

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Informe UIT-R SM. 2211-2
(06/2018)

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 | Radio astronomía |
| 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, 2018

© UIT 2018

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.2211-2

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

(2011-2014-2018)

ÍNDICE

| | <i>Página</i> |
|--|---------------|
| 1 Introducción..... | 2 |
| 2 Panorámica general de la tecnología TDOA | 2 |
| 3 Ventajas e inconvenientes del método TDOA con respecto al método AOA tradicional | 3 |
| 4 Sistemas híbridos..... | 8 |
| 5 Resumen | 8 |
| 6 Referencias | 9 |
| Anexo 1 – Factores que afectan a la distancia de detección en RF y a la zona de cobertura de localización geográfica para las estaciones de comprobación técnica | 10 |
| Anexo 2 – Estudio de simulación de la precisión en la localización geográfica y de la zona de cobertura para las estaciones de comprobación técnica AOA/TDOA híbridas..... | 25 |
| Anexo 3 – Estudio sobre la utilización de un sistema TDOA con un sistema AOA ya existente..... | 35 |

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.

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.

¹ La potencia de llegada (POA) utiliza la relación de potencia medida de una señal en múltiples puntos de medición para calcular el punto de origen. Esa POA 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.

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 § 6.)

CUADRO 3-1

Ventajas del método TDOA

| | |
|---|---|
| Requisitos de antena más sencillos | <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> |
| Requisitos de ubicación y de calibración más sencillos | <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.⁴ 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 reemanación 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> |

CUADRO 3-1 (continuación)

| | |
|--|---|
| <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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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> |
| <p>Complejidad del sistema</p> | <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 interceptación 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> |
| <p>Rechazo del ruido y la interferencia sin correlación</p> | <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.</p> <p>En el punto 4.8.5.5 se presenta una aplicación conexas 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> |

CUADRO 3-1 (continuación)

| | |
|--|---|
| 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 POA 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> |
| 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> |

CUADRO 3-1 (*fin*)

| | |
|---|--|
| <p>Posibilidad de llevar a cabo un análisis completo fuera de línea en el servidor central</p> | <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

| | |
|--|--|
| <p>Señales de banda estrecha</p> | <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 S/N 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> |
| <p>Imposibilidad de utilizar el método de radiorrecalada o de marcación separada con una única estación</p> | <p>Los métodos de marcación separada y de radiorrecalada 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 radiorrecalada 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> |

CUADRO 3-2 (continuación)

| | |
|---|--|
| 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> |
| 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. 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 en el mejor de los casos del orden de hasta 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> |

CUADRO 3-2 (*fin*)

| | |
|--|--|
| No está adaptado para la localización geográfica coincidente de muchos emisores | 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. 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. |
| No permite la localización mediante una sola estación (SSL) | 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. El sistema AOA puede utilizarse para localización mediante una sola estación. |
| Consideraciones geométricas | La precisión de los sistemas TDOA y AOA es mayor (GDOP óptimo) cuando la fuente de la señal se encuentra en el interior de un perímetro que abarca un grupo de sensores interactivos y/o estaciones de radiogoniometría. En las inmediaciones de este perímetro la precisión y la eficacia de la localización disminuyen más rápidamente para la TDOA que para el AOA (véase el Anexo 1 y [8]). Cuando la fuente está muy lejos de este perímetro, la TDOA puede aproximarse mediante una línea de posición similar a la línea de marcación del sistema AOA (véase el Anexo 1 y [8]). El método AOA lleva a cabo la localización geográfica (es decir, indica la intersección de dos líneas de marcación) dentro de superficies donde se solapan las zonas de cobertura de dos estaciones de radiogoniometría. En el Anexo 1 aparece información relativa a la distancia de detección en RF y a la zona de cobertura de la localización geográfica de redes TDOA y AOA. Véase el Anexo 1. |
| Análisis fuera de línea con mediciones de una sola estación | 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. |

⁽¹⁾ Para las operaciones de radiorrecalada y marcación separada con una única estación portátil puede optarse por trabajar con la POA.

4 Sistemas híbridos

El método TDOA puede combinarse con una o más tecnologías de localización geográfica adicionales para producir lo que se denomina un sistema híbrido. Las tecnologías TDOA y AOA pueden combinarse en una o más estaciones dando lugar a sistemas AOA/TDOA híbridos. La TDOA también puede combinarse con otras tecnologías de localización geográfica tales como la técnica de relación de amplitudes de POA, dando lugar a un sistema TDOA/POA híbrido.

Los sistemas AOA/TDOA híbridos consisten en un mínimo de dos emplazamientos, uno de los cuales al menos tiene capacidad de medición del AOA y de la TDOA y los restantes tienen capacidad de medición de la TDOA. Los dos sensores TDOA producen una línea hiperbólica que representa los valores de diferencia de tiempo descritos en el Manual de la UIT sobre Comprobación Técnica del Espectro, Edición 2011, punto 4.7.3.2. El sistema AOA produce una línea de marcación cuya intersección con la línea hiperbólica de la TDOA identifica el emplazamiento del emisor. Estos sistemas se discuten con más detalle en el Anexo 2 y Anexo 3.

5 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, aprovechando las ventajas de cada una de ellas. Las estaciones TDOA móviles son eficaces sólo en caso de utilización híbrida con el AOA.

6 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, págs. 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*. págs. 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.
- [8] KOZMIN, Vladimir A., PAVLYUK, Alexander P. y TOKAREV, Anton B. [2014] Comparison of spectrum monitoring coverage features of AOA and TDOA geolocation methods – *Electrosviaz*, No. 2, 2014 (la traducción al inglés aparece en: <http://www.ircos.ru/en/articles.html>).

Anexo 1

Factores que afectan a la distancia de detección en RF y a la zona de cobertura de localización geográfica para las estaciones de comprobación técnica

1 Introducción

Hay varias consideraciones relativas a la instalación de las estaciones de comprobación técnica que afectan a su distancia de detección en RF y en su zona de cobertura de localización geográfica. La eficacia global de cualquier estación de comprobación técnica, independientemente de sus características de funcionamiento, se verá influenciada por las ventajas o inconvenientes que ofrecen la selección de los equipos, la instalación y el emplazamiento.

En las instalaciones en el mundo real, probablemente los sistemas de comprobación técnica del espectro incluirán estaciones AOA y TDOA desplegadas en combinaciones de plataformas fijas y móviles. En la selección de la tecnología de localización geográfica utilizada para un emplazamiento de comprobación técnica debe hacerse un cierto número de consideraciones y normalmente se basará en:

- El acceso del emplazamiento a la energía eléctrica y la red.
- La proximidad a señales de energía, tanto deseadas como no deseadas. La ubicación de emplazamientos de comprobación técnica en las proximidades de servicios inalámbricos o equipos eléctricos industriales es necesaria en muchas áreas metropolitanas.
- El terreno y la línea de visibilidad entre el emplazamiento y la zona que va a supervisarse.
- La densidad de emisores y el carácter del tráfico espectral.
- La importancia de la base de usuarios en la zona que va a supervisarse (es decir, infraestructura crítica o instalaciones del gobierno, etc.).
- La duración de la actividad de comprobación técnica. Algunos productos de comprobación técnica están bien adaptados a actividades de comprobación técnica de corta duración (menos de 12 horas) debido al pequeño tamaño, el funcionamiento con baterías y la facilidad de montaje y desmontaje.
- Los factores de instalación en el emplazamiento, incluidos el tamaño de los equipos, la disponibilidad y utilización de la energía eléctrica, la conectividad de la red, el arrendamiento del emplazamiento y la calibración y mantenimiento de los equipos.

Además, un sistema de comprobación técnica del espectro puede incorporar tecnología antigua y moderna (por ejemplo, aumento de las estaciones existentes con equipos más modernos), así como la condición y función de los equipos de comprobación técnica existentes. La selección de una sola tecnología para abordar todos los casos posibles no es realista. Cada tecnología de localización geográfica tiene aspectos que funcionan bien en ciertos casos pero no en otros.

Las simulaciones con un conjunto específico de condiciones se utilizan aquí para ilustrar la repercusión que tiene la elección de diseño y las características del emisor en la distancia de detección en RF y en la zona de cobertura de la localización geográfica. Las siguientes simulaciones se basan en modelos de propagación normalizados de la industria elaborados entre 2004 y 2007². No tienen en cuenta los datos del terreno en 3D reales y, por consiguiente, la cobertura en RF se

² Modelos desarrollados en el consorcio Wireless World Initiative New Radio (WINNER I and II) coordinados por Nokia Siemens Networks.

modela uniformemente desde cada emplazamiento de comprobación técnica, lo que ofrece la posibilidad de observar las distintas repercusiones de la anchura de banda del emisor, la potencia y la altura de la antena en condiciones ideales. Las simulaciones hacen uso de una herramienta informática que se emplea de forma rutinaria para responder a la cuestión: «¿Cuántas estaciones de comprobación técnica serán necesarias, aproximadamente, para cubrir una determinada zona de interés?»

2 Consideraciones generales

Es importante en primer lugar definir la distancia de detección en RF y la zona de cobertura de la localización geográfica:

- La distancia de detección en RF se define como la mayor distancia (en km) desde la estación de comprobación técnica a la que puede detectarse un emisor con relación señal/ruido positiva. La distancia de detección puede ser diferente en direcciones distintas dependiendo del tipo de terreno, de las características de los edificios y de otros factores.
- La zona de cobertura de la localización geográfica se define como la zona geográfica sobre la que puede localizarse razonablemente un emisor utilizando los métodos disponibles (es decir, AOA, TDOA, híbrido y POA).

Es importante observar la diferencia entre la distancia de detección en RF, que requiere una relación S/N positiva en la estación de comprobación técnica, y la zona de cobertura de la localización geográfica, que no exige un valor positivo de S/N en cada estación de comprobación técnica. Los métodos de localización geográfica TDOA, que realizan una correlación entre la señal recibida en diferentes emplazamientos, permite localizar emisores con señales por debajo del umbral de ruido. La potencia de ruido recibida en los emplazamientos no está correlada. En el Manual de la UIT sobre Comprobación Técnica del Espectro, puntos 4.7.3.2.2 y 4.7.3.2.3, aparece información más detallada sobre el funcionamiento de los métodos de localización geográfica TDOA.

La zona de cobertura de la localización geográfica para grupos de estaciones de radiogoniometría fijas AOA y sensores TDOA puede analizarse considerando las redes de comprobación técnica AOA y TDOA que constan de hasta tres estaciones interactivas ya que dan lugar a áreas en las que las zonas de cobertura de tres y dos estaciones se solapan así como a áreas cubiertas por una sola estación.

Consideraremos la cobertura de localización geográfica para tres sensores fijos, identificados en la Fig. 1 como S1 a S3 y tres estaciones de radiogoniometría fijas, identificadas en la Fig. 2 como DF1 a DF3, con la misma geometría pero funcionando en redes TDOA y AOA respectivamente. También se supone que las redes van equipadas con estaciones de comprobación técnica móviles, identificadas en las Figs. 1 y 2 como MS, que utilizan equipos con la misma tecnología que los sensores fijos y las estaciones de radiogoniometría. Utilizando diferentes contornos coloreados se representan en las Figs. 1 y 2 las diversas distancias de detección en RF de cada estación fija. Aparece en amarillo la zona de detección en RF común a todas las estaciones fijas dentro de la cual la fuente de emisión (denominada en lo que sigue «transmisor») tiene una relación S/N positiva. Como los sensores TDOA utilizan correlación cruzada síncrona en el tiempo, la correspondiente zona de cobertura de la localización geográfica de la red de sensores S1 a S3 en la Fig. 1 es mayor que la de las estaciones de radiogoniometría DF1 a DF3 de la Fig. 2.

Cabe señalar que la distancia de detección en RF y las zonas de cobertura de la localización geográfica en ambas Figuras se construyen teóricamente basándose en un cierto transmisor de prueba con potencia y una altura de antena específicas. Si estos parámetros se modifican, ello alterará inevitablemente los contornos de las zonas de cobertura en cierto grado, lo que se describe con más detalle en el § 3.

En una red TDOA, las coordenadas del transmisor se determinan basándose en la zona de intersección de las tres líneas de posición, como muestra la Fig. 1 en relación con el transmisor T1, donde se intersectan las líneas de posición 1-2, 3-1 y 3-2. En una red AOA la localización geográfica utilizando sólo estaciones de radiogoniometría fijas se lleva a cabo por las tres estaciones de radiogoniometría, como muestra la Fig. 2 (las líneas de marcación 1 y 3 localizan de manera efectiva el transmisor T1). La red AOA también es eficaz en zonas cubiertas por sólo dos estaciones de radiogoniometría, como muestra la misma Figura en relación con el transmisor T2 (líneas de marcación 4 y 5).

FIGURA 1

Zona de cobertura de la localización geográfica en una red TDOA

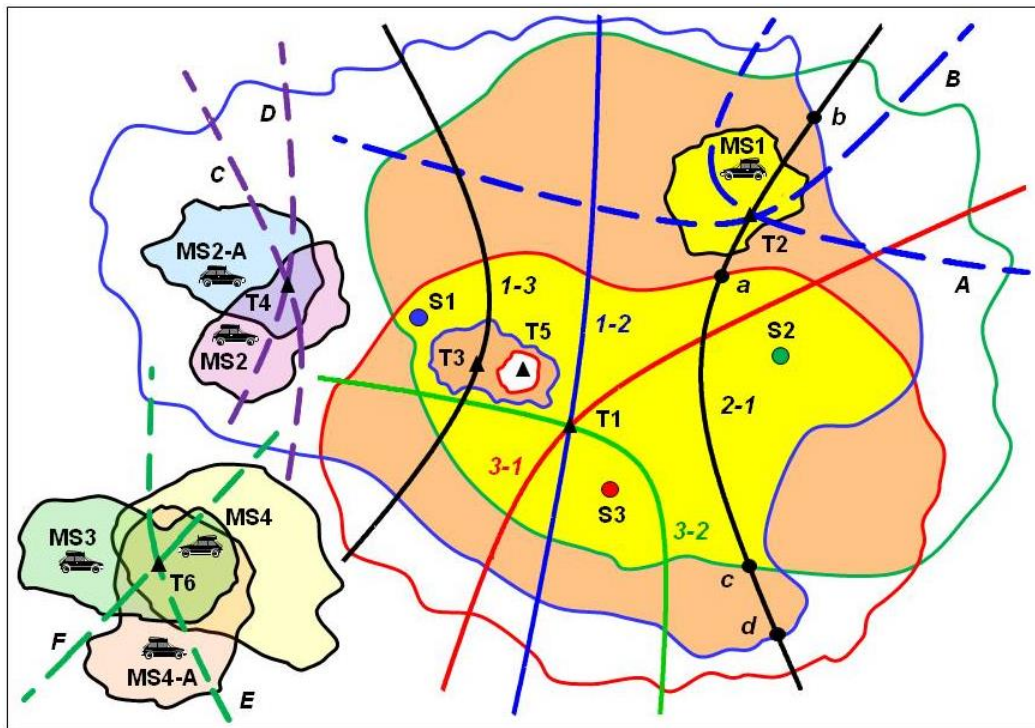
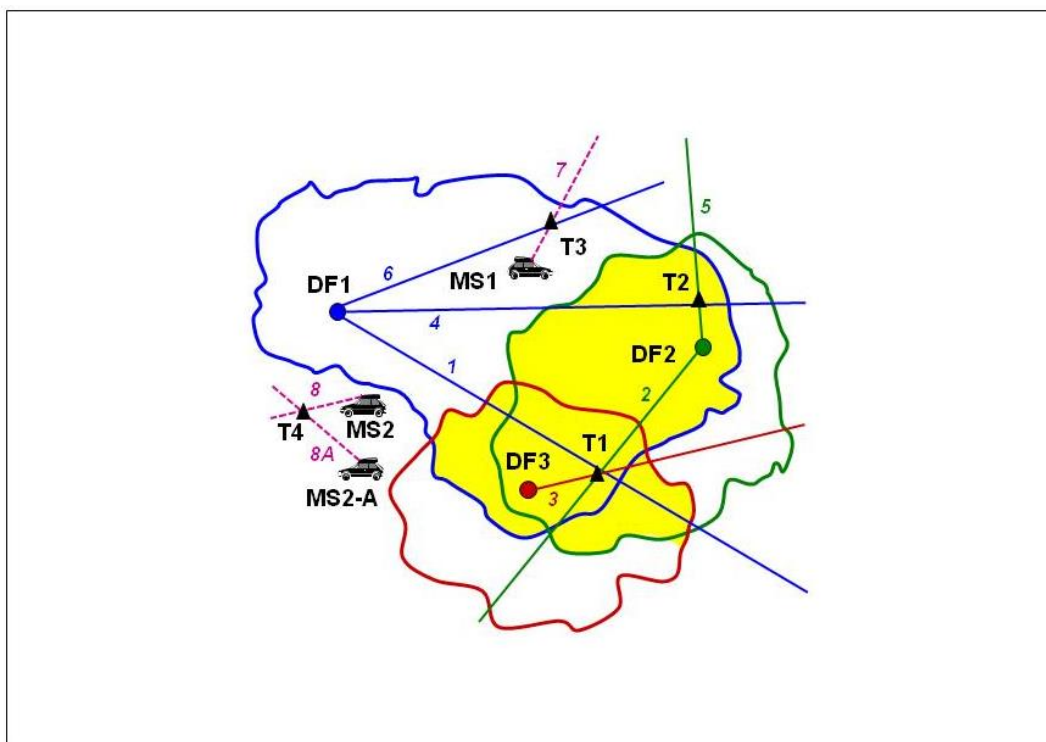


FIGURA 2

Zona de cobertura de la localización geográfica en una red AOA



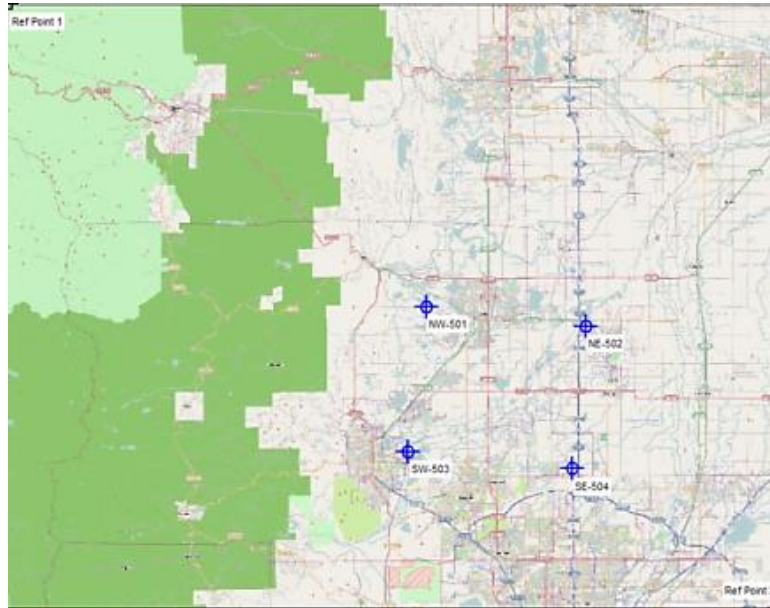
Si en una red TDOA el transmisor de interés se encuentra situado en una de las zonas fuera de los límites del sensor (color marrón en la Fig. 1) el sistema sólo puede producir una línea de posición, representada por la línea 2-1 en relación con el transmisor T2 o una línea de marcación al transmisor. En este caso, las coordenadas del transmisor deben determinarse con la ayuda de una estación móvil (MS1 en la Fig. 1), interactuando con los dos sensores fijos. Esto se representa en la Fig. 1 por la intersección de la línea de posición 2-1 con otras dos líneas establecidas por esta estación móvil (líneas de posición A y B representadas como líneas de puntos para indicar su variabilidad a medida que la estación se desplaza).

El transmisor de interés debe encontrarse dentro de la distancia de detección en RF de una de las estaciones TDOA si es intermitente (requiriendo así una medición activada). Si el transmisor es persistente, puede que no necesite encontrarse dentro de la distancia de detección en RF de ninguno de los sensores TDOA, pero sí en el interior de la zona de localización geográfica para poder realizar una estimación del emplazamiento. La localización exacta puede determinarse con la ayuda de estaciones móviles pero puede llevar mucho tiempo en algunos casos. A menudo las estaciones móviles tienen una distancia de detección en RF limitada debido a la pequeña altura de las antenas. Sin embargo, existen técnicas para elevar la antena de una estación móvil utilizando estructuras públicamente disponibles tales como aparcamientos o terrenos elevados.

En [8] se discuten otros casos de cobertura TDOA y AOA deducidos de las Figs. 1 y 2, y se presentan ejemplos de interacción entre estaciones fijas y móviles.

3 Simulación de factores que afectan a la distancia de detección en RF en las estaciones de comprobación técnica TDOA y AOA

FIGURA 3
Zona de simulación en Boulder, Colorado (EE.UU.)



En los ejemplos de este punto se utiliza una región situada en el Estado de Colorado de EE.UU., como muestra la Fig. 3. Cuatro estaciones (NW-501, NE-502, SW-503 y SE-504) están separadas aproximadamente 18 km. Las simulaciones ilustrarán la distancia de detección en RF para estaciones AOA y TDOA tradicionales que funcionan de manera autónoma. A efectos de esta simulación, la distancia de detección se define como la mayor distancia (en km) a la que una estación de comprobación técnica puede detectar un emisor con una relación S/N positiva.

Las simulaciones muestran en color la probabilidad de detección (rojo: probabilidad alta, azul: probabilidad baja). Este punto destaca los factores que pueden repercutir en la distancia de dirección en RF. Algunos de ellos se encuentran bajo control del operador tales como:

- La altura y la ganancia de la antena de la estación de comprobación técnica.
- El tipo y la longitud del cable de la línea de alimentación en RF, el acondicionamiento de la señal tal como la atenuación, los filtros, etc.
- El entorno de ruido de RF local de la estación.
- Los alrededores físicos (incluidos los terrenos próximos).

A su vez, algunos factores puede que no tengan relación con la estación de comprobación técnica sino que dependen estrictamente de las características del emisor:

- Frecuencia portadora.
- Potencia de salida.
- Anchura de banda de la señal.
- Elevación de la antena del emisor.

La herramienta de simulación utilizada en este informe permite al usuario modificar alguno de estos factores, o todos, a fin de determinar su influencia sobre la distancia de detección en RF y la zona de cobertura de la localización geográfica (para mediciones de localización geográfica TDOA con correlación cruzada). Para mayor sencillez se utiliza aquí un modelo de terreno rural con visibilidad

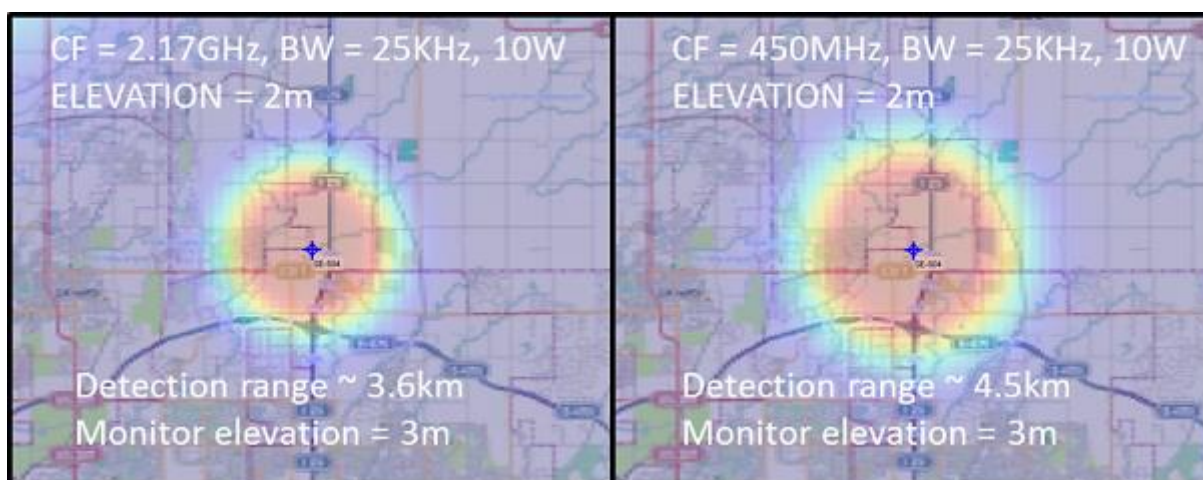
directa. La herramienta de simulación cuenta con otros modelos de terreno para casos urbanos, suburbanos, en interiores y en interiores/exteriores. También se incluyen modelos de propagación con visibilidad directa y sin visibilidad directa.

3(a) Efectos de la frecuencia portadora del emisor

En la Fig. 4, SE-504 se muestra en una extensión de terreno que mide 17,2 km de norte a sur y 21,8 km de este a oeste (este gráfico del terreno se utilizará en todas las simulaciones de este punto referentes a la distancia de detección en RF). Se supone que esta estación funciona con un umbral de ruido de -150 dBm/Hz, una ganancia de antena de 0 dB, una altura de antena de 3 m con un cable LMR-400 RF de 2 m que conecta la antena de recepción a un sensor de RF. Para la simulación de la izquierda, la frecuencia portadora del emisor es 2,17 GHz, la anchura de banda de la señal es 25 kHz, la potencia de salida es 10 W y la elevación de la antena es de 2 m. La simulación de la derecha muestra el efecto que produce la reducción de la frecuencia portadora del emisor a 450 MHz sobre la distancia de detección en RF³.

FIGURA 4

Modelo de propagación rural con visibilidad directa; el emisor y la estación de comprobación técnica se encuentran casi a nivel de suelo



Están empezando a emplearse bandas de frecuencia más elevadas (por encima de los 3 GHz) para la telefonía celular y otros servicios con licencia. La comprobación técnica de estos servicios desde emplazamientos fijos será cada vez más difícil debido al número de emplazamientos de comprobación técnica necesarios para proporcionar la debida cobertura. Por esa razón, serán cada vez más importantes las tecnologías basadas en redes de estaciones de comprobación técnica fijas, móviles y reubicables.

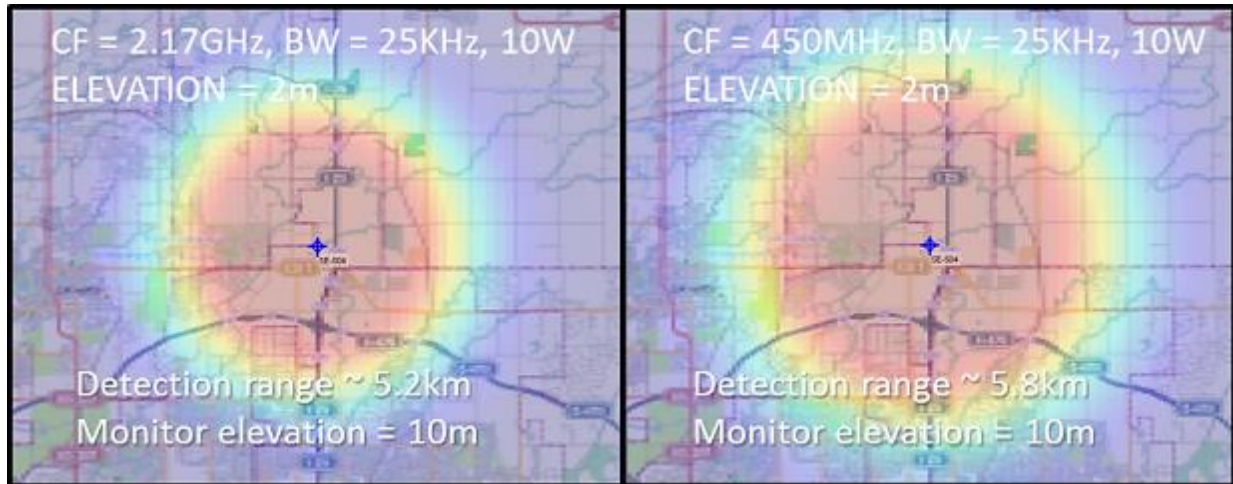
³ Las pérdidas de propagación son menores en frecuencias inferiores, lo que se traduce en una mayor distancia de detección en RF.

3(b) Efectos de la elevación de la antena de la estación de comprobación técnica

En la Fig. 5 la elevación de la estación de comprobación técnica se aumenta a 10 m y el resto de factores permanecen inalterables. Se produce un incremento significativo de la distancia de detección en RF esperada debido a que eso mayor la probabilidad de que la línea de visibilidad directa apunte a emisores. La elevación de la antena del emisor tiene un efecto similar.

FIGURA 5

Modelo de propagación rural con visibilidad directa; el emisor está así en el suelo y la estación de comprobación técnica está elevada

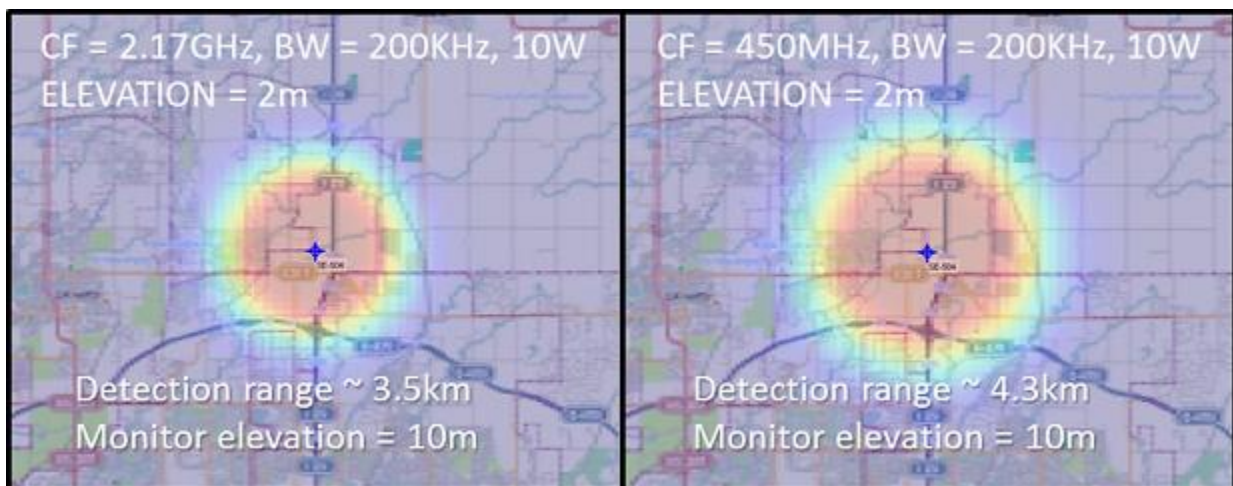


3(c) Efectos de la anchura de banda de la señal

En la Fig. 6 todos los elementos permanecen idénticos a los de la Fig. 5, pero la anchura de banda de la señal pasa de 25 kHz a 200 kHz. Obsérvese cómo la distancia de detección disminuye a causa de la menor densidad espectral de potencia.

FIGURA 6

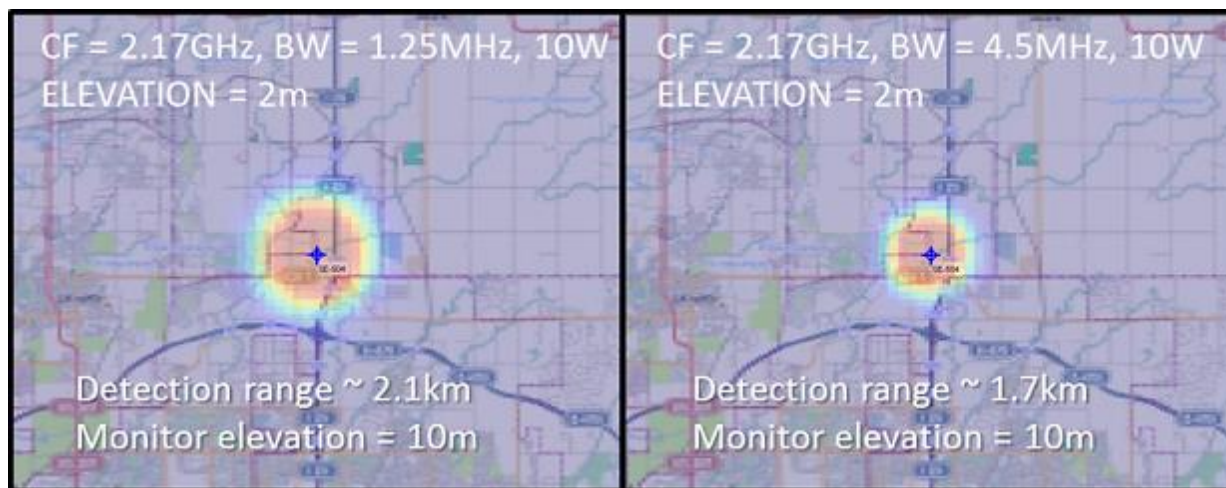
Igual que la Fig. 5 salvo que la anchura de banda de la señal pasa de 25 kHz a 200 kHz



La Fig. 7 muestra los resultados de simulaciones basados en el ejemplo de 2,17 GHz y en el aumento de la anchura de banda de la señal a 1,25 MHz y 4,5 MHz, respectivamente. El resto de variables son las mismas que las de la Fig. 5 (izquierda). Es muy evidente la repercusión de la anchura de banda de la señal en la capacidad de un emisor de propagar sus señales a una cierta distancia y la correspondiente reducción de la distancia de detección en RF de una estación de comprobación técnica.

FIGURA 7

La anchura de banda de la señal pasa de 1,25 MHz a 4,5 MHz; la potencia del emisor, la elevación y la frecuencia portadora permanecen inalterables

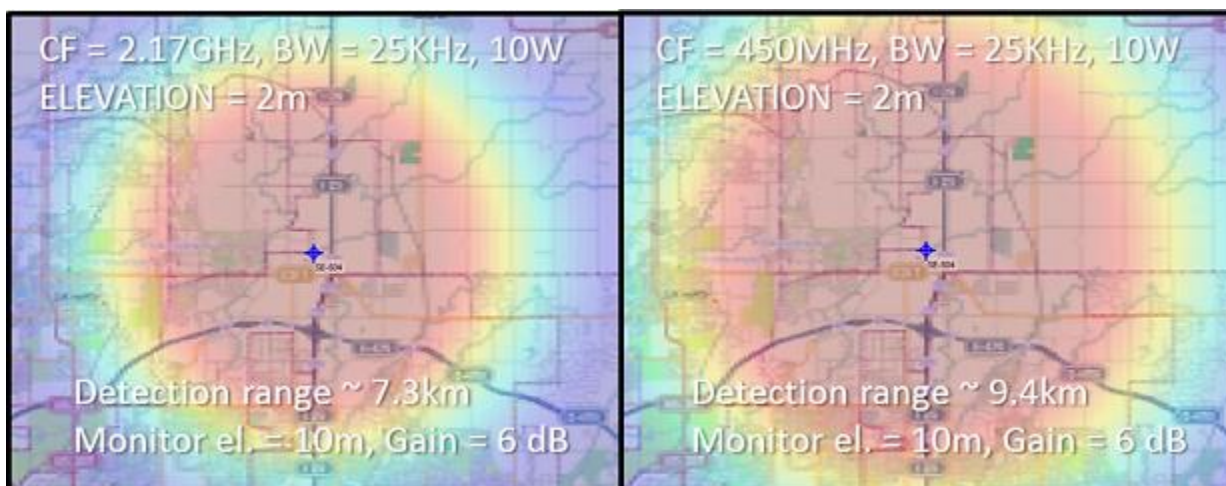


3(d) Efecto de la ganancia de antena

La Fig. 8 muestra los resultados de una simulación en la que se añadió 6 dB de ganancia de antena para ilustrar el uso de una antena direccional. La anchura de banda de la señal se redujo a 25 kHz. Estos resultados ofrecen una indicación de la distancia de cobertura esperada para algunas estaciones AOA tradicionales, que tienen ganancias asociadas a sus sistemas de antena o desde una estación TDOA equipada con una antena direccional. La escala del mapa es la misma en todas las simulaciones.

FIGURA 8

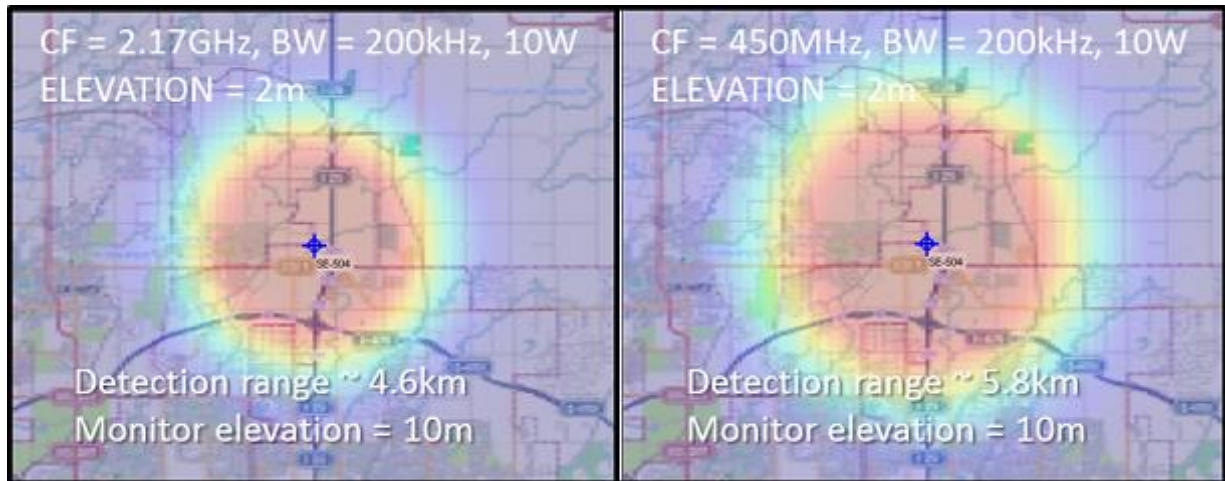
La ganancia de antena se aumenta 6 dB, la anchura de banda del emisor se reduce a 25 kHz y las frecuencias portadoras son 2,17 GHz y 450 MHz, respectivamente



La Fig. 9 muestra los resultados de la misma simulación que en la Fig. 8 salvo que la anchura de banda del emisor se aumentó a 200 kHz.

FIGURA 9

Igual que la Fig. 8 salvo que la anchura de banda de la señal se aumentó a 200 kHz

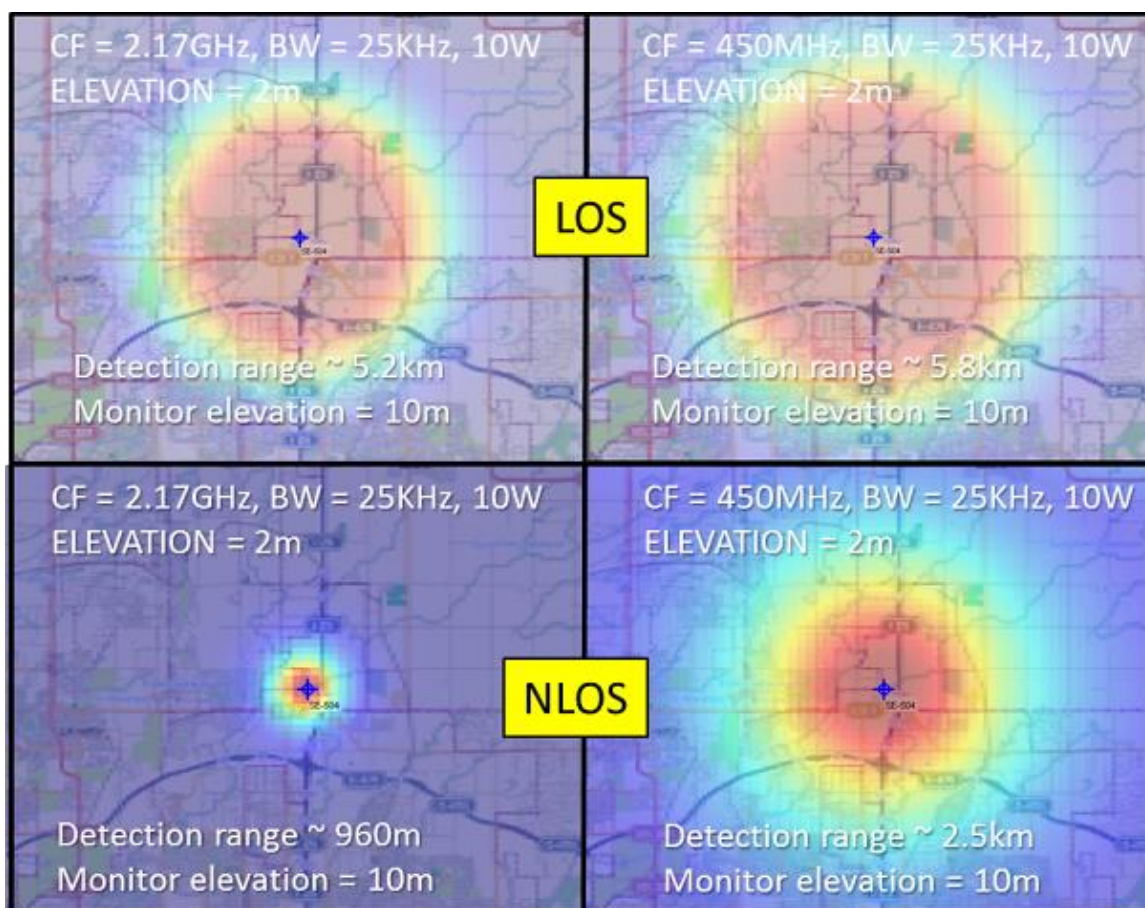


3(e) Efectos de terreno y de la visibilidad directa

Las Figs. 4 a 9 muestran los resultados de las simulaciones que pretenden ilustrar la influencia que tienen diferentes factores de diseño y características del emisor sobre la distancia de detección en RF de una sola estación de comprobación técnica que funciona de forma autónoma. En las simulaciones anteriores no se han tenido en cuenta los efectos de sombra de los edificios y el terreno. Para demostrar su repercusión en la distancia de detección, la Fig. 10 muestra una comparación entre los modelos de propagación rurales con visibilidad directa y sin visibilidad directa. Se repite aquí el mismo caso de la Fig. 5 en las simulaciones de la parte de arriba comparadas con el modelo de propagación sin visibilidad directa de la parte de abajo. Se muestra muy gráficamente los efectos que puede tener la visibilidad directa en la detección en RF. También sirve para destacar el importante papel de las estaciones móviles y no reubicables en los modernos sistemas de comprobación técnica del espectro. Deben considerarse estos factores cuando se seleccione el emplazamiento y se diseñe una estación de comprobación técnica utilizada para realizar mediciones destinadas a localizar un emisor.

FIGURA 10

Influencia sobre la distancia de detección en RF de la propagación con y sin visibilidad directa



4 Simulación de factores que afectan la zona de cobertura de la localización geográfica en estaciones de comprobación técnica TDOA y AOA

En este punto se traza una zona geográfica ampliada y se muestran cuatro estaciones de comprobación técnica. Las simulaciones de la izquierda señalan la distancia de detección en RF de las distintas estaciones de comprobación técnica que funcionan de manera independiente. Las simulaciones de la derecha indican la zona de cobertura de la localización geográfica para mediciones TDOA con correlación cruzada.

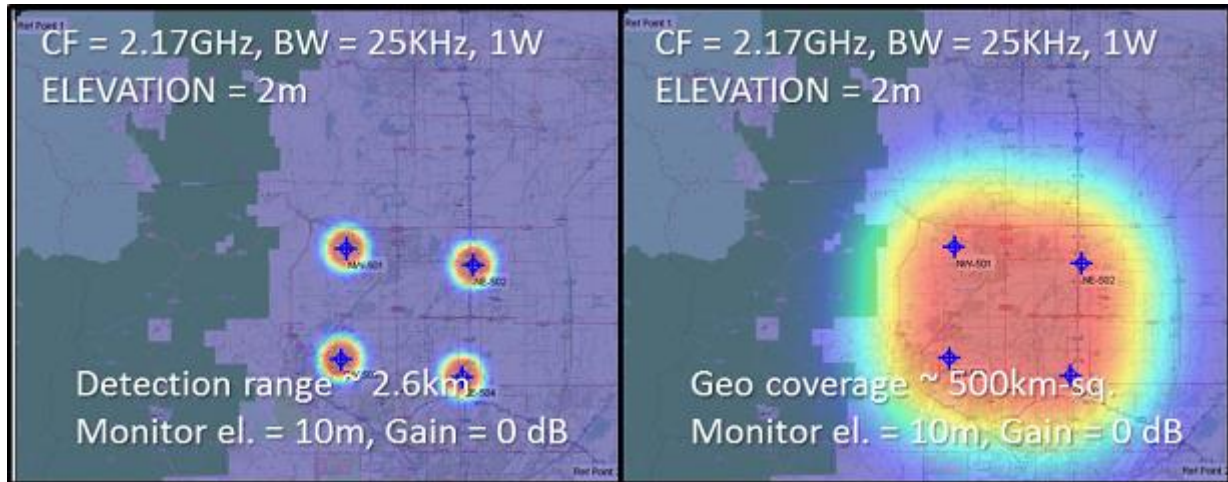
La zona de cobertura de la localización geográfica se define como la zona geográfica sobre la que puede localizarse razonablemente un emisor utilizando los modelos disponibles (es decir, AOA, TDOA, híbrido y POA). Es importante señalar la diferencia entre distancia de detección en RF, que requiere un valor positivo de la relación S/N en la estación de comprobación técnica, y cobertura de la localización geográfica, que no exige dicho valor positivo de la S/N en cada una de las estaciones de comprobación técnica.

La Fig. 11 muestra los resultados de una simulación en la que el emisor se fijó a 2,17 GHz pero el nivel de potencia se reduce a 1 W. Con el emisor situado a una altura de 2 m (y utilizando el modelo de propagación rural con visibilidad directa sin datos del terreno), la distancia de detección de la estación de comprobación técnica es de unos 2,6 km. Se trata de un valor muy optimista considerando que la señal, en la práctica, probablemente sufrirá apantallamiento por edificios o por el terreno. La zona de cobertura de la localización geográfica TDOA, mostrada a la derecha, se estima que es mucho mayor ya que utiliza mediciones con correlación cruzada con toda la red de

estaciones de comprobación técnicas⁴. La simulación supone correlación entre cuatro pares de estaciones de comprobación técnica.

FIGURA 11

Distancia de detección en RF de cuatro estaciones de comprobación técnica (izquierda) y zona de cobertura de la localización geográfica utilizando el método TDOA (derecha)

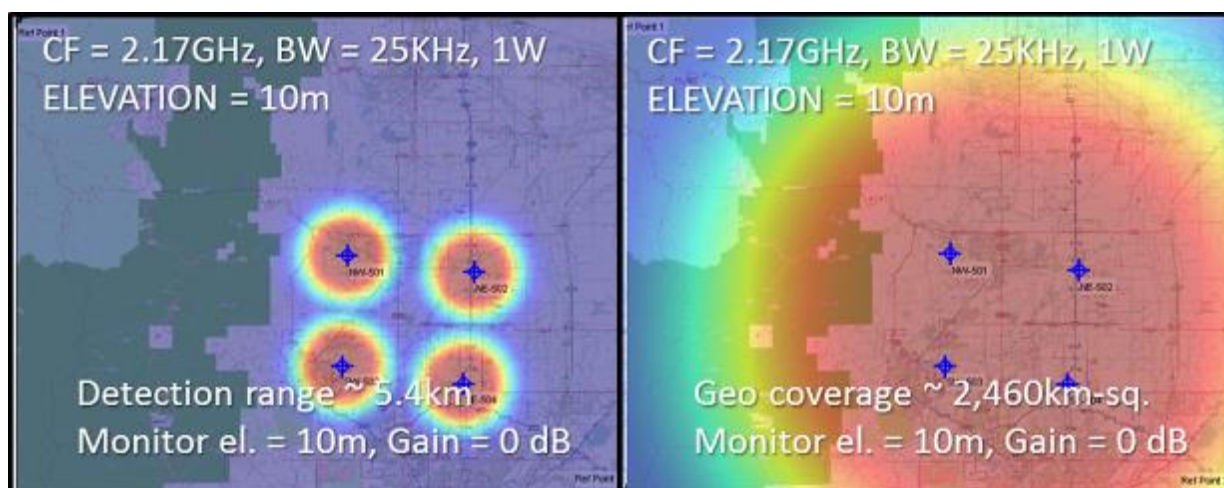


La Fig. 12 muestra los resultados de una simulación en la que se ha aumentado la elevación del emisor a 10 m. Puede observarse una distancia de detección en RF mejorada para los sistemas AOA y TDOA. La zona de cobertura de la localización geográfica TDOA (a la derecha) también se ha ampliado. Una importante consideración en esta simulación es la Pérdida de precisión de la posición geométrica (GDOP) asociada con la geometría de la estación relativa al emplazamiento del emisor. Se utiliza para indicar cómo afectarán los errores en los datos de medición a la estimación final del emplazamiento (se muestra gráficamente en el § 5, Fig. 14). La GDOP para las redes TDOA aumenta a medida que el emplazamiento del emisor se desplaza fuera de la zona limitada por las estaciones de comprobación técnica. Por tanto, cabe esperar que la precisión de la TDOA disminuya fuera de la red de sensores. Si bien la simulación muestra una amplia zona donde son posibles las mediciones de localización geográfica, no muestra el efecto de la GDOP sobre la precisión esperada.

⁴ En el caso de mediciones TDOA, la misma señal transmitida por dos sensores distintos sufre una correlación cruzada, lo que suprime las características del ruido independientes. En el límite teórico de tiempos elevados de correlación cruzada, el receptor y el ruido medioambiental no son un factor y el comportamiento de detección del sistema resulta menos limitado por el comportamiento individual del receptor, incluido el factor de ruido.

FIGURA 12

El mismo caso que la Fig. 11 salvo que el emisor se ha elevado a 10 m



Las ganancias de procesamiento logradas por algoritmos TDOA avanzados pueden proporcionar capacidades de localización del emisor en una zona más amplia que la distancia de detección en RF de las estaciones individuales.

5 Comparación entre mediciones de localización geográfica en RF simuladas y reales

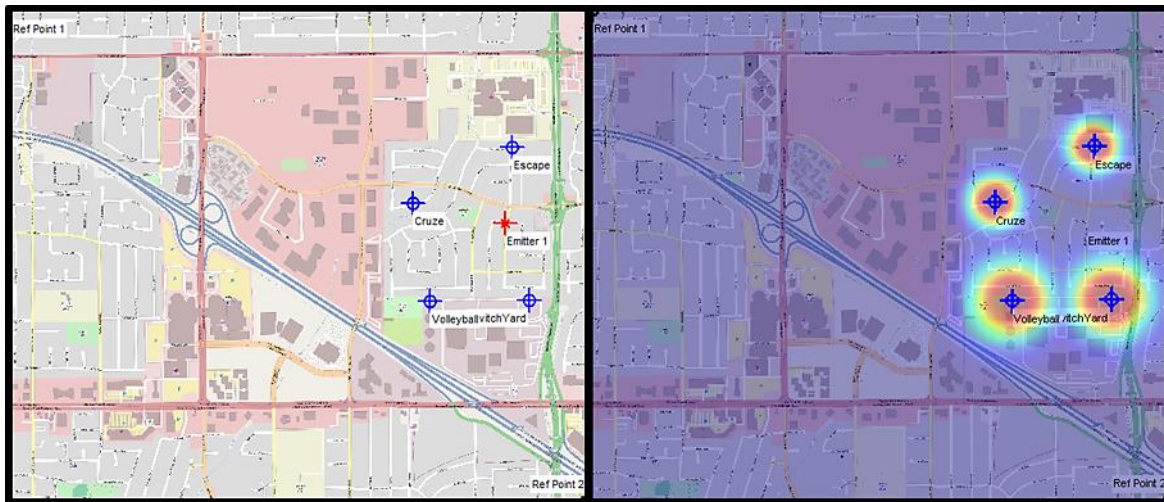
La prueba descrita a continuación se llevó a cabo con el objetivo específico de localizar emisores de baja potencia de la misma naturaleza que los teléfonos móviles. Por tanto, la separación entre estaciones de comprobación técnica fue inferior a 1 km. Si bien este caso no puede aplicarse directamente a las tareas típicas de regulación del espectro, sirve como un buen ejemplo de comparación entre mediciones simuladas y mediciones reales.

La zona donde se realizó la prueba es Santa Clara, California (EE.UU), y el terreno es típicamente suburbano con algunos alrededores industriales (edificios de oficinas de 5 ó 6 plantas, hospitales, aparcamientos, tiendas minoristas, etc.). En la simulación se utilizó un modelo «suburbano sin visibilidad directa» para el terreno. Las estaciones «Volleyball» y «SwitchYard» eran temporales, pero fijas, con elementos de antena omnidireccional y antena directiva de parche. Se encontraban en trípodes de 2,5 m y se alimentaban mediante pequeñas baterías de litio. Las estaciones «Escape» y «Cruze» eran móviles y estaban instaladas en vehículos con antenas magnéticas todas ellas alimentadas por batería. El transmisor se desplazó en torno a la zona limitada por las estaciones de comprobación técnica.

La Fig. 13 (izquierda) representa la disposición de las estaciones de comprobación técnica y un emplazamiento del emisor de prueba. En estos ejemplos, el emisor era un teléfono móvil transmitiendo desde un vehículo a un enlace ascendente UMTS con una potencia de 2 W y en 831 MHz (una anchura de banda de la señal de aproximadamente 4,5 MHz). La Figura de la derecha muestra la distancia de detección en RF esperada de las estaciones de comprobación técnica. Como puede verse, el emisor está fuera de la distancia de detección en RF de cada una de las estaciones suponiendo el modelo de terreno suburbano sin visibilidad directa.

FIGURA 13

Montaje para la localización de un emisor en Santa Clara y distancia de detección en RF esperada

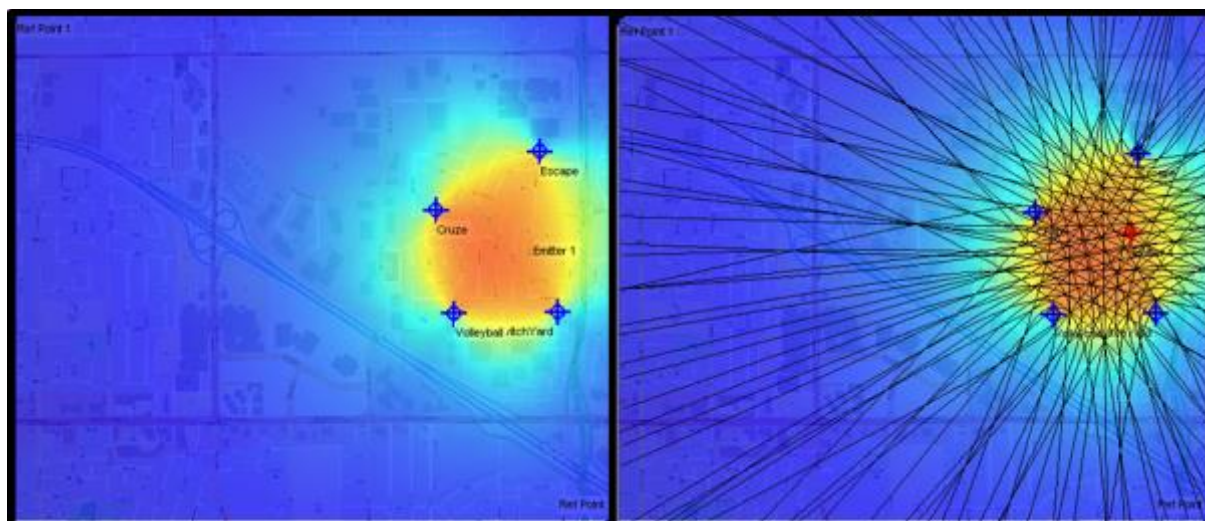


La distancia de detección de las dos estaciones de comprobación técnica situadas más al sur es mayor debido a las antenas directivas y con una elevación algo mayor que apuntan al norte. Todas las estaciones de comprobación técnica se conectaron mediante módems celulares a un servidor de localización geográfica con una dirección IP encaminable ubicado en un edificio de oficinas situado en Santa Clara. El control de la red de sensores se logró mediante un ordenador portátil desde el vehículo que llevaba al emisor.

La Fig. 14 (izquierda) muestra una representación estimada de la Pérdida de precisión de la posición geométrica (GDOP) para esta instalación de estaciones de comprobación técnica. Obsérvese cómo la GDOP baja (buena) se extiende fuera de los límites de la red en algunas direcciones pero no en todas. En la práctica, la capacidad de una red TDOA para determinar una línea de posición/dirección a un emisor puede extenderse fuera del perímetro de las estaciones de comprobación técnica⁵. La Figura de la derecha muestra las líneas hiperbólicas esperadas de la diferencia de tiempo constante entre pares de sensores. Cabe esperar que la precisión de la localización geográfica mejore en regiones de baja GDOP (en rojo) y que cruzan perpendicularmente las líneas hiperbólicas.

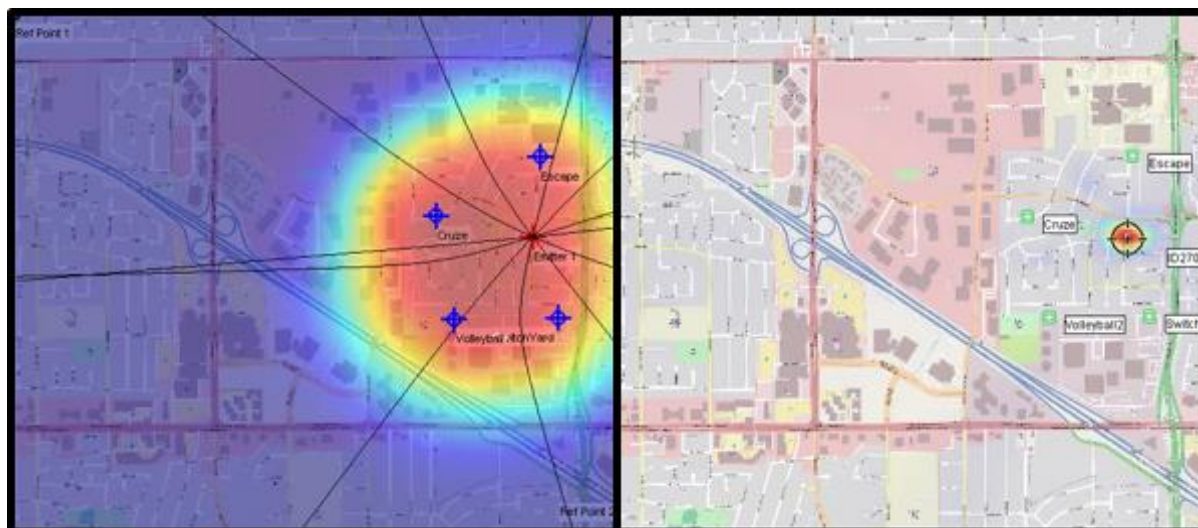
⁵ Una «línea de posición» producida por una agrupación de múltiples estaciones TDOA es análoga a una sola marcación AOA desde un emplazamiento AOA, pero no proporciona un resultado de localización geográfica. Sólo indica la dirección del emisor (cuando éste se encuentra fuera de la zona limitada por las estaciones TDOA).

FIGURA 14
GDOP del emplazamiento en Santa Clara y líneas hiperbólicas TDOA



La Fig. 15 (izquierda) muestra la zona de cobertura de la localización geográfica esperada (suponiendo correlación de hasta cuatro pares de sensores) y las líneas hiperbólicas al emplazamiento del emisor. La Figura de la derecha muestra una medición real del emplazamiento del emisor. Se realizaron varias mediciones en este emplazamiento con un error TDOA inferior a 50 m.

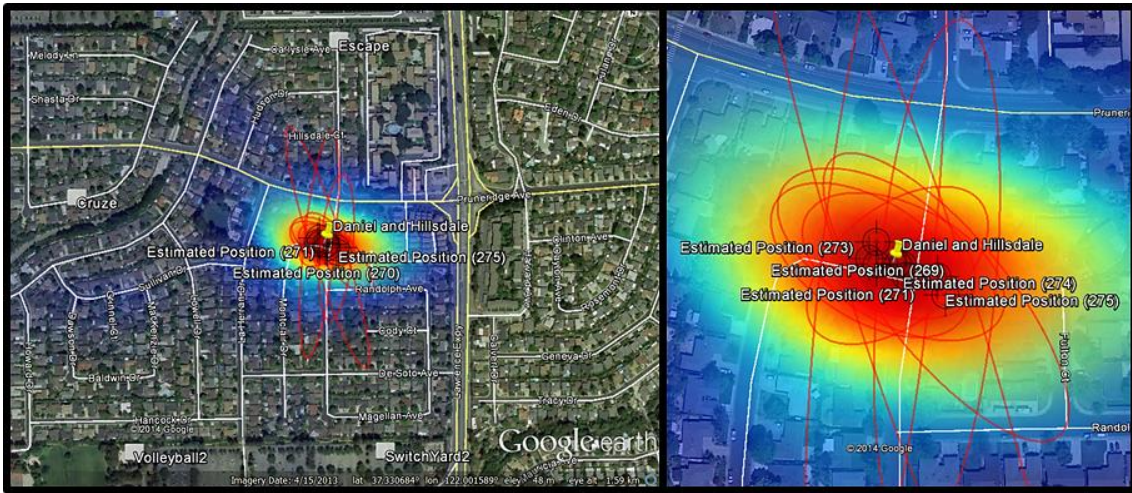
FIGURA 15
Estimación de la zona de cobertura geométrica y medición real del emplazamiento del emisor



La Fig. 16 muestra varios resultados de localización geográfica superpuestos a un mapa Google Earth® con los colores asociados de la probabilidad, la probabilidad de error elíptico (EEP) y la posición estimada del emisor (EP). El punto amarillo indica el emplazamiento real del emisor.

FIGURA 16

Superposición de las mediciones de localización geográfica sobre un mapa Google Earth. A la derecha aparece la zona ampliada

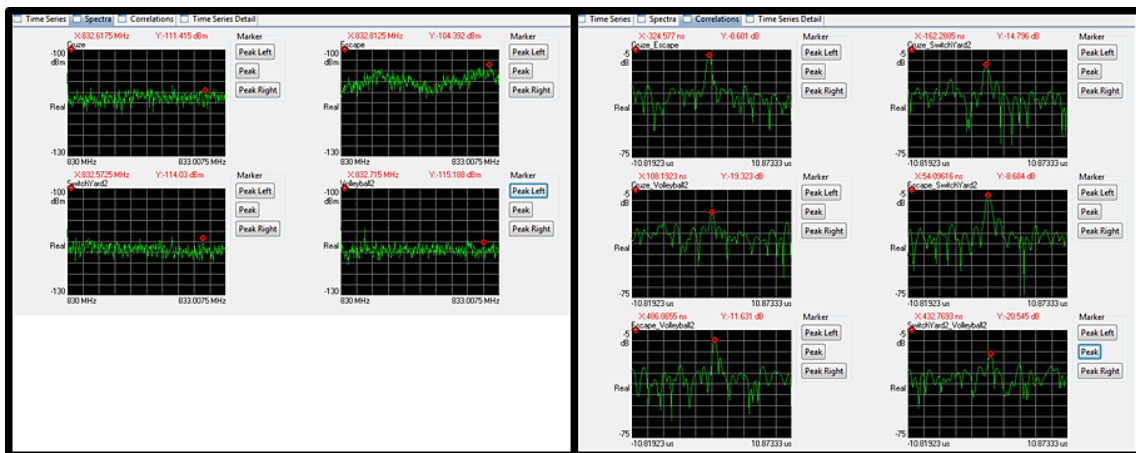


En este caso, los resultados de las simulaciones y de las mediciones coinciden.

La Fig. 17 (izquierda) muestra que el emisor sólo llegó a un emplazamiento de comprobación técnica con un valor de S/N positivo (escape). Sin embargo, la capacidad de localizar geográficamente el emisor con TDOA fue muy intensa como queda evidenciado por la buena correlación cruzada entre los pares de sensores (Fig. 17 (derecha)).

FIGURA 17

Gráficas espectral y de correlación típicas para el dispositivo UMTS medido en una prueba en funcionamiento real en 2013



El objeto de estas simulaciones y mediciones es ilustrar la diferencia entre la distancia de detección en RF y la zona de cobertura de la localización geográfica, y las condiciones que repercuten sobre ellas. La distancia de detección en RF está sujeta a muchos factores distintos y depende de las elecciones de diseño y de las restricciones del emplazamiento. En la zona de cobertura de la localización geográfica influyen las limitaciones impuestas por la distancia de detección en RF pero varía dependiendo del método de localización geográfica (es decir, AOA, TDOA, POA, etc.). Se trata de consideraciones importantes cuando se selecciona el método de localización geográfica y la localización de un emplazamiento de estación de comprobación técnica.

6 Conclusiones

Las redes TDOA pueden ser más eficaces para servir a grandes ciudades y centros industriales donde puede instalarse un gran número de sensores permitiendo la automatización de los procesos de comprobación técnica, incluida la función de localización geográfica del transmisor.

A su vez, a las ciudades relativamente pequeñas y sus suburbios circundantes, así como a los centros industriales aislados, se les puede dar servicio más eficazmente mediante un pequeño número de estaciones de radiogoniometría o estaciones AOA/TDOA híbridas separadas por distancias relativamente grandes. En este caso, el uso de sólo dos estaciones puede ser eficaz para llevar a cabo la localización geográfica de transmisores.

La detección de todas las actividades de las señales en toda una zona metropolitana no puede lograrse de manera realista con ninguna tecnología de localización geográfica o comprobación técnica fija. Los reguladores normalmente tienen prioridades de comprobación técnica en parte del espectro, en zonas específicas y durante instantes/eventos concretos importantes. En el actual entorno del espectro es vital la instalación de un sistema que satisfaga la mayoría de las necesidades y tenga la flexibilidad de reubicación y reconfiguración cuando sea necesario.

La instalación del tipo adecuado de estación de comprobación técnica basándose en las condiciones de la zona minimizará el número de estaciones y maximizará la cobertura y la eficacia. Por ejemplo, en zonas rurales abiertas sin grandes reflectores, las estaciones AOA y AOA/TDOA (híbridas) serán extremadamente eficaces. Sin embargo, en entornos urbanos densos o entornos combinados donde aparecen muchos reflectores cercanos en los edificios, puede ser más eficaz emplear una red TDOA con la capacidad de utilizar también algoritmos POA y de localización geográfica híbridos.

Anexo 2

Estudio de simulación de la precisión en la localización geográfica y de la zona de cobertura para las estaciones de comprobación técnica AOA/TDOA híbridas

1 Introducción

Este Anexo compara la precisión en la localización geográfica de las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica AOA/TDOA híbridas con los sistemas AOA y TDOA autónomos, basándose en los resultados obtenidos mediante simulaciones informáticas realistas.

El estudio hizo uso de simulaciones informáticas para modelar la precisión y la zona de cobertura obtenidas por estaciones de comprobación técnica radioeléctrica capaces de implementar técnicas AOA/TDOA híbridas. Comparadas con estaciones basadas en técnicas AOA solamente o en técnicas TDOA solamente, estas simulaciones indican que un sistema AOA/TDOA híbrido puede ofrecer cobertura a una zona de interés más amplia utilizando un menor número de estaciones, así como incrementar la precisión de la localización geográfica, en el interior y el exterior de la zona rodeada por las estaciones de comprobación técnica.

2 Métodos de localización geográfica

El procesamiento típico de la localización geográfica combina mediciones realizadas desde distintos emplazamientos para efectuar una estimación del emplazamiento del emisor. La calidad de la estimación del emplazamiento se especifica en términos de error de distancia (en metros). Valores más pequeños de este parámetro indican una mejor estimación de la localización.

A medida que aumenta la densidad de emisores, la capacidad que tiene un sistema de comprobación técnica del espectro/radiogoniometría de localizar geográficamente emisores *con precisión* pasa a ser una característica importante, especialmente cuando se abordan problemas de interferencia.

Existen muchos métodos distintos disponibles para procesar la localización geográfica. Aquí se discuten tres métodos de localización geográfica diferentes. El primero combina mediciones AOA procedentes de múltiples emplazamientos que utilizan sistemas de antenas de radiogoniometría para determinar el AOA. El segundo combina las mediciones TDOA procedentes de un mínimo de tres emplazamientos (se necesitan tres pares de mediciones TDOA para efectuar la localización geográfica). El tercero es un método híbrido que combina mediciones AOA y TDOA para realizar el procesamiento de la localización geográfica (se necesita un mínimo de dos emplazamientos, uno con capacidad de medición AOA y TDOA y otro con capacidad de medición TDOA). Para mayor sencillez estos tres métodos se denominan AOA, TDOA y AOA/TDOA híbrido.

Obsérvese que un emplazamiento de comprobación técnica capaz de realizar mediciones AOA se denomina emplazamiento AOA, un emplazamiento de comprobación técnica que realiza mediciones TDOA se denomina emplazamiento TDOA y un emplazamiento de comprobación técnica que puede realizar mediciones AOA y TDOA se denomina emplazamiento AOA/TDOA híbrido.

Las principales características de los tres métodos de localización geográfica aparecen en el Cuadro 1.

(En el Informe [UIT-R SM. 2211](#) figura una discusión más detallada de las ventajas y limitaciones de los sistemas TDOA).

CUADRO 1

| Características del sistema de localización geográfica | SÓLO AOA | SÓLO TDOA | AOA/TDOA híbrido |
|---|--|--|---|
| Mínimo número de emplazamientos necesarios para la localización geográfica | 2 estaciones | 3 estaciones | 2 estaciones AOA/TDOA híbrido. Una estación puede ser TDOA sólo. |
| Precisión de la localización geográfica | Disminuye linealmente a medida que aumenta la distancia a la estación de comprobación técnica. | Aproximadamente constante entre los emplazamientos TDOA. Se degrada rápidamente en la zona fuera de los emplazamientos TDOA. | La misma que TDOA en la zona entre los emplazamientos híbridos. Similar a AOA en la zona fuera de los emplazamientos. |
| La precisión disminuye al aumentar la distancia al emisor | Sí | Sólo en transmisores situados en la zona fuera de los emplazamientos TDOA. | Sólo en transmisores situados lejos de los emplazamientos híbridos. |
| Independiente de la modulación de la señal | Sí | TDOA no funciona con señales sin modular. Dificultades con las señales de banda estrecha. | Sí, si hay al menos dos emplazamientos híbridos. |

CUADRO 1 (*fin*)

| Características del sistema de localización geográfica | SÓLO AOA | SÓLO TDOA | AOA/TDOA híbrido |
|---|---|--|--|
| Requisito de comunicación de datos | Bajo, 10-30 kbit/s | Medio a alto, 120 kbit/s – 2 Mbit/s | Tan bajo como en AOA si sólo se utiliza AOA o ligeramente superior que TDOA si se utilizan simultáneamente AOA y TDOA. |
| Restricciones del emplazamiento (Véase el § 3) | Las antenas de mayor tamaño pueden ser difíciles de montar, limitando posiblemente la disponibilidad de emplazamientos. | Omnidireccional sencilla, más fácil de montar. | Las mismas que AOA para emplazamientos híbridos. |
| Complejidad de la antena | Antena multielementos | Antena sencilla | Antena multielementos y/o de un solo elemento. |
| Requisitos de calibración | A veces (depende del sistema AOA) ⁶ . | No | A veces (depende del sistema AOA). |

Como puede observarse en el Cuadro cada método tiene sus ventajas e inconvenientes. En una aplicación específica (urbana/suburbana, permanente/temporal, terreno llano/montañoso, etc.) los requisitos de instalación determinarán la configuración óptima.

3 Simulación de la precisión de la localización geográfica utilizando un ejemplo específico

Se llevó a cabo una simulación informática detallada de la precisión de la localización geográfica en el interior y en torno a la ciudad de Belo Horizonte en Brasil. Se simularon distintos sistemas de comprobación técnica del espectro, incluidos AOA, TDOA y AOA/TDOA híbrido y los resultados se compararon en cuanto a la precisión de localización geográfica esperada.

La simulación se llevó a cabo utilizando una herramienta informática que combina el cálculo de la localización geográfica con la posibilidad de escuchar la señal objetivo en las diferentes estaciones consideradas, basándose en la potencia del transmisor y en los efectos de propagación de la señal utilizando un terreno en 3D. La simulación incluyó suposiciones concretas sobre el número de emplazamientos, la altura de la antena de recepción y otros parámetros indicados en el Cuadro 2.

⁶ Algunos sistemas AOA se autocalibran y no requieren más ajustes de calibración a menos que se introduzcan cambios.

CUADRO 2

Parámetros utilizados en la simulación informática

| | |
|--|--|
| Frecuencia central | 450 MHz |
| Anchura de banda de la señal | 25 kHz |
| Potencia de salida del transmisor | 10 W o 1 W (p.r.a.) (véase el texto) |
| Altura de la antena de transmisión | 10 m (sobre el terreno medio) |
| Altura de la antena de recepción | 30 m (sobre el terreno medio) |
| Ganancia de la antena de recepción | 0 dB |
| Factor de ruido del receptor | 12 dB |
| S/N recibida en el receptor | +10 dB |
| Mínimo número de estaciones que reciben un valor de S/N especificado | 2 estaciones para AOA e híbrido, 3 estaciones para TDOA |

NOTA – A menos que se indique otra cosa en el Cuadro, se utilizaron los mismos parámetros en todas las técnicas de localización geográfica: AOA, TDOA e híbrida.

La precisión de la localización geográfica se evaluó basándose en el error de distancia.

4 Herramienta de análisis de software especializada

En este ejemplo, la herramienta completa de software incluye las siguientes simulaciones:

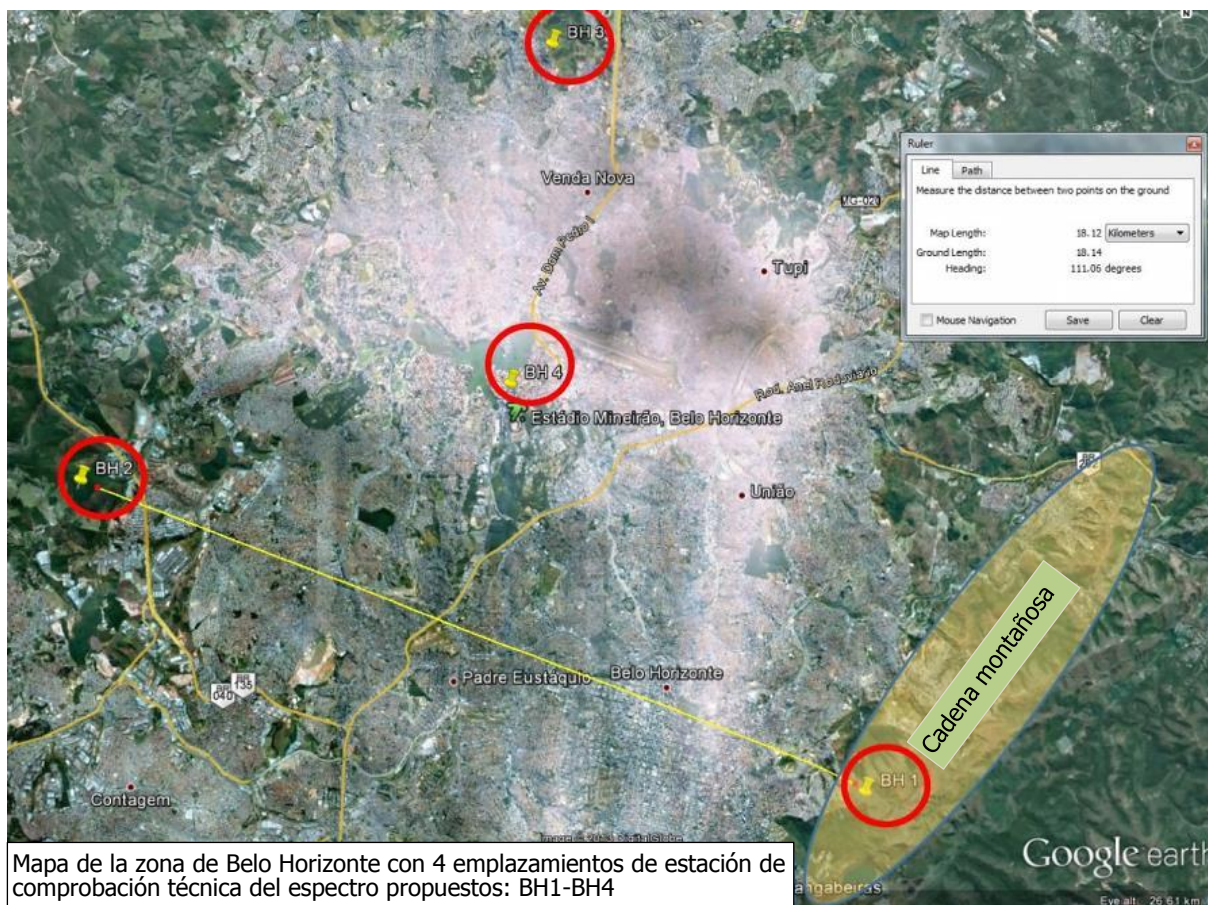
Cobertura – El análisis de la cobertura muestra el número de emplazamientos que pueden recibir («escuchar») al emisor transmitiendo desde un lugar concreto con diferentes niveles de potencia.

Precisión de la localización geográfica – El análisis de la precisión en la localización geográfica AOA, TDOA y AOA/TDOA híbrida muestra el comportamiento de los diferentes métodos de localización.

Optimización de la configuración del sistema – Este análisis muestra el número de emplazamientos necesarios para distintos métodos de localización geográfica a fin de lograr una precisión en la localización geográfica comparable.

4(a) Ejemplo de localización geográfica

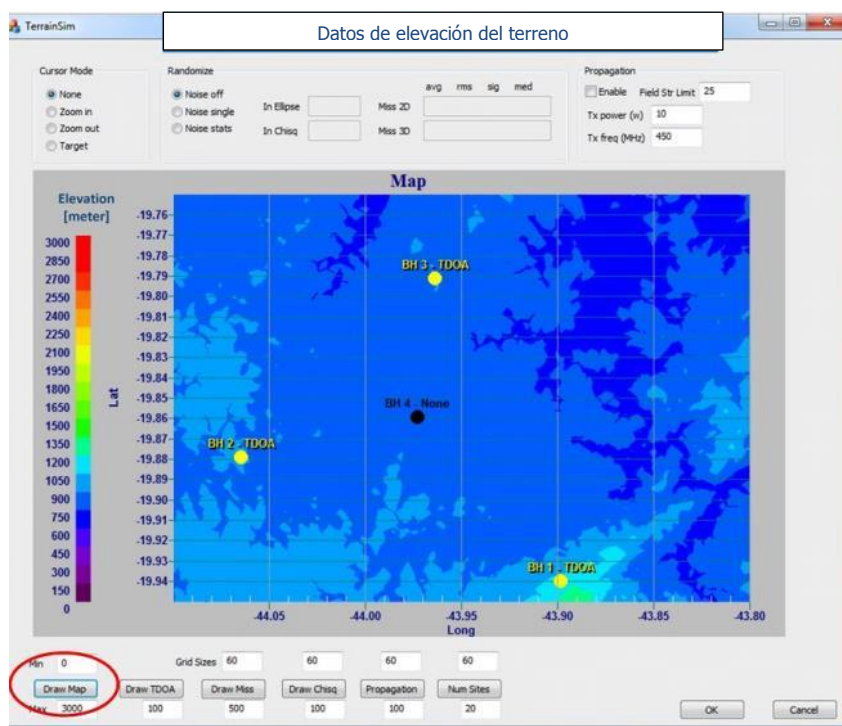
La Figura que aparece a continuación muestra la localización de los cuatro emplazamientos seleccionados para análisis e identificados como BH1, BH2, BH3 y BH4 en el interior y en los alrededores de Belo Horizonte sobre los mapas Google. La separación de los emplazamientos es de unos 18 km y el terreno es relativamente llano, salvo la cadena montañosa en las proximidades del emplazamiento BH1.



Mapa de la zona de Belo Horizonte con 4 emplazamientos de estación de comprobación técnica del espectro propuestos: BH1-BH4

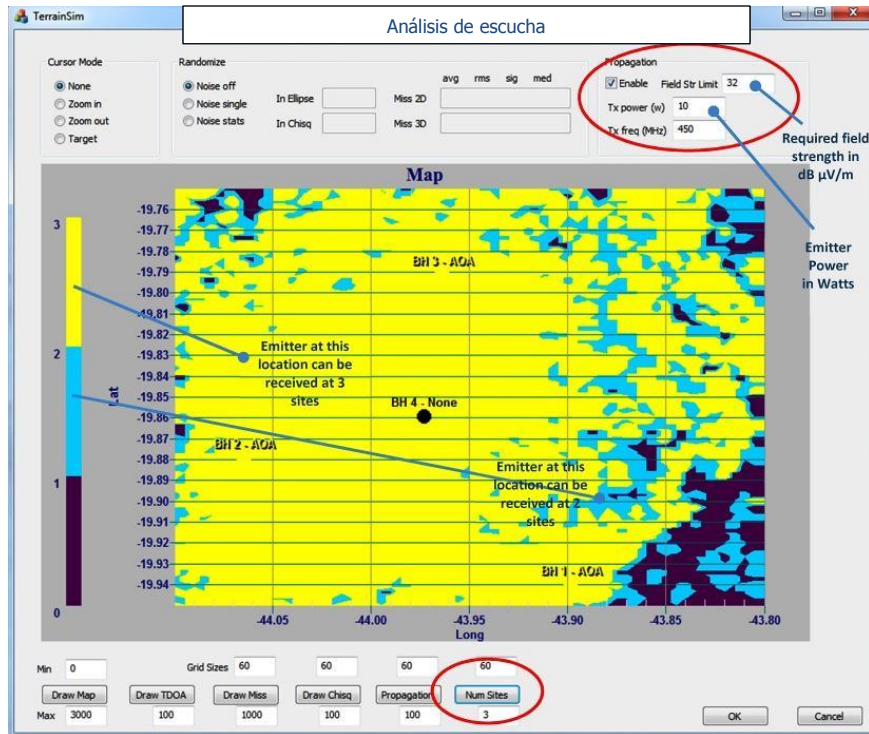
4(b) Ejemplo de datos de elevación del terreno

La pantalla de la siguiente Figura muestra los datos de elevación del terreno. Además, aparecen cuatro emplazamientos con sus nombres y su capacidad de localización geográfica. En esta pantalla de muestra, todos los emplazamientos se han seleccionado con capacidad TDOA. Los datos del terreno se utilizaron en los cálculos de la propagación y de la localización geográfica.



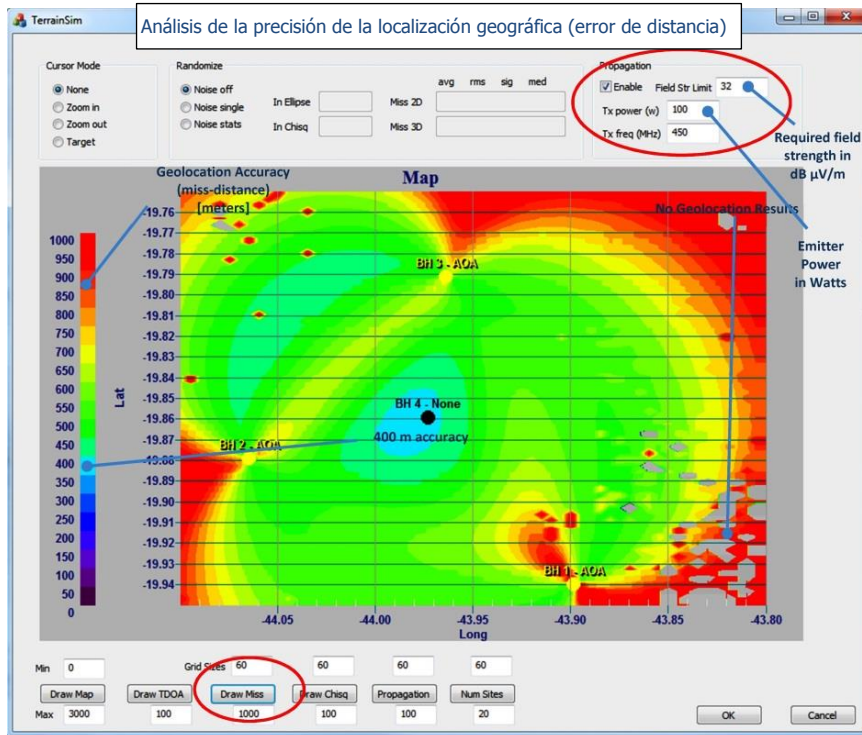
4(c) Ejemplo de análisis de escucha

La siguiente pantalla muestra los contornos de escucha. En esta pantalla, los códigos de color indican el número de estaciones que pueden recibir señales del emisor con la intensidad de campo requerida. Esta pantalla incluye los efectos de las variaciones de elevación del terreno y del nivel de potencia del transmisor. En esta pantalla de muestra todos los emplazamientos se han seleccionado con capacidad AOA.



4(d) Ejemplo de trazado del error de distancia

La siguiente pantalla muestra los contornos de precisión en la localización geográfica en términos de error de distancia (en metros). También en este caso, el error de distancia se calcula para la intensidad de campo específica requerida. En esta pantalla de muestra todos los emplazamientos se han seleccionado con capacidades AOA.

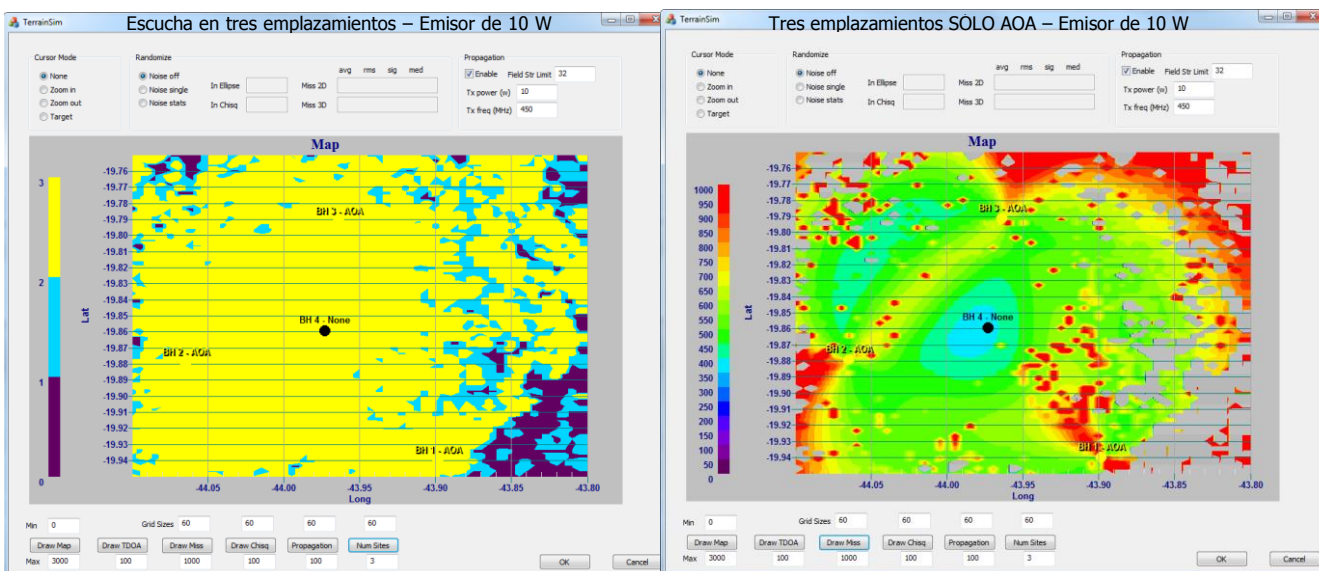


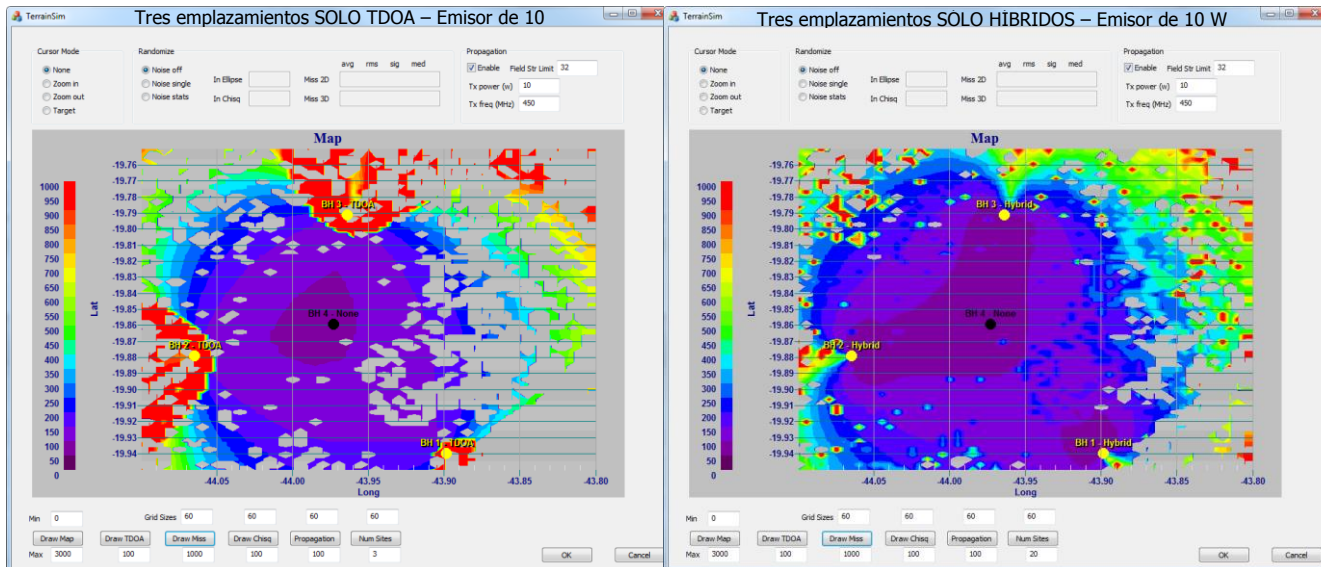
5 Resultados de las simulaciones

Este estudio de caso se realizó bajo una variedad de condiciones tales como número de estaciones que intervienen en la red de comprobación técnica del espectro, potencia del transmisor variable entre 1 W y 100 W con diferentes condiciones de propagación y distintas técnicas de localización geográfica. En los siguientes párrafos se resumen los principales resultados obtenidos en este estudio utilizando las hipótesis de 10 W y 1 W.

5(a) Red de tres estaciones de comprobación técnica

Las siguientes Figuras presentan la comparación entre los sistemas de localización geográfica AOA, TDOA y AOA/TDOA híbrido para el caso de un transmisor de 10 W. El primer gráfico muestra la escucha de cada una de las tres estaciones de un transmisor de 10 W en la zona de interés.





5(b) Resumen de los resultados de las simulaciones (3 estaciones)

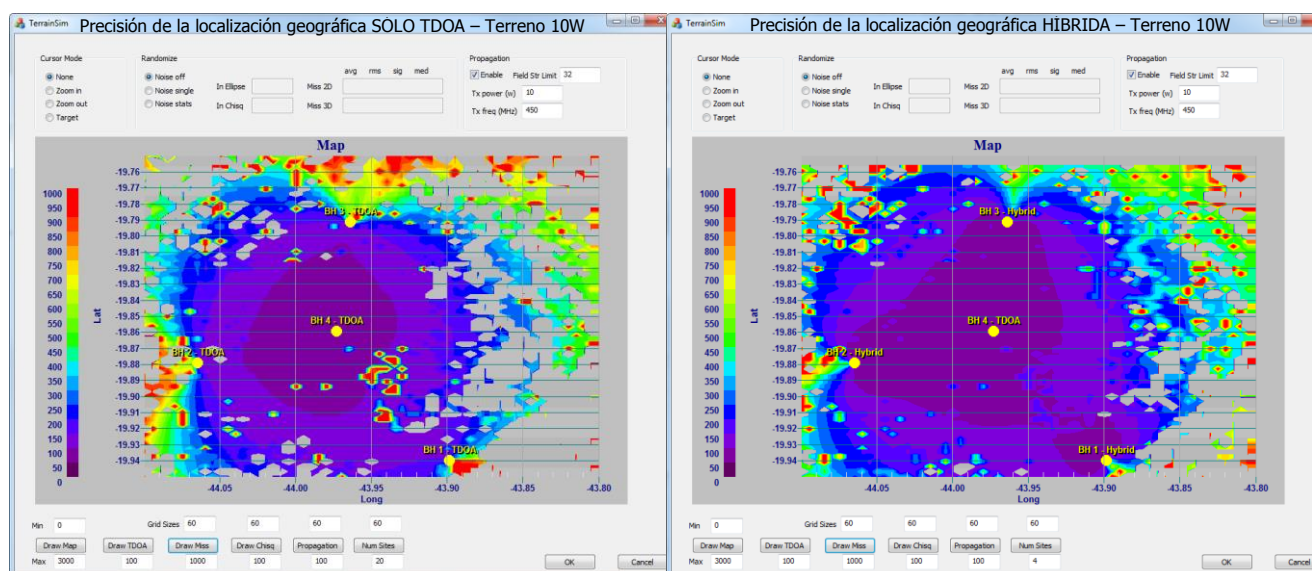
Un sistema que consta de tres estaciones AOA cubre toda la zona de interés pero la precisión de la localización geográfica es pequeña en el caso de transmisores distantes. No obstante, las estaciones AOA pueden proporcionar línea de marcación incluso si sólo una estación intercepta al transmisor.

Un sistema que consta de tres estaciones TDOA proporciona una buena precisión en la zona delimitada por las estaciones. Sin embargo, como cabe esperar, la precisión en la localización geográfica se degrada fuera de esta zona. En esta simulación hay también grandes vacíos (zonas grises) en los que no se espera ningún resultado de localización geográfica ya que la cobertura de la localización geografía de TDOA depende parcialmente de la geometría del emplazamiento así como de la distancia de separación. La cobertura para transmisores de 1 W o menos disminuye, como cabía esperar, si sólo se utilizan tres estaciones TDOA con esta distancia de separación (18 km) o si el emisor no está suficientemente próximo al menos a una estación. Esta simulación supone que se precisa un mínimo de tres emplazamientos con un valor de S/N positivo. No tiene en cuenta la capacidad de correlar con el umbral ruido (tanto AOA como TDOA pueden generar un resultado con sólo una estación que presente un valor de S/N positivo utilizando técnicas de correlación).

Para este ejemplo se espera que un sistema híbrido que utiliza técnicas AOA y TDOA ofrezca una mayor precisión en la localización geográfica sobre una zona de cobertura más amplia.

5(c) Red de cuatro estaciones de comprobación técnica

Las siguientes Figuras presentan la comparación de los resultados de la localización geográfica para sistemas basados en estaciones TDOA y AOA/TDOA híbridas, en el caso de un transmisor de 10 W.



5(d) Resumen de los resultados de la simulación (4 estaciones)

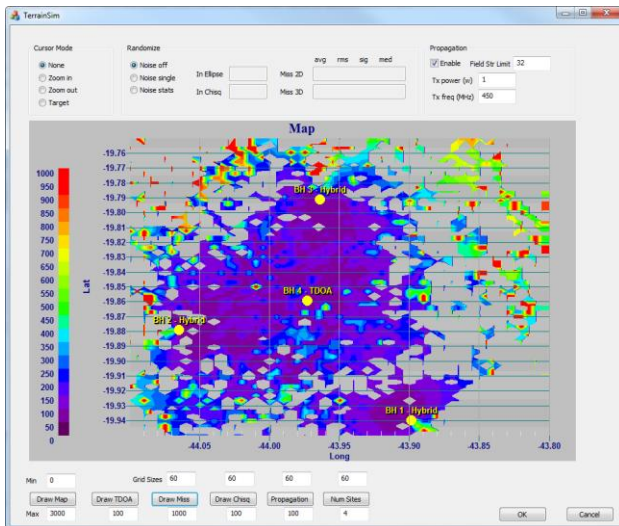
Los resultados con una red de cuatro estaciones son coherentes con los obtenidos con tres estaciones pero con unos resultados de cobertura mejorados. Utilizando sólo estaciones TDOA se logra una buena precisión en la zona rodeada por las cuatro estaciones, pero esta precisión en la localización geográfica se degrada fuera de esta zona. Hay algunos vacíos (zonas grises) donde no se dispone de resultados de localización geográfica. Con cuatro estaciones TDOA la cobertura para transmisores de 1 W o menos disminuye (por las mismas razones indicadas en el caso de tres estaciones).

Como en el ejemplo de tres estaciones, esta simulación demuestra que un sistema híbrido que utiliza técnicas AOA y TDOA puede proporcionar una mejor precisión en la localización geográfica en una zona de cobertura más amplia.

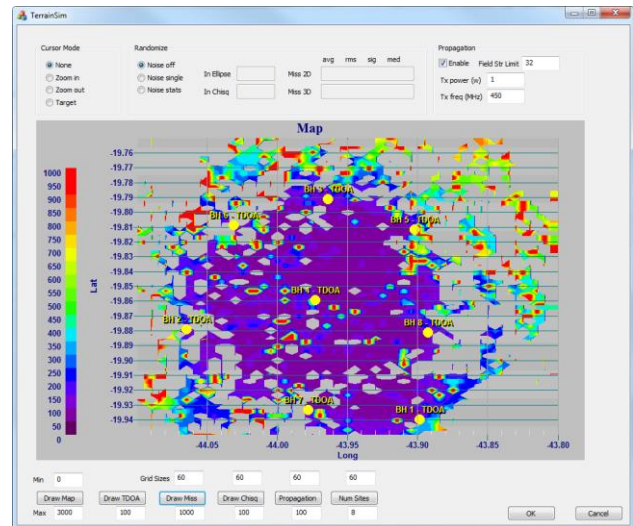
5(e) Comparación del número de estaciones en la red

La discusión en los párrafos anteriores muestra que la zona de cobertura de un sistema híbrido que utiliza técnicas AOA y TDOA puede ser mayor que la zona de cobertura de un número igual de estaciones SÓLO TDOA. A fin de cuantificar las ventajas de implementar un sistema AOA/TDOA híbrido, se ha modelado para el caso del transmisor de 1 W el número de estaciones SÓLO TDOA requerido para proporcionar una cobertura equivalente a la de una red de tres estaciones AOA/TDOA híbridas más una estación TDOA.

En las siguientes Figuras se simulan cuatro estaciones híbridas a la izquierda y ocho estaciones SÓLO TDOA a la derecha.



Cuatro emplazamientos HÍBRIDA (3xHÍBRIDA + 1xTDOA)



Ocho emplazamientos SÓLO TDOA

Basándose en esta simulación informática, cabe esperar que la solución de localización geográfica AOA/TDOA híbrida requiera menos estaciones que una solución de localización geográfica SÓLO TDOA para lograr la misma o mejor cobertura y la misma o mejor precisión. Basándose en las hipótesis de esta simulación, un sistema híbrido que utiliza técnicas AOA y TDOA puede ofrecer unos menores costes de instalación y repetitivos. Como cada situación es distinta deben considerarse detenidamente los requisitos de cobertura, el terreno, las limitaciones del emplazamiento y otros factores del Cuadro 1 a fin de determinar la disposición óptima para una aplicación particular.

6 Conclusión

Basándose en las simulaciones informáticas, una solución de localización geográfica AOA/TDOA híbrida puede ofrecer un cierto número de ventajas respecto a los sistemas AOA y TDOA. En el ejemplo presentado, una combinación AOA/TDOA proporciona mejor cobertura con menos emplazamientos de comprobación técnica.

Anexo 3

Estudio sobre la utilización de un sistema TDOA con un sistema AOA ya existente

1 Introducción

La monitorización de malla basada en TDOA⁷ proporciona una cobertura asequible de entornos complejos así como unas capacidades sofisticadas de monitorización del espectro y localización de emisores. Ahora bien, los sistemas TDOA tienen ciertos inconvenientes en comparación con los sistemas AOA y viceversa. Utilizar un sistema AOA existente con un sistema TDOA supone una solución complementaria y útil para solventar esos inconvenientes.

El programa experimental de monitorización simple con sensores TDOA y AOA se utilizó por primera vez en Tokio (Japón), en 2016, para estudiar la eficacia de un sistema de monitorización complementario de ese género.

2 Objetivos y escenarios de prueba

El objetivo del programa fue determinar la mejor manera de configurar el sistema TDOA con un sistema AOA existente teniendo presente los puntos fuertes y débiles de ambos sistemas.

2.1 Coubicación de sensores TDOA y AOA

Los sensores TDOA se colocaron en la misma ubicación que los sensores AOA existentes alrededor de la bahía de Tokio y se utilizaron para determinar la ubicación de los emisores de prueba. Se utilizaron los dos sistemas para realizar las mediciones.

Se conectaron los sensores TDOA a una antena omnidireccional y se utilizó una red LAN por cable.

En el experimento se utilizó una señal de transmisor de prueba desde una ubicación conocida.

En la Fig. 18 se muestra la ubicación de los sensores AOA y TDOA (3 de cada tipo).

⁷ La monitorización de red se realiza mediante sensores de monitorización, antenas y accesorios complementarios, y consiste en la monitorización de un territorio de gran tamaño que se divide en diversas áreas de monitorización más pequeñas (mallas).

FIGURA 18
Ubicación de sensores AOA y TDOA



2.2 Colaboración entre sensores fijos AOA y móviles TDOA

Como el sistema AOA no puede calcular la ubicación del emisor si no recibe dos o más líneas de marcación, cuando sólo puede obtenerse una, la ubicación del emisor se calcula utilizando sensores móviles TDOA.

Para aplicar ese escenario en la prueba, se desplegaron sensores TDOA fijos, uno por uno, en la misma ubicación que los sensores AOA. También se utilizó un sensor TDOA móvil.

La idea de ese sistema de monitorización es que la estación móvil TDOA se mueve a lo largo de la línea de marcación medida por el sensor AOA.

3 Resultados

3.1 Coubicación de sensores TDOA y AOA

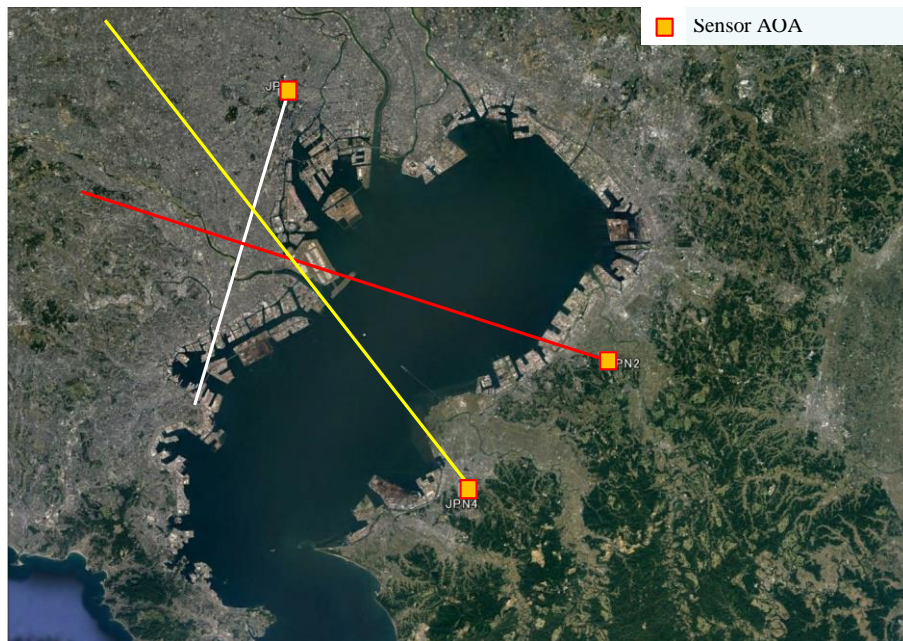
Se capturó la señal de una posición de emisor conocida y se calculó la posición del emisor utilizando un sistema AOA. Las líneas de color (blancas, amarillas y azules en las figuras) son las líneas de marcación calculadas por el método AOA. En algunas mediciones, las líneas de marcación no se cruzaron en un punto, como se muestra en la Fig. 19.

No pudo dilucidarse el motivo, pero tal vez se debió a un reflector cercano o a otra distorsión frontal de onda.

El perfil de señal de emisor conocido en ese caso fue:

| | |
|------------------------|-------------|
| Frecuencia | 1 020,0 MHz |
| Ancho de banda ocupado | 500 kHz |

FIGURA 19
Resultado obtenido por el método AOA

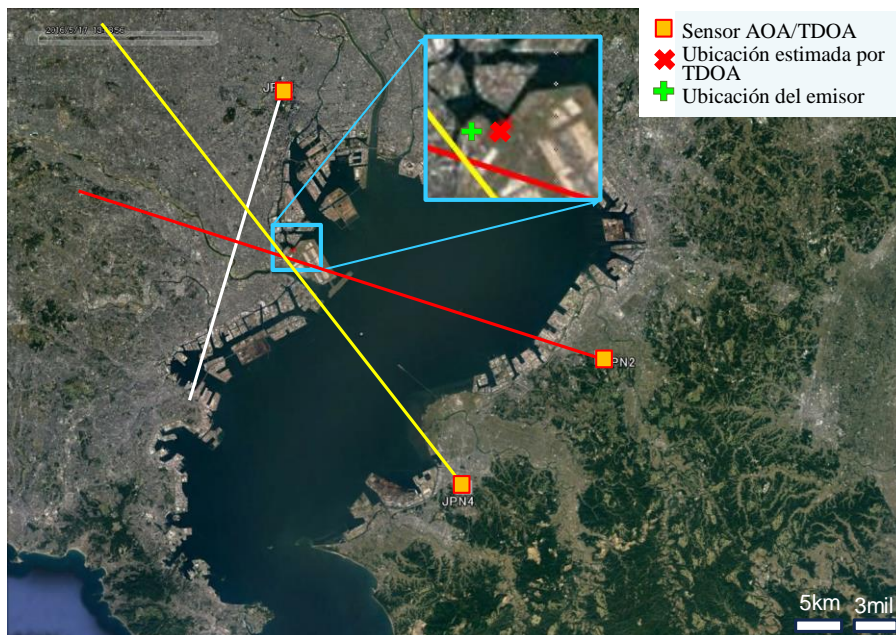


Los sensores TDOA capturaron la misma señal y se calculó la posición estimada.

Para precisar la posición del emisor y minimizar ambigüedades se mostraron los resultados de TDOA y AOA.

En la Fig. 20 se muestra la posición estimada por AOA y TDOA superpuestos.

FIGURA 20
Posición estimada por el método TDOA y AOA



Los resultados muestran que las mediciones simultáneas de AOA y TDOA pueden reducir ambigüedades y/o mejorar la precisión en las mediciones de la ubicación del emisor.

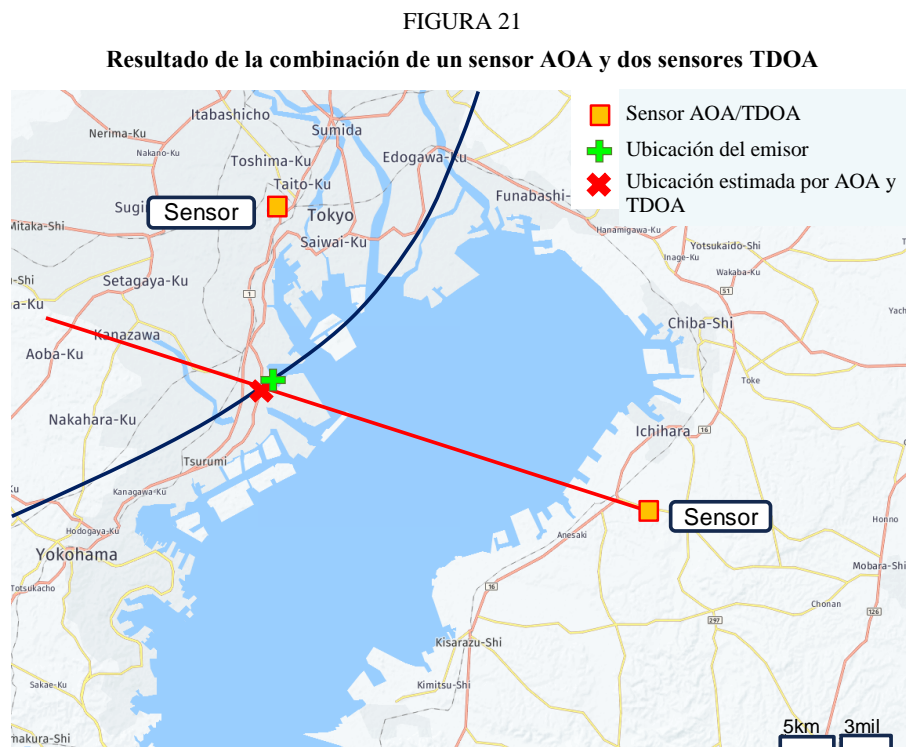
En algunos casos se vio que un sensor AOA con dos TDOA es una buena solución para localizar el emisor.

Para calcular con éxito la posición del emisor se necesitan, al menos, dos sensores AOA o tres TDOA si se utiliza cualquiera de los dos métodos por separado (AOA o TDOA). Ahora bien, debido a trayectos múltiples, obstáculos, debilidades de señal, etc., puede que no sea posible detectar la señal del emisor en un número suficiente de sensores.

Para superar ese problema se descubrió que combinando los métodos AOA y TDOA puede calcularse con éxito la posición del emisor, incluso cuando no hay un número suficiente de sensores que reciben el nivel de señal adecuado.

En la Fig. 21 se muestran los resultados de medición reales obtenidos con una estación AOA y con dos sensores TDOA. La línea roja es la línea de marcación y la línea azul es la línea hiperbólica formada por dos sensores TDOA.

Como puede verse, con una línea de marcación y una línea hiperbólica puede localizarse la posición del emisor. La ubicación estimada del emisor (X en rojo) puede calcularse a partir de la intersección de las dos líneas.

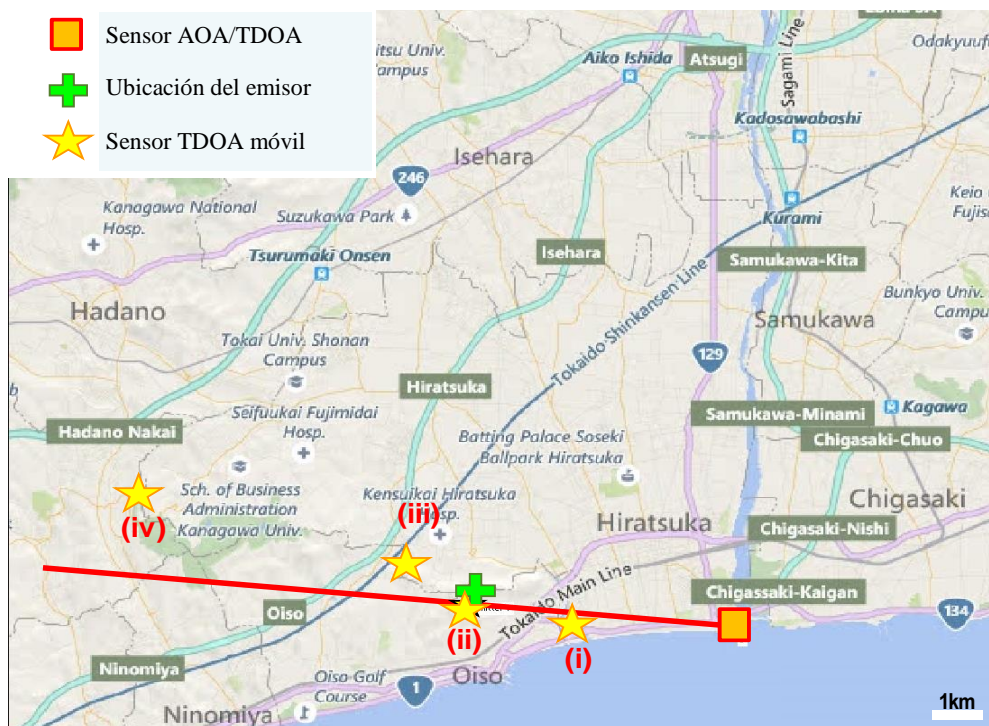


3.2 Utilizar sensores TDOA móviles con sensor AOA fijo

Si se obtiene una línea de marcación a partir de un sensor AOA, puede suponerse que el emisor está situado a lo largo de la línea de marcación. En ese caso, el sensor TDOA móvil puede moverse sobre la línea de marcación, desde cerca del sensor AOA hasta el otro extremo, y las líneas hiperbólicas formadas con otro sensor TDOA fijo ubicado en el sensor AOA pueden calcular la ubicación del emisor.

La Fig. 22 ilustra la idea.

FIGURA 22
Modelo de un sensor AOA/TDOA y un sensor TDOA móvil



La línea de marcación obtenida por AOA es la línea roja mostrada en la Fig. 22.

Se desplazó el sensor móvil TDOA desde cerca de la posición del sensor AOA hacia el extremo más alejado de la línea de marcación para ubicar la ubicación del emisor (desde la ubicación (i) hasta la ubicación (iv), mostrada en las Figs. 23 a 26), y se calcularon las líneas hiperbólicas en cada posición.

En las Figs. 23, 24, 25 y 26 se muestran los resultados de las estimaciones de la posición del emisor con un sensor AOA y dos sensores TDOA.

FIGURA 23
Posición estimada en el lugar (i)

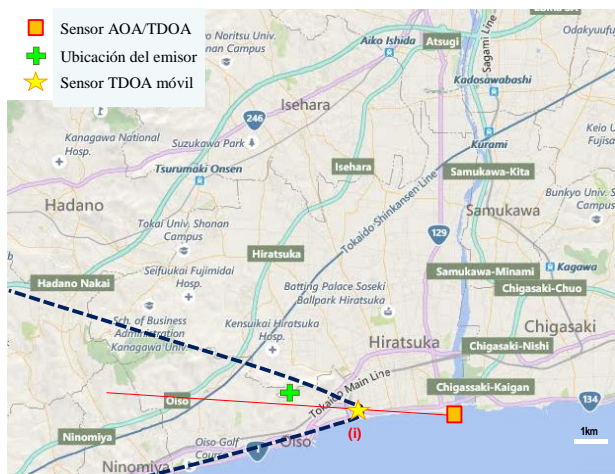


FIGURA 24
Posición estimada en el lugar (ii)

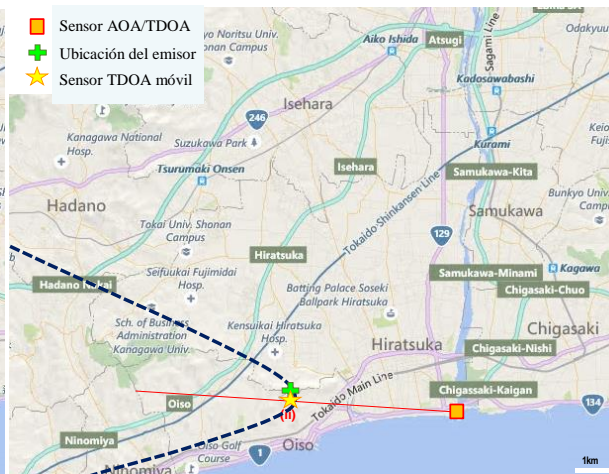


FIGURA 25

Posición estimada en el lugar (iii)

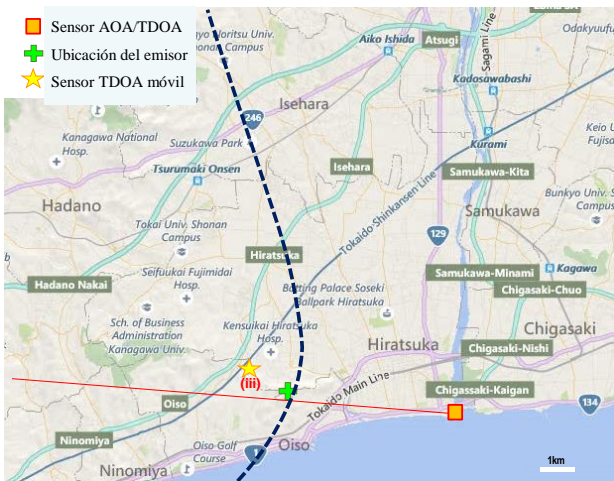
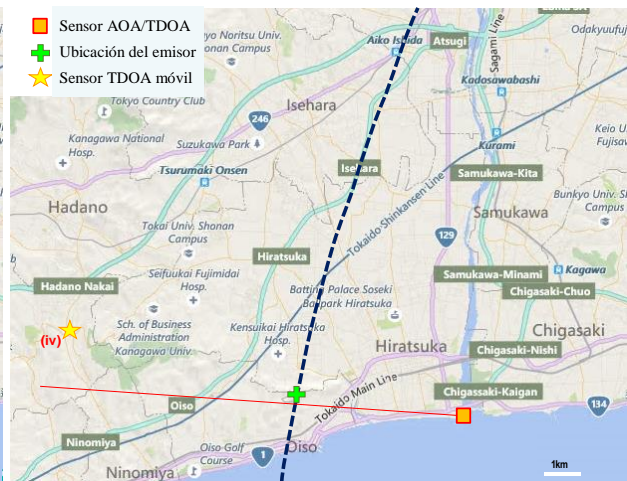


FIGURA 26

Posición estimada en el lugar (iv)



El resultado calculado en la ubicación (i) no representa una posición válida porque el tiempo de diferencia calculado superó el tiempo de transmisión de las ondas de radio entre los sensores TDOA.

La distancia entre los sensores TDOA en la Fig. 23 es de 3,0 km y $10 \mu\text{s}$ en tiempo de transmisión de las ondas de radio. El tiempo de diferencia calculado por el algoritmo TDOA fue de $9,99 \mu\text{s}$.

Eso significa que la ubicación del emisor no podría estar entre dos sensores donde podría determinarse la ubicación del emisor mediante sensores TDOA.

La distancia entre los sensores TDOA en la Fig. 24 es de 5,0 km y $16,7 \mu\text{s}$ en tiempo de transmisión de las ondas de radio. El tiempo de diferencia calculado por el algoritmo TDOA fue de $16,6 \mu\text{s}$.

Los resultados calculados para la ubicación (iii) y (iv) fueron buenos ya que el cálculo de la ubicación del emisor fue el mismo para los dos sensores.

La distancia entre los sensores TDOA en las Figs. 25 y 26 fue, respectivamente, de 6,6 km y $12,55 \mu\text{s}$ y $41,7 \mu\text{s}$ en tiempo de transmisión de las ondas de radio. El tiempo de diferencia calculado por TDOA fue de $11,74 \mu\text{s}$ y $-8,42 \mu\text{s}$.

4 Conclusión y tema futuro

En algunas zonas en las que ya se utilizan sistemas AOA, podría servir de complemento un sistema de monitoreo TDOA.

En el presente Anexo se ha demostrado la complementariedad del sistema de monitorización TDOA con un sensor AOA existente. El resultado de esa complementariedad son diversas ventajas:

- Ventaja 1: Puede reducirse la ambigüedad en el cálculo de la ubicación de un emisor comparando los resultados de ambos sistemas.
- Ventaja 2: Al combinar la línea de marcación obtenida por AOA y la línea hiperbólica obtenida por TDOA puede calcularse la posición del emisor con menos sensores.
- Ventaja 3: Incluso cuando no hay una red física de sensores TDOA, puede utilizarse un sensor AOA y dos sensores TDOA adicionales (al menos uno de ellos debe ser un sensor TDOA móvil) y servirse de la colaboración entre los sistemas AOA y TDOA para localizar la posición del emisor.

Los experimentos descritos en el presente Anexo se llevaron a cabo sin una conexión de red permanente ni una instalación de sensores para el sistema TDOA.

Es posible que el sistema móvil TDOA no reciba la señal simultáneamente en cada punto de medición, pero funciona bien si se combinan las líneas hiperbólicas con el resultado de AOA y puede localizar la posición del emisor.

Además, eso puede ampliar la robustez de las estaciones/redes de monitorización AOA existentes con más sensores TDOA.
