
Capítulo 7 Prevención y Reducción de Interferencias en Satélites Geoestacionarios

7.1 Eficiencia en el uso de la órbita geoestacionaria y el espectro radioeléctrico

Es bien sabido que los recursos naturales del espectro de radiofrecuencia y la órbita geoestacionaria están en creciente demanda. Por ello, cuando se requiere colocar nuevos sistemas satelitales, o bien, se busca incrementar la capacidad de tráfico de los sistemas existentes, se debe tener un especial cuidado para poder optimizar el uso tanto de las frecuencias como de la órbita geoestacionaria para evitar causar interferencias en otros sistemas y poder preservar, lo mejor posible, estos limitados recursos globales.

Asumiendo un cierto espaciamiento entre satélites, operando en la misma banda de frecuencia, la cantidad de posiciones orbitales geoestacionarias es limitada. El problema es particularmente significativo en la banda C (6/4 GHz) y en la banda Ku (14/10-12 GHz) para las porciones de la órbita geoestacionaria que sirven en las regiones con el mayor volumen de comunicaciones, por ejemplo el arco de 49°E a 90°E (sobre el Océano Índico), de 135°O a 87°O (que sirve a Norteamérica) y de 1°O a 35°O (sobre el Océano Atlántico)

El crecimiento del tráfico en estas áreas tiene que ser acomodado con la inclusión de nuevas bandas de frecuencia (o extensiones de bandas ya utilizadas) o el uso de bandas de frecuencias más altas, lo que permitiría la reducción del espaciamiento entre satélites y por ello, un uso más eficiente de los anchos de banda y de la órbita.

Para un eficiente uso de la órbita geoestacionaria se recomienda lo siguiente:

- **Técnicas de modulación y codificación**

Para sistemas analógicos usando modulación en frecuencia (FM), a medida que el índice de modulación crece, la capacidad por satélite es reducida, pero la densidad de ruido en banda base debido a la interferencia dada en la razón C/I también cae. Esto permite un menor espaciamiento entre satélites y, por lo tanto, un uso más eficiente de la órbita geoestacionaria.

Para transmisiones digitales que usan modulación PSK (Phase-shift Keying), muy utilizada en la actualidad, la inmunidad a la interferencia de una señal se incrementa a medida que se reduce el número de fases, permitiendo un menor espaciamiento entre satélites, por ello, para los casos en que se tienen 4 u 8 fases, se puede considerar una configuración óptima para el uso eficiente de la órbita geoestacionaria.

Continuando con el caso de transmisión digital, la eficiencia en el uso del espectro también se puede incrementar si se utilizan técnicas de procesamiento de señales como:

- Codificación de baja tasa de transmisión (LRE) y multiplicación de circuitos digitales (DCM) para telefonía.
- Técnicas de reducción de la tasa de transmisión de bits para video y televisión (estándar MPEG) y para transmisión de datos.

Sin embargo, la codificación con corrección de error, FEC (Forward Error Correction), generalmente usada para mejorar la eficiencia de potencia, tiende a reducir la eficiencia espectral.

- **Procesamiento de señales a bordo**

La implementación de un procesamiento de señales dentro de los transpondedores regenerativos, permite optimizar los parámetros del enlace y permite una menor potencia de transmisión. Esto ayuda a reducir la interferencia con satélites adyacentes y con ello se incrementa la eficiencia en la utilización de la órbita geoestacionaria.

- **Homogeneidad entre redes**

La más eficiente utilización de la órbita geoestacionaria se podría obtener si todos los satélites alojados en ella, teniendo la misma área geográfica de iluminación y usando las mismas bandas de frecuencias, tuvieran las mismas características. Sin embargo, es obvio que en la realidad, esta homogeneidad es prácticamente imposible de obtenerse, debido a que distintos sistemas satelitales tienen distintas funciones, por lo que siempre existirán diferencias entre ellos.

Las características que diferencian a los sistemas satelitales generan una diferenciación del espaciamiento angular necesario para proteger a un sistema del otro sobre las interferencias generadas, sobre todo, por satélite adyacente. Siempre se debe de tomar en cuenta el mayor espaciamiento necesario entre los dos, para no afectar a ninguno de los sistemas.

Los elementos de los sistemas que más afectan en la eficiencia de la utilización de la órbita geoestacionaria y que utilizan la misma banda de frecuencia son:

- **Características de los lóbulos laterales de la antena de la estación terrena.**

El patrón de radiación de las antenas de la estación terrena, particularmente en los primeros 10° a partir del punto de máxima radiación en dirección al satélite geoestacionario, es uno de los más importantes factores que determinan la interferencia entre sistemas satelitales geoestacionarios. La reducción de los niveles de los lóbulos laterales puede incrementar significativamente la eficiencia en la utilización de la órbita.

- **Características de la antena del satélite**

Las antenas satelitales deben satisfacer dos condiciones para optimizar la utilización de la órbita y el espectro:

- I. Para lograr un mejor uso de la localización de la órbita, el patrón de radiación debe de ajustarse de la mejor manera al área de cobertura del servicio. Esta condición se puede cumplir utilizando complejos diseños de antenas, con alimentadores múltiples y haces irregulares.
- II. Fuera del área de cobertura del servicio, el nivel de los lóbulos laterales y el nivel del patrón de radiación deben de ser lo más pequeños posibles para minimizar la interferencia entre sistemas satelitales adyacentes.

- **Polarización cruzada**

El uso de polarización ortogonal, ya sea lineal o circular, permite una discriminación entre transmisión y recepción en la misma banda de frecuencias en un mismo satélite. Los valores típicos para el aislamiento entre polarizaciones rondan entre los 30 y 35 dB para buenos diseños de alimentadores de antenas. Esto aumenta la discriminación que proveen las propiedades de direccionalidad

La ventaja de implementar sistemas con polarización ortogonal es, como se mencionó anteriormente, la reutilización de frecuencia, la cual permite multiplicar por dos la capacidad de tráfico, y esto, combinado con las técnicas de aislamiento espacial, aumentaría todavía más la capacidad de tráfico del sistema.

7.2 Precisión de puntería de las antenas de satélites geoestacionarios

Con el fin de evitar interferencias inaceptables, la puntería de una antena instalada en un satélite geoestacionario en la dirección de máxima radiación de todo haz dirigido hacia la Tierra se debe mantener dentro de los valores:

- a) 10% de la abertura del haz entre puntos representativos de la mitad de potencia, con relación a la dirección de puntería nominal
- b) 0.3° con relación a la dirección de puntería nominal, debiendo tomarse el valor que resulte mayor. Esto, siempre y cuando, el haz tenga una cobertura menor que la mundial.

Cuando el haz no es simétrico con relación al eje de máxima radiación, la tolerancia en cualquier plano que contenga este eje se referirá a la abertura del haz entre puntos de media potencia en dicho plano.

7.3 Mantenimiento de la posición en longitud de los satélites geoestacionarios para servicio fijo por satélite

Los satélites, gracias a las fuerzas perturbadoras que actúan sobre ellos, tienden a modificar su órbita, esto provoca que requieran realizar maniobras para mantenerse dentro de ciertos límites, en el caso de los satélites geoestacionarios, dentro del cubo imaginario que delimita su posición orbital.

Las antenas de las estaciones terrenas, necesitan que el satélite se mantenga en su posición, para poderlo ver y que la dirección de máxima ganancia de las antenas apunte directamente al satélite.

Un buen mantenimiento de la posición permitiría una disminución en la posible interferencia entre satélites adyacentes, además de lograr una menor separación angular entre ellos, lo que beneficia el aumento de la capacidad de la órbita geoestacionaria.

Por ello, se recomienda mantener la posición de los satélites dentro de $\pm 0.1^\circ$ de longitud con relación a su posición nominal y en casos particulares, dentro de $\pm 0.5^\circ$.

La precisión con que se puede mantener la posición depende, hasta cierto punto, de la exactitud de la determinación de la órbita. La determinación de la órbita de los satélites geoestacionarios se basa generalmente en mediciones de distancia en dos estaciones distantes entre sí o en mediciones de distancia y de los ángulos de acimut y de elevación en una sola estación. No es posible determinar la órbita efectuando mediciones de distancia en una sola estación.

La calibración apropiada de la determinación de distancias y, en particular, de las mediciones de los ángulos permite determinar la posición en longitud del satélite con una exactitud de unas pocas milésimas de grado.

Para una estación terrena que funciona con una estación espacial geostacionaria, ésta parece inmóvil con respecto a la Tierra. Sin embargo, las variaciones de las fuerzas de gravitación que actúan en la estación espacial y las limitaciones en el control de posición significan que los parámetros orbitales de la estación espacial geostacionaria no son constantes.

El mantenimiento de la posición en longitud se efectúa mediante correcciones orbitales Este-Oeste que ajustan el semieje mayor y la excentricidad a sus valores deseados. En la práctica, los elementos orbitales ajustados después de una corrección tienen errores, debido al funcionamiento impreciso de los propulsores del satélite.

El movimiento con respecto a la posición orbital nominal de la estación espacial en un sentido este/oeste (tolerancia longitudinal) está limitado en el Reglamento de Radiocomunicaciones, pero no se especifica el movimiento en el sentido norte/sur (excursión de inclinación). Eligiendo la dirección de propulsión Norte-Sur ideal se logra que la corrección orbital N-S, cuya función es mantener la inclinación dentro de un límite determinado, no altere el desplazamiento longitudinal. En la práctica, no obstante la propulsión tiene un componente que no es Norte-Sur producido por los errores de control. En consecuencia, puede producirse un cambio imprevisto del desplazamiento longitudinal.

El conjunto de estos factores determina el error de mantenimiento de la posición en longitud, pero comúnmente el más importante es la interacción entre la corrección orbital N-S y el desplazamiento longitudinal.

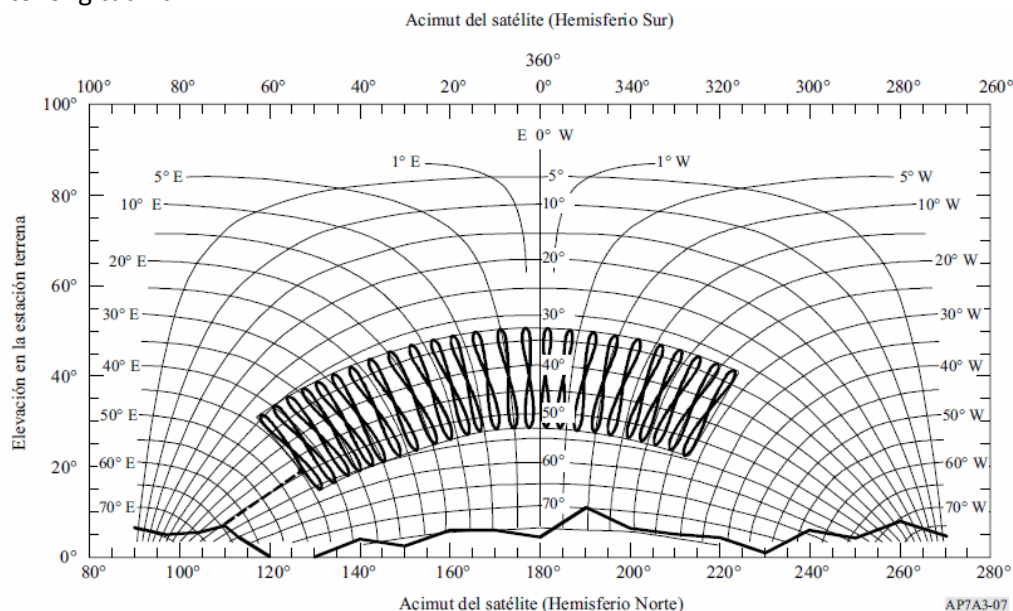


Figura 7-1: Apuntamiento de satélites geostacionarios desde 28°W hasta 44°E con 110° de acimut por medio de una estación terrena con latitud 43°.

La mitigación del mantenimiento en posición en el sentido norte/sur de una estación espacial geostacionaria permite que su órbita se incline, con una inclinación que aumenta gradualmente con el tiempo. Por consiguiente, la determinación de la zona de coordinación requiere considerar la amplitud del movimiento de la antena de la estación terrena. Aunque en la práctica la dirección de puntería de la antena de estación terrena puede variar en función del tiempo, la antena de la estación terrena puede también estar apuntando en un sentido durante periodos de tiempo considerables. Por tanto, se supone que la ganancia de la antena de la estación terrena en la dirección del

horizonte es constante. Para una estación terrena que funciona con una estación espacial en una órbita como la descrita anteriormente, la hipótesis de ganancia hacia el horizonte constante a medida que aumenta el ángulo de inclinación puede conducir a una estimación conservadora de la zona de coordinación, que aumenta al aumentar el ángulo de inclinación.

En el caso de estaciones terrenas que funcionan en algunas bandas de frecuencias, puede haber atribuciones con igualdad de derechos a servicios espaciales que funcionan en sentido Tierra-espacio y espacio-Tierra. En esta situación, cuando dos estaciones terrenas están funcionando en sentidos de transmisión opuestos, sólo es necesario establecer la zona de coordinación para la estación terrena transmisora, pues las estaciones terrenas receptoras son tomadas en consideración automáticamente. Por consiguiente, una estación terrena receptora que funciona en una banda de frecuencias atribuida bidireccionalmente sólo se coordinará con una estación terrena transmisora si está situada dentro de la zona de coordinación de ésta.

7.4 Espaciamento o separación angular de los satélites geoestacionarios

Como se mencionó en capítulos anteriores, las posiciones orbitales están asignadas de acuerdo a la zona geográfica. Observando la Figura 1-6, se ven arcos de la órbita geoestacionaria vacíos, esto es debido a que las posiciones orbitales de esos arcos están en regiones poco pobladas, por ejemplo el Océano Pacífico; por el contrario, hay regiones sobrepobladas, como América y Europa.

A medida que se desarrollan las comunicaciones globales y los sistemas satelitales crecen, ha sido necesario reducir cada vez más el espacio entre satélites para poder tener disponible mayor cantidad de posiciones orbitales en aquellos arcos sobrepoblados.

Para este problema, la UIT ha realizado estudios para determinar la mínima separación angular entre satélites en la órbita geoestacionaria, tomando como referencia a los lóbulos laterales de las antenas utilizadas en las estaciones terrenas.

Definir un diagrama de radiación para las antenas permite controlar el PIRE fuera del eje principal de radiación y la potencia recibida por los lóbulos laterales, consiguiendo una utilización más eficaz de la órbita geoestacionaria.

La UIT recomienda que las antenas de estaciones terrenas que funcionan con satélites geoestacionarios tengan un objetivo de diseño por el que la ganancia, G , del 90% por lo menos de las crestas de los lóbulos laterales no exceda de:

$$G = 29 - 25 \log \theta$$

Donde:

G : Ganancia con relación a una antena isotrópica.

θ : Ángulo con respecto al eje en la dirección del satélite.

Este requisito debe cumplirse para valores del ángulo comprendidos entre 1° ó $(100 \lambda/D)$, tomando el valor superior, y 20° para cualquier dirección fuera del eje que forme un ángulo de hasta 3° con la órbita geoestacionaria.

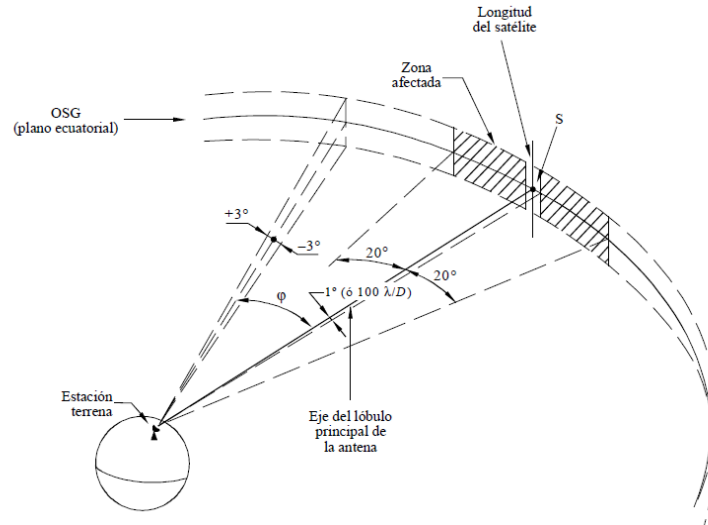


Figura 7-2: Ejemplo de la zona alrededor de la órbita geostacionaria a la que se le aplica el objetivo de diseño para antenas de estaciones terrenas.

Por otro lado, de acuerdo a la regulación de la FCC (Federal Communications Commission), al igual que en la UIT, especifica la relación de niveles para los lóbulos laterales de las estaciones terrenas que transmiten a satélites geostacionarios, de la siguiente manera:

$$\begin{array}{ll}
 29 - 25 \log \theta \text{ dBi} & 1^\circ \leq \theta \leq 7^\circ \\
 8 \text{ dBi} & 7^\circ \leq \theta \leq 9.2^\circ \\
 32 - 25 \log \theta \text{ dBi} & 9.2^\circ \leq \theta \leq 48^\circ \\
 -10 \text{ dBi} & 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ
 \end{array}$$

Donde θ es el ángulo con respecto a la dirección del lóbulo principal de la antena.

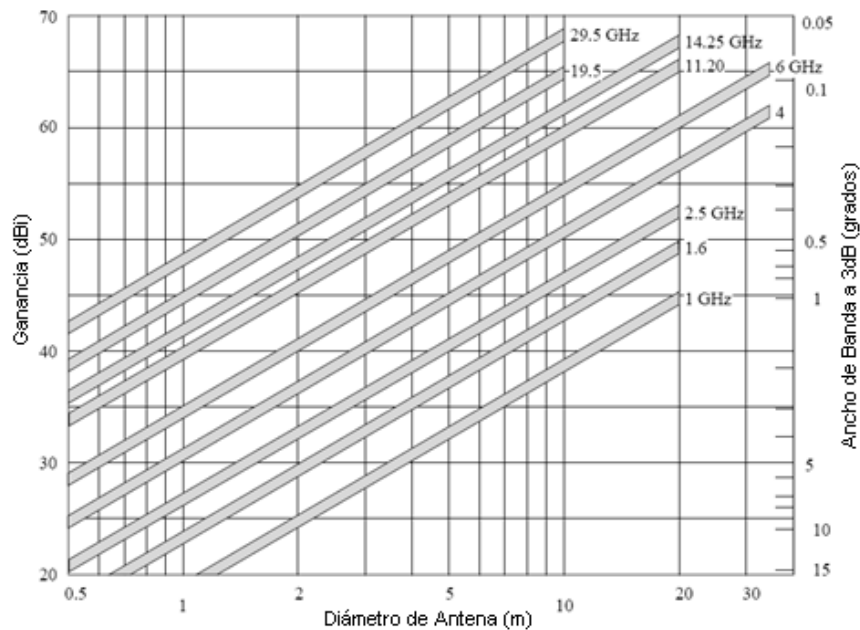


Figura 7-3: Relación de la ganancia y el ancho del haz principal con el diámetro de la antena y la banda de frecuencia en la que operan.

Una vez teniendo el objetivo de diseño del patrón de radiación, se puede obtener la separación mínima entre satélites considerando las frecuencias a utilizar, ya que esto permite conocer la longitud de onda y, por lo tanto, el diámetro de las antenas. Como se sabe, a mayor diámetro de antena, se tendrá mayor directividad y, por lo tanto, un lóbulo principal más pequeño, lo que permite tener a los satélites con menor separación angular. En la actualidad, para las comunicaciones satelitales en órbita geoestacionaria, las bandas C, Ku y Ka son las más utilizadas.

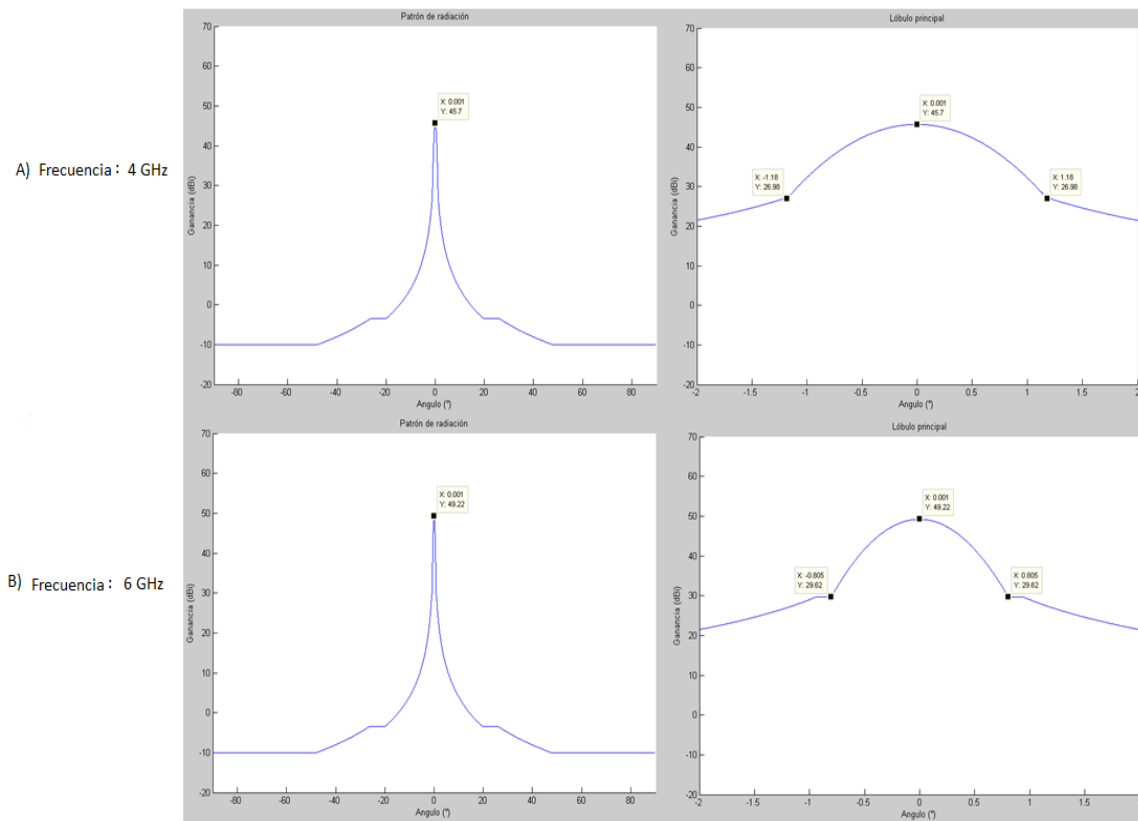


Figura 7-4: Patrón de radiación para una antena de 5.5 metros operando en banda C. A) Enlace ascendente. B) Enlace descendente.

La Figura 7-4 muestra un ejemplo del patrón de radiación teórico de una antena típica que transmite en banda C cumpliendo con la recomendación de la UIT. Como se sabe, el enlace ascendente trabaja en el rango de 3.7 – 4.2 GHz y el descendente de 5.925 -6.425 GHz. Para deducir la separación necesaria entre satélites, el lóbulo principal solo deberá transmitir hacia un satélite, por ello el tener 2° de separación para banda C permite minimizar considerablemente las interferencias entre sistemas satelitales adyacentes y puede mejorar si se utilizan antenas de mayor diámetro.

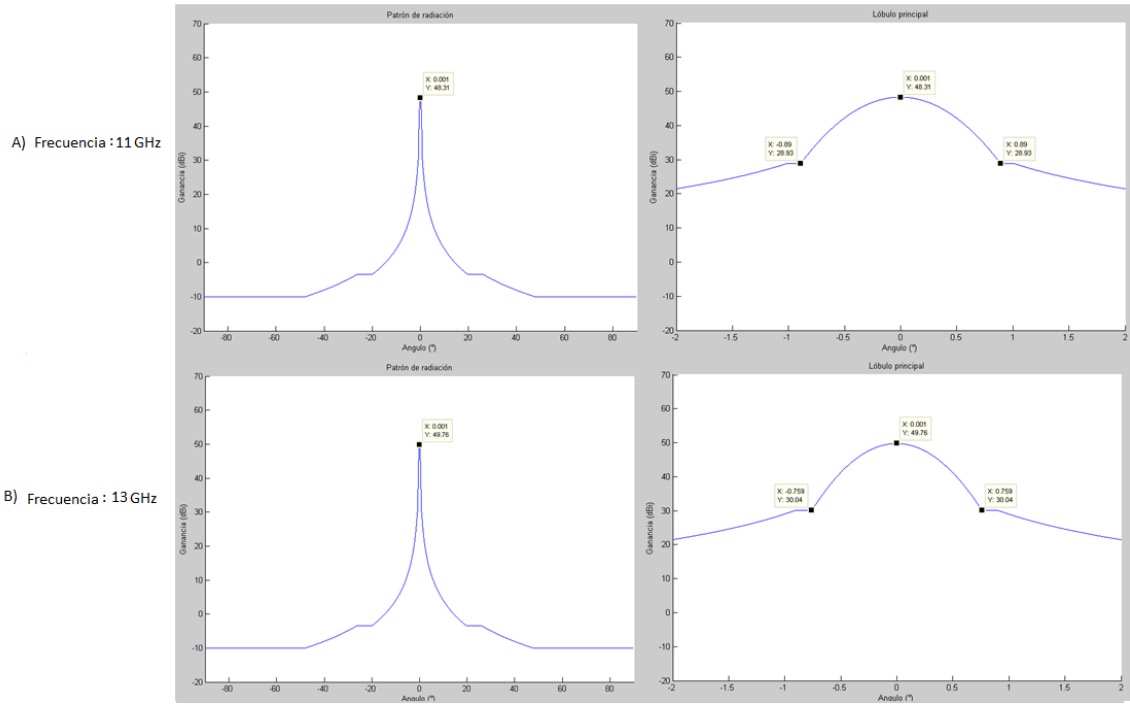


Figura 7-5: Patrón de radiación para una antena de 2.7 metros operando en banda Ku. A) Enlace ascendente. B) Enlace descendente.

Para el caso de antenas de estaciones terrenas que operan en banda Ku, el panorama mejora, ya que son más directivas (como se observa en la Figura 7-5), con la ventaja de utilizar antenas de menor diámetro. En este caso, únicamente utilizando banda Ku, la separación entre satélites podría ser hasta de 1° , doblando la capacidad de la órbita geoestacionaria.

En la actualidad, se tienen satélites con separación de hasta 1.9° , gracias a la coordinación y regulación de operadores satelitales de países que comparten arcos o de la órbita geoestacionaria (por ejemplo México, Estados Unidos y Canadá en América del Norte).

Por último, cabe mencionar que en la separación angular entre satélites se tiene en cuenta el llamado ángulo geocéntrico, lo que en algunas ocasiones se llega a confundir con el ángulo topocéntrico, siendo el primero, el ángulo tomando en cuenta el centro de la Tierra, y el segundo, el ángulo visto desde una estación terrena hacia la órbita geoestacionaria.

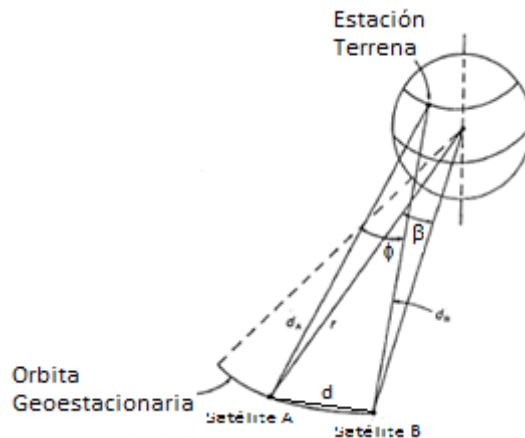


Figura 7-6: Separación de dos satélites geoestacionarios vistos desde una estación terrena.

Tomando como referencia la Figura 7-6, donde β es la separación entre dos satélites geoestacionario (ángulo geocéntrico); ϕ es la separación angular entre 2 satélites geoestacionarios vistos desde una estación terrena (ángulo topocéntrico); d_A y d_B son los rangos del satélite A y el satélite B respectivamente, para la estación terrena; r es la órbita geoestacionaria; y d es la separación entre dos satélites.

Usando la Ley de cosenos se obtiene:

$$d^2 = d_A^2 + d_B^2 - 2d_A d_B \cos \phi$$

También se relaciona d con β usando:

$$d^2 = 2r^2 + 2r^2 \cos \beta = 2r^2(1 + \cos \beta)$$

Comparando las ecuaciones y despejando ϕ se concluye que:

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{d_A^2 + d_B^2 - 2r^2(1 + \cos \beta)}{2d_A d_B} \right]$$

Conversión muy útil para conocer el ángulo de separación a partir de una antena de la estación terrena. El ángulo topocéntrico es muy parecido al geocéntrico para antenas ubicadas en la línea ecuatorial, pero a medida que se alejan de ésta, la diferencia entre ángulos será mayor, lo que tiene que tomarse en cuenta para el diseño de las antenas.

7.5 Técnicas de geolocalización

Las interferencias intencionales representan un porcentaje muy pequeño del total de ocurrencias de interferencia en sistemas satelitales geoestacionarios, sin embargo, cuando estos suceden, es necesario resolverlos lo más pronto posible siendo el primer paso, y el más importante, ubicar el lugar en el que es transmitida aquella señal interferente. Para lograr esto se requiere realizar un proceso de geolocalización.

El concepto de geolocalización está referido, en términos generales, a la determinación de la locación de un vehículo, persona u objeto en la Tierra. En este caso particular, la localización de la fuente de una señal (transmisor) depende de la obtención de una combinación de parámetros tales como frecuencia, tiempo y espacio.

7.5.1 Sistemas de Geolocalización basados en un solo satélite

Para los sistemas de geolocalización basados en un solo satélite se requieren circuitos especiales ubicados dentro de éste. Estos circuitos son: un interferómetro y una antena direccional con detector de energía escaneando la Tierra o una antena especial montada en el satélite con arreglo tridimensional.

Una técnica que no requiere de circuitos especiales está basada en la velocidad residual de satélites geoestacionarios cercanos. Esto parte del hecho de que estos satélites nunca están totalmente estacionados en una posición, ya que existen perturbaciones orbitales que cambian con el tiempo. Como se explicó en capítulos anteriores, los satélites se encuentran dentro de una caja imaginaria

y es necesario realizar ciertas acciones correctivas desde tierra para mantenerlos en su posición nominal.

Los lentos movimientos de los satélites geoestacionarios crean un pequeño corrimiento en frecuencia (corrimiento Doppler). Estos corrimientos pueden llegar a ser del orden de $\pm 0.25^\circ$ Este-Oeste y $\pm 0.1^\circ$ Norte-Sur. Tomando en cuenta la excentricidad de la órbita que está entre los 4.7×10^{-5} y 3.6×10^{-4} , se realiza un cálculo de la máxima velocidad residual de acuerdo al corrimiento Doppler para la frecuencia de la portadora utilizada, por ejemplo: para una portadora de 406 MHz con un corrimiento en frecuencia de 2.27 Hz, se tendría una máxima velocidad residual de 1.68 m/s, tomando en cuenta una excentricidad de 3.6×10^{-4} . Sin embargo, para utilizar este método es necesario contar con osciladores muy estables en el satélite o circuitos muy complejos en la base terrena para lograr mediciones muy precisas del corrimiento en frecuencia.

7.5.2 Sistemas de Geolocalización basados en dos satélites

El contar con dos satélites provee de diversidad espacial que permite utilizar las antenas de cada satélite como una antena en arreglo de fase con dos o más elementos y por ello, se podrían utilizar técnicas de interferometría.

Estas técnicas se caracterizan por realizar mediciones de la señal interferente que se propaga en dos satélites de comunicación ubicados en la órbita geoestacionaria. Debido a las finitas dimensiones de la antena transmisora, cuando se tiene una señal interferente que viaja en dirección del satélite principal o interferido, existen lóbulos laterales de niveles variables en la dirección de satélites adyacentes. Si estos satélites trabajan en bandas de frecuencias dentro de las cuales se tiene la frecuencia de transmisión, entonces se tendrán versiones con menor potencia de la señal interferente que pueden ser recibidas en tierra. Por ello, las señales de los dos satélites pueden ser observadas a través de una estación de monitoreo.

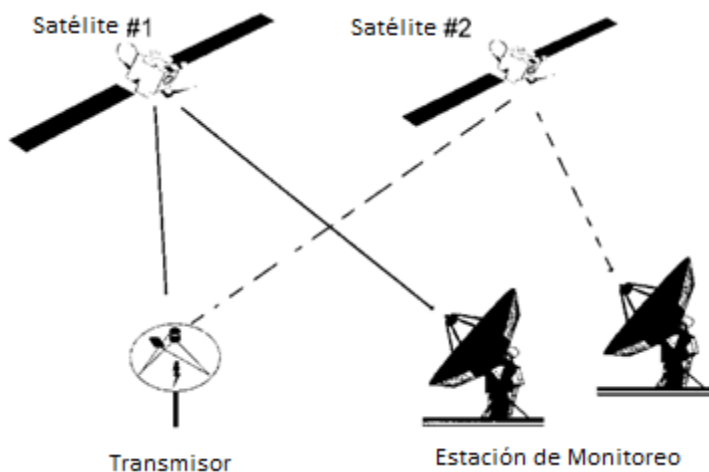


Figura 7-7: Configuración de un sistema de geolocalización que utiliza múltiples satélites.

7.5.3 Detección

Las técnicas de geolocalización requieren de un sistema de detección, debido a que la señal transmitida en los satélites adyacentes es muy débil, por lo que se recurre a la llamada CAF (Cross Ambiguity function), técnica de correlación que utiliza compensación tanto en tiempo como en frecuencia.

Esta función está definida por:

$$A(\tau, \nu) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} s_1(t) s_2^*(t + \tau) e^{-i2\pi\nu t} dt$$

donde s_1 y s_2 son funciones complejas de las dos señales que contienen una componente en común, τ y ν son los parámetros de tiempo y frecuencia compensados, buscados simultáneamente para que el valor de $|A(\tau, \nu)|$ sea el máximo, y T es la duración de la correlación.

Una vez realizada la correlación, se calcula el SNR, el cual está dado por:

$$SNR = \frac{2 BT snr^2}{k[1 + snr(1 + 1/k)]}$$

donde snr es el SNR en la entrada del canal del satélite principal (medido en el receptor del enlace de bajada), B es el ancho de banda del ruido de canal (se asume idéntico en ambos canales), T es el tiempo de integración, y k es el factor de exceso, que se define como:

$$k = \frac{snr \text{ (canal principal)}}{snr \text{ (canal excedido)}}$$

El término $2BT$ es conocido como Ganancia de Procesamiento (PG). De acuerdo a la razón de Nyquist, se tienen $2BT$ muestras independientes en un periodo de tiempo T , por lo tanto:

$$2 BT = N$$

donde N es el número de puntos muestra por canal. En la práctica, esto determina el poder de procesamiento de un TLS.

Para poder identificar el pico de correlación, es necesario que este exceda el valor del ruido de fondo, considerando que existen correlaciones espurias debido al ruido, la SNR obtenida después de la correlación debe ser de por lo menos 20 dB.

La directividad de la antena transmisora, la sensibilidad de los canales satelitales, la buena implementación del sistema de monitoreo de la estación terrena, y el PG del equipo utilizado para el procesamiento de la señal, son factores que se relacionan con la efectividad en la detección de la señal interferente.

Debido a la gran variedad de niveles de señal, tipos de antena y tipos de onda en las comunicaciones satelitales y en la posibilidad de interferencias exteriores, es difícil determinar, en general, cuando la señal puede ser detectable en un satélite adyacente. Además de las características de radiación de la antena transmisora y de la potencia de transmisión, el impacto que tiene sobre otras señales en los canales tanto del satélite interferido como del adyacente, deben ser considerado (por ejemplo intermodulación o señales inducidas en polarizaciones contrarias). Estas señales deben de tratarse como simples contribuciones de ruido.

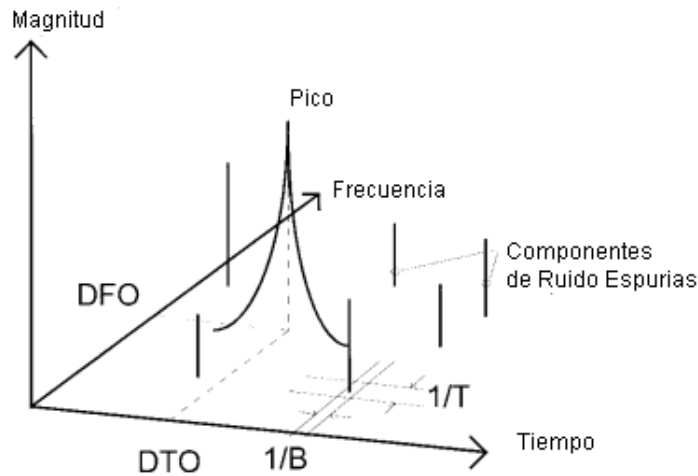


Figura 7-8: CAF y componentes espurias de ruido.

De acuerdo a la relación entre la SNR de recepción de las dos terminales terrenas y al rendimiento de la antena, es posible inferir el tamaño de la antena posible a detectar para una separación angular dada de los satélite, o al contrario, dado el tamaño de la antena, cual es la máxima separación angular para la cual es posible la detección de la señal en el canal del satélite adyacente.

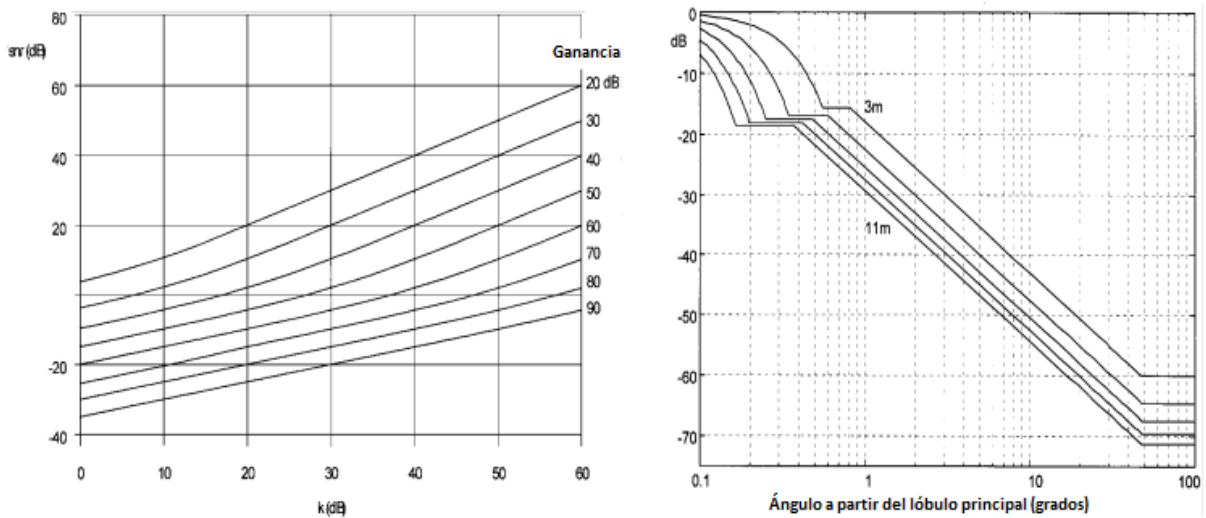


Figura 7-9: Relación entre el SNR del canal principal y la discriminación entre los dos canales con PG como parámetro. Se toma en cuenta una SNR después de la correlación de 20 dB. Y el patrón de radiación de distintas antenas de banda Ku, tomando en cuenta su diámetro.

Para ejemplificar esto, si se tuviera un TLS con PG de 60 dB, asumiendo que la señal tiene un SNR de 10 dB medida en el satélite interferido. Considerando la sensibilidad del canal del satélite adyacente idéntica a la del canal del satélite interferido. De acuerdo a la Figura. se tiene que con un valor k de 50 dB se puede obtener una adecuada correlación. Por otro lado, la detección puede ser realizada con satélites alejados más de 6° de la dirección del transmisor con una antena de 11m de diámetro y con satélites 20° apartados utilizando una antena de 3m.

De acuerdo a los parámetros utilizados, las técnicas utilizadas en los sistemas de geolocalización se pueden dividir en tres:

- Time Difference of Arrival (TDOA)
- Frequency Difference of Arrival (FDOA)
- FDOA/TDOA

TDOA se obtiene a partir de la diferencia en la longitud de los dos distintos caminos que toma la señal para viajar del transmisor hacia cada satélite. Conociendo la ubicación de los dos receptores en tierra que detectan ambas señales, además de la distancia entre los satélites y la estación terrena, se realiza la estimación con la diferencia de tiempos de llegada, gracias a un sistema receptor de dos canales capaz de estimar con precisión la diferencia de retardo entre los dos caminos.

Debido a su geometría, se le conoce como posicionamiento hiperbólico, ya que, dado que se conoce la ubicación de los dos receptores y además se conoce el TDOA, la posible ubicación de la fuente de la señal se encuentra en una mitad de un hiperboloide de dos hojas.

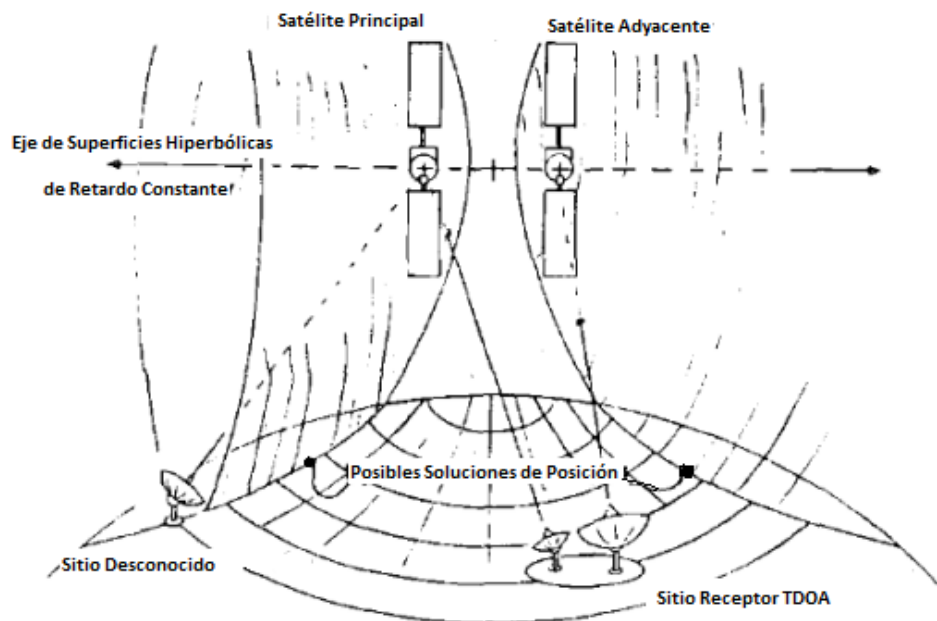


Figura 7-10: Geometría tridimensional de TDOA.

Una ventaja del uso de TDOA es que permite localizar la fuente de la señal sin necesidad de interrumpir las transmisiones actuales realizadas por los dos satélites, ya que no requiere ningún equipamiento adicional en ellos.

Otra característica importante es su capacidad para localizar fuentes generadoras de un amplio rango de tipos de señal. Casi cualquier señal modulada (video, audio, digital, etc.) puede ser localizada basándose en la medida de la diferencia en el tiempo de retardo de una porción de la forma de onda. Inclusive aquellas señales de ruido pseudoaleatorio pueden ser localizadas utilizando una variable de tiempo de retardo correlacionado para inferir la diferencia en tiempo de retardo. Sin embargo, cuando se presenta el caso de querer localizar una señal CW (Continuous Wave) conocida como senoidal pura o portadora limpia (debido a que no está modulada y, por lo tanto, no con-

tiene información) resulta imposible obtener un resultado no ambiguo, ya que para que esto suceda, el periodo de la señal CW tendría que ser mayor a la diferencia de tiempo de retardo.

Un problema del uso de TDOA como única herramienta de localización, es que el transmisor se localiza dentro de una curva en la superficie terrestre generada por la diferencia de tiempos de llegada, el problema reside en que la curva es de gran longitud, dejando como resultado una superficie muy amplia para poder definir la ubicación de la fuente.

Para resolver el problema de la ambigüedad se pensaron en varias soluciones. La primera consistió en usar la multilateración, que consiste en utilizar más de dos receptores, los cuales reciben la señal transmitida por el satélite y, por medio de una unidad central, localizan de manera más precisa la fuente de transmisión, sin embargo, tendrían que estar a una cierta distancia para poder funcionar y aun así no resolverían el problema de encontrar fuentes generadoras de señales CW.

Otra opción consistía en utilizar un satélite adyacente adicional, esto quiere decir, contar con 3 caminos distintos, el satélite principal y 2 adyacentes, de esta forma, se podría trazar una curva distinta para la diferencia de tiempos de llegada, generaría dos superficies que no serían más que mitades de hiperboloides. El transmisor se encontraría en la intersección de las dos, sin embargo esto no elimina la ambigüedad, ya que la intersección de dos superficies solo generaría una curva y no un punto en el mapa.

Un problema común en los dos métodos propuestos es que requieren infraestructura extra y que sería implementada con la única función de ayudar a la geolocalización y, sin embargo, no serían suficientes para tener resultados precisos.

FDOA también llamada diferencial Doppler, es una técnica análoga a TDOA. Como su nombre lo dice, utiliza el efecto Doppler para obtener la ubicación del transmisor gracias a una diferencial calculada a través de las diferentes posiciones de cada receptor y a la velocidad relativa de cada satélite, gracias a que estos están en constante movimiento, ya que si tanto los satélites, como los receptores estuvieran fijos, no se podría dar el efecto Doppler necesario para esta técnica.

A diferencia de TDOA, la infraestructura y la configuración necesaria para FDOA es muy compleja, lo que conlleva a requerir equipos más caros y robustos. La ventaja de este método es que puede encontrar transmisores aun a pesar de que estos transmitan portadoras puras o CW, a diferencia de TDOA que le resulta muy complicado poder predecir la ubicación de transmisores de este tipo.

La desventaja más importante de este método es el tiempo que tarda en dar un resultado, debido a la gran cantidad de datos que requiere para poder realizar la correlación cruzada, necesaria para el cálculo de desplazamiento Doppler.

Al igual que TDOA, con FDOA se obtienen curvas, en este caso, perpendiculares a aquellas obtenidas con la otra técnica, esto debido a que una trabaja en tiempo y la otra en frecuencia, obteniendo componentes ortogonales.

7.5.4 Estimación de las componentes de diferencia de tiempo y de frecuencia

Para la estimación, ya sea en el caso de TDOA o de FDOA, se utiliza una variable de incertidumbre definida como:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{B_u \sqrt{SNR}} ; \sigma_v = \frac{1}{T_u \sqrt{SNR}}$$

Donde σ_τ es la incertidumbre de la diferencia de tiempo y σ_ν es la incertidumbre de la diferencia de frecuencia en unidades rms. SNR es la obtenida después de la correlación y los términos B_u y T_u son el ancho de banda y la duración de la señal, respectivamente, también con unidades rms, los cuales se obtienen con:

$$T_u = 2\pi \frac{\sqrt{\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} t^2 |u(t)|^2 dt}}{\sqrt{\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |u(t)|^2 dt}};$$

$$B_u = 2\pi \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 G_u(f) df}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} G_u(f) df}}$$

Donde $u(t)$ es la señal en el dominio del tiempo y G_u es la densidad espectral de potencia de la señal.

Con esto, dado un valor asumido de SNR, la precisión de la estimación de diferencia de tiempo de llegada depende directamente del ancho de banda de la señal y, por el otro lado, la precisión de la estimación de diferencia de frecuencia de llegada dependerá directamente de la duración de la señal.

Por ello para el caso de señales moduladas, las cuales tiene un mayor ancho de banda que las CW, es más conveniente utilizar TDOA al tener un máximo ancho de banda, en cambio, para el caso de señales CW, lo ideal es utilizar FDOA, siendo esta, una técnica que requiere un tiempo considerable para el procesamiento de los datos pero que no depende del ancho de banda de la señal.

Además de estos parámetros, también es conveniente tomar en cuenta otras contribuciones de error, tales como el equipo de medición, la propagación y les efemérides del satélite. Por ejemplo: los efectos de propagación pueden retrasar las señales, lo cual afecta directamente a la medición de la diferencia de tiempo de llegada, además de los errores en la posición del satélite. Las diferencias en el oscilador de translación del satélite y errores en la velocidad relativa afectarán directamente a la diferencia de frecuencia de llegada.

Para disminuir estos errores se suele utilizar una señal de referencia transmitida a través de una terminal conocida y bien localizada. Dicha señal se transmite tanto en el satélite principal como en el adyacente y se recibe en los receptores utilizados para la estimación. Esto tiene como beneficios:

- Eliminación de los errores de oscilación del satélite y retraso de la señal provocados por efectos de propagación, teniendo una señal de referencia con la cual se comparan esos efectos.
- La señal de referencia originada de un punto conocido permite localizar al transmisor desconocido a una distancia relativa con respecto al transmisor conocido. Gracias a esto, errores de posición y velocidad que producen efectos en TDOA y FDOA que son comunes a ambos transmisores pueden ser reducidos considerablemente.

7.5.5 Combinación de técnicas FDOA y TDOA

En la actualidad se utilizan técnicas que combinan ambos parámetros: TDOA y FDOA. Estos valores se utilizan para generar líneas de posición las cuales se dibujan en una computadora que genera

un mapa. La intersección de las líneas de posición se utiliza para obtener lo que se conoce como elipse de probabilidad dentro del cual se encuentra el transmisor que genera la señal interferente. Las mediciones se pueden realizar con cualquier combinación, ya sea TDOA/TDOA, FDOA/FDOA y FDOA/TDOA. Cada combinación tiene sus usos en diferentes escenarios de interferencia, pero por mucho, el método más rápido para la localización de un emisor es FDOA/TDOA.



Figura 7-11: Elipses de probabilidad.

Esta técnica requiere únicamente dos satélites monitoreando simultáneamente, en comparación con TDOA/TDOA que requiere de 3 satélites y FDOA/FDOA que requiere que los satélites cambien de posición.

Con todas las implicantes de tener TDOA y FDOA por separado, lo ideal es juntarlos. FDOA por su gran capacidad de medición de todo tipo de escenarios de interferencia y TDOA por la rapidez en las mediciones. Esta combinación permite obtener estimaciones de geolocalización instantáneas usando únicamente dos satélites. También se cuenta con escenarios de interferencia que TDOA solo no podría resolver. Por ejemplo, el hecho de que las líneas de FDOA varían de acuerdo a la superficie de la tierra en periodos relativamente cortos de tiempo es una ventaja ya que permite la localización rápida y precisa de señales que no están moduladas, pero tienen una frecuencia constante.

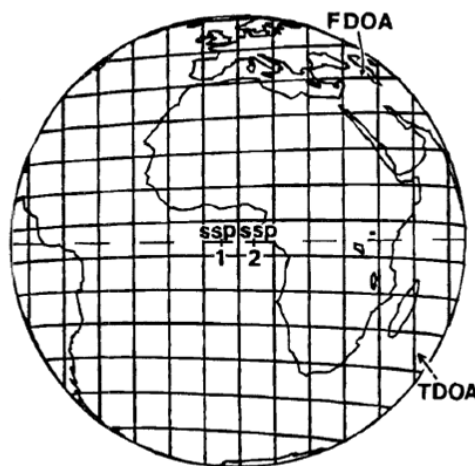


Figura 7-12: Líneas de posición utilizando FDOA/TDOA con 2 satélites.

Para satélites más viejos, un error dominante es el ruido de fase en el transpondedor. Por esto, un buen sistema de geolocalización debe tener la capacidad de eliminar los efectos de este ruido y

producir mediciones de TDOA y FDOA corregidas. Esto incrementa drásticamente la precisión en la estimación. El no eliminar los efectos del ruido de fase podría reducir mucho esta precisión, incluso llegando al punto de ser inútil la medición.

Estos sistemas de geolocalización suelen ser implementados para su uso fácil y rápido en interfaces gráficas o GUI (Graphic User Interface) las cuales se conectan al equipo de medición, un procesador digital de señales, un generador de señales y la cadena ascendente de transmisión de la estación terrena que se usarán para estimar la zona de donde proviene la señal interferente.

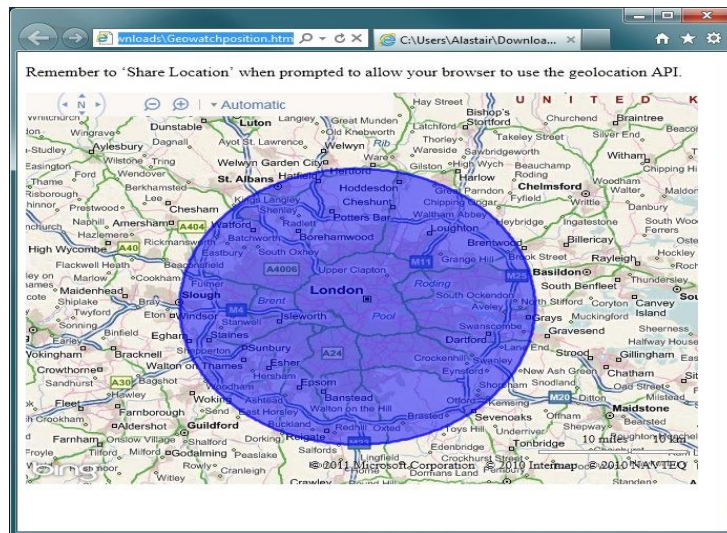


Figura 7-13: Elipse de probabilidad obtenida a través de una interfaz gráfica (GUI).

Una vez que se tiene ubicada la elipse, el siguiente paso es buscar posibles lugares de donde proviene la transmisión, y si es necesario, ir al lugar para realizar una investigación en la cual, en algunas ocasiones, es necesario contactar a organismos reguladores locales para resolver el problema de interferencia.

La relación entre TDOA y FDOA provoca que se tengan variaciones tanto espaciales como temporales. Esto quiere decir que, para el caso de las variaciones temporales, una geolocalización no dará el mismo resultado si se realiza en el día que en la noche, además de que hay la posibilidad de caer en lo que se denomina como “tiempos ciegos” en los cuales la geolocalización no se pueda llevar a cabo, efecto provocado por la geometría de la Tierra y de los satélites en conjunto con las estaciones de monitoreo. En cuanto a las variaciones espaciales, se dan debido a que la Tierra y los satélites están en movimiento, por lo que las distancias suelen ser distintas en cada momento. Se puede dar el caso de tener un “espacio ciego”, esto es, cuando el transmisor al que se intenta geolocalizar se ubica en el horizonte o muy cercano a este, lo que provoca que alguno de los satélites no pueda ubicarlo y, por lo tanto, no se realice el proceso como se desea.

Una vez analizadas las tres técnicas principales para la geolocalización de transmisores, es importante concluir que, tanto FDOA como TDOA tienen sus ventajas y desventajas, por ello FDOA/TDOA logra un completo análisis, siendo el tiempo de procesamiento la única variante que depende del tipo de portadora (modulada o no modulada), así como su técnica de acceso (TDMA, FDMA, CDMA, etc.). Para saber que técnica utilizar, es importante conocer qué tipo de interferencias se presentan con frecuencia, los recursos con que se cuenta y la posibilidad de implementar sistemas más robustos tanto de detección como de procesamiento.