

Antena conmutada de seis puertos y seis haces basada en monopolos con carga capacitiva en una cavidad anular para NTN/HAPS en banda S

Javier Vera-Sánchez, Miguel Ferrando-Rocher, Gorka Casaus-Goyeneche, Miguel Ferrando-Bataller
Antennas and Propagation Lab, iTEAM Research Institute, Universitat Politècnica de València (UPV), Spain
jversan2@upv.es

Abstract—This paper presents an all-metal, six-port switched-beam antenna concept aimed at S-band Non-Terrestrial Networks (NTN) and High-Altitude Platform Stations (HAPS). The radiator set consists of six capacitively loaded monopoles (top-hat posts) embedded in a shallow annular cavity. Internal metallic septa are used to condition the cavity fields and to bias the radiation toward mid-elevation angles, which is desirable for HAPS-to-ground coverage. By exciting one port at a time while terminating the remaining ports, the antenna generates six directive beams providing full azimuthal coverage through electronic switching. Full-wave simulations confirm strong impedance matching over 2.5 GHz to 4.0 GHz and coupling levels consistent with practical switched-beam operation with a profile of only $0.14\lambda_0$. The fully metallic implementation avoids dielectric materials, improving robustness against harsh environmental conditions.

Index Terms—Antena íntegramente metálica, banda S, NTN, HAPS, conmutación de haz, antena multipuerto, cavidad anular, monopolo con carga capacitiva.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes no terrestres han pasado, en muy pocos años, de ocupar un lugar casi testimonial a convertirse en un elemento central dentro del diseño de futuras infraestructuras de comunicaciones. En este nuevo escenario, la cobertura, la capacidad y la gestión de interferencias ya no pueden tratarse por separado, sino como variables estrechamente acopladas dentro de una misma arquitectura de sistema. En el caso particular de las NTN móviles, el papel de la antena se estudia cada vez más en relación con conceptos de agrupaciones distribuidas y estrategias coordinadas de precodificación, capaces de modificar la selectividad espacial a nivel de sistema [1], [2]. Al mismo tiempo, los terminales integrados terrestre-satélite están impulsando el desarrollo de *front-ends* compactos, multibanda y de apertura compartida, en los que la banda S aparece con frecuencia como una opción especialmente atractiva debido a la solidez de sus condiciones de propagación y a la madurez tecnológica de las soluciones por debajo de 6 GHz [3], [4].

Dentro de este ecosistema, las plataformas a gran altitud, o HAPS, han adquirido un interés creciente como solución intermedia entre la infraestructura terrestre convencional y los sistemas satelitales, ya que permiten proporcionar cobertura regional con una latencia reducida y con una notable flexibilidad de despliegue. Para mejorar las prestaciones de comunicación en este tipo de plataformas se han propuesto diversas estrategias avanzadas, entre ellas la integración de

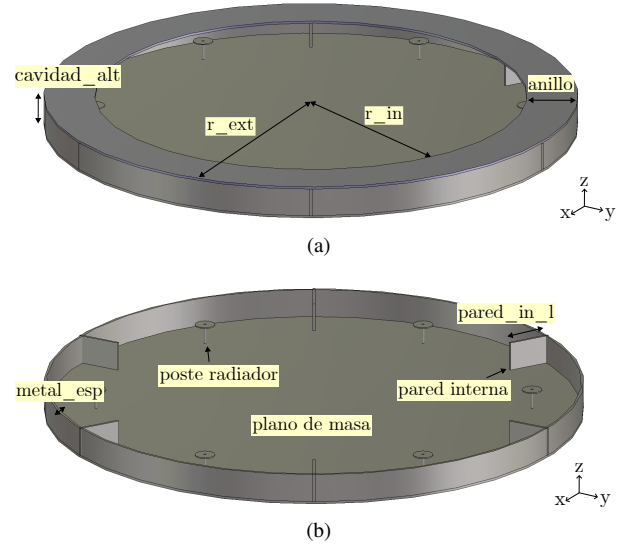


Fig. 1. Vista en perspectiva de la antena propuesta: (a) estructura completa, (b) interior de la cavidad.

superficies inteligentes reconfigurables, capaces de redirigir pasivamente la energía radiada y mejorar la eficiencia del sistema [5], [6]. Sin embargo, este tipo de enfoques suele llevar asociado un aumento de la complejidad global, mayores exigencias energéticas y una dependencia de componentes activos o de materiales dieléctricos cuya fiabilidad a largo plazo puede verse comprometida en un entorno tan exigente como el estratosférico.

Desde el punto de vista de un HAPS, la función de la carga útil de antena consiste en iluminar la zona de servicio aprovechando la potencia radiada de la forma más eficiente posible. Un haz estrictamente cenital rara vez constituye la solución óptima, salvo en configuraciones muy concretas en las que el servicio se concentre exclusivamente en el nadir. Lo más habitual es trabajar con una huella de cobertura amplia, en la que una parte sustancial de los enlaces de interés se establece a ángulos de elevación intermedios. En muchos despliegues, además, resulta conveniente disponer de varios haces seleccionables de forma dinámica sin necesidad de recurrir a una agrupación en fase completa con múltiples canales activos. Precisamente en ese espacio intermedio, situado entre una antena de haz fijo y un verdadero *phased*

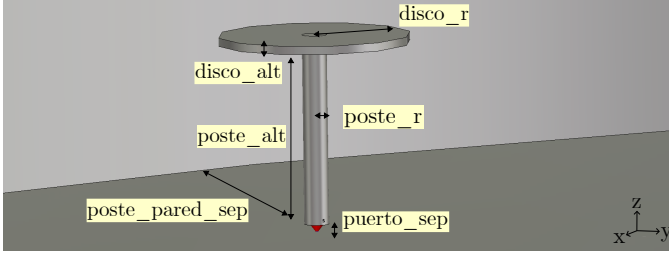


Fig. 2. Vista detallada de uno de los elementos radiantes, implementado como un monopolo con carga capacitiva mediante un poste metálico rematado por un disco circular.

array, las arquitecturas basadas en conmutación de haz siguen ofreciendo una solución muy atractiva.

Frente a arquitecturas más complejas, basadas en conformación activa de haz o en superficies reconfigurables, una estrategia de conmutación de puertos permite generar varios sectores de cobertura a partir de una única estructura radiante y de una sola cadena de radiofrecuencia, complementada por una red de conmutación. De este modo, se alcanza un compromiso razonable entre selectividad espacial, complejidad de *hardware* y fiabilidad, tres aspectos particularmente relevantes en aplicaciones NTN y HAPS.

Las antenas conmutadas basadas en cavidades ya han demostrado ser especialmente adecuadas para cargas útiles de vigilancia en las que la robustez mecánica constituye un requisito esencial, como se ha puesto de manifiesto en implementaciones espaciales ADS-B en banda L [7], [8]. En el presente artículo, ese mismo principio arquitectónico se reoptimiza y se traslada a la banda S con el objetivo de aplicarlo a terminales NTN/HAPS. A diferencia de los trabajos previos, el diseño aquí propuesto se concibe específicamente para orientar la radiación hacia ángulos de elevación intermedios, más adecuados para escenarios de cobertura entre una HAPS y usuarios en tierra que una iluminación puramente vertical.

El resto del artículo se organiza del siguiente modo: en la Sección II se describe la arquitectura de la antena y el principio de conmutación de haz. La Sección III presenta los resultados simulados de impedancia y radiación. Por último, la Sección IV recoge las principales conclusiones y las líneas de trabajo futuro.

II. ARQUITECTURA DE LA ANTENA

La estructura propuesta se muestra en las Fig. 1 y 2. La antena está formada por un plano de masa metálico y una pared exterior anular que define una cavidad de perfil bajo, con una altura total de 14.12 mm, lo que supone aproximadamente $0.14\lambda_0$ a la frecuencia central de 3 GHz. En su interior se distribuyen acimutalmente seis elementos radiantes, excitados a través de seis puertos independientes. Cada elemento se implementa mediante un poste metálico rematado por un disco, que actúa como carga capacitiva. Además, en el interior de la cavidad se incorporan varias paredes internas metálicas a modo de cortocircuito cuya función es modificar las condiciones

de contorno y la distribución de campo, desplazando así el haz radiado en campo lejano respecto de una iluminación estrictamente vertical. Los principales parámetros geométricos de la antena se resumen en la Tabla I.

El disco superior incrementa la capacitancia efectiva en el extremo del radiador, lo que permite alcanzar la resonancia y mejorar la adaptación sin necesidad de aumentar la altura del poste. Desde un punto de vista físico, el elemento radiante puede interpretarse mediante un modelo resonante sencillo, en el que el poste aporta una contribución predominantemente inductiva, mientras que el disco y su entorno inmediato introducen una capacitancia efectiva. En la práctica, sin embargo, el radiador no opera de forma aislada. La cavidad aporta carga reactiva adicional, reduce la radiación trasera y estabiliza los caminos de corriente. A ello se suma el efecto de las paredes internas, que modifican de manera controlada los campos dentro de la cavidad y se aprovechan aquí para orientar el haz hacia ángulos de elevación intermedios.

El modo de funcionamiento se ha planteado deliberadamente de forma sencilla. En cada estado de operación se excita un único puerto, mientras que los otros cinco se terminan en $50\ \Omega$. Bajo estas condiciones, el elemento radiante activo domina la excitación del sistema y el entorno formado por la cavidad y las paredes internas determina la forma final del haz. Al conmutar el puerto activo, el lóbulo principal gira en azimut, dando lugar a una solución de cobertura en seis sectores mediante una única cadena de RF y una red de conmutación. El objetivo no es sustituir una agrupación en fase, sino proporcionar un conjunto de haces práctico, con una complejidad de radiofrecuencia considerablemente menor, pero capaz de ofrecer un grado de selectividad espacial acorde con las tendencias actuales en NTN.

Las simulaciones electromagnéticas de onda completa se llevaron a cabo en CST Studio Suite. En esta etapa, la estructura se modeló como un conductor eléctrico perfecto. Los parámetros S multipuerto se calcularon excitando un puerto en cada simulación y adaptando los restantes. Esa misma condición de terminación se empleó también en los cálculos de radiación, de modo que cada diagrama presentado corresponde a un estado de conmutación físicamente realista.

Las prestaciones de la antena se evalúan en toda la banda simulada, desde 2 GHz to 4.5 GHz, prestando especial atención al intervalo en el que el diseño está destinado a operar y donde la adaptación resulta más favorable. Además de la adaptación de entrada, se analiza el acoplamiento entre puertos con los puertos no excitados terminados en $50\ \Omega$, con el fin de comprobar que los elementos inactivos presentan un comportamiento adecuado en cada estado de conmutación. Los diagramas de radiación se presentan a 3 GHz, frecuencia próxima al centro de la banda de interés, donde puede apreciarse con claridad el sesgo hacia elevaciones intermedias introducido por la cavidad anular y las paredes internas.

III. RESULTADOS SIMULADOS

La magnitud de los parámetros S simulados se presenta en la Fig. 3. El coeficiente de reflexión de entrada muestra

Tabla I
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PRINCIPALES DE LA ANTENA PROPUESTA.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Radio exterior de la cavidad, r_{out}	115 mm	Radio interior de la cavidad, r_{in}	93 mm
Altura de la cavidad, $cavidad_alt$	14.12 mm	Anchura del anillo superior, $anillo$	22 mm
Longitud de las paredes internas, $pared_in_l$	17.66 mm	Espesor metálico, $metal_esp$	1 mm
Altura del poste, $poste_alt$	7.96 mm	Radio del poste, $poste_r$	0.55 mm
Altura del disco de carga, $disco_alt$	0.36 mm	Radio del disco de carga, $disco_r$	4.28 mm
Separación del puerto de alimentación, $puerto_sep$	0.36 mm	Separación entre poste y pared, $poste_pared_sep$	21 mm

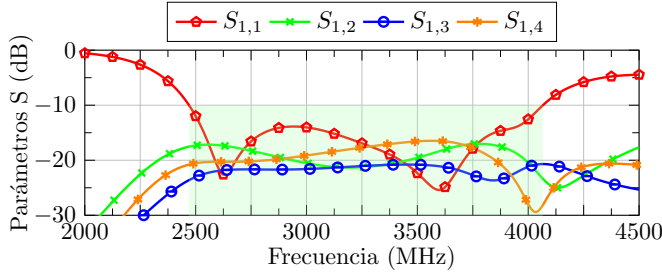


Fig. 3. Parámetros S simulados de la estructura de seis puertos. La antena presenta una buena adaptación en la banda objetivo comprendida entre 2.5 GHz to 4.0 GHz, con niveles de acoplamiento compatibles con una operación mediante conmutación de puertos.

su mejor comportamiento en el intervalo comprendido entre 2.5 GHz to 4 GHz, donde el $|S_{11}|$ se mantiene por debajo de -10 dB y alcanza típicamente valores situados entre -25 hasta -14 dB. En concreto, el ancho de banda a -10 dB se extiende desde 2470 MHz hasta 4066 MHz, lo que representa un rango de operación de 1596 MHz. Fuera de ese rango, la adaptación se degrada progresivamente, lo cual resulta coherente con un elemento radiante de geometría fija con carga capacitiva, integrado en una cavidad en la que los efectos reactivos de orden superior adquieren una influencia creciente. El acoplamiento entre puertos se mantiene, en cualquier caso, por debajo de -16 dB. Los elementos radiantes inactivos no captan una fracción dominante de la potencia inyectada, lo que resulta importante tanto desde el punto de vista de la eficiencia como de la estabilidad de los diagramas entre distintos estados de conmutación. En una implementación *hardware* real, estos niveles de acoplamiento también relajan las exigencias sobre la red de conmutación, ya que una fuga excesiva hacia los estados no activos tiende a distorsionar la iluminación efectiva del sistema.

El comportamiento con conmutación de haz se resume en la Fig. 4, donde se presentan los diagramas tridimensionales simulados de la ganancia a 3 GHz para cada uno de los estados de excitación. La observación principal es su notable repetibilidad. A medida que el puerto excitado va cambiando desde el Puerto 1 hasta el Puerto 6, el lóbulo principal rota en azimut de forma acorde, generando seis sectores diferenciados y manteniendo al mismo tiempo una forma de haz globalmente comparable. Esto puede apreciarse directamente al comparar las Fig. 4a a 4f.

Otro aspecto relevante es la propia naturaleza de la in-

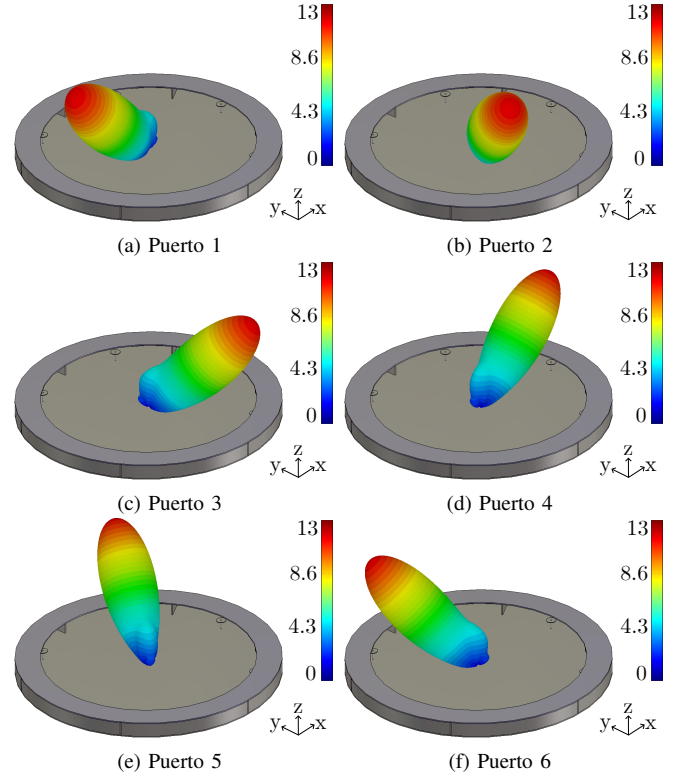


Fig. 4. Diagramas tridimensionales simulados de ganancia a 3 GHz, en escala lineal, para los seis estados de conmutación. El haz principal rota en azimut al seleccionar el puerto activo.

clinación del haz. Aunque el lóbulo principal rota limpiamente en azimut, su ángulo de elevación permanece en líneas generales consistente de un puerto a otro, lo que confirma la simetría azimutal esperable en la estructura. En una configuración íntegramente metálica con cavidad posterior, este comportamiento no solo resulta plausible, sino también esperable, ya que el contorno anular y las paredes internas rompen la simetría propia de un monopolo en espacio libre y sesgan los caminos de corriente soportados por la cavidad, imponiendo un ángulo de iluminación preferente que se mantiene prácticamente idéntico en los seis sectores. La ganancia máxima se sitúa de forma sistemática en torno a 11 dBi para cada puerto, lo que confirma el funcionamiento directivo sectorizado de una estructura compacta única.

Los valores numéricos de directividad y ganancia se resumen en la Fig. 5, donde la ganancia varía desde 9.1 dBi a

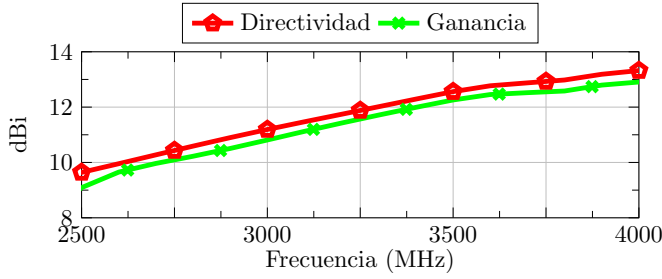


Fig. 5. Directividad y ganancia simuladas.

Tabla II
EFICIENCIA TOTAL DE RADIACIÓN SIMULADA.

f (GHz)	Directividad (dBi)	Ganancia (dBi)	η_{tot}
2.5	9.6	9.1	0.88
3.0	11.2	10.8	0.91
3.5	12.6	12.3	0.93
4.0	13.3	12.9	0.91

2500 MHz hasta 12.9 dBi a 4000 MHz. La Tabla II complementa esta información con la eficiencia total de radiación, que se mantiene siempre por encima del 88% (máximo del 93% a 3.5 GHz), confirmando el buen comportamiento de la estructura metálica en términos de pérdidas.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una antena multihaz de seis puertos, totalmente metálica y de bajo perfil, para plataformas HAPS y NTN en banda S. La estructura propuesta combina seis monopolos con carga capacitiva con una cavidad anular poco profunda cargada con paredes metálicas internas, lo que permite radiación a elevaciones medias y cobertura acimutal completa de 360° mediante excitación secuencial de puertos. Los resultados de simulación confirman una adaptación de impedancias sólida en el intervalo de 2.5 GHz to 4.0 GHz, con niveles de acoplamiento por debajo de -16 dB. La ganancia se comprende entre 9.1 y 12.9 dBi, con eficiencias de radiación superiores al 88% y un perfil de solo $0.14\lambda_0$. En conjunto, los resultados demuestran que la antena propuesta constituye una solución totalmente metálica, compacta, de banda ancha y mecánicamente robusta para aplicaciones HAPS y NTN. Se fabricará un prototipo de la antena propuesta, cuyos resultados experimentales se mostrarán durante la presentación de este trabajo en el congreso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido financiación de la SESAR 3 Joint Undertaking a través del proyecto SATERA (Grant No. 101164313), del Ministerio de Ciencia e Innovación de España mediante los proyectos PID2022-136869NB-C33 y PID2022-141055NB-C21, y de INDRA Espacio S.L.U. en el marco del proyecto LINCE del Programa Tecnológico Espacial Español. Asimismo, ha contado con el apoyo de la Universitat Politècnica de València a través del proyecto PAID-01-25.

REFERENCIAS

- [1] G. Bacci, R. de Gaudenzi, M. Luise, L. Sanguinetti, and E. Sebastiani, "Formation-of-arrays antenna technology for high-throughput mobile nonterrestrial networks," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 5, pp. 4919 – 4935, 2023.
- [2] R. de Gaudenzi, G. Bacci, M. Luise, L. Sanguinetti, and P. Angeletti, "Applicability of CF-MIMO Precoding to a Formation of Arrays (FoA) for Mobile Satellite Communications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 61, no. 5, pp. 11 069 – 11 087, 2025.
- [3] J. Wu, Y. Cheng, Y. Wang, C. Liao, and X. Ding, "S-/k-/ka-band shared-aperture antenna with polarization diversity for system integration of terrestrial and satellite mobile communications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 11, pp. 4097 – 4101, 2025.
- [4] F. Tiezzi, C. Domínguez, J. Padilla, N. Ortiz, M. C. Viganò, and S. Vaccaro, "User terminal antennas for s-band mobile satellite communication systems," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 32, no. 4, pp. 277 – 289, 2014.
- [5] K. An, Y. Sun, Z. Lin, Y. Zhu, W. Ni, N. Al-Dhahir, K.-K. Wong, and D. Niyato, "Exploiting multi-layer refracting ris-assisted receiver for hap-swipt networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 10, pp. 12 638–12 657, 2024.
- [6] N. Gao, S. Jin, X. Li, and M. Matthaiou, "Aerial RIS-Assisted High Altitude Platform Communications," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 10, pp. 2096–2100, 2021.
- [7] J. Vera-Sánchez, M. Ferrando-Rocher, G. Casasus-Goyeneche, and M. Ferrando-Bataller, "L-Band Unit-Cell Antenna Design for Satellite-Based ADS-B Surveillance," in *2025 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting (AP-S/CNC-USNC-URSI)*, 2025, pp. 1893–1895.
- [8] J. Vera-Sánchez, A. Martín-Núñez, M. Ferrando-Rocher, and M. Ferrando-Bataller, "Circularly Polarized Conical Array for ADS-B Applications in LEO Satellites," in *2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2025, pp. 1–3.