

REVISIÓN DE LOS DETECTORES CFAR DE VENTANA DESLIZANTE.

José Raúl Machado Fernández¹

josemf@electronica.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba

RESUMEN

Los detectores o procesadores CFAR de ventana deslizante son el mecanismo más comúnmente aplicado para ejecutar la detección de blancos de radar embebidos en *clutter*. La presente revisión aborda las variantes CFAR más relevantes que han sido presentadas para solucionar las limitaciones del clásico procesador de promediación (CA-CFAR). Si bien las soluciones propuestas para mejorar el desempeño frente a heterogeneidades son numerosas, no han sido ejecutadas comparaciones fiables que permitan seleccionar las mejores variantes, dado que la mayoría de los estudios sólo hacen competir a un número reducido de detectores aplicando métodos específicos de comparación. Precisamente, la revisión realizada contribuye a resolver este problema, pues describe los procesadores candidatos y los métodos de comparación más importantes que permitirán arribar a conclusiones definitivas. Conjuntamente, se devela un problema poco abordado de la detección CFAR: el mantenimiento de la probabilidad de falsa alarma frente a *clutter* de estadística variable. Además, se señala la necesidad de la creación de una librería informática para la simulación del desempeño de detectores CFAR frente a distintos escenarios de *clutter*.

PALABRAS CLAVES: detectores CFAR, procesadores CFAR, probabilidad de falsa alarma, procesador de promediación, CA-CFAR

ABSTRACT

Sliding window CFAR detectors (or CFAR processors) are the more widely applied mechanism for performing the detection of targets surrounded by clutter. This survey deals with the more relevant CFAR alternatives that have been presented for solving the limitations of the classical Cell Averaging processor (CA-CFAR). Although a variety of solutions are available for improving the performance against non-homogeneities, no reliable comparisons have been yet conducted, given the fact that most studies only take into account a limited number of detection alternatives and specific comparison methods. Indeed, the current paper contributes to solve this problem by describing the candidate processors and the more used comparison methods that will lead to find definitive conclusions. Also, an often ignored CFAR

problem is revealed: the maintaining of the false alarm probability against statistically variable clutter. Moreover, the need to create a framework for the simulation of the performance of CFAR processors in different clutter scenarios is pointed out.

KEYWORDS: *CFAR detectors, CFAR processors, false alarm probability, cell averaging processor, CA-CFAR.*

INTRODUCCIÓN

La tarea de los radares activos con respuesta pasiva (radares primarios) es ubicar a los blancos de radar dentro de la región de observación estimando su posición, velocidad y características principales[3]. El transmisor de radar emite ondas electromagnéticas esperando que se reflejen en los objetos presentes en esta región, produciendo ecos que puedan ser recibidos de vuelta en la antena del radar. Entonces, varias etapas de procesamiento se encargan de extraer la información contenida en el eco; por ejemplo, el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la señal de sondeo revela la distancia del objeto relativa al radar.

De las varias etapas o mecanismos de procesamiento que aplican los radares, el primero siempre es la detección, que busca confirmar la presencia o ausencia de un blanco en una celda de resolución determinada[4]. Entiéndase que pueden existir varios objetos que produzcan reflexiones y que no sean blancos; por ejemplo, en la exploración marítima los barcos son comúnmente los blancos y los ecos producidos sobre la superficie del mar son considerados como una señal interferente. Esta señal interferente recibe el nombre de *clutter*, y para el caso de la exploración marítima se dice que se está en presencia de *clutter* marino[5], si bien existen también el *clutter* terrestre[6], el atmosférico[7], el de hielo[6, 8], entre otros.

Entonces, la detección de radar busca resolver el problema de la discriminación entre *clutter* y blancos. Las técnicas más populares de detección son los detectores o procesadores CFAR (*Constant False Alarm Rate*, Razón de Falsas Alarmas Constante) de ventana deslizante.

El principio de ventana deslizante significa que el procesamiento sobre las muestras de *clutter* se realiza analizando sólo un tramo de la traza de distancia a la vez. Así, una ventana se desliza por todas las celdas resolutiveas disponibles por distancia, ejecutando un algoritmo que decide si la celda en el centro de la ventana es un blanco, mediante la comparación con las magnitudes encontradas en las celdas vecinas[9]. De esta forma, se evita que los cambios en los niveles promedio en las porciones distantes afecten la decisión local.

La propiedad CFAR establece una relación entre los dos parámetros fundamentales de la detección: la probabilidad de detección (P_d) y la probabilidad de falsa alarma (P_f)[4]. La probabilidad de detección cuantifica la relación entre los blancos que se detectan y los que pasan desapercibidos. Por ejemplo, una probabilidad de detección de 0,5 significa que el procesador sólo detectará la mitad de los blancos que atraviesen la zona de alcance. Por su parte, la probabilidad de falsa alarma mide la proporción entre las muestras de *clutter* que son equívocamente clasificadas como blanco y aquellas que son correctamente descartadas por pertenecer al fondo. Por ejemplo, una probabilidad de falsa alarma de 0,1 significa que,

como promedio, cada diez muestras de *clutter*, tiene lugar una falsa alarma. El lector podrá comprender que el detector ideal es uno que alcance una $P_d = 1$ y una $P_f = 0$.

Generalmente, al modificar el ajuste del detector la ganancia en la P_d y la P_f siguen una relación de proporcionalidad inversa; esto es, al mejorar una la otra empeora. En radares se utiliza el criterio de Neyman-Pearson que establece que el valor de la P_f toma precedencia[4]; o sea, que hay que garantizar los requerimientos de diseño de P_f para luego proceder a maximizar la P_d . De aquí se origina la propiedad CFAR que indica que los detectores mantienen, o intentan mantener, la probabilidad de falsa alarma constante de acuerdo a los requerimientos del diseño durante todo el período de operación. Los requerimientos de P_f varían según la aplicación, pero los valores más comúnmente encontrados van desde $P_f = 10^{-4}$ hasta $P_f = 10^{-9}$.

El presente artículo realiza una revisión sobre los detectores CFAR que han sido propuestos en la literatura, describiendo los mecanismos que utiliza cada uno para resolver los problemas del detector tradicional de promediación. Además, se abordan las comparaciones que han sido realizadas entre los esquemas detectores y los métodos más utilizados de comparación, para brindar al lector una perspectiva general del tema, así como criterios para seleccionar la variante CFAR más acorde a una aplicación particular.

DETECTOR CLÁSICO DE PROMEDIACIÓN CA-CFAR

El detector clásico de radar es el CA-CFAR (Cell Averaging-CFAR, CFAR de Promediación de Celdas), cuya estructura se muestra en la figura 1. Como la mayor parte de los esquemas CFAR, operan bajo el principio de ventana deslizante, decidiendo sobre la presencia o no de un blanco en la celda bajo evaluación (Y) a partir de la información de las celdas vecinas o de referencia (X) [10]. La cantidad de celdas vecinas (N) se selecciona típicamente entre los valores de 8, 16, 32 y 64. Si se seleccionan 64 celdas, quiere decir que se colocarán 32 a cada lado del centro Y , también conocido como CUT (Cell Under Test, Celda Bajo Evaluación).

El propósito de las celdas vecinas es la estimación del valor medio o promedio aritmético del clutter, para lo cual la medición obtenida en cada una de ellas es promediada. Precisamente, cuando $N = 64$ se considera que las muestras son suficientes como para hacer una estimación acertada del clutter, ya que el aumento por encima de ese nivel no mejora significativamente el promedio hallado y trae consigo problemas vinculados al procesamiento de situaciones excepcionales como son: la ocurrencia de múltiples blancos y la aparición de saltos en el nivel del clutter [11]. Cuando se está en presencia de dichas situaciones, se dice que el clutter es heterogéneo. En caso contrario, se clasifica como homogéneo [12].

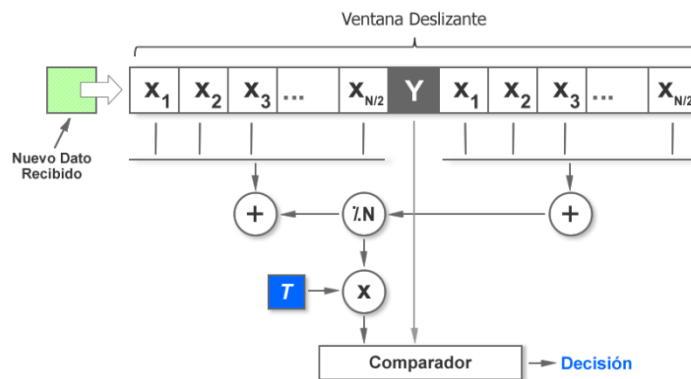


Figura 1. Diagrama en bloques de un detector CA-CFAR.

Prosiguiendo con la explicación del CA-CFAR, una vez hallado, el promedio de las celdas X se multiplica por un factor de escala o ajuste (T) resultando en la obtención del umbral de detección. Posteriormente, un comparador se encarga de señalar la presencia de un blanco si el valor de la muestra Y está por encima del umbral estimado [13].

El factor T es un elemento decisivo en la detección. Si la T es seleccionada demasiado alta, el umbral resultante será muy elevado y buena parte de los blancos estarán por debajo de él. Por el contrario, si la T se escoge muy pequeña, aunque se detectarán la mayoría de los objetivos, el detector clasificará erróneamente como blancos a muestras de clutter que sobrepasen ligeramente el promedio habitual. Ambas situaciones descritas se ilustran en la figura 2 donde son calculados dos promedios de clutter utilizando dos factores: uno excesivamente bajo y otro excesivamente alto. Más allá de la selección de valores extremos de T , la elección de la cifra exacta determina las probabilidades de falsa alarma y de detección del radar.

Otro elemento incorporado habitualmente en la ventana deslizante son las celdas de guarda. Una celda de guarda es aquella que se omite de la estimación del promedio para evitar el esparcimiento de la señal del blanco hacia regiones vecinas. Comprensiblemente, las celdas son seleccionadas alrededor del punto bajo evaluación (Y) y su número rara vez es superior a dos.

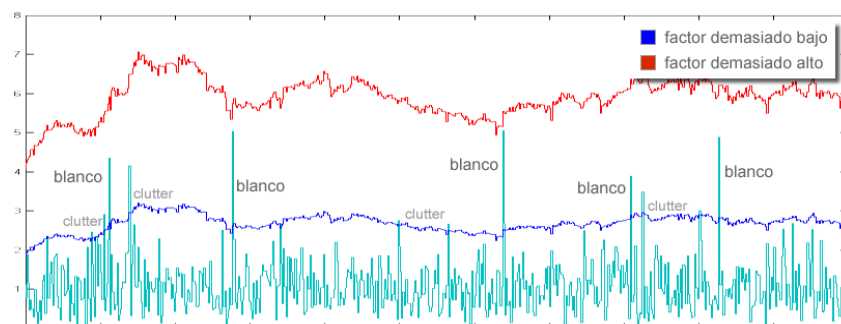


Figura 2. Diferentes umbrales de detección CA-CFAR.

PROBLEMAS DEL DETECTOR CLÁSICO

Aunque el detector CA-CFAR es el comúnmente utilizado como referencia en la literatura [14-18], su desempeño no es del todo satisfactorio. De hecho, la mayor parte de las investigaciones en la rama intentan solucionar los problemas de la variante CA-CFAR.

El principal de ellos, es el débil comportamiento ante *clutter* heterogéneo [19, 20]. Entiéndase que si aparecen múltiples blancos en la ventana deslizante o si hay saltos en el nivel del *clutter*, se distorsiona el umbral calculado y las falsas alarmas u omisiones de blanco comienzan a ocurrir con una frecuencia superior a la esperada. Suele decirse que las heterogeneidades presentes en el *clutter* pueden enmascarar a los blancos producto de la distorsión introducida en el cálculo del promedio del fondo.

Otro problema, que fue identificado en [21], consiste en la pérdida de la propiedad CFAR cuando la estadística del *clutter* cambia, aún si no se afecta significativamente la media. Como múltiples se ha demostrado en varias publicaciones [7, 22-24], que el parámetro de forma de las distribuciones que modelan el *clutter*, cambia continuamente. Esto provoca que el factor de ajuste del CA-CFAR pierda correspondencia con el estado del fondo, y que por tanto, la probabilidad de falsa alarma operacional se desvíe de la concebida en el diseño.

VARIANTES MEJORADAS DE DETECCIÓN

El primero de los problemas planteados anteriormente es el que ha recibido mayor atención por parte de la comunidad de radar mientras que existe mucha menos literatura dedicada al segundo. A continuación, se abordan las soluciones existentes.

MODIFICACIÓN DEL ALGORITMO DE CÁLCULO DEL PROMEDIO DEL FONDO

A continuación se describen las variantes de detectores CFAR de ventana deslizante que modifican el algoritmo de cálculo del CA-CFAR para obtener un desempeño mejorado frente a heterogeneidades. Estos procesadores eligen métodos alternativos al cálculo del promedio aritmético para evitar que las heterogeneidades del clutter afecten las probabilidades de falsa alarma y de detección establecidas por diseño.

PROCESADORES GO-CFAR, SO-CFAR Y OS-CFAR

Las variantes SO-CFAR (Smallest Of-CFAR, CFAR de Menor de), GO-CFAR (Greatest of CFAR, CFAR de Mayor de) y OS-CFAR (Ordered Statistics-CFAR, CFAR de Estadística Ordenada) fueron introducidas en [11] en un primer intento por corregir los problemas del CA-CFAR. El SO-CFAR y el GO-CFAR ofrecen soluciones a la cuestión de los cambios de nivel del clutter; a la vez que el OS-CFAR está especialmente diseñada para ignorar la ocurrencia de blancos múltiples. No obstante, las nuevas propuestas tienen desempeño reducido ante clutter homogéneo, en el que CA-CFAR está especializado.

Las variantes SO-CFAR y GO-CFAR proponen utilizar respectivamente la mitad de las celdas de referencia que menor o mayor promedio tenga. Así, se descartan los máximos locales eligiendo utilizar el grupo de celdas que está antes o el que viene después de la celda de referencia (Y). La diferencia principal entre

ambas es que el SO-CFAR beneficia ligeramente la P_d y el GO-CFAR hace lo mismo con la P_f [12]. En la práctica, ambas variantes resultan en una ganancia más bien reducida.

La alternativa OS-CFAR es considerada como la mejora más significativa al detector clásico ya que introduce un cambio radical en el modo de estimación del promedio [19]. En este caso, la media será obtenida ordenando todos los valores en las celdas de referencia y seleccionando la cifra que esté justo en el medio. Adicionalmente, puede elegirse un valor diferente del situado en el centro influir sobre la elevación del umbral de detección.

Puede comprenderse entonces que, aunque ocurran múltiples blancos dentro de la ventana deslizante, el mecanismo despreciará sus aportes en la evaluación de la celda Y . Sin embargo, es importante señalar que la solución proporciona una pobre estimación del nivel del clutter, al reducir la búsqueda del promedio a la consideración de un único valor. Igualmente, el tiempo necesario para ordenar los valores de las celdas de control retrasa la operación global de la detección.

La teoría de la detección CFAR ha continuado desarrollándose hasta la actualidad. Los detectores CA, SO, GO y OS-CFAR constituyen la base de los mecanismos posteriores [25]. A continuación se desarrollan las variantes de detección más relevantes que modifican el algoritmo de cálculo de la media. Como lectura adicional sobre otras arquitecturas puede consultarse [18, 26-38].

Procesadores AND-CFAR y OR-CFAR

Los procesadores AND-CFAR y OR-CFAR fusionan las técnicas CA-CFAR y OS-CFAR [39, 40]. Ambas alternativas precisan del cálculo de los umbrales de detección utilizando el promedio aritmético tradicional y la estadística ordenada con los factores T_{CA} y T_{OS} respectivamente. La diferencia radica en que el AND-CFAR detecta un blanco sólo cuando el valor de la celda central (Y) sobrepasa ambos umbrales; mientras que el OR-CFAR rechaza la existencia de un objetivo sólo cuando la magnitud de Y es inferior a ambos umbrales.

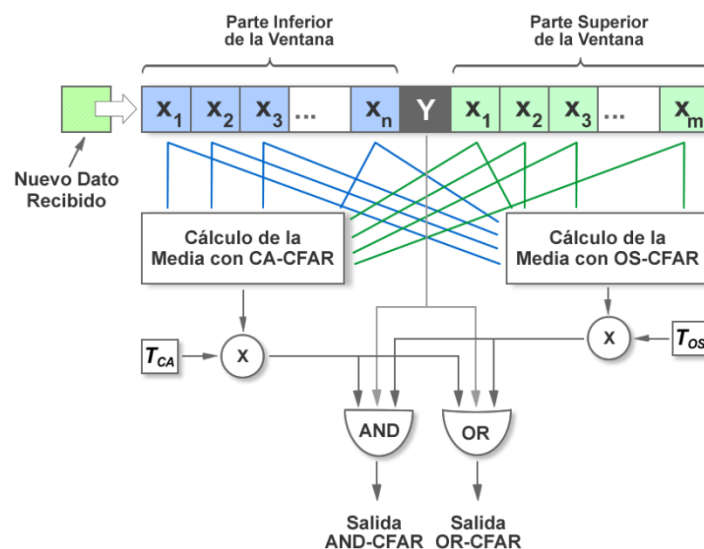


Figura 3. Estructura de los procesadores AND-CFAR y OR-CFAR.

La figura 3 muestra la estructura interna del AND-CFAR y del OR-CFAR. Otro detector basado también en fusión de CA y OS-CFAR fue presentado en [41].

Procesadores ML-CFAR, MX-CFAR y MN-CFAR

Al igual que el AND-CFAR y el OS-CFAR, los procesadores ML-CFAR [42, 43], MX-CFAR [41] y MN-CFAR [41] ejecutan combinaciones del CA-CFAR y el OS-CFAR. Ahora la fusión se realiza con los promedios estimados del fondo y no con las decisiones finales, por lo que se utiliza un solo factor de ajuste (T).

El ML-CFAR (*Mean Level-CFAR*, CFAR de Nivel Promedio) promedia las estimaciones del fondo realizadas por estadística ordenada y promedio aritmético, buscando sacar lo mejor del OS y el CA: resistencia contra heterogeneidades y alta probabilidad de detección. Por su parte, el MX-CFAR (*Maximum-CFAR*, CFAR de Máximo) y el MN-CFAR (*Minimum-CFAR*, CFAR de Mínimo) utilizan el mayor y la menor de las estimaciones respectivamente. Por ende, el MX-CFAR favorece la probabilidad de falsa alarma, mientras que el MN-CFAR favorece la probabilidad de detección.

Procesador CMLD-CFAR

El procesador CMLD-CFAR (Censored Mean Level Detector-CFAR, Detector CFAR de Censado del Nivel Medio) emplea técnicas tanto de ordenamiento como de censado (cálculo del promedio aritmético) [44]. El esquema omite las muestras de referencia de mayores amplitudes y ejecuta el cálculo de la media con las restantes. Como resultado, sufre ligeras pérdidas de detección en ambientes homogéneos, pero es robusto en situaciones de múltiples blancos, siempre y cuando la cantidad de celdas omitidas coincida o supere al número de objetivos interferentes presentes. No obstante, sin el conocimiento apriorístico de la cantidad de blancos, el CMLD puede perder su robustez y propiedades CFAR.

Una variante mejorada fue presentada en [45] bajo el nombre de CMLD de dos Niveles. Conjuntamente, en [46] se abordó el EXC-CFAR (Excision CFAR, CFAR de técnica Excisión) que se basa igualmente en la cancelación de las magnitudes superiores. El procesador TM-CFAR (Trimmed Mean-CFAR, CFAR de Podado y Media) también utiliza un principio parecido, pero remueve muestras tanto del extremo superior como del inferior. Otros desarrollos basados en técnicas similares pueden encontrarse en [47-50].

Procesador MSCA-CFAR

El procesador MSCA-CFAR (Minimum Selection-CA-CFAR, CA-CFAR de Selección de Mínimos) se basa en la división de la ventana de referencia en sub-ventanas de tamaño reducido. Posteriormente, se extrae la muestra con menor magnitud de cada sub-ventana y se promedian los mínimos extraídos para calcular la media del fondo [51]. Esta manera de proceder permite eliminar la interferencia de los blancos próximos, pero provoca una pobre estimación de la media del clutter.

La figura 4 muestra un diagrama en bloques del funcionamiento del procesador MSCA-CFAR. De acuerdo a su concepción original, el detector puede utilizar cualquier tamaño para las sub-ventanas de referencia que pueden incluso compartir celdas. En general, a medida que aumenta el tamaño de las sub-ventanas se hace más pobre la estimación del promedio del fondo pero se logra una mayor protección contra heterogeneidades.

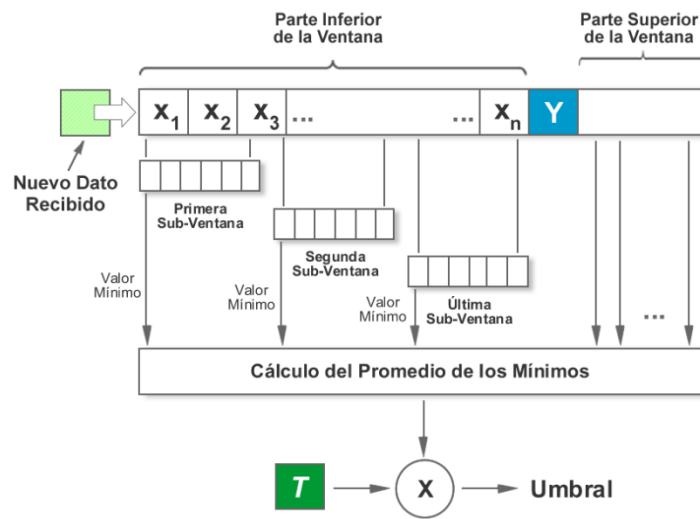


Figura 4. Diagrama en bloque del detector MSCA-CFAR.

Procesador DT-CFAR

El procesador DT-CFAR (Double Threshold-CFAR, CFAR de Doble Umbral), propuesto inicialmente en [52] y desarrollado posteriormente en [53-55], realiza el cálculo del promedio al igual que el CA-CFAR pero produce dos umbrales de detección en lugar de uno, usando lógicamente dos factores de escala diferentes: T_1 y T_2 . El umbral T_2 es el clásico umbral CA-CFAR, y es aplicado luego de descartar los blancos interferentes con el umbral T_1 que se actualiza en varias iteraciones hasta que no quedan blancos en la ventana deslizante.

Para calcular T_1 se requiere asumir una distribución estadística para el fondo (en [52] se asumió una distribución exponencial) y encontrar sus parámetros. A través de ellos se define T_1 para una probabilidad de falsa alarma deseada y se excluyen los blancos de magnitud superior al umbral que resulta de multiplicar T_1 por el promedio de las celdas en la ventana.

La próxima iteración excluye las celdas que superaron el umbral anteriormente y ejecuta nuevamente el procedimiento de estimación de los parámetros de la distribución del fondo para actualizar T_1 . El proceso se repite hasta que no se encuentran más valores que sobrepasen el umbral, o la diferencia entre dos T_1 s consecutivos supere un determinado límite. Ante una densidad elevada de blancos, se elevan la cantidad de iteraciones requeridas y el algoritmo puede retrasar la operación global de detección. Para solucionar esto, existe también un mecanismo basado en histogramas para establecer T_1 que reduce el gasto computacional a expensas de reducir la precisión con que se descartan los blancos.

Procesador VI-CFAR

El VI-CFAR (Variability Index-CFAR, Índice de Variabilidad CFAR) es un algoritmo compuesto muy popular que se basa en el cálculo del índice de variabilidad para determinar si utilizar un CA-CFAR, un GO-CFAR, un SO-CFAR o un OS-CFAR para procesar los datos. Básicamente, el esquema calcula la media y la varianza de las partes inferiores y superiores de las ventanas, y con ello estima el Índice de Variabilidad que luego

se compara con umbrales que determinan si la información contenida corresponde a clutter homogéneo o no. En caso afirmativo se utiliza el CA-CFAR, de lo contrario se aplica el OS-CFAR, y algunas situaciones particulares indican la aplicación del GO-CFAR y el SO-CFAR. Las fórmulas necesarias para calcular el Índice de Variabilidad y los umbrales de detección son detalladas en [56, 57]. Una variante derivada denominada ODV-CFAR (Ordered Data Variability-CFAR, CFAR de Variabilidad de Datos Ordenados) ha sido desarrollada en [47, 58, 59].

Procesador IS-CFAR

Considerado como una mejora de la variante S-CFAR (Switching-CFAR, CFAR de Conmutación) [60], el detector IS-CFAR (Improved Switching-CFAR, CFAR de Conmutación Mejorada) persigue lograr un mejor funcionamiento en condiciones de ambientes heterogéneos sin complejizar excesivamente el algoritmo de estimación del promedio[61]. Su estructura interna se muestra en la figura 5.

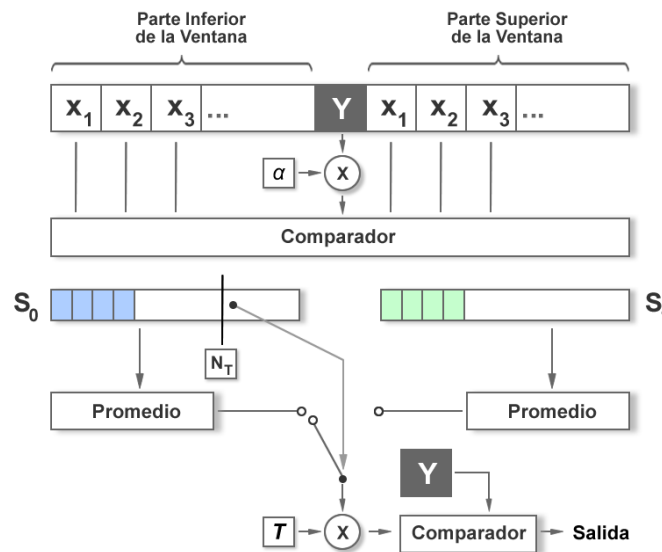


Figura 5. Estructura del procesador IS-CFAR.

Para efectuar la detección, el esquema compara cada celda de la ventana con la celda central multiplicada por un factor de corrección ($\alpha \cdot Y$). Las celdas cuya magnitud sea menor que $\alpha \cdot Y$ son colocadas en el conjunto S_0 , el resto van hacia S_1 . Si la cantidad de celdas en S_0 es mayor que un valor prefijado N_T , se calcula el promedio utilizando el conjunto S_0 ; en caso contrario, se utiliza S_1 . Una elección común es utilizar $\alpha = 0,5$ y $N_T = 32$. Así, el conjunto S_0 incluiría las celdas que fuesen menores que la mitad de la magnitud de la celda central; y se seleccionaría a S_0 cuando este contenga más de 32 celdas.

Procesador MAP-CFAR

El procesador MAP-CFAR (CFAR de Mapeado)[62] propone realizar un análisis individual de cada celda de resolución para evitar que las heterogeneidades aisladas contaminen el procesamiento global. La propuesta, que ha sido desarrollada a profundidad en [59, 63, 64], requiere del almacenamiento de múltiples muestras por cada celda, por lo que la cantidad de datos a almacenar aumenta considerablemente con respecto al CA-CFAR.

El principal cambio que introduce el MAP-CFAR no está en el algoritmo de cálculo en sí, sino en la manera de desplazar la ventana. La ventana se moverá ahora a través de las diferentes realizaciones de una misma celda, por lo que cada una de sus celdas corresponderá a un instante de tiempo diferente. Puede decirse entonces que la solución aplica un mecanismo temporal de detección, en contraposición a la alternativa espacial sostenida por la mayoría de las variantes CFAR.

Procesador CI-CFAR

El CI-CFAR (Cell under test Inclusive-CFAR, CFAR de Celda bajo Evaluación Incluida) busca mejorar el desempeño frente a saltos de clutter (clutter edges) mediante la separación de las celdas de la región de exploración en regiones homogéneas [65]. Aunque utiliza una técnica de estadística ordenada, el algoritmo es más rápido que el OS-CFAR clásico porque evita el recálculo de la media del fondo para cada nueva celda que entra a la ventana deslizando. De hecho, el esquema no precisa de una ventana deslizando.

El algoritmo consta básicamente de dos pasos. El primero consiste en explorar la región de búsqueda, dividiéndola en porciones de igual dimensión que usualmente incluyen varias celdas. Luego, cada porción es comparada con la consecutiva para comprobar si tienen las mismas propiedades estadísticas utilizando la prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling (A-D). La prueba es conocida como un fuerte medidor de la separación entre las funciones de distribución empíricas. Si las porciones tienen una estadística semejante, serán fundidas en una única porción. Se continúan ejecutando iteraciones hasta que no pueden fundirse más porciones. Un ejemplo del procedimiento de unión de regiones se ilustra en la figura 6.

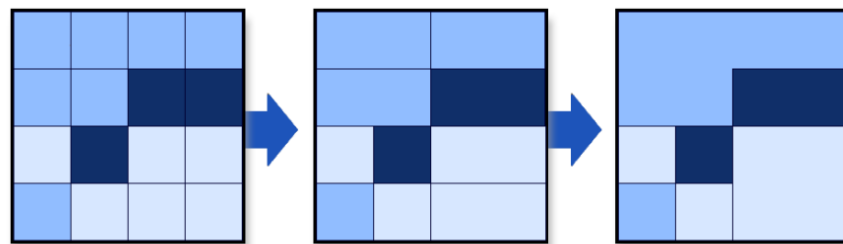


Figura 6. Proceso de unificación de las regiones de estadística similar.

El segundo paso ejecuta la decisión sobre la presencia de los blancos. Cada porción encontrada por el algoritmo de búsqueda es tratada como una ventana independiente donde se busca el umbral de detección a través de un algoritmo de estadística ordenada que resulta en la estimación de la media por un mecanismo de estadística ordenada. Entonces, se evalúa la pertenencia de cada celda a la clase blanco a través del umbral de estadística ordenada calculado. El cálculo del umbral es común para todas las celdas de la misma porción por lo que sólo es necesario ejecutarlo una vez. Nótese que las celdas bajo evaluación son incluidas en la estimación de la media del fondo, lo que justifica el nombre otorgado al procesador (celda bajo evaluación incluida). Un detector similar basado en pre-segmentación fue presentado en [66].

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD FRENTE A CAMBIOS ESTADÍSTICOS DEL FONDO

Cuando ocurren cambios estadísticos en la distribución del *clutter* sin que se modifique de manera significativa la media, los detectores que cambian el algoritmo de cálculo del promedio son incapaces de garantizar que la probabilidad de falsa alarma se mantenga cercana al valor concebido en el diseño. En este caso, es necesario implementar un mecanismo de corrección del factor de ajuste (T) del CA-CFAR para que el procesador se adapte a las condiciones cambiantes del medio, según fue verificado en [21].

El modelo tradicional de *clutter* es considerado homogéneo cuando se asume que sus parámetros no cambian y heterogéneo cuando varias alteraciones se superponen al modelo invariable homogéneo. En realidad, el *clutter* homogéneo experimenta cambios de la estadística en tiempo y espacio dentro de la zona de cobertura, aun cuando no ocurren heterogeneidades. Según ha sido probado en [7, 22-24], los cambios en el fondo se manifiestan a través de la fluctuación del parámetro de forma de la distribución que sigue el *clutter*. Entonces, es más correcto asumir que el *clutter* nunca es homogéneo sino que su condición estacionaria queda restringida a intervalos de tiempo y espacio. Este nuevo tipo de *clutter* puede denominarse como *clutter* homogéneo con cambios estadísticos lentos, en relación a que se asume que la distribución del *clutter* permanece constante durante un número determinado de celdas.

Una solución lógica al problema en cuestión sería la de corregir el factor de ajuste del procesador de acuerdo a una fórmula empírica basada en condiciones ambientales. Sin embargo, en [5] se reconoce que los progresos en este sentido son insuficientes. Los modelos propuestos no dependen de la velocidad del viento o del estado del mar, dos condiciones de conocida influencia en el carácter de las mediciones. Igualmente se admite que los resultados fueron extraídos de experimentos restringidos a un conjunto limitado de condiciones.

Otra forma de corregir el problema es la de realizar la estimación del parámetro de forma del *clutter* y transformarlo en el factor de ajuste del CA-CFAR. Para ello, sería necesario buscar métodos de estimación eficientes que garanticen la obtención del parámetro de forma de la distribución del *clutter* con precisión y bajos recursos computacionales; además de obtener fórmulas de transformación específicas para la cantidad de celdas que se estén utilizando en la ventana deslizante.

Aunque aún no se ha presentado un esquema completamente funcional, varias publicaciones respaldan la validez de la aproximación anterior. En [67] se logró diseñar un esquema que distingue entre las distribuciones K, Log-Weibull, KK y WW utilizando redes neuronales artificiales. Posteriormente, en [68] se dio un desarrollo más completo a la idea para los modelos Weibull, Log-Normal y K, validándose además con lecturas reales de radar. Estos esquemas permiten la estimación rápida de la distribución preferencial del *clutter*, necesaria para la posterior estimación de los parámetros de forma.

Adicionalmente, en [69-71] se encontraron métodos eficientes de estimación de los parámetros K, Weibull y Pareto que mejoran la velocidad y precisión de las alternativas tradicionales y permiten implementar sistemas en tiempo real. A su vez, en [72-75] se propusieron fórmulas de transformación basadas en ajustes de curvas realizadas sobre los resultados de simulaciones intensivas de Monte Carlo; mientras que en [76] las fórmulas fueron extendidas para varias cantidades de celdas en la ventana deslizante. Estas fórmulas aún deben de mejorarse pues sólo cubren las probabilidades de falsa alarma de $P_f = 10^{-2}$, $P_f = 10^{-3}$ y $P_f = 10^{-4}$. A pesar de ello, y de que los diferentes componentes no han sido presentados de forma conjunta, las publicaciones presentadas respaldan la idea de que se podría alcanzar

una solución válida para corregir el problema de la desviación en la probabilidad de falsa alarma frente a los cambios estadísticos del clutter.

COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CFAR

Dada la gran cantidad de alternativas CFAR que han sido desarrolladas por diferentes autores, uno de los puntos de mayor interés es la comparación entre ellas. Desafortunadamente, las publicaciones existentes comparan un número limitado de variantes CFAR, usualmente demostrando la supremacía de una alternativa con respecto al CA-CFAR y al OS-CFAR. La sección actual presenta primeramente los métodos más utilizados de comparación para luego dar paso a algunos estudios que muestran resultados de comparaciones.

MÉTODOS DE COMPARACIÓN

Los métodos de comparación utilizan fundamentalmente tres parámetros: la probabilidad de detección, la probabilidad de falsa alarma y la relación señal/ruido (SNR, Signal to Noise Ratio). Las figuras 7, 8 y 9 muestran tres representaciones gráficas que suelen hacerse de estos parámetros con el objetivo de comparar el desempeño de los detectores. Los ejemplos mostrados ejecutan una comparación de unas pocas variantes de procesamiento.

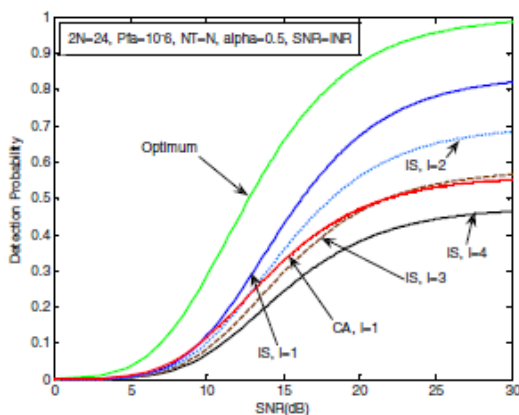


Figura 7. Probabilidad de Detección con Respecto a la relación Señal a Ruido para una Probabilidad de Falsa Alarma Constante [1].

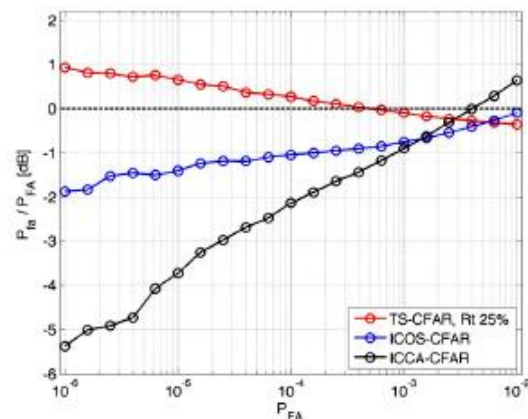


Figura 8. Relación entre la Probabilidad de Falsa Alarma Operacional y la de Diseño con el cambio de la Probabilidad de Falsa Alarma de Diseño [2].

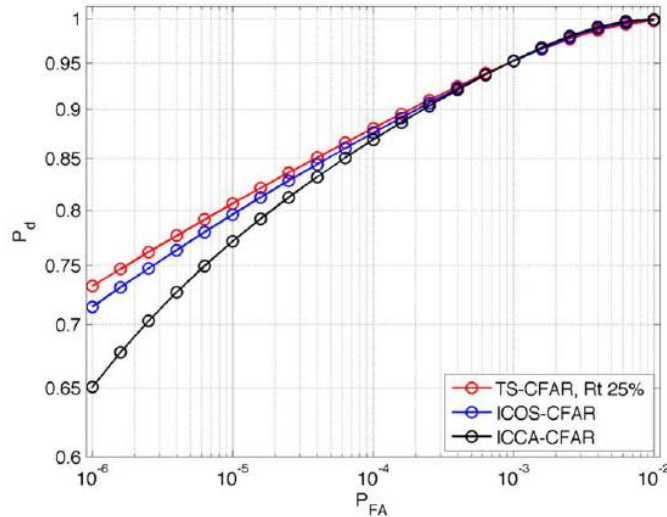


Figura 9. Ganancia de la Probabilidad de Detección con el Empeoramiento de la P_f [2].

La figura 7 contiene un ejemplo de la técnica de comparación visual más utilizada en las comparaciones. Se puede medir la probabilidad de detección que pueden alcanzar los detectores al aumentar la relación señal a ruido, manteniendo constante la probabilidad de falsa alarma. Normalmente, se comparan los detectores contra un esquema óptimo de referencia que opera con el conocimiento a priori de todos los parámetros de las señales presentes. La arquitectura que más se acerque al detector de referencia, y tenga por tanto mayor P_d , se selecciona como la de mejor desempeño.

Aunque de uso menos frecuente, las gráficas de las figuras 8 y 9 presentan la variación de la probabilidad de falsa alarma operacional y la probabilidad de detección frente a la probabilidad de falsa alarma de diseño respectivamente. En el primer caso se mide directamente la propiedad CFAR, o sea, la habilidad de los esquemas de mantener la P_f de diseño, siendo los valores cercanos a 0 los que representan el comportamiento deseado. En el segundo caso, se repite el experimento de la figura 7, pero esta vez variando la P_f y manteniendo constante la relación señal a ruido. Las mejores arquitecturas son aquellas que sostienen mayores probabilidades de detección al reducirse la P_f .

Además de las comparaciones gráficas, existen dos métodos numéricos de muy amplio uso. El ADT (Average Decision Threshold, Umbral de Decisión Promedio) y la pérdida CFAR (CFAR Loss). El ADT cuantifica el umbral promedio utilizado por cada sistema para realizar la detección. El objetivo de los sistemas CFAR es usar los umbrales más bajos posibles que garanticen la probabilidad de falsa alarma de diseño. Por tanto, mientras menor sea el ADT, mejor es el detector en cuanto a la probabilidad de detección.

La expresión (1) ofrece la fórmula para calcular el ADT, mientras que la (2) muestra cómo se mide la separación diferencia entre dos procesadores a través de la relación de ADTs (ratio of ADT). Cuando se utiliza el procesador óptimo para calcular la relación de ADT, cómo en la expresión (3), en realidad se está calculando la pérdida CFAR, que es el aumento de la relación señal a ruido que permite a un sistema igualar la probabilidad de detección del detector óptimo[2, 12].

$$ADT = \frac{E(TZ)}{\mu^2} \quad (1)$$

$$\Delta[dB] = 10 \log \left[\frac{E(T_1 Z_1)}{E(T_2 Z_2)} \right] \quad (2)$$

$$L_{CFAR}[dB] = 10 \log \left[\frac{E(T_1 Z_1)}{E(T_O Z_O)} \right] \quad (3)$$

Donde T es el factor de ajuste o escala, Z el promedio estimado del *clutter*, μ es el promedio real del *clutter*, Δ es la relación de ADTs, L_{CFAR} es la pérdida CFAR, y el subíndice O indica al detector óptimo o de referencia.

Las comparaciones gráficas y los métodos numéricos deben ser aplicados para distintos escenarios si se desea realizar una comparación justa. Los esquemas siempre son probados primeramente bajo *clutter* homogéneo donde generalmente el CA-CFAR tiene ventaja. Esta medición permite empero cuantificar la pérdida del resto de los procesadores con respecto al de promediación. En segundo lugar, se prueban los desempeños frente a saltos de *clutter* y múltiples blancos próximos, donde se espera hacer evidente la ventaja de los diferentes esquemas frente al CA-CFAR.

Otro experimento que se ejecuta de forma asidua es la variación de los parámetros internos de los detectores para observar la influencia de la configuración sobre los parámetros de la detección. Por ejemplo, en el CA-CFAR se puede comprobar la influencia de la variación de la cantidad células en la ventana deslizante; y en el IS-CFAR se pueden modificar los parámetros α y N_T descritos con anterioridad.

Por último, y aunque no es una práctica común, se recomienda la medición del mantenimiento de la propiedad CFAR frente a cambios estadísticos de la señal de fondo. Esto permitirá acercar más las simulaciones a las condiciones reales del *clutter*, de acuerdo a lo demostrado en [7, 22-24]. Es también muy importante cuantificar el consumo computacional de los diferentes esquemas, pues la velocidad de ejecución es crítica en desarrollos de radar.

COMPARACIONES REALIZADAS EN LA LITERATURA

A continuación se citan algunas de las comparaciones más relevantes encontradas en la literatura. Ellas incluyen varios de los detectores tratados en apartados previos.

En [77] se comparó el procesador OSVI-CFAR, que utiliza estadística ordenada e índice de variabilidad, con el VI-CFAR tradicional, el CA-CFAR, el GO-CFAR, el SO-CFAR y el OS-CFAR. Se concluyó que el OSVI-CFAR es más robusto frente a situaciones con múltiples blancos distribuidos a ambos lados de la celda bajo evaluación; mientras que el desempeño frente a saltos de *clutter* fue muy parecido.

De manera similar, tras realizar una comparación con el CA-CFAR, el SO-CFAR, el GO-CFAR y el OS-CFAR, en [1] se demostró que los procesadores IS-CFAR y EXC-CFAR tienen menos pérdidas de detección tanto en ambientes homogéneos como heterogéneos. Especialmente, los sistemas muestran un desempeño superior para el caso de saltos de *clutter*. Al mismo tiempo, permiten una implementación más sencilla que sus contrapartes de estadística ordenada.

En [41] demostraron las ventajas de aplicar las variantes ML-CFAR, MX-CFAR y MN-CFAR en lugar del OS-CFAR y el CA-CFAR. El MN-CFAR fue seleccionado como el de mejor desempeño global frente a escenarios conteniendo heterogeneidades, señalándose además la importancia de la selección apropiada de la configuración interna de los procesadores para obtener una evaluación certera de sus capacidades. Como complemento a esta investigación, y aunque se utilizaron notaciones diferentes para los nombres de los detectores, en [78] se comprobó que el MX-CFAR desplegaba el comportamiento más estable cuando la cantidad de blancos era elevada en la ventana de referencia.

En [79] se evaluó el desempeño del OR-CFAR y el AND-CFAR en comparación con el CA-CFAR y el OS-CFAR frente a clutter distribuido Rayleigh, Exponencial y Weibull. Se concluyó que el AND-CFAR tenía mejor desempeño en la detección que el OR-CFAR, el OS-CFAR y el CA-CFAR para los tres tipos de clutter.

Una variante del detector IS-CFAR fue comparado con las alternativas CA-CFAR y OS-CFAR para clutter Pareto en [80]. Como resultado, se comprueba que el IS-CFAR logra probabilidades de detección superiores que sus contrapartes. Con respecto al mantenimiento de la probabilidad de falsa alarma, se encontró que el IS-CFAR reducía el número de falsas alarmas con respecto al valor esperado, mientras que el OS-CFAR las aumentaba.

Por último, en [81] la desviación en la probabilidad de falsa alarma de varios detectores CFAR de ventana deslizante fue probada frente a diferentes perfiles de clutter que contenían múltiples blancos y saltos en el nivel del fondo. Como resultado, se encontró que el MSCA-CFAR y el IS-CFAR mantenían buena estabilidad en la P_f en presencia de blancos interferentes en la ventana deslizante; mientras que todos los esquemas probados sufrieron desviaciones considerables ante saltos de nivel. La comparación establecida también incluyó las variantes CA-CFAR, OS-CFAR, AND-CFAR y OR-CFAR.

Como puede apreciarse, en la mayoría de los casos sólo se evalúan algunos detectores contra las variantes clásicas. El resto de los artículos consultados siguen la misma tónica.

CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

El presente artículo reúne y describe, en un solo documento, las principales variantes de detectores CFAR de ventana deslizante que han sido presentadas en la literatura. Se abordaron también los métodos de comparación que se utilizan para medir la efectividad de los detectores, citándose las comparaciones que han sido establecidas por diferentes autores.

La mayor parte de las soluciones existentes buscan corregir los problemas del detector clásico CA-CFAR frente a heterogeneidades que pueden aparecer en la ventana deslizante. Si bien el número de aproximaciones a este problema es numeroso, aún no se ha llegado a una solución definitiva. Uno de los principales problemas en este sentido es que no existen comparaciones fiables entre las alternativas disponibles: los estudios presentados abarcan un grupo muy reducido de detectores y no aplican todos los métodos de comparación disponibles. Precisamente, la revisión efectuada ayuda en este sentido pues lista los detectores y métodos que deben ser utilizados en futuras comparaciones.

Aunque menos numerosos, algunos artículos han abordado también otro problema del detector CA-CFAR: la degradación de su desempeño frente a las variaciones estadísticas del clutter. Las soluciones a este problema buscan corregir el factor de ajuste del CA-CFAR mediante la estimación del parámetro de forma

de la distribución del clutter. Si bien se han mostrado resultados favorables, los desarrollos requieren aún de un mayor grado de terminación y de validación con datos reales de clutter.

En cuanto a los métodos de comparación, los parámetros más importantes que es necesario comparar son la probabilidad de detección, la probabilidad de falsa alarma, la relación señal a ruido y el consumo computacional. Es muy importante que se mida la influencia de la configuración interna de cada detector sobre estos parámetros antes de poner a competir a los diferentes esquemas. Los principales escenarios de comparación son el clutter homogéneo, clutter con saltos de clutter, clutter con múltiples blancos cercanos y clutter con variaciones estadísticas.

Como líneas futuras de investigación, se identifica la necesidad de crear una librería informática que contenga múltiples variantes CFAR y distribuciones de clutter, para la prueba y comparación de los esquemas. De esta forma se podrá elegir la mejor variante, o en su defecto, confeccionar un nuevo detector que integre lo mejor de los diversos esquemas que han sido propuestos.

REFERENCIAS

- [1] S. Erfanian and V. T. Vakili, "Analysis of Some CFAR Detectors in Nonhomogenous Environments Based on Switching Algorithm," *IEEE*, 2009.
- [2] D. Tao, S. Normann Anfinssen, and C. Brekke, "Robust CFAR Detector Based on Truncated Statistics in Multiple-Target Situations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 1, pp. 117-134, 2016.
- [3] D. K. Barton and S. A. Leonov, *Radar Technology Encyclopedia* (Electronic Edition) ed. Artech House, 1998.
- [4] M. Barkat, *Signal Detection and Estimation*, 2nd ed. Artech House, 2005.
- [5] K. Ward, R. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter Scattering, the K Distribution and Radar Performance*, 2nd ed. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [6] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3er ed. McGraw-Hill, 2008.
- [7] S. Sayama and S. Ishii, "Suppression of Log-Normal Distributed Weather Clutter Observed by an S-Band Radar," *Wireless Engineering and Technology* vol. 4 no. 3, pp. 125-133, 2013.
- [8] R. Vicen Bueno, M. Rosa Zurera, M. P. Jarabo Amores, and D. de la Mata Moya, "Coherent Detection of Swerling 0 Targets in Sea-Ice Weibull-Distributed Clutter Using Neural Networks," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 12, pp. 3139 - 3151, 2010.
- [9] J. R. Machado Fernández and R. C. Sánchez Rams, "Implementación de un Detector de Promediación de Clutter (CA-CFAR) usando VHDL," *Telemática*, vol. 15, no. 2, pp. 52-61, 2016.
- [10] A. Farina and F. A. Studer, *A Review of CFAR Detection Techniques in Radar Systems*. Horizon House-Microwave Inc, 1986.
- [11] H. Rohling, "Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 19, no. 4, 1983.
- [12] J. d. I. C. Bacallao Vidal, "Un modelo Teórico de la Técnica DRACEC. Metodología del Proceso de Adaptación al Fondo," Instituto Técnico Militar "José Martí", 2003.
- [13] A. Cetin, "CFAR Detection in K-Distributed Sea Clutter," Master of Science in Electrical and Electronics Engineering, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2008.
- [14] S. Takahashi, "A CFAR Circuit of Detecting Spatially Correlated Target for Automotive UWB Radars," *Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University*, 2010.

- [15] G. Caso and L. De Nardis, "Cooperative Spectrum Sensing based on Majority decision under CFAR and CDR constraints," presented at the Workshop on Cognitive Radio Medium Access Control and Network Solutions, IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2013.
- [16] F. A. P. de Figueiredo, "LTE Random Access Detection Based on a CA-CFAR Strategy," *IEEE '13 International Radar Conference*, 2013.
- [17] Y. Qin and H. Gong, "A New CFAR Detector based on Automatic Censoring Cell Averaging and Cell Averaging," *TELKOMNIKA*, vol. 11, no. 6, pp. 3298 - 3303, 2013.
- [18] T.-T. Van Cao, *Non-homogeneity Detection in CFAR Reference Windows using the Mean-to-Mean Ration Test*. Tech report ADA554930, DSTO Defence Science and Technology Organisation, 2012.
- [19] D. T. Nagle, "Analysis of Robust Order Statistic CFAR Detectors," Doctor of Philosophy, Illinois Institute of Technology, 1991.
- [20] R. Vican Bueno, "Automatic Detection of Signals by Using Artificial Intelligence Techniques," Ph.D. Thesis, Signal Theory and Communications Department, Universidad de Alcalá, 2011.
- [21] J. R. Machado Fernández and J. C. Bacallao Vidal, "MATE-CFAR: Ambiente de Pruebas para Detectores CFAR en MATLAB," *Telemática*, vol. 13, no. 3, pp. 86-98, 2014.
- [22] Y. Dong, "Distribution of X-Band High Resolution and High Grazing Angle Sea Clutter, Technical Report DSTO-RR-0316," Electronic Warfare and Radar Division, Defence Science and Technology Organization, Edinburgh, South Australia 2006.
- [23] E. Makhoul, Y. Zhan, A. Broquetas, J. Ruiz Rodon, and S. Baumgartner, "Sea Clutter Statistical Characterization using Terrasar-X Data," *IEEE*, 2014.
- [24] R. Palama, M. S. Greco, P. Stinco, and F. Gini, "Statistical Analysis of Bistatic and Monostatic Sea Clutter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, no. 4, pp. 3036-3054, 2015.
- [25] N. Mojena Hernández, "Evaluación del Desempeño de los Detectores CFAR en Radares Costeros," Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, Departamento de Telecomunicaciones y Telemática, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2016.
- [26] N. Levanon, "Detection Loss Due to Interfering Targets in Ordered Statistics CFAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 6, 1987.
- [27] J. S. Bergin, C. M. Teixeira, P. M. Techau, and J. R. Guerci, "Improved Clutter Mitigation Performance using Knowledge-Aided Space-Time Adaptive Processing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 3, 2006.
- [28] G. Ginolhac, P. Forster, J. P. Overlez, and F. Pascal, "Spatio-Temporal Adaptive Detector in Non-Homogeneous and Low-rank Clutter," 2007.
- [29] D. Ramakrishnan and J. Krolik, "Adaptive Radar Detection in Doubly Nonstationary Autoregressive Doppler Spread Clutter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 2, 2009.
- [30] P. Wang, H. Li, and B. Himed, "Parametric Rao Tests for Multichannel Adaptive Detection in Partially Homogeneous Environment," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 3, 2011.
- [31] A. Pourmottaghi and M. R. Taban, "A CFAR Detector in a Non-Homogenous Weibull Clutter," *IEEE Transactions on AES*, 1995.
- [32] H. Amirmehrabi and R. Viswanathan, "A New Distributed Constant False Alarm Rate Detector," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 1, 1997.
- [33] C. H. Gowda and R. Viswanathan, "Performance of Distributed CFAR Tests in Nonhomogeneous Background," *IEEE*, 1997.
- [34] I. G. Garvanov and C. A. Kabakchiev, "Average Decision Threshold of CA CFAR and excision CFAR Detectors in the Presence of Strong Pulse Jamming," 1999.

- [35] M. Ali Khalighi and M. Hasan Bastani, "Adaptive CFAR Processor For Nonhomogeneous Environments," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36, no. 3, 2000.
- [36] Q. Yaowen and N. Chandra Karmakar, "Novel CFAR Detection," presented at the 3rd International Conference on Electrical & Computer Engineering, Dhaka, Bangladesh, 2004.
- [37] D. S. Ranjan and H. Krishna Moorthy, "Development of Adaptive Algorithm for CFAR in non-homogenous environment," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 3, no. 1, 2013.
- [38] J. P. Pascual, N. von Ellenrieder, M. Hurtado, and C. H. Muravchik, "Adaptive Radar Detection Algorithm Based on an Autoregressive GARCH-2D Clutter Model," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014.
- [39] W. Liu and X. Liu, "AND-CFAR and OR-CFAR Detectors Design in Weibull Background," *IEEE 2003 International Radar Conference*, 2003.
- [40] C. Ru Hong, Y. Tsung Hwang, W. Chieh Hsu, C. Ho Chang, J. Chi Huang, and H.-E. Liao, "Programmable AND-CFAR Signal Detector Design and Its FPGA Prototyping for FMCW Radar Systems," *International Symposium on VLSI Design, Automation and Test*, pp. 1 - 4, April 2011 2011.
- [41] M. B. El Mashade, "Performance Analysis of CFAR Detection of Fluctuating Radar Targets in Nonideal Operating Environments," *International Journal of Aerospace Sciences*, vol. 1, no. 3, pp. 21-35, 2012.
- [42] T. Laroussi and M. Barkat, "Adaptive ML-CFAR Detection for Correlated Chi-Squared Targets of All Fluctuation Models in Correlated Clutter and Multiple Target Situations," *IEEE*, 2007.
- [43] T. Laroussi and M. Barkat, "Performance Analysis of ML-CFAR Detection for Partially Correlated Chi-square Targets in Rayleigh Correlated Clutter and Multiple-Target Situations," *IEEE Proceedings*, 2006.
- [44] J. Rickard and G. Dillard, "Adaptive detection algorithms for multipletarget situations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-13, no. 4, pp. 338–343, 1977.
- [45] S. Himonas and M. Barkat, "Automatic censored CFAR detection for nonhomogeneous environments," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 286–304, 1992.
- [46] S. Erfanian and S. Faramarzi, "Performance of Excision Switching-CFAR in K distributed sea clutter," *Proceedings of APCC*, 2008. Narmak, Tehran, Iran
- [47] A. Farrouki and M. Barkat, "Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environments," *Proc. Inst. Elect. Eng.—Radar, Sonar Navigat.*, vol. 152, no. 1, pp. 43–51, 2005.
- [48] E. Conte, M. Lops, and A. Tulino, "Hybrid procedure for CFAR in non-Gaussian clutter," in *Proc. Inst. Elect. Eng.—Radar, Sonar Navigat.*, 1997, vol. 144, no. 6, pp. 361–369.
- [49] E. Magraner, N. Bertaux, and P. Refregier, "Detection in gamma distributed nonhomogeneous backgrounds," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 46, no. 3, pp. 1127–1139, 2010.
- [50] P. Liu and C. Han, "Adaptive Censored Cell-Averaging CFAR Detection in Distributed Sensor Networks," 2007.
- [51] J. Mo Yang and W. Woo Kim "Performance Analysis of a Minimum Selected Cell Averaging CFAR Detection," in *11th IEEE International Conference on Communication Technology*, 2008, pp. 442-445.
- [52] B. Barboy, A. Lomes, and E. Perkalski, "Cell-Averaging CFAR for Multiple-Target Situations," vol. 133, no. 2, pp. 176-186, 1986.

- [53] M. B. El Mashade, "Performance Evaluation of the Double-Threshold CFAR Detector in Multiple-Target Situations," *Journal of electronics & Information Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 204-210, 2006.
- [54] G. Gao, L. Liu, L. Zhao, G. Shi, and G. Kuang, "An Adaptive and Fast CFAR Algorithm Based on Automatic Censoring for Target Detection in High-Resolution SAR Images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 6, pp. 1685-1697, 2009.
- [55] Y. Cui, J. Yang, and Y. Yamaguchi, "On the Iterative Censoring for Target Detection in SAR Images," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 641-645, 2011.
- [56] A. Kumar Yadav and L. Kant, "Moving Target Detection using VI-CFAR Algorithm on MATLAB Platform," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, no. 12, pp. 915-918, 2013.
- [57] J.-W. Shin, Y.-K. Seo, D.-W. Do, S.-M. Choi, and H.-N. Kim, "Modified Variability-Index CFAR Detection Robust to Heterogeneous Environment," presented at the International Conference on Systems and Electronic Engineering, Phuket (Thailand), December 18-19, 2012, 2012.
- [58] J. Zhao, R. Tao, and Y. Wang, "A New CFAR Detector Based on Ordered Data Variability," presented at the IEEE Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 2006.
- [59] M. Xiangwei and Q. Fuyong, "Adaptive Clutter Map Detector in nonhomogeneous environment," in *ICSP2010 Proceedings*, 2010, pp. 2231-2234.
- [60] T.-T. Van Cao "A CFAR Thresholding Approach Based on Test Cell Statistics," *IEEE*, 2004. PO Box 1500, Edinburgh, SA 5111, Australia
- [61] W. K. Abd-Ali and G. A. Aramice, "Analysis of improved Switching Constant False Alarm Rate Processor (IS-CFAR) for Different Swerling Radar Target Cases.," *Asian Journal of Information Technology*, vol. 10, no. 7, pp. 290-295, 2011. Baghdad, Iraq
- [62] R. Nitzberg, "Clutter MAP CFAR Analysis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-22, no. 4, pp. 419-421, 1986.
- [63] S. Tao, T. Ran, W. Yue, and Z. Siyong, "Performance Analysis of Multidimensional Clutter MAP CFAR," in *ICSP'04 Proceedings*, 2004.
- [64] Z. Ren-li, S. Wei-xing, M. Xiao-feng, and H. Yu-bing, "Clutter map CFAR detector based on maximal resolution cell," *SIViP*, vol. 9, pp. 1151-1162, 2015.
- [65] J. Hun Kim and M. R. Bell, "A Computationally Efficient CFAR Algorithm Based on a Goodness-of-Fit Test for Piecewise Homogeneous Environments," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 3, pp. 1519-1535, 2013.
- [66] J. Oliver Hinz, M. Holters, U. Zolzer, A. Gupta, and T. Fickenscher, "Presegmentation-based Adaptive CFAR Detection for HFSWR," presented at the IEEE '12 International Radar Conference, 2012.
- [67] A. González Padilla, B. Bravo Quintana, J. R. Machado Fernández, and A. Bueno González, "Clasificación del Clutter Marino utilizando Redes Neuronales Artificiales," *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones (RIELAC)*, vol. 34, no. 1, pp. 1-11, 2013.
- [68] J. R. Machado Fernández and J. d. I. C. Bacallao Vidal, "Fast Selection of the Sea Clutter Preferential Distribution with Neural Networks (under review)," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2017.
- [69] J. R. Machado Fernández, J. C. Bacallao Vidal, and N. Chávez Ferry, "A Neural Network Approach to Weibull Distributed Sea Clutter Parameter's Estimation," *Inteligencia Artificial* vol. 18, no. 56, pp. 3-13, 2015.
- [70] J. R. Machado Fernández and J. C. Bacallao Vidal, "Improved Shape Parameter Estimation in K Clutter with Neural Networks and Deep Learning," *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, vol. 3, no. 7, pp. 96-103, 2016.

- [71] J. R. Machado Fernández and J. C. Bacallao Vidal, "Improved Shape Parameter Estimation in Pareto Distributed Clutter with Neural Networks," *International Journal of Artificial Intelligence and Interactive Multimedia*, vol. 4, no. 8, pp. 7-11, 2016.
- [72] J. R. Machado Fernández, "Estimation of the Relation between Weibull Distributed Sea clutter and the CA-CFAR Scale Factor," *Journal of Tropical Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 19-28, 2015.
- [73] J. R. Machado Fernández and J. C. Bacallao Vidal, "Optimal Selection of the CA-CFAR Adjustment Factor for K Distributed Amplitude Samples with a Fluctuating Shape Parameter (Accepted)," *Nova Scientia*, 2016.
- [74] J. R. Machado Fernández and J. C. Bacallao Vidal, "Estimation of the Optimal CA-CFAR Threshold Multiplier in Pareto Clutter with Known Parameters (under revision)," *Entramado*, 2016.
- [75] J. R. Machado Fernández and J. C. Bacallao Vidal, "Optimal Selection of the CA-CFAR Adjustment Factor for K Power Sea Clutter with Statistical Variations," (accepted) *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2016.
- [76] J. R. Machado Fernández, S. Torres Martínez, and J. d. I. C. Bacallao Vidal, "CA-CFAR Adjustment Factor Correction with a priori Knowledge of the Clutter Distribution Shape Parameter (accepted)," *International Journal of Artificial Intelligence and Interactive Multimedia*, 2016.
- [77] H. Wenlin, W. Yongliang, W. Shouyong , and F. Qianxue, "A Robust CFAR Detector Based on Ordered Statistic," *2006 CIE International Conference on Radar*, pp. 1 - 4, Oct. 2006 2006.
- [78] M. Baadache and F. Soltani, "Performance Comparison of Some CFAR Detectors in Homogenous and Non-Homogenous Clutter," presented at the 2013 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), 2013.
- [79] W. K. Abd-Ali, "Evaluation of AND-CFAR and OR-CFAR Processors under Different Clutter Models," *Eng. & Tech. Journal*, vol. 31, no. 5, pp. 964-975, 2013.
- [80] G. V. Weinberg, "Formulation of a Generalised Switching CFAR with application to X-Band Maritime Surveillance Radar," *Springer Plus*, vol. 4, no. 574, pp. 1-13, 2015.
- [81] J. R. Machado Fernández, N. Mojena Hernández, and J. d. I. C. Bacallao Vidal, "Evaluation of CFAR Detectors Performance (accepted)," *ITECKNE*, 2017.