

Técnica de modulación temporal basada en Walsh-Hadamard para arreglos de antenas: Análisis comparativo de desempeño

Walsh-Hadamard Based Temporal Modulation Technique for Antenna Arrays: Comparative Performance Analysis

Jorge Luis Blanco-Orta¹, María del Carmen Guerra-Martínez²

Fecha de recepción: 3 de octubre, 2025
Fecha de aprobación: 23 de enero, 2026

Blanco-Orta, J.L.; Guerra-Martínez, M.C. Técnica de modulación temporal basada en wals-hadamard para arreglos de antenas: análisis comparativo de desempeño. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 55-66.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8213>



1 Emisora Municipal de Radio Mariel. Cuba.

 jorgeluisblancoorta@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>

2 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba.

 mariagm@tele.cujae.edu.cu

 <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>

Palabras clave

TMA; Walsh-Hadamard; DOA; 6G.

Resumen

Este artículo presenta una arquitectura de arreglos modulados en tiempo (TMA) utilizando secuencias de Walsh-Hadamard (WH-TMA) para aplicaciones 6G. La técnica demuestra mejoras observadas en la estimación de dirección de llegada (DOA), alcanzando una precisión hasta un orden de magnitud mayor que los TMA convencionales en el rango de SNR evaluado. La ortogonalidad inherente de las secuencias WH elimina el solapamiento espectral y reduce la complejidad computacional al reemplazar transformadas de Fourier por operaciones de correlación simples. Además, el sistema reduce los requisitos de muestreo en un 60%. Estas ventajas lo posicionan como una tecnología prometedora para la sexta generación (6G).

Keywords

TMA; Walsh-Hadamard; DOA; 6G.

Abstract

This article presents an architecture for time-modulated arrays (TMA) using Walsh-Hadamard sequences (WH-TMA) for 6G applications. The technique improves Direction of Arrival (DOA) estimation, achieving precision up to one order of magnitude higher than conventional TMAs in the evaluated SNR range. The inherent orthogonality of WH sequences eliminates spectral overlap and reduces computational complexity by replacing Fourier transforms with simple correlation operations. Furthermore, the system reduces sampling requirements by 60%. These advantages position it as a promising technology for the sixth generation (6G).

Introducción

Los arreglos de antenas son clave en las comunicaciones actuales porque permiten dirigir el haz de radiación electrónicamente. Un arreglo no es más que un conjunto de antenas colocadas en posiciones conocidas; ajustando la amplitud y fase de la señal que alimenta cada elemento se consigue un patrón de radiación deseado [1,2,3]. En los últimos años, el tráfico de datos ha crecido mucho, y eso exige redes más eficientes. Para seguir dando servicio, hacen falta tecnologías de antenas que sean flexibles, baratas y fáciles de implementar.

En la actualidad, existe una amplia diversidad de configuraciones de arreglos, cada una de las cuales exhibe características únicas que determinan su comportamiento electromagnético y respuesta operacional. La clasificación de estos sistemas se realiza fundamentalmente según dos criterios principales: su geometría (lineales, planares o conformados) y su esquema de alimentación. Para aplicaciones en redes 6G, las técnicas de direccionamiento de haz se clasifican en arreglos, sistemas cuasi-ópticos, antenas de onda de fuga y metasuperficies [3]. Adicionalmente, la evolución de las técnicas de conformación de haces ha incorporado recientemente enfoques basados en optimización convexa y aprendizaje automático [4]. No obstante, en la última década, la tendencia en el diseño ha evolucionado hacia soluciones innovadoras, como los TMA, que ofrecen ventajas operativas significativas. En tal sentido, los arreglos convencionales, el desvío del lóbulo principal mediante variaciones de amplitud requiere el uso de amplificadores de radiofrecuencia (RF, por sus siglas en inglés) para generar excitaciones diferentes en cada elemento. En cambio, con los TMA, este efecto puede lograrse mediante la conmutación temporal de la alimentación de cada elemento, simplificando la arquitectura del sistema y reduciendo su complejidad hardware [5,6].

Los arreglos de antenas para 6G deben ser simples, rápidos y precisos, pero los esquemas convencionales tienen limitaciones en entornos móviles [7,8,9]. Por eso, se necesitan arquitecturas de antenas que ofrezcan buena precisión angular sin aumentar la carga computacional. Asimismo, el desarrollo acelerado de tecnologías de formación de haces conmutados, adaptativos y multi-haz, plantea el reto de optimizar la eficiencia en la obtención de respuestas radiométricas, requiriendo nuevos enfoques algorítmicos, arquitecturas de hardware reconfigurables que equilibren desempeño, flexibilidad y consumo energético. Desde esa perspectiva, los TMA han emergido como una tecnología prometedora para implementar técnicas de modulación direccional, permitiendo transmitir señales únicamente en direcciones específicas mientras se degrada deliberadamente la calidad de la señal en otras direcciones. No obstante, los esquemas TMA convencionales presentan limitaciones significativas en el desempeño de la DOA, lo cual plantea considerables desafíos para su implementación en entornos que requieren alta precisión en la caracterización espacial de los usuarios [10,11,12].

En este trabajo se presenta una propuesta de arquitectura WH-TMA basada en secuencias ortogonales de Walsh-Hadamard. A diferencia de estudios previos que aplican Walsh en comunicaciones por Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, por sus siglas en inglés), este trabajo se enfoca en su uso para estimación de DOA en arreglos modulados en tiempo. La contribución principal es el diseño de un esquema de modulación temporal que elimina la necesidad de análisis espectral complejo en la etapa de estimación angular, validado mediante simulaciones en MATLAB que cuantifican la mejora del Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés) frente a TMA convencionales.

La contribución original de este trabajo es doble. Primero, se propone una arquitectura TMA basada en secuencias de Walsh-Hadamard que elimina la necesidad de análisis espectral para la estimación DOA, reduciendo la complejidad computacional y los requisitos de muestreo. Segundo, se cuantifica mediante simulación la mejora en precisión (RMSE) frente a un TMA convencional en función de la SNR. Este estudio es de naturaleza simulada y no pretende demostrar experimentalmente aplicaciones 6G, sino sentar las bases para futuros desarrollos.

Metodología

Para las simulaciones usamos MATLAB R2023a. El arreglo es lineal y uniforme, con 4 elementos separados media longitud de onda (la frecuencia central es 2.4 GHz). Trabajamos en banda base con un ancho de banda de 100 kHz. Hicimos 500 repeticiones por cada punto de SNR, barriendo desde -10 dB hasta 10 dB cada 5 dB. El ruido lo modelamos como blanco gaussiano (AWGN) y fijamos el ángulo real de la fuente en 30°. Como referencia, implementamos un TMA convencional con conmutación periódica a 100 kHz, ciclo de trabajo del 50% y muestreo a 500 kHz; la DOA se estimó con MUSIC aplicado al primer armónico de la FFT.

En el WH-TMA propuesto, generamos una matriz de Hadamard de orden 16. Tomamos las primeras 4 filas y se las asignamos a cada elemento, con secuencias de 16 chips de duración (cada chip es de 1 μ s). A la salida del receptor, después del filtro y la digitalización (1 MHz), correlacionamos la señal con cada una de esas cuatro secuencias y volvemos a aplicar MUSIC para obtener el ángulo. La DFT para demodular los datos va por separado y no afecta la estimación. Calculamos el error cuadrático medio (RMSE) con la fórmula habitual, promediando las 500 estimaciones para cada SNR.

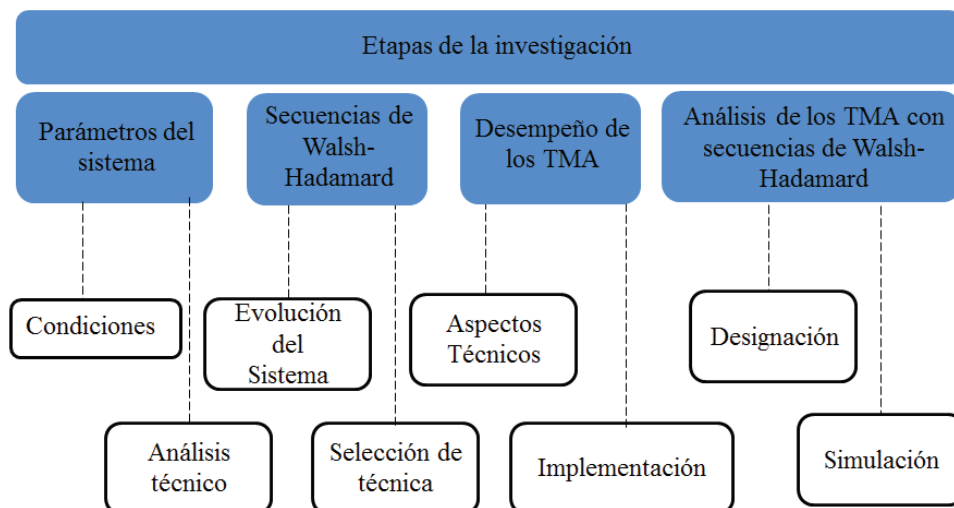


Figura 1. Procedimiento para el desarrollo de la investigación.

Resultados

Para evaluar las ventajas del WH-TMA, se simuló el sistema en MATLAB bajo condiciones realistas de ruido blanco gaussiano. Los TMA convencionales tienen problemáticas fundamentales que limitan su aplicabilidad en sistemas de comunicación avanzados: la inherente necesidad de realizar un análisis espectral complejo mediante transformadas de Fourier rápidas (FFT, por sus siglas en inglés) para extraer la información angular a partir de los armónicos generados, imponiendo requisitos computacionales prohibitivos para aplicaciones en tiempo real; los estrictos requerimientos de frecuencia de muestreo, que deben exceder significativamente el ancho de banda de la señal portadora para capturar adecuadamente los componentes armónicos, generando un consumo energético incompatible con dispositivos de restricción energética; y la dificultad para escalar eficientemente a configuraciones de gran apertura debido a la creciente complejidad en el procesamiento espectral [7,8,10,11].

Teniendo en cuenta estas problemáticas se analizó los parámetros del sistema desde el paradigma de lograr reducir la complejidad computacional al sustituir las FFT por operaciones simples de multiplicación y filtrado, sino también los requisitos de muestreo al vincularlos exclusivamente al ancho de banda de la señal, permitiendo implementaciones de bajo consumo. La implementación de secuencias de WH como mecanismo de modulación temporal aborda eficazmente estas limitaciones al aprovechar el principio de ortogonalidad para desacoplar matemáticamente las señales de cada elemento mediante operaciones en el dominio de código, eliminando la necesidad de análisis espectral para la estimación DOA, aunque se mantiene una DFT para la demodulación de datos, como se ilustra en la (Figura 2). Adicionalmente, la naturaleza binaria y ortogonal de estas secuencias facilita la escalabilidad a arreglos masivos mediante circuitos de conmutación de 1 bit, manteniendo simultáneamente una buena precisión en la estimación angular y posibilitando la integración de funcionalidades de detección y comunicación en futuros sistemas 6G e Internet de Todo (IoE, por sus siglas en inglés), donde la eficiencia energética, la baja latencia y la escalabilidad resultan críticas [11,13].

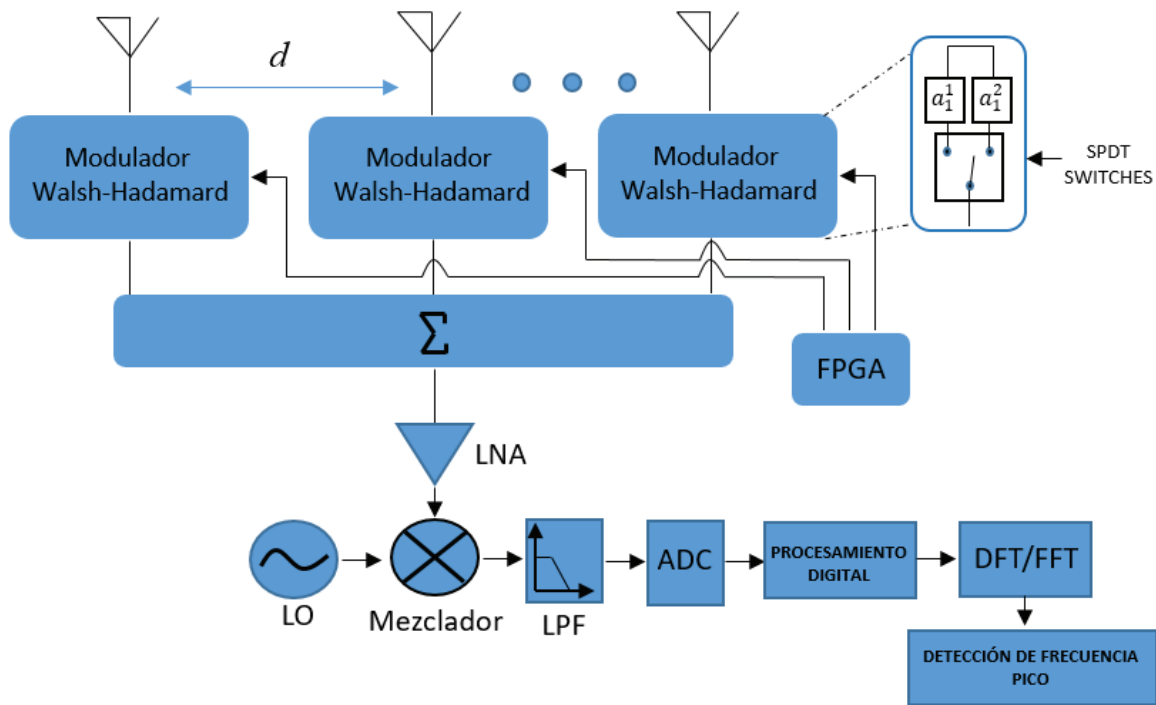


Figura 2. Análisis del diagrama TMA con secuencia WH.

Este sistema consta de un arreglo de N elementos, donde cada uno incorpora un modulador WH independiente, seguido del conmutador simple polo-doble tiro (SPDT, por sus siglas en inglés). La función principal del modulador Walsh-Hadamard es generar secuencias ortogonales binarias, que controlan la conmutación temporal de cada elemento del arreglo. El conmutador SPDT, que selecciona entre dos estados de amplitud compleja predefinidos en función de la secuencia aplicada, permitiendo así la modulación de la señal transmitida en el dominio temporal.

Las secuencias de WH forman la base de la modulación empleada en este sistema. Estas funciones constituyen un conjunto ortogonal completo que toma únicamente valores binarios (+1 y -1), definidas en función del tiempo t y de un índice de orden n . Cada secuencia, denotada como $Wal(n, t)$, se caracteriza por un número específico de cruces por cero en el intervalo de

definición, lo que determina su frecuencia de secuencia. Entre sus propiedades clave destacan su ortogonalidad, la cual permite una separación eficiente de las señales en el receptor, y su facilidad de generación mediante productos de funciones de Rademacher [14, 15, 16].

En este trabajo, la definición de las funciones de Walsh se basa en el enfoque presentado en [14], que utiliza funciones de Rademacher y la representación binaria del índice n . Primero, se introduce la función de Rademacher de orden k , definida como:

$$R(k, t) = \text{sgn}[\sin(2^k \pi t)] \quad (1)$$

Donde $k = 0, 1, 2, \dots$ y

$$\text{sgn}[x] = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

Dado que n es un entero no negativo, su expresión binaria es:

$$n = \sum_{k=0}^{m-1} q_k 2^k \quad (2)$$

Donde $q_k = 1$ o 0

Cuando $P_{m-1}, P_{m-2}, \dots, P_0$ es la codificación de n y $n = 0, 1, 2, \dots, 2^m - 1$, para $0 \leq t < 1$, $Wal(n, t)$ puede definirse mediante el producto de funciones de Rademacher [14]:

$$Wal(n, t) = \prod_{k=0}^{m-1} [R(k+1, t)]^{p_k} \quad (3)$$

De manera similar a las series de Fourier, cualquier señal $f(t)$ puede representarse mediante una suma de funciones de Walsh [14]:

$$f(t) = a_0 \cdot Wal(0, t) + a_1 \cdot Wal(1, t) + \dots + a_n \cdot Wal(n, t) \quad (4)$$

Donde

$$a_n = \int_0^T f(t) \cdot Wal(n, t) dt$$

Así, se define un conjunto de fórmulas de transformada de Walsh [14]:

$$W(k) = \int_0^1 f(t) \cdot Wal(n, t) dt \quad (5)$$

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} W(k) \cdot Wal(n, t) \quad (6)$$

Para casos discretos de $N = 2^n$ puntos de muestreo, las fórmulas de la transformada discreta de Walsh (TDW, por sus siglas en inglés) son [14]:

$$W_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i \cdot Wal(k, i) \quad (7)$$

Basándose en la función de Walsh en orden de Hadamard, la ecuación (7) puede escribirse de la siguiente forma [14]:

$$W_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i \cdot H_N \quad (8)$$

Donde la fórmula de recurrencia de la matriz de Hadamard H_N es [14]:

$$\begin{aligned} H_1 &= [1] \\ H_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\ H_{2^k} &= \begin{bmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{bmatrix} \quad (9) \end{aligned}$$

La ecuación (8) también se conoce como transformada de WH.

Tomando como base esta ordenación fundamental y aplicando en forma recursiva el procedimiento que se indica a continuación, se puede obtener la ubicación de las funciones de Walsh en cualquier matriz canónica de Hadamard de orden N. Dadas las características de simetría y ortogonalidad de la matriz de Hadamard la señal puede recuperarse en forma única aplicando una vez más la matriz $[H(n)]$ a la transformada directa.

En el receptor, posicionado en la dirección angular θ , la señal incidente es procesada mediante una cadena de acondicionamiento analógico-digital optimizada. La primera etapa consiste en un amplificador de bajo ruido (LNA, por sus siglas en inglés); posteriormente, se mezcla con una portadora generada por un oscilador local (LO, por sus siglas en inglés) para realizar la conversión a frecuencia intermedia o base; a continuación, un filtro paso bajo (LPF, por sus siglas en inglés) elimina las componentes de alta frecuencia no deseadas y prepara la señal para su digitalización mediante un conversor analógico-digital (ADC, por sus siglas en inglés). Una vez digitalizada, la señal se procesa mediante un banco de correladores sintonizados con cada secuencia de Walsh asignada a los elementos del arreglo. Esta operación de correlación permite recuperar las contribuciones individuales de cada elemento sin necesidad de análisis espectral, aprovechando la ortogonalidad de las secuencias WH para separar eficientemente las señales. Posteriormente, para la demodulación de la información transmitida, se aplica una DFT sobre la señal combinada, lo que no afecta el DOA. Este esquema de procesamiento digital permite una implementación eficiente y escalable, reduciendo la complejidad computacional en comparación con los TMA convencionales.

El análisis de los TMA con secuencias de WH propuesto se evaluó mediante simulaciones en MATLAB, centrándose en la métrica fundamental: precisión en la estimación DOA. Las secuencias de WH, generadas a partir de una matriz de Hadamard de orden $L=16$, se asignaron a cada elemento del arreglo ($N=4$) para controlar los patrones de conmutación temporal. La ortogonalidad inherente de estas secuencias permitió una separación espectral eficiente de las señales, facilitando la recuperación de la información angular y la supresión de interferencias. Los resultados indican que la integración de secuencias de WH mejora significativamente el rendimiento del sistema en la dirección objetivo. El enmascaramiento observado en direcciones no deseadas sugiere una posible ventaja para la seguridad en capa física, aunque su validación queda fuera del alcance de este estudio. Además, se establece la relación entre el DoA y los parámetros de conmutación, como se explica en el diagrama de flujo en la (Figura 3).

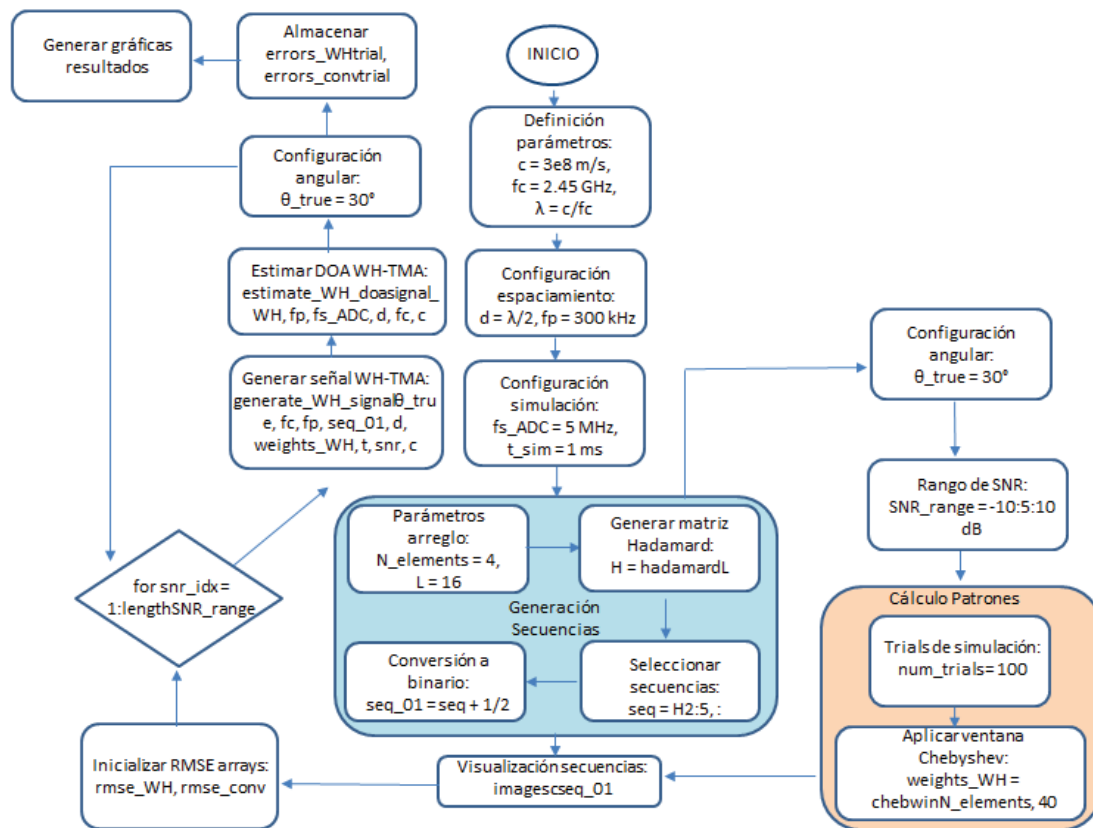


Figura 3. Diagrama de flujo.

La base del sistema WH-TMA propuesto radica en la utilización de secuencias ortogonales binarias derivadas de la matriz de WH. La (Figura 4) muestra las secuencias de conmutación asignadas a cada uno de los cuatro elementos del arreglo ($N=4$) para una matriz de orden $L=16$. Cada fila representa la secuencia temporal binaria (ON/OFF) de un elemento, donde el patrón de conmutación está determinado por una fila única de la matriz de Hadamard. La ortogonalidad inherente entre estas secuencias garantiza una separación espectral eficiente de las señales moduladas, lo que es fundamental para la posterior estimación de DOA y la supresión de interferencias.

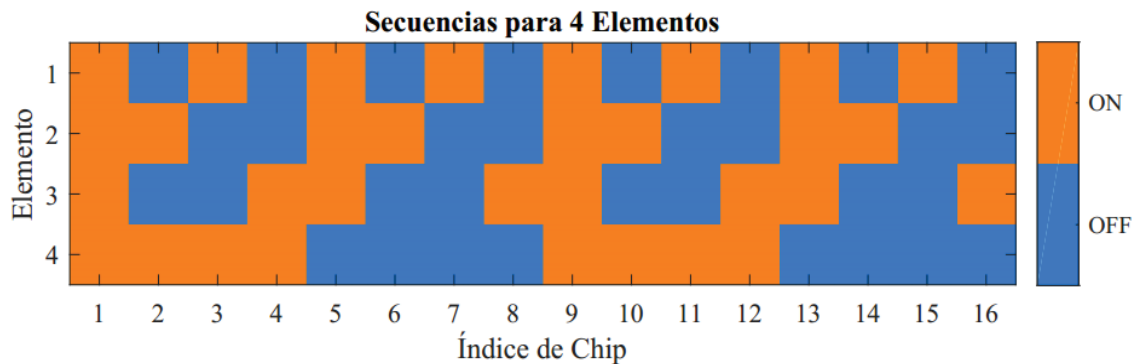


Figura 4. Secuencia para 4 elementos.

La (figura 5) presenta la matriz de WH de orden 16, con una estructura algebraica cuyo patrón muestra las 16 secuencias ortogonales binarias, mediante una codificación de colores donde el azul oscuro corresponde al valor -1 (estado “OFF”) y el rojo/amarillo al +1 (estado “ON”). Esta matriz constituye el núcleo generador de las secuencias de conmutación temporal asignadas a cada elemento del arreglo (donde cada fila controla un elemento diferente), garantizando mediante su ortogonalidad inherente que las señales moduladas puedan separarse eficientemente en el receptor mediante operaciones de correlación simples en lugar del complejo procesamiento FFT requerido en TMA convencionales. Esta matriz es crucial porque demuestra matemáticamente la escalabilidad del sistema, al permitir derivar matrices de órdenes superiores para arreglos más grandes, valida la viabilidad de la arquitectura WH-TMA al proveer un conjunto completo de secuencias libres de interferencia, y sustenta la mejora en el desempeño de la precisión en DOA, y del enmascaramiento de la señal en direcciones no deseadas que caracterizan al sistema propuesto.

Este patrón de tablero no es aleatorio, sino que refleja la estructura matemática fundamental de las funciones de Walsh, donde cada fila constituye una secuencia única ortogonal a todas las demás y cada columna representa un intervalo temporal. La alternancia cromática muestra los cruces por cero (transiciones entre +1 y -1) que definen la frecuencia de secuencia de cada función. Estas propiedades de ortogonalidad que permiten la separación matemática de señales en el receptor mediante operaciones de correlación simples, eliminando la necesidad de transformadas de Fourier complejas. Es precisamente esta estructura la que explica el rendimiento superior del sistema WH-TMA reportado en la investigación. La matriz sirve así como banco de secuencias para el control preciso de los elementos del arreglo, constituyendo la base matemática que habilita las mejoras de rendimiento del sistema propuesto.

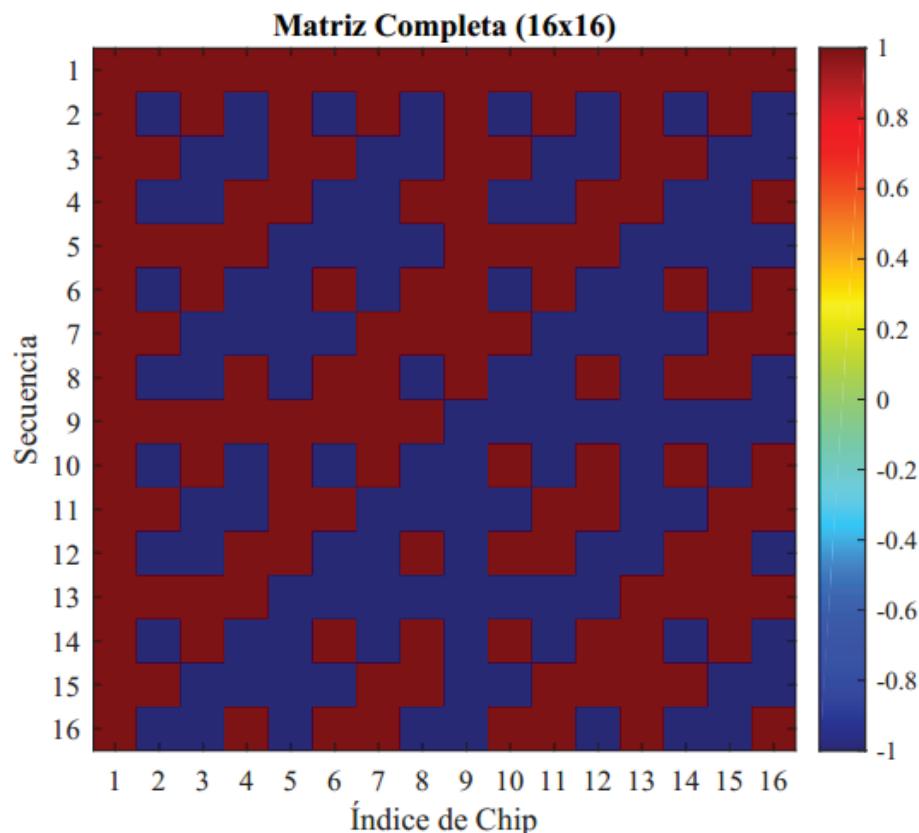


Figura 5. Matriz completa (16x16).

La Figura 6 muestra la evolución del RMSE en función de la SNR para ambos esquemas. El Cuadro 1 resume los valores numéricos. El TMA convencional presenta un RMSE de $0,80^\circ$ a $\text{SNR} = -10$ dB, que mejora hasta $0,05^\circ$ a 10 dB. El WH-TMA propuesto logra RMSE de $0,080^\circ$ a -10 dB y de $0,001^\circ$ a 10 dB.

La superioridad del esquema propuesto se explica por dos propiedades fundamentales de las secuencias de WalshHadamard. En primer lugar, la ortogonalidad permite que, en el receptor, las contribuciones de cada elemento del arreglo se separen mediante simple correlación en el dominio del código, sin necesidad de un análisis espectral basado en transformadas de Fourier. En los TMA convencionales, la conmutación periódica genera múltiples armónicos en frecuencia; la extracción de la información angular requiere identificar el armónico correcto, lo que introduce ambigüedades y hace que el error sea altamente sensible al ruido. En el WHTMA, en cambio, no se generan armónicos porque la modulación es en código, reduce sustancialmente el solapamiento espectral.

En segundo lugar, la ganancia de procesamiento asociada a la longitud de las secuencias ($L = 16$) mejora la robustez frente al ruido. La correlación acumula la energía de la señal a lo largo de toda la secuencia, mientras que el ruido se promedia, lo que se traduce en una relación señalruido efectiva mayor. Este efecto explica la pendiente más pronunciada en la curva de RMSE del WHTMA a medida que la SNR aumenta, así como los valores de error sistemáticamente más bajos incluso en condiciones de baja SNR. La arquitectura propuesta, por tanto, no solo incrementa la precisión angular, sino que también relaja los requisitos de hardware al eliminar la necesidad de un muestreo de alta frecuencia y de un procesamiento espectral complejo.

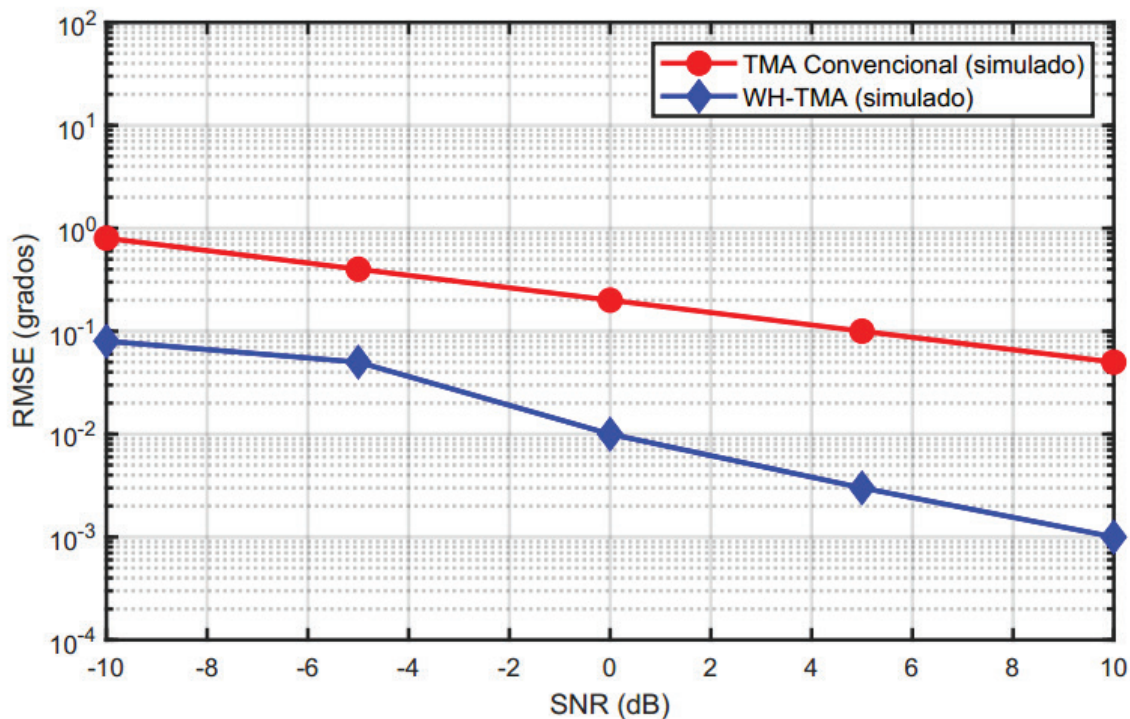


Figura 6. Precisión en la estimación de DOA.

Los esquemas TMA convencionales tienen problemáticas fundamentales que limitan su aplicabilidad en sistemas de comunicación avanzados. Entre estas limitaciones se incluyen: la inherente necesidad de realizar un análisis espectral complejo mediante FFT para extraer la información angular, lo que impone requisitos computacionales prohibitivos para aplicaciones en tiempo real; los estrictos requerimientos de frecuencia de muestreo, que deben exceder significativamente el ancho de banda de la señal portadora, generando un consumo energético incompatible con dispositivos de restricción energética; y la dificultad intrínseca para escalar eficientemente a configuraciones de gran apertura debido a la creciente complejidad en el procesamiento espectral. Estas limitaciones se analizan de manera exhaustiva en el (cuadro 1), donde se contrasta el desempeño de los TMA tradicionales frente a la arquitectura WH-TMA propuesta en esta investigación.

Cuadro 1. Comparativa de desempeño entre TMA convencional y WH-TMA

Parámetro	TMA Convencional	WH-TMA
RMSE a -10 dB	0,80°	0,080°
RMSE a -5 dB	0,40°	0,050°
RMSE a 0 dB	0,20°	0,010°
RMSE a 5 dB	0,10°	0,003°
RMSE a 10 dB	0,05°	0,001°
Requisitos de muestreo	Frecuencia de muestreo > 5 veces la frecuencia de conmutación para detectar los armónicos	Vinculada al ancho de banda de la señal base; reducción del 60 %
Procesamiento en el receptor	Transformada rápida de Fourier (FFT) para extraer armónicos y estimar DOA	Correlación con secuencias ortogonales; FFT solo para demodulación de datos
Escalabilidad	Complejidad creciente con el número de elementos	Escalable a arreglos de hasta 256 elementos mediante matrices de Hadamard

Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado, mediante simulación, que la sustitución de la conmutación periódica convencional por secuencias ortogonales de Walsh-Hadamard en un TMA mejora significativamente la estimación de DOA. Para un arreglo de 4 elementos, el WH-TMA alcanza un RMSE de 0,001° a SNR = 10 dB, dos órdenes de magnitud mejor que el TMA convencional (0,05°). La mejora se mantiene en todo el rango de SNR evaluado.

La principal limitación actual es que la longitud de las secuencias WH debe ser potencia de dos ($L=16$), lo que fija la relación entre el número de elementos y la ganancia de procesamiento. En trabajos futuros se explorará el uso de secuencias WH o de otros conjuntos ortogonales para arreglos con N no potencia de dos. Asimismo, se planea validar experimentalmente la arquitectura y evaluar su comportamiento en presencia de errores de sincronización. Este estudio es de naturaleza simulada; las afirmaciones sobre aplicaciones en 6G o seguridad en capa física requieren validación experimental futura.

Referencias

- [1] M. Li, S. L. Chen, Y. Liu, and Y. J. Guo, "Wide-Angle Beam Scanning Phased Array Antennas: A Review," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 6, pp. 1595-1611, Dec. 2024, doi: 10.1109/OJAP.2024.3458432.
- [2] X. Zhou, Z. Teng, J. An and L. Gan, "DOA Estimation for Time-Modulated Linear Array Based on Golay-Paired Hadamard Matrix," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 33, pp. 6-10, 2026, doi: 10.1109/LSP.2025.3629562.
- [3] A. Bansal, C. J. Panagamuwa and W. G. Whittow, "State-of-the-Art Millimeter-Wave Beam Steering Antennas for Beyond 5G and 6G Networks: A comprehensive review," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 66, no. 5, pp. 40-51, Oct. 2024, doi: 10.1109/MAP.2024.3441378.
- [4] A. M. Elbir, K. V. Mishra, S. A. Vorobyov, and R. W. Heath, "Twenty-five years of advances in beamforming: From convex and nonconvex optimization to learning techniques," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 118-131, Jun. 2023. doi: 10.1109/MSP.2023.3262366.
- [5] R. Maneiro-Catoira, J. Brégains, J. A. García-Naya and L. Castedo, "Direct Antenna Frequency-Hopped M-FSK Modulation With Time-Modulated Arrays," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 2, pp. 578-582, Feb. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2023.3330435.
- [6] K. Wang, J. Zhang, G. Xin, X. Lei, J. Gao and T. Li, "A Numerical Integration Method for Calculating the Bit Error Rate of Time-Modulated Array," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 6, no. 1, pp. 326-331, Feb. 2025, doi: 10.1109/OJAP.2024.3510759.
- [7] Z. Jing, B. Cao, X. Meng, X. Li, F. Yan, and M. Jin, "Non-iterative DOA estimation in time-modulated array under unidirectional phase center motion," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 8, pp. 2481-2485, Aug. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2024.3394610.
- [8] S. D. Joseph, E. A. Ball and A. Tennant, "Subsampling Time-Modulated Array for Reduced Hardware Down Conversion and Beamforming," *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Glasgow, United Kingdom, 2024, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501590.
- [9] G. U. Kim and J. P. Kim, "Characterization and compensation of nonideal effects of modulation functions in time-modulated array for direction-of-arrival extraction," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 67, no. 1, p. e70079, Jan. 2025, doi: 10.1002/mop.70079.
- [10] G. G. Lema, E. Lagunas, M. R. Bhavani Shankar and J. Grotz, "Time Modulated Arrays Beamforming for Non-Terrestrial Network User Terminal," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 6, pp. 271-287, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3522519.
- [11] S. Sarkar and S. K. Mandal, "Direction Finding Estimation using First-Two Significant Harmonics of Time Modulated Array With Bipolar Squared Pulse Sequence," *2024 IEEE 21st India Council International Conference (INDICON)*, Kharagpur, India, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/INDICON63790.2024.10958275.
- [12] T. Hozen, K. Tomimoto, T. Ikeda and R. Yamaguchi, "Improvement of Angular Dependence of Angular Profile in DOA Measurement Method using Rotating Reflector Antenna," *IEICE Communications Express*, vol. 14, no. 2, pp. 47-50, February 2025, doi: 10.23919/comex.2024ATL0012.
- [13] J. P. Kim and G. U. Kim, "Measurement of phase difference and direction of arrival using time-modulated array with general modulation parameters," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 7, pp. 1627-1631, Jul. 2023, doi: 10.1109/LAWP.2023.3251322.
- [14] Z. Ding, T. Ji, M. Li and Q. H. Wu, "A Hybrid Signal Processing Method Combining Mathematical Morphology and Walsh Theory for Power Quality Disturbance Detection and Classification," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 584-592, March 2024, doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.04430.
- [15] N. Nakamoto, K. Kihira, T. Fukasawa, Y. Inasawa, and N. Shinohara, "Waveguide slot array with code-division multiplexing function for single RF chain digital beamforming," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E107-B, no. 8, pp. 541-551, Aug. 2024, doi: 10.23919/transcom.2023EBP3123.
- [16] Z. Dai, P. Li, Z. Li, R. Li, and H. Gu, "Direction-of-arrival estimation for time-varying arrays using FCN-based deep learning," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E108-B, no. 5, pp. 593-609, May 2025, doi: 10.23919/transcom.2024EBP3103.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.