

IMPLEMENTACIÓN DE UN DETECTOR DE PROMEDIACIÓN DE CLUTTER (CA-CFAR) USANDO VHDL

José Raúl Machado Fernández¹, Roberto Carlos Sánchez Rams²

ISPJAE, calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda Marianao, La Habana, Cuba

josemf@electrica.cujae.edu.cu

RESUMEN

Los detectores de radar son los encargados de tomar la decisión sobre la presencia o no de un blanco, realizando la discriminación del *clutter* que es una señal interferente. Con el objetivo de crear una base comparativa para implementaciones más complejas, los autores construyen el esquema clásico de detección CA-CFAR usando VHDL. Este lenguaje permite colocar la arquitectura diseñada en una tarjeta FPGA para su posterior aplicación en ambientes operacionales, lográndose así una solución de costo reducido. El correcto funcionamiento del esquema se probó comparando simulaciones realizadas en Quartus II 9.1 bajo *clutterWeibull* con las ya disponibles de una arquitectura similar en MATLAB.

PALABRAS CLAVES: Detectores de Radar, CA-CFAR, VHDL, FPGA.

ABSTRACT

Radar detectors are responsible for making decisions on the presence or absence of a target, performing the discrimination of clutter, which is an interfering signal. With the goal of creating a comparative base for more complex implementations, the authors build the classical CA-CFAR detection scheme using VHDL. This language allows placing the designed architecture in an FPGA kit for later use in operational environments, achieving thus a low cost solution. The proper functioning of the implemented scheme is tested by comparing simulations in Quartus II 9.1 under Weibull clutter with data available from a similar architecture in MATLAB.

KEYWORDS: Radar Detectors, CA-CFAR, VHDL, FPGA.

INTRODUCCIÓN

La labor de los radares activos consiste en detectar blancos dentro del área de observación y estimar parámetros básicos como la posición y la velocidad (Madisetti 2010). La detección es una tarea relativamente fácil cuando los objetivos están ubicados en un medio no reflector, porque los ecos captados en el receptor son resultado estrictamente del rebote de las ondas electromagnéticas en la superficie del blanco. En dicho caso, los retornos pueden ser comparados con un umbral fijo, señalándose la existencia de blancos cuando las lecturas superen cierto umbral predeterminado [1].

No obstante, en ambientes de operación reales aparece una señal interferente llamada *clutter* que se superpone a la información del blanco y del ruido superando comúnmente la magnitud de este último [2]. El *clutter* es el resultado del rebote de la emisión del radar en el fondo donde está contenido el blanco. Dos de los fondos más comunes encontrados son el *clutter* terrestre y el *clutter* marino [3]. Generalmente el *clutter* marino presenta un nivel de interferencia superior al terrestre, por lo que los radares que operan en ambientes de mar tienen una seria limitación en su desempeño impuesta por los ecos indeseados [4].

La modelación matemática del *clutter* es la de una variable aleatoria continua cuya función de densidad de probabilidad (PDF, *ProbabilityDensityFunction*) contiene regularmente entre uno y tres parámetros [5-9]. Los modelos más populares son el Log-Normal [10, 11], el Weibull [12, 13] y el K [14, 15].

Cuando se diseñan detectores para blancos de radar embebidos en *clutter*, se suele utilizar el criterio de Neyman-Pearson, según el cual se busca garantizar una probabilidad de falsa alarma (Pf) y luego intentar mejorar al máximo la probabilidad de detección (Pd). Así, los mecanismos de discriminación de *clutter* más populares son denominados CFAR (*Constant False Alarm Rate*, Tasa de Falsa Alarma Constante) porque aseguran que la detección ocurra bajo la garantía de una falsa alarma constante [3].

En la literatura pueden encontrarse varios tipos de algoritmos CFAR basados en un mecanismo de ventana deslizante. Las variantes clásicas son el CA-CFAR (*Cell Averaging CFAR*, Promediación de *Clutter*), el GO-CFAR (*Greatest-Of CFAR*, Mayor-de), el SO-CFAR (*Smallest-Of CFAR*, Menor-de) y el OS-CFAR (*Ordered Statistics CFAR*, Estadística Ordenada). Dichos detectores han sido tratados por varios autores [16-18] y son frecuentemente usados como referencia en investigaciones actuales [19-22]. La mayoría de las variantes de CFAR tienen en común que permiten el ajuste de la probabilidad de falsa alarma mediante un factor de escala o ajuste (T), modificando en una relación inversa el nivel de probabilidad de detección [16, 17].

MOTIVACIÓN Y APORTES

El grupo de Radares del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE) está enfocado en el desarrollo de detectores de radar basados en algoritmos de estimación novedosos como son la detección con el empleo de momentos de alto orden [23, 24] y la aplicación de las redes neuronales artificiales a la búsqueda de los parámetros del *clutter* [25-27]. Dichos algoritmos han sido validados mediante comparaciones teóricas y semi-empíricas en simulaciones de alcance limitado, donde se sugiere que son más eficientes que las soluciones tradicionales. No obstante, no se dispone de comparaciones cabales que puedan probar irrefutablemente que un sistema operando con el mecanismo nuevo sea superior al tradicional en todos los sentidos.

Consecuentemente, los autores del presente trabajo se trazan como objetivo la implementación de un sistema clásico de detección CFAR por Promediación de Clutter (CA-CFAR). Una vez lista, se espera que la implementación permita realizar comparaciones fiables y bajo múltiples condiciones de operación entre el CA-CFAR y las propuestas de [23-27].

El esquema se logró usando VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) y se probó en la aplicación Quartus II 9.1, lo que permite colocarlo en una tarjeta FPGA (Field Programmable Gate Array) para su posterior aplicación en ambientes operacionales. Por tanto, el resultado permite crear una solución de detección de costo reducido que evita la compra de equipamiento. Adicionalmente, el correcto funcionamiento de la arquitectura construida fue probado usando como referencia una solución similar construida en Simulink de MATLAB 2011 [28].

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente sección está destinada a ofrecer al lector los métodos y pasos utilizados en la construcción de la arquitectura CA-CFAR, de modo que pueda ser reproducida la investigación. Para su mejor entendimiento, la sección se divide en dos epígrafes. En el primero se describe el modelo de clutter Weibull usado para probar la arquitectura implementada, y en el segundo se presentan los bloques elaborados por los autores en VHDL para la conformación del esquema CA-CFAR implementable en un FPGA Cyclone II, disponible en la Universidad Tecnológica de la Habana (UTH-CUJAE).

GENERACIÓN DE CLUTTER WEIBULL Y AMBIENTE MATE-CFAR

La generación del clutter Weibull permitió probar el funcionamiento del esquema implementado en VHDL con un modelo popular de clutter, lo que crea un entorno de prueba más parecido al esperado en operación real que si se empleara una distribución clásica Gaussiana. El modelo Weibull empleado sigue la siguiente PDF:

$$f(x|\alpha, \beta) = \frac{\beta x^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}} \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta} \right]$$

Donde β es el parámetro de forma y α el de escala de la distribución. Para obtener muestras Weibull se emplea el método de inversión detallado en (Gato Martínez 2014) cuya expresión es:

$$F^{-1}(u) = \alpha [-\ln(1-u)]^{\frac{1}{\beta}}, \quad 0 < u < 1$$

Donde u es una variable uniformemente distribuida entre 0 y 1. Es importante señalar que en adición al uso del modelo Weibull para el clutter, se empleó el Swerling V [2] para los blancos. El modelo Swerling V es muy sencillo y representa blancos no fluctuantes de amplitud constante.

BLOQUES ELABORADOS USANDO VHDL

El CA-CFAR opera bajo el principio de ventana deslizante, según el cual se desplaza el mecanismo detector por toda la zona de cobertura. Así, se evalúa la existencia de un blanco mediante la comparación del nivel encontrado en la celda central o de prueba (Y) con el promedio hallado en las celdas vecinas o de referencia (X). Las celdas de guarda son removidas del cálculo del promedio para evitar que el blanco se desparrame en su vecindad [29]. Adviértase que en la figura 1, N representa la cantidad total de celdas y M la cantidad de celdas en la mitad de la ventana; por tanto $M = N/2$.

En correspondencia con la estructura descrita, el CA-CFAR diseñado usando VHDL contiene siete entradas y una salida, según se aprecia en la figura 2. La primera entrada está concebida para recibir los datos y la segunda para la elección del factor de escala o ajuste (T). Este factor es un multiplicador que se aplica luego de hallar el promedio de las celdas de referencia. El resultado de esta operación se usa como umbral para determinar si existe un blanco o no en la celda de prueba. Valores típicos del factor de escala están entre 1.5 y 8.

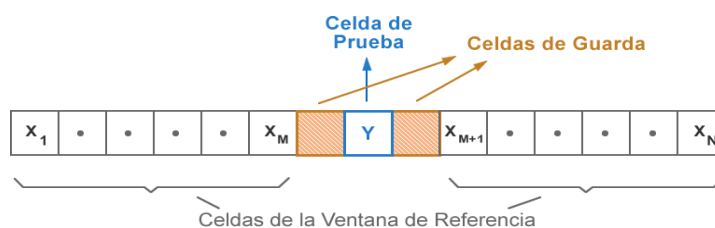


Figura 1. Estructura del Esquema CA-CFAR.

La tercera entrada representa la cantidad de celdas (N) que se elige entre los valores de 8, 16, 32 y 64; mientras que la cuarta es la cantidad de celdas de guarda, típicamente entre 0 y 3. Las primeras cuatro entradas descritas hasta aquí son requerimientos del funcionamiento propio del esquema. En cambio, las restantes surgen como necesidades particulares de la implementación en VHDL.

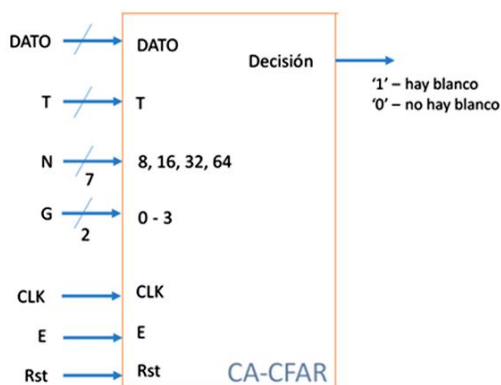


Figura 2. Diagrama de entradas y salidas del esquema CA-CFAR logrado usando VHDL.

La quinta entrada es el reloj (CLK, Clock) y corresponde al ciclo de muestreo que se establezca según la velocidad de procesamiento deseada para las muestras. La sexta entrada complementaria (E, Enable) advierte cuando en el puerto uno (DATO) hay una señal estable que puede ser leída. Por último, la entrada de Reinicio (Rst, Reset) inicializa el sistema y pone a nivel bajo todos los registros para un nuevo ciclo de uso.

Por su parte, la salida de decisión resulta de la operación básica de comparación entre el resultado del promedio de las celdas vecinas multiplicado por el factor de ajuste y el valor de la celda de prueba. Si el valor de la celda de prueba es superior, la salida indica un 1 señalando la existencia de un blanco.

Con respecto a la composición interna del diagrama de la figura 2, el diseño de la arquitectura CA-CFAR en VHDL fue acometida en forma de bloques para simplificar el procedimiento. La figura 3 presenta los cuatro bloques internos que componen la solución: el Almacenador de Muestras, el Promedio del CA-CFAR, el Factor de Escala y la Decisión. Los bloques tienen un comportamiento secuencial y la entrada de Rst es común para todos, aunque no esté indicada en el diagrama interno.

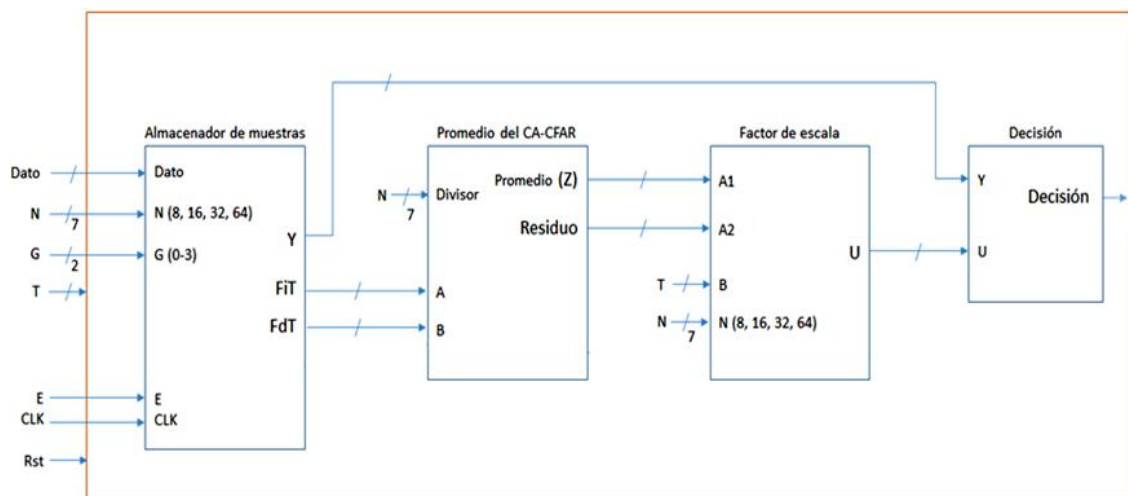


Figura 3. Bloques Internos de la arquitectura CA-CFAR lograda usando VHDL.

El Almacenador de Muestras, primer bloque a la izquierda, es el encargado de guardar las muestras ofrecidas en cada período del reloj (más precisamente, el sistema funciona con los flancos de subida). Las señales FiT y FdT son las sumas de la partes inferior y superior de la ventana, respectivamente. Ellas se pasan como dato al siguiente bloque que también recibe el número de celdas como datos de entrada. Nótese que en la figura 3 se muestra que el puerto N es de siete bits y el G de dos.

El bloque Promedio del CA-CFAR ejecuta la división de los datos recibidos a través de A y B por el valor N y pasa al siguiente bloque el promedio obtenido junto al residuo propio de la operación. A continuación, el Factor de Escala utiliza el promedio para calcular el umbral empleando el factor de ajuste (T). Finalmente, la decisión final es tomada en el bloque Decisión comparando la celda central (Y) con el umbral estimado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez explicado el procedimiento seguido para la construcción del esquema CA-CFAR usando VHDL, la presente sección presenta evidencia del funcionamiento del sistema basándose en simulaciones realizadas en Quartus II 9.1, con clutterWeibull de $\alpha = \beta = 2$ y blancos Swerling V. La figura 4 muestra el comienzo de la operación del CA-CFAR implementado. Las señales graficadas son el reloj (CLK), el reinicio (Rst), el multiplicador (T100), el Dato, la Decisión tomada por el detector sobre la presencia del blanco, el valor en la celda de prueba (Ym) y el umbral estimado (Um). La escala de tiempo se encuentra en la parte superior de la gráfica.

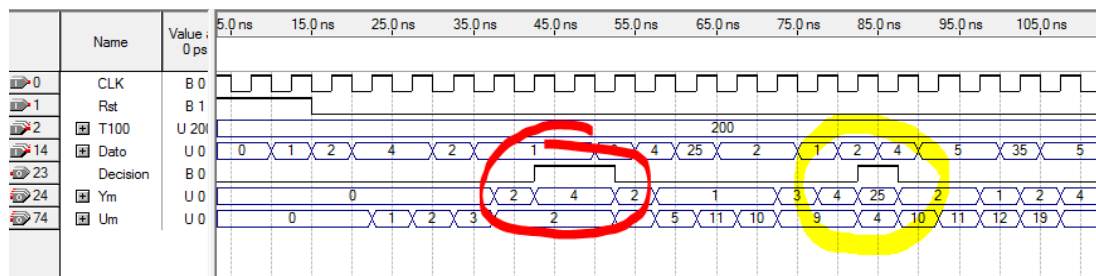


Figura 4. Falso Positivo al Comienzo de una Simulación.

Con un círculo rojo y otro amarillo se denotan los dos momentos clave en la simulación graficada en la figura 4. El círculo rojo representa una falsa alarma y el amarillo una detección correcta. Mientras que el segundo indica que el sistema funciona bien, el primero señala la existencia de un blanco que en realidad no existe. Las falsas alarmas pueden ocurrir en un CA-CFAR de forma aislada aun cuando la relación Señal a Ruido (SNR, Signal to Noise Ratio) es favorable [16]. Ellas representan una muestra de la imperfección del sistema causada por la cantidad finita de muestras tomadas para calcular el promedio y la imposibilidad de aumentar la potencia de transmisión a un valor demasiado elevado.

Sin embargo, la falsa alarma mostrada en la figura 4 es resultado de una característica propia de la implementación y no de la concepción del funcionamiento CA-CFAR. Siempre que el sistema arranca es necesario esperar que la ventana se llene de valores antes de hacer efectiva la detección. Por tanto deben omitirse al inicio tantas Decisiones como celdas (N) existan en la ventana de exploración.

Una vez el sistema sale de su arranque inicial, los parámetros N y T son los que tienen una mayor influencia en el resultado de la decisión. Si se aumenta el número de celdas (N) la estimación del promedio se vuelve más precisa y consecuentemente disminuye el número de falsas alarmas. No obstante, la ganancia es muy pequeña para tamaños por encima de 64 celdas, por lo que rara vez se usan ventanas superiores [16].

La influencia del parámetro T se muestra en la figura 5 que se compone de cinco gráficas. La inferior representa la secuencia de blancos y clutter generada, donde la SNR fue de cinco. El resto son resultado de las decisiones tomadas por el sistema para varios factores de ajuste (T).

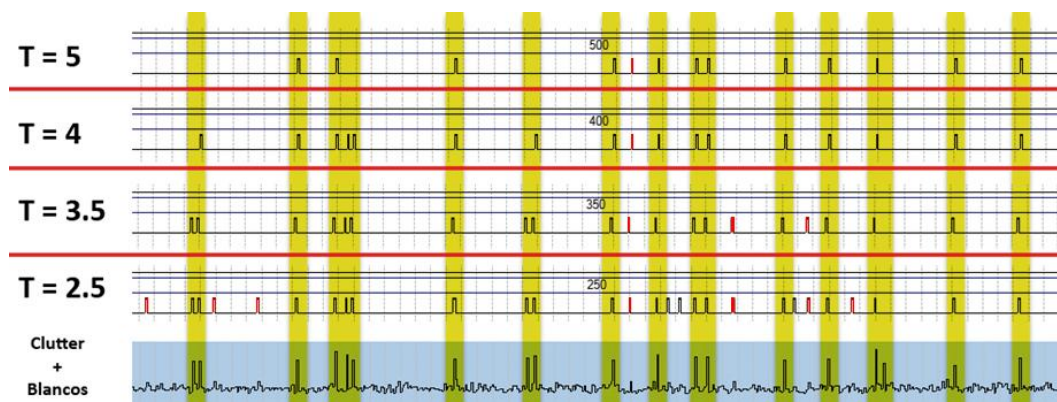


Figura 5. Influencia del Parámetro T en la Operación del CA-CFAR.

Puede notarse que la operación con $T = 2.5$ provoca siete falsas alarmas (señaladas en rojo); mientras que para $T = 3.5$ aparecen tres, para $T = 4$ una y para $T = 5$ una también. Si solo se tienen en cuenta las falsas alarmas, podría ser aceptado afirmar que las variantes $T = 4$ y $T = 5$ son igual de efectivas. Sin embargo, debe notarse que para $T = 5$ se pierden cuatro blancos que en realidad si existen (el primero, segundo, quinto y sexto), por uno para $T = 4$. Consiguientemente, en el ejemplo mostrado puede concluirse que el esquema de $T = 4$ funciona mejor que el resto.

El ejemplo de la figura 5 ilustra perfectamente el efecto de la variación de T en una solución CA-CFAR. Si el factor de ajuste es demasiado bajo, ocurren demasiadas falsas alarmas porque el producto del promedio de las celdas vecinas con T es demasiado bajo, y se verá superado frecuentemente por las muestras de clutter con amplitud ligeramente mayor que la media. En caso contrario, o sea si el factor de ajuste se elige demasiado alto, aunque no ocurrirán muchas falsas alarmas se perderán blancos que existen en realidad. Esto ocurre porque el producto del promedio de las celdas vecinas con T es demasiado alto, y no podrá ser sobrepasado por blancos de baja magnitud. En definitiva, la elección del valor más eficiente de T depende de N y de la hipótesis asumida para el clutter. En [28, 30] se aborda esta cuestión más en detalle.

VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La herramienta MATE-CFAR fue elegida para la validación de los resultados. Esta aplicación fue diseñada en [28] usando Simulink de MATLAB 2011 y tiene como objetivo la evaluación apriorística de los procesadores CFAR y el cálculo, mediante simulaciones de Monte Carlo, de probabilidades de detección y de falsa alarma. Su principal ventaja es que, a través de 12 parámetros modificables, permite el ajuste de la relación blanco a clutter y de los parámetros internos de los detectores.

El método de validación consistió en comparar los resultados de las simulaciones efectuadas usando el CA-CFAR de VHDL con aquellos obtenidos realizando la misma operación en el ambiente de pruebas MATE-CFAR. El mismo conjunto de datos fue pasado a ambas arquitecturas y se comprobó que los

valores obtenidos a la salida eran idénticos. La figura 6 muestra un ejemplo de lo anterior, ilustrando un subconjunto representativo de los datos evaluados.

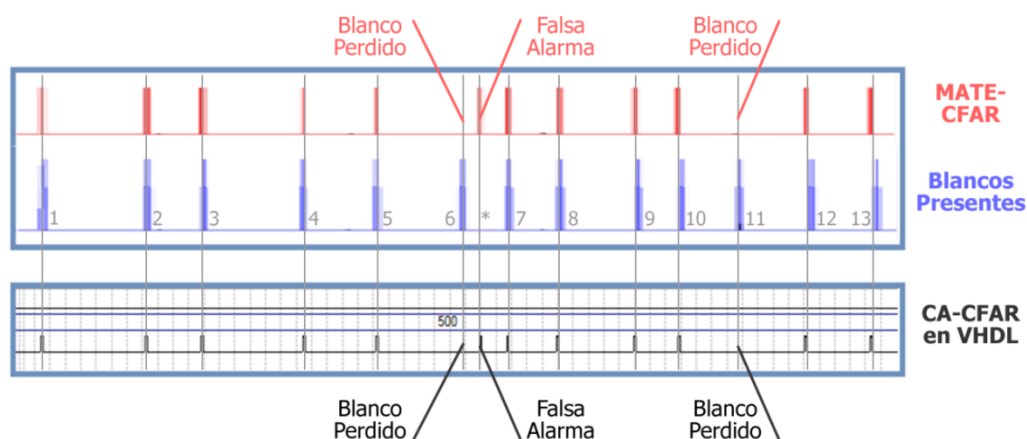


Figura 6. Comparación de los Resultados del CA-CFAR en VHDL y el MATE-CFAR.

En la figura 6 puede observarse que el CA-CFAR en VHDL y el MATE-CFAR tienen una respuesta idéntica ante los 13 blancos del intervalo de simulación mostrado. En total se cometen tres errores en las decisiones tomadas. La secuencia es como sigue. Los cinco primeros blancos son detectados correctamente antes de que el sexto sea omitido (blanco perdido). Luego ocurre una falsa alarma antes del séptimo blanco que es detectado correctamente, al igual que el octavo, noveno y décimo. Finalmente, el blanco número 11 es omitido (blanco perdido) y tanto el 12 como el 13 son correctamente procesados.

CONCLUSIONES

Se construyó un esquema CA-CFAR usando VHDL para su posterior uso en sistemas de radar. La arquitectura creada logra una solución de costo reducido que puede usarse para mejorar los detectores de radar cubanos usando tarjetas FPGA. El funcionamiento del esquema se comprobó usando muestras Weibull y blancos Swerling V y verificando los resultados con aquellos obtenidos con una variante previamente construida en Simulink de MATLAB 2011. Adicionalmente, la solución concebida constituye una importante referencia para implementaciones posteriores más complejas que pueden incluir la corrección adaptativa de varios elementos del esquema y la construcción de detectores que son variantes mejoradas del CA-CFAR.

REFERENCIAS

1. Kouemou, G., *Radar Technology*. 2009: I-Tech.
2. Richards, M.A., J.A. Scheer, and W.A. Holm, *Principles of Modern Radar Vol I Basic Principles*. 2010: Scitech Publishing.
3. Skolnik, M.I., *Radar Handbook*. 3er ed. 2008: McGraw-Hill.
4. Watts, S., *Radar Detection Prediction en K-distributed Sea Clutter and Thermal Noise*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987. **23**(1): p. 40-45.
5. Weiping, N., et al., *Statistical Analysis of High Resolution TerraSAR-X Images for Ground Targets Detection*, in *2013 Seventh International Conference on Image and Graphics*. 2013.
6. Ollila, E., et al., *Compound-Gaussian Clutter Modeling with an Inverse Gaussian texture distribution*. IEEE Transactions on Signal Processing Letter, 2012. **19**(12): p. 876-879.
7. Cai, L., et al., *Some Analysis of Fuzzy CAGO/SO CFAR Detector in Non-Gaussian Background*, en *IEEE 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*. 2010. p. 1-4.
8. Cai, L., et al., *Performace Analysis of Distributed Fuzzy CA-CFAR Detector in Pearson Distributed Clutter*, en *Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. 2009. p. 491-495.
9. Ishii, S., S. Sayama, and K. Mizutani, *Effect of Changes in Sea-Surface State on Statistical Characteristics of Sea Clutter with X-band Radar*. Wireless Engineering and Technology, 2011. **2**(3): p. 175-183.
10. Farina, A., A. Russo, and R. Studer, *Coherent Radar Detection in Log-Normal Clutter*. IEE Proceedings on Communications, Radar and Signal Processing, 1986. **133**(1): p. 39-54.
11. Ward, K., R. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter. Scattering, the K distribution and Radar Performance*. 2nd ed. 2013, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology.
12. Chan, H.C., *Analysis of the North Truro Sea Clutter Data (N. DREO 1051)* 1990, Defense Research Establishment Ottawa (Ontario). p. 50.
13. Chen, Z., et al. *The Analysis of Sea Clutter Statistics Characteristics Based on the Observed Sea Clutter of Ku-Band Radar*. en *IEEE Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*. 2013.
14. Raghavan, R.S., *A Method for Estimating Parameters of K-Distributed Clutter*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991. **27**(2): p. 238-246.
15. Sayama, S. and S. Ishii, *Suppression of Log-Normal Distributed Weather Clutter Observed by an S-Band Radar*. Wireless Engineering and Technology 2013. **4** (3): p. 125-133.
16. Rohling, H., *Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983. **AES-19**(4).
17. Farina, A. and F.A. Studer, *A Review of CFAR Detection Techniques in Radar Systems*. Microwave Journal, 1986. **29**(1): p. 115-118.

18. Weingberg, G.V., *Estimation of False Alarm Probabilities in Cell Averaging Constant False Alarm Rate Detectors via Monte Carlo Methods*. 2004, Salisbury, Australia: Tech report ADA429631, DSTO Systems Sciences Laboratory.
19. Takahashi, S., *A CFAR Circuit of Detecting Spatially Correlated Target for Automotive UWB Radars*. Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University, 2010.
20. Caso, G. and L. De Nardis, *Cooperative Spectrum Sensing based on Majority decision under CFAR and CDR constraints*, en *Workshop on Cognitive Radio Medium Access Control and Network Solutions*. 2013: IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. p. 51 – 55.
21. de Figueiredo, F.A.P., *LTE Random Access Detection Based on a CA-CFAR Strategy*. Convergent Networks Department, Research and Development Center Campinas, SP - Brazil, 2013.
22. Qin, Y. and H. Gong, *A New CFAR Detector based on Automatic Censoring Cell Averaging and Cell Averaging*. TELKOMNIKA, 2013. **11**(6): p. 3298 - 3303.
23. Bacallao Vidal, J.C., *Un modelo Teórico de la Técnica DRACEC. Metodología del Proceso de Adaptación al Fondo*. 2003, Tesis Doctoral, Instituto Técnico Militar "José Martí": La Habana, Cuba.
24. Guillén Soriano, C., *Determinación de la Frontera de Decisión y Evaluación de la Calidad de la Detección en el Método DRACEC para dos Momentos de la Amplitud*, Departamento de Telecomunicaciones y Telemática, Facultad de Ingeniería Eléctrica. 2013, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE).
25. Machado Fernández, J.R. and A. Bueno González, *Clasificación del Clutter Marino utilizando Redes Neuronales Artificiales*, Grupo de Radares, Departamento de Telecomunicaciones y Telemática. 2012, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE): Habana, Cuba.
26. Machado Fernández, J.R., B. García Delgado, and A. Machado Gil, *Reconocimientos de Parámetros de la Distribución K Asociados a Mediciones de Clutter Marino usando Redes Neuronales Artificiales*, en *VIII Congreso Internacional de Telemática y Telecomunicaciones, Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura '14*. 2014: La Habana, Cuba.
27. Machado Fernández, J.R., *Empleo de las Redes Neuronales Artificiales en la Estimación de los Parámetros del Clutter Marino Distribuido Weibull*, en *VIII Congreso Internacional de Telemática y Telecomunicaciones, Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura '14*. 2014: La Habana, Cuba.
28. Machado Fernández, J.R. and J.C. Bacallao Vidal, *MATE-CFAR: Ambiente de Pruebas para Detectores CFAR en MATLAB*. Telem@tica, 2014. **13**(3): p. 86-98.
29. Ward, K., R. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter Scattering, the K Distribution and Radar Performance*. 2nd ed. 2013, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology.
30. Machado Fernández, J.R., *Estimación de la Relación entre el Clutter Marino Distribuido Log-Normal y el factor de Escala CA-CFAR para varias Probabilidades de Falsa Alarma*, en *Brigadas Técnicas Juveniles 14 (Ponencia Relevante)*. 2014: La Habana, Cuba.