

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 441 231**

51 Int. Cl.:

G01S 3/74 (2006.01)

G01S 3/80 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.12.2010 E 10792940 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.10.2013 EP 2517037**

54 Título: **Procedimiento de estimación del número de fuentes incidentes en una red de sensores mediante la estimación de la estadística del ruido**

30 Prioridad:

21.12.2009 FR 0906216

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

03.02.2014

73 Titular/es:

**THALES (50.0%)
45, rue de Villiers
92200 Neuilly Sur Seine, FR y
FERREOL, ANNE (50.0%)**

72 Inventor/es:

**GERMONT, CÉCILE y
CHEVALIER, PASCAL**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 441 231 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 estimación del número de fuentes incidentes en una red de sensores mediante la estimación de la estadística del ruido

5 La invención se refiere, en particular, a un procedimiento y a su sistema asociado que permite estimar el número de fuentes incidentes en una red que comprende C sensores o antenas en los que se utilizan N observaciones.

Para la descripción que viene a continuación, se va a utilizar la siguiente notación:

- C número de sensores de recepción;
- N número de observaciones no redundantes que se utilizan, por ejemplo, $N = C$ si únicamente se consideran las estadísticas de orden 2 de la señal recibida, $N = f(C^q)$ en la que $f(.)$ es una función polinómica de N de orden $\text{Ent}(q/2)$ si se consideran las estadísticas de orden q;
- K el número de muestras de señal para cada observación;
- M es el número de fuentes a estimar;
- $\mathbf{x}(t)$ es la señal recibida en la red de sensores, vector de tamaño C.

15 El problema de la estimación del número de fuentes presentes en una mezcla constituye una etapa crucial en los sistemas de escucha pasiva antes de la aplicación de tratamientos de localización de alta resolución, de técnicas de separación, o incluso de demodulación conjunta. Se trata de detectar (M) fuentes con M comprendido entre 0 y N-1 donde N es el número de observaciones no redundantes utilizadas en los C sensores de la antena de recepción.

En un contexto electromagnético, los sensores son unas antenas y las fuentes radioeléctricas se propagan siguiendo una polarización. En un contexto acústico los sensores son unos micrófonos y las fuentes son sonoras.

20 Los métodos clásicos de estimación del número de fuentes presentes en una mezcla se basan, por ejemplo, en unas pruebas estadísticas basadas en los valores propios (VP) de la matriz de covarianza de la señal recibida en los sensores de la antena de recepción. Estas pruebas se basan en el conocimiento de la ley de probabilidad de la fluctuación de los valores propios de ruido sabiendo que la matriz de covarianza de la señal se estima a partir de K muestras estadísticamente independientes y que el ruido se considera blanco y gaussiano.

25 Los valores propios más grandes de la matriz de covarianza corresponden a los valores propios de señal mientras que los valores más pequeños de la matriz corresponden en general al ruido. Asintóticamente (K tiende hacia el infinito) y en presencia de un ruido blanco los valores propios de ruido son todos idénticos. Para un número finito K de muestras, se observan unas fluctuaciones que vuelven la separación entre los valores propios de señal y los valores propios de ruido no inmediata. Para hacer frente a estas fluctuaciones estadísticas, las pruebas más tradicionales son las pruebas del chi cuadrado, AIC y MDL que se van a detallar a continuación y que utilizan la estadística considerada gaussiana del ruido blanco.

Prueba del chi cuadrado

Esta prueba consiste en estimar la razón de verosimilitud entre los valores propios de ruido y en probar de forma creciente diferentes hipótesis en el número N-M de valores propios de ruido

35
$$RV(M) = 2K(N - M) \log \left(\frac{g(N - M)}{a(N - M)} \right)$$

40 en la que $g(N-M)$ y $a(N-M)$ representan las medias geométricas y aritméticas de los (N-M) valores propios más bajos de la matriz de covarianza **B** de la observación, siendo K el número de muestras observadas. La razón de verosimilitud sigue asintóticamente la ley del chi cuadrado de $(N-M)^2-1$ grados de libertad ya que el ruido se considera blanco y gaussiano, lo que permite fijar un umbral de detección cuando el número de muestras K es elevado ($K > 30$).

Prueba AIC (criterio de información de Akaike) y MDL (Minimum Distance Length)

45 Este criterio lo desarrolló inicialmente H. Akaike para determinar el orden de un modelo [1]. Se basa en el cálculo de la razón de verosimilitud de los valores propios de ruido con la adición de un término correctivo que permite tener en cuenta las situaciones en las que el valor de K es bajo (por ejemplo $K < 30$). El número de fuentes se determina entonces como el número entero que minimiza la siguiente cantidad:

$$AIC(M) = -K(N - M) \log \left(\frac{g(m)}{a(m)} \right) + m(2N - m)$$

en la que $g(m)$ y $a(m)$ representan las medias geométricas y aritméticas de los $m = N-M$ valores propios más bajos de la matriz de covarianza \mathbf{B} de una observación, siendo K el número de muestras observadas.

Se ha propuesto otra prueba para hacer frente al problema de consistencia de la prueba AIC, se trata del criterio de la longitud de distancia mínima o MDL que introduce un término correctivo modificado.

- 5 Se propone un método de la técnica anterior [2] para detectar el número de fuentes en presencia de ruido coloreado. Este método se basa en la hipótesis de una red lineal y de señales no correlacionadas.

Criterios empíricos de umbral

10 Los criterios estadísticos anteriores se basan en una estructura blanca de un ruido aditivo que es gaussiano. En la práctica, el ruido ni es blanco, ni gaussiano. En estas condiciones, cuando el número de observaciones K tiende hacia el infinito, los valores propios de ruido ya no son todos idénticos. Es por ello que se han propuesto unos criterios puramente empíricos que buscan clasificar los « pequeños » y los « grandes » valores propios. Estos métodos presentan en particular como inconveniente que hacen hipótesis fuertes o bien sobre la estructura de la matriz de covarianza o bien sobre la de la matriz de covarianza del ruido o bien sobre la de la matriz de covarianza de la señal sin ruido.

15 **Decrecimiento del espectro de los valores propios**

20 Cuando unas señales incidentes presentan unas altas correlaciones o unas bajas desviaciones angulares, algunos valores propios del espacio señal se vuelven próximos a los del ruido, lo que conduce a una subestimación del número de fuentes. Se han desarrollado métodos para resolver este problema, postulando una ley de distribución empírica de los valores propios del espacio ruido. La modelización del decrecimiento puede ser lineal o exponencial. La estimación del número de fuentes se basa entonces en la búsqueda de un salto significativo en el decrecimiento de los valores propios. No obstante, es necesario regular un valor de umbral de detección que se basa en la hipótesis de un ruido aditivo y gaussiano circular.

Redes de neuronas

25 Se han desarrollado otros métodos en torno a redes de neuronas para estimar un reducido número de fuentes presentes. Estos métodos exigen una estructura en la matriz de covarianza del ruido y presentan una complejidad de implementación bastante importante.

Filtrado de Wiener

30 Se han propuesto también unos métodos basados en el filtro multietapa de Wiener [3]. Estos permiten evitar la fase de cálculo de la matriz de covarianza de la señal así como la descomposición en valores propios. Se considera que el ruido aditivo es un ruido blanco y que las fuentes las genera un filtro de tres coeficientes y son incidentes a una red lineal equiespaciada. La prueba de detección del número de fuentes utiliza por tanto esta estructura. En la práctica, no se conoce la difusión temporal de las fuentes y el ruido no tiene necesariamente una estructura blanca. Otros métodos consideran que el ruido es gaussiano y está espacialmente correlacionado, dos hipótesis que no se verifican necesariamente en una situación real.

35 El método empírico descrito en [4] se basa en la modelización del decrecimiento exponencial de los valores propios de ruido, esto es

$$r(p) = \exp\left(-\sqrt{\frac{12p}{K(p^2-1)}}\right) \quad \text{siendo} \quad \frac{\lambda_p}{\lambda_{p-1}} = r(p)$$

40 en la que p es el número de valores propios de ruido, $(\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_N)$ son los valores propios de la matriz de covarianza y K es el número de observaciones utilizadas para estimar la matriz de covarianza. La prueba de decisión ruido o señal es entonces la siguiente:

$$\begin{array}{c} \text{Hipótesis Ruido} \\ \left| \lambda_{N-p} - \hat{\lambda}_{N-p} \right| < \eta \frac{\lambda_{N-p+1}}{\sqrt{K}} \\ \text{Hipótesis Señal} > \end{array} \quad \text{siendo} \quad \hat{\lambda}_{N-p} = \frac{\lambda_{N-p+1}}{r(p+1)}$$

Este método, a pesar de su eficacia presenta el inconveniente de no funcionar cuando el número de observaciones utilizadas para estimar la matriz de covarianza tiende hacia el infinito. Supone una estructura blanca del ruido y solo funciona, por lo tanto, en presencia de ruido correlacionado y coloreado.

También se conoce de la técnica anterior el documento de KRITCHMAN S. y otros: "Nonparametric detection of the number of signals and random matrix theory", SIGNALS, SYSTEMS AND COMPUTERS, 2008, 42, ND ASILOMAR CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 26 de octubre de 2008 (26-10-2008), páginas 1.680-1.683, XP031475587-ISBN 978-1-4244-2940-0. Y el de CHEN W. y otros: "Detection of the number of signals: a predicted eignethreshold approach", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US LNDK-DOI: 10.1109/78.80959, vol. 39, n.º 5, 1 de mayo de 1991 (01-05-1991), páginas 1.088- 1.098; XP002506761 ISSN 1053- 587X.

Desde un punto de vista general el objetivo técnico es estimar el número M de componentes de la siguiente mezcla lineal:

$$\mathbf{r}_k = \sum_{m=1}^M \mathbf{a}_m s_m(k) + \mathbf{n}_k \quad \text{para } 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

en la que \mathbf{r}_k vector de dimensión Nx1 es una transformación más o menos lineal de la observación \mathbf{x}_k recibida en los C sensores. \mathbf{n}_k es un vector de ruido aditivo. Cada fuente $s_m(k)$ está asociada a la signatura \mathbf{a}_m . Si se consideran las estadísticas de orden 2, el objetivo es detectar M a partir de la siguiente matriz de covarianza:

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{r}_k (\mathbf{r}_k)^H$$

Desde un punto de vista muy general la detección del número M se lleva a cabo a partir de los N valores propios λ_i de la matriz **B**.

El objeto de la presente invención se refiere a un procedimiento que permite, en particular, tener en cuenta las señales mezcladas en el caso de ruido correlacionado y/o coloreado, o también de ruido no gaussiano, no circular, y sin ninguna particularidad de geometría específica de red de sensores. El procedimiento funciona en presencia de fuentes correlacionadas y/o que presentan un alto gradiente de potencia. Por extensión a los órdenes superiores, el procedimiento puede detectar un número de fuentes superior al número C de sensores de la antena de recepción.

La invención se refiere a un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 para determinar el número de fuentes incidentes en una red que comprende C sensores que reciben N observaciones.

La invención también se refiere a un sistema para determinar el número de fuentes incidentes en una red que comprende C sensores que reciben N observaciones caracterizado porque comprende al menos un receptor que comprende un procesador adaptado para ejecutar las etapas del procedimiento expuestas con anterioridad.

Se mostrarán mejor otras características y ventajas del procedimiento y del sistema de acuerdo con la invención con la lectura de la descripción que sigue de un ejemplo de realización, dado a título ilustrativo y en modo alguno limitativo, adjunto de las figuras que representan:

- la figura 1, un ejemplo de sistema de tratamiento de antenas; y
- la figura 2, un ejemplo de una red de sensores de posición (x_n, y_n).

La figura 1 muestra un ejemplo de sistema de tratamiento de antena que está compuesto por una red 1 de sensores o de antenas 4i que reciben unas señales procedentes de diferentes fuentes con unos ángulos de incidencia θ_{ip} (i es el índice del emisor y p el del trayecto) diferentes y de un receptor 3. El receptor comprende un procesador adaptado para ejecutar las etapas del procedimiento de acuerdo con la invención. La red también puede comprender unos obstáculos 2 en los que las señales se reflejan antes de que las reciban las antenas. Los sensores 4i simples de la red reciben las señales que emiten las fuentes con una fase y amplitud que dependen en particular de sus ángulos de incidencia y de la posición de los sensores. Los ángulos de incidencia se establecen en una dimensión o 1 D mediante el azimut θ_m y en dos dimensiones 2D mediante el azimut θ_m y la elevación Δ_m . La figura 2 esquematiza un ejemplo de una red de 6 sensores que reciben las señales de P = 2 fuentes diferentes.

El procedimiento de acuerdo con la invención tiene, en particular, como objeto determinar el número M de fuentes incidentes en una red que comprende C sensores que reciben N observaciones. Para ello, se van a ejecutar las siguientes etapas en el receptor 3.

Etapas 1: Cálculo de la matriz **B** de dimensión NxN observada en N componentes y obtenida a partir de una señal recibida en C sensores.

Etapas 2: Cálculo de los valores propios $\{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ de la matriz **B**.

Etapas 3: Clasificación de los valores propios de la matriz **B** de la señal para obtener $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_N$ e inicialización del número de fuentes recibidas en $M = M_{max}$.

Etapas 4.0: Inicialización de i en $i = M+1$.

Etapa 4.1: $i = i-1$.

Etapa 4.2: Cálculo de la media y de la desviación estándar de los valores propios de ruido.

→ Cálculo de la media de los $N-i$ valores propios de ruido más pequeños de la matriz \mathbf{B} :

$$\lambda_{med} = \frac{1}{N-i} \sum_{j=i+1}^N \lambda_j$$

5

→ Cálculo de la desviación estándar de los $N-i$ valores propios más pequeños de la matriz \mathbf{B} :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-i} \sum_{j=i+1}^N (\lambda_j - \lambda_{med})^2}$$

10

Etapa 4.3: Si $\lambda_i > \lambda_{med} + \eta\sigma$, entonces este valor propio pertenece al espacio señal y el número de fuentes presentes en la mezcla es igual a i , en la que η es un umbral que permite controlar la probabilidad de falsa alarma. El procedimiento ha terminado.

Etapa 4.4: Si $\lambda_i < \lambda_{med} + \eta\sigma$, este valor propio pertenece al espacio ruido, volver a la etapa 4.1.

15 El procedimiento depende en particular de dos parámetros M_{max} y η . M_{max} puede tradicionalmente ser igual a $N/2$ de acuerdo con un ejemplo no limitativo. η es un coeficiente que da la sensibilidad del procedimiento y que depende de una probabilidad de falsa alarma. Se puede elegir, por ejemplo, tal que $2 \leq \eta \leq 6$.

20 De acuerdo con una variante de implementación, la etapa 3 del procedimiento ordena los valores propios de la matriz por orden decreciente, siendo el objetivo obtener los valores propios que corresponden al ruido de forma contigua.

De acuerdo con un modo de realización, la matriz \mathbf{B} corresponde a la matriz de covarianza de la observación $\mathbf{r}_k = \mathbf{x}(t_k)$. La matriz \mathbf{B} se escribe entonces:

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}(t_k) \mathbf{x}(t_k)^H \quad (2)$$

en la que $\mathbf{x}(t)$ corresponde a la señal recibida en la red de sensores y se escribe:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \dots \\ x_n(t) \\ \dots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = \sum_{m=1}^M \rho_m \mathbf{a}(\theta_m) s_m(t) + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A} \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

$$s_m(t) = s(t) \exp(j2\pi f_m t)$$

25

en la que:

- $x_n(t)$ es la señal recibida en el n -ésimo sensor;
- $s(t)$ corresponde a la señal temporal que emite la fuente;
- ρ_m, θ_m, τ_m son respectivamente la amplitud, y la dirección de incidencia de la m -ésima fuente;
- $\mathbf{a}(\theta)$ es la respuesta de la red de sensores en una fuente de dirección θ ;
- $\mathbf{n}(t)$ es el ruido aditivo, las componentes de ruido son independientes entre canales de recepción y tienen como potencia σ^2 . El ruido también comprende las eventuales interferencias;
- $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \dots s_M(t)]^T$, vector de las señales temporales de las fuentes;
- \mathbf{A} matriz de los vectores directores para los diferentes trayectos m , $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1) \dots \mathbf{a}(\theta_M)]$;

35 en este caso $N = C$.

De acuerdo con otro modo de implementación del procedimiento de la invención, la matriz considerada \mathbf{B} corresponde a la matriz de covarianza espacio-temporal de la señal. $\mathbf{r}_k = \mathbf{x}_k(t_k)$ es un vector de observación que

contiene L desviaciones temporales diferentes de la observación $\mathbf{x}(t)$ definida por la ecuación (3):

$$\mathbf{x}_f(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t - \tau_1) \\ \dots \\ \mathbf{x}(t - \tau_i) \\ \dots \\ \mathbf{x}(t - \tau_L) \end{bmatrix} = \sum_{m=1}^M \mathbf{b}(\theta_m, f_m) s_m(f_m, t) + \mathbf{n}(t)$$

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{x}_f \mathbf{x}_f} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_f(t_k) \mathbf{x}_f(t_k)^H$$

5 en la que $s_m(t)$ y $s_m(f_m, t)$ son las entrada/salida de un filtro de banda finita centrado en f_m . En este caso $N = LC$ y M representa el número de componentes espacio-frecuenciales presentes en la señal. En presencia de portadoras puras, el número de componentes espacio-frecuenciales es igual al número de fuentes de la observación $\mathbf{x}(t)$ que define la ecuación (3).

De acuerdo con otro ejemplo de implementación, la matriz considerada \mathbf{B} es una estimación de la matriz de los intercumulantes de orden $2q$ de las señales para K observaciones del vector $\mathbf{x}(t_k)$ de dimensión $C \times 1$.

10 El procedimiento estima entonces el número M de componentes independientes del espacio señal de esta matriz, el cual corresponde al número de fuentes recibidas cuando estas son estadísticamente independientes. El modelo de señal se escribe:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{m=1}^P \mathbf{a}(\theta_m) s_m(t) + \mathbf{n}(t)$$

en la que P es el número de fuentes presentes y M el número de componentes independientes de la mezcla.

15 Sabiendo que $x_n(t)$ es la n -ésima componente de $\mathbf{x}(t)$, el intercumulante viene definido por:

$$\begin{aligned} cum_{\mathbf{x}}(i_1, \dots, i_{2q}) = \\ cum(x_{i_1}(t), \dots, x_{i_i}(t), x_{i_{i+1}}(t)^*, \dots, x_{i_q}(t)^*, x_{i_{q+1}}(t), \dots, x_{i_{q+i}}(t), x_{i_{q+i+1}}(t)^*, \dots, x_{i_{2q}}(t)^*) \end{aligned}$$

para $1 \leq i_q \leq C$ y en la que $cum(\cdot)$ designa el cumulante. Los intercumulantes estimados en K muestras se ordenan a continuación en la matriz $\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}}$ de la siguiente manera:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}}(I(\Omega_{row}), J(\Omega_{col})) = \hat{c}_{\mathbf{x}}(i_1, \dots, i_{2q})$$

$$I(\Omega_{row}) = \sum_{k=1}^q 2^{q-k} (i_k - 1) + 1 \quad \text{siendo} \quad \Omega_{row} = \{i_1, \dots, i_q\}$$

$$J(\Omega_{col}) = \sum_{k=1}^q 2^{q-k} (i_{q+k} - 1) + 1 \quad \text{siendo} \quad \Omega_{col} = \{i_{q+1}, \dots, i_{2q}\}$$

20

en la que $\hat{c}_{\mathbf{x}}(i_1, \dots, i_{2q})$ es una estimada en K muestras de $cum_{\mathbf{x}}(i_1, \dots, i_{2q})$. La matriz $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}}$ se escribe:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}} = \left(\mathbf{A}^{\otimes l} \otimes \left(\mathbf{A}^{\otimes (q-l)} \right)^* \right) \hat{\mathbf{R}}_{ss} \left(\mathbf{A}^{\otimes l} \otimes \left(\mathbf{A}^{\otimes (q-l)} \right)^* \right)^H + \hat{\mathbf{R}}_m$$

$$\mathbf{A}^{\otimes q} = \underbrace{\mathbf{A} \otimes \dots \otimes \mathbf{A}}_{q \text{ veces}}$$

en la que $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1) \dots \mathbf{a}(\theta_p)]$ es la matriz de los vectores directores para los diferentes trayectos indizados por p y en la que \otimes designa el producto de Kronecker y $\hat{\mathbf{R}}_{ss}$, $\hat{\mathbf{R}}_{nn}$ son respectivamente las matrices compuestas por los intercumulantes de orden $2q$ de la señal fuente $\mathbf{s}(t)$ y del ruido aditivo $\mathbf{n}(t)$.

5 En este modo de realización, la matriz $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ es de dimensión $N \times N$ en la que $N = C^q$. El número M de componentes independientes que tiene que detectar el procedimiento está comprendido entre 0 y $M = f(P^q)$ de acuerdo con la ecuación (1) ya que la matriz $\hat{\mathbf{R}}_{ss}$ es de dimensión $P^q \times P^q$ (P es el número de fuentes de la señal $\mathbf{x}(t)$). En presencia de P fuentes independientes, el rango de $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ a determinar vale $M = P$. Hay que señalar que la determinación del rango de la matriz $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ es a la vez válida para los algoritmos de goniometría y para los algoritmos de identificación ciega.

10 De acuerdo con otro modo de realización, el procedimiento comprende las siguientes etapas. En presencia de M emisores (o clústeres), un sistema de localización mide a lo largo del tiempo un conjunto de parámetros caracterizados por los vectores ζ_k para $1 \leq k \leq K$. Los vectores ζ_k pueden estar compuestos por el azimut θ_k y la relación entre señal y ruido SNR_k de uno de los emisores en el instante t_k : $\zeta_k = [\theta_k \text{SNR}_k]^T$ (T designa la transpuesta de un vector). Estos vectores también pueden estar compuestos por el vector director $\mathbf{a}(\theta_k)$ de una de las fuentes siendo su relación entre señal y ruido: $\zeta_k = [\mathbf{a}(\theta_k)^T \text{SNR}_k]^T$. De manera más general la k -ésima medición ζ_k está viciada con un error y está asociada al m -ésimo emisor de la siguiente forma:

$$\hat{\zeta}_k = \xi_m + \mathbf{e}_k \quad \text{para } 1 \leq k \leq K \quad \text{y } 1 \leq m \leq M \quad (4)$$

20 en la que \mathbf{e}_k es el vector ruido asociado a la k -ésima medición y ζ_m el vector de parámetro asociado al m -ésimo emisor.

A partir de $\hat{\zeta}_k$ se puede construir una observación $f(\hat{\zeta}_k)$ de mayor tamaño. En particular para un sistema de goniometría que produce unos azimuts θ_k a lo largo del tiempo, se puede construir $\hat{\zeta}_k = [\theta_k \text{SNR}_k]^T$ y llevar a cabo la siguiente transformación no lineal:

$$f(\hat{\zeta}_k) = f\left(\hat{\zeta}_k = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_k \\ \text{SNR}_k \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j\hat{\theta}_k) \\ \vdots \\ \exp(jL\hat{\theta}_k) \\ \text{SNR}_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

25 construyendo entonces la siguiente observación:

$$\mathbf{r}_k = f(\hat{\zeta}_k) \otimes f(\hat{\zeta}_k) \quad (6)$$

la cual obedece a la ecuación (1), con la signatura $\mathbf{a}_m = f(\zeta_m) \otimes f(\zeta_m)$, se puede estimar el número M de clústeres a partir de los valores propios de la siguiente matriz de covarianza:

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [f(\hat{\zeta}_k) \otimes f(\hat{\zeta}_k)] [f(\hat{\zeta}_k) \otimes f(\hat{\zeta}_k)]^H \quad (7)$$

30 Para todos los ejemplos de implementación descritos con anterioridad, en el caso de que la matriz \mathbf{B} no sea de rango pleno, el procedimiento considera los \mathbf{R} valores propios no nulos de la matriz \mathbf{B} .

El procedimiento de acuerdo con la invención permite, en particular, estimar el número de fuentes presentes en una mezcla para una estructura de ruido cualquiera, pudiendo el ruido ser de cualquier estadística y de cualquier correlación. El procedimiento ofrece robustez con respecto al número de muestras de señal disponibles. Es robusto

con respecto a un comportamiento asintótico en el que el número de observaciones es grande. El procedimiento también se puede utilizar en el caso de un número reducido de muestras de señal disponibles. El procedimiento funciona en presencia de fuentes correlacionadas o incluso que presentan un alto gradiente de potencia. El procedimiento funciona para cualquier geometría de red. El procedimiento también puede estimar un número de fuentes superior al número de sensores C de la antena por extensión a los órdenes superiores.

Referencias

[1] H. Akaike, « A new look at the statistical model identification », IEEE Trans on Aut. Control, 19, n.º 6, diciembre de 1974.

[2] Lu Gan; Xin Qi; Liping Li; Huaguo Zhang, "Estimation of the number of signals in the presence of color noise", ICCAS, 2009.

[3] An, Zhijuan; Su, Hongtao; Bao, Zheng; "A New Method for Fast Estimation of Number of Signals", IEEE, 2008.

[4] O. Michel, P. Larzabal, H. Clergeot, "Critères de détection du nombre de sources corrélées pour les méthodes HR en traitement d'antenne", GRETSI91 Juan-les-Pins.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de determinación del número de fuentes incidentes en una red que comprende C sensores (4i) que reciben N observaciones y un receptor (3) adaptado **caracterizado porque** comprende al menos las siguientes etapas:

5 **Etap 1:** Calcular la matriz **B** de dimensión NxN observada en N componentes y obtenida a partir de una señal o datos recibida(os) en C sensores de observación:

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{r}_k (\mathbf{r}_k)^H$$

10 en la que \mathbf{r}_k vector de dimensión Nx1 es una transformación más o menos lineal de la observación \mathbf{x}_k recibida en los C sensores.

Etap 2: Calcular los valores propios $\{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ de la matriz **B**.

Etap 3: Clasificar los valores propios de la matriz **B** de la señal para obtener $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_N$ e inicialización del número de fuentes recibidas en $M = M_{max}$, se puede considerar M_{max} igual a $N/2$ por ejemplo.

15 **Etap 4.0:** Inicialización de i en $i = M+1$.

Etap 4.1: $i = i-1$.

Etap 4.2: Calcular la media y de la desviación estándar de los valores propios de ruido.

→ Calcular la media de los $N-i$ valores propios más pequeños de la matriz **B**:

20

$$\lambda_{med} = \frac{1}{N-i} \sum_{j=i+1}^N \lambda_j$$

→ Calcular la desviación estándar de los $N-i$ valores propios más pequeños de la matriz **B**:

25

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-i} \sum_{j=i+1}^N (\lambda_j - \lambda_{med})^2}$$

Etap 4.3: Si $\lambda_i > \lambda_{med} + \eta\sigma$, entonces este valor propio pertenece al espacio señal y el número de fuentes presentes en la mezcla es igual a i, en la que η es un umbral que permite controlar la probabilidad de falsa alarma.

30 **Etap 4.4:** Si $\lambda_i < \lambda_{med} + \eta\sigma$, este valor propio pertenece al espacio ruido, volver a la etapa 4.1.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** se ordenan los valores propios de la matriz por orden decreciente.

3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** la matriz **B** es el valor estimado de la matriz de covarianza de la observación:

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}(t_k) \mathbf{x}(t_k)^H$$

35

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{x}(t_k)$$

$\mathbf{x}(t)$ es la señal recibida en la red de sensores, vector de tamaño C, y $\mathbf{x}(t_k)$ es la señal recibida para el instante t_k .

4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** la matriz **B** es el valor estimado de la matriz de covarianza espacio-temporal de la observación:

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{x}_f \mathbf{x}_f} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_f(t_k) \mathbf{x}_f(t_k)^H$$

$\mathbf{r}_k = \mathbf{x}_f(t_k)$ es un vector de observación que contiene L desviaciones temporales diferentes de la observación $\mathbf{x}(t)$ definida por la ecuación (3):

$$\mathbf{x}_f(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t - \tau_1) \\ \dots \\ \mathbf{x}(t - \tau_i) \\ \dots \\ \mathbf{x}(t - \tau_L) \end{bmatrix} = \sum_{m=1}^M \mathbf{b}(\theta_m, f_m) s_m(f_m, t) + n(t)$$

en la que $s_m(t)$ y $s_m(f_m, t)$ son las entrada/salida de un filtro de banda finita centrado en f_m .

5 5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** en el caso de que la matriz \mathbf{B} no sea de rango pleno, el procedimiento considera los R valores propios no nulos de la matriz de covarianza.

6. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** la matriz \mathbf{B} es una estimación de la matriz de los intercumulantes de orden $2q$ de las señales para K observaciones del vector $\mathbf{x}(t_k)$ de dimensión $C \times 1$ y **porque** el procedimiento comprende una etapa de estimación de la dimensión del espacio señal de la matriz de estadísticas considerada, la cual corresponde al número de fuentes cuando estas son independientes al utilizar el siguiente modelo señal:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{m=1}^P \mathbf{a}(\theta_m) s_m(t) + \mathbf{n}(t)$$

en la que P es el número de fuentes presentes.

Sabiendo que $x_n(t)$ es la n -ésima componente de $\mathbf{x}(t)$, el intercumulante viene definido por:

$$\begin{aligned} cum_{\mathbf{x}}(i_1, \dots, i_{2q}) = \\ cum(x_{i_1}(t), \dots, x_{i_i}(t), x_{i_{i+1}}(t)^*, \dots, x_{i_q}(t)^*, x_{i_{q+1}}(t), \dots, x_{i_{q+i}}(t), x_{i_{q+i+1}}(t)^*, \dots, x_{i_{2q}}(t)^*) \end{aligned}$$

15

para $1 \leq i_q \leq C$ y en la que $cum(\cdot)$ designa el cumulante,

los intercumulantes estimados en K muestras se ordenan a continuación en la matriz $\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}}$ de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}}(I(\Omega_{row}), J(\Omega_{col})) &= \hat{c}_{\mathbf{x}}(i_1, \dots, i_{2q}) \\ I(\Omega_{row}) &= \sum_{k=1}^q 2^{q-k} (i_k - 1) + 1 \quad \text{siendo } \Omega_{row} = \{i_1, \dots, i_q\} \\ J(\Omega_{col}) &= \sum_{k=1}^q 2^{q-k} (i_{q+k} - 1) + 1 \quad \text{siendo } \Omega_{row} = \{i_{q+1}, \dots, i_{2q}\} \end{aligned}$$

20

en la que $\hat{c}_{\mathbf{x}}(i_1, \dots, i_{2q})$ es una estimada en K muestras de $cum_{\mathbf{x}}(i_1, \dots, i_{2q})$, $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}}$ se escribe:

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx} = \left(\mathbf{A}^{\otimes l} \otimes (\mathbf{A}^{\otimes(q-l)}) \right)^* \hat{\mathbf{R}}_{ss} \left(\mathbf{A}^{\otimes l} \otimes (\mathbf{A}^{\otimes(q-l)}) \right)^H + \hat{\mathbf{R}}_{nn}$$

$$\mathbf{A}^{\otimes q} = \underbrace{\mathbf{A} \otimes \dots \otimes \mathbf{A}}_{q \text{ veces}}$$

en la que $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1) \dots \mathbf{a}(\theta_p)]$ es la matriz de los vectores directores para los diferentes trayectos indizados por p y en la que \otimes designa el producto de Kronecker y $\hat{\mathbf{R}}_{ss}$, $\hat{\mathbf{R}}_{nn}$ son respectivamente las matrices compuestas por los intercumulantes de orden $2q$ de la señal fuente $\mathbf{s}(t)$ y del ruido aditivo $\mathbf{n}(t)$.

5 7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** comprende al menos las siguientes etapas:

efectuar unas mediciones a lo largo del tiempo de un conjunto de parámetros característicos de los emisores, **caracterizándose** las mediciones **por** los vectores ζ_k para $1 \leq k \leq K$, estando compuestos los vectores ζ_k por el azimut θ_k y la relación entre señal y ruido SNR_k de uno de los emisores en el instante t_k : $\zeta_k = [\theta_k \text{SNR}_k]^T$ o por el vector director $\mathbf{a}(\theta_k)$ de una de las fuentes siendo su relación entre señal y ruido: $\zeta_k = [\mathbf{a}(\theta_k)^T \text{SNR}_k]^T$;

10

a partir de $\hat{\zeta}_k$ construir una observación $f(\hat{\zeta}_k)$;

a continuación, construir la siguiente observación:

$$\mathbf{r}_k = f(\hat{\zeta}_k) \otimes f(\hat{\zeta}_k)$$

15

que obedece a la ecuación (1), con la signatura $\mathbf{a}_m = f(\zeta_m) \otimes f(\zeta_m)$ estimar el número M de clústeres a partir de los valores propios de la siguiente matriz de covarianza:

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [f(\hat{\zeta}_k) \otimes f(\hat{\zeta}_k)] [f(\hat{\zeta}_k) \otimes f(\hat{\zeta}_k)]^H$$

8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** para un sistema de goniometría que genera unos valores de azimuts θ_k a lo largo del tiempo, el procedimiento construye $\hat{\zeta}_k = [\theta_k \text{SNR}_k]^T$ y efectúa la siguiente transformación no lineal:

20

$$f(\hat{\zeta}_k) = f\left(\hat{\zeta}_k = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_k \\ \text{SNR}_k \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j\hat{\theta}_k) \\ \vdots \\ \exp(jL\hat{\theta}_k) \\ \text{SNR}_k \end{bmatrix}$$

9. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** el valor de umbral está fijado entre 2 y 6.

10. Sistema para determinar el número de fuentes incidentes en una red que comprende C sensores (4i) que reciben N observaciones, **caracterizado porque** comprende al menos un receptor (3) que comprende un procesador adaptado para ejecutar las etapas del procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 9.

25

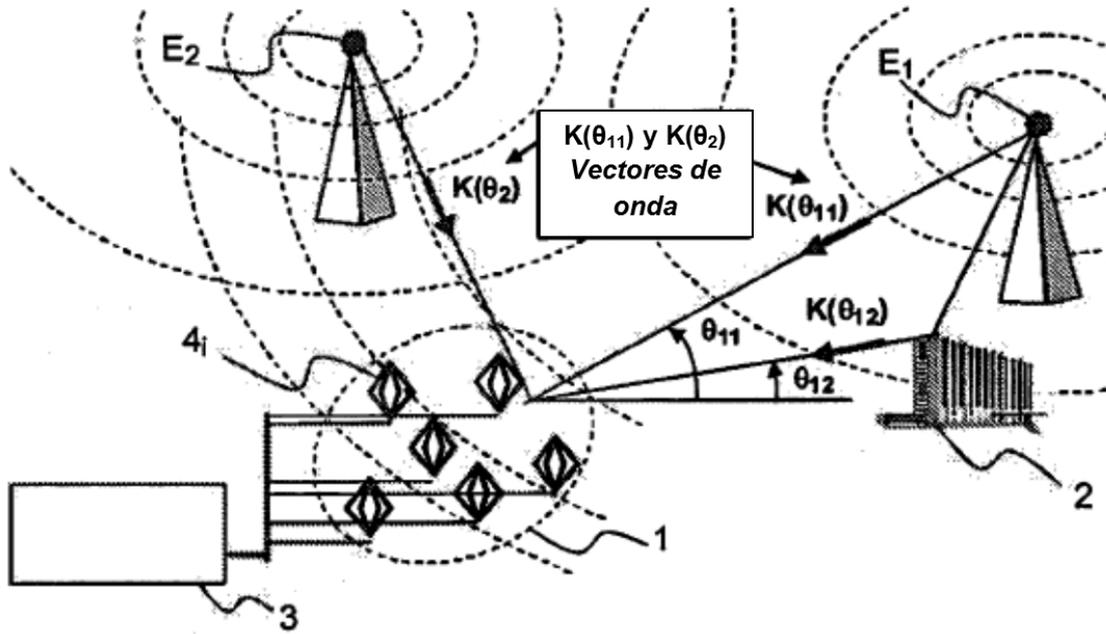


FIG.1

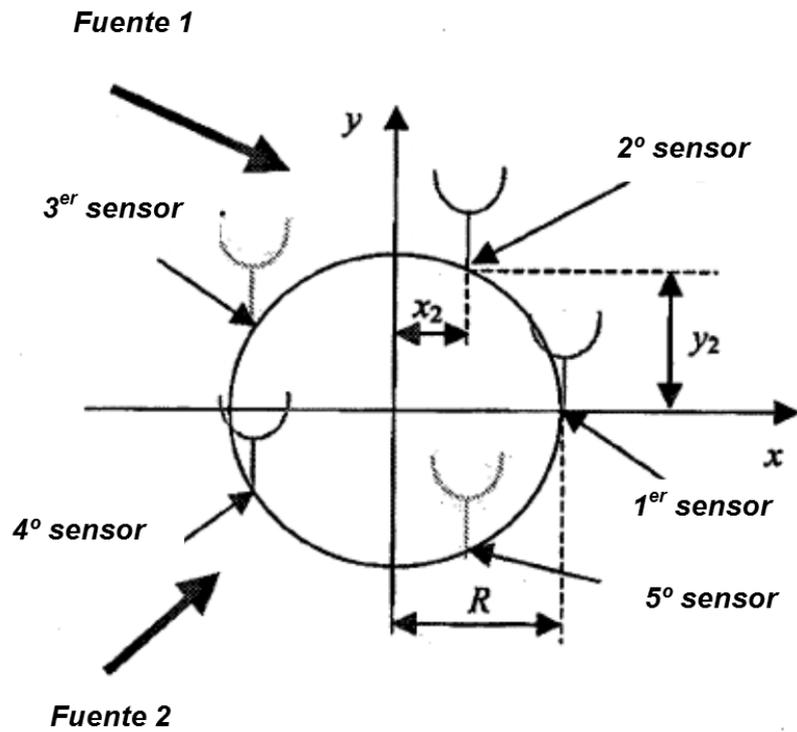


FIG.2