

SISTEMA DE ENFOQUE BASADO EN DOS ESPEJOS ELÍPTICOS Y UN ESPEJO PLANO ROTATORIO PARA UN RADAR A 300GHZ

J. Montero-de-Paz⁽¹⁾, O. Garcia-Perez⁽¹⁾⁽²⁾, A. Rivera-Lavado⁽¹⁾, E. Ugarte-Muñoz⁽¹⁾, B. Andres-Garcia⁽¹⁾, M. Molina-Romero⁽¹⁾, T. Finn⁽²⁾, José Antonio López⁽²⁾, V. Gonzalez-Posadas⁽¹⁾, L. E. Garcia-Muñoz⁽¹⁾, D. Segovia-Vargas⁽¹⁾

jmontero@tsc.uc3m.es

⁽¹⁾ Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Avenida de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Madrid.

⁽²⁾ Centro Astronómico de Yebes
Cerro de la Palera s/n, 19141, Yebes, Guadalajara.

Resumen- A focusing system for a 300 GHz radar with two target distances (5m and 10m) is proposed, having 1cm resolution in both cases. The focusing system is based on a gaussian telescope scheme and it has been designed using gaussian beam quasi-optical propagation theory with a homemade Matlab analysis tool. It has been translated into a real focusing system based on two elliptical mirrors and a plane mirror in order to have scanning capabilities and validated using the commercial antenna software GRASP.

I. INTRODUCCIÓN

La banda de frecuencias de terahercios (THz) o señales electromagnéticas a frecuencias de terahercios (0.1THz – 10THz) es uno de los temas que más interés están cobrando en los últimos años en la comunidad electromagnética. Esta banda ha sido tradicionalmente asociada a trabajos de astronomía y espectroscopia molecular. A estas frecuencias, se pueden generar pulsos extremadamente pequeños que son capaces de obtener una alta resolución espacial, atravesar materiales que son opacos a la luz y visualizar e identificar estructuras microscópicas mediante análisis espectral. Además existe un gran interés en diferentes aplicaciones de esta tecnología en defensa y seguridad, automóviles, biología y medicina [1].

Sin ninguna duda la aplicación más importante de esta tecnología es la detección de objetivos por motivos de seguridad. Esto es debido a que la mayoría de la ropa y los sobres son razonablemente transparentes a estas frecuencias, mientras que al mismo tiempo se puede obtener una imagen con alta resolución. En la actualidad se está haciendo un gran esfuerzo en diseñar sistemas de formación de imágenes a la frecuencia de THz [2]-[5].

En este artículo se propone un sistema de enfoque para un radar funcionando a 300GHz a una distancia de detección de 5m y con una resolución, definida como el ancho de haz a -3dB, de 1cm. Este sistema de enfoque formará parte de un sistema radar completo.

El artículo está organizado de la siguiente manera: primero se presenta el sistema completo y la herramienta

desarrollada para el análisis del mismo así como el alimentador del sistema. Seguidamente, se analiza el sistema de enfoque utilizando teoría quasi-óptica (QO) de propagación de haces gaussianos y se obtienen los principales parámetros. A continuación se traducen dichos parámetros de QO a parámetros de espejos elípticos y se obtiene el sistema de enfoque real. Dicho sistema será validado en la sección III y se presentarán los resultados obtenidos. Finalmente se incluyen una serie de conclusiones y líneas futuras.

II. DISEÑO DEL SISTEMA

En esta sección se presenta el sistema propuesto y se lleva a cabo un exhaustivo análisis del mismo basado en teoría QO de propagación de haces gaussianos [6]. El diseño está basado en un telescopio gaussiano, donde la separación entre los dos elementos de enfoque es igual a la suma de sus distancias focales. En la Fig. 1 se puede ver un esquemático del mismo. En esta sección los elementos focalizadores se representarán como lentes finas para reducir los cálculos, mientras que en la sección III éstos serán reemplazados por espejos elípticos. Se han escogido espejos elípticos porque si se diseñan adecuadamente reducen los efectos de distorsión y el nivel de contrapolar [7]-[9].

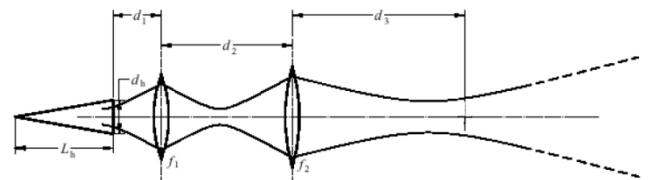


Fig. 1. Esquemático del camino QO de un telescopio gaussiano.

A. Herramienta de análisis

Los programas de análisis de antenas de onda completa, en el rango de QO, requieren de un gran número de recursos computacionales y periodos muy largos de tiempo para

realizar los cálculos pertinentes. Es por ello que sería muy interesante disponer de una herramienta capaz de obtener una aproximación rápida y precisa del comportamiento de un sistema electromagnético en el rango de QO. El objetivo no es resolver el problema electromagnético completo sino desarrollar una aplicación que reduzca de manera considerable el tiempo de cómputo basada en teoría QO de propagación de haces gaussianos [6]. Una vez que las principales variables del sistema han sido obtenidas, el problema electromagnético completo será resuelto y optimizado utilizando un programa de análisis de antenas de onda completa comercial como es GRASP [10].

La herramienta [11] ha sido implementada utilizando Matlab [12] y un ejemplo puede verse en la Fig. 2. Para validar los resultados obtenidos, se han implementado y comprobado diferentes sistemas disponibles en la bibliografía. Uno de ellos es el radiotelescopio de 40m que el Observatorio Astronómico Nacional posee en Yebes [13].

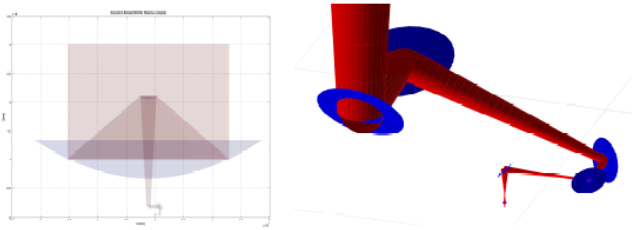


Fig. 2. Ejemplo de la herramienta desarrollada. Los diferentes elementos que conforman el sistema están dibujados en azul mientras que en rojo se muestran los haces gaussianos. Este esquemático emula el sistema completo presentado en [13].

B. Diseño QO

Gracias a la herramienta desarrollada, es posible calcular de manera rápida y sencilla los principales parámetros del sistema. Como fuente de alimentación del sistema se ha elegido una bocina cónica corrugada debido a que ha demostrado poseer un muy buen haz gaussiano sobre un rango de frecuencia de al menos 1.5:1 [6]. A partir de la longitud de la longitud y de la apertura de la bocina se calculan los parámetros de esta [6], [14], y, a continuación se calculan los demás parámetros del sistema para obtener una resolución de 1cm a una distancia de 5m.

Basándose en la teoría QO de propagación de haces gaussianos se obtiene la siguiente matriz ABCD, siguiendo las etiquetas de la Fig. 1:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A partir de la matriz ABCD y de los parámetros de la bocina calculados en la Sección II.A, se pueden calcular el *beam waist* de salida y su posición. A continuación es fácil obtener el ancho de haz a -3dB y el tamaño del *spot* obtenido. En la Fig. 3 se muestra el tamaño de la mitad del *spot* a una distancia de 5m en función de los parámetros f_1 y f_2 cuando $d_1=300mm$ y $d_2=500mm$. Se ha impuesto que aquellas combinaciones que den lugar a *semi-spots* mayores de 15mm sean iguales a 15mm para facilitar la representación. Asimismo se ha resaltado una combinación de f_1 y f_2 que da lugar a un *spot* de 1cm (*semi-spot* de 5mm).

Se puede obtener una representación similar para distintos pares de distancias d_1 y d_2 , así como para una distancia de escaneo d_3 diferente.

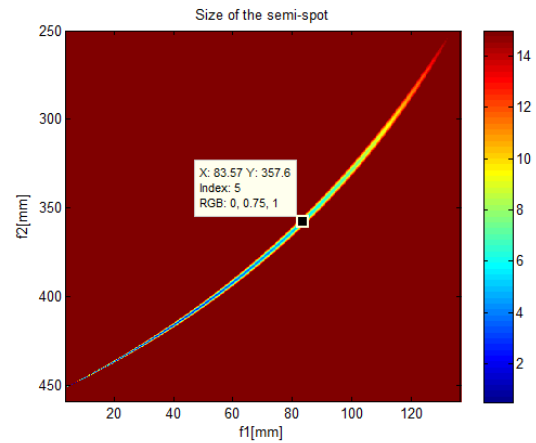


Fig. 3. Tamaño del *semi-spot* en función del foco de las dos lentes finas (f_1 y f_2) para unas distancias $d_1=300m$ y $d_2=500mm$.

Parece evidente que el espejo que tendrá mayor tamaño y que, por tanto, impondrá el tamaño máximo del sistema completo es el segundo. Por esta razón se ha llevado un estudio sobre el diámetro del segundo espejo en función de todos los parámetros de QO. De teoría QO de propagación de haces gaussianos se tiene que un diámetro de 4ω (cuatro veces el *beam radius*) trunca el haz a un nivel de 34.7dB por debajo del nivel de potencia en la dirección de propagación e incluye el 99.97% de la potencia en el modo fundamental del haz gaussiano. Esto es generalmente suficiente para reducir los efectos de la difracción causados por el truncamiento. Es por ello que el diámetro mínimo del segundo espejo se ha obtenido teniendo en cuenta que debe ser, al menos, 4 veces el *beam radius* [6].

Se ha observado que el diámetro más pequeño del segundo espejo no depende de las distancias d_1 y d_2 o de los focos f_1 y f_2 , si no que viene impuesto por la distancia de escaneo d_3 y por el tamaño del *spot*. En la Fig. 4 se muestra el diámetro mínimo del segundo espejo en función del tamaño de *spot* deseado para dos distancias de escaneo.

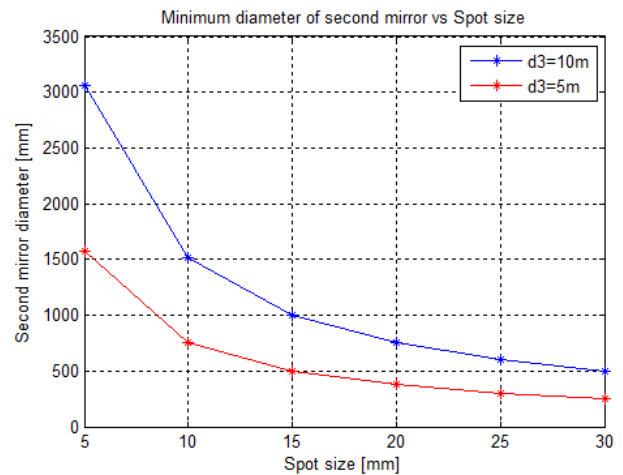


Fig. 4. Diámetro del segundo espejo en función del tamaño del *spot*.

Una vez que se ha obtenido el diámetro mínimo del segundo espejo se obtienen los parámetros de QO que dan lugar a dicho diámetro mínimo para una distancia de escaneo de 5m y un tamaño de *spot* de 1cm. Estos parámetros se

recogen en la Tabla I y en la Fig. 5 se muestra el diagrama de radiación del sistema obtenido con teoría QO para el haz gaussiano con el modo fundamental, con 10 y con 20 modos.

TABLA I
PARÁMETROS QO DEL SISTEMA

d_1 [mm]	d_2 [mm]	d_3 [mm]	f_1 [mm]	f_2 [mm]
300	500	5000	83.86	357.15

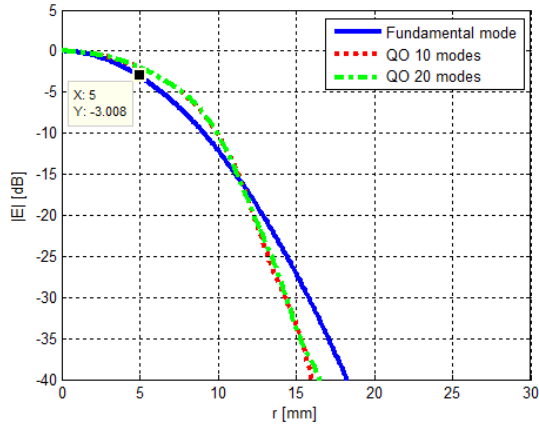


Fig. 5. Semi-spot obtenido con QO.

III. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

El sistema diseñado basado en QO ha sido trasladado a elementos reales (espejos elípticos) y simulado utilizando un software comercial de análisis de antenas de onda completa, GRASP [13] con el objetivo de validar el proceso de diseño.

El primer paso consiste en traducir los parámetros QO obtenidos en la sección previa cuando se utilizaban lentes finas en parámetros físicos para construir los espejos elípticos. Esta relación viene dada por:

$$f = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \quad (2)$$

donde $R1$ es la distancia desde el espejo elíptico a su foco de entrada y $R2$ es la distancia desde el espejo elíptico a su foco de salida. Esto se puede ver mejor en la Fig. 6.

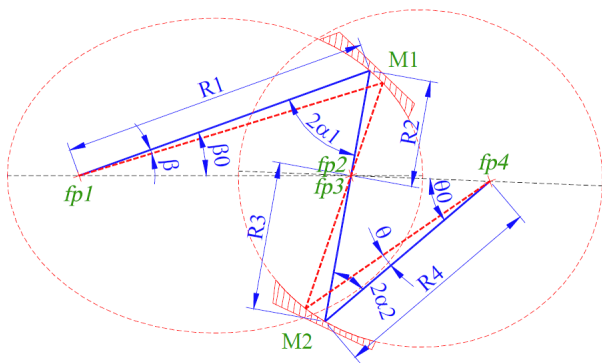


Fig. 6. Layout óptico con dos espejos elípticos y algunos parámetros. El rayo principal está representado por una línea azul sólida [9].

Siguiendo las etiquetas de la Fig. 6, $R1$ es la distancia desde el *beam waist* de la bocina al primer espejo elíptico; $R2$ es la distancia desde el primer espejo elíptico hasta el foco común; $R3$ es la distancia desde el foco común hasta el segundo espejo elíptico; y $R4$ es la distancia desde el segundo espejo elíptico al foco de salida (aproximadamente

la distancia de escaneo de 5m). Los parámetros obtenidos se recogen en la Tabla II.

TABLA II
PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS ESPEJOS ELÍPTICOS

$R1$ [mm]	$R2$ [mm]	$R3$ [mm]	$R4$ [mm]	$2\alpha_1$ [°]	$2\alpha_2$ [°]
306.9	115.4	384.6	5003.4	60	60

Las dimensiones del sistema se pueden ver en la Fig. 7. Los ángulos se han elegido de tal manera que reduzcan el tamaño global del sistema. Se ha situado un espejo plano a la salida del segundo espejo elíptico de tal manera que proporcione una capacidad de escaneo al sistema.

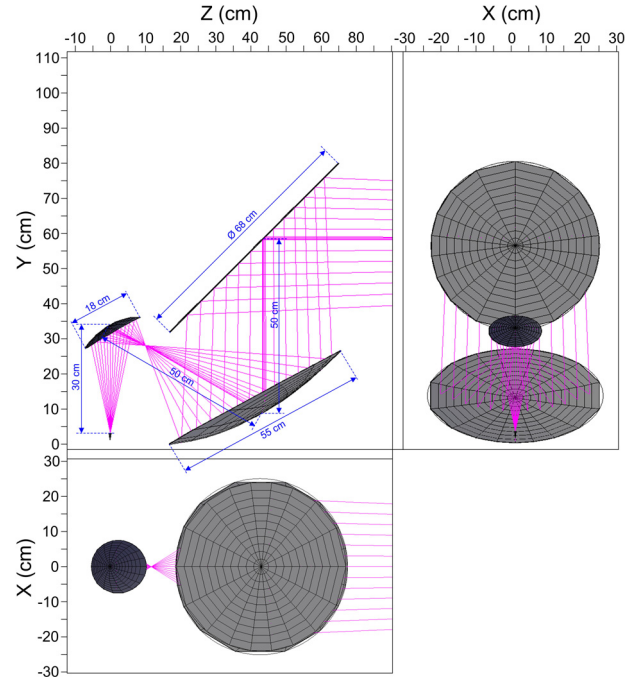


Fig. 7. Sistema de enfoque diseñado para detectar objetivos a 5m con una resolución de 1cm.

En la Fig. 8 se puede apreciar el *spot* obtenido mientras que en la Fig. 9 se muestran tres cortes del mismo. Se obtiene un *spot* de 1cm de diámetro, el nivel de lóbulo secundario está por debajo de 30dB en ambos cortes y el nivel de contrapolar está por debajo de los 30dB. Con este sistema se tiene una ganancia de 70.1dBi.

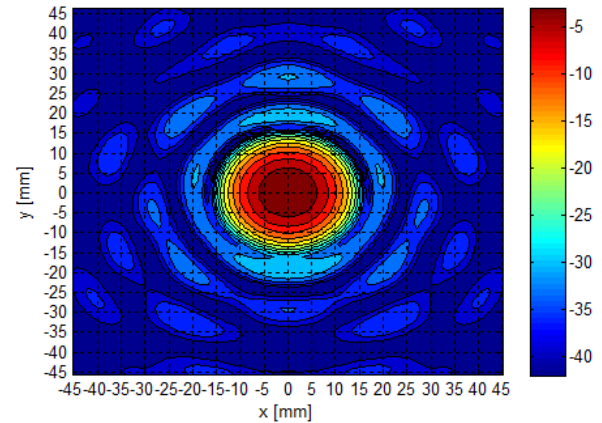


Fig. 8. Spot a una distancia de 5m.

Asimismo se han analizado las capacidades de escaneo que posee el sistema. Como se ha mencionado anteriormente, se ha incluido un espejo plano a la salida del segundo espejo

elíptico para proporcionar capacidad de escaneo al sistema de enfoque. En la Fig. 10 se muestra el corte en $\varphi=90^\circ$ a 5m cuando el sistema está escaneando en el plano $\varphi=0^\circ$. Cuando se escanea en el plano $\varphi=90^\circ$ se obtiene un comportamiento similar. El diagrama de radiación apenas se distorsiona incluso cuando se llevaba a cabo un desplazamiento elevado (500mm).

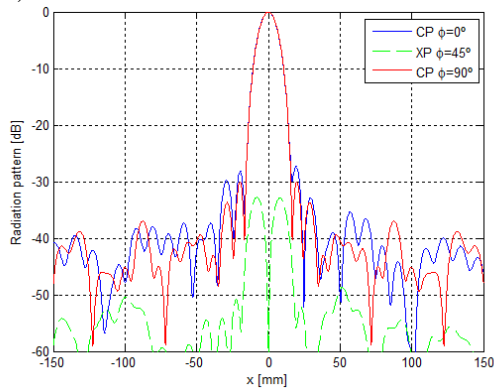


Fig. 9. Componente copolar y contrapolar en tres planos cuando no se está escaneando.

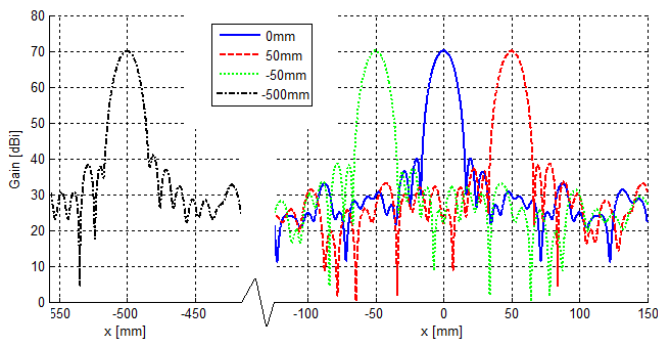


Fig. 10. Capacidad de escaneo en el plano $\varphi=0^\circ$.

Una vez que se han analizado el tamaño del *spot* y la capacidad de escaneo del sistema, se ha llevado a cabo una simulación software para observar el comportamiento del sistema en una situación real. Un objetivo ha sido colocado a 5m y éste ha sido escaneado con el sistema de enfoque diseñado (Fig. 11). El tamaño de dos *spots* se ha dibujado en la misma escala que la del sujeto a ser escaneado para comparar sus dimensiones así como el resultado del escaneo y se han introducido una pistola, un círculo, una llave y un aspa. A la vista de los resultados de la simulación parece factible que el sistema aquí presentado pueda ser construido e integrado en un sistema radar de detección de objetivos.

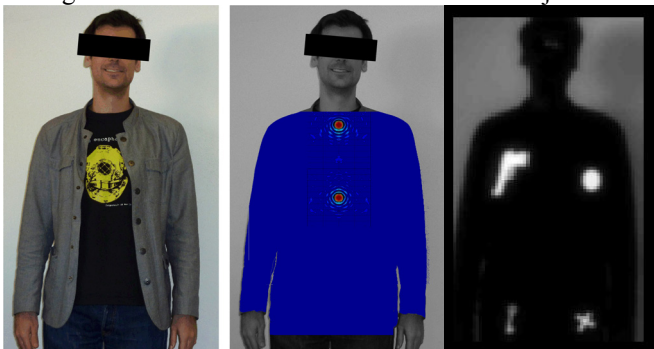


Fig. 11. Simulación software del comportamiento del sistema de enfoque.

IV. CONCLUSIONES

Se ha presentado un sistema de enfoque para detección de objetivos a 5m con una resolución de 1cm funcionando a 300GHz. Este sistema de enfoque deberá ser integrado con toda la electrónica necesaria para general la señal de 300GHz y con elementos de procesamiento de señal para detectar armas u otro tipo de objetos que se encuentren ocultos en el objetivo a escanear para construir un radar.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONSOLIDER-INGENIO 2010 CSD2008-00068 y CICYT Neolmag TEC2009-14525-C02. Los autores quieren agradecer al Centro Astronómico de Yebes por su apoyo técnico.

REFERENCIAS

- [1] P. H. Siegel, "Terahertz Technology", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., Vol. 50, No. 3, Mar 2002.
- [2] A. García-Pino, B. González-Valdés, Ó. Rubiños-López, J. A. Martínez-Lorenzo, J. Grajal-de-la-Fuente, "Sistema Óptico de Barrido a 300GHz Basado en una Geometría Confocal", XXV Simposium Nacional Unión Científica Internacional de Radio URSI, Bilbao, September, 2010.
- [3] K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart, T. Bryllert, G. Chattopadhyay, E. Schlecht, J. Gill, C. Lee, A. Skalare, I. Mehdi, P. H. Siegel, "Penetrating 3-D Imaging at 4- and 25-m Range Using a Submillimeter-Wave Radar", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 56, No. 12, December 2008.
- [4] I. Ederra, R. Gonzalo, B. E. J. Alderman, P. G. Huggard, B. P. de Hon, M. C. van Beurden, A. Murk, L. Marchand, P. de Maagt, "Sub-Millimeter-Wave Imaging Array at 500GHz based on 3-D Electromagnetic-Bandgap Material", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 56, No. 11, November 2008.
- [5] N. Llombart, K. B. Cooper, R. J. Dengler, T. Bryllert, P. H. Siegel, "Confocal Ellipsoidal Reflector System for a Mechanically Scanned Active Terahertz Imager", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 58, No. 6, June 2010.
- [6] P. F. Goldsmith, Quasioptical Systems: Gaussian beam quasioptical propagation and applications, IEEE Press/Chapman and Hall, New York, 1998.
- [7] J. A. Murphy, "Distortion of a Simple Gaussian Beam on Reflection From Off-Axis Ellipsoidal Mirrors," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, vol. 8, no. 9, pp. 1165-1186, 1987.
- [8] J. A. Murphy and S. Withington, "Perturbation analysis of Gaussian-beam-mode scattering at off-axis ellipsoidal mirrors," Infrared Physics and Technology, vol. 37, pp. 205-219, 1996.
- [9] A. Baryshev and W. Wild, "ALMA band 9 optical layout," ALMA Memo #394, 2001.
- [10] GRASP, General Reflector and Antenna arm analysis software, <http://www.ticra.com/what-we-do/software-descriptions/grasp/>.
- [11] M. Molina-Romero, Implementación de una herramienta para el estudio rápido de sistemas quasi-ópticos, Master Thesis Dissertation, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2010
- [12] MATLAB, <http://www.mathworks.com/>.
- [13] L. E. García-Muñoz, Contribución al Estudio de la Focalización Multibanda de Radiotelescopios, PhD Dissertation, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2003.
- [14] R. J. Wylde, "Millimetre-wave Gaussian beam-mode optics and corrugated feed horns", IEE Proceedings, Vol. 131, No.4, August 1984.