



Leandro Guimarães Pralon

**Modelagem probabilística de sinais em radares
de ruído que utilizam pulsos senoidais
modulados em frequência**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro
Setembro de 2012



Leandro Guimarães Pralon

**Modelagem probabilística de sinais em radares
de ruído que utilizam pulsos senoidais
modulados em frequência**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico e Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Mauro Pedro Fortes
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes
IME

Prof. Weiler Alves Finamore
UFJF

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico e Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Setembro de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Leandro Guimarães Pralon

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações no Instituto Militar de Engenharia, no ano de 2007. Desde 2008 integra o Grupo Especial de Radar do Centro Tecnológico do Exército, onde desenvolve atividades de processamento digital de sinais aplicados a sistemas radar. Participou do projeto do radar de busca e vigilância de médio alcance, SABER M60 e do radar secundário S60. É membro ativo da equipe de desenvolvimento dos radares SENTIR M20 e SABER M200, de vigilância terrestre e de busca e vigilância de longo alcance, respectivamente.

Ficha Catalográfica

Pralon, Guimarães Leandro

Modelagem probabilística de sinais em radares de ruído que utilizam pulsos senoidais modulados em frequência / Leandro Guimarães Pralon; orientador: José Mauro Pedro Fortes. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

v., 148 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Radar de Ruído; 3. Sinais Aleatórios; 4. Modulação em Frequência. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título..

CDD: 621.3

À minha esposa Barbara.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor José Mauro Pedro Fortes pelo apoio, simpatia de sempre, paciência e incentivo para a realização deste trabalho

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao grande amor da minha vida, minha esposa Barbara, por motivos tantos que seria impossível enumerá-los em uma quantidade finita de páginas. Meu eterno amor e agradecimento na conclusão desta jornada e de todas as demais que compartilhamos e compartilharemos ao longo de nossas vidas.

Aos meus pais, por estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida, com apoio incondicional a todas as minhas decisões. Por não medirem esforços na minha educação, me fazendo chegar aonde estou hoje. Meu amor e agradecimento por toda a ajuda nesse trabalho.

À minha querida irmã por ser mais que um modelo de profissional e pessoa para mim, ser também uma amiga e confidente.

Aos meus amigos Bruno Pompeo, Maikon Bueno, Gabriel Beltrão e Higor Cioqueta pelas intermináveis discussões técnicas e conversas de apoio responsáveis, respectivamente, por me abrirem novos horizontes e não me deixar sair do caminho em busca deles.

Aos colegas do Centro Tecnológico do Exército e da Orbisat pelo carinho e atenção.

A Deus por colocar todas essas pessoas na minha vida.

Resumo

Pralon, Guimarães Leandro; Fortes, José Mauro Pedro. **Modelagem probabilística de sinais em radares de ruído que utilizam pulsos senoidais modulados em frequência**. Rio de Janeiro, 2012. 148p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Radares são sistemas eletromagnéticos de detecção e localização de objetos refletores. Sua operação consiste na transmissão de formas de onda e na detecção e processamento do sinal refletido no alvo, visando extrair algumas características deste (e.g. posição, velocidade, direção, tipo de alvo). Radares de ruído, por sua vez, são sistemas que transmitem sinais com forma de onda aleatória e que, por este motivo, apresentam elevado desempenho em presença de interferências externas, intencionais ou não, e supressão da ambiguidade em distância na detecção de alvos. O presente trabalho desenvolve inicialmente uma modelagem probabilística dos sinais envolvidos em radares de ruído. Esta modelagem permite a obtenção de expressões fechadas para funções autocorrelação, densidades espectrais de potência, funções correlação cruzada e ganhos de processamento associadas aos diversos sinais envolvidos. Com base nesta modelagem, é feita uma análise comparativa de radares que utilizam compressão de pulso e integração em sua cadeia de recepção. Mais especificamente, são comparados radares de ruído com radares tradicionais (que utilizam formas de onda determinísticas - *chirps*) operando em cenários que permitem avaliar aspectos como a resolução em distância, o nível de lóbulos secundários e a eliminação de ambiguidades.

Palavras-chave

Radar de Ruído; Sinais Aleatórios; Modulação em Frequência.

Abstract

Pralon, Guimarães Leandro; Fortes, José Mauro Pedro (Advisor). **A probabilistic approach in signal modeling for noise radars that employ frequency modulated pulses.** Rio de Janeiro, 2012. 148p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Radars are electromagnetics systems used for detecting and locating reflecting objects. Their operation is based on the transmission of waveforms and on the detection and processing of the reflected signal so that some targets can be estimated (e.g. position, velocity, direction and type of target). Noise radars are systems that use random signals as the transmitting waveform and that for this reason present high performance against external interference, intentional or not, and the suppression of range ambiguity in the detection of targets. The present work initially develops a probabilistic model for the random signals involved in Noise Radars. This model allows for derivation of closed forms expressions for autocorrelation functions, power spectral densities, processing gains, and cross-correlation functions of the random signals involved. Based on this model, a comparison of radars that employ pulse compression and integration in their receivers. More specifically, Noise Radars are compared to traditional radars that use deterministic waveforms (chirps) under different scenarios which are chosen so that some specific aspects like range resolution, side-lobe levels and range ambiguity elimination can be evaluated.

Keywords

Noise Radar; Random Signals; Frequency Modulation.

Sumário

1	Introdução	13
2	Conceitos básicos de sistemas radar	16
2.1	Radar Pulsado	19
2.2	Ambiguidade em Distância	20
2.3	Resolução em distância	21
2.4	Equação Radar	22
2.5	Radar Ruído	24
3	Receptor Radar	26
3.1	Detector	31
3.2	Integração de Pulsos	33
3.3	Compressão de Pulso	36
4	Pulsos de transmissão - portadoras moduladas em frequência	43
4.1	Sinal Modulador Determinístico Linear em Frequência	47
4.2	Sinal Modulador Aleatório	49
4.3	Envoltória Complexa do Processo Estocástico que Caracteriza o Sinal de Transmissão	53
4.4	Sinal modulador aleatório e plano em uma faixa de frequências	56
4.5	Largura de Banda	59
4.6	Teste das aproximações efetuadas	61
5	Modelo Probabilístico do Receptor Radar	65
5.1	Relação Pico-Lóbulo Lateral	72
5.2	Alvos com ambiguidade	80
5.3	Resolução em Distância do Radar de Ruído	85
6	Resultados Numéricos	86
6.1	Pulsos de Transmissão	88
6.2	Cenário 1	93
6.3	Cenário 2	100
6.4	Cenário 3	104
6.5	Cenário 4	107
6.6	Cenário 5	110
7	Conclusão	114
	Referências Bibliográficas	117
A	Potência do sinal e do ruído na saída do bloco integrador, quando sinais de transmissão determinísticos são utilizados	120
B	Resposta do filtro receptor que maximiza a razão sinal ruído associada a sua saída	123

C	Autocorrelação da envoltória complexa do sinal determinístico modulado linearmente em frequência	126
D	Propriedades do sinal de transmissão proposto, caracterizado por um processo estocástico	128
D.1	Potência Média	128
D.2	Função Média	129
D.3	Função Autocorrelação	130
D.4	Média e variância da diferença entre fases do sinal de transmissão em momentos distintos	131
E	Cálculo da função autocorrelação da envoltória complexa dos sinais de transmissão propostos, caracterizados por portadoras moduladas em frequência faixa larga	134
F	Cálculo da largura de banda dos sinais de transmissão propostos, caracterizados por portadoras moduladas em frequência faixa larga	136
G	Função autocorrelação do sinal de saída do filtro casado quando os sinais de transmissão propostos, caracterizados por portadoras moduladas em frequência por sinais aleatórios, são utilizados	138
H	Potência do ruído de saída do filtro correlator quando os sinais de transmissão propostos, caracterizados por portadoras moduladas em frequência por sinais aleatórios, são utilizados	140
I	Potência da interferência causada por ambiguidade em distância na saída da compressão de pulsos, quando os sinais de transmissão propostos, caracterizados por portadoras moduladas em frequência por sinais aleatórios, são utilizados	142
J	Resolução em distância de sistemas que empregam os sinais de transmissão propostos, caracterizados por portadoras moduladas em frequência por sinais aleatórios	145
K	Razão entre a potência de pico e a potência de lóbulos secundários quando os sinais de transmissão propostos, caracterizados por portadoras moduladas em frequência por sinais aleatórios, são utilizados	146

Lista de figuras

2.1	Diagrama em blocos simplificado de um sistema radar.	16
2.2	Sinal de retorno de um sistema radar.	17
2.3	Temporização de um sistema radar pulsado.	19
2.4	Sistema Radar com ambiguidade em distância.	21
3.1	Diagrama em blocos da cadeia de recepção básica de um sistema radar.	26
3.2	Diagrama em blocos do módulo pré-processamento.	27
3.3	Diagrama em blocos da cadeia de recepção de um sistema radar que trabalha com as envoltórias complexas dos sinais envolvidos.	27
3.4	Diagrama em blocos da cadeia de recepção de um sistema radar que emprega integração de pulsos.	34
3.5	Diagrama em blocos da cadeia de recepção de um sistema radar que emprega filtragem casada.	36
3.6	Resolução em distância antes e depois da compressão de pulsos.	40
3.7	Diagrama em blocos da cadeia de processamento do receptor de um sistema radar implementada digitalmente.	42
4.1	Diagrama em blocos da geração de um sinal de transmissão modulado em frequência.	46
4.2	Função autocorrelação do sinal de transmissão parametrizada pela largura de banda do sinal modulador - $K_p = 10^7$.	61
4.3	Função Amostra do Sinal Modulador $a(t)$ - 1MHz.	62
4.4	Densidade Espectral de Potência Média do Sinal Modulador - 1MHz.	63
4.5	Sinal de Transmissão - 5MHz.	63
4.6	Função autocorrelação da envoltória complexa do sinal transmitido - FM faixa larga, $B_s = 5\text{MHz}$.	64
4.7	Densidade espectral de potência da envoltória complexa do sinal transmitido - FM faixa larga, $B_s = 5\text{MHz}$.	64
5.1	Comportamento do ganho total, G_t , da razão sinal ruído na saída do integrador, parametrizado pelo produto tempo-banda, $B_s\tau_s$ - FM faixa larga.	72
5.2	Sinal Linearmente Modulado em Frequência Comprimido.	74
5.3	Sinal Linearmente Modulado em Frequência Comprimido [dB].	74
5.4	Sinal Linearmente Modulado em Frequência Comprimido [dB].	75
5.5	Comportamento da potência do sinal com o intervalo de tempo $\lambda = t - T_0$ na saída do filtro correlator, parametrizado pela largura de banda do sinal, B_s - FM faixa larga, $B_a = 1\text{MHz}$, $\tau_s = 1\mu s$.	78
5.6	Comportamento da potência do sinal com o intervalo de tempo $\lambda = t - T_0$ na saída do integrador, parametrizado pelo número de pulsos integrados, n_p - FM faixa larga, $B_a = 1\text{MHz}$, $B_s = 5\text{MHz}$, $\tau_s = 1\mu s$.	78

5.7	Comportamento da razão potência do pico e potência do sinal referente à instantes de tempo dentro da zona de convergência na saída do integrador em função do número de pulsos integrados, parametrizado pela largura de banda do sinal de transmissão - FM faixa larga, $\tau_s = 10\mu s$, $B_a = 1\text{MHz}$.	80
5.8	Comportamento da razão Sinal-Interferência com o número de pulsos integrados, parametrizado pelo produto tempo-banda do sinal, $B_s\tau_s$ - FM faixa larga.	84
6.1	Função amostra do sinal de transmissão caracterizado por uma portadora modulada em frequência faixa larga por um processo estocástico - $s_i(t)$.	89
6.2	Densidade espectral de potencia de uma função amostra do sinal de transmissão caracterizado por uma portadora modulada em frequência faixa larga por um processo estocástico.	90
6.3	Autocorrelação de uma função amostra do sinal de transmissão caracterizado por uma portadora modulada em frequência faixa larga por um processo estocástico.	90
6.4	Sinal de transmissão caracterizado por uma portadora determinística modulada linearmente em frequência - Chirp.	91
6.5	Densidade espectral de potencia do sinal de transmissão caracterizado por uma portadora determinística modulada linearmente em frequência - Chirp.	91
6.6	Autocorrelação do sinal de transmissão caracterizado por uma portadora determinística modulada linearmente em frequência - Chirp.	92
6.7	Cenário 1: Saída da compressão de pulsos.	95
6.8	Cenário 1: Saída da compressão de pulsos [dB].	96
6.9	Cenário 1: Saída da integração de pulsos, $n_p = 200$.	96
6.10	Cenário 1: Saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	97
6.11	Cenário 1: Saída da integração de pulsos, $n_p = 200$.	97
6.12	Cenário 1: Saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	98
6.13	Cenário 1: Resolução em distância associada à saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	99
6.14	Cenário 2: Saída da compressão de pulsos [dB].	101
6.15	Cenário 2: Saída da integração de pulsos, $n_p = 200$.	102
6.16	Cenário 2: Saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	102
6.17	Cenário 2: Saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	103
6.18	Cenário 3: Saída da integração de pulsos, $n_p = 200$.	105
6.19	Cenário 3: Saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	106
6.20	Cenário 3: Medida da resolução em distância a partir da saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	106
6.21	Cenário 4: Saída da integração de pulsos, $n_p = 200$.	108
6.22	Cenário 4: Saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	109
6.23	Cenário 4: Saída da integração de pulsos, $n_p = 200$.	109
6.24	Cenário 4: Saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	110
6.25	Cenário 4: Medida da resolução em distância com base na saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	111
6.26	Cenário 5: Saída da integração de pulsos, $n_p = 200$.	112
6.27	Cenário 5: Saída da integração de pulsos [dB], $n_p = 200$.	112

Lista de tabelas

6.1	Especificações do sistema utilizado nas simulações.	86
6.2	Grandezas derivadas do sistema utilizado nas simulações.	88
6.3	Tabela de Alvos - Cenários 1.	93
6.4	Valores teóricos de entrada - Cenário 1.	93
6.5	Valores teóricos - Cenário 1.	94
6.6	Valores medidos - Cenário 1.	94
6.7	Valores teóricos de ganhos de processamento - Cenário 1.	95
6.8	Tabela de Alvos - Cenário 2.	100
6.9	Valores teóricos de razão sinal-ruído [dB] associadas à entrada do detector - Cenário 2.	100
6.10	Valores medidos de razão sinal-ruído [dB] associadas à entrada do detector - Cenário 2.	101
6.11	Tabela de Alvos - Cenário 3.	104
6.12	Valores teóricos de razão sinal-ruído [dB] associadas à entrada do detector - Cenário 3.	104
6.13	Valores medidos de razão sinal-ruído [dB] associadas à entrada do detector - Cenário 3.	105
6.14	Tabela de Alvos - Cenário 4.	107
6.15	Valores teóricos de razão sinal-ruído [dB] associadas à entrada do detector - Cenário 4.	107
6.16	Valores medidos de razão sinal-ruído [dB] associadas à entrada do detector - Cenário 4.	108
6.17	Valores medidos de razão sinal-ruído [dB] associadas à entrada do detector - Cenário 7.	111