(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 569 710**

(51) Int. CI.:

G01S 7/41 (2006.01)
G01S 13/91 (2006.01)
G01S 7/28 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.10.2011 E 11784734 (3)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.02.2016 EP 2628020**

(54) Título: **Sistema de radar**

(30) Prioridad:

12.10.2010 GB 201017210

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
12.05.2016

(73) Titular/es:

TMD TECHNOLOGIES LIMITED (100.0%)
Unit 3 Swallowfield Way
Hayes, Middlesex UB3 1DQ, GB

(72) Inventor/es:

WARD, KEITH DOUGLAS

(74) Agente/Representante:

LÓPEZ CAMBA, María Emilia

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

Esta invención está relacionada con el radar y de manera especial con el tipo de sistema de radar que es empleado para el control del tráfico aéreo en los aeropuertos comerciales y en las bases militares de aviación.

El propósito de un radar primario de control de tráfico aéreo local es detectar objetivos en el aire, tanto los cooperantes como los no cooperantes, en las cercanías de los aeropuertos en todas las altitudes operacionales y en las gamas de hasta las 70 millas náuticas (alrededor de 130 km). Estos radares funcionan invariablemente tal manera que la frecuencia de propagación de las señales de retorno son procesadas con el fin de determinar si existe la evidencia de un efecto Doppler causado por el movimiento radial de retornos del objetivo. Si no existe un efecto Doppler se asume que los retornos son de desorden estático y por lo tanto pueden ser eliminados, mientras que aquellos con un retorno Doppler significativo se supone que proceden de un objetivo de aviación y son pasados por el sistema de filtración, detectados y emitidos como mapas de radar. Tales sistemas de procesamiento pueden ser de diferentes grados de sofisticación y de discriminación y son descritos por nombres tales como Moving Target Indication (MTI), Moving Target Detection (MTD) o Pulse-Doppler. Estos acuerdos, combinados con el uso de mapas de contorno y mapas de desorden con la finalidad de filtrar los retornos del desorden excesivo ocasional que se elevan por encima de los filtros Doppler, han trabajado bien hasta los tiempos recientes y ha sido posible distinguir entre la aviación y la confusión de fondo con un nivel elevado de certeza.

Sin embargo de manera reciente, con el fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, se ha vuelto común emplear turbinas de viento aero generadoras como una fuente de energía. Tales turbinas de viento constan típicamente de una torre de hasta 180 m de altura soportando una carcasa y un rotor de hasta 80 m de diámetro que se da la vuelta con el fin de ponerse perpendicular a la dirección del viento predominante. La turbinas de viento aero generadoras pueden estar presentes individualmente o en grandes instalaciones con hasta 200 o más en los parques eólicos. Estos parques eólicos, si están presentes en la región de un aeropuerto o de una base aérea, presentan un considerable reto para la previsión del control de tráfico aéreo debido a que tendrán una sección transversal de radar (RCS) que es considerablemente mayor que la de la mayoría de los objetivos que son necesario detectar. Por ejemplo, una torre estática puede tener un RCS de unos 100.000 m^2 y la de la pala puede ser de aproximadamente 1000 m^2 mientras que los RCS de un gran avión de pasajeros es normalmente solo de 100 m^2 y la de un jet militar puede ser sólo del orden de 1 m^2. Además, la turbina de viento puede generar cantidades variables de Doppler. Por ejemplo, si la turbina es girada de tal manera que la antena de radar ve la turbina en el plano del rotor, las palas del rotor se moverán hacia y lejos del radar a medida que el rotor gira el cual va a generar un efecto Doppler significativo en la señal de retorno desde la turbina. En determinadas circunstancias esto puede ser manifestado como una serie de destellos de intensidad muy alta en las señales de retorno de radar de acuerdo como las diversas palas están instantáneamente normales a la dirección de la turbina de viento desde la antena de radar (generalmente cuando están en posición vertical).

El resultado de esto es que el radar que retorna desde un parque eólico es visto como una masa de confusión dentro de la cual no es posible distinguir objetivos genuinos desde la confusión derivada por el parque eólico. Puede ser posible distinguir los objetivos desde la confusión del parque eólico es utilizado un sistema de antenas en fase, pero tales sistemas de antenas en fase son de costes prohibitivos para cualquier cosa distinta de las aplicaciones militares. Por ejemplo, un sistema de antenas en fase para un radar militar puede costar del orden de £ 30 millones, mientras que un radar de control de tráfico aéreo puede costar sólo £ 3 millones o menos. Los radares de control de tráfico aéreo local más básicos tienen solamente un único haz principal, a menudo complementado con un haz secundario de nivel alto de rango cercano, de tal manera que el área ocupada por el parque eólico "esterilizará" los retornos desde los aviones incluso cuando estén volando a alturas muy por encima de las turbinas.

Por otra parte, aunque ha sido propuesto mitigar los efectos de las turbinas de viento aero generadoras mediante la modificación de las propias turbinas, esto es a menudo impracticable debido a que no es posible conseguir el acceso a las turbinas. De hecho, incluso pueden estar ubicadas en un país diferente.

El documento de patente WO 2006/108275 describe un sistema de vigilancia de radar que incluye un radar de vigilancia primario (PSR) un distinto y separado radar de vigilancia secundario (SSR), ambos de los cuales generan mapas objetivo. El PSR genera un mapa objetivo mediante la detección de la radiación reflejada desde el objetivo y el SSR genera un mapa objetivo mediante la detección de la radiación de un transpondedor emitida desde el objetivo como una respuesta a la recepción recibida por el objetivo debido a una señal del SSR.

En el artículo "Options for mitigation of the effects of wind farms on radar systems" (Jackson C A et al, IEEE conference Publication, Londres 15 de octubre de 2007) son discutidas varias opciones con el fin de reducir el efecto de los parques eólicos en los retornos de radar, incluyendo la disminución de la cantidad de energía radiada hacia el parque eólico.

La presente invención proporciona un sistema de radar tal y como está definido en la reivindicación 1.

El sistema de acuerdo con la invención tiene la ventaja que el proceso organiza efectivamente los haces nulos recibidos con el fin de minimizar o enmascarar las turbinas de viento según como el haz principal que está transmitiendo la transmisión principal realiza las exploraciones a través de la zona y maximiza los retornos de los objetivos genuinos. El proceso puede ser auto calibrante (que es decir, puede ser innecesario el posicionamiento exacto de las antenas auxiliares) y puede producir valores nulos eficaces de elevación y Doppler en los rangos conocidos y en los ángulos de acimut de las turbinas de viento. Las antenas adicionales pueden ser platos simples o antenas impresas planas, que son baratos de fabricar en cantidad y que pueden ser configurados remotamente con el fin de adaptarse a la aplicación. Aunque las antenas auxiliares requerirán canales receptores adicionales, esto puede ser proporcionado mediante el uso de receptores digitales modernos.

Las antenas auxiliares pueden ser capaces tanto de rotar con la antena principal o estar fijas en la dirección de las turbinas de viento aero generadoras.

De acuerdo con el aspecto más amplio de la invención, una sola antena auxiliar tiene la desventaja que un numero de número de valores nulos pueden estar presentes en la señal de retorno de tal manera que los retornos pueden ser minimizados en un número de elevaciones diferentes. Por lo tanto, es preferido ser utilizada una pluralidad de antenas auxiliares con la intención de generar un numero de lóbulos que se solapan a diferentes elevaciones de tal manera que un valor nulo es generado en solamente un número pequeño de elevaciones, preferiblemente en una elevación única que corresponde a la elevación de la (s) turbina (s). El componente puede incluir más de dos antenas auxiliares si se desea y puede tener cualquier número de antenas auxiliares, por ejemplo hasta diez, pero preferiblemente no más de cuatro antenas fijas debido a que demasiadas antenas auxiliares pueden generar una carga computacional demasiado grande. Las antenas auxiliares adicionales puede estar situadas en la estructura proporcionada para la antena, bien por debajo o por encima de la antena principal y bien sean fijas o rotativas con la antena principal.

En una forma de dispositivo y método para generar los valores nulos en las señales de retorno, el procesador es operable para implementar un filtro de detección que coincide con la señal objetivo en un ruido de fondo característico de la turbina de viento. La señal de radar recibida durante la prueba de detección es definida como un vector α, cuyos componentes son las amplitudes complejas de la célula de rango bajo prueba para todos los impulsos dentro del tiempo de permanencia del haz de exploración (en la dirección del ángulo acimutal bajo prueba) de todas las antenas. La prueba estadística para estos datos es dada por

$$\alpha \boldsymbol{R}^{-1}\mathbf{s}^*$$

donde α es un vector de definición de las señales de retorno bajo prueba;
$\boldsymbol{R}^{-1}$ es el inverso de una estimación de la covarianza matriz de la señal del radar desde una turbina de viento; y
s* es el conjugado complejo del vector de señal del objetivo para ser detectado.

Un umbral *h* es aplicado a esta prueba estadística para determinar si debe ser o no considerada la señal de retorno como contenedora de un objetivo.

Una estimación de la matriz de covarianza del ruido de las turbinas de viento aero generadoras puede ser obtenido desde un vector de señal *V*, que es la señal de radar recibida desde una turbina de viento con los mismos componentes que α más arriba, tal como sigue,

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{H}$$

Donde H denota la transpuesta hermítica.

Es generalmente promediar ***R*** sobre muchos ejemplos de *V* con el fin de mejorar la exactitud de la estimación de ***R***. De esta manera,

$$\boldsymbol{R} = \langle \boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{H} \rangle$$

Donde los símbolos <> denotan un promedio.

La matriz de covarianza estimada ***R*** no necesita ser generada para las señales de retorno sobre el conjunto completo de los valores de rango que son generados en las señales de retorno ya que esto requeriría una carga computacional muy grande. En lugar de ello, es posible y preferente, para el procesador, generar las estimaciones solo para esos valores de los retornos que tienen retrasos que corresponden a la distancia desde la antena de radar a la turbina de viento o al parque eólico. Asimismo, no es necesario generar la matriz de covarianza para todos los ángulos acimutales.

De esta manera, el procesador puede ser operable con el fin de generar la matriz de covarianza ***R*** solo para las señales de retorno que corresponden al rango y el ángulo acimutal de cada turbina de viento y es operable preferiblemente con la finalidad de generar la matriz de covarianza ***R*** para las señales de retorno que corresponden al rango y el ángulo acimutal de las turbinas de viento que están formando un parque eólico.

Durante el funcionamiento, el procesador puede generar una estimación de la matriz de covarianza de un promedio del producto externo, VV^H, de las señales de retorno *V*, una vez que se ha iniciado el funcionamiento del sistema de radar. Esto puede ser realizado mediante la generación de las estimaciones para las turbinas de viento de manera individual, si es posible. En tal caso, donde la antena principal es una antena reflector, el vector de retorno *V* desde cada turbina de viento aero generadora sería muestreada una vez para cada revolución completa de la antena y esa muestra puede ser añadida al promedio corriente de la matriz de covarianza. Sin embargo, tal procedimiento puede tener la desventaja que si solamente es obtenida una sola muestra desde cada turbina, por cada revolución de la antena, el proceso puede convertirse en demasiado largo para generar una buena estimación matriz de la covarianza con las muestras suficientes para cada valor. En este caso puede ser preferido tomar un promedio sobre los retornos para un número de turbinas de viento aero generadoras en un parque eólico o de manera alternativa tomar un promedio sobre los retornos de todas las turbinas de viento aero generadoras en un parque eólico.

De forma alternativa, puede ser posible muestrear los retornos de todas las turbinas de viento en un procedimiento de formación para cada orientación de las turbinas y la velocidad antes de la sesión de prueba y poner la estimación de la matriz de covarianza en una tabla de búsqueda para el uso con posteriores condiciones de prueba.

Si se puede predecir el momento de "destello" de las turbinas utilizando las transmisiones de una de las antenas auxiliares puede ser posible generar dos matrices de covariancia, una matriz de covarianza correspondiente a una señal intensa de retorno desde la turbina de viento durante un "destello" y otra matriz de covarianza que corresponde a una señal de retorno en la ausencia de un "destello" y el procesador es operable para generar una pluralidad de filtros acoplados en dependencia de si es observado o no un destello. Este procedimiento puede mejorar el rendimiento reduciendo el número de falsas alarmas causadas por los destellos.

De acuerdo con otro aspecto, la invención proporciona un método de detectar la posición de un objetivo en la presencia de una turbina de viento o un parque eólico, que comprende transmitir los impulsos de radar desde una antena principal que se desplaza de manera acimutal y el procesamiento de las señales de retorno recibidas de la antena principal y una pluralidad de antenas auxiliares, incluyendo el método los pasos de: generación de una firma de la turbina de viento desde un número de señales de retorno recibidas por la antena principal y las antenas auxiliares en un proceso de entrenamiento, generando los datos del modelo de un objetivo o recibiendo los datos para el modelo de un objetivo desde una memoria, y probando las señales retornadas para la presencia de un avión utilizando la firma y los datos del modelo. El método comprende preferiblemente los pasos de:

(1) generar una estimación de la matriz de covarianza $\boldsymbol{R}$ de las señales de retorno de las turbinas de viento que son recibidas por las antenas;
(2) generar un filtro acoplado que es dado por,

$$\alpha \boldsymbol{R}^{-1}\mathbf{s}^*$$

donde α es un vector de definición de las señales de retorno;
$\boldsymbol{R}^{-1}$ es el inverso de la estimación de la matriz de covarianza; y
$\mathbf{s}^*$ es el conjugado complejo de la señal objetivo detectada;
(3) comparar la salida del filtro con un valor de umbral; y
(4) determinar si debe o no ser considerada una señal de retorno como un objetivo dependiendo del valor de salida del filtro en comparación con el valor de umbral.

La invención también proporciona un portador que lleva un programa de ordenador que comprende una pluralidad de instrucciones implementables por el ordenador para causar que un ordenador esté programado de esta forma con el fin de realizar el método de la invención.

Una forma de dispositivo y de los sistemas de radar de acuerdo con la presente invención será descrita ahora a manera de ejemplo con referencia a los dibujos que se acompañan en los que:
La figura 1 es un diagrama esquemático que muestra un sistema de radar convencional;
La figura 2 muestra la forma de impulso de radar empleado por una forma de radar;
La figura 3 muestra un mapa de radar desde tal sistema de radar en la presencia de un parque eólico;
La figura 4 muestra esquemáticamente que un número de destellos que pueden ser causados por el radar que refleja las turbinas de viento;
La figura 5 muestra esquemáticamente una forma de sistema de radar de acuerdo con la presente invención;
La figura 6 es una vista esquemática de la emisión de un componente y radar de acuerdo con la presente invención;
La figura 7 muestra una estimación de la matriz de covarianza formada desde la salida del sistema de radar que esta mostrado en la figura 6; y
La figura 8 es un diagrama esquemático que muestra los pasos principales del proceso empleados en el dispositivo de acuerdo con la invención.

Refiriéndose a los dibujos que se acompaña, la figura 1 muestra una forma típica del sistema de radar empleado para el control del tráfico aéreo en la vecindad de un aeropuerto o de una base militar aérea. Este tipo de sistema de radar 1 comprende típicamente una antena 2 y la circuitería electrónica para generar y para transmitir los impulsos

de radar y para la recepción, procesamiento y visualización de los impulsos.

La antena es típicamente una antena reflector convencional parabólica en la cual el impulso transmitido es enviado a un plato que transmite una señal en forma de una serie de impulsos y recibe la señal después la reflexión por el objetivo 10, en este caso un aeroplano y cualesquiera otros objetos que son capaces de reflejarla. La señal transmitida es normalmente en forma de un tren repetitivo de impulsos cortos y es generada por un transmisor 3 que comprende un generador formador de ondas 4, un excitador 6 para la mezcla de la forma de onda generada hasta la frecuencia de radar y un amplificador de potencia 8. La señal es entonces enviada a la antena 2 a través de un duplexor 12. Después de la reflexión de la señal por el objetivo 10 la señal reflejada conocida como el retorno o la señal de retorno o retornada, es recibida por la antena 2 y enviada, vía el duplexor 12, a un receptor 13 que tiene un amplificador de ruido reducido 14 como su primera etapa. El propósito del duplexor es permitir que la antena comparta a la vez la señal para ambas la transmisión y la recepción y con el fin de proteger el receptor del daño cuando el transmisor está encendido. Después de la amplificación de la señal retornada por el amplificador 14, la señal es enviada a una sección de mezcladores y amplificadores 16, que es típicamente un receptor superheterodino en el cual la señal se mezcla a la vez con la salida de dos osciladores locales 17, siguiendo lo cual la señal es procesada por un compresor de impulso 20, un cancelador MTI (indicación de objetivo en movimiento) 22, un umbral CFAR (ratio de falsa alarma constante) 24 y es mostrada en una pantalla 25, por ejemplo un pantalla de indicador de posición de plan (PPI) que muestra el rango y el ángulo de los mapas detectados.

En virtud de la construcción de la antena, el radar exhibirá sensibilidad máxima para devolver las señales de objetivos en un lóbulo 26 que se extiende hacia fuera desde la antena, con el resultado de que la antena detectará los objetivos con una sensibilidad variable a cualquier altura del nivel del suelo a cualquier altitud dada y generará los mapas detectados en la pantalla 25.

La figura 2 muestra la forma general de los impulsos que puede ser empleada en una forma de radar, aunque será apreciado que esto es meramente un ejemplo y que pueden ser utilizados otros impulsos. Para una antena de radar que gira a 4 segundos por revolución y que tiene una anchura de haz de 1,5 ° (es decir, una revolución de 1/240) que es típica de un radar de control de tráfico aéreo, el haz tendrá un tiempo de permanencia en cualquier localización en el suelo de alrededor de 16 ms. Con el fin de que el radar tenga un rango máximo de aproximadamente 70 millas náuticas (130 km) es establecida una frecuencia de impulso (PRF) de aproximadamente 1 kHz para los impulsos, que da un periodo interimpulso de 1 ms. Dos de tales impulsos 30 aparecen la figura 2. Cada impulso suele ser típicamente de 25 µs de duración y puede ser una secuencia pseudo aleatoria o un chirrido de típicamente 2MHz de ancho de banda para las técnicas de compresión de impulso, seguida de un período más largo hasta el final de la franja de tiempo para el impulso durante el cual el sistema de radar está esperando para el retorno desde el objetivo. Este tiempo puede variar de impulso a impulso, con el fin de permitir la detección de objetivos en movimiento sobre una gama amplia de velocidades. También pueden ser impulsos más cortos intercalados con pulsos largos con el fin de ser capaces de detectar objetivos a un rango muy corto cuando no es posible detectarlos con el impulso largo.

Un mapa de radar típico tal como se ve en una pantalla del plan de indicador de posición (PPI) está mostrado en la figura 3 para un sistema de radar en la vecindad de un parque eólico. En el centro del indicador puede ser vista una gran cantidad de desorden o confusión 40 que esta originado desde el parque eólico. En adición al desorden pueden ser vistos un par de seguimientos 42 y 43 de objetivos que están volando en cursos que se cruzan el uno con el otro en la región del desorden. Los rastros de los objetivos son observados mediante líneas formadas por un número de retornos en posiciones ligeramente definidas obtenidos para cada revolución de la antena. Sin embargo, debido a que un único retorno se observa para cada objetivo y para las turbinas de viento generadoras del desorden 40 independientemente de la altura de los objetivos y los aerogeneradores, los mapas de los aviones simplemente desaparecen en la masa general del desorden 40 para reaparecer una vez que el avión ha dejado la región del parque eólico. Cuando el avión está en la región del parque eólico no es posible rastrearlo de manera precisa.

Los retornos desde las turbinas de viento varían dependiendo de una serie de condiciones, en particular en la orientación de la turbina con respecto a la antena. Por ejemplo, la torre de la turbina generará un retorno largo estático mientras que las palas generarán retornos de varios tamaños y efecto Doppler. En un extremo, donde la dirección de la antena está en alineación con la góndola y por lo tanto, normal al plano de las palas de la turbina, está presente muy poco Doppler en los retornos desde la turbina, mientras que si la turbina está orientada de tal manera que la dirección de la antena es perpendicular a la góndola y de esta manera en el plano de las palas de la turbina, los retornos son tales como están mostrados en la figura 4 y forman una señal 50 en el efecto Doppler cero causada por el mástil o otras partes de la turbina de viento cuya rango no cambia y una serie de "destellos" 52 que aparece en seis veces la tasa de rotación de las palas de la turbina (suponiendo tres en cada turbina) y que tienen efectos Doppler positivos y negativos alternativos. Estos destellos son provocados por las reflexiones desde el borde de las palas de la turbina según como cada pala está desplazándose instantáneamente hacia (desplazamiento positivo) o alejándose de (desplazamiento negativo) la antena. Incluso en el caso de un sistema de radar MTI en el cual las reflexiones desde objetivos estáticos tales como las torres de los aerogeneradores que no exhiben Doppler son suprimidas, es observada una masa de desorden que está originada por las palas de las turbinas de viento y la cual puede empequeñecer los retornos desde los objetivos.

La figura 5 muestra esquemáticamente una forma del sistema de radar de acuerdo con la invención. Los dispositivos tales como el amplificador de potencia del generador de forma de ondas y excitador formando el transmisor 3 han sido retirados por motivos de claridad, ya que tienen componentes del receptor 13 tales como el amplificador de poco ruido 14, los mezcladores y amplificadores 16 y el compresor de impulso 20.

En el sistema mostrado en la figura 5, la antena principal 2 puede ser una antena reflector convencional que es capaz de transmitir impulsos por ejemplo tal como se muestra en la figura 2 y recibir retornos y procesarlos con el fin de presentarlos en una pantalla PPI 25. La antena tendrá típicamente una anchura de haz estrecha, por ejemplo de 0,5° a 2° y girará alrededor de un eje vertical con el fin de obtener los retornos en todos los ángulos acimutales alrededor de la antena. Además de la antena principal están presentes una serie de antenas auxiliares 62 y 64 en el mástil que soporta la antena principal. Estas antenas auxiliares pueden estar fijadas y dirigidas hacia un parque eólico cercano representado por la turbina de viento aero generadora 66. De manera alternativa, tal y como está indicado más arriba, pueden girar con la antena principal y estar sincronizadas con ella o bloqueados de tal manera que sólo "vean" la turbina de viento o el parque eólico. Aunque la antena principal puede tener un ancho de haz relativamente estrecho, las antenas auxiliares pueden tener haces más anchos, por ejemplo tienen anchos de haz de 4 a 16° y preferiblemente de 6 a 12°. Normalmente las antenas auxiliares fijas tienen anchos de haz de unos 8° de tal manera que cada antena auxiliar puede ver un parque eólico entero en lugar de meramente una turbina individual. También, aunque en la figura 5 se muestran dos antenas auxiliares, es posible en algunos casos emplear una única antena auxiliar o usar más de dos antenas si se desea mejorar la direccionalidad de la organización de las antenas formada por la antena principal 60 y las antenas auxiliares 62 y 64.

Durante el funcionamiento, son generados los impulsos y son amplificados por un transmisor 3 y enviados a un duplexor 12 que permite que los impulsos sean transmitidos a la antena principal 2 y recibidos por todas las antenas. Los impulsos son enviados a la antena 2 desde son transmitidas en el éter y las señales de retorno son recibidas por cada una de los antenas 2, 62 y 64. Las señales de retorno desde la antena 2 son enviadas al duplexor 12 y luego a un receptor 13a, correspondiente al receptor 13 que se muestra en la figura 1, el cual determina la amplitud compleja (un número complejo con la amplitud y fase de la señal recibida) en cada rango de cada retorno de impulso. Las señales de retorno de las antenas 62 y 64 son enviadas directamente a los receptores 13b y 13c respectivamente, donde son determinadas sus amplitudes complejas. Los receptores 13b y 13 c incluyen también un amplificador de ruido bajo 14, la sección de los mezcladores y amplificadores 16 y el compresor de impulso 20. No es necesario enviar los retornos de las antenas 62 y 64 mediante el duplexor 12 debido a que estas antenas no transmiten cualesquiera impulsos.

La figura 6 muestra la forma de salida desde las tres antenas 2, 62 y 64 después de procesar por los receptores. La salida desde el receptor 13a forma una matriz de dos dimensiones 66 que tiene 32.000 elementos (2000 por 16), para 2000 valores diferentes de retraso (correspondiente a los contenedores de rango de 0,5 µs del receptor) para cada uno de los 16 impulsos que han sido enviados durante el tiempo de permanencia de la antena principal sobre cada ángulo acimutal. Cada elemento es un número complejo *V*1 a *V*16 correspondiente a la amplitud compleja de la señal de radar retornada para el impulso relevante en cada uno de los contenedores de rango. Solamente las amplitudes complejas para el contenedor de rango enésimo correspondiente al rango de una turbina de viento o un parque eólico son etiquetadas por motivos de claridad, pero son registrados los datos para cada contenedor de rango.

Adicionalmente a la emisión de la matriz 66 originada desde la antena principal, una matriz de salida 68 y 70 es generada desde los retornos de las antenas auxiliares 62 y 64 respectivamente. Los retornos desde las antenas auxiliares son suprimidos para todos los valores de rango distinto a aquellos que corresponden al rango de la turbina de viento o del parque eólico de manera tal que estas dos matrices están vacías aparte de su contenedor rango enésimo.

La emisión desde la antena 60 será, por supuesto, generada para cada ángulo acimutal de la antena como según como rote en los 360°. Sin embargo, las emisiones son generadas desde las antenas auxiliares solamente para los ángulos acimutales a los cuales ellas están dirigidas si son fijas o para el intervalo de tiempo en el que están dirigidas a la turbina eólica o al parque eólico si se mueven junto con la antena principal. El equipo que procesa los retornos sintonizara típicamente el procesamiento de los retornos desde las antenas auxiliares con procesado desde la antena principal de tal manera que los retornos desde las antenas auxiliares son procesados solamente cuando la antena principal está dirigida hacia la turbina de viento o el parque eólico. El sistema de radar de este modo tiene una puerta acimutal que causa solamente aquellos los retornos los rendimientos desde el parque eólico o la (s) turbina (s) de viento ser corregida para las turbinas y los retornos desde otros ángulos acimutales procesados de manera convencional. La emisión desde la antena principal 2 y desde cada una de las antenas auxiliares 62 y 64 es entonces pasada al procesador 74 para su posterior procesamiento. Aunque en el dibujo está mostrado un único procesador y que se refiere este documento, será apreciado que el procesador puede proporcionado por un número de procesadores separados que pueden ser proporcionados mediante hardware o software y que puede incluir su propia memoria etc.

La figura 8 muestra esquemáticamente el funcionamiento del procesador 74. En la figura 8 están mostrados los datos como una simple caja de decisión de entrada de flujo 80 que puede ser mediante la combinación de las

emisiones desde los receptores 13a a 13c como un único flujo de serie o pueden ser procesados los datos de cada uno de los receptores en paralelo. En la caja 80 es determinado o no el rango y el acimut de los datos de entrada que corresponden a un parque eólico o una turbina de viento. Si no es así, los datos son procesados convencionalmente pasándolos a una unidad de cancelación de la indicación de objetivo en movimiento (MTI) 22, una unidad de ratio de falsa alarma constante (CFAR) 24 y desde allí a la pantalla 25.

Si el rango y el acimut corresponden a una turbina de viento o a un parque eólico, los datos que forman los elementos V_i del vector $\boldsymbol{V}$ de retornos (donde i toma los valores desde 1 a 16 para la antena principal 2, los valores de 17 a 32 para la antena auxiliar 62 y los valores de 33 a 48 para la antena auxiliar 64) son enviados a una unidad entrenador 82. La unidad entrenadora genera los productos transversales de los elementos del vector $\boldsymbol{V}$ con sus conjugados complejos, V_iV_j * para formar una estimación de la matriz de covarianza R durante una sesión de entrenamiento. Los productos transversales son promediados sobre muchos ejemplos de V con el fin de mejorar la exactitud de la estimación. Esto está mostrado en la figura 7, donde los símbolos <> se refieren a los valores promedio de los productos transversales. Los muchos ejemplos de V pueden ser obtenidos de muchas turbinas de viento o de una única turbina con muchas exploraciones de la antena. Claramente cuanto mayor sea el número de ejemplos utilizado para formar los productos transversales mayor será la exactitud de la matriz de covarianza $\boldsymbol{R}$. Preferiblemente son utilizadas por lo menos 10 y especialmente por lo menos 100 muestras, pero el número de muestras utilizado para formar la estimación de la matriz de covarianza no debe ser tan grande que dure más de 10 minutos y especialmente no más de 5 minutos. Si de manera significativa son utilizadas más muestras, el tiempo utilizado antes de que pueden ser obtenidos los datos de prueba puede ser también demasiado grande o la reflexión de las turbinas de viento puede cambiar, por ejemplo debido a un cambio en la dirección del viento.

De manera adicional a ser enviados a la unidad entrenador 82, los datos que forman los elementos del vector pueden ser enviados a una unidad detector 84, durante el procedimiento de prueba (es decir, cuando el radar está siendo utilizado para detectar los aviones). La entrada de datos de amplitud compleja desde los receptores 13a a 13d durante la sesión de prueba es designada como α_i más bien que V_i. La unidad detector 84 recibe los datos que forman la matriz de covarianza $\boldsymbol{R}$ desde la unidad entrenador 82 y genera el inverso $\boldsymbol{R}^{-1}$ mediante métodos computacionales estándar, aunque el inverso puede ser generado obviamente por la unidad entrenador 82 en lugar de por la unidad detector 84. La unidad detector también recibe un vector s que forma un modelo de retorno 86 de un objetivo que se desea observar o su conjugado complejo s*. La unidad detector 84 entonces realiza pruebas para la presencia de un objetivo mediante la formación de un valor h que está dado por:

$$h = \alpha \boldsymbol{R}^{-1} s^*$$

Los valores de h por encima de un umbral designado pueden ser consideradas un objetivo genuino. La emisión desde el detector pasa a la pantalla 25 junto con la información de datos desde la unidad MTI 22 y la unidad CFAR 24 su visualización en la unidad de pantalla.

De esta manera, la unidad procesador 74 es operable con el fin de determinar:

(i) si el acimut detectado está libre de las sombras conocidas de todos los aerogeneradores; o,
(ii) si el rango detectado está libre de las sombras conocidas de todos los aerogeneradores; o,
(iii) si los datos recibidos exceden el umbral de detección del filtro acoplado de la turbina.

Si cualquiera de estas pruebas es cierta, el objetivo es asumido como real y es generado un mapa de radar.

Las muestras del vector complejo $\boldsymbol{V}$ empleadas con el fin de formar la matriz de covarianza $\boldsymbol{R}$ dadas para los datos de entrenamiento que puedan ser obtenidas antes de que el sistema sea usado o mientras el sistema está en funcionamiento, por ejemplo como un flujo promedio, son generadas simultáneamente con los datos de prueba. Aunque idealmente los datos del entrenamiento que son utilizados para formar la matriz de covarianza no deben incluir cualquier dato del objetivo de tal manera que sean generados los valores de $\boldsymbol{R}$ y $\boldsymbol{R}^{-1}$ en la ausencia de los datos del objetivo, en la práctica los datos del objetivo son insignificantes comparados con los retornos desde las turbinas de viento por lo que una buena estimación de la matriz de covarianza es obtenida incluso cuando los datos de entrenamiento son obtenidos en la presencia de objetivos. Por esta razón los datos de entrenamiento pueden ser obtenidos por la generación de un flujo promedio cuando son obtenidos los datos de prueba. De manera alternativa, los datos podrían ser obtenidos con anterioridad y los valores ser almacenados en una tabla de consulta, que incluya, por ejemplo, los valores para los retornos en cada orientación y/o valor de velocidad de la turbina de viento. Si la matriz de covarianza es obtenida desde turbinas de viento aero generadores individuales, puede ser necesario ejecutar el sistema durante un periodo de tiempo significativo con el fin de obtener suficientes datos de entrenamiento debido a que puede ser necesario una rotación de la antena principal con el fin de obtener los datos de entrenamiento para cada turbina de viento. Sin embargo, si las antenas auxiliares son fijas y tienen un ancho de haz suficientemente amplio con el fin de observar el parque eólico completo en lugar de una única turbina individual, los datos de entrenamiento pueden registrados para el parque eólico entero en cada barrido de la antena principal.

Aunque las antenas auxiliares normalmente serán enteramente pasivas y no serán empleadas con la finalidad de transmitir impulsos, es posible, cuando no están girando, utilizarlas activamente con el fin de mitigar el efecto de grandes destellos RCS desde las palas. Si es utilizado un transmisor de baja potencia con el fin de iluminar una turbina de viento desde una de las antenas auxiliares fijas y está sincronizada con la rotación de la antena principal

de tal manera que la turbina de viento es iluminada solamente cuando la antena principal es dirigida a cualquier parte, las reflexiones de la turbina pueden ser recibidas por una antena fija auxiliar diferente y utilizada para detectar la secuencia de los destellos altos RCS de cada turbina. Estos datos pueden ser utilizados para predecir cuándo ocurrirán los destellos durante el tiempo de iluminación de la antena que está rotando y ajustar el procesamiento en consecuencia. Por ejemplo, el procesamiento podría ser modificado con el fin de estimar dos matrices de covarianza, uno en presencia de un destello y la otra en la ausencia de un destello. El umbral aplicado a *h* para identificar un retorno como un objetivo podría ser ajustado en consecuencia con la finalidad de reducir el ratio de falsas alarmas.

Pueden ser aplicados otros medios de procesamiento, diferentes de un filtro acoplado descrito más arriba, a las señales de las antenas principales y auxiliares con el fin de discriminar entre los retornos de una única turbina de viento solamente y la combinación de una turbina eólica y un avión objetivo. Por ejemplo la estimación de la matriz de covarianza puede ser mal condicionada y puede requerir un procesamiento alternativo para una inversión sencilla. Todos los algoritmos de discriminación basados en el tratamiento de los datos desde la antena principal y las auxiliares forman parte de esta invención.

Pueden ser utilizadas técnicas de procesamiento adicionales conjuntamente con el proceso conducido descrito más arriba. Por ejemplo puede ser empleada una técnica de "seguimiento antes de la detección" en la cual son detectados mapas preliminares y un seguimiento preliminar es establecido. Los mapas verificados son emitidos solamente si son compatibles con el seguimiento preliminar establecido previamente y, si el objetivo es perdido para una exploración dentro del entorno nulo que rodea una turbina de viento o parque eólico, puede ser generado y emitido un mapa estimado. Los mapas generados de esta manera preferiblemente no permiten al sistema superar cualquier ratio de mapa falso especificado.

Tal y como se describió más arriba, la unidad procesador 74 es operable para discriminar entre el avión y las turbinas de viento utilizando simultáneamente ambos, el efecto Doppler y la información de la elevación contenida dentro de las señales retornadas. Sin embargo, es posible para ello discriminar usando secuencialmente el efecto Doppler y la información de la elevación. Esto puede ser conseguido mediante el uso de procesadores MTI convencionales para la información Doppler en todos los canales del receptor y entonces formando la matriz de covarianza de la emisión de los MTIs a través de todas las antenas seguidas por un filtro acoplado de elevación. Este enfoque es probable tener que tenga un rendimiento inferior pero es más sencillo de implementar.

El componente y el radar de acuerdo con la invención pueden ser empleado junto con otros, convencionales, métodos de mitigación de turbina de viento, por ejemplo el rango dinámico receptor mejorador, los lóbulos laterales compresión pulso reducido, la detección objetivo en movimiento mejorado y el umbral CFAR (ratio de falsa alarma constante) en los canales de procesamiento estándar y técnicas de seguimiento avanzadas.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de radar operable con el fin de detectar un objetivo (10) en un área en presencia de una turbina de viento (66) situada en la zona, sistema de radar que comprende:
   Una antena principal (2) que es operable para desplazarse acimutalmente con el fin de barrer la zona;
   Un transmisor (3) para transmitir los impulsos desde la antena principal (2); y
   Un receptor (13a) para recibir las señales de retorno desde la antena principal (2);
   Estando el sistema de radar **caracterizado por** incluir además:
   una pluralidad de antenas auxiliares (62, 64) adaptadas para la captura de la radiación reflejada transmitida por la antena principal (2) y con el fin de generar las señales de retorno desde las antenas auxiliares (62, 64) en base a la radiación capturada; y
   Un procesador (74) para el procesamiento de las señales de retorno, siendo operable el procesador (74), para:
      a. generar una firma de la turbina de viento desde un número de las señales de retorno recibidas por la antena principal (2) y las antenas auxiliares (62, 64) en un proceso de entrenamiento;
      b. generar los datos para el modelo de un objetivo o recibir los datos del modelo del objetivo desde la memoria
      c. probar las señales de retorno desde la antena principal (2) y las antenas auxiliares (62 64) para la presencia de un objetivo; y.
      d. Si un objetivo es detectado, generar los datos que representan un objetivo detectado.

2. Un sistema de radar como el reivindicado en la reivindicación 1, en el que el procesador es operable para aplicar un filtro acoplado de detección de la señal del objetivo, en un ruido de fondo característico de la turbina de viento.

3. Un sistema de radar como el reivindicado en la reivindicación 1 ó en la reivindicación 2, en la que el procesador es operable para generar una estimación de la matriz de covarianza ***R*** del ruido de la turbina de viento desde las señales de retorno desde la turbina de viento, donde ***R*** es definida como:

$$\boldsymbol{R} = \langle \boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^{H} \rangle$$

En la cual V es la amplitud compleja de las señales de retorno desde la turbina de viento, V^H es la conjugada hermítica de V y los símbolos <> representan un promedio.

4. Un sistema de radar como el reivindicado en la reivindicación 3, en el que el procesador es operativo con el fin de generar el valor de:

$$\alpha \boldsymbol{R}^{-1} s^{*}$$

donde α es un vector que define las señales de retorno bajo prueba;
   $\boldsymbol{R}^{-1}$ es el inverso de la estimación de la matriz de covarianza de la señal de radar desde la turbina de viento; y
   s * es el conjugado complejo de los datos del modelo del vector de la señal del objetivo para ser detectado.

5. Un sistema de radar como el reivindicado en la reivindicación 4, en el que el procesador es operativo para aplicar un umbral al valor $\alpha \boldsymbol{R}^{-1} s^{*}$ con el fin de determinar si señal de retorno debe o no ser considerada como que contiene un objetivo.

6. Un sistema de radar como el reivindicado en cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en la que el procesador es operable para generar la matriz de covarianza ***R*** solamente para las señales de retorno que corresponden al rango y/o al ángulo acimutal de la turbina de viento.

7. Un sistema de radar como el reivindicado en cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en la que el procesador es operable para generar la matriz de covarianza desde un promedio de flujo de las señales de retorno en una sesión de prueba.

8. Un sistema de radar como el reivindicado en cualquiera de las reivindicaciones 3 a 7, en donde la antena principal es una antena reflector que está organizada para girar con el fin de barrer el área a través una completa revolución y el procesador es operable para sumar los valores de las señales de retorno obtenidas desde cada barrido para formar la matriz de covarianza.

9. Un sistema de radar como el reivindicado en cualquiera de las reivindicaciones 3 a 8, en el que el procesador es operable para generar dos matrices de covarianza, una de matriz de covarianza que corresponde a una

intensa señal de retorno desde la turbina de viento durante un "destello" y otra matriz de covarianza que corresponde a una señal de retorno en la ausencia de un "destello".

10. Un método para detectar la posición de un objetivo en la presencia de una turbina de viento, que comprende la transmisión de impulsos de radar desde una antena principal que se desplaza acimutalmente y **caracterizado por** el procesamiento de las señales de retorno recibidas por la antena principal y una pluralidad de antenas auxiliares de incluyendo el método los pasos de la generación de una firma de la turbina de viento desde un número de las señales de retorno recibidas por la antena principal y las antenas auxiliares en una sesión de entrenamiento, generar los datos del modelo de un objetivo o recibir los datos del modelo de un objetivo desde una memoria y probar las señales de retorno para la presencia de una aeronave usando la firma y los datos del modelo.

11. Un método como el reivindicado en la reivindicación 10, que comprende los pasos de:

a. generar una estimación de la matriz de covarianza ***R*** de las señales de retorno desde las turbinas de viento que son recibidos por las antenas
b. generar un filtro acoplado que es dado por
i. $\alpha \boldsymbol{R}^{-1} s^*$
ii. donde α es un vector de definición de las señales de retorno;
1. $\boldsymbol{R}^{-1}$ es el inverso de la estimación de la matriz de covarianza; y
2. s * es el conjugado complejo de señal del objetivo a ser detectado
c. comparar la emisión del filtro con un valor de umbral; y.
d. determinar si una señal de retorno debe ser o no considerada como un objetivo dependiendo del valor de emisión del filtro en comparación con el valor del umbral.

12. Un método como el reivindicado en la reivindicación 11, en donde la matriz de covarianza ***R*** es generada únicamente para las señales de retorno que corresponden al rango y/o al ángulo acimutal de la turbina de viento o de un grupo de turbinas de viento.

13. Un método como el reivindicado en la reivindicación 11 ó en la reivindicación 12, el cual incluye la iluminación de la turbina de viento desde una antena auxiliar y la generación de dos matrices de covarianza, una matriz de covarianza que corresponde a una señal intensa de retorno desde la turbina de viento durante un "destello" y otra matriz de covarianza que corresponde a una señal de retorno en la ausencia de un "destello" y generar una pluralidad de filtros acoplados en dependencia de si es o no observado un destello.

14. Un portador de datos que lleva un programa de ordenador que comprende las instrucciones implementables por el procesador para causar que un ordenador de esta manera programado realice un método tal como está reivindicado en cualquiera de las reivindicaciones 10 a 13.

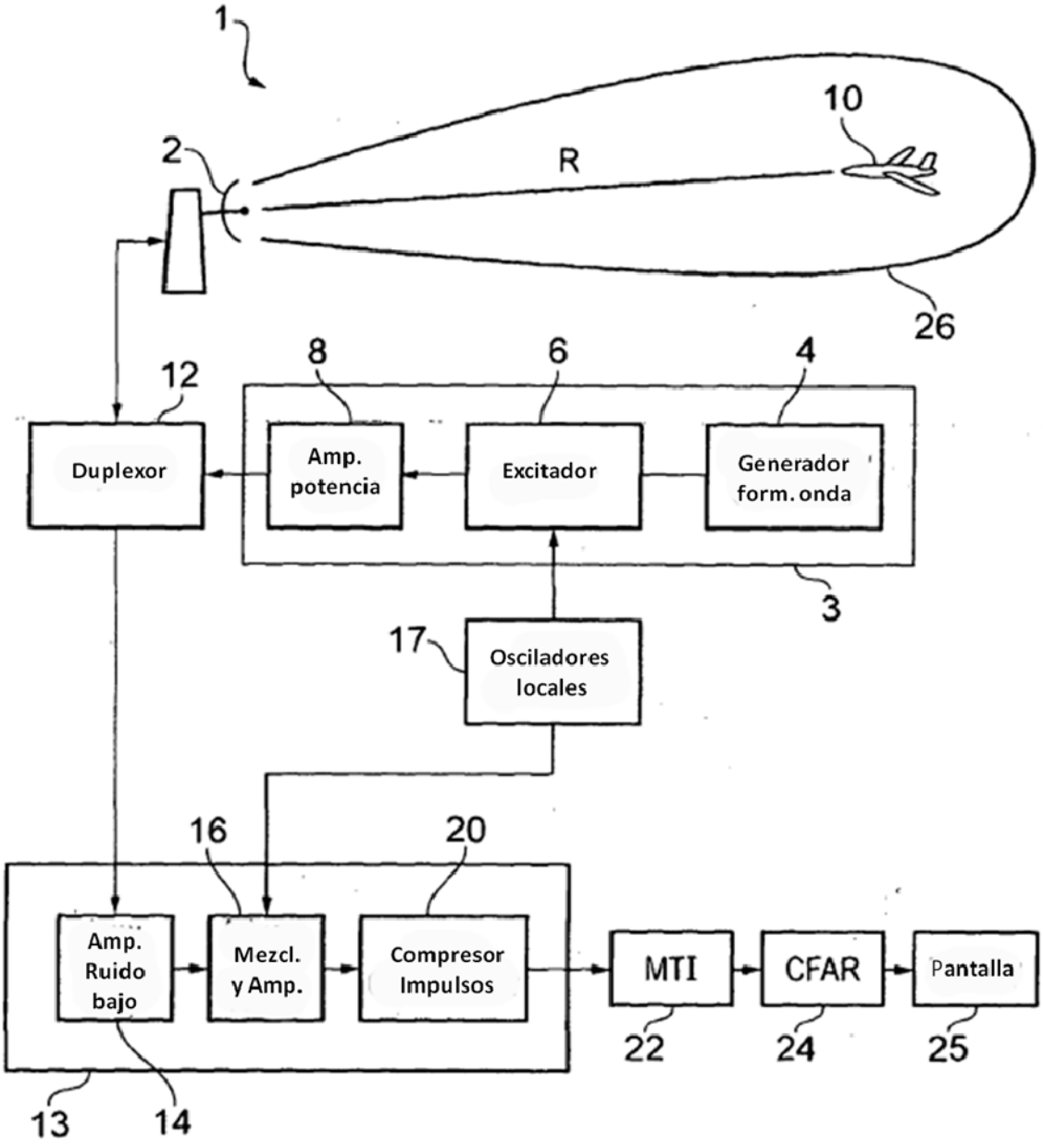

1
2
R
10
26
12
8
6
4
Duplexor
Amp. potencia
Excitador
Generador form. onda
3
17
Osciladores locales
16
20
Amp. Ruido bajo
Mezcl. y Amp.
Compresor Impulsos
MTI
CFAR
Pantalla
22
24
25
13
14

FIG. 1

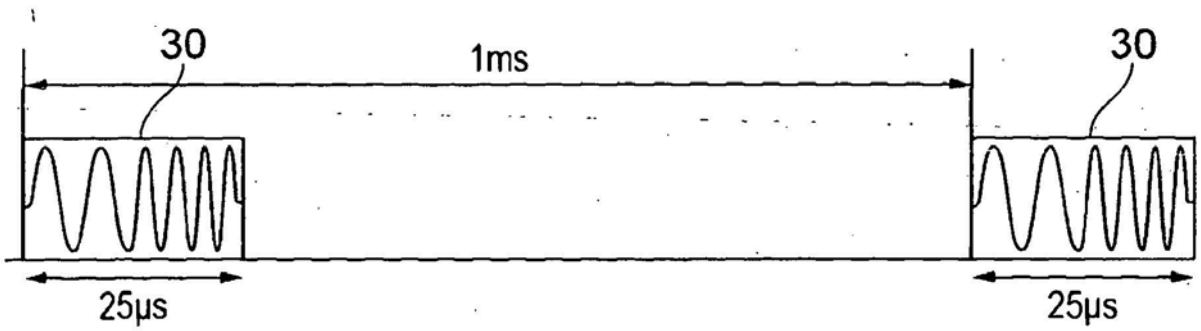


FIG. 2

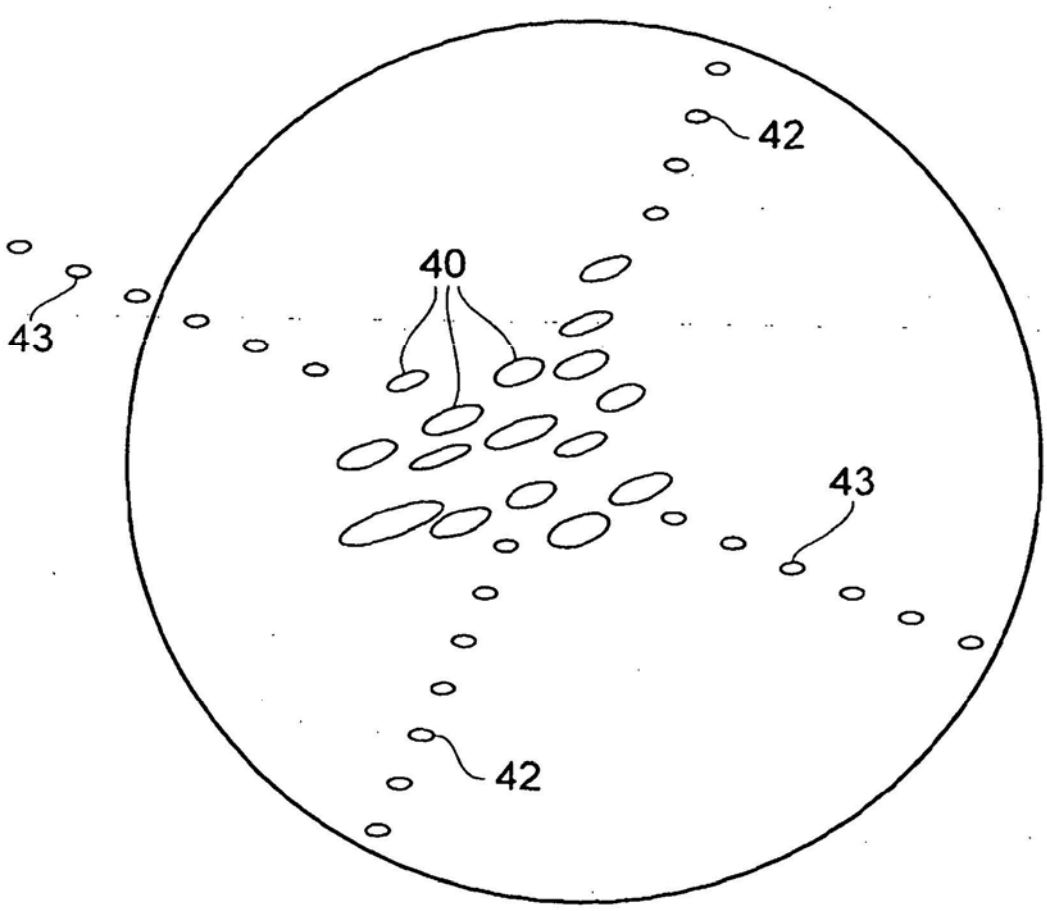
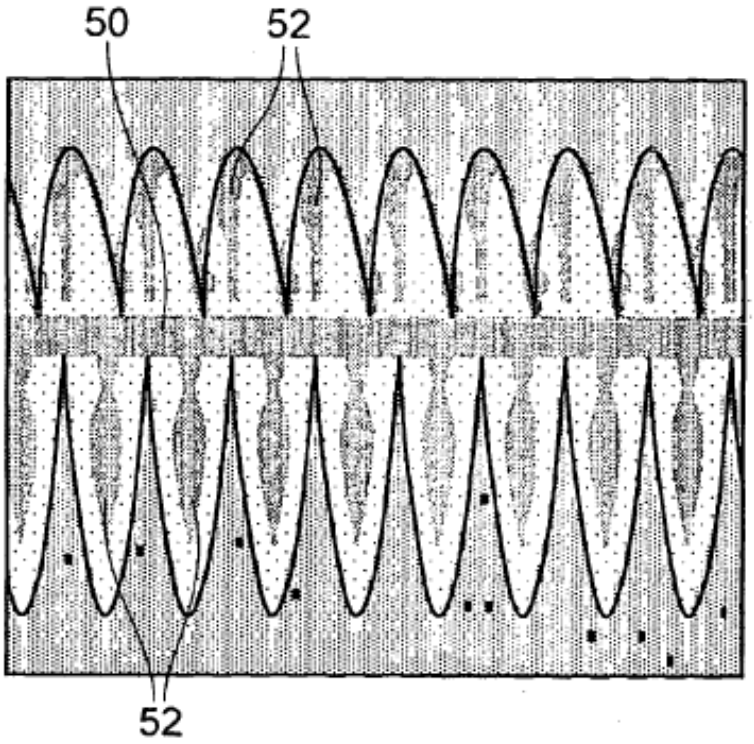


FIG. 3



Doppler versus tiempo durante 3 revoluciones

FIG. 4

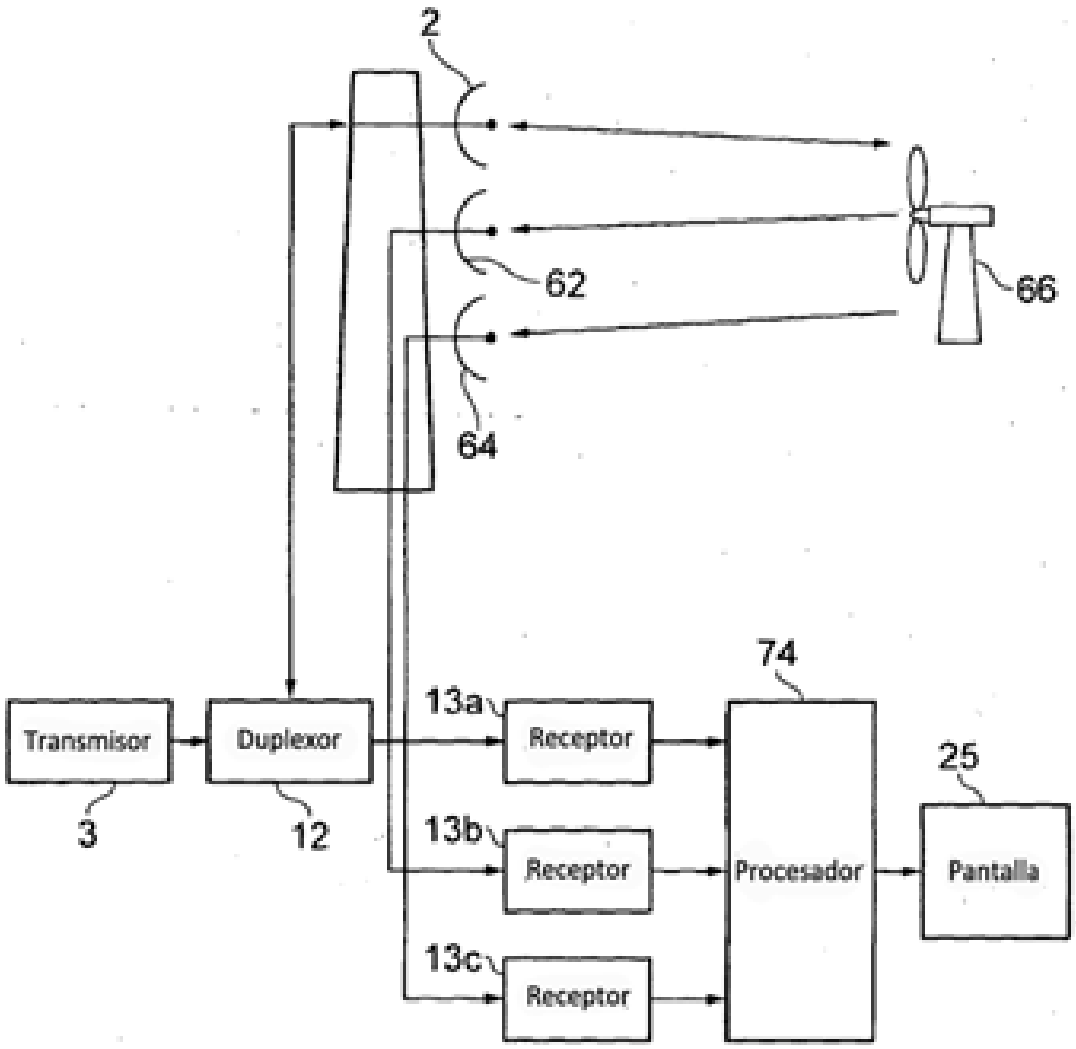

2
62
66
64
74
13a
Transmisor
Duplexor
Receptor
25
13b
Receptor
Procesador
Pantalla
3
12
13c
Receptor

FIG. 5

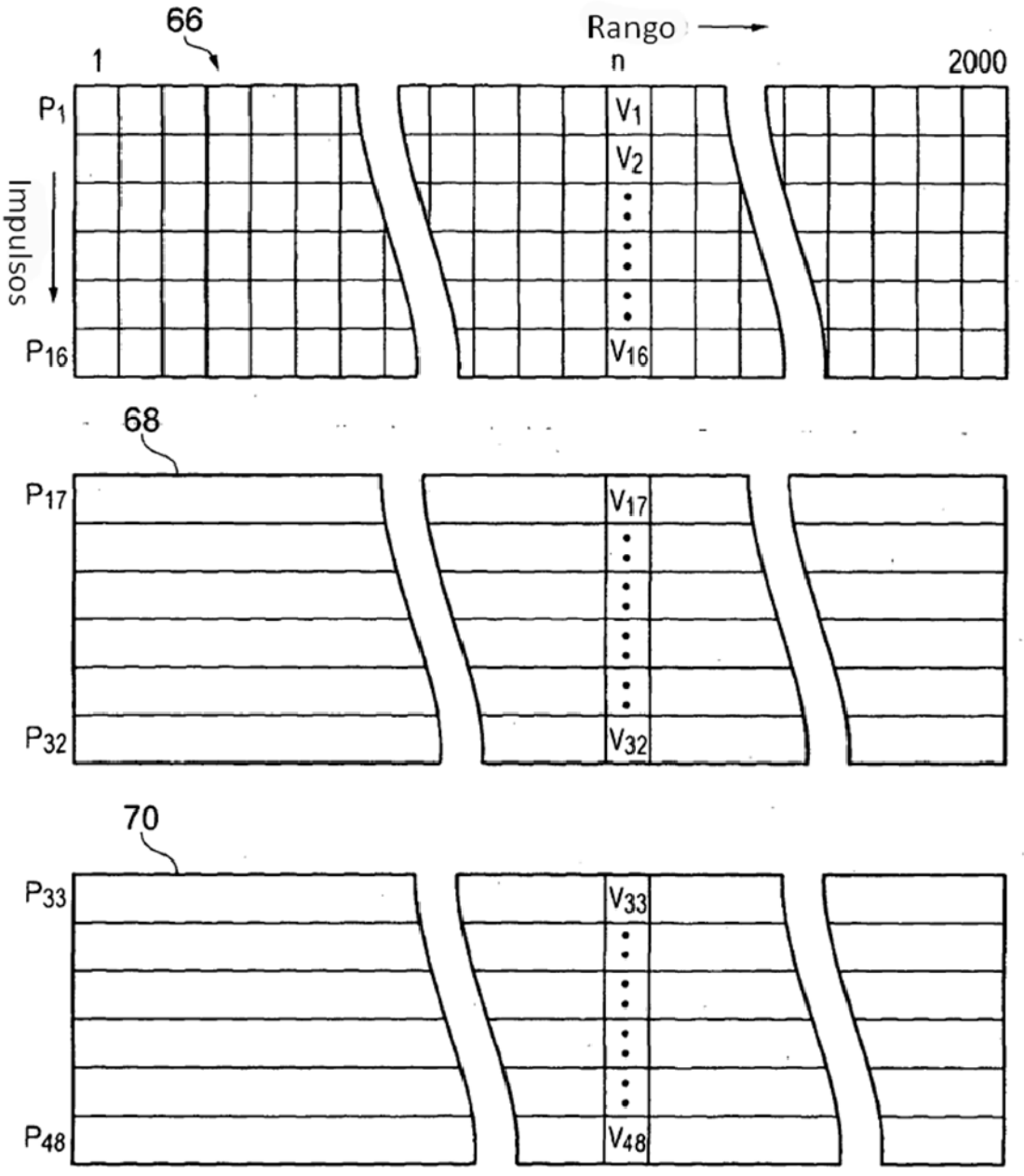

66
1
Rango
n
2000
P1
P16
Impulsos
V1
V2
V16
68
P17
P32
V17
V32
70
P33
P48
V33
V48

FIG. 6

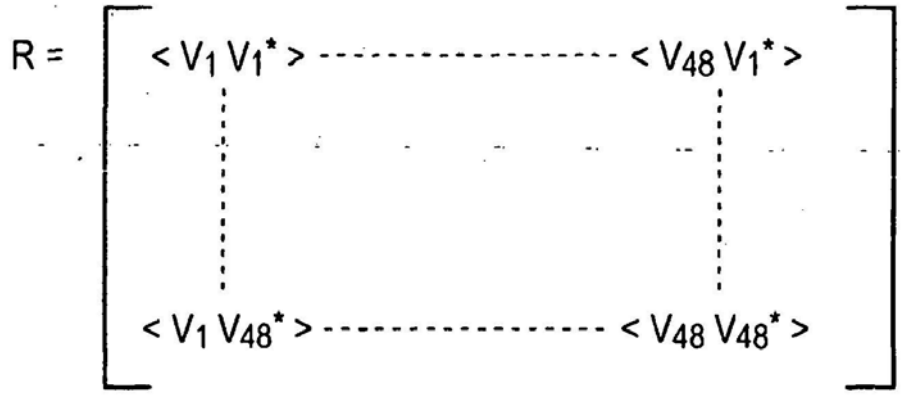


FIG. 7

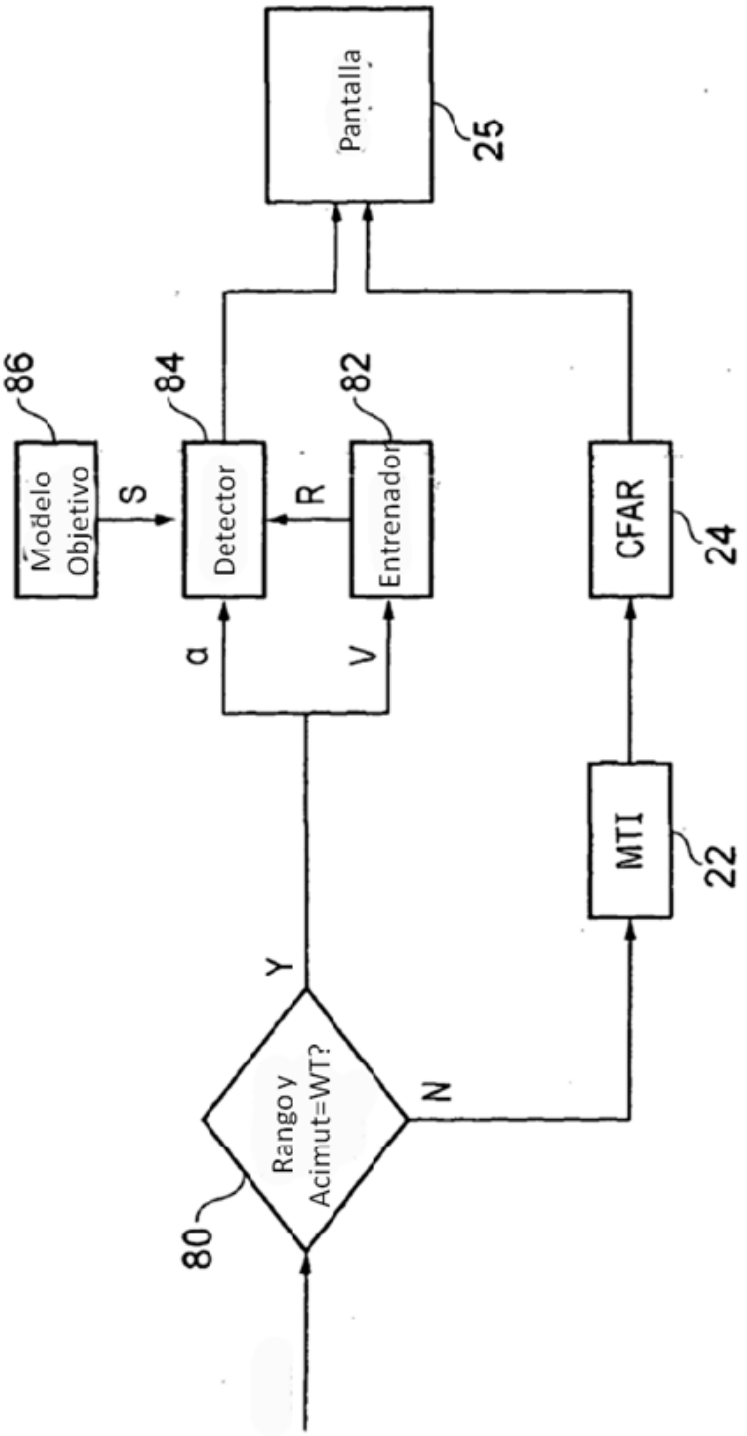

Pantalla
25
86
84
82
Modelo Objetivo
S
Detector
R
Entrenador
CFAR
24
α
V
MTI
22
Y
Rango y Acimut=WT?
N
80

FIG. 8