

# ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISSÃO DE UMA REDE DE METAMATERIAIS NÃO-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. Uma rede de metamateriais formada por anéis concêntricos repartidos pode exibir permissividade e permeabilidade simultaneamente negativas. Um estudo de uma rede formada por seis ressoadores de anéis repartidos não-uniformes é conduzido experimentalmente, focalizando as suas características de transmissão e reflexão que resultam de sua assimetria longitudinal. Tais características são analisadas e comparadas com seus parâmetros de espalhamento duais associados a uma rede uniforme de anéis repartidos. Na rede não-uniforme os diâmetros dos anéis variam de passos de 0,5 mm, o que lhe confere uma geometria gradiente. Como resultado da sua inserção em um guia de onda da banda X que opera abaixo do corte, obtém-se uma banda de transmissão mais larga em relação à rede uniforme.

Palavras-chave: metamateriais, ressoadores de anéis repartidos, rede de anéis gradientes, rede de anéis uniformes, bandas de transmissão.

## INTRODUÇÃO

Os assim denominados metamateriais constituem materiais artificialmente estruturados (dielétrico e inclusão metálica) que podem interagir com as ondas eletromagnéticas e controlá-las. Um tipo desse material consiste em anéis concêntricos repartidos que podem exibir simultaneamente permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativas. Tal estrutura denominada de ressoador de anéis concêntricos repartidos, derivado 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 para propagação de ondas em guias de onda miniaturizados que operam abaixo do corte <sup>(1-2)</sup>. Mesmo com dimensões menores que o comprimento de onda de operação tais estruturas podem ser aplicadas nas faixas de frequências de microondas até terahertz <sup>(3)</sup>. A literatura tem apresentado relatos sobre os vários aspectos dos metamateriais e progressos na pesquisa desta área <sup>(4-17)</sup>.

Neste trabalho relatam-se experimentos sobre propagação de ondas através de um guia de onda da banda X no qual é inserida uma rede de seis ressoadores de anéis repartidos com diâmetros variáveis, desta forma não-uniforme ou gradiente <sup>(16)</sup>, mostrando os seus respectivos espectros de transmissão e reflexão e como esta estrutura compara-se a uma rede periódica e uniforme de seis anéis com 9 mm de diâmetro. Ademais, as bandas de transmissão medidas são comparadas entre si e com um modelo de simulação do CST Microwave Studio.

## **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE RESSOADORES DE ANÉIS REPARTIDOS NÃO-UNIFORMES**

A rede de ressoadores sob investigação não é uma estrutura periódica, como ilustra a Fig. 1, consiste de seis diferentes anéis concêntricos de cobre (com espessura  $h = 37 \mu\text{m}$ ) impressos sobre um substrato de kapton (poliamida), de espessura  $t = 1,6 \text{ mm}$  e constante dielétrica  $\epsilon = 3,2$ , confeccionados por técnica de circuito impresso. Os outros parâmetros geométricos são: espaçamento entre os anéis interno e externo  $d = 0,75 \text{ mm}$ , largura dos anéis  $w = 0,80 \text{ mm}$  e a abertura (*gap*) dos anéis  $g = 1,00 \text{ mm}$ . Os raios do anel interno variam de  $r = 1,00$  a  $r = 2,25 \text{ mm}$ , com passos de  $0,25 \text{ mm}$ , tal que o menor e o maior diâmetro dos anéis sejam  $6,70$  e  $9,00 \text{ mm}$ , 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  $C_0$  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.

Para melhor delinear os objetivos de nosso estudo, a rede gradiente com seis diferentes anéis repartidos com diâmetros linearmente variáveis pode ser separada em duas configurações: (a) rede de anéis de diâmetros crescentes, (b) rede de anéis de diâmetros decrescentes, ambos para serem usados com o propósito de comparação experimental com a (c) rede de anéis com diâmetros constantes, como ilustrado na Fig. 3. Cada amostra é colocada no interior de um guia de onda com o objetivo de obter os correspondentes parâmetros de transmissão  $S_{12}$  e  $S_{21}$  e os parâmetros de reflexão progressiva ou regressiva  $S_{11}$  e  $S_{22}$ , que estão relacionados com as portas 1 (entrada) e 2 (saída) do guia de onda como suporte.

Inserindo no guia de onda, a rede de anéis repartidos pode produzir permissividade negativa quando a frequência de operação é abaixo da frequência de corte do modo dominante no guia vazio. Além disso, a permeabilidade magnética negativa é obtida a partir da interação entre a componente transversal do campo magnético com os ressoadores de anéis repartidos, produzindo uma resposta magnética desses ressoadores, assim provendo uma banda de transmissão (frequentemente chamada de “left-handed transmission band”).

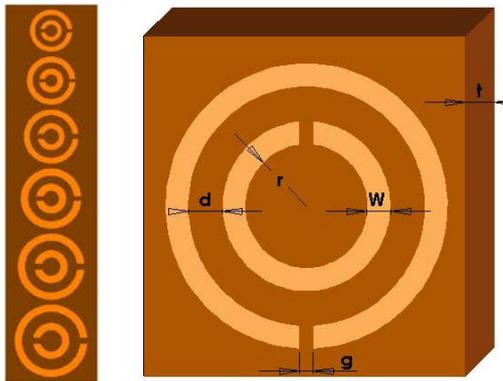


Figura 1. Rede de seis anéis repartidos com diâmetros linearmente variáveis e uma célula de ressonador de anéis repartidos.

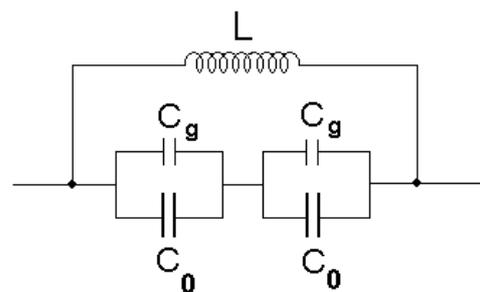


Figura 2. Circuito equivalente da estrutura do ressonador de anéis repartidos mostrada na Fig. 1.

Numa outra análise, são comparadas as bandas de transmissão entre as redes não-uniformes e uniformes, tanto em relação às respostas magnéticas e elétricas,

como em relação à sua largura de banda. Por último, as bandas de transmissão medidas são comparadas com um modelo de simulação - o CST Microwave Studio.

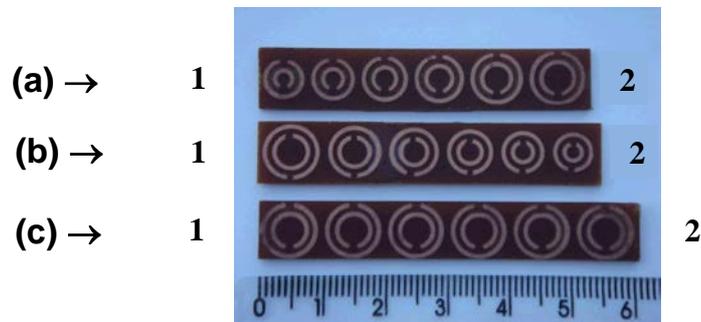


Figura 3. Diferentes configurações de redes de seis anéis em comparação: (a) rede de anéis de diâmetros crescentes, (b) rede de anéis de diâmetros decrescentes e (c) rede uniforme com anéis de diâmetro constante. Os números 1 e 2 representam as portas de entrada e saída do dispositivo.

#### ARRANJO EXPERIMENTAL E EXPERIMENTOS

Experimentos foram implementados inserindo uma rede de seis anéis uniformes ou não-uniformes no interior de um guia de onda retangular metálico da banda X (8,2-12,4 GHz), conforme mostrado na Fig. 4, para investigar o efeito sobre os espectros de transmissão e reflexão. A rede é colocada sobre o plano de simetria de um guia de onda padrão WR-90 de secção transversal  $2,29 \times 1,02 \text{ mm}^2$  e frequência de corte 6,55 GHz. Redes diferentes com seis células de anéis repartidos não-uniformes, e anéis repartidos uniformes de diâmetro constante com 9,00 mm são usadas para investigar o seu efeito nos espectros de transmissão e reflexão. 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 ou refletido através do meio combinado.

O analisador de rede é usado para medir os coeficientes de transmissão  $S_{21}$  e  $S_{21}$  e os coeficientes de reflexão  $S_{11}$  e  $S_{22}$  através do meio combinado, e também para coletar os dados experimentais. Os coeficientes de transmissão e reflexão

estão, por sua vez, relacionados com a entrada (1) e saída do dispositivo (2), ou seja, conjunto do guia de onda mais rede de metamateriais (Fig. 5).

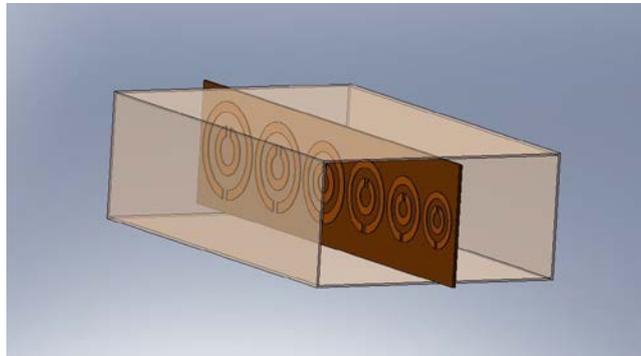


Figura 4. Guia de onda carregado com ressonador de anéis concêntricos não-uniformes.



Figura 5. Montagem experimental conectada ao analisador de rede para medir o espectro de transmissão e reflexão das redes de ressoadores de anéis repartidos com seis células.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

As Figs. 6 (a) e 6 (b) apresentam os resultados experimentais para os módulos com suas respectivas fases desdobradas dos coeficientes de transmissão  $S_{12}$  e  $S_{21}$  e os de reflexão  $S_{11}$  e  $S_{22}$ , para a rede de anéis com diâmetros crescentes. Como pode ser observado no painel esquerdo, há uma coincidência entre os coeficientes de transmissão em módulo e fase, ou seja, ambas as fases e magnitudes de  $S_{12}$  e  $S_{21}$  são idênticas. Por outro lado, vê-se no painel direito que  $S_{11}$  não é igual a  $S_{22}$ , fato que é devido à assimetria da estrutura, porquanto uma rede assimétrica é caracterizada por diferentes coeficientes de reflexão progressiva e regressiva. Os

módulos dos coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{22}$  mostram uma visível variação entre 6,00 e 12,40 GHz, mesmo abaixo da frequência de corte (em 6,55 GHz). Isto implica impedâncias de ondas muito diferentes para a estrutura dependendo sobre que lado a onda excitadora atua sobre a amostra. Quanto aos valores das fases, a variação é clara na faixa 7,50-10,50 GHz.

Nas Figs. 7 (a) e 7 (b), observa-se o mesmo cenário: para a rede de diâmetros decrescentes a relação  $S_{12} = S_{21}$  ainda permanece, enquanto que  $S_{11} \neq S_{22}$ . Além disso, o coeficiente  $S_{11}$  da configuração gradiente crescente é similar ao  $S_{22}$  da rede gradiente decrescente, e vice-versa, como era esperado.

Por último, os quatro parâmetros de espalhamento para a rede de anéis de diâmetros constantes (uniforme) estão demonstrados na Fig. 8, onde os coeficientes de transmissão e reflexão são praticamente similares, não se levando em conta as ocorrências acima da banda X e na faixa do ruído de fundo (<3 GHz). Neste caso, a estrutura é simétrica nas direções de propagação progressiva ou regressiva.

Analisando o espectro de transmissão das redes uniforme e gradiente como traçado na Fig. 9 (a), o primeiro tem uma banda passante centrada ao redor de 3,22 GHz, que corresponde à resposta magnética, um valor bem abaixo da frequência de corte em 6,55 GHz, desta forma caracterizando um material com índice de refração negativo <sup>(1,2)</sup>. A segunda banda com seis picos corresponde à resposta elétrica, cobrindo a faixa de 4,03 a 7,90 GHz, na qual o número de picos corresponde ao número de ressoadores, análogo a um conjunto de cavidades acopladas <sup>(16)</sup>. Em contraposição, a estrutura gradiente distingue-se pela presença de uma transmissão em banda larga abaixo da frequência de corte do guia de onda <sup>(16,17)</sup>, uma faixa que se estende de 3,80 a 8,90 GHz, certamente por causa da resposta magnética que se insere dentro da banda elétrica <sup>(17)</sup>.

As bandas de transmissão de ambas as estruturas são comparadas com o modelo de simulação pelo CST com uma relativa concordância, ocorrendo um pequeno deslocamento para a esquerda referente à rede gradiente, como mostrado na Fig. 9 (b).

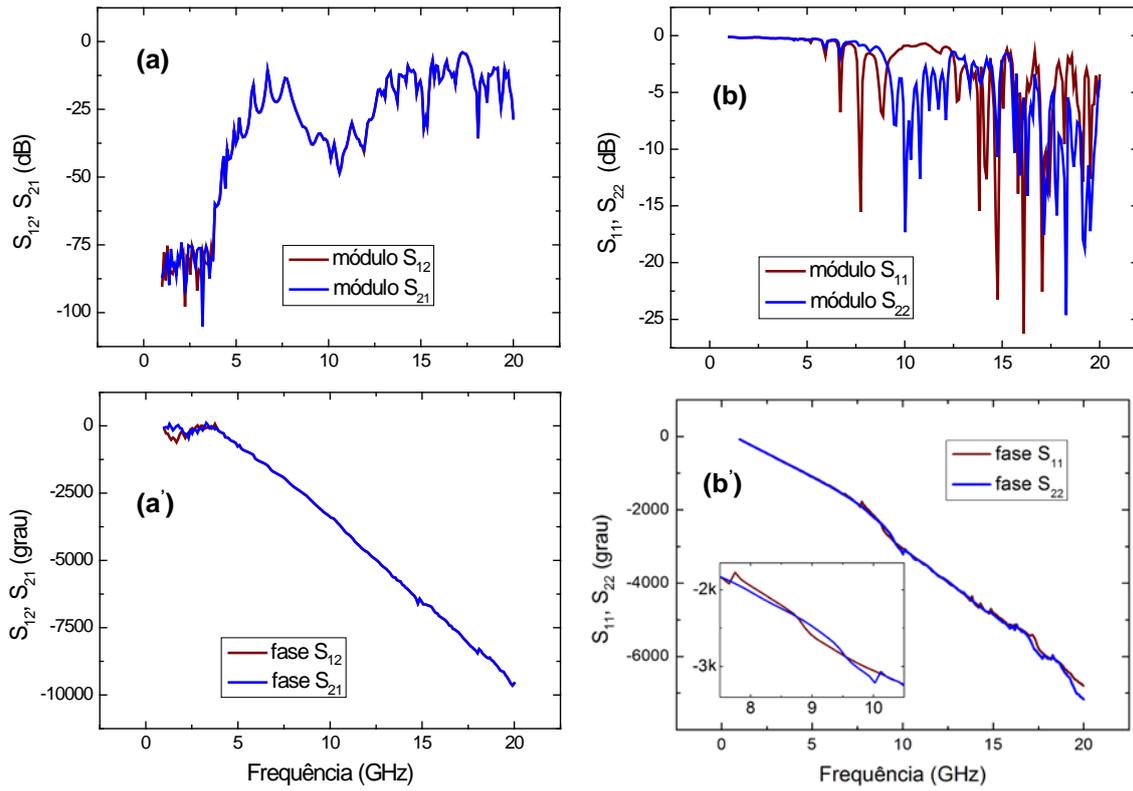


Figura 6. (a) Medidas experimentais: módulos (dB) dos coeficientes de transmissão  $S_{12}$  e  $S_{21}$  e suas respectivas fases; (b) módulos (dB) dos coeficientes de transmissão  $S_{11}$  e  $S_{22}$  e suas respectivas fases para a rede não-uniforme crescente.

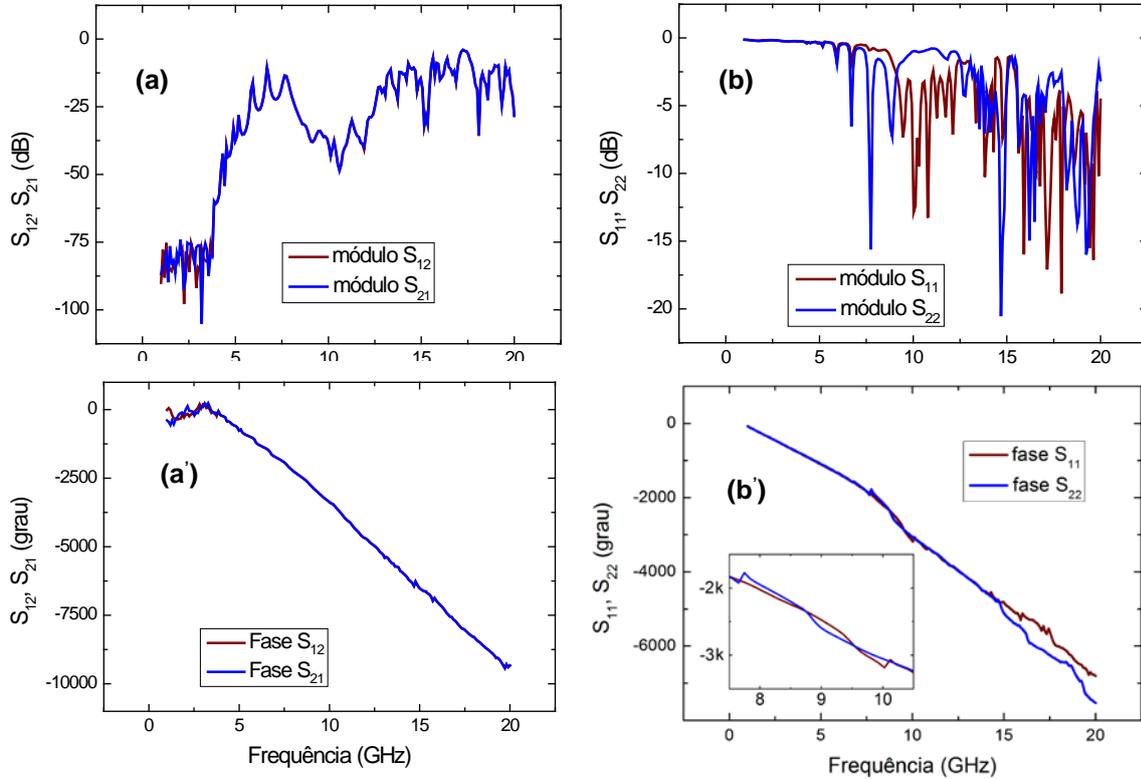


Figura 7. (a) Medidas experimentais: módulos (dB) dos coeficientes de transmissão  $S_{12}$  e  $S_{21}$  e suas respectivas fases; (b) módulos (dB) dos coeficientes de transmissão  $S_{11}$  e  $S_{22}$  e suas respectivas fases para a rede não-uniforme decrescente.

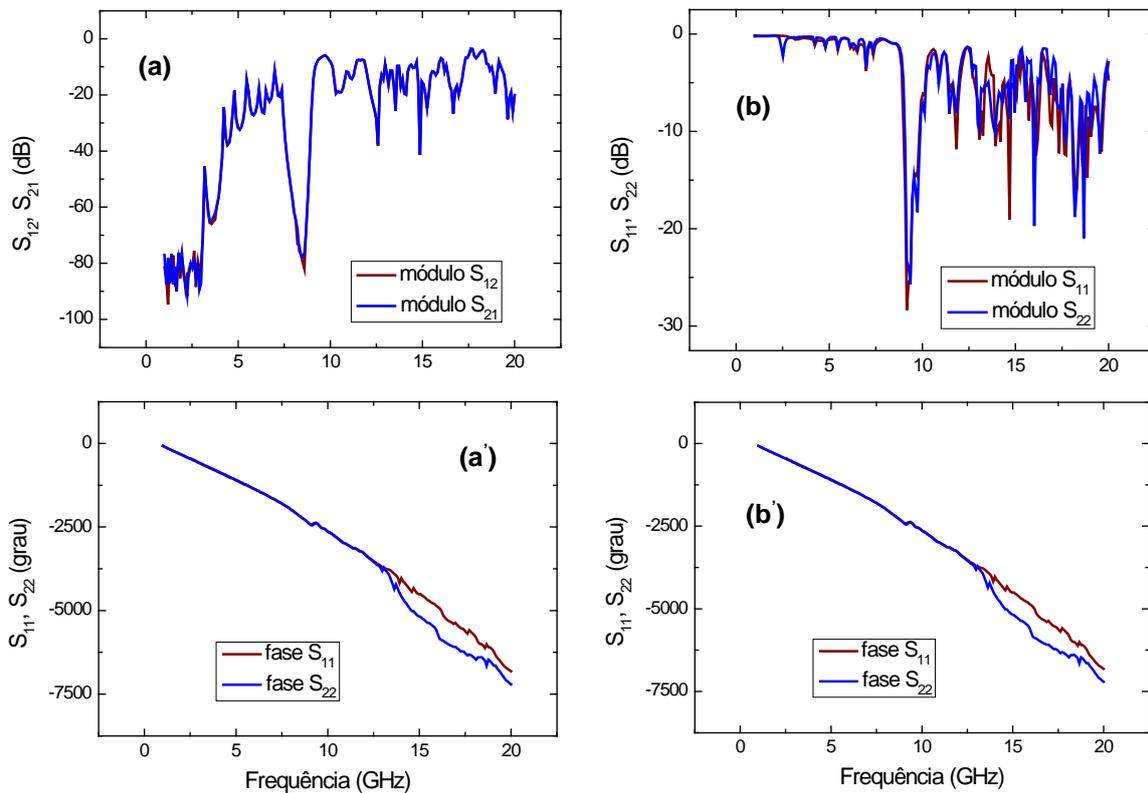


Figura 8. (a) Medidas experimentais: módulos (dB) dos coeficientes de transmissão  $S_{12}$  e  $S_{21}$  e suas respectivas fases; (b) módulos (dB) dos coeficientes de transmissão  $S_{11}$  e  $S_{22}$  e suas respectivas fases para a rede uniforme com diâmetro constante de 9 mm.

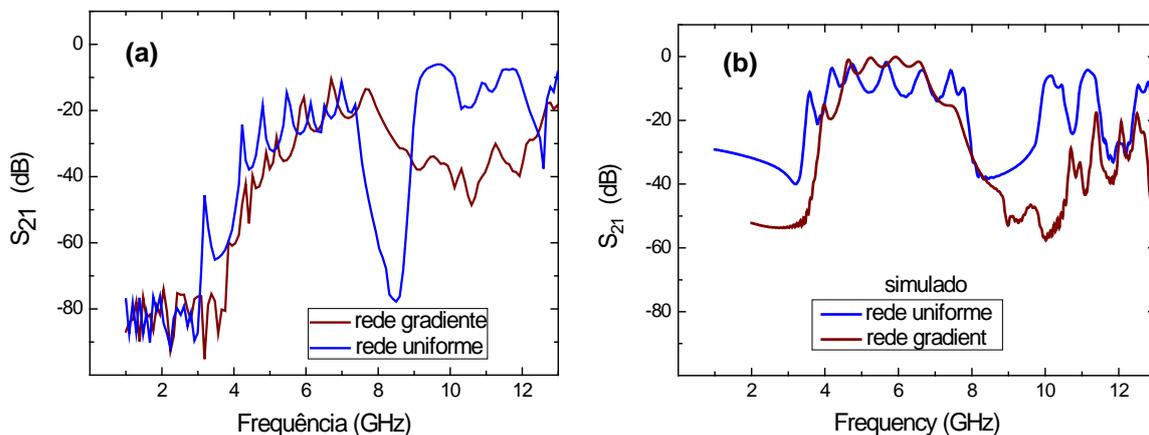


Figura 9. (a) Medidas do módulo de  $S_{21}$  para as redes gradiente e uniforme com seis ressoadores de anéis repartidos; (b) valores simulados pelo CST para as redes respectivas.

## CONCLUSÕES

Um estudo de redes não-uniformes (gradientes) e uniformes formadas por seis anéis repartidos foi implementado experimentalmente, em que foram medidas as características de transmissão e reflexão. Para a rede uniforme os parâmetros de

transmissão e reflexão tem o mesmo comportamento ( $S_{12} = S_{21}$  e  $S_{11} = S_{22}$ ), isto significa que esta rede possui simetria especular e recíproca. Para as redes gradientes com diâmetros crescentes e decrescentes dos anéis, os coeficientes de transmissão são idênticos ( $S_{12} = S_{21}$ ), pois as estruturas são ainda recíprocas. Por outro lado, os coeficientes de reflexão progressivos e regressivos diferem bastante em módulo e fase devido à assimetria da rede. Em todos os eventos as fases comprovaram e evidenciaram o comportamento de cada parâmetro de espalhamento S. Uma das peculiaridades da rede não-uniforme reside no fato de que a sua resposta magnética situa-se dentro da banda elétrica, ao contrário da rede uniforme, cuja resposta magnética situa-se à direita e fora da banda elétrica. Este fato contribui para que a banda elétrica inerente seja mais larga do que aquela da rede uniforme. Se um pico de frequência no espectro de transmissão da rede não-uniforme manifesta um índice de refração negativo, é algo a ser investigado futuramente. 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 do guia de onda, e em especial as redes gradientes possibilitam a transmissão eletromagnética em banda larga, principalmente a realização de filtros passa-faixas.

#### **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho tem sido apoiado pelo CNPq e pela FAFESP.

#### **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, *Microw. Opt. Techn. Lett.*, v.52, n.10, p. 2175-2178, 2010.
- (2) MARQUÉS, R.; MARTEL, J.; MESA, F.; MEDINA, F. Left-handed-media simulation and transmission of EM waves in subwavelength split-ring-resonator-loaded metallic waveguides, *Phys. Rev. Lett.*, v.89, n.18, p. 183901, 2002.
- (3) MOSER, H. O.; CASE, B. D. F.; WILHELMI, O.; SAW, B. T. Terahertz response of a microfabricated rod-split-split-ring-resonator electromagnetic material, *Phys. Rev. Lett.*, v.94, p. (063901)1-4, 2005.
- (4) PENDRY, J. B.; HOLDEN, A. J.; ROBBINS, D. J.; STEWART, W. J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, v.47, p. 2075, 1999.

- (<sup>5</sup>) PENDRY, J. Manipulating the near field with metamaterials, *Optics and Photonic News*, v.9, p. 32-37, 2004.
- (<sup>6</sup>) SMITH D.; PENDRY J.; WILTSHIRE, M. Metamaterials and negative refraction index, *Science*, v.305, p. 788-792, 2004.
- (<sup>7</sup>) RAMAKRISHNA, S.A. Physics of negative refractive index materials, *Reports on Progress in Physics*, v.68, p. 449-521, 2005.
- (<sup>8</sup>) OZBAY, E.; GUVEN, K.; AYDIN, K. Metamaterials with negative permeability and negative refractive index: experiments and simulations, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, v.9, p. S301-S307, 2007.
- (<sup>9</sup>) SMITH, D. R.; PADILLA, W. J.; VIER, D. C.; NEMAT-NASSER, S. C.; SCHULTZ, S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Phys. Rev. Lett.*, v.84, n.18, p. 4184-4187, 2000.
- (<sup>10</sup>) AYDIN, K.; OZBAY, E. Identifying magnetic response of split-ring resonators at microwave frequencies, *Opto-Electron. Rev.*, v.14, n.3, p. 193-199, 2006.
- (<sup>11</sup>) 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.
- (<sup>12</sup>) KATSARAKIS, N.; KOSCHNY, T.; KOSCHNY, M.; KAFESAKI, M.; ECONOMOU, E. N.; SOUKOULIS, C. M., Electric coupling to the magnetic resonance of split ring resonators, *Applied Physics Letters*, v.84, n.15, p. 2943-2945, 2004.
- (<sup>13</sup>) 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.
- (<sup>14</sup>) AYDIN, K.; GUVEN, K.; KAFESAKI, M.; ZHANG, L.; SOUKOULIS, C.; OZBAY, E. Experimental observation of true left-handed transmission peaks in metamaterials, *Opt. Lett.*, v.29, n.22, p. 2623-2625, 2004.
- (<sup>15</sup>) CASTRO, P. J.; BARROSO, J. J.; LEITE NETO, J. P. Experimental study on split-ring resonators with different slit widths. *J. Electromagn. An. Appl.*, v.5, p.306-310, 2013.
- (<sup>16</sup>) LAM, T.; GREGOR, R. B.; PARAZZOLI, C. G.; TANIPELLAN M. H. Compact waveguide bandpass and bandstop filters using negative index material concepts. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, p. 2336-2339, 2010.
- (<sup>17</sup>) 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 International Microwave and Optoelectronics Conference, Rio de Janeiro, RJ, 2013. *Proceedings*. Rio de Janeiro, SBMO/IEEE, 2011, p. 116642(1-5).

- (<sup>17</sup>) LAM, T.; GREGOR, R. B.; PARAZZOLI, C. G.; TANIELLAN M. H. Compact waveguide bandpass and bandstop filters using negative index material concepts. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, p. 2336-2339, 2010.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF A METAMATERIAL NONUNIFORM SPLIT-RING ARRAY**

### **ABSTRACT**

Metamaterials are artificially structured metallo-dielectric materials especially engineered to interact with electromagnetic waves so as to control their propagation characteristics. In this work, resonator incorporating two concentric metallic split rings are printed on a substrate of kapton (polyamide). A metamaterial array built of concentric split rings can exhibit negative permeability and permittivity simultaneously. A study of a nonuniform metamaterial array using six nonlinear split-ring resonators of varying diameters is conducted experimentally to measure the transmission and reflection characteristics that arise from its longitudinal asymmetry. Such characteristics are examined and compared with their counterpart symmetric scattering coefficients associated with a uniform split-ring array. In the nonuniform split-ring array the ring diameters vary in steps of 0.5 mm, which yields a gradient geometry. Inserting the nonuniform array in a X-band waveguide operating below cutoff frequency provides a transmission band wider than that obtained from the uniform array.

Key-words: metamaterials, split-ring resonators, gradient split-ring array, transmission bands.