

Informe Técnico OAN 2004-2

**SISTEMAS DE HOLOGRAFÍA DE MICROONDAS PARA
CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES REFLECTORAS**

SEGUNDA PARTE

**Identificación de radiofuentes útiles
para el sistema de holografía.
Parámetros de muestreo y posición del receptor.**

Febrero, 2004.
José Antonio López Pérez.
CAY/OAN/IGN

CONTENIDO

<i>I. Introducción.</i>	3
<i>II. Criterios de selección de las radiofuentes</i>	3
II.1. Rango de elevación.	3
II.2. Frecuencia de la radiación.	4
II.3. Potencia emitida por la radiofuente.	4
II.4. Tiempo de vida de la radiofuente.	5
II.5. Restricciones impuestas por el receptor.	5
<i>III. Análisis de las radiofuentes.</i>	5
III.1. Radiofuentes naturales.	5
III.2. Transmisores terrestres.	6
III.3. Satélites no geostacionarios.	6
III.4. Satélites geostacionarios.	7
III.5. Conclusiones.	7
<i>IV. Radiofuentes naturales.</i>	8
<i>V. Satélites geostacionarios.</i>	11
<i>VI. Conclusiones.</i>	13
<i>Apéndice I: Parámetros de muestreo.</i>	15
<i>Apéndice II: Posición del receptor de holografía.</i>	18
<i>Apéndice III: Temperatura equivalente de ruido de sistema a 12.75GHz y contribución al error de medida.</i>	20
<i>Apéndice IV: Tamaño de las bocinas del receptor de holografía.</i>	30
<i>Referencias bibliográficas.</i>	32
<i>Acrónimos.</i>	33

I. Introducción.

El presente documento representa la segunda parte del informe “*Sistemas de Holografía de Microondas para la Caracterización de Superficies Reflectoras*”.

Se llevará a cabo la identificación de las radiofuentes más apropiada para un sistema de holografía, como los descritos en la primera parte, atendiendo a las siguientes características:

- Frecuencia y potencia de la señal emitida (a mayor frecuencia y mayor potencia, menor error del sistema de medida),
- Elevación a la que se realizaría la medida (interesa poder medir la superficie del reflector a varias elevaciones para evaluar la influencia de la gravedad sobre la estructura),
- Tiempo de vida de la radiofuente, para poder hacer medidas a lo largo de la vida del radiotelescopio que permitan que su superficie esté siempre optimizada.

Entre las radiofuentes que se considerarán se tiene:

- Radiofuentes naturales: planetas, estrellas, radiogalaxias, máseres y cuásares.
- Radiofuentes artificiales: satélites de comunicaciones y transmisores terrestres.

Los apartados II a V presentan el análisis de estas radiofuentes y los resultados de la búsqueda e identificación.

Además, en función de la frecuencia de emisión de las radiofuentes elegidas como más adecuadas para el sistema de holografía, se determinarán los parámetros de muestreo del diagrama de radiación del radiotelescopio, para la realización de las medidas holográficas. Para ello, se tendrá también en cuenta la resolución deseada en el plano de la apertura.

Estos cálculos se muestran en el apéndice I. Por su parte, en el apéndice II se expone la posición óptima del receptor en el radiotelescopio.

Por último, las características del receptor que se use para el sistema de holografía (ya sea mediante recuperación de la fase o mediante holografía coherente) dependerán de la radiofuente elegida. Sin embargo, el receptor puede tener una temperatura equivalente de ruido de sistema excesiva, tal que introduzca un error de medida demasiado grande, o el tamaño de las bocinas puede ser poco práctico para su instalación en el radiotelescopio. Los apéndices III y IV recogen los cálculos a este respecto.

II. Criterios de selección de las radiofuentes

A continuación se explican los criterios para la selección de radiofuentes apropiadas para el sistema de holografía.

II.1. Rango de elevación.

Se desea que las medidas de la superficie del radiotelescopio puedan realizarse a varios ángulos de elevación diferentes. Ello ayuda a caracterizar el comportamiento de la estructura trasera, que soporta los paneles de la superficie, en función del ángulo de elevación, ya que las medidas revelarían las deformaciones

gravitacionales de la estructura en función de dicho ángulo y permitirían la comparación con los resultados de las simulaciones mediante elementos finitos que se usaron para el diseño de dicha estructura.

II.2. Frecuencia de la radiación.

El uso de radiofuentes que emitan señales de alta frecuencia ofrece las siguientes ventajas sobre las que emiten a bajas frecuencias:

- El error de medida del sistema de holografía es menor (ver fórmulas 31 y 34 en [1]).
- El tamaño de las bocinas del receptor es también menor.
- El tamaño de los mapas del diagrama de radiación a medir también es menor (ver fórmula 26 en [1]), con lo cual puede asumirse que el proceso de medida no está diluyendo deformaciones gravitacionales de la estructura que puedan ocurrir en el rango de ángulos de elevación y de acimut que abarca el mapa medido.

Entre las radiofuentes naturales más intensas se encuentran los máseres moleculares:

- Máseres de metanol (CH_3OH) a 12.18GHz
- Máseres de agua (H_2O) a 22.2GHz
- Máseres de monóxido de silicio (SiO) a 43GHz y a 86GHz.

Por su parte, entre las radiofuentes artificiales más intensas se encuentran las radiobalizas emitidas por satélites de comunicaciones que se usan para su seguimiento o con propósitos de investigación de las condiciones de propagación a través de la atmósfera. Los valores típicos de la frecuencia de estas radiobalizas están alrededor de 4GHz, 12GHz, 20GHz, 30GHz, 40GHz y 50GHz.

Si es posible, es deseable también que el sistema de holografía pueda realizar medidas a diferentes frecuencias, lo que permitiría chequear la presencia de efectos dependientes de la frecuencia que no son atribuibles a las deformaciones de la superficie.

II.3. Potencia emitida por la radiofuente.

Cuanto mayor sea la potencia emitida por la radiofuente, menor será el error que se cometa en las medidas de holografía, pues se dispondrá de mayor relación señal-ruido.

La baja potencia emitida por radiofuentes naturales es un factor limitante para su uso. Sería necesario usar grandes tiempos de integración, lo que prolongaría excesivamente el tiempo de medida, y receptores enfriados a temperaturas criogénicas, lo que complica el diseño y construcción del receptor de holografía. Esto puede no suponer un inconveniente cuando se trata de radiotelescopios que puedan tener receptores enfriados en las bandas de interés.

Por su parte, las radiofuentes artificiales transmiten una mayor potencia sobre reducidos anchos de banda, permitiendo elevadas relaciones señal-ruido incluso con receptores calientes.

II.4. Tiempo de vida de la radiofuente.

Es importante que se disponga de radiofuentes con un tiempo de vida suficiente que permita realizar medidas periódicas de la superficie de la antena, a lo largo del tiempo de vida de la misma, para mantener dicha superficie optimizada.

En este aspecto, las radiofuentes naturales son evidentemente superiores a las artificiales. El tiempo de vida medio de un satélite de comunicaciones es de 10 – 15 años, sin embargo, cuando éste tiempo se acaba, son sustituidos por satélites de nueva generación, con lo cual siempre hay satélites disponibles.

II.5. Restricciones impuestas por el receptor.

El uso de una determinada radiofuente puede estar limitado por ciertas restricciones impuestas por el receptor, entre las que se encuentran: la temperatura equivalente de ruido del sistema y el tamaño de las bocinas de receptor.

Por un lado, si la frecuencia de la radiofuente es muy alta, la temperatura equivalente de ruido del sistema puede ser elevada, haciendo necesario un receptor enfriado, lo cual complica el diseño, construcción y operación del receptor.

Por otro lado, si la frecuencia es muy baja, el tamaño de las bocinas del receptor puede resultar excesivamente grande, complicando su construcción y su instalación. Se limitaría así la posición del receptor a focos del sistema óptico donde hubiera espacio suficiente para colocarlas.

III. Análisis de las radiofuentes.

III.1. Radiofuentes naturales.

El principal inconveniente de las radiofuentes naturales es su baja potencia emitida. En la mayoría de los casos, salvo los máseres, que por otra parte son bs más intensos, radian energía en bandas de frecuencia muy anchas. Por tanto, no limitan la elección de la frecuencia del receptor.

A pesar de su baja intensidad, su uso no es descartado para calibraciones de puntería y foco de los radiotelescopios y para medidas holográficas ocasionales de baja resolución y pobre precisión.

Otro inconveniente para su uso en sistemas de holografía es su constante movimiento en el cielo. Dado que la elevación de la radiofuente va cambiando durante la medida del diagrama de radiación, es necesario adaptar el programa de observaciones holográficas a los intervalos de visibilidad sobre el horizonte.

Las principales ventajas son su fiabilidad, en cuanto a predicción de su posición, y su gran tiempo de vida.

III.2. Transmisores terrestres.

Se pueden usar transmisores terrestres ocasionalmente, cuando existen formaciones geológicas elevadas cerca de la antena o cuando se dispone de presupuesto para construir una torre suficientemente alta sobre la que colocar un transmisor. Así se dispondría de una radiofuente muy intensa a una elevación que dependerá de la altura y la distancia a la que esté dicha formación geológica o dicha torre, pero que normalmente será baja.

Frente a la ventaja de su elevada intensidad, tienen los siguientes inconvenientes:

- La medida se realiza a un único, y por lo general bajo, ángulo de elevación
- La medida puede estar realizándose en condiciones de campo cercano, lo cual implica introducir una serie de correcciones en las medidas para compensar su efecto.
- Pueden necesitar licencias y permisos administrativos para su instalación y operación.

Un ejemplo de sistema de holografía que usa un transmisor sobre una torre es el utilizado para las medidas holográficas de las antenas de 12 metros de diámetro prototipos del proyecto ALMA. En el observatorio VLA (Nuevo México, USA), donde se realizan estas medidas, se ha construido una torre¹ de 50 metros de altura a unos 300 metros de distancia de las antenas. Sobre esta torre se ha instalado un transmisor de ondas milimétricas que es utilizado en las medidas holográficas. Dada la proximidad del transmisor, debe usarse una corrección en las medidas para compensar el efecto del campo cercano.

En este caso se justifica la construcción de dicha torre y del transmisor dadas las exigencias de precisión de la superficie (< 25 micras rms) y de error de medida (< 10 micras rms) del sistema.

Otro buen ejemplo puede encontrarse en [17].

Dado que no existen formaciones geológicas elevadas cerca del lugar de emplazamiento del radiotelescopio de 40 metros que permitan considerar el uso de transmisores para el sistema de holografía ni se considera imprescindible la construcción de una torre y un transmisor, se descarta por completo esta opción a partir de ahora.

III.3. Satélites no geostacionarios.

Este tipo de satélites es descartado por las razones que se exponen a continuación:

- Cortos intervalos de visibilidad sobre el horizonte, variando entre 9 y 17 minutos, aproximadamente, para órbitas circulares de entre 300Km y 900Km de altura. Esto supone una fuerte restricción sobre la medida de mapas completos del diagrama de radiación y sobre la velocidad a la que debe moverse la antena, que puede no estar diseñada y capacitada para el seguimiento de satélites tan rápidos (recordemos que se trata de un radiotelescopio, cuyo uso es el seguimiento de radiofuentes naturales).
- Dificultad de apuntado hacia el satélite: las inhomogeneidades en el campo gravitatorio recorrido por la órbita del satélite en cada pasada hacen que los parámetros orbitales no sean estables y fáciles de predecir a largo plazo, entorpeciendo la disponibilidad de predicciones de puntería precisas.
- Dadas sus aplicaciones y condiciones de operación, su tiempo de vida es menor que el de satélites geostacionarios.

¹ El precio de la torre es de 50 keuro, aproximadamente.

III.4. Satélites geostacionarios.

La principal ventaja de los satélites geostacionarios es la elevada relación señal-ruido que pueden producir en el receptor como resultado de una alta potencia transmitida (PIRE) en un ancho de banda reducido.

Otras ventajas importantes son:

- Gran número de satélites geostacionarios visibles desde el Centro Astronómico de Yebes, lo que permitiría realizar medidas a varios ángulos de elevación.
- Por existir un gran número de satélites geostacionarios visibles, se dispone de un amplio conjunto de frecuencias de las radiobalizas que transmiten, pudiéndose realizar observaciones a distintas frecuencias.
- Visibilidad continua sobre el horizonte, lo que supone una flexibilidad total en la programación de las observaciones.
- Posición nominal fija en el cielo, si bien su movimiento de deriva alrededor de esta posición puede predecirse con gran precisión, lo cual supone una ventaja a la hora de realizar el apuntado de la antena.
- Tiempo de vida relativamente largo (10-15 años)
- Cuando su combustible se agota, se sustituye por otro de nueva generación.

El mayor inconveniente es que, dependiendo de la posición geográfica de la antena (latitud y longitud), existirá un ángulo de elevación por encima del cual no podrán observarse satélites geostacionarios. Este máximo se produce para satélites cuya longitud es igual a la longitud del radiotelescopio.

III.5. Conclusiones.

Según lo explicado en los apartados anteriores sobre las ventajas y los inconvenientes de los distintos tipos de radiofuentes, parece lógico centrar la búsqueda de éstas entre las radiofuentes naturales y los satélites geostacionarios solamente.

En los siguientes apartados se mostrarán los resultados de la búsqueda de radiofuentes adecuadas dentro de estos dos tipos.

IV. Radiofuentes naturales.

Se han utilizado las referencias [2] a [5] para la búsqueda de radiofuentes naturales intensas que puedan ser útiles para el sistema de holografía del radiotelescopio de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes. La tabla siguiente muestra el resultado de la búsqueda donde para cada radiofuente se muestra su intensidad (1 Jansky (Jy) = 10^{-26} W/Hz·m²), su frecuencia de emisión y las coordenadas ascensión recta y declinación.

Fuente: Vizier Service								
Nombre SiO maser	Flujo (Jy)	Frec. (GHz)	RA2000			DEC2000		
			hh	mm	ss	dd	mm	ss
VY CMA	311	43	7	22	58.2	-25	46	3
R LEO	244	43	9	47	33.4	11	25	46
W HYA	440	43	13	49	1.96	-28	22	4
R CAS	373	43	23	58	24.3	51	23	18

Nombre H2O maser	Flujo (Jy)	Frec. (GHz)	RA2000			DEC2000		
			hh	mm	ss	dd	mm	ss
KL IRC2	200.900	22.2	5	35	14.47	-5	22	29.6
W3 OH	14.090	22.2	2	27	4.69	61	52	25.6
SGR 2BM	3.422	22.2	17	47	19.71	-28	23	2.3
W49 N	29.980	22.2	19	10	13.4	9	6	14.4

Tabla 1: Relación de radiofuentes naturales útiles para las medidas holográficas con el radiotelescopio de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes.

En primer lugar, se muestran los máseres de SiO a 43GHz más intensos visibles desde el observatorio. La trayectoria en elevación en el cielo que describen estas radiofuentes se muestra en la figura siguiente:

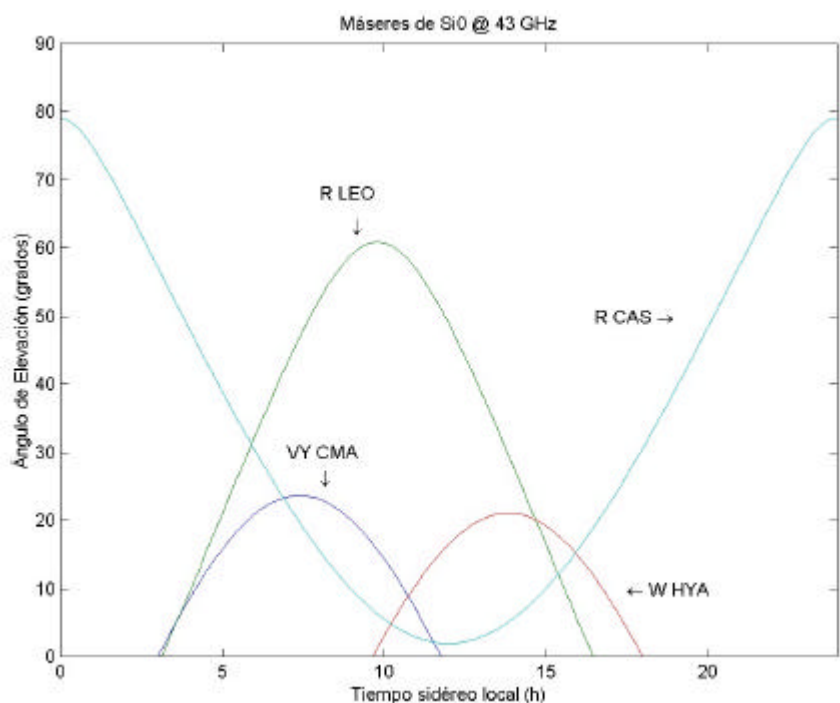


Figura 1: Ángulos de elevación recorridos por los máseres de SiO de la tabla 1.

Como se puede observar, VY CMA y W HYA culminan a bajos ángulos de elevación. En cambio R LEO y R CAS, que es circumpolar, permitirían medidas en rangos mucho más amplios.

En segundo lugar se muestran los máseres de H₂O. Nótese la elevada intensidad de KL IRC2, lo cual le convierte en la mejor radiofuente natural para la holografía. No en vano ha sido utilizada en medidas holográficas como se muestra en [6].

Estos máseres recorren los ángulos de elevación que se muestran en la figura siguiente:

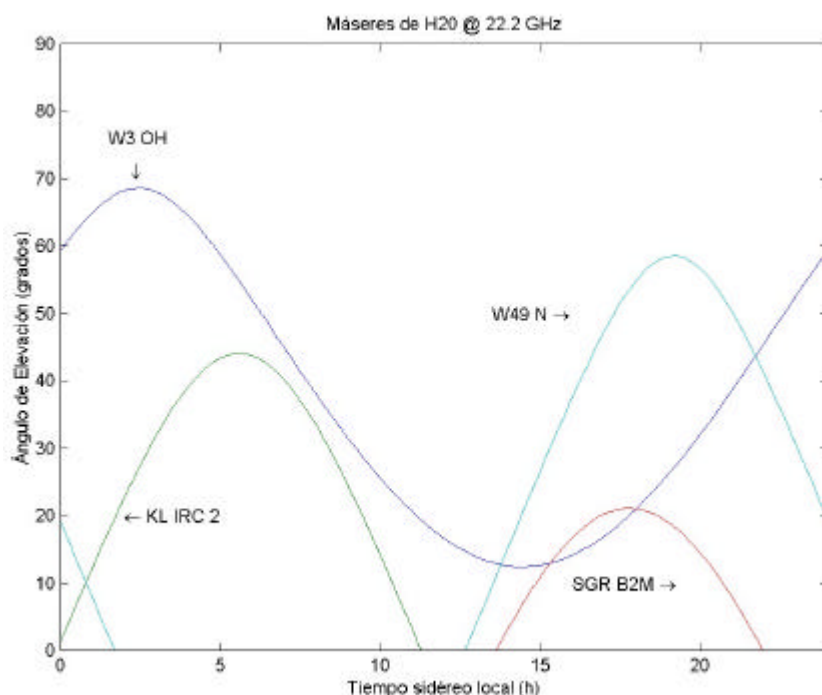


Figura 2: Ángulos de elevación recorridos por los máseres de H₂O de la tabla 1.

Las medidas holográficas descritas en [6] muestran los resultados de aplicar la técnica de holografía coherente (ya descrita en [1]) al radiotelescopio de 30 metros MRT (IRAM, Pico de Veleta) utilizando máseres intensos de H₂O a 22GHz. Para ello se utilizó una antena de referencia de 1.75 metros de diámetro y sendos receptores (test y referencia) calientes con entrada en mezclador (800K de temperatura de ruido equivalente en simple banda). Con este sistema y esta radiofuente se consiguió realizar mapas del diagrama de radiación de 32x32 puntos, lo cual supone una resolución de 1.6 metros en la apertura (baja resolución), y una precisión en la medida de 25 μ m. Sin embargo, el tiempo de medida fue de 5 horas durante 8 días consecutivos para poder completar cuatro mapas del diagrama de radiación, ya que sólo el tiempo de integración necesario para alcanzar esa precisión fue de 18 segundos por punto del mapa.

Aunque sería viable, similares condiciones son poco prácticas para su aplicación en el radiotelescopio de 40 metros debido fundamentalmente al largo tiempo de medida requerido.

Otro inconveniente adicional de las radiofuentes naturales es que su ángulo de elevación cambia rápidamente (10°/hora, aproximadamente), lo cual es un factor limitante para las observaciones holográficas porque sería necesario planificar observaciones durante varios días para completar una medida del diagrama de radiación en torno a un determinado ángulo de elevación deseado.

En el caso de utilizar la técnica de recuperación de fase, el tiempo de medida tendrá que multiplicarse por dos, dado que se necesitan dos medidas de la amplitud del diagrama de radiación en condiciones de focalización diferentes, como ya se explicó en [1]. Esto implica que la realización de medidas holográficas mediante recuperación de fase resulta ser poco adecuada cuando sólo se dispone de radiofuentes naturales, ya que el tiempo de medida es excesivamente grande.

Planetas. Cálculos con Venus.

Finalmente, también se ha querido investigar los planetas como radiofuentes útiles para el sistema de holografía. El más adecuado parece ser Venus, debido a que tiene mayor temperatura de brillo que el resto de planetas. Según la información proporcionada en [7], puede extrapolarse que la temperatura de brillo de Venus a 12.5GHz es 500K. La densidad de flujo para Venus tendrá un máximo cuando esté más cerca de la Tierra, lo que ocurre cada 1.5 años, y vendrá dada por:

$$S = \frac{2k}{\lambda^2} \cdot T_B \cdot \Omega_S$$

donde k es la constante de Boltzmann ($1.380662 \cdot 10^{23}$ J/K), λ es la longitud de onda a 12.5GHz, T_B es la temperatura de brillo a 12.5GHz y Ω_S es el ángulo sólido que comprende a Venus desde el punto de observación.

Sustituyendo valores en la fórmula anterior, se obtiene una densidad de flujo de 1470 Jy, que es mucho menor de la que se puede obtener con máseres de H_2O . Por tanto, los planetas serán descartados como radiofuentes útiles para el sistema de holografía, no así para otro tipo de medidas como calibraciones de puntería y focalización o medidas de eficiencia de apertura.

También se han encontrado algunos máseres de metanol (CH_3OH) a 12.18GHz. Sin embargo, su intensidad es con diferencia mucho menor que la de los máseres de H_2O , por lo que también han sido descartados.

V. Satélites geostacionarios.

Se ha realizado una búsqueda de satélites geostacionarios con posiciones orbitales comprendidas entre 70°E y 70°W , ya que los satélites fuera de este rango se observarían desde el Centro Astronómico de Yebes con ángulos de elevación inferiores a 10° , lo cual empieza a ser un ángulo demasiado bajo para hacer medidas holográficas de calidad. Téngase en cuenta también que los modelos de compensación del apuntado de la antena por refracción atmosférica son menos fiables a elevaciones bajas debido a que el recorrido de la señal por la atmósfera es mayor.

La gráfica siguiente muestra la elevación a la que se observa una determinada posición de la órbita geostacionaria desde el Centro Astronómico de Yebes, cuyas coordenadas son $40^{\circ} 31' 31'' \text{ N}$ y $3^{\circ} 5' 17'' \text{ W}$.

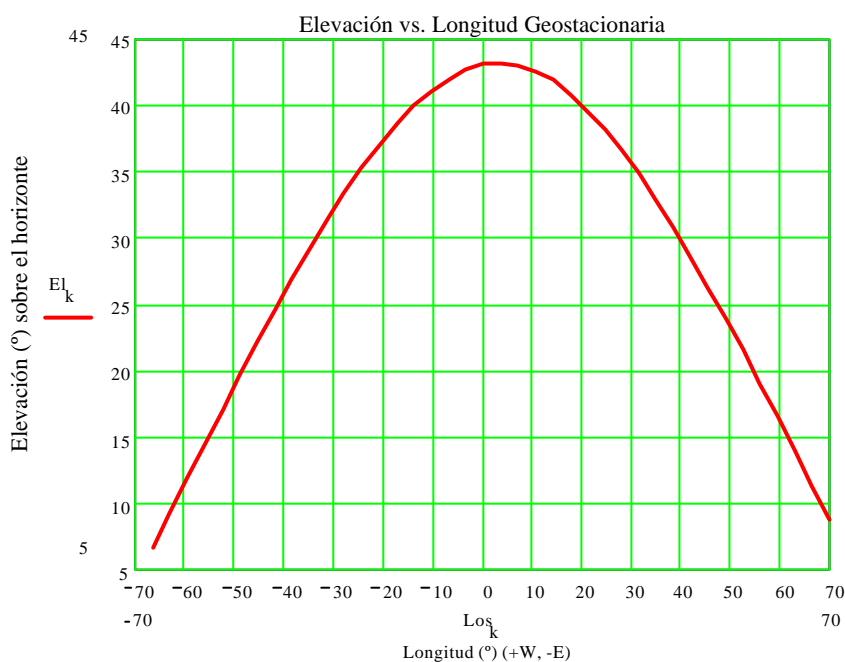


Figura 3: Ángulo de elevación con que se observan las posiciones geoestacionarias desde el Centro Astronómico de Yebes

Como puede observarse, la máxima elevación posible de medida es, aproximadamente, 43° , y sólo podrá obtenerse con satélites geostacionarios cuya longitud coincida con la longitud de la estación.

A continuación se muestra una tabla con los satélites geostacionarios encontrados como más apropiados para la realización de medidas holográficas con el radiotelescopio de 40 metros.

Para la búsqueda se han utilizado las siguientes fuentes:

- Información proporcionada por los propios operadores del satélite
- Jean-Philippe Donnio: 'The Satellite Encyclopedia'. Tag's Broadcasting Services, 1993-2000. <http://www.TBS-satellite.com/tse>.
- <http://www.uplinkstation.com>

La tabla siguiente muestra los resultados de dicha búsqueda. Como puede comprobarse, hay una gran variedad de satélites con los que realizar las medidas a distintas elevaciones. La frecuencia de las radiobalizas se encuentra en la banda Ku de frecuencias.

Hay que hacer especial mención a la potente radiobaliza (20dBW mínimo) emitida por HISPASAT 1C. Este puede ser un buen candidato para los primeros días de la holografía con el radiotelescopio de 40 metros.

Satélite	Longitud GEO	Elevation (grados)	Radiobaliza (GHz)	PIRE (dBW)	Polarización	Año de fin vida útil
Eutelsat HB3	13°E	40	12,5	8 min	H	2011,5
Eutelsat W2	16°E	39	12,501	9 min	H	2010
Eutelsat W3	7°E	42	12,501	9 min	H	2011
Eutelsat W1	10°E	42	12,50025 12,74975	9 min 9 min	H H	2012
Eutelsat EUROIRD	28,5°E	32	12,501	TBC	H	2013
Eutelsat ATLANTIC BIRD 1	12,5°W	42	12,50015 12,74985	9 min 9 min	H H	2017
Eutelsat ATLANTIC BIRD 2	8°W	42	12,5005	9 min	H	2013
Eutelsat ATLANTIC BIRD 3	5°W	43	11,6999	9 min	V	2014
Eutelsat SESAT	36°E	28	12,501	9 min	H	2010
Hispasat 1C	30°W	35	11,702	20 min	V	2015
Hispasat 1D	30°W	35	11,7	12 min	H	2017
Intelsat 705	50°W	24	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2010
Intelsat 709	55,5°W	19	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2011
Intelsat 706	53°W	21	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2010
Intelsat 707	1°W	43	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2011
Intelsat 801	31,5°W	35	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2010
Intelsat 901	18°W	41	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2015
Intelsat 903	34,5°W	32	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2017
Intelsat 905	24,5°W	39	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2017
Intelsat 906	64°E	9	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2017
Intelsat 907	27,5°W	36	11,198 11,452	6 min 6 min	RHCP RHCP	2018

Tabla 2: Relación de satélites geoestacionarios útiles para las medidas holográficas con el radiotelescopio de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes.

Muchos de los satélites de la tabla anterior también poseen radiobalizas en banda C (4GHz). Sin embargo, esta banda ofrece las siguientes desventajas frente a la banda Ku:

- El tamaño de las bocinas del receptor es mayor, al ser la frecuencia de operación menor, lo que hace que el receptor sea más grande y menos manejable.
- El área en el cielo del diagrama de radiación a medir también es mayor (en un factor 9, aproximadamente, ver fórmula 26 en [1]), lo cual implica que durante la medida del diagrama se estarían diluyendo las deformaciones gravitacionales de la antena en todo el rango de acimut y elevación del mismo. Además si el área a barrer para la medida es grande, se puede sufrir interferencia por satélites vecinos [8].
- Por último, dado que en banda C hay que mover la antena barriendo zonas de cielo más amplias, es necesario moverla a velocidades más elevadas para poder realizar la medida en un tiempo razonable. Esto es desaconsejable porque se pueden producir daños en los servomecanismos.

Ejemplos de medidas holográficas con satélites geostacionarios pueden encontrarse en [9] a [16].

En el caso del radiotelescopio de 30 metros MRT (IRAM, Pico de Veleta), se diseñó un receptor para recibir la radiobaliza sin modular a 39.592GHz del satélite ITALSAT. Con dicho receptor se ha conseguido reducir el error de la superficie a $50\mu\text{m}$ rms mediante la medida de mapas del diagrama de radiación de alta resolución (128x128 puntos, lo que implica 35cm de resolución en la apertura, aproximadamente). El tiempo de medida de cada mapa es de 3.5 horas, aproximadamente, y el error de medida se estima en $20\mu\text{m}$ rms para un tiempo de integración de 0.25s por punto del mapa.

Dada la mayor potencia transmitida por el satélite, su uso supone una notable reducción del tiempo de medida y un aumento de la resolución debido a que el tiempo de integración es menor que con radiofuentes naturales, pudiéndose además medir más área del diagrama de radiación para conseguir dicho aumento de la resolución.

VI. Conclusiones.

De acuerdo con la información recopilada y presentada para cada tipo de radiofuentes, se concluye que las más apropiadas para el sistema de holografía del radiotelescopio de 40 metros son los satélites geostacionarios. Sus principales ventajas frente a las demás han sido expuestas en la sección III.4.

A partir de la tabla de satélites geostacionarios útiles mostrada anteriormente y de los cálculos presentados en los apéndices, se puede llegar a las siguientes conclusiones para el sistema de holografía:

- El receptor debe ser sintonizable entre 11.198GHz y 12.75GHz.
- La polarización recibida será RHCP, ya que es la dominante entre el conjunto de satélites y permite también la recepción de polarización lineal, si bien en este caso se produciría una pérdida de 3dB.
- Los ángulos de elevación a los que se podrán realizar medidas están en torno a: 42°, 35°, 28° y 20°.
- El intervalo de muestreo del diagrama de radiación varía entre 103" para la frecuencia más alta y 117" para la más baja (ver apéndice I).
- El área del mapa de alta resolución del diagrama de radiación varía entre $3.6^\circ \times 3.6^\circ$ para la frecuencia más alta y $4.14^\circ \times 4.14^\circ$ para la más baja (ver apéndice I).
- El receptor de holografía estará situado en la cabina del subreflector, dadas las ventajas explicadas en el apéndice II.
- La temperatura equivalente de ruido de sistema en toda la banda y a todos los ángulos de elevación se tomará como 145K para el canal de test y 120K para el canal de referencia, como se explica en el apéndice III. Estos valores serán utilizados en simulaciones posteriores.
- El tamaño de las bocinas del receptor no supone ningún inconveniente a su instalación en la cabina del subreflector, como se explica en el apéndice IV.
- La contribución al error de medida debido a la temperatura de ruido de sistema resulta ser (apéndice III):
 - 80 micras RMS para el caso de un sistema de recuperación de la fase (fórmula 31 en [1]).
 - 26 micras RMS para el caso de un sistema de holografía coherente (aplicando la teoría recogida en [21]).

En los próximos capítulos del informe "*Sistemas de Holografía de Microondas para la Caracterización de Superficies Reflectoras*", se presentarán los resultados de simulaciones numéricas de sendos sistemas de holografía (recuperación de fase y coherente) llevadas a cabo a partir de estas conclusiones.

Apéndice I: Parámetros de muestreo.

Parámetros de muestreo en las observaciones de holografía con el radiotelescopio de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes

Variables auxiliares:

$m := 0..4$ (cinco frecuencias de radiobaliza a analizar)
 $q := 0..2$ (tres valores de resolución en la apertura a considerar)
 $\text{GHz} := 10^9$

Constantes:

Velocidad de la luz en el vacío (m/s): $c := 2.997925 \cdot 10^8$
Frecuencia y longitud de onda de las radiobalizas (GHz):

$$\begin{array}{ccccc} f_0 := 11.198 & f_1 := 11.452 & f_2 := 11.7 & f_3 := 12.5 & f_4 := 12.75 \\ \lambda_0 := \frac{c}{f_0 \cdot \text{GHz}} & \lambda_1 := \frac{c}{f_1 \cdot \text{GHz}} & \lambda_2 := \frac{c}{f_2 \cdot \text{GHz}} & \lambda_3 := \frac{c}{f_3 \cdot \text{GHz}} & \lambda_4 := \frac{c}{f_4 \cdot \text{GHz}} \end{array}$$

Factor de sobremuestreo: $k := \frac{1}{0.85}$

Diámetro del reflector primario (m): $D := 40$

Resoluciones deseadas en el plano de la apertura:

Baja resolución	Media resolución	Alta resolución
$d_0 := \frac{D}{25}$	$d_1 := \frac{D}{50}$	$d_2 := \frac{D}{100}$

$$d = \begin{pmatrix} 1.6 \\ 0.8 \\ 0.4 \end{pmatrix} \text{ metros}$$

Número de puntos del diagrama de radiación a medir (se toma una potencia de 2 para que el algoritmo de FFT sea eficiente):

$$n_q := \frac{k \cdot D}{d_q} \quad N_q := 2^{\left\lfloor \frac{\log(n_q)}{\log(2)} \right\rfloor + 1} \quad N = \begin{pmatrix} 32 \\ 64 \\ 128 \end{pmatrix}$$

Baja resolución: Con un mapa de 32 x 32 puntos se consigue una resolución mínima de 1.6 metros

Media resolución: Con un mapa de 64 x 64 puntos se consigue una resolución mínima de 0.8 metros

Alta resolución: Con un mapa de 128 x 128 puntos se consigue una resolución mínima de 0.4 metros

Area medida en el plano de apertura L (m) x L (m): $L := k \cdot D$ $L = 47.059$

Ancho de banda espacial de la apertura: $B_m := \frac{D}{2 \cdot \lambda_m}$

Frecuencia de muestreo (teorema de Nyquist): $f_{s_m} := k \cdot 2 \cdot B_m$

Intervalo de muestreo (arcsec): $\Delta_m := \frac{1}{f_{s_m}} \cdot \left(\frac{180 \cdot 3600}{\pi} \right)$ $\Delta = \begin{pmatrix} 117.345 \\ 114.742 \\ 112.31 \\ 105.122 \\ 103.061 \end{pmatrix}$

A 11.198GHz, el intervalo de muestreo es 117 "
 A 11.452GHz, el intervalo de muestreo es 114 "
 A 11.7GHz, el intervalo de muestreo es 112 "
 A 12.5GHz, el intervalo de muestreo es 105 "
 A 12.75GHz, el intervalo de muestreo es 103 "

Tamaño del diagrama de radiación a medir, T (°) x T (°): $T_{m,q} := \frac{(N_q - 1) \cdot \Delta_m}{3600}$

$T = \begin{pmatrix} 1.01 & 2.054 & 4.14 \\ 0.988 & 2.008 & 4.048 \\ 0.967 & 1.965 & 3.962 \\ 0.905 & 1.84 & 3.708 \\ 0.887 & 1.804 & 3.636 \end{pmatrix}$

A 11.198 GHz, el tamaño del mapa a medir es:

1.01° x 1.01° para mapas de 32 x 32 puntos
 2.054° x 2.054° para mapas de 64 x 64 puntos
 4.14° x 4.14° para mapas de 128 x 128 puntos

A 11.452 GHz, el tamaño del mapa a medir es:

0.988° x 0.988° para mapas de 32 x 32 puntos
 2.008° x 2.008° para mapas de 64 x 64 puntos
 4.048° x 4.048° para mapas de 128 x 128 puntos

A 11.7 GHz, el tamaño del mapa a medir es:

0.967° x 0.967° para mapas de 32 x 32 puntos
 1.965° x 1.965° para mapas de 64 x 64 puntos
 3.962° x 3.962° para mapas de 128 x 128 puntos

A 12.5 GHz, el tamaño del mapa a medir es:

0.905° x 0.905°	para mapas de 32 x 32 puntos
1.84° x 1.84°	para mapas de 64 x 64 puntos
3.708° x 3.708°	para mapas de 128 x 128 puntos

A 12.75 GHz, el tamaño del mapa a medir es:

0.887° x 0.887°	para mapas de 32 x 32 puntos
1.804° x 1.804°	para mapas de 64 x 64 puntos
3.636° x 3.636°	para mapas de 128 x 128 puntos

Apéndice II: Posición del receptor de holografía.

El diseño del radiotelescopio de 40 metros incluye la posibilidad de colocar el receptor de holografía en la cabina del subreflector, permitiendo así hacer las medidas desde el foco primario². Este receptor se moverá solidariamente con el subreflector, que tiene cinco grados de libertad.

Se ha previsto que la bocina de test de dicho receptor ilumine la superficie del reflector principal a través de una ventana radomizada de 26cm de diámetro en el vértice del subreflector. Por su parte, la bocina de referencia apunta hacia el cielo a través de otra ventana radomizada de 80cm de diámetro en la parte trasera (puerta de acceso) de la cabina.

Las observaciones con este receptor serían llevadas a cabo retrayendo el subreflector 1204mm desde su posición para observaciones con receptores con foco Cassegrain hasta la posición en que la bocina de test quede en foco primario. Este movimiento es llevado a cabo por un servomecanismo. La figura siguiente esboza esta situación.

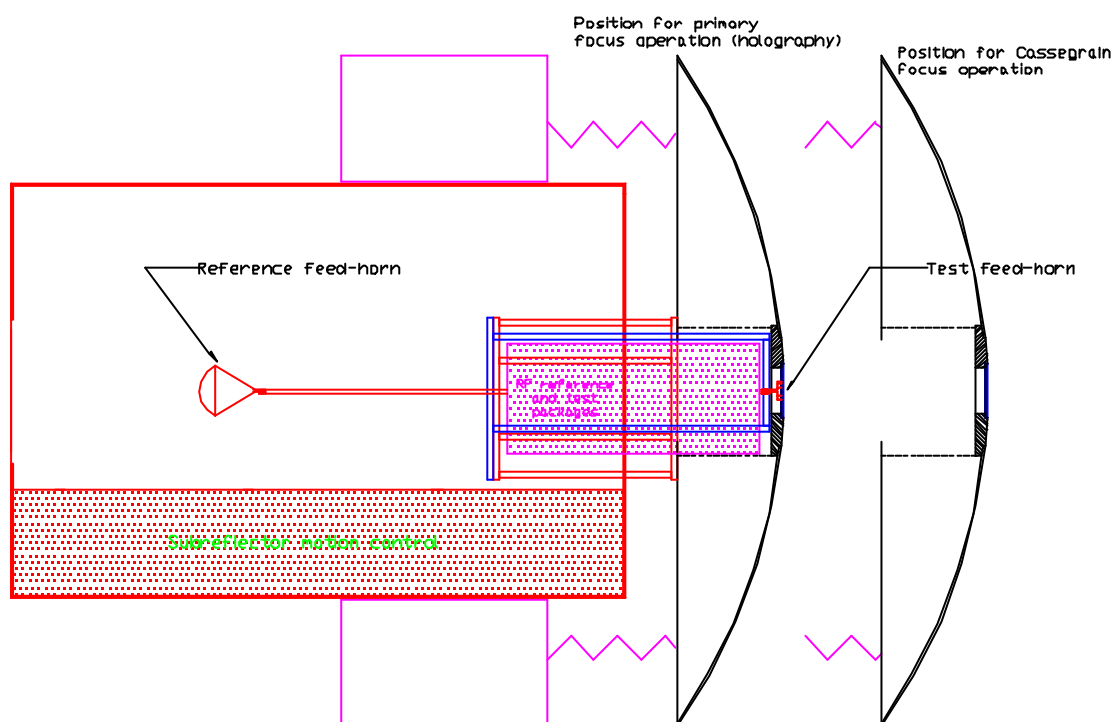


Figura AII.1: Instalación del receptor en foco primario.

² Un esquema igual se usa en el radiotelescopio de 30m de IRAM en Pico de Veleta y en el proyecto ALMA.

Se ha decidido que este emplazamiento es el idóneo para instalar el receptor de holografía por las siguientes razones:

- Desde este foco se mide sólo el estado de la superficie del reflector principal, cuya contribución al error de la superficie es dominante. No se miden así contribuciones menores al error de superficie de otros reflectores y espejos dentro de la cabina como ocurriría en caso de estar situado en foco Cassegrain.
- El receptor resulta bastante compacto y los osciladores locales pueden ser compartidos por ambos canales para obtener una gran estabilidad de fase en las medidas.
- El tamaño de las bocinas, como se muestra en el apéndice IV, no impone ninguna limitación espacial dentro de la cabina del subreflector.

Apéndice III: Temperatura equivalente de ruido de sistema a 12.75GHz y contribución al error de medida.

La temperatura equivalente de ruido del sistema está formada por la suma de la temperatura de ruido del receptor más la temperatura de ruido de la antena.

Temperatura de ruido del receptor:

Elemento	Ganancia	Temperatura de Ruido
Bocina + Polarizador	-0.25dB	17 K
LNA	40dB	65 K
Mezclador	30dB	2610 K
	Total	87K

Para el cálculo de la temperatura de ruido del receptor se ha tomado valores proporcionados para componentes comerciales por fabricantes de amplificadores de bajo nivel de ruido y mezcladores. Sin embargo, para las pérdidas de la bocina y del polarizador se ha hecho una estimación basándose en la experiencia con otros receptores en el CAY.

La fórmula de la temperatura de ruido de un conjunto de cuadripolos lineales en cascada nos da el valor de la temperatura equivalente de ruido del receptor:

$$T_{REC} = (L_{feed} - 1) \cdot T_0 + L_{feed} \cdot \left(T_{RF} + \frac{T_{DWN}}{G_{RF}} \right) \text{ K}$$

donde $T_0 = 290\text{K}$.

Temperatura de antena

La temperatura equivalente de ruido de la antena viene dada por la siguiente expresión:

$$T_a = h_B \cdot T_{sky} + \frac{1}{2} (1 - h_B) (T_{sky} + T_g)$$

$$T_{sky} = T_{atm} + T_{bck}$$

donde T_a es la temperatura de ruido de antena,

h_B es la eficiencia de haz,

T_{sky} es la temperatura de brillo del cielo, que es la suma de la temperatura de brillo de la atmósfera (T_{atm}) y de la de la radiación de fondo cósmico ($T_{bck} = 2.7\text{K}$),

T_g es la temperatura de brillo del suelo (300K).

Con esta fórmula se asume la aproximación de que el haz principal de la antena está dirigido al cielo y que, del resto del diagrama, la mitad apunta al cielo y la otra mitad al suelo.

Con ayuda de la figura siguiente, se estima que T_{atm} vale 20°K a 20° elevación y 12GHz. Aunque este valor mejora cuando aumenta el ángulo de elevación y disminuye la frecuencia, se considerará constante en todo el rango de elevación y a todas las frecuencias de radiobaliza.

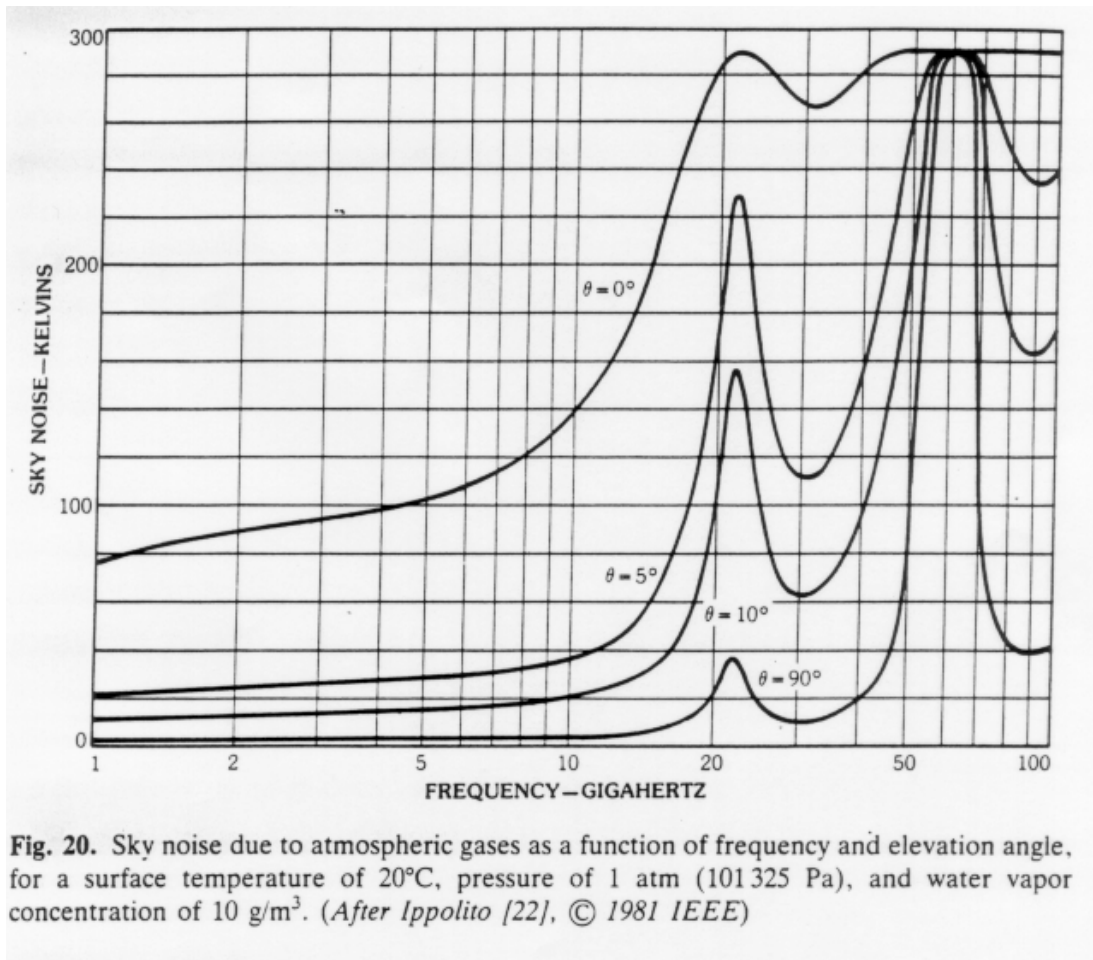


Fig. 20. Sky noise due to atmospheric gases as a function of frequency and elevation angle, for a surface temperature of 20°C, pressure of 1 atm (101 325 Pa), and water vapor concentration of 10 g/m³. (After Ippolito [22], © 1981 IEEE)

Figura AIII.1: Ruido atmosférico debido a gases en función de la frecuencia y el ángulo de elevación.

Para calcular la eficiencia de haz, se utiliza la siguiente fórmula 13 de [18] que la relaciona con la eficiencia de apertura [18]:

$$h_b = 0.8899 \cdot \left[\frac{q_b}{l/D} \right]^2 \cdot h_a$$

donde θ_b es el ancho de haz a potencia mitad
 λ es la longitud de onda de la señal
 D es el diámetro de la antena
 η_a es la eficiencia de apertura

Los valores de θ_b y de η_a han sido calculados con el programa SABOR [19] para la configuración en foco primario, que es el foco elegido para instalar el receptor de holografía.

El ancho de haz resulta ser de 138", aproximadamente, y la eficiencia de apertura es del 73%, considerando una bocina "cos-q" que produzca una iluminación con -10dB en el borde del reflector y un error RMS inicial de la superficie de 300 micras.

Con estos datos, se obtiene una eficiencia de haz del 84%. Sustituyendo, resulta que la temperatura de ruido equivalente de antena es 45K.

Por tanto, la temperatura de ruido de sistema será $45K+87K = 132K$. Adoptando un margen de seguridad del 10% en las estimaciones, podemos considerar que dicha temperatura será menor de 145K.

Estos cálculos se refieren a la temperatura de ruido de sistema en el canal de test del receptor de holografía. Para el canal de referencia, cuya antena es una bocina cónica corrugada orientada hacia la dirección del satélite, la temperatura de ruido de sistema será algo menor, pues todo su diagrama observa la temperatura de brillo del cielo. En este caso, $T_a = T_{sky} = 20K$. Por tanto, el valor total será 107K. Adoptando de nuevo el mismo margen de seguridad, podemos considerar que en el canal de referencia la temperatura de ruido de sistema será menor de 120K.

Contribución al error de medida de un sistema de recuperación de fase.

Aplicando la fórmula 31 en [1] y tomando los siguientes valores:

- PIRE=12dBW
- Distancia al satélite = 38000Km
- Diámetro = 40m
- Eficiencia de apertura = 0.73 (estimado con SABOR)
- Ancho de banda = 400Hz
- Tiempo de integración = 0.25s
- Temperatura de ruido de sistema = 145K
- Frecuencia = 11.2GHz
- Taper de iluminación = -10dB
- Número de puntos del mapa = 128

se tiene que la contribución al error de medida debido al ruido del sistema es 80 micras.

A este valor habría que sumarle la contribución debida a errores de medida de amplitud y fluctuaciones del ángulo de llegada de la señal y errores de puntería de la antena. Esto será tratado en sucesivos capítulos.

Contribución al error de medida de un sistema de holografía coherente.

Para este cálculo se utiliza la teoría presentada en [21].

Constantes:

$$k := 1.380658 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{\text{Wat}}{\text{Hz} \cdot \text{K}} \quad \text{Constante de Boltzmann}$$

$$v := 2.997925 \cdot 10^8 \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} \quad \text{Velocidad de la luz en el vacío}$$

Parámetros de la antena y los receptores:

	Test	Referencia
Diametro:	$D_1 := 40 \text{ m}$	$D_2 := 0.24 \text{ m}$
Eficiencia:	$\eta_1 := 0.73$	$\eta_2 := 0.65$
Temperatura de ruido de sistema:	$T_1 := 145 \text{ K}$	$T_2 := 120 \text{ K}$
Número de puntos de la FFT:	$K := 100$	valor típico
Tiempo de integración (s):	$\tau := 0.25 \cdot \text{sec}$	valor típico
Ancho de banda de predetección:	$B := \frac{K}{\tau}$	$B = 400 \text{ Hz}$
Ancho de banda de postdetección:	$W := \frac{1}{2 \cdot \tau}$	$W = 2 \text{ Hz}$

Frecuencia de trabajo $f := 11.198 \text{ GHz}$ $\lambda := \frac{v}{f}$ $\beta := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$

Error rms en la superficie: $\epsilon := 300 \cdot \mu\text{m}$ Valor estimado del ajuste inicial de paneles

Error rms de fase: $\delta := \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\lambda}$ $\delta = 0.141 \text{ rad}$

Distancia de correlación: $c := 0 \cdot \text{mm}$

Parámetros de muestreo:

Factor de sobremuestreo: $\kappa := \frac{1}{0.85}$ $\kappa = 1.176$

Resolucion deseada en el plano de la apertura (m): $d := 0.40 \text{ m}$

Numero de puntos del mapa: $n := \frac{\kappa \cdot D_1}{d}$ $N := 2^{\left\lfloor \frac{\log(n)}{\log(2)} \right\rfloor + 1}$ $N = 128$

Dimensiones del mapa en la apertura, L x L (m): $L := \kappa \cdot D_1$ $L = 47.059 \text{ m}$

Ancho de banda en la apertura: $\text{BW} := \frac{D_1}{2 \cdot \lambda}$

Frecuencia de muestreo: $f_s := \kappa \cdot 2 \cdot \text{BW}$ $f_s = 1.758 \times 10^3$

Intervalo de muestreo (arcsec): $\Delta := \frac{1}{f_s}$ $\Delta \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3600 = 117.345$

Dimensiones del mapa en el cielo, T x T (arcsec): $\Theta := (N - 1) \cdot \Delta$

$\Theta \cdot \frac{180}{\pi} = 4.14$ grados

Parámetros típicos de un satélite:

Potencia isotropica radiada efectiva: $\text{PIRE} := 12 \cdot \text{dBW}$ $\text{pire} := 10^{\frac{\text{PIRE}}{10}} \cdot \text{Wat}$

Distancia: $R := 38000 \text{ km}$

Densidad de potencia que llega al telescopio:

$$\text{PD} := \frac{\text{pire}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad 10 \cdot \log\left(\frac{\text{PD}}{\text{Wat} \cdot \text{m}^{-2}}\right) = -150.588 \text{ dBW/m}^2$$

Potencia recibida on-axis: $P_1 := \frac{\pi}{4} \cdot \eta_1 \cdot \text{PD} \cdot (D_1)^2$ $P_2 := \frac{\pi}{4} \cdot \eta_2 \cdot \text{PD} \cdot (D_2)^2$

$$P_1 = 8.012 \times 10^{-13} \text{ Wat} \quad P_2 = 2.568 \times 10^{-17} \text{ Wat}$$

$$10 \cdot \log\left(\frac{P_1 \cdot 1000}{\text{Wat}}\right) = -90.962 \text{ dBm} \quad 10 \cdot \log\left(\frac{P_2 \cdot 1000}{\text{Wat}}\right) = -135.904 \text{ dBm}$$

$$10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 44.941 \text{ dB}$$

Relaciones portadora-ruido:

$$\text{CN}_1 := \frac{P_1}{k \cdot T_1 \cdot B} \quad 10 \cdot \log(\text{CN}_1) = 60.002 \text{ dB}$$

$$\text{CN}_2 := \frac{P_2}{k \cdot T_2 \cdot B} \quad 10 \cdot \log(\text{CN}_2) = 15.883 \text{ dB}$$

Diagrama de Airy: $\Lambda(x) := \text{if}\left(x > 0, 2 \cdot \frac{J_1(x)}{x}, 1\right)$ Este es el diagrama de radiación de una apertura circular con iluminación uniforme.

$$\theta_{up} := \frac{\Theta \cdot \frac{180}{\pi}}{2}$$

Máximo valor del ángulo en el mapa

Rango angular (rad): $\theta_{deg} := 0, 0.001.. \theta_{up}$ $\theta_{rad}(\theta_{deg}) := \frac{\pi \cdot \theta_{deg}}{180}$

Parámetro angular: $u(\theta_{deg}) := \sin(\theta_{rad}(\theta_{deg}))$

Calculamos los diagramas de radiación suponiendo iluminación uniforme y que para el diagrama de error tomamos el que aparece en el artículo de Ruze:

Valor axial de las ganancias: $r_o := \eta_2 \left(\frac{\pi \cdot D_2}{\lambda}\right)^2$ $g_o := \eta_1 \left(\frac{\pi \cdot D_1}{\lambda}\right)^2$

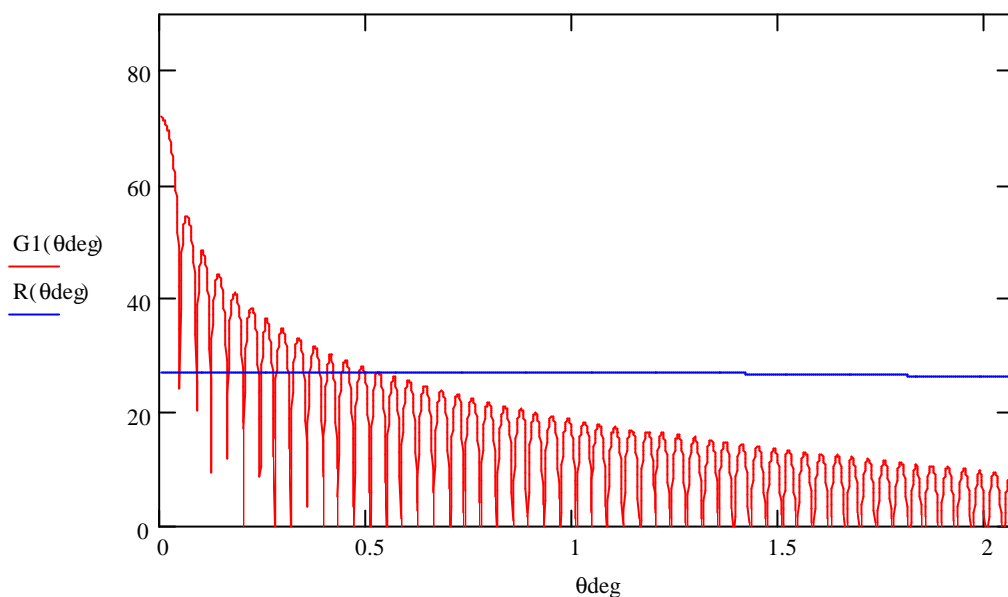
Diagrama de referencia: $10 \cdot \log(r_o) = 27.123 \text{dB}$ $10 \cdot \log(g_o) = 72.064 \text{dB}$

$$r(\theta) := \Lambda\left(\beta \cdot \frac{D_2}{2} \cdot u(\theta)\right)^2 \quad R(\theta_{deg}) := 10 \cdot \log(r_o \cdot r(\theta_{deg}))$$

Diagrama del reflector [1]:

$$g_l(\theta) := \Lambda\left(\beta \cdot \frac{D_1}{2} \cdot u(\theta)\right)^2 + \frac{(\beta \cdot c)^2}{g_o} \cdot \left[\sum_{n=1}^{20} \frac{\delta^{2 \cdot n}}{n \cdot n!} \cdot \exp\left[-\frac{\left(\frac{\beta \cdot c \cdot u(\theta)}{2}\right)^2}{n}\right] \right]$$

$$G_l(\theta_{deg}) := 10 \cdot \log(g_o \cdot g_l(\theta_{deg}))$$



Cálculos de ruido: según [2], el ruido viene dado por las siguientes expresiones:

$$\sigma_1(\theta) := \sqrt{2 \cdot k \cdot T_2 \cdot P_1 \cdot g_1(\theta) \cdot W} \quad \sigma_2(\theta) := \sqrt{2 \cdot k \cdot T_1 \cdot P_2 \cdot r(\theta) \cdot W} \quad \sigma_n(\theta) := \sqrt{k^2 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot B \cdot W}$$

$$\sigma_e(\theta) := \sqrt{\sigma_n(\theta)^2 + \sigma_1(\theta)^2 + \sigma_2(\theta)^2}$$

Valor axial: $\sigma_o := \sigma_e(0)$ $\sigma_o = 7.287 \times 10^{-17} \text{ Wat}$ $10 \cdot \log\left(\frac{\sigma_o}{\text{Wat}}\right) = -161.374 \text{ dBW}$

$$\sigma_{1\text{dB}}(\theta) := 10 \cdot \log\left(\frac{\sigma_1(\theta)}{\sigma_o}\right) \quad \sigma_{2\text{dB}}(\theta) := 10 \cdot \log\left(\frac{\sigma_2(\theta)}{\sigma_o}\right) \quad \sigma_{n\text{dB}}(\theta) := 10 \cdot \log\left(\frac{\sigma_n(\theta)}{\sigma_o}\right)$$

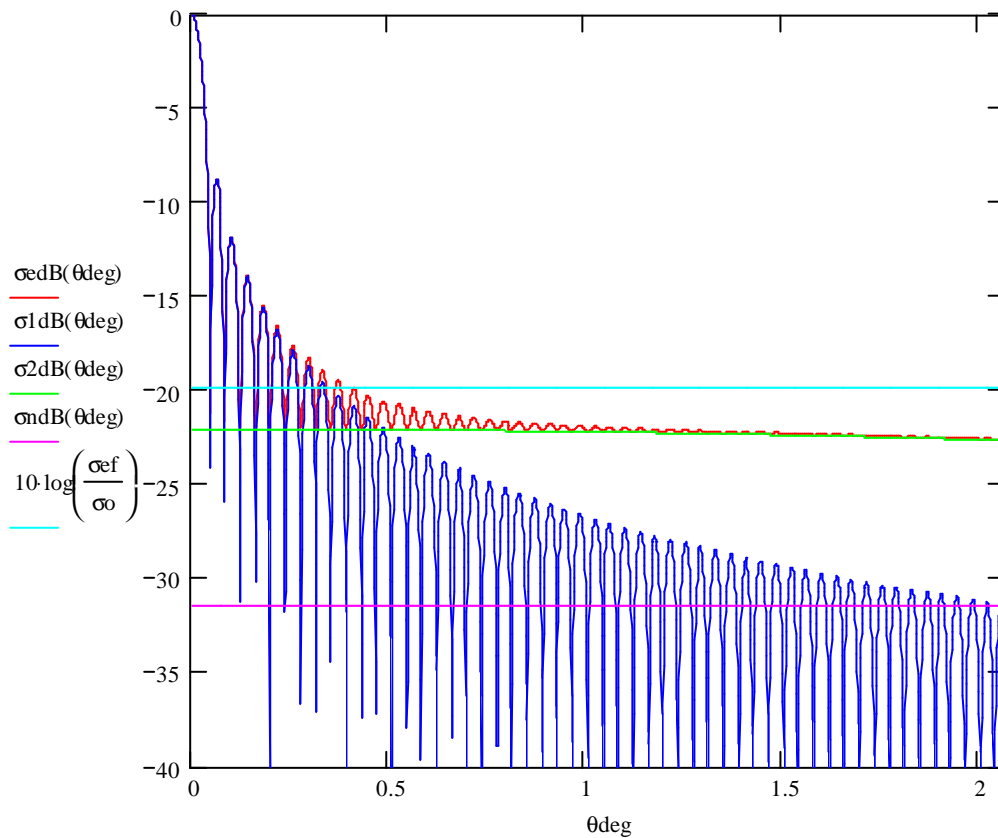
$$\sigma_{e\text{dB}}(\theta) := 10 \cdot \log\left(\frac{\sigma_e(\theta)}{\sigma_o}\right)$$

Calculemos el ruido rms de medida efectivo:

$$M := \frac{N}{2} \quad i := 0..M \quad j := 0..M \quad \Delta\text{deg} := \Delta \cdot \frac{180}{\pi} \quad \alpha_{i,j} := \sqrt{(i \cdot \Delta\text{deg})^2 + (j \cdot \Delta\text{deg})^2}$$

$$U_{i,j} := \sigma_e(\alpha_{i,j}) \quad \sigma_{ef} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M 4 \cdot (U_{i,j})^2 + (U_{0,0})^2}{N^2}} \quad 10 \cdot \log\left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0}\right) = -19.853\text{dB}$$

$$\text{SNR} := \frac{\sqrt{P_1 \cdot P_2}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{ef}} \quad 10 \log(\text{SNR}) = 36.289\text{dB}$$



El error rms en la medida de la superficie será [2]:

$$\Delta z := \frac{1}{16 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{\lambda \cdot N}{k^2 \cdot \text{SNR}} \quad \Delta z = 26 \mu\text{m}$$

El máximo ancho de banda de predetección para que el término de ruido constante sea despreciable será [2]:

$$B_{m_1} := \frac{2 \cdot g_1(\alpha_{M,M}) \cdot P_1}{k \cdot T_1} \quad B_{m_2} := \frac{2 \cdot r(\alpha_{M,M}) \cdot P_2}{k \cdot T_2}$$

$$B_{\text{max}} := \max(B_m)$$

$$B_{\text{max}} = 18 \text{ kHz}$$

Referencias:

- [1] Ruze: "Antenna tolerance theory, a review". Proc. IEEE, vol. 54, nº 4, pp. 633-640. Apr. 1966.
- [2] Larry R. D'Addario: "Holographic antenna measurements: further technical considerations". NRAO. Nov. 1982.

Apéndice IV: Tamaño de las bocinas del receptor de holografía.

En este apéndice se dan estimaciones del tamaño de las bocinas para verificar su viabilidad y realizabilidad. El diseño detallado se realizará a partir de las especificaciones resultantes de las simulaciones que se llevarán a cabo en los siguientes capítulos.

Bocina del canal de test en foco primario.

Este apartado se estima cual sería el tamaño de la bocina del canal de test, situada en el foco primario. Desde este foco, lo habitual es utilizar bocinas circulares con corrugaciones en su apertura, cuya geometría se muestra en la figura siguiente. También se muestra un diagrama de radiación típico de este tipo de bocinas [20].

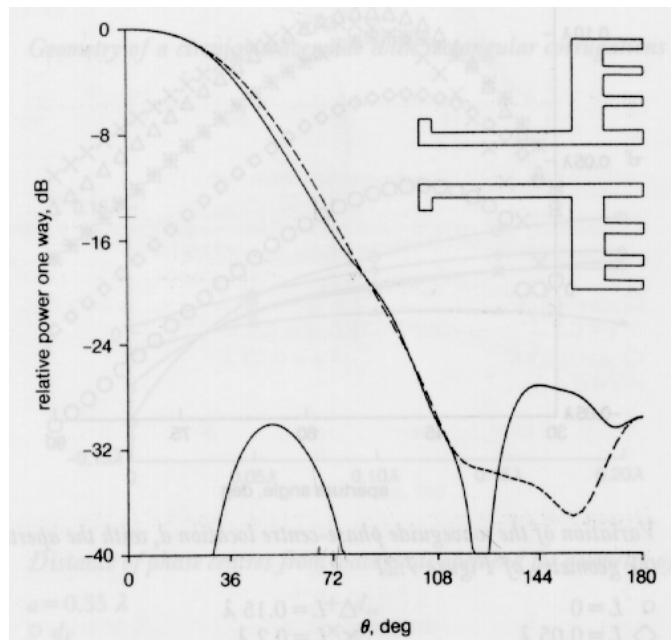


Figura AIV.1: Alimentador típico en foco primario.

El diámetro típico para estas bocinas es de tres longitudes de onda, típicamente [20], lo cual supondría un diámetro máximo de 8 centímetros a la frecuencia de radiobaliza más baja. Este diámetro es menor que el diámetro de la ventana del vértice del subreflector.

Dado el diámetro del radiotelescopio (40m) y su distancia focal (15m), se puede calcular, con ayuda de la fórmula siguiente, el semiángulo subtendido desde el foco primario hasta el borde del reflector principal. Este ángulo resulta ser 67.4 grados.

$$\Theta_0 = 2 \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{1}{4 \cdot F/D} \right) \approx 67.4^\circ$$

Así mismo, puede calcularse la atenuación espacial desde dicho foco al borde del reflector, que resulta ser 3.2dB.

$$A = 20 \log \left(\sec^2 \left(\frac{\Theta_0}{2} \right) \right)$$

Con estas cifras podemos ya adelantar que el diseño de esta bocina deberá cumplir que su diagrama de radiación tenga un ancho de haz tal que a 67.4 grados del eje el valor del diagrama haya caído 7dB respecto del máximo, para que, al incluir la atenuación espacial, tengamos una iluminación con -10dB de taper en el borde respecto al centro. Esta iluminación debe cumplirse, aproximadamente, para todas las frecuencias de radiobalizas de la tabla 2.

Bocina del canal de referencia.

Con respecto al canal de referencia, su bocina estaría colocada en la cabina del subreflector con su eje coincidiendo con el de la parábola y apuntando hacia el cielo a través de una ventana (ver figura AII.1.).

El tamaño de esta bocina está relacionado con el ancho del mapa del diagrama de radiación a medir, de modo que se suele tomar como regla de diseño un HPBW igual al doble del ancho del mapa a medir. Esto supone que el diagrama de radiación de la bocina decae 0.75dB respecto del centro en el borde del mapa.

Como el mayor mapa que pretendemos medir es de 128x128 puntos, o de 4.14°x4.14° a la frecuencia de radiobaliza menor (que es la que necesita un mayor ancho del mapa), resulta que un primer parámetro de diseño de esta bocina es: HPBW = 8.3° @ 11.198GHz.

Con ayuda del programa SABOR, se estima que el diámetro de una bocina cónica corrugada que cumpla este requisito está en torno a 24cm y su ganancia es de 26dB. Sin embargo, la longitud resultante es 1m, aproximadamente, lo cual excesiva, si bien puede reducirse aproximadamente a la tercera parte con ayuda de una lente de menisco.

De nuevo, las dimensiones de esta bocina son realizables y no suponen ningún inconveniente para su instalación en la cabina del subreflector.

Referencias bibliográficas.

- [1] José A. López Pérez: "Introducción a las técnicas holográficas para la caracterización de superficies reflectoras". Primera parte del informe: "Sistemas de holografía de microondas para caracterización de superficies reflectoras". Informe Técnico OAN 2004-1. Enero, 2004.
- [2] G. Comoretto et al: 'The Arcetri atlas of H₂O maser sources'. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 84, 179-255 (1990).
- [3] Vizier Catalogue Service: <http://vizier.u-strasbg.fr/cgi-bin/VizieR>
- [4] J.L. Caswell, F.F. Gardner, R. P. Norris, K.J. Wellington, W.H. MacCutcheon and R.S. Peng: 'Methanol masers at 12GHz'. Mon. Not. R. Astron. Soc. 260, 425-436 (1993).
- [5] J.L. Caswell, R.A. Vaile, S.P. Ellingsen and R. P. Norris: 'Galactic methanol masers at 12GHz'. Mon. Not. R. Astron. Soc. 274, 1126-1152 (1995).
- [6] D. Morris, J.W.M. Baars, H. Hein, H. Steppe, C. Thum and R. Wohlleben: 'Radio-holographic reflector measurement of the 30m millimeter radio telescope at 22GHz with a cosmic signal source'. Astron. Astrophys. 203, 399-406 (1988).
- [7] B. L. Ulich, J. R. Cogdell and J. H. Davis: "Planetary Brightness Temperature Measurements at 8.6mm and 3.1mm Wavelengths". Icarus 19, 59-82 (1973).
- [8] D. R. DeBoer, P. G. Steffes: "Performance and uses of a refurbished 30-m former satellite communications antenna: The Georgia Tech Woodbury Research Facility". Radio Science, vol. 34, no. 4, pages 991-1003, July -August 1999.
- [9] M. Kesteven, G. Graves, M. Calabretta: 'Parkes Holography'. Technical Report available at http://www.atnf.csiro.au/people/mkesteve/PKS_HOLO/pks_holo.html.
- [10] D. J. Rochblatt, B. L. Seidel: "DSN Microwave Antenna Holography". TDA Progress Report 42-76. October-December 1983.
- [11] M.P. Godwin, E.P. Schoessow and B.H. Grahl.: "Improvement of the Effelsberg 100 meter telescope based on holographic reflector surface measurement". Astron. and Astroph. 167, 390, 1986.
- [12] IRAM Staff: "Phase-coherent holography of the 30m telescope in Sept. 1996". Internal IRAM Working Report.
- [13] IRAM Staff: "Holography of the 30m Telescope in September'97". Internal IRAM Working Report.
- [14] IRAM Staff: "Holography of the 30m Telescope in September'98". Internal IRAM Working Report Nr. 253.99
- [15] IRAM Staff: "Holography of the 30m Telescope in September'99". Internal IRAM Working Report Nr. 258.99
- [16] Vivek Dhawan: "A portable holography system for the VLBA". <http://www.aoc.nrao.edu/~vdhawan/holo.htm>
- [17] X.Zhang et al.: "First Result of the SMA Holography Experiment". Submillimeter Array Memorandum, No. 102.

- [18] D. Downes: “*Radio Telescopes: Basic Concepts*”. Diffraction-Limited Imaging with Very Large Telescopes, 53-83. 1989, Kluwer Academic Publishers.
- [19] SABOR (software for the analysis of horns and reflectors), “ETSIT Madrid”.
- [20] A.D. Olver: ‘*Microwave Horn and feeds*’. IEEE series 39.
- [21] L.R. D'Addario: “*Holographic Antenna Measurements: Further Technical Considerations*”. 12 Meter Millimeter Wave Telescope. Tech. Memo. No. 202, November, 1982.

Acrónimos.

ALMA	Atacama Large Millimeter Array
CAY	Centro Astronómico de Yebes
PIRE	Potencia isotrópica radiada equivalente.
ETSIT	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación.
FED	Effective focal ratio
LHCP	Left handed circular polarization
LNA	Low Noise Amplifier
OAN	Observatorio Astronómico Nacional
RHCP	Right-handed circular polarization
RMS	Root Mean Square
SABOR	Software for Analysis of Horns and Reflectors
SSB	Single Side Band
SSR	Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones