

Optimización de superficies selectivas en frecuencia monocapa mediante BPSO y CG-FFT

A. L. Gutiérrez⁽¹⁾, J. R. Pérez⁽¹⁾, J. Basterrechea⁽¹⁾

angelgutlop@gmail.com, jesus-ramon.perez@unican.es, jose.basterrechea@unican.es

⁽¹⁾ Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Laboratorios de I+D de Telecomunicaciones. Plaza de La Ciencia. Avda. Los Castros s/n. Santander. España

Abstract - A single-layer frequency selective surface (FSS) optimization scheme that combines a Binary Particle Swarm Optimizer (BPSO) with the CG-FFT method, is presented in this work. The BPSO algorithm uses the FSS reflection and transmission coefficients obtained with CG-FFT to carry out the optimization of the FSS geometry, period, and adjacent dielectric materials (thickness and dielectric constant), as required. Optimization constraints are stated in terms of reflection and transmission coefficient masks as a function of frequency. Half-, quarter- and eight-folded symmetry restrictions can be incorporated, if desired, during the optimization process. A summary of results is presented and the pros and cons of the approach are discussed.

I. INTRODUCCIÓN

Las superficies selectivas en frecuencia (FSS) son estructuras compuestas por una serie de celdas metálicas distribuidas uniformemente sobre un plano de masa. Su capacidad para filtrar espacialmente ondas electromagnéticas, en función de la frecuencia y/o ángulo de incidencia, ha propiciado su utilización en aplicaciones tan diversas como reducir la sección radar de un objeto [1], implementar conductores magnéticos artificiales [2], e incluso apantallar un recinto frente a señales interferentes [3]-[4].

El comportamiento espectral de una FSS va a estar determinado por su periodo, la geometría de las metalizaciones y los materiales que las rodean; puesto que habitualmente son estructuras multicapa, como se muestra en la Fig. 1. Mediante una combinación adecuada de estos parámetros, es posible conseguir que la FSS presente una respuesta de banda ancha o estrecha en cada una de las topologías de filtrado existentes.

Puesto que existen una gran variedad de geometrías y materiales con los que implementar una FSS, es complicado determinar mediante procesos de prueba y error que configuración es la mejor para una aplicación, incluso si una vez implementada se ajusta su geometría mediante elementos activos que cortocircuiten o no zonas metálicas de la superficie [5].

En la última década, varios grupos de trabajo han utilizado los algoritmos genéticos con el fin de llevar a cabo la optimización de una FSS [6]. Sin embargo, este tipo de algoritmos carece de memoria y, por lo tanto, son propensos a detener el proceso en soluciones locales. Esta limitación ha sido superada por los algoritmos de optimización basados en un enjambre de partículas (PSO), puesto que aprovechan el

conocimiento adquirido por toda la población a lo largo de toda su historia para orientar la búsqueda hacia las mejores soluciones.

En este trabajo, se utiliza una versión binaria de PSO (BPSO) [7] junto con el método del gradiente conjugado en combinación con la transformada rápida de Fourier (CG-FFT) [8] con el que se obtiene el comportamiento espectral de la FSS. El objetivo se centra en optimizar tanto la geometría de la FSS y su periodo, como los medios dieléctricos que la rodean, ajustando su respuesta en base a especificaciones impuestas por máscaras de gálibo para los coeficientes de transmisión y/o reflexión.

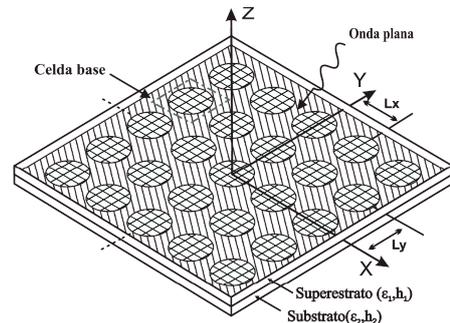


Fig. 1. Estructura multicapa utilizada en la optimización.

II. MÉTODO CG-FFT

El método CG-FFT resuelve la ecuación de campo eléctrico (1) mediante un proceso iterativo y permite obtener la amplitud y fase de las corrientes existentes sobre la superficie metálica cuando sobre ésta incide un campo electromagnético.

$$\hat{n} \times \vec{E}^i(\vec{r}) = \hat{n} \times \int_S G^F(\vec{r} - \vec{r}') \vec{J}(\vec{r}') dS' \quad (1)$$

En (1), E^i representa el campo incidente, \hat{n} es un vector normal a la superficie S , J la corriente inducida y G^F es la función de Green diádica con la que se imponen las condiciones de contorno forzadas por el periodo de la FSS y los materiales dieléctricos que la rodean.

Considerando la estructura periódica, el proceso de cálculo se apoya en la naturaleza discreta del problema en el dominio transformado, para lo cual emplea funciones base de tipo rooftop y funciones de test blade-razor para representar

las corrientes en las metalizaciones de la celda unidad y realizar el promediado, respectivamente. Como resultado final del desarrollo matemático del modelo, se obtienen las componentes de campo tangenciales a la superficie, con las que se conformarán los operadores del gradiente conjugado.

$$-E_x^{iD}(\vec{r}) = E_{xx}^{SD}(\vec{r}) + E_{xy}^{SD}(\vec{r}) \quad (2)$$

$$-E_y^{iD}(\vec{r}) = E_{yx}^{SD}(\vec{r}) + E_{yy}^{SD}(\vec{r}) \quad (3)$$

con:

$$E_{\alpha\beta}^{SD}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi^2} F^{-1} \left\{ F \left[\prod (\vec{r} - \vec{r}_\alpha^{mn}) \right] \otimes \left[\tilde{\gamma}_\alpha \tilde{G}_{\alpha\beta}^F \tilde{J}_\beta^D \right] \right\} \quad (4)$$

$$E_\alpha^{iD}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi^2} F^{-1} \left\{ F \left[\prod (\vec{r} - \vec{r}_\alpha^{mn}) \right] \otimes \left[\tilde{E}_\alpha^i(\vec{r}) \tilde{\gamma}_\alpha \right] \right\} \quad (5)$$

donde α y β representan x o y , F y F^{-1} la transformada directa e inversa de Fourier, \sim la transformada de Fourier de la función sobre la que se encuentra, γ la función blade-razor, $\tilde{G}_{\alpha\beta}^F$ la componente $\alpha\beta$ de la función de Green transformada, y \tilde{J}_β^D la transformada de la función base orientada según β .

Independientemente de la FSS a analizar, el método CG-FFT va a mejorar en cada iteración el error cometido en la aproximación de las corrientes inducidas sobre la superficie, en un factor proporcional al condicionamiento de las matrices que forman los operadores, k , y del error inicial, e_o , del que parta (6). Esto implica que si la celda unidad de la FSS presenta simetría, el algoritmo del gradiente conjugado invertirá menos iteraciones en alcanzar el error objetivo, con la consiguiente reducción de tiempo en el proceso de optimización de FSS utilizado en este artículo.

$$\|e(n)\| = 2 \cdot \|e_o\| \cdot \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^n \quad (6)$$

III. OPTIMIZACIÓN BINARIA DE FSS MEDIANTE ENJAMBRES DE PARTÍCULAS

Debido a su eficiencia para resolver problemas multidimensionales, multimodales y no lineales, la optimización mediante enjambre de partículas (PSO) ha sido aplicada con éxito a campos tan diversos como la planificación de redes de distribución eléctrica, gestión empresarial, teoría de juegos, a la síntesis de alimentación en antenas, etc.

Cualquier esquema de PSO lleva a cabo la optimización compartiendo el conocimiento que cada uno de los miembros de una población ha adquirido a lo largo del tiempo, lo que evita que la exploración se produzca de forma caótica.

Gracias a este intercambio de información, cada partícula además de conocer su mejor posición histórica que ha encontrado en su desplazamiento (p_{best}), conoce la mejor posición que han encontrado sus vecinos (g_{best}). Con esta información, cada individuo decide razonadamente hacia qué lugar del espacio de soluciones orientará sus próximos pasos, actualizando su velocidad (7)-(8) y posición (9)-(10) de acuerdo a las expresiones:

$$\hat{v}_k^{i+1}(n) = v_k^i(n) + c_1 \rho_1 \left[p_{best}(n) - \psi_k^i(n) \right] + c_2 \rho_2 \left[g_{best}(n) - \psi_k^i(n) \right] \quad (7)$$

$$v_k^{i+1}(n) = \text{sign}(\hat{v}_k^{i+1}(n)) \cdot \min(|\hat{v}_k^{i+1}(n)|, V_{max}) \quad (8)$$

$$\psi_k^i(n) = \begin{cases} 0, & \text{if } \rho_3 \geq s(v_k^i(n)) \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$s(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (10)$$

donde el bit n de la partícula k lleva asociada una velocidad $v_k^{i+1}(n)$ y una posición $\psi_k^i(n)$ en la iteración i . Además ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 son números aleatorios con una distribución uniforme $U[0,1]$, c_1 y c_2 son las constantes de aceleración cognitiva y social, que se fijan a un valor de 2, y V_{max} limita la velocidad máxima a 4 para evitar una exploración lenta, puesto que en la versión binaria de PSO el ratio de evolución es máximo cuando la velocidad es próxima a cero.

Una vez que una partícula ha completado un desplazamiento, puede compartir el conocimiento adquirido inmediatamente con el resto de sus vecinas, o esperar a que el resto de ellas terminen su movimiento, dando lugar a la versión *asíncrona* (A) y *síncrona* (S) de PSO, respectivamente. Por otra parte, en función de si la información se comparte con toda la población, o con un subconjunto de ella, es posible diferenciar entre el PSO con topología *global* (G) y *local* (L), respectivamente. De esta forma se conforman los cuatro esquemas de PSO (AG, AL, SG y SL), cada uno de los cuales puede ser modificado mediante un operador propio de los algoritmos genéticos, la selección por torneo (TS), con objeto de focalizar la búsqueda hacia las soluciones más prometedoras del espacio de decisión. En base a trabajos previos [9], la mejor configuración de PSO para realizar la optimización de FSS es la AG-TS en su versión binaria, puesto que mejora la velocidad de convergencia sin sacrificar la tasa de éxito del algoritmo.

Para evaluar la calidad de la solución aportada por una partícula, se utiliza una función de coste (11), también denominada de *fitness*, en la cual se comparan los coeficientes de transmisión (C_t) y reflexión (C_r) de la FSS calculados mediante el método CG-FFT en el punto frecuencial P , con tres máscaras: UM, para limitar el valor máximo que puede alcanzar $C_{t(r)}$, LM, para restringir su valor inferior, y RM para acotar superiormente a $C_{r(t)}$.

$$F = \sum_{P=1}^M \left(|UM(P)|_{dB} - |C_{t(r)}(P)|_{dB} \right)^2 + \sum_{P=1}^M \left(|C_{t(r)}(P)|_{dB} - |LM(P)|_{dB} \right)^2 + \sum_{P=1}^M \left(|RM(P)|_{dB} - |C_{r(t)}(P)|_{dB} \right)^2 \quad (11)$$

Para su posterior procesamiento con el método CG-FFT, la secuencia binaria generada por cada partícula del enjambre es dividida en diferentes vectores para generar la geometría, codificar el periodo de la FSS, así como seleccionar el

substrato y superestrato. Para optimizar la geometría, la celda unidad se divide en $2^N \times 2^M$ dominios idénticos, en cada uno de los cuales se decide si existe o no metalización durante el proceso de optimización. Por otra parte, el periodo es codificado en binario mediante una secuencia de 12 bits, de los cuales 6 son utilizados para representar los términos decimales. Además, se ha creado una base de datos con más de 500 materiales comerciales, con información sobre su espesor y constante dieléctrica, de entre los cuales se selecciona con 18 bits un substrato y un superestrato.

IV. RESULTADOS

En esta sección, a modo de ejemplo, se presentan los resultados proporcionados por el esquema descrito previamente, cuando se plantea obtener una respuesta objetivo que establece para el coeficiente de transmisión de la FSS una respuesta paso banda centrada en 13GHz con un ancho de banda del 5%, un rechazo en reflexión a la frecuencia central de 30dB y un nivel de supresión lateral de 20dB. Este objetivo es difícil de conseguir mediante estructuras convencionales monocapa. Las tres máscaras utilizadas (UM, LM y RM), que se muestran en la Fig. 2, han sido definidas mediante 15 puntos para reducir la carga computacional que conlleva la optimización de las FSS.

La celda unidad se divide en 16x16 regiones idénticas, sobre las que se define la geometría a partir de las secuencias binarias obtenidas durante el proceso de optimización. Esta definición de la geometría se puede realizar sin imponer simetrías o con simetría mitad, cuarto u octante.

Se ha evaluado el comportamiento del esquema AG-TS de PSO descrito previamente, con las cuatro estrategias de generación de geometría para las FSS, incluyendo en él sólo la geometría (G) o, además, realizando la optimización del periodo y los medios dieléctricos superior e inferior (GPD). Para tener en cuenta la naturaleza aleatoria del optimizador por enjambre de partículas, para cada caso se han promediado ocho realizaciones independientes que utilizan una población de 50 partículas.

Los resultados de las simulaciones están reflejados en la Tabla 1, en la que *TE* es la tasa de éxito expresada en tanto por ciento, *Fitness* es el valor residual promedio alcanzado por las realizaciones tras 35000 evaluaciones de la función de coste (10), *NF* es el número medio de llamadas a la función de fitness invertidas por las simulaciones que convergen en alcanzar un error menor de 5 dB, *Tcpu* es el tiempo de procesador promedio que han tardado en alcanzar ese valor e *Iteraciones CG* es el número promedio de iteraciones empleadas por el método CG-FFT para encontrar las corrientes inducidas sobre la superficie de la FSS. Además, se incluye información sobre parámetros generados por el proceso de optimización: el periodo de la estructura, y el espesor (*h*) y la constante dieléctrica (ϵ) del substrato y superestrato.

A la vista de los resultados cabe destacar que, independientemente del tipo de optimización seleccionado, G o GPD, utilizar simetrías para generar la geometría puede llegar a reducir el número de iteraciones del método CG-FFT (y por lo tanto el tiempo de optimización de una FSS) en un 90%. Sin embargo, esta ventaja no puede ser aprovechada tan sólo utilizando la optimización de la geometría, puesto que replicar un octavo, un cuarto, o una mitad de la superficie

reduce el número de bits empleados de 256 a 36, 64 y 128, respectivamente. En consecuencia, el espacio de posibles soluciones se reduce o incluso se anula frente al caso en que la geometría es totalmente aleatoria. Esta es la causa de que ninguna de las optimizaciones realizadas con la FSS en espacio libre empleando simetrías converja.

Desde el punto de vista del optimizador, incluir en el proceso la geometría, el periodo y los dieléctricos de la FSS, permite ampliar el espacio de búsqueda aliviando el problema planteado. De esta forma, se consigue una tasa de éxito incluso superior a la obtenida con una superficie totalmente aleatoria, pero invirtiendo en ello menos de la mitad del tiempo original, como ocurre cuando se utiliza una FSS con una geometría generada replicando una mitad.

Se puede señalar como significativo que utilizar geometrías simétricas, además de permitir a la FSS ser más estable ante variaciones en la polarización (en algunas situaciones), permite obtener una respuesta más estable en frecuencia, como por ejemplo ocurre con el coeficiente de reflexión en las geometrías presentadas en la Fig. 2.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un esquema de optimización de FSS monocapa que emplea una versión binaria de PSO en combinación con el método CG-FFT para evaluar la respuesta en transmisión y reflexión de la misma.

En el trabajo se analiza el efecto que produce la inclusión en el esquema de condiciones de simetría (mitad, cuarto y octante) en la geometría, que puede resultar ventajosa en algunas situaciones, aunque en otras puede resultar perjudicial al reducirse significativa o totalmente el espacio de soluciones.

Para aliviar este último problema, se ha incorporado al proceso de optimización tanto el periodo de la FSS como los espesores y materiales colindantes a la misma.

Si bien los resultados obtenidos son prometedores, resulta preciso incorporar mejoras en el método que permitan reducir el tiempo de optimización e incorporar más capas en el proceso de optimización.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2008-02730/TEC).

REFERENCIAS

- [1] L. Hai-Tao, C. Hai-Feng, C. Zeng-Yong, Z. De-Yong, "Absorbing properties of frequency selective surface absorbers with cross-shaped resistive patches". *Materials & Design*, Volume 28, Issue 7, 2007, pp 2166-2171.
- [2] A. Pirhadi, M. Hakkak, F. Keshmiri, R. Karimzadeh Bae, "Design of compact dual band high directive electromagnetic band gap (EBG) resonator antenna using artificial magnetic conductor". *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 6, pp 1682-1690, June 2007.
- [3] W. Kiermeier, E. Biebl, "New dual-band frequency selective surfaces for GSM frequency shielding". *Proceedings of the 37th European Microwave Conference*, pp. 222-225, 9-12 Oct. 2007.
- [4] G. H. H. Sung, K. W. Sowerby, A. G. Williamson, "Modeling a low-cost frequency selective wall for wireless-friendly indoor environments", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 311-314, 2006.
- [5] C. Mias, "Varactor-tunable frequency selective surface with resistive-lumped-element biasing grids". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 9, pp 570-572, September 2005

- [6] G. Manara, A. Monorchio and R. Mittra, "Frequency selective surface design based on genetic algorithm". Electronics Letters, vol. 35, issue 17, pp 1400-1401, 19 Aug 1999.
- [7] J. Kennedy, R. Eberhart: "A discrete version of the particle swarm algorithm". IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics, vol. 5, pp 4104-4108, 1997.
- [8] M.F. Cátedra, R. P. Torres, J. Basterrechea, E. Gago, "The CG-FFT Method. Application of signal processing techniques to electromagnetics". Artech House Inc., 1995.
- [9] A. L. Gutiérrez, J. R. Pérez, J. Basterrechea, "Binary particle swarm optimization of FSS using a cg-FFT modelling". European Conference on Antennas and Propagation, pp 45-49, 23-27 March 2009.

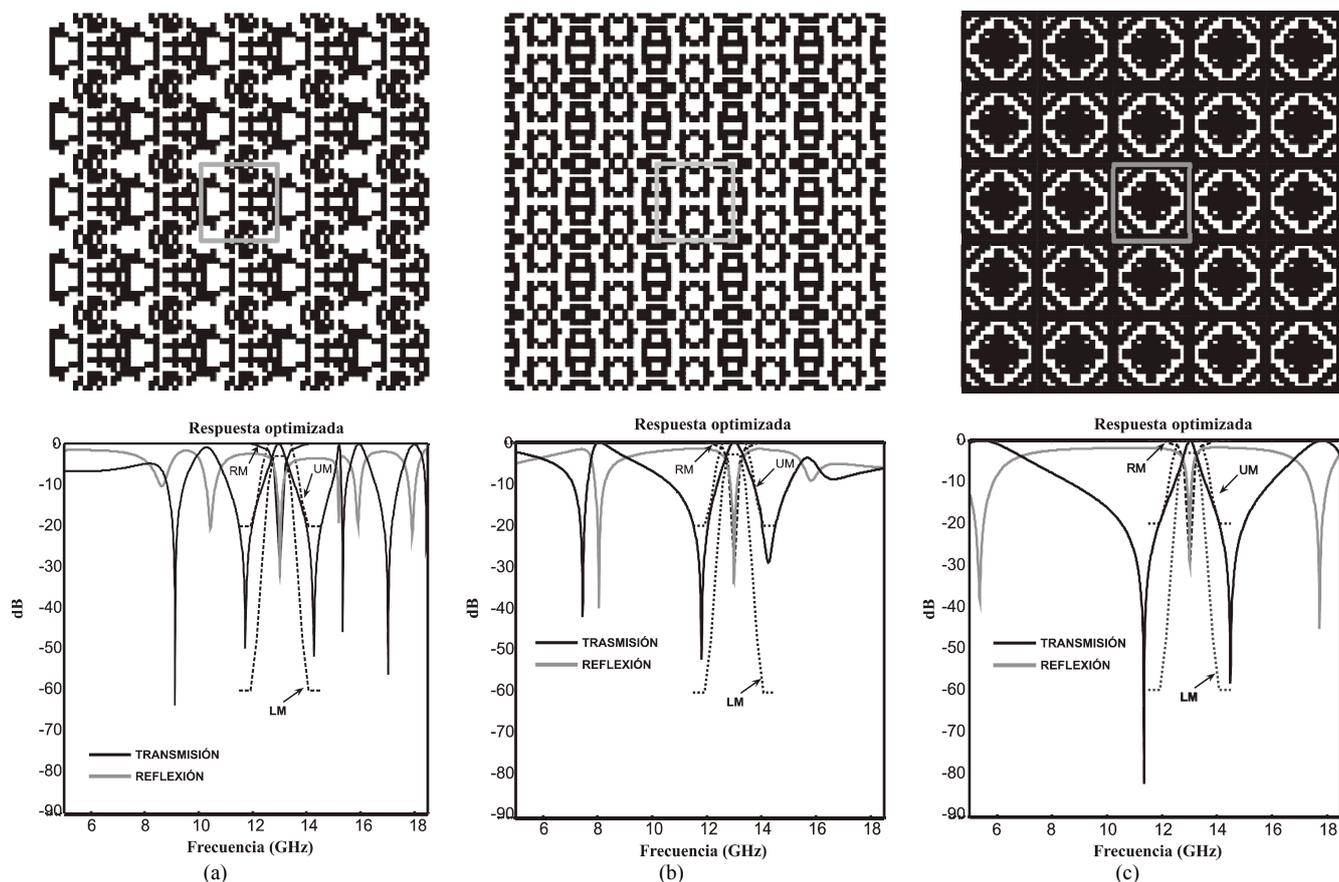


Fig. 2. Geometrías de FSSs y respuestas optimizadas conseguidas mediante el proceso de optimización de FSS, utilizando para ello simetrías en la generación de la celda base. (a) Una mitad. (b) Un cuarto. (c) Un octavo.

Parámetros (promediados)	SIN SIMETRÍA		MITAD		CUARTO		OCTAVO		
	G	GPD	G	GPD	G	GPD	G	GPD	
TE (%)	50	37.5	0	62.5	0	37.5	0	12.5	
$Fitness$	5.10	88.12	622.22	40.55	1549.17	34.62	1549.41	186.36	
NF	15137	20000	—	5450	—	9666	—	25950	
T_{cpu} (seg)	24501	19738	—	11373	—	7462	—	40880	
$Iteraciones$ CG	504.80	293.69	584.58	190.76	64.55	75.84	53.59	110.99	
$Periodo$ (mm)	6.900	14.460	6.900	17.971	6.900	23.359	6.900	25.826	
$Superstrato$	ϵ_r	1.000	5.465	1.000	5.848	1.000	5.264	1.000	4.500
	h(mm)	0.000	1.147	0.000	1.353	0.000	0.715	0.000	3.048
$Substrato$	ϵ_r	1.000	5.019	1.000	4.926	1.000	3.031	1.000	10.900
	h(mm)	0.000	0.864	0.000	1.452	0.000	0.491	0.000	3.226

Tabla 1. Resultados de la optimización binaria mediante PSO para las cuatro opciones de generación de la geometría. Se han considerado dos esquemas de optimización de la FSS: geometría (G) y geometría, dieléctricos y periodo (GPD).