

Antenas

Abraham Luna Castellanos

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Calle Luis Enrique Erro No.1
Santa María Tonantzintla, Puebla
C.P. 72840
Tel. (222) 2663100 1308
e-mail: aluna@inaoep.mx

Las telecomunicaciones son en la vida actual una herramienta tan cotidiana que hemos perdido de vista su impacto y poder. Cuando la evolución selectivamente nos dotó de sentidos, no había la necesidad de las telecomunicaciones, ahora prácticamente nacemos con un chip bajo el brazo y para este uso. Una componente vital de todo sistema de telecomunicaciones es la antena, prácticamente es esta componente la que define sus usos.

En este documento revisamos los conceptos básicos de la antenas, explicamos métodos para la medición de algunos de los parámetros fundamentales de las antenas y enfocamos prácticas como uso didáctico en temas de física en general.

Ondas de Radio

Una onda de radio o de radiofrecuencia es un tipo de onda electromagnética, tal como lo son: la luz, los infrarrojos, los ultravioletas (UV), los rayos X y los rayos gamma, que sólo se diferencian por su frecuencia o longitud de onda. Las ondas de radio se encuentran en la parte de bajas frecuencias (longitud de ondas grandes) del espectro electromagnético, que van desde 3KHz hasta 300GHz, en la Figura 1 se muestra el espectro electromagnético y la ubicación de las ondas de radio.

Espectro Radioeléctrico

El rango de las ondas de radio se subdivide en bandas por décadas, siendo este denominado **Espectro Radioeléctrico** (ver Tabla 1). El espectro radioeléctrico es un recurso de naturaleza muy escasa, y debido a la enorme demanda de servicios de radiocomunicación, implica que la asignación de frecuencias a dichos servicios sea un proceso complejo, sujeto a una cuidadosa planificación, la cual debe tener un alcance internacional. Por eso el espectro radioeléctrico se divide en bandas de frecuencias, las cuales se atribuyen a diferentes servicios radioeléctricos. En la Tabla 1 se muestra el espectro radioeléctrico.

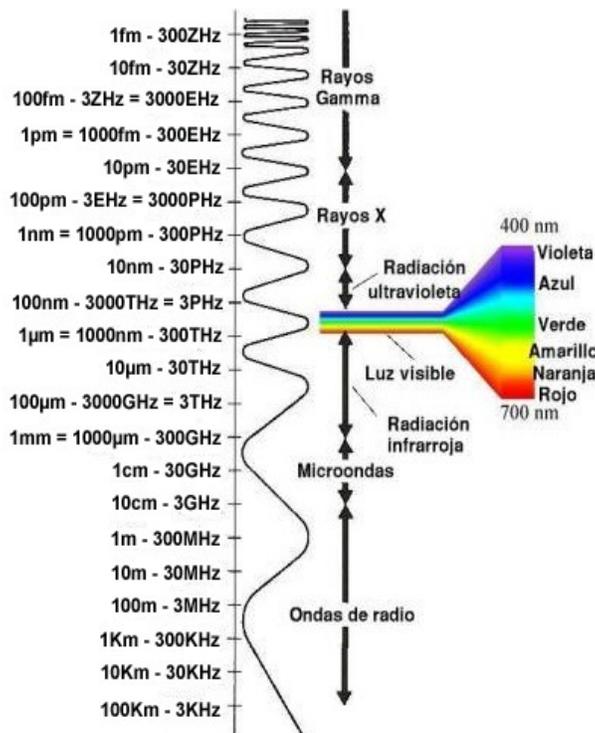


Figura 1. Espectro Electromagnético.

BANDA	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	DENOMINACIÓN
VLF	3KHz-30KHz	100Km-10Km	Very Low Frequency
LF	30KHz -300KHz	10Km-1Km	Low Frequency
FM	0.3MHz-3MHz	1000m-100m	Medium Frequency
HF	3MHz-30MHz	100m-10m	High Frequency
VHF	30MHz-300MHz	10m-1m	Very High Frequency
UHF	0.3GHz-3GHz	100cm-10cm	Ultra High Frequency
SHF	3GHz-30GHz	10cm-1cm	Super High Frequency
EHF	30GHz-300GHz	10mm-1mm	Extremely_High Frequency

Tabla 1.- Denominación del Espectro Radioeléctrico.

Las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico (Tabla 1) se adjudican a servicios concretos reglamentados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) que es el organismo regulador a nivel mundial, y después, los países asignan las frecuencias a las diferentes estaciones emisoras. El organismo que regula los servicios y modalidades en México es la Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL).

Servicios y Modalidades de Telecomunicaciones.

Servicios de radiocomunicación.- Es todo lo que implica la transmisión, la emisión o la recepción de ondas radioeléctricas para fines específicos de Telecomunicación, como son: Servicio fijo, Servicio móvil, Servicio entre satélites, Servicio móvil aeronáutico, etc.

Modalidades.- Son todas las aplicaciones que tiene un servicio de radiocomunicaciones, en particular para fines de Telecomunicación, como son: radiotelefonía celular, radiocomunicación móvil especializada de flotillas, enlaces para los sistemas de radiodifusión en AM y FM, etc.

Por ejemplo, la radiocomunicación móvil **especializada de flotillas**, es una aplicación o modalidad del **servicio móvil**, particularmente del servicio móvil terrestre, la cual puede ser utilizada por el gobierno para propósitos de seguridad, o puede explotarse comercialmente por personas que obtengan la concesión correspondiente. Otro ejemplo es la modalidad de **radiotelefonía celular**, que es un sistema de comunicación de alta tecnología telefónica, que se transmite de manera inalámbrica, utilizando ondas electromagnéticas que viajan por aire y es también una modalidad del **servicio móvil**.

Antenas

Según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés), la **Antena** se define como un dispositivo que forma parte de un sistema transmisor (Tx) o receptor (Rx) diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (OEM). Aunque las antenas presentan formas muy diversas, todas se caracterizan por ser una región de transición de onda guiada a onda radiada al espacio libre.

Además de recibir o transmitir energía electromagnética, a veces se requiere que la antena optimice o acentúe la energía radiada o recibida de algunas direcciones del espacio y que suprima la de otras direcciones, entonces la antena debe comportarse como un dispositivo direccional, que radie o reciba potencia con las características de direccionalidad más adecuadas a cada aplicación en concreto. Los diferentes tipos de antenas que se emplean con mayor frecuencia son: antenas de hilo (dipolo, monopolo, espira circular o cuadrada y hélice), antenas de apertura (bocina, piramidal), antenas impresas o microtiras. A continuación se definen las tres clases de antena utilizadas en radiocomunicación.

Antena Isotrópica.- Es una antena ficticia, no realizable físicamente, que radia con la misma intensidad en todas las direcciones del espacio. Aunque no existe ninguna antena con esas características, es muy utilizada como antena de referencia.

Antena Direccional.- Esta es una antena que concentra la mayor parte de su radiación en una dirección particular. Ejemplos de estas antenas son las cornetas, los reflectores, las logarítmico-periódicas y las Yagi.

Antena Omnidireccional.- Esta es una antena que radia uniformemente en un plano. Ejemplos de estas antenas son los monopolos y dipolos. A continuación se mencionan algunos parámetros de antenas.

Patrón de Radiación.- Es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio, a una distancia fija, normalmente en la región del campo lejano (donde el campo eléctrico es radial). Esta puede ser representada en forma tridimensional (3D, Figura 3 (a)) o de forma

bidimensional (2D, ver Figura 2 (b)). Dicho diagrama suele representar la densidad de potencia radiada, o bien la amplitud y/o fase del campo eléctrico radiado por la antena, habitualmente se representa la amplitud del campo eléctrico. La representación del diagrama 3D se da en coordenadas esféricas con centro en la antena, manteniendo la distancia de medida constante. En algunos casos, no es necesario obtener el patrón de radiación 3D; es suficiente representar algunos cortes del diagrama completo (2D, Figura 2 (b)), es decir, cortes bidimensionales, los cuales se pueden representar en coordenadas polares donde el ángulo representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada.

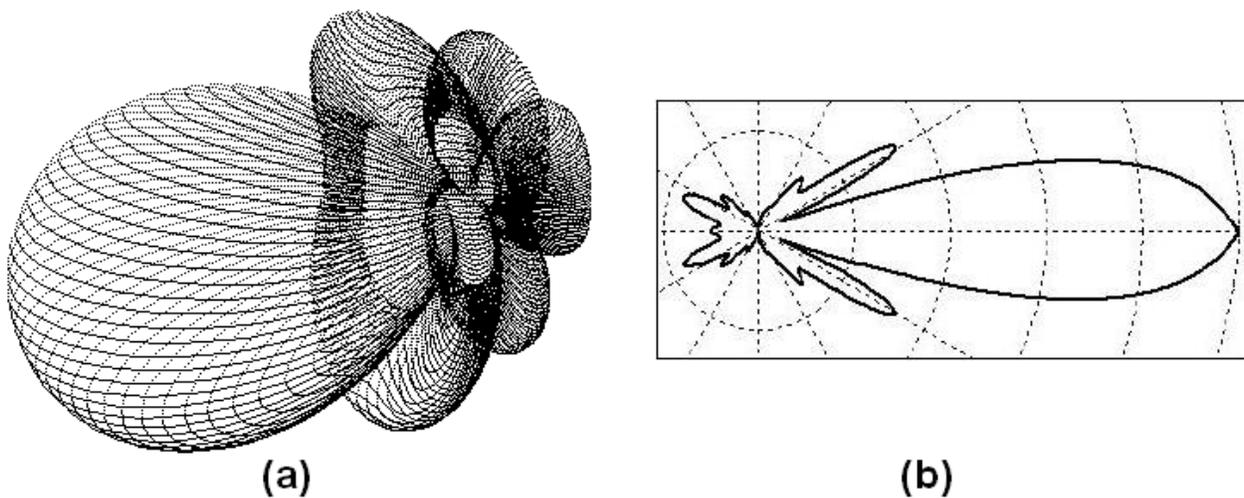


Figura 2.- Patrones de Radiación de una antena yagi. En (a) se muestra un patrón de radiación volumétrico, y en (b) se muestra un patrón de radiación bidimensional.

La amplitud del campo eléctrico, o la densidad de potencia radiada, pueden mostrarse de forma absoluta o relativa (valores normalizados). En el segundo caso, el máximo toma un valor igual a la unidad, se pueden representar dichos valores relativos en escalas lineales o logarítmicas (dB).

En un diagrama de radiación típico de una antena direccional (ver Figura 3), se aprecia una zona en la que la radiación es máxima, a la que se denomina **haz principal o lóbulo principal**. A las zonas que rodean a los máximos del diagrama, pero de menor amplitud que el máximo absoluto, se les llama **lóbulos secundarios**. Entre los lóbulos están los **nulos** en donde la radiación es cero o mínima. El lóbulo diametralmente opuesto al lóbulo principal se denomina **lóbulo trasero**.

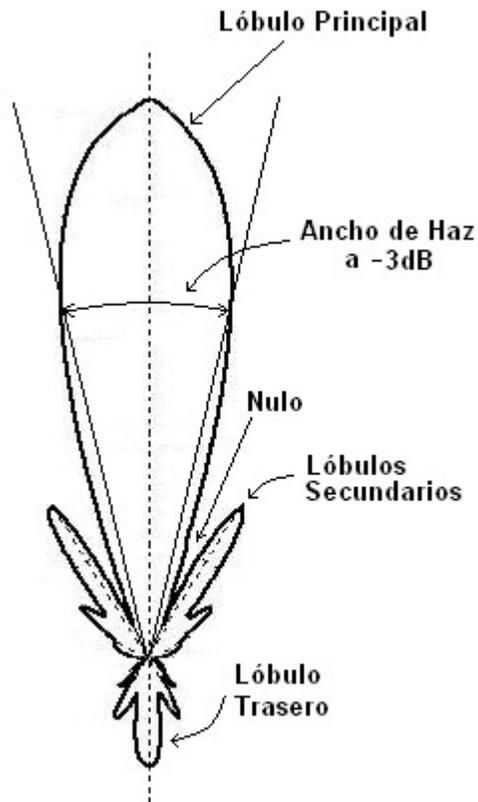


Figura 3.- Patrón de Radiación donde se muestran el lóbulo principal, lóbulos secundarios, nulos, lóbulo trasero y ancho de haz a -3dB.

En la representación de la Figura 4 existen parámetros que nos arrojan más información sobre el patrón de radiación como los siguientes:

- La relación delante-atrás, es el cociente, entre el valor del diagrama en la dirección del máximo y el valor en la dirección diametralmente opuesta.
- El ancho angular del haz principal del patrón de radiación o ángulo de apertura de la antena, se define como la separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación toma el valor mitad del máximo, o valor a -3dB (en un patrón de potencia normalizado).

El diagrama del patrón de radiación está en función del tipo de antena, de sus propiedades eléctricas y dimensiones físicas.

Ganancia.- La característica más importante de una antena es la ganancia. Esto viene a ser la potencia de amplificación de la señal. La ganancia representa la razón entre la intensidad de campo que produce una antena en un punto determinado y la intensidad de campo que produce una antena isotrópica, en el mismo punto y en las mismas condiciones.

Ancho de banda.- Todas las antenas, debido a su geometría finita, están limitadas a operar

satisfactoriamente en una banda o margen de frecuencias. Este intervalo de frecuencias, en el que un parámetro de antena determinado no sobrepasa unos límites prefijados, se conoce como el Ancho de Banda de la antena. Este puede ser definido respecto a múltiples parámetros como: diagrama de radiación, ganancia, impedancia, etc. Determinar el ancho de banda de trabajo de una antena es muy necesario en el momento de utilizarla para cualquier tipo de aplicación, ya que es importante conocer las limitaciones del elemento usado.

Factor de Antena (FA).- Se define como el cociente del campo eléctrico incidente en la antena y la tensión registrada en sus terminales de salida de la antena; cuando se hacen mediciones de intensidad de campo eléctrico, el campo eléctrico incidente en los elementos de una antena induce una corriente, y bajo esas circunstancias se puede medir una tensión en las terminales de la antena; de manera que si se quiere conocer la intensidad del campo eléctrico en ese punto del espacio se puede utilizar el FA, con la expresión siguiente:

$$FA = E/V$$

Donde: E es el campo Eléctrico incidente y V es el voltaje en las terminales de la antena. La unidad lineal del FA es 1/m y en escala logarítmica (dB) son dB/m.

Antena Dipolo

En su versión más sencilla, el dipolo consiste en dos elementos conductores rectilíneos colineales de igual longitud, alimentados en el centro, y de radio mucho menor que el largo (ver Figura 4).

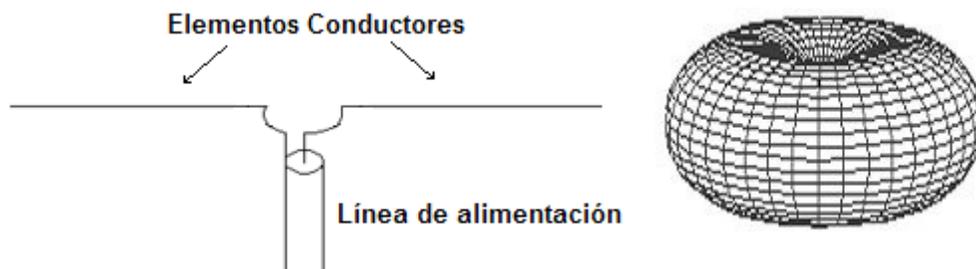


Figura 4.- Antena dipolo simple y su patrón de radiación tridimensional.

La longitud del dipolo es la mitad de la longitud de onda de la frecuencia de resonancia del dipolo, y puede calcularse como $150/\text{frecuencia (MHz)}$. El resultado estará dado en metros.

A causa del efecto de bordes la longitud real será algo inferior, del orden del 95% de la longitud calculada. Por ejemplo, para obtener una antena resonante en la banda de 10m a la frecuencia de 28.9MHz, el dipolo tendrá teóricamente 5.21 metros de largo y en la práctica, el largo real físico del dipolo será algo menor del orden de 4.95m.

La longitud real del dipolo a la frecuencia de resonancia dependerá de muchos otros parámetros, como el diámetro del conductor, o bien la presencia de otros conductores a proximidad.

La emisión es máxima en el plano perpendicular al dipolo y cero en la dirección de los

conductores, es decir, la dirección de la corriente. El patrón de radiación tridimensional tiene la forma de un toro de sección circular y de radio interno nulo, el dipolo es vertical y está en el centro del toro. La ganancia típica de un dipolo es de 2dB, los límites de frecuencia de operación son desde muy bajas hasta 8GHz y su ancho de banda es del 10%. La ganancia típica de un dipolo es de 5 a 15dB, los límites de frecuencia de operación son desde 50MHz hasta 2GHz.

Antena Yagi

En virtud del principio de reciprocidad, se puede decir que las propiedades (impedancia, ganancia, etc.) de una antena cualquiera son las mismas tanto en emisión como en recepción. Vamos a mencionar el funcionamiento de una antena Yagi-Uda en transmisión. Una antena Yagi-Uda está formada por un elemento alimentado (conectado al emisor o al receptor) formado por un simple **dipolo o un dipolo doblado** llamado también "radiador" de manera inapropiada, ya que en la antena Yagi-Uda todos los elementos irradian de manera comparable. Además de ese elemento, la antena tiene uno o varios elementos aislados llamados, injustamente, elementos parásitos. El elemento parásito situado delante del elemento alimentado y que refuerza el campo hacia adelante, se llama **director**. Al elemento parásito situados detrás y que refuerzan el campo hacia adelante se llama **reflector**.

La corriente que circula en el elemento alimentado irradia un campo electromagnético, el cual induce corrientes en los "elementos parásitos" de la antena. Las corrientes inducidas en esos elementos irradian también campos electromagnéticos que a su vez inducen corrientes en los demás. Finalmente la corriente que circula en cada uno de los elementos es el resultado de la interacción entre todos los elementos. El campo electromagnético irradiado por la antena en cada dirección será la suma de los campos irradiados por cada uno de los elementos. Esta suma es complicada porque la amplitud y la fase de la corriente que circulan en cada elemento son diferentes.

En la Figura 5 presentamos una antena Yagi señalando sus distintos elementos, los cuales son:

- 1: Elemento conductor (dipolo doblado).
- 2: Reflectores.
- 3: Directores.
- 4: Cable.



Figura 5.- Antena Yagi.

Dependiendo entre otras cosas de la cantidad de elementos directores, y de la longitud de

la antena, es posible llegar a ganancias máximas de por ejemplo 15 dB, lo que equivale a multiplicar la señal por 32.

Una antena Yagi se utiliza principalmente para recibir y transmitir señales en VHF y en UHF.

Antena	Características	
Helicoidal		<ul style="list-style-type: none"> -Hilo conductor bobinado sobre un soporte rígido. -Directividad: Moderada. -Ganancia: 6-18 dBi. -Frecuencia de operación mínima: 100MHz. -Frecuencia de operación máxima: 3GHz. -Ancho de banda: 52%
Parabólica		<ul style="list-style-type: none"> -Antena direccional que recoge las ondas que recolecta un reflector metálico de forma parabólica. -Directividad: Alta -Ganancia: 12-25 dBi. -Frecuencia de operación mínima: 400MHz. -Frecuencia de operación máxima: 13+GHz. -Ancho de banda: 33%
Logarítmica Periódica		<ul style="list-style-type: none"> -Se compone de una sucesión de elementos radiantes semejantes, cuyas distancias mutuas y frecuencias de resonancia propias se hallan en progresión geométrica. -Directividad: Alta. -Ganancia: 6-8 dB. -Frecuencia de operación mínima: 3MHz. -Frecuencia de operación máxima: 18GHz. -Ancho de banda: 163%

Tabla 2.- Características de otras antenas direccionables como la antena Yagi-Uda.

Onda polarizada y polarización de la antena.

La polarización es la orientación física del campo eléctrico de la onda radiada en el espacio. Se sabe que la dirección de oscilación de un campo eléctrico es siempre perpendicular a la dirección de propagación. Es una característica de las antenas que la radiación que emiten este polarizada, la dirección de la polarización de la onda es la misma que la dirección del elemento radiador, estas ondas polarizadas son "determinísticas", lo que significa que la cantidad de campo esta definido en función del tiempo y posición. En muchas situaciones las ondas pueden ser parcialmente polarizadas. De hecho, este caso puede verse como la situación más general de polarización de onda, una onda está parcialmente polarizada cuando puede considerarse que consiste de dos partes, una completamente polarizada y el otro completamente sin polarizar. Dado que estamos interesados principalmente en ondas radiadas por antenas, consideramos sólo ondas polarizadas.

Polarización lineal, circular y elíptica.

Consideremos una onda plana viajando en la dirección positiva "z", con el campo eléctrico todo el tiempo en la dirección "x" como se muestra en la Figura 6a. Esta onda se dice que está "Linealmente Polarizada" (en la dirección x) y el campo eléctrico está en función del tiempo y posición descritos por:

$$E_x = E_{x_0} \sin(\omega t - \beta z)$$

En general, el campo eléctrico de una onda que viaja en la dirección "z" puede tener ambas componentes, en "x" y "y", como se muestra en la Figura 6b y 6c. Si las dos componentes E_x y E_y son de igual amplitud, el campo eléctrico total a un valor fijo de "z", rota como función del tiempo con la punta del vector formando un trazo circular, se dice que la onda está circularmente polarizada (Figura 4b). Generalmente, la onda consiste de dos componentes de campo eléctrico, E_x y E_y , de diferentes amplitudes y fases relativas. Obviamente, hay campos magnéticos con amplitudes proporcionales a ellos y en fase con E_x y E_y , pero ortogonales a los correspondientes vectores de campo eléctrico. En esta situación general, tomando un solo valor de "z", la resultante del vector eléctrico al ser girado en función del tiempo, donde la punta del vector describe una elipse se llama polarización elíptica, y la onda se dice que está elípticamente polarizada (Figura 6c), los casos de polarización lineal y circular pueden ser vistos como un caso particular de la polarización elíptica.

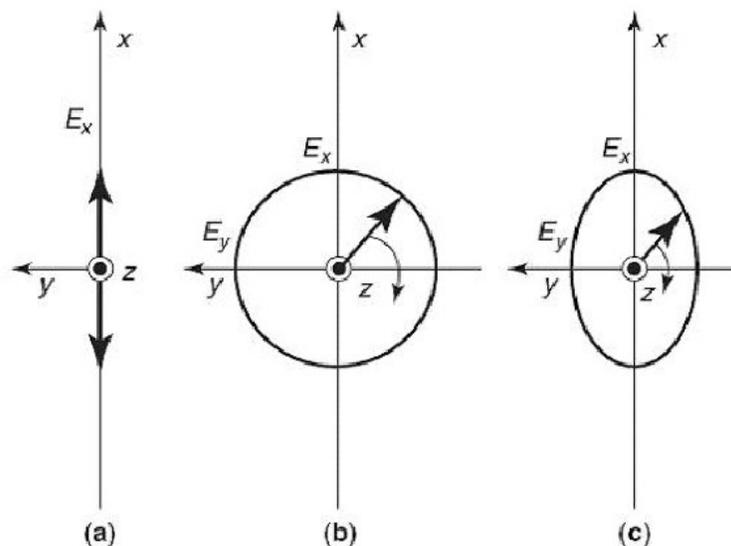


Figura 6.- Polarización de una onda: (a) Lineal, (b) Circular, (c) Elíptica.

Criterio de campo lejano (Far-Field).

El criterio de campo lejano está definido como " la región de campo de una antena donde la distribución del campo angular es esencialmente independiente de la distancia desde la

antena". En esta región domina la parte real de la densidad de potencia. Para ciertas aplicaciones, el criterio de campo lejano es la técnica preferida para determinar la amplitud y/o fase característica de la emisión de una antena bajo prueba. La distancia radial que define la región de campo lejano es:

$$R > 2 D^2 / \lambda$$

Donde: R es la distancia que separa la antena de transmisión y la antena bajo prueba, D es la apertura de la antena bajo prueba y λ es la longitud de onda de operación de la antena bajo prueba. La antena bajo prueba es colocada a una distancia mayor a "R", respecto a una antena fuente, para crear un frente de fase plano sobre la apertura eléctrica de la antena bajo prueba.

Práctica de Radio ASTRONOMÍA BÁSICA

Objetivo general: Determinar los parámetros fundamentales de una antena y una fuente astronómica.

Objetivos particulares:

1.- Determinar:

Resolución de la antena

Beam Width Full Null (BWFN)

Half Power Beam Width (HPBW)

Directividad (d)

Ganancia (G)

Eficiencia del beam principal

2.- Medir la eficiencia relativa de una antena con respecto a la calidad de su superficie.

3.- Medir el diámetro del Sol en microondas.

Material:

Antena con apertura circular en frecuencias de radio (Radio Telescopio Docente II)

Papel aluminio

Sol

Analizador de espectros

Introducción:

Una radio antena se puede definir como la estructura asociada con la región de transición entre una onda guiada en material y una onda libre. Sin tomar en cuenta el tipo de antena todas involucran el principio que la radiación es producida por cargas aceleradas o desaceleradas.

Cada antena posee patrones, los cuales son cantidades de tres dimensiones que involucran la variación del campo o potencia (proporcional al campo al cuadrado) como función de las coordenadas esféricas θ y ϕ .

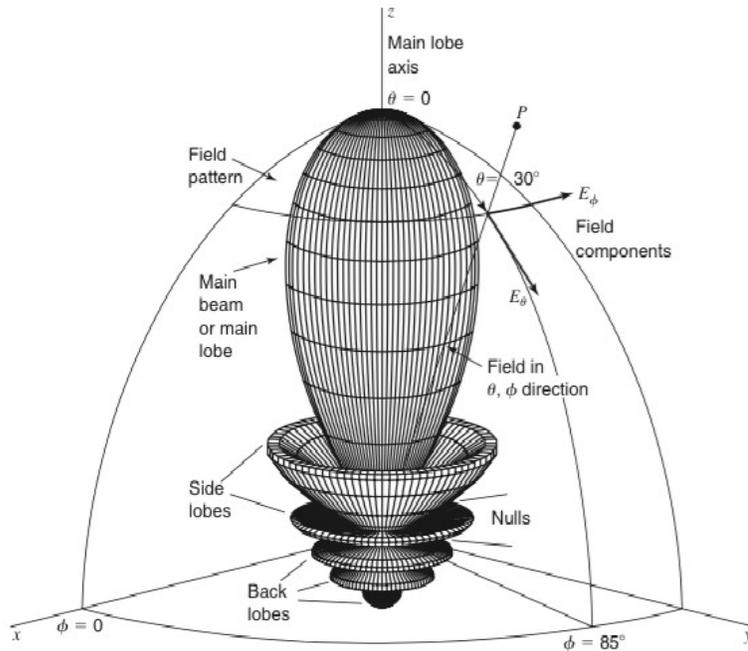


Figura 1: Patrón 3D de una antena direccional con máximo en dirección z a $\theta_0 = 0^\circ$.

La mayoría de la radiación en el patrón de antena está contenida en el beam principal o lóbulo principal acompañada por radiación en los lóbulos laterales. Entre los lóbulos se encuentran los nulos donde el campo se va a cero. La radiación en alguna otra dirección se especifica por los ángulos θ y ϕ .

Procedimiento

- 1.- Se activa la antena y el receptor. Se deja pasar el tránsito solar. Al final se toman datos sin detección de fuente para tener una estimación del ruido.
- 2.- El receptor va grabando los espectros de señal a ruido cada 30 segundos y tránsito del Sol en un archivo de texto para ser analizados después. La adquisición de datos se hace por dos horas.
- 3.- Se arruga papel aluminio y se coloca en la superficie de la antena. Se realizan mediciones cada 30 segundos en el tránsito solar para estimar una medida del rms al cambiar la rugosidad de la superficie en la antena. La adquisición se hace nuevamente por dos horas.

Resultados y análisis de resultados

Se obtienen los espectros de potencia del receptor de la señal a ruido y del tránsito del sol en Potencia (dB) vs frecuencia (Hz). Se checan que todos los archivos de datos tengan datos bien comportados, los que no cumplen este requerimiento son eliminados para no tener errores en la determinación de los parámetros.

Ya que los espectros del receptor tienen un nivel de ruido, se resta este ruido. Para hacer

esto se localizan los archivos del ruido, se promedian dichos datos y se extrae este nivel a los espectros del receptor.

Cabe aclarar que el heterodinaje ha hecho que las frecuencias de decenas de GHz bajen a solo GHz, es por esto que la frecuencias graficada está a 1.2GHz en vez de 12GHz para poder analizar los resultados.

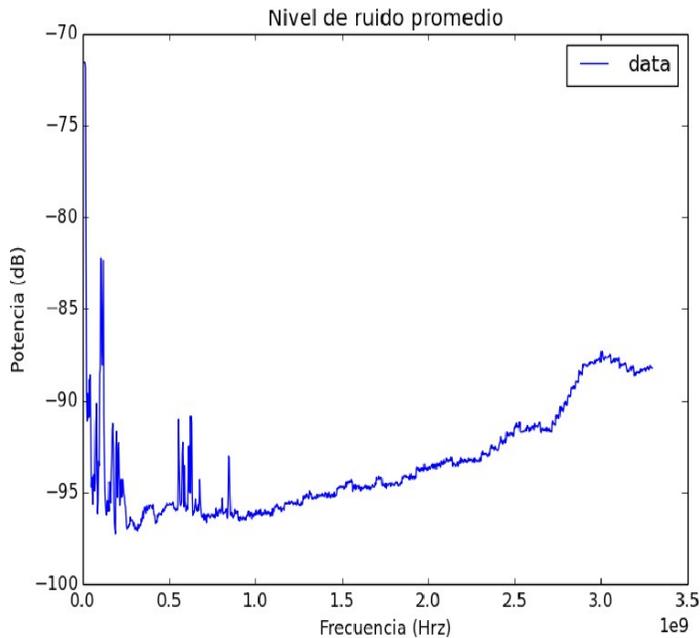


Figura 2: Espectro promedio del ruido del receptor. Se observan del lado izquierdo líneas causadas por señales de comunicaciones en el rango de frecuencias.

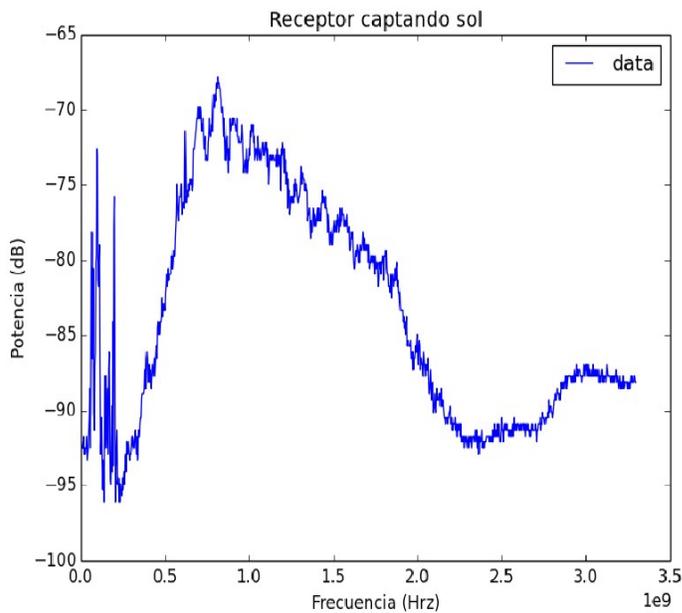


Figura 3: Espectro promedio de la señal del receptor que tiene el tránsito del Sol.

Una vez tenido todos los espectros corregidos por ruido se procede a integrar la potencia en el ancho de banda del receptor.

Se procede a convertir la potencia dB a Watts mediante la formula:

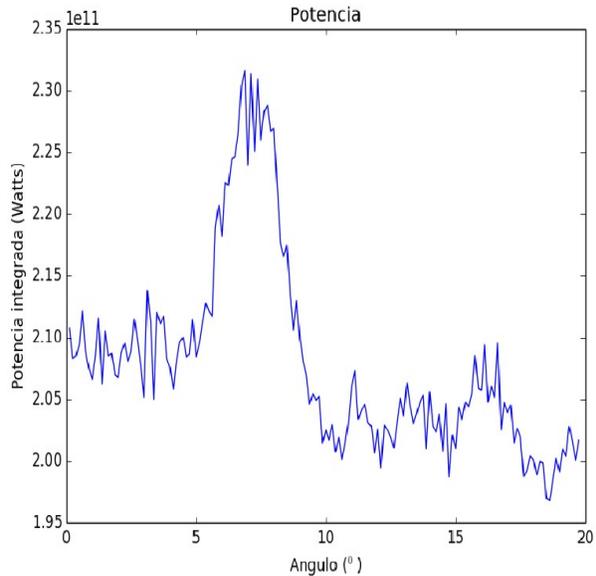
$$P \text{ (dB)} = 10\log_{10} P \text{ (Watt/1Watt)} \quad (1)$$

Una vez hecho esto para cada espectro tomado cada de 30 segundos se va contruyendo la curva de potencia integrada en el ancho de banda.

También se convierte el paso de tiempo a grados angulares mediante la relación que hay entre grados angulares y el tiempo. Si el Sol recorre 15° en 60 minutos, en 0.5 min = 30 segundos se mueve 0.125° . Este es el factor de conversión.

El espectro obtenido es:

Figura 4: Potencia integrada en cada ancho de banda durante el periodo de observación.



La antena usada tiene un diametro de 80cm, observa a una frecuencia de 12GHz. Usando la ecuación de resolución angular $R = 1.22\lambda/D$ con D el diámetro se obtiene una resolución de 2.36°

Se sabe que el diámetro angular del Sol es de 0.5° . El tamaño del sol es menor al tamaño del haz de la antena, así que el patron que se dibuja corresponde a la antena con una pequeña contribución del sol que se calculará después.

Se normaliza la potencia integrada para poder operar y calcular los parámetros de la antena. Para normalizar se toma el nivel de ruido que se tiene y se baja a cero, en seguida se divide por el valor de la potencia más alta calculada y ya se tieneespectro normalizado.

Una vez normalizado el espectro integrado se procede a ajustar una gaussiana al pico mas grande que correspondería al beam principal. El ajuste se hace con el paquete MPFIT disponible en python donde se da una estimación de la prueba χ^2 . El paquete busca el valor mínimo de χ^2 y arroja los valores de la media y sigma del ajuste.

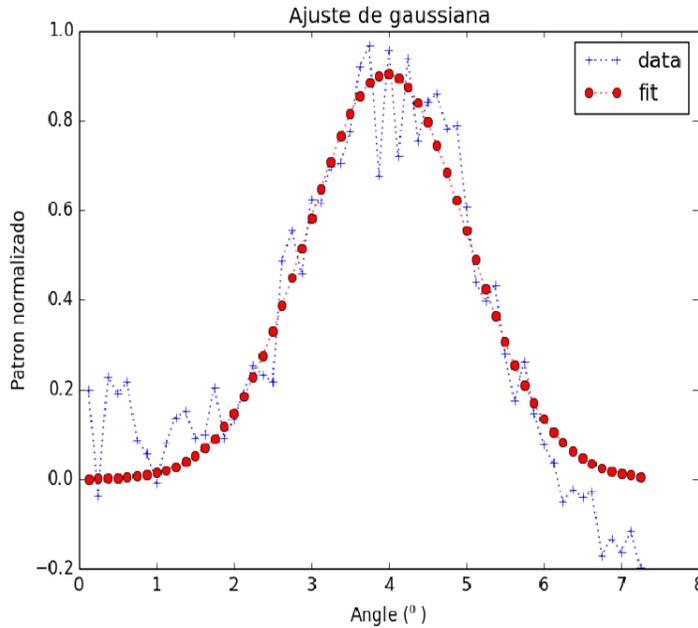


Figura 5: Mejor ajuste de gaussiana al patrón normalizado.

El mejor ajuste da un valor de sigma (σ) de 1.04° con un valor de $\chi^2 = 0.64$.

Se conoce la relación que hay entre el FWHM (Full Width Half Maximum) de una distribución gaussiana y la desviación estandar. La ecuación es

$$\text{FWHM} = 2 \sigma \sqrt{2 \ln 2}$$

Al aplicar la ecuación se tiene que se obtiene un FWHM de 2.44° que se puede tomar como la resolución de la antena por ajustarse una gaussiana.

El libro Radioastronomy de J.D. Krauss menciona que el ancho entre los primeros nulos es el doble de ángulo de la resolución de la antena. Se ha calculado una resolución de 2.44° , por lo que el Full Null Beam Width (FNBW) es 4.88° .

Krauss en su libro también menciona que el área del beam se define como

$$\Omega A = \int_{4\pi} \int P_n(\theta, \varphi) d\Omega \quad (3)$$

y que el Full Width Half Power de la antena en cada dirección θ, φ se relaciona con el área del beam con

$$\Omega A \approx \text{FWHP}_\theta \text{FWHP}_\varphi \quad (4)$$

Como el $\text{FWHP}_\theta = \text{FWHP}_\varphi$ por ser una apertura circular de la antena, entonces se cumple que $\Omega A \approx \text{FWHP}^2$

Por la definición de ΩA , se integra el patrón normalizado sobre toda la esfera, eso quiere decir que se deben tomar en cuenta los lóbulos secundarios. Por lo tanto hay que integrar el espectro de las potencias integradas en toda la observación. El resultado de la integral sobre el espectro normalizado tomando en cuenta los lóbulos secundarios es de $\Omega A =$

5.05°. Por tanto se tiene que $FWHP = \sqrt{\Omega A} = 2.24^\circ$.

También es posible calcular la eficiencia del beam de la antena. La eficiencia se define como

$$\epsilon_M = \Omega_M / \Omega_A \quad (5)$$

donde Ω_M es el área del beam principal sin tomar en cuenta la contribución de los lóbulos secundarios. Se integra el espectro solo debajo del pico principal y se obtiene $\Omega_M = 3.38$. Así $\epsilon_M = 3.15/5.05 = 0.62$. Así se obtiene una eficiencia del 62%. Para calcular la directividad de la antena se debe tomar en cuenta que ésta se define como

$$D = \frac{4\pi}{\int_{4\pi} P_n(\theta, \varphi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (6)$$

Nuevamente se toma en cuenta la integral sobre toda la esfera del espectro tomando en cuenta la contribución de los lóbulos secundarios.

Ya que estamos tabajando con grados directamente se convierte $4\pi = 4\pi(180/\pi)^2 = 41253$. Como $\Omega_A = 5.05^\circ$ se calcula una directividad $D = 41253/5.05 = 8168.81$.

Ya que la directividad se presenta en dBi (decibeles isotrópicos) se emplea la conversión a dBi. $dBi = 10\log_{10}(D) = 10\log_{10}(8168.81) = 39.12dBi$.

La ganancia se calcula conociendo la eficiencia de la antena. Se sabe que la eficiencia de la antena es del 60%. por lo tanto $G = \kappa D = (0.6)(8168.81) = 4901.28$. Nuevamente la ganancia se presenta en unidades dBi. Transformando como el caso anterior se obtiene una ganancia $G = 36.9dBi$.

El siguiente ejercicio es medir la eficiencia relativa de un antena con respecto a la calidad de su superficie. En esta parte se extiende papel aluminio corrugado sobre la superficie de la antena como se muestra en la siguiente figura y se repite el ejercicio anterior, es decir, se toman datos mientras transita el Sol.



Figura 6: Antena con el papel aluminio corrugado en su superficie.

Ruze et al. 1996 presenta una ecuación en donde se estima la eficiencia de la antena respecto del rms σ de la superficie.

$$\eta_A = \eta_0 e^{-(4\pi\sigma/\lambda)} \quad (7)$$

Para obtener la eficiencia de la antena con el papel corrugado tenemos que observar el espectro integrado de la potencia en ese caso. Nuevamente se toman dos horas de datos cada 30 segundos y se van guardando en archivos de texto. Se promedia el nivel de ruido y se le extrae a todos los espectros del receptor. Se integra en el ancho de banda, se convierten los segundos de tiempo a grados angulares como en el caso anterior y se obtiene el nuevo espectro integrado el cual es el siguiente:

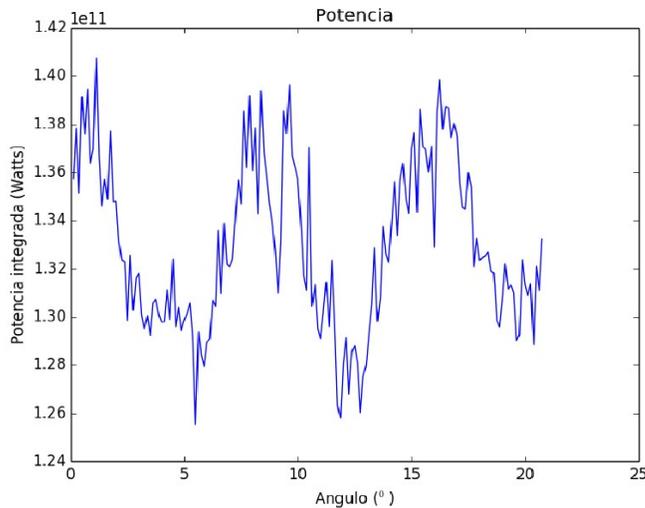


Figura 7: Espectro de la potencia integrada para antena con papel aluminio corrugado en su superficie.

Como se observa en la nueva gráfica, se tiene que el nivel de ruido aumento más, y sobre todo al parecer los lóbulos secundarios se hicieron más prominentes al ver los dos picos extremos. Se normaliza el espectro y se ajusta una gaussiana al pico principal del espectro usando MPFIT nuevamente.

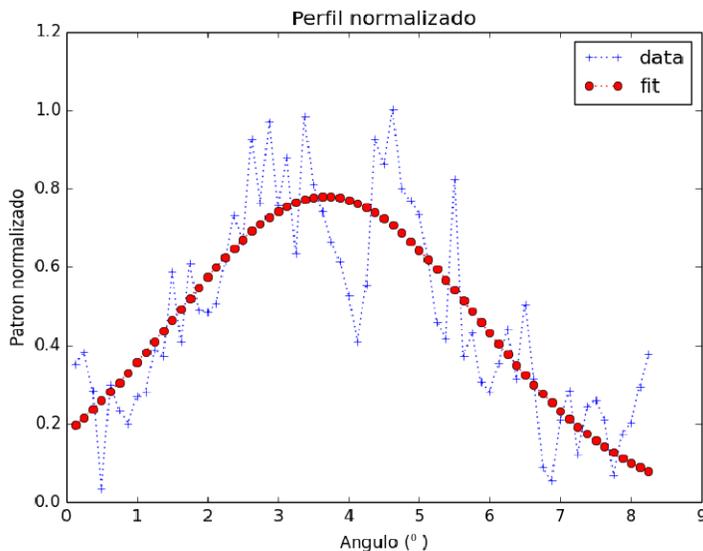


Figura 8: Mejores ajuste del espectro integrado de la antena con papel aluminio corrugado en su superficie.

El mejor ajuste de la gaussiana ha dado un valor de $\sigma = 2.13^\circ$ con un valor de $\chi^2 = 1.32$. Comparando con el valor anterior de la gaussiana de la antena sin el papel aluminio nos dice que esta gaussiana se ha ensanchado. Ahora utilizando la definición de FWHM relacionado con la desviación estándar se obtiene una resolución de la antena $R_{\text{new}} = 5^\circ$.

Conociendo que $1^\circ = 0.01745$ radianes se realiza la conversión y se calcula el nuevo diámetro que tendría la antena con este papel arrugado.

$$R = 1.22 \lambda / D \quad \Leftrightarrow \quad D = 1.22 \lambda / R \quad (8)$$

$\lambda = 2.5\text{cm}$ porque se observa a 12GHz, y $R=0.08725$. Por lo tanto el nuevo diámetro es de $D=28.65\text{cm}$.

El resultado anterior nos indica que al haber aumentado el rms de la superficie de la antena fue equivalente a disminuir el diámetro de la misma y como consecuencia tener una resolución más baja. Esto nos dice que para poder ocupar eficientemente un radiotelescopio, la superficie de la antena debe tener un rms tal que permita ocupar todo el diámetro de la antena.

Ahora sabemos que la eficiencia de la antena esta dada como la razon entre la potencia que emite la fuente y la potencia que recibe la antena. El Sol manda cierta potencia captada por la antena, si suponemos que el pico máximo del ajuste gaussiano es la potencia recibida por la antena, haciendo el cociente de eficiencias se elimina la potencia emitida por el sol y termina siendo el cociente de potencias medias entre los casos con y sin papel aluminio.

$$\frac{\eta_A}{\eta_0} = \frac{\text{Potencia}_{A_{\text{tot}}} / \text{Potencia}_{A_{\text{rec}}}}{\text{Potencia}_{0_{\text{tot}}} / \text{Potencia}_{0_{\text{rec}}}} = \frac{\text{Potencia}_{A_{\text{rec}}}}{\text{Potencia}_{0_{\text{rec}}}} \quad (9)$$

con $\text{Potencia}_{A_{\text{rec}}}$ la potencia recibida máxima en la antena con papel aluminio y $\text{Potencia}_{0_{\text{rec}}}$ sin el papel aluminio en la superficie de la antena.

Calculando los máximos viendo del ajuste y regresando a su valor original sin normalizar se tiene que $\text{Potencia}_{A_{\text{rec}}} = 1.36 \times 10^{11}\text{W}$, $\text{Potencia}_{0_{\text{rec}}} = 2.83 \times 10^{11}$.

Empleando la ecuación de Ruze para estimar el rms en cm se tiene que

$$\sigma = \lambda / (4\pi) \sqrt{-\ln(\eta_A / \eta_0)} \quad (10)$$

sustituyendo $\eta_A / \eta_0 = 0.48$, $\lambda = 2.5\text{cm}$ se tiene que $\sigma = 0.14\text{cm}$. Por lo tanto, sustituyendo el valor claculado de σ y sustituyendolo en la ecuación de Ruze se obtiene que la eficiencia relativa entre la antena con y sin papel aluminio es

$$\eta_A / \eta_0 = 0.6 \Leftrightarrow \eta_A = 0.6 \eta_0 \quad (11)$$

es decir, la antena con el papel aluminio tiene una eficiencia de 0.36, menor a la eficiencia de la antena normal sin papel.

Medir el diámetro angular del sol en radio requiere de unos cuantos cálculos. El libro "Tools of Radioastronomy" de Rohlif menciona que para beams de radiotelescopios se

pueden aproximar con gaussianas y que la relación entre el tamaño de la fuente θ_0 , el tamaño del beam θ_b y el tamaño real de la fuente θ_s está dado por

$$\theta_0^2 = \theta_s^2 + \theta_b^2 \quad (12)$$

Con cada ángulo tomado como la resolución encontrada. Despejando θ_s se tiene que

$$\theta_s = \sqrt{\theta_0^2 - \theta_b^2} \quad (13)$$

Tomando el FWHM calculado para la antena sin el papel aluminio $\theta_0 = 2.44^\circ$ y el $\theta_b = 2.36^\circ$ tomado del cálculo teórico de la resolución angular de la antena da como resultado $\theta_s = 0.62^\circ$

Se han hecho estimaciones del radio solar y Swanson Paul en un artículo publicado en 1973 en Solar Physics da una medida del radio solar a longitudes de onda de milímetros y centímetros. Para el caso de observar el sol a una longitud de onda de 2.8cm de acuerdo al artículo, que es muy cercano a lo que observamos en este experimento (2.5cm), se tiene que la razón entre el radio solar observado y el radio solar fotosférico es $R/R_0 = 1.054$ promediando los valores de las razones halladas en el artículo a 2.8cm de longitud de onda. Como el radio fotosférico se calcula a 0.5° , entonces el radio del Sol a 2.8cm se espera que sea de 0.53° .

Conclusiones

Los parámetros calculados en este trabajo de la antena comparados con los resultados teóricos fueron los siguientes

 Tabla 1: Parámetros básicos de una antena calculados y parámetros teóricos.

	Parámetros Observados	Parámetros teóricos
Resolución de la antena	2.44 ^o	2.36 ^o
Beam Width Full Null (BWFN)	4.88 ^o	4.72 ^o
Half Power Beam Width (HPBW)	2.24 ^o	1.98 ^o
Directividad (d)	39.12 dBi	39 dBi
Ganancia (G)	36.9 dBi	37 dBi

Como se puede observar, los parámetros calculados en esta práctica tienen concordancia con los valores esperados en cada parámetro de la antena, dentro de errores relativos del 5%.

Aumentar el rms en la superficie de una antena es equivalente a disminuir el diámetro de la misma y esto es claramente observable cuando se obtuvo un rms de 0.14cm al poner papel aluminio corrugado en la superficie de la antena y la eficiencia relativa entre la antena del papel corrugado y sin papel fue de 0.6.

El radio del Sol calculado de la resolución del beam observado fue de 0.62° , que difiere en un 17 % del valor que se reporta en la literatura por Swanson, 1973.

Bibliografía

- 1.- Wilson, Rohlfs & Huttemeister, Tools of Radioastronomy, 2009, Fifth Edition, Springer.
- 2.- Kraus, Radioastronomy, 2001
- 3.- Swanson, P.N. 1973, Solar Physics, Vol. 32, Issue 1, 77-80