



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 356 821**

51 Int. Cl.:  
**G01S 19/07** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04728200 .9**

96 Fecha de presentación : **19.04.2004**

97 Número de publicación de la solicitud: **1613978**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **11.01.2006**

54 Título: **Corrección de errores inducidos por la troposfera en los sistemas de posicionamiento global.**

30 Prioridad: **17.04.2003 GB 0308894**  
**23.04.2003 GB 0309142**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**13.04.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**13.04.2011**

73 Titular/es:  
**THE SECRETARY OF STATE FOR DEFENCE**  
**Dstl Porton Down**  
**Salisbury, Wiltshire SP4 0JQ, GB**

72 Inventor/es: **Powe, Matthew, Duncan;**  
**Butcher, James y**  
**Owen, John, Ifor, Rewbridge**

74 Agente: **Polo Flores, Carlos**

ES 2 356 821 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

Corrección de errores inducidos por la troposfera en los sistemas de posicionamiento global.

La presente invención se refiere a desarrollos pensados para aumentar la exactitud obtenible de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS).

5 Actualmente, existen dos sistemas GPS a disposición del público, conocidos como NAVSTAR, de propiedad de los EE.UU., y GLONASS, de propiedad de la Federación Rusa. Estos han existido durante aproximadamente dos décadas, pero en el futuro inmediato se espera que la ampliación regional europea del GPS comenzará a proporcionar sus servicios, seguido a los pocos años por un sistema europeo bajo el nombre de GALILEO.

10 Los sistemas existentes han sido perfeccionados progresivamente de manera que usando una implementación de fase diferencial puede lograrse potencialmente una exactitud de localización de menos de 2 cm a lo largo de una línea base de 1000 km, pero con un coste de cálculo y del tiempo tomado para determinar la ubicación. Las mediciones en tiempo real o casi en tiempo real tienen una resolución correspondientemente más baja, y actualmente los requisitos para alta precisión significan que se emplean necesariamente ampliaciones adicionales para complementar la información GNSS. Además, estas podrían incluir un receptor que toma mediciones procedentes de muchos satélites, hasta todos aquellos visibles para él por medio de los cuales calcular una solución de posición determinada en exceso y rechazar los datos incoherentes para mejorar la exactitud de la solución de posición. Tal sistema puede usar datos procedentes de más de una constelación de satélites GNSS, GPS y GLONASS.

15 Aunque el GNSS se usa principalmente para establecer la ubicación de un usuario que tiene un receptor adecuado, normalmente móvil, también se usa con respecto a proporcionar señales de tiempo exactas a los usuarios cuyas ubicaciones ya se conocen o no tienen que conocerse. Los conjuntos de determinación de posición de un solo usuario tienen receptores sencillos de transmisiones por satélite y un conjunto de circuitos que efectúa el modelado de al menos algunos efectos atmosféricos que influyen en la recepción de señal para en cierto modo eliminar los errores en la posición calculada.

20 Sin embargo, si el usuario está interesado en obtener una posición o una medición de tiempo, surge un error significativo de la incapacidad de modelar exactamente el retardo en las señales GNSS causado por la atmósfera, concretamente la ionosfera y la troposfera.

25 Los usuarios de navegación por satélite generan su posición tridimensional y la solución de tiempo procesando cuatro o más mediciones de pseudoalcance a cuatro o más satélites. Una medición de pseudoalcance es la diferencia entre el tiempo de reloj del satélite en la emisión de la señal y el tiempo de reloj del receptor del usuario en la recepción. La observación del pseudoalcance está relacionada, por lo tanto, con el tiempo de propagación de radio y, por lo tanto, el alcance entre el satélite y el usuario. Como las estimaciones de la posición del satélite son conocidas (son emitidas por el satélite) un usuario puede resolver las cuatro incógnitas (la posición tridimensional y el tiempo) usando cuatro o más observaciones de pseudoalcance. Como parte del filtro de la solución de navegación/tiempo del usuario, se corrigen las variaciones en el tiempo de propagación de radio de las observaciones de pseudoalcance a partir de esta propagación en el espacio libre.

30 En el filtro de la solución de navegación/tiempo del usuario, se aplican varias correcciones a la medición de pseudoalcance sin tratar incluyendo correcciones troposféricas, ionosféricas y relativistas.

35 En el documento WO-A1-03/069366 Se ha sugerido cómo adaptar los retardos ionosféricos y mediante el uso de un emplazamiento denominado del servidor que recibe señales de satélites GNSS, deduce factores de corrección aplicables a receptores GPS en las inmediaciones antes de emitirlos localmente para que sean recibidas por tal receptor GPS y usadas para modificar el modelo embarcado usado para corregir tales retardos. Para retardos ionosféricos, que comprenden un pequeño grado de refracción del recorrido de la señal y un cambio más significativo en la velocidad de la señal, los retardos y las correcciones para los mismos son sustancialmente constantes a lo largo de un periodo de tiempo que requiere actualización de datos de corrección como máximo unas pocas veces por día.

40 Los efectos troposféricos, por otra parte, son de cambio relativamente rápido (o de corta duración) y localizados geográficamente, resultando fundamentalmente de fenómenos del tiempo o meteorológicos más que fenómenos climáticos. Sin embargo, la troposfera constituye una de las mayores fuentes de error identificadas en el efecto que tiene sobre las señales que se propagan a través de la misma. La troposfera introduce curvatura de los rayos y, por lo tanto, un aumento en el recorrido de la señal que constituye un retardo de la señal que está influido por varios factores meteorológicos, pero particularmente el contenido de agua. Los retardos troposféricos son difíciles de modelar con sencillez.

45 Tradicionalmente, el retardo troposférico ha sido tratado mediante el uso de modelos de retardo troposférico global que funcionan a partir de parámetros denominados climáticos que son relativamente invariantes y puede almacenarse en el receptor del usuario, pero estos parámetros constituyen, como mucho, una expectativa media o estacional, pero no una que esté basada meteorológicamente, es decir, basada en condiciones del tiempo actuales, recientes o predichas.

50 Uno de tales modelos que se usa y puede incorporarse en un receptor GPS portátil es el modelo de retardo

troposférico cenital RTCA para usuarios de WAAS descrito en el documento "Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning Systems/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment" RTCA D0229C, noviembre de 2001.

5 Tal modelo es útil en la medida en que simplifica los retardos troposféricos a valores cenitales (identificados en este documento como  $D^z$  o ZTD) pero aún existe la necesidad de mapear estos para los efectos de la elevación causados por bajas inclinaciones del satélite respecto al usuario. Uno de tales modelos de mapeo es descrito por Niell en el documento "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths", Journal of Geophysical Research Vol. 101, N° B2, páginas 3227-3246, febrero de 1996.

10 Sin embargo, aunque estos modelos permiten la incorporación en un receptor del usuario son de capacidad inherentemente limitada para tener en cuenta cambios en las condiciones troposféricas que afectan a los retardos de señal causados por el tiempo constantemente cambiante y localizado.

15 El documento US2002/0199196 describe un procedimiento y aparato para determinar la posición de un terminal de usuario. El procedimiento comprende recibir en el terminal de usuario una señal de televisión emitida procedente de un transmisor de señal de televisión; determinar un primer pseudoalcance entre el terminal de usuario y el transmisor de señal de televisión basado en una componente conocida de la señal de televisión emitida; recibir en el terminal de usuario una señal de posicionamiento global procedente de un satélite de posicionamiento global; determinar un segundo pseudoalcance entre el terminal de usuario y el satélite de posicionamiento global basado en la señal de posicionamiento global; y determinar una posición del terminal de usuario basada en el primer y segundo pseudoalcances, una ubicación del transmisor de señal de televisión, y una ubicación del satélite de posicionamiento global. Una ubicación puede ajustar el valor de cada pseudoalcance según la velocidad de propagación troposférica.

20 Aunque existen modelos para obtener datos troposféricos exactos teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas en una o más regiones, como por predicción numérica del tiempo (NWP), la naturaleza localizada y, por lo tanto, la gran cantidad de datos generados ha sido percibida como la confirmación de que actualmente no pueden usarse para mejorar perceptiblemente los dispositivos factibles; es decir, debido tanto a que estos datos son demasiado grandes para ser enviados por sistemas de comunicación que están disponibles para los usuarios móviles como a la limitada capacidad de proceso dentro de una cantidad de tiempo razonable.

25 En un primer aspecto, la presente invención proporciona un procedimiento de obtención de datos de retardo troposférico para uso en un sistema de posicionamiento global por satélite (GNSS) tal como se expone en la reivindicación 1 de la misma. Las características subordinadas de la invención se exponen en las reivindicaciones subordinadas de la misma.

30 La presente invención también proporciona aparatos adecuados para llevar a cabo procedimientos del primer aspecto de la invención.

35 En lo anterior y la siguiente discusión, se ha hecho referencia a valores de retardos troposféricos y valores de retardos troposféricos cenitales sin relación a su naturaleza. Mientras que es posible obtener un único valor de retardo troposférico para una posición particular, es más habitual obtenerlo como un denominado retardo "húmedo" y un retardo "seco" o "hidrostático". Aparte de las circunstancias en las que es importante distinguir, en particular con respecto a la reducción de datos, en esta memoria descriptiva, la intención de las referencias a retardo o retardos troposféricos y su obtención es que se interprete como obtener valores para cada uno.

40 También merece la pena mencionar que los satélites tienen capacidad limitada para transmitir señales adicionales a aquellas ya transmitidas y, en general, sólo pueden transmitir algún dato, incluyendo datos de corrección, periódicamente.

45 Sin embargo, el entorno meteorológico está cambiando continuamente ya que las características del tiempo varían su posición en relación con la región mapeada. Así, además de obtener valores de retardos troposféricos asociados con puntos de cuadrícula de la región mapeada, la presente invención también implica una reducción de datos suficiente para permitir la transmisión de todo o parte del conjunto de modificaciones utilizables por un usuario dentro de un tiempo, dictada por la disponibilidad de transmisión y la velocidad de transmisión del satélite, siendo tal tiempo significativamente anterior al tiempo de validación de la información meteorológica usada por el modelo meteorológico.

50 Para asegurar la validez de los datos obtenidos troposféricamente, se prefiere transmitir dichas modificaciones de valores de retardos a un usuario correspondientes a una resolución temporal meteorológica de dichas informaciones de modelo meteorológico de no más de 1 hora, y/o correspondientes a una resolución espacial meteorológica de dicha información de modelo meteorológico de más de 90 km, en la medida en que el tiempo y la distancia están enlazados por la velocidad de movimiento de las características relevantes del tiempo.

55 En la medida en que el modelo meteorológico obtiene unos valores de retardos troposféricos a partir de datos empleados en otro sitio para pronosticar o predecir las condiciones del tiempo en una o más ubicaciones, es decir, condiciones que varían con el tiempo, es posible predecir valores de retardos troposféricos en el futuro a partir de dicha información meteorológica y desarrollar un conjunto de predicciones de dichas correcciones para una región geográfica de la superficie de la tierra, por medio de lo cual cada miembro de dicho conjunto de predicciones describe una

corrección que se vuelve actual como una función del tiempo desde el desarrollo. Por lo tanto, es posible comunicar dicho conjunto de predicciones de correcciones como un lote y usar los miembros del conjunto en el momento para el cual cada uno fue predicho se vuelve actual con respecto al pronóstico. Tal comunicación puede ser a un satélite en órbita y los miembros retransmitidos de uno en uno en el momento para el cual cada uno fue predicho se vuelve actual con respecto al pronóstico.

Más detalles y ventajas de la invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción con referencia a los siguientes dibujos, en los que

la Figura 1 es una representación esquemática de un sistema de posicionamiento GNSS conocido de la técnica, que ilustra un dispositivo receptor de posicionamiento de usuario y una pluralidad de satélites de posicionamiento en órbita,

la Figura 2 es una representación esquemática de una primera realización del sistema de posicionamiento GNSS que plasma la presente invención, que ilustra un dispositivo receptor de posicionamiento de usuario, una estación terrestre y una pluralidad de satélites de posicionamiento en órbita,

la Figura 3(a) es una ilustración gráfica de trazado de rayos,

la Figura 3(b) es una ilustración gráfica de mapeo de un campo de refringencia en el trazado de rayos,

la Figura 4 es una representación ilustrativa de un archivo de datos de retardo cenital, adecuado para compresión de datos mediante técnicas de compresión de imagen,

la Figura 5 es una representación gráfica de cómo afecta el ruido a la compresión y

Haciendo referencia a la Figura 1, esta representa en forma esquemática una sección de la superficie de la tierra 50 y, en relación con la misma, un sistema de posicionamiento global 100 que comprende una pluralidad de satélites GNSS 110<sub>1</sub>, 110<sub>2</sub>, 110<sub>3</sub>,... en órbita terrestre y un usuario 120, en forma de un receptor de señal y un procesador de tipo manual o montado en un vehículo en o encima de la superficie de la tierra.

El receptor de usuario 120 comprende, de manera convencional, un receptor frontal 122 de señales transmitidas desde los diversos satélites a la vista a frecuencias de radiofrecuencia, un medio de procesamiento 124 y un aparato de visualización de información o de suministro similar 126. El medio de procesamiento incluye un procesador digital que responde a las señales recibidas desde, y características de, los diversos satélites cuyas posiciones orbitales son conocidas con respecto a puntos sobre la tierra y calcula, a partir de las variaciones en la recepción de estas señales, una solución que comprende la posición del receptor de usuario en dos o tres dimensiones, y, de manera importante en algunas aplicaciones, el tiempo.

El receptor de usuario puede determinar, a partir de la pluralidad de señales de satélite recibidas a través de las mediciones de pseudoalcance esbozadas anteriormente, una posición aproximada, pero comprometida por los retardos infligidos a las señales por la refracción en la troposfera causada por refracción, principalmente el contenido de agua de sistemas meteorológicos como frentes meteorológicos. Tal refracción troposférica puede compensarse, al menos en una primera aproximación, aplicando al procesamiento de las señales recibidas un primer modelo 130 que representa condiciones climáticas anticipadas para esa ubicación aproximada en el momento del año. Este denominado modelo climático es esencialmente no meteorológico, en la medida en que es actualizado infrecuentemente y representa, como mucho, una representación de condiciones medias. De manera conocida el modelo climático 130 guarda parámetros durante al menos uno, y preferentemente todos de la época del año, la latitud y la altitud cuando pertenecen a la posición del usuario y opcionalmente puede guardar parámetros de longitud y/o momento del día.

El modelo climático está dispuesto para generar retardos troposféricos cenitales (ZD) que pueden ser aplicables a la ubicación de usuarios que puede ser mapeada en relación con la inclinación de la elevación del satélite con respecto al receptor para ofrecer un valor más exacto del retardo troposférico y efectuar correcciones de pseudoalcance con respecto a la dirección adoptada realmente por el recorrido de la señal recibida, particularmente si el satélite está en elevación baja.

Con este fin, el primer modelo puede incluir una función de mapeo de elevación 130' que emplea, por ejemplo como una aproximación de fracción continua de tres términos, sustancialmente tal como fue expuesto por Niell en el documento mencionado anteriormente. Sin embargo, también debería entenderse que los parámetros usados en el modelo de mapeo, que se obtienen de los parámetros de la época del año, la latitud y la altitud mencionados anteriormente, también están sometidos a errores causados por perturbaciones meteorológicas, aunque para muchos propósitos estos errores pueden considerarse demasiado pequeños para corregirlos.

Este aparato de la técnica anterior utiliza el retardo troposférico cenital, y dado el caso, la función de mapeo, para efectuar una corrección aproximada a los retardos troposféricos permitiendo al receptor calcular una solución más exacta para la posición y el tiempo.

Pese a sus inexactitudes inherentes, este primer modelo es valioso en la medida en que permite que un

receptor de usuario sea fabricado y usado con esta facilidad de corrección (si bien es cierto que limitada) incorporada y sin depender de recibir señales de otro sitio. Hasta ahora, la exactitud de posicionamiento de un receptor de usuario se ha visto comprometida por varios factores pero, a medida que estos se resuelven, y se reducen las fuentes de error, resulta evidente que los errores residuales de retardo troposférico que quedan después de usar el primer modelo ahora son una causa importante de limitación de la exactitud.

Haciendo referencia ahora a la Figura 2, de acuerdo con la presente invención, en una ubicación de la tierra hay provista una estación terrestre 200, denominada convenientemente en este documento como un servidor, aunque puede haber más de uno asociado con diferentes regiones de la superficie de la tierra. Este servidor no tiene medios para recibir señales de satélites pero está conectado para recibir de una o más organizaciones meteorológicas información que representa los resultados de, o adecuados para, predicción numérica del tiempo (NWP) para ubicaciones en diversas posiciones alrededor de la tierra; la información meteorológica puede ser de naturaleza global o confinada a una o más regiones sub-globales.

En el servidor hay provisto, y se indica por 230, un duplicado del primer modelo (130) tal como se usa en el receptor de usuario, que contiene los parámetros no meteorológicos de modelado climático anteriormente mencionados.

En el servidor también hay provisto un modelo meteorológico indicado en general por 250. Este modelo responde a información meteorológica provista por la NWP y determina valores exactos para ZD (como componentes húmeda y seca).

Los valores ZD de retardo troposférico cenital para los dos modelos se comparan en 260 para determinar las diferencias entre ellos que constituyen un error atribuible al primer modelo. Las diferencias constituyen así valores de modificaciones por los cuales el producto del primer modelo podría ser modificado o corregido para proporcionar el mismo resultado que el segundo modelo.

Estas correcciones se codifican y someten a reducción de datos en 270, como se describe detalladamente más adelante, y luego se comunican al receptor de usuario por medio de un canal de comunicación 280 que constituye un enlace ascendente a uno o más de los satélites GNSS 110<sub>1</sub>, etc. por medio del transmisor 275 y la retransmisión desde el satélite o satélites hasta el receptor de usuario, indicado en general en 220.

El receptor de usuario incluye un decodificador 228 de los datos de valores de corrección que proporciona así valores de ZD para el primer modelo (valores húmedo y seco) haciéndolos realmente iguales que si se obtienen exactamente por el segundo modelo presente sólo en el servidor remoto, para uso en el cálculo de navegación y tiempo.

Opcionalmente, como también se describe más adelante, las correcciones pueden incluir puntos aplicables a funciones de mapeo del primer modelo de manera que tanto al retardo cenital como a los valores de la función de mapeo se les da una mayor exactitud para el cálculo de posición y tiempo.

La visión general anterior del sistema se amplía más adelante con la discusión de más características que pueden emplearse individualmente pero que cuando se usan juntas se interrelacionan ventajosamente.

Haciendo referencia al servidor 200, el modelo meteorológico está basado en un grupo tridimensional de puntos de cuadrícula para la que se dispone de información meteorológica y usa tal información para obtener un campo de refringencia que permite el trazado de rayos entre un punto del terreno cerca de la superficie de la tierra y un satélite particular, como resultado de lo cual puede hallarse un valor de retardo troposférico (para cada uno de los retardos húmedo y seco).

En este punto es apropiado ofrecer algunos antecedentes sobre propagación y refringencia atmosférica y efectos atmosféricos ya que están relacionados con el trazado de rayos y la NWP.

La velocidad de propagación de una onda electromagnética a través de un medio puede expresarse en términos del índice de refracción,  $n$ , definido como el cociente de la velocidad de la luz a través del espacio libre y la velocidad a través del medio (Ecuación 1-1).

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-1)$$

donde:

$n$  es el índice de refracción

$c$  es la velocidad de la luz en el espacio libre

$v$  es la velocidad de propagación

En la práctica, y como se ilustra en la Figura 3(a), el recorrido se curva por refracción a medida que pasa entre

el satélite y la tierra, la mayoría de este retardo. El retardo temporal troposférico del GNSS, ignorando los efectos relativistas, se define como el tiempo de propagación de la señal GNSS desde el satélite hasta el usuario menos el tiempo de propagación del espacio libre:

$$d_{trop} = \int_{Usuario}^{\infty V} n(s)ds - \int_{Usuario}^{\infty V} ds \quad (1-2)$$

5 donde:

s es la distancia a lo largo del recorrido de propagación.

La primera integral es a lo largo del recorrido de propagación curvado; la segunda integral es a lo largo de un recorrido recto geométrico.

10 La ecuación diferencial que describe el recorrido de los rayos curvados puede expresarse, en coordenadas cartesianas, como:

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (1-3)$$

donde  $r=r(s)$  es el vector que describe el recorrido de los rayos,

s es la longitud del recorrido de los rayos curvados hasta r,

n es el campo escalar del índice de refracción,

15  $\nabla n$ , un campo vectorial, es el gradiente de n.

La ecuación diferencial puede desarrollarse como

$$\frac{d^2 r}{ds^2} = \frac{1}{n} \left( \nabla n - \left( \nabla n \cdot \frac{dr}{ds} \right) \frac{dr}{ds} \right) \cdot (1-4)$$

20 Una ecuación diferencial ordinaria de primer orden (ODE) con valores iniciales conocidos puede resolverse usando métodos numéricos: por ejemplo, los métodos de Runge-Kutta o Adams-Moulton. Las ecuaciones diferenciales de orden superior pueden resolverse numéricamente reescribiéndolas como un sistema equivalente de ecuaciones de primer orden. Usando la sustitución  $r_1=r$  y  $r_2=r'$  (la primera derivada), la ecuación diferencial del recorrido de los rayos (1-4) puede expresarse como un sistema equivalente de dos ecuaciones diferenciales de primer orden 1-5 y 1-6:

$$r_1' = \frac{dr}{ds} = r_2 \quad (1-5)$$

$$r_2' = \frac{d^2 r}{ds^2} = \frac{1}{n} (\nabla n - (\nabla n \cdot r_1') r_1') \quad (1-6)$$

25 La determinación del recorrido de los rayos equivale a la solución de un sistema de dos ODEs con valores iniciales. Pueden usarse métodos numéricos estándar para resolver el problema: por ejemplo, un método de Runge-Kutta con control adaptativo del paso de integración coherente con las tolerancias definidas por el usuario.

Con el recorrido de los rayos resuelto, el retardo troposférico puede calcularse como:

$$d_{trop} = \int_a^b n(s)ds + \int_b^c ds - \int_a^c ds \quad (1-1)$$

30 donde a, b y c son como se muestra en la Figura 3(a). El punto b corresponde al punto en el que puede suponerse que la curvatura de los rayos y la refringencia son despreciables, en esta memoria descriptiva por encima de una altitud de 70 km.

35 El procedimiento de trazado de rayos para determinar el recorrido desde el usuario hasta el satélite (a a b en la Fig. 3(a)) comienza en el punto a y supone un ángulo de elevación inicial de  $\alpha_{Aparente}$ . Aunque la posición precisa del satélite y, por lo tanto  $\alpha_{Verdadero}$  es conocida,  $\alpha_{Aparente}$  (de manera que el recorrido de los rayos se cruza con el punto c) inicialmente sólo puede estimarse. Como el trazado de rayos empezará en un ángulo que es, como mucho, una suposición, el recorrido de los rayos resultante en general no se cruzará con el punto c. Obteniendo al menos dos trazados de rayos y usando métodos de interpolación o iterativos es posible establecer un ángulo de exactitud

adecuada a partir del cual se obtiene el retardo troposférico. La presente invención está basada en obtener para su uso un valor más exacto para cada retardo troposférico.

Al menos parte de la determinación del retardo troposférico se basa en el modelado de Predicción Numérica del Tiempo (NWP) que pronostica la evolución de los procesos físicos atmosféricos aplicando las ecuaciones aplicables, incluyendo la conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Los campos tridimensionales de variables continuas incluyendo la humedad, la presión, la temperatura y la velocidad se procesan numéricamente y las características meteorológicas, incluyendo los frentes meteorológicos, son propiedades derivadas secundarias. Puede introducirse una diversidad de mediciones en el modelo numérico incluyendo observaciones de superficie, de radiosonda, y de satélite. Se modela el ciclo del agua incluyendo los efectos de la humedad del terreno, la temperatura de la superficie del mar, la formación de nubes y la precipitación.

Los modelos numéricos pueden ser globales o de área limitada. Los modelos de alta resolución de área limitada a menudo se denominan modelos de mesoescala ya que reflejan características meteorológicas de mesoescala, patrones del tiempo de menos de 100 km de tamaño.

La Oficina Meteorológica del Reino Unido (UKMO) tiene y pone a disposición modelos denominados unificados de datos de mesoescala y globales. Cada uno de los mapas del modelo de NWP define una cuadrícula sobre la región de cobertura del mapa y los modelos proporcionan retardos troposféricos en puntos correspondientes. Por ejemplo, la UKMO tiene dos modelos de NWP, el modelo denominado global y el modelo de mesoescala. El primero tiene una resolución horizontal de 0,8333 grados (5/6 de grado) en longitud y 0,5555 grados (5/9 de grado) en latitud que dan una cuadrícula de 432 x 325 puntos que definen la superficie de la tierra, cada punto asociado con una celda de aproximadamente 60 km a latitudes medias y aproximadamente 90 km en los trópicos. Este mapa global puede usarse, entre otras cosas, para proporcionar puntos límites para un modelo de mesoescala que es un modelo regional centrado en las Islas Británicas y tiene una resolución de 0,11 grados en longitud y latitud (estando girada la cuadrícula con un polo desplazado para mantener la resolución horizontal uniforme) y tiene puntos 146 x 182 puntos de cuadrícula que corresponden a un grupo de celdas de aproximadamente 12 km x 12 km. Ambos modelos tienen 38 niveles verticales y se extienden hasta aproximadamente 40 km.

En cualquier punto de cuadrícula del mapa relevante puede obtenerse el índice de refracción atmosférica (y, por lo tanto, el gradiente del índice de refracción) a partir de los campos de presión, presión parcial de vapor de agua y temperatura del modelo de predicción numérica del tiempo. La refringencia atmosférica puede dividirse en componentes seca (hidrostática) y húmeda. Una sencilla expresión de dos términos que tiene una exactitud de refringencia del 0,5% es:

$$N = N_{seca} + N_{húmeda} = \frac{77,6}{T} \left( P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (1-8)$$

$$N = 10^6 (n - 1) \quad (1-9)$$

donde:

$N$  es la refringencia

$n$  es el índice de refracción

$P$  es la presión atmosférica (en milibares)

$e$  es la presión de vapor de agua (en milibares)

$T$  es la temperatura (en kelvin)

Los campos de predicción numérica del tiempo que han de usarse se expresan en un sistema de coordenadas esféricas, es computacionalmente conveniente, por lo tanto, generar el gradiente de refringencia en coordenadas esféricas ( $r, \theta, \alpha$ ), que pueden convertirse en coordenadas curvilíneas locales ( $u, v, w$ ) usando la siguiente transformación.

$$\nabla n_{uvw} = \frac{\partial n}{\partial r} u + \frac{1}{r \sin \alpha} \frac{\partial n}{\partial \theta} v + \frac{1}{r} \frac{\partial n}{\partial \alpha} w \quad (1-10)$$

Luego se aplica una transformación rotacional adicional al sistema de coordenadas curvilíneas para dar el gradiente en un sistema cartesiano fijo ( $x, y, z$  en la Fig. 3(b)) adecuado para resolver numéricamente las ecuaciones 1-5 y 1-6.

Los valores de campos de NWP entre los puntos de cuadrícula pueden interpolarse linealmente y logarítmica-linealmente. Pueden usarse técnicas de extrapolación lineal y log-lineal para ampliar los campos de NWP más allá del punto de cuadrícula más alto y por debajo del terreno de la NWP. Para una construcción exacta del campo de índice de

refracción, debe tenerse en cuenta la variación de la aceleración gravitatoria con la altura y la latitud. Puede suponerse equilibrio hidrostático. Con el campo de índice de refracción tridimensional ( $n$ ) definido, pueden resolverse las ecuaciones del recorrido de los rayos y calcularse el retardo troposférico usando la Ecuación 1-2.

5 El índice de refracción atmosférica puede dividirse en componentes seca (hidrostática) y húmeda. La componente húmeda posee la mayor variabilidad espacial y temporal. A menudo es conveniente dividir los retardos cenitales totales en retardos cenitales húmedo y seco. El retardo cenital hidrostático puede modelarse exactamente dada una medición de presión de la superficie, sin embargo, el retardo cenital húmedo no puede determinarse exactamente a partir de mediciones de humedad de la superficie, ya que no son representativas de la atmósfera superior.

10 Para ayudar a la comprensión se hace referencia brevemente a la discusión de la presentación de retardos troposféricos como componentes denominadas "húmeda" y "seca" y mapeo de elevación tal como se aplica a los mismos.

Al modelar el retardo troposférico, es conveniente, de acuerdo con el primer modelo, relacionar el retardo troposférico en un ángulo de elevación dado, con el retardo cenital ( $d_{Trop}^z$ ) por medio de una función de mapeo ( $m(\varepsilon)$ ).

15 
$$d_{Trop} = d_{Trop}^z m(\varepsilon)$$

El retardo cenital hidrostático puede modelarse exactamente dada una medición de presión de la superficie pero el retardo cenital húmedo no puede determinarse exactamente a partir de mediciones de la humedad de la superficie, ya que no son representativas de la atmósfera superior. La expresión para el retardo troposférico en un ángulo de elevación dado puede definirse como:

20 
$$d_{Trop} = d_{hid}^z m_{hid}(\varepsilon) + d_{hum}^z m_{hum}(\varepsilon)$$

Se observa que debe tenerse cuidado al aplicar la simplificación de la superposición de retardos atmosféricos hidrostático y húmedo: el recorrido de propagación depende tanto de la componente hidrostática como de la húmeda.

25 Las funciones de mapeo hidrostático y húmedo según la metodología de Niell poseen un alto grado de exactitud sin la necesidad de información meteorológica previa, y la variación del retardo troposférico con el ángulo de elevación puede modelarse eficazmente mediante un desarrollo de fracciones continuas.

30 Las características meteorológicas que poseen una gran variación espacial y/o temporal de retardo troposférico tendrán impacto sobre la exactitud de las correcciones troposféricas obtenidas de la NWP y el ancho de banda requerido para la difusión con base regional o global. La variación temporal y espacial de la refringencia hidrostática es generalmente pequeña, mientras que las características meteorológicas asociadas con cambios rápidos en la humedad atmosférica tienen un impacto significativo sobre la relación de exactitud/ancho de banda.

Las características meteorológicas menores que la resolución del modelo de predicción numérica no se reflejarán exactamente en la corrección troposférica obtenida de la NWP.

35 Un frente meteorológico marca la superficie de contacto entre masas de aire: definido como un gran volumen de aire cuyas propiedades físicas son en gran parte uniformes horizontalmente durante cientos de kilómetros. El frente puede marcar la aparición de cambios abruptos en la humedad atmosférica, la temperatura y, por lo tanto, la refringencia. Los frentes pueden dividirse en tres clasificaciones: cálido, frío y ocluido.

40 El cambio más rápido en el retardo troposférico es probable que ocurra cuando la elevación del satélite y la inclinación del frente son iguales. Generalmente, en el Reino Unido, los sistemas frontales se desplazan a 30-50 kilómetros por hora y pueden tener como resultado variaciones del retardo cenital de 3 cm/hora. Los retardos troposféricos varían de acuerdo con la inclinación respecto a la tierra en la medida en que el trazado de rayos está teniendo lugar a través de características meteorológicas que varían de manera diferente tanto con la altitud como con la posición.

45 El servidor 200 toma así como datos de entrada información del modelo de predicción numérica del tiempo regional o global que incluye datos de presión, temperatura y humedad y calcula el campo de índice de refracción tridimensional a partir de los datos meteorológicos. Los retardos troposféricos húmedo y seco se obtienen a partir de un área cuadrículada, que corresponde a la cobertura de la NWP, a alturas que corresponden a una base de datos del terreno (que puede ser el terreno de la NWP). Estos se transforman en, o se calculan inicialmente como retardos cenitales. Para las mismas ubicaciones de la cuadrícula incluyendo la altura, se calculan retardos cenitales húmedo y seco a partir del primer modelo 210.

50 El servidor, al calcular la diferencia entre el primer modelo y el modelo meteorológico, y de este modo las modificaciones requeridas para los retardos cenitales del primer modelo para hacerlos exactos, obtiene estas diferencias cada una como un cambio fraccional a partir del valor del primer modelo, como un porcentaje.



Esto es beneficioso por dos razones. En primer lugar, se descubre que pese a los valores reales de los retardos y las diferencias, las diferencias se encuentran en un pequeño intervalo, (aproximadamente  $\pm 10\%$ ) a partir de los valores correspondientes del primer modelo; esto permite desarrollar un menor intervalo de valores de corrección que transmitir que si se usaran diferencias de valores reales. En segundo lugar, proporciona mejor corrección de los valores de retardos cenitales del primer modelo por interpolación.

Se transmite una corrección,  $BC_{\%}$ , definida como una corrección porcentual para el primer modelo que incluye la variación del retardo cenital con la altura. Las correcciones son en forma de un conjunto de datos cuadrículados. El usuario puede interpolar linealmente su corrección troposférica a partir de los puntos del conjunto adyacente.

$$BC_{\%}(\phi, \lambda, h_0) = 100 \cdot \frac{ZD_{nwp}^{h_0} - ZD_{apriori}^{h_0}}{ZD_{apriori}^{h_0}}$$

donde,

$ZD_{nwp}^{h_0}$  es el retardo cenital, medido desde la altura  $h_0$ , calculado a partir de la predicción numérica del tiempo,

$ZD_{apriori}^{h_0}$  es el retardo cenital, estimado a partir de la altura  $h_0$ , calculado usando el modelo atmosférico a priori.

$h_0$  es la altura sobre el nivel medio del mar a la que se calcula el porcentaje de corrección de emisión,

$\phi$  es la latitud a la que se calcula el porcentaje de corrección de emisión,

$\lambda$  es la longitud a la que se calcula el porcentaje de corrección de emisión.

El usuario puede calcular el retardo cenital como:

$$ZD_{Usuario}^{h_1} = ZD_{apriori}^{h_1} (1 + BC_{int\%} / 100)$$

donde,

$BC_{int\%}$  es el porcentaje de corrección interpolado,

$h_1$  es la altura del usuario.

Debería observarse que esta técnica evita requerir al receptor de usuario que almacene el conjunto de datos del terreno de la NWP, que, a medida que el modelo de NWP evoluciona, es probable que cambie. Si el usuario está situado en uno de los puntos de cuadrícula que corresponde a las correcciones de emisión y a  $h_1=h_0$ , la corrección troposférica aplicada por el usuario es igual a  $ZD_{nwp}^{h_0}$ .

Se apreciará que, particularmente para comunicación por satélite y más particularmente por satélites GNSS, hay un límite sobre el ancho de banda de transmisión. Aunque las mejoras pueden disminuir esta restricción en el futuro, por ahora es necesario planear transmitir datos a menos de 500 bits/s y típicamente 200 a 250 bits/s. Esto se agrava porque los satélites no están disponibles para transmitir en todo momento, sino sólo dentro de ciertas ventanas de transmisión. Con este fin, es apropiado que los datos de corrección obtenidos de los modelos sean adecuados para la reducción de datos.

Cada uno de los mapas del modelo de NWP define una cuadrícula sobre la región de cobertura del mapa y los modelos proporcionan retardos cenitales en puntos correspondientes, y de este modo se define un conjunto de diferencias (modificaciones o correcciones) que corresponde a dichos puntos geográficos. De este modo, para un conjunto particular de información meteorológica en un momento particular, el servidor puede compilar un grupo de matrices de tales modificaciones de retardo cenital para las diversas ubicaciones de la cobertura del mapa de la organización.

Por ejemplo, como se mencionó anteriormente, la UKMO tiene dos modelos de NWP, el denominado modelo global y el modelo de mesoescala. El primero tiene una resolución que da una cuadrícula de 432 x 325 puntos que define la superficie de la tierra, y el modelo de mesoescala, que es un modelo regional centrado en las Islas Británicas, tiene 146 x 182 puntos de cuadrícula.

Por lo tanto, existe un grupo de matrices bidimensionales de conjuntos de correcciones de puntos, cada uno representado por una palabra de múltiples bits. En particular, esto puede representarse, como en esta realización, por una palabra de 8 bits.

Por lo tanto, en la estación base existe, y basado en el UM de interés, una distribución geográfica de correcciones, esencialmente una imagen de mapa en escala de grises de 8 bits de las correcciones. Hasta el punto en

que ayude a la comprensión, tal mapa es capaz de ser representado visualmente y la Figura 4 comprende tal representación de un mapa de corrección global.

Mientras que la representación visual es realmente/según la información y su difusión, se apreciará que el formato de la información se presta a técnicas de compresión de datos empleadas con tales imágenes bidimensionales para reducir el tamaño del archivo de datos o la información para la difusión.

Puede emplearse un mapa de compresión sin pérdidas o con pérdidas, pero en estas realizaciones el servidor efectúa una compresión de imagen con pérdidas; la compresión preferida es de acuerdo con el estándar JPEG2000 (basado en ondas pequeñas) aunque pueden usarse otros estándares, como JPEG (basado en el coseno) u otras técnicas como submuestreo simple, para reducir el tamaño del archivo de la información.

En este punto es apropiado referirse de nuevo al receptor de usuario. En la medida en que la señal de datos de corrección se recibe desde el GNSS (o el) satélite con las señales habituales, no es necesario ningún conjunto de circuitos especiales. El conjunto de datos (de imagen) de corrección se pasa al procesador de cálculo de retardo cenital que decodifica la imagen para uso de los valores de píxeles individuales como correcciones como se describió anteriormente. Tal decodificación puede llevarse a cabo por una característica de hardware incorporada en el receptor o tal decodificación puede lograrse mediante software cargado dentro del procesador central del receptor; el software para descompresión de archivos de imágenes JPEG es bien conocido.

Por ejemplo, si el tamaño de archivo de la imagen sin comprimir es aproximadamente 141 kb, un factor de compresión de 35 (que reduce el tamaño del archivo a 4 kb) indica poco ruido de compresión, pero en una compresión más grande de 140 (a 1 kb) el ruido de compresión es evidente. Esto también se muestra gráficamente en la Figura 5.

Se apreciará que las condiciones para las funciones de retardo húmedo son mucho más complejas y producen mayores tamaños de archivo que las funciones de retardo seco. Separando así las funciones de retardo húmedo y seco de las que pueden esperarse razonablemente tamaños de archivos comprimidos del orden de 9 kb y 1 kb respectivamente, hay necesidad de difundir aproximadamente 88.000 bits.

Este conjunto de datos puede transmitirse como una sola imagen a todos los satélites de un grupo de constelaciones. En esta realización, la capacidad de efectuar transmisión de datos a una velocidad tan baja se logra efectuando la transmisión a los satélites GNSS, con la totalidad de las imágenes a alta velocidad de transmisión/larga duración o sólo parte de la imagen asociada con la región del mapa asociada con un satélite particular o dividida entre los satélites para que cada uno reciba únicamente la parte relacionada con él, permitiendo un factor adicional de reducción por tres en el tiempo de recepción requerido; es decir, la transmisión y la recepción tardarían aproximadamente 2 minutos a una velocidad de transmisión de datos de 250 bits/s.

De este modo, cada uno de los satélites GNSS puede emitir, con las señales normales, señales de corrección que cada receptor de usuario puede emplear con el modelado de retardo troposférico cenital para efectuar una corrección en los valores empleados con el modelo de acuerdo con condiciones meteorológicas sustancialmente actuales pertenecientes a esta ubicación.

Se apreciará que la velocidad de difusión de datos es de importancia tanto técnica como económica. En primer lugar, la capacidad de transmisión de datos disponibles para asignación de canales en la información adicional es limitada, al menos en las implementaciones actuales del GNSS.

Mientras que para otros tipos de datos la solución puede ser prolongar la duración del hecho de transmisión, en el caso de actualizar datos dependientes del tiempo esto no es una opción adecuada. En la medida en que el tiempo cambia y las características del tiempo se desplazan sobre la superficie de la tierra y, por lo tanto, las cuadrículas empleadas en el modelo meteorológico, existe un elemento de vigencia, es decir, un intervalo de tiempo y/o distancia para el que es válido un valor de retardo troposférico deseado. Se cree que tal tiempo de vigencia es del orden de una hora y/o un tamaño de cuadrícula de 50 a 90 km. Así, si un usuario ha de basarse en valores de retardos troposféricos generalmente meteorológicos (a modo de una corrección) debería estar dentro de tal tiempo de validez o la posición para la que se generó. Por lo tanto, en cuanto a transmisión a un usuario, la transmisión debe ser a tal velocidad que el usuario pueda recibir y procesar la información mientras aún es válida. Las velocidades de transmisión por satélite son tanto de velocidad de transmisión de bits lenta como de disponibilidad intermitente para descargar tal información de corrección. Por lo tanto, es imprescindible efectuar una reducción de datos para adaptar la transferencia de un conjunto de (imágenes) datos de corrección mientras los datos conservan la viabilidad.

Además, el tiempo que se tarda para descargar el conjunto de (imágenes) datos de corrección no debería ser excesivamente prolongado como para hacer que el usuario rehúse esperar el tiempo que tarda efectuar la descarga, descomprimir el archivo de datos de imagen y calcular la posición.

De este modo, es importante efectuar el grado de reducción de datos/compresión de imagen que logra estos diversos objetivos.

Con respecto a la discusión anterior de la viabilidad de los valores de retardos (y las correcciones obtenidas) debería observarse que empleando datos basados en el procedimiento del modelo de NWP es posible, en la práctica, predecir las condiciones del tiempo y obtener retardos troposféricos para cualquier punto dado con anticipación, hasta

varias horas, pese a que la viabilidad del retardo troposférico predicho es relativamente pequeña (como se describió anteriormente) una vez que es actual para el tiempo predicho.

5 Por lo tanto, es posible desarrollar no sólo un conjunto de retardos troposféricos (como retardos troposféricos cenitales) asociados con unos puntos de cuadrícula de las regiones, sino también desarrollar conjuntos correspondientes predichos para el futuro. Es decir, el servidor puede obtener un conjunto de predicciones de conjuntos de correcciones.

Esto puede ser útil si el servidor sólo puede dedicarse periódicamente a desarrollar correcciones de retardo, ya que el conjunto de predicciones puede almacenarse y sus miembros, conjuntos de correcciones para un momento particular, recuperarse cuando ese momento es el actual y el conjunto válido.

10 Alternativamente, tal conjunto de predicciones podría transmitirse y almacenarse dentro del satélite para su recuperación y retransmisión de conjuntos de correcciones en momentos para los que la validez es actual, o almacenarse análogamente en el receptor para su recuperación.

15 Pese a la capacidad tanto de producir como de subir conjuntos de datos de predicción, en la práctica, por el momento, el cuello de botella de la transmisión de datos es la descarga desde el satélite (particularmente un satélite GNSS) hasta el usuario.

20 Para reducir el tamaño del conjunto de datos de correcciones archivados que han de transmitirse por un satélite a un usuario, puede disponerse que transmita sólo correcciones de retardos aplicables a usuarios dentro del alcance, es decir, a la vista del satélite, en tanto que ignorando los datos para usuarios en otros puntos del globo. Esto puede lograrse por el servidor determinando qué parte del conjunto de datos de correcciones subir a cualquier satélite particular, con respecto a usuarios que puedan acceder a él, o el servidor puede subir el conjunto de datos globales pero el satélite determinar qué parte del conjunto retransmitir.

La descripción anterior se ha concentrado en describir la obtención, comunicación y uso de correcciones a retardos troposféricos cenitales que representan las mayores fuentes de errores de posicionamiento no corregibles por el primer modelo de receptor de usuario.

25 Como se mencionó anteriormente, el primer modelo también emplea una función de mapeo que emplea parámetros que también dependen de la atmósfera y son adaptados por elementos usados en el modelo climático, es decir, una función de la época del año (a), la latitud (b) y la altitud (c). Estos también pueden corregirse mediante conjuntos de correcciones obtenidos en el servidor. Esta función de mapeo puede expresarse como:

$$m(\varepsilon, a, b, c) = 1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}} \quad (2-1)$$

$$\frac{\sin(\varepsilon) + \frac{a}{\sin(\varepsilon) + \frac{b}{\sin(\varepsilon) + c}}$$

30 donde  $\varepsilon$  es el ángulo de elevación.

Esto puede expresarse además como:

$$m(\varepsilon, a, b, c) = \frac{1 + \frac{a_0 + \Delta a}{1 + \frac{b_0 + \Delta b}{1 + c_0 + \Delta c}}}{\sin(\varepsilon) + \frac{a_0 + \Delta a}{\sin(\varepsilon) + \frac{b_0 + \Delta b}{\sin(\varepsilon) + c_0 + \Delta c}}} \quad (2-2)$$

donde  $a_0$ ,  $b_0$  y  $c_0$  son los valores del primer modelo y  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$  son correcciones que han de aplicarse a los mismos para efectuar el mapeo de elevación obtenible por el modelo meteorológico.

35 Mediante un procedimiento de ajuste aplicado de manera que se minimiza la suma de los cuadrados de los restos entre la ecuación (2-2) y el rayo trazado (de verdad). Por lo tanto, puede obtenerse un conjunto de valores de correcciones compuestos de  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  y  $\Delta c$  como un archivo de imagen de datos similar o superpuesto sobre el archivo de imagen de datos de corrección cenital aumentando la longitud de palabra del mismo para que incluya elementos de palabra que comprendan estas correcciones.

La anti-codificación de transmisión y recepción es como antes excepto que el receptor ahora tiene valores de corrección para emplear con los parámetros de la función de mapeo por lo cual tanto el retardo cenital como sus valores de mapeo se representan con más exactitud.

Se apreciará que es posible incluir en funciones de mapeo de elevación los parámetros de longitud y momento del día, y el procedimiento anterior para obtener una solución numérica para los mismos puede ampliarse a los mismos.

Aunque es conveniente y ventajoso de muchas maneras emplear la NWP, pueden usarse otras fuentes meteorológicas en combinación con la misma para aumentar los datos disponibles. Cualquier otro modelo meteorológico que tome una vista tridimensional de la atmósfera puede emplearse en lugar de la NWP. Como se apreciará, los retardos troposféricos obtenidos por NWP se definen para una cuadrícula que tiene un tamaño de celda limitado por el modelo de NWP en uso. Muchas características del tiempo que tienen un alto contenido de humedad y pueden afectar al retardo troposférico, como las tormentas, pueden estar por debajo del umbral de resolución del modelo de NWP. Sin embargo, existen varias fuentes de datos como las imágenes por satélite de una naturaleza esencialmente dimensional que pueden identificar con alta resolución la existencia de tales características y la información contenida en las mismas puede emplearse para variar los valores de NWP para una celda particular de la cuadrícula para tener en cuenta tales características a través de la cuadrícula de NWP.

La realización descrita anteriormente está pensada para permitir a un receptor de usuario que tenga un primer modelo no meteorológico incorporado determinar su posición con más exactitud que los que es posible mediante el uso del modelo solo. Se apreciará que parte de la solución de cálculo es obtener unos valores de tiempo hasta la exactitud permitida por la interpretación del modelo del retardo troposférico. Para algunos usuarios, es la función de tiempo la que tiene importancia y tal usuario puede conocer la ubicación precisa de un receptor fijo.

La exposición anterior puede resumirse de la siguiente manera:

El servidor de corrección troposférica toma como entrada de datos información del modelo de predicción numérica del tiempo regional o global que incluye datos de presión, temperatura y humedad. Podrían usarse datos meteorológicos adicionales, por ejemplo estimaciones de vapor de agua de alta resolución a partir de observaciones por satélite, para aumentar los datos de NWP y ayudar a la corrección de características meteorológicas muy pequeñas (por ejemplo, tormentas convectivas locales).

El servidor de corrección troposférica calcula el campo de índice de refracción tridimensional a partir de los datos meteorológicos. Se calculan los retardos cenitales húmedo y seco para un área cuadrículada, que corresponde a la cobertura de la NWP, a alturas que corresponden a una base de datos del terreno (que puede ser el terreno de la NWP). En el caso del servidor 200, para las mismas ubicaciones de la cuadrícula incluyendo la altura, los retardos cenitales húmedo y seco se calculan a partir de un modelo previo. El servidor calcula luego la diferencia entre los retardos cenitales previos y los basados en observación meteorológica como porcentaje. Luego, el conjunto de datos cuadrículados de las correcciones de porcentaje húmedo y seco se cuantifican y comprimen usando una técnica de compresión de imagen con pérdidas. La imagen comprimida, incluyendo los datos requeridos para decodificación de imagen, se difunde luego a la estación de enlace ascendente por satélite (parte de la infraestructura terrestre del sistema de navegación por satélite). Los datos de imagen se refieren al estado atmosférico actual y también pueden incluir varias horas de imágenes predichas. La subida de datos puede ser desde una o más estaciones de enlace ascendente y puede ser transmitida hacia uno o más satélites. Los datos pueden ser de naturaleza global o regional. Los datos enviados a cada satélite pueden ser de área limitada, de manera que la constelación de satélites proporciona cobertura global a pesar de los datos de cada satélite.

La subida por lotes a los satélites de varias horas de imágenes predichas puede usarse para reducir la carga sobre la infraestructura terrestre del sistema de navegación por satélite. Cada satélite emite la imagen troposférica más aplicable y más actual como parte de los datos de navegación del sistema de navegación por satélite.

El sistema de seguimiento de señales de navegación por satélite del usuario recibe las imágenes troposféricas, los datos de navegación estándar incluyendo parámetros de determinación de órbitas de satélites y realiza observaciones de pseudoalcance y portadora acumulada. Se descomprimen las imágenes comprimidas de corrección troposférica húmeda y seca. Se calculan los retardos cenitales húmedo y seco anteriores. El modelo de retardo cenital húmedo y seco anterior es el mismo que el usado en el servidor de corrección troposférica. Los retardos cenitales húmedo y seco del usuario, que corresponden a la ubicación del usuario, se calculan luego usando interpolación entre puntos de datos cuadrículados adyacentes.

Los retardos de propagación cenital húmedo y seco se convierten luego en correcciones de pseudoalcance específico del satélite usando funciones de mapeo de elevación por satélite. Por último, se calcula la solución de navegación estándar, pero con el añadido de correcciones de retardo troposférico basado en observación meteorológica.

Una discusión más exhaustiva sobre los factores que afectan a la implementación de un sistema de posicionamiento, las técnicas de predicción numérica del tiempo y la obtención de información de retardo troposférico corregido a partir de mediciones meteorológicas, y basado puede hallarse en el documento "Tropospheric Delay Modelling and Correction Dissemination using Numerical Weather Prediction Fields", de M Powe, J Butcher y J Owen dado en las Actas del GNSS 2003.

5

## REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de obtención de datos de retardos troposféricos para uso al aumentar la exactitud con la que puede determinarse la ubicación de un receptor de usuario (220) en un sistema global de navegación por satélite (GNSS) (100), comprendiendo el procedimiento las etapas de
- 5 generar un primer conjunto de valores de retardos troposféricos aproximados aplicables a diversas ubicaciones geográficas del receptor de usuario a partir de un primer modelo (230), que es conocido en sí, en una ubicación (200) alejada de dicho receptor de usuario;
- generar un segundo conjunto de valores de retardos troposféricos que sean exactos y aplicables a dichas diversas ubicaciones geográficas del receptor de usuario a partir de un segundo modelo, que es un modelo meteorológico en una ubicación alejada de dicha receptor de usuario;
- 10 desarrollar un conjunto de modificaciones de valores de retardos troposféricos (260) aplicables a dicho primer modelo de manera que juntos, dicho primer modelo y dichas modificaciones de valores de retardos troposféricos pueden proporcionar un conjunto de valores de retardos troposféricos sustancialmente en concordancia con dicho segundo conjunto de valores de retardos troposféricos, y
- 15 comunicar dicho conjunto de modificaciones de valores de retardos troposféricos a dicho receptor de usuario para modificar los valores de retardos troposféricos aproximados de dicho receptor de usuario.
2. Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que el primer modelo está basado en parámetros no meteorológicos.
3. Un procedimiento según la reivindicación 2, en el que dichos parámetros no meteorológicos comprenden al menos uno de la época del año, la latitud y la altitud.
- 20 4. Un procedimiento según la reivindicación 3, en el que dichos parámetros no meteorológicos comprenden al menos uno de la longitud y el momento del día.
5. Un procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dichos conjuntos de valores de retardos troposféricos comprenden valores de retardos troposféricos cenitales.
- 25 6. Un procedimiento según la reivindicación 5, en el que los primeros modos contienen una función de mapeo que relaciona valores de retardos troposféricos en un ángulo de elevación dado con los valores de retardos troposféricos cenitales.
7. Un procedimiento según la reivindicación 6, en el que dicho conjunto de modificaciones de valores de retardos troposféricos comprende un conjunto de modificaciones para uso con la función de mapeo del primer modelo.
- 30 8. Un procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que las modificaciones de valores de retardo son las diferencias entre valores correspondientes de
- el primer conjunto de valores de retardos troposféricos aproximados atribuibles al primer modelo y
  - el segundo conjunto de valores de retardos troposféricos exactos atribuibles al segundo modelo, que es un modelo meteorológico.
- 35 9. Un procedimiento según la reivindicación 8, en el que las modificaciones de valores de retardos se expresan como un cambio fraccional a partir de los valores del primer conjunto de valores de retardos troposféricos.
10. Un procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que el conjunto de modificaciones de valores de retardos se expresa como un grupo de datos, teniendo cada modificación un valor que se determina para un punto de cuadrícula individual sobre al menos una parte de la superficie de la tierra.
- 40 11. Un procedimiento según la reivindicación 10, en el que dicho conjunto de modificaciones se expresa como un archivo de datos digitales.
12. Un procedimiento según la reivindicación 11, en el que dicho archivo de datos digitales es una imagen en escala de grises de palabras de múltiples bits, representando cada palabra una ubicación de la región.
- 45 13. Un procedimiento según la reivindicación 12, que comprende las etapas adicionales de aplicar reducción de datos (270) al conjunto de modificaciones de valores de retardos troposféricos para obtener un conjunto reducido de modificaciones de valores de retardos troposféricos para la comunicación a un usuario.
14. Un procedimiento según la reivindicación 13, en el que la reducción de datos es un procedimiento de compresión de imagen.
15. Un procedimiento según la reivindicación 13 o la reivindicación 14, que comprende reducir el tamaño de los datos mediante reducción de datos con pérdidas.

16. Un procedimiento según la reivindicación 15, que comprende efectuar reducción de datos reduciendo el archivo de datos de conjuntos de correcciones según un estándar JPEG 2000 o JPEG 90.
17. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dichos valores de retardos troposféricos exactos se obtienen mediante una técnica de trazado de rayos.
- 5 18. Un procedimiento según la reivindicación 17, en el que dichos valores de retardos troposféricos exactos se obtienen mediante generación de campo de índice de refracción tridimensional.
19. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicho modelo meteorológico está basado en datos de predicción numérica del tiempo (NWP) para una región de la tierra.
- 10 20. Un procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 19, en el que dicho modelo meteorológico o cada una de dichas modificaciones de valores de retardos troposféricos es aumentado por datos meteorológicos observados directamente.
21. Un procedimiento según la reivindicación 20, en el que dichos datos observados directamente tienen una resolución menor que los datos de NWP.
- 15 22. Un procedimiento según la reivindicación 20 o la reivindicación 21, en el que dichos datos meteorológicos observados directamente se obtienen como un conjunto de datos relacionados con una región de la superficie de la tierra que corresponde a al menos parte de los datos de NWP.
23. Un procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 19 a 22, en el que dicha región es sustancialmente global.
- 20 24. Un procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 23, que comprende predecir valores de retardos troposféricos exactos en el futuro a partir de dicha información meteorológica y desarrollar un conjunto de predicciones de modificaciones de valores de retardos para dicha región geográfica de la superficie de la tierra, por medio de lo cual cada miembro de dicho conjunto de predicciones describe una modificación de valor de retardo que se vuelve actual como una función de tiempo desde el desarrollo.
- 25 25. Un procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, por medio del cual el conjunto de modificaciones de valores de retardos troposféricos se comunica a dicho receptor por un canal de comunicación o enlace de datos.
26. Un procedimiento según la reivindicación 25 cuando depende de la reivindicación 24, que comprende comunicar dicho conjunto de predicciones de modificaciones de valores de retardos como un lote y usar miembros del conjunto cuando el momento para el cual cada uno fue predicho se vuelve actual con respecto al pronóstico.
- 30 27. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende comunicar al menos parte del conjunto de modificaciones de valores de retardos a al menos un satélite en órbita (110<sub>1</sub>, 110<sub>2</sub>,...) y retransmitir al menos parte de dicho conjunto a dicho receptor desde dicho satélite en órbita.
28. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que sólo esa parte del conjunto de modificaciones de valores de retardos que puede ser utilizada por un receptor en una región dentro del alcance de un satélite (110<sub>1</sub>, 110<sub>2</sub>,...) se comunica a dicho satélite.
- 35 29. Un procedimiento según la reivindicación 13 y cualquiera de las reivindicaciones subordinadas de la misma, que comprende aplicar reducción de datos suficiente para permitir la transmisión de todo o parte de dicho conjunto de modificaciones de valores de retardos utilizables por dicho receptor dentro de un tiempo dictado por la disponibilidad de transmisión y la velocidad de transmisión del satélite, siendo dicho tiempo sustancialmente inferior al tiempo de validez de la información meteorológica usada por el modelo meteorológico.
- 40 30. Un procedimiento según la reivindicación 29, en el que la reducción de datos está dispuesta para permitir la transmisión de datos de modificación de valor de retardo a un receptor a una velocidad de transmisión de datos comprendida entre 25 y 500 bits/s.
- 45 31. Un procedimiento según la reivindicación 30, en el que la reducción de datos está dispuesta para permitir la transmisión de datos de modificación de valor de retardo comprendida entre 200 y 250 bits/s.
32. Aparato que comprende medios adaptados para llevar a cabo los procedimientos de cualquiera de las reivindicaciones 1-31.
33. Un receptor de sistema global de navegación por satélite (GNSS) (220) que puede calcular, con mayor exactitud, la ubicación de dicho receptor, o el tiempo actual, comprendiendo dicho receptor
- 50 medios (130) accionables para generar, a partir de un modelo embarcado de datos no meteorológicos, un primer conjunto de valores de retardos troposféricos aproximados aplicables a señales recibidas desde una pluralidad de dichos satélites y calcular una posición aproximada del receptor en relación con la superficie de la tierra o el tiempo,

**caracterizado porque** el receptor también comprende

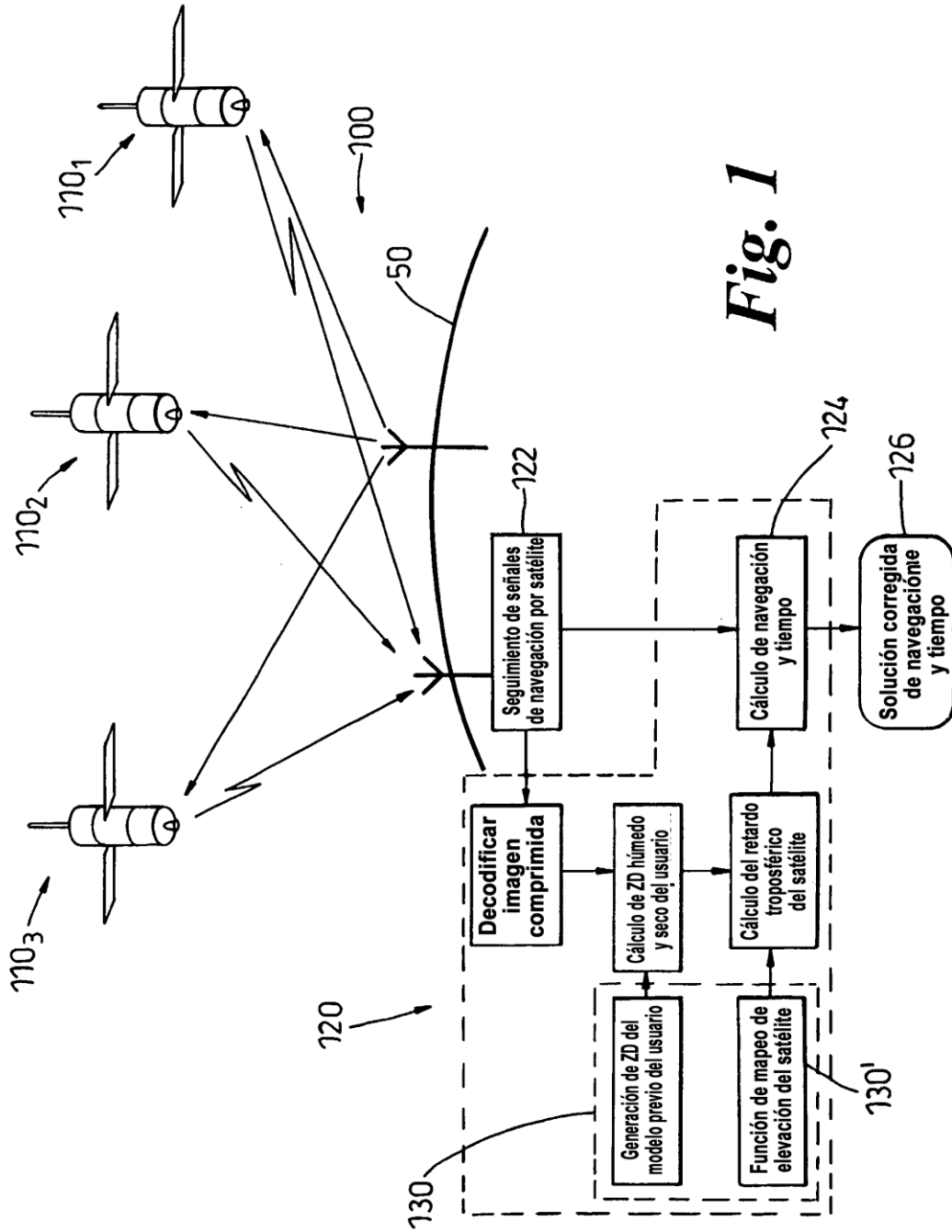
medios accionables para recibir un conjunto de modificaciones de valores de retardos troposféricos obtenidos previamente a partir de datos meteorológicos,

5 medios para corregir el primer conjunto de valores de retardos troposféricos aproximados de acuerdo con el conjunto de modificaciones de valores de retardos troposféricos,

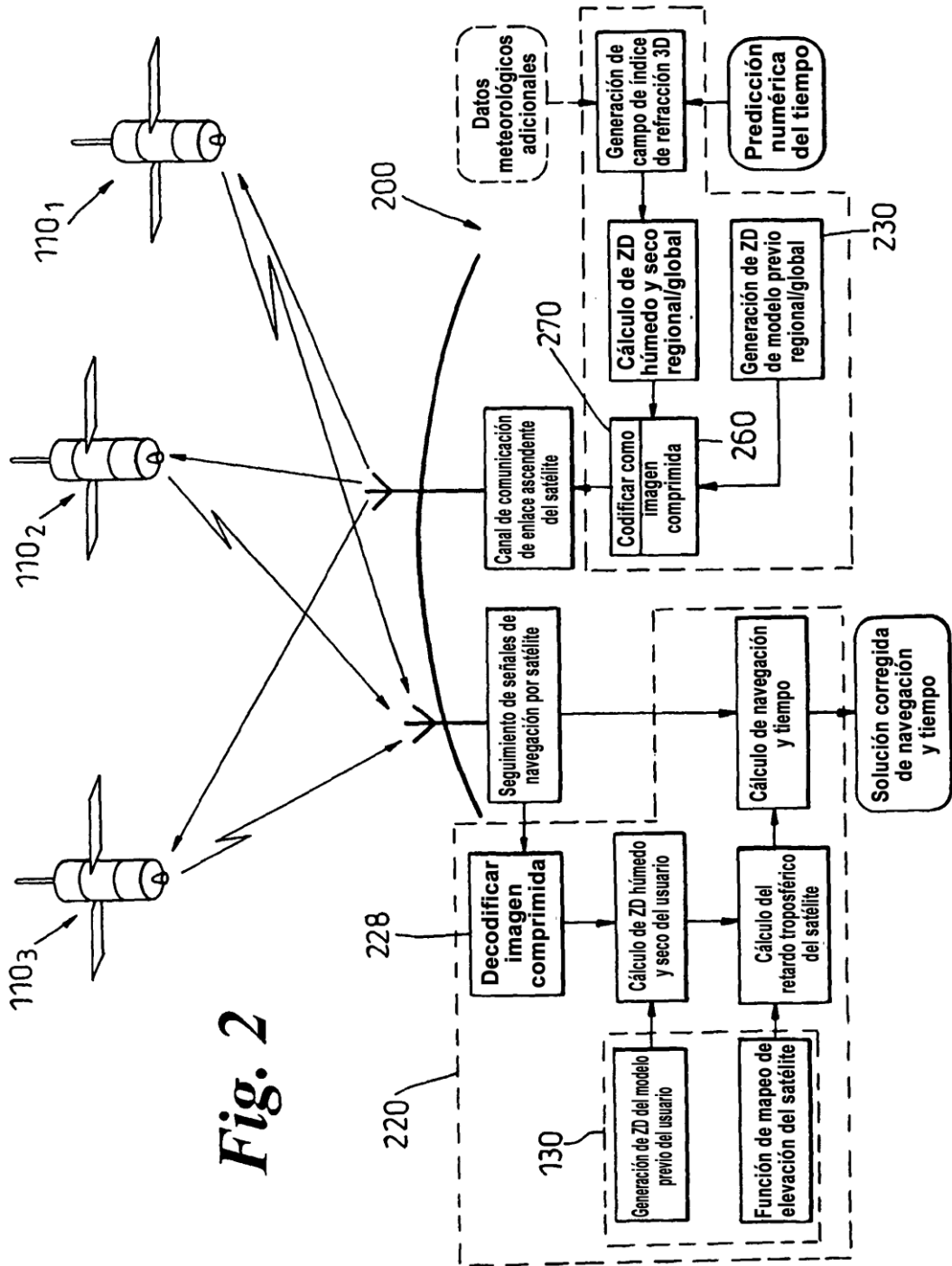
y medios para calcular la ubicación del receptor o el tiempo.

10 34. Un receptor según la reivindicación 33, en el que dichos medios para corregir el primer conjunto de valores de retardos troposféricos aproximados son accionables para efectuar una de una interpolación y una extrapolación de dichas modificaciones según la posición calculada del usuario en relación con ubicaciones para las cuales se han obtenido las modificaciones.

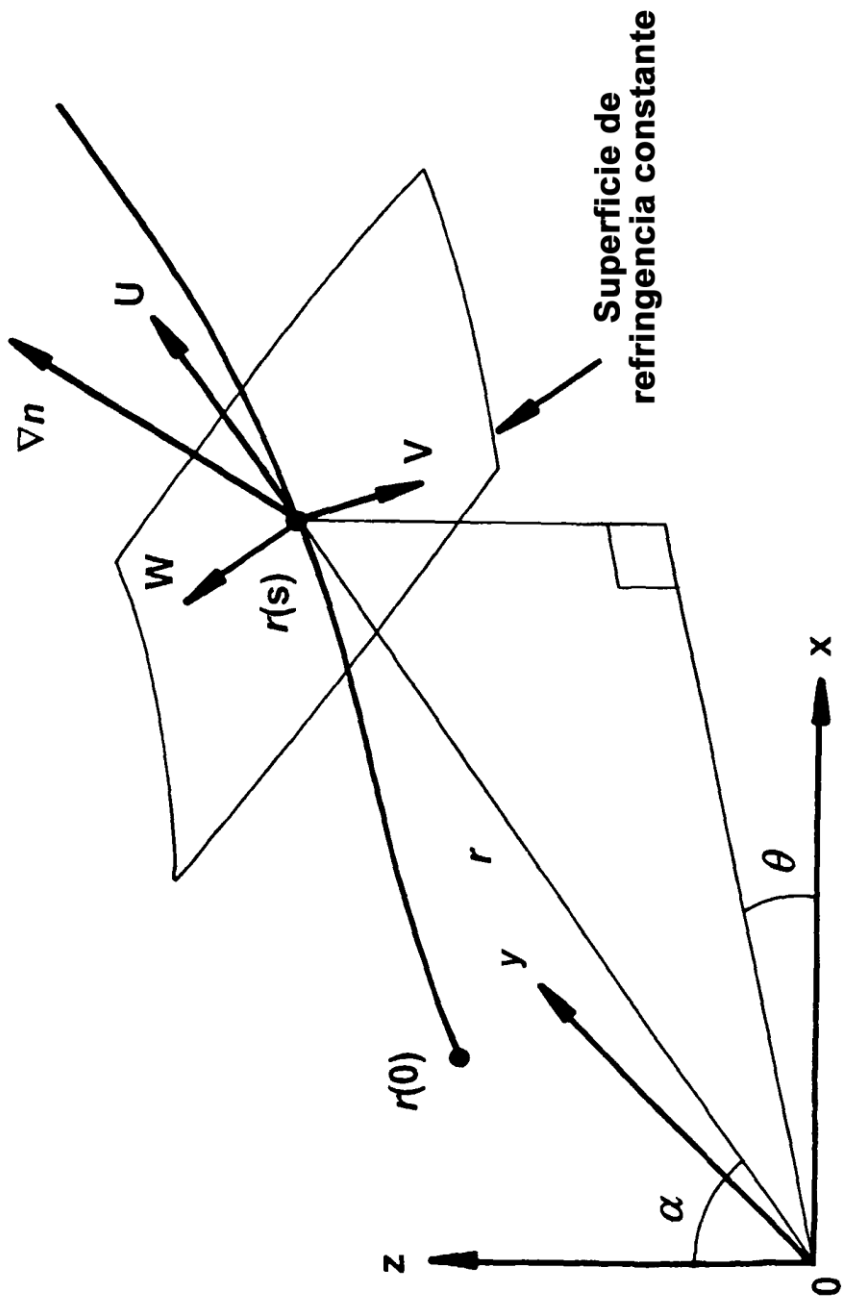




**Fig. 1**



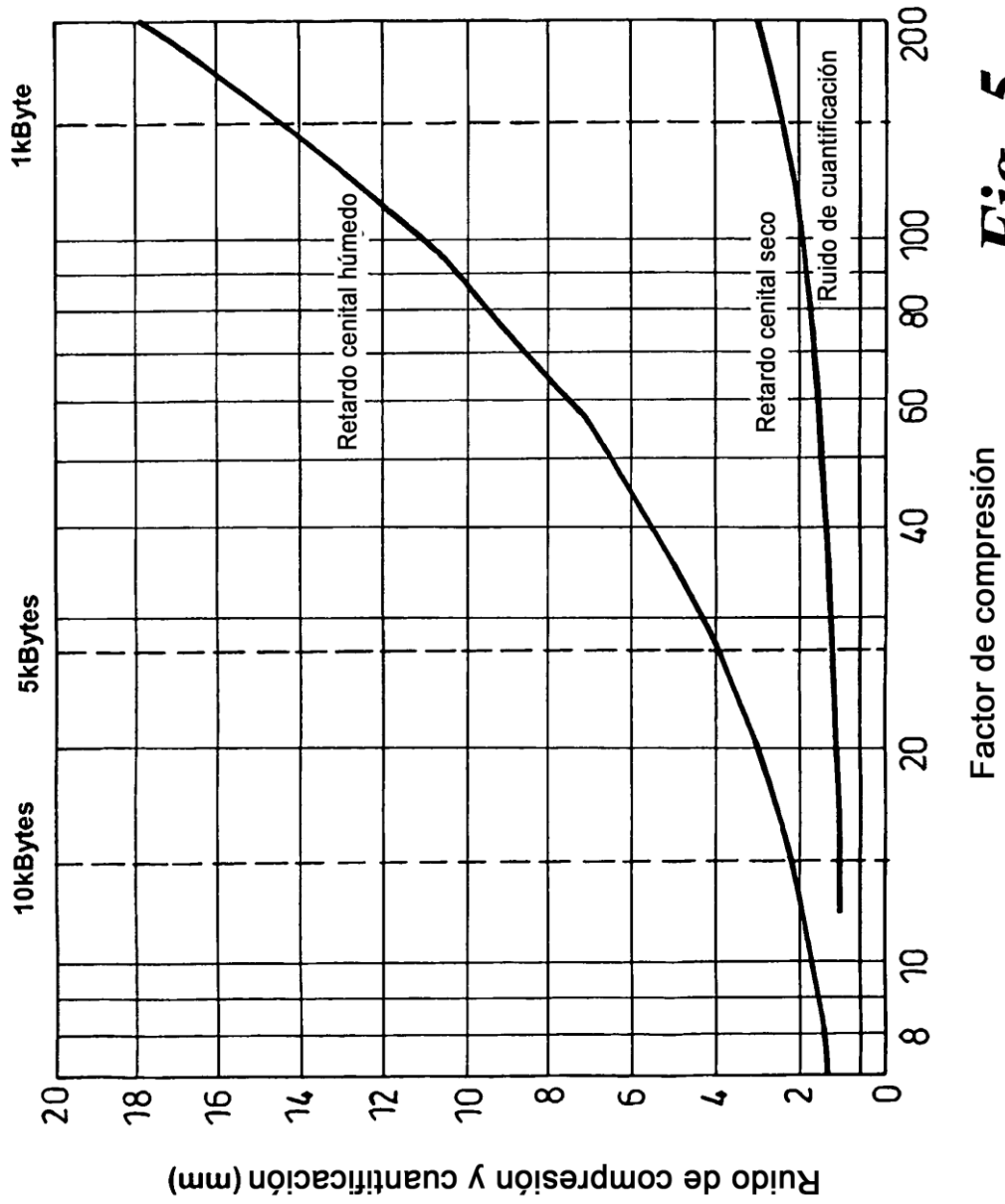




*Fig. 3(b)*



*Fig. 4*



**Fig. 5**

Factor de compresión

#### REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

Esta lista de referencias citadas por el solicitante es sólo por conveniencia del lector. No forma parte del documento de patente europea. Aun cuando se ha tenido mucho cuidado al compilar las referencias, no pueden excluirse errores u omisiones y la Oficina Europea de Patentes declina toda responsabilidad a este respecto.

#### Documentos de patente citados en la descripción

- WO 03069366 A1 [0008]
- US 20020199196 A [0014]

#### Bibliografía no de patentes citada en la descripción

- Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning Systems/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, *RTCA D0229C*, Noviembre de 2002 [0011]
- Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, Febrero de 1996, vol. 101 (B2), 3227-3246 [0012]
- **M Powe; J Butcher; J Owen.** Tropospheric Delay Modelling and Correction Dissemination using Numerical Weather Prediction Fields. *Actas del GNSS*, 2003 [0109]