

# Estudio del Fenómeno de Multipactor en Componentes Pasivos Inductivos de Microondas para Aplicaciones Espaciales

F. D. Quesada Pereira\*, V. E. Boria<sup>†</sup>, B. Gimeno Martínez<sup>‡</sup>,

J. Pascual García\*, J. L. Gómez Tornero\*, Alejandro Álvarez Melcón\*

\*Departamento TIC, Universidad Politécnica de Cartagena, e-mail: fernando.quesada@upct.es

<sup>†</sup>Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, e-mail: vboria@dcom.upv.es

<sup>‡</sup>Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo, Universidad de Valencia, e-mail: benito.gimeno@uv.es

**Abstract**— This paper presents an investigation on multipaction risk in inductive waveguide microwave filters. For the investigation, a fast software tool based on an integral equation formulation is used. The accuracy and efficiency of the tool has allowed for the first time to investigate multipaction risk in complex inductive waveguide devices, including dielectric loaded cavity filters and evanescent waveguide dielectric resonators. The study reveals higher multipaction risk for narrower bandpass filters. To alleviate the problem with multipaction generation, a novel inductive filtering structure is proposed. Results demonstrate that using the new filtering concept multipaction risk can be reduced as much as 30% with regard to the initial design.

## I. INTRODUCCIÓN

El interés por el estudio del fenómeno de multipactor en dispositivos de alta potencia ha crecido mucho en la última década [1]. Esto se debe al hecho de que los componentes de alta potencia pueden funcionar de forma errónea si se producen descargas debidas al multipactor durante su ciclo de vida. Este efecto es especialmente importante en el hardware diseñado para operar a bordo de satélites, ya que una descarga de multipactor puede conducir a un fallo en el transpondedor completo del satélite. Para evitar estos indeseables efectos, el hardware espacial se somete una serie de pruebas intensivas antes de ser lanzado. Generalmente esta es una tarea muy costosa, al tener que ser rediseñados y probados varios dispositivos, antes de conseguir una configuración apropiada que este libre de sufrir el fenómeno de multipactor en su modo de funcionamiento normal.

Para poder reducir el tiempo de desarrollo y el coste del hardware espacial, es necesario poder predecir el riesgo de multipactor en los dispositivos en la fase de diseño, antes de su fabricación y su prueba. Debido a este hecho, se han realizado gran cantidad de esfuerzos para el modelado y la predicción precisa del riesgo de multipactor en componentes de alta potencia de satélites. Por ejemplo, en [2] se presentó un método para el cálculo de los voltajes de pico dentro de filtros paso banda y multiplexores. No obstante, la técnica presentada es solamente aproximada, al estar basada en modelos circuitales. Recientemente, el factor de magnificación de voltaje (Voltage Magnification Factor (VMF)) ha sido introducido como una figura de mérito útil para poder mensurar el riesgo de multipactor [3]. El VMF se calcula asumiendo que los campos electromagnéticos dentro de la estructura son conocidos, y proporciona una estimación apropiada del máximo voltaje que

puede existir dentro del dispositivo bajo prueba. El uso del VMF en la predicción de multipactor favorece el interés en el desarrollo de herramientas de software específicas para el cálculo de los campos electromagnéticos dentro del hardware espacial [1], [4].

En este artículo se ha empleado una herramienta software específica para el estudio del riesgo de multipactor en filtros de microondas inductivos. Esta herramienta software se basa en una técnica de ecuación integral de superficie que permite analizar un número cualquiera de objetos inductivos dieléctricos o metálicos dentro de una guía de onda rectangular. Una vez que los campos se calculan de forma precisa empleando la nueva técnica numérica, el VMF dentro de la estructura se puede extraer de forma sencilla como en [3], [4]. Debido a la precisión y eficiencia de la herramienta empleada, se ha podido realizar por primera vez un estudio del impacto del ancho de banda y de la forma de las ventanas de acoplo en las posibilidades de manejo de potencia dentro de la guía. El análisis de los resultados lleva a deducir que el riesgo de multipactor se incrementa de forma considerable en filtros con un ancho de banda estrecho, mientras que, por otro lado, la forma de las ventanas no resulta crítica.

Por último, hay que decir que la herramienta software empleada ha permitido investigar por primera vez el riesgo de multipactor en filtros en guía inductivos cargados con dieléctricos. Se han analizado dos configuraciones diferentes que incluyen postes dieléctricos. La primera es un filtro de cavidad cargado con dieléctricos, mientras que la segunda esta formada por resonadores dieléctricos situados en una sección de guía evanescente.

Además de las importantes conclusiones extraídas del estudio llevado a cabo, se propone una nueva topología de filtro indicada para las aplicaciones donde el multipactor sea un factor crítico. La idea de la nueva topología consiste en situar dos objetos dieléctricos fuera del centro dentro de los resonadores. Los postes dieléctricos situados lejos del centro tienden a empujar el campo eléctrico fuera del área central, y por tanto se consigue una distribución de campo muy uniforme.

## II. TEORÍA

Para el estudio del riesgo de multipactor se ha desarrollado un software específico, basado en una técnica de ecuación

integral de superficie. El resultado ha sido un método preciso y eficiente que permite estudiar estructuras inductivas muy complejas, las cuales contienen un número indeterminado de postes metálicos y/o dieléctricos de geometría arbitraria.

Una vez que se resuelve la ecuación integral de superficie mediante el método de los momentos, resulta relativamente sencillo calcular los campos dentro de la estructura, y en consecuencia el factor de magnificación de voltaje (*VMF*) [3], [4]. Si se asume que el ancho de la guía rectangular es *a* y su dimensión vertical *b*, el voltaje se puede definir integrando el campo eléctrico a lo largo de la altura de la guía de onda *b*. Para el modo fundamental  $TE_{1,0}$ , único que se propaga habitualmente en los diseños prácticos de filtros inductivos, resulta que el voltaje es:

$$V(z) = b E_y(x, z) \quad (1)$$

donde los ejes de referencia de la estructura se dan en Fig. 1. Asimismo, el voltaje es generalmente calculado en el punto medio del ancho de la guía de onda, ya que el máximo del campo normalmente se da en esa posición. Este voltaje se puede calcular en todos los planos a lo largo del eje longitudinal de la estructura (variando *z*). El máximo de todos los voltajes calculados ( $V_t = V(z)|_{max}$ ) se emplea para definir el *VMF* como:

$$VMF(\omega) = \left| \frac{V_t(\omega)}{V_{in}(\omega)} \right| \quad (2)$$

donde  $V_{in}$  es el voltaje asociado a la excitación del modo que se propaga en la estructura, estando la dependencia explícita con la frecuencia del *VMF* representada en (2). La capacidad máxima de soportar una determinada potencia dentro del dispositivo se puede calcular usando la susceptibilidad del voltaje  $V_{dis}$  propuesta en [5]. Este límite se obtiene de las curvas de ruptura de un material específico, introduciendo un margen conversador. Para evitar el riesgo de multipactor, la potencia que puede transmitir el dispositivo debe ajustarse a este margen [4]:

$$P < \frac{V_{dis}^2}{2 Z_0 (VMF)^2} \quad (3)$$

De la condición anterior se puede deducir claramente que el riesgo de multipactor crece para *VMF*s grandes, al decrecer el margen de potencia. Asimismo, es importante señalar que, según (2), el margen superior se debe verificar para todo el rango de frecuencias en que el dispositivo opera. En particular, para una estructura dada, es importante identificar las frecuencias donde el *VMF* es máximo, ya que éstas representan el riesgo más alto de generación de multipactor.

### III. RESULTADOS

Se ha estudiado la influencia del ancho de banda del filtro en el riesgo de generación de multipactor. Para ello, se han diseñado dos filtros de ventanas inductivas acopladas, uno con 6% y el otro con un 3.6% de ancho de banda relativo (ver Fig. 1 para la geometría y Fig. 2 para los parámetros

de dispersión; se incluyen, asimismo, los datos evaluados con HFSS<sup>1</sup> como validación).

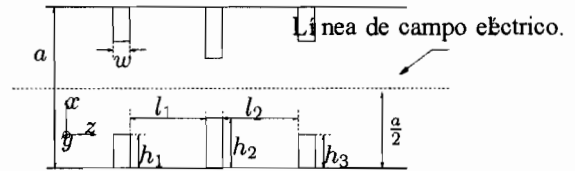


Fig. 1. Estructura general de un filtro de dos polos inductivo - (a) Filtro de banda ancha:  $h_1 = h_3 = 4.775$  mm,  $h_2 = 6.025$  mm,  $l_1 = l_2 = 12.0$  mm - (b) Filtro de banda estrecha:  $h_1 = h_3 = 5.075$  mm,  $h_2 = 6.325$  mm,  $l_1 = l_2 = 13.0$  mm. Dimensiones comunes para todos los filtros:  $w = 2$  mm,  $a = 19.05$  mm, altura  $b = 9.525$  mm.

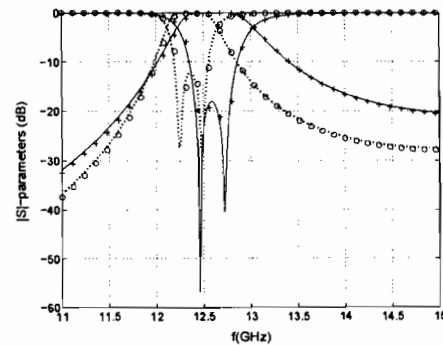


Fig. 2. Parámetros de dispersión de un filtro de banda ancha (línea gruesa) y otro de banda estrecha (línea punteada). Los parámetros calculados con HFSS se representan con cruces (banda ancha) y círculos (banda estrecha)

En ambos casos el valor máximo del voltaje se da en el centro de las cavidades resonantes y a las frecuencias donde  $S_{21}$  es -3dB. En Fig. 3 se representa la variación del *VMF* a lo largo de la línea de campo eléctrico ( $x = a/2$ , ver Fig. 1), como una función de la frecuencia.

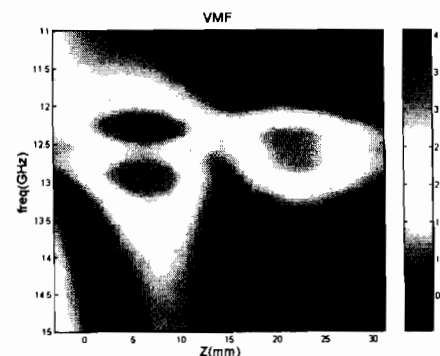


Fig. 3. Factor de Magnificación de Voltaje para el filtro de banda ancha en el plano central de la guía de onda ( $x = a/2$ ) en función de la frecuencia.

El valor máximo valor calculado es  $VMF = 4.0$  para el filtro de banda ancha y  $VMF = 4.8$  para el filtro de banda estrecha. En términos de potencia, esto representa una

<sup>1</sup>HFSS v.10.0, Ansoft Corporation, Pittsburgh, PA, 2005.

reducción del 27% en la capacidad de soportar un determinado nivel de potencia sin riesgo de multipactor del filtro de banda estrecha respecto al filtro de banda ancha. Esto se debe a la energía almacenada más alta requerida por el filtro de banda estrecha. Esta mayor energía almacenada implica intensidades de campo más grandes dentro de los resonadores, y por tanto un mayor riesgo de multipactor.

El siguiente estudio se ha realizado para estimar la influencia de la forma de las ventanas de acoplo en la generación de multipactor. Para este propósito se ha diseñado un filtro con un ancho de banda relativo del 6%, usando ventanas de acoplo redondeadas como inversores de impedancia (las dimensiones de Fig. 1 son:  $h_1 = h_3 = 4.975$  mm,  $h_2 = 6.225$  mm,  $l_1 = l_2 = 12$  mm,  $R = 1$  mm). El comportamiento de este filtro es muy similar al filtro de banda ancha previamente discutido. En particular, el máximo VMF se encuentra exactamente en la mismas posiciones que antes (Fig. 3). Asimismo, las simulaciones revelan un  $VMF = 4.0$ , el cual es el mismo valor que el calculado para el filtro original. Como confirmación de estos resultados, se ha diseñado un filtro similar con un ancho de banda relativo del 6%, empleando en este caso ventanas de acoplo de forma triangular (las dimensiones de Fig. 1 son:  $h_1 = h_3 = 5.75$  mm,  $h_2 = 7.1$  mm,  $l_1 = l_2 = 11.75$  mm). De nuevo, el comportamiento en relación al riesgo de multipactor no cambia de forma significativa. En concreto, para esta estructura se ha obtenido un  $VMF = 4.2$ . Este valor representa un incremento muy pequeño respecto al filtro original. Examinando la distribución de campo, se puede concluir que la forma de las ventanas de acoplo, no es un factor crítico de cara a la generación de multipactor, al situarse éstas en zonas donde existe un nivel de campo bajo. Este hecho se puede apreciar en Fig. 4, donde se representa el patrón de distribución del campo eléctrico dentro de la estructura a la frecuencia del máximo VMF ( $f = 12.28$ GHz).

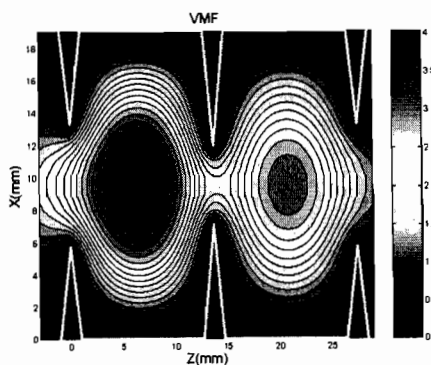


Fig. 4. Distribución de campo eléctrico en el filtro con ventanas de acoplo triangulares, a la frecuencia del máximo VMF ( $f = 12.28$ GHz).

Tal y como se dijo previamente, la herramienta software desarrollada también es capaz de tratar cuerpos dieléctricos dentro de la guía de ondas. Por lo que se ha estudiado el riesgo de multipactor en filtro formado por cavidades cargadas con dieléctricos (las dimensiones de Fig. 1 son:  $h_1 = h_3 = 5.075$  mm,  $h_2 = 6.925$  mm,  $l_1 = l_2 = 6.0$  mm, el radio de los

postes dieléctricos  $R = 1.5$  mm,  $\epsilon_r = 6$ , los postes se sitúan en el centro de las cavidades). El filtro posee, una vez más, un ancho de banda relativo del 6%, y un  $VMF = 4.0$ . Este valor es exactamente el mismo que en el filtro de banda ancha original sin cargar. Este resultado es importante, ya que indica que se puede reducir el tamaño de los resonadores, cargando éstos con dieléctricos, sin incrementar el riesgo de multipactor. El interés del resultado puede tener un impacto importante en aplicaciones para satélite. Aunque el campo experimente niveles altos dentro de los dieléctricos, el máximo voltaje que puede provocar multipactor se debe medir en el contorno del poste dieléctrico. Esto se debe a que los electrones no pueden moverse libremente dentro de un cuerpo dieléctrico sólido.

Otra estructura útil para aplicaciones por satélite está basada en resonadores dieléctricos situados en un tramo de guía evanescente, tal y como se ilustra en Fig. 5.

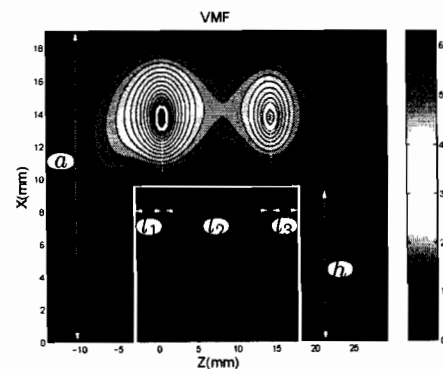


Fig. 5. Filtro no simétrico basado en resonadores dieléctricos situados en un tramo de guía evanescente. Las dimensiones son:  $h = 9.525$  mm,  $l_1 = l_3 = 3.6$  mm,  $l_2 = 14$  mm, el radio de los resonadores es  $R = 0.7$  mm,  $\epsilon_r = 18$ ,  $a = 19.05$ mm.

En este caso el objetivo de diseño ha sido un ancho de banda relativo del 3.6%, como en el filtro original de banda estrecha. Una vez más, para esta configuración el VMF no crece drásticamente en relación al filtro original basado en resonadores de cavidad. En particular, se ha evaluado un  $VMF = 5$ , lo cual representa solo un pequeño incremento del 6%.

De este estudio se puede concluir que un factor limitador desde el punto de vista de la capacidad de manejar potencia es el ancho de banda del filtro. Para filtros de banda estrecha se debe prestar un cuidado especial para no sobrepasar el umbral de potencia de la estructura que pueda provocar multipactor. Para poder incrementar los niveles de potencia admisibles por filtros inductivos de microondas en guía, se propone una nueva estructura, la cual consigue reducir de forma considerable el riesgo de padecer multipactor para un mismo nivel de potencia.

Se ha podido apreciar en todas las estructuras estudiadas hasta el momento que el máximo nivel de voltaje (1) se da en las zonas centrales de los resonadores (por ejemplo, ver Fig. 4). La idea que se ha tenido consiste en situar dos postes dieléctricos en una posición desplazada respecto al plano

principal de la guía. Estos dos cuerpos dieléctricos tienden a concentrar el campo en su interior, por lo tanto, realizan la función de reducir el nivel de los campos en la zona central. El resultado es un campo más uniformemente distribuido dentro de cada resonador, y por tanto una reducción del máximo  $VMF$  en la estructura.

Para comprobar la validez de esta propuesta, se ha estudiado en primer lugar un filtro con dos objetos dieléctricos de forma circular situados fuera del plano central. En este ejemplo, el ancho de banda se ha escogido igual al del filtro de banda estrecha original (ancho de banda relativo del 3.6%, las dimensiones de Fig. 1 son:  $h_1 = h_3 = 4.5$  mm,  $h_2 = 5.905$  mm,  $l_1 = l_2 = 6$  mm, el radio de los postes dieléctricos es  $R = 1.5$  mm,  $\epsilon_r = 10$ , los postes se sitúan en el plano central de la longitud de cada cavidad, con 3 mm de distancia desde las paredes de la guía). Debido al efecto de atracción del campo introducido por los postes dieléctricos añadidos, el máximo del campo no se encuentra en el eje central de la cavidad ( $x = a/2$ ). En cambio, el máximo se ha desplazado hacia los postes dieléctricos unos 5mm. Los datos estiman un  $VMF = 3.5$ , el cual representa una importante reducción en el riesgo de multipactor de un 25% en relación al filtro original de banda estrecha. En la figura Fig. 6 se representa la distribución de campo dentro del filtro a la frecuencia del máximo  $VMF$ , pudiéndose apreciar una distribución de campo más uniforme como resultado de la presencia de los postes dieléctricos, con la consecuente reducción del riesgo de multipactor.

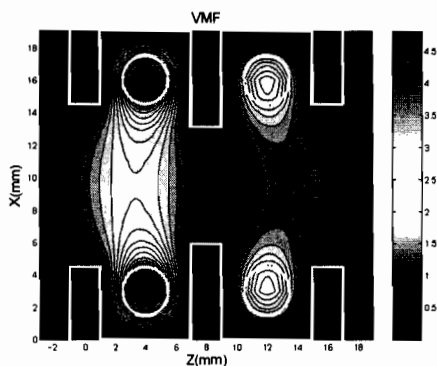


Fig. 6. Distribución de campo para el filtro de cavidad con postes circulares dieléctricos alejados del centro, pudiéndose apreciar el efecto de atracción del campo ejercido por éstos.

Se puede lograr una mejora aún mayor, adaptando de forma progresiva el efecto de atracción de la distribución de los campos ejercido por los postes dieléctricos. Esto se puede hacer, por ejemplo, con postes dieléctricos de forma triangular. En este caso uno de los vértices del triángulo se sitúa cerca del eje central de los resonadores, reduciendo de este modo la perturbación del alto nivel de campo presente en dicha zona. De esta forma se consigue un mayor efecto uniformador del campo, tal y como se aprecia en Fig. 7.

Esta segunda configuración se ha diseñado con un ancho de banda relativo igual al de filtro de banda ancha original (ancho

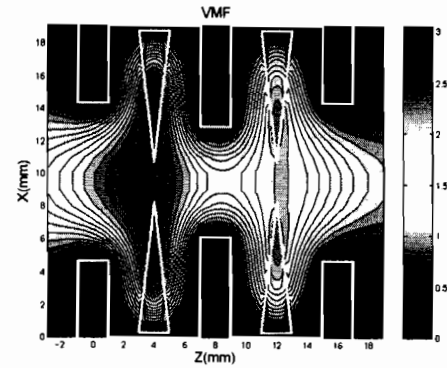


Fig. 7. Distribución de campo para el filtro de cavidad con postes dieléctricos triangulares situados en los lados, pudiéndose apreciar una distribución de campo más uniforme.

de banda relativo del 6%, dimensiones del figura Fig. 1 son:  $h_1 = h_3 = 4.675$  mm,  $h_2 = 6.125$  mm,  $l_1 = l_2 = 6.0$  mm,  $\epsilon_r = 11$ , base de los triángulos 2 mm, altura de los triángulos 8.0 mm, los dieléctricos se sitúan en el centro de cada cavidad con la base sobre las paredes de la guía). Debido a la atracción más suave de los campos, el máximo es ahora  $VMF = 2.8$ , representando un reducción del riesgo de multipactor del 30% con respecto al filtro de cavidad original.

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se ha investigado extensamente el riesgo de multipactor en filtros inductivos de microondas en guía. El estudio se ha llevado a cabo empleando un software dedicado basado en la resolución de una ecuación integral de superficie. Se han extraído conclusiones interesantes de los análisis realizados. En particular, se ha podido identificar que el factor crítico asociado al riesgo de multipactor es el ancho de banda del filtro. Finalmente, se ha propuesto una nueva estructura basada en postes dieléctricos situados fuera del plano principal de la guía. Las simulaciones realizadas demuestran que se puede reducir el riesgo de multipactor un 30 % si se emplea la nueva configuración, en relación a los diseños tradicionales.

#### REFERENCIAS

- [1] C. Vicente, M. Mattes, D. Wolk, H. Hartnagel, J. Mosig, and D. Raboso, "Multipactor breakdown prediction in rectangular waveguide based components," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, (Long Beach), IEEE, 12-17, June 2005.
- [2] A. Sivasdas, M. Yu, and R. Cameron, "A simplified analysis for high power microwave bandpass filter structures," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, (Boston), IEEE, 11-16, June 2000.
- [3] M. Ludovico, L. Accatino, and M. Mongiardo, "CAD of multipactor-free waveguide components for communication satellites," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, (Seattle, USA), IEEE, 2-7, June 2002.
- [4] H. Esteban, J. Morro, V. Boria, C. Bachiller, B. Gimeno, and L. Conde, "Hybrid full-wave simulator for the multipaction modelling of low-cost H-plane filters," (Noordwijk, The Netherlands), ESA/ESTEC, 8-11, September 2003.
- [5] A. Woode and J. Petit, "Diagnostic investigation into the multipactor effect, susceptibility zone measurements and parameters affecting a discharge," tech. rep., ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 1989. ESTEC Working Paper, No. 1556.