

Antena de patrón conmutado para la banda ISM (2,45 GHz)

Jorge A. Cabrera-Botero*, Carlos I. Páez-Rueda**

Resumen

En el artículo se presenta el diseño y comprobación experimental de una antena de patrón conmutado con SLL reducido, conformada por un arreglo lineal de antenas acopladas por abertura de 1×6 elementos y alimentada por una matriz Butler 4×6 de área reducida, para la banda ISM (2,45 GHz). La antena es diseñada y fabricada en tecnología Microstrip multicapa, compacta, con espesor total de 62 milésimas de pulgada y con capacidad para conmutar 4 haces.

Palabras Clave: Antenas inteligentes, Antena de haz conmutado, Matriz Butler.

Abstract

In this paper the design and experimental verification of a switched beam antenna with low SLL, formed by an aperture-coupled linear array antenna 1×6 elements and fed by a 4×6 reduced Butler matrix for the ISM band (2,45 GHz) is presented. The antenna was designed and manufactured with a compact multilayer microstrip technology, total thickness of 62mil, and the ability to switch 4 beams.

Keywords: Smart Antennas, Switched beam antenna, Butler Matrix

1. Introducción

Las antenas de patrón conmutado son una subclase de antenas inteligentes, en las cuales se escoge un patrón de radiación entre varios predefinidos con el fin de cambiar su dirección de radiación [1], como se detalla en la Fig. 1a. Los desarrollos tecnológicos recientes de este tipo de antenas están dirigidos hacia su aplicación en las bandas S, X, Ku y Ka, para detección de señales de arribo interferentes y capacidad de direccionamiento de haz [2–4], y hacia la mejora de las características y medidas de desempeño de las antenas, tales como niveles de lóbulo lateral reducidos, anchos de banda más grandes, haces más directivos, reducción de tamaño, pesos y costos de fabricación para aplicaciones aeroespaciales [5–7]. Estas antenas pueden tener su mayor aplicación en las comunicaciones móviles, debido a que sus características de selectividad espacial y angular permiten mejorar la cobertura, la capacidad y la calidad de estos servicios [8].

Las antenas de patrón conmutado consisten de tres elementos: un arreglo de antenas, un circuito o matriz de desfase y una red de conmutación (Fig. 1b). La matriz de desfase, ante la excitación de una de sus entradas, genera en sus salidas los valores de amplitud y de fase requeridos para generar a través del arreglo de antenas, el patrón de radiación deseado. Para seleccionar la entrada de la matriz de desfase ésta se encuentra asociada a una red de conmutación.

* Oficial Naval egresado de la Escuela Naval Arturo Prat, Valparaiso, Chile, 1998. Especialista en Inteligencia Naval Estratégica, Escuela de Inteligencia y Contrainteligencia Naval, Cartagena, 2002. Ingeniero Naval Electrónico egresado de la Escuela Naval Almirante Padilla, Cartagena, 2006. Máster en Ingeniería Electrónica, de la Pontificia Universidad Javeriana, 2012. email: jorge.cabrera@javeriana.edu.co.

** Ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Javeriana. Máster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes. Profesor Asociado del Departamento de Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá-Colombia. email: paez.carlos@javeriana.edu.co.

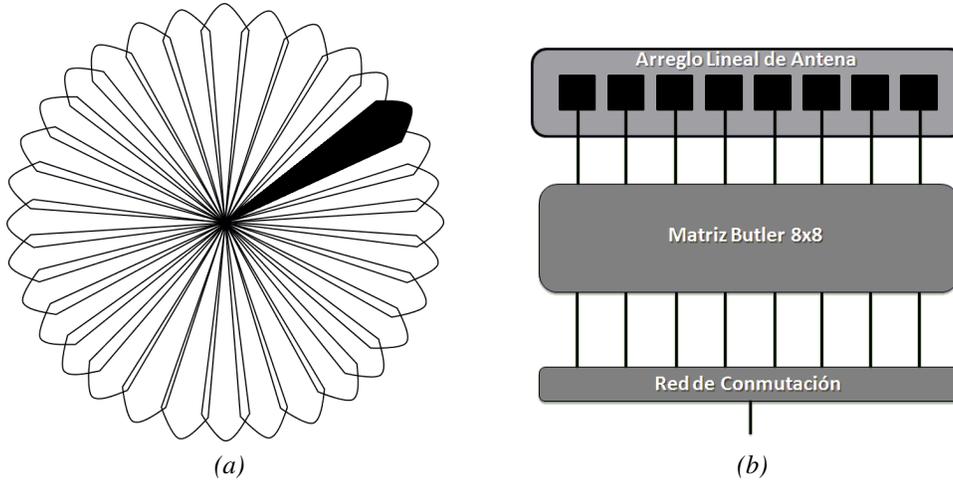


Figura 1. Antena inteligente de Haz Conmutado. (a) Patrones predefinidos. (b) Diagrama en bloques

En particular, la matriz Butler [9] de $N \times N$ es una matriz de desfase de RF basada en circuitos [10], donde N es el número de puertos de entrada y de salida. Esta red tiene la capacidad de producir N patrones de desfases diferentes [11], siendo N usualmente potencia de 2 (4×4 , 8×8 , etc). Las antenas de patrón conmutado basadas en la matriz Butler tienen modernamente varios desafíos, entre ellos, el de obtener un gran ancho de banda, un área circuital pequeña y unos lóbulos laterales reducidos. En ese sentido, ya que el componente básico de esta matriz de desfase son los dispositivos conocidos como híbridos [12], entonces una razonable reducción de su tamaño en general corresponde a una considerable reducción en el área neta de la matriz Butler. De forma similar, los efectos producidos por el acoplamiento mutuo en los elementos radiadores y la radiación parásita de los elementos de la matriz, deterioran el patrón de radiación e incrementan considerablemente los niveles de lóbulo lateral de la antena [13].

En este trabajo de investigación, se presenta el diseño, optimización y comprobación experimental de una antena de patrón conmutado para mejorar el desempeño de la tecnología WiFi. El enfoque principal está dirigido hacia el diseño de la red de alimentación con tamaño reducido y al diseño del arreglo lineal de antenas para obtener un nivel de lóbulo lateral inferior al tradicional siguiendo la propuesta de [14, 15]. El diseño se realiza teniendo en cuenta las capacidades que ofrece el mercado nacional, como parte del interés existente por el Comando de la Armada Nacional y del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones SISCOM de la Pontificia Universidad Javeriana, en la investigación de nuevos sistemas de radiación adaptables y miniaturizados para diversas aplicaciones RADAR (Radio Detection And Ranging) para plataformas navales y aéreas.

El resto del presente artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se incluye el procedimiento de diseño de la antena de patrón conmutado, incluyendo los componentes básicos de la matriz de desfase Butler de área reducida y el arreglo de antenas. En la Sección 3 se exponen los resultados experimentales del sistema fabricado. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones de esta investigación.

2. Diseño del sistema

2.1 Topología

Dentro de los factores más importantes que afectan el desempeño de los lóbulos laterales reportados en [16], son los producidos por la radiación espúrea la matriz Butler. Una solución a este problema, es separar la matriz Butler del arreglo de antenas y conectar ésta ya sea por medio de cables coaxiales o mediante acoplamiento por abertura al arreglo [16]. Para la esta investigación se decidió utilizar la última opción, cuya configuración requiere del uso de dos substratos paralelos separados por un plano de tierra [17]. Los niveles de SLL se mejoraron a través de la técnica propuesta en [14], por medio del incremento de la cantidad de elementos radiantes del arreglo. Según este método, un número adicional de elementos radiantes son conectadas a la matriz Butler por medio de divisores de potencia. En el caso de la matriz Butler de 4×4 , se propuso adicionar dos divisores de potencia con desfases adicionales de 180° , como se detalla en la Fig. 2.

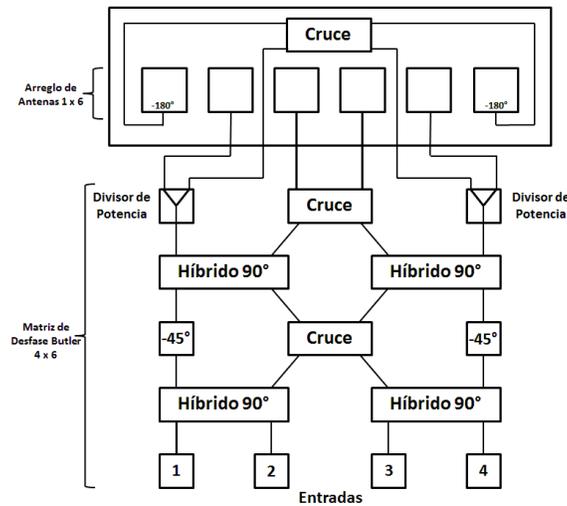


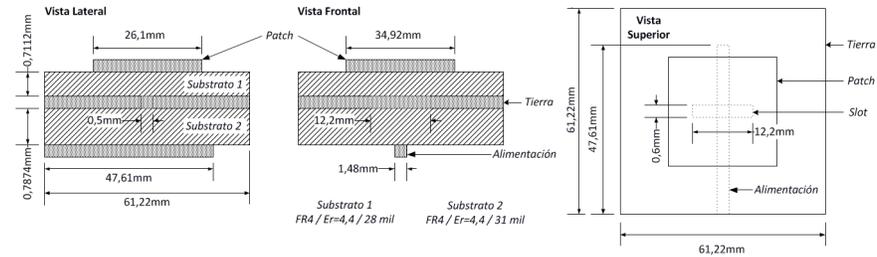
Figura 2. Topología de la Antena

2.2 Elemento básico del arreglo

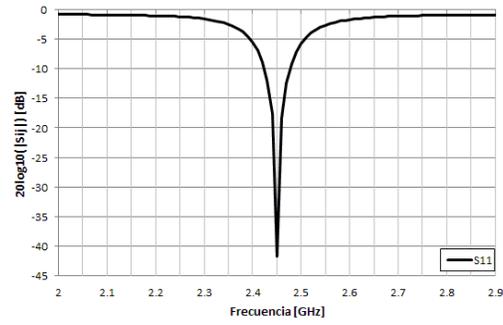
El diseño del elemento del arreglo de antena se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en [18] y en [19], considerando una impedancia característica de $Z_o = 50 \Omega$ y un substrato tradicional de tipo FR4 con espesor de 28 mil ($h_1 = 0,7112 \text{ mm}$) con valor típico de $\epsilon_r = 4,4$. La abertura sobre el plano conductor se ubica debajo, centrado a lo largo y a lo ancho del parche Microstrip para permitir el acoplamiento buscado [17]. La capa inferior está separada de la capa intermedia por un substrato FR4 con espesor de 31 mil ($h_2 = 0,7874 \text{ mm}$), siendo diseñada y optimizada para un coeficiente de reflexión de $-41,76 \text{ dB}$ a la frecuencia de $2,45 \text{ GHz}$, un ancho de banda de 60 MHz y nivel de cros polarización en el plano E inferior a $-24,5 \text{ dB}$, como se detalla en la Fig. 3.

2.3 Arreglo lineal

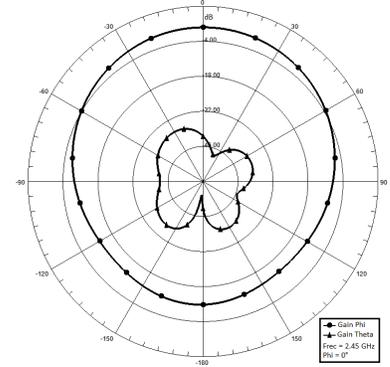
Al realizar el análisis teórico del patrón de un arreglo lineal de antenas de cuatro elementos 1×4 espaciados por una longitud de $\lambda/2$ de acuerdo con el procedimiento descrito en [18], se obtuvieron



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Antena Parche Microstrip Acoplada por Abertura. (a) Modelo. (b) Coeficiente de reflexión. (c) Ganancia.

niveles de lóbulo lateral en un rango entre -11 dB y -12 dB. Para un arreglo teórico lineal de 1×6 se obtuvo una mejora razonable del SLL en -3 dB en todos los patrones de radiación. Por tal razón, se realizó el diseño del arreglo con esta última configuración sobre un substrato FR4 de 28 mil de espesor con $\epsilon_r = 4,4$. Para el diseño se tuvieron en cuenta las atenuaciones que sufrirán las señales de los elementos 1, 2, 5 y 6, debido a los divisores de potencia simétricos y a las longitudes adicionales que tendrán las líneas de alimentación Microstrip de los elementos más externos del arreglo. Los resultados finales de la simulación arrojan valores de SLL inferiores a -15 dB para todos los patrones de radiación, según se puede apreciar en la Fig. 4b para el cuadrante de radiación principal $-90^\circ < \theta < 90^\circ$. En la Fig. 4a se detalla el coeficiente de reflexión, comprobando su acoplo a una frecuencia de resonancia de 2,45 GHz y un ancho de banda de 50 MHz medido entre $|S_{11}| < -10$ dB.

2.4 Matriz de desfase tipo Butler de área reducida

2.4.1 Híbrido reducido

El diseño de este híbrido se realiza típicamente con cuatro líneas de transmisión de 90° ($\lambda/4$) [20]. Debido a este criterio de diseño, el tamaño de la matriz Butler es usualmente inaceptable para aplicaciones portables. Para un diseño planar, las técnicas de reducción de tamaño de este componente incluyen el uso de capacitores impresos en el área interna del híbrido [21], el uso de líneas acopladas [22], el uso de líneas de transmisión artificiales [23], de líneas Microstrip discontinuas y de líneas Microstrip dobles [24], y el uso de stubs terminados en circuito abierto [25, 26]. Esta última técnica fue escogida ya que ofrece características electromagnéticas de acoplamiento, aislamiento

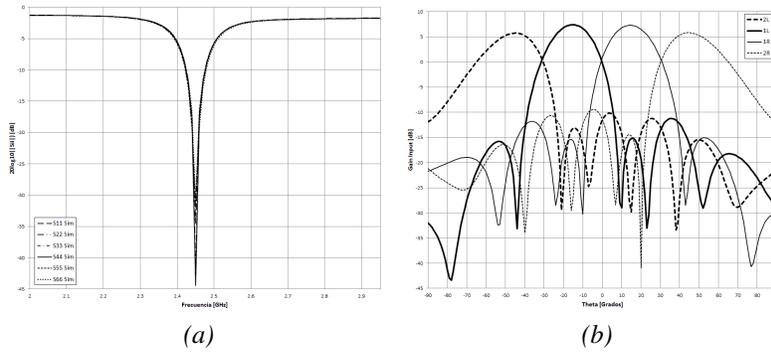


Figura 4. Simulación del arreglo de 1×6 . (a) Coeficiente de reflexión. (b) Ganancia.

y facilidad de fabricación nacional. La metodología de diseño utilizada fue [27], la cual consiste en reducir la longitud de la línea de transmisión de $\lambda/4$ usando stubs en diversas configuraciones. El modelo final del híbrido diseñado se presenta en la Fig. 5 sobre un sustrato FR4 de 31 mil de espesor, obteniéndose un ancho de banda operacional de 300 MHz.

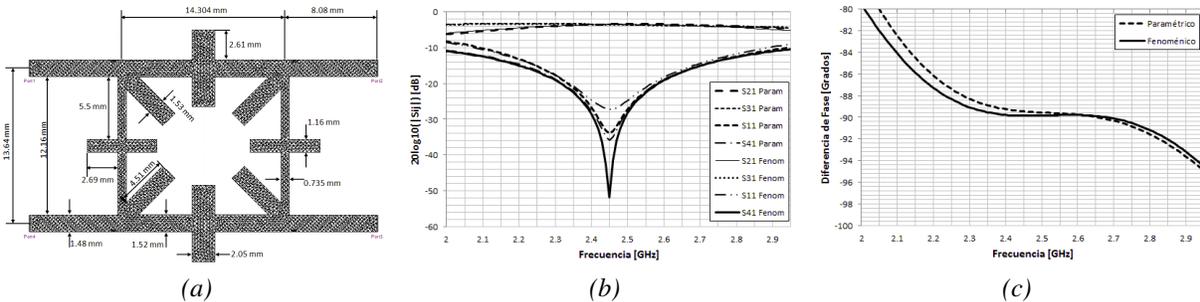


Figura 5. Híbrido Reducido. (a) Modelo. (b) Coeficiente de reflexión. (c) Diferencia de Fase.

2.4.2 Cruce Reducido

El término “cruce” se refiere al dispositivo que permite en tecnología planar, cruzar físicamente dos señales guiadas de RF. Este dispositivo es diseñado usualmente a partir de dos híbridos branchline en cascada debido a su simplicidad de diseño [28]. Para reducir el área del cruce se usa el mismo procedimiento de reducción usado con el híbrido. El modelo final del cruce diseñado se presenta en la Fig. 6.

2.4.3 Desfasador de 45°

El desfasador es un dispositivo que idealmente produce un desfase controlado entre sus puertos. En particular, en una matriz Butler de 4×4 se requieren idealmente desfasadores de 45° para compensar la operación de los demás subcomponentes. El diseño considerado fue el convencional de banda angosta [29] y se detalla en la Fig. 7a-7b. Este dispositivo fue ajustado a un valor de desfase real de $31,4^\circ$ para compensar los efectos de retardo de los otros componentes.

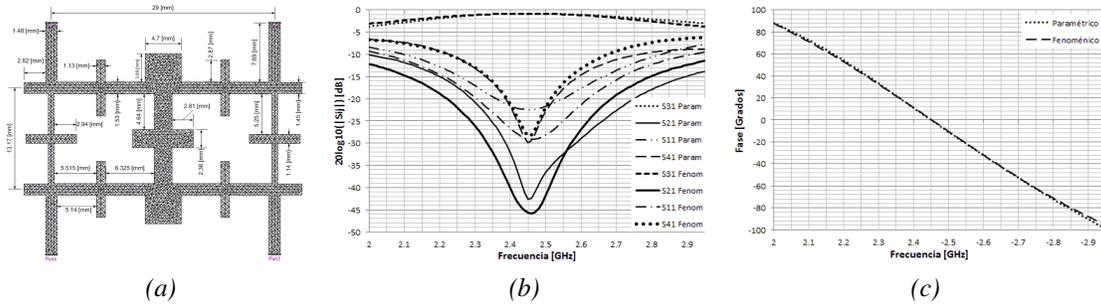


Figura 6. Cruce Reducido. (a) Modelo. (b) Coeficiente de Reflexión. (b) Diferencia de Fase.

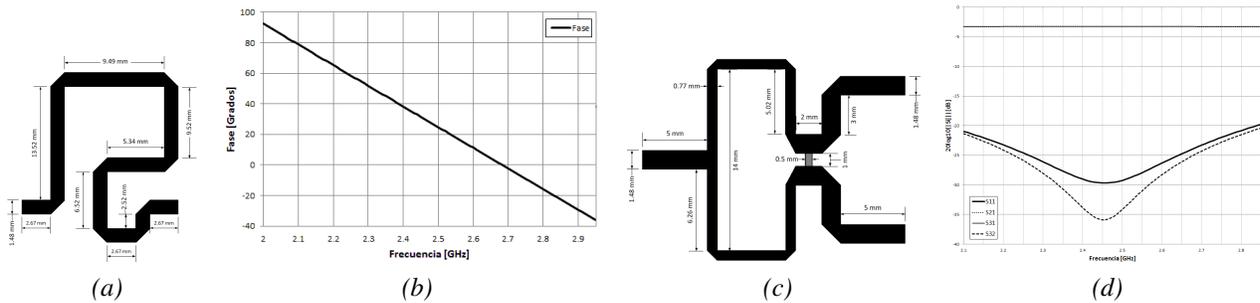


Figura 7. Desfasador y Divisor Wilkinson. (a) Modelo desfasador. (b) Diagrama de Fase del desfasador. (c) Modelo del divisor Wilkinson. (d) Parámetros de Scattering del divisor Wilkinson

2.4.4 Divisor de Potencia

El divisor de potencia Wilkinson, cuya matriz de Scattering convencional es detallada en [20], fue utilizado para convertir la matriz Butler de 4×4 a 4×6 [14] modificando las salidas 5 y 8. En la Fig 7c-7d se detalla el diseño final de dicho dispositivo.

2.4.5 Ensamble de la Matriz de Desfase

Para el diseño final de la matriz Butler de área reducida se ensambló la matriz por fases, como se detalla en la Fig. 8. El área total de la matriz Butler obtenida fue de $87,7 \times 73,5 \text{ mm}^2$, lo que equivale a una reducción de área del 61 % con respecto a la matriz Butler propuesta en [30].

La última etapa corresponde en convertir la matriz Butler 4×4 en un sistema de 4×6 , por medio de dos divisores de potencia Wilkinson simétricos, un cruce reducido y líneas de transmisión adicionales. Este sistema es finalmente integrado al arreglo de antenas de 1×6 , por medio de un diseño de tres capas. El subsistema de desfase es ubicado sobre un sustrato FR4 de 31 mil de espesor, mientras que el arreglo de antenas se encuentra sobre otro sustrato FR4 de 28 mil de espesor. Los dos subsistemas se encuentran separados por un plano conductor con las aberturas necesarias para su conexión electromagnética, como se detalla en la Fig. 9. El sistema total tiene unas dimensiones de $365,8 \times 165,71 \text{ mm}^2$ con un espesor de 62 mil, y por ende, es compatible con la tecnología tradicional de las tarjetas electrónicas.

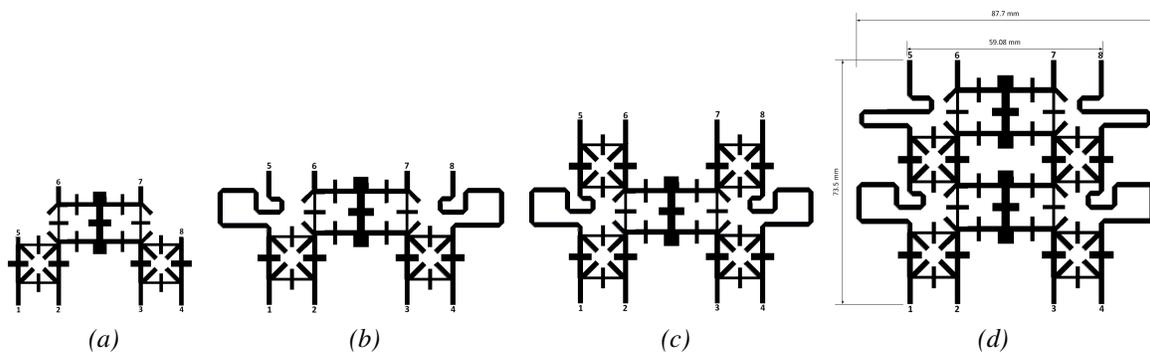


Figura 8. Ensamble de la Matriz Butler 4×4 . (a) Etapa 1. (b) Etapa 2. (c) Etapa 3. (c) Etapa 4.

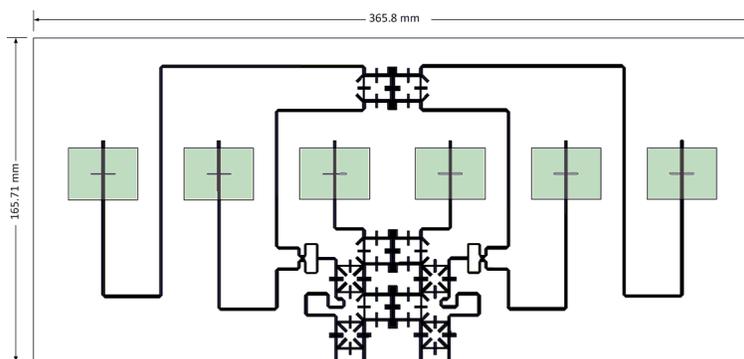


Figura 9. Modelo de la Antena de Patrón Conmutado

3. Resultados

3.1 Evaluación experimental del híbrido y el cruce

La evaluación experimental del híbrido y cruce reducido se realizaron de forma independiente con un sustrato FR4 de 31 mil de espesor, contrastando sus resultados con el diseño convencional a una frecuencia de 2,45 GHz, como se detalla en la Fig. 10a y en la Tabla 1. Los resultados experimentales muestran que la técnica de reducción además de lograr una reducción del área del 38,2 % para el híbrido y 45,55 % para el cruce, no afectó el desempeño de cada dispositivo.

Tabla 1. Comparación de Resultados Híbrido y Cruce

Dispositivo	Resultados del Híbrido					Resultados del Cruce				
	S11[dB]	S21[dB]	S31[dB]	S41[dB]	Δ Fase	S11[dB]	S21[dB]	S31[dB]	S41[dB]	Δ Fase
Convencional (Sim.)	-33,6	-3,48	-3,5	-32,62	-90,27°	-25,84	-65,87	-0,85	-28,98	0,02°
Convencional (Exp.)	-33,82	-3,86	-3,55	-22,75	-90,72°	-20,08	-63,25	-0,92	-23,48	91,99°
Reducido (Sim.)	-27,25	-3,52	-3,52	-51,77	-91,33°	-29,03	-45,65	-0,84	-28,44	0,2°
Reducido (Exp.)	-31,23	-3,91	-3,42	-26,74	-88,91°	-25,75	-44,8	-0,92	-21,32	82,1°

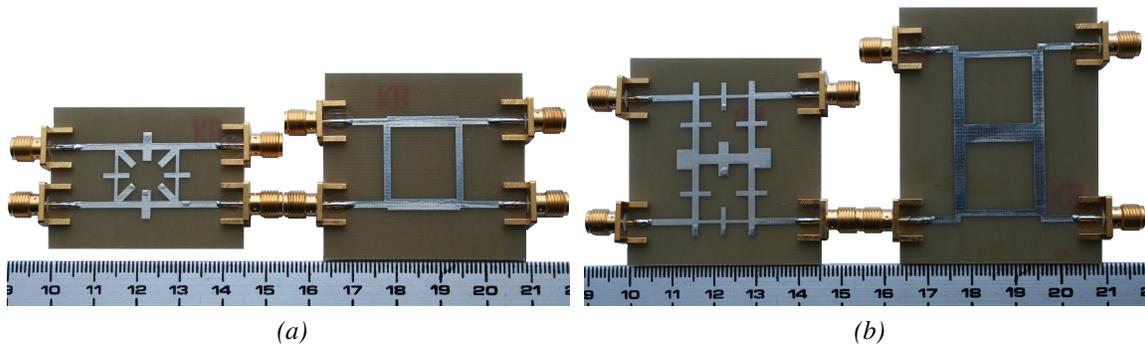


Figura 10. Prototipos del híbrido y cruce

3.2 Evaluación de la Antena Conmutada

Finalmente, la antena conmutada conformada por la matriz de desfase y el arreglo de antenas fue fabricada y caracterizada. En la Fig. 11a se detalla los elementos radiantes, y en la Fig. 11b se detalla la red de alimentación. La fabricación fue realizada en Taiwán por costos del prototipo, aunque sobre volumen la tecnología nacional es también competitiva.

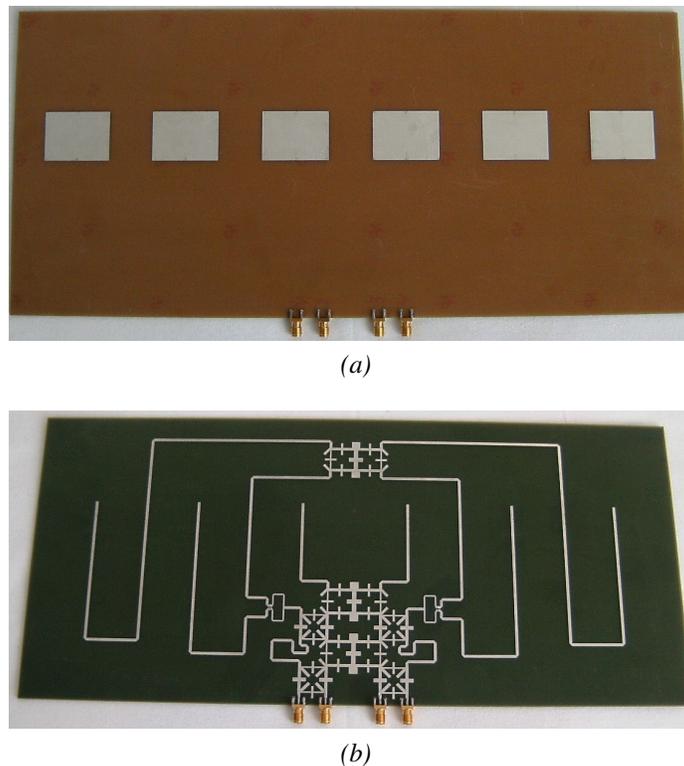


Figura 11. Antena de Patrón Conmutado. (a) Capa de Radiación. (b) Capa de Alimentación.

En la Fig. 12a-d se comparan los coeficientes de reflexión simuladas versus las obtenidas de forma experimental. Debido a las diferencias en la constante dieléctrica de la antena y la resolución típica del método computacional, se encontró un corrimiento en frecuencia de 90MHz. La antena presenta un mejor acoplamiento a la frecuencia de 2,5GHz, con valores de coeficientes de reflexión

inferiores a -33 dB para los puertos uno y tres y a -41 dB para los otros dos puertos, con un ancho de banda medido con referencia a los -10 dB de 415 MHz. Ya que la matriz de Scattering medida fue simétrica, se puede concluir que no existen problemas con los conectores en los puertos y el material del substrato es aceptablemente uniforme en toda la antena.

La evaluación particular de la antena a 2,5 GHz se detalla en la Tabla 2. Se allí se deduce que aunque los patrones $2R$ y $2L$ son muy similares a los obtenidos en simulación, los patrones $1L$ y $1R$, muestran algunas diferencias tanto en la ganancia máxima como en los lóbulos laterales. Esto último se puede deber a la atenuación que sufren las ondas electromagnéticas por el mayor recorrido que deben hacer para alimentar los elementos y, en cierto grado, a la precisión experimental ya que la resolución angular fue de 5 grados. En general, la antena se comporta de la forma esperada, con los cuatro patrones de radiación bien definidos y con niveles de lóbulo lateral por debajo de $-13,57$ dB. Los niveles de crosspolarización de la antena son muy buenos, considerado que son inferiores a -21 dB a la frecuencia de evaluación.

La medida de la relación de C/I (Carrier / Interference) evaluada por medio de la ganancia experimental angular de cada haz es detallada en la Fig. 12e-h, obteniéndose un valor de $C/I = 26$ dB, el cual es un decibel mejor que lo obtenido en el diseño. Las radiaciones espúreas en el lóbulo posterior de la antena muy posiblemente causadas por la matriz Butler, deterioran la radiación de la antena en su parte posterior. Ya que la antena fue diseñada para operar en el rango $-90^\circ < \theta < 90^\circ$, no se consideran como una desventaja operacional. Finalmente, en la Fig. 12i-l se detallan los cuatro patrones de radiación, junto con los niveles de crosppolarización, donde se aprecian algunas asimetrías producto de la radiación de los conectores.

Tabla 2. Comparación Ganancias Máximas

Pto	Patrón	Simulación		Experimental		
		Gmax [dBi]	$\theta \pm (\Delta\theta/2)$	Gmax [dBi]	$\theta \pm (\Delta\theta/2)$	SLL
1	1R	3,9439	$14^\circ \pm 0,5^\circ$	2,1519	$14,8^\circ \pm 2,5^\circ$	$-13,57$ dB
2	2L	0,7685	$-45^\circ \pm 0,5^\circ$	0,5259	$-49,3^\circ \pm 2,5^\circ$	$-14,08$ dB
3	2R	0,905	$44^\circ \pm 0,5^\circ$	0,4235	$44,4^\circ \pm 2,5^\circ$	$-13,89$ dB
4	1L	3,9205	$-15^\circ \pm 0,5^\circ$	2,1519	$-19,7^\circ \pm 2,5^\circ$	$-14,11$ dB

4. Conclusiones

En la presente investigación se ha diseñado y evaluado una antena de patrón conmutado con capacidad de cuatro haces operando en la banda de WiFi en 2,45 GHz. El desempeño de la antena en la dirección de radiación está acorde con el diseño realizado. El porcentaje de la reducción de área de la matriz Butler es del 61 % sin afectar el desempeño de la matriz de desfase, con una relación de lóbulos laterales inferior a $-13,5$ dB, relación de la radiación principal de cada haz versus sus interferencias mejor a 26 dB y un nivel de crosspolarización mejor a -21 dB.

Los efectos de las radiaciones espúreas de las líneas de alimentación Microstrip de la matriz de desfase Butler son notables hacia la parte posterior de la antena, sin embargo están fuera de la región operacional de la aplicación buscada en el diseño. La antena de patrón conmutado fue diseñada para una posible fabricación industrial sobre volumen a nivel competitivo en Colombia.

Como trabajos a futuro se espera continuar la investigación en matrices Butler de mayor orden, integrar diferentes estrategias de conmutación a esta antena y explorar las técnicas de obtención de

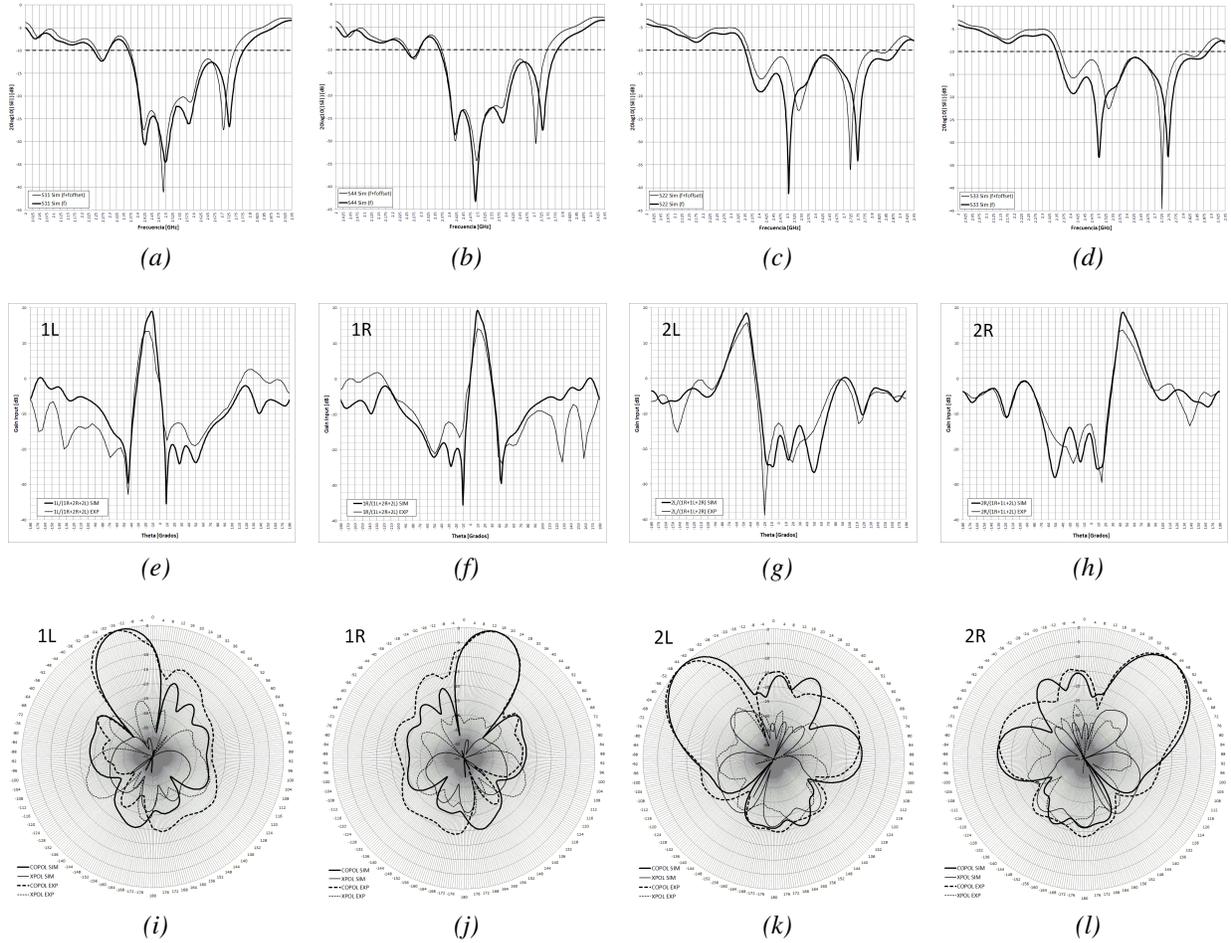


Figura 12. Desempeño de la antena conmutada. (a) Coeficiente de reflexión Puerto 1. (b) Coeficiente de reflexión Puerto 4. (c) Coeficiente de reflexión Puerto 2. (d) Coeficiente de reflexión Puerto 3. (e) (C/I) en 1L. (f) (C/I) en 1R. (g) (C/I) en 2L. (h) (C/I) en 2R. (i) Patrón 1L. (j) Patrón 1R. (k) Patrón 2L. (l) Patrón 2R.

un mayor número de haces al combinar dos o más entradas a la matriz Butler.

Agradecimientos y reconocimientos

El autor Jorge A. Cabrera fue parcialmente financiado por la Armada Nacional de Colombia, como parte de su programa de formación en Educación Superior. Los autores desean dar los agradecimientos al Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana, por el apoyo requerido en Software, Hardware y personal para realizar la presente investigación. Los autores también desean agradecer al Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de los Andes, por el apoyo en la caracterización angular de la antena por medio de su cámara anecoica siguiendo con las normas internacionales.

Referencias

- [1] S. Bellofiore, C. Balanis, J. Foutz, A. Spanias. "Smart-antenna systems for mobile communication networks part i: Overview and antenna design". *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*. Vol. 44. 2002. pp. 145-154.
- [2] S. Ibrahim, M. Rahim, T. Masri, M. Karim, M. A. Aziz. "Multibeam antenna array with butler matrix for wlan applications," in *Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007. The Second European Conference on*. 2007.
- [3] A. El-Tager, M. Eleiwa. "Design and implementation of a smart antenna using butler matrix for ism-band," in *Progress In Electromagnetics Research Symposium*. 2009.
- [4] A. S. Abdallah. "Printed circuit switched-beam smart antenna system using 4x4 butler matrix beamforming network at the band (11.25-12.85) ghz". *International Journal of Advancements in Computing Technology*. Vol. 1. 2009. pp. 70-77.
- [5] M. Hiranandani, A. Kishk. "Widening butler matrix bandwidth within the x-band," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*. 2005.
- [6] K. Wincza, S. Gruszczynski, K. Sachse. "Reduced sidelobe four-beam antenna array fed by modified butler matrix". *Electronics Letters*. Vol. 42. 2006. pp. 508-509.
- [7] M. Nedil, A. Habib, T. Denidni. "Novel ultra-wideband cb-cbw butler matrix," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE*. 2008.
- [8] M. Kamarudin, P. Hall. "Switched beam antenna array with parasitic elements". *Progress In Electromagnetics Research B*. Vol. 13. 2009. pp. 187-201.
- [9] J. L. Butler. "Multiple beam antenna system employing multiple directional couplers in the leading," 1966.
- [10] P. Hall, S. Vetterlein. "Review of radio frequency beamforming techniques for scanned and multiple beam antennas". *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H*. Vol. 137. 1990. pp. 293 - 303.
- [11] J. Remez, R. Carmon. "Compact designs of waveguide butler matrices". *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*. Vol. 5. 2006. pp. 27-31.
- [12] M. Nedelchev, I. Iliev. "Synthesis and analysis of reduced-size branch-line hybrids". *Micro-wave Review*. Vol. 2. 2008. pp. 16-19.
- [13] T. Mbarek, A. Gharsallah. "Mutual coupling in phased arrays for 3x4 butler matrices antenna network," in *Signals, Circuits and Systems, 2008. SCS 2008. 2nd International Conference on*. 2008.
- [14] S. Gruszczynski, K. Wincza, K. Sachse. "Reduced sidelobe four-beam n -element antenna arrays fed by 4 x n butler matrices". *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*. Vol. 5. 2006. pp. 430-434.

- [15] K. Wincza, S. Gruszczynski, K. Sachse. "Conformal four-beam antenna arrays with reduced sidelobes". *Electronics Letters*. Vol. 44. 2008. pp. 174-175.
- [16] D. M. Pozar, B. Kaufman. "Design considerations for low sidelobe microstrip arrays". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*. Vol. 38. 1990. pp. 1176-1185.
- [17] D. M. Pozar. "Microstrip antennas". *Proceedings of the IEEE*. Vol. 80. 1992. pp. 79-90.
- [18] C. A. Balanis. *Antenna Theory. Analysis and Design*. John Wiley and Sons, Inc.. 2005.
- [19] D. M. Pozar. "Analysis of an infinite phased array of aperture coupled microstrip patches". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*. Vol. 37. 1989. pp. 418-425.
- [20] R. Ludwig, G. Bogdanov. *RF Circuit Design*. Pearson Education, Inc. 2009.
- [21] S. Jung, R. Negra, F. Ghannouchi. "A design methodology for miniaturized 3-db branch-line hybrid couplers using distributed capacitors printed in the inner area". *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*. Vol. 56. 2008. pp. 2950-2953.
- [22] Z. Liu, R. Weikle. "A compact quadrature coupler based on coupled artificial transmission lines". *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*. Vol. 15. 2005. pp. 889-891.
- [23] C. Wang, T. Ma, C. Yang. "A new planar artificial transmission line and its applications to a miniaturized butler matrix". *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*. Vol. 55. 2007. pp. 2792-2801.
- [24] C. Tang, M. Chen, C. Tsai. "Miniaturization of microstrip branch-line coupler with dual transmission lines". *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*. Vol. 18. 2008. pp. 185-187.
- [25] C. Tang, M. Chen. "Synthesizing microstrip branch-line couplers with predetermined compact size and bandwidth". *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*. Vol. 55. 2007. pp. 1926-1934.
- [26] N. Muhammad, S. Rahim, N. Jizat, T. Rahman, K. Tan, A. Reza. "Beam forming networks using reduced size butler matrix". *Wireless Personal Communications*. Vol. 2010. 2010. pp. 1-20.
- [27] I. Sakagami, T. Munehiro, R. Teraoka. "A reduced branch-line coupler with eight stubs," in *Microwave Conference Proceedings, 1997. APMC '97, 1997 Asia-Pacific*. 1997.
- [28] J. Wight, W. Chudobiak, V. Makios. "A microstrip and stripline crossover structure". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 24. 1976. p. 270.
- [29] O. Khan. "Design of x-band 4x4 butler matrix for microstrip patch antenna array," in *TEN-CON 2006. 2006 IEEE Region 10 Conference*. 2006.
- [30] N. Jizat, S. Rahim, T. Rahman. "Dual band beamforming network integrated with array antenna," in *Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation (AMS), 2010 Fourth Asia International Conference on*. 2010.