

CARACTERIZACIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN GENERADO POR UNA MATRIZ DE BUTLER DE 16 PUERTOS

Armando Carrillo Vargas
Ernesto Andrade Mascote
Universidad Nacional Autónoma de México
armando@geofisica.unam.mx

Resumen

Se presenta un análisis de las observaciones del radiocielo observado con el radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART usando una matriz de Butler analógica de 16x16 puertos. El análisis comprende la detección de las fuentes de radio estelares más intensas: Casiopea, cignus A, virgo, centauro, cangrejo, entre otras. Con base en las observaciones se determina parcialmente el patrón de radiación generado por la matriz. También se presenta una simulación del patrón de radiación que se compara con los resultados observados. El análisis ha permitido detectar varios problemas en el gradiente de fase en las señales que alimentan la matriz. Se presenta una propuesta concreta para optimizar el patrón de radiación y mejorar la operación del radiotelescopio MEXART.

Palabras Clave: radiotelescopio, matriz de Butler, MEXART.

Introducción

El radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART, (por sus siglas en inglés, Mexican Array Radio Telescope) [1], se encuentra ubicado en Coeneo, Michoacán. Los objetivos científicos del instrumento son: La detección y el rastreo de perturbaciones transitorias de gran escala en el viento solar, estudios de la densidad y velocidad del viento solar, pronóstico de tormentas geomagnéticas, entre otros. Los estudios se fundamentan en observaciones de fuentes de radio estelares empleando la técnica de centelleo interplanetario [2]. Los estudios requieren observar cientos de fuentes de radio estelares cubriendo la mayor región del cielo. El radiotelescopio fue diseñado como un instrumento de tránsito, es decir, emplea la rotación de la Tierra para observar el cielo en la dirección este-oeste. Para poder observar en el plano norte-sur o meridiano central se requiere generar varios lóbulos separados simétricamente.

En este trabajo se presenta la caracterización del patrón de radiación asociado con la configuración de observación usada actualmente en el radiotelescopio: Un arreglo planar rectangular con 256 dipolos arreglados en 16 Línea, cada Línea integrada con 64 dipolos, una matriz de Butler de 16x16 puertos, un sistema multiplexor, un receptor superheterodino y el sistema adquisidor de datos. La **Figura 1** muestra un esquema a bloques de la configuración de operación. Esta configuración permite observar el radiocielo con un sistema de 16 lóbulos desplegados en el plano del meridiano central cubriendo un rango en declinación de 120° sobre el meridiano local. La **Figura 2** muestra el patrón de radiación simulado numéricamente para la matriz de 16 puertos.

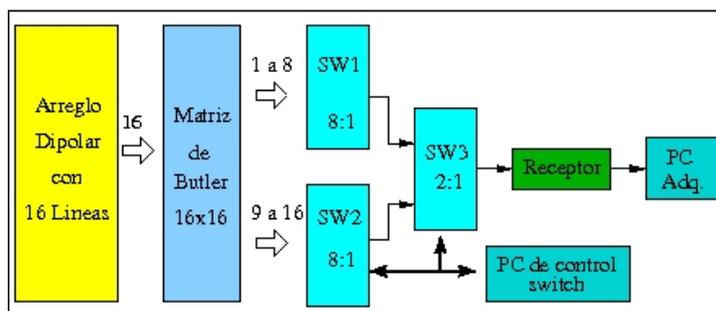


Fig. 1. Bosquejo a bloques de la configuración del radiotelescopio MEXART considerada para diseñar el sistema de direccionamiento presentado en este trabajo.

Matriz de Butler

Existen diversos métodos y dispositivos para implementar la formación y direccionamiento de un conjunto independiente de lóbulos. Uno de los métodos emplea una red configurada en paralelo, atribuida a Butler [3], y descubierta independientemente por Shelton [4]. Esta es una red sin pérdida, la cual utiliza acopladores direccionales 3dB, y conmutadores de fase fija. Esta técnica se emplea para formar N lóbulos independientes y simétricos generados con un arreglo de N radiadores. Actualmente el MEXART cuenta con una matriz Butler analógica de 16x16 puertos generando un conjunto de 16 lóbulos simétricos y ortogonales. Considerando que el conjunto se despliega en el plano norte-sur geográfico se denominaron 8 lóbulos norte y 8 sur, respectivamente, el centro de la simetría apunta al cenit local, ver la **Figura 2**. Detalles del diseño se pueden consultar en [5].

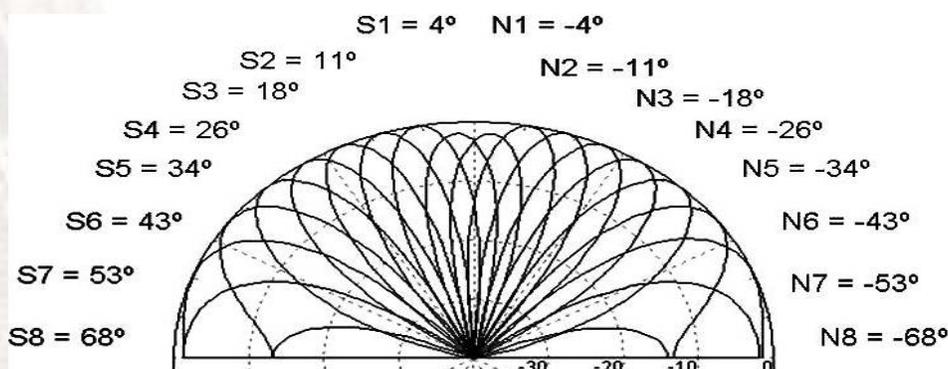


Fig. 2. Patrón de radiación simulado numéricamente, plano E_0 , para una matriz de 16 puertos.

Observaciones

Durante el primer semestre del 2009 se realizaron observaciones usando los 16 diferentes lóbulos generados por la matriz. Cada lóbulo se empleó durante 24 horas y varios días distintos. La **Figura 3** presenta cuatro ejemplos de los registros típicos de amplitud vs. tiempo sideral local obtenidos para los lóbulos N1, N2, S7 y S8. En los registros se puede observar el cambio de nivel en la emisión del cielo de fondo al transitar por el lóbulo correspondiente. También se aprecian la ocurrencia esporádica de interferencias satelitales. Es relevante notar que los registros del cielo, a primera vista, son muy parecidos, pero al revisar en detalle sobresalen las fuentes de radio presentando claras diferencias. Para caracterizar los patrones se estudió el registro generado por cada lóbulo y se identificaron las cinco fuentes de radio más intensas: El cangrejo, casiopea, cisne A, virgo y centauro, que se encuentran distribuidas estratégicamente en declinación. La **Tabla 1** muestra las fuentes de calibración detectadas por cada uno de los 16 lóbulos de la matriz y sus parámetros básicos observados: amplitud, declinación donde apunta cada lóbulo, ascensión recta y declinación de las fuentes.

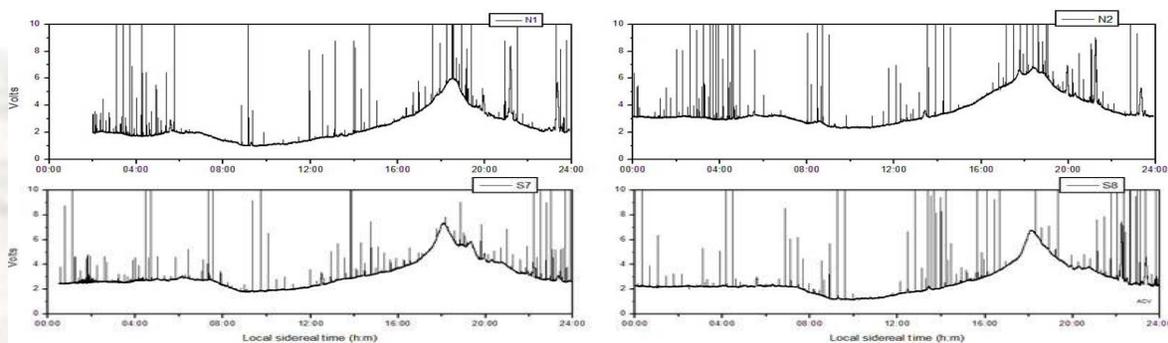


Fig. 3. Ejemplos de los registros de amplitud vs. tiempo obtenidos para los lóbulos N1, N2, S7 y S8.

Simulaciones numéricas del patrón de radiación observado

Con el objetivo de poder caracterizar y comparar, parcialmente, el patrón de radiación real generado por la matriz con base en una estimación teórica se procedió a derivar numéricamente el patrón usando el programa PCAAD [6]. Para obtener el patrón se consideraron los parámetros siguientes: frecuencia central de operación 140 MHz, un dipolo de alambre con polarización lineal este-oeste empleado como elemento para formar arreglos lineales de 64 dipolos que alimentan cada uno de los 16 puertos de la matriz, amplitud de alimentación constante, gradiente de fase constante en los puertos de alimentación, entre otros. La **Figura 4** presenta un panel con 4 ejemplos del patrón asociado al lóbulo sur 1. Cada gráfica fue derivada usando un error gaussiano con valor diferente asociado al gradiente de fase de alimentación de los puertos de entrada de la matriz. En la **Figura 4** también se puede apreciar la posición que tienen las fuentes de calibración respecto de los lóbulos del patrón de radiación. La **Tabla 2**, presenta los parámetros básicos derivados teóricamente para cada lóbulo. Cabe mencionar que el

patrón fue simulado sólo para el plano E_{θ} o norte-sur, lo cual nos da información parcial del patrón tridimensional.

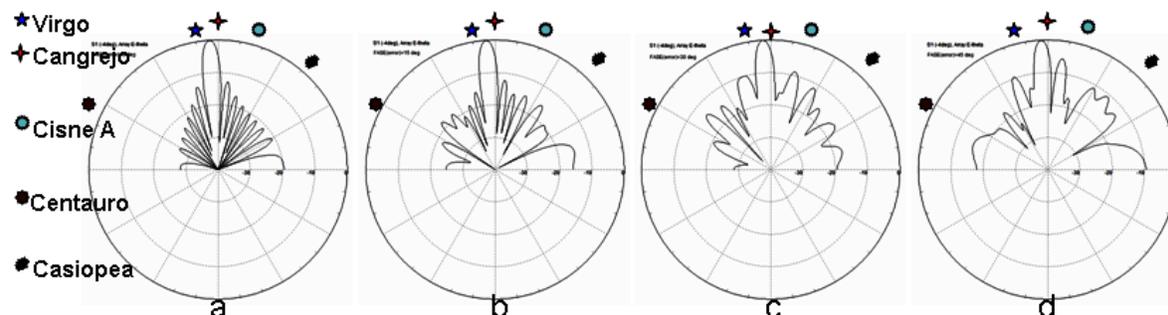


Fig. 4. Cuatro patrones de radiación estimados numéricamente, en el plano norte-sur, para el lóbulo sur 1. Los paneles presenta el patrón considerando para la fase un gradiente de alimentación con un error gaussiano de: a) 0° , b) 15° , c) 30° y d) 45° .

Tabla 1. Las fuentes de calibración detectadas por cada uno de los 16 lóbulos de la matriz y sus parámetros básicos: No. de lóbulo y su declinación, amplitud observada (volts), ascensión recta y declinación de las fuentes.

Lóbulo	Cangrejo RA 05:34:53 DC 22:01:14	Virgo RA 12:31:09 DC 12:21:11	Centauro RA 13:22:28 DC -42:48:00	Cisne A RA 20:00:07 DC 37:03:12	Casiopea RA 23:25:06 DC 62:19:00
N1(24°)	0.783	0	0	0.520	4.559
N2(31°)	0.818	0	0	0	5.035
N3(38°)	0	0.314	0	4.615	0.284
N4(46°)	0	0	0	3.555	1.570
N5(54°)	0	0	1.455	0	0.395
N6(63°)	0.110	0.165	0.755	0.295	0.127
N7(73°)	0	0.879	0	0.513	0.349
N8(88°)	0.622	0.161	0.168	0.261	1.868
S1(16°)	0.674	0	0.126	0.929	3.534
S2(9°)	0.245	0.108	0.539	1.964	1.603
S3(2°)	0.195	0.843	0.224	3.515	1.257
S4(-6°)	0	1.003	0.123	4.155	0.745
S5(-14°)	0.050	0.263	0	1.414	1.204
S6(-23°)	0	0.232	0.497	2.827	1.284
S7(-33°)	0.767	0.109	0.229	1.111	1.224
S8(-48°)	0.231	0.502	0.170	1.133	1.435

Análisis y medidas de calibración

El análisis de los registros generados por los diferentes lóbulos mostró irregularidades en la detección de las fuentes de radio estelares. Las irregularidades principales consisten en: 1) se detectaban fuentes de radio muy distantes, en declinación, con un mismo lóbulo, 2) se detectan fuentes con lóbulos que, según nuestra simulación numérica, no deberían hacerlo, 3) en más de un lóbulo se detectan varias de las fuentes de radio con ganancias similares, ver la **Tabla 1**, y 4) El núcleo galáctico se detecta claramente con la mayoría de los lóbulos.

Las observaciones presentaron una evidencia clara de que el sistema generador de lóbulos no trabaja correctamente. Considerando que el patrón de radiación de la matriz se caracteriza principalmente por su directividad, que está en función de dos parámetros: amplitud y gradiente de fase de alimentación en cada puerto. Se procedió a verificar, en el laboratorio, los parámetros en cada nivel de combinación de la matriz. Se determinó que el error máximo acumulado en cada nivel tenía un valor de $\pm 2^\circ$, es decir, un mínimo neto de $\pm 8^\circ$, lo cual no es bastante alto si consideramos los valores de referencia generados numéricamente. Por otra parte, también se procedió a medir el nivel de señal aportado por cada arreglo encontrando una dispersión con un rango máximo de 50mV, valores dentro del rango permitido. En otra prueba, se procedió a verificar el gradiente de fase entre las líneas que traen la señal de los arreglos para alimentar los puertos de la matriz. Primero se verificó la longitud eléctrica de los cables, cabe mencionar que tienen una longitud física de 180 metros. Se encontraron longitudes eléctricas dispersa en un rango de $\pm 90^\circ$. Para corregir los patrones se procedió a agregar cables con una longitud eléctrica específica, en un rango de 12° a 45° . Las longitudes eléctricas se corrigieron hasta acotarlas en un rango de $\pm 30^\circ$. Es decir, el error en el gradiente de fase neto se encuentra en el rango de $\pm 38^\circ$, ver la **Figura 4b**.

Después de las correcciones se procedió a observar las fuentes de referencia usando una configuración que suma un par de antenas contiguas, con el fin de evaluar la suma básica de patrones y así poder asegurar que las sumas entre antenas contiguas fuesen correctas. Como suele ocurrir, en varias de las sumas se encontró que aún existía un error significativo en el gradiente de fase neto. Es decir, las trazas de los lóbulos al transitar por las fuentes presentaban patrones con lóbulos laterales presentando niveles mayores a -10dB. Finalmente, se procedió a obtener nuevos registros para cada uno de los lóbulos generados con la matriz y se repitió el análisis encontrando mínimas variantes en la configuración de los patrones de cada lóbulo.

Tabla 2. Parámetros básicos derivados teóricamente para cada lóbulo.

Lóbulo	Declinación (grados)	Ancho a 3dB (grados)	Directividad dB
S1	16	10.5	16.7
S2	9	10.7	16.6
S3	2	11	16.5
S4	-6	11.7	16.3
S5	-14	12.6	16
S6	-23	14.4	15.6
S7	-33	17.8	14.9
S8	-28	17.8	13.9
N8	28	17.8	13.9
N7	73	17.8	14.9
N6	63	14.4	15.6
N5	54	12.6	16
N4	46	11.7	16.3
N3	38	11	16.5
N2	31	10.7	16.6
N1	24	10.5	16.7

Conclusiones

El análisis de las fuentes de radio determinó que la matriz y su sistema de alimentación de señal no trabaja correctamente. Con base en las pruebas realizadas se determinó que: a) el error de fase aportado por los cables que llevan la señal del arreglo hacia la matriz tiene la contribución mayor para modificar incorrectamente el conjunto de lóbulos generados por la matriz, b) También se determinó que el error aportado por la propia matriz es dos veces el valor que se puede tolerar. Con base en el análisis, entre observaciones de las fuentes de radio y los patrones de radiación derivados numéricamente, se puede concluir que el error neto del gradiente de fase presente en el sistema se encuentra en un rango de 30° a 45° . Este error en el gradiente de fase es el responsable de la pobre directividad del conjunto de lóbulos generados por la matriz.

Actualmente se trabaja en desarrollar un conjunto de atenuadores digitales que permita hacer cambios en el gradiente de fase de 0° a 90° a pasos de 5° con el fin de obtener un ajuste fino. También se tiene considerado, a mediano plazo, implementar una matriz digital que de mayor flexibilidad de operación con un gradiente de error interno mucho menor al presentado por la matriz analógica.

Referencias

1. A. Carrillo, "Construcción y calibración del radiotelescopio de centelleo interplanetario, MEXART", Tesis Doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
2. A. Hewish, P.F. Scott and D. Willis, "Interplanetary scintillation of small diameter radio sources", *Nature*, vol. 203, 1964.
3. J. Butler and R. Lowe, "Beam forming matrix simplifies design of electrically scanned antennas", *Electron. Design.*, vol. 9, Apr. 1961.
4. J. P. Shelton and S. S. Kelleher, "Multiple beams from linear arrays", *IRE Trans. Antenna Propagt.*, vol.1, Mar., 1961.
5. A. Carrillo, "Matriz de Butler de 16 puertos", Comunicación Técnica, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004-6, Noviembre, 2004.
6. D. M. Pozar, PCAAD 5.0: Personal Computer Aided Antenna Design, Antenna Design Associates, Inc, Leverett, MA., 2002.

