



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 365 703**

51 Int. Cl.:
G01S 7/292 (2006.01)
G01S 13/42 (2006.01)
G01S 13/72 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **03100775 .0**
96 Fecha de presentación : **25.03.2003**
97 Número de publicación de la solicitud: **1351069**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **08.10.2003**

54 Título: **Procedimiento de detección de objetos múltiples aplicado en particular a radares de vigilancia con formación de haces múltiples en elevación.**

30 Prioridad: **02.04.2002 NL 1020287**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
10.10.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
10.10.2011

73 Titular/es: **THALES NEDERLAND B.V.**
Zuidelijke Havenweg 40
P.O. Box 42
7550 GD Hengelo, NL

72 Inventor/es: **Driessen, Hans;**
Meijer, Wietze y
Zwaga, Jitse

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 365 703 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de detección de objetivos múltiples aplicado en particular a radares de vigilancia con formación de haces múltiples en elevación

5 La presente invención versa acerca de un procedimiento de radar para detectar objetivos. Puede aplicarse a radares de vigilancia, por ejemplo con multiformación de haces en elevación y, más generalmente, a todo tipo de radares.

En nuestro ejemplo, tal como se da en este documento, un radar de vigilancia consiste en un radar multihaz con una antena giratoria cuya misión es detectar objetivos a larga distancia. Convencionalmente, los seguimientos de objetivos se forman combinando trazados de objetivos extraídos de la señal de radar recibida en barridos separados usando un filtro de seguimiento y una lógica de inicio de seguimiento.

10 Después, la detección tradicional de objetivos implica establecer un valor umbral en tres etapas: establecer un valor umbral de la intensidad de la señal a nivel de eco, establecer un valor umbral después de la integración binaria a nivel de trazado y establecer un valor umbral después de la integración binaria a nivel de seguimiento. La detección de objetivos en un solo barrido de un sistema de radar de vigilancia se lleva a cabo por medio de la integración binaria de detecciones de objetivos, lo que se denomina ecos, en intervalos consecutivos coherentes de procesamiento de un barrido. Cada barrido de un radar de vigilancia consiste en un gran número de intervalos coherentes de procesamiento, o ráfagas, cada uno de los cuales cubre un intervalo de acimut. Dado que la abertura angular en acimut del haz de radar es típicamente varias veces el tamaño del intervalo de acimut cubierto por una ráfaga, la señal del objetivo estará presente en varias ráfagas consecutivas de un barrido, las N_b ráfagas sobre el objetivo. En el caso de un radar Doppler de impulsos de vigilancia, la señal recibida en una trama de impulsos Doppler se obtiene de cada ráfaga después de un muestreo apropiado del alcance y la aplicación de un banco de filtros Doppler. A cierto alcance y a cierta velocidad Doppler en esta trama se declara la detección de un eco si la señal recibida está por encima del umbral que garantiza una probabilidad predeterminada constante de falsas alarmas a nivel de eco.

25 Se declara una detección de un objetivo en un barrido, un trazado si, para el mismo alcance y la misma velocidad Doppler, hay N_h ecos en N_b ráfagas consecutivas. En el caso de que se reciba la señal usando una formación electrónica simultánea multihaz en elevación, también se requiere que los ecos se originen de la señal recibida en el mismo haz de elevación. Los parámetros N_h y N_b y el umbral a nivel de eco se escogen de tal manera que se garantice una cierta probabilidad de falsas alarmas a nivel de trazado.

30 A continuación, se usa un trazado del objetivo para iniciar un filtro de seguimiento. Se usa la predicción del filtro de seguimiento para barridos subsiguientes para identificar trazados de posibles objetivos que pueden estar asociados con el seguimiento. Después de N_s barridos (incluyendo el barrido que produjo el trazado inicial), se declara la detección confirmada del seguimiento del objetivo si hay N_p trazados de los posibles N_s asociados con el seguimiento. Los parámetros N_p y N_s y la probabilidad de falsas alarmas a nivel de trazado se escogen de tal manera que se garantice una cierta probabilidad de falsas alarmas a nivel de seguimiento.

35 Otra solución para detectar objetivos consiste en remplazar el modelo convencional de detección de seguimientos en tres etapas con el modelo de seguimiento previo a la detección de una sola etapa, denominado TBD, que implica únicamente el establecimiento de un valor umbral de intensidad de la señal a nivel de seguimiento. En este modelo de TBD, el objetivo es establecer un valor umbral de la señal integrada del objetivo presente a la elevación, el alcance y la velocidad Doppler del objetivo en las N_b ráfagas sobre el objetivo de los N_s barridos sobre los que integramos. Es bien conocido que demorando el establecimiento del umbral y, por ello, permitiendo que se acumule la señal del objetivo, puede lograrse una gran mejora en la probabilidad de detección con respecto a los modelos tradicionales de detección de seguimiento en múltiples etapas con igual probabilidad de falsas alarmas. El modelo de seguimiento previo a la detección se describe, por ejemplo, en Blackman, S.S. y Popoli, R «Design and Analysis of Modern Tracking Systems», Norwood, Massachusetts: Artech House, 1999.

45 Puede definirse el espacio tetradimensional de medición como dividido en células con alcance-acimut-elevación-velocidad Doppler, o células de radar. El tamaño de una célula de radar es igual en alcance y Doppler a la del colector de alcance-Doppler, al intervalo de una ráfaga en acimut y a la abertura angular en altura del haz en elevación. Los centros de las células de radar coinciden en alcance y en Doppler con los centros de los colectores de alcance-Doppler de la trama de alcance-Doppler, y en elevación con los centros de los haces en elevación. En el caso de un número impar de ráfagas sobre el objetivo N_b , los centros de las células de radar en acimut coinciden con los de los intervalos en acimut de las ráfagas. Sin embargo, en el caso de un número par de ráfagas sobre el objetivo, las células de radar están centradas en los bordes de los intervalos de acimut de las ráfagas. Esto permite definir que la señal medida en una célula de radar es la suma de las N_b mediciones de potencia de las N_b ráfagas más cercanas al acimut de las células de radar en el colector de alcance-Doppler y un haz en elevación correspondiente al alcance, Doppler y elevación de las células de radar. Por ello, puede proyectarse en las células de radar la señal integrada sobre las ráfagas sobre el objetivo.

Volviendo al tema del radar de TBD para vigilancia, el problema encontrado en la práctica es, en primer lugar, que cada célula de radar de un barrido podría ser el origen de un nuevo seguimiento que, después de procesar N_s

barridos, puede llevar a una detección de seguimiento. Dependiendo de los parámetros del radar de vigilancia, como la cobertura del alcance y el tamaño de la ventana de alcance y el número de ráfagas por barrido, el número de células de radar en un barrido y, por ende, el número de puntos potenciales de inicio puede alcanzar los 109. Partiendo de una célula de radar, el área tetradimensional a la que puede haberse movido el objetivo puede consistir perfectamente en varios cientos de células de radar en el siguiente barrido, número que aumenta exponencialmente con cada barrido en el periodo de integración. Así, junto al problema de la cantidad ingente de puntos potenciales de inicio en cada barrido, es también un problema de encontrar la señal de seguimiento en los siguientes barridos del periodo de integración.

Cuando se aplica a sensores electroópticos en los que el TBD tiene tramas bidimensionales de datos como entrada en una tasa de actualización relativamente elevada, el problema de encontrar la señal del objetivo en múltiples tramas puede ser todavía abordado valiéndose de técnicas de fuerza bruta. Partiendo de todos los píxeles de la primera trama del periodo de integración, estas técnicas simplemente integran las intensidades de los píxeles en las tramas siguientes para todas las trayectorias dinámicamente posible del objetivo. Debido a la gran tasa de actualizaciones, el tiempo de integración es relativamente corto, permitiendo que las trayectorias dinámicamente posibles del objetivo se restrinjan a trayectorias de velocidad constante. Dado que, en la mayoría de los casos, el número máximo de píxeles que puede moverse un objetivo durante el tiempo de integración es pequeño, el número de velocidades discretas que llevan a una suma única de intensidad de los píxeles será limitado, permitiendo una restricción adicional del número de trayectorias posibles que deben intentarse. Ejemplos de estas técnicas de fuerza bruta son la transformada de Hough (descrita en Smith, M. C. «Feature Space Transform for Multitarget Detection» Proc. IEEE Conf. On Decision and Control, Albuquerque, Nuevo México, diciembre de 1980, pp. 835-836), los bancos de filtros de velocidad (descritos en Stocker, A. D. y Jansen, P. «Algorithms and Architectures for Implementing Large Velocity Filter Bank» Proc. SPIE Conf. On Signal and Data Processing of Small Targets, 1991, pp. 140-155) y algoritmos de programación dinámica (descritos, por ejemplo, en Arnold J. et al «Efficient Target Tracking Using Dynamic Programming» IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems, vol. 29, n° 1, enero de 1993, pp. 44-56).

Sin embargo, tal como se ha mencionado con anterioridad, las técnicas de TBD aplicadas son técnicas de fuerza bruta que ensayan todas las trayectorias posibles del objetivo durante el tiempo de integración. Para los sensores electroópticos, esto es viable porque estos sensores son bidimensionales y tienen tasas de actualización elevadas.

En la bibliografía pueden encontrarse algunos casos en los que se han aplicado estas técnicas de fuerza bruta a los sistemas de radar, según se describe, por ejemplo, en Urkowitz, H. y Allen, M. R. «Long Term Noncoherent Integration Across Resolvable Sea Clutter Areas» Proc. National Radar Conf., 1989, pp. 67-71. Para llegar a demandas de procesamiento viables en la práctica usando técnicas de fuerza bruta, es necesario reducir el problema a dos dimensiones considerando únicamente trayectorias radiales del objetivo. Cuando la aplicación concierne a un radar de seguimiento o multifunción, la tasa de actualizaciones aumentada en comparación con la de un radar de vigilancia reduce el crecimiento del área potencial de objetivos durante el periodo de integración. Además, la cantidad de datos que debe procesarse se reduce mucho en la mayoría de los casos usando como entrada el procesamiento real del TBD, no los datos medidos no tratados, sino únicamente aquellos puntos de datos que han superado un umbral de predetección.

Cuando son aplicadas a los sistemas de radar, las técnicas de fuerza bruta se enfrentan a una cantidad mucho mayor en cada barrido y a una cantidad mucho mayor de trayectorias posibles de los objetivos durante el tiempo de integración. El requisito resultante de potencia de procesamiento no puede ser satisfecho.

Es un propósito de la presente invención en particular superar este problema de requisitos demasiado elevados de la potencia de procesamiento. Con este fin, un objeto de la invención es un procedimiento como se describe en la reivindicación 1.

Las principales ventajas de la presente invención son que no reduce el rendimiento de la detección en comparación con una técnica auténtica de seguimiento previo a la detección, que puede ser usada para aumentar el rendimiento de la detección para cualquier sistema sensor en el que las limitaciones de la potencia de procesamiento vuelvan inútiles en la práctica las arquitecturas de seguimiento por fuerza bruta previo a la detección y que es simple de implementar.

Otras características y ventajas de la invención aparecerán a partir de la siguiente descripción, realizada con referencia a los dibujos adjuntos, de los cuales:

- la Figura 1 muestra la probabilidad teórica de detección del TBD para un radar de vigilancia;
- la Figura 2 muestra la probabilidad teórica de detección del TBD para un radar de vigilancia con y sin preselección, y la probabilidad de detección a nivel de seguimiento usando un modelo convencional de detección;
- la Figura 3 muestra un diagrama de bloques del enfoque básico del algoritmo TBD basado en un filtrado recursivo;

- la Figura 4 muestra la probabilidad de detección del procesamiento propuesto de TBD según la invención y de un procesamiento idealizado convencional y de TBD para la aplicación de un radar Doppler de impulsos de vigilancia con formación de haces múltiples en elevación que detectan objetivos.

5 Según la invención, en una primera etapa se usa un mecanismo de preselección. Este mecanismo de preselección identifica únicamente células de radar en un barrido para el que podría merecer la pena iniciar un procesamiento de TBD. De modo que, tras una preselección, se inicia el algoritmo de TBD y el vídeo de radar no tratado es procesado en un número limitado de barridos hacia atrás y hacia delante. Así, partiendo de una preselección, se procesan los datos no tratados medidos y solo tendrá lugar un establecimiento de un valor umbral en la intensidad de la señal integrada a nivel de seguimiento, como se busca en un modelo auténtico de TBD.

10 La Figura 1 muestra una probabilidad teórica de detección del TBD para un radar de vigilancia en función de la relación señal-ruido (SNR). La probabilidad teórica de detección P_d del TBD para un radar de vigilancia ha sido trazada para un intervalo de barridos integrados $N_s = \{1, \dots, 8\}$. El número de ráfagas sobre el objetivo en cada barrido se fija, por ejemplo, a $N_b = 4$.

15 En la Figura 1, se usa en cada caso un umbral a nivel de umbral λ_t correspondiente a una falsa alarma al nivel de seguimiento de $P_{FA}^t = 10^{-10}$, como también resulta de los criterios típicos de iniciación del seguimiento convencional de 2 trazados de 2 barridos con una probabilidad de falsas alarmas a nivel de trazado de 10^{-5} .

20 Por la Figura 1, parece que el incremento en la probabilidad de detección disminuye con cada nuevo barrido añadido al intervalo de integración, viniendo claramente el mayor incremento de los primeros barridos añadidos. Teniendo en cuenta que un aumento en el periodo de integración también aumenta el tiempo de reacción, se ha restringido el número de barridos en el periodo de integración a $N_s = 4$ en los siguientes ejemplos numéricos.

25 El procedimiento según la invención se acerca al rendimiento teórico de la detección del algoritmo de TBD. La etapa de preselección permite reducir significativamente el número de células de radar que deben considerarse en cada barrido con una reducción mínima de rendimiento. Para aproximar el rendimiento teórico de detección del TBD para un radar de vigilancia, se consideran las estadísticas de la señal integrada del objetivo, por ejemplo la función de densidad de probabilidad, que produciría un procesamiento ideal de TBD. Suponiendo que la integración es de N_s barridos con N_b ráfagas sobre el objetivo en cada barrido, la sumE de integración para la que ha de establecerse un valor umbral es igual a una suma de $N_s N_b$ mediciones independientes x_i de potencia distribuida de Rayleigh:

$$SumE = \sum_{k=1}^{N_s} \left[\sum_{b=1}^{N_b(k)} x(k, b) \right] \quad (1)$$

30 Suponiendo además que las x_i están normalizadas con respecto al nivel del ruido de fondo distribuido de Rayleigh y que tienen una relación lineal señal-ruido, denominada SNR y denotada como ρ , entonces la función de densidad de probabilidad, denominada pdf y denotada $p_1(x)$ para todas las x_i es igual a:

$$p_1(x) = \frac{1}{1+\rho} \exp\left(-\frac{x}{1+\rho}\right) \quad (2)$$

Si se aplica un umbral igual a λ_h a la medición x de potencia, correspondiente a la detección de eco presentada anteriormente, la probabilidad de detección P_D^h está dada por:

$$P_D^h = \Gamma\left(\frac{\lambda_h}{1+\rho}, 1\right) \quad (3)$$

siendo Γ la función gamma incompleta definida como

$$\Gamma(\lambda, N) = \int_{\lambda}^{\infty} t^{N-1} \exp(-t) dt.$$

35 La pdf de las muestras de potencia $p_0(x)$ solo de ruido y la probabilidad de falsas alarmas P_{FA}^h para un umbral de λ_h se obtienen sustituyendo una SNR de $\rho=0$ en (2) y (3), luego $P_0(x) = \exp(-x)$ y $P_{FA}^h = \Gamma(\lambda_h, 1)$.

En el modelo TBD, se establece un valor umbral para la suma de integración sumE dada por (1) que lleva a una detección de seguimiento. Para la probabilidad teórica de detección y P_D^t y la probabilidad de falsas alarmas P_{FA}^t de

TBD cuando se aplica un umbral λ_t , simplemente hay que tener en cuenta que ahora se establece un valor umbral para una suma de $N_s N_b$ mediciones de potencia distribuidas según (2), en vez de para una sola:

$$P_D^t = \Gamma\left(\frac{\lambda_t}{1+\rho}, N_s N_b\right) \quad (4)$$

y

$$P_{FA}^t = \Gamma(\lambda_t, N_s N_b). \quad (5)$$

Según la invención, el modelo de preselección se usa para superar el problema de que para cada célula de radar de cada barrido deba darse inicio a un algoritmo de TBD costoso en cuanto al cálculo. En el modelo de preselección, una preselección inicia un algoritmo de TBD que procesa de forma recursiva $N_s - 1$ barridos hacia atrás y, subsiguientemente, $N_s - 1$ barridos hacia delante. Como tal, una preselección lleva a N_s periodos únicos de integración correlacionados: del primer periodo de integración, el barrido del que se originó la preselección es el último, y del último periodo de integración es el primer barrido. Además, yendo hacia atrás, procesar los barridos previos es necesario para llegar a una pérdida aceptable de detección a nivel de seguimiento debida a la preselección. Sin embargo, sí requiere que esté disponible, es decir, almacenado en memoria, el vídeo de radar de los últimos N_s barridos. Para calcular la probabilidad teórica de detección de TBD usando este modelo de preselección, se tiene en cuenta en las Ecuaciones (4) y (5) la restricción de que en al menos uno de los barridos, la suma de integración de los N_b barridos sobre el objetivo debe haber superado el umbral λ_p de preselección:

$$P_D = \sum_{n_s=1}^{N_s} \left[(-1)^{n_s+1} \binom{N_s}{n_s} \exp\left(-\frac{\lambda_p}{1+\rho} n_s\right) \sum_{n_b^1=1}^{N_b-1} \sum_{n_b^2=1}^{N_b-1} \dots \sum_{n_b^{n_s}=1}^{N_b-1} \left\{ \Gamma\left(\frac{\lambda_t}{1+\rho}, N_s N_b - n_s(N_b-1) + \sum_{i=1}^{n_s} n_b^i\right) \frac{\left(\frac{\lambda_p}{1+\rho}\right)^{n_s(N_b-1) - \sum_{i=1}^{n_s} n_b^i}}{\prod_{i=1}^{n_s} (N_b - 1 - n_b^i)} \right\} \right] \quad (6)$$

y

$$P_{FA} = \sum_{n_s=1}^{N_s} \left[(-1)^{n_s+1} \binom{N_s}{n_s} \exp(-\lambda_p n_s) \sum_{n_b^1=1}^{N_b-1} \sum_{n_b^2=1}^{N_b-1} \dots \sum_{n_b^{n_s}=1}^{N_b-1} \left\{ \Gamma\left(\lambda_t, N_s N_b - n_s(N_b-1) + \sum_{i=1}^{n_s} n_b^i\right) \frac{\lambda_p^{n_s(N_b-1) - \sum_{i=1}^{n_s} n_b^i}}{\prod_{i=1}^{n_s} (N_b - 1 - n_b^i)} \right\} \right] \quad (7)$$

En la Figura 2, se ha trazado la probabilidad teórica de detección de TBD en función de la SNR, con y sin preselección. La probabilidad de falsas alarmas a nivel de seguimiento vuelve a fijarse, por ejemplo, a $P_{FA}^t = 10^{-10}$, y el número N_s de barridos integrados es, por ejemplo, igual a 4. Se usa, por ejemplo, un umbral λ_p de preselección correspondiente a una probabilidad de falsas alarmas de $P_{FA}^p = 2,5 \cdot 10^{-4}$, logrando una reducción del 99,975% en el número de algoritmos TBD que deben iniciarse en cada barrido. Además, se traza y se representa mediante una curva 21 la probabilidad de detección para un modelo de detección convencional de seguimiento en tres etapas en cuatro barridos. En el modelo convencional de detección, se aplican, por ejemplo, un criterio de detección binaria de 3 de 4 barridos a nivel de seguimiento, un criterio de detección binaria de 3 de 4 barridos a nivel de trazado y un umbral λ_h a nivel de eco correspondiente a una probabilidad de falsas alarmas de $P_{FA}^h = 4,2266 \cdot 10^{-2}$. Como tal, la probabilidad de falsas alarmas a nivel de seguimiento para el modelo convencional de detección también es igual a 10^{-10} .

Por la Figura 2, también parece que la ganancia potencial en el rendimiento de detección cuando se usa el modelo TBD de detección en vez del modelo convencional de detección es significativa. La verdadera detección TBD es representada por medio de una curva 22. Con el algoritmo TBD se logra una probabilidad de detección de $P_D^t = 0,9$ con una SNR 6dB inferior a cuando se usa un modelo convencional de detección. Esto significa que el alcance de detección se extiende más del 40% usando un modelo TBD. Además, la Figura 2 muestra que, al usar el modelo propuesto de preselección correspondiente a una curva 23, el solicitante ha señalado que se experimenta una pérdida desdeñable en el rendimiento de detección.

En una etapa siguiente, según la invención, el algoritmo TBD que se inicia por medio de una preselección usa el alcance, el Doppler, el acimut y la elevación de las células de radar para iniciar un filtro recursivo de seguimiento. En cada barrido son examinadas las células de radar en las ventanas de validación de los filtros de seguimiento en busca de la presencia de objetivos en base a la predicción del filtro de seguimiento y a la SNR previamente medida, y se selecciona una célula de radar con la que actualizar el filtro de seguimiento. Gracias a la actualización del filtro de seguimiento, el área que debe ser investigada por el algoritmo TBD, la ventana de validación, se mantiene en un

mínimo. Sin actualizar, el área a la que puede haberse movido el objetivo crecería exponencialmente con cada barrido adicional del periodo de integración. Por último, se establece el valor umbral de la señal integrada sobre las células de radar seleccionadas.

5 Para lograr las probabilidades de detección presentadas previamente, es necesario integrar la señal del objetivo en múltiples barridos. En un enfoque de TBD basado en un filtrado recursivo, esto requiere la predicción de la posición del objetivo en el siguiente barrido usando las posiciones del objetivo en los barridos previos en un filtro de seguimiento, o únicamente la posición del objetivo indicada por el trazado de preselección. Pueden ser identificadas tres fuentes de errores que dificultan el proceso de predicción:

- 10 - errores de medición: asociados tanto con las posiciones del objetivo en el pasado, que se han propagado al filtro de seguimiento, como con los errores de medición asociados con la posición del objetivo que está a punto de ser detectado;
- maniobras del objetivo: durante el tiempo entre dos barridos, el tiempo de barrido, el objetivo puede iniciar una maniobra. Dado que el tiempo de barrido es del orden de segundos, una maniobra del objetivo puede hacer que la posición del objetivo se desvíe significativamente de la predicción;
- 15 - asociaciones indebidas: asociar al seguimiento ecos de accidentes geográficos, picos de ruido o una señal de un objetivo diferente hace que el resultado del filtro de seguimiento se desvíe de la verdadera trayectoria del objetivo.

20 Convencionalmente, se aborda la incertidumbre combinada causada por estas fuentes de error no solo considerando el punto exacto de la predicción de la asociación, sino también una región que lo rodea: la ventana de validación. Cuando se construye la ventana de validación se intenta conseguir, por una parte, que la posición verdadera del objetivo esté casi con certeza dentro de la misma. Por otra parte, se intenta mantener la ventana de validación lo más pequeña posible, para restringir el número de trazados que tienen que considerarse para su asociación con el seguimiento. Otra razón para restringir el tamaño de la ventana de validación es que un trazado alejado del punto de predicción es más probable que se haya originado en un objetivo diferente, en ecos de accidentes geográficos o en ruido.

Aunque los procesamientos convencionales usan la ventana de validación para seleccionar cuáles de los trazos se consideran para la asociación con el seguimiento, el procedimiento según la invención la usa en algoritmos TBD basados en el filtrado recursivo para seleccionar qué datos de un barrido se consideran para la asociación. Por ello, no se seleccionan únicamente datos que habrían llevado a un trazado, sino todos los datos dentro de la ventana de validación, tal como se busca en el auténtico procesamiento de TBD.

Otro enfoque consiste, por ejemplo, en establecer un valor umbral en la probabilidad integrada, en vez de en la intensidad de la señal integrada. En este caso, se usa la intensidad de la señal integrada junto con los datos de posición, por ejemplo, para calcular una probabilidad. Esta probabilidad, junto con la probabilidad de otros barridos, se usa para establecer un valor umbral a nivel de seguimiento. La probabilidad integrada de N_s barridos para los que ha de establecer un valor umbral que lleve a una detección de seguimiento es igual al producto de las probabilidades de los barridos separados. Por ejemplo, el seguimiento se borra cuando la probabilidad integrada de N_s barridos está por debajo del umbral para varios barridos consecutivos.

40 El diagrama de bloques de la Figura 3 resume el enfoque básico del algoritmo de TBD basado en el filtrado recursivo. Dado que se conoce la manera de construir la ventana de validación, en una primera etapa 31 se seleccionan, de cada barrido, los datos que tienen que ser considerados para la asociación. La siguiente etapa 32 asocia realmente, de entre los datos dentro de la ventana de validación, los datos que es más probable que se hayan originado en el objetivo del seguimiento. Es posible, por ejemplo, basar esto en la distancia al punto de predicción y en la intensidad observada de la señal usando cualquier información disponible en cuanto a la maniobrabilidad del objetivo y a la intensidad de la señal del objetivo. Un algoritmo 30 de filtro de seguimiento tiene como entrada el resultado del algoritmo 31, 32 de asociación. En una primera etapa 33, el algoritmo de filtro de seguimiento actualiza los atributos de seguimiento con los datos asociados. En particular, la expresión «atributos de seguimiento» representa los aspectos cinemáticos de un seguimiento, como la posición y la velocidad, y los aspectos energéticos, como la SNR y la suma de integración. En una etapa siguiente 34, el algoritmo predice atributos de seguimiento en el siguiente barrido a partir de los atributos actualizados de seguimiento. Los atributos predichos de seguimiento que resultan de esta última etapa 34 son también entradas de las etapas previas 31, 32, 33.

55 El diagrama de bloques de la Figura 3 representa la etapa de mantenimiento del seguimiento. Cuando se inicia un seguimiento, el procedimiento según la invención basa los atributos actualizados de seguimiento en los atributos del trazado de preselección. Acto seguido, se aplica el procedimiento de la Figura 3 a los barridos anteriores para ser procesados, remontándose en el tiempo, retrodiendo, en vez de prediciendo. Una vez que esos barridos ante sido procesados, está disponible el primer periodo de integración que debe someterse a ensayo para el inicio del seguimiento. A continuación, el procesamiento continúa hacia delante en el tiempo desde el barrido en el que se originó la preselección, y la señal integrada en periodos subsiguientes de integración es sometida al establecimiento

de un valor umbral. Si ninguno de los primeros N_s periodos de integración lleva a la detección, se detiene el inicio del seguimiento. Si no, se entra en la fase de mantenimiento del seguimiento. Se borra un seguimiento cuando la suma de integración está por debajo del umbral durante cierto número de barridos seguidos (este número puede ser un parámetro de diseño). Como se ha indicado anteriormente, se usa el resultado del filtrado de seguimiento, los atributos predichos del seguimiento, en la asociación de datos para construir la ventana de validación y seleccionar los datos que han de ser asociados del interior de la misma.

Un candidato lógico para hacer seguimiento de los atributos cinemáticos es, por ejemplo, el filtro de Kalman. Dado que es recursivo, proporciona características de estimación de error en las que puede basarse la asociación de datos, y es barato en términos de la carga de proceso. Además, en la bibliografía es posible encontrar diversos filtros de seguimiento basados en el filtro de Kalman, diseñados para abordar trazados múltiples y/o débiles, que pueden usarse para derivar de los mismos posibles filtros de seguimiento TBD, como se describe, por ejemplo, en Lerro, D. y Bar-Shalom, Y., "Automated Tracking with Target Amplitude Information" Proc. American Control Conference, San Diego, California, 1990, pp. 2875-2880 o en Zwaga, J. H. y Driessen, H. "An Efficient One-Scan-Back PDAF for Target Tracking in Clutter", Proc. SPIE Conf. On Signal and Data Processing of Small Targets, 2001, pp. 393-404.

La SNR del objetivo puede ser seguida de manera simple usando la media, posiblemente ponderada de los últimos barridos. Dependiendo de la tasa relativa del alcance del objetivo durante el periodo de promedio, hay que corregir un cambio de $1/r^4$ en la SNR con el alcance cambiante r . Para la duración del periodo de media que va a usarse, es necesario encontrar un compromiso entre la media de las fluctuaciones de la sección transversal de radar (RCS) (modeladas, por ejemplo, como una distribución de Rayleigh) y poder seguir los cambios temporales en la RCS, por ejemplo debidos a los cambios en el ángulo de aspecto. Promediar las fluctuaciones de la RCS habla de un largo periodo de promedios, mientras que poder seguir los cambios temporales en la RCS habla de un periodo breve de promedios.

Suponiendo que se dispone de una estimación de la SNR del objetivo, o, mejor, la amplitud \bar{A} no normalizada del objetivo para el siguiente barrido, se deriva una expresión de la razón de verosimilitud L_{ST} de que la suma de integración (de N_b ráfagas) asociada con una célula de radar se origine en un objetivo. La probabilidad p_{st} de que las amplitudes medidas A_{k+1}^i que contribuyen a la suma de integración de una célula de alcance-Doppler en el barrido $k+1$ se originen en un objetivo está dada por

$$p_{st} = \prod_{i=1}^{N_b} \frac{2A_{k+1}^i}{\bar{A}_{k,k,\square,k-(N_s-1)}^2} \exp \left[\frac{-(A_{k+1}^i)^2}{\bar{A}_{k,k,\square,k-(N_s-1)}^2} \right] \quad (8)$$

en la que $\bar{A}_{k,k,\square,k-(N_s-1)}$ se estima extrayendo la amplitud de la raíz media al cuadrado de los últimos N_s barridos, según se ha indicado.

La probabilidad p_{sn} de que las amplitudes medidas se originen en el ruido está dada por

$$p_{sn} = \prod_{i=1}^{N_b} \frac{A_{k+1}^i}{\sigma^2} \exp \left[\frac{-(A_{k+1}^i)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (9)$$

en la que $2\sigma^2$ es el nivel del ruido de fondo.

Así, la razón de verosimilitud L_{ST} , basada en la intensidad de la señal medida está dada por

$$L_{ST} = \frac{p_{st}}{p_{sn}} = \frac{\prod_{i=1}^{N_b} \frac{2A_{k+1}^i}{\bar{A}_{k,k,\square,k-(N_s-1)}^2} \exp \left[\frac{-(A_{k+1}^i)^2}{\bar{A}_{k,k,\square,k-(N_s-1)}^2} \right]}{\prod_{i=1}^{N_b} \frac{A_{k+1}^i}{\sigma^2} \exp \left[\frac{-(A_{k+1}^i)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (10)$$

que puede simplificarse a

$$L_{ST} = \left(\frac{2\sigma^2}{\bar{A}_{k|k, \square, k-(N_s-1)}^2} \right)^{N_b} \exp \left[1 - \left(\frac{2\sigma^2}{\bar{A}_{k|k, \square, k-(N_s-1)}^2} \right) \sum_{i=1}^{N_b} \frac{(A_{k+1}^i)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (11)$$

en la que la suma de $(A_{k+1}^i)^2 / (2\sigma^2)$ es la suma de integración de las N_b ráfagas asociadas con la célula de radar.

5 A continuación, suponiendo que el vector $s_{k+1|k}$ de estado del objetivo predicho con la covarianza asociada $P_{k+1|k}$ de error estén disponibles (como ocurre cuando se usa un filtro de Kalman para el filtrado de seguimiento), se deriva una expresión de la razón de verosimilitud L_{PT} de que el objetivo en seguimiento estará en una cierta célula de radar en el siguiente barrido. Las estadísticas residuales de la diferencia vectorial \tilde{z} entre una posición exacta en el dominio tetradimensional de la medición de radar y la predicción $s_{k+1|k}$ para el barrido $k+1$ están dadas por la pdf

$$f(\tilde{z}) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \tilde{z}^T (HP_{k+1|k}H^T)^{-1} \tilde{z}\right)}{\sqrt{|2\pi HP_{k+1|k}H^T|}} \quad (12)$$

10 en la que H es la matriz de observación, como en el filtrado de seguimiento estándar extendido de Kalman (véase, por ejemplo, Blackman, S. S. y Popoli, R. «Design and Analysis of Modern Tracking Systems», Norwood, Massachusetts: Artech House, 1999). Para una célula de radar en el barrido $k+1$ con el centro de la célula en

alcance, acimut, elevación y Doppler $\mathbf{z}_{célula, k+1} = \left[r_{célula, k+1} \quad b_{célula, k+1} \quad e_{célula, k+1} \quad d_{célula, k+1} \right]^T$ se puede

calcular la probabilidad p_{pt} de que el objetivo estará en ella integrado la pdf $f(\tilde{z})$ de (12) en el volumen tetradimensional de la célula de radar

$$p_{pt}(\mathbf{z}_{célula, k+1}) = \int_{\frac{r_{célula, k+1}-RBTamaño}{2}}^{\frac{r_{célula, k+1}+RBTamaño}{2}} \int_{\frac{v_{célula, k+1}^d - RBTamaño}{2}}^{\frac{v_{célula, k+1}^d + RBTamaño}{2}} \int_{\frac{b_{célula, k+1} - BITamaño}{2}}^{\frac{b_{célula, k+1} + BITamaño}{2}} \int_{\frac{e_{célula, k+1} - EBAnchura}{2}}^{\frac{e_{célula, k+1} + EBAnchura}{2}} f\left(\begin{bmatrix} r \\ b \\ e \\ v^d \end{bmatrix} - h(s_{k+1|k})\right) de db dv_d dr \quad (13)$$

15 en el que RBTamaño, DBTamaño, BITamaño y EBAnchura son el tamaño del colector de alcance, el tamaño del colector Doppler, el tamaño del intervalo de acimut de una ráfaga y la anchura del haz en elevación, respectivamente, y h es la función estándar (no lineal) de transformación del espacio de estado al dominio de medición del radar (véase, por ejemplo, Blackman, S. S. y Popoli, R., citado anteriormente). En el algoritmo de TBD propiamente dicho nos aproximamos a esta integral por medio de una suma de Riemann, en la que se descubre que, para una aplicación de radar, basta usar dos puntos por dimensión.

20 Para un seguimiento basado en mediciones de ruido, no hay preferencia alguna para ninguna de las $N_{RC, k+1}$ células de radar en la ventana de validación del barrido $k+1$. Por lo tanto, todas las células de radar tienen una probabilidad igual p_{pn} de $1/N_{RC, k+1}$.

Así, la razón de verosimilitud L_{PT} basada en la posición de la célula de radar está dada por

$$L_{PT} = \frac{p_{pt}}{p_{pn}} = \frac{p_{pt}}{1/N_{RC, k+1}} \quad (14)$$

estando dada p_{pt} por (13).

25 Combinando la razón de verosimilitud basada en la intensidad medida de la señal L_{ST} y la basada en la posición de las células de radar L_{PT} , se llega a la razón de verosimilitud L_{SPIT} de que una medición sea originada por un objetivo en base tanto a la intensidad de la señal medida como a la posición en la ventana de predicción

$$L_{SPIT} = L_{ST} L_{PT} = \left(\frac{2\sigma^2}{\bar{A}_{k|k, \square, k-(N_s-1)}^2} \right)^{N_b} \exp \left[\left(1 - \frac{2\sigma^2}{\bar{A}_{k|k, \square, k-(N_s-1)}^2} \right) \sum_{i=1}^{N_b} \frac{(A_{k+1}^i)^2}{2\sigma^2} \right] \frac{p_{pt}}{1/N_{RC, k+1}} \quad (15)$$

30 en la que, nuevamente, p_{pt} está dada por (13). En esta razón de verosimilitud precisamente basa el procedimiento según la invención la asociación de datos o la selección de células de radar en el enfoque básico al diseño de algoritmo de TBD basado en el filtrado recursivo.

El algoritmo de TBD basado en el filtrado recursivo (RFB) puede ser iniciado con el trazado de preselección \underline{P}_0 en el barrido $k = 0$. El trazado de preselección consiste en la posición de medición $\underline{z}_0^p = [r_{célula,0} \quad b_{célula,0} \quad e_{célula,0} \quad d_{célula,0}]^T$ (es decir, igual al centro de la célula de radar de la preselección) con la covarianza R de error de medición asociado igual al de la aproximación gaussiana de una densidad de probabilidad uniforme en el volumen de la célula de radar

$$R = \text{diag} \left(\left[\frac{RBTamaño^2}{12} \quad \frac{BITamaño^2}{12} \quad \frac{EBAnchura^2}{12} \quad \frac{DBTamaño^2}{12} \right] \right) = \text{diag} \left(\left[\sigma_{r,q}^2 \quad \sigma_{b,q}^2 \quad \sigma_{e,q}^2 \quad \sigma_{d,q}^2 \right] \right) \quad (16)$$

Junto con la posición de la medición, el trazado de preselección consiste en las amplitudes medidas $\underline{A}_0 = \{A_{0,1}^1, \dots, A_{0,N_b}^{N_b}\}$ en las N_b ráfagas consideradas para la célula de radar. Mediante la debida transformación al espacio de estado de la posición de la medición del trazado de preselección (teniendo en cuenta el componente desconocido de la velocidad tangencial) y promediando las amplitudes medidas, se obtienen los atributos iniciales de seguimiento $s_{0|0}$, $P_{0|0}$ y $\bar{A}_{0|0}$ para el barrido $k = 0$.

Ahora bien, aplicar el algoritmo RFB-TBD remontándose en el tiempo para procesar los $N_s - 1$ barridos anteriores es igual a aplicarlo avanzando en el tiempo, lo que se presentará más tarde, salvo en que se usa una matriz F_{-1} de transición de estado de un barrido hacia atrás en el tiempo en lugar de la matriz F estándar de transición de estado de un barrido hacia delante. El resultado del procesamiento de los barridos anteriores es que las $N_s - 1$ células de radar de los barridos anteriores que es más probable que contuvieran el objetivo han sido asociadas de forma recursiva con el seguimiento, con posiciones de medición \underline{z}_k^{ML} y amplitudes medidas \underline{A}_k , siendo $k = \{-1, \dots, -(N_s - 1)\}$. Además, están disponibles la suma de integración $\text{Sum}_{E_{0|0}, \dots, -(N_s - 1)}$ para el primer periodo de integración y la amplitud media $\bar{A}_{0|0, \dots, -(N_s - 1)}$ del objetivo.

Si la suma de integración para el primer periodo de integración está por encima del umbral, ya puede declararse la detección de un trazado de seguimiento en el barrido $k = 0$. Si no se superó el umbral o para entrar en la fase de mantenimiento del seguimiento hay que proseguir hacia delante desde el barrido $k = 0$. Sin embargo, antes de proseguir con el procesamiento de TBD hacia delante, tienen que actualizarse el vector $s_{0|0}$ de estado inicial y la covarianza asociada $P_{0|0}$ de error con las posiciones de medición asociadas \underline{z}_k^{ML} en los $N_s - 1$ barridos anteriores.

Si este inicio recursivo se realiza con la posición de medición \underline{z}_{-1}^{ML} en el primer barrido hacia atrás, entonces la actualización con la posición de medición $\underline{z}_{-n_s}^{ML}$ en el barrido n_s -ésimo hacia atrás está dada por

$$K = P_{0|0, -(n_s-1)} \left(HF_{-n_s} \right)^T \left[HF_{-n_s} P_{0|0, -(n_s-1)} \left(HF_{-n_s} \right)^T + R \right]^{-1} \quad (17)$$

$$s_{0|0, -n_s} = s_{0|0, -(n_s-1)} + \hat{p}_{-n_s}^t K \left[\underline{z}_{-n_s}^{ML} - h \left(s_{0|0, -(n_s-1)} \right) \right] \quad (18)$$

$$P_{0|0, -n_s} = \left(I - \hat{p}_{-n_s}^t K H F_{-n_s} \right) P_{0|0, -(n_s-1)} \quad (19)$$

Aquí, K es la ganancia de Kalman y F_{-n} la matriz de transición de estado en n barridos hacia atrás. En la parte del procesamiento de TBD hacia atrás y la actualización con las posiciones de medición resultantes, se modela la dinámica del objetivo como si no experimentase perturbaciones aleatorias; es decir, el ruido del proceso se pone a cero. Esto es conforme a los sistemas convencionales de seguimiento, en los que la inicialización del trazado se realiza únicamente para trayectorias perfectamente rectas del objetivo para reducir el número de inicializaciones por falsas alarmas.

Aunque estas ecuaciones se derivan, en principio, del filtro de seguimiento estándar extendido de Kalman, también se puede usar el denominado factor de reducción de la información (véase Li, X. R. and Bar-Shalom, Y. "Tracking in clutter with Nearest Neighbor Filter: Analysis and Performance" IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems, vol. 32, nº 3, julio de 1996, pp. 995-1009), la probabilidad $\hat{p}_{-n_s}^t$ de que la célula de radar asociada con la posición de medición $\underline{z}_{-n_s}^{ML}$ se origine en un objetivo. De esta manera, se toma en consideración la incertidumbre de una asociación indebida con una actualización ponderada con la probabilidad $\hat{p}_{-n_s}^t$. Esta probabilidad puede ser derivada de la razón de verosimilitud $L_{SP}^{-n_s}$ de la célula de radar asociada del n_s -ésimo barrido hacia atrás como

$\hat{p}_{-n_s}^t = L_{SP^T}^{-n_s} / (1 + L_{SP^T}^{-n_s})$ dado que la razón de verosimilitud está definida como la probabilidad de que la medición se origen en un objetivo dividida por la probabilidad de que contenga ruido. El factor de reducción de la información se aplicará de forma análoga en la parte de procesamiento de barrido del algoritmo RFB-TBD.

- 5 Para describir la parte de procesamiento de barrido hacia delante del algoritmo RFB-TBD, es posible empezar en el punto en el que se ha encontrado la célula de radar con la máxima razón de verosimilitud $L_{SP^T}^k$ en el barrido k . Entonces, la actualización del vector de estado predicho $s_{k|k-1}$ y de la covarianza asociada $P_{k|k-1}$ de error con la posición de medición z_k^{ML} usando la probabilidad $\hat{p}_k^t = L_{SP^T}^k / (1 + L_{SP^T}^k)$ como factor de reducción de la información está dada por

$$K = P_{k|k-1} H^T [HP_{k|k-1}H^T + R]^{-1} \quad (20)$$

$$s_{k|k} = s_{k|k-1} + \hat{p}_k^t K [z_k^{ML} - h(s_{k|k-1})] \quad (21)$$

$$P_{k|k} = (I - \hat{p}_k^t KH) P_{k|k-1} \quad (22)$$

- 10 en las que solo se indica ahora el número de barrido del último barrido del que se han usado datos para estimar un vector de estado o una covarianza de error; el primer barrido del que se han usado datos siempre es el barrido $k = -(N_s - 1)$. Para el cálculo de la amplitud media $\bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}$ de los últimos N_s barridos (incluyendo el barrido k), se toman en cuenta las amplitudes al cuadrado de cada célula de radar ponderadas con la probabilidad \hat{p}_k^t del objetivo y ponderadas por la probabilidad $\hat{p}_k^n = 1 - \hat{p}_k^t$ de ruido, correspondiendo una amplitud al cuadrado a una SNR lineal de cero

$$\bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)} = \sqrt{\frac{\sum_{l=0}^{N_s-1} \left(\hat{p}_{k-l}^t \sum_{i=1}^{N_b-1} (A_{k-l}^i)^2 + \hat{p}_{k-l}^n N_b 2\sigma^2 \right)}{N_s N_b}} \quad (23)$$

- 15 De forma análoga, la suma de integración se calcula como

$$\text{Sum}E_{k|k, \dots, k-(N_s-1)} = \sum_{l=0}^{N_s-1} \left(\hat{p}_{k-l}^t \sum_{i=1}^{N_b-1} \frac{(A_{k-l}^i)^2}{2\sigma^2} + \hat{p}_{k-l}^n N_b \right) \quad (24)$$

La suma de integración $\text{Sum}E_{k|k, \dots, k-(N_s-1)}$ es la intensidad de la señal integrada para la que se establece un valor umbral para declarar una detección de seguimiento de objetivo en el barrido k . La predicción de los atributos cinemáticos y energéticos para el barrido $k+1$ está dada por

$$s_{k+1|k} = F s_{k|k} \quad (25)$$

$$P_{k+1|k} = F P_{k|k} F^T + Q \quad (26)$$

$$\bar{A}_{k+1|k, \dots, k-(N_s-1)} = \bar{A}_{k|k, \dots, k-(N_s-1)} \quad (27)$$

en las que ahora se usa una covarianza Q de ruido de proceso para modelar la dinámica aleatoria del objetivo.

- 20 En el barrido $k+1$, el procedimiento según la invención usa en primer lugar el criterio de activación periódica $d^2 = \tilde{z}^T (HP_{k+1|k}H^T)^{-1} \tilde{z} \leq G$ para seleccionar las células de radar de la ventana de validación, en el que se escoge una ventana G que garantice una probabilidad fija de que el objetivo esté dentro de la ventana de validación resultante (véase, por ejemplo, Blackman y Popoli, citado previamente). Usando el vector de estado predicho $s_{k+1|k}$, la covarianza asociada $P_{k+1|k}$ de error y la amplitud estimada $\bar{A}_{k+1|k, \dots, k-(N_s-1)}$ del objetivo, se calcula según (15) la
- 25 razón de verosimilitud de que el objetivo esté en la célula de radar para todas las células de radar de la ventana de validación en base a la posición de las células de radar y a las amplitudes medidas proyectadas en la misma. La última etapa del algoritmo RFB-TBD es asociar con el seguimiento la célula de radar con la máxima razón de verosimilitud $L_{SP^T}^{k+1}$.

Es posible usar un filtro de partículas como filtro de seguimiento. Un filtro de partículas se describe en particular en Y. Boers y J. N. Driessen «Particle Filter Based Detection For Tracking» Proc. of the American Control Conference 25-27 de junio de 2001 Arlington, Virginia. En este caso, se introducen los datos no tratados en una ventana de validación para que el filtro de seguimiento calcule la densidad de probabilidad condicional del estado, dados los datos de la medición. Esta densidad de probabilidad se usa para estimar el estado del blanco y la probabilidad de la presencia del objetivo, usándose esta para establecer un valor umbral a nivel de seguimiento.

El algoritmo de TBD basado en un filtrado recursivo puede implementarse, por ejemplo, para la aplicación de un radar Doppler de impulsos de vigilancia con formación de haces múltiples en elevación cuya misión es detectar objetivos múltiples. Este algoritmo está bien dotado para procesar haces múltiples en elevación.

Los parámetros importantes de radar en este contexto son, en este ejemplo, que el tiempo de rotación del radar es de 5 segundos, el intervalo de acimut de una ráfaga es $\Delta\theta = 0,85^\circ$, la abertura angular en acimut del haz de radar es $\Delta\alpha = 2,2^\circ$, la abertura angular en elevación del haz de radar es $\Delta\beta = 5,0^\circ$, el tamaño del colector de alcance es $R_{\text{Tamaño}} = 80$ m, y el tamaño del colector Doppler es $\Delta v_{\text{Tamaño}} = 12$ m/s. A partir de la abertura angular en acimut del haz de radar y el intervalo de acimut de una ráfaga es posible derivar que en la abertura angular del haz de radar caben aproximadamente 2,6 intervalos de acimut. Para garantizar que, con independencia de la posición relativa de las ráfagas sobre el objetivo, se cubre un área igual en acimut a la abertura angular del haz de radar, se ha escogido que el número de ráfagas integradas en cada barrido sea $N_b = 4$.

Una RCS (sección transversal de radar) del objetivo puede modelarse como si tuviera una media de 5 m^2 y estuviera distribuida como una pdf χ^2 con dos grados de libertad e independiente de ráfaga en ráfaga. La posición inicial y la velocidad del objetivo del cazabombardero en el dominio de radar son:

Alcance aleatorio entre 150 km y 500 km.

Elevación igual al centro del haz en elevación (2.66°).

Acimut de 0° .

Velocidad radial de 300 m/s más una desviación aleatoria entre más y menos la mitad del colector Doppler $\Delta v_{\text{Tamaño}}$.

Velocidad tangencial de 0 m/s.

Se supone que el objetivo no acelera y que solo se mueve según las condiciones iniciales a lo largo de una trayectoria de velocidad constante.

Como filtro de seguimiento recursivo es posible usar un filtro que siga la posición tridimensional y la velocidad con un modelo blanco de aceleración constante por piezas (por ejemplo, como se describe en Blackman, S. S. y Popoli, R.) para la dinámica del objetivo en el que la desviación típica de las aceleraciones aleatorias está fijada a 1 m/s^2 , correspondiente a una aceleración máxima asumida de 0,2 g. La velocidad máxima asumida del objetivo que se tiene en cuenta en la inicialización del filtro de seguimiento es de 1000 m/s.

En este ejemplo, un ciclo consiste en 4 barridos para determinar la probabilidad de detección para el procedimiento de iniciación de RFB-TBD de $N_s - 1$ barridos hacia atrás y hacia delante tras una preselección. De forma análoga a la derivación de la probabilidad teórica de detección, esto se logra permitiendo que cada uno de los 4 barridos de un ciclo genere una preselección, después de lo cual se inicia el algoritmo RFB-TBD. El alcance inicial se elige de forma aleatoria para obtener la probabilidad de detección desde los 500 km, en los que sería casi 0 para el procesamiento de TBD, hasta los 150 km, en los que sería casi 1 para el procesamiento convencional. A menor escala, escoger al azar el intervalo inicial introduce una pérdida por horquillaje, puesto que el alcance del objetivo varía con respecto a la posición de los colectores de alcance. Por la misma razón, también se escoge al azar la velocidad radial inicial dentro de una horquilla igual al tamaño del colector Doppler en torno a una velocidad nominal.

Para comparar los resultados con el del procesamiento convencional y con el máximo rendimiento posible para un procesamiento de TBD, es posible procesar los mismos datos por medio de un procesamiento convencional idealizado y de un procesamiento TBD. El carácter "idealizado" de estos procesamientos está en que, de cada barrido, se introducen la intensidad de la señal recibida en las auténticas ráfagas sobre el objetivo en el alcance, Doppler y (naturalmente) elevación verdaderos en los modelos de detección convencional y por TBD. Se ha usado en cada caso una probabilidad de falsa alarma a nivel de seguimiento de $P_{FA} = 10^{-10}$. Los resultados se dan en particular en la Figura 4.

En la Figura 4 se traza la probabilidad de detección en función del alcance para el procesamiento RFB-TBD (curva 41) y los procesamientos convencional idealizado (curva 42) y TBD (curva 43). Estos resultados se basan en aproximadamente 28000 ciclos, resultando en una media de 400 ciclos por horquilla con un alcance de 5 km. La probabilidad de detección se ha determinado partiendo de los ciclos en cada horquilla con un alcance de 5 km.

Teniendo en cuenta la Figura 4, parece que, en realidad, el procesamiento RFB-TBD supera en rendimiento al procesamiento TBD idealizado. Este es el resultado de la capacidad del algoritmo RFB-TBD de aprovechar los picos de ruido en las células de radar próximas a la célula de radar exacta en la que se encuentra el objetivo. Como se ha hecho notar, por ejemplo, en Kirilin, R. L. y Marama, B. H. «The Effect of Noise-Only Tracks on the Performance of a Combined Detection and Tracking Algorithm», IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, nº 1, enero de 1997, pp. 329-333, hay que penalizar el hecho de que en un procesamiento TBD se han considerado múltiples trayectorias del objetivo, una de las cuales lleva a una detección de seguimiento del objetivo. El carácter restrictivo de la zona de búsqueda del algoritmo RFB-TBD sugiere que esta penalización será limitada. Cuando la posición exacta del objetivo está cerca del límite de dos células de radar, la potencia del objetivo es aproximadamente igual para ambas células de radar. Sin embargo, la realización del ruido difiere, resultando ocasionalmente en una amplitud más elevada en una célula de radar próxima a la célula de radar exacta en la que está el objetivo. Una conclusión es que, al menos en la fase de inicialización, el enfoque basado en el filtrado recursivo, es decir, restringir el área de búsqueda a la ventana de validación de un filtro de seguimiento y asociar únicamente la célula de radar que es más probable que contenga el objetivo, no reduce el rendimiento de la detección.

Con respecto al procesamiento convencional, como puede derivarse de los alcances de detección de 0,9, se logra una ganancia de 8,4 dB para una probabilidad de detección de 0,9, que es incluso más que la probabilidad teórica de detección. Esto puede explicarse por el hecho de que la potencia del objetivo no es igual para todas las ráfagas sobre el objetivo en un barrido, como se supone en la derivación teórica. Cuando el haz de radar barre el objetivo, el nivel de potencia del objetivo seguirá la forma del haz en acimut. Para un procesamiento de TBD, el resultado es que la intensidad de la señal integrada corresponde a un nivel medio de potencia inferior al del centro del haz. Sin embargo, para un procesamiento convencional, esto significa que para las dos ráfagas exteriores de las cuatro ráfagas sobre el objetivo, la probabilidad de detección del eco es mucho menor que para las dos ráfagas interiores. Esto tiene un efecto mucho más fuerte (negativo) sobre la probabilidad de detección para el criterio de 3 de 4 a nivel de trazado del modelo convencional de detección (y, así, sobre la probabilidad de detección de seguimiento) del que la potencia media disminuida sobre las ráfagas sobre el objetivo tiene en la probabilidad de detección de seguimiento del modelo de detección de TBD.

Para un radar de vigilancia puede usarse un enfoque para el TBD basado en el filtrado recursivo. Derivado directamente de este enfoque, se ha dado un algoritmo RFB-TBD inicial que usa, por ejemplo, un filtro de seguimiento de Kalman como filtro recursivo que se actualiza con la célula de radar que es más probable que contenga el objetivo en cada barrido. Junto a esto, se ha presentado un modelo de preselección en el que únicamente para las células de radar en un barrido que hayan superado un umbral de preselección se inicia un procesamiento de TBD que también procesa hacia atrás un número limitado de barridos. A través de un análisis del rendimiento teórico de la detección, el solicitante ha demostrado que, usando este modelo de preselección para iniciar un procesamiento de TBD, pueden reducirse significativamente las demandas de cálculo con una pérdida desdeñable en el rendimiento de la detección. Los resultados de la simulación llevada a cabo por el solicitante indican que el rendimiento teórico del TBD puede lograrse usando el procesamiento propuesto de RFB-TBD para la inicialización del seguimiento.

Más en general, la invención también puede usarse para aumentar el rendimiento de la detección para sistemas de sensores en los que las limitaciones de la potencia de procesamiento vuelven las arquitecturas de fuerza bruta de seguimiento previo a la detección inútiles en la práctica. Por último, la invención es simple de implementar.

La invención ha sido descrita para un radar de vigilancia; sin embargo, puede ser aplicada para todo tipo de radares, como, por ejemplo, los radares de búsqueda, seguimiento o multifunción.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para la detección de un objetivo con un radar, comprendiendo el radar medios de transmisión para generar ráfagas de impulsos de radar, consistiendo cada barrido de radar en un número ($N_b(k)$) de ráfagas, **caracterizado porque**, para cada barrido k:
- 5
- en una primera etapa, las células de radar son preseleccionadas por un proceso de detección;
 - en una segunda etapa, se inicia un proceso de seguimiento previo a la detección sobre las células de radar preseleccionadas usando un filtro de seguimiento para construir una ventana de validación asociada con el siguiente barrido k+1;
 - en una tercera etapa, los datos que estén dentro de la ventana de validación del barrido k+1 se usan para
- 10 actualizar el proceso de seguimiento previo a la detección y se usan para construir la ventana de validación asociada con el siguiente barrido k+2.
- siendo repetida la tercera etapa de barrido en barrido.

2. El procedimiento reivindicado en la reivindicación 1 **caracterizado porque** el proceso de seguimiento previo a la detección procesa datos no tratados dentro de la ventana de validación durante un número limitado de barridos remontándose en el tiempo y avanzando en el tiempo.
- 15
3. El procedimiento reivindicado en la reivindicación 2 **caracterizado porque** el proceso de seguimiento previo a la detección procesa los datos no tratados dentro de la ventana de validación durante $N_s - 1$ barridos remontándose en el tiempo y, subsiguientemente, $N_s - 1$ barridos avanzando en el tiempo.
- 20
4. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 2 o 3 **caracterizado porque** los datos no tratados que están dentro de la ventana de validación son transformados en un trazado virtual **caracterizado por** una posición en alcance, una velocidad Doppler, una posición en elevación, una posición en acimut y una intensidad de la señal integrada, usándose esta información de alcance, de velocidad Doppler, de elevación y de acimut como entrada para el filtro de seguimiento, usándose la intensidad de la señal integrada junto con las intensidades de señales integradas de otros barridos para establecer un valor umbral a nivel de seguimiento.
- 25
5. El procedimiento reivindicado en la reivindicación 4 **caracterizado porque** la intensidad de la señal integrada es una suma de integración sumE de N_s barridos con $N_b(k)$ ráfagas sobre el objetivo en cada barrido, siendo la suma de integración sumE cuyo valor umbral debe establecerse, lo que lleva a una detección de seguimiento, igual a una suma de mediciones independientes $x(k,b)$ de potencia distribuida de Rayleigh:

$$SumE = \sum_{k=1}^{N_s} \left[\sum_{b=1}^{N_b(k)} x(k,b) \right]$$

6. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 2 o 3 **caracterizado porque** los datos no tratados que están dentro de la ventana de validación son transformados en un trazado virtual **caracterizado por** una posición en alcance, una velocidad Doppler, una posición en elevación, una posición en acimut y una intensidad de la señal integrada, usándose esta información de alcance, de velocidad Doppler, de elevación y de acimut como entrada para el filtro de seguimiento, usándose la intensidad de la señal integrada junto con los datos de posición para calcular una probabilidad, usándose esta probabilidad, junto con la probabilidad de otros barridos para establecer un valor umbral a nivel de seguimiento.
- 30
7. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 2 o 3 **caracterizado porque** los datos no tratados que están dentro de la ventana de validación son introducidos en el filtro de seguimiento que calcula la densidad de probabilidad condicional del estado teniendo en cuenta los datos de la medición, usándose esta densidad de probabilidad para estimar el estado del objetivo y la probabilidad de la presencia del objetivo, usándose esta para establecer un valor umbral a nivel de seguimiento.
- 35
8. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 6 o 7 **caracterizado porque** la probabilidad integrada de N_s barridos para los que se ha de establecer un valor umbral, lo que lleva a una detección de seguimiento, es igual al producto de las probabilidades de los barridos separados.
- 40
9. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 1 a 8 **caracterizado porque** el filtro de seguimiento es un filtro recursivo.
- 45
10. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 1 a 6 **caracterizado porque** el filtro de seguimiento es un filtro de Kalman.
11. El procedimiento reivindicado en la reivindicación 9 **caracterizado porque** el filtro de seguimiento es un filtro de partículas.

12. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 1 a 11 **caracterizado porque** el filtro de seguimiento:
- selecciona (31) los datos de cada barrido que tienen que ser considerados para su asociación;
 - asocia (32) de los datos dentro de la ventana de validación los datos que es más probable que se han originado del objetivo en el seguimiento;
 - actualiza (33) los atributos de seguimiento con los datos asociados;
 - predice (34) los atributos de seguimiento en el barrido siguiente a partir de los atributos actualizados de seguimiento.
13. El procedimiento reivindicado en la reivindicación 12 **caracterizado porque** el resultado de los seguimientos de filtrado, los atributos predichos de seguimiento, se usa para construir la ventana de validación y esta ventana de validación se usa para seleccionar los datos no tratados que han de ser usados para la actualización del siguiente seguimiento.
14. El procedimiento reivindicado en las reivindicaciones 13 o 12 **caracterizado porque** los atributos de seguimiento comprenden atributos cinemáticos.
15. 15. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 12 a 14 **caracterizado porque** los atributos de seguimiento comprenden atributos energéticos.
16. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 12 a 15 **caracterizado porque**, cuando se inicia un seguimiento, los atributos actualizados de seguimiento son actualizados sobre los atributos de la célula preseleccionada.
20. 17. El procedimiento reivindicado en la reivindicación 5 y en una de las reivindicaciones 12 a 16 **caracterizado porque** se borra un seguimiento cuando la suma de integración sumE está por debajo del umbral para varios barridos en una serie de barridos consecutivos.
25. 18. El procedimiento reivindicado en la reivindicación 8 y en una de las reivindicaciones 12 a 16 **caracterizado porque** se borra un seguimiento cuando la probabilidad integrada de N_s barridos está por debajo del umbral para varios barridos consecutivos.
19. El procedimiento reivindicado en una de las reivindicaciones 12 a 18 **caracterizado porque** se aplica a un radar de vigilancia con formación de haces en elevación.

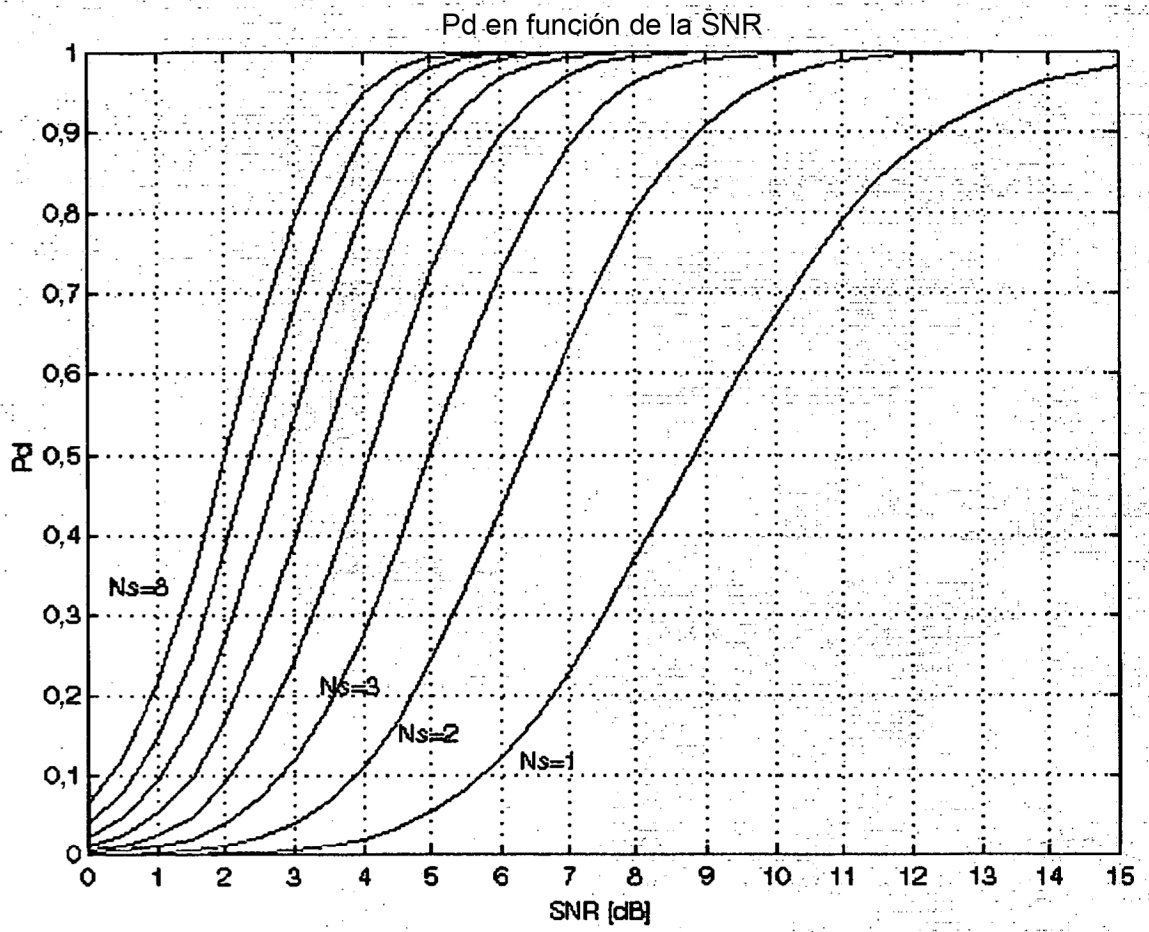


Figura 1

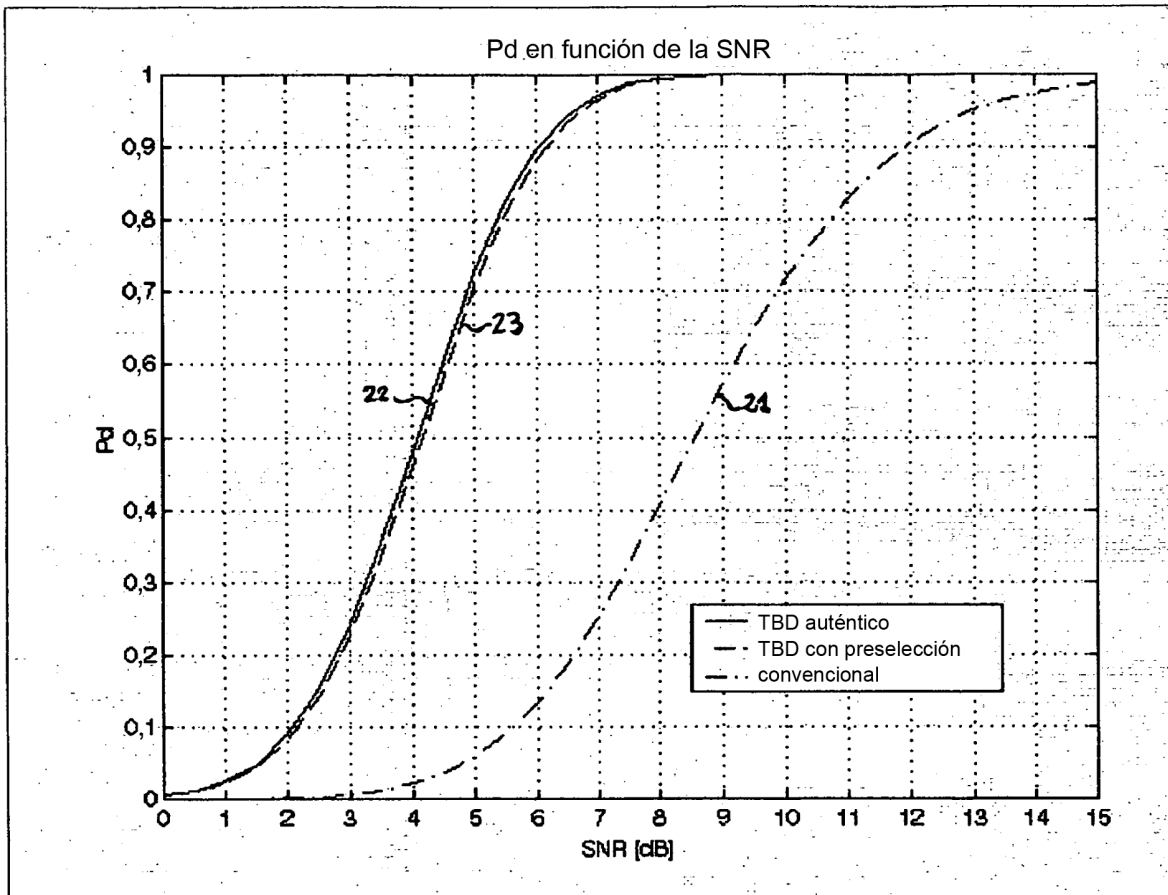


Figura 2

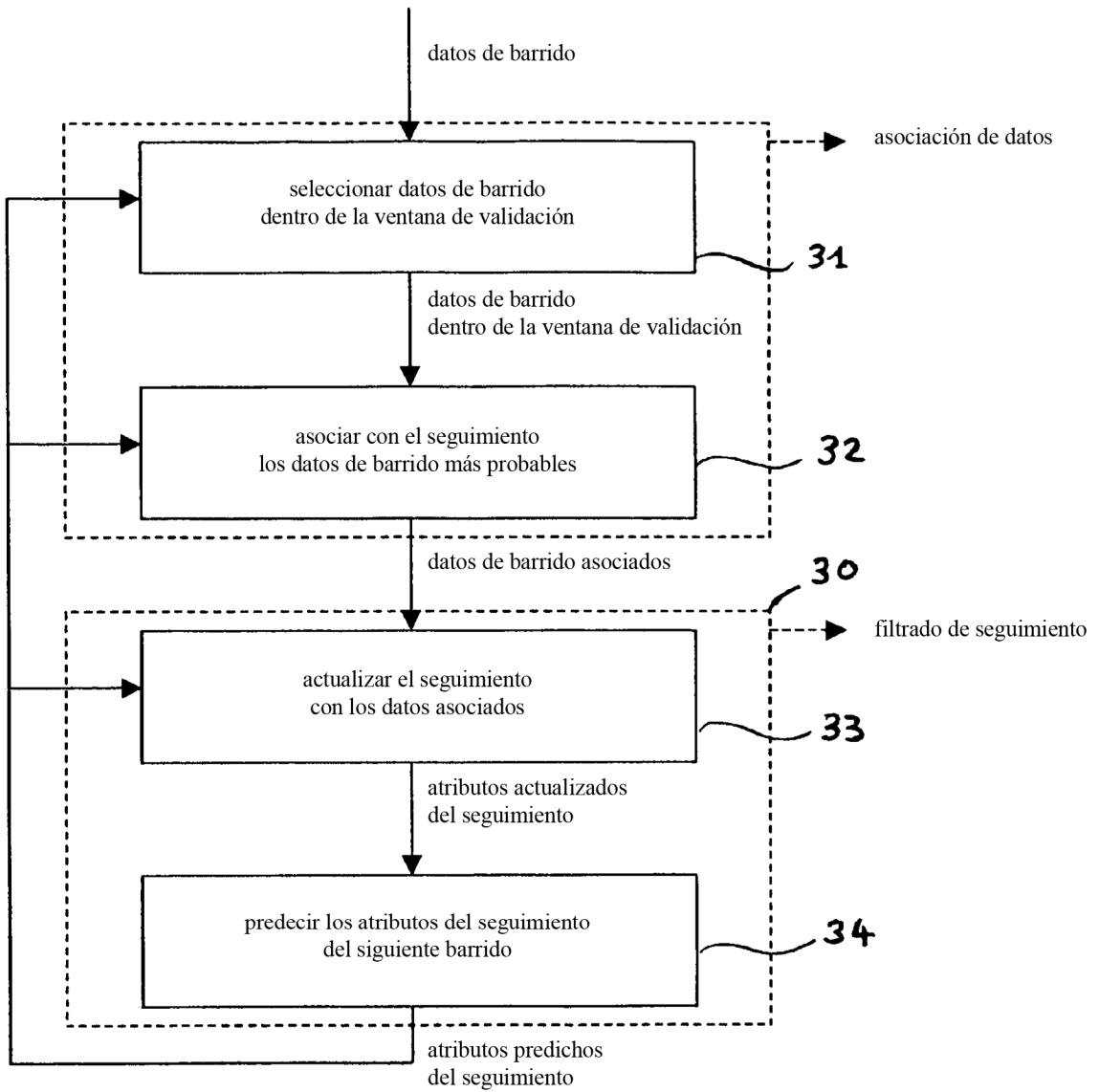


Figura 3

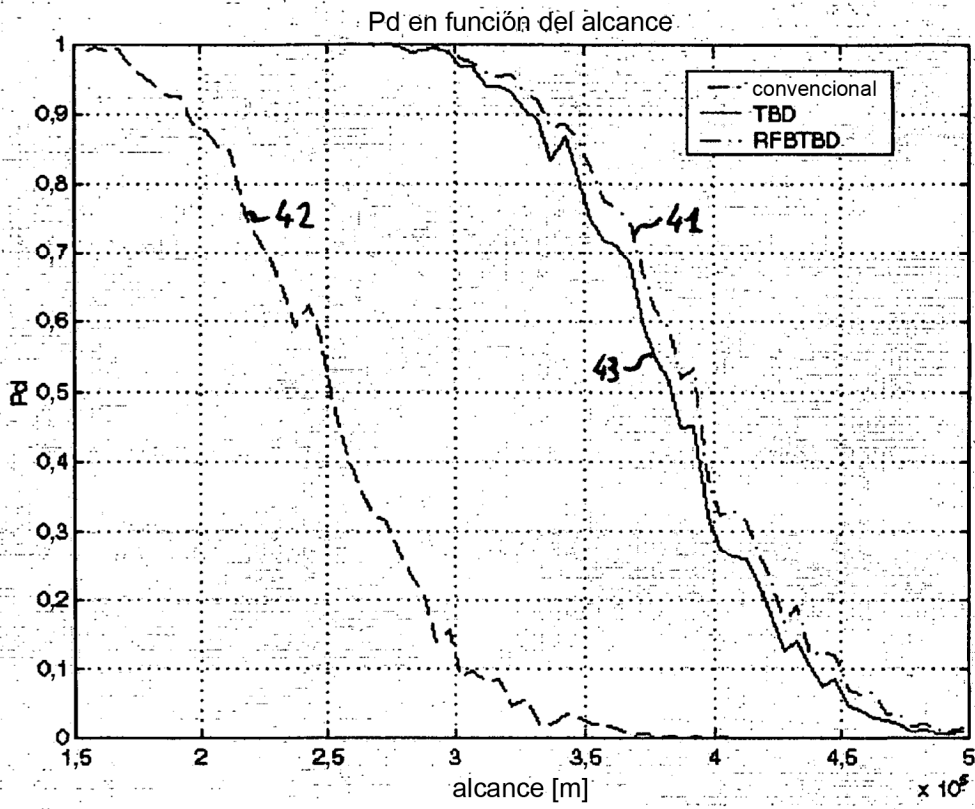


Figura 4