



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 320 599**

51 Int. Cl.:

G01S 13/90 (2006.01)

G01S 13/95 (2006.01)

G01S 13/89 (2006.01)

G01K 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07290707 .4**

96 Fecha de presentación : **07.06.2007**

97 Número de publicación de la solicitud: **1868010**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **19.12.2007**

54 Título: **Radiómetro interferométrico.**

30 Prioridad: **16.06.2006 FR 06 05371**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
25.05.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
25.05.2009

73 Titular/es: **AGENCE SPATIALE EUROPEENNE**
8-10, rue Mario Nikis
F-75738 Paris Cédex 15, FR

72 Inventor/es: **De Maagt, Peter;**
Christensen, Jacob Björn;
Carlström, Anders;
Emrich, Anders Johan Gunnar y
Back Andersson, John Stefan

74 Agente: **Martín Santos, Victoria Sofía**

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

Radiómetro interferométrico.

La invención se refiere a un radiómetro interferométrico para la formación de imágenes de una emisión de radiación de una escena objetivo.

Más particularmente, pero sin limitarse, no obstante, a esta aplicación particular, la invención se refiere a un radiómetro interferométrico embarcado en un vehículo espacial para la formación de imágenes de una emisión de radiación de una superficie planetaria. El radiómetro de acuerdo con la invención está particularmente bien adaptado para formar imágenes de la Tierra en una banda de microondas, y particularmente en longitudes de onda milimétricas o submilimétricas, desde una órbita geoestacionaria.

La expresión “superficie planetaria” debe entenderse en sentido amplio, de modo que no solamente designa a las superficies de los planetas de tipo terrestre y de los planetas gaseosos, sino también las de los satélites, asteroides, cometas, etc.

Los radiómetros de microondas embarcados en un vehículo espacial constituyen un complemento de la formación de imágenes ópticas en el espectro visible e infrarrojo procurando perfiles verticales de temperatura y de humedad a través de la atmósfera, incluso en presencia de nubes, así como informaciones relativas a las precipitaciones. Frecuentemente, estos radiómetros funcionan en un modo de observación en nadir; estos radiómetros realizan mediciones pasivas y son capaces de discriminar radiaciones recibidas de diferentes niveles en la atmósfera mediante observación del ensanchamiento del espectro de las líneas de emisión.

Los radiómetros de la generación actual se embarcan en satélites de órbita baja (LEO), que orbitan a una altitud comprendida entre aproximadamente 300 y 900 km. Debido a la altitud relativamente reducida de estos satélites, se obtiene una resolución espacial satisfactoria del orden de varias decenas de kilómetros alrededor del nadir en el dominio espectral comprendido entre 50 - 100 GHz por medio de una antena única de diámetro igual o inferior a aproximadamente 1 m. Se recuerda que el criterio de Rayleigh para la resolución espacial en el caso de una observación en nadir es:

$$r \approx \frac{1,22\lambda}{D} R \quad [1]$$

donde r es el poder de resolución (tamaño de la característica espacial resuelta más pequeña), λ la longitud de onda de la radiación, D el diámetro de la antena y R la distancia antena/suelo. En el caso de una observación siguiendo un ángulo inclinado (*off-nadir*), la resolución espacial se degrada fuertemente.

Los radiómetros LEO presentan un franja de medición de aproximadamente 2.000 km y aseguran una cobertura global de la superficie terrestre gracias a su movimiento orbital. Por consiguiente, estos instrumentos no pueden procurar una cobertura continua de la misma región de la Tierra: típicamente, su periodo de revisita es del orden de 2 - 3 días. De este modo, los radiómetros LEO presentan una buena resolución espacial pero su resolución temporal es mediocre.

Una resolución temporal bastante mejor, e idealmente una vigilancia permanente, es necesaria para seguir en tiempo real la evolución de episodios interesantes desde un punto de vista meteorológico, tales como huracanes que se acercan a una costa o la formación de tormentas (previsión a muy corto plazo o “*nowcasting*”). Esto solamente puede obtenerse embarcando un radiómetro en un satélite geoestacionario (GEO), que orbita a una altitud de aproximadamente 36.000 km. Sin embargo, teniendo en cuenta el gran aumento de la distancia Tierra-instrumento, sería necesaria una antena de un diámetro irrealizable para obtener una resolución espacial similar a la de los radiómetros LEO. Por ejemplo, para conseguir una resolución lineal de 30 km (correspondiente a una resolución angular inferior a 1 miliradian) a 50 GHz, sería necesario un reflector de 8 m de diámetro y que presente una rugosidad de superficie inferior a 0,1 mm. Actualmente, no es posible lanzar y desplegar una antena de este tamaño con este acabado de superficie en órbita GEO. De este modo, la técnica anterior no permite obtener una formación de imágenes de microondas de la Tierra a partir de una órbita GEO, con una resolución espacial satisfactoria.

Para evitar este problema, al NASA desarrolla actualmente un dispositivo de demostración en el suelo para un radiómetro que funciona a 50 GHz (GeoSTAR) basado en el principio de interferometría o de síntesis de apertura. Este concepto se describe en las publicaciones “A Microwave Sounder for GOES-R: A GeoSTAR Progress Report”, por B. H. Lambrigsten, P. P. Kangaslahti, A. B. Tanner y W. J. Wilson, 14ª International TOVS Study Conference, Pekín, R.P. China; 25-31 de mayo de 2005; y B. Lambrigsten et al., “GeoSTAR - a synthetic aperture approach for a geostationary microwave sounder”, 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, Vol. 2, 6 de marzo de 2004, páginas 1008-1014.

El radiómetro GeoSTAR propuesto consiste en una red en Y de receptores de microondas que funcionan en modo heterodina I/Q, estando todas las antenas orientadas en la misma dirección. Un sub-sistema digital calcula las correlaciones cruzadas entre las señales convertidas en frecuencia de todos los pares de receptores posibles; de esta manera, cada par de antenas constituye, con el correlador asociado, un interferómetro. La señal compleja de correlación cruzada, expresada como una función de la separación entre antenas (“línea de base” o “*baseline*”), se denomina “función de visibilidad” y es esencialmente la transformada de Fourier de la luminancia de la escena observada, expresada en función del ángulo de incidencia. Entonces puede reconstruirse una imagen calculando la transformada de Fourier inversa de la función de visibilidad. La red en Y conduce a un muestreo del dominio bidimensional de frecuencias espaciales (denominado plano u-v) siguiendo una trama hexagonal, y el número de muestras es del orden de $N \cdot (N-1)$, donde N es el número de antenas individuales.

De acuerdo con el criterio de muestreo de Nyquist, el campo de visión no ambiguo se determina mediante la separación mínima entre pares de antenas. Para una cobertura terrestre total, este campo de visión debe ser superior al diámetro angular del disco terrestre tal como se ve desde una órbita GEO, o sea aproximadamente $17,5^\circ$. Esto conduce a una separación máxima entre elementos receptores igual a aproximadamente 3,5 longitudes de onda, es decir 2,1 cm a 50 GHz. En la práctica, esto conduce a una configuración compacta de antenas de recepción montadas borde con borde. Esto significa que, en dicho sistema de acuerdo con la técnica anterior, existe una relación directa entre el poder de resolución, que determina la longitud de la línea de base más larga y por consiguiente la longitud de los brazos de la red en Y, y el número de elementos receptores en cada brazo. Por ejemplo, para obtener una resolución espacial de 30 km a 50 GHz, es necesaria una línea de base de 8 metros; esto corresponde a aproximadamente 200 receptores por brazo, o incluso a un total de 600 receptores.

El criterio de muestreo puede relajarse si se requiere un campo de visión más reducido, por ejemplo si solamente se van a formar imágenes de una región limitada de la superficie terrestre.

De este modo, el concepto de radiómetro de síntesis de apertura propuesto conduce a un gran número de receptores y por consiguiente a una masa que no es viable, así como a una potencia consumida elevada. Este concepto de acuerdo con la técnica anterior presenta también otros inconvenientes.

En primer lugar, el calibrado en amplitud y en fase de un número tan grande de receptores es extremadamente difícil.

Otro inconveniente se debe a que el diagrama de recepción de la apertura sintetizada presenta lóbulos secundarios muy macados, salvo si se aplica una función de ponderación para la conformación del haz. Dado que la utilización del criterio de Nyquist impone una configuración prácticamente compacta de las antenas en los brazos de la red, el diseñador del instrumento no dispone de ninguna libertad para modificar la distribución geométrica de los puntos de muestreo en el plano u-v para mejorar la forma del diagrama de recepción sintetizado.

Otro inconveniente se debe a que las exigencias de sensibilidad, resolución espacial y campo de visión no pueden satisfacerse simultáneamente, pero están estrechamente ligadas. Por lo tanto, es difícil encontrar un compromiso satisfactorio entre estas exigencias.

Otro inconveniente más se debe al hecho de que el radiómetro, debido al tipo y a la configuración geométrica de las antenas, solamente puede funcionar en una banda única. Teniendo en cuenta el gran número de elementos requeridos incluso en funcionamiento mono-banda y su configuración compacta, un funcionamiento multi-banda es particularmente difícil de aplicar.

La invención pretende resolver al menos algunos de los problemas descritos anteriormente, para procurar un radiómetro que esté bien adaptado para la formación de imágenes de la Tierra en microondas y más particularmente en ondas milimétricas y submilimétricas, desde una órbita geoestacionaria. Las “ondas milimétricas y submilimétricas” corresponden aproximadamente a una frecuencia comprendida entre 30 GHz y 3 THz, pero la invención puede emplearse en un intervalo de frecuencias más amplio, por ejemplo entre aproximadamente 1 GHz y 10 THz.

De acuerdo con la presente invención, este objetivo se consigue mediante un radiómetro interferométrico que comprende una red poco densa de elementos receptores que se hace girar alrededor de un eje dirigido hacia la escena observada. La rotación permite obtener un muestreo satisfactorio del plano u-v incluso sin que sea necesario utilizar una red completa de elementos montados borde con borde. Aunque el criterio de Nyquist no sea satisfactorio en todo momento, la apertura se muestrea totalmente en el transcurso de una media rotación. Esto conlleva una gran reducción del número de elementos receptores, por ejemplo en un factor comprendido entre 4 y 6, en los ejemplos descritos a continuación, lo que hace viable una formación de imágenes de alta resolución de la Tierra desde una órbita GEO. Además, dado que ya no es necesario un ensamblaje compacto de los receptores, la distribución espacial de las muestras en el plano u-v puede optimizarse con cuidado para reducir los lóbulos secundarios de los diagramas de recepción de apertura sintetizados. La utilización de una red de detectores de densidad reducida hace posible también una formación de imágenes multi-banda. Otra ventaja importante procurada por la invención se debe a que la rotación de la red facilita el calibrado de forma significativa.

Se observará que el principio de muestreo por rotación está particularmente bien adaptado a la formación de imágenes terrestres desde una órbita GEO, dado que el instrumento es estacionario con respecto a la escena observada.

ES 2 320 599 T3

Sin embargo, una formación de imágenes desde una órbita LEO, sigue siendo posible, pero se hace más compleja por la necesidad de tener en cuenta el desplazamiento relativo del satélite con radiómetro embarcado con respecto al suelo.

Más exactamente, un objeto de la invención es procurar un radiómetro interferométrico para la formación de imágenes de una emisión de radiación de una escena objetivo, que comprende:

- una pluralidad de elementos receptores para recibir dicha radiación, estando dichos elementos receptores dispuestos en forma de una red bidimensional o tridimensional;
- primeros medios de tratamiento de la señal para calcular un conjunto bidimensional o tridimensional de muestras de una función de visibilidad de dicha emisión de radiación mediante correlación cruzada por pares de las señales recibidas por dichos elementos receptores; y
- segundos medios de tratamiento de la señal para reconstruir una imagen de la intensidad de dicha emisión de radiación a partir de dichas muestras de dicha función de visibilidad;

caracterizado porque comprende además medios de rotación de dicha red bidimensional o tridimensional de elementos receptores alrededor de un eje de rotación que está prácticamente dirigido hacia dicha escena objetivo;

y porque dichos segundos medios de tratamiento de la señal están adaptados para reconstruir dicha imagen de la intensidad a partir de una pluralidad de conjuntos bidimensionales de muestras de dicha función de visibilidad, correspondiendo cada uno de dichos conjuntos de muestras a una posición angular diferente de dicha red bidimensional o tridimensional de elementos receptores.

Más exactamente, un objeto de la invención es procurar un radiómetro interferométrico embarcado en un vehículo espacial que esté adaptado para proceder a la formación de imágenes de una superficie planetaria.

De acuerdo con ciertas realizaciones particulares de la invención:

Dicha red de elementos receptores puede ser prácticamente bidimensional y perpendicular a dicho eje de rotación.

Las separaciones entre dichos elementos receptores pueden seleccionarse de tal manera que no sean constantes, ni múltiplos enteros de una separación mínima. En particular, la disposición de dichos elementos receptores puede seleccionarse de tal manera que defina una distribución no uniforme de dichas muestras de dicha función de visibilidad en un dominio bidimensional de frecuencias espaciales, asegurando que los lóbulos secundarios de un diagrama de recepción sintetizado de dicho radiómetro interferométrico presenten una amplitud normalizada inferior o igual a -20 dB y preferiblemente inferior o igual a -40 dB. De manera ventajosa, la distribución de dichas muestras de dicha función de visibilidad en un dominio bidimensional de frecuencias espaciales puede aproximarse mediante una función de apodización, tal como una función Gaussiana, función cosinusoidal, una ventana de Hamming o una ventana de Hanning.

Dichos medios de rotación de dicha red bidimensional o tridimensional pueden estar adaptados para operar a una velocidad de rotación comprendida entre 0,001 y 100 rpm y en particular entre 0,01 y 10 rpm y preferiblemente entre 0,1 y 1 rpm.

Dichos elementos receptores pueden estar adaptados para recibir una radiación electromagnética en al menos una banda de frecuencias comprendida en el dominio espectral 1 GHz - 10 THz, o más particularmente en el dominio espectral 30 GHz - 400 GHz.

La anchura de dicha red bidimensional de elementos receptores perpendicular a dicho eje de rotación es ventajosamente suficiente para procurar una resolución angular de la imagen de intensidad reconstruida que sea inferior o igual a 7 miliradianes y preferiblemente inferior o igual a 1 miliradian, al menos en dicha banda de frecuencias.

Además, el número y la disposición de dichos elementos receptores se definen ventajosamente de tal manera que, después de una media rotación de la red bidimensional giratoria, la densidad de muestreo resultante para dicha función de visibilidad sea suficiente para proporcionar un campo de visión no ambiguo que presenta una anchura superior o igual a 17°, al menos en dicha banda de frecuencias.

Ventajosamente, el eje de rotación puede atravesar prácticamente el centro de inercia de dicha red bidimensional o tridimensional de elementos receptores.

Dichos elementos receptores pueden alinearse a lo largo de una pluralidad de brazos lineales. En particular, el radiómetro interferométrico puede comprender tres brazos lineales con una separación angular de 120° unos con respecto a otros para formar una red en Y, atravesando dicho eje de rotación el centro de dicha red.

De forma ventajosa, el número y la separación de los elementos receptores son idénticos en cada uno de dichos brazos lineales.

Dichos primeros medios de tratamiento de la señal pueden estar ventajosamente adaptados para introducir una pluralidad de desfases temporales relativos entre dichas señales recibidas que deben ser objeto de una correlación cruzada, y para calcular funciones de visibilidad en función del desfase temporal, estando dichos segundos medios de tratamiento de la señal adaptados para reconstruir una imagen multi-banda de dicha emisión de radiación realizando la transformada de Fourier de dichas funciones de visibilidad en función del desfase temporal.

El radiómetro interferométrico de acuerdo con la invención puede comprender además medios de calibrado de fase y/o de amplitud relativos, adaptados para comparar los conjuntos de muestras de dicha función de visibilidad correspondientes a diferentes posiciones angulares de dicha red de elementos receptores giratoria y recuperar las informaciones de calibrado de fase y/o amplitud relativas por medio de dicha comparación. En particular, dichos medios de calibrado pueden estar adaptados para comparar conjuntos de muestras de dicha función de visibilidad correspondientes a posiciones angulares desfasadas una media rotación. En el caso en el que la red de elementos receptores giratoria presenta, al menos aproximadamente, una simetría discreta de rotación (por ejemplo, una simetría de rotación de 60°), dichos medios de calibrado pueden estar adaptados para comparar conjuntos de muestras de dicha función de visibilidad correspondientes a posiciones angulares que difieren en un ángulo correspondiente a dicha simetría discreta de rotación.

Los elementos receptores pueden estar adaptados para distinguir la radiación recibida entre dos componentes de polarización, y dichos segundos medios de tratamiento de la señal pueden estar adaptados para reconstruir dos imágenes de intensidad correspondientes a diferentes componentes de polarización para dicha emisión de radiación. En particular, dichos segundos medios de tratamiento de la señal pueden estar adaptados para calcular los parámetros de Stokes de la radiación recibida.

Un radiómetro interferométrico multi-banda puede comprender una pluralidad de radiómetros interferométricos individuales, tales como se han descrito anteriormente, cuyas redes bidimensionales o tridimensionales de elementos receptores están montadas en una estructura giratoria común, estando cada uno de dichos radiómetros interferométricos adaptado para funcionar en una banda espectral diferente.

En una realización ventajosa, cada uno de dichos radiómetros interferométricos individuales comprende una pluralidad de brazos lineales a lo largo de los cuales se alinean los elementos receptores correspondientes, siendo los brazos lineales de dichos radiómetros interferométricos mutuamente paralelos.

Otras características y ventajas de la presente invención surgirán a la luz de la siguiente descripción, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- La figura 1 es una ilustración esquemática de un radiómetro interferométrico de acuerdo con la presente invención;

- La figura 2 ilustra el principio de la radiometría interferométrica que utiliza una red estacionaria en Y de elementos receptores, conocido en la técnica anterior;

- La figura 3 ilustra el tratamiento de la señal utilizado para la reconstrucción de imágenes de acuerdo con la invención;

- La figura 4A ilustra esquemáticamente un ejemplo de radiómetro interferométrico multi-banda de acuerdo con una realización de la invención;

- La figura 4B es una vista a mayor escala de la parte central del radiómetro interferométrico de la figura 4A; y

- La figura 5 es un esquema de principio que ilustra el principio de calibrado con línea de base invertida.

La Figura 1 proporciona una vista general de un radiómetro interferométrico embarcado en un vehículo espacial, de acuerdo con la invención, utilizado, por ejemplo, para la formación de imágenes de la Tierra desde una órbita geoestacionaria. La figura procura también una definición del sistema de coordenadas que se utilizará en el conjunto de la siguiente descripción.

El radiómetro interferométrico es portado por un vehículo espacial SAT estabilizado siguiendo 3 ejes, que puede ser un vehículo de transmisiones convencional para satélites geoestacionarios de telecomunicación. Éste radiómetro interferométrico comprende esencialmente una red bidimensional de elementos receptores, REA, que, en una realización preferida, está en forma de Y, medios ROT para hacer girar a la red REA alrededor de un eje (z) orientado hacia el centro de la Tierra con respecto al vehículo espacial no giratorio SAT, a una velocidad angular del orden de 0,1 - 1 rpm, medios de tratamiento de la señal SP1, SP2 y medios de calibrado CM. Para compensar el efecto ejercido por el conjunto giratorio REA sobre la dinámica de orientación del vehículo espacial SAT, este último puede estar equipado ventajosamente con una rueda de reacción de rotación inversa.

La elección de la velocidad de rotación merece una descripción breve. Desde un punto de vista mecánico, la rotación debe ser preferiblemente tan lenta como sea posible, para reducir las fuerzas ejercidas sobre el vehículo espacial y para simplificar el sistema de compensación de los momentos. Un límite bajo para la velocidad de rotación

se fija mediante la tasa de repetición de imágenes, dado que es necesaria al menos media rotación para formar una imagen. Una velocidad de rotación ligeramente más elevada se prefiere para asegurar que la función de calibrado opere sobre una imagen que puede considerarse estable. La estabilidad de fase y de amplitud también debe tenerse en cuenta: derivas importantes necesitan calibrados más frecuentes, y por consiguiente una velocidad más elevada.

El conjunto giratorio REA está constituido por tres brazos lineales separados mutuamente 120° para formar una Y, pasando el eje de rotación del conjunto en las proximidades del centro de dicha Y. Cada brazo tiene cierto número de elementos receptores (desde aproximadamente 50 hasta más de 400, de acuerdo con la aplicación particular en cuestión), estando cada uno constituido por una antena de recepción y la electrónica frontal asociada. La antena es típicamente una antena de cuerno o una antena con lente integrada. La electrónica frontal asegura la amplificación, la conversión a una frecuencia intermedia y opcionalmente la digitalización de las señales recibidas.

Una descripción detallada de la configuración geométrica de los elementos receptores se proporcionará a continuación, en referencia a las figuras 4A y 4B.

La emisión de radiación de la escena observada (por ejemplo el disco terrestre ED) a la longitud de onda λ puede pedirse mediante su temperatura de luminancia $T_B(\lambda, \xi, \eta)$, donde:

$$\xi = \sin\theta \cos\phi$$

$$\eta = \sin\theta \sin\phi$$

Las coordenadas esféricas θ y ϕ se definen en la figura 1; el origen del sistema de coordenadas coincide con el centro del radiómetro, el eje z se dirige hacia el centro de la Tierra y el eje y es paralelo al eje de rotación de la tierra y está orientado hacia el sur. El ángulo ψ mide la posición angular de la red de elementos receptores REA en el plano x-y.

Los primeros medios de tratamiento de la señal SP1 reciben a la entrada las señales recibidas por los diferentes elementos receptores del radiómetro interferométrico y calculan la función llamada de visibilidad, V. A continuación, los segundos medios de tratamiento de la señal SP2 reciben a la entrada dicha función de visibilidad y reconstruyen la distribución de las temperaturas de luminancia $T_B(\lambda, \xi, \eta)$ del disco terrestre observado ED. La imagen reconstruida se transmite a continuación al suelo mediante medios de comunicación no representados.

También están previstos medios de calibrado CM para compensar las derivas de la ganancia compleja de los elementos receptores. En ausencia de calibrado, el cual debe realizarse durante todo el periodo de vida útil del instrumento, estas derivas harían imposible la recuperación de imágenes útiles.

Recordamos ahora, con referencia a la figura 2, los principios de base de la formación de imágenes interferométrica por medio de un receptor estacionario, conocido en la técnica anterior.

En esta figura, los círculos representan elementos receptores individuales, los cuales son equidistantes a lo largo de tres brazos que forman una figura en Y. Consideramos dos elementos receptores 201 y 202 que presentan ganancias complejas propias g_{201} y g_{202} , estando cada elemento receptor identificado por sus coordenadas $(x_i, y_i, z_i = 0)$, $i = 201, 202$.

Se define la "línea de base" o vector de distancia, (u,v) de la siguiente manera:

$$u = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{x_{202} - x_{201}}{\lambda}, v = \frac{\Delta y}{\lambda} = \frac{y_{202} - y_{201}}{\lambda}$$

La función de visibilidad se define como la correlación cruzada compleja de las señales recibidas por un par cualquiera de elementos receptores, expresada en función de la línea de base (u,v) correspondiente:

$$V(u, v) = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 G(\xi, \eta) T_B(\xi, \eta) e^{j2\pi(u\xi + v\eta)} \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} \quad [2]$$

Para fines de simplificación, se ha supuesto en la ecuación 2 que la ganancia compleja es idéntica para todos los elementos receptores y la ganancia (real) $G(\xi, \eta)$ se ha definido como igual a $G(\xi, \eta) = g_{201}(\xi, \eta) \cdot g_{202}^*(\xi, \eta)$. Además, se ha omitido la influencia sobre V, T_B y G de la longitud de onda λ .

Además de las ganancias de antena, la ecuación [2] muestra que la función de visibilidad corresponde esencialmente a la Transformada de Fourier de la temperatura de luminancia de la escena observada, u y v representan las

frecuencias espaciales. Dado que $T_B(\xi, \eta)$ tiene como resultado valores reales, la visibilidad $V(u, v)$ es hermitiana, es decir $V(-u, -v) = V^*(u, v)$, donde “*” representa el operador de conjugación compleja.

A partir de una medición de la visibilidad en el plano $u-v$ (que es un dominio bidimensional de frecuencias espaciales), puede reconstruirse la distribución espacial de la temperatura de luminancia de la escena observada mediante una simple Transformada inversa de Fourier:

$$\hat{T}_B(\xi, \eta) = 4\pi \frac{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}}{G(\xi, \eta)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(\sqrt{u^2 + v^2}) \hat{V}(u, v) e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} du dv \quad [3]$$

donde $w(\sqrt{u^2 + v^2})$ es una función de ponderación, normalizada de tal manera que $w(0) = 1$, la cual se utiliza para reducir los lóbulos secundarios que resultan del truncamiento de la función de visibilidad en correspondencia con la longitud de línea de base máxima. Puede optarse ventajosamente por una función de ponderación de tipo Gaussiano: $w(\rho) = e^{-\rho^2/\rho_0^2}$, donde $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$. El factor de escala ρ_0 se selecciona generalmente para que esté comprendido entre aproximadamente el 60-70% de la longitud de línea de base máxima, lo que asegura que la función de ponderación Gaussiana conduce a un valor que cae por debajo de 0,1 para la longitud de línea de base máxima.

En la figura 2, los puntos representan las líneas de base asociadas a cada par de elementos receptores. Por ejemplo, el punto indicado por la referencia (u, v) corresponde a la línea de base orientada desde el elemento 201 hacia el elemento 202, mientras que $(-u, -v)$ es la línea de base invertida, orientada desde el elemento 202 hacia el elemento 201. En principio, para una red de N receptores, se forman $N \cdot (N-1)$ líneas de base (incluyendo las líneas de base invertidas); en la práctica, sin embargo, existe una redundancia elevada, lo que significa que muchas líneas de base coinciden; por consiguiente, el número efectivo de líneas de base independientes es significativamente menor. La figura 2 muestra que una red en Y de elementos receptores equidistantes produce una red hexagonal regular de líneas de base en el plano $u-v$. Un cálculo de la correlación cruzada para todos los pares de elementos receptores disponibles (ecuación [2]) conduce a la función de visibilidad $V(u, v)$ de la escena observada, muestreada en el plano $u-v$ por dicha red de líneas de base.

La resolución espacial de la distribución de las temperaturas de luminancia $\hat{T}_B(\xi, \eta)$ se determina mediante la longitud de la línea de base máxima $\rho_{\max} = \max(\sqrt{u^2 + v^2})$, véase la ecuación [1]. Más exactamente, la resolución se define finalmente mediante el factor de escala ρ_0 de la función de ponderación $w(\rho)$ utilizada para la reconstrucción de la imagen, la cual, a su vez, se selecciona de modo que sea proporcional a $\rho_{\max}$. Además, se sabe por la teoría de muestreo que, para evitar cualquier distorsión de solapamiento (frecuencia fantasma), el muestreo de la función de visibilidad debe ser suficientemente denso para satisfacer el criterio de Nyquist para un campo de visión no ambiguo que abarca la totalidad del disco terrestre. Para una observación desde una órbita GEO:

$$d_{\text{muestreo}} \leq \frac{R_{\text{GEO}}}{2R_{\text{Tierra}}} \lambda \approx 3,3\lambda \quad [4]$$

donde R_{GEO} es el radio de una órbita geoestacionaria, R_{Tierra} es el radio de la tierra y d_{muestreo} la distancia máxima entre puntos adyacentes de la red de líneas de base. Como se ha descrito anteriormente, la ecuación [4] determina la separación máxima autorizada de los elementos receptores individuales que constituyen la red Y de la figura 2. Este criterio, combinado con las exigencias de resolución que determinan el tamaño de la red, determina de forma casi unívoca el número de elementos receptores.

En adelante, se entenderá porqué ha sido imposible, hasta ahora, la formación de imágenes de la Tierra en longitudes de onda milimétricas desde una órbita GEO con una resolución espacial satisfactoria. Se observará, en vista de la ecuación [1], que para obtener una resolución espacial del orden de 30 km, correspondiente a una resolución angular de aproximadamente 1 miliradian, a 50 GHz es necesaria una línea de base $\rho_{\max}$ de aproximadamente 8 m; teniendo en cuenta la configuración en Y de la red REA, esto conduce a brazos de longitud igual a aproximadamente 4 m. El criterio de muestreo de Nyquist conduce, sobre la base de la ecuación [4], a un número total de receptores igual a aproximadamente 630. Es muy difícil realizar un instrumento de tal complejidad, así como ponerlo en una órbita GEO y calibrarlo para obtener imágenes útiles.

La idea en la que se basa la presente invención es que el hecho de hacer girar a la red de elementos receptores REA y aumentar la base de muestras de la función de visibilidad correspondiente a diferentes posiciones angulares permite reducir muy significativamente el número de elementos receptores, y por consiguiente la complejidad, la masa, la potencia consumida y las exigencias de calibrado del radiómetro. Además, la invención procura también otras ventajas significativas que se describen a continuación.

Si se intenta reducir el número de elementos receptores en un radiómetro interferométrico estacionario en Y, aumentando simplemente la separación entre elementos, la red de líneas de base correspondiente en el plano u-v conservaría la misma forma hexagonal, pero presentaría una densidad de muestreo fuertemente reducida. Como se ha descrito anteriormente, un muestreo insuficiente de la función de visibilidad induciría muchos errores vinculados a la distorsión de solapamiento para la distribución de temperaturas de luminancia reconstruida, haciéndola prácticamente inútil.

Es en este contexto en el que entra en juego la rotación de la red de elementos receptores. De acuerdo con la invención, se hace girar a dicha red alrededor del eje z y una adquisición de fotografías instantáneas (“snapshots”) de la función de visibilidad tiene lugar a intervalos regulares durante media rotación. Cada fotografía instantánea muestrea la función de visibilidad de la escena observada para cierto valor de rotación de la red de líneas de base poco densa. Añadiendo conjuntos de muestras correspondientes a cada posición angular, se obtiene un muestreo denso de $V(u,v)$ en una red circular de líneas de base. La reconstrucción de la distribución de las temperaturas de luminancia es entonces posible después de media rotación (no es necesaria una rotación completa debido a la simetría hermitiana de la función de visibilidad).

Por supuesto, para evitar cualquier distorsión de solapamiento, el muestreo compuesto del plano u-v debe satisfacer el criterio de Nyquist, incluso si éste no es el caso para las fotografías instantáneas individuales. Esto se obtiene asegurándose de que la red de líneas de base correspondientes a cada fotografía instantánea no contiene “separaciones radiales” mayores que el límite de Nyquist expresado por la ecuación [4].

Hasta ahora, solamente se ha considerado el caso de una radiación incidente estrictamente monocromática. En realidad, los elementos receptores presentan un ancho de banda limitado y una selectividad de frecuencia en el interior de este ancho de banda es una propiedad habitualmente deseable. Puede obtenerse esta selectividad de frecuencia midiendo correlaciones cruzadas entre elementos receptores para cierto número de desfases temporales τ .

Como se representa en la figura 3, las fotografías instantáneas de correlación cruzada ISV, correspondientes a diferentes posiciones angulares de la red y a diferentes desfases temporales τ , llenan un espacio de muestreo tridimensional u-v- τ con una red tridimensional de puntos de muestreo TDS de forma cilíndrica.

La selectividad de frecuencia se obtiene mediante una Transformada de Fourier (FT en la figura 3) con respecto a τ de las mediciones de correlación cruzada, de la misma manera que la Transformada de Fourier bidimensional con respecto a u y v determina la resolución espacial. Por consiguiente, las muestras de la función de visibilidad se convierten en imágenes multispectrales de alta resolución MI del disco terrestre.

La resolución de frecuencias generalmente no es suficiente: muchas aplicaciones necesitan también poder discriminar entre los componentes de polarización vertical y horizontal (con respecto a la superficie del suelo) de la radiación recibida. La experiencia muestra que la distribución de temperaturas de luminancia puede ser muy diferente para estos dos componentes de polarización.

En el caso de instrumentos no giratorios, una medición independiente de dos componentes de polarización ortogonal es relativamente fácil. En el caso de la presente invención, sin embargo, la rotación de la red de elementos receptores introduce una complicación: la rotación de polarización de cada antena se realiza al mismo tiempo que la del interferómetro y se obtiene una combinación de polarizaciones X e Y. Este problema puede resolverse utilizando antenas que presentan un conjunto común de ejes de polarización ortogonales y mediante correlación cruzada de las señales polarizadas ortogonalmente correspondientes para determinar los parámetros de Stokes. Es ventajoso utilizar como ejes de polarización las direcciones fijas con respecto a la antena XA e YA; los parámetros de Stokes se obtienen entonces de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} I_A &= \langle E_{XA} E_{XA}^* \rangle + \langle E_{YA} E_{YA}^* \rangle \\ Q_A &= \langle E_{XA} E_{XA}^* \rangle - \langle E_{YA} E_{YA}^* \rangle \\ U_A &= \langle E_{XA} E_{YA}^* \rangle + \langle E_{YA} E_{XA}^* \rangle \\ V_A &= j \langle E_{XA} E_{YA}^* \rangle - j \langle E_{YA} E_{XA}^* \rangle \end{aligned} \quad [5]$$

donde j es la unidad imaginaria y $E_{XA,YA}$ son las componentes del campo eléctrico según las polarizaciones XA e YA respectivamente.

ES 2 320 599 T3

La conversión en el sistema de referencia x,y fijo con respecto al satélite es entonces un sencillo cambio de coordenadas:

$$\begin{aligned} I_s &= I_A \\ Q_s &= Q_A \cos 2\phi - U_A \sin 2\phi \\ U_s &= -Q_A \sin 2\phi + U_A \cos 2\phi \\ V_s &= V_A \end{aligned} \quad [6]$$

Otro cambio de coordenadas permite obtener las componentes de polarización vertical y horizontal requeridas.

Se observará que las consideraciones físicas permiten suponer que, para la observación de la Tierra $V_s = V_A \approx 0$, dado que la difusión en la atmósfera o en la superficie terrestre solamente genera ondas no polarizadas o polarizadas linealmente. Por consiguiente $(E_{XA}E_{YA}^*) \approx (E_{XA}^*E_{YA})$ y el cálculo de uno solo de estos es suficiente.

Como se ha descrito anteriormente, y al contrario que en el caso del radiómetro interferométrico estacionario, en el instrumento de acuerdo con la invención el número de elementos receptores (y por consiguiente el de los correladores cruzados en los primeros medios de tratamiento de la señal) no se determina de forma unívoca mediante la combinación de las exigencias de resolución espacial y del criterio de muestreo de Nyquist. En la práctica, la sensibilidad y el tiempo de regeneración de la imagen determinan el número mínimo aceptable de elementos receptores para un instrumento de acuerdo con la invención.

La sensibilidad se expresa en términos de resolución térmica de medición (Ne Δ T o NeDT), que cuantifica la más pequeña diferencia de temperatura de luminancia que puede medirse, y se define habitualmente como la desviación típica de 100 estimaciones consecutivas de la temperatura de luminancia para una escena fija, por ejemplo 300 K. Puede demostrarse que la sensibilidad aumenta (y que, por consiguiente, Ne Δ T disminuye) en caso de aumento del número de elementos receptores (y, por consiguiente, de correladores) y de aumento del tiempo de regeneración de la imagen, lo que define el tiempo de integración máximo. Se ha demostrado, en el caso de una función de ponderación Gaussiana, que la distribución óptima del tiempo de integración τ_{int} en el plano u-v es proporcional a la función de

ponderación, a saber $\tau_{int}(\rho) = \tau_0 e^{-\rho^2/\rho_0^2}$ con $\tau_0 = 2N_{corr}\tau_{imagen} \frac{\Delta u \Delta v}{\pi \rho_0^2}$

Con esta distribución,

$$Ne\Delta T(\theta) \approx \frac{4\pi}{G(\theta)} \frac{T_{sis} \pi \rho_0^2}{\eta_c \sqrt{2N_{corr} B \tau_{imagen}}} \quad [7]$$

donde:

$G(\theta)$ es la ganancia del elemento receptor, supuesta independiente de ϕ e idéntica para todos los pares de elementos;

T_{sis} es la temperatura de ruido del sistema;

N_{corr} es el número de correladores (es decir el número de pares de líneas de base para los cuales se calcula la función de visibilidad);

η_c es el rendimiento de los correladores, incluyendo las pérdidas debidas a la conversión de analógico a digital;

B es el ancho de banda de medición de la señal compleja;

τ_{imagen} es el tiempo de regeneración de la imagen;

ρ_0 es un parámetro de escala de la función de ponderación $w(\rho)$, supuesta de tipo Gaussiano: $w(\rho) = e^{-\rho^2/\rho_0^2}$ y Δu , Δv son los pasos de muestreo más grandes en el plano u-v.

La ecuación [7] puede asimilarse a una función de ponderación arbitraria y a un muestreo no uniforme del plano u-v.

La libertad de que dispone el diseñador del instrumento para determinar el número de elementos receptores sobre la base de las exigencias de sensibilidad y de tiempo de regeneración es un aspecto particular de la presente invención: como se ha indicado anteriormente, en el caso de un instrumento no giratorio, este número se determina de forma unívoca mediante las exigencias de resolución espacial y de muestreo.

Ahora puede cuantificarse la reducción del número de elementos receptores que puede obtenerse gracias a la invención. Los conocimientos actuales en el campo meteorológico sugieren que una necesidad mínima es una resolución de 200 km (aproximadamente 7 mrad) con un tiempo de regeneración de la imagen de 12 h y un $\text{Ne}\Delta T$ de 1,5 K a 53 GHz. Exigencias que conducen a resultados más satisfactorios son una resolución de 30 km (aproximadamente 1 mrad), un tiempo de regeneración de la imagen de 30 minutos y un $\text{Ne}\Delta T$ de 0,5 K. Estas exigencias son satisfactorias para un radiómetro interferométrico giratorio que comprende 140 elementos, en comparación con los 630 elementos que serían necesarios en caso de utilización de un instrumento no giratorio, es decir una reducción de aproximadamente el 77%.

Esta drástica reducción de la complejidad del radiómetro, y por consiguiente de su masa, hace posible la realización de un instrumento multi-banda, que funciona en varias bandas de frecuencias en el dominio espectral de 30-400 GHz (este intervalo se da a título ilustrativo y no es en ningún caso limitante). Un instrumento multi-banda está constituido simplemente por una pluralidad de radiómetros individuales de acuerdo con la invención, montados en una estructura giratoria común.

En particular, para una aplicación meteorológica, se puede querer tomar imágenes en varias bandas diferentes: 50 - 56 GHz (es decir, para mayor sencillez, "banda de 53 GHz"), 118,45 - 123,25 GHz ("118 GHz") 166 - 188,31 GHz ("183 GHz") y 346 - 380,20 GHz ("380 GHz"), etc. Las mediciones en la banda de 53 GHz y de 183 GHz permiten determinar la temperatura y la concentración de vapor de agua, siendo estas mediciones las de mayor prioridad: las mediciones a 118 GHz ofrecerían además la posibilidad de discriminar entre las nubes y una precipitación mientras que las mediciones a 380 GHz permitirían una mejor cobertura de la concentración de vapor de agua a gran altitud y una discriminación entre precipitación y nubes de tipo cirros.

La siguiente tabla proporciona el número de elementos receptores en un ejemplo de realización de un radiómetro de cuatro bandas de acuerdo con la invención y una comparación con el número de elementos que serían necesarios en el caso de un radiómetro no giratorio con prestaciones similares:

Banda	Red Y giratoria		Red Y estacionaria
	Número de elementos	$\text{Ne}\Delta T$ a los 30 minutos	Número de elementos
53 GHz	136	0,5 K	630
118 GHz	107	1,0 K	630
183 GHz	107	1,1 K	630
380 GHz	107	2,6 K	630
Número total de elementos	457		2520

Puede observarse que el número de elementos receptores requeridos para el radiómetro de cuatro bandas de acuerdo con el ejemplo de realización de la presente invención es inferior al que sería necesario para un radiómetro no giratorio que opere en una banda única. El número de elementos podría reducirse aún más, planteando exigencias de sensibilidad menos severas.

La figura 4A es una vista desde el nadir del conjunto giratorio de un radiómetro interferométrico multi-banda de acuerdo con una realización de la invención. El instrumento comprende una estructura de soporte en Y STR constituida por tres brazos A1, A2 y A3 que se extienden en una dirección radial y con una separación angular de 120°. Puede hacerse girar la estructura de soporte alrededor de un eje que atraviesa su centro, soportando dicha estructura cuatro redes REA de elementos receptores, estando cada una adaptada para recibir una radiación en una banda diferente: REA-53 funciona en la banda "53 GHz", REA-118 en la banda "118 GHz", REA-183 en la banda "183 GHz" y REA-380 en la banda "380 GHz".

Más exactamente, cada red de elementos receptores comprende tres sub-redes lineales que se extienden a lo largo de los brazos de la estructura de soporte STR. Las sub-redes lineales de diferentes radiómetros interferométricos individuales que se extienden a lo largo del mismo brazo de la estructura de soporte son mutuamente paralelos.

Se observará que solamente la red de elementos receptores de menor frecuencia se extiende por toda la longitud de los brazos y que la longitud de las redes disminuye a medida que la frecuencia aumenta: esto se debe a que la longitud de línea de base requerida para obtener una misma resolución espacial es proporcional a la longitud de onda de la radiación, como muestra la ecuación 1.

ES 2 320 599 T3

La figura 4B es una vista a mayor escala de la parte central de la figura 4A y permite apreciar la disposición de los elementos receptores individuales en cada red lineal. En primer lugar, se observará que la distancia entre elementos no es constante; una tendencia general muestra que la separación entre elementos es menor hacia el centro del interferómetro, y que su densidad se reduce hacia el extremo externo. Las disposiciones de los elementos receptores en los brazos A1, A2 y A3 son idénticas, a excepción del hecho de que la red 53 GHz en el brazo A3 está descentrada aproximadamente 0,4 m para hacer sitio a la red 380 GHz. Los elementos situados más hacia el exterior en este brazo están, por lo tanto, retirados de tal manera que las longitudes físicas de todos los brazos sean iguales.

La parte externa de los brazos presenta un patrón repetitivo de separaciones entre elementos, por ejemplo 12λ-19λ a 53 GHz, hasta el extremo de la red.

Parece, en vista de la figura 4B, que la operación multi-banda solamente es posible porque la invención hace innecesaria una disposición compacta de los elementos receptores; si no, la red correspondiente a una operación mono-banda ocuparía la totalidad de la parte central del instrumento, lo que ya no dejaría sitio para las demás redes.

La determinación de la disposición exacta de los elementos receptores del radiómetro interferométrico es una cuestión de optimización y depende de los objetivos de prestaciones considerados. Hay que tener en cuenta varias consideraciones:

En primer lugar, como se ha descrito anteriormente, la resolución espacial requerida determina la longitud de línea de base máxima, y el criterio de Nyquist determina la densidad de muestras requerida en el plano u-v (después de la rotación del interferómetro).

El número total de receptores se determina mediante la sensibilidad requerida. A menudo es necesario encontrar un compromiso entre la complejidad del instrumento, su sensibilidad y su resolución temporal: para aumentar la sensibilidad es necesario aumentar el tiempo de integración, y por consiguiente degradar la resolución temporal o aumentar el número de elementos receptores, o ambas cosas.

Gracias a la utilización de un muestreo por rotación, no es necesario montar los elementos receptores borde con borde. Esto permite al diseñador del instrumento adaptar la distribución de densidad de las longitudes de línea de base $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ para mejorar el rendimiento. En la técnica anterior, la utilización de una separación entre elementos constante conduce a una distribución de la densidad de las longitudes de líneas de base que es casi uniforme, hasta un valor máximo $\rho_{\max}$, en el que la densidad cae a cero. Esto corresponde a la síntesis de una apertura “dura”, o ventana, que está afectada intrínsecamente por lóbulos secundarios de difracción pronunciados, que deben suprimirse mediante un tratamiento de la señal apropiado.

Por el contrario, en el caso de una realización ventajosa de la invención, los elementos receptores no son equidistantes, ni tampoco sus distancias relativas se expresan mediante múltiplos enteros de una línea de base mínima. Esto permite obtener una distribución de la densidad de las longitudes de línea de base que decrece gradualmente hacia cero, reduciendo o suprimiendo de este modo los lóbulos secundarios. A menudo se considera una distribución Gaussiana como óptima, pero pueden utilizarse otras funciones de apodización adecuadas tales como una función cosinusoidal, de Hamming, de Hanning, etc. En la práctica, sin embargo, la función de apodización deseada solamente puede ser aproximada.

Una definición cuidadosa de la disposición de los elementos receptores puede conducir a una amplitud relativa de los lóbulos secundarios que no supere -20 dB y preferiblemente -40 dB. Idealmente, la distribución de las líneas de base debe estar adaptada a la función de ponderación $w(p)$ utilizada para la recuperación de la distribución de las temperaturas de luminancia (ecuación [3]).

Como se describe a continuación, para el calibrado, es ventajoso utilizar una configuración de elementos casi idéntica en los tres brazos.

El calibrado constituye una etapa muy importante en la formación de imágenes mediante interferometría, dado que los elementos receptores presentan derivas de amplitud y, aún más importante, derivas de fase que pueden hacer imposible la recuperación de la distribución de las temperaturas de luminancia rápidamente, si éstas no se corrigen. Los inventores determinaron que la rotación de la red de elementos receptores puede contribuir a calibrar el instrumento. De hecho, dado que la red gira perpendicularmente al plano u-v que es barrido, la misma línea de base aparece con un signo inverso en cada media rotación. A una velocidad de rotación del orden de 1 rpm, la escena observada puede considerarse como constante y por consiguiente la inversión de las líneas de base transforma la función de visibilidad en su conjugada compleja. En otras palabras, si ψ es el ángulo de rotación de la red, $V(u,v; \psi \pm 180^\circ) = V(-u,-v; \psi) = V^*(u,v; \psi)$. Como se verá a continuación, esto puede utilizarse para el calibrado de fase y de desfase temporal de los elementos receptores. Además, en el caso particular de una red en Y que comprende brazos idénticos, una rotación de 120° mantiene la configuración interferométrica inalterada, es decir $V(u,v; \psi \pm 120^\circ) = V(u,v; \psi)$ y esto también es útil para el calibrado. Mediante combinación de las relaciones indicadas anteriormente, se obtiene:

$$V(u, v, \psi \pm 60^\circ) = V(u, v, \psi \pm 180^\circ) = V^*(u, v; \psi)$$

ES 2 320 599 T3

$$V(u, v, \psi \pm 120^\circ) = V(u, v; \psi)$$

es decir que cada rotación de 60° aporta informaciones de calibrado útiles.

La idea de base para los calibrados con línea de base invertida se basa en el hecho de que dos mediciones realizadas desde redes de receptores opuestos miden las mismas informaciones con distorsiones de fase opuestas, de las que entonces puede hacerse una media.

A continuación se describe más exactamente esta técnica de calibrado con referencia a la figura 5. Esta figura es un esquema funcional simplificado de un interferómetro individual constituido por un par de elementos receptores A y B, comprendiendo la electrónica frontal asociada amplificadores (FEA-A y FEA-B), mezcladores de frecuencia intermedia IF (MA, MB) para una conversión-reducción de frecuencia, asociados a un oscilador local LO y un correlador CORR.

Las partes derecha e izquierda de la figura 5 corresponden a orientaciones opuestas de la línea de base A-B, es decir a posiciones angulares de la red en Y separadas 180° . La señal recibida por la antena A (B, respectivamente) es objeto de una amplificación de un factor $G_A e^{i\phi_A}$ ($G_B e^{i\phi_B}$) y después se mezcla con una señal sinusoidal generada localmente, que oscila a una frecuencia ω_{LO} , con un desfase de inserción $\phi_{LO,A}$ ($\phi_{LO,B}$).

Siendo V_{C_0} y $V_{C_{180}}$ las mediciones de correlación a lo largo de la línea de base para los ángulos de rotación de interferómetro 0° y 180° respectivamente. De acuerdo con la figura 5, se deduce:

$$V_{C_0} = S_1 S_2^* = S_1 S_2^* \cdot G_A G_B \cdot e^{j(\phi_A - \phi_B + \phi_{LO,A} - \phi_{LO,B})} \quad [8]$$

$$V_{C_{180}}^* = S_A^* S_B = S_1 S_2^* \cdot G_A G_B \cdot e^{-j(\phi_A - \phi_B + \phi_{LO,A} - \phi_{LO,B})}$$

De este modo, el error combinado de fase puede determinarse a partir del argumento de la proporción entre las mediciones de correlación para dos orientaciones opuestas del interferómetro, es decir:

$$\frac{V_{C_0}}{V_{C_{180}}^*} = e^{j2(\phi_A - \phi_B + \phi_{LO,A} - \phi_{LO,B})} \quad [9]$$

La ecuación [9] demuestra la razón por la cual la rotación del interferómetro conduce a conjuntos de informaciones redundantes.

La rotación aporta además informaciones redundantes adicionales que facilitan el calibrado: se consideran dos elementos (A y B) situados a lo largo de un brazo de la Y que gira y dos elementos más (C y D) situados a lo largo de otro brazo. Suponemos por otro lado que la separación entre los elementos A y B es idéntica a la separación entre C y D. Entonces, debido a la simetría discreta de rotación de la red en Y REA, la línea de base entre A y B será idéntica a la línea de base entre D y C después de una rotación de 60° del interferómetro, es decir:

$$V_{C_0} = S_1 S_2^* \cdot G_A G_B \cdot e^{j(\phi_A - \phi_B + \phi_{LO,A} - \phi_{LO,B})} \quad [10]$$

$$V_{C_{60}}^* = S_1 S_2^* \cdot G_D G_C \cdot e^{j(\phi_D - \phi_C + \phi_{LO,D} - \phi_{LO,C})}$$

La proporción entre estas dos observaciones en la ecuación [10] proporciona una observación, independiente de la escena, de los errores combinados de ganancia y de fase para los receptores que toman parte en las dos mediciones. Pueden determinarse proporciones similares para todas las combinaciones de elementos con separaciones entre elementos comunes a lo largo de los brazos y las ecuaciones pueden formularse para cada rotación de un múltiplo entero de 60° , es decir:

$$\frac{V_{C_0}}{V_{C_n \cdot 60}} = \frac{G_A G_B}{G_C G_D} e^{j(\phi_A - \phi_B + \phi_C - \phi_D + \phi_{LO,A} - \phi_{LO,B} + \phi_{LO,C} - \phi_{LO,D})} \quad [11]$$

donde $V_{C_n \cdot 60}$ indica que las ecuaciones pueden formularse para cada rotación de un múltiplo entero de 60°.

Se observará que la ecuación [9] es un caso particular de la ecuación [11], es decir que después de una rotación de 180° $G_A = G_C$, $\phi_B = \phi_D$ etc. De este modo, la ecuación [11] describe el conjunto completo de informaciones redundantes que se añade debido a la rotación.

La disposición de los elementos del interferómetro comprende también líneas de base instantáneamente redundantes para las cuales pueden determinarse sin rotación proporciones similares a la ecuación [11].

La ecuación [11] no puede resolverse independientemente para un conjunto único de receptores, pero cuando se combinan todas las ecuaciones similares [11], puede establecerse una solución matricial bien condicionada que permite determinar los errores relativos de ganancia y de fase para cada receptor individual. Esta solución se beneficia de las redundancias que resultan a la vez de la rotación y de las redundancias disponibles instantáneamente.

La descripción proporcionada anteriormente es una descripción general que demuestra de qué manera aparecen redundancias adicionales debido a la rotación. Estas redundancias contribuyen a la solución matricial de los coeficientes de calibrado de amplitud y de fase relativos. La formulación de esta solución puede basarse en la técnica anterior, por ejemplo el calibrado espacial con redundancia descrito en la tesis doctoral de A. J. Camps Carmona "Application of interferometric Radiometry to Earth Observation", Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 1996.

Los calibrados de fase y de amplitud relativos puede realizarse por separado en cada canal de resolución para recuperar las variaciones que están en función de la frecuencia. Estos calibrados deben completarse con un calibrado radiométrico absoluto.

El calibrado radiométrico absoluto puede proporcionarlo un sistema diferente que procura un calibrado absoluto para una parte conocida de la imagen observada. La imagen recuperada por el radiómetro interferométrico puede calibrarse entonces mediante la conversión a escala de la imagen interferométrica de tal manera que la intensidad en la parte comúnmente observada de la imagen esté alineada para dos sistemas de observación.

Se observará que el hecho de que, de acuerdo con las realizaciones de las figuras 4A y 4B, los tres brazos no sean rigurosamente idénticos no perjudica al calibrado. Las configuraciones de las líneas de base a lo largo de los tres brazos son muy similares y pueden formularse gran número de ecuaciones similares a [11] que comprenden todos los elementos.

La invención se ha descrito en referencia a varios ejemplos de realizaciones. Sin embargo, el especialista en la técnica comprenderá que pueden aportarse algunas modificaciones sin alejarse no obstante del marco de la presente invención.

La forma de Y de la red a menudo se considera óptima para la formación de imágenes mediante interferometría, pero ésta no es exclusiva. Otras formas, por ejemplo de T, L, V o circular también están bien adaptadas para realizar la invención.

La red puede comprender brazos no lineales, por ejemplo curvos.

Además, no es necesario que la red de elementos receptores sea, en sentido estricto, bidimensional: los elementos receptores no deben estar situados necesariamente en el mismo plano en la medida en que una corrección de fase esté prevista para tener en cuenta las diferencias de trayectoria introducidas por una configuración tridimensional. Debido a esto, la red REA puede definirse de forma más amplia como "bi- o tri-dimensional".

Además, no es necesario que todos los elementos receptores estén alineados a lo largo de brazos lineales: al contrario, varios elementos no alineados pueden tener un efecto beneficioso. En particular, una configuración triangular de los elementos, con líneas de base comunes en cada brazo, constituye una realización ventajosa, dado que ésta refuerza la redundancia instantánea entre los brazos.

Desde un punto de vista estrictamente interferométrico, no es necesario hacer girar a la red de elementos receptores alrededor de su centro. Sin embargo, en la práctica, es ventajoso equilibrar las masas y los momentos alrededor del eje, haciendo pasar a este último por el centro de inercia de la red, para obtener un instrumento estable.

En el conjunto de la descripción anterior, se ha supuesto implícitamente que las antenas de todos los elementos receptores que operan en la misma banda de frecuencia tenían el mismo diámetro. Esto no es necesario: dado que la rotación de la red proporciona una configuración compacta no necesaria, elementos receptores de diferente tamaño

ES 2 320 599 T3

pueden coexistir en la red. En particular, pueden utilizarse antenas más grandes en la parte externa de la red que en la parte interna, donde la convergencia de los brazos induce restricciones de volumen.

La utilización de correlaciones cruzadas diferidas y de transformadas de Fourier con respecto al desfase temporal para obtener la selectividad espectral prevista es ventajosa con respecto a los sistemas con filtros analógicos de selectividad cadena arriba de los correladores, para los cuales filtros no adaptados y no calibrados introducirían distorsiones en las mediciones de temperatura de luminancia. Sin embargo la técnica que utiliza una transformada de Fourier exige más potencia que el filtrado analógico; por consiguiente, en algunas aplicaciones, puede preferirse esta última técnica o una combinación de las dos técnicas.

Finalmente, no es necesario que todos los medios de tratamiento de la señal para la recuperación de imágenes estén embarcados en el satélite, como se sugiere en la figura 2. Una variante de realización puede prever, por ejemplo, embarcar en el satélite únicamente los primeros medios de tratamiento de la señal y los medios de calibrado, y transmitir las muestras de visibilidad $V(u,v,\tau)$ al suelo para un tratamiento posterior.

REIVINDICACIONES

1. Radiómetro interferométrico para la formación de imágenes de una emisión de radiación de una escena objetivo (ED), que comprende:

- una pluralidad de elementos receptores (201, 202) para recibir dicha radiación, estando dichos elementos receptores (201, 202) dispuestos en forma de una red bidimensional o tridimensional (REA);
- primeros medios de tratamiento de la señal (SP1) para calcular un conjunto bidimensional de muestras de una función de visibilidad (V) de dicha emisión de radiación mediante correlación cruzada por pares de las señales recibidas por dichos elementos receptores (201, 202); y
- segundos medios de tratamiento de la señal (SP2) para reconstruir una imagen de la intensidad (MI) de dicha emisión de radiación a partir de dichas muestras de dicha función de visibilidad (V);

caracterizado porque comprende además medios (ROT) de rotación de dicha red bidimensional o tridimensional de elementos receptores (REA) alrededor de un eje de rotación (z) que está prácticamente dirigido hacia dicha escena objetivo (ED);

y porque dichos segundos medios de tratamiento de la señal (SP2) están adaptados para reconstruir dicha imagen de la intensidad (MI) a partir de una pluralidad de conjuntos bidimensionales de muestras de dicha función de visibilidad (V), correspondiendo cada uno de dichos conjuntos de muestras a una posición angular diferente de dicha red bidimensional o tridimensional giratoria (REA) de elementos receptores.

2. Radiómetro interferométrico embarcado en un vehículo espacial de acuerdo con la reivindicación 1, adaptado para la formación de imágenes de una superficie planetaria (ED).

3. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 1 ó 2, en el que dicha red de elementos receptores (REA) es prácticamente bidimensional y perpendicular a dicho eje de rotación (z).

4. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las separaciones entre dichos elementos receptores (201, 202) no son ni constantes, ni múltiplos enteros de una separación mínima.

5. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 4, en el que la disposición de dichos elementos receptores (201, 202) se selecciona de modo que defina una distribución no uniforme de dichas muestras de dicha función de visibilidad (V) en un dominio bidimensional de frecuencias espaciales, asegurando que los lóbulos secundarios de un diagrama de recepción sintetizado de dicho radiómetro interferométrico presentan una amplitud normalizada inferior o igual a -20 dB y preferiblemente inferior o igual a -40 dB.

6. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 4 ó 5, en el que la disposición de dichos elementos receptores (201, 202) es tal que la distribución de dichas muestras de dicha función de visibilidad (V) en un dominio bidimensional de frecuencias espaciales puede aproximarse mediante una función de apodización, tal como una función Gaussiana, una función cosinusoidal, una ventana de Hamming y una ventana de Hanning.

7. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos medios (ROT) de rotación de dicha red bidimensional o tridimensional (REA) están adaptados para operar a una velocidad de rotación comprendida entre 0,001 y 100 rpm, preferiblemente entre 0,01 y 10 rpm y aún más ventajosamente entre 0,1 y 1 rpm.

8. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos elementos receptores (201, 202) están adaptados para recibir una radiación electromagnética en al menos una banda de frecuencias comprendida en el dominio espectral 1 GHz - 1 THz.

9. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 8, en el que dichos elementos receptores (201, 202) están adaptados para recibir una radiación electromagnética en al menos una banda de frecuencias comprendida en el dominio espectral 30 GHz - 400 GHz.

10. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 8 ó 9, en el que la anchura de dicha red bidimensional o tridimensional (REA) de elementos receptores perpendicularmente a dicho eje de rotación (z) es suficiente para procurar una resolución angular de la imagen de intensidad reconstruida inferior o igual a 7 miliradianes, y preferiblemente inferior o igual a 1 miliradian, al menos en dicha banda de frecuencias.

11. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el número y la disposición de dichos elementos receptores (201, 202) son tales que, después de media rotación de la red bidimensional o tridimensional giratoria (REA), la densidad de muestreo resultante para dicha función de visibilidad

ES 2 320 599 T3

(V) es suficiente para procurar un campo de visión no ambiguo que presenta una anchura superior o igual a 17° , al menos en dicha banda de frecuencias.

12. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho eje de rotación (z) atraviesa prácticamente el centro de inercia de dicha red bidimensional o tridimensional de elementos receptores (REA).

13. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos elementos receptores (201, 202) están alineados a lo largo de una pluralidad de brazos lineales (A1, A2, A3).

14. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 13, en el que dichos elementos receptores (201, 202) están alineados a lo largo de tres brazos lineales (A1, A2, A3) con una separación angular de 120° unos con respecto a otros para formar una red en Y (REA), atravesando dicho eje de rotación (z) el centro de dicha red.

15. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 13 ó 14, en el que el número y la separación de los elementos receptores (201, 202) son idénticos en dichos brazos lineales (A1, A2, A3).

16. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos primeros medios de tratamiento de la señal (SP1) están adaptados para introducir una pluralidad de desfases temporales relativos (τ) entre dichas señales recibidas que deben ser objeto de una correlación cruzada para calcular funciones de visibilidad (V) en función del desfase temporal y dichos segundos medios de tratamiento de la señal (SP2) están adaptados para reconstruir una imagen multi-banda (MI) de dicha emisión de radiación realizando la transformada de Fourier de dichas funciones de visibilidad en función del desfase temporal.

17. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además medios (CM) de calibrado de fase relativa, en el que dichos medios de calibrado (CM) están adaptados para comparar el conjunto de muestras de dicha función de visibilidad (V) correspondientes a diferentes posiciones angulares de dicha red de elementos receptores giratoria (REA) y recuperar las informaciones de calibrado de fase relativa que resultan de dicha comparación.

18. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además medios (CM) de calibrado de amplitud relativa, en el que dichos medios de calibrado (CM) están adaptados para comparar el conjunto de muestras de dicha función de visibilidad (V) correspondientes a diferentes posiciones angulares de dicha red de elementos receptores giratoria (REA) y recuperar las informaciones de calibrado de amplitud relativa que resultan de dicha comparación.

19. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 17 ó 18, en el que dichos medios de calibrado (CM) están adaptados para comparar los conjuntos de muestras de dicha función de visibilidad (V) correspondientes a diferentes posiciones angulares de dicha red de elementos receptores giratoria (REA) desfasados media rotación.

20. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 17 a 19, en el que dicha red de elementos receptores giratoria (REA) presenta, al menos aproximadamente, una simetría discreta de rotación, y en el que dichos medios de calibrado (CM) están adaptados para comparar los conjuntos de muestras de dicha función de visibilidad (V) correspondientes a diferentes posiciones angulares de dicha red de elementos receptores giratoria (REA) desfasados un ángulo correspondiente a dicha simetría discreta de rotación.

21. Radiómetro interferométrico de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los elementos receptores (201, 202) están adaptados para distinguir la radiación recibida entre dos componentes de polarización, y en el que dichos segundos medios de tratamiento de la señal (SP2) están adaptados para reconstruir dos imágenes de intensidad correspondientes a diferentes componentes de polarización para dicha emisión de radiación.

22. Radiómetro interferométrico de acuerdo con la reivindicación 21, en el que dichos segundos medios de tratamiento de la señal (SP2) están adaptados para calcular los parámetros de Stokes de la radiación recibida.

23. Radiómetro interferométrico multi-banda que comprende una pluralidad de radiómetros interferométricos individuales de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, cuyas redes bidimensionales o tridimensionales de elementos receptores correspondientes (REA-53, REA-118, REA-183, REA-380) están montadas en una estructura giratoria común (STR), estando cada uno de dichos radiómetros interferométricos adaptado para funcionar en una banda espectral diferente.

24. Radiómetro interferométrico multi-banda de acuerdo con la reivindicación 23, que comprende una pluralidad de radiómetros interferométricos en los que dichos elementos receptores (201, 202) están alineados a lo largo de una pluralidad de brazos lineales (A1, A2, A3), siendo los brazos lineales correspondientes (A1, A2, A3) de dichos radiómetros interferométricos individuales, mutuamente paralelos.

FIG.1

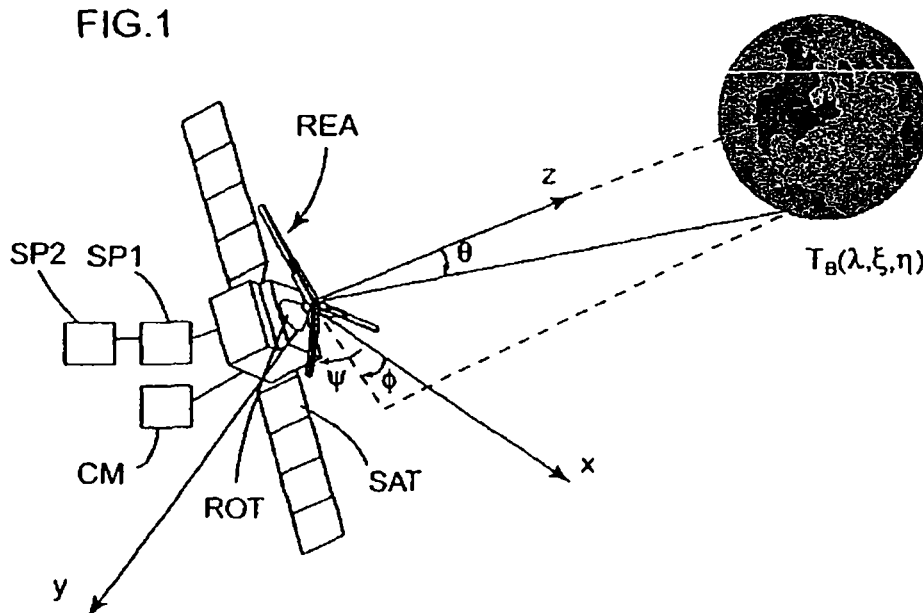


FIG.2

