

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 400 352**

51 Int. Cl.:

G01S 13/93 (2006.01)

G01S 5/02 (2010.01)

G01S 3/74 (2006.01)

G01S 3/80 (2006.01)

G01S 3/46 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.10.2004 E 04818145 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.12.2012 EP 1682923**

54 Título: **Procedimiento de localización de uno o de varios emisores**

30 Prioridad:

07.11.2003 FR 0313128

14.05.2004 FR 0405254

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

09.04.2013

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
45, RUE DE VILLIERS
92200 NEUILLY SUR SEINE, FR**

72 Inventor/es:

**FERREOL, ANNE y
HEURGUIER, DOMINIQUE**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 400 352 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

Procedimiento de localización de uno o de varios emisores

La invención se refiere a un procedimiento de localización de uno o de varios emisores.

5 Se aplica, en particular, en la localización de emisores instalados en tierra a partir de un dispositivo móvil sin tener conocimiento a priori de las señales emitidas.

El campo técnico es, en particular, el de la localización pasiva de emisores.

10 La figura 1 ilustra una localización aerotransportada. El emisor está en la posición (x_0, y_0, z_0) . El portador en el instante t_k está en la posición (x_k, y_k, z_k) y ve al emisor bajo la incidencia $(\theta(t_k, x_0, y_0, z_0), \Delta(t_k, x_0, y_0, z_0))$. Los ángulos $\theta(t, x_0, y_0, z_0)$ y $\Delta(t, x_0, y_0, z_0)$ evolucionan a lo largo del tiempo y dependen de la posición del emisor así como de la trayectoria del portador.

Los ángulos $\theta(t, x_0, y_0, z_0)$ y $\Delta(t, x_0, y_0, z_0)$ se indican con respecto a una red de N antenas que se puede fijar bajo el portador tal y como lo muestra la figura 2.

15 Actualmente existen varias técnicas que permiten determinar la posición (x_m, y_m, z_m) de un emisor. Estas técnicas de localización difieren, en particular, por los parámetros que se estiman de forma instantánea al nivel de la red de los sensores. Estas se pueden clasificar de la siguiente manera:

Uso de la goniometría

20 Estas técnicas se conocen y se utilizan en la técnica anterior. En la mayor parte de los casos, estas se basan en una goniometría 1 D en acimut. Los acimuts $\theta_{km} = \theta(t_k, x_m, y_m, z_m)$ asociados al m -ésimo emisor se miden para diferentes instantes t_k . Utilizando la posición (x_k, y_k, z_k) del portador en el instante correspondiente k , se estima una posición (x_{mk}, y_{mk}, z_{mk}) del emisor m mediante una intersección con el suelo. La posición (x_k, y_k, z_k) del portador la proporciona un GPS, su orientación se obtiene mediante una brújula en el caso de un portador terrestre y mediante una central de navegación en el caso de una aeronave. A partir de todas las posiciones (x_{mk}, y_{mk}, z_{mk}) , el método lleva a cabo una extracción de datos que permite determinar las M posiciones dominantes (x_m, y_m, z_m) de los emisores incidentes. La localización se obtiene por triangulación o por intersección con el suelo (goniometría 2D). El inconveniente de las técnicas de triangulación es que estas requieren un desplazamiento importante. Por otra parte, las técnicas de goniometría deben utilizar una red de sensores no ambigua para proporcionar las incidencias. Esto tiene como inconveniente la necesidad de una tabla de calibración y de limitar el tamaño de la red de sensores y, en consecuencia, de proporcionar unas incidencias limitadas en precisión.

Uso de la diferencia de fase entre 2 sensores remotos

30 La diferencia de fase $\Delta\varphi(t_k, x_0, y_0, z_0)$ entre sensores depende de la posición de los 2 sensores así como de la incidencia $(\theta(t_k, x_0, y_0, z_0), \Delta(t_k, x_0, y_0, z_0))$ del emisor. Esta fase que depende del tiempo está directamente vinculada a la posición (x_0, y_0, z_0) del emisor. Como consecuencia, al estudiar la función del tiempo $\Delta\varphi(t, x_0, y_0, z_0)$ se puede deducir de esta la posición (x_0, y_0, z_0) del emisor. En esta familia de aplicación los 2 sensores son remotos para aumentar la precisión de la medición de la fase. Esto tiene como inconveniente que varía la diferencia de fase $\Delta\varphi(t, x_0, y_0, z_0)$ en función del tiempo en más de 2π y la técnica precisa entonces una etapa que permite desarrollar la fase en más de 2π . Por otra parte, en esta técnica la fase se mide realizando directamente una intercorrelación entre 2 sensores lo que no permite tratar el caso de emisores múltiples.

Uso de la medición de la frecuencia portadora del emisor

40 Estas técnicas aprovechan el hecho de que la frecuencia portadora estimada es la suma de la frecuencia portadora del emisor y del desfase doppler causado por la velocidad de desplazamiento del portador. El desfase doppler tiene la ventaja de depender de la posición (x_0, y_0, z_0) del emisor y de serlo también en función del tiempo $\Delta f(t, x_0, y_0, z_0)$. Como consecuencia al estudiar la función del tiempo $\Delta f(t, x_0, y_0, z_0)$ se puede deducir de esta la posición (x_0, y_0, z_0) del emisor. Sin embargo, la medición de este desfase doppler presenta como inconveniente el hecho de necesitar unos emisores con unas formas de ondas particulares. Esta medición de frecuencia se puede hacer mediante técnicas cíclicas que suponen que la señal emitida es no circular.

Uso de los tiempos de propagación

50 Estas técnicas aprovechan las diferencias de tiempo de propagación entre antenas (TDOA o *Time difference of arrival*) que están directamente vinculadas a las distancias respectivas del emisor en las diferentes antenas y, por lo tanto, a la posición (x_0, y_0, z_0) del emisor. Al utilizar al menos tres antenas lo suficientemente espaciadas, se puede deducir la posición (x_0, y_0, z_0) del emisor mediante localización hiperbólica. El inconveniente de estas técnicas es que estas no se pueden llevar a cabo en un contexto mono portador a causa de las considerables distancias requeridas entre antenas. Por otra parte, en estas técnicas la diferencia de tiempo se mide realizando directamente una intercorrelación entre 2 sensores, lo que no permite tratar el caso de emisores múltiples.

El documento "Localization of multiple sources with moving arrays" de Sheinvald describe dos estimadores que permiten encontrar las direcciones de llegada en una red móvil de sensores.

El procedimiento de acuerdo con la invención se basa, en particular, en un nuevo enfoque para la estimación directa de las posiciones (x_m, y_m, z_m) de cada uno de los emisores a partir de un análisis paramétrico de la señal multicanal en distintos instantes t_k durante un intervalo Dt . El análisis paramétrico tiene, en particular, como función adicional separar los diferentes emisores en cada instante t_k . A continuación se asocian los parámetros de un mismo emisor procedentes de los diferentes instantes t_k para finalmente localizar cada uno de los emisores.

La invención se refiere a un procedimiento de localización de una o de varias fuentes, encontrándose dicha o dichas fuentes en movimiento con respecto a una red de sensores, comprendiendo el procedimiento una etapa de separación de las fuentes con el fin de identificar los vectores directores asociados a la respuesta de los sensores a una fuente de incidencia dada, siendo los ángulos de incidencia variables y dependiendo de la posición de la red de sensores y de dichas fuentes, que comprende las siguientes etapas:

- asociar los vectores directores $\mathbf{a}_{1m} \dots \mathbf{a}_{km}$ del m-ésimo emisor obtenidos respectivamente en los instantes $t_1 \dots t_k$, durante un intervalo Dt con el fin de separar los diferentes emisores en cada instante t_k ;
- localizar la posición (x_m, y_m, z_m) del m-ésimo emisor a partir de los vectores $\mathbf{a}_{1m} \dots \mathbf{a}_{km}$ asociados a un mismo emisor y procedentes de los diferentes instantes t_k .

El procedimiento se caracteriza porque la etapa de localización comprende al menos las siguientes etapas:

maximizar un criterio de correlación vectorial normalizado $L_k(x, y, z)$ en el espacio (x, y, z) de posición de un emisor con

$$L_k(x, y, z) = \frac{|\mathbf{b}_k^H \mathbf{v}_k(x, y, z)|^2}{(\mathbf{b}_k^H \mathbf{b}_k)(\mathbf{v}_k(x, y, z)^H \mathbf{v}_k(x, y, z))}$$

con

$$\mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{1m} \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{km} \end{bmatrix} = \mathbf{v}_k(x_m, y_m, z_m) + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{v}_k(x, y, z) = \begin{bmatrix} \mathbf{b}(t_1, x, y, z) \\ \vdots \\ \mathbf{b}(t_k, x, y, z) \end{bmatrix}$$

y

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{1m} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{km} \end{bmatrix}$$

en las que \mathbf{w}_k es el vector ruido para todas las posiciones (x, y, z) de un emisor.

El procedimiento de acuerdo con la invención presenta, en particular, las siguientes ventajas:

- permite localizar, además de la posición en (x, y, z) de un emisor, su vector velocidad;
- se aplica cuando se está en presencia de uno o de varios emisores incidentes;
- su aplicación no precisa conocimientos particulares acerca de la señal emitida;
- permite usar una red de sensores ambigua, es decir varias incidencias están asociadas a la misma respuesta de la red, que tiene la ventaja de ser grande y, por lo tanto, de ser más robusta frente a los fenómenos de acoplamiento entre antenas o, de manera más general, frente a los errores de modelización de la red de antenas;
- se puede aplicar en redes calibradas en (θ, Δ) ;
- se puede aplicar en redes de antenas con diversidad de amplitud como las antenas colocalizadas: red con dipolos con el mismo centro de fase y que tienen orientaciones diferentes.

Se mostrarán mejor otras características y ventajas del objeto de la presente invención con la lectura de la siguiente descripción que se da a título ilustrativo y en modo alguno excluyente en relación con las figuras adjuntas, que representan:

- la figura 1 el esquema de principio de la localización de un emisor de posición instalado en tierra por medio de una aeronave;

- la figura 2 la relación entre una red de antenas y la incidencia de un emisor;
- la figura 3 un esquema general que explica el funcionamiento del procedimiento de acuerdo con la invención;
- las figuras 4, 5 y 6 unos ejemplos de aplicación del procedimiento de acuerdo con la invención.

5 Para una mejor comprensión del objeto de la presente invención, la descripción que viene a continuación se da a título ilustrativo y en modo alguno excluyente para localizar varios emisores dispuestos en tierra por medio de una red de sensores que están instalados en una aeronave en movimiento. Un sistema de este tipo se describe, por ejemplo, en la figura 1. La aeronave está equipada con un procesador adaptado para ejecutar las etapas del procedimiento de acuerdo con la invención.

El procedimiento también se puede aplicar en el marco de un vehículo en movimiento en tierra.

10 La figura 3 representa, en un diagrama tiempo-amplitud de la señal, la señal $x(t)$ compuesta por una combinación de las señales de los emisores en diferentes instantes t_1, t_2, \dots, t_k . En esta figura se resumen las diferentes etapas aplicadas, esto es la separación de los emisores SE y la estimación paramétrica EP, la asociación de los parámetros de cada emisor, la localización de un emisor.

15 En presencia de M emisores, el procedimiento dispone, en el instante t a la salida de los N sensores de la red, del vector $\mathbf{x}(t)$ representativo de la mezcla de las señales de los M emisores. Alrededor del instante t_k , el vector $\mathbf{x}(t + t_k)$ de dimensión $N \times 1$, que representa la mezcla de las señales de los M emisores, se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{x}(t+t_k) = \sum_{m=1}^M \mathbf{a}(\theta_{km}, \Delta_{km}) s_m(t+t_k) + \mathbf{b}(t+t_k) = \mathbf{A}_k \mathbf{s}(t+t_k) + \mathbf{b}(t+t_k) \quad \text{para } |t| < \Delta t/2 \quad (1)$$

20 en la que $\mathbf{b}(t)$ es el vector ruido que se supone gaussiano, $\mathbf{a}(\theta, \Delta)$ es la respuesta de la red de sensores con un fuente de incidencia (θ, Δ) , $\mathbf{A}_k = [\mathbf{a}(\theta_{k1}, \Delta_{k1}) \dots \mathbf{a}(\theta_{kM}, \Delta_{kM})]$, $\mathbf{s}(t) = [S_1(t) \dots S_M(t)]^T$, $\theta_{km} = \theta(t_k, x_m, y_m, z_m)$ y $\Delta_{km} = d(t_k, x_m, y_m, z_m)$. En este modelo la matriz \mathbf{A}_k de mezcla depende del instante t_k de observación.

El vector director de la incidencia que corresponde al m -ésimo emisor en el instante t_k

$$\mathbf{a}_{km} = \mathbf{a}(\theta_{km}, \Delta_{km}) = \mathbf{a}(t_k, x_m, y_m, z_m) \quad \text{del } m\text{-ésimo emisor} \quad (2)$$

es una función conocida de t_k y de la posición del emisor (x_m, y_m, z_m) .

El procedimiento de acuerdo con la invención comprende al menos las siguientes etapas:

- 25 1. estimar uno o varios parámetros asociados a la posición de la fuente, por ejemplo los vectores directores, las incidencias, la posición, etc. y separar los M emisores para los diferentes instantes t_k , lo que consiste en identificar los vectores directores de incidencia \mathbf{a}_{km} para $(1 \leq m \leq M)$. Esta primera etapa se realiza, por ejemplo, mediante unas técnicas de separación de fuentes conocidas por el experto en la materia;
- 30 2. asociar los parámetros estimados para el m -ésimo emisor, por ejemplo asociando los diferentes vectores directores de incidencias $\mathbf{a}_{1m}, \dots, \mathbf{a}_{km}$ obtenidos respectivamente en los instantes t_1, \dots, t_k ;
3. localizar el m -ésimo emisor a partir de los vectores asociados.

Etapa de asociación

35 En presencia de M emisores y tras la separación de fuentes, el procedimiento presenta en el instante t_k las M firmas \mathbf{a}_{km} para $(1 \leq m \leq M)$. En el instante t_{k+1} la separación de fuente da los M vectores \mathbf{b}_i para $(1 \leq i \leq M)$. El objetivo de este seguimiento es determinar para el m -ésimo emisor, el índice $i(m)$ que minimiza la diferencia entre \mathbf{a}_{km} y $\mathbf{b}_{i(m)}$. En este caso, se deducirá de esto que $\mathbf{a}_{k+1, m} = \mathbf{b}_{i(m)}$. Para realizar esta asociación se define, por ejemplo, la distancia entre dos vectores \mathbf{u} y \mathbf{v} mediante:

$$d(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = 1 - \frac{|\mathbf{u}^H \mathbf{v}|^2}{(\mathbf{u}^H \mathbf{u})(\mathbf{v}^H \mathbf{v})} \quad (3)$$

en la que \mathbf{u}^H es la transpuesta conjugada del vector \mathbf{u} .

40 En estas condiciones el índice $i(m)$ verifica:

$$d(\mathbf{a}_{km}, \mathbf{b}_{i(m)}) = \min_{1 \leq i \leq M} [d(\mathbf{a}_{km}, \mathbf{b}_i)] \quad (4)$$

por consiguiente,

$$d(\mathbf{a}_{km}, \mathbf{b}_{i(m)}) = \min_{1 \leq i \leq M} \left[1 - \frac{|\mathbf{a}_{km}^H \mathbf{b}_{i(m)}|^2}{(\mathbf{a}_{km}^H \mathbf{a}_{km})(\mathbf{b}_{i(m)}^H \mathbf{b}_{i(m)})} \right]$$

En esta asociación se considera una función β_m asociada al m-ésimo emisor:

$$\beta_m(t_k) = d(\mathbf{a}_{km}, \mathbf{a}_{0m}) \quad (5)$$

5 A través de la asociación se obtiene para cada emisor m y para $1 \leq m \leq M$, la función $\beta_m(t)$. Esta función tiene en particular como objetivo eliminar los instantes t_k cuyo valor $\beta_m(t_k)$ parece demasiado alejado de una interpolación de la función $\beta_m(t)$, es decir que se eliminan los instantes aberrantes que pueden estar asociados a otros emisores. Se define una zona de tolerancia $\pm \Delta$ alrededor de la curva definida por la función $\beta_m(t_k)$. Esta zona de tolerancia dependerá de la precisión de estimación de los vectores directores \mathbf{a}_{km} . En particular en presencia de $M = 1$ fuente la zona será del orden de $\Delta = 3/\sqrt{B\Delta T}$ (en la que Δt es el tiempo elemental de estimación paramétrica ilustrado en la figura 3 y B es la banda instantánea de la señal $\mathbf{x}(t)$).

Las etapas de esta asociación para K instantes t_k son, por ejemplo, las siguientes:

- 15 **Etapas ASE - 1:** Inicialización del proceso en $k = 2$. El número M de emisores inicial está, por ejemplo, determinado por una prueba de detección del número de fuentes en el instante t_0 conocido por el experto en la materia;
- Etapas ASE - 2:** Para $1 \leq m \leq M$ determinación de los índices $i(m)$ aplicando la ecuación (4) y utilizando el vector $\mathbf{a}_{k,m}$ con $1 \leq m \leq M$ y los vectores \mathbf{b}_i identificados en el instante t_{k+1} para $(1 \leq i \leq M)$;
- Etapas ASE - 3:** Para $1 \leq m \leq M$ realizar la operación $\mathbf{a}_{k+1,m} = \mathbf{b}_{i(m)}$;
- Etapas ASE - 4:** Incremento $k \leftarrow k+1$ y si $k < K$ retorno a la etapa ASE-1;
- 20 **Etapas ASE - 5:** A partir de la familia de instantes $\langle T \rangle = \{t_1 < \dots < t_k\}$, eliminar los / instantes $t_k \in \Phi$ de tal modo que los coeficientes $\beta_m(t)$ no pertenecen a la zona delimitada por la curva de interpolación de las $\beta_m(t_k)$ y la zona de tolerancia Δ . También se eliminarán los instantes t_k en los que $|\beta_m(t_k) - \beta_m(t_{k-1})| < \Delta$. Tras esta selección la nueva familia de instantes es $\Phi = \{t_1 < \dots < t_l\}$ y se pone $K = l$.

Al finalizar estas etapas, el procedimiento ha determinado los vectores $\mathbf{a}_{1m}, \dots, \mathbf{a}_{km}$ asociados al m-ésimo emisor.

25 Localización de un emisor

El procedimiento determina la posición del m-ésimo emisor a partir de las componentes de los vectores \mathbf{a}_{1m} hasta \mathbf{a}_{km} . Estos vectores \mathbf{a}_{km} tienen la particularidad de depender del instante t_k y, sobre todo, de la posición (x_m, y_m, z_m) del emisor. En particular, para una red compuesta por $N = 2$ sensores separados por una distancia de d en el eje del portador el vector verifica \mathbf{a}_{km} :

$$\mathbf{a}_{km} = \left[\begin{array}{c} 1 \\ \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta(t_k, x_m, y_m, z_m)) \cos(\Delta(t_k, x_m, y_m, z_m))\right) \end{array} \right] = \mathbf{a}(t_k, x_m, y_m, z_m) \quad (6)$$

30 El valor 1 de la primera componente corresponde al sensor de referencia. Según la figura 1, la incidencia $(\theta(t_k, x_m, y_m, z_m), \Delta(t_k, x_m, y_m, z_m))$ se puede calcular directamente a partir de la posición (x_k, y_k, z_k) del portador en el instante t_k y la posición (x_m, y_m, z_m) del emisor.

Etapas de transformación del vector

35 De acuerdo con una primera variante de realización, el procedimiento comprende una etapa de corrección de los \mathbf{a}_{km} , la medición de los vectores directores \mathbf{a}_{km} se obtiene por lo general con la excepción de un factor complejo indeterminado. De acuerdo con esta primera variante, el procedimiento comprende una etapa que consiste en cambiar la referencia de fase del vector director medido volviéndolo a llevar al baricentro de fase (definido con la excepción de un coeficiente escalar constante que se puede fijar en 1). Esta operación se realiza, por ejemplo, 40 estimando el coeficiente de corrección determinado por la transformación siguiente de los \mathbf{a}_{km} en \mathbf{a}'_{km} :

$$a'_{km} = \left(\prod_i \frac{a_i}{|a_i|} \right)^{\frac{1}{N}} a_{km} \quad (7)$$

El coeficiente de corrección no está totalmente determinado por esta expresión teniendo en cuenta la indeterminación de orden de N de la raíz compleja. Se realiza, por lo tanto, un seguimiento de la evolución de fase durante el periodo de observación.

- 5 Estando definido el coeficiente complejo con la excepción de un factor entre las N raíces N-ésima de la unidad, el seguimiento de fase consiste en fijar de manera arbitraria el primer coeficiente de corrección (tomando la raíz 1, por ejemplo), a continuación en determinar en cada nueva iteración k+1, el coeficiente que minimiza las diferencias de fases medias entre el vector director recentrado en k+1 y el vector recentrado en el instante k.

El criterio de minimización, para unas mediciones en la misma frecuencia, puede ser igual a:

$$\min_{\rho \in \mathbb{N}^N} \sum_{i \in \text{med}} \min(\text{mod} \left(\left| \arg \left(\frac{\rho \cdot a_{k+1}(i)}{a_k(i)} \right) \right|, 2\pi \right), 2\pi - \text{mod} \left(\left| \arg \left(\frac{\rho \cdot a_{k+1}(i)}{a_k(i)} \right) \right|, 2\pi \right)) \quad (8)$$

- 10 en la que los a_{k+1} son los vectores director recentrados con el coeficiente de corrección determinado arbitrariamente por una cualquiera de las raíces N-ésimas de la expresión. Para unas mediciones en unas frecuencias diferentes, se pueden comparar las fases de las componentes de los dos vectores directores corrigiéndolas de una potencia dada en relación con estas dos frecuencias.

- 15 Si se consideran los vectores $b_{km} = a'_{km}$, entonces se puede comparar esta medición con el valor teórico $b(t_k, x_m, y_m, z_m)$ para el cual el vector director teórico $a(t_k, x_m, y_m, z_m)$ se calcula para un origen considerado en el baricentro (geométrico) teórico de fase (lugar geométrico para el cual la suma teórica de las diferencias de fase se anula). Este lugar no coincide (en general) con el centro de fase de la red.

- 20 De acuerdo con otra variante de realización el procedimiento comprende una etapa de transformación del vector a_{km} en un vector b_{km} cuyas componentes están formadas a partir de las componentes de vector a_{km} . En particular, el procedimiento construye, por ejemplo, el vector b_{km} de dimensión (N-1)x1 seleccionando un sector de referencia en $n = i$:

$$b_{km} = \begin{bmatrix} a_{km}(1) / a_{km}(i) \\ \vdots \\ a_{km}(i-1) / a_{km}(i) \\ a_{km}(i+1) / a_{km}(i) \\ \vdots \\ a_{km}(N) / a_{km}(i) \end{bmatrix} = b(t_k, x_m, y_m, z_m) \quad (9)$$

en la que $a_{km}(i)$ es la i-sima componente de a_{km} .

- 25 Las componentes de b_{km} corresponden en este caso a las relaciones de las componentes del vector a_{km} y del vector $a_{km}(i)$.

Así pues, en el ejemplo de la ecuación (6) al fijar $i = 1$ se obtiene:

$$b_{km} = \left[\exp \left(j 2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta(t_k, x_m, y_m, z_m)) \cos(\Delta(t_k, x_m, y_m, z_m)) \right) \right] \quad (10)$$

$$= a_{km}(2) / a_{km}(1)$$

Sabiendo que los vectores directores a_{km} se estiman con un cierto error e_{km} tal que $a_{km} = a(t_k, x_m, y_m, z_m) + e_{km}$ se puede deducir de esto que sucede lo mismo para el vector transformado b_{km} de (9).

- 30 Etapa de maximización de un criterio de correlación

Sabiendo que el vector a_{km} es una función de la posición (x_m, y_m, z_m) del emisor sucede lo mismo para el vector b_{km} . El procedimiento comprende una etapa de maximización de un criterio de correlación vectorial normalizado $L_K(x, y, z)$ en el espacio (x, y, z) de posición de un emisor en la que

$$L_K(x,y,z) = \frac{|\mathbf{b}_K^H \mathbf{v}_K(x,y,z)|^2}{(\mathbf{b}_K^H \mathbf{b}_K)(\mathbf{v}_K(x,y,z)^H \mathbf{v}_K(x,y,z))} \quad (11)$$

con

$$\mathbf{b}_K = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{1m} \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{Km} \end{bmatrix} = \mathbf{v}_K(x_m, y_m, z_m) + \mathbf{w}_K, \quad \mathbf{v}_K(x,y,z) = \begin{bmatrix} \mathbf{b}(t_1, x, y, z) \\ \vdots \\ \mathbf{b}(t_K, x, y, z) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{w}_K = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{1m} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{Km} \end{bmatrix}$$

- 5 El vector ruido \mathbf{w}_K tiene como matriz de covarianza $\mathbf{R} = E[\mathbf{w}_K \mathbf{w}_K^H]$. Partiendo de la hipótesis de que se conoce la matriz \mathbf{R} , el criterio se puede considerar como una técnica de blanqueo. En estas condiciones se obtiene el criterio $L_K'(x, y, z)$ siguiente:

$$L_K'(x,y,z) = \frac{|\mathbf{b}_K^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}_K(x,y,z)|^2}{(\mathbf{b}_K^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{b}_K)(\mathbf{v}_K(x,y,z)^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}_K(x,y,z))} \quad (12)$$

Con $\mathbf{R} = E[\mathbf{w}_K \mathbf{w}_K^H]$:

- 10 • Hay que señalar que los criterios de las ecuaciones (11) y (12) son iguales cuando $\mathbf{R} = \sigma^2 \mathbf{I}$, es decir cuando los errores se consideran de igual nivel en todos los sensores e independientes entre sensores. El criterio $L_K(x, y, z)$ de la ecuación (12) es, por lo tanto, válido para un ruido de modelo \mathbf{w}_K de estadísticas blancas.
- 15 • Los criterios $L_K(x, y, z)$ y $L_K'(x, y, z)$ están comprendidos entre 0 y 1 y verifican $L_K(x, y, z) = L_K'(x, y, z) = 1$ para la posición (x_m, y_m, z_m) del m-ésimo emisor. Esta normalización permite fijar un umbral de buena localización η . De este modo todos los máximos (x_m, y_m, z_m) de $L_K(x, y, z)$ que verifican $L_K(x_m, y_m, z_m) > \eta$ son considerados como buenas localizaciones. El umbral se puede fijar en función de un conocimiento aproximado de las estadísticas de \mathbf{w}_K .
- 20 • Los criterios $L_K(x, y, z)$ y $L_K'(x, y, z)$ presentan la ventaja de poder aplicar una técnica de localización en presencia de una red de sensores calibrados en el espacio (θ, Δ) . Sabiendo que en el instante t_k se conoce la relación analítica que vincula la incidencia $(\theta(t_k(x, y, z)), \Delta(t_k(x, y, z)))$ del emisor en su posición (x, y, z) , se puede entonces deducir a partir de la incidencia $(\theta(t_k, x, y, z), \Delta(t_k, x, y, z))$ el vector $\mathbf{a}(t_k, x_m, y_m, z_m) = \mathbf{a}(\theta(t_k, x, y, z), \Delta(t_k, x, y, z))$ realizando una interpolación de la tabla de correlación (relativa a las antenas calibradas). Hay que señalar, no obstante, que este procedimiento es insensible a una polarización en fase (a causa del criterio de correlación vectorial).
- 25 • Estos criterios también permiten tener en cuenta la fase y la amplitud de las componentes de $\mathbf{a}(\theta, \Delta)$. El método se puede, por lo tanto, considerar con unas redes de antenas colocadas de diversidad de diagrama.

Hay que señalar que en un contexto aerotransportado el conocimiento de la altitud h del avión permite reducir el cálculo del criterio en el espacio de búsqueda (x, y) poniendo $z = h$. En el ejemplo de las ecuaciones (6) y (10) el vector $\mathbf{v}_K(x, y, z)$ se escribe de la siguiente manera:

30

$$\mathbf{v}_K(x,y,z) = \begin{bmatrix} \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta(t_1, x, y, z)) \cos(\Delta(t_1, x, y, z))\right) \\ \vdots \\ \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta(t_K, x, y, z)) \cos(\Delta(t_K, x, y, z))\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

En este procedimiento se puede considerar inicializar el algoritmo en $K = K_0$ y a continuación calcular de forma recursiva el criterio $L_K(x, y, z)$. En estas condiciones $L_K(x, y, z)$ se calcula recursivamente de la siguiente forma:

$$L_{K+1}(x,y,z) = \frac{|\alpha_{K+1}(x,y,z)|^2}{\beta_{K+1} \gamma_{K+1}(x,y,z)} \quad (14)$$

en la que

$$\alpha_{K+1}(x,y,z) = \alpha_K(x,y,z) + \mathbf{b}_{K+1}^H \mathbf{b}(t_{K+1},x,y,z)$$

$$\gamma_{K+1}(x,y,z) = \gamma_K(x,y,z) + \mathbf{b}(t_{K+1},x,y,z)^H \mathbf{b}(t_{K+1},x,y,z)$$

$$\beta_{K+1} = \beta_K + \mathbf{b}_{K+1}^H \mathbf{b}_{K+1}$$

5 Los coeficientes $\alpha_{K+1}(x, y, z) = \alpha_K(x, y, z) + \mathbf{b}_{K+1}^H \mathbf{b}(t_{K+1}, x, y, z)$, $\gamma_{K+1}(x, y, z) = \gamma_K(x, y, z) + \mathbf{b}(t_{K+1}, x, y, z)^H \mathbf{b}(t_{K+1}, x, y, z)$, $\beta_{K+1} = \beta_K$ son unos espectros intermedios que permiten calcular $L_{K+1}(x, y, z)$.

Cuando los vectores $\mathbf{b}(t_{K+1}, x, y, z)$ y \mathbf{b}_{km} son de normas constantes igual a p la relación de recurrencia de la ecuación (14) se convierte en:

$$L_{K+1}(x,y,z) = \frac{|\alpha_{K+1}(x,y,z)|^2}{\beta^2 (K+1)^2} \quad (15)$$

en la que $\alpha_{K+1}(x, y, z) = \alpha_K(x, y, z) + \mathbf{b}_{K+1}^H \mathbf{b}(t_{K+1}, x, y, z)$.

10 El procedimiento se describe hasta aquí suponiendo que los emisores tienen unas posiciones fijas. Se puede extender con facilidad al caso de blancos móviles de vector velocidad (v_{xm}, v_{ym}, v_{zm}) para los cuales se dispone de un modelo de evolución. En estas condiciones la incidencia del m -ésimo emisor se parametriza de la siguiente manera:

$$\theta_{km} = \theta(t_k, x_m - v_{xm} t_k, y_m - v_{ym} t_k, z_m - v_{zm} t_k) \quad (16)$$

y

$$15 \quad \Delta_{km} = \Delta(t_k, x_m - v_{xm} t_k, y_m - v_{ym} t_k, z_m - v_{zm} t_k)$$

en la que (x_m, y_m, z_m) es la posición del emisor en el instante t_0 y (v_{xm}, v_{ym}, v_{zm}) las componentes de la velocidad del emisor en el instante t_0 . En estas condiciones el vector \mathbf{b}_{km} de la ecuación (9) está parametrizado por (x_m, y_m, z_m) y (v_{xm}, v_{ym}, v_{zm}) de la siguiente manera:

$$\mathbf{b}_{km} = \mathbf{b}(t_k, x_m, y_m, z_m, v_{xm}, v_{ym}, v_{zm}) + \mathbf{w}_{km} \quad (17)$$

20 De manera natural los criterios de localización L_K y L'_K de las ecuaciones (11) y (12) ya no están parametrizados solo por (x, y, z) , sino también por (v_x, v_y, v_z) . El procedimiento consiste, por lo tanto, en maximizar el criterio $L_K(x, y, z, v_x, v_y, v_z)$ en función de los 6 parámetros (x, y, z, v_x, v_y, v_z) .

25 El procedimiento se puede aplicar a un enorme número de medidas. En este caso, el procedimiento comprende una etapa de reducción de la complejidad numérica de cálculo (que depende del número de medidas) reduciendo K . El procedimiento prevé llevar a cabo sobre las medidas elementales los siguientes tratamientos:

- decimación de los instantes t_k eliminando los instantes vecinos para los cuales la evolución de la curva $\beta_m(t_k)$ no es significativa;

- filtrado (alisado de las medidas que son los vectores directores) y sub-muestreo;
- las medidas se fusionan a continuación en un intervalo de tiempo definido (extracción por asociación de vector director para producir una medida de síntesis).

Recapitulación de las etapas del procedimiento

5 El procedimiento de localización de varios emisores que utilizan K instantes t_k se puede resumir en las siguientes etapas:

Etapla nº. 1: Identificación de los vectores \mathbf{a}_{km} para $(1 \leq m \leq M)$ en los K instantes t_k aplicando, por ejemplo, una técnica de separación de fuentes y de identificación de fuentes tal y como se describe en las referencias [2] y [3].

10 **Etapla nº. 2:** Asociación de los vectores \mathbf{a}_{1m} hasta \mathbf{a}_{km} obtenidos en los instantes respectivos $t_1 \dots t_k$ asociados al m -ésimo emisor para $1 \leq m \leq M$ aplicando las etapas ASE-1 hasta ASE-5 descritas con anterioridad.

Etapla nº. 3: Inicialización del proceso en $m = 1$.

Etapla nº. 4: Transformación de los K vectores \mathbf{a}_{km} en unos vectores \mathbf{b}_{km} tal y como sugiere la ecuación (9).

15 **Etapla nº. 5:** Cálculo y maximización del criterio $L_K(x, y, z)$ de la ecuación (11) para obtener la posición (x_m, y_m, z_m) del m -ésimo emisor.

Etapla nº. 6: Incremento $m \leftarrow m+1$ y si $m < M$ retorno a la etapa nº. 3. Con el fin de afinar la estimación de la posición (x_m, y_m, z_m) de los emisores, se pueden llevar a cabo de forma iterativa las etapas del procedimiento de la siguiente manera:

20 **Etapla nº. 7:** Identificación de los vectores \mathbf{b}_i para $(1 \leq i \leq M)$ en el instante t_{k+1} aplicando, por ejemplo, una técnica de separación y de identificación de fuentes tal y como se describe en las referencias [2] y [3].

Etapla nº. 8: Para $1 \leq m \leq M$ determinación de los índices $i(m)$ aplicando la ecuación (4) y utilizando el vector \mathbf{a}_{km} y los vectores \mathbf{b}_i para $(1 \leq i \leq M)$

Etapla nº. 9: Para $1 \leq m \leq M$ se realiza la operación $\mathbf{a}_{k+1m} = \mathbf{b}_{i(m)}$.

25 **Etapla nº. 10:** Para $1 \leq m \leq M$ cálculo del criterio $L_{k+1}(x, y, z)$ de forma iterativa utilizando las ecuaciones (14) y (15) y minimización de $L_{k+1}(x, y, z)$ para obtener la posición (x_m, y_m, z_m) del m -ésimo emisor.

Etapla nº. 11: Si se decide continuar para ser más preciso y menos ambiguo el procedimiento vuelve a la etapa nº. 7.

Ejemplo de aplicación del procedimiento

30 Las simulaciones se han realizado con una red de $N = 2$ sensores alineados en el eje de la portadora con $d/\lambda = 3$. Como $d/\lambda = 3$ un método que realiza una goniometría en los instantes t_k sería completamente ambiguo y no permitiría en consecuencia realizar las triangulaciones para llevar a cabo la localización del emisor. En las figuras 5, 6 y 7 que corresponden a los criterios de localización para $K = 3, 7$ y 16 se traza el pseudo-espectro $L_K(x, y)$ que hay que maximizar permitiendo determinar la posición del emisor en el espacio (x, y) . Sabiendo que si el emisor se sitúa en (x_0, y_0) entonces $L_K(x_0, y_0) = 1$, se deduce que las curvas iso-niveles $L_K(x, y) = 0,99$ caracterizan la anchura del

35 lóbulo principal. Subrayando que la precisión de localización depende de la anchura de este lóbulo, se deduce de acuerdo con las figuras 5, 6 y 7 que cuanto mayor es K mejor será la precisión de localización.

Referencias

- [1] RO. SCHMIDT. *A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation*, noviembre de 1981.
- 40 [2] J. F. CARDOSO, A. SOULOUMIAC, *Blind beamforming for non-gaussian signals*, IEE Proceedings-F, vol. 140, nº. 6, págs. 362-370, diciembre de 1993.
- [3] P. COMON, *Independent Component Analysis, a new concept?*, Signal Processing, Elsevier, abril de 1994, vol. 36, nº. 3, págs. 287-314.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de localización de una o de varias fuentes, encontrándose dicha o dichas fuentes en movimiento con respecto a una red de sensores, comprendiendo el procedimiento una etapa de separación de las fuentes con el fin de identificar los vectores directores asociados a la respuesta de los sensores en una fuente de incidencia dada, siendo los ángulos de incidencia variables y dependientes de la posición de la red de sensores y de dichas fuentes, que comprende las siguientes etapas:

- asociar los vectores directores $\mathbf{a}_{1m} \dots \mathbf{a}_{Km}$ obtenidos para el m-ésimo emisor y respectivamente para los instantes $t_1 \dots t_K$, durante un intervalo Dt con el fin de separar los diferentes emisores en cada instante t_k ;
- localizar la posición (x_m, y_m, z_m) del m-ésimo emisor a partir de los vectores $\mathbf{a}_{1m} \dots \mathbf{a}_{Km}$ asociados a un mismo emisor y procedentes de los diferentes instantes t_k ,

caracterizado dicho procedimiento **porque** la etapa de localización comprende al menos la siguiente etapa:

maximizar un criterio de correlación vectorial normalizado $L_k(x, y, z)$ en el espacio (x, y, z) de posición de un emisor con

$$L_k(x, y, z) = \frac{|\mathbf{b}_k^H \mathbf{v}_k(x, y, z)|^2}{(\mathbf{b}_k^H \mathbf{b}_k)(\mathbf{v}_k(x, y, z)^H \mathbf{v}_k(x, y, z))}$$

con

$$\mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{1m} \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{Km} \end{bmatrix} = \mathbf{v}_k(x_m, y_m, z_m) + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{v}_k(x, y, z) = \begin{bmatrix} \mathbf{b}(t_1, x, y, z) \\ \vdots \\ \mathbf{b}(t_K, x, y, z) \end{bmatrix}$$

y

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{1m} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{Km} \end{bmatrix}$$

en las que \mathbf{w}_k es el vector ruido para todas las posiciones (x, y, z) de un emisor.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado porque** el vector \mathbf{b}_k comprende un vector representativo del ruido cuyas componentes son funciones de las componentes de los vectores $\mathbf{a}_{1m} \dots \mathbf{a}_{Km}$.

3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado porque** comprende una etapa en la que se determina la matriz de covarianza $\mathbf{R} = E[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H]$ del vector ruido y **porque** se maximiza el criterio

$$L_k'(x, y, z) = \frac{|\mathbf{b}_k^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}_k(x, y, z)|^2}{(\mathbf{b}_k^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{b}_k)(\mathbf{v}_k(x, y, z)^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}_k(x, y, z))}$$

4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3 **caracterizado porque** la evaluación del criterio $L_k(x, y, z)$ y/o del criterio $L_k'(x, y, z)$ es recursiva.

5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4 **caracterizado porque** comprende una etapa de comparación de los máximos con un valor umbral.

6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5 **caracterizado porque** el valor de K se fija inicialmente en K_0 .

7. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 6 **caracterizado porque** los emisores que hay que localizar son móviles y **porque** el vector considerado está parametrizado por la posición del emisor a localizar y el vector velocidad.

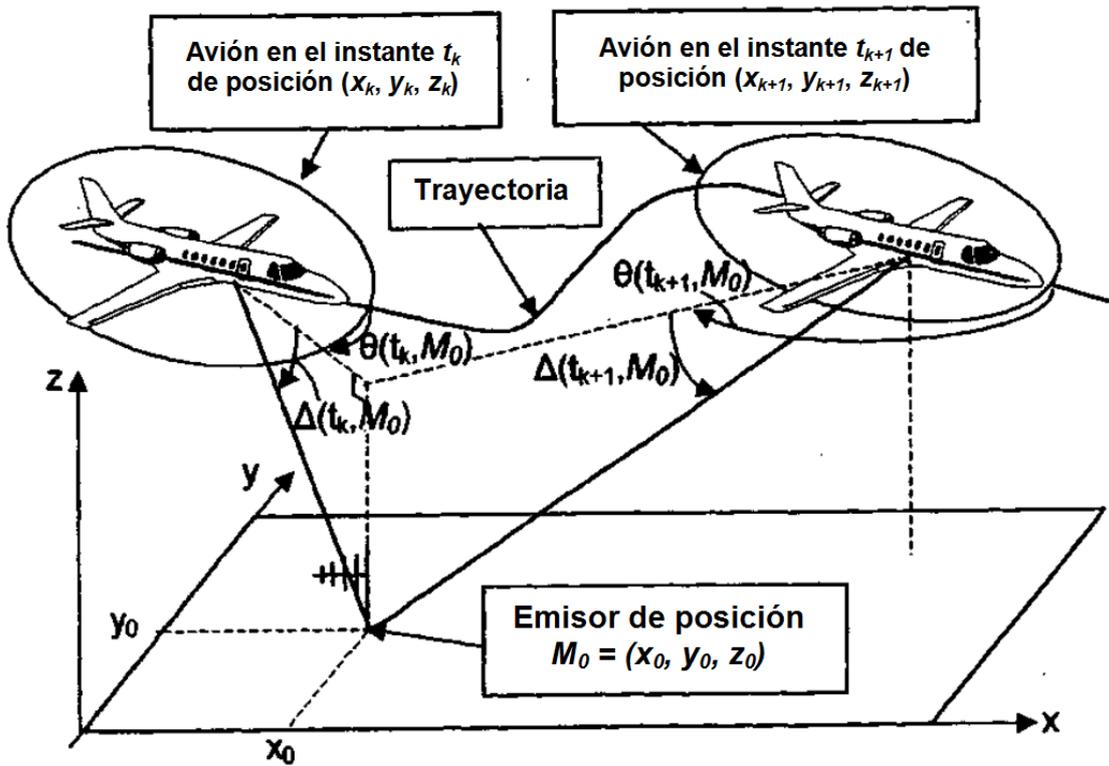


FIG.1

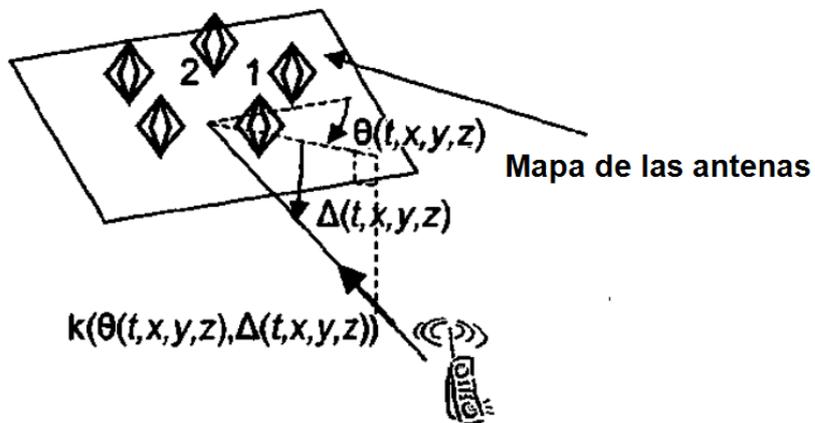


FIG.2

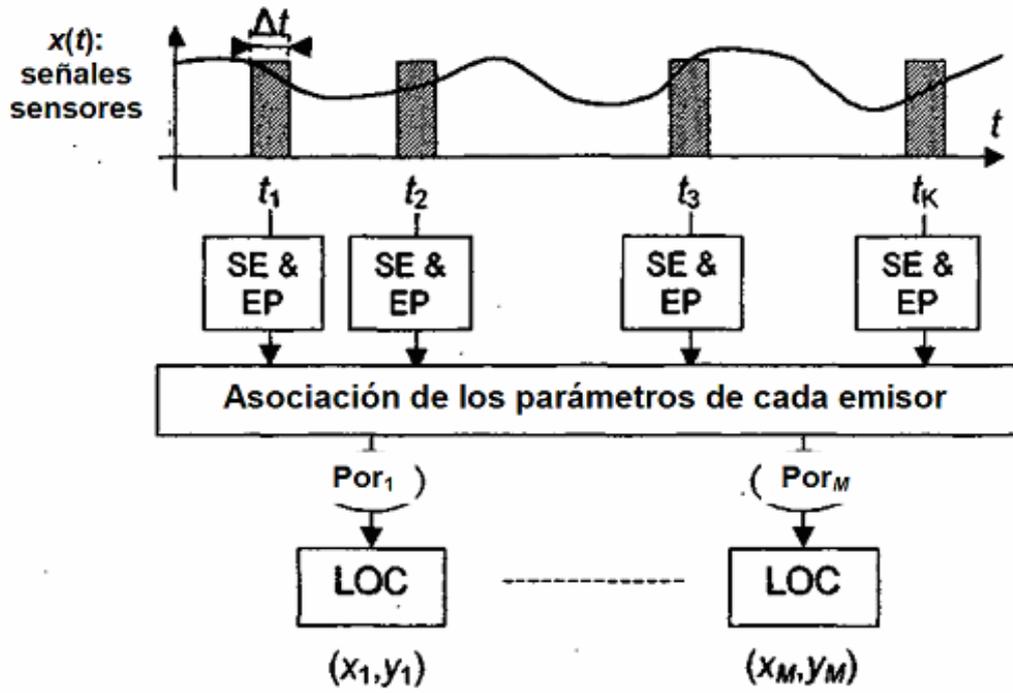


FIG.3

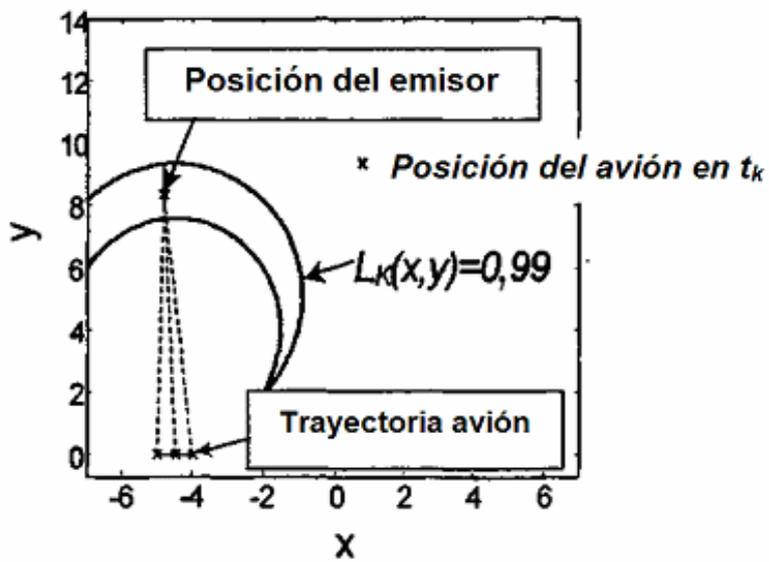


FIG.4

