

Utilização de FRP variável para tratamento de zonas cegas em sistemas de radar de ruído pulsado

Bruno Pompeo, Leandro Pralon e Gabriel Beltrão

Resumo—Esse trabalho propõe um método para eliminar zonas cegas e ambiguidade em distância em sistemas de radar monostático pulsado. Para tal, utiliza-se o conceito de radar de ruído (sinais de transmissão caracterizados por processos estocásticos) combinado com frequências de repetição de pulsos (FRPs) aleatórias. Por fim, uma comparação entre o método proposto e o método utilizado em sistemas convencionais - frequência de repetição de pulsos fixa - é realizada.

Palavras-Chave—sistemas de radar, radar de ruído, formas de onda, frequência de repetição de pulsos

Abstract—This work addresses a method of eliminating blind zones and range ambiguity in monostatic pulsed radar systems. It is employed a combined use of Noise Radar (transmitted signals characterized by stochastic processes) and random pulse repetition frequency (PRFs). Finally, a comparison between the proposed method and conventional systems method - fixed pulse repetition frequency - is drawn.

Keywords—radar systems, noise radar, waveform, pulse repetition frequency.

I. INTRODUÇÃO

Radares do tipo pulsado são sistemas cujas formas de onda de transmissão são sinais de duração finita transmitidos periodicamente. A distância de um alvo é estimada medindo-se o intervalo de tempo que um pulso transmitido leva para viajar até ele e retornar. Se o sinal refletido no alvo for recebido após a transmissão de pulsos subsequentes, este poderá ser interpretado, erroneamente, como retorno dos referidos pulsos. Consequentemente, para que um alvo seja detectado sem que haja esse tipo de ambiguidade, ele precisa estar localizado, no máximo, a uma distância dada pela equação 1 [1].

$$R_{max} = \frac{c}{2FRP} \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz e FRP a frequência de repetição de pulsos.

Neste contexto, a frequência de repetição de pulso, FRP , torna-se um parâmetro fundamental em sistemas dessa natureza. Particularmente em radares de longo alcance, o intervalo entre dois pulsos consecutivos deve ser grande, ou seja, uma pequena FRP deve ser empregada. Por outro lado, a frequência de repetição de pulso deve ser suficientemente grande para que a detecção e o rastreamento do alvo não sejam comprometidos [1]. Esse aumento necessário da FRP , não só impacta na estimação da distância, como também provoca zonas cegas em radares do tipo monostáticos (uma única antena transmite

e recebe o sinal). Nota-se então, que existe um dilema por parte do projetista do sistema, em relação a escolha do valor da FRP que deverá ser adotada.

Diversos estudos relativos à questão da ambiguidade em distância já foram propostos [2], em especial, linhas de pesquisas envolvendo radares que utilizam diversidade de forma de onda [3],[4]. Dentre elas, o uso de forma de onda aleatória, teoria desenvolvida na década de 50, porém pouco explorada até então devido às limitações de *hardware*. Tais formas de onda são moduladas em frequência ou amplitude por um sinal caracterizado por um processo estocástico, sendo cada pulso de transmissão uma função amostra do processo resultante. Sistemas que empregam as referidas formas de onda são denominados Radares de Ruído [5].

Adicionalmente, estudos recentes do desempenho de sistemas dessa natureza mostram que radares de ruído também podem ser empregados com o intuito de se resolver problemas de zona cega inerentes a sistemas monostáticos [6]. Ainda em [6] a análise feita considerando uma única FRP conclui que a única característica do sistema afetada, quando um alvo encontra-se em uma zona cega, é a potência média do sinal de entrada no detector, sendo esta proporcional à fração do pulso recebida. Em radares de longo alcance, que tendem a apresentar zonas cegas, esta limitação torna-se crítica pois compromete a detecção de alvos que estejam mais distantes e presentes nessas zonas.

O presente trabalho tem como foco propor um método para minimizar os efeitos causados pela ambiguidade em distância e, consequentemente, garantir a detecção de alvos em zonas cegas em radares pulsados. Para tal, utiliza-se conjuntamente o conceito de formas de onda aleatórias e de FRP também aleatória, eliminando a ambiguidade em distância e diminuindo a perda de energia dos sinais de retorno provenientes de alvos localizados dentro de zonas cegas. A aleatoriedade da frequência de repetição de pulsos é entendida como uma mudança no intervalo de tempo entre pulsos consecutivos, o que ocasiona um deslocamento espacial dessas zonas. Esse deslocamento garante uma menor perda de energia ao longo do tempo de iluminação do alvo, comparado a sistemas que utilizam FRP fixa, já que ele não encontrar-se-á sempre na mesma região em termos de zona cega.

Na Seção II, uma breve explicação sobre o funcionamento de radares de ruído e sobre a teoria de modulação em frequência aleatória são apresentados, mostrando as características principais de tais sistemas. Em seguida, na Seção III, são descritos os casos de FRP fixa e FRP aleatória, mostrando as particularidades das duas propostas. A Seção IV traz os resultados das simulações realizadas utilizando o

método proposto e comparando com os resultados obtidos quando se utiliza uma *FRP* fixa. Por fim, na Seção V, uma conclusão é tecida acerca do método proposto.

II. RADAR DE RUIDO

Radares de ruído são sistemas que utilizam sinais aleatórios como formas de onda de transmissão e empregam filtragem casada e integração de pulsos na sua cadeia de recepção [5]. Tais sistemas têm a propriedade única de garantir alta resolução tanto em distância quanto em velocidade as quais podem ser controladas de forma independente variando-se a largura de banda do sinal e o tempo de integração respectivamente [7].

A cadeia de recepção de um radar do tipo pulsado, de ruído ou convencional, é ilustrada na figura 1.

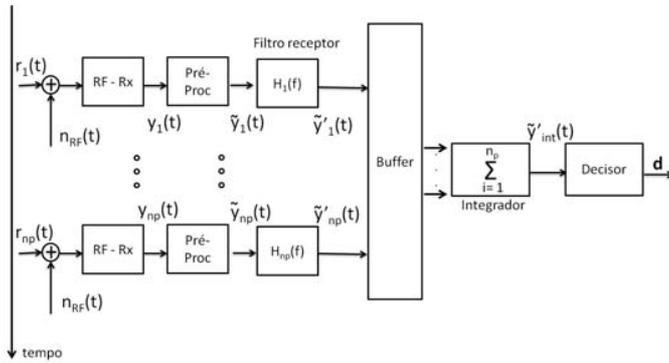


Fig. 1. Diagrama em blocos de um receptor radar que emprega compressão de pulsos e integração

O primeiro estágio dessa cadeia, após o pulso $r_i(t)$ ser recebido na antena do radar, é um módulo de RF. Em seguida, esse sinal passa por um pré-processamento e sua envoltória complexa, $\tilde{y}_i(t)$, em relação a frequência intermediária, é obtida. Uma filtragem casada é aplicada a cada sinal $\tilde{y}_i(t)$ e o sinal resultante dessa operação, $\tilde{y}'_i(t)$, é armazenado em um acumulador, para uma posterior integração dos n_p sinais filtrados. Neste trabalho essa integração será considerada como uma soma linear. Finalmente, um decisor é responsável por indicar a presença de alvos no cenário de observação com base na relação sinal-ruído (*SNR*) do sinal em sua entrada.

O sinal de transmissão, $s(t)$, é uma portadora modulada em frequência por um sinal modulador caracterizado por um processo estocástico [5]. Este sinal é dado por

$$s(t) = \sqrt{2P_t} \cos \left(2\pi f_c t + K_p \int_{-\infty}^t a(\alpha) d\alpha + \lambda \right) \quad (2)$$

onde λ é uma variável aleatória uniforme, distribuída entre $(0, 2\pi]$, f_c é a frequência central de transmissão, P_t é a potência média do sinal, K_p é a constante de modulação e $a(t)$ é o sinal modulador, caracterizado por um processo estocástico gaussiano, estacionário no sentido amplo, com potência unitária e densidade espectral de potência plana em uma faixa de frequências.

Dessa forma, considerando-se um único alvo localizado a uma distância R do radar, o sinal recebido na antena, $r(t)$,

proveniente da reflexão do sinal transmitido no alvo, é dado por

$$r(t) = w(t) [As(t - T)] \quad (3)$$

onde A é o desvanecimento sofrido pelo sinal durante o trajeto de ida e volta ao sistema, $T = \frac{2R}{c}$ é o tempo gasto para o sinal, que foi refletido, retornar ao radar, sendo c a velocidade da luz no espaço livre e $w(t)$ é uma função janela, a qual assume valores nulos durante a transmissão do pulso. Essa janela surge pois em radares monostáticos durante a transmissão não há recepção, dando origem a zonas cegas. Sendo assim, a função janela é escrita como

$$w(t) = \begin{cases} 0 & , \frac{k}{FRP} < t < \frac{k}{FRP} + \tau; \\ 1 & , \text{demais casos} \end{cases} \quad (4)$$

sendo $k \in \mathbb{N}$, $k \leq n_p$ e τ a largura dos pulsos de transmissão.

Foi demonstrado em [8] que quando sinais dessa natureza são empregados, a ambiguidade em distância é eliminada e em [6] que quando o alvo localiza-se dentro de uma zona cega, as características do sinal na entrada do detector permanecem inalteradas, com exceção de sua *SNR*, esta proporcional à fração de pulso recebida, $0 \leq T_{int} \leq \tau$, na antena do radar. A *SNR* do sinal na entrada do detector é dada por [5]

$$SNR = \frac{n_p T_{int} A^2 P_t}{N_0/2} \quad (5)$$

sendo $N_0/2$ o nível da densidade espectral do ruído térmico.

Ainda que pulsos de ruído tenham um desempenho melhor do que outras formas de onda de transmissão em cenários com zonas cegas [6], a redução de energia pode provocar a não detecção de determinados alvos. Dessa forma, faz-se necessário o uso de técnicas adicionais visando a minimização deste efeito.

III. FREQUÊNCIA DE REPETIÇÃO DE PULSO VARIÁVEL

Sistemas monostáticos que empregam *FRP* fixas têm sua eficiência comprometida quando determinado alvo encontra-se em uma de suas zonas cegas. Nesta situação, para os n_p pulsos recebidos, T_{int} será invariante e menor do que a largura do pulso de transmissão, τ . Assim, há uma diminuição no valor da *SNR*, dada pela equação 5, a qual tem seu valor máximo quando $T_{int} = \tau$. A figura 2 ilustra essa situação, considerando um alvo localizado a uma distância R do radar, onde *ON* significa que o receptor está ligado e *OFF* que o receptor está desligado, ou seja, um pulso está sendo transmitido.

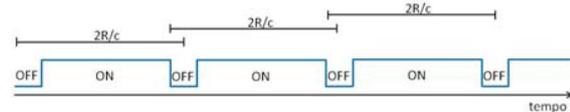


Fig. 2. Exemplo de sistema com *FRP* fixa

Neste trabalho utiliza-se frequências de repetição de pulsos variáveis. Conforme ilustrado na figura 3, percebe-se que o alvo não permanece na zona cega durante todas as n_p

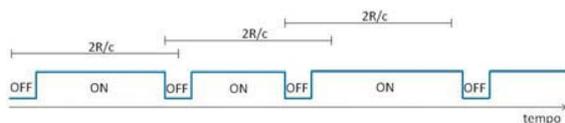


Fig. 3. Exemplo de sistema com FRP aleatória

transmissões, já que o tempo em que o receptor fica ligado varia pulso a pulso.

Utilizando-se de FRP variável, a SNR do sinal de saída da integração de pulsos passa a ser dada pela soma das contribuições de cada uma das frações integradas, T_{int_i} , conforme mostrado na equação 6.

$$SNR = \sum_{i=1}^{n_p} T_{int_i} \cdot \frac{A^2 P_t}{N_0/2} \quad (6)$$

Nota-se que uma escolha adequada das $FRPs$ possibilita a detecção de alvos independente de suas posições, o que não pode ser afirmado no caso de FRP fixa. Na próxima seção, apresenta-se um exemplo numérico onde se considera as $FRPs$ variáveis aleatórias uniformemente distribuídas.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

No intuito de validar o modelo proposto neste trabalho, foram feitas quatro simulações. Para tal, foi utilizado um simulador de radar monostático pulsado de longo alcance, com distância máxima de detecção 100Km. Utilizou-se como sinal de transmissão, em todos os casos, a forma de onda descrita na equação 2, sendo $P_t = 1W$, $f_c = 2GHz$ e $K_p = 9.56$. O sinal modulador $a(t)$ segue as características descritas na seção II, com largura de banda de 1MHz. A largura de pulso do sinal de transmissão, τ , é de $30\mu s$.

Considerou-se nas simulações duas configurações para a FRP . Na primeira, a FRP foi mantida fixa e igual a 3.33 kHz, enquanto que na segunda, variou-se a FRP de forma aleatória, de modo que esta seguisse uma distribuição uniforme entre [2.85kHz,4kHz]. Para ambas, foram analisados dois cenários.

No primeiro, um único alvo foi inserido a uma distância de 44 km do radar. Percebe-se que, considerando uma FRP fixa de 3.33 kHz e com base na equação 4, o respectivo alvo localiza-se dentro de uma zona cega, as quais ocorrem a cada 45 km, com largura espacial de 9 km centrada nesse valor ($\tau = 30\mu s$). Em contrapartida, conforme apresentado na seção III, quando se utiliza $FRPs$ variáveis, o alvo nem sempre encontrar-se-á dentro de uma zona cega. O sinal de entrada no detector para essa configuração, considerando FRP fixa e FRP aleatória, é mostrado nas figuras 4 e 5 respectivamente.

Note que, na Figura 4, a SNR associada ao sinal na entrada do detector não é suficiente para que o mesmo seja detectado, já que o sinal não se difere do ruído. Por outro lado, na Figura 5, pode-se observar que o nível de potência do sinal em $R = 44$ km se sobressai ao ruído, garantindo a detecção do referido alvo.

No segundo cenário, um único alvo foi inserido a uma distância de 30 km do radar, ou seja, fora de qualquer zona

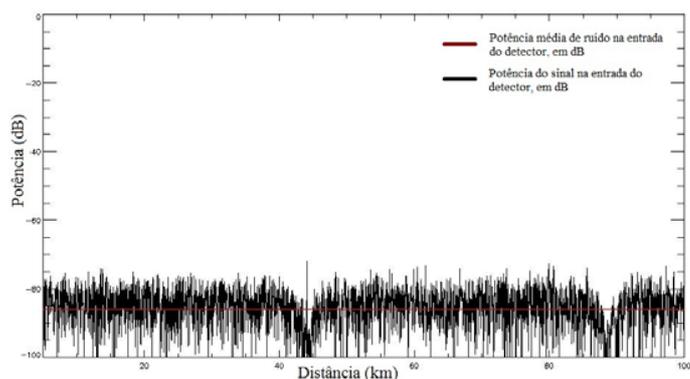


Fig. 4. Sinal de entrada no detector com FRP fixa no primeiro cenário

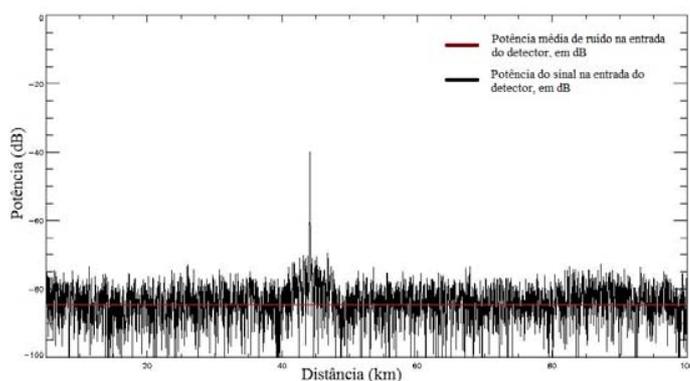


Fig. 5. Sinal de entrada no detector com FRP aleatória no primeiro cenário

cega utilizando-se FRP fixa e igual a 3.33 kHz. Conforme apresentado na seção III, quando se utiliza $FRPs$ variáveis, o alvo nem sempre encontrar-se-á fora de uma zona cega, o que poderia acarretar uma perda de desempenho do sistema. No entanto, o sinal de entrada no detector para essa configuração, considerando FRP fixa e FRP aleatória, mostrado nas figuras 6 e 7 respectivamente, mostra que o alvo é detectado em ambas as configurações, não havendo perda considerável de desempenho.

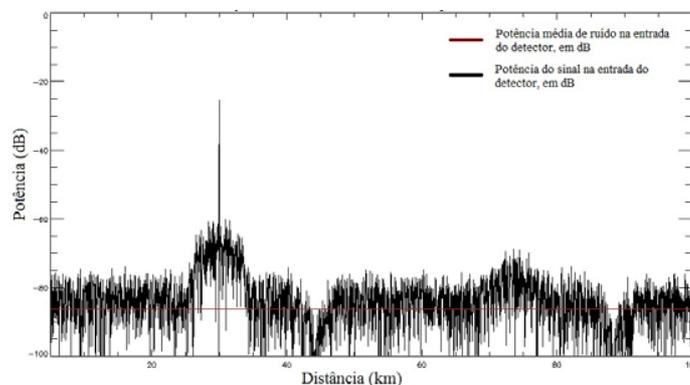


Fig. 6. Sinal de entrada no detector com FRP fixa no segundo cenário

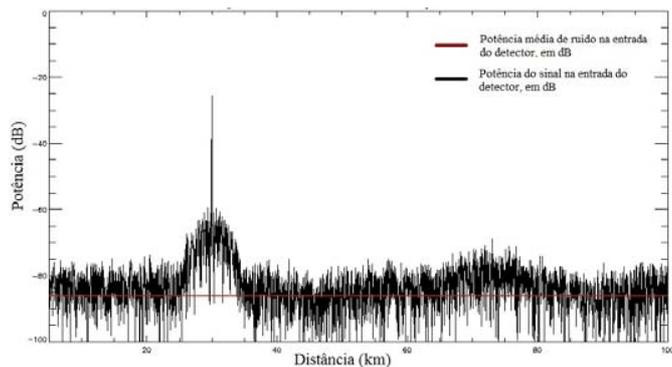


Fig. 7. Sinal de entrada no detector com FRP aleatória no segundo cenário

Percebe-se com base nos dois cenários estudados, que o uso de *FRP* variável, em particular aleatória uniformemente distribuída, é preferível ao uso de *FRP* fixa em sistemas de radar monostático pulsado de longo alcance que empregam formas de onda de transmissão caracterizadas por portadoras moduladas aleatoriamente em frequência.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um método baseado no uso simultâneo de formas de onda de transmissão aleatórias e frequência de repetição de pulsos (*FRP*) variável, no intuito de minimizar os efeitos causados pelas zonas cegas e ambiguidades em distância em radares monostáticos pulsados. Para tal, utilizou-se como forma de onda de transmissão uma portadora modulada em frequência por um processo estocástico gaussiano, estacionário no sentido amplo, com potência unitária e densidade espectral de potencial plana em uma faixa de frequências juntamente com *FRPs* aleatórias uniformemente distribuídas.

A partir da eficiência comprovada do uso da referida forma de onda em sistemas sujeitos a ambiguidades em distância [8], foi objeto de estudo o efeito causado pela redução da relação sinal-ruído do sinal de entrada no detector utilizando-se *FRP* fixa e *FRP* variável. O modelamento matemático demonstrou que tal efeito pode ser minimizado por uma escolha adequada do intervalo temporal entre os pulsos, independente da posição que se encontra o alvo.

Para validar os conceitos apresentados, foi utilizado um simulador de radar considerando duas diferentes formas de transmissão. Na primeira, foi utilizada *FRP* fixa, característica de um sistema clássico, onde o alvo de interesse se manteve presente em uma zona cega durante todo o intervalo de execução. Nesta análise, pode se observar que o sinal na entrada do detector (após a filtragem casada e integração de pulsos), relativo a este alvo, apresenta uma *SNR* muito baixa para ser detectado.

Na segunda configuração, fez-se uso do modelo proposto neste trabalho, utilizando-se *FRPs* variáveis, considerando o alvo na mesma posição do primeiro cenário descrito. Ao contrário deste, nessa segunda análise as zonas cegas foram deslocadas devido a variação do intervalo de transmissão entre pulsos, garantindo que nem sempre o alvo se encontrasse em

zonas cegas. Isto permitiu que a *SNR* associada ao sinal na entrada do detector, relativo a este alvo, fosse suficientemente grande para detectá-lo.

Por fim, uma comparação entre o método convencional e o método proposto, ambos utilizando forma de onda aleatória, foi tecida considerando um alvo localizado fora das zonas cegas. Nesta análise, pode se observar que o desempenho dos dois sistemas são similares, demonstrando que o método proposto é eficiente também neste caso.

REFERÊNCIAS

- [1] Skolnik M., *Radar Handbook*, Second Edition, McGrawHill, 1990
- [2] Levanon, N., *Mitigating range ambiguity in high PRF radar using inter-pulse binary coding*, IEEE Trans. AES, v.45, pp.687-697, 2009
- [3] Lukin K. A., Kulyk V. V., Zemlyaniy O. V., *Application of dynamical chaos for design of random waveform generators* - 1^o International Workshop on the Noise Radar Technology - Yalta, Crimea, Ukraine, 2002. - P. 127-135.
- [4] Coxson G., Russo J., *Efficient exhaustive search for binary codes*, IEEE Trans. AES, v.41, pp. 302-308, 2005.
- [5] Pralon L., *Modelagem probabilística de sinais em radares de ruído que utilizam pulsos senoidais modulados em frequência*. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2012.
- [6] Pralon L., Pompeo B., Beltrão G., Cioqueta H., Cosenza B. e Moreira J., *On a Blind Zone Elimination Method Based on Partial Compression Filter Design Using Random Waveforms For Monostatic Pulsed Radars*, Radar 2012 - Glasgow, Scotland, 2012.
- [7] Lukin, K. e Narayanan, R., *Fifty years of noise radar*, 11th International Radar Symposium (IRS), Vilnius, p.504-506, 2010.
- [8] Pralon, L., Pompeo, B., Beltrão, G., Cioqueta, H., Cosenza, B. and Fortes, J.M., *Random Phase/Frequency Modulated Waveforms for Noise Radar Systems Considering Phase Shift*, 5th European Radar Conference - Amsterdam, Netherlands, 2012.