

Filtro Notch HTS para Supresión de RFI en Receptores VGOS

Pablo García Carreño⁽¹⁾, Abel García Castellano⁽¹⁾⁽²⁾, Gabriel Gómez Molina⁽¹⁾, Marta Bautista Durán⁽¹⁾

José Antonio López Pérez⁽¹⁾

pablo.garcia@oan.es, abel.g.castellano@a-raege-az.pt, g.gomez@oan.es, m.bautista@oan.es, jalopezperez@transportes.gob.es

⁽¹⁾Observatorio de Yebes. Dir. Gral. Instituto Geográfico Nacional (IGN)

⁽²⁾ Estação RAEGE de Santa Maria, Associação RAEGE Açores, Santa Maria - Azores, Portugal

Resumen—This paper shows the solution adopted to suppress an interference generated by a powerful space debris radar at 1.75 Km from the RAEGE Santa Maria station. It is shown that, given the high sensitivity required in radio astronomical receivers, high temperature superconductor filters (HTS) are the best solution to adopt. A HTS filter based on spiral resonators has been designed, manufactured and installed at the station. The rejection of this filter has allowed the RAEGE Santa Maria radiotelescope to observe in the presence of this radar.

TABLA I
BANDAS VGOS ACTUALES

Banda	Rango de Frecuencias (MHz)
A	3.000,4 - 3.480,4
B	5.240,4 - 5.720,4
C	6.360,4 - 6.840,4
D	10.200,4 - 10.680,4

I. INTRODUCCIÓN

El Observatorio de Yebes es la única Instalación Científico Técnica Singular (ICTS) en la comunidad de Castilla-La Mancha y cuenta entre sus instrumentos con dos radiotelescopios: uno de 40 metros de diámetro, denominado Aries XXI [1] y otro de 13.2 metros, denominado Jorge Juan [2], que pertenece al proyecto de la Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales (RAEGE) [3].

El proyecto RAEGE, es un proyecto hispano-luso que pretende desarrollar una red de cuatro estaciones geodésicas estratégicamente situadas en diferentes placas tectónicas para estudios geodésicos. Dos se situarán en España (Yebes y Canarias) y otras dos en el archipiélago de las islas Azores (Portugal), una en la isla de Santa María y otra en la isla de Flores. Este proyecto se integra dentro de un proyecto global más ambicioso (VGOS, VLBI Global Observing System) que pretende formar una red de observatorios para obtener parámetros geodésicos de nuestro planeta con periodicidad de 24 horas y precisiones inferiores a 1 mm. [4]

Para alcanzar estos resultados, los radiotelescopios están equipados con un receptor de banda ancha que cubre el rango de 2 a 14 GHz [5]. Esta banda no es utilizada íntegramente sino que, para evitar las partes del espectro más perjudicadas por las interferencias, se utilizan 4 sub-bandas de 500 MHz estratégicamente situadas idénticas en todas las estaciones aunque en el futuro se planea ampliar estas sub-bandas a 1 GHz de ancho de banda. Actualmente las bandas de frecuencias utilizadas en la red VGOS vienen definidas en la tabla I.

El principal problema al que se enfrentan tanto la radioastronomía como el VLBI geodésico son las interferencias. El creciente número de tecnologías inalámbricas demandan cada vez una mayor parte del espectro. Esto va en contraposición de la tendencia de los receptores con anchos de banda mayores con los que se equipan los radiotelescopios.

Las señales recibidas en radioastronomía proceden de fuentes celestes que se encuentran a millones de años luz, por tanto, la potencia con la que llegan a nuestro planeta es extremadamente débil, por debajo del nivel de ruido. Para poder estudiarla, es necesario utilizar receptores criogénicos ultra sensibles, en los que el primer elemento de la cadena son amplificadores de ultra bajo ruido que permiten amplificar mucho la señal sin añadir apenas ruido.

Estos amplificadores están preparados para recibir señales muy débiles, por lo que si reciben señales externas artificiales, con una potencia considerable, puede dar lugar a su saturación, intermodulación o incluso ruptura, dejando ciego el receptor, puesto que su punto de compresión es relativamente bajo en comparación con amplificadores convencionales.

Cuando aparece esta situación, es necesario actuar delante del amplificador, teniendo en cuenta que, cualquier solución que añada pérdidas en la cadena, degradará considerablemente la sensibilidad del receptor. Actualmente, los filtros superconductores de alta temperatura (HTS) son la mejor solución ya que presentan unas pérdidas de inserción cercanas a 0 dB y un tamaño lo suficiente pequeño para instalarse en el interior del criostato y enfriarse sin perjudicar su temperatura.

En este artículo, se presenta la problemática de la estación RAEGE Santa María. A 1.75 Km de esta estación, se encuentra un radar de basura espacial que cegaba completamente el receptor. Este problema se solventó mediante la instalación de un filtro superconductor HTS. En la figura 1 se muestra el radiotelescopio de la estación.

II. SITUACIÓN INICIAL RAEGE STA MARÍA

En octubre del año 2022, se instaló por primera vez un receptor que cumplía las especificaciones de VGOS en el radiotelescopio de esta estación. No obstante, tras su instalación se pudo apreciar como debido a la presencia de un radar de basura especial, el receptor presentaba compresión



Fig. 1. Radiotelescopio de la Estación RAEGE Sta Marfa.

en todas las bandas de frecuencia, imposibilitando su uso en observaciones geodésicas [6].

Este radar, divide su emisión en dos bandas. La primera de ellas comprendida entre 2.937 y 2.947 MHz y la otra entre 2.954 y 2.964 MHz. La forma de la banda medida se puede apreciar en la figura 2.

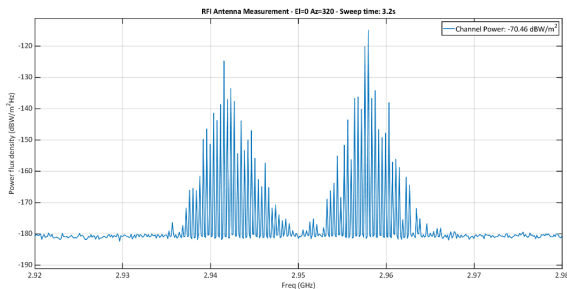


Fig. 2. Espectro medido del radar de basura espacial.

En la tabla I se puede apreciar que el principal problema que presenta esta interferencia es la poca separación con la primera de las bandas de VGOS, ya que tan solo están separadas por 36 MHz. Para conseguir el correcto funcionamiento del receptor, es necesaria la instalación de un filtro que permita introducir una atenuación suficiente (estimada en 20 dB en estudios de compatibilidad [6]) introduciendo la menor atenuación posible a partir de 3 GHz, donde se inicia la primera de las bandas VGOS.

La primera de las soluciones por la que se optó, fue la instalación de un filtro comercial paso alto con una tecnología LTCC que introducía una atenuación de 50 dB en las frecuencias del radar [7], sin embargo, las pérdidas que presenta en la banda A de VGOS imposibilitan la observación de esa banda. Con esta situación, la estación no fue aceptada en el núcleo del proyecto VGOS, y sólo pudo participar como *tag-along*, demostrando, a pesar de todo, que su funcionamiento en el resto de las bandas era correcto. Por ello, se llevó a cabo un diseño de filtro a medida, utilizando la tecnología HTS para reducir las pérdidas al máximo y preservar la sensibilidad del receptor.

III. FILTRO *notch* HTS

Los filtros superconductores de alta temperatura son un recurso cada vez más utilizado para evitar interferencias en

radioastronomía por las siguientes características:

- Su temperatura crítica es de 84 Kelvin, que se adapta al funcionamiento de los criostatos donde la etapa fría se encuentra a una temperatura de aproximadamente 10 Kelvin.
- Presentan unas pérdidas óhmicas unas 100 veces menores que las del cobre, por lo que se pueden considerar despreciables.
- La constante dieléctrica del sustrato sobre el que se depositan, no varía a estas temperaturas criogénicas, por lo que es posible simular resonadores de alto factor de calidad cuya frecuencia central se ajuste a la simulada.

Estos tipos de filtros se han utilizado ampliamente en radioastronomía en forma de paso banda [8]- [10], y en forma de filtro *notch* [11]. En el caso que se presenta, se requiere la utilización de un resonador con un alto factor de calidad, de manera que permita obtener una gran selectividad. Además, el gran ancho de banda de la banda de funcionamiento del receptor (2 - 14 GHz, lo que supone un FBW = 150 %) hace que sea necesario, un rechazo de espurios de forma que no aparezcan respuestas indeseadas en el resto de la banda de paso.

Ante las características que se presenta, se propone utilizar los resonadores espirales, por ser los más adecuados para ajustarse a las especificaciones impuestas.

A. Resonadores espirales

Los resonadores de tipo espiral han sido ampliamente utilizados en la bibliografía para la realización de filtros superconductores de ancho de banda estrecha [12] [13]. Sus principales características que hacen que sea un tipo de resonador que se ajuste a las características del filtro a diseñar se resumen en:

- La cantidad elevada de pistas por superficie afecta únicamente a los campos cercanos a ésta por lo que, los campos significativos, que son los más cercanos a masa y por tanto profundos en el sustrato, no sufren grandes cambios y hacen que el filtro se vea menos afectado por las imprecisiones de fabricación.
- Debido a la razón anterior, los resultados de simulación son bastante similares a los resultados finales obtenidos, y por tanto, permite realizar filtros de bandas muy estrecha sin necesidad de grandes ajuste post-fabricación.
- La capacidad intrínseca de las espiras para almacenar mayor cantidad de energía para las mismas densidades de corriente permite mejorar el factor de calidad, lo que redundará en obtener dispositivos con factor de calidad más elevado.
- Los campos son mayores cuanto más grande es la distancia sobre las espiras, permitiendo de esta manera un mayor control de éstos con la distancia a la caja para su confinamiento. Además, el aumento de pérdidas debido a las corrientes inducidas en la metalización de las cajas es muy pequeño en estos filtros.
- En su segundo armónico, la corriente fluye en dirección opuesta en el interior y exterior de la espira, por lo que el campo en el centro de la espira es muy pequeño; sólo existe un campo significativo entre las espiras. Esto reduce la inductancia de la espira en su segundo modo

armónico, y desplaza esta frecuencia a entre dos veces y media y tres veces la fundamental [14].

B. Diseño y fabricación del filtro

Como se ha expuesto en la sección anterior, se utilizará un diseño con resonadores de forma de espiras porque se solucionan dos problemas que presenta este diseño, por un lado la alta selectividad que requiere el filtro, ya que la separación entre el radar y la primera banda de VGOS es de tan solo 36 MHz, y por otro lado la necesidad de cancelación espurios.

Se ha realizado un filtro de orden 6 con espiras de 48 x 10 mm con tres vueltas y una separación entre ellas de cuarto de longitud de onda. Hay que tener en cuenta que la longitud de la espira permite ajustar la frecuencia de resonancia entre ella, y la separación con la línea de 50 Ω el factor de acoplamiento.

Para conseguir el ancho de banda requerido, utilizando una estructura simétrica tradicional, las dimensiones necesarias de separación entre la espira y la línea de 50 Ω son excesivamente pequeñas, lo que provoca que las tolerancias de fabricación no sean lo suficientes para alcanzar estas dimensiones. Es por ello que, para tener unas dimensiones óptimas para la fabricación, se tuviese que optar por una topología asimétrica que permitiese atenuar de mayor manera las partes de frecuencias más afectadas por el radar.

La topología final del filtro se muestra en la figura 3 mientras que las dimensiones de cada espira se muestran en la tabla II

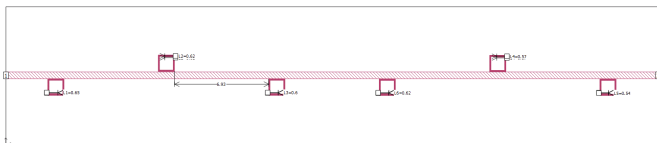


Fig. 3. Topología del filtro notch para la estación RAEGE Sta María.

TABLA II
ESPIRAS PARA FILTRO notch DEL RECEPTOR DE SANTA MARÍA.

Número de Resonador	Longitud (mm)	Gap (mm)
1	2.65	0.08
2	2.62	0.04
3	2.6	0.06
4	2.62	0.06
5	2.57	0.04
6	2.54	0.08

IV. RESULTADOS

Para la fabricación del filtro se ha utilizado un superconductor de alta temperatura de 600 nm de espesor de Ytrio-Bario y Óxido de Cobalto, depositado epitaxialmente sobre un sustrato de 0.5 mm de espesor de Óxido de Magnesio. Para mejorar el contacto de los conectores, y con la caja, se han depositado unas capas de oro de 200 nm de espesor. Además, debido a los grandes gradientes térmicos que va a soportar, se utilizaron conectores tipo K (2,92 mm) con contacto deslizante capaz de absorber los cambios térmicos a los que se ve sometido el sustrato.

La figura 4 muestra el resultado final del filtro tras su fabricación y montaje en una caja de titanio completamente dorada.

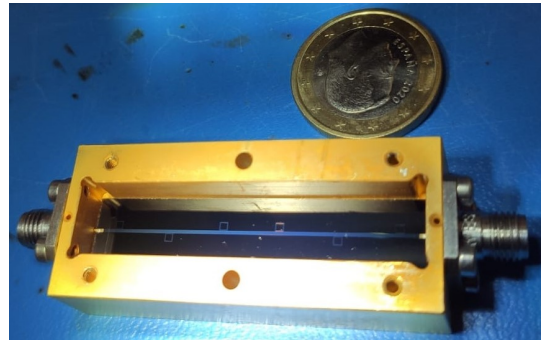


Fig. 4. Filtro notch para el receptor de Santa María.

Para caracterizar el filtro, se utilizó un criostato de laboratorio que permite enfriarlo a una temperatura de 15 Kelvin. Para calibrar el criostato, se realizó una calibración a temperatura ambiente convencional para, posteriormente, medir el filtro en temperatura criogénica descontando los efectos de los cables coaxiales al enfriarse (este proceso fue realizado de forma previa) y realizar una nueva medida criogénica de un *through* para descontar posibles variaciones en los cables coaxiales con respecto a la medida inicial.

Los resultados finales del filtro se muestran en la figuras 5 y 6. En 5, se muestra una medida con alta resolución de la banda afectada por el notch, en rojo se muestra la reflexión del filtro (S11) mientras que en azul se muestra las pérdidas de inserción (S21). El filtro presenta una atenuación superior a 20 dB en toda la banda de funcionamiento del radar, con una atenuación mayor a su frecuencia más perjudicial en 2.956 GHz, además presenta unas pérdidas inferiores a 0.5 dB a la frecuencia de inicio de la banda A cumpliendo de esta manera las especificaciones. En la figura 6 se muestra la banda completa de VGOS, donde solo aparece una respuesta espuria a 8.8 GHz, no obstante coincide con un armónico de la emisión del radar.

El filtro empeora su adaptación en el rango de frecuencias de 7 GHz y 13 GHz, esto es debido a desadaptación en la cavidad del *glass bead* del conector, que puede ser mejorado mediante un mecanizado más preciso de la caja de titanio, al presentar actualmente errores superiores a la décima de milímetro.

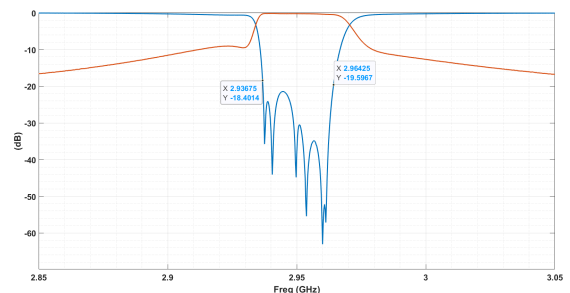


Fig. 5. Parámetros S del filtro para Sta María.

Los filtros diseñados fueron instalados en el receptor

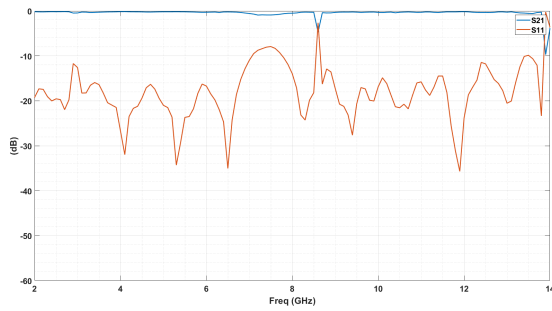


Fig. 6. Parámetros S del filtro para Sta María en la banda completa.

VGOS. Esto se muestra en la figura 7, tomada tras su instalación. En la figura 8 se muestran las franjas de correlación entre los radiotelescopios de Santa María y de Yebes en la banda A de VGOS con el radar encendido, confirmando de esta manera su correcto funcionamiento.

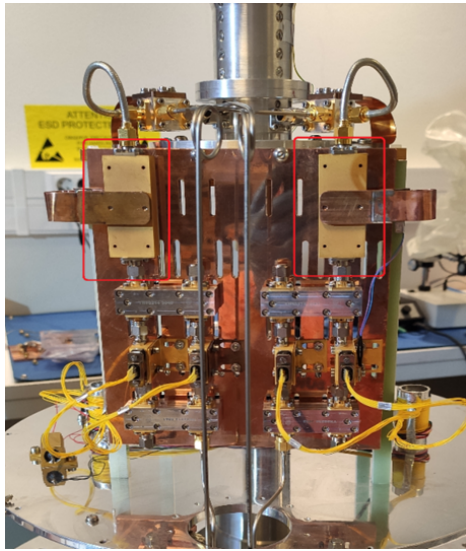


Fig. 7. Filtros notch instalados en el receptor VGOS de Santa María.

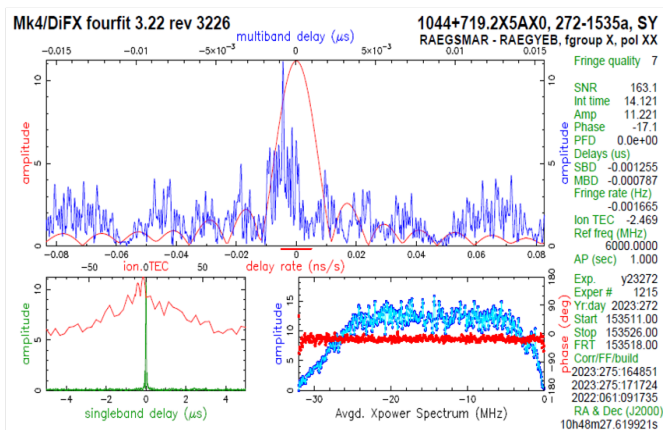


Fig. 8. Franjas de correlación entre RAEGE Sta María y RRAEGE Yebes.

Además, actualmente, gracias a estos filtros HTS la estación RAEGE Santa María ha sido aceptada en el núcleo de radiotelescopios de la red VGOS con muy buenas prestaciones

en los resultados obtenidos.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado un filtro *notch* superconductor basado en espiras resonantes para mitigar los efectos de una fuerte RFI provocada por un radar que saturaba el receptor VGOS de la estación de RAEGE Santa María. Estos filtros fueron diseñados y fabricados íntegramente en el Observatorio de Yebes, permitiendo filtrar las señales sin degradar significativamente el comportamiento inicial del receptor. Como consecuencia, han permitido a la estación de RAEGE Santa María recuperar la banda A del receptor VGOS y formar parte de esta importante red global de observación de VLBI geodésico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del artículo quieren agradecer su trabajo y esfuerzo al diferente personal técnico del Observatorio de Yebes, encargados de la fabricación y montaje de los diferentes filtros, proceso muy delicado y complejo resuelto con gran éxito.

Parte de la instrumentación utilizada para la caracterización de estos nuevos desarrollos ha sido financiada por los fondos FEDER “Infraestructuras de desarrollo y actividades de laboratorio para geodesia espacial en el Observatorio de Yebes (YDALGO)” ICTS-2018-01-CNIG-11

REFERENCIAS

- [1] F. Colomer, P. de Vicente, M. Rioja. *Observatorio Astronómico Nacional NASA Goddard Space Flight Center Code 698 Greenbelt, MD 20771*, 117.
- [2] J.A. López-Fernández, et al. *IGN Yebes technology development center. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*, 2014.
- [3] J. Gómez González, F. Colomer, J.A. López Fernández and M.C.S. Assis. *RAEGE: An Atlantic Network of Geodynamical Fundamental Stations*, Hobart, Australia. 2010.
- [4] W. T. Petrachenko, et al. *VLBI2010: Next Generation VLBI System for Geodesy and Astrometry*, International Association of Geodesy Symposium, Geodesy for Planet Earth, Volume 136, 999-1005, 2011.
- [5] P. García-Carreño et al. *Geodetic VLBI ultra low noise broad-band receiver for 13 meter VGOS radiotelescopes*. 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). IEEE, 2016. p. 476-479.
- [6] J.A. López-Perez et al. *Radio Signal Measurements at the RAEGE Santa Maria station* Technical Report. IT-CDT-2023-02
- [7] I. Malo et al. *Cryogenic Measurement of two LTCC Commercial Filters for Interferences Reduction in Radio Astronomy Receivers* Technical Report. IT-CDT-2022-14.
- [8] P. Bolli, et al. *A high temperature superconductor microwave filter working in C-band for the Sardinia Radio Telescope*. Journal of Astronomical Instrumentation, vol 3, 2014.
- [9] F. Huang, et al. *Superconducting spiral bandpass filter designed by a pseudo-Fourier technique*. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, vol. 12, no 8, p. 1293-1301.
- [10] P. Bolli, et al. *A high temperature superconductor notch filter for the Sardinia Radio Telescope*. Experimental Astronomy, 2018, vol. 45, p. 165-176.
- [11] C.J. Turner, et al. *Superconducting Notch Filter for RFI Mitigation in Ground-Based Radio Telescope*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, vol. 33, no 3, p. 1-5.
- [12] F. Huang, et al. *Ultra-compact superconducting narrow-band filters using single- and twin-spiral resonators* IEEE Trans. Microw. Theory Technol., vol. 51, no. 2, pp. 487–491, Feb. 2003.
- [13] F. Huang, et al. *A narrowband superconducting filter using spirals with a reversal in winding direction*. IEEE Trans. Microw. Theory Technol., vol. 54, no. 11, pp. 3954–3959, Nov. 2006.
- [14] F. Huang, et al. *Superconducting spiral wide bandpass filters with wide upper stopband*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 53(7), 2335–2339. 2005.