

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Informe UIT-R SM.2211

(06/2011)

Comparación de los métodos de diferencia de tiempo de llegada y de ángulo de llegada para la localización geográfica de señales

Serie SM

Gestión del espectro



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de los Informes UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REP/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión sonora
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro

Nota: Este Informe UIT-R fue aprobado en inglés por la Comisión de Estudio conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2011

© UIT 2011

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

INFORME UIT-R SM.2211

**Comparación de los métodos de diferencia de tiempo de llegada
y de ángulo de llegada para la localización
geográfica de señales**

(2011)

ÍNDICE

	<i>Página</i>	
1	Introducción.....	1
2	Panorámica general de la tecnología TDOA	2
3	Ventajas e inconvenientes del método TDOA con respecto al método AOA tradicional.....	2
4	Resumen	8
5	Referencias	8

1 Introducción

El presente Informe compara las ventajas e inconvenientes de los métodos de diferencia de tiempo de llegada (TDOA) y de ángulo de llegada (AOA) para la localización geográfica de señales. Aunque el Informe se centra en el método TDOA, conviene señalar que existen otras técnicas de localización geográfica¹. El método AOA determina el ángulo de llegada de una onda en un punto de medición. Estos métodos AOA han sido de uso habitual en muchas aplicaciones radiogoniométricas, y presentan algunas ventajas e inconvenientes, por ejemplo con respecto a los requisitos de antena. Los métodos TDOA, por su parte, calculan la diferencia de tiempo de llegada de una onda en múltiples puntos de medición, y determinan el punto de origen a partir de comparaciones de tiempo y forma de onda. Aunque la utilización de métodos TDOA no está muy extendida en la comprobación técnica del espectro, su utilidad ha ido en aumento gracias a la disponibilidad de una potencia de cálculo asequible y compacta, los avances en la tecnología en materia de receptores radioeléctricos, la facilidad de acceso a enlaces de datos y gracias a una señal de temporización distribuida de una manera más precisa. El presente documento ofrecerá una breve panorámica general de la tecnología TDOA y comparará las ventajas e inconvenientes del método TDOA con respecto a los métodos AOA más tradicionales.

¹ La intensidad de la señal recibida utiliza la relación de potencia medida de una señal en múltiples puntos de medición para calcular el punto de origen. Esa intensidad es utilizada a menudo para la localización geográfica en interiores. La diferencia de frecuencia de llegada (FDOA) emplea el desplazamiento de la frecuencia de una fuente en movimiento (y/o múltiples receptores) causado por el efecto Doppler para calcular el punto de origen. El método FDOA a menudo se usa junto con el TDOA en aplicaciones en aeronaves.

2 Panorámica general de la tecnología TDOA

La técnica TDOA mide el tiempo de llegada de una señal de radiofrecuencia a varios puntos en el espacio y compara la diferencia de tiempo entre cada receptor. La manera tradicional de estimar la TDOA es calcular la correlación cruzada de una señal que llega a dos receptores. La TDOA estimada es el retardo que maximiza la función de correlación cruzada. Si se conoce la ubicación de cada receptor, es posible deducir la ubicación de la fuente de las emisiones a condición de que todos los receptores estén sincronizados. Una línea hiperbólica de diferencia de tiempo de llegada constante, denominada isócrona o línea de posición (LoP), complementa una línea de marcación (LoB) de un sistema AOA. Para una discusión más detallada sobre los métodos TDOA, véase el punto 4.7.3.2 del Manual de la UIT sobre Comprobación Técnica del Espectro, Edición de 2011.

Los métodos TDOA se han utilizado para tareas de radiolocalización en algunas aplicaciones del ámbito de la defensa y, más recientemente, en algunas aplicaciones concretas, como la localización de teléfonos móviles celulares para respuestas de emergencia (incendios, ambulancias, etc.). En el pasado, el principal obstáculo para un despliegue más amplio en el ámbito civil ha sido el tiempo de sincronización en nanosegundos requerido. Como la radiación electromagnética viaja aproximadamente a 30 cm/ns, toda fluctuación significativa de fase de la temporización entre receptores se traducirá directamente en una pérdida de precisión en la localización. Actualmente, la aparición de sistemas de navegación por satélite (GPS, Galileo y GLONASS) brinda una solución accesible y asequible para mantener la sincronización temporal. De resultados de ello, vendedores de distintos países de todo el mundo ofrecen hoy sistemas basados en el método TDOA.

3 Ventajas e inconvenientes del método TDOA con respecto al método AOA tradicional

Para entender mejor el método TDOA, presentamos un breve estudio comparativo de sus ventajas e inconvenientes con respecto al método AOA. Conviene señalar que la TDOA y el AOA son técnicas complementarias para la localización geográfica. Un sistema de localización geográfica que combine ambas podrá resultar más eficaz que cualquiera de estos métodos por sí solo [1]. Asimismo, disponer de un método alternativo y verificado de localización geográfica puede ser crucial para toda actividad de fiscalización del espectro.

A fin de simplificar la discusión, consideraremos que el sistema TDOA utiliza un mecanismo de detección basado en la correlación cruzada y que los receptores de medición retransmiten señales muestreadas a un servidor central para el procesamiento de la TDOA. Este método es preferible en la mayoría de aplicaciones de comprobación técnica del espectro, tanto por su comportamiento en tareas de localización como por su flexibilidad. A fin de simplificar todavía más la discusión, compararemos el sistema TDOA con un sistema AOA de interferómetro correlativo (CI). La interferometría correlativa es una técnica AOA ampliamente aplicada en la comprobación técnica radioeléctrica moderna. El interferómetro correlativo se presenta y discute en el punto 4.7.2.2.5 del Manual de la UIT sobre Comprobación Técnica del Espectro, Edición de 2011.

(NOTA 1 – Las referencias a «Puntos» que figuran en los Cuadros 3-1 y 3-2 aluden al Manual de la UIT sobre Comprobación Técnica del Espectro, Edición de 2011. Los números entre corchetes que figuran en los Cuadros aluden a las Referencias que figuran en § 5.)

CUADRO 3-1
Ventajas del método TDOA

<p>Requisitos de antena más sencillos</p>	<p>La antena es económica, de baja complejidad y puede ser de pequeño tamaño. Los receptores TDOA pueden emplear una única antena sencilla (por ejemplo, un monopolio o un dipolo). A diferencia de los sistemas AOA, la antena no requiere unas tolerancias mecánicas y una precisión radioeléctrica elevadas, y su calibración tampoco precisa de pruebas de funcionamiento ni de mediciones. Otra ventaja añadida es que la antena puede ser de pequeño tamaño y pasar inadvertida. Este hecho es importante al instalar sistemas de comprobación técnica en lugares históricos o con restricciones arquitectónicas o en la negociación de acuerdos de ubicación con un tercero.</p>
<p>Requisitos de ubicación y de calibración más sencillos</p>	<p>Los requisitos de ubicación son menos restrictivos que en el caso del método AOA y la calibración que se requiere es escasa o nula. Esto aumenta la flexibilidad al elegir la ubicación de los sistemas TDOA. Por ese motivo, el despliegue de las instalaciones TDOA es más rápido. En instalaciones urbanas, pueden colocarse receptores adicionales TDOA para contrarrestar el efecto de apantallamiento de los edificios altos. Por su parte, el criterio que debe regir la elección de la ubicación de una estación AOA debe ser minimizar la distorsión del frente de onda debida a la reemanción procedente de obstáculos locales, a las reflexiones en el suelo y a los cambios en la conductividad del suelo. Algunos sistemas de antenas AOA deben calibrarse después de la instalación para minimizar los errores resultantes dependientes de la frecuencia y de la dirección. La calibración del sistema de antenas es uno de los principales factores que limitan el comportamiento de los sistemas AOA [2]. Los problemas relacionados con la ubicación de los sistemas AOA se abordan con más detalle en los puntos 4.7.2.3.1.2 y 2.6.1.3.</p>
<p>Banda amplia, señales de baja relación S/N y señales de corta duración</p>	<p>El sistema TDOA funciona bien con señales nuevas y futuras de modulaciones complejas, anchura de banda amplia y corta duración. Por lo general, el sistema AOA funciona bien con señales de banda estrecha, pero pueden aplicarse métodos AOA avanzados para ubicar cualquier señal, incluidas las señales de banda amplia, complejas y de corta duración. El comportamiento del método TDOA depende en gran medida de la anchura de banda de la señal. El comportamiento del método AOA suele ser ajeno a la anchura de banda de la señal, siempre que la separación de canales FFT sea similar a la anchura de banda de la señal. El comportamiento del método TDOA suele mejorar conforme aumenta la anchura de banda de la señal. Tanto el método TDOA como el AOA funcionan mejor con señales con una relación S/N más alta y tiempos de integración más largos. La ganancia de procesamiento por correlación permite que las técnicas TDOA detecten y localicen señales con una S/N baja (o incluso negativa). Además, la ganancia de procesamiento por correlación permite que otros receptores TDOA participen en una localización geográfica, aunque su S/N sea muy baja o negativa. Las técnicas básicas AOA no pueden detectar y localizar señales con una S/N negativa, y pueden tener problemas para localizar señales con una SNR baja. Técnicas avanzadas AOA, como las técnicas de resolución avanzada o las técnicas AOA correlativas con ayuda de datos (radiogoniometría de referencia) pueden procesar estas señales. Pese a que las técnicas básicas AOA no se benefician de la ganancia de procesamiento por correlación de la señal, aprovechan hasta cierto punto la ganancia del sistema resultante de la utilización de múltiples elementos radiantes y canales de recepción. La localización geográfica de señales de corta duración requiere de receptores coordinados, sincronizados en el tiempo a una fracción de la anchura de banda de la señal inversa. Esta capacidad es fundamental para los sistemas TDOA. Además, el método TDOA puede efectuar la localización geográfica utilizando mediciones de muy corta duración de señales de una duración más larga. Si se conmutan los elementos radiantes del método AOA, se reducirá la duración de integración requerida.</p>

CUADRO 3-1 (Continuación)

Complejidad del sistema	<p>La complejidad del receptor y de la antena de un sistema TDOA es menor que la del sistema de antenas y el receptor dual o multicanal de un sistema típico AOA.</p> <p>Un receptor TDOA precisa al menos un radiocanal en tiempo real para un procesamiento continuo y la probabilidad más alta de intercepción de la señal ⁽¹⁾. Esto puede dar como resultado un receptor menos complejo en entornos radioeléctricos sencillos. Las técnicas avanzadas de procesamiento de la TDOA son necesarias cuando se utiliza un receptor sencillo en entornos radioeléctricos complejos. Los métodos eficaces para la sincronización temporal (GPS) y las interfaces de enlace de datos son fácilmente accesibles.</p>
Rechazo del ruido y la interferencia sin correlación	<p>El tratamiento por correlación que se utiliza en el método TDOA puede suprimir el ruido cocanal y coincidente en el tiempo y las señales interferentes sin correlación entre estaciones. Esta propiedad permite que el sistema localice geográficamente señales con una relación baja entre la señal y la interferencia + ruido ($S/N + I$).</p> <p>Las mediciones con coordinación temporal se llevan a cabo en todos los receptores. Las señales que no son comunes a dos o más receptores se suprimen. Gracias al procesamiento avanzado, un sistema TDOA puede efectuar la localización geográfica a partir únicamente de las correlaciones con la mejor observación de la señal emitida. En el punto 4.8.5.5 se presenta una aplicación conexa de técnicas de correlación cruzada para el análisis de interferencias.</p> <p>Los sistemas AOA avanzados pueden reducir los efectos de la interferencia cocanal coincidente en el tiempo sin correlación mediante el uso de la correlación con señales de referencia. Otras técnicas avanzadas de procesamiento, como MUSIC, pueden ser robustas en relación con el ruido y la interferencia sin correlación. No obstante, estas técnicas son costosas desde el punto de vista del cálculo y su utilización en la comprobación técnica del espectro no está generalizada.</p>
Localización geográfica en interiores, estadios y universidades	<p>Gracias a técnicas avanzadas de procesamiento, el método TDOA puede emplearse para la localización geográfica de señales de gran anchura de banda en interiores y exteriores, a corta distancia (< 100 m de radio), y en entornos de elevada propagación por trayectos múltiples [4].</p> <p>Los sistemas AOA no suelen funcionar bien en estas condiciones. El problema de una sincronización temporal precisa en interiores se puede resolver con conmutadores Ethernet compatibles IEEE-1588 y receptores TDOA. Conviene señalar que una técnica alternativa para la localización geográfica a partir de la intensidad de la señal recibida suele resultar más eficaz que el método TDOA en entornos de elevada propagación por trayectos múltiples y de corto alcance, en particular en el caso de las señales de banda estrecha.</p>
Reduce la interferencia cocanal coherente (multitrayecto) bajo determinadas condiciones	<p>Tanto el método AOA como el TDOA se ven amenazados por el multitrayecto, también conocido como interferencia cocanal coherente. La incidencia de la posición del sensor en relación con las señales reflejadas por trayectos múltiples en cada uno de estos métodos es distinta.</p> <p>Con una anchura de banda de la señal suficiente, la TDOA es menos sensible a la distorsión del frente de onda provocada por obstáculos locales (multitrayecto local). La TDOA puede requerir el procesamiento avanzado de la señal para resolver las ambigüedades en la ubicación provocadas por obstáculos distantes (multitrayecto distante). El procesamiento avanzado puede filtrar todavía más los pares de correlación que se utilizan en la localización geográfica mediante el método TDOA a fin de mejorar los resultados en condiciones de elevada propagación por trayectos múltiples. Mediante un procesamiento TDOA avanzado, se puede suprimir el multitrayecto resuelto en el tiempo entre estaciones [5], hecho que mejorará el comportamiento en entornos urbanos densos ⁽²⁾.</p>

CUADRO 3-1 (*Fin*)

Consideraciones geométricas	<p>La precisión de los métodos TDOA y AOA es máxima cuando la fuente de la señal se encuentra en las proximidades de los lugares de medición.</p> <p>La precisión de la localización geográfica mediante la TDOA está determinada por la pérdida de precisión de la posición geométrica (GDOP), la calidad de la sincronización temporal y la calidad de la estimación de la TDOA. La incertidumbre en la ubicación no guarda relación directa con la distancia de la línea de base entre los receptores TDOA [6]. Este hecho puede resultar beneficioso en determinadas condiciones.</p> <p>Por su parte, la precisión de los métodos AOA guarda una relación directa con la distancia entre el origen y cada uno de los receptores AOA. La incertidumbre en la posición en el método AOA es función de la incertidumbre del ángulo de marcación y la distancia entre el receptor y la posición estimada. Cuando la fuente está muy alejada del perímetro, el método TDOA describe una línea de posición similar a la línea de marcación del AOA. En esta situación, la incertidumbre de la ubicación y la marcación aumentan de manera similar con la distancia en ambos métodos.</p>
Apto para su utilización en las redes de sensores de RF	<p>Tanto en los métodos TDOA como en los AOA, un aumento en el número de receptores mejorará los resultados, gracias a la ganancia de proximidad y a unas estadísticas mejoradas.</p> <p>El método TDOA es adecuado para instalaciones de múltiples receptores gracias a su baja complejidad, tamaño, potencia, una antena más sencilla y unos requisitos de ubicación simplificados. Una mayor densidad de estaciones de comprobación técnica a distancia, calificadas anteriormente como sensores de radiofrecuencia, acerca el receptor de comprobación técnica a la señal de interés. La reducción resultante en la pérdida de trayecto, descrita en ocasiones como «ganancia de proximidad», mejora la detección y el comportamiento de la localización geográfica [7]. Además, la ganancia de procesamiento por correlación en las técnicas TDOA permite la intervención de más sensores en la localización geográfica, pese a que su S/N puede ser muy baja o negativa.</p>
Posibilidad de llevar a cabo un análisis completo fuera de línea en el servidor central	<p>Los sistemas TDOA pueden almacenar y catalogar mediciones de señales coordinadas temporalmente procedentes de todos los receptores, de modo que es posible realizar un análisis completo fuera de línea en un servidor central. Este análisis incluye un análisis del espectro de la señal de cada receptor, mediciones de correlaciones cruzadas y localización geográfica.</p> <p>Los sistemas AOA también pueden almacenar y catalogar algunas mediciones de señal (como los resultados y la fiabilidad de la marcación) en un servidor central. Estas mediciones están coordinadas temporalmente con el grado de sincronización temporal que se puede obtener con el sistema AOA. Mediciones como el análisis del espectro y las correlaciones cruzadas no son habituales, ya que precisan unos requisitos de velocidad de datos de retorno similares a los de los sistemas TDOA.</p>

- (1) Los sistemas típicos de interferometría correlativa utilizan la multiplexión por división en el tiempo (MDT) para reducir el número de receptores requeridos. En estos sistemas, entre 2 y 3 receptores deben conmutarse con 5, 7 o más antenas. Estos sistemas son menos complejos que los sistemas de radiogoniometría plenamente paralelos, pero la duración mínima de la señal para poder llevar a cabo la localización debe ser más larga.
- (2) El método TDOA ha permitido la localización geográfica de señales de banda estrecha (30 kHz) procedentes de teléfonos celulares de sistemas de telefonía móvil avanzada en entornos urbanos densos con un valor eficaz de la precisión de localización inferior a unos pocos cientos de pies [5].

CUADRO 3-2

Inconvenientes del método TDOA

Señales de banda estrecha	<p>Puede ser imposible o difícil localizar mediante las técnicas TDOA las señales que varían lentamente, entre las que se incluyen portadoras no moduladas y señales de banda estrecha.</p> <p>El comportamiento de la técnica TDOA es una función que depende en gran medida de la anchura de banda de la señal, y este comportamiento empeora conforme se reduce la anchura de banda de la señal. Asimismo, los trayectos múltiples son, potencialmente, un problema para señales de banda estrecha cuando esta posee unas características temporales amplias en relación con la dispersión del retardo. En estas condiciones, resulta más difícil discriminar la distorsión de la forma del impulso ocasionada por los trayectos múltiples, lo que añade error a la estimación de la diferencia temporal. La mínima anchura de banda de la señal para un comportamiento aceptable variará en función de la aplicación. Por ejemplo, el método TDOA ha permitido la localización geográfica de señales de banda estrecha (30 kHz) procedentes de teléfonos celulares de sistemas de telefonía móvil avanzada en entornos urbanos densos con un valor eficaz de la precisión de localización inferior a unos pocos cientos de pies [5]. Unas condiciones de <i>S/N</i> superior y unos tiempos de observación más largos pueden mejorar la localización mediante la técnica TDOA para determinadas señales de banda estrecha.</p> <p>Los sistemas AOA funcionan adecuadamente tanto con señales de banda estrecha y señales no moduladas como con señales de banda ancha.</p>
Imposibilidad de utilizar el método de radiorecalada o de marcación separada con una única estación	<p>Los métodos de marcación separada y de radiorecalada necesitan al menos dos estaciones TDOA (una de ellas como mínimo ha de ser móvil) y un enlace de datos⁽¹⁾.</p> <p>Los métodos de localización geográfica por marcación separada y por radiorecalada de AOA son posibles con una sola estación portátil. Esto permite llevar a cabo tareas de localización geográfica en entornos en los que los receptores TDOA conectados en red no son prácticos o económicos. Estos métodos se describen en el punto 4.7.3.3.</p>
Enlaces para transmisión de datos a velocidad superior	<p>Los sistemas TDOA que transmiten a un servidor central formas de onda muestreadas procedentes de receptores precisan de enlaces para transmisión de datos a alta velocidad. Las necesidades en materia de red del receptor son asimétricas con una anchura de banda de recarga superior a la anchura de banda de descarga. El procesamiento avanzado, incluida la compresión de la señal, puede reducir los datos transmitidos. Los sistemas TDOA que establecen el tipo de dirección en el receptor presentarán unos requisitos de velocidad de transmisión de datos más modestos. Los requisitos en materia de enlaces de datos para los sistemas TDOA se abordan con más detalle en el punto 4.7.3.2.4, «Consideraciones relativas a la red».</p> <p>Los sistemas AOA requieren una velocidad de datos menor ya que solamente se transmiten a una estación central algunas de las características de la señal, como el tiempo, la frecuencia y el ángulo de marcación.</p>
Sensible a las fuentes de descorrelación de señales	<p>Un sistema TDOA debe reducir cuidadosamente todas las fuentes potenciales de descorrelación de señales entre receptores. Estas fuentes incluyen las desviaciones relativas de la frecuencia de referencia entre receptores y las desviaciones relativas de la frecuencia de la señal (desplazamiento Doppler) ocasionadas por fuentes móviles o el entorno local. El máximo tiempo de integración coherente estará limitado no sólo por la duración de la señal, sino también por la estabilidad del oscilador de referencia del receptor y por la dinámica del canal inalámbrico.</p> <p>Los sistemas TDOA de alta calidad incluirán bucles de seguimiento para mantener la coherencia temporal y de frecuencia. La corrección Doppler automática es fundamental para compensar los efectos de la descorrelación de las fuentes desplazadas por efecto Doppler.</p> <p>Los sistemas AOA básicos y algunos sistemas AOA avanzados de resolución (que utilizan MUSIC) no son sensibles a la descorrelación de la señal entre estaciones de medición. Los sistemas AOA avanzados que establecen correlaciones con señales de referencia son sensibles a la descorrelación de señales.</p>

CUADRO 3-2 (*Fin*)

Sincronización temporal más precisa	<p>La TDOA precisa de una sincronización temporal de alta calidad con respecto a la anchura de banda inversa de la señal de interés. La tecnología actual (por ejemplo, GPS) permite obtener una sincronización temporal en el receptor TDOA superior a 20 ns.</p> <p>Los sistemas AOA plantean unos requisitos de sincronización temporal menos estrictos, que pueden llegar a ser de unos pocos segundos entre receptores. En la práctica, algunas señales de interés, como las señales con salto de frecuencia o de corta duración, exigen unos niveles superiores de sincronización de la estación AOA.</p>
Señales con elementos periódicos	<p>Aunque es poco probable, en determinadas circunstancias los algoritmos TDOA pueden generar respuestas incorrectas para las señales que contienen elementos periódicos. Entre los ejemplos de estas señales se incluyen las secuencias con datos repetidos o los impulsos de sincronismo. Este problema y una posible manera de minimizarlo se describen con más detalle en el punto 4.7.3.2.3 «Factores que afectan a la precisión».</p> <p>Los sistemas AOA básicos son ajenos a este problema ya que no llevan a cabo la correlación cruzada de la señal.</p>
Velocidad de cálculo de la localización geográfica	<p>Por lo general, las señales muestreadas se transmiten a un servidor de localización geográfica para su cálculo. Este hecho incide en la capacidad y la velocidad de la red. Un enlace lento puede retrasar considerablemente el tiempo de cálculo de la localización geográfica.</p> <p>La velocidad típica de localización geográfica de los sistemas TDOA puede ser del orden de 1 fix por segundo, muy lejos de los 100 fixes por segundo de los sistemas AOA. La utilización de enlaces de datos de anchura de banda superior puede mejorar la velocidad de localización geográfica de los sistemas TDOA. La utilización de unos tiempos de observación más breves y/o de técnicas de compresión avanzadas también puede reducir los requisitos de anchura de banda para datos. Una vez transmitidas las mediciones a un servidor central, el nuevo cálculo de las localizaciones geográficas de la TDOA se efectúa a una velocidad notablemente superior, ya que se trabaja a partir de datos almacenados localmente.</p>
No está adaptado para la localización geográfica coincidente de muchos emisores	<p>Algunos sistemas AOA pueden llevar a cabo la localización geográfica de muchas señales separadas en frecuencia. A menudo, esto recibe el nombre de radiogoniometría de banda ancha. En el caso de la TDOA, aunque esta posibilidad existe, es incompatible con dicho sistema, principalmente porque los requisitos para la transmisión de datos son muy superiores.</p> <p>Es posible reducir la transmisión de datos para la TDOA en la ayuda de datos sincronizando la señal (estableciendo el tipo de dirección) en cada receptor.</p>
No permite la localización mediante una sola estación (SSL)	<p>Se requiere un mínimo de 2 sensores para generar una línea de posición, y se necesita un mínimo de 3 y 4 sensores para la localización geográfica en 2-D y en 3-D, respectivamente.</p> <p>El sistema AOA puede utilizarse para localización mediante una sola estación.</p>
Consideraciones geométricas	<p>La precisión de los sistemas TDOA y AOA es mayor (GDOP óptimo) cuando la fuente de la señal se encuentra en las inmediaciones del lugar de medición.</p> <p>Si se abandonan las inmediaciones de la estación de medición, la precisión de la localización mediante el método TDOA se reduce más rápidamente que en el caso del sistema AOA.</p> <p>Cuando la fuente se encuentra muy lejos del perímetro, la TDOA traza una línea de posición similar a la línea de marcación del sistema AOA. En tal caso, en ambos métodos la incertidumbre en la localización y la marcación aumenta en la misma proporción con la distancia.</p>
Análisis fuera de línea con mediciones de una sola estación	<p>El sistema AOA permite efectuar un análisis fuera de línea de la línea de marcación a partir de las mediciones procedentes de una sola estación. El sistema TDOA no permite efectuar análisis fuera de línea de las líneas de posición a partir de las mediciones de una sola estación.</p>

⁽¹⁾ Para las operaciones de radiorecalada y marcación separada con una única estación portátil puede optarse por trabajar con la intensidad de la señal recibida.

4 Resumen

TDOA es una tecnología de localización geográfica complementaria cuya utilización para la comprobación técnica del espectro radioeléctrico no está muy extendida. La utilidad del sistema TDOA ha ido en aumento gracias a la disponibilidad de una potencia de cálculo asequible y compacta, una tecnología más avanzada en materia de receptores radioeléctricos, una conectividad de datos ubicua y la precisión en la distribución de la sincronización temporal. El sistema TDOA presenta algunas ventajas con respecto al sistema AOA, en particular en lo relativo a la detección y localización geográfica de señales de banda ancha modernas, unos requisitos de antena más sencillos, la posibilidad de procesar la propagación por trayectos múltiples de corto alcance en entornos urbanos y la predisposición para despliegues de redes de sensores de bajo coste. El sistema también presenta algunos inconvenientes con respecto al sistema AOA, especialmente en la localización de señales de banda estrecha y no moduladas, que suelen tener unos requisitos mayores en materia de datos de retorno, y precisa al menos de 2 receptores por línea de información de posición y de un mínimo de 3 receptores para la localización en 2-D. En el campo de la comprobación técnica de las señales modernas, existe una tendencia hacia una anchura de banda de las señales cada vez mayor y una disminución de la densidad espectral de la potencia. La utilización de tecnologías complementarias para la localización geográfica, como el método TDOA, puede mejorar la probabilidad de detección y localización de señales modernas en muchos entornos. Los sistemas híbridos AOA/TDOA pueden neutralizar algunos de los inconvenientes que plantea el uso de una u otra técnica.

5 Referencias

- [1] BROUMANDAN, ALI y otros [2008] *Practical Results of Hybrid AOA/TDOA Geolocation Estimation in CDMA Wireless Networks*. Calgary: s.n., 2008. IEEE 68th Vehicular Technology Conference. 978-1-4244-1722-3.
 - [2] KRIZMAN, KEVIN J., BIEDKA, THOMAS E. y RAPPAPORT, THEODORE S. [1997] *Wireless Position Location: Fundamentals, Implementation Strategies, and Sources of Error*. s.l.: IEEE, 1997. Vehicular Technology Conference. Vol. 2, p. 919-923.
 - [3] SCHWOLEN-BACKES, ANDREAS [2010] *A comparison of radiolocation using DOA respective TDOA*. Hamburg: Plath GmbH.
 - [4] PATWARI, NEAL y otros [julio de 2005] Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*. p. 54-69.
 - [5] STILP, LOUIS A. [1997] TDOA technology for locating narrowband cellular signals: Cellphone location involves several practical and technical considerations. Time difference-of-arrival (TDOA) technology provides accuracy for locating analog cellphones in urban environments. *Urgent Communications*. [Online] 4 1.
http://mrtmag.com/mag/radio_tdoa_technology_locating/index.html.
 - [6] TORRIERI, DON J. [1984] Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vols. AES-20, 2.
 - [7] AGILENT TECHNOLOGIES [2009] *Techniques and Trends in Signal Monitoring, Frequency Management, and Geolocation of Wireless Emitters*. Application Note. 5990-3861EN.
-