

# LA MATRIZ BUTLER PARA APLICACIONES EN ANTENAS INTELIGENTES CONMUTADAS

## Butler Matrix for smart switched beam antenna applications

Jorge Alberto Cabrera Botero<sup>1</sup>  
Carlos Iván Páez Rueda<sup>2</sup>

Recibido: 19 de junio 2017  
Aceptado: 04 de octubre de 2017

### Resumen

En el presente artículo se describe el estado del arte de la matriz Butler en el contexto de antenas inteligentes conmutadas, como producto de la revisión bibliográfica de artículos científicos, revistas indexadas, tesis de grado y libros relacionados con el tema. Se describen los principales avances y desarrollos en su arquitectura, componentes constitutivos, implementaciones exitosas, problemas y desafíos modernos desde su invención, hasta la primera década del siglo XXI. El documento concluye con la sensibilización sobre la importancia de la matriz, su vigencia y su relevancia en el desarrollo de sistemas de comunicaciones y de radar.

**Palabras clave:** Matriz Butler, híbrido, cruces, RADAR, antena de haz conmutado, microcinta.

### Abstract

This paper describes the Butler Matrix's state of the art in switched beam smart antennas, as a result of the bibliographical revision of scientific articles, indexed journals, dissertations and books related to the subject. It describes the main advances and developments in its architecture, constituent components, successful implementations, problems and modern challenges from its invention, until the first decade of the 21st century. The document concludes with the awareness of the importance of the matrix, its validity and its relevance in the development of communications systems and radar.

**Keywords:** Butler Matrix, hybrid, crossovers, RADAR, switched beam antenna, microstrip.

<sup>1</sup> Magister en Ingeniería Electrónica, Oficial Armada Nacional. [jorge.cabrera@armada.mil.co](mailto:jorge.cabrera@armada.mil.co).

<sup>2</sup> Magister en Ingeniería Eléctrica. Docente e investigador del Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana. [paez.carlos@javeriana.edu.co](mailto:paez.carlos@javeriana.edu.co).

## Introducción.

El concepto de antena inteligente nace en el año 1930, cuando G. C. Southworth demostró que dos o más sistemas de antenas directivos similares podían ser combinados para obtener un efecto directivo total (1930).

En la actualidad, las antenas inteligentes consisten en un arreglo de antenas y de un sistema de procesamiento de señales, que permiten detectar la dirección de arribo de una señal incidente y/o generar un haz en una dirección determinada (Bellofiore, Balanis, Foutz & Spanias, 2002).

Su uso en los sistemas RADAR (Radio Detection and Ranging) permite la búsqueda más eficiente de blancos y la obtención de información tridimensional sobre los mismos, que sería imposible de adquirir con antenas convencionales. También apoyan la operación de sistemas más complejos para la radiolocalización, la realización de ataques electrónicos y la prevención contra ataques electrónicos, gracias a su capacidad de selectividad espacial, por lo que son especialmente versátiles para su uso a bordo de buques de guerra.

En comunicaciones móviles, se explotan sus características de selectividad espacial y de detección de dirección de arribo de señales incidentes, permitiendo el desarrollo de estaciones base más eficientes (Baggen, Bottcher & Eube, 2007).

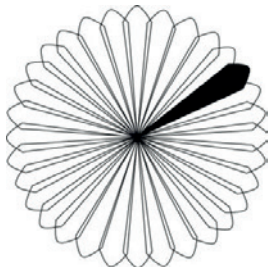


Figura 1. Sistema de antena de haz conmutado.

Clasificadas dentro de uno de los dos grandes grupos de las antenas inteligentes, los sistemas de haz conmutado permiten

escoger uno de varios patrones de radiación predefinidos, con la característica de ser inflexibles ya que no ofrecen un haz diferente a los ya establecidos (Figura 1) (Bellofiore et al., 2002). Su topología típica consta de tres elementos: un arreglo de antenas, un circuito o matriz de desfase u una red de conmutación (Figura 2). Las matrices de desfase se clasifican según su frecuencia de operación en matrices de RF (Radio Frecuencia) o de IF (Frecuencia Intermedia), y según el método que usan para la generación del haz, que puede ser digital u óptico (P Hall & Vetterlein, 1990).

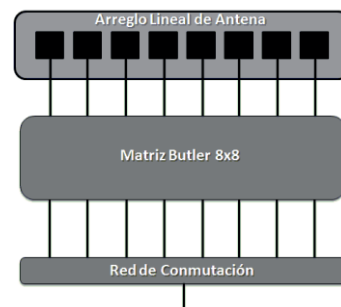


Figura 2. Sistema de haz conmutado con MB.

Dentro del grupo de RF se encuentran las basadas en lentes (Ruze y Rotman), en reflectores híbridos, y en circuitos. Estas últimas incluyen la matriz de Blass (Chen, Hong, Kuai & Xu, 2009), la matriz Nolen (Ali, Fonseca, Coccetti & Aubert, 2009) y la matriz de Butler (Butler, 1966).

En 1960, se introdujo la matriz Butler (en adelante, MB), más eficiente, con patrones directivos adicionales y con menos componentes que los usados en sistemas previos, apropiada para alimentar los elementos de un arreglo de antenas con una amplitud uniforme (Butler, 1966).

En el presente documento se realiza una revisión bibliográfica sobre los principales avances de desarrollos en la arquitectura de la MB, sus componentes constitutivos, implementaciones exitosas, problemas y desafíos modernos, desde su creación en la década de 1960, hasta la primera década del siglo XXI.

En primer lugar, se realiza una descripción de la MB y de sus componentes: híbridos, cruces, desfasadores de 45°, y la topología de un sistema de haz conmutado. En segunda instancia, se describen brevemente los sistemas implementados con MB en tecnología planar, cerrando el documento con las problemáticas y desafíos actuales y las conclusiones.

**Matriz Butler**

La MB se denota como una red de NxN, donde N es el número de puertos de una entrada y de salida (Macnamara, 1987). Ante la presencia de una señal en uno de sus puertos de entrada, la MB produce diferentes cambios de fase en cada uno de sus elementos sobre la señal, la cual finalmente se presenta en todas las salidas de la matriz con fases diferentes. Típicamente, se requiere que N sea una potencia de 2, existiendo por lo tanto matrices de 4x4, 8x8, 16x16, entre otras. Un arreglo de antenas, conectado a los puertos de salida de la MB, recibirá en cada uno de sus elementos la señal con la misma amplitud, pero con diferentes fases, lo que causará la generación de un patrón específico de radiación cuyo haz principal estará en una dirección particular (Ramez & Carmon, 2006). La excitación de cada puerto de entrada de la MB produce un haz en un ángulo diferente, permitiendo generar N patrones diferentes para N puestos de entrada a la matriz (Macnamara, 1987).

Los componentes típicos de una MB tienen características de banda angosta, es decir, sus pérdidas de inserción, pérdidas de retorno y fase no se mantienen iguales en un amplio rango de frecuencias, por lo que las medidas de desempeño que la caracterizan dependen directamente del comportamiento a la frecuencia operacional de sus componentes (Zheng, Chan, Leung & Xue, 2007).

En la Tabla 1 se puede observar que un arreglo lineal de 4 elementos de antena distanciados entre sí por  $\lambda_0/2$ , alimentado por una MB, produce 4 haces distanciados

entre sí por 30°; también se describen las fases producidas por la MB en sus puertos de salida (5-8), para cada uno de sus puertos de entrada (1-4). Si se desea obtener una resolución de haz más pequeña es necesario aumentar el número de elementos radiantes o bien disminuir la distancia entre los elementos del arreglo. Con una MB de 8x8 se generan 8 haces con resolución de 15°, con un arreglo lineal de 8 elementos distanciados entre sí por  $\lambda_0/2$ .

Tabla 1. Distribuciones de fases MB 4x4

Puertos Salida/Entrada	1	2	3	4
5	135°	45°	90°	0°
6	90°	180°	-45°	45°
7	45°	-45°	180°	90°
8	0°	90°	45°	135°
Diferencia Fase	-45°	135°	-135°	45°
Dir. Lóbulo Ppal	15°	-45°	45°	-15°
Nomenc. Haz.	1R	2L	2R	1L

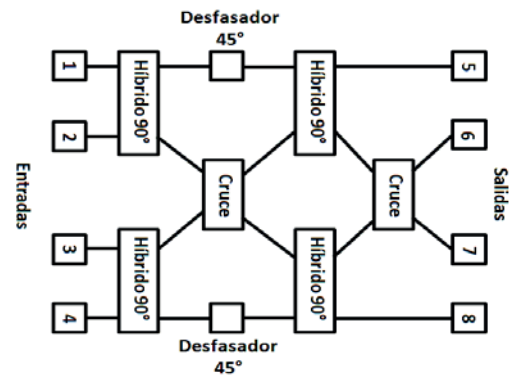


Figura 3. MB 4x4

Una MB convencional está conformada por tres tipos de elementos (Figura 3): Híbridos, cruces y desfasadores de 45°.

**Híbridos**

Un híbrido es una juntura de cuatro puertos con propiedades que permiten que una onda incidente en el puerto uno acople igual potencia en los puertos de salida dos y tres, y un aislamiento en el puerto cuatro (1) (Reinhold & Bogdanov, 2009). Se clasifican de acuerdo con la diferencia de fase que se produce entre los dos puertos de salida: 90° o 180° (Lange, 1969). Su función dentro de la MB es la de producir las

diferencias de fase requeridas para alimentar el arreglo de antenas.

$$S_{-1}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \end{bmatrix} \quad (1)$$

En el diseño e implementación de la MB se pueden usar tres tipos de híbridos de 90°: el Branchline, el Lange y el de Disco Circular.

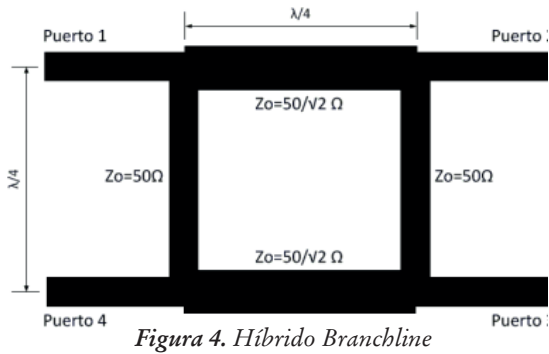


Figura 4. Híbrido Branchline

El Híbrido Branchline se realiza con cuatro líneas de transmisión de longitud eléctrica de 90° (λ/4): dos de ellas con una impedancia de 50 Ω y las otras dos con una impedancia de 50/2 Ω, para un sistema con impedancia de referencia de 50 Ω (Figura 4).

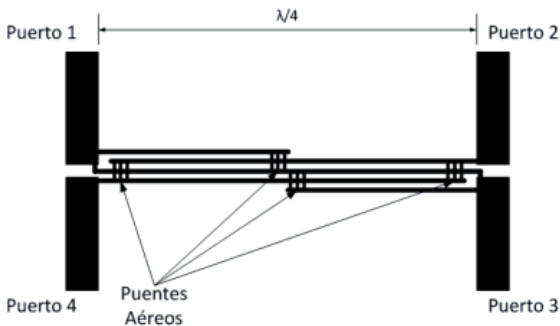


Figura 5. Híbrido Lange en tecnología Microcinta

El acoplador Lange (Figura 5) consiste de tres o más líneas unidas alternadamente mediante puentes aéreos hechos con alambre (Lange, 1969). El ancho combinado de las líneas es comparable al ancho de una línea de 50 Ω en el substrato anfitrión, y el acoplamiento deseado entre los puertos se controla a través de la distancia que separa las

líneas interdigitadas (Kaiffas & Sahalos, 2006).

Los híbridos de disco circular consisten básicamente de cuatro puertos ubicados simétricamente en ángulos aproximados sobre un disco resonador, lo que le permite obtener dos pares de puertos aislados y con una diferencia de fase de 90° entre las ondas acopladas (Page & Judah, 1989). Algunos diseños incluyen el uso de elementos de sintonización en la forma de pasos de impedancia y Stubs reactivos con el fin de mejorar el ancho de banda operacional, con una modificación que se denominó híbrido elíptico (Figura 6) (Kaifas & Sahalos, 2006).

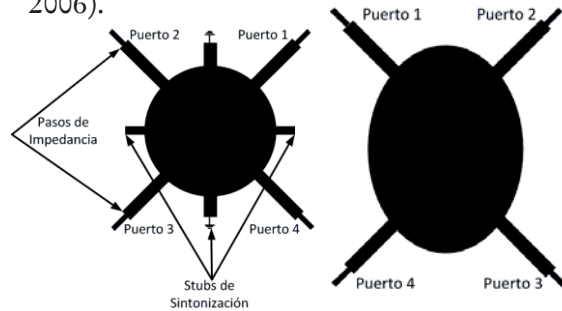


Figura 6. Híbrido de disco circular (izq) y elíptico (der).

### Cruces

Los cruces permiten a dos líneas que se cortan físicamente, llevar las señales de RF manteniendo alto aislamiento entre las mismas. Su implementación se logra mediante puentes aéreos, conexiones con cable, conexiones multicapa (Zak & Sachse, 2001) e implementaciones enteramente planares, como la Microcinta (en adelante, MC). Los cruces más comunes son el acoplador de 0 dB y el Lange. El primero consiste de dos híbridos Branchline en cascada, no requiere de técnicas adicionales de fabricación y permite la impresión de toda la matriz en una sola capa (Wight, Chudobial & Makios, 1976). La matriz de Scattering (2) indica que al presentarse una señal por el puerto uno, esta sale por el puerto tres con un desfase de 90°, mientras que los puertos dos y cuatro permanecen aislados. Así mismo, si se presenta una señal por el puerto cuatro, ésta última se presenta en el puerto dos

con un desfase de 90°, mientras los puertos uno y tres permanecen aislados. Idealmente, estos cruces no introducen pérdidas, motivo por el cual son denominados como acopladores de 0 dB.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j \\ j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

En 1976 también se introdujo la opción de cruces MC más compactos, como se observa en la Figura 7, en donde los dos brazos paralelos interiores son reducidos a un solo brazo (Wight et al., 1976).

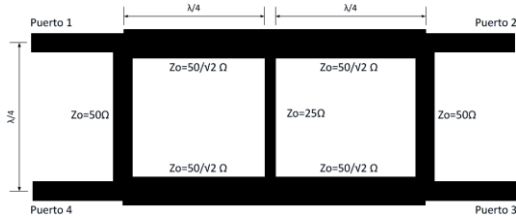


Figura 7. Cruce compacto MC

Con el fin de mejorar el ancho de banda de la MB y de reducir el área impresa del circuito, se implementó un cruce a partir de un híbrido Lange modificado (Denidni & Libar, 2003), consiste de tres líneas interdigitadas (Figura 8), una de las cuales implementa el cruce de una señal, y las otras dos son conectadas mediante cables para permitir el cruce de la otra señal, con el inconveniente de requerir de un diseño en tres dimensiones.

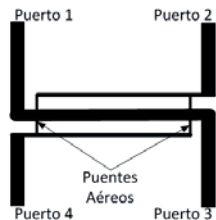


Figura 8. Cruce tipo Lange.

**Desfasadores de 45°**

La función del desfasador es la de proveer retardos adicionales a los obtenidos en los híbridos, los cuales son necesarios para lograr las diferencias de fase adecuadas en los puertos de salida de la MB. Para una matriz de 4x4 se requieren dos cambiadores de fase de

- 45°, mientras que para matrices de tamaños mayores se requerirá de mayor cantidad de desfasadores con diferentes ángulos de retardo (Moody, 1964). Los usados comúnmente en las MB en tecnología MC son los líneas de retardo MC (Figura 9) y las líneas Schiffiman.

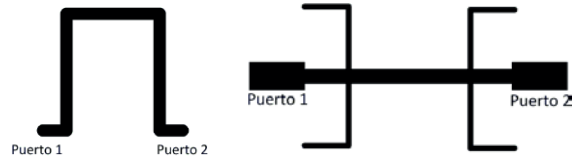
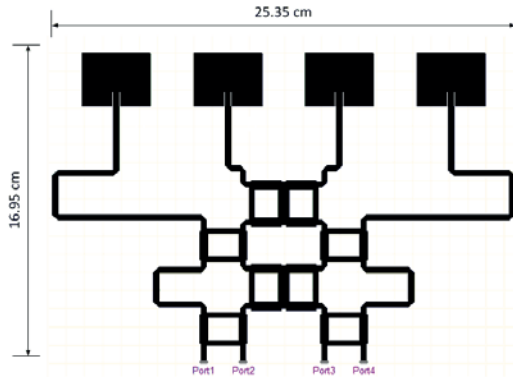


Figura 9. Líneas de retardo MC: lineal (izq) y con stubs en abierto (der)

Las líneas de retardo MC usan líneas de transmisión MC con la impedancia característica usada para toda la MB, usualmente 50 Ω. Además, debe tener la longitud apropiada para causar el desfase deseado teniendo en cuenta el substrato anfitrión y la frecuencia central de operación. Tienen el inconveniente de ser linealmente dependientes de la frecuencia (Khan, 2006) y por lo tanto su operación es en banda angosta. Es posible usar stubs de carga terminados en abierto para mejorar el ancho de banda (Zheng et al., 2007).

**Topología sistema de haz conmutado**

La mayoría de sistemas modernos son implementados en tecnologías planares con diseños monocapa o multicapa. Entre otros tipos de tecnología planar se destacan las implementaciones en: guía de onda coplanar (CPW) (Nedil, Habib & Denidni, 2008), stripline (Chang, Lee & Shih, 2010), slotline (Denidni & Nedil, 2008), cerámica cocida a baja temperatura (LTCC) (Tudosie, Barth & Vehldeick, 2006), líneas de transmisión conductoras complementarias CCS TL) (Liu, Wu, Tzuang & Wu, 2005), y la más utilizada, MC (Nord, 1997).



**Figura 10.** Sistema de antena de haz conmutado con red de desfase Butler.

**Fuente:** (Cabrera & Páez, 2010).

En la Figura 10 se observa el esquemático de una antena de haz conmutado convencional de 4 elementos, diseñada por los autores (Cabrera & Páez, 2010), en donde se encuentra una MB 4x4 conformada por 4 híbridos branchline, 2 cruces y 2 desfases lineales. El diseño del sistema es en tecnología MC sobre un sustrato FR4 de 60 milésimas de pulgada de espesor y  $\epsilon_r = 4.4$ . Los elementos radiantes son antenas tipo patch rectangular con alimentación empotrada. La frecuencia central de operación de este diseño es 2.45 GHz, pues fue diseñada para las aplicaciones industriales de Wi-Fi.

### Sistemas con MB en tecnología planar

La mayor parte de trabajos de investigación y desarrollo sobre la MB y antenas inteligentes de haz conmutado incluyen configuraciones de MB de 4x4 y arreglo de antenas de 1x4: sistema para 60 GHz (Lafond & Himdi, 2002), sistema con un arreglo de antenas patch MC (Ahmad & Seman, 2005), sistema para la banda WLAN 5.25 GHz (Pham, Lee, & Flaviis, 2005), sistema con polarización circular (Khan, 2006), sistema de 4 elementos radiantes omnidireccionales a 2.4 GHz para la banda WLAN (Ibrahim & Rahim, 2007), sistema para trabajar en 60 GHz (Tseng, Chen, & Chu, 2008), sistema para la banda de 2.4 GHz con un arreglo lineal de 4 antenas tipo DRA (Dielectric Resonator

Antenna) (Kamal et al., 2008), sistema para la banda ISM 2.4-2.48 GHz (El-Tager & Eleiwa, 2009), y sistema para trabajar en aplicaciones WLAN en la banda de 5.2 GHz (Bhowmik & Srivastava, 2010).

Otros trabajos incluyen: sistema con doble polarización, usando dos MB de 4x4 en capas diferentes que alimentan dos arreglos de antena de 2x4 elementos (Gao, Li, Leong, & Yeo, 2001), sistema con una MB convencional de 8x8 en tecnología MC (Denidni & Libar, 2002), sistema para aplicación en estaciones base para comunicaciones de banda ancha (Siachalou et al., 2004), sistema para aplicaciones UMTS, conformada por híbridos elípticos y por cruces Lange (Kaifas & Sahalos, 2006), sistema para UMTS de cuatro arreglos verticales, con ocho elementos radiantes cada uno, alimentados por una MB de 4x4 (Barba, Page, Encinar, Montejo-Garai, & A, 2006), sistema con un arreglo lineal de ocho elementos de antena tipo patch rectangular (Wincza & Sachse, 2006), sistema conectado a un arreglo de antenas de 2x4 (Ibrahim, Rahim, Masri, Karim, & Aziz, 2007), y, finalmente, sistema donde el arreglo lineal de antenas fue alimentado en el borde por líneas MC de 100  $\Omega$ , con transformadores de impedancia de 100 a 50  $\Omega$  (Abdallah, 2009).

### Problemáticas y desafíos de la MB

Los principales desafíos modernos para la MB están relacionados con un ancho de banda operacional grande, un área circuital pequeña y unos lóbulos laterales reducidos.

El primer reto ha sido uno de los principales temas de investigación: en 1967 se evaluó un método para diseñar MB para operación en banda ancha empleando combinaciones particulares de híbridos, eliminando la necesidad del uso de desfases (Chow & Davies, 1967), y en 1969 se encontró que la solución anterior solo era aplicable para matrices de hasta de 8x8, proponiendo usar transformadores híbridos y acopladores direccionales con varios valores

de acoplamiento (Withers, 1969). En 1997 se propuso el uso de híbridos branchline y acopladores de 0 dB en cascada, con posteriores revisiones e implementaciones (Betcheler, Mayer, & Weigel, 1997; Chun & Hong, 2006; Collado, Grau, & Flaviis, 2006; Denidni & Libar, 2003; He, Wang, He, Xing, & Yin, 2007; Wincza & Gruszczynski, 2005; Zheng et al., 2007), obteniendo mejores anchos de banda con mayores áreas circuitales y mayor complejidad en los diseños.

El segundo desafío, relacionado con el tamaño de la MB, es uno de los principales inconvenientes para su uso comercial (Nedelchev & Iliev, 2008). En su forma convencional, un híbrido ocupa gran área sobre el circuito impreso, siendo demasiado grandes para ciertas aplicaciones de microondas (Nedelchev & Iliev, 2008). Como los híbridos constituyen el principal componente de la MB, su reducción permite lograr importantes reducciones en el área general de la matriz. Algunas aproximaciones consisten en el uso de híbridos con elementos concentrados (Nedelchev & Iliev, 2008), de capacitores concentrados (Sakagami, Munehiro, & Teraoka, 1997), en el reemplazo de todos los componentes de la MB por sus equivalentes concentrados en CMOS (Chang, Chin, Wu, & Chang, 2008), en el uso de recodos en forma de ingletes o en forma circular (Kadir et al., 2007), en el uso de técnicas de plano de tierra patronado (Zheng et al., 2009), líneas de transmisión artificiales (Chakrabarty & Mondal, 2009), líneas de transmisión dobles (Tang, Member, Chen, & Tsai, 2008) y técnicas fractales como la Sierpinski, Moore y Minkowski (Ghali & Moselhy, 2004), y la Koch (Chen & Wang, 2007).

El tercer desafío para la MB es el de reducir los niveles de lóbulo lateral del haz. Los efectos producidos por el acoplamiento mutuo en el arreglo, deterioran el patrón de radiación e incrementan considerablemente los niveles de lóbulo lateral, que también se incrementan debido a las radiaciones parásitas producidas por los recodos existentes en la MB y a los problemas de ensamble del circuito (Mbarek & Gharsallah, 2008).

Una solución es la transposición de los elementos de un arreglo lineal, en el que se usan más elementos radiantes organizados en varios subarreglos, alimentados todos por una sola MB convencional y varios acopladores direccionales de 180°, sin degradar significativamente las otras características del arreglo (Li, Chu, Lin, & Chang, 2004). Otra solución es el aumento del número de elementos radiantes en los extremos del arreglo lineal (Wincza, Gruszczynski, & Sachse, 2008). También se pueden combinar dos entradas en la MB, para obtener niveles de lóbulo lateral inferiores a -20 dB (Siachalou et al., 2004), o espaciar los elementos del arreglo de antenas de forma no uniforme (Alfaouri, 1998).

## Conclusiones

La MB se ha constituido como una de las más importantes redes de desfase usadas en los sistemas de antenas inteligentes de haz conmutado. Su diseño convencional en tecnología planar incluye híbridos branchline, cruces y desfases de línea de retardo MC, los cuales son componentes tradicionales y comúnmente usados en la ingeniería de microondas. Por ende, la MB es atractiva para las aplicaciones modernas debido a su simplicidad y escalabilidad.

Aunque en los últimos 20 años ha sido sistemáticamente investigada e implementada, la MB continúa siendo un problema abierto de investigación debido a tres desafíos principales: sus componentes son fundamentalmente de banda angosta y, por ende, para su aplicación en las tecnologías modernas de banda ancha se requiere de una reingeniería completa en la metodología de diseño de la MB; el área requerida para una alta selectividad espacial en la antena de haz conmutado es prohibitiva, restringiendo su uso en el mercado de aplicaciones portables; finalmente, los desfases en la MB producen lóbulos laterales que para muchas aplicaciones RADAR y de detección de arribo no son aceptables, debido a lo cual su disminución sin incrementar la complejidad de la MB, es todo un reto de ingeniería.

## Referencias

- Abdallah, A. S. (2009). 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*, 1(1), 70–77. <http://doi.org/10.4156/ijact.vol1.issue1.10>
- Ahmad, S. R., & Seman, F. C. (2005). 4-port Butler Matrix for Switched Multibeam Antenna Array. *Proceedings of Asia Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, Malaysia, 69–73.
- Alfaouri, M. (1998). Design Considerations for Low Sidelobe Levels for Rectangular Microstrip Array Antennas. In *Fifteenth National Radio Science Conference* (pp. 1–9). Cairo.
- Ali, A., Fonseca, N., Coccetti, F., & Aubert, H. (2009). Novel Two-Layer 4x4 SIW Nolen Matrix For Multi-beam Antenna Application In Ku Band. In *Review Literature and Arts of the Americas* (pp. 241–243).
- Baggen, L., Böttcher, M., & Eube, M. (2007). 3D-Butler matrix topologies for phased arrays. In *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications* (pp. 531–534).
- Barba, M., Page, J. E., Encinar, J. A., Montejo-garai, J. R., & A, A. (2006). A Switchable Multiple Beam Antenna for GSM-UMTS Base Stations in Planar Technology. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(11), 3087–3094.
- Bellofiore, S., Balanis, C. A., Foutz, J., & Spanias, A. S. (2002). Smart-Antenna Systems for Mobile Communication Networks Part I: Overview and Antenna Design. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 44(3), 145–154.
- Betcheler, T., Mayer, B., & Weigel, R. (1997). A New High-Temperature Superconducting Double-Hybrid Coupler with Wide Bandwidth. In *International Microwave Symposium Digest* (pp. 5–8).
- Bhowmik, W., & Srivastava, S. (2010). Optimum Design of a 4x4 Planar Butler Matrix Array for WLAN Application. *Journal of Telecommunications*, 2(1), 68–74.
- Butler, J. L. (1966). *Multiple Beam Antenna System Employing Multiple Directional Couplers In The Leadin*.
- Cabrera, J., & Páez, C. (2010). Diseño de una Antena de Patrón Conmutado para Banda ISM (2.4 GHz). In *III Conferencia Internacional de Telecomunicaciones, Tecnologías de la Información y Comunicaciones*
- Chakrabarty, A., & Mondal, P. (2009). Design of Miniaturised Branch-Line and Rat-Race Hybrid Couplers with Harmonics Suppression. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 3(1), 109–116. <http://doi.org/10.1049/iet-map>
- Chang, C., Chin, T., Wu, J., & Chang, S. (2008). Novel Design of a 2.5-GHz Fully Integrated CMOS Butler Matrix for Smart-Antenna Systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56(8), 1757–1763.
- Chang, C., Lee, R., & Shih, T.-Y. (2010). Design of a Beam Switching / Steering Butler Matrix for Phased Array System. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(2), 367–374.
- Chen, P., Hong, W., Kuai, Z., & Xu, J. (2009). A Double Layer Substrate Integrated Waveguide Blass Matrix for Beamforming Applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 19(6), 2007–2009.



- Chen, W.-L., & Wang, G.-M. (2007). *Design of Novel Miniaturized Fractal-Shaped Branch-Line Couplers*. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, 3–5.
- Chow, P. E. K., & Davies, D. E. N. (1967). *Wide-Bandwidth Butler Matrix Network*. *Electronic Letters*, 3(6), 3–4.
- Chun, Y., & Hong, J. (2006). Compact Wide-Band Branch-Line Hybrids. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54pp704–709.
- Collado, C., Grau, A., & Flaviis, F. De. (2006). Dual-Band Planar Quadrature Hybrid With Enhanced Bandwidth Response. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(1), 180–188.
- Denidni, T. A., & Libar, T. E. (2002). Experimental Investigation of a Microstrip Planar Feeding Network for a Switched-Beam Antenna Array. In *Antennas and Propagation Society International Symposium* (pp. 130–133).
- Denidni, T. A., & Libar, T. E. (2003). Wide Band Four-Port Butler Matrix for Switched Multibeam Antenna Arrays. In *The 14th IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings* (pp. 2461–2464).
- Denidni, T. A., & Nedil, M. (2008). *Experimental Investigation of a New Butler Matrix Using Slotline Technology for Beamforming Antenna Arrays*. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, (August 2006), 641–649. <http://doi.org/10.1049/iet-map>
- El-Tager, A. M., & Eleiwa, M. A. (2009). Design and Implementation of a Smart Antenna Using Butler Matrix for ISM-band. In *Progress In Electromagnetics Research Symposium* (pp. 1–5).
- Gao, S. C., Li, L. W., Leong, M. S., & Yeo, T. S. (2001). Integrated Multibeam Dual-Polarised Planar Array. *IEE Proceedings on Microwave and Antennas Propagation*, 148(June), 3–7.
- Ghali, H., & Moselhy, T. A. (2004). Miniaturized Fractal Rat-Race, Branch-Line, and Coupled-Line Hybrids. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 52(11), 2513–2520.
- Hall, P., & Vetterlein, S. (1990). Review of Radio Frequency Beamforming Techniques for Scanned and Multiple Beam Antennas. *IEE Proceedings*, 137(5), 293–303.
- He, J., Wang, B., He, Q., Xing, Y., & Yin, Z. (2007). Wideband X-Band Microstrip Butler Matrix. *Progress in Electromagnetics Research*, (74), 131–140.
- Ibrahim, S. Z., & Rahim, M. K. A. (2007). Switched Beam Antenna using Omnidirectional Antenna Array. In *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceedings*.
- Ibrahim, S. Z., Rahim, M. K. A., Masri, T., Karim, M. N. A., & Aziz, M. Z. A. A. (2007). Multibeam Antenna Array with Butler Matrix for WLAN Applications. In *The Second European Conference on Antennas and Propagation* (pp. 2–6).
- Kadir, M. F. A., Rose, M. R. C., Shah, M. S. R. M., Mismam, D., Suaidi, M. K., & Aziz, M. Z. A. A. (2007). 4x4 Butler Matrix Design by Using Circular Bend. In *2007 Asia - Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceedings* (pp. 4–8).
- Kaifas, T. N., & Sahalos, J. N. (2006). On the Design of a Single-Layer Wideband Butler Matrix for Switched-Beam UMTS System Applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 48(6), 193–204.

Kamal, M., Rahim, A., Nazif, M., Salleh, M., Ayop, O., & Masri, T. (2008). Switched Beam Antenna System Design. In *2008 IEEE International RF and Microwave Conference Proceedings* (pp. 302–305).

Khan, O. U. (2006). Design of X-band Butler Matrix for Microstrip Patch Antenna Array. In *2006 IEEE Region 10 Conference 00*, pp. 6–9).

Lafond, O., & Himdi, M. (2002). Multibeam antenna in Millimeter Waves. In *32nd European Microwave Conference* (pp. 2–5).

Lange, J. (1969). Interdigitated Stripline Quadrature Hybrid. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1150–1151.

Li, W. R., Chu, C. Y., Lin, K. H., & Chang, S. F. (2004). Switched-Beam Antenna Based on Modified Butler Matrix with Low Sidelobe Level. *Electronics Letters*, 40(5), 290–292.

Liu, A., Wu, H., Tzuang, C. C., & Wu, R. (2005). Ka-band 32-GHz Planar Integrated Switched-beam Smart Antenna. In *2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 00*, pp. 565–568.

Ludwig Reinhold; Bogdanov, G. (2009). *RF Circuit Design*. (P. Hall, Ed.).

Macnamara, T. (1987). Simplified Design Procedures for Butler Matrices Incorporating 90° Hybrids or 180° Hybrids. *IEE Proceedings*, 134(I), 50–54.

Mbarek, T., & Gharsallah, A. (2008). Mutual Coupling in Phased Arrays For 3x4 Butler Matrices Antenna Network. In *2008 International Conference on Signals, Circuits and Systems* (pp. 1–5).

Moody, H. J. (1964). The Systematic Design of the Butler Matrix. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 786–788.

Nedelchev, M. V., & Iliev, I. G. (2008). Synthesis and Analysis of Reduced-Size Branch-Line Hybrids. *Microwave Review*, 16–19.

Nedil, M., Habib, A. M., & Denidni, T. A. (2008). Novel Ultra-Wideband CB-CPW Butler Matrix. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (pp. 6–9).

Nord, H. (1997). *Implementation of a 8x8-Butler Matrix in Microstrip*. Technische Universität, Wien - Royal Institute of Technology.

Page, M. J., & Judah, S. R. (1989). A Microstrip Planar Disk 3dB Quadrature Hybrid. *1989 IEEE MTT-S Digest*, 247–250.

Pham, N. T., Lee, G., & Flaviis, F. De. (2005). Microstrip Antenna Array with Beamforming Network for WLAN Applications. In *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (pp. 267–270).

Remez, J., & Carmon, R. (2006). Compact Designs of Waveguide Butler Matrices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 5, 27–31.

Sakagami, I., Munehiro, T., & Teraoka, R. (1997). A Reduced Branch-Line Coupler With Eight Stubs. *1997 Asia Pacific Microwave Conference*, 3, 1137–1140.

Siachalou, E., Vafiadis, E., Goudos, S. S., Samaras, T., Koukourlis, C., & Panas, S. (2004). On The Design of Switched-Beam Wideband Base Stations. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 46(1), 158–167.

Southworth, G. C. (1930). Certain Factors Affecting the Gain of Directive Antennas. *Proceedings of the IRE*, 18(9), 1502–1536. <http://doi.org/10.1109/JRPROC.1930.222178>.

Tang, C., Member, S., Chen, M., & Tsai, C. (2008). Miniaturization of Microstrip Branch-Line Coupler With Dual Transmission Lines. *Components*, 18(3), 2008–2010.

Tseng, C., Chen, C., & Chu, T. (2008). A Low-Cost 60-GHz Switched-Beam Patch Antenna Array With Butler Matrix Network. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 432–435.

Tudosie, G., Barth, H., & Vahldieck, R. (2006). A compact LTCC Butler matrix realization for phased array applications. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 441–444.

Wight, J. S., Chudobiak, J., & Makios, V. (1976). The Microstrip and Stripline Crossover Structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 270.

Wincza, K., & Gruszczynski, S. (2005). A Broadband 4x 4 Butler Matrix for Modern-Day Antennas. *In European Microwave Conference*, 2, 4, Oct.

Wincza, K., Gruszczynski, S., & Sachse, K. (2008). Conformal Four-Beam Antenna Arrays With Reduced Sidelobes. *Electronics Letters*, 44(3), 2008–2009. <http://doi.org/10.1049/el>

Wincza, K., & Sachse, K. (2006). Reduced Sidelobe Four-Beam N -Element Antenna Arrays Fed by 4 N Butler Matrices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 5, 430–434.

Withers, M. J. (1969). Frequency - Insensitive Phase - Shift Networks and Their use in a Wide-Bandwidth Butler Matrix. *Electronics Letters*, 5(20), 496–498.

Zak, T., & Sachse, K. (2001). An Integrated Butler Matrix in Multi-Layer Technology for Multi-Port Amplifier Applications. *In 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications* (pp. 59–62).

Zheng, S., Chan, W. S., Leung, S. H., & Xue, Q. (2007). Broadband Butler Matrix With Flat Coupling. *Electronics Letters*, 43(10), 3–4. <http://doi.org/10.1049/el>

Zheng, S. Y., Member, S., Yeung, S. H., Member, S., Chan, W. S., Man, K. F., ... Leung, S. H. (2009). Size-Reduced Rectangular Patch Hybrid Coupler Using Patterned Ground Plane. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 57(1), 180–188.