

Análise da Resposta de uma *FSS* na Presença de um Substrato Inspirado em Estrutura *EBG* 2D

Leonardo Oliveira de Sousa
Centro de Ciências Exatas e Naturais¹
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido²
Mossoró, RN³
leosousaa98@gmail.com

Humberto Dionísio de Andrade^{2,3}
Departamento de Engenharias e
Tecnologias⁴
humbertodionisio@ufersa.edu.br

José Filipe de Lima^{2,3,4}
limaflipe569@gmail.com

Isaac Barros Tavares da Silva^{2,3,4}
isaac.barros@ufersa.edu.br

Emerson Nunes dos Santos^{1,2,3}
emerson.nunes@alunos.ufersa.edu.br

Nickson Saymon de Oliveira Lopes^{2,3,4}
nicksonsaymon@gmail.com

Matheus Emanuel Tavares Sousa^{2,3,4}
matheusemanuel_tavares@hotmail.com

Samanta Mesquita de Holanda^{2,3,4}
samanta.holanda@ufersa.edu.br

Resumo— Este artigo investiga a resposta da aplicação de um substrato dielétrico baseado em estrutura do tipo *Electromagnetic Band Gap (EBG)* em uma Superfície Seletiva em Frequência (*FSS*). Foram realizadas simulações no software ANSYS HFSS®, no qual foram variados parâmetros de dimensão da estrutura inspirada em *EBG* afim de verificar a frequência de ressonância, coeficiente de transmissão, largura de banda e estabilidade angular de uma *FSS* projetada para operar na frequência de ressonância de 3,56 GHz composta por substrato com duas permissividades relativas. Os resultados obtidos demonstraram melhorias no comportamento da frequência de ressonância, pois houve supressão de frequências não desejadas que surgiram para ângulos de incidência diferentes de zero, bem como foi observado o deslocamento da frequência de ressonância em sentido contrário ao esperado de acordo com a variação da permissividade total do substrato.

Palavras-Chave— Superfície Seletiva em Frequência, *FSS*, *EBG*, Substrato dielétrico, 5G.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a tecnologia móvel tem avançado significativamente e têm-se percebido grandes mudanças na forma como as pessoas se comunicam e se conectam, sendo uma dessas mudanças a tecnologia 5G. As redes 5G apresentam diversos recursos em comparação com as redes 2G/3G/4G, como alta velocidade de vários Gbps, baixa latência, conectividade massiva de dispositivos, aumento da capacidade de rede, baixo consumo de energia, largura de banda e confiabilidade, prevendo cerca de 1,2 bilhões de conexões até 2025 [1-4]. Para acompanhar a evolução da tecnologia 5G têm sido desenvolvidos dispositivos que atuam em conjunto com tal tecnologia, como antenas, absorvedores e Superfícies Seletivas em Frequência, mais conhecida pela sigla em inglês *FSS (Frequency Selective Surfaces)* [5,6].

Uma *FSS* é constituída por elementos de arranjo periódico do tipo ressonante, como um *patch*, um dipolo, um *loop*, ou outra estrutura complementar [7]. Atualmente, esses dispositivos são objetos de interesse para importantes estudos, os quais podem ter aplicações em diversas áreas, como lentes planas [8], redução da seção transversal de radar (da sigla em inglês, *RCS*) [9], conversores de polarização [10], antenas inteligentes [11] e segurança em redes sem fio [12]. Outra importante aplicação, é a implementação dessas estruturas para confinar sinais selecionados de rádio em ambientes *indoor*, aumentando a perda de transmissão de rádio causadas pelas paredes de uma construção [13]. Tais arranjos são projetados de acordo com sua aplicação, podendo apresentar

diversas formas de elementos e combinações, atuando como diferentes tipos de filtros de ondas eletromagnéticas [7]. Dada a sua importância e grande número de aplicações, várias técnicas têm sido propostas para melhorar o desempenho das *FSS*, estando entre elas o uso de estruturas do tipo *EBG* [14].

Estruturas *EBG* são arranjos periódicos artificiais que ajudam ou evitam a propagação de ondas eletromagnéticas em uma banda de frequência específica em materiais dielétricos ou condutores metálicos [15]. Além de fatores como o formato e tamanho do elemento, permissividade e espessura do substrato, ângulo de incidência e o espaço entre os elementos [16], a implementação da estrutura *EBG* no substrato dielétrico de uma *FSS* também implica em mudanças como surgimento, supressão, deslocamento, ou outras mudanças na frequência, na resposta do arranjo de uma *FSS*.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a resposta de uma *FSS* com estrutura *EBG* 2D com simetria translacional discreta no substrato para aplicação no confinamento de sinais baseados na tecnologia 5G, através de simulação computacional e variação dos parâmetros do substrato *EBG*, sendo analisada a frequência de ressonância, coeficiente de transmissão, largura de banda e estabilidade angular da superfície.

II. METODOLOGIA

Várias técnicas de análise e caracterização têm sido usadas para dimensionar estruturas *FSS*, sendo algumas delas baseadas em métodos numéricos. O presente trabalho utiliza-se do Método do Circuito Equivalente (MCE), desenvolvido inicialmente por Marcuvitz [17], para modelagem do arranjo periódico com formato de espiras quadradas, proposto por Langley e Parker [18]. Com desenvolvimento de rotinas computacionais foram modeladas espiras quadradas, as quais são utilizadas como base deste trabalho.

O modelo e as dimensões (em milímetros) da *FSS* sem *EBG* foram calculadas para uma frequência de ressonância de 3,56 GHz, apresentadas na Fig. 1(a). A Fig. 1(b) apresenta o circuito RL Série equivalente da estrutura analisada, o qual atua como um filtro rejeita faixa.

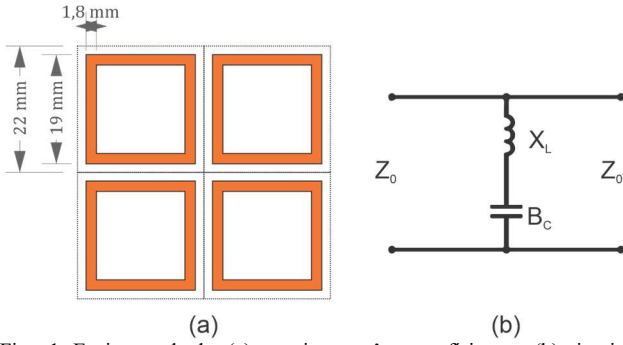


Fig. 1. Espira quadrada: (a) arranjo e parâmetros físicos; e (b) circuito equivalente.

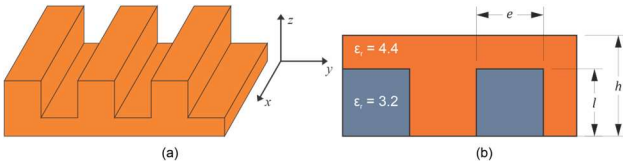


Fig. 2. (a) Configuração dielétrica com geometria translacional discreta ao longo do eixo y ; e (b) representação 2D do substrato com EBG utilizado.

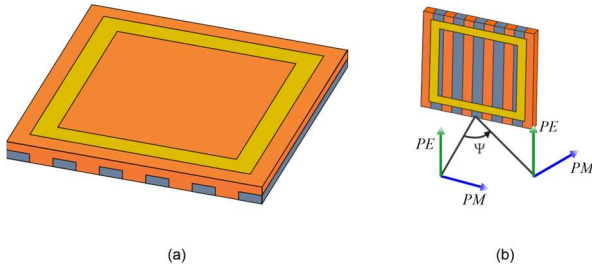


Fig. 3. Representação de uma célula de FSS simulada com substrato EBG: (a) perspectiva isométrica; (b) sentidos das polarizações vertical (PE) e horizontal (PM), e ângulo de incidência (ψ).

A partir do modelo projetado sem EBG, foi inserido uma estrutura EBG 2D com simetria translacional discreta no substrato da FSS, representada pela Fig. 2(a). Os materiais utilizados na composição do novo substrato são apresentados na Tabela 1, sendo utilizados dois FR4 com diferentes permissividades. A Fig. 2(b) apresenta a vista 2D do substrato, em que o material superior e inferior são os FR4 com permissividade relativa de 4,4 e 3,2, respectivamente. Os parâmetros l e e foram variados para análise da resposta da FSS. Neste trabalho, o valor de l foi variado de 0,4 a 1,6 mm com passo de 0,4 mm, e tais variações foram comparadas com a estrutura sem EBG ($l=0$). O valor de h foi mantido constante com 1,6 mm e a parte condutora da FSS é o cobre com espessura de 0,05 mm.

TABELA 1. CARACTERÍSTICA DOS MATERIAIS DO SUBSTRATO.

	FR4 (1)	FR4 (2)
ϵ_r	4,4	3,2
$\text{tg } \delta$	0,02	0,02
Espessura (h)	1,6 mm	1,6 mm

A Fig. 3(a) descreve a vista 3D de uma célula da FSS com substrato EBG, a qual é possível visualizar a disposição dos materiais com diferentes permissividades no substrato. Para todos os resultados simulados, foram analisadas as respostas

para a polarização vertical (PE) e horizontal (PM), descrito na Fig. 3(b).

Foi realizada também, a análise de estabilidade angular a partir da variação do ângulo de incidência da onda eletromagnética. Percebe-se o ângulo ψ (psi) na Fig. 3, o qual foi variado de 0° a 60° com incremento de 15° . E, para todos os tipos de análises do substrato simulado, foi analisada a Largura da Banda (BW, *Bandwidth*) das FSS obtidas em relação a -10 dB.

Todas as simulações foram realizadas utilizando o software ANSYS HFSS[®] através do método de Floquet, adotando o intervalo de frequência de 1 a 7 GHz com 451 pontos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Estudo da variação dos valores de l da estrutura EBG

Nas Fig. 4 e 5 são apresentadas as respostas em frequência para diferentes valores de l com incidência normal para polarização horizontal e vertical, respectivamente, tal que as curvas de l igual 0 representam a estrutura sem EBG no substrato.

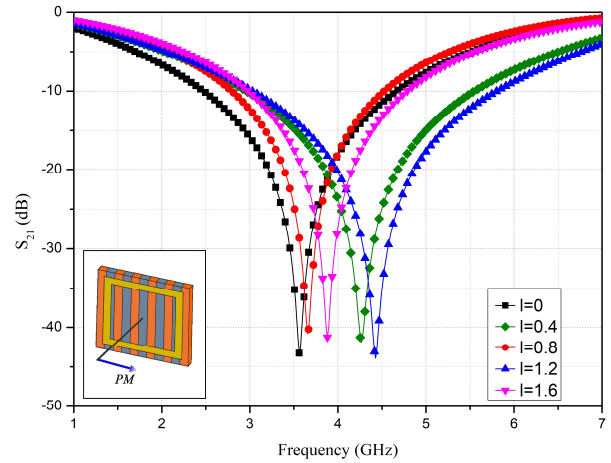


Fig. 4. Coeficiente de transmissão da FSS para diferentes valores de l com polarização horizontal e e igual a 2 mm.

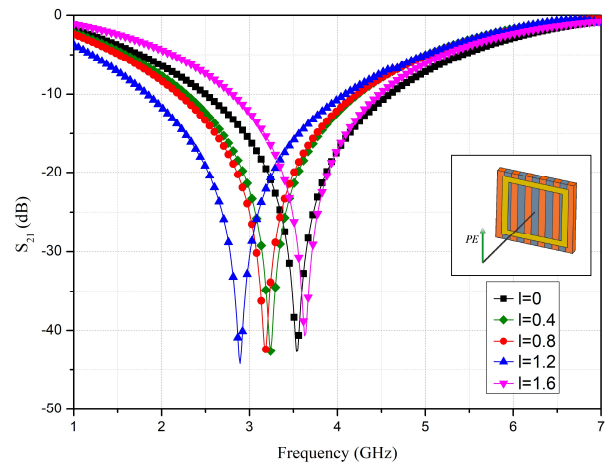


Fig. 5. Coeficiente de transmissão da FSS para diferentes valores de l com polarização vertical e e igual a 2 mm.

Observa-se na Fig. 4 que, para polarização horizontal, a frequência de ressonância desloca-se para direita com a presença do substrato EBG. Tal variação de frequência dá-se

pela mudança na permissividade do substrato, pois, à medida que se aumenta o valor de l , a permissividade total do substrato torna-se menor, deslocando à frequência para direita. Já na polarização vertical (Fig. 5), no qual o vetor de campo elétrico é paralelo as linhas de fronteiras do substrato dielétrico, a frequência de ressonância tende a deslocar-se para esquerda devido aos efeitos de bordas nas fronteiras entre os dois materiais. Na Tabela 2 são apresentadas a frequência de ressonância, o coeficiente de transmissão e a largura de banda para os diferentes valores de l com incidência normal.

TABELA 2. COMPORTAMENTO DA FSS SIMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE l COM INCIDÊNCIA NORMAL.

l (mm)	f_r (GHz)		S_{21} (dB)		BW (GHz)	
	PM	PE	PM	PE	PM	PE
0	3,56	3,53	-43,30	-42,71	2,17	2,08
0,4	4,27	3,24	-41,87	-42,65	2,59	1,95
0,8	3,65	3,17	-40,78	-42,87	1,72	2,01
1,2	4,43	2,89	-43,95	-44,24	2,77	2,24
1,6	3,88	3,63	-41,25	-40,66	1,78	1,66

Conforme a Tabela 2, verifica-se que não houve relação linear da largura de banda da estrutura ressoante com relação a variação do valor de l . A estrutura com l igual a 1,6 mm, à qual encontra-se totalmente dividida periodicamente por substratos com diferentes permissividades, apresentou o menor estreitamento da largura de banda para polarização vertical, com redução de 0,42 GHz (20%) em relação a estrutura de $l = 0$. E a estrutura com l igual a 0,8 mm apresentou a menor largura de banda para polarização horizontal, com redução de 0,45 GHz (21%) em relação a estrutura de $l = 0$. Para l igual a 1,2 mm, obteve-se a maior largura de banda, com aumento de 0,6 e 0,16 GHz, representando um aumento de 27,6% e 7,7% para polarização horizontal e vertical, respectivamente.

O arranjo com l igual a 1,6 mm sofreu a menor influência dos efeitos de bordas, obtendo o menor deslocamento da frequência de ressonância, deslocando 0,1 GHz à direita na polarização vertical, enquanto que na polarização horizontal o deslocamento foi de 0,32 GHz à direita. Para os dois tipos de polarizações, a média do coeficiente de transmissão foi de -42,43 dB para todos os valores de l , apresentando pouca variação do coeficiente de transmissão. As demais configurações de estruturas apresentaram elevadas variações de frequência entre modos de polarização, tal que para o l igual a 1,2 mm obteve-se a maior variação de frequência entre as polarizações horizontal e vertical, com valores de 4,43 e 2,89 GHz, respectivamente. Comparando as configurações com l igual a 0, 1,6 e 1,2 mm, a variação entre os modos de polarização foram de 0,8%, 6,9% e 53,3%, respectivamente.

Devido à estrutura com l igual 1,6 mm apresentar menor variação da frequência de ressonância entre os modos de polarização, foi variado o valor de e para 1 mm da mesma e verificada sua resposta. Os resultados são apresentados nas Fig. 6 e 7 para os modos de polarização horizontal e vertical, respectivamente.

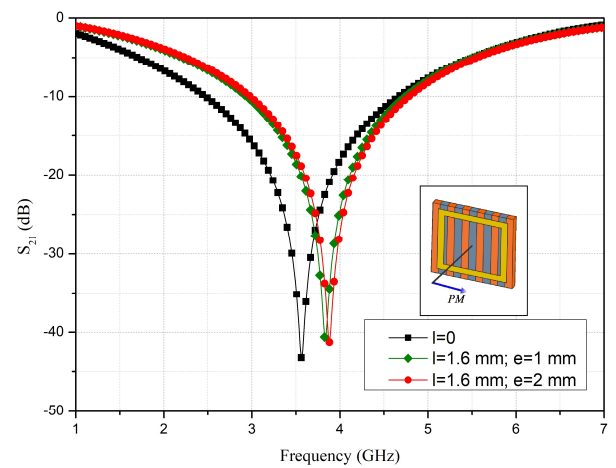


Fig. 6. Coeficiente de transmissão para l igual a 0 e 1,6 mm com valores de e igual a 1 e 2 mm com polarização horizontal.

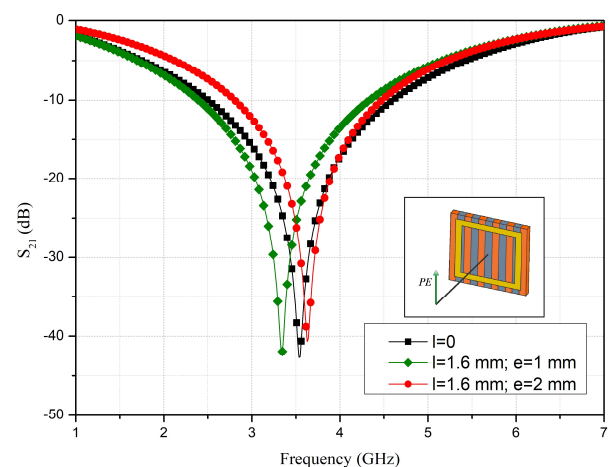


Fig. 7. Coeficiente de transmissão para l igual a 0 e 1,6 mm com valores de e igual a 1 e 2 mm com polarização vertical.

Observa-se na Fig. 6 que, para polarização horizontal, os resultados das estruturas com EBG no substrato mantiveram-se quase idênticas, não apresentando grandes diferenças da frequência de ressonância e largura de banda quando o valor de e foi variado para 1 mm, tal que para e igual a 2 mm o deslocamento foi de 0,320 GHz para direita em relação a $l = 0$, e 0,267 a direita para e igual a 1 mm. Na Fig. 7, para polarização vertical, houve uma diminuição de 9% na largura de banda e um deslocamento da frequência de ressonância de 0,21 GHz à esquerda da estrutura com e igual a 1 mm em relação a estrutura com l igual a 0 mm, e uma diminuição de 21% na largura de banda e deslocamento de da frequência de ressonância de 0,08 GHz à direita em relação a estrutura em l igual a 0. Neste caso, a predominância dos efeitos de borda foi maior com o menor valor de e . O coeficiente de transmissão demonstrou pouco deslocamento, em torno de -41,19 dB. A variação entre os modos de polarização para e igual a 1 mm foi de 15%, enquanto que para e igual a 2 mm foi de 6,9%.

B. Estudo de estabilidade angular

A Fig. 8 apresenta os resultados obtidos nas simulações para o estudo de estabilidade angular para todos os valores de l polarizados horizontalmente e verticalmente, mantendo o valor de e constante igual a 2 mm.

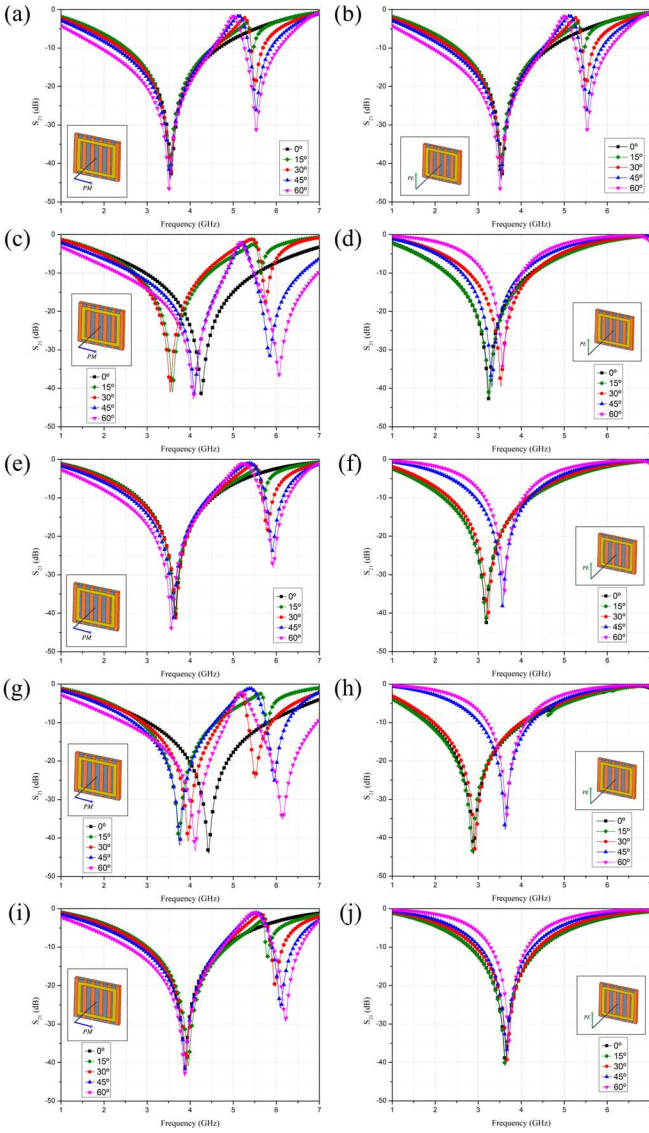


Fig. 8. Estudo de estabilidade angular das estruturas com $e=2$ mm. Os gráficos à esquerda representam a resposta para polarização horizontal e à direita para polarização vertical, com valores de l iguais a: (a) e (b) 0 mm; (c) e (d) 0,4 mm; (e) e (f) 0,8 mm; (g) e (h) 1,2 mm; (i) e (j) 1,6 mm.

Percebe-se que, na Fig. 8, há o surgimento de uma segunda frequência de ressonância em polarização horizontal quando o ângulo de incidência é diferente de zero para todos os valores de l . Já na polarização vertical, houve surgimento de uma segunda frequência apenas na configuração padrão ($l=0$), ou seja, com a inserção do substrato dielétrico inspirado em *EBG*, o surgimento da segunda frequência foi suprimido pela geometria do substrato.

Em relação a estabilidade angular da *FSS*, observa-se que a estrutura se apresentou estável sem a presença do substrato *EBG* para ambos modos de polarização, Fig. 8(a) e 8(b). Com a presença da estrutura *EBG*, a estabilidade angular apresentou melhorias nas polarizações verticais com l igual 0,4 mm (Fig. 8(d)) e l igual a 1,2 mm (Fig. 8(g)). A resposta da estrutura com l igual a 0,8 em polarização vertical apresentou um leve deslocamento na frequência de 0,41 GHz à direita para ângulos maiores que 30°, Fig. 8(f).

Como observa-se na Fig. 8(c) e 8(g), as estruturas com l igual a 0,4 e 1,2 mm apresentaram instabilidades significativas na polarização horizontal. Tais estruturas são detalhadas a partir das Tabela 3 e 4 para l igual a 0, 0,4 e 1,2

mm, respectivamente, as quais são apresentadas as frequências de ressonância e largura de banda para cada ângulo de incidência.

TABELA 3. DADOS NUMÉRICOS DO GRÁFICO DA FIG. 10(C) E FIG. 10(D), $L=0,4$ MM.

Ângulo de incidência	f_r (GHz)		BW (GHz)	
	<i>PM</i>	<i>PE</i>	<i>PM</i>	<i>PE</i>
0°	4,27	3,24	2,59	1,95
15°	3,59	3,25	1,72	2,02
30°	3,23	3,53	1,68	1,47
45°	4,09	3,32	2,15	1,41
60°	4,08	3,57	2,49	0,88

TABELA 4. DADOS NUMÉRICOS DO GRÁFICO DA FIG. 10(G) E FIG. 10(H), $L=1,2$ MM.

Ângulo de incidência	f_r (GHz)		BW (GHz)	
	<i>PM</i>	<i>PE</i>	<i>PM</i>	<i>PE</i>
0°	4,43	2,89	2,77	2,24
15°	3,73	2,85	1,73	2,24
30°	3,96	2,93	1,78	2,04
45°	3,76	3,63	1,88	1,21
60°	4,12	3,65	2,35	0,88

Conforme a Tabela 3, a estrutura com l igual a 0,4 mm demonstrou-se baixa estabilidade angular, apresentando deslocamento máximo da frequência de ressonância de 1,04 GHz à esquerda em relação a incidência de 0° para polarização horizontal, responsável pelo ângulo de 30°. Para polarização vertical, o valor máximo foi de 0,33 GHz à direita para o ângulo de 60°. Em relação a largura de banda, tal estrutura apresentou significativas variações, com valores mínimos de 1,68 e 0,88 GHz, para polarização horizontal e vertical, respectivamente; e máximos de 2,59 e 2,02 GHz, para polarização horizontal e vertical, respectivamente.

Analisando a Tabela 4, a estrutura com l igual a 1,2 mm apresentou deslocamento máximo de 0,7 GHz à esquerda (ângulo de incidência de 15°) em relação a incidência de 0° para polarização horizontal, caracterizando a maior variação neste valor de l . Já para polarização vertical, o máximo foi de 0,76 GHz à direita (incidência de 60°) em relação a incidência de 0°, demonstrando maiores instabilidades nos ângulos de 15 e 60°. Em relação a largura de banda, a estrutura com l igual a 1,2 mm apresentou valores mínimos de 1,73 GHz (15°) e 0,88 GHz (60°), para polarização horizontal e vertical, respectivamente; e máximos de 2,77 GHz (0°) e 2,24 GHz (0° e 15°), para polarização horizontal e vertical, respectivamente.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho investigou-se a resposta que a aplicação de uma estrutura *EBG 2D* com simetria translacional discreta no substrato de uma *FSS* apresenta sobre o coeficiente de transmissão, frequência de ressonância, largura de banda e estabilidade angular na faixa de frequência do 5G para variações de parâmetros do substrato dielétrico.

Foi observado que, com a inserção do substrato inspirado em estrutura *EBG*, com a incidência do vetor de campo elétrico paralelo as linhas de interface entre os dois materiais, ocorre um deslocamento da frequência de ressonância à esquerda à medida que o parâmetro l aumenta. Este fenômeno causado pelos efeitos de bordas sobressai a diminuição da permissividade total do substrato que aumenta com o valor de

l , o qual tenderia a mover a frequência para direita. Este deslocamento de frequência permite também o dos elementos periódicos da FSS mantendo a frequência desejada.

No mesmo caso no qual o vetor de campo elétrico é paralelo as linhas de interface, ocorreu a supressão de uma segunda frequência de ressonância quando os ângulos de incidência são diferentes de 0° , melhorando a estabilidade angular do arranjo. E, referindo-se a largura de banda, não se obteve uma correlação para as variações dos parâmetros propostos. Neste trabalho não foi aplicado um fator de correção, sendo analisado apenas a influência do substrato EBG. Para trabalhos futuros pode-se investigar o comportamento de um substrato com materiais dispostos em formato xadrez afim de analisar a possibilidade de melhorias no modo de polarização horizontal, além disso, pode ser aplicado técnicas de inteligência artificial para previsões dos resultados simulados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a assistência e apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Grupo de Estudo e Pesquisa em Eletromagnetismo Aplicado e Comunicação (GEPEAT), Capítulo Estudantil MTT-S UFERSA e Laboratório de Telecomunicações e Micro-Ondas (LABMICRO) da UFERSA.

REFERENCES

- [1] GSMA. *Two-Thirds of Mobile Connections Running on 4G/5G Networks by 2025, Finds New GSMA Study*. Acesso: 23 abr. 2023. Disponível em: <https://www.gsma.com/newsroom/press-release/two-thirds-mobile-connections-running-4g-5g-networks-2025-finds-new-gsma-study/>
- [2] G. Barb and M. Ottesteanu, "4G/5G: A Comparative Study and Overview on What to Expect from 5G," 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Milan, Italy, 2020, pp. 37-40, doi: 10.1109/TSP49548.2020.9163402.
- [3] HE Xiaolong, *Discussion on the application of 5G communication technology in smart power grid [J]*. Electronics World, 2020 (10):64-65.
- [4] J. Han, Y. Wang, Y. Wang, X. Feng and Z. Liu, "Typical application and economic evaluation under the background of deep integration of 5G+ smart grid", 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Hangzhou, China, 2022, pp. 665-669, doi: 10.1109/ACPEE53904.2022.9783923.
- [5] T. -K. Wu, "Improved Broadband Bandpass FSS Filters For 5G Applications", 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, USA, 2018, pp. 2033-2034, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609110.
- [6] M. B. Kakhki e T. A. Denidni, "Beam Tilting Antenna Using FSS Layer for 5G Applications", 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, USA, 2018, pp. 47-48, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608567.
- [7] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. 3 ed. New York, United States: Wiley-Blackwell, 2000. 440 p. ISBN 978-0471370475.
- [8] S. Pandey, R. K. Arya e R. Mittra, "Flat lens design using space-qualifiable multilayer frequency select variables", 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, pp. /APS.2016.7696528.
- [9] V. K. Chakradhary, H. Bhusan Baskey e M. J. Akhtar, "Novel X-band Microwave Absorber Based on CarbonNanofiber Integrated with the FSS Structure for RCS Reduction of Strategic Targets", 2018 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), Kolkata, India, pp. 1-4, 2018.
- [10] C. Yang, P. Liu e X. Zhu, "Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna Array Based on FSS Polarization Converter", 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Xi'an, China, pp. 1-3, 2019.
- [11] J. Li, Q. Zeng, R. Liu e T. A. Denidni, "A Gain Enhancement and Flexible Control of Beam Numbers Antenna Basedon Frequency Selective Surfaces", in IEEE Access, vol. 6, pp. 6082-6091, 2018.
- [12] S. Yadav, C. P. Jain e M. M. Sharma, "Smartphone Frequency Shielding with Penta-Bandstop FSS for Security and Electromagnetic Health Applications", in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 61, no. 3, pp. 887- 892, June 2019.
- [13] M. Raspopoulos e S. Stavrou, "Frequency Selective Buildings Through Frequency Selective Surfaces", in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 8, pp. 2998-3005, Aug. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2158779.
- [14] Y. -M. Yu, C. -N. Chiu, Y. -P. Chiou e T. -L. Wu, "Suppression of end-fired emission for a miniaturized-element frequency-selective shielding surface with finite size using EBG", 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Dresden, Germany, 2015, pp. 50-55, doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256131.
- [15] K. V. Prasad, M. V. S. Prasad, M. S. Kumar e B. Alekhya, *Surface wave suppression in patch arrays using EBG structures*. Conference on Signal Processing and Communication Engineering Systems (SPACES), Dept. of ECE, K L. p. 99-104. 2018.
- [16] A. L. S. Campos, *Superfícies seletivas em frequência: análise e projeto*. Natal: IFRN Editora, 2009. 196 p.
- [17] Marcuvitz, N., 'Wave guide Handbook' (McGraw-Hill 1951).
- [18] R. J. Langley e E. A. Parker, *Equivalent circuit model for arrays of square loops*. Electronics Letters, [S.L.], v. 18, n. 7, p. 294, 1982. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/el:19820201>.