

Antena de patrón conmutado de área reducida para operar en la banda industrial, científica y médica de 2,45 GHz¹

Switched Antenna Pattern with Reduced Area for the Industrial, Scientific and Medical 2.45 GHz Band²

Jorge A. Cabrera-Botero³

Carlos I. Páez-Rueda⁴

DOI:10.11144/JAVERIANA.IYU18-1.APCA

¹ Fecha de recepción: 17 de julio de 2012. Fecha de aceptación: 30 de septiembre de 2013. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado *Antena de patrón conmutado para la banda ISM (2,4 GHz)*. Número de registro MIE-1011. Desarrollado por el grupo de investigación SISCOM de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, con financiación parcial de la Armada Nacional de Colombia y apoyo de la Universidad de los Andes.

² Reception date: July 17th, 2012. Acceptance date: September 30th, 2013. This article is derived from the research project called *Antena de patrón conmutado para la banda ISM (2.4 GHz)*. Registration number MIE-1011. It was developed by the research group SISCOM, from Pontificia Universidad Javeriana, Bogota, Colombia, with partial financing of Colombia National Navy and Los Andes University support.

³ Oficial Naval, Escuela Naval Arturo Prat, Valparaíso, Chile. Especialista en Inteligencia Naval Estratégica, Escuela de Inteligencia y Contrainteligencia Naval, Bogotá, Colombia. Ingeniero naval electrónico, Escuela Naval Almirante Padilla, Colombia. Máster en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: jorge.cabrera@javeriana.edu.co.

⁴ Ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Máster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Profesor asociado del Departamento de Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana.

Correo electrónico: paez.carlos@javeriana.edu.co.

Resumen

En el artículo se presenta el diseño y la 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, que opera en la banda industrial, científica y médica de 2,45 GHz. La antena es diseñada y fabricada nacionalmente con 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.

Keywords plus

intelligent antennas, switched-beam antenna.

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 SIM (Industrial, Scientific and Medical) band in 2.45 GHz is presented. The antenna was designed and manufactured domestically with a compact multilayer microstrip technology, total thickness of 62 mil, and the ability to switch 4 beams.

Keywords

Smart antennas, switched beam antenna, Butler matrix.

Palabras clave descriptores

Antenas inteligentes, Antena de haz conmutado.

Introducción

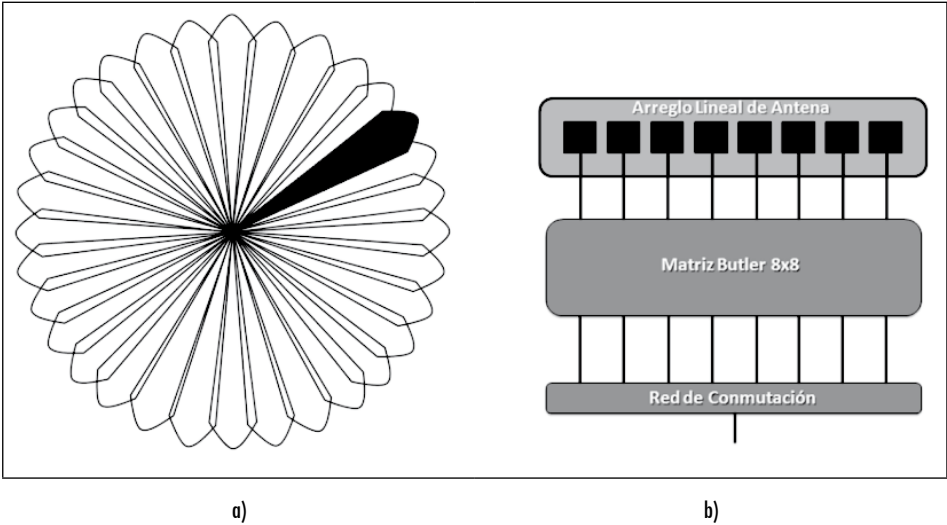
Las antenas de patrón conmutado son una subclase de antenas inteligentes en las cuales se escoge un patrón de radiación entre varios predefinidos con el fin de cambiar su dirección de radiación (Bellofiore *et al.*, 2002), como se detalla en la figura 1a. Los desarrollos tecnológicos recientes de este tipo de antenas están dirigidos hacia su aplicación en las bandas S, X, Ku y Ka, para la detección de señales de arribo interferentes y la capacidad de direccionamiento de haz (Ibrahim *et al.*, 2007; Abdallah, 2009), y hacia la mejora de las características y medidas de desempeño de las antenas, 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 (Hiranandani y Kishk, 2005; Nedil, Habib y Denidni, 2008). Estas antenas pueden tener su mayor aplicación en las comunicaciones móviles, debido a que sus características de selectividad espacial y angular mejoran la cobertura, la capacidad y la calidad de estos servicios (Kamarudin y Hall, 2009).

Las antenas de patrón conmutado consisten de tres elementos: un arreglo de antenas, un circuito o matriz de desfase y una red de conmutación (figura 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, mediante el arreglo de antenas, el patrón de radiación deseado. Para seleccionar la entrada de la matriz de desfase esta se encuentra asociada a una red de conmutación.

En particular, la matriz Butler (Butler, 1966) de $N \times N$ es una matriz de desfase de RF basada en circuitos (Hall y Vetterlein, 1990), donde N es el número de puertos de entrada y de salida. Esta red tiene la capacidad de producir N patrones de desfases diferentes (Remez y Carmon, 2006), 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 (Nedelchev e Iliev, 2008);

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 (Mbarek y Gharsallah, 2008).

Figura 1. Antena inteligente de haz conmutado: a) patrones predefinidos y b) diagrama en bloques



Fuente: presentación propia de los autores.

En este trabajo de investigación se presenta el diseño, la optimización local y la 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 (Gruszczynski, Wincza y Sachse, 2006; Wincza, Gruszczynski y Sachse, 2008). 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 de *radio detection and ranging* (RADAR) para plataformas navales y aéreas.

El resto del presente artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 1 se incluye el procedimiento de diseño de la antena de patrón conmutado, incluidos los componentes básicos de la matriz de desfase Butler de área reducida y el arreglo de antenas. En la sección 2 se exponen los resultados experimentales del sistema fabricado. Finalmente, se presentan las conclusiones de esta investigación.

1. Diseño del sistema

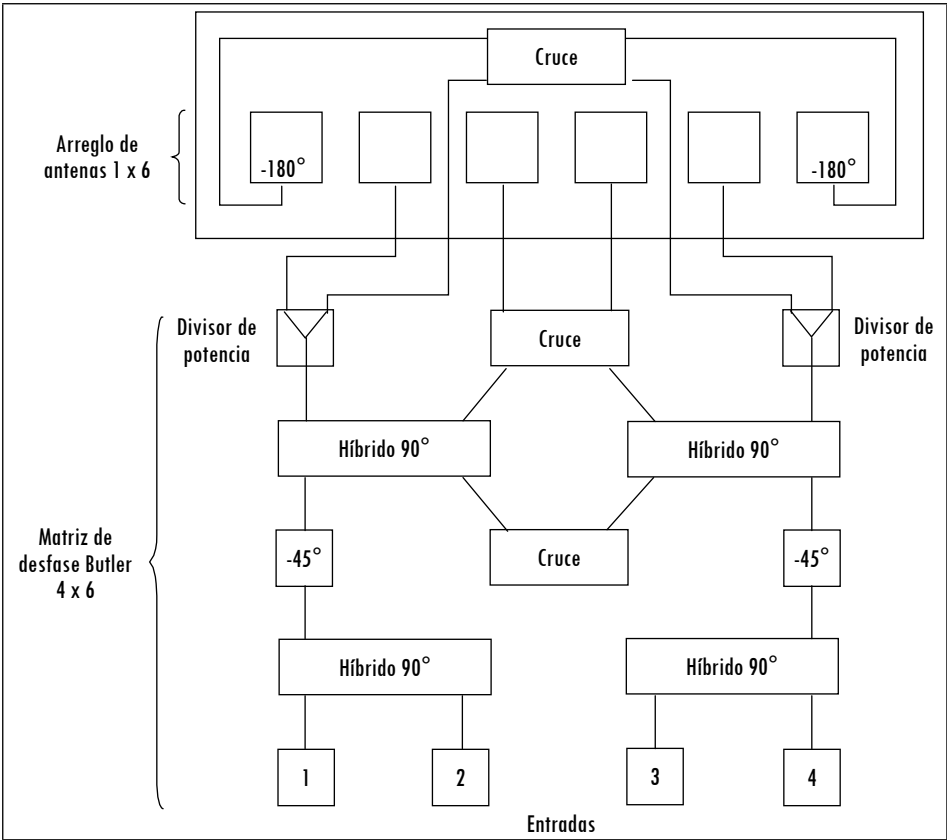
1.1. Topología

Dentro de los factores más importantes que afectan el desempeño de los lóbulos laterales reportados en (Pozar y Kaufman, 1990), son los producidos por la radiación espuria la matriz Butler. Una solución a este problema es separar la matriz Butler del arreglo de antenas y conectarla ya sea por medio de cables coaxiales o mediante acoplamiento por abertura al arreglo (Pozar y Kaufman, 1990). Para esta investigación se decidió utilizar la última opción, cuya configuración requiere dos sustratos paralelos separados por un plano de tierra (Pozar, 1992). Los niveles de de lóbulo lateral o *sidelobe level* (SLL) se mejoraron a través de la técnica propuesta en (Gruszczynski, Wincza y Sachse, 2006), incrementando la cantidad de elementos radiantes del arreglo. Según este método, un número adicional de elementos radiantes son conectados a la matriz Butler por medio de divisores de potencia. En el caso de la matriz Butler de 4×4 , se propuso adicionar 2 divisores de potencia con desfases adicionales de 180° , como se detalla en la figura 2.

1.2. Elemento básico del arreglo

El diseño del elemento del arreglo de antena se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en (Balanis, 2005) y en (Pozar, 1989), considerando una impedancia característica de $Z_0 = 50 \Omega$ y un sustrato tradicional FR4 con espesor de 28 milésimas de pulgada ($h_1 = 0,7112$ 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 (Pozar, 1992). La capa inferior está separada de la capa intermedia por un sustrato FR4 con espesor de 31 milésimas de pulgada ($h_2 = 0,7874$ mm), siendo diseñada y optimizada para un coeficiente de reflexión de $-41,76$ dB a la frecuencia de 2,45 GHz, un ancho de banda de 60 MHz y nivel de polarización cruzada en el plano E inferior a $-24,5$ dB, como se detalla en la figura 3.

Figura 2. Topología de la antena conmutada



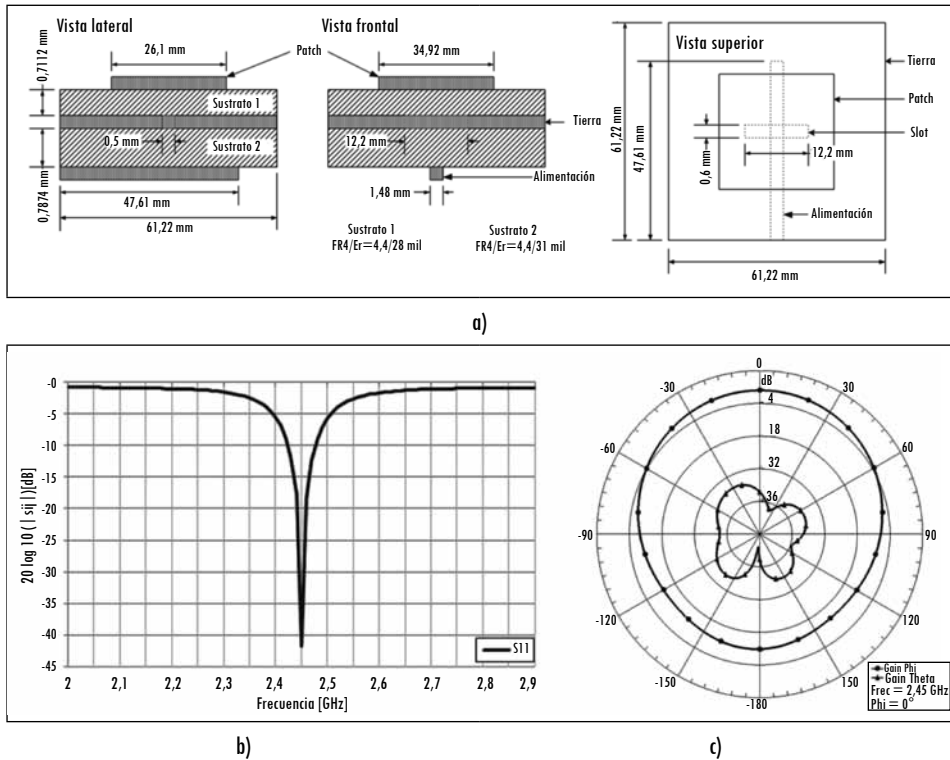
Fuente: presentación propia de los autores.

1.3. 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 (Balanis, 2005), se obtuvieron 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 diseñó el arreglo con esta última configuración sobre un sustrato FR4 de 28 milésimas de pulgada de espesor con $\epsilon_r = 4,4$. Para el diseño posterior debe considerarse la atenuación adicional 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. En los resultados finales de la simulación

se encontraron valores de SLL inferiores a -15 dB para todos los patrones de radiación, según se puede apreciar en la figura 4b para el cuadrante de radiación principal $-90^\circ < \theta < 90^\circ$. En la figura 4a se detalla el coeficiente de reflexión y se comprueba su acoplo a una frecuencia de resonancia de $2,45$ GHz y un ancho de banda de 50 MHz, medido entre $|S_{11}| \leq 10$ dB.

Figura 3. Antena parche microstrip acoplada por abertura: a) Modelo, b) coeficiente de reflexión y c) ganancia



Fuente: presentación propia de los autores.

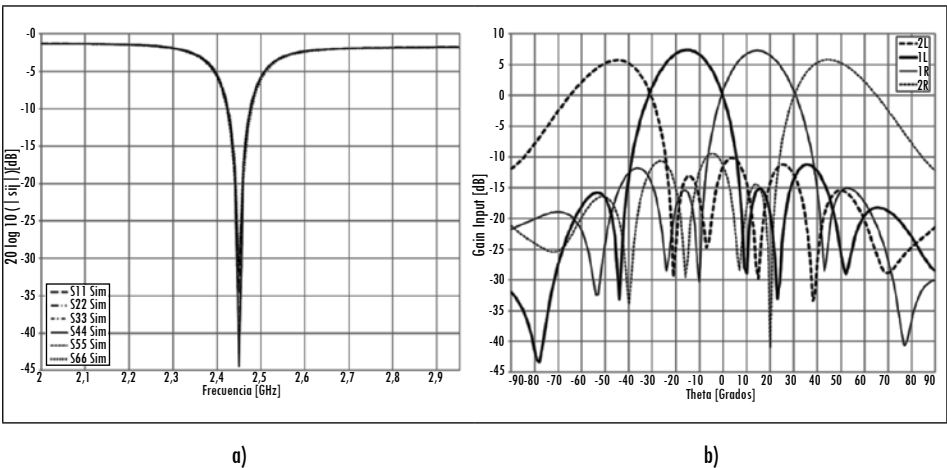
1.4. Matriz de desfase tipo Butler de área reducida

1.4.1. Híbrido reducido

El diseño de este híbrido se realiza típicamente con cuatro líneas de transmisión de 90° ($\lambda/4$) (Ludwig y Bogdanov, 2009). 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 capacitores impresos en el área interna del híbrido (Jung, Negra y Ghannouchi, 2008), el uso de líneas acopladas (Liu y Weikle, 2005), el uso de líneas de transmisión artificiales (Wang, Ma y Yang, 2007), de líneas microstrip discontinuas y de líneas microstrip dobles (Tang, Chen y Tsai, 2008), y el uso de *stubs* terminados en circuito abierto (Tang y Chen, 2007; Muhammad *et al.*, 2010). Se escogió esta última ya que ofrece características electromagnéticas de acoplamiento, aislamiento y facilidad de fabricación nacional. La metodología de diseño utilizada fue (Sakagami, Munehiro y Teraoka, 1997), 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 figura 5 sobre un sustrato FR4 de 31 milésimas de pulgada de espesor y se obtuvo un ancho de banda operacional de 300 MHz.

Figura 4. Simulación del arreglo de 1×6 : a) coeficiente de reflexión y b) ganancia

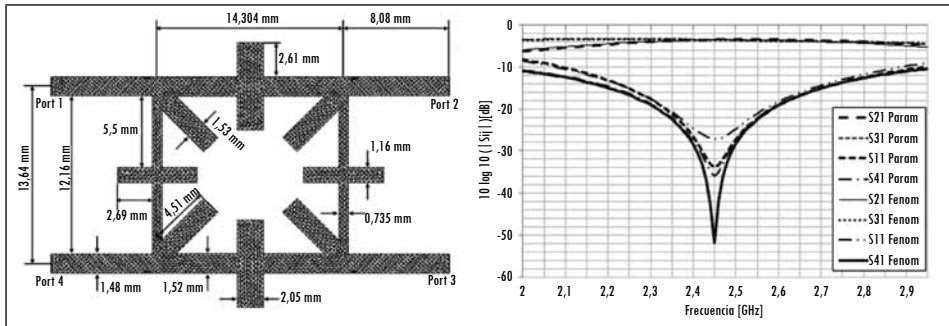


Fuente: presentación propia de los autores.

1.4.2. Cruce reducido

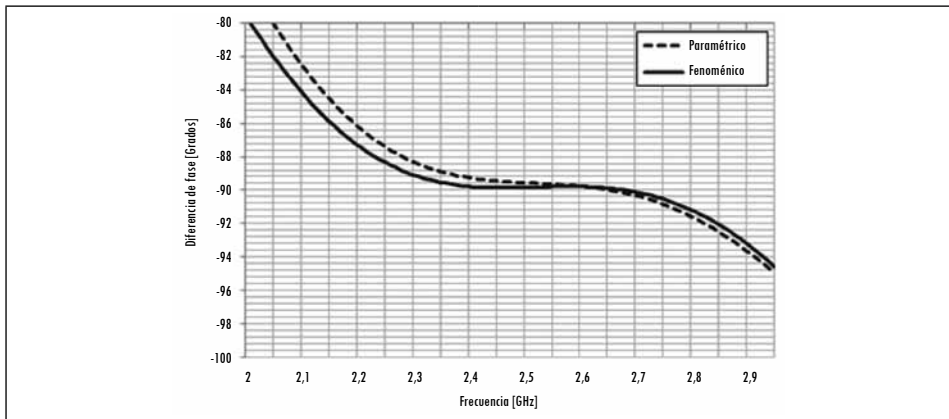
El término *cruce* se refiere al dispositivo que permite, en tecnología planar, cruzar físicamente dos señales guiadas de RF. Este dispositivo es diseñado usualmente a partir de dos híbridos *branchline* en cascada, debido a su simplicidad de diseño (Wight, Chudobiak y Makios, 1976). Para reducir el área del cruce se usa el mismo procedimiento de reducción usado con el híbrido. El modelo final del cruce diseñado se presenta en la figura 6.

Figura 5. Híbrido reducido: a) modelo, (b) coeficiente de reflexión y (c) diferencia de fase



a)

b)



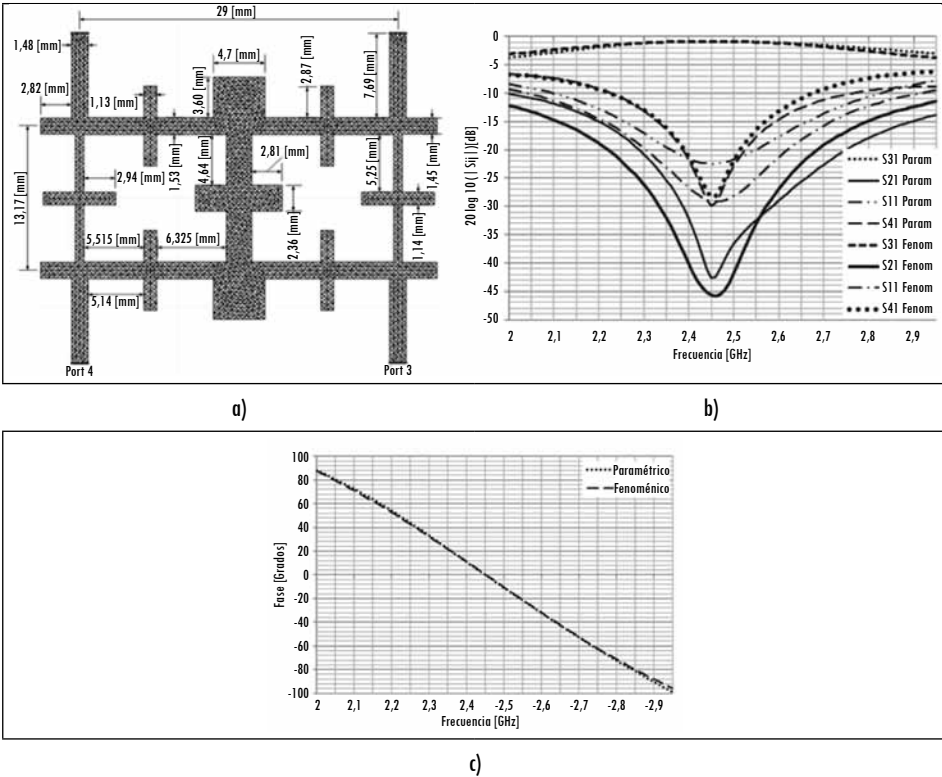
c)

Fuente: presentación propia de los autores.

1.4.3. Desfasador de 45 grados

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 (Khan, 2006) y se detalla en las figuras 7a y 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 y c) diferencia de fase



Fuente: presentación propia de los autores.

1.4.4. Divisor de potencia

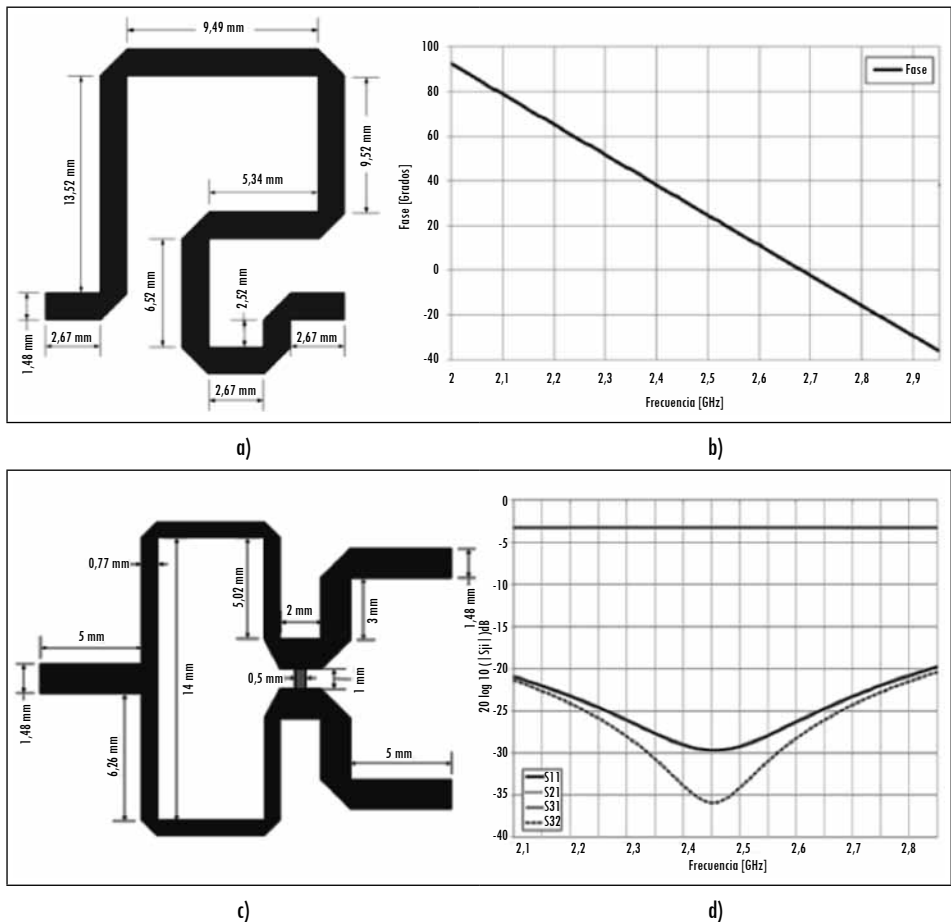
El divisor de potencia Wilkinson, cuya matriz de *scattering* convencional es detallada en (Ludwig y Bogdanov, 2009), fue utilizado para convertir la matriz Butler de 4×4 a 4×6 (Gruszczynski, Wincza y Sachse, 2006) modificando las salidas 5 y 8. En las figuras 7c y 7d se detalla el diseño final de dicho dispositivo.

1.4.5. 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 figura 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 (Jizat, Rahim y Rahman, 2010). 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

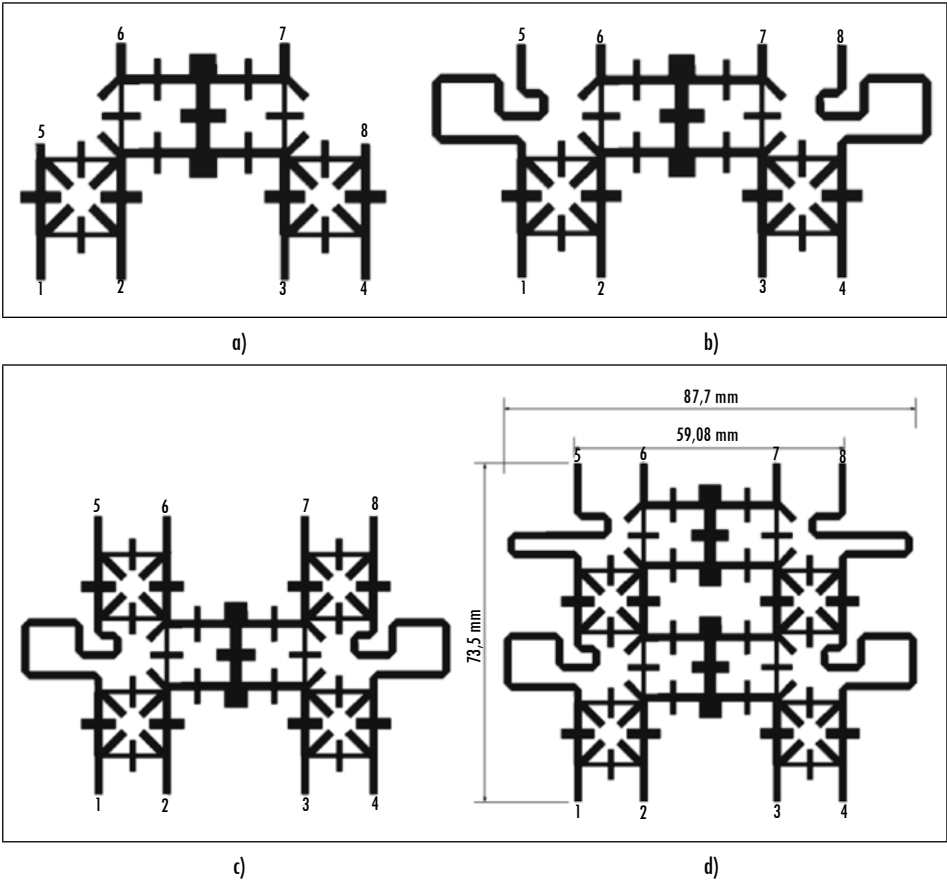
transmisión adicionales. Este sistema es finalmente integrado al arreglo de antenas de 1×6 , por medio de un diseño de tres capas. El subsistema de desfase es ubicado sobre un sustrato FR4 de 31 milésimas de pulgada de espesor, mientras que el arreglo de antenas se encuentra sobre otro sustrato FR4 de 28 milésimas de pulgada 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 figura 9. El sistema total tiene unas dimensiones de $365,8 \times 165,71 \text{ mm}^2$ con un espesor de 62 milésimas de pulgada y, por ende, es compatible con la tecnología tradicional de las tarjetas electrónicas.

Figura 7. Desfasador y divisor Wilkinson: a) modelo desfasador, b) diagrama de fase del desfasador, c) modelo del divisor Wilkinson y d) parámetros de *Scattering* del divisor Wilkinson



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 8. Ensamble de la Matriz Butler 4×4: a) etapa 1, b) etapa 2, c) etapa 3 y c) etapa 4

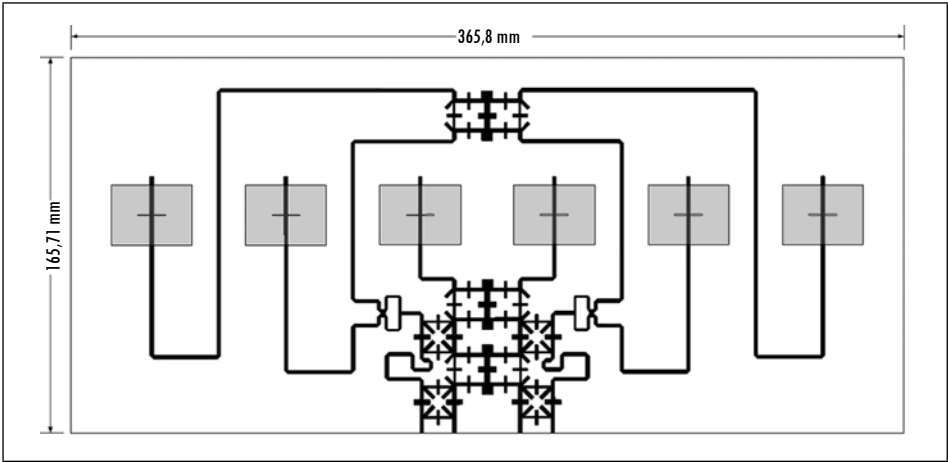


Fuente: presentación propia de los autores.

1.4.6. Optimización local

Aunque las dimensiones promedio de los componentes del sistema fueron diseñadas con longitudes estándares de cada componente, fue necesario realizar un ajuste y optimización local de cada subsistema una vez fueron integradas en las diferentes etapas de diseño. Dicha optimización local se hizo de forma exhaustiva utilizando variaciones entre un 20 % de las dimensiones estándares de cada componente.

Figura 9. Modelo de la antena de patrón conmutado



Fuente: presentación propia de los autores.

2. Resultados

2.1. Evaluación experimental del híbrido y el cruce

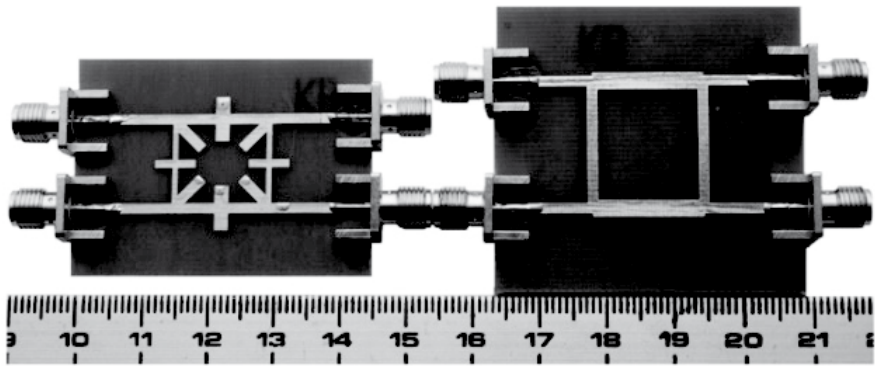
La evaluación experimental del híbrido y cruce reducido se llevó a cabo de forma independiente con un sustrato FR4 de 31 milésimas de pulgada de espesor, que contrasta sus resultados con el diseño convencional a una frecuencia de 2,45 GHz, como se detalla en la tabla 1 y en la figura 10a. Los resultados 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

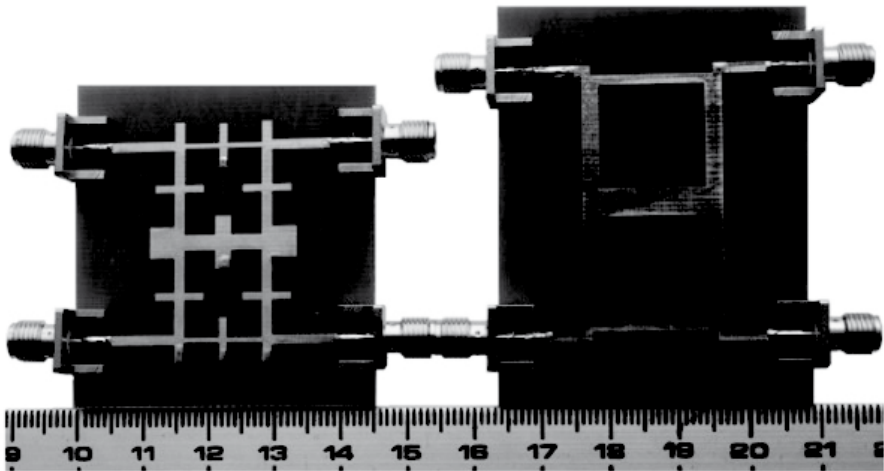
Dispositivo	Resultados del híbrido					Resultados del cruce				
	S11 [dB]	S21 [dB]	S31 [dB]	S41 [dB]	D Fase [°]	S11 [dB]	S21 [dB]	S31 [dB]	S41 [dB]	D Fase [°]
Convencional (Sim)	-33,60	-3,48	-3,50	-32,62	-90,27	-25,84	-65,87	-0,85	-28,98	0,02
Convencional (Exp)	-33,82	-3,86	-3,55	-22,75	-90,72	-20,08	-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	0,20
Reducido (Exp)	-31,23	-3,91	-3,91	-26,74	-88,91	-25,75	-44,80	-0,92	-21,32	82,10

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 10. Prototipos del híbrido y cruce



a)



b)

Fuente: presentación propia de los autores.

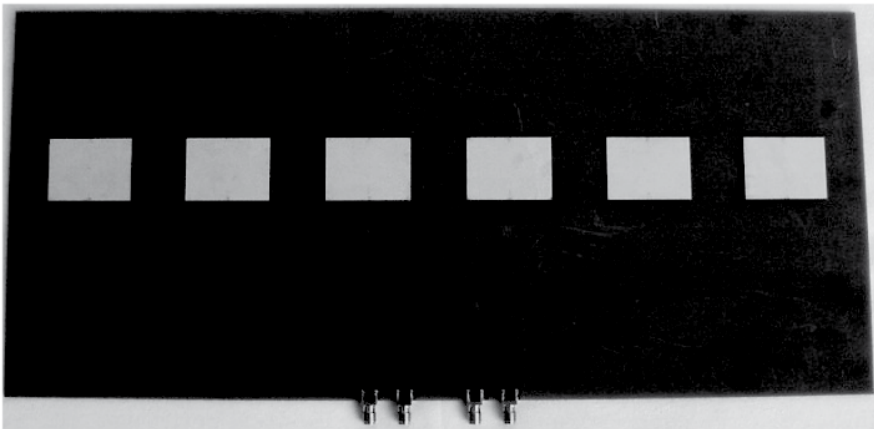
2.2. Evaluación de la antena conmutada

Finalmente, la antena conmutada conformada por la matriz de desfase y el arreglo de antenas fue fabricada y caracterizada. En la figura 11a se detallan los elementos radiantes y en la figura 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.

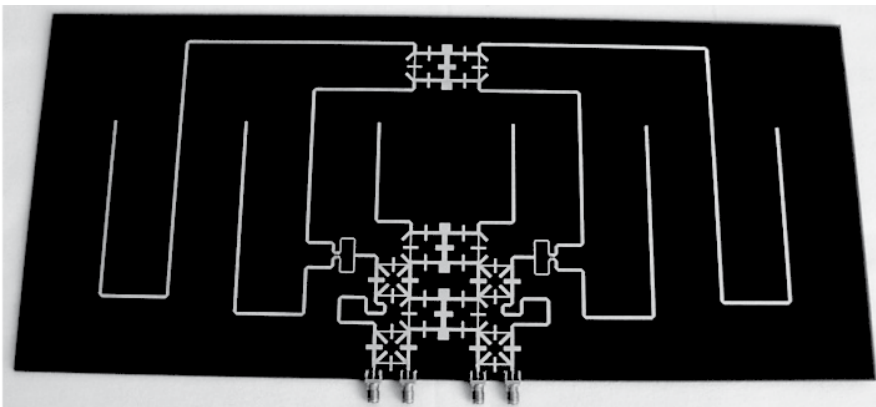
La evaluación del coeficiente de reflexión simulada *versus* la experimental fue aceptable, salvo por un corrimiento en la frecuencia central de operación de 90 MHz

causada por la diferencia experimental de la constante dieléctrica de la antena y la resolución típica del método computacional. La antena presenta un mejor acoplamiento a la frecuencia de 2,5 GHz, con valores de coeficientes de reflexión inferiores a -33 dB para los puertos 1 y 3 y a -41 dB para los otros 2 puertos, con un ancho de banda medido con referencia a los -10 dB de 415 MHz. Este ancho de banda permite la operación de la antena en la banda ISM de 2,45 GHz sin modificaciones. Ya que la matriz de *scattering* medida fue simétrica, se puede concluir que no existen problemas con los conectores en los puertos y que el material del sustrato es aceptablemente uniforme en toda la antena.

Figura 11. Antena de patrón conmutado: a) capa de radiación y b) capa de alimentación



a)



b)

Fuente: presentación propia de los autores.

La evaluación particular de la antena a 2,5 GHz se detalla en la tabla 2. De allí se deduce que aun cuando 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 hacen para alimentar los elementos y, en cierto grado, a la precisión experimental, ya que la resolución angular fue de 5°. 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 polarización cruzada de la antena son muy buenos, considerado que son inferiores a -21 dB a la frecuencia de evaluación. En particular, la ganancia en 2L y 2R inferior a 1 dB fue también debido a los pesos requeridos en el arreglo lineal para mejorar considerablemente C/I de la antena conmutada.

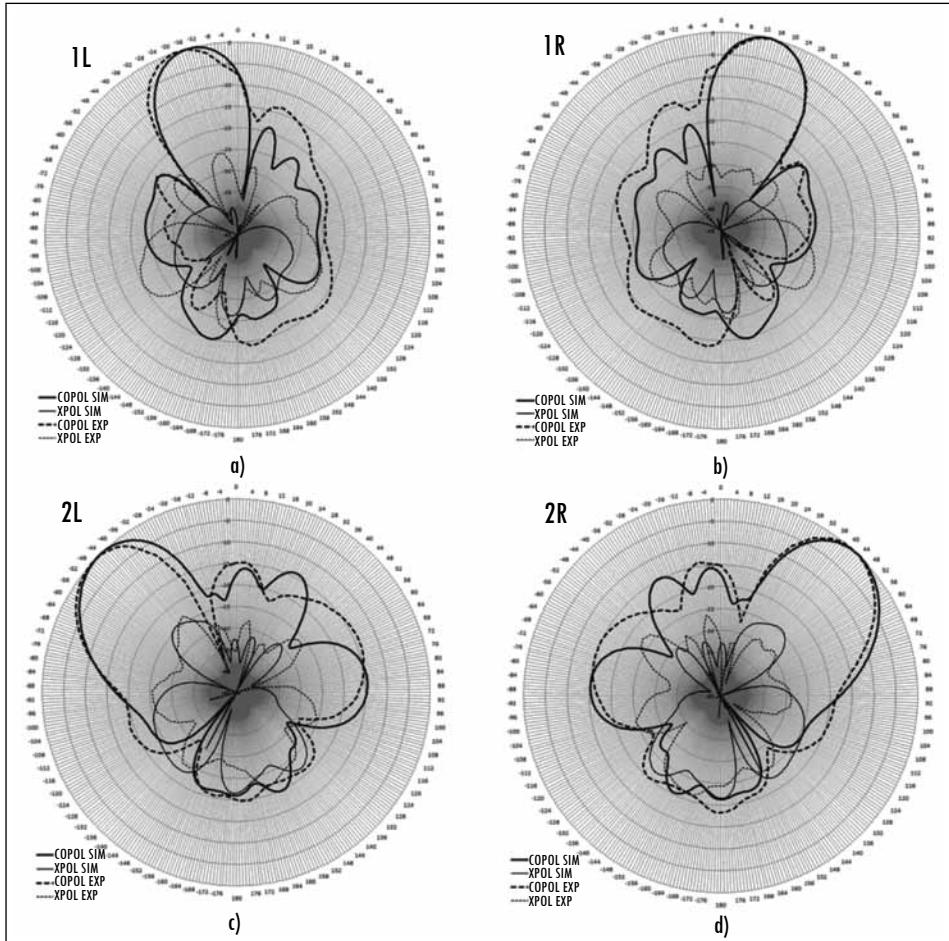
Tabla 2. Comparación de las ganancias máximas

Pto	Patrón	Simulación		Experimentación		
		Gmax [dBi]	Ángulo [Grados]	Gmax [dBi]	Ángulo [Grados]	SLL [dB]
1	1R	3,9439	14 ± 0,5	2,1519	14,8 ± 2,5	-13,57
2	2L	0,7685	-45 ± 0,5	0,5259	49,3 ± 2,5	-14,08
3	2R	0,9050	44 ± 0,5	0,4235	44,4 ± 2,5	-13,89
4	2L	3,9205	-15 ± 0,5	2,1519	19,7 ± 2,5	-14,11

Fuente: presentación propia de los autores.

La medida de la relación de C/I (Carrier/Interference), evaluada por medio de la ganancia experimental angular de cada haz, fue determinada experimentalmente y se obtuvo un valor de C/I = 26 dB, el cual es fue decibel mejor que lo obtenido en el diseño. Experimentalmente se encontraron algunas radiaciones espurias en el lóbulo posterior de la antena causadas por la matriz de desfase Butler; sin embargo, estas no se consideran una desventaja operacional, ya que la antena fue diseñada para operar en el rango $-90^{\circ} < \theta < 90^{\circ}$. Finalmente, en la figura 12 se detallan los cuatro patrones de radiación, junto con los niveles de polarización cruzada, donde se aprecian algunas asimetrías producto de la radiación de los conectores.

Figura 12. Desempeño de la antena conmutada: a) patrón 1L, b) patrón 1R, c) patrón 2L y d) patrón 2R



Fuente: presentación propia de los autores.

Conclusiones

En la presente investigación se ha diseñado y evaluado una antena de patrón conmutado con capacidad de 4 haces que operan en la banda ISM 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 polarización cruzada mejor a -21 dB.

Los efectos de las radiaciones espurias 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 un mayor número de haces al combinar dos o más entradas a la matriz Butler. En particular, los resultados encontrados evidencian una apreciable reducción de la matriz de desfase para la cual deben diseñarse estrategias especiales para la reducción del tamaño del arreglo de antenas.

Referencias

- ABDALLAH, A. S. 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*. 2009, vol. 1, pp. 70-77.
- BALANIS, C. A. *Antenna theory: Analysis and design*. New York: John Wiley and Sons, 2005.
- BELLOFIORE, S.; BALANIS C.; FOUTZ, J. y SPANIAS, A. Smart-antenna systems for mobile communication networks part I: Overview and antenna design. *Antennas and Propagation Magazine*. 2002, vol. 44, pp. 145-154.
- BUTLER, J. L. *Multiple beam antenna system employing multiple directional couplers in the leading*. s. d., 1966.
- EL-TAGER, A. y ELEIWA, M. Design and implementation of a smart antenna using butler matrix for ism-band. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2009.
- GRUSZCZYNSKI, S.; WINCZA, K. y SACHSE, K. Reduced sidelobe four-beam n -element antenna arrays fed by $4 \times n$ Butler matrices. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*. 2006, vol. 5, pp. 430-434.
- HALL, P. y VETTERLEIN, S. Review of radio frequency beamforming techniques for scanned and multiple beam antennas. *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H*. 1990, vol. 137, pp. 293-303.
- HIRANANDANI, M. y KISHK, A. Widening butler matrix bandwidth within the x-band. *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, 2005.
- IBRAHIM, S.; RAHIM, M.; MASRI, T.; KARIM, M. y AZIZ, M. A. Multibeam antenna array with Butler matrix for WLAN applications. *The Second European Conference on Antennas and Propagation*, Edinburgh, 2007.
- JIZAT, N.; RAHIM, S. y RAHMAN, T. Dual band beamforming network integrated with array antenna. *Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation (AMS)*, 2010.

- JUNG, S.; NEGRA, R. y GHANNOUCHI, F. A design methodology for miniaturized 3-db branch-line hybrid couplers using distributed capacitors printed in the inner area. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2008, vol. 56, pp. 2950-2953.
- KAMARUDIN, M. y HALL, P. Switched beam antenna array with parasitic elements. *Progress in Electromagnetics Research B*. 2009, vol. 13, pp. 187-201.
- KHAN, O. Design of x-band 4x4 butler matrix for microstrip patch antenna array. *TENCON 2006. 2006 IEEE Region 10 Conference*, 2006.
- LIU, Z. y WEIKLE, R. A compact quadrature coupler based on coupled artificial transmission lines. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*. 2005, vol. 15, pp. 889-891.
- LUDWIG, R. y BOGDANOV, G. *RF circuit design*. New York: Pearson Education, 2009.
- MBAREK, T. y GHARSALLAH, A. Mutual coupling in phased arrays for 3×4 Butler matrices antenna network. *2nd International Conference on Signals, Circuits and Systems*, 2008.
- MUHAMMAD, N.; RAHIM, S.; JIZAT, N.; RAHMAN, T.; TAN, K. y REZA, A. Beam forming networks using reduced size butler matrix. *Wireless Personal Communications*. 2010, pp. 1-20.
- NEDELICHEV, M. e ILIEV, I. Synthesis and analysis of reduced-size branch-line hybrids. *Microwave Review*. 2008, vol. 2, pp. 16-19.
- NEDIL, M.; HABIB, A. y DENIDNI, T. Novel ultra-wideband cb-cbw Butler matrix. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2008.
- POZAR, D. M. Analysis of an infinite phased array of aperture coupled microstrip patches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1989, vol. 37, pp. 418-425.
- POZAR, D. M. Microstrip antennas. *Proceedings of the IEEE*. 1992, vol. 80, pp. 79-90.
- POZAR, D. M. y KAUFMAN, B. Design considerations for low sidelobe microstrip arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1990, vol. 38, pp. 1176-1185.
- REMEZ, J. y CARMON, R. Compact designs of waveguide butler matrices. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*. 2006, vol. 5, pp. 27-31.
- SAKAGAMI, I.; MUNEHIRO, T. y TERAOKA, R. A reduced branch-line coupler with eight stubs. *Microwave Conference Proceedings, 1997. APMC '97, 1997 Asia-Pacific*, 1997.
- TANG, C. y CHEN, M. Synthesizing microstrip branch-line couplers with predetermined compact size and bandwidth. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2007, vol. 55, pp. 1926-1934.
- TANG, C.; CHEN, M. y TSAI, C. Miniaturization of microstrip branch-line coupler with dual transmission lines. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*. 2008, vol. 18, pp. 185-187.
- WANG, C.; MA, T. y YANG, C. A new planar artificial transmission line and its applications to a miniaturized butler matrix. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2007, vol. 55, pp. 2792-2801.
- WIGHT, J.; CHUDOBIAK, W. y MAKIOS, V. A microstrip and stripline crossover structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1976, vol. 24, p. 270.

WINCZA, K.; GRUSZCZYNSKI, S. y SACHSE, K. Conformal four-beam antenna arrays with reducedsidelobes. *Electronics Letters*. 2008, vol. 44, pp. 174-175.

WINCZA, K.; GRUSZCZYNSKI, S. y SACHSE, K. Reduced sidelobe four-beam antenna array fed by modified Butler matrix. *Electronics Letters*. 2006, vol. 42, pp. 508-509.