

COMPARAÇÕES ENTRE EQUALIZAÇÕES ADAPTATIVAS EM SISTEMAS RÁDIO-DIGITAIS DE ALTA CAPACIDADE

João César M. Mota*

Departamento de Engenharia Elétrica
UFCE, C.P. 6001
60.000 - Fortaleza, CE - Brasil

Rui Fragassi Souza

Departamento de Microonda e Óptica
FEE/UNICAMP, C.P. 6101
13.081 - Campinas, SP - Brasil

João Célio B. Brandão

CETUC, PUC/RJ
R. Marquês de S. Vicente, 225
22.453 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

RESUMO

Neste trabalho compara-se a atuação individual e conjunta de equalizadores com controle no domínio da frequência em Banda Passante, do tipo Linear-Parabólico, e equalizadores cujo controle é feito no domínio do tempo e em Banda Base, dos tipos síncrono e fracionário. Os resultados obtidos indicam que o conjunto de equalizadores linear-parabólico e transversal síncrono, com 5 derivações, apresenta uma melhoria superior à dos dois individualmente, enquanto que o equalizador fracionário, com 5 derivações, apresenta o melhor resultado atuando individualmente. Também são determinados, através de simulação em computador e usando um critério de melhor desempenho, os parâmetros ótimos do equalizador linear-parabólico.

1. INTRODUÇÃO

O desvanecimento seletivo em frequência tem sido a principal causa na deterioração da confiabilidade dos sistemas rádio-digitais de alta capacidade. Entre os vários dispositivos de contra-medidas utilizados para opor-se a este problema tem-se destacado a equalização adaptativa com controle tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Mota et al. [1] mostraram a ação benéfica de uma estrutura de equalização adaptativa em Banda Passante (BP) nos sistemas rádio-digitais multiníveis QAM, cujo controle é feito no domínio da frequência. Muitos trabalhos têm mostrado a boa atuação nestes sistemas de equalização adaptativa em Banda Base (BB), com controle no domínio do tempo [2], [3], [4]. Por outro lado, não tem sido amplamente investigada a melhoria obtida com a utilização conjunta destas duas técnicas de equalização [5]. Embora possa se prever vantagens nessa utilização conjunta, a sensibilidade dessas duas técnicas em condições severas de propagação justifica uma avaliação cuidadosa do problema.

Neste trabalho é feita, através de simulação em computador, uma avaliação do desempenho individual e conjunto de uma estrutura particular de equalizador com controle no domínio da frequência, tipo Linear-Parabólico (ELP) [1], e equalizadores transversais lineares complexos, síncronos e fracionários, cujo controle está no domínio do tempo [6]. Não se considera a presença de ruído nas análises feitas.

Em adição a esta análise, é estudada a otimização do ELP, através do critério de melhor desempenho, obtendo-se entre outros parâmetros, o posicionamento ótimo dos filtros detectores.

2. EQUALIZAÇÃO ADAPTATIVA EM SISTEMAS RÁDIO-DIGITAIS

Os equalizadores adaptativos são classificados, basicamente, através das técnicas de controle utilizadas para ajustar seus parâmetros:

- equalizadores adaptativos com controle no domínio do tempo (EACDT):

procuram restaurar a forma dos pulsos transmitidos, equalizando o canal em amplitude e fase.

- equalizadores adaptativos com controle no domínio da frequência (EACDF):

procuram restaurar a forma de densidade espectral de potência do sinal transmitido, equalizando o canal em amplitude.

Esses dois tipos de equalizadores são usados neste trabalho e são descritos sucintamente a seguir.

Os equalizadores transversais lineares complexos dos tipos síncrono e fracionário, dispostos em banda base, têm uma estrutura geral mostrada na Fig. 1 e são descritos em diversas referências. O controle dos ganhos pode ser feito por diversos critérios a partir do sinal no domínio do tempo, procurando-se combater de forma direta a interferência entre símbolos, a interferência entre canais cruzados e o ruído nos instantes de amostragem. Neste trabalho o cálculo dos coeficientes é feito pelo critério do mínimo erro quadrático médio entre as amostras do pulso equalizado e os valores desejados. Para isto, foi utilizada a solução analítica da equação de minimização e, também, o algoritmo do gradiente determinístico para a confirmação dos resultados [7].

O EACDF usado neste trabalho é do tipo ressonância fixa em banda passante, que combate, simultaneamente, distorções lineares e parabólicas no espectro de amplitude do canal, sendo assim chamado equalizador linear-

* Atualmente no DMO/FEE/UNICAMP, C.P. 6101, 13.081 - Campinas, SP - Brasil.

parabólico (ELP) [1], cuja estrutura é mostrada na Fig. 2. As principais características desta estrutura de equalização são: mesmo comportamento nas condições de fase mínima e não-mínima do canal de transmissão, algo ritmo de ajuste de parâmetros independente dos símbolos já decididos e de recuperação de sincronismo, convergência em condições não muito severas de propagação e fácil implementação.

Nesta estrutura, os parâmetros ajustáveis C_1 e C_2 são obtidos através de um algoritmo recursivo que usa informações provenientes de três filtragens estreitas do sinal na saída do ELP, nas frequências: $f_1 < f_0 < f_2$ (f_1 e f_2 simétricas em relação a f_0) [1].

Os parâmetros fixos (T_1 , T_2 , f_0 , f_1 e f_2) de estrutura de equalização linear-parabólica, supondo uma fácil implementação, são obtidos pelas condições:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \triangleq \frac{f_0}{k} \quad k = 1, 2, \dots$$

$$T_2 = \frac{k}{2f_0} \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{n + 0,5}{2f_0}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

- otimização dos parâmetros fixos do ELP:

Para uma dada banda de passagem do sinal, as expressões apresentadas em (1) permitem obter um número finito de conjuntos de parâmetros fixos, variando-se k e n , quando se impõe a preservação das características linear e parabólica da equalização.

Na Tabela 1 são apresentados quinze conjuntos de parâmetros fixos dos ELP's permitidos para um sistema 64-QAM, com taxa de 140 Mbs, utilizando filtros transmissor e receptor do tipo raiz de cosseno levantado com excesso de faixa ("roll-off") $\alpha = 0,4$. É utilizado o modelo de dois raios para o canal de transmissão.

O conceito de Melhoria (M) pode ser utilizado como critério para otimização dos parâmetros fixos do ELP:

$$M = \left(\frac{A_{SEQZ}}{A_{CEQZ}} \right)_{\tau} \quad (2)$$

onde A_{SEQZ} e A_{CEQZ} são as áreas sob a curva de assinatura do sistema sem e com equalização, respectivamente, para um mesmo retardo no canal τ . Sendo assim, o conjunto de parâmetros fixos que fornecer o maior valor de melhoria será escolhido como o conjunto ótimo para obtenção do melhor desempenho do sistema, para um determinado retardo fixado no canal.

Na Tabela 2 estão mostrados os valores aproximados de M para os quinze conjuntos de parâmetros fixos, com retardos de 3ns e 6,3ns. Estes valores são resultados da utilização do programa ASTRAL (Análise e Simulação em Transmissão Digital) [8] para obtenção das assinaturas e da expressão (2). Observa-se na Tabela 2 que o conjunto C_{11} obteve o maior valor de M nos dois retardos: $M = 8,3$ e $4,0$, para retardos $\tau = 3,0$ ns e $6,3$ ns, respectivamente. Também observa-se que o conjunto C_4 com

$M = 8,3$ e $3,6$ teve um bom desempenho.

Embora o conjunto C_{11} tenha obtido melhorias superiores nos dois valores de retardo testados, os resultados obtidos não permitem afirmar, a priori, que este conjunto terá melhoria sempre superior para qualquer retardo do canal. No entanto, será utilizado o conjunto C_{11} no restante deste trabalho.

3. ATUAÇÃO INDIVIDUAL E CONJUNTA DE EACDT E EACDF

O programa ASTRAL foi utilizado para avaliar o desempenho do sistema 64-QAM, 140 Mbs e excesso de faixa 0,4, através das assinaturas e das melhorias provocadas pela atuação isolada ou conjunta de equalizadores transversais lineares complexos síncronos (ETLCS) e fracionários (ETLCF) com controle no domínio do tempo em BB, ambos com 5 derivações, e um equalizador linear-parabólico (ELP) em BP, cujo controle é feito no domínio da frequência.

As Figs. 3 e 4 mostram as assinaturas obtidas para retardos do canal iguais a 3,0ns e 6,3ns, respectivamente. Pode-se observar a melhor atuação do conjunto (ELP+ETLCS) em relação à ação isolada desses dois equalizadores. Isto é devido à pré-equalização na amplitude do canal fornecida pelo ELP, facilitando a atuação do ETLCS que, praticamente, se esforça para equalizar somente a fase. Por outro lado, é observado o melhor desempenho das estruturas de equalização envolvendo o ETLCF. Este comportamento é explicado pela não produção de "aliasing" do ETLCF o que garante desempenho superior ao ETLCS. Os valores das melhorias, usando a expressão (2), comprovam, quantitativamente, as afirmações acima: retardo $\tau = 3,0$ ns : $M(\text{ELP}) = 8,3$, $M(\text{ETLCS}) = 26,6$, $M(\text{ETLCF}) = 46,1$, $M(\text{ELP} + \text{ETLCS}) = 38,3$, $M(\text{ELP} + \text{ETLCF}) = 41,6$; retardo $\tau = 6,3$ ns : $M(\text{ELP}) = 4,0$, $M(\text{ETLCS}) = 10,9$, $M(\text{ETLCF}) = 18,0$, $M(\text{ELP} + \text{ETLCS}) = 14,8$, $M(\text{ELP} + \text{ETLCF}) = 16,4$. Estes valores mostram que a estrutura de equalização utilizando o ETLCF apresentou o melhor desempenho, sendo, inclusive, superior ao ETLCF+ELP. Este comportamento é devido às distorções provocadas pelo ELP quando o sistema está sujeito a desvanecimentos muito severos [1].

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi comparada a atuação individual e conjunta de estruturas de equalização transversal linear com controle no domínio do tempo em banda base, com uma estrutura de equalização no domínio da frequência em banda passante para sistemas rádio-digitais multinível QAM de alta capacidade. Os resultados mostraram, utilizando uma simulação computacional, que os melhores desempenhos dos sistemas foram obtidos com o equalizador síncrono usado em conjunto com o equalizador linear-parabólico (ELP) e em sistemas utilizando somente o equalizador fracionário, este sendo superior aos demais testados. Também foi realizado um estudo de otimização dos parâmetros fixos do ELP pelo critério de melhor desempenho, avaliado pelo cálculo da melhoria provocada pela equalização. Embora não tenham sido inclui-

dos neste trabalho, outros aspectos tecnológicos de implementação, como tamanho físico dos circuitos do ELP, podem ser importantes na definição do melhor conjunto de parâmetros.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro parcial do CNPq, CAPES/PICD e TELEBRÁS. Agradecemos aos colegas Manoel V. Barbin e Afonso H. M. de Souza pelo interesse e discussões durante o seu desenvolvimento.

BIBLIOGRAFIA

[1] J.C.M. Mota, M.V. Barbin, A.H.M. de Souza, R.F. Souza, J.C.B. Brandão, "Um equalizador adaptativo para sistemas rádio-digitais multinível QAM", submetido ao 6º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Campina Grande, PB, setembro 1988.

[2] W.K. Wong, B. Williamson, P.M. Grant e C.F.N. Cowan,

"Adaptive transversal filters for multipath compensation in microwave digital radio", Int. Conf. on Comm. (ICC'84), pp. 989-992, 1984.

[3] R. Agustí, F. Casadevall e J.J. Olmos, "Performance of Fractioned and Nonfractioned Equalizers with High-Level QAM", IEEE J. on Sel. Areas in Comm., V. SAC-5, nº 3, pp. 476-483, abril 1987.

[4] B. Baccetti, S. Bellini, G. Filiberti e G. Tartara, "Full Digital Adaptive Equalization in 64-QAM Radio Systems", IEEE J. on Sel. Areas in Comm., V. SAC-5, nº 3, pp. 466-475, abril 1987.

[5] G. Sebal, B. Lankl e J.A. Nossek, "Advanced Time- and Frequency - Domain Adaptive Equalization in Multilevel QAM Digital Radio Systems", IEEE J. on Sel. Areas in Comm., V. SAC-5, nº 3, pp. 448 - 456, abril 1987.

[6] S.U.H. Qureshi, "Adaptive Equalization", Proc. IEEE, V. 73, nº 9, pp. 1349-1387, setembro 1985.

[7] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, 1ª ed., 1986.

[8] J.C.B. Brandão, ASTRAL - Um Programa para Análise e Simulação de Sistemas de Transmissão Digital, Rel. Tec. D - ST - 05/87, CETUC - PUC/RJ, Janeiro 1987.

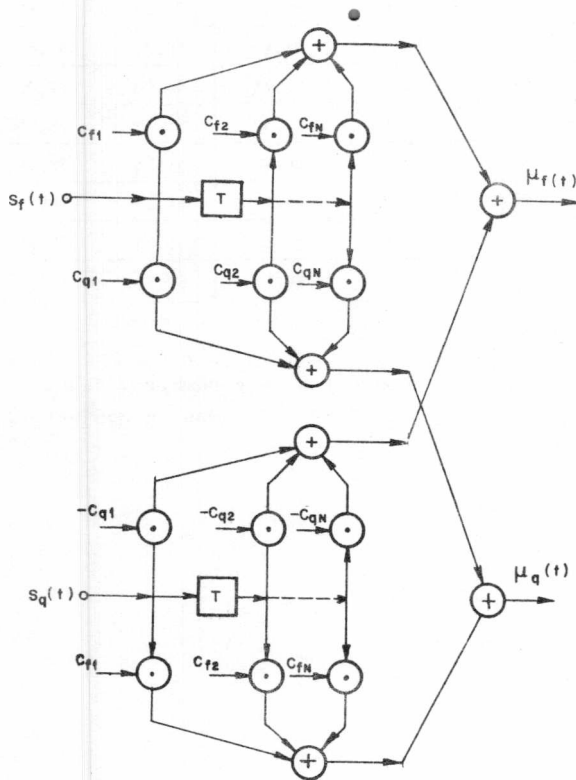


Fig. 1 - Implementação analógica de um equalizador transversal linear complexo síncrono (T é o inverso da taxa de símbolos) ou fracionário (T é uma fração do inverso da taxa de símbolos). $S_f(t)$ e $S_q(t)$ são sinais na entrada e $\mu_f(t)$ e $\mu_q(t)$ são sinais na saída do equalizador em BB com N derivações, em fase e quadratura, respectivamente. $\{C_{fn}\}$ e $\{C_{qn}\}$ são os conjuntos dos coeficientes ajustáveis.

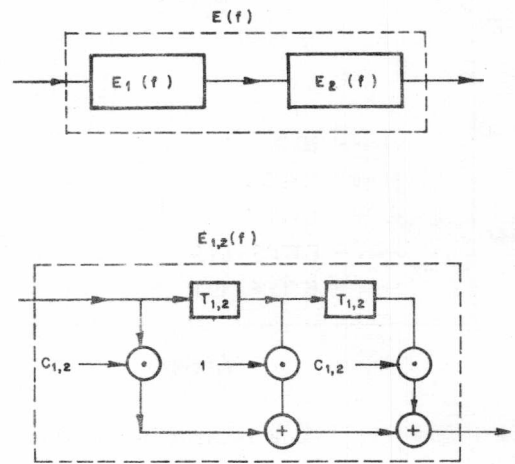


Fig. 2 - Equalizador Linear-Parabólico. T_1 e T_2 são escolhidos de tal forma que $E_1(f)$ e $E_2(f)$ combatem distorções lineares e parabólicas, respectivamente. $E(f) = E_1(f) E_2(f)$. C_1 e C_2 são parâmetros ajustáveis.

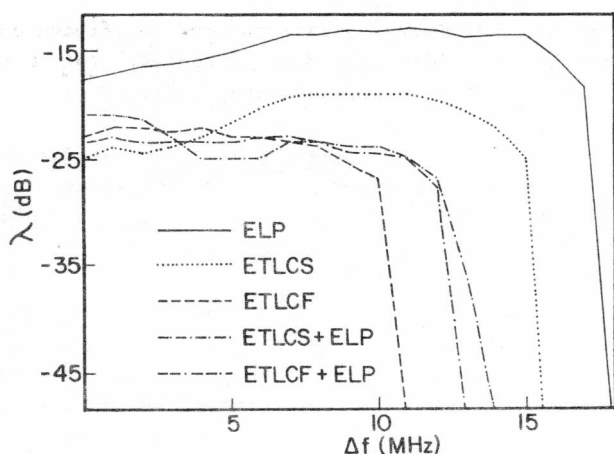


Fig. 3 - Assinaturas de um sistema rádio-digital 64-QAM, 140 Mbs e excesso de faixa $\alpha=0,4$, com equalização individual e conjunta. ELP = Equalizador linear parabólico, ETLCS(F) = equalizador transversal linear complexo síncrono (fracionário), com retardos com duração igual a um (meio) período de símbolo e cinco (cinco) derivações. Retardo do canal $\tau = 3,0$ ns.

Conjuntos	Parâmetros Fixos			
	T_1 (ns)	T_2 (ns)	f_1 (MHz)	f_2 (MHz)
C ₁	17,86	21,43	58,35	81,65
C ₂	17,86	35,71	63,00	77,00
C ₃	3,57	35,71	63,00	77,00
C ₄	3,57	21,43	58,35	81,65
C ₅	10,71	21,43	58,35	81,65
C ₆	10,71	35,71	63,00	77,00
C ₇	25,00	35,71	63,00	77,00
C ₈	25,00	21,43	58,35	81,65
C ₉	32,14	21,43	58,35	81,65
C ₁₀	32,14	35,71	63,00	77,00
C ₁₁	17,86	28,57	61,25	78,75
C ₁₂	3,57	28,57	61,25	78,75
C ₁₃	10,71	28,57	61,25	78,75
C ₁₄	25,00	28,57	61,25	78,75
C ₁₅	32,14	28,57	61,25	78,75

Tabela 1 - Conjuntos de parâmetros fixos.
 $f_0 = 70$ MHz em todos os conjuntos.

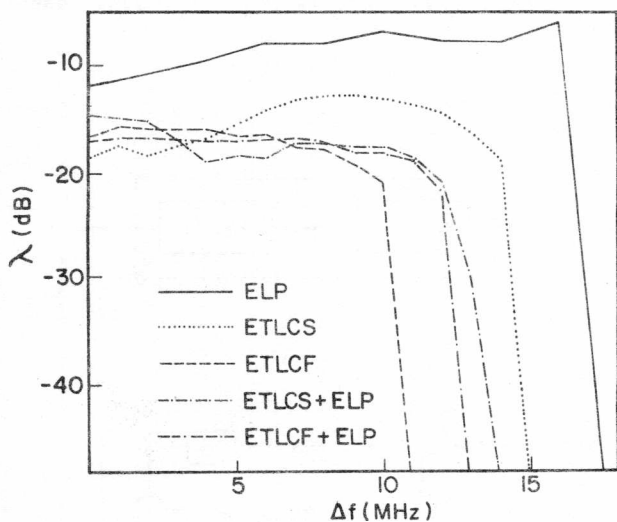


Fig. 4 - Idem fig. 3 com retardo do canal $\tau = 6,3$ ns.

retardos	Melhoria (M)														
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅
$\tau = 3,0$ ns	7,2	7,7	7,4	8,3	7,9	7,6	7,7	4,3	2,6	6,5	8,3	7,7	8,0	7,4	5,0
$\tau = 6,3$ ns	3,2	3,5	3,3	3,6	3,7	3,6	3,5	2,3	1,7	3,0	4,0	3,5	3,6	3,7	2,5

Tabela 2 - Melhorias individuais obtidas com quinze ELP's atuando num sistema 64-QAM, 140 Mbs e $\alpha = 0,4$ (excesso de faixa).