

Bayesian Processors of Radar Signals for the Skyguard Radar System of the Ecuadorian Army

Fernando Lara, Marcelo Ortiz, Enrique V. Carrera, *Senior Member, IEEE*, Alexis F. Tinoco, Héctor Moya and Rubén León

Abstract—This paper presents the implementation of an advanced Bayesian digital signal processor applied to the Skyguard Ecuadorian's army radar. This new auto-regressive processor uses adaptive filters for clutter cancelation, allowing its implementation in general purpose hardware. The proposed processor is evaluated using both a detailed simulation and real signals obtained from the actual Skyguard radar. The results for Moving Target Indicator, Moving Target Detection and auto-regressive processors are compared in this work. Specifically, the Receiver Operating Characteristic curves for a signal-to-clutter ratio lower than 0 dB, keeping a probability of detection higher than 90%, are presented. The proposed auto-regressive processor shows a gain of 13 dB compared to the Moving Target Indicator processor, and a performance similar to the Moving Target Detection processor with a significant reduction of its computational cost.

Index Terms—Radar systems, Skyguard radar, auto-regressive processors, adaptive filters.

I. INTRODUCTION

En la actualidad el desarrollo de mejores técnicas de procesamiento de radar es un desafío continuo para muchos grupos de investigadores. Uno de esos grandes desafíos es el incremento de aeronaves no tripuladas (UAV del inglés, *unmanned aerial vehicle*), para lo cual, nuevos sistemas de radar deben ser desarrollados [1]. Otro de los desafíos que enfrentan los sistemas de radar modernos es su elevado costo, problema que golpea directamente a los países en vías de desarrollo.

El estudio y diseño de nuevos procesadores de radar, podría presentarse como una alternativa a nuevos sistemas de radar. Estos procesadores basados en técnicas de procesamiento digital de señales pueden llegar a sustituir a procesadores de sistemas de radar antiguos mejorando su desempeño y dotando a estos sistemas de las características que se requieren en la actualidad.

El sistema de defensa aérea Oerlikon Skyguard cuenta con un procesador Moving Target Indicator (MTI), este procesador

This work was supported by Centro de Investigación de Aplicaciones Militares CICTE (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE), and Dirección de Investigación y Desarrollo Militar (COMACO – Ecuador).

F. Lara, M. Ortiz, A.F. Tinoco and R. León are with Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes (WiCOM-Energy), and Centro de Investigación de Aplicaciones Militares (CICTE), Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí 171103, Ecuador. (e-mail: mflara3@espe.edu.ec; maortiz12@espe.edu.ec; aftinoco@espe.edu.ec; rdleon@espe.edu.ec).

E.V. Carrera is with Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes (WiCOM-Energy), Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí 171103, Ecuador. (e-mail: evcarrera@espe.edu.ec).

H. Moya is private software developer, Conocoto, Ecuador. (e-mail: moya.unda@gmail.com).

fue registrado en los años 70 [2]. La evolución de este sistema antiguo es el Moving Target Detection (MTD) [3]. Actualmente, los procesadores MTD están siendo empleados en nuevos sistemas de detección [4]–[6] debido al incremento en la capacidad de cómputo de los dispositivos, lo que permite implementar bancos de filtros acoplados de forma digital y por ende, mejorar el desempeño frente a procesadores MTI.

Es importante indicar que el procesador MTI discrimina entre objetivos y clutter (*i.e.*, interferencia y reflejos en nubes, suelo, edificaciones, etc.) mediante la medición directa del desvío Doppler en la señal reflejada, lo cual, limita la detección de objetivos estacionarios. Por otro lado, el procesador MTD usa diferentes filtros Doppler para reconocer objetivos como si estuviesen en movimiento a pesar de estar estacionarios en el espacio. Este incremento en la capacidad de detección de los procesadores MTD también mejora el rango dinámico del procesador [7].

En el artículo [8], se propone un procesador para radares de pulso implementado con matrices de puertas lógicas programable en campo (FPGA del inglés, *Field-programmable gate array*), el procesador propuesto cuenta con dos etapas de procesamiento: compresión de pulso y MTD. En [9] se presenta la detección de objetivos por medio de la extracción de características para la resolver la hipótesis binaria (presencia de objetivo) con arboles de decisión. En [7] se presenta un procesador de radar basado en aprendizaje profundo, el cual, es probado con señales de radar simuladas.

En este artículo se propone implementar un procesador Auto-regresivo (AR), con filtros adaptativos para la cancelación de clutter. De esta forma, se propone un procesador con un desempeño comparable al procesador MTD con una reducción significativa en el costo computacional. Esta alternativa permite implementar este tipo de procesadores en hardware de cómputo de propósito general. Además, el diseño propuesto es evaluado tanto en un entorno simulado como a través de señales de radar reales adquiridas en el desarrollo del presente trabajo.

El desempeño de los procesadores MTI, MTD y AR obtenido a través de simulaciones de objetivos o blancos de radar, se evalúa en base a: la probabilidad de detección del 90%, con una probabilidad de falsa alarma constante (10^{-5}), donde, el procesador MTI requiere una Relación Señal a Clutter (SCR del inglés, *Signal-to-clutter Ratio*) o Relación Señal a Ruido (SNR del inglés, *Signal-to-noise Ratio*) de al menos 12.5dB, mientras que el procesador MTD y AR alcanzan el 90% de probabilidad de detección a partir de $-1dB$ de SCR, lo que significa una mejora de 13.5dB frente al procesador implementado actualmente en el sistema Skyguard

[10].

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección II se presenta un breve marco teórico y conceptos generales del procesamiento de señales de radar. En la Sección III se presentan las arquitecturas a ser analizadas, mientras que en la Sección IV se explica el funcionamiento de los detectores propuestos para el procesador de radar. Los resultados y pruebas con señales reales son presentados en la Sección V y finalmente, las conclusiones son presentadas en la Sección VI.

II. MARCO TEÓRICO

En esta sección se analiza el proceso para obtener señales eco de radar y la teoría de hipótesis binaria.

A. Señales Eco de Radar

Se denomina señales eco de radar a los pulsos electromagnéticos emitidos y posteriormente recibidos para la detección de objetivos. La duración del pulso electromagnético se representa como δ (en segundos) y su valor permite definir la longitud de la celda de resolución de cada anillo del radar, como se muestra en la Fig. 1a. Es conocido que para definir la resolución de una celda se requiere la longitud axial y la apertura radial [11]. De esta forma, la longitud de la celda de resolución esta dada por la Ec. (1):

$$R_d = \frac{c \times \delta}{2} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s) y R_d es la resolución de la celda en longitud.

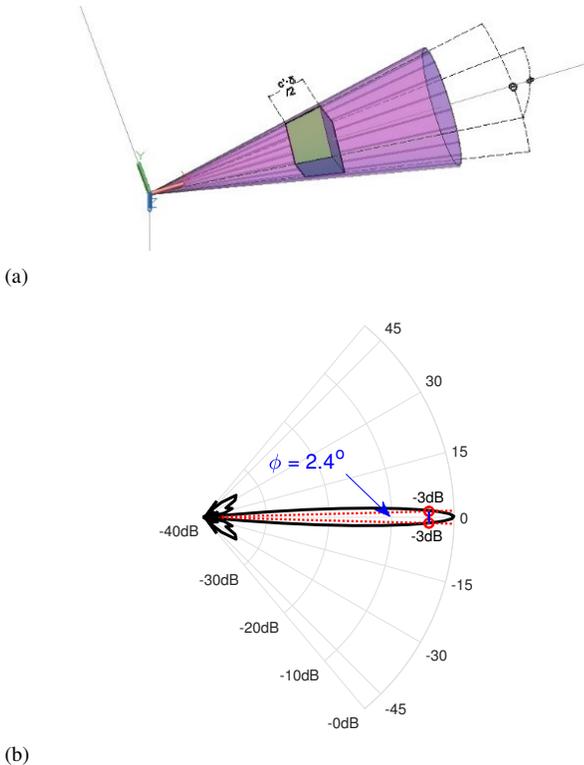


Fig. 1. a) Celda de detección, b) Diagrama de Radiación (Plano H)

El Sistema Skyguard presenta una resolución R_d de 150 m en modo de exploración, y de 50 m en modo de seguimiento. Estos valores corresponden al cambio de la duración del pulso $\delta_e = 1 \mu s$ para exploración y $\delta_s = 0.33 \mu s$ para seguimiento.

El pulso se produce cada T segundos y al inverso de este tiempo ($1/T$) se denomina Frecuencia de Repetición de Pulsos (PRF del inglés *Pulse Repetition Frequency*) [11]. El PRF es utilizado para sincronizar los ciclos de rotación de la antena del radar (rotación angular ω en rpm) con la irradiación de los ecos.

El diagrama de radiación de la antena de radar es caracterizada por el ancho del haz azimutal (ϕ) y en elevación (θ) en el plano. Para determinar el ancho del haz se utilizan los puntos de media potencia como se observa en la Fig. 1b. Es importante mencionar que para definir la operación de un radar se necesita conocer si el haz tiene una mayor apertura en azimut o en elevación, de acuerdo a ello se define si su lóbulo es de tipo lápiz (*pencil*) o abanico (*fan*) [12]. En el caso de un *pencil-beam* la apertura del haz tanto en azimut como en elevación son pequeñas y similares; por otra parte, en el caso de *fan-beam* la apertura del haz en elevación es mayor a la apertura en azimut o viceversa, en el caso del Sistema Skyguard presenta un lóbulo fan-beam.

Adicionalmente, la resolución espacial está definida por la distancia mínima entre dos blancos adyacentes y que aún se puedan diferenciar el uno del otro en la detección de radar. La resolución espacial y la celda de resolución están fuertemente relacionadas: la resolución espacial esta definida por la apertura del haz en elevación, en azimut y por la distancia longitudinal R_d .

Para la detección de un blanco se define el número mínimo de ecos N que inciden sobre una celda de resolución con la presencia de un blanco. En la Fig. 2 se observa la superposición de los ecos respecto a una celda de resolución para que el blanco sea detectado, es decir, se presenta el haz de la antena definido por el ángulo ϕ con la intención de evidenciar la superposición de lóbulos en el radar monopulso, esto se define mediante la Ec. (2) [12], [13]:

$$N = \frac{\phi}{6\omega T} = \frac{\phi \times PRF}{6\omega} \quad (2)$$

donde T esta dado en segundos, PRF en Hertz, ω en revoluciones por minuto y ϕ en grados.

En el caso del sistema de defensa antiaéreo Oerlikon Skyguard, se tiene un PRF de 6.4kHz, una rotación angular de la antena de $\omega = 60$ rpm y una apertura azimutal del haz de $\phi = 2.4^\circ$ [10]. Basado en estos parámetros se define el número mínimo de ecos que inciden sobre un blanco para el sistema de defensa aérea Oerlikon Skyguard $N = 43$.

B. Hipótesis Binaria

La principal pregunta a responder en el procesamiento digital de señales de radar está relacionada con la hipótesis binaria de si la señal de eco recibida contiene el eco de un blanco o no. Esto se puede plantear a través de la hipótesis binaria de la Ec. (3).

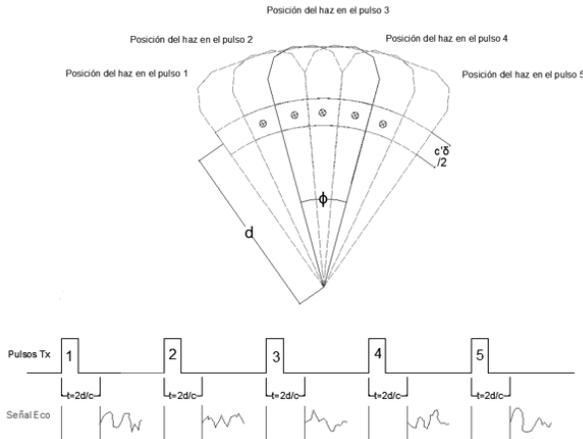


Fig. 2. Celdas de resolución consecutiva vistas azimutalmente y con superposición.

$$\begin{aligned} H_0 : r(n) &= c(n) + w(n) & n &= 0, 1, \dots, N-1 \\ H_1 : r(n) &= s(n) + c(n) + w(n) & n &= 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (3)$$

donde $r(n)$ es la señal eco recibida, $c(n)$ es el clutter, $w(n)$ es ruido blanco Gaussiano y $s(n)$ es la señal del blanco. Estas señales están dadas por el n -ésimo pulso de radar.

La hipótesis H_0 considera que la señal eco recibida no tiene presencia de blanco, mientras que la hipótesis H_1 supone que existe la presencia de un blanco en el eco recibido. En la siguiente sección se propone una revisión de las arquitecturas clásica MTI y MTD. Estas arquitecturas permiten decidir entre las hipótesis H_0 y H_1 en forma de maximizar la probabilidad de detección, manteniendo la probabilidad de falsa alarma controlada.

III. ARQUITECTURAS

En esta sección se revisan las arquitecturas MTI, MTD y AR con la finalidad de entender sus principales características.

A. Procesador MTI

El sistema Skyguard que dispone el Ejército Ecuatoriano tiene un procesador con etapas similares a un procesador MTI, debido a que estos sistemas fueron construidos en los años 70. MTI no es más que un modo de operación que permite discriminar los objetivos del clutter a través de una medición directa de la velocidad del objetivo usando la desviación Doppler de la señal reflejada. Para ello, el radar cuenta con una etapa inicial de preprocesamiento, es decir, un filtro Doppler fijo para la cancelación del clutter. De acuerdo a sus autores [14], se obtiene la estructura de un procesador de radar MTI al contar con un filtro cancelador HSIAO [15] y un detector de magnitud aplicado a la fase y cuadratura de la información de la señal de eco recibida. Finalmente, se realiza un proceso de búsqueda del máximo valor en el buffer de tamaño N , para posteriormente comparar con los umbrales preestablecidos y mantener la probabilidad de falsa alarma constante (CFAR del inglés, *Constant False Alarm Rate*). La Fig. 3 muestra el diagrama de bloques del procesador MTI previamente descrito.

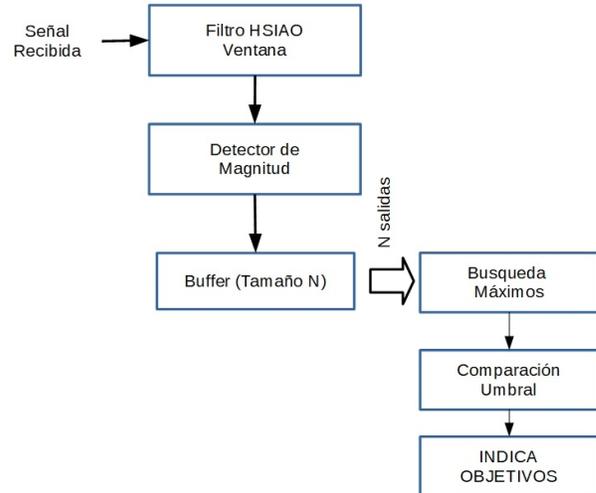


Fig. 3. Diagrama de bloques del procesador MTI. (Tomada de [16])

B. Procesador MTD

La característica principal de un procesador MTD es contar con un filtro blanqueador de clutter y un banco de filtros acoplados en cascada [17], [18]. En el sistema propuesto, la cancelación de clutter se la realiza con filtros adaptativos LMS (del inglés, *Least Mean Squares*) y KRW (del inglés, *Kalman Random Walk*) [16] para eliminar el clutter de la señal de eco recibida. Este proceso elimina el clutter de la señal eco recibida, por lo que, en la señal de salida del filtro se tienen solo ruido blanco y en caso de existir, la señal de objetivo. El banco de filtros acoplados se implementa a través de la Transformada Discreta de Fourier (DFT del inglés, *Discrete Fourier Transform*).

Tanto el procesador MTD como MTI tienen el mismo principio, las principales diferencias son la mejora significativa en la probabilidad de detección y la capacidad de detectar objetivos con velocidad cero. La estructura del procesador está basada en la teoría presentada por [3] y cuyo diagrama de bloques se presenta en la Fig. 4.

El radar MTD transmite un grupo de N pulsos a una frecuencia de repetición de pulsos constante. Este conjunto de pulsos a menudo se refiere como un intervalo de procesamiento coherente (CPI del inglés, *Coherent Processing Interval*) o lote de pulsos. Los ecos recibidos durante el CPI son procesados en el banco de filtros acoplados, con esto se puede determinar cambios en la frecuencia Doppler. Cada filtro acoplado es diseñado para detectar la contribución de energía en ciertas frecuencias no superpuestas a causa del efecto Doppler presente en el eco como resultado de la reflexión en el objetivo [14].

C. Procesador Auto-Regresivo

El procesador Auto-regresivo es una variante del procesador MTD, sigue la estructura presentada en [3], con las variaciones presentadas en [19], [20] para mejorar su desempeño sobre clutter tipo Weibull.

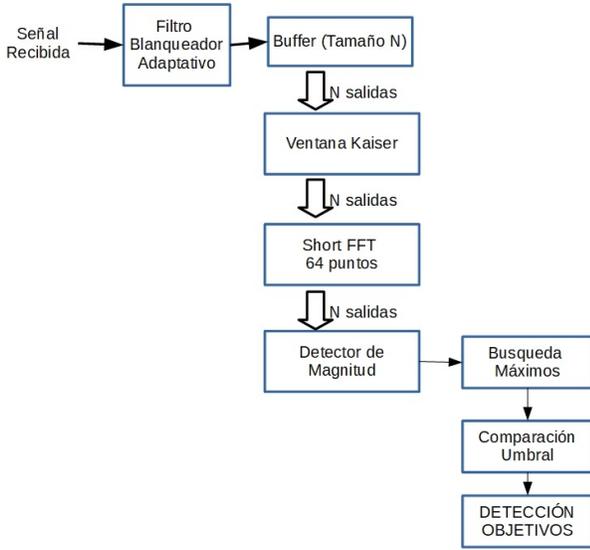


Fig. 4. Diagrama de bloques del procesador MTD.

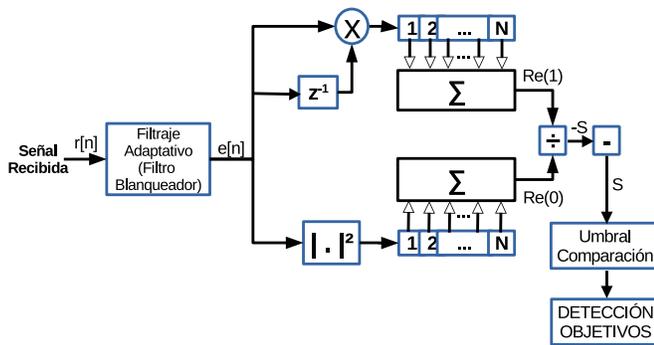


Fig. 5. Diagrama de bloques del procesador Auto-regresivo.

La principal diferencia en la estructura es la posibilidad de tener un cálculo secuencial, a diferencia del uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT del inglés, *Fast Fourier Transform*) en la que se debe analizar buffers de tamaño N [13].

El procesador auto-regresivo es un estimador de los parámetros para un sistema de respuesta lineal, en la cual las señales tienen presencia de ruido blanco [17], [20]. La estructura del procesador auto-regresivo se presenta en [20], [21] y se ilustra en la Fig. 5.

El procesador propuesto de la Fig. 5 presenta una primera etapa de filtraje de clutter, y en una segunda etapa se espera realizar la detección del objetivo mediante la estimación de la frecuencia, utilizando una estructura secuencial del estimador auto-regresivo.

IV. DETECCIÓN DE OBJETIVOS

A. Detector en Procesador MTD

Para la cancelación de clutter en el procesador MTI se utiliza el Filtro HSIAO descrito en [15], [22], mientras que

TABLA I
PRUEBA DE DETECCIÓN CON DISTINTAS VENTANAS.

Ventana	Error Medio (@ $PRF = 1$)	
	Desvío doppler Fijo (0.25)	Doppler Aleatorio
Hanning	4.469	8.316
Hamming	3.106	7.305
Blackman	5.630	9.660
Blackman Harris	7.007	12.431
Blackman Tukey	1.735	2.595
(@ $r = 25$)		
Kaiser (@ $a = 2$)	0.756	2.778

para el procesador MTD y AR se utiliza el filtro adaptativo LMS presentado en [16], [23], [24].

En el caso del procesador MTD, para implementar el banco de filtros acoplados se utiliza la FFT y se realizaron pruebas para evaluar cual tipo de ventana (*i.e.*, Blackman, Flat-top, Hanning, entre otras) genera el mayor desempeño.

Se plantea cambiar la función de ventana rectangular, a causa de que produce discontinuidades de señal al principio y al final de la misma. Para suavizar esta discontinuidad de señal es necesario el uso de una función de ventana diferente. Otro problema de la ventana rectangular es la presencia de lóbulos laterales de alta potencia alrededor de la frecuencia central [25].

Según los lóbulos de frecuencia, la función de ventana puede mejorar la detección al permitir la separación de dos objetivos cercanos. De acuerdo a las características del sistema de radar se tiene $N = 43$, pero para acelerar el procesamiento se utiliza la FFT de 64 muestras, donde la diferencia entre N y las 64 muestras de la FFT se completa con ceros, al realizar esto, se puede utilizar el algoritmo de radix 2 para el cálculo de la FFT, el mismo que presenta una complejidad de $N \log_2 N$ [26] operaciones complejas. Al considerar $N = 64$ se obtiene 384 operaciones complejas, si no se hace esto y se mantiene la ventana de $N = 43$ se utilizaría el algoritmo de radix mixto, el que presenta una complejidad de $4N \log_2 N - 6N + 8$ [27], con lo que se tendría 684 operaciones complejas.

La Tabla I muestra el error promedio obtenido en la detección cuando se usan diferentes tipos de ventana en la FFT. Esta prueba se realizó con la simulación de 10000 objetivos considerando con un desvío Doppler normalizado de 0.25, y con 10000 objetivos con un desvío Doppler aleatorio entre 0.15 y 0.4 (valores normalizados).

En la Fig. 6 se observa la representación tiempo-frecuencia del detector con las dos ventanas que presentan el mejor desempeño, Blackman Tukey y Kaiser, donde se aprecia que a pesar de estar separados 43 muestras en azimut se tiene la detección de los dos objetivos. Con la ventana de Kaiser el segundo objetivo tiene una mayor magnitud (Fig. 6c y Fig. 6d), por lo que, las pruebas de probabilidad de detección se realizan con la ventana de Kaiser.

Finalmente, al utilizar el procesador AR se tiene $3 + 4N$ operaciones complejas, al tener $N = 43$ se tienen 175

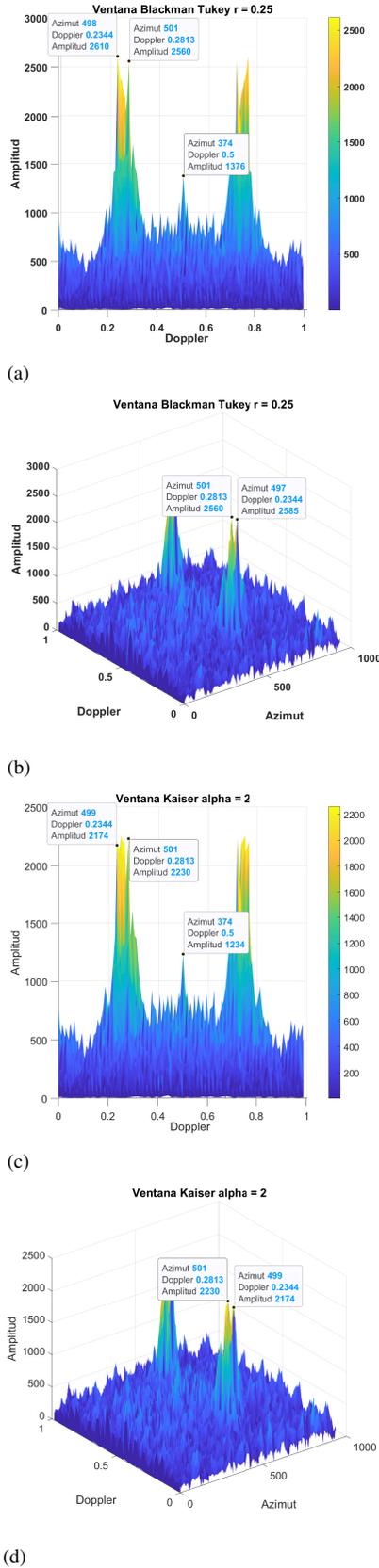


Fig. 6. Comparación entre las ventana Blackman-Tukey y Kaiser con 2 objetivos: (a) vista frontal Blackman-Tukey, (b) vista isométrica Blackman-Tukey, (c) vista frontal Kaiser, y (d) vista isométrica Kaiser.

operaciones complejas por cada nuevo valor de I y Q.

B. Detector en Procesador Auto-Regresivo

En el procesador auto-regresivo se utiliza un estimador espectral de máxima entropía para detectar el desvío Doppler presente en los objetivos. Como se mencionó, las ventajas de este estimador son la reducción del costo computacional y el procesamiento secuencial.

El procesador auto-regresivo parte de la función de auto-correlación Ec. (4), calculando la relación entre el buffer de elementos del primer factor de la función de auto-correlación y el buffer de elementos de estimación de energía o factor cero.

$$Re(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} y(n)y^*(n-k) \quad (4)$$

En el diagrama de bloques de la Fig. 5, se observa como este procesador posee dos buffers en el cálculo correspondiente, El buffer 1 corresponde a la Ec. (5), donde, se multiplica la muestra actual que ingresa al procesador por la anterior (Primer factor auto-correlación), y el buffer 0 corresponde a la Ec. (6), donde, se multiplica la señal que ingresa al procesador por su conjugada (estimación de energía).

$$Re(1) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} e(n)e^*(n-1) \quad (5)$$

$$Re(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} e(n)e^*(n) \quad (6)$$

donde $e(n)$ es la salida del filtro cancelador de clutter.

Finalmente, el coeficiente auto-regresivo utilizado para detectar un objetivo en el procesador AR esta dado por el parámetro S descrito en la Ec. (7), donde:

$$S = -\frac{Re(1)}{Re(0)} = -re(1) \quad (7)$$

Para determinar el desvío Doppler con este estimador hace falta el cálculo de S_e , coeficiente que tiene la información espectral de la señal [17]:

$$S_e(f) = \frac{\sigma^2}{|1 + S \times \exp(j2\pi f)|^2} \quad (8)$$

Al utilizar la función de auto-correlación como eje del procesador propuesto, se consigue un procesador secuencial reduciendo su costo computacional, frente al esquema del procesador MTD el cual requiere el cálculo de la FFT, por cada nuevo valor.

Para tener una idea del desempeño del procesador propuesto se presenta la representación en tiempo-frecuencia (Fig. 7). En donde, la detección de un objetivo se muestra en la Fig. 7a, y para ver el desempeño con dos objetivos se presenta en la Fig. 7b.

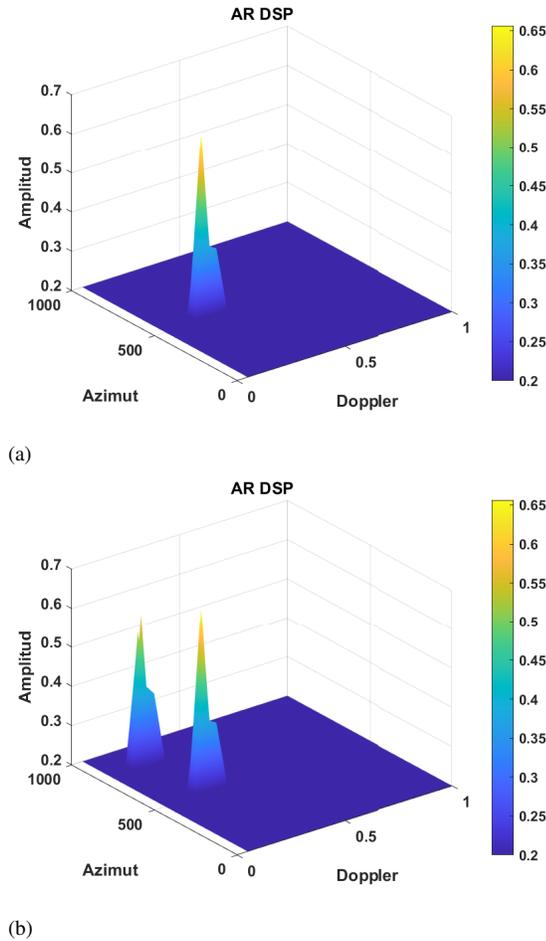


Fig. 7. Representación tiempo-frecuencia para el procesador auto-regresivo (medio): (a) con un objetivo o blanco, y (b) con dos objetivos.

V. RESULTADOS

A. Etapa de Simulaciones

Para evaluar el desempeño de los procesadores clásicos MTD, MTI y el procesador auto-regresivo propuesto, se generan las curvas operacionales de radar (ROC), probando con la cantidad de objetivos necesaria para cada probabilidad de falsa alarma constante (CFAR), dada por la Teoría de Monte-Carló [28], esto se presenta en la Ec. (9).

$$N_T = \frac{10}{P_{fa}} \quad (9)$$

donde P_{fa} es la probabilidad de falsa alarma y N_T corresponde al número de blancos simulados para garantizar una determinada P_{fa} .

Para esto se prueba cada procesador con N_T blancos, de acuerdo a la P_{fa} y con una SCR específica, de tal forma de obtener las ROC de los blancos simulados manteniendo una SCR entre -5 y 15 dB. La Fig. 8 presenta las curvas operacionales de los tres procesadores evaluados.

En la Fig. 8a se presenta la ROC del procesador MTI con distintas P_{fa} : 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5} . En esta figura se aprecia que con una $P_{fa} = 10^{-5}$ se requiere que los blancos

tengan al menos 13.5 dB para tener una probabilidad de detección mayor al 90% , lo que corresponde a la teoría clásica.

En la Fig. 8b se presenta la ROC del procesador MTD con con similares P_{fa} : 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5} . En este caso el procesador MTD tiene una probabilidad de detección mayor al 90% con blancos iguales o mayores a -0.5 dB de SCR ($P_{fa} = 10^{-5}$). Esto se debe principalmente a la inclusión del filtro adaptativo LMS el cual le da una ganancia de aproximadamente 3 dB.

Finalmente, en la Fig. 8c se presenta la ROC del procesador AR con con distintas P_{fa} : 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5} . Se puede apreciar en este caso que con una $P_{fa} = 10^{-5}$ se requiere que los blancos tengan al menos -1 dB para tener una probabilidad de detección mayor al 90% . Todas las ROC presentadas en la Fig. 8, corresponden a un clutter de tierra estacionario con un coeficiente de correlación de 0.85 .

Una vez realizadas las pruebas con los tres procesadores, se compara su desempeño en la Fig. 9. Es importante mencionar que para obtener las ROC con P_{fa} igual a 10^{-5} se simularon 1000000 de blancos, cada blanco incluye 43 ecos correspondientes al blanco simulado. El clutter añadido a la señal de blancos corresponde a un clutter de tierra y estacionario.

En la Fig. 10, se repitió el experimento, cambiando el clutter simulado. En este caso se simula un clutter de tierra no-estacionario, con un coeficiente de correlación aleatorio entre 0.825 y 0.925 .

En escenarios reales el clutter tiene un comportamiento no estacionario, es por esto que, se realizaron simulaciones con clutter no estacionario, en la Fig. 10 se observa, el desempeño del procesador MTD, el cual, se mantiene dentro de los rangos de operación conocidos del procesador MTD en ambientes reales, por otra parte, el procesador Auto-regresivo propuesto presenta una robustez similar frente a clutter no estacionario (simulado), por lo que, se podría pensar que presentara los mismos resultados en ambientes reales.

B. Señales de Radar Reales

Para evaluar el desempeño del procesador AR en una implementación real, se realizó la adquisición de señales de radar correspondientes al sistema Skyguard del ejército ecuatoriano. Para dicha adquisición se utilizó una tarjeta Gage Scope Oscar [29], muestreando las señales del radar a una frecuencia de 1 MHz y con una resolución de 16 bits. La tarjeta se encuentra alojada en un mainboard Gigabyte Aorus Z390 Designare, con un procesador Intel Core i9 9900K. El sistema cuenta además con 32 GB de memoria RAM y un disco de estado sólido de 1 TB; en el hardware descrito se implemento el procesador para el radar Oerlikon.

El sistema Oerlikon tiene una cobertura de 16 km, considerando celdas de resolución de 150 m se obtienen 107 anillos de procesamiento, para realizar procesamiento en tiempo real se adquieren los datos correspondientes a un giro y se procesan, en una función de procesamiento desarrollada en C++, dicha función implementa el algoritmo del procesador auto regresivo para cada anillo, teniendo un tiempo de aproximado de procesamiento de 0.9 s, por lo que, se digitaliza un giro del radar, y el siguiente se utiliza para procesar.

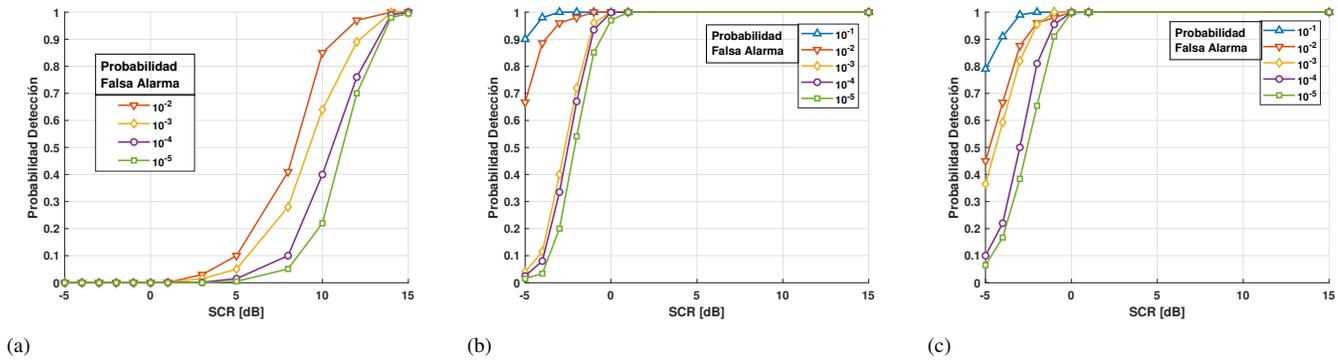


Fig. 8. Curvas Operacionales de Radar – ROC: (a) procesador MTI con filtro HSIAO, (b) procesador MTD con filtro LMS, y (c) procesador Auto-regresivo con filtro LMS.

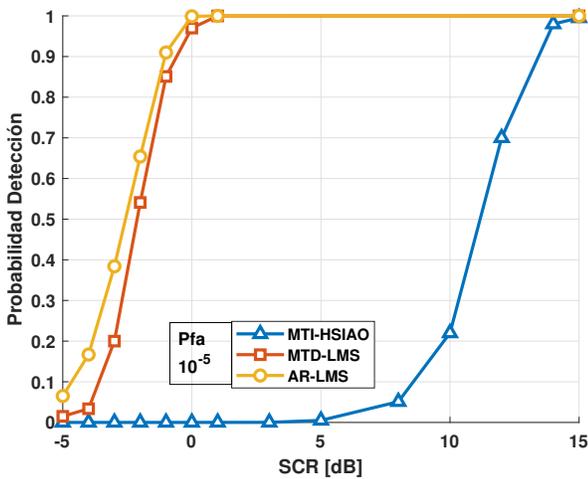


Fig. 9. Curvas ROC de los procesadores MTI, MTD y AR con $P_{fa} = 10^{-5}$ y un ambiente de clutter estacionario.

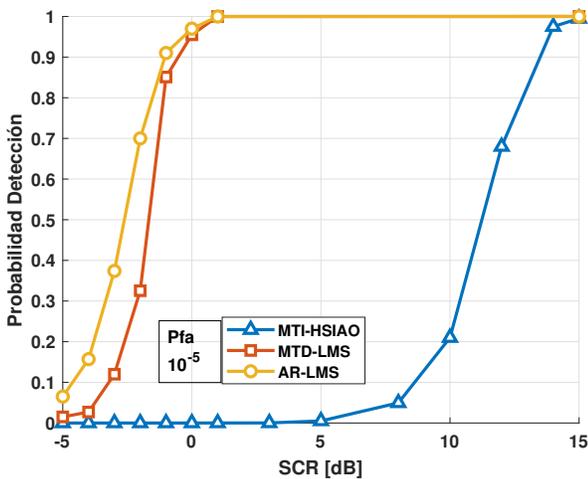


Fig. 10. Curvas ROC de los procesadores MTI, MTD y AR con $P_{fa} = 10^{-5}$ y un ambiente de clutter no estacionario.

La Fig. 11a presenta una señal muestreada, correspondiente a la fase de anillo del radar Skyguard. En este anillo existe la presencia de un objetivo en la muestra 3150 y el objetivo o blanco corresponde a una aeronave a 9 km de la posición del radar. Por otra parte, la Fig. 11b presenta el resultado de procesar el anillo de la Fig. 11a con el procesador auto-regresivo propuesto.

En la Fig. 11b se observa claramente como el pico generado en la salida del procesador AR corresponde a la aeronave, y a pesar de tener retornos fuertes a causa del clutter estos no producen picos en la salidas del procesador AR, ya que el clutter es atenuado con el filtro LMS.

Finalmente, en la Fig. 12 se presenta el indicador de posición (PPI del inglés *Plan Position Indicator*) correspondiente a un giro del radar Skyguard y procesado con el esquema AR propuesto, considerando que un blanco en movimiento ubicado a 9 km del radar en un ángulo de 185° está presente. En la imagen del PPI también se observa un falso positivo generado a 3 km con un ángulo de 30° , y un blanco fijo en 5.5 km con ángulo de 50° .

VI. CONCLUSIONES

El procesador AR propuesto presenta una ganancia aproximada de 13 dB en la detección de objetivos frente al clásico MTI. Por otra parte, el procesador AR tiene una ligera ganancia frente al procesador MTD en la probabilidad de detección; sin embargo, la principal ventaja frente a procesador MTD es la reducción en el costo computacional al no utilizar la FFT y emplear una estimación espectral.

Una ventaja notable del procesador MTD es su mayor precisión en la búsqueda del efecto Doppler de los objetivos. El procesador MTD que utiliza un estimador espectral de máxima entropía da una buena aproximación del valor Doppler del objetivo, pero no presenta la misma precisión que el procesador MTD clásico.

Considerando el costo computacional como un factor determinante, a través de este estudio se concluye que el procesador AR es la mejor opción para una modernización de los procesadores de radar en los sistemas Skyguard, ya que, existe una reducción de 209 operaciones complejas por cada nuevo valor de I y Q .

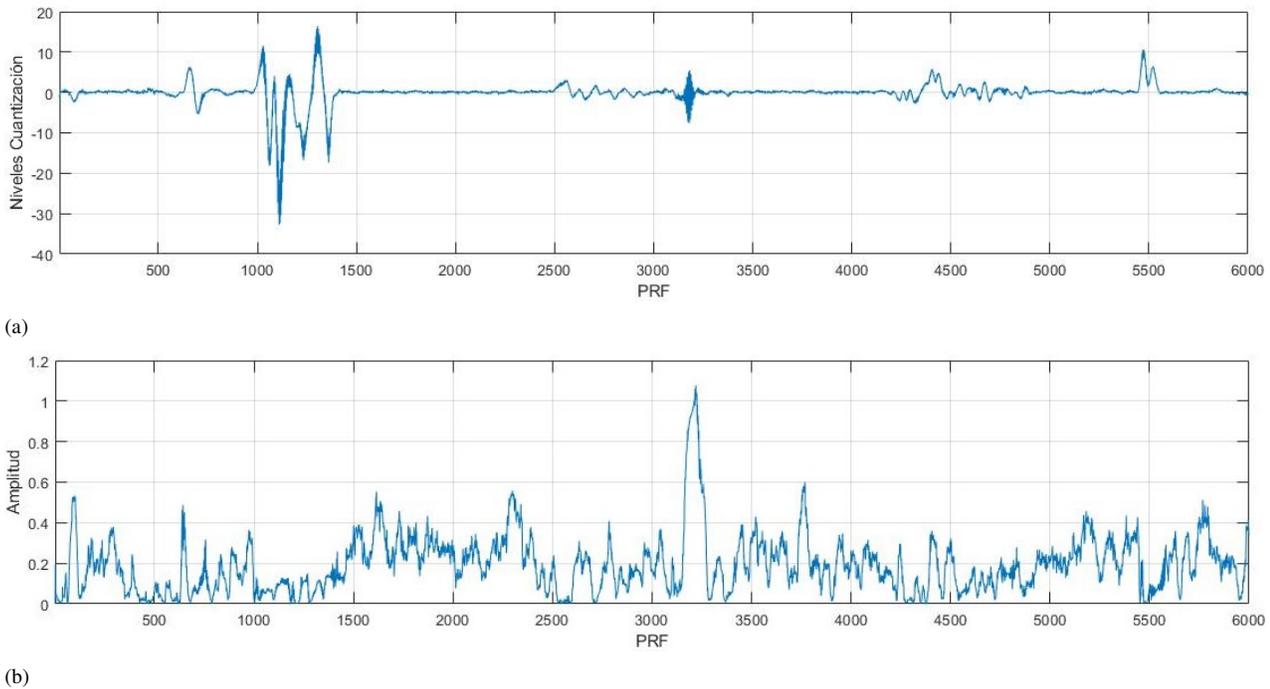


Fig. 11. Señales adquiridas en el radar Skyguard: (a) Señal adquirida para un anillo, y (b) salida de procesador auto-regresivo.

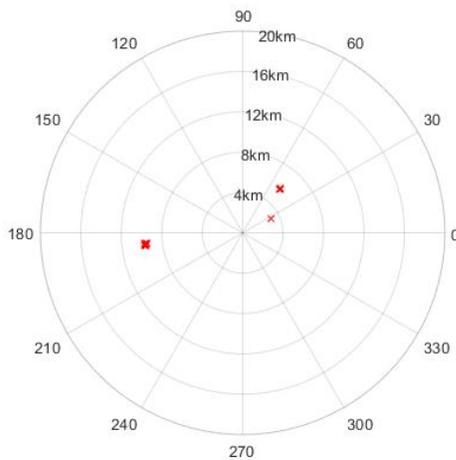


Fig. 12. PPI correspondiente procesador AR: Objetivo móvil 9km - 185°

La evaluación realizada con señales reales presenta resultados prometedores para una futura actualización y operación en tiempo real del procesador Auto-regresivo en el Sistema de Radar Skyguard.

AGRADECIMIENTOS

R. León y A. F. Tinoco expresan sus eternos agradecimientos, por la formación de Posgrado recibida de los Profesores F. Walter, F. Sakane, D. Andrade y J. C. Lacava del ITA Brasil

REFERENCIAS

- [1] P. Wellig, P. Speirs, C. Schuepbach, R. Oechslin, M. Renker, U. Boeniger, and H. Pratisto, "Radar systems and challenges for c-uav," in *2018 19th International Radar Symposium (IRS)*. IEEE, 2018, pp. 1–8.
- [2] Y. Tomita, T. Irabu, and E. Kiuchi, "Moving target indication radar," Oct. 11 1977, uS Patent 4,053,885.
- [3] P. Metford and S. Haykin, "Experimental analysis of an innovations-based detection algorithm for surveillance radar," in *IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing)*, vol. 132, no. 1. IET, 1985, pp. 18–26.
- [4] F. Santi, D. Pastina, and M. Bucciarelli, "Maritime moving target detection technique for passive bistatic radar with gnss transmitters," in *2017 18th International Radar Symposium (IRS)*. IEEE, 2017, pp. 1–10.
- [5] E. Hyun, Y.-S. Jin, Y. Ju, and J.-H. Lee, "Development of short-range ground surveillance radar for moving target detection," in *2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*. IEEE, 2015, pp. 692–695.
- [6] S. Nag and M. Barnes, "A moving target detection filter for an ultra-wideband radar," in *Proceedings of the 2003 IEEE Radar Conference (Cat. No. 03CH37474)*. IEEE, 2003, pp. 147–153.
- [7] E. V. Carrera, F. Lara, M. Ortiz, A. Tinoco, and R. León, "Target detection using radar processors based on machine learning," in *2020 IEEE ANDESCON, 2020*, pp. 1–5.
- [8] M. Yang, J. Yang, Y. Hou, and C. Jin, "Implementation architecture of signal processing in pulse doppler radar system based on fpga," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 21, pp. 7335–7338, 2019.
- [9] H. Deng, Z. Geng, and B. Himed, "Radar target detection using target features and artificial intelligence," in *2018 International Conference on Radar (RADAR)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [10] EUCOMIS, *Fire Control System Skyguard*. Contraves, 1979, vol. 11.
- [11] S. Hovanessian, "An algorithm for calculation of range in a multiple prf radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 2, pp. 287–290, 1976.
- [12] M. I. Skolnik *et al.*, *Introduction to radar systems*. McGraw-hill New York, 1980, vol. 3.
- [13] R. León, "Estimación do parâmetro de forma e densidade espectral de potência de uma sequência weibull coerente discreta no tempo," *Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos*, no. 1, 1992.
- [14] W. W. Shrader and V. Gregers-Hansen, "Mti radar," in *Radar Handbook*. Citeseer, 1970, pp. 1–22.
- [15] M. Ispir and Ç. Candan, "Least square and min-max design of mti filters with nonuniform interpulse periods," in *2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13)*. IEEE, 2013, pp. 1–6.

- [16] F. Lara, M. Ortiz, E. V. Carrera, A. Tinoco, and R. León, "Filtros adaptativos en el procesador bayesiano mti (moving target indicator) para el sistema de radar skyguard del ejército ecuatoriano," *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, no. E29, pp. 650–664, 2020.
- [17] R. O'Donnell, C. Muehe, M. Labitt, W. Drury, and L. Cartledge, "Advanced signal processing for airport surveillance radars," *IEEE Electronic and Aerospace Systems Convention (EASCON'74)*, pp. 71–71, 1974.
- [18] R. O'Donnell and C. Muehe, "Automated tracking for aircraft surveillance radar systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 4, pp. 508–517, 1979.
- [19] A. Farina, A. Russo, F. Scannapieco, and S. Barbarossa, "Theory of radar detection in coherent weibull clutter," in *IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing)*, vol. 134, no. 2. IET, 1987, pp. 174–190.
- [20] S. Kay, "Robust detection by autoregressive spectrum analysis," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 30, no. 2, pp. 256–269, 1982.
- [21] C. Jaramillo, R. León, R. Lara-Cueva, D. S. Benitez, and M. Ruiz, "A new structure for sequential detection and maximum entropy spectral estimator for characterization of volcanic seismic signals," in *2014 IEEE Latin-America Conference on Communications (LATINCOM)*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [22] J. K. Hsiao, "Mti optimization in a multiple-clutter environment," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 3, pp. 401–405, 1976.
- [23] B. Widrow and J. McCool, "A comparison of adaptive algorithms based on the methods of steepest descent and random search," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 24, no. 5, pp. 615–637, 1976.
- [24] B. Widrow and E. Walach, "On the statistical efficiency of the lms algorithm with nonstationary inputs," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 30, no. 2, pp. 211–221, 1984.
- [25] F. Lara and M. Ortiz, "Procesador bayesiano de señales de radar para el sistema oerlikon," Bachelor's Thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Quito - Ecuador, 2019.
- [26] F. Qureshi and O. Gustafsson, "Generation of all radix-2 fast fourier transform algorithms using binary trees," in *2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, 2011, pp. 677–680.
- [27] E. Chu and A. George, *Inside the FFT black box: serial and parallel fast Fourier transform algorithms*. CRC press, 1999.
- [28] H. L. Van Trees, *Detection, estimation, and modulation theory, part I: detection, estimation, and linear modulation theory*. John Wiley & Sons, 2004.
- [29] D. Gage, "Oscar express 44xx compuscope," <http://www.gage-applied.com/digitizers/16-bit/pcie/composcope-oscar-44xx-express.htm>, 2018, online; accessed 22 octubre 2020.



Fernando Lara nació en Quito, Ecuador, el 30 de diciembre de 1995. Obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, en la Universidad de las Fuerzas Armadas. Actualmente cursa el programa de Maestría en Investigación de Electrónica (Telecomunicaciones - ESPE). Sus intereses de investigación son procesamiento digital de señales, procesadores de radar y procesamiento de señales con técnicas de aprendizaje computacional.



Marcelo Ortiz nació en la ciudad de Quito, el 15 de marzo de 1994. Obtuvo su grado de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (2019). Fue participante en el Proyecto Modernización del Procesador del sistema antiaéreo Oerlikon Skyguard. Sus áreas de interés son procesamiento de señales y redes de datos.



Enrique V. Carrera se graduó como ingeniero electrónico en la ESPE (Ecuador) en 1992, obtuvo su maestría en ingeniería eléctrica en la Universidad Católica de Rio de Janeiro en 1996, y en 1999 obtuvo su título de Doctor en Ciencias en la Universidad Federal de Rio de Janeiro. Fue investigador invitado en la Universidad de Rochester, EEUU, en 1999. Del 2000 al 2004, fue investigador asociado en la Universidad de Rutgers, EEUU. Trabajó como profesor asociado en la Universidad San Francisco de Quito hasta el 2011 y desde entonces es profesor titular en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Ecuador). A partir de 2014 ha colaborado como profesor externo en la Universidad Rey Juan Carlos, España, y actualmente es Visitante Distinguido por la Sociedad de Computación del IEEE. Sus principales áreas de investigación son el procesamiento digital de señales y la inteligencia computacional.



Alexis F. Tinoco S. nació en Quito, Ecuador, en 1968. Se graduó en Ingeniería Electrónica (opción Telecomunicaciones) de la "Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército" en Quito - Ecuador (1994). Obtuvo los títulos de Maestría en Ciencias (1999) y Doctor en Ciencias (2011) del Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Fue profesor adjunto en la División de Ingeniería Electrónica y miembro del Laboratorio de Antenas y Propagación - LAP (www.ele.ita.br/lap) de Departamento de Telecomunicaciones de ITA. Actualmente es profesor en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Tiene experiencia en el área de Ingeniería Electrónica, con énfasis en Sistemas de Telecomunicaciones. Antenas de microcinta, redes de antenas, circuitos de microondas y procesamiento de señales digitales son sus áreas de interés.



Hector Moya obtuvo su grado de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en 1996. Fundador de la empresa DESYTEL S.A. en la cual trabaja en el desarrollo de sistemas AVL. Sus áreas de interés son el desarrollo de software y algoritmos avanzados utilizando sistemas OEM.



Rubén León Vásquez nació en Ambato, Ecuador, un 30 de abril de 1962. Se recibió de los grados de Ing. y M.Sc. de las Universidades ESPE e ITA-Brasil, respectivamente. Desde 1985 a 2020 es profesor de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. En 1993 se unió al Centro de Investigación en Aplicaciones Militares CICTE-ESPE. Sus actuales áreas de interés de investigación son Procesamiento digital de señales aplicado a redes de nueva generación y procesadores de radar.