

Matriz de Butler de Banda Ancha en Banda X para Antenas Reconfigurables

G. Expósito-Domínguez⁽¹⁾, J.M. Fernández-González⁽¹⁾, P. Padilla⁽²⁾, M. Sierra-Castañer⁽¹⁾.
{gexposito, jmfdez, m.sierra.castaner}@gr.ssr.upm.es, pablopadilla@ugr.es

⁽¹⁾Grupo de Radiación, Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. 28040. Madrid, España

⁽²⁾Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones, Universidad de Granada. Periodista Daniel Saucedo Aranda. 18071. Granada, España.

Abstract- The work presented in this document shows the complete simulation of a Butler matrix. This circuit will be used in the feeding of a steerable onboard antenna in X band. The antenna consists of printed elements grouped in an array. This terminal works in a frequency band from 7.25 up to 8.4 GHz (15% of bandwidth), where both bands, reception (7.25 – 7.75 GHz) and transmission (7.9–8.4 GHz), are included simultaneously. The whole antenna reaches 31 dBi, with a beamwidth smaller than 10° and a dual circular polarization. This antenna also includes the capability of electronic steering in elevation $\pm 45^\circ$ and mechanically motorized junction 360° in azimuth.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una red de Butler para un terminal de comunicaciones embarcado en banda X. La red de Butler tendrá 4 entradas y 4 salidas, por lo tanto, 4 direcciones de apuntamiento $\pm 45^\circ$ y $\pm 75^\circ$. Este circuito alimenta a un primer sub-array de 4x4 elementos, que posteriormente se une para conseguir la ganancia requerida, para las condiciones meteorológicas más comunes. El ancho de banda de la antena a cubrir es de 1.15 GHz en la frecuencia central de 7.825 GHz, lo que supone un 15%. Para cubrir esta banda de funcionamiento la red de Butler está basada en elementos de banda ancha, tales como un híbrido multietapa. La función principal de esta antena impresa [1] es la transmisión de contenido multimedia por satélite en tiempo real. Un ejemplo de funcionamiento de la antena se muestra en la Fig. 1. La antena terminal es una antena impresa de escaneo variable en elevación, y mecánico en azimut capaz de orientar el haz principal en la dirección del satélite en función de la posición terrestre de la antena.

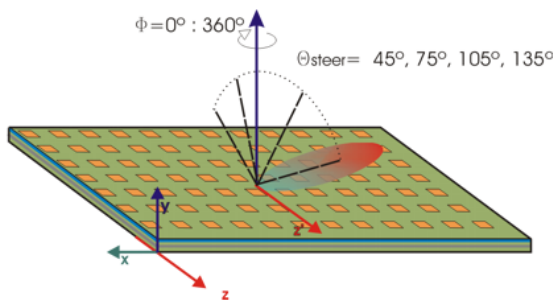


Fig. 1. Escenario de utilización de la antena.

II. ESPECIFICACIONES Y ARQUITECTURA

La antena opera con polarización circular a izquierdas en la banda de recepción (7.25–7.75 GHz) y con polarización circular a derechas en la banda de transmisión (7.9–8.4 GHz). El elemento radiante es un parche apilado alimentado con un híbrido 90°/3dB para conseguir las polarizaciones deseadas (LHCP y RHCP) y asegurar un buen aislamiento entre puertas.

Se elige una estructura rectangular formada por un array de 16 x 24 elementos, los cuales son tratados de dos maneras diferentes: en columnas y en filas.

A. Filas

Primero, los 24 elementos están agrupados en filas, siendo la separación entre ellos de $0.85 \lambda_{|7.25 \text{ GHz}}$. Para conseguir el diagrama de radiación deseado y cumplir con el galíbo de las recomendaciones, la alimentación de los elementos sigue una distribución no uniforme que decae en los extremos (triangular al cuadrado). Esto se consigue con una red pasiva impresa.

B. Columnas.

En segundo lugar 16 filas de 24 elementos serán agrupadas con una separación de $0.5 \lambda_{|7.25 \text{ GHz}}$. La dirección de apuntamiento se consigue gracias a la variación de fase entre los elementos de cada fila.

Una explicación más detallada sobre la antena se muestra en [2].

III. DISEÑO DE LA RED DE BUTLER

Una matriz de Butler es una red que consiste en 2^n entradas, 2^n salidas, $2^{n-1} \log_2 2^n$ acopladores híbridos, saltos de pista y desfases (Fig. 2). Para una configuración plana con una sola capa, existen varios cruces de pista, en los que es importante un gran aislamiento entre puertas, al igual que la linealidad de los elementos [3].

Una matriz de Butler recoge o emite las señales de un array de antenas, y les aplica un cambio de fase, de tal manera que produce 2^n haces con una separación angular constante. Cada señal de salida S_n en el puerto n se expresa de la siguiente manera:

$$S_n = \sum_{m=1}^n A_m e^{j\alpha_{mn}} \quad (1)$$

Donde A_m es la señal de entrada en el puerto m y α_{mn} es la diferencia de fase entre las puertas de entrada.

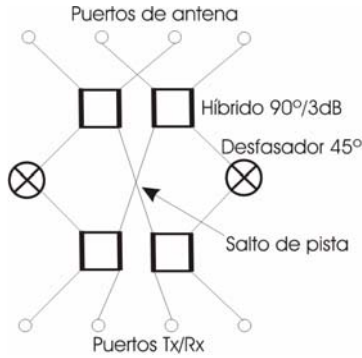


Fig. 2. Esquema de una red de Butler 4 x 4.

A continuación se presenta el diseño, simulación y resultados de los elementos que conforman la red.

A. Híbrido 90°/3 dB.

Un híbrido 90° es un circuito que consigue una diferencia de fase entre sus salidas (2 y 3) de 90°. Un reparto a -3 dB y un aislamiento en la puerta 4, (Fig. 3).

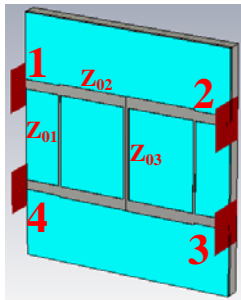


Fig. 3. Híbrido 90°, 3dB, de dos etapas.

La peculiaridad de este híbrido es que está realizado en dos etapas con el fin de ensanchar la banda. Aplicando el teorema de Bartlett de excitación par e impar, al igual que en la resolución del híbrido de una etapa [4], se obtienen las siguientes ecuaciones de diseño [5]:

$$\left(\frac{Z_{02}}{Z_0}\right)^2 = \frac{2Z_{01}Z_{03}}{Z_0^2 + Z_{01}^2} \quad (2)$$

$$\left(\frac{Z_{01}}{Z_0}c_0 - 1\right) = 1 - c_0^2 \quad (3)$$

Siendo c_0^2 la relación entre la potencia en la puerta 2 y 3. En este caso el diseño se realiza para un reparto de potencia equitativo, $c_0^2=1/2$.

Puesto que se dispone de tres incógnitas y solo 2 ecuaciones, existe un grado de libertad, que se utiliza para igualar Z_{02} a Z_0 , o también denominada solución periódica.

Después de realizar los cálculos y optimizarlos con CST Studio Suite 2011, estos son los resultados que se consiguen:

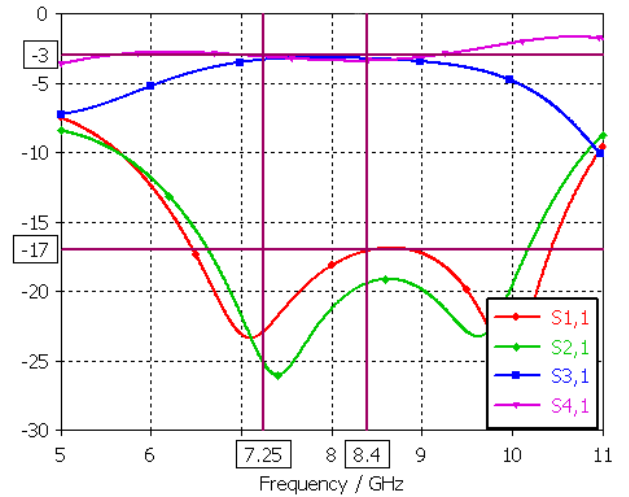


Fig. 4. Parámetros S del híbrido 90°/3 dB, de dos etapas.

Se consigue una respuesta plana en transmisión (S_{21} y $S_{31} = -3$ dB) un aislamiento y coeficiente de reflexión mejor que -17 dB (S_{11} y $S_{41} < -17$ dB) (Fig. 4). También se muestra como la fase entre las dos salidas se mantiene constante con un valor de $90^\circ \pm 5^\circ$ en el ancho de banda de trabajo (Fig. 5).

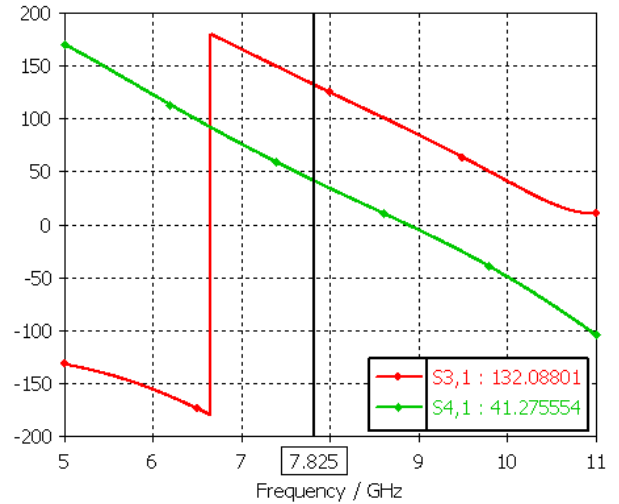


Fig. 5. Fase de los parámetros S del híbrido.

B. Salto de pista

En Fig. 6 se muestra un salto de pista construido a partir de dos híbridos puestos en cascada, también se muestra el principio de funcionamiento.

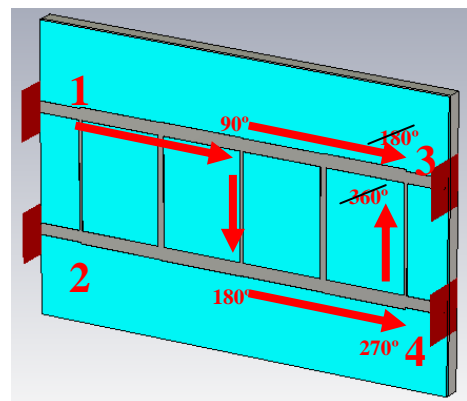


Fig. 6. Salto de pista basado en híbridos.

La señal que entra por el puerto 1 sale por la puerta 4; en cambio la señal por la puerta 3 se anula debido a que sus componentes están en oposición de fase.

De igual manera, ocurre para la entrada por la puerta 2, tal y como se puede ver en la Fig. 7. El aislamiento entre puertas es menor que -13 dB en toda la banda de funcionamiento.

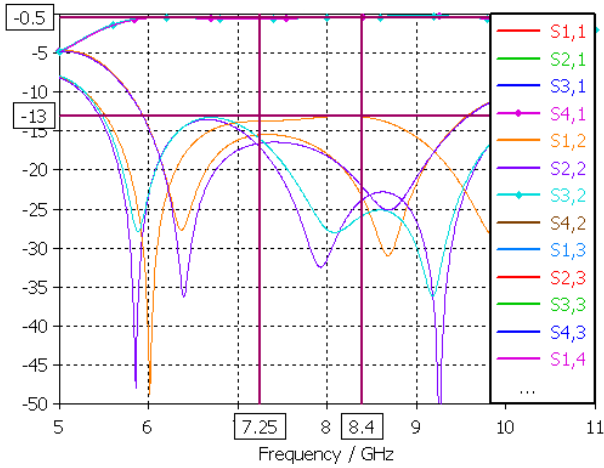


Fig. 7. Parámetros S del salto de pista.

También se muestra el desfase que introduce el salto de pista, el cual tiene que ser tomado en cuenta en el resto del circuito para que siga cumpliendo las condiciones de simetría (Fig. 8)

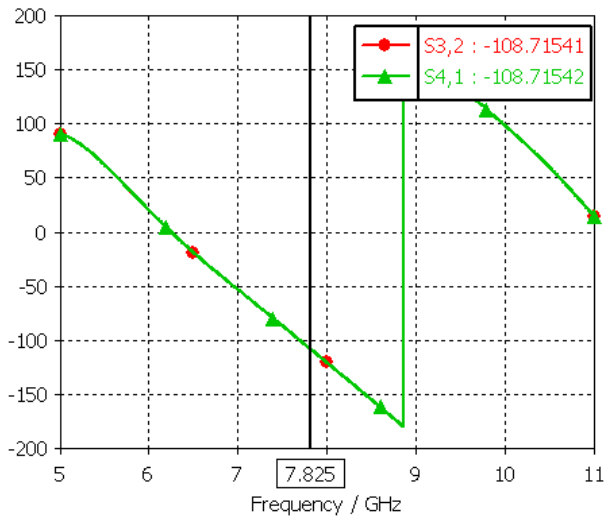


Fig. 8. Fase de los parámetros S del salto de pista.

C. Red de Butler

Por último se muestra el escenario de simulación completo (Fig. 9), basado en la Fig. 2. En el se pueden ver los híbridos de dos etapas, saltos de pista (que están contruidos con dos híbridos de banda ancha) y las líneas de transmisión, que en función de su longitud, las dos primeras corrigen el desfase de los saltos de pista, e introduce una variación de fase de 45°, y las dos últimas corrige el desfase de los últimos saltos de pista.

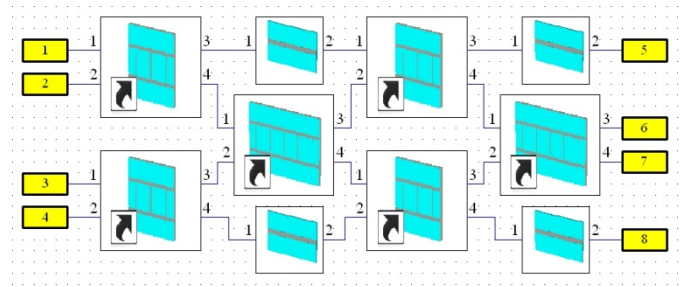


Fig. 9. Red de Butler.

Se muestra en Fig. 10, la amplitud de los parámetros S de la red de Butler. En condiciones ideales, el reparto de potencia debe ser de -6 dB a cada una de las salidas, sin embargo se puede apreciar como entre las puertas 5 y 7 hay un desbalance, esto es debido a que por la salida 5 la señal no tiene que atravesar ningún salto de pista, siendo este un elemento que introduce más pérdidas que una simple línea de transmisión.

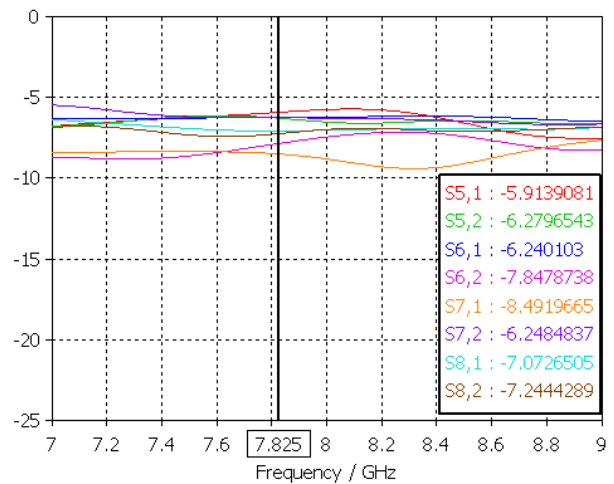


Fig. 10. Amplitud de los parámetros S de la red de Butler.

A continuación se presentan los desfases de las salidas (Fig. 11). Puede verse como para la segunda entrada hay una diferencia de fase entre las salidas de 135° y de 45° para la primera entrada.

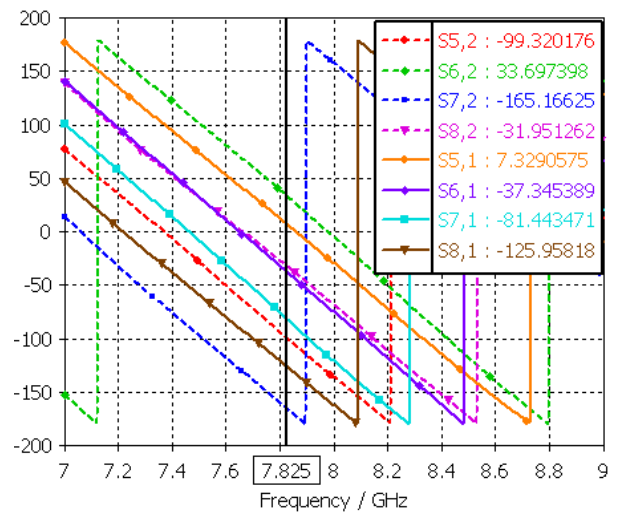


Fig. 11. Fase de los parámetros S de la red de Butler.

Los resultados para las puertas 3 y 4 no se muestran en las figuras, sin embargo son exactamente iguales a las de las

puertas 1 y 2, excepto porque las diferencias de fase a la salida son de -45° y -135° .

IV. UTILIZACIÓN DE LA RED DE BUTLER

Después de diseñar la red completa, esta se usa como circuito alimentador de la antena descrita en II. Las diferencias de fase conseguidas entre las salidas de la red de Butler, α : $\pm 45^\circ$ y $\pm 135^\circ$, arrojan unos ángulos de apuntamiento tal y como se calculan en la formulación del factor de array con exploración electrónica y elementos equidistantes (3):

$$g|_{\psi=0} = \text{arc cos}\left(\frac{-\alpha}{Kd}\right) \quad (3)$$

Siendo finalmente los ángulos de apuntamiento: 45° , 75° , 105° , 135° .

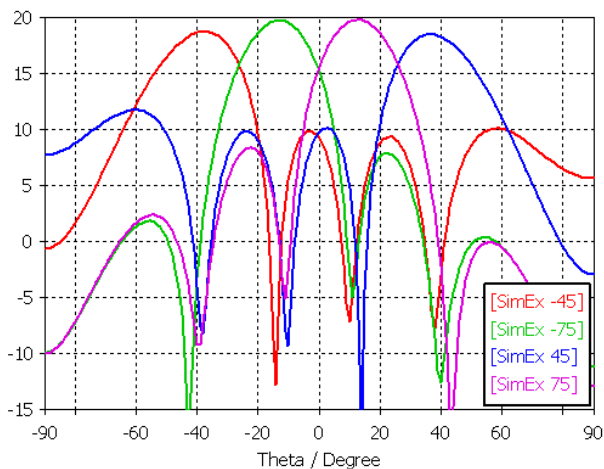


Fig. 12. Diagrama de radiación en θ .

En la Fig. 12, se presentan las diferentes direcciones de apuntamiento en función de la entrada escogida en la matriz de Butler. También se puede apreciar una reducción de la directividad del lóbulo principal en las direcciones más separadas de la perpendicular o "broadside", esto se debe al ensanchamiento del haz, y a la no isotropidad de los elementos radiantes.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una red de Butler para una antena de apuntamiento electrónico en banda X de banda ancha. Para conseguir este propósito se ha utilizado como elemento base un híbrido 90° en dos etapas, tanto en el híbrido como en el salto de pista. También se muestran los resultados de los elementos que componen la red y también los parámetros S de la simulación completa. En último lugar se interconectan la salida de la red de Butler a la entrada de la antena, de tal manera que se obtiene el diagrama de radiación para los diferentes ángulos de apuntamiento.

Los resultados y medidas de la red se presentarán en la URSI 2011 de Leganés.

AGRADECIMIENTOS

Las simulaciones mostradas en este trabajo fueron realizadas usando CST Microwave Studio Suite con una licencia de colaboración entre Computer Simulation Technology (CST) y la Universidad Politécnica de Madrid. Mención especial para la compañía NELTEC S.A. que cedió

los sustratos sin coste alguno para la realización de estos prototipos. Este trabajo ha sido financiado mediante una beca homologada UPM con referencia CH/003/2011, el proyecto CG10-UPM/TIC-5805, cofinanciado por la Comunidad de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid, y el proyecto CROCANTE con referencia TEC2008-06736-C03-01.

REFERENCIAS

- [1] J.R. James, P.S. Hall, "Handbook of Microstrip Antennas", IEE Electromagnetic waves series, Peter Peregrinus Ltd, 1989.
- [2] G. Expósito-Domínguez, P. Padilla-Torre, J.M. Fernández-González, M. Sierra-Castañer, "Electronic Steering Antenna Onboard for Satellite Communications in X Band", *5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2011)*, Rome, Italy, Apr. 2011.
- [3] T. A. Denidni, T. E. Libar, "Wide Band Four-Port Butler Matrix for Switched Multibeam Antenna Arrays", *The 14th International symposium on personal, indoor and mobile radio communication proceedings*. 2003.
- [4] G. Matthaei, L. Young, "Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures", Artech House Publishers, 2000.
- [5] J.M. Inclán-Alonso, "PFC: Antena para Comunicaciones por Satélite en Banda X", Publicaciones ETSIT-UPM, Junio 2010.