

Informe Técnico OAN 2004-4

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

CUARTA PARTE

**Simulación de un sistema de holografía coherente  
para el radiotelescopio de 40m del Centro  
Astronómico de Yebes.**

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

## CONTENIDO

<b><i>I. Introducción.</i></b>	<b>3</b>
<b><i>II. Descripción del sistema de holografía coherente.</i></b>	<b>4</b>
<b><i>III. Descripción del proceso de simulación.</i></b>	<b>5</b>
<b>III.1. Parámetros de simulación.</b>	<b>5</b>
<b>III.2. Modelo de campo en la apertura.</b>	<b>6</b>
<b>III.3. Modelo de diagrama de radiación.</b>	<b>10</b>
<b>III.4. Modelo del proceso de medida.</b>	<b>10</b>
III.4.1. Errores de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada.	10
III.4.2. Ruido del sistema.	11
III.4.3. Errores de medida.	12
<b>III.5. Cálculo del error residual.</b>	<b>12</b>
<b><i>IV. Resultados de la simulación.</i></b>	<b>14</b>
<b>IV.1. Simulación sin fuentes de error.</b>	<b>14</b>
<b>IV.2. Simulación con ruido de sistema.</b>	<b>14</b>
<b>IV.3. Simulación con errores de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada.</b>	<b>15</b>
<b>IV.4. Simulación con fluctuaciones de amplitud.</b>	<b>16</b>
<b>IV.5. Simulación con fluctuaciones de fase.</b>	<b>16</b>
<b>IV.6. Simulación con todos los términos de error.</b>	<b>17</b>
<b><i>V. Conclusiones.</i></b>	<b>20</b>
<b><i>Referencias bibliográficas.</i></b>	<b>21</b>
<b><i>Acrónimos.</i></b>	<b>23</b>

## I. Introducción.

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

Aquí se muestran los resultados de simulaciones numéricas de un sistema de holografía coherente a 12.75GHz aplicado al radiotelescopio de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes.

Como se mencionó en [3], el conocimiento del error de la superficie del reflector principal del radiotelescopio es el propósito principal del sistema de holografía. Esta información está contenida en la fase de la distribución del campo electromagnético en la apertura del reflector (ver apartado III.B en [1]).

En contraposición al sistema de holografía por recuperación de fase, donde la fase de la distribución de campo electromagnético en la apertura es calculada por medio de un algoritmo iterativo con la sola ayuda de medidas de amplitud del diagrama de radiación, el método de holografía coherente mide la fase de dicho diagrama, además de su amplitud. Con esta medida completa<sup>1</sup> (amplitud y fase), la distribución de campo en la apertura está precisamente determinada por la transformada de Fourier del diagrama medido (ver apartado III.A en [1], [5]).

Los aspectos teóricos de la holografía coherente pueden ser revisados en [6]-[8], [11] y [16].

La holografía coherente ha sido aplicada con éxito a gran cantidad de grandes antenas y radiotelescopios. Resultados sobre su aplicación en la Deep Space Network (JPL/NASA) pueden encontrarse en [10]-[12], [14]-[16]. Entre otros radiotelescopios, cabe destacar que dicha técnica ha sido aplicada en el Millimetre Wave Observatory (MWO) [9], en el radiotelescopio de 100m de Effelsberg [13], en el de IRAM 30m en Pico de Veleta [18]-[21], en el Submillimetre Array (SMA) [23]-[25], en el radiotelescopio de 64m de Parkes (Australia) [26] y en las antenas del Very Large Baseline Array (VLBA) [29].

Como se dijo en [3], resulta significativo el hecho de que dos de los radio-observatorios más importantes del mundo (el 30m IRAM y el 15m JCMT) hayan optado por usar holografía coherente después de haber usado sistemas con recuperación de la fase. Asimismo el proyecto ALMA está usando holografía coherente en campo cercano para la caracterización y el ajuste de las antenas prototipo [27].

Como cualquier otro sistema de medida, la holografía coherente sufre efectos indeseados y errores de medida que limitan su precisión. Los tipos de error que serán examinados en este informe son los siguientes:

- Relación señal a ruido limitada debido al ruido del sistema,
- Errores de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada debidos a cambios atmosféricos, imperfecciones de los servomecanismos de la antena, errores en los encoders y cambios de la temperatura y del viento.
- Fluctuaciones de amplitud y fase provocadas por errores de medida y desbalance aleatorio entre los canales del receptor.

Estas simulaciones son similares a las realizadas en [14] para la DSN y en [22] para el VLBA.

En primer lugar, se presenta el concepto de la holografía coherente, si bien ya fue introducido en el apartado V de [1]. A continuación se muestran los parámetros y el modelo del proceso de medida usado para la simulación. Después, se presenta el conjunto de simulaciones realizadas junto con sus resultados. Finalmente, se dan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados.

---

<sup>1</sup> Holografía viene de la palabra griega “*holos*”, que significa *registro completo*.

## II. Descripción del sistema de holografía coherente.

El sistema realizará medidas del diagrama de radiación del radiotelescopio de 40m mediante comparación con una señal de referencia cuando la antena barre una cierta área del cielo alrededor de una satélite geostacionario, que transmite una radiobaliza sin modular.

Una vez medido el diagrama de radiación (amplitud y fase) la distribución de campo en la apertura se obtiene mediante transformada de Fourier. La fase de este campo revela la información importante acerca del estado de la superficie del reflector [10], [11], [16].

El sistema de holografía coherente consiste en un receptor superheterodino de doble canal como front-end (canal de test y canal de referencia) y un analizador FFT como back-end. El front-end tendrá dos bocinas: la bocina de test y la bocina de referencia, que estarán instaladas en la cabina del subreflector como se indicó en el apéndice II de [2]. La bocina de referencia y su canal de recepción sirven como referencia de fase para las medidas.

Ambos canales del receptor compartirán los osciladores locales para evitar cambios aleatorios de fase entre los canales que puedan distorsionar las medidas.

El receptor convertirá las señales captadas por cada canal a una banda intermedia suficientemente baja para que la señal pueda ser tratada por el analizador de FFT. En cada punto del diagrama de radiación a medir, este back-end calculará el espectro de la correlación cruzada entre ambas señales (test y referencia) para generar una estimación de la amplitud y la fase del diagrama de radiación en dicho punto de medida.

Ejemplos de receptores de holografía coherente pueden encontrarse en [15] y en [17].

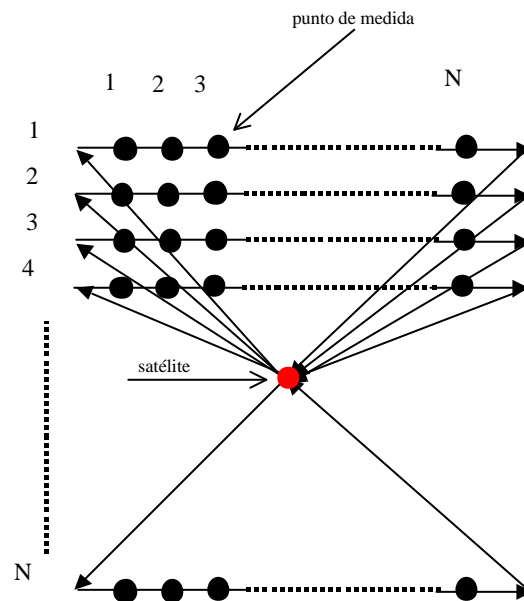


Figura 1: Recorrido en el cielo del haz del radiotelescopio.

La figura 1 muestra el recorrido en el cielo que debe realizar el haz del radiotelescopio para llevar a cabo la medida discreta ( $N \times N$  puntos) del diagrama de radiación. Antes y después de barrer cada fila del diagrama, el haz apuntará hacia el satélite para realizar una calibración de amplitud y fase que permita eliminar derivas del receptor o del satélite que perjudicarían a las medidas.

Dado que el satélite deriva respecto a su posición nominal, es necesario que los servomecanismos de la antena realicen un seguimiento del satélite (a partir de predicciones suministradas por el operador) y a este movimiento de seguimiento superpongan los barridos mostrados en la figura 1.

### III. Descripción del proceso de simulación.

Esta sección muestra el conjunto de parámetros necesarios para las simulaciones numéricas del sistema de holografía coherente y explica el proceso de simulación aplicado a la antena de 40 metros.

#### III.1. Parámetros de simulación.

Se han asumido los siguientes parámetros para la simulación:

##### Parámetros de la antena:

- Operación desde el foco primario (como resultado de lo expuesto en [2])
- Diámetro del reflector principal = 40m
- Distancia focal del reflector principal = 15m
- Diámetro de subreflector = 3.28m
- Magnificación = 21.0919

##### Parámetros de la bocina de referencia:

- Tipo: bocina cónica corrugada
- HPBW = 2 x ancho del diagrama a medir = 7.3° para un mapa de 128x128 puntos a 12.75GHz.
- Diámetro = 24cm
- Ganancia = 27.8dBi @ 12.75GHz

Si bien la bocina de referencia trabajará en la banda de 11.2GHz a 12.75GHz, a la hora de diseñar y construir esta bocina los parámetros de la misma se especificarán a 11.2GHz porque esta es la frecuencia más baja de observación, de acuerdo con los resultados del apartado V en [2]. La frecuencia más baja impone el máximo tamaño del mapa a medir y, por tanto, el máximo HPBW de la bocina.

##### Parámetros de la señal:

- Frecuencia = 12.75GHz  $\Rightarrow \lambda = 23.5\text{mm}$  (como resultado de [2])
- Radiobaliza sin modulación.

##### Parámetros de muestreo:

- Número de puntos del mapa = 128x128 (mapa de alta resolución)
- Factor de sobremuestreo = 1/0.85
- Intervalo de muestreo = 103 arcsec @ 12.75GHz

#### Parámetros del satélite:

- Satellite EIRP = 12dBW (valor típico según [2])
- Satellite distance = 38000Km (valor típico)

#### Parámetros del receptor:

- Temperatura de ruido de sistema del canal de test = 145K (como resultado de [2])
- Temperatura de ruido de sistema del canal de referencia = 120K (como resultado de [2])
- Ancho de banda de predetección = 400Hz (valor típico)
- Tiempo de integración = 0.25s (valor típico)

#### Términos de error:

- Errores de medida entre puntos consecutivos del mapa:
  - ◆ Fluctuaciones de amplitud = 3% RMS
  - ◆ Fluctuaciones de fase = 2° RMS

Estos valores se corresponden con los errores de medida del analizador FFT más un margen que incluya desbalances aleatorios de amplitud y fase entre canales.

- Error RMS de puntería y fluctuación del ángulo de llegada = 6 arcsec (obtenido del balance de error de puntería).

### **III.2. Modelo de campo en la apertura.**

El primer paso es crear un modelo de la distribución de campo electromagnético en la apertura. El modelo utilizado es el mismo que el descrito en [3], para poder establecer comparaciones consecuentes entre ambos métodos. Este modelo asume una distribución de amplitud gaussiana con 10dB de taper en el borde del reflector principal.

El balance de error de la superficie del radiotelescopio especifica las siguientes contribuciones al error de la superficie para operación desde el foco primario:

<b>Contribución</b>	<b>Error RMS</b>
Precisión de los paneles	75 $\mu$ m
Alineación de los paneles	80 $\mu$ m
Estructura trasera	95 $\mu$ m
<b>Total RSS</b>	<b>145 mm</b>

**Tabla 1: Resumen del balance de error de la superficie del radiotelescopio de 40 metros.**

Esta tabla implica que la distribución de fase en la apertura de la antena modelo debe ser generada de modo que tenga un error de 145 $\mu$ m RMS. El modo de conseguir esto es mediante la creación de una distribución de fase con los siguientes efectos:

- Deformaciones de pequeña escala, modeladas por medio de una variable aleatoria gaussiana (cada pixel del mapa de la apertura podrá tener una fase aleatoria). Este efecto tendría en cuenta el error

debido a la precisión de los paneles. La desviación típica de esta variable aleatoria tendrá que ser  $75\mu\text{m}$ .

- Alineación de los paneles: Este efecto será simulado moviendo cada panel, perpendicularmente a su plano medio, una cantidad dada por un número aleatorio gaussiano. La desviación típica de esta nueva variable aleatoria gaussiana tendrá que ser  $80\mu\text{m}$ .
- Deformaciones a gran escala: Dado que, generalmente, la estructura trasera contribuye al error de la superficie con deformaciones a gran escala, se introducirá un astigmatismo en la fase del campo en la apertura para simular el efecto del error introducido por la estructura trasera. La contribución de esta aberración al error total tendrá que ser  $145\mu\text{m RMS}$ .

La distribución de campo en la apertura puede escribirse como:

$$E(x, y) = E_0(x, y) \cdot e^{j\Phi(x, y)} \quad (1)$$

donde  $(x, y)$  son las coordenadas cartesianas en la apertura,  $E_0(x, y)$  la distribución de amplitud y  $\Phi(x, y)$  la distribución de fase.

La figura 2 muestra un mapa de cada uno de los efectos descritos anteriormente y la fase resultante cuando se suman los tres efectos.

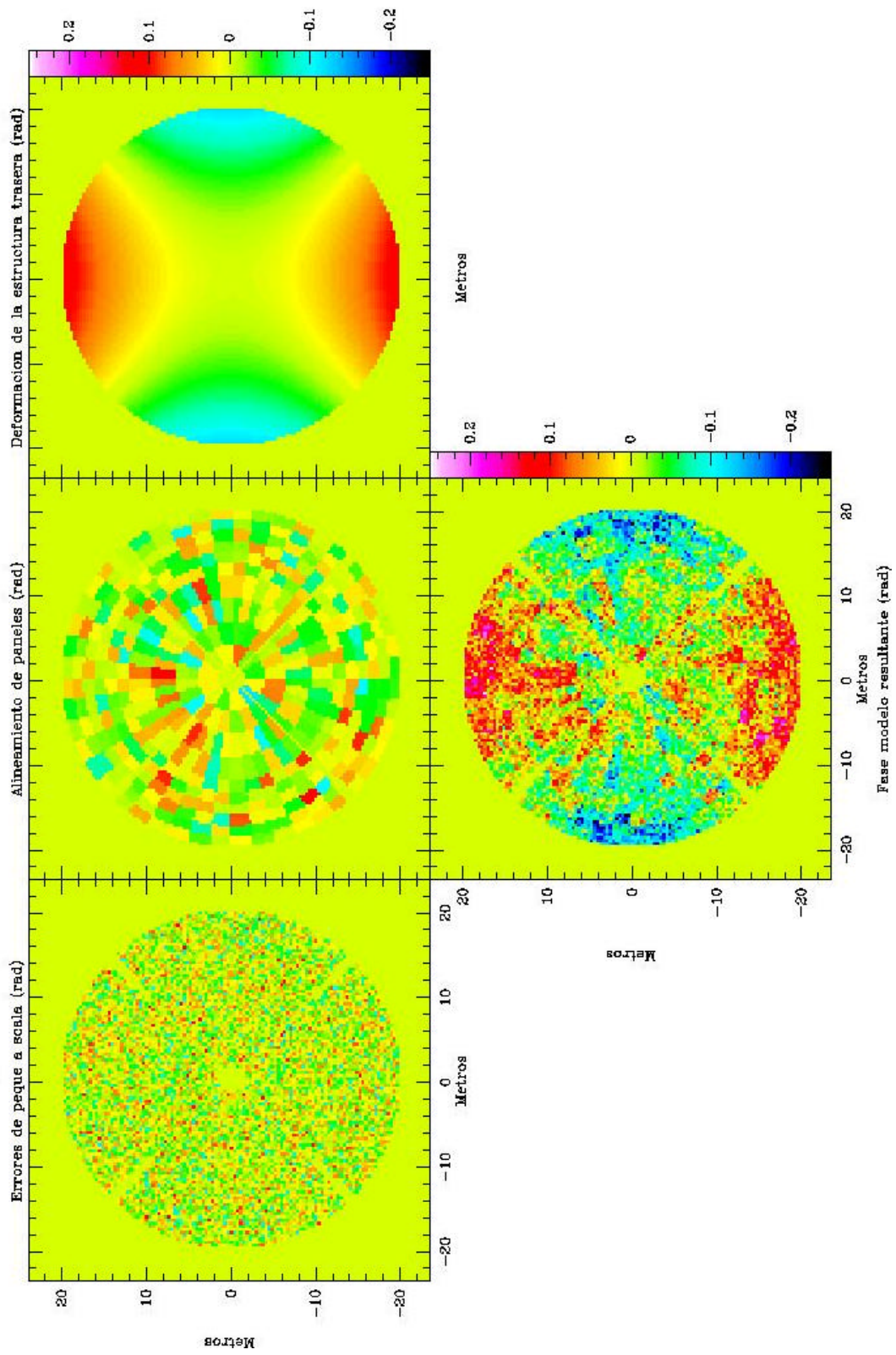


Figura 2: Contribuciones al error de fase de la antena modelo.



Por otro lado, la figura 3 muestra las distribuciones de amplitud y fase en la apertura que serán utilizadas como modelo para la obtención de datos sintéticos del diagrama de radiación.

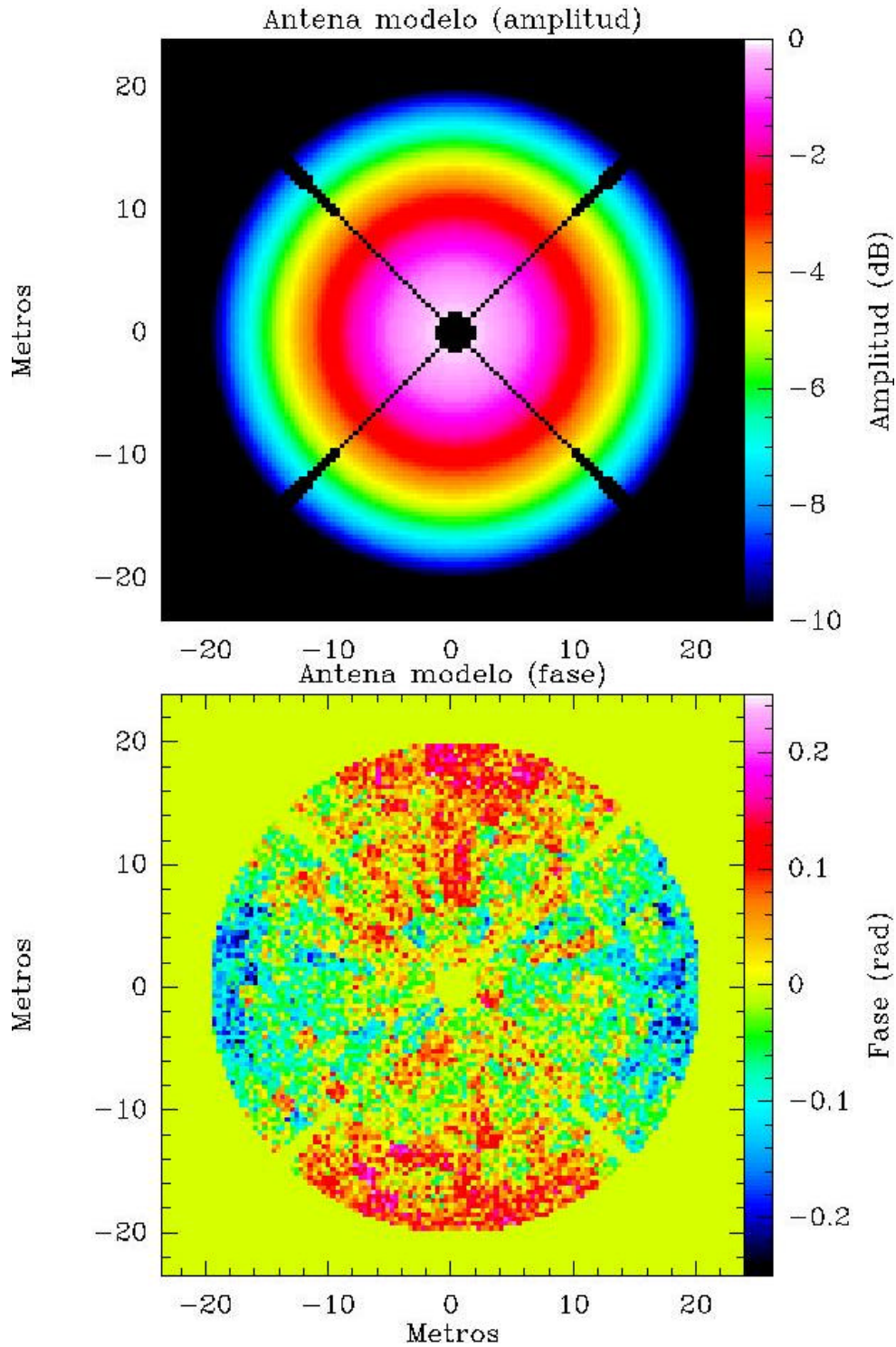


Figura 3: Distribución “modelo” de campo en la apertura.

El error RMS de la superficie del modelo es  $145\mu\text{m}$ , tal y como se deseaba. La eficiencia por tolerancia de la superficie resultante es del 99.4%, lo cual implica un error RMS efectivo de  $137\mu\text{m}$ , según la fórmula de Ruze [4]. El error RMS efectivo es menor debido a la ponderación por la amplitud.

### III.3. Modelo de diagrama de radiación.

El diagrama de radiación de la antena modelo de la figura 2 se calcula mediante transformada de Fourier bidimensional de la distribución de campo “modelo” en la apertura.

$$F(u, v) = FT[E(x, y)] = A(u, v) \cdot e^{j\psi(u, v)} \quad (2)$$

donde  $u = \sin\theta \cdot \cos\phi$ ,  $v = \sin\theta \cdot \sin\phi$ ,  $A(u, v)$  es la amplitud del diagrama y  $\psi(u, v)$  es su fase.

Para la bocina de referencia se asume un diagrama de radiación con perfil gaussiano y con un HPBW igual al doble del ancho del diagrama de radiación a medir. Esto implica un *taper* de 0.75dB entre el centro del mapa y el borde del mismo. Este diagrama puede escribirse como:

$$R(u, v) = e^{-0.3454 \frac{(u^2 + v^2)}{HPBW^2}} \quad (3)$$

Se asume también que la fase de  $R(u, v)$  es constante en todo el ancho del mapa a medir. Esto puede asumirse debido a que, para una bocina corrugada, la fase cambia sólo  $2.2^\circ$  desde el máximo hasta el punto a  $-0.75\text{dB}$  y  $6.8^\circ$  hasta el punto a  $-3\text{dB}$ . Además, por tratarse de un error sistemático que se añadiría a la medida (y que se puede cuantificar mediante medidas de la bocina en una cámara anecoica), puede ser descontado durante el proceso de reducción y análisis de las medidas.

Estos diagramas serán utilizados para simular las medidas, después de añadir los términos de error que se mencionan en la sección siguiente.

### III.4. Modelo del proceso de medida.

Los dos diagramas de amplitud calculados anteriormente (radiotelescopio modelo y bocina de referencia) están libres de ruido y perturbaciones de medida. Sin embargo, las medidas reales incluyen ciertos términos de error. Para simular medidas reales, se añaden los siguientes términos de error a los diagramas de radiación sin perturbar:

- Errores de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada
- Ruido del sistema
- Errores de medida

#### III.4.1. Errores de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada.

Los errores de puntería del radiotelescopio y las fluctuaciones del ángulo de llegada de la señal son modelados mediante un valor RMS conjunto. Según el balance del error de puntería del radiotelescopio de 40 metros, se estima que este valor RMS es de 6 arcsec.

Sea  $\theta_{rms}$  este valor RMS; entonces, la relación con el RMS en cada eje (acimut y elevación),  $u_{rms}$  y  $v_{rms}$ , será:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_{rms} &= \sqrt{u_{rms}^2 + v_{rms}^2} \quad \text{suponiendo } u_{rms} = v_{rms} \\ \text{entonces } \mathbf{q}_{rms} &= u_{rms} \cdot \sqrt{2} = v_{rms} \cdot \sqrt{2} \end{aligned} \quad (4)$$

El diagrama de radiación distorsionado por el efecto de estos errores puede modelarse como:

$$\tilde{F}(u,v) = F(u,v) + \frac{\partial F(u,v)}{\partial u} \cdot u_{rms} \cdot n_u + \frac{\partial F(u,v)}{\partial v} \cdot v_{rms} \cdot n_v \quad (5)$$

donde  $F(u,v)$  es el diagramas de radiación modelo sin distorsionar y  $n_u$  y  $n_v$  son variables aleatorias gaussianas como medida nula y varianza unidad.

Este tipo de error no se añade al diagrama de la bocina de referencia por tratarse de un haz muy ancho, lo cual le hace insensible a este tipo de error.

#### II.4.2. Ruido del sistema.

Este error es modelado a través de la temperatura equivalente de ruido del sistema. El efecto del ruido del sistema es tratado en [8] y fue expuesto en el apartado V.B de [1]. En estas simulaciones se considera el mismo modelo que el expuesto en [8].

Después de la adición de estos errores, los diagramas de radiación perturbados pueden escribirse como.

$$\begin{aligned} Fn(u,v) &= \tilde{F}(u,v) + N_F(u,v) \quad \text{para el radioteles copio} \\ Rn(u,v) &= R(u,v) + N_R(u,v) \quad \text{para la antena de referencia} \end{aligned} \quad (6)$$

donde  $N_F(u,v)$  y  $N_R(u,v)$  son los términos de error debido al ruido del sistema, según [8], añadidos a sus respectivos diagramas.

El diagrama de radiación resultante del proceso de medida del sistema de holografía coherente será el producto de ambos diagramas más un término de error:

$$G(u,v) = Fn(u,v) \cdot Rn^*(u,v) = \tilde{F}(u,v) \cdot R^*(u,v) + n(u,v) \quad (7)$$

donde \* denota complejo conjugado, y , de acuerdo con [22], el ruido  $n(u,v)$  viene dado por:

$$n(u,v) = \mathbf{s}(u,v) \cdot (N_1(0,1) + j \cdot N_2(0,1)) \quad (8)$$

donde

$$\mathbf{s}(u,v) = \sqrt{k^2 \cdot Ts_1 \cdot Ts_2 \cdot B \cdot W + 2 \cdot k \cdot Ts_2 \cdot W \cdot |F(u,v)|^2 + 2 \cdot k \cdot Ts_1 \cdot W \cdot |R(u,v)|^2} \quad (9)$$

como se indica en [8].

En estas fórmulas,  $k$  es la constante de Boltzmann ( $k = 1.380662 \cdot 10^{-23}$  J/K),  $W=1/(2 \cdot \tau)$  es el ancho de banda de post-detección,  $\tau$  es el tiempo de integración,  $T_s$  es la temperatura equivalente de ruido del canal  $i$  ( $i=1$  para el canal de test e  $i=2$  para el canal de referencia),  $B$  es el ancho de banda de pre-detección y  $N_i(0,1)$ ,  $i=1,2$  son variables aleatorias gaussianas con media nula y varianza unidad.

### III.4.3. Errores de medida.

Este término de error incluye errores de medida en la amplitud y en la fase, así como desbalances aleatorios de amplitud y fase entre los canales del receptor.

Estos errores son introducidos en la simulación como fluctuaciones de amplitud y de fase del diagrama resultante después de la multiplicación de ambos diagramas.

$$M(u, v) = |G(u, v)| \cdot (1 + \alpha \cdot n_a) \cdot e^{j \cdot \text{phase}(G(u, v)) + \beta \cdot n_p} \quad (10)$$

donde  $M(u,v)$  es el diagrama medido (medida sintética),  $\alpha$  es el valor RMS de las fluctuaciones de amplitud,  $\beta$  es el valor RMS de las fluctuaciones de fase,  $n_a$  y  $n_p$  son variables aleatorias gaussianas de media nula y varianza unidad.

La figura 4 muestra la amplitud y la fase del diagrama  $M(u,v)$  resultante después de añadir todos los términos de error.

### III.5. Cálculo del error residual.

El error entre el campo en la apertura modelo y el resultado de la transformada inversa de Fourier del diagrama simulado, se calcula para cuantificar el impacto de los términos de error en el uso del método de holografía coherente.

$$\tilde{E}(x, y) = IFT[M(u, v)] \quad (11)$$

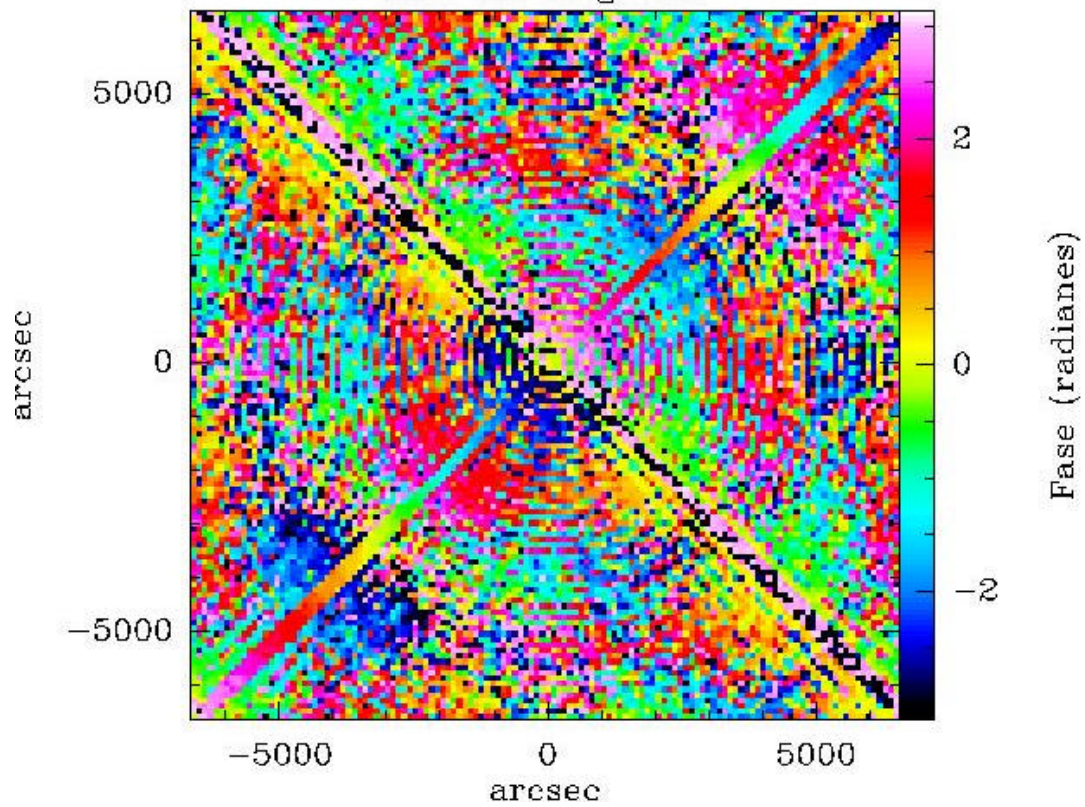
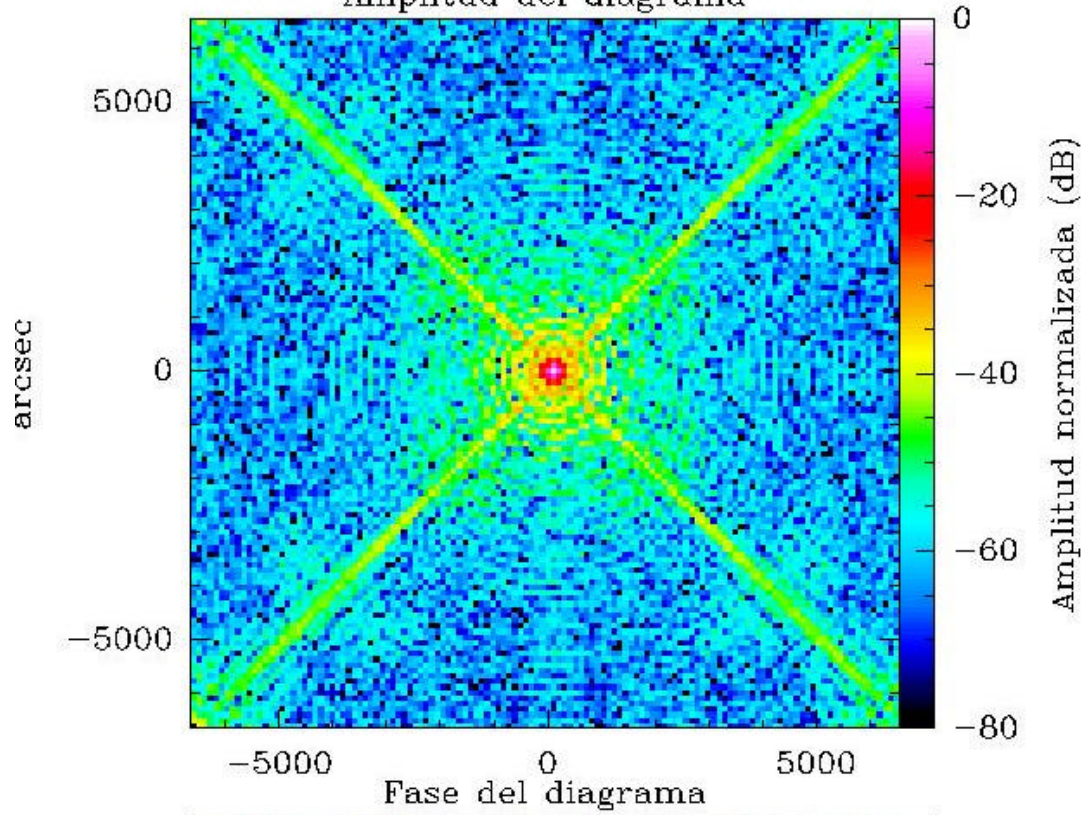
Este error es calculado en amplitud como la diferencia entre los mapas de amplitud y en fase como diferencia entre los mapas de fase (modelo y resultado). Para este último (residuo de la fase), el error RMS ponderado por la distribución de amplitud (WRMS) también es calculado ya que este valor es una indicación de la contribución al error de medida de la superficie del sistema de holografía coherente.

Cada simulación consiste en 50 ejecuciones del proceso de simulación mencionado anteriormente. Cada ejecución utiliza una semilla diferente del generador para la obtención de los números aleatorios. De este modo se puede obtener una buena estimación del error del sistema así como de su varianza<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Asumiendo que la distribución de este error sea gaussiana.

Figura 4: Diagrama sintetizado para simular las medidas  
Amplitud del diagrama



## IV. Resultados de la simulación.

Esta sección muestra los resultados de las simulaciones numéricas, como se han descrito en el apartado III, del sistema de holografía coherente. Se han llevado a cabo cinco tipos de simulaciones, cada una bajo la influencia de una sola de las fuentes de error. Así, se podrá evaluar el impacto de cada fuente de error independientemente de las demás y se podrá verificar si existe alguna fuente de error dominante.

Una simulación final con todas las fuentes de error mostrará el error del sistema bajo unas condiciones típicas de operación.

### IV.1. Simulación sin fuentes de error.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una simulación sin términos de error, es decir:

- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de test = 0K
- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de referencia = 0K
- Fluctuaciones de amplitud = 0 % RMS
- Fluctuaciones de fase = 0° RMS
- Error de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada = 0" RMS

Esta simulación pretende verificar que no se introduce ningún error cuando se mide en un escenario sin términos de error. Por tanto, el error residual WRMS de la fase debe ser nulo. Sin embargo, la simulación arroja un valor de 5 $\mu$ m RMS, muy diferente del valor esperado.

El origen de esta discrepancia está en el efecto de suavizado (*apodization*) que introduce el diagrama gaussiano (0.75dB en el borde del mapa) de la bocina de referencia al multiplicarlo por el diagrama sintetizado. Esto ha sido verificado mediante compensación de la forma del diagrama de referencia al diagrama sintetizado, lo cual equivale a cancelar el efecto del suavizado.

### IV.2. Simulación con ruido de sistema.

Esta simulación evalúa el impacto del ruido del sistema en la precisión de la medida del sistema de holografía coherente.

Una simulación de este tipo implica los siguientes parámetros:

- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de test = 145K
- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de referencia = 120K
- Fluctuaciones de amplitud = 0 % RMS
- Fluctuaciones de fase = 0° RMS
- Error de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada = 0" RMS

Aunque se ha establecido previamente un tiempo de integración de 0.25s, la simulación ha sido también repetida para otros valores de este parámetro. Ello se debe a que el tiempo de integración es un factor decisivo en la duración de la medida y es importante conocer la relación entre la duración de la medida y la precisión alcanzable.

La tabla siguiente recoge los resultados de la simulación. En esta tabla, y en las siguientes, se presenta el error residual WRMS como el promedio de las 50 repeticiones de la simulación. Además, se presenta su desviación estándar ( $\sigma$ ), asumiendo que dicho error tuviera una distribución gaussiana.



Tiempo de integración (t)	Error WRMS residual	Duración del mapa*
0.5 s	16 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 3 \mu\text{m}$ )	4.4 h
0.25 s	23 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 4 \mu\text{m}$ )	3.3 h
0.125 s	33 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 6 \mu\text{m}$ )	2.7 h
0.0625 s	46 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 9 \mu\text{m}$ )	2.4 h

\*Para el cálculo de la duración del mapa se asume un tiempo de 60s por fila para movimiento y establecimiento de la posición de la antena. Este valor es una estimación basada en la experiencia holográfica con otras antenas.

**Tabla 2: Resultados de la simulación con ruido del sistema.**

### IV.3. Simulación con errores de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada.

La tercera simulación incluye solamente la influencia de los errores de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada:

- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de test = 0K
- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de referencia = 0K
- Fluctuaciones de amplitud = 0 % RMS
- Fluctuaciones de fase = 0° RMS
- Error de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada = 6" RMS

De nuevo, aunque se estableció que el valor RMS de este error es de 6", se ha repetido la simulación para otros valores, por el interés que tiene evaluar la variación del error del sistema en función de esta fuente de error.

La fase de la distribución de campo en la apertura puede presentar aberraciones sistemáticas debido a los errores y fluctuaciones introducidos. Por tanto, se realizará un ajuste por mínimos cuadrados de la distribución de fase para eliminar dichas aberraciones, ya que no son causadas por la propia superficie del reflector.

La tabla siguiente muestra los resultados:

Error RMS ( $q_{\text{rms}}$ )	Error WRMS residual (antes del ajuste)	Error WRMS residual (después del ajuste)
2"	24 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 9 \mu\text{m}$ )	14 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 2 \mu\text{m}$ )
3"	35 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 13 \mu\text{m}$ )	19 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 4 \mu\text{m}$ )
4"	47 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 18 \mu\text{m}$ )	24 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 5 \mu\text{m}$ )
6"	70 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 26 \mu\text{m}$ )	35 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 8 \mu\text{m}$ )
8"	94 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 35 \mu\text{m}$ )	46 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 10 \mu\text{m}$ )
12"	140 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 52 \mu\text{m}$ )	68 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 16 \mu\text{m}$ )

**Tabla 3: Contribución al error del sistema de los errores de puntería y las fluctuaciones del ángulo de llegada.**

#### IV.4. Simulación con fluctuaciones de amplitud.

A continuación se muestran los resultados de la simulación con el único efecto de las fluctuaciones de amplitud:

- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de test = 0K
- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de referencia = 0K
- Fluctuaciones de amplitud = 3 % RMS
- Fluctuaciones de fase = 0° RMS
- Error de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada = 0" RMS

Nuevamente, aunque se ha establecido que las fluctuaciones valen 3% RMS, también se han simulado otros valores. Estos resultados se recogen en la tabla siguiente:

Fluctuaciones de amplitud (a)	Error W RMS residual
1 % RMS ( $\cong \pm 0.1$ dB)	8 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 4$ $\mu\text{m}$ )
2 % RMS ( $\cong \pm 0.2$ dB)	16 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 7$ $\mu\text{m}$ )
3 % RMS ( $\cong \pm 0.3$ dB)	24 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 10$ $\mu\text{m}$ )
4 % RMS ( $\cong \pm 0.4$ dB)	32 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 14$ $\mu\text{m}$ )
5 % RMS ( $\cong \pm 0.5$ dB)	40 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 18$ $\mu\text{m}$ )
10 % RMS ( $\cong \pm 1$ dB)	80 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 36$ $\mu\text{m}$ )

**Tabla 4: Contribución al error de las fluctuaciones de amplitud.**

#### IV.5. Simulación con fluctuaciones de fase.

Ahora se presentan los resultados sólo con fluctuaciones de fase:

- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de test = 0K
- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de referencia = 0K
- Fluctuaciones de amplitud = 0 % RMS
- Fluctuaciones de fase = 2° RMS
- Error de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada = 0" RMS

También se han simulado otros valores de las fluctuaciones de fase, como se recoge en la tabla siguiente:

Fluctuaciones de fase (b)	Error WRMS residual
1° RMS	14 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 3$ $\mu\text{m}$ )
2° RMS	29 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 5$ $\mu\text{m}$ )
5° RMS	71 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 12$ $\mu\text{m}$ )
10° RMS	138 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 22$ $\mu\text{m}$ )

**Tabla 5: Contribución al error de las fluctuaciones de fase.**



#### IV.6. Simulación con todos los términos de error.

Por último, se presentan los resultados de la simulación que incluye todos los términos de error simultáneamente:

- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de test = 145K
- Temperatura equivalente de ruido del sistema del canal de referencia = 120K
- Fluctuaciones de amplitud = 3 % RMS
- Fluctuaciones de fase = 2° RMS
- Error de puntería y fluctuaciones del ángulo de llegada = 6" RMS

El resultado de las 50 repeticiones con números aleatorios diferentes arroja un resultado para el error residual WRMS de  $83\mu\text{m}$  ( $\sigma = 25\mu\text{m}$ ). Sin embargo, si se eliminan las aberraciones de la distribución de fase, como se hizo en el caso de los errores de puntería, se obtiene **50mm** ( $s = 7\text{ mm}$ ).

Si se suma, en sentido RSS, cada una de las contribuciones al error, se tiene:

Caso	Error WRMS residual
Ruido de sistema (145K, 120K, 0.25s)	23 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 4\mu\text{m}$ )
Errores de puntería (6" RMS)	35 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 8\mu\text{m}$ )
Fluctuaciones de amplitud (3% RMS)	24 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 10\mu\text{m}$ )
Fluctuaciones de fase (2° RMS)	29 $\mu\text{m}$ ( $\sigma = 5\mu\text{m}$ )
<b>Total RSS</b>	<b>56 mm</b>

**Tabla 6: Suma RSS de las contribuciones al error del sistema.**

Como se puede observar, este valor está en consonancia con el valor dado por la simulación con todas las fuentes de error. Ello significa que todas las fuentes de error son independientes y que la contribución total puede calcularse como RSS de las contribuciones parciales, aproximadamente.

Por tanto, puede decirse que el error de un sistema de holografía aplicado al radiotelescopio de 40m con los parámetros descritos anteriormente vale:

$$50\text{ mm}(s = 7\text{ mm}).$$

La figura 5 muestra la comparación entre las distribuciones modelo y resultado (y las diferencias entre ambas) para una de las 50 repeticiones de esta simulación. Por su parte, la figura 6 muestra la dispersión de los valores del error residual en función del índice de ejecución (de 1 hasta 50, cada una con diferente semilla del generador de números aleatorios), así como un histograma que permita esbozar la forma de la distribución del error.

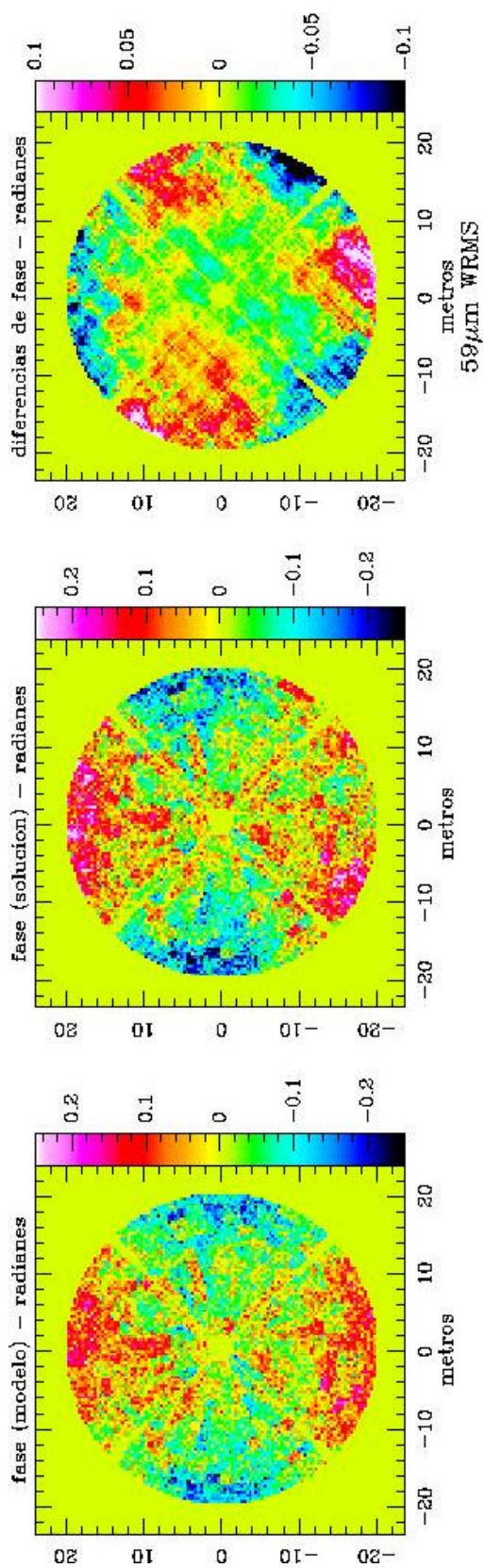


Figura 5: Comparacion de distribuciones en la apertura (simulacion con todos los errores, 128x128, 1 entre 50)

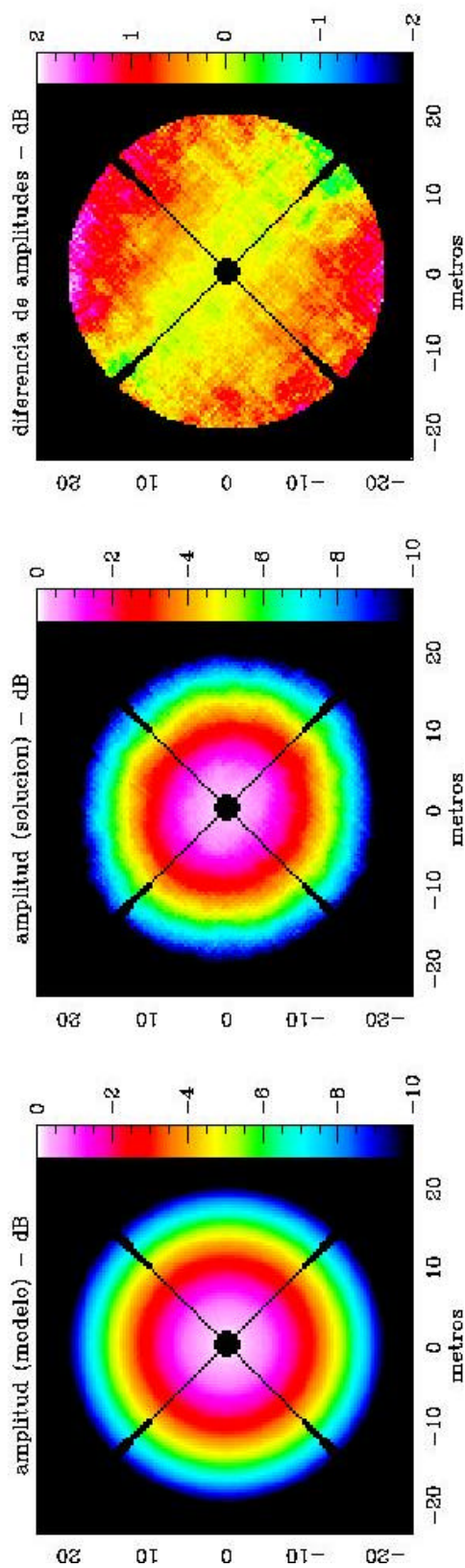
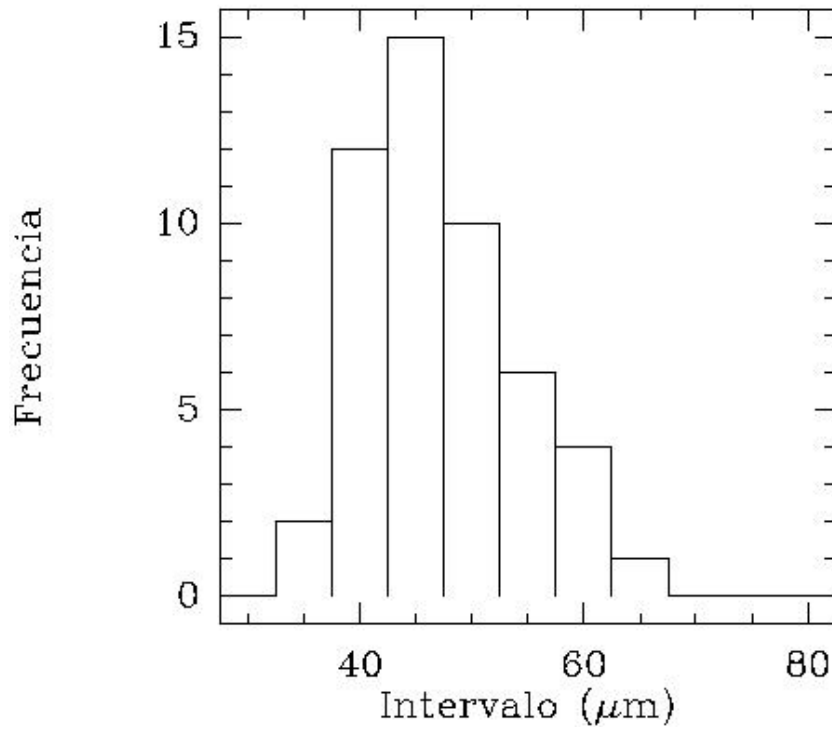
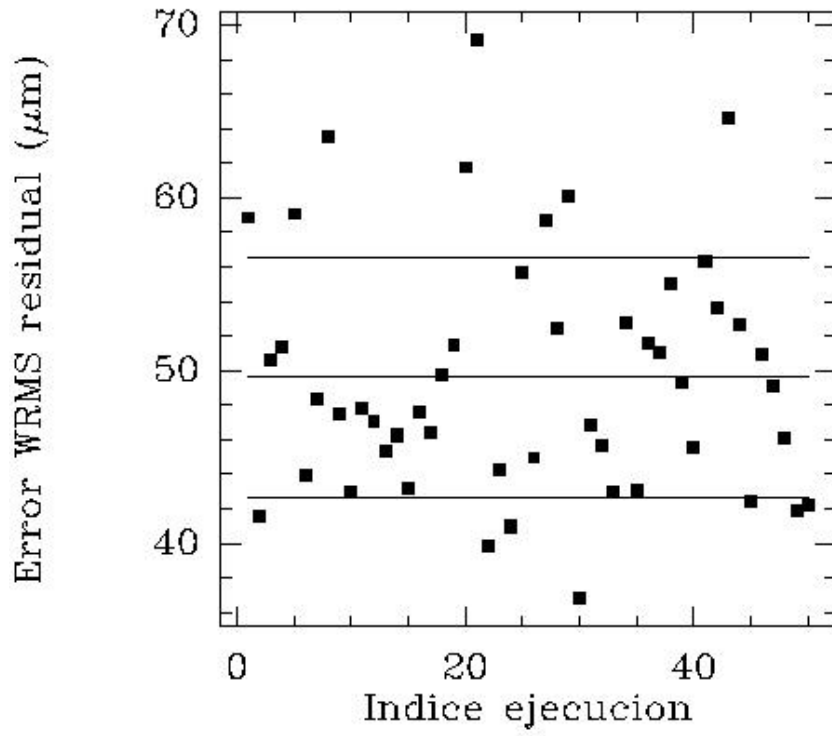


Figura 6: Dispersion del error.  
(simulacion con todos los errores)



## V. Conclusiones.

Se han realizado un conjunto de simulaciones numéricas sobre el comportamiento de un sistema de holografía coherente a 12.75GHz con el radiotelescopio de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes. A partir de estas simulaciones, presentadas en las secciones anteriores, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Los errores aleatorios de puntería y las fluctuaciones del ángulo de llegada de la señal del satélite son la fuente dominante de error. Por tanto, habrá que tener especial cuidado con las condiciones meteorológicas con las que se realizan las medidas. Es recomendable, pues, realizar las medidas en condiciones de temperatura ambiente estable, poco o ningún viento y baja humedad.
- El valor medio del error WRMS residual del sistema de medida es  $50\mu\text{m}$  ( $\sigma = 7 \mu\text{m}$ ) cuando se consideran todas las fuentes de error. Este valor es una estimación del error de medida del método coherente que tuviese los parámetros considerados en el apartado III.1.
- La duración de cada medida del diagrama de radiación es de 3.3 horas, aproximadamente.
- Es necesario cuidar la estabilidad del receptor para minimizar el impacto de fluctuaciones aleatorias de amplitud y fase entre canales.
- Grosso modo se puede decir que el error y la duración de las medidas del método coherente son la mitad de los requeridos por el método de recuperación de la fase ( $50\mu\text{m}$  frente a  $122\mu\text{m}$  y 3.3h frente a 6.6h) [3].

Dadas las ventajas del método coherente sobre el de recuperación de fase, se adoptará dicho método para las medidas holográficas del radiotelescopio de 40 metros.

## 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] J. Ruze: "Antenna Tolerance Theory – A review". Proc. IEEE vol 54, No. 4, April 1966, 633-640.
- [5] Samuel Silver: "Microwave Antenna Theory and Design". IEE Electromagnetic Waves Series 19. Peter Peregrinus Ltd., 1984. Chapter 6, pp 169-174.
- [6] J.C. Bennet, A.P. Anderson, P.A. McInnes, A.J.T. Whitaker: "Microwave holographic metrology of large reflector antennas". IEEE Trans. AP24, 295, 1976.
- [7] P.F. Scot and M. Ryle: "A rapid method for measuring the figure of a radio telescope reflector". Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 178, 539-545, 1977.
- [8] Larry R. D'Addario: "Holographic Antenna Measurements: Further Technical Considerations". 12 Metre Millimetre Wave Telescope. Tech. Memo. No. 202, November 1982.
- [9] C.E. Mayer, J.H. Davis, W.L. Peters, W.J. Vogel: "A holographic surface measurement of the Texas 4.9m antenna at 86 GHz". IEEE Trans. on Instr. & Meas. Vol. MI-32, N° 1, March, 1983.
- [10] D.J. Rochblatt, B.L. Seidel: "DSN Microwave Antenna Holography". TDA Progress Report 42-76. October-December 1983.
- [11] Y. Rahmat-Samii: "Surface diagnosis of large reflector antennas using microwave holographic metrology: An iterative approach". Radio Science, Volume 19, Number 5, Pages 1205-1217, Sept-Oct, 1984.
- [12] Y. Rahmat-Samii: "Microwave holography of large reflector antennas: Simulation algorithms". IEEE Trans. on AP, AP33, No. 11, pp. 1194-1203. Nov. 1985.
- [13] 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.
- [14] D.J. Rochblatt, Y. Rahmat-Samii: "Effects of measurement errors on microwave antenna holography". IEEE Trans. on AP, AP39, No. 7, pp. 933-942. July, 1991.
- [15] D.J. Rochblatt: "A Microwave Holography Methodology for Diagnostics and Performance Improvement for Large Reflector Antennas". TDA Progress Report 42-108. Feb. 15, 1992.
- [16] D.J. Rochblatt, B.L. Seidel: "Microwave antenna holography". IEEE Trans on AP, AP40, N° 6, Jun. 1992.

- [17] F. Mattiocco, P.M. Cocher, Y. Bortolotti: "*39.592 GHz Holography Dual Channel Receiver User's Manual*". IRAM, Technical Report, March, 1996.
- [18] IRAM STAFF: "*PHASE-COHERENT HOLOGRAPHY OF THE 30M TELESCOPE IN SEPT. 1996*". INTERNAL IRAM WORKING REPORT.
- [19] IRAM Staff: "*Holography of the 30m Telescope in September'97*". Internal IRAM Working Report.
- [20] IRAM Staff: "*Holography of the 30m Telescope in September'98*". Internal IRAM Working Report Nr. 253.99
- [21] IRAM Staff: "*Holography of the 30m Telescope in September'99*". Internal IRAM Working Report Nr. 258.99
- [22] Brian Butler: "*Simulations of Some Types of Holography Errors for VLBA Antennas*". VLBA Test Memo. No. 62. National Radio Astronomy Observatory. April 30, 1999.
- [23] X.Zhang et al.: "*First Result of the SMA Holography Experiment*". Submillimeter Array Memorandum, No. 102.
- [24] X.Zhang et al.: "*Planned Panel Alignment Procedure for the SMA Antennas Using the Microwave Holography Technique*". Submillimeter Array Memorandum, No. 85. August, 1996
- [25] X.Zhang: "*Certain Optics Considerations for the Holography Experiment*". Submillimeter Array Memorandum, No. 86. Nov. 1996.
- [26] M. Kesteven, G. Graves, M. Calabretta: '*Parkes Holography*'. Technical Report available at [http://www.atnf.csiro.au/people/mkesteve/PKS\\_HOLO/pks\\_holo.html](http://www.atnf.csiro.au/people/mkesteve/PKS_HOLO/pks_holo.html).
- [27] Larry R. D'Addario: "*ALMA Holography System Overview*". <http://www.tuc.nrao.edu/~ldaddari/holography/overview.htm>
- [28] D. Morris: "*Telescope Testing by Radio Holography*". International Symposium on Millimeter and Submillimeter Wave Radio Astronomy. Granada, September, 11-14, 1984.
- [29] Vivek Dhawan: "A portable holography system for the VLBA". <http://www.aoc.nrao.edu/~vdhawan/holo.htm>

## **Acrónimos.**

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
HPBW	Half Power Beam Width
LHCP	Left handed circular polarization
LNA	Low Noise Amplifier
OAN	Observatorio Astronómico Nacional
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