Caracterización Electromagnética de Reflectores de Esquina para la Calibración de Tecnología SAR

David Ramos Somolinos[(1)], María Moragrega Langton[(1)], Gema Sánchez Sánchez[(2)], Alicia Auñón Marugán[(1)], Nuria Gimeno Martínez[(1)], Nuria Casal Vázquez[(1)], Patricia Cifuentes Revenga[(1)], Santiago Martín Iglesias [(1)], Juan Manuel Cuerda [(1)], Borja Plaza Gallardo[(1)], David Poyatos Martínez[(1)] .

[(1)]Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), 28850 Madrid. España. Email: poyatosmd@inta.es.

[(2)]Universidad Politécnica (UPM), Escuela de Ingeniería y Diseño Industrial, 28012 Madrid. España.

***Resumen*—Synthetic aperture radar (SAR) technology is present in a wide variety of Earth observation missions. An example of this is PAZ satellite, responsible for collecting information for defence purposes, high resolution mapping or disaster management natural, among others. To ensure the accuracy and fidelity of the data, the SAR system should be properly calibrated. Although there are several means of performing this calibration, passive elements such as corner reflectors are commonly used. In this work different designs and materials for these corner reflectors are studied, with the aim of eliminating sources of error during calibration and reducing the heavy weight of these systems. More precisely, a model manufactured out of steel will be analyzed and considered as reference, an aluminium prototype with a new geometry and a polylactic acid (PLA) model whose surface is coated with nickel conductive paint. This research is conducted using the electromagnetic simulation software Ansys Electronics HFSS and the bistatic anechoic chamber (BIANCHA) from the National Institute for Aerospace Technology (INTA). In addition, new designs built out of composite materials currently under development are presented.**

I. Introducción

PAZ es el elemento radar del Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite (PNOTS) para el desarrollo, operación y explotación de sensores espaciales de observación de la Tierra [1]. Una representación de este satélite puede verse en la Fig. 1.

La observación de la Tierra desde el espacio ha sido fundamental para comprender y vigilar nuestro planeta [2]. A lo largo de los años, se han lanzado numerosas misiones espaciales con el fin de capturar datos tanto ópticos como radar, así como imágenes de alta resolución, que desempeñan un papel crucial en multitud de aplicaciones [3]. Entre las tecnologías utilizadas para obtener estas imágenes, el radar de apertura sintética cumple un papel muy importante [4].

El equipo de Sistemas SAR Espaciales y Calibración del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) es el responsable del Centro de Calibración y Validación PAZ, desde donde se garantiza un correcto funcionamiento del producto durante toda la vida de la misión. Para ello, se lleva a cabo un programa continuo de monitorización de los datos adquiridos, junto con campañas regulares de calibración diseñadas específicamente para mantener y verificar la precisión del sistema [5]. Para estos procesos de calibración se utilizan elementos de referencia colocados en ubicaciones conocidas con precisión centimétrica y cuyas RCS están perfectamente caracterizadas [6]. Los elementos de calibración más comúnmente empleados son los reflectores de esquina, a menudo con forma de triedro, como el que se puede apreciar en la Fig. 2, y su RCS se caracteriza estimando la energía reflejada por el área de sus caras [7]. Al ser elementos pasivos, no introducen ningún tipo de retardo electrónico, haciéndolos ideales para este tipo de tareas.

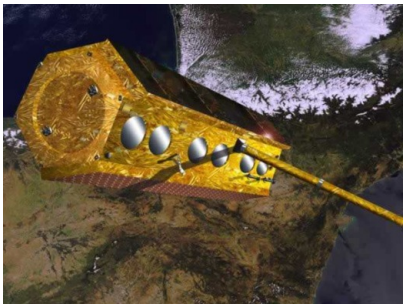


Fig. 1. Satélite PAZ con tecnología SAR perteneciente al PNOTS.

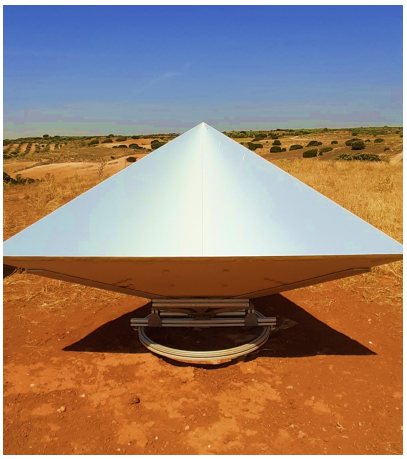


Fig. 2. Ejemplo de un triedro metálico de calibración de sistemas SAR.

La precisión de la calibración radiométrica se ve limitada no sólo por la estabilidad del instrumento, sino también por la precisión con la cual se puede determinar la RCS de los elementos de calibración. Las fuentes de error principales a este respecto incluyen defectos de fabricación que afecten a la planitud de las caras y su ortogonalidad [8]. Por otro lado, la manera más fiable de eliminar dichos errores es a través de la caracterización de la RCS de los reflectores mediante medidas en cámaras anecoicas.

El objetivo de este artículo es presentar los resultados e investigaciones realizadas para la mejora de los reflectores de esquina, incluyendo el estudio de nuevos materiales y nuevas formas de unión entre las planchas que componen el triedro. Aunque el diseño se ha realizado en modelos a pequeña escala, los resultados son extrapolables a elementos de calibración de mayor tamaño. El proyecto se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Electromagnetismo Computacional y Aplicado (CAEMLab) del INTA, que cuenta con las herramientas de simulación y las instalaciones adecuadas para evaluar diseños de reflectores de esquina en condiciones controladas.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección II se describen los tres diseños de reflectores de esquina analizados en este trabajo; en la sección III se presenta por un lado, el software empleado para la simulación electromagnética de los reflectores, y por otro, la instalación de medida y la configuración elegida; en la sección IV se comparan los resultados simulados y medidos; en la sección V se presentan los nuevos diseños fabricados y en la sección VI se desarrollan las conclusiones.

II. Diseño de los reflectores de esquina

Los sistemas SAR dedicados a la observación de la Tierra han de ser capaces de recoger datos de calidad bajo cualquier condición climática y en todo momento, para lo cual es esencial una correcta calibración [9], que se define como el conjunto de procesos aplicados a los datos SAR en crudo que permiten relacionarlos de manera unívoca con las características del terreno iluminado [10].

Un reflector SAR es un elemento pasivo que redirige la onda electromagnética incidente hacia la fuente emisora con mayor o menor intensidad dependiendo de su diseño. Aunque existen distintos tipos de reflectores, los más utilizados en la calibración son los de esquina debido a su buen comportamiento devolviendo la señal reflejada mediante el triple rebote en sus caras internas y a su estabilidad frente a pequeñas desalineaciones. En la banda de frecuencia de funcionamiento de PAZ, las aristas internas de estos elementos pueden medir entre uno y tres metros. Los avances en los diseños de reflectores y el uso de materiales avanzados ofrecen mejoras en términos de precisión y eficiencia de los sistemas SAR de observación de la Tierra [11] [12].

En este artículo se presentan los resultados obtenidos con tres triedros construidos a escala 1:10, aproximadamente, como se muestra en la Fig. 3. El primer modelo está fabricado en acero, el segundo en aluminio y el tercero en ácido poliláctico (PLA) recubierto con pintura conductora.

Las caras del reflector de acero tienen un grosor de 1.2 cm y la longitud de sus aristas internas es de 13.8 cm. Este modelo ofrece una RCS muy precisa debido a su robustez y a la planitud de sus caras y se utiliza normalmente en la cámara anecoica para la calibración de medidas de firma radar. Este modelo servirá de referencia tanto para las simulaciones como para la comparación con el resto de diseños.

El modelo central de la Fig. 3 se corresponde con un triedro de aluminio cuyas caras han sido refinadas hasta tener un grosor de 0.2 cm. Esto aligera la estructura, pero también modifica la manera en que las distintas superficies que lo componen se unen entre sí. Lo que se busca con ese diseño es evaluar este nuevo tipo de unión que permite reducir el peso total y verificar las consecuencias de pequeñas discrepancias entre el modelo simulado y el fabricado.

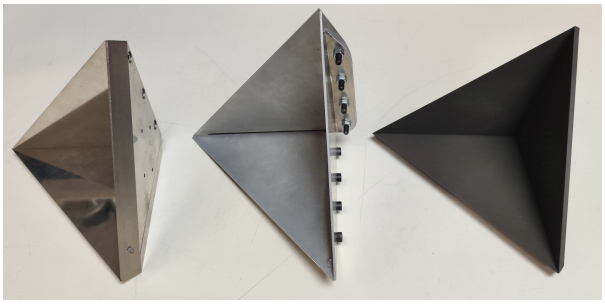


Fig. 3. Reflectores de esquina fabricados: acero (izquierda), aluminio (centro) y PLA (derecha).

Tabla I
Dimensiones físicas de los reflectores de esquina

	Acero	Aluminio	PLA
Longitud de arista (cm)	13.8	15	13.8
Grosor de cara (cm)	1.2	0.2	1.2
Peso (g)	2690.1	295.5	369.0

Finalmente, el modelo de PLA comparte el mismo diseño que el triedro de acero y permite evaluar el uso de materiales avanzados durante el proceso de fabricación. Esto permitiría reducir en gran medida el peso del reflector sin empeorar su comportamiento electromagnético. El reflector está fabricado mediante un sistema de impresión 3D en PLA y su superficie está recubierta con pintura conductora de níquel.

Como ya se ha mencionado, aunque el diseño se ha realizado en modelos a pequeña escala, los resultados y las conclusiones extraídas del estudio son extrapolables a elementos de calibración de mayor tamaño.

III. Herramientas de simulación e instalación de medida

Las herramientas de simulación son fundamentales para el análisis de sistemas electromagnéticos complejos [13]. En este trabajo se ha utilizado Ansys Electronics v2023 R1 [14], aplicando concretamente el método de resolución de ecuaciones integrales HFSS-IE. Todas las simulaciones realizadas se han llevado a cabo fijando un rango de frecuencia que abarca desde 6 GHz a 14 GHz en pasos de 0.1 GHz, donde además se ha modelado como fuente un frente de ondas planas teniendo en cuenta sus dos polarizaciones phi (ϕ) y theta (θ).

En dichas simulaciones se modelan las geometrías de los reflectores de acero y PLA (común a ambos) y del reflector de aluminio, que sigue un nuevo diseño. Puesto que el prototipo de PLA está cubierto de una capa de pintura conductora lo suficientemente gruesa, en todos los casos se ha seleccionado un material conductor perfecto (PEC) como base para el modelado. Un ejemplo de los modelos CAD utilizados se puede ver en la Fig. 4.

Sin embargo, los resultados de las simulaciones por sí solos no son suficientes para poder asegurar el correcto funcionamiento de los reflectores. Es por esto que el siguiente paso consistió en realizar campañas de medida con los prototipos fabricados.

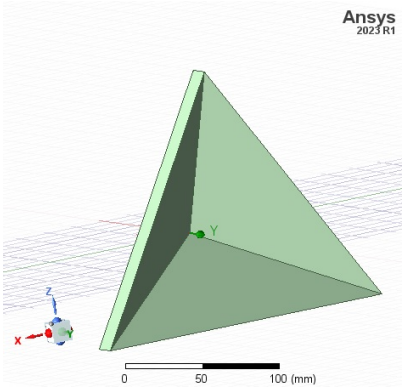


Fig. 4. Modelo CAD de simulación del triedro de acero y de PLA.



Fig. 5. Instalación de medida en espacio libre BIANCHA.

Como se menciona anteriormente, la manera fiable de evaluar nuevos diseños de reflectores de esquina es mediante la medida de su RCS en cámaras anecoicas. Para la realización de este trabajo, las medidas se han llevado a cabo en BIANCHA, representada en la Fig. 5. La principal característica de esta cámara es la capacidad de posicionar las dos antenas situadas en los extremos de sus brazos en cualquier punto de una semiesfera imaginaria centrada en el punto en el cual se coloca la muestra bajo estudio [15] [16].

De la misma forma que en las simulaciones, las medidas se realizan en el rango de frecuencia de 6 GHz a 14 GHz, haciendo uso para ello de antenas SP6000 [17] y de un analizador vectorial de redes (VNA) ZVA de cuatro puertos [18].

IV. Resultados

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a las comparativas entre las RCS teóricas de las dos geometrías planteadas frente a los valores obtenidos mediante las simulaciones y las medidas.

De esta forma, en la Fig. 6 se compara la respuesta teórica de RCS de la geometría común al triedro de acero y de PLA, frente a los resultados obtenidos al medir dichas RCS en BIANCHA. Se puede apreciar cómo las curvas simuladas y medidas son más similares entre sí que con respecto a la teórica. Esto se debe fundamentalmente a que efectos como la difracción en los bordes no son considerados en la

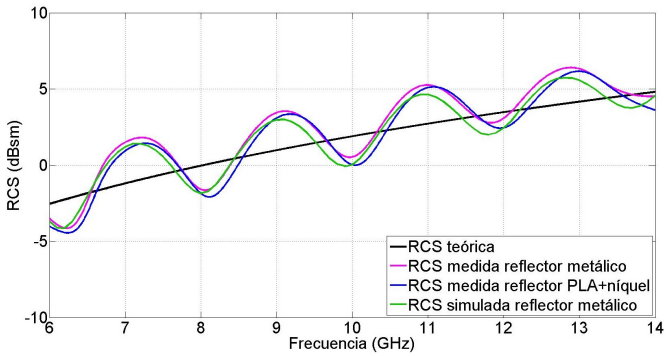


Fig. 6. Comparativa entre la RCS teórica de la geometría de los triedros de acero y PLA y sus respectivas RCS medidas.

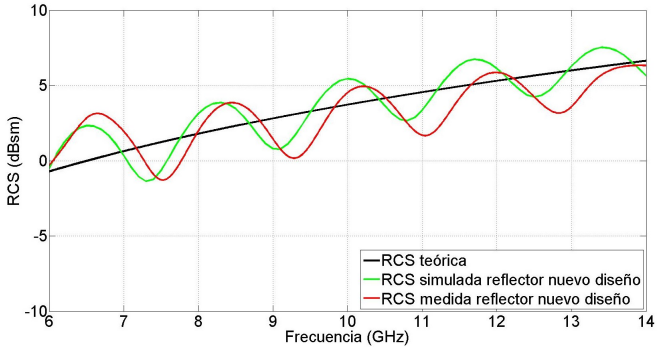


Fig. 7. Comparativa entre la RCS teórica de la nueva geometría y su RCS medida.

formulación teórica, mientras que sí se tienen en cuenta tanto en las simulaciones como en las medidas.

Por otro lado, en la Fig. 7 se muestran los resultados correspondientes al reflector de aluminio de nuevo diseño. En este caso, es especialmente llamativo que los resultados entre simulaciones y medidas difieren entre sí por encima del error inherente a la instalación de medida, lo que puede explicarse por las ligeras deformaciones achacables al proceso de fabricación, y que se pueden observar en la Fig. 8.

V. Nuevos diseños fabricados

Con el objetivo de continuar profundizando en el estudio de diferentes materiales, recubrimientos y geometrías se han diseñado nuevos triedros de bajo peso y se va a proceder a su estudio en radiofrecuencia. Estos triedros, con una arista interna todos ellos de 13,8 cm, se han fabricado en materiales compuestos como fibra de vidrio y fibra de carbono (ver Fig.

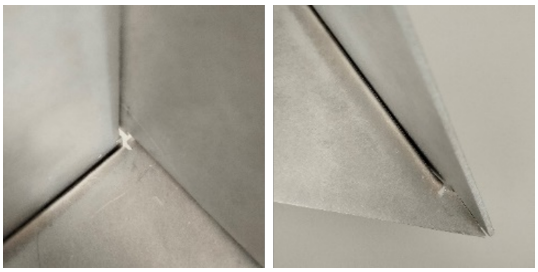


Fig. 8. Deformaciones encontradas en el agujero de drenaje y los bordes del nuevo diseño de reflector de esquina.



Fig. 9. Nuevos diseños de reflectores de esquina fabricados en fibra de vidrio (arriba) y fibra de carbono (abajo).

9) y con PLA recubierto con pintura de cobre y plata.

Además del estudio en radiofrecuencia, se pretende evaluar la degradación de los materiales y de las pinturas, por lo que se colocarán a la intemperie durante varios meses y se comprobará si este proceso ha tenido consecuencias sobre la reflectividad del triedro. El análisis dimensional realizado antes y después de exponerlos a la intemperie permitirá evaluar posibles deformaciones debidas a la lluvia o a los gradientes de temperatura.

VI. Conclusiones

Para que la tecnología SAR empleada en la misión PAZ proporcione imágenes de alta resolución de la Tierra, es crucial llevar a cabo una calibración muy precisa mediante la cual se garantice la calidad de los datos medidos. Si bien para estos procesos de calibración es muy frecuente el empleo de elementos pasivos como los reflectores de esquina, estos conllevan una serie de problemáticas asociadas: verificación de la planitud y ortogonalidad de sus caras, posibles imperfecciones durante el proceso de fabricación, elevado peso o posible degradación a lo largo del tiempo por su exposición a la intemperie.

En este artículo se exploran distintas alternativas de materiales para los reflectores de esquina convencionales y se pone a prueba el potencial de las simulaciones como herramienta durante el desarrollo de nuevas geometrías de triedros.

La primera conclusión que se puede extraer es que el error que se comete al usar como referencia el valor simulado es muy inferior al obtenido al usar el valor teórico y esto se fundamenta en el hecho de que en la simulación se tiene en cuenta efectos tales como la difracción en los bordes que no se tienen en cuenta en la curva teórica.

La segunda conclusión que se puede extraer está relacionada con el potencial que tienen los nuevos materiales y los nuevos recubrimientos frente a los diseños tradicionales. Diseños fabricados en impresión 3D y recubiertos con pinturas metálicas ofrecen los mismos resultados en radiofrecuencia que diseños convencionales mucho más pesados facilitando el transporte y manejabilidad de los reflectores de esquina del campo de calibración.

Finalmente, se está avanzando en nuevos diseños de reflectores fabricados en materiales compuestos y en impresión 3D con nuevos recubrimientos que habrán de ser caracterizados en radiofrecuencia y sobre los que se llevará a cabo un estudio de degradación con el objetivo final de que puedan formar parte del campo de calibración del PAZ.

Agradecimientos

Al equipo de Sistemas SAR Espaciales y Calibración del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) responsable del Centro de Calibración y Validación PAZ.

Referencias

[1] M. J. Gonzalez Bonilla, J. M. Cuerda Munoz, E. V. Carrasco, M. G. Rodriguez and N. C. Vazquez, "PAZ Mission. Science Activities," in *Proceedings of The 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 2021, pp. 1-4.

[2] P. P. Mathieu et al., "The ESA's Earth Observation Open Science Program [Space Agencies]," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 86-96, June 2017.

[3] A. Reigber et al., "Very-High-Resolution Airborne Synthetic Aperture Radar Imaging: Signal Processing and Applications," in *Proceedings of The IEEE*, vol. 101, no. 3, pp. 759-783, March 2013.

[4] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek and K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 6-43, March 2013.

[5] J. M. Cuerda Munoz, M. Garca Rodriguez, M. J. Gonzalez Bonilla, N. Casal Vazquez and P. Cifuentes Revenga, "External Radiometric Calibration and Characterization of PAZ. First results of Commissioning Phase," in *Proceedings of The 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Aachen, Germany, 2018, pp. 1-4.

[6] Q. Huang, et al., "Quick Quality Assessment and Radiometric Calibration of C-SAR/01 Satellite Using Flexible Automatic Corner Reflector" *Remote Sensing*, vol. 15, no. 1, pp. 104, 2023.

[7] M. Qiu, X. Ai, Z. Xu and F. Zhao, "Comparative Analysis of Monostatic and Bistatic RCS Scattering Characteristics for Corner Reflector," in *Proceedings of The International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China)*, Xuzhou, China, 2022, pp. 1-3.

[8] B. Döring, M. Schwerdt and R. Bauer, "TerraSAR-X Calibration Ground Equipment," in *Proceedings of The Wave Propagation in Communication, Microwaves Systems and Navigation (WFMN)*, Chemnitz, Germany, 2007.

[9] A. Freeman, "SAR calibration: an overview," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 6, pp. 1107-1121, Nov. 1992.

[10] J. C. Curlander, R. N. McDonough , *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*, 1st ed., John Wiley & Sons, 1992.

[11] Q. Yuxiao, D. Perissin, and L. Lei, "The Design and Experiments on Corner Reflectors for Urban Ground Deformation Monitoring in Hong Kong," *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013.

[12] I. Bozsó, L. Banyai, V. Wesztergom, and E. Szucs, "Benchmark of C-band Radar Corner Reflector based on Sentinel-1 SAR Images. First Results in the Monitoring of the Dunaszekcső Landslide (Hungary) using Corner Reflectors," in *Proceedings of The EGU Generaly Assembly*, Vienna, Austria, 2018.

[13] Z. Chen, C. -F. Wang and W. J. R. Hoefer, "A Unified View of Computational Electromagnetics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 2, pp. 955-969, Feb. 2022.

[14] Ansys HFSS - 3D High Frequency Simulation Software. Accessed: October 1, 2024. [Online]. Available: https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss.

[15] P. López Rodríguez, O. Hernán Vega, D. Poyatos Martínez and D. Escot Bocanegra, "BIANCHA: A spherical indoor facility for bistatic electromagnetic tests," in *Proceedings of AMTA*, Austin, TX, USA, 2016, pp. 1-6.

[16] D. Escot, D. Poyatos, J. A. Aguilar, I. Montiel, I. González and F. Saez de Adana, "Indoor 3D Full Polarimetric Bistatic Spherical Facility for Electromagnetic Tests," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 52, no. 4, Aug. 2010, pp. 112-118.

[17] Dual Polarized Probes: Measurement Probes and Feeds. Accessed: October 1, 2024. [Online]. Available: https://www.mvg-world.com/es/productos/antenas/measurement-probes-and-feeds/dual-polarized-probes.

[18] Rohde & Schwarz ZVA vector network analyzer. Accessed: October 2, 2024. [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/analizadores-de-redes/rs-zva-vector-network-analyzer_63493-9660.html.