



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 367 598**

51 Int. Cl.:
G01S 13/89 (2006.01)
G01S 13/00 (2006.01)
G01S 13/52 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08290686 .8**
96 Fecha de presentación : **11.07.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2144085**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **13.01.2010**

54 Título: **Método y sistema de altimetría.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
04.11.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
04.11.2011

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

72 Inventor/es: **D'Addio, Salvatore**

74 Agente: **Pons Ariño, Ángel**

ES 2 367 598 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

Método y sistema de altimetría

5 La invención se relaciona con un método y sistema de altimetría para determinar un perfil de elevación de una porción de la superficie terrestre. Más precisamente, la invención se relaciona con un método de altimetría pasivo bistático, que utiliza señales de oportunidad tales como señales GNSS y que incorpora la compensación de la curvatura de retardo-doppler.

La invención se puede aplicar, en particular, al campo de la altimetría de satélites para oceanografía.

10 La posibilidad de medir con alta precisión la topografía oceánica a mesoescala es de principal importancia para los oceanógrafos, meteorólogos o climatólogos con el fin de mejorar el entendimiento de la circulación del océano, la batimetría del océano, contracorrientes, mareogramas y modelos del clima Terrestre.

15 Durante los últimos años los altímetros convencionales de radar han suministrado cantidades enormes de datos permitiendo la observación de muchas características oceánicas. Sin embargo, en razón a que se basan en la observación del océano sobre una pequeña huella a lo largo de la dirección de observación de nadir, los altímetros clásicos tales como TOPEX/Poseidon, Jason, o ESA RA y RA-2, no pueden suministrar alto muestreo espacial-temporal, absolutamente necesario para mapear adecuadamente las características de mesoescala del océano, a menos que se desplieguen en constelaciones ad-hoc.

20 El altímetro oceánico de barrido amplio se ha previsto como una solución potencial para incrementar el muestreo espacio temporal; sin embargo es una solución muy compleja y costosa. Ver W. J. Emery, d. g. Baldwin, D. K. Mathews, "Sampling the Mesoscale Ocean Surface Currents With Various Satellite Altimeter Configurations", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42, No. 4, Apr 2004, 795.

25 En este contexto, desde 1993 la Agencia Europea del Espacio y posteriormente la Industria Europea han estado trabajando en la idea de hacer uso de las señales GNSS (Sistema Satelital de navegación Global) reflejadas desde la superficie del océano con el fin de efectuar la altimetría. La técnica, designada como "PARIS" (Sistema de Reflectometría e Interferometría pasiva), ha sido investigado y probado experimentalmente por la ESA, NASA y muchas otras organizaciones de investigación relacionadas con el espacio y no relacionadas con el espacio. PARIS es un altímetro de barrido muy amplio capaz de alcanzar un barrido de 1000 km o más, dependiendo de la altitud orbital, en razón a que recoge las señales reflejadas del océano desde diversos satélites GNSS, hasta 12 pistas cuando Galileo esté disponible.

Para una descripción detallada de la técnica PARIS, ver:

30 - M. Martin-Neira, "A Passive Reflectometry and Interferometry system (PARIS): Application to Ocean Altimetry", ESA Journal, 1993

- U.S. Patent No. 5546087; y

-G.A. Hajj, C. Zufra, "Theoretical Description of a Bistatic System for Ocean Altimetry Using the GPS Signal", Radio Science, Vol. 38, No. 5, Oct. 2003.

35 Debido al cubrimiento global de naturaleza bi o multi-estática de esta técnica, el instrumento PARIS de órbita Terrestre baja permitiría un muestreo espacial-temporal alto de la superficie de la Tierra. Por estas razones, PARIS se ha identificado como una técnica complementaria muy promisoría con respecto a los altímetros de radar convencional con el fin de manejar la altimetría a mesoescala o la detección rápida de tsunamis. El requisito de precisión con el fin de efectuar adecuadamente la altimetría de mesoescala se considera con una precisión de 5 cm de altura sobre una extensión espacial de 100 km a lo sumo. Véase P. Y. Le Traon and G. Dibarboue, G. Ruffini, E. Cardellach. "Mesoscale Ocean Altimetry Requirements and Impact of GPS-R measurements for Ocean Mesoscale Circulation Mapping. Technical Note Extract from the PARIS-BETA-ESTEC/ESA Study" ESTEC, Dec. 2002, available at <http://arxiv.org/abs/physics/0212068>.

45 Sin embargo, una desventaja principal de esta técnica es que, siendo intrínsecamente pasiva, es altamente dependiente de las características de las señales de navegación disponibles. De hecho, el ancho de banda y la potencia de las señales transmitidas son los parámetros más importantes que controlan el desempeño de un altímetro, bien sea radar o basado en PARIS, mono-estático o bi estático. Actualmente las señales de navegación transmitidas muestran una potencia y ancho de banda significativamente reducidos con respecto a los altímetros de radar convencionales. Esto implica una precisión de altímetro, exactitud y resolución por pulso más pobres. Diversos estudios y resultados de datos experimentales aéreos han predicho que el receptor PARIS con base en el espacio que explote el código GPS C/A no puede cumplir con los requisitos de altimetría a mesoescala del océano, adoptando aún las máximas dimensiones razonables del instrumento.

De otro lado, una explotación de una señal similar al código GPS P (que presenta un ancho de banda más amplio, y, a su vez, mejores desempeños) está sobre el límite para cumplir con los requisitos de mesoescala para una resolución espacial de 100 km, como lo muestran O. Germain and G. Ruffini en su documento "A revisit to the GNSS-R code range precision", Proceedings of GNSS-R Workshop, 14-15 de Junio 2006, ESTEC.

- 5 La invención tiene por objeto mejorar los desempeños de la técnica PARIS, es decir, su precisión, exactitud y/o resolución espacial.

De acuerdo con la invención, se puede lograr tal mejora al aplicar la compensación de la curvatura de retardo-Doppler a la altimetría biestática pasiva utilizando las señales de "oportunidad" (por ejemplo GNSS).

- 10 La compensación de la curvatura retardo-Doppler –también conocida como compensación de curvatura de rango de retardo– es una técnica de procesamiento de señal introducida de 1998 por R. K. Raney con el fin de mejorar la resolución espacial de los altímetros de radar monoestáticos: Ver R. Keith Raney, "The Delay/Doppler Radar Altimeter", IEEE, Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36. No. 5, Sept 1998; y la Patente U.S No. 5736957.

- 15 La aplicación de la compensación de curvatura retardo-Doppler a una técnica de altimetría biestática pasiva como PARIS no es directa y requiere adaptación específica.

Más específicamente, un objeto de la presente invención es un método de altimetría para determinar un perfil de elevación de una porción de la superficie terrestre de acuerdo con la reivindicación 1. Tal método comprende las etapas de:

- 20 a.- suministrar un receptor de señal sobre una primera plataforma que vuela por encima de dicha porción de la superficie terrestre, para recibir una serie temporal de señales emitidas por una segunda plataforma volante y dispersada por dicha porción de la superficie terrestre;

b.- Computar las formas de onda de la altimetría, indicativas del perfil de elevación de dicha porción de la superficie terrestre, al procesar las señales recibidas;

y se caracteriza porque dicha etapa de computar las formas de onda de la altimetría comprende:

- 25 (b.1.1) determinar las formas de onda de la correlación al correlacionar de manera cruzada las señales recibidas con una pluralidad de réplicas cambiadas por la frecuencia de las señales emitidas, correspondiendo el cambio de frecuencia de cada replica al cambio Doppler promedio de las señales reflejadas en un momento dado por una región particular de la superficie Terrestre;

- 30 (b.1.2) Introducir un cambio temporal a las formas de onda de correlación con el fin de compensar la curvatura de retardo del rango; y

(b2) sumar incoherentemente las formas de onda de correlación cambiadas temporalmente que corresponden a las señales esparcidas por la misma región de la superficie Terrestre en diferentes momentos durante el movimiento de la primera plataforma.

Las características ventajosas de la invención constituyen la materia objeto de las reivindicaciones dependientes.

- 35 Otro objeto de la invención es un sistema de altimetría de acuerdo con la reivindicación 15. Tal sistema comprende un satélite que lleva un receptor para recibir una serie temporal de señales conocidas emitidas por un segundo satélite y esparcidas por una porción de la tierra por debajo de dicho satélite; y medios para procesar la señal para llevar a cabo un método de altimetría de acuerdo con la invención.

- 40 Características y ventajas adicionales de la presente invención serán evidentes de la descripción que sigue, tomado en conjunto con los dibujos que la acompañan, los cuales muestran:

Figura 1, la traza de correlación cruzada de una señal GNSS esparcida recibida con un altímetro que se lleva al espacio de acuerdo con la invención, con una réplica localmente generada del mismo;

Las Figuras 2 y 3, la geometría del método de altimetría PARIS, conocido de la técnica anterior;

- 45 Las Figuras 4A y 4B, la compensación de la curvatura de retardo del rango de un conjunto de formas de onda de correlación que corresponden a diferentes cambios del Doppler;

Las Figuras 5 y 6, la geometría del método de Altimetría de la invención, enfatizando las diferencias con respecto a la técnica PARIS; y

Figura 7, un diagrama de flujo del algoritmo de procesamiento de señal llevado a cabo de acuerdo con una realización de la invención.

5 Con el fin de estimar la altura de un punto blanco SP sobre la superficie de la tierra con respecto al elipsoide de referencia, un altímetro PARIS computa la correlación cruzada de una réplica conocida con los pulsos del código de navegación recibidos reflejados/esparcidos por la superficie de la tierra; el punto blanco SP (denominado punto de reflexión especular) se define como el punto de la superficie de la tierra que refleja especularmente los pulsos de código de navegación recibidos por el altímetro. La Figura 1 representa una forma de onda de correlación cruzada PARIS típica (XC) para la señal GNSS de espectro esparcido tal como una señal de GPS. Como la altimetría de radar convencional, la distancia entre el receptor que se lleva al espacio y el punto de reflexión sobre la superficie de la tierra- y por lo tanto la elevación de dicho punto de reflexión – se determina al estimar el punto de potencia medio HP sobre el borde que se eleva de la forma de onda XC.

10 De hecho, computar la correlación cruzada de la señal GNSS reflejada con una réplica localmente generada de la misma produce la distancia desde el satélite GNSS al altímetro por vía de una ruta indirecta que pasa a través del punto de reflexión especular SP. Al mismo tiempo, el altímetro también recibe la misma señal GNSS a través de una ruta directa libre en el espacio que permite la computación de la distancia en línea recta desde el altímetro y el satélite GNSS. En este punto, determinar la altitud del punto de reflexión especular SP con respecto al elipsoide de referencia se reduce a un simple problema geométrico.

15 Por lo tanto, un altímetro PARIS estima el rango de radar mínimo al procesar la señal de navegación especularmente o especularmente de manera aproximada, reflejada por la superficie de la tierra. Más precisamente, asumiendo una superficie de la tierra cuasiplana (lo que es razonable para aplicaciones oceanográficas) la señal reflejada útil para la determinación de la altitud proviene de la huella limitada por la longitud de un chip de código (también denominada una huella de chip). Esto es análogo a la noción de “huella limitada por pulso” en la altimetría de radar convencional.

20 Típicamente, un satélite con altímetro PARIS se suministra con una antena multihaz cuya huella 3dB es mucho más amplia que la huella de un chip. Cada haz de la antena explorado con el fin de seguir el punto de reflexión especular sobre la superficie del mar.

25 De hecho, en cada momento, el satélite altímetro PARIS está visualizando muchos puntos de reflexión, en razón a que muchos satélites GNSS están en visibilidad. Si Galileo y las constelaciones de GPS están disponibles, se puede calcular que en promedio el satélite PARIS tiene acceso simultáneo a ocho puntos de reflexión, que pueden ser seguidos para extraer los datos de altimetría de acuerdo con el método de procesamiento de la invención.

30 Con el fin de garantizar una buena proporción de señal a ruido térmico, se prevé una antena multihaz con ocho haces con ganancia media/alta. Un procesador de geometría maneja la antena multihaz con el fin de apuntar cada haz hacia un punto de reflexión respectivo, cuya posición es computada adaptativamente en tiempo real.

35 En realidad, la señal GNSS que incide sobre la superficie de la tierra no es reflejada especularmente, sino es esparcida sobre un ángulo sólido relativamente amplio. Por lo tanto, en cada momento dado la antena receptora también recibe una cantidad significativa de potencia esparcida por puntos que descansan por fuera de la huella de un chip. De acuerdo con la técnica anterior, esta potencia no se puede utilizar para altitud, y se pierde efectivamente.

40 Esto reduce la ya pobre potencia de señal disponible, y afecta negativamente la precisión y exactitud del altímetro.

La Figura 2 representa esquemáticamente la geometría de un sistema PARIS.

45 El plano ES representa la superficie Terrestre, (más particularmente, la superficie del océano, en razón a que la técnica está dirigida esencialmente a aplicaciones oceanográficas), que se puede considerar plana en una primera aproximación. El satélite S1 se mueve a lo largo de la órbita LEO O1 a una altitud de por ejemplo 700 km, y lleva un receptor RX para recibir señales GNSS emitidas por un segundo satélite S2, que orbita a una altitud mucho mayor (la órbita de MEO o GEO). Más precisamente, el receptor RX recibe las señales GNSS desde tanto una ruta directa DP como una ruta reflejada más larga RP; la ruta reflejada corresponde a la reflexión especular de un “punto especular” SP. La línea SPT representa el seguimiento del punto especular en la medida en que los satélites S1, S2 se mueven a lo largo de las respectivas órbitas (realmente, el movimiento de S2 se puede despreciar en una primera aproximación, debido a la alta altitud del satélite GNSS). Obsérvese que, a diferencia de la altimetría de radar convencional, el punto SP, cuya la altitud se mide, no es el “punto nadir” NP del satélite S1 (NPT representa el seguimiento del punto nadir en la superficie terrestre).

Como se discutió anteriormente, la señal útil para la determinación de la altitud no viene solamente del punto especular SP sino de una huella elíptica F centrada sobre dicho punto (la huella F es elíptica en lugar de ser circular como en la altimetría de radar convencional porque SP no es el punto nadir). El tamaño de la huella F está directamente relacionado con la duración del chip de código de navegación sobre el cual se efectúa la correlación. Las elipses IL_1 e IL_2 que rodean el punto especular SP son las así llamadas "líneas de iso-retardo", es decir, los locus de los puntos de la superficie Terrestre ES que tienen la misma distancia desde el satélite S1. Más precisamente, IL_1 es la intersección de la superficie Terrestre con un elipsoide tridimensional definido por la condición:

$$-D_{S1-SP} + D_{S2-SP} = c \cdot T_{\text{chip}}, \text{ donde}$$

- 10 D_{S1-SP} es la distancia entre S1 y el punto especular SP;
 D_{S2-SP} es la distancia entre S2 y el punto especular SP;
 T_{chip} es la duración de un chip de código de navegación; y
 c es la velocidad de la luz.

15 De manera similar IL_2 es la "línea de iso-retardo" asociada con el elipsoide definida por $D_{S1-SP} + D_{S2-SP} = 2 \cdot c \cdot T_{\text{chip}}$ y así sucesivamente, se puede entender que IL_1 delimita la huella de un chip F.

Debido al movimiento del satélite S1 a lo largo de su órbita O1, las señales recibidas por el receptor RX son cambiadas de frecuencia por el efecto Doppler. El cambio Doppler de una onda electromagnética esparcida por un punto genérico de la superficie de la tierra depende de la posición de dicho punto y de la velocidad del satélite S1 a lo largo de su órbita O1. En la Figura 2, las líneas DL_1 , DL_0 Y DL_1 representan las así llamadas "líneas iso-Doppler", es decir, los locus de los puntos sobre la superficie de la tierra ES que corresponden al mismo cambio Doppler. En el primer orden las líneas iso-Doppler son hipérbolas con un eje de simetría definido por la proyección de la velocidad del receptor sobre la superficie de la tierra. Estas líneas determinan regiones sobre la superficie del mar que aparecen como "tiras" o zonas contiguas (DZ_{-2} , DZ_{-1} , DZ_0 , DZ_1 , DZ_2 sobre LA Figura 3), cuyo ancho es inversamente proporcional al tiempo de integración coherente adoptado para procesar los pulsos reflejados.

Como se muestra en la Figura 3, en el caso de un altímetro PARIS convencional, el ancho de la zona Doppler DZ_0 coincide con el de una huella de un chip F; de hecho, se puede mostrar que ésta es la elección óptima en términos de proporción señal a ruido y, a su vez, la precisión de la altura final. Las señales que vienen de la zona Z Doppler externas DZ_{-2} , DZ_{-1} , DZ_1 , y DZ_2 son simplemente descartadas, aún si estas zonas caen dentro del ancho del haz de 3dB dentro de la antena receptora.

La compensación de la curvatura de retardo Doppler es ventajosa porque ésta permite la explotación de las señales expansivas por puntos sobre la superficie de la tierra que descansan dentro de varias zonas Doppler, solamente limitadas por el ancho del haz de la antena. Como consecuencia, la potencia de la señal disponible no se utiliza más eficientemente que en la altimetría PARIS convencional.

35 Como se mencionó anteriormente, el altímetro PARIS convencional efectúa una correlación cruzada de la señal reflejada con una réplica del código generado a bordo, sintonizado en frecuencia con la frecuencia Doppler que corresponde al retorno del eco del punto especular. En su lugar, un altímetro de acuerdo con la invención efectúa una pluralidad de relaciones cruzadas paralelas del eco reflejado con un conjunto de réplicas de código cambiado de frecuencia N, correspondiendo el cambio de frecuencia de cada réplica a un valor posible del cambio Doppler introducido por el movimiento del satélite, es decir, que corresponde a una zona Doppler diferente sobre la superficie de la tierra.

45 La separación Doppler dentro de dos réplicas de código se selecciona con el fin de asegurar que las correspondientes regiones Doppler sobre la superficie de la tierra sean adyacentes sin traslapo. De acuerdo con propiedades conocidas de la transformada de Fourier el ancho de dichas regiones Doppler, y por lo tanto la separación de la frecuencia Doppler entre réplicas de código, es inversamente proporcional al tiempo de integración coherente.

Evitar el traslapo de las regiones Doppler es importante con el fin de garantizar que las formas de onda de correlación de salida N sean estadísticamente independientes. A su vez, esto asegura la efectividad de la etapa de integración incoherente posterior.

50 Comparada con la altimetría PARIS clásica, donde se evalúa la forma de onda de correlación única sintonizada con la frecuencia Doppler del punto especular, un altímetro de acuerdo con la invención producen unas formas

de onda de correlación N , desde las cuales se puede efectuar una medición de altura diferente N , permitiendo una mejor predicción de la medición.

5 Sin embargo, las formas de onda de correlación que corresponden a diferentes regiones Doppler son sometidas a retardos extra con respecto a la que corresponde al punto especular (también denominada en lo sucesivo como “región Doppler cero”. Este retardo extra es inducido por la curvatura esférica del frente de onda del pulso transmitido en la medida en que ésta incide sobre la superficie del océano; por lo tanto, este efecto es conocido como curvatura Doppler de retardo. En razón a que la estimación de la altura se efectúa al evaluar los retardos de la forma de onda, los retardos extra no deseados tienen que ser compensados con el fin de medir correctamente la altura del océano de cada una de las formas de onda. Al aplicar la corrección de retardo, cada forma de onda se puede alinear con respecto a aquella que corresponde al punto especular (región Doppler cero).

El retardo adicional inducido por la curvatura Doppler de retardo se puede evaluar de manera precisa, siempre y cuando las posiciones relativas de los satélites S1, S2 y la Tierra sean conocidas. Esto permite efectuar la corrección requerida.

15 La Figura 4A muestra las formas de onda de la correlación XC, representadas como funciones de la correlación de Retardo τ que corresponde a diferentes frecuencias Doppler (f_D) y por lo tanto a diferentes zonas Doppler sobre la superficie de la Tierra. La Figura 4B representa las mismas formas de onda después de la corrección de la curvatura Doppler de retardo, efectuada al introducir un desplazamiento temporal dependiente de la frecuencia Doppler $\Delta\tau(f_D)$. Las formas de onda corregidas CXC están perfectamente alineadas, indicando que las diferentes zonas Doppler tienen la misma elevación promedio, es decir, que la superficie de la Tierra es plana a la escala de la resolución parcial del instrumento. Las diferencias de elevación entre las zonas Doppler introduciría un desalineamiento (es decir un cambio temporal residual) entre las formas de onda corregidas correspondientes.

20 El procesamiento de retardo/Doppler permite aplicar un tiempo de integración coherente de correlación cruzada significativamente mayor con respecto al caso del altímetro PARIS convencional. De hecho, para el caso clásico, el tiempo de integración coherente óptimo se obtiene cuando la región Doppler cero une de manera precisa la dimensión de seguimiento de la huella limitada por pulso, como ya se presentó en la Figura 3. En otras palabras, en un altímetro PARIS convencional el tiempo de integración coherente se selecciona para coincidir con el tiempo de correlación de la reflexión de la huella limitada por pulso. Un elección del tiempo de integración coherente mayor que este valor implicaría una reducción de la precisión de la medición debido a un más bajo tiempo disponible para un promedio incoherente, dado su valor fijo de resolución espacial en el océano. Esto ya no es cierto cuando se aplica el procesamiento retardo/Doppler. En este caso, como los retornos de potencia son procesados desde las regiones Doppler vecinas, un incremento adicional de la integración del tiempo de integración coherente no reduce el promedio incoherente disponible.

25 Se debe subrayar que utilizar un tiempo de integración coherente mayor de lo usual (por ejemplo correlación) se hace posible por el hecho de que la coherencia de la fase pulso a pulso se satisface intrínsecamente en las señales de navegación. Como consecuencia, la longitud de las réplicas de código adaptadas en la correlación cruzada determina directamente la longitud de tiempo de la integración coherente.

30 La geometría de iluminación de un altímetro de acuerdo con la invención, que adopta un tiempo de integración coherente alto se describe en la Figura 5. Se puede ver que varias zonas Doppler estrechas descansan dentro de la huella de un chip F. Más aún, las señales que vienen de las regiones de la superficie de la tierra que descansan por fuera de dicha huella de un chip F pero dentro del ancho del haz BW de la antena receptora, se tienen en cuenta para la estimación de la altitud.

35 Después de un periodo de tiempo coherente de correlación cruzada, el punto especular de reflexión que corresponde a uno de los satélites GNSS ha recorrido una ruta sobre la superficie del mar cuya longitud depende de su velocidad y del tiempo de integración coherente adecuado. Las velocidades puntuales especulares típicas para los rangos de altitud de la órbita LEO entre 6 y 6,5 km/s y el tiempo de integración coherente usualmente no exceden los 20 ms.

40 De hecho, el tiempo de integración coherente máximo está prácticamente restringido por el tiempo de correlación de la superficie de la tierra y por la tasa de bits de la información que modula el código de navegación, si está presente: véase S. J. Frasier, A. J. Camps, “Dual –Beam Interferometry for Ocean Surface Current Vector Mapping”, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 39, No. 2, Febrero 2001. Por otro lado, como se presentó anteriormente, el ancho de la zona Doppler es inversamente proporcional al tiempo de integración coherente. Considerando el tiempo de integración introducido anterior y las altitudes típicas del satélite, la zona Doppler tiene un ancho de huella del orden de 500 m-1 km. Denotado por el origen de la referencia de tiempo, después de un periodo de correlación coherente, en el tiempo t_1 el punto de reflexión especular (en razón de que su trayectoria es casi perpendicular a las líneas y su Doppler) ha viajado solamente

una fracción de la anchura de la región Doppler), como se ilustró en la Figura 6. Con el fin de producir solamente una forma de onda de cada zona Doppler, se efectúa una integración incoherente de las formas de onda sucesivas M. El número M de formas de onda integradas consecutivas se selecciona preferiblemente de tal manera que en un tiempo de integración coherente, el punto especular SP se mueve una distancia igual a $1/M^{\text{ésima}}$ del ancho de la zona Doppler. Esto significa que la zona Doppler $n^{\text{ésima}}$ en el momento t_M traslapa exactamente la $(n + 1)^{\text{ésima}}$ zona Doppler a tiempo. (Véase Figura 6). El intervalo de tiempo $t_M - t_0$ se denomina tiempo de integración incoherente “intra Doppler”.

Después de la integración incoherente “intra Doppler”, se obtiene una forma de onda única para cada archivo de datos Doppler.

Además de la región incoherente “intra Doppler”, el método de procesamiento de señal de la invención comprende la etapa de sumar incoherentemente las formas de onda que corresponden a las señales esparcidas por la misma región de la superficie de la Tierra en diferentes momentos durante el movimiento de la primera plataforma, y por lo tanto afectados por diferentes desplazamientos Doppler (integración “inter Doppler” o promediación). En razón a que el punto especular se mueve a lo largo de la superficie del océano, la altura de cada punto de esparcimiento sobre la superficie de la tierra se estima secuencialmente desde el Doppler más alto a cada archivo de datos de frecuencia más baja, hasta el punto de que esté por fuera del campo visual (ancho de banda de la antena 3 dB); para cada región del océano, el promedio incoherente se aplica luego a través de las formas de onda obtenidas en diferentes momentos, en los diferentes programas ejecutables Doppler. De esta manera, para cada huella limitada Doppler en el océano, se acumulan diferentes formas de onda (nótese que para huella Doppler solamente se obtiene una forma de onda después de la etapa de integración incoherente intra-Doppler, como se describió anteriormente). Estas formas de onda son promediadas posteriormente de manera incoherente, sin degradar la resolución espacial, en razón a que se mantiene esencialmente el traslapo de la huella exacta entre las formas de onda Doppler, como se ilustra en la Figura 6.

Si la precisión de la estimación de la altitud es más importante que la resolución espacial alta, se puede incluir una tercera etapa de integración, en donde las formas de onda de las huellas adyacentes sean promediadas incoherentemente. El número de regiones Doppler promediadas es determinado esencialmente por la resolución espacial objetivo. Por ejemplo, la altimetría a mesoescala requiere una alta precisión de medición, pero no requiere resolución espacial mejor de aproximadamente 100 km.

Se describirá ahora una implementación de ejemplo del procesamiento de señal necesario para llevar a cabo el método de altimetría de la invención con referencia a la Figura 7.

La primera etapa de procesamiento comprende un cálculo paralelo de las correlaciones cruzadas entre una señal recibida RS y una pluralidad de frecuencias desplazadas, réplicas generadas localmente LGR de la señal de posicionamiento emitida por el segundo satélite S2. El tiempo y la frecuencia de la señal LGR dependen de la posición relativa de los satélites S1, S2 y de la superficie de la tierra; por lo tanto, se computan en tiempo real por un “procesador de geometría” GP. Esta es una diferencia significativa con respecto al caso de los altímetros Doppler de retardo monoestáticos de la técnica anterior.

Como se representa en la Figura 7, las correlaciones cruzadas se pueden computar en el dominio de frecuencia: tanto la señal recibida como las réplicas generadas localmente son transformadas según Fourier (bloques FFT) y luego multiplicadas en un bloque multiplicador M.

La compensación de la curvatura Doppler de retardo se puede efectuar fácilmente en el dominio de frecuencia al multiplicar cada forma de onda Doppler por un coeficiente de fases suministrado por un bloque de compensación Doppler DC. De nuevo, los factores de fase para cada forma de onda Doppler dependen de la configuración de la geometría del sistema, y por lo tanto se evalúan numéricamente por el “procesador de geometría” GP. Se actualizan continuamente de tal manera que el error de la medición de la altura debido a la correlación de retardo es significativamente inferior que la precisión de la medición de la altura final deseada.

Después de la compensación del retardo se aplica una transformada de Fourier inversa (bloque IFFT) a cada forma de onda del archivo de datos Doppler.

Alternativamente, las correlaciones cruzadas se pueden computar directamente (en dominio de tiempo), pero aún en este caso la compensación de la curvatura Doppler de retardo se lleva a cabo más ventajosamente en el dominio de frecuencia.

La correlación cruzada y la compensación de la curvatura se efectúan para periodos de integración coherentes sucesivos M, como se discutió anteriormente (ver Figura 6). Las formas de onda M resultantes para cada uno de los archivos de datos Doppler M se almacenan en rutas consecutivas de un registrador de cambio A1 y entonces se suman incoherentemente por los bloques de suma $\Sigma 1$. De esta manera, al final de la etapa de integración

incoherente “intra-Doppler”, se obtiene una forma de onda única para cada zona Doppler de la superficie de la tierra.

5 Estas formas de onda son cargadas entonces a una registradora de cambio $\Sigma 2$ y sumadas incoherentemente a las formas de onda ya almacenadas en dicho registro. Después de cada adición, las celdas de registro son desplazadas en una posición. Esto permite integrar todas las formas de onda que corresponden a la región única de la superficie de la Tierra recibidas en diferentes momentos y por lo tanto con diferente desplazamiento Doppler (integración incoherente “inter-Doppler”).

10 Si es apropiado, se puede obtener un promedio incoherente adicional con el fin de mejorar la precisión mientras se degrada la resolución espacial al integrar las formas de onda de potencia de diferentes huellas del océano en un tercer bloque de integración $\Sigma 3$. El número k de las formas de onda de huella promedio se seleccionan de acuerdo con la resolución espacial objetivo.

15 De acuerdo con diferentes realizaciones de la invención, el procesamiento de datos se puede efectuar completamente a bordo, o se puede compartir entre los segmentos de espacio y tierra. Se puede efectuar a bordo un esquema de procesamiento distribuido típico, las correlaciones paralelas y una corrección de curvatura de retardo aproximada; los bordes de ataque de la forma de onda se pueden almacenar y transmitir sobre tierra, garantizando tasas de datos razonables. Un refinamiento de la corrección de retardo, una promediación incoherente y el cálculo del perfil de altimetría de la superficie de la tierra se pueden efectuar posteriormente sobre tierra.

20 La precisión de la medición de altura de un altímetro de acuerdo con la invención se comparará ahora con la del altímetro PARIS convencional. Esta comparación se ha efectuado con la ayuda de simulaciones numéricas. El escenario de referencia se definió mediante los siguientes parámetros:

Señal de navegación: GPS en L5, frecuencia central en 10, 23 Mchips.

Altitud de la órbita: 500 km

25 grados Ángulo de incidencia SP de referencia con respecto a la dirección nadir del satélite de altimetría: 16

Ángulo entre el plano de incidencia de la dirección orbital del satélite de Altimetría: 0°

Velocidad del viento a nivel del mar: 10 m/s

Ganancia de la antena de RX: 30 dBi

Cifra de Ruido RX: 2 dB

30 Ancho de banda RX RF: 20 MHz

Frecuencia transmitida L5 GPS: 1176,45 MHz

GPS EIRP: 28 dBW

Resolución espacial objetivo: 100 km.

35 El ángulo de incidencia del punto SP con respecto a la dirección nadir del satélite de altimetría varía con la geometría, y por lo tanto con el tiempo. Sin embargo, la variación es pequeña, y tiene una influencia despreciable sobre la medición de la altitud. Por esta razón, se ha utilizado en las simulaciones un ángulo constante (16°).

El plano de incidencia se define como el plano que contiene los dos satélites (S1 y S2) y el punto de reflexión especular SP. En la simulación, el ángulo entre este plano y la dirección orbital del satélite S1, O1 se ha tomado igual a 0°. Esto significa que el satélite S1 se mueve dentro del plano de incidencia.

40 Enfocándose sobre una forma de onda única de tiempos independientes N_{inc} integrados incoherentemente, la posición de la medición de la altura σ_h del altímetro pasivo biestático para un punto especular en el ángulo de elevación $\theta_{elev, SP}$ se puede evaluar analíticamente como:

$$\sigma_h = \frac{c \overline{P_s}}{2 \text{sen } \theta_{elev, SP} \overline{P_s'}} \sqrt{\frac{1}{N_{inc}} \left(1 + \frac{1}{SNR}\right)^2 + \frac{1}{N_{inc}} \left(\frac{1}{SNR}\right)^2}$$

donde C es la velocidad de la luz, P_s y P_{s'} son respectivamente la potencia media y la pendiente de la forma de onda del punto que corresponde al retardo relativo al nivel medio del mar y SNR es la proporción de la señal térmica a ruido de la forma de onda en el punto que corresponde al nivel medio del mar.

Para más detalle y una derivación de esta ecuación véase:

- 5 - C. Zuffada, V. Zavorotny, "Coherence Time and Statistical properties of the GPS signal scattered off the ocean surface and their impact in the accuracy of remote sensing of sea surface topography and winds", International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Volume 7, 9-13 Julio 2001; y

-R.E. Fischer, "Standard Deviation of Scatterometer Measurements from Space, IEEE Transactions on Geoscience Electronics", Vol. 10, No. 2, Apr 1972.

- 10 La fórmula anteriormente presentada se puede adoptar para la invención y para el caso PARIS convencional. Considerando el parámetro SNR como la proporción de señal a ruido de una forma de onda de un archivo de datos Doppler único genérico después de un periodo de integración coherente, la ecuación anterior (adaptando N_{inc} que corresponde a una resolución espacial de 100 km) suministraría la precisión de la medición de la altura obtenida si se adopta solamente el archivo de datos Doppler para la estimación. Así la precisión de la medición de la altura final se obtiene mediante integración incoherente de las formas de onda corregidas de retardo N en diferentes archivos de datos Doppler. Así, considerando como primera aproximación θ_{elev, SP} y la proporción P_s/P_{s'} constantes para todas las regiones Doppler, la proporción de la precisión de la medición de la altura del altímetro de la invención (σ_{h,s} donde "S" representa "aperturas sintéticas") y el de un altímetro PARIS σ_h es dada por:

$$\sigma_{h,s} / \sigma_h = \frac{\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_{h,i}^2}}{\sigma_h} = \frac{\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{N_{inc,S}} \left(1 + \frac{1}{SNR_{i,S}} \right)^2 + \frac{1}{N_{inc,S}} \left(\frac{1}{SNR_{i,S}} \right)^2 \right]}}{\sqrt{\frac{1}{N_{inc}} \left(1 + \frac{1}{SNR} \right)^2 + \frac{1}{N_{inc}} \left(\frac{1}{SNR} \right)^2}}$$

- 20 donde el numerador representa el promedio incoherente de las formas de onda Doppler N, SNR_{i, s} representa la proporción de señal a ruido y la forma de onda Doppler i-ésima y N_{inc, s} es el número de formas de onda promediadas incoherentes para cada software ejecutable Doppler. Representando por T_{100 km} el tiempo necesario para que el punto especular SP viaje 100 km sobre la superficie de la Tierra y por T_{coh} el tiempo de integración coherente adoptado, el número de formas de onda promediadas incoherentes para cada software ejecutable Doppler es dado por N_{inc,S} = T_{100 km}/T_{coh}.

- El tiempo de integración coherente T_{coh} para el caso PARIS convencional se ha seleccionado con el fin de maximizar la precisión de altura. Como ya se discutió, el valor de integración coherente óptimo es igual al tiempo de correlación de la huella limitada a un chip. Es importante resaltar que el ángulo de incidencia del punto especular con respecto al satélite varía en la medida en que el punto especular se mueve a lo largo de la superficie del océano. Por lo tanto las formas de onda del software ejecutable Doppler varían consecuentemente, Sin embargo, se puede verificar que, para la geometría de la misión considerada aquí, la variación de la geometría del mapeo Doppler sobre una ruta de 100 km sobre la superficie del océano es despreciable. Por ejemplo, para un ángulo de incidencia que tiene un valor inicial de 18°, el punto especular cubre 100 km en aproximadamente 16 segundos. Durante este periodo, el ángulo de incidencia en el punto especular varía aproximadamente 1,5°. Por lo tanto, como una primera aproximación y solamente con el fin de evaluar la precisión de la medición de la altura, la variación de las formas de onda Doppler a lo largo del vuelo se pueden considerar despreciables.

- Los desempeños de un instrumento de acuerdo con la invención se han evaluado para dos configuraciones, adoptando ambas un tiempo de integración coherente de 20 ms. En la primera configuración se procesan 29 archivos de datos Doppler, que corresponden a una región sobre la superficie de la tierra que tiene un ancho de aproximadamente 25 km, en comparación con 10 km para la huella de un chip. En la segunda configuración, solamente se procesan 15 programas ejecutables Doppler, que corresponden a una región sobre la superficie de la Tierra que tiene el mismo ancho que la primera zona del chip. Dicho de otra manera, en la segunda configuración la región de la superficie de la Tierra que esparce señales útiles para la estimación de la altitud es esencialmente la misma que la altimetría PARIS clásica.

Las simulaciones dan los siguientes valores para los parámetros N_{inc, s} y N_{inc}:

$$N_{inc,S} = 805$$

$$N_{inc} = 10732$$

El número de formas de onda integradas incoherentemente es mayor en el caso de PARIS que para la invención, en razón a que el tiempo de integración correspondiente es más bajo. Sin embargo, el método de la invención comprende una etapa de integración incoherente adicional, efectuada a través de las formas de onda Doppler N.

5 La simulación muestra que, en el caso de la primera configuración, la aplicación de un método de la invención mejora la precisión de la estimación de la altitud en aproximadamente 34%-5,3 cm en lugar de 8,1 cm. En el caso de la segunda configuración, no se obtiene ninguna mejora significativa. El resultado era esperado, y confirma que la mejora del desempeño obtenida gracias a la invención se debe al mayor ancho de la región procesada y por lo tanto a la más eficiente utilización de la potencia de señal disponible.

10 Procesar un número aún mayor de formas de onda permitiría una mejora adicional de la precisión de la estimación de la altitud. Por lo tanto, se ha probado una tercera configuración, correlacionando de manera cruzada N= 55 formas de onda con de fin de abarcar completamente la huella de la antena de 3dB. La precisión de la medición resultante es igual a 4 cm, equivalente a un factor de mejora del 51% con respecto al PARÍS convencional.

15 Es valioso notar que casi el doble del número de archivos de datos Doppler procesados (55 en lugar de 29) mejora la precisión en sólo el 28% con respecto a la segunda configuración. Esto se debe simplemente al hecho de que la potencia esparcida y la ganancia de la antena RX disminuye para regiones más allá del punto especular SP. Como consecuencia, el número N de formas de ondas Doppler procesadas no se puede incrementar indefinidamente: dada la ganancia de la antena, el tiempo de integración coherente y la geometría de referencia, se puede determinar el número óptimo de archivos de datos Doppler, maximizando la precisión de la estimación. Es valioso notar que el valor óptimo no necesariamente garantiza el cubrimiento completo de la huella de la antena de 3dB.

Como se discutió anteriormente, el método de la invención se puede utilizar para mejorar la precisión de la altimetría PARIS al mantener la resolución espacial sin cambio.

25 Alternativamente, dicho método se podría utilizar para mejorar la resolución espacial al mantener la precisión sin cambio, o mejorar ambos parámetros al encontrar un compromiso de "a la medida" entre ellos.

REIVINDICACIONES

1. Un método de altimetría para determinar un perfil de elevación de una porción de la superficie de la tierra (ES), que comprende las etapas de:
- 5 (a) suministrar a un receptor de señal (RX) sobre una primera plataforma (S1) que vuela por encima de dicha porción de la superficie de la tierra, para recibir una serie temporal de señales emitidas por la segunda plataforma volante (S2) y esparcidas mediante dicha porción de la superficie de la Tierra;
- (b) computar las formas de onda de altimetría, indicativas del perfil de elevación de dicha porción de la superficie de la Tierra, al procesar las señales recibidas;
- 10 caracterizado porque dicha etapa de computar las formas de onda de altimetría comprende:
- (b.1.1) determinar las formas de onda de correlación (XC) al correlacionar cruzadamente las señales recibidas con una pluralidad de réplicas con frecuencia desplazada generadas localmente de las señales emitidas, con el desplazamiento de frecuencia de cada replica correspondiente al cambio Doppler promedio de las señales reflejadas en un momento dado por una región particular de la superficie de la Tierra;
- 15 (b.1.2) Introducir un cambio temporal dependiente de la frecuencia Doppler a las formas de onda de correlación con el fin de compensar el retardo extra inducido por la curvatura esférica del frente de onda de las señales emitidas en la medida en que éste incide sobre la superficie de la Tierra;
- (b2) sumar incoherentemente las formas de onda de coordinación temporalmente desplazadas (CXC) que corresponden a las señales esparcidas por la misma región de la superficie de la Tierra en diferentes momentos durante el movimiento de dicha primera plataforma.
- 20
2. Un método de altimetría de acuerdo con la reivindicación 1, en donde dicha primera y segunda plataforma son satélites.
- 25
3. Un método de altimetría de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, donde dichas señales emitidas por la segunda plataforma son señales coherentes.
4. Un método de altimetría de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dichas señales emitidas por la segunda plataforma son señales del espectro esparcidas.
- 30
5. Un método de altimetría de acuerdo con la reivindicación 4, en donde dichas señales emitidas por la segunda plataforma son señales GNSS.
6. Un método de altimetría de acuerdo con la reivindicación 5, en donde el tiempo de correlación entre las señales recibidas y las réplicas localmente generadas de las señales GNSS emitidas es significativamente mayor que un chip de estas últimas.
- 35
7. Un método de altimetría de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el desplazamiento de frecuencia entre las réplicas cambiadas de frecuencia generadas localmente de las señales emitidas es inversamente proporcional a la duración de dichas réplicas.
- 40
8. Un método de altimetría de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicho receptor sobre dicha plataforma también recibe señales emitidas por dicha segunda plataforma volante a través de una ruta directa (DP), con el fin de generar la réplica cambiada de frecuencia para estar correlacionada con la señal esparcida.
- 45
9. Un método de altimetría de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además la etapa de sumar incoherentemente una pluralidad de formas de onda de correlación desplazadas temporalmente que corresponde al mismo desplazamiento de frecuencia Doppler y adquirida dentro de un tiempo de integración incoherente, durante el cual el punto (SP) sobre la superficie de la Tierra refleja especularmente las señales emitidas por dicha segunda plataforma de vuelo que se mueve desde una distancia a lo sumo igual al ancho de la zona Doppler correspondiente.
- 50
10. Un método de altimetría de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además una etapa adicional de promediar especialmente las formas de onda de una altimetría con el fin de mejorar la precisión del perfil de elevación determinado, mientras disminuye su resolución espacial.
- 55
11. Un método de altimetría de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, y en donde dicha etapa de computar las formas de onda de altimetría comprende:
- 60 -convertir las señales recibidas en el dominio de frecuencia;

- en los dominios de frecuencia, multiplicar dichas señales por dichas réplicas de frecuencia desplazada de la misma e introducir el desplazamiento de fase dependiente de la frecuencia Doppler, que corresponde a dicho desplazamiento de tiempo dependiente de la frecuencia Doppler en el dominio de tiempo;

- retrotransformar las señales procesadas en el dominio de tiempo.

5

12. Un método de altimetría de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde los posibles valores del desplazamiento Doppler introducidos por el movimiento del satélite y en los desplazamientos de tiempo correspondientes son computados al tomar en cuenta las posiciones relativas variantes en el tiempo de la primera y segundas plataformas y de la tierra.

10

13. Un método de altimetría de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde las señales emitidas de una pluralidad de segundas plataformas es recibida por dicho receptor, y procesadas simultáneamente con el fin de computar dichas formas de onda de altimetría.

15

14. Un método de altimetría de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además una etapa adicional de determinar un perfil de la altura de la región de la superficie de la Tierra por encima del primer satélite sobre la base de dichas formas de onda de altimetría.

20

15. Un sistema de altimetría que comprende:

- un primer satélite que lleva un receptor para recibir una serie temporal de señales emitidas por un segundo satélite y esparcidas en una porción de la Tierra por debajo de dicho satélite;

25

- medios para procesamiento de señal para computar las formas de onda de altimetría, indicativas del perfil de elevación de dicha porción de la superficie de la tierra al:

30

- determinar las formas de onda de correlación (XC) mediante correlación cruzada de las señales recibidas por dicho primer satélite con una pluralidad de réplicas con frecuencia desplazada generadas localmente de las señales emitidas por dichos segundo satélite, correspondiendo el desplazamiento de frecuencia de cada réplica al desplazamiento Doppler promedio de las señales reflejadas en un momento dado por una región particular de la superficie de la Tierra;

-introducir un desplazamiento temporal dependiente de la frecuencia Doppler a las formas de onda de correlación con el fin de compensar en la curvatura del rango; y

35

- sumar incoherentemente las formas de onda de correlación cambiadas temporalmente (CXC) que corresponden a las señales esparcidas por la misma región de la superficie de la tierra en diferentes momentos durante el movimiento de dicho primer satélite.

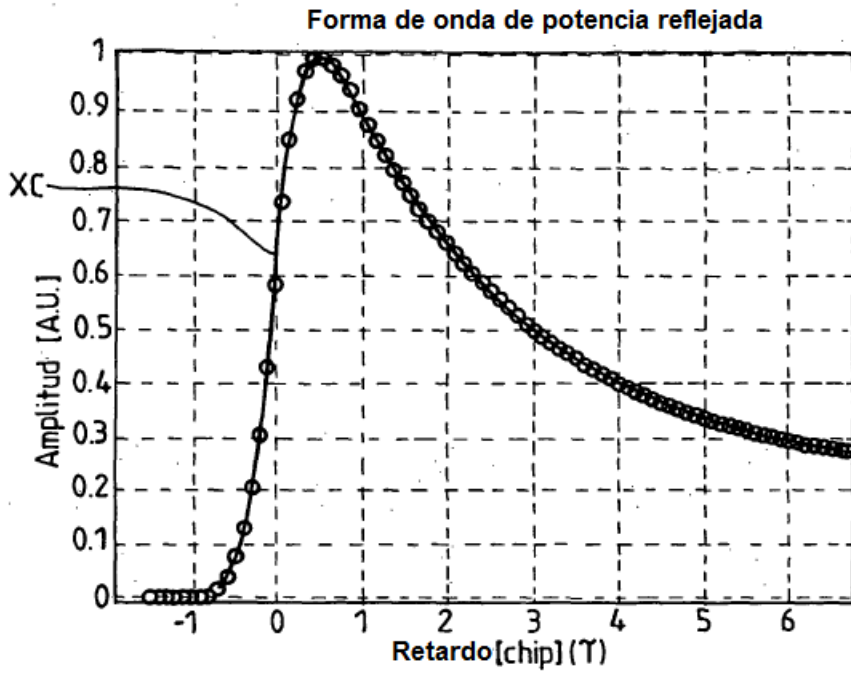


FIG.1

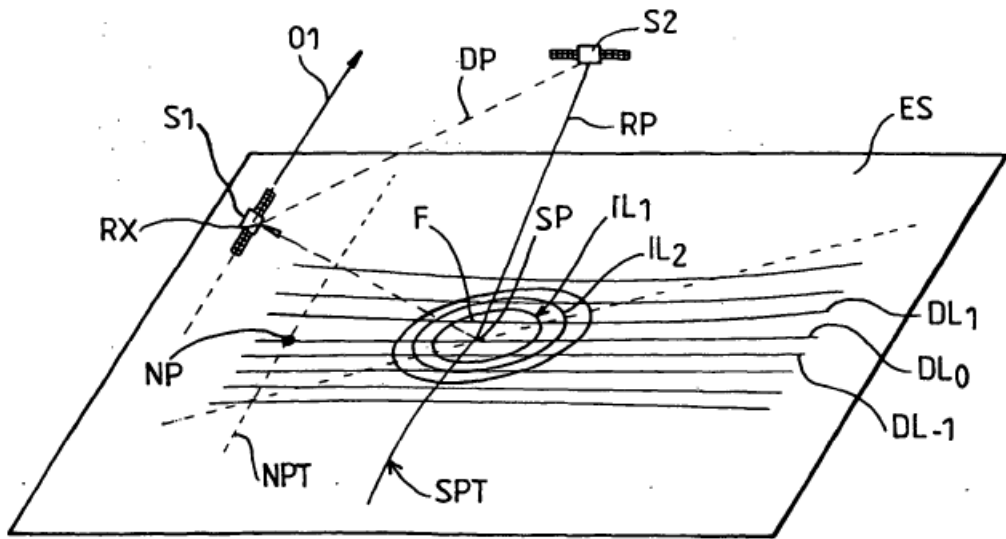


FIG.2

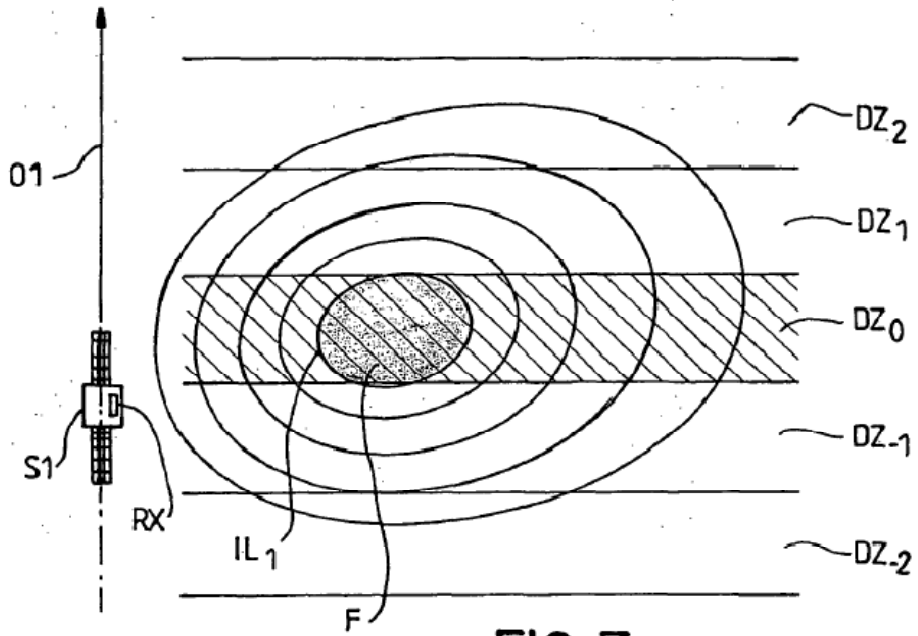


FIG. 3

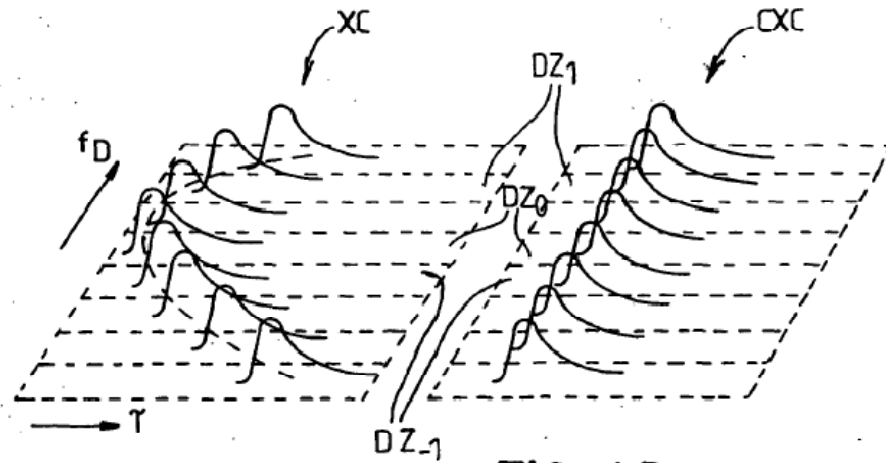


FIG. 4A

FIG. 4B

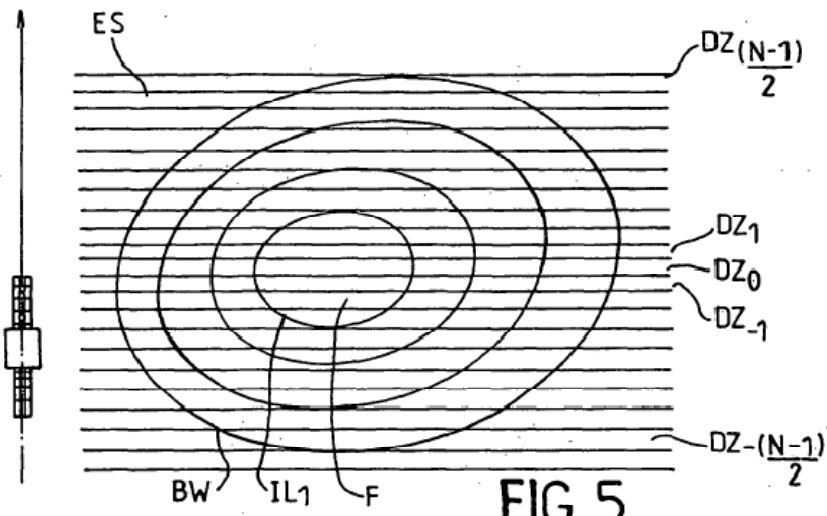


FIG. 5

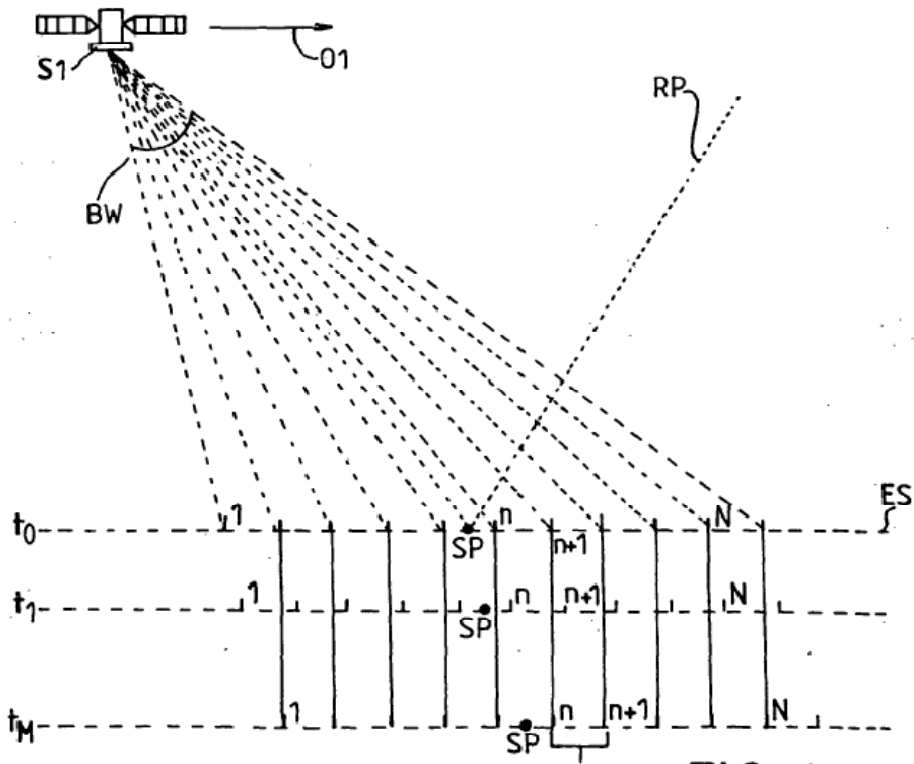


FIG. 6

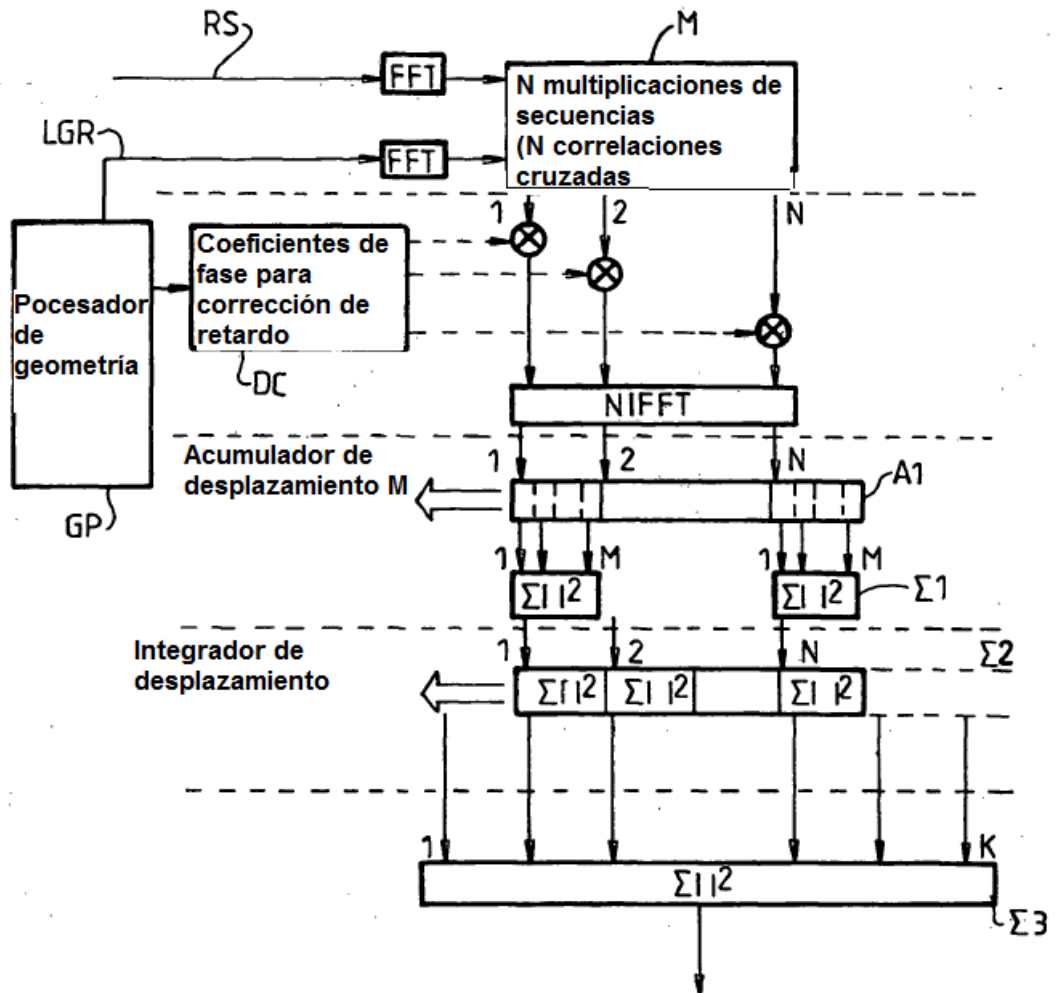


FIG.7