

INFORME 1175 *

EXPERIMENTO SOBRE LA UTILIZACIÓN DE SATÉLITES GEOESTACIONARIOS
EN 406 MHz PARA TRANSMITIR AVISOS DE SOCORRO

(Cuestión 90/8)

(1990)

1. Introducción

La utilización de satélites para cursar comunicaciones de socorro y seguridad reviste gran importancia. Desde septiembre de 1982, el sistema COSPAS-SARSAT** de órbita polar baja, ha estado suministrando localizaciones de situaciones de peligro en las frecuencias de 121,5 y 406 MHz. Esas localizaciones se calculan utilizando el efecto Doppler en las señales de socorro transmitidas resultantes del paso de un satélite en movimiento por la radiobaliza estacionaria de localización de siniestros (RLS) por satélite. Se está evaluando también el empleo de satélites geostacionarios para retransmitir comunicaciones de las RLS por satélite para el sistema de 406 MHz (Informe 761).

De hecho, en el suministro de avisos y localizaciones de socorro y seguridad, se complementan el sistema de satélites de órbita polar de baja altitud y el sistema de satélites geostacionarios. Por ejemplo, un sistema de satélites geostacionarios puede proporcionar en todo momento alertas casi instantáneas, pero en las regiones de elevada latitud, por encima 75°, la cobertura o bien está limitada o no resulta posible. Por

* Se ruega al Director del CCIR que señale el presente Informe a la atención de la Organización Marítima Internacional (OMI), la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y la Secretaría de COSPAS-SARSAT.

** Sistema espacial para búsqueda de embarcaciones en peligro-búsqueda y salvamento por satélite (seguimiento asistido).

otra parte, las regiones polares están adecuadamente cubiertas por el sistema de órbita polar baja. Los datos procedentes de los satélites de órbita polar baja están sujetos a retardos en las alertas de socorro debidos al paso intermitente de los satélites. Los retardos son mayores en el ecuador y dependen del número de satélites y del número y la ubicación de las estaciones terrenas receptoras. Un sistema de satélites geoestacionarios puede proporcionar alertas instantáneas pero no localizaciones basadas en mediciones Doppler, dado que no existe una velocidad relativa entre los satélites y las radiobalizas. Con los satélites geoestacionarios se pueden utilizar otros medios para establecer la localización, por ejemplo, identificación de usuario o transmisión de coordenadas. En consecuencia, hay motivos para combinar las ventajas de los sistemas de satélites geoestacionarios y de órbita polar de baja altitud.

En 1984, se inició un experimento sobre transmisión de avisos de socorro por satélites geoestacionarios que funcionan en la banda de 406 MHz, que se está llevado a cabo por Estados Unidos de América (EE.UU.), Francia y Canadá. En el presente Informe se resumen los trabajos realizados y los resultados obtenidos por los tres países.

2. Descripción del experimento

La Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) inició en Estados Unidos un experimento para evaluar la viabilidad de la utilización de satélites geoestacionarios para ampliar el sistema COSPAS-SARSAT y mejorar la eficacia de las operaciones de búsqueda y salvamento (SAR) [Friedman y otros, 1984]. La NASA colocó un repetidor en 406 MHz a bordo del vehículo espacial GOES-7 (Satélite Ambiental Operacional Geoestacionario) en febrero de 1987 y construyó una estación terrena para procesar las transmisiones cursadas por las RLS por satélite.

El Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) de Francia y el Departamento de Comunicaciones (DOC) de Canadá han desarrollado sus propios procesadores de estación terrena para la recepción de los mensajes RLS por satélite en 406 MHz. Las balizas utilizadas en el experimento se ajustan a las características técnicas establecidas en la Recomendación 633.

2.1 Objetivos

Los objetivos del experimento GOES-7 SAR en 406 MHz son:

- demostrar que los procesadores de estación terrena pueden recuperar datos de las transmisiones RLS por satélite en 406 MHz retransmitidas a través de un satélite geoestacionario;
- demostrar que se pueden proporcionar alertas casi instantáneas para RLS por satélite en 406 MHz que funcionan en diferentes condiciones ambientales;
- determinar los requisitos técnicos que deben tener los procesadores de estación terrena para detectar toda la gama de parámetros de señal RLS por satélite en 406 MHz especificados en la Recomendación 633;
- realizar el experimento a escala internacional;
- desarrollar técnicas para integrar los mensajes de avisos de socorro recibidos a través de satélites geoestacionarios en el sistema COSPAS-SARSAT.

2.2 Fases del experimento

Para alcanzar el objetivo general el experimento se está realizando en dos fases principales: la fase de verificación de los conceptos técnicos y la fase de verificación de los conceptos de sistema.

2.2.1 Verificación de los conceptos técnicos

La verificación de los conceptos técnicos finalizó en septiembre de 1988 y se centró en el desarrollo de procesadores de señales y en la ejecución de las pruebas técnicas diseñadas para reunir datos sobre la calidad de funcionamiento de los procesadores de estación terrena en función de las transmisiones RLS por satélite, que se someten a diversas alteraciones controladas y se hacen funcionar en diversas condiciones ambientales. Las pruebas técnicas se llevaron a cabo en las cuatro etapas siguientes: pruebas con prototipos, pruebas de verificación de la calidad de funcionamiento del repetidor del vehículo espacial después del lanzamiento, pruebas en órbita y pruebas prácticas.

Durante la etapa de pruebas con prototipos, cada país determinó las características de funcionamiento del procesador de su estación terrena y verificó las respuestas del procesador terreno a las señales alteradas de RLS por satélite, que se generaban y controlaban de forma local. Las pruebas con prototipos consistieron en la medición de la respuesta de frecuencia, la estabilidad de la frecuencia y la ganancia, el umbral del procesador de señales, el efecto de ráfagas de transmisión perdidas, la discriminación en el tiempo y la frecuencia, la sensibilidad a las variaciones de velocidad binaria, la sensibilidad a la deriva de frecuencia, la sensibilidad a la variación del índice de modulación y la sensibilidad a la interferencia.

La etapa de la prueba de verificación de calidad de funcionamiento del repetidor de vehículo espacial después del lanzamiento, terminada poco después del lanzamiento del GOES-7 efectuado el 26 de febrero de 1987, incluyó la medición de la estabilidad de frecuencia, la respuesta de frecuencia del transpondedor, la linealidad del amplificador del satélite y la distorsión de intermodulación dentro del transpondedor.

La etapa de la prueba en órbita se destinó a demostrar que, como mínimo, el sistema cumple los requisitos técnicos del SMSSM de la OMI. Los participantes llevaron a cabo pruebas para medir el margen de protección para las señales y la capacidad del sistema.

El objetivo de las pruebas prácticas era demostrar que el procesamiento de las transmisiones RLS por satélite en 406 MHz puede proporcionar una capacidad de alerta casi instantánea bajo diversas condiciones operacionales. El principal criterio de calidad de funcionamiento fue la aptitud del procesador de la estación terrena para detectar las transmisiones de las RLS por satélite y procesar los mensajes sin errores.

2.2.2 Verificación de los conceptos del sistema

La verificación de los conceptos del sistema, cuya terminación está prevista para mediados de 1989, seguirá explorando la respuesta de los procesadores terrenos a las transmisiones procedentes de las RLS por satélite en diversas condiciones ambientales. Por otra parte, el esfuerzo principal se centrará en determinar el mejor método operacional para integrar los avisos de

alerta recibidos por conducto de los satélites geoestacionarios con la información recibida desde el sistema COSPAS-SARSAT de órbita polar y baja altitud. Esta etapa consistirá principalmente en pruebas de interconexión de redes terrenas entre el sistema COSPAS-SARSAT de órbita baja y el sistema GOES-SAR. Los parámetros tales como formato de mensaje, el contenido y la frecuencia de transmisión se fijarán durante esta etapa. Además, pueden también llevarse a cabo pruebas de tipo práctico.

2.3 Configuración del experimento

El vehículo espacial de prueba, GOES-7, utilizado durante el experimento SAR de satélite geoestacionario fue situado a 75°W. La estación terrena de Estados Unidos con el procesador especial está emplazada en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard (GSFC) de la NASA, cerca de Washington, DC, y está interconectada con el Centro de Control de Misión (MCC) COSPAS-SARSAT de Estados Unidos, que se encuentra en la Base de las Fuerzas Aéreas de Scott cerca de St. Louis, Missouri. El procesador de la estación terrena de Canadá está ubicado en los laboratorios del DOC cerca de Ottawa, y está interconectado con el CCM de Canadá para el COSPAS-SARSAT en la Base de las Fuerzas Aéreas de Trenton, Ontario. El procesador de la estación terrena de Francia se ubicó en el Centro Espacial Meteorológico de Lannion, Bretaña, y se interconectó con el Centro Espacial del CNES en Toulouse. Se desplegaron RLS por satélite en el mar y en tierra. También se ubicaron simuladores especiales de RLS por satélite en el GSFC de la NASA y en el Lannion. Los simuladores se podían modificar en la gama de los parámetros de las RLS por satélite, y tenían diversos niveles de potencia según a las necesidades de las pruebas de ingeniería.

2.3.1 Segmento espacial

El experimento está concebido para realizarse con la mínima repercusión en el actual diseño de los vehículos espaciales. Entre las modificaciones del vehículo espacial GOES-7 se hallan un canal receptor con una anchura de banda de 120 kHz a 406,050 MHz y un combinador que permite transmitir con el mismo equipo de enlace descendente que el canal del repetidor de la plataforma de recogida de datos (DCPR - data collection platform repeater) existente. La potencia del transmisor asignada al SAR se ha mantenido al mínimo posible para evitar la degradación del sistema DCPR operacional.

El repetidor del GOES-7 SAR se incorporó parcialmente en la etapa de frecuencia intermedia de la DCPR, que contiene un Control Automático de Ganancia (CAG) del receptor. En consecuencia, el CAG respondió a la potencia combinada de los dos canales. La relación G/T de entrada fue de $-18,7 \text{ dB(K}^{-1})$. La p.i.r.e. total del enlace descendente fue de +33 dBm, y se compartió entre los dos canales. Se ajustaron las ganancias, de manera que cuando no había señales de la DCPR o la radiobaliza, los dos canales compartían la potencia porigual con una p.i.r.e. para cada uno de +30 dBm. Un requisito operacional diario de retransmitir datos meteorológicos a través del sistema DCPR produjo una condición de compartición de frecuencia que degradó la calidad de funcionamiento del experimento GOES-SARSAT. Por fortuna, esas situaciones se dieron en momentos previstos, que se pudieron evitar durante la mayor parte de las pruebas. La compartición de potencia entre los dos canales fue adecuada para la realización del experimento, pero no se recomienda para un sistema operacional.

2.3.2 RLS por satélite en 406 MHz

Los formatos de señal RLS por satélite a 406 MHz se definen en la Recomendación 633. Las RLS por satélite transmiten una ráfaga de portadora modulada digitalmente durante unos 440 ms (formato de mensaje corto) una vez cada 50 segundos aproximadamente. La señal de RLS por satélite consiste en 160 ms de portadora no modulada seguidos de 112 bits de datos en código Manchester con modulación en fase en 400 bit/s. En la RLS por satélite se utiliza un código Bose-Chaudhuri-Hocquenghen (BCH) (82,61), que es una versión abreviada del código de corrección de errores triple BCH (127,106). El código BCH protege 61 bits de datos que consisten principalmente en un código de identidad de usuario único. La portadora tiene modulación por desplazamiento de fase, con desplazamientos de fase de $\pm 1,1$ radianes, lo que produce cierta portadora residual en la señal modulada.

2.3.3 Balances del enlace

El balance del enlace, calculado para la estación en tierra de EE.UU. en el Cuadro I (se obtuvieron valores semejantes para las estaciones en tierra de Canadá [Keightley, mayo de 1987] y de Francia [Dumont y otros, 1986]), muestra que con 8 RLS por satélite activas se dispone, en ausencia de desvanecimiento, de una relación portadora-densidad de potencia de ruido (C/N_0) de 34,9 dBHz. Se pueden esperar degradaciones del enlace de 4 - 5 dB en condiciones de mar gruesa, etc. Ello puede conducir a una C/N_0 recibida de unos 30 dBHz. Con un enlace tan degradado, un receptor convencional que utiliza un bucle de enganche de fase para recuperar la frecuencia de portadora y la fase no puede conseguir el enganche. Suponiendo que son posibles la detección de la señal de RLS por satélite y su sincronización, el valor teórico de la proporción de errores en los bit/s (BER) en el enlace por satélite geostacionario es de alrededor de 3×10^{-2} para una sola ráfaga. Una forma de conseguir una calidad de funcionamiento aceptable consiste en integrar la señal de RLS por satélite a lo largo de un número suficiente de ráfagas para una BER dada aceptable.

CUADRO IBalances de potencia de los satélites del experimento GOES-7 SAR
(para la estación terrena de EE.UU)

Parámetro	Valor
Enlace ascendente:	
Frecuencia (MHz)	406,025
Angulo de elevación (grados)	5
p.i.r.e. de la RLS por satélite (dBW) ¹	7,0
Atenuación de polarización (dB)	3,0
Atenuación de espacio libre (dB)	176,9
Relación G/T de la antena de satélite [dB(K ⁻¹)]	18,7 ²
Constante de Boltzmann [dB(J/K)]	-228,6
C/N ₀ del enlace ascendente (dBHz) sin desvanecimiento	37,0
Enlace descendente:	
Frecuencia (MHz)	1 698,65
Angulo de elevación (grados)	45,0
p.i.r.e. del satélite (dBW) ³	0,0
Pérdida por compartición de potencia (dB) ⁴	15,8
p.i.r.e. de la RLS por satélite (dBW)	-15,8
Pérdida fuera de haz de la antena de satélite (dB)	0,9
Atenuación atmosférica (dB)	0,1
Atenuación de espacio libre (dB)	188,5
Relación G/T de la antena de la estación terrena [dB(K ⁻¹)] ⁵	15,7
Constante de Boltzmann [dB(J/K)]	-228,6
C/N ₀ del enlace descendente (dBHz)	39,0
C/N ₀ del enlace ascendente (dBHz)	37,0
C/N ₀ global (dBHz)	34,9

¹ Para una antena con polarización lineal de 0 dBi de ganancia.

² Valor medido en órbita.

³ Según la especificación.

⁴ Compartición de potencia entre ruido y 8 señales transmitidas simultáneamente.

⁵ Utilizando la antena de 7,3 m del Laboratorio de Pruebas GOES del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA.

2.3.4 Estación terrena

Cada uno de los países participantes instaló una estación terrena. Las señales RLS por satélite recibidas, se sometieron a una conversión con reducción de frecuencia y a un filtrado, aplicándose las señales así obtenidas a un convertidor analógico-digital y subsiguientemente a un procesador digital de señales. Los tres países eligieron un método de tratamiento totalmente digital por la flexibilidad que proporciona y teniendo en cuenta el volumen de tratamiento necesario.

2.3.4.1 Diseño teórico de los procesadores de señal digitales

La radiobaliza de 406 MHz tiene unas características que permiten desarrollar una técnica que posibilita la demodulación de los datos recibidos con proporciones de error aceptables. La primera característica es que la parte esencial del mensaje de la radiobaliza, o sea el campo de 60 bits que identifica unívocamente la radiobaliza concreta asociada a un determinado barco o aeronave, no varía de transmisión a transmisión. Esta propiedad permite prever un medio para la integración de múltiples mensajes, gracias a la cual se puede aumentar la relación señal/ruido efectiva y conseguir la proporción de errores de 1×10^{-5} para los bits protegidos del código. La existencia en la señal de 406 MHz de un código de corrección de errores potente ayuda a obtener más rápidamente el objetivo deseado de una proporción de errores de 1×10^{-5} .

Por ello, los tras países han construido procesadores con los siguientes requisitos básicos comunes [Davisson y otros, 1984; Dumont y otros, 1988; Flikkema y otros, 1988 y Keightley, junio de 1987]:

- funcionamiento para mensajes individuales con una C/N_0 inferior a 30 dBHz;
- identificación, recopilación y clasificación de mensajes sucesivos de una determinada RLS por satélite para realización de las funciones de integración;
- integración de tantas ráfagas de varias RLS como sea necesario;
- interpretación del código BCH y realización de correcciones apropiadas de los datos;
- funcionamiento en presencia de interferencia de onda continua; y
- funcionamiento en tiempo casi real.

3. Descripción de las pruebas

Se concibieron las pruebas para evaluar la calidad del procesador (o sea, la sensibilidad del receptor), el margen del sistema, el Tiempo de Transferencia de Mensajes (TTM), la capacidad del sistema, y los efectos de las condiciones geométricas y ambientales en esos parámetros.

Cada prueba, a excepción de las pruebas prácticas, se organizó en unidades denominadas bloques de mensajes; cada bloque consistía en ráfagas de 20 mensajes por cada RLS por satélite o en transmisiones de aproximadamente 17 minutos de duración dado que cada ráfaga se repite cada 47,6 a 52,5 s. Durante las pruebas prácticas, las RLS por satélite se activaron normalmente durante periodos de prueba de 30 minutos.

3.1 Sensibilidad del receptor y margen del sistema

Durante las pruebas con prototipos y en órbita se midió la sensibilidad del receptor (umbral de procesamiento). Esa sensibilidad se define como el valor mínimo de la relación C/N_0 de la estación terrena para el que se logra una probabilidad de detección de mensajes (de prueba) sin errores (PDEFM) de al menos 0,99.

Para determinar el margen del sistema durante las pruebas en órbita, cada país utilizó su propia estación terrena y un simulador de RLS por satélite instalado en el GSFC de la NASA. Las características de emisión de ese simulador se conformaron a las estipulaciones de la Recomendación 633. La p.i.r.e. utilizada para las pruebas de margen del sistema fue semejante a la de una RLS por satélite con una antena de polarización lineal que transmite con un ángulo de elevación de 5° (véase el Cuadro I). El margen del sistema se define como la diferencia existente entre el valor mínimo de la p.i.r.e. con el que se obtiene una PDEFM de 0,99 y la p.i.r.e. característica de 37 dBm.

Durante las pruebas en órbita se enviaron simultáneamente desde el simulador ubicado en el GSFC de la NASA por el enlace ascendente 15 RLS por satélite simuladas. A cada RLS simulada se le asignó una p.i.r.e. de enlace ascendente, que fue constante para la duración de la prueba pero varió según la radiobaliza. Por consiguiente, la prueba del margen también sirvió para demostrar la capacidad de los procesadores americano y francés de cursar 15 RLS por satélite simultáneamente.

3.2 Tiempo de transferencia de mensajes

Se define el Tiempo de Transferencia de Mensajes (TTM) como el intervalo de tiempo mínimo entre la activación de la RLS por satélite y la lectura del primer mensaje sin errores en la estación terrena. Se define TTM_{50} como el tiempo necesario para recibir en la estación terrena un mensaje sin errores del 50% de las RLS por satélite detectadas. Se define TTM_{90} como el tiempo necesario para recibir en la estación terrena un mensaje sin errores del 90% de las RLS por satélite detectadas. Esos parámetros se midieron durante todas las etapas de la fase de verificación de los conceptos técnicos.

3.3 Capacidad del sistema

El objetivo de las pruebas de capacidad fue determinar la capacidad de los procesadores de la estación terrena de procesar varias RLS por satélite activadas simultáneamente. Se realizaron las pruebas con RLS por satélite simuladas. Los simuladores se ubicaron en el GSFC de la NASA y en la estación terrena del CNES instalada en Lannion.

3.4 Pruebas prácticas

Se realizaron las pruebas prácticas con RLS por satélite marítimas comerciales ubicadas en emplazamientos especialmente seleccionados. El objetivo de esas pruebas fue determinar el nivel de señal o sea la degradación de la calidad de funcionamiento del procesador terreno causada por parámetros geométricos y ambientales tales como el ángulo de elevación, el estado del mar y el bloqueo por las olas en las RLS por satélite marítimas.

4. Resultados de las pruebas

Las pruebas de verificación de los conceptos técnicos demostraron que en todo momento se podía lograr una calidad de funcionamiento del procesador para una amplia gama de variaciones de los parámetros. A continuación se ofrece un resumen de los resultados más importantes de las pruebas.

4.1 Pruebas con prototipos4.1.1 Sensibilidad del receptor/umbral de procesador

En el Cuadro II, se muestra la calidad de funcionamiento del procesador medida en cada país durante las pruebas con prototipos.

CUADRO IICalidad de funcionamiento del procesador en las pruebas con prototipos

C/N ₀ (dBHz)	Canadá		Francia		EE.UU	
	Nº de bloques de mensaje	PDEFM	Nº de bloques de mensaje	PDEFM	Nº de bloques de mensaje	PDEFM
30	10	1,00	240	1,00	-	1,00
29	10	1,00	240	1,00	-	1,00
28	10	1,00	240	1,00	-	0,98
27	200	1,00	240	1,00	-	0,90
26	200	0,705	240	1,00	-	-
25	-	-	240	0,95	-	-
24	-	-	240	0,70	-	-

Teniendo en cuenta los datos del Cuadro II, se indican las siguientes sensibilidades del receptor o umbrales del procesador:

Procesador de Canadá: 27 dBHz

Procesador de Francia: 26 dBHz

Procesador de EE.UU: 28 dBHz

PDEFM: Probabilidad de detección de mensajes sin errores

4.1.2 Tiempo de transferencia de mensajes

En el Cuadro III, se muestran los tiempos de transferencia de mensajes (TTM₅₀, TTM₉₀ o TTM₉₅) obtenidos en cada país durante las pruebas con prototipos. Los datos indican que, para los niveles umbral del procesador (TTM₅₀) ≤ 8 minutos y TTM₉₀ ≤ 14 minutos.

CUADRO IIIResultados de TTM en la pruebas con prototipos

C/N ₀ (dBHz)	Canadá		Francia		EE.UU	
	TTM (minutos)		TTM (minutos)		TTM (minutos)	
	50%	95%	50%	90%	50%	90%
32	3	4	1	2	2	3
30	-	-	-	-	3	4
28 ¹	5	10	3	4	5	9
27 ²	8	14	-	-	8	15
26 ³	-	-	6	9	-	-
25	-	-	8	13	-	-
24	-	-	11	15	-	-

- 1) Nivel umbral del procesador de EE.UU.
 2) Nivel umbral del procesador de Canadá.
 3) Nivel umbral del procesador de Francia.

4.2 Pruebas en órbita4.2.1 Márgen del sistema

En el Cuadro IV, se indica la calidad de funcionamiento de cada procesador para los niveles de p.i.r.e. obtenidos desde una RLS por satélite típica (37 dBm). Se utilizaron esos datos para determinar el márgen del sistema en órbita según los procedimientos descritos en el § 3.1.

CUADRO IV

Calidad de funcionamiento del sistema en las pruebas en órbita

p.i.r.e. equivalente (dBm)	Canadá		Francia		EE.UU	
	Nº de bloques de mensaje	PDEFM	Nº de bloques de mensaje	PDEFM	Nº de bloques de mensaje	PDEFM
37	288	1,00	360	1,00	-	-
34	576	1,00	-	-	-	-
33	-	-	360	1,00	480	1,00
32	-	-	360	1,00	-	-
31,5	-	-	360	0,99	-	-
31	864	1,00	-	-	-	-
30,5	-	-	-	-	720	0,99
30	864	0,995	360	0,95	-	-
29,5	-	-	-	-	720	0,91
29	864	0,978	360	0,85	720	0,68
28	864	0,891	360	0,50	720	0,21

Se observa en el Cuadro IV que durante las pruebas en órbita los márgenes de sistema logrados varían de 5,5* a 7 dB, según el procesador y la estación terrena utilizados. Estos márgenes, que simulan el borde de la zona de cobertura del satélite, tienen una correlación relativamente buena con los márgenes predichos a partir de los umbrales del procesador medidos de 26 - 28 dBHz y del valor nominal de la C/N_0 del enlace, de 35 dBHz calculado en el Cuadro I.

* Con un umbral de p.i.r.e. de la RLS por satélite de 31,5 dBm, la C/N_0 en recepción es de 28,6 dBHz para la estación terrena francesa, lo que equivale a una degradación del umbral de 2,6 dB con respecto a los resultados de las pruebas con prototipos. Esa degradación fue ocasionada por el CAG de la estación terrena francesa, que no se ajustó a las variaciones de nivel de señal resultantes de la compartición de potencias en el enlace descendente (véase el § 2.3.1). Este problema no existirá en la próxima generación de repetidores a 406 MHz instalados a bordo de los satélites GOES-NEXT, que contarán con un enlace descendente especializado que funcionará a 1 544,5 MHz (véase el § 6.2 del Informe 761).

4.2.2 Tiempo de transferencia de mensajes

En el Cuadro V, se muestran los tiempos de transferencia de mensajes (TTM_{50} y TTM_{90}) obtenidos en Francia y EE.UU. durante las pruebas en órbita. Estos datos indican que para los niveles umbral del procesador $TTM_{50} \leq 4,5$ minutos y $TTM_{90} \leq 7,5$ minutos.

CUADRO V

Resultados de TTM en las pruebas en órbita

p.i.r.e. equivalente (dBm)	Francia			EE.UU		
	TTM (minutos)		PDEFM	TTM (minutos)		PDEFM
	50%	90%		50%	90%	
33	2,5	5,5	1,00	1,5	3,5	1,00
32	4	6,5	1,00	-	-	-
31,5 ¹	4,5	7,5	0,99	-	-	-
30,5 ²	-	-	-	3	6,5	0,99
30	6	11	0,95	-	-	-
29,5	-	-	-	4,5	9,5	0,91
29	9	14	0,85	7,5	13,5	0,68
28	12	16	0,50	-	-	-

1) Nivel umbral del procesador de Francia.

2) Nivel umbral del procesador de EE.UU.

4.2.3 Pruebas de capacidad

Como se indica en el § 3.1, los resultados de las pruebas de margen demostraron que los procesadores americano y francés tienen la capacidad de cursar simultáneamente al menos 15 RLS por satélite activas. El procesador canadiense, si bien funcionaba en tiempo real, tenía limitaciones de velocidad de proceso, anchura de banda y capacidad, por lo que Canadá no comunicó otros resultados de pruebas de capacidad.

4.2.3.1 Capacidad del procesador de Francia

Se efectuó esta prueba para comprobar que el procesador era capaz de:

- recibir y detectar 71 RLS por satélite sin errores, y

- recibir y detectar sin errores cuatro RLS por satélite suplementarias, además de las 71 sin que la serie normal de 71 RLS afectara el tiempo de espera de detección.

Estas condiciones son muy representativas de las que se encuentran realmente, dado que cada nueva situación de siniestro se produce en un momento en que ya se han detectado diversas balizas, que aún siguen transmitiendo (otros avisos de socorro, balizas de orbitografía, balizas de prueba).

Se efectuó la prueba con un simulador desarrollado por el CNES e instalado en Lannion (Francia).

Se ha ajustado la p.i.r.e. de las radiobalizas por satélite simuladas para mantener la C/N_0 en recepción en torno a 32 dBHz. Las frecuencias de las radiobalizas por satélite estaban distribuidas uniformemente en 20 kHz.

Se puso en marcha el procesador (o se volvió a colocar en la posición inicial). Se simuló entonces una serie de 71 radiobalizas por satélite activas.

Cuando cada una de estas 71 radiobalizas por satélite hubo transmitido veinte mensajes, se añadieron otras cuatro radiobalizas suplementarias a la serie inicial. Se repitió la prueba en cuatro ocasiones.

Los resultados del Cuadro VI muestran que el procesador pudo detectar 75 radiobalizas por satélite (las primeras 71 en menos de diez minutos y las cuatro restantes en menos de cuatro minutos).

CUADRO VI

Resultados de las pruebas de capacidad

Número de RLS por satélite	PDEFM	TTM min		Número de detecciones
		50%	90%	
71 iniciales	1.00	4	8	284
4 suplementarias	1.00	2	3	16

Cabe señalar que el uso de dos demoduladores solamente limita la capacidad verdadera del procesador. Si se aumenta el número de demoduladores y se mejora el soporte lógico, se incrementará la capacidad del procesador.

En el Anexo I figura un análisis teórico de la capacidad.

4.2.3.2 Capacidad del procesador de EE.UU.

Se efectuaron dos tipos de pruebas de capacidad (normales y suplementarias) para evaluar la calidad de funcionamiento del procesador de estación terrena. En las pruebas normales, se activó un número constante de RLS por satélite para un bloque completo de 20 ráfagas ordinarias por baliza (véase el § 3). En las pruebas suplementarias se utilizaron bloques de 40 ráfagas.



Se realizó un total de cuatro pruebas (dos de cada tipo). Las pruebas números 1 y 2 fueron pruebas normales en las que se utilizaron 26 y 30 RLS por satélite activas simuladas. Las pruebas números 3 y 4 fueron pruebas suplementarias. En la prueba 3, se activaron 27 RLS por satélite para las primeras 20 ráfagas y luego para las 20 ráfagas siguientes, se activaron 3 balizas además de las 27 originales que ya estaban transmitiendo. Igualmente, en la prueba 4 se activaron 55 balizas para las primeras 20 ráfagas y luego, para las siguientes 20 ráfagas, se pusieron en funcionamiento 4 balizas más. El tipo de prueba suplementaria proporciona una evaluación de la capacidad del procesador para proporcionar un aviso de alerta para un nuevo siniestro en un canal ya congestionado con balizas activadas.

En el Cuadro VII se ofrece un resumen de los resultados de las pruebas normales. La PDEFM media para 26 y 27 balizas activadas simultáneamente fue de 1,0 y 0,98, respectivamente, mientras que para 30 balizas el valor fue de 0,99. Por ello, se puede concluir que la capacidad del procesador de la estación terrena cuando mantiene un PDEFM de 0,99, es de unas 30 RLS por satélite. Para 55 RLS por satélite activas (prueba 4), la PDEFM se redujo a 0,81. Se ha determinado que el motivo de esa degradación es una falta de ajuste de la carga de procesamiento entre los procesadores y el computador principal. Se prevé que la nueva distribución de la carga de procesamiento conducirá a una capacidad superior a 50 balizas activas con una anchura de banda de 15 kHz para una PDEFM de 0,99 y un TTM_{90} inferior a 10 minutos.

CUADRO VII

Pruebas de capacidad de EE.UU.: resultados de las pruebas normales

Prueba Nº	Nº de RLS por satélite	Nº de bloques	PDEFM	TTM (minutos)		Nº de mensajes
				50%	90%	
1	26	8	1,0	0,9	3,4	1156
2	30	8	0,99	0,9	5,3	1154
3	27	10	0,98	0,9	4,1	2995
4	55	3	0,81	1,2	11,7	1076

Los resultados de TTM proporcionan más información sobre la característica de capacidad del procesador terreno. Es probable que la estadística más importante sea el TTM_{90} global. Para 26 balizas activas, ese valor global fue de 3,4 minutos; para 30 balizas activas, fue de 5,3 minutos.

En el Cuadro VIII, se ofrecen los resultados de las pruebas 3 y 4 de balizas suplementarias. En ambas pruebas, se generaron alertas casi instantáneas para todas las RLS suplementarias en cada bloque, lo que dio valores del PDEFM de 1,0. Los datos TTM se asemejan a los correspondientes a las pruebas normales, lo que demuestra la capacidad del procesador terreno de detectar RLS por satélite recientemente activadas.

CUADRO VIIIPruebas de capacidad de EE.UU.: resultados de las pruebas suplementarias

Prueba Nº	Nº de RLS por satélite	Nº de bloques	PDEFM	TTM (minutos)		Nº de mensajes
				50%	90%	
3	27→30	10	1,0	0,9	4,2	182
4	55→59	3	1,0	2,5	16,3	43

4.2.4 Pruebas prácticas

La etapa de las pruebas prácticas se llevó a cabo empleando RLS por satélite instaladas en emplazamientos especialmente seleccionados. El objetivo de esas pruebas fue determinar la calidad de funcionamiento del procesador terreno en presencia de parámetros geométricos y ambientales, tales como el ángulo de elevación, el estado del mar, y el bloqueo por las olas en las balizas por satélite marítimas.

Para alcanzar ese objetivo se realizaron dos series de pruebas con RLS por satélite operacionales (véase el Cuadro IX). En una prueba efectuada del 25 al 27 de mayo de 1988 se lanzaron RLS por satélite mar adentro en Bretaña, Francia y cerca de Chincoteague, Virginia. En la segunda prueba, las balizas se botaron entre el 20 de junio y el 2 de julio de 1988 desde la Boheme, un balandro de 45 pies que realizaba un viaje entre Bermudas y Annapolis, Maryland. En general, durante esas pruebas el mar se mantuvo en calma.

CUADRO IXPruebas prácticas: resumen de las ubicaciones de las RLS por satélite

Prueba	Ubicación	Estado del mar	Angulo de elevación
Bretaña	en cubierta/en flotación	0,5 m	3,5°-12°
Virginia	en flotación	0,5 m	46°
La Boheme	en flotación	0,5 m	45°-51°

Resulta importante señalar que la estructura de bloques utilizada en las pruebas de margen y de capacidad no se pudo aplicar en las pruebas prácticas. La duración de las pruebas prácticas fue de 30 minutos. El procesador terreno siguió produciendo mensajes durante todo el tiempo en que se detectaron radiobalizas. Todos los mensajes se utilizaron para generar las estadísticas.

4.2.4.1 Resultados de las pruebas prácticas de EE.UU.

En el Cuadro X, se indican los resultados de las pruebas prácticas de EE.UU. La tercera columna del cuadro, P_{DET} , recoge la frecuencia de detecciones completas para cada una de las pruebas. En las pruebas se logró una P_{DET} global de 0,95. No todas las activaciones se detectaron dentro de los 17 minutos de activación; ello queda reflejado en los datos de PDEFM. De las 60 primeras detecciones, 2 se lograron después de 17 minutos, lo que arroja una PDEFM global para las pruebas prácticas de 58/63 ó 0,92.

CUADRO X

Resultados de las pruebas prácticas de EE.UU.

Prueba	TTM (minutos)		Nº de (30 min)	P_{DET} (17 min)	TTM (minutos)	
	Pruebas	Mensajes			PDEFM 50%	90%
Bretaña	32	557	0,94(30/32)	0,91(29/32)	1	3
Virginia	15	184	0,93(14/15)	0,93(14/15)	2	8
La Boheme	16	317	1,0 (16/16)	0,94(15/16)	1	4

El Cuadro X también muestra los datos TTM para los mensajes de las pruebas prácticas que se detectaron en menos de 17 minutos. Se observa una calidad muy buena de las alertas casi instantáneas: 8 minutos o menos para TTM_{90} . Las balizas lanzadas frente a la costa de Bretaña presentaban un interés particular debido a su bajo ángulo de elevación hacia el satélite GOES-7 ($3,5^\circ$). Los resultados corresponden a un total de 1.058 puntos de datos (mensajes), lo que proporciona una fiabilidad estadística relativamente alta.

4.2.4.2 Resultados de las pruebas prácticas de Francia

En mayo de 1988, el CNES y los servicios de búsqueda y salvamento franceses realizaron una serie de pruebas mar adentro en Bretaña. Se activaron dos tipos de RLS por satélite durante periodos de media hora en cubierta o en flotación en el mar. Los ángulos de elevación de la balizas fueron de unos $3,5^\circ$. En el Cuadro XI se indican los resultados de esas pruebas.

CUADRO XIResultados de las pruebas prácticas de Francia

Nº de RLS por satélite	Nº de pruebas	P _{DET} (30 min)	PDEFM (17 min)	TTM (minutos)	
				50%	90%
1	29	0,97	0,93	2	6
2	24	0,96	0,92	2	6

Se efectuaron unas pocas pruebas con balizas en flotación, con ángulos de elevación tan bajos como 2°. Esas pruebas señalan que la detección en esos ángulos bajos resulta posible. No obstante, no se dispone de información detallada.

5. Conclusiones

El experimento técnico GOES-7 ha demostrado que un sistema de satélites geoestacionarios en 406 MHz puede suministrar rápidamente alertas de socorro [Sessions y otros, 1989]. Esta conclusión se basa en los siguientes aspectos del experimento:

- las pruebas con prototipos realizadas en las estaciones terrenas de EE.UU., Francia y Canadá
 - confirmaron que el concepto se puede conseguir técnicamente;
 - demostraron una calidad de funcionamiento del procesador consistente con una amplia gama de variación de los parámetros de la RLS por satélite;
- las pruebas en órbita con los enlaces ascendentes de las RLS controlados;
 - midieron adecuadamente los márgenes del sistema;
 - mostraron que se puede alcanzar una capacidad de sistema de al menos 75 RLS por satélite que funcionan en la banda de 20 kHz; y
- las pruebas prácticas de ingeniería demostraron que las balizas ubicadas en el mar se podían procesar con éxito.

En resumen, este experimento demuestra que un sistema de satélites geoestacionarios, que utiliza RLS por satélite en 406 MHz que satisfacen las características de la Recomendación 633, puede cumplir satisfactoriamente el requisito de capacidad que se indica en el Informe 761.

6. Perspectivas futuras

Como se señaló en el § 2.2, después de la verificación de los conceptos técnicos se emprendió la verificación de los conceptos de sistema. El objetivo principal de esta última fase de las pruebas es la evaluación de la utilidad de los datos de alerta recibidos a través de los satélites geoestacionarios cuando se les integra con la información procedente del sistema de satélites COSPAS-SARSAT de órbita polar baja. Durante esta fase también se están investigando los métodos de integración de esos dos conjuntos de datos.

Al terminar esas dos fases de pruebas, se tomará una decisión sobre el empleo futuro de la capacidad de los satélites geoestacionarios. Por otra parte, cabe señalar que la próxima generación de satélites GOES (serie denominada GOES-NEXT), los dos vehículos espaciales indios INSAT (INSAT IIA y IIB) y posiblemente un satélite japonés estarán equipados con transpondedores mejorados, que aumentarán el margen del sistema en unos 3 dB. Esos nuevos transpondedores estarán disponibles para su uso, si se desea, a partir de principios de 1990 y continuarán estándolo hasta fines de los años 90 [Dumont, 1988; y Vollmers y otros, 1989].

REFERENCIAS

- DAVISSON, L., DAVIS, K., NARDI, J. et KHORRAMI, J. [abril, 1984] 406 MHz ELT processor for geostationary satellites. Proc. International Symposium on Satellite-Aided Search and Rescue, Toulouse, Francia.
- DUMONT, P., FRIEDMAN, M.L., HAYES, E.J. et ROGALSKI, W.I. [octubre, 1986] 406 MHz geostationary SAR experiment. XXXVIIe Congrès, Fédération internationale d'astronautique, Innsbruck, Austria.
- DUMONT, P., BONNERY, M. et MAGUINAUD, A. [marzo, 1988] Receiver-processor for detection of 406 MHz SARSAT distress messages. 12th International Communication Satellite Systems Conference, Crystal City, Virginie, Estados Unidos de América.
- DUMONT, P. [octubre, 1988] - 406 MHz COSPAS/SARSAT distress beacon signals relayed by geosynchronous satellites: present status and future developments. XXXIX Congress, International Astronautical Federation, Bangalore, India.
- FLIKKEMA, P.G., DAVISSON, L.D. et SESSIONS, W.B. [octubre, 1988] - The US SARSAT geosynchronous experiment: ground processor description and test results, IEE Fourth International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation, Londres, Reino Unido.
- FRIEDMAN, M.L., GOUDY, P. et KAMINSKY, Y. [abril, 1984] 406 MHz geostationary satellite SARSAT experiment. Proc. International Symposium on Satellite-Aided Search and Rescue, Toulouse, Francia.
- KEIGHTLEY, R.J. [mayo, 1987] Simulation of the Canadian GOES signal processor. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-23, N° 3, pp. 361-370.
- KEIGHTLEY, R.J. [junio, 1987] Threshold testing of the Canadian GOES experimental processor. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing, Victoria, Canadá.

SESSIONS, W.B., WELLSPEAK, G., KAHLE, D.R. et FLIKKEMA, P.G. [abril, 1989] - Results of experiments to expedite COSPAS/SARSAT 406 MHz satellite EPIRB alerts via NOAA's geostationary operational environmental satellite (GOES). Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) Annual Assembly Meeting, Seattle, Washington, Estados Unidos de América.

VOLLMERS, R.R., FLATOW, F.S. et SESSIONS, W.B. [abril, 1989] - Search and rescue services: instantaneous alert notification of sailors and aviators in distress. GOES I-M Operational Satellite Conference, Crystal City, Virginia, Estados Unidos de América.

ANEXO I

INTEGRACIÓN Y FIABILIDAD DE MENSAJES PARA EL SISTEMA DE SATÉLITES GEOESTACIONARIOS EN LA BANDA DE 406 MHz

1. Integración de mensajes y tiempo de alerta

El uso de mensajes múltiples (por ejemplo, decodificación lógica por mayoría) puede reducir los niveles umbral necesarios, lo que a su vez puede reducir la ganancia de antena de satélite o incrementar los márgenes de señal, pero aumentando el tiempo necesario para la alerta. El tiempo de alerta, depende también del número de usuarios. Todavía no se han establecido soluciones transaccionales detalladas entre capacidad del sistema y recepción de la alerta para sistemas geoestacionarios que utilizan radiobalizas a 406 MHz. No obstante, se puede obtener una primera estimación considerando solamente la probabilidad de superposición de mensajes sin decodificación lógica por mayoría.

La probabilidad de interferencia mutua, viene dada por [Texas Instruments, 1977]:

$$P_I = 1 - \left(1 - \frac{2\tau}{T} \cdot \frac{2\Delta f}{F}\right)^{N-1}$$

donde:

- P_I : probabilidad de interferencia mutua,
- N : número de RLS por satélite en el campo de visión,
- τ : duración de una transmisión en ráfagas en segundos (440 ms),
- Δf : anchura de banda de la señal total en kHz (1,5 kHz para una anchura de -10 dB),
- T : periodo entre transmisiones de ráfagas, en segundos (50 s),
- F : espectro total de búsqueda en el cual pueden existir señales en kHz ($F = 8$ kHz).

El término F representa la banda de frecuencias en la que se distribuyen las frecuencias centrales de la RLS por satélite y su valor se estima a partir de la anchura de banda total de búsqueda del procesador de a bordo en SARSAT, que es 24 kHz [SARSAT, 1979] reducida por el desplazamiento Doppler total (± 8 kHz) que sólo se produce en el sistema por satélite a baja altitud.

Sustituyendo:

$$P_I = 1 - (0,9934)^{N-1} = 0,4809$$

La probabilidad de no interferencia en la primera ráfaga es P , siendo $P_i = 1 - P$; en ráfagas siguientes, la probabilidad de que se produzca por lo menos una ráfaga sin interferencia en j intentos viene dada por:

$$P_{ij} = 1 - P_i^j = 1 - \binom{j}{0} P_i^0 (1 - P_i)^{j-0}$$

El parámetro j está relacionado con el máximo retardo en la recepción de la alerta, T_a , mediante $T_a = (j - 1) T$:

Para $N = 100$ plataformas, $j = 1$ y $T = 0$ s

$$P_{ij} = 0,52$$

Para $j = 7$, $T_a = 300$ s

$$P_{ij} = 0,99$$

Utilizando este análisis preliminar, es posible que el sistema geoestacionario facilite indicaciones de alerta dentro de un periodo de tiempo de 6 min cuando existan 100 RLS por satélite dentro de la zona de cobertura. Es necesario perfeccionar este análisis, incluyendo en el mismo los efectos, cuidadosamente estudiados, de la dispersión existente de frecuencias así como la probabilidad de detectar y decodificar correctamente los mensajes transmitidos.

2. Fiabilidad de mensajes

El mensaje de la RLS por satélite experimental a 406 MHz, contiene un código BCH de corrección de errores capaz de corregir 3 bits erróneos en la porción fija del mensaje de la RLS por satélite (82 bits). Utilizando este código, la probabilidad de un error de mensaje en la porción fija (véase la Recomendación 633) del mensaje, viene dada por la probabilidad de que se produzcan 4 o más errores. Suponiendo que los errores son independientes, la probabilidad de que se produzca un error de mensaje es:

$$P_{mf} = \sum_{i=4}^{82} \binom{82}{i} P_e^i (1 - P_e)^{82-i}$$

en donde P_e es la probabilidad de un bit erróneo.

Para la porción variable del mensaje corto (6 bits), la probabilidad de un error de mensaje no queda mejorada por el código, y viene dada por:

$$P_{mv} = 1 - (1 - P_e)^6$$

Para el mensaje largo facultativo (32 bits) la probabilidad de un error de mensaje viene dada por:

$$P_{ml} = 1 - (1 - P_e)^{32}$$

El cuadro VI da los resultados para dos diferentes probabilidades de bits erróneos:

CUADRO VI

P_e	P_{mf}	P_{mv}	P_{ml} (largo facultativo)
10^{-2}	$8,0 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{-2}$	0,28
10^{-3}	$1,8 \times 10^{-5}$	$6,0 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-2}$

Así pues, para una probabilidad de bits erróneos de 10^{-3} , el error de mensaje es razonablemente pequeño en todos los casos, asegurando una recepción correcta al cabo de unos pocos intervalos de repetición de mensaje.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SARSAT [octubre de 1979] Performance specification of the SARSAT SAR Processor (SARP), SARSAT Document N.º D-3.
 TEXAS INSTRUMENTS [mayo de 1977] Final Report for a study of satellite emergency locator systems. Texas Instruments, NASA Contract, NAS5-23676.