

Retos en la Medida de Parámetros Eléctricos de Antenas: el caso del Laboratorio de Ensayos y Homologación de Antenas de la Universidad Politécnica de Madrid

M. Sierra Castañer⁽¹⁾, P. Caballero Almena⁽¹⁾, C. Martínez Portas⁽¹⁾, X. Sun⁽¹⁾, F. Rodríguez Varela⁽¹⁾ y B. Galocha Iragüen⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Telecomunicación
Avda. Complutense, 30. 28040 Madrid.
⁽¹⁾ (+34) 91 06 71903, manuel.sierra@upm.es

RESUMEN: Esta ponencia presenta los retos a los que nos enfrentamos en el LEHA-UPM de la ETSI Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid en la caracterización de los parámetros eléctricos de antenas (diagrama de radiación, ganancia, directividad, relación de onda estacionaria...). Los retos más importantes a los que nos enfrentamos son, en el ámbito técnico la medida en temperatura, la medida con la incertidumbre necesaria para aplicaciones de espacio, las técnicas de reducción de tiempo de medida, el uso de herramientas para la cancelación de reflexiones o mejora de la relación señal a ruido entre otras. En el ámbito del sistema de calidad destacamos la complejidad de la caracterización de las incertidumbres de medida en estos sistemas y los trabajos que se han realizado a nivel europeo para la realización de intercomparaciones en este ámbito con un número reducido de instalaciones.

1. INTRODUCCIÓN

Esta ponencia presenta los retos a los que nos enfrentamos en el Laboratorio de Ensayos y Homologación de Antenas de la ETSI Telecomunicación (LEHA-UPM) en la caracterización de los parámetros eléctricos de antenas (diagrama de radiación, ganancia, directividad, relación de onda estacionaria...) en el margen de frecuencias de 660 MHz hasta 110 GHz. Este laboratorio comenzó a trabajar en el año 1980, y en año 2000 comenzamos a dar servicios externos de una manera estructurada. En el año 2010 obtuvimos la acreditación de ENAC ISO17025, tras un trabajo de puesta en marcha del sistema de calidad. Cuenta con varios sistemas de medida: un sistema esférico de campo próximo, un rango compacto de doble reflector y un sistema esférico-plano-cilíndrico.

En estos momentos el laboratorio se dedica a fines docentes, a fines investigadores y a dar un servicio externo a empresas de los sectores de espacio, defensa, telecomunicaciones, astronomía, entre otros. Hoy en día la mayor parte de nuestras medidas se realizan para empresas fuera de España, destacando los servicios para medidas de sistemas de la Agencia Espacial Europea como las antenas de Venus Express, Mars Express, Solar Orbiter, Juice, BepiColombo, y satélites como Astra, Hispasat, Envisat, ...

Los retos más importantes a los que nos enfrentamos son, en el ámbito técnico la medida en temperatura, la medida con la incertidumbre necesaria para aplicaciones de espacio, las técnicas de reducción de tiempo de medida, el uso de herramientas para la cancelación de reflexiones o mejora de la relación señal a ruido entre otras.

En el ámbito del sistema de calidad destacamos la complejidad de la caracterización de las incertidumbres de medida en estos sistemas y los trabajos que se han realizado a nivel europeo para la realización de intercomparaciones en este ámbito con un número reducido de instalaciones. En este caso se trabaja con la Asociación Europea de Antenas y Propagación de Ondas en un grupo de trabajo específico para este fin.

Dividimos este artículo en los siguientes apartados. En el apartado 2 realizamos la descripción de las capacidades del LEHA-UPM, incluyendo tanto las capacidades de infraestructura, como los sistemas de calidad, y las redes en las que está colaborando el laboratorio. En el apartado 3, se presentan algunos de los retos a los que nos enfrentamos. En particular, lo hemos dividido en las siguientes secciones: el apartado 3.1 se centra en la medida de antenas de espacio, destacando algunas técnicas para medida en temperatura, reducción de fuentes de error, extrapolación del diagrama de radiación. El apartado 3.2 se centra en la reducción de tiempo de medida para la caracterización de antenas y estructuras para aplicaciones móviles, que se consideran ya “Commodities”. El apartado 3.3 nos centramos en los cálculos de incertidumbre de nuestras medidas, y el apartado 3.4 en los ejercicios de intercomparación interlaboratorio que realizamos en el marco de EurAAP (European Association on Antennas and Propagation). Por último, en el capítulo 4 presentamos las conclusiones principales del trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS CAPACIDADES DEL LEHA-UPM

El Laboratorio de Ensayos y Homologación de Antenas de la Universidad Politécnica de Madrid [1] está compuesto de tres recintos anecoicos con varios sistemas para la caracterización de los parámetros eléctricos de las antenas para distintas aplicaciones, situado en el edificio B (laboratorio B-031) de la ETSI de Telecomunicación de la UPM (Avda. Complutense, 30, 28040 Madrid). En estos recintos se ubican los siguientes sistemas:

1. Sistema de medida esférico en campo próximo (o lejano dependiendo del tamaño de la antena): con un posicionador de roll sobre acimut para la antena bajo prueba que permite medir antenas hasta 1 metro de diámetro desde 660 MHz hasta 110 GHz (Figura 1).
2. Sistema de rango compacto, que nos permite medir desde 7 hasta 110 GHz antenas de hasta 3 metro de diámetro, mediante técnica de campo lejano. Este sistema permite medir también sección radar en configuración cuasi-monoestática (Figura 2).
3. Sistema plano-cilíndrico para medida de grandes antenas (hasta 4 metros de diámetro) con un plano de 4.75 metros de lado que permite medir hasta 40 GHz sin necesidad de corrección, y en un área más pequeña se ha medido hasta 110 GHz. (Figura 3). En el sistema cilíndrico se han medido también comportamiento de radomos para ocultamiento y protección de antenas.
4. En estos momentos se está construyendo un nuevo sistema para llegar hasta los 220 GHz, que permitirá medir antenas hasta 60 cm de diámetro.

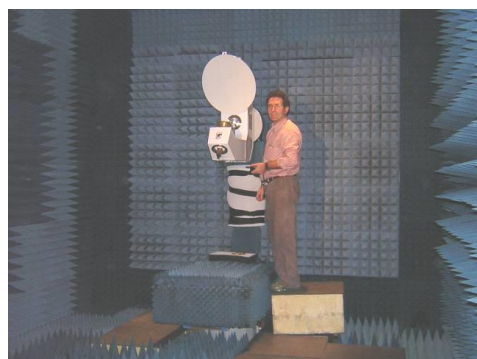


Figura 1: Sistema de medida esférico. Posicionador de Antena bajo prueba.

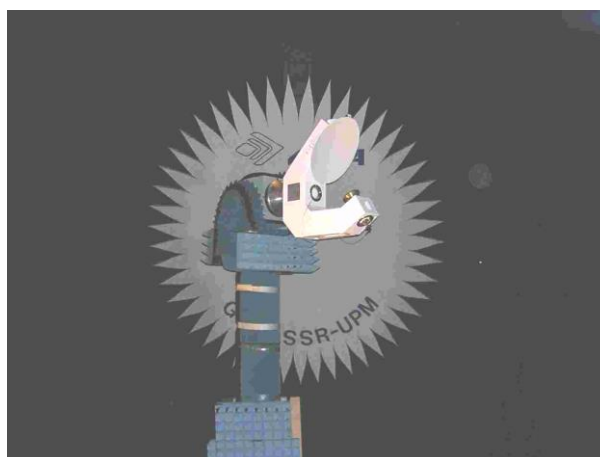


Figura 2: Sistema de medida de rango compacto. Posicionador de Antena bajo prueba y reflector parabólico.



Figura 3: Medida de ocultamiento de antena en sistema plano-cilíndrico.

Además de la infraestructura anterior, el LEHA-UPM ha trabajado en software para la medida de antenas. El paquete software PROCENCA permite controlar todo el equipamiento de radiofrecuencia para poder medir, los controladores de posicionadores, realizar las adquisiciones de campo, las transformaciones de campo próximo a campo lejano, y la extracción de parámetros más importante de antenas.

Otro valor es la acreditación ISO17025, por ENAC. Se consiguió esta acreditación en el año 2010 para una serie de procedimientos de medida realizados internamente, y basados en las recomendaciones del IEEE [2,3], a las que los miembros del LEHA-UPM han contribuido en sus últimas actualizaciones.

También es relevante la participación en redes: el LEHA-UPM pertenece a la red de Laboratorios de la Comunidad de Madrid (RLA), gracias a la cual apostamos por la acreditación ISO17025. También es parte activa de la Red Europea de Antenas y Propagación de Ondas, en particular, del grupo de trabajo "Measurements", donde entre otras cosas, se potencian y organizan los ejercicios de intercomparación, y que se presentará de una forma más detallada en la próxima sección.

Por último, los integrantes del LEHA-UPM, participan de manera activa en investigación en nuevas técnicas de medida de antenas, publicando de manera continuada en las mejores revistas científicas del sector. Algunos de estos trabajos se han publicado también en libros como [4,5].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha mencionado en la introducción, vamos a tratar cuatro temas distintos en este apartado: uno dedicado a los retos de la medida de antenas de satélite, y cómo los hemos resuelto, un segundo a la reducción de tiempo de medida para determinadas antenas, como son las antenas y los radomos de telefonía móvil. El tercer apartado incluye un estudio de los cálculos de incertidumbre, tarea siempre compleja en este tipo de medidas, y un cuarto sobre los trabajos de intercomparación que se han afrontado desde la Red Europea de Antenas, donde el LEHA-UPM participa muy activamente.

3.1 Retos en la Medida de Antenas de Satélite

La medida de antenas de satélite requiere aumentar al máximo la precisión de las medidas para lo cual han de utilizarse técnicas para la cancelación o reducción de errores. Del mismo modo muchas veces se necesita simular condiciones de medida en condiciones extremas, por ejemplo, de temperatura, debido a las altas temperaturas a las que se encuentran los sistemas de satélite. En esta sección se resumen algunos de los trabajos que hemos realizado en este ámbito. La Tesis Doctoral de Francisco Cano [6] analizó cómo se podían utilizar distintas técnicas de filtrado espacial para esta reducción de errores. En particular se analizaron técnicas basadas en reconstrucción de fuentes en la superficie de la antena, y filtrado de todas aquellas que se situaban fuera de la misma, y técnicas de caracterización del campo eléctrico en distintas contribuciones modales (modos esféricos y cilíndricos), filtrando aquellos modos que no podían corresponder a una solución física del problema electromagnético. Estas técnicas se utilizaron con éxito para reducir el efecto de reflexiones debidas a malfuncionamiento del material absorbente o a acoplos mutuos entre estructuras del sistema de medida de antenas y elementos del satélite en sí; a reducción del leakage de estructuras del sistema de medida de antenas, a mejora de la relación señal a ruido, y mediante técnicas iterativas, incluso a la extrapolación del diagrama de radiación de la antena, significando bien una reducción del tiempo de medida, bien una caracterización de porción del diagrama imposible de caracterizar en un determinado sistema.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo en el sistema plano donde se observa cómo se cancela el efecto de la radiación reflejada en el suelo utilizando la técnica de filtrado espacial de las fuentes fuera de la antena.

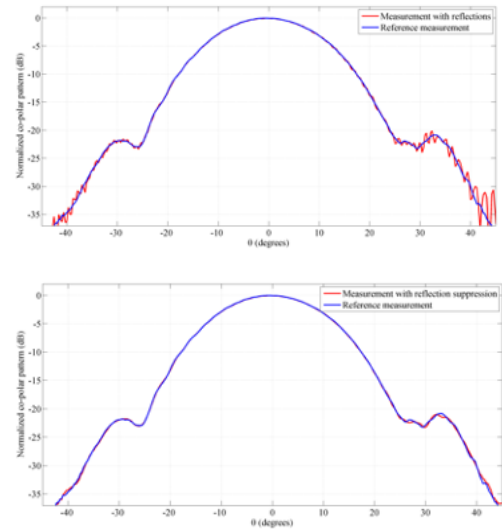


Figura 4: Efecto de la reflexión en una medida y el resultado de su cancelación.

El segundo reto que presentamos es la medida a diferentes temperaturas. En el caso de la antena BepiColombo, misión de la Agencia Espacial a Mercurio, y proyecto conjunto entre Sener, Ryma y la UPM. Hubo que asegurar el funcionamiento en un muy amplio margen de temperatura. Para ello se emplearon dos técnicas, por una parte, se midió calentando la antena en un sarcófago, pudiendo caracterizar desde temperatura ambiente hasta 150°C. Para temperaturas superiores se simuló el comportamiento de la antena, validando las simulaciones hasta dichos 150°C. La Figura 5 presenta el sarcófago y las medidas de cortes del diagrama de radiación en componentes co-polar y contra-polar hasta los 150°C.

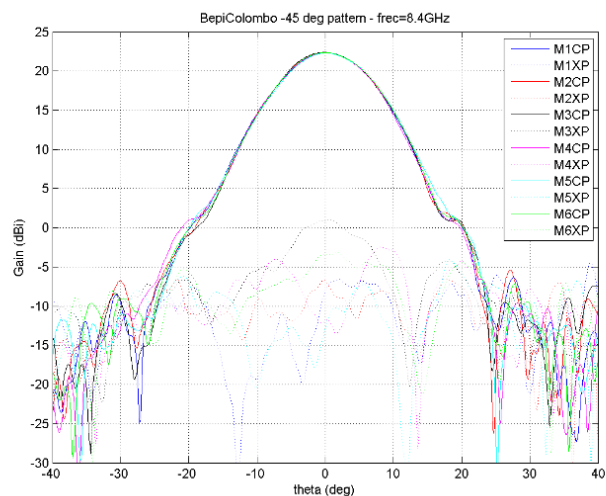


Figura 5: Medida en un sarcófago de la antena de BepiColombo y medidas de diagrama de radiación a 22, 60, 100 y 150°C.

3.2 Medidas de un corte en campo próximo para las antenas de telefonía móvil

Otro reto importante en la medida de antenas es la reducción del tiempo de medida. Sobre todo, para antenas que se pueden considerar “commodities”, como ya son las antenas para estaciones base de telefonía móvil, su bajo precio de mercado hace que no se puede utilizar el tiempo de medida habitual para otro tipo de antenas. En el LEHA-UPM hemos estado investigando distintas técnicas para medida en campo próximo mediante uno o dos cortes el diagrama de radiación de algunas antenas y caracterizar con una incertidumbre suficiente tanto el diagrama de radiación en campo lejano en los planos principales como la ganancia de la antena. En [8] se muestra una comparativa de técnicas de medida en un solo corte, donde dos de ellas se han desarrollado y aplicado en nuestro laboratorio. En la Fig. 6 se muestra el resultado para una antena de telefonía móvil estándar y cómo los resultados son adecuados para el corte vertical, no así para el corte diagonal. Esta técnica nos permite caracterizar los planos principales aprovechando la separabilidad del diagrama de radiación de algunas antenas.

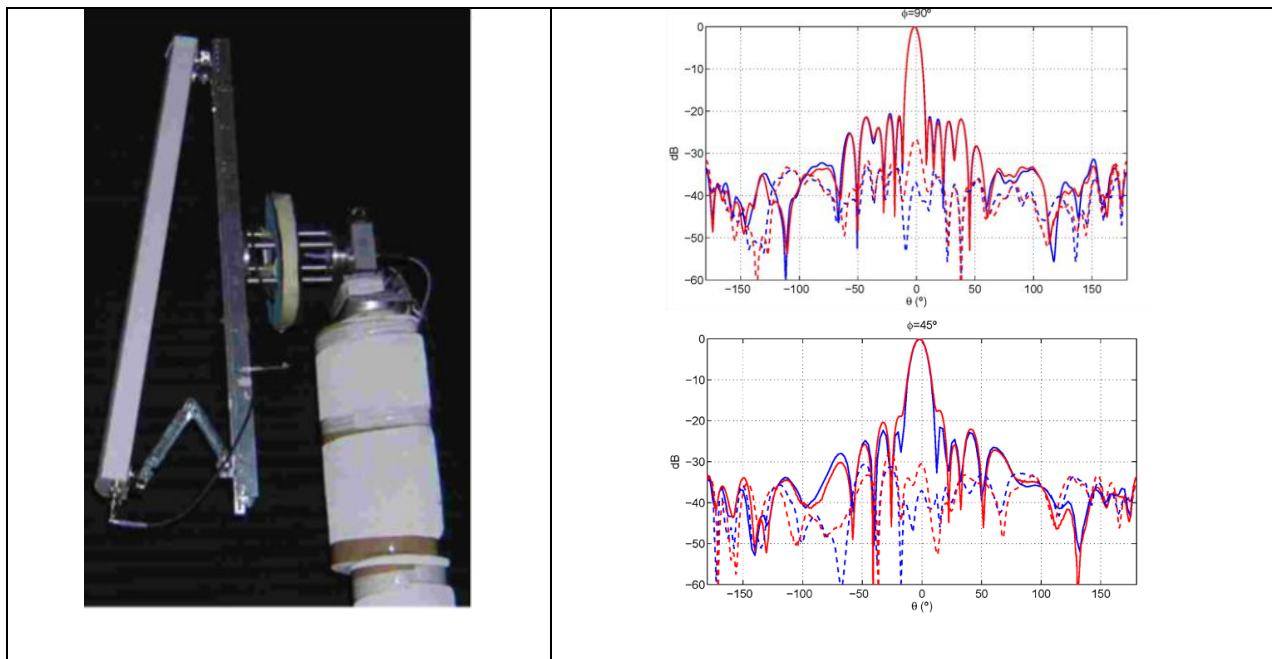


Figura 6: Medida de diagramas de radiación en campo cercano mediante un corte: corte vertical y corte diagonal.

3.3 Cálculo de incertidumbre en medida de antenas

En la medida de los parámetros eléctricos de antenas, es un reto la caracterización de la incertidumbre asociada. Desde el LEHA-UPM, a través de la red de Excelencia del VI Programa Marco de la UE, colaboramos en la definición de los parámetros más importantes a los distintos tipos de sistema de medida de antena, frecuencia y tipo de antena, trabajo que se publicó en [9]. Este trabajo fue aplicado a los sistemas del LEHA-UPM en la Tesis Doctoral de S. Burgos Martínez [10], donde se definieron las contribuciones en la incertidumbre de la medida de antena más importantes para cada uno de nuestros sistemas, procedimientos, según la banda de frecuencia y el tipo de antena. A raíz de esta tesis doctoral se inició el trabajo en la definición de la incertidumbre para nuestro sistema de medida. En la Figura 7 se muestra un ejemplo del cálculo de esta para un caso típico, donde hay una lista de

contribuciones (primera columna), el método que se utiliza para su cálculo y las distintas situaciones, una llamada a las herramientas utilizadas para la caracterización de cada una de dichas contribuciones y los resultados.

| ERROR SOURCES | Method & effect on directivity uncertainty | Tools | Uncertainty Values (dB) | Probability Distribution | Divisor | Standard Uncertainty (σ) (dB) |
|--|---|--|-------------------------|--------------------------|------------|--|
| Stray signals : | | | | | | |
| Reflectivity level | Anechoic material 18" Calculation from excel sheet | _reflectividad.xls | 0,13 | Normal | 3 | 0,043 |
| Multiple reflections | Estimation $d=3$ m 0,1 dB; $d=5.5$ m 0,01 dB | Sliding measurement _CalculationRef-Ant.pdf | 0,010 | Normal | 1 | 0,010 |
| AUT scattering | grandes: 0,015 dB o $\rho > 3$ GHz / Antenas pequeñas y $F < 3$ GHz | _CalculationRef-Ant.pdf | 0,015 | Normal | 1 | 0,015 |
| Mechanical Set-up inaccuracies | | | | | | |
| Antenna tower pointing, Axes intersection, Probe position | Theodolite alignment ($< 0.15^\circ$ and < 0.5 mm) Calculation for Reference antenna VAST12 | _CalculationRef-Ant.pdf | 0,010 | Normal | 1 | 0,010 |
| Measurement distance | Tape (< 1 cm) NF-FF simulations or Calculation from excel sheet | NF-FF simulation _dist lejano.xls | 0,001 | Normal | 1 | 0,001 |
| Electrical System | | | | | | |
| Thermal drift | Air conditioning Drift measurement | Negligible Montecarlo Simulation | 0,000 | Normal | 1 | 0,000 |
| Noise | Included in the leakage | | 0,000 | Normal (3σ) | 3 | 0,000 |
| Receiver non-linearity | VNA Specifications | Datasheet _Ampl-Non-Lin.pdf | 0,100 | Normal | 3 | 0,033 |
| Flexing cables and rotary joints | Measurement < 7 GHz=0,05dB / $7-20$ GHz=0,08dB / > 20 GHz=0,1dB | | 0,100 | Normal (3σ) | 3 | 0,033 |
| Leakage and crosstalk | Caso peor (45 dB) Simulation | Excel file _SNR.xls | 0,049 | Normal (3σ) | 3 | 0,016 |
| Probe Related | | | | | | |
| Probe Polarization & Pattern | – | Estimation | 0,015 | Normal (3σ) | 3 | 0,005 |
| Software errors | | | | | | |
| Transformation SW errors | SNFTD: Uncertainty 0,010dB EXPAND: Uncertainty 0,015dB | Estimation | 0,015 | Normal | 1 | 0,015 |
| Truncation errors | | | | | | |
| Truncation errors | – | Not applicable | 0,000 | Normal | 1 | 0,000 |
| Combined Directivity Standard Uncertainty (U_c) | $u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2}$ | | | | | 0,071 |
| Expanded Uncertainty (U_p) Confidence Interval (p) → Coverage Factor (k_p) | $u_p = k_p \cdot u_c$ | | | Normal p = 95% | k_p 2 | 0,142 |

Figura 7: Ejemplo de cálculo de incertidumbre para diagrama de radiación medido en campo próximo esférico.

3.4 Programas de intercomparación de la red EurAAP

El último punto que vamos a comentar es la participación en campañas de intercomparación. A través de la red EurAAP (Asociación Europea de Antenas y Propagación de Ondas) se han organizado distintas campañas de intercomparación con los laboratorios [11] más importantes de medida de antenas en Europa, incluyendo distintos tipos de antenas, bandas de trabajo y aplicaciones. Los grandes retos que tenemos para cumplir con los criterios establecidos en la norma ISO17025 son la baja cantidad de laboratorios acreditados en Europa y el largo tiempo que resulta para cada campaña. Para tratar de reducir los tiempos de duración de estas campañas hemos abierto en esta red un nuevo servicio que denominamos “Self Evaluation Measurement”. Para ello se guardan unos patrones que han sido caracterizados utilizando las intercomparaciones entre los distintos laboratorios y una entidad individual puede solicitar un patrón, medirlo, entregar los resultados al laboratorio de referencia (el dueño de la antena) y recibir un informe con los resultados. La combinación de los dos servicios, el clásico de “Antenna Measurement Intercomparison” y este de “Self Evaluation Measurement” nos permite poder dar soporte a la comunidad europea de sistemas de medida de antenas.

4. CONCLUSIONES

En esta ponencia hemos presentado algunos de los retos que nos afectan en la medida de parámetros eléctricos de antenas en el laboratorio de ensayos y homologación de antenas de la Universidad Politécnica de Madrid (LEHA-UPM). La combinación de servicio de medida con la labor de investigación en nuevas técnicas de medida y su procesado, con la participación en redes internacionales nos permite estar a la vanguardia en este ámbito, manteniendo una alta calidad de servicio a nuestros clientes.

5. REFERENCIAS

- [1] Página web LEHA-UPM: <https://www.gr.ssr.upm.es/index.php/es/leha/sobre-nosotros>
- [2] IEEE 149-2021. IEEE Recommended Practice for Antenna Measurements. IEEE APS/SC - Antennas and Propagation Standards Committee. Published Feb. 2022.
- [3] IEEE 1720-2021. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements. IEEE APS/SC - Antennas and Propagation Standards Committee. Published Dec. 2012.
- [4] M. Sierra Castañer, L.J. Foged. "Post-processing techniques in Antenna Measurements". Scitech Publishing (IET). 2019. ISBN: 9781785615375. e-ISBN: 9781785615382. DOI: 10.1049/SBEW529E
- [5] L.J. Foged, M. Sierra-Castaner "Modern automotive antenna measurements", Artech House, Boston 2022, ISBN: 978163081849
- [6] F. Cano Fácila, "Contribution to the quality improvement of the antenna measurement using post-processing techniques". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Julio 2012.
- [7] Víctor Sánchez, Fernando Martín, Aingeru Barrio, Iñaki Pinto, Rafael Garcia, Manuel Sierra, Leandro de Haro, Jose Luis Besada, Belén Galocha. "Measurement of BepiColombo mission medium gain antenna parameters under realistic thermal conditions". International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2017, 9(7), 1409–1418. # Cambridge University Press and the European Microwave Association, 2017 doi:10.1017/S175907871700099X.
- [8] R. Cornelius, T. Salmerón-Ruiz, F. Saccardi, L. Foged, D. Heberling, and M. Sierra-Castañer. "A Comparison of Different Methods for Fast Single-Cut Near-to-Far-Field Transformation" IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 56, no. 2, April 2014, pp. 252-261, ISSN: 1045-9243, DOI:10.1109/MAP.2014.6837096
- [9] Antenna Centre of Excellence, "Deliverable A1.2D2. Recommendations and comparative investigations for near-field antenna measurement techniques and procedures". Dec. 2007.
- [10] S. Burgos Martínez, "Contribution to the uncertainty evaluation in the measurement of the main antenna parameters". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Septiembre 2009.
- [11] M. A. Saporetti, L. J. Foged, M. Sierra-Castaner, S. Pivnenko, R. Cornelius, D. Herberling. Description and Results: Antenna Measurement Facility Comparisons. IEEE Antennas and Propagation Magazine. Volume: 59, Issue: 3, June 2017 Page(s): 108 – 116.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía el apoyo a esta publicación a través del proyecto InterSpace "NUEVAS TECNOLOGIAS DE ARRAY DE ANTENAS Y PROCESADO DIGITAL PARA LOS FUTUROS SISTEMAS INTEGRADOS RADIO DE ONDAS MILIMÉTRICAS TERRESTRES Y ESPACIALES" (número de proyecto PID2020-112545RB-C51) del programa estatal de generación de conocimiento y fortalecimiento científico y tecnológico del sistema de I+D+i y del programa estatal de I+D+i orientada a los retos de la sociedad.