

Equivalent circuit Method applied on a Tri-Band reconfigurable FSS design in S-Band

Gabriel Amaral Souto¹, Humberto Dionísio de Andrade¹, Matheus Emmanuel Tavares Souza¹, José Lucas da Silva Paiva¹, Idalmir de Souza Queiroz Júnior¹

¹Centro Integrado de Tecnologia e Desenvolvimento – Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)

Caixa Postal 137 – 59.625-900 – Mossoró – RN – Brazil

{humbertodionisio, idalmir}@ufersa.edu.br, gamaralsouto@bol.com.br

Abstract. *The most commonly used filtering elements in communication technology are the frequency selective surfaces (FSS): conductive planar structures that prevent the passage of wave fronts at certain frequencies. Through the equivalent circuit method (ECM) three designs were simulated and later measured to collect and analyze the components of the scattering matrix (dB). This study brings a ring-Jerusalem Cross resonator, active through short-circuit method, resonant in 1,8, 3.1 and 5.8 GHz band reject solution, reconfigurable to 3.1 GHz. It was observed that the project has operation in 1,8, 3.1 and 5.8 GHz with reflection coefficient at -19.33, -29.19 and -27.29 dB with 754 MHz bandwidth, respectively.*

Resumo. *Quando se deseja filtrar ondas eletromagnéticas em propagação são utilizadas as superfícies seletivas em frequência (SSF): estruturas planares condutivas que previnem a passagem de uma frente de onda em determinadas frequências. Através do método do circuito equivalente (ECM) dois projetos foram simulados para análise dos componentes de sua matriz espalhamento (dB). Esse estudo traz uma solução com geometria em anel-Cruz de Jerusalém, ativa pelo método do curto circuito, ressoante em 1.8, 3.1 e 5.8 GHz com coeficiente de reflexão em -19,33, -29.19 e -27.29 dB, respectivamente.*

1.Introdução

Superfícies seletivas de frequência (FSS), do inglês Frequency Selective Surfaces (FSS), são condutores planares, semelhantes às antenas de microfita, amplamente utilizadas em dispositivos móveis e inteligentes, que podem atuar como um filtro de frequência; quando colocados sob uma frente de onda, podem responder ativa ou passivamente para rejeitar ou selecionar uma determinada largura de banda [Campos 2008].

Projetar soluções inovadoras em superfícies reconfiguráveis do seletor de frequência se torna uma contribuição importante ao pensar em filtros versáteis, especialmente ao usar modelos híbridos. Neste trabalho é apresentada a sequência lógica para design de uma Superfície Seletiva em Frequência e a simulação de um projeto rejeita-faixa em 1.8, 3.1 e 5.8 GHz, ativa pelo método do curto circuito com a geometria combinada entre a Cruz de Jerusalém e o Anel externo.

Para ter uma ideia completa do desempenho de um projeto de FSS, é necessário analisar o coeficiente de transmissão da matriz de dispersão [Balanis 2016] quando o dispositivo é exposto a uma faixa de frequências, o método dos elementos finitos é usado para obter resultados do simulador. e então, usando o método do espaço livre, os parâmetros da matriz de espalhamento são medidos com mais eficiência [Wu 2012] para corroborar o que foi simulado.

Os filtros passivos são difundidos principalmente porque são simples de projetar e fabricar, o filtro de tela usado nas janelas de forno de microondas em sistemas de aquecimento é um exemplo clássico para dispositivos passivos comerciais. No entanto, quando se trata de filtros ativos, que podem responder diferentemente quando colocados em outras condições, o estado da técnica permanece experimental [Marcuvitz 1956].

Recentemente, o foco da pesquisa em tecnologia da comunicação também se concentrou no desenvolvimento de dispositivos operando na banda de rádio aplicada a expansões de serviços Wi-Fi, entre 3,3 a 3,5 GHz (5G) e também a 5,8 GHz [ECC 2019]. Está se tornando mais comum encontrar filtros, antenas e absorvedores que operam nessa faixa de frequência. Estudos adicionais sobre filtros ativos são necessários para aprimorar a escolha de dispositivos que podem oferecer blindagem eletromagnética, beneficiando particularmente os setores de sistemas de segurança, saúde e sistemas de comunicação.

A metodologia apresentará o método do Circuito Equivalente (MCE) utilizado para projetar os elementos primários da geometria (Cruz de Jerusalém e Anel Externo) bem como o método do curto-circuito do qual é possível retirar o comportamento do dispositivo chaveado sem que seja necessário o projeto de um circuito de alimentação para os dispositivos chaveadores.

2. Metodologia

Para qualquer geometria apresentada neste estudo, o ponto de partida para o cálculo da reatância e da admitância do elemento será sempre o dipolo simples, como mostra a Figura 1. As equações aproximadas 1 a 5 colocam a reatância e a admitância normalizada [Campos 2008] para o modo de incidência da TM. As fitas têm uma espessura desprezível com largura w e uma periodicidade p . O ângulo ϕ é o ângulo de incidência da onda [Chen 2019].

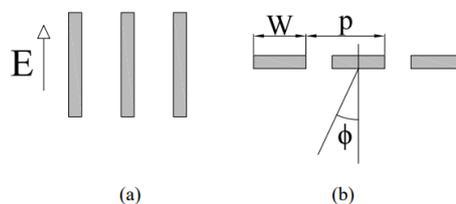


Fig. 1. Representação de um arranjo de dipolos periódicos (a) em uma incidência TM01 (b) aspectos construtivos.

Este método simplifica a análise do SSF em relação ao seu equivalente, o método de onda completa, por reduzir os recursos computacionais alocados e requer menor complexidade de código para o programador [Lu 2016]. Ele fornece ao projetista

uma comparação com um filtro em um circuito elétrico (capacitores e indutores em paralelo), dando uma idéia do que está acontecendo com esse condutor quando colocado sob um campo de incidente.

A equação 1 fornece a reatância de um elemento em função da periodicidade p , largura w , comprimento de onda λ e ângulo de incidência sobre o eixo z Φ [Campos 2008].,

$$\frac{X_i}{Z_0} = F(p, w, \lambda, \Phi) = \frac{p \cos \Phi}{\lambda} \left\{ \ln \left[\operatorname{cosec} \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \Phi) \right\} \quad (1)$$

Para o modo de propagação transversal magnética (TM), o campo elétrico normalmente é incidente na fita e o campo magnético é paralelo (ou antiparalelo, dependendo do quadro) com o ângulo ϕ mostrado em 1.b. Este cálculo leva em consideração não a periodicidade, mas a diferença entre as faixas condutoras g [Campos 2008].

As equações 2 a 4 são fornecidas como parâmetros para calcular a função G necessária para determinar a reatância indutiva.

$$G(p, w, \lambda, \Phi) = \frac{0,5(1 - \beta^2) \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) (C_+ + C_-) + 4\beta^2 C_+ C_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta^2}{4}\right) + \beta^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{8}\right) (C_+ + C_-) + 4\beta^6 C_+ C_-} \quad (2)$$

$$\beta = \operatorname{sen} \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \quad (3)$$

$$C_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \operatorname{sen} \Phi}{\lambda} - \left(\frac{p \cos \Phi}{\lambda}\right)^2}} - 1 \quad (4)$$

Onde C_+ e C_- são termos numéricos usados para estimar os coeficientes na equação 2 com base na frequência central de análise do projeto. Usando apenas os aspectos construtivos e as designações de design para aplicações, é possível calcular numericamente a admissão em função da reatância indutiva, como mostra a equação 5 [Campos 2008].

$$\frac{B_c}{Z_0} = 4F(p, w, \lambda, \theta) \quad (5)$$

As equações 1 a 5 são válidas apenas quando a condição $p(1 + \operatorname{sen} \Phi) / \lambda < 1$ é atendida. Eles só podem ser usados no modo TE ou TM, excluindo também os casos em que há polarização cruzada [Branhão 2019].

Essa geometria é escolhida principalmente para obter um comportamento de banda tripla quando associado a um elemento de anel em um formato híbrido. A FSS híbrida pode ser descrita como um dispositivo cujos seus elementos periódicos consistem em duas ou mais tipologias de geometria. A Figura 2 mostra a geometria escolhida como uma matriz de 2 por 2 elementos.

O método de curto-circuito é aplicado neste estudo por sua simplicidade na aplicação nos projetos fabricados, principalmente porque não é necessário um projeto de linha de alimentação. Consiste em substituir o agente ativo, neste caso o diodo PIN, por um condutor de curto-circuito com resistência e reatância semelhantes [Munk 2014], tanto para os estágios de simulação quanto de medição. A Figura 2 mostra o projeto final do condutor de curto-circuito projetado para ter impedância semelhante ao modelo desejado de diodo PIN.

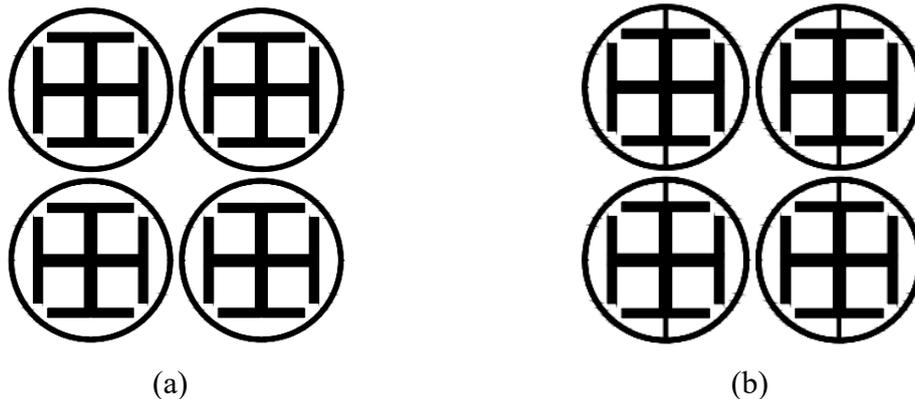


Fig. 2. Geometria do elemento híbrido 4 por 4 proposto (a) Modo OFF (b) Modo ON.

Pelo método dos elementos finitos é possível substituir o dispositivo chaveado por um condutor com mesma impedância característica e, quando faz-se presente o campo incidente, seu comportamento é idêntico ao dispositivo chaveado no âmbito da simulação.

É importante notar que todas as dimensões do projeto foram encontradas usando o ECM, exceto a linha de curto-circuito. Um método analítico para descrever superfícies seletivas de frequência híbridas ou projetos ativos não é conhecido [Cong 2017].

3. Resultados e Discussão

O projeto foi centrado em três frequências principais para aplicações em blindagem eletromagnética: 1,8, 3,1 e 5,8 GHz; utilizando FR4 (fibra de vidro) com altura de 1,6 mm como substrato. Projeta-se uma tipologia híbrida para que fosse possível obter o comportamento *Tri-band* desejado.

Os métodos frequentemente utilizados para obter melhores resultados são o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método de Circuitos Equivalentes [Debus 2019]. Ambos foram utilizados em diferentes estágios, o ECM foi utilizado para encontrar uma melhor dimensão para as frequências do projeto e o MEF comercial foi utilizado para simular a geometria final e obter a matriz de espalhamento.

Primeiro, é necessário analisar como os campos induzidos se comportam no dispositivo para entender melhor o comportamento da matriz espalhamento. Para elementos filtrantes, geralmente é observado apenas o coeficiente de transmissão - $S(2,1)$ - que descreve a parte da onda transmitida em função da frente da onda incidente.

A distribuição dos campos elétrico e magnético no condutor é mostrada na Figura 5. Dentro dos algoritmos da simulação, foi considerado um modo de propagação TM01 [Silva 2008], que pode explicar o comportamento dos campos induzidos mostrados em 5.a e 5. b.

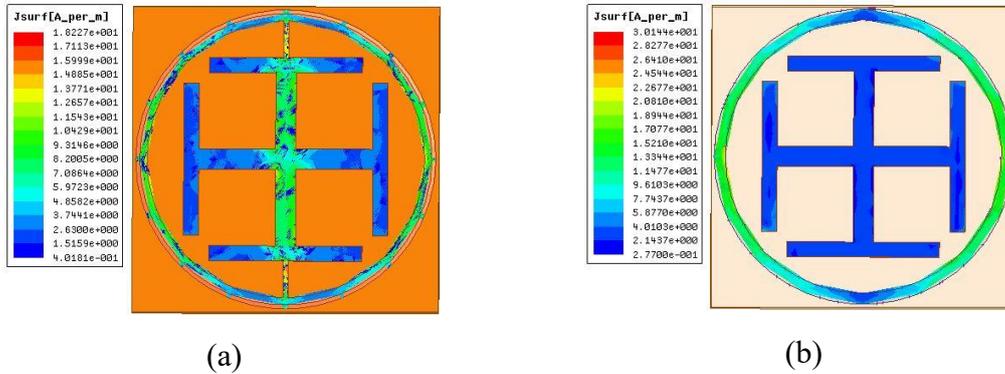


Fig. 3. Comportamento da onda incidente em (a) Modo ON (b) Modo OFF.

É possível perceber que o curto-circuito na figura 3a causou uma reconfiguração da densidade superficial de corrente como era previsto. Este fenômeno sugere que os lobos de rejeição foram também rearranjados para que este comportamento seja observado no coeficiente de transmissão.

Também é possível observar que outro lóbulo de rejeição é formado em 8 GHz, que o comportamento não pôde ser previsto no ECM por sua crescente falta de precisão progressiva quando a frequência é aumentada [Campos 2008]. Nesses casos, seria adequado usar um método analítico como o *Full Wave Method* (FWM) associado ao Teorema de Galerkin [Marcuvitz 1956] para ter uma ideia completa de como o elemento ressoa para frequências mais altas.

Os dados extraídos de uma simulação comercial, pelo MEF através do *Ansys HFSS*®, são exibidos na figura 4,

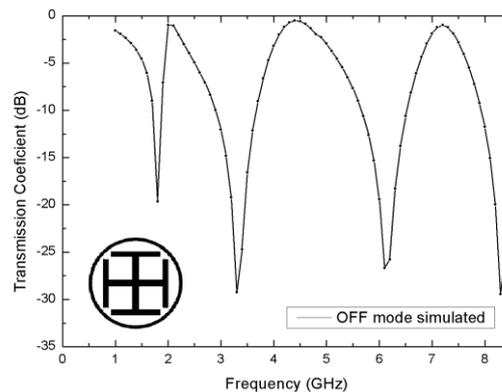


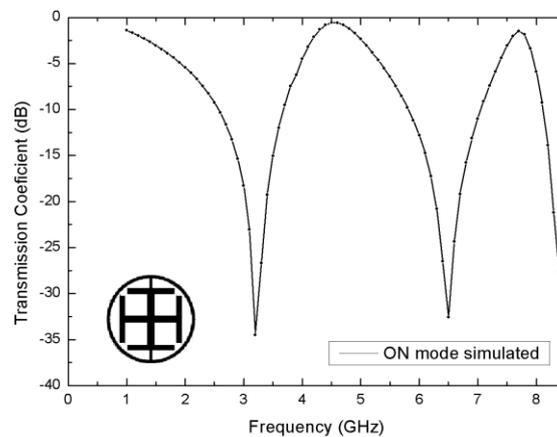
Fig. 4 Coeficiente de transmissão, S(2,1), versus Frequência (Modo OFF).

É possível notar que o projeto ressoou dentro da largura de banda desejada, enquanto no modo OFF, o lóbulo aparente em 8 GHz também é contabilizado como uma função não desejada. A Tabela 1 supõe os pontos de interesse na figura 4.

Tabela 1. Variáveis de interesse mostradas na Figura 4.

Parâmetro	Dispositivo em modo OFF		
	1.8	3.1	5.8
Frequência (GHz)	1.8	3.1	5.8
Coefficiente de Transmissão	-19.33 dB	-29.19 dB	-19.78 dB
Largura de Banda	101 MHz	557 MHz	754 MHz

Após o chaveamento, a redefinição da densidade superficial de corrente faz com que o primeiro lobo em 1,8 GHz desapareça e um desvio considerável da largura de banda em torno de 5,8 GHz.

Fig. 5. Coeficiente de transmissão, $S(2,1)$, versus Frequência (Modo ON).

Durante a fase do projeto, foi possível afirmar que o primeiro lobo localizado em torno de 1,8 GHz deve-se à presença do anel externo, o rearranjo das correntes parece ter causado uma fusão dos dois primeiros lóbulos devido à sua proximidade e grande largura de banda. Os resultados são mostrados na Tabela 2:

Tabela 2. Variáveis de interesse mostradas na Figura 5.

Parâmetro	Dispositivo em modo ON		
	1.8	3.1	5.8
Frequência (GHz)	1.8	3.1	5.8
Coefficiente de Transmissão	-4.01 dB	-29.98 dB	-9.91 dB
Largura de Banda	-	831 MHz	-

Percebe-se que a ativação do dispositivo foi alcançada pelos desaparecimentos dos lobos em 1.8 e 5.8 GHz, observado pelo coeficiente de reflexão de -4.01 e -9.91 dB, quando comparados os dados da tabela 1 em com a tabela 2.

4. Conclusão

O projeto de estruturas planares com o objetivo de filtrar ondas eletromagnéticas trata-se de uma análise cuidadosa das frequências de aplicação e parâmetros construtivos. Os modelos híbridos mostram-se soluções mais eficazes quando comparados a elementos únicos quando é necessário filtrar várias frequências em um único dispositivo.

Um modelo híbrido Anel-Cruz apresentou resultados que concordam com o projeto proposto em design por *ECM* e *FEM*, sendo uma solução *Tri-band* em 1,8, 3,1 e 5,8 GHz, rejeita-faixa, com -17,55, -31,99 e -25,31 dB no modo ON, respectivamente, e -3,9, -30,11 e -12,55 dB no modo OFF, respectivamente, atuando como um passa-faixa para a frequência de 1,8 GHz. É possível afirmar que o projeto é operacional até a fase de simulação e respondeu de acordo com o protótipo modelado.

Este estudo utilizando diodos PIN no protótipo, bem como sua inclusão na fase de simulação, além do desenvolvimento e implementação de um projeto de linha de alimentação para fazer um estudo paramétrico de várias maneiras de ativar os diodos e seus respectivos efeitos na matriz de dispersão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio CNPq, CAPES, Grupo de Telecomunicação e Eletromagnetismo Aplicado da Universidade Federal Rural do Semiárido (Ufersa), Instituto de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) e Instituto de Ciência e Tecnologia do Rio Grande da Paraíba (IFPB).

Referências

- Balanis, C. (2016) “Antenna Theory: Analysis and design”. 6. ed. New York, United States: Wiley, 2016. 1109 p. v. 1. ISBN 1118642066.
- Campos, A. (2008). “Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e projeto”. 1. ed. Natal, Rio Grande do Norte: IFRN. 198 p. v. 1.
- Wu, T. K. (2012) “Frequency Selective Surface and Grid Array”. 2. ed. New York, United States: Wiley, 2012. 327 p. v. 1. ISBN 978-0471311898.
- Munk, B. A. (2014) Frequency Selective Surface: Theory and Design. 3. ed. New York, United States: Wiley-Blackwell, 2014. 440 p. ISBN 978-0471370475.
- Marcuvitz, N. (1951) “Waveguide Handbook”. 2. ed. New York, United States: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951. 446 p.
- Chen, H. et al. “Design of an Ultra-Thin Magnetic-Type Radar Absorber Embedded With FSS.” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, VOL. 9, 2010 Networks National Laboratory, CNIT Via Cisanello 145, Beijing, China.
- Branhão, T.H. et al. (2019) FSS-based Dual-Band Cassegrain Parabolic Antenna for RadarCom Applications. *Journal on Wireless Communications and Networking*, Photonic Networks National Laboratory, CNIT Via Cisanello 145, Pisa, Italy, 56124.
- ECC. Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). THE EUROPEAN TABLE OF FREQUENCY ALLOCATIONS AND APPLICATIONS IN THE

FREQUENCY RANGE 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE). Registro em: 16 mar. 2019.

- Chen, Hai-yan et al. (2010) Design of an Ultra-Thin Magnetic-Type Radar Absorber Embedded With FSS. *IEEE Antennas And Wireless Propagation*, Lisbon, v. 9, n. 2, p.899-901, jun. Bianual.
- Cong, L. (2017). Ultra-wideband RCS Reduction and Gain Enhancement of Aperture-Coupled Antenna Based on Hybrid-FSS. *Radioengineering*, Beijing, v. 11, n. 2, p.217-239.
- Debus, C.; Bolivar, P. H. (2007). Frequency selective surfaces for high sensitivity terahertz sensing. *Applied Physics Letters*, Viena, v. 91, n. 184102, p.541-544, out.
- Chen, H et al. (2018) Experimental Demonstration of Microwave Absorber Using Large-Area Multilayer Graphene-Based Frequency Selective Surface. *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, London, v. 0018, n. 9480, p.327-345, jul. 2018. Anual.
- Lu, Z. (2016) A Dual-band Reconfigurable FSS Composite Structure Based on MEMS Switches. *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, Wuxi, v. , n. , p.630-633.
- Nayaran, S. (2017) et al. Design of Low Observable Antenna using Active Hybrid-Element FSS Structure for Stealth Applications. *International Journal Of Electronics And Communications*, Bangalore, v. , n. , p.1455-1457.