

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 671 924**

51 Int. Cl.:

G01S 13/90 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.07.2013 PCT/EP2013/064570**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.01.2014 WO14012828**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.07.2013 E 13739635 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.03.2018 EP 2875384**

54 Título: **Método para el procesamiento de datos brutos Spotlight SAR de alta resolución obtenidos espacialmente**

30 Prioridad:

**19.07.2012 DE 102012212743
10.10.2012 US 201261711894 P**

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

11.06.2018

73 Titular/es:

**DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND
RAUMFAHRT E.V. (100.0%)
Linder Höhe
51147 Köln, DE**

72 Inventor/es:

**PRATS, PAU;
SCHEIBER, ROLF;
RODRÍGUEZ-CASSOLÀ, MARC y
MITTERMAYER, JOSEF**

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 671 924 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 para el procesamiento de datos brutos Spotlight SAR de alta resolución obtenidos espacialmente

- 5 La invención se refiere a un procedimiento para el tratamiento de datos brutos SAR («Synthetic Aperture Radar», radar de apertura sintética) en datos de imagen exactos, que se registran espacialmente en el modo Spotlight SAR.

1. ¿Qué planteamiento de objetivo y qué problema técnico sirve de base a la invención, qué finalidad tiene la invención?

- 10 A continuación se realiza en primer lugar una breve introducción al SAR y modo Spotlight de un SAR para el fijo y deslizante (starring o sliding) de un SAR. Un radar con apertura sintética, acortado SAR («Synthetic Aperture Radar»), es un instrumento para la teledetección, que se usa de manera creciente en la reproducción, supervisión y examen de la superficie de la tierra. Un sistema de este tipo se compone de una plataforma portante, que se mueve
15 con una velocidad constante sobre la superficie de la tierra, una antena, que mira en una dirección ortogonalmente respecto a la dirección de movimiento, es decir, ortogonalmente al movimiento, y un sistema de radar coherente, que emite periódicamente con una frecuencia de repetición de pulso («pulse repetition frequency», PRF) impulsos de ondas electromagnéticas de alta frecuencia.

- 20 La dirección del movimiento de la plataforma portante se designa como dirección de acimut y la dirección ortogonal, que está orientada de forma oblicua hacia abajo, se designa como dirección de distancia o también como dirección de rango. En el modo de funcionamiento normal SAR, que se designa como modo de reproducción de bandas o también como modo Stripmad, al sobrevolar un área a observar se reproduce una banda con la longitud del trayecto sobrevolado. La anchura de banda depende entre otros de la longitud de la ventana de tiempo en la que se reciben
25 los ecos de radar dispersados de vuelta de los impulsos emitidos. Los ecos recibidos se transforman (mezclan) en frecuencia, demodulan, digitalizan y se depositan en una memoria de señales de eco bidimensionales como así denominados datos brutos.

- 30 Cada tratamiento SAR comprende esencialmente una compresión de distancia, una corrección de la variación de distancia al objetivo conocida también como migración de células de rango y una compresión de acimut. La resolución geométrica en la dirección de distancia es una función de la anchura de banda de los impulsos de radar emitidos. Para mejorar esta resolución se modulan anteriormente los impulsos emitidos, para lo que en la mayoría de los casos se usa una modulación de frecuencia lineal, que también se presupone a continuación siempre. La compresión de distancia significa un filtrado de las señales recibidas en la dirección de distancia conforme a la teoría
35 de filtro óptimo («matched filter»), por lo que se comprimen las señales expandidas temporalmente en impulsos.

- La variación de distancia al objetivo (migración de rango) es una consecuencia de la modificación de la distancia entre la antena y el objetivo puntual durante la formación de la apertura sintética. La corrección de la migración de rango corrige la variación de distancia de los ecos que pertenecen a objetivos puntuales en la memoria de ecos de
40 datos brutos bidimensionales.

- La compresión de pulsos en la dirección acimutal según la teoría de filtro óptimo se corresponde con la formación de la apertura sintética. La modulación de acimut es asimismo una consecuencia de la variación de distancia entre la antena y el objetivo durante el vuelo de paso de la plataforma portante. El filtrado óptimo significa una suma
45 coherente de todos los ecos que pertenecen a una posición de acimut. Cuando la variación de distancia al objetivo se corrige antes de la compresión de acimut, la compresión de acimut se puede materializar mediante una función de filtrado unidimensional.

- Spotlight-SAR fijo (starring) y Spotlight-SAR deslizante (sliding) son tipos de funcionamiento de sistemas SAR, que permiten una resolución geométrica significativamente más elevada. En el modo Spotlight se controla la antena durante todo el vuelo de paso, de modo que esta ilumina una superficie de escena igual (mancha; spot), se gira así
50 correspondientemente en el acimut según se muestra en la figura 1. De este modo se puede mejorar la resolución de acimut en comparación al modo de reproducción de bandas convencional. Sin embargo, las dimensiones de escena observadas se reducen drásticamente. En el modo Spotlight deslizante, el centro de rotación no es el centro de la antena, sino más lejos de la escena iluminada, de modo que se puede cubrir un área de acimut mayor que en el caso Spotlight.

- Para la señal de datos brutos Spotlight, la anchura de banda de escena es mayor que la frecuencia de repetición de pulsos PRF del registro de datos. Las propiedades de la señal SAR se pueden representar en un diagrama de tiempo-frecuencia. La figura 2 muestra la frecuencia Doppler de tres objetivos puntuales con la misma distancia oblicua (línea en negrita). La abscisa se corresponde con el tiempo de acimut y la ordenada con la frecuencia instantánea. Dado que cada vez se ilumina la misma superficie de escena, se observan todos los objetivos durante toda la duración. Esto tiene la consecuencia de que la anchura de banda de escena comprende varios intervalos PRF. Por consiguiente son necesarios procedimiento que tengan en cuenta esta subexploración de la señal de
60 acimut. El tratamiento de acimut necesita por ello una atención especial, dado que el filtro óptimo convencional en la dirección de acimut requiere un relleno con ceros (zero-padding) en el dominio de frecuencia de acimut, para

satisfacer la gran anchura de banda de escena.

5 En las publicaciones existen métodos convencionales para el procesamiento de datos Spotlight-SAR espaciales y trabajan satisfactoriamente hasta una duración de observación de acimut determinada. Con duración creciente se mejora la resolución, no obstante, adquieren importancia otros efectos y se deben tener en cuenta. Algunos de ellos se conocen y se han desatendido hasta ahora para los sistemas Spotlight SAR o sólo se tienen en cuenta de forma aproximada, otros de nuevo todavía no están descritos en las publicaciones.

10 Un primer efecto a tener en cuenta es la curvatura de la órbita. Para tiempos de observación largos el histórico de fase de la señal de acimut ya no es puramente hiperbólico, como se supone por la mayoría de los algoritmos de procesamiento. Por consiguiente se necesita una corrección para evitar un desenfoque y errores de fase.

15 Un segundo efecto se refiere al movimiento de la plataforma durante la emisión de la señal chirp. Aunque la duración de esta señal de emisión se sitúa en el rango de menos de diez microsegundos, la plataforma se mueve algunos centímetros. Si no se aplica una corrección para tener en cuenta este movimiento, la consecuencia son errores de fase y un empeoramiento de la resolución en ambas direcciones espaciales (distancia y acimut). Si el efecto es despreciable, se habla de la así denominada aproximación de arranque-parada. A este respecto se considera que la plataforma no se mueve durante la emisión y la recepción de la señal. En la literatura se usa la aproximación de arranque-parada («stop-and-go») también para el caso de que el satélite se mueve entre la emisión del pulso y la recepción del eco, lo que se corresponde para sensores espaciales de un recorrido de algunas decenas de metros (aproximación de arranque-parada slow time). Este efecto sólo se corresponde con un desplazamiento en la dirección de acimut que presenta una dependencia de la distancia, pero se puede corregir fácilmente. El efecto es por consiguiente inofensivo y diferente al efecto aquí descrito, que tiene en cuenta el movimiento de la antena durante la emisión y recepción de las señales. Para diferenciar claramente los dos efectos, lo último se designa como aproximación de arranque-parada fast time.

Finalmente un tercer efecto se provoca por la troposfera. Esto condiciona un retardo adicional y desfase de la señal, que varía debido a la geometría de observación variable dentro de la apertura sintética y provoca un desenfoque y error de fase, si no se corrigen.

30

2. Estado de la técnica

35 Ninguno de los métodos conocidos actualmente para el procesamiento de datos Spotlight-SAR tiene en cuenta todos los problemas descritos para conseguir un enfoque perfecto y la resolución deseada. Así en todos los procesadores descritos en los documentos EP-B-0795762, US-B-6.222.933, EP-B-0924534, EP-B-2167989 y [R1] se asume un histórico de fase puramente hiperbólico y se desprecian la curvatura de la órbita así como los otros efectos descritos arriba.

40 Sin embargo hay algunas publicaciones que se encargan del problema de la órbita curvada. El trabajo [R2] calcula numéricamente un núcleo de procesamiento que optimiza el tratamiento SAR conforme a una normalización L2. El procedimiento en [R3] es otra posibilidad para la manipulación de la órbita curvada. Mientras que [R3] aborda el problema de la aproximación de arranque-parada slow time, actualmente no hay ningún procedimiento que tenga en cuenta la propiedad de arranque-parada fast time y tampoco ninguno para la troposfera.

45 El efecto de arranque-parada fast time es completamente conocido en sensores FMCW («frequency modulation continuous wave», onda continua de modulación de frecuencia) y existen distintos procedimientos de compensación en la literatura [R4]. La aproximación de arranque-parada slow time, se analiza en [R1] para sistemas espaciales.

50 Finalmente los efectos de la troposfera también se tratan en [R1], no obstante, sólo se aproximan a un desplazamiento constante de la imagen SAR en la dirección de distancia. La variación de la troposfera dentro de la apertura sintética se desatiende y no se trata en ninguna publicación.

55 El método para el enfoque exacto de los datos brutos Spotlight-SAR espaciales, de alta resolución se describen en relación con el algoritmo de «Extended Chirp Scaling» (ECS) y a saber en su forma adaptada para datos Spotlight. Éste usa subaperturas para tener en cuenta la gran anchura de banda de escena (véase US-B-6.222.933 y EP-B-0924534) así como un procedimiento de scaling y SPECAN de acimut para el procesamiento de acimut (véase EP-B-0795762). Se señala que también se pueden usar otros núcleos de procesamiento, p. ej. el algoritmo de rango Doppler o el algoritmo de número de ondas (omega-k) o cualquiera basado en la transformación chirp-Z. Asimismo para el procesamiento de datos en modo Spotlight deslizante se puede realizar el tratamiento de acimut con la ayuda de scaling de acimut de banda base [R4] (véase el documento EP-B-2167989).

60

3. Desventajas del estado de la técnica

65 Ninguno de los métodos conforme al estado de la técnica tiene en cuenta así los efectos relevantes para datos Spotlight-SAR de alta resolución.

Los métodos expuestos en las publicaciones para el procesamiento de datos Spotlight SAR suponen un histórico de fase hiperbólico y desprecian otros efectos (véanse los documentos US-B-6.222.933 y EP-B-0924534). En [R2] se describe un procedimiento para tener en cuenta la órbita curvada; pero este procedimiento usa una evaluación numérica y una inversión de la descomposición de valores singulares (SVD, «Singular Value Decomposition»). En [R3] se describe otro método en base a la linealización del trayecto curvado. Ninguno de estos procedimientos es rectilíneo y ambos desprecian la variancia de acimut de la función de impulso (IRF, «impulse response function»), que depende por su lado de la órbita curvada. Si se usan estos métodos, la consecuencia podrían ser el desenfoque de acimut y errores de fases para objetivos apartados de la posición de referencia, especialmente en el caso de tiempos de observación largos y la variancia de acimut ligado a ello de la curvatura de órbita o IRF.

El efecto de arranque-parada fast time se ha tratado en algunas publicaciones [R4]. En [R4] se describe una solución para radares FMCW, no obstante, en el presente caso se necesita una solución para un sistema de radar pulsado. En [R5] se describe una solución para un radar pulsado, sin embargo, en relación con un procesamiento de dominio de tiempo que es muy intensivo en cálculos y por consiguiente ineficiente. La solución aquí presentada se propone en el marco de un procesador eficiente basado en FFT.

En cuanto a la troposfera, en [R1] sólo se tiene en cuenta un desplazamiento constante, en donde se desprecia la variación dentro de la apertura sintética.

4. Objeto y sumario de la invención

El objetivo de la presente invención es resolver las insuficiencias de los procedimientos del estado de la técnica para el procesamiento de datos brutos Spotlight SAR. El objetivo primario de la invención es un método exacto y eficiente para el procesamiento de datos brutos Spotlight SAR espaciales.

Para la solución de este objetivo con la invención se propone un procedimiento para el tratamiento de datos brutos Spotlight SAR de alta resolución, que está caracterizado según la invención por

- una adaptación del histórico de distancia a un desarrollo hiperbólico apropiado para el tratamiento SAR eficiente teniendo en cuenta

- una función para la corrección geométrica bajo inclusión numérica del desarrollo orbital medido realmente usando una corrección de fase dependiente del acimut (p. ej. conforme a las etapas 3.3 y 3.4) y

- una función para la corrección de los efectos del tiempo de propagación constantes y variables dentro del tiempo de iluminación en la troposfera usando una corrección de fase igualmente dependiente del acimut (p. ej. conforme a las etapas 3.5 y 3.6).

En una configuración ventajosa de la invención se puede realizar una compensación del movimiento relativo del sensor respecto al objetivo, que se realiza durante la emisión y la recepción del pulso de radar modulado en frecuencia (p. ej. conforme a las etapas 3.8 y 3.9). En este punto se menciona que las etapas del procedimiento aquí descritas también se pueden realizar sin las etapas del procedimiento según la reivindicación 1.

Es ventajoso que se use un procedimiento basado en chirp scaling, eventualmente combinado con un procedimiento SPECAN, en donde se realiza una compensación de la aproximación de Taylor de 2º grado del espectro de frecuencia 2D (p. ej. conforme a las etapas 3.10 y 3.11). En este punto se menciona que esta variante del procedimiento según la invención también se puede realizar independientemente de las etapas del procedimiento de la reivindicación 1 y/o de la reivindicación 2.

En otra configuración ventajosa de la invención puede estar prevista una compensación adicional geométrica y/o condicionada por el tiempo de propagación de señales para la ampliación del rango de validez de la corrección geométrica de una línea en el centro de la distancia a un área extendida (p. ej. conforme a las etapas 3.21-3.24). En este punto se menciona que las etapas del procedimiento aquí descritas también se pueden realizar sin las etapas del procedimiento según las reivindicaciones 1 a 3.

En otra configuración ventajosa de la invención puede estar previsto que se realicen las siguientes etapas a tratar de forma secuencial:

Transformación de los datos de subapertura presentes en el dominio de tiempo al dominio de frecuencia de distancia mediante FFT en la dirección de distancia (véase la etapa 3.2);

multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{OC0,1}(t, f_r; r_{ref})$ dada por

$$H_{OC0,1}(t, f_r; r_{ref}) = \exp \left[j \frac{4\pi}{c} \cdot (f_0 + f_r) \cdot \Delta r_{residual}(t, r_{ref}) \right], \quad (1)$$

donde t designa el tiempo de acimut, c la velocidad de la luz, f_r el vector de frecuencia de distancia, f_0 la frecuencia central y $\Delta r_{residual}(t; r_{ref})$ la diferencia entre el histórico de distancia real y su aproximación hiperbólica para una distancia de referencia, lo último descrito por

$$\Delta r_{residual}(t; r_{ref}) = \left| \bar{p}_{SAT}(t) - \bar{p}_{bc}(t) \right| - \sqrt{r_{ref}^2 - v_{eff, bc}^2(t) \cdot (t - t_0)^2}, \quad (2)$$

donde $p_{SAT}(t)$ designa la posición de satélite como función del tiempo en un sistema de coordenadas terrestres geocéntricas (ECEF, «Earth-centered-Earth-fixed coordinates») y $p_{bc}(t)$ la posición del punto de referencia en el centro del lóbulo de antena para cada instante de acimut t igualmente en coordenadas ECEF. $v_{eff, bc}$ es la velocidad efectiva para el punto de referencia en el instante de acimut t y t_0 es el así denominado tiempo cero-Doppler del objetivo, en donde ambos se calculan numéricamente a partir de los vectores de estado del órbita y las coordenadas del objetivo (véanse las etapas 3.3 y 3.4);

15 multiplicación de los datos bidimensionales con una función de fase $H_{troposfera}(t, f_r; r_{ref})$ dada por

$$H_{troposfera}(t, f_r; r_{ref}) = \exp \left[j \frac{4\pi}{c} \cdot (f_0 + f_r) \cdot \Delta r_{troposfera}(t; r_{ref}) \right], \quad (3)$$

donde $\Delta r_{troposfera}(t; r_{ref})$ designa un retardo de la señal dependiente del acimut, provocado por la troposfera, en el trayecto de propagación que se puede calcular aproximadamente con

$$\Delta r_{troposfera}(t; r_{ref}) = \frac{Z \cdot \exp \left[\frac{-h(r_{ref})}{H} \right]}{\cos \theta(r_{ref}) \cos \alpha(t; r_{ref})}, \quad (4)$$

donde Z designa el retardo de la señal en el zenit en metros, H el espesor de troposfera, $h(r_{ref})$ la altura del objetivo, θ el ángulo de observación (off-nadir) y α el ángulo de acimut durante la apertura sintética, que de nuevo se puede determinar numéricamente a partir de los datos de órbita y el punto de referencia en el centro del lóbulo de antena en cada instante de acimut t . Z y H son parámetros de modelo cuyos valores se pueden aproximar relativamente bien con 2,3 m y 6 km para cada punto sobre la tierra, pero en donde también se pueden usar valores más exactos u otros modelos, si están presentes (véanse las etapas 3.5 y 3.6);

transformación de los datos de subapertura mediante una FFT acimutal corta en el dominio de frecuencia bidimensional (véase la etapa 3.7);

35 multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{ss}(f_a, f_r)$ dada por

$$H_{ss}(f_a, f_r) = \exp \left[j \cdot 2\pi \cdot f_a \cdot \tau_{ss}(f_r) \right], \quad (5)$$

donde τ_{ss} designa el desplazamiento de acimut dependiente de la frecuencia de distancia:

$$\tau_{ss}(f_r) = \left(f_r + \frac{B_r}{2} \right) \frac{\tau_p}{B_r}, \quad (6)$$

con τ_p igual a la duración de pulso (chirp), B_r igual a la anchura de banda chirp y f_r el vector de frecuencia de distancia dado por:

$$f_r \in \left[-\frac{f_s}{2}, \frac{f_s}{2} \right], \quad (7)$$

con f_s como frecuencia en la dirección de distancia. Para un down-chirp se debe usar el vector reflejado de (8) (véanse las etapas 3. 8 y 3. 9), es decir $\tau_{ss, down-chirp}(f_r) = \tau_{ss, up-chirp}(-f_r)$.

50 En el caso del uso de un núcleo de procesamiento en base a chirp scaling (p. ej. «Extended Chirp Scaling», ECS) para el tratamiento variante en distancia se ofrecen las siguientes etapas de procedimiento adicionales en la configuración preferida de la invención:

multiplicación de los datos bidimensionales con una función de fase $H_{\Delta ECS}(f_a, f_r)$ dada por

$$H_{\Delta ECS}(f_a, f_r) = \exp[j \cdot \phi_{\Delta ECS}], \quad (8)$$

5 con

$$\phi_{\Delta ECS} = \frac{4\pi}{\lambda} r_{ref} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_{eff}}\right)^2} + (\phi_0(f_a) + \phi_1(f_a) \cdot f_r + \phi_2(f_a) \cdot f_r^2), \quad (9)$$

10 donde el segundo sumando en la ecuación (9) se corresponde con la serie de Taylor de la señal hasta el elemento cuadrático en la frecuencia de distancia, según se ha usado para derivar el procedimiento de chirp scaling (e implícitamente también ECS) (véanse las etapas 3.10 y 3.11). Los coeficientes son:

$$\phi_0(f_a) = -\frac{4\pi}{\lambda} r_{ref} \beta(f_a), \quad (10)$$

$$15 \quad \phi_1(f_a) = -\frac{4\pi}{c} \frac{r_{ref}}{\beta(f_a)}, \quad (11)$$

$$\phi_2(f_a) = -\frac{2\pi}{c^2} \frac{\lambda r_{ref} \cdot (\beta^2(f_a) - 1)}{\beta^3(f_a)}, \quad (12)$$

20 donde para el término de modulación acimutal es válido:

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_{eff}}\right)^2}; \quad (13)$$

25 transformación de los datos de subapertura de vuelta al dominio de frecuencia de acimut mediante una FFT inversa en la dirección de distancia (véase la etapa 3.12).

Asumiendo que el procesamiento variante en distancia ya se ha realizado y los datos están presentes en el dominio de frecuencia de acimut de tiempo de distancia, en otra configuración ventajosa de la invención se puede continuar con las siguientes etapas del procedimiento:

30 transformación de la subapertura de vuelta al dominio de tiempo de acimut mediante FFT acimutal inversa corta (véase la etapa 3.21);

multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{OCO,2}(t, \tau)$ dada por

$$35 \quad H_{OCO,2}(t, \tau) = \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (\Delta r_{residual}(t; r) - \Delta r_{residual}(t; r_{ref}))\right], \quad (14)$$

en donde $\Delta r_{residual}(t; r)$ se debe calcular numéricamente (véanse las etapas 3.22 y 3.23).

40 Transformación de los datos de subapertura de vuelta al dominio de frecuencia de acimut mediante FFT acimutal corta (véase la etapa 3.24);

En complementación de las etapas de tratamiento mencionadas anteriormente, en el procesamiento de los datos brutos Spotlight SAR con un procedimiento de chirp scaling y un método SPECAN puede estar previsto adicionalmente realizar de forma secuencial las siguientes etapas:

45 subdivisión de los datos brutos Spotlight SAR en subaperturas acimutales (véase la etapa 3.1);
tratamiento secuencial según las etapas 3.2 a 3.12;

50 multiplicación de la señal por la función de chirp scaling H_{cs} (véanse las etapas 3.13 y 3.14), dada por

$$H_{cs}(f_a, \tau; r_0) = \exp[-j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot a(f_a) \cdot (\tau - \tau_{ref}(f_a))]; \quad (15)$$

transformación de la señal en el dominio de frecuencia bidimensional mediante FFT en la dirección de distancia (véase la etapa 3.15);

5

multiplicación de la señal por la función de fase H_{rcmc} (véanse las etapas 3.16 y 3.17) dada por

$$H_{rcmc}(f_a, f_r; r_{ref}) = \exp\left[-j \frac{\pi}{K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a))} f_r^2\right] \cdot \exp\left[j \frac{4 \cdot \pi}{c} \cdot r_{ref} \cdot a(f_a) \cdot f_r\right] \quad (16)$$

10 para realizar la corrección de la variación de distancia, la compresión de distancia y la compresión de distancia de segundo orden;

transformación de la señal en el dominio de frecuencia de acimut del tiempo de distancia mediante FFT inversa en la dirección de distancia (véase la etapa 3.18);

15

multiplicación de la señal por la función de corrección de fase H_{corr} (véanse las etapas 3.19 y 3.20) dada por

$$H_{corr}(f_a; r_0) = \exp\left[j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a)) \cdot a(f_a) \cdot \left(\frac{2}{c} \cdot (r_0 - r_{ref})\right)^2\right]; \quad (17)$$

20 continuación secuencial del tratamiento según las etapas 3.21 a 3.24;

multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{specan,1}(f_a; r_0)$ (véanse las etapas 3.25 y 3.26) dada por

25

$$H_{specan,1}(f_a; r_0) = \exp\left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_0 \cdot (\beta(f_a) - 1)\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{\pi}{K_{sci}} \cdot f_a^2\right]; \quad (18)$$

transformación de las subaperturas en el dominio de tiempo de acimut mediante FFT acimutal inversa corta (véase la etapa 3.27);

30 multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{specan,2}(f_a; r_0)$ (véanse las etapas 3.28 y 3.29) dada por

$$H_{specan,2}(t) = \exp\left[-j \cdot \pi K_{sci} \cdot t^2\right]; \quad (19)$$

35 composición de las subaperturas acimutales (véase la etapa 3.30);

multiplicación de los datos bidimensionales por una función para la supresión del lóbulo lateral en la dirección de acimut (véase las etapas 3.31 y 3.32);

40 transformación de los datos bidimensionales en el dominio de frecuencia mediante FFT acimutal larga (véase la etapa 3.33);

multiplicación de los datos bidimensionales por una función para la corrección del diagrama de antena de acimut (véase las etapas 3.34 y 3.35);

45

multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{specan,3}(f_a)$ (véanse las etapas 3.36 y 3.37) dada por

$$H_{specan,3}(f_a) = \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f_a^2}{K_{sci}}\right]. \quad (20)$$

50

El uso del procedimiento según la invención según una de las reivindicaciones 5 a 7 también es apropiado para el tratamiento bidimensional de datos brutos SAR espaciales en los modos de registro Stripmap, ScanSAR y TOPS.

55 En el procedimiento según la invención se expone un tratamiento de subapertura para evitar un aliasing de acimut según se expone en el documento US 6.222.933 B1 así como EP 0924534 B1. Por consiguiente se puede usar una

PRF más baja, dado que el teorema de exploración sólo se debe garantizar dentro de la supabertura en la dirección de acimut. Dentro de cada subapertura se añaden varias etapas al desarrollo del procesamiento convencional, a fin de tener en cuenta los efectos relevantes descritos anteriormente.

5 Según la presente invención se tiene en cuenta la órbita curvada mediante una corrección de fase y un desplazamiento de la señal en la dirección de distancia. La corrección depende del acimut y se calcula p. ej. numéricamente a partir de la geometría del registro de datos para un punto en el centro de la escena. Esta etapa se designa como "compensación de órbita de primer orden" y se realiza para una distancia de referencia. Dentro de la misma etapa de procesamiento también se puede realizar una corrección de fase dependiente del acimut y desplazamiento para tener en cuenta el retardo en la troposfera. En la mayoría de los casos es suficiente usar un modelo de troposfera para el cálculo del retardo, según se muestra p. ej. en [R1], en donde en el presente caso se ha recogido la dependencia de acimut adicionalmente en el modelo. Dado que estos dos procedimientos se realizan en el dominio de tiempo de acimut y el lóbulo de antena es habitualmente muy estrecho para sistemas espaciales se tiene en cuenta implícitamente la variancia de acimut de la función de impulso IRP, lo que conduce a una mejor solución comparado con [R2] y [R3].

Luego se puede realizar, deseado falsamente, la corrección de la aproximación de arranque-parada de forma eficiente como multiplicación de fase en la señal en el dominio de frecuencia bidimensional.

20 Después de estas tres correcciones se sigue el tratamiento de subaperturas como habitualmente, en donde cada núcleo de procesamiento desarrollado para datos SAR Stripmap es apropiado para realizar las etapas de compresión de distancia, corrección de la modificación de distancia a objetivo y compresión de distancia secundaria. En el ejemplo de realización descrito se usa el algoritmo de Extended Chirp Scaling (ECS), dado que permite un tratamiento SAR sin interpolaciones y por consiguiente es igualmente eficiente y exacto. No obstante, dado que en el ECS se realiza la interrupción en el dominio de frecuencia bidimensional después del elemento de segundo orden, se debe realizar otra corrección, conforme a una función de fase sencilla. Finalmente podría existir la necesidad de una "compensación orbital" de segundo orden, lo que de nuevo se corresponde con una corrección de fase, dado que aquella de primer orden sólo era válida exactamente para una distancia de referencia. Luego se realiza el tratamiento en acimut mediante scaling de acimut y SPECAN, según se describe en el documento EP 0795762 B1, US 6.222.933 B1 así como EP 0924534 B1, según lo cual resulta la imagen enfocada.

En conjunto de esta manera se consiguen las siguientes ventajas con el procedimiento según la invención:

35 - La órbita curvada se tiene en cuenta de forma eficiente y adecuada para una distancia de referencia, de modo que además se pueden usar los algoritmos convencionales, que asumen un histórico de fase hiperbólico. El método propuesto tiene en cuenta la variancia de acimut de la corrección.

40 - La influencia de la troposfera se tiene en cuenta y corrige de forma eficiente y adecuada. El método propuesto también tiene en cuenta la variancia de acimut de la corrección dentro de la apertura sintética.

- La aproximación de arranque-parada fast-time se tiene en cuenta y corrige de forma eficiente y adecuada.

45 - Las tres correcciones descritas arriba se realizan como etapas de pretratamiento, de modo que cualquier núcleo se puede usar para el procesamiento SAR variante en distancia, sea ECS, rango-Doppler, omega-k, transformada chirp-Z, etc.

50 - Se realiza una compensación orbital de segundo orden para posibilitar una corrección dependiente de la distancia de la órbita curvada y de la troposfera. Debido a la gran distancia entre el sensor y la escena no se necesita esta etapa en general en el caso de sensores espaciales de este tipo.

5. Descripción detallada de un ejemplo de realización preferido

A continuación se explica más en detalle en referencia al dibujo un ejemplo de realización de la invención. En detalle, se muestra:

55 la figura 1, esquemáticamente la geometría de registro válida básicamente para Spotlight SAR,

la figura 2, el diagrama de tiempo-frecuencia para el modo Spotlight,

60 las figuras 3a y 3b, el diagrama de flujo de un ejemplo de realización del procedimiento según la invención,

la figura 4, en forma de un diagrama el error de la aproximación hiperbólica, calculado numéricamente para un objetivo en el centro de la escena,

65 las figuras 5a a 5i, diagramas de contorno para los resultados de procesamiento de nueve objetivos simulados, y a saber en las figuras 5a a 5c en el área próxima, en las figuras 5d a 5f en el centro de la distancia y en las figuras 5g

a 5i en el área alejada,

las figuras 6a a 6e, diagramas de contorno para los resultados de procesamiento de cinco reflectores, registrados por TerraSAR-X, en donde no se ha efectuado ninguna mejora según la invención, de modo que son evidentes los efectos de desenfoque en la dimensión de acimut y de distancia, y

las figuras 7a a 7e, los diagramas de contorno para los resultados de procesamiento de cinco reflectores, registrados por TerraSAR-X y procesados según el procedimiento según la invención, en donde los reflectores se sitúan en el centro de la distancia, y a saber a excepción del primer reflector que se sitúa en una esquina en la zona cercana.

Las figuras 3a y 3b, a las que se remite a continuación a través de la figura 3, muestran en un diagrama de flujo esquemático las etapas de procedimiento individuales en una realización preferida del procedimiento según la presente invención. En las ecuaciones que se refieren a la figura 3, t es el vector de tiempo en la dirección de acimut (es decir, el tiempo slow), τ el tiempo en la dirección de rango también designada como dirección de distancia (es decir, el tiempo de propagación del eco), f_a el vector de frecuencia de acimut (es decir, la frecuencia Doppler), f_r la frecuencia de distancia, f_0 la frecuencia central, r_0 la distancia a un objetivo puntual, r el vector de distancia, λ la longitud de onda, c la velocidad de la luz y $j = \sqrt{-1}$ es la unidad de valor complejo.

Los datos brutos Spotlight se subdividen en la etapa 3.1 primeramente en subaperturas, conforme al documento US 6.222.933 B1 así como EP 0924534 B1. Durante el tratamiento se debe explorar de forma suficiente la anchura de banda de acimut B_a de un objetivo puntual, que depende de la anchura de haz de antena. No obstante, toda la anchura de banda de acimut es mayor que la anchura de banda máxima instantánea B_a , ya que la posición de acimut de un objetivo provoca un offset de frecuencia. La frecuencia instantánea se da por la ecuación (21):

$$f_i = K_{rot} \cdot t = -\frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot r_{roto}} \cdot t, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}, \quad (21)$$

donde T es la duración de observación y r_{roto} la distancia de distancia de vectores respecto al centro de rotación dado por la geometría, que se corresponde en el caso Spotlight con el centro de la escena, según se muestra en la figura 1. Cuando se procesan los datos, la frecuencia de repetición de pulso PRF debería ser al menos tan grande como toda la anchura de banda de acimut $B_{a,total}$, a fin de impedir frecuencias de acimut ambiguas durante la corrección de la variación de distancia. La frecuencia de acimut ambiguas producen una pérdida de resolución y un empeoramiento de la imagen enfocada definitiva debido a la aparición de «imágenes fantasma». Mediante el uso del tratamiento de subaperturas es suficiente por ello una frecuencia de repetición de pulso PRF más baja. El cálculo de un tiempo de subapertura T_{sub} está dado por la ecuación (22):

$$T_{sub} \leq \frac{PRF - B_a}{|K_{rot}|}. \quad (22)$$

Según la subdivisión en aperturas en la etapa 3.1 se continua el tratamiento para cada subapertura i con el centroide Doppler $f_{DC,i}$ correspondiente. Para impedir un mal resultado de tratamiento debido al tratamiento de subaperturas, las subaperturas se forman con baja superposición.

A continuación bajo «FFT acimutal corta («Fast-Fourier-Transformation»)» o «IFFT acimutal corta («Inverse-Fast-Fourier-Transformation»)» se entiende la longitud corta mediante aplicación de un tratamiento de subapertura o pequeño número de puntos de operaciones de FFT o IFFT en la dirección de acimut. Después de la reunión de las subaperturas (según se trata a continuación en conexión con la etapa 3.30) se establece de nuevo la longitud completa de la señal de tiempo y por ello las operaciones de FFT finales deben ser una «FFT acimutal larga» o una «IFFT acimutal larga».

En la etapa de tratamiento 3.2 se transforman los datos en el dominio de frecuencia de distancia a través de una FFT en la dirección de distancia. Luego se realiza la compensación orbital de primer orden, para la que se multiplica función $H_{OCO,1}$ especificada en la ecuación (23) (bloque 3.3) por la señal en una primera unidad de multiplicación 3.4:

$$H_{OCO,1}(t, f_r; r_{ref}) = \exp \left[j \frac{4\pi}{c} \cdot (f_0 + f_r) \cdot \Delta r_{residual}(t; r_{ref}) \right]. \quad (23)$$

A este respecto r_{ref} se corresponde con la distancia de referencia y $\Delta r_{residual}(t; r_{ref})$ se calcula numéricamente a partir de los datos de órbita y un punto de referencia en el centro de la escena como sigue:

$$\Delta r_{residual}(t; r_{ref}) = \left| \bar{p}_{SAT}(t) - \bar{p}_{bc}(t) \right| - \sqrt{r_{ref}^2 - v_{eff, bc}^2(t) \cdot (t - t_0)^2}, \quad (24)$$

donde $p_{SAT}(t)$ designa la posición del satélite como función del tiempo en un sistema de coordenadas terrestres geocéntricas (ECEF, «Earth-centered-Earth-fixed coordinates») y $p_{bc}(t)$ la posición del punto de referencia en el centro del lóbulo de antena para cada instante de acimut t , igualmente en coordenadas ECEF. $v_{eff,bc}$ es la velocidad efectiva para el punto de referencia en el instante t y t_0 es el así denominado tiempo cero-Doppler del objetivo, en donde ambos se calculan numéricamente a partir de los vectores de estado de la órbita y las coordenadas del objetivo. La ec. (23) desplaza la envolvente de la señal y también corrige la fase en el valor correspondiente $\Delta r_{residual}(t; r_{ref})$. La figura 4 muestra un ejemplo para esta magnitud para los datos del sensor TerraSAR-X y una duración de registro conforme a una resolución acimutal de 20 cm. El error es mayor de 300° y provocaría el desenfoque y errores de fase si no se corrige.

Luego se realiza una corrección similar, para compensar la variación de la troposfera dentro de la apertura sintética, para lo que la función $H_{troposfera}$ especificada en la igualdad (23) (bloque 3.5) se multiplica por la señal en otra unidad de multiplicación 3.6. Para ello se requiere un modelo para el retardo en la troposfera. Convenientemente se usa y amplía aquel de [R1] para considerar la variación dentro de la apertura sintética.

$$\Delta r_{troposfera}(t; r_{ref}) = \frac{Z \cdot \exp\left[\frac{-h(r_{ref})}{H}\right]}{\cos\theta(r_{ref}) \cos\alpha(t; r_{ref})}, \quad (25)$$

en este caso Z es el retardo de la señal en el zenit en metros, H es el espesor de troposfera, $h(r_{ref})$ es la altura del objetivo, θ el ángulo de observación (off-nadir) y α el ángulo de acimut durante la apertura sintética, que de nuevo se puede determinar numéricamente a partir de los datos de órbita y el punto de referencia en el centro del lóbulo de antena en cada instante de acimut t . Z y H son parámetros de modelo cuyos valores se pueden aproximar relativamente bien con 2,3 m y 6 km para cada punto sobre la tierra, pero en donde también se pueden usar valores más exactos u otros modelos, si están presentes. El parámetro importante es α que produce un histórico de fase adicional, casi cuadrático sobre la señal y por consiguiente provoca el desenfoque, si no se corrige. En cuanto se ha calculado la variación del retardo, esto se puede corregir tanto en cuanto a la envolvente como también la fase de forma similar a la ec. (23):

$$H_{troposfera}(t, f_r; r_{ref}) = \exp\left[j \frac{4\pi}{c} \cdot (f_0 + f_r) \cdot \Delta r_{troposfera}(t; r_{ref})\right]. \quad (26)$$

Por motivos de eficiencia se calculan las funciones de fase (23) y (26) en una etapa común.

Luego una FFT acimutal corta lleva los datos al dominio de frecuencia bidimensional (bloque 3.7), en la que para la asunción de la aproximación de arranque-parada (bloque 3.8) se corrige mediante la ec. (7) y la unidad de multiplicación 3.9:

$$H_{yy}(f_a, f_r) = \exp\left[j \cdot 2\pi \cdot f_a \cdot \tau_{ss}(f_r)\right], \quad (27)$$

donde τ_{ss} designa el desplazamiento de acimut dependiente de la frecuencia de distancia:

$$\tau_{ss}(f_r) = \left(f_r + \frac{B_r}{2}\right) \frac{\tau_p}{B_r}, \quad (28)$$

con τ_p igual a la duración de pulso (chirp), B_r igual a la anchura de banda chirp y f_r el vector de frecuencia de distancia dado por:

$$f_r \in \left[-\frac{f_s}{2}, \frac{f_s}{2}\right], \quad (29)$$

con f_s como frecuencia en la dirección de distancia. Para un down-chirp se debe usar el vector reflejado de (28), es decir, $\tau_{ss,down-chirp}(f_r) = \tau_{ss,up-chirp}(-f_r)$.

Si se usa un algoritmo de chirp scaling como núcleo de procesamiento, p. ej. ECS como en este ejemplo de realización, debido a la interrupción de la función raíz según el elemento cuadrático en el dominio de frecuencia

bidimensional se debe realizar una corrección restante (bloque 3.10). La ecuación (30) describe la corrección restante y se realiza mediante la unidad de multiplicación 3.11.

$$H_{\Delta ECS}(f_a, f_r) = \exp[j \cdot \phi_{\Delta ECS}], \quad (30)$$

5

en donde $\phi_{\Delta ECS}$ se calcula como sigue:

$$\phi_{\Delta ECS} = \frac{4\pi}{\lambda} r_{ref} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_{eff}}\right)^2} + (\phi_0(f_a) + \phi_1(f_a) \cdot f_r + \phi_2(f_a) \cdot f_r^2). \quad (31)$$

10 El segundo sumado en la ecuación (31) se corresponde con la serie de Taylor hasta el elemento cuadrático en la frecuencia de distancia, según se ha usado para derivar el procedimiento de chirp scaling (e implícitamente también ECS). Los coeficientes son:

$$\phi_0(f_a) = -\frac{4\pi}{\lambda} r_{ref} \beta(f_a), \quad (32)$$

15

$$\phi_1(f_a) = -\frac{4\pi}{c} \frac{r_{ref}}{\beta(f_a)}, \quad (33)$$

$$\phi_2(f_a) = -\frac{2\pi}{c^2} \frac{\lambda r_{ref} \cdot (\beta^2(f_a) - 1)}{\beta^3(f_a)}, \quad (34)$$

20 donde para el término de modulación acimutal es válido:

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_{eff}}\right)^2}. \quad (35)$$

Una FFT inversa en la dirección de distancia (bloque 3.12) lleva la señal a la zona de frecuencia de distancia.

25

Luego se realiza un chirp scaling, para el que la función de chirp scaling $H_{cs}(f_a, \tau; r_0)$ especificada en la ecuación (38) (bloque 3.13) se multiplica por la señal en una primera unidad de multiplicación 3.14.

30 El chirp scaling produce una adaptación de la curvatura dependiente de la distancia de la vía en la curvatura de una vía de referencia para una distancia de referencia r_{ref} , en donde una vía representa el lugar geométrico de los centros de fases de todas las señales de distancia, que pertenecen a un objetivo puntual. La forma de la vía de referencia se puede describir con $\tau_{a,ref}(f_a)$ de la siguiente manera:

$$\tau_{a,ref} = \frac{2 \cdot r_{ref}}{c} \cdot (a(f_a) + 1), \quad (36)$$

35

donde el factor de escalado lineal $a(f_a)$ describe la dependencia de la frecuencia de la variación de distancia:

$$a(f_a) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \cdot f_a}{2 \cdot v_{eff}}\right)^2}} - 1. \quad (37)$$

40 En la función de chirp scaling H_{cs} , K_{eff} es la tasa de modulación en la dirección de distancia, que depende de la frecuencia de acimut y la distancia de referencia, dado que incluye la compresión de distancia secundaria:

$$H_{cs}(f_a, \tau; r_0) = \exp[-j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot a(f_a) \cdot (\tau - \tau_{ref}(f_a))]. \quad (38)$$

45 Después del chirp scaling se usa una FFT de distancia (bloque 3.15) para la transformación de datos en el dominio de frecuencia bidimensional, en donde la compresión de distancia, la corrección de la variación de distancia al objetivo y la compresión de distancia secundaria se realizan a través de una multiplicación por la función de fase $H_{rnc}(f_a, f_r; r_{ref})$ especificada con la ecuación (39) (bloque 3.16) en una segunda unidad de multiplicación 3.17.

$$H_{remc}(f_a, f_r; r_{ref}) = \exp \left[-j \frac{\pi}{K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a))} f_r^2 \right] \cdot \exp \left[j \frac{4 \cdot \pi}{c} \cdot r_{ref} \cdot a(f_a) \cdot f_r \right]. \quad (39)$$

5 En la ecuación (39) la primera función de fase designa la función de filtro para la compresión de distancia. La segunda función de fase realiza la corrección de la variación de distancia al objetivo. Debido al chirp scaling realizado con la ecuación (38) se puede efectuar esta corrección para todas las distancias simultáneamente mediante un desplazamiento lineal en la dirección de distancia.

10 En la siguiente etapa del proceso se usa una IFFT en la distancia (bloque 3.18) para una transformación inversa en el rango de distancia-Doppler. Durante el escado chirp se introduce en la señal un offset de fase de acimut adicional, dependiente de la distancia, que se retira a través de una multiplicación por una función de corrección $H_{corr}(f_a; r_0)$ especificada en la ecuación (40) (bloque 3.19) en la unidad de multiplicación 3.20.

$$H_{corr}(f_a; r_0) = \exp \left[j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a)) \cdot a(f_a) \cdot \left(\frac{2}{c} \cdot (r_0 - r_{ref}) \right)^2 \right]. \quad (40)$$

15 En la siguiente etapa del proceso se expone la compensación orbital de segundo orden. La etapa contiene una FFT acimutal inversa corta (bloque 3.21) seguida de una multiplicación por la función de fase $H_{OCO,2}$ (bloque 3.22), descrita mediante la ecuación (41) mediante la unidad de multiplicación 3.23:

$$20 \quad H_{OCO,2}(t, \tau) = \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left(\Delta r_{residual}(t; r) - \Delta r_{residual}(t; r_{ref}) \right) \right], \quad (41)$$

donde $\Delta r_{residual}(t; r)$ se debe calcular numéricamente. Para ello se seleccionan varios objetivos de referencia dentro de la banda reproducida, que a saber en la misma posición de acimut se sitúan no obstante en diferentes posiciones de distancia. Para cada objetivo i se calcula la corrección $\Delta r_{residual}(t; r_{ref,i})$ correspondiente. Para determinar la corrección para todas las distancias, es suficiente una interpolación lineal. Una FFT acimutal corta (bloque 3.24) trae la señal de vuelta al rango de distancia-Doppler.

30 A continuación se sigue el tratamiento con el scaling de acimut y el método SPECAN. El histórico de fase hiperbólico se sustituye por uno puramente cuadrático, en donde la señal se procesa con la función de fase $H_{specan,1}(f_a; r_0)$ (bloque 3.25) a partir de la ecuación (42) en la unidad de multiplicación 3.26:

$$H_{specan,1}(f_a; r_0) = \exp \left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_0 \cdot (\beta(f_a) - 1) \right] \cdot \exp \left[-j \cdot \frac{\pi}{K_{scl}} \cdot f_a^2 \right]. \quad (42)$$

El histórico de fase puramente cuadrático se describe por la tasa de scaling-Doppler $K_{scl}(r)$,

$$35 \quad K_{scl}(r) = -\frac{2 \cdot v_{eff,ref}^2}{\lambda \cdot r_{ref}}, \quad (43)$$

40 que se corresponde con la tasa Doppler de un objetivo a la distancia de referencia r_{ref} . Dado que el scaling de acimut provoca en el dominio de tiempo un desplazamiento de señales de acimut, que se sitúan apartadas del centro de iluminación, se necesita una pequeña ampliación de la dimensión de acimut. En general ésta se garantiza mediante la ampliación de la subapertura a la siguiente potencia de dos. Lo última se prefiere, dado que se debe minimizar el coste de cálculo para la etapa de FFT/IFFT.

45 En la siguiente etapa del tratamiento se realiza una FFT inversa en la dirección de acimut (bloque 3.27) para convertir los datos de vuelta al rango de acimut/distancia. Luego se realiza el así denominado deramping mediante la función $H_{specan,2}(t)$ (bloque 3.28), en la ecuación (44), y bloque de multiplicación 3.29.

$$H_{specan,2}(t) = \exp \left[-j \cdot \pi K_{scl} \cdot t^2 \right]. \quad (44)$$

50 A continuación se reúnen las subaperturas individuales en la etapa 3.30. Aquí también se aplican la función de ponderación para la reducción del lóbulo lateral en la dirección de acimut (bloque 3.31) mediante la unidad de multiplicación 3.32. Después de una FFT acimutal larga (bloque 3.33) se realiza la corrección del diagrama de antena (bloque 3.34) con la unidad de multiplicación 3.35. En la última etapa se deben calcular los datos para la garantía de un tratamiento fiel a la fase con la función de fase $H_{specan,3}(f_a)$ (bloque 3.36) según la ecuación (45) con la

unidad de multiplicación 3.37.

$$H_{\text{specu3}}(f_a) = \exp \left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f_a^2}{K_{\text{scd}}} \right]. \quad (45)$$

5 El procedimiento propuesto permite el procesamiento eficiente de datos Spotlight espaciales, de alta resolución.

La descripción arriba expuesta del ejemplo de realización preferido describe completamente la idea general de la invención, de modo que terceros pueden modificar y/o adaptar algoritmos de procesamiento Spotlight SAR existentes, usando el estado de conocimiento actual, sin tener que experimentar para ello y desviarse del concepto genérico. Adaptaciones y modificaciones de este tipo se deben entender en el sentido del ejemplo de realización preferido expuesto. El tipo y los métodos para la realización de la funcionalidad expuesta puede asumir una pluralidad de formas de conversión alternativas, sin desviarse por ello de la idea de la invención.

6. Descripción de los resultados de un ejemplo de realización

15 Las figuras 5a a 5i (a continuación, acortado, figura 5) muestran el resultado del tratamiento según el método de la invención para nueve objetivos simulados. Dado que no se han usado funciones de ponderación durante el tratamiento, las líneas de contorno de la representación en la figura 5 se corresponden con funciones Sinc bidimensionales ($\text{sinc } x = \sin x/x$). Los nueve objetivos puntuales tienen diferentes posiciones de distancia y acimut dentro de un tamaño de escena. La disposición de los objetivos se corresponde con las posiciones de esquina de una escena del tamaño 3000 m x 8000 m en acimut y distancia. La geometría simulada es conforme a un escenario asistido espacialmente, donde se ha asumido la aproximación de arranque-parada y no se ha simulado la influencia de la troposfera. Por tanto esta simulación valida la compensación de la curvatura orbital (3.3, 3.4) y la corrección de la aproximación para el chirp scaling (3.10, 3.11). La distancia de referencia seleccionada para el escalado se sitúa en 620994,46 m. La resolución geométrica teórica es 0,16 m x 0,44 m en la dirección de acimut y de distancia. Las desviaciones máximas de la resolución medida de los valores teóricos son 2 % en acimut y 2 % en distancia.

Las figuras 6a a 6e muestran el resultado del tratamiento de cinco reflectores de una imagen SAR real registrada por el satélite TerraSAR-X sobre Oberpfaffenhofen, Alemania. Para ello no se ha usado el método según la invención, de modo que ni se ha tenido en cuenta correctamente la órbita curvada, ni la aproximación de arranque-parada y ni el efecto de la troposfera. Aquí se ha usado el procedimiento de chirp scaling convencional, según se describe en [R3]. Cuatro reflectores se sitúan en el centro y un quinto en el borde de la escena, que presentan una extensión de 3500 m x 8800 m en acimut y distancia. Las resoluciones geométricas posibles teóricamente son 0,16 m x 0,44 m en la dimensión de acimut y distancia. Las desviaciones máximas de los valores medidos de los teóricos son 50 % en acimut y 20 % en distancia. Las figuras 7a a 7e muestra el resultado según el tratamiento con el método de la invención. Las desviaciones máximas de la resolución medida de los valores teóricos son ahora 2 % en acimut y 2% en distancia, por lo que se validan todas las etapas de la invención.

7. Referencias bibliográficas

- 40 [R1] H. Breit, T. Fritz, U. Bals, M. Lachaise, A. Niedermeier, M. Vonavka, «TerraSAR-X SAR processing and products», IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, nº 2, pág. 727-740, febrero 2010.
- 45 [R2] D. D'Aria, A. Monti Guarnieri, «High-Resolution Spaceborne SAR Focusing by SVD-Stolt», IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 4, nº 4, pág. 639-643, octubre 2007.
- [R3] H. Shin, J. Lim, «Omega-K algorithm for spaceborne Spotlight SAR imaging», IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 9, nº 3, pág. 343-347, mayo 2012.
- 50 [R4] A. Ribalta, «Time-domain reconstruction algorithms for FMCW-SAR», IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 8, nº 3, pág. 396-400, mayo 2011.
- 55 [R5] A. Ribalta, «High resolution SAR image reconstruction: the generalized backprojection algorithm», in Proc. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vancouver, Canada, julio 2011.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el tratamiento de datos brutos Spotlight-SAR bidimensionales de alta resolución de un área reproducida, sobrevolada por un sensor SAR, donde el sensor SAR presenta un emisor, una antena y un receptor y los datos brutos emitidos por el sensor SAR y recibidos después de la reflexión por el área se han obtenido como pulso de radar modulado en frecuencia, caracterizado por

- un tratamiento de datos brutos SAR que se realiza en el dominio de frecuencia adaptando el histórico de fase de la señal de acimut a una curva hiperbólica teniendo en cuenta

- una función para la corrección geométrica de una línea, que discurre esencialmente en el centro del área reproducida y en la dirección de movimiento del sensor SAR, con inclusión numérica del desarrollo orbital medido realmente y usando un corrector de fase dependiente del acimut y

- una función para la corrección de efectos del tiempo de propagación variables dentro del tiempo de iluminación usando una corrección de fase igualmente dependiente del acimut.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por una compensación del movimiento relativo del sensor SAR respecto al objetivo, que se produce durante el envío y recepción del pulso de radar modulado en frecuencia.

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por el uso de un procedimiento basado en chirp scaling con una aproximación de Taylor de 2º grado, en donde se realiza una compensación de la aproximación de Taylor de 2º grado del espectro de frecuencia 2D de un objetivo puntual de referencia.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por una ampliación del rango de validez de la corrección geométrica de la línea en esencialmente el centro del área reproducida a toda el área reproducida mediante una compensación adicional geométrica y/o condicionada al tiempo de propagación de señal.

5. Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado por las siguientes etapas a realizar de forma secuencial:
transformación de los datos brutos SAR presentes en el dominio de tiempo, subdivididos en subaperturas en el dominio de frecuencia de distancia mediante FFT en la dirección de distancia,

donde la función de la corrección geométrica de la línea, que discurre esencialmente en el centro del área reproducida y en la dirección de movimiento del sensor SAR, bajo inclusión numérica del desarrollo orbital medido realmente y usando una corrección de fase dependiente del acimut comprende la multiplicación de los datos brutos SAR bidimensionales por una función de fase $H_{OCO,1}(t;f_r;r_{ref})$, que está dada por

$$H_{OCO,1}(t, f_r; r_{ref}) = \exp \left[j \frac{4\pi}{c} \cdot (f_0 + f_r) \cdot \Delta r_{residual}(t; r_{ref}) \right], \quad (46)$$

donde t designa el tiempo de acimut, c la velocidad de la luz, f_r el vector de frecuencia de distancia, f_0 la frecuencia central y $\Delta r_{residual}(t;r_{ref})$ la diferencia entre el histórico de distancia real y su aproximación hiperbólica para una distancia de referencia, r_{ref} , lo último descrito por

$$\Delta r_{residual}(t; r_{ref}) = \left| p_{SAT}(t) - \bar{p}_{bc}(t) \right| - \sqrt{r_{ref}^2 - v_{eff,bc}^2(t) \cdot (t - t_0)^2}, \quad (1)$$

donde $p_{SAT}(t)$ designa la posición del satélite como función del tiempo en un sistema de coordenadas terrestres geocéntricas y $p_{bc}(t)$ es la posición del punto de referencia en esencialmente el centro del área iluminada por la antena para cada instante de acimut t en las coordenadas terrestres geocéntricas, $v_{eff,bc}$ la velocidad efectiva para el punto de referencia en el instante de acimut t y t_0 el así denominado tiempo cero Doppler del objetivo, en donde $v_{eff,bc}$ y t_0 se calculan numéricamente a partir de los vectores de estado del desarrollo orbital medido y las coordenadas del objetivo de un punto de referencia en el área reproducida,

donde la función para la corrección de los efectos del tiempo de propagación variables dentro del tiempo de iluminación en la troposfera usando una corrección de fase igualmente dependiente del acimut comprende la multiplicación de datos bidimensionales por una función de fase $H_{troposfera}(t;f_r;r_{ref})$ que está dada por

$$H_{troposfera}(t, f_r; r_{ref}) = \exp \left[j \frac{4\pi}{c} \cdot (f_0 + f_r) \cdot \Delta r_{troposfera}(t; r_{ref}) \right], \quad (48)$$

donde $\Delta r_{troposfera}(t;r_{ref})$ designa un retardo de la señal dependiente del acimut, provocado por la troposfera, en el

trayecto de propagación que se puede calcular aproximadamente con

$$\Delta r_{\text{troposférica}}(t; r_{\text{ref}}) = \frac{Z \cdot \exp\left[\frac{-h(r_{\text{ref}})}{H}\right]}{\cos \theta(r_{\text{ref}}) \cos \alpha(t; r_{\text{ref}})}, \quad (49)$$

- 5 donde Z designa el retardo de la señal en el zenit en metros, H el espesor de troposfera, $h(r_{\text{ref}})$ la altura del objetivo, θ el ángulo de observación (off-nadir) y α el ángulo de acimut que se modifica durante la apertura sintética, que de nuevo se puede determinar numéricamente a partir de los datos de órbita y el punto de referencia en el centro del área iluminada por la antena en cada instante de acimut t, y Z y H son parámetros de modelo cuyos valores se pueden aproximar relativamente bien p. ej. con 2,3 m y 6 km para cada punto sobre la tierra, pero en donde también se pueden usar valores más exactos un otros modelos; y

transformación de los datos de subapertura mediante una FFT acimutal corta en el dominio de frecuencia bidimensional,

- 15 donde una compensación del movimiento relativo del sensor SAR respecto al objetivo, que se produce durante la emisión y la recepción del pulso de radar modulado en frecuencia, comprende la multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{\text{ss}}(f_a, f_r)$, que está dada por

$$H_{\text{ss}}(f_a, f_r) = \exp\left[j \cdot 2\pi \cdot f_a \cdot \tau_{\text{ss}}(f_r)\right], \quad (50)$$

- 20 donde τ_{ss} designa el desplazamiento de acimut dependiente de la frecuencia de distancia:

$$\tau_{\text{ss}}(f_r) = \left(f_r + \frac{B_r}{2}\right) \frac{\tau_p}{B_r}, \quad (51)$$

- 25 con τ_p como duración de pulso de radar (duración de chirp), B como anchura de banda de chirp y f_r como vector de frecuencia de distancia, que está dado por:

$$f_r \in \left[-\frac{f_s}{2}, \frac{f_s}{2}\right], \quad (52)$$

- 30 con f_s como frecuencia de exploración en la dirección de distancia, en donde en un down-chirp para es τ_{ss} es válido

$$\tau_{\text{ss,down-chirp}}(f_r) = \tau_{\text{ss,up-chirp}}(-f_r),$$

y

- 35 transformación de los datos de subapertura en el dominio de tiempo mediante una FFT inversa bidimensional.

6. Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado por las siguientes etapas para la compensación de la aproximación de Taylor, y a saber en el caso del uso de un núcleo de procesamiento en base a chirp scaling (p. ej. «Extended Chirp Scaling», ECS) para el tratamiento variable a la distancia:

transformación de los datos de subapertura en el dominio de frecuencia bidimensional mediante una FFT bidimensional,

- 45 multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{\Delta\text{ECS}}(f_a, f_r)$ dada por

$$H_{\Delta\text{ECS}}(f_a, f_r) = \exp\left[j \cdot \phi_{\Delta\text{ECS}}\right], \quad (53)$$

con

50

$$\phi_{\Delta ECS} = \frac{4\pi}{\lambda} r_{ref} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_{eff}}\right)^2} + (\phi_0(f_a) + \phi_1(f_a) \cdot f_r + \phi_2(f_a) \cdot f_r^2), \quad (54)$$

5 donde λ designa la longitud de onda y v_{eff} la velocidad efectiva teniendo en cuenta la rotación de la tierra entre el sensor SAR y el punto de referencia, y el segundo sumando en la ecuación (54) se corresponde con la serie de Taylor de la señal hasta el elemento cuadrático en la frecuencia de distancia, según se ha usado para derivar el procedimiento de chirp scaling (e implícitamente también ECS), y a saber con los coeficientes siguientes:

$$\phi_0(f_a) = -\frac{4\pi}{\lambda} r_{ref} \beta(f_a), \quad (55)$$

$$10 \quad \phi_1(f_a) = -\frac{4\pi}{c} \frac{r_{ref}}{\beta(f_a)}, \quad (56)$$

$$\phi_2(f_a) = -\frac{2\pi}{c^2} \frac{\lambda r_{ref} \cdot (\beta^2(f_a) - 1)}{\beta^3(f_a)}, \quad (57)$$

15 donde r_{ref} es la distancia respecto al punto de referencia y es válida para el término de modulación de acimut:

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_{eff}}\right)^2}; \quad (58)$$

y

20 transformación de los datos de subapertura en el dominio de tiempo mediante una FFT inversa bidimensional.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores bajo inclusión de la reivindicación 4, caracterizado por las siguientes etapas, y a saber si el tratamiento de datos brutos SAR en el dominio de frecuencia se realiza ya a excepción de un enfoque en la dirección de acimut:

25 transformación de los datos brutos SAR subdivididos en las subaperturas de vuelta al dominio de tiempo de acimut mediante una FFT acimutal inversa;

30 multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{OCO,2}(t, \tau)$ dada por

$$H_{OCO,2}(t, \tau) = \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (\Delta r_{residual}(t; r) - \Delta r_{residual}(t; r_{ref}))\right], \quad (59)$$

donde $\Delta r_{residual}(t; r)$ se debe calcular numéricamente para cada distancia, y

35 transformación de los datos de subapertura de vuelta al dominio de frecuencia de acimut mediante FFT acimutal corta.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores bajo inclusión de la reivindicación 3, caracterizado por las siguientes etapas a realizar secuencialmente, y a saber presuponiendo el uso adicional de un método SPECAN:

40 subdivisión de los datos brutos Spotlight SAR en subaperturas de acimutal;

transformación de los datos de subapertura al dominio de frecuencia de acimut mediante FFT acimutal corta;

45 multiplicación de la señal con la función chirp scaling H_{cs} , dada por

$$H_{cs}(f_a, \tau; r_{ref}) = \exp\left[-j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot a(f_a) \cdot (\tau - \tau_{ref}(f_a))^2\right], \quad (60)$$

50 donde τ designa el tiempo de distancia, τ_{ref} el tiempo de distancia para el punto de referencia, $a(f_a)$ el factor de escala lineal, y $K_{eff}(f_a; r_{ref})$ la tasa de modulación en la dirección de distancia para el punto de referencia;

transformación de la señal en el dominio de frecuencia bidimensional mediante FFT en la dirección de distancia;

- 5 con la finalidad de la corrección tanto de la variación de distancia como también de la compresión de distancia, como también de la compresión de distancia de segundo orden, se realiza una multiplicación de la señal por la función de fase H_{rcmc} dada por

$$H_{rcmc}(f_a, f_r; r_{ref}) = \exp\left[-j \frac{\pi}{K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a))} f_r^2\right] \cdot \exp\left[j \frac{4 \cdot \pi}{c} \cdot r_{ref} \cdot a(f_a) \cdot f_r\right] \quad (61)$$

- 10 transformación de la señal en el dominio de frecuencia de acimut del tiempo de distancia mediante FFT inversa en la dirección de distancia;

multiplicación de la señal con una función de corrección de fase H_{corr} dada por

$$H_{corr}(f_a; r) = \exp\left[j \cdot \pi \cdot K_{eff}(f_a; r_{ref}) \cdot (1 + a(f_a)) \cdot a(f_a) \cdot \left(\frac{2}{c} \cdot (r - r_{ref})\right)^2\right], \quad (62)$$

donde r es el vector de distancia;

- 20 multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{specan,1}(f_a; r)$ dada por

$$H_{specan,1}(f_a; r) = \exp\left[j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r \cdot (\beta(f_a) - 1)\right] \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{\pi}{K_{scl}} \cdot f_a^2\right], \quad (63)$$

donde K_{scl} es el factor de escala de acimut;

- 25 transformación de los datos de subapertura en el dominio de frecuencia de acimut mediante FFT acimutal inversa corta;

multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{specan,2}(f_a; t_0)$ dada por

$$H_{specan,2}(t) = \exp\left[-j \cdot \pi \cdot K_{scl} \cdot t^2\right]; \quad (64)$$

composición de las subaperturas formando la magnitud de acimut completa;

- 35 multiplicación de los datos bidimensionales por una función para la supresión del lóbulo lateral en la dirección de acimut;

transformación de los datos bidimensionales en el dominio de frecuencia mediante FFT acimutal larga;

multiplicación de los datos bidimensionales por una función para la corrección del diagrama de antena de acimut; y

- 40 multiplicación de los datos bidimensionales por una función de fase $H_{specan,3}(f_a)$ dada por

$$H_{specan,3}(f_a) = \exp\left[-j \cdot \pi \cdot \frac{f_a^2}{K_{scl}}\right], \quad (65)$$

- 45 9. Uso del procedimiento según una de las reivindicaciones 5 a 7 para el tratamiento bidimensional de datos brutos SAR espaciales en el modo de registro Stripmap, ScanSAR y TOPS.

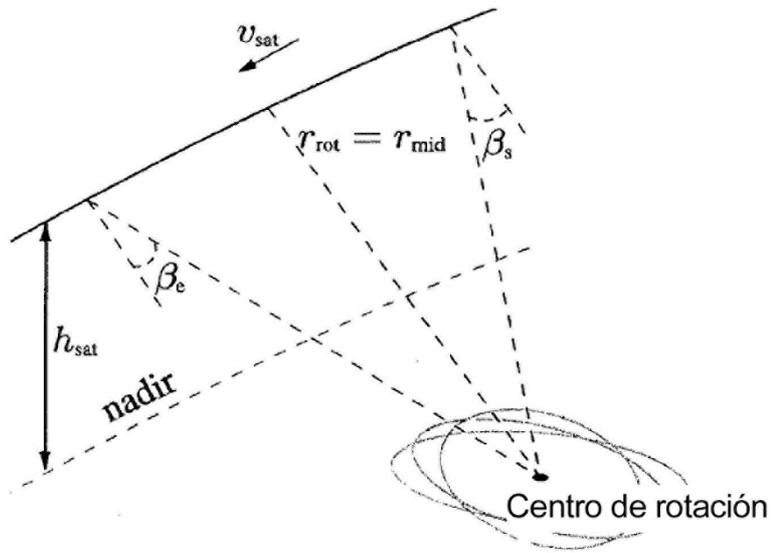


Fig. 1

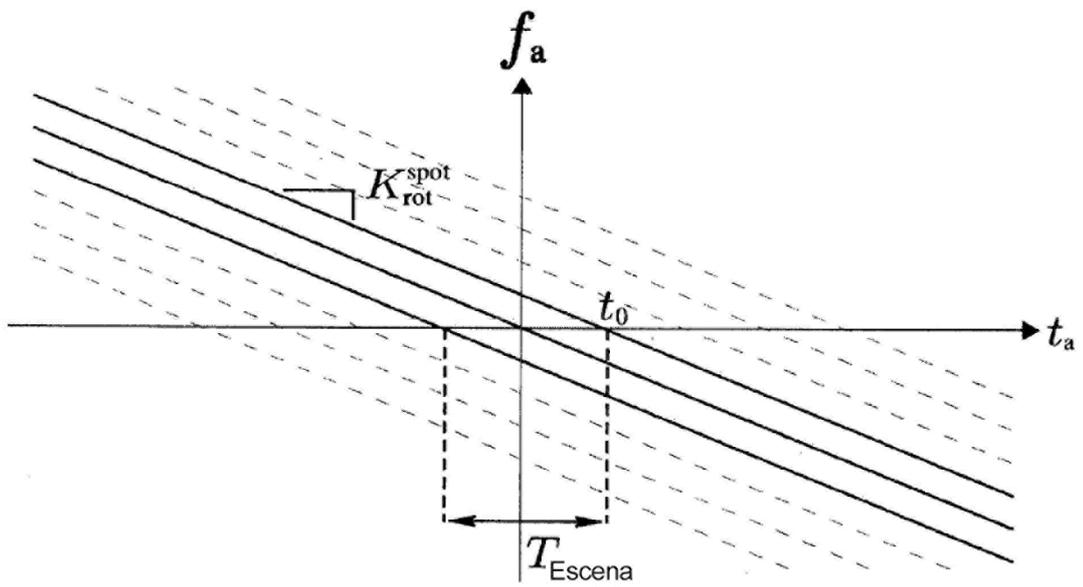


Fig. 2

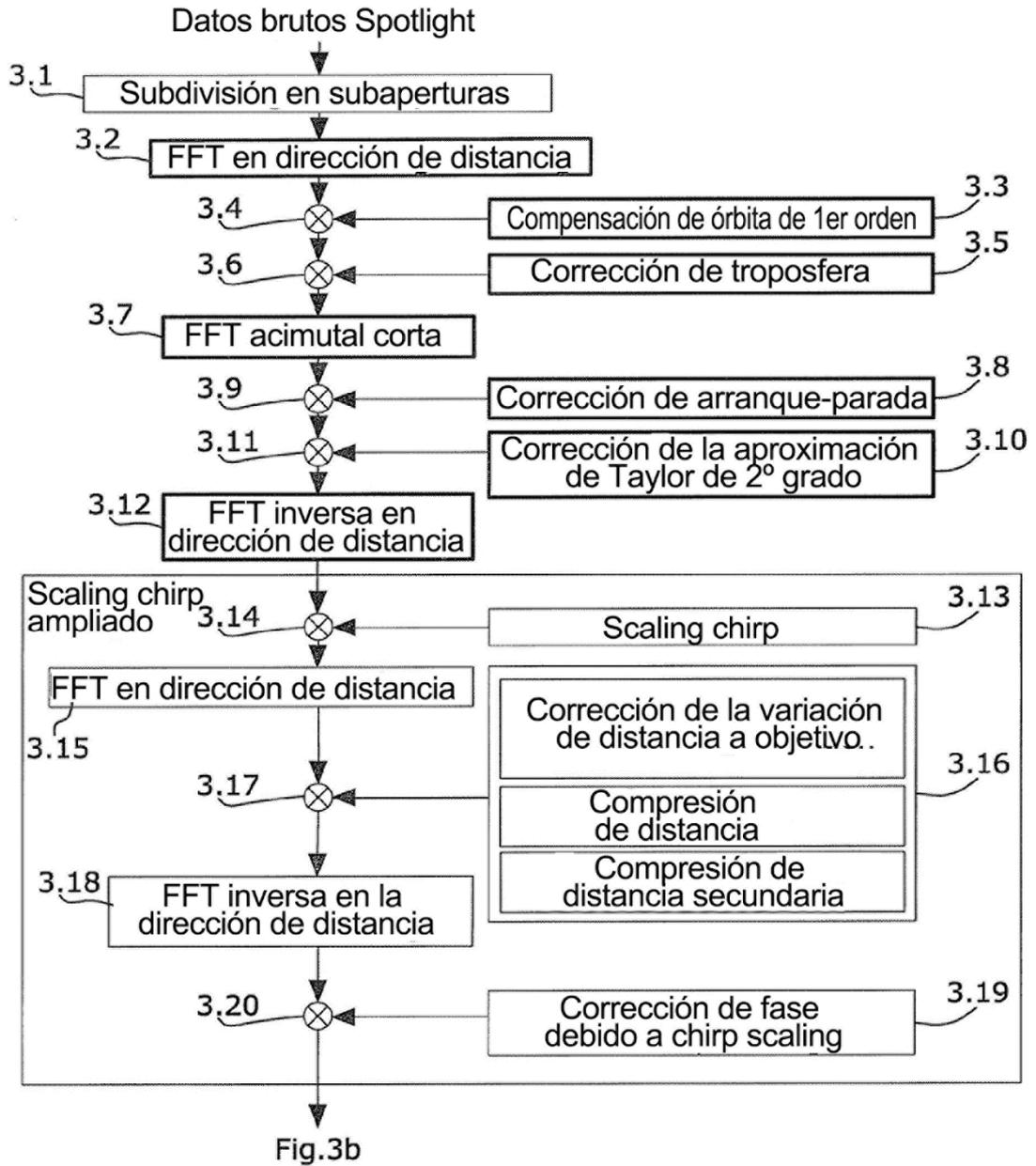


Fig.3a

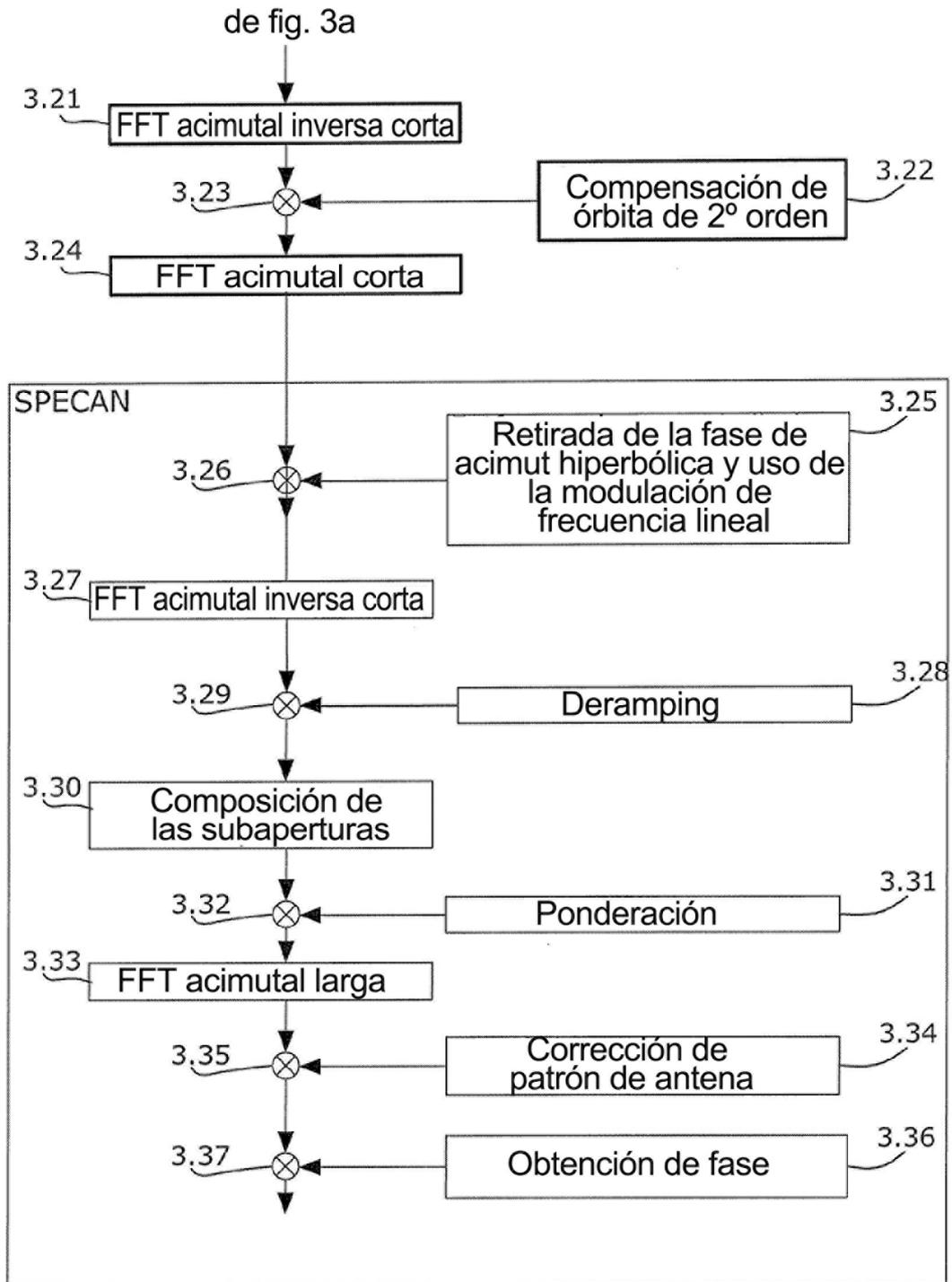


Fig.3b

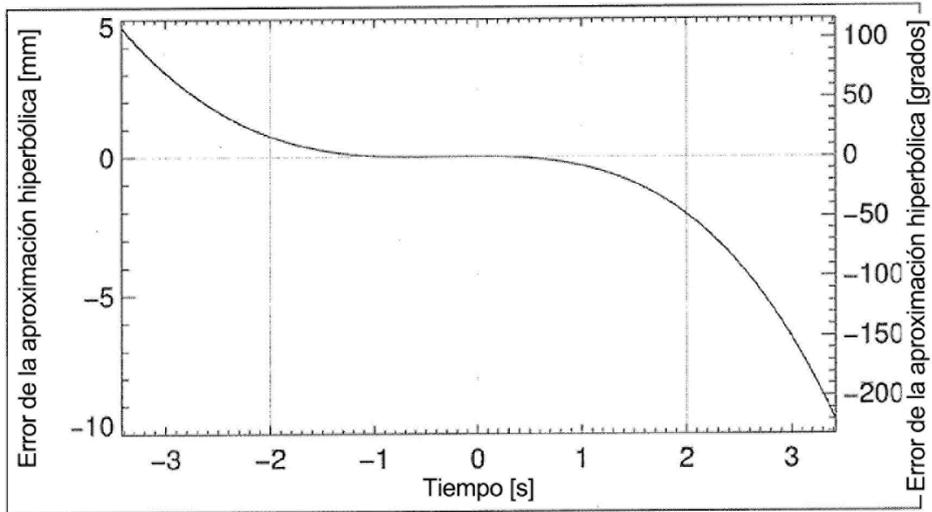


Fig. 4

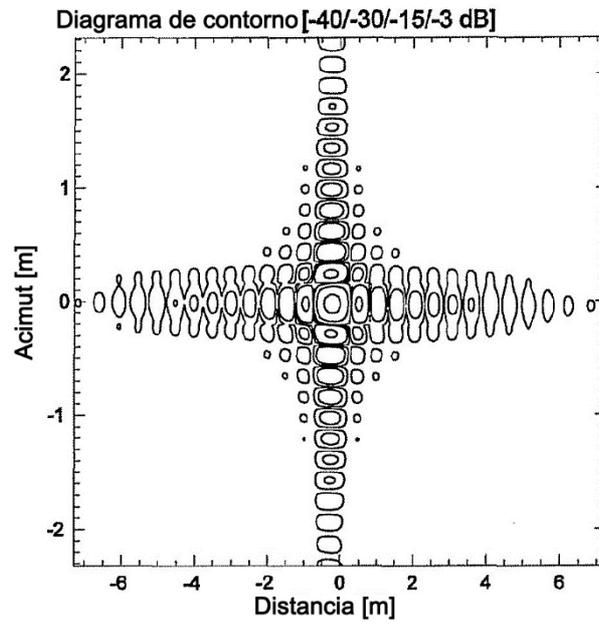


Fig. 5a

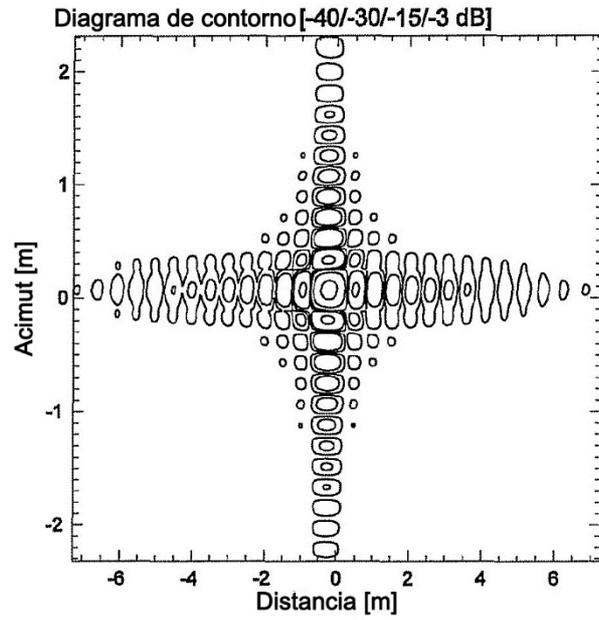


Fig.5b

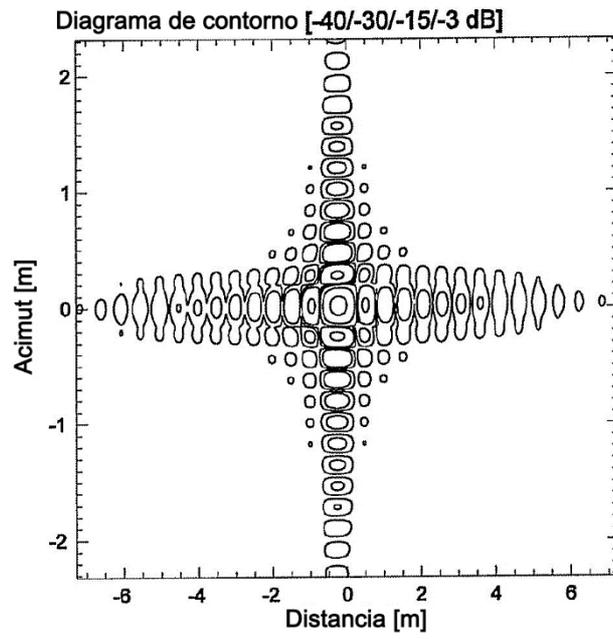


Fig. 5c

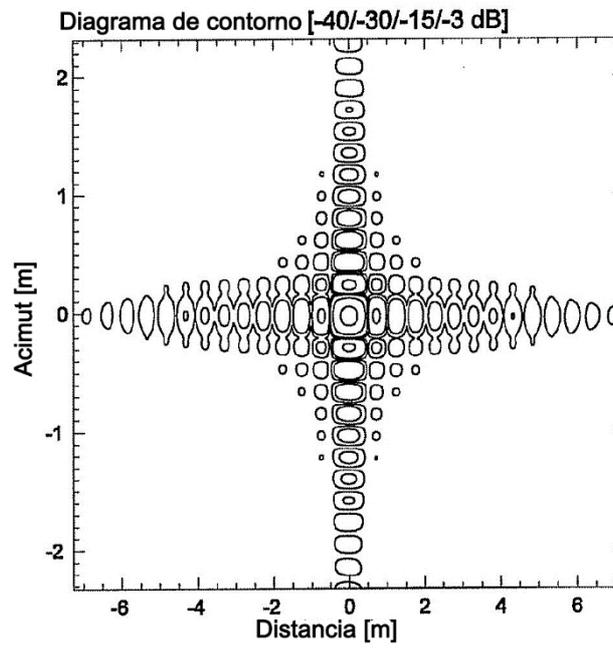


Fig. 5d

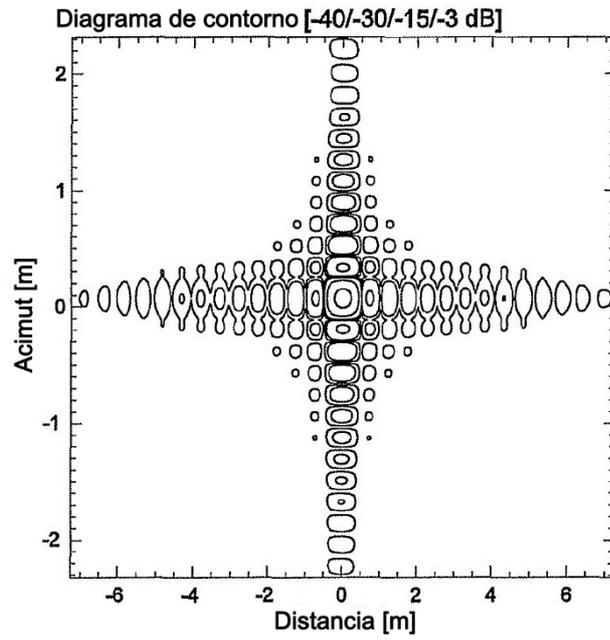


Fig. 5e

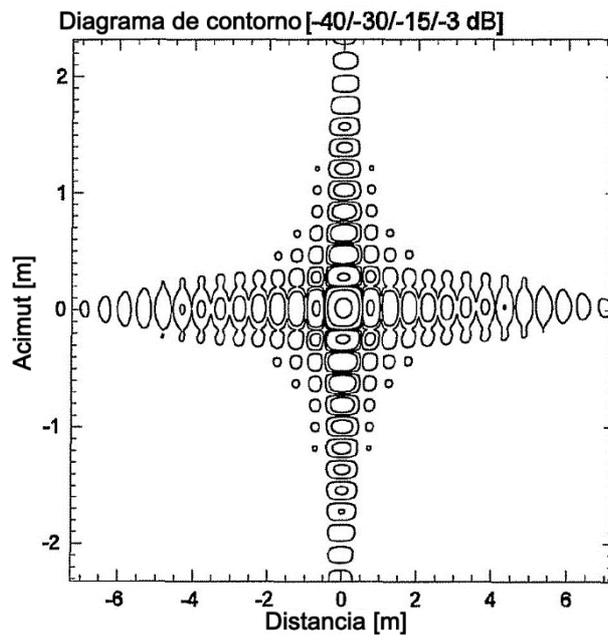


Fig. 5f

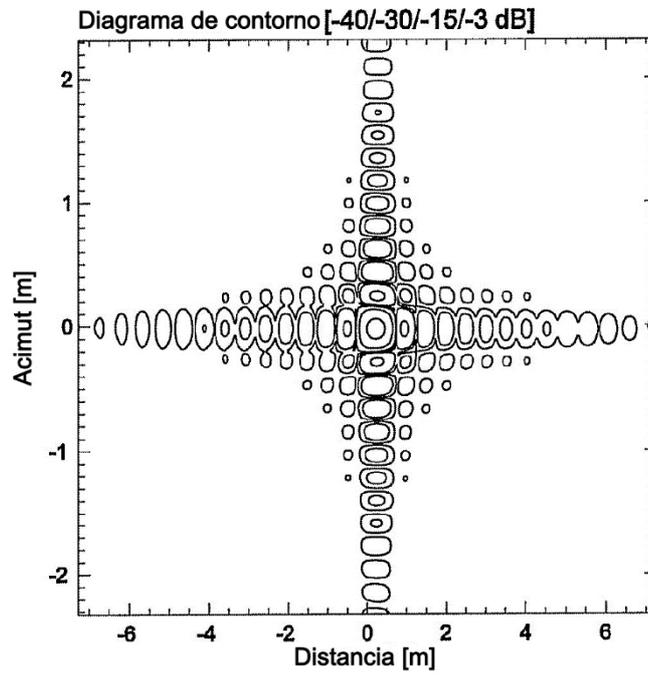


Fig. 5g

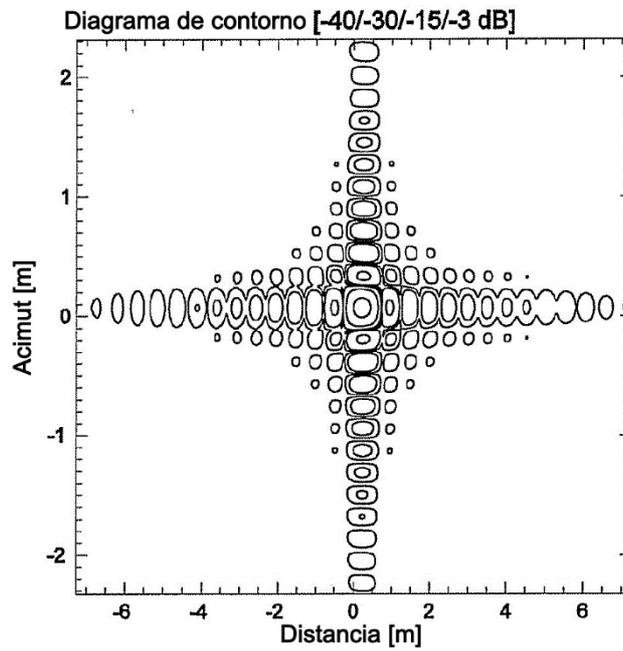


Fig. 5h

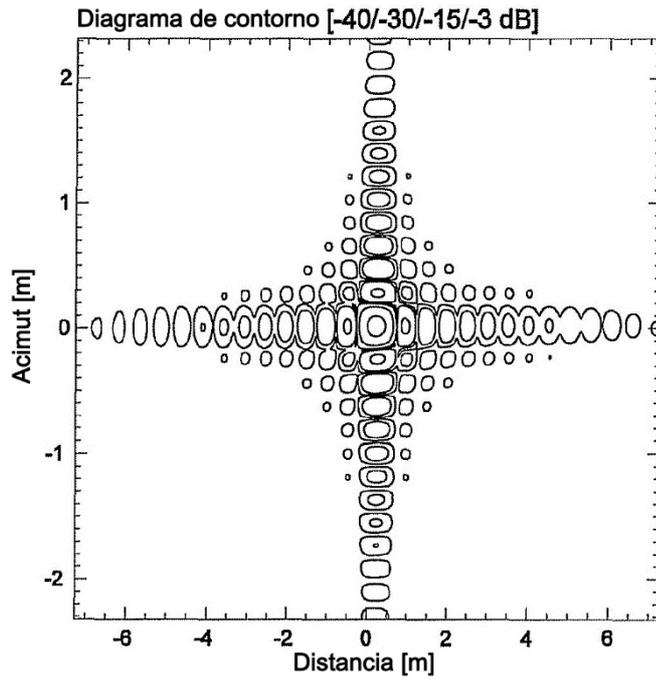


Fig. 5i

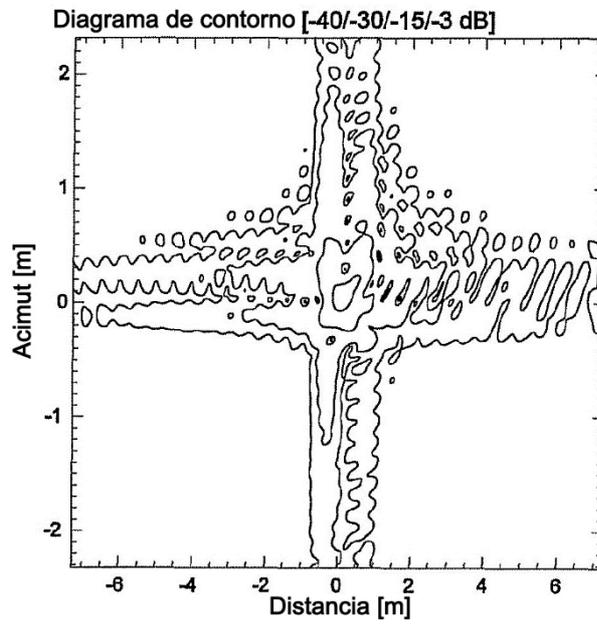


Fig. 6a

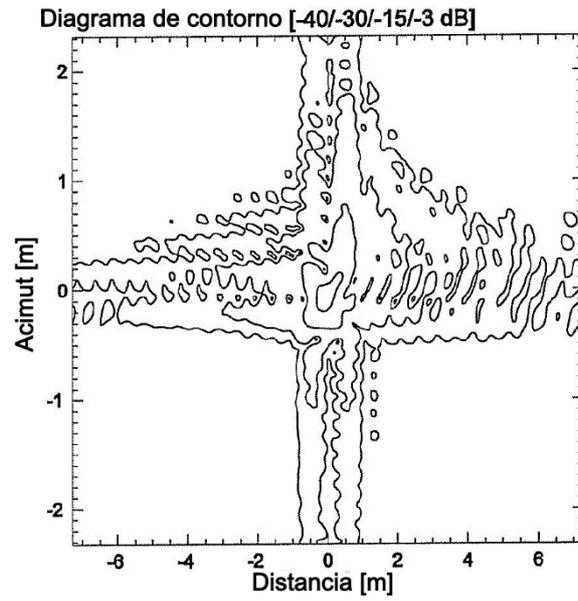


Fig. 6b

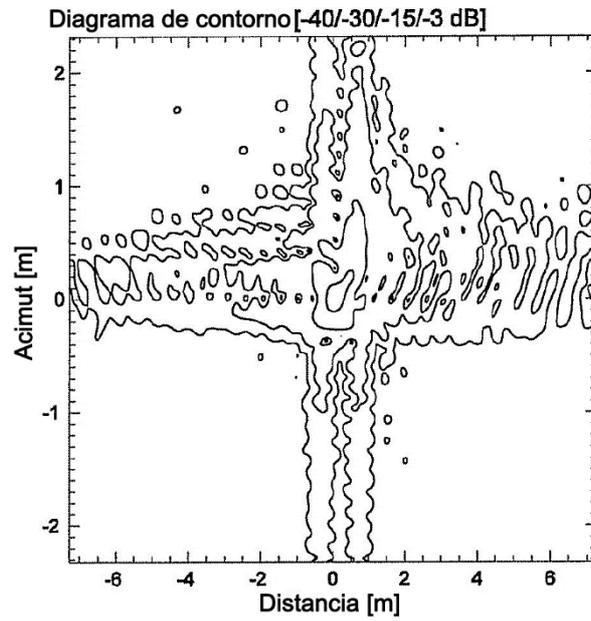


Fig. 6c

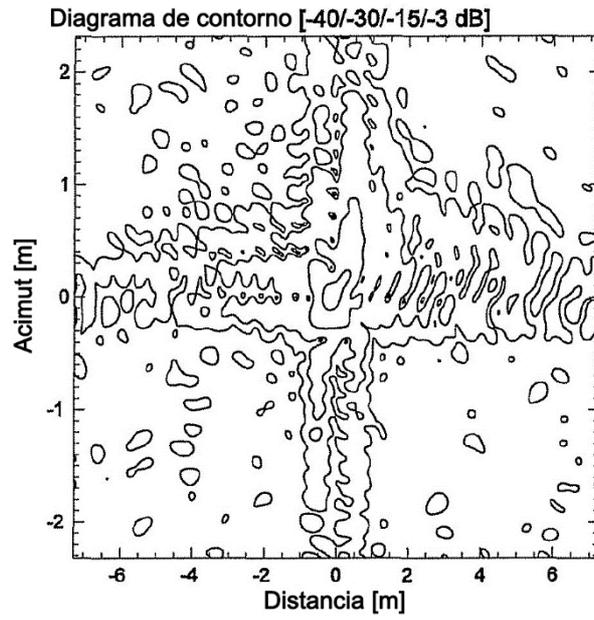


Fig. 6d

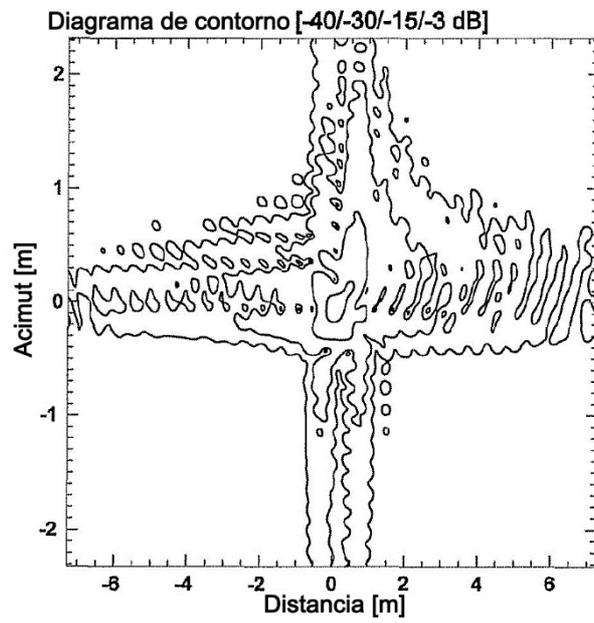


Fig. 6e

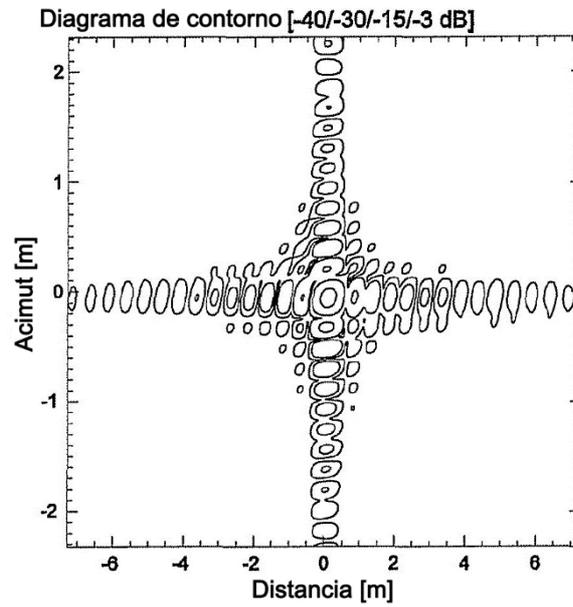


Fig. 7a

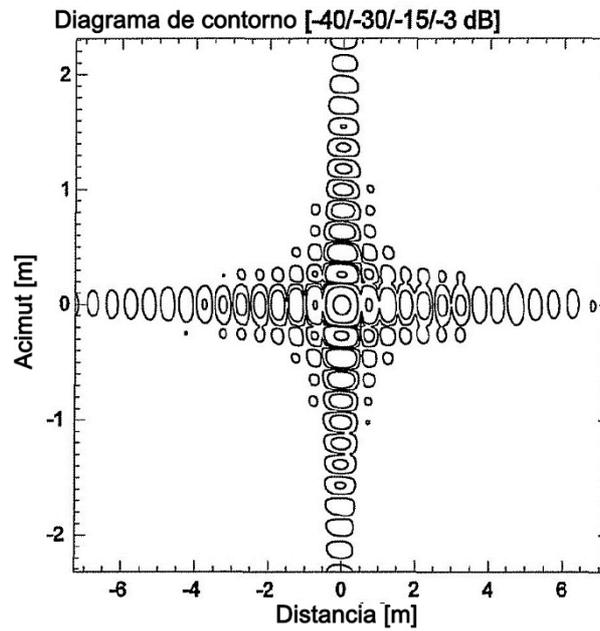


Fig. 7b

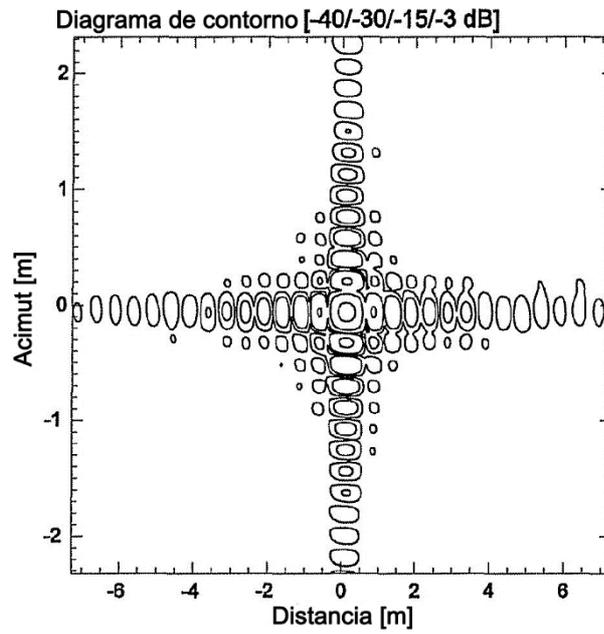


Fig. 7c

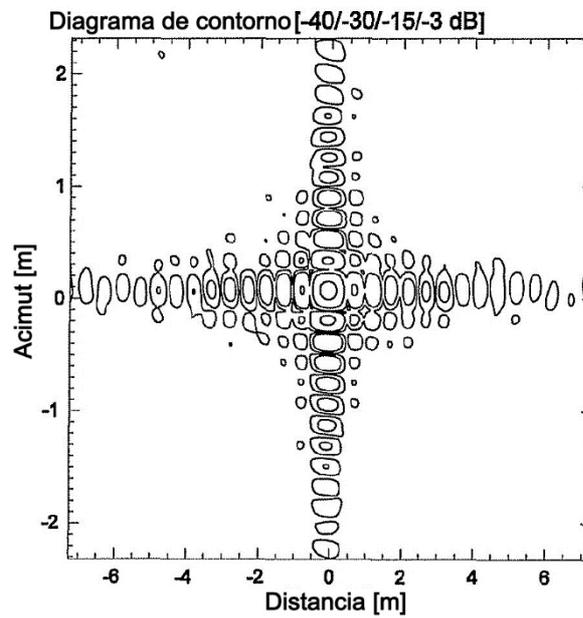


Fig. 7d

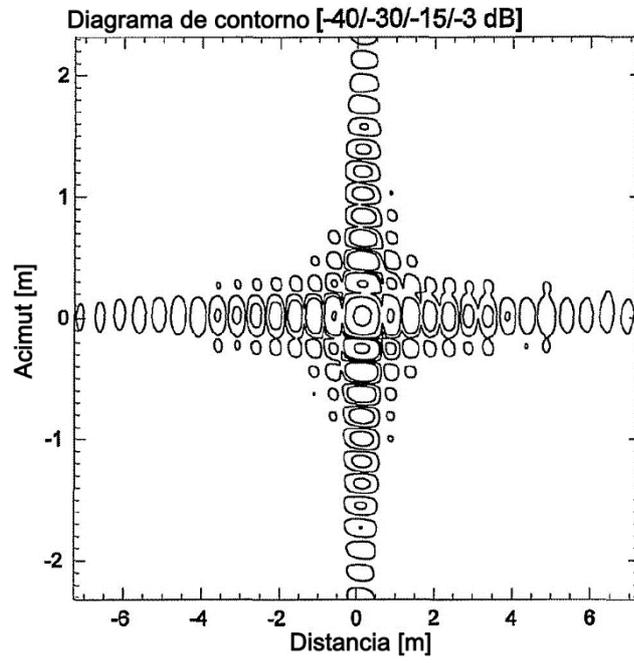


Fig. 7e