

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1598

Métodos de radiogoniometría y localización de señales de acceso múltiple por división en tiempo y acceso múltiple por división de código

(Cuestión UIT-R 28/1)

(2002)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el desarrollo considerable de las redes de telefonía celular aumenta el riesgo de interferencia dentro de las redes y entre redes, especialmente en las fronteras de los países en los bordes de las zonas de cobertura de las estaciones que funcionan con diferentes operadores y/o en el caso de bandas de frecuencias compartidas o bandas adyacentes;
- b) que el mantenimiento de un elevado nivel de calidad de servicio reviste una importancia fundamental, tanto para los operadores como para los usuarios del servicio;
- c) que es necesario proporcionar a los operadores y a los organismos reguladores los instrumentos necesarios para investigar las interferencias perjudiciales;
- d) que las técnicas utilizadas en esas redes requieren métodos radiogoniométricos aceptables,
- e) que las reclamaciones por interferencias relativas a las redes celulares modernas son a menudo difíciles de resolver;
- f) que los sistemas que utilizan tecnologías de acceso múltiple por división en tiempo (AMDT) y acceso múltiple por división de código (AMDC) constituyen una parte importante de los servicios de radiotelefonía que actualmente funcionan en el mundo;
- g) que actualmente se encuentran disponibles en el mercado, equipos que permiten realizar medidas de radiogoniometría de señales digitales,

recomienda

- 1 que en las estaciones de comprobación técnica fijas y móviles se introduzcan las capacidades de radiogoniometría de señales AMDT y AMDC que utilizan la sincronización;
- 2 que el proceso de radiogoniometría emplee principios similares a los que figuran en el Anexo 1 y los métodos que se describen en los Anexos 2 y 3.

ANEXO 1

Proceso de radiogoniometría y localización de señales AMDT y AMDC

Con respecto a la radiogoniometría de señales AMDT y AMDC, se recomienda intentar una identificación preliminar de la señal, antes o durante el proceso de radiogoniometría, a fin de poder utilizar los métodos radiogoniométricos aplicables a esas señales. Con ese propósito, resulta interesante asociar las técnicas radiogoniométricas con las técnicas de identificación preliminar. En efecto, en cuanto a precisión y cuando se trata de fuentes múltiples las técnicas cooperativas son más eficaces que los métodos no cooperativos.

- Un radiogoniómetro capaz de procesar señales discontinuas como las de AMDT, AMDC o dúplex por división en el tiempo debe, por lo tanto, permitir la aplicación sucesiva de varios métodos destinados a mejorar la precisión de la radiogoniometría en un contexto a ciegas y en tiempo real en una primera etapa, de conformidad con los métodos habituales recomendados en el Anexo 2.
- El objeto de la radiogoniometría deberá ser el registro monocanal o, preferentemente, multicanal de la señal.
- La identificación preliminar de la señal mediante intercorrelación con señales de prueba, se deberá efectuar en tiempo real o en tiempo ligeramente diferido.

Y

- Si el proceso de identificación preliminar falla, la radiogoniometría en contexto a ciegas como se describe en el Anexo 2 (métodos de sincronización y finalmente de alta resolución) se puede llevar a cabo en tiempo real o en tiempo diferido (con una señal registrada multicanal) para obtener una mayor precisión angular, a la vez que aumentan las capacidades de discriminación de las fuentes en entornos medianamente difíciles (trayectorias múltiples, fuentes múltiples).
- Si el proceso de identificación preliminar es satisfactorio, la radiogoniometría se puede llevar a cabo en un contexto de cooperación tal como se describe en el Anexo 3, en tiempo real o tiempo diferido (con una señal registrada multicanal) para obtener una mayor precisión angular, a la vez que aumentan de manera considerable las capacidades de discriminación de las fuentes en entornos desfavorables (trayectorias múltiples, contexto de fuentes múltiples de alta densidad).

ANEXO 2

Contexto a ciegas de radiogoniometría de señales AMDT

Si no se identifica, o no se puede identificar, la forma de onda mediante el proceso de identificación preliminar y no se dispone de información sobre un posible parámetro de discriminación dentro de la señal (entorno de contexto a ciegas), se recomienda aplicar los siguientes métodos de radiogoniometría:

Todos esos métodos se pueden mejorar utilizando antenas directivas, realizando un reconocimiento previo de sus parámetros técnicos (portadora, anchura de banda, tipo de modulación, duración de los intervalos, etc.), cuando están disponibles, y efectuando mediciones múltiples (por proceso de triangulación, proceso de radiorrecalada, etc.).

- La interferometría tradicional o correlativa (secuencial o en paralelo con canales múltiples) se puede acoplar a una sincronización de señal mediante detección de energía. El principio de la interferometría es el cálculo del retardo de fase entre las señales obtenidas en varios sensores y la comparación entre el resultado obtenido y un cuadro de calibrado, a fin de obtener la dirección de la fuente. Sincronizar la activación del radiogoniómetro con el instante de llegada de los intervalos de tiempo determinado mediante un cálculo de la energía de la señal tiene numerosas ventajas:
 - el radiogoniómetro se activa durante la duración efectiva de un intervalo de tiempo;
 - salvo en el caso de interferencia entre intervalos de tiempo, (véase más adelante), el radiogoniómetro funciona sobre una señal procedente de una fuente única.

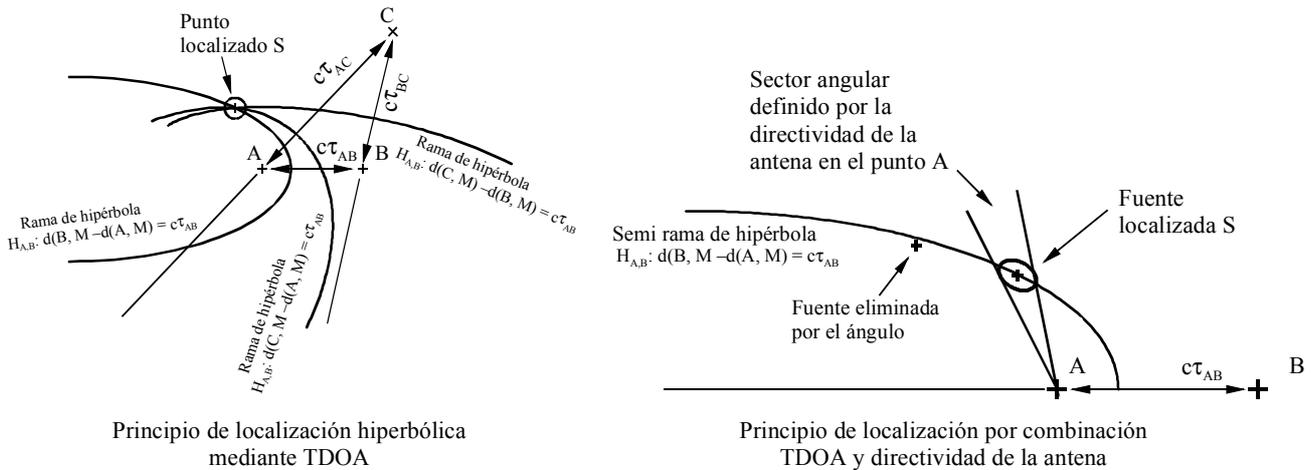
La ventaja de un radiogoniómetro en paralelo con respecto a uno secuencial radica en que no se necesita realizar la conmutación de antena. Por consiguiente, la integración más prolongada de la señal proporciona una ganancia y una precisión adicionales de aproximadamente 7 dB para una medición efectuada durante un intervalo de tiempo.

- Los métodos habituales de alta resolución, como el algoritmo MUSIC, para tratar situaciones de recepción más complejas suponen interferencia, condiciones de propagación desfavorables, etc. El principio de esa técnica se basa en el cálculo y la reducción de la matriz de autocorrelación de la señal recibida en cada sensor de la red de antenas. Esos métodos requieren una potencia de cálculo y retardos mayores que la interferometría correlativa. Las ventajas de esas técnicas son las siguientes:
 - Son más precisas que la interferometría correlativa.
 - Efectúan la radiogoniometría incluso en situaciones de emisiones múltiples o de interferencia (se puede realizar con interferencia de densidad baja a media, según el número de elementos de antena).
 - La radiogoniometría se lleva a cabo incluso en condiciones de propagación multitrayecto.
 - Además, al igual que para la interferometría correlativa, es posible sincronizar la activación de los radiogoniómetros con el instante de llegada de los intervalos de tiempo de las señales AMDT, obteniéndose las numerosas ventajas señaladas en el párrafo precedente.
- La técnica de la diferencia de tiempo de llegada (TDOA, *time difference of arrival*) se basa en la intercorrelación de las señales digitales recibidas en un conjunto de sensores síncronos y suficientemente distantes como para permitir la localización hiperbólica de la fuente. El principio básico de ese método en una geometría bidimensional es el siguiente: para un transmisor único, si se considera un par de antenas síncronas (A, B) situadas a una distancia conveniente, el proceso de intercorrelación de la señal recibida en cada antena A y B proporciona una TDOA τ_{AB} , y la localización correspondiente del transmisor estará dada por una rama H_{AB} de hipérbola definida por la posición de las antenas A y B y por la TDOA τ_{AB} . Si se considera otro par de antenas síncronas distantes (A, C) y el mismo proceso de intercorrelación de la señal recibida en cada antena A y C, la posición correspondiente del transmisor estará dada por la rama H_{AC} de una hipérbola definida como antes por la posición de las antenas A y C, y por la TDOA τ_{AC} . Por consiguiente, la posición del transmisor vendrá determinada por la intersección de las ramas H_{AB} y H_{AC} de las hipérbolas. Cabe observar que incluso en una situación de transmisor único, pueden producirse ambigüedades geométricas, por lo que la precisión depende en gran medida de la configuración geométrica. Este problema se puede resolver utilizando antenas directivas o mediante un proceso de radiogoniometría adicional.

En un contexto de fuentes múltiples, la técnica TDOA se puede mejorar mediante el uso de antenas directivas, lo que permite limitar el campo angular explotado, los riesgos de ambigüedad causados por transmisores múltiples y el peligro de asociación falsa de las TDOA con respecto a los diferentes transmisores. Además, las antenas directivas pueden limitar el número de mediciones síncronas a sólo dos antenas. Luego, la posición hiperbólica se puede utilizar para aumentar la precisión obtenida a partir de las mediciones angulares o para resolver ambigüedades.

FIGURA 1

Localización TDOA a ciegas



1598-01

También se puede recurrir a la técnica TDOA como método a ciegas con respecto a la forma de onda de espectro ensanchado (AMDC). Asimismo, se puede utilizar en contexto de cooperación, pero tiene menos interés que las técnicas recomendadas más adelante, en el marco de este estudio. Ya sea a ciegas o en cooperación, se estudia la aplicación de las técnicas TDOA para la localización de llamadas de emergencia a través de la infraestructura de red celular.

ANEXO 3

Contexto cooperativo para formas de onda AMDT y AMDC de código abreviado o conocido

En este caso, que se aplica a señales que utilizan AMDT o AMDC con códigos abreviados, la forma de onda tiene parámetros normalizados incluidos en canales de servicios y de tráfico, emitidos de manera continua o a intervalos de secuencias conocidas presentes en los intervalos AMDT, los códigos PILOT o los códigos de sincronización en el caso de protocolos AMDC, etc. En lo que sigue, a esas señales se les llamará señales conocidas:

- La interferometría tradicional o correlativa, secuencial o en paralelo se acopla a una sincronización de la señal mediante intercorrelación. El principio de la interferometría consiste en calcular el retardo de fase entre las señales obtenidas en diversos sensores, y efectuar la comparación entre el resultado y un cuadro de calibración a fin de determinar la dirección de la fuente. El hecho de sincronizar el activador de radiogoniometría con el instante de llegada de los intervalos de tiempo determinados por el cálculo de intercorrelación de la señal con una secuencia de referencia incluida en la señal presenta mayores ventajas en comparación con las técnicas a ciegas. El interés adicional radica en la mejora del proceso de sincronización, que es más preciso y más fiable gracias a la explotación de secuencias conocidas de la señal.

Esta técnica resulta suficiente en numerosos casos prácticos de entorno de baja densidad.

- La interferometría cooperativa en paralelo se basa en la determinación de una referencia de fase en cada sensor mediante intercorrelación total o parcial de la señal recibida con la señal discriminatoria (en el caso de protocolos AMDC que utilizan códigos largos (IS 95, Globalstar) se puede considerar una intercorrelación solamente parcial). El conjunto de retardos de fase se compara con los valores de un cuadro de calibrado.

Esta técnica presenta múltiples ventajas:

- permite sacar provecho de una ganancia significativa de detección gracias a la intercorrelación multicanal, lo cual mejora en gran medida la sensibilidad del radiogoniómetro y sus resultados en el contexto de fuentes múltiples;
 - la resolución obtenida de mediciones no elaboradas de la fase es de aproximadamente $cT_S/2$ a cT_S , donde T_S representa la duración de un símbolo (o de un segmento en el caso de una sincronización sobre códigos de protocolos AMDC). La precisión es aún mayor con relaciones $C/(N+I)$ suficientemente elevadas. Esta medida básica intrínsecamente exacta permite mejorar al mismo tiempo la convergencia de la localización (es decir, limitar el número de marcaciones que se han de efectuar), su precisión y su fiabilidad;
 - permite separar las fuentes que situadas en la misma banda cuando utilizan secuencias, palabras o códigos de sincronización diferentes, lo que permite trabajar en un contexto de misión múltiple cuando las fuentes presentan distintas características discriminatorias o están separadas por un retardo de tiempo superior a la duración de algunos símbolos;
 - permite efectuar cómputos, medir porcentajes de ocupación (ocupación de intervalos de tiempo en el caso de protocolos AMDT y ocupación de códigos en el caso de protocolos AMDC) y asociar localización y mediciones técnicas.
- Técnicas multicanal adaptables basadas en la explotación de las matrices de autocorrelación e intercorrelación de la señal con las secuencias de referencias contenidas en ella. Con respecto a esas técnicas, existen dos enfoques posibles:
- *Método genérico de sincronización multicanal y radiogoniometría de alta resolución* (MUSIC, ESPRIT y métodos derivados, etc.), previamente mencionado, que mejora los resultados del radiogoniómetro por interferometría en contexto de fuentes múltiples o cuando aparecen dificultades de propagación (trayectos múltiples).
 - *Método de sincronización multicanal y separación de fuentes mediante técnicas adaptables y radiogoniometría especializada de alta resolución:*
 - Los métodos de filtrado adaptable para sincronización utilizan filtros adaptables espaciotemporales y optimizan la detección y la recepción de fuentes AMDT o AMDC. Efectúan la demodulación de las señales emitidas a la vez que rechazan las señales interferentes. Permiten, en particular, corregir las situaciones de interferencia cocanal y de canal adyacente en las redes celulares o en las redes que utilizan fuentes múltiples; la localización de las fuentes se obtiene mediante su identificación (por ejemplo, en el caso de una red GSM, se demodula y se decodifican los canales de radiobaliza para extraer los datos de identificación de las estaciones de base, como BSIC, CI y LAC en las redes GSM, lo que proporciona

sus posiciones previa consulta del operador, y para extraer los datos de sincronización -número de trama- que permiten sincronizar los radiogoniómetros en red).

- Además, los métodos multicanal permiten utilizar procesos de radiogoniometría precisos y de alta resolución destinados a formas de onda AMDT y AMDC, incluso en condiciones de intensa perturbación (fuertes interferencias), como se ilustra en las Figs. 2 a 4.

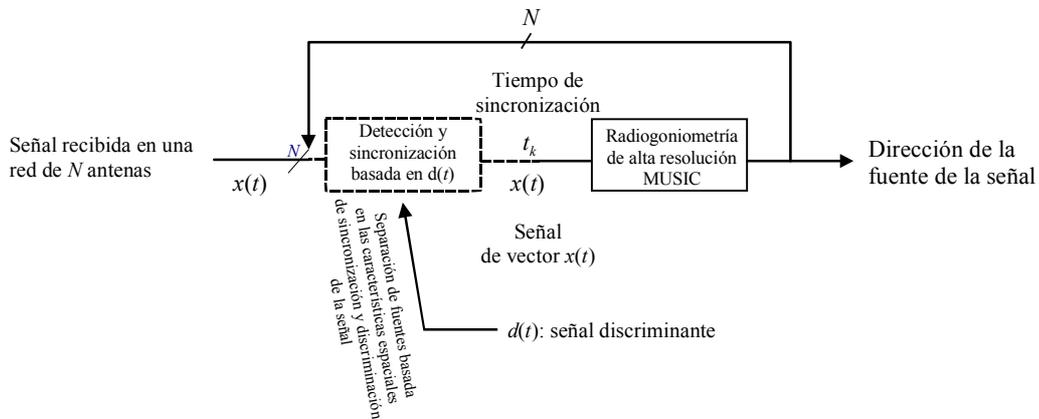
De esta manera, las técnicas adaptables complementan muy eficazmente las soluciones indicadas previamente para condiciones muy difíciles: propagación en medio urbano denso, reutilización intensiva de las frecuencias en las redes celulares 2G y 3G, señales de alta incidencia, etc., especialmente cuando la presencia próxima de reflectores múltiples perturba el frente de onda e impide la localización angular precisa (lo que es característico de las condiciones existentes en las zonas urbanas).

Las técnicas adaptables mencionadas anteriormente se adaptan bien a situaciones complejas y posteriores al proceso en tiempos ligeramente diferidos.

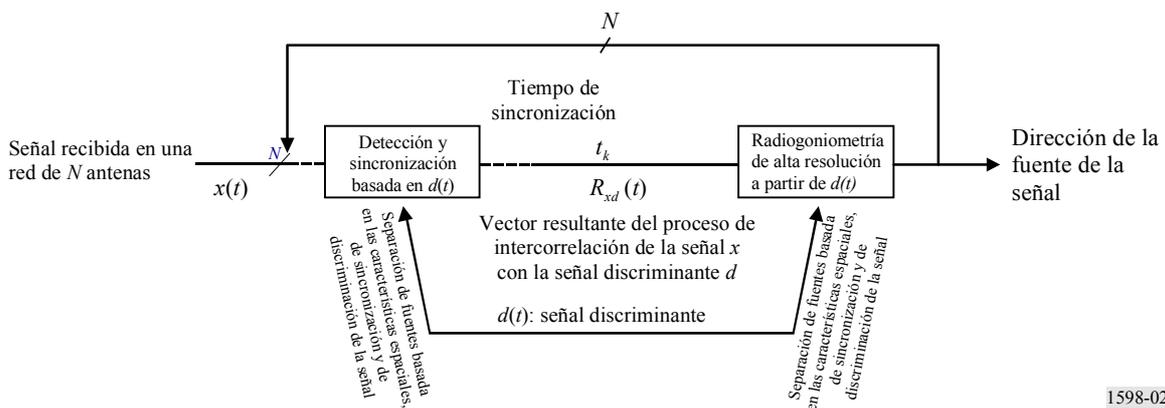
FIGURA 2

**Métodos de radiogoniometría de alta resolución en contexto cooperativo;
ejemplo de aplicación práctica**

Aplicación de un método genérico de radiogoniometría de alta resolución con o sin una primera etapa de sincronización basado en la señal discriminante



Aplicación de un método específico de radiogoniometría de alta resolución dedicado a la señal discriminante d



Las Figs. 2 a 4 representan ilustraciones y resultados de esos métodos:

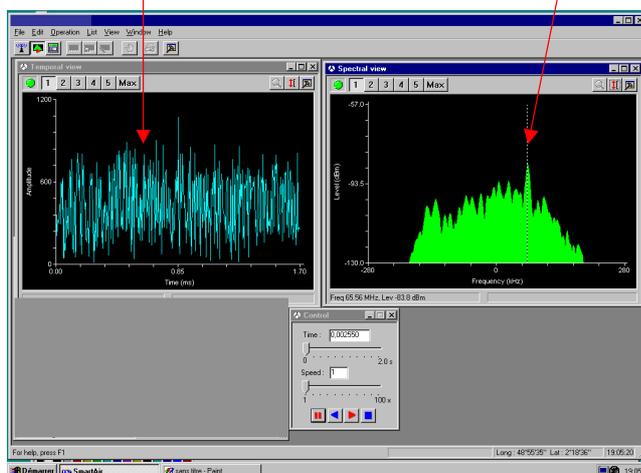
- la Fig. 2 muestra dos aplicaciones prácticas posibles de la sincronización multicanal y de las funciones de radiogoniometría dentro de los sistemas de medición y comprobación técnica del espectro;
- la Fig. 3 proporciona los resultados del método de filtrado adaptable en dos situaciones reales de interferencia de campo dentro de las redes GSM;
- la Fig. 4 presenta un ejemplo de resultados de separación de fuentes y de radiogoniometría en situaciones de interferencia en las que intervienen frecuencias de radiobaliza GSM. Como en los casos anteriores esos resultados se obtuvieron en el marco de una experiencia realizada en un caso real en la red GSM.

FIGURA 3

Ejemplo de uso de sincronización, identificación y localización de fuentes con filtros adaptables en condiciones de recepción adversas en las redes GSM

Ruido de la señal de tiempo causado por las interferencias

Canal de corrección de frecuencias FCCH incluido en el BCCH



Duración de la señal y espectro (copia de pantalla)

Resultados del análisis

Fecha :
 Señal :
 Canal : 90 D
 Comentarios:

Aproximadamente el mismo nivel

Aproximadamente la misma relación C/I próxima a 0 dB

Canales BCCH

N.º canal	FU	CI	LAC	MCC	BSIC	DTX	Nivel (dBm)	C/I	E_b/N_0	RXQUAL
BCCH										
BTS1	90	cccc1	lllll1	mmm	bb1	0	-82,3	0,1	24,3	6
BTS2	90	cccc2	lllll2	mmm	bb2	0	-82,5	-0,1	22,6	6

Información complementaria sobre el canal BCCH

N.º BTS	Frecuencias de uso BCCH (lista CA)	Frecuencias adyacentes (lista BA)
BTS1	90 105 118	69 84 89 90 93 94 97 98 107 112 122 123
BTS2	90 113 116	71 85 90 92 94 108 111 119 122

Informe

Conclusión: BTS1 y BTS2 tienen aproximadamente el mismo nivel de BCCH; el nivel de su interferencia entre canales BCCH es muy alto.

Situación de interferencia sencilla en la que intervienen canales de señalización (BCCH a frecuencias de radiobaliza).

Nota 1 – Los parámetros de identificación de las redes y células (MCC, MNC, CI, LAC, etc.) se han decodificado pero sus valores reales se ocultan por razones de confidencialidad.

FIGURA 4

Métodos de radiogoniometría de alta resolución; ejemplo de resultado en una red GSM

Ejemplo de resultados de radiogoniometría obtenidos por un método de alta resolución y una etapa de sincronización basada en una señal GSM discriminante

La radiogoniometría de dos estaciones de base GSM que comparten la misma frecuencia se logra mediante una red de cinco antenas y una señal registrada durante 2 s. La señal discriminante utilizada aquí es la ráfaga SCH que está presente en las frecuencias de radiobaliza GSM

