

Implementação prática de algoritmos adaptativos de passo variável em sistemas de cancelamento de ruído

Practical implementation of variable step-size algorithms in noise cancellation systems

Rafael Rodrigo Pertum

pertum@alunos.utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil.

Eduardo Vinicius Kuhn

kuhn@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil.

RESUMO

Este projeto de pesquisa trata da implementação prática de algoritmos adaptativos de passo variável. Para isso, foi utilizada a placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors, a IDE (*integrated development environment*) Keil MDK (*microcontroller development kit*) e o software MATLAB®. Inicialmente, foi realizada na placa de desenvolvimento a implementação de um sistema de cancelamento adaptativo de ruído, utilizando um algoritmo VSS-NLMS (*variable step-size normalized least-mean-square*) desenvolvido por Zipf, Tobias e Seara. Em seguida, foram conduzidas comparações de desempenho entre os resultados obtidos a partir da placa de desenvolvimento e do MATLAB®, as quais confirmam a validade da implementação proposta para sinais de fala por meio da métrica NRR (*noise reduction ratio*). Tendo em vista os resultados alcançados e visando dar continuidade ao projeto, pretende-se agora implementar outros algoritmos adaptativos, incluir uma planta na entrada de referência para emular imperfeições na aquisição dos sinais, bem como realizar testes qualitativos mais extensos.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo VSS-NLMS; filtragem adaptativa; processamento digital de sinais.

ABSTRACT

This research project deals with the practical implementation of variable step-size adaptive algorithms. To this end, the development board Cortex-FM4 Starter from Cypress Semiconductors, the IDE (*integrated development environment*) Keil MDK (*microcontroller development kit*), and the MATLAB® software were used. Firstly, it was carried out in the development board the implementation of an adaptive noise cancelling system, using a VSS-NLMS (*variable step-size normalized least-mean-square*) algorithm introduced by Zipf, Tobias and Seara. Next, performance comparisons between the results obtained from the development board and from MATLAB® were conducted, which confirm the validity of the proposed implementation for speech signals through the NRR (*noise reduction ratio*) metric. Taking into account the results achieved and aiming to go ahead with the present project, the main goals now are to implement others adaptive algorithms, include a plant at the reference input to emulate imperfections on the signal acquisition, as well perform more qualitative tests.

KEYWORDS: VSS-NLMS algorithm; adaptive filtering; digital signal processing.

Recebido: 31 ago. 2018.

Aprovado: 04 out. 2018.

Direito autoral:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

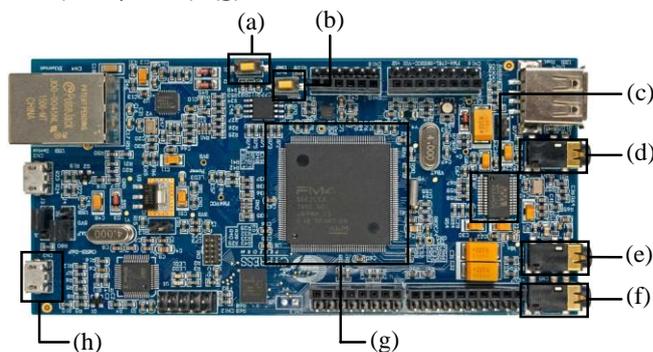
Inicialmente proposto por Widrow et al. (1975), sistemas de cancelamento adaptativo de ruído (*adaptive noise cancelling* - ANC) vem sendo utilizados em diversas aplicações práticas (tais como na redução de eco em circuitos de telefonia de longa distância, bem como no cancelamento de ruído em sinais de áudio/fala). Nessas aplicações, uma réplica do ruído que corrompe o sinal de interesse é sintetizada por meio de um sinal de referência e uma estrutura de filtragem, a qual tem seus coeficientes atualizados por um algoritmo adaptativo (WIDROW; STEARNS, 1985). Dentre os algoritmos comumente utilizados, destacam-se os algoritmos VSS-NLMS (*variable step-size normalized least-mean-squares*), os quais apresentam uma rápida velocidade de convergência associada a um pequeno erro em regime permanente (SAYED, 2008).

Neste contexto, o presente projeto de pesquisa tem por objetivo a implementação prática de relevantes algoritmos adaptativos de passo variável, visando analisar o desempenho desses algoritmos em diferentes cenários de operação, bem como desenvolver de técnicas eficientes de implementação (PERTUM; KUHN, 2017). Nesse sentido, é apresentada aqui a implementação de um sistema de ANC empregando um algoritmo VSS-NLMS introduzido por Zipf, Tobias e Seara (2010), o qual apresenta elevada imunidade ao ruído de medição (KUHN; ZIPF; SEARA, 2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a implementação do sistema de ANC, a placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors foi utilizada. Essa placa (mostrada na Figura 1) possui um microcontrolador ARM® Cortex-M4 S6E2CC operando a 200 MHz, *drivers* e periféricos específicos para processamento digital de sinais (em especial, sinais áudio). A implementação do código foi realizada por meio da IDE (*integrated development environment*) Keil MDK (*microcontroller development kit*) fornecida pela ARM®. Adicionalmente, essa 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 na Figura 2).

Figura 1 – Placa de desenvolvimento ARM Cortex-M4 Starter da Cypress Semiconductors. (a) Botão de propósito geral. (b) Botão de reset. (c) Codec de áudio Wolfson WM8731. (d) Conector P2 de entrada de áudio (*line in*). (e) Conector P2 para microfone. (f) Conector P2 de saída de áudio (*headphone*). (g) Microcontrolador ARM® Cortex-M4 32-bit. (h) Conector USB.



Fonte: Cypress®, adaptado pelo autor (2018).

Figura 2 – Trecho do código da implementação proposta do sistema de ANC.

```
//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);
```

Fonte: Autoria própria (2018).

A topologia adotada para o sistema de ANC é representada na Figura 3. Nessa topologia, uma réplica $\hat{d}(n)$ do ruído $d(n)$ que corrompe o sinal de interesse $s(n)$ é sintetizada na saída do filtro adaptativo, isto é,

$$\hat{d}(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (1)$$

onde $\mathbf{w}(n) = [w_0(n), w_1(n) \dots w_{M-1}(n)]^T$ denota os coeficientes da estrutura transversal de filtragem de ordem M , $\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1) \dots x(n-M+1)]^T$, o vetor contendo as amostras mais recentes do sinal de entrada e $()^T$, o operador de transposição. Logo, o sinal de erro é obtido como

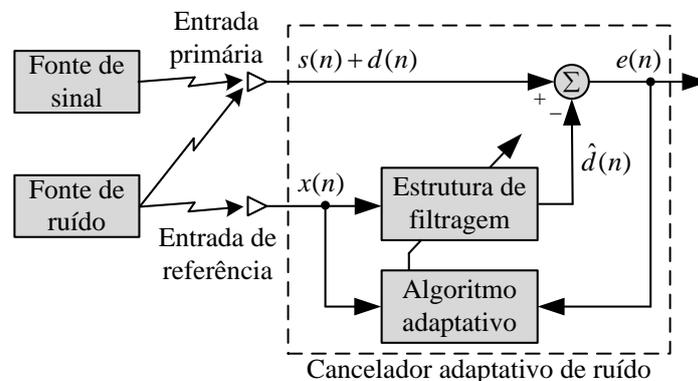
$$e(n) = s(n) + d(n) - \hat{d}(n) \quad (2)$$

ou ainda,

$$e(n) = s(n) + d(n) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n). \quad (3)$$

Note que, conforme os coeficientes $\mathbf{w}(n)$ da estrutura de filtragem convergem para a solução ótima, ou seja, modelam a resposta do meio entre a fonte de ruído e a entrada primária, $\hat{d}(n)$ se aproxima de $d(n)$; conseqüentemente, o sinal de erro $e(n) \rightarrow s(n)$, o que resulta em uma atenuação do ruído na saída do sistema.

Figura 3 – Topologia de um sistema de ANC.



Fonte: Widrow (1985) (adaptado pelo autor).

Para a atualização dos coeficientes da estrutura de filtragem, um algoritmo VSS-NLMS foi utilizado. Em tais algoritmos, a equação de adaptação dos coeficientes é dada por (SHIN; SAYED; SONG, 2004)

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu(n) \frac{\mathbf{x}(n)e(n)}{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n) + \varepsilon} \quad (4)$$

onde ε denota um parâmetro de regularização e $\mu(n)$, a regra de ajuste do passo de adaptação variável. Particularmente para o algoritmo aqui implementado, a regra de ajuste é descrita como (ZIPF; TOBIAS; SEARA, 2010)

$$\mu(n) = \frac{p^2(n)}{q^2(n)} \quad (5)$$

com

$$p(n) = \beta p(n-1) + (1-\beta)e(n)e(n-1) \quad (6)$$

e

$$q(n) = \beta q(n-1) + (1-\beta)e^2(n) \quad (7)$$

sendo $0 \leq \beta < 1$ um parâmetro de regularização.

Observa-se que $p^2(n)$ e $q^2(n)$ são aproximadamente iguais no início do processo de adaptação devido a forte correlação entre $e(n)$ e $e(n-1)$; por consequência, o passo de adaptação $\mu(n)$ tende a um valor unitário. Em contrapartida, quando o algoritmo converge para a solução ótima, $e(n)$ apresenta uma correlação fraca com $e(n-1)$; logo, $p^2(n)$ tende para um valor menor que $q^2(n)$ e, conseqüentemente, $\mu(n)$ se aproxima de zero. A variação de $\mu(n)$ entre os valores 0 e 1 resulta em uma rápida velocidade de convergência no início da adaptação [$\mu(n) \rightarrow 1$] e um erro reduzido em regime permanente [$\mu(n) \rightarrow 0$] (KUHN; ZIPF; SEARA, 2018).

Com o intuito de verificar a validade da implementação proposta, comparações de desempenho entre resultados experimentais (provenientes da placa de desenvolvimento) e de simulação (obtidos via MATLAB®) foram realizadas. Essas comparações foram realizadas por meio da métrica NRR (*noise reduction ratio*) expressa em dB, a qual é definida como

$$\text{NRR}(k) = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{n=kL}^{kL+L-1} [e(n) - s(n)]^2}{d^2(n)} \right\}, \quad k=0, \dots, K-1 \quad (8)$$

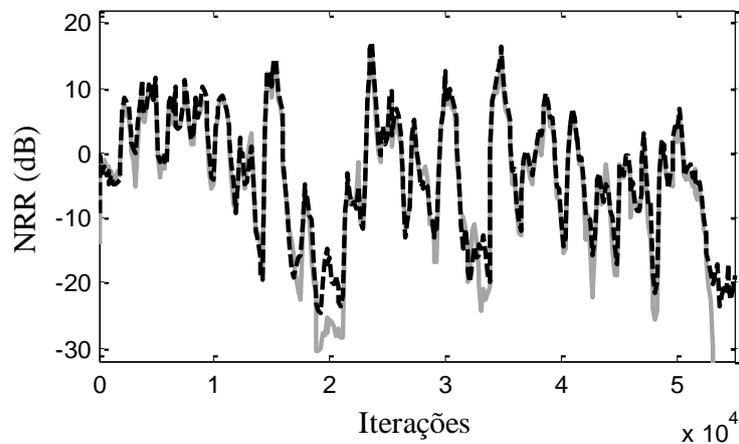
onde L caracteriza o tamanho do quadro de observação utilizado para calcular a média temporal e K , o número de quadros.

Para tal, gerou-se um ruído branco gaussiano com média zero e variância 10^{-2} (entrada de referência), o qual após ser filtrado por uma planta fornecida pela Recomendação G. 168 ITU-T (2015) é adicionado ao sinal de fala disponível na Recomendação P.50 da ITU-T (2000), resultando em uma SNR (*signal-to-noise-ratio*) de 0,3 dB. Esses sinais serviram como entrada para o sistema implementado tanto em MATLAB® quanto na placa de desenvolvimento (o canal esquerdo da *line-in* é usado para a entrada de referência e o direito para a entrada primária). Finalmente, foi realizada a aquisição do sinal de erro observado na saída do sistema, produzindo assim os resultados experimentais e de simulação.

RESULTADOS

Para o algoritmo VSS-NLMS considerado, os valores dos parâmetros foram $M=128$, $\beta = 0,99$ e $\varepsilon = 1$. Além disso, as variáveis do sistema são inicializadas como $\mathbf{w}(0)=\mathbf{0}$, $\mu(0)=0$ e $p(0)=q(0)=0$. Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 4, na qual se observa semelhança entre os resultados experimentais e de simulação; 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 amostras de áudios em (PERTUM; KUHN, 2018)].

Figura 4 – Curvas de NRR obtidas a partir do resultado de simulação (linha cinza) e do resultado de simulação (linha tracejada).



Fonte: Autoria própria (2018).

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada a implementação de um sistema de ANC com um algoritmo VSS-NLMS de elevada imunidade ao ruído de medição. Para tal, a placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors e a IDE Keil μ Vision® MDK foram utilizadas. 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. Ainda, salienta-se que o presente projeto deu origem a um artigo de iniciação científica, ao qual foi publicado no XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (evento científico nacional de grande relevância na área). Por fim, visando dar continuidade ao presente trabalho de pesquisa, pretende-se agora implementar outros algoritmos adaptativos, incluir uma planta na entrada de referência para emular imperfeições na aquisição dos sinais, bem como realizar testes qualitativos mais extensos.



REFERÊNCIAS

KUHN, E. V.; ZIPF, J. G. F.; SEARA, R. On the stochastic modeling of a VSS-NLMS algorithm with high immunity against measurement noise. **Signal Processing**, v. 147, p.120-132, 10 jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.01.014>

PERTUM, R. R.; KUHN, E. V. Implementação prática de algoritmos adaptativos de passo variável em sistemas de cancelamento de ruído. In: XXII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22, 2017, Londrina. **Anais eletrônicos**. Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/paper/view/583>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

PERTUM, R. R.; KUHN, E. V. **Exemplos dos arquivos de áudio utilizados nas avaliações**. Laboratório de Processamento de Sinais e Eletrônica, 2018. Disponível em: <http://lapse.td.utfpr.edu.br/downloads/audios_artigo_sbrt2018.zip>. Acesso em: 30 ago. 2018.

SAYED, A. H. **Adaptive filters**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

SHIN, H.; SAYED, A. H.; SONG, W. Variable Step-Size NLMS and Affine Projection Algorithms. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 11, n. 2, p.132-135, fev. 2004. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lsp.2003.821722>

WIDROW, Bernard et al. Adaptive noise cancelling: Principles and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 63, n. 12, p.1692-1716, 1975. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/proc.1975.10036>

WIDROW, B.; STEARNS, S. D. **Adaptive Signal Processing**. Upper Saddle River: Prentice-Hall Signal Processing Serie, 1985.

ZIPF, J. G. F.; TOBIAS, O. J.; SEARA, R. Non-parametric VSS-NLMS algorithm with control parameter based on the error correlation. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS SYMPOSIUM (ITS), Manaus, AM, Brasil. p. 1-5. 2010.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Fundação Araucária FA – Paraná/Brasil pelo Programa de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).