

Implementação de Sistema de Cancelamento Adaptativo de Ruído utilizando um Algoritmo VSS-NLMS Robusto

Rafael Rodrigo Pertum e Eduardo Vinicius Kuhn

Resumo—Este artigo apresenta a implementação de um sistema de cancelamento adaptativo de ruído utilizando um algoritmo VSS-NLMS (*variable step-size normalized least-mean-square*) com elevada imunidade ao ruído de medição. Tal implementação é realizada na placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors, a qual possui recursos para aquisição e síntese de sinais de áudio. Resultados experimentais e de simulação atestam a validade da implementação proposta. Ainda, avaliações subjetivas preliminares confirmam a eficácia do sistema em termos de atenuação de ruído.

Palavras-Chave—Algoritmo VSS-NLMS, cancelamento adaptativo de ruído, filtragem adaptativa.

Abstract—This paper presents the implementation of an adaptive noise cancelling system using a variable step-size normalized least-mean-square (VSS-NLMS) algorithm with high immunity against the measurement noise. Such an implementation is carried out in the Cortex-FM4 Starter kit from Cypress Semiconductors, which has acquisition and synthesis resources for audio signals. Experimental and simulation results validate the proposed implementation. Moreover, preliminary subjective assessments confirmed the effectiveness of the system in terms of noise attenuation.

Keywords—VSS-NLMS algorithm, adaptive noise canceling, adaptive filtering.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, sistemas de cancelamento adaptativo de ruído (ANC, *adaptive noise cancelling*) vêm sendo amplamente utilizados em diversas aplicações práticas, tais como na atenuação de interferência da rede elétrica em equipamentos biomédicos, bem como na supressão de ruído em aparelhos auditivos, celulares e de áudio-conferência [1]-[3]. Especificamente, busca-se nessas aplicações mitigar o ruído que degrada o sinal de interesse, visando assim facilitar a interpretação da informação desejada e/ou melhorar a qualidade da comunicação. Para tal, já que as fontes de ruído podem variar com o tempo, técnicas de filtragem adaptativa são consideradas para sintetizar (em tempo real) uma estimativa do ruído que corrompe o sinal de interesse. Dentre os algoritmos comumente utilizados, destacam-se o algoritmo LMS (*least-mean-square*), NLMS (*normalized LMS*) e os algoritmos VSS-NLMS (*variable step-size NLMS*) [2], [3]. Em particular, é apresentado em [4] um algoritmo VSS-NLMS baseado na autocorrelação do erro, o qual apresenta elevada imunidade ao ruído de medição, robustez às variações na potência do sinal de entrada e simplicidade de implementação (em termos de complexidade computacional e número de parâmetros). Nesse contexto, o presente trabalho de pesquisa tem por objetivo i) realizar a implementação prática de um sistema de ANC utilizando o algoritmo de [4]; e ii) avaliar o desempenho da implementação proposta frente a atenuação de ruído.

Rafael Rodrigo Pertum, acadêmico do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, PR, Brasil (e-mail: pertum@alunos.utfpr.edu.br).

Eduardo Vinicius Kuhn, professor do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, PR, Brasil (e-mail: kuhn@utfpr.edu.br).

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação Araucária.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção, a topologia de um sistema de ANC e as expressões do algoritmo VSS-NLMS introduzido em [4] são brevemente revisitadas.

A. Topologia de um sistema de ANC

Em um sistema de ANC (conforme ilustrado na Fig. 1), um algoritmo adaptativo [empregando um sinal de referência $x(n)$ e o sinal de erro $e(n)$] ajusta os coeficientes de uma estrutura de filtragem de forma a produzir uma estimativa $\hat{d}(n)$ do ruído $d(n)$ que corrompe o sinal de interesse $s(n)$. Então, realizando a subtração entre o sinal corrompido por ruído (observado na entrada primária) e a estimativa do ruído, obtém-se o sinal de erro como

$$e(n) = s(n) + d(n) - \hat{d}(n). \quad (1)$$

Note que, conforme o algoritmo adaptativo converge para a solução em regime permanente [isto é, $\hat{d}(n) \equiv d(n)$], o sinal de erro tende para o sinal de interesse [isto é, $e(n) \rightarrow s(n)$], produzindo assim a atenuação do ruído na saída do sistema (como desejado).

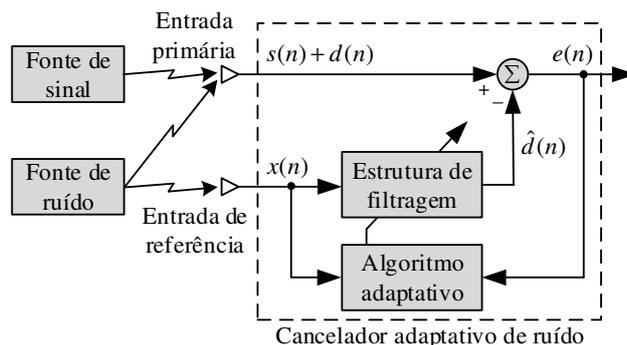


Fig. 1. Topologia geral de um sistema de ANC.

B. Algoritmo VSS-NLMS

Para uma estrutura transversal de filtragem, a equação de adaptação dos coeficientes do algoritmo VSS-NLMS é expressa como [4]

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu(n) \frac{\mathbf{x}(n)e(n)}{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n) + \epsilon} \quad (2)$$

onde $\mu(n)$ denota o passo de adaptação variável, $\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \cdots w_{M-1}(n)]^T$, o vetor de coeficientes do filtro adaptativo de ordem M , $\mathbf{x}(n) = [x(n) \cdots x(n-M+1)]^T$, um vetor contendo as amostras mais recentes da entrada de referência, $(\cdot)^T$, o operador de transposição e ϵ , um parâmetro de regularização. No algoritmo considerado, a regra de ajuste do passo de adaptação é dada por

$$\mu(n) = \frac{p^2(n)}{q^2(n)} \quad (3)$$

com

$$p(n) = \beta p(n-1) + (1-\beta)e(n)e(n-1) \quad (4)$$

e

$$q(n) = \beta q(n-1) + (1-\beta)e^2(n) \quad (5)$$

sendo $0 \ll \beta < 1$ um parâmetro de suavização (para mais detalhes sobre o funcionamento do algoritmo, veja [4]).

III. IMPLEMENTAÇÃO PROPOSTA

Na implementação do sistema de ANC, foi utilizada uma placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors, a qual possui um microcontrolador ARM[®] Cortex-M4 S6E2CC operando à 200 MHz [5]. Essa placa de desenvolvimento conta com um *codec* (*coder-decoder*) Wolfson[®] WM8731 responsável por realizar a interface entre entrada/saída de áudio (disponíveis através de conectores do tipo P2 estéreo) e o microcontrolador por meio do protocolo de comunicação I2S (*inter-IC sound*). Salienta-se que os sinais de áudio (fala) envolvidos foram digitalizados com uma frequência de amostragem de 8 kHz e cada amostra quantizada em 16 bits. Além disso, a placa de desenvolvimento possui um dispositivo específico para depuração via USB (*universal serial bus*), permitindo assim acompanhar a execução do código bem como acessar as variáveis de interesse armazenadas na memória.

Para o desenvolvimento do código, foi considerada a IDE (*integrated development environment*) Keil μ Vision[®] MDK (*microcontroller development kit*) fornecida pela ARM[®] [6]. Essa IDE permite a programação em *assembly*, linguagem C (adotada aqui) e C++. Adicionalmente, a IDE oferece suporte à biblioteca CMSIS-DSP (*Cortex microcontroller software interface standard – digital signal processing*), na qual são encontradas funções já otimizadas para realizar operações de processamento de sinais em microcontroladores Cortex-M (veja um trecho do código desenvolvido na Fig. 2). Tal IDE possibilita ainda compilar, gravar e depurar o código de forma integrada com a placa de desenvolvimento utilizada sem a necessidade de qualquer outra ferramenta externa, o que auxilia sobremaneira durante a implementação (concepção, teste e otimização).

```
//produto interno entre w[] e x[]
arm_dot_prod_f32(w, x, M, &d_chapeu);
//cálculo da energia de x[]
arm_power_f32(x, M, &energia);
//determinação do erro
e=d-d_chapeu;
//cálculo de p
p=beta*p_anterior+(1-beta)*e*e_anterior;
//cálculo de q
q=beta*q_anterior+(1-beta)*(e*e);
//determinação de mu
mu=(p/q) * (p/q);
//cálculo do fator de adaptação
arm_scale_f32(x, (mu/energia) * e, fator, M);
//atualização dos coeficientes do filtro adaptativo
arm_add_f32(w, fator, w, M);
```

Fig. 2. Trecho de código da implementação proposta do sistema de ANC.

IV. RESULTADOS ALCANÇADOS

No intuito de avaliar a implementação proposta para o sistema de ANC, comparações de desempenho entre resultados experimentais (provenientes da placa de desenvolvimento) e de simulação (obtidos via MATLAB[®]) são apresentadas. Particularmente, sinais de áudio são sintetizados com o auxílio do MATLAB[®] a fim de emular aqueles observados na entrada primária e de referência do sistema. Para tal, gera-se um ruído branco gaussiano com média zero e variância 10^{-2} (entrada de referência), o qual após ser filtrado por uma planta obtida de [7, Modelo 6] é adicionado ao sinal de fala fornecido em [8, Voz feminina 1] (entrada primária) resultando em uma SNR (*signal-to-noise ratio*) de 0,3 dB. Esses sinais servem como entrada para o sistema implementado tanto em MATLAB[®] quanto na placa de desenvolvimento (o canal esquerdo da *line-in* é usado para entrada de referência e o direito para entrada primária). Finalmente, é realizada a aquisição do sinal de erro observado na saída do sistema, produzindo assim os resultados experimentais e de simulação.

Para o algoritmo VSS-NLMS considerado, os valores dos parâmetros são $M = 128$, $\beta = 0,99$ e $\varepsilon = 1$. Além disso, as

variáveis do sistema são inicializadas como $\mathbf{w}(0) = \mathbf{0}$, $\mu(0) = 0$ e $p(0) = q(0) = 0$. A avaliação de desempenho do sistema de ANC é realizada através da métrica NRR (*noise reduction ratio*) expressa em dB, a qual é definida como

$$\text{NRR}(k) = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{n=kL}^{kL+L-1} [e(n) - s(n)]^2}{d^2(n)} \right\}, \quad k = 0, \dots, K-1 \quad (6)$$

onde $L = 160$ caracteriza o tamanho do quadro de observação utilizado para calcular a média temporal e $K = 345$, o número de quadros. Os resultados obtidos são ilustrados na Fig. 3, na qual se observa semelhança entre os resultados experimentais e de simulação¹; conseqüentemente, ratifica-se a validade da implementação proposta. Ainda, destaca-se que avaliações subjetivas preliminares atestam a eficácia do sistema na atenuação do ruído (veja exemplo dos áudios em [9]).

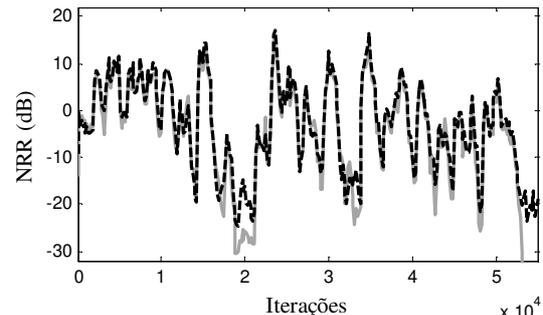


Fig. 3. Curvas de NRR obtidas a partir do resultado de simulação (linha cinza) e do resultado de experimental (linha escura tracejada).

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, foi apresentada a implementação de um sistema de cancelamento adaptativo de ruído com um algoritmo VSS-NLMS de elevada imunidade ao ruído de medição. Para tal, a placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors foi utilizada, a qual possui recursos importantes para a aquisição e síntese de sinais de áudio. Adicionalmente, a IDE Keil μ Vision[®] MDK foi considerada por oferecer bibliotecas e recursos importantes para o desenvolvimento. Comparações de desempenho através de curvas de NRR (*noise reduction ratio*) obtidas a partir de resultados experimentais e de simulação confirmam a eficácia da implementação proposta em termos de atenuação de ruído. Visando dar continuidade ao presente trabalho de pesquisa, pretende-se conduzir avaliações subjetivas mais extensas, incluir uma planta na entrada de referência para emular imperfeições na aquisição dos sinais, bem como construir um arranjo de microfones para integrar ao sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Widrow et al., "Adaptive noise cancelling: Principles and applications," in *Proc. IEEE*, vol. 63, no. 12, pp. 1692-1716, Dec. 1975.
- [2] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2014.
- [3] A. H. Sayed, *Adaptive Filters*. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
- [4] J. G. F. Zipf, O. J. Tobias, and R. Seara, "Non-parametric VSS-NLMS algorithm with control parameter based on the error correlation," in *Proc. IEEE Int. Telecommun. Symp.*, Manaus, AM, Brazil, Sep. 2010, pp. 1-5.
- [5] Cypress Semiconductors, *ARM Cortex-FM4 Starter kit (S6E2CC-ETH)*, Disponível em: <http://www.cypress.com/documentation/development-kitsboards/sk-fm4-1761-s6e2cc-fm4-family-quick-start-guide>
- [6] ARM, *Keil μ Vision[®] MDK*, Disponível em: <https://www.keil.com>
- [7] ITU-T Recommendation G.168 - *Digital Network Echo Cancellers*. Geneva, Switzerland: Int. Telecomm. Union, Apr. 2015.
- [8] ITU-T Recommendation P.50 - *Appendix I: Real speech recordings (Brazilian Portuguese)*, Geneva, Switzerland: Int. Telecomm. Union, 2000.
- [9] R. R. Pertum e E. V. Kuhn. (17 Julho 2018). *Exemplos dos arquivos de áudio utilizados nas avaliações* [Online]. Disponível em: http://lapse.td.utfpr.edu.br/downloads/audios_artigo_sbtr2018.zip

¹ A resposta ao impulso do *codec* de áudio é considerada na simulação a fim de caracterizar adequadamente o comportamento do sistema de ANC implementado na placa de desenvolvimento.