



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 367 287**

51 Int. Cl.:
G01S 13/90 (2006.01)
G01S 7/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04734054 .2**
96 Fecha de presentación : **20.05.2004**
97 Número de publicación de la solicitud: **1625416**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **15.02.2006**

54 Título: **Mejoras relativas a un aparato y método de obtención de imágenes.**

30 Prioridad: **21.05.2003 GB 0311646**
21.05.2003 EP 03253158

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
02.11.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
02.11.2011

73 Titular/es: **ASTRIUM LIMITED**
Gunnels Wood Road
Stevenage Hertfordshire SG1 2AS, GB

72 Inventor/es: **Hall, Charles David y**
Priestley, David Martin

74 Agente: **González Palmero, Fé**

ES 2 367 287 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

Mejoras relativas a un aparato y método de obtención de imágenes

Campo de la invención

5 Esta invención se refiere a mejoras relativas a un aparato y método de obtención de imágenes. Más particularmente, aunque no exclusivamente, esta invención se refiere a un aparato de obtención de imágenes de apertura sintética para obtener imágenes de la superficie de la Tierra desde un satélite en órbita y que se usa para proporcionar información de actitud de radar.

Antecedentes de la invención

Principios de los radares de obtención de imágenes conocidos

10 La figura 1 muestra un ejemplo de un aparato de radar de obtención de imágenes convencional que orbita alrededor de la Tierra. Tal como se muestra en la figura, el radar de obtención de imágenes es un instrumento activo que ilumina el suelo a través de una antena de haz estrecho que también se usa para recibir la radiación dispersada de vuelta por el suelo. La iluminación del suelo es mediante una secuencia de pulsos de radar cortos, normalmente repetidos a una tasa de unos cuantos kHz, a medida que la antena se mueve regularmente a lo largo de la trayectoria. La secuencia de reflexión de pulsos de radar recibidos se muestrea a una tasa alta y entonces pueden procesarse para formar mapas de la reflectividad de radar del suelo (imágenes) y otros productos de información del suelo.

20 El operador del radar está obligado a proporcionar datos de imágenes para las regiones de suelo definidas por el (los) cliente(s). El radar funciona acumulando datos de reflexión a medida que su huella del haz se mueve por la región de suelo deseada. Con el fin de garantizar que se ilumina el trozo de suelo correcto mediante el radar, la dirección de puntería de la antena debe conocerse y controlarse. La región iluminada por el radar es mayor que las dimensiones de imagen solicitadas en un margen de aproximadamente el 10% (el uso de un margen mayor que éste sería ineficaz desde el punto de vista energético). Por tanto, la precisión de puntería del haz es normalmente del orden de 1/10 de la anchura del haz del radar tanto en los sentidos longitudinal a la trayectoria como transversal a la trayectoria.

Funcionamiento del radar para la formación de imágenes

30 Tal como se conoce bien en la técnica de los radares de obtención de imágenes, las características de pulso de radar requeridas para la determinación de la actitud difieren de las características necesarias para la formación de imágenes. Se facilita en el presente documento como antecedentes una breve descripción de las características de pulso de obtención de imágenes de SAR.

35 La resolución de distancia oblicua de un instrumento de SAR para una formación de imágenes adecuada normalmente es significativamente inferior a 100 m (y en algunos casos, significativamente inferior a 1 m). La duración de un pulso de una portadora de microondas no modulada que puede presentar esta resolución de distancia oblicua es normalmente inferior al microsegundo (la resolución espacial requerida establece el ancho de banda de pulso necesario). Con el fin de lograr una resolución radiométrica adecuada, cada celda de resolución de suelo debe iluminarse también con suficiente energía para garantizar que la radiación que dispersa de vuelta hacia la antena se recibe con una relación señal a ruido (SNR) suficiente.

40 Los requisitos anteriores, en conjunto, exigen una potencia de transmisión de pulsos de portadora no modulada mucho más alta de lo que es viable para un sistema de radar no terrestre. Sin embargo, una celda de resolución de suelo puede iluminarse con la misma energía usando un pulso de potencia inferior pero que tiene una duración correspondientemente más larga sin cambiar el ancho de banda de pulso (resolución). Esto puede lograrse en la práctica modulando la portadora de microondas mediante un tono cuya frecuencia es creciente (habitualmente de manera lineal). El grado del aumento de frecuencia aplicado a la portadora es el ancho de banda del pulso. De este modo, a un pulso de radiación relativamente largo se le proporciona un ancho de banda grande (potencia de resolución).

45 Por tanto, cada pulso de SAR es alargado y de potencia moderada, consistiendo en una portadora modulada mediante un tono de frecuencia creciente (algunas veces denominada frecuencia variable (*chirp*)), y puede resolver características de suelo separadas (transversalmente a la trayectoria) mediante distancias determinadas por su resolución de distancia oblicua y ángulo de incidencia local.

50 La resolución a lo largo de la trayectoria se logra sintetizando una apertura grande a lo largo de la trayectoria a partir de una secuencia de pulsos de radar. Tal síntesis es una operación de procesamiento de señales coherente que extrae información de imágenes a lo largo de la trayectoria a partir de la progresión de fase de las reflexiones de radar entre pulsos sucesivos, usando el conocimiento de la geometría de visualización. Para el procesamiento más sencillo, el radar debe generar un pulso cada vez que la posición de la antena a lo largo de la trayectoria avanza la misma distancia particular. Para muchos sistemas de SAR conocidos (espaciales en particular) esto corresponde a

una emisión de pulsos a intervalos de tiempo equidistantes (habitualmente menos de 1 ms). Cada pulso tiene normalmente la característica de frecuencia variable tal como se describió anteriormente en el presente documento. En el caso de un SAR espacial conocido (en el que el retardo de ida y vuelta entre la transmisión del pulso y la recepción de la reflexión es normalmente de unos pocos milisegundos), varios pulsos están simultáneamente en vuelo.

Las reflexiones de pulso recibidas normalmente se demodulan por el radar y se muestrean a una tasa consecuente con la resolución de distancia oblicua requerida (desde decenas hasta centenas de MHz). Excepto en el caso de los requisitos más exigentes para la obtención de imágenes en vuelo en tiempo real, la imagen se calcula a partir del flujo de datos adquirido en el suelo algún tiempo después de adquirirse. Por tanto, el procesamiento de imágenes de SAR convencional es extremadamente intensivo desde el punto de vista computacional.

Además, el radar de obtención de imágenes convencional se basa normalmente en el funcionamiento de un juego completo de sensores de sistema de control de actitud (por ejemplo, sensores estelares de una misión espacial) para proporcionar el nivel necesario de conocimiento de la actitud para permitir que el haz del radar se apunte adecuadamente con precisión. Esto conduce a desventajas de coste y a una alta carga de procesamiento.

El documento US-A-5 440 309 da a conocer un portador que lleva un sistema de radar de obtención de imágenes y un método de estimación de errores de movimiento del portador a partir de datos de radar sin procesar.

Objetos y sumario de la invención

La presente invención tiene como objetivo superar o al menos reducir sustancialmente algunas de las desventajas mencionadas anteriormente.

El principal objeto de la presente invención es proporcionar un aparato de obtención de imágenes de radar de bajo coste que sea fiable para su aplicación como sensor de actitud. Esto se logra mediante la eliminación de sensores de actitud inerciales/geocéntricos del diseño de la invención.

En términos generales, la presente invención se basa en el concepto de iluminar una superficie seleccionada con una huella del haz de radar para la obtención de imágenes, y perfilar/procesar los ecos de radar resultantes de una manera lógica y eficaz, de modo que se deriva información de actitud de radar en tiempo real respecto a varios ejes predefinidos asociados con el radar que depende de las disposiciones relativas del radar y la superficie seleccionada y de las características de la huella del haz de radar.

Por tanto, según un primer aspecto de la invención, se proporciona un aparato de obtención de imágenes de radar para obtener imágenes de una superficie desde una plataforma que se mueve en relación con la superficie, que comprende: medios de transmisión para transmitir radiación a la superficie; medios de recepción para recibir la radiación, después de que se haya dispersado desde la superficie, a lo largo de una trayectoria de recepción predeterminada; y medios de procesamiento para procesar señales representativas de la radiación recibida para proporcionar información de actitud de radar, siendo la información de actitud representativa de la puntería de la plataforma resuelta en varias componentes axiales, y en el que la información de actitud se deriva dependiendo de una determinación de una característica de distancia en relación con la superficie y de una determinación de una distribución de frecuencia Doppler asociada con la radiación dispersada, comprendiendo los medios de procesamiento medios dispuestos para correlacionar los datos recibidos asociados con la radiación dispersada con datos de patrón de antena de radar predeterminados, medios dispuestos para derivar datos de posición pico representativos de la dirección del eje de puntería de la antena de radar, medios dispuestos para transformar dichos datos de posición pico en distancia oblicua y espacio de frecuencia Doppler, y medios dispuestos para determinar dicha información de actitud dependiendo de los datos de posición pico transformados.

Preferiblemente, la disposición de procesamiento comprende además medios para determinar datos de puntería de alabeo, cabeceo y/o guiñada asociados con la plataforma de radar, determinándose dichos datos de puntería mediante la derivación de la información de actitud y mediante una entrada selectiva de datos de elevación del terreno de modo que se tengan en cuenta las variaciones en la geometría de visualización del radar con la elevación del terreno.

Los medios dispuestos para correlacionar los datos recibidos pueden comprender una primera parte de circuito, los medios dispuestos para derivar datos de posición pico pueden comprender una segunda parte de circuito, los medios dispuestos para transformar dichos datos de posición pico pueden comprender una tercera parte de circuito, los medios dispuestos para determinar dicha información de actitud pueden comprender una cuarta parte de circuito y puede proporcionarse una parte de circuito separada para determinar datos de puntería de alabeo, cabeceo y/o guiñada asociados con la plataforma de radar.

Preferiblemente, los medios de transmisión están dispuestos para transmitir un primer conjunto de pulsos de radar correspondientes a un primer ángulo de elevación en relación con la superficie, conjunto de pulsos de radar que incluye un pulso de radar de determinación de distancia emitido en un primer momento predeterminado y un pulso de radar de discriminación de frecuencia emitido en un segundo momento predeterminado, estando dispuestos dichos medios de recepción para recibir dichos pulsos en momentos predeterminados diferentes, y estando

dispuestos dichos medios de procesamiento para derivar datos de actitud de eje de cabeceo y alabeo dependiendo de la determinación de una distancia oblicua y un desplazamiento de frecuencia Doppler asociados con las características de pulso recibidas.

5 Ventajosamente, hay una pluralidad de tales conjuntos de pulsos de radar correspondientes a una pluralidad de ángulos de elevación en relación con la superficie, y uno o más de tales conjuntos de pulsos se reciben y procesan para derivar datos de actitud de eje de guiñada dependiendo de la determinación de una distancia oblicua y un desplazamiento de frecuencia Doppler diferencial asociados con las características de pulso recibidas.

10 De manera conveniente, los medios de transmisión están adaptados para emitir pulsos de radar de onda continua (CW). Alternativamente, los medios de transmisión podrían adaptarse para emitir pulsos de radar de frecuencia variable, si se desea.

15 Preferiblemente, el aparato de obtención de imágenes de la invención es un aparato de obtención de imágenes de apertura sintética. Sin embargo, debe apreciarse que no se requiere que el aparato de obtención de imágenes de la invención sea del tipo de obtención de imágenes de apertura sintética. Por ejemplo, el aparato de obtención de imágenes de la invención podría comprender en su lugar un radar de obtención de imágenes dirigido hacia delante. Alternativamente, el aparato de obtención de imágenes de la invención podría comprender un radar de obtención de imágenes con un barrido horizontal grande, dirigido en parte hacia los lados y en parte hacia delante.

20 Además, según un segundo aspecto de la invención, se proporciona un método de obtención de imágenes de una superficie desde una plataforma que se mueve en relación con la superficie, comprendiendo el método las etapas de: transmitir radiación a la superficie; recibir la radiación, después de que se haya dispersado desde la superficie, a lo largo de una trayectoria de recepción predeterminada; y procesar señales representativas de la radiación recibida para proporcionar información de actitud de radar, siendo la información de actitud representativa de la puntería de la plataforma resuelta en varias componentes axiales, y en el que la información de actitud se deriva dependiendo de una determinación de una característica de distancia en relación con la superficie y de una determinación de una distribución de frecuencia Doppler asociada con la radiación dispersada. El procesamiento de las señales representativas de la radiación recibida comprende correlacionar los datos recibidos asociados con la radiación dispersada con datos de patrón de antena de radar predeterminados, derivar datos de posición pico representativos de la dirección del eje de puntería de la antena de radar, transformar dichos datos de posición pico en una distancia oblicua y un espacio de frecuencia Doppler, y determinar la información de actitud dependiendo de dichos datos de posición pico transformados.

30 La presente invención también se extiende a una aeronave o un sistema de comunicaciones por satélite que incorpora el aparato de obtención de imágenes descrito anteriormente.

35 Debe apreciarse que el aparato y el método de obtención de imágenes de la invención pueden implementarse con un coste razonable, y que tienen utilidad para diversas aplicaciones, por ejemplo en misiones de radar espacial y misiones de radar aéreo. La presente invención puede aplicarse ventajosamente a cualquier banda de ondas de radar.

40 Debe apreciarse también que la presente invención puede usarse convenientemente para establecer la puntería de una aeronave respecto a dos ejes de referencia con un esfuerzo computacional factible, un requisito de almacenamiento de datos razonable y con suficiente precisión para garantizar que el radar recoge datos fiables durante la obtención de imágenes. Cuando hay una capacidad de direccionamiento del haz limitada, el sensor de actitud de la invención también puede soportar ventajosamente un cierto grado de sensibilidad al desapuntamiento del ángulo de guiñada.

De manera conveniente, la presente invención puede realizarse en software.

45 Debe indicarse también que la presente invención puede utilizarse ventajosamente en el control de actitud en bucle cerrado de la plataforma que lleva el radar antes, durante y después de las fases de obtención de imágenes de radar. Esto puede lograrse fácilmente sin usar ningún recurso de sistema terrestre.

Las características anteriores y otras de las invenciones se exponen con particularidad en las reivindicaciones adjuntas y se describirán a continuación en el presente documento con referencia a los dibujos adjuntos.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 muestra una disposición de radar convencional que obtiene imágenes de la superficie de la Tierra;

50 la figura 1A muestra una tabla que resume las características de la huella lobular típica de la antena de radar de la invención;

la figura 2 es un diagrama explicativo relativo al funcionamiento del aparato de obtención de imágenes de radar según una realización de la invención;

la figura 3 muestra una disposición de detección de la actitud del radar que obtiene imágenes de la superficie de la Tierra según otra realización de la invención;

la figura 4 muestra cómo se determina la distancia en una realización de la presente invención correlacionando los ecos de radar con un patrón de antena de radar predeterminado;

- 5 la figura 5 muestra cómo se determina un refinamiento de la distancia según una realización de la invención correlacionando los ecos de radar con un patrón de antena de nulo central predeterminado;

la figura 6 muestra un diagrama de diversas etapas de procesamiento para su implementación en una realización de la invención;

- 10 la figura 7 muestra otro diagrama de diversas etapas de procesamiento para su implementación en una realización de la invención;

la figura 8 muestra cómo se determina la frecuencia central Doppler de ecos de radar según una realización de la invención;

la figura 9 muestra una secuencia de transformaciones de señal preferidas propuesta para su uso en la invención;

- 15 la figura 10 muestra otro diagrama de diversas etapas de procesamiento para su implementación en una realización de la invención;

la figura 11 muestra un cronograma de funcionamiento preferido relativo a la medición de la actitud del radar en la presente invención;

la figura 12 muestra un marco de puntería de sensor de actitud del radar natural que puede aplicarse a la presente invención;

- 20 la figura 13 es un diagrama explicativo relativo a la estimación de la puntería del radar según una realización de la invención; y

la figura 14 es otro diagrama explicativo relativo a la corrección del procedimiento de estimación de la puntería del radar de la figura 13.

Descripción detallada de realizaciones preferidas

- 25 La técnica de detección de la actitud de la invención que va a describirse a continuación en el presente documento se basa para su éxito en la adquisición de datos de ecos de radar desde una superficie de dispersión seleccionada, la superficie de la Tierra por ejemplo. Los instrumentos de radar que son particularmente adecuados para proporcionar este tipo de datos pueden ser aéreos o espaciales, y frecuentemente hacen uso de un procesamiento de apertura sintética de modo que se favorece la resolución espacial sobre el suelo creada mediante la obtención de imágenes. Sin embargo, aunque la técnica de detección de la actitud de la invención descrita es muy adecuada para un radar de apertura sintética (SAR), es igualmente adecuada para otros tipos de radar (por ejemplo, radar de obtención de imágenes dirigido hacia delante y radar de obtención de imágenes con barrido horizontal grande dirigido en parte hacia los lados/en parte hacia delante). Por consiguiente, el término "radar" se usa a lo largo de toda la descripción.

- 35 En la siguiente descripción, se proporciona en primer lugar un resumen de los supuestos básicos que subyacen a la descripción de las realizaciones preferidas de la invención. A continuación se proporciona una descripción de cómo las capacidades del radar de la invención pueden explotarse eficazmente para la determinación de la actitud de la antena en tiempo real, a bordo, en el contexto de un radar espacial (aunque debe indicarse que la invención no se limita a radares de tipo espacial).

- 40 **Supuestos que subyacen a la descripción de realizaciones preferidas**

Órbita de la aeronave

Se supone una altitud de 500 km para los fines de esta discusión.

Precisión de la determinación de la actitud mediante AOCS

- 45 Se supone que un AOCS de bajo coste puede determinar la actitud con una precisión del orden de $\pm 2^\circ$ respecto a cada uno de tres ejes. Se supone una precisión de puntería comparable.

Definiciones de los ejes

Para una explicación más clara, los ejes de referencia se definen en el presente documento coincidiendo con los ejes de la antena de radar primaria, tal como sigue:

Eje de alabeo: paralelo al eje longitudinal de la antena (por tanto, longitudinal al vector velocidad de vuelo nominal).

Eje de cabeceo: perpendicular al eje de alabeo, en el plano de la antena.

Eje de guiñada: perpendicular a los ejes tanto de alabeo como de guiñada, a través de los lóbulos principales de la antena nominal.

- 5 En la práctica, estos ejes pueden no corresponder a los ejes de control de la aeronave. Esto no presenta un problema de transformación de coordenadas.

Patrones de antena de radar y cobertura de barrido

- 10 Para facilidad de la explicación, las dimensiones de la antena se consideran de 1,1 m de altura (medida a lo largo del eje de cabeceo) por 2,5 m de longitud (medida a lo largo del eje de alabeo). Las anchuras angulares de lóbulo de la antena principal de nulo a nulo son por tanto de $3,13^\circ$ en elevación y de $1,38^\circ$ en azimut. Se supone que ángulos de incidencia útiles son de entre 20° y 50° respecto al nadir local. A una altitud de 500 km, las huellas de la iluminación (medidas entre los primeros nulos del patrón de antena) tienen las siguientes características tal como se indican mediante una tabla en la figura 1A.

Capacidades del radar Core

- 15 Se plantean los siguientes supuestos respecto a las capacidades del radar de la invención:
- Flexibilidad en la tasa de pulsos del radar, son posibles desde pulsos individuales hasta frecuencias de repetición de pulsos que se aproximan a 40 kHz.
- Están disponibles duraciones de pulsos de radar individuales de entre aproximadamente $1 \mu\text{s}$ y como máximo 2 ms.
- 20 Debe evitarse información de ecos de radar demodulados con componentes útiles en DC. Debe usarse alguna forma de modulación de portadora.
- Es posible una modulación de fase de la portadora tanto mediante un tono sencillo como mediante un aumento de frecuencia lineal (el modo de modulación normal).
- Pueden estar disponibles múltiples centros de fase de antena que permiten sintetizar, por ejemplo, un nulo de eje de puntería de antena de elevación.
- 25 Está disponible una pequeña selección de filtros antisolapamiento de premuestreo en la cadena de recepción, cuyo ancho de banda más bajo es del orden de 10 MHz, que podría usarse para modos de sensor de actitud de radar.
- Pueden programarse tasas de muestreo concomitantes
- Puede desactivarse la BAQ.
- 30 Usando la tasa de muestreo disponible más baja, la memoria intermedia de línea de ecos es efectivamente de longitud ilimitada.
- Está disponible una unidad de gestión de datos (DMU) para almacenar en memoria intermedia pequeñas cantidades de ecos sucesivos.
- Puede accederse a la DMU mediante un ordenador de determinación de la actitud del radar.
- Está disponible un direccionamiento limitado del haz de elevación.

35 Funcionamiento y modos de SAR

Stripmap, Scansar y Spotlight son los modos preferidos de obtención de imágenes de radar de la invención. Está previsto usar los huecos entre periodos de obtención de imágenes de radar para adquirir datos de sensor de actitud del radar.

Objetivos de rendimiento funcional del sensor de actitud del radar

- 40 En las direcciones tanto transversal a la trayectoria como longitudinal a la trayectoria, la mitad de la anchura del lóbulo de antena principal es menor que el error de determinación de la actitud mediante AOCS esperado. Por tanto, la incertidumbre en la puntería de la aeronave en cualquier momento podría provocar potencialmente que el radar ilumine el trozo de terreno erróneo.
- 45 Con el fin de garantizar que los ecos de radar se recojan desde la región correcta de la Tierra en la dirección transversal a la trayectoria, el haz de elevación debe dirigirse (mediante algún medio) con una precisión mejor que la que es posible usando solo sensores de AOCS aproximados. Este direccionamiento debe completarse antes de que

comience la obtención de imágenes. En la realización preferida de la invención, el radar se usa para establecer el error de puntería de alabeo en relación con la requerida para la escena en cuestión. El conocimiento de este error de puntería puede usarse para dirigir el haz de elevación, provocando o bien:

el reapuntamiento mecánico de la aeronave respecto al eje de alabeo, o bien:

- 5 el direccionamiento programado electrónicamente del haz de elevación.

Para fines de formación de imágenes de radar, se considera que el objetivo de precisión de la puntería del haz transversal a la trayectoria es del orden de $\pm 1/10$ de la anchura del haz de 3db de elevación, que es de aproximadamente $\pm 0,15^\circ$.

- 10 Dado un haz de elevación apuntado de manera apropiada, tarde o temprano el haz transitará por el área de suelo objetivo en algún momento, como resultado del movimiento longitudinal a la trayectoria de la aeronave. Con el fin de garantizar que se recogen los datos apropiados, se usa el radar para establecer el error de puntería de cabeceo en relación con la requerida para la escena en cuestión. Estos datos pueden usarse para programar una recogida de datos correcta provocando, o bien:

el reapuntamiento mecánico de la aeronave respecto al eje de cabeceo, o bien:

- 15 el direccionamiento programado electrónicamente del haz de azimut, o bien:

la sincronización apropiada de la transmisión de pulsos de radar y la recepción de ecos.

Se considera que el objetivo de precisión de la puntería del haz longitudinal a la trayectoria es del orden de $\pm 1/10$ de la anchura del haz de 3db de azimut, que es de aproximadamente $\pm 0,07^\circ$.

Características de rendimiento primarias del sensor de actitud del radar

- 20 Desde el punto de vista de un AOCS, las características de rendimiento críticas de un sensor de actitud son:

resolución angular,

características de ruido,

tasa de lectura,

precisión.

- 25 Es probable que pueda lograrse suficiente resolución angular mediante un sensor de actitud de radar.

Se obtienen mediciones de sensor de actitud de radar estadísticamente independientes iluminando diferentes trozos de suelo. Con una velocidad respecto al suelo a lo largo de la trayectoria del orden de 7 kms^{-1} , normalmente estarán disponibles desde el radar mediciones estadísticamente independientes sólo cada de 2 a 3 segundos (véase la figura A). En comparación con la mayoría de los sensores de AOCS, esta es una velocidad de lectura muy baja.

- 30 Aunque el radar es un dispositivo de determinación de distancias de precisión, las fuentes de error requieren estudio. Sin embargo, merece la pena indicar en el presente documento que, puesto que la puntería de la aeronave se calcula a partir de datos de radar usando la geometría de la órbita y el geoide de la Tierra, la altura del terreno local influye en la precisión de cualquier medición de actitud particular. Por ejemplo, a una distancia del radar medida de 600 km, un error en la altura del terreno de 1 km introduciría normalmente un error de puntería de alabeo de aproximadamente $0,17^\circ$ si se deja sin compensar. Este error es mayor que la precisión de puntería del haz deseada. Por tanto, las variaciones en la altura del terreno con respecto a la superficie modelo del geoide se compensan en cierta medida. En las realizaciones preferidas de la invención, el uso de un mapa de elevación del terreno en una rejilla aproximada se considera que es suficientemente eficaz para lograr una corrección de la altura del terreno.

Explicación de los principios de funcionamiento

- 40 Haciendo referencia a continuación a la figura 2, se muestra que una antena de radar (SAR) a bordo del satélite 2 durante su órbita alrededor de la Tierra irradia un haz 1 de radiación transmitida. El haz 1 se dirige de manera oblicua a la ubicación P de dispersión en la superficie sombreada produciendo un barrido (tal como se muestra). Obsérvese que a medida que el satélite 2 continúa en su órbita la radiación se transmite normalmente como una serie de pulsos para generar un barrido bien definido.

- 45 La característica P de dispersión en la superficie sombreada y dentro del barrido dispersa el pulso transmitido, y parte de la radiación dispersada viaja de vuelta al satélite 2 a lo largo de un haz de recepción predeterminado (no mostrado) para su procesamiento posterior. Las diversas etapas de procesamiento para su implementación particular en la invención van a describirse en secciones posteriores de esta descripción.

Debe entenderse que las disposiciones relativas y el movimiento relativo del radar y la superficie de dispersión seleccionada producen un desplazamiento de frecuencia Doppler en la radiación dispersada. El desplazamiento de frecuencia Doppler es positivo cuando la dispersión es por delante del satélite, cero cuando la dispersión es transversal al satélite y negativo cuando la dispersión es por detrás del satélite. En secciones posteriores de esta descripción se muestra cómo el perfilado/procesamiento de la invención de los ecos de radar proporciona una estimación precisa y fiable de la distancia (distancia oblicua) entre el satélite y el área local de suelo iluminada por la huella de haz del radar. Estos datos de distancia, junto con el conocimiento del satélite respecto a la superficie de dispersión, permiten determinar datos de actitud fiables respecto al eje de alabeo predefinido. Además, se muestra cómo puede hacerse uso del radar de la invención para determinar la orientación respecto al eje de cabeceo predefinido, perfilando la transformada de Fourier de un pulso más largo. Esto proporciona de manera conveniente un perfil de la desviación Doppler asociada con el haz del radar, a partir del cual puede determinarse la dirección de puntería del haz del radar particular.

Teniendo en cuenta lo anterior, debe apreciarse también que la reflectancia del suelo en general no muestra características fuertes, repetibles, con una relación direccional conocida con respecto a la trayectoria respecto al suelo del satélite. Además, el patrón del haz de antena tiene una simetría radial relativamente fuerte respecto a la línea de eje de puntería. Por tanto, no es probable que pueda derivarse de manera fiable información de puntería de eje de guiñada a partir de los ecos de radar procedentes del suelo (sin direccionamiento del haz de elevación). De hecho, con el fin de proporcionar los datos de actitud de alabeo y cabeceo en relación con el suelo, es esencial que la puntería de guiñada se mantenga de manera que el eje de alabeo de la aeronave permanezca alineado con la velocidad orbital hasta dentro de un par de grados (desatendiendo la cuestión de cualquier corrección de dirección Doppler cero necesaria como resultado de la rotación de la Tierra bajo la aeronave).

Al mantener aproximadamente la puntería de guiñada, se indica por tanto que la actitud de alabeo y cabeceo puede determinarse a partir de los datos de radar, puesto que cambios en la puntería de alabeo provocan predominantemente cambios en la distancia a lo largo del eje de puntería con respecto al suelo y cambios en la puntería de cabeceo provocan que el espectro Doppler de los ecos del suelo se desplace. En estas condiciones, la determinación del vector B del eje de puntería permite calcular la actitud de la antena de radar.

La forma natural de este vector (tras el procesamiento) es en términos de distancia oblicua del eje de puntería y frecuencia central Doppler (DCF) del eco de radar (que se refiere directamente al ángulo azimutal). La actitud de alabeo/cabeceo puede determinarse convenientemente resolviendo simultáneamente las ecuaciones geométricas usando estas dos cantidades. En la primera aproximación, esto puede lograrse mediante referencia a la superficie del geoide de la Tierra local. Sin embargo, una solución precisa es complicada por la variación en la elevación del terreno en relación con la superficie del geoide. El efecto de la variación de la altura del terreno local en la determinación de la puntería es comparable con, o mayor que, la precisión de la determinación requerida. Un posible enfoque para este problema se expone en una sección posterior de la descripción en referencia a la figura 14.

Requisitos del pulso de determinación de la actitud

A una altitud orbital de radar espacial típica (es decir, 500 km), la resolución de distancia oblicua requerida para determinar la puntería del haz de elevación hasta 1/10 de la anchura del haz no es más exigente que a aproximadamente 500 m (considerablemente más relajada que para la obtención de imágenes). A medida que disminuye la altitud, la resolución de distancia oblicua necesaria se vuelve más exigente (de manera lineal) mientras que el beneficio de la disminución de la distancia de la antena al suelo, que proporciona un aumento de la densidad de potencia de iluminación del suelo, aumenta como el cuadrado de la altitud. En conjunto, estas relaciones significan que no es necesario usar un pulso de radar de frecuencia variable de obtención de imágenes convencional para la medición de la actitud. En su lugar, es completamente suficiente una ráfaga de portadora de microondas, cuya duración concuerda con la resolución más alta necesaria para la resolución del ángulo de elevación. En la práctica, esta ráfaga de onda continua (CW) (normalmente del orden de 1 μ s de duración) debe modularse mediante un tono de frecuencia fijada, (es decir, 5 MHz) para que el demodulador del radar deje pasar la componente de frecuencia de señal de frecuencia cero (DC). El uso de un pulso de esta sencillez para la determinación del ángulo de elevación tiene la ventaja de no requerir una "eliminación de frecuencia variable" (*de-chirping*) (una tarea que requiere un grado significativo de procesamiento de la señal).

En la dirección longitudinal a la trayectoria, el desplazamiento Doppler de las reflexiones de radar se usa para discriminar ángulos de azimut. La resolución Doppler requerida para medir el ángulo de azimut hasta 1/10 de la anchura del haz de azimut depende de la velocidad de la antena en relación con el suelo. Para un radar espacial típico a una altitud de 500 km, la resolución Doppler del pulso de radar debe ser del orden de 500 Hz. Un pulso de radar modulado con tono sencillo de 2 ms de duración es necesario para esta precisión de determinación del ángulo de azimut (el pulso de determinación de la elevación no puede usarse tampoco para la medición del ángulo de azimut porque una ráfaga de CW que dura 1 μ s tiene una resolución de frecuencia de 1 MHz).

En una segunda realización de la invención, mostrada en la figura 3, un satélite 6 que porta una antena de radar SAR que se mueve en relación con la superficie de la Tierra transmite una serie de pulsos de radiación a tres ubicaciones P1, P2, P3 diferentes en la superficie sombreada por medio de tres haces 10, 11, 12 de transmisión que iluminan un barrido.

La suposición inicial en este caso es que la capacidad de que el sensor de actitud del radar detecte rotación alrededor del eje de guiñada es baja. De hecho, el sistema de radar tendrá una capacidad de direccionamiento del haz de elevación limitada. Los tres haces 10, 11 y 12 de transmisión tal como se propone están separados cada uno por aproximadamente una anchura de haz. Tal como se muestra en la figura 3, estos haces, que se usan normalmente en el modo de obtención de imágenes Scansar, se mueven de P1 a P2 a P3 con intervalos de tiempo y periodos de permanencia adecuados para esta tarea de obtención de imágenes particular. El uso del radar de la invención de este modo elimina eficazmente la simetría de haz más o menos cilíndrica alrededor de la dirección del eje de puntería.

Por tanto, tal como se muestra en la figura 3, el sistema de la invención puede usarse para presentar una cierta sensibilidad a la rotación del eje de guiñada. Si hay un desapuntamiento significativo respecto al eje de guiñada, entonces el lugar geométrico de los puntos de intersección con el suelo del haz de radar (P1, P2 y P3 para los haces de elevación dirigidos) no se encuentra en una línea iso-Doppler. Si cada uno de los tres haces 10, 11 y 12 se usa para establecer la frecuencia central Doppler de los ecos procedentes del suelo, entonces las diferencias entre estas mediciones sucesivas pueden proporcionar alguna medida del ángulo de desapuntamiento de guiñada.

Obsérvese que la sincronización del redireccionamiento del haz y los periodos de residencia para esta tarea de estimación de la actitud son necesariamente igual que para el modo de obtención de imágenes Scansar. Tampoco es necesario usar las posiciones de los tres haces. Puede ser suficiente, por ejemplo, usar sólo aquellos haces correspondientes a puntos de dispersión del suelo, P1 y P3.

Teniendo en cuenta lo anterior, por tanto, la transmisión de un par de pulsos de transmisión de radar, cada uno una ráfaga de CW sencilla modulada mediante un tono fijo, una corta y una larga, es suficiente para realizar una medición de la actitud de alabeo-cabeceo individual (ángulo de alabeo a partir de la distancia oblicua P1, ángulo de cabeceo a partir del desplazamiento Doppler P1), y la transmisión de al menos un par de pulsos adicionales a un ángulo de elevación diferente permite determinar el ángulo de guiñada a partir de mediciones de distancia oblicua-desplazamiento Doppler diferenciales (P2 y P3).

Puesto que la distancia oblicua y el desplazamiento Doppler en el eje de puntería de la antena deben determinarse inequívocamente, también es importante que sólo un pulso de cada tipo esté en vuelo en cualquier momento. Para un radar espacial a una altura de 500 km (y un tiempo de ida y vuelta de pulso de aproximadamente 4 ms), puede ser posible intercalar la transmisión de pulso corto y pulso largo y las ventanas de recepción, permitiendo que se transmitan un par de pulsos y se reciban sus ecos a lo largo de un periodo de entre 8 ms y 10 ms sin infringir el requisito de recepción inequívoca. La certeza de la determinación de la actitud puede aumentarse fácilmente realizando una sucesión de mediciones.

Las siguientes secciones de esta descripción establecen los principios del funcionamiento del sensor de actitud de la invención mediante explicaciones separadas de:

cuestiones de medición de la distancia oblicua del eje de puntería,

cuestiones de medición de la frecuencia central Doppler del eje de puntería,

cuestiones de determinación de la actitud (incluyendo la compensación de la variación de la altura del terreno).

Principios de determinación de la distancia oblicua

El radar de la invención puede usarse para medir distancias de ecos a lo largo de una dirección de referencia en el patrón de ganancia de elevación de la antena. Las características operacionales del radar y las técnicas de procesamiento de señales a bordo requeridas para solucionar este problema son diferentes de las necesarias para modos de obtención de imágenes de SAR habituales, tal como se comenta más adelante en el presente documento.

Muestreo de distancias

Puesto que el tiempo de vuelo de un pulso de radar es sólo de unos pocos milisegundos (pequeño en comparación con retardos de AOCS), puede muestrearse todo el barrido accesible en esta invención inequívocamente (con sólo un pulso de radar en vuelo en cualquier momento). Esto simplifica en gran medida las tareas de procesamiento de datos.

Características del pulso de radar

Siempre que pueda lograrse una relación señal a ruido adecuada, pueden usarse pulsos de radar de onda continua (portadora modulada mediante un tono fijo). También está disponible la opción de usar pulsos de frecuencia variable para mejorar la relación señal a ruido (S/N), aunque no se prefiere en vista de la carga de procesamiento a bordo que requeriría.

Una resolución de distancia oblicua de radar equivalente a 1/10 de la anchura de 3dB del lóbulo de haz de elevación principal sería suficiente. Se exige el pulso de radar más corto en el menor ángulo de incidencia local. A 20°, la longitud de pulso máxima consecuente con esta resolución es de 1,75 μ s. Se requiere un intervalo de muestreo

máximo de $0,875 \mu\text{s}$ para proporcionar la resolución angular requerida para el menor ángulo de incidencia y es más que suficiente a ángulos de incidencia superiores. Esta tasa de muestreo es muy baja en comparación con la requerida con modos de obtención de imágenes de SAR normales.

Ventana de recepción

- 5 Con el fin de determinar la distancia de la región de suelo desde la cual está recibiendo un eco de radar, la duración de la ventana de recepción debe ser suficientemente larga para adaptarse a todo el barrido accesible. Esto corresponde a una duración de la ventana de recepción del orden de 1,5 ms. Puede usarse entonces el patrón de ganancia de elevación de la antena completo para discriminar entre diferentes ecos del suelo. Esto contrasta con los modos de obtención de imágenes normales que usan sólo la parte central del lóbulo principal.

10 Almacenamiento intermedio de ecos

El requisito de tasa de muestreo de datos mínima (para el sensor de actitud del radar) es muy bajo. Si se usa el filtro antisolapamiento de ancho de banda mínimo en la cadena de recepción (~ 10 MHz), entonces la tasa de entrada de datos en las memorias intermedias FIFO del ensamblador de paquetes de radar CORE es menor que su capacidad para vaciarse. Por tanto la memoria intermedia de datos de eco es efectivamente ilimitada.

15 Compresión de datos

Los datos del sensor de actitud del radar no están destinados al suelo y la tasa de transmisión de datos es relativamente baja de modo que no es necesario una BAQ. Con el fin de evitar el procesamiento de desempaqueamiento de BAQ innecesario, el radar funciona con la BAQ apagado (como en el caso de datos de réplica).

20 Determinación de distancia mediante correlación de ecos con el patrón de elevación de la antena

En una realización preferida de la invención, tal como se muestra en la figura 4, la potencia de eco de radar recibida se modula mediante el patrón de ganancia de elevación de la antena. Tal como se muestra, este patrón también es borroso en pequeña medida, debido a que el pulso de radar tiene una duración finita. También se prevé que la variación con el tiempo de la potencia recibida instantánea se module fuertemente por el ruido.

- 25 Obsérvese que el eco con ruido de un pulso individual puede correlacionarse ventajosamente con el patrón de ganancia de elevación conocido dando lugar a la variación filtrada en la potencia de la señal con la distancia oblicua.

Detección de picos

- El mayor valor en la matriz de correlación se ubica en la distancia oblicua del centro del haz de elevación. Puede ser suficientemente preciso ubicar el valor de correlación pico en el intervalo de muestreo de distancia oblicua más cercano. También es posible, con poca carga computacional extra, usar el valor pico de correlación y varios de sus vecinos más cercanos para realizar una interpolación sencilla, dando lugar a la distancia oblicua a lo largo del eje de puntería en una escala de intervalos de distancia no en números enteros.

Refinamientos en los principios de determinación de la distancia oblicua

- 35 La figura 5 muestra cómo se determina un refinamiento en la distancia según una realización de la invención correlacionando ecos de radar con un patrón de antena de nulo central predeterminado.

- La característica dominante de cualquier eco de radar es el ruido. Los inventores han reconocido cómo puede reducirse la incertidumbre en la determinación de la distancia promediando las contribuciones de varios ecos. La mejora lograda es máxima cuando los ecos son totalmente independientes estadísticamente. Se propone que varios ecos de determinación de distancia sucesivos (~ 5), separados por el intervalo de tránsito de suelo del lóbulo de antena principal longitudinal a la trayectoria, se combinen para formar una única estimación de la distancia.

El sistema RF de la antena puede permitir convenientemente la imposición de un nulo a lo largo de la dirección del eje de puntería de elevación. Puede ser una ventaja usar este patrón de antena de elevación para pulsos de determinación de distancia puesto que la pendiente de la función de correlación en las proximidades del eco pico puede aumentarse.

45 Transformaciones de señal en la determinación de la distancia oblicua del eje de puntería

Tal como se describió anteriormente, la figura 4 muestra las transformaciones de señal primaria implicadas en la determinación de la distancia oblicua del eje de puntería.

- Obsérvese que etapas iguales en el ángulo de elevación (el marco natural para expresar el patrón de ganancia de elevación) corresponden a etapas de tiempo de la distancia oblicua crecientes de manera no lineal a medida que el ángulo de incidencia aumenta. Por tanto, es necesario volver a muestrear los datos de eco en el dominio de tiempo

según esta relación no lineal con el fin de potenciar/maximizar el rendimiento de la correlación del perfil de potencia de ecos/patrón de antena.

Parámetros y etapas de procesamiento de la determinación de la distancia oblicua del eje de puntería

5 La figura 6 muestra un diagrama de diversas etapas de procesamiento para su implementación en una realización de la invención.

Tal como se muestra en la figura 6, los datos de ecos a los que se accede desde la DMU están en forma de paquete y deben desempaquetarse.

10 Un filtro en el dominio de tiempo sencillo (SR3) (precedido por un desplazamiento de frecuencia SR2) que dé lugar a una reducción de la tasa de transmisión de datos (seguida por una FFT más corta) requiere menos Flops que realizar la FFT de todo el conjunto de datos. El vector de aumento de fase en el dominio de tiempo puede calcularse previamente y ponerse a disposición como una matriz.

La etapa de volver a muestrear la distancia (SR4) puede combinarse en la práctica con el filtro promedio con bajo coste extra, seleccionando la posición de grupos contiguos de muestras para el promediado según los intervalos de remuestreo de salida requeridos por la geometría.

15 La correlación del patrón de antena de elevación con el perfil de potencia de distancia recibido (SR5 a SR8) se logra de manera convenientemente eficaz tal como se muestra, usando la secuencia FFT/multiplicación/IFFT sobre los conjuntos de muestras de tasa reducida.

20 El coste de la detección de picos (SR9) y una interpolación sencilla (SR10) para hallar la distancia oblicua en el eje de puntería es muy bajo. Una alternativa es extender los datos antes de la IFFT final (mediante relleno con ceros) para dar lugar a una matriz de salida interpolada. El coste es el de una IFFT más larga.

La siguiente sección establece las etapas de procesamiento preferidas al nivel superior necesarias para derivar la información de altitud de la antena de radar a partir de los datos de eco de radar recibidos.

Procesamiento para la determinación de la actitud

25 La figura 7 identifica las etapas de procesamiento del nivel superior preferidas, necesarias para derivar la actitud de la antena de radar a partir de datos de eco de radar recibidos. Tal como se muestra en la figura, la entrada superior izquierda representa datos de eco muestreados sin procesar para pares de pulsos de determinación de la actitud tal como están disponibles a partir del hardware del radar (entrada desde la unidad de gestión de datos (DMU) del radar).

30 Estas etapas de procesamiento son convenientemente operaciones de software que se llevan a cabo en tiempo real, a bordo de la plataforma de radar. También se identifican entradas de datos de parámetros primarios.

35 Obsérvese que los datos de eco de radar sin procesar procedentes del suelo tienen, en general, mucho ruido, pero también ocupan todo el alcance del patrón de antena bidimensional a través del que pasan los pulsos de radar. Tal como se muestra, tras su transferencia desde la unidad de gestión de datos de radar y su desempaquetamiento, estos datos se correlacionan (en distancia oblicua y espacio Doppler) con los patrones de antena de elevación y azimut, respectivamente. A partir de estas correlaciones, pueden hallarse posiciones de respuesta pico precisas que corresponden a la dirección del eje de puntería de la antena. De manera conveniente, éstas se traducen en distancia oblicua y frecuencia Doppler usando parámetros geométricos y de radar básicos.

40 La solución de las rotaciones de Euler de alabeo, cabeceo y guiñada (que usa y produce la matriz del coseno de la dirección de puntería de la antena o DCM) se desarrolla convenientemente mediante un proceso iterativo, en cuya base se encuentra una técnica de Newton-Raphson convencional adaptada para ello. En la realización mostrada, una solución de puntería precisa requiere una entrada de mapa de elevación del terreno aproximado (puesto que la altura del terreno influye en la geometría de visualización).

45 Obsérvese que sólo se requiere que la plataforma de radar proporcione el vector de estado de movimiento de la antena (vectores posición y velocidad en espacio tridimensional), transmitido a partir de mediciones de GPS por el AOCS en el momento de la medición de la actitud.

50 Procesar un par de pulsos de elevación-azimut requiere menos de 1 millón de operaciones aritméticas (muchas de las cuales pueden ser operaciones con números enteros) y normalmente se espera que se ejecute en aproximadamente 50 ms o menos en un procesador apto para el espacio típico. Por ejemplo, esta carga extra podría tratarse mediante una tarjeta de ordenador convencional en tiempo real. Una interfaz de datos de bajo volumen, sencilla, con la plataforma ACS permite el control de la actitud en tiempo real basándose en mediciones de radar.

Se pone a disposición del procesador convenientemente un mapa de elevación del terreno aproximado (del orden de 8 megamuestras). Éste es con mucho el mayor elemento de todos los requisitos de memoria de procesamiento.

Principios de determinación de la frecuencia central Doppler

5 El espectro Doppler de los ecos de radar procedentes del suelo puede usarse para evaluar la puntería del haz longitudinal a la trayectoria. La correlación de este espectro Doppler con el patrón de antena de azimut relaciona la potencia pico del espectro Doppler con la puntería del eje de puntería de azimut de la antena. Las características operacionales del radar y las técnicas de procesamiento de señales a bordo requeridas para solucionar este problema son diferentes de las necesarias para los modos de obtención de imágenes de SAR habituales y de las requeridas para la medición de la distancia. Estas características se definen en las siguientes secciones.

Muestreo Doppler

10 A diferencia de los modos de obtención de imágenes normales, la progresión de fase a lo largo de la trayectoria de datos comprimidos de distancia que resulta del movimiento de la aeronave entre pulsos de radar no es necesariamente de interés. En su lugar, el procesamiento puede llevarse a cabo con un ancho de banda mucho más grande que el usado normalmente para un SAR de obtención de imágenes espacial, de manera que se muestrea el patrón de haz de azimut inequívocamente.

15 En principio, el eco de un pulso individual puede usarse para establecer la frecuencia Doppler del eco de potencia pico.

Características de los pulsos de radar

Siempre que se logre una relación señal a ruido adecuada, podrían usarse si se desea pulsos de radar de onda continua (portadora modulada por un tono fijo).

20 Una resolución de frecuencia Doppler equivalente a 1/10 de la anchura del lóbulo de haz de azimut principal se considera suficiente para satisfacer los requisitos de determinación de la puntería. A una velocidad respecto al suelo subsatelital del orden de 7500 ms^{-1} (desatendiendo el efecto de la rotación de la Tierra en esta estimación), los puntos de 3db del lóbulo principal de la antena se producen normalmente a aproximadamente $\pm 2,5 \text{ kHz}$ con respecto al eje de puntería. Para una resolución de 500 Hz (1/10 de la distancia Doppler del lóbulo principal) exige una duración de pulso mínima de 2 ms. El radar Core permite normalmente una longitud de pulso máxima de 2 ms.

25 Obsérvese que la resolución de frecuencia requerida exige normalmente una duración del pulso de aproximadamente 1000 veces la requerida para fines de determinación de distancia. Por tanto, está claro que se requieren dos tipos de pulsos de radar distintos para solucionar los problemas tanto de determinación de distancia como de localización del espectro Doppler.

Ventana de recepción

30 La duración de la ventana de recepción se requiere que sea suficientemente larga para adaptarse a ecos de todo el barrido accesible ($\sim 1,5 \text{ ms}$ para un pulso corto) y para adaptarse al pulso de azimut extendido (2 ms).

Almacenamiento intermedio de ecos

35 El requisito de tasa de muestreo de datos mínima es muy bajo. Si se usa un filtro antisolapamiento de ancho de banda mínimo en la cadena de recepción ($\sim 10 \text{ MHz}$), entonces la tasa de entrada de datos en las memorias intermedias FIFO del ensamblador de paquetes Core es menor que la capacidad para vaciarse. Por tanto, la memoria intermedia de datos de eco es efectivamente ilimitada.

Ancho de banda de procesamiento de azimut

40 El lóbulo de antena principal y los primeros dos lóbulos laterales contienen juntos más del 98% de la energía de eco. En principio, el uso de sólo estas partes del espectro Doppler correspondiente es suficiente para realizar la medición Doppler requerida. Adaptarse a estas partes del patrón de antena (con la puntería del eje de puntería en la dirección de desplazamiento Doppler cero) requiere un ancho de banda de aproximadamente 30 kHz.

45 Con una incertidumbre de puntería de azimut de $\pm 2^\circ$, la frecuencia central Doppler puede desplazarse dentro del intervalo aproximado de $\pm 15 \text{ kHz}$ de cero. Por tanto, el ancho de banda máximo de la parte útil de la señal de eco es del orden de 60 kHz. Puede hacerse que sea menor que esto eligiendo incluir las contribuciones de menos lóbulos laterales.

Correlación del espectro Doppler con el patrón Doppler de antena

50 La correlación del espectro Doppler del eco de radar con el patrón de antena de azimut (expresada en términos de frecuencia Doppler en relación con un eje de puntería apuntado a Doppler cero) filtra ventajosamente los datos permitiendo determinar la frecuencia Doppler a la que se devuelve la potencia pico. Esto se muestra claramente en la figura 8.

Detección de picos

5 El mayor valor en la matriz de correlación se ubica en la frecuencia Doppler del centro del haz de azimut. Puede ser suficientemente preciso ubicar el valor de correlación pico en el intervalo de muestreo Doppler más cercano. También es posible, con poca carga computacional extra, usar el valor pico de correlación y varios de sus vecinos más cercanos para realizar una interpolación sencilla, dando lugar a la frecuencia Doppler a lo largo del eje de puntería en una escala de muestreo no en números enteros.

Refinamientos en los principios de determinación de la frecuencia central Doppler

10 La incertidumbre en la determinación de la DCF del eje de puntería puede reducirse convenientemente promediando contribuciones de varios ecos. La mejora lograda es máxima cuando los ecos son totalmente independientes estadísticamente. Se propone por tanto que varios ecos sucesivos (~5), separados por el intervalo de tránsito de suelo del lóbulo de antena principal longitudinal a la trayectoria, se combinen para formar una única estimación de la DCF.

Transformaciones de señal en la determinación de la DCF

15 La figura 9 muestra una secuencia propuesta de etapas de procesamiento de DCF preferidas para su implementación en la invención. Se muestran señales en la forma más conveniente para definir los principios de procesamiento.

Se supone que el pulso de radar se modula con un tono en la región de 5 MHz y que el menor ancho de banda del filtro de canal es del orden de 10 MHz.

20 El ancho de banda de la señal requerido para la correlación con el espectro del patrón de antena es de sólo aproximadamente 60 kHz. Por tanto, es necesario un filtrado y, en el proceso mostrado, la tasa de muestreo puede reducirse en un factor que se aproxima a 200:1.

Es probable que se logre una mínima alteración de la señal por medio de un filtro en el dominio de frecuencia aplicado a todo el conjunto de muestras de entrada. Sin embargo, realizar una FFT sobre el conjunto de muestras de entrada completo implicaría una carga computacional de unos 3,6 MFlops.

25 Las transformaciones de la señal mostradas en la figura 9 proporcionan una implementación de compromiso en la que puede lograrse el filtrado mediante un desplazamiento de frecuencia y un promediado de las muestras en el dominio de tiempo seguido por un filtrado en el dominio de frecuencia sobre un conjunto de puntos de datos más corto. Este enfoque usa convenientemente menos operaciones de coma flotante (Flops) sin comprometer demasiado el rendimiento.

30 La correlación del espectro Doppler recibido de banda estrecha con el espectro del patrón de antena de azimut (evaluado a una puntería del eje de puntería de Doppler cero) se realiza eficazmente mediante una secuencia FFT-multiplicación-IFFT incluso para el conjunto de muestras relativamente corto (~210 muestras) que contiene la información deseada.

Parámetros y etapas de procesamiento de la determinación de la DCF

35 La figura 10 muestra otro diagrama de diversas etapas de procesamiento para su implementación en una realización de la invención.

40 Las etapas de procesamiento de la determinación de la DCF preferidas y sus parámetros de entrada se describen ahora en el contexto de un filtrado en el dominio de tiempo / en el dominio de frecuencia mixto. En cada punto en la secuencia, se proporciona una indicación del volumen del conjunto de datos (para un eco individual), a partir del cual se evalúa la carga de operaciones de coma flotante total.

Tal como se muestra, el desplazamiento de frecuencia en el dominio de tiempo (DCF2) (un desplazamiento descendente igual al del tono de modulación) se logra convenientemente mediante la multiplicación de los datos por un vector de aumento de fase precalculado.

45 El filtro promedio (DCF3) suma N muestras consecutivas para generar cada nuevo punto de datos, reduciendo la tasa de muestreo en un factor de N. El conjunto de datos resultante se rellena con ceros para la posterior FFT de base 2. Si el filtro en el dominio de frecuencia (DCF5) se define como una ventana rectangular, entonces no se requiere multiplicación. Los puntos de datos distribuidos alrededor del DC podrían simplemente pasarse a una matriz más corta.

50 La correlación del espectro de potencia de datos con el del patrón de antena es de interés, de modo que es necesaria la detección. La correlación se lleva a cabo eficazmente tal como se muestra, usando las etapas de FFT-multiplicación-IFFT (DCF7 a DCF9). Es probable que el conocimiento de la frecuencia Doppler del intervalo que contiene el valor de correlación pico sea suficientemente preciso. Sin embargo, la carga computacional impuesta por una interpolación cuadrática usando el valor pico y sus vecinos más cercanos es insignificante en comparación con

las otras etapas de procesamiento. Una alternativa es extender los datos antes de la IFFT final (mediante relleno con ceros) para dar lugar a una matriz de salida interpolada. El coste es el de una IFFT más larga.

Cronograma de funcionamiento del sensor de actitud del radar

5 Una escena de imagen de radar típica se reconstituye a partir de normalmente un mínimo de 10000 ecos e implica frecuentemente 30000 o más. La duración de esta ráfaga de pulsos de radar continua es normalmente de entre 3 y 20 segundos.

10 En cambio, un par de pulsos de determinación de la actitud del radar requiere 10 ms o menos de tiempo de radar, tal como se muestra en la figura 11. Obsérvese que el tiempo de procesamiento de la determinación de la actitud no se incluye en este cronograma debido, en principio, a que el procesamiento puede realizarse mientras el radar está usándose para fines de adquisición de datos para obtención de imágenes.

15 La determinación de la actitud del radar (y acciones de control de la actitud basadas en la misma) puede llevarse a cabo convenientemente antes, entre y después de eventos de obtención de imágenes. El radar de la invención puede usarse para obtener referencias de actitud también durante un periodo de obtención de imágenes, aunque la pérdida de 20 a 30 ecos de imagen consecutivos en pulsos de determinación de la actitud conduce a un bajo nivel de degradación de la calidad de la imagen (lóbulos de rejilla) en la imagen final. Sin embargo, éste es un modo de funcionamiento que es no es necesario considerar puesto que el sensor de actitud del radar puede verse ayudado (para fines de control) por giroscopios de estado sólido de bajo coste que pueden proporcionar mediciones de actitud durante los periodos de obtención de imágenes, obviando la necesidad de interrumpir la secuencia de pulsos de obtención de imágenes en absoluto. Con esta configuración ACS, la propagación y el control de la determinación de la actitud serían continuos, basándose en referencias del sensor de actitud del radar ocasionales "rellenadas" por datos de giroscopio.

Principios de determinación de la puntería de radar

En esta sección, se comentan los principios para la determinación de la puntería usando el radar de la invención como sensor.

25 Se definen el marco de coordenadas y los parámetros necesarios. Se comenta un método de determinación de la puntería.

Marco de coordenadas

30 Una vez que se ha calculado un par de datos de DCF y distancia oblicua del eje de puntería de la antena, puede usarse para establecer la puntería del eje de puntería en el marco de coordenadas natural del instrumento. La figura 12 define este marco en términos de ángulo de elevación (e) en el plano de desplazamiento Doppler cero y ángulo de azimut (a) entre el plano de desplazamiento Doppler cero y el plano que contiene el vector del eje de puntería (y la línea del nadir local).

Parámetros de entrada en la determinación de la puntería del radar

35 Expresada en términos de distancia con respecto al suelo y desplazamiento Doppler, la superficie Doppler observada por el radar se determina mediante la posición relativa y el movimiento relativo del radar y puntos en el suelo.

Esta superficie Doppler puede usarse convenientemente para resolver la puntería de elevación y azimut de la antena de radar.

40 Puede aplicarse una corrección de la elevación del suelo una vez que se conoce la ubicación en el suelo aproximada del vector del eje de puntería de la antena.

Los parámetros de entrada son los parámetros orbitales, un modelo de geoide de la Tierra (por ejemplo, GEM6), datos de rotación de la Tierra y parámetros límite (por ejemplo, los que definen una "vista sobre el horizonte").

Se usa también un mapa de elevación del terreno.

45 Las mediciones de entrada incluyen distancia, dcf, triplete de tiempo del radar, datos de puntería de la aeronave y una estimación de la elevación del suelo local (cero para la estimación inicial de la puntería de elevación y azimut).

Estimación de la puntería del radar

La figura 13 es un diagrama explicativo que se refiere a la estimación de la puntería del radar según una realización de la invención.

50 Un vector de estado orbital, un modelo de la superficie del geoide de la Tierra local y un modelo de rotación de la Tierra se consideran suficientes para definir la superficie Doppler visualizada por el radar.

Puede usarse una estimación inicial de los ángulos de elevación y azimut con la posición del nadir local para definir la región del geoide de la Tierra que va a usarse. A partir de esto y los movimientos relativos, es posible calcular la superficie Doppler en términos de distancia y frecuencia Doppler.

- 5 Dada la distancia de radar medida, la dcf y los valores iniciales aproximados de los ángulos de elevación y azimut, es posible solucionar de manera iterativa los ángulos de elevación y azimut precisos de manera consecuente con el par de distancia, dcf medido para la geometría de visualización particular. Tal como se muestra, esto se obtiene inicialmente suponiendo una elevación del terreno local de cero.

En el procedimiento mostrado, la ubicación en el suelo del eje de puntería puede calcularse fácilmente, permitiéndose el acceso a un mapa de elevación del suelo para lograr una estimación de la puntería más precisa.

10 **Corrección de la estimación de la puntería para la altura del terreno**

Aunque el método de estimación descrito anteriormente es inherentemente preciso, si el radar está visualizando un suelo con altura significativa por encima del dato de la superficie del geoide de la Tierra, la primera estimación de la puntería obtenida será errónea. La magnitud de este error depende de la altura del suelo visualizado por el haz del radar. Los inventores han reconocido cómo puede corregirse.

- 15 La figura 14 muestra cómo puede repetirse el componente primario del cálculo de la determinación de la actitud del radar con entradas derivadas de la primera estimación de puntería (en particular, la altura del terreno local) para proporcionar una estimación de la puntería corregida para la altura del terreno local.

Sólo puede justificarse una única iteración de corrección de la altura del terreno, puesto que la densidad del mapa de altura del terreno requerido viene fijada por las dimensiones del haz del radar sobre el suelo.

- 20 La mejor estimación de la puntería posible se obtiene para ecos de radar procedentes de una región del suelo plana y horizontal (a lo largo de toda el área iluminada), aunque quizá esté elevada. La suposición de un suelo plano y horizontal se introduce en los patrones de antena propuestos para el procedimiento de correlación (debe hacerse una suposición de este tipo). Un suelo inclinado a lo largo de la huella del haz altera la certidumbre de la medición. Un suelo con pendiente cambiante a lo largo de la huella del haz altera la medición aún más gravemente. En general, es probable que el radar esté dirigido a este tipo de suelo.

Por tanto, en el peor de los casos, la incertidumbre de la determinación de la puntería es comparable con la anchura angular del lóbulo principal. Por tanto, se obtiene poco beneficio (excepto en las mejores condiciones de visualización) por el uso de un mapa del terreno compuesto por puntos de datos más estrechamente separados que la anchura y altura del patrón del haz principal.

- 30 Un mapa del terreno con muestras separadas 15 km (la menor dimensión de la huella del haz principal de barrido cercano) consiste normalmente en entre 1,5 y 5,0 millones de muestras de altura. Esto puede considerarse un volumen de datos razonable.

Instalaciones de procesamiento a bordo

- 35 Se prevé que haya al menos dos instalaciones con capacidad de procesamiento a bordo del radar de la invención. El propio radar contiene capacidades de procesamiento de datos significativas.

El "módulo de servicio" está equipado ventajosamente con al menos un procesador significativo para tratar funciones de la aeronave tales como el AOCS y funciones de tratamiento de datos de la aeronave.

- 40 Puesto que el volumen de datos de radar sin procesar adquiridos para la determinación de la actitud es relativamente alto, se prevé que estos datos se procesen (al menos al nivel de "distancia, dcf y registro de tiempo") mediante el procesador del radar. Si el procesador suministrado normalmente con el equipo de radar es insuficiente para tratar esta carga extra, puede añadirse una tarjeta de procesamiento convencional adicional al sistema de radar con relativa facilidad.

- 45 Una vez que se han calculado los datos de distancia y dcf, es una cuestión abierta si la actitud debe determinarse (y corregirse para la variación en altura del terreno) mediante los procesadores del radar o mediante el ordenador de ACOS. Con seguridad, debe existir una interfaz de transferencia de datos radar-ordenador de AOCS. El volumen de datos que va a transferirse entre estos sistemas (una vez procesados los datos de radar sin procesar) es bajo. Sin embargo, los datos del mapa del terreno son de tamaño significativo y deben ser accesibles para el procesador que los requiera.

- 50 A pesar del volumen significativo de los datos del mapa del terreno, una división eficaz de las tareas de procesamiento es procesar los datos de radar sin procesar en CORE, pasando los datos de distancia, dcf, registro de tiempo al procesador de AOCS para la determinación de la actitud.

Opciones para el control basándose en datos del sensor de actitud del radar

Tal como se explicó anteriormente, los inventores han propuesto un concepto de radar de bajo coste. Con las tecnologías de RF actuales, el objetivo de bajo coste descarta una antena de SAR con gran cantidad de centros de fase. Por tanto, no puede considerarse el direccionamiento del haz electrónico ya sea en la dirección de elevación (especialmente) o en la dirección de azimut. Por motivos similares, no se considerará una antena que pueda dirigirse mecánicamente respecto a la aeronave. La única opción para el control del haz de elevación es reapuntar toda la aeronave respecto al eje de alabeo antes de la adquisición de datos de la escena. Es improbable que el control del eje de alabeo sea particularmente ágil por tres motivos principales:

se prevé que la autoridad del actuador primario de AOCS no sea alta (motor de par de torsión magnético)

10 habrá un retraso de tiempo significativo en el historial de datos del sensor de actitud del radar (en comparación con los sensores de AOCS primarios) y

15 la frecuencia de las salidas del sensor de actitud del radar es probable que sea baja (en comparación con los sensores de AOCS primarios), lo que hace que el control de la posición en bucle cerrado estable y rápido sea imposible (a menos que se ayude con giroscopios). A continuación en el presente documento se comenta la filosofía de la acción de control.

Quedan dos opciones razonables para garantizar que se recogen datos correctos a lo largo de la trayectoria. Éstas son:

ajustar la sincronización de funcionamiento del radar o

reapuntar la aeronave respecto al eje de cabeceo.

20 La solución preferida es usar los datos del sensor de actitud del radar para ordenar una sincronización de funcionamiento del radar apropiada, porque:

aunque podría estar disponible una mayor autoridad de actuador de cabeceo (aprovechando las dimensiones físicas de la aeronave más grandes), de igual forma es probable que la inercia de cabeceo sea al menos un orden de magnitud mayor que aquella alrededor del eje de alabeo, y

25 las consideraciones de retraso de tiempo y frecuencia de datos del sensor de actitud del radar expuestas anteriormente también se aplican respecto al eje de cabeceo.

Direccionamiento de guiñada

30 En vista de la simetría relativamente alta del haz del radar respecto a la dirección del eje de puntería, el instrumento de radar no puede usarse para soportar un AOCS de bajo coste respecto a la implementación del direccionamiento de guiñada.

Filosofía de la acción de control

Se supone que la aeronave puede maniobrarse a una actitud particular para la obtención de imágenes usando las capacidades de puntería aproximada del AOCS, antes de la adquisición de datos.

35 Usando un AOCS que puede determinar la actitud sólo de manera aproximada (y por tanto la puntería de la aeronave) en comparación con el requisito de puntería de la antena de radar (y sin la opción dirigir de manera electrónica el haz de elevación para una misión de radar de bajo coste), no hay alternativa a usar el error de puntería de alabeo determinado por el radar para ordenar el control fino de la actitud del eje de alabeo (una vez que la aeronave ha ejecutado su maniobra aproximada).

El error de puntería de cabeceo determinado por el radar puede usarse o bien para:

40 ordenar la puntería de cabeceo fina de la aeronave, o para

ordenar una sincronización de la transmisión de pulsos de radar apropiada cuando el radar está en el modo de obtención de imágenes.

Se proponen dos estrategias para la segunda opción. Tras una maniobra aproximada, se usa el radar para determinar el error de puntería de cabeceo. El uso de estos datos puede implicar entonces:

45 intervención del suelo para ordenar la sincronización de pulsos de radar apropiada, o

avance/retardo a bordo automático para sincronizaciones de pulsos de radar previamente ordenadas (calculadas nominalmente para error de puntería cero).

Habiendo descrito la presente invención anteriormente haciendo referencia a varias realizaciones particulares, debe apreciarse que las realizaciones son, a todos los respectos, a modo de ejemplo y que son posibles modificaciones y variaciones en las mismas sin apartarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Por tanto, por ejemplo, aunque la invención se ha descrito haciendo referencia a un radar de apertura sintética (SAR), la enseñanza de esta invención podría aplicarse igualmente a otros tipos de radares (por ejemplo, radar de obtención de imágenes dirigido hacia delante y radar de obtención de imágenes con barrido horizontal grande que en uso está dirigido en parte hacia los lados/en parte hacia delante). Además, la invención puede aplicarse a cualquier banda de ondas de radar. Además, debido a que la invención conlleva una ventaja definitiva de bajo coste, encuentra utilidad en diversas aplicaciones espaciales así como en aplicaciones aéreas.

10 Apéndice

Lista de siglas

	AOCS	Sistema de control de actitud y órbita
	BAQ	Cuantificación adaptativa de bloques
	CORE	Elementos de radar común
15	CW	Onda continua
	DMU	Unidad de gestión de datos
	FIFO	Primero en entrar, primero en salir ("First in first out")
	FRT	Seguidor de rotación Faraday
	H	Polarización horizontal
20	H/W	Hardware
	I	Número entero
	IFE	Equipo de frecuencia intermedia
	Intops	Operaciones de números enteros por segundo
	MIPS	Millones de instrucciones por segundo
25	Q	Cuadratura
	RF	Radiofrecuencia
	SAR	Radar de apertura sintética
	sqrt	Raíz cuadrada
	S/W	Software
30	TBD	Por definir
	V	Polarización vertical

REIVINDICACIONES

1. Aparato de obtención de imágenes de radar para obtener imágenes de una superficie desde una plataforma que se mueve en relación con la superficie, que comprende:
 - medios de transmisión para transmitir radiación a la superficie;
 - 5 medios de recepción para recibir la radiación, después de que se haya dispersado desde la superficie, a lo largo de una trayectoria de recepción predeterminada;
 - y medios de procesamiento para procesar señales representativas de la radiación recibida para proporcionar información de actitud de radar, siendo la información de actitud representativa de la puntería de la plataforma resuelta en varias componentes axiales, y en el que la información de actitud se deriva dependiendo de una determinación de una característica de distancia relativa a la superficie y de una determinación de una distribución de frecuencia Doppler asociada con la radiación dispersada, comprendiendo los medios de procesamiento medios dispuestos para correlacionar los datos recibidos asociados con la radiación dispersada con datos de patrón de antena de radar predeterminados, medios dispuestos para derivar datos de posición pico representativos de la dirección del eje de puntería de la antena de radar, medios dispuestos para transformar dichos datos de posición pico en una distancia oblicua y espacio de frecuencia Doppler, y medios dispuestos para determinar dicha información de actitud dependiendo de los datos de posición pico transformados.
2. Aparato de obtención de imágenes de radar según la reivindicación 1, que comprende además medios para determinar datos de puntería de alabeo, cabeceo y/o guiñada asociados con la plataforma de radar, determinándose dichos datos de puntería mediante la derivación de la información de actitud y mediante una entrada selectiva de datos de elevación del terreno de modo que se tengan en cuenta las variaciones en la geometría de visualización del radar con la elevación del terreno.
3. Aparato de obtención de imágenes de radar según la reivindicación 3, en el que dichos medios dispuestos para correlacionar los datos recibidos comprenden una primera parte de circuito, dichos medios dispuestos para derivar datos de posición pico comprenden una segunda parte de circuito, dichos medios dispuestos para transformar dichos datos de posición pico comprenden una tercera parte de circuito, dichos medios dispuestos para determinar dicha información de actitud comprenden una cuarta parte de circuito y en el que se proporciona una parte de circuito separada para determinar datos de puntería de alabeo, cabeceo y/o guiñada asociados con la plataforma de radar.
4. Aparato de obtención de imágenes de radar según la reivindicación 2 ó 3, en el que los medios de transmisión están dispuestos para transmitir un primer conjunto de pulsos de radar correspondientes a un primer ángulo de elevación en relación con la superficie, conjunto de pulsos de radar que incluye un pulso de radar de determinación de distancia emitido en un primer momento predeterminado y un pulso de radar de discriminación de frecuencia emitido en un segundo momento predeterminado, estando dispuestos dichos medios de recepción para recibir dichos pulsos a diferentes momentos predeterminados, y estando dispuestos dichos medios de procesamiento para derivar datos de actitud de eje de cabeceo y alabeo dependiendo de la determinación de una distancia oblicua y un desplazamiento de frecuencia Doppler asociados con las características de pulso recibidas.
5. Aparato de obtención de imágenes de radar según la reivindicación 4, en el que hay una pluralidad de tales conjuntos de pulsos de radar correspondientes a una pluralidad de ángulos de elevación en relación con la superficie, y uno o más de tales conjuntos de pulsos se reciben y procesan para derivar datos de actitud de eje de guiñada dependiendo de la determinación de una distancia oblicua y un desplazamiento de frecuencia Doppler diferencial asociados con las características de pulso recibidas.
6. Aparato de obtención de imágenes de radar según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los medios de transmisión están adaptados para emitir pulsos de radar de onda continua (CW).
7. Aparato de obtención de imágenes de radar según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que los medios de transmisión están adaptados para emitir pulsos de radar de frecuencia variable.
8. Aparato de obtención de imágenes de radar según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el aparato es un aparato de obtención de imágenes de apertura sintética.
9. Aeronave (2, 6) que incorpora un aparato de obtención de imágenes según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
10. Sistema de comunicaciones por satélite que incorpora un aparato de obtención de imágenes según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

11. Método de obtención de imágenes de una superficie desde una plataforma que se mueve en relación con la superficie, comprendiendo el método las etapas de:

transmitir radiación a la superficie;

5 recibir la radiación, después de que se haya dispersado desde la superficie, a lo largo de una trayectoria de recepción predeterminada; y

10 procesar señales representativas de la radiación recibida para proporcionar información de actitud de radar, siendo la información de actitud representativa de la puntería de la plataforma resuelta en varias componentes axiales, y en el que la información de actitud se deriva dependiendo de una determinación de una característica de distancia en relación con la superficie y de una determinación de una distribución de frecuencia Doppler asociada con la radiación dispersada, comprendiendo el procesamiento de las señales representativas de la radiación recibida para proporcionar información de actitud de radar correlacionar los datos recibidos asociados con la radiación dispersada con datos de patrón de antena de radar predeterminados, derivar datos de posición pico representativos de la dirección del eje de puntería de la antena de radar, transformar dichos datos de posición pico en una distancia oblicua y un espacio de frecuencia Doppler, y determinar la información de actitud dependiendo de dichos datos de posición pico transformados.

12. Programa informático que comprende instrucciones que pueden ejecutarse por ordenador que, cuando se ejecuta en una disposición de procesador, provocará que la disposición de procesador realice el método según la reivindicación 11.

20

Fig.1.

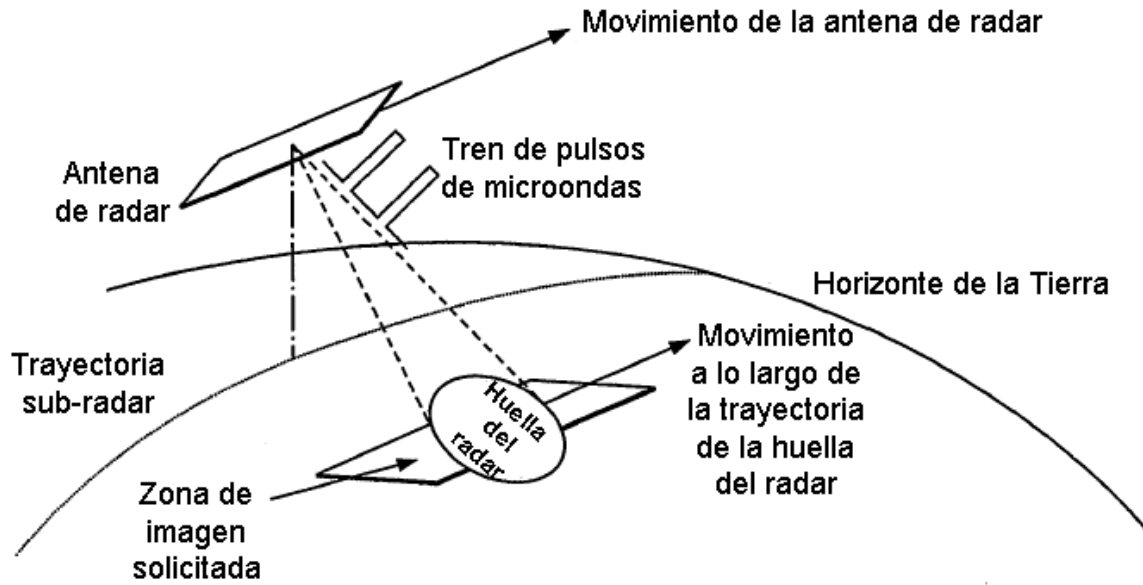


Fig.1A.

Ángulo de incidencia (centro del haz) (grados)	Distancia oblicua aproximada (en el centro del haz) (km)	Huella en el suelo (transversal a la trayectoria) (km)	Huella en el suelo (longitudinal a la trayectoria) (km)
20	530	31	14
50	741	63	28

Fig.2.

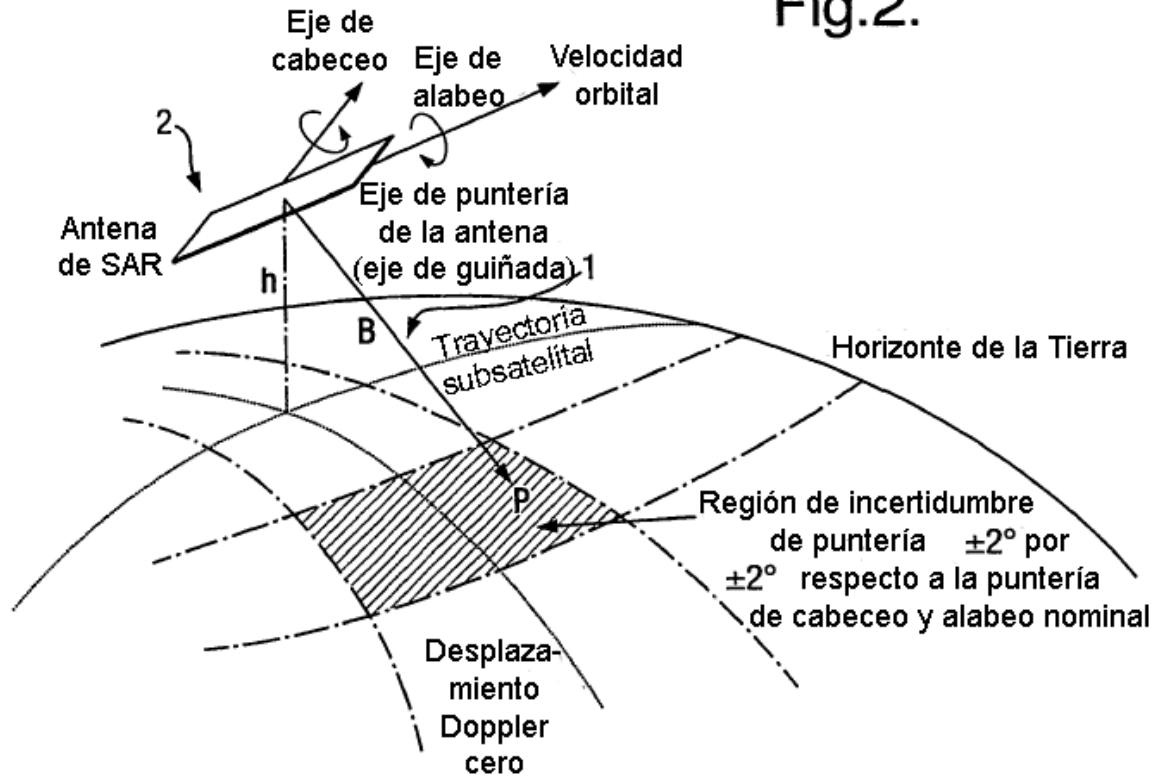


Fig.3.

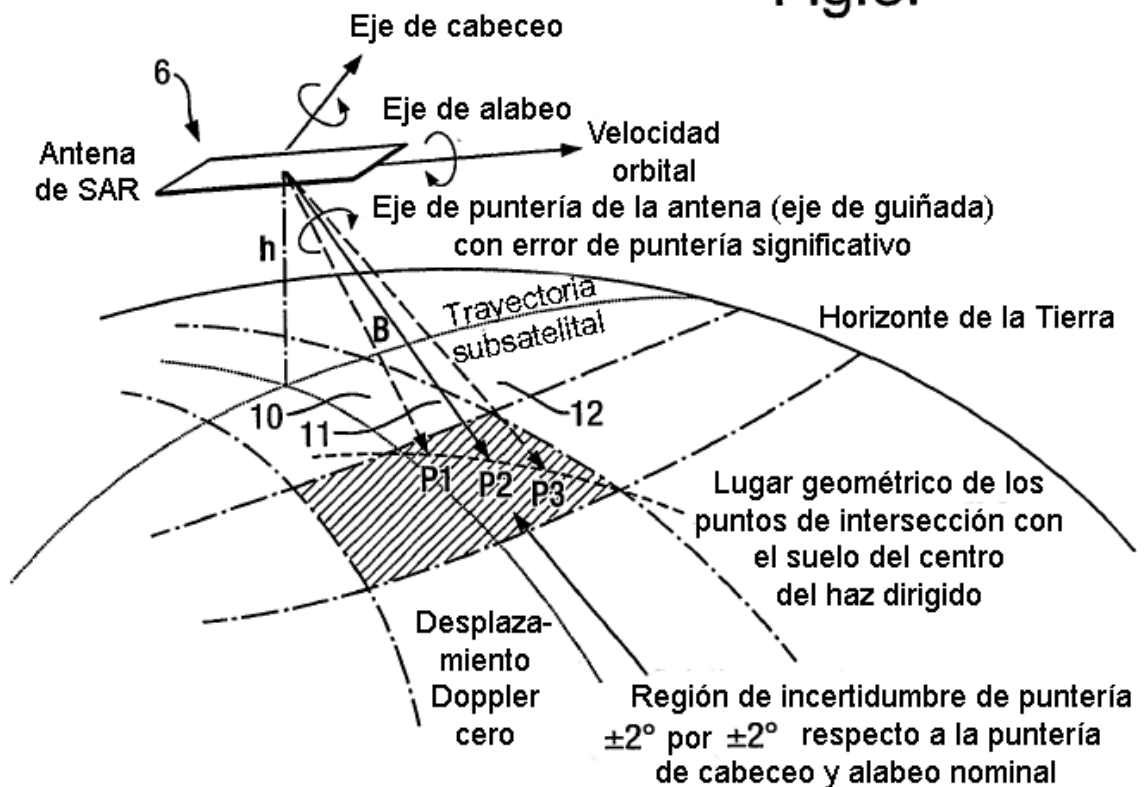


Fig.4.

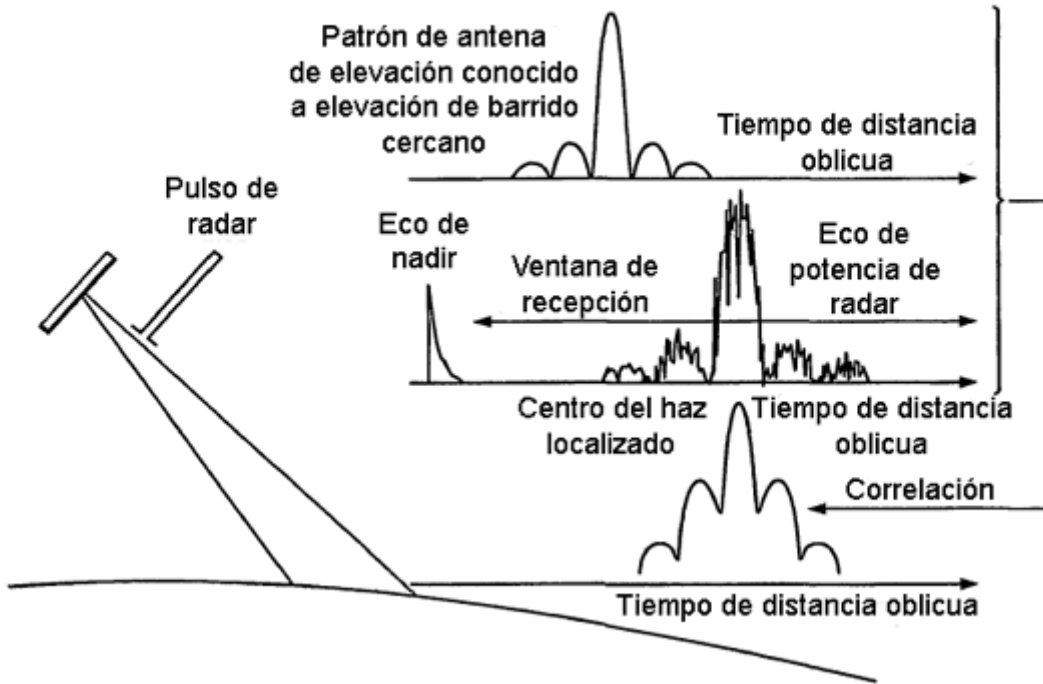


Fig.5.

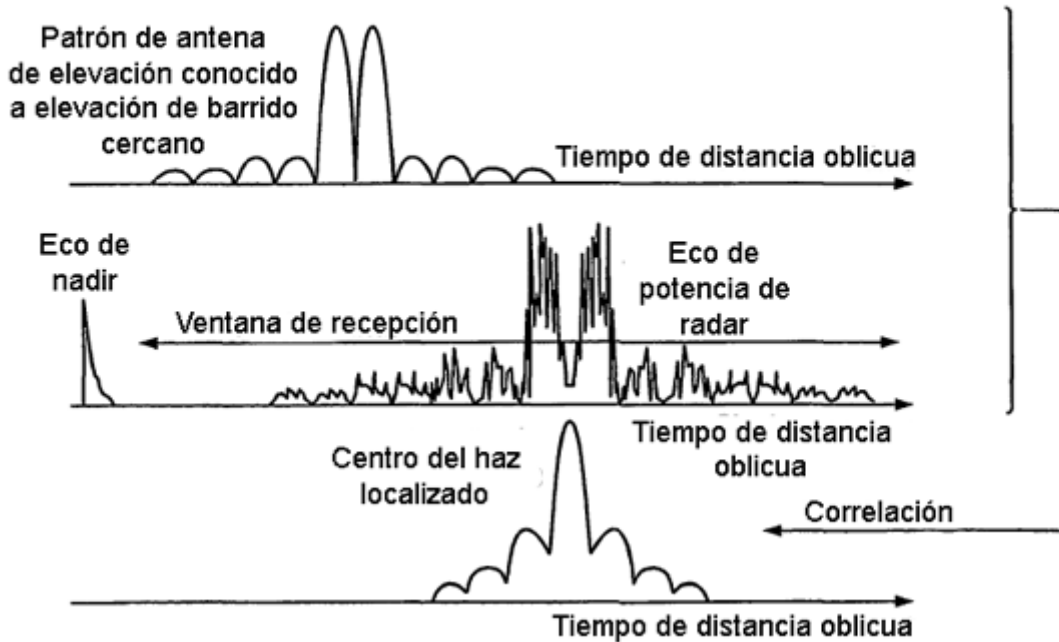


Fig.6.

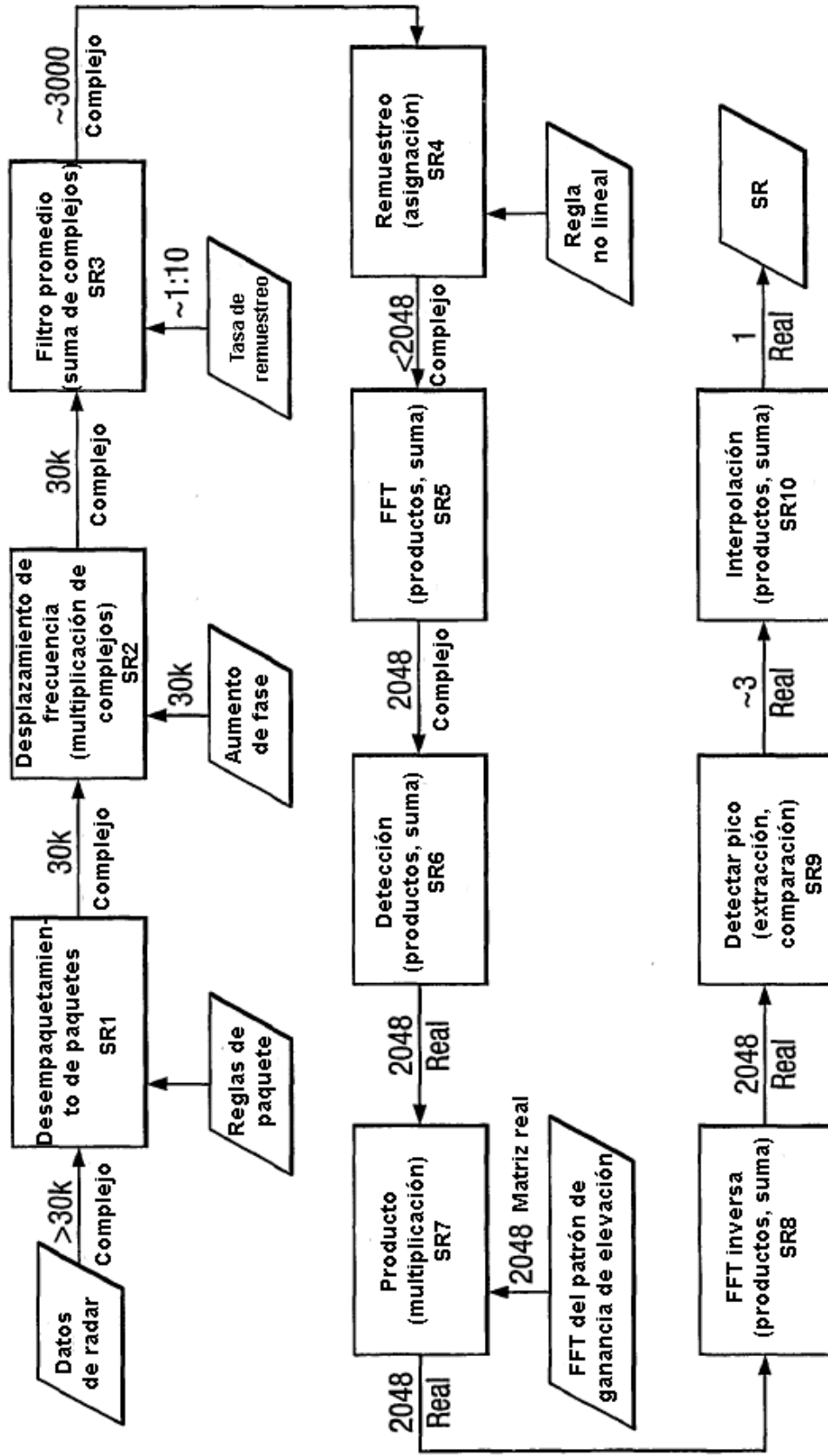


Fig.7.

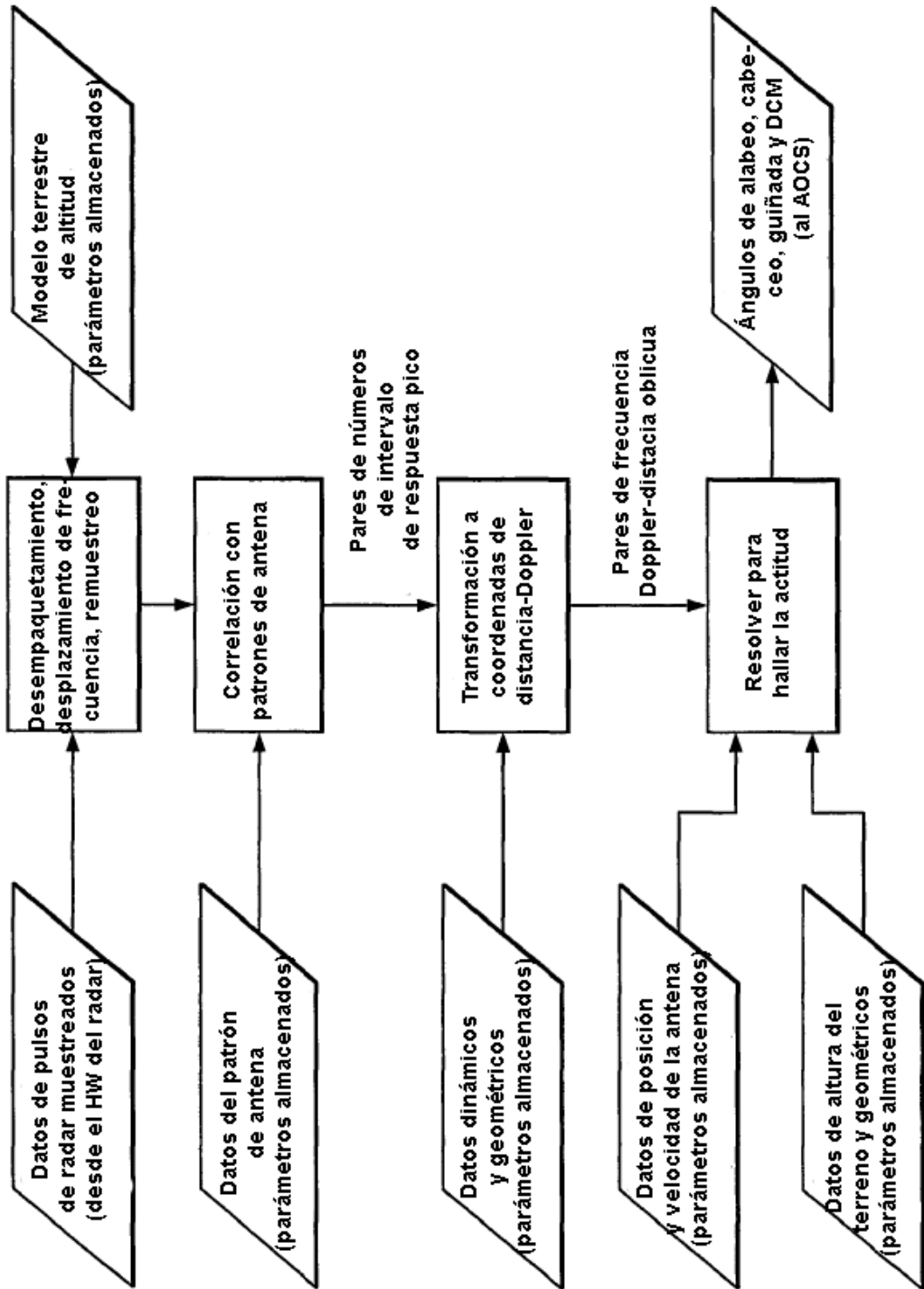


Fig.8.

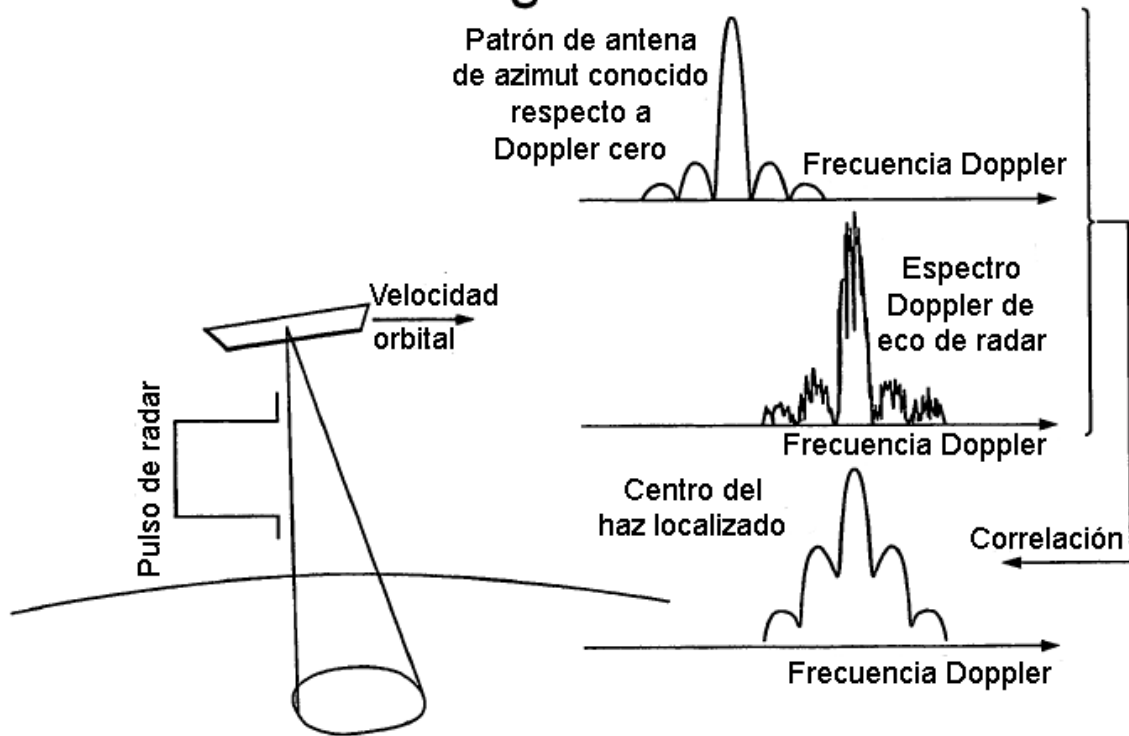


Fig.9.

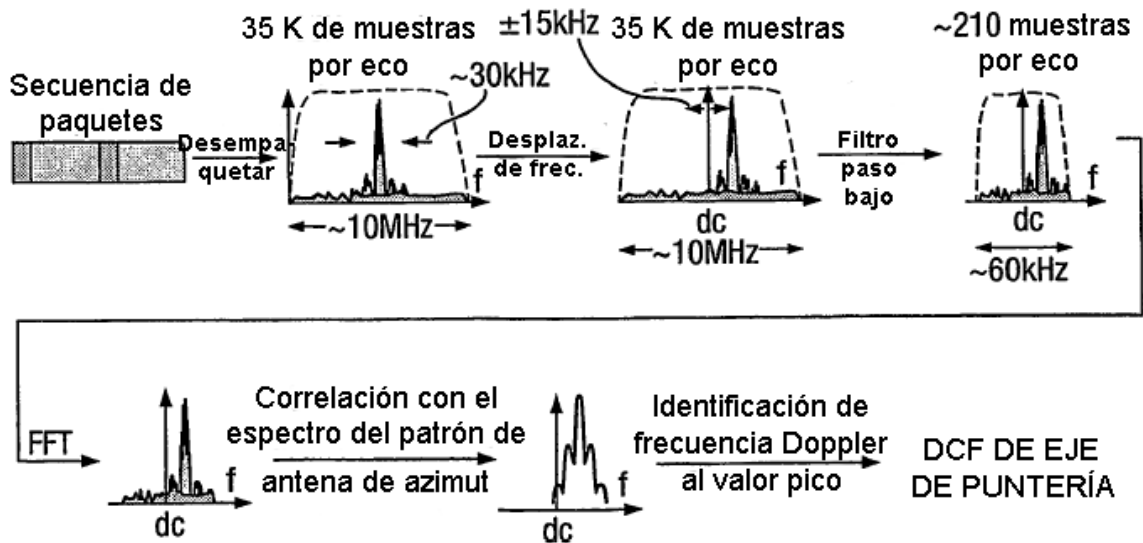
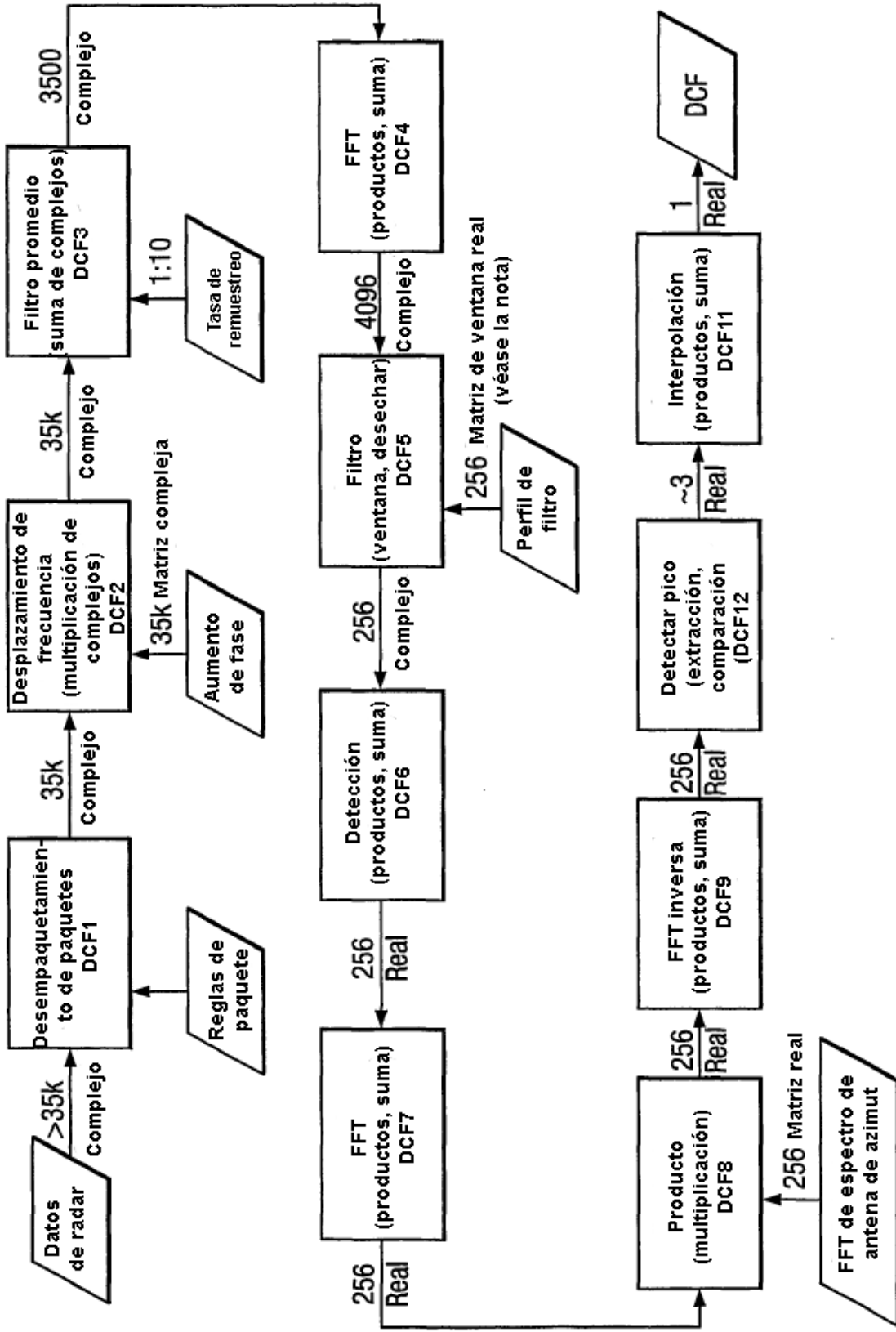


Fig.10.



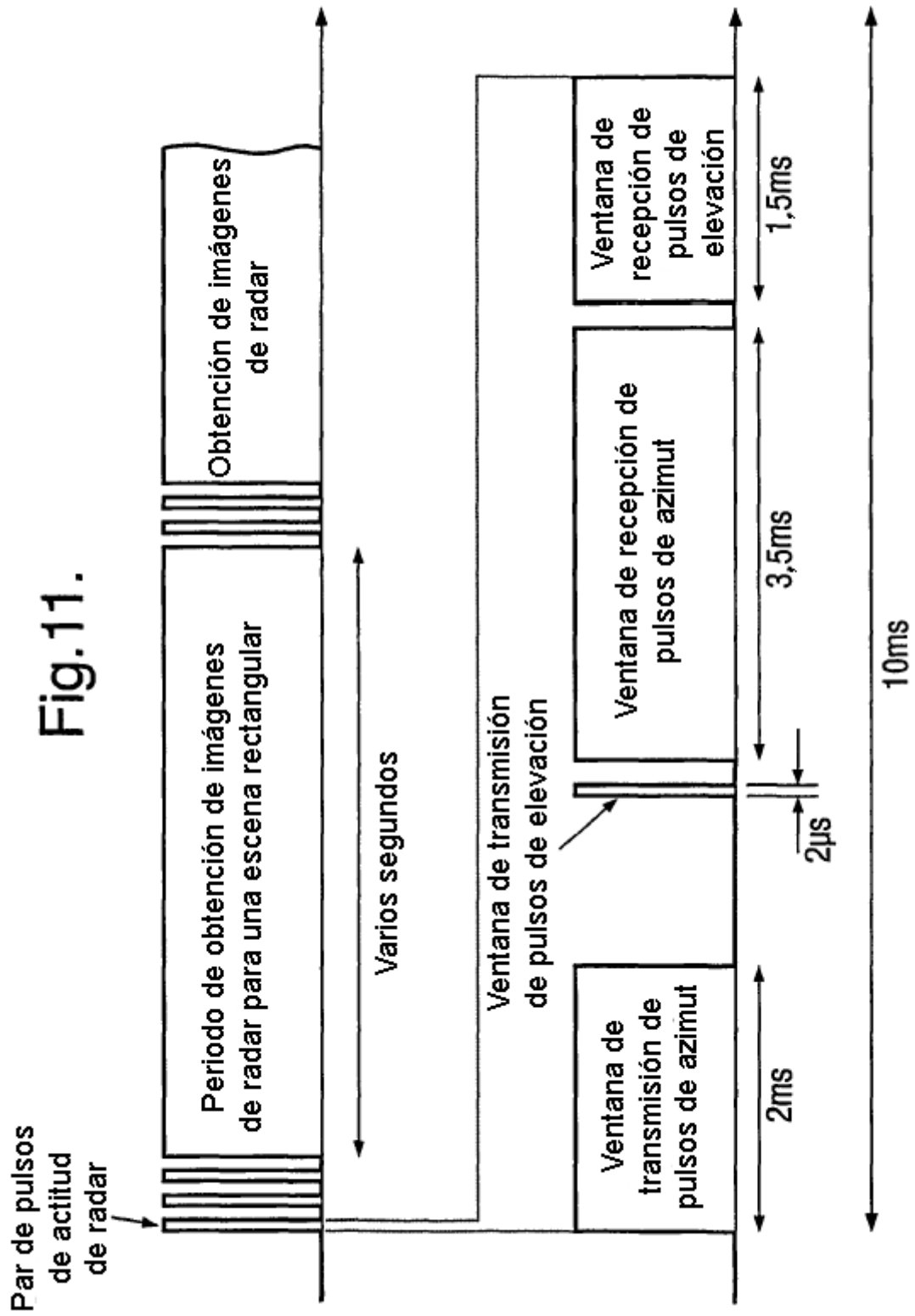


Fig.12.

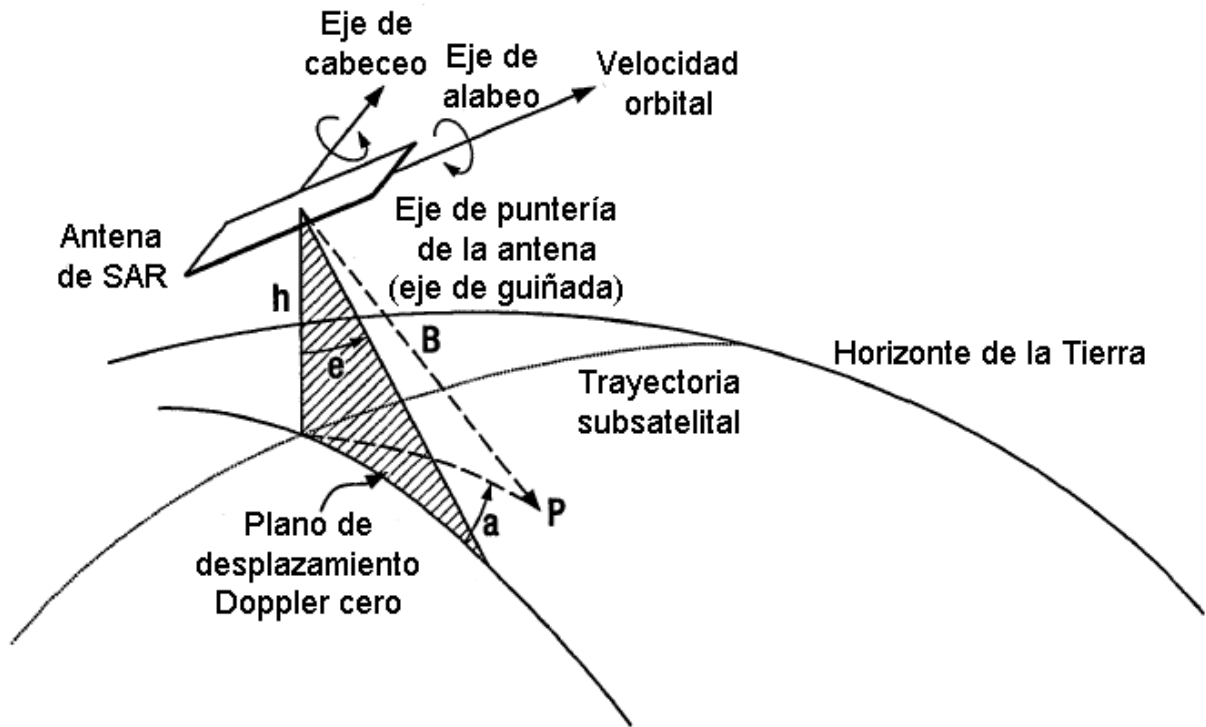


Fig.13.

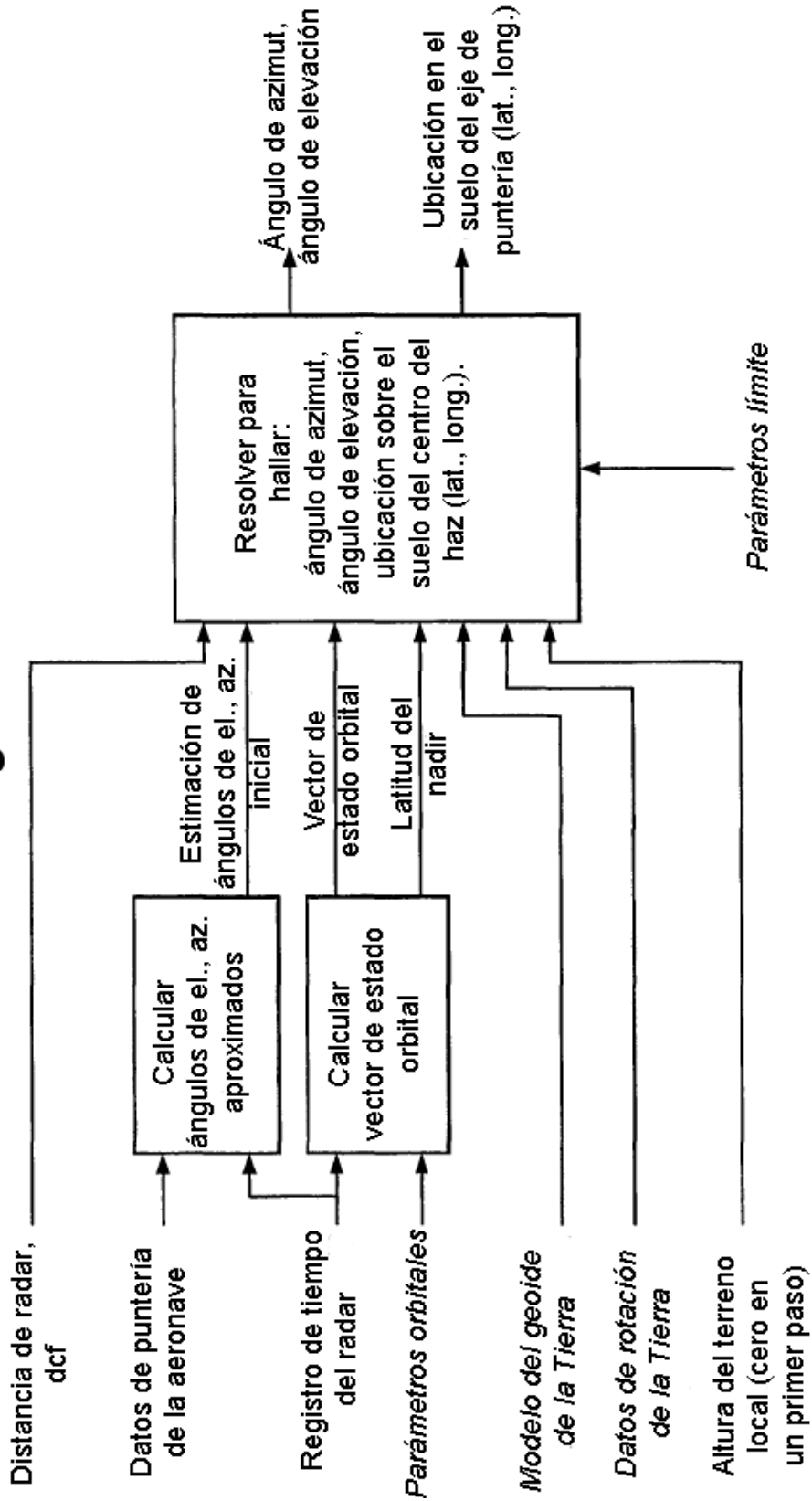


Fig.14.

