

SISTEMA DE ESTIMACIÓN DE DIRECCIÓN DE ARRIBO PARA UN RADIO COGNITIVO CONSCIENTE DE LA UBICACIÓN

Yunior Ibarra Guerra, Alexander R. Ramírez Zaldívar, Abel Hernández Violat, Noslen Rojas
Ramírez

CID MECATRONICS, Calle 15 y 86A, Playa, La Habana, Cuba
cid3@reduim.cu

RESUMEN

El conocimiento de la ubicación espacial de Usuarios Primarios licenciados (PU, por sus siglas en inglés) puede impactar positivamente el proceso de detección espectral e intercambio en Redes de Radio Cognitivo (CRN, por sus siglas en inglés). De forma general, los PU no cooperan con usuarios secundarios, lo que hace del proceso de su ubicación un verdadero reto. Uno de los métodos más efectivos de la localización de PU en CRN se basa en la estimación de la Dirección de Arribo (DoA, por sus siglas en inglés) de sus señales con empleo de arreglos de antenas. Aunque los fundamentos teóricos de estas técnicas se encuentran ampliamente divulgados, este no es el caso de las variantes de implementación en escenarios reales. En este trabajo, se propone la implementación práctica de un sistema de estimación de DoA para CRN con el empleo de transceptores integrados de microondas conectados a una placa de desarrollo de FPGA de Intel. El diseño basado en el empleo combinado de lógica programable y software ejecutado en un procesador empotrado, permite solucionar el problema de estimación de DoA en arreglos de antenas. La comprobación experimental con señales de PU reales permite corroborar el correcto funcionamiento de sistema en escenarios prácticos. El diseño implementado constituye una vía factible en la obtención práctica de CRN como solución a la creciente saturación espectral actual y puede extenderse a otras aplicaciones como las redes de sensores inalámbricos o el despliegue de la 6G en la que las CRN constituyen una tecnología clave.

PALABRAS CLAVES: DoA, Dirección de Arribo, Radio Cognitivo, Nios II, FPGA.

DIRECTION OF ARRIVAL ESTIMATION SYSTEM FOR A LOCATION AWARE COGNITIVE RADIO

ABSTRACT

Licensed Primary Users (PU) spatial location awareness by Cognitive Radios(CR) can positively impact the Cognitive Radio Networks(CRN) spectral sensing and sharing process. PU generally doesn't cooperate with secondary users who make its location process a real challenge. One of CRN's most effective PU location methods is based on its signal's Direction of Arrival (DoA) estimation using antenna arrays. Although the theoretical foundations of these techniques are widely disclosed, this is not the case for the implementation variants in real scenarios. This work proposes the practical implementation of a DoA estimation system for CRN with integrated microwave transceivers connected to an Intel FPGA development board. Based on the combined use of programmable logic and software executed in an embedded processor, the design allows for solving the DoA estimation problem in antenna arrays. The experimental verification with accurate PU signals provides for verifying the correct operation of the system in practical scenarios. The implemented design constitutes a feasible way to obtain practical CRN as a solution to increasing spectral saturation. It can be extended to other applications, such as wireless sensor networks or the deployment of 6G, in which CRN constitutes a key technology.

INDEX TERMS: DoA, Direction of Arrival, Cognitive Radio, Nios II, FPGA.

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad actual se enfrenta a una saturación espectral sin precedentes y se prevé que empeore en el futuro cercano con el incremento de tecnologías inalámbricas emergentes. Algunas de las más representativas lo constituyen la Sexta Generación de Celulares (6G), la internet de las Cosas (IoT), por sus

siglas en inglés), así como el empleo extensivo de Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) por solo citar algunos [1-5]. En este sentido, la tecnología de radio cognitiva se presenta como una solución prometedora al inevitable problema de saturación y sub utilización del espectro radioeléctrico. De forma general, los radios cognitivos realizan la detección espectral, identifican dinámicamente el espectro inutilizado y de forma oportunista emplean aquellos agujeros espectrales para su propia transmisión. El despliegue de esta tecnología mejora la eficiencia espectral mediante el acceso de múltiples usuarios secundarios a bandas ociosas del espectro licenciado. Presenta como retos fundamentales el intercambio equitativo y eficiente del espectro a través de la detección espectral y el cumplimiento de las políticas de acceso [6].

Los esquemas de detección espectral cooperativos (CCS, por sus siglas en inglés) permiten mejorar el rendimiento de la detección espectral en las CRN [7]. En este caso, es posible explotar la diversidad espacial de múltiples usuarios para un despliegue efectivo de las CRN, donde la información de la ubicación de los PU permita mapear bandas vacantes de manera eficiente [8, 9]. Esta nueva funcionalidad facilita un salto cualitativo superior a los sistemas existentes y se denomina radio cognitivo consciente de la ubicación [10-12]. Los radios cognitivos conscientes de la ubicación propician el despliegue de capacidades claves en las CRN que incluyen la detección espacio-temporal mejorada [13, 14], el enrutamiento inteligente [15, 16] y nuevas estrategias de asignación de recursos de radio [17].

Aunque los fundamentos de la CR conciben un motor de ubicaciones dentro de su estructura cognitiva, sus principios de diseño y empleo no han recibido tanta atención debido a las limitaciones físicas de los terminales de radio. La mayor parte de los estudios de la radio cognitiva se enfocan en la detección e intercambio espectral eficiente y la asignación de recursos por métodos tradicionales [18-20]. Existen variantes en las WSN donde se adiciona un receptor de GPS a cada usuario secundario para compartir su ubicación con el resto de los nodos [3]. Sin embargo, un problema a afrontar es que el PU no comunica con los CR y solo se dispone de un conocimiento muy limitado acerca de su señalización, potencia o esquema de modulación. Por tanto, se necesita acudir a las técnicas de localización pasivas no cooperativas para implementar esta nueva funcionalidad en los CR [3].

Las técnicas de localización pasivas pueden categorizarse en cuatro tipos fundamentales con base a la naturaleza de la información que comparten los CR para obtener los estimados de la ubicación. Estas se basan en: la Intensidad de Señal Recibida, el Tiempo de Arribo, la Diferencia de Tiempo del Arribo y la Dirección o Ángulo de Arribo (RSS, ToA, TDoA y DoA o AoA, por sus siglas en inglés, respectivamente) [21-23]. Los métodos que se basan en la RSS estiman la dirección de los usuarios primarios a partir de la potencia de sus señales con un costo computacional y de hardware relativamente bajo. Como desventaja presenta una baja exactitud que se traduce en considerables errores de posición. Por otro lado, en los métodos que se basan en ToA y TDoA, se obtienen los estimados de la ubicación a partir del retardo de tiempo de las señales que se reciben en múltiples terminales de radio. Cuando se emplean varios nodos alcanza una buena exactitud, pero como inconveniente requieren una precisa sincronización entre múltiples CR además se necesitan como mínimo tres nodos, lo que complica el proceso de implementación y puesta a punto [23]. Por último, los métodos que se basan en la estimación de DoA emplean la información de las direcciones de los PU para obtener los estimados de la ubicación. Una gran ventaja que presentan los métodos de estimación de DoA es que con un mínimo de dos nodos (CR), en este caso dos, es posible ubicar los PU. Los estimados de DoA pueden obtenerse bien por antenas direccionales, arreglos de antenas, o arreglos virtuales formados por CR cooperativos [14].

El empleo de arreglos de antenas con el procesamiento coherente de las señales es el único que permite la estimación de DoA de PU que coexisten en frecuencia, así como en presencia de interferencia co-canal [24, 25]. Además, posibilitan la aplicación de métodos de estimación de DoA de superresolución angular, donde es posible superar al límite espacial de Rayleigh [26]. Una ventaja de esta característica es que permite incrementar la resolución angular sobre la base del procesamiento de las señales sin necesidad de modificar la estructura del arreglo.

En este sentido, en [2] se propone un nuevo método de detección espectral con empleo un arreglo de antenas para la estimación de DoA de las señales de PU y de esta forma se mejora la probabilidad de detección de una CRN. Por otro lado, en [1] se propone un nuevo paradigma de detección profundo en comunicaciones 5G para estimar de forma conjunta el estado de la ubicación y ocupación espectral de PU. En [3] se presenta un nuevo algoritmo de estimación conjunta de la frecuencia portadora y DoA en dos dimensiones (2D) y se realiza el seguimiento espacial de PU en CRN con un filtro extendido de Kalman.

La principal desventaja que presentan los métodos de estimación de DoA con arreglos de antenas y en particular los que alcanzan la superresolución, es la demanda de una mayor potencia de cálculo y la

complejidad del hardware. El requerimiento de múltiples canales receptores coherentes en un mismo CR es lo que ha limitado por años su empleo en escenarios prácticos. Sin embargo, gracias a los avances en la microelectrónica, se encuentran disponibles en el mercado transceptores integrados de banda ancha y dispositivos con gran potencia de cálculo a un relativo bajo coste.

El empleo de estos dispositivos disminuye el encarecimiento de la implementación de los sistemas de radio con arreglos de antenas [27]. No obstante, a pesar de madurez teórica de las técnicas de CR y estimación de DoA, poco se divulga acerca de la implementación práctica de los métodos de estimación de DoA con superresolución en los CR. La mayor parte de los trabajos se limita a la validación mediante simulaciones, lo que no siempre considera las complejidades del hardware o el costo de la implementación real. Además, en algunas ocasiones se proponen métodos de solución novedosos cuya aplicación en tiempo real resulta prohibitiva debido al elevado costo computacional.

Este trabajo tiene como objetivo la implementación práctica de un sistema de estimación de DoA de PU para un radio cognitivo multicanal con arreglo de antenas. El empleo de uno de los métodos más eficientes para la estimación de DoA con superresolución permite alcanzar los requerimientos para su funcionamiento en tiempo real. La comprobación del sistema implementado con señales reales en un entorno electromagnético complejo, permite validar su correcto funcionamiento. El sistema permite la integración en una CRN donde la ubicación exacta de cada PU se conoce a partir de los estimados de DoA proporcionado por cada CR y de esta forma se puede mejorar considerablemente el CSS.

2. RADIO COGNITIVO CONSCIENTE DE LA UBICACIÓN

Si se considera la red de radio cognitivo que se presenta en la figura 1, formada por el CR1 y el CR2, donde coexisten los usuarios primarios PU1, PU2 y PU3. El PU2 con dirección θ_2 respecto a CR1 transmite en una cierta banda de frecuencias con portadora f_2 . En caso de que CR2 no reciba las transmisiones del PU2, CR1 puede transmitir en la misma banda de frecuencias hacia CR2 en la dirección opuesta de PU2.

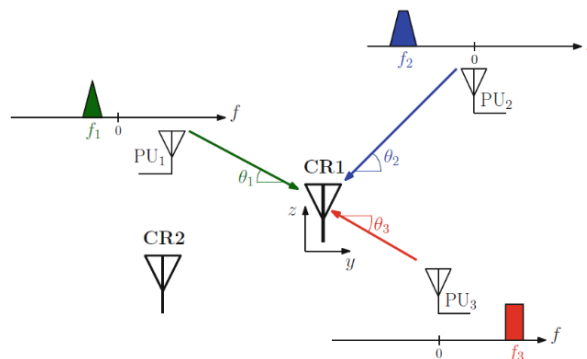


Figura 1: Ilustración de tres transmisiones de PU que inciden en un sistema de CR consciente de la ubicación.

Bajo esta concepción, la estimación de DoA puede mejorar el rendimiento de los CR con el conocimiento de las bandas vacantes en el dominio espacio-frecuencia [28]. La exactitud de la localización en sistemas de comunicaciones inalámbricos permite detectar bandas vacantes en el dominio de la frecuencia, lo que facilita el establecimiento de nuevos enlaces para los usuarios secundarios. Además, tributa de forma sustancial a la información del estado del canal (CSI, por sus siglas en inglés), lo que permite establecer enlaces confiables con elevadas tasas de datos [29].

Modelo de los datos para la estimación de DoA en radios cognitivos

Si se considera un Arreglo Lineal Uniforme (ULA, por sus siglas en inglés) de M antenas isotrópicas como el que se muestra en la Fig. 2. En la zona lejana al arreglo existen P fuentes emisoras que transmiten señales de banda estrecha no correlacionadas desde diferentes direcciones $\{\theta_1, \dots, \theta_p\}$.

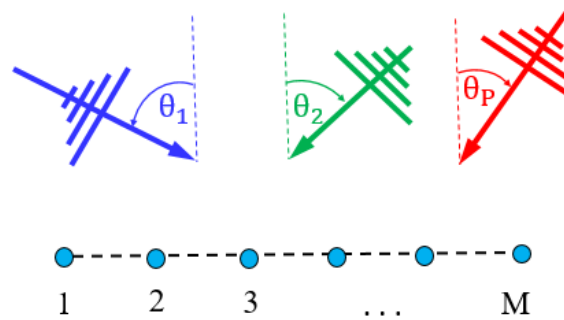


Figura 2: Estimación de la DoA de P emisores en el espacio por un arreglo lineal uniforme de M antenas.

El vector de observaciones de dimensión $M \times 1$ que se obtiene a la salida del arreglo de antenas, se define por la ecuación (1).

$$x(t) = As(t) + n(t), t = 1, \dots, N \quad (1)$$

donde: $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_p)]$ es la matriz de respuestas del arreglo de antenas, $s(t) = [s_1(t), \dots, s_p(t)]$ es el vector de fuentes de señal, N es el número de muestras y el vector de respuestas del arreglo debido a la p-ésima fuente emisora se expresa por la ecuación (2).

$$a(\theta_p) = [1, e^{j2\pi \sin(\theta_p)d/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(M-1)\sin(\theta_p)d/\lambda}]^T \quad (2)$$

donde: $(\cdot)^T$ es la transpuesta, λ es la longitud de onda de la frecuencia portadora y d es el espaciamiento entre elementos del arreglo de antenas. Se asume que el ruido $n(t)$ es un proceso blanco Gaussiano con media cero y covarianza $\sigma_n^2 I_M$ [30], donde I_M es la matriz de identidad de $M \times M$ elementos, además el ruido es no correlacionado con la señal $s(t)$.

Métodos de estimación de DoA sobre la base del procesamiento de señales de arreglos de antenas

La estimación de la dirección de arribo mediante el procesamiento de señales de arreglos de antenas brinda probadas ventajas sobre otros métodos [26]. Una de las más representativas constituye la capacidad de estimar la DoA de múltiples fuentes emisoras en la misma frecuencia portadora de forma simultánea. Esta característica posee una elevada importancia en la ubicación y localización de fuentes de interferencia co-canal en los sistemas de comunicaciones de radios cognitivos [6]. Los métodos de estimación de DoA con superresolución se caracterizan por estimar la DoA con resoluciones superiores al ancho del haz principal del arreglo de antenas, a diferencia del método que se basan en la formación del diagrama direccional de forma digital como es el caso de Capon y Bartlett [7].

En este sentido, el método de Clasificación de Múltiples Señales (MUSIC, por sus siglas en inglés) constituye una solución eficiente al problema de estimación de DoA con superresolución. MUSIC es el método espectral que mejor rendimiento muestra y el desarrollo de varias modificaciones permiten adaptarlo a varias aplicaciones [31]. A pesar de constituir un método subóptimo [26], MUSIC estima con superresolución la DoA de $M - 1$ señales en una búsqueda espectral unidimensional. Su principal desventaja es la sensibilidad a los efectos de la propagación por múltiples trayectos, aunque estos pueden mitigarse con los métodos de preprocesamiento como el promedio y suavizado espacial [31].

En la Fig. 3 se muestra el espectro espacial P, obtenido por los métodos de Bartlett, Capon y MUSIC en un arreglo ULA de 10 elementos al que inciden dos señales desde las direcciones -10° y 5° .

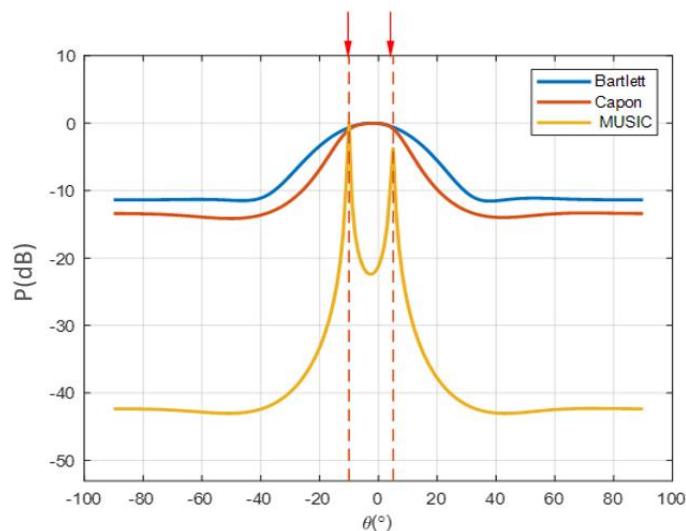


Figura 3: Comparación del espectro espacial de los métodos de estimación de DoA con baja resolución y con superresolución.

Como se aprecia, el método de MUSIC forma dos picos definidos en las direcciones correspondientes a las fuentes emisoras, por lo que es posible discernirlas con elevada resolución. Sin embargo, el espectro se fusiona en uno solo pico en el método de Bartlett y Capon, por lo que es imposible determinar con exactitud las direcciones de las fuentes emisoras. Esta característica denota la baja resolución de los métodos que se basan en la formación digital del diagrama direccional comparado con los de superresolución como MUSIC.

Otro método que se emplea es el de Estimación de Parámetros por Técnicas de Invariancia Rotacional (ESPRIT, por sus siglas en inglés) [32-34], este posee una buena exactitud en el estimado debido a que posee solución analítica, a diferencia de los métodos espectrales como MUSIC. Como desventaja presenta la necesidad del doble de elementos de antenas que MUSIC para estimar la DoA del mismo número máximo de fuentes emisoras y se ha demostrado que no posee buen rendimiento con un número de antenas relativamente bajo [26]. Además, necesita que los elementos del arreglo de antenas presenten la propiedad de invarianza rotacional espacial [35].

Los métodos que más exactitud alcanzan en la estimación de DoA con superresolución son los que se basan en el principio de Máxima Verosimilitud (ML, por sus siglas en inglés). Un problema común en estos métodos es la necesidad de solucionar un problema de optimización multidimensional no lineal. Por su complejidad computacional, los métodos disponibles para solucionar esta problemática son prácticamente irrealizables en aplicaciones en tiempo real, además de que no necesariamente garantizan la convergencia global [31]. De forma similar, el método de Ajuste del Subespacio Ponderado (WSF, por sus siglas en inglés) es uno de los métodos más robustos desarrollados para la estimación de DoA. WSF combina el principio de ML con el de los subespacios de las muestras, lo que le permite la estimación de DoA de manera más eficiente. También presenta como desventaja que no posee solución analítica, por lo que se revuelve por métodos iterativos con una fuerte carga computacional para aplicaciones en tiempo real [31].

Una de las modificaciones de MUSIC que más se emplea es el método Root-MUSIC Unitario [31], sobre todo por su buen rendimiento en ULA y relativo bajo coste computacional [31]. Este aprovecha la estructura de Vandermonde de la matriz de respuestas del ULA y sustituye la búsqueda espectral por un problema de factorización de polinomios complejos. La factorización polinómica le permite estimar las DOA sin la necesidad de una búsqueda espectral discreta, por lo que arroja mejor exactitud que MUSIC. Las operaciones con matrices poco densas permiten mitigar los efectos indeseables del multi trayecto de forma similar al promedio espacial [31]. Además, la transformación unitaria de la matriz R_x de números complejos a reales simplifica de manera considerable el proceso de implementación del método. Estos son los aspectos que se consideraron para la selección de Root-MUSIC Unitario para la implementación de la estimación de DoA en el radio cognitivo consciente de la ubicación.

Método Root-MUSIC Unitario

La matriz de covarianza espacial de los sensores R_x , constituye un parámetro clave en los métodos que se basan en subespacios los constituye. Cuando las señales son no correlacionadas con el ruido, R_x puede expresarse mediante la ecuación (3).

$$R_x = E\{x(t)x(t)^H\} = AR_sA^H + \sigma_n^2 I_M \quad (3)$$

Donde $R_s = E\{s(t)s(t)^H\}$, $E\{\cdot\}$ representa el operador esperanza matemática, σ_n^2 es la varianza de ruido y $(\cdot)^H$ es la traspuesta conjugada de una matriz. En la práctica R_x es desconocida, por lo que un buen estimado lo constituye la ecuación (4) [31].

$$R_x = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T x(k)x(k)^H \quad (4)$$

donde T es el número de muestras. El método Root-MUSIC Unitario sustituye la matriz R_x por una matriz de covarianza espacial de valores reales dada por la ecuación (5).

$$C = \frac{1}{2} Q_M^H (R + J_M R_x^* J_M) Q_M = \text{Re}\{Q_M^H R_x R_x Q_M\} \quad (5)$$

Donde $\text{Re}\{\cdot\}$ representa la parte real de un número complejo y $(\cdot)^*$ representa la operación compleja conjugada de una matriz. J_M es una matriz de intercambio de dimensión $M \times M$ que posee unos en la anti diagonal y ceros en las demás posiciones. Q_M es una matriz poco densa unitaria definida por la ecuación (6), donde 0_1 es un vector de 1 ceros, cuyo valor se define en el primer caso para un número de M par e impar para el segundo.

$$Q_M = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_1 & jI_1 \\ J_1 & -jI_1 \end{bmatrix}, & \text{para } M = 2l \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_1 & 0_1 & jI_1 \\ 0_1^T & \sqrt{2} & 0_1^T \\ J_1 & 0_1 & -jI_1 \end{bmatrix}, & \text{para } M = 2l + 1 \end{cases} \quad (6)$$

La descomposición en valores propios de C se define por la ecuación (7).

$$C = \Lambda_s E_s^H + \sigma_n^2 E_n E_n^H \quad (7)$$

donde $E_s = [e_1, \dots, e_P]$ son los vectores propios de señal, $E_n = [e_{P+1}, \dots, e_M]$ son los vectores propios de ruido y Λ_s es una matriz diagonal de los valores propios de señal. De esta forma, el polinomio del método Root-MUSIC Unitario puede expresarse de acuerdo a la ecuación (8).

$$f_{U_MUSIC}(z) = \tilde{a}^T(1/z) E_n E_n^T \tilde{a}(z) \quad (8)$$

donde: $\tilde{a}(z) = Q_M^H \tilde{a}(z)$ y $z_i = e^{j2\pi d \sin \theta_i / \lambda}$ son las raíces de la ecuación 8. Si se determinan las P raíces más cercanas al círculo unitario, es posible estimar las DOA a partir de la ecuación (9), donde \angle representa el operador de ángulo.

$$\theta_i = \sin^{-1} \frac{\angle(z_i) \lambda}{2\pi d}, \quad i = 1, \dots, P \quad (9)$$

En [31] se demuestra que Root-MUSIC con promediación hacia adelante y hacia atrás de la matriz de covarianza espacial y Root-MUSIC Unitario poseen el mismo rendimiento. Este último además posee la ventaja de ser más eficiente desde el punto de vista computacional debido a que todos los cálculos se

realizan con valores reales. El seudocódigo de la implementación del método Root-MUSIC Unitario se muestra en la Fig. 4.

Esquema Root-MUSIC Unitario	
1.	$\mathbf{R} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \mathbf{x}(k)\mathbf{x}(k)^H$ /* Matriz de covarianza*/
2.	$\mathbf{C} = \text{Re}\{\mathbf{Q}_M^H \mathbf{R} \mathbf{Q}_M\}$ /* Transformación Unitaria*/
3.	$[\mathbf{V}, \mathbf{\Lambda}] = \text{eig}(\mathbf{C})$ /* Descomposición en Valores Propios*/
4.	$\mathbf{V} = \mathbf{V}_s \mathbf{V}_n$ /* Submatrices de señal vs ruido*/
5.	$\mathbf{V}_n = \mathbf{V}(P+1:N)$ /* Submatriz de ruido*/
6.	$\tilde{\mathbf{a}}(z) = \mathbf{Q}_M^H \mathbf{a}(z)$ /* Transformación unitaria de la matriz de respuestas*/
7.	$f_{U_MUSIC}(z) = \tilde{\mathbf{a}}^T(1/z) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^T \tilde{\mathbf{a}}(z)$ /* Polinomio de Root MUSIC Unitario*/
8.	$\mathbf{Z}_i(1:P) = \text{roots}(f_{U_MUSIC}(z))$ /* Extracción de las P raíces del polinomio más cercanas al círculo unitario */
9.	$\theta_i = \sin^{-1} \frac{\angle(\mathbf{Z}_i)\lambda}{2\pi d}$, $i = 1, \dots, P$ /* Cálculo del ángulo de DOA a partir de las P raíces encontradas*/

Figura 4: Seudocódigo del algoritmo Root-MUSIC Unitario para la estimación de DoA.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ESTIMACIÓN DE DOA

Selección de la plataforma de hardware para la implementación del método de estimación de DoA

Para responder a la demanda de los sistemas de comunicaciones inalámbricas de nueva generación, las tecnologías de radiofrecuencia actuales poseen requerimientos que restringen su tamaño, peso, potencia y costo (SWaP, por sus siglas en inglés). Gracias a los avances en el campo de la microelectrónica, es posible la fusión en un solo chip de funciones que hace una década se realizaban en componentes por separado. Ejemplo de esto lo constituyen la familia de transceptores integrados AD93XX y ADRV93XX de Analog Devices [36]. El AD9361 es uno de los circuitos integrados más difundidos en placas de evaluación para el desarrollo de prototipos en aplicaciones prácticas con un relativo corto período de tiempo. En el presente trabajo se seleccionó la placa de evaluación ARRradio de la compañía Terasic [37] para la recepción de las señales de radiofrecuencia. Esta entrega las muestras digitalizadas de las componentes en fase y en cuadratura en banda base del transceptor AD9361 a través un conector de alta velocidad HSMC. Además, permite la entrada de un oscilador y reloj externo para garantizar la coherencia en los sistemas de recepción multicanales.

Como plataforma de procesamiento en FPGA se seleccionó la placa de desarrollo de TR4 de Terasic, esta porta un dispositivo FPGA Stratix IV de Intel y es compatible con la interfaz HSMC de los ARRradio. Entre las ventajas de esta selección resaltan la posibilidad de emplear múltiples ARRradios en una misma placa a través de sus conectores HSMC, así como la disponibilidad de varias salidas de reloj para la sincronización las señales recibidas por múltiples canales. Posee dos conectores PCI Express 4x y una ranura de memoria RAM para la extensión de las capacidades de almacenamiento temporal. Además, posee un elevado número de recursos lógicos que permiten la implementación de complejos algoritmos de procesamiento de señales de arreglos de antenas.

A partir del seudocódigo de Root-MUSIC Unitario de la Fig. 4, cabe destacar que a pesar de ser uno de los métodos menos complejos entre los disponibles, aún persiste una fuerte carga computacional para su implementación en sistemas embebidos. Los principales requerimientos radican en la ejecución en tiempo real del cálculo de la matriz \mathbf{R}_x , su descomposición en valores propios y la determinación de las raíces de un polinomio complejo de orden $2M-2$. El empleo combinado de diseños en Lenguaje de Descripción de

Hardware (HDL, por sus siglas en inglés) y procesadores empotrados de alto rendimiento, constituye una solución factible para la ejecución de complejos algoritmos en tiempo real [38]. En esta se combina el alto grado de paralelismo de la lógica programable en HDL con la flexibilidad y precisión del software en un procesador. Es por ello que se seleccionó esta arquitectura de procesamiento para la implementación del método de estimación de DoA seleccionado.

Programación de los transceptores e implementación del método seleccionado

Como muestra la Fig. 5, se emplearon dos transceptores integrados AD9361 conectados a la FPGA a través del conector HSMC del ARRradio para un total de cuatro canales radio receptores. El control y configuración de los AD9361 se realizó por el procesador Nios II a través del protocolo de comunicación SPI según se describe en [39]. Las muestras I/Q de salida de los AD9361 se reciben a través de un bus de 12 bits en formato CMOS de salida simple [39]. En la implementación de la recepción de los datos se integró la calibración de las diferencias de amplitud y fase de los canales receptores sobre la base de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) [40].

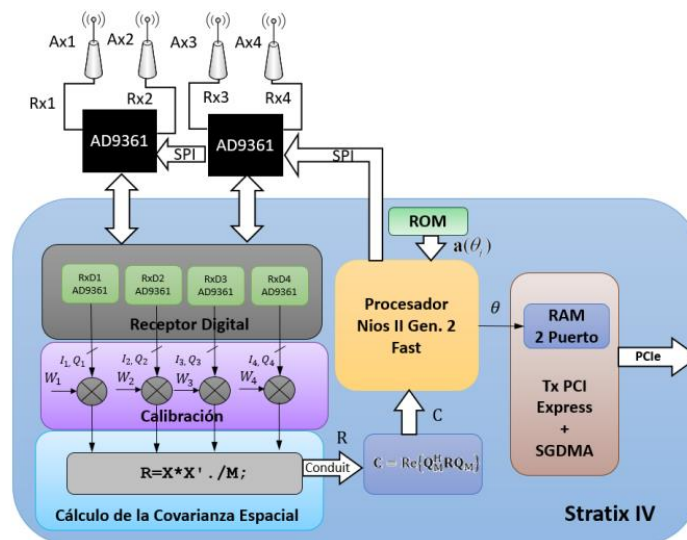


Figura 5: Diagrama funcional de la implementación en FPGA del método Root-MUSIC Unitario.

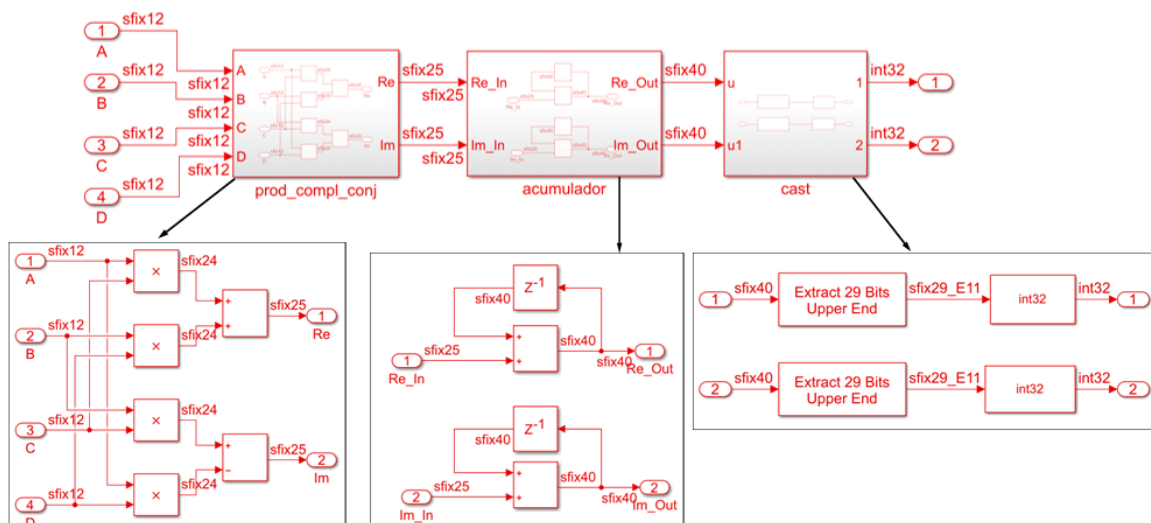


Figura 6: Modelo en Simulink del cálculo de la matriz de covarianza en punto fijo.

La matriz de covarianza espacial se implementó en HDL mediante el flujo de diseño basado en modelos de Simulink y el toolbox HDL Coder de Matlab. Como se aprecia en la ecuación (5), el cálculo de los valores de la matriz de covarianza puede expresarse como la suma acumulada del producto complejo conjugado de dos señales. Para asegurar el máximo paralelismo, cada uno de los coeficientes de la matriz se implementó de forma independiente mediante el modelo de la Fig. 6.

En el diseño se empleó la notación en punto fijo, los datos de 28 bits a la salida del acumulador se estandarizaron a enteros con signo de 32 bits para la compatibilidad con los registros internos del procesador Nios II. A partir del modelo obtenido, se generó el código HDL con las restricciones temporales necesarias y se comprobó en Quartus Prime 17.0. La transmisión de la matriz de covarianza unitaria al procesador Nios II se implementó de forma paralela para asegurar la mínima latencia.

Se empleó la biblioteca de C++ JACOBI_EIGENVALUE C++ para la descomposición de los valores propios de la matriz C [41]. Esta biblioteca permite el cálculo de los valores y vectores propios de una matriz simétrica real mediante el método iterativo de Jacobi. La búsqueda de las raíces del polinomio complejo de la ecuación (8) se realizó mediante el método numérico de Laguerre. Este constituye uno de los métodos más efectivos para la búsqueda de raíces reales, complejas, simples o múltiples. Aunque para algunos tipos de raíces complejas poco se ha probado acerca de su convergencia, una gran experiencia empírica sugiere que la no convergencia es extremadamente inusual [41].

4. RESULTADO Y DISCUSIONES

Uno de los retos que enfrenta la implementación práctica de sistemas de estimación de DoA para radios cognitivos en la actualidad es la disponibilidad de sistemas de verificación efectivos durante su funcionamiento. En el caso particular de la estimación de DoA, una variante es la incorporación de receptores GPS en cada PU para tomar como referencia su ubicación y luego comprobar el rendimiento real del sistema.

Este proceso se simplificó con el empleo de señales de PU cooperativos que en su estructura transmiten la información relacionada con su posición. En este caso se emplearon las señales provenientes del equipamiento de Transmisión Automática de Vigilancia Dependiente (ADS-B, por sus siglas en inglés) de la aviación comercial. Se seleccionó el filtro adaptado como técnica de detección espectral debido a la estructura conocida de las señales. El receptor ADS-B y filtro adaptado se implementaron en HDL para la posterior detección y decodificación de los datos de referencia. De esta forma se capturaron las señales a procesar por el sistema de estimación de DoA y se siguieron PU específicos. Esto permitió la posterior comprobación del rendimiento de los estimados de DoA con elevada precisión. En la Fig. 7 se muestra el esquema funcional de la validación comprobación del subsistema de estimación de DoA implementado.

Se empleó un ULA de 4 dipolos de media onda con plano reflector trasero separados a media longitud de onda en la frecuencia de 1090 MHz. El arreglo se ubicó en exterior a una altura adecuada para la recepción de las señales ADS-B y se conectó a través de cables coaxiales de bajas pérdidas a los cuatro canales receptores de los ARRradio. El primer canal de recepción se derivó a la entrada receptor ADS-B implementado en HDL para la recepción y decodificación del identificador de las señales y así estimar la DoA de los PU de interés. Por otro lado, las señales del arreglo de antenas en su conjunto se procesan en banda base en el sistema implementado. En la Fig. 8 se muestra una captura de las componentes en fase de las señales ADS-B recibidas por cada dipolo del arreglo de antenas y adquiridas durante las pruebas provenientes de un avión comercial, la sinusoide envolvente resulta producto del efecto Doppler.

Luego del procesamiento de las señales del arreglo de acuerdo al método Root-MUSIC Unitario, se envían los valores de DoA estimados a la PC a través de la interfaz PCI Express junto a los datos de posición obtenidos por el receptor ADS-B de la trama detectada. En una interfaz gráfica en Matlab, se representa en tiempo real el ángulo y trayectoria angular obtenido por el sistema de estimación de DoA. En otro software, con base en los datos de la trama ADS-B recibida, se calcula la posición y acimut del transmisor con respecto al punto de referencia establecido. A la izquierda de la Fig. 9 se muestra el acimut decodificado

de la trama de un transmisor ADS-B (310.57 °) y a la derecha, el resultado de la estimación de DoA mediante el método Root-MUSIC Unitario implementado en la FPGA (310.81 °).

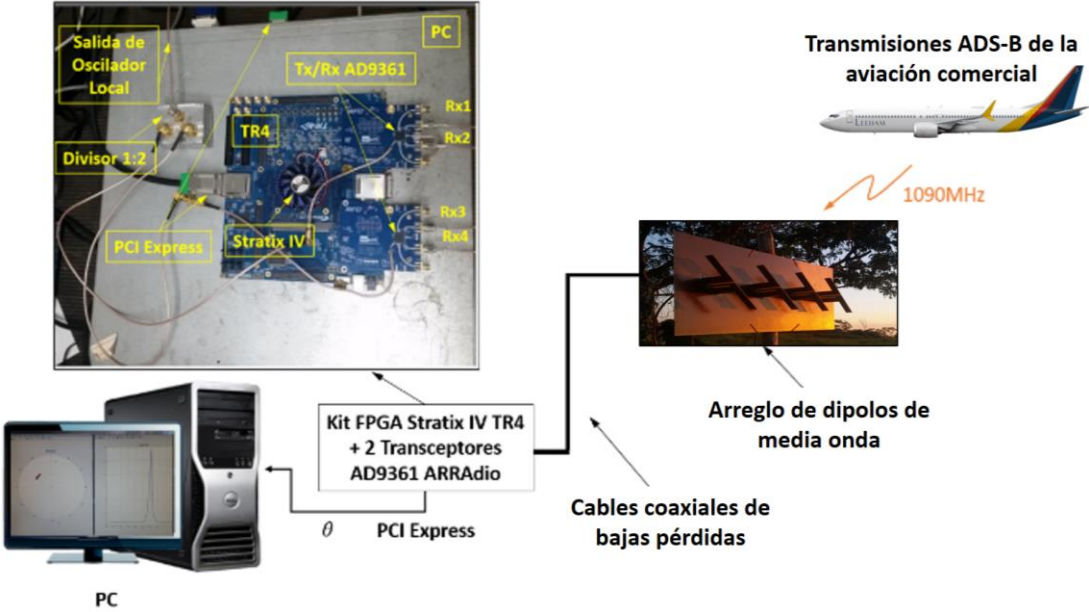


Figura 7: Validación del sistema implementado con empleo de las transmisiones ADS-B de la aviación comercial.

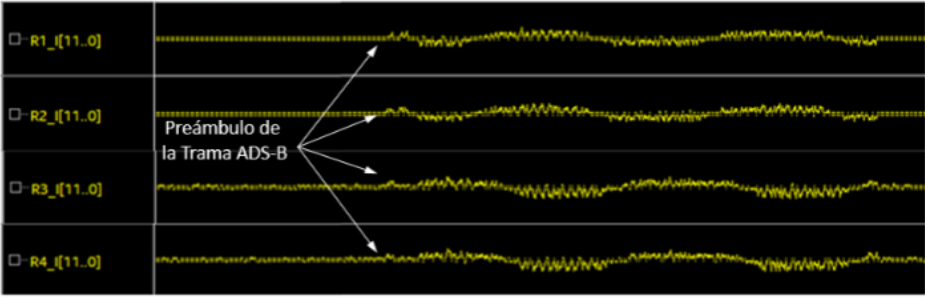


Figura 8: Captura de las componentes en fase de las señales ADS-B recibidas por el arreglo de antenas y adquiridas durante las pruebas experimentales.

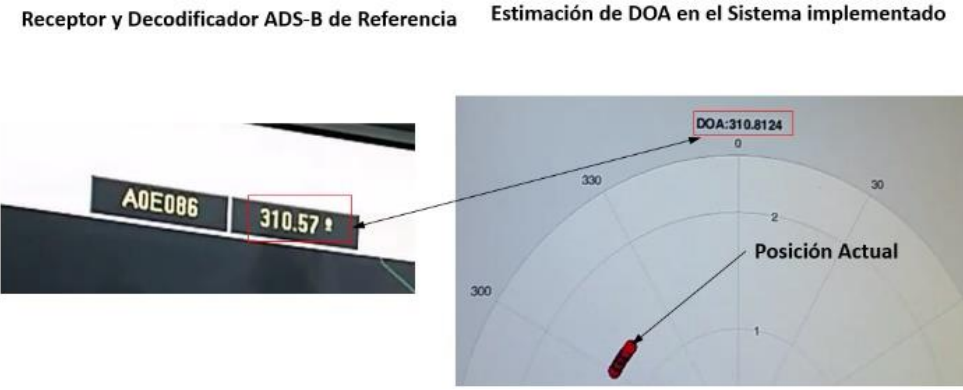


Figura 9: Captura de las componentes en fase de las señales ADSB recibidas por el arreglo de antenas y adquiridas durante las pruebas experimentales.

Para caracterizar el sistema en el rango completo de exploración, se calculó el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) obtenido en la estimación de DoA de 100 transmisores seleccionados de forma aleatoria, de manera que se cubrió todo el sector de 180 °. El resultado de este proceso se muestra en la Fig. 10.

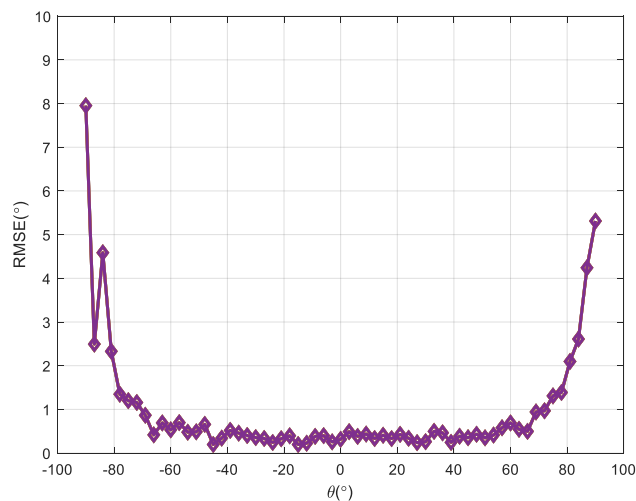


Figura 10: RMSE de la estimación de DoA en el radio cognitivo consciente de la ubicación implementado.

Se aprecia que el error es mínimo en el centro del arreglo de antenas y aumenta en las direcciones extremas, con un valor de 0.41 ° en el rango de ± 80 °. Este comportamiento es similar al del Límite Inferior de Cramer-Rao (CRLB, por sus siglas en inglés) para un ULA [42]. En [43] se presenta una implementación del método MUSIC para la detección de inyecciones maliciosas de paquetes ADS-B y se obtienen errores de alrededor de los 60 °. En [44] se implementa un dispositivo con características semejantes para el seguimiento angular de drones comerciales a partir de sus emisiones de radio. Se emplearon los métodos de Bartlett, Capon, MUSIC y ESPRIT para la estimación de DOA y se obtienen errores entre 1.5 y 4 °. En este caso, los métodos con superresolución muestran un peor rendimiento que los de Bartlett y Capon. La pérdida de rendimiento de las dos implementaciones anteriores pueden ser resultado de errores en el modelo de los datos [42]. Es posible solucionar esta deficiencia mediante técnicas de calibración de la respuesta del arreglo de antenas con sus respectivas ventajas y desventajas [45]. En [46] se obtienen errores aproximados al de este trabajo con empleo de métodos basados en la factorizaciones QR y LDL de la matriz de covarianza espacial.

Los errores obtenidos resultan satisfactorios debido a que valores de RMSE de alrededor de 1 ° se consideran permisibles para aplicaciones de localización con la información de DoA estimada en múltiples nodos [47]. Los resultados anteriores permiten verificar la validez de la implementación del CR multicanal con conocimiento de la ubicación. Aunque en esta etapa solamente se cuenta con la información de DoA de los PU, el intercambio con otros CR permitirá la ubicación del terminal en la CRN.

El empleo de los métodos de superresolución permite ubicar a los PU con gran exactitud con un mínimo de dos CR. Para una completa funcionalidad del sistema, se pueden emplear algoritmos de formación digital del diagrama direccional, como los que se implementan en [48, 49]. Estos permiten direccionar la transmisión y recepción de los CR, lo que posibilita un incremento de la cobertura y las tasas de datos [50]. También es posible implementar métodos adaptativos para mitigar las interferencias y aumentar la SNR de las señales deseadas, como la solución que se propone para antenas inteligentes en [51].

5. CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de estimación de DoA con arreglo de antenas para el funcionamiento en tiempo real en un radio cognitivo. El conocimiento de la ubicación de los PU circundantes permite un salto cualitativamente superior a los sistemas de CR existentes. La selección e implementación de Root-MUSIC Unitario para la estimación de DoA permite alcanzar los requerimientos necesarios en la plataforma de procesamiento seleccionada. La solución hardware-software propuesta facilita el desarrollo de nuevos prototipos de CR en un relativamente corto período de tiempo. Los resultados obtenidos con señales de PU reales demuestran la validez del sistema en un entorno electromagnéticamente hostil. El RMSE promedio resultante presenta valores satisfactorios en un rango de exploración relativamente amplio para un ULA. Aunque se seleccionó el método Root-MUSIC Unitario para la estimación de DoA, la arquitectura concebida posibilita implementar métodos más avanzados con mínimos cambios. La adopción de una base tecnológica actualizada permite la obtención de CR realizables a la altura de las exigencias de los sistemas inalámbricos modernos. La arquitectura de recepción multicanal adoptada permite el escalado del CR con métodos de formación digital del diagrama direccional para el direccionamiento de las transmisiones de los CR en las CRN con mayor cobertura, robustez y eficiencia. A pesar de que las comprobaciones experimentales se realizaron en banda L, la adopción del AD9361 para el sistema de recepción permite que el sistema pueda operar en un relativamente amplio ancho de banda. El empleo de señales cooperativas de PU con información de su posición espacial, como es el caso de los transmisores ADS-B, permite la efectiva validación de sistemas de estimación de DoA en tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] P. Deepanramkumar and N. Jaisankar, "BlockCRN-IoCV: Secure Spectrum Access and Beamforming for Defense Against Attacks in mmWave Massive MIMO CRN in 6G Internet of Connected Vehicles," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 74220-74243, 2022.
- [2] S. Surekha and M. Z. U. Rahman, "Cognitive Energy-Aware Spectrum Sensing With Improved Throughput for Medical Sensor Networks," *IEEE Sensors Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 1-4, 2022.
- [3] S. K. Gottapu and V. Appalaraju, "Cognitive radio wireless sensor network localization in an open field," in *2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES)*, 2018, pp. 45-48.
- [4] N. Ruan, W. Han, F. Wen, and J. Shi, "DoA Estimation in B5G/6G: Trends and Challenges," *Sensors*, vol. 22, no. 14. doi: 10.3390/s22145125
- [5] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, 2020.
- [6] O. Holland, "Spectrum Policy and Cognitive Radio Standards," in *Handbook of Cognitive Radio*, W. Zhang, Ed. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 1485-1508.
- [7] S. P T, R. Perumal, and N. Sathishkumar, "Recent Paradigms for Efficient Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Issues and Challenges," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1717, p. 012057, 01/10 2021.
- [8] S. Sun, H. Huang, X. j. Jing, and J. Du, "Cyclostationary spectrum sensing based fisher analyzer under stochastic geometric network model," in *2017 11th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2017, pp. 1-5.
- [9] F. Liu, Z. Zhang, R. Du, J. Sheng, and C. Huang, "Frequency-Angle Spectrum Hole Detection with Taylor Expansion Based Focusing Transformation," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, no. 10, pp. 2330-2343, 2020.
- [10] X. Xu, L. Li, Y. Cai, X. Chen, and M. Zhao, "Transmission Rate Optimization in Cooperative Location-aware Cognitive Radio Networks," in *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2019, pp. 1-6.
- [11] F. Li, J. Zhang, and K. B. Letaief, "Location-aware spectrum sharing in cognitive radio networks - A semi-matching approach," in *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2014, pp. 1603-1607.
- [12] A. Abdelbari and B. Bilgehan, "A Novla DoA Estimation Method of Several Sources for 5G Networks," in *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, 2020, pp. 1-6.

- [13] X. Liang *et al.*, "Throughput Optimization for Cognitive UAV Networks: A Three-Dimensional-Location-Aware Approach," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 7, pp. 948-952, 2020.
- [14] K. Tan, Z. Wang, Z. Liu, and L. Sun, "Research on Full-Space Spectrum-Sharing Strategy for Massive MIMO Cognitive Radio Systems," in *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE)*, 2021, pp. 639-644.
- [15] A. Elbagoury, A. Saeed, and M. Youssef, "Location-aware probabilistic route discovery for cognitive radio networks," in *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2014, pp. 2102-2107.
- [16] W. Wang, A. Kwasinski, D. Niyato, and Z. Han, "Learning for Robust Routing Based on Stochastic Game in Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 6, pp. 2588-2602, 2018.
- [17] T. Xue, X. Dong, and Y. Shi, "Resource-Allocation Strategy for Multiuser Cognitive Radio Systems: Location-Aware Spectrum Access," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 884-889, 2017.
- [18] Y. Ibarra Guerra, A. Hernández Violat, and A. R. Ramírez Zaldívar, "Adaptive Reception System Design with Spectrum Scan for Cognitive Radio," *Telemática*, vol. 19, no. 3, pp. 57-68, 2020.
- [19] C. Baylis, A. Egbert, J. Alcalá-Medel, A. Dockendorf, A. Martone, and R. J. Marks, "Real-Time Circuit Reconfiguration for a Cognitive Software-Defined Radar Transmission: A New Paradigm in Spectrum Sharing," presented at the 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal and Power Integrity (EMC+ SIPI), 2019.
- [20] O. Holland, H. Bogucka, and A. Medeis, "The Universal Software Radio Peripheral (USRP) Family of Low-Cost SDRs" in *Opportunistic Spectrum Sharing and White Space Access: The practical Reality*, Wiley, 2015, pp. 3-23.
- [21] C. Zhang, Z. Hu, T. N. Guo, R. C. Qiu, and K. Currie, "Cognitive Radio Network as Wireless Sensor Network (III): Passive target intrusion detection and experimental demonstration," in *2012 IEEE Radar Conference*, 2012, pp. 0293-0298.
- [22] N. Saeed, H. Nam, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, "Primary User Localization and Its Error Analysis in 5G Cognitive Radio Networks," *Sensors*, vol. 19, no. 9. doi: 10.3390/s19092035
- [23] X. Li, Z. D. Deng, L. T. Rauchenstein, and T. J. Carlson, "Contributed Review: Source-localization algorithms and applications using time of arrival and time difference of arrival measurements," *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, no. 4, p. 041502, 2016/04/01 2016.
- [24] H. Wang, X. Lyu, and K. Liao, "Co-Channel Interference Suppression for LTE Passive Radar Based on Spatial Feature Cognition," *Sensors*, vol. 22, no. 1. doi: 10.3390/s22010117
- [25] H. Wang, J. Wang, J. Jiang, K. Liao, and N. Xie, "Target Detection and DoA Estimation for Passive Bistatic Radar in the Presence of Residual Interference," *Remote Sensing*, vol. 14, p. 1044, 02/21 2022.
- [26] H. Krim and M. Viberg, "Two Decades of Array Signal Processing Research: The Parametric Approach," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, 1996.
- [27] Y. Ibarra Guerra, A. R. Ramírez Zaldívar, A. Hernández Violat, and N. Rojas Ramírez, "Implementación Hardware-Software de un Sistema de Estimación de DoA con Súper Resolución," *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 43, pp. 16-32, 2022.
- [28] H. Celebi and H. Arslan, "Utilization of location information in cognitive wireless networks," *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 14, no. 4, 2007.
- [29] X. Yang, Y. She, L. Xie, and Z. Li, "Channel state information-based multi-dimensional parameter estimation for massive RF data in smart environments," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2021, no. 1, p. 16, 2021/04/14 2021.
- [30] A. Patwari and G. R. Reddy, "1D Direction of Arrival estimation using RootMUSIC and ESPRIT for dense uniform linear arrays," presented at the 2nd IEEE International Conference On Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology (RTEICT), Nueva Delhi, India, 2017.
- [31] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing (Detection, Estimation and Modulation Theory)*. John Wiley & Sons, Inc, 2002.

- [32] Y. Jung, H. Jeon, S. Lee, and Y. Jung, "Scalable ESPRIT Processor for Direction-of-Arrival Estimation of Frequency Modulated Continuous Wave Radar," *Electronics*, vol. 10, no. 6, p. 695, 2021.
- [33] Z. Meng and W. Zhou, "Direction-of-Arrival Estimation in Coprime Array Using the ESPRIT-Based Method," *Sensors*, no. 1424-8220 pp. 1-14, 2019.
- [34] J. Li, M. Shen, and D. Jiang, "DoA estimation based on combined ESPRIT for coprime array," in *IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, China, 2016.
- [35] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT- Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques " *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 37, no. 7, pp. 984-995, 1989.
- [36] Analog Devices. (2020). *Wideband Transceiver IC*. Available: www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/wideband-transceivers-ic.html
- [37] Terasic Inc. (2020). *HSMC ARRADIO Daughter Card*. Available: <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&CategoryNo=65&No=946>
- [38] A. Shamseldin, H. Soubra, and R. Elnabawy, "Performance of DSP operations implemented using a soft microprocessor: a case study based on Nios II," in *2021 International Conference on Microelectronics (ICM)*, 2021, pp. 66-69.
- [39] Analog Devices, "AD9361 Reference Manual," ed: ANALOG DEVICES, 2020.
- [40] B. Chen and J. Wu *Synthetic Impulse and Aperture RADAR (SIAR): A Novel Multi-Frequency MIMO RADAR*. China: National Defense Industry Press, 2014.
- [41] FSU.(2022). https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/cpp_src/jacobi_eigenvalue.
- [42] B. Friedlander, "The Mythical Uniform Linear Antenna Array," in *2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, 2021, pp. 221-225.
- [43] W. Huygen, J. Sun, and J. Hoekstra, "ADS-B Signal Verification Using a Coherent Receiver," *Engineering Proceedings*, vol. 13, no. 1. doi: 10.3390/engproc2021013004
- [44] M. T. d. Oliveira, R. K. Miranda, J. P. C. L. d. Costa, A. L. F. d. Almeida, and R. T. d. Sousa, "Low Cost Antenna Array Based Drone Tracking Device for Outdoor Environments," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2019, p. 5437908, 2019/06/27 2019.
- [45] M. D. Al-Dabbagh, A. Gaber, and A. Omar, "Phase Calibration of Massive MIMO System for Direction of Arrival Applications," presented at the 2019 IEEE MTT-S International Microwave Conference on Hardware and Systems for 5G and Beyond(IMC-5G), Atlanta; USA, 2019.
- [46] A. A. Hussain, N. Tayem, A.-H. Soliman, and R. M. Radaydeh, "FPGA-Based Hardware Implementation of Computationally Efficient Multi-Source DOA Estimation Algorithms," *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp. 88845-88858, 2019.
- [47] J. Matuszewski and T. Kraszewski, "Evaluation of emitter location accuracy with the modified triangulation method by means of maximum likelihood estimators," *Metrology and Measurement Systems*, vol. vol. 28, no. No 4, pp. 781-802, 2021.12.22 2021.
- [48] A. R. Ramírez Zaldívar, Y. Ibarra Guerra, A. Hernández Violat, N. Rojas Ramírez, and A. Peña Sierra, "Formador digital de múltiples diagramas simultáneos basado en FPGA y el transceptor AD9361," *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 43, no. 1, pp. 1815-5928, 2022.
- [49] A. R. Ramírez Zaldívar, A. Hernández Violat, and Y. Ibarra Guerra, "Antenna System Processor Design with Digital Beamforming Using FPGA," *Telemática*, vol. 19, no. 3, pp. 48-56, 2020.
- [50] G. Misra, K. Agarwal, A. Agarwal, and S. A. Kuntal Ghosh, "Smart Antenna for Wireless Cellular Communication - A Technological Analysis on Architecture, Working Mechanism, Drawbacks and Future Scopes," presented at the Second International conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC 2018), 2019.
- [51] G. R. Gómez, S. L. V. Bernal, and F. M. Rizo, "Space Time Adaptive Processing for Radio Frequency Identification Smart Antenna Systems," *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, RIELAC*, vol. 39, no. 3, pp. 89-104, 2018.

SOBRE LOS AUTORES

Yunior Ibarra Guerra es Ingeniero Radioelectrónico en la especialidad de Telecomunicaciones, graduado en el ITM "José Martí" en el año 2015, aspirante al título académico de Máster en Sistemas Digitales en la

Manuscrito recibido: 04-11-2022, aceptado: 05-01-2023

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

Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echevarría”. Investigador Agregado desde el 2022, Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica “CID MECATRONICS”, La Habana, Cuba. Correo electrónico: cid3@reduim.cu, No. ORCID: 0000-0002-0538-4053.

Alexander R. Ramírez Zaldívar es Ingeniero Radioelectrónico en la especialidad de Telecomunicaciones, graduado en el año 2015, aspirante al título académico de Máster en Sistemas Digitales en la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echevarría”. Investigador Agregado desde el 2022, Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica “CID MECATRONICS”, La Habana, Cuba. Correo electrónico: cid3@reduim.cu, No. ORCID: 0000-0002-0538-4053. No. ORCID: 0000-0002-0372-0746.

Abel Hernández Violat es Ingeniero Radioelectrónico graduado en el ITM “José Martí” en 1997, aspirante al grado académico de Doctor en Ciencias Técnicas en el ITM “José Martí”, Investigador Auxiliar desde el 2012, Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica “CID MECATRONICS”, La Habana, Cuba. Correo electrónico: cid3@reduim.cu, No. ORCID: 0000-0001-6886-3871.

Noslen Rojas Ramírez es Ingeniero Radioelectrónico graduado en el ITM “José Martí” en 1994, Máster en Radioelectrónica ITM “José Martí” 1997, Doctor en Ciencias Técnicas ITM “José Martí” 2008, Investigador Titular desde el 2012. Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica, “CID MECATRONICS”, La Habana, Cuba. Correo electrónico: cid3@reduim.cu, No. ORCID: 0000-0002-8884-320X.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses en relación al contenido del artículo aquí reflejado.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Los autores participaron de forma balanceada en la conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo

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.

