

Processamento de sinais para análise de Seção Reta Radar de alvos revestidos com Metamateriais

Márcio Martins da Silva Costa¹, Luiz Felipe de Moura Nohra² e José Everardo J. Ferreira²

¹Centro de Guerra Eletrônica da Marinha (CGEM) - Ilha de Mocanguê, s/nº - Niterói/RJ

²Estado-Maior da Aeronáutica - Esplanada dos Ministérios, Bloco "M" - Brasília/DF

Resumo — Neste trabalho são apresentados conceitos de Metamateriais e seu potencial para aplicação em áreas de Defesa, especialmente a Guerra Eletrônica. Uma modelagem de processamento de sinais radar é apresentada com base em pesquisas realizadas sobre a redução da Seção Reta Radar (RCS) de alvos revestidos com Metamateriais. O modelo apresentado permite verificar o impacto operacional para a defesa se aplicada esta nova tecnologia em aeronaves militares. Os resultados alcançados mostram uma redução significativa na probabilidade de detecção de um meio que empregue este recurso em comparação a outro que faz uso de técnicas furtivas convencionais.

Palavras-Chave — Metamaterial, Left-Handed Metamaterial, Seção Reta Radar, Processamento de Sinais, Detecção de Alvos.

I. INTRODUÇÃO

Metamateriais são estruturas artificiais com propriedades eletromagnéticas únicas ou superiores aos materiais convencionais. A palavra “meta” em Grego significa além de, acima de, e neste sentido, o nome Metamaterial, significa além ou acima dos materiais convencionais, aqueles encontrados na natureza e que possuem permissividade e permeabilidade, ambas, positivas, e são os chamados de Materiais “destros” ou conhecidos universalmente como RH. Ao passo que Metamateriais são todos aqueles cuja permissividade e permeabilidade diferem dos RH. A Fig. 1 apresenta o gráfico Permissividade (ϵ) x Permeabilidade (μ) [9], onde no 1º quadrante estão contidos os materiais RH, e nos demais, os Metamateriais. Contudo, é no 3º quadrante que se encontram o mais especial dentre os Metamateriais. Conhecidos universalmente por LH, ou materiais “canhotos”, cujas permissividade e permeabilidade são negativas [1,2].

Este artigo está organizado conforme se segue. Na seção II e III, respectivamente, os modelos do sinal transmitido e dos sinais ecos são apresentados. Na seção IV é realizada uma modelagem da Seção Reta Radar dos alvos. Na seção V é apresentada a estrutura de processamento empregada. Na seção VI são descritos os processos de implementação da simulação. Na seção VII são apresentados os resultados; e na seção VIII, as considerações finais.

Costa, Márcio M.S., mcosta@ita.br, Tel. +55-21-2189-1976/1588, Fax +55-21-2189-1970; Nohra, L.F.M., nohra@ita.br, Tel +55-61-3961-8485; Ferreira, J.E.J., rasgador@ita.br, Tel +55-61-3961-8311.

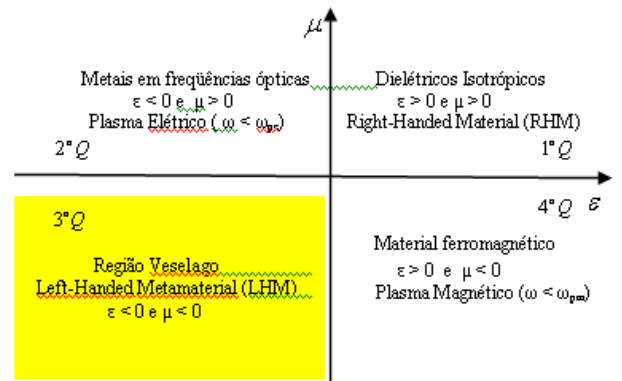


Fig. 1. Permissividade x Permeabilidade [3] ($\epsilon \times \mu$).

II. SINAL TRANSMITIDO

Considere que o sinal transmitido pelo Radar Doppler Pulsado de uma fragata, passa-faixa com energia E_s , seja expresso por

$$s(t) = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \left[\sqrt{E_s} \cdot \tilde{s}(t) \cdot \exp \{ j\omega_s t \} \right], \quad (1)$$

onde $\tilde{s}(t)$ é a envoltória complexa de $s(t)$ que é dado por um pulso de duração T_s da forma

$$\tilde{s}(t) = \frac{1}{T_s} \text{rect} \left[\frac{t}{T_s} \right], \quad (2)$$

para $\omega_s = 2\pi f_s$, sendo f_s a frequência da portadora e $\lambda_s = c_0/f_s$ o comprimento de onda [4,5,6].

Considere ainda que o radar transmita uma sequência de m pulsos, onde o último sinal transmitido é expresso por

$$s_m(t) = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \left[\sqrt{E_s} \cdot \tilde{s}_m(t) \cdot \exp \{ j\omega_s t \} \right]. \quad (3)$$

Neste caso, o valor de $\tilde{s}(t)$ apresentado em (2) passa a ser, no m -ésimo pulso, expresso por

$$\tilde{s}(t) = \tilde{s}_m(t + mT_p), \quad (4)$$

onde T_p é o período de repetição de pulso.

Considerando que o diagrama de campo da antena seja representado pela função $G_D(\xi)$, onde ξ equivale à direção de apontamento da antena para $0^\circ \leq \xi \leq 360^\circ$, obtém-se a expressão (5) como representação de todos os m -pulsos que chegam ao alvo

$$\tilde{s}_m(t + mT_p; \xi) = \sum_{n=1}^{n=m} G_D(\xi) \cdot \frac{1}{T_s} \text{rect}\left[\frac{t}{T_s}\right] \quad (5)$$

Na k -ésima varredura, após uma sequência de m -pulsos transmitidos, a quantidade de sinais incidentes no alvo passam a ser representados por

$$\tilde{s}_m(t + mT_p; \xi; k) = \sum_{n_k=1}^{n_k=m} G_D(\xi) \cdot \frac{1}{T_s} \text{rect}\left[\frac{t}{T_s}\right] \quad (6)$$

III. SINAL ECO

Considerando o nível 2 da Teoria de Detecção apresentada em [10], o sinal eco passa a ser expresso por

$$\begin{aligned} \tilde{r}(t + mT_p; \xi; k; \tilde{v}_k, \tau_{s_k}, f_s) &= \sum_{n_k=1}^{n_k=m} G_D^2(\xi) \cdot \tilde{v}(t) \\ &\cdot \exp\left\{-j\omega_s(t - \tau_{s_k} - (k-1)T_V)\right\} \\ &\cdot \exp\left\{j2\pi f_s t\right\} \cdot \frac{1}{T_s} \text{rect}\left[\frac{t - \tau_{s_k} - (k-1)T_V}{T_s}\right], \end{aligned} \quad (7)$$

onde T_V é o tempo de varredura do Radar e

$$\tilde{v}(t) = v(t) \cdot \exp\{j\varphi t\} \quad (8)$$

é a refletividade complexa do alvo pontual com fase φ .

Desconsiderando o efeito Clutter, adiciona-se a (7) um ruído térmico circularmente gaussiano, ergódico, passa-faixa e de média nula, representado por $\tilde{n}(t)$. Logo, o sinal eco passa a ser representado por

$$\tilde{\psi}(t + mT_p; \xi; k; \tilde{v}_k, \tau_{s_k}, f_s) = \begin{cases} \tilde{\psi}(t + mT_p; \xi; k; \tilde{v}_k, \tau_{s_k}, f_s) + \tilde{n}(t + mT_p; k), & \text{para } H_1 \\ \tilde{n}(t + mT_p; k), & \text{para } H_0, \end{cases} \quad (9)$$

onde H_1 é a hipótese de que existe um sinal eco de um alvo e H_0 é a hipótese de só há ruído.

IV. SEÇÃO RETA RADAR DOS ALVOS

Para a Seção Retra Radar (RCS) dos alvos foi considerada a expressão [5]

$$\sigma_\alpha(t + mT_p) = \lim_{d_\alpha \rightarrow \infty} 4\pi d_\alpha^2 \frac{E_{r_\alpha}^2(t)}{E_{s_\alpha}^2(t)}, \quad (10)$$

onde σ_α indica a RCS de um alvo α , d_α é a distância de cada alvo ao Radar, $E_{r_\alpha}^2$ é a potência por unidade de área do espalhamento de $r_\alpha(t)$ na recepção da antena do Radar e $E_{s_\alpha}^2$ é a potência por unidade de área do espalhamento de $s_\alpha(t)$ incidente nos alvos.

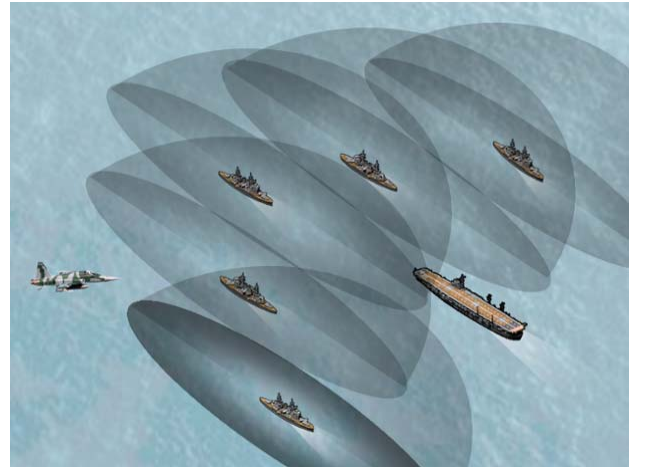
A Seção Retra Radar normalizada, no m -ésimo pulso, para ondas planas incidentes com polarizações TM e TE , consideradas de forma distintas, passou a ser

$$\frac{\sigma_\alpha(t + mT_p)}{\lambda_s} = \lim_{d_\alpha \rightarrow \infty} \frac{2\omega_s d_\alpha^2 E_{r_\alpha}^2}{c_0 E_{s_\alpha}^2}, \quad (11)$$

Conforme o item VI deste artigo, foi considerada a aplicação de Metamateriais nas superfícies das aeronaves, visando a diminuição da sua Seção Retra Radar e com o objetivo de degradar a capacidade de detecção dos radares inimigos, conforme ilustrado na Fig. 2.

IV. ESTRUTURA DE PROCESSAMENTO

Foi considerada uma estrutura simplificada de processamento apresentada na Fig. 3. Os dados brutos recebidos pelo radar foram divididos em duas saídas, a fim de atender aos objetivos do artigo. Na primeira saída não foi aplicada nenhuma técnica de processamento. Na segunda, empregou-se um integrador linear como método de processamento convencional.



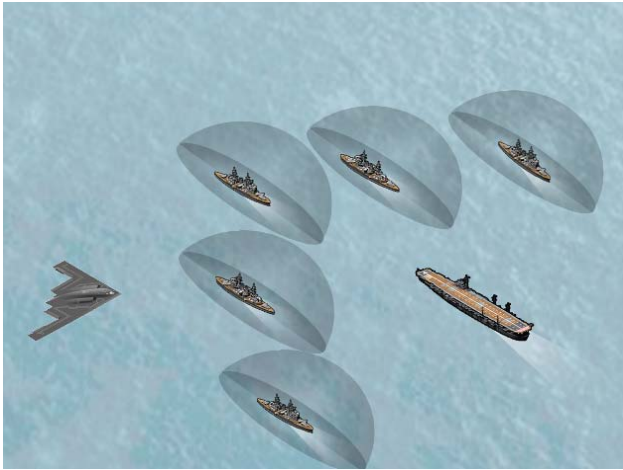


Fig. 2. Capacidade de detecção de radares contra aeronaves com diferentes RCS.

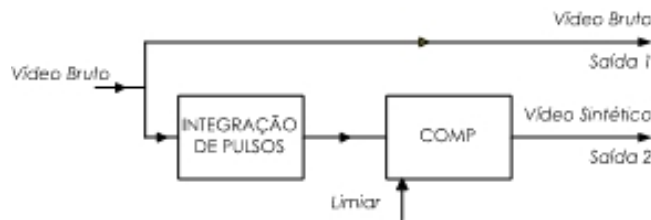


Fig. 3. Estrutura do Processador.

VI. SIMULAÇÃO

A simulação baseou-se no experimento realizado por Oraizi, em 2008 [7]. Em sua abordagem, foram consideradas duas formas idênticas de cilindros, sendo uma revestida com Metamaterial e outra sem revestimento. O resultado do referido trabalho de interesse para este artigo baseou-se na redução da Seção Reta Radar dos cilindros, resumido em valores aproximados na Tabela I.

TABELA I REDUÇÃO DE SEÇÃO RETA RADAR ALCANÇADA POR ORAZI [13].

Frequência (GHz)	Cilindro...	Redução de RCS (dB)
8	sem revestimento	2
10	sem revestimento	4
12	sem revestimento	4
8	revestido com Metamaterial	-34
10	revestido com Metamaterial	-38
12	revestido com Metamaterial	-32

Em nossa simulação foi considerada a redução alcançada de RCS de 40 dB para cilindros revestidos com Metamateriais, incluindo *Double Negative* (DNG), ou seja, localizados no terceiro quadrante da Fig. 1, para uma frequência de 10 GHz. Guardadas as devidas proporções e considerando o objetivo deste artigo, os cilindros foram substituídos pelas aeronaves para a construção do cenário radar representado na Fig. 4.



Fig. 4. Cenário radar.

Na Fig. 4 identificam-se três aeronaves se aproximando de uma fragata dotada de um Radar Doppler Pulsado. Foram consideradas 400 realizações na simulação, divididas equitativamente em dois eventos distintos. No primeiro caso, nenhuma das aeronaves possuía revestimentos furtivos. No segundo, a RCS normalizada de uma delas foi reduzida em 40 dB.

A fim de facilitar a identificação dos alvos, foi considerada uma relação sinal-ruído (S/N) de 10 dB durante toda a simulação e foi mantida constante a probabilidade de falso alarme (P_{fa}) em $1,3 \times 10^{-5}$.

Também foram considerados na simulação radar os parâmetros apresentados na Tabela II.

TABELA II PARÂMETROS RADAR.

Parâmetro	Valor	Unidade
Dimensão em azimute da "tela" radar	512	Pixel
Dimensão em alcance da "tela" radar	1024	Pixel
Frequência de repetição de pulso	1200	Hz
Frequência da portadora	10	GHz
Comprimento de onda	0,03	Metros

Ressalta-se que neste trabalho não foi desenvolvida uma modelagem numérica envolvendo os materiais de revestimento dos alvos. Foi considerada a redução de Seção Reta Radar alcançada com exemplos numéricos, a qual foi aplicada em nossa modelagem de processamento de sinais radar. O objetivo foi verificar o impacto operacional da aplicação de Metamateriais furtivos em cenários de defesa.

VII. RESULTADOS

No primeiro evento, nenhuma das aeronaves que compunham a vaga atacante foi revestida com materiais furtivos. Assim, na Fig. 5 ilustram-se os vídeos radar da fragata após 200 realizações, empregando o processador simplificado da Fig. 3. Na Fig. 5 (a) as aeronaves detectadas são apresentadas pelos três pontos de maior amplitude em relação ao ruído térmico circularmente gaussiano, ergódico, passa-faixa e de média nula, representado por $\tilde{n}(t)$, que compõe a base do gráfico. Baseando-se no trabalho de Oraizi,

o eixo z (σ_α/λ_s) considerou uma onda incidente com polarização TM . Os valores de x e y correspondem à tela radar, divididos em 512 e 1024 pixels para azimute e distância, respectivamente.

A Fig. 5 (b) representa a *Saída 1* do processador proposto na Fig. 3, onde também podem ser identificados no vídeo bruto radar o posicionamento das três aeronaves que se aproximam da fragata.

A Fig. 5 (c) ilustra a *Saída 2* da integração de pulsos, onde as três aeronaves destacam-se em meio a falsos alarmes.

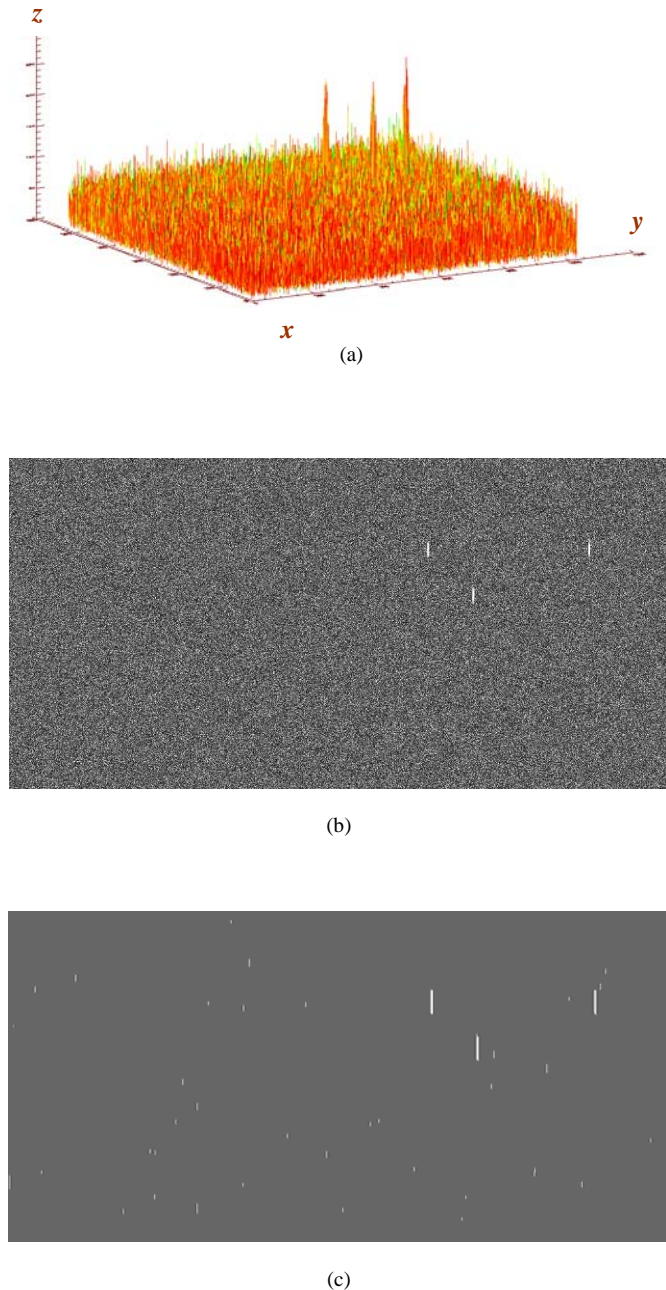


Fig. 5. Vídeos radar após processamento dos sinais ecos recebidos das três aeronaves sem revestimento furtivo.

No segundo evento, uma das aeronaves foi revestida com Metamateriais furtivos, simulado por meio da redução de 40 dB de sua Seção Reta Radar. O resultado do processamento dos sinais radar é apresentado na Fig. 6, onde são identificados por uma seta vermelha e círculos brancos os locais onde o “pip” radar da aeronave agora revestida encontra-se ausente.

A Fig. 6 (a) apresenta os mesmos eixos da Fig. 5 (a). No entanto, somente dois pontos de maior amplitude se destacam em meio ao ruído térmico aditivo.

A Fig. 6 (b) representa a *Saída 1* do processador proposto na Fig. 3, onde também pode ser identificados no vídeo bruto radar a ausência de uma das aeronaves.

A Fig. 6 (c) ilustra a *Saída 2* da integração de pulsos, onde somente duas das três aeronaves destacam-se em meio aos falsos alarmes.

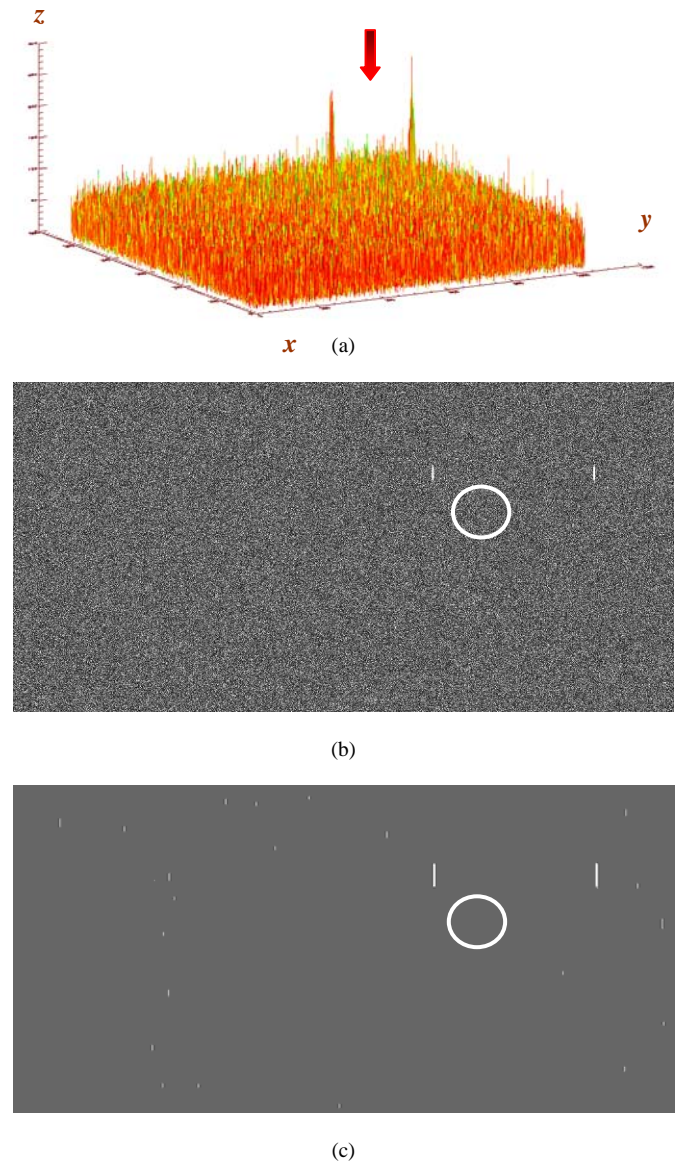


Fig. 6. Vídeos radar após processamento dos sinais ecos recebidos das três aeronaves sendo duas sem revestimento e uma com revestimento de Metamaterial furtivo.

VIII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme descrito na seção VI, o objetivo deste trabalho foi verificar o impacto operacional da aplicação de Metamateriais em cenário de defesa, por exemplo, Tecnologia Furtiva, inserido no contexto da Guerra Eletrônica.

Tomando como referência comparativa os resultados alcançados na redução de RCS com a aplicação numérica de Metamateriais em formas cilíndricas [7], esta pesquisa inseriu estes mesmos valores em uma modelagem de processamento de sinais radar por meio da aplicação de um processador simplificado.

Os resultados apresentados na seção VII demonstraram que o emprego de Metamateriais apresentam um potencial significativo frente às tecnologias furtivas convencionais. Sua aplicabilidade forçaria mudanças dos conceitos operacionais e tecnológicos em vigor para buscar a oposição adequada à nova técnica.

Isto justifica o elevado interesse de respeitáveis membros da comunidade acadêmica e órgãos governamentais ou não em incrementar as pesquisas na referida área.

REFERÊNCIAS

- [1] Lindell, I.V., Sihvola, A.H. and J., Kurkijarvi, “Karl F. Lindman: the last Hertzian, and a Harbinger of Electromagnetic Chirality”. IEEE, Antennas and Propagation Magazine, vol. 34, n°. 3, p. 24-30, 1992.
- [2] V.G.Veselago, “The electrostatics of substances with simultaneously negative values of μ and ϵ ”. Sov. Phys.-Usp., vol. 10, n°. 4, p. 509-514, 1968.
- [3] J. Everardo J. F., J. Edimar B. O., L. A. de Andrade, “Projeto, fabricação, testes e resposta em frequência de Double Negative Metamaterials em uma dimensão utilizando split-ring resonator com geometria triangular equilátera de cobre em dielétrico teflon e fibra de vidro. Anais do X Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (X SIGE), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 24-26DEZ, 2008.
- [4] Van Trees, H.L. Detection, Estimation, and Modulation Theory- Parts I. New York: John Wiley and Sons, Inc. 1968.
- [5] Skolnik, M. I. Introduction to Radar Systems. Singapore: McGraw-Hill Book Co, 1988.
- [6] Peebles, P. Z. Radar Principles. New York: John Wiley & Sons, Inc., 766 p., 1998.
- [7] Oraizi, H. A. Abdolali, “Combination of MLS, GA & CG for the reduction of RCS of multilayered cylindrical structures composed of dispersive metamaterials”. Progress In Electromagnetics Research B, vol. 3, p. 227-253, 2008.