

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 615 269**

51 Int. Cl.:

**G01S 13/87** (2006.01)

**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: **20.02.2013 PCT/EP2013/053332**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.08.2013 WO2013124292**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.02.2013 E 13709061 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.11.2016 EP 2817652**

54 Título: **Procedimiento y sistema de calibración de receptores y localización de objetos simultáneas para multilateración**

30 Prioridad:

**21.02.2012 EP 12156317**

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

**06.06.2017**

73 Titular/es:

**KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (50.0%)**

**Kaiserstrasse 12**

**76131 Karlsruhe, DE y**

**COMSOFT SOLUTIONS GMBH (50.0%)**

72 Inventor/es:

**BEUTLER, FREDERIK;**

**HANEBECK, UWE D. y**

**LEESON, MIKE**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 615 269 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 y sistema de calibración de receptores y localización de objetos simultáneas para multilateración

La presente invención se refiere a un procedimiento y sistema de multilateración, y en particular a un procedimiento y sistema de multilateración, preferiblemente multilateración de área extensa, en el que se realizan de forma simultánea una localización de objetos y una calibración de receptores.

La multilateración es un procedimiento para el seguimiento de objetos, es decir, para recuperar una información fiable acerca del estado de uno o más objetos. El estado podría comprender la posición y/o la velocidad de los objetos, pero no se limita a estas cantidades. En general, el estado puede comprender toda la información que se considere necesaria acerca del objeto, por ejemplo, la aceleración de los objetos. Existe una amplia gama de aplicaciones para los procedimientos de multilateración. Son particularmente relevantes los procedimientos de multilateración de área extensa (WAM, *wide-area multilateration*) que se emplean en la vigilancia aérea civil o militar, es decir, para el seguimiento de las posiciones, las velocidades, etc. de aeronaves u otros objetos como, por ejemplo, helicópteros, vehículos aéreos no tripulados o satélites. Otro ejemplo para una multilateración es la localización de un teléfono celular en el caso de una llamada de emergencia. Los procedimientos de multilateración también se pueden usar para aplicaciones de automoción sobre la base de la recuperación de información acerca de los objetos en el entorno de un coche, por ejemplo, para aumentar la seguridad o la comodidad de conducción.

El principio básico de la multilateración es la recepción de las señales que son transmitidas por uno o más objetos que se van a seguir en varios receptores, que también se designan en lo sucesivo como sensores, que están ubicados en diferentes sitios de receptor, que también se designan en lo sucesivo como posiciones de sensor, y hacer uso de los diferentes tiempos de recepción de cada una de las señales que se miden en los diferentes sitios de receptor. Para ese fin, un sistema de multilateración comprende al menos un número de receptores y una unidad de procesamiento que está configurada para procesar los tiempos de recepción de una señal que se mide en cada uno de los receptores y para emitir un conjunto estimado de información que comprende, por ejemplo, las posiciones respectivas de los uno o más objetos.

Se pueden desplegar diversos montajes y procedimientos para vigilancia. Por ejemplo, se puede usar radar primario o secundario. El radar primario usa la reflexión de una señal en la superficie de un objeto. Por lo tanto, este se puede usar con el fin de localizar objetos "no cooperativos" que no están emitiendo señales de forma autónoma y/o no contestan a peticiones que son solicitadas por el sistema de multilateración. En un sistema de radar secundario, las señales que se transmiten a partir del sistema de multilateración por medio de un "interrogador" son contestadas por un transpondedor de un objeto. Un sistema de este tipo también se denomina "sistema activo". En contraposición a esto, un "sistema pasivo" hace uso de unas señales que son transmitidas de forma autónoma por un objeto o que son solicitadas por otro equipo. Además, se puede distinguir entre los procedimientos de multilateración deterministas y los estocásticos.

Una técnica bastante sencilla para hallar la posición de un objeto por medio del equipo que se ha descrito en lo que antecede es un procedimiento determinista tal como sigue.

Una relación entre la posición de un objeto que emite una señal y los tiempos de recepción de la señal en cada uno de los receptores viene dada por un conjunto de N ecuaciones

$$y^i = \frac{\| \underline{x} - \underline{S}^i \|}{c} + t_e \quad (i \in \{1, \dots, N\}) \quad , \quad (1)$$

con  $\underline{x}$  que indica la posición del objeto y  $\underline{S}^i$  que indica la posición del  $i$ -ésimo receptor, etiquetando  $N$  el número de receptores,  $c$  que indica la velocidad de propagación del medio (aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s en el aire), etiquetando  $t_e$  el tiempo de emisión de la señal, siendo  $y^i$  los tiempos de recepción medidos en el  $i$ -ésimo receptor, y  $\| \cdot \|$  que indica la norma euclídea o norma  $L_2$  en el espacio. Por lo general, la dimensión  $D$  del espacio  $y$ , por lo tanto, también la dimensión de los vectores  $\underline{x}$  y  $\underline{S}^i$ , es 2 o 3. Con el fin de eliminar el tiempo de emisión desconocido  $t_e$ , el conjunto de ecuaciones (1) se transforma en otro conjunto de ecuaciones que comprende las *diferencias* de tiempo de llegada (TDOA, *time difference of arrival*) en lugar de los tiempos de recepción medidos. Por lo tanto, sin pérdida de generalidad, se puede elegir un receptor de referencia, por ejemplo, el receptor en  $\underline{S}^1$ , y los tiempos de recepción medidos de cada uno de los otros receptores se pueden sustraer del tiempo de recepción medido en  $\underline{S}^1$ . El resultado es un conjunto de  $(N - 1)$  ecuaciones, describiendo cada una de las cuales una hiperboloide en el espacio. La posición del objeto viene dada entonces por la intersección de estas hiperboloides. Para el caso bidimensional, se deduce que se requieren al menos  $N = 3$  receptores para una determinación única de la posición de un objeto. Entonces, la posición del objeto viene dada por la intersección de 2 hipérbolas. En el caso tridimensional, son necesarios 4 receptores para localizar el objeto en el punto de intersección de 3 hiperboloides. Se pueden usar receptores adicionales para mejorar la precisión del resultado.

Debido a que el procedimiento descrito es un modelo puramente determinista, este ignora que las mediciones en el mundo real están superpuestas con ruido. Para abordar esta cuestión, se han de emplear unos procedimientos de

estimación que prevean una consideración explícita del ruido o los errores de medición dentro del cálculo. La cuestión se ha analizado, por ejemplo, en la Referencia [1], en la que se introduce un “error de ecuación” y se usa un procedimiento de mínimos cuadrados para una estimación de la posición de un objeto. Bajo ciertas suposiciones, el algoritmo que se propone en la Referencia [1] se puede considerar como un estimador de máxima probabilidad. Un desarrollo adicional es el estimador de máxima probabilidad que se propone en la Referencia [2], en la que se usa adicionalmente una variable intermedia. Esto conduce a una solución en el hiperespacio.

Además, algunas variantes del *filtro de Kálmán* probaron ser especialmente adecuadas para abordar el problema del seguimiento de objetos. El filtro de Kálmán prevé una estimación del estado de un sistema en tiempo real, incluso en aquellos casos en los que solo se encuentra disponible información a partir de unas observaciones poco precisas. Cuando se usan filtros de Kálmán, es un prerrequisito que la dinámica del estado del sistema se describa por separado del proceso de medición. Esto se realiza normalmente mediante (i) una ecuación de sistema que describe la evolución temporal del estado del sistema y (ii) una ecuación de medición que acopla el estado del sistema con las mediciones. Por lo general, ambas de las ecuaciones comprenden una parte determinista y una parte estocástica. De esta forma, no solo es posible describir observaciones ruidosas, sino también hacer frente a las incertidumbres en el modelado del comportamiento dinámico del estado [10].

En un enfoque discretizado en el tiempo, la ecuación de sistema y la ecuación de medición se pueden escribir entonces en la forma:

$$\underline{z}_{k+1} = \underline{a}(\underline{z}_k, \underline{w}_k) \quad , \quad (2)$$

$$\underline{y}_k = \underline{h}(\underline{z}_k, \underline{v}_k) \quad , \quad (3)$$

en las que la función  $\underline{a}$  describe de forma recursiva la evolución temporal del estado del sistema  $\underline{z}_k$  mediante la propagación del mismo de un escalón de tiempo dado  $k$  al siguiente escalón de tiempo  $(k + 1)$ , y la función  $\underline{h}$  establece, para cualquier escalón de tiempo  $k$ , una relación para el estado del sistema  $\underline{z}_k$  y la medición  $\underline{y}_k$ . Además,  $\underline{w}_k$  y  $\underline{v}_k$  son variables aleatorias que describen incertidumbres del modelo de evolución temporal de la Ec. (2) o el ruido durante el proceso de medición que se describe mediante la Ec. (3). Entonces, debido a la naturaleza estocástica de las ecuaciones (2) y (3), también el estado  $\underline{z}_k$  y la medición  $\underline{y}_k$  son variables aleatorias. La propagación en el tiempo de una distribución de probabilidad del estado  $\underline{z}_k$  se puede describir entonces mediante un procedimiento en dos etapas que comprende una etapa de predicción y una etapa de filtro. Sea  $f^e(\underline{z}_k)$  una distribución estimada de  $\underline{z}_k$  en el escalón de tiempo  $k$ . Entonces, en una primera etapa, una predicción para la distribución  $f^p(\underline{z}_k)$  del estado  $\underline{z}_k$  en el escalón de tiempo  $(k + 1)$  viene dada por la ecuación de Chapman-Kolmogorov

$$f^p(\underline{z}_{k+1}) = \int f(\underline{z}_{k+1} | \underline{z}_k) \cdot f^e(\underline{z}_k) d\underline{z}_k \quad , \quad (4)$$

en la que la densidad de transición  $f(\underline{z}_{k+1} | \underline{z}_k)$  se define mediante la Ec. (2). En la segunda etapa, la medición actual  $\hat{\underline{y}}_k$  se usa para filtrar el resultado de la Ec. (4) de acuerdo con la regla de Bayes

$$f^e(\underline{z}_k) = c_k \cdot f(\hat{\underline{y}}_k | \underline{z}_k) \cdot f^p(\underline{z}_k) \quad , \quad (5)$$

en la que  $c_k = 1 / (\int f(\hat{\underline{y}}_k | \underline{z}_k) \cdot f^p(\underline{z}_k) \cdot d\underline{z}_k)$  es una constante de normalización y  $f(\hat{\underline{y}}_k | \underline{z}_k)$  es la probabilidad que se define mediante la Ec. (3).

En las condiciones de que las ecuaciones (2) y (3) sean ambas lineales y que el estado esté normalmente distribuido, la densidad  $f^p$  que se predice en la Ec. (2) así como la densidad estimada  $f^e$  de la etapa de filtro en la Ec. (5) se pueden derivar exactamente dentro del marco de Kálmán que da los primeros dos momentos, es decir, el valor de esperanza y la covarianza, de estas distribuciones. Debido a que, en dichas condiciones, ambas densidades permanecen normalmente distribuidas para todos los escalones de tiempo, las densidades se describen completamente con las mismas.

No obstante, el procedimiento de filtro de Kálmán que se ha descrito en lo que antecede se limita a modelos puramente lineales. Debido a que los procedimientos de multilateración se basan, en general, en ecuaciones de medición no lineales, no se puede aplicar la formulación original del filtro de Kálmán. No obstante, se encuentran disponibles variantes tales como el *filtro de Kálmán ampliado* (EKF, *extended Kálmán filter*) o el *filtro de Kálmán inodoro* (UKF, *unscented Kálmán filter*) que proporcionan aproximaciones en el caso de las ecuaciones no lineales. Un análisis del rendimiento de estos filtros en el contexto de la multilateración se da en la Referencia [3], que también aborda la reciente tendencia “hacia el uso de un número de sensores de baja fidelidad, de menor coste” [3]. El EKF se ha derivado del filtro de Kálmán original por medio de una linealización sucesiva del proceso [9]. Por otro lado, el UKF o los así denominados *filtros gaussianos* son ejemplos de *filtros de Kálmán de regresión lineal* (LRKF, *linear regression Kálmán filter*) basados en muestras [10]. Varios tipos de filtros gaussianos se han analizado con detalle en la Referencia [9], y se ha mostrado que estos filtros son numéricamente superiores frente al EKF sin dar lugar a costes numéricos adicionales. En algunos casos, por ejemplo, si las ecuaciones consideradas se pueden separar en una subestructura lineal y una subestructura no lineal o si el vector de estado comprende una parte

directamente observada y una parte indirectamente observada, solo parte del proceso de filtrado se ha de tratar de una forma aproximada, cuando se usan unos procedimientos de descomposición apropiados, por ejemplo, tal como se propone en la Referencia [10] para la clase de los filtros gaussianos.

5 Se debería prestar atención al hecho de que todos los procedimientos de multilateración que se han mencionado hasta el momento, es decir, el procedimiento determinista de la Ec. (1) así como los procedimientos estocásticos que se describen en las Referencias [1 - 3], no trabajan con los datos en bruto que se obtienen de los tiempos de recepción medidos, sino con las mediciones de TDOA (*time difference of arrival*, diferencia de tiempo de llegada). Esto implica que estos procedimientos se basan, en última instancia, en el hallazgo del punto de intersección de un número de hiperboloides. Tal como se ha mencionado en lo que antecede, la razón de esto es eliminar de la descripción el tiempo de emisión desconocido de las señales. No obstante, la intersección de hiperboloides “se considera una tarea difícil” [6]. Por lo tanto, en las Referencias [5] y [6] se desarrolla un procedimiento de multilateración que permite reducir el problema a hallar la intersección de conos, que es numéricamente mucho más fácil de manejar. El tiempo de emisión  $b$  de una señal se estima de ese modo. En la Referencia [5], la estimación se realiza mediante la reducción al mínimo de la distancia de Mahalanobis  $M(b)$  con respecto a  $b$ .

15 Tal como ya se ha bosquejado en lo que antecede, se pueden usar soluciones en forma cerrada tal como se propone en las Referencias [1, 2] o estimadores de estados tal como se divulga en la Referencia [3], cuando los tiempos de llegada se convierten en diferencia de tiempo de llegada. Por otro lado, si los tiempos de llegada se procesan directamente, el problema es igual al problema del GPS y se puede usar la solución en forma cerrada de la Referencia [4]. Enfoques adicionales que procesan tiempos de llegada directamente mediante el uso de un estimador de estados se pueden hallar en la Referencia [5] o [6] (véase en lo que antecede), en donde, en la última, un modelo de sistema describe la evolución del tiempo de emisión con el tiempo. Obsérvese que, en la Referencia [5], no se usa modelo de sistema alguno para describir el tiempo de emisión. El tiempo de emisión se determina mediante el uso de una cierta medida de distancia en una etapa separada.

25 Un inconveniente de los procedimientos y sistemas de multilateración del estado de la técnica es que es necesario que todos los sensores del sistema de multilateración estén sincronizados con precisión, de tal modo que los tiempos de recepción medidos se pueden realizar con una precisión lo bastante alta. Por lo tanto, se requiere que todos los sensores tengan la misma base de tiempos de tal modo que se eliminan los desplazamientos de reloj de cada uno de los relojes de sensor. Esta sincronización requiere un esfuerzo elevado y se realiza, por lo general, por medio de transpondedores de referencia o relojes atómicos adicionales. El proceso para determinar los desplazamientos de reloj, de tal modo que todos los relojes de sensor están sincronizados, se denomina calibración.

30 El objeto de la presente invención es la provisión de un procedimiento y un sistema de multilateración, en el que no se requiere sincronización alguna de los relojes de sensor.

Este objeto se logra mediante un procedimiento y un sistema con las características de las reivindicaciones.

35 En la multilateración, preferiblemente multilateración de área extensa (WAM, *wide-area multilateration*), unas señales que se emiten a partir de varios objetos, por ejemplo, aeronaves, se reciben en diferentes sensores. De acuerdo con los tiempos de recepción medidos, se estiman las posiciones de los objetos. La presente invención realiza una calibración de reloj y una localización de forma simultánea, es decir, no se requiere calibración explícita alguna de los sensores. Además, la presente invención opera directamente sobre el tiempo de recepción medido. No es necesaria conversión alguna a diferencias de tiempo de llegada (TDOA, *time difference of arrival*). Esto se logra mediante el modelado de los tiempos de emisión de la señal como un proceso de ruido completamente correlacionado.

45 La presente invención se basa en que las señales de una pluralidad de objetos, por ejemplo, varias aeronaves y, preferiblemente, unas señales que representan movimientos de aeronaves sirven para la parte de sincronización y el desplazamiento de sensor estimado para la parte de localización. Los requisitos para el algoritmo son que al menos una de varias aeronaves se ha de localizar con el fin de resolver el problema de sincronización. Se usan las señales transmitidas de varias aeronaves (en unas posiciones desconocidas), en donde el número de aeronaves necesarias para realizar los cálculos se puede determinar al comparar el número de incógnitas (el número de aeronaves multiplicado por sus grados de libertad más el número de desplazamientos de aeronave desconocidos más el número de desplazamientos de sensor desconocidos) frente al número de mediciones dadas (la longitud del vector de medición que se especifica adicionalmente en lo sucesivo).

55 La ventaja de la invención es que esta permite el uso de muchos sensores no sincronizados económicos, en comparación con el uso de unos pocos sensores que están sincronizados con precisión, por ejemplo, con relojes atómicos. Además, no es necesaria sincronización alguna con un reloj global y se toma en consideración el retardo de tiempo en la transmisión, por ejemplo, de antenas a sensores. La expresión “sensores no sincronizados” quiere decir que no se requiere que los relojes que están asociados con cada uno de los sensores, a los que también se hace referencia en lo sucesivo como “relojes de sensor”, estén sincronizados entre sí. De hecho, el tiempo inherente de cada uno de los relojes de sensor podría ser completamente arbitrario, excepto por el requisito de que el tiempo inherente de cada uno de los relojes de sensor no ha de comprender discontinuidades.

El nuevo enfoque de acuerdo con la invención se basa en el concepto de que se puede localizar un cierto número de objetos con el fin de calibrar la red y que una serie de mediciones adicionales se pueden procesar de forma cronológica en el estimador. La presente invención es particularmente adecuada para sistemas pasivos, véase en lo que antecede.

5 De acuerdo con la invención, se requiere que una señal transmitida se pueda relacionar de forma única con un objeto que va a ser seguido por el sistema de multilateración. Para procesar la señal transmitida, se usa solo su tiempo de recepción medido en los sensores. No obstante, una señal transmitida también puede comprender una información adicional tal como, por ejemplo, la posición del objeto de acuerdo con WGS84, la altura barométrica, y similares.

10 Para el procedimiento de acuerdo con la invención, se realizan las siguientes suposiciones:

- Una señal transmitida, que se considera como un único evento en el tiempo, se puede detectar en diferentes sensores en diferentes tiempos de recepción.
- Cada sensor puede formar un mensaje que contiene el tiempo de recepción de cada señal transmitida y suficiente información para identificar de forma única el objeto transmisor y el evento específico en el tiempo.
- 15 • Los mensajes de sensor en relación con un único evento de transmisión se pueden combinar en un conjunto de mensajes que contiene los tiempos de recepción que se miden a partir de los sensores.
- Además, los conjuntos de mensajes se procesan de una forma cronológica, de tal modo que se puede estimar el desplazamiento de sensor.

20 Dicho de otra forma, un dispositivo de transmisión de un objeto genera una señal respectiva. Un sensor detecta la señal y crea un mensaje. La unidad de procesamiento recopila mensajes y crea un conjunto de mensajes. El algoritmo procesa el conjunto de mensajes. El conjunto de mensajes depende de un objeto respectivo. Por lo tanto, un conjunto de mensajes se origina en una señal que es emitida por el objeto y que es recibida por varios sensores. El vector de medición es la recopilación de varios conjuntos de mensajes a partir de diferentes objetos y su disposición en un vector. Por lo tanto, el vector de medición depende de todos los objetos disponibles.

25 En el procedimiento de acuerdo con la presente invención, el tiempo de emisión se modela como un ruido de medición completamente correlacionado, en el que no se adopta modelo de sistema explícito alguno. El tiempo de emisión se puede calcular de una forma similar a la de la Referencia [5].

30 Un aspecto de la invención está relacionado con un procedimiento de multilateración de al menos uno de una pluralidad de  $P$  objetos. El procedimiento usa una pluralidad de  $N$  sensores; una unidad de procesamiento; un dispositivo de transmisión en cada uno de los objetos, en el que cada uno de los transmisores está configurado para transmitir una señal respectiva. El procedimiento comprende las siguientes etapas: (i) transmitir señales mediante el dispositivo de transmisión de cada uno de los objetos; (ii) recibir las señales transmitidas a partir de cada uno de los objetos y medir los tiempos de recepción respectivos mediante cada uno de los sensores; (iii) combinar los tiempos de recepción medidos de las señales recibidas en una serie ordenada de forma cronológica de conjuntos de mensajes, en el que cada uno de los conjuntos de mensajes comprende los tiempos de recepción de una única señal transmitida; (iv) recopilar todos los conjuntos de mensajes válidos  $y_k$  que tienen lugar dentro de un intervalo de tiempo previamente determinado  $\Delta T_k$ , en el que el índice  $k \in \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$  indica un escalón de tiempo, y en el que un conjunto de mensajes es válido, cuando este contiene al menos dos tiempos de recepción medidos; (v) procesar al menos dos de los conjuntos de mensajes obtenidos de forma cronológica por medio de la realización, por dicha unidad de procesamiento, de un proceso de estimación, en el que durante el proceso de estimación se estima un vector de desplazamiento de tiempo  $\underline{q}_k$ , en el que  $\underline{q}_k$  comprende los desplazamientos de tiempo  $\underline{q}_k^i$  de las mediciones de cada uno de los  $N$  sensores en el escalón de tiempo  $k$  e  $i \in \{1, \dots, M\}$ ; y (vi) emitir la posición de dicho al menos uno de una pluralidad de objetos.

45 Dicho de otra forma, la combinación de los eventos de tiempo medidos de acuerdo con el aspecto anterior se realiza tal como sigue:

Los tiempos de medición recibidos se registran de forma asíncrona en los sensores individuales y se transmiten a una unidad de procesamiento central. Los tiempos de medición recibidos a partir de diferentes sensores que se refieren a la misma señal transmitida se usan para formar un conjunto de mensajes; un conjunto de mensajes válido contiene unos tiempos de medición recibidos a partir de al menos dos sensores. La etapa (iii) que se ha expuesto en lo que antecede se corresponde con el agrupamiento de los conjuntos de mensajes válidos en unas ubicaciones de longitud  $\Delta T_k$  y la creación de un vector de medición. Este es un medio para ensamblar vectores de medición requeridos a partir de las mediciones individuales. Ahora, estos vectores de medición contienen tiempos de recepción de varios objetos a varios sensores, que se usan para resolver el problema de calibración simultánea en subsiguientes etapas de procesamiento. Además de este proceso de agrupamiento, los vectores de medición se clasifican con respecto a los tiempos de recepción con el fin de evitar procedimientos complicados para incluir una información de medición fuera de secuencia en el proceso de estimación.

En las fórmulas en lo sucesivo que comienzan con la Ec. (6), el agrupamiento se puede ver tal como sigue. Los tiempos de recepción individuales para un objeto y un sensor se dan en la Ec. (6) y con más detalle en la Ec. (13)

con el funcional de distancia no lineal a partir de la Ec. (10). El vector de medición en la Ec. (24) es el que resulta del agrupamiento y contiene varios tiempos de recepción individuales.

En lo sucesivo en el presente documento se dan unos intervalos de tiempo de agrupamiento específicos para configuraciones de sensores típicas que se usan en el contexto aerospacial.

5 La expresión “obtenido de forma cronológica” quiere decir que los conjuntos de mensajes correspondientes se clasifican en el tiempo.

Para ilustrar el uso mencionado de dos conjuntos de mediciones consecutivas: Para el mero cálculo de las posiciones de objeto y los desplazamientos de tiempo de sensor, es suficiente el procesamiento de un único mensaje (de una longitud suficiente). Cuando, además, se desean las velocidades de los objetos y la deriva de los  
10 relojes de sensor, se usan dos conjuntos de mediciones consecutivas para realizar los cálculos requeridos.

De acuerdo con un aspecto de la invención, el proceso de estimación del procedimiento comprende: una etapa de predicción que se realiza de acuerdo con la ecuación de Chapman-Kolmogorov; y una etapa de filtro que se realiza usando la regla de Bayes.

15 De acuerdo con un aspecto de la invención, el procedimiento comprende adicionalmente una etapa, en la que un vector de tiempo de emisión  $\underline{b}_k$  se modela como un proceso de ruido correlacionado completo y/o se estima, preferiblemente mediante el uso de una expresión de distancia que depende de un valor de esperanza de  $\underline{b}_k$ , en la que  $\underline{b}_k$  comprende los tiempos de emisión  $b_k^j$  de cada uno de los P objetos en el escalón de tiempo k, en la que  $j \in \{1, \dots, P\}$ .

De acuerdo con un aspecto de la invención, la etapa de filtro se realiza de acuerdo con una ecuación de medición

$$20 \quad \underline{y}_k = \tilde{h}(\underline{x}_k, \underline{S}, \underline{b}_k, \underline{o}_k, \underline{v}_k) \quad ,$$

que, para cualquier escalón de tiempo k, describe una relación entre una medición  $\underline{y}_k$ , y en la que  $\tilde{h}$  es una función que depende de: un vector de posición de objeto  $\underline{x}_k$  en un escalón de tiempo k, que comprende las posiciones  $\underline{x}_k^j$  de cada uno de los P objetos en el escalón de tiempo k, en la que  $j \in \{1, \dots, P\}$ ; un vector de posición de sensor  $\underline{S}$  que comprende las posiciones  $\underline{S}^i$  de cada uno de los N sensores, en la que  $i \in \{1, \dots, N\}$ ; el vector de desplazamiento de  
25 tiempo  $\underline{o}_k$ ; un vector de ruido general  $\underline{v}_k$  que comprende unos ruidos generales  $v_k^{i,j}$  en el escalón de tiempo k, en la que  $i \in \{1, \dots, N\}$  y  $j \in \{1, \dots, P\}$ ; y, posiblemente, el vector de tiempo de emisión  $\underline{b}_k$  (es decir, la expresión que define la función  $\tilde{h}$  podría depender de forma explícita, o no, del vector de tiempo de emisión  $\underline{b}_k$ ).

De acuerdo con un aspecto de la invención, la ecuación de medición viene dada por

$$\underline{y}_k = \underline{h}(\underline{x}_k^1, \dots, \underline{x}_k^P) + \mathbf{H}^b \cdot \underline{b}_k + \mathbf{H}^o \cdot \underline{o}_k + \underline{v}_k$$

30 con

$$\mathbf{H}^b = \mathbf{I}_P \otimes \underline{1}_N \quad , \quad \mathbf{H}^o = \underline{1}_P \otimes \mathbf{I}_N \quad .$$

De acuerdo con un aspecto de la invención, la etapa de predicción se realiza de acuerdo con un modelo para describir la evolución temporal de un estado. En este modelo para describir la evolución temporal de un estado, el tiempo se describe mediante una serie de *escalones* de tiempo discretos  $k \in \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$ . Para cada uno de los  
35 *escalones* de tiempo k  $E \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$ , por lo tanto el estado viene dado por un vector  $\underline{z}_k$  que comprende: el vector de posición de objeto  $\underline{x}_k$ ; un vector de velocidad de objeto  $\underline{X}_k$  que comprende la velocidad de cada uno de los objetos; el vector de desplazamiento de sensor  $\underline{o}_k$ ; un vector de deriva de sensor  $\underline{O}_k$  que comprende la deriva de cada uno de los desplazamientos de sensor. Además, el modelo comprende una ecuación de sistema recursiva

$$\underline{z}_{k+1} = \underline{a}(\underline{z}_k, \underline{w}_k) \quad ,$$

40 en la que  $\underline{a}$  es una función que depende del estado en el *escalón* de tiempo k y  $\underline{w}_k$  indica un proceso de ruido a lo largo de los *escalones* de tiempo k  $E \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$ .

De acuerdo con un aspecto de la invención, la función a es una función afín, preferiblemente una función lineal, del estado  $\underline{z}_k$  y el ruido  $\underline{w}_k$ .

45 De acuerdo con un aspecto de la invención, el proceso de ruido  $\underline{w}_k$  a lo largo de los escalones de tiempo k  $E \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$  se modela como un proceso de distribución gaussiana.

De acuerdo con un aspecto de la invención, la etapa de predicción se realiza usando las ecuaciones de predictor de Kálmán.

De acuerdo con un aspecto de la invención, se supone que la medición y el estado son conjuntamente de distribución gaussiana, y que la densidad estimada se describe mediante un valor de esperanza y una covarianza.

- 5 De acuerdo con un aspecto de la invención, la dependencia para la componente de la altura se reduce mediante la aplicación de un operador de rotación sobre las coordenadas de las posiciones de sensor.

De acuerdo con un aspecto de la invención, la dinámica en los valores de medición para el  $j$ -ésimo objeto se reduce mediante la sustracción del valor mínimo del conjunto de mensajes con respecto a cada una de las componentes del vector de medición  $y_k$ , y mediante la adición, al resultado del mismo, de la distancia esperada del  $j$ -ésimo objeto.

- 10 De acuerdo con un aspecto de la invención, el número  $P$  de los objetos se encuentra entre 2 y 10, preferiblemente entre 3 y 5, y lo más preferiblemente  $P = 4$ ; y/o el número  $N$  de los sensores se encuentra entre 5 y 15, preferiblemente entre 6 y 10, y lo más preferiblemente  $N = 7$ .

- 15 De acuerdo con un aspecto de la invención, la longitud de cada uno de los intervalos de tiempo de agrupamiento  $\Delta T_k$  con  $k \in \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$  se encuentra entre 0,01 y 10 s, preferiblemente entre 0,1 y 5 s, y lo más preferiblemente es igual a 0,5 s.

- 20 Un aspecto de la invención está relacionado con un sistema de multilateración de al menos uno de una pluralidad de  $P$  objetos. El sistema usa una pluralidad de  $N$  sensores y un dispositivo de transmisión en cada uno de los objetos, en el que cada uno de los transmisores está configurado para transmitir una señal de mensaje respectiva. El sistema comprende adicionalmente una unidad de procesamiento que está configurada para operar preferiblemente de acuerdo con un procedimiento de acuerdo con uno de los aspectos tal como se ha descrito en lo que antecede.

El concepto básico de la presente invención se puede resumir tal como sigue:

- 25 La solución del problema de localizar un conjunto de objetos (aeronaves) que transmiten señales en unos tiempos de transmisión desconocidos se basa en unos tiempos de recepción en un conjunto de sensores (estaciones de base), en donde los sensores no están sincronizados uno con respecto a otro y con respecto a los objetos.

La invención permite calibrar los sensores, lo que es equivalente a determinar un conjunto de desplazamientos que relaciona el tiempo verdadero con la base de tiempos que se usa en los sensores. No se realiza asunción alguna acerca de la magnitud de estos desplazamientos, por lo tanto los desplazamientos pueden ser arbitrariamente grandes y no estar acotados.

- 30 En este procedimiento, se determinan los desplazamientos eficaces que perturban el sistema debido a que estos influyen en el procedimiento de localización. Esto incluye los propios errores de sincronismo, pero también los tiempos de ejecución de señal en los receptores, ciertos retardos de propagación y de procesamiento y así sucesivamente. Como resultado, los desplazamientos eficaces no son fácilmente mensurables, si es que lo son en absoluto.

- 35 El primer desafío es cómo realizar la calibración de desplazamientos de tiempo de sensor sin cambiar la configuración de soporte físico del sistema de localización y sin usar información adicional del exterior.

- 40 De acuerdo con la presente invención, los propios objetos, por ejemplo, aeronaves, se usan para realizar la calibración. Esto no se ha hecho antes de que se realizara la presente invención y no es obvio por varias razones. En primer lugar, las posiciones de objeto son desconocidas y solo se pueden calcular una vez que se han dado los desplazamientos de sensor. Por lo tanto, los objetos no se pueden usar simplemente como balizas de referencia. En segundo lugar, mediante la inclusión de los objetos en el proceso de calibración para los desplazamientos de tiempo de sensor, se introducen más variables desconocidas, que incluyen tres incógnitas para cada posición de aeronave y una incógnita adicional para el desplazamiento de transmisión adicional en cada objeto.

- 45 Por lo tanto, el uso de los propios objetos para la calibración da como resultado dos desafíos más. El segundo desafío es que cada objeto introduce nuevas incógnitas en el proceso de calibración. En lugar de solucionar el proceso de calibración, esto hace más difícil el problema (inicial).

- 50 La presente invención proporciona una solución de este problema. En ciertas circunstancias, pero que son solo unas pocas configuraciones de objetos/sensores, es posible estimar los desplazamientos de sensor dados los tiempos de recepción. Se puede dar una solución única si se satisface la condición  $N \cdot P \geq N + P \cdot (D + 1)$ . ¡En ninguna de las otras circunstancias se pueden obtener las variables deseadas! Por ejemplo, cinco sensores (estaciones de base) requieren al menos 5 objetos (aeronaves) para que se resuelva completamente el problema de estimación.

El tercer desafío que resulta del uso de los propios objetos para la calibración es que ahora la calibración se basa en las señales recibidas, para las que tanto los tiempos de transmisión (en el objeto) como los tiempos de recepción (en el sensor) son desconocidos. Los dos desplazamientos correspondientes siempre tienen lugar de forma aditiva y no

se pueden separar.

La presente solicitud de patente divulga una estructura de estimación apropiada para prever el cálculo de los desplazamientos deseados. Para ese fin, los desplazamientos de tiempo de sensor desconocidos, de acuerdo con la invención, se tratan como unas cantidades variables en el tiempo que se modelan como variables de estado con modelos explícitos para su evolución temporal respectiva, véanse las Ecs. (18) a (23).

Este conjunto de desplazamientos de tiempo de sensor desconocidos se estima entonces de manera explícita de forma simultánea con el estado principal, es decir, las posiciones de objeto, y con el primer conjunto de desplazamientos desconocidos (que se corresponden con los desplazamientos de transmisión de objeto en la presente notación). La intuición principal para hacer posible esta estimación es establecer el sistema regular completamente acoplado de ecuaciones para los dos conjuntos de desplazamientos en la Ec. (27) que prevé su estimación simultánea junto con los desplazamientos de transmisión y las posiciones de objeto. Este procedimiento también se puede aplicar cuando solo se desea una calibración y los parámetros de objeto no son de interés.

Esta estimación simultánea de los desplazamientos de tiempo de sensor, las posiciones de objeto, y los desplazamientos de tiempo de transmisión no se pueden lograr al considerar la configuración matemática convencional para realizar la localización de objetos. La presente invención usa un sistema de ecuaciones que se amplían mediante la cantidad correcta de objetos redundantes y se ponen en la estructura correcta. De acuerdo con una realización de la presente invención, se proporciona la composición de las matrices de dependencia en la Ec. (27) que da como resultado un sistema regular (es decir, resoluble) de ecuaciones. De forma equivalente, las matrices, en la Ec. (25) han de tener el tamaño y la estructura correctos.

Por lo tanto, la presente invención proporciona la estructura de vector - matriz correcta que permite una separación de los dos conjuntos de desplazamientos y permite lograr la así denominada observabilidad de las variables deseadas, es decir, su solución sobre la base de las mediciones dadas.

En lo sucesivo, la invención se ilustra y se explica con la ayuda de ejemplos y figuras. Las figuras muestran:

Figura 1: Dos aeronaves que emiten mensajes, que se reciben a partir de diferentes sensores.

Figura 2: Los diferentes modelos de medición. a) Tiempo de vuelo; b) Tiempo de vuelo y tiempo de emisión; c) Tiempo de vuelo, tiempo de emisión y desplazamiento de sensor; d) Tiempo de vuelo, tiempo de emisión, desplazamiento de sensor y ruido.

Figura 3 (a) y (b): El ECM para 30 y 10 aeronaves a un nivel de ruido diferente. Las líneas de trazos (trazos cortos y trazos largos) muestran los resultados para unos datos calibrados, en el caso en el que, en cada escalón de tiempo, se encuentran disponibles todas o solo partes de las mediciones, respectivamente. La línea continua y la línea de trazos y puntos muestran los resultados para unos datos no calibrados, en el caso en el que, en cada escalón de tiempo, se encuentran disponibles todas o solo partes de las mediciones, respectivamente.

Figura 4: Resultados experimentales: (a) Representación gráfica para Latitud y Longitud. Las líneas claras y finas son la trayectoria estimada de las aeronaves. Las líneas gruesas de color negro son los datos de ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance Broadcast*, Vigilancia - Radiodifusión Dependiente Automática) procedentes de las aeronaves. (b) El ECM entre la trayectoria estimada y la trayectoria a partir de los datos de ADS-B sin el error en la altitud.

Figura 5: Diagrama de flujo de una realización del procedimiento.

La siguiente notación se usará por la totalidad de las explicaciones que se dan en lo sucesivo en el presente documento:

- $k$ : escalón de tiempo
- $P$ : número total de objetos que se van a seguir
- $N$ : número total de sensores
- $\underline{z}_k$ : estado en el *escalón* de tiempo  $k$
- $\underline{x}_k^j$ : posición del objeto  $j$  en el *escalón* de tiempo  $k$
- $\underline{y}_k^{i,j}$ : medición en el sensor  $i$ , que proviene del objeto  $j$  en el *escalón* de tiempo  $k$
- $\underline{S}^i$ : posición de sensor  $i$
- $\underline{v}_k^{i,j}, \underline{w}$ : procesos de ruido

En el seguimiento de multilateración, las posiciones de  $P$  objetos, por ejemplo, aeronaves, que están ubicados en unas posiciones desconocidas  $\underline{x}_k^j$  para  $j = 1, \dots, P$  se han de calcular en diferentes escalones de tiempo  $k$ . Varios sensores que están ubicados en unas posiciones conocidas  $\underline{S}^i$  para  $i = 1, \dots, N$  están midiendo eventos de tiempo. Un evento medido, que se origina en el objeto  $j$ , en el sensor  $i$  en el *escalón* de tiempo  $k$  se define como  $\underline{y}_k^{i,j}$ .

La relación entre el evento de tiempo medido y la posición de los objetos viene dada por una ecuación de medición no lineal

$$y_k^{i,j} = h^{i,j}(\underline{x}_k^j, \underline{S}^i, v_k^{i,j}) \quad , \quad (6)$$

en la que las cantidades medidas están corrompidas con un ruido  $v_k^{i,j}$ .

Además, el comportamiento dinámico del sistema se describe mediante una ecuación de sistema

$$\underline{z}_{k+1} = \underline{a}(\underline{z}_k, \underline{w}_k) \quad , \quad (7)$$

5 en la que la variable de estado  $\underline{z}_k$  comprende la posición de los objetos y variables de estado adicionales como la velocidad, etc.

Con el fin de estimar la posición de los objetos, se usa el marco bayesiano. Este consiste en la etapa de predicción y de filtro. En la etapa de predicción, la densidad estimada  $f^p(\underline{z}_k)$  de la etapa de filtro previa se propaga del escalón de tiempo  $k$  al escalón de tiempo  $(k + 1)$  por medio de la ecuación de Chapman-Kolmogorov

$$10 \quad f^p(\underline{z}_{k+1}) = \int f(\underline{z}_{k+1} | \underline{z}_k) \cdot f^e(\underline{z}_k) d\underline{z}_k \quad , \quad (8)$$

en la que  $f(\underline{z}_{k+1} | \underline{z}_k)$  es la densidad de transición que se define mediante la Ec. (7).

En la etapa de filtro, el valor de medición actual  $\hat{y}_k$  se usa para actualizar el resultado de la etapa de predicción  $f^p(\underline{z}_k)$  de acuerdo con la regla de Bayes

$$f^e(\underline{z}_k) = c_k \cdot f(\hat{y}_k | \underline{z}_k) \cdot f^p(\underline{z}_k) \quad , \quad (9)$$

15 en la que  $c_k = 1 / (\int (\hat{y}_k | \underline{z}_k) \cdot f^p(\underline{z}_k) d\underline{z}_k)$  es una constante de normalización y  $f(\hat{y}_k | \underline{z}_k)$  es la probabilidad que se define mediante la Ec. (6).

Con el fin de derivar un modelo de medición para el procedimiento de multilateración de acuerdo con la invención, es decir, un procedimiento de multilateración en el caso de relojes de sensor no sincronizados, se describen las diferentes influencias en el proceso de medición. En primer lugar, solo se considera el tiempo de llegada, entonces esto se amplía al caso de que el tiempo de emisión sea desconocido. Después de eso, se describen el desplazamiento de sensor y la influencia del ruido. Los cuatro modelos diferentes se muestran en la figura 2.

1) Tiempo de Vuelo: El tiempo de vuelo describe el tiempo de propagación de una señal desde un objeto  $j$  hasta un sensor  $i$ . La relación entre el tiempo de llegada medido  $d_k^{i,j}$  y la posición de objeto desconocida  $\underline{x}_k^j$  viene dada entonces por la distancia euclídea de acuerdo con

$$25 \quad d_k^{i,j} = \frac{\| \underline{x}_k^j - \underline{S}^i \|_2}{c} \quad , \quad (10)$$

en la que  $c$  es la velocidad de propagación de onda y  $\| \cdot \|_2$  es la norma  $L_2$ .

2) Tiempo de Vuelo + Tiempo de Emisión Desconocido: En el segundo escenario, el sensor no puede determinar directamente el tiempo de propagación debido al hecho de que el tiempo de emisión del objeto para un cierto mensaje no es conocido. Este tiempo de emisión desconocido  $b_k^j$  conduce a un desplazamiento desconocido

$$30 \quad y_k^{i,j} = d_k^{i,j} + b_k^j \quad , \quad (11)$$

en la que este tiempo de emisión es igual para todos los sensores para este cierto mensaje. En lo sucesivo, se hace referencia al tiempo de emisión como desplazamiento de objeto.

3) Tiempo de Vuelo + Tiempo de Emisión Desconocido + Desplazamiento de sensor: El tercer escenario es una situación en la que además de la situación que se ha descrito en lo que antecede del escenario 2), asimismo los relojes de sensor no están sincronizados entre sí. Por lo tanto, cada sensor tiene un desplazamiento de sensor  $o_k^j$  y esto da como resultado

$$35 \quad y_k^{i,j} = d_k^{i,j} + b_k^j + o_k^i \quad . \quad (12)$$

Este desplazamiento de sensor es igual para todos los mensajes, que se miden al mismo tiempo.

4) Tiempo de Vuelo + Tiempo de Emisión Desconocido + Desplazamiento de sensor + Ruido: En un escenario real, tienen lugar perturbaciones. Con el fin de hacer frente a estas incertidumbres, se usa un proceso de ruido  $v_k^{i,j}$ , lo que conduce a

$$y_k^{i,j} = d_k^{i,j} + b_k^j + o_k^i + v_k^{i,j} . \quad (13)$$

5 Con detalle, la Ec. (13) descompone el tiempo de recepción individual en

- $d_k^{i,j}$ , la distancia espacial entre el objeto afectado y el sensor afectado dividida por la velocidad de propagación de onda, lo que da como resultado el tiempo de propagación neto,
- $b_k^j$ , el desplazamiento que se corresponde con el tiempo de transmisión desconocido en el objeto,
- $o_k^i$ , el desplazamiento que se corresponde con el tiempo de recepción desconocido - o, de forma equivalente, la falta de sincronización - en el sensor,
- $v_k^{i,j}$ , ruido de media nula.

De acuerdo con un aspecto de la invención, se acaba de hacer referencia a los desplazamientos en los sensores debido a que estos son los que se van a estimar. Los tiempos de propagación entre sensores y objetos se usan para calcular las posiciones de objeto de forma simultánea con los desplazamientos de sensor. El modelo de sistema describe la evolución del estado con el tiempo. En lo sucesivo, se analizan el modelo de movimiento para una aeronave y el modelo de sistema para el desplazamiento de sensor. Por último, se realiza un análisis para el desplazamiento de aeronave.

1) Modelos de Movimiento para Aeronaves: Se pueden aplicar diferentes tipos de modelos de movimiento para aeronaves, dependiendo del movimiento esperado que se va a realizar. En una realización, se aplica un modelo de movimiento convencional, el modelo de velocidad constante, [7, 8]. El modelo de velocidad constante se describe en el espacio de estados como

$$\begin{bmatrix} x_{k+1}^j \\ \dot{x}_{k+1}^j \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{x, \dot{x}} \cdot \begin{bmatrix} x_k^j \\ \dot{x}_k^j \end{bmatrix} + \frac{w_{k+1}^{x, \dot{x}}}{k} , \quad (14)$$

en la que la matriz de sistema viene dada por

$$\mathbf{A}^{x, \dot{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & T \cdot \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} , \quad (15)$$

en la que  $T$  es el tiempo de muestreo y  $\dot{x}_k^j$  la velocidad de la aeronave  $j$ .

El ruido de proceso  $w_k^{x, \dot{x}}$  que se supone como de distribución gaussiana, con media nula y una matriz de covarianza que viene dada por

$$\mathbf{C}^{x, \dot{x}} = \begin{bmatrix} \frac{T^3}{3} \mathbf{C}^{\dot{x}} & \frac{T^2}{2} \mathbf{C}^{\dot{x}} \\ \frac{T^2}{2} \mathbf{C}^{\dot{x}} & T \mathbf{C}^{\dot{x}} \end{bmatrix} . \quad (16)$$

La matriz de covarianza  $\mathbf{C}^{\dot{x}}$  depende del modelo de sistema de tiempo continuo

$$\mathbf{C}^{\dot{x}} = \text{diag} \left( [C^x \quad C^y \quad C^z] \right) . \quad (17)$$

Este es un modelo de movimiento de objetos específico, un así denominado "modelo de velocidad constante", con unos parámetros de ruido genéricos para la aceleración que se modela como ruido blanco.  $C^x, C^y, C^z$  indican las varianzas espaciales de la aceleración en un espacio cartesiano. Para una aplicación concreta, estos valores se han de determinar sobre la base de consideraciones prácticas. En el presente caso, se puede hacer referencia a la Referencia [8].

2) Modelos de Desplazamiento de sensor: Debido a la deriva de reloj, los relojes de cada uno de varios sensores se distancian y tiene lugar un desplazamiento de reloj/sensor  $O_k^j$  del sensor i. El desplazamiento de reloj se modela como un proceso de tiempo continuo

$$\dot{o}^i(t) = \rho^i(t) , \quad (18)$$

5 en el que la  $\rho^i(t)$  se modela como un proceso de ruido con las características de tiempo de la deriva, que viene dado por

$$\dot{\rho}^i(t) = w^{\dot{o}}(t) , \quad (19)$$

lo que conduce a

$$\ddot{o}^i(t) = w^{\ddot{o}}(t) . \quad (20)$$

10 Después de la discretización en el tiempo, el modelo de sistema discreto en el tiempo viene dado por

$$\begin{bmatrix} O_{k+1}^i \\ \dot{O}_{k+1}^i \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{o,\dot{o}} \cdot \begin{bmatrix} O_k^i \\ \dot{O}_k^i \end{bmatrix} + \underline{w}_k^{o,\dot{o}} , \quad (21)$$

en la que la matriz de sistema viene dada por

$$\mathbf{A}^{o,\dot{o}} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

y el proceso  $\underline{w}_k^{o,\dot{o}}$  se supone como de distribución gaussiana, con una covarianza

$$\mathbf{C}^{o,\dot{o}} = \begin{bmatrix} \frac{T^3}{3} C^{\dot{o}} & \frac{T^2}{2} C^{\dot{o}} \\ \frac{T^2}{2} C^{\dot{o}} & T C^{\dot{o}} \end{bmatrix} . \quad (23)$$

15

$C^{\dot{o}}$  es la varianza del proceso de tiempo continuo.

3) Modelos de desplazamiento de aeronave: En el enfoque propuesto, se supone que la evolución del tiempo de emisión con el tiempo no se puede describir mediante un modelo de sistema adecuado. Los tiempos de emisión se suponen como un proceso de ruido  $b_k^j$  que se modela posteriormente como un proceso de ruido correlacionado completo en la ecuación de medición.

20

En lo sucesivo, la ecuación de medición y la ecuación de sistema resultantes para el procedimiento de multilateración de acuerdo con la invención con relojes no sincronizados se muestran para un conjunto de mensajes completo. Además, se da una desigualdad para un escalón de tiempo.

Sobre la base de la Ec. (13), la ecuación de medición resultante para P aeronaves y N sensores viene dada por

$$\underline{y}_k = \underline{h}(\underline{x}_k^1, \dots, \underline{x}_k^P) + \mathbf{H}^b \cdot \underline{b}_k + \mathbf{H}^o \cdot \underline{o}_k + \underline{v}_k \quad (24)$$

25

en la que

$$\mathbf{H}^b = \mathbf{I}_P \otimes \underline{\mathbf{1}}_N , \mathbf{H}^o = \underline{\mathbf{1}}_P \otimes \mathbf{I}_N . \quad (25)$$

⊗ simboliza el producto de Kronecker. En la ecuación no lineal, los tiempos de vuelo se enumeran de acuerdo con

$$\underline{h}(\underline{x}_k^1, \dots, \underline{x}_k^P) = \left[ d_k^{1,1} \dots d_k^{N,1} \dots d_k^{i,j} \dots d_k^{N,P} \right]^T \quad (26)$$

Usando las Ecs. (25) y (26), la Ec. (24) también se puede escribir en la forma

$$\underline{y}_k = \frac{1}{c} \begin{bmatrix} \|\underline{x}_k^1 - \underline{S}^1\| \\ \vdots \\ \|\underline{x}_k^1 - \underline{S}^N\| \\ \vdots \\ \|\underline{x}_k^P - \underline{S}^1\| \\ \vdots \\ \|\underline{x}_k^P - \underline{S}^N\| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots \\ & \ddots & \\ 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_k^1 \\ \vdots \\ b_k^P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots \\ & \ddots & \\ 0 & \dots & 1 \\ & \vdots & \\ 1 & 0 & \dots \\ & \ddots & \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} o_k^1 \\ \vdots \\ o_k^N \end{bmatrix} + \underline{v}_k \quad (27)$$

- 5 Tal como se ha descrito anteriormente, el tiempo de emisión se considera como ruido completamente correlacionado debido al hecho de que no se puede adoptar modelo de sistema alguno para el tiempo de emisión. En este caso, el nuevo proceso de ruido  $F \underline{v}_k$  en

$$\underline{y}_k = \underline{h}(\underline{x}_k^1, \dots, \underline{x}_k^P) + \mathbf{H}^o \cdot \underline{o}_k + \underline{v}_k^F \quad (28)$$

consiste en

$$\underline{v}_k^F = \mathbf{H}^b \cdot \underline{b}_k + \underline{v}_k \quad (29)$$

- 10 Los primeros dos momentos de proceso de ruido vienen dados entonces por

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_k^{v^F} &= \mathbf{H}^b \cdot \underline{\mu}_k^b, \\ \mathbf{C}_k^{v^F} &= \mathbf{H}^b \cdot \mathbf{C}_k^b \cdot (\mathbf{H}^b)^T + \mathbf{C}_k^v. \end{aligned} \quad (30)$$

El estado del sistema consiste en las posiciones, las velocidades, los desplazamientos de sensor, y las derivas de sensor, de acuerdo con

$$\underline{z}_k = \left[ (\underline{x}_k^1)^T \ (\dot{\underline{x}}_k^1)^T \ \dots \ (o_k^1)^T \ (\dot{o}_k^1)^T \ \dots \right]^T \quad (31)$$

- 15 La ecuación de sistema se puede modelar como una ecuación de sistema lineal sobre la base de las Ecs. (14) y (21), que viene dada por

$$\underline{z}_{k+1} = \mathbf{A} \cdot \underline{z}_k + \underline{w}_k, \quad (32)$$

en la que la matriz de sistema viene dada por

$$\mathbf{A} = \text{blkdiag}(\mathbf{A}^{\underline{x}, \dot{\underline{x}}}, \dots, \mathbf{A}^{\underline{x}, \dot{\underline{x}}}, \mathbf{A}^{o, \dot{o}}, \dots, \mathbf{A}^{o, \dot{o}}) \quad (33)$$

- 20 y la covarianza del ruido de proceso

$$\mathbf{C}^w = \text{blkdiag}(\mathbf{C}^{\underline{x}, \dot{\underline{x}}}, \dots, \mathbf{C}^{\underline{x}, \dot{\underline{x}}}, \mathbf{C}^{o, \dot{o}}, \dots, \mathbf{C}^{o, \dot{o}}) \quad (34)$$

Si  $P$  aeronaves están emitiendo señales, que son recibidas por  $N$  sensores, se pueden usar  $N \cdot P$  posibles mediciones para un escalón de tiempo. La ecuación de medición consiste en  $N + P \cdot (D + 1)$  variables desconocidas, en la que  $D$  es la dimensión considerada, en general  $D = 3$ . Se puede dar una solución única si se satisface la condición  $N \cdot P \geq N + P \cdot (D + 1)$ .

- 5 Para la estimación, se usa un filtro de densidad supuesta gaussiana [9], en el que las densidades involucradas se describen mediante los primeros dos momentos. Debido al modelo de movimiento lineal, la Ec. (8) se puede resolver con la ecuación de predictor de Kálmán. No obstante, debido a la ecuación de medición no lineal, la Ec. (9) no se puede solucionar directamente. Con el fin de resolver la etapa de filtro, se supone que el estado y la medición son conjuntamente de distribución gaussiana.
- 10 Debido a la ecuación de medición no lineal, se usa un filtro de densidad supuesta gaussiana. La etapa de filtro se resuelve sobre la base de los primeros dos momentos y se supone que la medición y el estado son conjuntamente de distribución gaussiana. Para una medición dada  $\hat{y}_k$ , la gaussiana condicional viene dada por

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_k^e &= \underline{\mu}_k^p + \mathbf{C}_k^{z,y} \cdot \left(\mathbf{C}_k^y\right)^{-1} \cdot \left(\hat{y}_k - \left(\underline{\mu}_k^y + \mathbf{H}^b \cdot \underline{\mu}_k^b\right)\right) , \\ \mathbf{C}_k^e &= \mathbf{C}_k^p - \mathbf{C}_k^{z,y} \cdot \left(\mathbf{C}_k^y\right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{C}_k^{z,y}\right)^T , \end{aligned} \quad (35)$$

- en la que  $\underline{\mu}_k^p$  y  $\mathbf{C}_k^p$  son la media y la covarianza predichas. Con el fin de calcular la media estimada  $\underline{\mu}_k^e$  y la covarianza  $\mathbf{C}_k^e$ , se han de calcular los tres momentos desconocidos, es decir, la covarianza cruzada entre el estado y la medición  $\mathbf{C}_k^{z,y}$ , la covarianza del proceso de medición  $\mathbf{C}_k^y$ , y la medición predicha  $\underline{\mu}_k^y$ . Se debería hacer notar que, para el cálculo de la medición predicha  $\underline{\mu}_k^y$ , no se consideran los valores de los desplazamientos de aeronave. Los valores para los desplazamientos de aeronave se determinan en una etapa separada, que se explicará en lo sucesivo.

- 20 En el procedimiento de multilateración de acuerdo con la invención, unos procedimientos de descomposición tal como se propone en la Referencia [10] se aplican con el fin de reducir el esfuerzo matemático. Cuando se usan estos procedimientos de descomposición en modelos lineales condicionales, es posible aproximar los cálculos que se han bosquejado en lo que antecede, es decir, en particular el cálculo de las expresiones de las Ecs. (35), en lo que respecta a las posiciones mediante un enfoque basado en muestras. Los puntos de muestra se propagan a través de la ecuación de medición en la Ec. (28). Estos puntos de muestra y la parte descompuesta se usan entonces con el fin de calcular la media y la covarianza del proceso de medición, así como la covarianza cruzada entre el estado y la medición.

- Hasta ahora, el desplazamiento de aeronave sigue siendo desconocido. Con el fin de determinar el desplazamiento de aeronave, se usa la distancia de Mahalanobis de la densidad de medición. Para cualquier escalón de tiempo  $k$ , la distancia de Mahalanobis se puede expresar mediante una función del valor medio  $\underline{\mu}_k^b$  del desplazamiento de aeronave  $\underline{b}_k$ . Entonces, el mínimo de la distancia de Mahalanobis se corresponde con el valor de mejor estimación para el desplazamiento de aeronave. Con el fin de hallar el valor de mejor estimación para el desplazamiento de aeronave, se toma la derivación de la Mahalanobis con respecto al valor medio del desplazamiento de aeronave,

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\underline{\mu}_k^b} \left( \hat{y}_k - \left( \underline{\mu}_k^y + \mathbf{H}^b \cdot \underline{\mu}_k^b \right) \right)^T \cdot \left( \mathbf{C}_k^y \right)^{-1} \cdot \\ \left( \hat{y}_k - \left( \underline{\mu}_k^y + \mathbf{H}^b \cdot \underline{\mu}_k^b \right) \right) = 0 , \end{aligned} \quad (36)$$

- 35 lo que conduce a

$$-2 \left( \mathbf{H}^b \right)^T \cdot \left( \mathbf{C}_k^y \right)^{-1} \cdot \left( \hat{y}_k - \left( \underline{\mu}_k^y + \mathbf{H}^b \cdot \underline{\mu}_k^b \right) \right) = 0 . \quad (37)$$

El desplazamiento de aeronave se calcula entonces mediante

$$\underline{\mu}_k^b = \left( (\mathbf{H}^b)^T (\mathbf{C}_k^y)^{-1} \mathbf{H}^b \right)^{-1} (\mathbf{H}^b)^T (\mathbf{C}_k^y)^{-1} \left( \hat{y}_k - \underline{\mu}_k^y \right) \quad (38)$$

y se usa entonces en la Ec. (35).

Debido a los modelos lineales en la Ec. (32), se usan las ecuaciones de predictor de Kálmán, que vienen dadas por

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_k^p &= \mathbf{A} \cdot \underline{\mu}_k^e, \\ \mathbf{C}_k^p &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{C}_k^e \cdot (\mathbf{A})^T + \mathbf{C}^w. \end{aligned} \quad (39)$$

Con referencia a la figura 5, el procedimiento se puede bosquejar tal como sigue. Para un escalón de tiempo arbitrario, con la densidad predicha del estado que se describe mediante sus dos primeros momentos, es decir, el valor de esperanza  $\mu_P$  y la matriz de covarianza  $C_P$ , se calculan la medición predicha  $\mu_y$ , la covarianza del proceso de medición  $C_y$ , y la covarianza cruzada entre el estado y la medición  $C_{zy}$ . Entonces, las cantidades calculadas se usan para obtener una estimación para el desplazamiento de aeronave  $\mu_b$  de acuerdo con la Ec. (38). A continuación, en la etapa de filtro, la densidad estimada del estado que se describe mediante su valor de esperanza  $\mu_e$  y  $C_e$  se calcula de acuerdo con la Ec. (35) usando los resultados a partir de las etapas previas. Entonces, de acuerdo con las ecuaciones de predictor de Kálmán (39), las expresiones  $\mu_e$  y  $C_e$  se usan para calcular la densidad predicha del estado para el siguiente escalón de tiempo, que viene dado una vez más por el valor de esperanza  $\mu_P$  y la matriz de covarianza  $C_P$ .

Algunas realizaciones de la invención también pueden comprender una característica que prevé una mejora de la precisión del procedimiento de multilateración. Esta característica opcional está relacionada con la implementación del procedimiento de multilateración y se analizará en lo sucesivo. La estimación se realiza en un sistema de coordenadas cartesianas. Debido al hecho de que la aeronave se está moviendo a una cierta altura barométrica, esto conduce al hecho de que la aeronave se mueve en un cierto espacio cartesiano en un plano. Con el fin de reducir las dependencias para la componente en el eje z, se puede usar una transformación. Se supone que esa cierta área se encuentra en la latitud  $\alpha$  y la longitud  $\beta$  y, por lo tanto, una matriz de rotación viene dada por

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Las posiciones de sensor se rotan de una forma tal que las dependencias en el eje z se eliminan de acuerdo con

$$\mathbf{R} \cdot \underline{S}^i. \quad (41)$$

Con el fin de reducir la dinámica en los valores de medición para la  $j$ -ésima aeronave, el valor mínimo se puede sustraer del conjunto de mensajes

$$\underline{y}_k^{1\dots N,j} = \left[ y_k^{1,j} \quad \dots \quad y_k^{N,j} \right]^T \quad (42)$$

que proviene de la  $j$ -ésima aeronave, y para reducir la dinámica en el desplazamiento de aeronave para la  $j$ -ésima aeronave, una posible distancia se puede añadir de acuerdo con

$$\underline{y}_k^{1\dots N,j} - \min \left( \underline{y}_k^{1\dots N,j} \right) + d_k^{\text{argmin} \left( \underline{y}_k^{1\dots N,j} \right), j}. \quad (43)$$

Para el estimador propuesto, es útil tener un cierto número de mediciones con el tiempo. Si la deriva está variando

lentamente, los conjuntos de mensajes a partir de diferentes aeronaves se pueden recopilar a lo largo de un cierto horizonte de tiempo breve.

De acuerdo con las realizaciones de la invención que se ha descrito en lo que antecede, el procedimiento de multilateración se ha evaluado con datos simulados y reales. En la simulación, el procedimiento de la invención se compara con el caso en el que los sensores están sincronizados con precisión. En el experimento, las posiciones estimadas se comparan con la posición de ADS-B de las aeronaves.

En la simulación, el procedimiento de acuerdo con la invención se compara con el caso en el que el desplazamiento de sensor es perfectamente conocido, en el que ambos algoritmos hacen uso de un estimador de estados (GADF - *Gaussian assumed density filter*, filtro de densidad supuesta gaussiana) y, en el último, el desplazamiento de sensor se omite del espacio de estados. Para la simulación, se colocan 8 sensores de acuerdo con la Referencia [11] con el fin de medir los tiempos de recepción de mensajes a partir de diferentes aeronaves. El número de aeronaves se seleccionó para ser 10 y 30, respectivamente. Los tiempos de recepción medidos comprenden el tiempo de vuelo, un desplazamiento de aeronave y de sensor. Además, los tiempos de recepción están corrompidos con un ruido gaussiano que varía de cero a 0,1 km. El tiempo de simulación es de 360 segundos, con un tiempo de muestreo de 0,1 segundos.

Además, los algoritmos son comparados entre una medición completa, es decir, todos los sensores recibieron datos a partir de todas las aeronaves en cada escalón de tiempo, y mediciones parciales, es decir, solo se mide una parte de la posible medición. En la figura 3(a), el error cuadrático medio (ECM) para todas las aeronaves (30 aeronaves) se muestra para el caso de unos datos calibrados y no calibrados, también para las mediciones completas y parciales. Los datos de campo se corresponden con cuando el desplazamiento de sensor es perfectamente conocido. Para unos datos no calibrados y una medición completa, el procedimiento de acuerdo con la invención tiene un ECM más alto que los datos de campo, cuando aumenta el nivel de ruido. Esta desviación aumenta cuando solo se toman mediciones parciales.

Si el número de aeronaves se disminuye a 10, la precisión para el procedimiento de acuerdo con la invención en comparación con los relojes calibrados se disminuye tal como se muestra en la figura 3(b). Esto se puede explicar por el hecho de que menos aeronaves sirven para la sincronización.

En el experimento del mundo real, se usaron unos datos no calibrados con el fin de estimar la trayectoria de las aeronaves. El enfoque propuesto se comparó con los datos de ADS-B procedentes de las aeronaves. El conjunto de datos completo contiene un registro de aproximadamente 13 minutos. En la evaluación, los datos a lo largo de un horizonte de 0,1 segundos se recopilan en un conjunto de datos para cada etapa de medición. Además, preferiblemente se usa una puerta de validación con el fin de hacer frente a los valores atípicos. Los valores atípicos pueden dar lugar a unas estimadas pobres para el procedimiento de localización y de sincronización. La puerta de validación se usa para comprobar el resultado del cálculo antes de actualizar el estado estimado del sistema. De forma más específica, con el fin de detectar valores atípicos, la medición predicha se compara con una medición real dependiendo de una incertidumbre dada. En la figura 4(a) se muestran los resultados para el enfoque propuesto y los datos de ADS-B. Los ECM para cada aeronave se representan en la figura 4(b).

A pesar de que la invención se ha ilustrado y descrito con detalle en los dibujos y la descripción anterior, tal ilustración y descripción se han de considerar ilustrativas o a modo de ejemplo y no restrictivas. Se entenderá que pueden hacerse cambios y modificaciones por parte de los expertos en la materia dentro del ámbito de las siguientes reivindicaciones. En particular, la presente invención cubre realizaciones adicionales con cualquier combinación de características a partir de diferentes realizaciones que se han descrito en lo que antecede y que se describen en lo sucesivo.

Además, en las reivindicaciones, la expresión “comprendiendo/que comprende” no excluye otros elementos o etapas, y el artículo indefinido “un” o “una” no excluye una pluralidad. Una única unidad puede satisfacer las funciones de varias características que se enuncian en las reivindicaciones. Las expresiones “esencialmente”, “en torno a”, “aproximadamente” y similares en conexión con un atributo o un valor en particular también definen exactamente el atributo o exactamente el valor, respectivamente. No se debería interpretar signo de referencia alguno en las reivindicaciones como limitante del ámbito.

#### Referencias

- [1] J. O. Smith y J. S. Abel, “*Closed-Form Least-Squares Source Location Estimation from Range-Difference Measurements*”, *IEEE Transactions of Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. ASSP-35, n.º 12, págs. 1661 - 1669, dic. de 1987.
- [2] Y. Chan y K. Ho, “*A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location*”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, n.º 8, págs. 1905 - 1915, agosto de 1994.
- [3] F. Fletcher, B. Ristic y D. Musicki, “*Recursive Estimation of Emitter Location using TDOA Measurements from two UAVs*”, en *Proceedings of the 10th International Conference on Information Fusion (Fusion, 2007)*, Quebec, Canadá, julio de 2007, págs. 1 - 8.

- [4] S. Bancroft, "An Algebraic Solution of the GPS Equations", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-21, n.º 1, págs. 56 - 59, enero de 1985.
- 5 [5] F. Beutler y U. D. Hanebeck, "A Two-Step Approach for Offset and Position Estimation from Pseudo-Ranges Applied to Multilateration Tracking", en *Proceedings of the 13th International Conference on Information Fusion (Fusion, 2010)*, Edimburgo, Reino Unido, julio de 2010, págs. 1 - 8.
- [6] P. Dunau, F. Packi, F. Beutler y U. D. Hanebeck, "Efficient Multilateration Tracking System with Concurrent Offset Estimation using Stochastic Filtering Techniques", en *Proceedings of the 13th International Conference on Information Fusion (Fusion, 2010)*, Edimburgo, Reino Unido, julio de 2010, págs. 1 - 8.
- 10 [7] G. Welch, B. D. Allen, A. Ilie y G. Bishop, "Measurement Sample Time Optimization for Human Motion Tracking/Capture Systems", en *Proceedings of Trends and Issues in Tracking for Virtual Environments, Workshop at the IEEE Virtual Reality 2007 Conference*, Charlotte, Carolina del Norte, marzo de 2007.
- [8] Y. Bar-Shalom, X. R. Li y T. Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- 15 [9] K. Ito y K. Xiong, "Gaussian Filters for Nonlinear Filtering Problems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, n.º 5, págs. 910 - 927, mayo de 2000.
- [10] F. Beutler, M. F. Huber y U. D. Hanebeck, "Gaussian Filtering using State Decomposition Methods", en *Proceedings of the 12th International Conference on Information Fusion (Fusion, 2009)*, Seattle, Washington, julio de 2009, págs. 1 - 8.
- 20 [11] J. Isaacs, D. Klein y J. Hespanha, "Optimal Sensor Placement for Time Difference of Arrival Localization", en *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, 2009*, celebrada conjuntamente con la 28ª Chinese Control Conference, 2009 (CDC/CCC 2009), Shanghái, China, dic. de 2009, págs. 7878 - 7884.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de multilateración de al menos uno de una pluralidad de P objetos, que usa:

una pluralidad de N sensores ubicados en posiciones conocidas  $\underline{S}^1, \dots, \underline{S}^N$ ;  
una unidad de procesamiento;

5 un dispositivo de transmisión en cada uno de los objetos en unas posiciones desconocidas  $\underline{x}_k^1, \dots, \underline{x}_k^P$ , en el que cada uno de los dispositivos de transmisión está configurado para transmitir una señal respectiva; comprendiendo el procedimiento las etapas de:

transmitir, el dispositivo de transmisión de cada uno de los objetos, señales en unos tiempos de transmisiones desconocidos;

10 recibir, cada sensor, i, las señales transmitidas a partir de cada uno de los P objetos, j, y medir los tiempos de recepción no calibrados  $y_k^{i,j}$  respectivos;

combinar los tiempos de recepción no calibrados medidos de las señales recibidas en una serie ordenada de forma cronológica de conjuntos de mensajes, en el que cada uno de los conjuntos de mensajes comprende los tiempos de recepción de una única señal transmitida;

15 recopilar todos los conjuntos de mensajes válidos que tienen lugar dentro de un intervalo de tiempo previamente determinado  $\Delta T_k$ , en el que el índice  $k \in \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$  indica un escalón de tiempo k, y en el que un conjunto de mensajes válido contiene al menos N tiempos de recepción no calibrados medidos; proporcionar una ecuación de medición para los P objetos y los N sensores

$$\underline{y}_k = \frac{1}{c} \begin{bmatrix} \|\underline{x}_k^1 - \underline{S}^1\| \\ \vdots \\ \|\underline{x}_k^1 - \underline{S}^N\| \\ \vdots \\ \|\underline{x}_k^P - \underline{S}^1\| \\ \vdots \\ \|\underline{x}_k^P - \underline{S}^N\| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots \\ & \ddots & \\ 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_k^1 \\ \vdots \\ b_k^P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots \\ & \ddots & \\ 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \\ 1 & 0 & \dots \\ & \ddots & \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} o_k^1 \\ \vdots \\ o_k^N \end{bmatrix} + \underline{v}_k$$

1

20 que, para cualquier escalón de tiempo k, describe una relación entre un conjunto de mensajes  $\underline{y}_k$ , y en el que  $\underline{y}_k$  es dependiente de: c, que es la velocidad de propagación de las señales transmitidas en el medio considerado;

un vector de posición de objeto  $\underline{x}_k$  en un escalón de tiempo k, que comprende las posiciones  $\underline{x}_k^j$  de cada uno de los P objetos en el escalón de tiempo k, en el que  $j \in \{1, \dots, P\}$ ;

25 un vector de posición de sensor S que comprende las posiciones  $\underline{S}^i$  de cada uno de los N sensores, en el que  $i \in \{1, \dots, N\}$ ; en el que  $\|\cdot\|$  es la norma euclídea convencional;

el vector de desplazamiento de tiempo  $\underline{o}_k$ , en el que  $\underline{o}_k = (o_k^1, \dots, o_k^N)$

un vector de ruido general  $\underline{v}_k$  que comprende unos ruidos generales  $v_k^{i,j}$  en el escalón de tiempo k, en el que  $i \in \{1, \dots, N\}$  y  $j \in \{1, \dots, P\}$ ;

30 en el que los números de N sensores y P objetos cumplen la siguiente condición:

$$N \cdot P \geq N + P \cdot (D + 1); \text{ y, en la que } D \text{ es la dimensión considerada; y}$$

procesar al menos uno de los conjuntos de mensajes obtenidos de forma cronológica por medio de la realización, por dicha unidad de procesamiento, de un proceso de estimación, en el que durante el proceso de estimación se estima un vector de desplazamiento de tiempo  $\underline{o}_k$ , en el que  $\underline{o}_k$

35 comprende los desplazamientos de tiempo  $o_k^i$  de las mediciones de cada uno de los N sensores en el escalón de tiempo k e  $i \in \{1, \dots, N\}$ ; y en el que se estima un vector de tiempo de transmisión  $\underline{b}_k$ , en el que  $\underline{b}_k$

comprende los tiempos de transmisión  $b_k^j$  de cada uno de los P objetos en el escalón de tiempo k, en el que  $j \in \{1, \dots, P\}$ ;

calcular las posiciones de objeto  $(x_k^1, \dots, x_k^P)$  y el vector de desplazamiento de tiempo  $(o_k^1, \dots, o_k^N)$  y

emitir la posición de dicho al menos uno de una pluralidad de objetos.

2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que el proceso de estimación comprende:

una etapa de predicción que se realiza de acuerdo con la ecuación de Chapman-Kolmogorov; y  
una etapa de filtro que se realiza usando la regla de Bayes.

5 3. El procedimiento de la reivindicación 1 o 2, en el que dicho vector de tiempo de transmisión  $\underline{b}_k$  multiplicado por la matriz  $\mathbf{H}^b$  y el término resultante se modela como un proceso de ruido completamente correlacionado, preferiblemente mediante el uso de una expresión de distancia que depende de un valor de esperanza de  $\underline{b}_k$ .

4. El procedimiento de la reivindicación 2 o 3, en el que la etapa de predicción se realiza de acuerdo con un modelo para describir la evolución temporal de un estado, en el que:

10 el tiempo se describe mediante una serie de escalones de tiempo discretos  $k \in \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$ ;  
para cada uno de los escalones de tiempo  $k \in \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$ , el estado viene dado por un vector  $\underline{z}_k$  que comprende:

el vector de posición de objeto  $\underline{x}_k$ ;

un vector de velocidad de objeto  $\underline{v}_k$  que comprende la velocidad de cada uno de los objetos;

15 el vector de desplazamiento de sensor  $\underline{d}_k$ ;

un vector de deriva de sensor  $\underline{Q}_k$  que comprende la deriva de cada uno de los desplazamientos de sensor;

y en el que el modelo comprende una ecuación de sistema recursiva

$$\underline{z}_{k+1} = \underline{a}(\underline{z}_k, \underline{w}_k),$$

20 en el que  $\underline{a}$  es una función que depende del estado en el escalón de tiempo  $k$  y  $\underline{w}_k$  indica un proceso de ruido a lo largo de los escalones de tiempo  $k \in \{1, \dots, N_{\Delta T}\}$ .

5. El procedimiento de la reivindicación 4, en el que la función  $\underline{a}$  es una función afín, preferiblemente una función lineal, del estado  $\underline{z}_k$  y el ruido  $\underline{w}_k$ .

6. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que el proceso de ruido se modela como un proceso de distribución gaussiana.

25 7. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6, en el que la etapa de predicción se realiza usando las ecuaciones de predictor de Kálmán.

8. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7, en el que:

se supone que la medición y el estado son conjuntamente de distribución gaussiana; y  
la densidad estimada se describe mediante un valor de esperanza y una covarianza.

30 9. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 8, en el que la dependencia para el componente de la altura se reduce mediante la aplicación de un operador de rotación sobre las coordenadas de las posiciones de sensor.

35 10. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 9, en el que la dinámica en los valores de medición para el  $j$ -ésimo objeto se reduce mediante la sustracción del valor mínimo del conjunto de mensajes con respecto a cada uno de los componentes del vector de medición  $\underline{y}_k$ , y mediante la adición, al resultado del mismo, de la distancia esperada del  $j$ -ésimo objeto.

11. Un sistema de multilateración de al menos uno de una pluralidad de P objetos, que usa:

una pluralidad de N sensores;

un dispositivo de transmisión en cada uno de los objetos, en el que cada uno de los dispositivos de transmisión está configurado para transmitir una señal respectiva; y comprendiendo adicionalmente el sistema

40 una unidad de procesamiento que está configurada para operar de acuerdo con un procedimiento definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10.

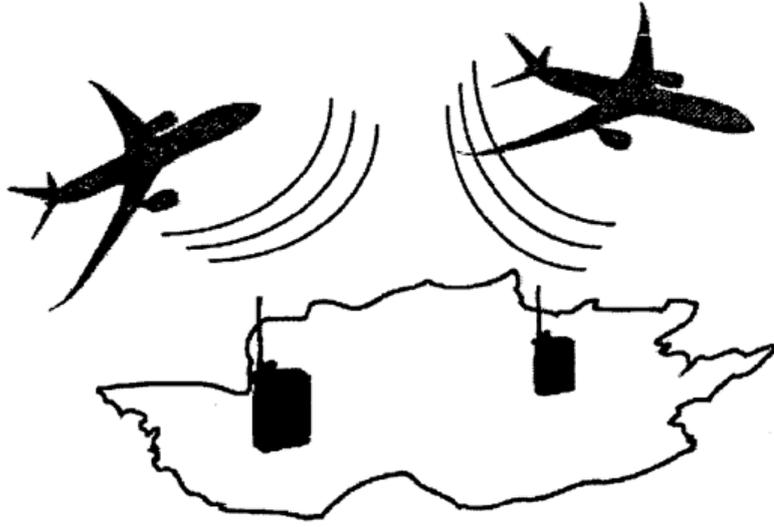


Fig. 1

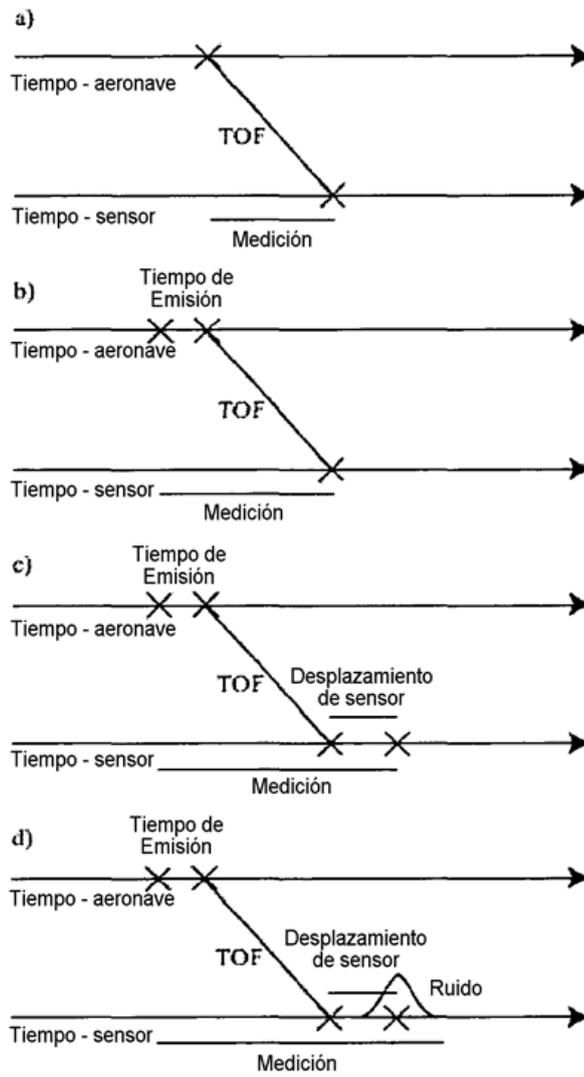


Fig. 2

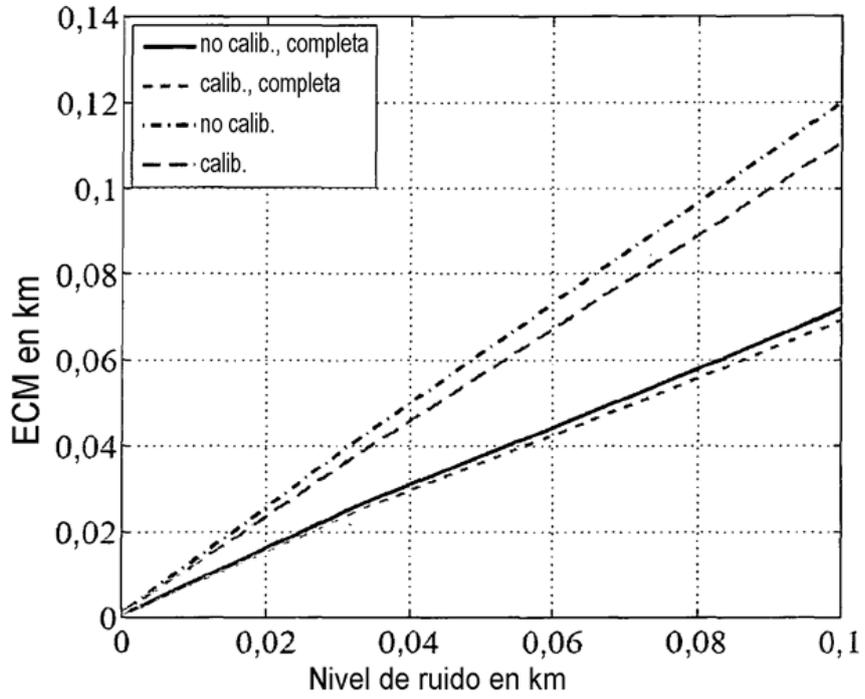


Fig. 3 (a)

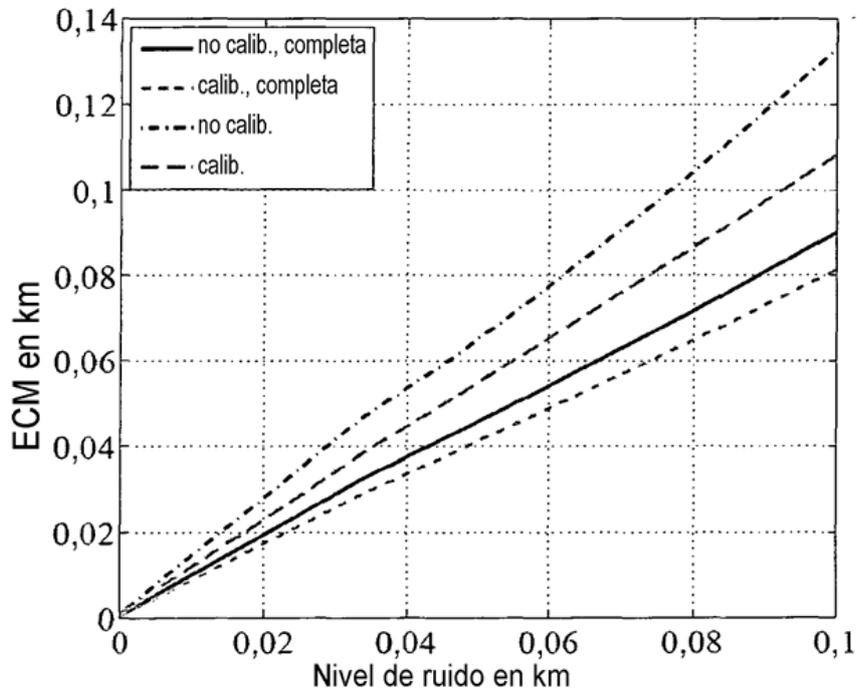


Fig. 3 (b)

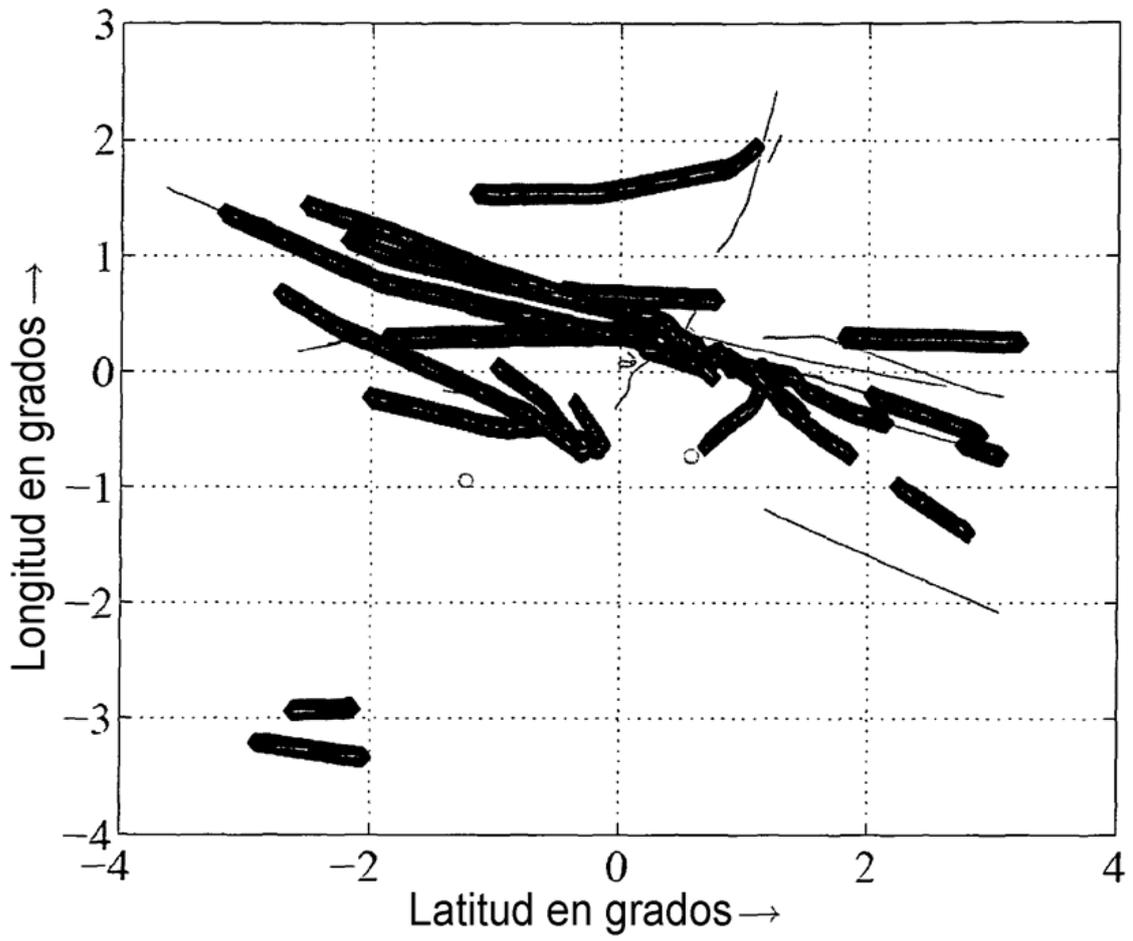


Fig. 4

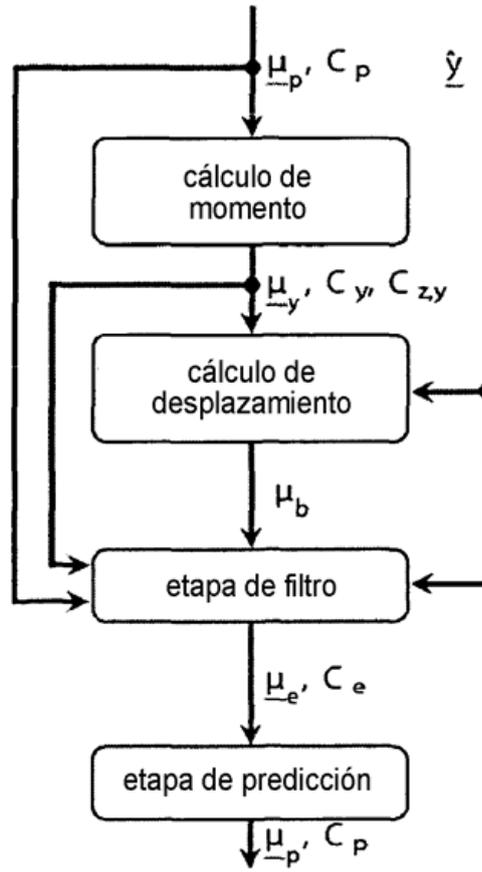


Fig. 5