

# Análise e Implementação de um Sonar Digital Utilizando Processo Gaussiano

E. L. do Nascimento e G. Jerônimo da Silva Jr.

**Resumo**— Este trabalho apresenta o estudo e a implementação de um sistema sonar utilizando processo gaussiano banda limitada como forma de onda transmitida. A precisão obtida a partir dos processos gerados é comparada com técnicas que utilizam outros sinais.

**Palavras-Chave**— Sonar, processo gaussiano, filtro casado, processamento digital de sinais.

**Abstract**— This paper presents the study and implementation of a sonar system using a gaussian limited band process as transmitted waveform. The accuracy obtained from the generated processes is compared to techniques that use other signals.

**Keywords**— Sonar, gaussian process, matched filter, digital signal processing.

## I. INTRODUÇÃO

Um sonar é um sistema que detecta, mede distância e velocidade de objetos utilizando ondas acústicas, diferentemente do radar que utiliza ondas de rádio [1]. Esses sistemas encontram aplicações em sensores de proximidade e aplicações submarinas [2].

Sistemas convencionais de sonar utilizam pulsos senoidais (PS), de duração  $\tau_w$ , dado por

$$x_{PS}(t) = [u(t) - u(t - \tau_w)]\text{sen}(\omega_c t),$$

em que  $u(t)$  é a função degrau unitário e  $\omega_c$  é a frequência da portadora [1]. Esse sinal reflete no alvo e é recebido por um detector de som, que mede o tempo de retorno e estima a posição do objeto. Nesses sistemas, quanto menor a duração do pulso  $\tau_w$ , maior será a precisão da posição do objeto, entretanto, maior será a banda do canal, implicando numa maior taxa de amostragem [1]. Além do sinal PS, o pulso modulado com frequência linear (MFL), dado por

$$x_{MFL}(t) = [u(t) - u(t - \tau_w)]\text{sen}\left(\frac{\pi\beta t^2}{\tau_w}\right),$$

é utilizado em radares e pode ser aplicado igualmente em sonares [1].

Este trabalho explora outros tipos de formas de ondas que podem ser utilizadas no lugar do PS ou MFL. A próxima seção apresenta um resumo do sonar digital e a principal técnica utilizada para medir a posição de um alvo. Na Seção III são apresentados os fatores de qualidade e os critérios para a geração das formas de ondas do sonar. A Seção IV mostra os resultados de experimentos e as conclusões estão na Seção V.

E. L. do Nascimento e G. Jerônimo da Silva Jr. Grupo de Processamento de Sinais, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, E-mails: emersonlima870@gmail.com, gilson.silvajr@ufpe.br.

## II. PRELIMINARES

Um sistema sonar digital funciona conforme mostrado na Figura 1. O processador digital de sinais (PDS) produz um sinal de tempo discreto  $x[n]$  a uma taxa de  $f_s$  amostras por segundo, que é convertido em um sinal de tempo contínuo  $x_c(t)$ . Após isso, um microfone recebe o sinal  $y_c(t)$ , que é amostrado com a mesma taxa  $f_s$  para obter  $y[n]$ .

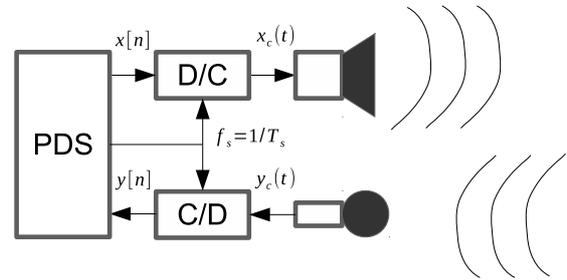


Fig. 1. Diagrama da implementação do sonar digital.

Desprezando a velocidade do alvo, o sinal recebido pelo microfone é dado por

$$y_c(t) = \alpha x_c(t - T_d) + \eta(t), \quad (1)$$

em que  $|\alpha| < 1$  é a atenuação do meio,  $\eta(t)$  é um ruído branco aditivo e  $T_d$  é o tempo de atraso, que é dado por  $T_d = 2d/v_s$ , em que  $d$  é a distância do objeto e  $v_s$  é a velocidade do som. A distância  $d$  do objeto é estimada por  $d = v_s T_d/2$ .

Um modo de obter o valor  $T_d$  a partir dos sinais  $x_c(t)$  e  $y_c(t)$  é através da correlação cruzada [3], definida por

$$\phi_{yx}(t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} y_c(\tau + t)x_c(\tau)d\tau.$$

Quando  $y_c(t)$  é dado por (1), a correlação resulta em

$$\phi_{yx}(t) = \alpha\phi_{xx}(t - T_d) + \eta_x(t), \quad (2)$$

em que  $\eta_x(t)$  é um ruído colorido, considerando que  $x_c(t)$  possui banda limitada, e  $\phi_{xx}(t)$  é a autocorrelação do sinal  $x_c(t)$ , um sinal par que possui valor máximo quando  $t = 0$ ,  $\phi_{xx}(0) = \int x_c^2(\tau)d\tau = \xi_x$  [3]. Assim, o valor máximo da correlação cruzada  $\phi_{yx}(t)$  ocorre em  $t = T_d$ .

Em um sonar digital, deve-se obter a correlação cruzada a partir do sinal amostrado  $y[n]$ . O sinal amostrado é dado por  $y[n] = y_c(n/f_s)$  e, utilizando o teorema da amostragem na correlação cruzada discreta [4],

$$\varphi_{yx}[n] \triangleq \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m+n]x[m] = \phi_{yx}(n/f_s),$$

e, usando (2), tem-se

$$\varphi_{yx}[n] = \frac{\alpha}{T_s} \phi_{xx}(T_s n - T_d), \quad (3)$$

em que  $T_s = 1/f_s$  é o período de amostragem. Nesse caso, se  $T_s \ll T_d$ , a amostra de máximo valor de  $\varphi_{yx}[n]$  ocorre quando  $n = \bar{n} \cong T_d/T_s$ . Com isso, a distância do objeto é estimada por  $d = v_s \bar{n} T_s / 2$ . Além disso, se  $n_d = T_s/T_d$  é inteiro, a correlação discreta é dada por  $\varphi_{yx}[n] = \varphi_{xx}[n - n_d]$ , em que  $\varphi_{xx}[n]$  é a autocorrelação discreta de  $x[n]$ .

Além disso, se  $n_d = T_s/T_d$  é inteiro, a correlação discreta é dada por  $\varphi_{yx}[n] = \varphi_{xx}[n - n_d]$ , em que  $\varphi_{xx}[n]$  é a autocorrelação discreta de  $x[n]$ .

### III. FATOR DE QUALIDADE E PROJETO DE FORMA DE ONDA

Uma forma mais adequada de computar  $\bar{n}$  é considerar a densidade de energia instantânea do sinal  $\varphi_{yx}[n]$  como função densidade de probabilidade. Assim

$$\bar{n} = \frac{1}{\xi_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} n \varphi_{yx}^2[n],$$

em que

$$\xi_\varphi = \sum_n \varphi_{yx}^2[n]$$

é a energia da correlação cruzada discreta. Com isso, adota-se o *desvio padrão amostral* (DPA)  $\sigma_n$  satisfazendo

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{\xi_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\bar{n} - n)^2 \varphi_{yx}^2[n].$$

Quanto menor  $\sigma_n$ , menor a incerteza sobre a distância. Além da DPA, introduz-se a *relação entre picos* (RP) de  $\varphi_{xx}[n]$  que é a relação entre seus dois maiores valores absoluto (o maior pelo segundo maior). Quanto maior a RP, mais fácil identificar o pico em  $\varphi_{yx}[n]$  e o sinal  $x[n]$  é visualmente destacável na presença de ruído.

A proposta do trabalho é escolher o sinal  $x[n]$  através de um processo gaussiano, aplicando um filtro passa-banda discreto para garantir que o sinal resultante esteja dentro de uma banda específica. O sinal produzido  $x[n]$  tem duração de  $N$  amostras, isto é,  $x[n] = 0$  para  $n < 0$  e  $n \geq N$ . Com isso,  $\varphi_{yx}[n]$  pode ser calculado por

$$\begin{aligned} r[n] &= \sum_{m=0}^{N-1} x[N-1-m]y[n-m] \\ &= x[N-1-n] * y[n] = \varphi_{yx}[n - (N-1)], \end{aligned} \quad (4)$$

que é a aplicação de um filtro FIR com  $N$  pontos conhecido como filtro casado [5]. Processos gaussianos são gerados e escolhe-se, dentre eles, o que possui a maior RP, o menor DPA ou que maximiza alguma função de qualidade.

### IV. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Em 10000 iterações, escolheu-se os sinais  $x_1[n]$ ,  $x_2[n]$  e  $x_3[n]$  com o menor DPA, a maior RP e a maior relação RP/DPA respectivamente. Esses sinais são comparados com um PS e um MFL com  $\omega_c = \beta = \pi \times 10^4$  rad/s. Todos os sinais são aplicados a um filtro FIR passa-faixa de 30 pontos

com frequências de corte 2 kHz e 20 kHz, respectivamente, considerando a taxa de amostragem 48 kHz. A duração de todos os sinais analisados é escolhida de forma que, após a aplicação do passa-faixa, resulte em sinais de 128, 256 e 512 pontos. Os parâmetros obtidos para os sinais com comprimento 512 estão na Tabela I. O resultado de um dos experimentos utilizando o sinal  $x_2[n]$  com um obstáculo a 1,5 m é mostrado na Figura 2.

TABELA I  
PARÂMETROS PARA SINAIS COM 512 AMOSTRAS.

sinal	DPA	RP	RP/DPA
$x_1[n]$	95,07	1,41	0,015
$x_2[n]$	153,59	1,60	0,010
$x_3[n]$	98,36	1,47	0,015
PS	152,02	1,04	0,007
MFL	12,97	1,38	0,110

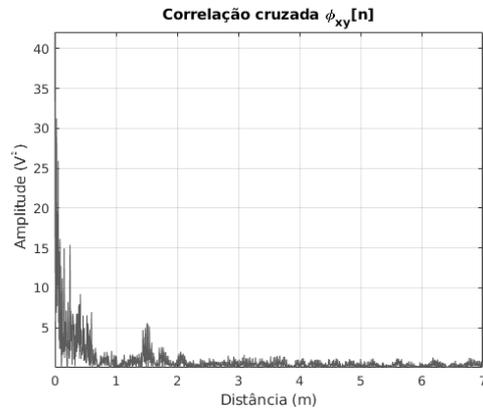


Fig. 2. Gráfico produzido pelo sonar projetado com alvo a 1,5 m.

### V. CONCLUSÕES

Um projeto de sonar, utilizando formas de onda construídas por meio de processos gaussianos, foi proposto e seu desempenho foi comparado com sistemas que utilizam formas de onda conhecidas. Observa-se que o sinal MFL possui o menor DPA, mas, considerando a RP, sinais obtidos por meio de processos gaussianos apresentam um melhor desempenho. Os experimentos indicaram que, formas de onda com alta RP possuem pico da correlação bem evidente visualmente. Estudo de outras formas de onda e técnicas para medição de velocidade de alvos estão em desenvolvimento.

### REFERÊNCIAS

- [1] M. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 2nd ed., ser. Professional Engineering. Mcgraw-hill, 2014.
- [2] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, 2nd ed. Springer-Verlag, 2010.
- [3] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Sinais e Sistemas*, 2nd ed. Pearson Prentice Hall, 2010.
- [4] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, and J. R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [5] U. Meyer-Baese, *Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays*, 4th ed., ser. Signals and Communication Technology. Springer, 2014.