

Estudio de la Ingeniería de Dispersión en Microondas empleando Líneas de Transmisión basadas en Metamateriales CRLH

J. S. GÓMEZ-DÍAZ, M. GARCÍA-VIGUERAS¹, F. D. QUESADA-PEREIRA¹,
J. PASCUAL GARCÍA, D. CAÑETE-REBENAQUE¹, J. L. GÓMEZ-TORNERO¹,
A. SHAHVARPOUR², C. CALOZ² Y A. ÁLVAREZ-MELCÓN¹

1. Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
Universidad Politécnica de Cartagena.
2. Poly-Grames Research Center Montreal y Centre de Recherche en Electronique
Radiofrequency (CREER). Universidad Politécnica de Montreal.

jsebastian.gomez@ono.com; mariagv1@hotmail.com;
fernando.quesada@upct.es; david.canete@upct.es;
josel.gomez@upct.es; attieh.shahvarpour@polymtl.ca;
christophe.caloz@polymtl.ca; alejandro.alvarez@upct.es

Resumen

En este artículo se presenta un estudio sobre la Ingeniería de la Dispersión en el dominio de las microondas. Para ello, se emplean líneas de transmisión basadas en metamateriales, que proporcionan un comportamiento dispersivo en un gran ancho de banda. Los dispositivos o fenómenos que se presentan son tanto guiados (usando líneas de transmisión) como radiados (empleando las estructuras metamateriales como antenas leaky-wave). A diferencia del estudio en régimen armónico que se suele realizar sobre los metamateriales, todos los novedosos efectos presentados son de banda ancha, listos para implementarse en los recientes sistemas de comunicaciones UWB.

Proyecto/Grupo de investigación: Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones (GEAT). Entidad Financiadora: Ministerio de Educación y

Ciencia y (Fundación Séneca de la Región de Murcia). Código: TEC2007-67630-C03-02 y beca FPU-AP2006-015, y (08833/PI/08).

Líneas de investigación: *Análisis electromagnético de dispositivos de radiofrecuencia; Diseño de circuitos y antenas para sistemas de comunicaciones; Radioastronomía; Sistemas de radiofrecuencia para aplicaciones por satélite.*

1. Introducción

En este artículo se realiza una introducción a la Ingeniería de la Dispersión, en el régimen de la microondas. Para ello, se emplean líneas de transmisión basadas en metamateriales composite right/left-handed (CRLH). Esta tecnología fue introducida en [1] y proporciona, entre otras características, un comportamiento dispersivo en un gran ancho de banda (del orden de varios GHz). Concretamente, se presentaran varios ejemplos novedosos de esta tecnología, incluyendo aplicaciones en modo guiado (empleando líneas de transmisión) y aplicaciones en modo radiativo (usando las estructuras metamateriales como antenas leaky-wave [1]). La principal novedad de este trabajo radica en el estudio de los metamateriales en el dominio temporal, al ser excitados por pulsos temporales de banda ancha, posibilitando así el uso de la Ingeniería de la Dispersión. Finalmente, cabe destacar que los trabajos aquí descritos surgen como una colaboración entre el grupo de investigación GEAT de la UPCT y el grupo de investigación del Prof. C. Caloz, de la École Polytechnique de Montréal, pionero mundial en el descubrimiento y desarrollo de los metamateriales. Esta colaboración ha permitido el intercambio de estudiantes entre ambas instituciones, propiciando una intensa colaboración científica.

2. Ingeniería de la Dispersión

Las estructuras basadas en metamateriales [1] poseen una naturaleza dispersiva. Esta naturaleza abre la puerta a la Ingeniería de la Dispersión, común en óptica, en el dominio de las microondas. La Ingeniería de la Dispersión consiste en modificar la fase de las ondas electromagnéticas con el fin de procesar señales de forma analógica, obteniendo una gran cantidad de aplicaciones: transformadores de Fourier de tiempo real, conformadores de pulso, correladores, etc. Esto es especialmente útil en aplicaciones a alta frecuencia, donde las soluciones digitales no son válidas, como por ejemplo en sistemas de transmisión de microondas de banda ancha y alta velocidad. En microondas, existe una gran tradición de ingeniería de la magnitud (o amplitud de las señales), basada en la consolidada teoría de filtros de microondas. Sin embargo, existen muy pocas soluciones específicas para la Ingeniería de la Dispersión (o fase).

En cualquier medio dispersivo, la velocidad de grupo (v_g) es función de la frecuencia, lo que implica un retardo de grupo también dependiente de la frecuencia. Al propagarse una señal de banda ancha por este tipo de medios,

sufre una distorsión, debido a que cada componente espectral viaja a una velocidad de grupo diferente. Esto es normalmente un defecto indeseable, y se trata de evitar. Sin embargo, si la dispersión (o fase) es diseñada de una forma adecuada, se pueden obtener una gran cantidad de fenómenos. La Figura 1 ilustra el concepto de Ingeniería de la Dispersión, mostrando como la manipulación de la fase proporciona diversos e interesantes efectos y funcionalidades.

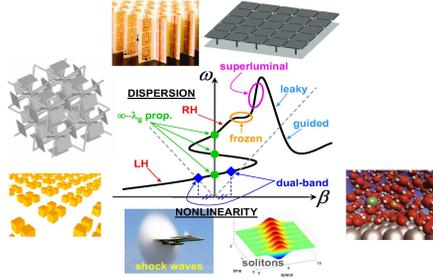


Figura 1: Diversos ejemplos de la Ingeniería de la Dispersión.

Las líneas de transmisión (TL) artificiales basadas en metamateriales CRLH están compuestas por celdas periódicas [1], que presentan un comportamiento diestro (L_R, C_R) y zurdo (L_L, C_L), y presentan la siguiente relación de dispersión:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{p} \cos^{-1}\left(1 - \frac{\chi}{2}\right) \quad (1)$$

donde

$$\chi = \left(\frac{\omega}{\omega_R}\right)^2 + \left(\frac{\omega_L}{\omega}\right)^2 - \kappa \quad (2)$$

y además se ha empleado

$$\kappa = L_L C_R + L_R C_L, \quad (3)$$

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} \quad \text{y} \quad \omega_L = \frac{1}{\sqrt{L_L C_L}}. \quad (4)$$

Como puede apreciarse en la Eq. (1), las CRLH TL proporciona un control sobre la fase sin precedentes en el dominio de las microondas. Este control ha propiciado una gran cantidad de aplicaciones en régimen armónico, como sistemas multi-banda (de dos, tres y hasta cuatro banda), circuladores, divisores de potencia, mezcladores, entre otros. En los siguientes apartados, presentaremos algunas novedosas aplicaciones que se han obtenido empleando señales de banda ancha, consiguiendo una transposición de fenómenos y componentes usados en el dominio óptico al régimen de las microondas.

3. Aplicaciones: Guiadas

Las líneas de transmisión CRLH son escalables en frecuencia, lo que posibilita un control de la fase en un gran ancho de banda. Una primera

aplicación [2], consiste en obtener un retardo en la propagación de pulsos temporales sintonizable con la frecuencia de modulación del propio pulso. Esto es posible gracias a que el retardo varía en función de la frecuencia, controlando así la velocidad de propagación del pulso. En [2] se propone la teoría que modela este dispositivo, validándolo con medidas experimentales. Un ejemplo de su funcionamiento puede ser apreciado en la Figura 2.

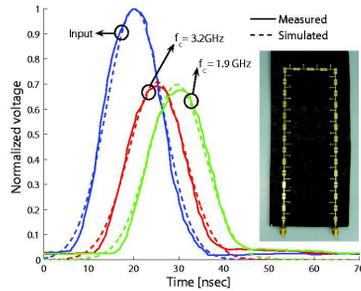


Figura 2: Propagación de pulsos temporales Gaussianos en una línea de transmisión CRLH [2]. Comparación de la formulación propuesta con medidas experimentales.

Posteriormente, se empleó esta propiedad de las líneas CRLH para obtener un resonador de banda ancha [3], capaz de proporcionar un control sobre la periodicidad de un tren de pulsos. La idea se refleja en la Figura 3. Como puede observarse, un tren de pulsos se propaga por una línea CRLH. En función de la frecuencia de modulación de los pulsos, el tiempo que tardará en ir y volver a lo largo de la línea será diferente. De esta forma, se puede controlar la periodicidad del tren de pulsos que salga fuera del resonador, variando la frecuencia de modulación del pulso. Un ejemplo que muestra el resultado a la salida del resonador se puede observar en la Fig. 4. Este dispositivo, diseñado en la UPCT, está actualmente siendo fabricado en los laboratorios de la École Polytechnique de Montréal.

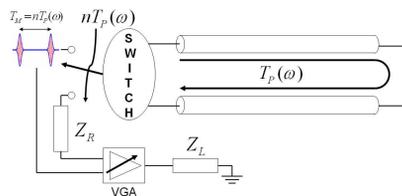


Figura 3: Resonador CRLH de banda ancha.

Por último, presentamos en la Figura 5 una línea de transmisión CRLH no lineal [4, 5]. Para obtener la no linealidad, se han usado varactores (condensadores que varían su capacidad en función del voltaje aplicado) a lo

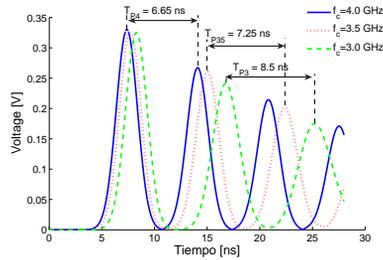


Figura 4: Pulsos Gaussiano a la salida del resonador de la Figura 3 para tres valores distintos de su frecuencia de modulación.

largo de la línea. La principal ventaja que posee es que permite combinar, por primera vez, los fenómenos de la dispersión y la no linealidad en el régimen de las microondas. En óptica, esta combinación ha dado lugar a múltiples fenómenos y dispositivos, como los solitones, las denominadas “shock waves”, o la automodulación de fase, por poner tres ejemplos.

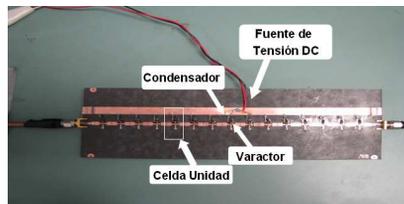


Figura 5: Línea de transmisión CRLH no lineal

Una interesante aplicación inicial de este tipo de líneas no-lineales es que son capaces de “balancear” [1] (es decir, conseguir una transición suave desde la zona frecuencial “zurda” a la región frecuencial “diestra”) las estructuras metamateriales. Esto se consigue variando la tensión en continua que alimenta a los varactores. En la Figura 6 (a) se muestra como un diseño genérico de una línea CRLH (como es el caso del de la Figura 5) proporciona un resultado no balanceado, apareciendo un band-gap en el coeficiente de transmisión de la estructura. Sin embargo, el empleo de la tensión continua sobre los varactores elimina este band-gap, balanceando de forma automática la línea CRLH [ver 6 (b)]. El uso de líneas CRLH no lineales permiten disminuir el usualmente elevado tiempo de diseño que requieren los metamateriales, empleando varactores genéricos, y modificando posteriormente su valor hasta conseguir estructuras balanceadas. Finalmente, destacar que en la actualidad tanto el grupo GEAT de la UPCT como el grupo del Prof. C. Caloz investigan de forma conjunta poder reproducir los fenómenos dispersivos y no lineales ópticos en el dominio de las microondas.

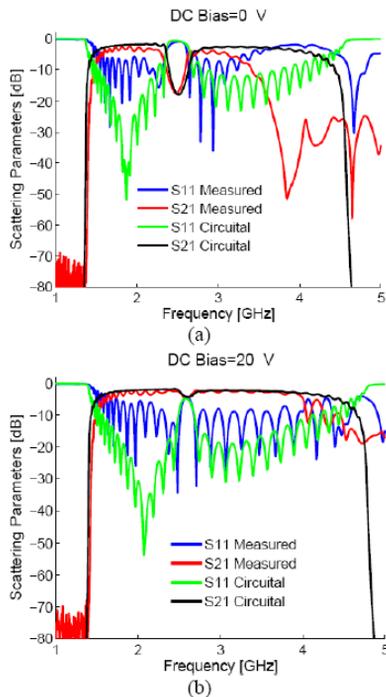


Figura 6: Parámetros de Scattering de la línea CRLH no lineal mostrada en la Figura 5. (a) DC Bias=0V. (b) DC Bias=20V.

4. Aplicaciones: Radiación

Una de las aplicaciones más importantes de las líneas de transmisión CRLH es su empleo como antenas leaky-wave (LW) [1]. La principal ventaja que proporcionan respecto al resto de antenas LW, es su posibilidad de escanear el espacio desde “backfire” hasta “endfire” de forma continua (es decir, escanear todo el espacio de la antena, conforme se varía la frecuencia de radiación). Este tipo de antenas han sido analizadas, hasta la fecha, únicamente en el dominio armónico. En [6] se presentó por primera vez un estudio detallado sobre el comportamiento de este tipo de antenas, cuando son excitadas por un pulso temporal. Como se esperaba, cada componente frecuencial es radiada a una zona del espacio diferente, lo que se conoce como descomposición espectro-espacial. Este fenómeno se aprovechó en [7] para reproducir el sistema *FROG* (Frequency Resolved Optical Gating) en el dominio de las microondas (*FREG*: Frequency Resolved Electric Gating). Un diagrama del sistema se muestra en la Figura 7. El objetivo del sistema es caracterizar, tanto en tiempo como en frecuencia, una señal desconocida. Para eso, se utiliza la descomposición espectro-espacial de la CRLH LWA que radian cada frecuencia a una zona del espacio diferente. En cada zona del espacio, se sitúan receptores temporales que captan la evolución

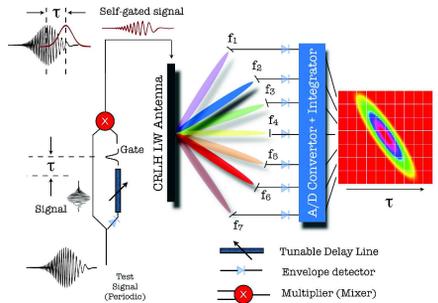


Figura 7: Esquema del sistema *FREG*, basado en la descomposición espectroespacial de la CRLH TL.

de cada componente espectral en función del tiempo. Además, con el fin de llevar hasta el límite la resolución temporal y frecuencial (de forma conjunta), se realiza un correlado de la señal de entrada consigo misma (versión de la señal desplazada en el tiempo). Este proceso, descrito en [7] permite llegar a los límites físicos de la máxima resolución conjunta (temporal y frecuencial) posible, a la hora de describir una señal temporal desconocida.

En la Figura 8 se pueden observar los espectrogramas (representación conjunta en tiempo y frecuencia) obtenidos de diversos pulsos temporales, validando así el sistema *FREG* propuesto.

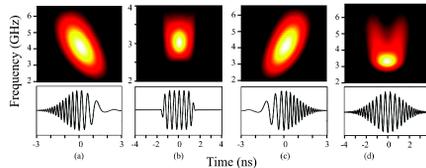


Figura 8: Espectrogramas obtenidos con el sistema *FREG* de distintos pulsos temporales de entrada.

El último fenómeno basado en la Ingeniería de la Dispersión que se presenta es el denominado efecto Talbot espacio-temporal [8, 9]. En óptica, es conocido desde el siglo XIX el efecto Talbot espacial, consistente en la reproducción de un patrón de interferencias, a una determinada distancia Talbot, cuando una luz ilumina un objeto periódico. Recientemente, se descubrió su versión temporal [10], basada en la dispersión del medio de propagación, en lugar de la dispersión ocasionada por la radiación (Fresnel). El fenómeno Talbot es ampliamente utilizado en óptica, en dispositivos como compresión de pulsos, multiplicadores de pulsos, alimentación de arrays, etc. Sin embargo, no se había conseguido reproducir este fenómeno hasta la fecha en el dominio de las microondas. El efecto Talbot espacio-temporal [8, 9], en el dominio de las microondas, es una

combinación del efecto Talbot monocromático (que se suele dar en óptica) con la respuesta transitoria de la radiación de pulsos de las antenas CRLH LW. Para conseguir reproducir este fenómeno, se emplea un array de CRLH LWAs, colocados a lo largo de un eje (ver Figura 9). Posteriormente, todas las antenas son alimentadas de forma simultánea por un pulso modulado. Gracias a la descomposición espectro-espacial de las CRLH LWA, cada componente frecuencial se radiará a una zona diferente del espacio, produciéndose un patrón de interferencias. Sin embargo, ese patrón de interferencias no es arbitrario, y reproduce la propagación de los pulsos a lo largo de las antenas en la denominada distancia Talbot (tomada sobre las antenas). Además, de forma análoga al dominio óptico, una multiplicación del número de pulsos aparece en distancias Talbot fraccionarias. En [9] se demuestra matemáticamente como en este caso, la distancia Talbot depende no sólo de la frecuencia de modulación del pulso (como en el dominio óptico), sino también de la zona del espacio sobre la que radia esta frecuencia (gracias al empleo de la descomposición espectro-espacial de la CRLH LWA). De esta forma, se consigue una distancia Talbot sintonizable, mucho más versátil que la que se encuentra en el dominio óptico.

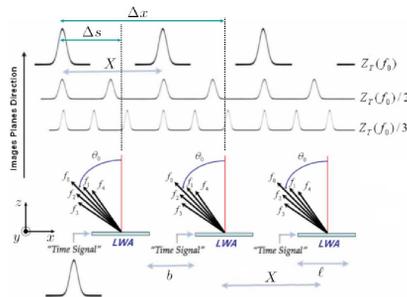


Figura 9: Configuración de un array de antenas CRLH LW para la obtención del fenómeno Talbot espacio-temporal.

Con el fin de demostrar la existencia de este novedoso fenómeno en el dominio de las microondas, se realizó una prueba experimental. Para ello, se empleó un array de 7 antenas CRLH LW, excitadas de forma simultánea por un generador de pulsos (tal y como se muestra en la Figura 10). Para la validación y demostración del fenómeno, se empleó una distancia Talbot fraccionaria, situada debajo de las antenas, donde se apreciara claramente la multiplicación de pulsos. La formulación presentada en [6] se empleó para realizar una simulación del fenómeno. Como puede observarse en la Figura 11, el efecto Talbot espacio-temporal aparece de forma nítida en el dominio de las microondas. La reconstrucción de pulsos y su multiplicación es claramente visible. Además, cabe destacar la concordancia entre las simulaciones y las medidas experimentales, teniendo en cuenta la tolerancia de los dispositivos empleados.

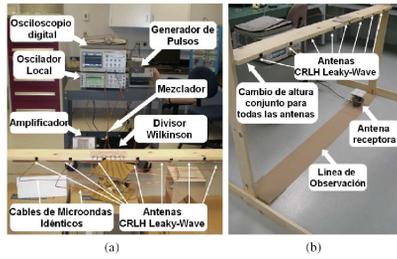


Figura 10: Configuración experimental empleada para reproducir el fenómeno Talbot espacio-temporal.

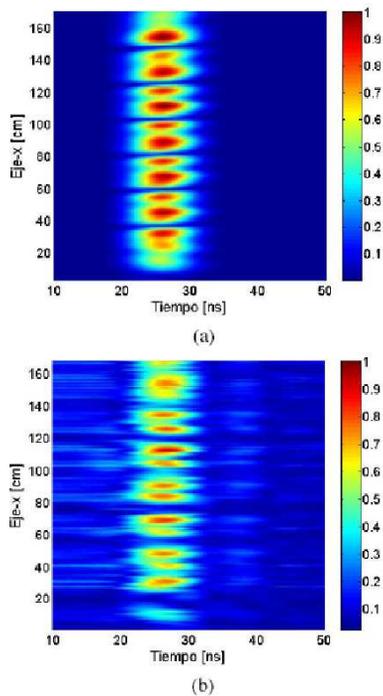


Figura 11: Campo eléctrico normalizado obtenido a la distancia Talbot dividida entre 2. La multiplicación de pulsos es claramente visible. (a) Simulación. (b) Medidas experimentales.

5. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un estudio sobre la Ingeniería de la Dispersión en el dominio de las microondas, empleando para ello líneas de transmisión basadas en metamateriales. Gracias al comportamiento dispersivo en un gran ancho de banda, y a la relativa facilidad con la que esta dispersión puede ser controlada, se ha propuesto una variedad de fenómenos, tanto en régimen de guiado como en régimen de radiación. El empleo de metamateriales de banda ancha para la obtención de este tipo de efectos (comunes en óptica) proporciona un nuevo enfoque al uso de los metamateriales, dejando de estar restringidos, como hasta la fecha, para aplicaciones en régimen armónico.

Referencias

- [1] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*. Wiley and IEEE Press, 2005.
- [2] J. S. Gomez-Diaz, S. Gupta, A. Alvarez-Melcon, and C. Caloz, Investigation on the phenomenology of impulse-regime metamaterial transmission lines, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Accepted, 2009.
- [3] J. S. Gomez-Diaz, S. Gupta, A. Alvarez-Melcon, and C. Caloz, Impulse-regime crlh resonator for tunable pulse rate multiplication, *Radio Science*, vol. 44, July 2009.
- [4] J. S. Gomez-Diaz, S. Gupta, A. Alvarez-Melcon, and C. Caloz, Numerical analysis of impulse regime phenomena in linear and non-linear metamaterial transmission lines, in *International Conference on Electromagnetic in Advanced Applications (ICEAA09)*, (Torino, Italy), IEEE, 20-25, September 2009, Invited.
- [5] J. S. Gomez-Diaz, S. Gupta, A. Alvarez-Melcon, and C. Caloz, Efficient time-domain analysis of highly-dispersive linear and non-linear metamaterial waveguide and antenna structures operated in the impulse-regime, *IET Microwave, Antennas and Propagation*, en revisión.
- [6] J. S. Gomez-Diaz, A. Alvarez-Melcon, and C. Caloz, Characterization of pulse radiation by crlh leaky-wave antennas using a time-domain green's function approach, in *IEEE, AP-S Antennas and Propagation International Symposium*, (San Diego, California, USA), 5-12, July 2008.
- [7] S. Gupta, J. S. Gomez-Diaz, and C. Caloz, Frequency resolved electrical gating principle for uwb signal characterization using leaky-wave structures, in *European Microwave Conference*, (Rome, Italy), September 2009.
- [8] J. S. Gomez-Diaz, S. Gupta, A. Alvarez-Melcon, and C. Caloz, Spatio-temporal talbot phenomenon using metamaterial composite right/left-handed leaky-wave antennas, *Journal of Applied Physics*, vol. 104, doi: 10.1063/1.3013905, July 2008.
- [9] J. S. Gomez-Diaz, S. Gupta, A. Alvarez-Melcon, and C. Caloz, Tunable talbot imaging distance using an array of beam-steered metamaterial leaky-wave antennas, *Journal of Applied Physics*, Accepted, 2009.
- [10] J. Azaña and M. A. Muriel, Temporal self-imaging effects: theory and application for multiplying pulse repetition rates, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, vol. 7, num. 7, pp. 728-744, 2001.