

# Simulador de Guerra Eletrônica Não-Com Utilizando Modelagem de Emissões de Radar

Felipe Aurélio Caetano de Bastos, Bruno Cosenza de Carvalho, João Abdalla Ney da Silva, Daniel de Araújo Lima e Julio Cesar Duarte

Centro Tecnológico do Exército – Av. das Américas, 28705 – Guaratiba – Rio de Janeiro - Brasil

**Resumo** — Este artigo tem como objetivo descrever os modelos matemáticos utilizados para a simulação computacional de emissões eletromagnéticas de radares. Os modelos apresentados neste trabalho compõem o núcleo do Simulador de Guerra Eletrônica de Não-Comunicações, ferramenta computacional desenvolvida pelo Centro Tecnológico do Exército e utilizada pelo Centro Integrado de Guerra Eletrônica para o aprendizado e avaliação de praças e oficiais em atividades de Guerra Eletrônica na área de não-comunicações.

**Palavras-chave** — Guerra Eletrônica; radar; simulação; modelagem matemática.

## I. INTRODUÇÃO

Os simuladores virtuais são programas capazes de reproduzir o comportamento de um ambiente real num ambiente computacional. Portanto, para que a simulação seja fiel à situação real, é necessário que todos os modelos de comportamento do fenômeno a ser reproduzido sejam bem conhecidos. Normalmente estes modelos são descritos por equações matemáticas bem definidas. Quanto mais completo for o modelo, isto é, quanto mais informações houver sobre o fenômeno e as expressões matemáticas associadas, mais fiel será o comportamento no mundo virtual.

Simuladores são usualmente empregados para a geração de conhecimento prévio sobre um determinado sistema com o objetivo de auxiliar na tomada de decisões, pois permitem avaliar a viabilidade de um processo, equipamento ou sistema sem a necessidade da implementação física do mesmo, possibilitando a redução de custos e riscos no processo produtivo. No caso específico do Simulador de Guerra Eletrônica Não-COM (SimGE-NCom), o objetivo é propiciar um meio de aprendizagem para os praças e oficiais, alunos do Centro Integrado de Guerra Eletrônica (CIGE), no que se refere à Guerra Eletrônica (GE) na área de Não-Comunicações e, ao mesmo tempo, fornecer ao instrutor as ferramentas necessárias para a avaliação desse aprendizado.

Deve-se destacar que a mais recente versão do simulador atenderá aos requisitos operacionais e técnicos definidos pelo CIGE, cuja entrega está prevista para o segundo semestre de 2007.

Bastos, F. A. C., fcaetano@ctex.eb.br, Carvalho, B. C., cbruno@ctex.eb.br, Silva, J. A. N., jabdalla@ctex.eb.br, Tel.:55-21-24106200 ramal 6752, Fax: 55-21-24106279, Lima, D. A., ldaniel@ctex.eb.br, Duarte, J.C., jduarte@ctex.eb.br., Tel.: 55-21-24106254, Fax.: 55-21-24106271.

Este trabalho foi financiado pelo EB, por meio do objetivo intermediário 2.3 do PBCT.

O simulador SimGE-NCom cria um ou mais postos de GE em um ambiente operacional onde várias emissões são geradas pelos mais diversos tipos de radares sem a necessidade da existência física dos mesmos, ou da mobilização de pessoal para o exercício, permitindo flexibilidade e baixo custo. O simulador pode ser dividido em dois grandes blocos: o Módulo de Gerenciamento (GR) e o Módulo de Processamento de Emissões (PE). O módulo GR é responsável por, entre outras funções, carregar o teatro de operações (TO) de acordo com o cenário planejado pelo instrutor, gerenciar as missões de GE e gerar históricos para fins de avaliação do instruendo. Por sua vez, o módulo PE é capaz de reproduzir as condições eletromagnéticas associadas à transmissão de um radar e à recepção dessa emissão por um posto de GE. Os dois módulos se integram de modo transparente ao usuário.

Este trabalho tem como finalidade descrever os componentes do módulo PE responsáveis pela geração de um sinal de radar no que se refere à propagação eletromagnética, tipos de varredura (comportamento espacial) e tipos de pulsos (comportamento temporal). A descrição desses componentes será detalhada na próxima seção. Deve-se ressaltar que houve grande preocupação em elaborar equações com baixo grau de complexidade para que o processamento final (envolvendo o módulo TO) não ficasse com uma carga computacional elevada, visto que os requisitos operacionais estabelecem que, num TO, podem existir até 64 emissores operando ao mesmo tempo.

## II. MÓDULO DE PROCESSAMENTO DE EMISSÕES

### A. Introdução

No simulador SimGE-NCom, a geração de um sinal de radar para visualização ou audição depende da interação entre os três componentes que compõem o módulo PE, a saber: emissor, canal e receptor. O componente canal modela matematicamente o meio pelo qual o sinal se propaga considerando que o transmissor tem visada direta com o receptor, ou seja, supõe-se que o sinal de radar propaga-se segundo a equação de atenuação no espaço livre.

Por sua vez, o componente receptor é composto por dois receptores: o de busca e outro de determinação de direção (DF). O receptor de busca foi modelado como um heterodino, com antena omnidirecional e filtro passa-baixa que limita a largura de banda do sinal simulado à banda de áudio. Posteriormente, o sinal resultante é enviado à placa de som,

presente no computador, para a sua reprodução. O receptor de DF é responsável por extrair os parâmetros de potência e ângulo de chegada dos sinais de radar presentes no TO. Esse receptor foi modelado como um heterodino que utiliza uma antena direcional. Por último, o componente Emissor é responsável pela simulação da fonte do sinal eletromagnético a ser gerado e será detalhado na próxima subseção.

### B. Geração de Emissões de Radar

O componente Emissor é responsável pela geração do sinal transmitido pelo radar. Basicamente, as equações matemáticas implementadas permitem combinar diferentes características espaciais (tipos de varredura e padrão de irradiação de antena) e temporais (tipos de variação do intervalo de repetição de pulso).

A Fig. 1 mostra o diagrama de blocos do componente Emissor. O bloco Gerador de Varredura é responsável por gerar um sinal, chamado envoltória, segundo uma varredura circular, helicoidal, setorial unidirecional, setorial bidirecional, ou estática [2]. Por sua vez, o bloco Conformador de Pulsos é responsável por gerar um sinal do tipo trem de pulsos com intervalo de repetição constante ou variável segundo a técnica *Stagger* ou pela técnica de grupos de pulsos [3]. O sinal de radar é obtido pela multiplicação do sinal de envoltória pelo trem de pulsos gerado pelo bloco Conformador de Pulsos.

Posteriormente, o sinal de radar é amplificado (multiplicado por um escalar) e limitado em banda por um filtro passa-baixa. O amplificador em questão modela todos os estágios de amplificação do transmissor do radar, assim como o ganho da antena de transmissão. É importante salientar que embora um sinal de radar real seja modulado por uma portadora de alta frequência, nenhuma modulação foi implementada no simulador, pois optou-se por trabalhar em banda básica com o objetivo de reduzir a frequência de amostragem de forma significativa, e, conseqüentemente, o tempo de processamento.

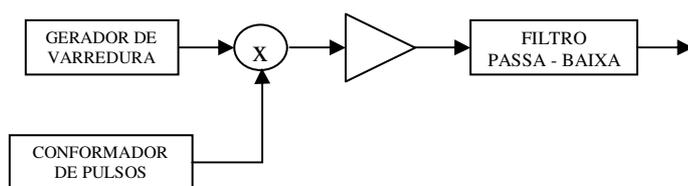


Fig. 1: Componente Emissor

Além do tipo de varredura, o padrão de irradiação da antena desempenha um papel importante na determinação do sinal de envoltória. Usualmente, a modelagem matemática do padrão de irradiação horizontal ou vertical de uma antena segue uma equação do tipo  $\text{sinc}(x)$  [4,5] ou do tipo Gaussiana [5], sendo a primeira usualmente empregada por melhor modelar um padrão de irradiação real. O modelo matemático dado pela função  $\text{sinc}(x)$  permite a livre escolha da largura do feixe,

porém, impede que a atenuação do lóbulo secundário seja escolhida livremente. Para resolver esse problema, optou-se por modelar separadamente o lóbulo principal da antena e os demais lóbulos secundários. Tomando como exemplo o padrão de irradiação horizontal,  $S(\theta)$ , seu modelo é dado por:

$$S(\theta) = \begin{cases} \left| \frac{\text{sen}(2,78\theta)}{(\pi\theta_{3dB})} \right|, & \text{se } |\theta| \leq \theta_1 \\ \left| \frac{\text{sen}(2,78\theta)}{(\pi\theta_{3dB})^{-a}} \right| k + (1-k) \left| \frac{\text{sen}(2,78\theta)}{(\pi\theta_{3dB})^{-b}} \right|, & \text{se } |\theta| > \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

onde  $\theta$  é o ângulo em azimute para o qual se deseja calcular o ganho de irradiação,  $\theta_{3dB}$  é a largura do feixe em azimute,  $a$  e  $b$  são parâmetros que ajustam a atenuação dos lóbulos secundários e traseiro, respectivamente,  $\theta_1$  é o ângulo que corresponde ao primeiro zero da função  $S(\theta)$ , e  $k$  é um fator de peso que varia linearmente entre o primeiro zero do lóbulo principal e  $\pi$ . Definem-se em (2) e (3) as expressões que descrevem o cálculo de  $\theta_1$  e  $k$ , respectivamente

$$\theta_1 = \frac{\pi\theta_{3dB}}{2,78} \quad (2)$$

$$k = \frac{\pi - |\theta|}{\pi - \theta_1}, \text{ para } |\theta| > \theta_1 \quad (3)$$

As atenuações dos lóbulos secundário e traseiro podem ser ajustadas de forma independente, uma vez que a determinação do primeiro é realizada pelo parâmetro  $a$ , enquanto que o ajuste do segundo é realizado pelo parâmetro  $b$ . A Fig. 2 mostra o padrão de irradiação horizontal de uma antena supondo uma abertura de feixe de  $3^\circ$ , uma atenuação de lóbulo secundário de 20 dB ( $a=20/13,2$ ) e uma atenuação do lóbulo traseiro de 30 dB ( $b=30/13,2$ ).

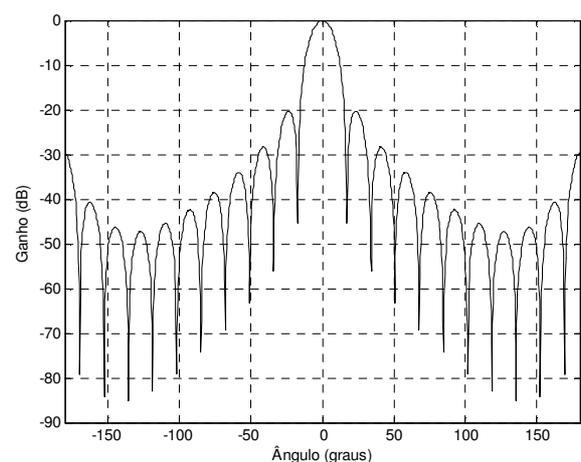


Fig. 2: Padrão de irradiação horizontal

A geração de um sinal de envoltória depende também de diversos fatores além da varredura escolhida e do padrão de

irradiação da antena, como a posição relativa entre transmissor e receptor, a velocidade de varredura do radar, entre outros. A tabela 1 mostra os parâmetros que devem ser fornecidos pelo instrutor para a criação de um sinal de acordo com a varredura escolhida.

Além do sinal de envoltória, é necessário, para a obtenção de um sinal de radar, criar um sinal do tipo trem de pulsos. Observa-se em (4) a expressão que descreve o sinal obtido quando a frequência de repetição de pulsos (FRP) é constante.

$$p(t) = \begin{cases} 1, & \text{para } mT \leq t \leq mT + \Delta T, m \in \mathbb{Z} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

onde  $T$  é o intervalo de repetição de pulso, ou o inverso da FRP, e  $\Delta T$  é a largura do pulso.

O simulador SimGE-NCom também permite a criação de um trem de pulsos com intervalo de repetição variável. A variação da FRP é usualmente empregada em processamento

de sinais de radar para resolver os problemas associados a ambigüidades na estimação de alcance ou velocidade de um alvo, e ainda como uma medida de proteção eletrônica. Duas técnicas são amplamente encontradas na literatura: a técnica *stagger* e a técnica de grupos de pulsos. Em ambas as técnicas, o padrão de variação se repete a cada  $M$  pulsos. Na primeira técnica, a frequência de repetição de pulsos é modificada pulso a pulso de acordo com uma seqüência predeterminada. Na segunda, a variação da FRP é realizada a cada  $N$  pulsos, onde  $N$  é um divisor de  $M$ . A técnica *stagger* pode ser vista como um caso particular da técnica de grupo de pulsos, supondo  $N$  igual a 1.

O modelo genérico para um sinal que tem FRP variante com o tempo é dado por

$$p(t) = \begin{cases} 1, & \text{para } mT_M + \sum_{i=1}^K T_i \leq t \leq mT_M + \sum_{i=1}^K T_i + \Delta T, m \in \mathbb{Z} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

TABELA I - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O GERADOR DE VARREDURA

Nome do parâmetro	Unidades	Varreduras				
		Circular	Heli-coidal	BiSeto-rial	UniSeto-rial	Estática
Atenuação do lóbulo secundário	dB	S	S	S	S	S
Largura do feixe horizontal	graus	S	S	S	S	S
Largura do feixe vertical	graus	S	S	S	S	S
Velocidade de varredura horizontal	rpm	S	N	N	N	N
Altura do radar em relação ao nível do mar	m	S	S	S	S	S
Altura do receptor em relação ao nível do mar	m	S	S	S	S	S
Distância entre o receptor e o radar	m	S	S	S	S	S
Ângulo relativo entre radar e receptor	graus	S	S	S	S	S
Ângulo inicial da plataforma (orientação)	graus	S	S	S	S	S
Tempo de varredura	s	N	S	N	N	N
Número de ciclos	--	N	S	N	N	N
Tempo de retorno	s	N	S	N	S	N
Frequência de varredura	rpm	N	N	S	S	N
Ângulo central do setor	graus	N	N	S	S	N
Largura angular do setor	graus	N	N	S	S	N

Obs: S → arâmetro utilizado / N → Parâmetro não utilizado

onde  $T_M$  corresponde ao período de repetição de um grupo composto por  $M$  pulsos,  $T_i$  corresponde ao intervalo de repetição do  $i$ -ésimo pulso dentro do grupo e  $K$  é igual a um número inteiro entre 1 e  $M$ . No caso particular onde  $T_i$  varia para cada valor do índice  $i$ , obtém-se a técnica *stagger* e, no caso que  $T_i$  é constante para cada conjunto de  $N$  valores de  $i$  ( $N < M$ ), mudando de valor apenas quando se muda de conjunto, então a técnica de grupos de pulsos é obtida.

A tabela 2 mostra uma relação de parâmetros que devem ser definidos pelo usuário do simulador SimGE-NCOM para a geração do sinal de trem de pulsos. Cabe ressaltar que a frequência de repetição de pulsos deve ser igual ao inverso de  $T_M$  caso a técnica de grupos de pulsos seja escolhida.

Com o intuito de ilustrar o funcionamento do simulador, considere um radar com varredura circular e FRP do tipo *Stagger*, com dois diferentes intervalos de repetição de pulsos,  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente iguais a 200 e 300  $\mu s$ . A largura de um pulso ( $\Delta T$ ) é de 50  $\mu s$ . A referida configuração corresponde a fazer  $M$  igual a 2, e  $T_M$  igual a 500  $\mu s$  em (5). A Fig. 3 apresenta o sinal trem de pulsos gerado pelo simulador.

### III - RESULTADOS OBTIDOS

Supondo ainda que a largura de feixe em azimute seja igual a 8°, que a velocidade de varredura seja de 10 rpm, e que a orientação da plataforma e o ângulo relativo entre o radar e o

receptor são iguais a  $0^\circ$ , obtém-se um sinal de envoltória, gerado pelo bloco gerador de varredura, conforme a Fig. 4.

O sinal de radar como visto pelo receptor é mostrado na Fig. 5, que também apresenta a interface gráfica do analisador de sinais. O valor final da amplitude do sinal radar foi obtido levando-se em consideração a potência do transmissor, os ganhos das antenas transmissora e receptora, o fator de desacasamento associado aos tipos de polarização das antenas, a distância entre o radar e o receptor, e a frequência de operação do radar.

**TABELA II – PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O GERADOR DE TREM DE PULSOS**

Nome do parâmetro	Unidades	Trem de pulsos		
		FRP constante	Stagger	Grupo de pulsos
Frequência de repetição de pulsos	KHz	S	N	S
Largura de pulso	$\mu$ s	S	S	S
Lista de intervalos de repetição de pulsos	$\mu$ s	N	S	S

Obs: S  $\rightarrow$  Parâmetro utilizado / N  $\rightarrow$  Parâmetro não utilizado

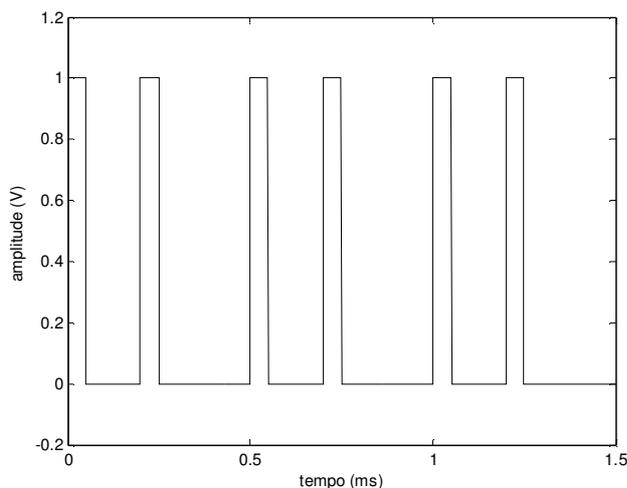


Fig. 3: Trem de Pulsos com duas FRPs diferentes

#### IV – CONCLUSÕES

O simulador SimGE-NCom corresponde a uma solução nacional que visa atender às necessidades dos cursos do CIGE no que se refere ao adestramento de operadores e analistas de GE NCom. Cabe ressaltar que o desenvolvimento proprietário desse simulador permite a introdução de futuras melhorias e a total adequação às doutrinas de emprego de postos de Guerra Eletrônica NCom.

Os modelos matemáticos apresentados neste artigo permitem recriar em computador o ambiente

eletromagnético devido às emissões de diversos radares espalhados em um teatro de operações. Sendo assim, solucionam os problemas associados à inexistência de diversidade e quantidade de emissores reais.

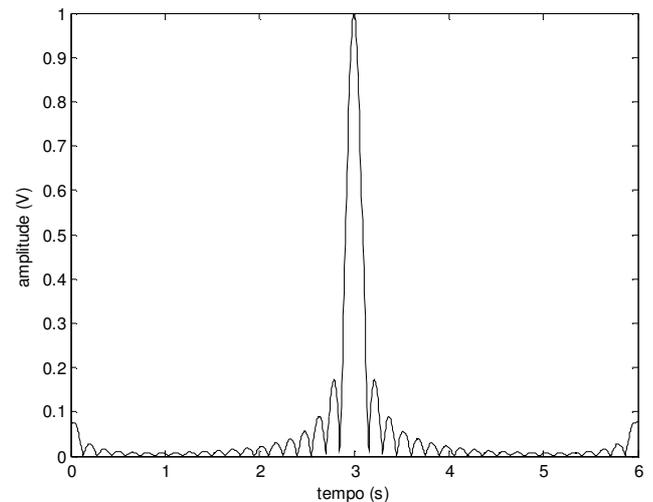


Fig. 4 - Sinal de Envoltória criado pelo gerador de varreduras

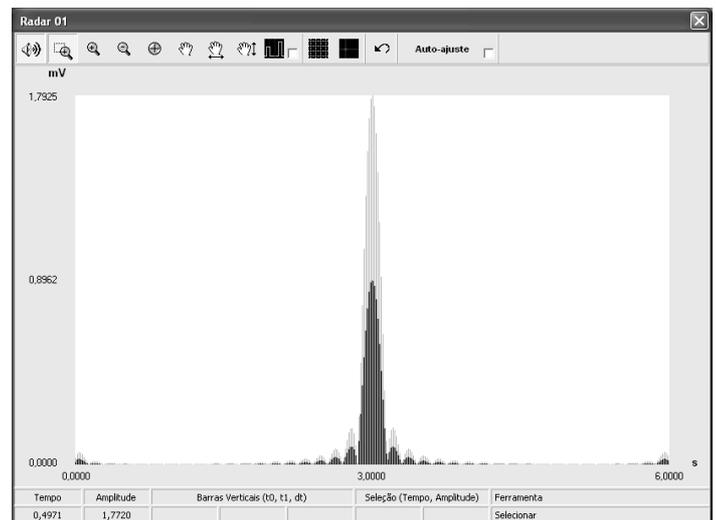


Fig. 5: Sinal radar com varredura circular e pulso stagger.

#### V – REFERÊNCIAS

- [1] Brasil. Departamento de Ciência e Tecnologia. Plano Básico de Ciência e Tecnologia, Brasília, DF, 2007.
- [2] Skolnik, M. I., Introduction to Radar System, Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1980.
- [3] Schleher, D. C., MTI and Pulsed Doppler Radar, Norwood, Artech House Inc., 1991.
- [4] Metz, R. F., Hirsch, H. L., A Unique Approach to Antenna Modeling. Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, p. 304-309, Maio, 1992.
- [5] Golden Jr, A., Radar Electronic Warfare, Washington, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 1987.