

Análises Numérica e Experimental de Metamaterial como Prospecção à Tecnologia *Stealth*

José Everardo J. Ferreira*, José Edimar B. Oliveira*, Luiz Alberto de Andrade**

* Departamento de Microondas e Optoeletrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Address: Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP – Brazil

Fax: + 55 – 01239473704; email: rasgador@ita.br

** Divisão de Materiais – Instituto de Aeronáutica e Espaço
Fax: + 55 – 01239476404

Resumo — Este trabalho tem por finalidade em demonstrar a Simulação Numérica, Projeto, Fabricação, Experimentos e Medidas em estruturas de cobre unidimensionais do tipo Split-Ring Resonator e Wires dispostas em Placas de Circuito Impresso (PCI) intercaladas, conhecidas como Left-Handed Metamaterial (LHM) com prospecção à Tecnologia Stealth em banda X. Inicialmente, foram realizadas simulações em uma célula unitária com nova geometria bem como o substrato envolvido, ou seja, uma inclusão do tipo Duplo Split-Ring Resonator de forma Triangular Equilátera (DSRRTE), logo após, simulações foram concretizadas em estruturas maiores, denominadas de bulk. Cada bulk composto de dez placas, sendo que cada placa com uma matriz de 7 x 7 DSRTEs, e em conjunção de dez placas wires, sendo que cada placa com uma matriz de 7 x 7 wires. Analogamente, foi realizado simulação num bulk com inclusão circular composto de dez placas, sendo que cada placa com uma matriz 7 x 7 Duplo Split-Ring Resonator Circular (DSRRC), e em conjunção de dez placas wires, análogo ao bulk triangular. No que tange ao substrato utilizado nos bulks, foi utilizado o Politetrafluoroethylene (PTFE) com fibra de vidro ao invés do FR4. Na simulação numérica, foi usado o software comercial CST Microwave Studio que está baseado na Técnica de Integração Finita (TIF) como um esquema consistente de discretização das Equações de Maxwell em sua forma integral. Em complemento as tarefas pertinentes as simulações numéricas, arranjos experimentais e medidas eletromagnéticas em espaço livre foram realizados com ênfase na técnica de calibração *Gated-Reflect-Line* (GRL) sob um plano de incidência normal. As respostas eletromagnéticas coletadas ao longo da Banda X foram analisadas em termos dos coeficientes de Reflexão (S11) e Transmissão (S21) das Estruturas Sob Teste (EST). Por fim, os dados relevantes com base nos resultados numéricos e experimentais foram comparados e discutidos com vista à aplicabilidade de LHM em pesquisas envolvendo a Tecnologia *Stealth*.

Palavras-chaves — LHM Metamaterial, SRR Triangular, Técnica de Integração Finita (FIT), Politetrafluoretileno (PTFE). *Gated-Reflect-Line* (GRL)

I. INTRODUÇÃO

1) *Considerações Iniciais*: Na natureza, podem existir três estados de agregação da matéria, que variam conforme a temperatura e a pressão as quais se submete um corpo: o estado sólido, que é quando as partículas elementares se encontram fortemente ligadas, e o corpo possui tanto forma quanto volume definidos; o estado líquido, no qual as partículas elementares estão unidas mais fracamente do que no estado sólido, e no qual o corpo possui apenas volume definido; e o estado gasoso, no qual as partículas elementares encontram-se fracamente ligadas, não tendo o corpo nem forma nem volume definidos. Além dos três principais estados de agregação da matéria, há mais dois outros estados. Físicos do final do século XX demonstraram que existe um quarto estado, o plasma, no qual as moléculas já não existem mais e os átomos se encontram desagregados em seus componentes. Nos níveis de temperaturas superiores a 1.000.000°C, todas as substâncias se encontram no estado de plasma. Na década de 1920, os físicos Satyendra Nath Bose e Albert Einstein previram que, a temperaturas muito baixas, partículas como os átomos vão se aglomerar com exatamente o mesmo estado quântico de menor energia possível. Esse quinto estado da matéria é conhecido como Condensado de Bose-Einstein (BEC, na sigla em inglês: *Bose-Einstein Condensate*). Esse fenômeno foi finalmente observado em laboratório em 1995, resfriando-se átomos de rubídio na fase vapor até a temperatura de 50 nanokelvins [1]. Assim posto, foi abordado de forma sucinta, os cinco estados da matéria que são encontrados na natureza e que até o presente momento são conhecidos, porém, como pode-se descrever as interações entre os materiais, nos estados acima descritos, e os campos eletromagnéticos? Assume-se que em escala macroscópica tal interação pode ser geralmente descrita

pelos Equações de Maxwell e pelas relações constitutivas que são freqüentemente usadas para descrever as propriedades eletromagnéticas em materiais através dos parâmetros constitutivos, denominados de permissividade elétrica (ϵ), permeabilidade magnética (μ) e condutividade elétrica (σ), para um determinado meio específico; tais parâmetros, também determinam a extensão espacial em que os campos eletromagnéticos podem penetrar num material, seja qual for o estado, numa determinada freqüência [2].

2) *Teoria Eletromagnética - Histórico:* Em setembro de 1885, Oliver Heaviside (1850 – 1925) introduziu pela primeira vez o termo permeabilidade magnética e condutância, introduziu também os seguintes termos: indutância, impedância, admitância e permitância que logo depois mudou para susceptância, após ter lido com denodo a obra de James Clerk Maxwell (1831 – 1879) intitulada “*Tratado sobre Electricidade e Magnetismo*”, livro que continha todas as suas ideias sobre este tema, condensou todo o trabalho realizado ao longo dos anos e publicando-o em 1873. Dessa forma, Heaviside tornou-se um fiel discípulo e um defensor por excelência da Teoria de Maxwell, seja pelo rigor matemático ou pelo fato de até aquela data, não havia nenhum dado experimental comprobatório alusivo a teoria de Maxwell, neste contexto, tornando-se apenas uma obra meramente especulativa, contudo, Heaviside juntamente com o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894) trabalharam com determinação e propósito no que tange ao registro condensado e posterior disseminação dos trabalhos concernentes a Teoria Eletromagnética, tornando-os, dessa forma, os principais responsáveis pelo legado de como as Equações de Maxwell são apresentadas na literatura atual [2]. De maneira que a participação de Heaviside no cenário científico foi uma das mais importantes molas propulsora que em particular, impulsionou a “*Teoria Eletromagnética Moderna*” ao nível de credibilidade merecida e que cuja literatura tem sido referenciada nos trabalhos científicos de mestrado e doutorado de forma axiomática.

3) *Metamaterial – Histórico:* Metamateriais são estruturas artificiais com propriedades eletromagnéticas únicas ou superiores aos materiais convencionais [3]. A palavra “meta” em Grego significa além de, acima de, e neste sentido, o nome metamaterial, significa além ou acima dos materiais convencionais, são tipicamente artificiais e conforme já mencionado, possuem propriedades não disponíveis na natureza, até o presente momento [4]. O termo Metamaterial foi criado por Rodger M. Walser [5] em 1999 na Universidade do Texas em Austin - USA. Na ocasião ele definiu metamaterial da seguinte forma: Compósito macroscópico artificial, tridimensional, projetado sob uma arquitetura celular periódica, fins produzir uma combinação extraordinária, não disponível na natureza, proporcionando duas ou mais respostas a uma dada excitação específica. Em consonância com Rodger Walser, trata-se de um material artificial que detém propriedades não encontradas na natureza [6]; na seqüência, será mostrada uma evolução histórica acerca de material artificial. O conceito de material artificial teve

início no final do século XIX. Em 1898 Jagadis Chunder Bose realizou o primeiro experimento fazendo uso de

4) *O Terceiro Quadrante:* Contido na Fig. 1, temos a região Veselago ou Materiais de Veselago[7].

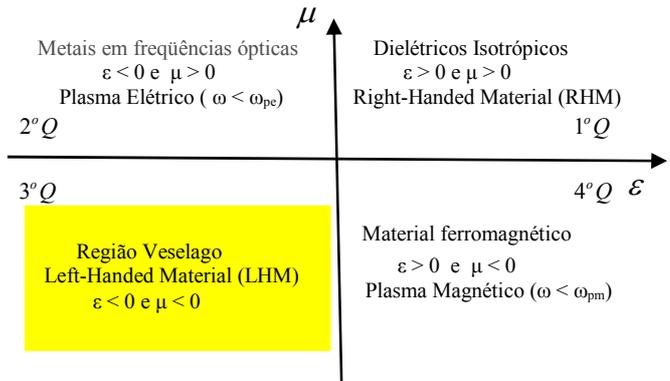


Fig. 1 Permissividade x permeabilidade (ε x μ)

5) *LHM e as Equações de Maxwell:*

Considerando uma região cheia de um material homogêneo e isotrópico, as equações de Maxwell no Sistema SI podem ser escritas [15]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

De modo que com $e^{j\omega t}$ variando no tempo e as relações constitutivas onde,

$$\vec{B} = \mu^* \vec{H} \quad e \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2)$$

Onde temos

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu^* \vec{H}, \quad \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon \vec{E} \quad (3)$$

Onde:

μ^* é a permeabilidade magnética complexa, e ϵ é a permissividade elétrica, parte real.

De (7), o rotacional do vetor campo magnético \vec{H} , ou seja, $\nabla \times \vec{H}$, também pode ser escrito:

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E} \quad (4)$$

Onde a quantidade entre parêntesis é definido como a permissividade elétrica complexa ou constante dielétrica complexa ϵ^* , isto é,

$$\epsilon^* = \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (5)$$

Aqui o σ é a condutividade do material. Quando a condutividade é larga, o material é considerado metálico *in nature*; do contrário, é considerado ser um material dielétrico.

A constante dielétrica complexa também pode ser escrita da seguinte forma:

$\epsilon^* = \epsilon_o (\epsilon' - j\epsilon'')$, com ϵ'' denominado de fator de perdas, e é definido por:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_o} \quad (6)$$

Permissividade elétrica normalizada:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_o} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (7)$$

De maneira análoga para a permeabilidade magnética, temos

$$\mu_r = \frac{\mu^*}{\mu_o} = \mu' - j\mu'' \quad (8)$$

Podemos ainda escrever (12) da seguinte forma:

$$\epsilon' = \text{Re}\left(\frac{\epsilon^*}{\epsilon_o}\right) \quad \text{e} \quad \epsilon'' = -\text{Im}\left(\frac{\epsilon^*}{\epsilon_o}\right) \quad (9)$$

$$\epsilon_r = \epsilon'(1 - jtg\delta_e), \quad \text{onde} \quad tg\delta_e = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (10)$$

O termo $tg\delta_e$ significa tangente de perdas elétrica de primeira ordem.

De forma análoga a equação (9), no que tange a permeabilidade magnética, tem-se:

$$\mu' = \text{Re}\left(\frac{\mu^*}{\mu_o}\right) \quad \text{e} \quad \mu'' = -\text{Im}\left(\frac{\mu^*}{\mu_o}\right) \quad (11)$$

$$\mu_r = \mu'(1 - jtg\delta_m) \quad \text{onde,} \quad tg\delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (12)$$

O termo $tg\delta_m$ significa tangente de perdas magnética de primeira ordem.

II. SIMULAÇÃO

Para prever a resposta de frequência *Bulk* de geometria triangular na configuração metamaterial proposta, cada um reconhece as suas características periódicas e recorre-se a uma formulação matemática baseada em modos de expansão de Floquet [8]. O *Bulk* investigado nesta publicação é ilustrada na Fig 2, ao passo que a sua resposta de frequência foi predita usando um programa de simulação CST *Microwave Studio* (www.cst.com), conforme apresentada na Fig. 3, onde observa-se a magnitude de S21 ao longo da Banda X.

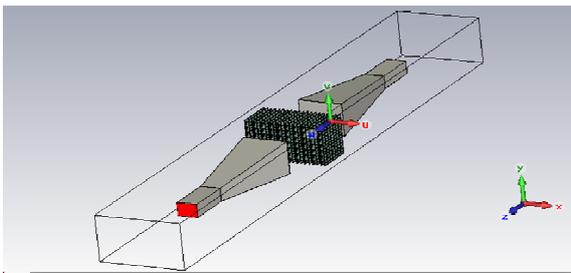


Fig. 2 – Simulação com cornetas em Bulk com inclusões Triangular e inclusões do tipo I (wires)

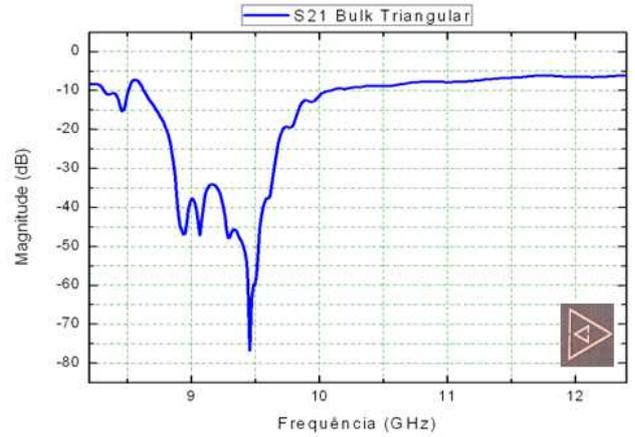


Fig. 3: Magnitude de S21

A resposta em frequência como visto na Fig. 3, está em consonância com a Fig. 16 (a) na página 1526 da referência [9]. Na Fig. 4 tem-se a simulação com *Bulk* circular e na Fig. 5 a magnitude de S21 ao longo da Banda X.

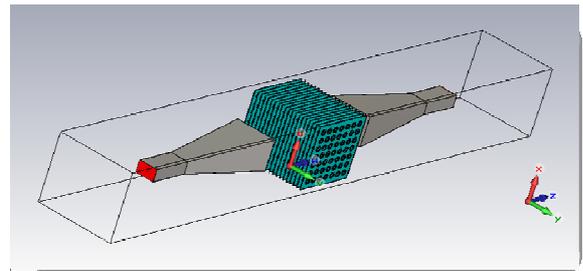


Fig. 4: Simulação com cornetas em Bulk com inclusões Circular e inclusões do tipo I (wires)

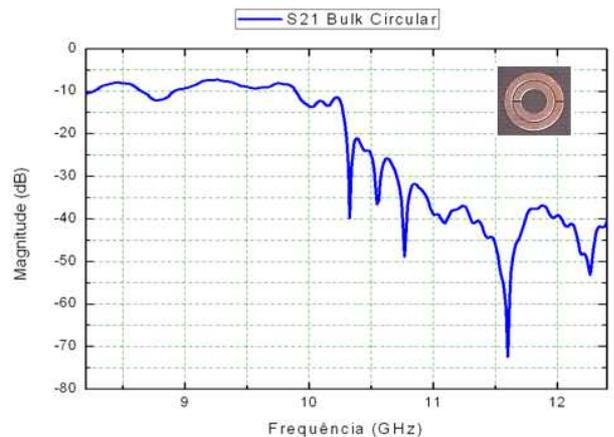


Fig. 5: Magnitude de S21

III. Metamaterial – Fabricação e Experimentos

No Laboratório de Antenas da Divisão de Eletrônica do IAE, foi montado o setup de medição e calibração conforme Fig. 6 que ilustram as placas absorvedoras na cor azul, com o objetivo atenuar o máximo possível de interferências, principalmente aquelas oriundas da presença do próprio operador, o analisador de rede com quatro portas, modelo N5230A, cobrindo a faixa de 300 MHz a 20 GHz e com o opcional 85071E-100, no domínio do tempo, porém não tinha o software 85071E. Diante dos fatos limitantes, assumiu-se em continuar com os mesmos procedimentos, mantendo desta forma a coerência nas medições, porém com diferentes analisadores de rede. Os arranjos experimentais e as respectivas medidas em espaço livre foram realizados conforme técnica de calibração *Gated-Reflect-Line (GRL)*, concorrendo dessa forma, para resposta de S41 apresentada na Fig. 7.

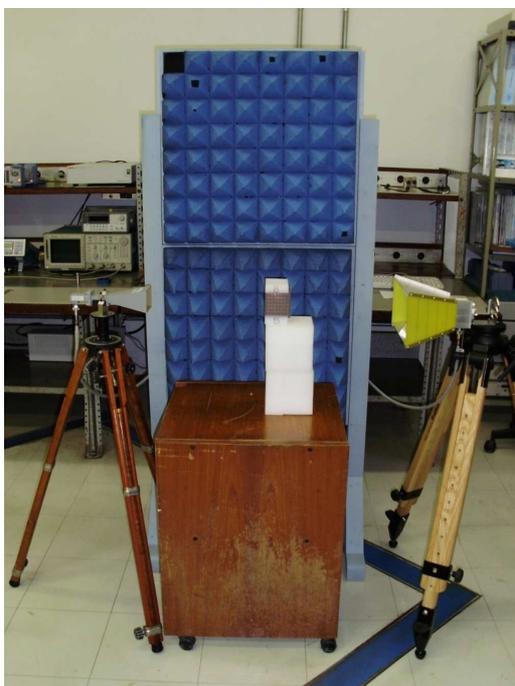


Fig. 6: Medição do bulk triangular a 40 cm da corneta 1.



Fig. 7: Magnitude S41 para *bulk* Triangular (55 mm x 95 mm x 51 mm)

IV. Conclusão

Este Paper mostra a resposta em frequência de um SRR de inclusões triangular equilátera e circular numa estrutura eletromagnética do tipo *microstripline* em PCB composto de *polytetrafluoroethylene (PTFE)* / fibra de vidro trançada. A estrutura composta de inclusões do tipo triangular ou fractal, com base nos resultados experimentais, comportou-se como uma lente, sugere ressonador Fabry-Perot. Sugere ainda, em torno de 9,5 GHz a existência de *Double Negative (DNG)*, como isso, encorajando a pesquisa em torno dessa frequência como dado importante à tecnologia *stealth*. A estrutura composta de inclusão do tipo Circular também sugere, em torno da frequência de 11,6 GHz, investigações mais acuradas em faixa mais estreita.

REFERÊNCIAS

- [1] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias.php?artigo=010130070730>, acessado em 08/03/2009.
- [2] E. Weber, “*Electromagnetic Theory*” by Oliver Heaviside, pp. XV - XXIV, Dec.1949.
- [3] L. F. Chen, C. K. Ong and C. P. Neo (National University of Singapore), Vassundara V. Varadan and V. K. Varadan, “*Microwave Electronics – Measurement and Materials Characterization*”, ISBN 0-470-84492-2, pp. 6 and 7, 2004.
- [4] Andrey K. Sarychev and Vladimir M. Slalaev, “*Electrodynamics of Metamaterials*,” ISBN-13 978-981-02-4245-9 e ISBN-10 981-02-4245-X, pp. vii – ix, 2007.
- [5] P. M. Valanju, R. M. Walser, and A. P. Valanju, “*Wave Refraction in Negative-Index Media: Always Positive and very Inhomogeneous*”, Vol. 88, No. 18, Physical Review Letters, pp. 87401-1 – 18740-4, 6 May 2002.
- [6] Andrey K. Sarychev, Vladimir M. Shalaev, “*Electrodynamics of Metamaterials*”, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN-13 978-981-02-4245-9, 2007.
- [7] V. G. Veselago, “The electrodynamic of substances with simultaneously negative values of μ e ϵ Sov. Phys. Uspekhi, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan-Feb. 1968.
- [8] R. Chiniard, A. Barka and O. Pascal “Floquet Modes Expansion Coupled to Multidomain Techniques Devoted to Large Phased Array Modelling”, European Microwave Conference, Vol. 1, 2005.
- [9] R. W. Ziolkowski, “Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials:”, IEEE transaction on Antenna and Propagation, Vol. 51, NO. 7, July 2003.