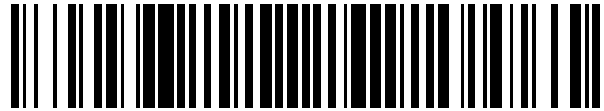


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 423 008**

51 Int. Cl.:

**G01S 19/07** (2010.01)

**G01S 19/23** (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.04.2007** **E 07006840 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.05.2013** **EP 1843166**

54 Título: **Determinación de errores de propagación**

30 Prioridad:

**03.04.2006 DE 102006016281**

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

**17.09.2013**

73 Titular/es:

**DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND  
RAUMFAHRT E.V. (100.0%)  
LINDER HÖHE  
51147 KÖLN, DE**

72 Inventor/es:

**JAKOWSKI, NORBERT, DR. y  
HOQUE, MOHAMMED MAINUL**

74 Agente/Representante:

**IZQUIERDO FACES, José**

**ES 2 423 008 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

Determinación de errores de propagación

5 La invención se refiere a un procedimiento y una disposición para la determinación de un error en la propagación de ondas electromagnéticas en una atmósfera que presenta partículas eléctricamente cargadas.

10 Las ondas de radio electromagnéticas de todos los sistemas de comunicación y/o navegación asistidos por satélites están sujetos a la interacción con el plasma de la ionosfera. La interacción es dispersiva, es decir, fuertemente dependiente de la frecuencia (proporcional a  $1/f^2$ ) y a frecuencias de oscilación  $f$  con más de 10 GHz prácticamente insignificante.

15 En la región de banda L utilizada por el GNSS (sistema global de navegación por satélite, de Global Navigation Satellite System) no pueden despreciarse los efectos de propagación ionosféricas no rectilíneos. Por este motivo es importante el conocimiento del estado actual de la ionosfera y la toma de medidas de la compensación de errores.

20 La base de la determinación de la posición con GNSS son mediciones de la fase de código y portadora. La fase medida se determina por la longitud de fase  $\int n ds$  en la que  $n$  designa el índice de refracción ionosférico y  $s$  el elemento de la trayectoria de rayos (o trayectoria de propagación). En la óptica geométrica se determina la propagación de la radio de onda, además del principio de Fermat (el principio de la llegada más corta), de manera que puede encontrarse la trayectoria de propagación con el mínimo de longitud de fase. Esto conduce a un índice de refracción  $n$  distinto de 1 a una trayectoria de rayos prolongada o error de retardo en comparación con el caso de comparación de la propagación de la onda a vacío. Por último lugar, en un GNSS, el error repercute falseando la distancia determinada del receptor de las señales entre el satélite y el receptor. Por tanto, en esta descripción se habla por razones de sencillez de un error de la trayectoria de rayos, incluso cuando la trayectoria de rayos prolongada real que han recorrido las ondas electromagnéticas en su trayectoria de la fuente de rayos al receptor no sea la única causa de error. Como causas de error se consideran especialmente una curvatura de la trayectoria de rayos y una interacción de la onda con el medio que recorre la onda. Sin embargo, la invención no se limita a GNSS, incluso cuando se hable de un error de la trayectoria de rayos.

30 Para el índice de refracción es válida una relación no lineal compleja de distintos parámetros geofísicos (estado de ionización, campo magnético) y parámetros geométricos (elevación, acimut). La primera aproximación del índice de refracción causa el errores de distancia en el orden de magnitud de hasta 100 m que son eliminables en GNSS mediante mediciones de dos frecuencias. Los procedimientos correspondientes son conocidos. Los errores de mayor orden en el índice de refracción ( $\sim 1/f^m$ ,  $m > 2$ ) se encuentran en el orden de magnitud de hasta varios centímetros.

40 Ya se ha propuesto mediante la medición y evaluación de señales que se recibieron a distintas frecuencias portadoras (frecuencias de oscilación) corregir los errores de primer orden ( $m=2$ ), así como los errores debidos a la trayectoria de propagación curvada. Sin embargo, existe además la necesidad de una reducción del error residual de segundo orden ( $m=3$ ) que en GNSS puede encontrarse, por ejemplo, en el orden de magnitud de varios centímetros. Sin embargo, la invención no se limita a GNSS. Más bien, la invención también puede usarse para la corrección, por ejemplo, en la detección remota mediante radar, por ejemplo, en la corrección de los efectos de la rotación de Faraday en el radar de banda L.

45 Mientras que los errores de primer orden  $d_1^{(1)}$  ( $m=2$ ) pueden eliminarse relativamente fácilmente mediante una combinación lineal de mediciones de fase de dos frecuencias, esto no es posible en los errores de mayor orden y la disponibilidad de solo dos frecuencias como en GPS (sistema de posicionamiento global, de Global Positioning System). Por este motivo, el problema se ha ignorado hasta ahora en la práctica de la medición. Los errores resultantes de esto quedan generalmente sin ser reconocidos. Se manifiestan en posiciones no inequívocas o falsamente determinadas. En series de medición más largas como es habitual en la geodesia, estos errores pueden determinarse incluso en parte de manera que apenas se noten.

55 Bassieri S. y col.: "Higher-order ionospheric effects on the Global Positioning System observables and means of modeling them" Manuscripta Geodaetica, tomo 18, nº 5 1993, páginas 280-289, XP009087044 ISSN: 0340-8825, describen efectos ionosféricos de mayor orden sobre las magnitudes de observación de sistemas de posicionamiento globales y medios de modelado. Se estima que el efecto de la ionosfera sobre las señales de GPS para los usuarios de la tierra se mueve basándose en un modelo realista de la densidad electrónica de la ionosfera y utilizando una aproximación del momento dipolar para el campo magnético de la tierra. La ecuación 21 del documento describe una aproximación del retraso ionosférico de segundo orden. La aproximación depende de la latitud magnética  $\theta_m$ .

65 Fraile-Ordóñez J.: "Real-time TEC determination for ionospheric modeling in WADGPS" Proceedings of the institute of Navigation (ION) GPS, tomo 2, 1995, páginas 1193-1197, XP002385759 describe un algoritmo para el cálculo en tiempo real del contenido electrónico total (TEC) ionosférico. El cálculo se basa en un algoritmo que se aplica en

mediciones de GPS de dos frecuencias.

5 Es un objetivo de la presente invención especificar un procedimiento y una disposición del tipo mencionado al principio que haga posible una determinación más precisa del error de la trayectoria de propagación o una determinación del error residual. A este respecto se renunciará opcionalmente a la utilización de dispositivos de medición adicionales y a trayectos de medición que se realicen, por ejemplo, con ayuda de satélites adicionales.

Las reivindicaciones adjuntas definen el ámbito de protección.

10 La invención se basa en la idea de que el contenido electrónico de la atmósfera, especialmente de la ionosfera, puede determinarse de forma fidedigna y con bajo coste técnico de aparatos.

15 Para esto pueden usarse especialmente señales que se recibieron a diferentes frecuencias portadoras al final de su trayectoria de propagación por la atmósfera y cuya trayectoria de propagación va a determinarse o a corregirse para determinar una medida del contenido y/o la densidad de partículas eléctricamente cargadas en la atmósfera. Esta medida de carga hace posible determinar con más precisión y opcionalmente corregir los errores de la trayectoria de propagación.

20 Una ventaja de esta manera de proceder consiste en que la medida de carga se determina exactamente para aquella región de la atmósfera de la que es importante en la determinación de errores. Sin embargo, también es posible determinar la medida de carga mediante mediciones separadas (con respecto a la atmósfera) independientemente del sitio o al menos en función de la región y ponerlas a disposición para la determinación de errores. En el caso de la determinación de la medida de carga puede recurrirse a su vez a señales que se transmitieron y recibieron a distintas frecuencias portadoras. Como medida de carga se usa preferiblemente el contenido electrónico de una trayectoria de propagación (o de una parte de la trayectoria) recorrida por la señal respectiva. El contenido electrónico (lineal referido a una única dimensión espacial) se define como la integral de la densidad electrónica sobre la trayectoria de propagación o sobre la parte de la trayectoria. A una densidad electrónica localmente poco variable también puede determinarse la densidad electrónica incluso como medida de carga y usarse para la corrección de errores o puede usarse un valor medio de la densidad electrónica.

30 Otra ventaja consiste en que no debe formarse una combinación lineal de señales de dos o varias frecuencias para determinar los errores o los errores residuales. A una combinación lineal tal empeora la relación de señal/ruído.

35 Especialmente se propone lo siguiente: un procedimiento para la determinación de un error en la propagación de ondas electromagnéticas en una atmósfera que presente partículas eléctricamente cargadas, en el que

- se evalúa una primera señal, transmitiéndose la primera señal mediante una primera onda electromagnética por la atmósfera y presentando la primera onda electromagnética una primera frecuencia de oscilación,
- 40 - se evalúa al menos una segunda señal, transmitiéndose la segunda señal mediante una segunda onda electromagnética por la atmósfera y presentando la segunda onda electromagnética una segunda frecuencia de oscilación que es distinta de la primera frecuencia de oscilación,
- se determina una medida para un contenido y/o una densidad de partículas eléctricamente cargadas (medida de carga) a partir de la primera señal y a partir de la segunda señal,
- 45 - la medida de carga se usa para determinar un término de una trayectoria de propagación de una onda electromagnética o un término de una magnitud equivalente a la trayectoria de propagación (por ejemplo, un tiempo de propagación), dependiendo el término de la frecuencia de oscilación.

50 En el caso de la trayectoria de propagación cuyo error va a determinarse puede tratarse especialmente de la trayectoria de propagación de señales que se usa para determinar la medida de carga. En general, los puntos finales de la trayectoria de propagación están definidos por el sitio del emisor (por ejemplo, un satélite del GNSS) y por el sitio del receptor.

55 La consideración de los efectos de errores de la trayectoria de mayor orden (por ellos se entiende especialmente efectos que son proporcionales al valor inverso de potencias superiores a la segunda potencia de la frecuencia de oscilación) conduce a un beneficio de precisión y efectividad (por ejemplo, tiempos más cortos de determinación de errores y corrección) en aplicaciones de navegación asistida por satélites precisas y que requieren una alta fiabilidad. La importancia de esta ventaja aumenta al aumentar los requisitos de futuras aplicaciones para determinar posiciones fiables y precisas en tiempos cada vez más cortos con GNSS (por ejemplo, para el control de máquinas).

60 En el caso del término puede tratarse especialmente de un término que depende de la tercera potencia de la frecuencia de oscilación. Es un conocimiento en el que se basa la invención que con el procedimiento de determinación de errores descrito en esta descripción puede determinarse especialmente el error de segundo orden ( $m=3$ ), formándose este error esencialmente por el hecho de que mediante la interacción de la onda electromagnética con el medio por el que se propaga la onda, especialmente mediante la interacción con el plasma de la ionosfera, tiene lugar una prolongación del retardo (retraso) en comparación con el caso hipotético en el que la onda se propague por el vacío.

Se prefiere usar este término (de forma más general: el término respectivo) para corregir un resultado para la trayectoria de propagación, especialmente para corregir la trayectoria de propagación linealmente considerada y/o para mejorar una corrección de primer orden (proporcional al valor inverso de la segunda potencia de la frecuencia de oscilación).

5 Según una forma de realización preferida, la propagación de la señal cuya trayectoria de propagación se determinará se simula mediante un cálculo de modelo y como resultado de la simulación se obtiene el error de la trayectoria de propagación. Esto incluye el caso en el que el error sea un resultado intermedio de la simulación y la simulación da una magnitud corregida con el error. Así pueden determinarse (estimarse) aproximadamente  
10 especialmente errores de mayor orden considerando las circunstancias locales, regionales y/o globales con suficiente precisión (por ejemplo, errores residuales < 2 mm para aplicaciones regionales). La simulación tiene la ventaja de que puede aplicarse de manera sencilla en la práctica, por ejemplo, la práctica en la determinación local mediante un GNSS. Especialmente pueden definirse coeficientes del modelo para los que pueden determinarse valores numéricos en función de las condiciones concretas respectivas de la propagación de señales y ponerse a  
15 disposición de los usuarios.

La medida de carga que es una información sobre el estado de ionización actual de la atmósfera, especialmente de la ionosfera, puede determinarse especialmente de las siguientes formas:

- 20 - En el propio sitio del usuario (es decir, por ejemplo, automáticamente durante una operación de un receptor de señales de GNSS para determinar una posición global). Esto se basa en el conocimiento de que el usuario recibe las señales de GNSS a dos frecuencias portadoras, fundamentalmente está incluso en situación de obtener información sobre el estado de ionización.
- 25 - En un sitio alejado del usuario o receptor, por ejemplo, mediante un servicio de datos de la ionosfera que proporciona la información de la ionosfera necesaria.
- En un sitio alejado del usuario o receptor también puede determinarse opcionalmente además el error y/o realizarse la corrección del error, por ejemplo, mediante un servicio de datos de la ionosfera. En el sitio alejado,  
30 las informaciones ya pueden asignarse a la trayectoria de propagación de la onda concreta cuyo error se determinará.

De forma más general, la medida de carga y/o una información sobre un campo magnético que influye en la propagación de la primera y/o segunda señal se usan como magnitudes de entrada del cálculo de modelo. La  
35 consideración del campo magnético sirve para la determinación del error causado por el término magnetoiónico y su modelación en el algoritmo de corrección. A este respecto existen especialmente las siguientes posibilidades:

- 40 - Las magnitudes de entrada o al menos una parte de las magnitudes de entrada de la simulación se determina/n por un dispositivo en el sitio de un receptor, recibiendo el receptor la onda electromagnética para la que se determinará el error de propagación.
- Las magnitudes de entrada o al menos una parte de las magnitudes de entrada se determina/n en un sitio que está alejado del sitio de un receptor que recibe la onda electromagnética.
- 45 - La determinación del término y opcionalmente la corrección del error de la trayectoria de propagación también se realiza en un sitio que está alejado del sitio de un receptor que recibe la onda electromagnética.

La magnitud de entrada o las magnitudes de entrada puede/n transmitirse, por ejemplo, mediante radio (por ejemplo, una red de telefonía móvil) o mediante una red de transferencia de datos (por ejemplo, internet) al sitio del receptor.  
50 Para la determinación del error se sigue especialmente un planteamiento que se basa completamente en consideraciones de la física de la propagación de radiación que considera preferiblemente informaciones sobre el campo magnético y sobre el estado actual de la atmósfera. Por ejemplo, por los cálculos de modelo anteriormente descritos que pueden ejecutarse asistidos por ordenador, la determinación y corrección de errores puede integrarse en un proceso de procesamiento de datos (con excepción de la corrección de errores de mayor orden en sí  
55 conocidos) en la determinación de la posición en GNSS. El procedimiento total de determinación y/o corrección de errores transcurre preferiblemente automáticamente. Una aplicación preferida se refiere al llamado procedimiento RTK (cinemática en tiempo real, Real Time Kinematik) en las redes de referencia para GNSS. Las redes de referencia ponen a disposición varias estaciones de recepción de GNSS que proporcionan informaciones a otros usuarios de GNSS en el entorno cercano de la estación respectiva que mejora la determinación de la posición en sí  
60 independiente (por ejemplo, mediante un receptor de GPS sencillo convencional) de otros usuarios.

El procedimiento puede presentar distintas etapas parciales que están implementadas en módulos de una disposición para la realización del procedimiento. Los módulos están unidos entre sí correspondientemente a la ejecución del procedimiento. En el caso de la disposición se trata, por ejemplo, de un dispositivo de procesamiento de datos que está opcionalmente posicionado en el sitio del receptor de señales y está conectado a éste.  
65

El cálculo de modelo anteriormente descrito puede realizarse especialmente por una módulo propio "Simulación" y proporcionar, por ejemplo, una base de datos semiempírica para la posterior determinación de coeficientes (es decir, magnitudes de entrada) del modelo. Puede proporcionarse una instrucción de corrección proporcionada por este modelo para la corrección del error, por ejemplo, dependiendo del requisito para aplicaciones de GNSS locales, regionales o globales.

Se consideran aplicaciones fundamentalmente en el sector de la detección remota/navegación asistida por satélites.

Ejemplos de realización de la invención se describen ahora en relación con el dibujo adjunto. Las figuras individuales del dibujo muestran:

Figura 1 un diagrama de flujo para la ilustración de un ejemplo de realización especialmente preferido del procedimiento según la invención,

Figura 2 una disposición en un GNSS para la determinación de la posición y para la corrección de errores,

Figura 3 una figura para la ilustración del efecto del campo magnético terrestre sobre la propagación de ondas magnéticas,

Figura 4 un diagrama para la ilustración de la dependencia de la dirección de la influencia del campo magnético para una ubicación seleccionada sobre la superficie terrestre,

Figura 5 a Figura 8 representaciones de errores residuales y concretamente errores residuales absolutos para un sitio de referencia y errores residuales relativos de otros sitios con respecto al sitio de referencia,

Figura 9 una configuración especial de la disposición representada en la Fig. 2.

El ejemplo de realización preferido descrito a continuación se refiere a un procedimiento realizado basado en consideraciones físicas realizado mediante procesos de procesamiento de datos numéricos para la determinación de errores de propagación de mayor orden. El ejemplo se refiere especialmente a la utilización para la precisa determinación de la posición en redes de referencia de GNSS.

Este lugar se ocupa inicialmente de las bases físicas en las que se basa el ejemplo de realización preferido. En relación con la Figura 2 se describe inicialmente una disposición para la determinación de un error de propagación. En la figura están representados varios satélites S1 .. S4 de un sistema global de navegación por satélite. Las señales enviadas por los satélites S1 ... S4 pueden ser recibidas tanto por uno como por varios usuarios 54 de un servicio 53 de datos ionosférico (es decir, un dispositivo de servicio para proporcionar datos mediante la ionosfera) y otras estaciones 52 de GNSS. Por el "usuario 54" se entiende especialmente un dispositivo de usuario puesto directamente a disposición del usuario, por ejemplo, un receptor de GNSS con dispositivo de evaluación para la evaluación de señales de GNSS y para la determinación de la posición del usuario.

El usuario necesita para una determinación de la posición cuatro señales (tres coordenadas espaciales y una temporal). Estas señales tienen errores causados por la ionosfera ION, ya que atraviesan la ionosfera ION cuyos límites están representados en la Fig. 2 mediante dos líneas curvas. El error de primer orden (especialmente respectivamente separado para las señales recibidas por uno de los satélites) para las cuatro ecuaciones de observación puede eliminarse mediante una medición de dos frecuencias, es decir, una evaluación de señales que han atravesado la misma trayectoria de rayos a dos frecuencias portadoras distintas. Los restantes errores residuales de mayor orden pueden eliminarse ahora mediante algoritmos de corrección, como aquí se ha propuesto. Existen especialmente las siguientes posibilidades:

1. El usuario deriva a partir de sus propias mediciones de dos frecuencias (respectivamente separadas para las trayectorias de propagación: S1-54, S2 -54, S3-54, S4-54) la información deseada sobre la ionosfera (TEC) y entonces la corrige con ayuda del algoritmo de corrección.

2. El usuario obtiene la información de la ionosfera del servicio 53 de datos de la ionosfera externo que puede disponer de estaciones terrenas propias y/o recibe los datos necesarios de otras estaciones 52 de medición, a las que naturalmente también puede pertenecer el usuario. Es importante que la información de la ionosfera derivable proceda de la misma zona que necesite el usuario. El usuario puede usar para la propia corrección (auto-realizada) de sus mediciones esta información de la ionosfera (por ejemplo, tarjeta de TEC, es decir, una tarjeta de la ionosfera con el dato del TEC en función del sitio o región de la ionosfera). Los valores de TEC contenidos no se corresponden exactamente con los valores de TEC medibles en las trayectorias de rayos del usuario. Correspondientemente al estado de la técnica, sobre una región determinada pueden producirse tarjetas de TEC con infraestructura desarrollada (por ejemplo, Europa, EE.UU., Japón), pero suficientemente buenas, de manera que los errores de distancia de segundo

orden generados por los errores de TEC puedan permanecer por debajo de 1 mm.

3. El usuario pone a disposición del servicio de datos de la ionosfera sus propias mediciones y recibe las correcciones relacionadas con la trayectoria de rayos. Estas correcciones evitan la aproximación de TEC expuesta en el caso 2, ya que las correcciones se realizan ahora relacionadas con la trayectoria de rayos.

A continuación se hace referencia además a la configuración especial de la disposición según la Fig. 2 que se representa en la Fig. 9. Números de referencia iguales significan a este respecto elementos iguales. El dispositivo 53 puede ser en la Fig. 9, por ejemplo, un dispositivo de una red de referencia, puede evaluar las señales, por ejemplo, del satélite S1 y especialmente determinar mediante el procedimiento de evaluación de las dos frecuencias que va a describirse posteriormente el contenido electrónico TEC para la región de la ionosfera ION que se encuentra sobre la trayectoria de rayos de las señales, por ejemplo, de S1 al dispositivo 53. El dispositivo 53 puede transmitir esta información o incluso informaciones de corrección que se derivan de TEC a un dispositivo de determinación de la posición del usuario 54, por ejemplo, mediante una red de transferencia de datos o mediante una conexión de radio.

El dispositivo de determinación de la posición presenta, por ejemplo, un dispositivo 55 de evaluación que recibe la señal del satélite S1 y procesa, por ejemplo, de la manera habitual para la posterior evaluación y para la determinación de la posición.

El dispositivo 55 de evaluación también puede configurarse para recibir señales a dos o más frecuencias distintas del satélite S1 y para procesar el posterior procesamiento de datos. En el caso del dispositivo de evaluación puede tratarse especialmente de un receptor para recibir señales y de un dispositivo de detección asociado al mismo para detectar y digitalizar las señales.

El dispositivo 55 de evaluación está conectado a un dispositivo 56 de determinación para comprobar una medida para un contenido y/o una densidad de partículas eléctricamente cargadas en la ionosfera. Sin embargo, este dispositivo 56 puede omitirse cuando, como ya se ha descrito, se ponga a disposición la información correspondiente de fuera del dispositivo de determinación de la posición. En este caso, el dispositivo 56 puede ser, por ejemplo, solo para el acoplamiento de la información mediante la medida de carga en el procesamiento de las informaciones de señal proporcionadas por el dispositivo 55 de evaluación.

Además, el dispositivo 53 de determinación de la posición presenta un dispositivo 57 de determinación de errores que está configurado, usando la medida de carga, para calcular un término de segundo orden para la corrección del error de la trayectoria de propagación y efectuar una corrección correspondiente. El dispositivo 57 también puede estar configurado según la corrección de errores para determinar la posición del dispositivo 53. A este respecto, por ejemplo, señales de otros satélites de GNSS se evalúan y consideran de forma correspondiente como las señales del satélite S1.

El índice de refracción  $n$  de la ionosfera terrestre es una función compleja que puede describirse aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$n = 1 - \frac{f_p^2}{2f^2} \pm \frac{f_p^2 \cdot f_g}{2f^3} \cos \Theta - \frac{f_p^4}{8f^4} \quad (\text{Ec. 1})$$

Aquí significan:  $f_p$  la frecuencia de plasma en la región considerada de la ionosfera,  $f_g$  es la girofrecuencia, una medida de la interacción entre el campo magnético terrestre local y los electrones libres en la ionosfera,  $\Theta$  el ángulo entre la trayectoria de rayos (trayectoria de propagación) y el campo geomagnético. La estructura dipolar del campo magnético terrestre conduce a una anisotropía de las propiedades de reflexión de la ionosfera y a una birrefringencia ( $\pm$  signo delante del término magnetoiónico en la Ec. 1). Por tanto, en la práctica de la medición normalmente solo se consideran los dos primeros términos en la Ec. 1.

El error de distancia de primer orden  $d_1^{(1)}$  resultante de esto puede representarse por:

$$d_1^{(1)} = \frac{K}{f^2} \int N_e ds \quad (\text{Ec. 2})$$

en la que la constante  $K = 40,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ ,  $N_e$  designa la densidad electrónica de la ionosfera y  $ds$  el elemento de la trayectoria de rayos. La integral en la Ec. 2 se designa el número electrónico total o en inglés: Total Electron Content (TEC):

$$TEC = \int N_e ds \quad (\text{Ec. 3})$$

Bajo las condiciones de alta ionización ionosférica (por ejemplo, en bajas latitudes geográficas y/o a alta actividad solar), el error de distancia  $d_1^{(1)}$  resultante puede ascender a hasta 100 m. Los siguientes términos de mayor orden,

incluida la curvatura de la trayectoria de rayos, proporcionan un error en el orden de magnitud del 0,1% del error del primer orden  $d_1^{(1)}$ . Por este motivo, en aplicaciones precisas (por ejemplo, en la determinación exacta en cm de la posición en un GNSS) se necesita una estimación de este error residual y su posterior corrección.

5 El siguientes ejemplo de realización de la invención se refiere a un procedimiento para la estimación eficaz del error residual de mayor orden y ofrece opcionalmente la posibilidad de su corrección en aplicaciones de GNSS operacionales. Las informaciones necesarias para la determinación del error residual, por ejemplo, la TEC, y/o la corrección pueden determinarse o realizarse incluso por uno o varios dispositivos de una red de referencia. Se permite que los usuarios de GNSS alcancen una alta precisión operacional de la determinación de la posición. Con  
10 la introducción de las correcciones de mayor orden, es decir, con la reducción de las incertidumbres de medida, son posibles soluciones fidedignas y más rápidas de los algoritmos de posicionamiento. Es decir, que los usuarios de estas correcciones poseen una ventaja comercial en comparación con aquellos que, al igual que antes, ignoran errores de propagación de mayor orden.

15 Ahora se describe el procedimiento en relación con la Fig. 1. La descripción parte de que se implementan etapas de procedimiento individuales en forma de módulos separados.

El módulo S "Simulación" proporciona una base de datos semiempírica para una posterior determinación de coeficientes de modelo de un modelo de simulación en el módulo M "Coeficientes de modelo". La simulación se  
20 fundamenta en un escenario lo más realista posible de la propagación de ondas de radio por la ionosfera. Para esto, el plasma ionosférico se describe mediante modelos ionosféricos adecuados (por ejemplo, con ayuda de perfiles de Chapman como se especifican en la siguiente publicación: Davies, K., "Ionospheric Radio" Peter Peregrinus Ltd., Londres, RU, 1990). Opcionalmente pueden entrar datos de medición de la ionosfera, especialmente datos de medición actuales en el modelo. Estos datos contienen especialmente informaciones sobre la distribución de la  
25 densidad electrónica a lo largo de las trayectorias de rayos simuladas o al menos el número electrónico total TEC. Pueden estar depositados (independientemente de si se midieron actualmente o no) en una base de datos. Los datos de medición actuales también pueden utilizarse alternativamente para el modelo de ionosfera.

Para la descripción del campo magnético existente en la región de propagación de las ondas electromagnéticas  
30 (aquí el campo magnético terrestre) puede usarse un modelo suficientemente bueno (por ejemplo, el campo de referencia geomagnético internacional, de International Geomagnetic Reference Field - IGRF, como se especifica en la siguiente publicación: Mande M., Macmillan S., "International Geomagnetic Reference Field-the eighth generation", Earth Planets Space, vol. 52, pág. 1119-1124, 2000)

35 En la Fig. 1 se representan varias magnitudes de entrada y/o informaciones de entrada posibles para el módulo S, concretamente datos de observación (datos de medición), el tiempo de la simulación, informaciones sobre posiciones de satélites y receptores de señales, la información de si la corrección del error de la trayectoria de propagación será válida localmente (es decir, en una región pequeña), regionalmente (es decir, para una mayor  
40 región) o globalmente (es decir, para todo el planeta), un modelo de la ionosfera, un modelo del campo magnético e informaciones sobre una aproximación matemática en la simulación y/o en la posterior determinación de coeficientes del modelo.

En el módulo M, los coeficientes (o de forma más general: magnitudes de entrada) de un algoritmo de corrección previamente desarrollado se adaptan para la corrección del error determinado a los datos de simulación y/o datos de  
45 medición del módulo S, por ejemplo, con el procedimiento de mínimos cuadrados. Cuanto mejor sea el principio físico, menos coeficientes se necesitarán. Con el algoritmo de corrección se obtienen correcciones próximas a la realidad, considerándose antes de la simulación y adaptación la variabilidad natural del estado ionosférico en función de una serie de factores geofísicos como, por ejemplo, hora del día y estación del año, latitud geográfica-geomagnética, actividad solar y geomagnética.

50 El módulo C siguiente al módulo M tiene la función de ocuparse de proporcionar el algoritmo de corrección (AC) adecuado, es decir, adecuado para el usuario, incluidos sus coeficientes de modelo. El AC puede estar correspondientemente certificado en determinados requisitos, es decir, haberse sometido a un control de calidad o validación para que pueda utilizarse para determinadas aplicaciones. Una institución separada puede transmitir o  
55 proporcionar como servicio de datos el AC a usuarios individuales o grupos de usuarios.

Fundamentalmente, la proporción de la información de corrección se realizará automáticamente para usuarios de GNSS operacionales.

60 En un primer caso (en la Fig. 1 representado por un "1" en un círculo), por ejemplo, el usuario de GNSS obtiene exclusivamente los datos de salida proporcionados por el módulo C, es decir, por ejemplo, el AC y la tabla de coeficientes del modelo. La información sobre el estado de la ionosfera (información ionosférica) necesaria para la realización de la corrección puede generarla el propio usuario o recurre a modelos de aproximación. Los usuarios de GNSS, debido a la recepción de señales de dos frecuencias, están fundamentalmente en situación de derivar por sí  
65 mismos la información necesaria de la ionosfera.

En un segundo caso (en la Fig. 1 y la Fig. 2 representado por un “2” en un círculo), por ejemplo, el usuario de GNSS también obtiene, además de los datos de salida de los módulos C, la información necesaria de la ionosfera de un proveedor de servicios externo. Así, el usuario de GNSS está en situación de calcular por sí mismo correcciones relevantes para él e insertarlas adecuadamente en los algoritmos de posición.

En un tercer caso (en la Fig. 1 y la Fig. 2 representado por un “3” en un círculo), por ejemplo, el usuario de GNSS obtiene la corrección de errores de retardo o corrección de errores de la trayectoria de propagación ionosférica de mayor orden completa referida a la trayectoria de rayos de las señales recibidas de una institución separada que debe proporcionar todas las informaciones necesarias. El usuario de GNSS no necesita realizar ningún cálculo propio, pero debe prestar atención a la correcta asignación de la información de corrección en los algoritmos de posición.

A continuación se describe un ejemplo de la creación de un algoritmo para la corrección de errores de 2º orden para la propagación de ondas de radio por la ionosfera.

Para la determinación de este error de 2º orden  $d_i^{(2)}$  se usa el término magnetoiónico (el 3º término a la derecha del signo igual) en la Ec. 1:

$$d_i^{(2)} = \pm \int \frac{f_p^2 \cdot f_g}{2f^3} \cos \Theta \cdot ds \quad (\text{Ec. 4})$$

Mientras que la girofrecuencia  $f_g$  de los electrones incluye la contribución de la inducción magnética B del campo magnético, el ángulo entre la trayectoria de rayos y el campo magnético también desempeña una función importante en la estimación del error. Como muestra la Fig. 3, el ángulo  $\Theta$  en una determinada trayectoria de rayos puede estar sometido a fuertes variaciones. En el punto central de la Fig. 3 se representa el globo terráqueo. Las flechas curvadas representan las líneas de campo del campo magnético. La trayectoria de rayos se representa para dos casos distintos respectivamente por una flecha recta que corta las líneas de campo. Respectivamente en un sitio de la flecha recta está marcado un ángulo entre la flecha y una línea discontinua que es una tangente de la línea de campo local.

La relación  $B_F$  entre la inducción geomagnética B y el número de electrones total puede expresarse de la siguiente manera por el teorema del valor medio del cálculo integral:

$$B_F = \frac{\int B \cos \Theta \cdot n_e ds}{TEC} \quad (\text{Ec. 5})$$

Aquí significan:  $n_e$  la densidad electrónica,  $ds$  el incremento de la trayectoria de rayos y  $TEC = \int n_e ds$  el número de electrones total (Total Electron Content TEC) a lo largo de la trayectoria de rayos. La relación  $B_F$  usada como parámetro del modelo de corrección describe la función de peso media referida a la trayectoria de rayos del campo magnético en la integración de la densidad electrónica. La modelación de este parámetro proporciona así una descripción eficaz de la influencia del campo magnético.  $B_F$  también puede usarse en otra aplicación para el cálculo del efecto de Faraday en señales de VHF linealmente polarizadas. Como el campo magnético disminuye fuertemente con la altura ( $1/r^3$ ), representando  $r$  la altura sobre la superficie del planeta,  $B_F$  se determina esencialmente por la proyección de la distribución de la densidad electrónica vertical sobre la trayectoria de rayos. Por este motivo, las magnitudes de entrada variables de un cálculo de simulación son, además de las propiedades físicas (distribución y densidad del plasma, magnitud del campo magnético) del sitio seleccionado, el ángulo de elevación  $\varepsilon$  y el ángulo acimutal  $\alpha$  de la trayectoria de rayos entre el emisor de la onda electromagnética (especialmente el satélite de GNSS) y el receptor sobre la superficie del planeta. La Fig. 4 muestra el resultado de un cálculo, por ejemplo, para el sitio geográfico  $\phi_{RX}=50^\circ N$  (es decir, 50 grados en latitud norte);  $\lambda_{RX}=10^\circ E$  (10 grados en longitud este),  $h_{RX}=100$  m (altura sobre el nivel del mar) y una altura del satélite de GNSS de 20200 km (altura de GPS). La relación  $B_F$  se representa para este sitio en función del ángulo de elevación  $\varepsilon = 10^\circ, 30^\circ$  y  $60^\circ$ .

La magnitud de  $B_F$  se especifica en la Fig. 4 por la distancia radial desde el centro del diagrama polar (T). El diagrama polar muestra una comparación del parámetro  $B_F$  (discontinua) necesario para el algoritmo de corrección en comparación con los datos simulados (línea continua). El cálculo se realiza para un receptor de GNSS en el sitio  $\phi_{RX}=50^\circ N$  y  $\lambda_{RX}=10^\circ E$ . El receptor puede recibir en la simulación virtualmente señales de GNSS de todas las direcciones del cielo (acimut) y a todas las elevaciones  $\varepsilon$  de la señal de entrada. La elevación está parametrizada aquí para 10, 30 y 60°. Los valores para  $B_F$  se representan como distancia radial desde el centro. El diagrama muestra una clara asimetría del parámetro de corrección magnética  $B_F$  con respecto a las direcciones del cielo.

Para modelar esta dependencia de forma adecuada,  $B_F$  se forma como diferencia de dos funciones circulares con los radios  $r_1$  y  $r_2$  y las coordenadas del punto medio  $(0, -y_1)$  o  $(0, r_2)$ . Mediante esto pueden modelarse muy bien las desviaciones de la función circular. Los parámetros  $r_1, r_2$  e  $Y_1$  se aproximan por polinomios de grado  $n$  ( $n$  se elige correspondientemente a la precisión requerida). Los polinomios pueden representarse en función del ángulo de



elevación mediante:

$$r_1(\varepsilon) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot (\varepsilon)^i$$

$$r_2(\varepsilon) = \sum_{i=0}^n b_i \cdot (\varepsilon)^i$$

$$y_1(\varepsilon) = \sum_{i=0}^n c_i \cdot (\varepsilon)^i$$

(Ec. 6)

Aquí,  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_i$  son los coeficientes del polinomio e  $i$  el índice continuo de la suma  $i=0\dots n$ . Para la representación de la dependencia acimutal, para un ángulo de elevación fijo se forma la diferencia de ambas ecuaciones circulares. Correspondientemente,  $B_F$  es una función del ángulo de elevación  $\varepsilon$  y del acimut  $\alpha$ :

$$B_F(\varepsilon, \alpha) = -y_1(\varepsilon) \cos \alpha + \sqrt{r_1^2(\varepsilon) - y_1^2(\varepsilon) \operatorname{sen}^2 \alpha} - 2r_2(\varepsilon) \cos \alpha'$$

(Ec. 7)

con

$$\begin{cases} \alpha' = \pi / 2 & \text{para } \pi / 2 < \alpha < 3\pi / 2 \\ \alpha' = \alpha & \text{si no} \end{cases}$$

De las Ec. 6 y Gl. 7 se obtiene:

$$B_F(\varepsilon, \alpha) = -\cos \alpha \cdot \sum_{i=0}^n c_i \cdot (\varepsilon)^i + \sqrt{\left\{ \sum_{i=0}^n a_i \cdot (\varepsilon)^i \right\}^2 - \operatorname{sen}^2 \alpha \cdot \left\{ \sum_{i=0}^n c_i \cdot (\varepsilon)^i \right\}^2} - 2 \cos \alpha' \cdot \sum_{i=0}^n b_i \cdot (\varepsilon)^i$$

(Ec. 8)

Correspondientemente,  $B_F(\varepsilon, \alpha)$  puede determinarse conociendo los coeficientes del polímero (Ec. 6) en función de los ángulos de elevación y acimutal. Las curvas discontinuas en la Fig. 4 muestran una adaptación óptima de los coeficientes para  $r_1$ ,  $r_2$  y  $y_1$  con polinomios de 4º grado.

A continuación se facilita un ejemplo de aplicación para la determinación de la posición en el GPS.

El error de distancia de 2º orden  $d_i^{(2)}$  se facilita por

$$d_i^{(2)} = \frac{K_F}{f^3} \int B \cos \theta \cdot n_e ds$$

(Ec. 9)

$$K_F = \frac{e^3}{16\pi^3 m_e^2 \varepsilon_0} = K_F = 1,1281 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ A kg}^{-1}$$

con

$$\begin{aligned} e &= 1,6021773 \times 10^{-19} \text{ As} \\ m_e &= 9,109390 \times 10^{-31} \text{ kg} \\ \varepsilon_0 &= 8,854187817 \times 10^{-12} \text{ As/Vm} \end{aligned}$$

Si se combina la Ec. 4 con la Ec. 9 se obtiene:

$$d_i^{(2)} = \frac{K_F}{f^3} \cdot B_F(\varepsilon, \alpha) \cdot \text{TEC}$$

(Ec. 10)

Para compensar los errores de distancia de primer orden  $d_i^{(1)}$  mediante una medición de dos frecuencias se forma la llamada combinación lineal  $L_3$  de las mediciones de fases portadoras de GPS a las frecuencias  $f_1=1.575$  GHz y  $f_2=1.228$  GHz.

$$\Phi_3 = (1 + \beta_3) \Phi_1 - \beta_3 \Phi_2$$

(Ec. 11)

con

$$\beta_3 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = 1,546 \quad (\text{Ec. 12})$$

Para la relación de la medición de fases con la distancia rectilínea  $\rho$  y los restantes errores residuales de mayor orden resulta, despreciando otros términos aquí no relevantes:

$$\Phi_3 = \rho + \Delta S_2 + \Delta S_x \quad (\text{Ec. 13})$$

en la que  $\Delta S_2$  designarán los errores residuales de 2º orden y  $\Delta S_x$  otros errores residuales de tercer y de mayor orden.

Para los errores residuales de 2º orden resulta:

$$\Delta S_2(\varepsilon, \alpha, TEC) = \frac{K_F}{f_1 f_2 (f_1 + f_2)} \cdot B_F(\varepsilon, \alpha) \cdot TEC \quad (\text{Ec. 14})$$

en metros.

Debido a la dispersividad de la ionosfera (dependencia de la frecuencia del índice de refracción  $n$ ) es posible la derivación del número de electrones total TEC a partir de mediciones de dos frecuencias, por ejemplo, en GPS. Para la fase de código  $\Phi$  a la frecuencia  $f_1$  resulta, por ejemplo:

$$\Phi_1 = \rho + c(dt - dT) + d_{f_1} + d_T + d_{MP1} + dq_1 + dQ_1 + \varepsilon_1 \quad (\text{Ec. 15})$$

con

- $\rho$  distancia entre el satélite de GPS y el receptor
- $c$  velocidad de la luz en el vacío
- $dt$  error de reloj - satélite
- $dT$  error de reloj - receptor
- $d_f$  error de distancia ionosférica debido al retraso de la propagación
- $d_T$  error de distancia troposférica debido al retraso de la propagación
- $d_{MP}$  error debido a la propagación en múltiples trayectorias
- $d_q$  retraso de la señal instrumental en el satélite
- $dQ$  retraso de la señal instrumental en el receptor
- $\varepsilon$  error residual (ruido)

$$\Delta\Phi = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} TEC + \Phi_{cal} \quad (\text{Ec. 6})$$

Después de determinar la constante de calibración  $\Phi_{cal}$  (por ejemplo, descrito en: Sardon E., Zarraoa N., Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrument biases?, Radio Science, vol. 5, pág. 1899-1910,1997), el TEC puede entonces determinarse con precisión directamente a partir de las mediciones de fases de dos frecuencias de GPS sobre  $\Delta\Phi$  hasta algunos  $10^{16}$  electrones/m<sup>2</sup>. Si este error permanece por debajo de  $5 \times 10^{16}$  electrones/m<sup>2</sup>, un requisito que generalmente se cumple sitúa el error de posicionamiento ionosférico de segundo y de mayor orden resultante de este error de TEC por debajo de 1 mm.

Para derivar para la propagación de los errores de propagación una solución de aproximación para usuarios de GNSS alemanes se eligió un punto de referencia central en la latitud geográfica de  $\phi_{Rx} = 50^\circ$  al norte y la longitud geográfica de  $\lambda_{Rx} = 10^\circ$  al este. El parámetro de corrección  $B_F(\varepsilon, \alpha)$  se aproxima entonces mediante la Ec. 8 con ayuda de un polinomio de cuarto orden.

$$B_F(\varepsilon, \alpha) = -\cos \alpha \cdot \sum_{i=0}^4 c_i \cdot (\varepsilon)^i + \sqrt{\left\{ \sum_{i=0}^4 a_i \cdot (\varepsilon)^i \right\}^2 - \sin^2 \alpha \cdot \left\{ \sum_{i=0}^4 c_i \cdot (\varepsilon)^i \right\}^2} - 2 \cos \alpha \cdot \sum_{i=0}^4 b_i \cdot (\varepsilon)^i \quad (\text{Ec. 15})$$

Los coeficientes determinados óptimos  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_i$  se resumen para usuarios de GNSS en Alemania (50°N; 10°E) en la Tabla 1 en la que "e-005" representa, por ejemplo, " $\cdot 10^{-5}$ ".

Tabla 1: Coeficientes del polinomio  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_i$ .

$i$	0	1	2	3	4
$a_i$	1,9871e-005	-8,2035e-008	1,2866e-008	-1,6579e-010	6,2901e,013
$b_i$	2,7995e-006	5,4497e-008	-3,7836e-009	5,0049e-011	-2,0707e-013
$c_i$	1,1327e-005	-5,3227e-010	-4,0348e-010	-2,1587e-011	1,1775e-013

5

10

Como las condiciones geomagnéticas-ionosféricas en una región como Alemania cambian relativamente insignificadamente, esta corrección puede utilizarse fundamentalmente también para otros sitios.

15

La precisión de la corrección se ha comprobado a un TEC vertical supuesto de 100 TECU (1 TECU=  $10^{16}$  electrones/m<sup>2</sup>) para los siguientes sitios: Rostock (al norte de Alemania), Garmisch (al sur de Alemania), Aachen (al oeste de Alemania) y Cottbus (al este de Alemania). Los restantes errores residuales se representan en las Fig. 5 a Fig. 8 en función del acimut. A este respecto, el ángulo de elevación  $\epsilon$  asciende a 5 grados en la Fig. 5, 10 grados en la Fig. 6, 30 grados en la Fig. 7 y 60 grados en la Fig. 8.

20

25

En cada una de las Figuras 5 a 8 están dispuestos unos debajo de los otros diagramas de seis partes, conteniendo cada diagrama en la dirección horizontal (eje x) de izquierda a derecha en orden creciente los ángulos acimutales. En el diagrama superior están representados respectivamente los errores de segundo orden para el sitio de referencia en el centro de Alemania, en el diagrama de debajo los errores residuales (3° y de mayor orden) para el sitio de referencia, en el diagrama de debajo los errores residuales de 2° orden debidos a la desviación del sitio de referencia para Rostock, en el diagrama de debajo los errores residuales de 2° orden debidos a la desviación del sitio de referencia para Garmisch, en el diagrama de debajo los errores residuales de 2° orden debidos a la desviación del sitio de referencia para Aachen y en el diagrama de debajo (es decir, en el último diagrama) los errores residuales de 2° orden debidos a la desviación del sitio de referencia para Cottbus. El eje vertical, es decir, el eje y de los diagramas se representa en unidades de 1 mm.

30

Es evidente que los errores de la ionosfera de 2° orden a un pequeño ángulo de elevación pueden ascender a casi 20 mm (diagrama superior, por ejemplo, en la Fig. 5 y Fig. 6). Es notable su clara dependencia de la dirección con los mayores errores en la dirección de propagación sur (ángulo acimutal de 180 grados), de manera que pueden resultar errores de medición sistemáticos. Los errores residuales no registrados por el modelo se encuentran generalmente por debajo de 2 mm (aproximadamente el 10% del error total de 2° orden).

35

El ejemplo muestra que la determinación de errores realizada para un sitio determinado es más precisa. Sin embargo, la utilización de un sitio de comparación es al menos suficiente para la región de Alemania cuando un error residual inferior a 2 mm es suficiente.

40

45

50

55

60

65

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para la determinación de un error en la propagación de ondas electromagnéticas en una atmósfera que presenta partículas eléctricamente cargadas, en el que
- se evalúa una primera señal, transmitiéndose la primera señal mediante una primera onda electromagnética por la atmósfera y presentando la primera onda electromagnética una primera frecuencia de oscilación,
  - se evalúa al menos una segunda señal, transmitiéndose la segunda señal mediante una segunda onda electromagnética por la atmósfera y presentando la segunda onda electromagnética una segunda frecuencia de oscilación que es distinta de la primera frecuencia de oscilación,
  - se determina una medida para un contenido y/o una densidad de partículas eléctricamente cargadas (medida de carga) a partir de la primera señal y a partir de la segunda señal,
  - la medida de carga se usa para determinar un término de una trayectoria de propagación de una tercera onda electromagnética o un término de una magnitud equivalente a la trayectoria de propagación, dependiendo el término, aparte de la medida de carga, también de la frecuencia de oscilación y de un parámetro de corrección magnética ( $B_F$ ) para considerar la influencia de un campo magnético del planeta,
  - usándose el parámetro de corrección magnética ( $B_F$ ) en función exclusivamente del ángulo de elevación ( $\varepsilon$ ) y del ángulo acimutal ( $\alpha$ ) de la trayectoria de rayos de un emisor (S1 - S4) de la primera y segunda onda electromagnética a un receptor (54) sobre la superficie del planeta para la corrección, pudiendo calcularse el parámetro de corrección ( $B_F$ ) para una región geográfica del planeta en la que se encuentra el receptor (54) en función del ángulo de elevación ( $\varepsilon$ ) y del ángulo acimutal ( $\alpha$ ) con ayuda de coeficientes del polinomio constantes determinados para la región geográfica.
- 25 2. Procedimiento según la reivindicación precedente, en el que la tercera onda electromagnética es la primera o segunda onda electromagnética.
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el que el término depende de la tercera potencia de la frecuencia de oscilación.
- 30 4. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el que el término se usa para corregir un resultado para la trayectoria de propagación.
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el que la propagación de una señal cuya trayectoria de propagación se determinará se simula por un cálculo de modelo y como resultado de la simulación se obtiene el error de la trayectoria de propagación.
- 35 6. Procedimiento según la reivindicación precedente, en el que la medida de carga y/o una información sobre un campo magnético que influye en la propagación de la primera y/o segunda señal se usa/n como magnitudes de entrada del cálculo de modelo.
- 40 7. Procedimiento según la reivindicación precedente, en el que las magnitudes de entrada o al menos una parte de las magnitudes de entrada se determina/n por un dispositivo en el sitio de un receptor, recibiendo el receptor la onda electromagnética para la que se determinará el error de propagación.
- 45 8. Procedimiento según una de ambas reivindicaciones precedentes, en el que las magnitudes de entrada o al menos una parte de las magnitudes de entrada se determina/n en un sitio que está alejado del sitio de un receptor que recibe la onda electromagnética.
- 50 9. Procedimiento según la reivindicación precedente, en el que la determinación del término y opcionalmente la corrección del error de la trayectoria de propagación también se realiza/realizan en un sitio que está alejado del sitio de un receptor que recibe la onda electromagnética.
- 55 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, en el que el parámetro de corrección magnética ( $B_F$ ) se determina para un sitio de referencia sobre la superficie del planeta y el valor determinado del parámetro de corrección magnética ( $B_F$ ) se usa para receptores dentro de una región sobre la superficie del planeta para la determinación del término.
- 60 11. Disposición para la determinación de un error en la propagación de ondas electromagnéticas en una atmósfera que presenta partículas eléctricamente cargadas, presentando la siguiente disposición:
- un dispositivo de evaluación (55) que está configurado para evaluar una primera señal, transmitiéndose la primera señal mediante una primera onda electromagnética por la atmósfera y presentando la primera onda electromagnética una primera frecuencia de oscilación,
  - un dispositivo de evaluación (55) que está configurado para evaluar una segunda señal, transmitiéndose la segunda señal mediante una segunda onda electromagnética por la atmósfera y presentando la segunda onda electromagnética una segunda frecuencia de oscilación que es distinta de la primera frecuencia de
- 65

oscilación,

- un dispositivo de determinación (56) que está configurado para determinar a partir de la primera señal y a partir de la segunda señal una medida para un contenido y/o una densidad de partículas eléctricamente cargadas (medida de carga),

5 - un dispositivo de determinación de errores (57) que está configurado para determinar usando la medida de carga un término de una trayectoria de propagación de una tercera onda electromagnética o un término de una magnitud equivalente a la trayectoria de propagación (por ejemplo, un tiempo de propagación), dependiendo el término, aparte de la medida de carga, también de la frecuencia de oscilación y de un parámetro de corrección magnética ( $B_F$ ) para considerar la influencia de un campo magnético del planeta

10 - usándose el parámetro de corrección magnética ( $B_F$ ) en función exclusivamente del ángulo de elevación ( $\varepsilon$ ) y del ángulo acimutal ( $\alpha$ ) de la trayectoria de rayos de un emisor (S1 - S4) de la primera y segunda onda electromagnética a un receptor (54) sobre la superficie del planeta, pudiendo calcularse el parámetro de corrección ( $B_F$ ) para una región geográfica del planeta en la que puede encontrarse el receptor (54) en función del ángulo de elevación ( $\varepsilon$ ) y del ángulo acimutal ( $\alpha$ ) con ayuda de coeficientes del polinomio constantes determinados para la región geográfica.

15 12. Disposición según la reivindicación precedente, en la que el dispositivo de determinación de errores está dispuesto en el sitio del dispositivo de evaluación o de los dispositivos de evaluación.

20 13. Disposición según una de las dos reivindicaciones precedentes, en la que el dispositivo de determinación está dispuesto en otro sitio distinto al dispositivo de evaluación o a los dispositivos de evaluación y está conectado mediante una red informática y/o una red de radio al o a los dispositivos de evaluación.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

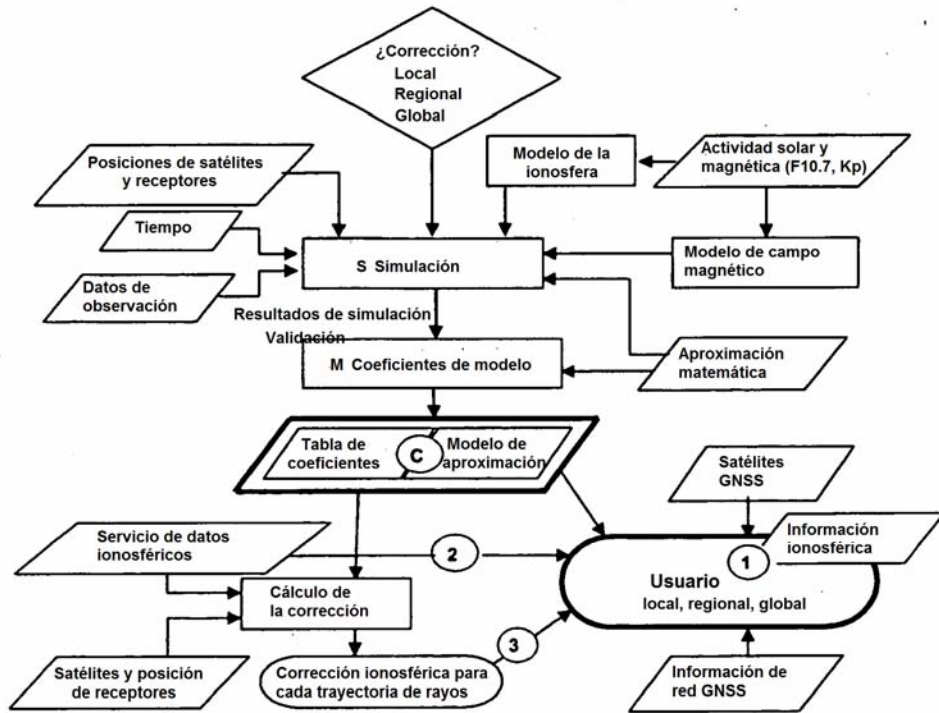


Fig. 1

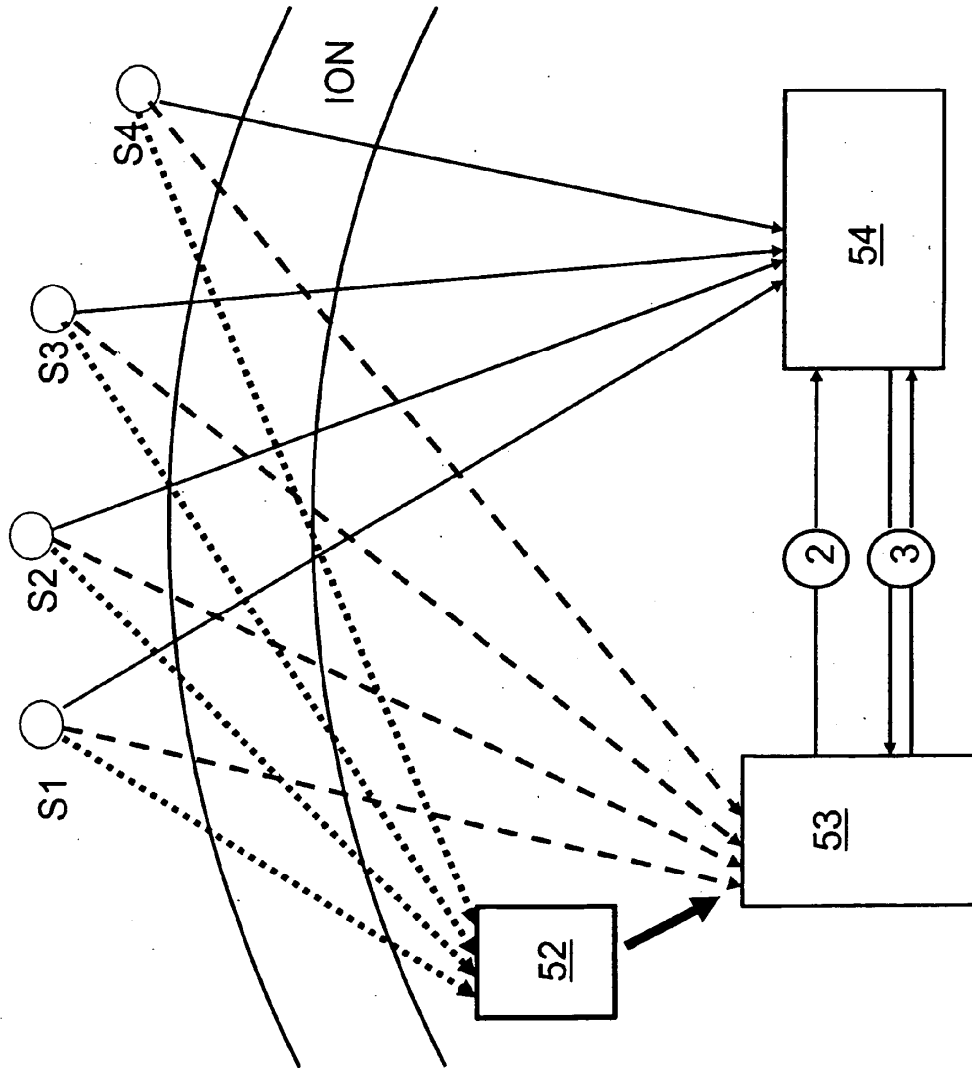


Fig. 2

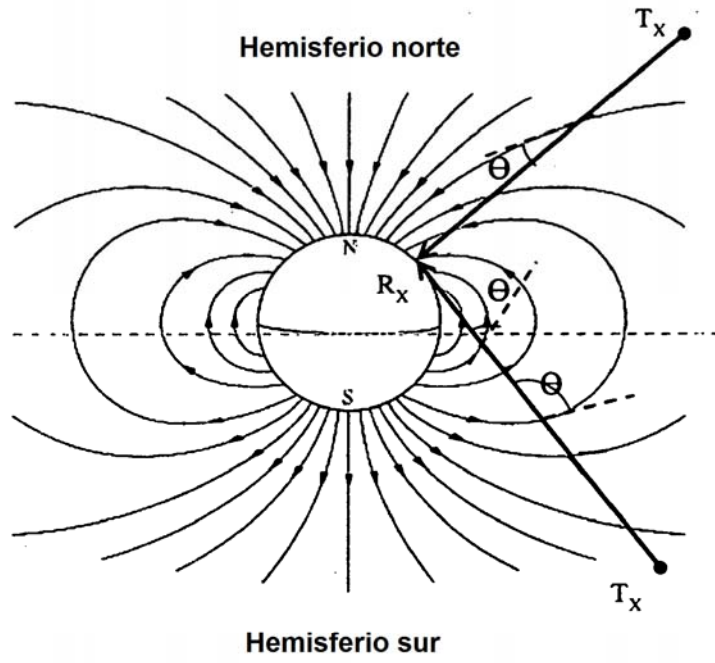


Fig. 3



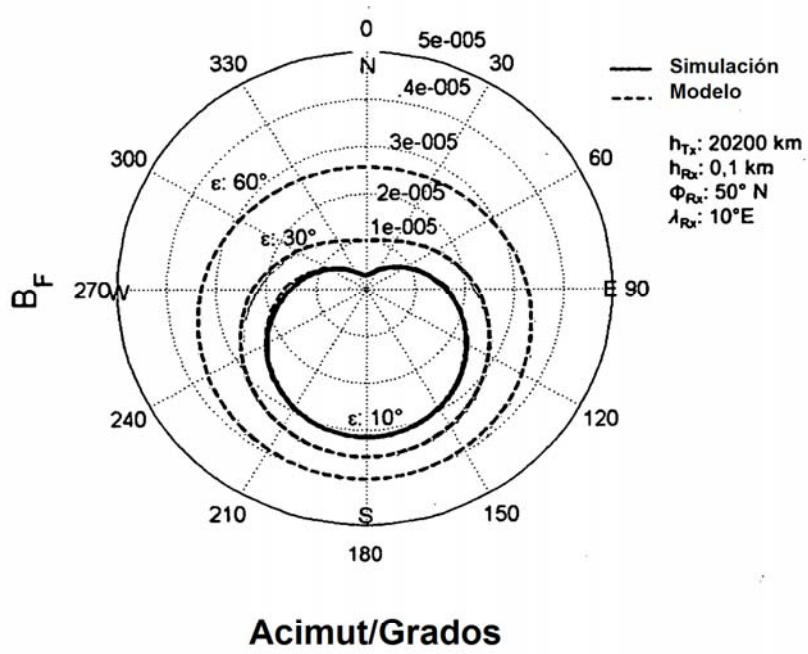


Fig. 4

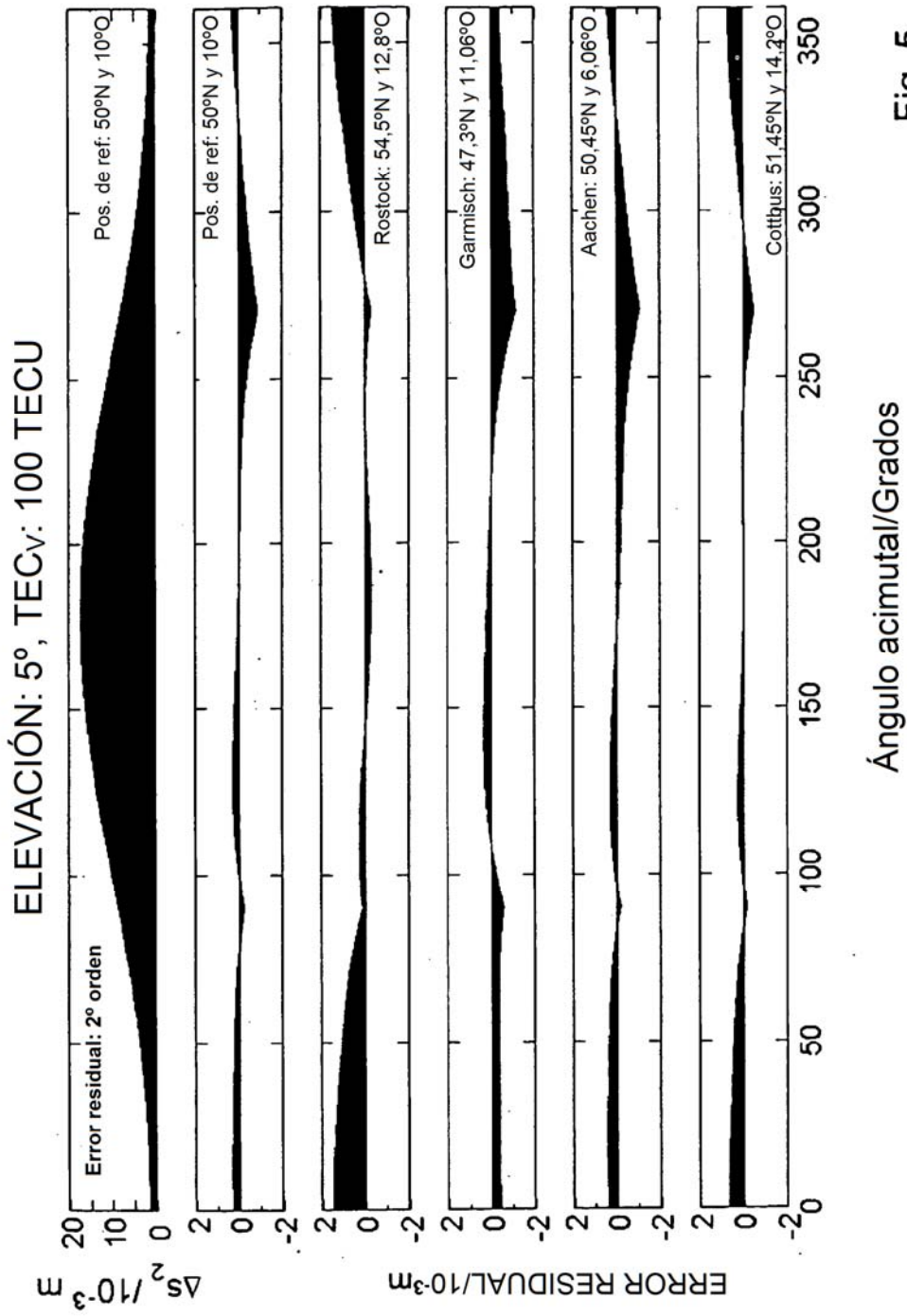
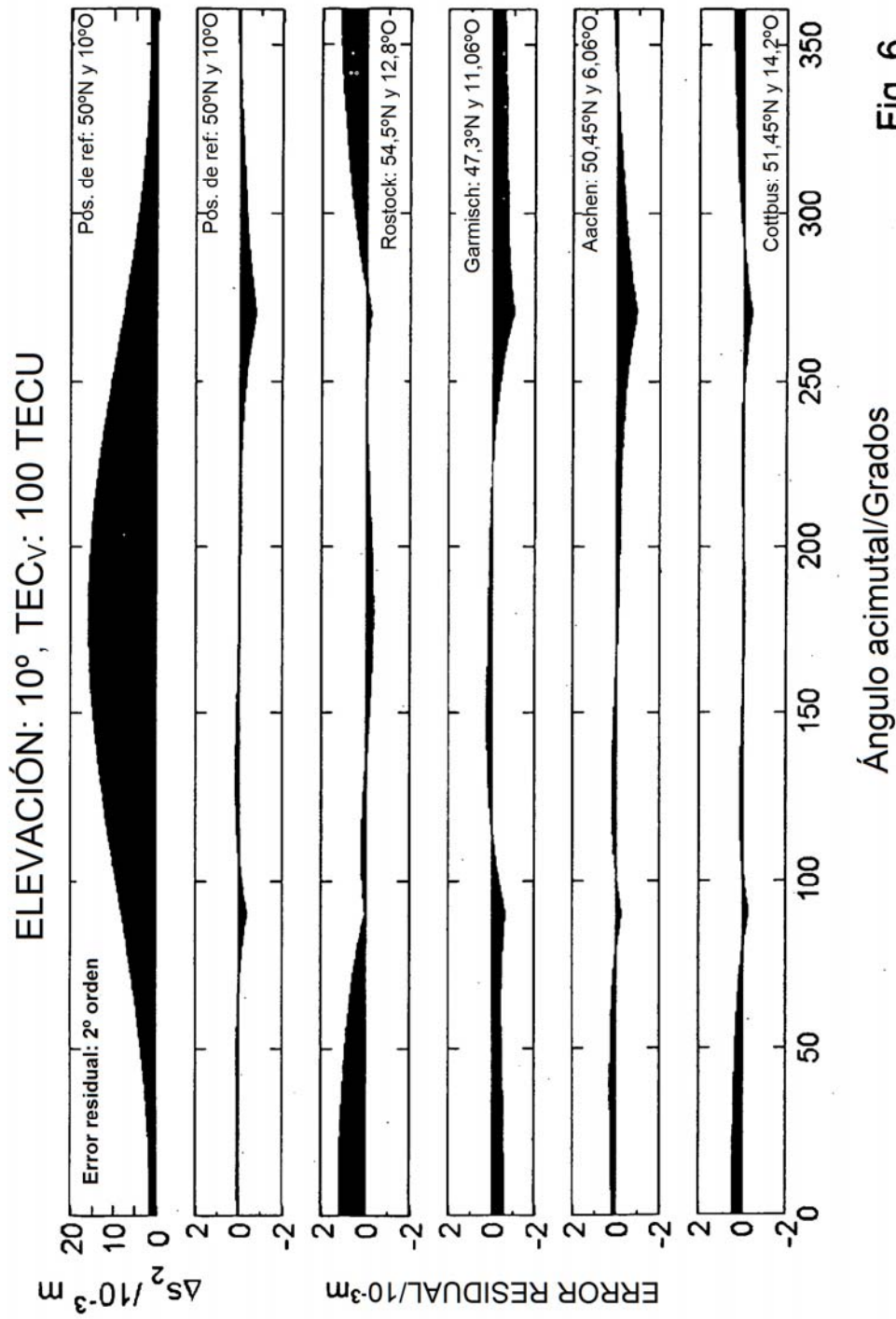
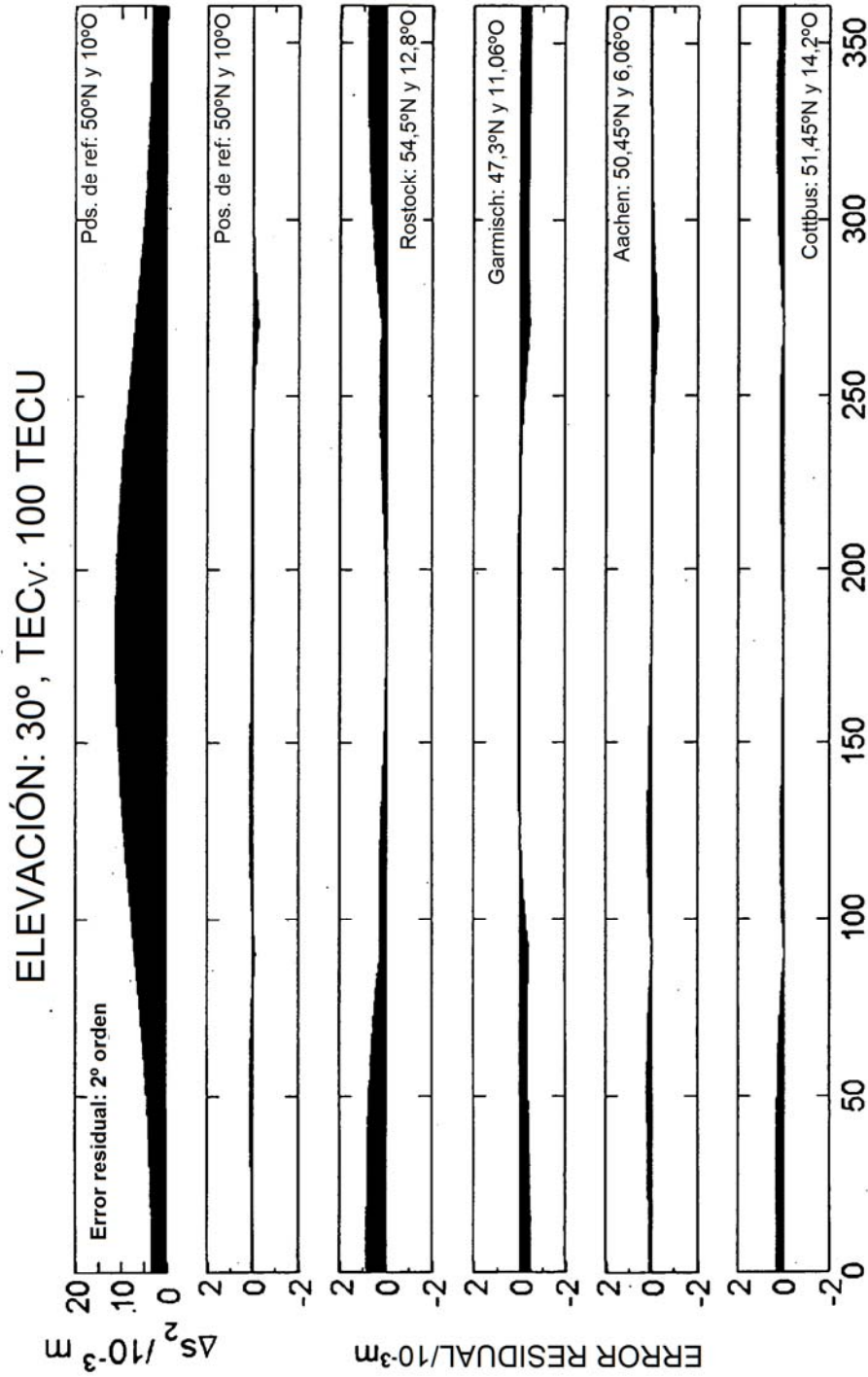


Fig. 5





Ángulo acimutal/Grados Fig. 7

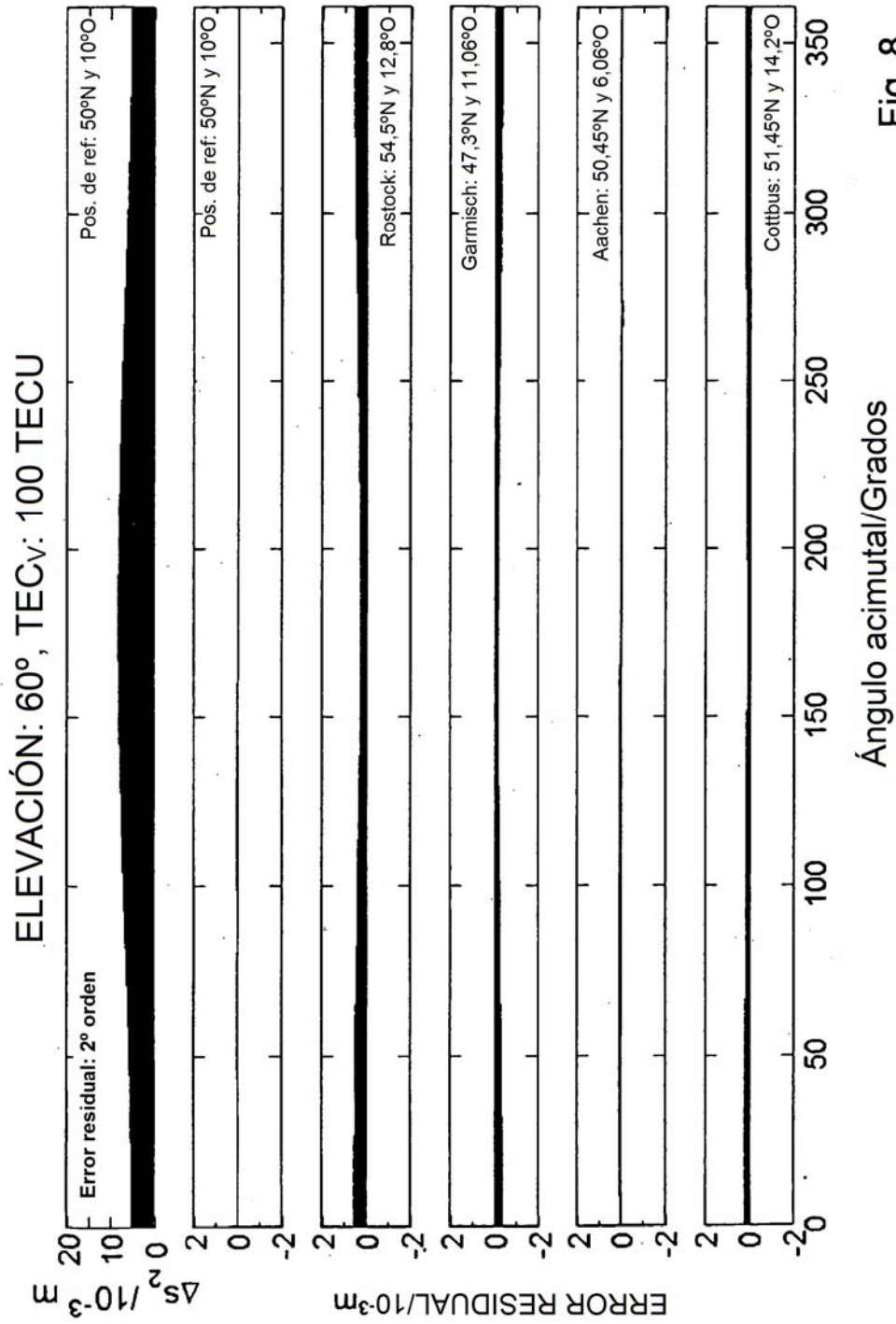


Fig. 8

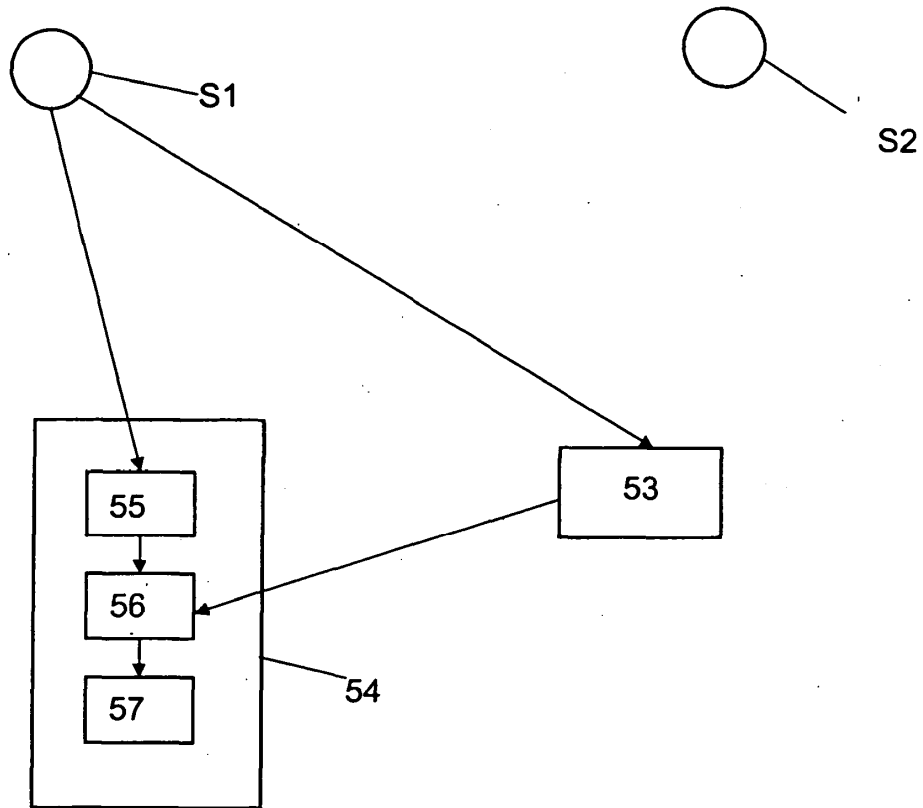


Fig. 9