

Novas configurações e aplicações de absorvedores de radiação eletromagnética em sistemas de comunicação e defesa

Victor Dmitriev e Jorge Andrey S. Macêdo

Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará – Belém – Brasil
victor@ufpa.br

Resumo — Absorvedores de radiação eletromagnética são utilizados em diversas aplicações civis e militares. Uma importante aplicação militar está relacionada na redução da detecção de aeronaves, tanques e outros veículos. Em aplicações civis, a diminuição da interferência eletromagnética pode ser citada. A maioria dessas aplicações requer um absorvedor com baixa refletividade, ocupando o menor espaço físico possível. Desta forma, absorvedores baseados em metamateriais são constantemente utilizados naquelas aplicações. O elevado interesse nesta área é o responsável pelo surgimento de novas configurações desses materiais absorvedores, visando a sua utilização em diversa faixa de frequência.

Palavras-chaves — Absorvedores de radiação eletromagnética, metamateriais, propriedades eletromagnéticas.

I. INTRODUÇÃO

Em diversas aplicações envolvendo RADAR, objetiva-se a diminuição da reflexão da onda eletromagnética oriunda, principalmente, das estruturas metálicas. Materiais absorvedores são empregados nessas aplicações, suprimindo totalmente ou parcialmente a onda incidente. Fisicamente, esses absorvedores convertem a energia eletromagnética em energia térmica. Do ponto de vista tecnológico, o rápido desenvolvimento dos sistemas eletrônicos e de telecomunicação ocasionou um crescente aumento da poluição eletromagnética e, conseqüentemente, um grande interesse por absorvedores.

Em determinadas aplicações como, por exemplo, sistema de comunicação, a interferência eletromagnética pode causar vários problemas como: o funcionamento inadequado de equipamentos eletrônicos e a geração de dados incorretos em aplicações envolvendo RADAR, comprometendo o seu desempenho. Em sistemas de defesa, a principal utilização desses materiais está relacionada à redução da observabilidade de estações terrestre de antenas, aviões, tanques e outros veículos. Em ambas as aplicações, é extremamente importante que um absorvedor ocupe o mínimo espaço possível e apresente um bom desempenho. Deste modo, é recorrente a utilização de absorvedores baseados em metamateriais, materiais artificiais nos quais suas propriedades eletromagnéticas estão diretamente relacionadas às pequenas inclusões que constituem os mesmos.

Victor Dmitriev, victor@ufpa.br, Jorge Andrey Macêdo, jandrey@ufpa.br, Tel +55-91-3201-7302

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPQ, CAPES e FAPESPA

Resumidamente, os metamateriais podem ser conceituados como meios artificiais constituídos por células (inclusões) metálicas as quais são bem menores do que o comprimento da onda incidente, conforme apresentada na Fig. 1. Conseqüentemente, a funcionabilidade de cada célula se assemelha a de um átomo, na qual a resposta eletromagnética da estrutura como um todo pode ser alterada a partir da modificação das dimensões, do formato e/ou do arranjo de suas inclusões metálicas.

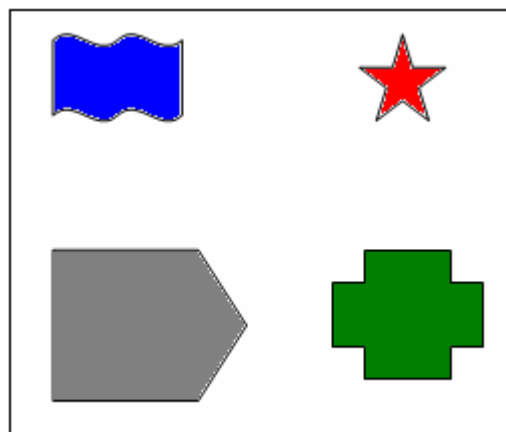


Fig. 1. Diagrama esquemático de um metamaterial.

Desde 2001, Fig. 2, após sua comprovação experimental, há um grande interesse em pesquisar estes novos materiais, tal interesse é justificado pela flexibilidade da resposta eletromagnética proporcionada pelos metamateriais, propiciando o desenvolvimento de dispositivos eletromagnéticos compactos com resposta igual ou superior quando comparados aos componentes convencionais. Em 2008, um grupo formado por cientistas do *College Boston* e da *Duke University* analisou e fabricou uma estrutura capaz de absorver quase 100% da radiação incidente em uma estreita faixa de frequência. Este absorvedor, diferentemente das estruturas convencionais, foi composto por uma fina camada de elementos metálicos dispostos sobre uma resina de fibra de vidro, tal dispositivo se apresentou como uma boa solução para problemas relacionados com a detecção ou filtragem da radiação eletromagnética.

Outros grupos continuam investigando e desenvolvendo novas configurações de absorvedores baseados em metamateriais, um grupo de pesquisadores japoneses, por exemplo, analisam o comportamento das propriedades eletromagnéticas de estruturas compostas por partículas de

sendust ou *permalloy* sobre uma resina de poliestireno. Estes pesquisadores investigam a influência do volume dessas partículas e de seu formato na resposta eletromagnética do metamaterial, desta forma, desenvolvem absorvedores para uma determinada faixa de frequência. Diante do que foi descrito, este trabalho apresentará as principais configurações de absorvedores baseados em metamateriais utilizados nos sistemas de comunicação e defesa.

II. ABSORVEDORES BASEADOS EM METAMATERIAIS

A. Histórico dos Metamateriais

O interesse por materiais artificiais começou no século dezenove, quando Bose realizou trabalhos envolvendo fios condutores trançados. No começo do século 20, Lindman investigou os meios chirais, Em meados do século vinte, Kock realizou uma análise do índice de refração de lentes de microondas constituídas por discos, fendas ou esferas [1]. Em 1968, Veselago analisou a eletrodinâmica de meios que apresentassem tanto a permissividade elétrica quanto a permeabilidade magnética negativa para uma mesma faixa do espectro de frequência. Somente em 2001 foi possível verificar experimentalmente as previsões de Veselago, com os avanços obtidos nas técnicas de fabricação e a consolidação dos novos conceitos de síntese dos materiais [2]. Vale ressaltar que em 2008, Munk questionou uma das previsões de Veselago, a de que os metamateriais obedeceriam à regra da mão direita [3]. Entretanto, foi a partir de 2001, que ocorreu um grande interesse por esses meios e, tendo em vista a flexibilidade de suas propriedades eletromagnéticas, a utilização desses materiais em diversas aplicações.

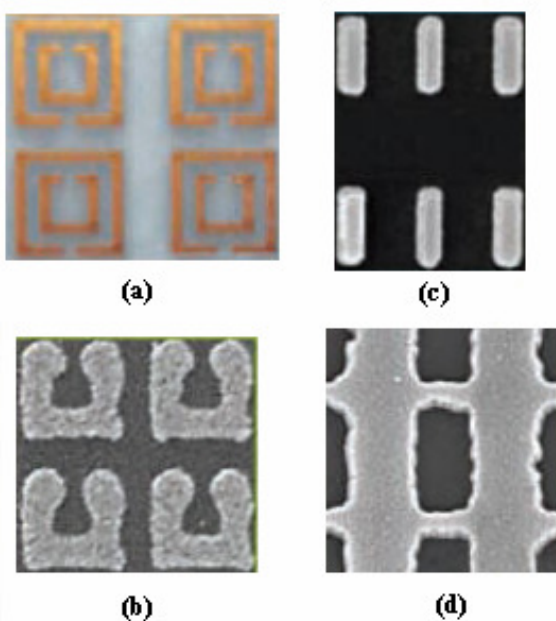


Fig. 2. Metamateriais com diversos formatos das inclusões. (a) em formato retangular, (b) em formato de “U”, (c) nanofios metálicos e (d) estruturas *fishnet*.

B. Absorvedores baseados em metamateriais

Há na literatura uma vasta gama de configuração de absorvedores como, por exemplo, o de *Salisbury* [4] no qual consiste de uma camada resistiva situada em, aproximadamente, $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (λ) distante da superfície metálica que deseja camuflar, Fig. 3, essa estrutura apresenta ressonância em uma estreita faixa de frequência.



Fig. 3. Configuração do absorvedor de Salisbury.

Outra configuração bastante conhecida são os absorvedores de *Jaumann*, nessa configuração, uma espécie de vários absorvedores de *Salisbury* subsequentes, é possível uma boa resposta eletromagnética para uma larga faixa e frequência.

Atualmente, há um grande esforço na busca por absorvedores que apresentem uma redução significativa na sua espessura. Adicionalmente, pesquisadores dessa área visam o desenvolvimento de uma estrutura que não necessite de uma camada metálica, diferentemente das duas configurações de absorvedores anteriormente citadas.

Uma alternativa para solucionar este problema são absorvedores baseados em metamateriais. Em 2006, Bilotti *et al.*, propuseram uma estrutura composta por anéis segmentados (SRR) dispostos sobre uma camada resistiva [5], mostrada esquematicamente na Fig. 4.

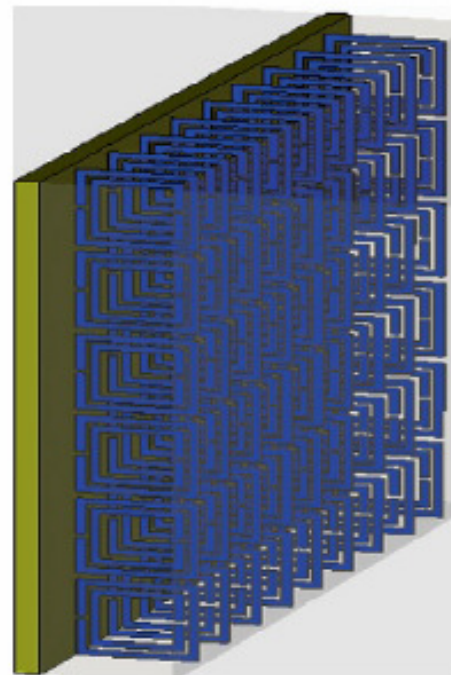


Fig. 4. Configuração de absorvedores proposta em [5].

Nesta configuração, os SRR's atuam como uma parede perfeitamente magnética (PMC) e, a camada resistiva estará situada bem próxima dessas inclusões metálicas. Neste caso, a espessura do absorvedor dependerá das dimensões dos SRR's, aproximadamente, $\lambda/20$.

Baseados na configuração anterior, Bilotti *et al.* analisaram uma estrutura com espessura da ordem de $\lambda/40$ e $\lambda/100$ [6]. A primeira espessura foi sintetizada através de múltiplos anéis segmentados, enquanto que na segunda configuração, utilizou-se espiras no lugar dos SRR's. A reflexão e a transmissão para essas configurações foram semelhantes as obtidas para o absorvedor mostrado na fig. 3, tais propriedades são apresentadas na TABELA I.

TABELA I REFLEXÃO E ABSORÇÃO DA ESTRUTURA ANALISADA EM [5]

Frequência (GHz)	Reflexão (dB)	Absorção (dB)
0,5	-3,0	-8,0
1,0	-4,0	-6,0
1,5	-4,5	-3,0
2,0	-21	-16
2,5	-8,0	-5,0
3,0	-7,5	-3,0
3,5	-8,0	-2,5
4,0	-9,0	-2,0
4,5	-9,5	-1,8
5,0	-9,8	-1,5

Nos absorvedores compostos por inclusões magnéticas, há algumas dificuldades de realização prática, estas que estão relacionadas com a disposição das inclusões, pois se tratando de uma estrutura magnética, existe uma determinada polarização da onda para que haja excitação dessas inclusões. Desta forma, o campo magnético nesses absorvedores obrigatoriamente deve ser paralelo ao eixo das inclusões magnéticas, conseqüentemente, essas células não podem ser colocadas sobre a camada resistiva, dificultando sua fabricação.

Em 2008, Landy *et al.* desenvolveram uma estrutura capaz de absorver quase 100% da radiação incidente [7]. Neste projeto, tanto células elétricas quanto magnéticas foram utilizadas. Logo, foi possível manipular a ressonância da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética independentemente. Por conseguinte, um casamento de onda dessa estrutura com o espaço livre foi possível, resultando na diminuição da refletividade. Diferentemente dos absorvedores convencionais, esta estrutura é fina, realizável e constituída, exclusivamente, de elementos metálicos. O absorvedor desenvolvido em [7] é mostrado esquematicamente na Fig. 5, sua resposta eletromagnética são é apresentada na TABELA II.

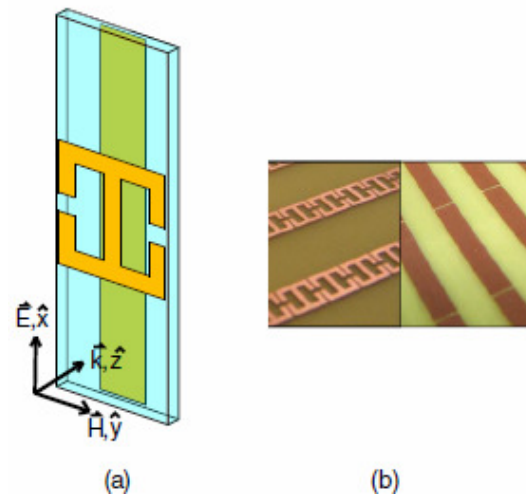


Fig. 5. Absorvedor baseado em células elétricas e magnéticas [7], (a) diagrama esquemático e (b) absorvedor experimental.

TABELA II REFLEXÃO E ABSORÇÃO DA ESTRUTURA INVESTIGADA EM [7]

Frequência (GHz)	Reflexão	Absorção
9,0	0,95	0,05
9,5	0,95	0,05
10,0	0,95	0,05
10,5	0,9	0,08
11,0	0,85	0,15
11,5	0,4	0,5
12,0	0,6	0,3
12,5	0,8	0,1
13,0	0,92	0,08
13,5	0,95	0,01
14,0	0,95	0,05

Atualmente, um grupo de pesquisadores japoneses investiga as propriedades eletromagnéticas (ϵ e μ) além da absorção, de estruturas compostas partículas de *permalloy* e *sendust* (ligas metálicas) dispostas sobre uma resina de poliestireno [8]. Conforme abordado anteriormente, as propriedades eletromagnéticas dos metamateriais dependem do tamanho das partículas que os constituem. Desta forma, o tamanho do raios das partículas foi variado entre 5 e 20 micrômetros (partículas no formato esférico) constatando a dependência prevista, TABELAS III e IV.

TABELA III PARTE REAL DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DE METAMATERIAS COMPOSTOS POR INCLUSÕES COM DIFERENTES VALORES DE RAIO [8]

Freq. (GHz)	5 μ m <i>sendust</i>	10 μ m <i>send.</i>	20 μ m <i>send.</i>	10 μ m <i>perm.</i>
0,5	4,5	4,5	3,7	5,0
0,6	4,8	4,8	3,2	4,5
0,7	4,3	4,3	3,0	4,2
0,8	4,0	4,0	2,7	4,2
0,9	4,0	4,0	2,5	4,3
1,0	3,8	3,8	2,2	4,0
2,0	3,0	3,0	1,8	3,5
3,0	2,5	2,5	1,5	3,0
4,0	2,0	1,7	1,1	2,7
5,0	1,8	1,5	1,1	1,8
6,0	1,5	1,1	0,9	1,6
7,0	1,3	1,1	0,8	1,4
8,0	1,5	0,96	0,7	1,2
9,0	1,2	0,8	0,65	1,1
10,0	1,1	0,7	0,5	1,2

TABELA IV PARTE IMAGINÁRIA DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DE METAMATERIAIS COMPOSTOS POR INCLUSÕES COM DIFERENTES VALORES DE RAIO [8]

Freq. (GHz)	5µm <i>sendust</i>	10 µm <i>send.</i>	20 µm <i>send.</i>	10 µm <i>perm.</i>
0,5	0,95	1,8	1,8	0,95
0,6	1,1	1,6	1,6	1,15
0,7	1,05	1,8	1,7	1,1
0,8	1,2	1,8	1,7	1,25
0,9	1,2	1,8	1,7	1,25
1,0	1,5	1,7	1,65	1,5
2,0	1,7	1,8	1,6	1,8
3,0	1,7	1,8	1,5	1,8
4,0	1,6	1,7	1,2	1,8
5,0	1,6	1,6	1,05	1,85
6,0	1,5	1,5	0,9	1,7
7,0	1,4	1,4	0,8	1,6
8,0	1,2	1,2	0,7	1,5
9,0	1,05	1,1	0,6	1,4
10,0	1,05	1,05	0,5	1,2

A TABELA III mostra que a parte real da permeabilidade do composto de permalloy alcança um valor máximo, próximo a 0,5, em 500 MHz. A parte imaginária deste composto alcançou um valor de, aproximadamente, 1,8 na frequência 3,5 GHz, TABELA IV. Os compostos de *sendust* ou *permalloy*, apresentaram baixa reflexão na faixa de frequência de 22 GHz até 40 GHz, conforme apresentado na fig. 6. Os parâmetros eletromagnéticos desses compostos podem ser ajustados de acordo com o tamanho das inclusões, logo, essas estruturas podem ser ajustadas visando um desenvolvimento de um absorvedor, de acordo com sua aplicação.

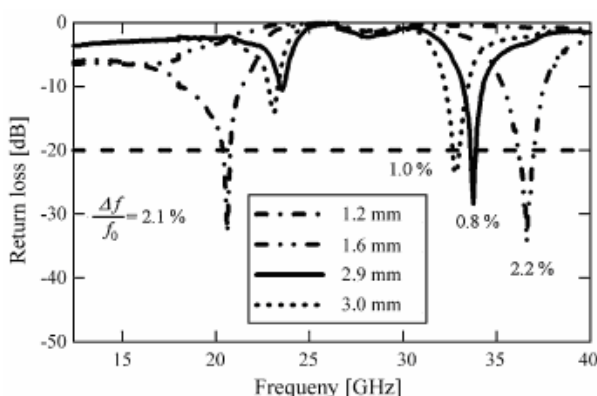


Fig. 6. Coeficiente de reflexão do absorvedor desenvolvido em [8].

III. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas algumas configurações de absorvedores de radiação eletromagnética baseados em metamateriais. Tais estruturas são utilizadas em sistemas de comunicação, minimizando a interferência eletromagnética entre os equipamentos eletrônicos. Em sistemas de defesa, a principal aplicação desses dispositivos está relacionada com a diminuição da observabilidade de aeronaves, tanques e outros veículos. Nessas aplicações, idealize-se uma estrutura que não ocupe um grande espaço físico, além de apresentar um bom desempenho. Para suprir essas exigências, absorvedores baseados em metamateriais são utilizados, pois a

flexibilidade de seus parâmetros eletromagnéticos os torna atraentes para diversas aplicações. Primeiramente, foi mostrado que a redução da espessura do absorvedor pode ser alcançada através de uma estrutura composta por células magnéticas dispostas sobre uma camada resistiva (espessura da ordem de $\lambda/20$). Em seqüência, visando uma maior redução da espessura, foi apresentado que a utilização de múltiplas células magnéticas ou de espiras é capaz de manter uma resposta semelhante ao do primeiro absorvedor analisado, com uma espessura da ordem de $\lambda/40$ e $\lambda/100$. Diante da dificuldade de realização prática, conseqüência direta que configuração do absorvedor impôs na estrutura, pois a campo magnético da onda incidente, necessariamente, deveria ser paralelo ao eixo das inclusões magnéticas. Posteriormente, apresentou uma estrutura composta de células elétricas e magnéticas, visando uma realização experimental, assim, foi mostrado um absorvedor com quase 100% de absorção e desenvolvido a partir de inclusões metálicas. Finalmente, foi apresentado um absorvedor investigado por um grupo de pesquisadores japoneses, nessa estrutura as dimensões das partículas, pequenas esferas, foram alteradas visando ajustar as propriedades eletromagnéticas dos metamateriais à uma determinada faixa do espectro de frequência. Dessa forma, foi possível desenvolver um absorvedor com um bom desempenho.

REFERÊNCIAS

- [1] Jorge Andrey S. Macêdo, "Formalismo FDTD para a modelagem da rotação de campos eletromagnéticos em meios dispersivos descritos pelo modelo de Drude", Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 2008.
- [2] A. Shelby, D. R. Smith, S. C. Nemat-Nasser e S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction", *Science*, vol. 292, pp. 77-79, 2001.
- [3] B. A. Munk, *Metamaterials: Critiques and alternatives*, John Wiley, New Jersey, 2009.
- [4] E. F. Knott, J. F. Shaeffer e M. T. Tuley, *Radar Cross Section*, Scitech Publishing, 2ªEd, 2004.
- [5] F. Bilotti e L. Vegni, "Design of metamaterial-based resonant microwave absorbers with reduced thickness and absence of a metallic backing", em: *Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals, Modelling and Applications*, Springer, 2008.
- [6] F. Bilotti, A. Toscano, L. Vegni, K. B. Aydin e E. Ozbay, "Efficient circuit models for the design of metamaterials based on artificial magnetic inclusions", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 55, 2865-2873, 2007.
- [7] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith e W. J. Padilla, "Perfect Metamaterial Absorber", *Phys. Rev. Letters*, 100, Maio 2008.
- [8] K. Sakai, N. Asano, Y. Wada e S. Yoshikado, "Composite electromagnetic wave absorber made of soft magnetic material and polystyrene resin and control of permeability and permittivity", *Journal of the European ceramic society*, 2009.