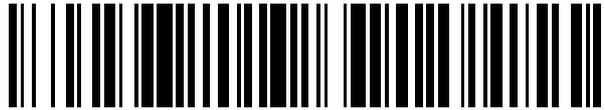


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 590 761**

51 Int. Cl.:

G01S 5/06 (2006.01)

G01S 5/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.12.2005 PCT/GB2005/050223**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.06.2006 WO06059155**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.12.2005 E 05815982 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.08.2016 EP 1828799**

54 Título: **Geolocalización de emisores**

30 Prioridad:

03.12.2004 GB 0426815

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

23.11.2016

73 Titular/es:

**SELEX ES LTD (100.0%)
Christopher Martin Road
Basildon, Essex SS14 3EL, GB**

72 Inventor/es:

**SARNO, G. C. y
LARSEN, RAY**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 590 761 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Geolocalización de emisores

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un método y a medios para localizar la posición de un emisor de ondas electromagnéticas mediante una pluralidad de receptores.

Antecedentes de la invención

10 Son bien conocidos sistemas para calcular información de posición de un emisor basado en tierra a partir de varias plataformas aerotransportadas. Algunas técnicas, conocidas como geolocalización mediante emisores o geolocalización mediante emisores de plataformas múltiples, incorporan varias tecnologías de radar, GPS y comunicaciones. Una técnica de este tipo comprende calcular la diferencia de tiempo de llegada (TDOA) de una señal procedente de un emisor que llega a un número de receptores. En "Microwave Emitter Position Location: Present and Future", Paradowski, páginas 97-116, 12th International Conference on Microwaves and Radar, 1998. MIKON '98, Volumen: 4, 20-22 de mayo de 1998, se presenta una reseña de técnicas de localización.

15 En los sistemas de radar, para poder deducir una distancia correcta hasta un emisor, son necesarias correcciones por la desviación de la línea de propagación debida a la refracción en la atmósfera de la tierra. En "Radar Range-Performance Analysis", de LV. Blake, Lexington Books, se describen algoritmos detallados.

Resumen de la invención

20 Según la invención, se da a conocer un método para localizar un emisor de ondas electromagnéticas utilizando una pluralidad de receptores, comprendiendo el método las etapas de: (a) detectar los tiempos de llegada de dichas ondas electromagnéticas a dichos receptores; (b) calcular la diferencia de tiempo de llegada relativa entre dichos receptores usando dichos tiempos de llegada detectados; (c) estimar la posición del emisor a partir de dichas diferencias de tiempo de llegada relativas calculadas; y (d) corregir dichos tiempos de llegada detectados por discrepancias de longitud de trayectoria provocadas por la atmósfera de la tierra; caracterizado por que la etapa (d) incluye las etapas adicionales de: (e) medir las diferencias de tiempo de llegada entre pares de dichos receptores; (f) obtener una estimación de la posición del emisor asumiendo una trayectoria en línea recta entre cada receptor y dicho emisor; (g) para cada receptor, usar dicha estimación y obtener la distancia en tierra del emisor a una plataforma de recepción; (h) usar dicha distancia en tierra, la altura conocida de la plataforma de recepción y un perfil de refracción asumido en una ecuación integral de trazo de rayos seleccionada para predecir una longitud de trayectoria real; (i) obtener la diferencia entre dicha longitud de trayectoria predicha y dichas trayectorias en línea recta para formar correcciones en dichas diferencias de tiempo de llegada; (j) repetir las etapas (e) a (i) hasta que dichas correcciones converjan; y (k) aplicar dichas correcciones convergidas para corregir dichos tiempos de llegada detectados de dichas ondas electromagnéticas a dichos receptores.

35 Según la invención, también se da a conocer un aparato para llevar a cabo el método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, comprendiendo el aparato: una pluralidad de receptores, incluyendo cada receptor medios para detectar el tiempo de llegada de ondas electromagnéticas recibidas en los mismos; medios para calcular las diferencias de tiempo de llegada relativas entre dichos receptores y para estimar la posición de dicho emisor; y medios para corregir dichos tiempos de llegada detectados por discrepancias de longitud de trayectoria provocadas por la atmósfera de la tierra; caracterizado por que los medios de corrección están dispuestos para llevar a cabo las siguientes etapas: (a) medir las diferencias de tiempo de llegada entre dichos pares de dichos receptores; (b) asumir trayectorias en línea recta, obtener una estimación de la posición del emisor; (c) para cada receptor, usar dicha estimación para obtener la distancia en tierra del emisor a una plataforma de recepción; (d) usar dicha distancia en tierra y la altura conocida de la plataforma de recepción y un perfil de refracción asumido en una ecuación integral de trazo de rayos seleccionada, predecir una longitud de trayectoria real; (e) obtener la diferencia entre dicha longitud de trayectoria predicha y la trayectoria en línea recta obtenida a partir de la posición estimada del emisor para formar una corrección en dichas diferencias de tiempo de llegada en la etapa (a); (f) volver a la etapa (a) y; continuar hasta que las correcciones en la etapa (e) converjan; aplicar a continuación dichos tiempos de llegada detectados de dichas ondas electromagnéticas a dichos receptores.

50 En al menos una realización preferida, la invención incluye un algoritmo que aplica una corrección por el efecto de propagación atmosférica del tiempo de llegada (TOA) de una señal RF que sale de un emisor basado en tierra y que es recibida en un número de plataformas aerotransportadas. La variación en el perfil de refracción de la atmósfera provoca que las señales RF se "doblen" y se desvíen de una trayectoria en línea recta. Por lo tanto, la trayectoria real seguida por la señal es más larga que la trayectoria directa. Esto afecta a la estimación del tiempo de vuelo de la señal. Un método tradicional de localización de emisores es la TDOA, que usa la diferencia en el tiempo de vuelo observada por pares de plataformas de recepción. Tal como se ha descrito anteriormente, la desviación de la trayectoria afectará a estas mediciones y, de este modo, afectará a la localización del emisor. Sin una corrección de la desviación de la trayectoria, la estimación de la localización del emisor presentará errores significativos.

55 El algoritmo es un esquema iterativo que permite obtener una estimación refinada de la localización del emisor. Esto

5 se lleva a cabo formando una estimación inicial de la localización del emisor usando la técnica TDOA y las mediciones de TOA no corregidas. A continuación se usa una integral de trazo de rayos con esta estimación de localización de emisores inicial para estimar la trayectoria real (a cada plataforma de recepción). Esto da como resultado mediciones de TOA refinadas, por lo tanto, mediciones de TDOA refinadas y, por lo tanto, una estimación de localización de emisores refinada. El procedimiento continúa hasta que las diferencias entre correcciones de TDOA sucesivas son suficientemente pequeñas.

10 La invención mejora la estimación de la localización de un emisor cuando se usan plataformas aerotransportadas para localizar emisores basados en tierra, especialmente cuando las plataformas de recepción están alejadas una gran distancia del emisor. De forma sorprendente, se ha comprobado que son necesarias muy pocas iteraciones antes de que se obtenga una convergencia a una solución aceptable. Además, se ha comprobado que la invención funciona con atmósferas no estándar, incluyendo perfiles de refracción atmosféricos especializados. La invención puede funcionar con cualquier perfil de refracción atmosférico arbitrario, incluso si no está definido totalmente por ecuaciones matemáticas.

15 La invención se ha probado en el contexto de la localización de un emisor RF basado en tierra mediante plataformas aerotransportadas. La invención funciona con pocas modificaciones en sentido contrario, es decir, con la localización de un emisor aerotransportado mediante plataformas de recepción basadas en tierra (o aerotransportadas).

Es posible aplicar la invención en variaciones de longitud de trayectoria en el contexto de la localización de emisores sujetos a diferentes efectos atmosféricos, teniendo en cuenta que el efecto atmosférico pueda ser representado en función de parámetros geométricos tales como la distancia y la altura.

20 Por lo tanto, teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se entenderá que la invención también se basa en un programa informático que comprende medios de código de programa que, al estar cargados en un ordenador, permitirán que el mismo funcione en el aparato descrito anteriormente en la presente memoria. Además, la invención también se basa en un programa informático que comprende medios de código de programa para llevar a cabo las etapas de método descritas anteriormente en la presente memoria cuando el programa se ejecuta en un ordenador.

25 Además, la invención también se basa en un producto de programa informático que comprende medios de código de programa almacenados en un medio que puede ser leído por ordenador para llevar a cabo las etapas de método descritas anteriormente en la presente invención cuando el programa se ejecuta en un ordenador.

Breve descripción de los dibujos

30 A continuación se describirá una realización preferida de la invención, haciendo referencia a los dibujos que se acompañan, en los que:

la Figura 1 es una ilustración esquemática de una realización preferida de la invención que muestra el efecto de la refracción atmosférica en la trayectoria de propagación de la señal entre un emisor en tierra y una plataforma de recepción aerotransportada;

35 la Figura 2 es un diagrama de flujo de un algoritmo de estimación de corrección de TDOA incorporado en la realización preferida;

la Figura 3 es una figura geométrica usada en el algoritmo de la Figura 2;

la Figura 4 es un diagrama de bloques de una modificación de la primera realización que utiliza un filtro Kalman;

la Figura 5 es una gráfica de una estimación de localización de un emisor real antes/después de la corrección de la refracción en un ejemplo;

40 la Figura 6 es un histograma que muestra el número de iteraciones necesarias para conseguir la convergencia en el algoritmo de la Figura 2;

la Figura 7 es una gráfica que muestra la solución de localización sin una corrección con un filtro Kalman; y

la Figura 8 es una gráfica que muestra la solución de localización con una corrección con un filtro Kalman.

Descripción de la realización preferida

45 En un sistema de localización que usa mediciones de diferencia de tiempo de llegada (TDOA) para geolocalizar un emisor, se ha asumido previamente que la trayectoria de rayo del emisor a cada plataforma de medición es una línea recta. Sin refracción, esta asunción es cierta. No obstante, las ondas electromagnéticas siempre son refractadas (desviadas) por diversos motivos. El índice de refracción de la atmósfera cambia con la presión del aire, la temperatura y el contenido de agua y es una función de la altura. Las capas, tales como las capas de evaporación

50 sobre la superficie del mar, también provocarán la desviación de los rayos.

Un perfil de refracción habitual (refractividad con respecto a altura) en los radares consiste en asumir una atmósfera que tiene un gradiente constante con la altura. Esto crea el "modelo 4/3", en el que el radio de la tierra se multiplica

por 4/3 para obtener una tierra en la que los rayos EM se convierten en líneas rectas. Este modelo resulta satisfactorio para bajas alturas; más allá de aproximadamente 5 a 8 km, el modelo no es representativo. Existen varios perfiles diferentes, incluyendo los específicos de regiones concretas. Para distancias oblicuas (slant ranges) previstas al emisor que son grandes (> 300 km) el efecto de desviación de rayos pasa a ser importante. Sin corrección, es razonable asumir que la estimación de la localización del emisor sea incorrecta (tal como se muestra más adelante, especialmente en altura). Según la invención, se da a conocer un algoritmo iterativo que permite aplicar una estimación de correcciones en mediciones de TDOA para convertir las mediciones que representan la trayectoria en línea recta (sin refracción) del emisor a cada plataforma de ELS (sistema de localización de emisores). Es posible usar un filtro Kalman para refinar la estimación de la localización del emisor.

El problema debido a la refracción a través de la atmósfera de las transmisiones de un emisor en la geolocalización de emisores se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Se muestran cuatro ELS 1, 2, 3 y 4 que permiten obtener tres pares de plataformas de medición. La emisión desde un emisor sufre refracción y será vista en una plataforma ELS con un tiempo de llegada (TOA), R , más grande de lo previsto con respecto a una trayectoria (R_T) en línea recta. La TDOA resultante de un par de plataformas será diferente a la TDOA obtenida asumiendo trayectorias R en línea recta, ya que la desviación de la trayectoria a cada plataforma será diferente. Cada ELS incluye una antena A de radar, un receptor Rx, un controlador C y un transceptor T. La TDOA obtenida a partir de un par de plataformas ELS caracteriza un hiperboloide en el espacio, cuya superficie representa una región de la posible localización del emisor, para derivar el mismo valor de TDOA (con un error de medición existe una incertidumbre en la posición real del emisor). Los hiperboloides basados en los valores de TDOA reales serán diferentes en forma a los que representan las TDOA en línea recta y, de este modo, la intersección de los hiperboloides (en este caso, tres, de los tres pares de plataformas ELS), que representa la localización del emisor, también será errónea.

Las plataformas de recepción observan las señales procedentes de un emisor con un tiempo de vuelo relacionado con la distancia R . No obstante, en estas plataformas, al intentar localizar el emisor, se ha asumido previamente que la trayectoria está indicada por R_T . Se asume que el emisor estará más alejado de lo que está. La técnica de TDOA obtiene en realidad diferencias en las trayectorias desviadas R para las diversas plataformas de recepción usadas y, por lo tanto, obtiene mediciones de TDOA incorrectas. Según la invención, la siguiente ecuación indica la TDOA obtenida a partir de las plataformas i y j (hablando estrictamente, esta ecuación define una diferencia de distancia de llegada en lugar de la diferencia de tiempo, aunque esto no resulta importante en lo que respecta al algoritmo):

$$TDOA_{i,j} = f(\hat{X}_j, \hat{Y}_j, \hat{Z}_j, x_e, y_e, z_e) - f(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i, x_e, y_e, z_e) + \gamma_j - \gamma_i$$

donde f es una función no lineal que da una distancia oblicua (o, de forma equivalente, un tiempo de vuelo en línea recta) del emisor en (x_e, y_e, z_e) a la plataforma en (X, Y, Z) . Las posiciones de las plataformas están indicadas como $(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z})$ para destacar que las posiciones de las plataformas no son conocidas exactamente y, por lo tanto, contribuyen a la medición errónea de la TDOA. γ_i es la trayectoria adicional debida a la desviación de la trayectoria (en distancia o en tiempo) para la plataforma i en comparación con una trayectoria en línea recta.

La invención minimiza $\gamma_j - \gamma_i$, la longitud de trayectoria residual debida a diferencias en la desviación de trayectoria a las plataformas i y j . El algoritmo se describe mediante el diagrama de flujo mostrado en la figura 2. Las etapas son las siguientes:

1. Medir la TDOA entre pares de plataformas (mínimo de 3 pares necesarios para la localización en 3D del emisor).
2. Asumir trayectorias en línea recta, usar un algoritmo, p. ej., Leva "An alternative closed-form solution to the GPS pseudorange equations" Mitre Journal 1997, páginas 39 a 54, para obtener una estimación en 3D de la posición del emisor.

A continuación, para cada plataforma de recepción:

3. Usando esta estimación de emisor inicial, obtener la distancia G en tierra del emisor a una plataforma de recepción.
4. Usar la distancia en tierra, la altura de la plataforma de recepción (conocida), y asumir el perfil de refracción en una ecuación integral de trazo de rayos (ver L. V. Blake, "Radar Range-Performance Analysis", Lexington Books) para predecir la longitud de trayectoria desviada:

$$R = \int_{h_0}^{h_i} \frac{n(h)}{\sqrt{1 - \frac{n_0 \cos(\theta_0)}{n(h) \left[1 + \frac{h}{re}\right]^2}}} dh$$

donde $n(h)$ describe el perfil de refracción atmosférico en función de la altura

n_0 es el índice de refracción en la superficie de la tierra

θ_0 es el ángulo de salida del rayo en el emisor

h_0 y h_1 son las alturas inicial y final de la trayectoria

5 re es el radio de la tierra

La integral se reformula a efectos de este algoritmo, de modo que la integral se calcula en términos de distancia en tierra, en vez de en términos de altura. Un problema de usar lo anteriormente descrito consiste en que el ángulo de salida para cada trayectoria refractada no es conocido. Este es el motivo por el que es necesaria una estimación inicial de la localización del emisor, ya que la misma permitirá obtener una estimación de la distancia entre el emisor y la plataforma (p. ej., la distancia en tierra). Reformulando la anterior integral en una forma diferente, es posible integrar en términos de distancia en tierra; de este modo, el cálculo de la trayectoria toma la forma de un problema de búsqueda de raíz sencillo en el que se intenta hallar un ángulo de salida que forma una trayectoria con la altura final h_1 correcta con la distancia G en tierra correcta. El algoritmo para integrar numéricamente esta integral de trazo de rayos "alternativa" es el siguiente (ver el triángulo rectángulo de la Figura 3):

10

15

$$dS = C \cdot dR + \left| (m^2 - C^2)^{1/2} \cdot dz / (1 + z/a) \right|$$

$$dz/dR = (1 + z/a) \cdot (m^2 - C^2)^{1/2} / C$$

o

$$dz = (1 + z/a) \cdot (m^2 - C^2)^{1/2} \cdot dR / C$$

donde $C = (1 + z_0/a) \cdot n_0 \cdot \cos(\theta_0)$ (es decir, una constante)

20

z_0 es la altura inicial

a es el radio de la tierra

n_0 es el índice de refracción inicial (es decir, 1,000300, o una cifra aproximada)

θ_0 es el ángulo de elevación inicial (ángulo sobre la horizontal)

$m = (1 + z/a) \cdot n$ (m se conoce como el índice de refracción modificado)

25

5. Obtener la diferencia entre la longitud de trayectoria desviada estimada y la trayectoria en línea recta (obtenida a partir de la posición estimada del emisor). Esto forma una corrección de la medición de la TDOA en la etapa 1. A continuación, ir a la etapa 2.

6. Continuar hasta que las correcciones en la etapa 5 converjan.

30

De forma adicional, es posible utilizar un filtro Kalman, tal como se muestra en la Figura 4, para filtrar las estimaciones de localización del emisor. Debido a que el filtro Kalman se usa con más de una medición, el esquema de corrección se aplica en varias mediciones de TDOA por separado y las correcciones (a partir de la etapa 6 anterior) se promedian.

35

Por lo tanto, la diferencia entre la longitud R de trayectoria refractada y la distancia oblicua R_T para una plataforma específica forma una corrección de las mediciones de TDOA. Las mediciones ajustadas de TDOA se usan a continuación para obtener una estimación "refinada" de la posición del emisor y, de este modo, estimaciones "refinadas" de distancias en tierra y una estimación "refinada" de la corrección de TDOA. Es previsible que exista un punto en el que las correcciones no cambian significativamente. Es posible que se produzcan situaciones en las que esto pueda suceder, aunque un factor que lo evita son las trayectorias muy similares de las plataformas ELS (las plataformas están próximas entre sí con respecto a su distancia al emisor), ya que, de este modo, las variancias de trayectoria mencionadas anteriormente serán relativamente pequeñas, provocando una estimación inicial razonable de la posición del emisor.

40

Ilustraciones

45

La invención se ha probado mediante simulación en un número de casos diferentes, aunque con el escenario básico que consiste en un emisor situado a más de 300 km de 4 plataformas de recepción aerotransportadas próximas entre sí a una altura nominal de 10 km. Se han asumido diversos perfiles de refracción, incluyendo el modelo exponencial ITU estándar y uno representativo de Dakar, siendo este un caso especialmente "negativo" para la desviación de rayos. Se comprobó el comportamiento del algoritmo en presencia y ausencia de otros errores de medición, así como su interacción con una etapa adicional de refinación de estimación (filtrado Kalman).

La Figura 5 muestra el efecto de la corrección de la estimación de la posición del emisor en presencia de refracción atmosférica a través del modelo exponencial ITU estándar (y sin otros errores de medición). En este caso, la localización del emisor se estimó perfectamente. Sin corrección, el emisor se localizó a aproximadamente 28 m de su posición real.

5 En otro ensayo, se observó el resultado de la etapa de refinamiento del filtro Kalman, tal como se muestra en la Figura 4. Las Figuras 7 y 8 muestran el resultado del filtro Kalman en su estado estable (es decir, cuando su resultado ha convergido), quedando sometidas las mediciones de TOA a desviaciones de trayectoria, descritas mediante un modelo para Dakar, en primer lugar, sin corrección y, posteriormente, con corrección a través del esquema propuesto. Cuantitativamente, la mejora obtenida con respecto a varias pruebas estadísticas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla: desviación promedio y estándar de error de solución de localización EKF (hasta dos cifras decimales)

	Latitud (m)		Longitud (m)		Altitud (m)	
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.
Corrección	0,51	048	-2,59	8,06	-17,71	14,77
Sin corrección	-3,92	0,49	32,29	8,11	1576,08	14,9

Se usó una aproximación estadística para analizar la convergencia de solución del algoritmo de la Figura 2. Se sintetizaron 200 grupos de mediciones de TDOA (cada grupo consiste en tres valores de TDOA obtenidos a partir de las cuatro plataformas ELS) con errores de medición aleatorios. Se procesó cada medición tal como se ha descrito anteriormente, y se registró el número de iteraciones necesarias para obtener la convergencia. Los resultados se muestran en la Figura 6.

Las observaciones de los resultados mostraron que existía una diferencia pequeña en la convergencia de pares de plataformas diferentes, de este modo, los resultados de los tres pares se combinaron para formar un histograma. Por lo tanto, se analizaron 600 valores de iteración. Estos casos cubren dos niveles diferentes de error de posición de plataforma: 1 m y 5 m, y tres niveles de error de TOA: 5 ns, 10 ns y 15 ns. Estos valores representan una desviación estándar. Estos valores se seleccionaron para examinar la manera en que el nivel de error de medición afecta a la estimación de la corrección de TDOA.

Tal como se muestra, son suficientes de dos a cuatro iteraciones para “asegurar” la convergencia a una solución. En el caso de un comportamiento oscilatorio, deberían promediarse un número par de soluciones para derivar una solución final.

Se investigó la precisión de las estimaciones de corrección de TDOA convergidas calculando una estimación de corrección de TDOA para cada una de un número de mediciones (200 grupos de valores de TDOA, sujetos cada uno a una posición de plataforma aleatoria y a errores de TOA), comparando estas estimaciones con las correcciones reales y obteniendo a continuación la desviación promedio y estándar de los errores. Aunque existía la presencia de errores de medición (ver arriba), los resultados muestran que es posible obtener una precisión por debajo de metros, con una dispersión con una magnitud similar. Se observaron dispersiones de error ligeramente superiores con errores de medición más grandes, aunque solamente de forma marginal.

Estos resultados indican que el error de medición no afectaría significativamente a la precisión del esquema de corrección de TDOA cuando se conoce el perfil de refracción.

35 Aunque en la realización se ha descrito la invención en el contexto de la localización de un emisor basado en tierra mediante plataformas aerotransportadas, de forma alternativa, la invención podría funcionar con pocas modificaciones en sentido opuesto, es decir, en el contexto de la localización de un emisor aerotransportado mediante plataformas de recepción basadas en tierra (o aerotransportadas). Además, se entenderá que la invención puede funcionar con cualquier perfil de refracción atmosférico arbitrario en caso deseado, por ejemplo, incluso si no está definido totalmente mediante ecuaciones matemáticas.

REIVINDICACIONES

1. Método para localizar un emisor de ondas electromagnéticas utilizando una pluralidad de receptores, comprendiendo el método las etapas de:
 - a. detectar los tiempos de llegada de dichas ondas electromagnéticas a dichos receptores;
 - 5 b. calcular la diferencia de tiempo de llegada relativa entre dichos receptores usando dichos tiempos de llegada detectados;
 - c. estimar la posición del emisor a partir de dichas diferencias de tiempo de llegada relativas calculadas; y
 - d. corregir dichos tiempos de llegada detectados por discrepancias de longitud de trayectoria provocadas por la atmósfera de la tierra;
 - 10 caracterizado por que la etapa (d) incluye las etapas adicionales de:
 - e. medir las diferencias de tiempo de llegada entre pares de dichos receptores;
 - f. obtener una estimación de la posición del emisor asumiendo una trayectoria en línea recta entre cada receptor y dicho emisor;
 - 15 g. para cada receptor, usar dicha estimación y obtener la distancia en tierra del emisor a una plataforma de recepción;
 - h. usar dicha distancia en tierra, la altura conocida de la plataforma de recepción y un perfil de refracción asumido en una ecuación integral de trazo de rayos seleccionada para predecir una longitud de trayectoria real;
 - i. obtener la diferencia entre dicha longitud de trayectoria predicha y dichas trayectorias en línea recta para formar correcciones en dichas diferencias de tiempo de llegada;
 - 20 j. repetir las etapas (e) a (i) hasta que dichas correcciones converjan; y
 - k. aplicar dichas correcciones convergidas para corregir dichos tiempos de llegada detectados de dichas ondas electromagnéticas a dichos receptores.
2. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa e) utiliza al menos tres pares de receptores.
3. Método según la reivindicación 1 o 2, en el que dichas discrepancias de longitud de trayectoria son provocadas por refracción y dicha ecuación integral de trazo de rayos seleccionada comprende:
 - 25

$$R = \int_{h_0}^{h_1} \frac{n(h)}{\sqrt{1 - \frac{n_0 \cos(\theta_0)}{n(h) \left[1 + \frac{h}{re}\right]^2}}} . dh ,$$

donde R es la longitud de trayectoria, n (h) describe el perfil de refracción atmosférico en función de la altura, n₀ es el índice de refracción en la superficie de la tierra, θ₀ es el ángulo de salida del rayo en el emisor, h₀ y h₁ son las alturas inicial y final de la trayectoria, re es el radio de la tierra.

- 30 4. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la etapa d) utiliza además un filtro Kalman para mejorar dicha corrección.
5. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada receptor está montado en una plataforma aerotransportada respectiva y dicho emisor está basado en tierra o es aerotransportado.
- 35 6. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que cada receptor está montado en una plataforma basada en tierra respectiva y dicho emisor es aerotransportado.
7. Aparato para llevar a cabo el método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, comprendiendo el aparato:

una pluralidad de receptores, incluyendo cada receptor medios para detectar el tiempo de llegada de ondas electromagnéticas recibidas en los mismos;
- 40 medios para calcular las diferencias de tiempo de llegada relativas entre dichos receptores y para estimar la posición

de dicho emisor; y

medios para corregir dichos tiempos de llegada detectados por discrepancias de longitud de trayectoria provocadas por la atmósfera de la tierra;

caracterizado por que los medios de corrección están dispuestos para llevar a cabo las siguientes etapas:

- 5 a. medir las diferencias de tiempo de llegada entre dichos pares de dichos receptores;
 - b. asumir trayectorias en línea recta, obtener una estimación de la posición del emisor;
 - c. para cada receptor, usar dicha estimación para obtener la distancia en tierra del emisor a una plataforma de recepción;
 - 10 d. usar dicha distancia en tierra y la altura conocida de la plataforma de recepción y un perfil de refracción asumido en una ecuación integral de trazo de rayos seleccionada, predecir una longitud de trayectoria real;
 - e. obtener la diferencia entre dicha longitud de trayectoria predicha y la trayectoria en línea recta obtenida a partir de la posición estimada del emisor para formar una corrección en dichas diferencias de tiempo de llegada en la etapa (a);
 - f. volver a la etapa (a) y;
 - 15 g. continuar hasta que las correcciones en la etapa (e) converjan; aplicar a continuación dichos tiempos de llegada detectados de dichas ondas electromagnéticas a dichos receptores.
8. Programa informático que comprende medios de código de programa para llevar a cabo las etapas de método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 cuando el programa se ejecuta en un ordenador.
9. Programa informático según la reivindicación 8, en el que los medios de código de programa están almacenados en un medio que puede ser leído por ordenador.
- 20 10. Ordenador que tiene cargado un programa informático según la reivindicación 8 o un programa informático en un medio que puede ser leído por ordenador según la reivindicación 9.

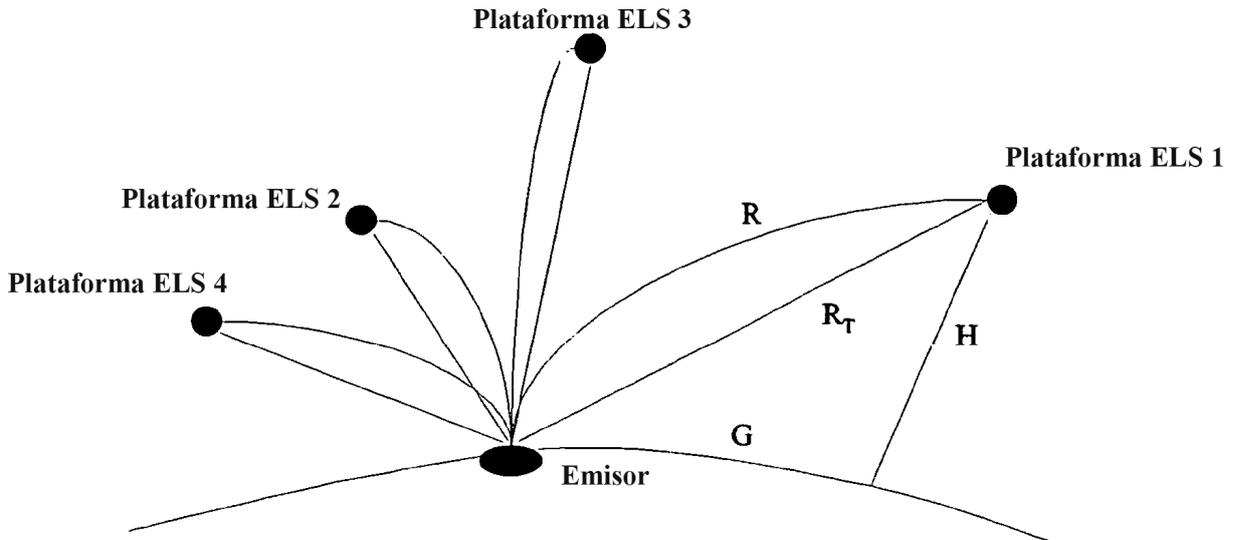


Figura 1. Ilustración de refracción atmosférica

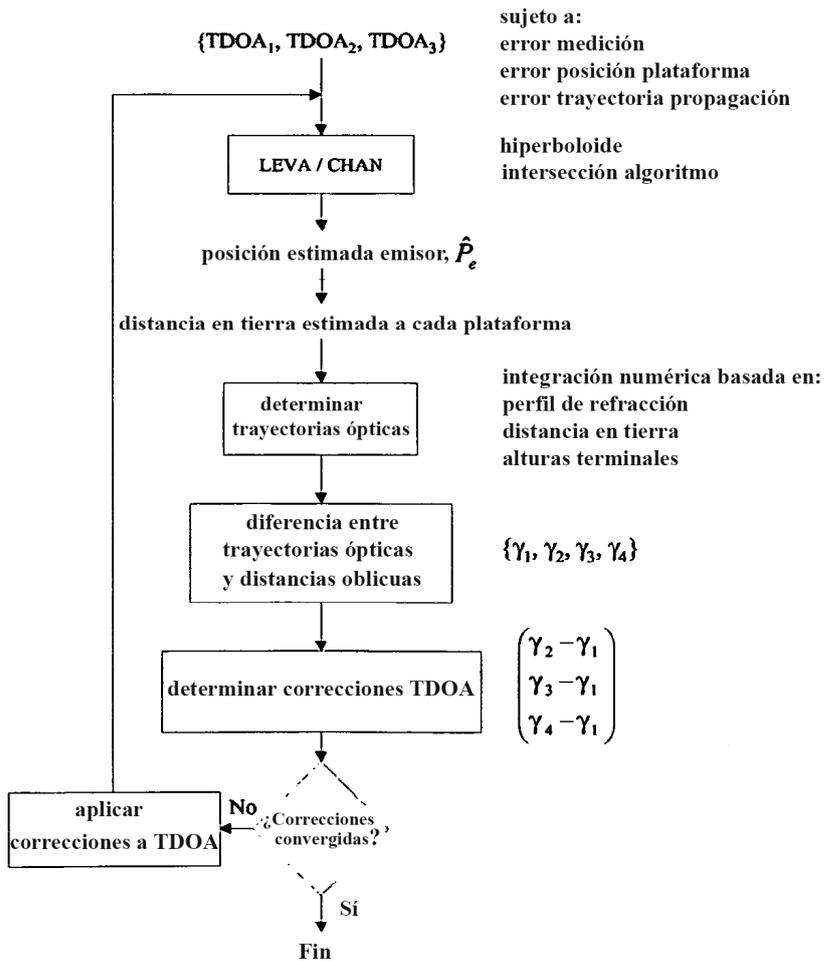


Figura 2

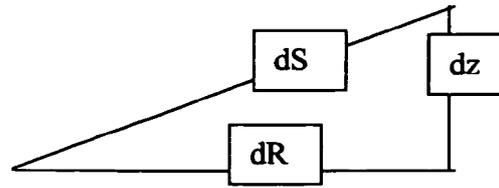


Figura 3

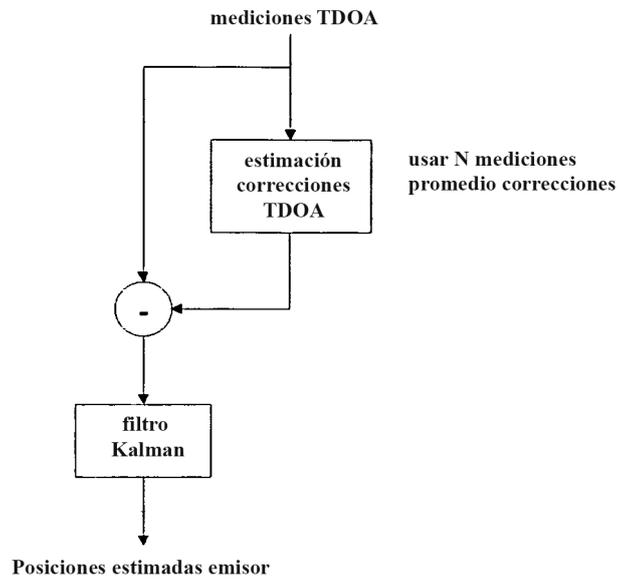


Figura 4

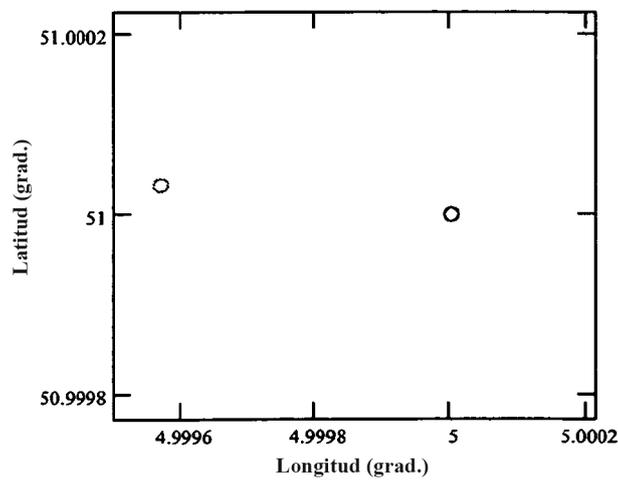


Figure 5

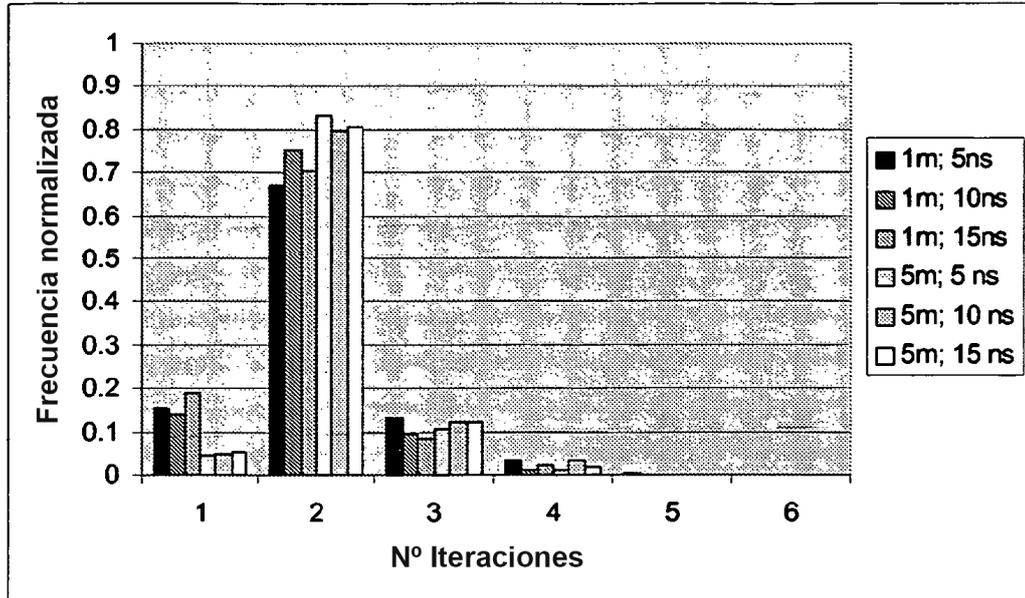


Figura 6

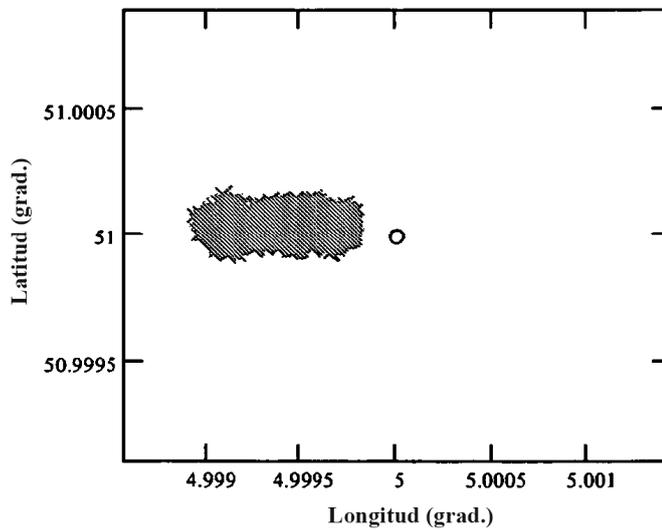


Figura 7

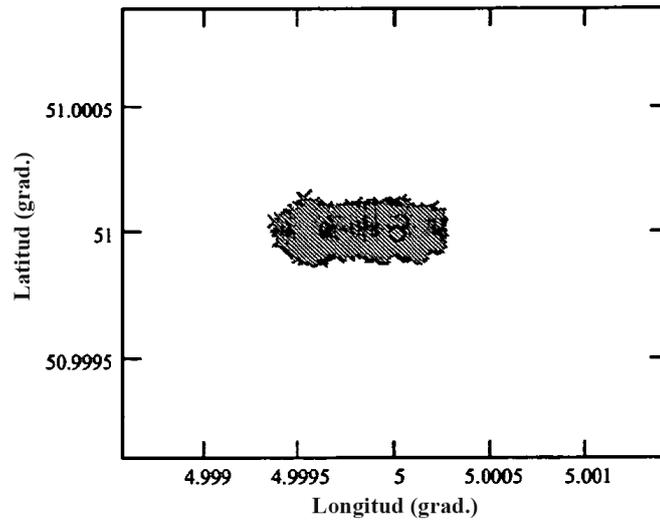


Figura 8