



TÉCNICO
LISBOA

ELETRÓNICA GERAL

3º TRABALHO DE LABORATÓRIO

FILTRO ADAPTATIVO

1º SEMESTRE 2020/2021

JOSÉ GERALD

JULHO 2020

1. Introdução

Este trabalho consta da simulação em computador (programa Matlab com Simulink) de um filtro adaptativo FIR transversal com algoritmo LMS desempenhando as funções de um cancelador de eco num sistema de transmissão de dados em banda de base.

Com este trabalho, procura-se que os alunos adquiram experiência e conhecimentos no âmbito dos filtros adaptativos, nomeadamente em questões relevantes como o peso computacional do filtro, a velocidade de adaptação, a estabilidade do algoritmo, o erro residual, entre outras.

1.1 Filtros Adaptativos

De uma forma genérica podemos definir os filtros adaptativos como sistemas (contínuos ou discretos) cujos parâmetros variam no tempo e apresentam as seguintes características:

- Adaptação automática (auto-otimização);
- Possibilidade de treino, para filtragens específicas;
- Não necessitam de procedimentos relativos à síntese (problema da aproximação);
- Podem identificar modelos, após um período de treino;
- Repararam-se a si próprios;
- Em geral, podem considerar-se sistemas não lineares de parâmetros variáveis no tempo;
- São mais difíceis de analisar que os filtros não adaptativos, mas possibilitam um melhor desempenho quando o sinal de entrada tem características desconhecidas ou variantes no tempo.

Os filtros adaptativos tiveram um importante incremento com o aparecimento da tecnologia digital (finais dos anos 70, princípio dos anos 80). Este facto deve-se ao problema de implementar grandes atrasos em tecnologia analógica. Com o advento dos processadores digitais de sinal (DSPs – “Digital Signal Processors”), o campo de aplicação da filtragem adaptativa começou a alargar os seus horizontes, e ainda hoje continua a expandir-se, invadindo o domínio clássico dos filtros não adaptativos, à medida que a tecnologia permite um maior peso computacional ser executado em menor tempo.

São atualmente áreas típicas de aplicação de filtragem adaptativa as áreas:

- Igualização para transmissão de dados;
- Identificação de sistemas;
- Detecção de sinais;
- Digitalização e síntese de voz;
- Cancelamento de eco;
- Cancelamento de ruído acústico;
- Branqueamento espectral.

1.2 Algoritmos de Adaptação

O algoritmo de adaptação dos coeficientes do filtro adaptativo é um dos blocos de processamento mais determinante do desempenho do filtro. Dele dependem essencialmente a velocidade de convergência, o erro residual, a estabilidade do processo de adaptação e o peso computacional. A escolha do algoritmo é essencialmente condicionada pela sua viabilidade de implementação com a tecnologia atual, no sistema em causa. Este facto é tanto mais verdade quanto se trata de aplicações de alta frequência em tempo real, como acontece atualmente nas redes de dados.

Existem atualmente duas grandes famílias de algoritmos para filtragem adaptativa: os *algoritmos de gradiente* e os *algoritmos de mínimos quadrados*. Enquanto os primeiros, por serem mais simples, foram (e ainda são) os mais utilizados na prática, os segundos, pelo atual rápido desenvolvimento da tecnologia, são certamente os algoritmos do futuro.

Os *algoritmos de gradiente* minimizam o valor quadrático médio do erro, são baseados no filtro de Wiener e, como tal, estimam o gradiente das superfícies de nível. Estes algoritmos apresentam baixa complexidade mas, para filtros recursivos, são sensíveis a mínimos locais das superfícies de erro. São exemplo destes algoritmos o algoritmo *LMS (Least Mean Squares)* e todas as suas simplificações, como, por exemplo, os vários *algoritmos de sinal*.

Os *algoritmos de mínimos quadrados* minimizam a soma dos quadrados dos erros, são baseados no filtro de Kalman e são determinísticos. Apresentam maior complexidade e, por vezes, problemas de estabilidade, mas possuem maior rapidez de convergência e não são sensíveis a mínimos locais das superfícies de erro. São exemplo destes algoritmos o algoritmo *RLS (Recursive Least Squares)* e as suas variantes, como, por exemplo, o algoritmo *Fast Kalman*.

2. Sistema de Transmissão de Dados

Um sistema elementar de transmissão de dados em banda de base encontra-se representado na Fig. 2.1. O sistema é composto por um emissor/recetor local, uma linha de transmissão e um emissor/recetor remoto (idêntico ao emissor/recetor local).

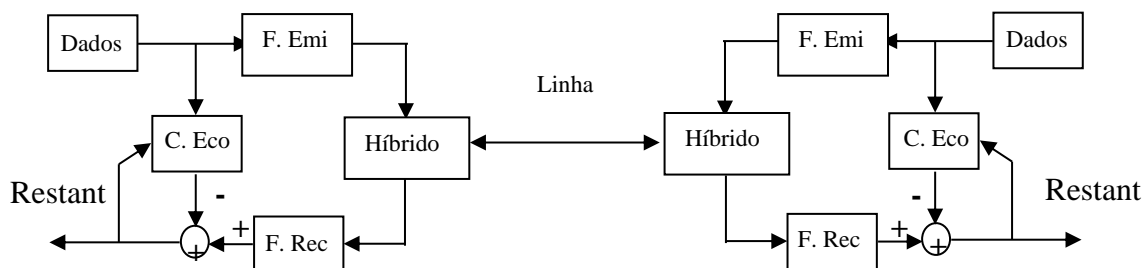


Fig. 2.1 – Sistema de transmissão de dados.

2.1 Gerador de Dados (Dados)

A função deste bloco de processamento é fornecer os dados a serem emitidos. Num sistema real, uma vez que os dados raramente apresentam a propriedade desejável de serem aleatórios, este bloco é seguido de um baralhador de dados (*scrambler*). No

presente caso, o gerador de dados é composto por um gerador elementar de dados binários (por exemplo, um gerador de onda quadrada) e por um baralhador de dados (que obedece a um polinómio estipulado), constituindo, deste modo, um gerador de dados aleatórios. O formato dos dados deverá ser NRZ com valores de +1 e -1.

2.2 Filtro de Emissão e Receção (F. Emi e F. Rec)

Um dos problemas mais comuns na transmissão de dados, devido não só à impossibilidade de gerar impulsos retangulares perfeitos, mas também à memória dos dispositivos e do canal de transmissão, é a interferência intersimbólica (*ISI – Inter-Symbol Interference*). Desta forma, é necessário incluir nos sistemas reais um filtro de emissão que reduz esta interferência. Usualmente são adotados filtros do tipo “raised cosine” ou do tipo “sinc(x)”.

Também, na receção, são necessários filtros não só para eliminar o ruído fora de banda, mas também (principalmente nos sistemas mais recentes) igualizar o canal de transmissão. Para os primeiros são adotados filtros clássicos de eliminação de espectro (algumas das vezes também “anti-aliasing”) e para os segundos são adotados igualizadores adaptativos.

2.3 Híbrido

Na Fig. 2.1, o sistema funciona a 4 fios para os emissores/recetores e a 2 fios na linha de transmissão. A passagem de 4 para 2 fios (e vice-versa) é realizada por circuitos chamados *híbridos* pela sua tecnologia mista de implementação. Estes circuitos são dimensionados por critérios de compromisso, por forma a obedecerem às características médias dos sistemas onde se inserem, donde resulta geralmente uma adaptação imperfeita. Devido a este facto, parte do sinal a ser enviado é refletido dando origem ao que se designa por eco.

2.4 Cancelador de Eco (C. Eco)

Nos sistemas de transmissão a longa distância (voz ou dados), existem quase sempre troços de sinal a 2 fios alternando com troços de sinal a 4 fios, interligados por híbridos que dão origem a ecos. Se a transmissão for “full-duplex” e os sinais emitido e recebido ocuparem a mesma banda de frequência, o recetor tem que ser capaz de separar os dois sinais. A utilização de um cancelador de eco adaptativo revelou-se o método mais eficaz para ritmos de transmissão elevados.

Na Fig. 2.2 encontra-se uma representação de um sistema de transmissão, onde se assinalam os ecos produzidos nos diversos híbridos pelo sinal proveniente do Emissor A.

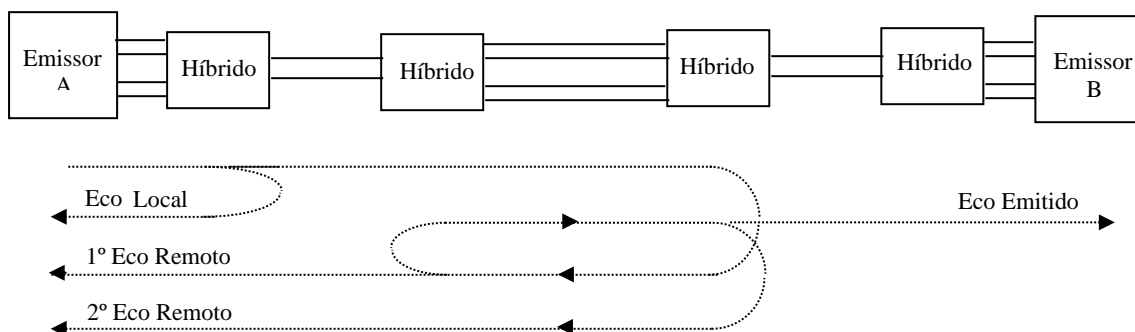


Fig. 2.2 – Ecos do sinal proveniente do Emissor A.

Para um sistema de transmissão de dados, o eco importante é o eco local, gerado no híbrido local, pela sua grande amplitude (pode estar mais de 40 dB acima do sinal recebido do emissor remoto), o que provoca erros nos discriminadores de nível de sinal. Para os sistemas de transmissão de voz, o eco importante é o eco remoto, gerado nos híbridos remotos, pelo seu grande atraso (nas transmissões via satélite pode chegar a mais de 0,6 s), o que baralha o cérebro humano, incapaz de correlacionar facilmente sinais idênticos separados de mais de 0,5 s.

O cancelador de eco é constituído por um filtro adaptativo a funcionar em modo de identificação, que no caso da transmissão de dados é colocado nos emissores/recetores terminais. No presente caso, o cancelador é implementado recorrendo à estrutura FIR transversal adaptativa. O diagrama de blocos desta estrutura encontra-se representado na Fig. 2.3, onde x_k representa o sinal de dados de entrada e que vai dar origem ao eco, c_i representa o coeficientes adaptativo da baixada i do filtro, y_k representa o sinal de erro que vai servir para adaptar o filtro (e é enviado para o restante recetor), e_k e \hat{e}_k representam o sinal de eco e a sua estimativa, respetivamente, e $H(z)$ representa a função de sistema do caminho do eco, que o filtro tem que identificar.

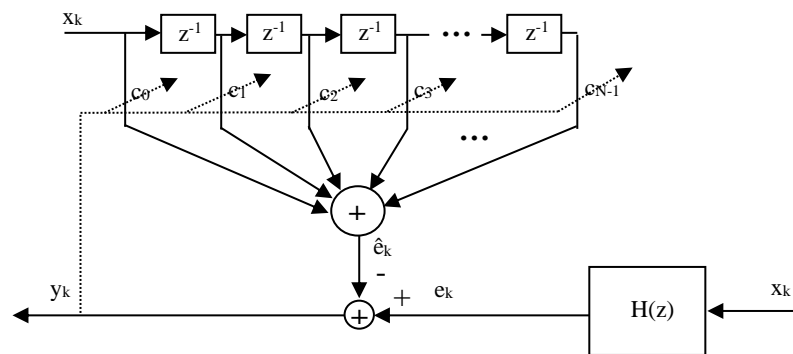


Fig. 2.3 – Estrutura do cancelador de eco.

3. Algoritmo LMS

O algoritmo *LMS* (*Least Mean Squares*) é atualmente um dos algoritmos mais utilizados pela sua simplicidade e robustez. Como algoritmo de gradiente, tem um peso computacional reduzido, o que o torna adequado nas aplicações de tempo real onde a frequência de amostragem se requer elevada. Quando aplicado a um filtro FIR transversal, forma um conjunto robusto do ponto de vista de estabilidade do processo de adaptação e apresenta uma rapidez de convergência moderada, que é adequada a muitas aplicações.

O algoritmo *LMS* (também designado por *Algoritmo do Gradiente Estocástico*) resulta de uma simplificação do algoritmo mais exato conhecido por *Algoritmo do Gradiente Determinístico*. A simplificação consiste em, no cálculo do gradiente, tomar o valor instantâneo do erro quadrático, y_k^2 , como estimativa do seu valor médio estatístico.

De acordo com o algoritmo LMS, a atualização dos coeficientes, que é realizada em todas as iterações (uma iteração do filtro corresponde no presente trabalho a um período de dados), é efetuada segundo

$$c_{i,k+1} = c_{i,k} + 2 \mu y_k x_{k-i}$$

onde $c_{i,k}$ representa o coeficiente da baixada i para a iteração k , μ é o passo de adaptação que regula a rapidez de convergência (condicionando também a estabilidade do algoritmo e o erro residual), y_k é o erro instantâneo, e x_{k-i} é a amostra do sinal de entrada do filtro que se encontra na baixada i para a iteração k .

4. Sistema de Teste do Filtro Adaptativo

Com base no sistema apresentado atrás, vai-se simular um sistema de teste para um filtro FIR transversal adaptativo, a funcionar como cancelador de eco num sistema simplificado de transmissão de dados em banda de base.

4.1 Arquitetura do Sistema

O diagrama de blocos de um sistema de teste encontra-se representado na Fig. 4.1.

O emissor/recetor remoto e o canal encontram-se reduzidos aos blocos de processamento de sinal responsáveis pela geração de ruído que se somará ao eco no recetor local (gerador de dados remoto e amplificador de ganho G). De facto, para efeitos do cancelador de eco, todo o sinal recebido pelo recetor local para além do sinal de eco é considerado ruído. Estão nestas condições não só o ruído propriamente dito, mas também o sinal proveniente do emissor remoto.

Também, a indefinição do instante de amostragem no recetor pode ocasionar erros graves (por exemplo, amostrar-se o sinal recebido no instante de transição entre dados). Este problema é facilmente resolvido com a utilização da técnica de sobreamostragem no recetor. Esta técnica consiste em utilizar uma frequência de amostragem superior à frequência de Nyquist, o que resulta na obtenção de mais do que uma amostra por dado. É usual utilizar 2 amostras por dado (amostra par e amostra ímpar). Desta forma, o cancelador de eco é dividido em 2 subcanceladores de eco (SC. Eco 1 e SC. Eco 2) a operar em paralelo (um para as amostras pares e outro para as amostras ímpares). O sistema de teste funciona, assim, a um ritmo duplo do ritmo de dados nos troços de processamento de sinal correspondentes ao filtro de emissão – híbrido – filtro de receção e amplificador de ganho – filtro de receção.

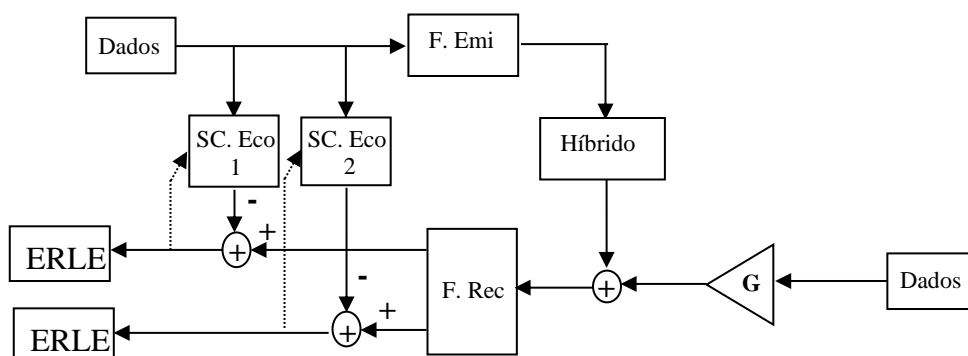


Fig. 4.1 – Diagrama de blocos de um sistema de teste.

Gerador de Dados – O gerador de dados aleatórios (bloco Dados), cujo diagrama de blocos se encontra representado na Fig. 4.2, é composto por um gerador de onda quadrada seguido de um baralhador de dados. No presente caso o baralhador de dados corresponde

ao polinómio $1+x^3+x^5$ para o emissor local e $1+x^5+x^7$ para o emissor remoto, a que correspondem as operações

$$y(t) = x(t) \oplus y(t-3T) \oplus y(t-5T)$$

$$y(t) = x(t) \oplus y(t-5T) \oplus y(t-7T)$$

respetivamente, onde T representa o período dos dados e \oplus a operação lógica “ou-exclusivo”.

De notar, que os dados à saída do gerador de dados aleatórios devem ter níveis $+1$ e -1 , pelo que é necessário um conversor de nível.

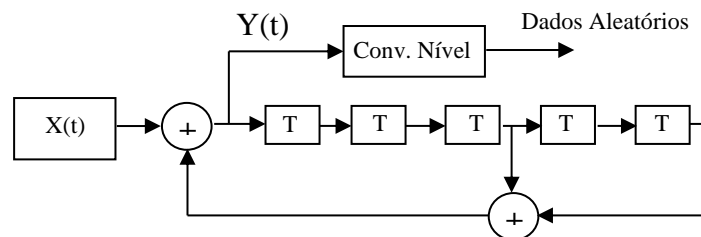


Fig. 4.2 – Diagrama de blocos do baralhador de dados do emissor local.

Filtro de Emissão – O filtro de emissão é realizado por um filtro FIR transversal de 14ª ordem com uma resposta impulsional do tipo $\sin(x)/x$, com a baixada do meio como baixada principal.

De notar, que este bloco fornece amostras com um ritmo igual ao dobro do ritmo de dados de entrada.

Os coeficientes do filtro de emissão encontram-se representados na Tabela 1.

Baixada	Coeficiente
0	-0,0905
1	0
2	0,12732
3	0
4	-0,21221
5	0
6	0,63662
7	1
8	0,63662
9	0
10	-0,21221
11	0

12	0,12732
13	0
14	-0,0905

Tabela 1 – Coeficientes do filtro de emissão.

Híbrido – Este circuito é realizado por um filtro de estrutura idêntica à adotada para o filtro adaptativo, por ser mais direta a análise dos resultados deste (em especial, se for omitido o filtro de emissão). Desta forma, o híbrido é realizado por um filtro FIR transversal de 9ª ordem a operar ao dobro do ritmo de dados. Os respetivos coeficientes encontram-se representados na Tabela 2.

Filtro de Receção – Neste sistema de teste, porque do ponto de vista do cancelador de eco se pode incluir a resposta impulsional deste filtro na resposta impulsional do híbrido, este bloco é substituído por um bloco equivalente a um circuito de amostragem e retenção (S&H – “Sample and Hold”). O S&H amostra ao dobro do ritmo dos dados e fornece 2 saídas (amostras pares e amostras ímpares) ao ritmo dos dados. Cada saída vai ser comparada com a saída de cada subcancelador de eco.

Baixada	Coeficiente
0	0
1	0,2
2	1
3	0,3
4	-0,4
5	-0,1
6	0,1
7	-0,05
8	-0,02
9	-0,01

Tabela 2 – Coeficientes do híbrido.

Cancelador de Eco – O cancelador de eco deve ser realizado mediante 2 subcanceladores a trabalhar ao ritmo de dados. Ambos os subcanceladores amostram o mesmo sinal de entrada ao mesmo ritmo, adquirindo, portanto, sinais de entrada iguais. Contudo, os subcanceladores são actualizados com sinais de erro diferentes, derivados das 2 saídas do S&H, e como tal, evoluem para estados diferentes. O filtro adaptativo que compõe cada subcancelador é um filtro FIR transversal de 25ª ordem adaptado pelo algoritmo *LMS*.

Bloco Ganho – Este bloco destina-se a atenuar o sinal remoto, pois este apresenta usualmente no receptor uma amplitude bastante inferior ao sinal de eco.

Nota: Para o **caso simplificado** de não se considerarem os filtros de emissão/receção, todo o sistema opera ao ritmo dos dados e há apenas 1 único filtro adaptativo responsável pela implementação do cancelador de eco. Com efeito, com o sistema de teste aqui descrito não há problemas de incerteza da fase de amostragem no recetor, pois todo o programa funciona por iterações e é fácil impor a condição de 1 iteração por dado transmitido. Neste **caso simplificado** existe apenas 1 cancelador de eco, 1 bloco ERLE e não existem filtros de emissão nem de recepção.

4.2 ERLE

O parâmetro mais usado para medir o desempenho do cancelamento do eco é o ERLE – “Echo Return Loss Enhancement”, medido em dB, definido pela razão entre os valores quadráticos médios do eco antes, e depois, do cancelamento:

$$ERLE = \frac{E[e_k^2]}{E[(e_k - \hat{e}_k)^2]} \Bigg|_{dB}$$

De notar, que em cada iteração, o que é fácil obter do programa de simulação não é a média estatística, mas uma estimativa instantânea do ERLE (obtida com os valores instantâneos de e_k e $e_k - \hat{e}_k$), que ao longo do tempo fornece uma estimativa da média temporal. Contudo, para a grande maioria dos sinais usados nestes sistemas de transmissão, estas médias resultam iguais.

5. Realização do Sistema de Simulação

Simule o sistema de teste descrito em 4.1 com o auxílio do programa Matlab com Simulink.

5.1 Teste dos Baralhadores de Dados

No gerador de dados local, aplique a saída de um gerador de onda quadrada à entrada do baralhador de dados. Obtenha os dados pseudo-aleatórios de saída.

Volte a reinicializar o programa, mas aplique agora um sinal de dados de entrada permanentemente a zero, à entrada do baralhador de dados. O que obtém à saída do gerador de dados? Comente este resultado.

Repita estas operações no gerador de dados remoto.

5.2 Teste do Filtro de Emissão (não fazer em caso simplificado)

Aplique uma amostra unitária ou um sinal contínuo de nível 1 ao filtro de emissão. Obtenha o sinal de saída. Comente o resultado obtido.

5.3 Teste do Híbrido

Repita o procedimento indicado em 5.2, mas agora aplicado ao filtro transversal que implementa o híbrido.

5.4 Teste do Filtro de Receção (*não fazer em caso simplificado*)

Aplique uma onda quadrada à entrada do bloco S&H. Dimensionar o período da onda quadrada por forma ao S&H amostrar 2 vezes por período. Obtenha os dois sinais de saída. Comente o resultado obtido.

5.5 Teste do Cancelador de Eco

Aplique à entrada dos subcanceladores de eco os dados provenientes do gerador de dados aleatórios. Em paralelo com cada subcancelador, a simular o caminho do eco a ser identificado, ligue um filtro FIR transversal de 4º ordem com todas as baixadas com coeficientes nulos, à exceção da última com coeficiente unitário. Faça $\mu < 0,03$.

Obtenha a evolução dos ERLEs e o valor dos coeficientes dos filtros adaptativos (ou em *osciloscópio* no monitor ou em ficheiro). De notar, que nesta simulação todo o sistema funciona ao ritmo de dados.

Na simulação pode utilizar os parâmetros:

- Start Time – 0.0;
- Stop Time – 800;
- Passo de adaptação μ – 0.05

5.6 Teste do Sistema

5.6.1 Sem Ruído

- a) Faça o ganho G do amplificador do sinal remoto $G=0$.
- b) Ligue todos os blocos do sistema de simulação (já com o Híbrido de 9ª ordem) e obtenha a evolução dos ERLEs, e se possível, os coeficientes dos filtros adaptativos. Na simulação com Simulink pode utilizar os valores dos parâmetros atrás indicados.
- c) Repita a experiência anterior, mas agora com um valor de μ dez vezes menor. Comente os resultados obtidos.
- d) Experimente vários valores de μ por forma a obter o seu maior valor, $\mu_{\text{máx}}$, que ainda conduz a um processo estável. Comente a evolução dos ERLEs para esta situação. Faça sugestões para otimizar o sistema.

5.6.2 Com Ruído

- a) Faça o ganho G do amplificador do sinal remoto $G=0,1$.
- b) Repita 5.6.1 b). Comente os resultados obtidos.

- c) Utilize agora os valores de $\mu=\mu_{\text{máx}}$ e $G=0,4$. Obtenha a evolução dos ERLEs. Comente os resultados obtidos.

6. Bibliografia

- [1] G. ZELNIKER, F. J. TAYLOR, *Advanced Digital Signal Processing*, Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [2] J. A. GERALD, *Eletrónica Geral*, Cap.7 - *Filtros Digitais*, slides das aulas teóricas, IST, 2015.