

Diseño de Filtros Paso-bajo usando Iris Rellenos de Dieléctrico para Aplicaciones de Alta Potencia

Antonio Romera Pérez⁽¹⁾, Alejandro Pons Abenza⁽¹⁾, Fernando D. Quesada Pereira⁽¹⁾,
 Juan Hinojosa Jiménez⁽¹⁾, Alejandro Álvarez Melcón⁽¹⁾, J. Sebastián Gómez Díaz⁽²⁾
 alejandro.pons@upct.es, fernando.quesada@upct.es, juan.hinojosa@upct.es, alejandro.alvarez@upct.es
⁽¹⁾Dpto. TIC, Universidad Politécnica de Cartagena, Cuartel de Antigones, Cartagena

⁽²⁾ Universidad de California Davis, Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Davis, CA 95616 EEUU.

Resumen—In this work, a novel low-pass filter based on dielectric-filled sections is presented. The employment of dielectric pieces in the critical parts of the structure prevent high-power space condition adverse effects like multipactor breakdown. In the low-pass filter, the use of dielectric pieces in the inverters leads to larger gaps between metallic parts. This strategy avoid the free movement of electrons in these critical regions, and also lead to size reduction, resulting in very compact waveguide filters. The proposed concept is validated with the manufacturing of a prototype with an aluminum housing and a teflon dielectric for the inverters, showing a good level of insertion loss (0.32 dB) and return losses better than 15 dB. This prototype has been power-tested at ESA-VSC laboratory, and the experimental results confirm the enhanced multipactor breakdown threshold in contrast with the classical corrugated analogous filter, showing no multipactor breakdown up to the maximum power tested in the experimental facility of 5.5 kW.

I. INTRODUCCIÓN

Una de los principales atractivos de la tecnología de guía de onda es el bajo nivel de pérdidas que proporciona, así como los altos niveles de potencia que es capaz de manejar. En aplicaciones espaciales, no obstante, el uso de potencias elevadas puede producir efectos nocivos en estas guías como son el multipactor [1], [2] o la descarga por el efecto corona [3], cuyas consecuencias suelen ser catastróficas para el dispositivo.

El efecto multipactor, que suele ser más crítico en los filtros diseñados en guía de onda, aparece cuando un electrón impacta con la suficiente energía en una placa metálica, lo que puede provocar la emisión de electrones adicionales debido al efecto de emisión secundaria (SEY, [4]). Esto produce un efecto de avalancha de electrones en el dispositivo que puede estropear las prestaciones eléctricas del filtro e incluso, en algunos casos, puede llegar a romperse. Este efecto es de especial interés en el análisis de alta potencia de dispositivos fabricados en guía de onda, ya que son susceptibles de sufrir ruptura por el efecto multipactor. En particular, el diseño de filtros paso-bajo con iris capacitivos resulta en estructuras con *gaps* muy pequeños, que reducen significativamente la potencia umbral a la cual se dispara este efecto [5].

Para mitigar este problema, una opción es utilizar geometrías con perfiles suaves en lugar de saltos abruptos, incrementando la dispersión de los electrones en las regiones críticas [6], [7]. Otra opción es emplear materiales dieléctricos para mejorar el umbral de multipactor [8].

En este contexto, este artículo presenta el análisis, diseño y demostración experimental de un nuevo tipo de filtro paso-bajo en guía de onda rectangular basado en iris capacitivos con

un alto nivel de potencia para el umbral de multipactor y un amplio rango libre de espurios. La idea principal es rellenar las áreas críticas del filtro (típicamente, los iris capacitivos más cerrados) utilizando un dieléctrico, para evitar el movimiento de los electrones libres en esta región. Esta configuración permite una mejora sustancial del umbral de multipactor en el dispositivo, en comparación con las implementaciones de filtros paso-bajo clásicas. Para evaluar las prestaciones de este nuevo filtro, se ha comparado el diseño de un filtro con iris rellenos de dieléctrico con su equivalente sin dieléctricos. Mientras que el filtro clásico presenta un umbral de 4 kW de multipactor (simulado con CST-FEST3D 2021), el nuevo filtro propuesto ha sido fabricado y testado en el laboratorio Europeo de alta frecuencia ESA-VSC, donde no ha aparecido el efecto multipactor hasta una potencia de 5.5 kW (máxima potencia disponible para este test), validando el diseño del nuevo filtro propuesto.

II. EJEMPLO DE DISEÑO PROPUESTO

La síntesis del diseño paso-bajo se realiza siguiendo la técnica descrita en [6]. En la Fig. 1 se muestra el bloque de diseño en el que se basa el nuevo filtro propuesto. Siguiendo

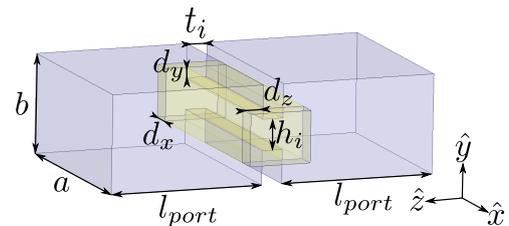


Fig. 1. Estructura 3D del inversor de impedancias propuesto. Para nuestro diseño, las dimensiones de la pieza dieléctrica son: $d_x = 1$ mm, $d_y = 0,5$ mm y $d_z = 1$ mm. El espesor del inversor se fija en $t_i = 1$ mm.

esta técnica, se diseña un filtro paso-bajo de orden $N = 6$, pérdidas de retorno RL = 21 dB y frecuencia de corte fijada en $f_c = 13,5$ GHz. Para las secciones de línea, se toma como referencia el estándar de guía rectangular WR-75 ($a = 19,05$ mm, $b = 9,525$ mm). La permitividad dieléctrica del material de relleno en los iris es de $\epsilon_r = 2,2$. Además de realizar este diseño, se realiza un segundo diseño estándar sin emplear dieléctrico en los inversores, para poder comparar sus prestaciones. En la tabla I se recogen las dimensiones de ambos filtros. Como se puede observar en la tabla, el filtro sin dieléctricos es más largo que el filtro con dieléctricos. Esto es debido a la menor longitud física de los inversores de

TABLA I
DIMENSIONES FÍSICAS (EN MM) DEL FILTRO PASO-BAJO MOSTRADO EN LA FIG. 2. SE INCLUYEN LAS DIMENSIONES DEL FILTRO DISEÑADO SIN DIELECTRICO EN LOS INVERSORES DE IMPEDANCIA.

Parámetro	K/Z_0	Inicial	Optimizado	Filtro sin ϵ_r
h_1	0.75	5.8	5.3	5.6
h_2	0.53	7.78	7.55	3.48
h_3	0.42	6.19	5.25	2.6
h_4	0.39	5.8	5.15	2.41
l_1		6.78	7.15	6.83
l_2		5.6	5.15	5.89
l_3		5.25	4.6	5.49

impedancia rellenos de dieléctrico en comparación con sus análogos sin dieléctrico.

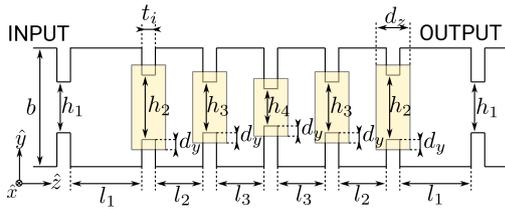


Fig. 2. Figura 2D para ilustrar la parametrización del filtro paso-bajo propuesto. Las dimensiones específicas de los inversores de impedancia se detallan en la Fig. 1.

Tal y como se puede ver en la Fig. 2, el primer inversor del filtro no está relleno de dieléctrico. Esto es debido a la dificultad para conseguir el valor teórico del primer/último inversor filtro utilizando el material dieléctrico. Puesto que el primer inversor siempre será el más grande, el *gap* no contribuirá significativamente al umbral de multipactor esperado para el diseño del filtro. Por otro lado, los inversores interiores del filtro, cuyos *gaps* serán menores, sí que están rellenos de dieléctrico. En la Fig. 3 se recogen las respuestas de parámetros S del filtro mostrado en la Fig. 2, empleando tanto las dimensiones iniciales como las dimensiones optimizadas de la tabla I, así como la respuesta del filtro base sin incluir dieléctrico en los inversores.

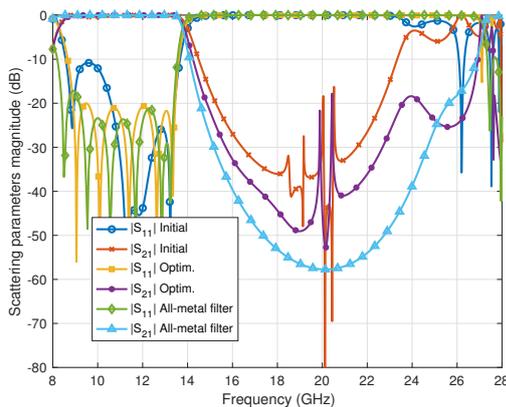


Fig. 3. Respuesta de parámetros de *Scattering* del filtro paso-bajo mostrado en la Fig. 2 para dos configuraciones diferentes. Se presenta la respuesta de los filtros con dimensiones optimizadas y sin optimizar tras aplicar la técnica de diseño, así como la respuesta del filtro equivalente sin usar dieléctrico en los inversores.

Observando la Fig. 3, podemos ver que la eualización del filtro obtenido tras aplicar la técnica de diseño no es

TABLA II
DIMENSIONES FÍSICAS (EN MM) DEL FILTRO MOSTRADO EN LA FIG. 4.

Parámetro	Filtro con ϵ_r	Filtro sin ϵ_r
h_1	4.7	5.72
h_2	5.4	3.69
h_3	3.1	2.8
h_4	2.9	2.58
l_1	5.85	7.42
l_2	3.31	6.48
l_3	2.26	6.05

perfecta, y que algunos polos de la respuesta se han hecho complejos. Esto es debido a que los inversores, al estar rellenos de dieléctrico, muestran una dependencia con la frecuencia mucho mayor. Además, la distancia entre los inversores (l_i) se ha reducido significativamente debido al uso de dieléctricos, causando acoplamientos cruzados no deseados. Sin embargo, la respuesta obtenida está bastante cerca de las especificaciones requeridas, por lo que una optimización de los *gaps* de los inversores y las longitudes de las secciones del filtro es capaz de compensar estos efectos no deseados. En contraste con el filtro sin dieléctricos, se puede observar que aparecen ciertos espurios en la banda entre 18 GHz y 21 GHz. Estos picos se asocian a las interacciones entre el material dieléctrico y el iris capacitivo.

III. FABRICACIÓN Y MEDIDA DE UN PROTOTIPO

Para realizar un test del filtro propuesto se han introducido algunos cambios en su geometría para facilitar la fabricación del mismo. En la Fig. 4 se puede ver un esquema 2D de la nueva estructura propuesta. La principal diferencia entre

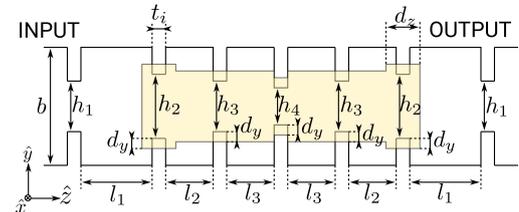


Fig. 4. Esquema 2D de la parametrización empleada para el filtro paso-bajo propuesto empleando iris capacitivos rellenos de dieléctrico.

esta estructura y la mostrada en la sección anterior es la unión de todas las piezas de dieléctrico que rellenan los inversores interiores del filtro. Puesto que aumentamos el material dieléctrico en el filtro, podemos reducir su tamaño, aunque también incrementará el nivel de pérdidas. No obstante, esta solución facilita considerablemente el proceso de mecanizado y alineamiento de la pieza en el interior del filtro. Las dimensiones finales de fabricación del filtro, tras una fase de optimización, están recogidas en la tabla II.

En la Fig. 5 se muestra la respuesta de parámetros S del filtro que se va a fabricar (según la Fig. 4) junto con la respuesta del filtro equivalente sin utilizar dieléctricos. Las diferencias observadas en las frecuencias más bajas de la banda de paso son debidas al comportamiento dispersivo de la guía rectangular cerca de su frecuencia de corte y al uso de dieléctricos en los inversores. En estas simulaciones, se han tenido en cuenta los materiales con pérdidas empleados en la fabricación (aluminio para el metal, teflón para el dieléctrico).

Como se puede observar en el *inset* de la Fig. 5, las pérdidas de inserción del filtro con dieléctricos son mayores que las observadas para el filtro sin dieléctricos (0.1 dB en el peor caso). En este caso, se observan de nuevo los espurios en la banda entre 17 GHz y 21 GHz. De forma similar al diseño con piezas dieléctricas separadas, el origen de esta banda espuria está asociado a las resonancias generadas por la interacción entre el material dieléctrico y los iris capacitivos. No obstante, tal como se puede ver en las simulaciones con pérdidas de la Fig. 5, este efecto negativo se ve atenuado por las pérdidas óhmicas de los propios materiales del filtro.

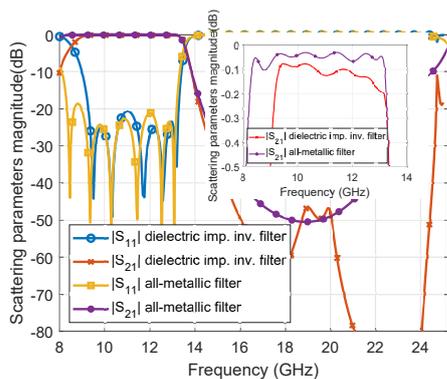


Fig. 5. Respuesta de parámetros S del filtro propuesto para su fabricación, comparado con el filtro diseñado sin dieléctrico en los inversores. En esta figura, se consideran pérdidas en las simulaciones de ambos filtros, cuyas pérdidas de inserción se pueden observar en la figura del *inset*.

En comparación con el filtro sin dieléctricos, el diseño propuesto también presenta algunas ventajas. Por un lado, las longitudes de las secciones de línea l_i en el filtro con dieléctricos son más cortas, lo que resulta en un filtro más compacto (una reducción de su huella de un 36%). También es interesante observar cómo los inversores con dieléctrico requieren *gaps* (h_i) mayores que en el caso análogo sin dieléctrico. Esto es debido a la reflexión adicional que introduce la presencia del material dieléctrico. Esta es una de las ventajas clave del diseño propuesto, debido a que evita tener *gaps* de tamaños relativamente pequeños y, por lo tanto, no sólo serán más fáciles de fabricar, sino que además, podrán incrementar el umbral efectivo a partir del cual aparece el efecto multipactor. Más concretamente, el *gap* más pequeño del filtro sin dieléctrico es de $h_4 = 2.58$ mm, mientras que este valor crece hasta 2.9 mm cuando introducimos el teflón en el inversor.

El análisis en simulación de multipactor se ha llevado a cabo usando el módulo de alta potencia del software electromagnético CST-FEST3D 2021, cuyos resultados se muestran en la Fig. 6. Para la frecuencia a la que se realizará el test experimental, se ha obtenido un umbral de potencia de multipactor estimado de aprox. 4 kW a una frecuencia de 13 GHz. Tal como se observa en la Fig. 6, el valor más bajo de umbral de multipactor se obtiene cerca de las frecuencias de corte inferior y superior del filtro (9 GHz y 13 GHz, respectivamente). Este comportamiento es típico en los filtros de microondas en guía. Para obtener estos resultados, se ha considerado que el filtro está compuesto por aluminio en términos de SEY. Tal y como se esperaba, el software de simulación confirma que el efecto multipactor se dispara en

el inversor de impedancia central, es decir, el inversor que presenta el *gap* más pequeño de toda la estructura.

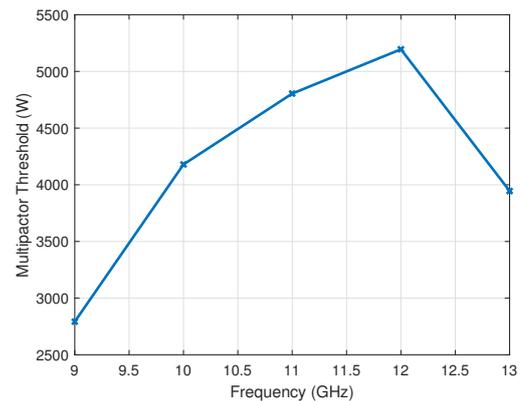


Fig. 6. Análisis del umbral de multipactor en función de la frecuencia dentro de la banda de paso del filtro. El análisis presentado se ha realizado con el módulo de alta potencia de la herramienta comercial CST-FEST3D 2021.

Para la fabricación del filtro, se utiliza teflón, dada la facilidad que presenta para ser mecanizado. Las partes metálicas del filtro se fabrican empleando aluminio. En la Fig. 7 se muestran las piezas del filtro fabricadas, así como la estructura completa ensamblada. En la fotografía mostrada en la Fig. 7(a) se puede observar cómo se acomoda la pieza de dieléctrico se acomoda en una de las mitades metálicas de la carcasa del filtro. Para ensamblar la estructura, simplemente se coloca la mitad superior de la carcasa y se atornilla, resultando en la estructura mostrada en la fotografía de la Fig. 7(b). En la Fig. 8 se muestran los resultados de parámetros S del filtro fabricado, comparados con los parámetros S obtenidos en simulación del mismo filtro.

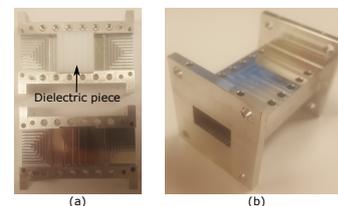


Fig. 7. Fotografías del prototipo fabricado. (a) Piezas del filtro antes del ensamblaje, mostrando la colocación de la pieza de teflón en el interior del filtro. (b) Vista del filtro ya ensamblado y atornillado.

Se puede observar un buen nivel de concordancia entre las respuestas del filtro medido y simulado. Con respecto a la respuesta objetivo mostrada en la Fig. 5, el filtro fabricado muestra un ancho de banda ligeramente mayor, con una frecuencia de corte ubicada en 13.6 GHz. Por otro lado, el nivel de pérdidas de retorno es menor que el esperado ($RL = 15$ dB). Las pérdidas de inserción medidas son de 0.32 dB. Estas pequeñas desviaciones entre la simulación de HFSS y las medidas del prototipo fabricado son debidas a una pequeña diferencia entre las permitividades del teflón empleadas en el diseño y en la realidad ($\epsilon_r = 2,1$ en lugar de $\epsilon_r = 2,2$), y a errores en el proceso de mecanizado y ensamblaje/alineamiento de la pieza dieléctrica. A pesar de estos inconvenientes, el filtro fabricado presenta un nivel de prestaciones lo bastante bueno para el experimento de alta potencia.

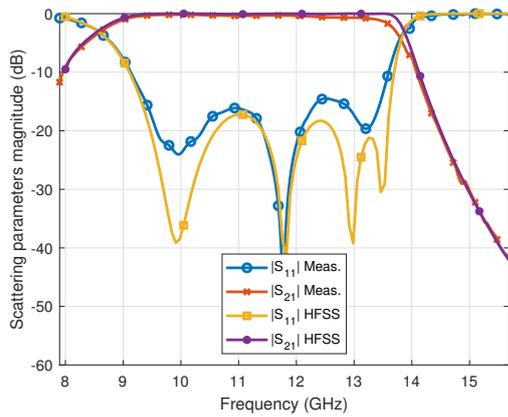


Fig. 8. Respuesta de parámetros S del filtro paso-bajo presentado en la Fig. 4, implementado con teflón. La respuesta medida es bastante similar a la obtenida en simulación empleando el software HFSS.

Para estudiar el origen de las pérdidas obtenidas, se ha realizado un estudio detallado sobre cómo las diferentes partes del filtro contribuyen a las pérdidas totales de la estructura. Para el filtro fabricado, aproximadamente el 68 % de las pérdidas totales son debidas a la pieza dieléctrica, mientras que el 32 % restante son debidas a las partes metálicas (paredes de la guía e iris capacitivos). Así mismo, tras analizar también el filtro diseñado con varias piezas dieléctricas en lugar de sólo una, se pudo observar que las pérdidas totales se pueden reducir al rellenar sólo los inversores de dieléctrico. Sin embargo, el efecto multipactor puede ocurrir en cualquier *gap* donde no haya pieza de dieléctrico, lo que puede resultar en un decremento del umbral de multipactor de toda la estructura. Como conclusión, se puede afirmar que existe un compromiso entre estos dos factores, y que el uso de una u otra topología dependerá de la aplicación y de las especificaciones requeridas.

Es importante mencionar que el empeoramiento de las pérdidas de retorno también se puede traducir en un incremento del umbral de multipactor en el dispositivo medido, debido a la desadaptación entre el generador del test de potencia y el dispositivo. Sin embargo, la diferencia no es significativa con respecto del filtro con pérdidas de retorno prescritas mayores de 20 dB (ver Fig. 5). En nuestro caso, las pérdidas de retorno más bajas medidas son aprox. 15 dB, que resulta en un umbral de multipactor medido que sería sólo un 2 % más alto que el umbral correspondiente al filtro con pérdidas de retorno mayores de 20 dB.

Para validar los resultados obtenidos, el filtro fabricado se ha testado en las instalaciones del laboratorio Europeo de alta frecuencia de la Agencia Espacial Europea y el Consorcio Espacial Valenciano (ESA-VSC). Las medidas confirmaron que el efecto multipactor no se dispara hasta una potencia máxima admitida por el banco de pruebas hasta 5.5 kW a la frecuencia de 13 GHz. El filtro de referencia, diseñado sin dieléctricos en los inversores, muestra un umbral de multipactor de aprox. 4 kW a la misma frecuencia. A pesar de que sólo ha sido posible conducir un test de potencia hasta una potencia máxima de 5.5 kW, es de esperar que el umbral de multipactor en el filtro propuesto alcance hasta un orden de magnitud superior debido al efecto de bloqueo de los electrones en los *gaps* críticos, tal y como se demuestra en

[8] para un transformador de impedancia de plano-E relleno de dieléctrico.

IV. CONCLUSIONES

En esta contribución, se presenta una nueva familia de filtros paso-bajo capacitivos con inversores rellenos de dieléctrico. Estos dieléctricos se incorporan en los *gaps* más pequeños, para evitar el movimiento de electrones libres en estas regiones. De esta forma, se evita la aparición del efecto multipactor en los *gaps* capacitivos, lo que potencialmente incrementa el umbral efectivo de multipactor entre las paredes de los iris. En este trabajo, se demuestra cómo el empleo de materiales con permitividad dieléctrica mayor permite espaciados más grandes en las ventanas capacitivas, manteniendo respuestas libres de espurios similares a las obtenidas con filtros paso-bajo corrugados tradicionales y consiguiendo mejoras en el manejo de alta potencia de los dispositivos diseñados. Esta estrategia de diseño puede combinarse para mejorar las prestaciones de alta potencia en diseños de filtros con inversores de geometría suave, para incrementar el umbral de multipactor en este tipo de dispositivos.

AGRADECIMIENTOS

Esta contribución ha sido apoyada financieramente por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España (Subvención MCIN/AEI/10.13039/501100011033) en el marco del subproyecto coordinado de I+D “GRETAS” con Ref. PID2019-103982RB-C42, así como a través de los fondos Next Generation de la Unión europea con el proyecto “ARIELS” con Ref. TED2021-129196B-C42, y el proyecto de la Fundación Seneca de la Región de Murcia (22076/PI/22) “Componentes radiantes y de filtrado de microondas para satélites”.

REFERENCIAS

- [1] J. Vaughan, “Multipactor,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 35, no. 7, pp. 1172–1180, jul 1988.
- [2] W. J. Gallagher, “The multipactor effect,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 26, no. 3, pp. 4280–4282, jun 1979.
- [3] T. Pinheiro-Ortega, J. Monge, S. Marini, J. Sanz, E. Sorolla, M. Mattes, C. Vicente, J. Gil, V. E. Boria, and B. Gimeno, “Microwave corona breakdown prediction in arbitrarily-shaped waveguide based filters,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 214–216, apr 2010.
- [4] C. Walker, M. El-Gomati, A. Assad, and M. Zadrazil, “The secondary electron emission yield for 24 solid elements excited by primary electrons in the range 250–5000 eV: a theory/experiment comparison,” *Scanning*, vol. 30, no. 5, pp. 365–380, 2008.
- [5] D. Wolk, C. Vicente, H. L. Hartnagel, M. Mattes, J. R. Mosig, and D. Raboso, “An investigation of the effect of fringing fields on multipactor breakdown,” in *5th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware*, Sep. 2005, pp. 93–99.
- [6] P. Vera-Castejon, D. Correas-Serrano, F. D. Quesada-Pereira, J. Hinojosa, and A. Alvarez-Melcon, “A novel low-pass filter based on rounded posts designed by an alternative full-wave analysis technique,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 10, pp. 2300–2307, oct 2014.
- [7] I. Arregui, F. Teberio, I. Arnedo, A. Lujambio, M. Chudzik, D. Benito, T. Lopetegi, R. Jost, F.-J. Gortz, J. Gil, C. Vicente, B. Gimeno, V. E. Boria, D. Raboso, and M. A. G. Laso, “High-power low-pass harmonic filters with higher-order TE_{n0} and non- TE_{n0} mode suppression: Design method and multipactor characterization,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 12, pp. 4376–4386, dec 2013.
- [8] T. Hu and W. Cui, “Design and multipactor analysis of microwave impedance transformer with dielectric filling,” in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*. IEEE, apr 2014.