Antena de microcinta con estructura híbrida metamaterial para 2.4 GHz

Microstrip antenna with metamaterial hybrid structure for 2.4 GHz

Ailyn Estévez Hidalgo^{1*} Francisco Marante Rizo¹

Recibido 14 de febrero de 2017, aceptado 21 de enero de 2018

Received: February 14, 2017 Accepted: January 21, 2018

RESUMEN

El diseño e implementación de una antena de microcinta con inserción en la línea de alimentación de una estructura metamaterial, la cual vista desde una perspectiva híbrida combina resonadores de anillos divididos (SRR) y resonadores de anillos divididos complementarios (CSRR), para la banda de 2.4 GHz es presentado en este trabajo. Los parámetros geométricos de la estructura son variados con el fin de evaluar la respuesta de frecuencia de resonancia y el patrón de radiación de la antena propuesta. La estructura metamaterial adyacente a la línea de alimentación produce un aumento considerable del ancho de banda con respecto al de la antena convencional, causado por el solapamiento de las bandas de frecuencias producidas por el parche radiante y la estructura zurda. El ancho de banda de la antena con inclusión metamaterial se incrementa al doble del esperado en la antena de parche original, de 2.74% hasta valores que oscilan entre 4.55% y 6%, al precio de la degradación de la ganancia, pero sin afectar considerablemente el acoplamiento y manteniendo una adecuada directividad. Simulación y resultados medidos son presentados y muestran que la estructura metamaterial propuesta, asociada a la línea de transmisión de las antenas de microcinta, es una manera novedosa de utilizar SRR y CSRR que permite suprimir la limitante de estrecho ancho de banda.

Palabras clave: Antenas de microcinta, metamaterial, resonador de anillos divididos, resonador de anillos divididos complementarios, ancho de banda.

ABSTRACT

The design and implementation of a microstrip antenna with an insertion in the feed line of a metamaterial structure, which from a hybrid perspective combines split ring resonators (SRR) and complementary split ring resonators (CSRR), for the band of 2.4 GHz is presented in this paper. The geometrical parameters of the structure are varied in order to evaluate the response of resonance frequency and the radiation pattern of the proposed antenna. The metamaterial structure adjacent to the power line produces a considerable increase in the bandwidth concerning to that of the conventional antenna, caused by the overlapping of the frequency bands produced by the radiant patch and the left-handed structure. The bandwidth of the antenna with metamaterial inclusion is increased to twice the expected in the original patch antenna, from 2.74% to values ranging from 4.55% to 6%, at expenses of gain degradation, but without significantly affecting the coupling, and maintaining a suitable directivity. Simulation and measured results are presented and show that the proposed metamaterial structure associated with the transmission line of microstrip antennas is a novel way of using SRR and CSRR, which allows suppressing the narrow bandwidth constraint.

¹ Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No. 11901, e/ Ciclovía y Rotonda Marianao. C.P. 19390. Ciudad de La Habana, Cuba. E-mail: ailyn.90@gmail.com; marante@electric.cujae.edu.cu

* Autor de correspondencia

Keywords: Microstrip antennas, metamaterial, split ring resonator, complementary split ring resonator, bandwidth.

INTRODUCCIÓN

Desde la invención de la antena de microcinta, la demanda por su aplicación se ha incrementado rápidamente debido a las propiedades de bajo perfil, peso ligero, compacta estructura de montaje y fabricación fácil e integrable con dispositivos de estado sólido [1], lo cual hace que se reduzcan los costos para su implementación, aunque presentan como limitante su característica de estrecho ancho de banda.

Avances en la tecnología reciente han aumentado considerablemente el ancho de banda [2-6], comparado con las antenas de microcinta tradicionales, siendo los metamateriales hoy en día, debido a sus características, de gran interés para su aplicación en estructuras planas [7-8]. Estos materiales artificiales en la actualidad son objeto de un estudio más esforzado y se caracterizan por poseer partes reales de permitividad eléctrica y permeabilidad magnética simultáneamente negativas, al menos en un estrecho margen de frecuencias, dando lugar a índices de refracción negativos [9]. Por ello se les llama materiales doble negativos (DNG: Double Negative, del inglés) o materiales con índice negativo (NIM: Negative Index Media, del inglés). Adicionalmente, estos materiales también son referidos como zurdos (LHM: Left-Handed Media, del inglés), pues en ellos las ondas electromagnéticas se propagan en dirección contraria a la propagación de la energía [10].

La idea de los materiales zurdos (LHM), se propuso teóricamente por primera vez en 1968, fecha en la que el físico ruso Víctor Veselago especulaba con la posible existencia de LHMs y predecía sus principales propiedades [11]. Habría que esperar treinta años desde el artículo de Veselago hasta que se produjera el siguiente hito en la investigación de los metamateriales. A finales de los 90, Pendry propone una estructura de hilos finos que presentaba permitividad eléctrica negativa y posteriormente, una partícula denominada resonador de anillos divididos (SRR: Split Ring Resonator, del inglés) [12], que presentaba permeabilidad magnética negativa. En el 2000 Smith combina los anillos SRR y los hilos

metálicos paralelos para fabricar la primera estructura LHM de la historia [13].

Aunque en los años siguientes se siguió investigando acerca de las propiedades de los LHMs realizados con SRRs, estos presentan la desventaja de tener grandes pérdidas, ser voluminosos y de funcionar en bandas de frecuencias muy estrechas, lo que dificultaba su uso en aplicaciones de microondas. Para evitar estas desventajas algunos investigadores propusieron las llamadas líneas de transmisión metamaterial (MTM-TL) [14] que inicialmente no se basan en efectos resonantes, tienen pocas pérdidas y pueden trabajar en una banda ancha de frecuencias, así como en configuración planar. Con el progreso rápido de los metamateriales, otra alternativa hecha de resonadores de anillos divididos complementarios (CSRR: Complementary Split Ring Resonator, del inglés) y gaps capacitivos fue propuesta por Falcone [15], abriendo el camino a la investigación de las líneas de transmisión compuestas zurdas/diestras (Composite Right/Left-Handed Transmission Line, CRLH TL, del inglés) [16] de tipo resonante.

Desde su descubrimiento, los metamateriales han sido involucrados en diversos campos de la ciencia y la ingeniería. Una de las áreas específicas que mayor interés ha tenido en su implementación ha sido el de las antenas, radio propagación y comunicaciones inalámbricas [17], ofreciendo una variedad de técnicas para mejorar las pérdidas de retorno, la ganancia [5, 9], la directividad, e incluso reducir el tamaño de la antena de parche [18].

Este trabajo explica como la inserción de una estructura híbrida metamaterial asociada a la línea de transmisión de una antena de microcinta tipo parche provoca un aumento considerable del ancho de banda, lo cual constituye una ventaja para su utilización y contribuye a suprimir de manera sencilla y económica este problema característico de las antenas de microcinta. Para analizar el comportamiento de la antena propuesta se utiliza el método de elementos finitos (FEM) en el software de simulación HFSS, el cual permite realizar una caracterización completa y encontrar las mejores dimensiones geométricas para el

diseño. Una concordancia satisfactoria entre el diseño simulado propuesto y los resultados experimentales reportados es mostrada.

ANÁLISIS TEÓRICO

Investigaciones científicas y experimentales publicadas en revistas de alto impacto [8, 19, 20] demuestran que la ubicación de estructuras metamateriales asociadas a la línea de transmisión en tecnología de microcinta producen un incremento del ancho de banda y bajas pérdidas de transmisión [21-22], para ello hay que tener en cuenta la configuración de los campos en la línea de microcinta. La característica distintiva de los LHM es que para ciertas bandas de frecuencia presentan índice de refracción negativo con modos propagativos posibles [19]. Este fenómeno se presenta solamente si ambos parámetros de permeabilidad magnética (μ) y permitividad eléctrica (ϵ), dentro de dichas bandas de frecuencias son negativos simultáneamente.

En [21] se ha visto cómo implementar líneas de transmisión con comportamiento zurdo basadas en celdas combinadas de SRRs y strips inductivos (en tecnología coplanar) o su versión complementaria, formada por CSRRs y gaps capacitivos (en tecnología microstrip). Generalmente, para aumentar el ancho de banda de los elementos radiantes en tecnología de microcinta se utiliza una de estas dos variantes en la antena [5-6]. En [6] la antena es construida usando una estructura compuesta por CSRRs en forma de anillos circulares grabados en el parche y aberturas en forma de tiras (strip gaps) en el plano de tierra, la cual adecuadamente excitada provee un medio con comportamiento zurdo (LHM). Sin embargo, tomando en cuenta que en la línea de transmisión es donde ocurre una fuerte concentración de los campos eléctrico y magnético, en este trabajo se propone ubicar una estructura híbrida compuesta por el SRR y su complementario CSRR en dicha línea y utilizar esta configuración de línea de transmisión metamaterial para alimentar una antena de microcinta de tipo parche.

Los SRR y CSRR tienen un comportamiento dual, mientras un SRR, para conseguir el efecto resonador deseado, debe ser alimentado por el flujo de un campo magnético que lo atraviese axialmente; un CSRR precisa ser excitado por el flujo de un campo eléctrico que también lo atraviese axialmente. Observando

bien los campos eléctricos y magnéticos de distintos tipos de línea se puede observar que es posible alimentar SRR a partir de líneas microstrip [23]. Los SRRs producen una permeabilidad magnética negativa al ser excitados con líneas de campo magnético normales al plano que contiene a los anillos. Una línea de microcinta cargada con SRR, como ilustra la Figura 1, es un medio con permeabilidad negativa, y por lo tanto presenta una característica de banda de rechazo. Para mejorar el acoplamiento, la distancia entre la línea y los anillos debe ser tan pequeña como sea posible.

Figura 1. Línea de microcinta cargada con resonador de anillo dividido (SRR). [20]

A fin de obtener el comportamiento zurdo, una estructura que introduce permitividad efectiva negativa en un determinado rango de frecuencias debe ser añadida. Utilizando el principio de Babinet [15, 21], puede concluirse que, en condiciones ideales en las que la conductividad del metal es infinita y su grosor despreciable, el CSRR tiene una frecuencia de resonancia idéntica a la de un SRR con las mismas dimensiones, pero en lugar de ser excitado por un campo magnético, lo es mediante un campo eléctrico en dirección axial. En tecnología de microcinta, si los CSRRs son grabados en el plano tierra debajo de la línea se logra una excitación adecuada, pues las líneas de campo eléctrico inciden perpendicularmente con valores máximos y los CSRRs excitados por campo eléctrico axial producen permitividad efectiva negativa [19].

Enfoque Híbrido: combinación de anillos SRR con CSRR.

El enfoque híbrido combina estructuras de otros dos enfoques: SRRs y CSRRs de un lado y gaps y strips por otra parte. Generalmente, SRRs y gaps proporcionan permeabilidad negativa, mientras CSRRs y strips proporcionan permitividad negativa. Usando varias combinaciones de estas estructuras,

los metamateriales híbridos pueden ser diseñados. Se propone diseñar una unidad de celda como combinación de SRR y CSRR, Figura 2.

Figura 2. Unidad de celda compuesta por SRR y CSRR. Se muestran ambas capas conductoras: vista superior (negro) y fondo (gris). [20]

En la Figura 2 se muestra una unidad de celda compuesta por un anillo resonante adyacente a la línea de microcinta con su complementario grabado en el plano tierra. Como habíamos explicado es importante tener en cuenta la distribución de campos magnéticos y eléctricos, ya que el campo eléctrico axial fuertemente confinado debajo de la tira conductora excita a los CSRR mientras que el desbordamiento del campo magnético estimula los SRR colocados al lado de la línea de alimentación. Ubicar los anillos adyacentes a la tira conductora no es la configuración más adecuada [7] debido a que se obtienen valores de campo incidente menores, sin embargo, se obtiene el comportamiento LHM deseado.

El experimento consiste en alimentar una antena de parche con una línea de transmisión cargada con la estructura metamaterial de enfoque híbrido, que se basa en la combinación de SRRs y CSRRs, para obtener mejores resultados en los parámetros de rendimiento de la antena.

Diseño de la antena de parche.

Inicialmente, siguiendo el procedimiento descrito en [24] y mediante la simulación en el software HFSS, el diseño obtenido presenta un parche radiante de 35 mm de ancho por 29.6 mm de largo empleando un sustrato de fibra de vidrio FR-4 con permitividad eléctrica relativa de 4.2, grosor de 1.5 mm y dimensiones de 97 x 91.6 mm. El plano tierra tiene las mismas dimensiones del dieléctrico, excepto

por su espesor, que al igual que el parche es de 0.035 mm (cobre). Como la impedancia de entrada de la antena decrece gradualmente, desde un máximo en los bordes del parche hasta un mínimo en el centro, la línea de alimentación es conectada relativamente cerca en un extremo ($y_0=8.2$ mm). A continuación, en la Figura 3 se muestra la representación de la antena y seguidamente la Tabla 1 que expone sus dimensiones.

Figura 3. Antena de parche para 2.44 GHz.

Tabla 1. Parámetros y dimensiones de la antena de parche original.

Parámetros	Dimensiones (mm)
L: largo del parche	29.6
W: ancho del parche	35
l: largo de la línea	31
w: ancho de la línea	3
y_0 : largo de la ranura	8.2
x_0 : ancho de la ranura	1.1
Plano de tierra de cobre	97 x 91.6 mm Grosor=0.035 mm
Sustrato de fibra de vidrio FR-4 ($\epsilon=4.2$, $\tan\delta=0.02$)	97 x 91.6 mm Grosor=1.5 mm

En la Figura 4 se muestra las pérdidas de retorno contra la frecuencia de resonancia. Se obtienen mínimas pérdidas de retorno de -22 dB a la frecuencia de 2.44 GHz, centro de la banda de trabajo. En este diseño se obtiene un ancho de banda de 68 MHz

(2.74%), reafirmando así la característica de banda estrecha que presenta este tipo de antena.

Figura 4. Parámetro S_{11} del parche rectangular para 2.44 GHz.

El acoplamiento de la antena con la línea de alimentación reveló un resultado positivo para una inserción de la ranura de 8.2 mm; la parte real de la impedancia es de 50.5Ω , sin embargo, la parte imaginaria de la impedancia es de -8Ω , lo cual representa una reactancia capacitiva pequeña. En la siguiente Figura se observa que la Razón de Onda Estacionaria (ROE) presenta valores por debajo de 2, criterio práctico de diseño para aplicaciones móviles.

Figura 5. ROE de la antena de parche.

Luego de analizar los resultados en la región de campo lejano se pudo observar en la Figura 6 que la antena muestra una directividad de 6 dB y una ganancia de 2.2 dB. La eficiencia de radiación es de un 42 %, relativamente baja, debido a las pérdidas provocadas por el sustrato utilizado.

Figura 6. Ganancia y Directividad de la antena de parche.

Se observa que la antena radia en la dirección del eje z y el patrón no presenta lóbulos secundarios. La relación *front-to-back* es buena, ya que la diferencia entre el lóbulo principal y el trasero es grande, lo cual indica que presenta características de radiación relevantes a pesar de la baja eficiencia de radiación. Es de destacar, que los parámetros fundamentales de radiación obtenidos revelan resultados no muy alentadores debido a las características del sustrato empleado en el diseño de la antena.

Inserción de la estructura híbrida con comportamiento LMH.

En la actualidad, existe una intensa actividad científica orientada a aumentar el ancho de banda de estas estructuras. Sin embargo, diversos investigadores, reconociendo la debilidad intrínseca de las estructuras de resonadores como medios de transmisión de banda ancha, han decidido explorar enfoques alternativos. Estos esfuerzos han tenido un éxito rotundo en el caso de los metamateriales zurdos con la introducción de la denominada “teoría de línea de transmisión para metamateriales” [25]. Por tanto, con el fin de obtener mejores resultados, principalmente aumentar el ancho de banda y analizar el comportamiento de la antena de parche rectangular, se insertan celdas metamateriales de enfoque híbrido asociadas a la línea de alimentación. A continuación, se muestra en la Figura 7 la representación esquemática de la estructura.

Figura 7. Representación esquemática de la configuración híbrida LMH (inclusiones CSRR en el plano de masa + SRR adyacentes a la tira conductora).

Con un breve acercamiento a las posibilidades de un enfoque híbrido, específicamente la combinación

de anillos cuadrados SRR con CSRR, se realiza un análisis del comportamiento de celdas con dicha composición en el diseño original de una antena de parche rectangular. En la Figura 8 se presenta la antena propuesta.

Figura 8. Antena de microcinta para 2.44 GHz con configuración híbrida LMH (inclusiones CSRR en el plano de masa + SRR adyacentes a la tira conductora).

Con el software de simulación se optimizaron las dimensiones mediante el proceso de parametrización de las variables físicas que caracterizan la estructura y los valores más aceptados correspondientes a la estructura metamaterial son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros y dimensiones de la estructura híbrida zurda propuesta.

Parámetros SRR=CSRR	Dimensiones (mm)
c1: lado del anillo cuadrado externo 1.	7
w: ancho de los anillos complementarios	0.4
t: distancia entre los anillos externo e interno	0.4
g: ancho del “gap”	0.5
d: distancia entre las celdas	0.5
a: distancia entre el SRR y la línea.	0.5

Se analiza como se observa en la Figura 9, el comportamiento del espacio entre los SRRs y la línea de transmisión -denominado por la variable “a”-, concluyendo que cuando no hay espacio entre ellos ($a=0\text{mm}$) se obtienen los mejores resultados en cuanto a ancho de banda y ganancia.

Figura 9. Comportamiento del ancho de banda y la ganancia en función del espacio entre los SRRs y la línea de transmisión.

En la Figura 10 se muestra como a medida que aumenta la separación entre los SRR cuadrados y la línea de transmisión, mejoran las pérdidas de retorno al precio de reducir el ancho de banda. Específicamente, para una separación de 0.5 mm, se obtiene un mínimo de pérdidas de retorno -33 dB para 2.46 GHz, con un ancho de banda correspondiente de 112 MHz (4.55%).

Figura 10. Comportamiento de las pérdidas de retorno en función del espacio entre los SRRs y la línea de transmisión.

Se puede observar en la Figura un pequeño corrimiento de la frecuencia de resonancia respecto a la antena original, por lo que habría que optimizar las dimensiones de la antena y de la estructura para que el mínimo de pérdidas de retorno caiga nuevamente en 2.44 GHz, centro de la banda de trabajo. Finalmente, se escoge el diseño de mayor ancho de banda, para el cual la separación “a” es 0 mm.

A continuación, se presenta en la Figura 11 que el diseño final obtenido tiene mínimas pérdidas de retorno en las frecuencias de 2.44 GHz, dentro de la banda que abarca de 2.4 GHz hasta 2.485 GHz, y 2.49 GHz. El ancho de banda que se obtiene es de aproximadamente 144 MHz (5.8%), revelando un aumento significativo en comparación con la antena convencional sin estructuras zurdas.

Figura 11. Parámetro S_{11} de la antena de microcinta para 2.44 GHz con configuración híbrida LMH.

En la siguiente Figura se muestra el parámetro de impedancia de la antena, el cual muestra buen acoplamiento en toda la banda de trabajo obteniéndose valores próximos a 50Ω en la parte real, aunque la parte imaginaria oscila entre -7Ω y 9Ω . Seguidamente se muestra la ROE, que presenta valores por debajo de 2 en todo el rango de frecuencia.

Figura 12. Parte real e imaginaria de la impedancia del parche rectangular para 2.44 y 2.49 GHz.

Figura 13. ROE de la antena de parche con estructura híbrida compuesta por SRR y CSRR.

En la Figura 14 se muestra el patrón de directividad de la antena de parche con la inserción de la estructura híbrida compuesta por SRR y CSRR. En la antena de estudio se logra una directividad de 6 dB, por lo que no se afecta respecto al diseño original.

Figura 14. Directividad de la antena de parche con estructura híbrida.

En la Figura 15 y 16 se observa la eficiencia de la antena y el patrón de ganancia en 3D respectivamente.

Figura 15. Eficiencia de la antena de parche con estructura híbrida compuesta por SRR y CSRR.

Figura 16. Diagrama de ganancia en 3D de la antena de parche con estructura híbrida.

La ganancia disminuye a 1.45 dB y la eficiencia decae a un 34 % como consecuencia de las pérdidas que se introducen en los planos conductores debido a la inserción de la estructura híbrida con comportamiento LHM.

Para mostrar el comportamiento de la permeabilidad y permitividad de la estructura y validar que estas poseen valores negativos en la región del espectro de interés se utiliza el método presentado en [26]; dicho procedimiento es un análisis matemático [27-28] realizado con el fin de probar el carácter zurdo de la estructura metamaterial. El análisis matemático se realizó con el apoyo del editor de ecuaciones presente en el software de simulación AWR Design Environment, el cual permite realizar los cálculos a partir de los parámetros S, que se extraen de la estructura simulada en el HFSS. La Figura 17 muestra los resultados obtenidos en el software de simulación AWR.

Figura 17. Comportamiento de ϵ_{eff} (erf22), μ_{eff} (mrf22) y el índice de refracción (nrf22) en la estructura metamaterial.

Puede observarse que los parámetros ϵ_{eff} y μ_{eff} y el índice de refracción se mantienen estables con valores negativos en un amplio rango de frecuencias, de 1.426 hasta 2.447 GHz, lo cual demuestra su carácter LHM. Los parámetros constitutivos de algunos de los materiales encontrados en la naturaleza que logran presentar valores negativos, lo hacen en rangos de frecuencias muy pequeños, lo cual hace que el cambio de signo tenga una pendiente abrupta; este tipo de pendiente se puede observar en la simulación de la estructura propuesta. Por último, en la región de frecuencias donde los parámetros constitutivos cambian sus signos alternadamente, lo cual lleva a que el índice de refracción sea complejo y aparezcan ondas evanescentes, aumentan considerablemente las pérdidas por lo que no hay transmisión de señal.

Adicionalmente, la Figura siguiente muestra la respuesta en frecuencia de los parámetros S_{11} y S_{21} de la línea de transmisión cargada con la estructura metamaterial propuesta en la que puede verse la banda de paso, correspondiente al rango de frecuencias para el cual la estructura presenta un valor negativo de permitividad dieléctrica efectiva y permeabilidad magnética efectiva, consiguiendo un medio que presenta ambas magnitudes, ϵ y μ simultáneamente negativas.

Figura 18. Pérdidas de inserción y de retorno simuladas para la estructura LHM propuesta.

RESULTADOS

En la Figura 19 se muestra la antena construida, la cual fue optimizada mediante la simulación para un diseño final de 45 mm de ancho x 68.7 mm de largo, debido a la tendencia actual que constituye una necesidad, de miniaturizar el diseño propuesto sin afectar los resultados obtenidos en la simulación para reducir los costos de implementación. Es importante destacar que las dimensiones del parche con la alimentación se mantienen idénticas, solo se

modificó la dimensión del plano tierra y por tanto del sustrato.

a)

b)

Figura 19. Antena implementada. a) Vista superior
b) Vista inferior.

En el analizador vectorial de redes se presentan las pérdidas de retorno para la banda de frecuencias de 2.4 GHz. Como se muestra en la Figura 20 se toma como criterio los valores por debajo de los -10 dB de 2.39 GHz hasta 2.54 GHz, alcanzando un valor mínimo de -20 dB en 2.49 GHz. El prototipo de antena de parche con la inserción de una estructura híbrida zurda concuerda con los valores obtenidos en el software de simulación HFSS.

Figura 20. Parámetro S_{11} de la antena de microcinta con estructura híbrida construida.

La antena implementada presenta un ancho de banda de 150 MHz (6%), el doble del alcanzado en la antena de parche convencional cubriendo la banda completa de frecuencias de 2.4 GHz. A continuación, se muestra la Razón de Onda Estacionaria (ROE).

Figura 21. ROE de la antena implementada para valores entre 2.39 y 2.54 GHz.

La antena construida muestra valores de ROE en torno a 2 para la banda de frecuencias de interés, lo cual demuestra el buen acoplamiento de la alimentación a la antena que proporciona máxima transferencia de potencia.

Se demuestra la correspondencia de los resultados alcanzados en la simulación con las mediciones del prototipo en la banda de frecuencias de 2.4 GHz. Hemos mostrado que la posibilidad de aumentar el ancho de banda en antenas de microcinta usando una línea de transmisión cargada con la estructura híbrida propuesta, sin afectar considerablemente los parámetros de radiación, es una manera novedosa de utilizar las estructuras resonadoras de anillos divididos (SRR y CSRR).

CONCLUSIONES

Se concluye que la antena de parche con línea de transmisión metamaterial presentada sobre la base de un enfoque híbrido de resonadores de anillos divididos y sus complementarios representa una solución para el incremento del ancho de banda, ya que se incrementa al doble el ancho de banda respecto a la antena convencional, de 2.78% hasta valores que oscilan entre 4.55% y 6%. Como se observó en la antena propuesta hay un incremento del ancho de banda al precio de la disminución de la ganancia, lo cual implica que la eficiencia decae. Los demás

parámetros se mantienen casi inalterables: buen acoplamiento, pequeños valores de ROE (en torno a 2) y apropiada directividad.

Es importante destacar el hecho de buscar alternativas como por ejemplo la utilización de otro sustrato dieléctrico con menores pérdidas, o el diseño de un arreglo de antenas que permita mejorar los valores de ganancia y eficiencia alcanzados. La directividad es un parámetro que se mantuvo inalterable.

Los resultados contribuyen al éxito de las antenas de microcinta en diversas aplicaciones como comunicaciones celulares terrestres, comunicaciones móviles de satélites, sistemas de satélite de difusión directa, sistema de posicionamiento global, sensor remoto e hipertermia, aeronaves, misiles, cohetes y naves espaciales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo ofrecido por todos los que han hecho posible la realización de esta investigación, en especial a la MSc. María del Pilar Eckenique Barbero, MSc. Grettel Rodríguez Trujillo, Dr.C.T. Miguel Eduardo Borrego Corona y al Laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

REFERENCIAS

- [1] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl and A. Ittipiboon. "Microstrip Antenna Design Handbook". 2001 Artech House, INC. ISBN 0-89006-513-6. URL:<http://ftp.yazd.ac.ir/FTP/E-Book/Electronic/Communication/Microstrip/Antennas/Microstrip/Antenna/Design/Handbook.pdf>
- [2] Armando J. Barrera Díaz. "Aplicación de los metamateriales en el diseño de antenas". Tesis de diploma. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). La Habana, Cuba 2010. URL: <http://biblioteca.cujae.edu.cu>.
- [3] Le-Wei Li, Ya-Nan Li and Juan R. Mosig. "Design of a Novel Rectangular Patch Antenna with Planar Metamaterial Patterned Substrate". IWAT. 2008. DOI: 10.1109/IWAT.2008.4511305
- [4] José Manuel Fernández González. Aplicación de estructuras metamateriales en el diseño, análisis y prototipado de antenas planas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2008. URL: http://www.upm.es/observatorio/vi/index.jsp?pageac=actividad.jsp&id_actividad=68737
- [5] Le-Wei Li, Ya-Nan Li, Tat Soon Yeo, Juan R. Mosig and Olivier J. F. Martin. A broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna. Applied Physics Letters. 96, 164101 (2010). DOI: 10.1063/1.3396984. URL:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3396984>
- [6] X. S. Li, F. M. Lin and D. L. Wu. "Metamaterial Based Patch Antenna with Broad Bandwidth and Simple Structures," PIERS Proceedings, Guangzhou, China, August 25–28, pp. 2478–2482. 2014. URL: <https://piers.org/piersproceedings/download.php?file=cG11cnMyMDE0R3Vhbmd6aG91fDRQNV8yNDc4LnBkZnwxNDZMTGwNDQyNDg=>
- [7] F. Falcone, F. Martín, J. Bonache, J. Baena, T. Lopetegi y M.Á. Gómez Laso. "Estructuras metamateriales en tecnología plana basadas en partículas SRR y CSRR". 30 de septiembre 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/228759555_Estructuras_metamateriales_en_tecnologia_plana_basadas_en_particulas_SRR_y_CSRR
- [8] Xu H-X, Wang G-M, Qi M-Q and Xu Z-M. Theoretical and experimental study of the backward-wave radiation using resonant-type metamaterial transmission lines. Journal of Applied Physics. Vol. 112.28. November, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4766310>
- [9] Daniel Catano-Ochoa, David E. Senior, Francisco Lopez and Erick Reyes-Vera. Performance Analysis of a Microstrip Patch Antenna loaded with an Array of Metamaterial Resonators. IEEE. 2016. DOI: 10.1109/APS.2016.7695849.
- [10] J. M. González-Arbesú, E. Úbeda and J. Romeu. "Metamateriales en microondas y antenas". BURAN diciembre 2003. URL:https://www.researchgate.net/publication/241776958_Metamateriales_en_microondas_y_antenas
- [11] V. G. Veselago. "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ." Sov. Phys.—Usp., Vol. 10, pp. 509–514. 1968. DOI: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699.

- [12] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart. "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Trans. Microw. Theory Tech. Vol. 47 N° 11, pp. 2075–2084. 1999. DOI: 10.1109/22.798002.
- [13] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz. "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," Phys. Rev. Lett.. Vol. 84, pp. 4184–4187. 2000. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>.
- [14] C. Caloz and T. Itoh. "Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH transmission line," Proc. IEEE-AP-S USNC/ URSI National Radio Science Meeting 2002. Vol. 2, pp. 412–15. 2002. DOI:10.1109/APS.2002.1016111.
- [15] F. Falcone, T. Lopetegi, M.A.G. Laso, J.D. Baena, J. Bonache, R. Marqués, F. Martín and M. Sorolla. "Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials", Phys. Rev. Lett. Vol. 93, pp. 197401. November 2004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.197401 PACS.
- [16] C. Caloz and T. Itoh. "Novel microwave devices and structures based on the transmission line approach of meta-materials", IEEE-MTT Int'l Symp. Vol. 1, pp. 195-198. Junio 2003. DOI:10.1109/MWSYM.2003.1210914.
- [17] Luis M. Castellanos, Francisco López y Erick Reyes-Vera. Metamateriales: principales características y aplicaciones. Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, [S.I.]. Vol.40 N°156, pp. 395-401. Oct. 2016. ISSN 2382-4980. DOI: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.345>.
- [18] R. O. Ouedraogo, E. J. Rothwell, A. R. Diaz, K. Fuchi and A. Temme, "Miniaturization of Patch Antennas Using a Metamaterial-Inspired Technique," IEEE Trans. Antennas Propag.. Vol. 60 N° 5, pp. 2175–2182. 2012. DOI: 10.1109/TAP.2012.2189699.
- [19] Juan Domingo Baena, Jordi Bonache, Ferran Martín, Ricardo Marqués Sillero, Francisco Falcone, Txema Lopetegi, Miguel A. G. Laso, Joan García-García, Ignacio Gil, Maria Flores Portillo and Mario Sorolla. "Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 53 N° 4, pp. 1451-1461. April 2005. DOI: 10.1109/TMTT.2005.845211.
- [20] V. Radonić, B. Jokanović and V. Crnojević-Bengin. "Different Approaches to the Design of Metamaterials". Microwave Review. Diciembre 2007. Vol. 13 N° 2. URL: <http://www.game.ftn.uns.ac.rs/Radovi/Domestic/journals/MWR/2007.pdf>
- [21] Y. Bonache Albacete. "Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados". Tesis para el grado de doctor en ciencias. Bellaterra: Universidad Autónoma de Barcelona. Diciembre. 2006. URL: <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5355/jba1de1.pdf?sequence=1>
- [22] Le-Wei Li, Ya-Nan Li, Tat Soon Yeo, Juan R. Mosig and Olivier J. F. Martin. Addendum: "A broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna". Applied Physics Letters. 99, 159901 (2011). DOI:10.1063/1.3651481.
- [23] David Cassany Viladomat. Diseño de celdas metamateriales usando tecnología monolítica multicapas. Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Trabajo realizado entre mayo de 2009 y abril de 2010 en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Puebla, México. URL: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13291/memoria3.pdf?sequence=1>
- [24] C. A. Balanis. "Modern Antenna Handbook". John Wiley & Sons. New Jersey. Estados Unidos. 2008. ISBN: 978-0-470-03634-1. URL: <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470036346.html>
- [25] Monografías del SOPT. "Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa". Ministerio de Defensa. Marzo 2011. URL: http://www.portalcultura.mde.es/Galerias/publicaciones/fichero/Monografia_SOPT_9.pdf
- [26] Grettel Rodríguez Trujillo. "Diseño de redes de adaptación de impedancias mediante el empleo de una combinación de configuraciones atípicas y metamateriales". Tesis presentada en opción al grado de Máster. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio

- Echeverría (CUJAE). La Habana, Cuba. 2014. URL: <http://biblioteca.cujae.edu.cu>.
- [27] Feng-Ju Hsieh, Cheng-Ling Chang and Wei-Chih Wang. Determination of Effective Constitutive Parameters, Material Boundaries and Properties of SRR-rod and Fishnet Metamaterials by Drude/Lorentz Dispersion Models. Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, KL, MALAYSIA. March 27–30 2012. URL: <https://piers.org/piersproceedings/download.php?file=cGllcnMyMDEyS3VhbGFMdW1wdXJ8MUE2YV8wMTMxLnBkZnwxMTA5MTkyMzM4MTE=>
- [28] Evren Ekmekçi and GönülTurhan-Sayan. Investigation Of Effective Permittivity And Permeability For A Novel V-Shaped Metamaterial Using Simulated S-Parameters.URL:http://www.emo.org.tr/ekler/68fcab5a34b87b6_ek.pdf.