

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 973 255**

51 Int. Cl.:

G01S 13/00 (2006.01)
G01S 13/91 (2006.01)
G01S 13/06 (2006.01)
G01S 13/02 (2006.01)
G01S 13/87 (2006.01)
G01S 13/58 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.09.2021 PCT/EP2021/074553**
87 Fecha y número de publicación internacional: **17.03.2022 WO22053452**
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.09.2021 E 21773359 (1)**
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.12.2023 EP 4165435**

54 Título: **Sistema de radar biestático o multiestático para la vigilancia aérea con iluminación espacial**

30 Prioridad:

10.09.2020 FR 2009148

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.06.2024

73 Titular/es:

**AIRBUS DEFENCE AND SPACE SAS (100.0%)
31 Rue des Cosmonautes, ZI du PALAYS
31402 Toulouse Cedex 4, FR**

72 Inventor/es:

**JEANNIN, NICOLAS;
VOULOUZAN, FRÉDÉRIC y
BERTHEUX, PHILIPPE**

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 973 255 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

Sistema de radar biestático o multiestático para la vigilancia aérea con iluminación espacial

Campo de la invención

5 La presente invención pertenece al campo de la vigilancia del espacio aéreo. La invención se refiere en particular a un sistema de radar biestático o multiestático para la vigilancia aérea, cuyo el o los transmisores están embarcados en satélites que orbitan alrededor de la Tierra.

Estado de la técnica

Existen diferentes sistemas de radar para la vigilancia del espacio aéreo.

10 Por ejemplo, existen sistemas de radar monoestáticos ubicados en tierra que transmiten pulsos de radio y detectan el retorno de un pulso después de la reflexión en un objetivo. La diferencia de tiempo entre la transmisión y la recepción determina la distancia del objetivo con respecto a la antena y la posición de la antena durante la recepción del eco determina el acimut del objetivo.

Del mismo modo existen sistemas de radar biestáticos, para los que el transmisor y el receptor están separados y sistemas de radar multiestáticos que comprenden varios transmisores y/o varios receptores distintos.

15 Sin embargo, la cobertura que ofrece un sistema de radar biestático o multiestático situado en tierra sigue siendo limitada.

20 Del mismo modo se ha estudiado el uso de un iluminador de oportunidad procedente del espacio (por ejemplo, un satélite de telecomunicación o de navegación) como transmisor de un sistema de radar biestático pasivo. Sin embargo, el uso de este tipo de iluminador de oportunidad presenta severas limitaciones en términos de alcance de detección y/o disponibilidad de señal a escala del globo terrestre, dadas las restricciones de cobertura y potencia de señal apropiadas de estas aplicaciones.

La solicitud de patente WO 2019/073230 A1 describe un sistema de radar biestático pasivo de este tipo con un iluminador de oportunidad desde el espacio.

Descripción de la invención

25 La presente invención tiene como objetivo remediar todos o parte de los inconvenientes de la técnica anterior, en particular los expuestos anteriormente, proponiendo una solución basada en un radar biestático o multiestático cuyos transmisores cooperan con los receptores para implementar diferentes modos de funcionamiento que permiten optimizar la cobertura, el alcance de detección así como la posibilidad de evitar el uso no autorizado de la señal transmitida por los transmisores.

30 Para ello y según un primer aspecto, la presente invención propone un dispositivo transmisor para un sistema de radar biestático o multiestático para la vigilancia aérea. El dispositivo transmisor está destinado a ser embarcado en un satélite que orbita alrededor de la Tierra. Dicho sistema de radar es un sistema activo y el dispositivo transmisor está configurado para cooperar con al menos un dispositivo receptor.

35 Cuando el dispositivo transmisor está embarcado en el satélite en órbita, el dispositivo transmisor está configurado para obtener una información relativa a una región de interés destinada a ser vigilada por al menos un dispositivo receptor del sistema de radar y para transmitir una señal en un haz de radio que ilumina al menos parte de dicha región de interés.

40 Se entiende por "sistema de radar biestático" un radar cuyo transmisor y receptor están separados, a diferencia de un radar monoestático en el que el transmisor y el receptor están colocados. Se entiende por "sistema de radar multiestático" un sistema de radar que comprende al menos tres componentes separados para vigilar un espacio común, por ejemplo un transmisor y dos receptores o dos transmisores y un receptor o incluso varios transmisores y varios receptores.

Por "vigilancia aérea" se entiende en particular que el objetivo del sistema de radar es una aeronave (avión, helicóptero, dron, aerostato, etc.) que evoluciona en un espacio aéreo por debajo de los 20 kilómetros de altitud.

45 El radar funciona en el campo de las radiofrecuencias, es decir, para señales cuya frecuencia de onda electromagnética varía entre 3 kHz (kilohercio) y 300 GHz (gigahercio).

La "región de interés" es, por ejemplo, una región geográfica en la superficie de la Tierra. Por tanto, el haz de radio se orienta de manera que la huella en tierra del haz cubra al menos parte de la región de interés.

Según otro ejemplo, la región de interés puede ser un volumen en el que se desea detectar y geolocalizar un objetivo. Por tanto, el haz de radio se orienta de manera que la intersección del haz con la región de interés sea distinta de cero.

5 Por la fórmula "una región de interés vigilada por un dispositivo receptor del sistema de radar", se entiende que el dispositivo receptor es capaz de recibir una señal de radio transmitida por el dispositivo transmisor y reflejada por un objetivo que se encuentra en el haz que transporta la señal de radio.

10 Se entiende por "haz de radio" un cono de iluminación en el que se enfoca principalmente la energía de la señal transmitida. El haz de radio corresponde por ejemplo al cono de iluminación correspondiente a una apertura angular de -3 dB para la antena del dispositivo transmisor (el haz de radio se define por tanto como la región angular, alrededor del eje de un lóbulo principal de un diagrama de emisión para la señal transmitida, en el que la energía irradiada es mayor que la mitad de la energía irradiada en el eje del lóbulo principal). Sin embargo, podrían utilizarse otras convenciones para definir un haz de radio.

Un dispositivo receptor del sistema de radar biestático o multiestático puede estar embarcado en distintos tipos de plataformas: aeronave, satélite, vehículo terrestre o marítimo, etc.

15 La invención se basa en la coordinación entre los dispositivos transmisores y los dispositivos receptores del sistema de radar. De hecho, un dispositivo transmisor debe transmitir una señal de radio en una dirección particular definida en función de la región de interés vigilada por el o los dispositivos receptores del sistema de radar. Se trata por tanto de un dispositivo transmisor "ad hoc" para el sistema de radar, en el sentido de que el dispositivo transmisor está especialmente configurado para enfocar la energía de la señal de radio hacia una región de interés que se desea vigilar. Por lo tanto, esto excluye transmisores de oportunidad, como por ejemplo un satélite de telecomunicaciones, cuyas señales se utilizarían de manera oportunista para la vigilancia con un sistema de radar pasivo. En efecto, contrariamente al objeto de la invención, las señales transmitidas por un satélite de telecomunicaciones se transportan en haces orientados para iluminar regiones predeterminadas con el fin de proporcionarles servicios de telecomunicaciones y estos haces no se orientan deliberadamente hacia regiones para las que se desea realizar una vigilancia por radar. En otras palabras, los haces de radio generados por un satélite de telecomunicaciones están orientados para responder a una misión de telecomunicaciones y no a una misión de vigilancia aérea, lo que conlleva una dilución del flujo de energía en tierra y, por consiguiente, a una menor utilidad para la detección de objetivos.

20 Por lo tanto, el dispositivo transmisor debe recibir información relativa a la región de interés para orientar un haz de radio de tal manera que ilumine al menos parcialmente la región de interés. Esta información puede corresponder a coordenadas geográficas de la región de interés, a una dirección que debe seguir un haz para iluminar la región de interés o bien a parámetros de configuración de un sistema de antena del dispositivo transmisor para producir un haz que ilumine la región de interés. El o los dispositivos receptores del sistema de radar deben del mismo modo conocer la región de interés iluminada.

25 La invención presenta las ventajas inherentes al carácter biestático o multiestático del radar, es decir en particular, la posibilidad de detectar objetos cuya geometría limita los retornos en una configuración monoestática.

La invención permite del mismo modo disponer de una capacidad de vigilancia garantizada en cualquier lugar del planeta sin tener que desplegar transmisores ubicados en tierra o en la atmósfera.

30 La invención permite del mismo modo detectar objetivos que evolucionan a muy baja altitud, lo que generalmente no ocurre con los radares de vigilancia aérea ubicados en tierra debido a la ausencia de una línea de apuntado directa entre el objetivo y el radar debido a la curvatura de la tierra.

La invención permite obtener alcances de detección significativos vinculados a una capacidad de enfocar la energía hacia una región de interés particular.

La cooperación entre el dispositivo transmisor y el dispositivo receptor permite del mismo modo impedir el aprovechamiento de las señales transmitidas por el dispositivo transmisor por parte de terceros.

45 En resumen, el uso de un dispositivo transmisor que funciona en cooperación con un dispositivo receptor de un sistema de radar biestático o multiestático permite la implementación de diferentes modos de funcionamiento que permiten optimizar la flexibilidad de cobertura, el alcance de detección, así como la posibilidad de impedir el uso no autorizado de la señal.

50 Conviene señalar que la coordinación entre un dispositivo transmisor y un dispositivo receptor del sistema de radar según la invención permite garantizar el uso de una base de tiempo y de frecuencia común entre estas dos entidades (se entiende por esto que el instante de emisión de la señal y la frecuencia a la que la señal es transmitida por el dispositivo transmisor es conocida a priori por el dispositivo receptor). Sin embargo, esta sincronización en tiempo y en frecuencia entre un dispositivo transmisor y un dispositivo receptor no siempre es necesaria, particularmente en el caso en que la ubicación del objetivo se basa en una medición de la diferencia en el tiempo de propagación de la señal
55 entre varios dispositivos receptores.

En modos particulares de realización, la invención también puede comprender una o más de las siguientes características, tomadas individualmente o según todas las combinaciones técnicamente posibles.

En modos particulares de realización, la forma de onda de la señal transmitida se genera directamente a bordo del satélite de manera autónoma.

- 5 En otras palabras, no se trata de una señal transmitida por una estación en tierra y repetida por el dispositivo transmisor embarcado en el satélite.

En modos particulares de realización, cuando un haz de radio transmitido por el dispositivo transmisor no puede iluminar completamente la región de interés, el dispositivo transmisor está configurado para iluminar sucesivamente diferentes subregiones de la región de interés.

- 10 Dichas disposiciones permiten buscar un objetivo con el dispositivo transmisor en una región de interés más amplia que la región cubierta por un haz de radio generado por el dispositivo transmisor.

En modos particulares de realización, el dispositivo transmisor comprende una antena de red por fases y una red de formación de haces configurada para redireccionar un haz de radio transmitido por el dispositivo transmisor según diferentes direcciones. Opcionalmente, el dispositivo transmisor también puede comprender un reflector destinado a ser iluminado por la red por fase colocada cerca del punto focal de dicho reflector.

- 15

Una antena de red por fases (redireccionamiento electrónico) permite de hecho redireccionar un haz más rápidamente que una antena de redireccionamiento mecánico. Por lo tanto, esto confiere una mejor capacidad de respuesta al sistema. En particular, esto puede permitir orientar continuamente el haz para mantener la iluminación de una región de interés durante el tiempo que el satélite sobrevuela dicha región. Del mismo modo esto puede permitir iluminar integralmente la región de interés de manera rápida con una secuencia de haces diferentes.

- 20

En modos particulares de realización, la señal transmitida es una combinación de una señal útil con una señal parásita, dicha señal parásita que está descorrelacionada de la señal útil y que presenta una función de ambigüedad con un lóbulo principal de un ancho en el campo de frecuencia mayor que el doble de la frecuencia Doppler máxima susceptible de ser observada por un cambio en un objetivo apuntado por el sistema de radar.

- 25 Dichas disposiciones permiten limitar muy fuertemente el uso por parte de terceros de la señal transmitida. Sólo un dispositivo receptor autorizado que tenga conocimiento de la señal útil y/o de la señal parásita podrá entonces detectar y geolocalizar un objetivo a partir de la señal reflejada por el objetivo.

Como recordatorio, la función de ambigüedad (tal como fue estudiada por Woodward en "*Probability and Information Theory with Applications to Radar*"), es una herramienta esencial en la teoría de la detección por radar que caracteriza las propiedades de la señal como instrumento de medida. La función de ambigüedad de una señal compleja se puede definir como la distancia entre esta señal y la misma señal alterada por la acción de un operador de traslación en tiempo y en frecuencia.

- 30

En modos particulares de realización, la señal parásita es una señal "*chirp*" que presenta una frecuencia que varía linealmente alrededor de una frecuencia central durante un período predeterminado con un cambio aleatorio en la frecuencia central de un período al siguiente.

- 35

En modos particulares de realización, el ancho de banda barrido por la señal "*chirp*" durante dicho período predeterminado es mayor que el doble del desfase de frecuencia Doppler máximo susceptible de observarse para un objetivo del sistema de radar.

- 40 Dichas disposiciones permiten asegurar que los ecos parásitos que regresan del suelo contaminarán necesariamente la señal reflejada por el objetivo. Un receptor que pertenece al sistema de radar y que conozca la señal útil o la señal parásita podrá suprimir estos ecos parásitos mediante un procesamiento de señal adecuado. Por el contrario, un receptor que no pertenezca al sistema de radar y que, por consiguiente, no conozca ni la señal útil ni la señal parásita, no será capaz de eliminar estos ecos parásitos.

Según un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un sistema de radar biestático o multiestático para la vigilancia aérea de una región de interés, dicho sistema de radar que tiene como objetivo geolocalizar una aeronave en dicha región de interés. El sistema de radar comprende:

- 45

- al menos un dispositivo transmisor según uno de los modos de realización anteriores, cada dispositivo transmisor que está configurado (cuando el dispositivo transmisor está a bordo del satélite en órbita) para transmitir una señal en un haz de radio que ilumina al menos parte de dicha región de interés,

- 50 - al menos un dispositivo receptor destinado a ser situado para vigilar dicha región de interés.

La invención se basa en la cooperación entre los dispositivos transmisores y los dispositivos receptores del sistema de radar. De hecho, un dispositivo transmisor transmite una señal de radio en una dirección particular definida en función de la región de interés vigilada por el o los dispositivos receptores del sistema de radar.

En modos particulares de realización, la invención también puede comprender una o más de las características siguientes, tomadas individualmente o en todas las combinaciones técnicamente posibles.

En modos particulares de realización, el sistema de radar es un sistema de radar multiestático que comprende varios dispositivos transmisores y/o varios dispositivos receptores.

5 La diversidad espacial de un sistema de radar multiestático permite mejorar las capacidades de detección y de geolocalización del sistema. La posibilidad de disponer de diferentes ángulos de observación permite, en particular, multiplicar las posibilidades de observar el objetivo bajo una geometría en la que la superficie equivalente de radar (SER) es grande, teniendo en cuenta la naturaleza altamente anisótropa de los objetivos de interés.

10 En modos particulares de realización, el sistema de radar comprende varios dispositivos transmisores y los diferentes dispositivos transmisores están embarcados en satélites organizados en constelaciones de modo que para una región de interés cualquiera en la superficie de la Tierra, siempre existe una línea de apuntado directa hacia dicha región de interés por varios de dichos satélites.

15 En modos particulares de realización, el o los dispositivos transmisores y/o el o los dispositivos receptores están además configurados para comunicarse a través de una red de telecomunicaciones por satélite para intercambiar datos entre dos dispositivos transmisores, entre dos dispositivos receptores, entre un dispositivo transmisor y un dispositivo receptor, entre una estación de control en tierra y un dispositivo transmisor o entre una estación de control en tierra y un dispositivo receptor.

20 Con este objetivo, el o los dispositivos transmisores y/o el o los dispositivos receptores comprenden un módulo de comunicación adaptado para establecer enlaces de comunicación con la red de telecomunicaciones por satélite. Dichas disposiciones permiten prever una cobertura mundial del sistema de radar. Conviene señalar que la red de telecomunicaciones por satélite puede ser distinta del sistema de radar según la invención.

25 Según un tercer aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento de vigilancia aérea con la ayuda de un sistema de radar biestático o multiestático. El sistema de radar comprende al menos un dispositivo transmisor embarcado en un satélite que orbita alrededor de la Tierra y al menos un dispositivo receptor, dicho al menos un dispositivo transmisor que está configurado para cooperar con dicho al menos un dispositivo receptor.

El procedimiento comprende las etapas siguientes:

- una determinación de una región de interés en la que se desea detectar y geolocalizar una aeronave,
- un posicionamiento de dicho dispositivo receptor para vigilar dicha región de interés,
- una comunicación al dispositivo transmisor de una información relacionada con dicha región de interés,
- 30 - una transmisión, por dicho dispositivo transmisor, de una señal en un haz de radio que ilumina al menos una parte de dicha región de interés,
- una estimación de la posición de la aeronave en la región de interés a partir de una señal recibida por el dispositivo receptor correspondiente a la reflexión en la aeronave de la señal transmitida por el dispositivo transmisor.

35 Por "posicionamiento del dispositivo receptor para vigilar dicha región de interés", se entiende que el dispositivo receptor está colocado en la región de interés o lo suficientemente cerca de la región de interés para que pueda recibir la señal transmitida por el dispositivo transmisor y reflejada por un objetivo que se encuentra en el haz de radio que transporta dicha señal. Además, un sistema de antena del dispositivo receptor está configurado para recibir esta señal.

En modos particulares de implementación, la invención puede comprender además una o más de las siguientes características, tomadas individualmente o en todas las combinaciones técnicamente posibles.

40 En modos particulares de implementación, cuando un haz de radio transmitido por un dispositivo transmisor no puede iluminar completamente la región de interés, el procedimiento comprende además la determinación de una secuencia de iluminación de diferentes subregiones de la región de interés para dicho dispositivo transmisor.

45 En modos particulares de implementación, la transmisión de la señal de radio comprende una combinación de una señal parásita con una señal útil, dicha señal parásita que está descorrelacionada de la señal útil y presentando una función de ambigüedad con un lóbulo principal de un ancho en el campo de la frecuencia mayor al doble del desfase de frecuencia Doppler máximo susceptible de observarse en un objetivo apuntado por el sistema de radar.

50 En modos particulares de implementación, el sistema de radar es un sistema de radar multiestático que comprende un número N_E de dispositivos transmisores y un número N_R de dispositivos receptores, donde N_E y N_R son números enteros naturales positivos, en los que un número $N_E \cdot N_R$ de configuraciones biestáticas disponibles es mayor o igual a dos.

En modos particulares de implementación, el número N_R de dispositivos receptores es mayor o igual a dos y la estimación de la posición de la aeronave comprende una medición de la diferencia del tiempo de llegada de la señal recibida por cada dispositivo receptor.

Dichas disposiciones permiten limitar la necesidad de sincronización entre transmisores y receptores. En efecto, no hay entonces necesidad de sincronización en tiempo y en frecuencia entre un transmisor y un receptor y sólo deben sincronizarse entre sí los diferentes receptores para realizar mediciones de tipo TDOA ("Time Difference Of Arrival"). Además, en este caso no es necesario que los receptores conozcan la posición del o de los transmisores.

5 En modos particulares de implementación, el número N_E de dispositivos transmisores es mayor o igual a dos y la estimación de la posición de la aeronave para un dispositivo receptor comprende una determinación de al menos dos puntuaciones de detección asociadas respectivamente con al menos dos dispositivos transmisores y las puntuaciones de detección se proyectan en una geometría común y después se acumulan.

10 En modos particulares de implementación, una decisión sobre la estimación de la posición de la aeronave se basa en una combinación de decisiones elementales correspondientes respectivamente a diferentes configuraciones biestáticas entre las $N_E \cdot N_R$ configuraciones biestáticas disponibles.

Dichas disposiciones permiten mejorar la sensibilidad de detección y la precisión de geolocalización de un objetivo.

15 En modos particulares de implementación, el procedimiento comprende además una etapa de organización de los diferentes satélites que transportan respectivamente los diferentes dispositivos transmisores en constelaciones de manera que, para una región de interés cualquiera en la superficie de la Tierra, siempre exista una línea de apuntado directa hacia dicha región de interés para varios de dichos satélites.

20 En modos particulares de implementación, una red de telecomunicaciones por satélite permite además un intercambio de datos entre dos dispositivos transmisores, entre dos dispositivos receptores, entre un dispositivo transmisor y un dispositivo receptor, entre una estación de control en tierra y un dispositivo transmisor o entre una estación de control en tierra y un dispositivo receptor.

Presentación de las figuras

La invención se comprenderá mejor con la lectura de la siguiente descripción, dada a título de ejemplo en ningún caso limitativo y hecha con referencia a las figuras 1 a 18 que representan:

25 la figura 1, una representación esquemática de un sistema de radar biestático según la invención,
 la figura 2, una representación esquemática de un sistema de radar multiestático según la invención,
 la figura 3, una representación esquemática del uso de una secuencia de iluminación para iluminar una región de interés,
 la figura 4, una representación esquemática de un modo de realización de un dispositivo transmisor según la invención,
 30 la figura 5, una representación esquemática de otro modo de realización de un dispositivo transmisor según la invención,
 la figura 6, una representación esquemática de un modo de realización de un dispositivo receptor,
 la figura 7, una representación esquemática de un módulo de filtrado adaptativo para disminuir la contribución de las interferencias en una señal recibida por un dispositivo receptor,
 la figura 8, una representación esquemática de un módulo de procesamiento espacio-temporal para implementar un
 35 filtrado adaptativo en el campo de frecuencia Doppler/frecuencia espacial,
 la figura 9, una representación esquemática del principio de filtrado bidimensional de tipo STAP en el campo de frecuencia Doppler/frecuencia espacial,
 la figura 10, una ilustración de la ventaja de disponer de dos configuraciones de medición diferentes basadas en dos
 40 dispositivos transmisores diferentes en el caso de un filtrado bidimensional de tipo STAP en el campo de frecuencia Doppler/frecuencia espacial,
 la figura 11, una representación esquemática de un modo particular de implementación de una estimación de la posición de un objetivo mediante una unidad de detección y ubicación del dispositivo receptor,
 la figura 12, una representación esquemática del principio de acumulación de puntuaciones de detección asociadas respectivamente a dispositivos transmisores diferentes,
 45 la figura 13, una representación de un espectrograma de una señal "chirp" lineal con una fluctuación aleatoria de la frecuencia central a lo largo del tiempo,
 la figura 14, una representación de una función de autoambigüedad para una señal útil (parte a) y para una señal parásita (parte b); una representación de una función de ambigüedad calculada respectivamente por un dispositivo receptor que no pertenece al sistema (parte c) y por un dispositivo receptor que pertenece al sistema (parte d) cuando
 50 la señal transmitida está protegida por una señal parásita,
 la figura 15, una representación esquemática del uso de una red de telecomunicaciones por satélite para intercambiar datos entre diferentes entidades del sistema de radar según la invención,
 la figura 16, una representación esquemática de un primer ejemplo de implementación de la invención,
 la figura 17, un gráfico que representa diferentes puntos de funcionamiento del primer ejemplo descrito con referencia
 55 a la figura 12,
 la figura 18, una representación esquemática de las principales etapas de un procedimiento de vigilancia aérea con la ayuda de un sistema de radar biestático o multiestático según la invención.

En estas figuras, referencias idénticas de una figura a otra designan elementos idénticos o similares. Por motivos de claridad, los elementos representados no están necesariamente a una misma escala, salvo que se indique lo contrario.

Descripción detallada de un modo de realización de la invención.

A) Descripción del sistema de radar

5 La figura 1 representa esquemáticamente un ejemplo de un sistema 90 de radar biestático según la invención. El objetivo 30 apuntado por el sistema 90 de radar es un avión. El sistema 90 de radar comprende un dispositivo 10 transmisor embarcado en un satélite 11 que orbita alrededor de la Tierra y un sistema 20 receptor. En el ejemplo ilustrado en la figura 1, el dispositivo 20 transmisor está embarcado en una aeronave 21. Sin embargo, nada impide, en variantes de la invención, que el dispositivo 20 receptor esté embarcado en otro tipo de plataforma, como por ejemplo un satélite, un vehículo terrestre o un barco.

El dispositivo 10 transmisor corresponde a la carga útil o al menos a una parte de la carga útil, del satélite 11 en el que está embarcado.

15 El dispositivo 10 transmisor y el dispositivo 20 receptor están coordinados entre sí para cooperar. Se entiende con ello en particular que el dispositivo 10 transmisor está especialmente configurado para enfocar la energía de una señal de radio transmitida por dicho dispositivo 10 transmisor hacia una región 50 de interés vigilada por el dispositivo 20 receptor. Con este objetivo, el dispositivo 10 transmisor está configurado para obtener una información relativa a la región 50 de interés y para dirigir un haz 40 de radio de manera que ilumine al menos parcialmente la región de interés. Por otro lado, el dispositivo 20 receptor se sitúa deliberadamente en las proximidades de la región 50 de interés en la que se desea detectar y geolocalizar un objetivo 30 de tal manera que el dispositivo 20 receptor sea capaz de recibir una señal 41 transmitida por el dispositivo 10 transmisor y reflejada por el objetivo 30.

25 En la figura 1, la región 50 de interés está representada por una región geográfica en la superficie 51 de la Tierra. Luego, el haz 40 de radio se orienta de manera que la huella 43 en tierra del haz 40 de radio cubra una parte al menos de la región 50 de interés. Sin embargo, la región de interés también podría corresponder a un volumen en el que se desea detectar y geolocalizar un objetivo. Entonces, el haz de radio se orienta de manera que la intersección del haz con la región de interés sea distinta de cero.

30 La información sobre la región 50 de interés que conviene ser vigilada puede transmitirse, por ejemplo, al dispositivo 10 transmisor y al dispositivo 20 receptor mediante una estación de control en tierra (no representada en la figura 1). Según otro ejemplo, la información sobre la región 50 de interés que conviene ser vigilada puede ser transmitida al dispositivo 20 receptor por el dispositivo 10 transmisor. Según otro ejemplo más, la información sobre la región 50 de interés que conviene ser vigilada puede ser transmitida al dispositivo 10 transmisor por el dispositivo 20 receptor.

El dispositivo 20 receptor busca entonces detectar un eco generado por la reflexión de la señal 41 sobre el objetivo 30 buscando réplicas de la señal transmitida desplazadas en tiempos y en frecuencias en la señal recibida por el dispositivo 20 receptor.

35 En el ejemplo considerado e ilustrado en la figura 1, el dispositivo 10 transmisor y el dispositivo 20 receptor están sincronizados en tiempo y en frecuencia (utilizan una base de tiempo y de frecuencia común). Además, el dispositivo 20 receptor tiene conocimiento del contenido y el momento de transmisión de la señal 41. El dispositivo receptor comprende, por ejemplo, una memoria electrónica en la que se almacenan los parámetros necesarios para la generación de una réplica de referencia de la señal transmitida por el dispositivo 10 transmisor. Un cálculo de una función de ambigüedad entre esta réplica de referencia y la señal recibida puede permitir por tanto detectar y geolocalizar el objetivo 30. De hecho, los desfases en el tiempo y la frecuencia de la señal 41 reflejada por el objetivo 30 con respecto a la señal transmitida por el dispositivo 10 transmisor son representativos de la posición del objetivo 30 con respecto al dispositivo 10 transmisor y al dispositivo 20 receptor.

45 La capacidad de detección de un objetivo se puede estimar a partir de la relación señal-ruido SNR_R (acrónimo de "Signal to Noise Ratio") de la señal recibida por el dispositivo 20 receptor. Esta relación señal-ruido SNR_R se puede cuantificar mediante la ecuación de radar siguiente:

[Mat. 1]

$$SNR_R = \frac{P_t G_t G_r t_{int} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k_B T_0 F_R L d_E^2 d_R^2}$$

en la que:

- σ es la superficie equivalente de radar (SER),

- P_t es la potencia media de transmisión,
- G_t es la ganancia de la antena en la transmisión en la dirección del objetivo,
- G_r es la ganancia de la antena en la recepción en la dirección del objetivo,
- λ es la longitud de onda,
- 5 - T_0 es la temperatura de ruido de referencia que normalmente se toma igual a 290 K,
- F_R es el factor de ruido de la cadena de recepción,
- d_E es la distancia entre el transmisor y el objetivo,
- d_R es la distancia entre el objetivo y el receptor (alcance de detección),
- L representa las pérdidas del sistema (propagación, procesamiento, impacto de las interferencias),
- 10 - t_{int} es la duración de integración de la medición,
- k_B es la constante de Boltzmann.

Conviene señalar que los niveles de potencia recibidos para una señal directamente recibida desde el dispositivo 10 transmisor y/o para señales 42 que provienen del dispositivo transmisor y reflejadas por la superficie 51 de la Tierra pueden ser varios órdenes de magnitud mayores que la señal 41 reflejada en el objetivo 30. Estas señales pueden perjudicar entonces la capacidad de detección del objetivo 30. Sin embargo, la interferencia debida a la señal directa y a las señales reflejadas por el suelo puede, bajo ciertas condiciones, reducirse en gran medida mediante el uso de técnicas de procesamiento de señales que se detallarán más adelante. Bajo esta hipótesis, los rendimientos de la detección se pueden evaluar probando la capacidad de discriminar la señal de interés del ruido térmico de recepción y el nivel de interferencia residual.

Tal como se ilustra en la figura 2, el sistema 90 de radar puede ser un sistema de radar multiestático que comprende varios dispositivos 10 transmisores y/o varios dispositivos 20 receptores para sondear una región de interés en un instante dado. Dichas disposiciones permiten mejorar las capacidades de detección mediante diversidad de transmisión y/o diversidad de recepción. En el ejemplo ilustrado en la figura 2, el sistema 90 de radar comprende dos ($N_E = 2$) dispositivos 10a, 10b transmisores y tres ($N_R = 3$) dispositivos 20c, 20d, 20e receptores. Esto permite multiplicar las configuraciones de detección y, por tanto, las capacidades de detección del sistema, logrando $N_E \cdot N_R$ operaciones biestáticas ($N_E \cdot N_R = 6$ en el ejemplo de la figura 2).

Se pueden poner en juego diferentes modos de procesamiento simultáneos, lo que permite aumentar la frecuencia de revisión de una subregión de la región de interés a vigilar y/o aumentar la sensibilidad de detección combinando los observables que provienen de las diferentes configuraciones biestáticas disponibles. Tal como se ilustra en la figura 2, un primer receptor 20c recibe una señal 41ac transmitida por un primer dispositivo 10a transmisor y reflejada por el objetivo 30 así como una señal 41bc transmitida por un segundo dispositivo 10b transmisor y reflejada por el objetivo 30; un segundo receptor 20d recibe una señal 41ad transmitida por el primer dispositivo 10a transmisor y reflejada por el objetivo 30 así como una señal 41bd transmitida por el segundo dispositivo 10b transmisor y reflejada por el objetivo 30; un tercer receptor 20e recibe una señal 41ae transmitida por el primer dispositivo 10a transmisor y reflejada por el objetivo 30 así como una señal 41 transmitida por el segundo dispositivo 10b transmisor y reflejada por el objetivo 30.

B) Dispositivo transmisor

En la invención, los dispositivos 10 transmisores están destinados a estar embarcados en satélites que se ubicarán en el espacio exoatmosférico para poder iluminar una o más regiones de interés ubicadas en las inmediaciones del globo terrestre. Se puede considerar cualquier tipo de órbita para los satélites que transporten los dispositivos 10 transmisores: desde la órbita baja (a partir de 300 kilómetros de altitud) hasta órbitas de tipo geostacionario.

Para permitir rendimientos de detección satisfactorios, un dispositivo 10 transmisor debe comprender una antena que tenga una alta ganancia G_t y por lo tanto una directividad significativa. La huella 43 en tierra de esta antena y por lo tanto la región en la que proporciona una capacidad de detección interesante es posiblemente menor que la región 50 de interés (tal como se ilustra en la figura 1). En tal caso, es conveniente que el dispositivo 10 transmisor esté configurado para poder barrer rápidamente la región 50 de interés con un haz 40 de radio orientando sucesivamente dicho haz 40 de radio en diferentes direcciones para cubrir sucesivamente diferentes subregiones que constituyen la región 50 de interés.

Tal como se ilustra en la figura 3, es posible determinar una secuencia de iluminación para un dispositivo 10 transmisor. La secuencia de iluminación comprende, por ejemplo, varias direcciones del eje principal del haz 40 de radio a aplicar sucesivamente para cubrir la totalidad de la región 50 de interés con las subregiones 43 secuencialmente iluminadas. La secuencia de iluminación puede ser determinista o pseudoaleatoria. Ventajosamente, el dispositivo receptor puede conocer la secuencia de iluminación para evitar una búsqueda innecesaria de objetivos en regiones no iluminadas. En tal caso, el dispositivo 10 transmisor puede configurarse, por ejemplo, para comunicar al dispositivo 20 receptor la secuencia de iluminación efectuada. Alternativamente, la secuencia de iluminación a efectuar puede transmitirse tanto al dispositivo 20 receptor como al dispositivo 10 transmisor mediante una estación de control en tierra.

Del mismo modo puede ser ventajoso que diferentes dispositivos 10 transmisores estén sincronizados entre sí para seguir simultáneamente la misma secuencia de iluminación. Dichas disposiciones permiten de hecho promover la diversidad de transmisión.

Independientemente de la secuencia de iluminación, es preferible poder orientar de forma continua un haz 40 de radio producido por un dispositivo 10 transmisor para mantener la iluminación de una región de interés durante el tiempo que el satélite vuela sobre dicha región (desplazamiento del satélite relativo a la Tierra cuando el satélite no es un satélite geoestacionario).

- 5 Con este objetivo, el dispositivo 10 transmisor puede comprender una antena que puede redireccionarse de manera mecánica o de manera electrónica con o sin reflector. Para permitir este rápido redireccionamiento en diversas circunstancias, se prefiere el uso de una antena de red por fases (redireccionamiento electrónico) con respecto a una antena de redireccionamiento mecánico para cuestiones relacionadas con la reactividad del sistema.

10 El redireccionamiento de un haz 40 de radio se controla mediante una unidad de control del dispositivo 10 transmisor en función de la información sobre la región 50 de interés a vigilar. Esta información puede ser transmitida, por ejemplo, por una estación de control en tierra. Esta información puede corresponder, por ejemplo, a un conjunto de pesos a aplicar a diferentes entradas de una red de formación de haces (BFN para "*Beam Forming Network*" en la literatura anglosajona). Según otro ejemplo, esta información puede corresponder a una dirección (o una secuencia de direcciones) que debe seguir el haz 40 de radio, los pesos a aplicar a nivel de la red formadora de haces que son
15 calculados entonces por la unidad de control del dispositivo 10 transmisor. Según otro ejemplo más, esta información puede corresponder a las coordenadas geográficas de la región de interés y el dispositivo 10 transmisor es entonces responsable de calcular una secuencia de iluminación así como los pesos a aplicar a la red de formación para efectuar dicha secuencia.

20 La señal transmitida por el dispositivo 10 transmisor puede ser una señal recibida desde una estación en tierra y repetida por el dispositivo 10 transmisor (de manera análoga a la realizada por un satélite de telecomunicaciones en modo transparente). Alternativamente y de manera preferente, la forma de onda de la señal transmitida por el dispositivo 10 transmisor es generada directamente por el dispositivo 10 transmisor a bordo del satélite 11, de forma autónoma.

25 En el caso de una señal generada directamente y de forma autónoma a bordo del satélite 11 por el dispositivo 10 transmisor, es posible controlar la forma de onda de la señal a transmitir a través de una interfaz de control remoto. Un generador de formas de onda del dispositivo 10 transmisor es, por ejemplo, inicializado por una estación terrestre a través de un canal de comunicación seguro. En ciertos modos de implementación, el procedimiento para generar la forma de onda se comparte entre el dispositivo 10 transmisor y el dispositivo 20 receptor para minimizar las cantidades de información a intercambiar para que estén coordinadas.

30 La figura 4 representa esquemáticamente un ejemplo de realización de un dispositivo 10 transmisor según la invención que comprende un generador 12 de formas de onda, una red 13 de formación de haces, una unidad 14 de control, una etapa 15 de amplificación y una antena 16 de red de fase que comprende una pluralidad de elementos 17 de antena. El generador 12 de formas de onda puede controlarse mediante una señal de sincronización que proviene de un sistema de distribución horaria, tal como por ejemplo un sistema de navegación por satélite (GNSS para "*Global Navigation Satellite System*") o desde un reloj ultra-estable (reloj atómico por ejemplo). La unidad 14 de control calcula los coeficientes complejos (pesos) que la red 13 de formación de haces aplicará a los diferentes elementos de antena. En el ejemplo ilustrado en la figura 4, una señal transmitida por el dispositivo 10 transmisor se genera directamente a
35 bordo del satélite de manera autónoma.

40 La figura 5 representa esquemáticamente otro ejemplo de realización de un dispositivo 10 transmisor según la invención para el cual una señal transmitida por el dispositivo 10 transmisor es una repetición de una señal recibida desde una estación en tierra. El dispositivo 10 transmisor no comprende un generador de formas de onda. Por El contrario, el dispositivo 10 transmisor comprende una cadena 18 de recepción para recibir la señal transmitida por la estación en tierra y para volver a transmitir dicha señal después de la amplificación y transposición de frecuencia. Con este objetivo, la cadena 18 de recepción comprende, de manera convencional, una antena de recepción, un filtro 182, un amplificador 183 y un convertidor 184 de frecuencia. Por lo demás, el dispositivo 10 transmisor ilustrado en la figura 5 es idéntico al dispositivo 10 transmisor descrito con referencia a la figura 4.

45 Un dispositivo 10 transmisor según la invención también comprende una memoria electrónica en la que se almacena información relativa a la región 50 de interés a vigilar, lo que permite orientar convenientemente un haz 40 de radio generado por el dispositivo transmisor (por ejemplo, coordenadas geográficas de la región 50 de interés, una secuencia de iluminación o parámetros de configuración de la red de formación de red). El dispositivo 10 transmisor puede del mismo modo comprender un módulo de comunicación (no representado en las figuras) para intercambiar información con una estación de control en tierra, con un dispositivo 20 receptor y/o con otro dispositivo 10 transmisor.

55 Puede ser ventajoso que el posicionamiento de objetivos para el dispositivo 10 transmisor esté provisto de un dispositivo de determinación de órbita precisa para transmitir sus efemérides e informaciones sobre el tiempo local a una estación en tierra de coordinación o para transmitir estas informaciones como modulación secundaria en la señal de radar destinada a los dispositivos 20 receptores.

Preferiblemente, los diferentes dispositivos 10 transmisores del sistema no deben interferir entre sí. Se puede implementar un mecanismo de compartición de espectro basado en una separación no exclusiva de frecuencia, de código, de tiempo o de polarización.

5 Los satélites que embarcan los diferentes dispositivos 10 transmisores se pueden organizar en constelaciones de manera que siempre haya una línea de apuntado directa para varios satélites hacia cualquier región de interés en las proximidades de la superficie de la Tierra. Se pueden encontrar diferentes ejemplos de este tipo de constelaciones en constelaciones existentes o planificadas de satélites de telecomunicaciones de órbita baja, sistemas de posicionamiento por satélite o satélites de observación de la Tierra.

B) Dispositivo receptor

10 La figura 6 representa esquemáticamente un ejemplo de dispositivo 20 receptor del sistema 90 de radar según la invención. El dispositivo 20 receptor se encarga de detectar una señal reflejada por un objetivo y discriminarla del ruido térmico y de las interferencias. Estas interferencias pueden provenir de la señal directa, reflejos de tierra (ecos parásitos reflejados desde el suelo) o interferencias intencionales (perturbaciones).

15 El dispositivo 20 receptor comprende una cadena 22 de recepción que puede comprender uno o más canales de recepción, cada uno de los cuales que está constituido, de manera convencional, de un sistema 221 de antena posiblemente redireccionable mecánica o electrónicamente, de una parte analógica que permite el filtrado 222, la amplificación 223, la conversión 224 de frecuencia y la digitalización 225 de señales.

20 Puede existir en la cadena 22 de recepción un canal de referencia configurado para recibir una señal que proviene directamente del dispositivo 10 transmisor (sin reflexión sobre un objetivo o sobre el suelo). Un canal de referencia de este tipo se puede utilizar para fines de supresión analógica de la señal directa y/o para fines de ayuda a la sincronización en tiempo y en frecuencia del dispositivo 20 receptor y/o para fines de supresión digital de la señal directa.

Los flujos digitales obtenidos se envían a una unidad 23 de procesamiento de señales cuyas operaciones tienen como objetivo limitar los efectos de enmascaramiento por interferencias de la señal reflejada por un objetivo.

25 Una unidad 24 de sincronización es responsable de proporcionar una señal de sincronización. Esta sincronización en tiempo y en frecuencia se puede obtener a partir de la recepción en el canal de referencia de la señal transmitida directamente por el dispositivo 10 transmisor en una frecuencia y en un instante de transmisión conocidos por el dispositivo 20 receptor. Según otros ejemplos, la sincronización se puede obtener con la ayuda de un sistema de distribución de tiempo como un sistema de posicionamiento por satélite o utilizando un reloj ultra-estable).

30 La unidad 24 de sincronización puede del mismo modo ser responsable de proporcionar a la unidad 23 de procesamiento de señales una réplica de referencia de la señal transmitida almacenada por el dispositivo transmisor.

Finalmente, el dispositivo 20 receptor comprende una unidad 25 de detección y ubicación. La ubicación se basa en una medición del tiempo de propagación de la señal entre el dispositivo transmisor y el dispositivo receptor o en una medición de la diferencia en el tiempo de llegada de la señal a nivel de varios receptores (método conocido como TDOA por "*Time Difference Of Arrival*").

35 El dispositivo 20 receptor puede del mismo modo incluir un módulo de comunicación (no representado en las figuras) para intercambiar informaciones con una estación de control en tierra, con un dispositivo 10 transmisor y/o con otro dispositivo 20 receptor.

40 Conviene señalar que la detección y/o la ubicación pueden del mismo modo implementarse en una entidad distinta de un dispositivo 20 receptor, por ejemplo mediante una estación de control en tierra, a partir de mediciones efectuadas por uno o más dispositivos 20 receptores.

D) Principio de detección

45 El principio de detección es el de la detección mediante un radar biestático, es decir, una detección de máximos locales provocados por un objetivo de interés sobre una estimación de la función de ambigüedad o una aproximación de esta última, que cubre en particular el caso del tratamiento de pulso-Doppler.

50 La principal dificultad de procesamiento en el caso de un radar biestático aerotransportado reside en la limitación del impacto del retorno de los reflejos de tierra (ecos parásitos recibidos por un dispositivo receptor tras su reflexión en el suelo) y de la señal directa (señal transmitida por el dispositivo transmisor recibida directamente por el dispositivo receptor sin reflexión en el objetivo). De hecho, la señal reflejada por el suelo y la señal recibida en línea directa desde el satélite transmisor pueden recibirse con un nivel de potencia muy superior a la señal recibida que proviene del objetivo (señal de interés) y por consiguiente pueden enmascarar la señal de interés.

Se pueden contemplar diferentes procedimientos para limitar estos efectos de enmascaramiento de la señal de interés.

En particular, es posible implementar una cancelación en el campo analógico, antes de la digitalización, de la componente debida a la señal directa en la señal recibida, mediante la sustracción de la señal de referencia (señal memorizada o señal recibida en un canal de referencia) con una ganancia y una fase apropiadas.

5 También es posible implementar la cancelación en el campo digital, después de la digitalización, para reducir la contribución de determinadas interferencias particularmente potentes (reflejos de tierra) conectando en cascada varios filtros e incluyendo réplicas traducidas en frecuencia de la señal de referencia. La figura 7 ilustra esquemáticamente un ejemplo de módulo 231 de filtrado adaptativo incluido en la unidad 23 de procesamiento de señales de un dispositivo 20 receptor para implementar dicha cancelación digital. La contribución de la señal directa y de los reflejos fuertes está limitada por la resta en la señal recibida digitalizada $x[n]$. Varios filtros 232 adaptativos toman en la entrada una versión desplazada por Doppler de la señal de referencia $s(t)$. En cada filtro 232 adaptativo, los pesos w_i de los filtros asociados respectivamente a los diferentes elementos de antena de la antena receptora del dispositivo 20 receptor son calculados por un procesador 233, con una frecuencia de actualización rápida, para minimizar la potencia de la señal $y[n]$ obtenida en la salida.

15 Estos dos tipos de cancelación (analógica y digital) se pueden combinar en determinados casos. La cancelación analógica permite reducir la dinámica de digitalización y por tanto evitar la introducción de ruido de cuantificación en el procesamiento. La cancelación digital permite suprimir parte de los retornos del reflejo y de residuo de la señal directa. Ya sea en el campo digital o en el campo analógico, el bucle de cancelación de señal tiene como objetivo minimizar la potencia de la señal $y[n]$ en la salida para limitar los efectos de enmascaramiento de una señal fuerte sobre una señal débil.

20 Alternativamente o además y como se ilustra en la figura 8, la unidad 23 de procesamiento de señales puede incluir un módulo 234 de procesamiento espacio-temporal para implementar un filtrado adaptativo en el campo de frecuencia Doppler/frecuencia espacial (del mismo modo llamado frecuencia angular). Este filtrado adaptativo se basa en una estimación de la matriz de covarianza en el campo de frecuencia Doppler/frecuencia espacial de los retornos del reflejo de tierra. A continuación, esta matriz de covarianza se utiliza para maximizar la relación señal-ruido más interferencias de detección en todo el cubo de detección según las tres dimensiones: frecuencia Doppler, frecuencia espacial y tiempo/distancia. El objetivo de este filtrado es suprimir los retornos que provienen del suelo según las propiedades estadísticas de la medición realizada en el campo Doppler/frecuencia espacial. La eficacia de este filtrado radica en la restricción a un arco estrecho ("*clutter ridge*" en inglés) de la contribución del reflejo en el campo Doppler/frecuencia espacial.

30 En la figura 8, cada cubo corresponde a una duración de integración coherente para un elemento de antena de la antena de recepción del dispositivo 20 receptor para una frecuencia Doppler particular (Conviene señalar que, por abuso del lenguaje, el término "frecuencia Doppler" corresponde a un "desplazamiento de frecuencia de la señal debido al efecto Doppler"). El objetivo es efectuar un filtrado adaptado bidimensional que permita rechazar el reflejo de tierra y los residuos de la señal directa. Estas técnicas se conocen como procesamiento STAP (acrónimo inglés para "*Space Time Array Processing*"). El módulo 234 de procesamiento espacio-temporal comprende, por ejemplo, un módulo 235 de estimación de la correlación de interferencias, un módulo 236 de cálculo de los pesos de filtrado y un módulo 237 de aplicación de dichos pesos de filtrado.

40 Tal como se ilustra en la figura 9, la eliminación del reflejo mediante procedimientos de procesamiento espacio-temporal puede deteriorar la capacidad de detección para objetivos cercanos al reflejo en el plano de frecuencia Doppler/frecuencia espacial debido a una implementación imperfecta del filtrado (esto se debe principalmente a la dificultad de disponer de una estimación fiable de la matriz de covarianza del reflejo). La figura 9 representa, en el plano de frecuencia espacial/frecuencia Doppler, para un satélite que genera Doppler cero (velocidad relativa cero con respecto a la Tierra u ortogonal a la línea de apuntado entre el objetivo y el satélite), la ubicación 71 de la señal directa, la ubicación 72 del reflejo y una zona 73 (sombreada) de menor capacidad de detección de los objetivos. Esta zona 45 73 de menor capacidad de detección se debe a imperfecciones en el filtrado espacio-temporal. Se trata de una zona para la que las pérdidas de la relación señal-ruido en relación con la relación señal-ruido óptima en ausencia de reflejo y de filtrado superan un cierto umbral.

50 La detección se hace comparando la potencia estimada en cada cuadro de frecuencia espacial/frecuencia Doppler/distancia después del enfoque mediante procesamiento espacio-temporal. El umbral de detección normalmente se establece para que corresponda a una probabilidad de falsa alarma dada utilizando una estadística a priori de ruido de detección. En el marco de procesamiento espacio-temporal de tipo STAP, la relación señal-ruido más interferencia se expresa como una función de la matriz de correlación de la señal. El ruido de fondo de detección se puede estimar conociendo la matriz de correlación para cada cuadro de distancia del ruido térmico y las señales interferentes. El filtrado adaptado crea zonas en el campo de frecuencia espacial/frecuencia Doppler en las que el retorno de la señal se atenuará fuertemente. Por consiguiente, el retorno de un objetivo situado en estas zonas será muy atenuado y probablemente el objetivo no podrá ser detectado. Estas zonas de menor capacidad de detección dependen de la profundidad de rechazo deseada, de la calidad de la estimación de la matriz de correlación del reflejo y del ancho espectral del reflejo en un cuadro de distancia/frecuencia espacial.

60 En el sistema de radar según la invención, la posibilidad de disponer de diferentes configuraciones geométricas de medición (diversidad generada por las diferentes configuraciones biestáticas disponibles proporcionadas por varios

dispositivos transmisores y/o varios dispositivos receptores) permite maximizar la probabilidad de que un objetivo no esté en el mismo campo de frecuencia espacial/frecuencia Doppler que el reflejo que retorna del suelo. Una ilustración de este efecto la proporciona la figura 10 que representa en el plano de frecuencia espacial/frecuencia Doppler la ubicación 71 de la señal directa, la ubicación 72 del reflejo y la zona 73 de menor capacidad de detección para un primer dispositivo transmisor, así como la ubicación 74 de la señal directa, la ubicación 75 del reflejo y la zona 76 de menor capacidad de detección para un segundo dispositivo transmisor. La zona de menor capacidad de detección resultante de la acumulación de mediciones que provienen de varios dispositivos transmisores es la intersección de las zonas de menor capacidad de detección en las diferentes configuraciones de medición (intersección de las zonas sombreadas). La zona resultante de menor capacidad de detección es, por tanto, significativamente menor que el área de menor capacidad de detección en el caso de que se utilice un único dispositivo transmisor.

E) Principio de ubicación

La unidad 25 de detección y de ubicación está configurada para estimar la posición de un objetivo 30 a partir de una información representativa de la distancia entre el objetivo 30 y el dispositivo 20 receptor. La figura 11 ilustra esquemáticamente un ejemplo de implementación de esta estimación de la posición del objetivo 30 por la unidad 25 de detección y de ubicación. El punto E corresponde a la posición de un dispositivo 10 transmisor, el punto R corresponde a la posición de un dispositivo 20 receptor, el punto C corresponde a la posición del objetivo 30 a detectar. La determinación por la unidad 25 de detección y de ubicación de un desfase temporal entre la señal recibida por el dispositivo 20 receptor y la réplica de referencia permite acceder a la diferencia entre por un lado la suma ($EC + RC$) de la distancia entre E y C y la distancia entre R y C y por otro lado la distancia entre E y R. Conociendo la distancia entre E y R, es posible ubicar C en el elipsoide 61 cuyos focos son E y R. Si está disponible y tal como se ilustra en la figura 11, el conocimiento de la posición del cono de iluminación del haz 40 de radio por el dispositivo 10 transmisor y/o del cono 60 de visibilidad del dispositivo 20 receptor se puede aprovechar para limitar la estimación de la posición del objetivo 30 a un sector 62 angular restringido del elipsoide 61 (en el ejemplo ilustrado en la figura 11 este sector 62 angular corresponde a la intersección entre el cono de iluminación del haz 40 de radio, el cono 60 de visibilidad y el elipsoide 61).

Estas informaciones son suficientes para volver a una ubicación del objetivo que provocó el eco. Una medición Doppler permite acceder a la velocidad de cambio de la distancia representativa de la geometría de la medición y de la velocidad del objetivo. Conviene señalar que los llamados procedimientos de supe resolución (MUSIC por ejemplo) se pueden utilizar para afinar la ubicación angular de los objetivos a resoluciones muy inferiores al ángulo de apertura de -3 dB de la antena utilizada por el receptor.

Ventajosamente, un sistema 90 de radar según la invención es un sistema de radar multiestático que comprende varios dispositivos 10 transmisores y/o varios dispositivos 20 receptores para generar diversidad de transmisión y/o diversidad de recepción. De hecho, si se denomina N_E el número de dispositivos 10 transmisores y N_R el número de dispositivos 20 receptores, donde N_E y N_R son enteros naturales positivos, se dispone de un número $N_E \cdot N_R$ (N_E multiplicado por N_R) de configuraciones biestáticas. Esto permite multiplicar las medidas de distancia y las medidas angulares cuando $N_E \cdot N_R$ es mayor o igual a dos ($N_E \cdot N_R \geq 2$). Estas mediciones se caracterizan por una covarianza de error que depende de la configuración de medición (geometría, relación señal-ruido, orientación relativa entre el dispositivo transmisor, el dispositivo receptor y el objetivo, etc.). El conocimiento de la correlación del error permite ponderar de manera óptima (en el sentido de mínimos cuadrados por ejemplo) la toma en cuenta de las diferentes medidas en el problema de posicionamiento del objetivo. Este problema de posicionamiento se puede expresar como la determinación de la posición minimizando el error cuadrático entre los observables medidos (distancia, posición angular) y estos mismos observables correspondientes a una posición dada definida a partir de las características de medición.

Cuando el número N_R de dispositivos 20 receptores es mayor o igual a dos ($N_R \geq 2$), el observable producido se puede expresar en forma de una diferencia en el tiempo de llegada, al nivel de los diferentes dispositivos 20 receptores, de la señal transmitida por un dispositivo 10 transmisor y reflejada por un objetivo 30. Esta medición de la diferencia de tiempo de llegada puede complementarse con información angular que proviene del estado del sistema de antena o del procesamiento espacio-temporal. La ubicación puede entonces llevarse a cabo utilizando diferencias en el tiempo de llegada siguiendo métodos TDOA convencionales de ubicación de una fuente de radiofrecuencia (la fuente de radiofrecuencia en el presente caso que es el objetivo que refleja la señal transmitida). La información proporcionada por una diferencia en el tiempo de llegada en el caso de un radar multiestático será la ubicación en un hiperboloide en lugar de en un elipsoide como en el caso del radar biestático. Una de las ventajas de la utilización de una medición del tiempo de propagación diferencial entre dos dispositivos receptores se basa en el hecho de que no es necesario conocer la posición del dispositivo transmisor, en la medida o la distancia entre el dispositivo transmisor y el objetivo se cancela por diferencia. Además, no es necesario mantener la sincronización en tiempo y en frecuencia entre un dispositivo transmisor y un dispositivo receptor. Sólo se requiere una sincronización de tiempo y de frecuencia entre los diferentes dispositivos receptores.

Cuando el número N_E de dispositivos 20 receptores es mayor o igual a dos ($N_E \geq 2$), es posible acoplar puntuaciones de detección asociadas respectivamente a los diferentes dispositivos transmisores proyectándolos en una geometría común para mejorar las capacidades de detección del sistema.

La figura 12 ilustra este principio con un ejemplo en el que dos puntuaciones de detección están asociadas respectivamente con emisiones que provienen de dos dispositivos 10 transmisores en una dirección dada. Las posiciones E_1 y E_2 respectivas de los dos dispositivos 10 transmisores, la posición C del objetivo 30 y la posición R de un dispositivo 20 receptor están representadas en la parte a) de la figura 12. Se denomina d_1 la suma ($E_1C + CR$) de la distancia entre E_1 y C y de la distancia entre C y R. Se denomina d_2 la suma ($E_2C + CR$) de la distancia entre E_2 y C y la distancia entre C y R. Se denomina d la distancia entre C y R. Se denomina d_{LOS1} la distancia de la línea de apuntado directa entre E_1 y R. Se denomina d_{LOS2} la distancia de la línea de apuntado directa entre E_2 y R.

Tal como se ilustra en la parte b) de la figura 12, las señales reflejadas hacia el dispositivo receptor (situado en R) por el objetivo (situado en C) que provienen respectivamente del primer dispositivo transmisor (situado en E_1) y del segundo dispositivo transmisor (situado en E_2) presentan un desfase temporal diferente debido a la geometría diferente entre, por un lado, el elipsoide con focos R y E_1 y por otro lado el elipsoide que tiene focos R y E_2 . Si se denomina c la velocidad de la luz (que también corresponde a la velocidad de propagación de una señal de radio), el desfase de tiempo observada a nivel del primer dispositivo transmisor entre la señal recibida después de la reflexión y la señal de referencia (que sería transmitida directamente por el dispositivo transmisor) vale $(d_1 - d_{LOS1})/c$. El desfase de tiempo observado en el segundo dispositivo transmisor entre la señal recibida después de la reflexión y la señal de referencia vale $(d_2 - d_{LOS2})/c$. Las dos curvas representadas en la parte b) de la figura 12 representan la evolución de la potencia P recibida por un dispositivo receptor en función del tiempo t respectivamente para el primer dispositivo transmisor y el segundo dispositivo transmisor. Se observa un pico de potencia recibida durante un valor de compensación de tiempo $(d_1 - d_{LOS1})/c$ para el primer dispositivo transmisor. Se observa un pico de potencia recibida durante un valor de compensación de tiempo $(d_2 - d_{LOS2})/c$ para el segundo dispositivo transmisor. Finalmente y tal como se ilustra en la parte b) de la figura 12, la amplitud de estos picos de potencia recibidos no es suficiente para superar un umbral S de detección. La amplitud de un pico de potencia corresponde a una puntuación de detección atribuida a un dispositivo transmisor.

Al conocer la geometría de la medición (es decir, conocer las posiciones E_1 y E_2 de los dispositivos transmisores, la posición R del dispositivo receptor y la dirección en la que el dispositivo receptor recibe una señal reflejada por el objetivo), es posible volver a muestrear las señales según una geometría común, es decir, la dirección de apuntado en la que las señales son recibidas por el dispositivo receptor, en función de la distancia d_{RC} separando el dispositivo transmisor y el objetivo. Tal como se ilustra en la parte c) de la figura 12, las señales que provienen respectivamente del primer dispositivo transmisor y del segundo dispositivo transmisor serán por tanto coincidentes, permitiendo un aumento de la potencia útil mientras el ruido de medición permanece descorrelacionado. Esto permite por tanto acumular las puntuaciones de detección asociadas respectivamente a los dos dispositivos transmisores. Esta acumulación de indicadores estadísticos permite mejorar la sensibilidad de detección por acumulación no coherente de potencias medidas en los diferentes grupos de observación. Esta acumulación no coherente permite generalmente aumentar la relación señal-ruido de la interferencia en un factor proporcional a la raíz del número de mediciones acumuladas.

Otra solución para aprovechar la configuración multiestática para aumentar la sensibilidad de detección consiste en tomar una decisión sobre la estimación de la posición del objetivo a partir de una combinación de decisiones elementales correspondientes respectivamente a diferentes configuraciones biestáticas entre las $N_E \cdot N_R$ configuraciones biestáticas disponibles. La combinatoria subyacente permite reducir la relación señal-ruido de la detección unitaria mientras se mantiene una probabilidad aceptable de detección falsa.

F) Protección de la forma de onda de la señal útil.

En la solución propuesta, los dispositivos 10 transmisores pueden ser escuchados y ubicados por un sistema competidor. En efecto, las trayectorias de los satélites 11 que transportan dichos dispositivos 10 transmisores son predecibles según las leyes de la mecánica espacial. Además, la potencia de las señales transmitidas por los dispositivos transmisores las hace, por ejemplo, fácilmente ubicables mediante sistemas de goniometría interferométricos situados en tierra o embarcados en plataformas aéreas o espaciales. Por lo tanto, en ausencia de una contramedida, los dispositivos 10 transmisores de un sistema 90 de radar según la invención pueden ser utilizados por posibles competidores como transmisores de oportunidad para un radar pasivo.

Es posible incluir en el sistema 90 de radar según la invención una funcionalidad que permita limitar muy fuertemente la utilización por un tercero de la señal transmitida por un dispositivo 10 transmisor. Con este objetivo, la señal transmitida por un dispositivo 10 transmisor es una combinación (por ejemplo una suma) de una señal útil con una señal parásita, dicha señal parásita que está descorrelacionada de la señal útil y presentando una función de ambigüedad con un lóbulo principal con un ancho en el campo de la frecuencia mayor que el doble del cambio de frecuencia Doppler máximo susceptible de observarse para un objetivo apuntado por el sistema de radar.

Un dispositivo 20 receptor del sistema 90 de radar conoce la forma de onda de la señal transmitida y/o la forma de onda de la señal parásita. El dispositivo 20 receptor puede entonces calcular una función de ambigüedad entre la señal recibida y la señal transmitida. La señal transmitida corresponde por ejemplo a una señal de referencia almacenada por el dispositivo 20 receptor o bien a una señal de referencia recibida directamente del dispositivo 10 transmisor (sin reflexión) de la que se resta la señal parásita.

Un receptor no autorizado que desee hacer un uso oportunista de la señal transmitida deberá realizar el cálculo de una función de ambigüedad entre la señal recibida por un canal de búsqueda después de la reflexión sobre el objetivo y la señal recibida por un canal de referencia directamente que proviene del dispositivo transmisor (sin reflexión). La señal recibida por el canal de referencia contiene tanto la forma de onda de la señal útil como la forma de onda de la señal parásita. Sin embargo, este receptor no puede separar a bordo la señal útil de la señal parásita. De hecho, la forma de onda de la señal útil está protegida, por ejemplo, por un mecanismo criptográfico que incluye un estado secreto de inicialización (como un registro de desplazamiento de retroalimentación lineal o LFSR por "Linear Feedback Shift Register" en la literatura anglosajona) y la señal parásita del mismo modo tiene un carácter pseudoaleatorio. Los lóbulos secundarios de la función de ambigüedad ("Cross Ambiguity Function" o CAF en la literatura anglosajona) en el campo de la frecuencia de la señal parásita mejorarán, por tanto, la contaminación de la señal reflejada por interferencias y reducirán la sensibilidad de detección en comparación con la obtenida a partir de un dispositivo receptor del sistema 90 de radar.

Ventajosamente, la señal parásita es una señal "chirp" que presenta una frecuencia que varía linealmente alrededor de una frecuencia central durante un cierto período de tiempo, con un cambio aleatorio en la frecuencia central de un período a otro. En la figura 13 se ilustra un espectrograma de ejemplo de dicha señal. El valor de la frecuencia central f_0 cambia, por ejemplo, con un período de duración T. Durante un período T, la señal "chirp" $c(t)$ toma, por ejemplo, la forma siguiente:

[Mat. 2]

$$c(t) = Ae^{i2\pi\left(f_0 + \frac{\Delta f}{T}t - \frac{\Delta f}{2}t\right)t}$$

donde A es un valor constante (amplitud de la envolvente) y Δf es la banda de frecuencia centrada en la frecuencia central f_0 barrida durante un período T.

Sin embargo, conviene señalar que, en caso de variaciones, la duración del período durante el cual la frecuencia de la señal varía linealmente alrededor de la frecuencia central puede cambiar de un período al otro. Además, la amplitud de la envolvente puede variar con el tiempo.

Con preferencia, el ancho de modulación de los *chirp* (es decir, el ancho Δf de la banda de frecuencia barrida durante un período T) se puede elegir para que sea mayor que la frecuencia Doppler máxima susceptible de observarse para un objetivo apuntado por el sistema 90 de radar para garantizar que los ecos parásitos que retornan del suelo necesariamente contaminarán significativamente la señal recibida por un receptor no autorizado que no pertenece al sistema 90 de radar.

La parte a) de la figura 14 representa un ejemplo de una función de autoambigüedad de una señal útil transmitida por un dispositivo transmisor del sistema 90 de radar según la invención. La parte b) de la figura 14 representa la función de autoambigüedad de la señal parásita de tipo "chirp". La parte c) de la figura 14 representa la función de ambigüedad calculada por un receptor no autorizado que no pertenece al sistema 90 de radar a partir de una señal recibida después de la reflexión por un objetivo y de una señal de referencia recibida directamente desde un dispositivo transmisor. Finalmente, la parte d) de la figura 14 representa la función de ambigüedad calculada por un dispositivo receptor que pertenece al sistema 90 de radar a partir de una señal recibida después de la reflexión por un objetivo y de una señal de referencia almacenada (como recordatorio, el dispositivo receptor tiene conocimiento de la forma de onda de la señal útil y/o de la señal parásita). En el ejemplo ilustrado en la figura 14, la señal parásita tiene una potencia diez veces menor que la señal útil.

En un entorno que comprende interferencias (reflejos de tierra, señales parásitas directas, perturbación, etc.), la energía devuelta por el lóbulo secundario de la función de ambigüedad deteriorará significativamente la sensibilidad de detección de un sistema competidor. En efecto, la ocupación en el plano de frecuencia de los lóbulos secundarios de la función de ambigüedad generados por la señal parásita enmascarará los ecos útiles en una parte importante del plano de frecuencia espacial/frecuencia Doppler.

Conviene señalar que los elementos descritos anteriormente para proteger la forma de onda de una señal útil transmitida por un dispositivo transmisor del sistema 90 de radar según la invención podrían aplicarse más ampliamente a otros sistemas de radares y en particular para sistemas de radares cuyo dispositivos transmisores no están necesariamente embarcados en satélites.

G) Control del sistema de radar

Para funcionar de manera eficaz, el sistema 90 de radar según la invención puede necesitar disponer de diferentes canales de comunicaciones (con preferencia seguros).

En particular, puede ser necesario un canal de comunicación entre un dispositivo transmisor y un dispositivo receptor para intercambiar informaciones sobre la sincronización, los patrones de iluminación, las efemérides de los

satélites que transportan los dispositivos transmisores, etc. Este canal de comunicación puede realizarse, por ejemplo, a través de una modulación secundaria en la señal transmitida por el dispositivo 10 transmisor con destino al dispositivo 20 receptor. Según otro ejemplo, este canal de comunicación puede realizarse mediante una red de telecomunicaciones por satélite adjunto.

- 5 Del mismo modo puede ser necesario un canal de comunicación entre diferentes dispositivos 20 receptores para permitir la construcción de una métrica de detección basada en mediciones efectuadas por varios dispositivos receptores. Este canal de comunicación puede del mismo modo permitir compartir la visión de la situación aérea específica de cada receptor para cubrir de manera óptima la región de interés.

- 10 Del mismo modo, puede ser necesario un canal de comunicación entre una estación de control en tierra y los dispositivos 10 transmisores y/o los dispositivos 20 receptores para transmitir cualquier información relevante para el funcionamiento del sistema (posición de los dispositivos transmisores, secuencia de iluminación, sincronización, resultados de las mediciones efectuadas por los dispositivos receptores, etc.).

- 15 Conviene señalar que estos canales de comunicación, sin embargo, no siempre son indispensables para el funcionamiento del sistema 90 de radar según la invención, en la medida en que determinadas informaciones pueden ser memorizadas a priori por un dispositivo 10 transmisor y/o por un dispositivo 20 receptor.

- 20 En un modo particular de realización, tal como se ilustra en la figura 15, los dispositivos 10 transmisores y/o los dispositivos 20 receptores están configurados para comunicarse a través de una red de telecomunicaciones por satélite para intercambiar datos entre dos dispositivos 10 transmisores, entre dos dispositivos 20 receptores, entre un dispositivo 10 transmisor y un dispositivo 20 receptor, entre una estación 81 de control en tierra y un dispositivo 10 transmisor o entre una estación 81 de control en tierra y un dispositivo 20 receptor. La red de telecomunicaciones por satélite comprende en particular los satélites 80 de telecomunicaciones y la estación 81 de control en tierra.

- 25 Tal como se ilustra en la figura 15, la red de telecomunicaciones por satélite permite, por ejemplo, establecer enlaces 82 de comunicación para enviar informaciones desde la estación de control 81 en tierra a los dispositivos 10 transmisores (por ejemplo una información relativa a la región de interés a vigilar, un comando relacionado con la forma de onda a generar, una secuencia de iluminación a efectuar, informaciones de sincronización, etc.), enlaces 83 de comunicación para intercambiar informaciones entre la estación 81 de control en tierra y los dispositivos 20 receptores (por ejemplo para la compartición de funciones de detección, observables medidos, objetivos ubicados, etc.) y enlaces 84 de comunicación para enviar informaciones desde los dispositivos 10 transmisores a los dispositivos 20 receptores (efemérides, sincronización, secuencia de iluminación, etc.).

- 30 La arquitectura de la red de telecomunicaciones por satélite puede tener diferentes formas y diferentes niveles de centralización (desde una arquitectura totalmente mallada hasta una arquitectura totalmente centralizada). Una red de telecomunicación por satélite es especialmente adecuada porque permite una cobertura mundial. Los enlaces establecidos entre satélites de telecomunicaciones 80 (ISL por "*Inter-Satellite Link*") permiten de hecho establecer un intercambio de datos entre dos entidades muy alejadas entre sí.

- 35 Conviene señalar que ciertas funciones descritas anteriormente con referencia a la figura 15 se pueden coubicar. Por ejemplo, un satélite 11 que transporta un dispositivo 10 transmisor puede desempeñar del mismo modo el papel de satélite 80 de la red de telecomunicaciones. También, pueden estar implicadas varias estaciones de control 81 en tierra para aumentar la resiliencia global del sistema. Un centro de control puede recopilar información de los diferentes dispositivos 20 receptores y realizar un procesamiento a partir de las informaciones recopiladas. Esta función podría del mismo modo ser realizada por uno de los dispositivos 20 receptores o por un satélite 80 de la red de telecomunicaciones.

H) Primer ejemplo con dispositivos transmisores en constelación MEO y dispositivos receptores aerotransportados

- 45 En la figura 16 se ilustra un primer ejemplo de implementación de un sistema 90 de radar según la invención. Este primer ejemplo se refiere a un sistema de radar multiestático 90 que comprende seis dispositivos 10a a 10f transmisores embarcados en satélites en órbita media (o MEO para "*Medium Earth Orbit*") a una altitud de 22.000 km y distribuidos en dos planos 63, 64 ortogonales orbitales. En cada plano orbital, los satélites están separados entre sí por un ángulo de 120° para permitir una iluminación continua de cualquier punto de la superficie de la Tierra. En un primer plano 63 orbital están situados tres satélites que llevan respectivamente los dispositivos 10a, 10b y 10c transmisores. En un segundo plano 64 orbital están situados tres satélites que llevan respectivamente los dispositivos 10d, 10e y 10f. En la figura 16, el cono 44 representa la zona que puede iluminarse en la Tierra por el satélite que embarca el dispositivo 10a. En el ejemplo ilustrado en la figura 16, los dispositivos transmisores 10a, 10d y 10e generan cada uno un haz 40 de radio para iluminar parte de una región 50 de interés en la superficie de la Tierra. Se pueden generar diferentes haces sucesivamente para barrer toda la región 50 de interés.

- 55 Por supuesto, se puede contemplar considerar una constelación que comprenda un mayor número de satélites para aumentar el número de dispositivos 10 transmisores y por tanto permitir una iluminación más frecuente de una subregión de la región 50 de interés, una duración de integración más larga y/o una mejor sensibilidad de detección.

5 En este primer ejemplo, los dispositivos 20 receptores están embarcados en aviones (receptores aerotransportados). La banda de frecuencias utilizada por el sistema 90 de radar es la banda X (intervalo de frecuencias de onda de radio denominada supra-alta frecuencia o SUF, situada en las proximidades de 10 GHz) para permitir una compatibilidad con los radares aerotransportados que funcionan normalmente en esta banda de frecuencia (para compromisos entre el tamaño de la antena, la capacidad de la electrónica y las atenuaciones de la señal durante la propagación en la atmósfera).

10 En el ejemplo considerado, un dispositivo 10 transmisor transmite una señal en banda X con una potencia de radio del orden de 10 kW con una antena de doce metros de diámetro cuyo reflector es capaz de formar un haz de radio en cualquier punto de la Tierra. Este tipo de redireccionamiento de antena es compatible con el uso de un sistema en fase en el plano focal del reflector. Cabe destacar que en términos de potencia y tamaño de antena, las características de esta antena son muy cercanas a las de ciertos satélites de telecomunicaciones. Un dispositivo 10 transmisor forma un único haz de radio de potencia radiada isotrópica equivalente máxima (EIRP para "*Effective Isotropic Radiated Power*") cercana a 100 dBW. La eficiencia de la antena transmisora es aproximadamente del 65%. La apertura a -3 dB de dicha antena es de 0,18°. La huella en tierra de un haz de radio formado por la antena tiene entonces un diámetro de unos 58 km. Por consiguiente, se puede iluminar una región de interés de 400 km de diámetro constituyendo alrededor de cincuenta haces iluminados sucesivamente siguiendo, por ejemplo, el esquema de iluminación ilustrado en la figura 3.

15 En el ejemplo considerado, un dispositivo 20 receptor comprende un sistema de antena con una apertura de 0,8 m² y una temperatura de ruido del sistema de 220 K.

20 La tabla siguiente resume los parámetros asociados con el primer ejemplo:

[Tabla 1]

Frecuencia	9,5 GHz
Altitud del satélite que embarca el dispositivo transmisor	22000 km
Diámetro de la antena del dispositivo transmisor	12 m
Ganancia de antena en la transmisión	59,7 dBi
Eficiencia de antena	0,65
Diámetro de la huella en tierra de un haz de radio	57,9 km
Potencia de transmisión	10 kW
Superficie de la antena del dispositivo receptor	0,8m ²
Ganancia de antena en la recepción	38,2 dBi
SER (superficie equivalente de radar) del objetivo	1 m ²
Temperatura de ruido del dispositivo receptor	220 K
Tiempo de integración	0,2 s
Pérdidas totales (atenuaciones atmosféricas, RF, procesamiento de la señal, etc.)	10 dB
Relación señal-ruido SNR _R de detección	10 dB
Número de haces para iluminar una región de interés de 400 km de diámetro	50
Tiempo de revisión	10 s
Alcance de detección máximo	204 km

25 Por tanto, parece posible obtener un alcance de detección de más de 200 km para objetivos de 0 dBm² de superficie equivalente de radar (SER). Estas sensibilidades se pueden mejorar aumentando el número de parejas formadas por la asociación de un dispositivo transmisor con un dispositivo receptor (es decir aumentando el número N_E.N_R de configuraciones biestáticas utilizadas) en el cálculo de la función de detección.

A partir de estos parámetros, es posible determinar otros puntos de funcionamiento para diferentes características del objetivo (diferentes valores de SER) y diferentes tamaños para la antena de un dispositivo receptor. En la figura 17 se muestra una ilustración de los diferentes puntos de funcionamiento posibles.

30 I) Segundo ejemplo con dispositivos transmisores en constelación MEO y dispositivos receptores en constelación LEO

En un segundo ejemplo, los dispositivos 10 transmisores están situados en una constelación similar a la del primer ejemplo descrito con referencia a la figura 16, pero los dispositivos transmisores están situados a una altitud ligeramente más baja y tienen una potencia de transmisión ligeramente mayor. Los receptores están situados por su parte en una constelación de satélites en órbita baja a una altitud de 700 km (órbita LEO para "Low Earth Orbit").

- 5 Para este segundo ejemplo, el sistema funciona en la banda L alrededor de 1.3 GHz. En este caso, el haz de radio producido por una apertura de -3 dB de una antena de un dispositivo transmisor es suficiente para iluminar completamente una región de interés de 400 km de diámetro. Esto permite evitar tener que recurrir a una secuencia de iluminación y poder integrar los retornos en duraciones de integración más largas que en el ejemplo anterior.

- 10 Los dispositivos 20 receptores en órbita baja comprenden una antena de 32 m² de superficie y una red de formación de haces digital. Se supone que el SER de los objetivos de interés será mayor en la banda L que en la banda X. La duración de integración para realizar el procesamiento es de 2.5 segundos.

La tabla siguiente resume los parámetros asociados con este segundo ejemplo:

[Tabla 2]

Frecuencia	1,3 GHz
Altitud del satélite que embarca el dispositivo transmisor	20700 km
Diámetro de la antena del dispositivo transmisor	12 m
Ganancia de antena en la transmisión	42,4 dBi
Eficiencia de antena	0,65
Diámetro de la huella en tierra de un haz de radio	398,1 km
Potencia de transmisión	12 kW
Superficie de la antena del dispositivo receptor	32 m ²
Ganancia de antena en la recepción	36,9 dBi
SER (superficie equivalente de radar) del objetivo	3,2 m ² (5dBm ²)
Temperatura de ruido del dispositivo receptor	220 mil
Tiempo de integración	2,5 s
Pérdidas totales (atenuaciones atmosféricas, RF, procesamiento de la señal, etc.)	10 dB
Relación señal-ruido SNR _R de detección	10 dB
Número de haces para iluminar una región de interés de 400 km de diámetro	1
Tiempo de revisión	2,5 s
Alcance máximo de detección	1240 km
Radio de la zona de detección proyectada en el suelo	1025 km
Número de satélites LEO en recepción para garantizar una cobertura en cualquier parte del globo (25% de cobertura de hilera de media)	200

- 15 En estas condiciones, como se resume en la tabla anterior, el alcance de detección de los satélites LEO es de más de 1240 km, lo que permite cubrir una zona de detección de 1025 km de radio alrededor del nadir del satélite. Suponiendo una constelación optimizada para proporcionar una cobertura global con una tasa de superposición del 25%, una constelación de 200 satélites podría proporcionar la parte de recepción del sistema.

- 20 La descripción anterior ilustra claramente que, a través de sus diversas características y sus ventajas, la presente invención logra los objetivos fijados, es decir, proponer un sistema de radar para la vigilancia aérea que permita optimizar la cobertura, el alcance de detección así como la posibilidad de evitar el uso no autorizado de la señal transmitida por un transmisor.

Conviene señalar que los modos de implementación y de realización considerados anteriormente se han descrito a modo de ejemplos no limitativos y que, por consiguiente, se pueden contemplar otras variantes.

- 25 Más allá de los ejemplos presentados, existen muchos otros puntos de operación posibles para la solución propuesta en términos de órbitas de los satélites transmisores y tipo de plataforma de recepción. También, son posibles varios puntos de funcionamiento en términos de frecuencia de funcionamiento en un intervalo de frecuencia que varía entre

0.1 y 100 GHZ con restricciones y oportunidades diferentes en las cadenas de transmisión y de recepción y en los procedimientos de procesamiento de señales.

Tal como se ilustra en la figura 18, la invención se refiere del mismo modo a un procedimiento 100 para la vigilancia aérea con la ayuda de un sistema 90 de radar biestático o multiestático. El sistema 90 de radar comprende al menos un dispositivo 10 transmisor embarcado en un satélite 11 en órbita alrededor de la Tierra y al menos un dispositivo 20 receptor. El procedimiento comprende en particular las etapas siguientes:

- 5
 - 10
 - 15
 - 20
- una determinación 101 de una región 50 de interés en la que se desea detectar y geolocalizar una aeronave 30,
 - un posicionamiento 102 de dicho dispositivo 20 receptor para vigilar dicha región 50 de interés,
 - una comunicación 103 al dispositivo 10 transmisor de una información relacionada con dicha región 50 de interés,
 - una emisión 104, por dicho dispositivo 10 transmisor, de una señal en un haz 40 de radio que ilumina al menos una parte de dicha región 50 de interés,
 - una estimación 105 de la posición de la aeronave 30 en la región de interés a partir de una señal 41 recibida por el dispositivo 20 receptor correspondiente a la reflexión en la aeronave 30 de la señal transmitida por el dispositivo 10 transmisor.
- Los diferentes elementos descritos anteriormente para los dispositivos 10 transmisores y/o los dispositivos 20 receptores del sistema 90 de radar según la invención se aplican, por supuesto, del mismo modo al procedimiento 100 en forma de etapas opcionales adicionales (determinación de una secuencia de iluminación, combinación de una señal parásita con la señal útil para proteger una señal transmitida por un dispositivo transmisor, uso de la diversidad de transmisión y/o de la diversidad de recepción para detectar y geolocalizar un objetivo, uso de una red de telecomunicaciones por satélite para intercambiar datos entre dos dispositivos transmisores, entre dos dispositivos receptores, entre un dispositivo transmisor y un dispositivo receptor, entre una estación de control en tierra y un dispositivo transmisor o entre una estación de control en tierra y un dispositivo receptor, etc.).

REIVINDICACIONES

- 5 1. Dispositivo (10) transmisor de un sistema (90) de radar biestático o multiestático para la vigilancia aérea, dicho dispositivo (10) transmisor que está destinado a ser embarcado en un satélite (11) en órbita alrededor de la Tierra, caracterizado por que el sistema (90) de radar es un sistema activo, el dispositivo (10) transmisor que está configurado para cooperar con al menos un dispositivo (20) receptor, y cuando el dispositivo (10) transmisor está a bordo del satélite (11) en órbita, el dispositivo (10) transmisor está configurado para obtener una información relativa a una región (50) de interés destinada a ser vigilada por dicho al menos un dispositivo (20) receptor del sistema (90) de radar y para transmitir una señal en un haz (40) de radio que ilumina al menos una parte de dicha región (50) de interés.
- 10 2. Dispositivo (10) transmisor según la reivindicación 1, en el que la forma de onda de la señal transmitida se genera directamente a bordo del satélite (11) de manera autónoma.
3. Dispositivo (10) transmisor según una de las reivindicaciones 1 a 2, para el cual, cuando un haz (40) de radio transmitido por el dispositivo (10) transmisor no puede iluminar completamente la región (50) de interés, el dispositivo (10) transmisor está configurado para iluminar sucesivamente diferentes subregiones (43) de la región de interés.
- 15 4. Dispositivo (10) transmisor según una de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende una antena (16) de red por fases y una red (13) de formación de haces configurada para redireccionar un haz (40) de radio transmitido por el dispositivo (10) transmisor según diferentes direcciones.
- 20 5. Dispositivo (10) transmisor según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la señal transmitida es una combinación de una señal útil con una señal parásita, dicha señal parásita que está descorrelacionada de la señal útil y que presenta una función de ambigüedad con un lóbulo principal con un ancho en el campo de frecuencia mayor que dos veces el desfase de frecuencia Doppler máximo susceptible de observarse para un objetivo (30) apuntado por el sistema (90) de radar.
- 25 6. Dispositivo (10) transmisor según la reivindicación 5, en el que la señal parásita es una señal "chirp" que presenta una frecuencia que varía linealmente alrededor de una frecuencia central durante un período predeterminado con un cambio aleatorio en la frecuencia central de un período al otro.
7. Dispositivo (10) transmisor según la reivindicación 6, en el que el ancho de banda barrido por la señal "chirp" durante dicho período predeterminado es mayor que el doble del desfase de frecuencia Doppler máximo susceptible de observarse para un objetivo (30) apuntado por el sistema (90) de radar.
- 30 8. Sistema (90) de radar biestático o multiestático activo para la vigilancia aérea de una región (50) de interés, dicho sistema (90) de radar que tiene como objetivo geolocalizar una aeronave (30) en dicha región (50) de interés, dicho sistema (90) de radar que comprende:
 - al menos un dispositivo (10) transmisor según una de las reivindicaciones 1 a 7, cada dispositivo (10) transmisor que está configurado para transmitir una señal en un haz (40) de radio que ilumina al menos una parte de dicha región (50) de interés,
 - al menos un dispositivo (20) receptor destinado a estar situado para vigilar dicha región (50) de interés.
- 35 9. Sistema (90) de radar multiestático según la reivindicación 8, que comprende varios dispositivos transmisores (10) y/o varios dispositivos receptores (20).
- 40 10. Sistema (90) de radar según la reivindicación 9 que comprende varios dispositivos transmisores (10), en el que los diferentes dispositivos transmisores (10) están embarcados en satélites (11) organizados en constelaciones de manera que para una región (50) de interés cualquiera en la superficie de la Tierra, siempre existe una línea de apuntado directa a dicha región (50) de interés para varios de dichos satélites (11).
- 45 11. Sistema (90) de radar según una de las reivindicaciones 9 a 10, en el que el o los dispositivos (10) transmisores y/o el o los dispositivos (20) receptores están configurados además para comunicarse a través de una red de telecomunicaciones por satélite para intercambiar datos entre dos dispositivos (10) transmisores, entre dos dispositivos (20) receptores, entre un dispositivo (10) transmisor y un dispositivo (20) receptor, entre una estación (81) de control en tierra y un dispositivo (10) transmisor o entre una estación (81) de control en tierra y un dispositivo (20) receptor.
- 50 12. Procedimiento (100) para la vigilancia aérea con la ayuda de un sistema de radar biestático o multiestático (90) activo, dicho sistema (90) de radar que comprende al menos un dispositivo (10) transmisor embarcado en un satélite (11) en órbita alrededor de la Tierra y al menos un dispositivo (20) receptor, dicho al menos un dispositivo (10) transmisor que está configurado para cooperar con dicho al menos un dispositivo (20) receptor, dicho procedimiento (100) que comprende:
 - una determinación (101) de una región (50) de interés en la que se desea detectar y geolocalizar una aeronave (30),
 - un posicionamiento (102) de dicho dispositivo (20) receptor para vigilar dicha región (50) de interés,
 - una comunicación (103) al dispositivo (10) transmisor de una información relativa a dicha región (50) de interés,

- una emisión (104), por dicho dispositivo (10) transmisor, de una señal en un haz (40) de radio que ilumina al menos una parte de dicha región (50) de interés,
 - una estimación (105) de la posición de la aeronave (30) en la región de interés a partir de una señal (41) recibida por el dispositivo (20) receptor correspondiente a la reflexión sobre la aeronave (30) de la señal transmitida por el dispositivo (10) transmisor.
- 5
13. Procedimiento (100) según la reivindicación 12 en el que, cuando un haz (40) de radio transmitido por un dispositivo (10) transmisor no puede iluminar completamente la región (50) de interés, el procedimiento (100) comprende la determinación de una secuencia de iluminación de diferentes subregiones (43) de la región (50) de interés para dicho dispositivo (10) transmisor.
- 10
14. Procedimiento (100) según una de las reivindicaciones 12 a 13, en el que la emisión(104) de la señal de radio comprende una combinación de una señal parásita con una señal útil, dicha señal parásita que está descorrelacionada de la señal útil y teniendo una función de la ambigüedad con un lóbulo principal con un ancho en el campo de la frecuencia superior al doble del desplazamiento de frecuencia Doppler máximo susceptible de observarse para un objetivo apuntado por el sistema de radar.
- 15
15. Procedimiento (100) según una de las reivindicaciones 12 a 14, en el que el sistema (90) de radar es un sistema de radar multiestático que comprende un número N_E de dispositivos (10) transmisores y un número N_R de dispositivos (20) receptores, donde N_E y N_R son números naturales positivos, en los que un número $N_E \cdot N_R$ de configuraciones biestáticas disponibles es mayor o igual a dos.
- 20
16. Procedimiento (100) según la reivindicación 15 en el que el número N_R de dispositivos (20) receptores es mayor o igual a dos y la estimación (105) de la posición de la aeronave (30) comprende una medición de la diferencia en el tiempo de llegada de la señal recibida por cada dispositivo (20) receptor.
- 25
17. Procedimiento (100) según la reivindicación 15 en el que el número N_E de dispositivos (10) transmisores es mayor o igual a dos y la estimación (105) de la posición de la aeronave (30) para un dispositivo (20) receptor comprende una determinación de al menos dos puntuaciones de detección asociadas respectivamente a al menos dos dispositivos (10) transmisores y las puntuaciones de detección se proyectan en una geometría común y luego se acumulan.
- 30
18. Procedimiento (100) según la reivindicación 15, en el que una decisión sobre la estimación (105) de la posición de la aeronave (30) se basa en una combinación de decisiones elementales correspondientes respectivamente a diferentes configuraciones biestáticas entre las $N_E \cdot N_R$ configuraciones biestáticas disponibles.
- 35
19. Procedimiento (100) según una de las reivindicaciones 15 a 18, que comprende además una organización de los diferentes satélites (11) que embarcan respectivamente los diferentes dispositivos (10) transmisores en constelaciones de manera que, para una región (50) de interés cualquiera en la superficie de la Tierra, siempre hay una línea de apuntado directa a dicha región (50) de interés para varios de dichos satélites (11).
20. Procedimiento (100) según una de las reivindicaciones 15 a 19 en el que una red de telecomunicaciones por satélite permite además un intercambio de datos entre dos dispositivos (10) transmisores, entre dos dispositivos (20) receptores, entre un dispositivo (10) transmisor y un dispositivo (20) receptor, entre una estación (81) de control en tierra y un dispositivo (10) transmisor o entre una estación (81) de control en tierra y un dispositivo (20) receptor.

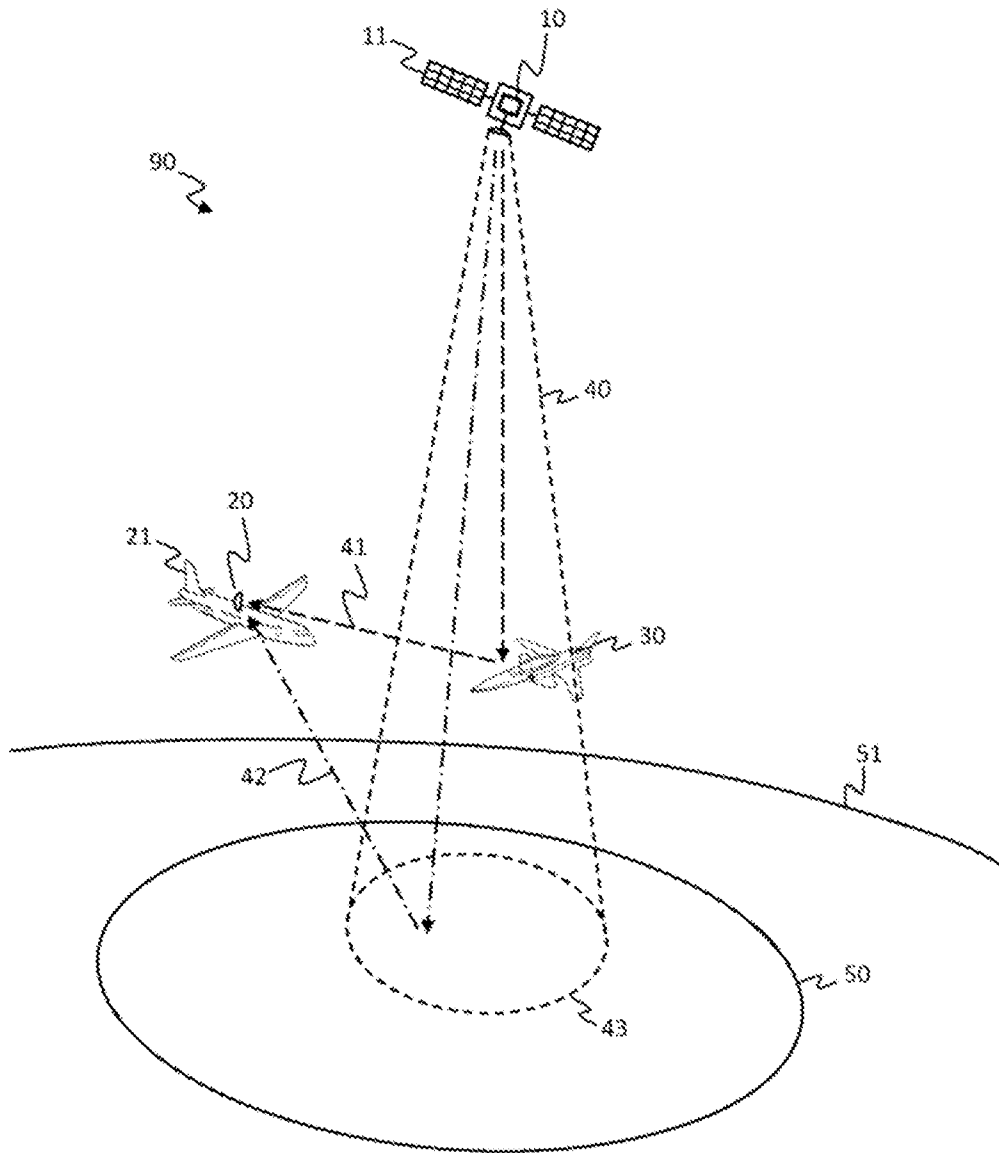


Fig. 1

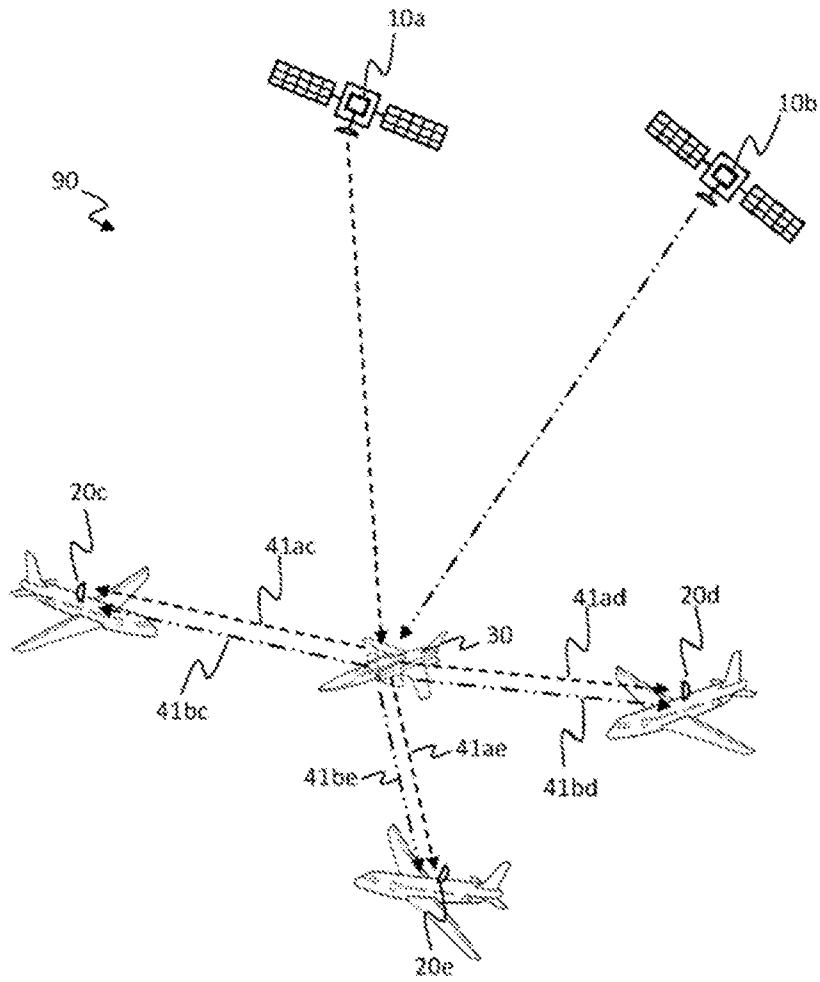


Fig. 2

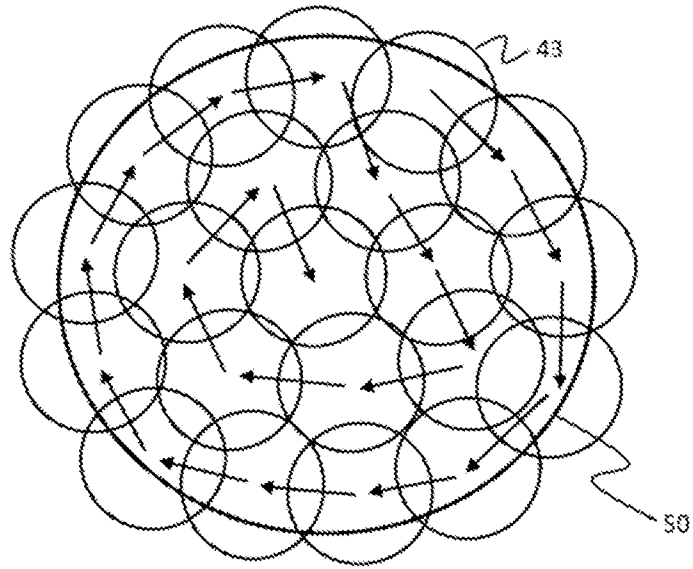


Fig. 3

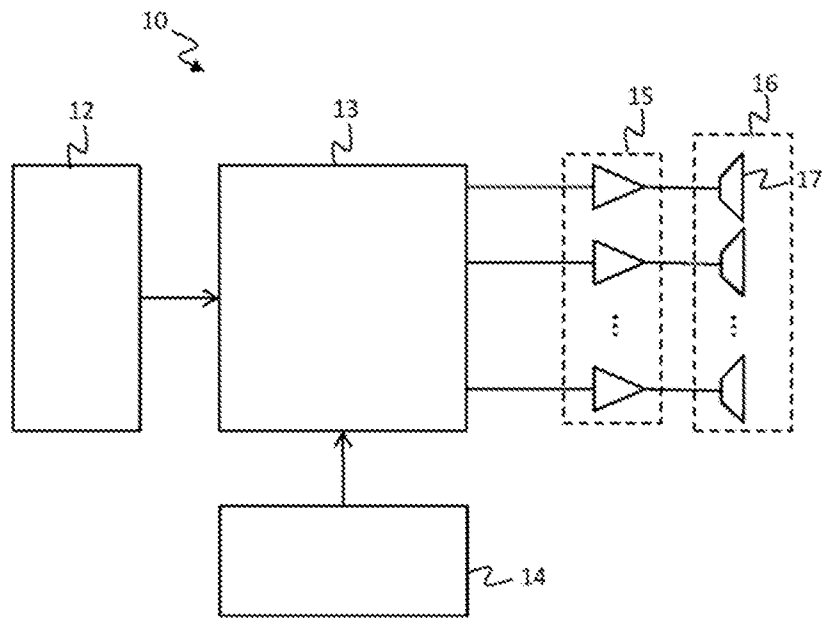


Fig. 4

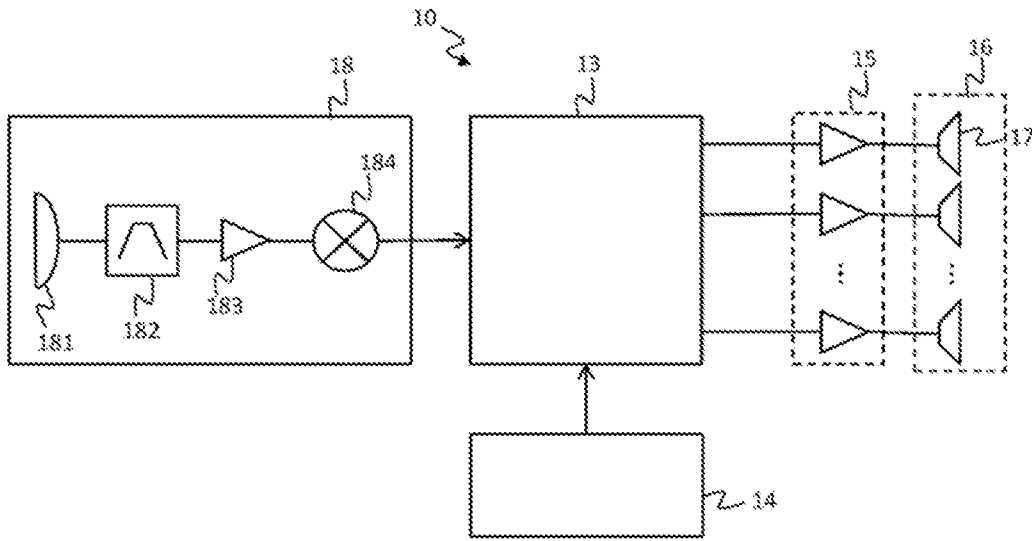


Fig. 5

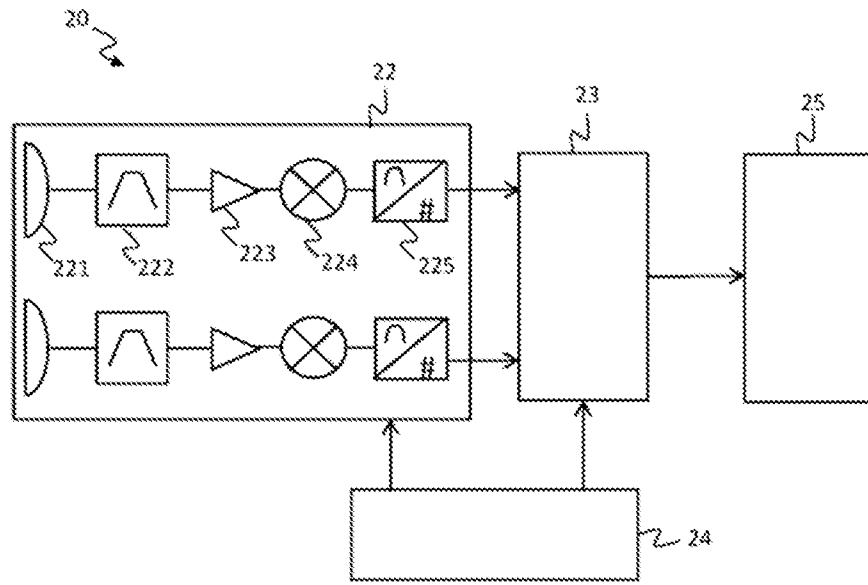


Fig. 6

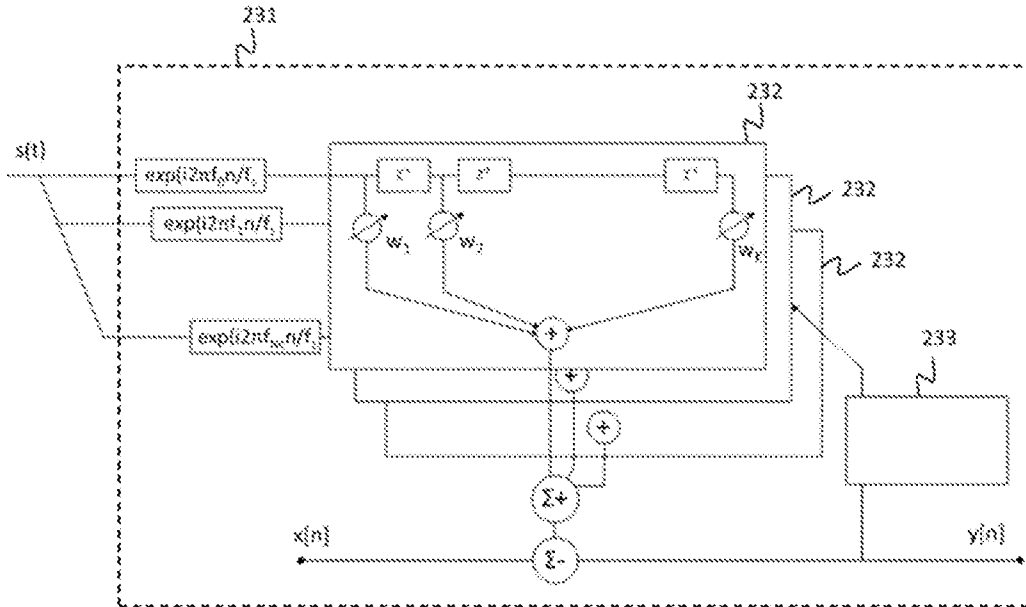


Fig. 7

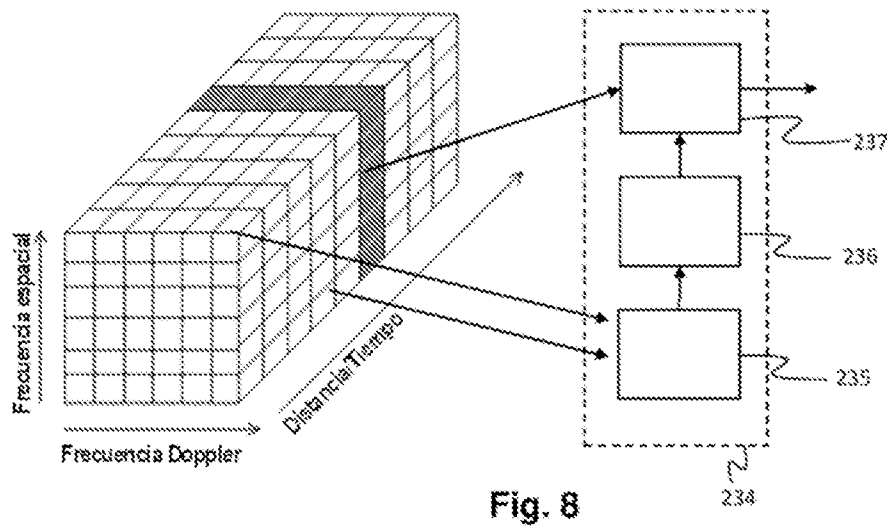


Fig. 8

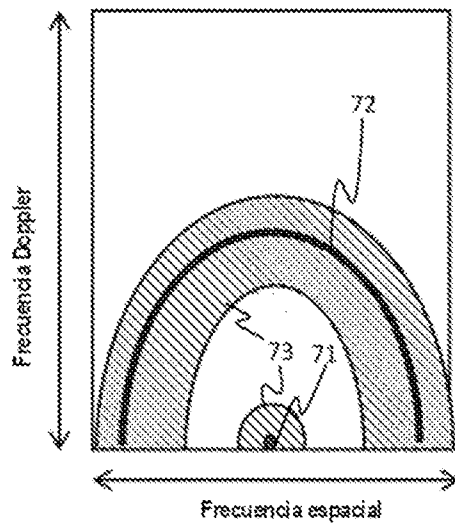


Fig. 9

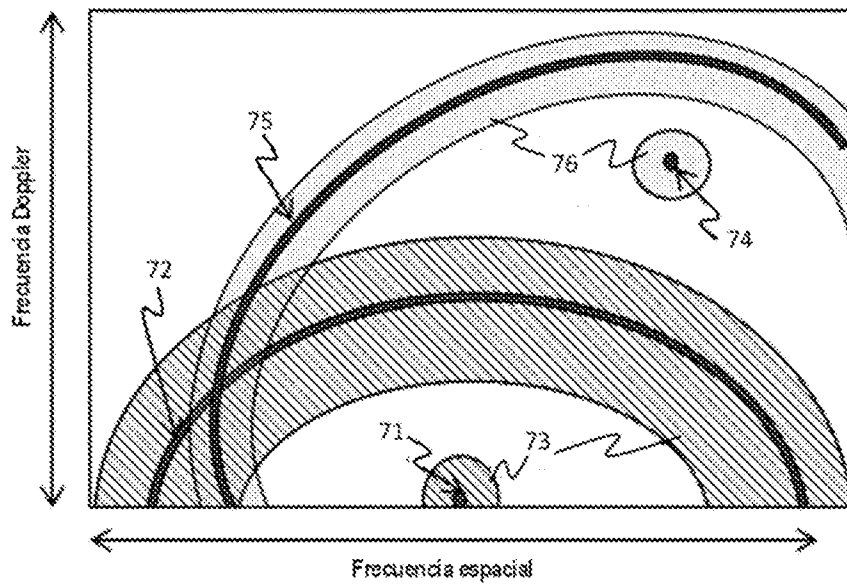


Fig. 10

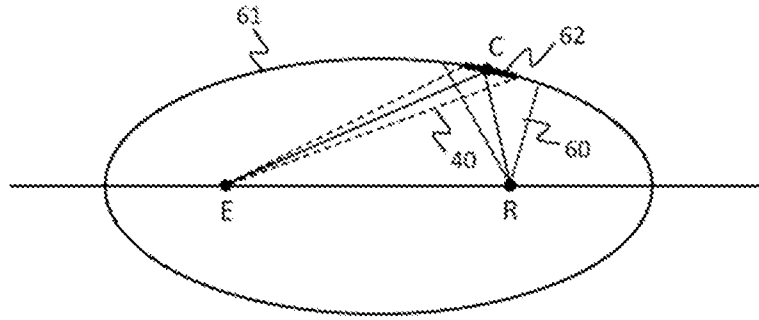


Fig. 11

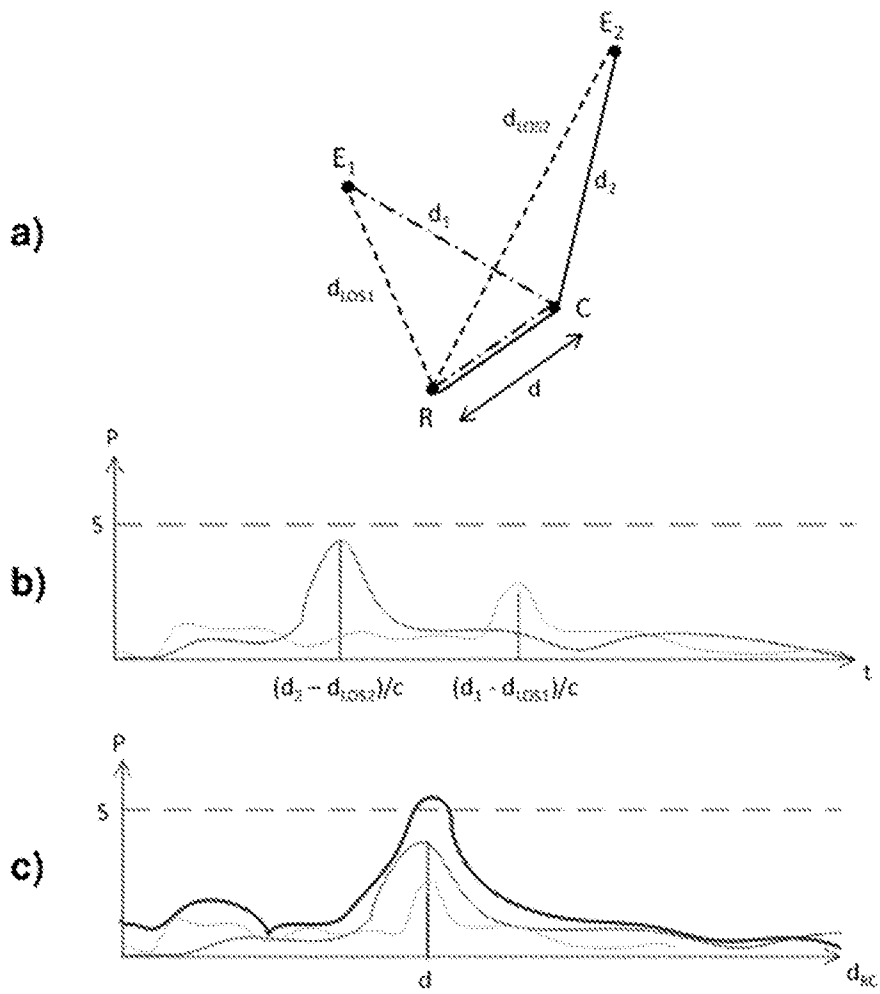


Fig. 12

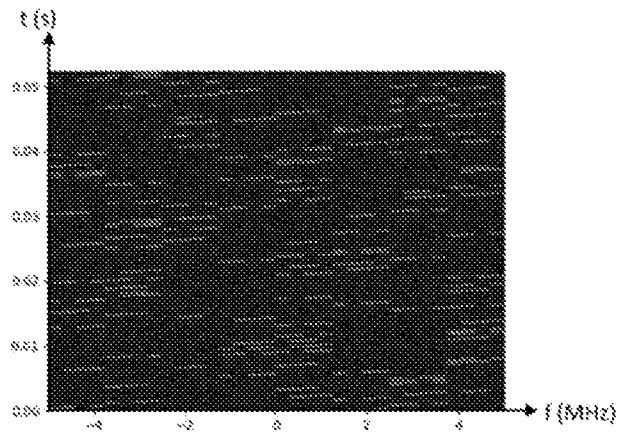


Fig. 13

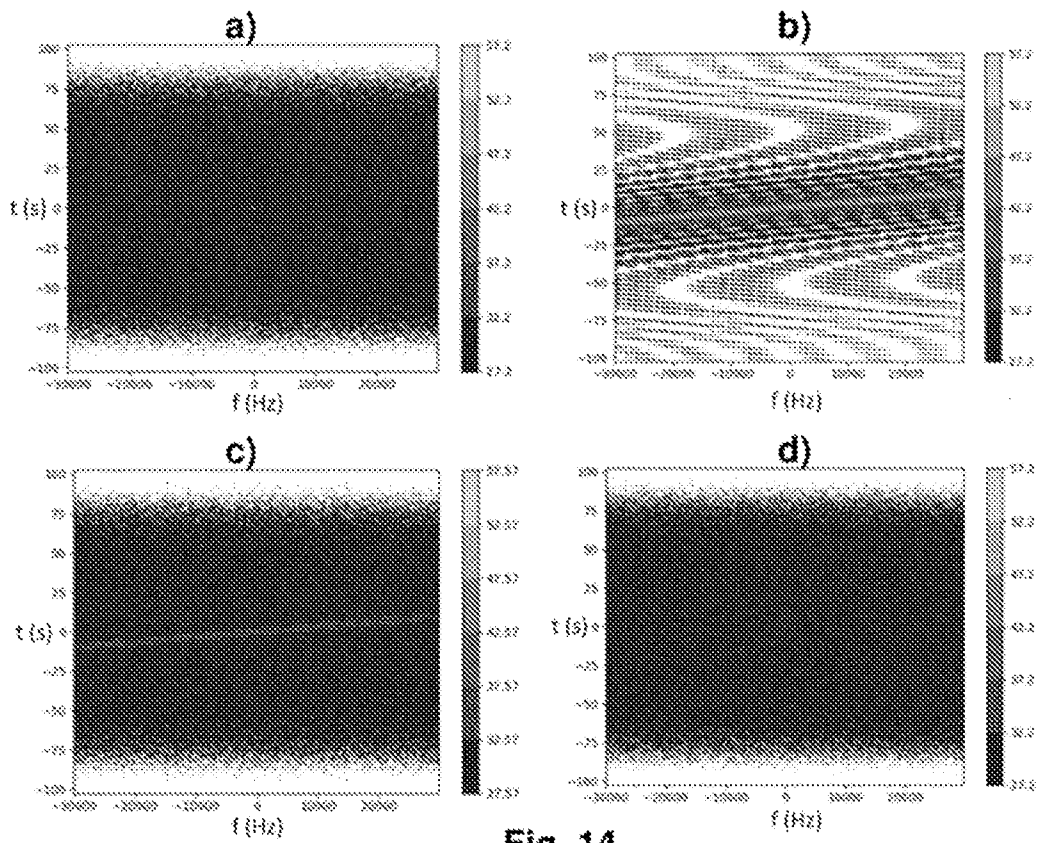


Fig. 14

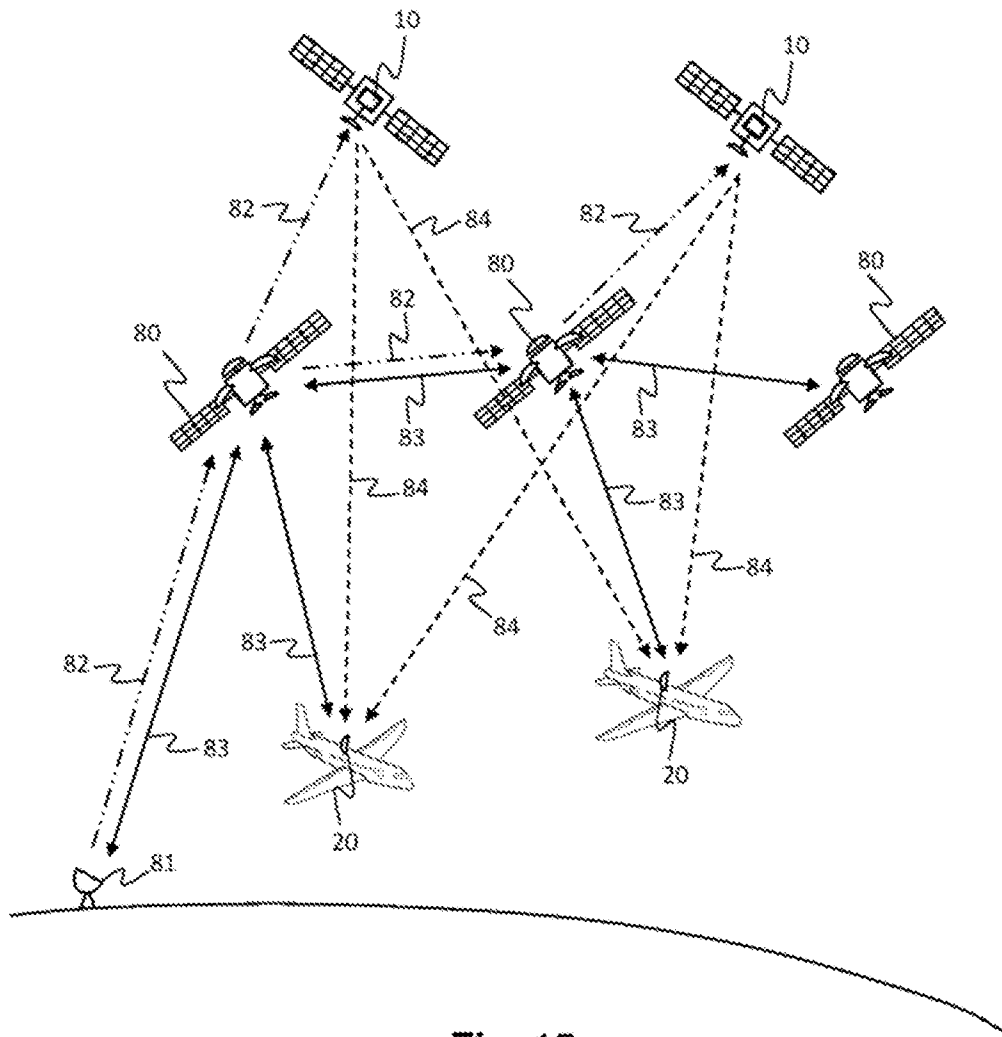


Fig. 15

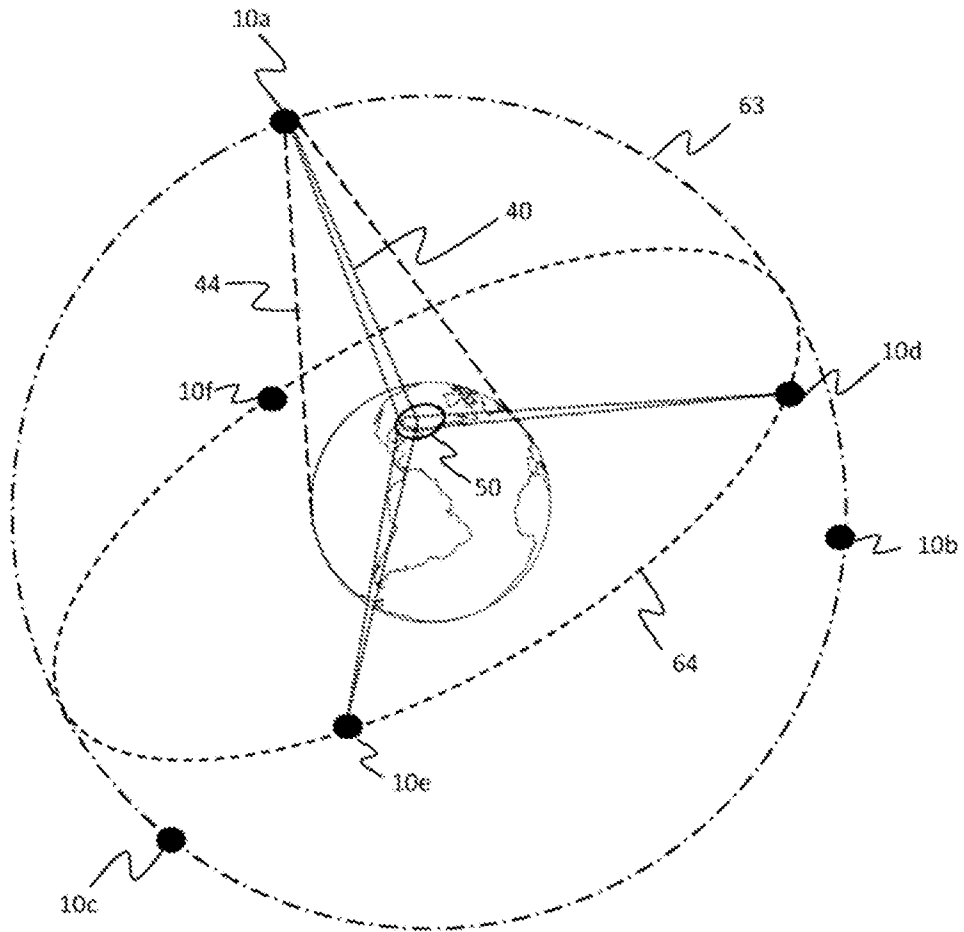


Fig. 16

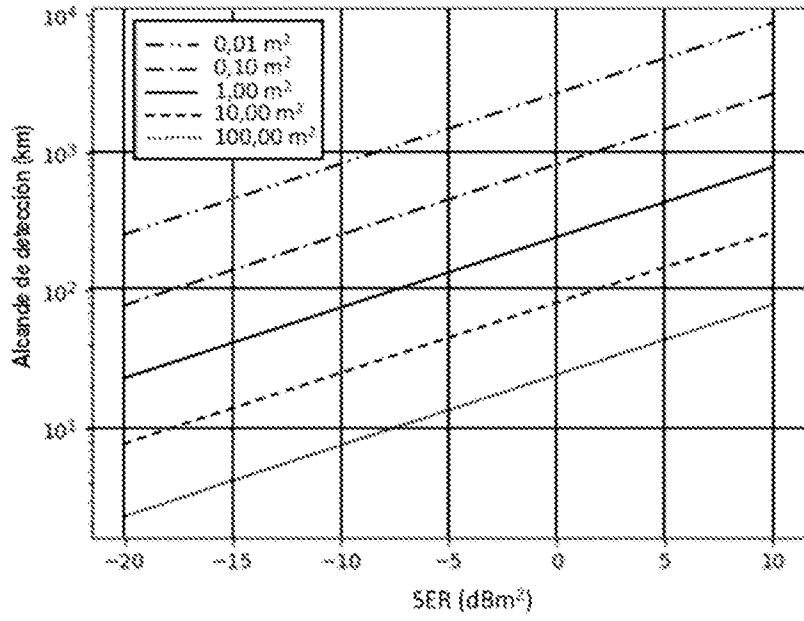


Fig. 17

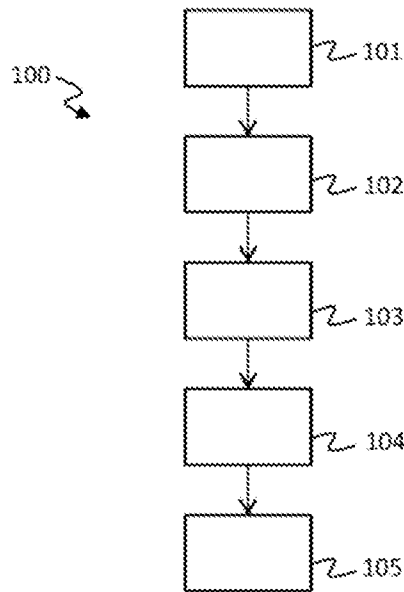


Fig. 18