

Estrutura periódica formada por ressoadores dielétricos inseridos em guia de onda para obtenção do efeito de metamaterial
(Dielectric resonators inserted in waveguide for building metamaterial structure)

Pedro J. Castro, Joaquim P. Leite Neto

Laboratório Associado de Plasma
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),
12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil
E-mail: pedro.castro@inpe.br

Resumo

A propagação de ondas eletromagnéticas em guia de onda preenchido com elementos designados como metamateriais tem atraído uma grande atenção pelo fato de serem usados para miniaturização dos componentes. A literatura tem exibido extensivamente ressoadores de anéis concêntricos abertos que possibilitam a propagação de ondas abaixo do corte e os designa como metamateriais: isto significa que é originado um meio com permissividade elétrica negativa. Os ressoadores dielétricos são elementos alternativos para a obtenção de metamateriais. Em experimentos, investigamos a propagação de ondas num guia de onda da banda X (8,2-12,4 GHz) carregado por uma estrutura periódica com 5 ressoadores dielétricos em que se verifica a presença de uma banda passante com 5 picos abaixo da frequência de corte assumida em 6,55 GHz. Isto representa a constatação de um meio com permissividade e permeabilidade negativas e com propagação reversa (ou seja, no sentido inverso à propagação direta), efeitos típicos dos metamateriais.

Palavras-chave: metamaterial, ressoadores dielétricos, permissividade negativa, permeabilidade negativa, estrutura periódica.

Abstract

Electromagnetic wave propagation in waveguide filled with elements designated as metamaterials has attracted great attention because they are used for miniaturization of waveguide components. The literature has extensively displayed split-ring resonators that allow wave propagation below the frequency cutoff and designates them as metamaterials: this means that a medium with negative electrical permittivity and magnetic permeability is originated. Dielectric resonators are alternative elements for obtaining metamaterials. In experiments, we investigated the wave propagation in an X band waveguide (8.2-12.4 GHz) loaded by a periodic structure with 5 dielectric resonators in which the presence of a transmission band with 5 peaks below cutoff frequency assumed at 6.55 GHz. This represents the ascertainment of a medium with negative permittivity and permeability and with backward propagation (ie, in the opposite direction to direct propagation), typical metamaterial effects.

Keywords: metamaterials, dielectric resonators, negative permittivity, negative permeability, periodic structure.

INTRODUÇÃO

Os assim denominados metamateriais constituem materiais artificialmente estruturados (dielétrico e inclusão metálica) que podem interagir com as ondas eletromagnéticas e controlá-las. A propagação de ondas eletromagnéticas em guia de onda preenchido com elementos designados como metamateriais tem atraído uma grande atenção pelo fato de serem usados para miniaturização dos componentes. Um tipo desse material consiste em anéis concêntricos repartidos, derivado da expressão inglesa “split-ring resonator” (SRR), que possibilitam a propagação de ondas abaixo do corte. E desta forma, podem exibir simultaneamente permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativas e apresentam ressonâncias tanto magnéticas como elétricas. A literatura tem apresentado relatos sobre os vários aspectos dos metamateriais e progressos na pesquisa desta área [1-4].

Os ressoadores dielétricos (RDs) são elementos alternativos para a obtenção de metamateriais, uma vez que, possuindo frequências ressonantes (modos eletromagnéticos), aqueles quando confinados em guias de ondas, podem apresentar essas ressonâncias abaixo da frequência de corte do guia de onda [5-7]. Neste trabalho relatam-se experimentos sobre propagação de ondas com cinco (5) ressoadores dielétricos, dispostos igualmente espaçados um do outro de 5 mm, portanto, formando uma estrutura periódica, inseridos em um guia de onda da banda X (8,2-12,4 GHz) e mostrando os seus respectivos espectros de transmissão e o efeito de metamaterial e como variam as suas características magnéticas e elétricas. Em contraposição, são comparadas essas características e as fases elétricas com outra estrutura periódica formada por 4 RDs. O guia de onda em pauta apresenta a sua frequência de corte em 6,55 GHz.

MATERIAIS E MÉTODOS

Experimentos foram implementados carregando um guia de onda retangular da banda X com uma rede periódica de ressoadores dielétricos (Figura 1). A rede é acondicionada sobre um substrato de poliestireno e inserida no interior do guia de onda padrão WR-90 de seção transversal $2,29 \times 1,02 \text{ mm}^2$ e frequência de corte 6,55 GHz. A montagem experimental completa é mostrada na Figura 1, onde o guia de onda com a rede de anéis é simetricamente conectado em ambas as extremidades a idênticos adaptadores guia-cabo coaxial, que são usados para excitar e detectar o sinal que se propaga através do meio combinado. O analisador de rede vetorial Agilent N5230C é usado para medir o coeficiente de transmissão S_{21} através do meio combinado, e também para coletar os dados experimentais.

Os ressoadores dielétricos (RDs) sob teste são de forma cilíndrica com diâmetro de 10,5 mm, 4,6 mm de altura e constante dielétrica $\epsilon_r = 37,6$, composição (Zr,Sn) TiO_4 e fabricados pela Murata Manufacturing Co. Esses dispositivos em número de 5 ou 4 elementos acondicionados sobre um substrato de poliestireno (de constante dielétrica $\epsilon \sim 1$) são inseridos no interior de um guia de onda da banda X, pelo qual podem se propagar ondas de 8,2 a 12,4 GHz com frequência de corte em torno de 6,55 GHz. Experimentos montados foram os seguintes: a) estrutura periódica com 5 RDs espaçados entre si de 5 mm (Figura 2); b) estrutura periódica com 4 RDs espaçados de 5 mm (Figura 3).

Neste estudo, os ressoadores de anéis concêntricos repartidos são inseridos no interior de um guia de onda com o objetivo de produzir permissividade negativa na condição em que a frequência de operação é inferior à frequência de corte do modo eletromagnético dominante TE. A resposta magnética destes ressoadores pode fornecer uma banda passante em que a permissividade elétrica e permeabilidade magnética são ambas negativas usando o guia de onda retangular como um meio hospedeiro para as redes de metamateriais sob teste.

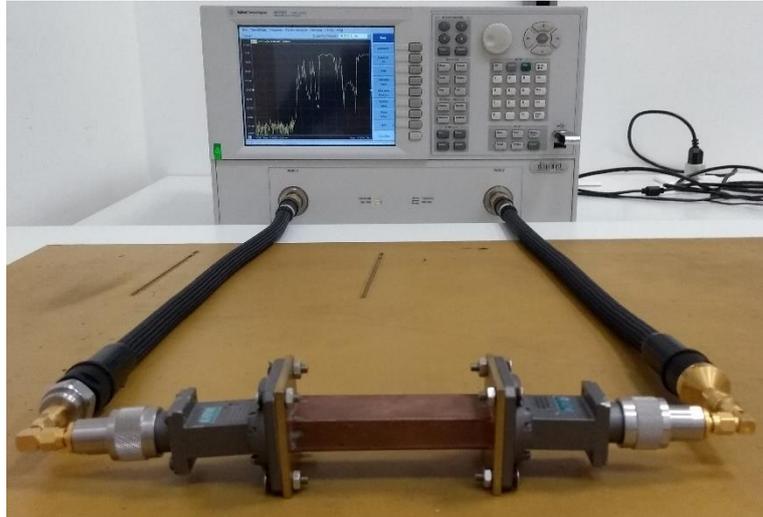


Figura 1. Montagem experimental completa conectada ao analisador de rede para medir o espectro de transmissão da rede periódica de ressoadores dielétricos com cinco amostras.

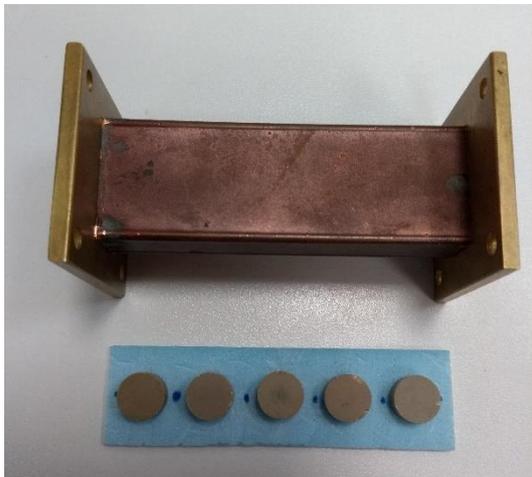


Fig. 2. Guia de onda carregado com 5 ressoadores dielétricos sobre substrato de poliestireno de alta densidade.

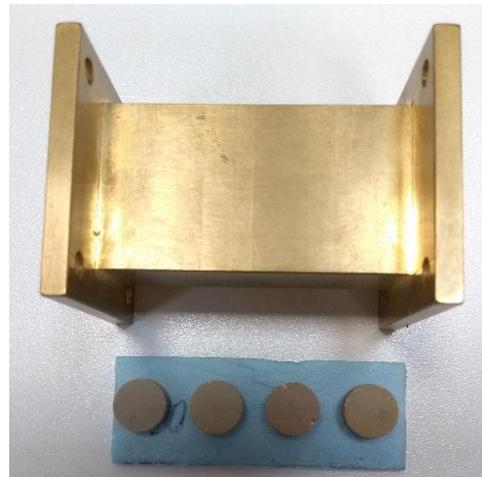


Fig. 3. Guia de onda carregado com 4 ressoadores dielétricos sobre substrato de poliestireno de alta densidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 4 (a) mostra os resultados experimentais para a estrutura periódica com 5 RDs. Observa-se uma banda passante, com cerca de 70 dB acima do ruído de fundo, nos picos de frequência: 5,45, 5,71, 6,04, 6,23 e 6,34 GHz, valores abaixo do corte em 6,55 GHz, fato que caracteriza um meio de permissividade e permeabilidade negativas [5-7]. Os picos se referem às frequências de ressonância em relação aos coeficientes de transmissão S_{21} e correspondem ao número de ressoadores, como se fosse um conjunto de cavidades acopladas. Observa-se que a 5ª frequência ressonante é diminuta, mas aparece. Outros picos de transmissão acima da frequência de corte do guia de onda (6,55 GHz) também são observados, como era esperado.

Pela simulação pode-se observar que os picos da banda de transmissão abaixo do corte é bastante próxima dos valores experimentais (Fig. 4 (b)), com a diferença que a simulação não leva em conta as perdas dielétricas e as perdas nas paredes metálicas. Na Fig. 4 (c), é mostrada a resposta do guia não-carregado (sem RDs), onde nenhum pico de ressonância é observado abaixo da frequência de corte de 6,55 GHz.

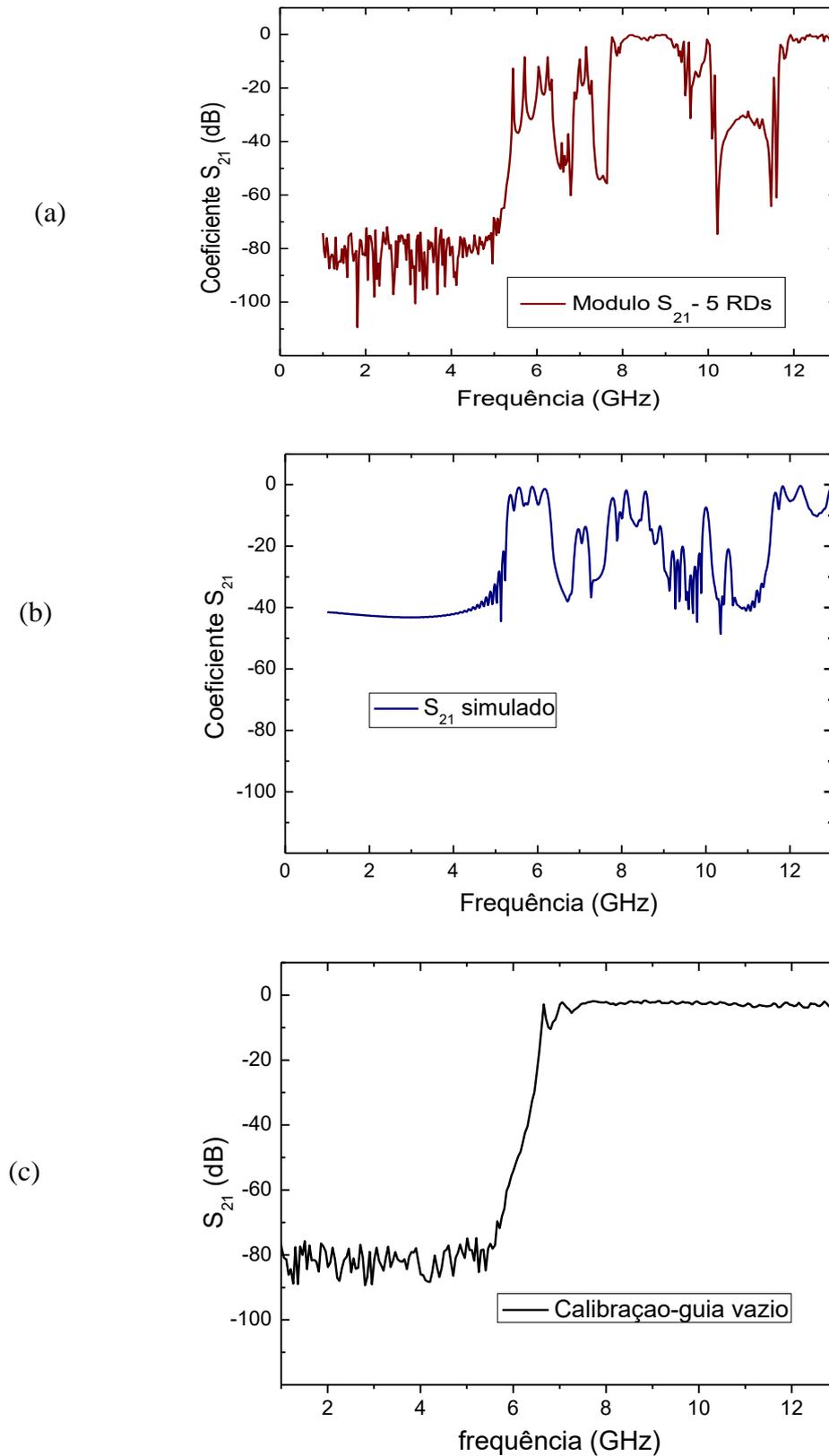


Figura 4. (a) Magnitude (dB) do coeficiente de transmissão S_{21} medido para a estrutura periódica com 5 RDs; (b) Magnitude (dB) do coeficiente de transmissão S_{21} simulado para a mesma estrutura; (c) Calibração da montagem com o guia de onda vazio.

A Fig. 5 apresenta os coeficientes de transmissão S_{21} medidos para a estrutura periódica de 4 ressoadores, espaçados entre si de 5 mm, e como era esperado, aparece uma banda passante composta por 4 picos ressonantes abaixo da frequência de corte em 6,55 GHz, cobrindo uma faixa de 5,35 a 6,36 GHz. Os 4 picos correspondem aos 4 ressoadores acoplados.

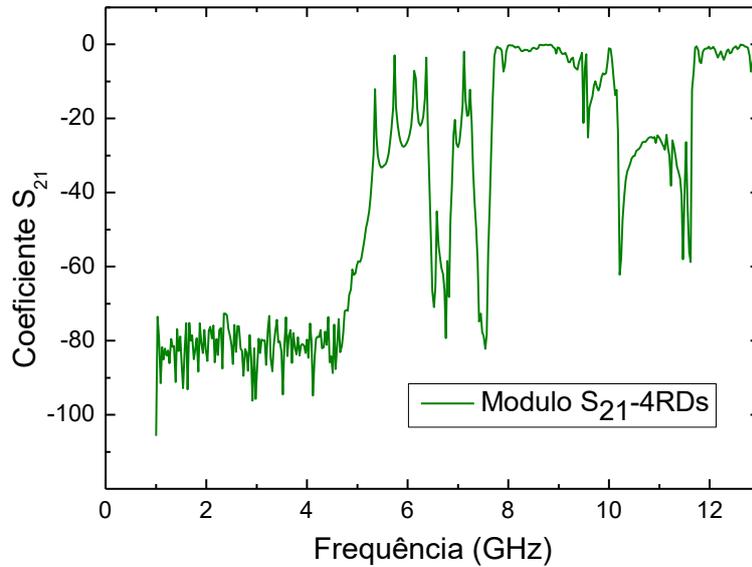


Figura 5. (a) Magnitude (dB) do coeficiente de transmissão S_{21} medido para a estrutura periódica com 4 RDs.

Para completar o estudo faz-se uma comparação das fases desdobradas para as duas estruturas de 4 e 5 RDs, como retrata a Fig. 6: verifica-se um avanço de fase para a estrutura com 5 RDs em relação àquela com 4 RDs, fato que reforça o efeito de onda com propagação reversa (ou seja, no sentido inverso à propagação direta), efeito típico de metamateriais [5-8].

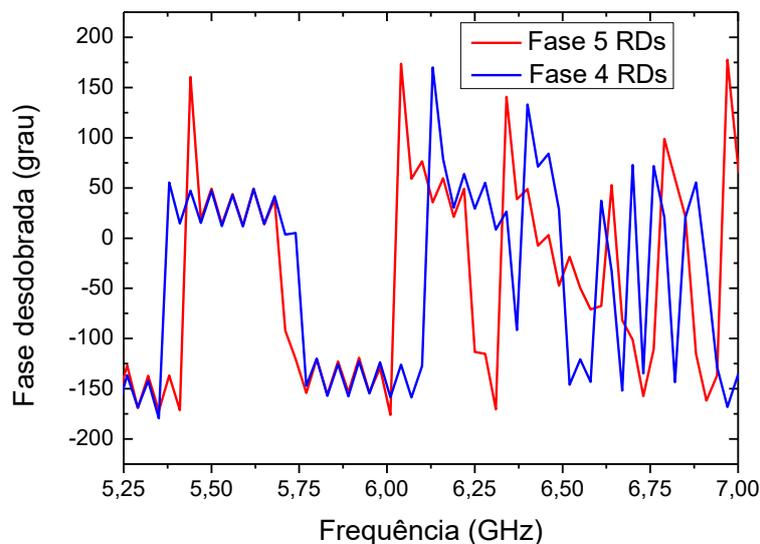


Figura 6. Fases desdobradas para as estruturas periódicas com 4 e 5 RDs, focalizando a banda passante abaixo da frequência de corte em 6,55 GHz.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigada a propagação de ondas num guia de onda da banda X carregado por estrutura periódica com 4 e 5 ressoadores dielétricos em que se constata a presença de suas frequências ressonantes abaixo do corte. Em todos os casos, o fato de haver uma banda passante composta por 4 ou 5 picos de frequências ressonantes abaixo do corte significa a constatação de um meio com permissividade negativa e com propagação reversa (ou seja, no sentido inverso à propagação direta), efeitos típicos dos metamateriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo suporte.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Marques, J. Martel, F. Mesa, and F. Medina, *Phys. Rev. Lett.* 89 (2001), p. 183901-04.
- [2] I. S. Nefedov, X. Dardenne, C. Craeye, and S. S. Tretyakov, *Microw. Opt. Tech. Lett.* 48 (2006), p. 4560-2564.
- [3] J. J. Barroso, P. J. Castro, and J. P. Leite Neto, *Opt. Tech. Lett.* 52 (2010), p. 2175-2178.
- [4] P. J. Castro, J. J. Barroso, and J. P. Leite Neto, *J. Elect. An. Appl.* 5 (2013), p. 366-370.
- [5] F. Chen, X. Wang, A. Hosseinzadeh, and E. Semouchkina, *Proc. 2012 IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation*, 2012.
- [6] F. Chen, X. Wang, G. Semouchkin, and E. Semouchkina, *AIP Advances* 4 (2014), p. 107129- 1-16.
- [7] N. Michishita, T. Ueda, A. Lai, T. Itoh, *Proc. on Asia-Pacific Microwave Conference*, 2007.
- [8] J. J. Barroso, J. P. Leite Neto, P. J. Castro, U. C. Hasar, J. E. B. Oliveira, Split-ring resonator loaded X-band waveguide supporting negative group velocity. In: *Negative Group Delay Devices: From Concept to Applications*, Editor: Blaise Ravelo. Stevenage, UK: IET Academic Books, 2018, Chapter 11, p. 291-308.