

Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en Ciencias de la Tierra. IGF Maestria en Física Espacial

Observaciones de Fuentes de Radio Detectadas en el MEXART con una Matriz de Butler de 16 X 16

$T \to S \to S$

que para obtener el grado de: MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

> presenta: Pablo Villanueva Hernández

Director de tesis: Dr. Juan Américo González Esparza



2009



Universidad Nacional Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. ii

Hoja de Datos del Jurado

1	Dates del alumno	
1.		
v manueva U amán dan		
	Hernandez	
	Pablo	
	57404298	
	Universidad Nacional Autonóma de México	
	Instituto de Geofísica	
	Física Espacial	
	9807909-4	
2.	Datos del tutor	
	Dr.	
	Juan Américo	
	González	
	Esparza	
3.	Datos del sinodal 1	
	Dr.	
	Román	
	Pérez	
	Enríquez	
4.	Datos del sinodal 2	
	Dr.	
	Stanley	
	Kurtz	
5.	Datos del sinodal 3	
	Dr.	
	Armando	
	Carrillo	
	Vargas	
6.	Datos del sinodal 4	
	Dr.	
	Solai	
	Jevakumar	
7.	Datos de la Tesis	
	Observaciones de Fuentes de radio detectadas en el MEXART	
	con una Matriz de Butler de 16x16.	
	87 p	
	2009	

 \mathbf{iv}

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Américo González por sus enseñanzas y apoyo como director de tesis y asesor.

A los miembors del jurado, Dr. Solai Jeyakumar, Dr. Armando Carrillo, Dr. Stanley Kurtz y Dr. Román Pérez por sus consejos como parte del jurado y por sus correciones de esta tesis.

A los compañeros del MEXART: Ing. Ernesto Andrade, M. en C. Gilberto A. Casillas, Dr. Ernesto Aguilar, Ing. Pablo Sierra, Ing. Samuel Vázquez, por sus aportaciones, comentarios y sugerencias sin las cuales no se hubiera podido realizar esta tesis.

A los compañeros del instituto de Geofísica: Verónica Ontiveros, Mario Rodríguez Martínez, Victor de la Luz, Pedro Corona, Diana Campos, Esmeralda Romero y Deni Zenteno por su apoyo en la revisión de esta tesis.

A mis compañeros Paris Sánchez Carreón, Sara Cortés Servin y Luis Torres Andrade por su apoyo con latex.

A todos los compañeros de la carrera por aguantarme todo este tiempo.

Al Instituto de Geofísica de la UNAM, y al Mexican Array Radio Telescope por el espacio en sus instalaciones para la realización de esta tesis. vi

DEDICATORIAS

A mi padrino Agustín Villanueva Cedillo, gracias por tu ayuda y apoyo en mis proyectos.

A mis papás Pablo Villanueva y Rosa María, mis hermanas Verónica, Rosa María y Gabriela, y a mi tía María Elena por su apoyo incondicional en todo este tiempo.

A la Familia Cabrera Becerril por su ayuda y apoyo en mis estudios.

A mis compañeros de la Facultad de Ciencias Roman, Lissette, Luis, Juan Niño, Maik, Mónica, Paty, Mariana, Laura, Efrain, Tochtli, César, David, Ubaldo, Horacio, Heliodoro, Rodolfo, Eleazar, Julián y Juan Manrriquez, por la ayuda en la carrera de Física.

A mis compañeros de la secundaria Augusto, Ernesto, Barajas, Avila, Luis, Ivan, López, Damian y Memo.

Resumen y estructura de la tesis

El objetivo de este trabajo es caracterizar la respuesta del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario de Coeneo Michoacán (Mexican Array Radio Telescope: ME-XART) bajo la configuración de 16 líneas de 64 dipolos (1/4 de antena) y una Matriz de Butler (MB) de 16 X 16 puertos. Para caracterizar el sistema se analizan los datos de 2 pruebas: una desarrollada en noviembre de 2007 y otra en mayo de 2008. Se desarrolla un cálculo teórico de los patrones de haces ideales y no ideales del sistema, los cuales sirven de referencia para estimar el flujo de las fuentes de radio y las trazas de la galaxia detectadas por cada uno de los haces del MEXART.

La tesis consta de cinco capítulos:

- Introducción. Explica qué es el Centelleo Interplanetario (CIP) y describe el proceso de la señal a través de las diferentes etapas del arreglo. Se presentan las características técnicas del MEXART.
- Matriz de Butler. Se describe qué es una matriz de butler (MB) y cómo funciona la de 16 x 16 puertos con la cual se desarrollaron las observaciones de esta tesis. Se hace el cálculo teórico del patrón de radiación del MEXART. Se presenta una tabla mostrando las direcciones a las que se espera que apunten los haces de la MB.
- Metodología. Se desarrolla un cálculo teórico de la directividad y ganancia de los 16 haces de la MB. Se discuten las diferencias entre el patrón de radiación de una línea de 64 dipolos y el de la MB. Se muestran los cálculos de sensibilidad de la antena y se reportan las amplitudes y los haces con que se esperaría registrar las radio-fuentes detectadas en las dos pruebas. Se describe cómo se hicieron las mediciones y se presenta la bitácora de observaciones.
- Análisis de radio-fuentes, pruebas de la Matriz de Butler. Se explica la metodología para caracterizar las radio-fuentes detectadas por el MEXART. Se discuten las observaciones de las dos pruebas del tránsito de la Galaxía y las

radio fuentes más intensas y se comparan con los resultados esperados. Los resultados de las dos pruebas indican que la directividad de la MB no es la esperada, existen haces secundarios con una ganancia comparable al haz principal que apuntan a direcciones diferentes. Se muestra un nuevo cálculo del patrón de radiación de la MB utilizando desfases aleatorios en las antenas para describir las diferencias entre los resultados esperados y las observaciones.

 Conclusiones. Se reporta la directividad y ganancia de la antena utilizando la MB. Se indican los haces de la MB en los que se detecta mejor cada radio fuente. Se propone una metodología para caracterizar en un futuro la respuesta del patrón de radiación del MEXART.

Índice general

Hoja de datos del Jurado III								
Agradecimientos v								
Dedicatorias VII								
Motivación y estructura de la tesis 1X								
1.	Intr	oducción	1					
	1.1.	El Centelleo Interplanetario (CIP)	1					
		1.1.1. Definición de sigma (RMS)	3					
		1.1.2. Índice de centelleo	3					
	1.2.	Observatorios de Centelleo Interplanetiario	4					
	1.3.	Descripción del MEXART	6					
		1.3.1. Base de la antena	8					
		1.3.2. Dipolos y líneas de transmisión	8					
		1.3.3. Acoplamiento (Balun)	9					
		1.3.4. Filtraje	10					
		1.3.5. Amplificación y combinación	10					
		1.3.6. Sistema de localización electrónico (Matriz de Butler)	11					
		1.3.7. Receptor	12					
		1.3.8. Tarjeta adquisidora de datos	14					
		1.3.9. Servidor de datos en tiempo real	14					
		1.3.10. Resumen	15					
	1.4.	Objetivos del Trabajo	16					
2.	Mat	riz de Butler	17					
	2.1.	Introducción	17					
	2.2.	Matriz de Butler (MB)	17					

		2.2.1. MB reflexiba.	18				
		2.2.2. Formación de lóbulos	19				
	2.3.	Matriz de Butler de $16X16$	21				
3.	Met	odología	29				
	3.1.	Patrón de radiación	29				
		3.1.1. Sensibilidad	31				
	3.2.	Resultados esperados	32				
		3.2.1. Fuentes	32				
	3.3.	Metodología y Bitácora de Observaciones.	33				
4.	4. Análisis de radio-fuentes, pruebas de la Matriz de Butler. 41						
	4.1.	Caracterización de la fuentes	41				
	4.2.	RMS	42				
		4.2.1. Medición de amplitud de las fuentes	42				
	4.3.	Línea de 64 dipolos	43				
	4.4.	Matriz de Butler	46				
		441 Haces L	48				
		4.4.2 Haces B	51				
	45	Análisis	54				
	4.6	Discusión	63				
	1.0.	161 Sensibilidad	63				
		4.6.2 Directivided	67				
		4.0.2. Directividad	07				
5.	Con	clusiones	75				
Bi	Bibliografía 79						

Capítulo 1 Introducción

El Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario de Coeneo Michoacán (Mexican Array Radio Telescope, MEXART por sus siglas en inglés) se inauguró el 1 diciembre de 2005 y es un arreglo de gran área de 64x64 dipolos, con una frecuencia de operación de 139.65 Mhz. Las señales que capta a través de las líneas de 64 dipolos, son filtradas, amplificadas, combinadas y posteriormente enviadas a los puertos de una Matriz de Butler (MB) en el cuarto de control [Gonzalez et al., 2004]. La MB suma, combina y desfasa las señales de cada una de las 64 líneas de 64 dipolos y genera un abanico de haces que apuntan a diferentes declinaciones en el cielo. Finalmente, de cada haz se obtiene una señal que se envía a los receptores donde éstas se procesan en un sistema de adquisición analógico-digital para que se almacenen en un disco duro para su análisis posterior, o ponerlos disponibles en tiempo real en el portal del observatorio (http://www.mexart.unam.mx). A continuación se describe la operación del instrumento y sus características generales. Las pruebas y observaciones que se reporta en esta tesis fueron desarrolladas con un 1/4 de la antena (16 líneas de 64 dipolos).

1.1. El Centelleo Interplanetario (CIP)

Existen en el Universo objetos estelares que son fuentes de ondas de radio, por ejemplo: cuásares, radio-galaxias y remanentes de supernovas. Las ondas de radio emitidas por estos cuerpos se detectan por medio de radiotelescopios en la Tierra. Cuando las señales de una radio fuente extragaláctica de ancho angular pequeño pasan a través del medio interplanetario, estas señales se propagan por irregularidades en la densidad del viento solar. Esto ocasiona un fenómeno de dispersión en los frentes de onda y la señal es captada con 'centelleo' por un radiotelescopio en la Tierra. Estas fluctuaciones en la intensidad de las radio-fuentes se le conoce como *Centelleo Interplanetario (CIP)* [Hewish and Scott, 1964]. La Figura 1.1 muestra un esquema simplificado del escenario de cómo se produce el fenómeno de CIP. En la figura aparece una fuente de radio estelar emitiendo ondas electromagnéticas que se propagan a través del cosmos. Al pasar las ondas de radio por estas estructuras en el viento solar, los frentes de onda se distorsionan y la señal de la fuente de radio es captada con centelleo en un radiotelescopio en la Tierra.



Figura 1.1: Diagrama de configuración Sol, Tierra, fuente de radio y perturbación de gran escala en el viento solar.

El fenómeno del CIP se debe principalmente a la dispersión de las ondas de radio que produce la microturbulencia del viento solar asociados con las variaciones de la densidad de electrones en el medio [Manoharan and Ananthakrishnan, 1990]. La técnica de CIP emplea observaciones de un radiotelescopio, que registra el tránsito de varias de estas fuentes de radio estelares de ancho angular pequeño, para generar mapas diarios del cielo. Estos mapas de CIP permiten hacer una detección indirecta de las perturbaciones de gran escala que se propagan del Sol a la Tierra [Hewish and Scott, 1964].

1.1.1. Definición de sigma (RMS)

Un parámetro importante para cuantificar las observaciones de un radiotelescopio y hacer mediciones de centelleo es "sigma" o rms, el cual mide las pequenãs variaciones de voltaje en los registros del instrumento (ver Figura 1.2). Estas variaciones se deben al ruido interno del receptor, al ruido procedente del cielo y a los componentes de la antena. Este parámetro se mide para cada observación utilizando la definición de valor cuadrático medio (RMS por sus siglas en inglés), el cual es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable, esto es, la variación para una serie de puntos alrededor de la media. Dada una colección de N valores $\{x_1, x_2,, x_n\}$, el parámetro se calcula de la siguiente manera [Spieguel, 1988]:

$$X_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

1.1.2. Índice de centelleo

A través de la técnica de CIP se puede inferir información del viento solar como su densidad y su velocidad.



Figura 1.2: Registro de B0821+394 [Tul'bashev and Augusto, 1990].

El grado de centelleo se caracteriza por el índice m, el cual se define como:

$$m = \frac{\text{intensidad de fluctuación de rms}}{\text{intensidad media de la fuente}}$$

De la figura 1.2 (Fuente de centelleo B0821+394 [Tul'bashev and Augusto, 1990] se mide la fluctuación del rms para cada fuente (oscilaciones observadas durante el tránsito) y la amplitud de la fuente es su intensidad media. Este índice da el grado de centelleo para el día observado. Para poder determinar si este centelleo está por arriba o por abajo del valor esperado, es necesario tener un año de observaciones para calcular un valor promedio de $m(\overline{m})$, ya que el centelleo depende del ángulo de enlogación de la fuente con respecto al Sol.

El índice m se define como:

$$m = \frac{\Delta S_{obs}}{S_{prom}}$$

en donde ΔS_{obs} es el centelleo observacional o flujo rms de la señal y S_{prom} es el flujo promedio asociado a un viento solar quieto. Este flujo promedio solamente se puede determinar conociendo la gráfica anual del índice m de la fuente. El índice de centelleo, g, es una magnitud cuantitativa de la dispersión de las ondas electromagnéticas en el viento solar. En términos de m, g se puede definir como:

$$g = \frac{m}{\overline{m(\epsilon)}}$$

Con ϵ la elongación de la fuente.

La magnitud de g proporciona información sobre los cambios en la densidad de electrones del plasma del viento solar por lo que si g es mayor que 1, indica que hay perturbaciones compresivas en el medio interplanetario entre el Sol y la Tierra[Manoharan and Ananthakrishnan, 1990].

1.2. Observatorios de Centelleo Interplanetiario

El primer radiotelescopio dedicado a estudios del viento solar aplicando la técnica del CIP fue construido en los años sesenta en el observatorio Mullard de Cambridge, Inglaterra. Este arreglo tenía un área física de 21,150 m², con una frecuencia central de operación de 81.5 MHz y un ancho de banda de 1 MHz. La antena consistía de un arreglo de 2,048 dipolos de onda completa, en una superficie física de 470 m de longitud en la dirección este-oeste por 45 m de en la dirección norte-sur. Estos dipolos estaban configurados en 16 líneas paralelas alineadas en dirección este-oeste, con 128 dipolos en cada línea [Aguilar-Rodríguez, 1997]. El arreglo de Cambrigde dejo de operar a finales de la década de los ochenta.

Existen actualmente en operación dos arreglos de antenas dedicados a desarrollar observaciones de viento solar empleando la técnica del CIP: el Ooty Radio Telescope (ORT) del National Center for Radio Astrophysics de la India [http://www.ncra.tifr.res.in/ncra_hpage/ort/ 2002] y el arreglo de 4 antenas del Solar Terrestrial Laboratory (STEL) de la Universidad de Nagoya en Japón [http://shnet1.stelab.nagoya u.ac.jp/omosaic/goin95/ips.html, 2006].

El ORT fue instalado en 1970, y se compone de una antena tipo cilindro parabólico de 530 m de largo, que funciona a una frecuencia de 326.5 MHz. En su superficie tiene 1,100 alambres en paralelo a la longitud del cilindro y tiene 1056 dipolos. El radiotelescopio Ooty está constituido por una superficie reflectora de alambre de acero delgado, puesta en forma paralela con respecto a la longitud del cilindro y sostenida por 24 soportes parabólicos separados a 25 m cada uno. Cada dipolo tiene un amplificador de bajo ruido y un controlador electrónico de fase. Las señales que capta el instrumento son recibidas en grupos de 48 dipolos. La característica única de este radiotelescopio, es que está construido en una colina que tiene una pendiente de 11 grados, igual a la latitud geográfica del Ooty, lo que lo hace tener un eje de rotación paralelo al eje de rotación de la tierra, dándole un montaje ecuatorial. Por el mecanismo de funcionamiento de este radiotelescopio, una fuente estelar puede ser seguida cerca de diez horas. En la actualidad el ORT es utilizado en el estudio de pulsares y de CIP [http://www.ncra.tifr.res.in/ncra.hpage/ort/ort.html, 2002].

El Solar-Terrestrial Laboratory (STELab) de la Universidad de Nagoya Japón tiene funcionando un sistema de cuatro antenas que se encuentran en las ciudades de Tokawa(34°N, 37°E), Fuji(35°N, 38°E), Sugadaira(36°N, 38°E) y Kiso(35°N, 37°E), las cuales operan a una frecuencia central de 327 MHz. Cada arreglo esta compuesto de 5 antenas reflectoras parabólicas cilíndricas. Con sus observaciones se realizan estudios de CIP y estimaciones de la velocidad del viento solar [http://shnet1.stelab.nagoya u.ac.jp/omosaic/goin95/ips.html, 2006].

Los radiotelescopios que se emplean para hacer los mapas diarios de índices de CIP son instrumentos que apuntan a una dirección fija en el espacio y utilizan la rotación de la Tierra para barrer el cielo. Por lo anterior, es necesario combinar mediciones de radiotelescopios ubicados en diferentes longitudes geográficas que permitan complementar las observaciones y con ello obtener un mejor rastreo de la evolución de las perturbaciones en el viento solar. Para rastrear continuamente la evolución de las estructuras a gran escala que pueden estar asociadas al Sol, es deseable que haya siempre al menos un radiotelescopio terrestre del lado día de la Tierra. Cada observatorio de CIP genera un mapa de varias decenas de fuentes estelares de radio por día. Para lograr un seguimiento completo de las perturbaciones que salen del Sol se requeriría combinar cada día, al menos cuatro mapas de CIP producidos por diferentes observatorios. El proyecto del MEXART plantea formar parte de una red mundial combinando datos con estos dos radioteléscopios mencionados arriba.

1.3. Descripción del MEXART



Figura 1.3: Plano de localización del MEXART.

El MEXART está localizado en la ciénega de Zacapu, en una región predominantemente agrícola, lejos de ciudades con mucha población y actividad industrial. El sitio está rodeado de montañas de poca altitud y con bajos niveles de ruido electromagnético en la frecuencia de operación. La Figura 1.3 muestra el plano de localización del observatorio. Sus coordenadas geográficas son: latitud 19°48'49" norte, longitud 101°41'39" oeste, y altura de 1964 m (SNM).

La Tabla 1 resume las características principales del arreglo de antenas del ME-XART con el cual se desarrollaron las observaciones que se reportan en esta tesis, las cuales se refieren a un arreglo de 16x64 dipolos de longitud de onda completa, su frecuencia de operación, ancho de banda, etc.

frecuencia de operación:	139.65 MHz
ancho de banda:	2 MHz
elemento básico:	dipolo de onda completa
elementos:	1024
líneas este-oeste:	16, cada línea con 64 dipolos

Tabla 1.1: Caraterísticas Técnicas del la Antena del MEXART.

El tamaño de la antena es un factor importante a considerar en el diseño de cualquier radiotelescopio, puesto que su área física está relacionada con la sensibilidad del instrumento: a mayor área, mayor el número total de fuentes que puede detectar. El MEXART consiste de un arreglo de 64 líneas con 64 dipolos cada una. Los 64 dipolos de cada línea están polarizados en dirección este-oeste y estas líneas están separadas entre si media longitud de onda en la dirección norte-sur [Gonzalez et al., 2005]. Para este trabajo se utilizaron 16 líneas de dipolos. De acuerdo a la longitud de onda asignada por la SCT (2.14 m), los cálculos para las dimensiones aproximadas del arreglo son: 64x2.14=136.96 metros en la dirección este-oeste y 16x1.07=70 metros en la dirección norte-sur; lo cual corresponde a un área de aproximadamente 2396 m² [Castillo, 2006].



Figura 1.4: Vista superior de la antena del MEXART.

1.3.1. Base de la antena

El levantamiento de la estructura que sostiene los dipolos consta de 16 filas de 17 postes de madera tratada (actualmente, debido al deterioro por factores climatológicos, éstos se están reemplazando por postes de plástico reciclado "pet"). El material de los postes debe ser dieléctrico, ya que pueden llegar a afectar la operación del MEXART. El uso de materiales metálicos o concreto, produce reflexión o apantallamiento en la señal de los dipolos [Carrillo-Vargas, 1998].

1.3.2. Dipolos y líneas de transmisión



Figura 1.5: Configuración de los dipolos y la línea de transmisión.

El elemento básico del arreglo es un dipolo de onda completa (λ =2.13 m) (Figura 1.6 izquierda)que está construido con alambre de cobre desnudo, calibre 14/AGW. Este alambre se conecta a una línea de transmisión paralela (Figura 1.6 derecha), del mismo material que el dipolo (alambre de cobre). La Figura 1.5 muestra un diagrama de cómo están ensamblados los dipolos y las líneas de transmisión. La separación entre la base de cada dipolo sobre la línea de transmisión es de una longitud de onda (λ =2.13 m) y cada línea de transmisión está constituida por 16 dipolos. Los cables conductores de cobre se mantienen paralelos a una distancia de 2.5 cm por medio de tubos aisladores de PVC los cuales permiten mantener la impedancia constante a lo largo de la línea de transmisión.



Figura 1.6: Fotografía de un dipolo (izquierda) y una de las líneas de transmisión (derecha) del MEXART.

1.3.3. Acoplamiento (Balun)

Las líneas de transmisión E-O se dividen en 4 secciones de 16 dipolos cada una. La sección tiene una longitud de 16x2.15=34.4 m. Cada sección se acopla a la línea de transmisión coaxial por medio de un transformador de impedancias (balun). Un balun es un dispositivo para acoplar dos sistemas (uno balanceado con otro no balanceado), en este caso, la línea bifilar de cobre con el del cable coaxial. El balun acopla las líneas de diferente material y elimina las pérdidas que se producen al propagarse la señal de un medio al otro [Andrade, 2000]. En el MEXART el balun que se utiliza es toroidal (Figura 1.7 derecha).



Figura 1.7: Balun.

1.3.4. Filtraje

Los filtros son dispositivos electrónicos que seleccionan una banda de frecuencias de las señales eléctricas que pasan a través de este y que pueden modificar su amplitud y fase. En el MEXART se utilizan filtros pasa altas y pasabandas dependiendo del rango de frecuencias que se quieran discriminar. El primer paso de filtraje, que se coloca antes de la primera etapa de amplificación y consiste en un filtro pasa altas (Figura 1.8 izquierda)el cual tiene una frecuencia de mínima de corte de 67 MHz. Con este filtraje se excluyen las señales de bajas frecuencias que saturan los primeros amplificadores. Los filtros pasabandas (Figura 1.8 derecha), que se colocan antes de la segunda etapa de amplificación, tienen una frecuencia central de 139.65 MHz (la misma del MEXART) y un ancho de banda de operación mínimo de 15 MHz.



Figura 1.8: Primera y segunda etapa de filtraje y amplificación.

1.3.5. Amplificación y combinación

La Figura 1.9 muestra el diagrama de la parte frontal del arreglo, en donde las señales de los bloques de 16 antenas se suman, filtran, amplifican y combinan en diferente etapas. El resultando final es una señal por cada línea de 64 dipolos que llega al cuarto de control. En el primer bloque de una sección, la línea de transmisión suma la señal de 16 dipolos. Esta señal pasa de la línea de transmisión (alambre de cobre) al cable coaxial mediante el balun y de ahí pasa por el filtro pasa-altas y el primer bloque de amplificación (Figura 1.8 izquierda) con ganancias típicas de 20 dB. Este bloque amplifica la señal que sale de la primera sección hacia el primer combinador de potencia 2:1 (Figura 1.10), en donde se une la señal de las dos secciones adjuntas (32 dipolos). Posteriormente, esta señal combinada de la mitad de la línea, pasa al segundo nivel de combinación (Figura 1.8 derecha) donde se une finalmente



Figura 1.9: Diagrama de bloques del arreglo dipolar.

la señal de toda la línea (64 dipolos). La señal combinada de los 64 dipolos pasa por el filtro pasabandas y el segundo nivel de amplificación (Figura 1.8 derecha). Después de pasar estas dos etapas de filtraje, amplificación y combinación, la señal de cada línea de 64 dipolos llega al cuarto de control. Por cada línea este-oeste de 64 dipolos hay 4 baluns, 4 filtros pasa-altas, 3 combinadores, 5 amplificadores y 1 filtro pasa-bandas. Esto da un total en el arreglo completo de: 256 baluns, 256 filtros pasa altas, 320 amplificadores, 192 combinadores y 64 filtros pasabandas.

1.3.6. Sistema de localización electrónico (Matriz de Butler)

Debido a la gran superficie del arreglo, es imposible implementar un sistema mecánico de localización que dirija el haz a cualquier punto en el cielo. Para poder direccionar la antena en dirección norte-sur se implementó un sistema de conmutación electrónica que puede formar múltiples haces (lóbulos) a diferentes declinaciones. La Figura 1.11 en el panel inferior muestra un diagrama del proceso de la señal en el cuarto de control. En este caso se trata de la operación de 16 líneas de 64 dipolos (1/4 de la antena). La señal de las 16 líneas se inyecta a la matriz de Butler que produce un abanico de haces en 16 declinaciones diferentes. Este sistema mantiene



Figura 1.10: Primera estapa de combinación.

constante la apertura de la antena fija y se aprovecha la rotación de la tierra, para hacer el barrido del cielo en ascención recta [Andrade, 2000]. La Matriz de Butler es un dispositivo de desfasamiento que se discute con más detalle en el siguiente capítulo.

1.3.7. Receptor

Un receptor en radioastronmía es un aparato que se emplea para detectar y medir la emisión en radio de las fuentes estelares. El nivel de potencia de la señal en un receptor de un radiotelescopio es del orden de 10^{-20} W [León-Tavares, 2003]. El MEXART utiliza el receptor de tipo superheterodino. Para esta tesis se utilizan datos obtenidos con 2 receptores similares, pero que tienen respuestas diferentes.

El receptor 0 fue diseñado por Carl Lyster y tiene las siguientes características:

- frecuencia de trabajo 139.65 MHz.
- ancho de banda de 2 MHZ.
- oscilador local de 100 MHz
- frecuencia intermedia de 10.7 MHz.
- filtro pasabanda centrado a 139.65 MHz con un ancho de banda de 6 MHz.



Figura 1.11: Configuración para observaciones con: 1) una línea de 64 dipolos (panel superior) y 2) con la MB(panel inferior) [Carrillo, 2009].

El receptor 1 fue diseñado por Michael Thursby y tiene las siguientes características:

- receptor superheterodino a potencia total.
- frecuencia de trabajo 139.65 MHz.
- ancho de banda de 1.5 MHZ.
- tiempo de integración de 1.3 ms.
- oscilador local de 100 MHz.
- frecuencia intermedia de 39.65 MHz.
- amplificador de entrada de RF con 23 dB.
- filtro pasabanda centrado a 139.65 MHz con un ancho de banda de 4 MHz.
- atenuador de 10 dB en pasos de 1 dB en la sección de frecuencia intermedia.



Figura 1.12: Receptor 0 y receptor 1.

1.3.8. Tarjeta adquisidora de datos

Es un conversor analógico digital (CAD) que toma la señal ya amplificada por el receptor, y la digitaliza, para ser visualizada y almacenada en una computadora por medio de los programas realizados por los doctores Solei Jayekumar y Armando Carrillo. En este caso se emplea una tarjeta adquisidora de National Instruments PCI-6133 BNC-2110 de 8 canales (Figura 1.13 izquierda), lo que permite hacer mediciones con ocho antenas distintas o con ocho lóbulos de la matriz de Butler, según la prueba que se vaya a desarrollar.

1.3.9. Servidor de datos en tiempo real

Los datos obtenidos después de estas etapas son almacenados en una computadora, la cual también es servidor de datos en tiempo real (Figura 1.13 derecha), desplegando estos en la página del MEXART [http://www.mexart.unam.mx, 2007] y en la pagina de Virtual Eart-Sun Observatory [http://www.veso.unam.mx/realtimedata.html, 2007] (VESO por sus siglas en inglés), el cual es un portal de internet que conjunta datos y observaciones en tiempo real de 4 instrumentos que monitorean el estado de la actividad solar, el medio interplanetario y el entorno magnético de la Tierra.



Figura 1.13: Tarjeta adquisidora (izquierda) y servidor de datos en tiempo real (derecha).

1.3.10. Resumen

La adquisición de señales en el MEXART se puede resumir de la siguiente manera: cada línea de 64 dipolos se dividida en 4 secciones de 16 dipolos. En cada una de estas secciones, la emisión de la radiofuente captada por los 16 dipolos pasa de la línea de transmisión hacia el cable coaxial mediante un balun. Cuando la señal se propaga por el cable coaxial pasa por un filtro pasa altas para eliminar las interferencias de baja frecuencia y evitar que la primera fase de amplificación se sature. Después de la amplificaión, la señal pasa por la primera etapa de combinación, en donde se suman las dos secciones contiguas de la antena. Este proceso se repiten en las otras dos secciones, por lo que en el canal central hay una segunda etapa de combinación, para sumar las señales de las 4 secciones. Esta señal ya combinada de 64 dipolos, pasa por una segunda fase de filtraje y amplificación, donde se utiliza un filtro pasabandas para eliminar interferencias a bajas y altas frecuencias y la señal se amplifica para ser llevadas al cuarto de control. En el cuarto de control, la señal que llega proveniente de cada una de las 16 líneas de 64 dipolos se conectada a la MB (dispositivo para el direccionamiento de los lóbulos de la antena). Esta MB tiene también 16 salidas que son conectadas a un seleccionador. Ya escogido el haz con el que se quiere trabajar se conecta un atenuador para evitar una saturación en los registros del receptor. La señal pasa por el receptor $(0 \circ 1)$ y finalmente de la tarjeta adquisidora a la computadora para guardar y procesar los datos.

En esta tesis, se presentas las observaciones realizadas entre los meses de noviembre de 2007 y junio de 2008 con la MB, y observaciones con una línea de 64 dipolos con y sin filtros pasa-altas y pasabandas desarrolladas el 28 y 29 de abril por el equipo técnico del MEXART (A. Carrillo, E. Andrade, S. Vazquéz y P. Sierra).

1.4. Objetivos del Trabajo

El MEXART va a estudiar perturbaciones transitorias de gran escala que viajan del Sol a la Tierra empleando la técnica del CIP. Para lograr la operación final del arreglo y desarrollar estas observaciones de manera rutinaria es necesario concretar varias etapas de calibración.

Este trabajo discute dos series de observaciones que se desarrollaron en noviembre de 2007 y en junio de 2008, para determinar la respuesta del MEXART operando con 16 líneas de 64 dipolos (1/4 de antena) y una MB de 16 puertos. El objetivo de esta tesis es caracterizar la respuesta de los 16 haces de la MB. Para ello se hace una estimación teórica de la directividad y ganancia de los 16 haces, la cual se compara posteriormente con las observaciones. Con estos resultados se presenta una estimación de la sensibilidad y directividad del sistema. Estas pruebas son de suma importancia, ya que son el paso previo para desarrollar las primeras observaciones del MEXART de fuentes que presentan CIP. La metodología desarrollada en esta tesis servirá para caracterizar la respuesta del sistema en futuras observaciones.

Capítulo 2 Matriz de Butler

2.1. Introducción

Un arreglo plano de dipolos como el MEXART es un arreglo geométrico compuesto de varios arreglos líneales en la dirección este-oeste (E-O). Esta configuración bidimensional de elementos contenidos en un plano, tiene la dirección de máxima radiación perpendicular al mismo plano. Una línea con 64 dipolos (polarizados E-O) a potencia total, genera un haz principal apuntando hacia el cenit. Sin embargo, al implementar dispositivos permutadores de fase entre las señales de los dipolos, el haz resultante puede ser declinado en cualquier dirección este-oeste.

En un arreglo de 16 líneas E-O con 64 dipolos, como el que trata la tesis, cuando se suman las señales de todas las líneas a potencia total se genera nuevamente un haz principal apuntando hacia el cenit. Como a su vez las líneas E-O están arregladas a lo largo de la dirección norte-sur (N-S), ahora es posible producir un desfasamiento progresivo en las señales de cada una de las 16 líneas N-S y así, al momento de combinarlas, declinar el haz resultante en cualquier dirección norte-sur. Este desfasamiento de las corrientes de las antenas se puede obtener de varias formas, por ejemplo, variando la longitud física de la trayectoria que recorre la onda, o mediante permutadores de fase.

2.2. Matriz de Butler (MB)

Existen diferentes métodos y dispositivos para implementar la formación y direccionamiento de un haz o lóbulo. Para frecuencias de radio, uno de estos métodos consiste en emplear una red configurada en paralelo pensada por Butler, la cual es una red sin perdidas que utiliza acopladores direccionales o uniones híbridas y conmutadores de fase fija. Con esto se forman N lóbulos contiguos generados con un arreglo de n dipolos (con N = 2n con n entero). Así la MB tiene 2n entradas y 2n salidas. El número de acopladores direccionales requeridos para un arreglo de Nelementos es $\frac{N}{2}log_2N$ y el número de conmutadores de fase fija es $\left(\frac{N}{2}\right)log_2(N-1)$ [Carrillo, 2007].

La complejidad de la MB se incrementa con el número de elementos. Una MB de 64 elementos, por ejemplo requiere 192 acopladores direccionales y 160 conmutadores de fase fija [Carrillo, 2004].

Para tener una idea básica de la operación de una red como la MB, se puede considerar un arreglo simple de 2 dipolos espaciados $\frac{\lambda}{2}$ y conectados a 2 puertos de un acoplador híbrido de -3dB's como se muestra en la figura 2.1. Si una señal se aplica en el puerto 1, un gradiente de fase de 90° será la resultante entre las señales en los puertos 2 y 3, lo cual producirá un haz orientado 30° a la derecha del arreglo [Carrillo, 2004]. Una señal insertada en el puerto 4 genera una distribución de fase que produce un haz orientado a 30° hacia la izquierda respecto a la normal del arreglo [Carrillo, 2004]



Figura 2.1: Acoplador direccional de -3 dB's [Carrillo, 2004].

2.2.1. MB reflexiba.

Una MB convencional se puede diseñar usando acopladores simétricos a -3dB's [Carrillo, 2007]. Cada matriz puede ser usada como un modulo para construir una configuración más grande. Si estas configuraciones son simétricas sobre su eje longitudinal el cual dividirá los puertos de entrada y salida en dos mitades (exceptuando las configuraciones más pequeñas las cuales no son simétricas), estas actuarán como lentes en una dirección. Esto es, el punto de alimentación corresponde al plano focal y las salidas a la región de colimación [Carrillo, 2004]. Es posible lograr lentes operando en dirección opuesta reorganizando los puertos de entrada y agregando conmutadores de fase apropiados en algunos de los puertos de entrada [Carrillo, 2004].

Una MB simétrica con respecto al eje de en medio de los puertos de entrada y salida, es la configuración deseada, ya que esto aseguraría que los puertos son idénticos [Shelton, 1979]. así una de esta matrices corresponde a una matriz del tipo reflexivo.

2.2.2. Formación de lóbulos

El método que se emplea en el MEXART para direccionar los haces del arreglo que se describe a continuación fue desarrollado por Butler [Butler and Lowe, 1961, Kraus, 1986, Carrillo-Vargas, 1998]. Una MB es un arreglo de 2N puertos (con N =número de entradas = número de salidas, en el caso del MEXART N=16). Todos los puertos están acoplados así el coeficiente de transferencia es 1/N. Por esta razón para cada uno de los puertos de entrada existe una distribución de fase particular entre los puertos de salida y todas estas son líneales; esto es, para los puertos de salida numerados como: n = 1, 2, ..., N la diferencia de fase entre los puertos o fase progresiva n y n - 1 es constante para toda n

Así la diferencia de fase β se define como:

$$\beta_n = \frac{(2n-1)\pi}{N}$$
ó $\beta_n = \frac{(2n-1)180}{N}$

Ahora teniendo un arreglo de antenas como el de la figura 2.2



Figura 2.2: Arreglo de n antenas que están espaciadas a la misma distancia y con la misma amplitud.

El campo eléctrico de campo lejano se define como:

$$E = E_0 \left[1 + e^{j\psi} + e^{2j\psi} + \dots + e^{(n-1)j\psi} \right]$$
(2.1)

ó como

$$E = E_0 \sum_{n=1}^{n=N} e^{(n-1)j\psi}$$
(2.2)

donde

$$\psi = 2\pi \frac{d}{\lambda} sen\theta + \beta$$

 θ es el ángulo entre las antenas y el campo lejano
 d es el espacio entre fuentes
 β es la fase progresiva

Si se multiplica 2.1 por $e^{j\psi}$ se tiene

$$Ee^{j\psi} = E_0 \left(e^{j\psi} + e^{2j\psi} + \dots + e^{nj\psi} \right)$$
(2.3)

restando 2.3 - 2.1 da

$$E = E_0 \frac{1 - e^{jn\psi}}{1 - e^{j\psi}} = E_0 \frac{\operatorname{sen}\left(n\frac{\psi}{2}\right)}{\operatorname{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)}$$
(2.4)

al termino $\frac{sen(n\frac{\psi}{2})}{sen(\frac{\psi}{2})}$ se le conoce como factor de arreglo.

Así el patrón para n antenas con el centro como punto de referencia es la ecuación 2.4. tomando el limite $\psi \longrightarrow 0$ 2.4 se reduce a:

$$E = nE_0 \tag{2.5}$$

Por lo que para tener un patrón normalizado se divide 2.4 entre 2.5 y se obtiene

$$E_n = \frac{E}{nE_0} = \frac{1}{n} \frac{\operatorname{sen}\left(n\frac{\psi}{2}\right)}{\operatorname{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)}$$
(2.6)

Una MB funciona como una transformada rápida de Fourier de 2^n elementos ortogonales, estos haces son combinaciones lineales independientes de los elementos del arreglo [Butler and Lowe, 1961].

Es importante destacar que el ancho del haz principal depende del número de líneas de antenas en el arreglo, haciéndose estrecho cuando el número de líneas se incrementa.

2.3. Matriz de Butler de 16X16

Para las pruebas de calibracón reportadas en este trabajo (realizadas por el equipo del MEXART: A. Carrillo, E. Andrade, S. Vázquez y P. Sierra) se utilizó una MB de 16X16 (diseñada por G. Sankar y S. Shureshkumar del NCRA de la India y ensamblada y calibrada por A. Carrillo, E. Andrade y F. Castillo de la UNAM). Esta MB tiene 16 entradas y 16 salidas, para la cual se emplean como entradas 16 de líneas de 64 dipolos del MEXART (1/4 de la antena). Esta MB genera un patrón de radiación de 16 haces principales como se ve en la Figura 2.7. Este es el patrón teórico esperado con 16 haces, de los cuales 8 apuntan hacia el norte y 8 hacia el sur. También la figura se observa que conforme estos haces se alejan del cenit se vuelven más anchos. Para esta simulación se supone que las 16 señales que alimentan la MB tienen la misma amplitud y fase; esto es, no se toma en cuenta ningún posible error en las 16 señales que alimentan a la MB, las cuales necesariamente modifican el patrón de haces resultante.

La cobertura angular para esta matriz se define como:

$$\theta_{cobertura} = 2sen^{-1}\frac{N-1}{2Nd}\lambda$$

con N el número de dipolos (16) y d la separación entre estos ($\lambda/2$), por lo que el ángulo de cobertura para una MB de 16X16 es de 139.2°.

La MB de 16 x16 consta de 32 acopladores direccionales y 24 permutadores de fase (ver Figuras 2.3 y2.4). El recorrido de la señales en la MB es el siguiente: la señal proveniente de cada una de las 16 líneas de 64 dipolos se conecta 2:1 en los híbridos de cuadratura (dispositivos electónicos que se usan como divisores o combinadores de señales, que presenta cambios de fase internos de 0° y de 90°). La señal que no se desfasa llega a un permutador de fase (dispositivo electrónico utilizado para direccionar señales o flujo de potencia a diversos componentes), que desfasan $\frac{\pi}{4}$. Posteriormente, estas señales resultantes son conectadas 2:1 en un híbrido de cuadratura con la señal que se desfasó 90° en el primer bloque de híbridos de cuadratura. La salida que no se desfasa pasa a una segunda línea de permutadores de fase en donde la señal se desfasa $\frac{\pi}{8}$ y $\frac{3\pi}{8}$. De este punto las señales pasan a una tercera línea de híbridos de cuadratura. La salida que se desfasa pasa a una tercera línea de permutadores de fase en donde la señal cambiará $\frac{\pi}{16} \frac{3}{16} \frac{5}{16} \frac{7}{16}$, para posteriormente combinarse nuevamente en una tercera etapa de híbridos de cuadratura. Como se ve en este diagrama las señales se van combinando entre sí al pasar por cada una de estas etapas por lo que si alguna señal de entrada no tiene la misma longitud y fase eléctrica que las demás. Al final de estas etapas, el resultado son 16 salidas que dan



Figura 2.3: Diagrama de interconección de una matriz de Butler de 16X16[Sankar and Sureshkumar, 2006].

16 haces diferentes. En la Figura 2.4 muestra una fotografía de la vista superior de la MB de 16X16 del MEXART. A la derecha están las 16 entradas donde se conectan

las señales de las 16 líneas de dipolos. Las cajas plateadas encierran los conmutadores de fase y los híbridos de cuadratura.



Figura 2.4: Vista superior de la Matriz de Butler del MEXART.

Utilizando la ecuación del parámetro β , 2.6 y el programa PCAAD se simuló un arreglo uniforme de 16X16 y se obtuvieron los desfasamientos y direcciones a las cuales apuntan los 16 haces [Carrillo, 2007]. La Tabla 2.1 muestra las fases progresivas (β) , las direcciones (θ_i) (con respecto al cenit del MEXART) a las que en principio se espera que apunten los 16 haces de la MB y los anchos esperados de estos a potencia media. En las Figuras 2.5 y 2.6 se muestran las gráficas de los 16 haces de la MB. Se observa que los haces L son simétricos con los haces R pero apuntan en dirección contraria, por lo que se espera que los haces R apunten hacia el norte y los L hacia el sur, también se observa que los primeros haces tienen dos lóbulos secundarios simetricos alrededor del haz principal, con muy poca ganancia, estos lóbulos secundarios se deforman en cuanto los haces se alejan del cenit. En la Figura 2.6 se observa que los haces L07, L08, R07 v R08 están más deformados v son mas anchos que los otros, por lo que cubren un rango mayor en declinación como se ve en la Tabla 2.1, el tener haces mas anchos aumenta el nivel de confusioón para medir radiofuentes. La Figura 2.7 muestra el patrón de radiación teórico de los 16 haces en coordenadas polares, simulado en C con la ecuación 2.6 esta gráfica es la suma de los haces mostrados en las Figuras 2.5 y 2.6, se observa como se sobreponen los haces a potencia media, por lo que las fuentes que esten en esas declinaciones se observarán con dos lóbulos como se verá mas adelante, también es mas sencilloobserva que se espera que los 16 haces apunten a distintas declinaciones y que los mas externos tengan un ancho mayor (L6, L7, L8, R6, R7 y R8).

Es importante resaltar que los valores obtenidos en esta simulación son considerados el caso ideal; sin embargo, como se verá en el siguiente capítulo, los resultados varían con respecto a los valores esperados.
haz	β	$ heta_i$	Ancho del haz.
L08	168.75°	-79°	61°
L07	146.25	-62	15
L06	123.75	-48	12
L05	101.25	-38	11
L04	78.75	-29	10
L03	56.25	-20	9
L02	33.75	-12	9
L01	11.25	-4	9
R01	-11.25	4	9
R02	-33.75	12	9
R03	-56.25	20	9
R04	-78.75	29	10
R05	-101.25	38	11
R06	-123.75	48	12
R07	-146.25	62	15
R08	-168.75	79	61

Tabla 2.1: Desfasamiento y declinación teórica de los 16 haces de la Matriz de Butler.



Figura 2.5: Patrón de radiación teórico de una Matriz de Butler de 16X16 de los haces L1, L2, L3, L4, R1, R2, R3 y R4



Figura 2.6: Patrón de radiación teórico de una Matriz de Butler de 16X16 de los haces L5, L6, L7, L8, R5, R6, R7 y R8



Figura 2.7: Patrón de radiación teórico de una Matriz de Butler de 16X16

Capítulo 3 Metodología

Esta tesis discute tres diferentes pruebas realizadas por el equipo del MEXART (A. Carrillo, E. Andrade, S. Vázquez y P. sierra). La primera es la medición del flujo galáctico con la línea 8 (64 dipolos) realizada el 15 de mayo de 2007. Para este caso, el montaje del dispositivo de observación es el mostrado en la configuración 1 de la Figura 1.11 del Capítulo 1. La señal captada por las 4 secciones de 16 dipolos, se acopló, filtró, amplificó y combinó en varias etapas hasta llegar al cuarto de control donde finalmente pasó por un atenuador de 9 dB conectado al receptor 0. La segunda prueba es una serie de observaciones utilizando la MB de 16x16 en noviembre de 2007 con el receptor 1, y la tercera es otra serie similar de observaciones con la MB en mayo de 2008 con el receptor 0. Para estas pruebas con la MB el proceso de la señal ya fue descrito en los dos capítulos anteriores, empleando las señales de las primeras 16 líneas de 64 dipolos del MEXART, las cuales se conectaron a las entradas de la MB, como se muestra en la configuración 2 de la Figura 1.11 del capítulo 1. También se presentan los trazos esperados del tránsito de la galaxia por el MEXART, los calculos de sensibilidad y las fuentes que se esperan que pasen por los haces de la MB.

3.1. Patrón de radiación

El patrón de radiación es una representación gráfica de la potencia de radiación de una antena en función de las coordenadas espaciales, típicamente comprende un haz principal y una estructura de haces laterales. Al ser un instrumento de tránsito, el ancho del haz principal determina la duración del tránsito de las radiofuentes. En el caso de un sólo dipolo, su patrón de radiación consiste de un haz muy ancho. Si sumamos en serie el patrón de radiación de varios dipolos alineados, los patrones se suman y resulta en un haz principal que empieza a crecer, mejorando la directividad. En el caso del MEXART, cada línea contiene 64 dipolos polarizados en dirección este-oeste (E-O) y cada línea genera un haz principal apuntando al cenit [Gonzalez et al., 2006]. La Figura 3.1 muestra el patrón de radiación de una línea de 64 dipolos.



Figura 3.1: Patrón de radiación de una línea de 64 dipolos visto en dirección este-oeste (izquierda) y norte-sur(derecha) [Carrillo, 2007].

En la dirección E-O (izquierda) el ancho angular del haz principal es de 1°, por lo mismo, el tránsito de una radio-fuente puntual dura 4 minutos y el del Sol, con un ancho angular de medio grado, es de 8 minutos. Sin embargo, en direción norte-sur (N-S) (derecha) el ancho angular del haz principal mide 120°, por lo que el rango de detección, desde la latitud del MEXART, es desde los -40° hasta los 80°.

Como se describe en capítulo anterior, teóricamente la MB de 16x16 genera un patrón de radiación con 16 haces principales apuntando a 16 diferentes declinaciones en el cielo. La Figura 3.2 muestra un dibujo del patrón de radiación sobre las 16 líneas de dipolos. Este patrón genera 16 lóbulos los cuales apuntan a: $\pm 4^{\circ}$, $\pm 11^{\circ}$, $\pm 18^{\circ}$, $\pm 26^{\circ}$, $\pm 34^{\circ}$, $\pm 43^{\circ}$, $\pm 53^{\circ}$ y $\pm 68^{\circ}$ en dirección N-S (+ para norte,- para sur) alrededor del cenit del MEXART. Esto a su vez corresponde a: -48° , -33° , -23° , -14° , -6° , 2° , 9° , 16° , 24° , 31° , 38° , 46° , 54° , 63° , 73° y 88° alrededor del ecuador celestial. En teoría, los 16 haces apuntan a diferentes latitudes (Figura 2.3 y Tabla 5.1) cubriendo un rango de 139^{\circ} alrededor del cenit del MEXART. La Figura 3.2 muestra el patrón de radiación esperado para una MB de 16X16 puertos.

3.1.1. Sensibilidad

La sensibilidad de un radiotelescopio esta dada por la expresión:

$$\Delta T = \frac{T_{sys}}{\sqrt{B\tau}}$$

Con τ el tiempo de integración y B el ancho de banda y T_{sys} la temperatura del sistema que se calcula como: $T_{sys} = T_{ant} + T_r + T_{sky}$ [Jeyakumar et al., 2007a, Carrillo, 2007].

Para medir la temperatura del sistema se pueden emplear dos métodos. El primero consiste en hacer mediciones con un analizador de espectros [Jeyakumar et al., 2007a, Carrillo, 2007], así el S. Jeyakumar, A. Carrillo y E. Andrade obtuvieron una potencia equivalente $P = 7.9 \times 10^{-1} 6W$. La Potencia de una antena esta relacionada con la temperatura del sistema (T_{sys}) y el ancho de banda del analizador de espectros (B_{rs}) de la siguiente manera:

$$P = kT_{sys}B_{rs}$$

Con lo que obtuvieron una $T_{sys} = 572$ K. Este valor aun esta afectado por las perdidas introducidas por los cables y baluns [Jeyakumar et al., 2007b].

Otra manera de estimar T_{sys} consiste en tomar el valor de la figura de ruido del primer amplificador que contribuye al receptor, en el caso del rev 0 este valor es de 2.9 dB, lo que corresponde a 275 K [Jeyakumar et al., 2007a, Carrillo, 2007]. Para estimar T_{sky} de la figura 3.3 se toma un promedio de temperaturas a lo largo del día. Tomando como promedio 200 K, despreciando la temperatura física de la antena y de la línea de transmisión y considerando una eficiencia de la línea de transmisión unitaria se tiene que $T_{sys} = T_R + T_A = 475K$ [Jeyakumar et al., 2007a, Carrillo, 2007].

S. Jeyakumar desarrolló estimaciones de la sensibilidad del MEXART basado en mediciones con el receptor 0 y el receptor 1. Para una línea de 64 dipolos el flujo mínimo observable sería de 99 Jy y 140 Jy, para 16 líneas de 64 dipolos de 2.5 Jy y 3.6 Jy para cada receptor [Jeyakumar et al., 2005], utilizando los valores reportados en esta tesis (ancho de banda de 2 MHz y 1.5 MHz y tiempos de integración de 10 y 47 milisegundos respectivamente para el receptor 0 y 1) se espera que el flujo mínimo observable sea de 4.6 Jy para el receptor 0 y de 3 Jy para el receptor 1. Los resultados obtenidos durante estas pruebas se presentaran en el siguiente capitulo.

	0 /					
Fuente	A.R.	δ	flujo 3C	relación señal ruido	flujo Culgoora	relación señal uido
	hh:mm:ss	0	[Jy]	teórica rcv $0/rcv1$	[Jy]	teórica rcv0/rcv1
casiopea	23:23:28	58	13000	1444/21667		
cisne	19:59:28	40	8700	1513/2320		
3C123	04:3794	29	204	22/34	247	54/82
cangrejo	05:34:32	22	1500	261/400	1256	218/334
3C033	01:08:51	13	58	10/16	72	12/19
virgo	12:30:50	12	1100	120/183	566	98/151
3C298	14:19:09	6	61	11/16	63	11/17
centauro	13:22:28	-42	800	87/133		

Tabla 3.1: Fuentes de radio detectadas por el MEXART, con los flujos a 175 MH (3C) y a 160 MHz (Culgoora).

3.2. Resultados esperados

3.2.1. Fuentes

La Figura 3.3 es una gráfica de contornos de flujo de radiación del plano Galáctico a 250 MHz captado con el radiotelescópio 96-helix de la Universidad de Ohio [Kraus, 1986]. Los contornos representan distintas temperaturas de brillo (3 K, 5 K, 7 K, 10 K, 15 K, 20 K, 25 K, 30 K, 40 K y 50 K). En el eje horizontal se gráfica la ascensión recta (AR) y en el eje vertical la decinación (δ) de las fuentes de radio. Las fuentes más intensas son las reportadas en la Tabla 3.1, que corresponden a las fuentes del tercer catálogo de Cambridge [De-Mendizabal, 2003] y del observatorio de Culgoora [Slee, 1995] y se reporta la relación señal ruido esperada con los receptores del MEXART. Por su intensidad y fácil identificación, se escogió este grupo de radio-fuentes para caracterizar la respuesta del instrumento y determinar el patrón de radiación de las tres pruebas. Debido a que no todas las fuentes observadas están en el catálogo de Culgoora, las comparaciones se harán con el 3C.

Para una línea de 64 dipolos, donde se tiene un haz muy ancho en la dirección N-S, se espera que centauro y virgo sean observados antes del tránsito del núcleo galáctico, mientras que cisne y casiopea transiten después. La nebulosa del cangrejo está localizada cerca de uno de los brazos de la Galaxia, en donde la temperatura de brillo disminuye de 10 a 7 K.

En el caso de las pruebas con la MB, los registros deben ser diferentes puesto que los haces tienen una mejor directividad. Así se espera que los haces que apuntan entre los 30 y 60° detecten un tránsito del núcleo galáctico sin estructuras y el paso del cisne y casiopea. Mientras que los haces que apuntan entre los 30° y 0°, deberán observar mas estructuras durante el tránsito del Núcleo Galáctico y captando a virgo y la nebulosa del cangrejo. De acuerdo al patrón teórico de la MB (Figura 3.2) y la declinación de las fuentes de mayor flujo (Figura 3.3), se espera entonces que estas fuentes sean captadas por diferentes haces. La Tabla 3.2 indica el ancho angular teórico de los haces de la MB y en qué haces se espera que transiten las fuentes más intensas.

Como primera aproximación para obtener el patrón del tránsito de la galaxia esperado, usando la figura 3.3, las direcciones y los anchos de los haces reportados en el capítulo anterior, se midió la temperatura del radiocielo correspondiente a la declinación de los lóbulos cada 20 minutos en ascención recta, asi al graficar temperatura vs ascensión recta se obtuvieron los patrones de las figuras 3.4 y 3.5 los cuales sirven para comparar con las observaciones.

En las figuras 3.4 y 3.5 se observa que en los lóbulos que apuntan hacia el norte (R's) no se espera el tránsito del Núcleo Galáctico (NG), mientras que en los haces que apuntan hacia el sur (L's), la amplitud de este va aumentando conforme se acerca a la declinación del NG.

En la figura 3.4 se muestran los haces R08, R07, R06, R05 y R01. Se observa una estructura que decrece. Esta estructura es una región a 15 K situada de 55° a 60° que es parte de un brazo espiral de la Galaxia.

En la figura 3.5 se muestran los contornos del tránsito de la galaxia para los haces R. En todos los haces se observan dos contornos, el del núcleo galáctico (entre las 15 y 20 hrs. de tiempo sideral) y el de un brazo de la galaxia (entre las 7 y 10 hrs. de tiempo sideral). Se espera que el tránsito del máximo de la galaxia cambie con el haz, ya que por ejemplo en L08 este ocurre a las 17:30 hrs. y en L01 a las 18:20 hrs. L08 presenta una amplitud mayor ya que es de los haces mas anchos esperados, por lo que integra una mayor área del cielo.

Nótese que, en principio, en los lóbulos L08, L07, L02, R03, R04, R05 y R06 no se esperan tránsitos de fuentes intensas.

3.3. Metodología y Bitácora de Observaciones.

Para tener como referencia el patrón de radiación de una línea de 64 dipolos se caracterizó el patrón de la línea 8 del día 15 de mayo de 2007, con el receptor 0. Esta línea era la mejor calibrada de esa época y por lo mismo se hicieron las primeras observaciones de los filtros pasa altas y pasabandas para mandar datos al Virtual Earth-Sun Observatory (VESO) [Vázquez et al., 2007]. Estas observaciones se repitieron el 28 y 29 de abril de 2009 con la antena 4, ya que después de hacer una prueba en los niveles de las antenas, está resulto tener una respuesta muy parecida a la de la antena 8. La prueba se repitió para tener observaciones sin filtros (28 de abril)

1	1	0	<u></u>
naz	declination °	rango -	ruentes esperadas
R08	88	103 - 73	
R07	73	65 - 81	
R06	63	57 - 69	casiopea
R05	54	48 - 59	casiopea
R04	46	41 - 50	
R03	38	33 - 42	cisne
R02	31	26 - 35	$3C123$, sol \star
R01	24	19 - 28	crangrejo, sol \star
L01	16	11 - 20	crangrejo, virgo, 3C033 sol \star
L02	9	4 - 13	virgo, 3C298, 3C033, sol \star
L03	2	-2 - 6	
L04	-6	-102	
L05	-14	-198	sol★★
L06	-23	-2917	sol★★
L07	-33	-4125	centauro
L08	-48	-6333	centauro

 Tabla 3.2: Declinación, ancho angular y fuentes de radio que se espera transiten por los haces de la MB.

★ noviembre de 2007, declinación de -20
 ★ mayo de 2008, declinación de 20°

y así poder cuantificar la mejora de la sensibilidad del instrumento. Se decidió usar la antena 4 ya que la 8 es la que se utiliza como referencia.

Las primera prueba de la MB se realizó en los meses de noviembre-diciembre de 2007 (del 18 de noviembre al 4 de diciembre). Para esta serie de pruebas no se utilizó el switch seleccionador por la salida correspondiente de la MB se conectó directo al receptor 1 con un atenuador de 14 dB's. Antes de iniciar estas mediciones, se realizó el ajuste de la fase eléctrica de los cables coaxiales de las 16 líneas que alimentan a la MB y se colocaron los filtros pasa altas y pasabandas construidos por el INAOE [Sierra et al., 2007].

La segunda prueba de la MB se realizó en los meses de mayo-junio de 2008 con el receptor 0. Antes de las mediciones, se volvieron a ajustar las fases eléctricas de los cables, pero ahora tomando en cuenta los filtros [Vázquez et al., 2008]. Esta prueba consistió, al igual que la anterior, en conectar las primeras 16 líneas de la antena a la MB, pero a diferencia de noviembre, la salida de la MB se conectó a un switch análogico [Baez-Ordaz, 2008]. El switch selecciona la salida de la MB (L08, L07,...R08) y la lleva a el receptor (figura 1.11). Para estas mediciones se utilizó un atenuador de 12 dB's.

El objetivo de las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008 fue caracterizar el patrón de radiación de la MB de 16x16. La Tabla 3.3 presenta la bitácora de observaciones para las dos pruebas de la MB. Cada haz se observó en un día distinto. En el siguiente capítulo se presentan los resultados.

 Tabla 3.3: Tabla de los días de observaciones de la MB durante las pruebas de noviembre de 2007 y mayo 2008.

Haz	observación	observación
L08	2007-11-26	2008-05-29
L07	2007 - 11 - 25	2008-05-30
L06	2007-11-23	2008-05-16
L05	2007 - 11 - 24	2008-06-5
L04	2007 - 11 - 22	2008-06-3
L03	2007 - 11 - 21	2008-05-26
L02	2007-11-20	2008-05-24
L01	2007-11-18	2008-05-14
R01	2007-11-27	2008-05-13
R02	2007-11-28	2008-05-15
R03	2007-11-29	2008-05-19
R04	2007-11-30	2008-05-17
R05	2007-12-01	2008-05-20
R06	2007-12-02	2008-05-21
R07	2007-12-03	2008-05-22
R08	2007 - 12 - 04	2008-05-23



Figura 3.2: Dirección en la que apuntan los haces de la MB de 16X16 puertos con referencia a la antena [Carrillo, 2007].



Figura 3.3: Mapa del Cielo en Radio donde se muestran las fuentes de radio más intensas y su ascención recta (eje horizontal) [John D. krauss, 1986]. El MEXART tiene una latitud de 19° 48'.



Figura 3.4: Patrones esperados del tránsito de la galaxia usando las mediciones de la figura 3.3 para los lóbulos R de la MB.



Figura 3.5: Patrones esperados del tránsito de la galaxia usando las mediciones de la figura 3.3 para los lóblos L de la MB.

Capítulo 4

Análisis de radio-fuentes, pruebas de la Matriz de Butler.

La aplicación de la Matriz de Butler (MB) de 16x16 puertos en el arreglo del ME-XART genera un abanico de haces que permiten observar simultáneamente a 16 diferentes declinaciones en el cielo. El objetivo de este capítulo es caracterizar el patrón de radiación de esta MB mediante el estudio de las primeras pruebas. Para ello, se van a analizar y comparar las mediciones de tres diferentes configuraciones: una sola línea de 64 dipolos en mayo de 2007; y dos series de pruebas de la MB, una realizada en noviembre de 2007 y la otra en mayo de 2008. Los patrones de radiación teóricos de estas configuraciones se van a contrastar con las observaciones de los tránsitos de las radio-fuentes estelares de mayor flujo. Estos también se compararán con los patrones simulados tomando desfases aleatorios en las antenas. Este método se aplicó anteriormente para caracterizar el patrón de radiación de diferentes líneas de 64 dipolos del MEXART, comprobando si la respuesta de cada línea tenía la misma amplitud y fase [Villanueva, 2008].

4.1. Caracterización de la fuentes

Para reportar las observaciones se necesita tener parámetros de medición. A continución se muestran los parámetros medidos para comparar con los resultados del capítulo anterior.

4.2. RMS

Para calcular este parámetro, se tomaron datos un minuto antes y después del tránsito de cada fuente. El valor de sigma se calcula para cada fuente, con el método descrito en el cápitulo 1 y se observa que este varía de una fuente a otra como se observa en la tabla 4.1, dependiendo de la temperatura del cielo y las condiciones del instrumento. En promedio, en mayo de 2007 se obtuvo un valor de sigma de alrededor de 0.040 V, en noviembre de 2007 de 0.014 V y en mayo de 0.024 V. Para las observaciones de abril de 2009 se obtuvo un rms de 0.9 V en promedio sin el uso de filtros y de 0.04 V usando filtros. Es importante resaltar que las tres pruebas tienen diferentes configuraciones donde se emplearon diferentes receptores y atenuaciones, por lo que la comparación de los datos debe hacerse con cuidado.

Tabla 4.1: Medición de sigma de las radiofuentes							
fuente	antena 8	noviembre 2007	mayo 2008				
casiopea	0.032	0.010	0.018				
cisne	0.034	0.012	0.024				
3C123	0.032	0.012	0.023				
nebulosa del cangrejo	0.035	0.10	0.024				
3C033		0.13	0.023				
virgo	0.034	0.011	0.025				
3C298		0.012	0.025				
centauro	0.034	0.10	0.024				
Sol	0.020	0.020	0.026				

4.2.1. Medición de amplitud de las fuentes

Es necesario caracterizar las fuentes de radio, para cada una de las tres pruebas. El primer método consiste en medir la amplitud de voltaje obtenidos de los datos capturados por la tarjeta adquisidora. Respectivamente para cada prueba, a partir del nivel base de los registros (i.e., antes del paso de la fuente y después del paso se tomaron los valores de voltaje donde no hubiera fluctuaciones muy grandes y se calculo el promedio), se midió el voltaje (V_o) del tránsito de las fuentes. Así se obtuvo el valor para la línea de 64 dipolos, y el de todos los haces de la MB (Figuras 4.2, 4.4 y 4.5 del Capítulo 3).

Nótese que el resultado de V_o varía para cada prueba. El valor de la amplitud máxima para cada una de las tres pruebas lo llamamos V_1 y por definición la amplitud será V_1 - V_o correspondiente a cada prueba.



Figura 4.1: Registros del tránsito de la nebulosa del cangrejo en tres pruebas diferentes. (a) Una línea de 64 dipolos (antena 8 / mayo-2007 / receptor 0). (b) Pruebas de la MB en Noviembre-2007 (haz R01 / receptor 1). (c) Pruebas de la MB en Mayo-2008 (haz L02 / receptor 0).

La Figura 4.1 muestra los registros de los tránsitos de mayor ganancia de la nebulosa del cangrejo (V_1) en las tres configuraciones. La primer gráfica corresponde a la observación de una línea de 64 dipolos en mayo-2007, la segunda a las observaciones con la MB en noviembre-2007, y la tercera a las observaciones con la MB en mayo-2008. El trazo de la nebulosa es distinto en cada prueba y el rms también. La línea vertical es la representación gráfica de la amplitud de la fuente. Como es de esperarse, con una línea de 64 dipolos la ganancia en sigmas es menor que el obtenido en las pruebas de la MB. El registro de noviembre-2007 muestra interferencias de satélites durante el tránsito de la nebulosa.

4.3. Línea de 64 dipolos

En mayo de 2007 se desarrollaron una serie de observaciones con líneas individuales de 64 dipolos y se hicieron los primero ajustes de longitud eléctrica de los cables coaxiales, además de que se corrigió las soldaduras en las líneas de transmisión [Vázquez et al., 2007, Sierra et al., 2007]. La observación del 15 de Mayo del 2007 corresponde a la línea 8, captada con el receptor 0, con una atenuación de 9 dB en RF. La línea 8 tenía ya implementada el bloque de los 4 filtros pasa-altas y un filtro pasa-bajas [Selvanayagam, 2006]. Teóricamente esta línea tiene un haz central que apunta al cenit, con un ancho angular de 1 grado en dirección E-O y 139 grados en dirección N-S. Entre las fuentes de radio estelares mas intensas que debe captar este haz se encuentran: virgo, centauro A, hercules A, sagitario A, 3C390.5, 3C392, 3CR400, cisne A, cisne X, casiopea A, nebulosa de cangrejo, 3C157 e Hidra. Estas radio-fuentes cubren un rango en 100 grados en declinación (de -42° a los 58°).

La Figura 4.2 muestra el registro del tránsito de la Galaxia en tiempo sideral local



Figura 4.2: Registro del tránsito de la Galaxia y las fuentes más intensas captadas a 140 MHz con una línea de 64 dipolos (Antena 8) el 15 de mayo de 2007.

captado por la línea 8. Se observan las fuentes de mayor flujo, las cuales son fáciles de reconocer por su ascención recta debido a que el eje horizontal tiene el mismo formato que la Figura 3.3 (El tiempo sideral es el tiempo medido por el movimiento aparente del equinoccio vernal con respecto a las estrellas, este es muy parecido, mas no idéntico al movimiento de las estrellas o ascención recta, debido a la preseción de la tierra [Kraus, 1986]). El tránsito del Núcleo de la Galaxia (NG) se caracteriza por el notable incremento en el flujo de radiación captado entre las 17:00 y las 21:00 horas de tiempo sideral local. La nebulosa del cangrejo se localiza en el brazo de la Galaxia. En mayo, el Sol alcanza su mayor altitud en el observatorio y el día 15 transita muy cerca del cenit del MEXART (-4°) con una a.r. de 3 horas y 12 minutos.

El 28 y 29 de abril de 2009 se hicierón mediciones con una línea de 64 dipolos

para hacer comparaciones de la respuesta del arreglo utilizando los filtros pasa-altas y pasa-bandas. En las observaciones del 28 de abril la configuración es la descrita en el cápitulo anterior pero sin el uso de los filtros, estos se volvieron a colocar para la prueba del 29 de abril.



Figura 4.3: Observaciones del 28 y 29 de abril de 2009 con una línea de 64 dipolos, utilizando filtros pasa-altas y pasa-bandas (29 de abril, panel superior) y sin filtros (28 de abril, panel inferior)).

En la figura 4.3 en el panel inferior (observaciones sin filtros) se observan mas tránsitos de interferencias y casi no se definen los trazos del núcleo de la galaxia y de las radio-fuentes, ya que como se explicó en el capítulo anterior la señal se satura cuando llega a los amplificadores por lo que el rms aumenta y las fuentes con flujos bajos no se captan, el uso de los filtros corrigen este problema ya que se observa que el rms disminuye haciendo que los trazos de las radio-fuentes se distingan más, por lo que para hacer observaciones con la MB se necesita usar filtros. Ambas observaciones se realizaron con el receptor 1 y con una atenución de 16 dB's en IF y se obtuvieron los siguientes datos:

En la tabla 4.2 se observa que la amplitud en rms aumenta para las fuentes de flujo mayor, debido a que el rms disminuye con el uso de filtros. También aumenta el número de fuentes observadas, aunque las fuentes pequeñas como 3C033 y 3C298 no se observan. En la Figura 4.3 se observan también muchas interferencias, sobre todo entre las 4 y las 9 hrs. esto se debe a que ese día hubo tormentas eléctricas por lo

Fuente	$\delta(^{\circ})$	Prueba sin filtros (rms	Prueba con filtros
		normalizado)	(rms normalizado)
casiopea	58°	22.67	245.55
cisne	40°	10.76	138.13
3c123	29°	N/D	2.00
nebulosa cangrejo	22°	N/D	49.00
Sol	20°	5.65	253.50
3c033	$13~^\circ$	N/D	N/D
virgo 12° N/D		40.00	
3c298	$(6^{\circ}$	N/D	N/D
centauro -42°		N/D	33.00

Tabla 4.2: Flujo de fuentes intensas normalizados a unidades de rms obtenidas con la línea 4 el 28 de abril de 2009 (sin filtros) y el 29 de abril de 2009 (Con filtros).

que estas líneas que saturan las mediciones son rayos cayendo cerca del MEXART.

4.4. Matriz de Butler

Ahora vamos a describir las dos pruebas de la MB de 16x16 puertos. La MB genera 16 haces que se dividen en dos conjuntos de 8 elementos: L y R. La primera prueba se realizó con una serie de observaciones en noviembre-2007. Antes de iniciar estas mediciones, se terminaron los ajustes de las longitudes eléctricas de las líneas de transmisón de las primeras 16 líneas de 64 dipolos de la antena y se les implementaron los bloques de filtros pasa-altas y pasa-bandas entregados por el INAOE en octubre de 2007. Las mediciones se realizaron con el receptor 1, con una atenuación de 14 dB y empleando el switch selector (-3 dB) antes del receptor. La segunda prueba se realizó en una serie de observaciones en mayo-2008, con el receptor 0, una atenuación de 12 dB y sin el switch selector. Para esta segunda prueba de la MB, se había corregido la fase eléctrica de las líneas de transmisión tomando en cuenta los filtros pasa-altas y pasa-bandas, y se implementó un nuevo sistema de alimentación para los amplificadores [Vázquez et al., 2008]. Con estas correcciones se esperaba empatar la amplitud y fase de cada una de las 16 líneas que alimentan la MB y con ello mejorar la directividad de los 16 haces.



Figura 4.4: Tránsito de la Galaxia por los lóbulos L de la MB contra tiempo sideral local (TSL): (arriba) pruebas desarrolladas en noviembre de 2007; (abajo) pruebas de mayo de 2008.

4.4.1. Haces L

Como se mencionó previamente, en mayo el Sol transita muy cerca del cenit; sin embargo, en noviembre este transita con una altitud de -45° y una AR de 15:25. La Figura 4.4 muestra los registros del tránsito de la Galaxia y del Sol captados por los haces L del MEXART durante la pruebas de la MB en noviembre-2007 y mayo-2008. Aunque cada observación se realizó en días diferentes, los registros están graficados en tiempo sideral local (TSL), lo cual permite identificar fácilmente las radio-fuentes por su AR. Comparando la respuesta de cada uno de los haces L, se puede notar que los trazos de las integraciones de flujo en noviembre-2007 y mayo-2008 son similares. Sin embargo, también se observan claras diferencias. A continuación se discute la respuesta de cada uno de los haces L durante las dos pruebas.

L1

Los perfiles de L1 en las dos pruebas son parecidos; aunque, como ya se comentó anteriormente, la altitud y la AR del Sol fue distinta en cada prueba. En noviembre-2007 el Sol apareció antes del tránsito del NG y en mayo-2008 después de casiopea. En general el flujo integrado también cambia, ya que se detectó con mayor ganancia en mayo-2008. Los perfiles del NG fueron parecidos, aunque en noviembre-2007 se captaron más interferencias. En noviembre-2007, se observa que el inicio de la prueba fue después de las 20:00 TSL, mientras que en mayo-2008 fue después de las 8:00 TSL. En ambas pruebas se registró bien casiopea, pero en mayo-2008 ésta se captó con mayor ganancia. El cisne apareció con muy poca ganancia en las dos pruebas. 3C123 no se detectó en noviembre-2007, pero si en mayo-2008, aunque con muy poco flujo. La nebulosa del cangrejo apareció en ambos registros con ganancia similar. 3C033 no se detectó en noviembre-2007. 3C298 no se detectó en ninguna de las dos pruebas. Centauro se captó con mejor ganancia en noviembre-2007, en ambos casos el transito del perfil es parecido al esperado.

$\mathbf{L2}$

El perfil de las dos gráficas de este haz es muy parecido al momento del tránsito del NG, donde el máximo se registró a las 18:30 en TSL. En ambos registros se observan interferencias en el tránsito de virgo y antes de casiopea; sin embargo, en noviembre-2007 éstas se detectaron con mayor frecuencia. En la gráfica de noviembre-2007, el inicio de la prueba es después de las 20:00 TSL, y en mayo-2008 después de las 8:00 TSL. En la prueba de mayo-2008, el Sol y casiopea se captaron con

mayor ganancia. Para casiopea el perfil de ambas pruebas es parecido y se presentan lóbulos secundarios a la entrada y salida de la misma. El cisne se detectó con una mayor ganancia en mayo-2008 al igual que 3C123. La Nebulosa del cangrejo también se captó mejor en mayo-2008 y su perfil es distinto al de noviembre-2007, ya que en el primer caso se presenta un lóbulo secundario antes del tránsito de la fuente. Paradojicamente, aunque su diferencia en declinación es de apenas un grado, 3C033 se detectó mejor en mayo-2008 y virgo en noviembre-2007. En ninguno de los dos registros de L2 se detectó 3C298, ni centauro, los tránsitos también son parecidos al esperado.

L3

Este haz presenta uno de los perfiles mas singulares del NG. El pico de máxima ganancia está localizado justo en Sagitario en el centro de la Galaxia. Nótese que el perfil fue distinto en las dos pruebas, ya que en noviembre-2007 se observó que después de sagitario (17:45 LST), hay una estructura que se captó con mayor ganancia (0.45 V) en mayo-2008. El Sol se detectó con mayor ganancia en noviembre-2007 y en ambos perfiles se aprecia un lóbulo secundario después de su tránsito. Casiopea se detectó mejor en mayo-2008. En ambas observaciones de L3 se detectó cisne A. 3C123 se captó en noviembre-2007 y no en mayo-2008. La nebulosa del cangrejo no se registró en mayo-2008 y la poca ganancia del mismo Sol en esa prueba nos indican que L3 no apunta hacia el cenit del MEXART. En ninguna de la dos pruebas se detectó a centauro A, debido al transito de sagitario en las observaciones de noviembre-2007 el tránsito es distinto al esperado, mientras que en mayo-2008 aparece otra estructura a las 20:00 hrs. que la hace también diferente.

$\mathbf{L4}$

Al igual que en L3, los perfiles del NG son diferentes, ya que el máximo en noviembre-2007 fue a las 18:10 TSL y en mayo-2008 a las 18:00 TSL. En noviembre-2007 el NG presenta solo un pico, pero en mayo-2008 son dos y al igual que en L3 se observó otra estructura una hora después del tránsito del máximo. En ambas observaciones, el Sol fue la fuente mas intensa, y en mayo-2008 se detectó con mayor ganancia. Casiopea y el cisne se observaron en ambas pruebas, pero se detectaron con mas ganancia en mayo-2008. 3C123, la nebulosa del cangrejo y 3C033 solamente se captaron en mayo-2008. Virgo se detectó en ambas pruebas con casi la misma amplitud y con el mismo patrón. 3C298 se observó mejor en mayo-2008. Finalmente, centauro A solo se registró en las observaciones de mayo-2008, el patrón de noviembre-2007 es más parecido al teórico que el de mayo-2008 ya que en mayo aparece un pico a las 19:00 hrs.

L5

El trazo del NG es similar en ambas pruebas, pero en noviembre-2007 el tránsito del máximo fue a las 17:00 TSL, mientras que en mayo-2008 ocurrió a las 18:00 TSL. Hay un gap en los datos de mayo-2008, por lo no se captaron datos de virgo ni centauro. En ambas pruebas, la ganancia del tránsito del Sol es menor que en L4. Casiopea se detectó con mayor ganancia en noviembre-2007. Pese a que su amplitud es muy pequeña, el cisne se registró mejor en mayo-2008. 3C123 se detectó mejor en noviembre-2007. La nebulosa del cangrejo y 3C033 se captaron mejor en mayo-2008. Para poder caracterizar virgo y centauro se utilizaron los datos del 6 de junio de 2008, que corresponden a observaciones de L5 con la misma configuración. Basado en esto, Virgo tuvo mayor ganancia en las pruebas de mayo-2008 y Centauro A solamente se detectó en noviembre-2007. 3C298 no se detectó en ninguna de las dos pruebas, ninguno de los tránsitos de estas pruebas se parece al perfil esperado ya que presentan un pico a las 19 hrs.

L6

Los perfiles del NG son parecidos pero difieren en las estructuras del máximo. La ganancia del Sol fue mayor en noviembre-2007. Casiopea se detectó mejor en noviembre-2007. El cisne se detectó mejor en mayo-2008. 3C123 se observó con la misma amplitud en ambas pruebas, aunque en mayo-2008 hay muchas interferencias alrededor del tránsito de la fuente. La nebulosa del cangrejo se observó mejor en noviembre-2007. 3C298 no se observó en ninguna prueba. Centauro A se detectó con la misma ganancia en las dos pruebas. Teóricamente se espera la amplitud del núcleo de la galaxia se mayor al observado.

L7

El perfil del NG es similar en ambas observaciones. El tránsito del Sol tuve mayor ganancia en noviembre-2007. Casiopea y cisne se detectaron mejor en noviembre-2007. 3C123 no se observó en ninguna de las dos pruebas. La nebulosa del cangrejo y 3C033 solamente se detectaron en noviembre-2007. 3C298 no se observa en ninguna de las dos pruebas y centauro solo se observó en los registros de mayo-2008. Ambos casos presentan un perfil distinto al esperado ya que presenta un máximo a las 19:00 hrs.

$\mathbf{L8}$

El perfil del NG es similar en ambas observaciones. El tránsito del Sol se detectó mejor en mayo-2008. Casiopea se observó con la misma amplitud y perfil en las dos pruebas. Cisne se detectó mejor en noviembre-2007. 3C123 no apareció en las observaciones de noviembre-2007. La nebulosa del cangrejo se detectó con mayor amplitud en mayo-2008. 3C033 no se detectó en noviembre-2007. Virgo se detectó mejor en mayo-2008, pero tiene el mismo perfil en ambas pruebas. 3C298 no se detectó en ninguna de las dos pruebas y centauro se detectó mejor en mayo-2008. L08 es el haz más ancho (61°) por lo que se espera que integre más área del radio cielo y que el tránsito del NG tarde 5 horas, en ambos registros pasa esto.

4.4.2. Haces R

La Figura 4.5 muestra los registros del tránsito de la Galaxia y del Sol captados por los haces R del MEXART durante la pruebas de la MB en noviembre-2007 y mayo-2008. Como en la Figura anterior, cada observación se realizó en días diferentes, pero los registros están graficados en tiempo sideral local (TSL). A continuación se discute la respuesta de cada uno de los haces R durante las dos pruebas.

$\mathbf{R1}$

Los dos perfiles del tránsito del NG son similares, pero en noviembre-2007 el máximo fue más agudo y definido aunque en ambos casos se tiene un patrón muy parecido al teórico pero con una amplitud mayor. La ganancia del tránsito solar fue mayor en noviembre-2007 y también se detectaron más lóbulos secundarios antes y después del Sol. Cisne solamente se detectó en mayo-2008. 3C123 se captó mejor en noviembre-2007. La nebulosa del cangrejo se detectó con la misma amplitud en ambas pruebas. 3C033 y virgo sólo se detectaron en mayo-2008. 3C298 se observó en ambas pruebas pero se detectó mejor en mayo-2008. Centauro no apareció en ninguna de las dos pruebas.

$\mathbf{R2}$

Los perfiles del NG son muy distintos para este haz. De hecho en noviembre-2007 el contorno se nota deformado y con un gap de datos de las 23:00 a las 5:00 TSL. En ambas pruebas se detectó el tránsito del Sol, el perfil es el mismo pero tuvo mayor ganancia en mayo-2008. Cisne se observó con más ganancia en mayo-2008. 3C123 sólo se detectó en mayo-2008. La nebulosa del cangrejo apareció en ambas



Figura 4.5: Tránsito de la galaxia por los lóbulos R de la MB, el panel superior corresponde a las observaciones de noviembre del 2007 (rcv. 1) y el panel inferior a las de mayo de 2008 (rcv. 0).

pruebas con una amplitud pequeña. 3C033 y 3C298 sólo aparecieron en mayo-2008. Virgo sólo apareció en noviembre-2007. Centauro se detectó en ambas pruebas con la misma amplitud.

$\mathbf{R3}$

El perfil del NG es distinto para ambas pruebas, ya que en noviembre-2007 se detectaron dos picos e interferencias entre las 20:00 y 22:00 de TLS. El tránsito del Sol tuvo la misma amplitud en las dos mediciones, pero su perfil es distinto ya que en mayo-2008 se observaron lóbulos secundarios antes y después del tránsito solar. Casiopea sólo apareció en los registros de mayo-2008. Cisne aparece en ambas pruebas, pero el perfil de la fuente fue distinto, se captó con mayor ganancia en mayo-2008 y se observarón lóbulos secundarios en noviembre-2007. 3C123, 3C033 y 3C298 no se detectaron en ninguna de las dos pruebas. La Nebulosa del Cangrejo apareció en ambas pruebas con el mismo perfil, pero tuvo mayor ganancia en mayo-2008. Finalmente, Centauro sólo se detectó en mayo-2008.

$\mathbf{R4}$

El perfil del NG aparece diferente en noviembre-2007, posiblemente porque el tránsito del Sol esta muy cerca del máximo galáctico. Casiopea apareció muy tenue en ambos registros. Cisne se observó en ambas pruebas con el mismo perfil, pero se detectó mejor en mayo-2008. 3C123 se captó en las dos pruebas y entró con más ganancia en noviembre-2007. La nebulosa del cangrejo y 3C298 sólo se observaron en las pruebas de noviembre-2007, mientras que 3C033 sólo se detectó en mayo-2008. Virgo y centauro aparecieron en las dos pruebas.

$\mathbf{R5}$

El perfil del tránsito del Núcleo Galáctico es muy parecido en ambas mediciones, pero ambos casos difieren del esperado ya que a partir de este haz no se espera detectar el tránsito del NG. En ambos se capta el Sol con el mismo patrón con la misma amplitud pero en noviembre se captó con mayor ganancia que en mayo. Casiopea se capta en las dos pruebas pero es en e mayo en que la fuente tiene mayor amplitud. Cisne aparece en ambas observaciones con el mismo perfil y la misma amplitud. 3C123 y La nebulosa del cangrejo solo aparecen en los datos de noviembre con amplitudes muy pequeñas. 3C033 no apareció en ninguna de las pruebas de este haz. Virgo se observo con poca ganancia y el mismo perfil en ambas pruebas, pero la mayor amplitud se registró en mayo. 3C298 no se registro en noviembre pero si en mayo. Centauro sólo apareció en los datos de noviembre.

$\mathbf{R6}$

Cualitativamente, el perfil del NG es el mismo en las dos pruebas. En ambos casos apareció el Sol con el mismo perfil. Casiopea se registró mejor en mayo-2008. El perfil y la amplitud de cisne fue la misma en las dos pruebas. 3C123, 3C033 y 3C298 sólo se detectaron en mayo-2008, mientras que en el caso de la nebulosa del cangrejo sólo fue en noviembre-2007. En ambas pruebas aparece virgo, pero en mayo-2008 tuvo más ganancia. Centauro apareció en las dos observaciones, pero en mayo tuvo mayor amplitud.

$\mathbf{R7}$

El perfil del NG es similar. Sin embargo, el tránsito del Sol fue distinto en ambos casos: en noviembre-2007 se captó un lóbulo secundario antes y en mayo-2008 fue después del tránsito solar. Casiopea, cisne y la nebulosa del cangrejo se observaron en ambas pruebas, pero en mayo-2008 tuvieron más ganancia. Virgo apareció en ambos registros con el mismo perfil y amplitud. 3C123, 3C033, 3C298 y centauro no se detectaron en ninguna de las dos pruebas.

$\mathbf{R8}$

Nuevamente, el perfil del NG es cualitativamente el mismo. El Sol apareció en ambas pruebas con el mismo perfil, pero se captó mejor en mayo-2008. Casiopea apareció en ambos registros, sin embargo, su perfil fue distinto ya que mientras en noviembre-2007 aparecieron dos lóbulos secundarios alrededor de la casiopea, en mayo-2008 sólo apareció uno después del tránsito de la fuente. Cisne y virgo aparecieron en las dos pruebas, pero se detectaron mejor en mayo-2008. 3C123, la nebulosa del cangrejo y 3C033 sólo aparecieron en las observaciones de mayo-2008. 3C298 y centauro no fueron detectados en estas pruebas.

4.5. Análisis

Como se puede observar en las dos figuras anteriores, los trazos de la Galaxia de cada haz obtenidos en noviembre de 2007 y mayo de 2008 son similares. Sin embargo, se detectaron más fuentes pequeñas en las pruebas de mayo-2008 [Mejía-Ambirz, 2009]. Lo que indica que el mantenimiento que se le dió a la antena corrigió algunos

1/1 1		•	9/109		0,0000	· •	2/2000	
lobulo	casiopea	cisne	3C123	crangrejo	3C033	virgo A	3C298	centauro A
L08	357.13	106.75	N/D	57.34	N/D	15.25	N/D	17.08
L07	55.45	140.30	N/D	57.34	3.75	34.57	N/D	N/D
L06	185.22	7.12	9.15	32.94	N/D	26.43	N/D	56.12
L05	135.31	18.30	15.25	41.48	2.82	3.05	N/D	136.64
L04	100.93	245.02	N/D	8.54	N/D	25.42	1.02	4.88
L03	9.98	364.98	30.50	8.54	0.94	25.42	N/D	N/D
L02	237.35	15.25	10.17	36.6	N/D	35.58	N/D	N/D
L01	328.29	17.28	N/D	59.78	N/D	17.28	N/D	9.76
R01	258.42	N/D	30.50	122.00	N/D	11.18	N/D	N/D
R02	N/D	110.82	N/D	4.88	N/D	25.42	N/D	79.30
R03	N/D	246.03	N/D	4.88	N/D	45.75	N/D	N/D
R04	22.18	143.35	6.10	4.88	N/D	34.57	N/D	30.50
R05	31.05	113.87	6.10	9.76	N/D	7.12	N/D	25.62
R06	46.58	328.38	N/D	20.74	N/D	4.07	N/D	13.42
R07	23.29	38.63	N/D	14.64	N/D	36.60	N/D	N/D
R08	79.85	96.58	N/D	N/D	N/D	20.33	N/D	N/D

Tabla 4.3: Flujo de las fuentes de radio más intensas en unidades de sigma (N/D significa que la fuente no se detectó). Observaciones de noviembre de 2007. Observaciones MB noviembre 2007

Observaciones MB mayo 2008								
lóbulo	casiopea	cisne	3C123	crangrejo	3C033	virgo	3C298	centauroA
L08	174.00	10.88	9.83	29.00	N/D	10.44	N/D	1.09
L07	13.53	5.44	3.03	6.53	3.03	4.18	N/D	1.60
L06	7.25	13.78	N/D	N/D	N/D	20.88	N/D	0.11
L05	4.83	29.00	2.27	3.63	2.27	6.96	N/D	N/D
L04	62.83	177.63	3.03	1.45	3.03	10.44	1.74	N/D
L03	19.33	203.00	N/D	N/D	N/D	13.92	3.48	N/D
L02	261.00	10.88	1.89	36.25	1.89	3.48	3.13	N/D
L01	241.67	32.63	4.16	14.5	4.16	3.48	1.39	0.36
R01	164.33	39.88	4.92	32.63	4.92	N/D	1.39	0.36
R02	140.17	50.75	7.19	18.13	7.19	N/D	1.04	1.81
R03	48.33	130.5	N/D	3.63	N/D	31.32	N/D	1.09
R04	38.67	141.38	1.13	N/D	1.13	3.48	1.39	1.09
R05	111.17	39.88	N/D	N/D	N/D	13.92	2.09	N/D
R06	101.5	126.88	5.67	N/D	5.67	10.44	1.74	1.45
R07	62.83	47.13	N/D	29.00	N/D	10.44	N/D	N/D
R08	67.67	90.63	3.40	10.88	3.40	31.32	N/D	N/D

Tabla 4.4: Flujo de las fuentes de radio más intensas en unidades de cangrejo (N/D significa que la fuente no se detectó). Observaciones de mayo de 2008.

problemas en las etapas de amplificación, lo cual aumento su ganancia. Como es de esperarse, cada haz presenta un trazo diferente de la Galaxia. Sin embargo, es muy notorio que aparecieron radio-fuentes no esperadas en los registros de algunos haces (por ejemplo, casiopea no debería ser detectada por L08 y L01 que apuntan hacia el sur). Esto indica que algunos los haces no tienen la respuesta esperada. Por otro lado, estas primeras pruebas nos permiten determinar con qué haces se pueden observar mejor en determinada declinación.

A continuación se presenta un serie de histogramas para comparar la respuesta de los 16 haces con el tránsito de cada una de las fuentes según los datos de las Tablas 4.3 y 4.4. Las fuentes se discuten en orden de declinación.



Figura 4.6: Tránsito de casiopea (58°) en los 16 haces de la MB para las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008.

La Figura 4.6 muestra la respuesta de los 16 haces al tránsito de casiopea en las dos pruebas de la MB. Basados en el catálogo 3C (Tabla 3.1), casiopea (58°) debería observarse con una ganancia de aproximadamente 2167 sigmas para rcv 1 y 1413 para el rcv 0; y solamente debería detectarse en R06 y R05 (Tabla 3.2). Sin embargo, en noviembre-2007, contrario a lo que esperábamos, el haz que mejor detectó a casiopea fue L08 y en mayo-2008 fue L02. En noviembre-2007 se presenta una tendencia donde casiopea se detectó mejor con los haces L's; sin embargo, en mayo-2008 la tendencia se invierte y se detecta mas con los haces R's. En general, las ganancias en cangrejos son menores a lo esperado.

La Figura 4.7 muestra los tránsitos de cisne (40°) en los 16 haces. Basados en el catálogo 3C (Tabla 3.1), cisne debería observarse con una ganancia de aproximadamente 2320 sigmas para rcv 1 y 1613 para el rcv 0; y solamente debería detectarse



Figura 4.7: Tránsitos de cisne (40°) por los 16 haces de la MB durante noviembre-2007 y mayo-2008.

en R03 y R04 (Tabla 3.2). Nuevamente, contrario a lo esperado, en ambas pruebas el haz que mejor detecta esta fuente es L03 y en ambos casos se aprecia una respuesta bimodal, con un pico en los L's y otro en los R's. También se aprecian unas zonas "ciegas" alrededor de R01, L01 y L02. En mayo-2008 la ganancia de L03 se aproximó mucho al valor esperado según el catálogo 3C.



Figura 4.8: Tránsitos de 3C123 (29°) por los 16 haces de la MB, durante las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008.

La Figura 4.8 muestra los tránsitos de 3C123 (29°) en los 16 haces. Según la Tabla 3.1, basados en el catálogo 3C (Tabla 3.1), 3C123 debería observarse con una ganancia de aproximadamente 133 sigas para el rcv 1 y 22 para el rcv 0; y solamente debería detectarse en R02 y R01 (Tabla 3.2). Sin embargo, la fuente se observó mejor

en noviembre-2007 con L03 y en mayo-2008 con L08. Esto difiere significativamente a lo esperado, ya que por su latitud se esperaría que se observara mejor con los haces centrales. En mayo-2008 mejoró la respuesta del radiotelescopio, ya que 3C123 se detectó en mas haces. En mayo-2008 no se detectó con L07, L03, R03, R05 y R07; mientras que en noviembre-2007 tampoco se detectó en L08, L07, L04, L01, R02, R03, R06, R07 y R08. En las dos pruebas, la ganancia en cangrejos está por arriba del valor esperado



Figura 4.9: Tránsitos de la nebulosa del cangrejo (22°) por los 16 haces de la MB durante las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008.

La nebulosa del cangrejo (22°) es la fuente de radio intensa cercana al cenit del MEXART, por lo que se espera que los haces que deberían detectarla mejor fueran los centrales. La ganancia esperada para esta fuente es de 400 sigmas con rcv 1 y 261 para el rcv 0; y según la Tabla 3.2, solamente debería detectarse en R01 y L01. En noviembre-2007 se cumplió con la expectativa, pues como se muestra en la Figura 4.9, R01 fue el haz que mejor la captó. Como sucedió con 3C123, la fuente también se observó con lóbulos L's. En mayo-2008, el haz que mejor observó al cangrejo fue L02. Cómo esperaríamos, el cangrejo se observó en la mayoría de los haces que detectaron 3C123. Paradojicamente, en mayo-2008 los haces que están apuntando más hacia el norte y al sur (L8 y R7) también detectaron al cangrejo.

La Figura 4.10 muestra las ganancias en cangrejos de los tránsitos de 3C033 (13°) por los 16 haces. Basados en el catálogo 3C (Tabla 3.1), 3C033 debería observarse con una ganancia de aproximadamente de 16 sigmas con rcv 1 y 10 con rcv 0; y solamente debería detectarse en L01 y L02 (Tabla 3.2). En las pruebas de noviembre-2007, 3C033 solamente se observó en tres haces: L03, L05 y L07. En las observaciones de mayo-2008, aumentó el número de haces que captaron la fuente y se observó mejor



Figura 4.10: Tránsitos de 3C033 (13°) por los 16 haces de la MB durante las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008.

con L08, sin embargo, esta no se detectó con L06, L03, R03, R05 y R07. 3C033 está localizada a -9° del cangrejo, por lo que se espería que se observara mejor con L02. Sin embargo, en ninguna de las dos pruebas se detectó con este haz. Similar al caso de la nebulosa del cangrejo, en las mediciones de mayo-2008, 3C033 se observó también en L08.



Figura 4.11: Tránsitos de virgo (12°) por los 16 haces de la MB, durante las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008.

La Figura 4.11 muestra los tránsitos de virgo (12°) por los 16 haces. Basados en el catálogo 3C (Tabla 3.1), virgo debería observarse con una ganancia de aproximadamente 183 sigmas en el rcv 1 y 120 con el rcv 0; y solamente debería detectarse en L01 y L02 (Tabla 3.2). Sin embargo, virgo mostró un comportamiento paradójico en las dos pruebas. La Figura 4.11 muestra que durante las mediciones de noviembre-2007, virgo se observó en todos los haces de la MB, obteniéndose con R03 la mejor y L05 la menor ganancias. Sin embargo, en mayo-2008 virgo se detectó mejor con L05 y no se captó en R03 y R08. En noviembre-2007 sus ganancias estuvieron por abajo del valor esperado, mientras que en mayo-2008 estas estuvieron por arriba.



Figura 4.12: Tránsitos de 3C298 (6°) por los 16 haces de la MB durante las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008.

La Figura 4.12 muestra los tránsitos de 3C298 (6°). Basados en el catálogo 3C (Tabla 3.1), 3C298 debería observarse con una ganancia de aproximadamente 16 sigmas en rcv 1 y 11 con el rcv 0; y solamente debería detectarse en L02 y L03 (Tabla 3.2). Sin embargo, durante las pruebas de noviembre-2007, 3C298 sólo se detectó en L04; mientras que en mayo-2008 la fuente se detectó mejor en L03 y no se captó en L08, L07, L06, L05, L02, R03, R07, ni R08. En noviembre-2007, sus ganancias en cangrejos estuvieron por abajo del valor esperado, mientras que en mayo-2008 estuvieron por arriba.

La Figura 4.13 muestra los tránsitos de centauro (-42°) por los 16 haces. Basados en el catálogo 3C (Tabla 3.1), centauro debería observarse con una ganancia de aproximadamente 133 sigmas para rcv 1 y 87 para el rcv 0; y solamente debería detectarse en L07 y L08 (Tabla 3.2). El histograma muestra que la respuesta es bimodal en las dos pruebas. En noviembre-2007, centauro se observó mejor con L05 y luego con R02, y no se detectó en los haces L07, L03, L02, R01, R03, R07 y R08. En mayo-2008 se observó mejor con R02 y L07 y no se captó con L05, L03, L02, R05, R07 y R08. En noviembre-2007 sus ganancias en cangrejos estuvieron por arriba del valor esperado, mientras que en mayo-2008 estuvieron por abajo.

La Figura 4.14 es un histograma que muestra los tránsitos del Sol por los 16


Figura 4.13: Histograma de los tránsitos de centauro (-42°) por los haces de la MB, durante las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008.



Figura 4.14: Tránsitos del Sol por los 16 haces de la MB durante las pruebas de noviembre 2007 y mayo 2008.

haces de la MB. Como se comentó previamente, no se espera que los resultados sean comparables ya que debido al movimiento de rotación y traslación de la Tierra, el Sol cambia su posición en ascención recta y declinación. En noviembre su declinación está por los -20° (respecto al ecuador) y en mayo se desplaza hacia el norte, por los 21°. En noviembre-2007 el Sol se detectó en todos los haces de la MB, pero el haz que mejor lo observó fue R07, siguiendo L04 y L07. En mayo-2008, el Sol transitaba alrededor del cenit del MEXART por lo que se esperaría que fuera detectado por los haces centrales de la MB. La Figura 4.14 muestra que para esta época los resultados son cercanos a lo esperado, puesto que se detectó con L01 y L02, aunque no con

la amplitud máxima. El flujo mayor se observó con L01 (el registro se saturó). La distribución en la Figura 4.14 muestra la misma tendencia que en el caso de la nebulosa del cangrejo.

4.6. Discusión

Es interesante también comparar la respuesta de una línea de 64 dipolos con filtros RF (Tabla 4.2) y sin filtros RF. La Tabla 4.5 muestra la comparación en unidades normalizadas obtenida para las fuentes más intensas con una línea de 64 dipolos sin filtros RF con respecto a una línea con filtros. En este caso, las ganancias de cada fuente con una línea sin filtros son menores como se observa en la Tabla 4.2, lo que indica que la implementación de los filtros RF mejoró significativamente la sensibilidad de la antena, ya que la nebulosa del cangrejo se observa con 49 sigmas y virgo se observo con 40 sigmas mientras que sin filtros no se observan estas fuentes. Casiopea y Cisne se observan 10 veces mejor usando los filtros. Como se esperaba, con una línea de 64 dipolos, no se detectaron fuentes menores a 165 Jy (p.e., 3C033 y 3C298).

Como se comento previamente, la respuesta de los haces no es cómo se esperaba teóricamente, ni en términos de directividad ni en amplitud. Las Figuras 4.15 y 4.16 son histogramas con las mejores ganancias de las fuentes detectadas con la MB, según las 4.3 y 4.4. Las ganancias están normalizadas a sus respectivas unidades de sigma y como referencia se muestran también el valor esperado según el catalogo 3C. En el caso de casiopea, las dos pruebas obtuvieron una ganancia en sigma menor a la esperada.

Tabla 4.5: Amplitudes nor	malizadas de fuentes det	ectadas	sin filtros	pasa alt	as y pa	sabandas.
fuente	nebulosa del cangrejo	virgo	casiopea	cisne	Sol	
amplitud en dB's	N/D	N/D	10.34	10.99	16.19	

4.6.1. Sensibilidad

En estas pruebas se esperaria que comparando las pruebas de noviembre y mayo la relación fuera la misma, esto no se observa debido a que por los mantenimientos realizados al arreglo se modifico el patrón de radiación de la antena, lo que no garantiza que el haz principal y el número de haces secundarios sea igual en número y que tengan la misma potencia.





Figura 4.15: Histograma de las comparaciones entre la teória y las observaciones con de la MB para las fuentes de radio más intensas (panel superior) y fuentes de centelleo (panel inferior) observadas en noviembre de 2007.







Figura 4.16: Histograma de las comparaciones entre la teória y las observaciones con de la MB para las fuentes de radio más intensas (panel superior) y fuentes de centelleo (panel inferior) observadas en mayo de 2008.

En Diciembre de 2008 después de corregir la tierra física de la pantalla deflectora y los niveles de voltaje en cada una de las antenas [Sierra et al., 2008, Vázquez et al., 2008], se realizó una nueva serie de observaciones con la MB. Estas pruebas no se reportan en este trabajo; sin embargo, los resultados, en términos de directividad, fueron similares a los de las pruebas de mayo-2008 y febrero-2009 [Mejía-Ambirz, 2009, Sierra et al., 2009], ya que ambas pruebas coincidieron en qué haces detectaron las fuentes intensas.

fuente	nov-2007 (unidades normalizadas)	may-2008 (unidades normalizadas)
casiopea	-17.83	-7.43
cisne	-8.03	-8.72
3C123	-0.47	-3.5
cangrejo	-5.16	-8.57
3C033	-6.33	-1.43
virgo	-6.02	-5.83
3C298	-11.96	-5.00
centauro	0.12	-16.82

Tabla 4.6: Diferencia entre las observaciones y las amplitudes esperadas del catálogo 3C. Cocientes expresados en unidades normalizadas.

La Tabla 4.6 muestra la compación entre los resultados esperados según el catálogo 3C y las observaciones del MEXART. El cociente entre ambos valores esta expresado en términos de unidades normalizadas, utilizando el mismo método que se utiliza para medir en dB's en telécomunicaciones, lo que permite comparar por ejemplo, las ganancias con los patrones de radiación de los haces. Todas las fuentes presentan resultados con unidades negativas (excepto centauro con rcv. 1), indicando que se captaron con menor ganancia a la esperada. Estos casos podrían deberse a que posiblemente los haces centrales son mas eficientes al captar al cangrejo y las otras fuentes fueron detectadas con mejor ganancia en los haces extremos, donde la potencia es menor y por tanto miden menos flujo al esperado.

4.6.2. Directividad

Las Figuras 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20 muestran los resultados de amplitud normalizada de las principales fuentes , graficadas en coordenadas polares (Tablas 3.1, 4.3, 4.4) para cada uno de los haces de la MB. Estas fuentes están ordenadas según su declinación y la ganancia está normalizada en función de los patrones simulados, en donde el máximo valor (=1) se define como el haz que detecta una ganancia igual a la esperada teóricamente para esa fuente. El cenit del MEXART (eje vertical en las gráficas) está localizado a los 20°, por lo que el lado izquierda de los diagramas corresponde a declinaciones norte y derecho a declinaciones sur. Cada vector apuntando a diferentes declinaciones indica la eficiencia con la cual ese haz se detectó a cada fuente.

Para L08 (Figura 4.17), en noviembre-2007, se tenían dos lóbulos con mucha potencia apuntando hacia los 58° (casiopea) y los 12° (virgo); sin embargo, en mayo-2008, el patrón se modifica y los lóbulos apuntaron hacia los 29° (3C123). En general, se observan comportamientos similares en las gráficas de los otros haces, la comparación de las dos pruebas muestran que la respuesta de los haces (patrón de radiación) cambia considerablemente en las dos pruebas y que no se tienen una directividad bien definida. Varios haces tienen dos o más lóbulos con amplitudes mayores a 0.5 (como L08, L04, L02, L01, R06, R04, R03, R02, R01) en dirección norte y sur. En los registros de los haces se pueden observar tránsitos de fuentes en declinaciones dispares hacia el norte y el sur.

La razón por lo que no se obtuvieron los resultados esperados es que no se tomaron en cuenta desfases en las seãles que llegan a la MB, por lo que los patrónes mas aproximados serían los que se muestran en las Figuras 4.21 y 4.22.

Estos patrones también fueron calculados en base a la ecuación2.1 del capítulo 2, en donde al parámetro ψ se le sumó una fase ϕ aleatoria, es decir quedo de la forma:

$$E = E_0 \left[e^{\phi_1} + e^{\psi + \phi_2} + e^{2\psi + \phi_3} + \dots + e^{15\psi + \phi_{16}} \right]$$

En donde ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 ,... ϕ_{16} son fases aleatorias, insertadas como números ramdom en el código C. El resultado de esto, da patrones deformados para todos los haces, ya que aparecen varios lóbulos secundarios y al menos uno tiene una amplitud mayor a 3 dB's, así por ejemplo L01 que tiene un haz principal apuntando a los -4°, y un haz secundario muy potente apuntando a -50°, o L03 que tiene un haz principal a los 19° y dos secundarios, uno a los 80° y otro a los -80°, es importante mencionar que estos también son patrones teóricos ya que los desfases fueron asignados aleatoriamente.



Figura 4.17: Distribución de fuentes de L08 a L05 de las pruebas de noviembre de 2007 (izquierda) y mayo de 2008 (derecha). La línea vertical representa el cenit del MEXART (20°) y las amplitudes (vectores) están expresadas en unidades normalizadas, donde, para cada fuente, 1 indica que la fuente se detectó con la misma amplitud que el valor teórico.



Figura 4.18: Distribución de fuentes de L04 a L01 de las pruebas de noviembre de 2007 (izquierda) y mayo de 2008 (derecha). Mismo formato figura anterior.



Figura 4.19: Distribución de fuentes de R08 a R05 de las pruebas de noviembre de 2007 (izquierda) y mayo de 2008 (derecha). Mismo formato figura anterior.



Figura 4.20: Distribución de fuentes de R04 a R01 de las pruebas de noviembre de 2007 (izquierda) y mayo de 2008 (derecha). Mismo formato figura anterior.



Figura 4.21: Patrón teórico, simulado con desfases aleatorios de los haces L1, L2, L3, L4, R1, R2, R3 y R4.



Figura 4.22: Patrón teórico, simulado con desfases aleatorios de los haces L5, L6, L7, L8, R5, R6, R7 y R8.

Capítulo 5

Conclusiones

Este trabajo analiza observaciones del MEXART con una línea de 64 dipolos y dos series de pruebas empleando una matriz de Butler (MB) de 16x16 puertos, con el objetivo de caracterizar el instrumento. Las observaciones se realizaron con dos receptores, diferentes atenuaciones y, en el caso de una sola línea de 64 dipolos, con y sin filtros pasabandas, por lo que la ganancia del instrumento es distinta en cada caso.

El uso del sistema de filtros pasabandas y pasa altas mejora significativamente la sensibilidad del MEXART, ya que estos cortan las interferencias de baja frecuencia que saturan la salida de los amplificadores de bajo ruido de primer nivel.

Para evaluar cuantitativamente la respuesta del instrumento con diferentes configuraciones, se utilizó inicialmente una metodología basada en la normalización de las amplitudes de las radio-fuentes a el voltaje medido con la nebulosa del cangrejo (unidades de cangrejos). Basados en esta metodología, se determinó que las observaciones de las fuentes 3C123, 3C033, virgo y centauro tuvieron una mayor amplitud respecto al flujo esperado basados en el catálogo 3C (a 178 MHz). Sin embargo, como se discute en el Capítulo 4, las unidades de cangrejo solamente son válidas cuando se aplican a una misma configuración específica y no se pueden comparar observaciones con diferentes configuraciones (por ejemplo, diferentes haces), ya que la temperatura cambia en cada caso. Este método, basado en cangrejos, es útil para la calibración de una línea de 64 dipolos, ya que la nebulosa del cangrejo es la fuente más cercana al cenit del MEXART y es una excelente referencia para estimar su patrón de radiación; pero no es el caso para evaluar la directividad de los diferentes haces de la MB. En el caso de la MB cada haz tiene una configuración electromagnética (declinación y eficiencia) particular. Para caracterizar los haces se recomienda entonces hacer una calibración usando una fuente de radio adecuada para cada lóbulo, por ejemplo, para calibrar L1 y R1 se puede utilizar a cangrejo y para R5 y R6 a casiopea (ver Tabla 3.2 del capítulo 3).

El uso del rms como unidad de flujo nos permite hacer comparaciones entre observaciones con diferentes lóbulos. Con ello podemos discernir diferencias entre los resultados obtenidos con la MB. Además, el rms indica la eficiencia de los receptores, es decir, qué receptor tiene una mejor respuesta para observar las fuentes de radio. Basados en este criterio, el receptor 1 es mejor que el receptor 0, ya que su ancho de banda de operación es menor e integra menos interferencias.

Como se esperaba, el flujo mínimo observable del instrumento aumenta con el uso de la MB, ya que se pueden captar fuentes como 3c033 (58 Jy) y 3C298 (61 Jy) que no se detectan con solo una línea de 64 dipolos. El número de radio fuentes observadas con la MB aumenta a mas de 183.

Los resultados de las dos pruebas de la MB indican que la directividad de sus haces no coincide con la esperada teóricamente.

Al utilizar en este trabajo un catálogo pequeño de radio fuentes (8) distribuidas inhomogéneamente a diferentes declinaciones, solamente es posible cuantificar parcialmente la directividad de cada haz.

Las Figuras 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20 del Capítulo 4 dan una aproximación de cómo es el patrón de radiación de cada uno de los 16 haces de la MB basado en las dos pruebas; pero como se menciona arriba este es un patrón a primera aproximación, debido al limitado catálogo de fuentes y que estas no hayan sido captadas necesariamente sobre el cenit de los haces principales y secundarios, si no en los bordes de los mismos, lo que disminuye el flujo observado.

Los resultados de las observaciones de la directividad de los haces se reprodujeron teóricamente en las Figuras 4.21 y 4.22 del Capítulo 4, en donde aparecen los lóbulos secundarios que indican las mediciones. Sin embargo, es importante señalar que para tener simulaciones más aproximadas al patrón real de la antena es necesario cuantificar los desfases producidos por los cables, amplificadores, baluns, combinadores, etc.

La Tabla 5.1 muestra cuáles fueron los haces que mejor detectan las radio-fuentes en las dos pruebas de la MB reportadas en la tesis (noviembre-2007 y mayo-2008) y en una tercera prueba en diciembre-2008 (J. Mejía-Ambríz et al., comunicación privada, 2009). Se observa que solamente para la nebulosa del cangrejo y cisne, la respuesta de los haces es consistente en las tres pruebas. En general, como las tres pruebas se realizaron utilizando las mismas 16 líneas, se percibe que la respuesta de los haces de la MB no es lo suficientemente robusta y varía con las calibraciones y los cambios de configuración en la antena. Esto indica que hay variaciones significativas en la amplitud y fase de las señales de las 16 líneas de 64 dipolos que necesitan ser atendidas.

Fuente	Noviembre 2007	Mayo 2008	Diciembre 2008
casiopea	L08	L02	L02
cisne	L03	L03	L03
3c123	L03	L08	L03
nebulosa del cangrejo	L02	L02	L02
3c033	L07	R02	
virgo	R03	R03	R04
3C298	L04	L03	R05
centauro	L05	R02	L05

Al momento de escribir esta tesis, se desarrollan observaciones con un mayor catálogo de radio fuentes y una mejor cobertura en declinaciones. La metodología descrita en este trabajo se puede extender para estimar con mayor presición el patrón de radiación de los haces y calibrar el arreglo para estabilizar la respuesta del sistema. La determinación del patrón de radiación de los haces y la estabilidad del sistema, permitirán entonces programar observaciones en el MEXART para futuros estudios sistemáticos de fuentes que presentan centelleo interplanetario.

Bibliografía

- E. Aguilar-Rodríguez. Arreglos para Radiotelescopía Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, 1997.
- E. Andrade. Diseño y Construcción del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario en Teoloyucan Estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores CuatitlÃjn, UNAM, fecha de examen profesional: 6 de noviembre de 2000., 2000.
- G. A. Baez-Ordaz. Software para el control de una matriz de butler usada en el radiotelescopio mexart, 2008.
- J. Butler and R. Lowe. Beams forming Matrix simplifies design of elextrically scanned Antennas, electron design. 1961.
- A. Carrillo. Construcción y calibración del radiotelescopio de centalleo interplanetario MEXART. PhD thesis, UNAM, 2007.
- A. Carrillo-Vargas. Estudio del viento solar por medio del centelleo interplanetario y el arreglo de gran superfie en méxico, 1998.
- F. Castillo. Diseño y Construcción de una Matriz de Butler de 16 puertos para el Radiotelescopio de Centelleo Interplanetaio en Coeneo Michoacán., tesis de licenciatura. Facultad de Ingenieria, UNAM., 2006.
- M. U. De-Mendizabal. Una base de datos de calibradores para MEXART Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, 2003.
- J.A. Gonzalez, E. Andrade, A. Carrillo, R. Perez-Enriquez, and S. Kurtz. *The ME-XART Interplanetary Scintillation Array in Mexico*. Geofísica Internacional., 2004.
- J.A. Gonzalez, E. Andrade, A. Carrillo, S. Jeyakumar, S. Ananthakrishnan, A. Praveenkumar, G. Sankarasubramanian, S. Sureshkumar, P. Sierra, S. Vazquez,

R. Perez-Enriquez, and S. Kurtz. *MEXART measurements of radio sources*. Proc. of the Solar Wind 11 / SOHO 16 Conference "Connecting Sun and Heliosphere", 2005.

- J.A. Gonzalez, E. Andrade, A. Carrillo, C. Rodriguez, R. Perez-Enriquez, S. Kurtz, and X. Blanco-Cano. *Calibration testings of the MEXART antenna measuring solar transits.* Advances in Space Research., 2006.
- A. Hewish and P. Scott. Interplanetary scitillation of small diameter radio sources. NATURE, 203:4, 1964.
- * http://shnet1.stelab.nagoya u.ac.jp/omosaic/goin95/ips.html. Pagina web del Solar Wind Observation by Interplanetary Scintillation del STELab. 2006.
- * http://www.mexart.unam.mx. Pagina web del Mexican Array Radiotelescope, ME-XART. 2007.
- * http://www.ncra.tifr.res.in/ncra_hpage/ort/ort.html. Pagina web del Ooty Radio Telescope. 2002.
- * http://www.veso.unam.mx/realtimedata.html. Pagina web del Virtual Earth Sun-Observatory. 2007.
- S. Jeyakumar, A. González, A. Carrillo, E. Andrade, S. Kurtz, and R. Peréz. Mexican Array Radio Telescope (MEXART) System performance and preliminary observations. 2005.
- S. Jeyakumar, A. Carrillo, A. González, and E. Andrade. *MEXART:II System calibration and characterisation of system perfomance*. 2007a.
- S. Jeyakumar, A. Carrillo, A. González, and E. Andrade. *MEXART: I. Sensitivity* of the array and observable Interplanetary Scintillation Sources. 2007b.
- J. D. Kraus. *Radio astronomy*. Cygnus-Quasar Books, second edition, 1986.
- J. F. León-Tavares. Diseño y construcción del Arreglo Dipolar de Grán Área del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario en Coeneo Michoacán. 2003.
- P. Manoharan and S. Ananthakrishnan. Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillation. *Mon. Not. R. ast. Soc.*, 244:12, 1990.

- J. C. Mejía-Ambirz. Eficiencias de los beams de la MB del MEXART a diferentes declinaciones. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, 2009.
- G. Sankar and S. Sureshkumar. Beam-former and Data processing system for the Mexican IPS Array. Instituto de Geofísica, UNAM, 2006.
- A.J. Selvanayagam. *Report on MEXART*. RAC, NCRA, TIFR, India., 2006.
- P. Sierra, A. Carrillo, E. andrade, and P. Villanueva. Reporte de estancia de trabajo en el MEXART 1-mayo a 28-junio. Instituto de Geofísica, UNAM, 2007.
- P. Sierra, A. Carrillo, E. andrade, and P. Villanueva. Reporte de estancia de trabajo en el MEXART del 23-junio al 24-septimbre. Instituto de Geofísica, UNAM, 2008.
- P. Sierra, A. Carrillo, and E. andrade. Reporte de estancia de trabajo en el MEXART, correspondiente al periodo de Enero a Marzo de 2009. Instituto de Geofísica, UNAM, 2009.
- O. B. Slee. Radio sources observed with the culgoora circular array. Aust. J. Phys., 48(1):143–186, 1995.
- M. R. Spieguel. Estadistica, Teoría y 875 problemas resueltos. Mc. Graw Hill, 1988.
- S. Tul'bashev and P. Augusto. Investigation of flat spectrum radio-sources by the interplanetary scintillation method at 111 mhz. 1990.
- S. Vázquez, A. Carrillo, E. andrade, and P. Villanueva. Reporte de estancia de trabajo en el MEXART del 15-febrero al 28-marzo. Instituto de Geofísica, UNAM, 2007.
- S. Vázquez, A. Carrillo, E. andrade, and P. Villanueva. Reporte de estancia de trabajo en el MEXART del 1-setiembtre a 31 de octubre. Instituto de Geofísica, UNAM, 2008.
- P. Villanueva. Observacion de Radiofuentes Detectadas con el MEXART. Facultad de Ciencias, UNAM, 2008.