

ANÁLISIS DE LA DECORRELACIÓN DE LA EMISIÓN SECUNDARIA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO BIESTÁTICO Y LA DIFERENCIA DE TIEMPO DE ARRIBO DE LAS SEÑALES

Dr. C. José A. Rodríguez Rojas¹, Nelson Chávez Ferry², Hugo Rodríguez Rodríguez³

^{1,2}Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría.” ³ITM “José Martí”

¹e-mail: jose@isde.co.cu

²e-mail: nelson@tele.cujae.edu.cu

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en determinar el ángulo biestático a partir del cual se puede obtener muestras aleatorias independientes. A su vez, investiga determinar el grado de correlación de las señales retrodispersadas en dependencia de la distribución espacial de los puntos receptores, así como también, la diferencia de tiempo de arribo de estas, cuando se emplea un sistema de radares multiestáticos. La obtención de muestras aleatorias de gran tamaño es una de las exigencias más relevantes para la aplicación y desarrollo del método DRACEC, con el fin de detección en el espacio de los momentos, a partir de su distribución gaussiana. Esta exigencia es difícil de realizar por el tiempo sumamente grande para su obtención y procesamiento. Sin embargo, es posible gracias al empleo de múltiples receptores que permiten obtener simultáneamente muestras aleatorias independientes de gran tamaño. Por otra parte, se desarrolla la simulación de la correlación de la emisión secundaria en función del ángulo biestático, teniendo en cuenta la longitud base entre el transmisor y el receptor, y el ángulo entre ellos. Además, se realiza un análisis exhaustivo de la función de correlación espacial y temporal de las fluctuaciones de la señal de un blanco de radar en un Sistema de Radar Multiestático, (SRME) compuesto por un transmisor y dos receptores. En este trabajo se obtuvo, además las expresiones aproximadas para determinar el coeficiente de correlación, las condiciones aproximadas de alta y baja correlación espacial y temporal de las fluctuaciones de los ecos a la entrada de los receptores del SRME.

PALABRAS CLAVES: Radar biestático, ángulo biestático, sistema de radar multiestático.

ANALYSIS OF SECONDARY EMISSION DECORRELATION AS A FUNCTION OF BISTATIC ANGLE AND SIGNAL ARRIVAL TIME DIFFERENCE

ABSTRACT

The objective of this work is to determine the bistatic angle from which independent random samples can be obtained. It also investigates the degree of correlation of the backscattered signals as a function of the spatial distribution of the receiving points and their time difference of arrival when using a multistatic radar system. Obtaining large, independent random samples is a crucial requirement for applying and developing the DRACEC method, which is used for detection in moment space based on a Gaussian distribution. This requirement is challenging to meet due to the prohibitively long acquisition and processing times involved. However, it becomes feasible through the use of multiple receivers, which enable the simultaneous acquisition of large, independent random samples. Furthermore, this work develops a simulation of the secondary emission correlation as a function of the bistatic angle, considering the baseline length between the transmitter and receiver and the angle between them. An exhaustive analysis is also performed of the spatial and temporal correlation function of the signal fluctuations from a radar target in a Multistatic Radar System (MRCS) comprising one transmitter and two receivers. Finally, this work derives approximate expressions for determining the correlation coefficient, as well as the approximate conditions for high and low spatial and temporal correlation of the echo fluctuations at the input of the MRCS receivers.

INDEX TERMS: Bistatic radar, bistatic angle, multistatic radar system.

Manuscrito recibido: 10-09-2025, aceptado: 01-10-2025

Sitio web: <https://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>

1. INTRODUCCIÓN

Una de las exigencias más relevantes para la aplicación del método de Detección de blancos de Radar por Análisis y Clasificación Estadística de la Emisión Celular (DRACEC), es la obtención de muestras aleatorias independientes de gran tamaño. Esto permitirá desarrollar el método de detección en el espacio de los momentos, a partir de su distribución gaussiana. Esta exigencia es difícil de realizar dado el tiempo sumamente grande para su obtención y procesamiento, por lo que es necesario emplear Sistemas de Radar Multiestáticos (SRME) que en el menor tiempo logren obtener el número de muestras indispensables. Esta condición es posible si se logra determinar el ángulo biestático entre estaciones, a partir del cual se puedan obtener muestras aleatorias decorrelacionadas e independientes.

En los trabajos desarrollados en [1] [2] [3] [4] [5] se destaca la necesidad de la obtención de M muestras, aleatorias, decorrelacionadas e independientes de gran tamaño y solo en [1] se determina cómo lograrlo mediante un SRME. La muestra aleatoria se tomará de gran tamaño, de forma tal que los momentos estadísticos seleccionados, por ejemplo, de primer orden (media) y de segundo orden (correlación), que a su vez son variables aleatorias, tengan una varianza pequeña, tan pequeña como sea posible, de esta manera se garantizará una probabilidad de detección elevada, tanto mayor cuanto mayor sea M . El problema en si consiste en cómo obtener en el menor tiempo posible la cantidad de datos e información suficiente sobre el blanco y el fondo donde está sumergido. Lograr el acopio de tal información, permitirán la caracterización estadística a través del mayor número de momentos de los parámetros posibles a analizar (amplitud, fase, polaridad, etc.). De manera que, determinar el ángulo biestático a partir del cual se puede obtener muestras aleatorias independientes y su grado de decorrelación en dependencia de la distribución espacial de los puntos receptores y de la diferencia de tiempo de arribo es el objetivo fundamental de nuestra investigación.

Cuando la detección de Radar se hace aplicando técnicas como DRACEC que requieren muestras aleatorias de gran tamaño para efectuar la decisión en el espacio de los momentos, el tiempo de formación de las mismas puede ser prohibitivamente grande, cuando el sistema de radar utilizado es del tipo monoestático. Este es el caso de blancos puntuales que se desplazan con velocidades relativamente bajas en el fondo de la superficie marina. De tal modo, el tiempo de permanencia de los mismos en una célula resolutive es mucho menor que el tiempo permisible para tomar una muestra aleatoria de gran tamaño necesaria para obtener la calidad necesaria de la detección, esta sería la contradicción a resolver con el empleo de un SRME

2. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE ALTA Y BAJA CORRELACIÓN DE LA EMISIÓN SECUNDARIA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO BIESTÁTICO

Para alcanzar una correlación desigual a cero entre las estaciones receptoras es necesario que el ángulo entre las estas y el blanco sea pequeño, mientras que la correlación temporal entre ellas sea también desigual a cero y mantenida durante un breve intervalo de tiempo, por otra parte cada centro de dispersión se caracteriza por el radio vector ρ_i el vector de velocidad v_i , y por la amplitud compleja de la señal b_i [5].

Sea en el SRME que se muestra en la Fig. 1 compuesto por un transmisor T_x y dos receptores R_{x1} y R_{x2} en la misma r_0 , r_1 , r_2 vectores unitarios y R_0 , R_1 , R_2 las distancias entre las estaciones receptoras y el blanco. Consideremos que la señal iluminadora será un par de pulsos con intervalo T_0 , además se considera que diferentes centros dispersores, (CDs) no serán resueltos por coordenadas angulares y de distancia.

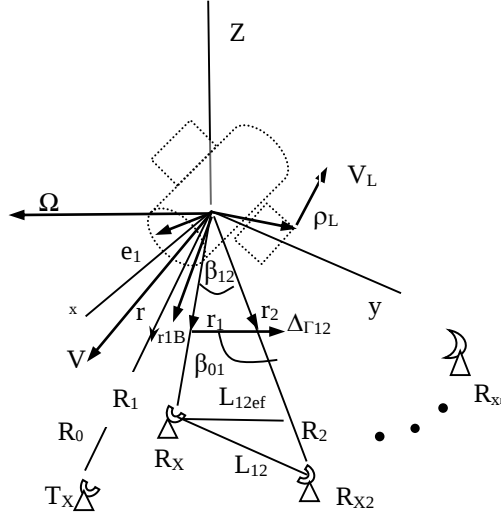


Figura 1: Análisis de la correlación espacio temporal de los ecos de un blanco en rotación.

Cherniak en [5] hace un análisis exhaustivo de la función de correlación espacial y temporal de las fluctuaciones de la señal de un blanco de radar en un sistema multiestático. En este trabajo se obtuvo, además, las expresiones aproximadas que permiten determinar no solo la matriz de covarianza, sino también, el coeficiente de correlación y las condiciones aproximadas de alta y baja correlación espacial y temporal de las fluctuaciones de los ecos de amplitudes complejas, a la entrada de los receptores de este sistema y determina que la región del lóbulo principal de la función de correlación obtenida se caracteriza por pequeñas longitudes de base entre las estaciones y por pequeños ángulos de rotación del blanco que pueden expresarse como:

$$\beta_{12} \approx L_{12ef}/R_1 \ll 1; \Omega T_0 \ll 1 \quad (1)$$

Donde:

- T_0 - intervalo de tiempo de observación.
- Ω - velocidad angular de giro del blanco alrededor de su centro de masa.
- L_{12ef} - longitud base efectiva entre dos estaciones receptoras.
- R_1 - Distancia de la estación hasta el blanco en el instante inicial de tiempo.
- β_{12} - ángulo entre la dirección del blanco y las estaciones receptoras.

Dado que, en la realidad, el número y la ubicación de los centros dispersores, las fases y amplitudes de las señales dispersadas son desconocidas a priori, el empleo directo de las relaciones obtenidas en [4] es raramente posible. Sin embargo, en muchos casos es suficiente estimar las fronteras de las regiones de alta y baja fluctuación de la correlación. Como elemento para establecer esta frontera sirve el módulo del coeficiente de correlación y su argumento. Las ecuaciones aproximadas para los módulos y fase de los coeficientes de correlación espacial R_{12} y temporal R_{kk} descritas y argumentadas en [4] corresponden con las expresiones:

$$|R_{12}| \approx |R_{21}| \approx 1 - (\pi^2 k_{12}^2 l_{12}^2 / 6\lambda^2) (L_{12ef}^2 / R_1^2) \quad (2)$$

$$|R_{kk}| \approx 1 - (2\pi^2 k_{kk}^2 l_{kk}^2 / 3\lambda^2) \cos^2(\beta_{0k}/2) \sin^2 \varepsilon_{kb} \Omega^2 T_0^2 \quad (3)$$

Donde:

- k_{11}, k_{12} - coeficientes que determinan la diferencia entre la distribución actual de los CDs en el blanco y la distribución uniforme.
- l_{12} - dimensiones del blanco a lo largo del vector unitario Δr_{12} .
- Δr_{12} - vector unitario dirigido desde r_1 a r_2 perpendiculares a la bisectriz de $\delta\tau \approx \frac{1}{\Delta f} \beta_{12}$.
- β_{0k} - ángulo biestático entre los vectores unitarios r_0 y r_k .
- ε_{kb} - ángulos entre el vector unitario r_k dirigido a la k-énima estación y Ω .

Las condiciones aproximadas de alta y baja correlación espacial y temporal son definidas en [4] [5] y se describen a continuación:

Regiones de alta correlación:

$$\begin{aligned} (L_{12ef}/R_1) &\leq (0.14 - 0.24)\lambda/l_{12}; \text{ para dos estaciones receptoras.} \\ (L_{12ef}/R_1) &\leq (0.07 - 0.12)\lambda/l_{12}; \text{ para dos radares monoestáticos.} \\ \Omega \sin \varepsilon_{kb} T_0 &\leq 0.07 = 0.12\lambda/k_{kk}l_k \cos(\beta_{0k}/2); (k = 1,2) \end{aligned} \quad (4)$$

Con estos criterios se expresa la máxima separación admisible entre estaciones y el ángulo de rotación del blanco, durante el intervalo de tiempo T_0 , para coeficientes de correlación dados por $|R_{12}| \geq 0.95$ y $|R_{kk}| \geq 0.95$; ($k = 1,2$). De este modo, para mantener una alta correlación espacial de las fluctuaciones de los ecos en un SRME, el ángulo entre las direcciones desde un blanco hacia las estaciones receptoras (L_{12ef}/R_1) podría no exceder una pequeña fracción (0.14-0.24) del ancho promedio del patrón dispersión del blanco. Este ancho promedio está determinado por la dimensión de blanco a lo largo de la dirección de la línea base efectiva.

Para mantener una alta correlación temporal de las fluctuaciones de los ecos en cada estación, el ángulo de la rotación del blanco alrededor del eje perpendicular al plano biestático (que pasa a través de la estación transmisora y la receptora), durante un intervalo de tiempo T_0 considerado no podrá exceder una pequeña fracción (0.07-0.12) del ancho promedio del patrón de dispersión del blanco. En este caso, el patrón de dispersión está determinado por la dimensiones del blanco a lo largo de dirección perpendicular a ambos ejes de rotación y la bisectriz del ángulo β_{01} . Cuando el coeficiente de correlación de las amplitudes reales no excede (0.20-0.25), estas fluctuaciones pueden ser consideradas prácticamente como decorrelacionadas. En este caso, el módulo del coeficiente de correlación de las amplitudes complejas no es más que (0.45-0.50) [5].

Regiones de baja correlación:

$$\begin{aligned} (L_{12ef}/R_1) &\geq \min[0.8\lambda/l_{12}; 3\lambda/\Delta\theta_y l_z; 3\lambda/\Delta\theta_z l_y] \\ (L_{12ef}/R_1) &\geq \min[0.4\lambda/l_{12}; 1.5\lambda/\Delta\theta_y l_z; 1.5\lambda/\Delta\theta_z l_y] \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

- l_{12}, l_z, l_y - dimensiones del blanco a lo largo del vector unitario perpendicular a la bisectriz del ángulo biestático β_{12} y a lo largo del eje z y del eje y.
- $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z$ -rangos de incertidumbre del aspecto inicial del blanco con respecto a la rotación alrededor de los ejes x, y, z respectivamente.

La primera expresión está relacionada con el caso de una pareja de dos estaciones receptoras, mientras que, la segunda expresión está relacionada con el caso de una pareja de radares monoestáticos con independiente recepción de la señal, cuando trabajan en una misma frecuencia. La condición de baja correlación espacial requiere que el ángulo entre las direcciones desde el blanco, hacia cada pareja de estaciones receptoras debe ser no menor que 0.8 del ancho promedio

del patrón de dispersión del blanco, determinado por la dimensión l_{12} . En el caso de una pareja de radares monoestáticos 0.4 sería sustituida por 0.8. Como el interés del análisis se enmarca en la región del lóbulo principal de la función de correlación entonces, a partir de las aproximaciones presentadas en (5) desarrolladas por Cherniak en [5] se puede expresar que:

$$2\text{sen}\left(\frac{\beta_{12}}{2}\right) \approx \frac{L_{12ef}}{R_1} \quad (6)$$

Sustituyendo el término izquierdo de (6) por su equivalente en (4) se obtiene la siguiente desigualdad:

$$2\text{sen}\left(\frac{\beta_{12}}{2}\right) \leq (0.14 \div 0.24) \frac{\lambda}{l_{12}} \quad (7)$$

Despejando β_{12} se obtiene el ángulo biestático por debajo del cual se trabajará en la región de alta correlación:

$$\beta_{12} \leq 2\arcsen(0.07 \div 0.112) \frac{\lambda}{l_{12}} \quad (8)$$

Para el caso cuando $l_{12} = \lambda$, $\beta_{12} \leq (8.02 \div 13.7)$

Por otra parte, se conoce de (6) que la correlación espacial decrece con el incremento de las relaciones de la longitud de base efectiva sobre la distancia del blanco, R_1 y de las dimensiones del blanco sobre la longitud de onda. Entonces a través de similar razonamiento se puede establecer el ángulo a partir del cual, las fluctuaciones de las amplitudes complejas de las señales a la entrada de las estaciones receptoras se encuentran en la región de baja correlación.

$$2\text{sen}\left(\frac{\beta_{12}}{2}\right) > 0.8 \frac{\lambda}{l_{12}} \quad (9)$$

Despejando β_{12} en (9) se obtiene el ángulo biestático a partir del cual se trabajará en la región de baja correlación:

$$\beta_{12} > 2\arcsen\left(0.4 \frac{\lambda}{l_{12}}\right) \quad (10)$$

Cuando $l_{12} = \lambda$, entonces $\beta_{12} = 47.1^\circ$

Si se despeja β_{12} a partir de la ecuación (6) se obtiene la expresión para demostrar la validez de los razonamientos anteriores.

$$\beta_{12} = 2\arcsen\left(\frac{L_{12ef}}{2R_1}\right) \quad (11)$$

3. ANÁLISIS DE LA DECORRELACIÓN DE LA EMISIÓN SECUNDARIA EN FUNCIÓN DEL ANGULO BIESTÁTICO Y LA DIFERENCIA DE TIEMPO DE ARRIBO DE LAS SEÑALES

Si se tiene en cuenta, que la diferencia de fase entre las señales que arriban a los puntos receptores se expresa como:

$$\Delta\phi = \omega\delta\tau \quad (12)$$

Entonces, la diferencia de camino se puede establecer en función de la diferencia de tiempo de arribo de las señales ($\delta\tau$) a la entrada de las estaciones receptoras y se expresa como: $\delta_R = \delta\tau C$, por lo que:

$$\Delta\phi = 2\pi f \frac{\delta_R}{C} \quad (13)$$

En la Fig. 2 se muestra un SRME centralizado con dos triángulos biestáticos $P_1P_0P_2$ y $P_1P_0P_3$ compuesto por dos estaciones receptoras P_1 , P_3 y un radar multiestático P_2 , el cual genera en el espacio una región de retrodispersión de las ondas electromagnéticas compuesta por i, j células resolutiveas. Esta geometría nos permitirá obtener muestras aleatorias decorrelacionadas de gran tamaño de los ecos de Radar en el receptor del monoestático en dependencia del ángulo biestático con respecto a cada una de las células resolutiveas [1] condición suficiente y necesaria que exige la teoría (DRACEC) [2] [3] [4], lo que conlleva a un análisis de la decorrelación de la emisión secundaria en función del ángulo biestático y la diferencia de tiempo de arribo de las señales.

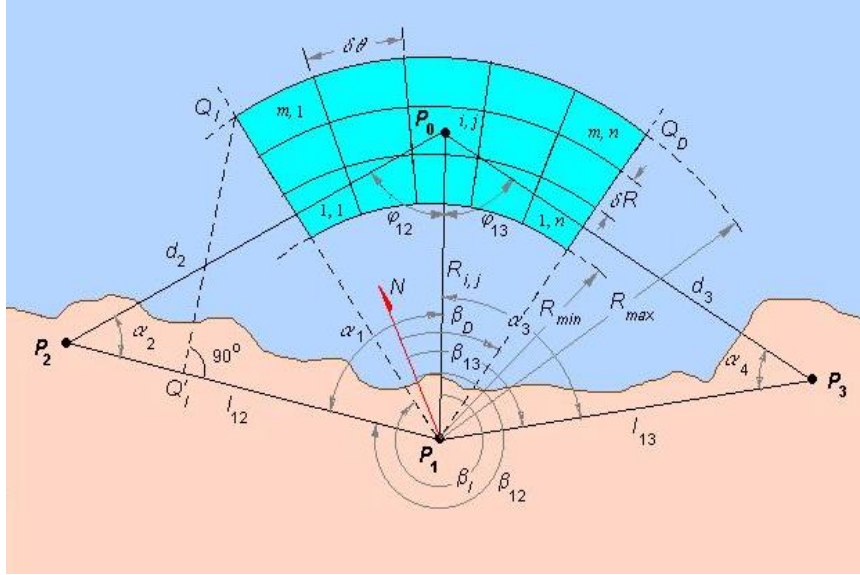


Figura 2: Región del espacio generada por el sistema SRME centralizado.

De la geometría del problema Fig. 2 se observa que el ángulo biestático β_{12} se puede obtener según la expresión:

$$\beta_{12} = \arcsen\left(\frac{l_{12}\sin\alpha_1}{d_2}\right) \quad (14)$$

Si d_2 se expresa como $R - \delta_R$ y además también, como una función de la diferencia de tiempo de arribo de las señales a la entrada de las estaciones receptoras ($\delta_R = \delta\tau c$) [2] entonces, sustituyéndola en (1) se obtiene la expresión que relaciona el ángulo biestático con la diferencia de tiempo de arribo de las señales δ_t :

$$\beta_{12} = \arcsen\left(\frac{l_{12}\sin\alpha}{R - \delta_t c}\right) \quad (15)$$

Donde:

- δ_t - diferencia de tiempo de arribo expresado como $\delta_t = \frac{(R - d_2)}{c}$.

En [1] se expone que, el ancho de la envolvente del lóbulo principal de la función de correlación mutua de las señales recibidas puede ser expresado en términos de diferencia de tiempo de arribo, más conocido por sus siglas en inglés TDOA ($\delta\tau \approx \frac{1}{\Delta f}$), así como también, en términos de diferencia de camino $\delta_R = \frac{c}{\Delta f}$. Además, si se plantea que a la región del lóbulo principal de las funciones de correlación le corresponde pequeñas longitudes de base entre las estaciones y pequeños ángulos de rotación del blanco [5] entonces, para las condiciones anteriores es válido establecer

para las regiones de alta y baja correlación la comparación entre los resultados obtenidos en (8) y (10), los cuales son comparables con los obtenidos en la expresión (2), a partir de que $\delta\tau \approx \frac{1}{\Delta f}$. Si los valores de $L_{efect} = l_{12} \sin \alpha_1$ según geometría del problema Fig. 2, R_1 y $\delta\tau \approx \frac{1}{\Delta f}$ se sustituyen en (15), se tiene una nueva expresión:

$$\beta_{12} = \arcsen \frac{L_{efect}}{R_1 - \frac{1}{\Delta f} c} \quad (16)$$

Por ejemplo, para $\Delta f = 700\text{kHz}$, entonces, los valores obtenidos $\beta = 9.57^\circ$ y $\beta = 56.7^\circ$, son comparables con los obtenidos en el ejemplo de la expresión (1) y se encuentran dentro del rango establecido en (8) y (10) para las regiones de alta y baja correlación respectivamente. De (15), si se sustituye $\delta t = \frac{(R-d_2)}{c}$ se llega nuevamente a la expresión (14), lo que confirma su correspondencia como se aprecia con la geometría del problema. Por otra parte, con la expresión (16) se determina la relación del ángulo biestático con respecto a la TDOA y se establece el ángulo biestático a partir del cual se obtiene muestras decorrelacionadas en cada una de las células resolutivas del sector de exploración si se conoce el valor de α_1 . De la geometría del problema Fig. 2 del triángulo biestático $P_1P_0P_2$ se puede expresar:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 360^\circ + \beta_{10i} - \beta_{12}, & \beta_{10i} < \beta_{12} \\ \beta_{10i} - \beta_{12}, & \beta_{10i} > \beta_{12} \end{cases} \quad (17)$$

El parámetro β_{10i} se conoce y se ubica dentro los límites del sector de exploración, se calcula a través de:

$$\beta_{10i} = \beta_{10l} + (j - 1)\delta\beta \quad (18)$$

igualmente, la distancia hasta un anillo en un sector j dado, se determina por la expresión:

$$R_{1j} = R(i - 1)_{min} \quad (19)$$

Con estas expresiones se determina el valor de $d_2^2 = R_{ij}^2 + l_{12}^2 - 2l_{12}R_{ij} \cos \alpha_1$, que a su vez se expresa como:

$$d_2 = R - \delta t c \quad (20)$$

Por lo que en (8) y (10) se establece el ángulo biestático crítico calculado en la expresión (6) a partir del cual se alcanza la zona de baja correlación y su correspondencia con la TDOA.

4. ANÁLISIS DEL TIEMPO DE OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE MUESTRAS ALEATORIAS INDEPENDIENTES

Como se explica en [2] [3] [4] [6] dentro de las exigencias del método DRACEC, están en emplear M muestras de gran tamaño de los parámetros de las señales reflejadas por los elementos que integran cada una de las células resolutivas de la región explorada. Las muestras no deben ser correlacionadas, con el objetivo de permitir el control de la probabilidad de detección y obtener un vector de clasificación o de rasgos. Como es sabido, la muestra aleatoria se toma de gran tamaño, de forma tal que los momentos estadísticos seleccionados, que a su vez son variables aleatorias, tengan una varianza pequeña, tan pequeña como sea posible. De esta forma se garantizará una probabilidad de detección elevada, tanto mayor cuanto mayor sea M , como se demuestra a continuación. Tomemos de ejemplo un radar monoestático, cuya frecuencia de repetición sea de 1500 Hz y un ancho del patrón de irradiación, asumiendo que la antena esta fija, iluminando de forma continua una célula resolutiva. Como se puede observar en la Fig. 3, al calcular los momentos estadísticos de primer orden (media) y de segundo orden (correlación), a medida que aumenta el tamaño de la muestra, la probabilidad de detección mejora, pero también aumenta el tiempo para la obtención de una muestra.

Si se tiene en cuenta, que para la toma de decisión se debe obtener un número grande de muestras M , por ejemplo, 10^4 para una P_{fa} de 10^{-4} , de este análisis se desprende la importancia que posee la decorrelación, para obtener muestras de gran tamaño aleatorias e independientes en un SRME que permiten disminuir el tiempo del procesamiento y a su vez, la obtención de los momentos estadísticos [6] [7] [8] [9] [10].

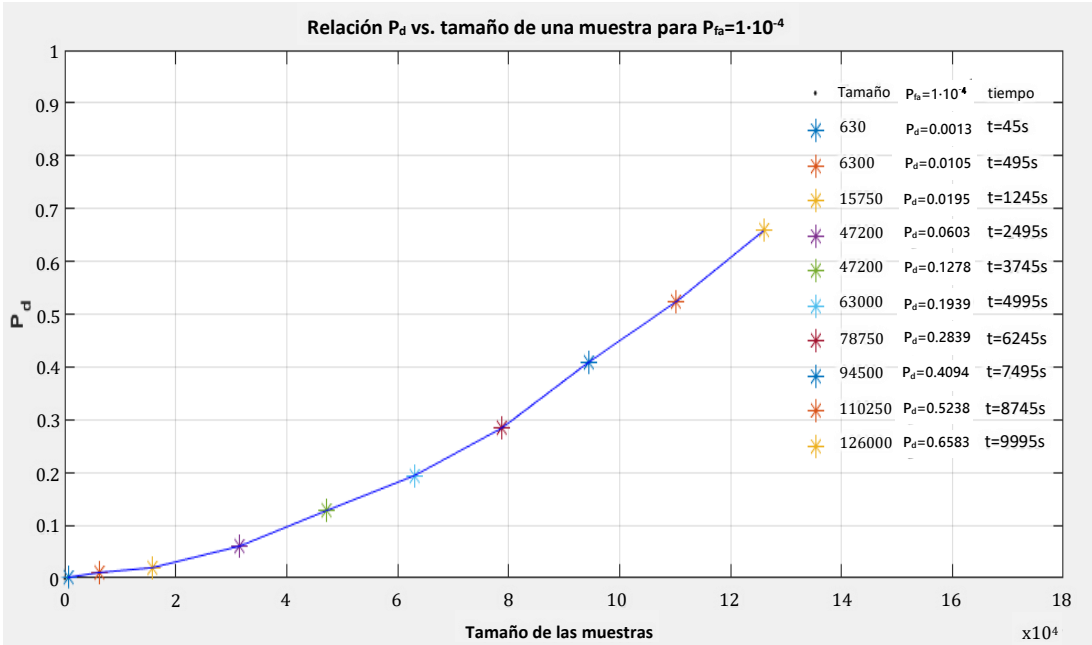


Figura 3: Relación Probabilidad de detección contra tamaño de una muestra.

5. ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN DE LA DECORRELACIÓN DE LA EMISIÓN SECUNDARIA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO BIESTÁTICO Y LA DIFERENCIA DE TIEMPO DE ARRIBO DE LAS SEÑALES

La matriz de ángulos biestáticos se obtiene a partir de la sustitución de $\delta\tau$ en (15) por la expresión $t_{ri} = \frac{R_1+R_2}{c}$, es decir, por $t_{ri} = -\frac{b_{12}}{c} \frac{\text{sen}(\frac{\Sigma\beta}{2}-\beta_{21})}{\text{sen}\frac{\Delta\beta}{2}}$, que es el tiempo de arribo de la señal dispersada del blanco, el cual coincide con el tiempo de muestreo necesario de las señales de retrodispersión en cada una de las células resolutivas del sector de exploración. Esto se traduce en la matriz de la diferencia de tiempo de arribo, en función de los ángulos biestático y de la longitud base o longitud efectiva del radar [1]. En la Fig.4 se muestran las simulaciones a partir de un experimento real desarrollado de un sistema multiestático, donde se aprecia que para distancias de detección superiores a 6 Km e inferiores a los 4 km los ángulos biestáticos están por encima y por debajo del ángulo crítico para la zona de alta y baja correlación según los datos obtenidos.

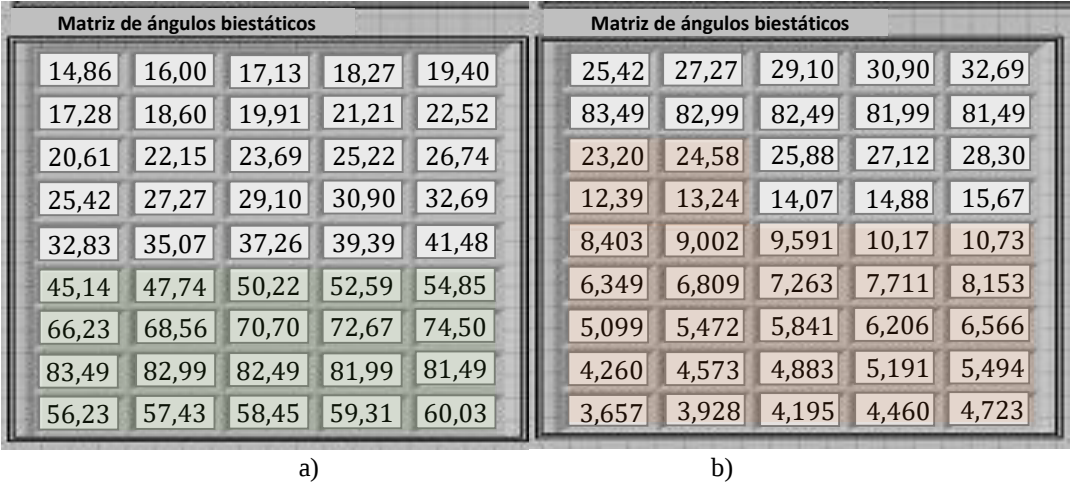


Figura 4: Matriz de ángulos biestáticos de a) alta y b) baja correlación.

En la Fig.5 se muestra el algoritmo de la matriz de ángulos biestáticos, cuyos resultados se representaron en la Fig.4.

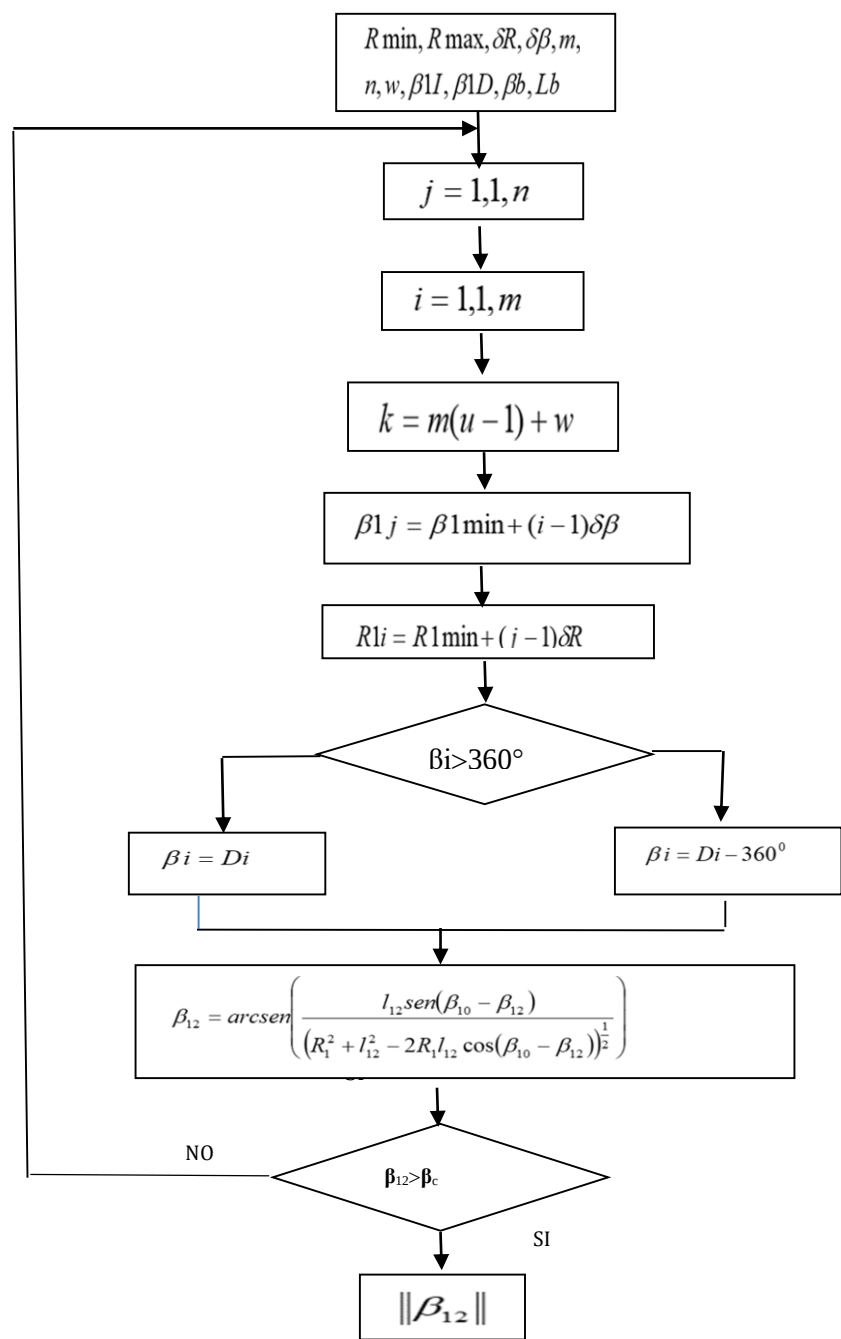


Figura 5: Algoritmo de la matriz de ángulos biestáticos.

6. SIMULACIÓN DE LAS ZONAS DE ALTA Y BAJA CORRELACIÓN DE LA EMISIÓN SECUNDARIA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO BIESTÁTICO

La simulación de las zonas de alta y baja correlación de la Emisión Secundaria en Función del Ángulo Biestático se pueden determinar mediante el algoritmo de la Fig.6. Sea $L_{efect} = 2000m$, $R_1 = 10000 m$, entonces resolviendo según la expresión (11) se obtiene que $\beta_{12} = 11.4^\circ$, valor que está en el rango establecido de (8) para la región de alta correlación, que corresponde con un coeficiente de correlación de $K_{12} = 0.96$. Por otra parte, si $L_{efect} = 8000m$, $R_1 = 10000 m$, se obtiene que $\beta_{12} = 47.1^\circ$, valor que está en el rango establecido de (10) para la región de alta correlación, el cual se corresponde con el coeficiente de correlación $K_{12} = 0.15$.

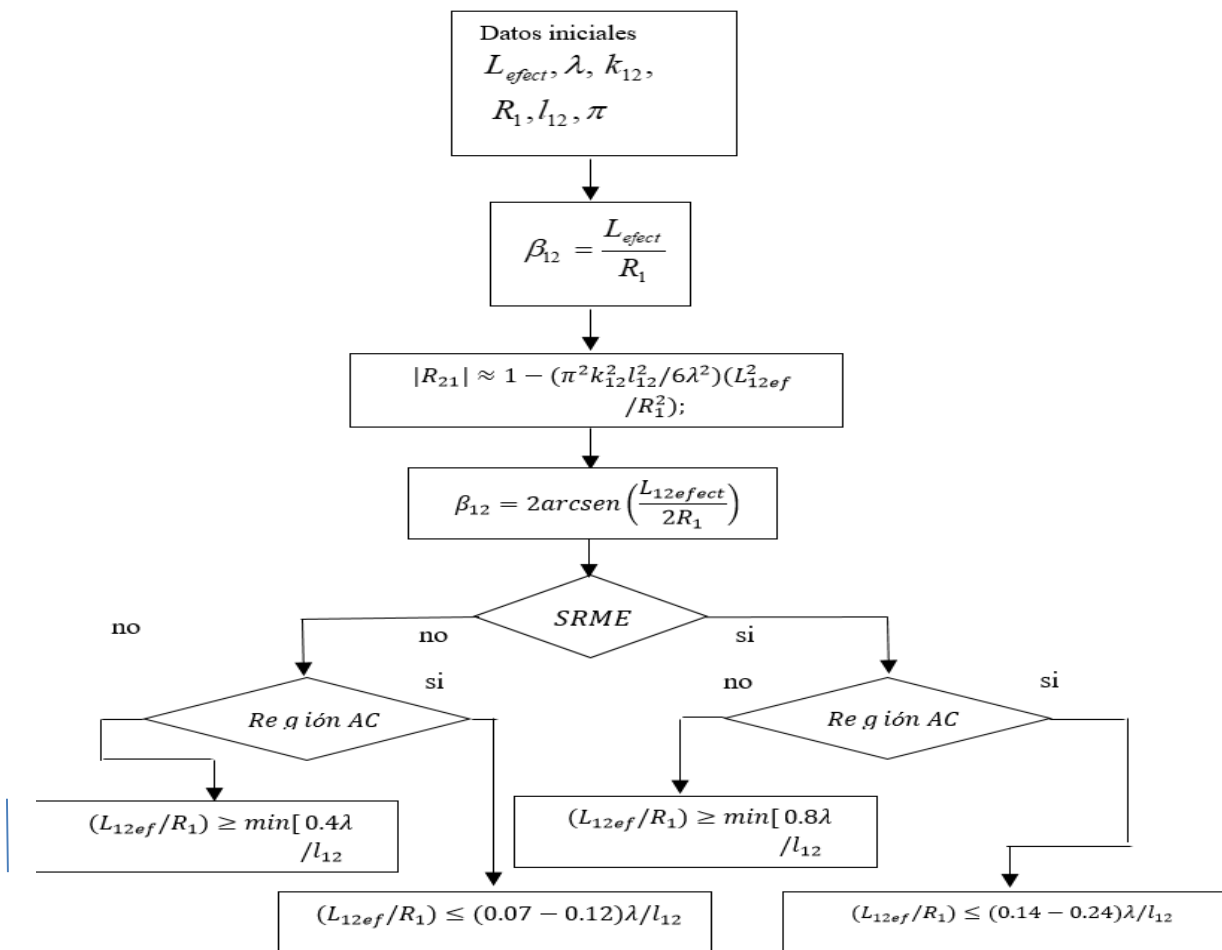


Figura 6: Algoritmo para el cálculo de las zonas de baja y alta correlación.

El Panel que implementa los ángulos biestáticos de las zonas de baja y alta decorrelación se muestra en la Fig.7.

PARAMÉTRICOS DEL SISTEMA		Sistema de Radares Multiestático	
Lefect, [m]	Long. de onda, [m]	ALTA CORRELACIÓN MULTIESTÁTICA	Azimut Biestático B de alta correlación B12 dec, [grados]
8000	0,032	●	13,7852
Rdet, m	Dimensión longitudinal, [m]	BAJA CORRELACIÓN MULTIESTÁTICA	Azimut Biestático B de baja correlación B12 dec, [grados]
10000	0,032	●	47,1598
Lefect/Rdet	Coef distr CD		
0,8	0,9		
Correlación		Red de Radares Monoestático	
●		BAJA CORRELACIÓN MONOESTÁTICA	Azimut Biestático B de baja correlación mono B12 dec, [grados]
●		●	23,0756
Coeficiente de correlación	Azimut Biestático B12 [grados]	ALTA CORRELACIÓN MONOESTÁTICA	Azimut Biestático B de alta correlación mono B12 dec, [grados]
0,15	47,1598	●	6,88013

Figura 7: Panel frontal para los ángulos biestático que determinan las zonas de baja y alta decorrelación.

7. CONCLUSIONES

Durante la investigación se determinó las zonas de baja y alta correlación de la Emisión Secundaria en Función del Ángulo Biestático, así como sus respectivas matrices, las cuales dependerán a su vez de la matriz de los ángulos de arribos y de la distancia entre las estaciones receptoras. Además, también se calculó el ángulo biestático a partir del cual se obtendrán muestras aleatorias decorrelacionadas, al mismo tiempo se obtuvo la relación de las probabilidades de detección con respecto al tamaño de una muestra.

REFERENCIAS

- [1] J.A. Rodríguez Rojas "Método de Obtención de Muestras Aleatorias de Gran Tamaño de los ecos de Radar con el Empleo de un Sistema Multiestático Centralizado", Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias, ITM "José Martí". La Habana, Cuba 2011.
- [2] Chávez Ferry, C. Guillen Soriano. "Detección por radar en el espacio de los Momentos de los parámetros de la señal dispersada". Conf. Digital Signal Processing". La Habana, Cuba, 2019. 83, pp. 359-366.
- [3] C. Guillen Soriano. "Formación de la Muestra Aleatoria y Cálculo de los Momentos Estadísticos para un Detector DRACEC". Tesis en opción del título de Master en Ciencias, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría". La Habana, Cuba 2018.
- [4] C. Guillen Soriano, N. Chávez Ferry. "Decision Rules for Radar Detection in the Moment Space with Arbitrary Correlation Degree and Constant False Alarm Rate", Progress 7th International Workshop on Artificial Intelligence and Pattern Recognition I WAIPR 2021, Havana. Cuba, October 5-2021.
- [5] V.S. Cherniak Fundamentals of Multisite Radar System, Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [6] C. Guillen Soriano, N. Chávez Ferry. "Decision Rules for Radar Detection in the Moment Space with Arbitrary Correlation Degree and Constant False Alarm Rate", Progress 7th International Workshop on Artificial Intelligence and Pattern Recognition I WAIPR 2021, Havana. Cuba, October 5-2021.

[7] C. Guillen Soriano, N. Chávez Ferry. "Radar Detection in the moment Space with Constant False Alarm". Digital Signal Processing 114 103080. 2021.

[8] C. Guillén Soriano y N. C. Ferry, "Determinación de la frontera de decisión y evaluación de la calidad de la detección en el método DRACEC para dos momentos de la amplitud". Journal of Aerospace Technology and Menagemennt 11 e2218. 2019.

[9] C. Guillén Soriano y N. Chávez, "Formación de la muestra aleatoria y cálculo de los momentos estadísticos para un detector DRACEC". Tesis en opción del título de Master en Ciencias, Universidad Tecnológica de la Habana José A. Echeverría La Habana Cuba 2018.

[10] C. Guillén Soriano y N. C. Ferry, "Supervised Clasification of Radar Targets Using el Espacio de los Momentos" Y.A. Germade, CG Soriano, N. Chávez. Telemática 20(4), pp. 40-51, 2021.

Sobre los autores

José Armando Rodríguez Rojas, es Ingeniero Radiotécnico, Doctor en Ciencias y Profesor Titular. en la Universidad Tecnológica de la Habana, provincia La Habana, Cuba. ORCID 0000-0002-9117-2371

Nelson Chávez Ferry, es Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencias y Profesor Titular. en la Universidad Tecnológica de la Habana, provincia La Habana, Cuba. ORCID 0000-0001-6580-9095

Hugo Rodríguez Rodríguez, es Ingeniero, Radiotécnico, especialista en radar graduado en la especialidad de sistemas radiotécnicos en la Universidad Tecnológica José Martí posee la categoría docente de Profesor Auxiliar, en la actualidad se encuentra desarrollando su tesis Doctoral. ORCID 0009-0002-0224-2440

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Autor 1:** 100% de la conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y aprobación de la versión final a publicar.
- **Autor 2:** 50% de contribución a la idea y organización del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y de la versión final.
- **Autor 3:** 50% de contribución a la idea y organización del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y de la versión final.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

