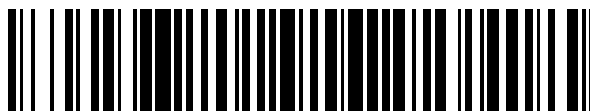


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 589 145**

51 Int. Cl.:

G01S 5/02 (2006.01)

G01S 13/86 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.08.2011** **E 11006479 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.08.2016** **EP 2420856**

54 Título: **Dispositivo y procedimiento para el posicionamiento tridimensional**

30 Prioridad:

18.08.2010 DE 102010034792

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

10.11.2016

73 Titular/es:

AIRBUS DS GMBH (100.0%)
Robert-Koch-Strasse 1
82024 Taufkirchen, DE

72 Inventor/es:

SCHLÖTZER, SUSANNE

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 589 145 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

Dispositivo y procedimiento para el posicionamiento tridimensional

La invención se refiere a un dispositivo y a un procedimiento para el posicionamiento tridimensional según la reivindicación 1 o 9.

- 5 Un posicionamiento tridimensional con requisitos de alta precisión, disponibilidad, continuidad e integridad es importante por ejemplo en el aterrizaje de helicópteros. En este caso se pueden producir problemas sobre todo con mala o ninguna visibilidad directa del lugar de aterrizaje. Para el posicionamiento tridimensional durante una aproximación para el aterrizaje son conocidas diferentes técnicas, que son explicadas brevemente a continuación, junto con sus inconvenientes.
- 10 Es conocida, por ejemplo, la integración de GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y un INS (Sistema de Navegación Inercial). Sin embargo, con ello puede que no se consigan los requisitos de precisión en una solución de posición tridimensional que son requeridos por ejemplo para un aterrizaje autónomo. Además, los datos de corrección diferencial están disponibles solamente de forma limitada. Además, esta solución es sensible a interferencias.
- 15 También es conocido el denominado radar de aproximación de precisión, que sin embargo ocasiona altos costes de funcionamiento. Además, el segmento de usuario no es totalmente autónomo con respecto a la determinación de la posición y a la supervisión de la integridad, ya que la supervisión se realiza en el segmento terrestre en lugar de en el segmento de usuario. Finalmente, es necesario un segmento terrestre caro de grandes dimensiones mecánicas y alto consumo de potencia.
- 20 Otra técnica conocida es un sistema de posicionamiento bidimensional local por radar que sin embargo está limitado a un posicionamiento bidimensional y por regla general presenta una menor disponibilidad y continuidad que un enfoque de fusión de datos de sensores con GNSS (Sistema global de navegación por satélite) e IMU (Unidad de medición inercial). Debido a la limitación del sistema a un posicionamiento bidimensional no puede ser considerado como auxiliar de aterrizaje, sino que es adecuado únicamente para el rodaje.
- 25 Por último, es conocido un sistema de aterrizaje por balizas de integridad que, sin embargo, puede ser perturbado fácilmente por interferencias, ya que funciona exclusivamente en la banda de frecuencias GNSS. Una alta precisión de la posición solo puede lograrse mediante el uso de algoritmos de fase de portadora, lo que tiene un efecto negativo sobre la disponibilidad y dificulta el desarrollo de conceptos de integridad. Además, esta tecnología ocasiona altos costes para el segmento terrestre debido a las balizas de integridad.
- 30 Se remite además a las siguientes publicaciones que se ocupan de soluciones de posicionamiento:
- Thibaut G.: "Cost Benefit Analysis on Precision Approach and Landing Systems (PALS) - Final Report", NIAG SG-99" Informe final, Vol. 2, documento AC/224(ACG5)D(2007)0002/ junio de 2007;
 - Cohen C.E., Pervan B.S., Cobb H.S., Lawrence D.G. Powell J.D., Parkinson B.W.: "Precision Landing of Aircraft Using Integrity Beacons", in Global Positioning System: Theory and Applications Volume II, Vol. 164, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC, 1996;
 - Greenspan R.L.: "GPS and Inertial Integration", in Global Positioning System: Theory and Applications Volume II, Vol. 164, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC, 1996; y
 - "SYMEO Local Positioning Radar System LPR-B 1 D", Documentación de productos, Symeo GmbH, 2009.
- 40 El documento US 2009/140887 A1 describe un sistema para la determinación de la posición mediante GPS que está acoplado a una unidad de corrección que deriva o recibe correcciones de posición para los datos de posición derivados de las señales GPS. Las correcciones de posición pueden ser recibidas por satélites o estaciones terrestres. Además está previsto un sistema de navegación inercial para determinar la posición del sistema. Puede también estar previsto un radar para la medición de la distancia a transpondedores colocados en el borde de la carretera y para la determinación de la posición de un vehículo en una carretera. Los datos de posición, las
- 45 correcciones de posición, los datos de radar y navegación inercial son procesados por un procesador central.
- El objeto de la presente invención es posibilitar un posicionamiento tridimensional mejorado, que compatibilice los requisitos de alta precisión, disponibilidad, continuidad e integridad en la solución de posición.
- Este objeto se consigue mediante un dispositivo para posicionamiento tridimensional con las características de la reivindicación 1 y mediante un procedimiento para el posicionamiento tridimensional con las características de la
- 50 reivindicación 9. Otras realizaciones de la invención son el contenido de las reivindicaciones dependientes.
- La invención prevé una fusión de las mediciones de radar secundario, mediciones GNSS y datos IMU en un procesador de integración que determina una posición tridimensional a partir de las mediciones y datos fusionados. El procesador de integración puede realizar para la fusión un acoplamiento de las mediciones y los datos con un

filtro no lineal. De acuerdo con la invención, el cálculo de una posición tridimensional en el lado del usuario se puede realizar de manera autónoma en el procesador de integración. Esto posibilita la supervisión de la integridad de la solución de posición directamente en el usuario, donde la información de una alarma de integridad es necesaria en primer lugar. El sistema de radar secundario utilizado para los fines de la invención, que puede ser realizado como radar FMCW (Onda continua modulada en frecuencia) que funciona en la banda C (IEEE), presenta una estación base, que está fijada a la unidad de usuario, y varios transpondedores (estaciones) localizados en un área local limitada. Las mediciones de distancia entre la estación base y los transpondedores se basan en mediciones de tiempo de vuelo. Asimismo la estación base envía señales de radar FMCW a las que se sincronizan los transpondedores dentro de un tiempo fijo. Después de la sincronización con éxito, los transpondedores devuelven una señal de respuesta FMCW. Con el fin de lograr una buena observabilidad de los estados de filtro, así como una alta disponibilidad e integridad de la solución de posición tridimensional en caso de un acoplamiento de las mediciones y los datos con un filtro no lineal, pueden ser procesadas adicionalmente mediciones brutas GNSS, y datos IMU en el filtro no lineal. El procedimiento es por tanto robusto con respecto a sombras de señal y limitaciones geométricas del sistema de radar secundario local.

Una forma de realización de la invención se refiere a un dispositivo para el posicionamiento tridimensional con: una estación base de radar secundario que está prevista para la medición de la distancia a los transpondedores y que presenta al menos una antena de radar, un receptor GNSS, que está previsto para la medición de señales GNSS y presenta una antena de recepción GNSS, una unidad de medición inercial que está prevista para determinar la posición de la antena de recepción GNSS, así como de la al menos una antena de radar en un sistema de coordenadas común con respecto a un punto de referencia, y un procesador de integración al que son suministradas las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS, las mediciones de distancia del radar y los movimientos del dispositivo en torno a los ejes del sistema de coordenadas común medidos por la unidad de medición inercial y que determina una posición tridimensional de un punto de referencia común por fusión de las mediciones y los datos suministrados, en el que es realizada una compensación del descentrado teniendo en cuenta los movimientos medidos.

Por la fusión de las mediciones y los datos de diferentes fuentes puede conseguirse una determinación robusta y muy fiable de una posición tridimensional del punto de referencia anclado en el segmento de usuario, lo que es importante por ejemplo para una aproximación de aterrizaje segura de un helicóptero.

La estación base secundaria puede estar configurada para funcionar en la banda C (IEEE) y utilizar señales de radar FMCW para la medición de la distancia.

En el dispositivo puede estar previsto un sistema de navegación inercial que presenta la unidad de medición inercial, y el procesador de integración puede ser configurado para determinar fuera de un área de operación del sistema de radar secundario una posición tridimensional con una primera navegación acoplada basada en las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS y las mediciones de navegación inerciales del sistema de navegación inercial y dentro del área de operación de la estación base de radar secundario determinar una posición tridimensional con una segunda navegación acoplada basada en las mediciones de distancia del radar, las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS y las mediciones de navegación inercial del sistema de navegación inercial.

De esta manera, por ejemplo en una fase de vuelo en la que la estación base de radar secundario está demasiado lejos de transpondedores del segmento terrestre, se puede realizar una determinación de la posición tridimensional basada en un GNSS y en la navegación inercial, mientras que en una fase de aproximación de aterrizaje cerca de los transpondedores se utilizan además las mediciones de distancia entre la/las antena(s) de radar y los transpondedores para el posicionamiento tridimensional, que debido a las menores varianzas de medición son ponderadas con más peso que las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS. De esta forma se puede conseguir en las diferentes fases de vuelo un posicionamiento tridimensional óptimo con respecto a las mediciones disponibles y las varianzas de medición asociadas.

Para el presente problema de filtro no lineal, el procesador de integración puede presentar un filtro de Kalman de puntos sigma para el procesamiento de las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS, de los datos IMU y de las mediciones de distancia del radar. Con un filtro de Kalman de puntos sigma se evita que sean despreciados por completo los términos de segundo orden u orden superior, como sería el caso en una linealización de las ecuaciones de medición. La consideración de la no linealidad es particularmente relevante en las mediciones de radar secundario debido a las pequeñas distancias entre el segmento de usuario y las estaciones de transpondedor, ya que aquí los términos de segundo orden con respecto al ruido de medición ya no son despreciables sin más.

El filtro de Kalman de puntos sigma puede estar previsto para la determinación de datos de corrección de una solución de navegación INS a partir de las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS y de las mediciones de distancia del radar, y el procesador de integración puede ejecutar un algoritmo de tipo strapdown, que determina la posición tridimensional a partir de los datos de corrección y los movimientos del dispositivo alrededor de los ejes del sistema de coordenadas común medidos por la unidad de medición inercial.

El filtro de Kalman de puntos sigma puede estar realizado alternativamente para determinar la posición tridimensional basándose en las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS, las mediciones de distancia del

radar y una solución de navegación INS y la posición tridimensional determinada pueden ser acoplada de forma retroactiva a un sistema de navegación inercial del dispositivo para calibración.

El filtro de Kalman de puntos sigma debería partir sobre todo no de una linealización de una distancia oblicua entre la al menos una antena de radar y un transpondedor, sino que también puede tener en cuenta términos no lineales, en particular términos de segundo orden.

En particular, una distancia oblicua r puede ser aproximada utilizando la siguiente función no lineal, que tiene en cuenta también términos de segundo orden:

$$\bar{r}(\underline{x}_{U,k}) = r(\underline{x}_{U,k}^-) + (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T \nabla r(\underline{x}_{U,k}^-) + \frac{1}{2} (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T H(\underline{x}_{U,k}^-) (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)$$

donde $\underline{x}_{U,k}$ es un vector de posición tridimensional en el instante k entre un transpondedor TP y el dispositivo U ,

$\underline{x}_{U,k}^-$, es un punto de aproximación actual, $\nabla r(\underline{x}_{U,k}^-)$ es el vector de la derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$ y

$H(\underline{x}_{U,k}^-)$ es la matriz de la segunda derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$.

Para resolver el problema del filtro no lineal, el filtro no lineal puede utilizar un procedimiento de optimización no lineal, en particular se puede utilizar un filtro de Kalman de puntos sigma o un filtro de segundo orden para la optimización.

Además, el filtro no lineal se puede implementar en un modelo de estado que dependiendo de la aplicación del dispositivo presente ecuaciones de estado lineales o no lineales.

Otra forma de realización de la invención se refiere al uso de un dispositivo para el posicionamiento tridimensional de acuerdo con la invención precedente a bordo de un dispositivo de vuelo para la navegación de aproximación de aterrizaje a un lugar de aterrizaje, en cuyas zonas marginales están dispuestos varios transpondedores de radar secundario para la estación base de radar secundario del dispositivo.

Finalmente, otra forma de realización de la invención se refiere a un procedimiento para el posicionamiento tridimensional con las siguientes etapas: la recepción de mediciones de distancia del radar de una estación base de radar secundario, que está prevista para la medición de la distancia a los transpondedores y que presenta al menos una antena de radar, la recepción de las mediciones de pseudodistancia de un receptor GNSS, que está previsto para la medición de señales GNSS y presenta una antena de recepción GNSS, la recepción de mediciones de movimientos de una unidad de medición inercial, que está prevista para determinar la posición de la antena de recepción GNSS, así como de la al menos una antena de radar en un sistema de coordenadas común con respecto a un punto de referencia, y la determinación de una posición tridimensional de un punto de referencia común por fusión de las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS, las mediciones de distancia del radar y los datos de la unidad de medición inercial teniendo en cuenta una compensación de descentrado entre el punto de referencia, la antena de recepción GNSS, la al menos una antena de radar y la unidad de medición inercial. La compensación de descentrado hace que a continuación todas las mediciones se refieran al mismo punto de referencia. La compensación de descentrado es necesaria ya que la antena de recepción GNSS, la(s) antena(s) de radar y la unidad de medición inercial están separadas espacialmente en el caso normal.

El procedimiento puede ser implementado por ejemplo en un ordenador de a bordo de un dispositivo de vuelo, por ejemplo de un avión o de un helicóptero, en el que ya existan un receptor GNSS y una antena de recepción GNSS, así como una unidad de medición inercial y eventualmente un sistema de radar secundario. Con esto se puede actualizar y mejorar un sistema de navegación de vuelo existente, de modo que se posibilita un posicionamiento tridimensional preciso y fiable incluso durante la aproximación para el aterrizaje. El procedimiento puede ser implementado como software que puede ser cargado en el ordenador de a bordo.

El procedimiento puede además estar caracterizado por las siguientes etapas: el filtrado no lineal para determinar los datos de corrección de soluciones de navegación del INS a partir de las mediciones de pseudodistancias recibidas y de las mediciones de distancia del radar recibidas y la ejecución de un algoritmo de tipo strap-down para determinar la posición tridimensional a partir de los datos de corrección y las mediciones de movimiento recibidas, o el filtrado no lineal para determinar la posición tridimensional a partir de las mediciones de pseudodistancia recibidas, las mediciones de distancia del radar recibidas y la solución de navegación del INS.

El filtrado no lineal puede presentar la aproximación de una distancia oblicua entre la al menos una antena de radar y un transpondedor por una función no lineal, en particular como caso especial una función cuadrática, en particular como caso especial la aproximación de una distancia oblicua r mediante el uso de la siguiente función no lineal:

$$\bar{r}(\underline{x}_{U,k}) = r(\underline{x}_{U,k}^-) + (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T \nabla r(\underline{x}_{U,k}^-) + \frac{1}{2} (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T H(\underline{x}_{U,k}^-) (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)$$

donde $\underline{x}_{U,k}$ es un vector de posición tridimensional en el instante k entre un transpondedor TP y el dispositivo U , $\underline{x}_{U,k}^-$ es un punto de aproximación actual, $\nabla r(\underline{x}_{U,k}^-)$ es el vector de la derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$ y $H(\underline{x}_{U,k}^-)$ es la matriz de la segunda derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$.

- 5 El filtrado no lineal puede utilizar un procedimiento de optimización no lineal para resolver el problema del filtro no lineal, en particular un filtro de Kalman de puntos sigma o un filtro de segundo orden para la optimización.

La presente invención se refiere, de acuerdo con otra forma de realización, a un programa informático para la realización de un procedimiento de acuerdo con una forma de realización de la presente invención y a un producto de programa informático que contiene un soporte de programa legible por máquina, en el que puede ser almacenado el programa informático en forma de señales de control legibles electrónicas y/u ópticamente.

- 10 Otras ventajas y posibilidades de aplicación de la presente invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción junto con los ejemplos de realización representados en los dibujos.

En la descripción, en las reivindicaciones, en el resumen y en los dibujos se utilizarán los términos contenidos en la lista incluida posteriormente de los símbolos de referencia y símbolos de referencia asociados.

- 15 Los dibujos muestran en:

Fig. 1, un ejemplo de realización de la arquitectura del sistema de un dispositivo para el posicionamiento tridimensional según la invención;

Fig. 2, la disponibilidad y la ponderación de los datos de sensores en el segmento de usuario en el curso de una trayectoria de aproximación al aterrizaje según la invención;

- 20 Fig. 3, un inserto acoplado para datos de sensor de radar secundario, RX GNSS e IMU según la invención; y

Fig. 4, un inserto acoplado para datos de sensores de radar secundario y RX GNSS integrados con una solución de navegación del INS, según la invención.

- 25 En la siguiente descripción los elementos iguales, funcionalmente iguales y funcionalmente relacionados están dotados de los mismos números de referencia. Los valores absolutos se muestran a continuación solo a modo de ejemplo y no deben interpretarse como que limitan la invención.

- 30 A continuación se describe la arquitectura del sistema de un sistema de posicionamiento 3D basado en un radar secundario y un inserto de filtro no lineal acoplado en virtud de un dispositivo 10 representado en la Fig. 1 para el posicionamiento tridimensional preciso en un área limitada espacialmente según la invención. La arquitectura incluye un segmento terrestre con un lugar de aterrizaje para helicópteros y un segmento de usuario que se encuentra en un helicóptero.

Arquitectura del sistema

El segmento terrestre y de usuario del dispositivo 10 para el posicionamiento tridimensional preciso en un área limitada espacialmente presenta los siguientes elementos:

1) Segmento terrestre:

- 35 Un número variable de transpondedores de radar secundario 14, cuya disposición se puede adaptar a las condiciones locales y cuya orientación de la antena puede ser optimizada para la aplicación concreta. Los transpondedores pueden estar dispuestos, por ejemplo, en las zonas marginales de una zona de aproximación de aterrizaje, en la Fig. 1 alrededor del lugar de aterrizaje de helicópteros 26, para así reconocer mediante el radar el lugar de aterrizaje, especialmente en caso de mala visibilidad, por ejemplo en caso de niebla baja.

2) Segmento de usuario:

- 45 a. Una estación base de radar secundario 12 con al menos una antena de radar 16, cuyo emplazamiento puede ser optimizado dependiendo del caso de aplicación, a fin de evitar el sombreado de las señales de radar y los efectos de trayectos múltiples. Una ampliación a dos o más antenas de radar es posible sin problemas. Aunque también pueden ser empleadas varias antenas de radar en el segmento de usuario, las siguientes descripciones son para una única antena de radar por razones de claridad. Las

señales de radar emitidas desde la estación base (líneas discontinuas en la Fig. 1) son enviadas de vuelta por los transpondedores 14 del segmento terrestre.

- b. Un receptor GNSS 18 (Sistema global de navegación por satélite) con antena de recepción GNSS 20. El receptor GNSS puede ser, por ejemplo, un receptor de señales de NAVSTAR GPS, GLONASS o el futuro GNSS europeo Galileo.
- c. Una IMU (Unidad de medición inercial) 20, para poder referir la posición de la antena de recepción GNSS y de la(s) antena(s) de radar a un sistema de coordenadas común anclado en el segmento de usuario.
- d. Un ordenador (de navegación) 24 en el que tiene lugar la fusión de datos de sensores y el cálculo de la solución de posición tridimensional del usuario. El ordenador 24 implementa también un procesador de integración para los datos de sensores con el inserto de filtro no lineal acoplado antes mencionado, que se describirá más adelante en detalle.

En caso de que el segmento de usuario respectivo disponga de forma estándar de sensores adicionales (por ejemplo, un altímetro), estos datos de sensores adicionales pueden ser utilizados también para generar la solución de posición. La disposición de sensores mostrada en la Fig. 1 representa la extensión mínima de dispositivo en la que el sistema de radar secundario 12, 14 es el componente principal. Con esta configuración mínima ya puede conseguirse de manera suficiente un buen rendimiento. Es posible una ampliación a sensores de temperatura, presión y humedad para conseguir mejores resultados en el modelado de los retardos de tiempo de vuelo a través de la troposfera.

Las coordenadas de las antenas de transpondedor 14 en un sistema de coordenadas absolutas son conocidas para el segmento de usuario para que las mediciones de distancia del radar puedan ser incluidas de forma práctica en el filtro no lineal. La información sobre las coordenadas de transpondedor puede ser almacenada, ya sea de forma estática en el segmento de usuario, o bien puede ser transmitida al segmento de usuario de forma dinámica a través de un enlace de datos. En caso de que el transpondedor 14 se encuentre sobre una plataforma en movimiento – por ejemplo un barco portador, las coordenadas absolutas de los transpondedores deben ser ajustadas de forma dinámica.

El sistema de radar secundario 12, 14 funciona en la banda C (IEEE) y utiliza señales de radar FMCW (FMCW: Onda continua modulada en frecuencia) para la medición de la distancia. En un entorno de corto a medio alcance de los transpondedores 14 del segmento terrestre se dispone de mediciones de distancia precisas en la estación base de radar secundario 12 del segmento de usuario. Dentro de esta área limitada espacialmente se puede realizar un posicionamiento tridimensional muy preciso. La solución de la posición dentro del área de operación se caracteriza por una alta disponibilidad y continuidad, así como por un riesgo de integridad muy pequeño de no reconocer grandes errores de posición inadmisibles.

Por las siguientes razones además de las mediciones de distancia con poco ruido del sistema de radar secundario 12, 14 son procesadas también mediciones de pseudodistancia GNSS con ruido intenso por el filtro no lineal. El sistema de radar secundario cubre un área de operación limitada y por lo general solo se instala allí donde se requieren simultáneamente altas exactitudes de posicionamiento, disponibilidades y continuidad, además de un riesgo de integridad bajo, en la Fig. 1 en el lugar de aterrizaje 26. Fuera de esta área, los requisitos para la solución de posición son por regla general más bajos. Con el dispositivo según la invención puede conseguirse una mejora de la solución de la posición tridimensional con aproximación en el área de operación crítica, por ejemplo el lugar de aterrizaje de helicópteros 26 mostrado en la Fig. 1. Este concepto está ilustrado en la Fig. 2 en el ejemplo de una ruta de aproximación o una trayectoria de aproximación: fuera del área de operación del radar secundario 28 (línea de puntos en la Fig. 2) no se dispone de medidas de distancia del radar de bajo ruido, por lo que la solución de la posición tridimensional se basa exclusivamente en una solución de navegación GNSS (diferencial)/INS (Sistema de Navegación Inercial) acoplada. Dentro del área de operación 28 es determinada una solución de navegación de radar secundario/GNSS (diferencial)/INS acoplada. En este caso, en el filtro no lineal debido a las altas varianzas de medición, las mediciones de pseudodistancia GNSS pueden ser ponderadas con menor peso que las mediciones de distancia del radar que tienen varianzas de medición decisivamente menores.

En el área de operación 28 del radar secundario, es decir en las proximidades del lugar de aterrizaje 26 en la Fig. 1, las mediciones de pseudodistancia con ruido pueden ser tenidas en cuenta con una ponderación baja como antes en el filtro, en lugar de procesar solo las mediciones de distancia del radar de bajo ruido. Por lo tanto, se puede mantener bajo el número de transpondedores 14 en el sistema y el procedimiento de posicionamiento es menos susceptible a la falta de mediciones de distancia entre la estación base de radar secundario 12 y los transpondedores 14 individuales debido a las sombras. Si se emplearan exclusivamente mediciones de distancia del radar para el posicionamiento podrían resultar valores VDOP (dilución de la posición vertical) muy grandes para el caso en que las antenas de transpondedor 14 y la antena de radar 16 del segmento de usuario se encuentren aproximadamente en un plano. En caso de una combinación de mediciones de señal por satélites y mediciones de señal por radar en un inserto de filtro acoplado resultan dentro del área de operación, a través de toda ella, valores HDOP (dilución de la posición horizontal) y VDOP muy buenos.]

El segmento de usuario dispone en el espacio de tres grados de libertad de rotación. Es necesario el conocimiento del ángulo de posición del segmento de usuario para el concepto de posicionamiento tridimensional, puesto que en el lado del usuario son utilizadas dos antenas separadas espacialmente (antena de radar 16 y antena de recepción GNSS 20 en la Fig. 1) para las señales GNSS y las señales de radar. La información de posición requerida es obtenida mediante integración de la IMU 20. Con ello, las mediciones GNSS y de radar puede ser remitidas a un punto de referencia o indicación común, realizándose una compensación de descentrado. Otros aspectos positivos en relación con el uso de la IMU 20 son que el sistema inercial presenta una alta disponibilidad, pueden conseguirse altas velocidades de datos y puede ser determinada una solución de navegación completa para todos los seis grados de libertad del segmento de usuario.

10 Inserto de filtro no lineal acoplado

Los datos de sensores que figuran a continuación son fusionados por el lado del usuario para obtener una solución de la posición 3D de alta precisión. Debido a la combinación de sensores seleccionada puede ser determinada una solución de navegación completa, que va más allá de una pura indicación de posición 3D. Para que la fusión de los datos de sensores conduzca a una solución de posición de alta precisión se tienen en cuenta en el modelo de medición del filtro las diferencias espaciales entre la posición de la antena GNSS, la(s) posición(es) de la antena(s) de radar y el ISA (Conjunto de sensores inerciales). Las diferencias entre los puntos de referencia de los datos de sensores (centro de fase de la antena GNSS, centro de fase de la antena de radar, ISA) son determinados en la instalación del sistema, por ejemplo en coordenadas Norte-Este-Abajo (NED). Como punto de referencia común es elegido a continuación el ISA, de modo que después de la instalación del sistema se pueden indicar los dos vectores de desplazamiento $\vec{d}_{\text{radar,NED}}$ y $\vec{d}_{\text{GNSS,NED}}$. Mediante el uso de la IMU 22 en el segmento de usuario pueden ser observados los ángulos de alabeo, elevación y dirección del segmento de usuario. Con ayuda de la información de la posición continuamente actualizada y de los vectores de desplazamiento predeterminados $\vec{d}_{\text{radar,NED}}$ y $\vec{d}_{\text{GNSS,NED}}$ se puede remitir la indicación de las ecuaciones de observación GNSS y de radar a un sistema de coordenadas (de referencia) común.

A continuación se recogen de forma individual los datos de salida de sensores. El procesamiento de algunos datos es opcional, por lo que se puede sopesar entre un mayor esfuerzo computacional y un aumento en el rendimiento mediante la utilización de mediciones independientes adicionales en el filtro.

El sistema de radar secundario 12 proporciona en el lado del usuario las siguientes mediciones:

- Distancias oblicuas a los n transpondedores 14 del segmento terrestre
- Opcional: tasas de variación de la distancia a los n transpondedores 14 del segmento terrestre
- factores de calidad y/o varianzas pertenecientes a las mediciones

El receptor GNSS 18 proporciona como salida del sensor las siguientes magnitudes:

- pseudodistancias (distancias oblicuas más componentes de error) a m satélites
- Opcional: Doppler a m satélites
- Opcional: ADR (rango Doppler acumulado) a m satélites
- Opcional: datos diferenciales de corrección (por ejemplo SBAS), que son aplicados a las mediciones de receptor GNSS
- Las desviaciones típicas de las mediciones

La IMU 22 proporciona mediciones de:

- Aceleración por eje
- Velocidad angular por eje

La Fig. 3 muestra un inserto acoplado para datos de sensores de radar secundario, RX GNSS e IMU, en el que las mediciones "en bruto" de aceleración y de velocidades angulares de la IMU 22 son procesadas en el procesador de integración 30. Las mediciones de distancia, las varianzas de medición y eventualmente las mediciones de velocidades de variación de distancia son suministradas por la estación base de radar secundario 12 a un filtrado previo de los datos 32 del procesador de integración 30. Además, las mediciones de pseudodistancias (PSR), las varianzas de medidas y eventualmente los datos de corrección diferenciales, las mediciones ADR y Doppler son suministrados a una corrección y prefiltro de datos 34 del procesador de integración 30. Los datos de salida de los dos filtros 32 y 34 son suministrados a un filtro no lineal 36 del procesador de integración 30, que a partir de estas mediciones y de una solución de navegación INS calcula datos de corrección 38, que son procesados por un

algoritmo de tipo Strapdown 38 ejecutado por un procesador de integración 30 para determinar la posición tridimensional. Al algoritmo de tipo strap-down 38 son suministradas además aceleraciones y velocidades angulares y eventualmente varianzas de medición, que fueron medidas por la IMU 22. Estos movimientos medidos del dispositivo 10 son igualmente procesados por el algoritmo de tipo strapdown 38. Como resultado, el procesador inercial 30 puede emitir además de la posición tridimensional también otros datos determinados, tales como covarianzas, velocidad, aceleración, situación.

Si por el lado del usuario, la IMU está ya integrada con un ordenador de navegación, la solución de navegación INS puede seguir siendo procesada directamente en el procesador de integración 31 como en el caso del inserto para datos de sensores de radar secundario y RX GNSS acoplado mostrado en la Fig. 4. Al filtro no lineal 37 del procesador de integración 31 son suministrados los datos de salida filtrados de los dos filtros 32 y 34 y una posición 3D determinada por el sistema de navegación inercial (INS) 23, la velocidad, la situación, la matriz de covarianzas de los estados y eventualmente la aceleración del dispositivo 10. A diferencia del inserto mostrado en la Fig. 3, el filtro no lineal 37 a partir de los datos suministrados no determina datos de corrección, sino la posición tridimensional del dispositivo 10 que emite el procesador de integración 31, en particular con otros datos determinados, tales como covarianzas, velocidad, aceleración, situación, tiempo. La solución de la posición determinada es utilizada además para apoyar al sistema de navegación inercial separado.

A continuación son explicados los dos procedimientos utilizados en los procesadores de integración 30 y 31 para la integración de datos de sensores de mediciones de radar secundario, RX GNSS y mediciones IMU en los filtros no lineales 36 y 37. Los procedimientos se pueden emplear alternativamente entre sí.

El uso del modelo de medición no lineal es para las mediciones de radar secundario debido a las pequeñas distancias entre el segmento de usuario y las estaciones de transpondedor y la geometría de usuario/transpondedor que cambia rápidamente en el área de operación. La medición de distancia del radar s_k entre un transpondedor TP y el usuario U con el vector de posición tridimensional $\underline{x}_{U,k}$ en el instante k puede expresarse como sigue:

$$s_k = r(\underline{x}_{U,k}) + v_k$$

Con la distancia oblicua geométrica $r(\underline{x}_{U,k})$:

$$r(\underline{x}_{U,k}) = \sqrt{(x^{TP} - x_{U,k})^2 + (y^{TP} - y_{U,k})^2 + (z^{TP} - z_{U,k})^2}$$

donde v_k es el ruido de la medición más componentes de errores no corregidos, tales como los errores de trayectos múltiples y de calibración. La función r en el punto de aproximación $\underline{x}_{U,k}^-$ actual no es aproximada por una función

lineal como es habitual en las mediciones GNSS. Una posibilidad es aproximar r por una función cuadrática $\bar{r}$ que refleja mejor las no linealidades del sistema de radar secundario:

$$\bar{r}(\underline{x}_{U,k}) = r(\underline{x}_{U,k}^-) + (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T \nabla r(\underline{x}_{U,k}^-) + \frac{1}{2} (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T H(\underline{x}_{U,k}^-) (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-).$$

$\nabla r(\underline{x}_{U,k}^-)$ es el vector de la derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$ y $H(\underline{x}_{U,k}^-)$ es la matriz de la segunda derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$. Por ejemplo, puede ser utilizado un filtro de segundo orden para la optimización. Muy adecuado para el presente problema de filtro no lineal es también un filtro de Kalman de puntos sigma. En general se puede emplear un procedimiento de optimización no lineal, de modo que no se parta de una simple linealización de las ecuaciones de distancia oblicua.

Los modelos de estado utilizados en el filtro pueden ser ajustados en base a la aplicación concreta. Dependiendo de la aplicación pueden ser más adecuadas ecuaciones de estado lineales o no lineales.

Robustez del sistema

El procedimiento descrito es robusto frente a interferencias, ya que no todos los sensores elegidos aquí se ven afectados de forma simultánea en la misma medida por una interferencia. Mientras que GNSS funciona en la banda L, el sistema de radar funciona en la banda C. Otra diferencia esencial es que el receptor GNSS en el segmento de usuario es pasivo, mientras que la estación base de radar secundario en el segmento de usuario es un componente activo. Debido a la alta redundancia de medición dentro del área de operación crítica, puede ser detectada de forma fácil una perturbación de GNSS o del sistema de radar. La robustez del sistema se incrementa aún más por el uso de una IMU, que es en gran medida insensible frente a interferencias. La salida de la solución de la posición tridimensional en el procesador de integración es precedida por una comprobación de integridad de la solución.

Además de procedimientos puramente de reconocimiento de errores pueden ser implementados también procedimientos de exclusión de errores en el calculador de integración, con lo que se consigue una muy alta disponibilidad de la solución de posición.

En particular, pueden conseguirse las siguientes ventajas por la presente invención y por las formas de realización de la invención:

- 5
 - Además de la alta precisión de la solución de posición tridimensional se puede lograr al mismo tiempo un alto nivel de disponibilidad, continuidad e integridad de la solución de posición dentro de un área limitada espacialmente.
 - Se pueden conseguir altas tasas de actualización de la solución de la posición.
- 10
 - El sistema es más robusto frente a interferencias que otras propuestas de sistema PALS (Aproximación de precisión y sistemas de aterrizaje) debido a la fusión de datos de sensores seleccionada, que combina diferentes principios de medición entre sí, y del inserto de filtro acoplado.
- 15
 - El posicionamiento se realiza de forma autónoma por el lado del usuario. La supervisión de la integridad de la solución de posición se puede efectuar directamente en la unidad de usuario. Requiere solo un pequeño esfuerzo para el operario y no es necesario un enlace de datos adicional entre el segmento terrestre y el de usuario.
 - Dimensiones mecánicas pequeñas, bajo consumo de potencia y bajos costes de adquisición y operación del sistema de aumentación local, es decir, de las estaciones base de radar secundario y de transpondedores.
- 20
 - El receptor GPS y la antena, así como la IMU ya están instalados en muchos segmentos de usuario en el sector aeroespacial, de modo que por el lado del usuario solo se requiere una ampliación de una estación base de radar secundario y antena(s). Los ordenadores de a bordo existentes puede ser utilizados para implementar en ellos los algoritmos de filtrado no lineal.
- 25
 - El segmento terrestre de radar secundario puede también ser instalado fácilmente en plataformas móviles (por ejemplo, portaaviones).

La presente invención tiene el potencial de proporcionar una solución de posición tridimensional en un área espacialmente limitada (por ejemplo, en el entorno de lugares de aterrizaje de helicópteros) con los requisitos de precisión, disponibilidad e integridad requeridos en aplicaciones aeroespaciales. Por lo tanto, el riesgo de accidentes se puede minimizar drásticamente, así como ahorrarse tiempo y costes, pudiendo realizarse aterrizajes autónomos en casos de mala/nula visibilidad del lugar de aterrizaje. La presente invención es además robusta frente a fuentes de interferencia.

Símbolos de referencia y acrónimos

10	Dispositivo para el posicionamiento tridimensional
12	Estación base de radar secundario
35 14	Transpondedor de radar secundario
16	Antena de radar
18	Receptor GNSS/RX GNSS
20	Antena de recepción GNSS
22	IMU
40 23	INS
24	Ordenador de navegación
26	Lugar de aterrizaje de helicóptero
28	Área de operación de radar secundario
30, 31	Procesador de integración
45 32	Filtrado previo de datos para mediciones de distancia del radar

	34	Corrección y filtrado previo de datos para las mediciones de pseudodistancia
	36	Filtro no lineal
	38	Algoritmo de tipo strapdown
	FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave/Onda continua modulada en frecuencia
5	GNSS	Global Navigation Satellite System / Sistema global de navegación por satélite
	HDOP	Horizontal Dilution Of Precision/ Dilución de la precisión horizontal
	IMU	Inertial Measurement Unit/ Unidad de medición inercial
	INS	Inertial Navigation System/Sistema de navegación inercial
	ISA	Inertial Sensor Assembly/ Disposición de sensor inercial
10	NED	North-East-Down/ Norte-Este-Abajo
	RX	Receptor
	SBAS	Satellite Based Augmentation System/Sistema de aumentación basado en satélites
	VDOP	Vertical Dilution Of Precision/Dilución de la precisión vertical

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo (10) para el posicionamiento tridimensional que presenta una estación base de radar secundario (12), que está prevista para la medición de la distancia a transpondedores (14) y presenta al menos una antena de radar (16), un receptor GNSS (18) que está previsto para la medición de señales GNSS y presenta una antena de recepción GNSS (20), una unidad de medición inercial (22) que está prevista para determinar con respecto a un punto de referencia la posición de la antena de recepción GNSS, así como la de la al menos una antena de radar en un sistema de coordenadas común, y un procesador de integración (24; 30; 31), al que son proporcionadas las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS, las mediciones de distancia del radar y movimientos del dispositivo alrededor de los ejes del sistema de coordenadas común medidos por la unidad de medición inercial (22), denominados en lo que sigue datos IMU, caracterizado por que el procesador de integración determina una posición tridimensional de un punto de referencia común por fusión de las mediciones y datos suministrados conforme a una fusión de datos de sensores, siendo realizada una compensación de descentrado teniendo en cuenta los movimientos medidos, presentando el procesador de integración (24; 30; 31) un filtro no lineal (36; 37) para el procesamiento de las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS, de los datos IMU generados por la unidad de medición inercial (22) y de las mediciones de distancias del radar.
2. Dispositivo según la reivindicación 1, caracterizado por que la estación base secundaria (12) está realizada para funcionar en la banda C (IEEE) y utilizar las señales de radar FMCW para medir la distancia.
3. Dispositivo según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que está previsto un sistema de navegación inercial (23) que presenta la unidad de medición inercial (22) y en el que el procesador de integración (24; 30; 31) está realizado para determinar fuera de una zona de operación (28) del sistema de radar secundario (12) una posición tridimensional con una primera navegación acoplada sobre la base de las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS (18) y de las mediciones de navegación inercial del sistema de navegación inercial (23), y dentro de la zona de operación (28) de la estación base de radar secundario (12) determinar una posición tridimensional con una segunda navegación acoplada sobre la base de las mediciones de distancia del radar, las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS (18) y las mediciones de navegación inercial del sistema de navegación inercial (23).
4. Dispositivo según la reivindicación 1, 2 o 3, caracterizado por que está previsto el filtro no lineal (36) para determinar datos de corrección para una solución de navegación INS a partir de las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS y de las mediciones de distancia del radar, y el procesador de integración (30) ejecuta un algoritmo de tipo strapdown (38), el cual determina la posición tridimensional a partir de los datos de corrección y de los movimientos del dispositivo alrededor de los ejes del sistema de coordenadas común medidos por la unidad de medición inercial (22).
5. Dispositivo según la reivindicación 1, 2 o 3, caracterizado por que el filtro no lineal (37) está configurado para determinar la posición tridimensional a partir de las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS, las mediciones de distancia del radar y una solución de navegación INS, y la posición tridimensional determinada es acoplada de forma retroactiva a un sistema de navegación inercial (23) del dispositivo para calibración.
6. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el filtro no lineal (36; 37) aproxima una distancia oblicua entre la al menos una antena de radar (16) y un transpondedor (14) por una función no lineal, en particular como caso especial una función cuadrática, en particular como caso especial una distancia oblicua r utilizando la siguiente función no lineal:

$$\bar{r}(\underline{x}_{U,k}) = r(\underline{x}_{U,k}^-) + (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T \nabla r(\underline{x}_{U,k}^-) + \frac{1}{2} (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T H(\underline{x}_{U,k}^-) (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)$$

donde $\underline{x}_{U,k}$ es un vector de posición tridimensional en el instante k entre un transpondedor TP y el dispositivo U ,

$\underline{x}_{U,k}^-$ es un punto de aproximación actual, $\nabla r(\underline{x}_{U,k}^-)$ es el vector de la derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$ y

$H(\underline{x}_{U,k}^-)$ es la matriz de la segunda derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$.

7. Dispositivo según la reivindicación 6, caracterizado por que el filtro no lineal (36; 37) utiliza para la solución del problema de filtro no lineal un procedimiento de optimización no lineal, en particular un filtro de Kalman de puntos sigma, o un filtro de segundo orden para la optimización.

8. Dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el filtro no lineal (36; 37) implementa un modelo de estado que, dependiendo de la aplicación del dispositivo, presenta ecuaciones de estado lineales o no lineales.

9. Procedimiento para el posicionamiento tridimensional, con las siguientes etapas: la recepción de mediciones de distancia del radar de una estación base de radar secundario (12), que está prevista para medir la distancia a los

transpondedores (14) y presenta al menos una antena de radar (16), la recepción de mediciones de pseudodistancias de un receptor GNSS (18), que está previsto para la medición de señales GNSS y presenta una antena de recepción GNSS (20), la recepción de mediciones de movimientos de una unidad de medición inercial (22), que está prevista para determinar con respecto a un punto de referencia la posición de la antena de recepción GNSS, así como de la al menos una antena de radar en un sistema de coordenadas común, caracterizado por la determinación de una posición tridimensional de un punto de referencia común por fusión de las mediciones de pseudodistancia del receptor GNSS, de las mediciones de distancia del radar y de las mediciones de movimientos de la unidad de medición inercial, en lo que sigue denominados datos IMU, conforme a una fusión de datos de sensores teniendo en cuenta una compensación de descentrado entre el punto de referencia, la antena de recepción GNSS, la al menos una antena de radar y la unidad de medida inercial y por el filtrado no lineal (37) para el procesamiento de las mediciones de pseudodistancias del receptor GNSS, de los datos IMU generados por la unidad de medición inercial (22) y de las mediciones de distancia del radar.

10. Procedimiento según la reivindicación 9, caracterizado además por las siguientes etapas: el filtrado no lineal (36) para la determinación de datos de corrección para una solución de navegación INS a partir de las mediciones de pseudodistancia recibidas y las mediciones de distancia del radar recibidas y la ejecución de un algoritmo de tipo strapdown (38) para determinar la posición tridimensional en base a los datos de corrección y las mediciones de movimiento recibidas, o el filtrado no lineal (37) para determinar la posición tridimensional a partir de las mediciones de pseudodistancia recibidas, de las mediciones de distancia del radar recibidas y de la solución de navegación INS recibida.

11. Procedimiento según la reivindicación 9 o 10, caracterizado por que el filtrado no lineal (36; 37) presenta la aproximación de una distancia oblicua entre la al menos una antena de radar (16) y un transpondedor (14) por una función no lineal, en particular como caso especial una función cuadrática, en particular como caso especial la aproximación de una distancia oblicua r utilizando la siguiente función no lineal:

$$\bar{r}(\underline{x}_{U,k}) = r(\underline{x}_{U,k}^-) + (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T \nabla r(\underline{x}_{U,k}^-) + \frac{1}{2} (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)^T H(\underline{x}_{U,k}^-) (\underline{x}_{U,k} - \underline{x}_{U,k}^-)$$

donde $\underline{x}_{U,k}$ es un vector de posición tridimensional en el instante k entre un transpondedor TP y el dispositivo U , $\underline{x}_{U,k}^-$ es un punto de aproximación actual, $\nabla r(\underline{x}_{U,k}^-)$ es el vector de la derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$ y $H(\underline{x}_{U,k}^-)$ es la matriz de la segunda derivada parcial de r en el punto $\underline{x}_{U,k}^-$.

12. Procedimiento según la reivindicación 11, caracterizado por que el filtrado no lineal (36; 37) utiliza para resolver el problema de filtro no lineal un procedimiento de optimización no lineal, en particular emplea un filtro de Kalman de puntos sigma o un filtro de segundo orden para la optimización.

13. Programa informático para la realización de un procedimiento según una de las reivindicaciones 9-12.

14. Producto de programa informático que contiene un soporte de programa legible por máquina en el que está almacenado un programa informático según la reivindicación 13 en forma de señales de control legibles de forma electrónica y/u óptica.

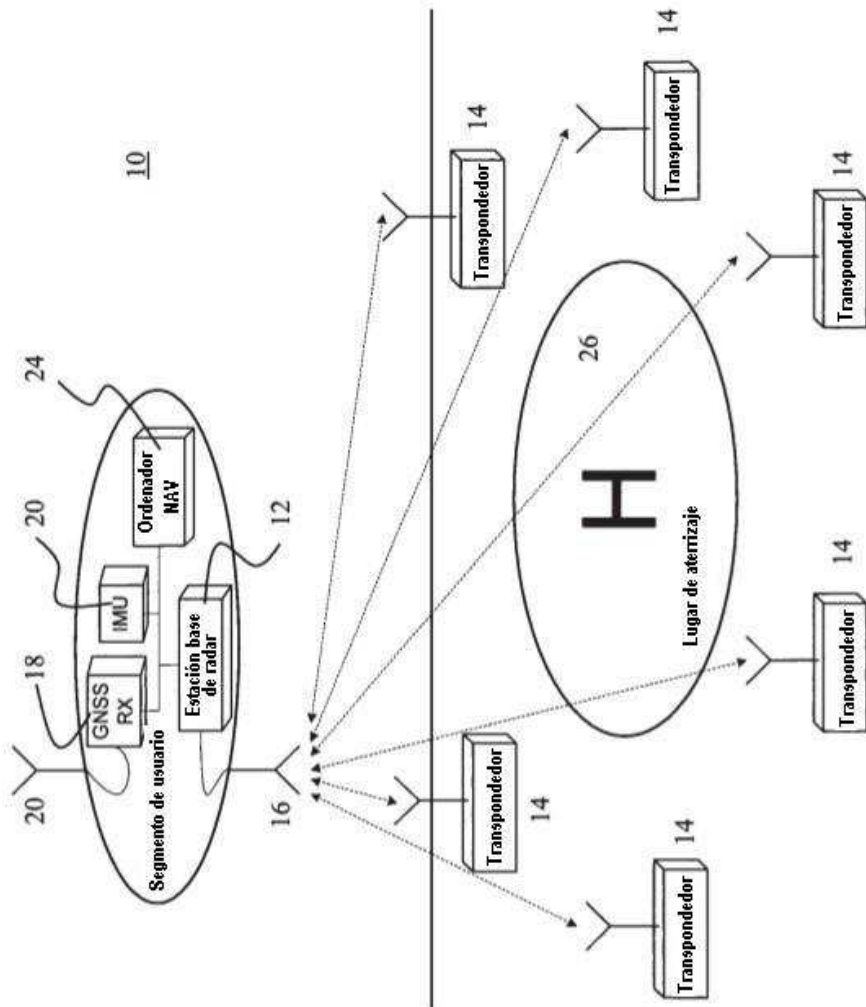


Fig. 1

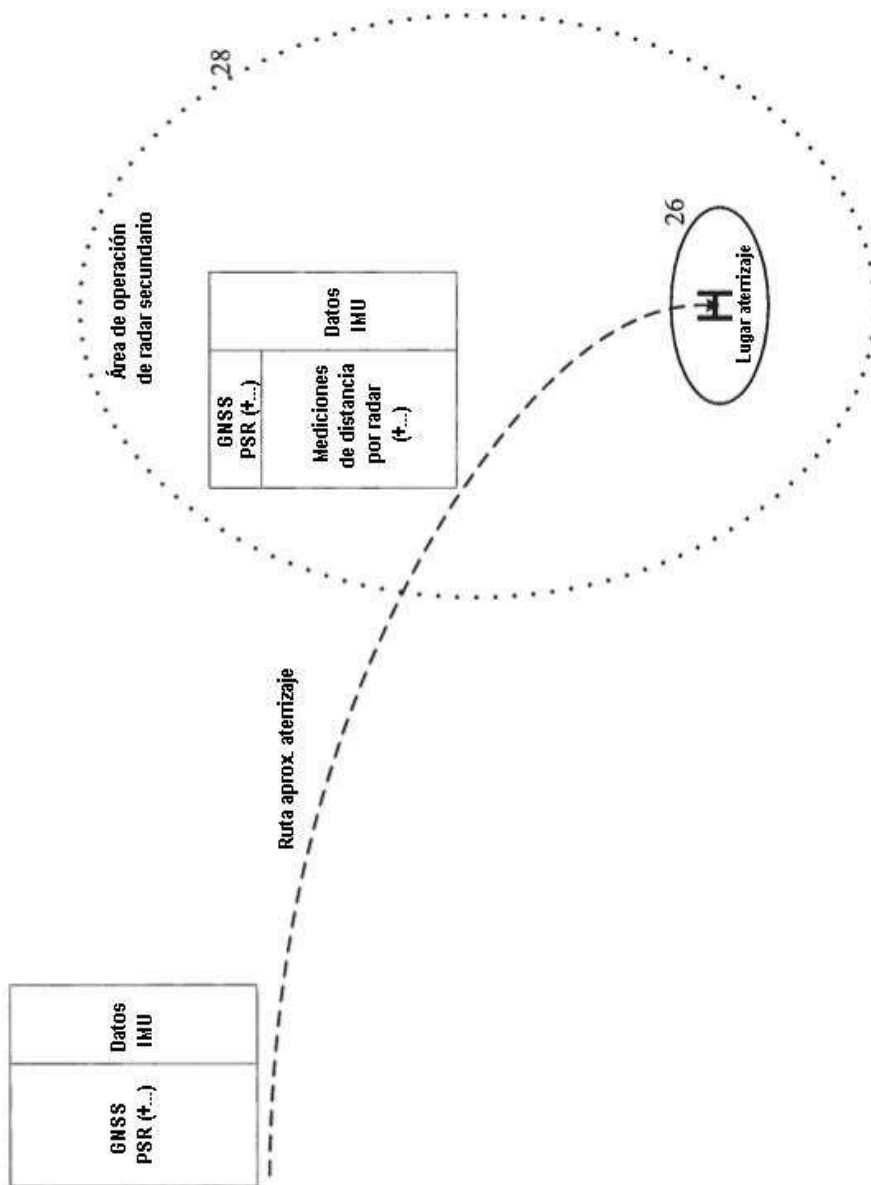


Fig. 2

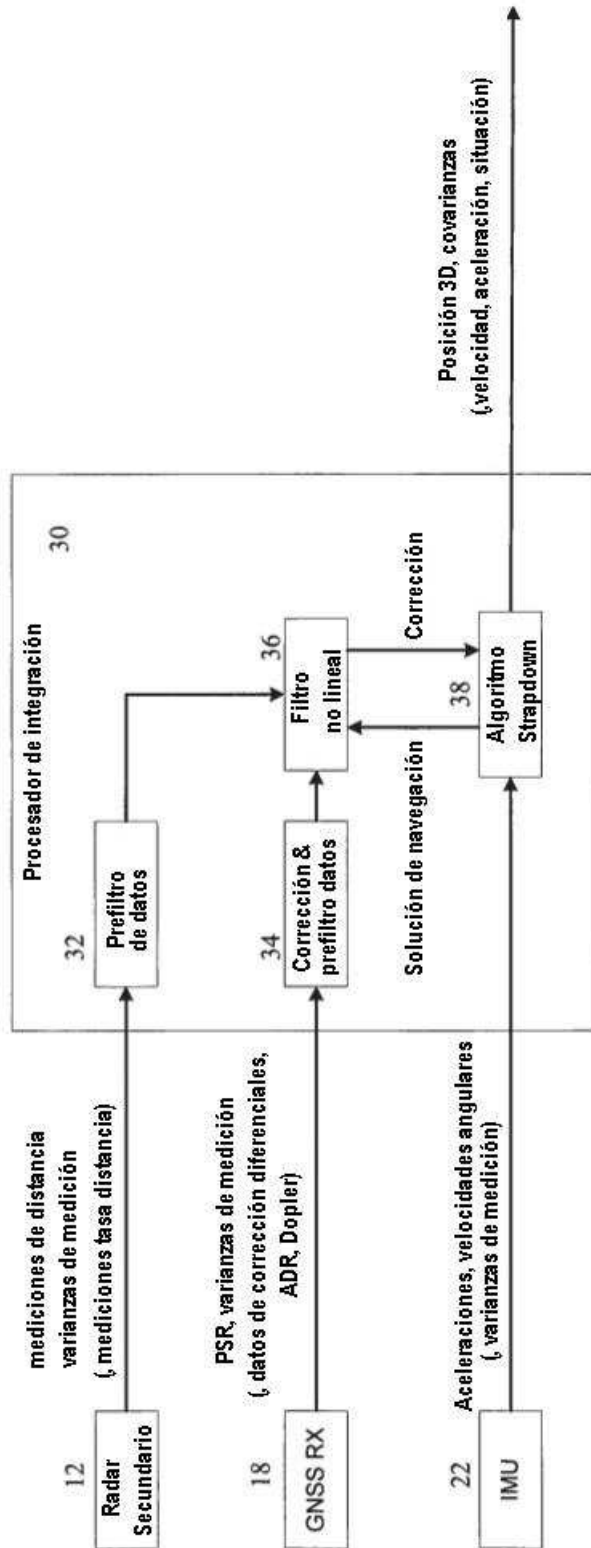


Fig. 3

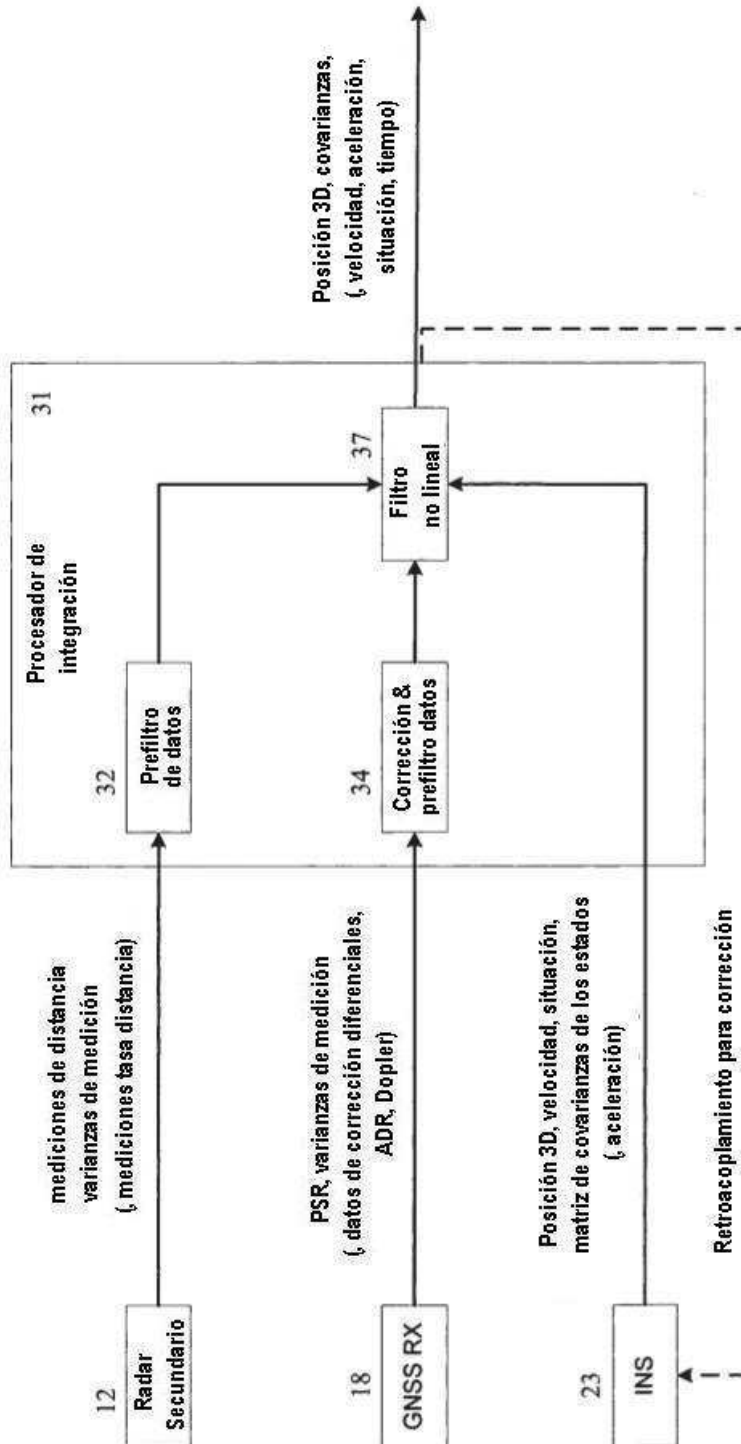


Fig. 4