



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS



⑪ Número de publicación: **2 551 882**

51 Int. Cl.:

**G01S 19/21** (2010.01)  
**G01S 19/40** (2010.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: 08.03.2013 E 13158413 (8)  
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: 09.09.2015 EP 2637040

<sup>54</sup> Título: Procedimiento adaptativo de estimación del contenido electrónico de la ionosfera

30 Prioridad:

09.03.2012 FR 1200717

73) Titular/es:

THALES (100.0%)

THALES (100.0%)  
45, rue de Villiers

92200 Neuilly Sur Seine, FR

④⁵ Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**24.11.2015**

72 Inventor/es:

#### TRILLÉS SÉPARÉS

TRILLES, SEBASTIEN;  
BERTIN DE LA HAUTIERE, S.

## BERT IN DE VAN DEN E

**Agent/Representant**

Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO I ÓPÉZ, Ma

CARPINTERO LOPEZ, Mario

ES 2 551 882 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento adaptativo de estimación del contenido electrónico de la ionosfera

La presente invención se refiere al campo de los procedimientos de estimación del contenido electrónico de la ionosfera adecuados para establecer unas correcciones para los sistemas de navegación, y más particularmente un procedimiento adaptativo que permita mejorar la estimación de este contenido electrónico en el caso de grandes heterogeneidades de la ionosfera.

En los sistemas de posicionamiento por satélite, comúnmente denominados GNSS por su acrónimo anglosajón, *Global Navigation Satellite System*, un receptor fijo o móvil tal como un vehículo o una aeronave, se localiza por trilateración por medio de un cálculo de las distancias que le separan de varios satélites. La precisión de la evaluación de la distancia entre el receptor y cada uno de los satélites es determinante en la precisión del posicionamiento obtenido. La principal fuente de error en la evaluación de esta distancia es el retardo acumulado por la señal cuando atraviesa la ionosfera, en la que la ionización parcial de los gases a alta altitud perturba la propagación de la señal e implica un retardo de transmisión variable.

Es necesario poder disponer de una estimación del contenido electrónico de la ionosfera terrestre, comúnmente denominado TEC, por su acrónimo anglosajón *Total Electron Content*, para tener en cuenta para cada señal de satélite considerada el retardo acumulado durante la travesía de la ionosfera. En la práctica, el receptor calcula su posición integrando varias correcciones de las distancias aparentes transmitidas por los satélites, por medio de diversas técnicas de integración y de filtrado. La estimación del contenido electrónico de la ionosfera permite una mejora de la precisión del cálculo del punto (posición, velocidad, fechado).

Para ello, los sistemas GNSS conocidos pueden completarse mediante los sistemas denominados de aumentación que proporcionan en tiempo real unas correcciones en conexión con la actividad de la ionosfera. Se utilizan unos sistemas de aumentación basados en estos satélites, comúnmente denominado SBAS por su acrónimo anglosajón *Satellite-Based Augmentation System*. Este es el caso por ejemplo del sistema EGNOS para Europa que difunde a partir de varios satélites geoestacionarios unos datos de correcciones con destino en los sistemas GPS.

Se han concebido diversos procedimientos para permitir una estimación del contenido electrónico de la ionosfera y tener en cuenta su impacto sobre los sistemas de navegación. En un enfoque conocido, comúnmente denominado modelo TRIN por su acrónimo anglosajón *TRiangular INterpolation*, la ionosfera es asimilada a una capa delgada alrededor del globo terrestre en la que se acumula la totalidad de la carga electrónica de la ionosfera.

El retardo de una señal emitida por un satélite, situado a una altitud superior a la capa delgada, hacia un receptor situado a más baja altitud que la capa delgada, se estima entonces por medio del punto de intersección de la capa delgada con el eje de transmisión de la señal, también denominado línea de visión, del satélite al receptor. Este punto es denominado comúnmente IPP por su acrónimo anglosajón *Ionosphere Pierce Point*. Se determina el retardo de una señal que atraviesa la capa delgada en un punto IPP dado por medio del contenido electrónico total vertical determinado en ese punto para un usuario mono-frecuencia. El contenido electrónico total o VTEC, por su acrónimo anglosajón *Vertical Total Electron Content*, representa la carga electrónica total de la ionosfera que habría percibido una señal que pase por este IPP y que atraviese la capa delgada según un eje vertical.

La estimación del contenido electrónico total vertical VTEC permite establecer una cartografía de los retardos de la ionosfera en forma de una rejilla esférica centrada en la tierra, situada en altura e inmóvil con relación a la tierra. El usuario se servirá entonces de esta rejilla, comúnmente denominada rejilla IONO, para calcular el retardo ionosférico en las líneas de visión de cada satélite considerado, por interpolación lineal sobre esta rejilla. Se difunde una actualización regular de los valores de la rejilla IONO, típicamente cada 30 segundos, por los sistemas SBAS con destino en los usuarios del sistema de navegación.

Según un procedimiento conocido, la rejilla IONO es accesible para los usuarios de los sistemas de navegación, se calcula por interpolación a partir de un segundo mallado que cartografía las mediciones del contenido electrónico total vertical VTEC. Contrariamente a la rejilla IONO, este segundo mallado no está ligado a la rotación de la tierra. El segundo mallado tiene un tiempo solar fijo, siendo constante la exposición al sol de cada uno de los nodos del mallado. El mallado se libera así de las evoluciones grandes de la capa ionosférica en el transcurso de una jornada. En este enfoque conocido bajo el nombre de modelo TRIN el segundo mallado está formado por un polígono regular centrado en la tierra que posee mil doscientas ochenta caras triangulares. A cada uno de los seiscientos cuarenta y dos vértices situadas alrededor del globo terrestre se asocia una evaluación del contenido electrónico total vertical VTEC. La figura 1 ilustra en una vista superior los mallados de la rejilla IONO y del polígono del modelo TRIN. Los nodos de la rejilla IONO se denominan IGP, por el acrónimo anglosajón *Ionospheric Grid Point*, los nodos del poliedro del modelo TRIN se denominan TMV, por el acrónimo anglosajón *Trin Model Vertex*. Típicamente, la distancia 10 que separa dos nodos IGP es de aproximadamente 550 km en el ecuador, disminuyendo esta distancia en función de la latitud. La distancia 11 que separa dos nodos TMV es de aproximadamente 950 km.

Las figuras 2.a y 2.b ilustran el principio del procedimiento de estimación del contenido electrónico de la ionosfera implementado actualmente para la corrección de los sistemas de navegación.

Una pluralidad de balizas 21 receptoras situadas sobre la superficie del globo terrestre 22 captan un conjunto de señales 23 emitidas por una pluralidad de satélites 24 de navegación situados en órbita. La ionosfera 25 se asimila a una capa delgada alrededor del globo terrestre en la que se acumula la totalidad de la carga electrónica. Se denomina ITL, por su acrónimo anglosajón *Ionosphere Thin Layer*, la superficie, por ejemplo esférica, de la capa delgada. Los vértices TMV de un poliedro denominado IPM por su acrónimo anglosajón *Ionosphere Polyhedral Mesh* forman el mallado del modelo TRIN. Los vértices TMV se sitúan sobre la superficie ITL.

Se sabe que la recepción por una baliza 21 de una señal 23 emitida por un satélite 24 en dos frecuencias, por ejemplo las frecuencias GPS L1 y GPS L2, permite, mediante una técnica conocida para el experto en la materia determinar la distancia entre la baliza 21 y el satélite 24, así como el contenido electrónico total a lo largo del eje de transmisión de la señal. Para más detalles sobre esta técnica, se podrá referir a la obra "Understanding GPS Principles and Applications", Elliott D. Kaplan, 2005, Artech House.

Según esta técnica, es posible, para cada señal 23 bifrecuencia determinar una estimación del contenido electrónico total VTEC, para el punto IPP de intersección entre el eje de transmisión de la señal 23 y la superficie ITL.

Como se ha representado en la figura 2.b, la recogida de un conjunto de medidas realizadas mediante una pluralidad de balizas 21 receptoras que reciben las señales de radiofrecuencia emitidas por una pluralidad de satélites 24 de navegación emisores situados en órbita, permite construir una nube 26 de puntos 27 sobre la superficie ITL; estando caracterizado cada punto 27 de la nube 26 por unas coordenadas espaciales del IPP y por una estimación del contenido electrónico total vertical VTEC en este punto.

En un procedimiento conocido, se realiza una estimación del contenido electrónico total vertical VTEC<sub>i</sub> en cada una de los vértices TMV del mallado IPM por medio de un filtro de Kalman a partir de una selección de puntos 27 situados a una distancia del vértice TMV inferior a un umbral S predeterminado.

A partir de esta cartografía de valores VTEC<sub>i</sub> sobre el mallado IPM, se determina una cartografía VTEC sobre la rejilla IONO, por ejemplo mediante interpolación lineal. Esta cartografía se pone a continuación a disposición de los usuarios de los sistemas de navegación, por ejemplo por medio de los sistemas de aumentación tales como EGNOS.

Las figuras 3.a y 3.b ilustran el principio del procedimiento en un caso simplificado de una distribución mono-dimensional. A partir de una distribución de valores medidos de VTEC asociados a sus abscisas IPP, el procedimiento estima unos valores VTEC<sub>1</sub>, VTEC<sub>2</sub> y VTEC<sub>3</sub> para unas abscisas predeterminadas X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> y X<sub>3</sub> que corresponden a los vértices TMV en el caso simplificado de un mallado mono-dimensional.

Típicamente, el cálculo de VTEC<sub>2</sub> está limitado por la necesidad de hacer pasar una recta por el punto VTEC<sub>1</sub> en la abscisa X<sub>1</sub> y otra por el punto VTEC<sub>3</sub> en la abscisa X<sub>3</sub>, así como por la limitación de situar VTEC<sub>2</sub> lo más cerca de la nube de puntos. El procedimiento se repite sucesivamente para cada uno de los puntos a lo largo del eje de abscisas. Como se ha representado en la figura 3.b, la estimación del contenido electrónico total para una abscisa X<sub>i</sub> dada por medio de los puntos de soporte X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> y X<sub>3</sub> puede seguir el caso convertirse en relativamente alejado de las medidas del contenido electrónico total. Las figuras 3.a y 3.b ilustran dos límites del enfoque actualmente implementado: el error cometido en cada estimación del contenido electrónico total sobre los nodos del mallado y la no linealidad de la estimación del contenido electrónico total en la proximidad de los nodos del mallado.

El procedimiento de estimación del contenido electrónico de la ionosfera actualmente implementado permite un cálculo del posicionamiento cuya precisión es suficiente cuando las heterogeneidades del contenido electrónico de la ionosfera son reducidas. Por el contrario, cuando la ionosfera presenta una actividad mayor, por ejemplo durante los picos de actividad solar, se constatan unas heterogeneidades de grandes amplitudes en el interior de superficies geográficas reducidas. Los procedimientos de estimación del contenido electrónico ionosférico existentes, como el modelo TRIN, no permiten una estimación suficientemente precisa para generar unas correcciones fiables, y permitir un posicionamiento satisfactorio para los usuarios de los sistemas de navegación. Se conocen en particular los documentos de Patente US 5.428.358, WO2007/032947 y US2006/017610 así como la publicación de Xingliang Huo et ál. titulada "Monitoring the Daytime Variations of Equatorial Ionospheric Anomaly Using IONEX Data and Champ GPS Data", IEEE Transactions, Vol. 49 n.º1, 1-1-2011. Estos documentos ilustran la técnica anterior conocida en la fecha de la presente invención.

La invención viene a proponer una solución alternativa para la estimación del contenido electrónico total de la ionosfera paliando las dificultades de implementación citadas anteriormente en el presente documento.

Con este fin, la invención tiene por objeto un procedimiento adaptativo de estimación del contenido electrónico de la ionosfera **caracterizado por que** comprende las etapas siguientes realizadas sucesivamente:

- una recogida de un conjunto de medidas realizadas por varias balizas receptoras fijas al suelo que reciben una señales de radiofrecuencia emitidas por varios satélites de navegación emisores situados en órbita,
- un cálculo, para cada una de las señales del conjunto de medidas, de las coordenadas espaciales del punto de intersección entre un eje de transmisión de la señal y una superficie que rodea la tierra, y de un contenido electrónico total vertical determinado en este punto de intersección; siendo así definida una nube de puntos,

- constituidos por las coordenadas espaciales del punto de intersección y de un contenido electrónico total vertical, un cálculo, por medio de un estimador estadístico, de un contenido electrónico total vertical, para cada uno de los nodos de un mallado inicial de la superficie,
- un análisis estadístico de dispersión del contenido electrónico total vertical en cada uno de los nodos del mallado inicial, que permite seleccionar entre dos niveles de perturbación predeterminados, una perturbación reducida o una perturbación grande, de la ionosfera,
- una etapa que comprende:
  - en el caso de una perturbación reducida, un cálculo que permite definir un estimador estadístico adaptado, a partir del estimador estadístico inicial,
  - en el caso de una perturbación grande, un cálculo que permite generar un nuevo mallado adaptado de la superficie, a partir del mallado inicial,
- un análisis estadístico del error del contenido electrónico total determinado, por medio del estimador estadístico adaptado y del mallado inicial en el caso de una perturbación reducida, o por medio del estimador estadístico inicial y del mallado adaptado en el caso de una perturbación grande; permitiendo el análisis estadístico de error seleccionar entre dos niveles de errores predeterminados, un error reducido que implica una validación de la adaptación del procedimiento, o un error grande que implica la parada del procedimiento.

La invención se comprenderá mejor y surgirán otras ventajas con la lectura de la descripción detallada de los modos de realización dados a título de ejemplo en las figuras siguientes.

- La figura 1, ya presentada, ilustra en una vista superior los mallados de la rejilla IONO y del modelo TRIN así como las terminologías asociadas,
- las figuras 2.a y 2.b, ya presentadas, ilustran el principio de un procedimiento conocido de estimación del contenido electrónico de la ionosfera,
- las figuras 3.a y 3.b, ya presentadas, ilustran el principio del procedimiento en un caso simplificado de una distribución mono-dimensional,
- la figura 4 ilustra en la forma de un organigrama un modo de realización preferido del procedimiento adaptativo de estimación del contenido electrónico de la ionosfera según la invención,
- las figuras 5.a y 5.b ilustran el principio del análisis estadístico de dispersión del contenido electrónico de la ionosfera,
- la figura 6 ilustra el principio del análisis taxonómico de la distribución del punto alrededor de un nodo de mallado,
- las figuras 7.a y 7.b ilustran el principio de un refinado del mallado en el caso de una distribución que pueda combinarse,
- las figuras 8.a y 8.b ilustran el principio de un refinado del mallado en el caso de una distribución estocástica,
- las figuras 9.a y 9.b ilustran el principio del procedimiento adaptativo según la invención en un caso simplificado de una distribución mono-dimensional.

Por razones de claridad, los mismos elementos llevarán las mismas referencias en las diferentes figuras.

La figura 4 ilustra en forma de un organigrama un modo de realización preferido del procedimiento adaptativo de estimación del contenido electrónico de la ionosfera según la invención.

Según la invención, el procedimiento comprende una **etapa 101** de recogida de un conjunto de medidas MSS realizadas por varias balizas 21 receptoras fijadas al suelo que reciben unas señales 23 de radiofrecuencia emitidas por varios satélites 24 de navegación emisores situados en órbita.

Sobre el mismo principio que el anteriormente descrito para la figura 2.a, la recepción por la baliza 21 de la señal 23 emitida en dos frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , permite determinar dos seudo-distancias  $d_1$  y  $d_2$  entre la baliza 21 y el satélite 24, por medio de la fórmula simplificada siguiente, desprovista del error de las medidas con unos relojes perfectos:

$$d_i = D + STEC / f_i^2 + T \quad (i)$$

en la que STEC representa el contenido electrónico total a lo largo de la línea de visión de la señal 23 y T representa el retardo acumulado por la señal cuando atraviesa la troposfera. El conjunto de medidas MSS comprende para cada señal 23, al menos una distancia, un valor TEC y unas coordenadas espaciales de la línea de visión de la señal.

El procedimiento incluye una **etapa 102** de cálculo para cada una de las señales 23 del conjunto de medidas MSS, de las coordenadas espaciales del punto de intersección IPP entre un eje de transmisión de la señal 23 y una superficie ITL centrada en la tierra, y un contenido electrónico total vertical VTEC determinado en este punto de intersección IPP. Se define así una nube 26 de puntos 27; estando constituido cada punto 27 por unas coordenadas espaciales del punto de intersección IPP y un contenido electrónico total vertical VTEC.

Una estimación del contenido electrónico total vertical VTEC en un punto IPP se determina, a partir de un conjunto de medidas MSS, como mínimo dos que utilicen unas frecuencias diferentes, mediante una técnica conocida para el

experto en la materia con la fórmula siguiente:

$$\text{STEC}(\varepsilon) = \text{VTEC} s(\varepsilon) \quad (\text{ii})$$

en la que  $s(\varepsilon)$  es una función de proyección que depende de  $\varepsilon$  que representa la inclinación de la línea de visión. Se podrá referir a la publicación "Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment: RTCA DO-229D" publicada en diciembre de 2006 por RTCA, "Radio Technical Commission for Aeronautics" que detalla este modo de cálculo.

En un modo de realización preferido de la invención, se implementa la superficie ITL utilizada en el modelo TRIN. Esta elección presenta varias ventajas como se describe a continuación. Sin embargo, la invención no se limita a esta superficie; siendo posible cualquier superficie que rodea la tierra, por ejemplo una superficie compacta sin bordes centrada sobre la tierra 22. Ventajosamente, se implementa la superficie homeomorfa en una esfera situada en altitud.

El procedimiento incluye una **etapa 103** de cálculo, por medio de un estimador estadístico ESC, de un contenido electrónico total vertical  $\text{VTEC}_i$  para cada uno de los nodos  $N_i$  de un mallado inicial IPM de la superficie ITL. En un modo de realización preferido de la invención, se implementa el mallado inicial IPM utilizado en el modelo TRIN. El mallado IPM forma de ese modo un poliedro regular centrado en la tierra que posee mil doscientas ochenta caras triangulares. Los nodos  $N_i$  del mallado corresponden a los seiscientos cuarenta y dos vértices TMV situados alrededor del globo terrestre. El mallado IPM no está vinculado a la rotación de la tierra, cada uno de los nodos está en un tiempo solar fijo.

La elección del mallado inicial IPM que corresponde al mallado utilizado en el modelo de TRIN presenta varias ventajas como se describe a continuación. Sin embargo, la invención no se limita al mallado IPM; es posible cualquier tipo de mallado de la superficie ITL, pudiendo estar los nodos en un tiempo solar fijo o no y en número variable.

Ventajosamente, el estimador estadístico ESC determina un contenido electrónico total vertical  $\text{VTEC}_i$  en cada uno de los nodos  $N_i$  del mallado IPM, por medio de un filtro de Kalman que tiene en cuenta los puntos 27 de la nube 26 situados a una distancia del nodo  $N_i$  considerado inferior a un umbral  $S$  predeterminado.

El procedimiento incluye una **etapa 104** de análisis estadístico de dispersión ASD del contenido electrónico total vertical  $\text{VTEC}_i$  en cada uno de los nodos  $N_i$  del mallado inicial IPM, que permite seleccionar entre dos niveles de perturbación predeterminados, una perturbación reducida  $P_1$  o una perturbación grande  $P_2$ , característicos de la actividad de la ionosfera.

Ventajosamente, la etapa 104 de análisis estadístico de dispersión ASD incluye las etapas siguientes realizadas sucesivamente:

- una selección para cada uno de los nodos  $N_i$  del mallado inicial IPM de un subconjunto  $\text{SEP}_i$  de puntos 27 situados a una distancia del nodo  $N_i$  considerado inferior a un umbral  $S_1$  predeterminado,
- un cálculo para cada uno de los nodos  $N_i$  del mallado inicial IPM de una dispersión local  $D_i$  calculada por procedimientos estadísticos, tales como por ejemplo una covarianza o un residuo de mínimos cuadrados, del contenido electrónico total vertical VTEC de los puntos 27 del subconjunto  $\text{SEP}_i$ ,
- una selección entre los dos niveles de perturbaciones de la ionosfera,  $P_1$  o  $P_2$  en función de un valor de dispersión local  $D_i$ .

Ventajosamente, el análisis estadístico de dispersión ASD puede limitarse a una parte del mallado de la superficie ITL, por ejemplo conservando nada más que los nodos expuestos al sol.

La etapa 104 de análisis estadístico de dispersión ASD se ilustra también por las figuras 5.a y 5.b descritas a continuación.

El procedimiento incluye una **etapa 105** de cálculo de un estimador estadístico adaptado ESCA, que permite determinar, además del contenido electrónico total vertical  $\text{VTEC}_i$  en cada uno de los nodos  $N_i$ , un gradiente espacial de evolución  $\text{GSE}_i$  del contenido electrónico total vertical en la proximidad del nodo  $N_i$  considerado. Un estimador estadístico adaptado ESCA se calcula cuando se determina una perturbación reducida  $P_1$  mediante el análisis estadístico de las dispersiones ASD.

Ventajosamente, el estimador estadístico adaptado ESCA permite calcular en cada uno de los nodos  $N_i$  del mallado IPM, un valor de  $\text{VTEC}_i$  y dos pendientes, determinadas en una referencia espacial predeterminada, que definen el gradiente espacial de evolución  $\text{GSE}_i$  del contenido electrónico total vertical VTEC en la proximidad del nodo  $N_i$  considerado.

Ventajosamente, el estimador estadístico adaptado ESCA se determina por medio de una regresión lineal múltiple adecuada para tener en cuenta unas incoherencias locales de las medidas de VTEC en la proximidad del nodo  $N_i$  considerado. De ese modo, el estimador estadístico adaptado ESCA permite limitar la no linealidad del contenido

electrónico total vertical VTEC en la proximidad de los nodos  $N_i$  del mallado IPM.

Como resultado de la etapa 105, se realiza un cálculo del contenido electrónico total vertical VTEC<sub>i</sub> y su gradiente espacial de evolución GSE<sub>i</sub> en una etapa 112 por medio del estimador estadístico adaptado ESCA en cada uno de los puntos  $N_i$  del mallado inicial IPM.

- 5 El procedimiento incluye una **etapa 106** de cálculo que permite generar un nuevo mallado adaptado IPMA de la superficie ITL, a partir del mallado inicial IPM. En el caso en el que se determina una perturbación grande  $P_2$  mediante el análisis estadístico de las dispersiones ASD, se determina un mallado adaptado IPMA a partir del mallado inicial (IPM), según un proceso iterativo aplicado a cada uno de los nodos ( $N_i$ ) del mallado inicial (IPM) y que comprende unas etapas de cálculo 107, 108 y 109.
- 10 En una **etapa 107**, un análisis taxonómico de una distribución DIST<sub>i</sub> de puntos 27 situados a una distancia del nodo  $N_i$  considerado inferior a un umbral  $S_2$  predeterminado, permite tanto:
- definir, cuando la distribución DIST<sub>i</sub> es agregable, varios agregados SEP<sub>ik</sub> de puntos 27 para los que los valores de contenido electrónico total vertical VTEC son homogéneos, y seleccionar una etapa 108 de refinado del mallado IPM mediante subclase D<sub>A</sub>,
  - seleccionar, cuando la distribución DIST<sub>i</sub> es estocástica, una etapa 109 de refinado del mallado IPM mediante subdivisión D<sub>S</sub>.

Ventajosamente, la etapa 107 comprende también unos medios que permiten limitar para cada punto  $N_i$  el número de agregados SEP<sub>ik</sub> inferior a un umbral predeterminado.

- 20 La etapa 107 de análisis taxonómico realizada sobre la distribución DIST<sub>i</sub> se ilustra también por la figura 6 descrita a continuación.

El procedimiento incluye una **etapa 108** que consiste en añadir un nuevo nodo de mallado AMV<sub>ik</sub> mediante agregados SEP<sub>ik</sub> en el caso en el que la distribución DIST<sub>i</sub> es agregable. La posición del nuevo nodo AMV<sub>ik</sub> corresponde a un baricentro de los puntos 27 del agregado SEP<sub>ik</sub>.

- 25 Esta etapa permite situar los nodos de mallado en la proximidad de los óptimos locales. El procedimiento se adapta a las evoluciones de la ionosfera buscando periódicamente estos óptimos locales, obteniendo una cartografía realista de las heterogeneidades de la ionosfera y sus evoluciones. Esto permite mejorar la precisión de la estimación del contenido electrónico total en el entorno de los nodos de mallado y asegurar una evolución lineal en la proximidad de los nodos.

- 30 En un primer modo de realización, la posición del nuevo nodo AMV<sub>ik</sub> corresponde al isobaricentro de los puntos 27; deduciéndose una ponderación idéntica en cada punto 27.

- 35 En un segundo modo de realización, la posición de un nuevo nodo AMV<sub>ik</sub> en el caso de la distribución DIST agregable, corresponde al baricentro de los puntos 27 del agregado SEP<sub>ik</sub> cuya ponderación  $P_{ik}$  depende de un ángulo formado entre el eje de transmisión de la señal 23 del punto considerado 27 y un eje vertical con relación a la tierra 22 que pasa por este punto 27. La ponderación permite de ese modo favorecer los puntos 27 determinados a partir de una señal 23 cuyo eje de transmisión sea sensiblemente vertical; siendo a priori más precisas las medidas de VTEC en estos puntos. Este modo de realización es particularmente ventajoso porque permite utilizar los puntos más fiables.

- 40 Ventajosamente, la etapa 108 incluye además uno o varios criterios de coherencia geométrica con el objetivo de generar un mallado IPMA lo más adaptado a la dinámica de la ionosfera. Un primer criterio de coherencia geométrica consiste en suprimir los nodos  $N_i$  del mallado inicial IPM situados a una distancia de un nuevo nodo AMV<sub>ik</sub>, inferior a un umbral predeterminado. Un segundo criterio de coherencia geométrica consiste en suprimir los nuevos nodos AMV<sub>ik</sub> generados fuera de la zona predeterminada.

- 45 La etapa 108 de refinado del mallado mediante subclase se ilustra también por las figuras 7.a y 7.b descritas a continuación.

- 50 El procedimiento comprende una **etapa 109** que consiste en añadir varios nuevos nodos de mallado SMV<sub>ik</sub> en el caso en el que la distribución DIST<sub>i</sub> es estocástica; siendo definido el número y la posición de los nuevos nodos SMV<sub>ik</sub> en función de los nodos  $N_i$  existentes y de una regla de subdivisión predeterminada.

- 55 Se pueden concebir varias técnicas de subdivisiones según la invención. Las figuras 8.a y 8.b presentan dos modos de realización del refinado del mallado por subdivisión. Las caras a las que  $N_i$  pertenece se referencian como 81. Los nodos vecinos a los que está conectado  $N_i$  son referenciados como 82.

Según un primer modo de realización, se posiciona un nuevo nodo SMV<sub>ik</sub> entre el nodo  $N_i$  considerado y cada uno de los nodos 82 vecinos que se le conectan. Cada nuevo nodo SMV<sub>ik</sub> se posiciona sobre la superficie ITL, a igual distancia del nodo  $N_i$  y del nodo vecino 82 considerado, de manera que se minimice la distancia que le separa del nodo  $N_i$  considerado.

Según un segundo modo de realización, se posiciona un nuevo nodo  $SMV_{ik}$  para cada una de las caras 81 a las que pertenece el nodo  $N_i$  considerado. Correspondiendo la posición del nuevo nodo  $SMV_{ik}$  a un baricentro de los nodos  $N_i$  y 82 de la cara 81 considerada.

5 La etapa 109 de refinado del mallado por subdivisión se ilustra también por las figuras 7.a y 7.b descritas a continuación.

El procedimiento incluye una **etapa 110**, realizada a la salida del proceso iterativo de la etapa 106 que consiste en comparar unas dispersiones espaciales de los nuevos nodos  $AMV_{ik}$  y  $SMV_{ik}$  del mallado adaptado IPMA y los nodos  $N_i$  del mallado inicial IPM. Esta etapa tiene como objetivo definir un criterio que permita validar, proseguir o interrumpir el refinado del mallado, realizado por las etapas 107, 108, 109.

10 El principio del cálculo es el siguiente:

- Si  $\sigma_i$  representa la dispersión espacial de un nodo  $N_i$  determinado por  $n_i$  puntos 27,
- Si  $\sigma_{ik}$  representa la dispersión espacial de un nuevo nodo  $AMV_{ik}$  (o  $SMV_{ik}$ ) determinado por  $n_{ik}$  puntos 27,

En un modo de realización, el nuevo mallado adaptado IPMA aporta una mejora con relación al mallado inicial IPM, ya que:

15 
$$\sigma_{ik} \cdot \chi_{n_{ik}}(AMV_{ik}) < \sigma_i \cdot \chi_{n_i}(N_i) \quad (iii)$$

en la que el parámetro  $\chi$  permite ponderar las dispersiones por el número de puntos 27 disponibles para el cálculo de dispersión.

Según la invención, la etapa 110 incluye una selección de las etapas siguientes:

- el cálculo, en una etapa 112, del contenido electrónico total vertical  $VTEC_i$  en cada uno de los nodos del mallado adaptado IPMA por medio del estimador estadístico ESC, en el caso en el que las dispersiones espaciales de los nuevos nodos  $AMV_{ik}$  y  $SMV_{ik}$  sean inferiores a las dispersiones espaciales de los nodos  $N_i$  del mallado inicial IPM; o dicho de otro modo cuando se cumple la relación (iii).
- la parada del procedimiento, en una etapa 111, en el caso en el que las dispersiones espaciales de los nuevos nodos  $AMV_{ik}$  y  $SMV_{ik}$  sean superiores a las dispersiones espaciales de los nodos  $N_i$  del mallado inicial IPM; o dicho de otro modo cuando no se cumple la relación (iii).
- el inicio de un nuevo cálculo, por medio de la etapa 106 ya descrita, de refinado del mallado aplicado sobre el conjunto de los nodos del nuevo mallado IPMA, en el caso en el que las dispersiones espaciales de los nuevos nodos  $AMV_{ik}$  y  $SMV_{ik}$  sean a la vez inferiores a las dispersiones espaciales de los nodos  $N_i$  del mallado inicial IPM y superiores a un umbral predeterminado; siendo considerado el mallado mejorable.

30 Ventajosamente, la etapa 110 incluye también una prueba sobre el número de nodos del mallado adaptado IPMA. Cuando este número sobrepasa un umbral predeterminado, el nuevo mallado IPMA no es válido. El procedimiento se interrumpe en la etapa 111.

El procedimiento incluye una **etapa 111** que consiste en interrumpir la adaptación del procedimiento en favor del procedimiento anteriormente definido como por ejemplo el modelo TRIN.

35 El procedimiento incluye una **etapa 112** que consiste en:

- calcular, en el caso de una perturbación reducida ( $P_1$ ), un nuevo contenido electrónico total vertical  $VTEC_i$  y su gradiente espacial de evolución  $GSE_i$  por medio del estimador estadístico adaptado ESCA para el mallado inicial IPM,
- calcular, en el caso de una perturbación grande ( $P_2$ ), un contenido electrónico total vertical  $VTEC_1$  por medio del estimador estadístico inicial ESC para el mallado adaptado IPMA.

40 El procedimiento incluye una **etapa 113** de análisis estadístico de error ASE del contenido electrónico total vertical  $VTEC_i$  determinado en la etapa 112, por medio del estimador estadístico adaptado ESCA y del mallado inicial IPM en el caso de una perturbación reducida  $P_1$ , o por medio del estimador estadístico inicial ESC y del mallado adaptado IPMA en el caso de una perturbación grande  $P_2$ . El análisis estadístico de error ASE permite seleccionar entre dos niveles de error predeterminados, un error reducido  $E_1$  que implica una validación de la adaptación del procedimiento en una etapa 114, o un error grande  $E_2$  que implica la parada del procedimiento en una etapa 115.

En el caso de una perturbación reducida  $P_1$ , el análisis estadístico de error ASE incluye las etapas siguientes realizadas sucesivamente:

- una selección para cada uno de los nodos  $N_i$  de un subconjunto  $SEP_{i4}$  de puntos 27 posicionados a una distancia del nodo  $N_i$  considerado inferior a un umbral predeterminado  $S_4$ ,
- un cálculo para cada uno de los puntos 27 del subconjunto  $SEP_{i4}$  de una diferencia  $DIFF$  entre el contenido electrónico total vertical  $VTEC_i$  determinado en el nodo  $N_i$  por medio del estimador estadístico ESCA y el

contenido electrónico total vertical VTEC del punto 27 considerado,

- un cálculo para cada uno de los nodos  $N_i$  de una dispersión local  $D_{i4}$  de las diferencias DIFF calculadas por procedimientos estadísticos, tales como por ejemplo una covarianza o un residuo de mínimos cuadrados,
- una selección entre dos niveles de errores predeterminados, un error reducido  $E_1$  o un error grande  $E_2$ , en función de un valor de dispersión local  $D_{i4}$ .

Ventajosamente, el análisis estadístico de error ASE aplicado en el caso de una perturbación reducida  $P_1$  incluye una segunda condición adecuada para determinar un error grande  $E_2$  por medio de una comparación en cada uno de los nodos  $N_i$  del valor del gradiente espacial  $GSE_i$  con los valores del gradiente espacial  $GSE_i$  de los nodos vecinos del nodo  $N_i$  considerado. Cuando se detectan unas desviaciones del gradiente superiores a un umbral predeterminado, se selecciona un error grande  $E_2$ , esta condición se añade a las condiciones anteriores.

En el caso de una perturbación grande  $P_2$ , el análisis estadístico de error ASE incluye según un mismo principio, las etapas siguientes realizadas sucesivamente:

- una selección para cada uno de los nodos  $N_i$ ,  $AMV_{ik}$  o  $SMV_{ik}$  del mallado adaptado IPMA de un subconjunto  $SEP_{i5}$  de puntos 27 posicionados a una distancia del nodo  $N_i$ ,  $AMV_{ik}$  o  $SMV_{ik}$  considerado inferior a un umbral predeterminado  $S_5$ ,
- un cálculo para cada uno de los puntos 27 del subconjunto  $SEP_{i5}$  de una diferencia DIF entre el contenido electrónico total vertical VTEC<sub>i</sub> determinado en el nodo  $N_i$ ,  $AMV_{ik}$  o  $SMV_{ik}$  por medio del estimador estadístico ESC y el contenido electrónico total vertical VTEC del punto 27 considerado,
- un cálculo para cada uno de los nodos  $N_i$ ,  $AMV_{ik}$  o  $SMV_{ik}$  de una dispersión local  $D_{i5}$  de las diferencias DIF calculadas por procedimientos estadísticos, tales como por ejemplo una covarianza o un residuo de mínimos cuadrados,
- una selección entre dos niveles de errores predeterminados, un error reducido  $E_1$  o un error grande  $E_2$ , en función de un valor de dispersión local  $D_{i5}$ .

Ventajosamente, el análisis estadístico de error ASE se puede limitar a una parte del mallado de la superficie ITL, por ejemplo no conservando más que los nodos expuestos al sol. Ventajosamente, los análisis estadísticos de dispersión ASD y de error ASE no tienen en cuenta más que un subconjunto de los nodos  $N_i$ ,  $AMV_{ik}$  o  $SMV_{ik}$  del mallado de la superficie ITL seleccionada partir de uno o varios criterios geométricos; tratando uno de los criterios por ejemplo sobre la posición de los nodos con relación al sol.

A la salida de la etapa 113, un error reducido  $E_1$  permite la utilización, en una etapa 114, de los valores VTEC<sub>i</sub> calculados en los nodos del mallado, IPM o IPMA. Se determinan unos valores de correcciones sobre una rejilla de usuario, como por ejemplo la rejilla IONO, a partir de estos valores VTEC<sub>i</sub>, por ejemplo mediante interpolación lineal. Estos valores de correcciones se difunden hacia los usuarios de los sistemas GNSS. A la inversa, un error grande  $E_2$  implica la parada del procedimiento en una **etapa 115** similar a la etapa 111. Los valores de VTEC<sub>i</sub> calculados, no son válidos y no se difunden.

Las figuras 5.a y 5.b ilustran el principio del análisis estadístico de dispersión ASD del contenido electrónico de la ionosfera, tal como se describe por la figura 4 en la etapa 104 del procedimiento. Para cada nodo  $N_i$  del mallado IPM, el procedimiento incluye una etapa de selección de un subconjunto  $SEP_i$  de puntos 27 de la nube 26 posicionados a una distancia del nodo  $N_i$  inferior a un umbral predeterminado  $S_1$ .

En la figura 5.a se representan bajo la forma de un histograma, los valores medidos de VTEC de los puntos 27 para cada subconjunto  $SEP_i$ . El procedimiento incluye una etapa de cálculo de una dispersión  $D_i$ , denominada dispersión local, de las medidas del contenido electrónico total vertical del subconjunto  $SEP_i$ .

El procedimiento incluye a continuación una etapa de selección entre dos niveles de perturbaciones de la ionosfera: una perturbación reducida  $P_1$ , una perturbación grande  $P_2$ . Según la invención, la selección entre los dos niveles de perturbación se determina mediante un cálculo dependiente de un valor de dispersión local  $D_i$ .

En un modo de realización posible de la invención, las dispersiones locales  $D_i$  se determinan en cada uno de los nodos  $N_i$  por procedimientos estadísticos, tales como por ejemplo una covarianza o un residuo de mínimos cuadrados.

Las figuras 5.a y 5.b ilustran el principio del análisis estadístico de dispersión para dos niveles de perturbación. En la figura 5.a, las dispersiones son relativamente limitadas, la perturbación calculada es reducida. En la figura 5.b, las dispersiones son más elevadas, la perturbación calculada es grande.

La figura 6 ilustra el principio del análisis taxonómico de una distribución del punto alrededor del nudo  $N_i$  del mallado, tal como se describe para la figura 4 en la etapa 107 del procedimiento. La distribución  $DIST_i$  comprende los puntos 27 de la nube 26 posicionados a una distancia del nodo  $N_i$  inferior a un umbral predeterminado  $S_2$ .

Las figuras 7.a y 7.b ilustran el principio de un refinado del mallado en el caso de una distribución agregable, tal como se describe para la figura 4 en la etapa 108 del procedimiento. Un análisis taxonómico realizado sobre la distribución  $DIST_i$  de puntos 27 permite determinar varios agregados  $SEP_{ik}$  de puntos 27, tales como los

representados en las figuras 7.a para los que una dispersión del contenido electrónico total vertical es inferior a un umbral predeterminado  $S_3$ .

Para cada uno de estos agregados  $SEP_{ik}$  se define un nuevo nodo  $AMV_{ik}$  correspondiente al baricentro de los puntos 27 del agregado  $SEP_{ik}$  cuya ponderación  $P_{ik}$  depende de un ángulo formado entre el eje de transmisión de la señal 23 del punto considerado 27 y un eje vertical con relación a la tierra 22 que pasa por este punto 27. La ponderación permite de ese modo favorecer los puntos 27 determinados a partir de una señal 23 cuyo eje de transmisión sea sustancialmente vertical; siendo a priori más precisas las mediciones de VTEC en estos puntos.

Este modo de realización es particularmente ventajoso porque permite posicionar los nodos del mallado en la proximidad de los óptimos locales. El procedimiento se adapta a las evoluciones de la ionosfera buscando periódicamente estos óptimos locales. Se obtiene una cartografía realista de las heterogeneidades de la ionosfera y sus evoluciones. Esto permite mejorar la precisión de la estimación del contenido electrónico total sobre los nodos del mallado y asegurar una evolución lineal en la proximidad de los nodos.

Ventajosamente, el procedimiento incluye además uno o varios criterios de coherencia geométrica con la finalidad de generar un mallado IPMA más adaptado a la dinámica de la ionosfera. Un primer criterio de coherencia geométrica consiste en suprimir los antiguos nodos  $N_i$  posicionados a una distancia del nuevo nodo  $AMV_{ik}$ , inferior a un umbral predeterminado. Un segundo criterio de coherencia geométrica consiste en suprimir los nuevos nodos  $AMV_{ik}$  generados fuera de una zona predeterminada.

Las figuras 8.a y 8.b ilustran el principio de un refinado del mallado en el caso de una distribución estocástica, tal como se describe en la figura 4 en la etapa 109 el procedimiento. El mallado adaptado IPMA se determina a partir del mallado inicial IPM por subdivisión. Se pueden concebir varias técnicas de subdivisiones según la invención. Las figuras 8.a y 8.b presentan dos modos de realización del refinado por subdivisión. Las caras a las que pertenece  $N_i$  son referenciadas como 81. Los nodos vecinos a los que se conecta  $N_i$  son referenciados como 82.

Según un primer modo de realización, denominado *subdivisión por la cara  $N+1$* , el mallado adaptado IPMA está formado por la adición de un nuevo nodo  $SMV_{ik}$  entre el nodo  $N_i$  considerado y cada uno de los nodos 82 vecinos que se le conectan. Cada nuevo nodo  $SMV_{ik}$  se posiciona sobre la superficie ITL, a igual distancia del nodo  $N_i$  y el nodo vecino 82 considerado; siendo así definida la posición del nodo  $SMV_{ik}$  de manera que se minimice la distancia que le separa del nodo  $N_i$ .

Según un segundo modo de realización, denominado *subdivisión baricéntrica*, el mallado adaptado IPMA se forma por la adición de un nuevo nodo  $SMV_{ik}$  para cada una de las caras 81. Correspondiendo la posición del nuevo nodo  $SMV_{ik}$  al baricentro de los nodos de la cara 81 considerada.

Las figuras 9.a y 9.b ilustran el principio del procedimiento adaptativo según la invención en un caso simplificado de una distribución mono-dimensional. Como ya se ha presentado para las figuras 3.a y 3.b, la figura representa, en trazado de puntos, una evolución de los valores medidos del contenido electrónico total vertical VTEC. Los procedimientos conocidos en la actualidad permiten estimar estos valores  $VTEC_i$ , representados por unos círculos en las figuras 9.a y 9.b para unas abscisas  $x_1, x_2, x_3$  y  $x_4$ .

La figura 9.a ilustra el principio del procedimiento adaptativo según la invención después del refinado del mallado por agregado. En este caso, la adición de los nodos al mallado se realiza para un subconjunto de las medidas que presentan unos valores homogéneos de VTEC. El procedimiento adaptativo según la invención permite determinar unos valores suplementarios de  $VTEC_i$ , representados por unos triángulos, con una precisión incrementada, en unas zonas que corresponden a unos óptimos locales.

La figura 9.b ilustra el principio del procedimiento adaptativo según la invención después del refinado del mallado por subdivisión. En este caso, la adición de los nodos al mallado se realiza según un criterio geométrico predefinido. El procedimiento adaptativo según la invención mejora la precisión de la estimación de los valores  $VTEC_i$  incrementando el número de nodos de soporte del mallado.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento adaptativo de estimación del contenido electrónico de la ionosfera que comprende las etapas siguientes:

- una recogida (101) de un conjunto de medidas (MSS) realizadas por varias balizas (21) receptoras fijas al suelo que reciben una señales (23) de radiofrecuencia emitidas por varios satélites (24) de navegación emisores situados en órbita,
- un cálculo (102), para cada una de las señales (23) del conjunto de medidas (MSS), de las coordenadas espaciales del punto (IPP) de intersección entre un eje de transmisión de la señal (23) y una superficie (ITL) que rodea la tierra, y de un contenido electrónico total vertical (VTEC) determinado en este punto de intersección (IPP); siendo así definida una nube (26) de puntos (27), constituidos por las coordenadas espaciales del punto (IPP) de intersección y de un contenido electrónico total vertical (VTEC),

estando el procedimiento **caracterizado porque** comprende además las etapas siguientes:

- un cálculo (103), por medio de un estimador estadístico (ESC), de un contenido electrónico total vertical (VTEC<sub>i</sub>), para cada uno de los nodos (N<sub>i</sub>) de un mallado inicial (IPM) de la superficie (ITL),
- un análisis estadístico de dispersión (ASD) del contenido electrónico total vertical (VTEC<sub>i</sub>) en cada uno de los nodos (N<sub>i</sub>) del mallado inicial (IPM), que permite seleccionar entre dos niveles de perturbación predeterminados, una perturbación reducida (P<sub>1</sub>) o una perturbación grande (P<sub>2</sub>), de la ionosfera,
- una etapa que comprende:

- en el caso de una perturbación reducida (P<sub>1</sub>), un cálculo (105) que permita definir un estimador estadístico adaptado (ESCA), a partir del estimador estadístico inicial (ESC),
- en el caso de una perturbación grande (P<sub>2</sub>), un cálculo (106) que permita generar un nuevo mallado adaptado (IPMA) de la superficie (ITL), a partir del mallado inicial (IPM),

- un análisis estadístico del error (ASE) del contenido electrónico total (VTEC<sub>i</sub>) determinado, por medio del estimador estadístico adaptado (ESCA) y del mallado inicial (IPM) en el caso de una perturbación reducida (P<sub>1</sub>), o por medio del estimador estadístico inicial (ESC) y del mallado adaptado (IPMA) en el caso de una perturbación grande (P<sub>2</sub>); permitiendo el análisis estadístico de error (ASE) seleccionar entre dos niveles de errores predeterminados, un error reducido (E<sub>1</sub>) que implica una validación de la adaptación (114) del procedimiento, o un error grande (E<sub>2</sub>) que implica la parada (115) del procedimiento.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** el estimador estadístico inicial (ESC), determina un contenido electrónico total vertical (VTEC<sub>i</sub>) en cada uno de los nodos (N<sub>i</sub>, AMV<sub>ik</sub>, SMV<sub>ik</sub>) del mallado (IPM, IPMA), por medio de un filtro de Kalman que tiene en cuenta los puntos (27) de la nube (26) situados a una distancia del nodo (N<sub>i</sub>, AMV<sub>ik</sub>, SMV<sub>ik</sub>) considerado inferior a un umbral (S) predeterminado.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el mallado inicial (IPM) de la superficie (ITL) forma un poliedro regular centrado sobre la tierra que posee mil doscientas ochenta caras triangulares, y **porque** cada uno de los nodos (N<sub>i</sub>) del mallado inicial (IPM) está en un tiempo solar fijo.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el análisis estadístico de las dispersiones (ASD) incluye las etapas siguientes realizadas sucesivamente:

- una selección para cada uno de los nodos (N<sub>i</sub>) del mallado inicial (IPM) de un subconjunto (SEP<sub>i</sub>) de puntos (27) situados a una distancia del nodo (N<sub>i</sub>) considerado inferior a un umbral (S<sub>1</sub>) predeterminado,
- un cálculo para cada uno de los nodos (N<sub>i</sub>) del mallado inicial (IPM) de una dispersión local (D<sub>i</sub>) calculada por procedimientos estadísticos, del contenido electrónico total vertical (VTEC) de los puntos (27) del subconjunto (SEP<sub>i</sub>),
- una selección entre los dos niveles de perturbaciones de la ionosfera, (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>), al menos en función de un valor de dispersión local (D<sub>i</sub>).

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** incluye una etapa (105) de cálculo de un estimador estadístico adaptado (ESCA), que permite calcular, además del contenido electrónico total vertical (VTEC<sub>i</sub>) de cada uno de los nodos (N<sub>i</sub>), un gradiente espacial de evolución (GSE<sub>i</sub>) del contenido electrónico total vertical en la proximidad del nodo (N<sub>i</sub>) considerado.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** incluye una etapa (106) de cálculo de un mallado adaptado (IPMA), determinado a partir del mallado inicial (IPM), según un proceso iterativo aplicado a cada uno de los nodos (N<sub>i</sub>) del mallado inicial (IPM) que comprende las etapas de cálculo siguientes:

- un análisis taxonómico de una distribución (DIST<sub>i</sub>) de puntos (27) situados a una distancia del nodo (N<sub>i</sub>) considerado inferior a un umbral (S<sub>3</sub>) predeterminado, que permite tanto:

- definir, cuando la distribución (DIST<sub>i</sub>) es agregable, varios agregados (SEP<sub>ik</sub>) de puntos (27) para los que

los valores del contenido electrónico total vertical (VTEC) son homogéneos, y seleccionar una etapa (108) de refinado del mallado (IPM) mediante subclase ( $D_A$ ),

- seleccionar, cuando la distribución ( $DIST_i$ ) es estocástica, una etapa (109) de refinado del mallado (IPM) mediante subdivisión ( $D_S$ ).

- 5 - la adición de un nuevo nodo de mallado ( $AMV_{ik}$ ) mediante agregados ( $SEP_{ik}$ ) en el caso en el que la distribución ( $DIST_i$ ) sea agregable; correspondiendo la posición del nuevo nodo ( $AMV_{ik}$ ) a un baricentro de los puntos (27) del agregado ( $SEP_{ik}$ ).
- 10 - la adición de varios nuevos nodos de mallado ( $SMV_{ik}$ ) en el caso en el que la distribución ( $DIST_i$ ) sea estocástica; siendo definido el número y la posición de los nuevos nodos ( $SMV_{ik}$ ) en función de los nodos ( $N_i$ ) existentes y una regla de subdivisión predeterminada.

15 7. Procedimiento según la reivindicación 6, **caracterizado porque** la posición de un nuevo nodo ( $AMV_{ik}$ ) en el caso de una distribución ( $DIST_i$ ) agregable, corresponde al baricentro de los puntos (27) del agregado ( $SEP_{ik}$ ) cuya ponderación ( $P_{ik}$ ) depende de un ángulo formado entre el eje de transmisión de la señal (23) del punto (27) considerado y un eje vertical con relación a la tierra (22) que pasa por este punto (27); permitiendo la ponderación favorecer los puntos (27) determinados a partir de una señal (23) cuyo eje de transmisión es sustancialmente vertical.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 6 o 7, **caracterizado porque** incluye al menos una de las dos reglas de subdivisión siguientes, permitiendo la adición de varios nuevos nodos ( $SMV_{ik}$ ) de mallado en el caso de una distribución ( $DIST_i$ ) estocástica:

- 20 - se sitúa un nuevo nodo ( $SMV_{ik}$ ) entre el nodo ( $N_i$ ) considerado y cada uno de los nodos vecinos (82) que le son conectados; estando situado cada nuevo nodo ( $SMV_{ik}$ ) sobre la superficie (ITL), a igual distancia del nodo ( $N_i$ ) y del nodo (82) vecino considerado, de manera que se minimice la distancia que le separa del nodo ( $N_i$ ) considerado,
- 25 - se sitúa un nuevo nodo ( $SMV_{ik}$ ) para cada una de las caras (81) a las que pertenece el nodo ( $N_i$ ) considerado; correspondiendo la posición del nuevo nodo ( $SMV_{ik}$ ) a un baricentro de los nodos ( $N_i$ , 82) de la cara (81) considerada.

30 9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 6 a 8, **caracterizado porque** incluye uno o varios criterios de coherencia geométrica, y **porque** uno de los criterios consiste en suprimir los nodos ( $N_i$ ) del mallado inicial (IPM) situados a una distancia de un nuevo nodo ( $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) inferior a un umbral predeterminado, o consiste en suprimir los nuevos nodos ( $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) generados fuera de la zona predeterminada.

35 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 6 a 9, **caracterizado porque** incluye una etapa (110), realizada a la salida del proceso iterativo, de comparación de las dispersiones espaciales de los nuevos nodos ( $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) del mallado adaptado (IPMA) y los nodos ( $N_i$ ) del mallado inicial (IPM), que permite seleccionar entre las etapas siguientes:

- 40 - el cálculo (112) del contenido electrónico total vertical ( $VTEC_i$ ) en cada uno de los nodos del mallado adaptado (IPMA) por medio del estimador estadístico (ESC), cuando las dispersiones espaciales de los nuevos nodos ( $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) son inferiores a las dispersiones espaciales de los nodos ( $N_i$ ) del mallado inicial (IPM),
- 45 - la parada (111) del procedimiento, cuando las dispersiones espaciales de los nuevos nodos ( $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) son superiores a las dispersiones espaciales de los nodos ( $N_i$ ) del mallado inicial (IPM),
- 50 - el inicio de un segundo cálculo (106) de refinado del mallado aplicado sobre el conjunto de los nodos del nuevo mallado (IPMA), cuando las dispersiones espaciales de los nuevos nodos ( $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) son a la vez inferiores a las dispersiones espaciales de los nodos ( $N_i$ ) del mallado inicial (IPM) y superiores a un umbral predeterminado.

55 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el análisis estadístico de error (ASE) incluye las etapas siguientes realizadas sucesivamente:

- 45 - una selección para cada uno de los nodos ( $N_i$ ,  $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) del mallado (IPM, IPMA) de un subconjunto ( $SEP_{i4}$ ,  $SEP_{i5}$ ) de puntos (27) posicionados a una distancia del nodo ( $N_i$ ,  $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) considerado inferior a un umbral predeterminado ( $S_4$ ,  $S_5$ ),
- 50 - un cálculo para cada uno de los puntos (27) del subconjunto ( $SEP_{i4}$ ,  $SEP_{i5}$ ) de una diferencia (DIFF, DIF) entre el contenido electrónico total vertical ( $VTEC_i$ ) determinado en el nodo ( $N_i$ ,  $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) por medio del estimador estadístico (ESC, ESCA) y el contenido electrónico total vertical (VTEC) del punto (27) considerado,
- 55 - un cálculo para cada uno de los nodos ( $N_i$ ,  $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) de una dispersión local ( $D_{i4}$ ,  $D_{i5}$ ) de las diferencias (DIFF, DIF),
- una selección entre dos niveles de errores predeterminados, un error reducido ( $E_1$ ) o un error grande ( $E_2$ ), en función de un valor de dispersión local ( $D_{i4}$ ,  $D_{i5}$ ).

55 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** los análisis estadísticos de dispersión (ASD) y error (ASE) no tienen en cuenta más que un subconjunto de los nodos ( $N_i$ ,  $AMV_{ik}$ ,  $SMV_{ik}$ ) del mallado de la superficie (ITL) seleccionados a partir de uno o varios criterios geométricos, y **porque** uno de los criterios se basa en la posición de los nodos con relación al sol.

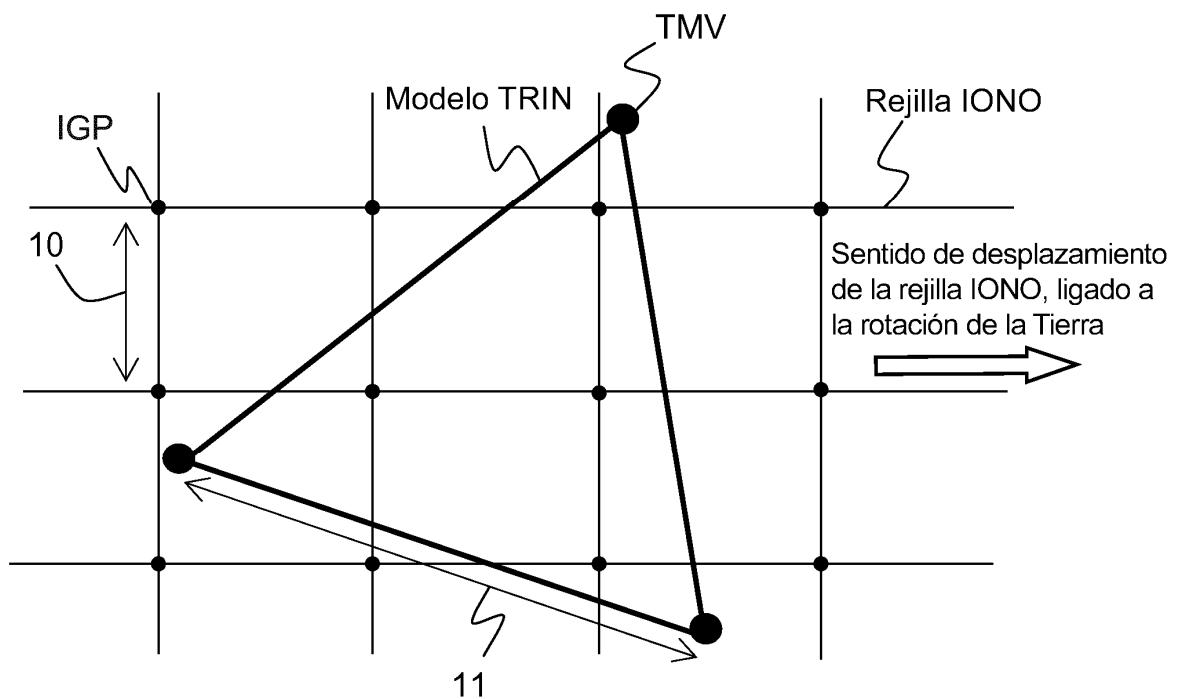


FIG.1

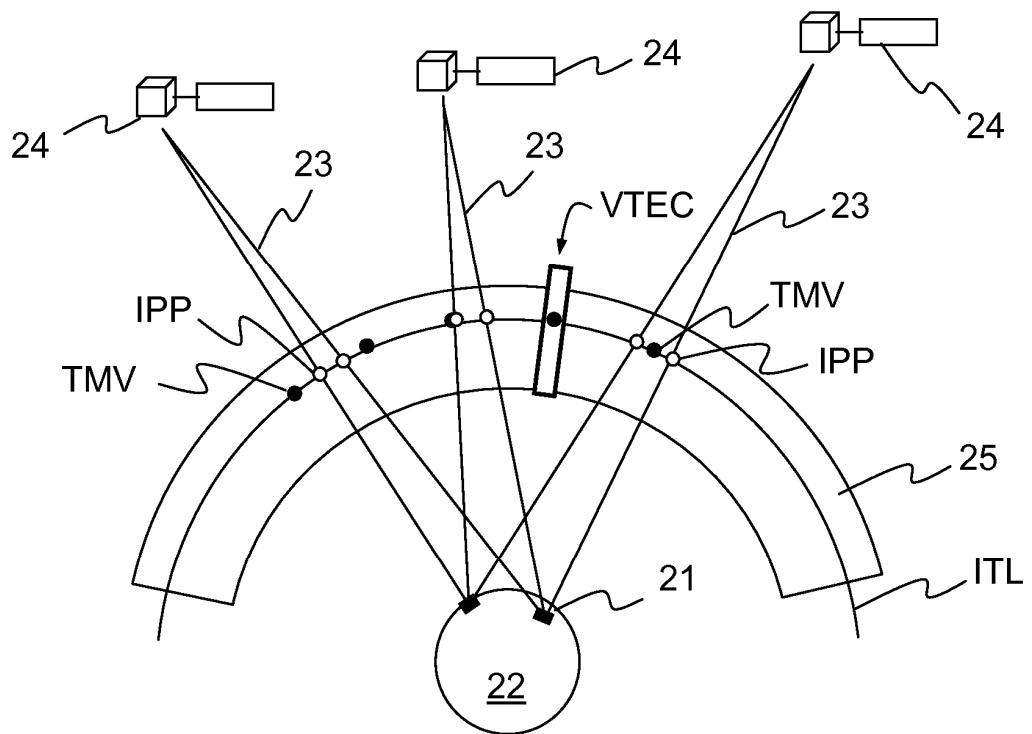


FIG.2a

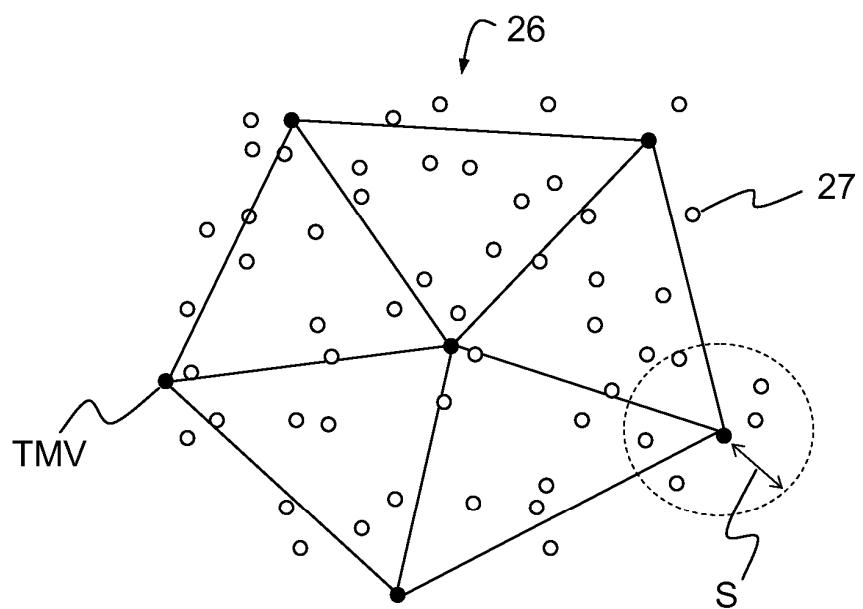


FIG.2b

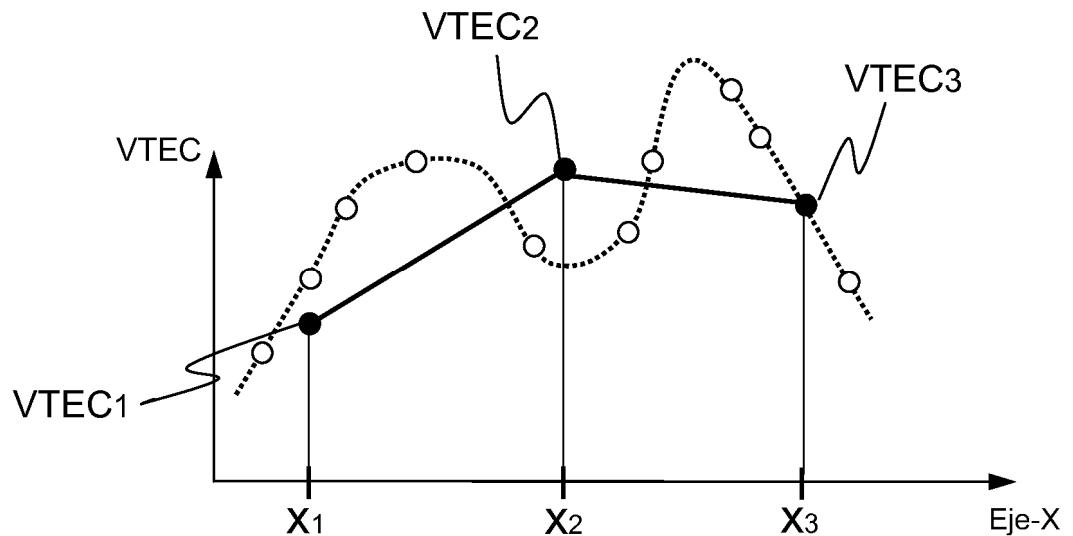


FIG.3a

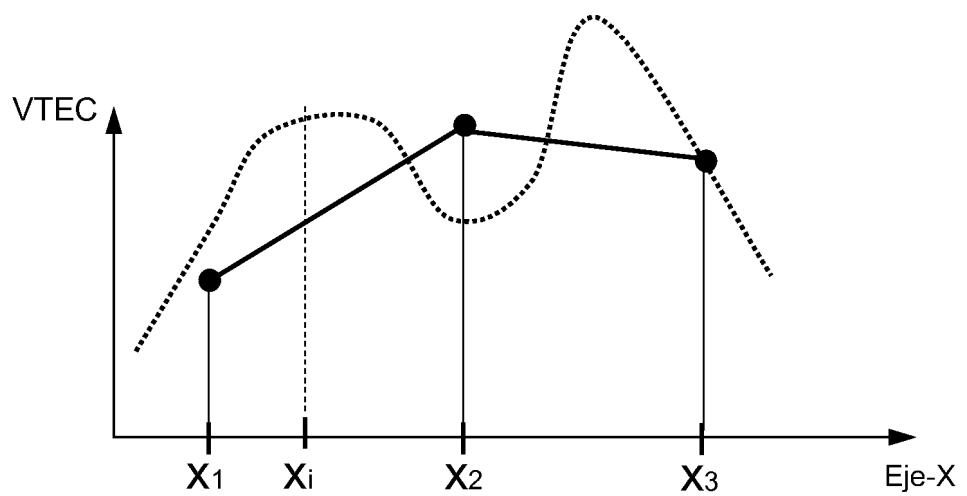


FIG.3b

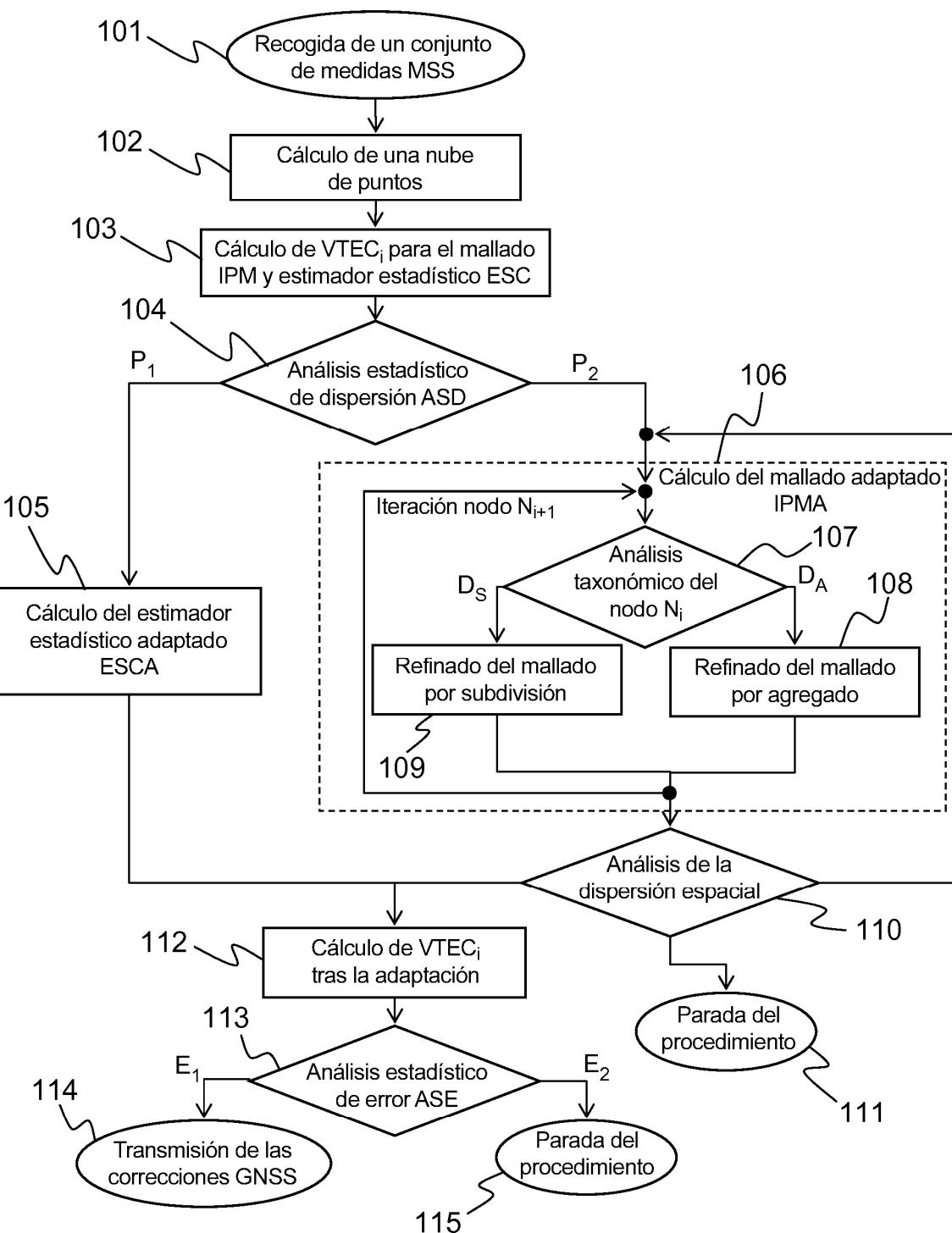


FIG.4

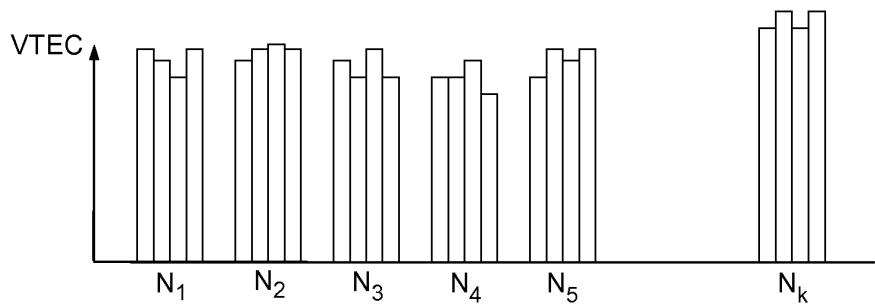


FIG.5a

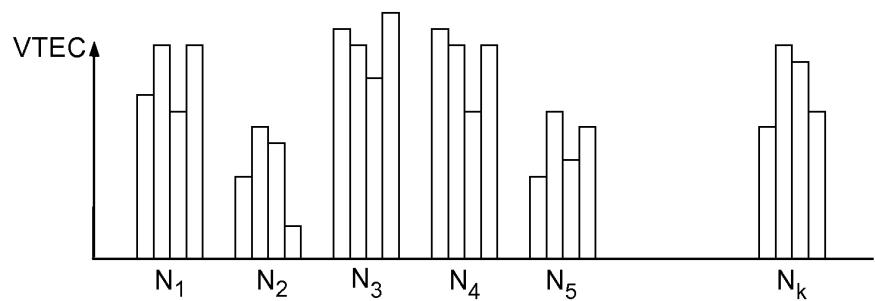


FIG.5b

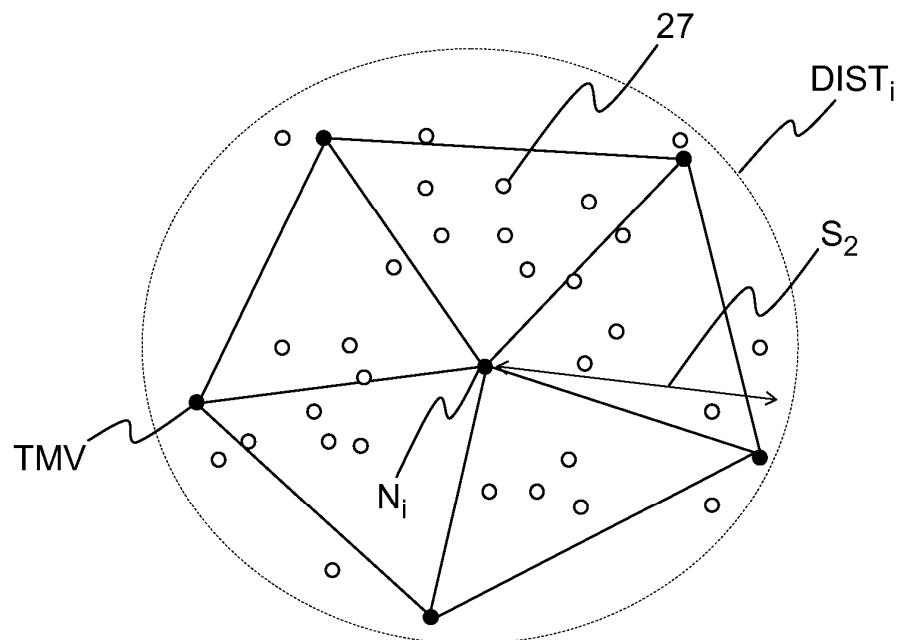


FIG.6

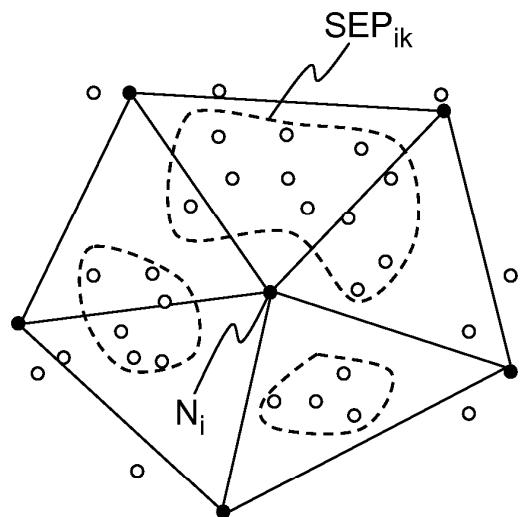


FIG.7a

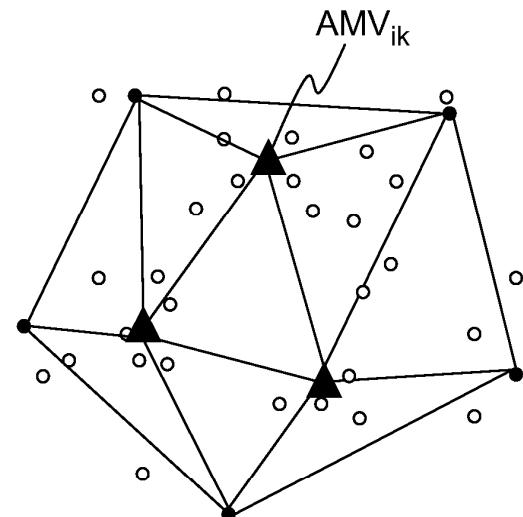


FIG.7b

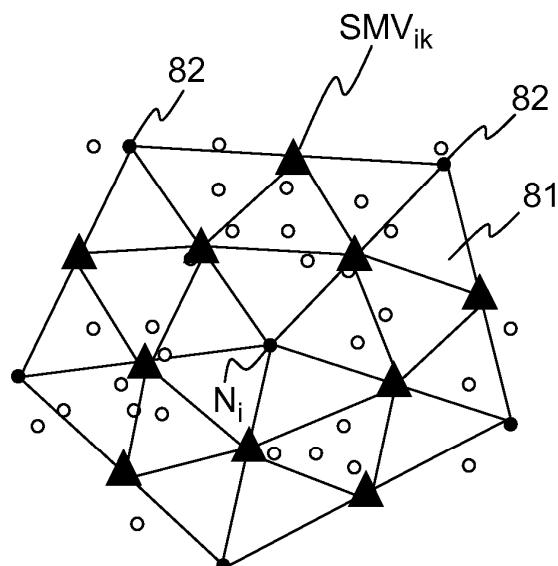


FIG.8a

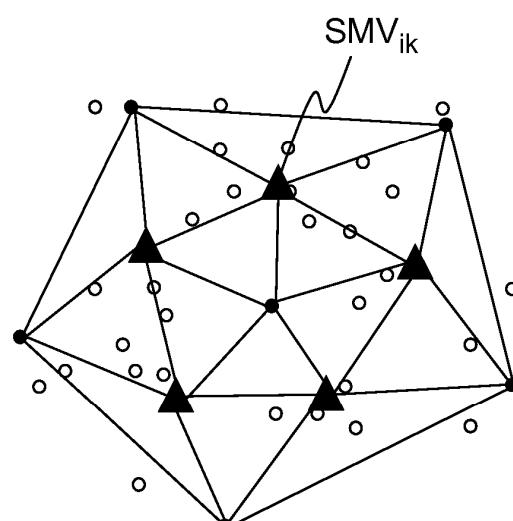


FIG.8b

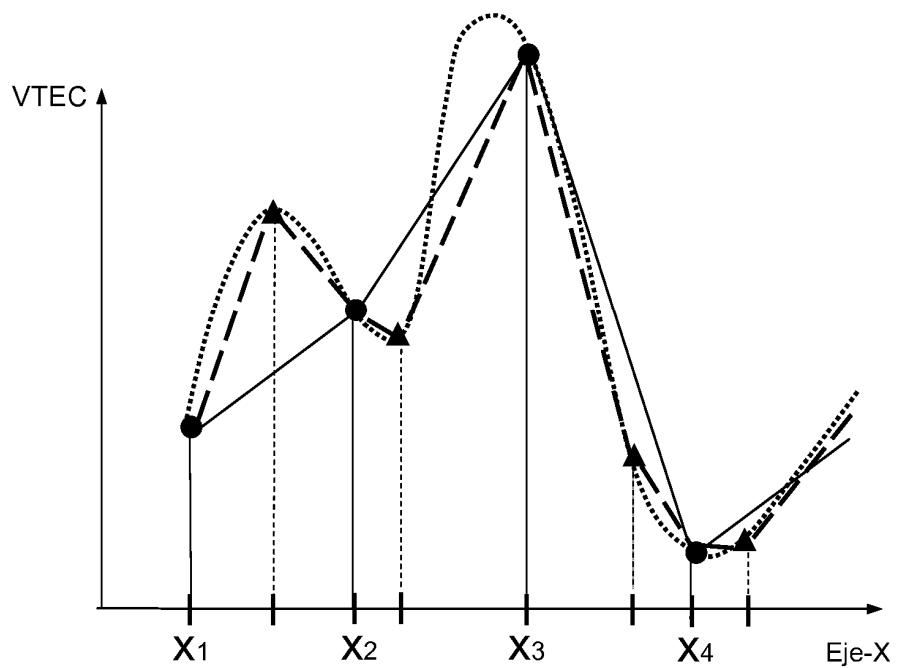


FIG.9a

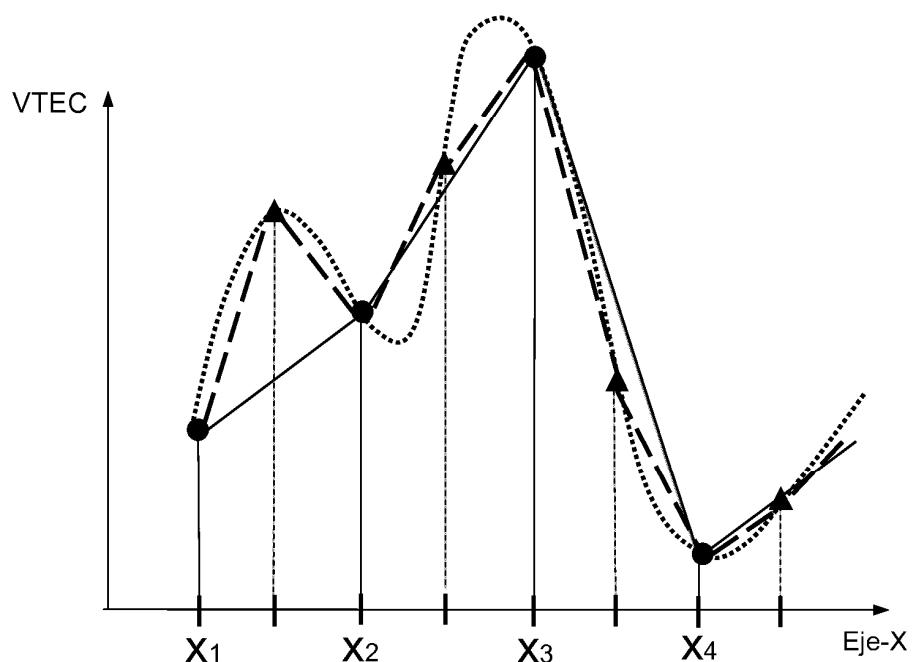


FIG.9b