

Uma Análise do Método Cepstral de Cancelamento de Realimentação Acústica

Marcelo Carsten Amaral, Pedro Miguel Rodrigues e Bruno Catarino Bispo

Resumo— Esse trabalho analisa o método cepstral de cancelamento de realimentação acústica. Demonstra-se que o erro do filtro adaptativo é composto pela soma de dois termos. O primeiro é relacionado somente ao caminho de realimentação e tende a zero, convergindo mais rapidamente para valores menores do fator de esquecimento. O segundo é relacionado aos cepstros do sinal de entrada e ao ganho do sistema de sonorização, contendo uma soma ponderada dos cepstros em que as ponderações são potências do fator de esquecimento. Simulações mostraram que, para sinais de fala, a soma ponderada dos cepstros converge, fato preponderante para a convergência do método. A velocidade de convergência, o valor após a convergência e as oscilações ao redor desse valor do segundo termo diminuem com o aumento do fator de esquecimento, comportamentos diretamente refletidos no erro do filtro. Nas primeiras iterações, o primeiro termo tem maior influência. Após algumas iterações, o segundo termo rege o desempenho do método.

Palavras-Chave— Cancelamento de realimentação, método cepstral, AFC-CE, fator de esquecimento, cepstro de fala.

Abstract— This work analyzes the cepstral method for acoustic feedback cancellation. It is shown that the adaptive filter error is composed of the sum of two terms. The first is related only to the feedback path and tends to zero, converging more quickly to smaller values of the forgetting factor. The second is related to the input signal cepstra and the gain of the reinforcement system, containing a weighted sum of the cepstra where the weights are powers of the forgetting factor. Simulations showed that, for speech signals, the weighted sum of the cepstra converges, a preponderant fact for the method convergence. The convergence speed, the value after the convergence and the oscillations around this value of the second term decrease with the increase of the forgetting factor, behaviors directly reflected in the filter error. In the first iterations, the first term has the greatest influence. After a few iterations, the second term governs the method performance.

Keywords— Feedback cancellation, cepstral method, AFC-CE, forgetting factor, speech cepstrum.

I. INTRODUÇÃO

Em um sistema de sonorização, o acoplamento acústico entre o alto-falante e o microfone inevitavelmente faz com que o sinal do alto-falante retorne ao microfone, gerando assim uma malha fechada de sinal. A realimentação acústica afeta o desempenho do sistema de duas maneiras. Em primeiro lugar, o sistema em malha fechada pode apresentar instabilidade, o que pode levar a oscilações que são acusticamente percebidas como apito. Este fenômeno também é conhecido como efeito Larsen [1], [2]. Como consequência, a amplificação alcançável

Marcelo Carsten Amaral e Bruno Catarino Bispo, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, e-mail: marcelo.carsten@grad.ufsc.br, bruno.bispo@ufsc.br; Pedro Miguel Rodrigues, Escola Superior de Biotecnologia, Universidade Católica Portuguesa, Porto, Portugal, e-mail: pmrodrigues@ucp.pt.

é limitada [1], [2]. Em segundo lugar, a qualidade do som é deteriorada por reverberação excessiva.

A fim de controlar o efeito Larsen e aumentar a amplificação alcançável, os métodos de cancelamento de realimentação acústica (AFC) utilizam um filtro adaptativo para estimar o sinal de realimentação e subtraí-lo do sinal do microfone [1], [2]. Mas os algoritmos tradicionais de filtragem adaptativa, que aproximam a solução de Wiener através do gradiente ou mínimos quadrados [3], apresentam desempenho insatisfatório no AFC porque os sinais que agem como entrada e interferência para o filtro são correlacionados [1], [2].

A maioria das soluções para superar este problema introduz um procedimento de decorrelação com o intuito de reduzir a correlação cruzada entre os sinais de entrada e de interferência para o filtro adaptativo [1]. Por outro lado, o método AFC baseado no cepstro do sinal do erro (AFC-CE) explora uma definição desse cepstro em função das respostas ao impulso do caminho de realimentação e do filtro adaptativo para calcular estimativas da primeira e utilizá-la para atualizar o filtro adaptativo [4].

Em [4], [5], ao aplicar o AFC-CE em sinais de fala, observou-se que o desalinhamento entre o filtro adaptativo e o caminho de realimentação acústica apresenta velocidade de convergência e valor após convergência que diminuem com o aumento do fator de esquecimento, parâmetro utilizado na equação de atualização do filtro. Esse fato foi explorado em [5] para desenvolver um fator de esquecimento variante no tempo. Porém, em ambos os trabalhos, nenhuma justificativa foi apresentada para esse comportamento.

Esse trabalho apresenta uma análise sobre a influência do fator de esquecimento e dos cepstros de sinais de fala no desempenho do método AFC-CE. Esse artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção II formaliza a abordagem AFC; a Seção III descreve resumidamente o método AFC-CE; na Seção IV, uma análise do método é apresentada, resultando numa equação do desalinhamento do filtro adaptativo em função do número de iterações do método; a Seção V descreve a configuração do ambiente simulado; na Seção VI, os resultados são apresentados e discutidos; a Seção VII conclui o trabalho.

II. CANCELAMENTO DE REALIMENTAÇÃO ACÚSTICA

A modelagem do cancelamento de realimentação acústica é ilustrada na Figura 1. O sinal de entrada $u(n)$ é o sinal desejado. Por conveniência, assume-se que ele inclui as características do microfone e conversor A/D.

O caminho de realimentação modela o acoplamento acústico entre alto-falante e microfone, e inclui as características do conversor D/A, alto-falante, microfone e conversor A/D. Assumindo linearidade e invariância no tempo, esse caminho

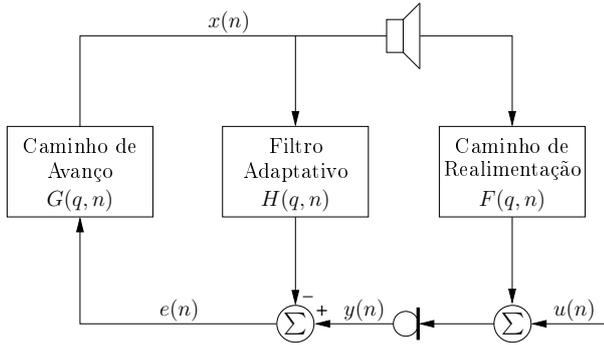


Fig. 1. Cancelamento de realimentação acústica.

é representado pela função de transferência [6]

$$F(q) = f_0 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{N_F} q^{-N_F}, \quad (1)$$

onde q denota o operador de deslocamento tal que $q^{-1}x(n) = x(n-1)$, ou pela resposta ao impulso

$$\mathbf{f} = [f_0 \ f_1 \ \dots \ f_{N_F}]. \quad (2)$$

O caminho de avanço modela o sistema de amplificação e qualquer dispositivo de processamento de sinal inserido nesta parte do sistema. Assumindo linearidade e invariância no tempo, ele é representado pela função de transferência

$$G(q) = g_0 + g_1 q^{-1} + \dots + g_{N_G} q^{-N_G} \quad (3)$$

ou pela resposta ao impulso

$$\mathbf{g} = [g_0 \ g_1 \ \dots \ g_{N_G}]. \quad (4)$$

O critério de estabilidade de Nyquist afirma que o sistema em malha fechada pode se tornar instável se houver pelo menos uma frequência ω para a qual [1]

$$\begin{cases} |G(e^{j\omega})F(e^{j\omega})| \geq 1, \\ \angle G(e^{j\omega})F(e^{j\omega}) = 2k\pi, \ k \in \mathbb{Z}, \end{cases} \quad (5)$$

onde $G(e^{j\omega})$ e $F(e^{j\omega})$ denotam a resposta em frequência dos caminhos de avanço e realimentação, respectivamente. Portanto, se uma componente frequencial não é atenuada e sua fase é deslocada por um múltiplo inteiro de π pela função de transferência de malha aberta do sistema de sonorização, essa componente frequencial nunca desaparecerá do sistema mesmo se o sinal de entrada $u(n)$ não estiver mais presente. Se for amplificada, sua magnitude aumentará após cada *loop* no sistema, levando a um apito naquela frequência [2].

O filtro adaptativo que identifica o caminho de realimentação acústica é representado pela função de transferência variante no tempo [6]

$$H(q, n) = h_0(n) + h_1(n)q^{-1} + \dots + h_{N_H}(n)q^{-N_H} \quad (6)$$

ou pela resposta ao impulso

$$\mathbf{h}(n) = [h_0(n) \ h_1(n) \ \dots \ h_{N_H}(n)]. \quad (7)$$

O sinal de realimentação $\mathbf{f} * x(n)$ é estimado como $\mathbf{h}(n) * x(n)$ e subtraído do sinal do microfone $y(n)$, gerando o sinal de realimentação compensado ou de erro [1]

$$\begin{aligned} e(n) &= y(n) - \mathbf{h}(n) * x(n) \\ &= u(n) + [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)] * x(n), \end{aligned} \quad (8)$$

que é efetivamente o sinal fornecido ao caminho de avanço. Idealmente, $H(q, n) = F(q)$ e $e(n) = u(n)$.

III. MÉTODO AFC-CE

No sistema representado na Figura 1, se $|G(e^{j\omega})[F(e^{j\omega}) - H(e^{j\omega}, n)]| < 1$, condição suficiente para garantir a estabilidade do sistema, então o cepstro de tempo curto do sinal de erro $e(n)$ pode ser definido como [4]

$$\mathbf{c}_e(n) = \mathbf{c}_u(n) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\{\mathbf{g} * [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]\}^{*k}}{k}, \quad (9)$$

onde $\{\cdot\}^{*k}$ denota a k -ésima potência de convolução.

A partir de (9), conclui-se que o cepstro de tempo curto $\mathbf{c}_e(n)$ do sinal de erro é o cepstro de tempo curto $\mathbf{c}_u(n)$ do sinal de entrada do sistema adicionado a uma série em função de \mathbf{g} , \mathbf{f} e $\mathbf{h}(n)$. Essa série é formada por convoluções sucessivas de $\mathbf{g} * [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]$, a resposta ao impulso em malha fechada do sistema de sonorização.

O método AFC-CE calcula o cepstro de tempo curto $\mathbf{c}_e(n)$ do sinal de erro utilizando as L amostras mais recentes de $e(n)$ e uma FFT de N_{FFT} pontos [4]. Então, o método calcula $\{\mathbf{g} * [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]\}^\wedge$, uma estimativa de $\{\mathbf{g} * [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]\}$, ao selecionar as primeiras $N_G + N_F + 1$ amostras de $\mathbf{c}_e(n)$ [4].

O caminho de avanço $G(q)$ pode ser estimado com certa precisão a partir de seus sinais de entrada e saída por um método de identificação de sistemas como um filtro adaptativo. Assim, conhecendo-se \mathbf{g} , o método calcula $[\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]^\wedge$, uma estimativa de $[\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]$, da seguinte maneira [4]

$$[\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]^\wedge = \{\mathbf{g} * [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]\}^\wedge * \mathbf{g}^{-1}. \quad (10)$$

Após isso, o método calcula $\hat{\mathbf{f}}(n)$, uma estimativa de $\mathbf{f}(n)$, a partir de (10) como se segue [4]

$$\hat{\mathbf{f}} = [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]^\wedge + \mathbf{h}(n-1). \quad (11)$$

Por fim, o método atualiza o filtro adaptativo como [4]

$$\mathbf{h}(n) = \lambda \mathbf{h}(n-1) + (1 - \lambda) \hat{\mathbf{f}}, \quad (12)$$

em que $0 \leq \lambda < 1$ é um fator de ponderação exponencial, denominado fator de esquecimento por fazer as estimativas mais antigas terem um efeito cada vez mais insignificante, que controla o compromisso entre robustez a perturbações de curta duração e capacidade de rastreamento do filtro adaptativo.

Portanto, a cada execução, o método AFC-CE obtém uma estimativa de \mathbf{f} para atualizar $\mathbf{h}(n)$. Se \mathbf{f} variar lentamente ao longo do tempo, esse esforço computacional pode não ser vantajoso, em relação ao desempenho, se realizado a cada amostra de $e(n)$. Por isso, na prática, o método é executado a cada N amostras, em que N é o parâmetro que controla o compromisso entre desempenho (latência e capacidade de rastreamento) e complexidade computacional [4].

IV. ANÁLISE DO MÉTODO AFC-CE

Ao estimar $\{\mathbf{g} * [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]\}$ como as primeiras $N_G + N_F + 1$ amostras de $\mathbf{c}_e(n)$, a estimativa é dada por

$$\{\mathbf{g} * [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]\}^\wedge = \mathbf{g} * [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)] + \mathbf{c}_{u0}(n), \quad (13)$$

em que

$$\mathbf{c}_{u0}(n) = \left[c_{u0}(n) \ c_{u1}(n) \ \cdots \ c_{u_{N_F+N_G}}(n) \right]^T \quad (14)$$

são as primeiras $N_G + N_F + 1$ amostras de $\mathbf{c}_u(n)$.

Substituindo (13) em (10), temos que

$$[\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]^\wedge = [\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)] + \mathbf{c}_{u0}(n) * \mathbf{g}^{-1}. \quad (15)$$

Substituindo (15) em (11) e considerando que $\mathbf{h}(n-1) \approx \mathbf{h}(n)$, temos que

$$\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{f} + \mathbf{c}_{u0}(n) * \mathbf{g}^{-1}. \quad (16)$$

O segmento $\mathbf{c}_{u0}(n)$ do cepstro da entrada atua como ruído e impede a estimativa instantânea da resposta ao impulso do caminho de realimentação de atingir seu valor ótimo.

No caso particular do caminho de avanço ser um atraso e um ganho, como definido em (26) e usualmente assumido na literatura, (16) se torna

$$\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{f} + \frac{\mathbf{c}_{u_{N_G}}(n)}{g_{N_G}}, \quad (17)$$

em que

$$\mathbf{c}_{u_{N_G}}(n) = \left[c_{u_{N_G}}(n) \ c_{u_{N_G+1}}(n) \ \cdots \ c_{u_{N_F+N_G}}(n) \right]^T \quad (18)$$

é o segmento de $\mathbf{c}_u(n)$ que está sobreposto a $[\mathbf{f} - \mathbf{h}(n)]$, de interesse.

Denotando \mathbf{c}_{uk} como o segmento $\mathbf{c}_{u_{N_G}}$ na k -ésima execução do método AFC-CE, a resposta ao impulso do filtro na k -ésima execução do método é obtida através da aplicação recursiva de (17) e (12), resultando em

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_k &= (1 - \lambda) (\lambda^{k-1} + \lambda^{k-2} + \dots + 1) \mathbf{f} \\ &+ \frac{1}{g_{N_G}} (1 - \lambda) (\lambda^{k-1} \mathbf{c}_1 + \lambda^{k-2} \mathbf{c}_2 + \dots + \mathbf{c}_k), \end{aligned} \quad (19)$$

que pode ser escrito como

$$\mathbf{h}_k = (1 - \lambda^k) \mathbf{f} + \frac{1}{g_{N_G}} (1 - \lambda) \boldsymbol{\rho}_k, \quad (20)$$

em que

$$\boldsymbol{\rho}_k = \lambda^{k-1} \mathbf{c}_1 + \lambda^{k-2} \mathbf{c}_2 + \dots + \lambda \mathbf{c}_{k-1} + \mathbf{c}_k. \quad (21)$$

A resposta ao impulso do filtro é composta pela soma de duas componentes. A primeira relacionada somente à resposta ao impulso do caminho de realimentação, a qual se deseja estimar. A segunda relacionada somente aos segmentos dos cepstros do sinal de entrada. O fator de esquecimento λ está presente em ambas as componentes.

O desalinhamento, ou erro de estimação, do filtro adaptativo na k -ésima iteração é definido por

$$\boldsymbol{\epsilon}_k = \mathbf{f} - \mathbf{h}_k. \quad (22)$$

Substituindo (20) em (22), o erro de estimação é dado por

$$\boldsymbol{\epsilon}_k = \lambda^k \mathbf{f} - \frac{1}{g_{N_G}} (1 - \lambda) \boldsymbol{\rho}_k. \quad (23)$$

e possui norma limitada superiormente por

$$\|\boldsymbol{\epsilon}_k\| \leq \lambda^k \|\mathbf{f}\| + \frac{1}{g_{N_G}} (1 - \lambda) \|\boldsymbol{\rho}_k\|. \quad (24)$$

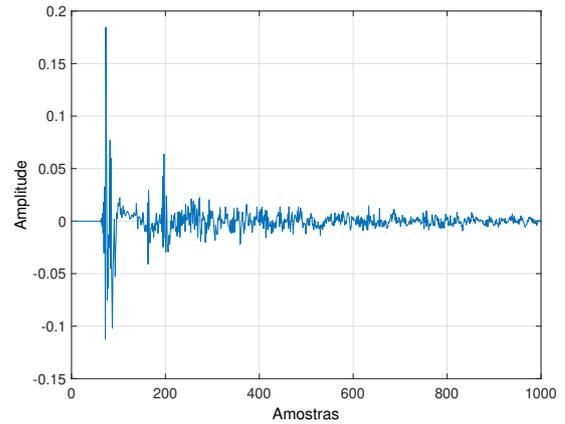


Fig. 2. Resposta ao impulso \mathbf{f} do caminho de realimentação.

Para valores elevados de k , $\lambda^k \mathbf{f} \rightarrow \mathbf{0}$ porque $\lambda < 1$ e, assim, o erro de estimação se reduz a

$$\boldsymbol{\epsilon}_k = -\frac{1}{g_{N_G}} (1 - \lambda) \boldsymbol{\rho}_k. \quad (25)$$

Portanto, após muitas execuções, o erro de estimação do método AFC-CE depende exclusivamente dos cepstros do sinal de entrada do sistema, fator λ e o ganho g_{N_G} .

Com base em (24), será possível analisar a influência do fator de esquecimento λ e dos cepstros do sinal de entrada no desempenho do método AFC-CE ao longo do tempo.

V. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

A. Caminho de Realimentação

A resposta ao impulso \mathbf{f} do caminho de realimentação acústica é uma resposta ao impulso de sala (RIR) disponível em [7]. A RIR teve sua frequência de amostragem reduzida para $f_s = 16$ kHz e foi truncada de forma que $N_F = 1000$. O resultado é exibido na Figura 2.

B. Caminho de Avanço

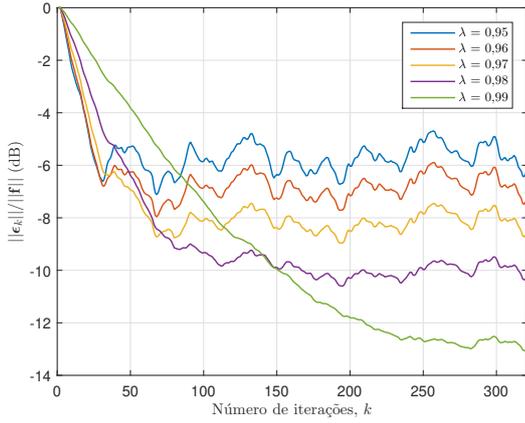
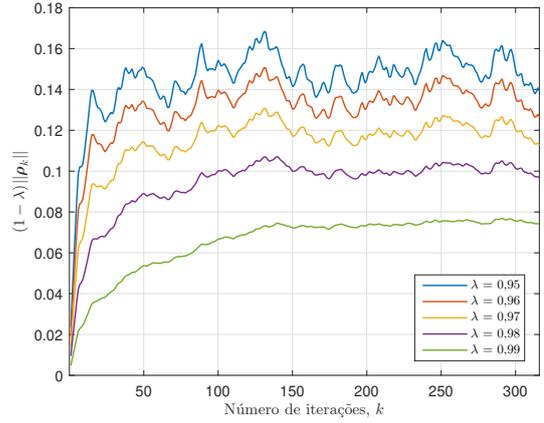
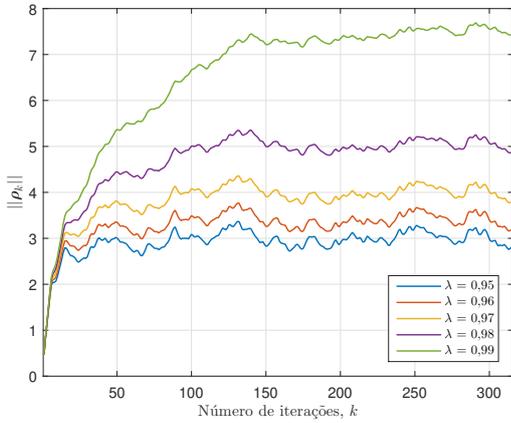
Como em [1], [4], o caminho de avanço foi definido como um atraso de 25 ms e um ganho, isto é,

$$G(q) = g_{N_G} q^{-N_G}, \quad (26)$$

onde $N_G = 400$ e o ganho g_{N_G} foi escolhido de forma que o sistema tenha uma margem de ganho estável igual a 3 dB.

C. Sinal de Fala

O sinal de entrada $u(n)$ foi criado a partir de sinais de fala. Cada sinal contém uma frase curta gravada em um intervalo de tempo de 4 s, a uma taxa de amostragem de 48 kHz e com nível de potência ativa normalizado para -26 dBov de acordo com o algoritmo da ITU-T Rec. P.56. A taxa de amostragem foi reduzida para 16 kHz. Vários sinais do mesmo locutor foram concatenados e os trechos de silêncio provenientes do início e final de cada sinal de fala foram removidos por meio de um detector de atividade de voz.


 Fig. 3. Resultado de $\|\epsilon_k\|/\|\mathbf{f}\|$ para vários valores de λ .

 Fig. 5. Resultado de $(1 - \lambda)\|\rho_k\|$ para vários valores de λ .

 Fig. 4. Resultado de $\|\rho_k\|$ para vários valores de λ .

VI. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desempenho do método AFC-CE com $L = 8000$ e $N = 1000$, como inicialmente proposto, $N_H = N_F$ e $\lambda = \{0,95; 0,96; 0,97; 0,98; 0,99\}$ é ilustrado na Figura 3 por meio do erro de estimação normalizado $\|\epsilon_k\|/\|\mathbf{f}\|$. Observa-se que, ao se aumentar λ , o erro de estimação $\|\epsilon_k\|$ apresenta velocidade de convergência, valor após a convergência e oscilação ao redor do seu valor após a convergência reduzidos. Os motivos para esses comportamentos são analisados e discutidos a partir do limite superior de $\|\epsilon_k\|$, definido em (24).

Uma análise do segundo termo do lado direito de (24) permite avaliar a influência dos cepstros do sinal de entrada no desempenho do método. Nesse sentido, a Figura 4 mostra $\|\rho_k\|$ para $\lambda = \{0,95; 0,96; 0,97; 0,98; 0,99\}$. Algumas observações podem ser feitas a partir dos resultados. O valor de $\|\rho_k\|$ converge após algumas iterações, fato preponderante para a convergência do método exibida na Figura 3. A velocidade de convergência de $\|\rho_k\|$ diminui com o aumento de λ , comportamento semelhante ao apresentado por $\|\epsilon_k\|$. O valor de $\|\rho_k\|$ após sua convergência aumenta com o aumento de λ , comportamento oposto ao observado em $\|\epsilon_k\|$. As oscilações de $\|\rho_k\|$ ao redor do seu valor após convergência são independentes de λ , diferentemente do visto em $\|\epsilon_k\|$.

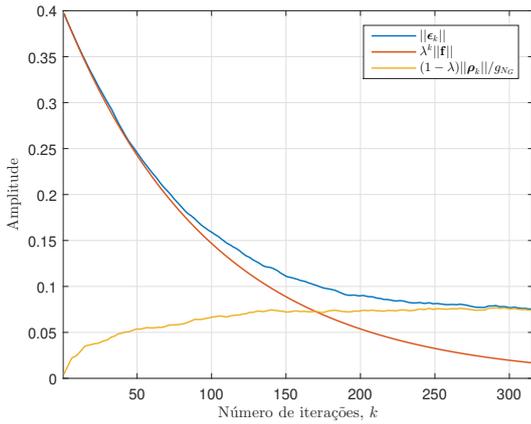
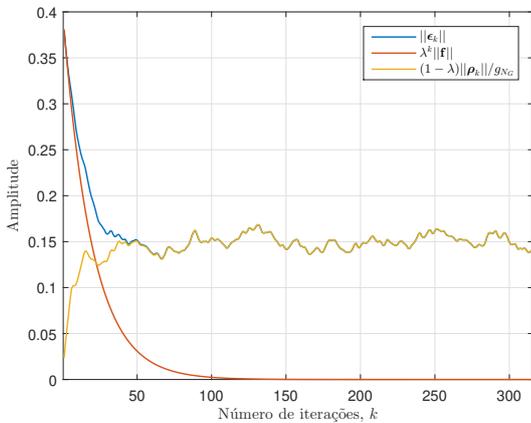
No entanto, como demonstrado em (23), os cepstros do sinal de entrada influenciam o erro de estimação ϵ_k através do termo $(1 - \lambda)\rho_k$. Nesse sentido, a Figura 5 mostra $(1 - \lambda)\|\rho_k\|$ para $\lambda = \{0,95; 0,96; 0,97; 0,98; 0,99\}$. Observa-se que seu valor após convergência diminui com o aumento de λ , comportamento oposto ao visto em $\|\rho_k\|$ (Figura 4), mas semelhante ao visto em $\|\epsilon_k\|$ (Figura 3). Portanto, após convergência, aumentar λ reduz $(1 - \lambda)\|\rho_k\|$ apesar de aumentar $\|\rho_k\|$. Nota-se também que as oscilações de $(1 - \lambda)\|\rho_k\|$ ao redor do seu valor após convergência diminuem com o aumento de λ , semelhantemente ao observado em $\|\epsilon_k\|$. Isso ocorre porque, dado que $\|\rho_k\|$ apresenta oscilações com igual amplitude independentemente de λ , o fator multiplicativo $(1 - \lambda)$ reduz as oscilações de forma mais intensa ao aumentar λ .

Uma análise completa da influência de λ e dos cepstros do sinal de entrada no desempenho do método AFC-CE para $\lambda = 0,99$ e $\lambda = 0,95$ pode ser realizada por meio das Figuras 6 e 7, respectivamente. Essas figuras mostram $\|\epsilon_k\|$, $\lambda^k\|\mathbf{f}\|$ e $(1 - \lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$, onde os dois últimos são os termos do limite superior de $\|\epsilon_k\|$ definido em (24). Ressalta-se que g_{N_G} é apenas um fator de ganho que afeta igualmente os dois casos.

Para $\lambda = 0,99$, observa-se que $(1 - \lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$ converge após aproximadamente 250 iterações e que, apesar de atingir valores pequenos, $\lambda^k\|\mathbf{f}\|$ não se torna nulo mesmo após 320 iterações. A lenta convergência desses dois termos resulta na baixa velocidade de convergência de $\|\epsilon_k\|$. Confirma-se que, como descrito em (25), $\|\epsilon_k\|$ converge para $(1 - \lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$ à medida que o número de execuções k do método aumenta.

Para $\lambda = 0,95$, observa-se uma convergência mais rápida de $\lambda^k\|\mathbf{f}\|$ e, como demonstrado anteriormente, de $(1 - \lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$. Nesse caso, $(1 - \lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$ converge e $\lambda^k\|\mathbf{f}\|$ se torna nulo após aproximadamente 50 e 100 iterações, respectivamente. Isso resulta numa convergência mais rápida de $\|\epsilon_k\|$. Por outro lado, devido ao menor valor de λ , ocorre um aumento no valor de $(1 - \lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$ após a convergência como discutido anteriormente. Isso resulta num aumento de $\|\epsilon_k\|$ após convergência. De forma geral, como observado na Figura 3, tanto a velocidade de convergência quanto o valor após convergência do erro de estimação $\|\epsilon_k\|$ serão tão maiores quanto menor for o fator de esquecimento λ .

Além disso, uma vez $\lambda^k\|\mathbf{f}\|$ apresenta um decaimento

Fig. 6. Resultado de $\|\epsilon_k\|$, $\lambda^k\|\mathbf{f}\|$ e $(1-\lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$ para $\lambda = 0,99$.Fig. 7. Resultado de $\|\epsilon_k\|$, $\lambda^k\|\mathbf{f}\|$ e $(1-\lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$ para $\lambda = 0,95$.

suave, as oscilações presentes $\|\epsilon_k\|$, principalmente ao redor do seu valor após convergência, são causadas exclusivamente pelas oscilações de $\|\rho_k\|$, demonstradas anteriormente. Com a diminuição de λ , as oscilações de $\|\epsilon_k\|$ ao redor do seu valor após convergência se intensificam devido ao aumento das oscilações de $\|\rho_k\|$, como discutido anteriormente.

Nas primeiras iterações do método, observa-se que $\|\epsilon_k\|$ apresenta valores consideravelmente inferiores para $\lambda = 0,95$. Isso ocorre porque $\lambda^k\|\mathbf{f}\| \rightarrow 0$ para $\lambda = 0,95$ muito mais rapidamente do que para $\lambda = 0,99$. Portanto, nas primeiras iterações, o termo $\lambda^k\|\mathbf{f}\|$ tem maior influência no desempenho do método. Após algumas iterações, o termo $(1-\lambda)\|\rho_k\|/g_{N_G}$ rege o desempenho do método AFC-CE.

VII. CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou uma análise sobre a influência do fator de esquecimento e dos cepstros do sinal de entrada do sistema de sonorização no desempenho do método AFC-CE. Considerou-se um caminho de realimentação invariante no tempo e um caminho de avanço definido como um atraso e um ganho, como normalmente realizado na literatura.

Uma equação para o erro da resposta ao impulso do filtro adaptativo em função do número de iterações do método foi

formulada. Demonstrou-se que ela é composta pela soma de dois termos. O primeiro é relacionado somente à resposta ao impulso do caminho de realimentação e tende a zero à medida que o número de iterações aumenta, convergindo mais rapidamente para menores valores do fator de esquecimento. O segundo é relacionado aos cepstros do sinal de entrada e ao ganho, contendo uma soma ponderada dos cepstros onde as ponderações são potências do fator de esquecimento.

Simulações mostraram que, para sinais de fala, a média ponderada dos cepstros converge, fato preponderante para a convergência do método. A velocidade de convergência, o valor após a convergência e as oscilações ao redor desse valor do segundo termo diminuem com o aumento do fator de esquecimento, comportamentos diretamente refletidos no erro do filtro. Nas primeiras iterações, o primeiro termo tem maior influência. Após algumas iterações, o segundo termo rege o desempenho do método.

REFERÊNCIAS

- [1] T. van Waterschoot and M. Moonen, "Fifty years of acoustic feedback control: state of the art and future challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 2, pp. 288–327, Feb. 2011.
- [2] B. C. Bispo, C. F. Yamamura, W. M. da Silva Nogueira, E. A. R. Theodoro, and P. M. Rodrigues, "Analysis of acoustic feedback cancellation systems based on direct closed-loop identification," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 217–229, Aug. 2020.
- [3] P. S. R. Diniz, *Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation*, 4th ed. New York, New York: Springer Science+Business Media, 2013.
- [4] B. C. Bispo and D. R. S. Freitas, "On the use of cepstral analysis in acoustic feedback cancellation," *Digital Signal Processing*, vol. 44, pp. 88–101, Sep. 2015.
- [5] W. M. da Silva Nogueira, C. F. Yamamura, B. C. Bispo, E. A. R. Theodoro, and P. M. Rodrigues, "Algoritmo para o fator de esquecimento do método cepstral de cancelamento de realimentação acústica," in *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, Campina Grande, Brazil, Sep. 2018, pp. 784–788.
- [6] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [7] M. Jeub, M. Schäfer, and P. Vary, "A binaural room impulse response database for the evaluation of dereverberation algorithms," in *Proceedings of International Conference on Digital Signal Processing*, Santorini, Greece, Jul. 2009.