

Sistema de cancelamento adaptativo de ruído: Implementação e avaliação de desempenho

Adaptive noise cancelling system: Implementation and performance evaluation

RESUMO

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.

O presente projeto de pesquisa trata da implementação e da avaliação de desempenho de um sistema de cancelamento adaptativo de ruído, operando com relevantes algoritmos adaptativos da literatura [isto é, com o NLMS (*normalized least-mean-square*) e três diferentes VSS-NLMS (*variable step-size NLMS*)]. Tal implementação foi realizada em linguagem C utilizando a placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors®, a qual possui recursos para aquisição, síntese e processamento de sinais de áudio. No intuito de avaliar o desempenho dos algoritmos implementados frente a sinais de fala contaminados por ruído, três metodologias foram utilizadas, a saber: *perceptual evaluation of speech quality* (PESQ) para avaliar a qualidade, bem como *short-time objective intelligibility measure* (STOI) e *application programming interface* (API) *speech-to-text* da Google Inc. para avaliar a inteligibilidade. Tais metodologias confirmam a eficácia da implementação proposta frente a diferentes valores de SNR (*signal-to-noise ratio*).

PALAVRAS-CHAVE: Controle de ruído; filtros adaptativos; processamento digital de sinais.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

The present research project deals with the implementation and the performance evaluation of an adaptive noise cancelling system, working with relevant algorithms of the literature [that is, with the NLMS (*normalized least-mean-square*) and three different VSS-NLMS (*variable step-size NLMS*)]. Such implementation was carried out in C language using the Cortex FM4 Starter development board from Cypress Semiconductors®, which has acquisition, synthesis and audio signal processing resources. In order to evaluate the performance of the implemented algorithms dealing with speech signal corrupted by noise, three methodologies were used namely, *perceptual evaluation of speech quality* (PESQ) to evaluate the quality, as well as *short-time objective intelligibility measure* (STOI) and *speech-to-text application programming interface* (API) of Google Inc. to evaluate the intelligibility. These methodologies confirm the effectiveness of the proposed implementation for different SNR (*signal-to-noise ratio*) values

KEYWORDS: Noise control; adaptive filters; digital signal processing.

INTRODUÇÃO

Sistemas de cancelamento adaptativo de ruído (ANC, *adaptive noise cancelling*) são utilizados em diversas aplicações, tal como na supressão de ruído em aparelhos auditivos, celulares e/ou de áudio-conferência (HAYKIN, 2014; SUGIYAMA; MIYAHARA; OOSUGI, 2019). Nessas aplicações, busca-se 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, visto que fontes de ruído podem variar com o tempo, técnicas de filtragem adaptativa são empregadas para sintetizar (em tempo real) uma estimativa do ruído que corrompe o sinal de interesse para, então, atenuá-lo (por subtração) no domínio elétrico (HAYKIN, 2014).

Dentre os algoritmos adaptativos comumente utilizados, destacam-se o algoritmo NLMS (*normalized least-mean-square*) e os algoritmos VSS-NLMS (*variable step-size NLMS*) (HAYKIN, 2014). Em particular, o algoritmo VSS-NLMS desenvolvido por Shin (SHIN; SAYED; SONG, 2004) visa prover uma rápida velocidade de convergência e um baixo erro em regime. No entanto, o funcionamento adequado desse algoritmo requer o ajuste de um elevado número de parâmetros, o que dificulta a sua empregabilidade prática. Para contornar esse problema, um algoritmo VSS-NLMS dito não paramétrico é derivado por Benesty (BENESTY et al., 2006), objetivando aplicações de cancelamento de eco acústico. Todavia, apesar de simulações atestarem seu bom desempenho em termos de velocidade de convergência, capacidade de rastreamento e reduzido erro em regime permanente, o algoritmo depende do conhecimento *a priori* da variância do ruído de medição. Logo, procedimentos precisos para estimar a variância desse ruído se fazem necessários; caso contrário, o desempenho do algoritmo é significativamente comprometido. Ainda, é apresentado por Zipf (ZIPF; TOBIAS; SEARA, 2010) um algoritmo VSS-NLMS baseado na autocorrelação do erro que não depende do conhecimento da variância do ruído de medição. Tal algoritmo possui baixa complexidade computacional e requer o ajuste de um único parâmetro, o qual mostra ter pouco impacto sobre o seu desempenho.

Neste contexto, o presente trabalho de pesquisa tem os seguintes objetivos, a saber: i) realizar a implementação prática de um sistema de ANC através da placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors®; ii) implementar quatro algoritmos adaptativos da literatura, isto é, o algoritmo NLMS bem como os algoritmos VSS NLMS de Shin, Benesty e Zipf; e iii) avaliar o desempenho dos algoritmos considerados, por meio de metodologias objetivas, em termos de qualidade e inteligibilidade de sinais de fala. Vale salientar que o presente trabalho estende os resultados apresentados em (PERTUM; KUHN, 2018), versando agora sobre outros algoritmos adaptativos como também sobre avaliações de desempenho mais abrangentes.

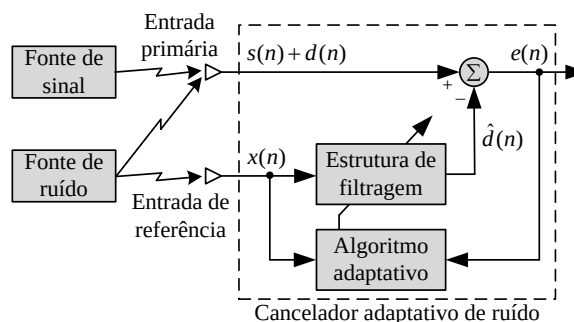
MATERIAIS E MÉTODOS

Em um sistema de ANC (conforme ilustrado na Figura 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, $\hat{d}(n) \rightarrow d(n)$ conforme $n \rightarrow \infty$], o sinal de erro tende para o sinal de interesse [isto é, $e(n) \rightarrow s(n)$ para $n \rightarrow \infty$], produzindo assim a atenuação do ruído na saída do sistema (como desejado).

Figura 1 – Topologia geral de um sistema de ANC.



Fonte: [Adaptado de (WIDROW; STEARNS, 1985)].

O sistema de ANC proposto foi implementado em uma placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors®, a qual possui um microcontrolador ARM® Cortex-M4 S6E2CC operando á 200 MHz. 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).

Para a implementação dos diferentes algoritmos adaptativos, foi considerada a IDE (integrated development environment) Keil μVision® MDK (microcontroller development kit) versão 5 fornecida pela ARM®. Um trecho de código relacionado a implementação do algoritmo NLMS (no sistema de ANC) é mostrada na Figura 2, considerando a linguagem de programação C.

Figura 2 – Trecho de código da implementação do algoritmo NLMS.

```
//cálculo da energia de x[]
arm_power_f32(x,M,&energia);
//produto interno entre w[] e x[]
arm_dot_prod_f32(w,x,M,&d_chapeu);
//determinação do erro
e=d-d_chapeu;
//cálculo do fator de adaptação
arm_scale_f32(x,alfa*e/(energia+ep),fator,M);
//atualiza os coeficientes do filtro
arm_add_f32(w,fator,w,M);
```

Fonte: Autoria própria.

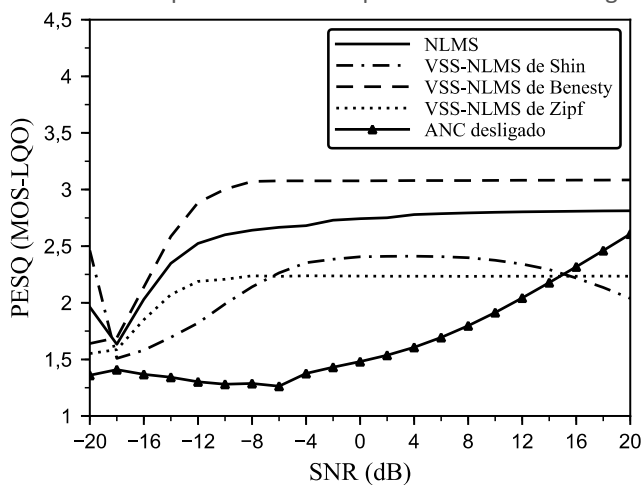
RESULTADOS E DISCUSSÃO

No intuito de avaliar o desempenho dos algoritmos implementados, comparações com respeito à qualidade e inteligibilidade dos sinais de fala originais e processados foram realizadas. A partir da implementação da PESQ fornecida em (ITU-T, 2005), da metodologia STOI disponível em (PARIENTE, 2018) e da API *speech-to-text* da Google Inc. [disponível em (ZANG, 2017)], comparações de desempenho do sistema de ANC operando com os diferentes algoritmos foram obtidas. Uma amostra das comparações realizadas pode ser visualizada nas Figuras 3-5. Essas figuras mostram curvas de desempenho alcançadas a partir de sinais de fala [obtidos de (ITU-T, 2000)] contaminados por ruído branco em uma faixa de -20 dB até 20 dB de SNR (*signal-to-noise ratio*). Especificamente, a Figura 3 traz curvas de qualidade obtidas através da metodologia PESQ, enquanto as Figuras 4 e 5 ilustram curvas de inteligibilidade obtidas através da metodologia STOI e da taxa de acerto no reconhecimento de palavras obtida via API *speech-to-text* do Google Inc. Em tais figuras, observa-se que o algoritmo VSS-NLMS de Benesty exibiu o melhor desempenho em termos de qualidade e inteligibilidade quando comparado com os demais. Além disso, percebe-se que para a faixa de valores de SNR de -16 dB até 12 dB, todos os algoritmos apresentaram desempenho superior de qualidade e/ou inteligibilidade quando comparados com as curvas obtidas com o sistema de ANC desligado.

CONCLUSÃO

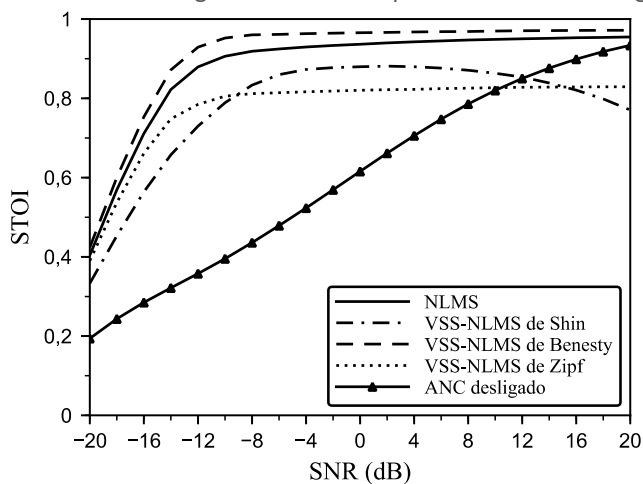
Neste trabalho, a implementação de um sistema de cancelamento adaptativo de ruído (ANC) foi apresentada. Para tal, a placa de desenvolvimento Cortex-FM4 Starter da Cypress Semiconductors® foi utilizada. Nessa implementação, o algoritmo NLMS (*normalized least-mean-square*) e três outros algoritmos VSS-NLMS (*variable step-size NLMS*) foram avaliados em termos de atenuação de ruído envolvendo sinais de fala. Comparações de desempenho através da PESQ (*perceptual evaluation of speech quality*), STOI (*short-time objective intelligibility measure*) e API (*application programming interface*) *speech-to-text* da Google Inc. foram apresentadas e discutidas, confirmando a validade da implementação proposta. Visando dar continuidade ao presente trabalho de pesquisa, pretende-se agora avaliar o desempenho do sistema de ANC proposto operando com sinais de fala contaminados por diferentes tipos de ruído (por exemplo, ruído colorido, balbúrdia e obras em construção), bem como analisar a complexidade computacional e o tempo de convergência dos algoritmos.

Figura 3 – Curvas de qualidade obtidas por meio da metodologia PESQ.



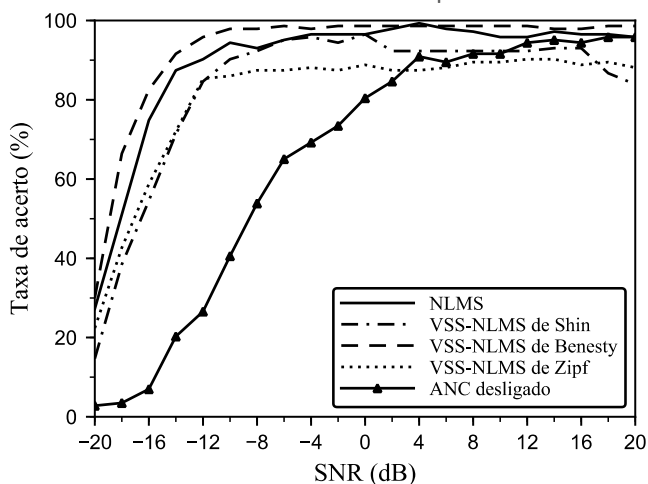
Fonte: Autoria própria.

Figura 4 – Curvas de inteligibilidade obtidas por meio da metodologia STOI.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 - Curvas de inteligibilidade obtidas a partir da taxa de acerto no reconhecimento de palavras via API speech-to-text do Google Inc., considerando um total de 143 palavras corretamente reconhecidas dentre 135 palavras diferentes.



Fonte: Autoria própria.

REFERÊNCIAS

- BENESTY, J. et al. A Nonparametric VSS NLMS Algorithm. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 13, n. 10, p. 581–584, out. 2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1703532/>>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- GOOGLE INC. **Cloud Speech-to-Text**. Disponível em: <<https://cloud.google.com/speech-to-text/>>. Acesso em: 17 jun. 2019.
- HAYKIN, S. **Adaptive Filter Theory**. 5 ed. ed. Upper Saddle River: NJ: Prentice-Hall, 2014.
- ITU-T. **ITU-T Test Signals for Telecommunication Systems**, Geneva, Switzerland: Int. Telecomm. Union, 2000. Disponível em: <<https://www.itu.int/net/itu-t/sigdb/menu.aspx>>. Acesso em: 13 ago. 2019.
- ITU-T. **Recommendation P.862 - Perceptual evaluation of speech quality (PESQ)**, Geneva, Switzerland: Int. Telecomm. Union, 2005. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-P.862>>. Acesso em: 13 ago. 2019.
- PARIENTE, M. FR-J: Laboratoire des Systèmes Perceptifs. (14 de maio 2019). *pystoi*. [Online]. Disponível em: <<https://github.com/mpariente/pystoi>>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- PERTUM, R. R.; KUHN, E. V. Implementação de Sistema de Cancelamento Adaptativo de Ruído utilizando um Algoritmo VSS-NLMS Robusto. In: XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, Campina Grande. **Anais...**, p. 45–46, Campina Grande: 2018. Disponível em: <https://www.dropbox.com/s/89k2t7swo064afk/Anais_SBrT_2018_v2.pdf?dl=0>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- SHIN, H.-C.; SAYED, A. H.; SONG, W.-J. Variable Step-Size NLMS and Affine Projection Algorithms. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 11, n. 2, p. 132–135, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1261961/>>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- SUGIYAMA, A.; MIYAHARA, R.; OOSUGI, K. A Noise Robust Hearable Device with an Adaptive Noise Canceller and Its DSP Implementation. In: ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), **Anais...**IEEE, p. 2722–2726, maio 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8683877/>>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- TAAL, C. H. et al. An Algorithm for Intelligibility Prediction of Time–Frequency Weighted Noisy Speech. **IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing**, v. 19, n. 7, p. 2125–2136, set. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5713237/>>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- WIDROW, B.; STEARNS, S. D. **Adaptive Signal Processing**. [s.l.] Prentice-Hall Signal Processing Series, 1985.
- ZANG, A. **Speech Recognition (Version 3.8) [Software]**, 2017. Disponível em: <https://github.com/Uberi/speech_recognition#readme>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- ZIPF, J. G. F.; TOBIAS, O. J.; SEARA, R. Non-parametric VSS-NLMS algorithm with control parameter based on the error correlation. **IEEE Int. Telecommun. Symp. (ITS)**, n. Its, p. 1–5, 2010. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b50d/c50d9ec28a82eaf2c9fd4bb37920087515f6.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo Programa de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI).