

Aplicação de Curvas Fractais em Elementos Convencionados para Projeto de FSS Miniaturizada com Estabilidade Angular

Vítor Fernandes Barros, Antonio Luiz P. S. Campos e Alfredo Gomes Neto

Resumo— Este artigo propõe a análise e projeto de uma superfície seletiva em frequência (FSS) com comportamento em frequência multibanda, independência de polarização, estabilidade angular e miniaturizada. Para atingir essas características, diferentes técnicas de miniaturização são combinadas, como a fractalização e o uso de elementos convencionados. O projeto resulta em uma FSS mais compacta, leve e eficiente. Medidas das características de transmissão da estrutura proposta foram realizadas e uma boa concordância entre os resultados simulados e medidos pôde ser observada.

Palavras-Chave— Superfícies seletivas em frequência, fractalização, elementos convencionados, técnicas de miniaturização.

Abstract— This paper proposes the analysis and design of a frequency selective surface (FSS) with multiband frequency behavior, polarization independence, angular stability and miniaturization. To achieve these characteristics, we combine different techniques of miniaturization, such as fractalization and use of convoluted elements. The design results in a more compact, lightweight and efficient FSS. Measurements of transmission characteristics of proposed structure were performed and a good agreement between simulated and measured results could be observed.

Keywords— Frequency selective surfaces, fractalization, convoluted elements, miniaturization techniques.

I. INTRODUÇÃO

Superfícies seletivas em frequência (*Frequency Selective Surfaces* – FSS) são arranjos periódicos bidimensionais de elementos metálicos impressos sobre uma camada dielétrica. Geralmente, arranjos periódicos de elementos tradicionais produzem uma única ressonância. Para se obter uma resposta em frequência do tipo multibanda, o uso de elementos convencionados ou fractais, ou ainda, uma combinação dos dois, pode ser utilizado.

Aplicações práticas usando FSS normalmente requerem estruturas reduzidas devido a limitações de espaço [1]. Estes requisitos fizeram com que os pesquisadores voltassem sua atenção para estruturas com dimensões reduzidas e muitas técnicas de miniaturização de FSS foram propostas [2] - [5].

Entre essas técnicas, os pesquisadores propuseram a aplicação de curvas fractais em geometrias de FSS [6] - [8]. Apesar dos resultados satisfatórios, limitações técnicas, como a dificuldade em controlar frequências de ressonância em estruturas multibandas e sua banda estreita típica, tornaram essa técnica de miniaturização pouco atraente.

Outros autores propuseram o uso de elementos convencionados objetivando a miniaturização de FSS [9] - [11]. Elementos convencionados podem reduzir, consideravelmente, o tamanho da célula unitária e ter bom desempenho quando incorporados em superfícies curvas. Além disso, a convolução dos elementos da FSS melhora a estabilidade angular das respostas em frequência. No entanto, alguns elementos podem ser complexos demais para serem construídos com técnicas tradicionais.

Seguindo uma linha similar, este trabalho tem como objetivo projetar e analisar modelos de FSS resultantes da combinação de algumas técnicas de miniaturização existentes, tais como elementos convencionados e curvas fractais espirais (FSE), um novo modelo de formas fractais. A diferença entre nossa estrutura proposta e outras estruturas encontradas na literatura é que nossa estrutura é muito simples de construir. Para fins de validação, um protótipo foi construído e medido.

II. PROJETO DA FSS

Normalmente, a célula unitária da FSS pode ser tratada como um circuito de ressonância quando iluminada pela onda incidente e sua frequência de ressonância pode ser simplesmente analisada com o modelo de circuito equivalente [12]. De acordo com a teoria do circuito equivalente, se o campo elétrico incidente é perpendicular ao espaço entre as fitas metálicas, a FSS se comporta como componente capacitivo no modelo de circuito equivalente.

No entanto, quando o campo elétrico é paralelo à fita metálica, ele pode ser modelado por um componente indutivo. Então a frequência de ressonância é determinada por $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$, em que L e C representam indutância e capacitância equivalentes da célula unitária, respectivamente. A frequência de ressonância pode ser reduzida aumentando os valores de indutância e/ou capacitância equivalentes.

A FSS proposta consiste em quatro elementos espirais semelhantes ao fractal apresentado em [13] conectados no meio da célula unitária, simetricamente. Esse projeto espiral em forma de fractal compacto fornece mais flexibilidade, porque podemos usar parâmetros fractais e características físicas da estrutura, para obter uma resposta em frequência desejada. Esse entrelaçamento é considerado como uma convolução.

Ao estreitar a largura dos espaços entre as linhas metálicas, a capacitância equivalente pode ser aumentada e aumentando o número de voltas do elemento, a indutância pode ser aumentada. O aumento da indutância e/ou capacitância equivalente diminuirá a frequência de ressonância e a característica de

miniaturização poderá ser alcançada. Além disso, o projeto de simetria central melhorará a estabilidade em relação a diferentes polarizações e ângulos de incidência.

A geometria proposta, ilustrada em Fig. 1, possui um desenho simplificado e permite que um maior número de iterações fractais seja construído. Isso facilita o processo construtivo da estrutura. A técnica FSE de contorno quadrado aplicada usa a seguinte regra de formação [13]:

$$L_k = f_s^k L$$

em que L_k é o comprimento do k -segmento, com $k \in N$, f_s é o fator de escala e L é o comprimento do elemento iniciador.

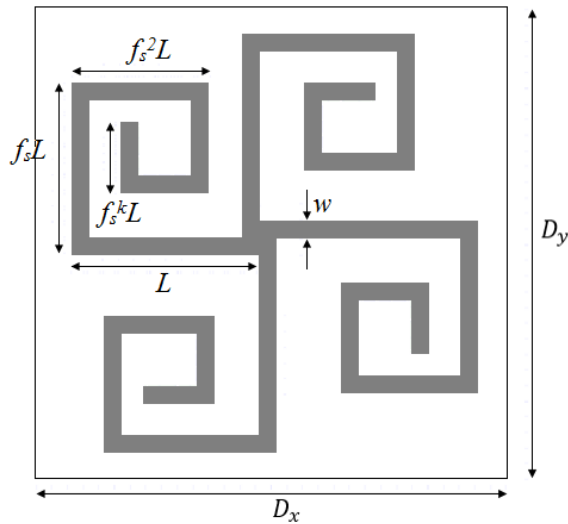


Fig. 1. Célula unitária da geometria proposta.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

A FSS com elemento fractal em espiral possui periodicidades $D_x = D_y = 30$ mm e $L = 13,5$ mm. Realizou-se um estudo paramétrico das variáveis de projeto: número de iterações fractais (k), largura da fita condutora (w) e fator de escala (f_s), para se obter conhecimento do comportamento da resposta em frequência da FSS, como função das dimensões físicas. As simulações foram feitas com o ANSYS HFSS.

Fig. 2 ilustra o efeito da variação do número de iterações na resposta da FSS, considerando $f_s = 0,8$ e $w = 1,5$ mm. Pode-se ver que as estruturas têm três ressonâncias. Para $k = 4$, as ressonâncias ocorrem em 1,56, 3,89 e 7,74 GHz. Para $k = 5$, as ressonâncias ocorrem em 1,56, 3,62 e 6,68 GHz. Para $k = 6$, as ressonâncias ocorrem em 1,56, 3,49 e 6,08 GHz. A primeira ressonância não é influenciada por este parâmetro, mas as outras duas são. É possível notar que, para as outras duas frequências ressonantes, que valores elevados de k implicam em redução das frequências de ressonância. Isso ocorre porque o número de espiras aumenta, produzindo um aumento na indutância.

Fig. 3 ilustra o efeito do fator de escala, f_s , na resposta da FSS, considerando $w = 1,5$ mm e $k = 5$. Para $f_s = 0,7$, as ressonâncias foram 1,96, 5,08 e 8,94 GHz. Para $f_s = 0,8$, as ressonâncias foram de 1,56, 3,62 e 6,68 GHz. Para $f_s = 0,9$, as ressonâncias foram 1,03, 2,56 e 5,08 GHz. É possível notar que um aumento no fator de escala leva à redução das frequências de ressonância. Isso ocorre porque os segmentos se aproximam, aumentando a capacitância.

Fig. 4 ilustra o efeito da largura da fita metálica, w , na resposta da FSS, considerando $f_s = 0,7$ e $k = 4$. Para $w = 1,0$ mm,

as frequências de ressonâncias foram 1,83, 4,68 e 8,54 GHz. Para $w = 1,5$ mm, as ressonâncias foram 1,96, 5,15 e 9,60 GHz. Para $w = 2,0$ mm, as ressonâncias foram 2,16 e 5,68 GHz. É possível notar que uma redução na espessura da fita condutora provoca uma redução das frequências de ressonância, pois a indutância aumenta.

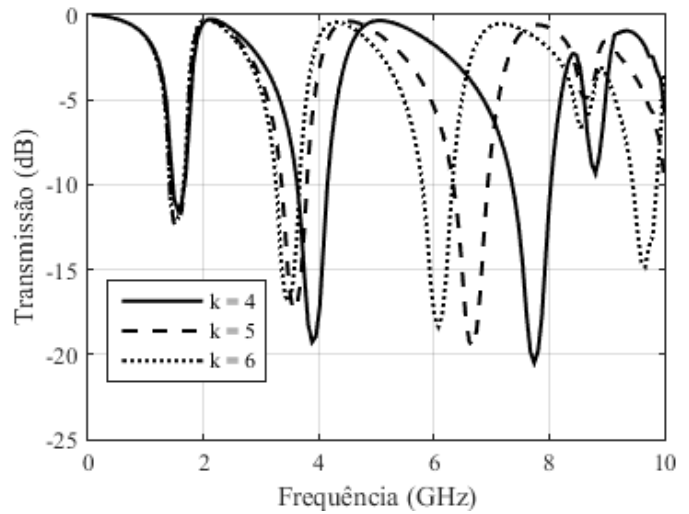


Fig. 2. Resposta em frequência simulada da FSS proposta para diferentes números de voltas.

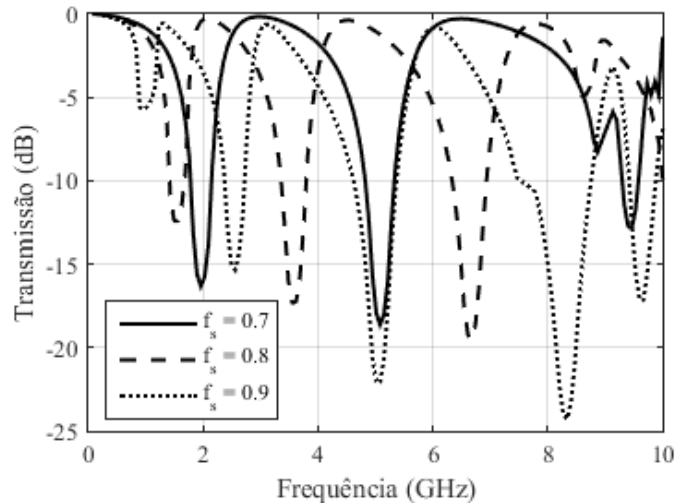


Fig. 3. Resposta em frequência simulada da FSS proposta para diferentes valores de fatores de escala.

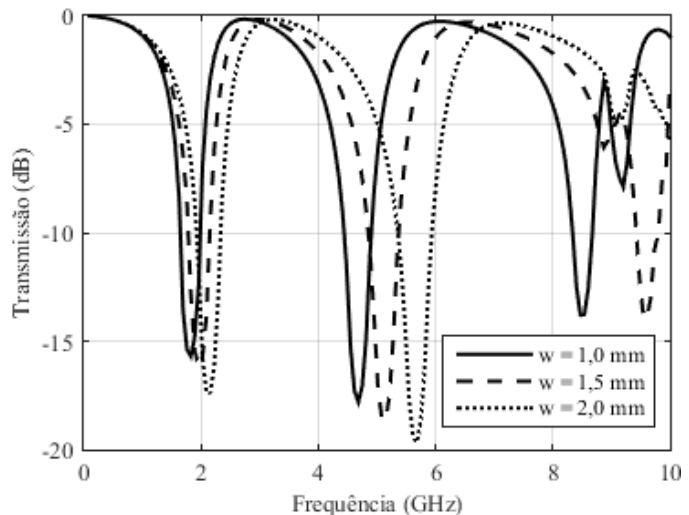


Fig. 4. Resposta em frequências simulada da FSS proposta para diferentes valores de larguras de fita.

Após este estudo paramétrico, um protótipo de FSS foi construído com o elemento FSE, com as seguintes dimensões de projeto: $L = 13,5$ mm, $w = 1,5$ mm, $k = 5$ e $f_s = 0,9$. A FSS foi montada em um dielétrico de fibra de vidro com permissividade dielétrica $\epsilon_r = 4,4$, de dimensões 25×25 cm² e espessura de 1,57 mm. Fig. 5 ilustra o protótipo construído. Nas medições foi utilizado um analisador vetorial de redes do fabricante Agilent modelo E5071C, duas antenas cornetas (horn antennas) do fabricante A. H. Systems, modelo SAS-571 (700 MHz a 18 GHz), posicionadas em linha de visada direta, conforme ilustrado em Fig. 6.

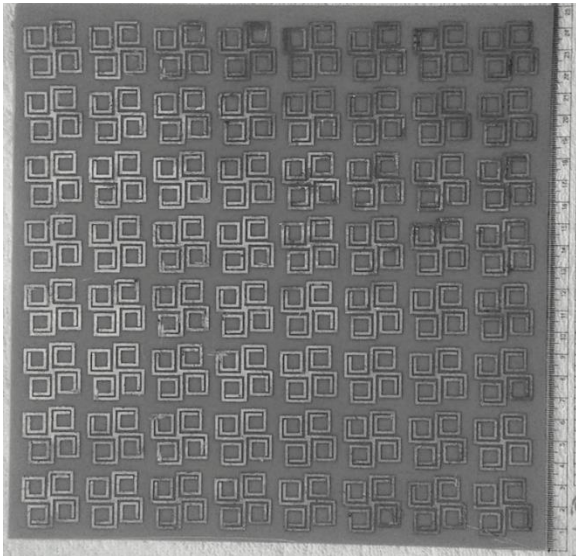


Fig. 5. Protótipo construído.

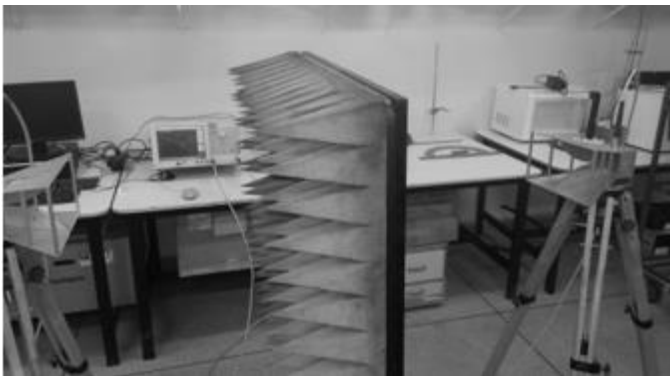


Fig. 6. Protótipo construído.

Fig. 7 ilustra a comparação entre os coeficientes de transmissão simulados e medidos para a faixa de 2 a 9 GHz. Obteve-se uma boa concordância entre os resultados, com frequências ressonantes de 2,54 GHz, 4,94 GHz e 8,47 GHz, para o caso dos resultados experimentais.

A estabilidade angular do FSS para polarizações verticais e horizontais também foi analisada, com ângulos de incidência variando entre 0° e 30°, como mostram as Figs. 8 e 9, respectivamente. A partir dos resultados medidos, notamos que a largura de banda praticamente não se degrada, em ambos os casos, para as duas primeiras ressonâncias. Na região entre 7,5 - 10,0 GHz, na polarização horizontal, apresenta uma redução insignificante na largura de banda, o que não compromete o desempenho do FSS.

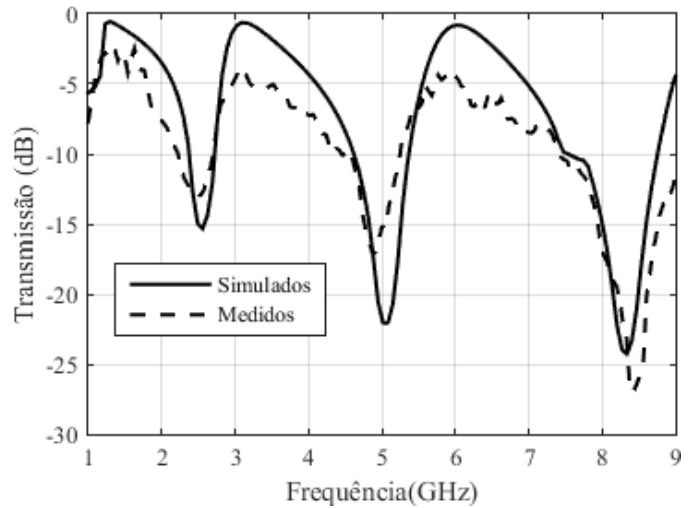


Fig. 7. Comparação entre os resultados medidos e simulados para a incidência normal.

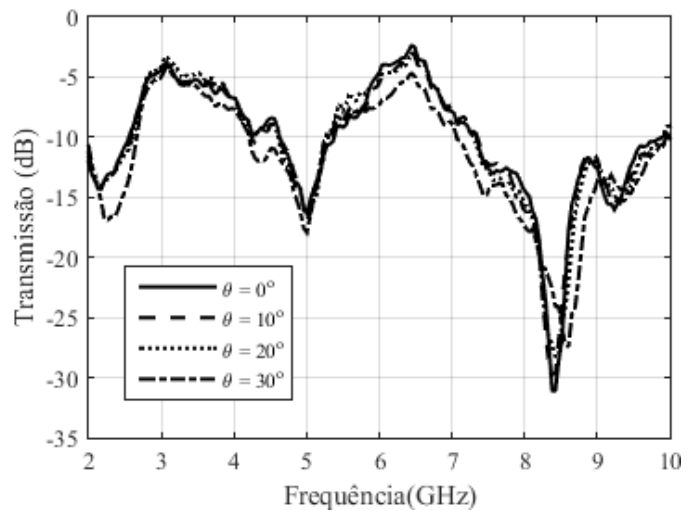


Fig. 8. Resposta de frequência medida do FSS construído para diferentes ângulos de incidência na polarização vertical.

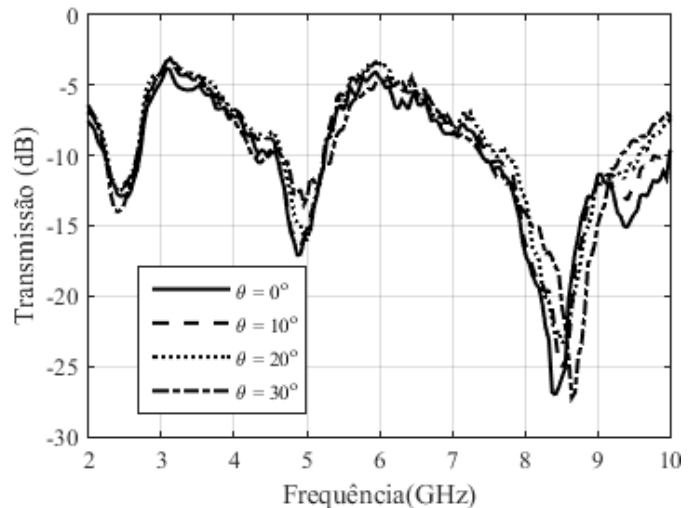


Fig. 9. Resposta de frequência medida do FSS construído para diferentes ângulos de incidência na polarização horizontal.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho, uma nova geometria que combina a fractalização e convolução, para miniaturização de FSS, foi proposta. Diferentemente de outras pesquisas recentes nesse

campo, este trabalho é pioneiro em propor e analisar uma combinação de um processo de fractalização relativamente recente, denominado Elemento Espiral Fractal (FSE), com a técnica matemática de convolução, potencializando suas propriedades individuais e resultando em um FSS com elementos com dimensões muito pequenas, mesmo para bandas de baixa frequência. Nós também investigamos o impacto na largura de banda dessas estruturas e suas características de estabilidade angular e independência de polarização. Como finalidades de validação, medições de um protótipo foram realizadas. Uma boa concordância entre os resultados foi observada. Como passos futuros deste trabalho, pretende-se obter uma expressão das frequências de ressonância em função das variáveis consideradas na análise paramétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem sinceramente ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento - CNPq pelo apoio ao trabalho de pesquisa sob o projeto 303693 / 2014-2.

REFERÊNCIAS

- [1] B. A. Munk, *Frequency selective surfaces: Theory and design*, New York, Wiley, New York, NY, 2000.
- [2] C. N. Chiu and K. P. Chang, "A Novel Miniaturized-Element Frequency Selective Surface Having a Stable Resonance", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, (2009), 1175 – 1177.
- [3] W. Li, T. Zhang, G. Yang, Q. Wu, "A Novel Frequency Selective Surface with Improved Miniaturization Performance", *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, (2012), 108 – 111.
- [4] N. Liu, X. J. Sheng, and J. J. Fan, "A Compact Miniaturized Frequency Selective Surface with Stable Resonant Frequency", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 62, 17–22, (2016), 17 – 22.
- [5] K. Sarabandi and N. Behdad, "A Frequency Selective Surface with Miniaturized Elements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, (2007), 1239 – 1245.
- [6] A. L. P. S. Campos, E. E. C. e Oliveira, and P. H. F. Silva, "Miniaturization of Frequency Selective Surfaces Using Fractal Koch Curves", *Microwave and Optical Technology Letters*, (2009), 1983 – 1986.
- [7] W. T. Wang et al., "Compact Angularly Stable Frequency Selective Surface Using Hexagonal Fractal Configurations", *Microwave and Optical Technology Letters*, (2009), 2541 – 2544.
- [8] J. Y. Xue, S. X. Gong, P. F. Zhang, W. Wang, and F. F. Zhang, "A New Miniaturized Fractal Frequency Selective Surface with Excellent Angular Stability", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, (2010), 131 – 138.
- [9] S. Ghosh and K. V. Srivastava, "An Angularly Stable Dual-Band FSS with Closely Spaced Resonances Using Miniaturized Unit Cell", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, (2017), 1 – 3.
- [10] B. S. Izquierdo, E. A. Parker, J. B. Robertson, and J. C. Batchelor, "Singly and Dual Polarized Convolved Frequency Selective Structures", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, (2010), 690 – 696.
- [11] V. F. Barros et al., "A Novel Simple Convolved Geometry to Design Frequency Selective Surfaces for Applications at ISM and UNII Bands", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, (2017). 553 – 563.
- [12] R. J. Langley and E. A. Parker, "Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit," *Electronic Letters*, (1983), 675 – 677.
- [13] A. L. P. S. Campos, F. C. G. Segundo, R. H. C. Maniçoba, A. G. Neto, and A. G. d'Assunção. "A simple fractal geometry to design multiband frequency selective surfaces", *Microwave and Optical Technology Letters*, (2012), 2321 – 2325.