



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 353 073**

51 Int. Cl.:
G01S 13/90 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08784550 .9**

96 Fecha de presentación : **26.06.2008**

97 Número de publicación de la solicitud: **2167989**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **31.03.2010**

54 Título: **Procedimiento para el procesamiento de datos brutos de TOPS (observación del terreno por barrido progresivo) - SAR (radar de apertura sintética).**

30 Prioridad: **04.07.2007 DE 10 2007 031 020**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
25.02.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
25.02.2011

73 Titular/es: **DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT-UND
RAUMFAHRT e.V.
Linder Höhe
51147 Köln, DE**

72 Inventor/es: **Prats, Pau;
Mittermayer, Josef;
Moreira, Alberto y
Scheiber, Rolf**

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 353 073 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para el procesamiento de datos brutos de TOPS (observación del terreno por barrido progresivo) - SAR (radar de apertura sintética).

5 **Campo técnico**

La invención se refiere a un procedimiento para el procesamiento de datos brutos de TOPS (Terrain Observation by Progressive Scan, observación del terreno por barrido progresivo)-SAR (Synthetic Aperture Radar, radar de apertura sintética) en datos de imagen de alta precisión.

A continuación se proporcionará en primer lugar una breve introducción a SAR y TOPS-SAR. Un radar con apertura sintética, abreviado SAR (Synthetic Aperture Radar), es un instrumento para la teledetección que se usa crecientemente en la representación, vigilancia y estudio de la superficie terrestre. Un sistema de este tipo se compone de una plataforma de soporte que se desplaza por la superficie terrestre a una velocidad constante, una antena orientada en dirección ortogonal respecto a la dirección del movimiento y un sistema de radar coherente que emite periódicamente pulsos de ondas electromagnéticas de alta frecuencia con una frecuencia de repetición de pulsos PRF.

La dirección del movimiento de la plataforma de soporte se denomina dirección del acimut, y la dirección ortogonal que se dirige en diagonal hacia abajo se denomina dirección del alcance o también dirección "range". En el modo de funcionamiento SAR normal, que se denomina modo de imagen o también modo "Stripmap", se representa durante el vuelo sobre un territorio que se ha de observar una franja con la longitud del trayecto sobrevolado. El ancho de la franja depende, entre otras cosas, de la longitud de la ventana temporal en la que se reciben los ecos del radar retroreflejados de los pulsos emitidos. Los ecos recibidos se convierten en frecuencia (mezclan), se desmodulan, se digitalizan y se depositan en forma de los denominados datos brutos en una memoria de señales de eco bidimensional.

Cada procesamiento SAR comprende esencialmente una compresión en la dirección del alcance, una corrección de la migración de las células en la dirección del alcance, conocida también como migración en profundidad, y una compresión en dirección del acimut. La resolución geométrica en la dirección del alcance es una función del ancho de banda de los pulsos de radar emitidos. Para mejorar esta resolución se modulan previamente los pulsos emitidos, para lo cual se usa en la mayoría de los casos una modulación de frecuencia lineal, que también se presupondrá en lo sucesivo. La compresión en la dirección del alcance significa la filtración de las señales recibidas en la dirección del alcance según la teoría del filtro adaptado ("matched filter"), por medio de lo cual se comprimen en pulsos las señales expandidas en el tiempo.

La migración de las células en la dirección del alcance (migración en profundidad) es consecuencia del cambio de la distancia entre la antena y el objeto puntual durante la formación de la apertura sintética. La corrección de la migración en profundidad corrige la migración en la dirección del alcance de los ecos pertenecientes a un objeto puntual en la memoria de datos brutos bidimensional de señales de eco.

La compresión de pulsos en la dirección del acimut según la teoría del filtro adaptado equivale a la formación de la apertura sintética. La modulación en la dirección del acimut es igualmente consecuencia de la variación de la distancia entre la antena y el objeto al paso de la plataforma de soporte. El filtrado adaptado significa la suma coherente de todos los ecos que pertenecen a una posición asociada al acimut. Cuando la migración de las células en la dirección del alcance se corrige antes de la compresión en la dirección del acimut, la compresión en la dirección del acimut se puede realizar mediante una función de filtro unidimensional.

El SAR de haz concentrado y el SAR de haz concentrado deslizante ("sliding") son modos de funcionamiento de los sistemas SAR que permiten obtener una resolución geométrica significativamente mayor. En el modo de haz concentrado, la antena se dirige durante todo el vuelo, es decir, se gira de forma correspondiente en la dirección del acimut, de manera que ilumine una misma área de la escena (punto; "spot"). De esta manera se puede mejorar la resolución en la dirección del acimut en comparación con el modo de imagen habitual. Las dimensiones observadas de la escena, sin embargo, se reducen drásticamente. En el modo de haz concentrado deslizante el centro de rotación no está en el centro de la antena, sino más apartado de la escena iluminada, de manera que se puede cubrir una región más grande que en el caso del haz concentrado.

Otro modo de registro SAR es el denominado modo ScanSAR. En el modo ScanSAR se modifica periódicamente el haz de la antena para iluminar diferentes subfranjas ("subswaths") en la dirección del alcance, es decir, franjas dispuestas a diferentes distancias de la trayectoria de vuelo. Esto permite incrementar el ancho de la franja a costa de la resolución en la dirección del acimut. Este modo también se conoce por el nombre de "modo de franja ancha".

A continuación se proporciona una descripción detallada del modo ScanSAR. La cobertura de franja ancha se logra por conmutación periódica de la elevación del haz de la antena de manera que el haz de la antena esté dirigido, dependiendo del ángulo de elevación conectado, a una subfranja diferente en la dirección del alcance. La conmutación del haz de la antena tiene como consecuencia que el sensor registra una secuencia finita de ecos, es decir, una ráfaga de pulsos, para cada una de las subfranjas representadas. En cada subfranja el explorador registra cíclicamente ráfagas de pulsos para un tiempo de mantenimiento T_D que se repite con un periodo T_R ("duración del ciclo").

ES 2 353 073 T3

La relación T_F/T_R (T_F es el tiempo de recepción de la antena) redondeada al número entero más bajo indica el número de observaciones representadas. El funcionamiento en modo de ráfagas de pulsos, necesario para lograr una cobertura de franja ancha, limita el registro Doppler para cada blanco a una relación T_D/T_F en comparación con una adquisición SAR en modo de imagen ("stripmap") equivalente. Como consecuencia de ello, el ancho de banda registrado en el acimut para cada blanco se reduce por el mismo valor y la resolución en la dirección del acimut empeora de forma correspondiente.

El modo ScanSAR presenta algunos inconvenientes. Se genera un efecto de festón ("scalping"), es decir, una modulación periódica de la amplitud en la imagen enfocada, así como una relación de ambigüedad variable asociada al acimut y un sigma-cero (σ_0) equivalente al ruido. Estos fenómenos son consecuencia del hecho de que se observan diferentes blancos con diferentes intervalos del diagrama de radiación de la antena en la dirección del acimut.

En un artículo de F. De Zan, A. Monti Guarnieri: "TOPSAR: Terrain observation by progressive scan", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, vol. 44, n° 9, páginas 2352-2360, septiembre de 2006, se ha propuesto un nuevo modo de adquisición de franja ancha, denominado TOPS-SAR. Éste supera los inconvenientes principales del modo ScanSAR antes descrito con la ayuda de una orientación de la antena en dirección del vuelo.

La solución propuesta en el artículo antes mencionado para lograr la misma cobertura de franja evitando al mismo tiempo los efectos no deseados consiste, a diferencia del caso del haz concentrado, en el giro opuesto de la antena durante la adquisición, es decir, en la dirección de giro opuesta desde atrás hacia delante, con una velocidad de rotación constante ω_r (véase la fig. 1), lo que produce un efecto contrario, es decir, un empeoramiento de la resolución en la dirección del acimut.

No obstante, todos los blancos se observan bajo el mismo diagrama de radiación de la antena en la dirección del acimut y por ello desaparece el efecto de festón ("scalping"), y las ambigüedades en acimut y el sigma-cero equivalente al ruido se vuelven constantes en la dirección del acimut. Al final de una ráfaga de pulsos (duración de la ráfaga de pulsos T_{B1}, T_{B2}, \dots), el ángulo de visibilidad de la antena A, que se desplaza con la velocidad v en dirección del acimut, se dirige para iluminar una subfranja siguiente, es decir, se modifica de nuevo hacia atrás desde la dirección a la primera subfranja (subfranja 1), para iluminar la segunda subfranja (subfranja 2). Una vez representada la última subfranja, la antena se vuelve a dirigir a la primera subfranja (subfranja 1), de manera que no quedan huecos entre las ráfagas de pulsos de la misma subfranja.

En lo que a la señal de datos brutos de TOPS en una ráfaga de pulsos se refiere, presenta similitud tanto con la del ScanSAR como con la del haz concentrado. La señal de TOPS se asemeja a la señal del haz concentrado en el sentido de que el ancho de banda de la escena es mayor que la frecuencia de repetición de pulsos PRF. También presenta similitudes con la señal del modo ScanSAR en el sentido de que la duración de las ráfagas de pulsos es menor que la ráfaga de pulsos inicial enfocada. Las propiedades de la señal de SAR se pueden visualizar claramente mediante un diagrama de tiempo-frecuencia.

El registro Doppler de tres blancos situados en la misma posición en la dirección del alcance (dirección "range") pero en posiciones diferentes en la dirección del acimut se representa en forma de líneas continuas gruesas (fig. 2). La abscisa corresponde al tiempo del acimut t y la ordenada a la frecuencia actual f_a . El blanco al comienzo de la ráfaga de pulsos se observa bajo un ángulo de estrabismo negativo, de lo cual resultan frecuencias Doppler negativas. Por otra parte, el blanco presenta al final de la ráfaga de pulsos frecuencias Doppler positivas.

En general, el ancho de banda total de la escena abarca varias PRF, de forma similar a como ocurre en el modo de haz concentrado. Por consiguiente, se requiere un procedimiento para tener en cuenta este muestreo insuficiente de la señal del acimut. En lo que a las similitudes con el ScanSAR se refiere, debe observarse el primer blanco representado (fig. 2). Se observa en el tiempo t_c , que se denomina tiempo medio de haz t_{mid} ; sin embargo, el blanco debería aparecer después del enfoque en la posición Doppler cero t_0 . Por lo tanto, la ráfaga de pulsos inicial enfocada es mayor que la duración real de la ráfaga de pulsos.

En el artículo antes mencionado, en el que se presenta el modo TOPS, también se propone un procesador funcional. Para la adaptación a un ancho de banda en la dirección del acimut mayor que la frecuencia de repetición de impulsos PRF, este procesador usa un paso de procesamiento previo como el que se describe en el artículo de C. Prati, A. Monti Guarnieri, F. Rocca: "SPOT mode SAR focusing with the ω -k technique", Proc. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Espoo, Finlandia, 3 a 6 de junio de 1991, páginas 631-634.

En este paso se despliegan los datos en el intervalo espectral para incorporar un mayor ancho de banda de la escena. Después se puede usar un procesador de imagen de número de onda convencional o cualquier otro procesador de imagen SAR para enfocar los datos.

Para efectuar finalmente una adaptación a la mayor ráfaga de pulsos inicial enfocada se aplica una solución de procesamiento posterior, como la que se propone en el artículo de A. Monti Guarnieri, C. Prati: "ScanSAR focusing and interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, páginas 1029-1038, julio de 1996. En este paso, los datos se despliegan en el intervalo temporal de forma similar a como se realiza en el paso de procesamiento previo. Un banco de filtros de tasa múltiple permite aplicar un filtrado dependiente del acimut.

Aparte del procesador antes comentado no existen en la bibliografía procesadores explícitos para el procesamiento de datos adquiridos en el modo TOPS. Una solución posible podría consistir en la combinación del procedimiento de escalado de frecuencias con subaperturas y el procedimiento SPECAN mejorado por escalado en el acimut, que se usa en el modo de haz concentrado deslizante conocido por el artículo de J. Mittermayer, R. Lord, E. Börner: "Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm", Proc. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Toulouse, Francia, 21 a 25 de julio de 2003. En este caso se usa una combinación del procedimiento SPECAN mejorado por escalado en acimut, como se propone en el documento EP 0795762 B1, junto con una solución de subapertura, conocida por el documento EP 0924534 B1, para la corrección de la migración de las células en la dirección del alcance.

La corrección de la migración de las células en la dirección del alcance se realiza mediante el uso del algoritmo de escalado de frecuencias, que se describe en el artículo de A. Moreira, J. Mittermayer y R. Scheiber: "Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and Scan SAR Imaging Modes", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, n° 5, 1996, páginas 1123-1136.

El mayor ancho de banda de la escena en el acimut se puede tener en cuenta usando subaperturas en el intervalo temporal, de manera que el ancho de banda momentáneo dentro de una subapertura es menor que la frecuencia de repetición de pulsos PRF. El procedimiento SPECAN mejorado por escalado en acimut se puede aplicar entonces a la señal del acimut para considerar la ráfaga de pulsos inicial enfocada, que es mayor que la ráfaga de pulsos registrado.

El procesador funcional para el modo TOPS antes explicado presenta el inconveniente de que requiere pasos de procesamiento previos y posteriores para manejar las peculiaridades de la señal TOPS, lo que complica el cálculo. Además, se requiere la transformación de Stolt, que constituye una interpolación, para completar la corrección de la migración en profundidad. El banco de filtros de tasa múltiple exige que los datos se procesen en pequeños bloques en el tiempo asociado al acimut con un cierto solapamiento, por lo que se vuelve ineficaz e impreciso cuando se realiza el procesamiento en la dirección del acimut.

El uso de subaperturas para la consideración del mayor ancho de banda de la escena junto con el procedimiento SPECAN mejorado por escalado de frecuencias presenta en el caso del TOPS algunos inconvenientes. En particular, el procedimiento SPECAN mejorado por escalado de frecuencias es ineficaz por el hecho de que la imagen enfocada se obtiene según una transformación de Fourier directa (se enfoca en el intervalo Doppler del alcance). Por lo tanto, siempre que las señales senoidales presentan frecuencias superiores a la frecuencia de repetición de pulsos PRF se produce una distorsión por repliegue del espectro ("aliasing"). La frecuencia de estas señales depende de la velocidad del sensor v , de la longitud de onda λ , del intervalo de escalado seleccionado y de la posición temporal del blanco en la dirección del acimut.

Los dos primeros no se pueden modificar durante el procesamiento, y la distancia de escalado debería encontrarse normalmente dentro de la franja representada para minimizar las dimensiones necesarias de la subapertura para la corrección de la migración de las células en la dirección del alcance. De lo contrario, el procesamiento se vuelve ineficaz. El tamaño de la escena limita el uso eficaz del procedimiento SPECAN mejorado por escalado en el acimut. Para escenas de pequeñas dimensiones, como ocurre en el modo de haz concentrado o de haz concentrado deslizante, o para ráfagas de pulsos de poca longitud, como los que aparecen en el modo ScanSAR, no se produce esta distorsión por repliegue del espectro y el procesamiento se vuelve eficaz.

Sin embargo, en el caso del TOPS, la distorsión por repliegue del espectro aparecerá con toda seguridad, puesto que las dimensiones de la escena habitualmente son bastante grandes para una ráfaga de pulsos. El procesamiento en bloques en la dirección del acimut podría ser una opción para enfocar las imágenes con la ayuda del procedimiento SPECAN mejorado por escalado en el acimut; sin embargo, esta solución es ineficaz. Otra posibilidad residiría en incrementar el muestreo PRF antes de la operación de escalado en el acimut mediante relleno con ceros; sin embargo, también en este caso se complican los cálculos y el procesamiento es ineficaz.

La solución de escalado en el acimut original no proporciona una solución eficaz que se pudiera aplicar al modo TOPS y al modo de haz concentrado deslizante para suprimir los lóbulos laterales en la dirección del acimut. Esto es consecuencia de la variación de la frecuencia en la dirección del acimut y de la posición temporal en la dirección del acimut de la función de referencia del acimut necesaria. Conforme al artículo de A. Moreira, R. Scheiber, J. Mittermayer: "Azimuth and Range Scaling for SAR and ScanSAR Processing", Proc. IEEE Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Lincoln, Nebraska, EE.UU., 1996, se puede modificar la exploración de la imagen en la dirección del acimut. Esto exige, sin embargo, que todos los blancos se encuentren en la banda de base, por lo que no constituye una opción para el modo TOPS y el modo de haz concentrado deslizante.

Exposición de la invención

El objetivo de la presente invención es realizar, en un procedimiento para el procesamiento de datos brutos de TOPS-SAR en datos de imagen, este procesamiento de manera muy eficaz, altamente precisa y sin interpolación, evitando el repliegue en la dirección del acimut y otros inconvenientes que aparecen en el procesamiento de señales brutas de TOPS.

ES 2 353 073 T3

De acuerdo con la presente invención, este objetivo se alcanza con un procedimiento para el procesamiento de datos brutos de TOPS (observación del terreno por barrido progresivo)-SAR (radar de apertura sintética) en datos de imagen exactos mediante las características indicadas en la parte caracterizadora de la reivindicación 1 adjunta.

5 En el procedimiento según la invención se realiza un procesamiento de subaperturas para evitar el repliegue en la dirección del acimut. En cada subapertura se realiza una compresión en dirección del alcance y una corrección de la migración de las células en la dirección del alcance, usándose una nueva solución de escalado en el acimut, denominada escalado de banda de base en el acimut, para el procesamiento de la señal asociada al acimut.

10 Durante el procesamiento asociado al alcance se produce una división en subaperturas en la dirección del acimut. En consecuencia, se puede usar una frecuencia de repetición de pulsos PRF más baja, puesto que el teorema de muestreo solo ha de cumplirse en las subaperturas en la dirección del acimut. Por eso es adecuado en este paso cualquier procesador en modo de imagen para realizar los pasos de la compresión en la dirección del alcance, la corrección de la migración de las células en la dirección del alcance y la compresión secundaria en la dirección del alcance.

15 En un ejemplo preferido se usa el algoritmo de escalado de frecuencias ampliado descrito en el artículo de A. Moreira, J. Mittermayer y R. Scheiber: "Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes", IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, nº 5, páginas 1123-1136, 1996. Este algoritmo permite realizar los pasos indicados sin usar ningún tipo de interpolación, por lo que la solución es más eficaz y precisa.

20 De acuerdo con la presente invención, el procesamiento en la dirección del acimut se realiza con un procedimiento mejorado del escalado en el acimut, por medio del cual se evitan una larga función de referencia en la dirección del acimut y, con ello, unas grandes dimensiones del acimut durante el procesamiento. El alcance del escalado no es constante sino que depende de la distancia. No es igual al vector distancia original. Se calcula de manera que en combinación con el paso de desrotación posterior se logre un muestreo constante en la dirección del acimut para todas las distancias.

30 Las ventajas del escalado en el acimut original para el modo ScanSAR y el modo de haz concentrado se mantienen con el escalado de banda de base en el acimut según la presente invención. El escalado en el acimut considera, por lo tanto, la modulación hiperbólica del acimut, de manera que el procesamiento en la dirección del acimut es altamente preciso para todas las distancias y no se requiere ningún muestreo nuevo con interpolación para la corrección geométrica en la dirección del acimut. El intervalo de muestreo deseado en la imagen procesada se puede ajustar mediante la selección de un alcance de escalado de referencia, facilitándose de este modo la recombinación de diferentes subfranjas.

35 La función de desrotación seleccionada que se aplica en el intervalo temporal del acimut permite que todos los blancos se encuentren en la banda de base, modificándose de este modo la tasa de modulación en frecuencia efectiva. Puesto que como consecuencia del paso de escalado en el acimut la fase es puramente cuadrática, se puede usar un filtro adaptado ("matched-filter") que tenga en cuenta la tasa de modulación en frecuencia efectiva. En este paso se puede incluir una función de ponderación durante el filtrado adaptado para reducir eficazmente los lóbulos laterales en la dirección del acimut. Una transformación rápida inversa de Fourier (IFFT) adicional proporciona una imagen enfocada, y una función de fase final en el intervalo de tiempo permite conservar fielmente la fase. El procedimiento de acuerdo con la presente invención presenta, por lo tanto, una elevada precisión de fase.

Con el procedimiento según la invención se obtienen en conjunto las ventajas siguientes:

50 Con el procesamiento de subaperturas se puede usar una menor frecuencia de repetición de pulsos PRF en el procesamiento, y también se puede usar la transformación rápida de Fourier (FFT) de corto tiempo, lo que simplifica los cálculos.

55 La solución de escalado de banda de base en el acimut según la invención permite al mismo tiempo establecer el intervalo de muestreo deseado y el tratamiento de banda de base de todos los blancos sin la necesidad de realizar pasos adicionales. Durante el filtrado adaptado también se pueden reducir eficazmente los lóbulos laterales a lo largo de la dimensión del acimut mediante una ponderación. El nuevo procesamiento asociado al acimut se realiza entonces únicamente con el uso de multiplicadores y transformadas de Fourier, evitando las interpolaciones. Como consecuencia se logra un procesamiento de alta precisión con conservación de fase.

60 La reivindicación 2 comprende una posibilidad de uso ventajosa del procedimiento indicado en la reivindicación 1 para el procesamiento de datos brutos de TOPS (observación del terreno por barrido progresivo)-SAR (radar de apertura sintética).

Descripción de los dibujos

65 La invención se explica con más detalle a continuación mediante formas de realización preferidas y haciendo referencia a los dibujos adjuntos. Muestran:

La Fig. 1 una geometría de adquisición, ya descrita anteriormente, para el modo de imagen TOPS,

la Fig. 2 un diagrama de tiempo-frecuencia, también descrito ya anteriormente, característico del modo de imagen TOPS,

la Fig. 3 un diagrama de flujo esquemático de una realización preferida del procedimiento según la presente invención,

la Fig. 4 un esquema que muestra el lugar del centro de rotación y la distancia de rotación en el modo de imagen TOPS,

la Fig. 5 un esquema que muestra cómo se realiza la conversión a la banda de base por multiplicación con una función chirp (línea discontinua larga) en el intervalo de tiempo de manera que se puedan suprimir eficazmente los lóbulos laterales en la dirección del acimut,

la Fig. 6 un diagrama de tiempo-frecuencia que muestra cómo la operación de escalado modifica la distancia de rotación necesaria para incorporar las señales para los blancos en la banda de base a un alcance diferente del alcance de escalado, en el que las líneas discontinuas representan el estado del diagrama antes de la operación de escalado y las líneas continuas el estado posterior a la operación de escalado, y

la Fig. 7 representaciones de contorno que muestran el resultado del procesamiento obtenido con el procedimiento de acuerdo con la invención de nueve objetos puntuales a corta distancia (arriba), a media distancia (centro) y a gran distancia (abajo).

Descripción de la invención

La Fig. 3 muestra en un diagrama de flujo esquemático los diferentes pasos de proceso de una realización preferida del procedimiento según la presente invención. En las ecuaciones relativas a la Fig. 3, t es el vector de tiempo en la dirección del acimut (es decir, el tiempo “slow”), τ el tiempo en la dirección del alcance, denominado también dirección “range” (es decir, el tiempo de transmisión del eco), f_a el vector de frecuencia en la dirección del acimut (es decir, la frecuencia Doppler), f_r la frecuencia asociada al alcance, r_0 la distancia a un objeto puntual, r el vector distancia, λ la longitud de onda, c la velocidad de la luz y v la velocidad en el suelo.

Los datos brutos de TOPS primero se dividen, en el paso 3.1, en subaperturas. Esta división se asemeja a la que se realiza en el procesamiento de haz concentrado de acuerdo con el documento de patente EP 0924534 B1 ya mencionado. Durante el procesamiento debe muestrearse lo suficiente el ancho de banda del acimut B_a de un objeto puntual, que depende del ancho del haz de la antena. El ancho de banda del acimut total de la escena, sin embargo, es mayor que el ancho de banda momentáneo máximo B_a porque el posicionamiento de un blanco en la dirección del acimut provoca un desplazamiento de frecuencia. La frecuencia momentánea viene dada por la ecuación (1):

$$f_i = K_{rot} \cdot t = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_{rot0}} \cdot t, \quad (1)$$

en la que r_{rot0} es la distancia vectorial al centro de rotación dado por la geometría, como se muestra en la Fig. 4.

Al procesar los datos, la frecuencia de repetición de pulsos PRF debería ser al menos tan grande como el ancho de banda total del acimut $B_{a, total}$ para evitar frecuencias ambiguas en la dirección del acimut durante la corrección de la migración de las células en la dirección del alcance. Las frecuencias ambiguas en la dirección del acimut provocan una pérdida de resolución y un empeoramiento de la imagen enfocada definitiva como consecuencia de la aparición de “ecos fantasma”.

Gracias al uso del procesamiento de subaperturas es suficiente, por lo tanto, una menor frecuencia de repetición de pulsos PRF. El cálculo de un tiempo de subapertura T_{sub} se realiza conforme a la ecuación (2):

$$T_{sub} \leq \frac{PRF - B_a}{|K_{rot}|}. \quad (2)$$

Después de la división en subaperturas en el paso 3.1 se continúa con el procesamiento para cada subapertura i con el centroide Doppler correspondiente $f_{DC, i}$. Para evitar obtener un resultado de procesamiento incorrecto como consecuencia del procesamiento de subaperturas, las subaperturas se forman con solapamiento reducido.

ES 2 353 073 T3

A continuación se entiende por “FFT (transformada rápida de Fourier) de corto tiempo asociada al acimut” e “IFFT (transformada rápida inversa de Fourier) de corto tiempo asociada al acimut” la corta longitud o el pequeño número de puntos de operaciones FFT o IFFT, respectivamente, en la dirección del acimut, obtenido por aplicación de un procesamiento de subaperturas. Tras combinar las subaperturas (como se tratará a continuación en relación con el paso 3.14) está restablecida la longitud completa de la señal temporal y las operaciones FFT siguientes deben ser, por lo tanto, una “FFT de largo tiempo asociada al acimut” o una “IFFT de largo tiempo asociada al acimut”.

En el paso de procesamiento 3.2 se transforman los datos en el intervalo Doppler del alcance mediante una FFT de corto tiempo asociada al acimut. Después se realiza un escalado de frecuencias, para el cual se multiplica la función de escalado de frecuencias $H_{CS}(f_a, \tau, r_0)$ indicada en la ecuación (5) (recuadro 3.3) con la señal en una primera unidad de multiplicación 3.4.

El escalado de frecuencias produce una adaptación de la curvatura de la trayectoria dependiente del alcance a la curvatura de una trayectoria de referencia para una distancia de referencia r_{ref} , representando una trayectoria el lugar geométrico de los centros de fase de todas las señales en la dirección del alcance que pertenecen a un objeto puntual. La forma de la trayectoria de referencia se puede describir con $t_{a,ref}(f_a)$ de la siguiente manera:

$$t_{a,ref} = \frac{2 \cdot r_{ref}}{c} \cdot (a(f_a) + 1), \quad (3)$$

en la que el factor de escalada lineal $a(f_a)$ describe la dependencia de frecuencia de la migración de las células en la dirección del alcance:

$$a(f_a) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \cdot f_a}{2 \cdot v}\right)^2}} - 1. \quad (4)$$

En la función de escalado de frecuencias H_{CS} , K_{eff} es la tasa de modulación en la dirección del alcance que depende de la frecuencia asociada al acimut y de la distancia de referencia, puesto que incluye la compresión secundaria en la dirección del alcance:

$$H_{cs}(f_a, \tau; r_0) = \exp\left[-j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot a(f_a) \cdot (\tau - \tau_{ref}(f_a))\right] \quad (5)$$

Después del escalado de frecuencias se usa una FFT asociada al alcance (recuadro 3.5) para la transformación de los datos en el intervalo de frecuencias bidimensional, realizándose la compresión en la dirección del alcance, la corrección de la migración de las células en la dirección del alcance y la compresión secundaria en la dirección del alcance mediante una multiplicación por la función de fase $H_{rcmc}(f_a, f_r, r_{ref})$ indicada en la ecuación (6) (recuadro 3.6) en una segunda unidad de multiplicación 3.7:

$$H_{rcmc}(f_a, f_r; r_{ref}) = \exp\left[-j \frac{\pi}{K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a))} f_r^2\right] \cdot \exp\left[j \frac{4 \cdot \pi}{c} \cdot r_{ref} \cdot a(f_a) \cdot f_r\right]. \quad (6)$$

En la ecuación (6) la primera función de fase designa la función de filtro para la compresión en la dirección del alcance. La segunda función de fase realiza la corrección de la migración de las células en la dirección del alcance. Como consecuencia del escalado de frecuencias realizado con la ecuación (5), esta corrección se puede efectuar para todas las distancias simultáneamente mediante un desplazamiento lineal en la dirección del alcance, que solo depende de la frecuencia asociada al acimut.

En el paso siguiente del proceso se usa una IFFT asociada al alcance (recuadro 3.8) para una retrotransformación al intervalo Doppler asociado al alcance. Durante el escalado de frecuencias se introduce en la señal un desplazamiento de fase adicional en la dirección del acimut dependiente del alcance que se elimina mediante una multiplicación por una función de corrección $H_{corr}(f_a; r_0)$ indicada en la ecuación (7) (recuadro 3.9) en una tercera unidad de multiplicación 3.10:

$$H_{corr}(f_a; r_0) = \exp\left[j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a)) \cdot a(f_a) \cdot \left(\frac{2}{c} \cdot (r_0 - r_{ref})\right)^2\right]. \quad (7)$$

En el paso siguiente del proceso se realiza un nuevo escalado en el acimut. Éste elimina la fase de acimut hiperbólica y la sustituye por una forma de fase cuadrática mediante una multiplicación de las señales por una función de fase $H_a(f_a; r_0)$ (recuadro 3.11) en una cuarta unidad de multiplicación 3.12:

$$H_a(f_a; r_0) = \exp\left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_0 \cdot (\beta(f_a) - 1)\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{\pi}{K_{scl}(r)} \cdot f_a^2\right] \quad (8)$$

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \cdot f_a}{2 \cdot v}\right)^2} \quad (9)$$

El registro de fase puramente cuadrático viene descrito por la tasa de escalado Doppler $K_{scl}(r)$. El alcance del escalado no es constante y no es igual al vector distancia original r ; depende de la distancia, como se describe en las ecuaciones (10) a (12). El motivo por el cual se usa este alcance de escalado dependiente de la distancia se explicará más adelante.

$$K_{scl}(r) = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_{scl}(r)} \quad (10)$$

$$r_{scl}(r) = \frac{r_{scl0}}{r_{rot0}} r_{rot}(r) \quad (11)$$

$$r_{rot}(r) = \frac{r_{rot0} - r}{1 - \frac{r_{scl0}}{r_{rot0}}} \quad (12)$$

Puesto que el escalado en el acimut en el intervalo de tiempo produce un desplazamiento de las señales asociadas al acimut que no se encuentran en el centro de iluminación, se precisa de un ligero aumento de la dimensión del acimut. Este aumento, sin embargo, entra generalmente en el intervalo que se alcanza aumentando el tamaño de subaperturas a la siguiente potencia de dos. El número de puntos en la dirección del acimut deberá ser una potencia de dos para minimizar los cálculos de los pasos FFT/IFFT.

En el paso siguiente del proceso se usa una IFFT asociada al acimut (recuadro 3.13) para una retrotransformación en el tiempo del acimut/alcance. A continuación, en el paso 3.14, se combinan las diferentes subaperturas. Después, el ancho de banda de la señal sigue cubriendo la frecuencia de repetición de pulsos PRF. Por lo tanto, se puede realizar una desmodulación en una quinta unidad de multiplicación 3.16, usando la función de desrotación $H_{derot}(t,r)$ indicada en la ecuación (13) (recuadro 3.15).

En la Fig. 5 se representa el efecto sobre la señal como consecuencia de esta función de desrotación. La tasa de modulación en frecuencia usada en la función de desrotación depende de la distancia y se indica en la ecuación (14). En este punto se modifica la tasa de modulación en frecuencia efectiva de la señal conforme a la ecuación (15).

$$H_{derot}(t, r) = \exp\left[-j \cdot \pi \cdot K_{rot}(r) \cdot (t - t_{mid})^2\right] \quad (13)$$

$$K_{rot}(r) = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_{rot}(r)} \quad (14)$$

$$K_{eff}(r) = K_{scl}(r) - K_{rot}(r). \quad (15)$$

Por el hecho de que el espectro de datos se encuentra ahora para todos los blancos en la banda de base, se puede usar un filtro adaptado. Después de una FFT de largo tiempo asociada al acimut (recuadro 3.17) se realiza un filtrado adaptado usando la ecuación (16) (recuadro 3.18) en una sexta unidad de multiplicación 3.19. En este punto también se puede realizar con facilidad una supresión de los lóbulos laterales en la dirección del acimut mediante una función de ponderación $W(f_a)$. En realidad, éste es el único punto óptimo en el que la aplicación de la función de ponderación da resultados correctos en el caso del TOPS.

$$H_{comp}(f_a, r) = W(f_a) \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{K_{eff}(r)} \cdot f_a^2 \right], \quad -\frac{PRF}{2} + f_{DC} < f_a < \frac{PRF}{2} + f_{DC} \quad (16)$$

5

f_{DC} es en este caso el centroide Doppler medio de la adquisición de datos. Una IFFT de largo tiempo (recuadro 3.20) proporciona una señal focalizada. Sin embargo, los datos deben multiplicarse por la función de fase $H_{fase}(t, r)$ indicada en la ecuación (17) con el fin de realizar un procesamiento de conservación de fase, para lo cual se usa una séptima unidad de multiplicación 3.22.

10

$$H_{fase}(t, r) = \exp \left[j \cdot \pi \cdot K_t(r) \cdot \left(1 - \frac{r_{scl0}}{r_{rot0}} \right)^2 \cdot (t - t_{mid})^2 \right], \quad (17)$$

15

en la que

20

$$K_t(r) = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot (r_{rot}(r) - r_{scl}(r))}. \quad (18)$$

25

A continuación se explica la necesidad de una tasa de escalado dependiente del alcance. El muestreo de la imagen tras usar la solución de escalado en el acimut se indica en la ecuación (19).

30

$$\Delta x_{nue} = \Delta x_{orig} \cdot \left(1 - \frac{r_{scl}}{r_{rot}} \right) = \frac{v}{PRF} \cdot \left(1 - \frac{r_{scl}}{r_{rot}} \right), \quad (19)$$

35

en la que Δx_{orig} es el muestreo original igual a v/PRF . Podría concebirse el uso de un alcance de escalado constante r'_{scl} , pero entonces cambiaría la tasa de rotación, como se representa en la Fig. 6 y se expresa mediante la ecuación (20):

40

$$r'_{rot} = r_{rot0} - (r - r'_{scl}). \quad (20)$$

45

Cuando se usa la ecuación (20) para tener la señal correctamente en la banda de base, cuando se usa un alcance de escalado constante, el muestreo definitivo de la imagen en la dirección del acimut depende de la distancia, como se constata en la ecuación (19). Puesto que es deseable tener el mismo muestreo en la dirección del acimut para todas las distancias y al mismo tiempo tener todos los blancos correctamente en la banda de base, la solución consiste, por lo tanto, en usar un vector de escalado y uno de rotación, indicados en la ecuación (11) y en la ecuación (12), respectivamente. Si esto se realiza de este modo, entonces el muestreo en la dirección del acimut viene dado por la ecuación (21):

50

$$\Delta x_{nue} = \Delta x_{orig} \cdot \left(1 - \frac{r_{scl0}}{r_{rot0}} \right), \quad (21)$$

55

en la que r_{scl0} se selecciona en función del muestreo definitivo deseado en la dirección del acimut y debe encontrarse dentro del ancho de muestreo para minimizar el aumento necesario de las subaperturas. Cabe señalar que en el modo de adquisición TOPS, r_{rot0} es negativa, de manera que el muestreo nuevo de la imagen es mayor que el muestreo original de los datos brutos. Esto resulta deseable puesto que la resolución es peor que en el caso del modo de imagen (stripmap).

60

65

La solución propuesta en la presente invención permite procesar eficazmente los datos de TOPS, ya que no se requiere un procesamiento en bloques para el enfoque en la dirección del acimut. La solución propuesta permite asimismo seleccionar las distancias definitivas en la dirección del acimut. Esto último resulta muy útil, puesto que se evita la necesidad de realizar una interpolación para la recombinación de diferentes subfranjas (diferentes subfranjas presentan diferentes frecuencias de repetición de pulsos PRF y, por lo tanto, diferentes muestreos en la dirección del acimut). El escalado en el acimut a la banda de base garantiza así que se tienen todos los blancos en la banda de base y que se selecciona el muestreo deseado en la dirección del acimut.

ES 2 353 073 T3

La Fig. 7 muestra el resultado del procesamiento de nueve blancos simulados en la banda X con el procedimiento de acuerdo con la invención. Puesto que no se usaron funciones de ponderación durante el procesamiento, la representación de las líneas de contorno en la Fig. 7 muestra funciones sinc bidimensionales ($\text{sinc } x = \sin x/x$). Los nueve objetos puntuales presentan diferentes posiciones en la dirección del alcance y en la del acimut correspondientes a la misma ráfaga de pulsos de TOPS.

Los blancos están dispuestos de tal manera que los blancos limiten en las posiciones angulares una escena con las dimensiones 7.200 m x 24.655 m en la dirección del acimut y en la dirección del alcance, respectivamente. La geometría simulada equivale al caso de encontrarse a bordo de vehículos espaciales, y el alcance de escalado de referencia seleccionado ascendió a 596.091,37 m. Las resoluciones geométricas teóricas posibles ascienden a aproximadamente 14,16 m x 0,89 m en la dimensión del acimut y del alcance, respectivamente. Las desviaciones máximas de las resoluciones medidas de los valores teóricos ascienden al 2% en el acimut y al 1% en el alcance.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el procesamiento de datos brutos de TOPS (observación del terreno por barrido progresivo)-SAR (radar de apertura sintética) en datos de imagen de alta precisión, **caracterizado** por un procesamiento bidimensional de los datos brutos de TOPS-SAR mediante un procedimiento de escalado de frecuencias y un procedimiento de escalado en el acimut en la banda de base, usando los siguientes pasos sucesivos:

a) división de los datos brutos de TOPS-SAR en datos de subapertura asociados al acimut (3.1);

b) realización de una FFT de corto tiempo asociada al acimut (3.2);

c) multiplicación de la señal por una función de escalada de frecuencias H_{cs} , definida por

$$H_{cs}(f_a, \tau; r_0) = \exp\left[-j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot a(f_a) \cdot (\tau - \tau_{ref}(f_a))\right],$$

en la que f_a es la frecuencia asociada al acimut, r_0 la distancia más corta de un blanco, r_{ref} una distancia de referencia, τ el tiempo en la dirección del alcance, denominado también dirección “range”, es decir, el tiempo de transmisión del eco, el factor $a(f_a)$ describe la dependencia de frecuencia de la migración de las células en la dirección del alcance

conforme a,
$$a(f_a) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \cdot f_a}{2 \cdot v}\right)^2}} - 1,$$
 λ es una longitud de onda, v designa la velocidad en el suelo, $K_{eff}(f_a;$

$r_{ref})$ la tasa de modulación dependiente de la frecuencia asociada al acimut f_a y de la distancia de referencia r_{ref} en la dirección del alcance y $\tau_{ref}(f_a)$ significa un tiempo de transmisión del eco de referencia dependiente de la frecuencia asociada al acimut f_a (3.3, 3.4);

d) realización de una FFT asociada al alcance para obtener la señal en el intervalo de frecuencias bidimensional (3.5);

e) multiplicación de la señal por la función de fase H_{rcmc} , definida por

$$H_{rcmc}(f_a, f_r; r_{ref}) = \exp\left[-j \frac{\pi}{K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a))} f_r^2\right] \cdot \exp\left[j \frac{4 \cdot \pi}{c} \cdot r_{ref} \cdot a(f_a) \cdot f_r\right].$$

para realizar la corrección de la migración de las células en la dirección del alcance, la compresión en la dirección del alcance y la compresión secundaria en la dirección del alcance, en la que f_r es la frecuencia asociada al alcance y c la velocidad de la luz (3.6, 3.7);

f) realización de una IFFT asociada al alcance para incorporar la señal en el intervalo Doppler asociado al alcance (3.8);

g) multiplicación de la señal por una función de corrección de fase H_{corr} , definida por

$$H_{corr}(f_a; r_0) = \exp\left[j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a)) \cdot a(f_a) \cdot \left(\frac{2}{c} \cdot (r_0 - r_{ref})\right)^2\right].$$

en la que r_0 es la distancia más corta a un objeto puntual (3.9, 3.10);

h) multiplicación de los datos bidimensionales recibidos en el intervalo Doppler asociado al alcance (= “range”) y tras realizar los pasos principales de una compresión en la dirección del alcance y una corrección de la migración de las células en la dirección del alcance de un blanco por una función de fase $H_a(f_a; r_0)$, definida por

$$H_a(f_a; r_0) = \exp\left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_0 \cdot (\beta(f_a) - 1)\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{\pi}{K_{scl}(r)} \cdot f_a^2\right]$$

en la que

5

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \cdot f_a}{2 \cdot v} \right)^2}.$$

10

$$K_{scl}(r) = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_{scl}(r)}$$

15

$$r_{scl}(r) = \frac{r_{scl0}}{r_{rot0}} r_{rot}(r)$$

20

$$r_{rot}(r) = \frac{r_{rot0} - r}{1 - r_{scl0} / r_{rot0}}.$$

25

y en la que r es el vector distancia, $K_{scl}(r)$ una tasa Doppler independiente del alcance, r_{rot0} una distancia de rotación como consecuencia de la geometría de TOPS, r_{scl0} un alcance de escalado seleccionado en función de la distancia definitiva deseada de la imagen, $r_{scl}(r)$ un vector distancia de escalado, por lo que los valores del alcance de escalado se encuentran dentro de una dimensión de alcance de una imagen y por lo que $r_{rot}(r)$ es un vector de distancia de rotación dependiente del alcance (3.11, 3.12);

30

i) transformación de los datos de subapertura mediante IFFT de corto tiempo asociadas al acimut de vuelta al intervalo de tiempo asociado al acimut y al alcance (3.13);

j) combinación de las subaperturas en la dirección del acimut (3.14);

35

k) multiplicación de los datos bidimensionales por una función de desrotación $H_{derot}(t,r)$, definida por

40

$$H_{derot}(t,r) = \exp \left[-j \cdot \pi \cdot K_{rot}(r) \cdot (t - t_{mid})^2 \right]$$

45

$$K_{rot}(r) = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_{rot}(r)}$$

50

en la que t es el vector de tiempo en la dirección del acimut y t_{mid} el tiempo medio de la ráfaga de pulsos (3.15, 3.16);

55

l) transformación de los datos desrotados mediante FFT de largo tiempo asociadas al acimut en el intervalo Doppler asociado al alcance (3.17);

m) seguidamente, multiplicación de los datos bidimensionales por una función de compresión en la dirección del acimut $H_{comp}(f_a,r)$, definida por

60

$$H_{comp}(f_a,r) = W(f_a) \cdot \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{K_{eff}(r)} \cdot f_a^2 \right], \quad -\frac{PRF}{2} + f_{DC} < f_a < \frac{PRF}{2} + f_{DC}$$

65

en la que

$$K_{eff}(r) = K_{scl}(r) - K_{rot}(r).$$

ES 2 353 073 T3

es la tasa de modulación en frecuencia efectiva después de las operaciones de escalado y desrotación, $W(f_a)$ la función de ponderación para la supresión de los lóbulos laterales y f_{DC} el centroide Doppler medio de la adquisición de datos, siendo éste el único punto óptimo en el modo TOPS en el que la aplicación de la función de ponderación para la supresión de los lóbulos laterales proporciona resultados correctos, puesto que todos los blancos se encuentran en la banda de base (3.18, 3.19);

n) transformación de los datos mediante una IFFT de largo tiempo asociada al acimut en los datos de imagen (3.20); y

o) multiplicación de los datos de imagen bidimensionales por una función de fase $H_{fase}(t,r)$, definida por

$$H_{fase}(t,r) = \exp \left[j \cdot \pi \cdot K_t(r) \cdot \left(1 - \frac{r_{scf0}}{r_{rot0}} \right)^2 \cdot (t - t_{mid})^2 \right],$$

en la que

$$K_t(r) = - \frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot (r_{rot}(r) - r_{scf}(r))},$$

para lograr una conservación de fase (3.21, 3.22).

2. Uso del procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 para un procesamiento bidimensional de datos brutos de SAR, SONAR y sísmicos en modos de imagen usando un giro mecánico y/o electrónico del diagrama de la antena en la dirección del acimut y/o de la elevación.

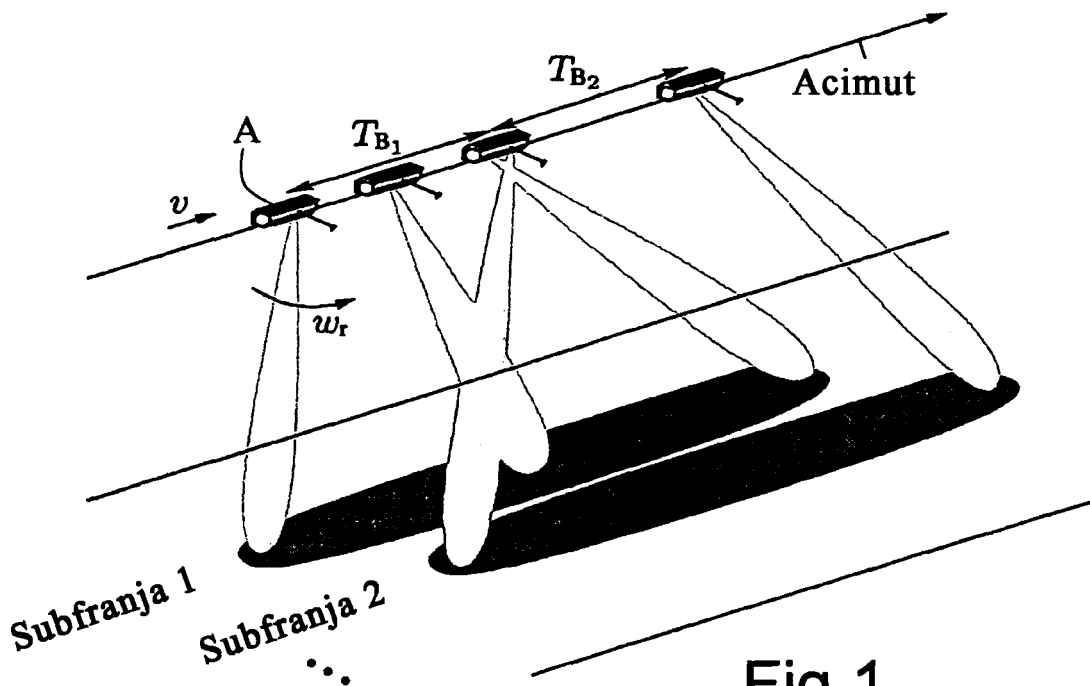


Fig.1

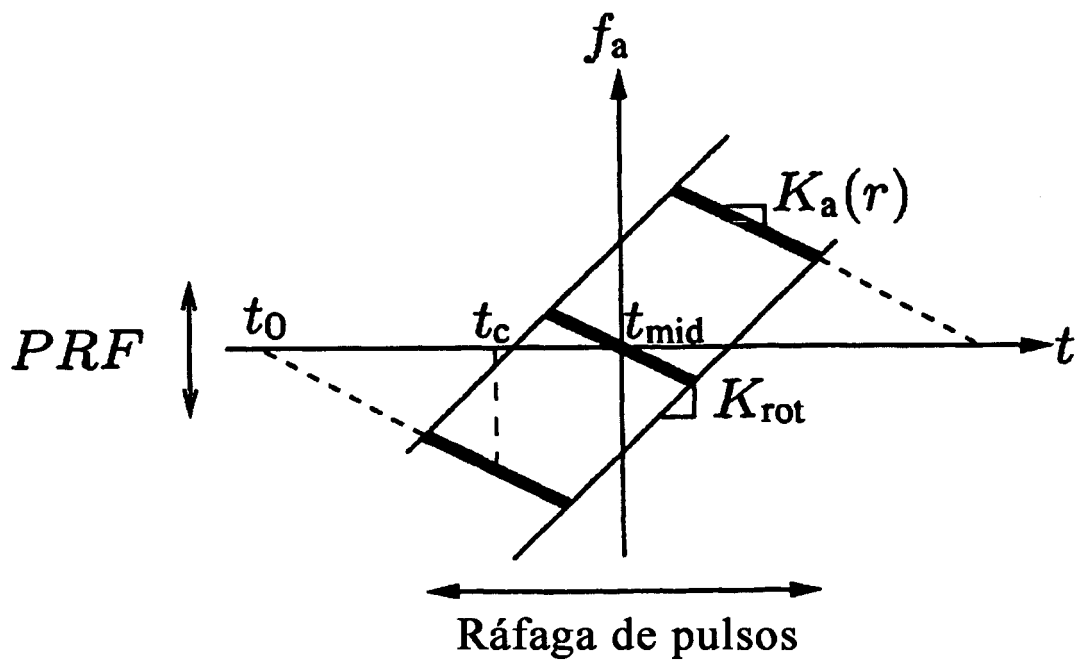


Fig.2

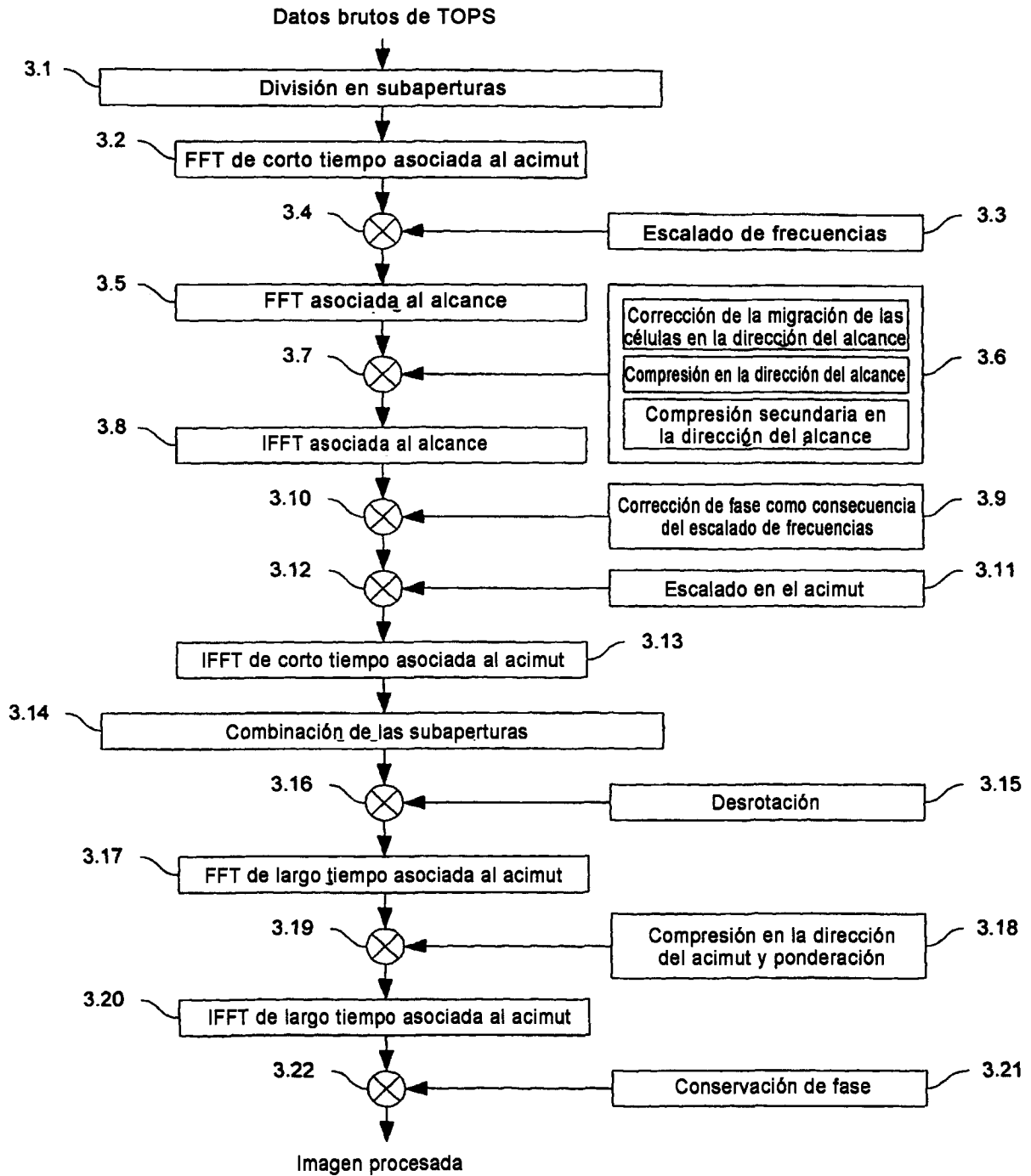


Fig.3

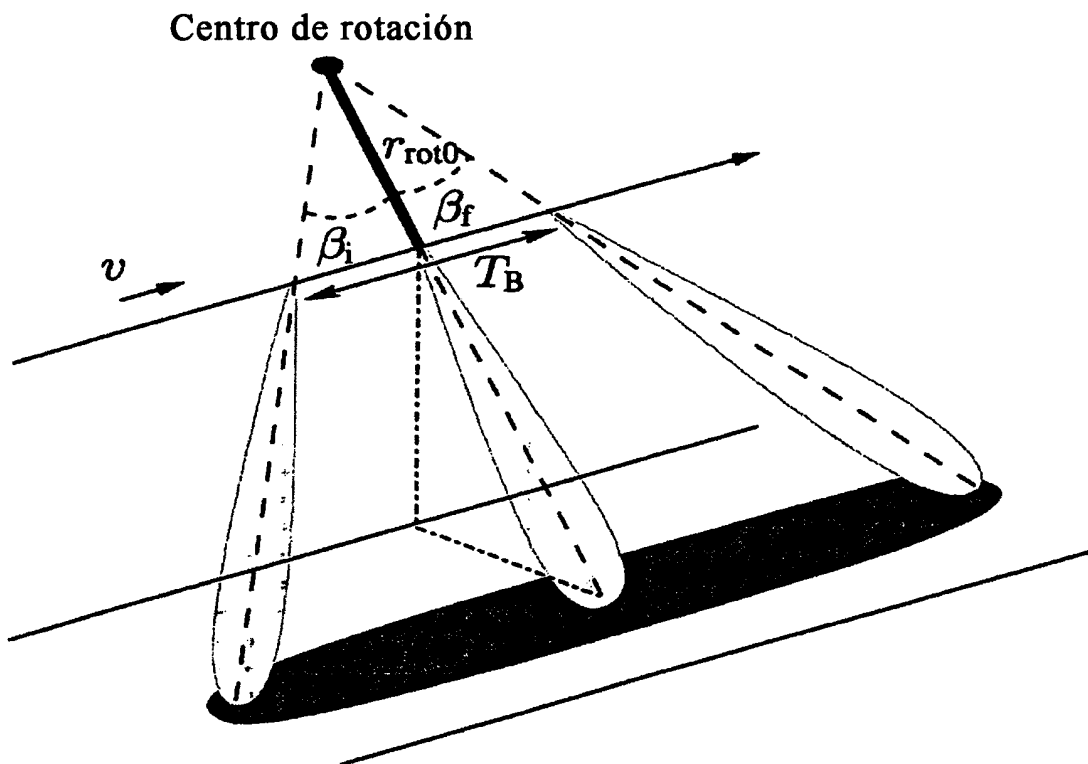


Fig.4

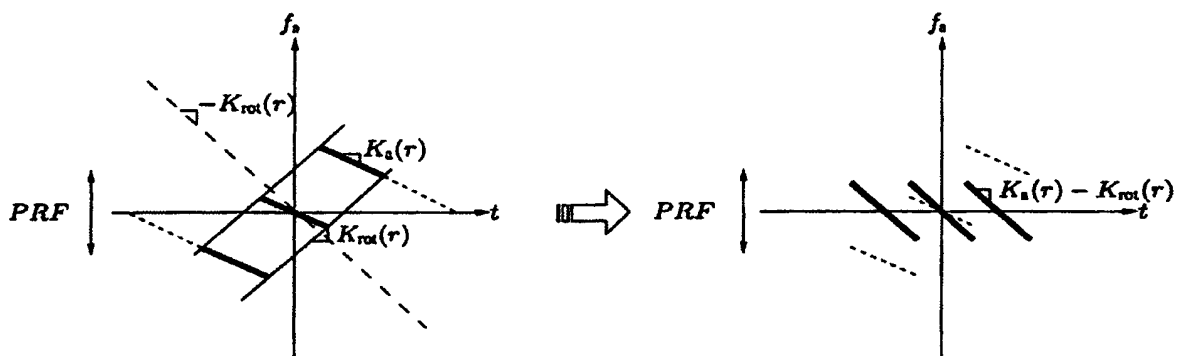


Fig.5

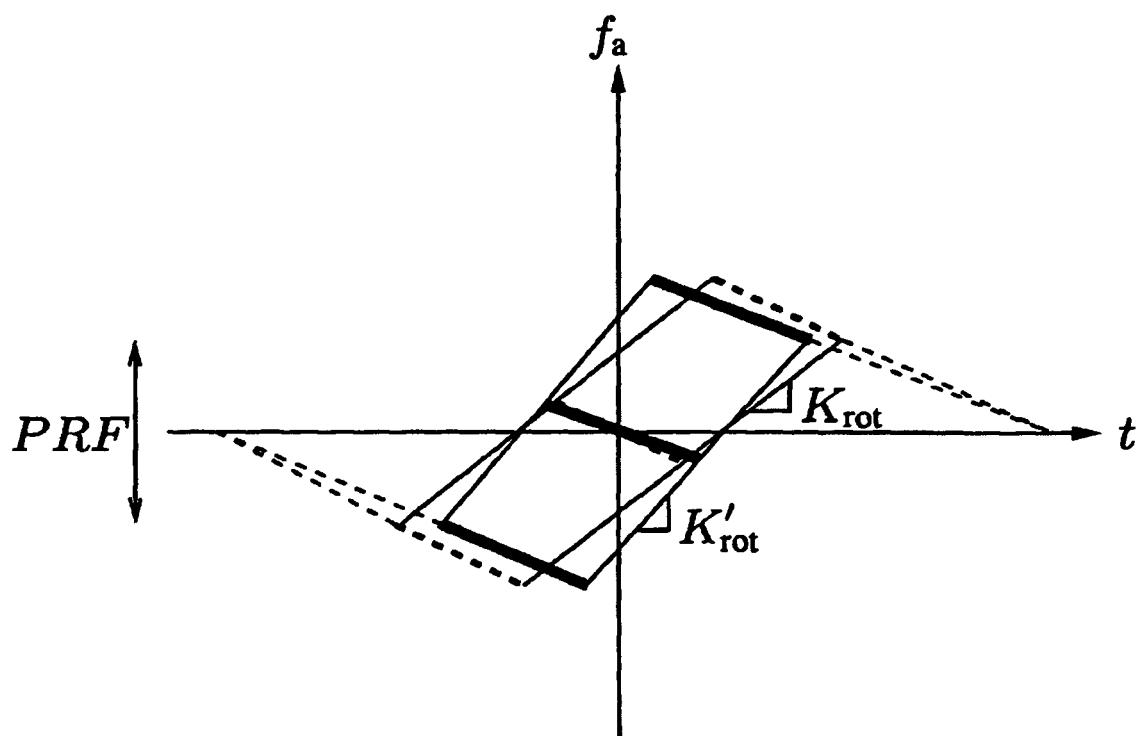


Fig.6

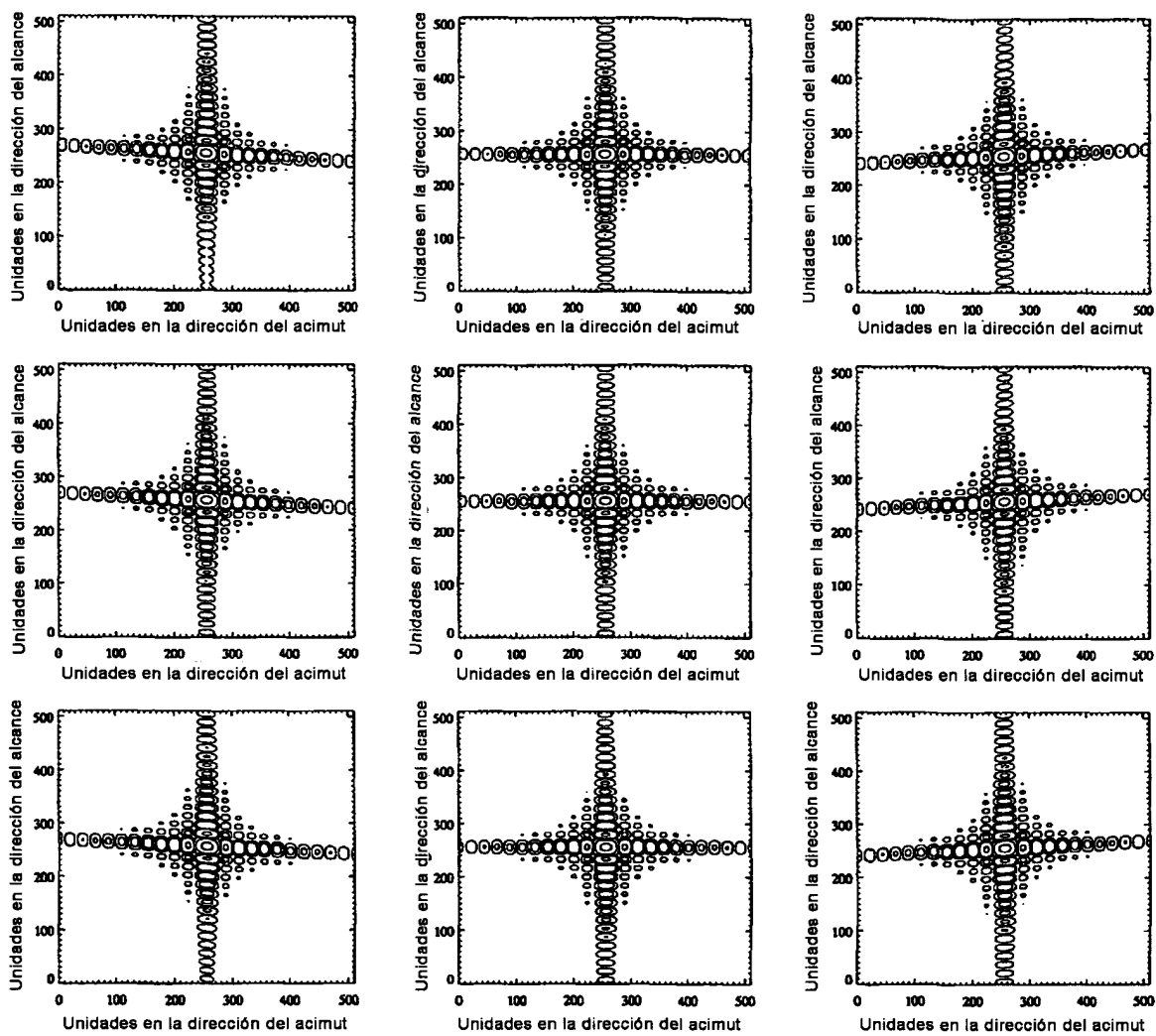


Fig.7