la comunidad científica utiliza otra técnica conocida como visión común y su variante, visión común de fase de portadora. Se trata de una técnica punto a punto en vez de una difusión general, como en el caso de recepción pasiva antes discutida. Dos emplazamientos que requieren transferencia de tiempo intercambian mediciones tomadas de satélites GPS individuales. La diferenciación de estos datos de seguimiento produce una comparación precisa entre los relojes locales en los dos emplazamientos. Las mediciones de fase de portadora incrementan la precisión de las mediciones de pseudodistancia o distancia entre el receptor y el satélite individual. Se obtiene más precisión midiendo la fase de portadora de RF ambigua en vez de la modulación de código PRN no ambigua. La ambigüedad de la señal de RF continua se traduce en una medición de frecuencia precisa en vez de en mediciones de tiempo. En el Servicio GNSS Internacional (IGS) se están desarrollando técnicas para utilizar la fase de portadora GPS en las operaciones. Las estaciones IGS participantes y los centros de análisis han podido lograr comparaciones de frecuencia con una precisión inferior al nanosegundo entre la red de estaciones participantes. Los resultados obtenidos hasta la fecha indican que a fin de lograr la plena capacidad de esta técnica debe desarrollarse una tecnología para calibrar los sistemas de recepción a niveles de picosegundos. La calibración de sistemas de recepción geodésicos mediante la utilización de simuladores del sistema GPS es objeto de esfuerzos por parte del NRL. Esta técnica, que proporciona un control completo de todas las condiciones de recepción de la señal, ofrece la posibilidad de una calibración absoluta para determinar la transferencia de época de tiempo.

La técnica más precisa de transferencia de tiempo de uso general es TWSTFT. Esta técnica aprovecha la capacidad bidireccional de los satélites de comunicaciones para transmitir señales horarias en ambos sentidos a fin de eliminar virtualmente los retardos de transmisión e introducidos por la instrumentación común entre los dos emplazamientos participantes. Se trata de una técnica punto a punto utilizada fundamentalmente entre centros de temporización adecuadamente equipados. La precisión de una medición sencilla en una sola transferencia bidireccional es de aproximadamente 10 ps. La precisión global depende de los retardos introducidos por la instrumentación no recíproca y por el transpondedor del satélite, y del posible movimiento

del satélite durante el proceso de transferencia. Teóricamente es posible lograr precisiones de transferencia de tiempo de 100 ps si se reducen suficientemente los errores no recíprocos.

Los métodos discutidos anteriormente son sistemas de transferencia de tiempo directa. Están específicamente diseñados para la transferencia de tiempo, tales como TWSTFT, o utilizan la sincronización como medio fundamental de funcionamiento, tales como GPS. En principio pueden emplearse otros sistemas de comunicaciones locales que requieren sincronización para los protocolos de comunicaciones AMDC o AMDT y la transferencia de datos puede emplearse en principio para distribuir la información de temporización en su zona local de cobertura, obtenidos del GPS o de otras fuentes locales como alternativa al mecanismo de transferencia de tiempo.

En los Cuadros 15-1 y 15-2 aparece un resumen del comportamiento de las diferentes técnicas, lo que constituye una síntesis global de las técnicas y tecnologías presentadas en este Manual.

CUADRO 15-1

Técnicas de transferencia de tiempo GNSS

Parámetro	GPS pasivo (SPS)	GPS Pasivo (PPS)	Visión común (Base corta)	Visión común (Base larga)	Visión común avanzada	Fase de portadora	WAAS/GPS
Valor eficaz de la precisión (ns) (Distancia)	≤ 8 ns ^{(1), (2)} con respecto a UTC(USNO)	≤ 8 ns con respecto a UTC(USNO)	3-8 ns (punto a punto)	5-10 ns (punto a punto)	≤ 5 ns (punto a punto)	≤ 5-10 ns (punto a punto)	≤ 20 ns con respecto a UTC(USNO)
Fuentes principales de error	SA, Multitrayecto, Reloj, Ionosfera, Troposfera, Equipo de Usuario, Entorno de RF, Temp (RX & Ant)	Multitrayecto, Reloj, Equipo de usuario, Entorno de RF, Temp (RX & Ant)	Equipo de usuario, Reciprocidad del trayecto, Efemérides, Entorno (Temp)			Equipo de usuario, Trayecto, Deslizamientos de cielo	Reloj, efemérides
Estabilidad (Valor medio)	≤ 8 ns @ 13 min ≈ 1 ns @ 1 día	≤ 5 ns @ 13 min ≈ 1 ns @ 1 día	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	<< 1ns @ 6 min	< SPS Pasivo
Calibrabilidad	3-5 ns Con RX normalizado					<< 1 ns Con calibración absoluta	3-5 ns Con RX normalizado
Velocidad de muestreo	1 cada 13 min	1 cada 5 min 1 cada 13 min	1 cada 13 min	≥ 1 cada 13 min (procesamiento posterior)	1 cada 5 min 1 cada 13 min	Similar a pasivo y visión común	Por determinar
Disponibilidad	Tiempo real		Depende del programa			Depende del procesamiento	Tiempo real

(1) Emplazamiento fijo con precisión 3D conocida a > 1 m, 3D.

(2) Depende del equipo de usuario.

CUADRO 15-2

Técnicas bidireccionales por satélite y terrenales

Parámetro	TWSTFT	Fibra LAN-WAN	Fibra de larga distancia	Bidireccional en común (OTA)
Precisión (punto a punto) (Distancia) (valor eficaz en ns)	≈ 1 ns (Banda-Ku) ≈ 1 ns (Banda-X) ≈ 3 ns (Banda-C)	≤ 1 ns @ 200 km	≤ 2 ns @ 8 000 km	≤ 5 ns @ 200 km
Fuentes principales de error	Reciprocidad del trayecto, Calibración del sistema, Entorno (Temp)	Reciprocidad del trayecto, Entorno (Temp)		Reciprocidad del trayecto, Calibración del sistema, Entorno (Temp)
Estabilidad (Valor promediado en el tiempo)	200 ps @ 1 h 100 ps @ 12 h	100 ps valor eficaz	Por determinar	Por determinar
Calibrabilidad (Nivel en ns)	≈ 1		≈ 2	≈ 3-5
Velocidad de muestreo	1 cada 5 min	Continua		
Actualización	Casi en tiempo real			

ISBN 978-92-61-13303-0 SAP id



9 789261 133030

3 6 1 3 3

Impreso en Suiza
Ginebra, 2014

Derechos de las fotografías: www.itu.int