

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 455 225**

51 Int. Cl.:

**G01S 3/06** (2006.01)  
**G01S 13/90** (2006.01)  
**G01S 13/95** (2006.01)  
**G01K 11/00** (2006.01)  
**G01V 3/17** (2006.01)  
**G01S 7/40** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.04.2010 E 10723692 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2014 EP 2440946**

54 Título: **Procedimiento y sistema de formación de imágenes radiométrica de síntesis de apertura espacio-temporal**

30 Prioridad:

**08.06.2009 FR 0953787**

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

**15.04.2014**

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES  
(100.0%)  
2 Place Maurice Quentin  
75001 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**CABOT, FRANÇOIS;  
KERR, YANN;  
RICHAUME, PHILIPPE;  
SOUYRIS, JEAN-CLAUDE y  
ROUGE, BERNARD**

74 Agente/Representante:

**CURELL AGUILÁ, Mireia**

**ES 2 455 225 T3**

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

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema de formación de imágenes radiométrica de síntesis de apertura espacio-temporal.

- 5 La presente invención se refiere a un procedimiento de formación de imágenes de síntesis de apertura que utiliza un radiómetro de formación de imágenes llevado a bordo de, por lo menos, un satélite y se refiere también al sistema de formación de imágenes correspondiente de realización del procedimiento.
- 10 Se han desarrollado satélites de observación de la Tierra, como, por ejemplo, el satélite SMOS (denominación en inglés de *Soil Moisture and Ocean Salinity*) para medir las temperaturas de brillo en forma de radiaciones electromagnéticas polarizadas, multiangulares, del suelo y de los océanos, con una alta posibilidad de revisita, típicamente un período de tres días, y de realizar así un seguimiento de la evolución de la humedad de los suelos y la salinidad de los océanos.
- 15 El satélite SMOS recorre una órbita heliosincrónica a la altitud de 755 km y a la velocidad de 7 km/s según un período de 100 minutos.
- El radiómetro de formación de imágenes llevado a bordo del satélite SMOS funciona en la banda L dentro de una banda de 17 MHz en torno a la frecuencia correspondiente a una longitud de onda de 21 cm.
- 20 El radiómetro de formación de imágenes está compuesto por 54 antenas elementales dispuestas por grupos de dieciocho en tres palas de un rotor en forma de "Y".
- Las antenas elementales están asociadas, cada una de ellas, a un receptor diferente y están conectadas, a través de los receptores y de un arnés compuesto por fibras ópticas, a un correlador de salida codificada en un bit, que permite correlacionar los campos eléctricos recibidos por cada par de antenas elementales.
- 25 Las longitudes de las fibras ópticas que forman el arnés son prácticamente idénticas y la precisión de posicionamiento de las antenas en las palas es de 3 mm. Cuando el satélite está en servicio, el mismo está inclinado un ángulo de 31,2 grados con respecto a la dirección del nadir.
- 30 Al ser de aproximadamente 1.000 km la instantánea, denominada *snap-shot*, el pixel de la imagen construida por un procedimiento de síntesis de apertura espacial es igual a 40 km y el tiempo de integración para calcular la correlación para un par cualquiera de antenas elementales es igual a 1,2 segundos.
- 35 El tamaño del píxel es igual a la resolución geométrica del dispositivo de formación de imágenes y el tiempo de integración constitutivo de una instantánea.
- Así, cien instantáneas consecutivas permiten la adquisición del mismo píxel para diferentes ángulos de incidencia comprendidos entre 0 y 55 grados.
- 40 Además, la sensibilidad radiométrica, denominada también resolución radiométrica, está comprendida entre 3,5 y 5,8° K.
- 45 El tiempo de muestreo de cada medición elemental del campo eléctrico recibido por una antena elemental es igual a  $10^{-6}$  segundos.
- Debido a la estructura de tres palas del radiómetro, la superficie de apertura obtenida es, por una parte, más pequeña que la correspondiente del disco en el cual están circunscritas las palas, y, por otra parte, anisótropa.
- 50 El aumento del número de palas permite incrementar la superficie de apertura y mejorar la isotropía de su contorno, aunque esto da como resultado un aumento del número de antenas elementales y consecuentemente un aumento de la masa del satélite.
- 55 El problema técnico consiste en incrementar la superficie de apertura sintetizada del radiómetro sin aumentar el número de antenas elementales, la resolución geométrica y sin deteriorar la resolución radiométrica.
- A este efecto, la invención tiene como objetivo un procedimiento de formación de imágenes radiométrica destinado a cartografiar por lo menos un parámetro característico de objetos distantes dispuestos sobre una superficie y detectable por la radiación electromagnética multiangular emitida por los objetos, de manera que el procedimiento utiliza una antena de red formada por antenas elementales dispuestas a bordo de, por lo menos, un satélite móvil con respecto a la superficie, estando el procedimiento caracterizado porque comprende las etapas que consisten en:
- 60 identificar cada antena elemental A(k) por un índice k,
- 65 aplicar una indicación de tiempo según una base de tiempos, a posiciones sucesivas P(t(i)) de una antena

elemental A(1) predeterminada de la antena de red que sirve como referencia espacio-temporal, muestreándose las posiciones sucesivas de la antena elemental de referencia A(1) según un período de muestreo  $\Delta t_{mue}$  en instantes sucesivos  $t(i)$  ordenados según un índice  $i$  y referenciándose dentro de un marco de referencia espacial fijo con respecto a la superficie sobrevolada,

5 estando un reloj local H(k) asociado a cada antena elemental A(k), para cada posición sucesiva muestreada P(t(i)) de la antena elemental de referencia A(1), sincronizar cada reloj local asociado H(k) con la base de tiempos,

10 para cada posición sucesiva muestreada P(t(i)) de la antena elemental de referencia A(1), determinar las posiciones espaciales respectivas de las antenas elementales A(k) con respecto a la antena elemental de referencia A(1),

15 en cada instante de muestreo t(i) correspondiente a una posición muestreada P(t(i)) de la antena elemental A(1), medir de manera analítica un campo electromagnético recibido por cada antena elemental A(k) y suministrar, para cada una de ellas, una componente en fase y una componente en cuadratura del campo,

20 asignar a cada medición analítica del campo electromagnético (E(k,t)) medido el índice  $k$  de la antena elemental correspondiente y la fecha t(i) de muestreo correspondiente,

25 para un índice de imagen  $i_m$  predeterminado, definir un dominio de imagen temporal  $D_{IM}(i_m)$  constituido por los instantes de muestreo t(j) tales que la diferencia t(i<sub>m</sub>)-t(j) es inferior o igual a una duración temporal de dominio de imagen  $\Delta t_{IM}$  predeterminada,

30 para cada par (k, j) de índice k de antena elemental A(k) y de índice de instante de muestreo j correspondiente al dominio de imagen temporal  $D_{IM}(i_m)$ , suministrar un vector de medición M(k, j) que contiene ordenadas temporalmente las muestras de las mediciones del campo electromagnético recibido por la antena elemental A(k) en los instantes de muestreo comprendidos entre el instante de muestreo t(j) y el instante de muestreo

$t(j - \frac{\Delta t_c}{\Delta t_{mue}})$ , designando  $\Delta t_c$  una duración de integración de la correlación entre dos vectores de medición

M(k,j), M(k',j'),

35 construir una imagen IM(i<sub>m</sub>) a partir de una función de visibilidad espacio-temporal que comprende un conjunto de coeficientes de visibilidades, siendo por lo menos un coeficiente de visibilidad igual a la correlación de dos vectores de medición M(k,j), M(k',j') cuyos índices de muestreo j, j' son diferentes.

Según unos modos particulares de realización, el procedimiento de formación de imágenes radiométrica comprende una o varias de las siguientes características:

40 - estando un tamaño de píxel  $T_{píxel}$  predeterminado y presentando una velocidad de desplazamiento con respecto a la superficie observada  $V_{sat}$  por lo menos un satélite portador de la antena de referencia elemental A(1), la duración de integración de correlación  $\Delta t_c$  es igual al producto de un coeficiente fraccionario  $\alpha$  por el tamaño  $T_{píxel}$  de un píxel dividido por la velocidad  $V_{sat}$  del por lo menos un satélite;

45 - el coeficiente fraccionario  $\alpha$  es inferior o igual a 1/3 y preferentemente igual a 1/5;

- la duración temporal de dominio de imagen  $\Delta t_{IM}$  es igual a la relación de la más grande de las distancias D que separan un par cualquiera de antenas elementales A(k) con respecto a la velocidad de desplazamiento  $V_{sat}$  del por lo menos un satélite, y

50 - una banda pasante B de filtrado de las frecuencias en torno a una frecuencia central  $\nu_0$  del campo electromagnético medido por cada una de las antenas elementales A(k) es inferior o igual a la relación de la velocidad de desplazamiento  $V_{sat}$  del por lo menos un satélite con respecto a la más grande de las distancias D que separan un par cualquiera de antenas elementales A(k);

55 - una banda de frecuencias de medición del campo electromagnético recibido por las antenas elementales A(k) está comprendida dentro de la banda L y preferentemente dentro de la banda de las frecuencias comprendidas entre 1.400 y 1.427 MHz;

60 - la precisión de localización de una antena elemental A(k) es igual al producto de un coeficiente fraccionario  $\beta$  por la longitud de onda  $\lambda_0$  correspondiente a la frecuencia central  $\nu_0$ , siendo el coeficiente fraccionario  $\beta$  inferior a 1/5 y preferentemente inferior a 3/20;

- la precisión de la base de tiempos es inferior a la relación de la precisión de localización con respecto a la velocidad de la luz;

- el período de muestreo  $\Delta t_{mue}$  es inferior al mínimo de una primera duración mínima de muestreo  $\Delta t_{Shannon}$  correspondiente a un criterio de Shannon y de una segunda duración  $\Delta T_B$  correspondiente al cumplimiento de la exigencia de una resolución radiométrica predeterminada  $\Delta T_B$ ,

5 siendo la primera duración  $\Delta t_{Shannon}$  igual a la mitad del período correspondiente a una longitud de onda  $\lambda_0$  de una frecuencia de medición,

10 siendo la segunda duración  $\Delta t_B$  función de la resolución radiométrica predeterminada  $\Delta T_B$ , de una temperatura de antena  $T_A$ , de una temperatura de receptor  $T_{rec}$ , de un ancho de banda pasante de filtrado  $B$ , de un número total  $(N+1)$  de antenas elementales, de una longitud  $D$  de la antena de red, de una superficie eficaz  $S_e$  de una antena elemental, del tamaño de un píxel  $T_{pixel}$ , de la velocidad  $V_{sat}$  del por lo menos un satélite;

- la segunda duración ( $\Delta t_B$ ) cumple la ecuación:

15

$$\Delta t_B = \sqrt{2} \left( \frac{\Delta T_B}{T_A + T_{rec}} \right) \frac{S_e}{D^2} \frac{1}{\sqrt{B}} (N + 1) \left( \frac{T_{pixel}}{V_{sat}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

20 La invención tiene también por objetivo un sistema de formación de imágenes radiométrica por satélite destinado a cartografiar por lo menos un parámetro característico de objetos distantes dispuestos sobre una superficie y detectable por la radiación electromagnética multiangular emitida por los objetos, caracterizado porque comprende

una antena de red formada por antenas elementales  $A(k)$  dispuestas a bordo de por lo menos un satélite móvil con respecto a la superficie,

25 por lo menos un conjunto de recepción conectado a la antena de red apto para

30 aplicar una indicación de tiempo, según una base de tiempos de alta precisión, a posiciones sucesivas  $P(t(i))$  de una antena elemental  $A(1)$  predeterminada de la antena de red que sirve como referencia espacio-temporal, muestreándose las posiciones sucesivas de la antena elemental de referencia  $A(1)$  según un período de muestreo  $\Delta T_{mue}$  en instantes sucesivos  $t(i)$  ordenados según un índice  $j$  y referenciándose dentro de un marco de referencia espacial fijo con respecto a la superficie sobrevolada,

35 estando un reloj local  $H(k)$  asociado a cada antena elemental  $A(k)$ , para cada posición sucesiva muestreada  $P(t(i))$  de la antena elemental de referencia  $A(1)$ , sincronizar cada reloj local asociado  $H(k)$  con la base de tiempos,

40 para cada posición sucesiva muestreada  $P(t(i))$  de la antena elemental de referencia  $A(1)$ , determinar las posiciones espaciales respectivas de las antenas elementales  $A(k)$  con respecto a la antena elemental de referencia  $A(1)$ ,

en cada instante de muestreo  $t(i)$  correspondiente a una posición muestreada  $P(t(i))$  de la antena elemental  $A(1)$ , medir de manera analítica un campo electromagnético recibido por cada antena elemental  $A(k)$  y suministrar, para cada una de ellas, una componente en fase y una componente en cuadratura,

45 asignar a cada medición analítica del campo electromagnético  $E(k,t(i))$  medido el índice  $k$  de la antena elemental correspondiente y la fecha  $t(i)$  de muestreo correspondiente,

y una unidad de tratamiento apta para

50 para un índice de imagen  $i_m$  predeterminado, definir un dominio de imagen temporal  $D_{IM}(i_m)$  constituido por los instantes de muestreo  $t(j)$  tales que la diferencia  $t(i_m) - t(j)$  es inferior o igual a una duración temporal de dominio de imagen  $\Delta t_{IM}$  predeterminada,

55 para cada par  $(k, j)$  de índice  $k$  de antena elemental  $A(k)$  y de índice de instante de muestreo  $j$  correspondiente al dominio de imagen temporal  $D_{IM}(i_m)$ , suministrar un vector de medición  $M(k, j)$  que contiene ordenadas temporalmente las muestras de las mediciones del campo electromagnético recibido por la antena elemental  $A(k)$  en los instantes de muestreo comprendidos entre el instante de muestreo  $t(j)$  y el instante de muestreo

$t(j - \frac{\Delta t_c}{\Delta t_{mue}})$ , designando  $\Delta t_c$  una duración de integración de la correlación entre dos vectores de medición

60  $M(k,j)$ ,  $M(k',j')$ , y

construir una imagen  $IM(i_m)$  a partir de una función de visibilidad espacio-temporal que comprende un conjunto

de coeficientes de visibilidades, siendo por lo menos un coeficiente de visibilidad igual a la correlación de dos vectores de medición  $M(k,j)$ ,  $M(k',j')$  cuyos índices de muestreo  $j, j'$  son diferentes.

Según unos modos particulares de realización, el sistema de formación de imágenes radiométrica comprende una o varias de las siguientes características:

- 5
- la antena de red comprende un primer segmento de antenas elementales alineadas, separado de un segundo segmento de antenas elementales o de una antena aislada única por una distancia de separación inferior o igual a un tamaño de la antena de red,
- 10
- presentando cada antena elemental  $A(k)$  un centro respectivo  $C(k)$ , los centros  $C(k)$ ,  $C(k+1)$  de dos antenas adyacentes de un mismo segmento están separados por una semilongitud de onda, y
- 15
- el primer segmento y el segundo segmento, respectivamente el primer segmento y la antena aislada, están orientados según una misma dirección;
- el sistema comprende un solo satélite y una sola antena de red de extensión unidimensional de longitud  $D$ ,
- 20
- la antena de red comprende un solo segmento de antenas elementales alineadas, presentando el segmento una longitud  $D1$  que es la mitad de la longitud  $D$  de la antena de red, y una antena elemental aislada, separada por un espacio vacío de la misma longitud  $D1$  que la del segmento y alineada con las antenas elementales del segmento;
- 25
- las antenas elementales de la antena de red están dispuestas en dos satélites que describen, cada uno de ellos, una órbita polar heliosincrónica y que forman un vuelo en formación, estando el primer segmento dispuesto en el primer satélite y estando el segundo segmento dispuesto en el segundo satélite;
- 30
- las altitudes de las órbitas polares son diferentes de una altura inferior al doble de la longitud de un segmento; y
- el primer satélite y el segundo satélite están situados sobre dos órbitas polares heliosincrónicas de la misma altitud, estando los satélites separados en la dirección longitudinal por una distancia comprendida entre una y dos longitudes de un segmento.

35 La invención se comprenderá mejor al leer la descripción de una forma de realización que se ofrece a continuación, ofrecida únicamente a título de ejemplo y realizada en referencia a los dibujos, en los cuales:

- 40
- la figura 1 es una vista general de una primera forma de realización de un sistema de formación de imágenes radiométrica según la invención,
- la figura 2 es una vista detallada de la antena de red radiométrica utilizada en el sistema de formación de imágenes de la figura 1;
- 45
- la figura 3 es una vista detallada por bloques funcionales de un conjunto de recepción de señales radiométricas captadas por la antena de red de la figura 2 y llevado a bordo del satélite del sistema de la figura 1;
- la figura 4 es una vista detallada por bloques de un módulo de medición del conjunto de recepción de la figura 3;
- 50
- la figura 5 es un diagrama de flujo de un procedimiento de formación de imágenes radiométrica llevado a la práctica por el sistema de formación de imágenes descrito en las figuras 1 a 4;
- 55
- la figura 6 es una representación espacio-temporal de la red interferométrica correspondiente al sistema descrito en la figura 1;
- la figura 7 es una vista general de una segunda forma de realización de un sistema de formación de imágenes radiométrica según la invención, basada en una formación en vuelo de dos satélites que se reparten el soporte de las antenas elementales que constituyen la antena de red,
- 60
- la figura 8 es una vista detallada de una tercera forma de realización de un sistema de formación de imágenes radiométrica según la invención.

65 Según la figura 1, un sistema de formación de imágenes radiométrica 2 comprende un satélite de observación 4 en órbita en torno a la Tierra, y una unidad de tratamiento 6 de los datos de observación recogidos y retransmitidos al suelo por el satélite 4.

El satélite de observación 4 describe una órbita polar heliosincrónica de 755 kilómetros de altitud, de periodo igual a 100 minutos y de velocidad lineal designada por  $\vec{V}_{sat}$  cuyo módulo es igual a 7 km/s.

5 El satélite 4 está inclinado con respecto a la dirección del Nadir según un ángulo de cabeceo designado por  $\theta$  en la figura 1, e igual a 31,2 grados.

Un marco de referencia triaxial vinculado a la plataforma del satélite 4, designado por  $(X_s, Y_s, Z_s)$  comprende un eje  $Y_s$  orientado según el sentido de la velocidad  $\vec{V}_{sat}$  y un eje  $X_s$  resultante de la rotación del ángulo  $\theta$  en torno al eje  $Y_s$  del eje de nadir.

15 El satélite 4 comprende una antena de red 8 de observación radiométrica formada por una antena de red elementales 9, un conjunto 10 de recepción y de transformación de señales radioeléctricas, transmitidas a través de un enlace radioeléctrico 11 y captadas por la antena de red 8, conectado a la salida de la antena de red 8.

El satélite 4 comprende también una antena de telemedición 12 conectada a la salida del conjunto 10 de recepción y apta para retransmitir hacia la unidad de tratamiento 6 datos de mediciones radiométricas a través de un enlace radioeléctrico de telemedición 14.

20 La antena de red 8 funciona dentro de una banda de frecuencias dedicada únicamente a la observación, designada por "banda L", cuyas frecuencias están comprendidas entre 1.400 y 1.427 MHz.

25 Esta banda de observación está centrada en torno a una frecuencia  $\nu_0$  correspondiente a una longitud de onda  $\lambda_0$  igual a 21 cm y que presenta un ancho de banda igual a 27 MHz.

Esta banda de observación permite medir temperaturas de brillo de objetos en forma de radiaciones electromagnéticas polarizadas y multiangulares emitidas por los objetos, siendo las temperaturas de brillo representativas particularmente de la humedad de los suelos y de la salinidad de los océanos.

30 La antena de red 8 está compuesta en este caso por un conjunto de antenas elementales 9 de estructura idéntica, aunque dispuestas en emplazamientos diferentes, designadas por  $A(k)$  para diferenciarlas, siendo  $k$  un índice entero diferente asignado a cada antena  $A(k)$ .

35 Las antenas elementales  $A(k)$  están dispuestas en alineación según un eje de extensión longitudinal de la antena de red 8 designado por  $Y_A$  y de la misma dirección que el eje  $Y_s$  del satélite 4. Un marco de referencia triaxial vinculado a la antena de red 8, designado por  $(X_A, Y_A, Z_A)$ , comprende ejes  $X_A, Y_A, Z_A$  cuyas orientaciones respectivas son idénticas a las de los ejes  $X_s, Y_s, Z_s$  del marco de referencia correspondiente vinculado al satélite 4.

40 De forma más precisa según la figura 2, la antena de red 8 forma una red interferométrica de antenas elementales y de un tamaño designado por  $D$ .

La antena de red 8 comprende un segmento 20, que tiene una longitud total  $D1$ , igual en este caso a la mitad de  $D$ , es decir, 25 metros, y compuesto por un número entero  $N$  de antenas elementales 20 sucesivas, alineadas.

45 La antena de red comprende también una única antena aislada  $A(N+1)$  separada del segmento 20 por un espacio vacío de longitud  $D2$  sustancialmente igual a  $D1$ , es decir, 25 metros, estando la antena aislada  $A(N+1)$  alineada según la alineación de las antenas elementales que componen el segmento 20.

50 El tamaño  $D$  de la antena de red 8 se selecciona en este caso de manera que la resolución geométrica, indicada como  $R_g$ , de una imagen obtenida por las mediciones radiométricas, es decir, el tamaño  $T_{\text{pixel}}$  de un píxel de imagen, sea igual a 4 km.

Al cumplir la resolución geométrica la ecuación:

55 
$$R_g = \frac{\lambda_0}{D} H \text{ (rel. 1)}$$

designando  $H$  la altitud del satélite, se deduce que el valor  $D$  es igual a aproximadamente 50 metros, y la longitud  $D1$  es igual a 25 metros.

60 Las antenas elementales 9 del segmento 20 son, por ejemplo, antenas de tipo "patch" clásicas con cavidad resonante dieléctrica que tienen una superficie radiante o de recepción en forma de disco.

Cada antena elemental  $A(k)$  de índice  $k$  comprende un centro asociado  $C(k)$ .

Dos antenas elementales  $A(k)$ ,  $A(k+1)$  del segmento 20 dispuestas adyacentes están separadas por sus centros respectivos  $C(k)$ ,  $C(k+1)$  una distancia  $d_A$  inferior o igual a una semilongitud de onda  $\lambda_0/2$  para cumplir la condición de muestreo de Shannon.

5 En este caso, la distancia  $d_A$  se selecciona igual a 10 cm y el número total  $N$  de antenas elementales del segmento 20 es por lo tanto igual a 250.

10 El tamaño  $D$  de la antena de red 8, el número y la disposición de las antenas elementales permiten de este modo obtener una resolución geométrica según la dirección  $Z_A$  perpendicular a la velocidad del satélite 4, igual a 4 km, y cumplir los criterios de reconstrucción de una imagen por una transformada de Fourier según la dirección  $Z_A$  después de la utilización de todas las mediciones de pares de antenas, definiendo cada par una base espacial de la red interferométrica formada por la antena de red elementales  $A(k)$ .

15 La precisión de localización de cada antena elemental  $A(k)$  es en este caso igual a 3 mm.

En una variante y de forma general, la precisión de localización es igual al producto de un coeficiente fraccionario  $\beta$  de la longitud de onda  $\lambda_0$  por la longitud de onda  $\lambda_0$ , siendo el coeficiente fraccionario  $\beta$  inferior a  $1/3$  y preferentemente inferior o igual a  $3/20$ .

20 En una variante, la antena de red está provista de receptores de posicionamiento de tipo GPS (*Global Positioning System*) que permiten estimar la deformación de la antena de red 8 en función de fluctuaciones de temperatura a velocidad lenta con respecto a la velocidad del satélite 4.

25 Según la figura 3, el conjunto de recepción 10 comprende terminales de entradas  $I(k)$ , variando el índice de antena elemental  $k$  de 1 a  $N+1$ , estando cada terminal de entrada  $I(k)$  conectado a una antena elemental  $A(k)$  asociada distinta, y comprende un terminal de salida (50) conectado a la antena de telemedición 12.

30 El conjunto de recepción 10 comprende una batería 52 de módulos de mediciones designados por  $Mod(k)$ , variando  $k$  entre 1 y  $N+1$ , una memoria masiva 54 conectada por la entrada a cada módulo de medición  $Mod(k)$  por medio de un par asociado distinto  $L(k)$  de enlaces, y un único emisor de datos de telemedición 56 conectado por la entrada a la memoria masiva 54 y por la salida a la antena de telemedición 12.

35 El conjunto de recepción 10 comprende también una base de tiempos 60 ó reloj maestro de alta precisión que está conectado por entradas distintas  $S(k)$ , variando  $k$  entre 1 y  $N+1$ , correspondiéndose cada entrada  $S(k)$  con un módulo de medición  $Mod(k)$  distinto asociado. Un enlace diferente de sincronización  $LS(k)$  conecta la base de tiempos 60 a cada entrada de sincronización  $S(k)$ .

40 La precisión de la base de tiempos 60 es en este caso igual a  $3/20$  de la longitud de onda  $\lambda_0$  dividido por la velocidad de la luz  $c$ , es decir igual a  $10^{-11}$  segundos. Esta precisión de la base de tiempos 60 se corresponde con la precisión de localización de cada antena elemental  $A(k)$  igual a 3 mm.

45 En una variante y de manera general, la precisión absoluta de la base de tiempos 60 es igual al producto de un coeficiente fraccionario  $\beta$  de la longitud de onda  $\lambda_0$  por la longitud de onda  $\lambda_0$  dividido por la velocidad de la luz, siendo el coeficiente fraccionario  $\beta$  inferior a  $1/3$  y preferentemente inferior o igual a  $3/20$ .

Según la figura 4, un módulo de medición  $Mod(k)$  cualquiera comprende de manera genérica, conectados en serie, un filtro de encabezamiento 102, un amplificador de bajo ruido 104, un filtro de canal 106 ó de ruido de banda pasante designada por  $B$  y un mezclador reductor 108 de frecuencias.

50 El mezclador reductor 108 comprende una primera entrada 110 conectada al filtro de canal 106, una segunda entrada 112 apta para recibir una señal de frecuencia de desplazamiento o de traslación, un primer terminal de salida 114, respectivamente un segundo terminal de salida 116 apto para suministrar una señal de salida en fase de frecuencia intermedia (FI), respectivamente una señal de salida en cuadratura de la misma frecuencia intermedia (FI) correspondiente a la parte real, respectivamente la parte imaginaria de una señal de salida denominada analítica o incluso sintetizada.

60 El módulo de medición  $Mod(k)$  comprende también, conectada al primer terminal de salida 114, respectivamente el segundo terminal de salida 116 del mezclador reductor 108, una primera cadena de tratamiento 118 de frecuencia intermedia (FI), respectivamente una segunda cadena de tratamiento 120 de frecuencia intermedia (FI).

El módulo de medición  $Mod(k)$  comprende también un reloj propio  $H(k)$  designado por 122, controlado por la base de tiempos 60 de alta precisión, conectado por la entrada  $S(k)$  a la base de tiempos 60, y también conectado a cada cadena de tratamiento de frecuencia intermedia 118, 120 así como al mezclador reductor 108.

65 La primera cadena de tratamiento 118 de frecuencia intermedia, respectivamente la segunda cadena de tratamiento

120 de frecuencia intermedia, comprenden, conectados en serie, un primer filtro de FI 124, un primer amplificador de FI 126, una primera unidad de corrección y de regulación 128, una primera unidad de muestreo 130, un primer digitalizador 132, respectivamente un segundo filtro de FI 134, un segundo amplificador de FI 136, una segunda unidad de corrección y de regulación 138, una segunda unidad de muestreo 140, un segundo digitalizador 142.

5 El primer digitalizador 132, respectivamente el segundo digitalizador 134, están conectados a la primera salida  $O_i(k)$  en fase, respectivamente la segunda salida  $O_q(k)$  en cuadratura, y son aptos para suministrar la parte real, respectivamente la parte imaginaria, cuantificada según un número entero  $q$  predeterminado de bits de la señal de medición analítica del campo electromagnético recibido por la antena correspondiente  $A(k)$ . El número entero  $q$  es un entero que puede adoptar un valor cualquiera incluyendo el valor 1.

10 El reloj 122 propio del módulo de medición  $Mod(k)$  comprende una entrada 146 conectada a la entrada de sincronización  $S(k)$ , una primera salida 148 conectada al segundo terminal de entrada 112 del mezclador reductor 108 y una segunda salida 150 conectada a una entrada de control 152 del primer muestreador 130 y a una entrada de control 154 del segundo muestreador 142.

15 El reloj 122 propio del módulo de medición  $Mod(k)$  comprende un generador de tiempo local 156, por ejemplo un oscilador de cuarzo, y una unidad de elaboración de señales de reloj 158 apta para controlar la señal de reloj local con la base de tiempos 60 de alta precisión y entregar señales de reloj síncrono de la base de tiempos 60.

20 Así, el módulo de medición  $Mod(k)$  es apto para aplicar una indicación de tiempo, con una alta precisión, a las señales medidas localmente por la antena elemental  $A(k)$  al mismo tiempo que la suministrada por la base de tiempos 60.

25 La banda pasante  $B$  del filtro de canal 106 se selecciona de tal manera que se verifica la siguiente relación:

$$B \leq \frac{V_{sat}}{D} \quad (\text{rel. 2})$$

30 designando  $V_{sat}$  el módulo de la velocidad del satélite 4 y designando  $D$  el tamaño de la antena de red elementales, dicho de otra manera, la distancia más grande que separa dos antenas elementales de la antena de red 8.

En este caso, se selecciona un valor de banda pasante  $B$  igual a 100 Hz.

35 Ya se han desarrollado filtros integrados de banda estrecha tales que funcionan en las longitudes de onda próximas a  $\lambda_0$ .

40 La duración de muestreo  $\Delta t_{mue}$  se selecciona de tal manera que sea inferior a la vez a una primera duración de muestreo  $\Delta T_{Shannon}$  que cumple un criterio de Shannon y a una segunda duración  $\Delta t_B$  correspondiente al cumplimiento de la exigencia de una resolución radiométrica deseada, indicada como  $\Delta T_B$ , es decir cumple la inequación:

$$\Delta t_{mue} \leq \text{Min}(\Delta t_{shannon}, \Delta t_B) \quad (\text{rel. 3})$$

45 La primera duración de muestreo  $\Delta T_{Shannon}$  que cumple un criterio de Shannon es igual a la mitad del periodo correspondiente a la longitud de onda  $\lambda_0$ , es decir, en este caso aproximadamente  $1,25 \cdot 10^{-5}$ .

La segunda duración  $\Delta t_B$  correspondiente al cumplimiento de exigencia de una resolución radiométrica deseada  $\Delta T_B$  cumple la ecuación siguiente:

$$50 \quad \Delta t_B = \sqrt{2} \left( \frac{\Delta T_B}{T_A + T_{rec}} \right) \frac{S_e}{D^2} \frac{1}{\sqrt{B}} (N + 1) \left( \frac{T_{pixel}}{V_{sat}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{rel. 4})$$

55 Designando  $T_A$  la temperatura de antena, designando  $T_{rec}$  la temperatura del receptor,  $B$  el ancho de banda pasante de filtrado,  $N+1$  el número total de antenas elementales,  $D$  la longitud de la antena de red 8,  $S_e$  la superficie eficaz de una antena elemental,  $T_{pixel}$  el tamaño de un píxel,  $V_{sat}$  la velocidad del satélite 4.

Para un valor de la relación  $\left( \frac{\Delta T_B}{T_A + T_{rec}} \right)$  idéntico al del sistema SMOS, se determina el valor de  $2 \cdot 10^{-5}$  segundos, lo cual se correspondería con un desplazamiento del satélite igual a 14 cm.

Aquí parece, en este caso concreto, que la primera duración de muestreo  $\Delta T_{Shannon}$  que cumple un criterio de

Shannon es la duración de dimensionamiento del periodo de muestreo  $\Delta t_{mue}$ .

En una variante, la frecuencia del filtro de canal 106 es programable, lo cual permite seleccionar una temperatura de brillo de observación.

5 En una variante, el conjunto de recepción es apto para medir varias temperaturas de brillo utilizando por lo menos dos baterías de filtros de canal centrados en frecuencias centrales diferentes.

10 Según la figura 5, un procedimiento de formación de imágenes radiométrica 200, destinado a cartografiar por lo menos un parámetro característico de objetos distantes dispuestos sobre una superficie y detectable por la radiación electromagnética multiangular emitida por los objetos, y que se lleva a la práctica por medio del sistema descrito en las figuras 1 a 4, comprende un conjunto de etapas 202, 204, 206, 208, 210, 212, 214, 216, 218, 220, 222, 224.

15 En una primera etapa 202, a cada antena elemental  $A(k)$  se le asocia un índice entero distinto  $k$  que permite identificar la antena elemental  $A(k)$ .

En una etapa sucesiva de inicialización 204, se selecciona una antena elemental  $A(k)$  de la antena de red 8 como referencia espacial con respecto a las otras antenas. Por ejemplo, se selecciona la antena elemental  $A(1)$ .

20 En la misma etapa de inicialización 204, se fija un instante inicial  $t(0)$  de puesta en marcha del muestreo de la posición inicial  $P(t(0))$  de la antena elemental de referencia  $A(1)$  a través de la puesta a cero de un contador de índice de muestreo  $i$ .

25 En la misma etapa de inicialización 204, para cada antena elemental  $A(k)$ , el reloj asociado  $(H(k))$  se sincroniza con la base de tiempos 60 y se determinan con precisión las posiciones espaciales respectivas de las antenas elementales  $A(k)$  con respecto a la antena elemental de referencia  $A(1)$ .

30 En una etapa sucesiva 206, para un valor actual  $i$  del índice del contador de muestreo, la posición muestreada  $P(t(i))$  de la antena elemental  $A(1)$  seleccionada de la antena de red elementales se referencia en un marco de referencia espacial fijo con respecto a la superficie sobrevolada por el satélite y se le aplica una indicación temporal por medio de la base de tiempos 60 de alta precisión según una coordenada temporal  $t(i)$ .

35 En la siguiente etapa 208, para cada antena elemental  $A(k)$ , se mantiene la sincronización del reloj asociado  $(H(k))$  con la base de tiempos 60 por un bucle de seguimiento de sincronización.

Esta etapa de mantenimiento de sincronización que viene a continuación de una fase de adquisición dentro de la etapa de inicialización 204 se efectúa, por ejemplo, con la ayuda de intercambio de señales de señalización y de un bucle de enganche de fase.

40 Cabe destacar que, en el caso en el que el reloj local sea muy estable, las correcciones de sincronización se efectúan según periodos de tiempo que pueden ser prolongados.

Cabe destacar también que, si las posiciones relativas entre las antenas elementales  $A(k)$  no varían en el transcurso del tiempo, pueden ponerse en práctica estrategias de sincronización de grupos de antenas.

45 En una etapa sucesiva 210, se actualiza, llegado el caso, la determinación de las posiciones espaciales respectivas de las antenas elementales  $A(k)$  con respecto a la antena elemental de referencia  $A(1)$ .

50 En el caso de la antena descrita en la figura 2, las posiciones relativas de las antenas elementales  $A(k)$  se consideran en este caso invariables en el tiempo. La etapa de determinación propiamente dicha de las posiciones relativas de las antenas elementales no se pone en práctica más que una sola vez, reduciéndose las etapas de determinación siguientes a una recuperación de valores de posición relativos, guardados.

55 Sin embargo, si las posiciones relativas de las antenas elementales  $A(k)$  varían en el transcurso del tiempo con una velocidad reducida con respecto a la velocidad del satélite debido, por ejemplo, a fluctuaciones de temperatura experimentadas por la antena, puede ponerse en práctica un mecanismo de determinación de las posiciones relativas, basado en receptores de posicionamiento global y un modelo de deformación.

60 Cabe destacar que también se pone en práctica un mecanismo de determinación de las posiciones relativas de las antenas elementales cuando la antena de red está repartida en satélites en vuelo de formación, determinándose las posiciones y actitudes relativas de los satélites entre sí, que varían débilmente con respecto a la velocidad del satélite.

65 En una etapa sucesiva 212, para el instante de muestreo actual  $(t(i))$  correspondiente a la posición muestreada  $P(t(i))$  de la antena elemental  $A(1)$ , se mide de manera analítica el campo electromagnético, por ejemplo eléctrico, recibido por cada antena elemental  $A(k)$ , con el fin de suministrar, para cada antena elemental  $A(k)$  una componente

en fase y una componente en cuadratura del campo medido  $E(k, t(i))$ .

En una etapa sucesiva 214, el índice  $k$  de la antena elemental y la fecha  $t(i)$  de muestreo correspondiente a la medición de campo electromagnético  $E(t, k)$  se asigna al valor complejo del campo medido.

A continuación, en una etapa sucesiva 216, después del transcurso de un período de muestreo  $\Delta T_{mue}$  a partir de  $t(i)$ , se incrementa en una unidad el contador de los instantes de muestreo, y se pone en práctica la etapa 206 con el instante de muestreo incrementado. En este caso, el valor del período de muestreo  $\Delta t_{mue}$  se toma igual a  $1,25 \cdot 10^{-5}$  segundos.

De forma paralela a la ejecución de las etapas de bucle 206, 208, 210, 212, 214, 216, se lleva a cabo una etapa de prueba 218 para verificar si el índice de muestreo actual  $i$  supera un valor de umbral  $i_{umbral}$  predeterminado. El valor de umbral  $i_{umbral}$  predeterminado se define por la relación

$$i_{umbral} = \frac{T_{pixel}}{V_{sat} \Delta T_{mue}} \quad (\text{rel. 5})$$

En este caso, con la velocidad del satélite igual a 7 km/s, el tamaño del píxel  $T_{pixel}$  igual a 4 km, y el período de muestreo  $\Delta t_{mue}$  igual a  $1,25 \cdot 10^{-5}$ , el valor de umbral es igual a aproximadamente 4715.

Si el índice actual  $i$  no supera el valor de umbral predeterminado, entonces en la etapa de temporización 220, la ejecución ulterior de la etapa 218 se retarda en un período fijado.

Si el índice de muestreo  $i$  actual supera el valor de umbral predeterminado  $i_{umbral}$ , en una etapa 220, para valores de  $i_m$  separados, por ejemplo, por  $T_{pixel}/\alpha V_{sat}/\Delta t_{mue}$ , se define un dominio de imagen temporal  $D_{IM}(i_m)$  que está constituido por los instantes de muestreo  $t(j)$  tales que la diferencia  $t(i_m)-t(j)$  es inferior o igual a una duración temporal de dominio de imagen  $\Delta t_{IM}$  predeterminada.

En este caso, la duración temporal de dominio de imagen  $\Delta t_{IM}$  es igual a la relación de la más grande de las distancias  $D$  que separan un par cualquiera de antenas elementales  $(A(k))$  con respecto a la velocidad de desplazamiento  $V_{sat}$  del satélite 4.

En la etapa siguiente 222, se suministra a cada par  $(k, j)$  de índice  $(k)$  de antena elemental  $A(k)$  y de índice de instante de muestreo  $j$  del dominio de imagen temporal  $D_{IM}(i_m)$ , un vector de medición  $M(k, j)$  que contiene, ordenadas temporalmente, las muestras de las mediciones del campo electromagnético recibido por la antena elemental  $A(k)$  en los instantes de muestreo comprendidos entre el instante de muestreo  $t(j)$  y el instante de muestreo  $t(j - \frac{\Delta t_c}{\Delta t_{mue}})$ , designando  $\Delta t_c$  una duración de integración de la correlación entre dos vectores de medición

$M(k, j)$ ,  $M(k', j')$ , y caracterizando el grado de aceptabilidad del efecto de desenfoque de movimiento debido al movimiento del satélite.

La duración de integración de la correlación entre dos mediciones es igual al producto de un coeficiente fraccionario  $\alpha$  del tamaño de un píxel dividido por la velocidad del satélite  $V_{sat}$ , siendo el valor del coeficiente fraccionario inferior o igual a 1/3 y preferentemente igual a 1/5.

Considerando en este caso el valor del coeficiente fraccionario  $\alpha$  igual a 1/5, la duración de integración de la correlación  $\Delta t_c$  es igual a aproximadamente 0,12 segundos.

En la siguiente etapa 224, se construye una imagen a partir de una función de visibilidad espaciotemporal calculada a partir:

por una parte, de una matriz de bases espacio-temporales que se corresponden con un interferómetro espacio-temporal, definiéndose una base espacio-temporal por el dato de un doblete de pared  $(k, j)$ ,  $(k', j')$  con, en este caso,  $k$  el índice de una primera antena elemental  $A(k)$  y  $j$  un índice de muestreo de la primera antena elemental  $A(k)$ ,  $k'$  el índice de una segunda antena elemental  $A(k')$  y  $j'$  un índice de muestreo de la segunda antena elemental  $A(k')$ , variando los índices  $k, k'$  entre 1 y 251, y variando los índices de muestreo  $j$  entre  $i$  e  $i - \Delta t_{IM}/\Delta t_{mue}$ ,

por otra parte, de los productos de correlación con respecto a la duración  $\Delta t_c$  entre los vectores de medición  $M(k, j)$ ,  $M(k', j')$  correspondientes a cada base  $((k, j), (k', j'))$ .

Un producto de correlación define un coeficiente de visibilidad indicado como  $V_{im}((k, j), (k', j'))$ , y el conjunto de los coeficientes de visibilidad para  $k, k'$  que varían de 1 a  $N+1$  y  $j, j'$  que varían sobre  $D_{IM}(i_m)$  define una función de visibilidad  $V_i$ .

En la etapa 224, se reconstruye así el dominio de Fourier de la imagen  $IM(i_m)$  a través de la función de visibilidad  $V_{i_m}$ , y la imagen  $IM(i_m)$  se obtiene finalmente mediante un tratamiento clásico de inversión.

5 Entre estos pares distintos, existen pares para los cuales los instantes de muestreo son diferentes. Así, la imagen reconstruida a partir de la función de visibilidad es una verdadera imagen obtenida por síntesis de apertura espacio-temporal utilizando las relaciones de coherencia espacio-temporales entre las diferentes mediciones  $M(k, j)$ .

La función de visibilidad se expresa por la siguiente expresión genérica de un coeficiente de visibilidad:

$$10 \quad V((k, j), (k', j')) = \overrightarrow{M(k, j)} \cdot \overrightarrow{M(k', j')} = \sum_{l=0}^{l=\Delta t_c / \Delta t_{mue}} \overrightarrow{E(k, j-l)} \cdot \overrightarrow{E^*(k', j'-l)}$$

de manera que el operador \* representa el operador de conjugación y el índice de sumatorio  $l$  varía de 0 al número de periodos de muestreo  $\Delta t_{mue}$  contenidos dentro de una duración de correlación  $\Delta t_c$ .

15 El tratamiento de inversión se basa en una relación de constitución que relaciona los coeficientes de visibilidad  $V_i((k, j), (k', j'))$  y la fuente de temperatura de brillo de la superficie observada designada por S.

El procedimiento permite, con la misma resolución geométrica y la misma resolución radiométrica, incrementar la superficie de apertura sintetizada del radiómetro.

20 El procedimiento y el sistema permiten también mejorar la resolución geométrica sin aumentar el número de antenas elementales, sin disminuir la superficie de apertura y sin deteriorar la resolución radiométrica, utilizando una antena unidimensional más sencilla de realizar y de montar en un satélite y sin presentar ningún efecto de aumento drástico de masa en el satélite.

25 El procedimiento permite mejorar la resolución radiométrica cuando aumenta la frecuencia de muestreo  $1/\Delta t_{mue}$ .

30 En una variante, el procedimiento utiliza una red interferométrica de antenas elementales  $A(k)$  dispuestas a bordo de, por lo menos, dos satélites móviles con respecto a la superficie observada, describiendo los satélites un vuelo en formación, es decir, sus posiciones relativas están coordinadas de forma precisa.

35 Según la figura 6, se describe una representación espacio-temporal de la red de interferometría espacio-temporal 300 obtenida con ayuda de la antena de red 8 espacio-temporal, en relación con un primer eje 302 orientado según el desplazamiento del satélite, representativo de la dimensión temporal, y un segundo eje 304, orientado según la dirección de extensión unidimensional de la antena de red 8 física, constituida por el conjunto de las antenas elementales, y representativo de una dimensión espacial.

40 El primer eje 302 es representativo de la extensión de la imagen  $IM(i_m)$  según el sentido de desplazamiento del satélite, mientras que el segundo eje 304 es representativo de la extensión de la imagen  $IM(i_m)$  en una dirección perpendicular al desplazamiento del satélite.

Se representan diferentes vistas 310, 312, 314, 316 de la antena 8 en diferentes instantes de muestreo.

45 La primera vista 310 de la antena 8 se corresponde con la posición de la antena 8 en el instante de muestreo  $t(i_m)$  referenciado por el índice  $i_m$ .

La segunda vista 312 de la antena 8 se corresponde con la posición de la antena 8 en el instante de muestreo  $t(i_m-1)$  que precede inmediatamente al instante de muestreo de la primera vista 310.

50 La vista 314 de la antena 8 se corresponde con la posición de la antena 8 en el instante de muestreo  $t(i_m) - \Delta t_{IM}$ , es decir, el último instante de muestreo que se tiene en cuenta en la provisión de un vector de medición  $M(k, j)$ , siendo k un índice cualquiera de una antena elemental  $A(k)$  y siendo j tal que  $t(j)$  pertenece al dominio de imagen temporal  $D_{IM}(i_m)$ .

55 La vista 318 se corresponde con la posición de la antena más alejada temporalmente de la vista 310 en el horizonte del tiempo de integración de correlación  $\Delta t_c$ .

A título de ejemplo, se representa un vector de base 320 que se corresponde con el doblete de par  $((k, j), (k', j'))$  con k igual a 1, j igual a i, k' igual a 256 y j' igual a  $i - \Delta t_{IM} / \Delta t_{mue}$ .

60 Según la figura 7, una variante del sistema de formación de imágenes radiométrica 402 comprende un primer satélite 404 y un segundo satélite 406 en órbita en torno a la Tierra, aptos para sobrevolar la superficie observada de manera coordinada, y una unidad de tratamiento 408 de los datos de observación recogidos y retransmitidos al suelo

por los dos satélites.

El primer satélite de observación 404 describe una primera órbita polar 410 heliosincrónica de 755 kilómetros de altitud, de período igual a 100 minutos y de velocidad lineal designada por  $\vec{V}_{sat}$  cuyo módulo es igual a 7 km/s.

5 El segundo satélite de observación 406 describe una segunda órbita polar 412 desplazada en longitud aproximadamente 16,60 metros en el nivel del ecuador con respecto a la primera órbita, estando la altitud modulada según una amplitud de  $\pm 25$  metros en torno a una altitud central idéntica a la de la primera órbita, para evitar una colisión en los polos y garantizar un mantenimiento de los satélites uno junto a otro en una misma latitud.

10 Se supone que en este caso los satélites 404 y 406 no están inclinados con respecto a su dirección respectiva de Nadir.

15 El primer satélite 404 comprende un primer segmento 424 de antenas elementales 426 y, no representados, un primer conjunto de recepción, y una primera antena de telemedición apta para retransmitir hacia la unidad de tratamiento 408 los datos de mediciones radiométricas de los campos electromagnéticos recibidos por las antenas elementales 426 del primer segmento 424.

20 El segundo satélite 406 comprende un segundo segmento 428 de antenas elementales 430 y, no representados en la figura 7, un segundo conjunto de recepción, y una segunda antena de telemedición apta para retransmitir hacia la unidad de tratamiento 408 los datos de mediciones radiométricas de los campos electromagnéticos recibidos por las antenas elementales 430 del segundo segmento 428.

25 El primer satélite 404 y el segundo satélite comprenden también medios de determinación, de alta precisión, de sus posiciones y actitudes relativas, utilizando, por ejemplo, láseres.

Las antenas elementales 426 y 430 son idénticas a las descritas en la figura 2.

30 Las longitudes del primer segmento 424 y del segundo segmento 428 son idénticas e iguales a 16,6 metros.

La arquitectura del primer conjunto de recepción difiere de la arquitectura del conjunto de recepción descrito en la figura 3 en que una primera interfaz de enlace entre satélites está conectada a la base de tiempos de alta precisión del primer conjunto de recepción.

35 La arquitectura del segundo conjunto de recepción difiere de la arquitectura del conjunto de recepción descrito en la figura 3 en que la base de tiempos se sustituye por una segunda interfaz de enlace entre satélites compatible de la primera interfaz de enlace entre satélites.

40 Los dos segmentos 424 y 428 forman así una antena de red 432 análoga a la antena de red 8 descrita en la figura 2.

Sin embargo, la antena de red 432 difiere de la antena de red 8 de la figura 2 en las posiciones relativas de las antenas elementales del segundo segmento con respecto a las antenas elementales del primer segmento debido a un desplazamiento relativo entre el primer satélite.

45 Incluso si este desplazamiento relativo permanece confinado dentro de un volumen de 25 m<sup>3</sup> aproximadamente, varía lentamente con respecto a la velocidad del satélite y permanece insignificante mientras dura el tiempo de integración de correlación, es necesario corregir regularmente las posiciones de las antenas elementales A(k) con respecto a una antena elemental de referencia A(1).

50 Esta corrección se pone en práctica a partir del conocimiento de las posiciones precisas de las antenas elementales con respecto a su segmento de pertenencia y con el conocimiento de la posición relativa de los segmentos 424 y 428.

55 La provisión de una indicación precisa de tiempo para cada antena elemental se lleva a cabo mediante la sincronización del reloj local asociado a la antena elemental con la base de tiempos única, de alta precisión, que se lleva a bordo del primer satélite 404.

60 La antena de red 432 funciona de manera análoga a la antena de red 8 y se puede aplicar el procedimiento de formación de imágenes radiométrica descrito en la figura 5.

La ventaja proporcionada por la segmentación de la antena de red en dos es la realización de satélites más pequeños en los cuales se montan antenas más pequeñas, incluso si estas antenas más pequeñas no constituyen más que segmentos de la antena de red 432.

65 Según la figura 8, una variante 502 del sistema de formación de imágenes radiométrica comprende un primer

satélite 504, respectivamente un segundo satélite 506, idéntico al primer satélite 404, respectivamente al segundo satélite 406 de la figura 7, siendo los dos satélites 504 y 506 en órbita en torno a la Tierra aptos para sobrevolar la superficie observada, de manera coordinada, y una unidad de tratamiento 508 idéntica a la unidad 408 de la figura 7.

5 La órbita 510 del primer satélite 504 es idéntica a la del primer satélite 404 de la figura 7.

El segundo satélite 506 describe una órbita polar 512 heliosincrónica, de la misma altitud que la altitud de la órbita 510 del primer satélite 504 y desplazada 25 metros permanentemente en latitud.

10 La órbita polar 512 está desplazada en longitud aproximadamente 16,60 metros en el nivel del ecuador con respecto a la primera órbita.

Así se evita una colisión de los satélites en los polos.

15 La antena de red 532 correspondiente funciona de forma análoga a la antena de red 432 y se puede aplicar el procedimiento de formación de imágenes radiométrica descrito en la figura 5.

La configuración de la figura 8 presenta la ventaja, con respecto a la de la figura 7, de no tener que ajustar la altura del segundo satélite con respecto al primer satélite.

20

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de formación de imágenes radiométrica destinado a cartografiar por lo menos un parámetro característico de objetos distantes dispuestos sobre una superficie y detectable por la radiación electromagnética multiangular emitida por los objetos, utilizando el procedimiento una antena de red (8; 432; 532) formada por unas antenas elementales (A(k)) dispuestas a bordo de por lo menos un satélite (4; 404, 406; 504, 506) móvil con respecto a la superficie, estando el procedimiento caracterizado porque comprende las etapas que consisten en:
- identificar (202) cada antena elemental (A(k)) por un índice k,
- aplicar (206) una indicación de tiempo según una base de tiempos (60), a posiciones sucesivas (P(t(i))) de una antena elemental (A(1)) predeterminada de la antena de red (8; 432, 532) que sirve como referencia espacio-temporal, muestreándose las posiciones sucesivas de la antena elemental de referencia (A(1)) según un período de muestreo ( $\Delta t_{mue}$ ) en instantes sucesivos (t(i)) ordenados según un índice (i) y referenciándose dentro de un marco de referencia espacial fijo con respecto a la superficie sobrevolada,
- estando un reloj local (H(k)) asociado a cada antena elemental (A(k)), para cada posición sucesiva muestreada (P(t(i))) de la antena elemental de referencia A(1), sincronizar (208) cada reloj local asociado (H(k)) con la base de tiempos (60),
- para cada posición sucesiva muestreada (P(t(i))) de la antena elemental de referencia (A(1)), determinar (210) las posiciones espaciales respectivas de las antenas elementales A(k) con respecto a la antena elemental de referencia (A(1)),
- en cada instante de muestreo (t(i)) correspondiente a una posición muestreada (P(t(i))) de la antena elemental (A(1)), medir (212) de manera analítica un campo electromagnético recibido por cada antena elemental (A(k)) y suministrar, para cada una de ellas, una componente en fase y una componente en cuadratura del campo,
- asignar (214) a cada medición analítica del campo electromagnético (E(k,t(i))) medido el índice (k) de la antena elemental correspondiente y la fecha (t(i)) de muestreo correspondiente,
- para un índice de imagen ( $i_m$ ) predeterminado, definir (220) un dominio de imagen temporal ( $D_{IM}(i_m)$ ) constituido por los instantes de muestreo (t(j)) tales que la diferencia  $t(i_m)-t(j)$  es inferior o igual a una duración temporal de dominio de imagen  $\Delta t_{IM}$  predeterminada,
- para cada par (k, j) de índice (k) de antena elemental (A(k)) y de índice de instante de muestreo (j) correspondiente al dominio de imagen temporal  $D_{IM}(i_m)$ , suministrar (222) un vector de medición M(k, j) que contiene ordenadas temporalmente las muestras de las mediciones del campo electromagnético recibido por la antena elemental (A(k)) en los instantes de muestreo comprendidos entre el instante de muestreo t(j) y el instante de muestreo  $t(j - \frac{\Delta t_c}{\Delta t_{mue}})$ , designando  $\Delta t_c$  una duración de integración de la correlación entre dos vectores de medición M(k,j), M(k',j'),
- construir (224) una imagen (IM( $i_m$ )) a partir de una función de visibilidad espacio-temporal que comprende un conjunto de coeficientes de visibilidades, siendo igual por lo menos un coeficiente de visibilidad a la correlación de dos vectores de medición M(k,j), M(k',j') cuyos índices de muestreo j, j' son diferentes.
2. Procedimiento de formación de imágenes radiométrica según la reivindicación 1, caracterizado porque un tamaño de píxel ( $T_{píxel}$ ) está predeterminado y por lo menos un satélite (4; 404; 504) que lleva la antena de referencia elemental (A(1)) presenta una velocidad de desplazamiento con respecto a la superficie observada ( $V_{sat}$ ), la duración de integración de correlación ( $\Delta t_c$ ) es igual al producto de un coeficiente fraccionario ( $\alpha$ ) por el tamaño ( $T_{píxel}$ ) de un píxel dividido por la velocidad ( $V_{sat}$ ) de dicho por lo menos un satélite (4; 404; 504).
3. Procedimiento de formación de imágenes radiométrica según la reivindicación 2, caracterizado porque el coeficiente fraccionario ( $\alpha$ ) es inferior o igual a 1/3 y preferentemente igual a 1/5.
4. Procedimiento de formación de imágenes radiométrica según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 3, caracterizado porque
- la duración temporal de dominio de imagen ( $\Delta t_{IM}$ ) es igual a la relación de la más grande de las distancias (D) que separan un par cualquiera de antenas elementales (A(k)) con respecto a la velocidad de desplazamiento ( $V_{sat}$ ) de dicho por lo menos un satélite (4; 404; 504), y
- porque una banda pasante (B) de filtrado de las frecuencias en torno a una frecuencia central ( $\nu_0$ ) del campo electromagnético medido por cada una de las antenas elementales (A(k)) es inferior o igual a la relación de la

velocidad de desplazamiento ( $V_{sat}$ ) de dicho por lo menos un satélite (4; 404; 504) con respecto a la más grande de las distancias (D) que separan un par cualquiera de antenas elementales (A(k)).

5. Procedimiento de formación de imágenes radiométrica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque una banda de frecuencias de medición del campo electromagnético recibido por las antenas elementales (A(k)) está comprendida dentro de la banda L y preferentemente dentro de la banda de las frecuencias comprendidas entre 1.400 y 1.427 MHz.

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 4 a 5, caracterizado porque la precisión de localización de una antena elemental (A(k)) es igual al producto de un coeficiente fraccionario ( $\beta$ ) por la longitud de onda ( $\lambda_0$ ) correspondiente a la frecuencia central ( $\nu_0$ ), siendo el coeficiente fraccionario ( $\beta$ ) inferior a 1/5 y preferentemente inferior a 3/20.

7. Procedimiento según la reivindicación 6, caracterizado porque la precisión de la base de tiempos ( $\Delta t$ ) es inferior a la relación de la precisión de localización con respecto a la velocidad de la luz.

8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque el período de muestreo ( $\Delta t_{mue}$ ) es inferior o igual al mínimo de una primera duración mínima de muestreo ( $\Delta t_{Shannon}$ ) correspondiente a un criterio de Shannon y de una segunda duración ( $\Delta t_B$ ) correspondiente al cumplimiento de la exigencia de una resolución radiométrica predeterminada ( $\Delta T_B$ ),

siendo la primera duración ( $\Delta t_{Shannon}$ ) igual a la mitad del período correspondiente a una longitud de onda ( $\lambda_0$ ) de una frecuencia de medición,

siendo la segunda duración ( $\Delta t_B$ ) función de la resolución radiométrica predeterminada ( $\Delta T_B$ ), de una temperatura de antena ( $T_A$ ), de una temperatura de receptor ( $T_{rec}$ ), de un ancho de banda pasante de filtrado (B), de un número total (N+1) de antenas elementales, de una longitud (D) de la antena de red (8), de una superficie eficaz ( $S_e$ ) de una antena elemental, del tamaño de un píxel ( $T_{pixel}$ ), de la velocidad ( $V_{sat}$ ) de dicho por lo menos un satélite (4; 404; 504).

9. Procedimiento según la reivindicación 8, caracterizado porque la segunda duración ( $\Delta t_B$ ) cumple la ecuación:

$$\Delta t_B = \sqrt{2} \left( \frac{\Delta T_B}{T_A + T_{rec}} \right) \frac{S_e}{D^2} \frac{1}{\sqrt{B}} (N + 1) \left( \frac{T_{pixel}}{V_{sat}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

10. Sistema de formación de imágenes radiométrica destinado a cartografiar por lo menos un parámetro característico de objetos distantes dispuestos sobre una superficie y detectable por la radiación electromagnética multiangular emitida por los objetos, caracterizado porque comprende

una antena de red (8, 432, 532) formada por unas antenas elementales (A(k)) dispuestas a bordo de por lo menos un satélite (4; 404, 406; 504, 506) móvil con respecto a la superficie,

por lo menos un conjunto de recepción conectado a la antena de red (8; 432; 532) apto para

aplicar una indicación de tiempo, según una base de tiempos ( $\Delta t$ ) de alta precisión, a posiciones sucesivas (P(t(i))) de una antena elemental (A(1)) predeterminada de la antena de red (8, 432, 532) que sirve como referencia espacio-temporal, muestreándose las posiciones sucesivas de la antena elemental de referencia (A(1)) según un período de muestreo  $\Delta T_{mue}$  en instantes sucesivos (t(i)) ordenados según un índice (i) y referenciándose dentro de un marco de referencia espacial fijo con respecto a la superficie sobrevolada,

estando un reloj local (H(k)) asociado a cada antena elemental (A(k)), para cada posición sucesiva muestreada (P(t(i))) de la antena elemental de referencia A(1), sincronizar cada reloj local asociado (H(k)) con la base de tiempos ( $\Delta t$ ),

para cada posición sucesiva muestreada (P(t(i))) de la antena elemental de referencia (A(1)), determinar las posiciones espaciales respectivas de las antenas elementales A(k) con respecto a la antena elemental de referencia (A(1)),

en cada instante de muestreo (t(i)) correspondiente a una posición muestreada (P(t(i))) de la antena elemental (A(1)), medir de manera analítica un campo electromagnético recibido por cada antena elemental (A(k)) y suministrar, para cada una de ellas, una componente en fase y una componente en cuadratura,

asignar a cada medición analítica del campo electromagnético (E(k,t(i))) medido el índice (k) de la antena elemental correspondiente y la fecha (t(i)) de muestreo correspondiente,

y una unidad de tratamiento (6) apta para

5 para un índice de imagen ( $i_m$ ) predeterminado, definir (220) un dominio de imagen temporal ( $D_{IM}(i_m)$ ) constituido por los instantes de muestreo ( $t(j)$ ) tales que la diferencia  $t(i_m)-t(j)$  es inferior o igual a una duración temporal de dominio de imagen  $\Delta t_{IM}$  predeterminada,

10 para cada par ( $k, j$ ) de índice ( $k$ ) de antena elemental ( $A(k)$ ) y de índice de instante de muestreo ( $j$ ) correspondiente al dominio de imagen temporal ( $D_{IM}(i_m)$ ), suministrar (222) un vector de medición  $M(k, j)$  que contiene ordenadas temporalmente las muestras de las mediciones del campo electromagnético recibido por la antena elemental ( $A(k)$ ) en los instantes de muestreo comprendidos entre el instante de muestreo  $t(j)$  y el instante de muestreo  $t(j - \frac{\Delta t_c}{\Delta t_{mue}})$ , designando  $\Delta t_c$  una duración de integración de la correlación entre dos vectores de medición  $M(k,j)$ ,  $M(k',j')$ ,

15 construir (224) una imagen ( $IM(i_m)$ ) a partir de una función de visibilidad espacio-temporal que comprende un conjunto de coeficientes de visibilidades, siendo por lo menos un coeficiente de visibilidad igual a la correlación de dos vectores de medición  $M(k,j)$ ,  $M(k',j')$  cuyos índices de muestreo  $j, j'$  son diferentes.

20 11. Sistema de formación de imágenes radiométrica según la reivindicación 10, caracterizado porque

la antena de red (8; 432; 532) comprende un primer segmento (20; 424), de antenas elementales alineadas, separado de un segundo segmento (428) de antenas elementales o de una antena aislada única ( $A(N+1)$ ) por una distancia de separación inferior o igual a la mitad de un tamaño de la antena de red (8; 432; 532),

25 porque cada antena elemental ( $A(k)$ ) tiene un centro respectivo ( $C(k)$ ), los centros ( $C(k), C(k+1)$ ) de dos antenas adyacentes de un mismo segmento (20, 424, 428) están separados por una semilongitud de onda ( $\lambda_0/2$ ), y porque

30 el primer segmento (424) y el segundo segmento (428), respectivamente el primer segmento (20) y la antena aislada ( $A(N+1)$ ), están orientados según una misma dirección.

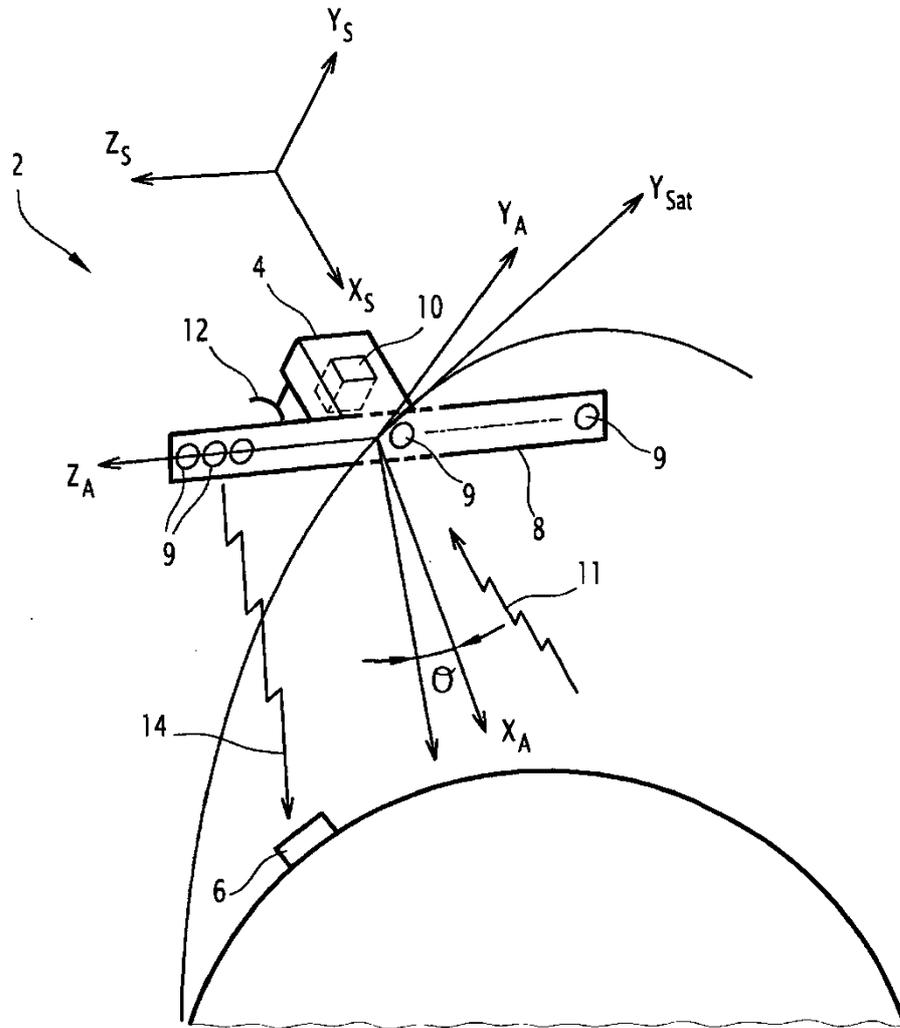
12. Sistema de formación de imágenes radiométrica según la reivindicación 11, caracterizado porque comprende un solo satélite (4) y una sola antena de red (8) de extensión unidimensional de longitud (D),

35 porque la antena de red (8) comprende un solo segmento (20) de antenas elementales alineadas, presentando el segmento (20) una longitud (D1) que es la mitad de la longitud (D) de la antena de red (8), y una antena elemental aislada ( $A(N+1)$ ), separada por un espacio vacío (30) de la misma longitud (D1) que la del segmento (20) y alineada con las antenas elementales del segmento (20).

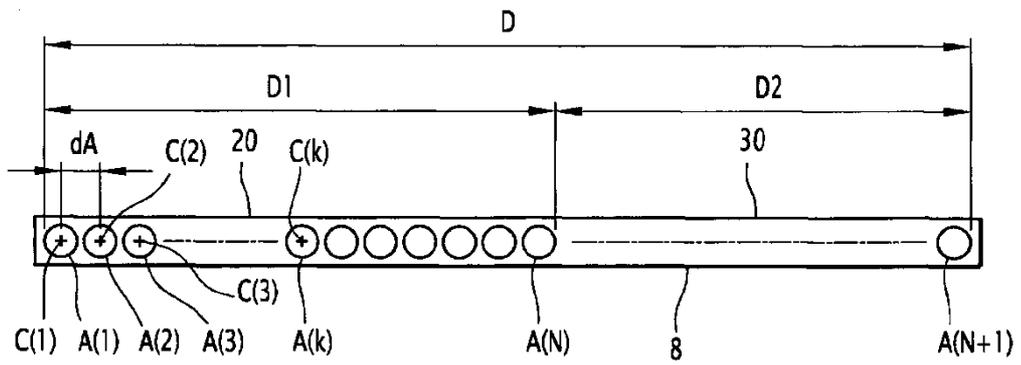
40 13. Sistema según la reivindicación 11, caracterizado porque las antenas elementales (426; 436) de la antena de red (432; 532) están dispuestas en dos satélites (404, 406; 504, 506) que describen, cada uno de ellos, una órbita polar heliosincrónica y que forman un vuelo en formación, estando el primer segmento (424) dispuesto en el primer satélite (404; 504) y estando el segundo segmento (428) dispuesto en el segundo satélite (406; 506).

45 14. Sistema según la reivindicación 13, caracterizado porque las altitudes de las órbitas polares difieren en una altura inferior al doble de la longitud de un segmento.

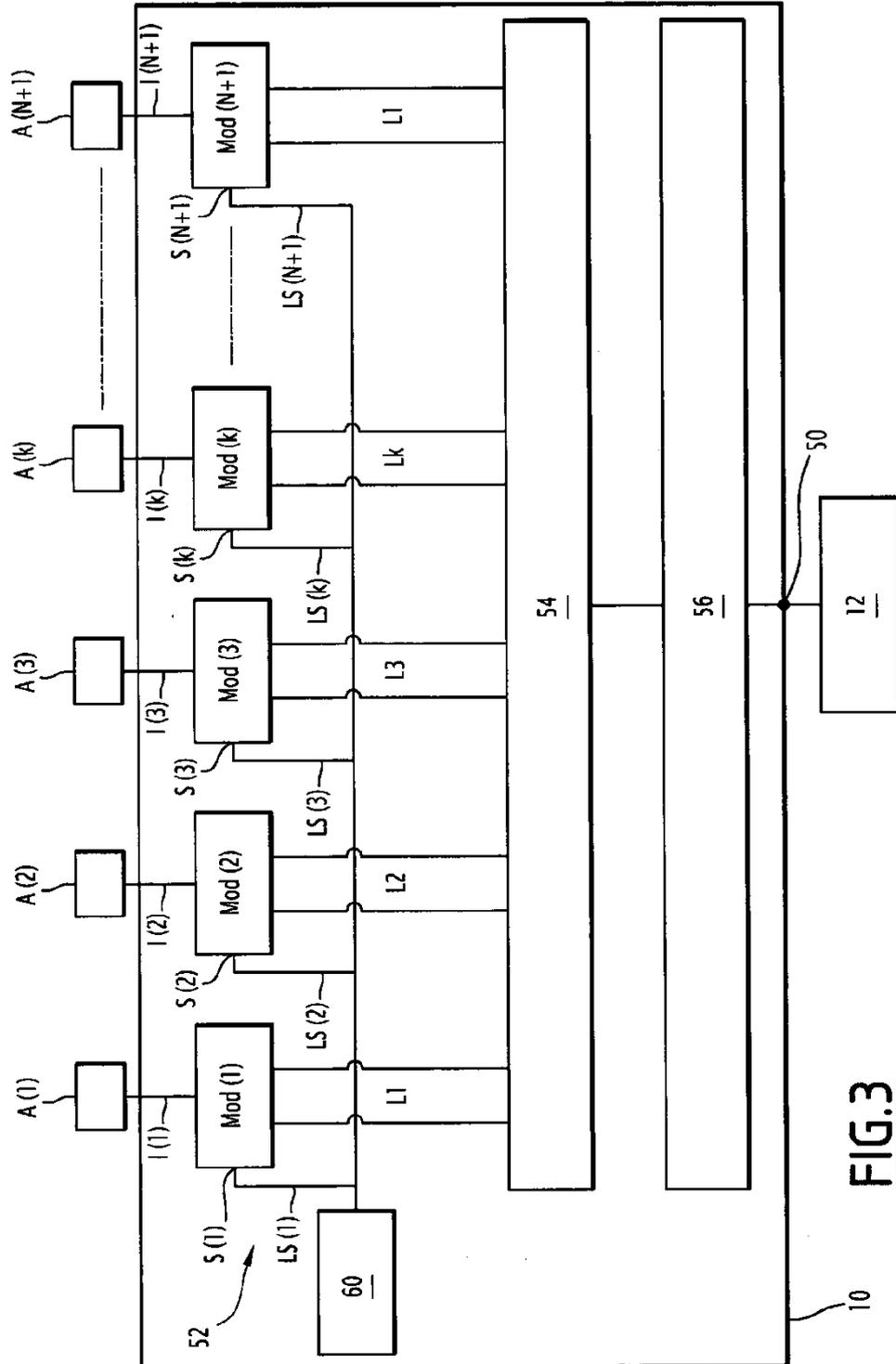
50 15. Sistema según la reivindicación 13, caracterizado porque el primer satélite (504) y el segundo satélite (506) están situados sobre dos órbitas polares heliosincrónicas de la misma altitud, estando los satélites (504, 506) separados en la dirección longitudinal por una distancia comprendida entre una y dos longitudes de un segmento.



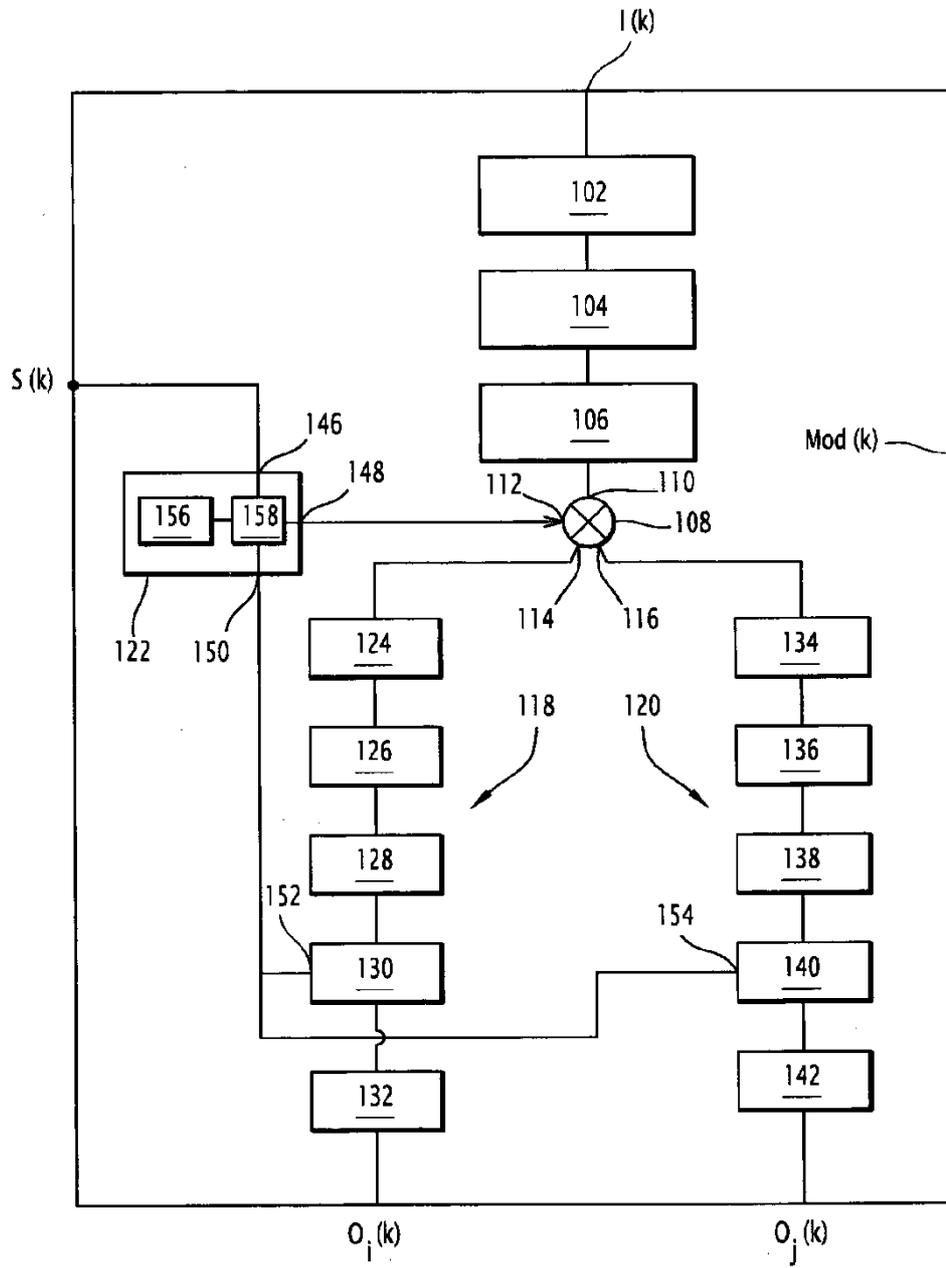
**FIG.1**



**FIG.2**



**FIG. 3**



**FIG. 4**

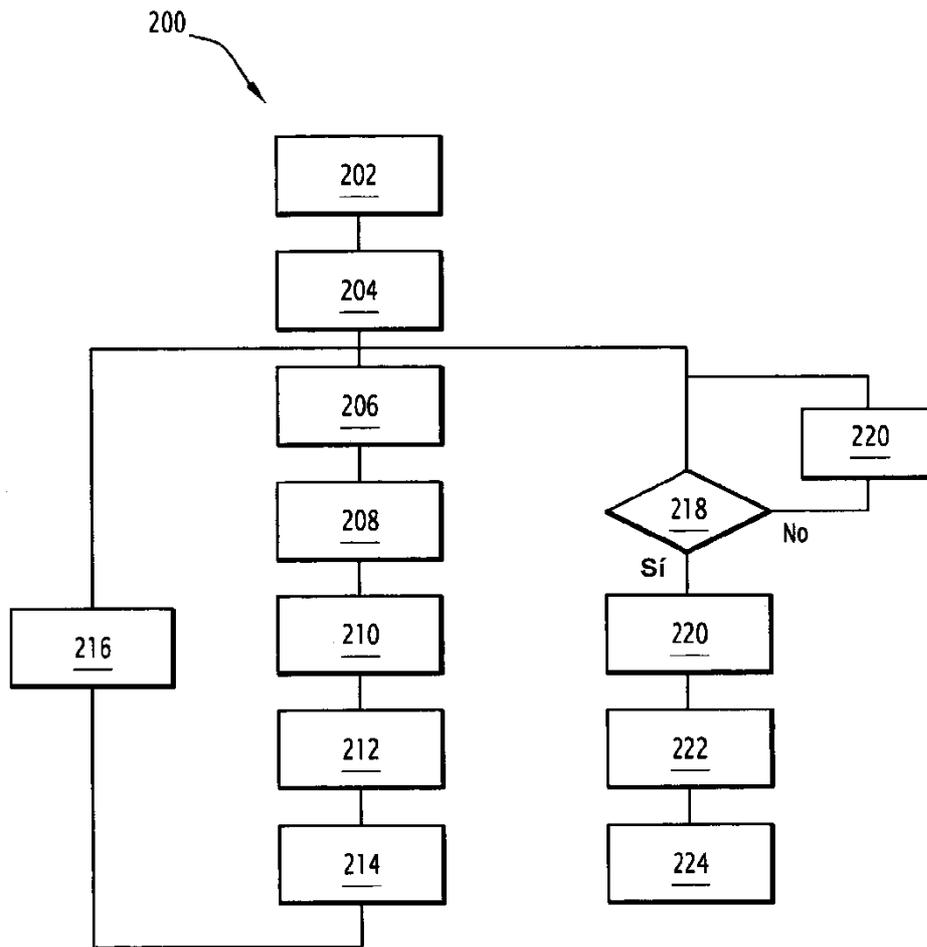
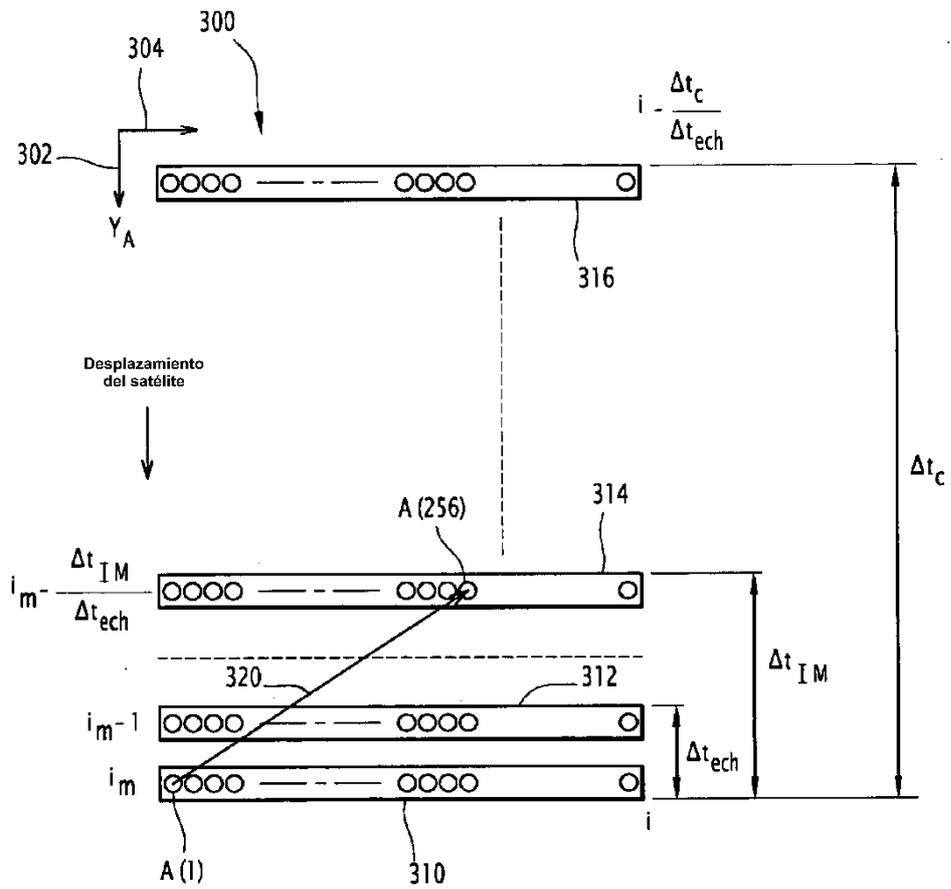
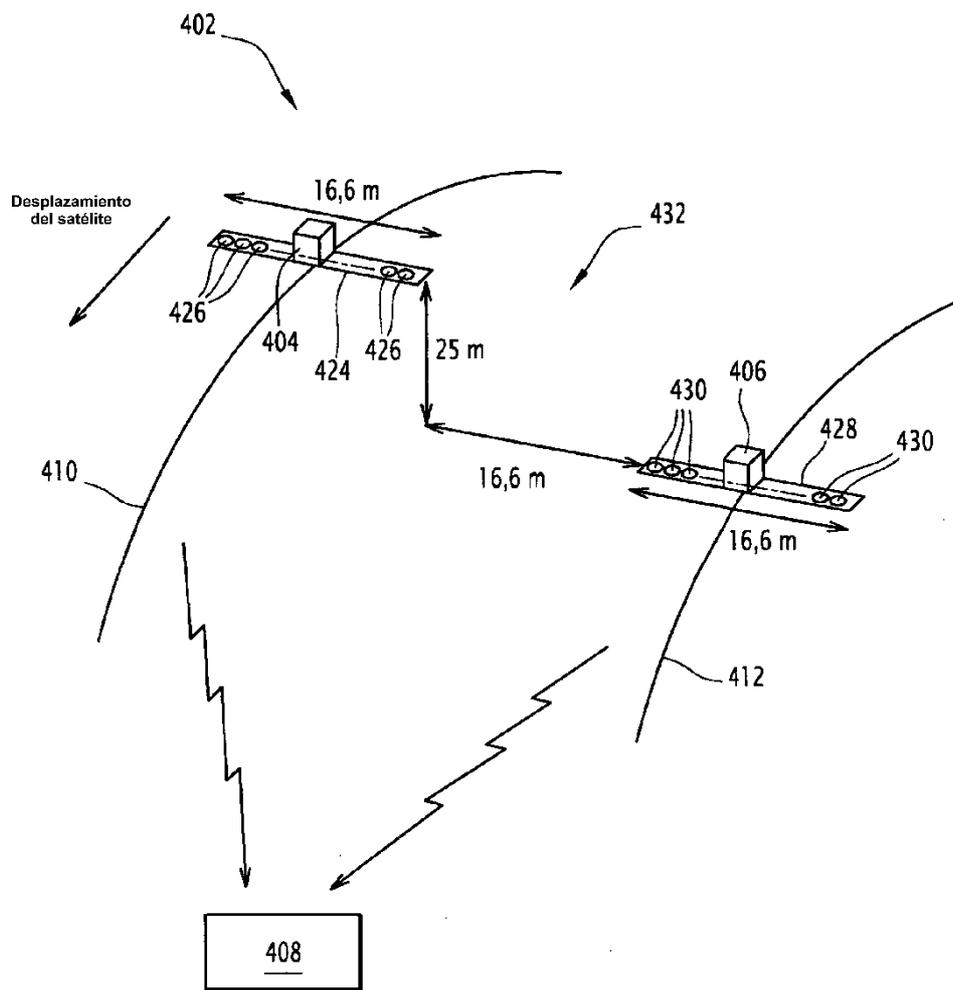


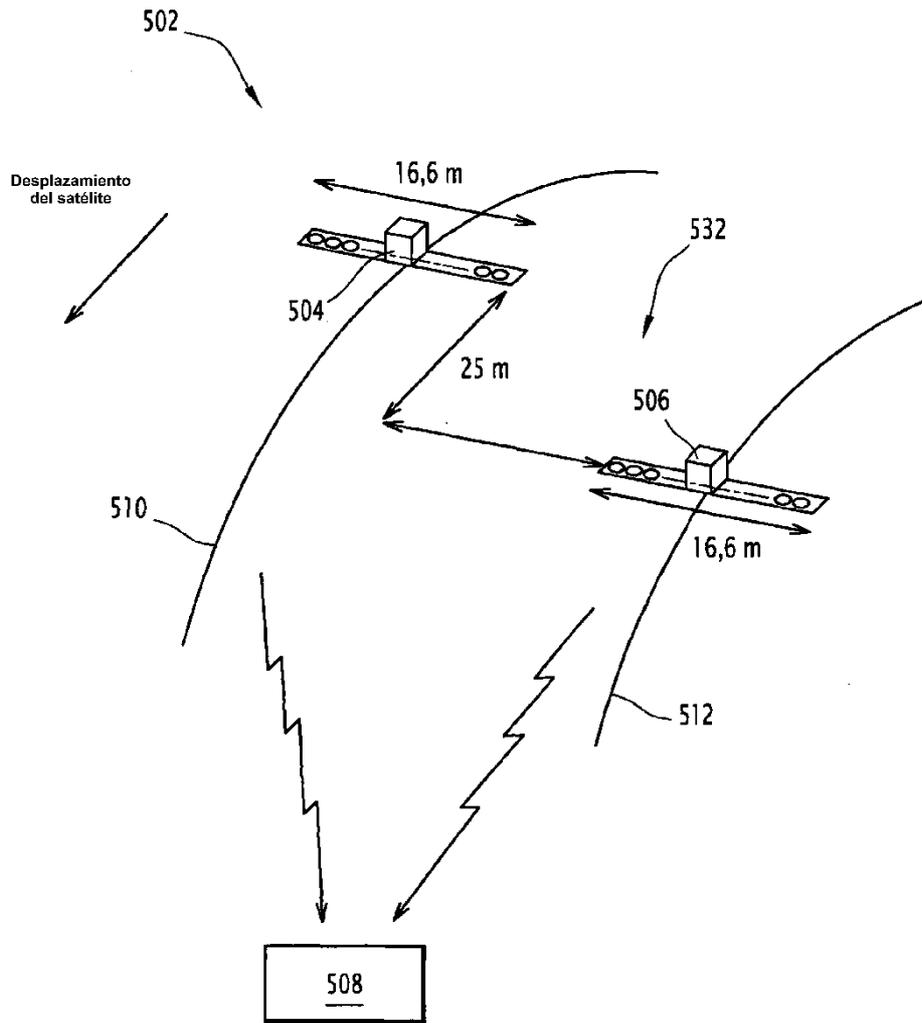
FIG.5



**FIG.6**



**FIG.7**



**FIG.8**