

Informe Técnico OAN 2004-5

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

QUINTA PARTE

**Diseño preliminar de un receptor de holografía
coherente para el radiotelescopio de 40m del
Centro Astronómico de Yebes.**

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

CONTENIDO

<i>I. Introducción.</i>	3
<i>II. Diagrama de bloques del sistema.</i>	4
II.1. Diagrama de bloques del módulo RF	5
II.2. Diagrama de bloques del módulo FI.	6
II.3. Analizador de FFT.	7
II.4. Analizador de espectros.	7
II.5. Ordenador de Holografía.	7
<i>III. Estrategia de observación.</i>	9
<i>IV. Conclusiones.</i>	12
<i>Referencias bibliográficas.</i>	12
<i>Acrónimos.</i>	13

I. Introducción.

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

El propósito de este informe técnico es presentar el diseño preliminar del receptor de holografía para el radiotelescopio de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes de acuerdo con los resultados obtenidos del trabajo recopilado en los informes anteriores [1], [2], [3] y [4]. El diseño final y detallado será objeto de informes posteriores.

A modo de resumen se pueden mencionar las características generales de dicho sistema de holografía como sigue:

- Sistema coherente, con medida de la fase del diagrama de radiación, dado el menor error de medida que presenta frente al sistema de recuperación de la fase [4].
- Receptor superheterodino de doble canal, como consecuencia de lo anterior, y en banda Ku (11.1GHz – 12.75GHz) al utilizarse radiobalizas sin modular emitidas por satélites geoestacionarios [2].
- Instalación en foco primario [2], aprovechando el espacio disponible en la cabina del subreflector y permitiendo así la determinación, sin la influencia de espejos o reflectores intermedios, de los errores de superficie del reflector principal, cuya contribución al balance de error es dominante. Además presenta la ventaja de que el receptor es más compacto y ambos canales pueden compartir la misma señal de oscilador local, lo que reduce en gran medida fluctuaciones de fase aleatorias entre canales.
- Error de medida estimado $\leq 50 \mu\text{m RMS}$ ($\sigma = 7 \mu\text{m}$) [4].
- Resoluciones en el plano de la apertura [2]:
 - ◆ 1.6m para un mapa de 32x32 pixeles (baja resolución)
 - ◆ 80cm para un mapa de 64x64 pixeles (media resolución)
 - ◆ 40cm para un mapa de 128x128 pixeles (alta resolución)
- Máximo tiempo de medida estimado [4]:
 - ◆ 0.5 horas para un mapa de 32x32 pixeles (baja resolución)
 - ◆ 1.5 horas para un mapa de 64x64 pixeles (media resolución)
 - ◆ 3.5 horas para un mapa de 128x128 pixeles (alta resolución)

En primer lugar se presentará el diagrama general de bloques del sistema y su interacción con los elementos/equipos del radiotelescopio. En segundo lugar, cada bloque del sistema será más detallado.

Finalmente se mostrará la estrategia de observación para llevar a cabo las medidas, así como el flujo de las operaciones a realizar para la obtención de los datos y para el análisis de los mismos, basándose en la experiencia previa del autor de este informe, en campañas de medidas de holografía en radiotelescopios como el 30m IRAM en Pico de Veleta y los prototipos de las antenas del proyecto ALMA en Socorro (Nuevo México).

II. Diagrama de bloques del sistema.

La figura siguiente muestra el diagrama de bloques del sistema de holografía, junto con la localización de cada uno de sus elementos y la interacción con equipos del radiotelescopio.

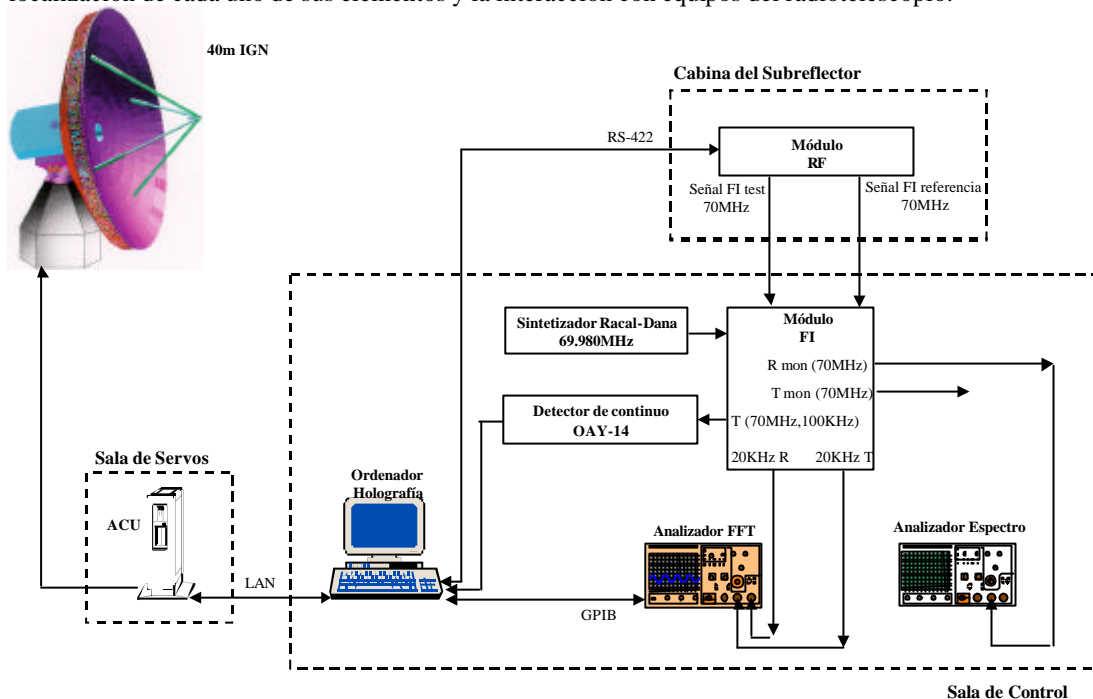


Figura 1: Diagrama de bloques general del sistema de holografía.

El sistema de holografía consta de los siguientes elementos:

- Módulo RF, que se encarga de convertir las señales de RF captadas por cada bocina (test y referencia) a una frecuencia intermedia (70MHz).
- Módulo IF, que se encarga de convertir las señales de FI (70MHz) a una frecuencia más baja (20KHz) capaz de ser procesada por el analizador de FFT. También genera un conjunto de señales de monitorización.
- Analizador de FFT, encargado de calcular la amplitud y la fase del diagrama de radiación en cada punto mediante comparación de las señales a 20KHz de test y de referencia.
- Analizador de espectros, utilizado para la puesta en marcha del sistema y para la monitorización de la radiobaliza.
- Ordenador de holografía, encargado de generar la tabla de posiciones en acimut y elevación, en función del tiempo, correspondientes al mapa a medir y transferirla al ordenador de control de antena (ACU), así como de la lectura de los datos de amplitud y fase suministrados por el analizador de FFT y la lectura de datos de posición proporcionados por el ACU. También es usado para el control de los convertidores de frecuencia del módulo RF y para la monitorización de la señal de test proporcionada por el módulo RF a través del detector de continuo.

e interacciona con los siguientes equipos del radiotelescopio:

- ACU, ordenador que controla el movimiento de la antena
- Sintetizador Racal-Dana, que proporciona al módulo FI la señal a 69.98 MHz necesaria para la conversión a 20KHz.

- Detector de continuo (unidad OAY-14), que proporciona una señal continua cuyo nivel es proporcional a la potencia de la señal de test.

Los módulos RF y FI son descritos a continuación con más detalle.

II.1. Diagrama de bloques del módulo RF

El diagrama de bloques del módulo RF, cuya ubicación es la cabina del subreflector (ver apéndice II en[2]), se muestra a continuación:

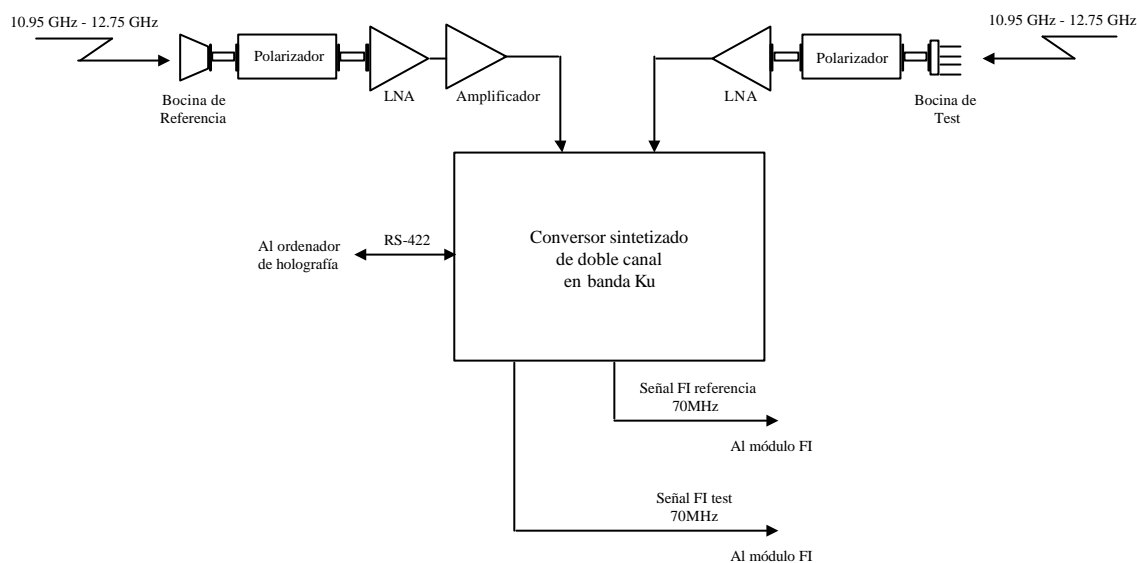


Figura 2: Diagrama de bloques del módulo RF.

El primer elemento del canal de referencia es la bocina, que será cónica corrugada para tener un diagrama de radiación con simetría de revolución en todo el ancho del mapa a medir. A continuación, un polarizador (lámina dieléctrica) que convertirá la polarización circular en lineal. El siguiente elemento es un amplificador de bajo nivel de ruido (modelo MITEQ AMFW-5S-107128-65 con temperatura equivalente de ruido de 65K y ganancia de 40dB). El siguiente amplificador, con temperatura de ruido de 2.2dB y ganancia de 40dB (en realidad se trata de dos unidades en cascada del modelo ALC ALS0513-20-15) tiene por objeto compensar la diferencia de ganancia entre la bocina de referencia y el radiotelescopio (40dB, aproximadamente). La salida de dicho amplificador es conectada a una de las entradas RF del convertidor sintetizado de doble canal (modelo MITEQ D2-108-6-1K).

Por su parte, el primer elemento del canal de test es la bocina que sirve de alimentador al reflector principal. Se trata de una bocina cónica con corrugaciones en la boca, que es el alimentador típico de reflectores. A continuación, un polarizador de circular a lineal y un LNA igual al del canal de referencia. La salida de este amplificador es conectada a la otra entrada RF del convertidor sintetizado.

El convertidor traslada las señales de RF (test y referencia) a la frecuencia intermedia de 70MHz mediante mezcla con un oscilador sintetizado cuya frecuencia es controlable a pasos de 1KHz. Además, el convertidor permite controlar su ganancia, en cada canal independientemente, en un rango de 30dB con pasos de 0.2dB. Dicho control se realiza desde el ordenador de holografía mediante comunicación RS-422.

Las señales de FI generadas por el conversor, son enviadas, mediante cables coaxiales, desde la cabina del subreflector hasta la sala de control, donde se encuentra el módulo FI.

II.2. Diagrama de bloques del módulo FI.

El diagrama de bloques del módulo FI, que se ubicaría en la sala de control, se muestra en la figura siguiente:

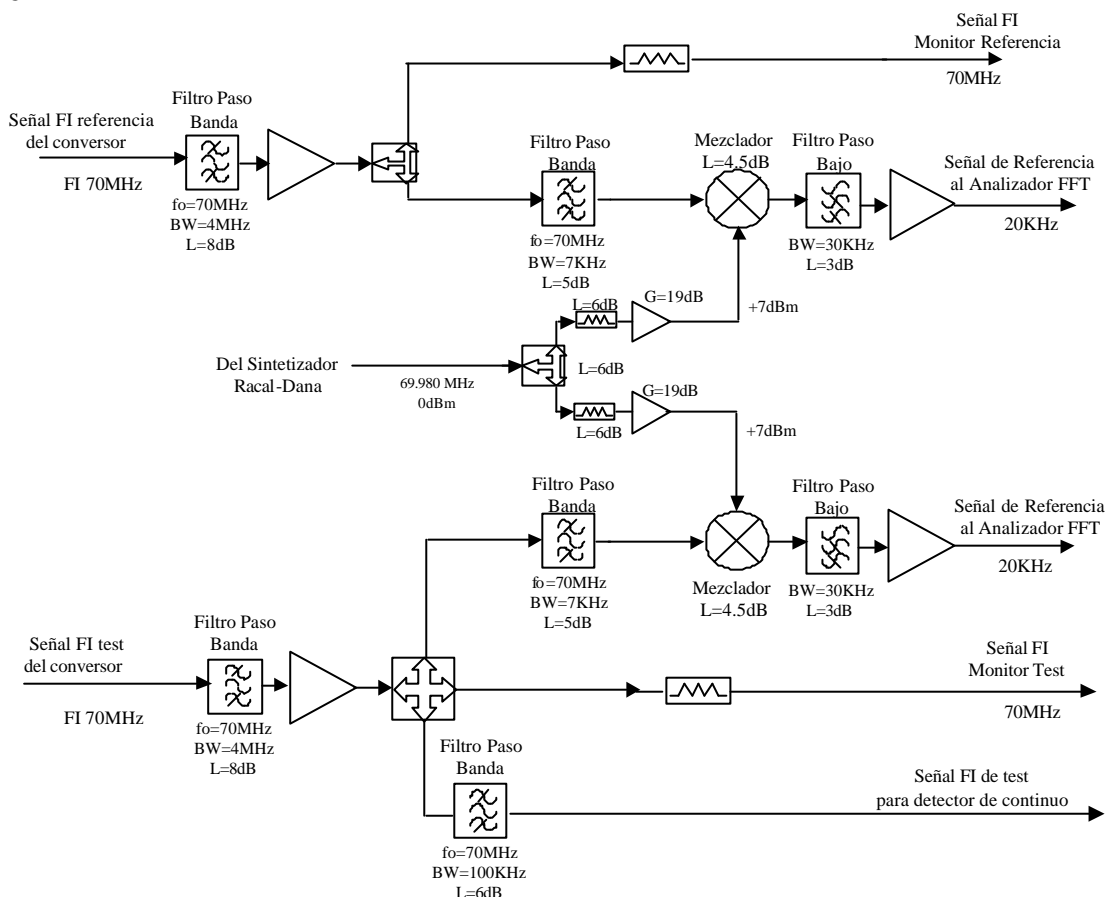


Figura 3: Diagrama de bloques del módulo FI.

Como se observa, cada señal FI procedente del conversor es filtrada al ancho de banda de salida del conversor, y amplificada. A continuación son divididas para obtener un conjunto de salidas de monitorización. Después, son filtradas nuevamente mediante sendos filtros de paso banda muy estrechos (7KHz), para seleccionar solamente la radiobaliza y rechazar señales adyacentes, y convertidas finalmente a 20KHz con ayuda de la señal de 69.98MHz proporcionada por el Racal-Dana. Por último, unos filtros de paso bajo "antialiasing" filtran las señales de 20KHz y rechazan todas aquellas por encima de 30KHz.

La posición de los amplificadores y atenuadores de la figura 3 es solo orientativa. Sus posiciones finales y valores de ganancia y atenuación, respectivamente, serán objeto del diseño detallado del receptor.

II.3. Analizador de FFT.

El analizador de transformada rápida de Fourier se encargará del cálculo de la amplitud y la fase del diagrama de radiación en cada uno de los puntos a medir, a partir de las dos señales de 20KHz (test y referencia) proporcionadas por el módulo FI.

En cada punto de medida, el ordenador de holografía demandará estos valores (amplitud y fase) al analizador vía GPIB (IEEE 488).

El analizador previsto es el modelo Agilent 35670A Dynamic Signal Analyzer, disponible en el Centro Astronómico de Yebes.

II.4. Analizador de espectros.

Se requiere de un analizador de espectros para la puesta en marcha del sistema y para la monitorización de la radiobaliza durante las medidas holográficas.

Es sabido que la frecuencia de la radiobaliza deriva debido al movimiento del satélite (efecto Doppler) y a la limitada estabilidad en frecuencia del oscilador a bordo que la genera ($\pm 40\text{KHz}$ en satélites Intelsat, por ejemplo). Pues bien, durante la puesta en marcha, el convertor sintetizado será ajustado para recibir la frecuencia nominal de la radiobaliza. Entonces, con ayuda del analizador de espectros y con la antena apuntando hacia el satélite, se determinará de frecuencia exacta de la radiobaliza. Esta información servirá para hacer un ajuste fino de la frecuencia del oscilador del convertor y situar la radiobaliza en el centro de la banda de paso del receptor.

Posteriormente, durante la adquisición de datos, la información sobre la deriva de la radiobaliza será proporcionada por el analizador de FFT y el ordenador de holografía modificará la frecuencia del convertor convenientemente.

Además, el analizador de espectros es necesario para ajustar la ganancia del convertor para que las salidas del módulo FI tengan unos valores nominales, cuando las antenas apuntan al satélite, que eviten la posible saturación de alguna etapa amplificadora.

Finalmente, el analizador de espectros es usado para monitorizar la radiobaliza durante las medidas. Ello permitirá verificar en cualquier instante la presencia de la radiobaliza, que puede, a veces, desaparecer por manipulaciones sobre el satélite desde su centro de control. En caso de pérdida de la radiobaliza, habría que abortar el proceso de medida.

II.5. Ordenador de Holografía.

El ordenador de holografía será un ordenador personal con sistema operativo Linux-Debian 3.0 o superior. Este ordenador se encargará de las siguientes tareas:

- Control y monitorización del convertor sintetizado en la puesta en marcha del sistema y durante las medidas mediante comunicación RS-422.
- Control y monitorización del analizador FFT en la puesta en marcha del sistema y durante las medidas mediante comunicación GPIB.

- Cálculo de la tabla de posiciones de acimut y elevación en función de tiempo de los puntos del diagrama de radiación a medir. Para ello se tendrá en cuenta el movimiento de deriva del satélite definido por la información proporcionada por su centro de control.
- Realización de calibraciones de puntería cuando el operador del sistema lo requiera.
- Monitorización de la señal en el canal de test con ayuda de la señal proporcionada por el módulo de FI a través del detector de continuo.
- Adquisición de datos mediante comunicación con el analizador de FFT (amplitud y fase) y con el ACU (posición real de la antena).
- Calibración de los datos crudos una vez realizadas las medidas.
- Reducción y análisis de los datos calibrados.
- Presentación de los resultados (amplitud y fase del campo en la apertura, mapa de deformaciones en la superficie y tabla de ajustes a los tornillos de sujeción de los paneles).
- Mantenimiento de la sincronización temporal mediante protocolo NTP.

Para llevar a cabo estas funciones, el ordenador de holografía contará con las siguientes opciones:

- Tarjeta de interfaz GPIB para comunicación con el analizador de FFT.
- Puerto Ethernet 10/100 para comunicación con el ACU.
- Tarjeta de adquisición de datos para lectura de la salida proporcionada por el detector de continuo.

III. Estrategia de observación.

Esta sección describe la estrategia general de las observaciones de holografía para llevar a cabo la adquisición de los datos y su posterior reducción y análisis.

Como ya se ha comentado, el propósito del sistema de holografía es llevar a cabo medidas de la superficie del reflector principal. Para ello es necesario medir previamente el diagrama de radiación del radiotelescopio en una rejilla cuadrada discreta de $N \times N$ puntos (píxeles). El número N es una potencia de dos ($N = 32, 64, 128$), para hacer un uso eficiente de la rutina de transformada de Fourier bidimensional, y su valor dependerá de la resolución deseada en el plano de la apertura (ver apéndice I en [2]). La distancia entre puntos adyacentes (intervalo de muestreo) viene dado por la frecuencia de la radiobaliza y el diámetro del reflector. Además, el centro de la rejilla cuadrada, situado por convenio en el punto $(N/2+1, N/2+1)$, debe estar orientado en la dirección del satélite.

Para una adquisición de datos adecuada, el radiotelescopio realizará barridos en acimut a velocidad constante (filas) a N ángulos de elevación diferentes (columnas). Se formará así la matriz de $N \times N$ puntos alrededor de la posición del satélite. La figura siguiente muestra el recorrido del haz principal del radiotelescopio para completar la adquisición de dicha matriz, que representará un conjunto de muestras discretas del diagrama de radiación.

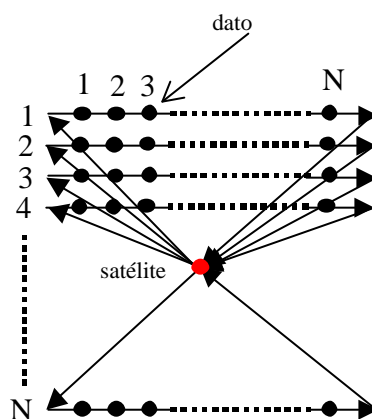


Figura 4: Recorrido del haz en el cielo durante la adquisición de datos (la dirección horizontal es el acimut y la vertical la elevación).

El movimiento de deriva del satélite respecto de su posición geoestacionaria nominal viene dado por las predicciones o efemérides suministradas por su centro de control. Este movimiento de deriva debe ser tenido en cuenta a la hora de determinar el movimiento de la antena durante la adquisición de datos. Esto significa que la separación entre filas de la matriz de la figura 4 puede no ser constante (como lo sería para un satélite ideal fijo en el cielo). Por tanto, al movimiento de deriva hay que superponer el conjunto de barridos en acimut con su correspondiente offset desde el centro del mapa, donde se considera que está el satélite.

Al principio de cada mapa y después, periódicamente, cada cierto número de filas se llevarán a cabo medidas de calibración con la antena apuntando al satélite. Estas medidas (de nuevo amplitud y fase) permitirán en el proceso de reducción de datos eliminar derivas en amplitud y fase del sistema de holografía producidas por la temperatura y derivas en la potencia transmitida por el satélite. En la figura 4 se representa el caso de realizar calibración al principio y al final de cada fila; este caso necesita mayor tiempo de medida, pero es el que mayor calidad de los datos proporciona, dada la frecuencia de calibración.

Estas calibraciones servirán también para comprobar la deriva de la frecuencia de la radiobaliza y actuar sobre el convertidor sintetizado en consecuencia.

Al final del mapa también será necesario realizar estas medidas de calibración.

Además, a lo largo del proceso de adquisición de datos puede ser necesario detenerlo para realizar una calibración de puntería que verifique si las predicciones del satélite son suficientemente precisas y si se degrada la puntería del radiotelescopio.

El software de adquisición de datos debe permitir detener y restablecer la observación a voluntad del operador del radiotelescopio para mayor flexibilidad en la utilización del mismo.

Los pasos para llevar a cabo la realización de las medidas holográficas se describen a continuación:

1. Obtención de las predicciones de apuntado o efemérides del satélite a observar.
2. Cargar dichas predicciones en el ordenador de holografía.
3. Comandar la antena para que haga un seguimiento del satélite.
4. Ajustar el convertidor (ganancia y frecuencia) a los valores nominales de la radiobaliza a recibir.
5. Realizar una calibración de puntería para determinar la bondad de las predicciones de apuntado del satélite y determinar posibles *offsets* de puntería necesarios.
6. Actualizar las predicciones según los resultados del paso anterior.
7. Comandar la antena para seguimiento del satélite.
8. Poner en marcha el sistema de holografía.
 - a. Monitorizar con el analizador de espectros las FI's a 70MHz.
 - b. Ajuste fino de la frecuencia y ganancia del convertidor sintetizado. Mostrar ambos valores en una interfaz gráfica (GUI) en el ordenador de holografía.
 - c. Comprobar niveles nominales de potencia en las salidas del módulo FI con el analizador de espectros.
 - d. Introducir parámetros de observación en el ordenador de holografía:
 - i. Intervalo de muestreo (Δ)
 - ii. Tamaño de la matriz (N)
 - iii. Tiempo de integración
 - iv. Fila de comienzo del mapa, N_0 (por si se trata de restablecer una observación detenida)
 - v. Número de filas entre intervalos de calibración.
 - vi. Número de muestras en cada calibración (M)
 - e. Mostrar los parámetros de observación en un GUI junto con los parámetros derivados como:
 - i. Velocidad en acimut = intervalo de muestreo / tiempo de integración
 - ii. Tamaño del mapa a medir = $(N-1) \cdot \Delta \times (N-1) \cdot \Delta$
 - f. Mostrar en un GUI los datos relevantes del satélite (nombre, posición datos de la radiobaliza) y de las condiciones ambientales (velocidad del viento, temperatura y humedad)
9. Cálculo de las posiciones de la antena para llevar a cabo las medidas y transferencia de estos datos al ACU.

Durante la adquisición de datos, el GUI mostrará la evolución de los datos de calibración en amplitud y fase para comprobar rápidamente la estabilidad del sistema. Mostrará también el número de filas medidas, el número de filas restante para completar el mapa y el número de filas repetidas debido a mal apuntado.

10. Comenzar las medidas:
 - a. Realizar una calibración, adquiriendo M muestras de amplitud y fase.
 - b. Mover la antena hasta el principio de la fila N_0 , donde comenzarán las medidas.

- c. Mover la antena en acimut desde esa posición a velocidad constante y adquirir los N puntos hasta que se llegue al final de la fila.
- d. Comprobar las diferencias entre posiciones comandadas y posiciones reales. Si existen grandes diferencias (debido a, por ejemplo, ráfagas de viento fuerte) repetir la medida de dicha fila.
- e. Si es hora de llevar a cabo una calibración, ésta se realizará apuntando la antena hacia el satélite y adquiriendo nuevamente M muestras. Si no es hora de llevar a cabo dicha calibración, entonces mover la antena al principio de la fila siguiente o barrer la fila siguiente en sentido contrario para ahorrar tiempo de movimiento de la antena y volver al punto 10.c hasta que se llegue al final del mapa o se comande detener la observación.
- f. Si se alcanza el final del mapa, realizar una calibración al final de la última fila y comprobar el apuntado mediante una calibración de puntería. Detener la observación.
- g. Si se ha comandado detener la observación, se terminará la fila en curso y se realizará una calibración.
- h. Si se detiene la observación para realizar una calibración de puntería, se llevará a cabo ésta y se actualizarán las predicciones convenientemente.

11. Reducción y análisis de datos:

- a. Comprobar la calidad de los datos de calibración y la bondad de las condiciones meteorológicas.
- b. Calibrar los datos crudos usando las calibraciones periódicas realizadas.
- c. Construir la matriz de N x N puntos a partir de los datos calibrados y sus posiciones reales en el cielo asociadas.
- d. Permitir la posibilidad de añadir ceros (*zero-padding*) a la matriz de datos para interpolar nuevos datos entre elementos de resolución consecutivos.
- e. Aplicar correcciones de fase para desplazar el plano de referencia hasta la apertura del reflector.
- f. Compensar el suavizado en amplitud y fase introducido por la bocina de referencia.
- g. Permitir la posibilidad de aplicar algún suavizado (Bartlett, Hamming, Hanning, ...) en amplitud para reducir el nivel de lóbulos secundarios de la función de enventanado después de la FFT bidimensional.
- h. Realizar la FFT bidimensional de la matriz de datos calibrados y corregidos. En este punto ya se tiene una distribución de campo en la apertura de la antena, pero necesita de más correcciones.
- i. Corregir los saltos de fase (entre $+180^\circ$ y -180° y viceversa), si los hubiera.
- j. Eliminar los efectos de franjas de difracción producidas por el subreflector y sus patas de soporte.
- k. Enmascarar las áreas de sombra producidas por el subreflector y sus patas de soporte.
- l. Corregir la contribución en la apertura de la fase de la bocina de test, ya que no se trata de un radiador perfecto de ondas esféricas.
- m. Ajustar y eliminar por mínimos cuadrados los efectos debidos a posibles errores de posición de la bocina de test (desenfoque y coma, fundamentalmente).
- n. En este momento ya se tiene un mapa de deformaciones independiente de la frecuencia. Es el momento de calcular los ajustes de los tornillos de soporte de los paneles para que la superficie recupere su forma parabólica (ver sección III.B en [1]).

IV. Conclusiones.

Se ha mostrado el diagrama de bloques del diseño preliminar del sistema de holografía así como su interacción con los elementos del radiotelescopio de 40 metros.

Dado el extenso uso de la banda de frecuencias elegida, todos los elementos del diagrama son componentes comerciales, lo cual supone una ventaja a la hora del diseño y construcción.

Sin embargo, la estrategia de observación revela que es necesario desarrollar un software específico, no tanto para controlar el movimiento como para llevar a cabo la reducción y el análisis de los datos.

Para el desarrollo de este software se contará con la experiencia del autor de este informe en campañas de holografía en el radiotelescopio de 30m IRAM en Pico de Veleta y en los prototipos de las antenas de 12m del proyecto ALMA.

El diseño detallado del sistema (tanto en su vertiente hardware como software) será objeto de próximos informe técnicos.

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] José A. López Pérez: *“Identificación de radiofuente útiles para el sistema de holografía. Parámetros de muestreo y posición del receptor”*. Segunda parte del informe *“Sistemas de holografía de microondas para caracterización de superficies reflectoras”*. Informe Técnico OAN 2004-2. Febrero 2004.
- [3] José A. López Pérez: *“Simulación de un sistema de holografía por recuperación de la fase para el radiotelescopio de 40m del Centro Astronómico de Yebes”*. Tercera parte del informe *“Sistemas de holografía de microondas para caracterización de superficies reflectoras”*. Informe Técnico OAN 2004-3. Marzo 2004.
- [4] José A. López Pérez: *“Simulación de un sistema de holografía coherente para el radiotelescopio de 40m del Centro Astronómico de Yebes”*. Cuarta parte del informe *“Sistemas de holografía de microondas para caracterización de superficies reflectoras”*. Informe Técnico OAN 2004-4. Abril 2004.

Acrónimos.

ACU	Antenna Control Unit
ALMA	Atacama Large Millimeter Array
CAY	Centro Astronómico de Yebes
DSN	Deep Space Network
PIRE	Potencia isotrópica radiada equivalente.
ETSIT	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación.
FED	Effective focal ratio
FFT	Fast Fourier Transform
GPIB	General Purpose Interface Bus
HPBW	Half Power Beam Width
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
LHCP	Left handed circular polarization
LNA	Low Noise Amplifier
OAN	Observatorio Astronómico Nacional
NTP	Network Time Protocol
RHCP	Right-handed circular polarization
RMS	Root Mean Square
RSS	Root Square Sum
SABOR	Software for Analysis of Horns and Reflectors
SSB	Single Side Band
SSR	Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones
WRMS	Weighted Root Mean Square