## ESTUDO EXPERIMENTAL E COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DE METAMATERIAIS DE ANÉIS REPARTIDOS NÃO-UNIFORMES E UNIFORMES

Pedro J. Castro\*, Joaquim J. Barroso, Joaquim P. Leite Neto Laboratório Associado de Plasma, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE Av. dos Astronautas, 1758 – 12227-010 São José dos Campos, SP \* castro@plasma.inpe.br

#### RESUMO

Metamateriais são compostos artificiais metalo-dielétricos construídos para controlar o fluxo de ondas eletromagnéticas e modificar suas características de propagação. Para uma rede periódica de metamateriais que incorpora anéis concêntricos repartidos, esta pode exibir permissividade e permeabilidade simultaneamente negativas. Um estudo da rede formada por seis anéis repartidos não-uniformes é conduzido experimentalmente, comparando as suas características de transmissão com anéis repartidos uniformes. Analisando as bandas de transmissão para redes não-uniformes com anéis repartidos e fechados, observou-se a presença de um pico em 4,40 GHz, que corresponde à resposta magnética, situado dentro da banda elétrica. Este fato está em contraposição ao que ocorre para uma estrutura periódica com anéis repartidos uniformes, cuja resposta magnética situa-se sempre à esquerda da resposta elétrica e isolado; neste caso, uma banda passante foi medida em 3,45 GHz correspondente à resposta magnética.

Palavras-chave: metamateriais, anéis repartidos uniformes, anéis repartidos nãouniformes, ressonância magnética, ressonância elétrica, banda de transmissão.

#### INTRODUÇÃO

Os assim denominados metamateriais constituem materiais artificialmente estruturados (dielétrico e inclusão metálica) que podem interagir com as ondas eletromagnéticas de modo a controlar as suas características de propagação. Um tipo desse material consiste em anéis concêntricos repartidos que podem exibir permissividade elétrica e permeabilidade magnética simultaneamente negativas. Tal

estrutura denominada de ressoador de anéis concêntricos repartidos, derivada da expressão inglesa "split-ring resonator" (SRR), apresenta ressonâncias tanto magnéticas como elétricas. A ressonância magnética é induzida pela abertura dos anéis e também pela região de separação entre os anéis interno e externo, os quais constituem elementos capacitivos (Fig.1). E devido à repartição dos anéis essas estruturas podem suportar comprimentos de onda muito maior que a dimensão dos anéis. Dadas as propriedades peculiares dos circuitos com esses metamateriais, uma estrutura periódica formada por anéis concêntricos repartidos pode ser utilizada em propagação de ondas em guias de onda miniaturizados que operam abaixo do corte <sup>(1-2)</sup>. A literatura tem apresentado relatos sobre os vários aspectos dos metamateriais e progressos na pesquisa desta área <sup>(3-15)</sup>.

Neste trabalho são descritos experimentos que examinam a propagação de microondas através de um guia de onda da banda-X no qual é inserida uma rede de seis anéis com diâmetros diferentes (gradientes), portanto não-uniformes, mostrando seu espectro de transmissão e como essa estrutura de anéis de diâmetros diferentes relaciona-se com as freqüências de ressonâncias magnéticas e elétricas. Além disso, é feita uma comparação da mencionada rede de anéis gradientes repartidos com a correspondente rede de anéis fechados, e também com uma rede uniforme de seis anéis de 9 mm de diâmetro. Por último, as bandas de transmissão medidas são comparadas com um modelo de simulação - o CST Microwave Studio.

### **RESSOADORES DE ANÉIS REPARTIDOS E SUA CONSTRUÇÃO**

A rede sob investigação como ilustra a Fig. 1, que não é uma estrutura periódica, consiste em seis anéis concêntricos linearmente diferentes, confeccionados de cobre (com espessura h = 37  $\mu$ m) impressos sobre um substrato de kapton (poliamida), de espessura t = 1,6 mm e constante dielétrica  $\varepsilon$  = 3,2, confeccionados por técnica de circuito impresso. Os outros parâmetros geométricos são: espaçamento entre os anéis interno e externo d = 0,75 mm, largura dos anéis w = 0,80 mm e a abertura (*gap*) dos anéis g = 1,00 mm. Os raios do anel interno variam de r = 1,00 a r = 2,25 mm, com passos de 0.25 mm, tal que o menor e o maior diâmetro dos anéis sejam 6,70 e 9,00, respectivamente. Vale lembrar que, quando g = 0 temos o caso de anéis fechados ("closed-ring resonator" – CRR). Os anéis comportam-se como uma capacitância distribuída representada por C<sub>0</sub> no circuito

equivalente mostrado na Fig. 2, onde L é a indutância mútua dos anéis e  $C_g$ , a capacitância da abertura ("gap") entre os anéis.

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.

Além da rede gradiente com seis diferentes anéis repartidos de diâmetros variáveis (Fig. 3 (a)), uma rede uniforme com seis anéis repartidos de 9,0 mm de diâmetro (Fig. 3 (c)) é utilizada para efeito de comparação em relação às respectivas bandas de transmissão. Ademais, uma rede gradiente, mas de anéis fechados (Fig. 3 (b)) é também usada com o propósito de comparação experimental.





Figura 1. Rede de seis anéis repartidos com diâmetros linearmente variáveis e uma célula de ressoador de anéis repartidos.

Figura 2. Circuito equivalente da estrutura de ressoador de anéis repartidos mostrada na Fig. 1.



Figura 3. Diferentes configurações de redes de seis anéis em comparação: (a) gradientes abertos (b) gradientes fechados e (3) anéis repartidos de diâmetro constante.

## ARRANJO EXPERIMENTAL E EXPERIMENTOS

Experimentos foram implementados inserindo rede de seis anéis uniformes ou nãouniformes no interior de um guia de onda retangular metálico da banda X (8,2-12,4 GHz), conforme mostrado na Fig. 4. A rede é colocada sobre o plano de simetria de um guia de onda padrão WR-90 de secção transversal 2,29 x 1,02 mm<sup>2</sup> e frequência de corte 6,55 GHz. Redes diferentes com seis células de anéis repartidos nãouniformes, anéis fechados não-uniformes e anéis repartidos uniformes de diâmetro constante com 9,00 mm são usadas para investigar o seu efeito nas bandas de transmissão. No detalhe da Fig. 4 vê-se a rede inserida no guia de onda e para facilitar a excitação do circuito, a primeira e a última célula da matriz são colocadas parcialmente fora do guia de onda retangular. A montagem experimental interligada ao analisador de rede vetorial Agilent N5230C é mostrada na Fig. 5, 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 propagante através do meio combinado.

Em alguns experimentos para destacar a banda de transmissão resultante do efeito de ressonância magnética, em vez de usar transições guia de onda/cabo coaxial, utilizou-se um par de sondas magnéticas (Fig. 6).



Figura 4. Guia de onda carregado com ressoador de anéis concêntricos não-uniformes.



Figura 5. Montagem experimental conectada ao analisador de rede para medir o espectro de transmissão das redes de anéis.



Figura 6. Detalhe das sondas magnéticas para destacar a transmissão da ressonância magnética.

#### **RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Resultados para os experimentos da rede de anéis gradientes repartidos e fechados são mostrados na Fig. 7, onde S<sub>21</sub> representa o coeficiente de transmissão medido em dB. No caso de anéis abertos, observam-se sete picos, seis deles certamente fazem parte da banda elétrica, conforme demonstrado pela matriz de anéis fechados, confirmando, portanto, que o número de picos corresponde ao número de ressoadores na banda elétrica <sup>(13)</sup>. Confrontando as curvas para anéis abertos e fechados na Fig. 7, podemos notar a presença de um pico em torno de 4,40 GHz. Por exclusão este deve corresponder à resposta magnética: um pico emergente da banda de elétrica causada pela resposta magnética da matriz gradiente <sup>(13)</sup>. Isto não ocorre em uma estrutura periódica de anéis repartidos, onde a resposta magnética situa-se sempre à esquerda da banda elétrica, fato evidente no caso da rede de anéis uniformes de 9 mm de diâmetro <sup>(13)</sup> com medição da frequência centrada em 3,45 GHz, como apresentado na Fig. 8; esta mesma figura apresenta a curva de calibração (guia de onda sem a rede de SRR) para garantir a condição de operação abaixo do corte. As estruturas gradientes em estudo apresentam outra peculiaridade: presença de uma transmissão em banda larga, abaixo da frequência de corte do guia de onda, que se estende de 3,80 a 8,90 GHz para os anéis repartidos e de 3,63 a 8,48 para os anéis fechados num nível efetivo de 65 dB acima do ruído de fundo (Fig. 7).

0

-20



Figura 7. Magnitude medida de  $S_{21}$  (dB) das bandas de transmissão para as redes nãouniformes com anéis abertos (SRR) e fechados (CRR) A seta vermelha indica a frequência da resposta magnética.

Figura 8. Magnitude medida do coeficiente de  $S_{21}$  (dB) para a rede de seis células com diâmetro constante de 9 mm (em vermelho) sobreposta ao sinal de calibração (guia de onda vazio, em cinza).

Resultados de simulação pelo CST Microwave Studio são comparados com os experimentais (já indicados na Fig. 7) para matrizes abertas e fechadas com boa concordância, conforme mostrado na Fig. 9: os picos em torno de 4,40 GHz para as bandas de transmissão magnética são quase coincidentes. A mesma observação mantém-se para a banda de ressonância elétrica.

O uso de sondas magnéticas (Fig. 6) tornou possível ajustar seletivamente e melhorar a ressonância magnética enquanto enfraquece a resposta elétrica: como esperado da Fig. 7, a banda passante da rede gradiente foi medida com pico centrado em 4,40 GHz em torno da região ressonante transmissão com cerca de 60 dB acima do nível de ruído de fundo (Fig. 10(a)). Vê-se que a resposta magnética estende-se de 3,82 a 4,90 GHz, cobrindo assim uma banda de 1,08 GHz. Para ressaltar esta característica de propagação a Fig. 10(b) apresenta a fase da rede gradiente com 6 SRRs. Pode-se observar também que há uma compressão de fase de dentro do intervalo de 4,25-4.45 GHz pelo fato de que a separação entre picos consecutivos é menor do que as distâncias dos picos nas regiões de freguências mais baixas (<4,2 GHz) e mais altas (>4,6 GHz), correspondente à potência residual de transmissão no patamar de ruído do instrumental de medição <sup>(15)</sup>. Este evento caracteriza a propagação de onda regressiva associada ao efeito do metamaterial a chamada transmissão "left-handed". De fato, observando a fase desdobrada, a inclinação da linha determinada pelas frequências em torno de 4,40 GHz é mais negativa em relação os segmentos retos exteriores à banda de transmissão (Figura 10(c)), indicando assim a propagação de ondas regressivas.

#### CONCLUSÕES

Um estudo de estruturas aperiódicas com seis anéis não-uniformes repartidos e fechados foi realizado experimentalmente, foram medidas e comparadas as suas bandas de transmissão inerentes. Comparando as bandas dessas estruturas, foi constatada a existência de um sinal ressonante em 4,40 GHz correspondente à resposta magnética que emerge da banda elétrica da rede com anéis repartidos. O modelo simulado comprovou a presença desse sinal para a rede gradiente, com boa concordância geral. A propagação de onda regressiva pode ser sugerida pela compressão de fase observada e pela não-linearidade da fase desdobrada na região de ressonância sendo interpretada como uma evidência de permissividade negativa. Entretanto, tal comprovação constitui um tema para estudos futuros.



Figura 9. Magnitude de  $S_{21}$  (dB) simulada pelo CST das bandas de transmissão para as redes não-uniformes (gradientes) de seis células com anéis abertos (SRR) e fechados (CRR). A seta azul indica a frequência correspondente à resposta magnética.



Figura 10. (a) Medida da magnitude e fase [(b) dobrada e (c) desdobrada] do coeficiente  $S_{21}$  correspondente à resposta magnética da rede gradiente com 6 SRRs.

As estruturas aqui estudadas permitem a miniaturização dos dispositivos desde que o maior diâmetro do anel seja muito menor do que o comprimento de onda, e em particular, possibilitam a transmissão eletromagnética em banda larga, especialmente a realização de filtros.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem contado com o apoio do CNPq e da FAPESP.

## REFERÊNCIAS

- 1. BARROSO, J. J.; CASTRO, P. J.; LEITE NETO, J. P. Experiments on wave propagation at 6.0 GHz in a left-handed waveguide, *Microwave and Optical Technology Letters*, v.52, n.10, p. 2175-2178, 2010.
- MARQUÉS, R.; MARTEL, J.; MESA, F.; MEDINA, F. Left-handed-media simulation andtransmission of EM waves in subwavelength split-ring-resonator-loaded metallic waveguides, *Physical Review Letters*, v.89, n.18, p. 183901, 2002.
- 3. PENDRY, J. B.; HOLDEN, A. J.; ROBBINS, D. J.; STEWART, W. J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v.47, p. 2075, 1999.
- 4. PENDRY, J. Manipulating the near field with metamaterials, *Optics and Photonic News*, v.9, p. 32-37, 2004.
- 5. SMITH D.; PENDRY J.; WILTSHIRE, M. Metamaterials and negative refraction index, *Science*, v.305, p. 788-792, 2004.

- 6. RAMAKRISHNA, S.A. Physics of negative refractive index materials, *Reports on Progress in Physics*, v.68, p. 449-521, 2005
- OZBAY, E.; GUVEN, K.; AYDIN, K. Metamaterials with negative permeability and negative refractive index: experiments and simulations, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, v.9, p. S301-S307, 2007.
- SMITH, D. R.; PADILLA, W. J.; VIER, D. C.; NEMAT-NASSER, S. C.; SCHULTZ, S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Physical Review Letters*, v.84, n.18, p. 4184-4187, 2000.
- 9. AYDIN, K.; OZBAY, E. Identifying magnetic response of split-ring resonators at microwave frequencies, *Opto-Electroncs Review*, v.14, n.3, p. 193-199, 2006.
- AYDIN, K.; BULU, I.; GUVEN, K.; KAFESAKI, M.; SOUKOULIS, C. M.; OZBAY, E. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonators parameters and designs, *New Journal of Physics*, v.7, n.168, p. 1-15, 2005.
- 11. AYDIN, K.; OZBAY, E. Experimental and numerical analyses of the resonances of split ring resonator, *Physica Status Solidi (b)*, v.244, n.4, p. 1197-1201, 2007.
- 12. AYDIN, K.; GUVEN, K.; KAFESAKI, M.; ZHANG, L.; SOUKOULIS, C.; OZBAY, E. Experimental observation of true left-handed transmission peaks in metamaterials, *Optics Letters*, v.29, n.22, p. 2623-2625, 2004.
- 13. CASTRO, P.J.; BARROSO, J.J.; LEITE NETO, J.P. Experiments on backward wave propagation in an X-band rectangular waveguide loaded with closed- and split-ring resonators. Submetido ao **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, 2014.
- CASTRO, P.J.; BARROSO, J.J.; LEITE NETO, J.P.; TOMAZ, A. Microwave Propagation Experiments on a Gradient Array of Split-Ring Resonators. In: IMOC 2013 – SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conference, 2013, Rio de Janeiro, RJ. *Proceedings*. Rio de Janeiro: IEEE/SBMO, 2013, p. 116642 (1-5).
- 15. CALOZ, C.; ITOH, T. *Electromagnetic Metamaterials*. Hoboken-NJ-USA: John Wiley & Sons Inc., 2006, pp. 85-100.

## EXPERIMENTAL AND COMPARATIVE STUDY OF METAMATERIALS ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF NON-UNIFORM AND UNIFORM SPLIT-RING RESONATORS

# ABSTRACT

Metamaterials are artificially structured metallic materials especially engineered to interact with electromagnetic waves so as to control their propagation characteristics. *A* metamaterial periodic array incorporating concentric split-rings can display simultaneously negative permeability and permittivity. A study of array formed by six non-uniform split-rings is driven experimentally by comparing its transmission characteristics with uniform ones. Examining the similarities and differences of transmission bands for non-uniform arrays with split and closed rings the presence of a peak at 4.40 GHz was observed, which corresponds to the magnetic response, located inside the electric band. This is in contrast to what occurs for a periodic structure with uniform-split ring resonators, whose magnetic response is always to the left of the electric response and isolated; in this case, a passband was measured at 3.45 GHz corresponding to the magnetic response.

Key-words: Metamaterials, split-ring resonators, magnetic response, electric response, left-handed transmission band.