



Departamento de
Comunicaciones



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

XXV CONVOCATORIA DE PREMIOS INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

RESUMEN TESIS DOCTORAL

Datos de la tesis:

Título	Diseño teórico y experimental de filtros paso banda <i>microstrip</i> basados en anillos acoplados con técnicas de supresión de armónicos
Autor:	Amadeu Griol Barres
Director:	Dr. Javier Martí / Dr. Juna Luis Corral
Lugar de realización y lectura:	Departamento de Comunicaciones ETSI Telecomunicación Universidad Politécnica de Valencia
Fecha de lectura	12 de diciembre de 2003
Calificación	Sobresaliente (<i>Cum Laude</i>)

Datos del autor:

Nombre	Amadeu Griol Barres
Nº de colegiado	8808

ÍNDICE

1. Introducción a la tesis
2. Descripción del trabajo realizado
3. Méritos de la tesis
 - 3.1. Contribuciones originales en revista internacional y citas
 - 3.2. Contribuciones originales en congresos internacionales
 - 3.3. Aplicabilidad práctica e interés industrial del trabajo
4. Otros méritos del autor

1. Introducción a la tesis

El filtrado es una función fundamental en los sistemas de comunicación, ya que los filtros son necesarios para separar señales y para reducir el ruido. Existen numerosas formas de implementar filtros eléctricos que operen en las bandas de frecuencias de microondas y milimétricas. Estos filtros, que son implementados con componentes discretos a bajas frecuencias, deben implementarse de forma distribuida (utilizando elementos como líneas de transmisión, resonadores y anillos) a frecuencias más elevadas.

Esta tesis doctoral se enmarca dentro del campo de investigación de los dispositivos de filtrado implementados de forma distribuida en tecnología microtira para aplicaciones en bandas de microondas y frecuencias milimétricas.

En concreto, y dentro de las numerosas topologías distribuidas utilizadas para aplicaciones de filtrado, la tesis se ha centrado en el estudio, diseño e implementación de filtros paso banda empleando como estructura básica el anillo *microstrip*. Las propiedades resonantes de estos anillos *microstrip* los convierte en unos excelentes candidatos para el desarrollo de filtros en tecnología impresa, aunque, en contraposición, su naturaleza distribuida se va a traducir en la presencia de múltiples bandas pasantes o armónicos. En este sentido, uno de los principales objetivos de la tesis ha sido estudiar y combinar diferentes técnicas para la atenuación de estas respuestas espurias.

2. Descripción del trabajo realizado

La primera parte de la tesis se ha centrado en estudiar y caracterizar el dispositivo central de la investigación, el anillo *microstrip*.

Esta caracterización se llevó a cabo mediante la obtención de la envolvente de campo eléctrico, para los distintos modos resonantes que se establecen en las estructuras implementadas con anillos *microstrip* que, a su vez, fueron clasificadas en función del tipo de excitación empleada para alimentar la estructura, *edge-coupled* o *side-coupled*. En la *figura 1* se muestra un esquemático de ambas topologías.

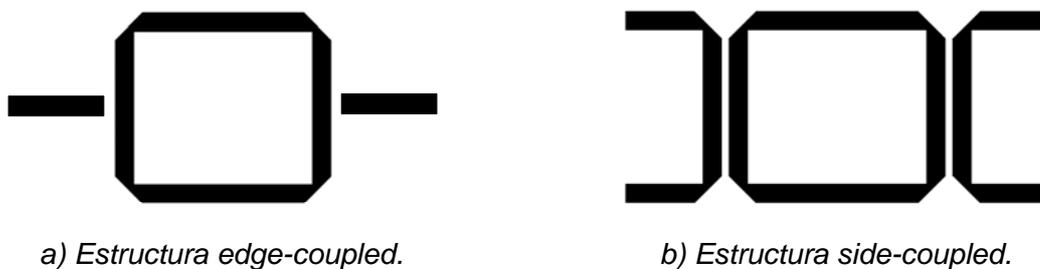


Figura 1: Formas de excitación de anillos resonantes a) edge-coupled, b) side-coupled.

Mediante simulaciones FDTD se obtuvo la envolvente de campo eléctrico para los diferentes modos resonantes de cada estructura. Estos resultados se reproducen en el capítulo 2 de la tesis. A la vista de los resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las estructuras con excitación *end-coupled*, presentan modos resonantes con máximos de campo alineados con los puntos de excitación. Además la estructura puede soportar modos degenerados. Estos modos degenerados pueden ser excitados mediante la introducción, en determinadas posiciones del anillo, de discontinuidades que pueden provocar la excitación y acoplo entre estos modos degenerados.
- En las estructuras *side-coupled*, y debido a la naturaleza del acoplamiento entre las etapas de excitación y los anillos, se pudo comprobar cómo ambos modos ortogonales van a ser excitados sin necesidad de introducción de discontinuidades. Es decir para cada modo

resonante TM_{n10} , vamos a obtener una doble resonancia. La separación entre la doble resonancia puede ser controlada a través de la continuidad y simetría del anillo, de forma que la introducción de discontinuidades va a producir un mayor o menor acercamiento de ambas resonancias.

El conocimiento de la envolvente de campo es fundamental para el estudio, ya que permite identificar y hacer un seguimiento de los modos resonantes y cómo estos modos se ven afectados por diferentes efectos, como la introducción en el anillo de discontinuidades, de estructuras *electromagnetic bandgap* o de elementos pasivos y activos.

La segunda parte del estudio se centró en la búsqueda de mecanismos de eliminación de armónicos de una estructura de filtrado base. Esta estructura se muestra en la figura 2 y consiste en dos anillos resonantes acoplados.

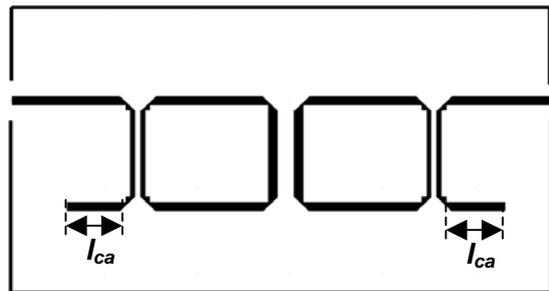


Figura 2: Estructura básica basada en el acoplamiento side-coupled de dos anillos resonantes.

La estructura bajo estudio, mostrada en la figura 2, es un filtro distribuido y por tanto va a presentar un comportamiento periódico, lo que se traduce en la formación de múltiples bandas de paso más o menos equiespaciadas, como vemos en la figura 3.

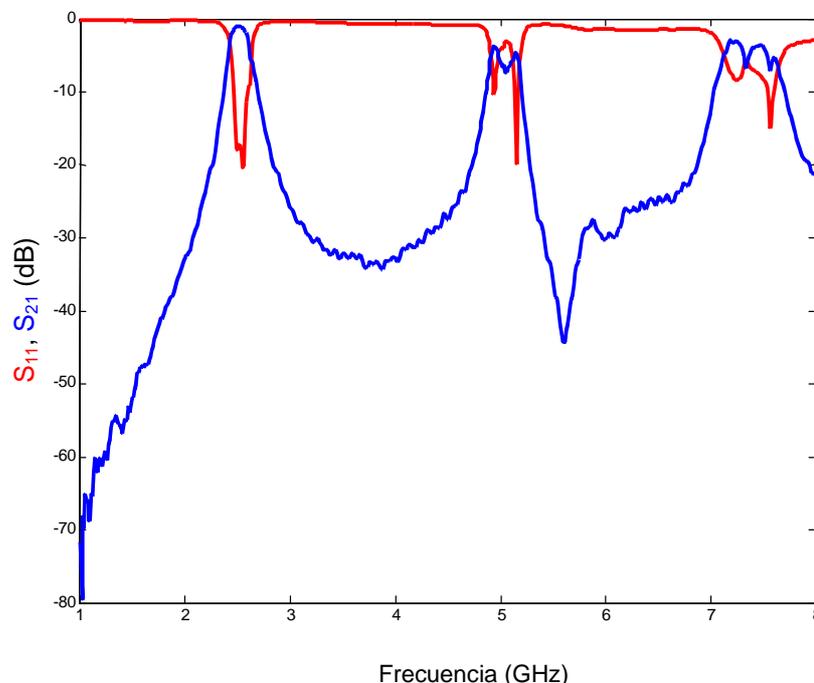


Figura 3: Respuesta del filtro mostrado en la figura 2.

Por tanto, la búsqueda de técnicas de eliminación de estas bandas espurias se concibe como una actividad fundamental ya que va a mejorar el ancho de banda de rechazo y, por tanto, las características del filtro y de los sistemas de comunicaciones donde estos filtros estén insertados. En este sentido es importante recalcar que en estos sistemas de comunicaciones, nos vamos a encontrar con elementos que presenten comportamientos no lineales, amplificadores, mezcladores, que se traducirán en la aparición de réplicas de la señal no deseadas a múltiplos de la frecuencia de la portadora. Por tanto, la utilización de filtros que permitan el rechazo de esta distorsión armónica va a suponer una ventaja de diseño fundamental y muchas veces imprescindible.

En este sentido, y a lo largo del trabajo realizado en la tesis doctoral, se han introducido varias técnicas de eliminación de armónicos cuyas características y utilidad se resumen a continuación a modo de conclusiones generales.

- **CONTROL DE LAS DISTRIBUCIONES DE CAMPO EN LAS ETAPAS DE EXCITACIÓN (MODOS DE ACOPLAMIENTO)**

La primera técnica introducida se basa en el análisis de las distribuciones de campo para la estructura *side-coupled* de dos anillos acoplados. Esta técnica consiste en eliminar el segundo modo resonante mediante el control de las distribuciones de campo en las líneas de excitación. Para ello se realiza una optimización de la longitud de las líneas acopladas de entrada, así como de la forma de los anillos que ya no son cuadrados, sino ligeramente rectangulares. La figura 4 muestra la respuesta de filtro optimizado, como vemos, en comparación con la respuesta básica de la figura 3 esta técnica da lugar a una reducción del segundo armónico de más de 25 dB. La verificación de esta técnica dio lugar a las siguientes publicaciones internacionales [Gri03e, Gri04].

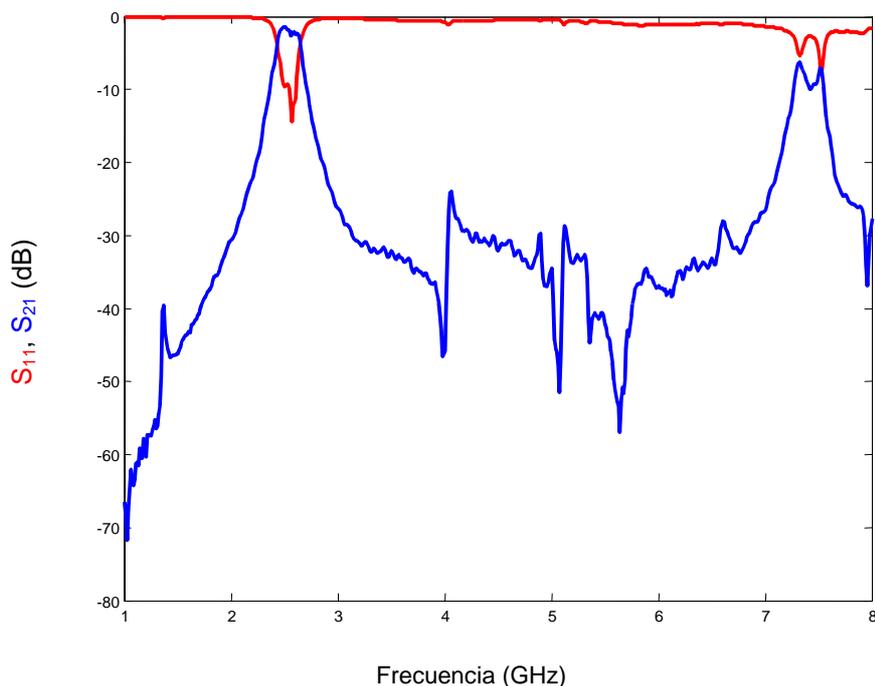


Figura 4: Respuesta del filtro con excitación optimizada.

- **UTILIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DE SALTO DE IMPEDANCIA**

La segunda técnica estudiada para la eliminación de armónicos, consistió en la introducción en el anillo de estructuras de salto de impedancia tanto en cascada como en el interior de los anillos. Estas estructuras consisten en la alternancia de líneas de mayor anchura con líneas de una anchura menor.

Como conclusión principal, podemos indicar que este estudio ha permitido clarificar los efectos reales de la introducción de las estructuras de salto de impedancia en el anillo, completando y corrigiendo los resultados de otros estudios ya existentes e incluso los obtenidos en nuestra primera interpretación [Mar98]. La figura 5 muestra el filtro de anillos con las estructuras de salto de impedancia en su interior y la respuesta obtenida, donde se observa una supresión del segundo armónico superior a 30 dB.

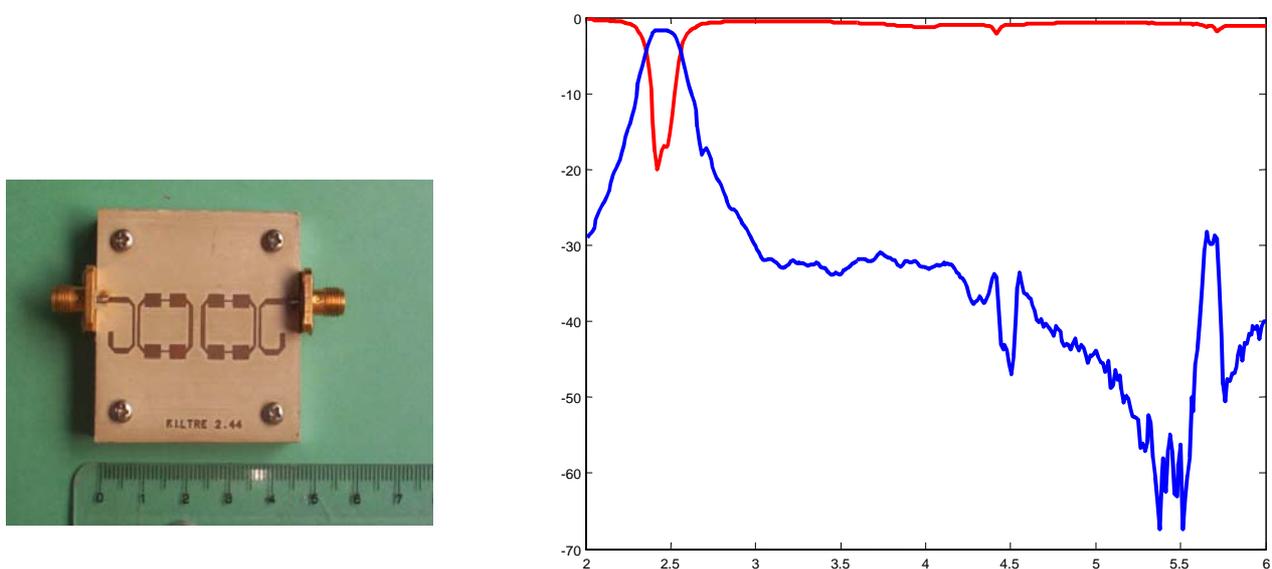


Figura 5: Filtro de anillos acoplados con estructuras de salto de impedancia en su interior (izq.) y su respuesta experimental (derecha).

- **UTILIZACIÓN DE ESTRUCTURAS SPURLINE**

En la segunda parte del capítulo 3 de la tesis se recogen los resultados obtenidos al utilizar estructuras *spurline* combinadas con los filtros de anillos acopladas. Estas estructuras *spurline* permiten la introducción de nulos adicionales que permiten obtener una mayor atenuación de las resonancias no deseadas.

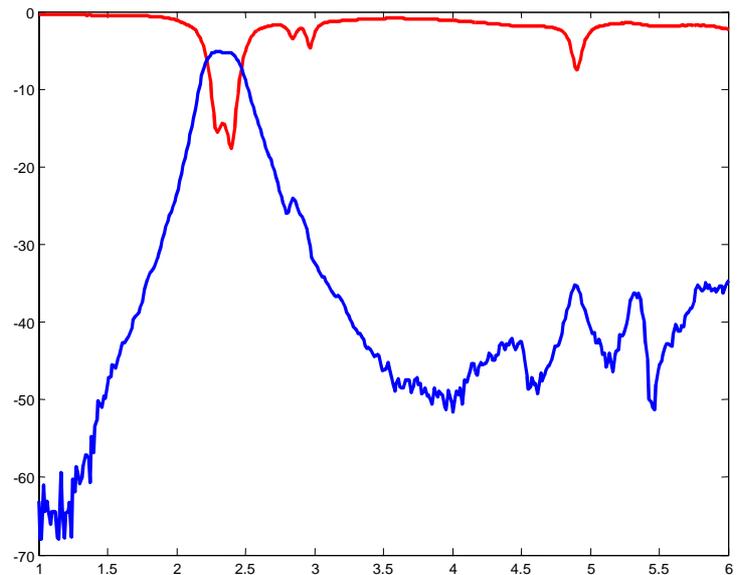
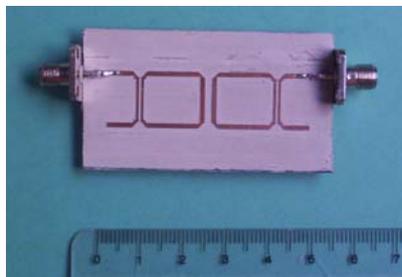


Figura 6: Filtro de anillos con estructuras *spurline* en su interior y su respuesta.

De igual forma que para el caso de la introducción de las estructuras de salto de impedancia, se estudiaron los casos de introducción de los filtros *spurline* en cascada y en el interior de los anillos. Los resultados obtenidos fueron correctos y dieron lugar a una publicación internacional [Gri01].

• UTILIZACIÓN DE ELEMENTOS ACTIVOS Y FILTROS SINTONIZABLES

En el capítulo 4 de la tesis se realizó un estudio destinado a la obtención de filtros sintonizables. Esta aplicación se basa en la introducción en el anillo de capacidades variables. Se comprobó como el efecto de estas capacidades depende del tipo de incidencia sobre la capacidad. Este efecto permite sintonizar una banda pasante de la estructura de anillos acoplados. En este mismo apartado del capítulo 4 se pudo comprobar la posibilidad de mejorar el ancho de banda de rechazo de este tipo de filtros mediante la introducción de cortes selectivos en las pistas que eliminen los modos no deseados. Las respuestas del filtro para distintas capacidades se muestran en la figura 7, donde se observa la capacidad de sintonía del filtro para determinadas resonancias.

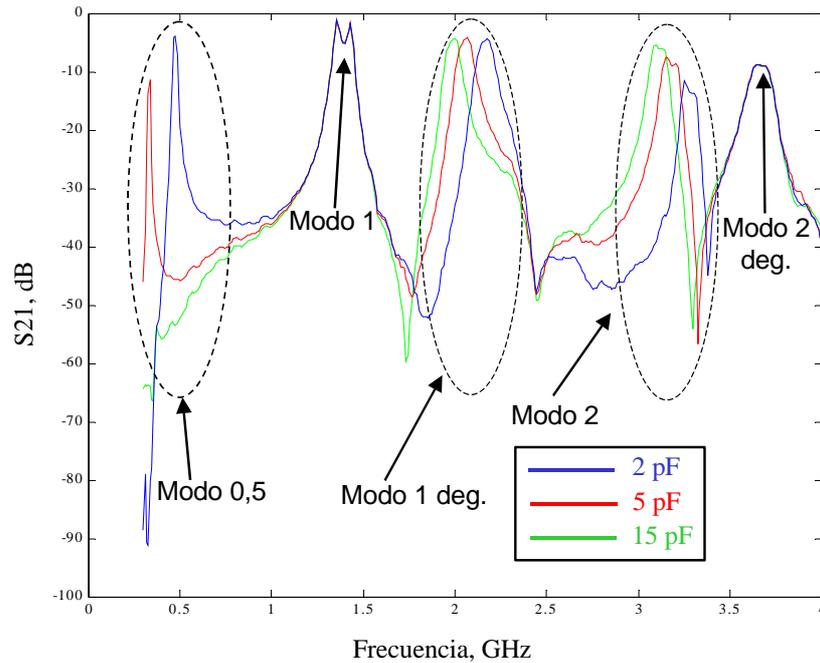


Figura 7: Respuesta del filtro sintonizable implementado mediante la introducción de capacidades variables en el interior del anillo.

En este mismo capítulo se realiza un estudio para la obtención de filtros activos. Para ello se introducen amplificadores MMIC en los anillos que, respetando unas condiciones de estabilidad, permiten amplificar la resonancia deseada. Además, se propuso esta introducción de elementos activos para la atenuación de los armónicos superiores del filtro. Para ello se propuso una estructura basada en el acoplo de dos anillos siendo uno de ellos un anillo con amplificadores MMIC en su interior. El efecto de supresión de armónicos se basa en aprovechar el desfase introducido por los amplificadores que hace que las resonancias de ambos anillos no se produzcan a las mismas frecuencias.

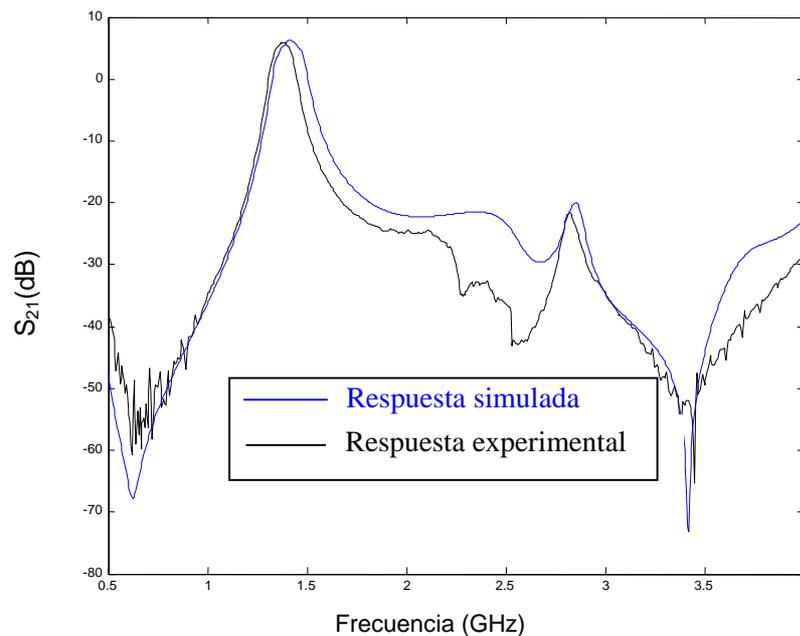


Figura 8: Respuesta del filtro activo obtenido al introducir amplificadores MMIC en el interior de uno de los anillos.

La figura 8 muestra la respuesta del filtro activo. Como se puede comprobar se obtiene una banda pasante con una ganancia media de 7 dB y a la vez, se consigue una reducción del segundo armónico en 25 dB. Este estudio de amplificadores activos basados en anillos acoplados también dio lugar a una publicación internacional [Gri99].

- **UTILIZACIÓN DE ESTRUCTURAS ELECTROMAGNETIC BANDGAP.**

Finalmente, se realizó un estudio previo de estructuras *Electromagnetic Bandgap* implementadas en tecnología *microstrip*. Este tipo de estructuras, como muestra la figura 9, se basan en el grabado en el plano de masa de la línea microstrip de un patrón periódico de círculos. Se obtuvieron una serie de conclusiones sobre la influencia de un conjunto de parámetros físicos sobre la respuesta de la estructura EBG. También se concluyó que la introducción de defectos en la periodicidad de estas estructuras EBG permite el diseño e implementación de dispositivos de microondas, tales como filtros paso banda o filtros elimina banda con múltiples bandas. En este capítulo se demuestra y aplica la teoría *Tight-Binding* para el estudio de estructuras EBG con defectos. Ese estudio dio lugar a una serie de publicaciones internacionales [Gri02a, Gri02c, Gri03b].

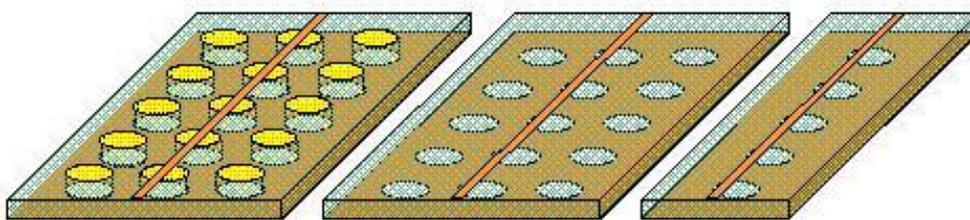


Figura 9: Evolución de las estructuras *Electromagnetic Bandgap* en tecnología *microstrip*.

En la segunda parte del capítulo 5, se demuestra la aplicación de los conceptos EBG para la supresión de armónicos. En primer lugar se comprobó como un anillo EBG presenta un desplazamiento de la segunda resonancia hacia frecuencias menores. Este efecto se ha utilizado para, mediante el acoplo entre dos anillos, uno de ellos EBG, atenuar el segundo armónico de la estructura global, utilizando la estructura que se muestra en la figura 10.

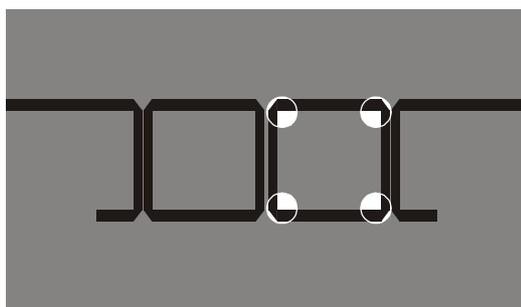


Figura 10: Estructura de anillos EBG para la supresión de armónicos.

La figura 11 muestra la respuesta del filtro cuya topología se muestra en la figura 10. Como vemos se consigue una atenuación del segundo armónico cercana a 30 dB.

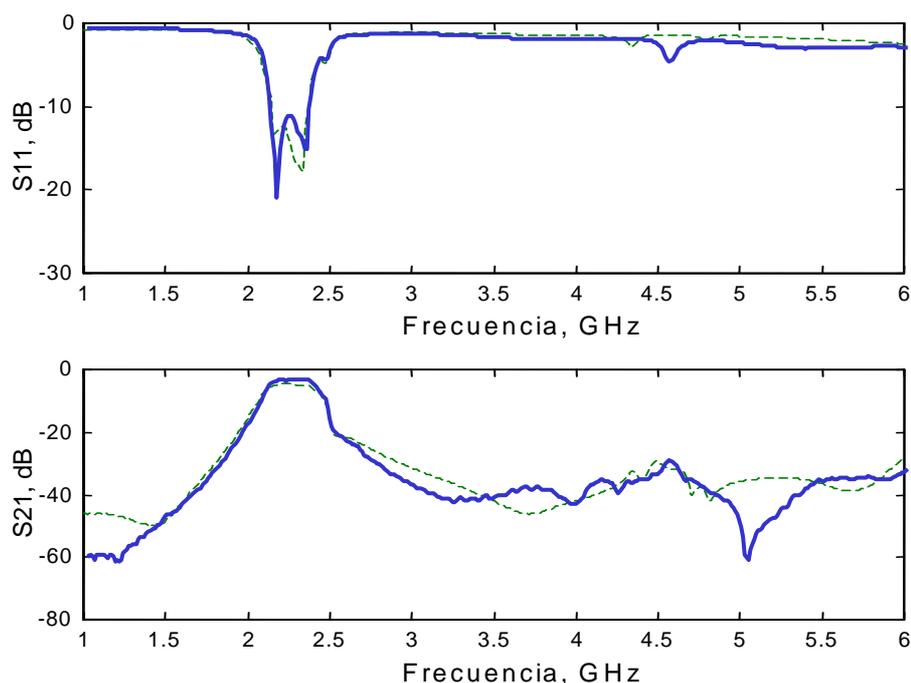


Figura 11: Respuestas de la estructura con estructuras EBG en el interior del anillo.

Este estudio dio lugar a una publicación internacional y a la participación en un congreso internacional [Gri02b,Gri03a]. Finalmente, el mismo efecto se consigue con estructuras de grabado no periódicas y de mayor simplicidad como las denominadas *Defected Ground Structures*. Los resultados obtenidos dieron lugar a una nueva publicación y a la participación en un congreso [Gri03c, Gri03d].

Finalmente y a modo de resumen, la tabla 1 muestra una comparativa de las propiedades y posibles inconvenientes de las técnicas de eliminación de armónicos implementadas.

		ARMONICOS ATENUADOS	NLPS ¹	NLPT ²	INCONVENIENTES
Control modos de acoplo		2º, aunque se puede ajustar para eliminar armónicos superiores. Técnica complementaria al resto.	>25 dB	-	Incremento de la longitud de líneas y finales abiertos.
saltos de impedancia	In	Junto con la técnica de control de modos de acoplo, se ha conseguido eliminar el 2º y 3º.	30 dB	>30 dB	Complicación de diseño y necesidad de líneas estrechas.
	Out	2º, aunque depende de las características de filtro paso bajo.	32 dB	-	Aumento del tamaño total.
Filtros spur-line	In	2º	28 dB	-	Necesidad de gaps estrechos. Dificultad de fabricación.
	Out	2º, aunque depende de las características de filtro diseñado.	30 dB	-	
Introducción de cortes		Depende de la posición, todos los pares o todos los impares.	>20 dB	-	Aparecen modos medios.
Elementos activos		Se ha podido reducir el nivel de 2º y 3º modo.	24 dB	25 dB	Necesidad de añadir líneas adicionales.

¹ NLPS: Nivel del segundo armónico respecto al fundamental conseguido experimentalmente.

² NLPT: Nivel de tercer armónico respecto al fundamental conseguido experimentalmente.

Estructuras EBG	In	2º, aunque depende de las características de los <i>bandgaps</i> .	20 dB	-	Perturbación del plano de masa. Dificultad de fabricación.
	Out	2º, aunque depende de la frecuencia central de los <i>bandgaps</i> generados.	25 dB	-	Aumento del tamaño total.
Estructuras DGS	In	Depende de las características del DGS, aunque se ha utilizado para eliminar el 2º.	20 dB	-	Perturbación del plano de masa. Aparición de picos debidos a las distintas resonancias de los anillos.
	Out	2º, aunque depende de la frecuencia central de los <i>notches</i> generados.	25 dB	-	Aumento del tamaño total.

Tabla 1: Comparativa entre las distintas técnicas de atenuación de armónicos

3. Méritos de la tesis

El trabajo llevado a cabo durante la realización de este estudio ha dado lugar a una serie de contribuciones originales que se detallan a continuación.

3.1. Contribuciones originales en revista internacional y citas

Publicaciones estructuras microstrip

[Mar98] J.Marti, A.Griol, “Harmonic suppressed microstrip multi-stage coupled ring bandpass filters”, *Electron. Lett.* vol. 34, no. 22, pp. 2140-2141, 1998.

[Gri99] A. Griol, J.Marti, “Microstrip multistage coupled ring active bandpass filters with harmonic suppression”, *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 7, pp. 575-576, 1999.

[Gri01] A. Griol, J. Marti, L. Sempere, “Microstrip multistage coupled ring bandpass filters using spur-line filters for harmonic suppression”, *Electron. Lett.*, Vol.37, No.9, pp. 572-573, 2001.

[Gri03a] A. Griol, D. Mira, A. Martinez, J. Marti, J.L. Corral, “Microstrip Multistage Coupled Ring Bandpass Filters Using Photonic Bandgap Structures For Harmonic Suppression”, *Electron. Lett.*, Vol.39, No.1, pp. 68-70, 2003.

[Gri03b] A. Griol, D. Mira, A. Martinez, J. Marti, J.L. Corral, “Multiple Frequency Photonic Bandgap Microstrip Structures Based on Defects Insertion”, *Microwave and Optical Tech. Lett.*, Vol.36, No.6, pp. 479-481, 2003.

[Gri03c] A. Griol, D. Mira, A. Martinez, J. Marti, J.L. Corral, “Harmonic Suppression in Microstrip Multistage Coupled Ring Bandpass Filters Using Defected Ground Structures”, *Microwave and Optical Tech. Lett.*, Vol.36, No.6, pp. 351-354, 2003.

[Gri04] A. Griol, D. Mira, J. Marti & J.L. Corral. “Microstrip Side-Coupled Ring Bandpass Filters with Mode Coupling Control for Harmonic Suppression”, *Electronics Letters* vol. 40, no. 15, 22nd July, 2004, p. 943-945

Algunas de estas publicaciones han sido referenciadas en otros trabajos. Algunos de estos artículos que nos referencian se citan a continuación:

[Que01] C. Quendo E. Rius, C. Perso, y M. Ney, “Integration of Optimized Low-Pass Filters in a Bandpass Filter for Out-of-band Improvement”, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 49, no. 12, pp. 2376-2383, 2001.

[Par01] H-J. Park, J-Y. Park, J-C. Lee, J-H. Kim, B. Lee, N-Y. Kim, “A new Harmonic-suppressed tunable microstrip ring bandpass filter”, *Microwave and Optical Tech. Lett.*, 2001.

[Sem01] E. Semouchkina, W. Cao, R. Mitra y W. Yu, “Analysis of resonance processes in microstrip ring resonators by the FDTD method”, *Microwave and Optical Tech. Lett.*, Vol. 28, no.5, pp.312-321, 2001.

[Hsi02] L-H. Hsieh, K. Chang, “Dual-mode quasi-elliptic-function bandpass filters using ring resonators with enhanced-coupling tuning stubs”, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 50, no. 5, pp. 1340- 1345, 2002.

[Hsi03] L-H. Hsieh, K. Chang, “Low-loss and high selectivity bandpass filter with harmonic suppression and piezoelectric”, *Electron. Lett.*, Vol. 39, no. 10, 2003.

Como se ha comentado, la investigación de estructuras EBG en dos dimensiones mediante la utilización de estructuras periódicas basadas en barras de alúmina también ha dado lugar a una serie de publicaciones que aunque no han sido objeto directo de la investigación de esta tesis, si se deben incluir dentro de los resultados de las líneas abiertas durante la realización de la tesis. Estas publicaciones se citan a continuación:

Publicaciones estructuras EBG-2D

[Cue03] F. Cuesta, A. Griol, A. Martínez, J. Martí, “Experimental demonstration of photonic crystal directional coupler at microwave frequencies”, *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 5, pp. 455-456, 2003.

[Mar03a] A. Martinez, A. Griol, P. Sanchis, J. Marti, “Mach-Zehnder interferometer employing coupled-resonator optical waveguides”, *Optics Lett.*, vol. 28, no. 6, pp. 405-407, 2003.

[Mar03b] A. Martinez, F. Cuesta, A. Griol, D. Mira, J. Garcia, P. Sanchis, R. Llorente, J. Marti, “Photonic-crystal 180° power splitter based on coupled-cavity waveguides”, Applied Physics Lett., Vol. 83, no. 16, 2003.

[San03] P. Sanchis, J. Garcia, A. Martinez, F. Cuesta, A. Griol, J. Marti, “ Analysis of adiabatic coupling between photonic crystal single-line-defect and couple-resonator optical waveguides”, Optics Lett., vol. 28, no. 20, 2003.

3.2. Contribuciones originales en congresos internacionales

[Gri02a] A. Griol, D. Mira, A. Martinez, J. Marti, “Applications of 1D Photonic Bandgap (PBG) Structures with Defects to Microstrip Circuits”, Proceedings Progress in Electromagnetic Research Symposium- PIERS 2002, Boston (EEUU), 2002.

[Gri02b] A. Griol, D. Mira, J. Marti, J.L Corral, “Microstrip Multistage Coupled Ring Bandpass Filters using Photonic Bandgap (PBG) Structures for Harmonic Suppression”, Proceedings Progress in Electromagnetic Research Symposium- PIERS 2002, Boston (EEUU), 2002.

[Gri02c] A. Griol, D. Mira, A. Martinez, J. Marti, “Circuit Applications Based on 1D Photonic Bandgap (PBG) Structures with Defects”, Proceedings Progress in Electromagnetic Research Symposium- PIERS 2002, Boston (EEUU), 2002.

[Gri03d] A. Griol, D. Mira, J. Marti, “Microstrip Multistage coupled ring bandpass filters using defected ground structures for harmonic suppression”, conferencia de Dispositivos Electrónicos 2003, Calella de Mar, 2003.

[Gri03e] A. Griol, D. Mira, J. Marti, J.L. Corral, “Harmonic suppression technique based on mode coupling control in microstrip multistage coupled ring bandpass filters”, IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2004, Fort-Worth (EEUU), 2004.

3.3. Aplicabilidad práctica e interés industrial del trabajo

Como se ha podido comprobar los resultados de esta tesis son componentes físicos que han sido comprobados experimentalmente y que por tanto, pueden aplicarse directamente al mercado en aplicaciones variadas, como por ejemplo comunicaciones móviles, aplicaciones de distribución de señales de vídeo y datos (LMDS o CaTV) e incluso aplicaciones de comunicaciones inalámbricas vía satélite.

Se ha de comentar que los filtros obtenidos han formado parte de montajes prácticos de proyectos europeos del grupo de investigación donde fue realizada la tesis, como Obanet y Gandalf.