

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DEL TELESCOPIO COSMOLÓGICO DE ATACAMA: LÓBULOS LATERALES Y ACOPLAMIENTO ÓPTICO

Patricio Gallardo, Fernando Henríquez, Rolando Dünner, Carlos Jerez.

INTRODUCCIÓN

El Telescopio Cosmológico de Atacama (ACT por sus siglas en inglés) es un telescopio de seis metros de diámetro ubicado a 5.200 metros de altura en el desierto de Atacama, Chile. El telescopio ACT es una colaboración, dirigida por la universidad de Princeton, de la cual nuestro grupo en la UC también forma parte. ACT observa la luz más antigua en el Universo, el fondo cósmico de microondas (CMB) a escalas angulares de arco minutos (una sexagésima parte de un grado). El receptor de ACT (MBAC) mide las fluctuaciones en la temperatura de brillo del CMB. Un nuevo detector para el telescopio (ACTPol [7]) se está construyendo y es necesario medir detalladamente parámetros ópticos del telescopio. En particular interesa medir lóbulos laterales (luz que entra en el detector pero que no proviene de la fuente astronómica a la que el telescopio apunta) en el telescopio, así como el acoplamiento óptico entre los reflectores del mismo (luz de origen térmico que entra en los detectores por difracción). La medición de estos parámetros es necesaria ya que el nuevo detector de ACT será diez veces más sensible.

Aunque existen simulaciones numéricas para acotar los problemas de acoplamiento óptico, es necesario un método para medir la luz lateral proveniente de las estructuras mecánicas del telescopio y así poder estimar el desempeño del actual diseño. Para poder cumplir con este propósito, se diseña un transmisor de microondas operando a 145 GHz. La caracterización del patrón de radiación de potencia de este transmisor es un paso fundamental para poder interpretar los datos de los experimentos en los que fue utilizado. Se caracteriza el patrón de radiación del transmisor utilizando el robot industrial ABB IRB1600 del Laboratorio de Robótica de Ingeniería Eléctrica. Además, se modela numéricamente el patrón de radiación utilizando un software de simulación electromagnética llamado HFSS. La comparación de los resultados de la simulación con el experimento (medición con el robot), permite determinar que las características de algunos elementos en el transmisor tienen una fuerte influencia en el patrón de radiación. Esta medición fue necesaria para la calibración del experimento en el telescopio.



Pontificia Universidad Católica de Chile

Rolando Dünner, Profesor. Ph.D. Astrofísica, M.Sc. Física e Ingeniero Civil, Especialidad Eléctrica.

Patricio Gallardo: Ingeniero Civil, Especialidad Eléctrica y Licenciado en Astronomía.

Carlos Jerez Handes: Profesor. Ph.D. Matemáticas Aplicadas y M.Sc. Matemáticas Aplicadas, École Polytechnique, Francia. Magister en Ciencias de la Ingeniería e Ingeniero Civil de Industrias, Especialidad Eléctrica.

Fernando Henríquez: Estudiante 4º año de Ingeniería Civil, Especialidad Eléctrica.

Contacto: Rolando Dünner - rdunner@astro.puc.cl
Carlos Jerez - cjerez@ing.puc.cl

EXPERIMENTACIÓN

Caracterización experimental del patrón de radiación

El transmisor de microondas a 145 GHz fue desarrollado en conjunto por la UC, la Universidad de Princeton y NASA Goddard Space Flight Center. Cuenta con un oscilador Gunn que genera la radiación. Esta radiación pasa por una rueda con paletas que es libre de girar a una velocidad constante, ocultando y mostrando la radiación del transmisor. Esta rueda permite separar la señal del transmisor de la señal atmosférica (en esta banda, la atmosfera emite radiación) que cambia lentamente.

La caracterización experimental del transmisor se realiza en el Laboratorio de Robótica del Departamento de Ingeniería Eléctrica. En particular se desarrolla un método para medir el patrón de radiación del transmisor con el robot industrial ABB IRB1600. El procedimiento consiste en medir la potencia irradiada por el transmisor a una distancia fija a diferentes posiciones angulares, mediante un receptor ubicado en el extremo del robot. La recepción se realiza mediante un broadband detector diode de Pacific Millimeter, ubicado dentro de una antena tipo corneta cuadrada. El recorte de la señal se realiza mediante un chopper óptico Stanford Research SR540. La Figura 1 muestra el desarrollo del experimento en el laboratorio. La caja metálica en la parte inferior es el transmisor. Se muestra además el robot ABB (naranja) sosteniendo la antena receptora dorada de tipo piramidal apuntando directamente a la apertura del transmisor de donde proviene la radiación.

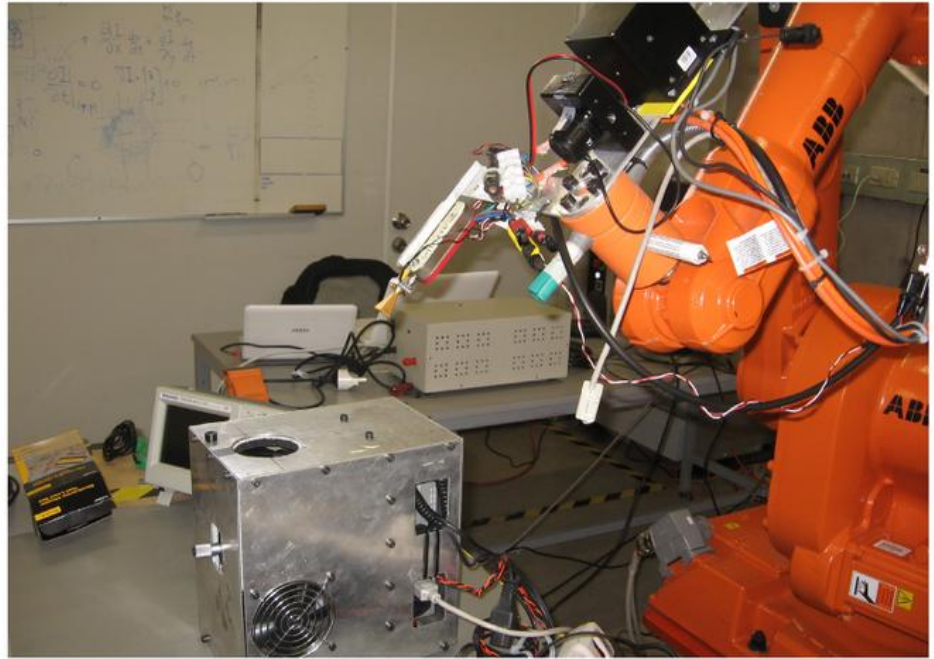


Figura 1: Montaje del experimento en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica

desarrollado por la empresa ANSYS, cuyo objetivo es asistir en el análisis y diseño de problemas electromagnéticos gobernados por las Ecuaciones de Maxwell en régimen armónico sujetos a geometrías y condiciones de borde con los que es imposible exhibir una solución analítica. Este programa busca la solución utilizando métodos numéricos, tales como FEM (Finite Element Method) y BEM (Boundary Element Method), incluido en las últimas versiones del software. En forma general, el Método de los Elementos Finitos (FEM) construye la solución dividiendo la región física de interés en pequeños elementos (en el caso de HFSS, usando tetraedros) y aproximando la función solución del problema localmente, buscando que se satisfagan las Ecuaciones de Maxwell y las condiciones de borde impuestas. El modelo de la guía de onda construido en HFSS se muestra en la Figura 3.

Experimentos en el telescopio

A continuación se describen los dos experimentos realizados en el telescopio ACT.

Acoplamiento óptico: Se ubica el transmisor en diferentes posiciones para simular experimentalmente un rayo luminoso que parte en uno de los reflectores y termina en la cámara (ver Figura 4). El objetivo de este experimento

es medir la cantidad de radiación que entra en la cámara producto del acoplamiento óptico (spillover). El transmisor se ubica en una estructura con un riel que permite movimientos horizontales a través del reflector en estudio. Se realizan dos barridos horizontales en cada reflector, registrando la potencia recibida por la cámara del telescopio. Se registra la

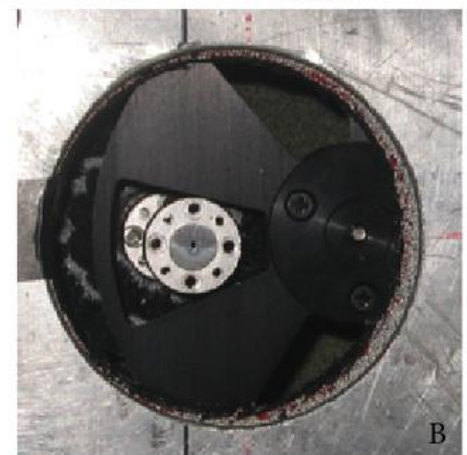
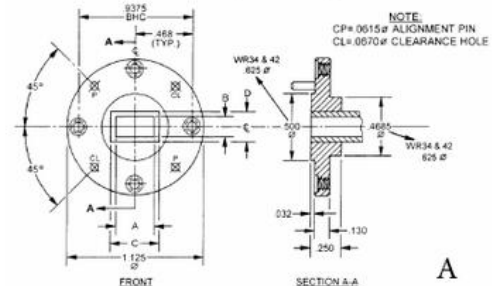


Figura 2: A: Esquema del flange. B: Guía de onda en la fuente

Caracterización numérica del patrón de radiación

El transmisor de microondas está compuesto básicamente por un oscilador conectado a una guía de onda, la guía de onda termina en un conector llamado flange. La simulación electromagnética se centra en estudiar la forma del patrón de radiación de esta configuración. En la Figura 2 (B) se aprecia una imagen del flange al interior de la fuente.

Modelación computacional: HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) es un software comercial,

posición de la fuente utilizando un Laser Tracker proporcionado por Faro, el que entrega precisión de 5 micrones. Para el reflector primario, la radiación de la fuente rebota en el secundario para luego entrar en la cámara. En la medición del reflector secundario, la radiación de la fuente entra directamente en la cámara.

Lóbulos laterales: En este experimento se ubica el transmisor en el escudo de radiación a unos diez metros del telescopio. Se realizan observaciones girando el telescopio sobre su propio eje a distintas elevaciones (ángulo entre la horizontal y la línea de visión) con un paso de 5 grados. El objetivo de este experimento es medir cuanta radiación entra en la cámara, producto de reflejos en la estructura del telescopio.

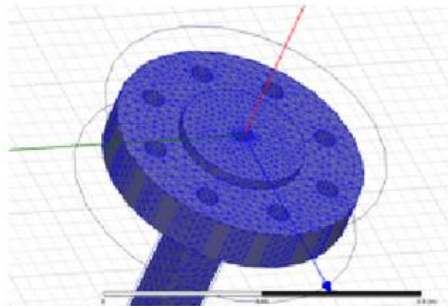


Figura 3: Modelo geométrico de la guía de onda en HFSS

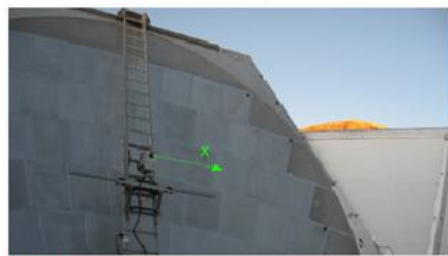


Figura 4: Montaje experimental en el telescopio.

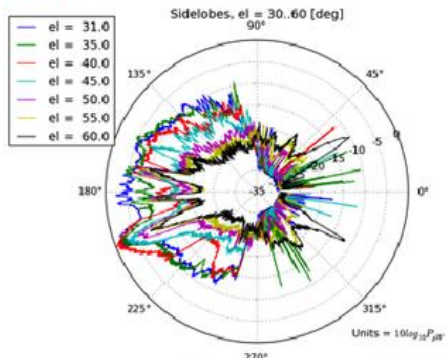


Figura 5: Potencia recibida en el experimento de lóbulos laterales para cada elevación

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados Experimentales

La caracterización de la fuente entrega algunos artefactos en la forma del patrón de radiación. En el plano del campo eléctrico, el patrón se asemeja al esperado (plano) para una guía de onda abierta. El plano del campo magnético muestra un patrón que no es plano y presenta fuertes lóbulos laterales. La simulación numérica entregará mayor información sobre estos artefactos.

El experimento de acoplamiento óptico entrega una apertura efectiva (dentro del 10% de spillover) para el espejo primario de $R = 2,86$ m ó 95% de los 6 m. En el espejo secundario se mide una apertura de 1,0 m con un error menor al 5%. El resultado del espejo primario entrega una apertura un poco menor a la prevista por el diseño óptico del telescopio. El experimento de lóbulos laterales muestra que, sin considerar la curvatura del frente

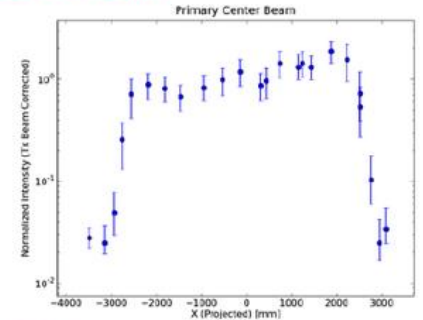


Figura 6: Barrido horizontal del espejo primario

de onda debido a la cercanía del transmisor, el nivel de lóbulos laterales es de -75 dB.

Resultados Numéricos

Se realizaron dos simulaciones computacionales, las cuales mostraron que la presencia del flange en la guía de onda juega un papel importante en el patrón de radiación del transmisor.

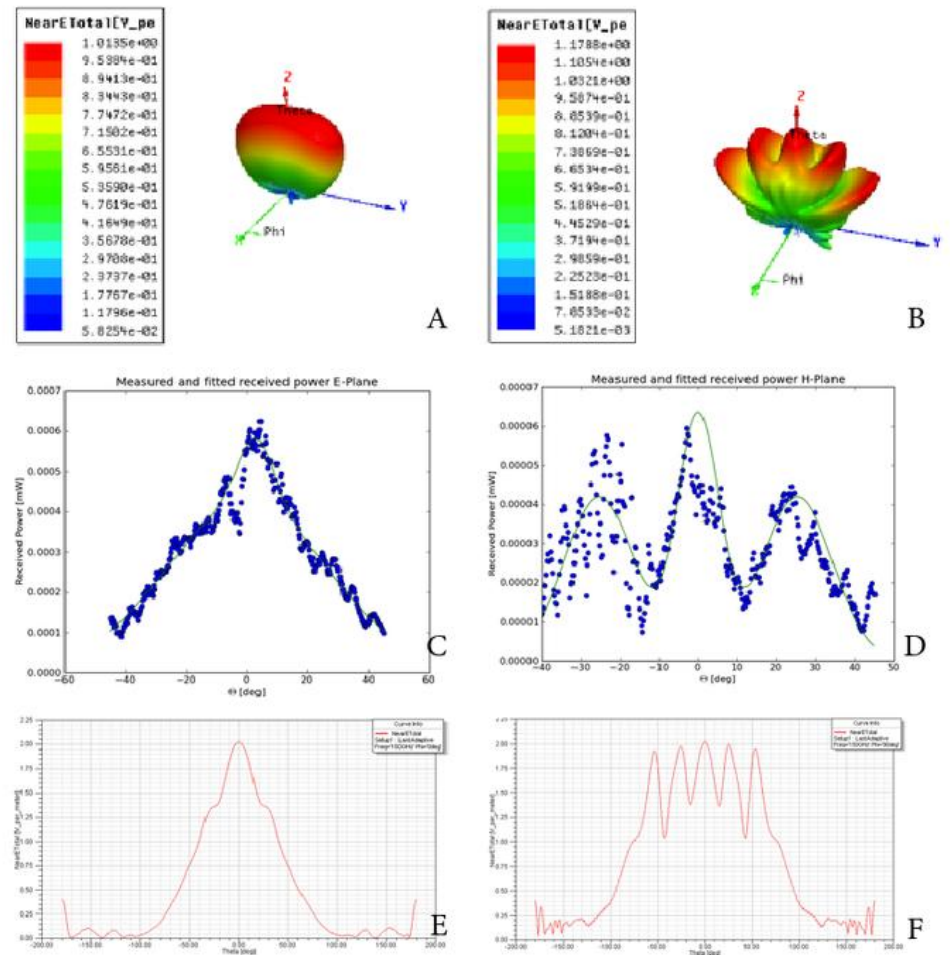


Figura 7: A: Magnitud del campo eléctrico simulado a una distancia de 30 cm del centro del transmisor para la guía de onda sin flange. B: Magnitud del campo eléctrico simulado a una distancia de 30 cm del centro del transmisor para la guía de onda con flange. C: Potencia medida para $\phi=0^\circ$ en la guía de onda con flange a 30 cm. D: Potencia medida para $\phi=90^\circ$ en la guía de onda con flange a 30 cm. E: Magnitud del campo eléctrico simulado a una distancia de 30 cm del centro del transmisor para la guía de onda sin flange para $\phi=0^\circ$. F: Magnitud del campo eléctrico simulado a una distancia de 30 cm del centro del transmisor para la guía de onda sin flange para $\phi=90^\circ$.

La densidad de corriente eléctrica sobre el flange de la guía de onda provoca los efectos que fueron medidos en el experimento con el robot.

Vemos que las simulaciones numéricas tienen un rol fundamental en entender efectos físicos en fenómenos electromagnéticos.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un método para caracterizar un transmisor de microondas a 145 GHz utilizando un robot industrial. La medición fue validada con una simulación numérica por elementos finitos utilizando el software HFSS.

Los resultados experimentales y los obtenidos con la simulación se utilizaron para calibrar el experimento en el telescopio ACT.

El nivel de lóbulos laterales en el telescopio es del orden de -75 dB con respecto al lóbulo principal. Esto permitiría que los lóbulos laterales no sean un problema para el nuevo detector.

El experimento de acoplamiento óptico entregó que la apertura efectiva del telescopio es mayor a la esperada del diseño óptico. Este resultado, sin embargo aún requiere de validación con modelos independientes que permitan acotar el error.

La instrumentación astronómica en bandas milimétricas presenta desafíos para la ingeniería de radio frecuencias. El Centro de Astro Ingeniería, en colaboración con otras instituciones pretende dar solución a problemas de instrumentación astronómica. De esta forma se perfila a Chile como un agente activo en el desarrollo de tecnologías para la investigación astronómica y no como un mero espectador.

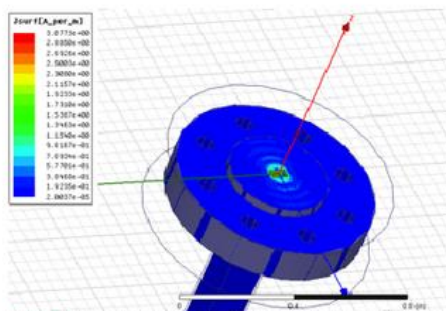


Figura 8: Magnitud del vector de densidad de corriente en la superficie del flange de la guía de onda

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al equipo del Atacama Cosmology Telescope, en particular al investigador principal Lyman Page de Princeton y a Edward Wollack de NASA por su contribución a este trabajo. La caracterización fue posible gracias al robot ABB del equipo de robótica, en Ingeniería Eléctrica UC. Agradecemos al ingeniero on-site de ACT, Masao Uehara por su contribución a este trabajo. Agradecemos la colaboración del profesor Marcelo Guarini por su apoyo y valiosos consejos. ACT se encuentra en la reserva científica de Chajnantor, la cual es posible gracias a CONICYT. Este proyecto fue financiado por la Vicerrectoría de Investigación UC, proyecto INICIO #39/2010 y FONDEF 11100147.

REFERENCIAS

1. GALLARDO Matamala, Patricio. Sidelobes and spillover in the Atacama Cosmology Telescope. Memoria (Ingeniería Eléctrica, en rev.). Santiago, Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, 2011. 77 p.
2. KERKK, A., WOLLACK E. y HORNER, N. Waveguide Flanges for ALMA Instrumentation [en línea]. ALMA Memo, 1999 [fecha de consulta: 26 Octubre 2011]. Disponible en: <http://www.alma.nrao.edu/memos/html-memos/alma278/memo278.pdf>
3. KOPP, M. An Introduction to HFSS: Fundamental Principles, Concepts and Use. ANSYS HFSS software.
4. JACKSON, John D. Classical Electrodynamics. 3 rd. ed. New York. Addison-Wesley. 1980. 880 p.
5. ROHLFS, Kristen. Tools of Radio Astronomy. 4 th. ed. Berlin. Springer. 2004. 461 p.
6. NIEMACK, Michael et al. ACTPol: a polarization-sensitive receiver for the Atacama Cosmology Telescope. Proceedings of the SPIE, Vol. 7741. pp. 77411S-77411S-21. 2010.
7. FOWLER, J. D. et al. Optical design of the Atacama Cosmology Telescope and the Millimeter Bolometric Array Camera. Applied Optics IP. Vol. 46, Issue 17, pp.3444-3454. 2007.

El transmisor de microondas a 145 GHz fue desarrollado en conjunto por UC, la Universidad de Princeton y NASA Goddard Space Flight Center

Principio Científico

La respuesta direccional de una antena o radio telescopio a la radiación incidente se puede expresar por medio del patrón de radiación. El patrón de radiación es una función del ángulo que muestra la potencia recibida en una cierta dirección angular. Para un reflector único, el patrón de radiación tiene la forma de un lóbulo principal seguido de lóbulos laterales. En la figura 9 vemos la respuesta típica para una antena parabólica. En el centro es posible identificar un lóbulo principal (main lobe) y a los lados, los lóbulos laterales (side lobes). Para fines astronómicos es importante minimizar los lóbulos laterales, ya que esta radiación puede generar artefactos indeseados en las observaciones científicas. El nuevo detector (actualmente en construcción) de ACT incrementa la sensibilidad en un factor 10, este incremento en sensibilidad hace que sea relevante caracterizar los lóbulos laterales y así asegurar que el nuevo detector entregará resultados confiables.

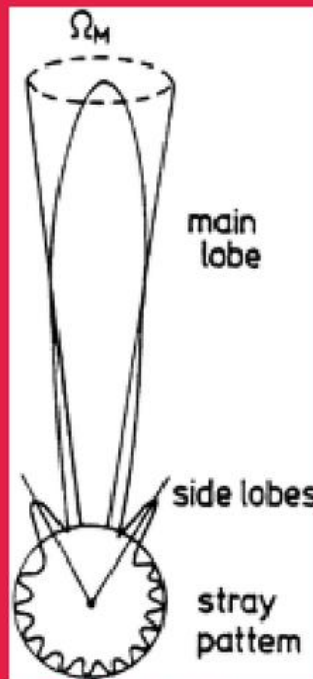


Figura 9: Patrón de radiación típico para un reflector único. Figura extraído de [5], Kraus.