

Análisis Eficiente de Componentes Pasivos Inductivos en Guía Empleando una Nueva Formulación de Ecuación Integral en el Dominio Espacial

F. D. Quesada Pereira*, F. Pérez Soler*, B. Gimeno Martínez[†], V. E. Boria[‡],
J. Pascual García*, J. L. Gómez Tornero*, D. Cañete Rebenaque*, Alejandro Álvarez Melcón*

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

[†]Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, e-mail: vboria@dcom.upv.es

[‡]Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo, Universidad de Valencia, e-mail: benito.gimeno@uv.es

Abstract— This paper presents an efficient software tool for the analysis of inductive waveguide components using a new spatial domain integral equation formulation. For the first time the Kummer and Ewald series acceleration techniques are combined into a single formulation for the efficient evaluation of the spatial domain parallel plate waveguide (PPW) Green's functions. Results are presented for complex microwave filters containing dielectric posts and rounded corners, showing the accuracy and usefulness of the proposed approach.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de componentes inductivos en tecnología a guiada es un tema que ha atraído la atención de muchos investigadores en la comunidad de microondas. Se debe esencialmente a la posibilidad de diseñar dispositivos complejos con interesantes aplicaciones prácticas, como puedan ser filtros paso banda [1] y estructuras cargadas con dieléctricos para comunicaciones por satélite.

Las técnicas modales se citan entre las más eficientes [1], para el análisis de dichos componentes. No obstante, se encuentran generalmente limitadas a geometrías de guía canónicas, como la rectangular y la circular. El análisis de otros elementos, incluyendo objetos con esquinas redondeadas y dieléctricos es necesario en muchas aplicaciones prácticas. Para trabajar con este tipo de geometrías complejas, las técnicas de elementos finitos y diferencias finitas han sido usadas con éxito previamente [2], aunque generalmente conllevan un alto coste computacional.

Una técnica alternativa que se puede usar para el análisis de problemas guiados es el método de ecuación integral. La forma más popular de la técnica de ecuación integral aplicada al análisis de problemas inductivos en guía, es la conocida formulación en el dominio espectral. En esta formulación, las funciones de Green de la guía de placas paralelas se expresan como series modales lentamente convergentes. La convergencia de estas series mejora seleccionando de forma apropiada ciertos tipos de funciones de base [3]. Para evitar los problemas asociados a la convergencia de las series infinitas,

se han usado otros métodos de ecuación integral que emplean las funciones de Green en espacio libre [4], [5], formulando, por tanto, todas las componentes necesarias en términos de funciones de Hankel cilíndricas o esféricas de segunda especie. El problema que presentan estas alternativas es que para la resolución numérica de la ecuación integral se deben invertir sistemas de ecuaciones grandes, como consecuencia de la necesidad de tener que mallar la totalidad de las paredes laterales de la guía de onda, además de los postes inductivos y las discontinuidades de la estructura.

Si prestamos atención a la formulación de las funciones de Green dentro de la guía de placas paralelas, son posibles dos representaciones equivalentes. Una se formula en el dominio espectral mediante series modales lentamente convergentes. La segunda se obtiene mediante la aplicación de la fórmula de la suma de Poisson, con frecuencia conocida como la representación espacial de las funciones de Green de la guía de placas paralelas. En este último caso, las funciones de Green se expresan como una serie infinita de imágenes espaciales, las cuales, una vez más, presentan una convergencia muy lenta.

De hecho, es este lento comportamiento convergente de las series de funciones de Green, el que ha evitado el uso extendido de las formulaciones de ecuación integral en el dominio espacial. A pesar de estas dificultades, se han hecho algunos intentos previos para acelerar la convergencia de las series modales. Estos intentos están basados en la aplicación de la transformación de Kummer para extraer los términos asintóticos de las series, en combinación con un modelado de los postes conductores o dieléctricos mediante corrientes filamentosas discretas [6]. Aunque la transformación de Kummer es eficaz para la aceleración de las series espectrales modales, la convergencia es aún lenta para ciertas derivadas de componentes espaciales, sobre todo en la proximidad de la singularidad de la fuente.

Una técnica de aceleración complementaria, conocida como el método de Ewald, se ha desarrollado para la evaluación de las funciones Green de la guía rectangular en el dominio

espacial. Este procedimiento numérico ha sido aplicado recientemente al estudio de estructuras periódicas unidimensionales, y se puede, por tanto, adaptar de forma sencilla al cálculo de las funciones de Green de la guía de placas paralelas, necesaria para el análisis de problemas inductivos en guía [7]. Sin embargo, para el conocimiento de los autores, esta formulación nunca se ha usado dentro una ecuación integral en el dominio espacial. Esto es probablemente debido a las dificultad en la aplicación de esta técnica para distancias grandes entre fuente y observación, conocida como la ruptura de alta frecuencia de la representación de Ewald descrita en [7].

En este artículo se presenta por primera vez una formulación completamente desarrollada en el dominio espacial, aplicada al análisis de componentes en guía de onda inductivos complejos. La ecuación integral no esta basada en las funciones de Green de espacio libre como en [4],[5]. En cambio, se fundamenta directamente en la obtención en el dominio espacial de las funciones de Green de la guía de placas paralelas. La ventaja de esta formulación estriba en que técnicas de discretización complejas, como las usadas en [4], se pueden también aplicar durante el proceso de resolución numérica de la ecuación integral. Además, sólo es necesario discretizar los saltos interiores, ya que los efectos de las paredes laterales de la guía se tienen en cuenta automáticamente debido al uso de las funciones de Green de la guía de placas paralelas. Para poder alcanzar una alta eficiencia en la técnica empleada, las aceleraciones de series de Ewald y Kummer se han combinado de forma apropiada dentro del método de ecuación integral. Un estudio de convergencia revela, por primera vez, que la combinación de los métodos de Kummer y de Ewald es la estrategia más eficiente para el cálculo rápido de los funciones de Green de las placas paralelas en el dominio espacial para todas las distancias entre fuente y observación. Una vez las funciones de Green y sus derivadas espaciales relevantes se han obtenido en el dominio espacial, siguiendo esta nueva formulación, se resuelve mediante el método de los momentos una ecuación integral de superficie, para el análisis de cuerpos dieléctricos y metálicos de forma arbitraria situados dentro de una determinada guía de onda. Finalmente, para certificar la alta precisión y eficiencia de la nueva técnica se presentan simulaciones de filtros de microondas prácticos cargados con dieléctricos.

II. TEORÍA

La formulación de la técnica de ecuación integral en el dominio espacial propuesta en este trabajo requiere la evaluación, directamente en el dominio espacial, de las funciones de Green de la guía de placas paralelas de una estructura general como la representada en Fig. 1.

Una primera formulación de las funciones de Green usando la teoría de imágenes básica, se puede escribir como una serie infinita de imágenes:

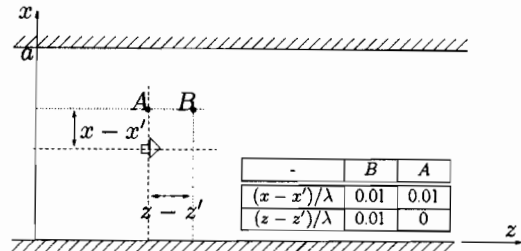


Fig. 1. Localización de los puntos fuente y de observación en la guía de ondas de placas paralelas para este ejemplo ($a/\lambda = 0.9$).

$$G_{Spat}(x, x', z - z') = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\xi}{j 4} \left[H_0^{(2)} \left(k_0 \sqrt{(z - z')^2 + (x - x' - 2na)^2} \right) + s_g H_0^{(2)} \left(k_0 \sqrt{(z - z')^2 + (x + x' - 2na)^2} \right) \right] \quad (1)$$

donde s_g es la función signo, y ξ es el parámetro constitutivo ($1/\epsilon_0$, o μ_0). Éstos toman diferentes valores dependiendo de la componente de las funciones de Green con la que se trabaje.

Las funciones de Green de las placas paralelas también se pueden formular en el dominio espectral, aplicando la formula de la suma de Poisson a las series superiores. En este caso se tiene una serie modal de la forma:

$$G_{Spec}(x, x', z - z') = \frac{2}{a \pi} \sum_{n=0}^{\infty} \xi \frac{e^{-j k_z |z - z'|}}{j k_z} f_n(k_x x) g_n(k_x x') \quad (2)$$

donde f_n y g_n son las funciones armónicas (sin o cos), según las diferentes componentes de las funciones de Green y : $k_z = \sqrt{k_0^2 - k_x^2}$, $k_x = \frac{n \pi}{a}$.

Para obtener las funciones de Green en el dominio espacial, tanto las series en (1) o en (2) deben ser sumadas numéricamente para cualquier localización de los puntos fuente y de observación. Sin embargo, es bien sabido que ambas series exhiben tasas de convergencia muy lentas para determinadas combinaciones de distancias entre puntos fuente y observación, convirtiendo esta alternativa en impráctica.

Para superar esta dificultad, la transformación de Kummer se puede utilizar para acelerar las series modales en (2). En esta técnica el término asintótico se puede extraer analíticamente de las series [6], siendo la serie resultante de convergencia rápida.

Por otro lado, el método de Ewald se puede usar para acelerar la convergencia de la serie de imágenes en (1). En este caso se aplica la transformación de Ewald a las componentes cilíndricas 2D de las series en (1) [7]. El intervalo de integración de cero a infinito se subdivide en dos partes, cada una de las cuales presenta convergencia gaussiana. La integración analítica de este término resulta en una convergencia rápida de una serie de funciones integrales exponenciales. El otro

término se pasa al dominio espectral usando de nuevo la fórmula de la suma de Poisson. En este dominio la integral resultante tiene expresión analítica en términos de la función complementaria de error. Esta última transformación conduce a series que también presentan convergencia gaussiana. Los pasos detallados se encuentran en [7] para el lector interesado.

A. Estudio de Convergencia.

Una importante contribución de este artículo es la combinación, por primera vez, de los métodos de Ewald y de Kummer para la evaluación eficiente de las funciones de Green de la guía de placas paralelas, para cualquier combinación de localizaciones de puntos fuente y destino.

La primera consideración es que el término exponencial en (2) mejora considerablemente el comportamiento de las series modales para puntos donde $|z - z'| \neq 0$. De hecho hemos observado que este término exponencial domina la convergencia de las series para las localizaciones fuente-observador que satisfacen la condición: $|z - z'|/\lambda > 0.01$ (punto B de Fig. 1). La figura Fig. 2 representa el comportamiento de la convergencia de las series modales en (2), después de la aplicación de la transformación de Kummer, para el punto A de la figura Fig. 1.

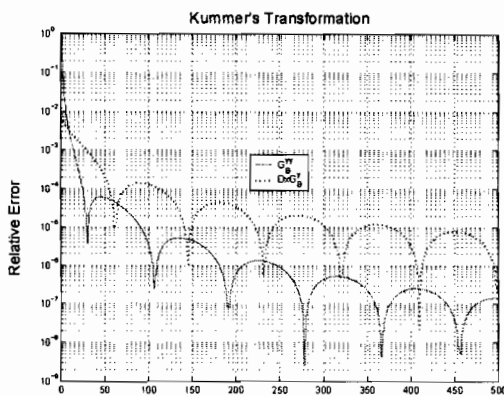


Fig. 2. Comportamiento de la técnica de aceleración de Kummer aplicada al punto A de la figura Fig. 1.

Se ha representado el potencial vector magnético dirigido según y , y la derivada espacial respecto al eje x . Se puede ver que incluso en el caso crítico, cuando $|z - z'| = 0$, las series de las funciones de Green sin derivar convergen más rápido (con errores relativos de 10^{-5} obtenidos con 100 modos). Por el contrario, una convergencia mucho más lenta se obtiene para la derivada (es difícil conseguir errores por debajo de 10^{-5}).

Debido a esta limitación de la técnica de Kummer, es conveniente explorar el método de Ewald aplicado a la aceleración de la serie de imágenes presentada en (1). En Fig. 3 se presenta la convergencia obtenida por el método de Ewald, de nuevo en el punto A de Fig. 1.

En este caso se puede observar una convergencia similar para ambas funciones de Green y la derivada espacial, consiguiéndose errores mejores que 10^{-5} con sólo tres términos

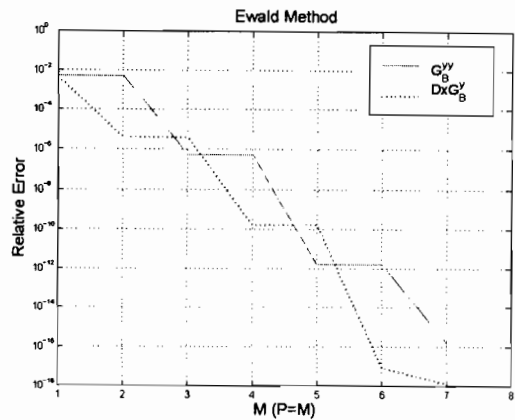


Fig. 3. Convergencia de la técnica de Ewald aplicada al punto A de la figura Fig. 1.

en las series. Sin embargo, para poder evaluar correctamente la eficiencia total del algoritmo, se debe tener en cuenta el mayor coste computacional asociado a la evaluación de la exponencial integral y las funciones complementarias de error requeridas por esta técnica.

Tomando en consideración todos estos importantes factores, se han combinado de forma apropiada las dos estrategias de aceleración en un algoritmo eficiente. Por una parte, la técnica Kummer se mantiene para el cálculo de las funciones de Green básicas, independientemente de la localización de los puntos de fuente y observación. Además, para los puntos donde $|z - z'|/\lambda > 0.01$, la técnica de Kummer también se usa para las derivadas espaciales, debido a la intervención del factor exponencial en la ecuación (2). De esta forma, se elimina el problema del método de Ewald en alta frecuencia y distancias grandes [7]. Para evitar pérdidas de precisión, el método de Ewald se aplica finalmente al cálculo de las derivadas de las funciones de Green cerca de la singularidad ($|z - z'|/\lambda < 0.01$). Mediante esta estrategia, es posible mantener errores relativos por debajo de 10^{-5} para todas las combinaciones de puntos de fuente y observación, con un mínimo esfuerzo computacional.

III. RESULTADOS

Para mostrar la validez y la precisión de la técnica implementada, se han estudiado diversos dispositivos inductivos de microondas. En primer lugar se presenta el análisis de un poste metálico y un poste dieléctrico dentro de una guía de onda, tal y como aparece en [8]. La figura Fig. 4 muestra el parámetro S_{21} para tres diferentes posiciones del poste dieléctrico.

Se puede observar un muy buen acuerdo en los tres casos. La geometría se ha discretizado usando 24 funciones de base triangulares. La herramienta software invierte 0.13 segundos por punto en frecuencia para completar el análisis de la estructura, en un ordenador con un procesador con frecuencia de reloj 1.6GHz

La mayoría de las realizaciones prácticas de filtros de ventanas inductivas con esquinas redondeadas, se deben a la

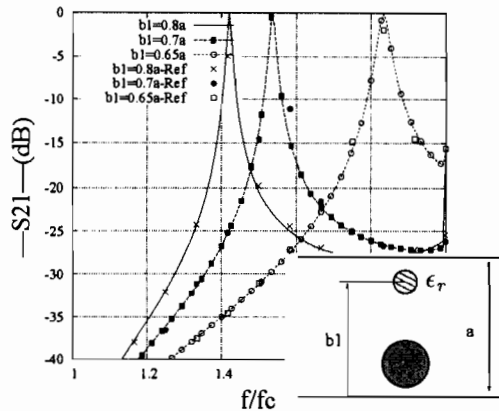


Fig. 4. Resultados obtenidos para un poste metálico y otro dieléctrico dentro de una guía rectangular, presentado en [8].

utilización de taladros de diámetro finito durante el proceso de fabricación. La evaluación de los efectos de las esquinas redondeadas en la respuesta del filtro, no es posible con las técnicas numéricas basadas en métodos modales [1]. Sin embargo, el método numérico desarrollado en esta sección, puede tener en cuenta fácilmente la perturbación en la respuesta del filtro producida por las esquinas redondeadas. Para demostrar que este es el caso, hemos analizado el filtro con esquinas redondeadas presentado en [2]. En ese trabajo la estructura se analizó mediante la técnica de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD). La figura Fig. 5 muestra los datos calculados con nueva alternativa propuesta en este artículo, junto con los resultados proporcionados en [2] y los calculados con HFSS.

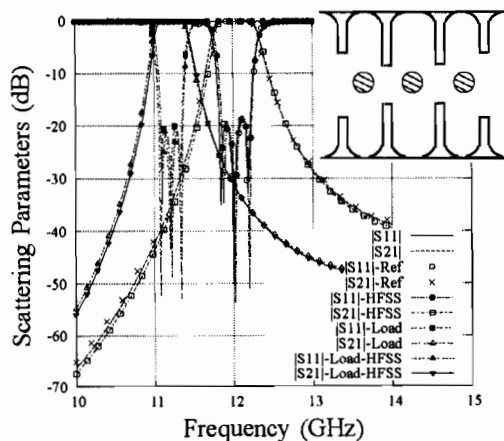


Fig. 5. Resultados obtenidos para un filtro de microondas inductivo con ventanas de acoplo redondeadas, presentado en [2]. También se incluye la simulación del filtro de cavidad cargado, apreciándose un desplazamiento en frecuencia de 900MHz. Los resultados han sido validados con la técnica de elementos finitos y con la empleada en [2].

Además, con la técnica expuesta es fácil diseñar un filtro compacto, cargando las cavidades resonantes con dieléctricos. La figura Fig. 5 representa los resultados para un filtro similar al anterior pero cargado con postes dieléctricos de permitividad

$\epsilon_r = 2.5$ y radio 1.5mm. De nuevo, las simulaciones realizadas con HFSS se añaden con el objeto de comparar. Se puede observar un muy buen acuerdo entre los datos evaluados en todos los casos. Para esta estructura la convergencia se ha conseguido empleando 112 funciones de base para la discretización de la geometría completa. El tiempo computacional invertido por el software desarrollado fue de sólo 0.26 segundos por punto en frecuencia en el mismo computador que antes.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una técnica de ecuación integral en el dominio espacial para el análisis de componentes inductivos que contienen tanto cuerpos dieléctricos como metálicos. Por primera vez, las técnicas de aceleración de Kummer y Ewald se han combinado para la evaluación eficiente de las funciones de Green requeridas y sus derivadas, para todas las combinaciones de punto fuente y observación. Se ha demostrado que las funciones de Green se calculan directamente en el dominio espacial con errores relativos menores al 10^{-5} , con un coste computacional mínimo. Los resultados de estructuras prácticas presentados confirman la utilidad y validez del método propuesto.

REFERENCIAS

- [1] G. Gerini and M. Guglielmi, "Full-wave CAD of a rectangular waveguide filter with integrated coaxial excitation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, pp. 986–990, May 2001.
- [2] P. Kozakowski and M. Mrozowski, "Gradient-based optimization of filters using FDTD software," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 12, pp. 389–391, October 2002.
- [3] C.-I. G. Hsu and H. A. Auda, "Multiple dielectric posts in a rectangular waveguide," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 34, pp. 883–891, August 1986.
- [4] V. Catina, F. Arndt, and J. Brandt, "Hybrid surface integral equation/mode-matching method for the analysis of dielectric loaded waveguide filters of arbitrary shape," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, pp. 3562–3567, November 2005.
- [5] H. Esteban, S. Cogollos, V. Boria, A. A. San Blas, and M. Ferrando, "A new hybrid mode-matching/numerical method for the analysis of arbitrarily shaped inductive obstacles and discontinuities in rectangular waveguides," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, pp. 1219–1224, April 2002.
- [6] Y. Leviatan, P. G. Li, A. T. Adams, and J. Perini, "Single post inductive obstacle in rectangular waveguide," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 31, pp. 806–812, October 1983.
- [7] F. Capolino, D. R. Wilton, and W. A. Johnson, "Efficient computation of the 2-D Green's function for 1-D periodic structures using the ewald method," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, pp. 2977–2984, September 2005.
- [8] R. Gesche and N. Löchel, "Two cylindrical obstacles in a rectangular waveguide-resonances and filter applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 37, pp. 962–968, June 1989.