

Aplicação de metamateriais em sistemas de comunicação e defesa

Victor Dmitriev, Jorge Andrey S. Macêdo, Anderson O. Silva, Tiago C. Martins e Aubedir S. Costa
Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará – Belém - Brasil

Resumo — Metamaterial é um arranjo de elementos estruturais com propósito de obter um material que apresentem propriedades eletromagnéticas vantajosas e não usuais, tais como, índice de refração negativo, permissividade elétrica ϵ negativa, permeabilidade magnética μ negativa, etc. A versatilidade proporcionada por esses materiais no desenvolvimento de meios com determinadas características eletromagnéticas, possibilita a manipulação da propagação da onda incidente. Este trabalho visa apresentar as principais aplicações tecnológicas relacionadas aos sistemas de comunicação e de defesa, envolvendo metamateriais.

Palavras-chaves — Metamateriais, absorvedores de radiação eletromagnética, inclusões metálicas.

I. INTRODUÇÃO

Em 2001, um grupo de pesquisadores do Caltech comprovou experimentalmente as previsões teóricas, realizadas pelo cientista russo Victor Veselago, sobre a eletrodinâmica dos meios com parâmetros constitutivos negativos para uma mesma faixa do espectro de frequência [1]. O desenvolvimento desses meios é possível através de metamateriais.

Metamaterial é um arranjo de elementos estruturais, em geral metais, com propósito de obter um material que apresentem propriedades eletromagnéticas vantajosas e não usuais, tais como, índice de refração negativo, permissividade elétrica ϵ negativa, permeabilidade magnética μ negativa, etc [2]. Vale ressaltar, que a disposição das inclusões metálicas pode ser periódica ou não e as dimensões físicas destas são menores do que o comprimento de onda da radiação eletromagnética em questão.

Desde a comprovação experimental realizada em 2001, há um grande interesse em pesquisar estes novos materiais, tal interesse é justificado pela resposta eletromagnética proporcionada pelos metamateriais, o que possibilita o desenvolvimento de dispositivos eletromagnéticos em diversas áreas como, por exemplo, aeroespacial, telecomunicações, engenharia biomédica, etc [3]. As aplicações na faixa de microondas envolvendo os metamateriais estão concentradas, principalmente, nos fenômenos relacionados à propagação e irradiação eletromagnética.

Victor Dmitriev, victor@ufpa.br, Jorge Andrey, jorgeandrey.silva@gmail.com, Tel +55-91-3201-7302; Anderson.osilva@gmail.com, Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e pelo CNPq.

Nessas aplicações, a versatilidade proporcionada por esses materiais no desenvolvimento de meios com determinadas características eletromagnéticas, possibilita a manipulação da propagação da onda incidente. Desta forma, é possível obter dispositivos compactos com resposta eletromagnética melhor ou igual às respostas dos componentes convencionais. Adicionalmente, existe a possibilidade de projetar, através da disposição dos arranjos e elementos estruturais que compõem o metamaterial, dispositivos multi-banda onde a frequência de operação pode ser projetada para uma aplicação específica, não havendo limitação quanto aos seus harmônicos de frequência.

Entre a faixa de microondas e a faixa do infravermelho há uma região que se encontra ausente de resposta eletromagnética [4], esta região compreende a faixa de 0,1-10,0 THz. Atualmente há diversos grupos de pesquisa espalhados pelo mundo com objetivo de desenvolver materiais que apresentem uma dada resposta eletromagnética. O interesse por estes materiais é justificado pela larga gama de fenômenos eletromagnéticos que podem ser analisados com o advento de dispositivos que operem nessa faixa do espectro de frequência, tal como um detector que opere em Terahertz, que será bastante propício nas áreas biológica e de segurança [5]-[6]. Dessa forma, os metamateriais são promissores para o desenvolvimento de materiais que apresentem uma determinada característica nessa faixa do espectro de frequência.

Diante do que foi descrito acima, este trabalho visa apresentar as principais aplicações tecnológicas envolvendo metamateriais relacionadas aos sistemas de comunicação e defesa.

II. METAMATERIAIS

Há bastante tempo que os materiais artificiais recebem atenção de diversos grupos de pesquisas em todo o mundo. As pesquisas por estes materiais iniciaram com o trabalho de Bose sobre fios condutores trançados em 1898. Posteriormente, em 1914, Lindman apresentou seu trabalho com materiais chirais. Após 50 anos do trabalho de Jagadis Chunder Bose, Kock investigou o índice de refração de lentes de microondas constituídas por esferas, discos ou fendas periodicamente distribuídas. Finalmente, em 1968, o cientista russo Victor 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. Em seus estudos teóricos Veselago concluiu que tais meios apresentariam índice de refração negativo [7]. Somente em 2001, com o advento de novas

técnicas de fabricação e de novos conceitos de síntese de materiais, foi possível verificar as previsões teóricas de Veselago [1]. Este fato ocasionou um grande interesse por estes materiais, tendo em vista a viabilidade prática dos mesmos, iniciando, deste modo, as pesquisas por metamateriais. Em princípio, os metamateriais podem ser constituídos por várias inclusões de materiais (em geral inclusões metálicas) com tamanho e formato variados, dispostas sobre um determinado material homogêneo. Tais inclusões são responsáveis pela resposta eletromagnética dos metamateriais, logo, é plenamente possível obter um determinado valor da permissividade e da permeabilidade somente alterando a disposição e o formato dessas inclusões. A Fig. 1 representa esquematicamente um metamaterial [8].

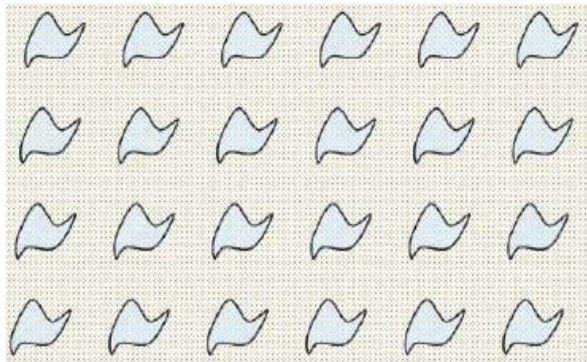


Fig. 1. Esquema ilustrativo de uma metamaterial [8].

As previsões teóricas de Veselago foram verificadas experimentalmente com um arranjo de fios condutores e anéis segmentados SRR (*Split Ring Resonator*), conforme mostrado na representação esquemática da Fig. 2 [3].

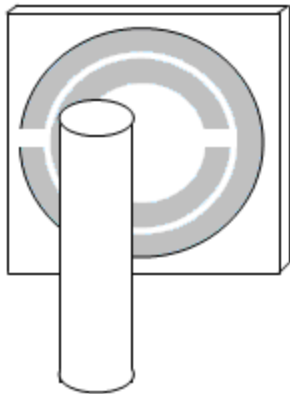


Fig. 2. Representação esquemática da célula unitária do metamaterial proposto em [3].

Para obter uma resposta magnética desejada, o metamaterial mais comumente utilizado é o SRR. Diferentemente dos arranjos de fios metálicos, utilizados na obtenção de uma dada resposta elétrica, desde o primeiro SRR proposto na obtenção de um material que apresentasse índice de refração negativo, importantes avanços foram obtidos. Há diversas aplicações nas quais os fios condutores não são desejados, devido há necessidade de interconexão das células unitárias e terminações específicas. Estruturas SRR's também apresentam ressonância elétrica, porém, tal ressonância está acoplada com a ressonância magnética, o que caracteriza uma estrutura bianisotrópica, material que

apresenta complexidade em sua análise. Na Fig. 3, são mostradas alguns elementos estruturais, com diferentes constituição e disposição. Na Tabela I, é mostrada a faixa do espectro de frequência para a qual o índice de refração é negativo, bem como a faixa de frequência para o qual o valor da permeabilidade magnética é menor do que zero, para as estruturas apresentadas na Fig. 3.

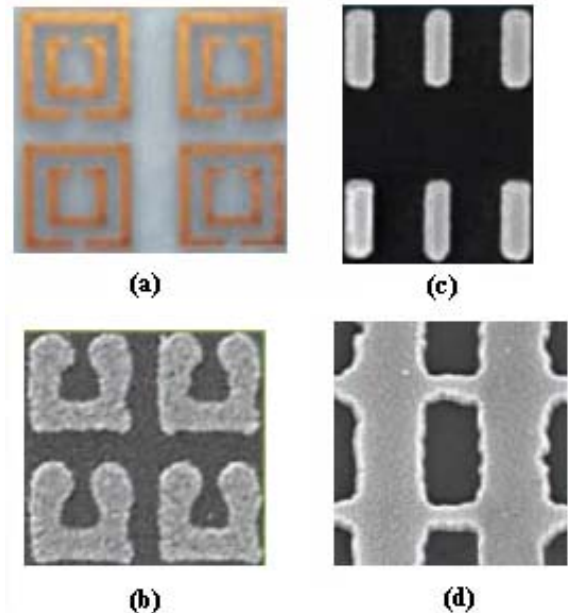


Fig. 3. Vários metamateriais analisados até hoje. (a) SRR em formato retangular, (b) SRR em formato de "U", (c) nanofios metálicos e (d) estruturas fishnet..

TABELA I CARACTERÍSTICA DAS ESTRUTURAS MOSTRADAS NA FIG.3.

Estrutura	Faixa de frequência com $n < 0$	Faixa de frequência com $\mu < 0$	Ano de investigação
(a)	10 GHz – 50GHz	1 THz – 2 THz	2000 – 2004
(b)	-----	10THz – 200 THz	2005 – 2006
(c)	200 THz – 500THz	200 THz – 500 THz	2006 – 2008
(d)	200 THz – 600THz	-----	2005 – 2007

Devido à flexibilidade na obtenção dos parâmetros eletromagnéticos dessas estruturas, os metamateriais são propícios ao desenvolvimento de dispositivos eletromagnéticos, apresentando desempenho igual ou superior aos dos materiais convencionais, quando utilizados na mesma aplicação. Nos sistemas de comunicação via satélite, a redução de tamanho dos componentes é um aspecto importante de projeto, deste modo, os metamateriais são bastante úteis no desenvolvimento desses sistemas. Uma outra aplicação que utiliza as funcionalidades eletromagnéticas dos metamateriais está relacionada com os sistemas de segurança e defesa. Tais aplicações serão abordadas na seção seguinte.

III. APLICAÇÕES

A) Sistema de comunicação

Os metamateriais proporcionam uma redução no tamanho dos dispositivos eletromagnéticos, mantendo o mesmo desempenho ou até mesmo um desempenho superior, quando comparados com os dispositivos convencionais. No recente trabalho de Fischer [9], há uma comparação entre o tamanho dos filtros convencionais utilizados em uma estação rádio base – ERB com o tamanho dos filtros baseados em metamateriais, tal comparação é apresentada na Fig. 4 [9].

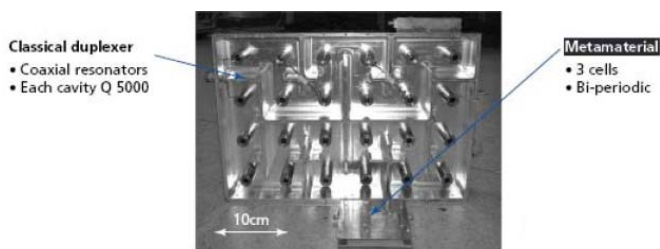


Fig. 4. Comparação entre o tamanho de um filtro convencional utilizado em ERB com um filtro baseado em metamaterial.

A redução de tamanho dos dispositivos eletromagnéticos é bastante importante para o desenvolvimento de sistema de comunicação via satélite. Conforme foi mostrado em [9], os metamateriais propiciam uma redução no tamanho das antenas, melhorando a sua funcionalidade e reduzindo o seu custo de fabricação. Este é um dos fatores que contribuíram para que a companhia Toyota pesquisasse antenas para a banda W baseadas em metamaterial visando a sua utilização no sistema de segurança da sua linha automotiva. Alguns protótipos destes dispositivos já foram desenvolvidos e os resultados são promissores [10].

B) Sistema de defesa

Em maio deste ano, 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 [11]. A Fig. 5 apresenta a estrutura desenvolvida por este grupo de pesquisa.

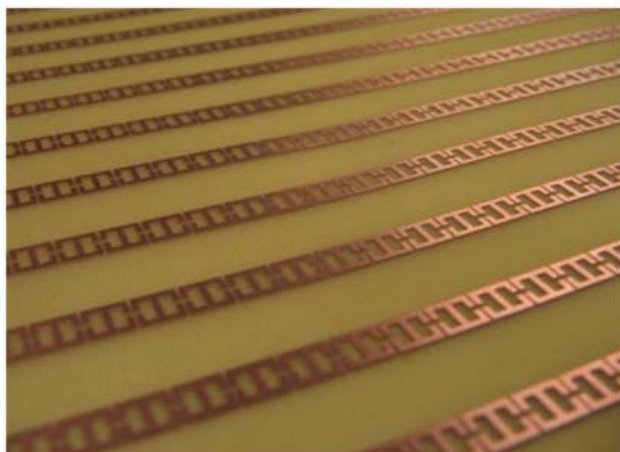


Fig. 5. Absorvedor baseado em metamateriais, desenvolvido em [11].

Diferentemente dos absorvedores convencionais, esta estrutura é fina e foi construída exclusivamente de elementos metálicos, proporcionando ao dispositivo uma maior flexibilidade para aplicações relacionadas com a detecção ou filtragem da radiação incidente. Outras configurações da disposição das inclusões que constituem os metamateriais podem ser realizadas, em [12], por exemplo, o metamaterial foi constituído por nanopartículas de ouro. Esta configuração proporcionou uma estrutura com parâmetros eletromagnéticos independentes da frequência. Adicionalmente, esse material apresentou um bom casamento de impedância de onda eletromagnética, sendo propício para utilização na absorção de ondas na faixa de 0,1 10,0 THz.

Uma aplicação que vem ganhando destaque desde que foi originalmente proposta em 2006 por Pendry *et al.*, é a cobertura de invisibilidade eletromagnética [13]. Ainda em fase de protótipo, conforme mostrado na Fig. 6, esta estrutura foi desenvolvida a partir de metamaterial e conseguiu reduzir o espalhamento total de um objeto na faixa de microondas.

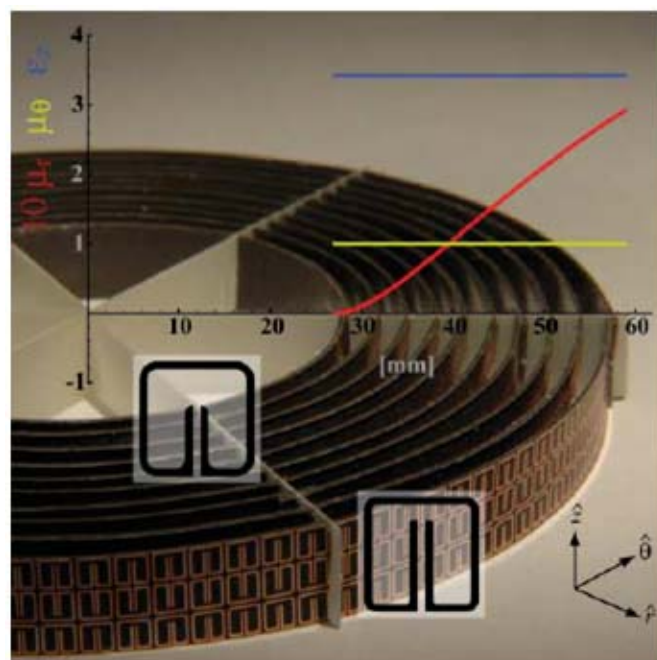


Fig. 6. Cobertura de invisibilidade eletromagnética construída com metamateriais [13].

Conforme pode ser verificado nas Fig's 5 e 6, o comportamento da estrutura e, conseqüentemente, sua aplicação, sofrem uma forte influência da disposição e do formato das inclusões que constituem o metamaterial. Vários trabalhos que abordam esse assunto são encontrados na literatura e dependendo da aplicação, essas inclusões podem adquirir diversos formatos. A resposta eletromagnética das inclusões é abordada próxima seção.

IV. INCLUSÕES QUE CONSTITUEM OS METAMATERIAIS

Conforme foi verificado em [14], a resposta eletromagnética de diferentes células unitárias é influenciada de acordo com o formato escolhido para esta célula. De acordo com o que foi descrito acima, as células SRR também apresentam ressonância elétrica, porém, há um acoplamento magneto-óptico (bianisotropia) nessas estruturas.

Estruturas simétricas eliminam os efeitos de acoplamento magneto-óptico relacionado à bianisotropia, pois em tais estruturas, a resposta magnética pode ser negligenciada. Estes materiais são desenvolvidos a partir da teoria de grupos. Em [14], metamateriais foram elaborados para operarem na faixa de frequência que vai de 0,1 THz até 1,5 THz. Na fig. 7 são apresentadas a distribuição do campo elétrico nas células unitárias analisadas em [14], bem como a parte real da permissividade elétrica para cada célula.

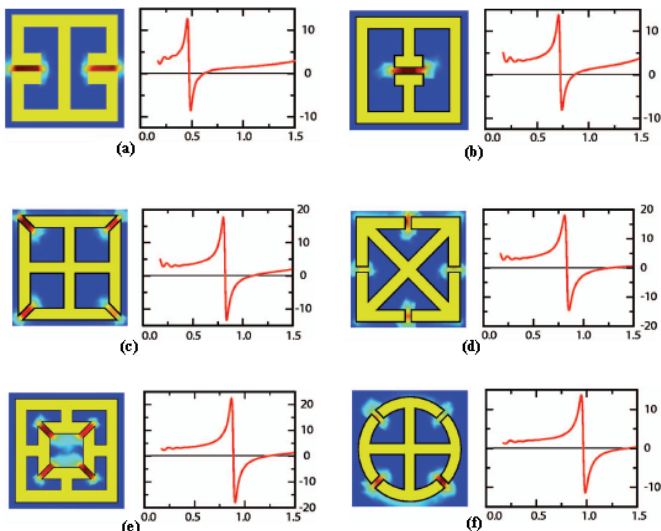


Fig. 7. Distribuição de campo elétrico normalizado e a permissividade elétrica para cada célula unitária analisada [14].

No diagrama que representa a distribuição de campo elétrico normalizado, é verificada uma região em vermelho que indica uma elevação do campo local nas proximidades do gap de cada célula. Adicionalmente, todas as estruturas analisadas apresentaram regiões na qual a parte real da permissividade elétrica assumiu um valor negativo. Nesta figura, o comportamento da permissividade elétrica se assemelha em todas as configurações de célula unitária, entretanto, a ressonância ocorre em diferentes frequências, evidenciando a influência que a formato dessas células exercem sobre os parâmetros eletromagnéticos dos metamateriais.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a evolução das pesquisas relacionadas aos metamateriais. Primeiramente o conceito de metamaterial foi definido. Posteriormente, a célula unitária que constituiu o primeiro metamaterial propriamente dito foi mostrada. Em seguida, foi descrita a evolução das pesquisas sobre SRR, enfatizando seus parâmetros eletromagnéticos. Na Seção III, foram abordadas duas aplicações envolvendo metamateriais, as características inerentes aos metamateriais em proporcionar uma redução do tamanho do dispositivo, mantendo seu desempenho eletromagnético, tornam essas estruturas uma excelente escolha em aplicações de sistemas de comunicação. Adicionalmente, a flexibilidade na obtenção dos parâmetros eletromagnéticos é de grande utilidade em aplicações relacionada aos sistemas de defesa e segurança. Finalmente, foi mostrado a influência que a escolha no formato das inclusões que constituem os metamateriais exerce sobre a resposta eletromagnética do meio. Enfatizando, deste modo, a importância na escolha da célula

unitária do material diante de uma dada aplicação. Muitos avanços foram obtidos, entretanto, não há dúvidas de que novas configurações de células surgirão, evidenciando a importância dos metamateriais em diversas áreas, tais como, engenharia biomédica, telecomunicações e aeroespacial.

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] <http://www.metamorphose-vi.org/>
- [3] 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.
- [4] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, "A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization", *Opt. Express*, 16, 2008.
- [5] F. Oliveira, R. Barat, B. Schulkin, F. Huang, J. Federici and D. Gary, "Neural network analysis of terahertz spectra of explosives and bio-agents," *Proc. SPIE 5070*, 2003.
- [6] D. Zimdars, "Fiber-pigtailed terahertz time-domain spectroscopy instrumentation for package inspection and security imaging," *Proc. SPIE 5070*, 2003.
- [7] V. G. Veselago, "Electrodynamics of media with simultaneously negative electric permittivity and magnetic permeability", em: S. Zouhdi, A. Sihvola, M. Arsalame, *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials*, vol. 89, Dordrech: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [8] R. W. Ziolkowski e N. Engheta, "Introduction, History, and Selected Topics in Fundamental Theories of Metamaterials" em N. Engheta e R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, New York: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [9] G. Fischer, "Next-generation base station radio frequency architecture," *Bell Labs Technical Journal* vol. 12, 2007.
- [10] K. Guven, "A Look on Metamaterial Research from Industry's Perspective", METAMORPHOSE Virtual Institute, 2008.
- [11] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith e W. J. Padilla, "Perfect Metamaterial Absorber", *Phys. Rev. Letters*, 100, Maio 2008.
- [12] A. Thoman, A. Kern, H. Helm and M. Walther, "Nanostructured gold films as broadband terahertz antireflection coatings", *Phys. Review B* 77, 2008.
- [13] D. Schurig, J. J. Mock, B. J Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr and D. R. Smith, "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies", *Science*, vol. 314, no. 5801, pp. 977-980, November 2006.
- [14] W. J. Padilla, M. T. Aronsson, C. Highstrete, M. Lee, A. J. Taylor and R. D. Averitt, "Electrically resonant terahertz metamaterials: Theoretical and experimental investigations", *Phys. Review B* 77, 2008.