



## Sistema de control para direccionar el radiotelescopio de centelleo interplanetario, MEXART

A. Carrillo Vargas, E. Andrade Mascote, A. González Esparza, E. Aguilar Rodríguez, G. Casillas, G. Sankar, S. Sureshkumar, P. Sierra Figueredo, S. Vázquez Hernández.

**Resumen:** Se reporta el diseño e implementación de un sistema para direccionar el radiotelescopio de centelleo interplanetario. El sistema se integra de: Una matriz de Butler de 16x16 puertos y un sistema multiplexor controlado digitalmente usando programación en Java. El sistema permiten al radiotelescopio observar el cielo en 16 direcciones diferentes.

Palabras Clave: radiotelescopio, matriz de Butler, control digital.

**Abstract:** We report on the design and implementation of a system to steer the direction of the radio telescope of interplanetary scintillation. The system consists of: Butler matrix of 16x16 ports and a digitally multiplexer system controlled using programming in Java. The system allows the radio telescope to observe the sky in 16 different directions. Key words: radio telescope, matrix of Butler, digital control.

### Introducción

El radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART, (por sus siglas en inglés, Mexican Array Radio Telescope) [1], se encuentra ubicado en Coeneo, Michoacán. Algunos de los objetivos científicos del instrumento son: El rastreo de perturbaciones transitorias de gran escala en el viento solar, estudios de la velocidad del viento solar, pronóstico de tormentas geomagnéticas, entre otros. Los estudios emplean la

técnica de centelleo interplanetario. Se fundamenta en observar cientos de fuentes de radio estelares y detectar las fluctuaciones en el flujo captado [2]. Para observar cientos de fuentes se requiere observar la mayor parte del cielo. El radiotelescopio fue diseñado como un instrumento de tránsito, es decir, emplea la rotación de la Tierra para escanear el cielo en la dirección este-oeste. En el plano norte-sur o meridiano central se pueden generar varios lóbulos separados simétricamente. El sistema capaz de generar un conjunto independiente de lóbulos se denomina matriz de Butler. Una matriz simétrica con N puertos permite obtener un conjunto independiente de lóbulos apuntando a N direcciones diferentes de observación.

El sistema de direccionamiento consideró los antecedente y requerimientos de operación para una configuración específica de observación usada el radiotelescopio. La configuración es la siguiente: 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 una declinación sobre el meridiano local de aproximadamente 120 grados. La **Figura 2** muestra el patrón de radiación simulado para la matriz de 16 puertos mostrando la posición y perfil de los 16 lóbulos en el plano meridiano. Existen diferentes procedimientos para seleccionar los lóbulos generados con la matriz de Butler. La selección de los lóbulos se puede implementar de tres modos: Manual, analógico y digital.

Armando Carrillo Vargas, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, Coyoacán, México D.F., c.p. 04510, México, [armando@geofisica.unam.mx](mailto:armando@geofisica.unam.mx).

Ernesto Andrade Mascote, [eandrade@geofisica.unam.mx](mailto:eandrade@geofisica.unam.mx).

Américo González Esparza, [americo@geofisica.unam.mx](mailto:americo@geofisica.unam.mx).

Ernesto Aguilar Rodríguez, [ernesto@geofisica.unam.mx](mailto:ernesto@geofisica.unam.mx).

Gilberto Casillas Pérez, [gacp@geofisica.unam.mx](mailto:gacp@geofisica.unam.mx).

Ganapathi Sankar, National Centre for Radio Astrophysics, Tata Institute of Fundamental Research, India, [shankar@ncra.tifr.res.in](mailto:shankar@ncra.tifr.res.in).

S. Sureshkumar, [suresh@ncra.tifr.res.in](mailto:suresh@ncra.tifr.res.in).

Pablo Sierra Figueredo, Instituto de Geofísica y Astronomía, Habana, Cuba, [sierra@iga.cu](mailto:sierra@iga.cu).

Samuel Vázquez Hernández, [samuel@iga.cu](mailto:samuel@iga.cu).

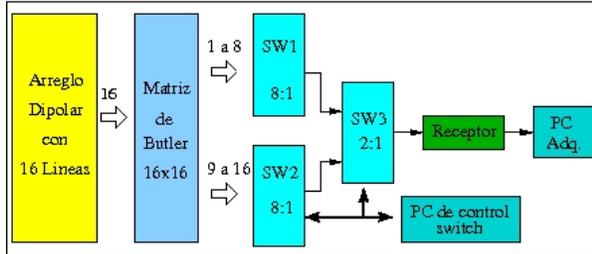


Fig. 1 Bosquejo a bloques de la configuración del radiotelescopio MEXART considerada para diseñar el sistema de direccionamiento presentado en este documento.

En la etapa inicial de operación el procedimiento de selección de un lóbulo se realizó manualmente, es decir, el cable de salida de cada puerto de la matriz se conectaba a mano al receptor. Este procedimiento no es recomendable ya que degrada los conectores, cables de interconexión, y genera inestabilidades eléctricas o de acoplamiento en el sistema, entre otros inconvenientes. En una segunda etapa, para minimizar el deterioro del sistema se implementó un sistema analógico que permitió controlar el sistema multiplexor usando conmutadores analógicamente, este sistema se empleó poco tiempo. Buscando una mayor flexibilidad de operación y control se diseñó un sistema multiplexor 16:1 y su control digital, el cual se presenta en este trabajo.

Para controlar o seleccionar las señales de salida de la matriz es necesario un control preciso y flexible del sistema de conmutadores que permiten seleccionar el lóbulo o dirección requerida por el observador. La tarea principal del sistema de control será seleccionar uno de los 16 lóbulos disponibles y enviar la señal a un receptor superheterodino que posteriormente entrega la señal de radiofrecuencia al sistema adquiredor para su respaldo y análisis.

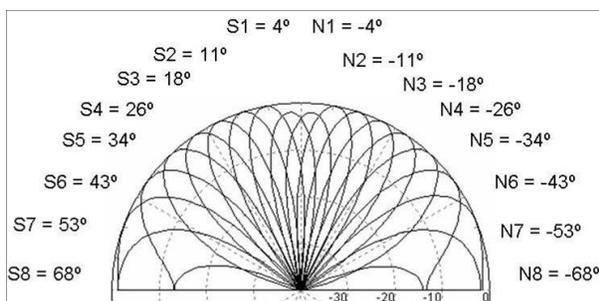


Fig. 2 Patrón de radiación simulado en el plano norte-sur para una matriz de Butler de 16x16 puertos.

### Matriz de Butler

Existen diferentes métodos y dispositivos para implementar la formación y direccionamiento de un haz o lóbulo, en frecuencias de radio, 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, o uniones híbridas, y conmutadores de fase fija. Esta técnica se emplea para formar N lóbulos independientes y simétricos generados con un arreglo de N radiadores [5].

El MEXART cuenta con un arreglo planar que permite varias opciones de operación. En este trabajo se utiliza un subarreglo rectangular con 256 antenas formando 16 Líneas, es decir una cuarta parte del arreglo total que se tiene. Para poder observar en diferentes direcciones con este subarreglo se diseñó una matriz Butler de 16x16 puertos. La matriz es analógica: emplea híbridos de cuadratura y conmutadores de fase constante, ver la **Figura 3**.

La **Tabla 1** presenta los lóbulos y la dirección en que observa, respectivamente. La matriz fue diseñada en el National Centre for Radio Astrophysic, del Tata Institute of Fundamental Research, India. El diseño mecánico, construcción y calibración fue responsabilidad del equipo técnico del MEXART. Detalles del diseño se pueden consultar en [5]. La **Figura 4** presenta una fotografía de la matriz de Butler.

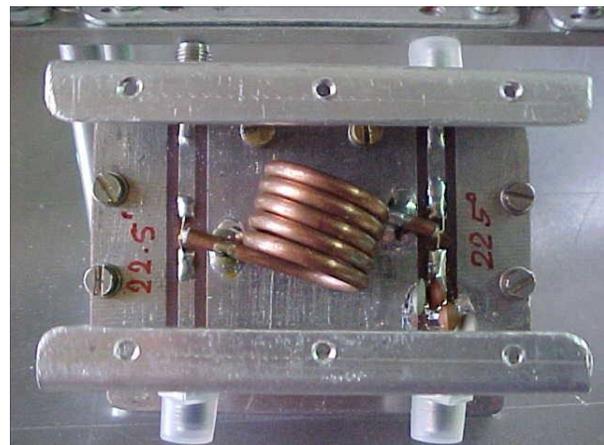


Fig. 3 Imagen de un híbrido de cuadratura usado para construir la matriz de Butler de 16 puertos.



**Tabla. 1:** Declinación en la que observa cada lóbulo de la matriz.

Lóbulo	Declinación (grados)	Lóbulo	Declinación (grados)
N1	24	S1	16
N2	31	S2	9
N3	38	S3	2
N4	46	S4	-6
N5	54	S5	-14
N6	63	S6	-23
N7	73	S7	-33
N8	88	S8	-48

### Sistema multiplexor

Las 16 señales de salida de la matriz tienen diversas opciones para llegar al sistema receptor, a continuación se presentan un par de opciones:

A) Enviar directamente cada señal de salida a un receptor independiente. Esto implica tener un sistema de 16 receptores idénticos, operacionalmente, para tener un estándar en las observaciones. Esta condición en muchas ocasiones es bastante difícil de lograr. Además, otro factor no deseado es el incremento en el costo del sistema.

B) Enviar las señales a varios receptores a través de un sistema multiplexor. Esta configuración tiene varias opciones: Se pueden emplear conmutadores (4:1, 8:1) en configuración tipo árbol, o un conmutador 16:1, según se requiera.

Considerando las condiciones de operación, se determinó diseñar un sistema multiplexor 16:1 empleando tres conmutadores (dos del tipo 8:1 y uno del tipo 4:1) y usar un sólo receptor, ver el esquema a bloques presentado en la **Figura 1**. Es decir sólo se puede observar una dirección del cielo a la vez. El sistema multiplexor fue diseñado considerando dos diferentes conmutadores fabricados por la empresa Hittite: HMC183QS2 (8:1) y HMC182S14E (4:1). Las hojas de datos técnicos de ambos conmutadores se pueden consultar en <http://www.hittite.com/>. En la **Figura 5** se presenta una fotografía del circuito impreso que integra el conmutador HMC182QS14, los puertos de alimentación (VEE, GND), control (A, B), puertos de entrada (RF1, RF2, RF3 y RF4), y puerto de salida (RFC).



Fig. 4. Fotografía de la matriz de Butler. Se pueden apreciar los módulos de los híbridos de cuadratura y conmutadores de fase. También se aprecian los cables de interconexión.

### Control digital

El sistema se diseñó considerando las condiciones impuestas por el proyecto: el sistema operativo principal que se utiliza es Linux, la interfase deberá ser multiplataforma, entre otros. Se decidió programar el sistema en lenguaje java, el cual tiene la ventaja de correr en Windows y Linux, por lo cual se deberá tener la máquina virtual de java instalada en el sistema operativo seleccionado. Además de tener instalando el paquete commapi de Sun Microsystems disponible en la página <http://java.sun.com/products/javacomm/>.

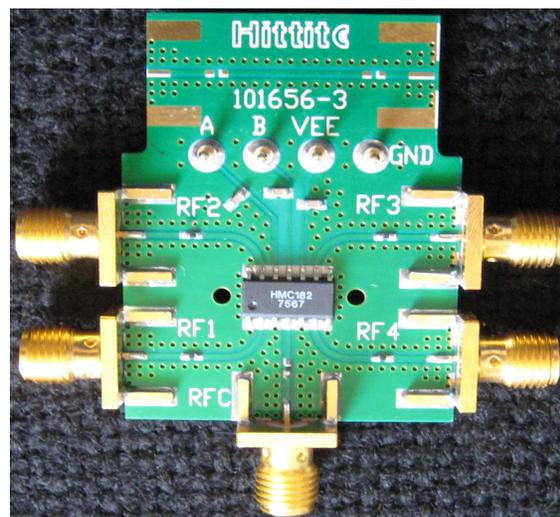


Fig. 5. Fotografía del circuito impreso que integra el conmutador 4:1, HMC182S14/HMC182S14E y puertos de entrada y salida .



El sistema de control digital se puede dividir básicamente en tres partes: 1) Interfase PC-multiplexores, 2) Programa para control digital, y 3) Fuente de voltaje para los conmutadores.

### Interfase PC-multiplexores

Para la comunicación entre la computadora y el multiplexor se consideró emplear una interfase estándar por puerto paralelo. Una tarea básica de la interfase consiste en establecer adecuadamente la alimentación de los conmutadores tanto para su operación y control, es decir, para configurar correctamente la tabla de verdad requiere que los 5v de salida del puerto paralelo de la computadora sean convertidos en -5v para que así el multiplexor pueda reconocerlo como un estado alto. El puerto paralelo está dividido básicamente en tres secciones las cuales son: Los datos de salida (8 bits), bits de control (4 bits), bits de estado (5 bits), es decir, 17 terminales, estos sumados a los 8 pines de tierra dan un puerto con un total de 25 terminales, denominado puerto DB-25.

### Tarjeta interfase

El diseño de la tarjeta interfase consideró como directrices la interconexión electrónica del puerto paralelo, la recepción de datos, y el envío de voltajes, (5v, -5v, 12v y -12v) para alimentar los 3 conmutadores y los circuitos integrados por medio de un solo cable. Además de considerar la interfase que usa el estándar del puerto paralelo que tiene el PC de salida, para facilitar la posición de todos los bits. Un detalle específico considerado al diseñar tarjeta interfase consiste en el requerimiento de implementar una etapa de conversión de voltaje para la tabla de verdad de los conmutadores, es decir, para la correcta operación de los bits de control. Específicamente, se requiere llevar los 3v de salida del puerto paralelo hasta 5v, y posteriormente, convertirlos a su inverso -5v. La **Figura 6** muestra la tarjeta interfase, los cables de control, alimentación, entre otros.

### Programa para el control digital

Los requerimientos básicos considerados para desarrollar el programa con base en las especificaciones de observación e instrumentación son las siguientes: Escribir datos binarios en el puerto paralelo, en términos prácticos el programa deberá direccionar los conmutadores para seleccionar un lóbulo o dirección

específica de observación del radiotelescopio. El programa deberá contar con un sistema de seguridad, deberá generar una bitácora de operación en la misma computadora que contenga los parámetros siguientes: el día, la hora, y la fecha de cada cambio de lóbulo, indicar quién fue el responsable que cambió de lóbulo, y un campo para anotar las observaciones o comentarios del usuario. El programa deberá tener un entorno gráfico de fácil operación.

Para cumplir los requerimientos y en especial el de crear una interfase gráfica agradable se decidió diseñar el programa en NetBeans [6]. Para descargar este software en Linux se trabaja desde el instalador donde se selecciona NetBeans, y agregar paquete. Para desarrollar el programa se requiere tener instalado el paquete **Commapi** de Sun. Sin dicho paquete el NetBeans marca un error de lectura de la librería. También se requiere la instalación de Paquete **comm3.0** para JDK de Java Sun Microsystems. El programa está desarrollado bajo el lenguaje Java de Sun Microsystems. La programación en Java permite obtener un programa multiplataforma ya que se puede ejecutar tanto en Linux como en Windows. El programa fue probado e implantado en un sistema con plataforma Linux/Ubuntu.

El programa o proyecto consta de 5 subrutinas: `abrir.java`, `guarda.java`, `ParrallelAboutBox.java`, `ParrallelApp.java` y `ParrallelView.java`. Cada subrutina es responsable de realizar operaciones específicas. El código del programa no se presenta por ser muy extenso, detalles del código se pueden consultar en [7].

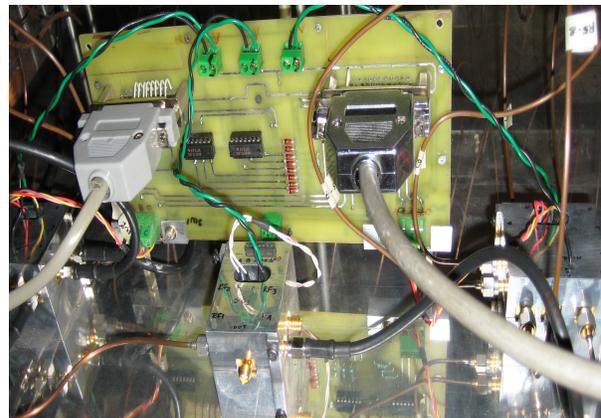


Fig. 6. Fotografía mostrando la tarjeta interfase, los conmutadores, cableado de alimentación y control.

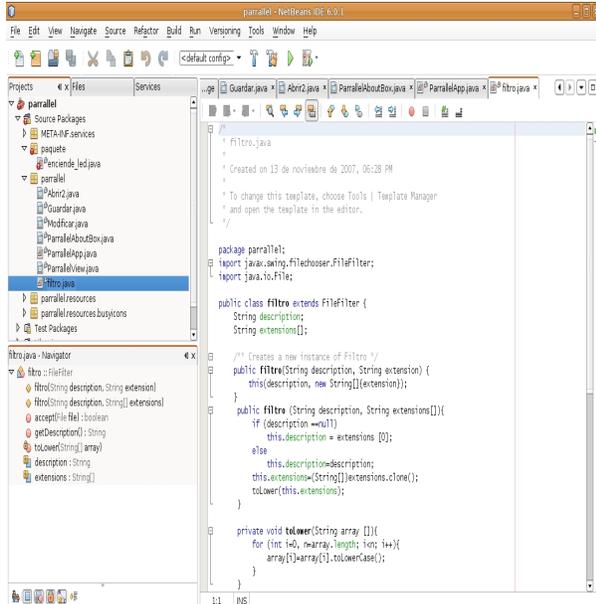


Fig. 7. Ambiente de programación de Netbeans, se aprecian las áreas de programación, librerías, subrutinas, entre otros.

En la **Figura 7** se muestra un ejemplo del ambiente de programación en NetBeans: herramientas, programas que integran el proyecto, área de programación, entre otros.

## Evaluación del sistema de control

La etapa de pruebas incluyó verificar, previo a la ejecución del programa, la operación correcta de cada componente del sistema: La matriz, el multiplexor, el sistema adquisidor, la fuente de alimentación, el NetBeans, entre otros. El sistema adquisidor usado para las pruebas usa una tarjeta de National Instruments 6036E PCI-CCA con 16 A/D puertos de entrada, maneja 16 bit, multifunción I/O y el programa fue desarrollado en LabView 7 Express.

En la **Figura 8** se muestra la interfase visual del proyecto o programa que permite seleccionar uno de los 16 lóbulos de la matriz. La aplicación presenta 6 campos: **Selec Beam** (permite elegir uno de los 16 lóbulos, etiquetados 1N a 8N y S1 a S8, es decir 8 lóbulos apuntan al norte y ocho apuntan al sur, cada uno con diferente declinación), ver la **Tabla 1**; **Control Beam** (activa el lóbulo seleccionado o detienen el lóbulo que observa), **Observed Beam** (ratifica o muestra el lóbulo que esta activo en la salida del multiplexor,

**Comments** (área para comentar o indicar condiciones especiales de la observación), **Login** (registro del usuario o responsable de la observación), y **Log File** (muestra una bitácora de los cambios recientes en la selección de lóbulos).

La **Figura 9** presenta la interfase gráfica del sistema adquisidor de datos y muestra una gráfica voltaje vs. tiempo de la señal captada por el radiotelescopio. En la gráfica se aprecian varios cambios de nivel en la señal, es decir, varios ejemplos de conmutación de los lóbulos marcados con las etiquetas siguientes: S1, S2, N2, N3, S3, N1, N7, N5, y S6. Por ejemplo, la nomenclatura S1 indica que el nivel de señal está asociado con el lóbulo Sur-1 que observa a 16 grados en declinación, ver la **Tabla 1**, y así para las siguientes etiquetas.

El nivel en la señal es directamente proporcional a la temperatura de cielo que observa cada lóbulo, es decir, cada cambio de nivel se encuentra asociado al flujo o radiación de fondo que capta el radiotelescopio. Como se observa en la gráfica el tiempo de conmutación es muy rápido, aproximadamente 20 milisegundos, más que suficiente para la escala de tiempo, 12 minutos, requerida en las observaciones de fuentes de radio empleadas en la técnica de centelleo interplanetario.

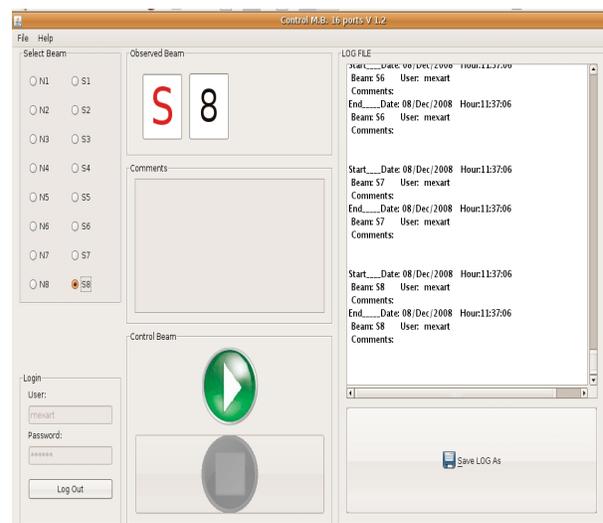


Fig. 8. Ventana de la aplicación para controlar la dirección o lóbulo que observa el MEXART. Se aprecian los 6 campos de operación.

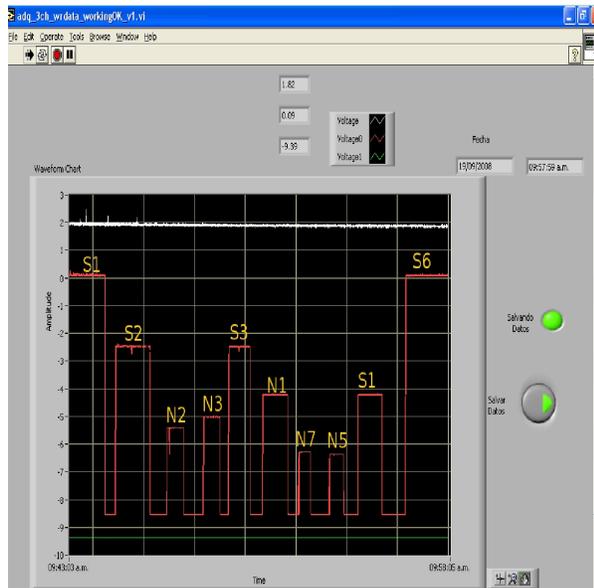


Fig. 9 Ventana del sistema adquisidor mostrando una gráfica típica de la señal captada por el radiotelescopio (voltaje vs. tiempo). La señal presenta marcados cambios de nivel asociados a la operación del control de conmutación de la matriz de Butler.

## Conclusiones

El sistema de generación del patrón de radiación y control digital que permite seleccionar el lóbulo o dirección de observación del radiotelescopio que se presenta en este trabajo se encuentra operacional. El sistema de control ha incrementado la eficiencia en las rutinas de observación del radiotelescopio MEXART. El sistema implementado permite que el control en direccionamiento y la operación del instrumento se puede realizar con sólo un observador. Ahora el observador puede seleccionar y detectar fuentes de radio muy cercanas en ascensión recta, integrando una bitácora que le permite tener un registro preciso de la operación o conmutación de los lóbulos. Actualmente se trabaja en una actualización del programa para lograr un control automático total de las observaciones.

Cabe mencionar que el costo económico en la implementación del sistema de control es muy bajo, considerando los beneficios: Prevención de daños en la matriz de Butler ocasionados al manipular los puertos de salida, el reducir el tiempo de operación para seleccionar los lóbulos, obtener una bitácora automática de la operación, entre otros.

## 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 Propagat.*, 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] <http://www.netbeans.org/>, 2008.
- [7] A. Carrillo et al., "Control digital para una matriz", Comunicación Técnica, Instituto de Geofísica, en prensa, 2009.

## Currículo corto de los autores

Armando Carrillo Vargas. Físico egresado de la Universidad Nacional Autónoma México en 1993. Obtuvo el grado de Maestría en Estudios Espaciales en 1998 y Doctorado en 2007 en el Posgrado en Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente es responsable técnico del radiotelescopio de centelleo interplanetario, MEXART-UNAM. Líneas de investigación: Técnicas de radiotelescopía, estudios del viento solar empleando la técnica de centelleo interplanetario, arreglos dipolares de gran área, entre otras.