

Equalização Dinâmica via CMA e DPC-CMA com Adaptação de Ganho em Sistemas Ópticos Coerentes PDM-QPSK a 112 Gb/s

Vitor Bedotti Ribeiro^{1*}, Eduardo de Souza Rosa¹, Júlio César Medeiros Diniz¹, Aldário C. Bordonalli² e Júlio C. R. F de Oliveira¹

* Autor a quem a correspondência deve ser dirigida: vribeiro@cpqd.com.br. 1- Fundação CPqD e 2- FEEC UNICAMP

Resumo—A equalização dinâmica é uma das principais etapas para a recuperação digital de um sistema coerente PDM-QPSK, responsável por separar as polarizações e compensar efeitos lineares, como a PMD, de forma adaptativa. O CMA e o DPC-CMA são os equalizadores dinâmicos cegos mais comuns em tais sistemas. No entanto, estes algoritmos apresentam velocidades de convergência relativamente baixas. Este artigo propõe e demonstra a aplicação de um método de adaptação de ganho que acelera a convergência do equalizador dinâmico. É analisado o desempenho dos algoritmos propostos em termos de erro médio quadrático, tolerância à PMD e ao ruído.

Palavras-Chave—CMA, Transmissão 100G, Adaptação de Ganho.

Abstract—Dynamic equalization is one of the most important stages for digital signal recovery of Coherent PDM-QPSK systems, and is responsible for polarization separation and to compensate for linear impairments such as PMD adaptively. The CMA and DPC-CMA are the most usual dynamic blind equalizers for those systems. However, those algorithms have relatively slow speed of convergence. This paper proposes and demonstrates the use of a gain adaptation method that accelerate the convergence of the dynamic equalizer. The algorithms performances are evaluated considering, mean square error, PMD and noise tolerance.

Keywords—CMA, 100G Transmission, Gain Adaptation.

I. INTRODUÇÃO

Novos perfis de tráfego na internet, como a distribuição de vídeo sobre demanda, aplicações *peer-to-peer* e computação em nuvem, requerem muito mais banda que as aplicações tradicionais. Essa mudança nas características do tráfego força um aumento na capacidade de transporte das redes ópticas atuais, que hoje tem uma banda limitada, principalmente, pelos amplificadores comerciais a fibra dopada com érbio (EDFA).

O uso da detecção coerente, processamento digital de sinais (DSP), formatos de modulação de alta eficiência espectral, conversores digitais-analógicos (DACs e ADCs) de alta velocidade, multiplexação em polarização (PDM), fibras com vários núcleos, transmissão sobre mais de um modo e pré-filtragem óptica permitiram em conjunto um aumento extraordinário na capacidade de transmissão das fibras ópticas.

Em [1] usando um DAC de alta velocidade foi possível gerar e transmitir por 400 km um sinal PDM 64-QAM a 256.8 Gb/s, [2] transmitiu 20Tb/s com pré-filtragem por 6.860 km na banda C do ITU-T. Em [3] 109 Tb/s foram transmitidos por

16.8 km em uma fibra com sete núcleos cada um com 97 canais PDM-QPSK a 172 Gb/s e em [4] dois sinais PDM-QPSK a 100 Gb/s foram transmitidos em modos diferentes por 40km em uma fibra de poucos modos.

Enquanto esses resultados são de caráter prospectivo a próxima geração de módulos comerciais encontra-se em normatização pela OIF [5], onde o formato de modulação escolhido foi o PDM-QPSK a 100 Gb/s com detecção coerente. A detecção coerente além de melhorar a sensibilidade do receptor permite compensar degradações sofridas pelo sinal ao propagar na fibra como a PMD, CD e efeitos não lineares ao usar técnicas de DSP [6].

No DSP de um receptor coerente o equalizador dinâmico, um dos blocos mais estudados, é responsável por separar os sinais multiplexados em polarização e por compensar a PMD e o resíduo de CD deixado pelo equalizador estático. O CMA (*constant modulus algorithm*) e o DPC-CMA (*differential phase compensated CMA*) são dois dos algoritmos mais cotados para realizar essa função, por serem equalizadores cegos, imunes ao ruído de fase e ao desvio em frequência entre o laser de sinal e o laser local. Uma das desvantagens do CMA em relação a outros algoritmos como o LMS (*least mean square*) e o DD-LMS (*decision directed LMS*) é menor velocidade de convergência, [7,8] o que pode acarretar em uma perda de sincronismo, caso haja uma mudança rápida no estado de polarização devido a PMD.

Com a adaptação de ganho é possível acelerar a velocidade de convergência desses algoritmos, considerando características locais da função de custo a ser minimizada. Esse trabalho aplica a adaptação proposta em [9] ao CMA e ao DPC-CMA, em um sistema de transmissão óptico a 112 Gb/s, e compara o desempenho em relação a velocidade de convergência, BER (*bit-error rate*), tolerância a PMD e ao ruído nos dois algoritmos.

II. SISTEMA DE TRANSMISSÃO PDM-QPSK COERENTE

A. Transmissor

Em um sistema de transmissão coerente PDM-QPSK, a unidade óptica transmissora, apresentada na Figura 1, é composta basicamente de um laser transmissor e um PM-QM (*polarization multiplexed quadrature modulator*) integrado. O sinal óptico do laser é dividido de forma igual e cada parte desse sinal é modulado por um modulador IQ. Em seguida um sinal sofre rotação de noventa graus na polarização e é multiplexado em polarização com o outro.

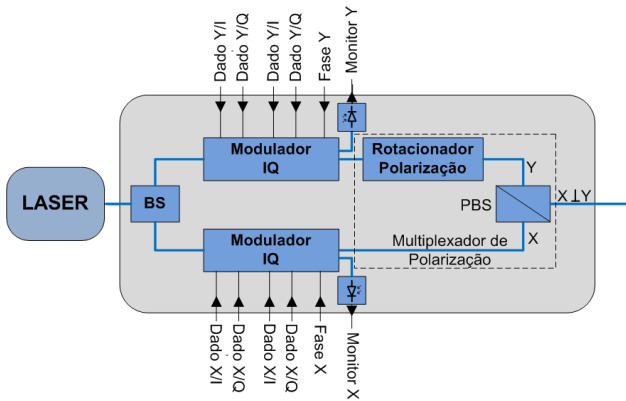


Fig. 1. Diagrama funcional do transmissor [10].

B. Receptor

O receptor coerente, por sua vez, é composto por um laser que serve de oscilador local e um módulo demodulador integrado e uma unidade de aquisição e processamento, como apresentado na Figura 2. O laser oscilador local é dividido igualmente e é misturado com cada polarização do sinal recebido na híbrida 90 graus. Quatro pares de fotodetectores balanceados convertem o sinal óptico em elétrico, representando em banda-base as componentes em fase e em quadratura dos sinais em cada polarização. Na sequência os sinais elétricos são amostrados por ADCs (analog-to-digital converters) de alta velocidade e processados digitalmente na unidade DSP.

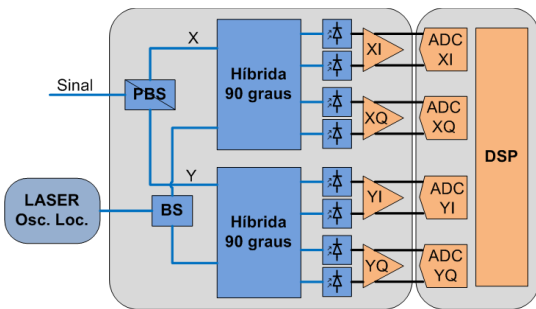


Fig. 2. Diagrama funcional do receptor coerente [11].

A recepção coerente por transferir as características de frequência/fase, polarização e amplitude do sinal óptico no domínio elétrico permite que as degradações sofridas pelo sinal óptico sejam compensadas digitalmente aplicando-se técnicas de DSP.

III. ALGORITMOS PARA PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAL

A Figura 3 mostra a sequência de algoritmos usualmente aplicada na unidade DSP. O bloco de Normalização e Ortogonalização compensa distorções na híbrida e diferenças de potência entre as componentes em fase e quadratura usando o algoritmo de Gram-Schmidt [12].

O bloco Equalizador Estático faz a compensação da dispersão cromática acumulada durante a transmissão no domínio do tempo como em [7]. O bloco Recuperação de Temporização usa o algoritmo de Gardner [13] para recuperar o tempo de símbolo corretamente. O bloco Equalizador

Dinâmico é responsável por demultiplexar as polarizações, equalizar a CD residual e efeitos que variam com o tempo, como a PMD. Os algoritmos usados nesse bloco são o CMA e uma variação proposta em [14] o DPC-CMA na configuração MIMO (multiple input multiple output) usando quatro filtros FIR [6,7], como mostrado na Figura 3. Após a equalização dinâmica a fase do sinal é recuperada no bloco Estimador de Fase, através do algoritmo FFCR (*feedforward carrier recovery*) como em [15]. Posteriormente ao estimador de fase é feita a decisão nos símbolos de cada polarização.

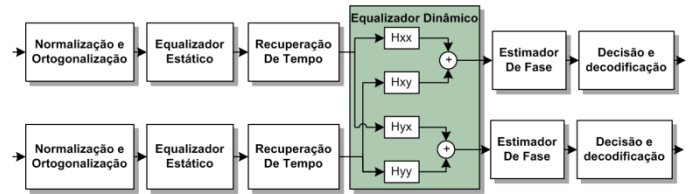


Fig. 3. Diagrama funcional da unidade DSP.

O Equalizador Dinâmico deve ser capaz de acompanhar variações da PMD, e de outros efeitos dinâmicos, que ocorrem em tempos na ordem de milissegundos ou até microssegundos [16]. Para que a equalização aconteça de forma eficiente, o algoritmo usado deve adaptar-se o mais rápido possível às mudanças no estado de polarização de forma a não perder o sincronismo, afetando assim a equalização e consequentemente o desempenho do sistema.

IV. CMA E DPC-CMA

A PMD faz com que o estado de polarização gire de forma arbitrária ao longo da fibra com um comportamento estocástico. Por isso é necessário que o CMA seja capaz de estimar a matriz inversa de Jones para a fibra e seguir sua evolução no tempo. Na configuração MIMO 2x2 temos que as saídas se relacionam com as entradas por [8]

$$\begin{aligned} x_{out}[k] &= \mathbf{H}_{xx}^H[k]x_{in}[k] + \mathbf{H}_{xy}^H[k]y_{in}[k] \\ y_{out}[k] &= \mathbf{H}_{yx}^H[k]x_{in}[k] + \mathbf{H}_{yy}^H[k]y_{in}[k] \end{aligned} \quad (1)$$

onde $x_{in}[k]$ e $y_{in}[k]$ são os vetores dos sinais de entrada, definidos para um filtro de ordem N como $x_{in}[k][k] = \{x_{in}[k], x_{in}[k], x_{in}[k-1], x_{in}[k-1], x_{in}[k-1], x_{in}[k-1], x_{in}[k-N+1], \dots, x_{in}[k-N+1]\}$.

$\mathbf{H}_{xx}^H[k], \mathbf{H}_{xy}^H[k], \mathbf{H}_{yx}^H[k], \mathbf{H}_{yy}^H[k]$ são os vetores com os coeficientes dos filtros. A atualização dos coeficientes é feita da seguinte forma utilizando a regra do gradiente estocástico

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{xx}[k] &= \mathbf{H}_{xx}[k] - \mu \cdot e_x[k] \cdot \mathbf{x}_{in}^*[k] \\ \mathbf{H}_{xy}[k] &= \mathbf{H}_{xy}[k] - \mu \cdot e_x[k] \cdot \mathbf{y}_{in}^*[k] \\ \mathbf{H}_{yx}[k] &= \mathbf{H}_{yx}[k] - \mu \cdot e_y[k] \cdot \mathbf{x}_{in}^*[k] \\ \mathbf{H}_{yy}[k] &= \mathbf{H}_{yy}[k] - \mu \cdot e_y[k] \cdot \mathbf{y}_{in}^*[k] \end{aligned} \quad (2)$$

$\mu \cdot e_y[k] \cdot \mathbf{y}_{in}^* = \mathbf{g}_{xx}[k]$ é o gradiente estocástico no instante k onde μ é o ganho ou passo de adaptação, $e_x[k]$ e $e_y[k]$ são os erros em relação ao critério CM (*Constant Modulus*) dados por

$$\begin{aligned} e_x[k] &= x_{out}[k](|x_{out}[k]|^2 - R_x) \\ e_y[k] &= y_{out}[k](|y_{out}[k]|^2 - R_y) \end{aligned} \quad (3)$$

Onde

$$R_x = \frac{E[|x_{in}|^4]}{E[|x_{in}|^2]}, R_y = \frac{E[|y_{in}|^4]}{E[|y_{in}|^2]} \quad (4)$$

No CMA, a fase entre cada polarização não é levada em consideração, por esse motivo é necessário usar estimadores de fase independentes. O DPC-CMA [14] é uma modificação do CMA que corrige a diferença de fase entre as polarizações de forma que é necessário somente um estimador de fase conjunto. Para corrigir a diferença de fase entre as polarizações é introduzido um termo na atualização dos coeficientes do filtro como mostrado em (5)

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{xx}[k] &= \mathbf{H}_{xx}[k] - \mu \cdot (e_x[k] \cdot \mathbf{x}_{in}^* + j \frac{1}{2} \Delta\varphi_k \mathbf{H}_{xx}) \\ \mathbf{H}_{xy}[k] &= \mathbf{H}_{xy}[k] - \mu \cdot (e_x[k] \cdot \mathbf{y}_{in}^* + j \frac{1}{2} \Delta\varphi_k \mathbf{H}_{xy}) \\ \mathbf{H}_{yx}[k] &= \mathbf{H}_{yx}[k] - \mu \cdot (e_y[k] \cdot \mathbf{x}_{in}^* - j \frac{1}{2} \Delta\varphi_k \mathbf{H}_{yx}) \\ \mathbf{H}_{yy}[k] &= \mathbf{H}_{yy}[k] - \mu \cdot (e_y[k] \cdot \mathbf{y}_{in}^* - j \frac{1}{2} \Delta\varphi_k \mathbf{H}_{yy}) \end{aligned} \quad (5)$$

onde $\Delta\varphi_k$ é a diferença de fase entre as polarizações, calculada como

$$\Delta\varphi_k = \left(\left(\arg(x_{out}) - \arg(y_{out}) \right) - \frac{\pi}{4} \right) \bmod \left(\frac{\pi}{2} \right) - \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

V. ADAPTAÇÃO DE GANHO

A escolha do ganho μ dos algoritmos baseados no método do gradiente, como as duas versões apresentadas do CMA, segue um compromisso entre a velocidade de convergência e o erro residual em regime, causado por oscilações do equalizador em torno do ponto ótimo. Portanto, ao aumentar o valor de μ , visando melhorar a velocidade de convergência, também penalizamos o desempenho do algoritmo em termos de erro quadrático médio [12]. Uma alternativa para contornar esta limitação é empregar métodos de adaptação de ganho, como os propostos em [9,18], cujo propósito é manter um ganho alto durante a o período de convergência, aumentando assim a velocidade, porém reduzi-lo durante a operação em regime, minimizando o erro.

De forma geral esses métodos aumentam ou diminuem o ganho levando em conta características locais da função. Em [9] foi proposto por Almeida et al um método para adaptação de parâmetros, em algoritmos de otimização estocásticos, como por exemplo o Gradiente Descendente.

A idéia principal no algoritmo é que se adaptações sucessivas em \mathbf{g}_i (que é componente de \mathbf{g}) têm a mesma direção, então a velocidade nesse eixo deve ser acelerada, e se adaptações em \mathbf{g}_i têm direções opostas, a velocidade deve diminuir. A primeira mudança então é que o ganho μ que é um escalar fixo para todas as componentes torna-se um vetor, $\mathbf{p}[k]$, ajustável em cada iteração. Sendo assim, temos que a regra de atualização dos coeficientes do filtro passa ser:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{xx}[k] &= \mathbf{H}_{xx}[k] - \mathbf{p}_{xx}[k] \cdot e_x[k] \cdot \mathbf{x}_{in}^* \\ \mathbf{H}_{xy}[k] &= \mathbf{H}_{xy}[k] - \mathbf{p}_{xy}[k] \cdot e_x[k] \cdot \mathbf{y}_{in}^* \\ \mathbf{H}_{yx}[k] &= \mathbf{H}_{yx}[k] - \mathbf{p}_{yx}[k] \cdot e_y[k] \cdot \mathbf{x}_{in}^* \\ \mathbf{H}_{yy}[k] &= \mathbf{H}_{yy}[k] - \mathbf{p}_{yy}[k] \cdot e_y[k] \cdot \mathbf{y}_{in}^* \end{aligned} \quad (7)$$

onde os vetores de ganho $\mathbf{p}[k]$ são calculados por

$$\mathbf{p}[k] = \mathbf{p}[k-1] \cdot \left(1 + \alpha \frac{\mathbf{g}[k-1] \cdot \mathbf{g}[k]}{\|\mathbf{g}[k-1]\| \cdot \|\mathbf{g}[k]\|} \right) \quad (8)$$

Na equação (8), α corresponde a velocidade de atualização dos parâmetros, que neste caso foi fixada em $\alpha = 1\%$. Como as estimativas de \mathbf{g} são ruidosas, é preferível usar uma média exponencial móvel para os valores de \mathbf{g} e também para evitar valores negativos de ganho limitamos em $1/2$ o coeficiente de adaptação; assim a equação assume a forma

$$\mathbf{p}[k] = \mathbf{p}[k-1] \cdot \max \left(\frac{1}{2}, \left(1 + \alpha \frac{\langle \mathbf{g}[k-1] \cdot \mathbf{g}[k] \rangle}{\|\mathbf{g}[k-1]\| \cdot \|\mathbf{g}[k]\|} \right) \right) \quad (9)$$

e a média exponencial é calculada por

$$\langle \mathbf{u}[k] \rangle = \gamma \mathbf{u}[k] + (1 - \gamma) \langle \mathbf{u}[k-1] \rangle \quad (10)$$

VI. SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO

Para testar e comparar o desempenho do CMA e o DPC-CMA com adaptação foi montado um ambiente de simulação como mostrado na Figura 4

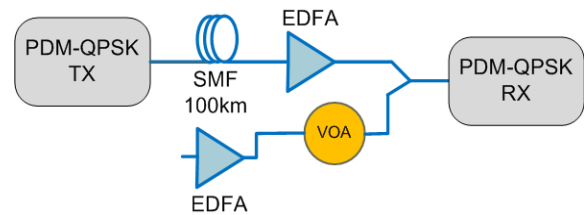


Fig. 4. Diagrama simplificado de simulação.

A unidade transmissora PDM-QPSK é a mesma da Figura 1 e o receptor coerente é como mostrado na Figura 2, transmitindo a 112 Gb/s. Os parâmetros da fibra são os valores comerciais de uma fibra padrão G.652, exceto quanto citado. Os parâmetros são apresentados na Tabela 1.

TABELA I. PARÂMETROS USADOS NA FIBRA DE SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento	100	km
Comprimento de onda de referência	1550	nm
Atenuação	0.2	dB/km
Dispersão	16.75	ps/(nm.km)
Coefficiente de PMD	0.5	ps/sqrt(km)

Três etapas de simulação foram feitas para testar velocidade de convergência, e comparar a BER variando a PMD e a OSNR.

Na primeira etapa realizou-se 500 simulações, variando as sementes aleatórias do simulador para avaliar a velocidade de convergência média com uma OSNR de 28 dB.

Na segunda etapa o coeficiente de PMD da fibra foi variado para que a PMD média na transmissão por 100 km estivesse entre 0 e 40 ps, com passos de 10 ps, e a OSNR em 28 dB. Para cada valor de PMD foram realizadas 100 simulações variando as sementes aleatórias.

Na terceira etapa o atenuador óptico variável (VOA) foi ajustado para controlar a potência de ruído ASE inserida de forma que a OSNR ficasse entre 29 dB e 11dB. Também foi simulada 100 vezes variando as sementes aleatórias.

Para verificar experimentalmente a robustez dos algoritmos em relação à DGD, foi montado o seguinte arranjo experimental:

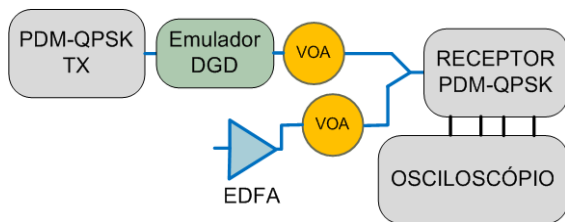


Fig. 5. Diagrama simplificado do experimento.

No experimento, a DGD foi variada de 0 a 35,7 ps usando um emulador de bancada. A OSNR do sinal foi ajustada para 20 dB através dos VOAs, e em cada valor de DGD usado foram feitas 50 medições no osciloscópio, com os dados processados posteriormente.

VII. RESULTADOS

Os resultados apresentados nessa seção foram comparados através da BER calculada por meio do fator de qualidade (Q) das constelações obtidas após a filtragem digital.

Na primeira etapa de simulação é comparada a velocidade de convergência do CMA com adaptação de ganho (CMA-GA), e o CMA padrão com ganho $\mu = 0.01$ e $\mu = 0.05$, sendo essa comparação apresentada na Figura 6. O DPC-CMA apresentou a mesma velocidade de convergência que o CMA no caso padrão ou com adaptação de ganho, por esse motivo não foi inserido na Figura 6. A partir da análise da Figura 6 podemos concluir que o CMA-GA tem velocidade de convergência aproximadamente cinco vezes superior que o CMA com $\mu = 0.01$ com mesmo desempenho em relação a

BER. O CMA com $\mu = 0.05$ tem a mesma velocidade de convergência que o CMA-GA, contudo a BER é três ordens de grandeza maior, demonstrando assim o benefício da adaptação de ganho.

Na segunda etapa de simulação foi obtido o gráfico da Figura 7. Nele foi medida a BER média entre as simulações para cada valor de PMD médio no final do enlace. Nessa análise podemos observar que, com baixa PMD, o CMA-GA tem desempenho ligeiramente melhor quando comparado ao CMA com $\mu = 0.01$, mas ao aumentar o valor de PMD, seu desempenho fica um pouco pior. O CMA-GA fica com uma BER menor que o CMA com $\mu = 0.05$, independente do valor de PMD. O mesmo acontece com DPC-CMA-GA comparado ao DPC-CMA, começando melhor e com o aumento da PMD fica ligeiramente pior.

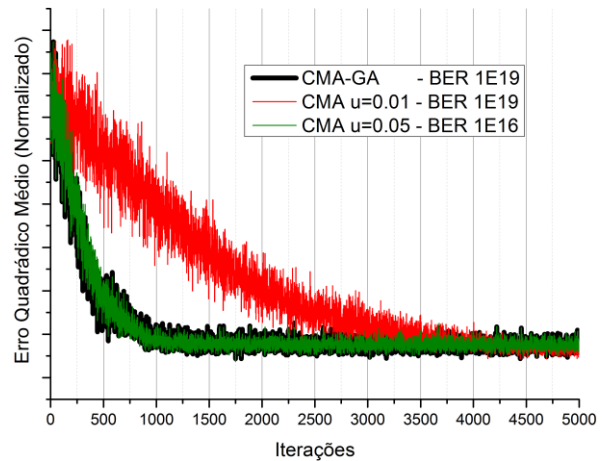


Fig. 6. Comparação da velocidade de convergência através do erro médio quadrático do CMA.

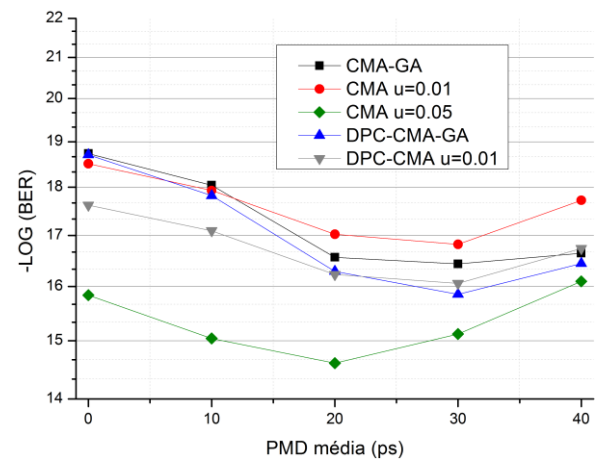


Fig. 7. Comparação da BER dos algoritmos versus a PMD média.

Na terceira etapa o desempenho dos algoritmos foi testado em relação a OSNR do sinal, sendo os resultados obtidos apresentados na Figura 8. Os algoritmos com adaptação de ganho tiveram um desempenho semelhante ao CMA e ao DPC-CMA com ganho $\mu = 0.01$, porém quando comparado com o CMA com ganho $\mu = 0.05$ a diferença na BER foi de três ordens de grandeza para uma OSNR perto de 30 dB. Essa diferença se suaviza com baixa relação sinal ruído do sinal

óptico, porém os algoritmos com adaptação de ganho sempre se mantêm com melhor desempenho.

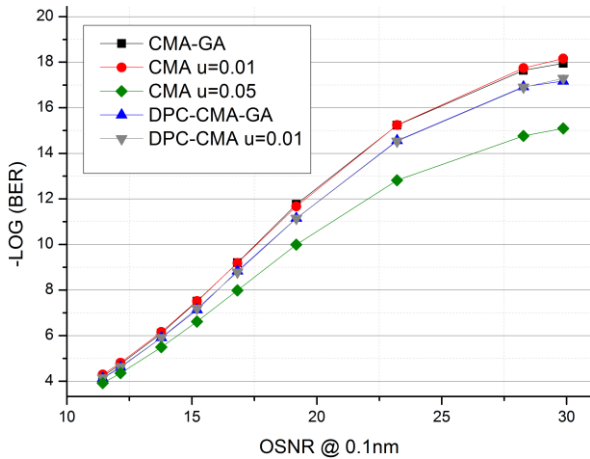


Fig. 8. Comparação da BER dos algoritmos versus a OSNR do sinal.

O desempenho dos algoritmos foi verificado experimentalmente, de acordo com a configuração da Figura 5, obtendo os resultados apresentados na Figura 9. Ao variar a DGD com um emulador de bancada de 0 até 35,7 ps, verificou-se que o CMA-GA mantém o desempenho em relação a BER comparável ao CMA com ganho $\mu = 0.01$, e também sustenta um desempenho superior ao CMA com $\mu = 0.05$, coincidindo com os resultados de simulação. Na Figura 9 verifica-se que a BER piora para todos os algoritmos quando a DGD está perto da metade do tempo de símbolo ($0.5/T \approx 18ps$) e volta a piorar novamente perto de $1/T$. Este comportamento é induzido por limitações no algoritmo de Gardner [13], utilizado para fazer a recuperação de tempo de símbolo. Foi demonstrado em [18] que quando a DGD está perto desses valores ela pode introduzir nulos na estimação de tempo deste algoritmo, degradando sua performance.

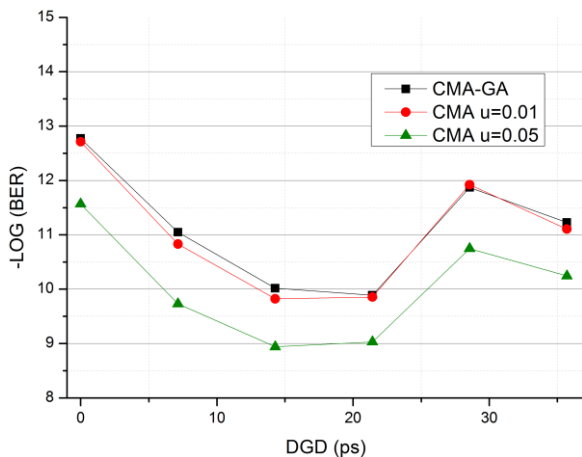


Fig. 9. Comparação da BER dos algoritmos para valores.

VIII. CONCLUSÕES

O uso da adaptação de ganho para o CMA e o DPC-CMA garante desempenho semelhante aos algoritmos originais em relação a BER, PMD e OSNR, com um ganho de aproximadamente cinco vezes na velocidade de convergência.

Aumentando o ganho do CMA padrão em cinco vezes temos praticamente a mesma velocidade de convergência que o CMA-GA, entretanto o desempenho em relação BER, PMD e OSNR diminui. Assim, foi demonstrado que a utilização da adaptação de ganho para sistemas PDM-QPSK aumenta a velocidade de convergência da equalização dinâmica, aumentando o desempenho dos sistemas ópticos.

AGRADECIMENTOS

Ao FUNTTEL e ao CPqD pelo financiamento e apoio.

REFERENCIAS

- [1] A.H. Gnauck, et al., "Generation and Transmission of 21.4-Gbaud PDM 64-QAM Using a High-Power DAC Driving a Single I/Q Modulator," in Proceedings of Optical Fiber Communication (OFC), PDPB2, 2011.
- [2] J.-X. Cai et al., "20 Tbit/s Capacity Transmission Over 6,860 km," in Proceedings of Optical Fiber Communication (OFC), PDPB4, 2011.
- [3] J. Sakaguchi, et al., "109-Tb/s (7x97x172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber," in Proceedings of Optical Fiber Communication (OFC), PDPB6, 2011.
- [4] M. Salsi, et al., "Transmission at 2x100Gb/s, over Two Modes of 40km-long Prototype Few-Mode Fiber, using LCOS-based Mode Multiplexer and Demultiplexer," in Proceedings of Optical Fiber Communication (OFC), PDPB9, 2011.
- [5] "100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document," Optical Internetworking Forum (OIF), junho 2009.
- [6] S.J. Savory, "Digital Coherent Optical Receivers: Algorithms and Subsystems," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, vol. 16, no.5, pp.1164-1179, Sept.-Oct. 2010.
- [7] S. J. Savory, "Digital filters for coherent optical receivers," Opt. Express 16, 804-817 (2008).
- [8] Yangyang Fan; Xue Chen; Weiqin Zhou; Xian Zhou; Hai Zhu; , "The Comparison of CMA and LMS Equalization Algorithms in Optical Coherent Receivers," Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010 6th International Conference on, vol., no., pp.1-4, 23-25 Sept. 2010.
- [9] L. B. Almeida, T. Langlois, J. D. Amaral and A. Plakhov, "Parameter Adaptation in Stochastic Optimization", in D. Saad (ed.), On-Line Learning in Neural Networks, Cambridge University Press, 1998.
- [10] "Implementation Agreement for Integrated Polarization Multiplexed Quadrature Modulated Transmitters," Optical Internetworking Forum (OIF), março 2010.
- [11] "Implementation Agreement for Integrated Dual Polarization Intradyne Coherent Receivers," Optical Internetworking Forum (OIF), Abril 2010.
- [12] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, 4th Ed., Prentice Hall, 2001.
- [13] F. Gardner, "A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers," IEEE Trans. Commun., vol. COM-34, no. 5, pp. 423-429, May 1986.
- [14] El-Darawy, M.; Pfau, T.; Hoffmann, S.; Noe, R.; , "Differential phase compensated constant modulus algorithm for phase noise tolerant coherent optical transmission," Summer Topical Meeting, 2009. LEOSST '09. IEEE/LEOS, vol., no., pp.95-96, 20-22 July 2009.
- [15] M. Seimetz, "High-order modulation for optical fiber transmission," in Springer series in optical Sciences, vol. 143, 2009, pp79-84.
- [16] C. Fludger, S. J. Savory, "Electronic and Optical Impairment Mitigation," Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2011 Conference on (OFC/NFOEC), Short Course Notes, SC259.
- [17] N.N. Schraudolph, "Local gain adaptation in stochastic gradient descent," Artificial Neural Networks, 1999. ICANN 99. Ninth International Conference on (Conf. Publ. No. 470), vol.2, no., pp.569-574 vol.2, 1999
- [18] D. Zibar, A. Bianciotto, W. Zhe, A Napoli, B. Spinnler, "Analysis and dimensioning of fully digital clock recovery for 112 gb/s coherent polmux QPSK systems," Optical Communication, 2009. ECOC '09. 35th European Conference on, vol., no., pp.1-2, 20-24 Sept. 2009