

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 698 382**

51 Int. Cl.:

G01S 13/90 (2006.01)

G01S 13/538 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.01.2012 PCT/EP2012/050737**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.09.2012 WO12116856**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.01.2012 E 12700561 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.08.2018 EP 2681585**

54 Título: **Procedimiento de detección y caracterización de un objetivo móvil sobre una imagen radar**

30 Prioridad:

03.03.2011 FR 1100644

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

04.02.2019

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
Tour Carpe Diem - Place des Corolles, Esplanade
Nord
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**BOSSER, LUC;
HOTTIER, VINCENT;
LE FOLL, DIDIER y
SFEZ, THIERRY**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 698 382 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 de detección y caracterización de un objetivo móvil sobre una imagen radar

La invención se refiere a un procedimiento de detección y de caracterización (posición/velocidad) de un objetivo móvil sobre una imagen radar que representa los ecos de reflectividad de una zona iluminada por un haz de radar. La invención se aplica concretamente a la producción simultánea de imágenes SAR-GMTI de alta resolución a partir de una aeronave equipada con una antena de radar.

En esta representación SAR-GMTI el "fondo de imagen" compuesto por reflectores fijos lo proporciona una imagen SAR (por sus siglas en inglés de "Synthetic Aperture Radar" radar de apertura sintética) y sobre este fondo de imagen, la posición de cada uno de los reflectores móviles que se quiere detectar (que por conveniencia denominaremos objetivo en el resto de la descripción) sobre la zona de interés está señalizada por un punto, al que se asigna un vector de velocidad correspondiente al vector velocidad del objetivo móvil en el instante de referencia elegido (generalmente el instante central de iluminación). El posicionamiento de cada objetivo móvil es posible por el modo GMTI (por sus siglas en inglés de "Ground Moving Target Indicator" indicador de objetivo móvil terrestre).

La solicitante presentó previamente la solicitud de patente francesa con el número 10/02083 que describe un procedimiento de construcción de imágenes de radar enfocadas. Como recordatorio, la figura 1 ilustra una fase de adquisición de datos por un portador móvil en modo SAR "Spot", es decir, un modo en el que el haz de antena está permanentemente dirigido hacia la zona que hay que convertir en imágenes. Un radar fijado en una aeronave 101 ilumina una zona 102 convertida en imagen durante una duración T_e de iluminación dirigiendo el haz de antena 103 sobre el centro 104 de dicha zona 102 a lo largo de la trayectoria 105 de la aeronave 101. Esta duración T_e es inversamente proporcional a la resolución contemplada según el eje transversal 106, siendo la resolución según el eje 108 radial a su vez, inversamente proporcional a la banda emitida por la antena de radar. La zona 102 convertida en imagen está dividida en una cuadrícula 110 de celdas para las que se pretende asociar al menos un nivel de reflectividad a cada una.

Los ecos retrodifundidos por la zona del suelo iluminada por el haz de radar permiten crear una imagen según el eje radial 108 y el eje transversal 106, respectivamente designados en lo sucesivo, por los términos de eje "Distancia" 108 y de eje "Doppler" 106. Esta imagen, calificada, en lo sucesivo, como imagen "Distancia-Doppler", proporciona para cada celda M situada en el interior de la zona 102 convertida en imagen, un valor de distancia D_M y un valor de frecuencia Doppler f_M , estando estos dos valores D_M y f_M referenciados con respecto a un instante t_{ref} dado, correspondiente, por ejemplo, al paso de la mitad de la duración total de iluminación.

Al describir un sector angular dado alrededor de la zona 102 convertida en imagen, el radar recolecta periódicamente una serie de N perfiles de distancia con una frecuencia de recurrencia f_r igual a N/T_e . Cada uno de los N perfiles en distancia ofrece una representación monodimensional de la zona 102 convertida en imagen según el eje 108 distancia. Además, el eje 108 distancia está dividido en varias casillas, teniendo cada una de dichas casillas, preferentemente, un tamaño ligeramente inferior a la resolución en distancia. Para una casilla distancia dada, un análisis espectral según el eje 106 transversal efectuado sobre la señal recolectada permite discriminar en Doppler los diferentes ecos contenidos en el interior de esta casilla. Este análisis espectral permite discriminar los ecos con la resolución deseada si se cumplen algunas condiciones.

La dificultad de la generación de imágenes SAR-GMTI se debe a que:

- en un modo SAR clásico (donde los reflectores fijos están posicionados en acimut en función de una medición de su frecuencia Doppler en un instante de referencia), los ecos móviles aparecen en una posición diferente a su posición real en la escena convertida en imagen: para estos ecos, la medición de la frecuencia Doppler ya no se puede vincular directamente a una posición en acimut. En efecto, la expresión de la frecuencia Doppler del objetivo no solamente hace intervenir su acimut (o más exactamente su ángulo con respecto al vector de velocidad del portador), sino también la velocidad radial del objetivo, información desconocida *a priori*. Además, el objetivo móvil está significativamente "desenfocado": su energía se diluye sobre un número importante de casillas Doppler, incluso de casillas Distancia si el objetivo es ambiguo en Doppler. Por consiguiente, un objetivo móvil no se beneficia del importante aumento de compresión del tratamiento SAR (amplia banda emitida y duración de integración larga), lo que vuelve su detección delicada, con mayor motivo si el Doppler (ambiguo) del objetivo pertenece al intervalo Doppler (ambiguo) cubierto por el conjunto de reflectores fijos iluminados por el haz. En este caso se habla de objetivos "endo clutter". Estos objetivos corresponden a los objetivos lentos o a los objetivos rápidos cuya velocidad radial induce un desfase frecuencial en Doppler correspondiente a la frecuencia de recurrencia del modo SAR (cuyo valor define la ambigüedad Doppler).
- Un modo GMTI (por sus siglas en inglés de "Ground Moving Target Indicator" indicador de objetivo móvil terrestre) clásico permite detectar y localizar los objetivos móviles, pero no proporciona ninguna representación con "resolución en acimut" de la zona de terreno iluminada por el haz de radar. En efecto, los tiempos de integración son, por lo general, demasiado cortos para discriminar en acimut los reflectores fijos del suelo con una resolución satisfactoria.

- Con el fin de reducir al máximo la expansión espectral del "eco de suelo" (señales retrodifundidas por el conjunto de los reflectores fijos del suelo iluminados por el haz de radar) y, por tanto, reducir el número de objetivos endo-clutter (por lo tanto, la detección resulta problemática), las adquisiciones GMTI dan prioridad a las geometrías de adquisición denominadas "en el eje": el vector de velocidad del portador y el vector de orientación que dirige el haz de radar son colineales. Ahora bien, estas configuraciones son precisamente unas configuraciones prohibidas para el SAR, puesto que impiden cualquier discriminación en acimut de los reflectores fijos iluminados por el haz. Por consiguiente, la solución clásica que consiste en la conversión en imágenes de la zona de interés con un modo SAR (desapuntado) para superponer a continuación, las detecciones procedentes de un modo GMTI orientado en el eje tiene un gran inconveniente: obliga al portador a efectuar un viraje entre la adquisición SAR y la adquisición GMTI.
- 5 En resumen, las soluciones clásicas para posicionar sobre una imagen SAR unos puntos asociados a los objetivos móviles presentes sobre la zona de interés consisten, generalmente, en efectuar dos adquisiciones separadas: una adquisición SAR y una adquisición GMTI. Las detecciones procedentes del modo GMTI se localizan y luego se superponen a la imagen SAR, utilizando la ubicación que proporciona el modo SAR para cada uno de los reflectores fijos convertidos en imágenes.
- 10 Con el fin de eludir el problema planteado por los objetivos endo-clutter, la adquisición GMTI se efectúa favoreciendo las orientaciones "en el eje", al contrario de la adquisición SAR que debe efectuarse obligatoriamente de manera desapuntada. No obstante, esta configuración resulta penalizadora en términos de tiempo puesto que obliga al portador a efectuar un viraje entre las dos adquisiciones para presentarse correctamente con respecto a la zona de interés iluminada por el haz.
- 15 Si la adquisición GMTI se hace no ya en el eje, sino en "iso-desapuntado" del SAR, se plantea el problema de la detección y de la localización de los objetivos endo-clutter. Este problema clásicamente se resuelve mediante unas técnicas de tipo STAP (por sus siglas en inglés de "Space Time Adaptive Process" proceso adaptativo de espacio tiempo). Estas técnicas requieren, no obstante, un número importante de vías de recepción para ser eficaces.
- 20 Además, las técnicas de tipo STAP no resuelven en absoluto el problema de "enfocado" de los objetivos y utilizan generalmente unas duraciones de integración muy inferiores a las ofrecidas por una adquisición SAR.
- 25 Con respecto a la caracterización del vector de velocidad asociado al objetivo, los modos GMTI clásicos permiten como mucho, una estimación de la componente radial de este vector.
- El documento WO 2010/056159 A1, el documento US 5 323 162 A, el documento US 2011/006944 A1 y el documento US 2004/032361 A1 describen unos procedimientos de detección sobre unas imágenes SAR. El objetivo de la invención consiste en suministrar naturalmente una representación SAR de la zona de interés, detectar los objetivos móviles, incluidos los objetivos endo-clutter y enfocarlos y posicionar los objetivos sobre la imagen SAR y caracterizar su vector de velocidad.
- 30 De manera más precisa, la invención se refiere a un procedimiento de detección y de caracterización de un objetivo móvil sobre una imagen radar que representa los ecos de reflectividad de una zona iluminada por un haz de radar de un portador formada por una repetición de adquisiciones radar, estando dicho procedimiento descrito por las reivindicaciones. Según la invención, el procedimiento comprende las siguientes etapas:
- 35 una primera etapa de eliminación de los ecos fijos estacionarios de gran reflectividad medidos sobre la imagen radar, una segunda etapa de reducción de la duración de integración por extracción de la porción de iluminación temporal central sobre la imagen radar,
- 40 una tercera etapa en la que se enfoca el eco del objetivo móvil mediante la aplicación de una corrección de la migración en distancia y de la migración en Doppler del objetivo móvil sobre la imagen radar, una cuarta etapa de extracción del objetivo móvil de la imagen radar,
- una quinta etapa de cálculo de la posición del objetivo y de las componentes del vector de velocidad del objetivo, de las cuales al menos la componente proyectada sobre la ruta del portador.
- 45 Ventajosamente, la primera etapa de eliminación de los ecos fijos estacionarios comprende las siguientes etapas:
- una disminución de la reflectividad de los ecos móviles que consiste en conservar, para cada uno de los píxeles de la imagen radar, la reflectividad mínima sobre el conjunto de la repetición de adquisiciones radar,
 - una detección de los ecos fijos mediante una operación de umbralado.
- 50 Ventajosamente, en la tercera etapa la corrección de la migración en distancia de un objetivo se ejecuta probando varios rangos de ambigüedad doppler posibles para el objetivo.
- Ventajosamente, en la tercera etapa, la corrección de la migración en Doppler de un objetivo se efectúa probando varias hipótesis de ley de fase cuadrática para compensar la fase residual que caracteriza la migración residual en Doppler del objetivo móvil, estando el término cuadrático de esta fase residual definido por la siguiente fórmula:

$$\phi_{2,c}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{\left(\vec{V} - \vec{V}_c\right)^2 - \left(\frac{\lambda \times f_d C}{2}\right)^2}{2R_c} \times t^2$$

donde:

\vec{V} : vector de velocidad del portador;

- 5
- \vec{V}_c : vector de velocidad del objetivo;
 - R_c : distancia Portador-Objetivo;
 - $f_d C$: frecuencia Doppler del objetivo;
 - λ : longitud de onda.

Ventajosamente, la tercera etapa comprende un filtrado de los puntos desenfocados.

- 10 Ventajosamente, la cuarta etapa comprende una operación de umbralado de píxeles de la imagen radar.

Ventajosamente, la quinta etapa comprende el cálculo de la componente radial del vector de velocidad del objetivo móvil conforme a la siguiente relación:

$$f_d C = \frac{2}{\lambda} \times \vec{U}_c \cdot \left(\vec{V} - \vec{V}_c\right) = \frac{2}{\lambda} \times \vec{U}_c \cdot \vec{V} - \frac{2}{\lambda} \times V_{cR}$$

- 15 donde:

- \vec{U}_c : vector unitario que apunta sobre el objetivo;
- V_{cR} : componente del vector de velocidad objetivo según el eje radial $V_{cR} = \vec{V}_c \cdot \vec{U}_c$

Ventajosamente, la quinta etapa comprende el cálculo de la componente del vector de velocidad del objetivo móvil proyectado según la ruta del avión conforme a la siguiente relación:

- 20

$$\phi_{2,CIM}(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{V \times V_{cV}}{R_c} \times t^2 - \frac{\lambda\pi}{2R_c} (2f_d M + k_{amb} \times f_r) \times k_{amb} \times f_r \times t^2$$

Donde,

- $\Phi_{2,CIM}(t)$: el desenfoque residual de dicho objetivo;
- V_{cV} : componente del vector de velocidad objetivo según la ruta del avión;
- 25 - k_{amb} : rango de ambigüedad Doppler del objetivo;
- M_c : posición aparente del objetivo, es decir, la posición del punto del suelo situado a la misma distancia que el objetivo;
- $f_d M$: frecuencia Doppler del punto M_c ;
- f_r : frecuencia de recurrencia.

- 30 La fase de detección de objetivos móviles del procedimiento de identificación según la invención sobre una imagen radar se puede implementar por medio de una única vía de recepción.

Además, el procedimiento según la invención permite aprovechar unas duraciones de integración muy superiores a las utilizadas clásicamente por un modo GMTI, con el fin de que los objetivos enfocados se beneficien de un aumento de compresión (y, por tanto, de una relación de Señal sobre Ruido) próximo al permitido por la totalidad de la adquisición SAR. Estas relaciones elevadas de Señal sobre Ruido permiten mejorar la calidad final de posicionamiento de los objetivos sobre la imagen SAR.

Además, el procedimiento suministra una estimación completa, en dos dimensiones, del vector de velocidad asociado al objetivo.

La invención se entenderá mejor y otras ventajas se pondrán de manifiesto tras la lectura de la siguiente descripción que se aporta a modo no limitativo y gracias a las siguientes figuras:

- 40

La figura 1 representa una ilustración de una fase de adquisición de datos por un portador móvil (técnica anterior). La figura 2a ilustra una imagen radar en bruto en Distancia Doppler que representa los objetivos móviles y los ecos estacionarios fijos.

La figura 2b ilustra una imagen radar en Distancia Doppler tras un tratamiento parcial según el procedimiento que ha eliminado unos ecos estacionarios fijos.

La figura 3 representa una imagen radar en Distancia y en tiempo que representan los objetivos móviles.

La figura 4 representa una imagen radar en Distancia Doppler tras un tratamiento parcial según el procedimiento que ha realizado una extracción parcial temporal de las recurrencias.

La figura 5 es un organigrama que presenta las etapas del procedimiento según la invención.

La figura 6 es un esquema geométrico que representa una adquisición SAR por un portador que apunta a un objetivo móvil.

La figura 7 es una imagen radar En Distancia Doppler resultante del procedimiento según la invención y que representa un objetivo móvil identificado en localización y en comportamiento de velocidad.

La invención se aplica a las portadoras móviles de tipo aeronave o satélites que llevan a bordo un dispositivo de tipo radar para la vigilancia de una zona de interés.

La invención permite obtener una imagen sintética sobre la que aparecen los móviles a los que está asociado un vector de desplazamiento que representa su dirección de desplazamiento y una cuantificación de la velocidad de desplazamiento. Una imagen de este tipo se obtiene a partir del procedimiento según la invención. La figura 7 es una representación esquemática de una imagen radar 50 obtenida mediante el procedimiento de la invención. Esta imagen representa un eco del objetivo móvil 21 y el vector de desplazamiento 52. La imagen representa en coordenadas 11 la distancia con respecto a las vías de recepción del portador y en coordenadas 12 la frecuencia Doppler de los reflectores fijos convertidos en imágenes. Sobre esta imagen, el objetivo móvil se posiciona en el lugar del reflector fijo caracterizado por el mismo acimut y la misma distancia que el objetivo móvil en el instante central de iluminación.

El objetivo del procedimiento según la invención consiste en suministrar a partir de una sola y misma adquisición radar una imagen SAR de una zona de interés y en superponer a esta imagen unos puntos correspondientes a la posición de los objetivos móviles presentes sobre la zona convertida en imagen.

De manera más precisa, estos puntos 51 proporcionan la posición estimada de los objetivos móviles en un instante dado (correspondiente al instante central de adquisición). Para un objetivo dado, además de la información de posición, la invención también permite proporcionar una estimación 52 del vector de velocidad del objetivo en el mismo instante de referencia.

Para cada uno de los objetivos móviles así detectados, el procedimiento proporciona a continuación, una caracterización de posición y de velocidad. La información de posición (referenciada con respecto al instante central de iluminación) se obtiene conforme a la Distancia portador-objetivo leída sobre la imagen Distancia-Doppler y conforme a una medición de desviación angular sobre el objetivo móvil reenfocado. Esta última medición precisa la utilización de dos vías de recepción en acimut. El procedimiento de localización del objetivo móvil no limita el alcance de la invención. El vector de velocidad del objetivo (en el instante central de iluminación) es la suma de dos componentes. La componente radial se calcula en función de la frecuencia Doppler del objetivo (frecuencia determinada de manera no ambigua al final de la etapa de detección) y de la posición angular proporcionada gracias a la medición de desviación. La componente que sigue la ruta del portador se deduce directamente del término cuadrático de fase que caracteriza la migración en Doppler del objetivo en el transcurso de la iluminación. Este término cuadrático se conoce gracias al procedimiento de la invención cuando se ha determinado la ley de fase que permite reenfocar el objetivo móvil.

La forma de onda utilizada es la de un modo SAR de resolución métrica o submétrica que utiliza una frecuencia de recurrencia lo más alta posible, con el fin de ampliar al máximo la zona clara en Doppler y aumentar la anchura de la ambigüedad Doppler.

Una ventaja de la invención es permitir la detección de objetivos móviles lentos (cuya frecuencia Doppler está comprendida en el intervalo Doppler cubierto por los ecos fijos de suelo) con una sola vía de recepción. Para hacerlo, la idea de base consiste en aprovechar el aumento de compresión elevada que permite la adquisición SAR (alta resolución de distancia y duración de adquisición larga con respecto a un modo GMTI clásico) y en discriminar los ecos fijos de los ecos móviles en función de la manera en la que migran en distancia y en Doppler en el transcurso del tiempo.

De este modo, sobre la imagen SAR "en bruto" generada de manera que se enfoquen los reflectores fijos canónicos de la zona de interés, los ecos fijos de fuerte SER (Superficie Equivalente Radar) ven su energía concentrada sobre una superficie muy reducida (debido a la resolución fina). Al contrario, los ecos móviles están significativamente desenfocados (a causa de la duración de integración larga del SAR) y ven, por tanto, su energía diluida sobre un número importante de píxeles: no se benefician del aumento de compresión en acimut del SAR.

El procedimiento según la invención se implementa por medio de un dispositivo radar acoplado a unas capacidades electrónicas y de tratamiento informático para una aplicación de formación de imágenes SAR (idealmente de

resolución de clase métrica) y que consta como mínimo de dos vías de recepción en acimut.

Estas capacidades electrónicas y de tratamiento informático para una aplicación de conversión en imágenes SAR pueden estar a bordo del portador o localizadas en una estación alejada. En este último caso, el portador tiene asimismo unos medios de transmisión de los datos medidos hacia la estación alejada. En el caso de una aplicación para una aeronave, como se ilustra en la figura 1, las dos vías de recepción pueden ser, por ejemplo, dos paneles de antena posicionados sobre una superficie del portador que hace frente a una dirección no colinear a la trayectoria del portador. Esto con el fin de poder discriminar en Doppler (y, por tanto, en acimut) los ecos fijos del suelo iluminados por el haz de radar y estar así en condiciones de constituir una imagen SAR.

La adquisición de imágenes radar efectuada como se ilustra en la figura 1 permite obtener una imagen 10 Distancia 11-Doppler 12 en bruto de la zona de interés. Sobre esta imagen 10 Distancia-Doppler en bruto de la zona de interés, los dos objetivos 13 y 14 aparecen significativamente desenfocados. Además, como a estos dos objetivos 13 y 14 se les ha asignado una velocidad radial no nula, su posición sobre la imagen SAR no corresponde a su posicionamiento real en el suelo. No obstante, a modo ilustrativo, se han seleccionado dos valores de velocidad radial significativamente diferentes para estos dos objetivos sintéticos:

El primer objetivo 13 tiene asignada una velocidad radial muy lenta, que le vuelve no ambiguo en Doppler: la frecuencia Doppler del objetivo (o más exactamente el intervalo Doppler cubierto por el objetivo sobre la imagen) se lee correctamente sobre la imagen SAR Distancia-Doppler. Para un reflector dado (fijo o móvil), el conocimiento de la frecuencia Doppler en el instante central de iluminación permite determinar sin error el término lineal de la migración en distancia asociado a este reflector en el transcurso de la iluminación. Por consiguiente, habida cuenta que el objetivo no es ambiguo en Doppler, el tratamiento SAR le aplica al primer orden una corrección de migración en distancia correcta. El término residual de migración en distancia ya no contiene término lineal y se extiende, por tanto, sobre un número muy restringido (incluso despreciable) de casillas de distancia. Este fenómeno es visible sobre la siguiente imagen SAR, donde el objetivo móvil 13 puntual no ambiguo está prácticamente concentrado en el interior de una única casilla de distancia.

El segundo objetivo 14, al contrario, tiene asignada una velocidad radial rápida, que la vuelve ambigua en Doppler: la frecuencia Doppler del objetivo leída sobre la imagen SAR (Distancia-Doppler) 10 difiere de la verdadera frecuencia Doppler del objetivo. Esta diferencia es un múltiplo de la frecuencia de recurrencia de la forma de onda del modo SAR. Por consiguiente, al contrario que el objetivo no ambiguo, el objetivo ambiguo sigue adoleciendo de una migración residual en distancia muy importante, extendida sobre un número significativo de casillas de Distancia. No obstante, el conocimiento del rango de ambigüedad del objetivo basta para determinar el término lineal de esta migración residual en distancia. Este fenómeno es visible sobre la Señal Distancia-Tiempo obtenida aplicando a la imagen Distancia-Doppler 10 una FFT (función de transformada de Fourier) inversa según el eje Doppler. esta señal Distancia-Tiempo está representada en la figura 3.

A partir de una imagen Distancia-Doppler en bruto como se ilustra en la figura 2a, el procedimiento 80 representado esquemáticamente en la figura 5 comprende una primera etapa 81 de eliminación de los ecos fijos estacionarios 15 de fuerte reflectividad medidos sobre la imagen radar 10.

Sobre la imagen 10 SAR Distancia-Doppler en bruto, los ecos fijos 15 de SER significativa iluminados por el lóbulo principal del haz de antena están enfocados y se benefician del aumento de compresión elevada del tratamiento SAR. Están, por tanto, por encima del nivel medio del "fondo de imagen" (compuesto en el ejemplo elegido de césped y de asfalto) y se concentran sobre un número de píxeles restringido en comparación con el número total de píxeles que cubre la zona iluminada por el lóbulo principal.

La contribución de estos ecos puede sustraerse por tanto poniendo a cero los píxeles de la imagen Distancia-Doppler donde se concentra su energía. Esta operación de puesta a cero, comúnmente denominada *blanking* por el término anglosajón, de un número limitado de píxeles no degrada significativamente las señales procedentes de los ecos móviles, en la medida en la que estos ecos están desenfocados y ven, por tanto, su energía diluida sobre un número muy grande de píxeles.

La detección de los ecos fijos fuertemente reflectantes no se resume a un simple umbralado sobre la imagen Distancia-Doppler. Tal tratamiento tendría como efecto indeseable detectar (y suprimir) asimismo los ecos móviles de muy fuerte SER o cuyo desenfoque no está suficientemente marcado (objetivos lentos, por ejemplo).

En una demanda de patente de la solicitante presentada en el 2001 con el número de publicación FR2833713 describe una solución eficaz. Este procedimiento consiste en aplicar previamente una operación de filtrado de los puntos no estacionarios sobre la imagen 10 Distancia-Doppler en bruto, con el fin de filtrar los diferentes ecos móviles e impedirles que superen el umbral de detección.

El principio de tal filtrado consiste, en primer lugar, en aplicar diferentes correcciones necesarias para la obtención de una imagen SAR enfocada en cualquier punto. Se ve un reflector estacionario a una distancia fija y a una frecuencia Doppler fija a lo largo de toda la iluminación. Por consiguiente, la generación de una "película" compuesta de imágenes SAR procedentes de un corte del tiempo de iluminación completo en sub-iluminaciones permite poner de manifiesto la no estacionalidad. En cada una de las imágenes de la película, se ve un reflector 15 estacionario en una posición

Distancia-Doppler idéntica y con la misma reflectividad. Al contrario, un reflector no estacionario 13 o 14 (en particular, un reflector móvil) se posicionará de manera diferente según las imágenes y/o fluctuará en amplitud.

En consecuencia, el filtrado de los puntos no estacionarios 13 o 14 consiste en conservar, para cada uno de los píxeles, la reflectividad mínima sobre el conjunto de las imágenes Distancia-Doppler de la película.

- 5 La amplitud de los ecos no estacionarios está así significativamente atenuada. Por el contrario, la resolución acimutal de esta imagen filtrada está degradada puesto que la duración de una sub-iluminación está reducida con respecto a la iluminación completa.

Con el fin de conservar la resolución acimutal óptima correspondiente a la iluminación completa, por último, se efectúa una operación de búsqueda de valor mínimo entre esta última imagen y la imagen en bruto de resolución plena.

- 10 La imagen de la figura 2B representa un esquema de una imagen radar obtenida tras la primera etapa del procedimiento. Sobre esta imagen 20 Distancia 11 - Doppler 12, se han eliminado los ecos fijos estacionarios 15 y solo quedan los ecos no estacionarios 13 y 14 que representan los objetivos móviles.

- 15 El procedimiento comprende una segunda etapa 82 de reducción de la duración de integración. La reducción de la duración de integración presenta un interés doble. En primer lugar, la hipótesis según la cual el objetivo sigue un movimiento rectilíneo uniforme es más fácil de verificar y en segundo lugar la carga de cálculo decrece significativamente. El tamaño de las señales se restringe y el número de leyes de fase a probar durante las siguientes etapas para la corrección de las migraciones en Doppler también se reduce, puesto que es proporcional al cuadrado de la duración de integración (la reducción de la duración de integración permite a la vez limitar la migración en Doppler residual y caracterizarla con un tamaño de casilla de Doppler más aproximado).

- 20 Esta reducción de la duración de integración se efectúa de la siguiente manera:

- retorno al dominio temporal aplicando una FFT inversa según el eje Doppler sobre la imagen Distancia-Doppler 20 libre de los ecos fijos de SER significativa,
 - desponderación temporal: la puesta a cero de los ecos fuertes se efectúa sobre una imagen Distancia-Doppler ponderada, con el fin de concentrar la energía de estos ecos sobre un número mínimo de píxeles sin disipación parásita de energía en los lóbulos secundarios. Una vez de vuelta al dominio temporal, el efecto de esta ponderación se debe suprimir.
 - Extracción de la porción temporal central.
- 25

- 30 La imagen de la figura 3 representa una imagen 30 Distancia 31-Tiempo 32. Los ecos móviles de velocidad radial lenta están representados por la línea 34 y los ecos móviles de velocidad de desplazamiento más elevada están representados por la línea 33.

La imagen 40 de la figura 4 representa un esquema de la imagen Distancia 41 - Doppler 42 de resolución acimutal degradada obtenida efectuando una FFT sobre la duración de integración reducida correspondiente a la porción temporal central extraída. Sobre esta imagen 40, el desenfoque de los objetivos 43 y 44 cubre, no obstante, un número de píxeles significativamente reducido con respecto a la imagen 10 Distancia-Doppler en bruto original.

- 35 El procedimiento 80 comprende a continuación, una tercera etapa 83 de enfoque del eco del objetivo móvil por un cálculo de corrección de la migración en distancia y de la migración en Doppler del objetivo móvil en la imagen radar.

- 40 El enfocado consiste en volver a concentrar sobre un número lo más limitado posible de casillas de Distancia-Doppler la energía de la señal retrodifundida por un objetivo, con el fin de permitir la detección sobre un ruido residual compuesto, ya sea únicamente por ruido térmico (zona clara), ya sea por ruido térmico y ecos débilmente reflectantes y no enfocados (zona endo-clutter).

En enfocado le permite al objetivo beneficiarse de un aumento de compresión importante, a la vez en distancia (banda ancha emitida) y en Doppler (duración de integración larga), a condición de lograr corregir su migración residual en distancia y su migración residual en Doppler.

- 45 La corrección del término lineal de la migración en distancia del objetivo en el transcurso de la adquisición inicialmente se hace durante la generación de la imagen SAR: la ley de corrección aplicada es entonces la aplicada a un eco fijo que, en el instante central de iluminación está situado a la misma distancia que el eco móvil y presenta la misma frecuencia Doppler ambigua que el objetivo móvil.

- 50 Como el término lineal de la migración en distancia depende únicamente de la frecuencia Doppler (no ambigua) del eco en el instante de referencia (en el presente documento instante central de iluminación), por tanto, la migración residual en distancia del objetivo puede estar completamente caracterizada solo por el conocimiento de su rango de ambigüedad en Doppler.

Se recuerda sucintamente la noción de rango de ambigüedad Doppler. A causa del muestreo de la señal con una frecuencia F_r , es imposible hacer la distinción entre una señal de frecuencia Doppler f_d y una señal de frecuencia Doppler $f_d + F_r$, o $f_d + 2F_r$, o $f_d + 3F_r$, etc.... Se habla de ambigüedad Doppler y de rango de ambigüedad Doppler. No

obstante, en el marco estricto de la formación de imágenes SAR, esto no plantea ningún problema. En efecto, como se conoce la geometría del problema (posición del portador, velocidad del portador, dirección de orientación del haz, posición de los puntos del suelo iluminados por el haz de radar...), se conoce el rango de ambigüedad de los ecos fijos del suelo iluminados por el haz de radar. Por el contrario, para un eco móvil del que se ignora en principio la velocidad, en principio, este rango de ambigüedad es desconocido. Por defecto, cuando se genera la imagen SAR, se establece la hipótesis de que los ecos recibidos tienen una frecuencia Doppler comprendida entre $fd_0 - Fr/2$ y $fd_0 + Fr/2$, donde fd_0 designa la frecuencia Doppler del punto central de la zona convertida en imagen (esta frecuencia Doppler fd_0 se conoce por la geometría de adquisición).

5 En consecuencia, es posible corregir el término lineal de la migración residual en distancia del objetivo efectuando diferentes hipótesis sobre su rango de ambigüedad. Para las clases de velocidades buscadas y con un modo SAR trabajando con una frecuencia de recurrencia elevada, es posible limitarse a los rangos +1 y -1.

En la imagen no ambigua, el objetivo no ambiguo en Doppler ya está correctamente corregido. Su migración residual en distancia no supera una casilla de Distancia.

15 Probando el rango de ambigüedad 1, esta vez es el objetivo ambiguo el que ve su energía reconcentrada sobre un intervalo de Distancia restringido: su migración en distancia residual es inferior al tamaño de la casilla. Para una resolución radial de clase métrica o ligeramente submétrica y tras la reducción de la duración de integración, se puede considerar que el término cuadrático que caracteriza la migración residual en distancia es inferior al tamaño de la casilla de distancia.

20 En este estadio del procedimiento, para un objetivo móvil dado, existe una imagen Distancia-Doppler (asociada a un valor de rango de ambigüedad en Doppler) para la que la migración en distancia del objetivo ha sido compensada. Sobre esta imagen, la migración residual del objetivo se resume en lo sucesivo a una migración en Doppler. Gracias a la reducción de la duración de integración, esta migración residual en Doppler puede caracterizarse por un término cuadrático de fase en el dominio del tiempo (los términos de órdenes superiores inducen un desenfoque despreciable).

25 La última etapa para reconcentrar la energía del objetivo consiste, por tanto, en probar diferentes hipótesis de "anchura" de desenfoque, haciendo variar el término cuadrático del error de fase residual en el dominio del tiempo.

30 De este modo, la imagen Distancia-Doppler sobre la que el objetivo no ambiguo ha sido reenfoque pertenece a la serie de imágenes asociadas al rango de ambigüedad cero. Para el objetivo ambiguo en doppler, la imagen sobre la que se ha concentrado la energía del objetivo sobre un número limitado de píxeles Distancia-Doppler pertenece a la serie de imágenes asociadas al rango +1.

35 El procedimiento 80 comprende a continuación, una cuarta etapa 84 de extracción del objetivo móvil de la imagen radar. Tras el enfocado, los objetivos se benefician de un aumento de compresión elevado y pueden, por tanto, ser detectados por un simple umbralado sobre un ruido residual compuesto, en el peor de los casos, por ecos de suelo reflectantes y desenfocados. No obstante, con el fin de evitar las detecciones parásitas de un mismo objetivo sobre varias imágenes distancia-Doppler, es preferible aplicar previamente sobre cada una de estas imágenes un filtrado de los puntos no estacionarios (idéntico al utilizado para filtrar los ecos de suelo altamente reflectantes). Al final de este filtrado, solo se conservan los objetivos enfocados.

40 El procedimiento 80 comprende a continuación, una quinta etapa 85 de cálculo de la posición del objetivo y de las componentes del vector de velocidad del objetivo, en particular, de la componente proyectada sobre la ruta del portador. La figura 6 es un esquema que representa la geometría de adquisición entre un portador y el objetivo móvil y los vectores de velocidad del objetivo móvil y del portador. En un primer tiempo se recapitulan las siguientes denotaciones:

Todas las magnitudes (posiciones, velocidades, rumbos...) están referenciadas con respecto al instante central de iluminación:

- 45 - P : posición del portador
- \vec{V} : vector de velocidad del portador
- C : posición del objetivo
- \vec{V}_c : vector de velocidad del objetivo

- R_c : distancia Portador-Objetivo: $R_c = \|\vec{PC}\|$

$$\vec{U}_c = \frac{\vec{PC}}{\|\vec{PC}\|}$$

- 50 - \vec{U}_c : vector unitario que apunta sobre C:
- V_{cR} : componente del vector de velocidad objetivo según el eje radial $V_{cR} = \vec{V}_c \cdot \vec{U}_c$

$$V_{cV} = \vec{V}_c \cdot \frac{\vec{V}}{V}$$

- V_{cV} : componente del vector de velocidad del objetivo según la ruta de un avión:

- G_c : rumbo del objetivo
- S_c sitio del objetivo
- $f_d C$: frecuencia Doppler del objetivo
- f_{d0} : frecuencia Doppler del punto del suelo situado en el centro del haz
- 5 - f_r : frecuencia de recurrencia del modo SAR/GMTI
- M_c : posición "aparente" del objetivo = posición del punto del suelo situado a la misma distancia que el objetivo y cuyo

Doppler no ambiguo está comprendido entre $f_{d0}-f_r/2$ y $f_{d0}+f_r/2$,

Doppler ambiguo es igual al Doppler ambiguo del objetivo.

- 10 - G_M : rumbo "aparente" del objetivo = rumbo del punto M_c
- f_{dM} : frecuencia Doppler del punto M_c
- k_{amb} : rango de ambigüedad Doppler del objetivo C: $k_{amb}=(f_d C-f_{dM})/f_r$
- T_e : duración de iluminación (duración de integración para el SAR)

$$t \in \left[-\frac{T_e}{2}, \frac{T_e}{2} \right]$$

- 15 El instante de referencia $t=0$ corresponde al instante central de iluminación: Portador-Objetivo en el transcurso del tiempo se expresa:

$$\left\| P(t)\vec{C}(t) \right\| = \left\| P(t)\vec{P}(0) + P(0)\vec{C}(0) + C(0)\vec{C}(t) \right\| = \left\| -\vec{V} \times t + R_c \times \vec{U}_c + \vec{V}_c \times t \right\| = \left\| -(\vec{V} - \vec{V}_c) \times t + R_c \times \vec{U}_c \right\|$$

A partir de ahí:

$$\left\| P(t)\vec{C}(t) \right\| = \sqrt{\left(-(\vec{V} - \vec{V}_c) \times t + R_c \times \vec{U}_c \right)^2} = \sqrt{R_c^2 - 2R_c \vec{U}_c \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c) \times t + (\vec{V} - \vec{V}_c)^2 \times t^2}$$

es decir:

$$\left\| P(t)\vec{C}(t) \right\| = R_c \sqrt{1 - 2 \frac{\vec{U}_c \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c)}{R_c} \times t + \frac{(\vec{V} - \vec{V}_c)^2}{R_c^2} \times t^2}$$

(expresión de la forma $\sqrt{1+x}$ donde $x \ll 1$)

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 + O(x^3)$$

Por desarrollo limitado:

En consecuencia:

$$\left\| P(t)\vec{C}(t) \right\| = R_c - \vec{U}_c \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c) \times t + \frac{(\vec{V} - \vec{V}_c)^2 - \left(\vec{U}_c \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c) \right)^2}{2R_c} \times t^2 + O(t^3)$$

- 25 En el instante $t = 0$, la frecuencia Doppler del objetivo móvil se expresa:

$$f_d C = \frac{2}{\lambda} \times \vec{U}_c \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c)$$

Por último, la posición del objetivo se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$\left\| P(t)\vec{C}(t) \right\| = R_c - \frac{\lambda \times f_d C}{2} \times t + \frac{\left(\vec{V} - \vec{V}_c \right)^2 - \left(\frac{\lambda \times f_d C}{2} \right)^2}{2R_c} \times t^2 + O(t^3)$$

La fase de la señal retrodifundida por el objetivo C en el transcurso del tiempo se expresa:

$$\phi_C(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \left\| P(t)\vec{C}(t) \right\|$$

5 La migración en Doppler del objetivo C en el transcurso de la iluminación está caracterizada por el término cuadrático $\phi_C(t)$.

Este término cuadrático se expresa, por tanto:

$$\phi_{2,C}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{\left(\vec{V} - \vec{V}_c \right)^2 - \left(\frac{\lambda \times f_d C}{2} \right)^2}{2R_c} \times t^2$$

10 Durante la generación de la imagen Distancia-Doppler (corrección de las migraciones en distancia y de las migraciones en Doppler con las leyes de corrección adaptadas a los reflectores fijos de la zona convertida en imagen), la corrección de migración aplicada al objetivo móvil es idéntica a la corrección aplicada al reflector fijo Mc. Como recordatorio Mc designa la posición "aparente" del objetivo.

La migración en Doppler de Mc está caracterizada por la siguiente fase cuadrática:

$$\phi_{2,M}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{\left(\vec{V} \right)^2 - \left(\frac{\lambda \times f_d M}{2} \right)^2}{2R_c} \times t^2$$

donde

$$R_c = \left\| \vec{PC} \right\| = \left\| \vec{PM}_c \right\|$$

15 En consecuencia, sobre la imagen Distancia-Doppler final (donde cada reflector fijo está enfocado), el desenfocado residual del objetivo móvil está caracterizado por el término de fase:

$$\phi_{2,CIM}(t) = \phi_{2,C}(t) - \phi_{2,M}(t)$$

El desenfocado residual se expresa, por tanto:

$$20 \quad \phi_{2,CIM}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{\left(\vec{V} - \vec{V}_c \right)^2 - \left(\vec{V} \right)^2}{2R_c} \times t^2 - \frac{\lambda\pi}{2R_c} (2f_d M + k_{amb} \times f_r) \times k_{amb} \times f_r \times t^2$$

Si se supone que el objetivo móvil se desplaza mucho menos rápido que el portador, esta expresión se convierte finalmente en:

$$\phi_{2,CIM}(t) = \underbrace{-\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{V \times V_{cV}}{R_c}}_{\text{término de fase residual}} \times t^2 - \underbrace{\frac{\lambda\pi}{2R_c} (2f_d M + k_{amb} \times f_r) \times k_{amb} \times f_r}_{\text{término de fase residual}} \times t^2$$

Desenfocado vinculado a la componente "ruta del avión" del vector de velocidad del objetivo

Desenfocado vinculado al rango de ambigüedad Doppler del objetivo (término compensable planteando una hipótesis sobre el valor del rango de ambigüedad)

Al final de la etapa 104 de extracción de los objetivos, se conocen las siguientes características para cada uno de los objetivos detectados:
Distancia Portador-Objetivo R_c en el instante central de iluminación.

5 Frecuencia Doppler no ambigua

$$\text{Frecuencia Doppler no ambigua } f_d C = f_d M + k_{amb} \times f_r$$

Primera caracterización de la ley de fase $\phi_{2,C/M}(t)$ sobre una duración de integración reducida con respecto a la duración de iluminación completa. Esta primera caracterización puede afinarse aumentando la duración de integración. De este modo, la etapa de reenfoque del objetivo se repite sobre una duración de integración más larga.
10 De este modo se puede mejorar la precisión sobre la estimación del término cuadrático de fase: para un objetivo dado, la primera estimación aproximada efectuada sobre una duración de integración restringida permite inicializar el enfoque "fino". Las nuevas pruebas de enfoque se efectúan con un paso más fino (según un número de hipótesis reducido) en torno al valor inicial. Al final de esta etapa, el enfoque final del objetivo puede alcanzarse mediante la utilización de un autofoco local de tipo PGA (por sus siglas en inglés de "Phase gradient autofocus" autofoco automático por gradiente de fase). Se puede acceder así al conocimiento fino de la ley de fase del objetivo móvil en el transcurso del tiempo.
15

A continuación, puede estimarse la localización angular del objetivo gracias a una medición de desviación angular en acimut (utilizando dos vías de recepción), efectuada sobre el objetivo móvil reenfoqueado. El importante aumento de compresión obtenido gracias al enfoque del objetivo sobre una duración de integración larga con una resolución radial fina permite reducir la desviación típica del ruido sobre esta medición de desviación angular.
20

En consecuencia, en una quinta etapa 105, el procedimiento calcula la posición del objetivo y las componentes del vector de velocidad del objetivo al menos en función de la ruta del portador sobre la imagen radar y de la componente radial portador-objetivo.

En este estadio, es posible, por tanto, estimar el vector \vec{V}_c que apunta hacia el objetivo móvil en el instante central de iluminación, conforme al conocimiento de la localización angular del objetivo, la distancia R_c , la altitud relativa Portador-Objetivo, las actitudes del avión y la información vinculada a la orientación de la antena.
25

Una vez estimada la posición del objetivo en el instante central de iluminación, también es posible caracterizar su vector de velocidad:

El conocimiento de la posición del objetivo y de su frecuencia Doppler no ambigua permite estimar la componente radial de su vector de velocidad, de acuerdo con la siguiente relación:
30

$$f_d C = \frac{2}{\lambda} \times \vec{U}_c \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c) = \frac{2}{\lambda} \times \vec{U}_c \cdot \vec{V} - \frac{2}{\lambda} \times V_{cR}$$

El conocimiento sobre la fase del objetivo en el transcurso del tiempo permite remontar a la componente V_{cV} del vector de velocidad proyectado siguiendo la ruta del avión, aprovechando la siguiente relación:

$$\phi_{2,C/M}(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{V \times V_{cV}}{R_c} \times t^2 - \frac{\lambda\pi}{2R_c} (2f_d M + k_{amb} \times f_r) \times k_{amb} \times f_r \times t^2$$

Al final, se obtiene, por tanto, una imagen SAR sobre la que están reposicionados los diferentes objetivos móviles detectados, con un vector de velocidad asignado a cada uno. Este resultado está ilustrado en la imagen esquemática Distancia-Doppler 50 de la figura 7.
35

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento (80) de detección y caracterización de un objetivo móvil (13; 14) sobre una imagen SAR que representa los ecos de reflectividad de una zona iluminada por un haz de radar de un portador (101) formada por una repetición de adquisiciones radar (103), que comprende las siguientes etapas:

- 5 - una primera etapa (81) en la que se eliminan los ecos fijos estacionarios de alta reflectividad medidos sobre la imagen radar, comprendiendo dicha primera etapa las siguientes etapas:
 - disminución de la reflectividad de los ecos móviles que consiste en conservar, para cada uno de los píxeles de la imagen radar, la reflectividad mínima sobre el conjunto de la repetición de adquisiciones radar,
 - detección de los ecos fijos mediante una operación de umbralado,
- 10 - una segunda etapa (82) en la que se reduce la duración de integración por extracción de la porción de iluminación temporal central sobre la imagen radar,
- una tercera etapa (83) en la que se enfoca el eco del objetivo móvil mediante la aplicación de una corrección de la migración en distancia y de la migración en Doppler del objetivo móvil sobre la imagen radar,
- una cuarta etapa (84) en la que se extrae el objetivo móvil de la imagen radar, comprendiendo dicha cuarta etapa una operación de umbralado de los píxeles de la imagen radar,
- 15 - una quinta etapa (85) en la que se calcula la posición del objetivo y las componentes del vector de velocidad del objetivo, de las cuales al menos la componente proyectada sobre la ruta del portador, obtenida según la siguiente relación:

$$\phi_{2,C/M}(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{V \times V_{cv}}{R_c} \times t^2 - \frac{\lambda\pi}{2R_c} (2f_d M + k_{amb} \times f_r) \times k_{amb} \times f_r \times t^2$$

20 en las que:

- t representa el tiempo;
- λ : longitud de onda;
- R_c : la distancia entre dicho portador y dicho objetivo;
- $\phi_{2,C/M}(t)$: el desenfoque residual de dicho objetivo;
- 25 - V_{cv} : componente del vector de velocidad del objetivo según la ruta de un avión;
- k_{amb} : rango de ambigüedad Doppler del objetivo;
- M_c : posición aparente del objetivo, es decir, la posición del punto del suelo situado a la misma distancia que el objetivo;
- $f_d M$: frecuencia Doppler del punto M_c ;
- 30 - f_r : frecuencia de recurrencia.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** en la tercera etapa (83) la corrección de la migración en distancia de un objetivo se ejecuta probando varios rangos de ambigüedad doppler posibles para el objetivo.

35 3. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** en la tercera etapa (83) la corrección de la migración en Doppler de un objetivo se efectúa probando varias hipótesis de ley de fase cuadrática para compensar la fase residual que caracteriza la migración residual en Doppler del objetivo móvil, estando el término cuadrático de esta fase residual definido por la siguiente fórmula:

$$\phi_{2,C}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{\left(\vec{V} - \vec{V}_c \right)^2 - \left(\frac{\lambda \times f_d C}{2} \right)^2}{2R_c} \times t^2,$$

en la que:

- 40 - V : vector de velocidad del portador
- V_c : vector de velocidad del objetivo
- R_c : distancia Portador-Objetivo:
- $f_d C$: frecuencia Doppler del objetivo

45 4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 2 y 3, **caracterizado porque** la tercera etapa (83) comprende un filtrado de los puntos desenfocados.

5. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** la quinta etapa (85) comprende el cálculo de la componente radial del vector de velocidad del objetivo móvil de acuerdo con la siguiente relación:

$$f_d C = \frac{2}{\lambda} \times \vec{U}_c \cdot (\vec{V} - \vec{V}_c) = \frac{2}{\lambda} \times \vec{U}_c \cdot \vec{V} - \frac{2}{\lambda} \times V_{cR}$$

donde:

V_{cR} : componente del vector velocidad del objetivo según el eje radial;
 U_c : vector unitario que apunta sobre el objetivo.

5

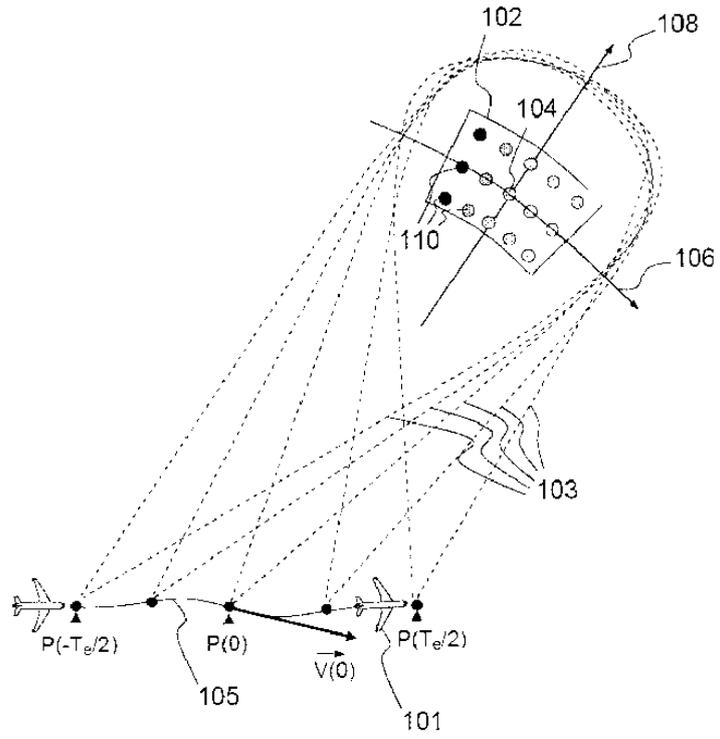


FIG.1

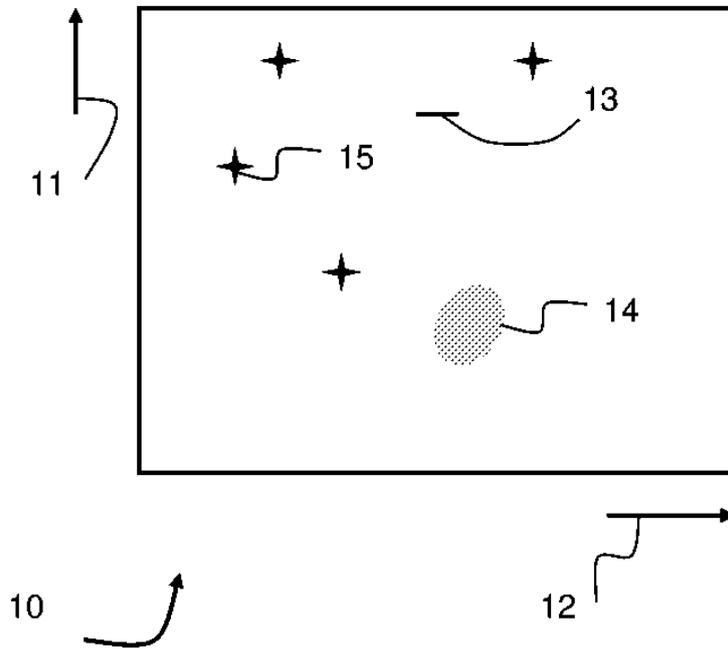


FIG. 2a

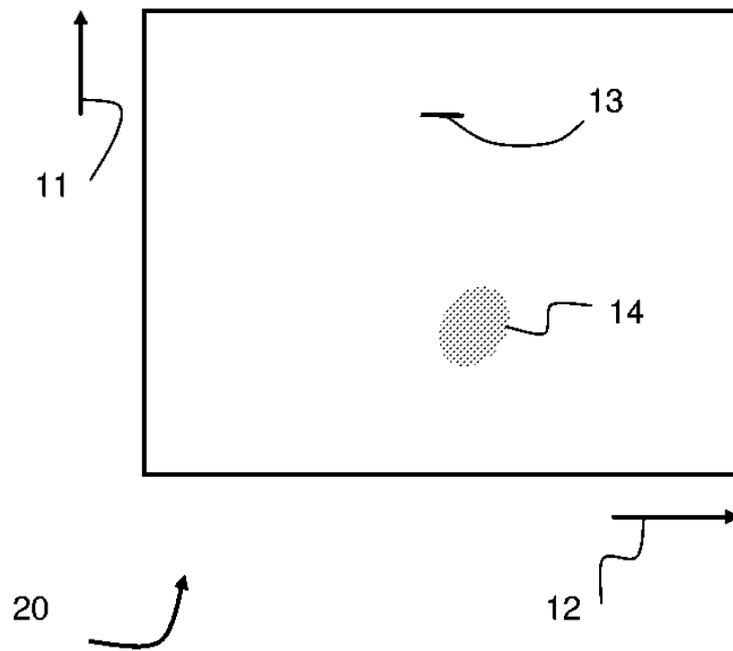


FIG. 2b

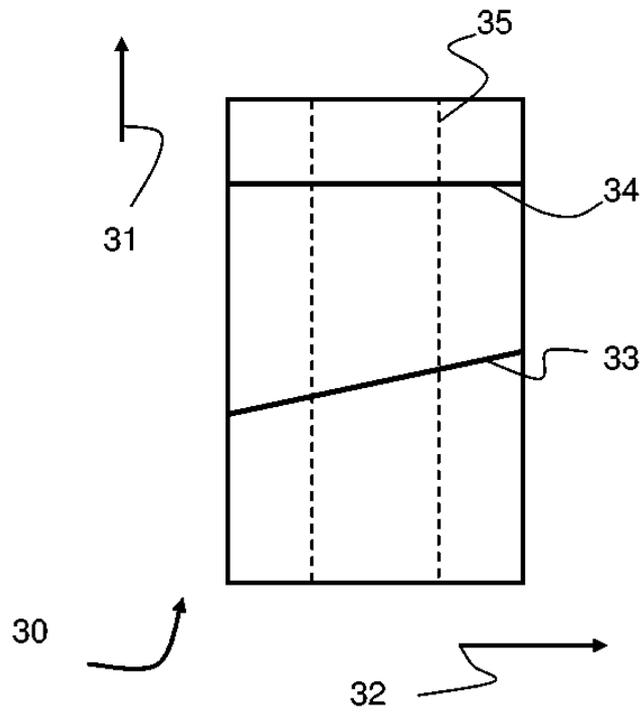


FIG. 3

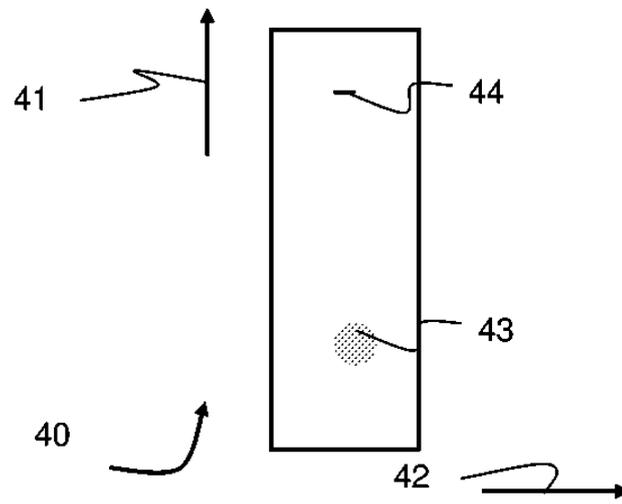


FIG. 4

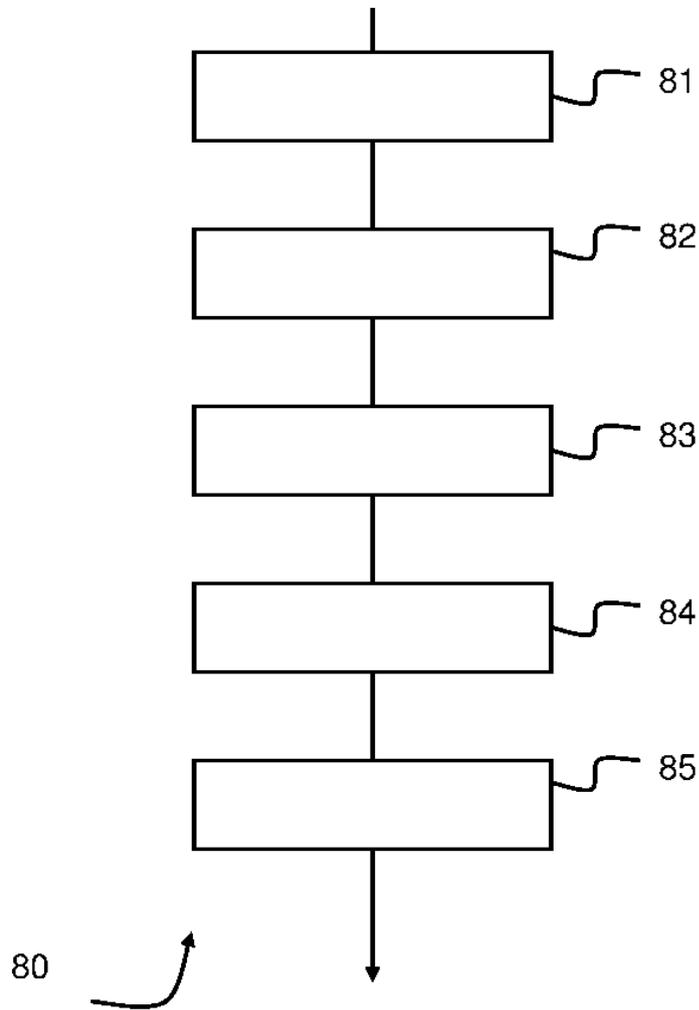


FIG.5

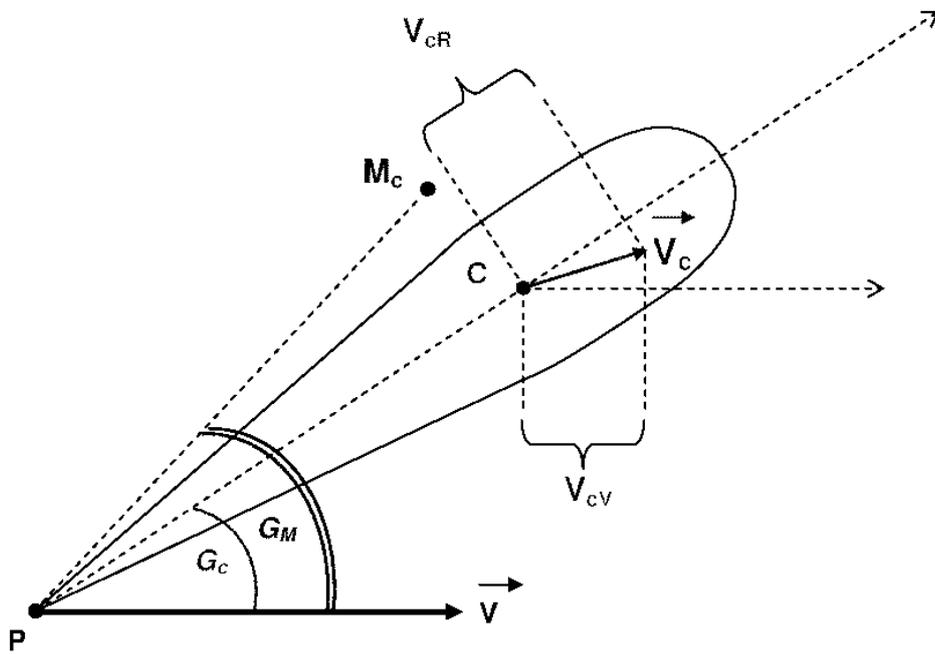


FIG.6

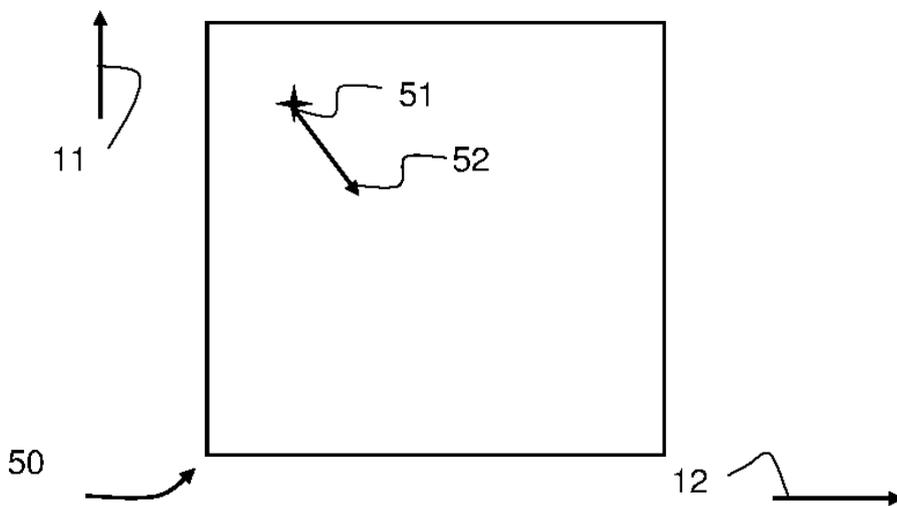


FIG.7