



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Estudio de Radiofuentes e Interferencias
Captados por el MEXART

T E S I S

que para obtener el título de:

F Í S I C O

presenta:

Pablo Villanueva Hernández



Director de tesis:
Dr. Juan Américo González Esparza

2007



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.

Hoja de Datos del Jurado

1.	Datos del alumno Villanueva Hernández Pablo 57404298 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 9807909-4
2.	Datos del tutor Dr. Juan Américo González Esparza
3.	Datos del sinodal 1 Dr. Stanley Kurtz
4.	Datos del sinodal 2 M. en C. Augusto Cabrera Manuel
5.	Datos del sinodal 3 Dr. Alejandro Lara Sánchez
6.	Datos del sinodal 4 Dr. Alfredo Santillán González
7.	Datos de la Tesis Estudio de Radiofuentes e Interferencias Captados por el MEXART 56 p 2007

AGRADECIMIENTOS

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

Al Dr. Stanley Kurtz, por sus consejos como parte del jurado y por sus correcciones de esta tesis.

A los miembros del Jurado: M. en C. Augusto Cabrera Manuel, Dr Alejandro Lara Sánchez, Dr. Alfredo Santillán González por sus críticas, sugerencias y tiempo dedicado a la revisión de esta tesis.

A los compañeros del MEXART: M. en C. Armando Carrillo Vargas, 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 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.

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.

A la Facultad de Ciencias por haberme formado como Físico.

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, Tochtli, César, David, Ubaldo, Horacio, Heliodoro, Rodolfo, Eleazar, Julián y Juan Manriquez, por la ayuda en la carrera de Física.

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

Índice general

Hoja de datos del Jurado	III
Agradecimientos	v
Dedicatorias	VII
Motivación y estructura de la tesis	IX
1. Introducción	1
1.1. Principios de radioastronomía	2
1.2. Radiotelescopios	2
1.3. Mecanismo de emisión electromagnética	4
1.4. Clases de radiofuentes	6
1.4.1. Radiofuentes del Sistema Solar	6
1.4.2. Radiofuentes galácticas	7
1.4.3. Radiogalaxias	8
1.4.4. Cuasares	9
2. El Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario de Coeneo, Mi-	
choacán. Mexican Array Radiotelescope (MEXART)	11
2.1. Radio telescopios modernos	11
2.2. La técnica de Centelleo Interplanetario	12
2.2.1. Índice de centelleo	13
2.3. Red Mundial de Observatorios de Centelleo Interplanetario (CIP)	14
2.4. El Radiotelescopio Prototipo	14
2.5. El MEXART	15
2.6. Frecuencia Protegida por la Comisión Federal de Telecomunicaciones	18
2.7. Objetivos del MEXART	19

3. Detección de fuentes	21
3.1. Arreglo para la detección de radiofuentes	21
3.2. Fuentes detectadas con el MEXART	23
3.2.1. SOL	23
3.2.2. Casiopea	27
3.2.3. Nebulosa del Cangrejo	27
3.2.4. Cisne	29
3.2.5. Virgo	29
3.3. Discusión	33
4. Interferencia	35
4.1. Interferencia	35
4.2. Observaciones de interferencias	35
4.2.1. Espectros dinámicos	36
4.3. Espectros de potencia	38
4.4. Discusión	39
5. Conclusiones	43
Bibliografía	45

Motivación y estructura de la tesis

El objetivo de esta tesis es describir las características del Observatorio de Centelleo Interplanetario de Coeneo Michoacán (Mexican Array Radio Telescope: MEXART) y mostrar las primeras mediciones de calibración del instrumento efectuadas entre julio de 2005 y abril de 2006. Estas mediciones incluyen observaciones del tránsito de las radiofuentes más intensas e interferencias en la banda de operación.

La tesis consta de cinco capítulos:

- Introducción. Se describen algunos principios básicos de radioastronomía.
- El Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario de Coeneo Michoacán: MEXART. Este capítulo explica qué es el Centelleo Interplanetario (CIP), hace una descripción técnica del arreglo MEXART y la motivación de construir un radiotelescopio de CIP en México.
- Radiofuentes. Se muestran las primeras radiofuentes que se detectaron y qué características tienen. Estas mediciones se utilizan para calibrar el haz principal (a potencia total) de cada una de las líneas de 64 dipolos que consta el arreglo.
- Interferencias. Se discuten las interferencias captadas (a potencia total) por diferentes líneas de 64 dipolos del MEXART y sus características.
- Conclusiones.

Capítulo 1

Introducción

La radioastronomía es la rama de la astronomía que estudia los objetos celestes y los fenómenos astrofísicos midiendo su emisión de radiación electromagnética en la región de radio del espectro.

A finales del siglo XIX se llevaron a cabo los primeros intentos para detectar la radioemisión celeste. Nikola Tesla, en su laboratorio de Colorado Springs analizó ondas cósmicas emitidas por nubes interestelares y estrellas del tipo gigante roja y obtuvo un patrón en las señales que anunció como señales extraterrestres. Sin embargo en 1932, el ingeniero estadounidense Karl G. Jansky, mientras trabajaba en un experimento para localizar fuentes lejanas de interferencias de radio terrestres, detectó por primera vez ruidos provenientes de la región cercana al centro de nuestra galaxia. La distribución de esta radioemisión galáctica fue cartografiada por el ingeniero estadounidense Grote Reber, utilizando un radiotelescopio con antena parabólica de 9.5 m que construyó en el patio de su casa. En 1943, Reber también descubrió la largamente codiciada radioemisión del Sol. La radioemisión solar ya había sido detectada (pero no identificada) pocos años antes, cuando fuertes estallidos solares produjeron interferencias en los sistemas de radar británicos, estadounidenses y alemanes, diseñados para detectar aviones. Como resultado de los grandes progresos realizados durante la II Guerra Mundial en antenas de radio y receptores sensibles, en la década de 1950 la radioastronomía floreció. Los científicos adaptaron las técnicas de radar desarrolladas en tiempos de guerra para construir diversos radiotelescopios en Australia, Gran Bretaña, Países Bajos, Estados Unidos y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, y muy pronto se despertó el interés de los astrónomos profesionales [Kraus, 1986, López, 2000].

Actualmente los radiotelescopios se utilizan para estudiar objetos celestes cercanos y lejanos como pulsares, así como también para el estudio del viento solar

empleando la técnica de centelleo interplanetario (CIP).

1.1. Principios de radioastronomía

Por lo que sabemos, la radioemisión cósmica proviene de procesos naturales, aunque de vez en cuando también se utilizan radiotelescopios para buscar (hasta ahora sin éxito) posibles fuentes de radioemisión de inteligencia extraterrestre. A continuación se describen brevemente algunos mecanismos físicos que producen la radioemisión cósmica¹.

1.2. Radiotelescopios

El intervalo de longitudes de onda de radio es relativamente grande, yendo desde 1 mm hasta más de 1 km, y los radiotelescopios deben tener antenas grandes para enfocar las señales que entran y producir una imagen nítida. El radiotelescopio más grande del mundo, está en el observatorio de Arecibo en Puerto Rico, su plato cóncavo tiene 305 m de diámetro[http://www.naic.edu/public/the_telescope.htm, 2004]. Por otro lado, las mayores antenas parabólicas dirigibles tienen platos que miden de 100 m de diámetro de donde se obtiene una resolución de 1 minuto de arco aproximadamente, equivalente a la del ojo humano en longitudes de onda ópticas². En una antena parabólica, las ondas de radio que entran son enfocadas por la superficie en una pequeña antena que las conduce a un receptor de radio extremadamente sensible. Estos receptores, aunque similares en principios a radios domésticos, detectan señales tan débiles como 10^{-17} Volts. Las partes críticas del receptor están con frecuencia enfriadas a temperaturas cercanas al cero absoluto para lograr el mejor rendimiento posible.

Para obtener mayor resolución, se utilizan conjuntos de antenas como interferómetros, que dan resoluciones de más o menos 1 segundo de arco, equivalentes a las de los grandes telescopios ópticos en condiciones de visión ideales. El mayor radiotelescopio de este tipo es el VLA³ situado en una llanura aislada cerca de Socorro, Nuevo México (E.U). El VLA contiene un total de 27 platos parabólicos, de 25 m de diámetro cada uno, que se mueven sobre vías de ferrocarril a lo largo de tres

¹Para medir el brillo aparente de una estrella, se utiliza como unidad el Jansky. La correspondencia de densidad de flujo es: $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2\text{Hz})$.

²Un minuto de arco o minuto sexagesimal, es una unidad del ángulo plano frecuentemente utilizada en artillería, astronomía y otras disciplinas, es equivalente a un grado sobre 60.

³VLA: Very Large Array

brazos de 21 km configurados en forma de Y. Cada antena contiene su propio receptor, y las señales de cada receptor son enviadas al cuarto de control donde son combinadas para formar la imagen mediante una técnica que se conoce como interferometría[<http://www.aoc.nrao.edu/evla/>, 2007]. Otros interferómetros utilizan antenas semejantes a las de televisión. Una instalación de este tipo, está en Cambridge, Inglaterra, y tiene 60 antenas para detectar radiación en longitudes de onda de 2 metros.

Se pueden lograr resoluciones más altas incluso si las antenas se sitúan a miles de kilómetros de distancia. Estos espaciamientos hacen poco práctico enviar señales desde cada antena directamente a un punto en común, por lo que en su lugar se realizan grabaciones separadas en cada antena y las cintas individuales se envían a una instalación central donde se procesan. Esta técnica de interferometría de base muy larga (VLBI) implica usar relojes atómicos en cada telescopio para sincronizar las grabaciones individuales con una precisión de una millonésima de segundo. De esta forma, se consiguen resoluciones angulares de una milésima de segundo de arco, equivalente al tamaño angular aparente de una pelota de básquetbol a la distancia de la luna.

Para lo fines de este trabajo, existen actualmente en operación dos arreglos de antenas dedicados a desarrollar observaciones de viento solar empleando la técnica del centelleo interplanetario (la técnica de CIP se discute en el siguiente capítulo). Estos dos observatorios en operación son: el Ooty Radio Telescope (ORT) del National Center for Radio Astrophysics de la India y el arreglo de 4 antenas del Solar Terrestrial Laboratory (STEL) de la Universidad de Nagoya en Japón. Con estos dos radiotelescopios se planea hacer una red mundial con el observatorio de Centelleo Interplanetario de Coeneo Michoacán (MEXART) para monitorear la actividad solar y sus perturbaciones en el medio interplanetario.

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 1100 alambres en paralelo a la longitud del cilindro y tiene 1056 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. Una fuente en el cielo puede ser seguida cerca de diez horas, por el mecanismo de funcionamiento de este radiotelescopio. En la actualidad este radiotelescopio es utilizado en el estudio de pulsares y de centelleo interplanetario[http://www.ncra.tifr.res.in/ncra_hpage/ort/ort.html, 2002].

Actualmente el Solar-Terrestrial Laboratory (STELab) de la Universidad de Nagoya Japón tiene funcionando un sistema de cuatro antenas que se encuentran en las



Figura 1.1: Antena del ORT de la India.

ciudades de Tokawa, Fuji, Sugadaira y Kiso, las cuales funcionan a una frecuencia central de 327 MHz. Con sus observaciones se realizan estudios de centelleo interplanetario y estimaciones de la velocidad del viento solar [<http://shnet1.stelab.nagoya.u.ac.jp/omosaic/goin95/ips.html>, 2006].

1.3. Mecanismo de emisión electromagnética

La radiación electromagnética puede ser producida por mecanismos térmicos y no térmicos.

Radiación térmica.

La radiación térmica es la que se produce por un mecanismo relacionado con la temperatura del objeto. No necesariamente todo cuerpo emite la energía que ha absorbido. Pero un objeto que absorbe toda la energía que recibe y luego la emite se le denomina Cuerpo Negro. Los mecanismos de emisión de energía son diversos, ya que unos cuerpos lo hacen en forma de radiación infrarroja, otros en luz visible y otros en el ultravioleta. La propiedad que determina la radiación que emite un cuerpo es su temperatura, ya que objetos con mayor temperatura emiten a frecuencias



Figura 1.2: Una de las cuatro antenas del STEL en Japón.

mayores. Por supuesto que los cuerpos también emiten radiación en el segmento de radiofrecuencia y esta fracción es la que estudia la radioastronomía. El Sol y las estrellas pueden considerarse como cuerpos negros y así se puede estimar su temperatura.

La radiación térmica también es emitida por gases. Un átomo de un gas se ioniza cuando otro átomo lo bombardea con suficiente energía como para expulsarle un electrón, dejando una partícula cargada positivamente y una negativamente. Estas partículas al recombinarse con sus opuestos liberan radiación electromagnética.

Otra forma de emisión de energía por los átomos se encuentra cuando los electrones cambian de nivel dentro del átomo, emitiendo un fotón de energía a una longitud de onda característica del átomo, Esta radiación se denomina línea de emisión ya que ocupa una línea discreta en el espectro electromagnético característico de cada átomo. Como el hidrógeno es el átomo primordial en el universo, su estudio en radioastronomía es clave y se realiza en el ancho de banda de los 21.11 cm (1420.4 MHz)[Rohlfs and Wilson, 2003, Smith and Carr, 1968, Smith, 1969].

Radiación No Térmica.

La radiación no térmica es la que se produce por un mecanismo no relacionado con la temperatura del objeto.

Radiación Sincrotón. La mayor parte de la radiación a bajas frecuencias (menores

a 1 GHz) recibida del espacio es de este tipo. Su mecanismo principal de producción tiene que ver con la interacción de partículas cargadas con campos magnéticos. Cuando una partícula entra en un campo magnético, éste la somete a un movimiento en espiral alrededor de las líneas de campo. Así la partícula se acelera e irradia energía, este fenómeno se denomina Radiación Ciclotrón. Cuando las partículas viajan a velocidades mucho menores que la de la luz, no es una fuente muy importante de radiación, pero cuando estas viajan a una velocidad cercana a la de la luz, son fuente muy importante de energía y se le denomina Radiación Sincrotrón.

MASERS (Microwave Amplified Stimulated Emission of Radiation) Son sitios muy compactos en el interior de nubes moleculares o en las atmósferas de viejas estrellas donde la emisión de ciertas líneas espectrales pueden ser enormemente amplificadas. Las moléculas encuentran un intenso campo de radiación como el de una estrella cercana. Las radiaciones provenientes de ellas atraviesan la nube molecular y el rayo original es ampliado exponencialmente [Rohlfs and Wilson, 2003, Smith and Carr, 1968, Smith, 1969].

1.4. Clases de radiofuentes

Se han descubierto y estudiado muchas radiofuentes en nuestro Sistema Solar, en nuestra galaxia y en el espacio profundo.

1.4.1. Radiofuentes del Sistema Solar

El Sol es la radiofuente más brillante del cielo a bajas frecuencias. Su radioemisión es mucho más intensa de lo que se espera de la emisión térmica de su superficie visible, la cual tiene una temperatura de cerca de 6000 °C. Esto se debe a que la mayor parte de la radioemisión observada en longitudes de onda de radio más largas proviene de la atmósfera exterior (no de la superficie), la cual tiene mayor temperatura (de cerca de 1 000 000 °C), pero es ópticamente invisible. Además de la emisión térmica, se producen explosiones y tormentas no térmicas, sobre todo durante los periodos de gran número de manchas solares, cuando la intensidad de radioemisión puede incrementarse en un factor de un millón o más en periodos de tiempo de una hora.

La otra fuente de radioemisión natural no térmica del sistema solar es el planeta Júpiter. En longitudes de onda cercanas a los 15 m, Júpiter emite fuertes estallidos de radiación que provienen de regiones relativamente pequeñas, cerca de la superficie de la nube de plasma que gira con el planeta. La intensidad de estos estallidos parece estar muy condicionada por la posición del satélite Ío. Además, Júpiter está rodeado por extensos cinturones de radiación que irradian en la banda de microondas a

longitudes de onda menores de 1 metro.

Se ha observado que emana radiación térmica de la superficie de la atmósfera de todos los planetas excepto Plutón. Instrumentos a bordo de las naves espaciales han utilizado estas emisiones para conseguir información sobre las condiciones meteorológicas de los planetas y otros fenómenos [Rohlfs and Wilson, 2003, Smith and Carr, 1968, Smith, 1969].

1.4.2. Radiofuentes galácticas

La Galaxia (cuando se escribe con mayúscula la palabra se refiere a nuestra galaxia, también llamada Vía Láctea) emite ondas de radio como resultado de la radiación sincrotrón de electrones de rayos cósmicos que se mueven dentro de su débil campo magnético. La emisión en la línea de 21 cm del hidrógeno neutro también se observa en toda la Galaxia. Los pequeños cambios en la longitud de onda de 21 cm son producidos por el movimiento de nubes de hidrógeno desde o hacia un observador. Estos cambios (desplazamiento hacia el rojo o el azul) son un ejemplo del fenómeno conocido como efecto Doppler. Las nubes más cercanas al centro de la Galaxia giran alrededor del centro a máxima velocidad y las observaciones del efecto Doppler se utilizan para medir la velocidad y determinar la posición de las nubes de hidrógeno. De esta forma, ha sido posible trazar las formas de los brazos espirales de la Vía Láctea, que todavía no se han observado en longitudes de onda ópticas.

La radioemisión térmica se observa en nubes de hidrógeno ionizado (llamadas regiones H II) situadas a lo largo de los brazos espirales de la Galaxia. Cuando los electrones libres se recombinan con iones de hidrógeno u otros elementos ligeros, la potencia de radio que surge se puede observar como líneas de recombinación en la región de radio del espectro.

Además de la difusa radiación de fondo de microondas, en la Galaxia existen fuentes discretas de radioemisión. Estas fuentes incluyen restos de supernovas, radioestrellas, nebulosas de emisión, nubes moleculares y pulsares.

Los restos de supernova son nubes de fragmentos de estrellas que han explotado. Los electrones relativistas producidos en la explosión de una supernova son capturados por el campo magnético que rodea el lugar de la explosión. Cuando estos electrones giran en espiral alrededor de las líneas del campo magnético, continúan irradiando durante miles de años. En algunos casos, la estrella misma continúa siendo fuente de radioemisión y se la denomina radioestrella. Otra clase importante de radioestrellas comprende los sistemas de estrellas dobles (binarias) que emiten ondas de radio cuando su masa se transfiere de un elemento al otro. A menudo, las radioestrellas son también fuentes de rayos X.

Las líneas espectrales también son el resultado de transiciones vibratorias y rotatorias de moléculas interestelares como el vapor de agua (H_2O), el amoníaco (NH_3), el metanol (CH_3OH) formaldehído (H_2CO) y el monóxido de carbono (CO). Se conocen más de 50 moléculas interestelares, incluyendo moléculas orgánicas y muy complejas. En algunas nubes interestelares, las líneas moleculares de radio son muy intensas debido al efecto máser (amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación).

La intensidad de la mayor parte de las radiofuentes cósmicas es constante, o sólo varía lentamente con el tiempo. Sin embargo, los pulsares emiten estallidos periódicos cortos o pulsos de radiación una vez por segundo. Aunque se les descubrió por su intensa radioemisión, más tarde se vio que algunos también emiten pulsos ópticos y rayos X. Se cree que los pulsares se forman cuando estrellas como el Sol se contraen por efecto de su propia gravedad a dimensiones de unos 10 km. La densidad entonces se hace muy grande y los átomos son despojados de sus electrones, dejando una llamada estrella de neutrones [Rohlf and Wilson, 2003, Smith and Carr, 1968, Smith, 1969].

1.4.3. Radiogalaxias

La mayor parte de las galaxias emiten ondas de radio y lo hacen con potencias comparables a las de nuestra propia galaxia, unos 10^{32} W. Sin embargo, en el caso de las llamadas radiogalaxias, la radioemisión es de más de 100 millones de veces más fuerte. La mayor parte de esta potencia no se origina en las galaxias mismas, sino en nubes de gases ionizados y recalentados o plasma, situadas a cientos de miles o incluso millones de años luz de la galaxia madre. Estas radionubes gigantes pueden tener 100 veces el tamaño de la galaxia misma y se encuentran entre los objetos conocidos más grandes del Universo.

Para generar las fuertes radioemisiones de las radiogalaxias se necesita gran cantidad de potencia, que puede ascender a una fracción significativa de la potencia total que resultaría de la combustión nuclear de una galaxia entera. El origen de esta potencia y la forma en que se convierte en radioemisiones han sido los problemas más importantes de la astrofísica desde que se descubrieron las radiogalaxias.

Imágenes detalladas de radiogalaxias, obtenidas con radiotelescopios de alta resolución, como el VLA, muestran a menudo un notable chorro de material conectando una brillante radiofuente compacta en el núcleo galáctico con los más extendidos radiolóbulos (nubes). Se acepta que estos chorros o haces transportan potencia desde el núcleo galáctico al plasma radioemisor, y que la fuente de potencia se encuentra en un objeto muy denso, posiblemente un agujero negro situado en el centro de la

galaxia. Con frecuencia se encuentra una radiofuente compacta en el centro de una radiogalaxia. Cerca del centro de una extraña radiogalaxia observada a mediados de la década de 1980, dos brillantes cúmulos de estrellas emiten chorros en apariencia trenzados.

1.4.4. Cuasares

Los cuasares parece que irradian con la luminosidad de cientos de galaxias, pero cada quásar es más pequeño que una galaxia normal en una relación de cerca de un millón. Los cuasares tienen desplazamientos hacia el rojo muy grandes y, por tanto, se piensa que están a gran distancia de la Vía Láctea. Como los cuasares parecen ser tan potentes, y como su radiación varía con rapidez, en principio se creyó que más bien serían débiles objetos cercanos en vez de potentes objetos distantes. No obstante, se han ido acumulando evidencias que apoyan la interpretación cosmológica de los desplazamientos hacia el rojo. Las radiogalaxias, los cuasares y los brillantes objetos conocidos como objetos tipo BL Lacertae ⁴ probablemente son fenómenos muy relacionados.

Al igual que las radiogalaxias, algunos cuasares también están rodeados de lóbulos extendidos de radioemisiones potentes, pero la mayor parte de la radioemisión desde los cuasares proviene de un núcleo brillante de sólo unos cuantos años luz de diámetro y coincide con el quasar visible ópticamente.

Cuando se observa con interferómetros de alta resolución, a menudo se ve que este núcleo está compuesto por dos o más regiones más pequeñas que parecen moverse la una hacia la otra con velocidades superlumínicas, muy superiores a la velocidad de la luz. Aunque estas velocidades tan altas parecen violar en principio la teoría de la relatividad de Albert Einstein, de hecho se pueden explicar como el resultado de un movimiento algo menor que la velocidad de la luz, casi dirigida hacia el observador.

⁴Objetos tipo BL Lacertae: objetos celestes que son potentes fuentes de radiación infrarroja que varía con rapidez y de ondas de radio.

Capítulo 2

El Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario de Coeneo, Michoacán. Mexican Array Radiotelescope (MEXART)

El centelleo interplanetario CIP es una técnica que permite detectar indirectamente perturbaciones de gran escala en el medio interplanetario. Por lo mismo esta técnica se emplea para estudiar la evolución de perturbaciones solares que se dirigen del astro hacia la órbita de la Tierra.

2.1. Radio telescopios modernos

Las antenas y receptores usados en la radioastronomía varían según las necesidades de las observaciones que se pretenden hacer. particular.

Existen varios tipos de antenas de ondas de radio:

Dipolo. es el más sencillo, el dipolo funciona porque la parte eléctrica de la radiación produce un voltaje muy pequeño entre las dos polos el cual pasa al equipo amplificador y graficador. Para recibir la señal el dipolo debe tener una fracción de la longitud de onda a captar.

Antena Yagi. Es como una antena receptora de UHF, ella consiste en un dipolo alimentador (feeder) colocado sobre una estructura en donde se localiza un dipolo reflector, y otros directores. El Feeder tiene un tamaño levemente inferior a la mitad de la longitud de onda a captar, el receptor es 5% mas grandes y los directores



Figura 2.1: Diagrama de un Radiotelescopio.

son sucesivamente 4% más pequeños que el feeder. Este tipo de antena mejora la resolución angular del dipolo. Es la más usada por aficionados.

Antenas parabólicas. Poseen discos cóncavos que envían las señales a receptores y amplificadores. Estos discos tienen la ventaja que poseen una gran área para recolectar las señales. El disco de un radiotelescopio está hecho de metal y tiene forma parabólica. El telescopio está apuntando a un objeto en el Universo. Las ondas de radio emitidas por ese objeto golpean la superficie del disco, y rebotan. Debido a la forma del disco, todas esas ondas rebotan hasta la punta del telescopio, el punto focal. Las ondas de radio están enfocadas allí. En el punto focal, las ondas de radio entran en un receptor. El receptor amplifica las ondas y las convierte en señales que pueden ser guardadas en una computadora (Figura 2.1). Los astrónomos usan las computadoras para transformar esta información en imágenes.

2.2. La técnica de Centelleo Interplanetario

Cuando las ondas de radio pasan a través del medio interplanetario son dispersadas por irregularidades en la densidad del plasma. Una de las manifestaciones de estas dispersiones es el centelleo interplanetario, el cual es la fluctuación en la densidad de radiación de flujo de las radiofuentes.

En el Universo existen objetos estelares que son fuentes de ondas de radio, por ejemplo: cuasares y radiogalaxias. Las ondas de radio emitidas por estos cuerpos pueden detectarse por medio de radiotelescopios en la Tierra. La técnica CIP emplea observaciones de radiotelescopios que registran el tránsito de varios cientos de estas

fuentes de radio estelares para generar mapas diarios del cielo. La técnica se basa en el estudio de las variaciones oscilantes (centelleo) que presenta la intensidad de señal de una fuente de radio estelar captada por el radiotelescopio. Este fenómeno se debe principalmente a la dispersión de las ondas de radio que produce la microturbulencia del viento solar. Estos mapas de CIP permiten hacer una detección indirecta de las perturbaciones de gran escala que se propagan del Sol a la Tierra. La figura 2.2 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 el viento solar perturbado (nube de plasma), los frentes de onda se distorsionan y la señal de la fuente de radio es captada con centelleo en un radiotelescopio en la Tierra. El instrumento es de tránsito, esto es, su haz apunta a una dirección fija en el cielo y registra el paso de las fuentes que pasan por el haz.

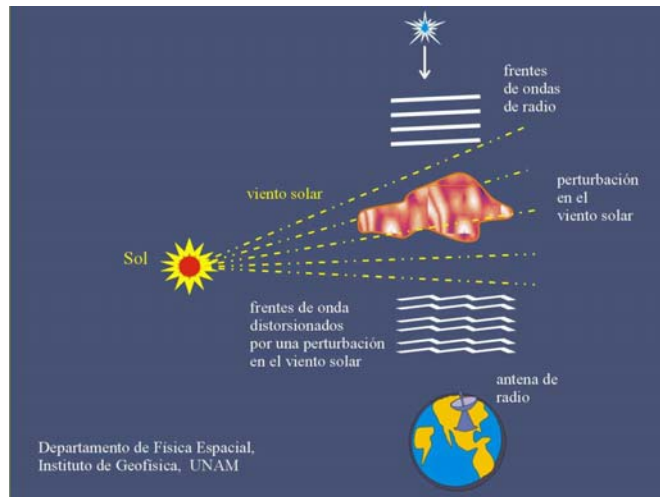


Figura 2.2: Diagrama de configuración Sol, Tierra, fuente de radio y perturbación de gran escala en el viento solar.

2.2.1. Índice de centelleo

A través la técnica de CIP se puede inferir información del viento solar como su densidad y su velocidad. El índice de centelleo, g , es una magnitud cuantitativa de la dispersión de las ondas electromagnéticas en el viento solar:

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

en donde ΔS_{obs} es el centelleo observacional o flujo rms de la señal y S_{prom} es el centelleo promedio asociado a un viento solar quieto. La magnitud de g proporciona información sobre los cambios en la densidad media del plasma.

2.3. Red Mundial de Observatorios de Centelleo Interplanetario (CIP)

Los radiotelescopios que se emplean para hacer los mapas diarios de índices de centelleo son instrumentos de tránsito 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 un mejor rastreo de la evolución de las perturbaciones en el viento solar. Esto se debe a la rotación de nuestro planeta; para rastrear las tormentas solares es necesario que haya siempre al menos un radiotelescopio terrestre del lado día de la Tierra. Cada observatorio de CIP genera un mapa de varios cientos de fuentes estelares de radio por día. Para lograr un seguimiento completo de las perturbaciones que salen del Sol se requieren combinar cada día, al menos cuatro mapas de CIP producidos por diferentes observatorios. El proyecto del MEXART plantea formar parte de una red mundial con observatorios en otras longitudes, tales como el radiotelescopio del National Centre for Radio Astrophysics (NCRA) en Ooty, India; los del Solar Terrestrial Environment Laboratory (STEL) en Nagoya, Japón, y el European Incoherent Scatter Radar (EISCAT) en el norte de Escandinavia.

La motivación de formar parte de una red mundial de radiotelescopios surge en 1992 a raíz de un convenio entre la UNAM y el Instituto Tecnológico de Florida (FTI). La doctora Silvia Bravo fue la iniciadora de este proyecto en nuestro país.

Este proyecto de la construcción de un radiotelescopio para observaciones de CIP en México fue planteado en dos etapas:

- La construcción de un arreglo dipolar prototipo que integró las características generales de operación del radiotelescopio final.
- La construcción del arreglo final (MEXART) en Coeneo, Michoacán.

2.4. El Radiotelescopio Prototipo

El desarrollo de actividades para la construcción del arreglo prototipo para detectar centelleo interplanetario en México comenzó en 1992 en el campo 3 de la FES

Cuautitlán, y posteriormente se trasladó a los terrenos de la estación geomagnética del Instituto de Geofísica-UNAM en Teoloyucan, Estado de México. El prototipo consistía de un arreglo de antenas dipolares de gran área con características similares al radiotelescopio de Cambridge, pero implementando varias mejoras como el empleo de tecnología moderna, una frecuencia de operación (139.6 MHz) superior a la de Cambridge (81.5 MHz) y una ubicación en una latitud geográfica más baja, lo que permite observar otras fuentes de radio.



Figura 2.3: Prototipo de Teoloyucan.

El prototipo constaba de 4 líneas de 64 dipolos cada una orientada en la dirección este-oeste. Cada línea este-oeste se subdividía en 4 secciones de 16 dipolos. Cada sección tenía un amplificador, para que las señales captadas por las 16 antenas se transmitieran a través de la línea de transmisión para posteriormente ser amplificadas con un amplificador de bajo ruido[León-Tavares, 2003].

2.5. EL MEXART

Los altos niveles de ruido electromagnético que se observan en todos los lugares cercanos al Distrito Federal impiden la operación de un radiotelescopio para captar señales de fuentes cósmicas. Por esta razón se decidió construir el arreglo final lejos de ciudades con mucha población y actividad industrial y se buscaron sitios que cumplieran con los requerimientos para montar el radiotelescopio final. Después de comparar diferentes locaciones se escogió el municipio de Coeneo, Michoacaán, ya que está en una ciénega rodeada de montañas de poca altitud y con muy bajos niveles de ruido electromagnético en la frecuencia de operación.



Figura 2.4: Localización del MEXART.

La antena del MEXART tiene características similares al radiotelescopio prototipo, pero es un arreglo con mayor área física, ya que en lugar de tener 4 líneas este-oeste de 64 dipolos como el prototipo, el MEXART tiene 64 líneas este-oeste. Las características principales del MEXART son:

Frecuencia central de operación	139.65 MHz
Ancho de banda	1.5 MHz
Elemento básico	Dipolo
Número de elementos	4096
Número de líneas Este Oeste	64, cada línea con 64 dipolos de onda completa
Numero de matrices de Butler	2 de 32 puertos cada una

Tabla 2.1: carateristicas del MEXART

El elemento básico del arreglo es un dipolo de onda completa ($\lambda=2.13$ m) que está construido con alambre de cobre desnudo, calibre 14/AGW. Este alambre se conecta a una línea de transmisión paralela, ensamblada con el mismo tipo de material

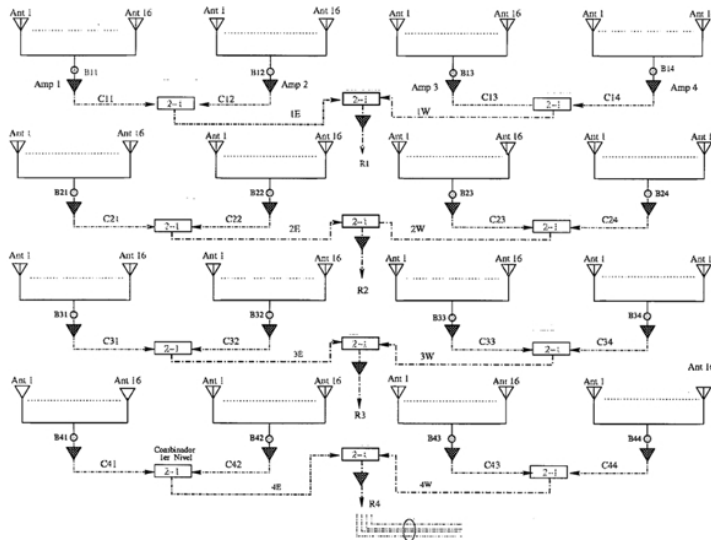


Figura 2.5: Configuración del arreglo prototipo.

que el dipolo detector. La separación entre la base de cada dipolo sobre la línea de transmisión es de 2.13 metros y cada línea de transmisión está constituida por 16 dipolos.

Las líneas de transmisión E-O se dividen en 4 unidades básicas de 16 dipolos cada una, los dipolos en las líneas de transmisión se encuentran polarizados horizontalmente en la dirección E-O, la unidad básica tiene una longitud de 34.8 m. El arreglo total se integra con 4096 dipolos. Cada unidad se acopla a la línea de transmisión coaxial por medio de un transformador de impedancias (balun). Para compensar las pérdidas de la señal de radiofrecuencia asociadas con las diversas atenuaciones en el cable coaxial, se determinó establecer dos etapas de amplificación con ganancias típicas de 20 dB.

La primer etapa amplificará la señal que sale del balun hacia el primer nivel de los combinadores de potencia 2:1 entre cada dos unidades básicas. El segundo nivel de amplificación se establece en la salida del segundo nivel de combinadores de potencia 2:1, en la línea de transmisión antes de enviar la señal hacia los receptores en el laboratorio, vía un cable coaxial (RG/214). Por lo que se tiene que en una línea este-oeste hay 4 baluns, o sea 256 baluns en total, también hay 5 amplificadores y tres combinadores, dando un total de 320 amplificadores y 192 combinadores en el

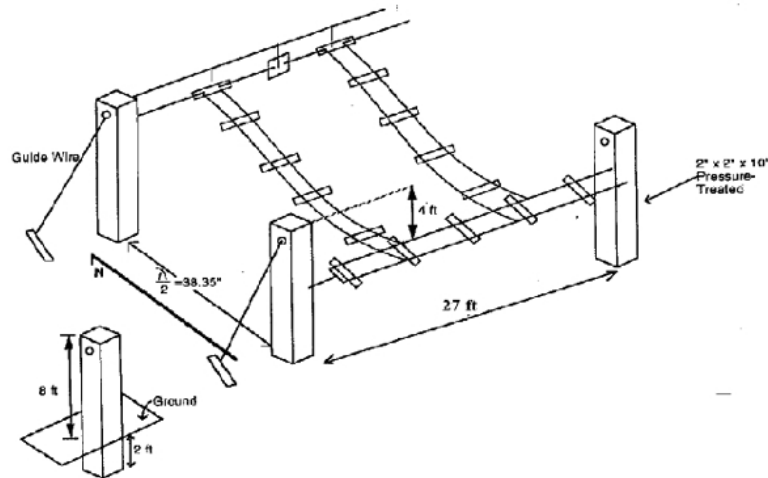


Figura 2.6: Configuración del arreglo.

arreglo.

El tipo de receptor es superheterodino con una frecuencia central de 139.65 MHz y un ancho de banda de 1.5 MHz. Las características de este receptor son: 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.

2.6. Frecuencia Protegida por la Comisión Federal de Telecomunicaciones

El ruido electromagnético que genera la actividad de la vida diaria en las ciudades modernas (industrias, radio, televisión, teléfonos celulares, aparatos electrodomésticos, etc.) perjudica peligrosamente los estudios científicos que se realizan en la ventana de radio. En México no existía oficialmente una banda dentro del espectro de

radio asignada y protegida para fines de investigación científica, por lo que fue necesario tramitarla ante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Gracias a las gestiones realizadas por los miembros del proyecto se logró que la Subsecretaría de Comunicaciones y Desarrollo Tecnológico, y la Dirección General de Políticas y Normas de Comunicaciones de la SCT asignaran la banda de frecuencia de 138.9 a 140.4 MHz para uso exclusivo de investigación espacial (oficio 2574). Posteriormente este acuerdo apareció en la segunda sección del Diario Oficial del 11 de enero de 1999, en donde la Comisión Federal de Telecomunicaciones publicó el cuadro nacional para atribuciones de frecuencias [González and Carrillo, 2005]

2.7. Objetivos del MEXART

El objetivo principal del proyecto es el estudio de perturbaciones transitorias de gran escala que viajan del Sol a la Tierra empleando la técnica del CIP, la cual se basa en el centelleo que las perturbaciones interplanetarias producen en las señales que nos llegan de las fuentes de radio.

El radiotelescopio va a funcionar como un instrumento de 64 lóbulos declinados simultáneamente en el meridiano local, los cuales son formados y controlados con un par de matrices de Butler, cada matriz generará 32 lóbulos. El arreglo dipolar se complementa con un sistema de amplificación de bajo ruido que está en el sistema subterráneo en el área de la antena. La señal de la antena es llevada hasta el cuarto de control donde es alimentada en un sistema de receptores del tipo superheterodinos. Finalmente la señal de cada lóbulo es capturada en un sistema de adquisición analógico digital, permitiendo monitorear las señales en tiempo real y almacenar datos para su posterior análisis [González-Esparza et al., 2004].

Al momento de desarrollar las observaciones para este trabajo, el MEXART está en la etapa final de calibración, por lo que aún no se tienen datos de CIP para estudiar tormentas solares. En esta etapa es necesario hacer muchas mediciones, para identificar la fuentes que detecta la antena y así mejorar la resolución de la misma. Estas pruebas permiten medir y optimizar la respuesta de cada uno de los sistemas del radiotelescopio.

En esta tesis se describen dos pruebas de calibración muy importantes para la operación del MEXART: las interferencias captadas alrededor de la frecuencia de operación y los primeros tránsitos de fuentes cósmicas captadas por líneas individuales E-O de 64 dipolos. Estas pruebas permiten conocer, calibrar y en su caso corregir la respuesta de cada línea E-O de 64 dipolos. La operación final del MEXART requiere que la señal de cada línea E-O de 64 dipolos que llegue al cuarto de control tenga la misma amplitud y fase. En el capítulo 2 se describen las observaciones de

los tránsitos de las fuentes de radio y en el capítulo 3 se describen las mediciones de interferencias.

Capítulo 3

Detección de fuentes

Las observaciones a las que se refiere este trabajo se realizaron entre julio de 2005 y abril de 2006, cuando el MEXART se encontraba en una de su primeras etapas de calibración. La operación del arreglo requiere que la señal de cada línea este-oeste de 64 dipolos llegue al cuarto de control con la misma amplitud y fase. Por lo mismo se desarrollan pruebas con la señal de salida de cada una de las 64 líneas E-O para comparar la ganancia/voltage obtenida para cada fuente así como la forma del patrón de radiación de cada línea del arreglo. En un arreglo calibrado la respuesta (ganancia/voltage y forma del patrón de radiación) debe ser la misma para cada línea de 64 dipolos.

Con el registro del tránsito de las fuentes, se determina la ganancia/voltage y la forma del lóbulo de cada línea este-oeste, tomando en cuenta la radiación de flujo y el tiempo en que estas fuentes tardan en transitar sobre el lóbulo principal de la antena. Al final el objetivo es lograr que cada línea tenga la misma ganancia y en el caso que esto no ocurra ajustar o corregir las fallas (por ejemplo problemas en las etapas de amplificación) para igualar la respuesta de todas las líneas.

En este capítulo se describe el procedimiento para caracterizar la respuesta de cada línea y se muestran ejemplos de los tránsitos de las fuentes más intensas captadas en observaciones. Con estos registros se desarrolla la caracterización de cada línea para efectuar posteriormente correcciones de las fallas por parte del equipo técnico del MEXART.

3.1. Arreglo para la detección de radiofuentes

Como se ve en la figura 3.1 en el plano este-oeste el patrón de radiación de una línea de 64 dipolos E-O a potencia total consta de un delgado lóbulo principal y

varios lóbulos secundarios menores. En cambio en el plano norte-sur se obtiene un lóbulo principal muy ancho. Esto se debe a que los dipolos están polarizados en la dirección este-oeste aumentando la directividad en ese plano. El ancho del lóbulo principal de la antena a potencia total es de aproximadamente un grado por lo que se espera que el tiempo de tránsito para las las fuentes de ancho angular pequeño sea de aproximadamente 4 minutos, y para el Sol de 8 minutos [Carrillo-Vargas, 2007].

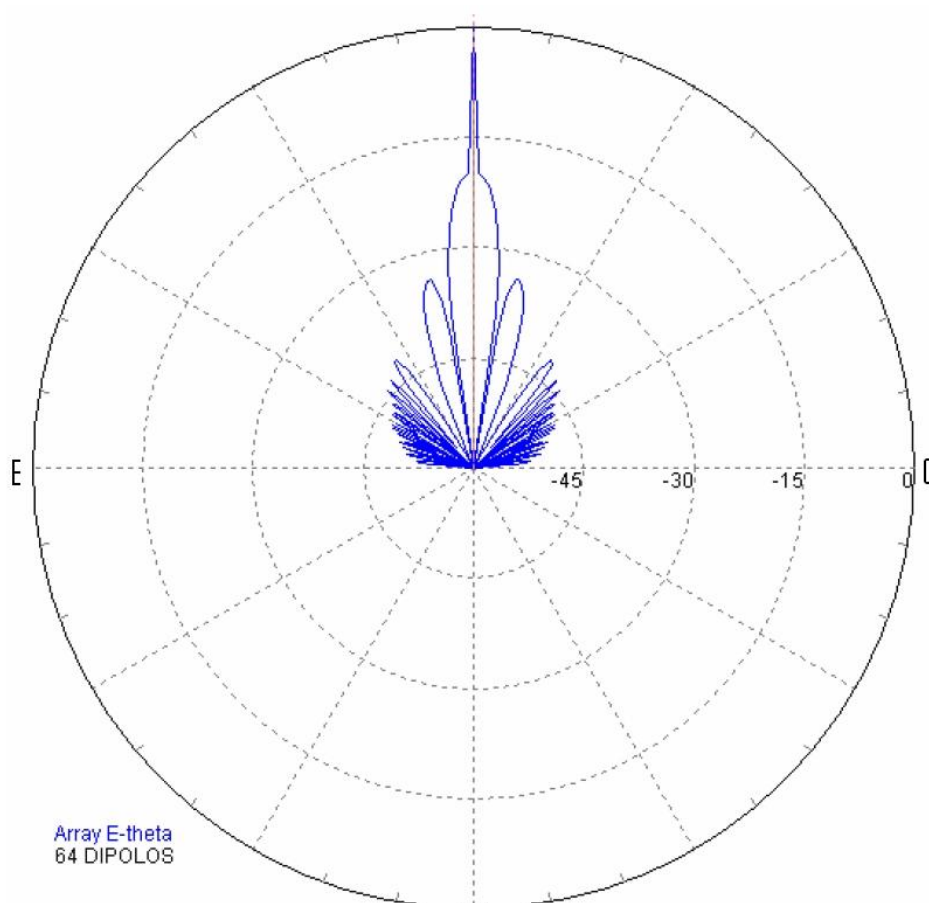


Figura 3.1: Patrón de radiación en el plano este-oeste de una línea de 64 dipolos alineados en la misma dirección.

En la figura 3.2 se muestra el arreglo instrumental para desarrollar la detección del tránsito de radiofuentes. Este arreglo consta de un receptor, una graficadora analógica y una computadora con una interfase para la adquisición de datos.



Figura 3.2: Diagrama de conexión para la recepción de datos.

La salida de una línea de 64 dipolos se conecta en serie a un atenuador de 6 y 3 dB, para que la señal no sature el receptor y se conecta en serie a un par de filtros pasabandas (hpf y lpf). Estos filtros sirven para captar 4 MHz al rededor de la frecuencia de operación 139.65 MHz. El pasabandas consiste en un filtro pasabajos, LPF, y un filtro pasa altos HPF. Después de pasar el filtro pasabandas, las señales que están en el rango del filtro llegan al receptor donde la señal se mezcla con una señal a 100 MHz dada por el oscilador local y después es amplificada y al final pasa por un circuito integrador con una constante de tiempo de 1.2 ms para acoplarla al sistema de registro digital y analogico. En el caso digital la señal pasa a la computadora y los datos son capturados con el programa LabView. La tarjeta adquisidora es una tarjeta de National Instruments, el modelo de esta es 6036E y es una tarjeta de 16 bits multifunción I/O de 16 entradas y 2 Salidas.

3.2. Fuentes detectadas con el MEXART

La tabla 3.1 muestra las fuentes cósmicas más intensas a 139.65 MHz que transitan sobre el MEXART y su potencia. La fuente más intensa es Casiopea que transita a 38 grados del cenit del MEXART, mientras que la nebulosa del cangrejo transita a tan sólo 2 grados del cenit. La figura 3.3 muestra las fuentes más intensas y su ubicación respecto al plano galáctico, y la figura 3.4 muestra cómo varía la intensidad de las fuentes con la frecuencia. Es interesante notar que hay fuentes que disminuyen su intensidad cuando aumenta la frecuencia, y sin embargo, existen otras fuentes, como el Sol quieto, la Luna y Júpiter que tienen un comportamiento opuesto. [Kraus, 1986]

3.2.1. SOL

Como se puede notar de la figura 3.4, el Sol es la fuente de radio más intensa del cielo. El diámetro del Sol es de 1,400,000 km, que es más de 100 veces mayor que el

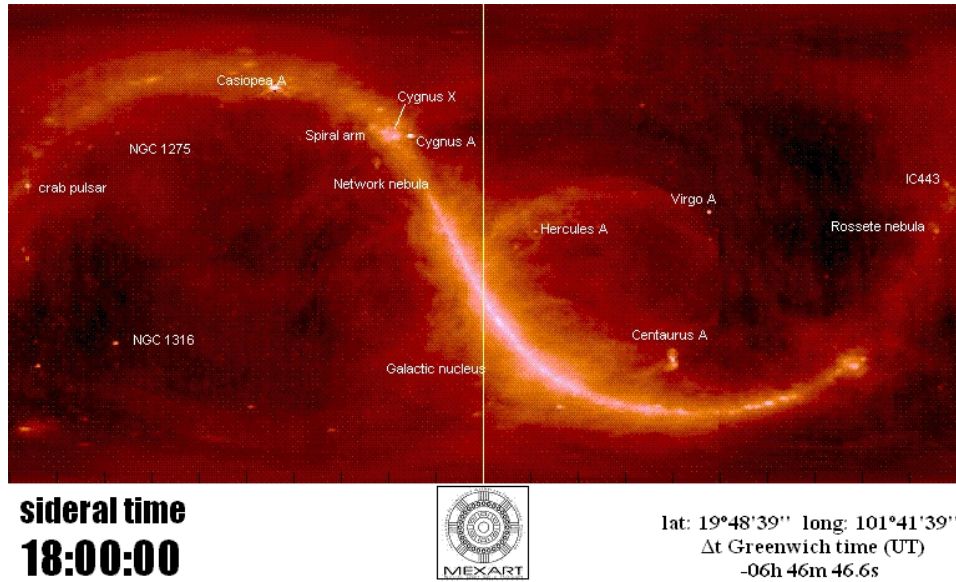


Figura 3.3: Mapa de radiofuentes que detecta el MEXART.

Fuente	Ascensión recta	Declinación	Flujo
Casiopea A	23:23:28	58° 49'	25157 Jy
Crab Nebula	05:34:32	22° 00'	1500 Jy
Cygnus X	19:59:28	40° 44'	8700 Jy
Virgo A	12:30:50	12° 23'	1100 Jy

medskip

Tabla 3.1: Fuentes detectadas por el MEXART [John D. krauss, 1986]

de la Tierra. El Sol es un cuerpo gaseoso muy caliente compuesto de cerca de 75 % hidrógeno, 25 % helio, menos de 1 % de oxígeno, todos los otros elementos constituyen menos del 1 %. La temperatura de su superficie es de cerca de 6000 K.

La fuente de energía en el Sol, es la fusión de núcleos de hidrógeno (protones) en núcleos de helio. En este proceso, se pierde una pequeña cantidad de masa que es transformada en energía. El Sol pierde medio millón de toneladas cada segundo en esta destrucción de masa para producir energía, pero mantendrá su actual producción de energía durante cerca de 5000 millones de años.

Por ser el Sol la fuente de radio más intensa del cielo, con las mediciones de sus

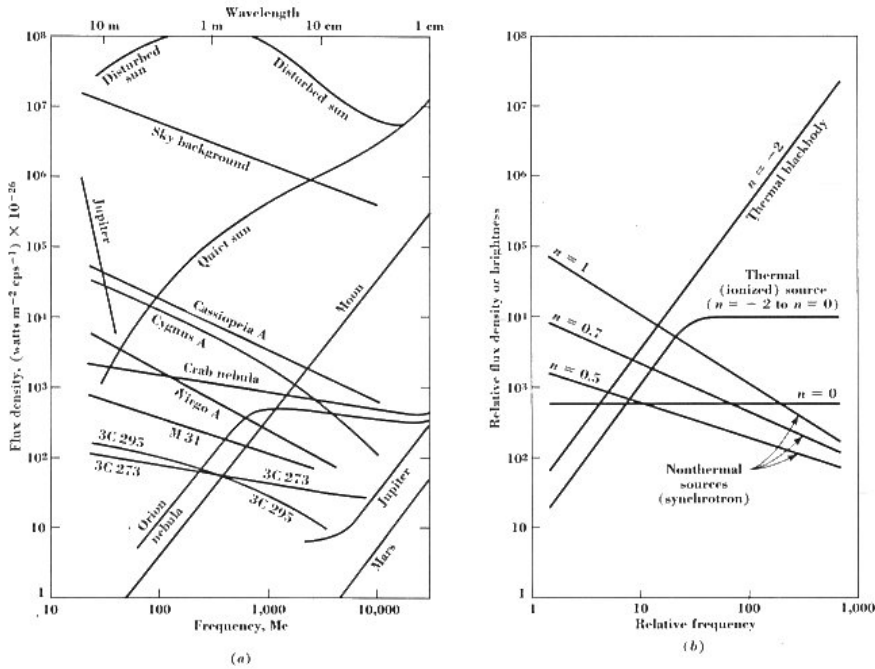


Figura 3.4: Gráfica de intensidad vs frecuencia de las fuentes más intensas [John D. krauss, 1986.

tránsitos se iniciaron las calibraciones del MEXART. En las figura 3.5 se muestran tres tránsitos del Sol detectados por una línea de 64 dipolos E-O del donde vemos que su nivel base es de 2 V y la respuesta es de 5 V sobre el nivel base, y su tiempo de tránsito de aproximadamente 8 minutos. Como se mencionó anteriormente, una línea de 64 dipolos polarizados a lo largo de la dirección este-oeste, produce un lóbulo principal y varios lóbulos pequeños apuntando a direcciones alrededor del cenit. Estos lóbulos secundarios aparecen en los tránsitos del Sol.

En la Figura 3.6 (25 abril de 2005) vemos un tránsito que dura 9 minutos y 42 segundos. Esta medición fue hecha sumando las señales de la líneas 9 y 10 utilizando un conector de tipo "T". Al ver la forma de esta gráfica vemos que la respuesta de estas líneas no est'a llegando con la misma fase al receptor por lo que interfieren entre sí y deforman el patrón de radiación.

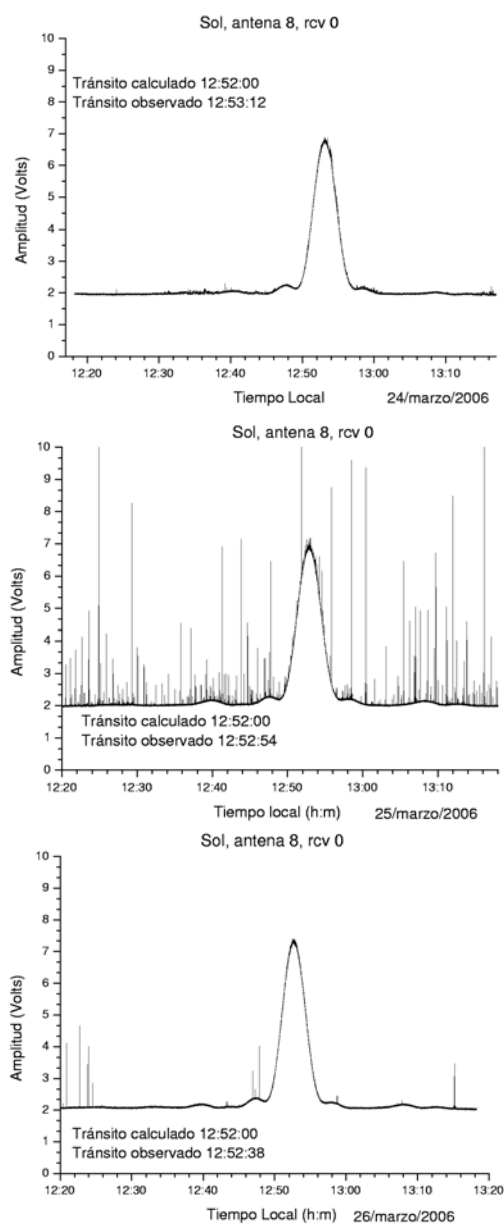


Figura 3.5: Tránsito del Sol captado con la línea 8, receptor 0. a) 24 de marzo del 2006; b) 25 de marzo del 2006; c) 26 de marzo del 2006.

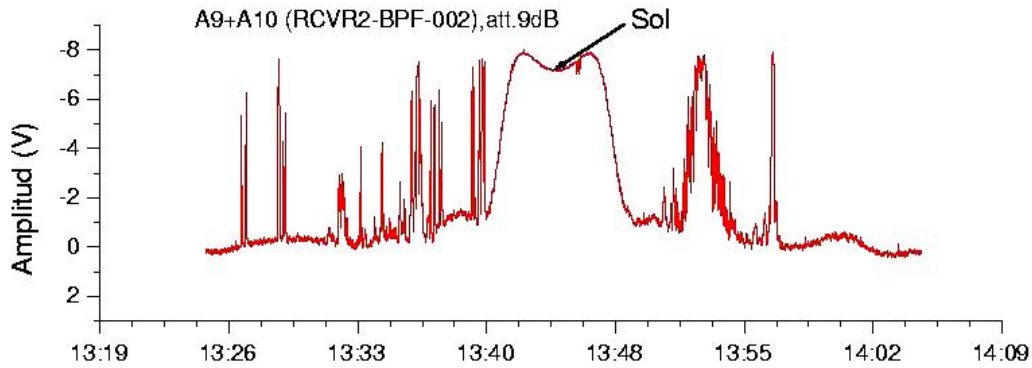


Figura 3.6: Sol captado con las líneas 9 y 10 el 25 de abril de 2005

3.2.2. Casiopea

Casiopea es una constelación en forma de una gran “W” por lo que es fácil de localizar en el cielo. Se extiende entre las declinaciones +46 a +87. Eso la convierte en una constelación circumpolar para la mayor parte de los observadores del hemisferio norte, es decir: siempre está sobre el horizonte, y es visible durante todo el año.

Casiopea se encuentra en la Vía Láctea, por lo que contiene muchas nebulosas galácticas de emisión y cúmulos abiertos. La estrella de mayor brillo aparente es Shedir, con magnitud 2.2. En la figura 3.7 se observa que el nivel base es de 2 V y la respuesta es de 1 V respecto al nivel base en los días 24 y 26 de marzo. Sin embargo el tránsito del día 25 ocurre con un nivel de interferencia muy alto (capítulo 4). Los tiempos de tránsito medidos para Casiopea son de aproximadamente 8 minutos, que es el doble del tiempo esperado, lo cual puede indicar problemas con el ancho del haz del MEXART.

3.2.3. Nebulosa del Cangrejo

Nebulosa del Cangrejo (también conocida como Objeto Messier 1, Messier 1, M1 o NGC 1952) son los restos de la explosión de una estrella situada en la constelación de Tauro. En el centro de la nebulosa hay un pulsar, denominado PSR0531+121, que gira a 30 rpm, emitiendo pulsos de radiación que van desde las ondas de radio a rayos gamma. Su descubrimiento produjo la primera evidencia que concluye que las explosiones de supernova producen pulsares (ver figura 3.8).

En las décadas de 1950 y 1960, la corona del Sol fue mapeada usando las ondas

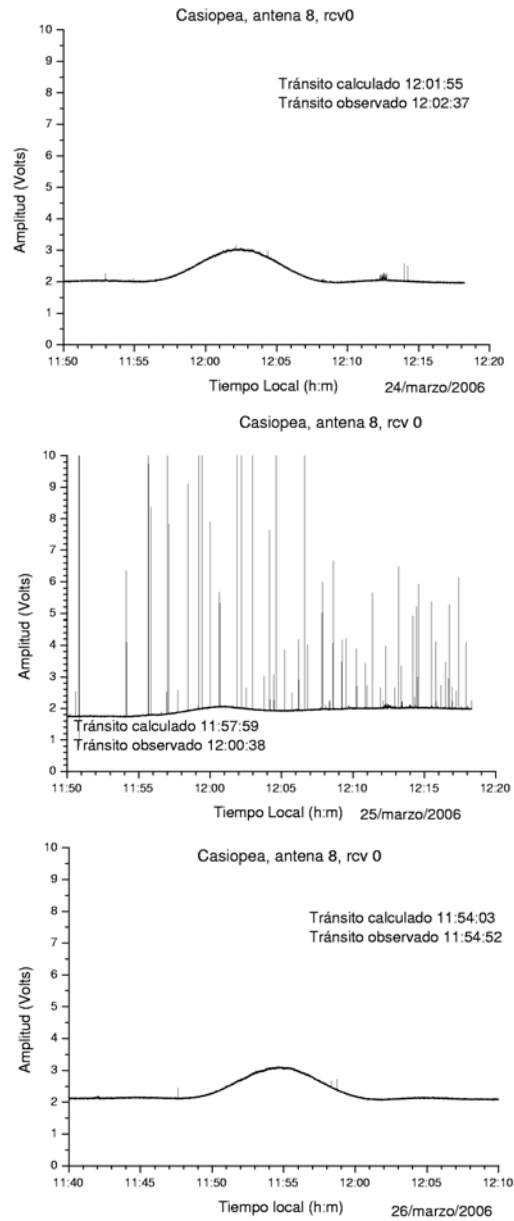


Figura 3.7: Tránsito de Casiopea línea 8 receptor 0; a) 24 de marzo del 2006; b) 25 de marzo del 2006; c) 26 de marzo del 2006.

de radio producidas por la Nebulosa del Cangrejo que pasan a través de la atmósfera Sol, y más recientemente, el espesor de la atmósfera de Titán, satélite de Saturno, fue medido conforme bloqueaba los rayos X producidos por la nebulosa.

En la Figura 3.8 se muestran las gráficas del 24 al 26 de marzo del 2006 del tránsito de la nebulosa del cangrejo (Nebulosa del Cangrejo). En estas gráficas se ven muchas interferencias (siguiente capítulo), pero aún así el tránsito es distinguible. El 24 de marzo vemos que el nivel base es de 1.9 V y la respuesta fue de 0.19 V sobre el nivel base, el tránsito duró 6 m 57 s. El 25 de marzo vemos que el nivel base es de 2.1 V y la respuesta fue de 0.28 V, el tránsito duró 6 m 38 s. El 26 de marzo vemos que el nivel base es de 2.1 V y la respuesta es de 0.27 V y el tránsito duró 4 m 29 s. Esta duración, a diferencia de los anteriores es aproximadamente el tiempo de tránsito esperado para una fuente de ancho angular pequeño.

3.2.4. Cisne

El cisne es una constelación del hemisferio norte que atraviesa la Vía Láctea. Dado el patrón de las estrellas principales, a veces se la conoce como la Cruz del Norte (en contraste con la Cruz del Sur). Contiene a Deneb, una estrella de primera magnitud y un grupo de seis estrellas que forman la Cruz del Norte. La constelación tiene muchos otros objetos de interés incluida la 61 Cygni, la primera estrella, aparte del Sol de la que se ha calculado su distancia a la Tierra. Contiene también a Cisne A, una de las más potentes radiofuentes del cielo, y a Cisne X-1, una potente fuente de rayos X, quizá el primer ejemplo conocido de agujero negro.

En la figura 3.9 se muestran las gráficas del 24 al 26 de marzo del 2006 de los tránsitos de cisne A y cisne X. El 24 de marzo vemos que el nivel base es de 2.6 V y la respuesta fue de 1.39 V sobre el nivel base, el tránsito duró 6 m 37 s. El 25 de marzo vemos que el nivel base es de 2.6 V la respuesta fue de 1.28 V y el tránsito duró 6 m 30 s. Finalmente el 26 de marzo vemos que el nivel base es de 2.6 V y la respuesta fue de 1.27 V, el tránsito duró 6 m 29 s.

3.2.5. Virgo

Virgo (la virgen) es una constelación del zodiaco. Se encuentra entre Leo al oeste y Libra al este y es una de las constelaciones más grandes visibles en el cielo. Es fácilmente identificable por su estrella α , Spica, la espiga de los agricultores medievales. Entre los objetos de “cielo profundo” más destacados está el gran cúmulo de galaxias de Virgo, así como el quasar 3C-273, uno de los más próximos a la Tierra (unos 3 000 millones de años-luz).

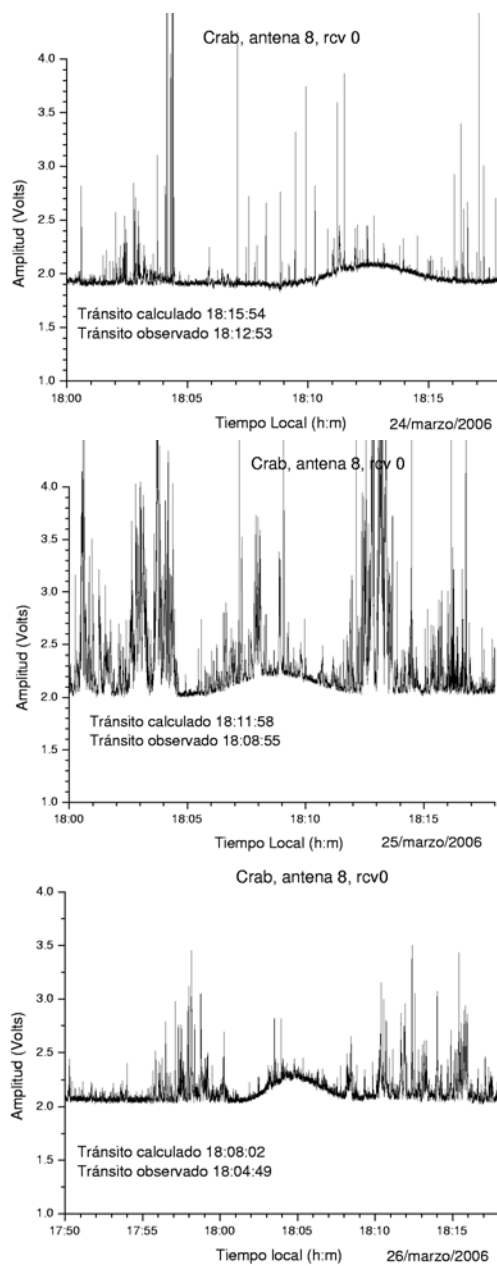


Figura 3.8: Tránsito de Crab Nebula, línea 8 receptor 0 ; a) 24 de marzo del 2006; b) 25 de marzo del 2006; c) 26 de marzo del 2006.

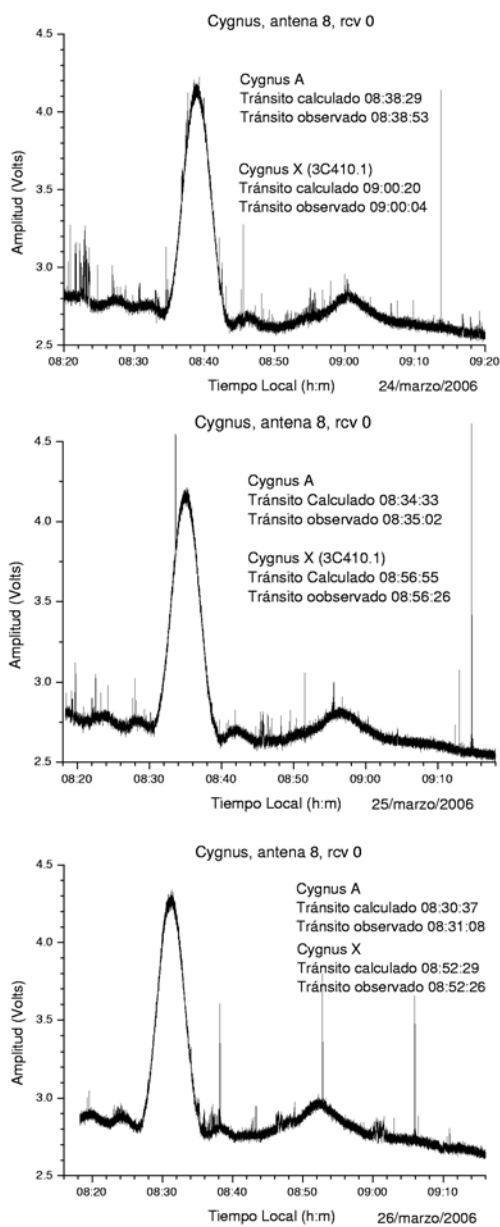


Figura 3.9: Tránsito de Cisne A y Cisne X, línea 8, receptor 0; a) 24 de marzo del 2006; b) 25 de marzo del 2006; c) 26 de marzo del 2006.

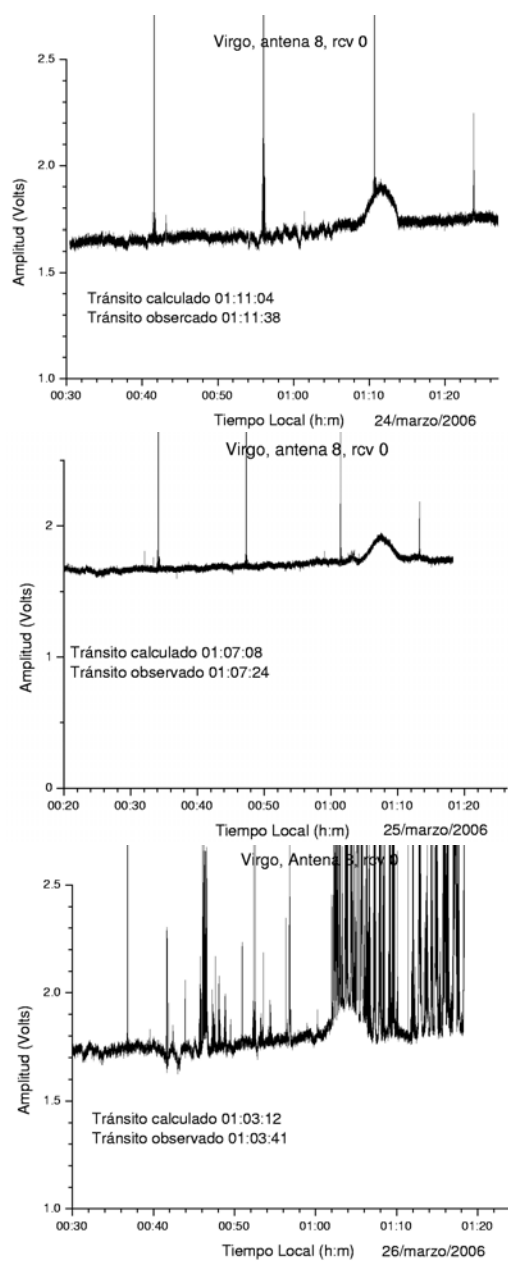


Figura 3.10: Tránsito de Virgo, línea 8 receptor 0; a) 24 de marzo del 2006; b) 25 de marzo del 2006; c) 26 de marzo del 2006.

En las figura 3.10 se muestran las gráficas del 24 al 26 de marzo del 2006 de tránsitos de Virgo. El 24 de marzo vemos que el nivel base es de 1.6 V, la respuesta fue de 0.13 V sobre el nivel base y el tránsito duró 3 m 57 s. El 25 de marzo vemos que el nivel base es de 1.7 V la respuesta fue de 0.18 V y el tránsito duró 4 m 08 s. Finalmente el 26 de marzo vemos que el nivel base es de 1.7 V la respuesta fue de 0.17 V y el tránsito duró 4 m 09 s. En este caso los tres tránsitos tienen aproximadamente la duración esperada.

3.3. Discusión

El haz principal de una línea de 64 dipolos este-oeste a potencia total tiene un ancho de aproximadamente 1 grado en esa dirección. La velocidad angular de la Tierra es de $0.25^\circ/\text{min}$, por lo que una radiofuente de ancho angular pequeño tarda cuatro minutos en transitar por el cenit del arreglo. En el caso del Sol, el ancho angular de este es de medio grado, lo cual no es despreciable con respecto al haz de la antena, por lo que el tiempo de tránsito de este es ocho minutos, por lo que al medir los tiempos de tránsito de las fuentes si obtenemos este tiempo podemos estar seguros de que el ancho del lóbulo principal de la antena es de un grado.

Como se ve en las gráficas de este capítulo la radiofuente más intensa detectada por el MEXART, en estas primeras mediciones es el Sol ya que tiene una respuesta de 5 V sobre el nivel base. Las gráficas de la figura 3.5 muestran un patrón que no es simétrico. Esto se puede deber a que el haz de la antena está inclinado en la dirección este o que la línea no está en fase como se ve en la figura 3.6, por lo que requieren correcciones técnicas.

Las fuentes menos intensas de estas primeras observaciones son la Nebulosa del Cangrejo y Virgo, debido a que la primera tiene un flujo de 1500 Jy, por lo que se espera que su respuesta sea menor a 1 V, mientras que Virgo es la fuente menos intensa pues tiene un flujo de 1100 Jy, además de que su ascensión recta es 10° menor a la del MEXART. Es importante señalar que las otras fuentes intensas tampoco están cerca del cenit del MEXART.

Con estas mediciones se calibra cada línea de 64 dipolos, con el objetivo de que cada una tenga la misma respuesta. La operación del MEXART requiere que la respuesta de cada línea sea la misma y cuando esto no ocurre puede indicar un fallo en el amplificador o combinador de alguna línea. Estas mediciones sirven para asegurar que cada línea está bien calibrada, condición indispensable para la operación de la matriz de Butler.

Cabe destacar que después de que se hicieron las mediciones para este trabajo, han venido ocurriendo mejoras en el radiotelescopio conforme la calibración continua.

Al momento de escribir esta tesis se mejoró el receptor del MEXART y se añadieron filtros pasabandas después de los baluns, con lo que se mejoró la señal de salida y las gráficas de los tránsitos, lo cual aumentó significativamente el número de fuentes captadas por el radiotelescopio.

Además de detectar radiofuentes que tienen su origen en las estrellas y en regiones lejanas del universo, el MEXART también detecta señales que no sirven para el centelleo interplanetario. Estas interferencias que se deben a la actividad humana, se le llama ruido electromagnético y se discuten en el próximo capítulo.

Capítulo 4

Interferencia

Los dipolos del MEXART tienen un ancho de respuesta muy amplio (de más de 100 MHz). Por lo mismo, y por los procesos de amplificación de la señal, el MEXART detecta muchos tipos de interferencias. Como se mencionó en la introducción, la radioastronomía nace al notar una interferencia que se repetía diariamente pero con un retraso de cuatro minutos diarios. Para la operación del arreglo es necesario identificar qué tipo de interferencias capta la antena y cómo pueden eliminarse, ya que sólo interesan las emisiones de radiofuentes que vienen del espacio y no las que produce la actividad humana. Por lo tanto, es necesario identificar y caracterizar las interferencias para poder idear filtros que puedan eliminar estas interferencias (y no las señales que provengan del Sol o de las otras radiofuentes ya que es lo que se quiere estudiar).

4.1. Interferencia

En las telecomunicaciones y áreas afines, la interferencia es cualquier señal que entra al sistema receptor y modifica la respuesta deseada, como señales de emisión de estaciones de radio, motores eléctricos, relámpagos, etc.

4.2. Observaciones de interferencias

Las observaciones realizadas en el MEXART fueron realizadas con un analizador de espectros hp, centrado en 140 MHz y con un span de 8 MHz, guardando datos cada cinco minutos. El analizador de espectros se conecta una de las salidas de la antena y su cable de salida se conecta a la computadora receptora, en el puerto serial.

Para recibir los datos de la computadora, se carga el programa de adquisición de datos. Ya cargado este se inicializa el programa, pidiendo descripción de la prueba, frecuencia central, span deseado, número de archivos a guardar e intervalo de tiempo entre captura de archivos. Al darle valores a estos campos, el programa configura al analizador de espectros para tomar los datos.

Los factores que hay que tomar en cuenta al hacer las mediciones son: el clima (ya que en el caso de haber tormentas eléctricas, vientos muy fuertes éstos también entrarán en los registros), la hora del día y la actividad humana cercana en ese momento (ya que es importante tomar en cuenta que las interferencias no sólo llegan del espacio, también pueden ser causadas por transmisores, como radios de comunicación, o campos magnéticos generados en motores de combustión interna, o motores eléctricos). Los datos salvados están en formato txt para ser graficados en un programa en IDL.

4.2.1. Espectros dinámicos

Para ver la evolución de las interferencias en función del tiempo se emplean gráficas de espectros dinámicos, en donde las señales captadas por la antena aparecen como manchas de diferentes colores según su intensidad. Cada punto representa una señal captada a una frecuencia determinada, por lo que las líneas en estas gráficas representan interferencias que barren determinados anchos de banda. La máxima interferencia es el Sol y en los espectros dinámicos, éste se ve como una enorme mancha oscura, indicando que la fuente emite en todo el ancho de banda de medición.

En la figura 4.1 se muestra un espectro dinámico de 6 horas de duración centrado a 140 MHz, con un span de 50 MHz, esto muestra que el rango de captación de los dipolos es muy grande. Podemos notar una línea continua de los 90 a los 110 MHz que corresponde a estaciones de radio y de telecomunicaciones, estas mismas líneas también se ven después de los 170 MHz, correspondiendo a estaciones de televisión. Aquí se puede apreciar claramente el ancho de respuesta de la antena.

Como se mencionó anteriormente se necesitan filtros pasabandas para atenuar las frecuencias que puedan interferir con las señales de las radiofuentes. La figura 4.2 muestra un espectro dinámico de aproximadamente 9 horas de duración en donde se ha aplicado un filtro pasabandas de 6 MHz alrededor de la frecuencia de operación y ya no se observan muchas de las líneas de interferencias de estaciones de radio y televisión antes mencionadas. Sin embargo aun se notan líneas de interferencia debajo de los 100 MHz que corresponden a estaciones de radio locales debido a que la señal llega saturada al receptor.

Las siguientes gráficas corresponden a observaciones realizadas entre los meses de

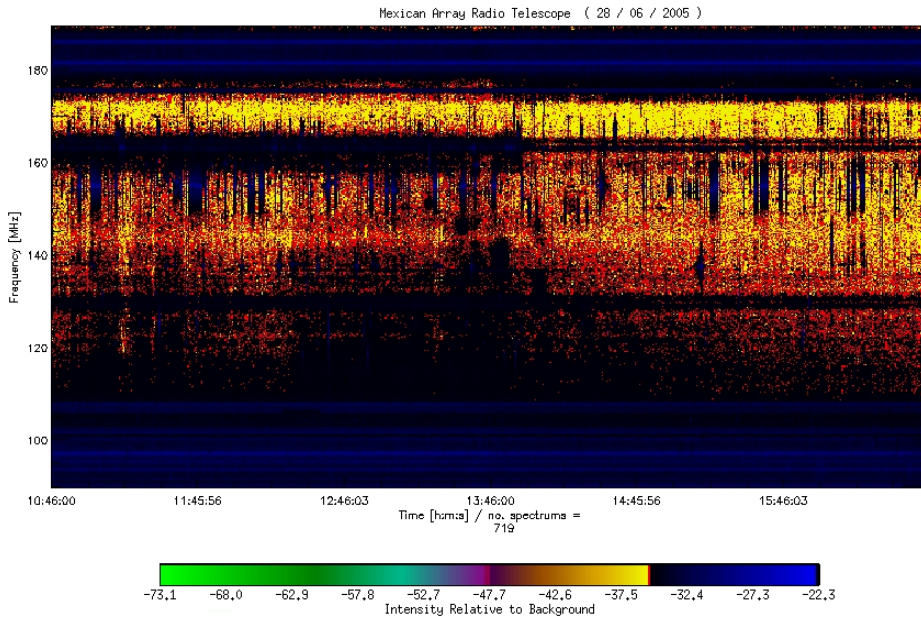


Figura 4.1: Prueba de detección de interferencias sin filtro. Espectrómetro dinámico del 28 de Junio del 2006 en un ancho de banda de 50 MHz

julio del 2005 y abril del 2006 en las cuales se utiliza la configuración ya mencionada anteriormente con el filtro pasabandas.

La figura 4.3 muestra un espectro dinámico obtenido el 1 de agosto de 2005 de 7 horas de duración, con un ancho de banda de 10 MHz, centrado en la frecuencia de operación donde se ve claramente un tránsito del Sol a las 13:53 horas. Este evento es notable por la acumulación de puntos en el espectro de potencias, el rango de frecuencias debidas al tránsito solar es de los 136.5 MHz a los 141.5 MHz. El tránsito muestra claramente 4 lóbulos, dos primarios y dos secundarios, la respuesta en ancho de banda de estos lóbulos esta entre los 135.7 y 142.4 MHz. La asimetría del lóbulo principal indica un problema con el patrón de radiación de la antena.

La figura 4.3 muestra interferencias en los 137.2, 137.5 y los 142.5 MHz. Las interferencias que están en los 142.4 y 137.2 MHz, tienen una duración muy corta y un ancho de banda de 0.4 y 0.3 MHz y desaparecen después de las 9:30. Las interferencias centradas en los 137.6 MHz son las más abundantes y antes de las 12, tienen una periodicidad de 12 minutos y aparecen esporádicamente antes de las 13 horas, después vuelven a aparecer, con una periodicidad de 14 minutos tienen un ancho de banda de 0.4 MHz. La figura 4.3 muestra interferencias entre los 137.25

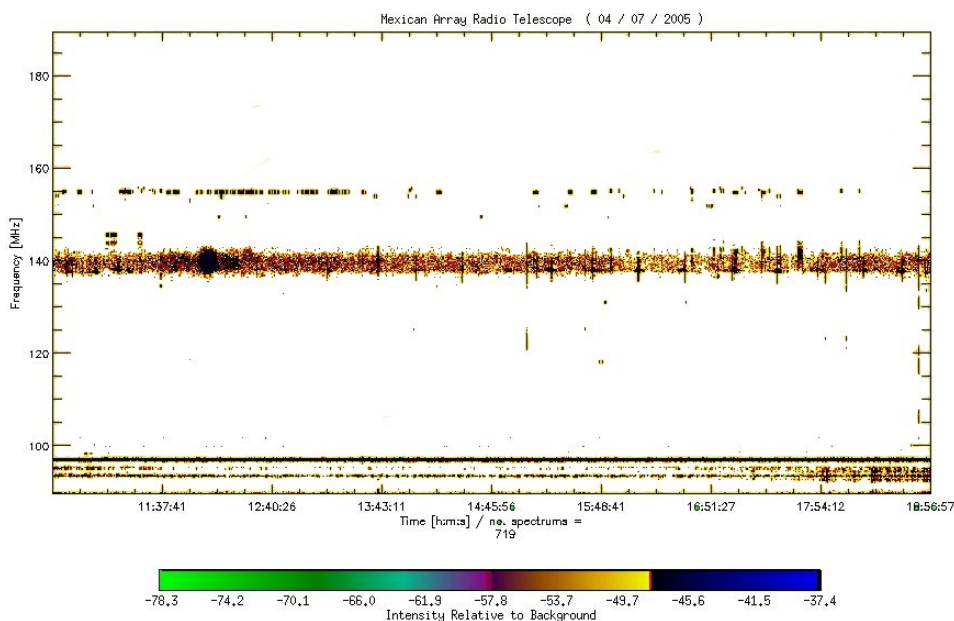


Figura 4.2: Prueba de detección de interferencias con filtro pasabandas. Espectro dinámico del 4 de julio del 2006, en un ancho de banda de 50 MHz

MHz y los 137.45 MHz, presentándose con un periodo aproximado de 12 minutos y con un ancho de 0.4 MHz de las 12:02, 12:15 y 14:37 se observa una interferencia abarcando entre los 136.2 MHz y 140.5 MHz (ancho de banda= 4.3 MHz), de los 136.6 a 140.5 MHz (ancho de banda=3.9 MHz) y de los 136 a 141.2 MHz (ancho de banda= 5.2 MHz). Este tipo de interferencias son las que más afectan en la operación de la antena ya que su ancho de banda en ocasiones cae dentro de la frecuencia de operación del MEXART.

4.3. Espectros de potencia

Las figuras 4.4 y 4.5 son gráficas de potencia contra tiempo obtenidas el 1 de agosto de 2006 a las 12:54 y 10:46 respectivamente. La figura 4.4 coincide con un tránsito del Sol, por lo que aumenta la potencia de -75.2 hasta los -69 DB en todo el ancho de banda que permiten los filtros al analizador de espectros, en la figura 4.5 se ve el paso de una interferencia en los 137.2 MHz que va desde los -74.8 hasta los -54 DB (esta es una de las interferencias que se comentan en la figura 4.3).

En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran espectros de potencia obtenidos el 7 de febrero

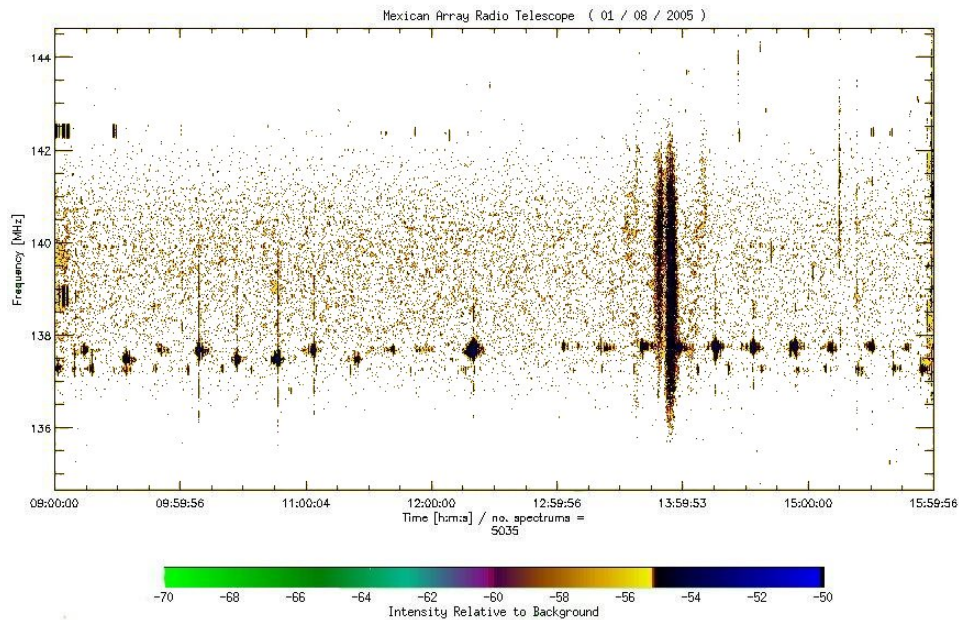


Figura 4.3: Espectro de potencias del 1 de Agosto de 2006 (12:54 hrs tiempo local) línea 12

de 2006 uno antes del tránsito y uno que coincide con el el tránsito del Sol y el de una interferencia. En la figura 4.6 acompañando el tránsito del Sol se observan 2 picos de interferencias uno a 137.5 y otro a 138.5 MHz. El nivel m'aximo de ganancia debido al tránsito del Sol, alcanza los -83.5 DB. Sin embargo las interferencias alcanzan los -82 DB. En la figura 4.7 muestra el transito del Sol y de las interferencias y en esta ocasión el nivel potencia debido al Sol alcanza los -81 dB, sin embargo la interferencia de los 137.5 alcanza lo -76 dB.

4.4. Discusión

Como se observa en las figuras 4.1 y 4.2 el ancho de banda de respuesta de una línea de 64 dipolos de MEXART es muy grande ya que sin filtros captan señales desde los 90 MHz hasta los 190 MHz; y que con filtros pasabandas (6MHz alrededor de la banda de operación) se siguen captando algunas de estas señales (en especial la de las que estan por debajo de los 95 MHz que provienen de las estaciones de radio de Zacapu), por lo que es necesario un mejor sistema de filtrado.

En los registros se observa que hay interferencias en los 137 MHz (figuras 4.5,

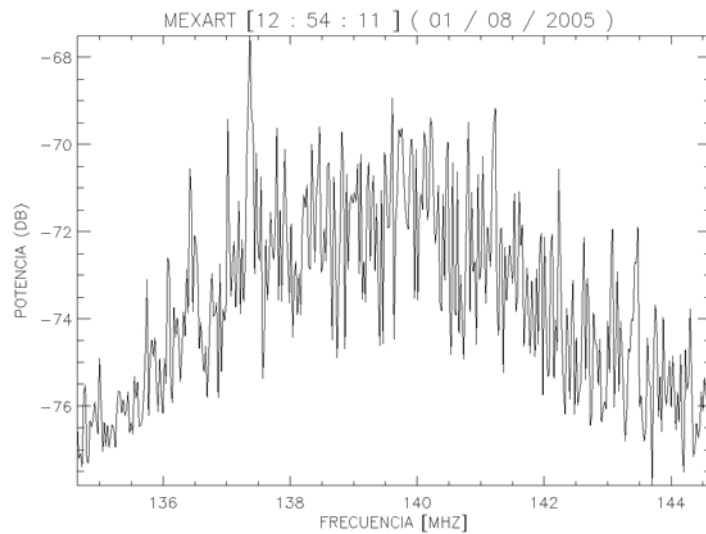


Figura 4.4: Prueba de detección de interferencias con filtro pasabandas. Espectro dinámico del 1 de Agosto de 2006 línea 12 con un ancho de banda de 10 MHz analizador de espectros

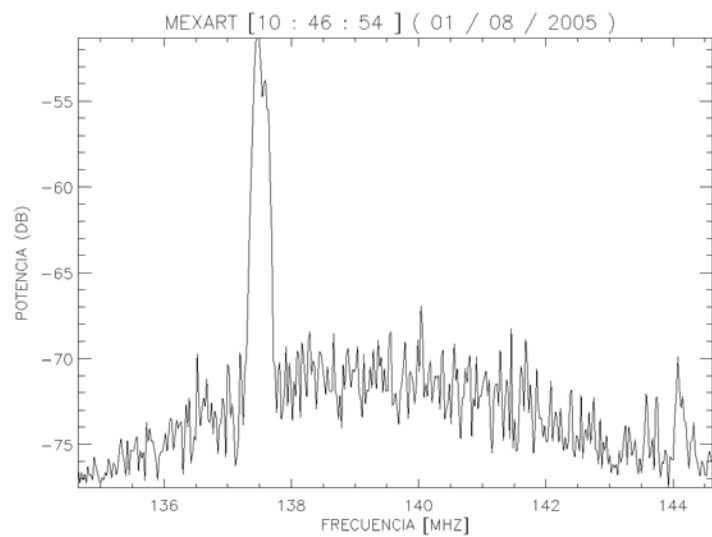


Figura 4.5: Espectro de potencias del 1 de Agosto de 2006 (10:47 hrs tiempo local) línea 12 .

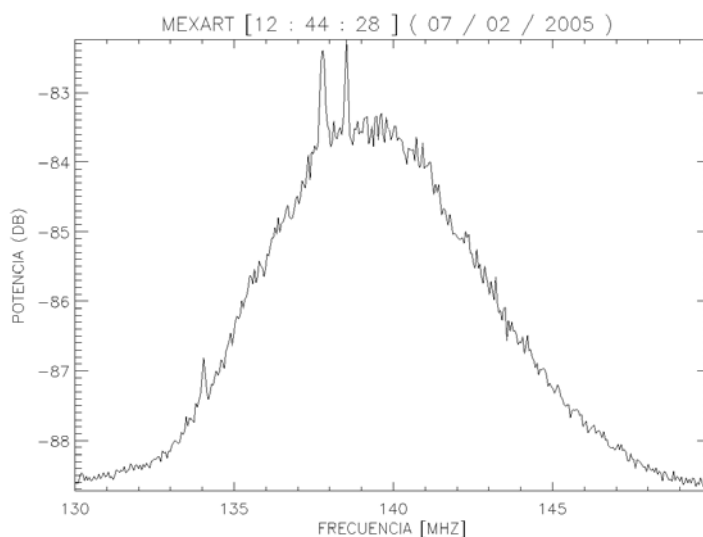


Figura 4.6: Espectro de potencias del 7 de febrero de 2006 (12:44 hrs tiempo local) línea 12

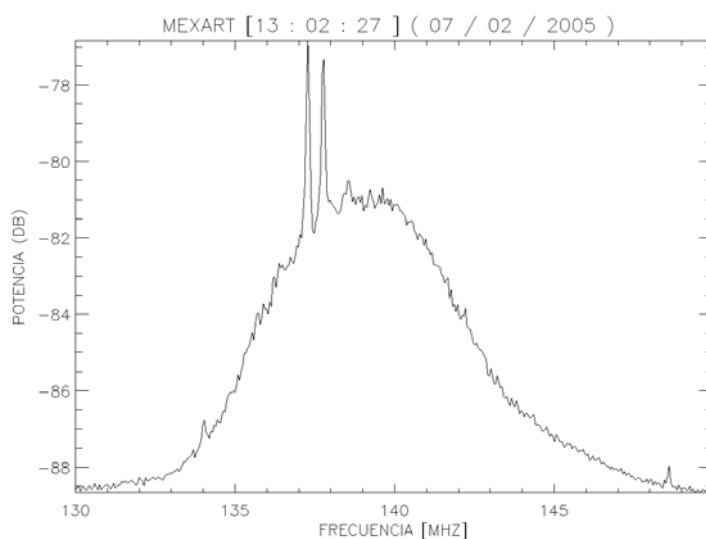


Figura 4.7: Espectro de potencias 7 de febrero 2006 (13:02 hrs tiempo local) línea 12

4.6 y 4.7), éstas son causadas por actividad humana y entran dentro de la banda de operación del MEXART. Estas interferencias son producidas por transmisiones

satelitales(ver la figura 4.9), ya que su periodo y amplitud son constantes. Estas son particularmente importantes y hay veces que aumentan su rango de frecuencias llegando a entrar en la frecuencia de operación del MEXART.

Como muestra la figura 4.8, con los registros del analizador de espectros observamos que las interferencias más importantes para el MEXART están entre los 137.2 y los 137.45 MHz (0.5 MHz) y los 142.1 y los 142.5 MHz (0.4 MHz), por lo que entre estas frecuencias hay un intervalo de 4.65 MHz casi libre de interferencias.

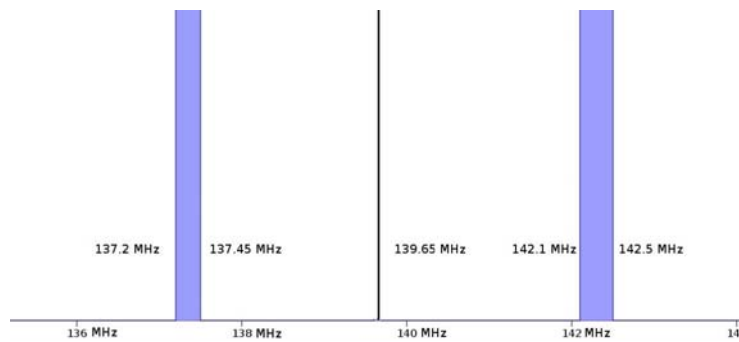


Figura 4.8: Gráfico de la frecuencias en que se ve interferencia.

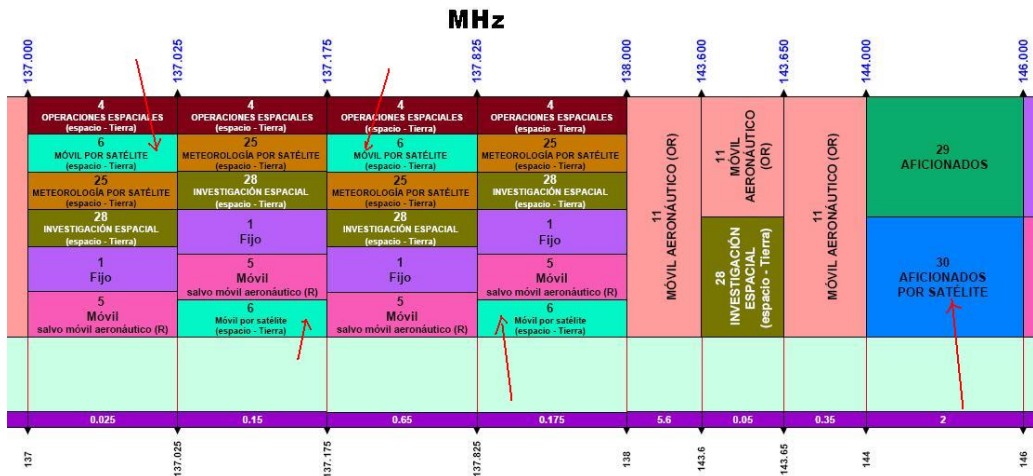


Figura 4.9: Tabla de asignación de frecuencias COFETEL.

Capítulo 5

Conclusiones

La radioastronomía se inició por accidente tratando de localizar fuentes de interferencias que hasta ese entonces se creían terrestres, pero que en realidad venían de lugares cercanos al centro de la galaxia. Para captar las débiles señales de las fuentes de radio cósmicas es necesario utilizar radiotelescopios con antenas de grandes dimensiones. Una forma de hacer una antena de gran área es construyendo arreglos de muchas antenas. En el caso del MEXART se tiene un arreglo de 4096 dipolos (con una frecuencia central de 139.65 MHz) cubriendo un área física de 9 500 m² y lo que se quiere medir es el centelleo de radiofuentes extragalácticas puntuales para entrar en una red de monitoreo del viento solar con los radiotelescopios de Ooty en la India y el Stelab en Japón.

Debido a que las señales de las fuentes de radio cósmicas son muy débiles, es necesario proteger la banda de observación del radiotelescopio. Gracias a las gestiones de la UNAM, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes decretó que la banda de frecuencias de 138.9 a 140.4 MHz sea para uso exclusivo de la investigación espacial.

La operación del MEXART requiere que la señal de cada línea de 64 dipolos este-oeste llegue al cuarto de control con la misma amplitud y fase. Para lograr esto es necesario hacer calibraciones con observaciones de tránsitos de varias fuentes de radio.

El capítulo 3 describe el procedimiento de como la señal llega de una línea de 64 dipolos este-oeste al cuarto de control. Para las observaciones de este trabajo (julio 2005 ,abril 2006) las fuentes captadas por el MEXART son el Sol, Casiopea, la Nebulosa del Cangrejo, Cisne A , Cisne X y Virgo. Debido al intenso flujo de potencia de éstas, es fácil encontrarlas y caracterizarlas en los registros. El tránsito de todas las fuentes estelares se detectan con una diferencia de tiempo de aproximadamente 4 minutos cada día (que no es el caso del Sol). Como se esperaba la fuente de radio

más intensa es el Sol. Estas mediciones de tránsitos permiten calibrar el patrón de radiación de la antena e indican posibles problemas en las etapas de amplificación y fase del arreglo.

En el caso del MEXART el ruido es la interferencia de la señal de las radiofuentes cósmicas por actividad humana. El capítulo 4 muestra un estudio de interferencias alrededor de la banda de operación del MEXART.

La zona libre de interferencias para el MEXART está acotada entre una frecuencia inferior de 137.45 MHz y una frecuencia superior de 142.1 MHz (Figura 4.8), entre estas frecuencias hay un intervalo de 4.65 MHz casi libres de interferencias.

Bibliografía

- Armando Carrillo-Vargas. *Procedimientos de calibración y observaciones en el ME-XART*. PhD thesis, Posgrado en Geofísica, UNAM, 2007.
- A. Gonzáles and A. Carrillo. El radiotelescopio de centelleo interplanetario. *Proyectos de desarrollo de infraestructura.*, 2:30, 2005.
- A. Gonzáles-Esparza, A. Carrillo, and E. Andrade. Infraestructura para el observatorio de centelleo interplanetario. *Reportes Internos 2004-5, Octubre 2005.*, 5:30, 2004.
- * <http://shnet1.stelab.nagoya-u.ac.jp/omosaic/goi95/ips.html>. *Página web del Solar Wind Observation by Interplanetary Scintillation del STELab*. 2006.
- * <http://www.aoc.nrao.edu/evla/>. *Página web del Very Large Array Radio Telescope*. 2007.
- * http://www.naic.edu/public/the_telescope.htm. *Página web National Astronomy and Ionosphere Center Arecibo Observatory*. 2004.
- * <http://www.ncra.tifr.res.in/ncra.hpage/ort/ort.html>. *Página web del Ooty Radio Telescope*. 2002.
- Jhon D. Kraus. *Radio astronomy*. Cygnus-Quasar Books, second edition, 1986.
- Jonathan Fco. León-Tavares. *Diseño y construcción del Arreglo Dipolar de Grán Área del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario en Coeneo Michoacán*. 2003.
- Ing. Jesus López. *Técnicas de radioastronomía*. 2000.
- Kristen Rohlfs and Thomas L. Wilson. *Tools of RadioAstronomy*. Springer, 2003.
- Alex G. Smith. *Radioexploración del Sol*. Reverte Mexicana S.A., 1969.

Alex G. Smith and Tomas D. Carr. *Radioexploración del sistema planetario*. Reverte Mexicana S.A., 1968.