

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 383 466**

51 Int. Cl.:
G01S 19/11 (2010.01)
G01S 19/51 (2010.01)
G01S 19/23 (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **08016410 .6**
96 Fecha de presentación: **18.09.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2040091**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **25.03.2009**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación**

30 Prioridad:
24.09.2007 DE 102007045711

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
21.06.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
21.06.2012

73 Titular/es:
Astrium GmbH
81663 München , DE

72 Inventor/es:
Martin, Sven;
Schlötzer, Susanne y
Voith von Voithenberg, Michael

74 Agente/Representante:
Lehmann Novo, Isabel

ES 2 383 466 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 dispositivo para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación.

La invención se refiere a un procedimiento para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación conforme a la reivindicación 1 y a un dispositivo correspondiente conforme a la reivindicación 22.

5 Los sistemas de satélite para la navegación mundial (GNSS, del inglés "Global Navigation Satellite System", sistema global de navegación por satélite) son empleados para la determinación de posición y la navegación en la tierra y en el aire. Los sistemas GNSS, tales como por ejemplo el sistema de navegación por satélite europeo que se encuentra en desarrollo (en lo que sigue denominado también sistema Galileo o abreviadamente Galileo) tienen un sistema que comprende una pluralidad de satélites o pseudolitos, un sistema de disposición de recepción fijo a la tierra y unido a una
 10 estación central de cálculo así como sistemas de uso, que evalúan y usan las señales de navegación emitidas por los satélites o pseudolitos.

En general, en un entorno de navegación, en particular en un sistema GNSS, debe ser conocida la posición exacta en un sistema de coordenadas de los emisores, que emiten las señales de navegación para la recepción por sistemas de uso. En un sistema de navegación por satélite, el conocimiento de los parámetros orbitales de Kepler de los satélites es
 15 de esencial importancia para una navegación exacta. Habitualmente, las posiciones exactas de sistemas GNSS terrestres, es decir sistemas de pseudolitos, son determinadas por una costosa medición de posición de los emisores de las señales de navegación. Hay ya primeros planteamientos para determinar mediante una autocalibración las posiciones de los emisores de navegación.

Las siguientes publicaciones describen la autocalibración de emisores de señales de navegación:

- 20 – "Self-Calibration of Pseudolite Arrays Using Self-Differencing Transceivers", E. A. LeMaster, S.M. Rock, Proceedings of the Institute of Navigation GPS-99 Conference, Nashville, TN, Sept. 1999, págs. 1549-1558;
- "Field Test Results for a Self-Calibrating Pseudolite Array", E. A. LeMaster, S.M. Rock, Proceedings of the Institute of Navigation GPS-2000 Conference, Salt Lake City, Sept. 2000, págs. 1046-1055;
- 25 – "An Improved Solution Algorithm for Self-Calibrating Pseudolite Arrays", E. A. LeMaster, S.M. Rock, Institute for Navigation National Technical Meeting, San Diego, CA. Enero 2002;
- "Field Demonstration of a Mars Navigation System Utilizing GPS Pseudolite Transceivers", E. A. LeMaster, S.M. Rock, Position, Location, and Navigation Symposium, Palm Springs, CA, Abril 2002; y
- "3-D Capabilities for GPS Transceiver Arrays", M. Matsuoka, E. A. LeMaster, S.M. Rock, Proceedings of the Institute of Navigation GPS-2002 Conference, Portland, OR, Sept. 2002, págs. 824-834
- 30 – "Mars Navigation System Utilizes GPS", LEMASTER E A ET AL, IEEE AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS MAGAZINE, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Vol. 18, nº 4, 1 de abril de 2003, (2003-04-01), páginas 3-8.

Una desventaja de los procedimientos y sistemas descritos en estas publicaciones consiste sobre todo en que un sistema de uso debe estar realizado como transceptor y con ello también debe poder emitir, lo que sin embargo no se
 35 desea siempre, en particular en aplicaciones militares. Si se encuentran muchos usuarios en el sistema de navegación, es ventajoso, teniendo en cuenta una anchura de banda limitada, que los usuarios individuales no puedan enviar señales de navegación. Otra desventaja en la realización como transceptor del sistema de uso consiste en que es necesario hardware complejo, pesado y de costes muy altos para el sistema de uso.

Constituye por ello la tarea de la presente invención crear un procedimiento y un dispositivo para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación, en los cuales un sistema de uso no debe estar
 40 realizado como transceptor para la autocalibración.

Esta tarea es resuelta mediante un procedimiento para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación con las características de la reivindicación 1 y un dispositivo correspondiente con las características de la reivindicación 22. Otras estructuraciones de la invención son objeto de las reivindicaciones
 45 subordinadas.

Una idea esencial de la invención consiste en emplear un algoritmo de autocalibración de varias etapas para transceptores de señales de navegación con empleo de un sistema de uso para la determinación de posición de los transceptores. En lo esencial, según un algoritmo así la autocalibración de una red de transceptores se produce en tres
 pasos:

- 50 1. calibración gruesa de las coordenadas de los transceptores;

2. estimación de la trayectoria del sistema de uso; y
3. calibración fina de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso sobre la base de la calibración gruesa y de la estimación de la trayectoria.

5 Mediante la autocalibración de las coordenadas de los transceptores puede conseguirse un ahorro considerable de tiempo en el establecimiento de un entorno de navegación local, por ejemplo para un campo de aterrizaje temporal o para la navegación en interiores en determinados edificios. Además no es necesario que un sistema de uso esté realizado como emisor de navegación, lo que es de considerable interés para aplicaciones militares para evitar la detección por un adversario. El empleo de sistemas pasivos de uso hace posible, a la vista de anchuras de banda limitadas, que no tenga que ser limitado el número de usuarios en el entorno de navegación. Finalmente, la invención hace posible hardware económico de usuario con poco peso.

La invención se refiere entonces conforme a una forma de realización a un procedimiento para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación con empleo de un sistema de uso para las señales de navegación con los siguientes pasos:

- a) calibración gruesa de las coordenadas de los transceptores;
- 15 b) estimación de la trayectoria del sistema de uso; y
- c) calibración fina de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso sobre la base de la calibración gruesa y de la estimación de la trayectoria.

En otra forma de realización de la invención se determina mediante la calibración gruesa la distancia entre dos transceptores.

20 Para la calibración gruesa, según otra forma de realización de la invención pueden emplearse ecuaciones de observación auto-diferenciadas ("self-differenced"). Esto hace posible la observación directa de la distancia entre dos transceptores.

25 El procedimiento puede estar realizado además conforme a una forma de realización de la invención de tal modo que una vez que han sido halladas las distancias entre todos los transceptores, las coordenadas de los transceptores pueden ser determinadas de forma gruesa por triangulación de las distancias halladas entre los transceptores. Con ello, los transceptores pueden ser dispuestos en un sistema local de coordenadas.

30 Para la determinación de las coordenadas de los transceptores, conforme a otra forma de realización de la invención se emplea un sistema local de coordenadas y se selecciona automáticamente la posición más conveniente del sistema de coordenadas con relación a los transceptores. La introducción de un sistema local de coordenadas hace posible la restricción del sistema, ya que dentro de una red de transceptores son posibles sólo posicionamientos relativos entre sí. Mediante la selección automática de la posición más conveniente del sistema de coordenadas puede mejorarse además la cuota de éxito de la autocalibración también para geometrías difíciles y mediciones muy ruidosas.

En otra forma de realización de la invención, tras el paso a) se determina la posición inicial del sistema de uso antes de la realización del paso b).

35 Para una primera estimación de la posición inicial del sistema de uso pueden emplearse, según una forma de realización de la invención, pseudodistancias doblemente diferenciadas ("double-differenced") como magnitud observada. A través de ello son compensados los errores de reloj de los transceptores y del sistema de uso, cuando no están sincronizados los emisores para las señales de navegación en los transceptores.

40 Adicionalmente, en una forma de realización de la invención, la determinación de la posición inicial de un sistema de uso puede producirse mediante una búsqueda en malla basada en una minimización de residuos de medida.

Para cada punto de malla, en otra forma de realización de la invención se determina la suma de los residuos cuadráticos de medida y se emplea como magnitud de prueba, para diferenciar entre distintos candidatos de prueba de los puntos de malla para la posición inicial.

45 Según una forma de realización de la invención, como primera estimación de la posición inicial puede escogerse aquel punto de malla que ofrece la menor suma de residuos cuadráticos de medida.

Conforme a otra forma de realización de la invención, la búsqueda en malla es realizada en el primer paso con una malla gruesa, que cubre toda la superficie del entorno de navegación, y en el siguiente paso con una malla fina, que se extiende en torno al punto de malla escogido en el paso previo.

50 Según otra forma de realización de la invención, las dimensiones de la zona de prueba para la determinación de la posición inicial del sistema de uso son determinadas por las coordenadas de calibración gruesa de los transceptores.

La estimación de la trayectoria del sistema de uso puede producirse conforme a otra forma de realización de la invención mediante un planteamiento iterativo de mínimos cuadrados aprovechando una pequeña dinámica del sistema de uso en la linealización de ecuaciones de observación.

- 5 Para la calibración fina de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso, según una forma de realización de la invención se emplean exclusivamente medidas de fase poco ruidosas de las señales de navegación emitidas por los transceptores.
- En otra forma de realización de la invención, la calibración fina de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso se produce mediante un planteamiento iterativo de mínimos cuadrados.
- 10 Para el planteamiento iterativo de mínimos cuadrados, conforme a una forma de realización se lleva a cabo un desarrollo en serie de Taylor de las ecuaciones de observación, que o bien es truncado tras el término lineal y a continuación se aplica un método estándar iterativo de mínimos cuadrados para la calibración fina, o bien es truncado tras el término cuadrático y a continuación se aplica un método cuadrático iterativo de mínimos cuadrados.
- En otra forma de realización de la invención se emplean ecuaciones de observación doblemente diferenciadas para la calibración fina.
- 15 Finalmente, conforme a una forma de realización de la invención se llevan a cabo iteraciones en el marco del planteamiento iterativo de mínimos cuadrados hasta que se satisface o bien el criterio de convergencia o bien el criterio de divergencia o se supera el número máximo admisible de iteraciones.
- Adicionalmente está previsto en una forma de realización de la invención que se repita la calibración fina empleando resultados que varían respecto a los resultados de la calibración gruesa.
- 20 La invención se refiere además en una forma de realización a un programa de ordenador para llevar a cabo el procedimiento según la invención.
- Otra forma de realización de la invención prevé un producto de programa de ordenador, que comprende un soporte de programa legible por máquina, en el que está almacenado un programa de ordenador conforme a la invención en la forma de señales de control legibles electrónica y/u ópticamente.
- 25 La invención se refiere además conforme a una forma de realización a un dispositivo para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación con empleo de un sistema de uso para las señales de navegación, que comprende:
- primeros medios para la calibración gruesa de las coordenadas de los transceptores;
 - segundos medios para la estimación de la trayectoria del sistema de uso; y
- 30 - terceros medios para la calibración fina de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso.
- Los primeros medios está conformados, según una forma de realización de la invención, para llevar a cabo un procedimiento según una de las reivindicaciones 2 hasta 5.
- Los segundos medios están conformados, según otra forma de realización de la invención, para llevar a cabo un procedimiento según la reivindicación 13.
- 35 Los terceros medios están conformados, según otra forma de realización de la invención, para llevar a cabo un procedimiento según una de las reivindicaciones 14 hasta 19.
- Según una forma de realización de la invención, pueden estar previstos además unos cuartos medios para la determinación de la posición inicial del sistema de uso, que están conformados para llevar a cabo un procedimiento según una de las reivindicaciones 6 hasta 12.
- 40 Los medios primeros hasta cuartos pueden estar implementados en particular mediante un procesador y una memoria, en la que está almacenado un programa según la invención para que sea ejecutado por el procesador.
- Otras ventajas y posibilidades de aplicación de la presente invención resultan de la siguiente descripción en conexión con los ejemplos de realización representados en los dibujos.
- 45 En la descripción, en las reivindicaciones, en el resumen y en los dibujos se emplean los conceptos empleados y los números de referencia asignados en la lista de números de referencia adjunta al final.
- Los dibujos muestran en:

- la figura 1 la evolución esquemática de un ejemplo de realización de la autocalibración de una red de transceptores conforme a la invención;
- la figura 2 la auto-diferenciación entre dos transceptores;
- 5 la figura 3 un ejemplo de realización para la posición real de los transceptores en la red respecto a la posición en el sistema local de coordenadas tras la autocalibración;
- la figura 4 la doble diferenciación en la red de transceptores;
- la figura 5 un ejemplo de realización de una zona bidimensional de prueba para la búsqueda basada en malla; y
- la figura 6 ejemplos para la suma de los residuos cuadráticos de medida en función de la posición inicial estimada del receptor de uso (izquierda: malla gruesa; derecha: malla fina).

10 En lo que sigue, elementos iguales y/o funcionalmente iguales pueden estar dotados de los mismos números de referencia. Los valores absolutos y datos de medida indicados en lo que sigue son sólo valores a modo de ejemplo y no representan ninguna restricción de la invención a dimensiones de ese tipo.

15 Un transceptor (TC) se compone de un pseudolito de sistema GNSS y de un receptor de sistema GNSS. En la siguiente descripción de algoritmos se supone que para el envío y la recepción se emplean dos antenas de los transceptores separadas, como se muestra en la figura 2. Los siguientes requisitos de sistema deben satisfacerse para una autocalibración, para que la red de transceptores pueda calibrarse exitosamente:

- a) Red bidimensional de TCs: ≥ 4 TCs, que se extienden por el plano
- b) Red tridimensional de TCs: ≥ 5 TCs, que se extienden por el espacio

20 Junto a los TCs debería estar disponible un receptor de uso móvil para la calibración fina del sistema. La evolución esquemática del algoritmo de autocalibración está representada en la figura 1.

En lo esencial, la autocalibración de la red de TCs se produce en tres pasos:

- 1) calibración gruesa
- 2) estimación de la trayectoria del sistema de uso o respectivamente del receptor de uso
- 3) calibración fina

25 En lo que sigue se describen en detalle los distintos pasos.

- 1) Calibración gruesa

En una configuración estática las coordenadas de TCs y las coordenadas del receptor de uso son calibradas de forma gruesa. Para la calibración gruesa de las coordenadas de TCs se emplean ecuaciones de observación auto-diferenciadas. El procedimiento para la auto-diferenciación entre dos transceptores está esbozado en la figura 2.

30 Mediante la auto-diferenciación de pseudodistancias entre dos TCs, la distancia r entre los dos TCs se hace directamente observable. Se hace aquí la simplificación de que la antena de transmisión (TX) y la antena de recepción (RX) del mismo TC se encuentran prácticamente en el mismo sitio:

$$\nabla\Delta\rho_{i,j}(t) = \rho'_i(t) - \rho'_i(t) + \rho'_j(t) - \rho'_j(t) = 2 \cdot \left\| \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \right\| + \nabla\Delta v_{\rho_{-i,j}}(t)$$

Ecuación (1)

35 con

ρ : medida de pseudodistancia

v_ρ : ruido de pseudodistancia debido a todas las fuentes de error (ruido de receptor, propagación multitrayecto)

Los índices i y j indican el TC i -ésimo o respectivamente j -ésimo. Tras la auto-diferenciación se obtiene la distancia doble r entre los dos TCs.

$$r_{i,j} \approx \frac{\nabla \Delta \rho_{i,j}(t_0)}{2}$$

Ecuación (2)

Una vez conocidas las distancias entre todos los TCs en la red, pueden ser determinadas las coordenadas de TCs de forma gruesa por triangulación. Como dentro de la red de TCs sólo son posibles posicionamientos relativos entre ellos, el sistema es restringido por la introducción de un sistema de coordenadas. Para sistemas bidimensionales se introducen tres restricciones adicionales y para sistemas tridimensionales seis restricciones adicionales sobre la base de los grados de libertad del sistema en lo que respecta a traslación y rotación. Para simplificar las siguientes consideraciones a modo de ejemplo, se imponen a las coordenadas locales de TCs en esta descripción las siguientes restricciones:

- 10 1. TC1* debe quedar situado en el origen de coordenadas del sistema de coordenadas ($x1^*=0, y1^*=0, z1^*=0$)
2. TC2* debe quedar situado a lo largo del eje x positivo del sistema de coordenadas ($y2^*=0, z2^*=0$)
3. TC3* debe estar situado en el plano xy y tener un valor y positivo ($y3^*>0, z3^*=0$)

En una red tridimensional de TCs debe cumplirse adicionalmente:

4. TC4* debe extenderse por el espacio y tener un valor z positivo ($z4^*>0$)
- 15 El algoritmo puede ser configurado de tal modo que busca automáticamente la posición más conveniente para el sistema cartesiano local de coordenadas. Con ello se mejora la cuota de éxito de la autocalibración también para geometrías difíciles, por ejemplo cuando tres TCs están colocados prácticamente de forma colineal, y para medidas muy ruidosas, suponiendo que hay TCs redundantes en la red.

En redes bidimensionales de TCs puede procederse como sigue:

- 20 Si n es el número de TCs en la red, pueden formarse $\binom{n}{3}$ triángulos de referencia. El triángulo de TCs que tiene la máxima similitud con un triángulo equilátero es escogido como triángulo de referencia para establecer el sistema de coordenadas:

$$\min \left[\sum_{n=1}^3 \left| \alpha_n - \frac{\pi}{3} \right| \right]$$

Ecuación (3)

25 con

$$\alpha_1 = \angle (TC2, TC1, TC3)$$

$$\alpha_2 = \angle (TC3, TC2, TC1)$$

$$\alpha_3 = \angle (TC2, TC3, TC1)$$

- 30 En redes tridimensionales de TCs puede procederse como sigue: el posicionamiento 3D con ≥ 4 TCs es sólo posible cuando al menos 1 TC sobresale suficientemente del plano. Si n es el número de TCs en la red, pueden formarse

entonces $\binom{n}{4}$ tetraedros de referencia. El tetraedro de TCs con el máximo volumen es escogido como tetraedro de referencia, siempre que haya TCs redundantes en la red:

$$\max \left[\text{abs} \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{pmatrix} \right]$$

Ecuación (4)

con

$$x_1 = y_1 = z_1 = y_2 = z_2 = z_3 = 0$$

- 5 El modo de proceder para el establecimiento del sistema cartesiano local de coordenadas para una red bidimensional de TCs se representa en la figura 3. Aquí está la posición real (número de referencia 30) de los TCs en la red respecto a la posición (número de referencia 32) en el sistema local de coordenadas tras la autocalibración. Se produce también un reordenamiento de los índices de TCs. Así, por ejemplo TC1 se convierte en TC1*, mientras que TC3 se convierte en TC2* y TC5 en TC3*.
- 10 Una vez que las ubicaciones de los TCs han sido calibradas de forma gruesa por triangulación, pueden determinarse las coordenadas del receptor de uso (designado en la figura 4 por "RX móvil"). El receptor de uso puede encontrarse dentro o también fuera del polígono formado por los TCs.

Para la primera estimación de la posición inicial del receptor de uso se emplean pseudodistancias doblemente diferenciadas como magnitudes de observación:

- 15 El empleo de dobles diferencias provoca que se eliminan o respectivamente compensan en lo esencial posibles errores de reloj, cuando los emisores en la red de TCs no están sincronizados. Como la distancia entre el usuario y los TCs no es directamente observable, se lleva a cabo una búsqueda en malla, en la que se busca la posición del usuario para la que resulta un mínimo de residuos de medida. Las ecuaciones de observación doblemente diferenciadas en la red de TCs puede formularse conforme a la figura 4 como sigue:

$$\nabla \Delta \rho_{Ro, PLR_{REF}}^{PLT_{REF}, PLT_N} = \rho_{Ro}^{PLT_N} - \rho_{PLR_{REF}}^{PLT_N} - \rho_{Ro}^{PLT_{REF}} + \rho_{PLR_{REF}}^{PLT_{REF}}$$

Ecuación (5)

Los índices tienen el siguiente significado

PLT Transmisor de pseudolito

PLR Receptor de pseudolito

- 25 Ro Receptor móvil

El receptor de TC1* es tomado siempre como receptor de referencia y el emisor de TC1* es tomado siempre como emisor de referencia en la formación de diferencias. Junto a las ecuaciones de observación doblemente diferenciadas medidas pueden calcularse también dobles diferencias teóricas para cada posición del usuario en la malla:

$$r_{Ro0}^{PLT} = \sqrt{(x^{PLT} - x_{Ro0})^2 + (y^{PLT} - y_{Ro0})^2 + (z^{PLT} - z_{Ro0})^2}$$

30 Ecuación (6)

$$\nabla \Delta \hat{\rho}_{Ro0, PLR_{REF}}^{PLT_{REF}, PLT_N} = r_{Ro0}^{PLT_N} - r_{PLR_{REF}}^{PLT_N} - r_{Ro0}^{PLT_{REF}}$$

Ecuación (7)

en que

$x_{Ro0}, y_{Ro0}, z_{Ro0}$ son las coordenadas x, y, z de un candidato a la posición inicial del usuario (punto de malla)

$x^{PLT}, y^{PLT}, z^{PLT}$ son las coordenadas x, y, z de las estaciones de emisión calibradas de forma gruesa

Como se supone que la antena RX y la antena TX de TC1* se encuentran en el mismo sitio, la distancia $r_{PLR_{REF}}^{PLT_{REF}}$ no aparece en la ecuación 7. En el siguiente paso se halla la diferencia de las ecuaciones de observación doblemente diferenciadas medidas y de las ecuaciones de observación doblemente diferenciadas esperadas para un punto de malla determinado:

$$dr(N - REF) = \nabla \Delta \rho_{Ro0, PLR_{REF}}^{PLT_{REF}, PLT_N} - \nabla \Delta \hat{\rho}_{Ro0, PLR_{REF}}^{PLT_{REF}, PLT_N}$$

Ecuación (8)

con $N=2 \dots$ el número de TCs en la red.

Esto da como resultado en total un número de residuos dr igual al número de TCs en la red menos 1 para un único candidato de prueba $Ro0$ para la posición inicial del usuario. La suma de los residuos cuadráticos de medida (S) para cada punto de malla es determinada y empleada como magnitud de prueba, para diferenciar entre diversos candidatos de prueba para la posición inicial del usuario:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} dr(i)^2$$

Ecuación (9)

Aquel punto de malla que ofrezca la menor suma de residuos cuadráticos de medida es tomado como primera estimación para la posición inicial del receptor del usuario.

La búsqueda en malla se lleva a cabo dos veces en total: primero para una malla gruesa, que cubre toda la superficie del entorno de navegación, luego para una malla fina, que se extiende en torno al candidato previamente seleccionado para la malla gruesa.

Las dimensiones de la zona de prueba, en la que debe buscarse la posición inicial del receptor del usuario, son determinadas por las coordenadas de TCs calibradas de forma gruesa (véase la figura 5).

Cuando una red tridimensional de TCs debe ser autocalibrada, la malla se extiende espacialmente en vez de en un plano. La malla se compone entonces de una multiplicidad de cubos individuales. La figura 6 ilustra cómo puede encontrarse el mínimo global de los residuos cuadráticos de medida mediante la búsqueda en malla:

2) Estimación de la trayectoria del sistema de uso o respectivamente del receptor del usuario

Para que pueda llevarse a cabo una calibración fina de la red de TCs, es necesario que el receptor del usuario se mueva en la zona de operación y que los datos del receptor del TC de referencia y del receptor del usuario sean grabados durante la trayectoria. Para poder calcular una solución de fase para la calibración fina, se resuelven exitosamente las ambigüedades de las medidas de fase. Mientras no aparezcan saltos de fase, las ambigüedades permanecen constantes durante la trayectoria del usuario. Al comienzo de la trayectoria del usuario, el sistema de ecuaciones, que descansa en el empleo de medidas de fase, está infradeterminado. Sólo cuando existen varios instantes de muestreo durante la trayectoria del usuario para el cálculo en el pos-procesamiento, puede resolverse el sistema de ecuaciones.

Para la primera estimación de la trayectoria del receptor del usuario se toman medidas de fase doblemente diferenciadas:

$$\nabla \Delta \phi_{Ro, PLR_{REF}}^{PLT_{REF}, PLT_N}(t) = r_{Ro}^{PLT_N}(t) - r_{PLR_{REF}}^{PLT_N} - r_{Ro}^{PLT_{REF}}(t) + r_{PLR_{REF}}^{PLT_{REF}} + \nabla \Delta N_{Ro, PLR_{REF}}^{PLT_{REF}, PLT_N} \cdot \lambda + \nabla \Delta v_{\phi_{-Ro, PLR_{REF}}}^{PLT_{REF}, PLT_N}(t)$$

Ecuación (10)

con

Φ : Medida de fase (unidad: metro)

r: Distancia oblicua

N: Ambigüedades (unidad: ciclos)

λ : longitud de onda

5 v_Φ : Ruido de fase debido a todas las fuentes de error (ruido de receptor, propagación multitrayecto)

Una estimación de todas las posiciones que adopta el usuario durante su trayectoria, se produce mediante una minimización iterativa no lineal de los residuos cuadráticos de medida. Se produce una linealización de las medidas de fase según las coordenadas del receptor del usuario. Las ambigüedades al comienzo de la trayectoria son consideradas aquí todavía como conocidas. Para la linealización durante la trayectoria del usuario se supone que el receptor del usuario no se mueve entre dos etapas de observación consecutivas. Con ello puede tomarse respectivamente la posición previa del usuario como valor inicial para la siguiente linealización. Se emplea un método estándar iterativo de mínimos cuadrados (ILS, del inglés "Iterative Least Square") para determinar la posición del usuario para la respectiva etapa de muestreo:

Aplicación del método de Gauss-Newton para la minimización de los residuos cuadráticos de medida:

$$15 \quad \underline{x}_{i+1} = \underline{x}_i - \left(J^T \cdot P \cdot J \right)^{-1} \cdot J^T \cdot P \cdot \underline{r}$$

Ecuación (11)

con

\underline{x} estados desconocidos de sistema

J matriz de Jacobi

20 \underline{r} vector de residuos de medida

P matriz de correlación

El índice i indica la iteración i-ésima.

3) Calibración fina

La calibración fina de la red de TCs descansa en el ejemplo de realización aquí descrito, en contraposición con la calibración gruesa, exclusivamente en el empleo de medidas de fase poco ruidosas. Las medidas de pseudodistancia, que se emplean para la calibración gruesa, tienen la ventaja de que no presentan ambigüedades. En cambio, las medidas de pseudodistancia están sin embargo mucho más afectadas por ruido, lo que se refleja en la precisión de la autocalibración. Como la precisión de la autocalibración debe ser del orden de centímetros, se lleva a cabo aún una calibración fina siguiente tras la calibración gruesa. Los resultados obtenidos hasta ahora a partir de la calibración gruesa y la estimación de la trayectoria del usuario se emplean como punto de partida para la linealización, que tiene lugar en el curso de la calibración fina. Las ambigüedades, invariantes en el tiempo, de las medidas de fase se consideran aquí también desconocidas, junto a las coordenadas de TCs invariantes en el tiempo y las coordenadas del usuario dependientes del tiempo. Resulta un problema de optimización no lineal. Para la calibración fina del sistema puede emplearse, en vez de un método ILS estándar, también un método cuadrático iterativo de mínimos cuadrados (QILS, del inglés "Quadratic Iterative Least Square"). En la linealización según los parámetros de sistema desconocidos se trunca entonces sólo tras el término cuadrático. La medida de fase representada en la ecuación 10 debe ser linealizada según las coordenadas de TCs, las coordenadas del usuario en el instante de muestreo t_0 y las ambigüedades iniciales. El truncamiento en la linealización sólo tras el término cuadrático tiene la ventaja de que en caso de malas aproximaciones iniciales por la calibración gruesa del sistema la optimización no lineal es mejorada en el sentido de que aun así converge. El algoritmo QILS empleado puede corresponder al algoritmo que está expuesto en LeMaster (1999). Sin embargo, en el planteamiento aquí expuesto, en contraposición con el planteamiento de LeMaster, se emplean ecuaciones de observación doblemente diferenciadas en vez de ecuaciones de observación auto-diferenciadas, ya que el usuario está conformado como mero receptor y no como tranceptor. Con ello se modifica el término, en el que las magnitudes de sistema buscadas aparecen en forma no lineal, quedando:

$$r_{Ro}^{PLTx}(t) - r_{PLREF}^{PLTx} - r_{Ro}^{PLTREF}(t) + r_{PLREF}^{PLTREF} = \sqrt{(x^{PLTx} - x_{Ro}(t))^2 + (y^{PLTx} - y_{Ro}(t))^2 + (z^{PLTx} - z_{Ro}(t))^2} - \sqrt{(x^{PLTx})^2 + (y^{PLTx})^2 + (z^{PLTx})^2} - \sqrt{(x_{Ro}(t))^2 + (y_{Ro}(t))^2 + (z_{Ro}(t))^2}$$

Ecuación (12)

Como ya se hizo en los planteamientos anteriores, también aquí se supone que la antena TX y la RX del mismo TC se encuentran en el mismo lugar. En la ecuación 12 se ha tenido ya en cuenta que el TC de referencia por definición se debe encontrar en el origen de coordenadas (0|0|0).

Los residuos de medida de las medidas de fase doblemente diferenciadas pueden ser separados de forma aproximada en un término lineal y en un término cuadrático:

$$\delta \nabla \Delta \phi_k = J_k \cdot \delta \underline{x}_k + Z(\delta \underline{x}_k) \cdot H_k \cdot \delta \underline{x}_k$$

Ecuación (13)

10 en que H es la matriz de Hesse y k se emplea como índice de bucle para la respectiva iteración.

El sistema de ecuaciones no lineal representado en la ecuación (13) puede ser resuelto de forma aproximada en dos pasos separados. En el primer paso se halla una aproximación para Z, mediante el recurso de que primeramente se determina $\delta \underline{x}_k$ por un método ILS estándar (véase el método de Gauss-Newton):

$$\delta \underline{x}_k = (J_k^T \cdot P \cdot J_k)^{-1} \cdot J_k^T \cdot P \cdot \delta \nabla \Delta \phi_k$$

15 Ecuación (14)

La ecuación no lineal 13 puede ser aproximada ahora por la ecuación 15:

$$\delta \nabla \Delta \phi_k = K_k \cdot \delta \underline{x}_k$$

con

$$K_k = J_k + Z(\delta \underline{x}_k) \cdot H_k$$

20 Ecuación (15)

En el segundo paso puede ser calculado el término de corrección $\delta \underline{x}_k$ para los estados desconocidos de sistema como sigue:

$$\delta \underline{x}_k = (K_k^T \cdot P \cdot K_k)^{-1} \cdot K_k^T \cdot P \cdot \delta \nabla \Delta \phi_k$$

Ecuación (16)

25 Se llevan a cabo las iteraciones del método QILS necesarias hasta que se cumple o bien el criterio de convergencia o bien el criterio de divergencia o respectivamente se supera el número máximo admisible de iteraciones.

Para el caso en que de la calibración gruesa resultan malas aproximaciones iniciales para las magnitudes desconocidas de sistema, es oportuno repetir la calibración fina empleando aproximaciones iniciales que varían respecto a los resultados de la calibración gruesa. En conjunto se acepta aquella solución del sistema que lleva a la menor suma de los residuos cuadráticos de medida.

30

NÚMEROS DE REFERENCIA

- 10 Calibración gruesa de las coordenadas de los transceptores
- 12 Estimación de la trayectoria del sistema de uso
- 5 14 Calibración fina de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso sobre la base de la calibración gruesa y de la estimación de la trayectoria
- 16 Triangulación
- 18 Búsqueda en malla
- 20 Planteamiento iterativo de mínimos cuadrados
- 22 Planteamiento iterativo de mínimos cuadrados
- 10 30 Posición real de los TCs en la red
- 32 Posición en el sistema local de coordenadas tras la autocalibración

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación con empleo de un sistema de uso para las señales de navegación con los siguientes pasos:
- 5 a) calibración gruesa (10) de las coordenadas de los transceptores;
- b) estimación (12) de la trayectoria del sistema de uso; y
- c) calibración fina (14) de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso sobre la base de la calibración gruesa y de la estimación de la trayectoria,
- caracterizado porque para la calibración fina se emplean ecuaciones de observación doblemente diferenciadas.
- 10 2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque en el marco de la calibración gruesa es hallada la distancia entre dos transceptores.
3. Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado porque para la calibración gruesa se emplean ecuaciones de observación auto-diferenciadas.
4. Procedimiento según la reivindicación 2 ó 3, caracterizado porque una vez que han sido halladas las distancias entre todos los transceptores, son determinadas las coordenadas de los transceptores de forma gruesa por triangulación (16) de las distancias halladas entre los transceptores.
- 15 5. Procedimiento según la reivindicación 4, caracterizado porque para la determinación de las coordenadas de los transceptores se emplea un sistema local de coordenadas y se busca automáticamente la posición más conveniente del sistema de coordenadas con relación a los transceptores.
- 20 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque tras el paso a) es determinada la posición inicial del sistema de uso antes de la realización del paso b).
7. Procedimiento según la reivindicación 6, caracterizado porque para una primera estimación de la posición inicial del sistema de uso se emplean pseudodistancias doblemente diferenciadas como magnitud de observación.
- 25 8. Procedimiento según la reivindicación 6 ó 7, caracterizado porque la determinación de la posición inicial de un sistema de uso se produce mediante una búsqueda en malla (18) basada en una minimización de residuos de medida.
9. Procedimiento según la reivindicación 8, caracterizado porque para cada punto de malla se determina la suma de los residuos cuadráticos de medida y se emplea como magnitud de prueba, para diferenciar entre diversos candidatos de prueba de los puntos de malla para la posición inicial.
- 30 10. Procedimiento según la reivindicación 9, caracterizado porque como primera estimación de la posición inicial se escoge aquel punto de malla que ofrece la menor suma de los residuos cuadráticos de medida.
11. Procedimiento según la reivindicación 10, caracterizado porque la búsqueda en malla se lleva a cabo con una malla gruesa, que cubre toda la superficie del entorno de navegación, y a continuación con una malla fina, que se extiende en torno al punto de malla seleccionado.
- 35 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 6 hasta 11, caracterizado porque las dimensiones de la zona de prueba para la determinación de la posición inicial del sistema de uso son determinadas por las coordenadas, calibradas de forma gruesa, de los transceptores.
13. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque la estimación de la trayectoria del sistema de uso se produce mediante un planteamiento iterativo de mínimos cuadrados (20) aprovechando una pequeña dinámica del sistema de uso en la linealización de ecuaciones de observación.
- 40 14. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque para la calibración fina (14) de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso se emplean exclusivamente medidas de fase poco ruidosas de las señales de navegación emitidas por los transceptores.
15. Dispositivo para la determinación automática de la posición de transceptores de señales de navegación con empleo de un sistema de uso para las señales de navegación, que comprende:
- 45 a) primeros medios (10) para la calibración gruesa de las coordenadas de los transceptores;
- b) segundos medios (12) para la estimación de la trayectoria del sistema de uso; y

c) terceros medios (14) para la calibración fina de las coordenadas de los transceptores y de la trayectoria del sistema de uso sobre la base de la calibración gruesa y de la estimación de la trayectoria,

caracterizado porque los terceros medios (14) para la calibración fina emplean ecuaciones de observación doblemente diferenciadas.

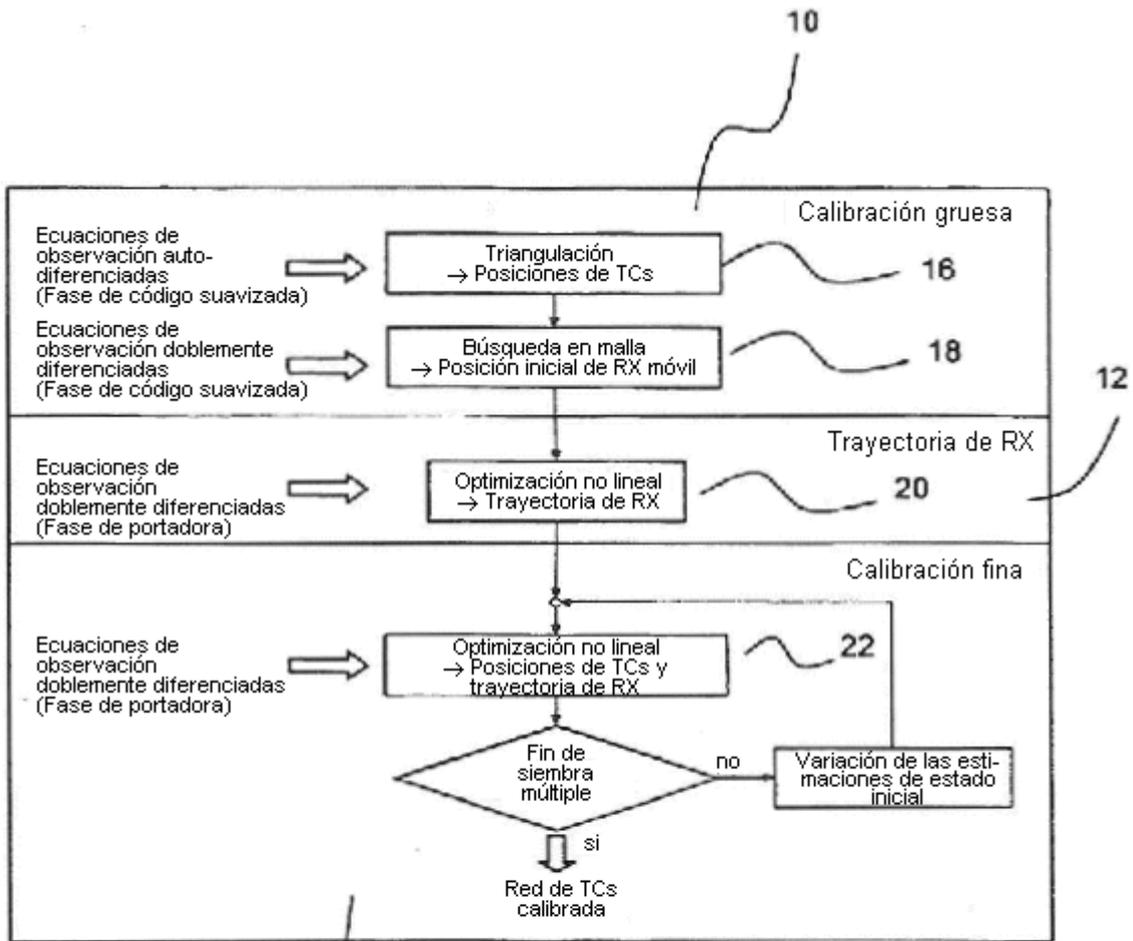


Fig.1

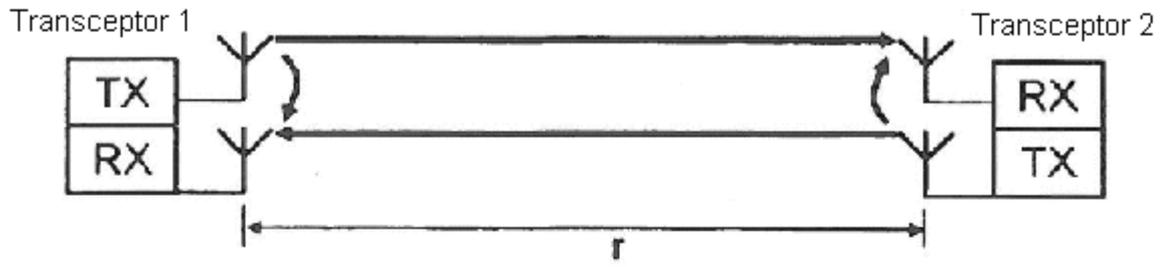


Fig. 2

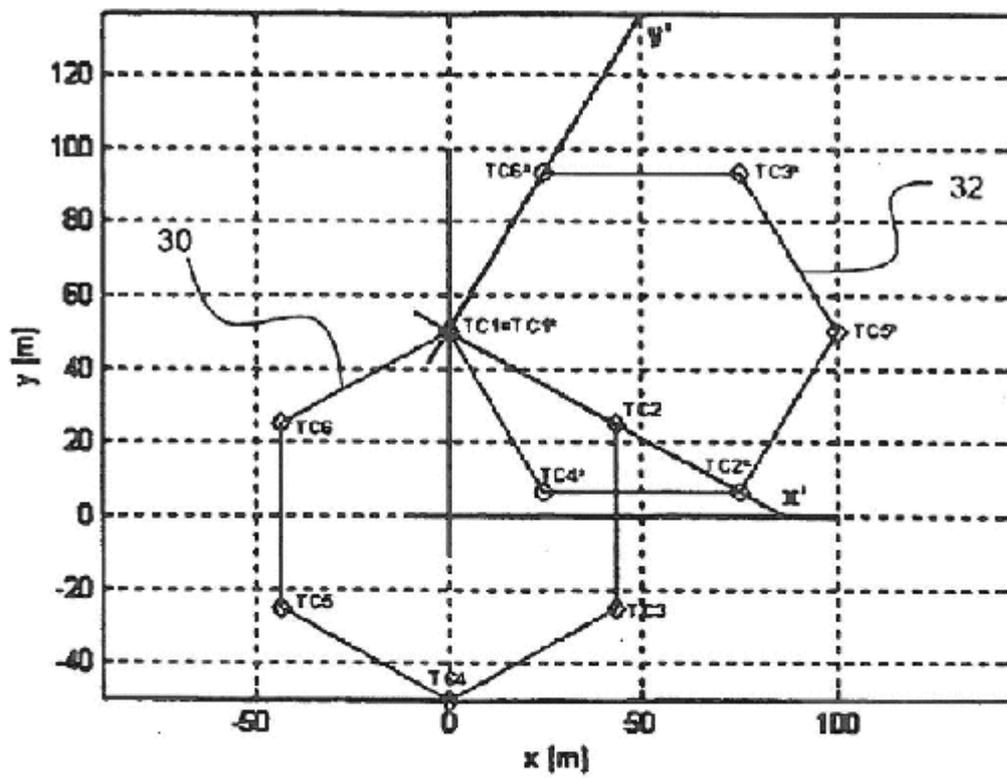


Fig. 3

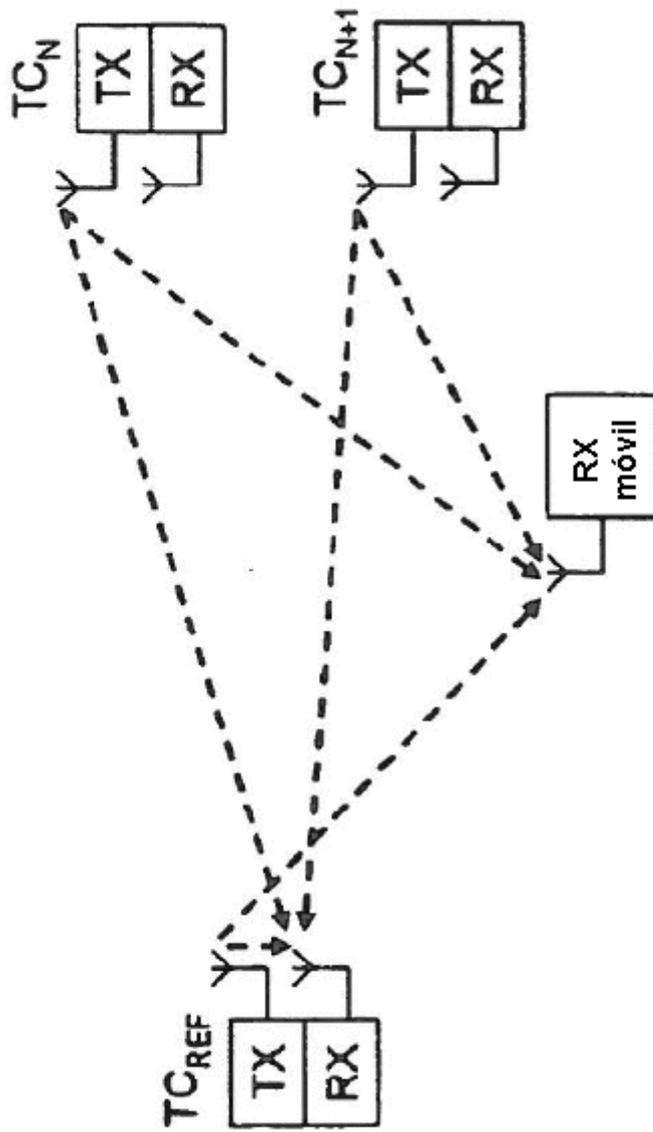


Fig. 4

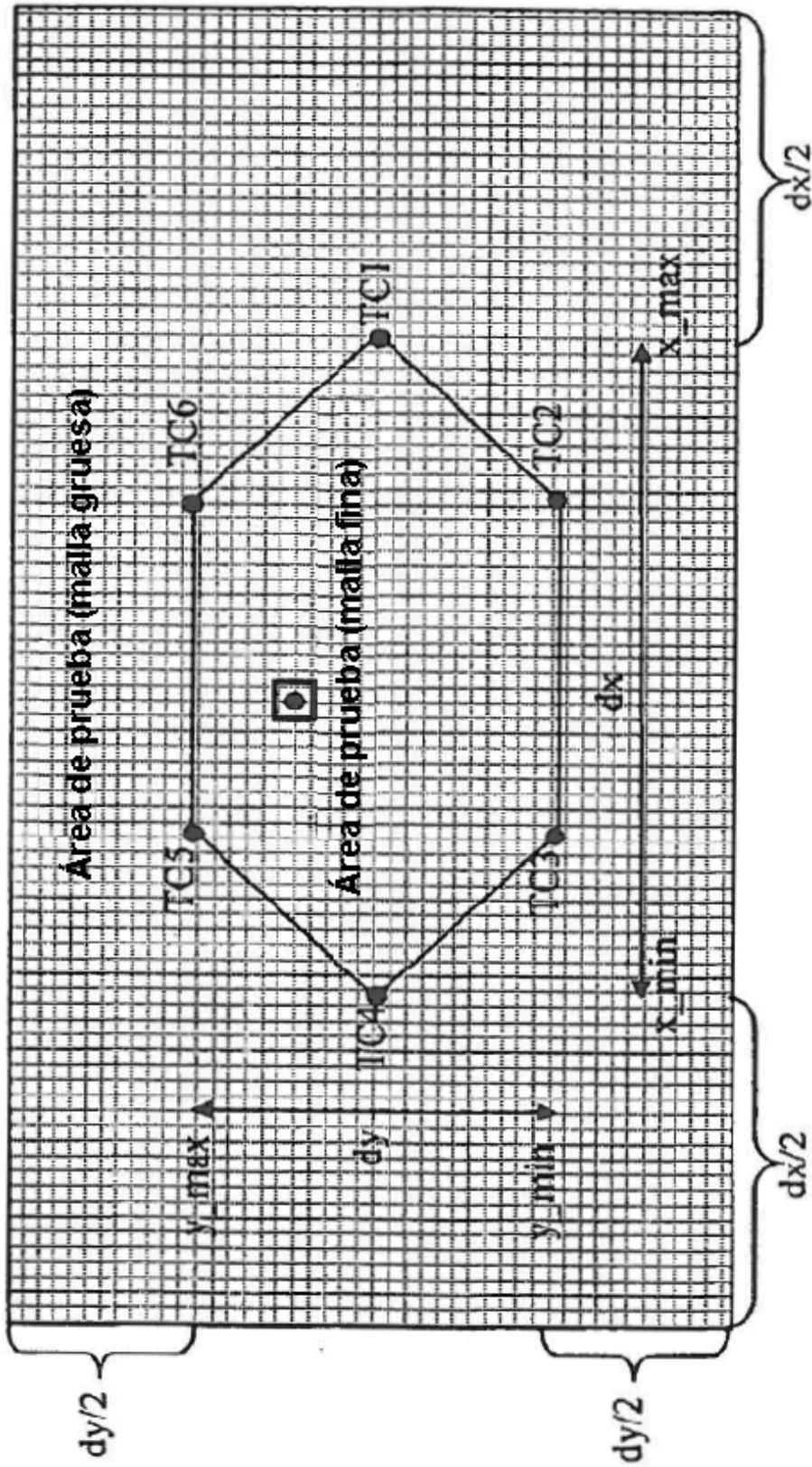


Fig. 5

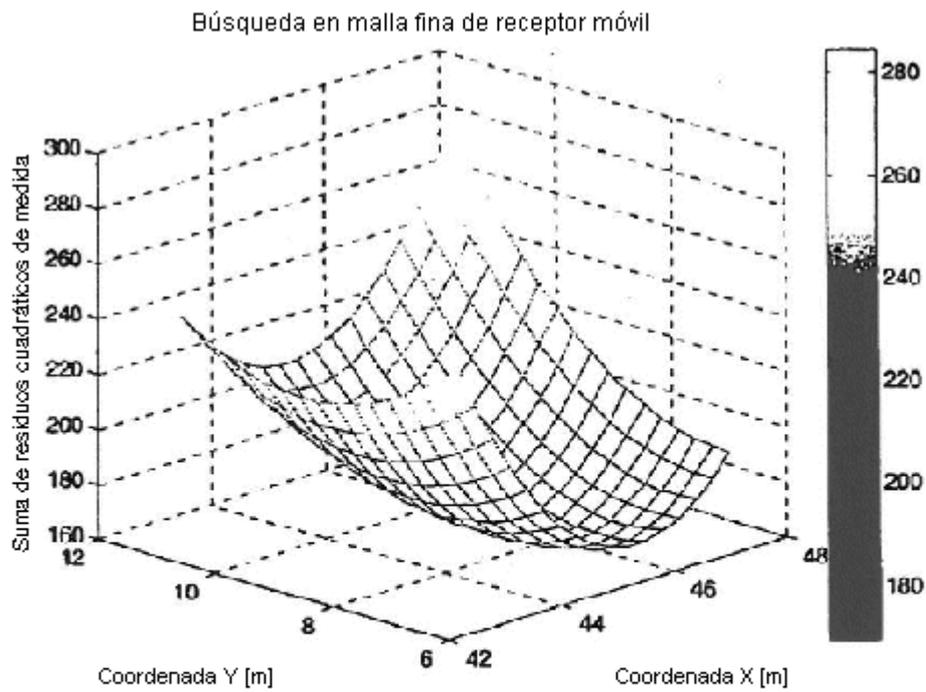
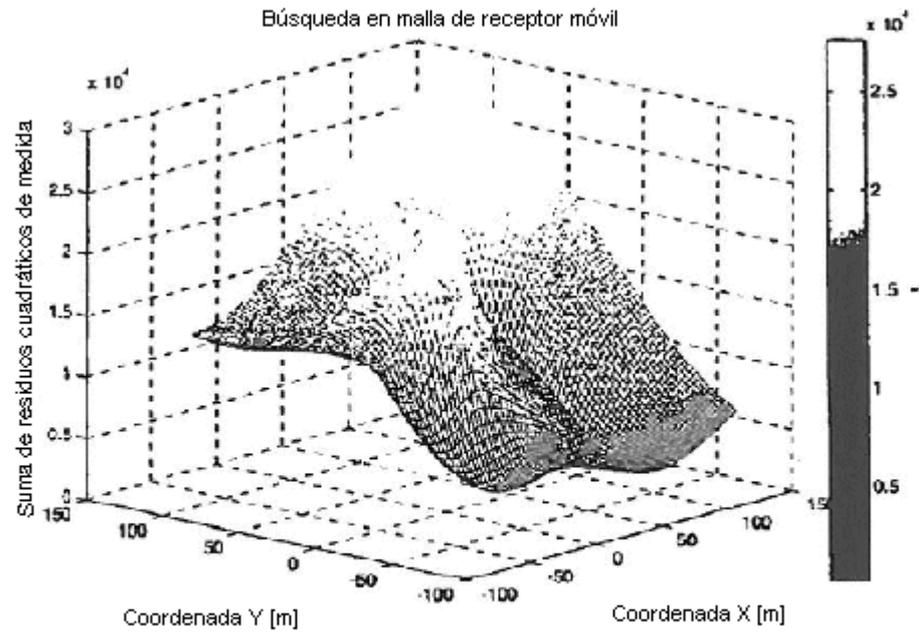


Fig. 6