



## Filtragem Adaptativa - TIP 7188

Prof. Dr. Charles Casimiro Cavalcante  
Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto

Período: 2022.2

### *Lista de Exercícios No. 3: Algoritmos Recursivos*

- 1. (Algoritmo LMF)** Deseja-se minimizar a função objetivo  $E\{e^4(n)\}$  utilizando-se um algoritmo do gradiente estocástico do tipo LMS. O algoritmo resultando é chamado de algoritmo *least mean fourth* (LMF). Derive tal algoritmo. Derive também o filtro ótimo para tal critério e compare as soluções.
- 2. (Algoritmo LMS)** Considere o uso de um a sequência de ruído branco com média nula e variância  $\sigma^2$  como entrada do algoritmo LMS. Avalie
  - (a) a condição para convergência do algoritmo em média quadrática;
  - (b) o erro em excesso em média quadrática.
- 3. (Algoritmo LMS Normalizado)** Avalie a questão anterior para o caso do algoritmo LMS-Normalizado. Compare os dois casos.
- 4. (Equalização de canais)** Considere um sinal branco gaussiano de variância unitária transmitido por um canal de comunicação de função de transferência  $H(z) = 1 + 1.6z^{-1}$ . Para compensar este canal utiliza-se um equalizador dado por  $W(z) = w_0 + w_1z^{-1}$ .
  - (a) Forneça o equalizador ótimo segundo o critério de Wiener. Esboce a posição dos zeros do canal e do equalizador no plano  $Z$ .
  - (b) Obtenha o filtro de erro de predição direta de passo unitário, correspondente ao sinal à saída do canal. Calcule os zeros deste filtro e compare com os do equalizador.
  - (c) Obtenha as trajetórias sobre as curvas de nível, tendo condições iniciais nulas para os coeficientes do equalizador, para os seguintes algoritmos
    - (a) Gradiente determinístico;
    - (b) Algoritmo de Newton;
    - (c) LMS;
    - (d) LMS-normalizado;
  - (d) Obtenha também a evolução do erro quadrático médio para cada um dos algoritmos anteriores.
  - (e) Qual o número de condicionamento para o problema em questão?
  - (f) Qual deveria ser o canal para que o número de condicionamento fosse menor/maior que 5? Comente os resultados.
- 5. (Identificação de sistemas)** Utilize o algoritmo LMS para identificar um sistema com a função de transferência dada abaixo.

$$H(z) = \frac{1 - z^{-12}}{1 - z^{-1}}$$

O sinal de entrada é um ruído branco distribuído uniformemente com variância  $\sigma_x^2 = 1$ , e o ruído de medida é assumido gaussiano branco descorrelacionado da entrada e com variância ~~de entrada~~  $\sigma_v^2 = 10^{-3}$ . O filtro adaptativo tem 12 coeficientes.

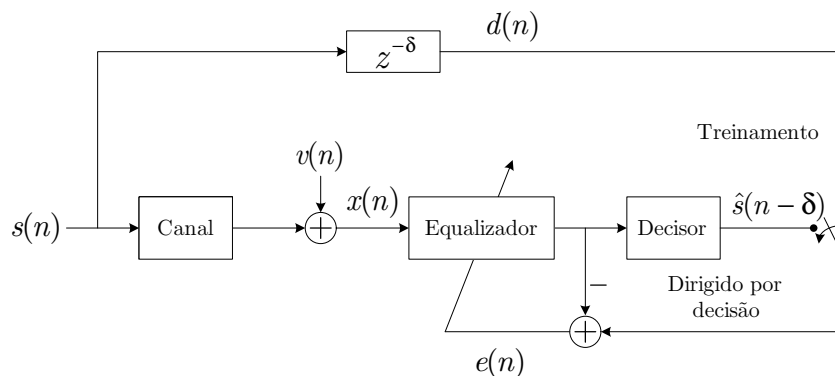
- (a) Calcule o limite superior para  $\mu$  (ou seja  $\mu_{\max}$ ) para garantir a estabilidade do algoritmo.

- Execute o algoritmo para  $\frac{\mu_{\max}}{2}$ ,  $\frac{\mu_{\max}}{10}$  e  $\frac{\mu_{\max}}{50}$ . Comente sobre o comportamento da convergência de cada caso.
- Meça o desajuste (*misadjustment*) em cada exemplo e compare com os resultados obtidos pela solução teórica (Eq. (3.50) do livro texto)
- Mostre o gráfico da resposta em frequência do filtro FIR em qualquer uma das iterações após a convergência ser obtida e compare com o sistema desconhecido.

**6. (Equalização adaptativa)** Seja o canal de comunicações dado por

$$H(z) = 0.5 + 1.2z^{-1} + 1.5z^{-2} - z^{-3}$$

e deseja-se projetar um equalizador para o mesmo. A estrutura do equalizador é mostrada na Figura 1. Os símbolos  $s(n)$  são transmitidos através de um canal e corrompidos por ruído aditivo gaussiano branco complexo  $v(n)$ . O sinal recebido  $x(n)$  é processado pelo equalizador FIR para gerar estimativas  $\tilde{s}(n - \delta)$ , as quais são passadas por um dispositivo decisor gerando símbolos  $\hat{s}(n - \delta)$ . O equalizador possui dois modos de operação: um modo de treinamento durante o qual uma versão atrasada e replicada da sequência de entrada é usada como o sinal de referência (desejado) e um modo dirigido por decisão no qual a saída do dispositivo de decisão substitui a sequência de referência. O sinal de entrada  $s(n)$  é escolhido de uma constelação QAM (por exemplo, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM ou 256-QAM).



**Figure 1:** Equalizador linear adaptativo operando em dois modos: modo de treinamento e modo dirigido por decisão.

- Faça um programa que treine o filtro adaptativo com 500 símbolos de uma constelação 4-QAM, seguindo de uma operação dirigida por decisão de 5000 símbolos de uma constelação 16-QAM. Escolha a variância do ruído  $\sigma_v^2$  de maneira que ela promova uma relação sinal ruído de 30 dB na entrada do equalizador. Note que os símbolos escolhidos não têm variância unitária. Por esta razão, a a variância do ruído necessita ser ajustada adequadamente para cada uma das diferentes modulações (constelações) QAM para fornecer o nível de SNR desejado. Escolha  $\delta = 15$  e o comprimento do equalizador  $M = 15$ . Mostre os gráficos da evolução temporal de  $s(n)$ ,  $x(n)$  e  $\tilde{s}(n - \delta)$ . Use o LMS-normalizado com um fator de passo de  $\mu = 0.4$ .
- Para os mesmos parâmetros do item (a), plote e compare os gráficos de evolução que seriam resultante se o equalizador fosse treinado com 150, 300 e 500 iterações. Use o LMS com  $\mu = 0.001$ .
- Assuma agora que os dados transmitidos foram gerados de uma constelação 256-QAM ao invés de 16-QAM. Plote os gráficos da evolução do sinal na saída do equalizador quando treinado usando o LMS-normalizado e 500 símbolos de treinamento.
- Gerar as curvas de taxa de erro de símbolo (SER, do inglês *Symbol Error Rate*) versus SNR na entrada do equalizador para símbolos de constelações 4, 16, 64 e 256-QAM. Faça SNR variar de 5 dB a 30 dB.