

Métodos de ortonormalização em tempo real para transmissão óptica coerente DP-QPSK a 112Gbit/s

Victor Emanuel S. Parahyba^{1*}, Vitor Bedotti Ribeiro¹, João Marcos T. Romano² e Júlio C. R. F de Oliveira¹

* Autor a quem a correspondência deve ser dirigida: victorp@cpqd.com.br. 1- Fundação CPqD, 2 – FEEC Unicamp

Resumo—Imperfeições no front-end do receptor coerente deterioram a qualidade do sistema de transmissão óptico. As componentes do sinal perdem sua característica de ortogonalidade, provocando interferência intrasimbólica. Este artigo propõe e compara métodos para a aplicação em tempo real dos procedimentos de ortonormalização de Gram-Schmidt e de Löwdin. A avaliação de desempenho dos métodos é feita segundo quatro parâmetros: eficiência da ortogonalização, desequilíbrio de potência entre as componentes, BER estimada e complexidade computacional.

Palavras-Chave—Ortogonalização, Transmissão 100Gb, Transmissão em tempo real.

Abstract—Imperfections on coherent receiver's front-end lead to deterioration of the quality of the optical transmission system. The components of the signal loses their orthogonality characteristic, causing intrasymbolic interference. This paper presents and compares methods for real time application of Gram-Schmidt and Löwdin orthonormalization procedures. The performance avaluation of the methods is made according to four parameters: orthonormalization efficiency, power imbalance between components, computing complexity and estimated BER.

Keywords—Orthogonalization, 100Gb Transmission, Real-time Transmission.

I. INTRODUÇÃO

A combinação de processamento digital de sinais (Digital Signal Processing - DSP), detecção coerente e formatos avançados de modulação têm ganhado grande destaque no objetivo de atingir taxas de transmissão cada vez mais altas em sistemas ópticos (100 Gbit/s Ethernet) [1]. Utilizando detecção coerente, todos os parâmetros do campo óptico (amplitude, fase, frequência e polarização) passam a estar disponíveis no domínio elétrico, possibilitando a utilização de formatos arbitrários de modulação e aumentando a robustez do sistema [2]. O DP-QPSK (Dual-polarization quadrature-phase shift keying) é um dos formatos de modulação em maior evidência atualmente por ter uma eficiência espectral quatro vezes maior em relação ao formato tradicional OOK (On-Off Keying) devido a utilização de diversidade de fase e polarização [3]. Somado a isso, o avanço na eletrônica digital possibilita a utilização de algoritmos de DSP na recepção para compensar efeitos indesejáveis provocados pela fibra óptica como dispersão cromática e dispersão de modo de polarização (Polarization Mode Dispersion - PMD) [4].

Um dos componentes mais importantes de um receptor digital coerente é o Front-End, responsável por mapear os campos ópticos em um conjunto de sinais elétricos através do batimento do sinal recebido com o oscilador local [1]. Para

atingir a diversidade de fase e polarização já mencionadas, o front-end contém um par de híbridas 90°, uma para cada componente de polarização, como mostra a Fig. 1.

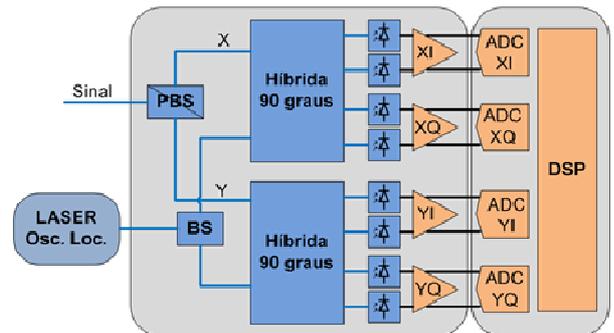


Fig. 1. Diagrama funcional do receptor coerente.

O campo óptico recebido é mapeado em quatro sinais elétricos: $r_I(t)\hat{x}$, $r_Q(t)\hat{x}$, $r_I(t)\hat{y}$ e $r_Q(t)\hat{y}$ [1], correspondentes às componentes em fase e em quadratura das duas polarizações [1]. Numa aplicação real, no entanto, as imperfeições no front-end do sistema causam desequilíbrios de potência entre as componentes em fase e quadratura de cada polarização, tornando-as não-ortogonais. Essas imperfeições podem trazer a crescente degradação do sistema e precisam ser compensadas [5].

Diversos algoritmos foram propostos para compensar essas imperfeições no front-end [6], sendo o Procedimento de Ortonormalização de Gram-Schmidt (GSOP) e o Procedimento de Ortonormalização de Löwdin (LOP) os mais populares. Este artigo propõe métodos para a implementação on-line das soluções tradicionais de compensação de desequilíbrios de quadratura (Quadrature Imbalance – QI).

Este trabalho apresenta inicialmente na seção II o problema de QI, caracterizando o impacto que esse desequilíbrio provoca em um sistema simulado de transmissão a 100Gbit/s. Na seção III, faz-se uma breve explicação do funcionamento dos procedimentos de ortonormalização e na seção IV são apresentadas três alternativas para a implementação do GSOP e do LOP em tempo real: acumulação, adaptação e misto. Os procedimentos propostos são comparados segundo a BER em um sistema simulado. Finalmente, os métodos são aplicados num sistema de transmissão experimental a 112 Gbit/s utilizando formato DP-QPSK e detecção coerente e comparados segundo quatro fatores: eficiência na ortogonalização, eficiência na normalização, BER e complexidade computacional. Os resultados são apresentados

na seção V.

II. DESEQUILÍBRIO DE QUADRATURA

Utilizamos o software OptiSystem para simular uma transmissão óptica coerente a 112 Gb/s por 100 km de fibra comercial SMF (*Single Mode optical Fiber*), e tratamos os sinais na recepção com um conjunto de algoritmos de DSP mostrados na Fig. 2. que compensam os efeitos gerados na simulação.

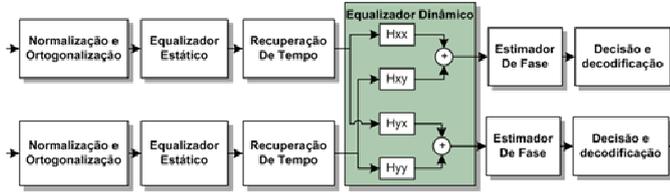


Fig. 2. Diagrama funcional da unidade DSP

Para analisar os efeitos provocados pela imperfeição na híbrida 90°, retiramos o bloco responsável pela ortonormalização e verificamos através da BER estimada como o aumento do erro de híbrida deteriora a qualidade do sistema. A Tabela I mostra os resultados obtidos.

TABELA II. DETERIORAÇÃO DA BER COM O ERRO DA HÍBRIDA

Erro da Híbrida	5°	7°	10°	15°	20°
BER	10^{-17}	10^{-16}	10^{-14}	10^{-14}	10^{-11}

A partir dos dados da tabela podemos perceber que um aumento no erro da híbrida contribui acentuadamente para o aumento na BER estimada, tornando essencial a compensação desse desequilíbrio. Nesta simulação o desequilíbrio de potência se manteve aproximadamente constante com média de 4.1% para a polarização X e -3.0% para a polarização Y, portanto a deterioração da BER está ligada, neste caso, principalmente ao desequilíbrio de ortogonalidade.

III. PROCEDIMENTOS DE ORTONORMALIZAÇÃO

Para uma híbrida 90° imperfeita, o ângulo entre as componentes em fase e em quadratura pode ser expresso por $\pi/2 - 2\theta$. Sendo os sinais recebidos dados por $r_I = t_1 \cos(\theta) + t_2 \sin(\theta)$ e $r_Q = t_2 \cos(\theta) + t_1 \sin(\theta)$, onde t_1 e t_2 são sinais perfeitamente ortogonais. A matriz de correlação R neste caso pode ser dada por [2]:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Os algoritmos de ortogonalização consistem de forma geral em procedimentos de manipulação desta matriz a fim de recuperar a ortogonalidade dos sinais.

A. GSOP

O Procedimento de Ortonormalização de Gram-Schmidt (GSOP) mantém inalterada a componente em fase (apenas tornando-a normalizada) enquanto rotaciona a componente em quadratura utilizando para isto o coeficiente de correlação entre os dois sinais [7], como mostra a equação a seguir:

$$\begin{aligned} s_I &= \frac{r_I}{\sqrt{P_I}} \\ s'_Q &= r_Q - \frac{\rho \cdot r_I}{P_I} \\ s_Q &= \frac{s'_Q}{\sqrt{P_Q}} \end{aligned} \quad (2)$$

Onde s_I e s_Q representam as componentes em fase e em quadratura ortonormalizadas, respectivamente; P_I e P_Q representam as potências médias das componentes recebidas e $\rho = E\{r_I \cdot r_Q\}$ é o coeficiente de correlação entre elas. O GSOP se mostrou muito efetivo na compensação de imperfeições de front-end [8].

B. LOP

A idéia básica por trás do Procedimento de Ortonormalização de Lowdin (LOP) é criar um conjunto de vetores que seja o mais próximo possível do conjunto original (ortogonal) no sentido de mínimo erro quadrático médio [9]. Para isto, utilizamos a matriz de transformação derivada da matriz de correlação dada por $L = R^{-1/2}$ [10] e representada em (3).

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta)}{\cos(2\theta)} & \frac{-\tan(2\theta)}{2\cos(\theta)} \\ -\frac{\tan(2\theta)}{2\cos(\theta)} & \frac{\cos(\theta)}{\cos(2\theta)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ao contrário do GSOP, o LOP provoca a rotação dos dois vetores em θ graus, cada um para uma direção. Por se tratar de um método simétrico, o LOP garante que o impacto do ruído de quantização não seja somente em uma das componentes e sim dividido igualmente entre as duas.

IV. ORTONORMALIZAÇÃO EM TEMPO REAL

Nos dois algoritmos apresentados na sessão anterior, temos matrizes de transformação cujos elementos são calculados a partir de esperanças envolvendo os sinais r_I e r_Q . Para tornar os dois conjuntos de amostras completamente ortonormalizados, é então necessário o cálculo de esperanças envolvendo todos os elementos da amostra. Esse cálculo se torna inviável em sistemas em tempo real já que o número de amostras se torna infinito, além de não levar em consideração a variação das imperfeições do front-end do sistema com o tempo. Por fim, a área utilizada num chip, no caso de uma implementação eletrônica, deve ser a menor possível, tornando alternativas que utilizem uma memória reduzida mais interessantes. Apresentamos, nesta sessão, três possíveis abordagens para a aplicação do GSOP e LOP para processamento on-line: acumulação, adaptação e misto.

A. Método Acumulativo

O método parte do pressuposto que o comportamento imperfeito da híbrida 90° se modifica muito lentamente com o tempo e, portanto, os sinais são aproximadamente estacionários no sentido amplo, ou seja, mantém as suas características de média e variância. Acumulamos na memória

do receptor uma quantidade significativa de amostras de r_I e r_Q de cada polarização e calculamos as esperanças nestes conjuntos de dados para então aplicar a matriz de ortogonalização (calculadas através dos métodos de Gram-Schmidt ou Löwdin) para todas as amostras seguintes que forem identificadas pelo receptor.

Na seção V apresentamos uma comparação entre o GSOP e o LOP utilizando o método de acumulação. Este procedimento possui uma complexidade computacional baixíssima, embora um espaço de memória razoável se faça necessário para resultados mais precisos.

B. Método Adaptativo

O método de adaptação estima a matriz de ortonormalização à medida que novas amostras chegam no receptor e a aplica a transformação a cada amostra. Para realizar essa estimação, utilizamos o conceito de médias móveis exponenciais como estimação da esperança.

A média móvel exponencial nada mais é do que um tipo simples de filtro de resposta finita ao impulso (Infinite Impulse Filter - IIR) que utiliza pesos para cada conjunto de dados que decaem exponencialmente com a chegada de novos dados. A fórmula para o cálculo da média móvel exponencial é dada por:

$$S_t = (1 - \alpha) \times S_{t-1} + \alpha \times X_t \quad (3)$$

Sendo S_t o valor da média móvel no momento t , X_t o valor da amostra neste instante de tempo e α é o coeficiente de atualização da média móvel anterior com a nova amostra e pode variar entre zero e um. Sendo que $\alpha = 0$ torna S_t constante e igual ao valor inicial e $\alpha = 1$ torna S_t dependente unicamente de X_t . Neste trabalho apresentamos o α na forma de porcentagem, enfatizando o nível de dependência do valor da média exponencial com o valor da amostra atual. A escolha mais adequada do α deve levar em consideração dois fatores: tempo de convergência e variância da média móvel após a convergência. Em geral, quanto maior o α , mais rápido se dá a convergência e maior se torna a variância em torno do valor ideal do valor ideal.

Este método é claramente mais custoso do ponto de vista computacional, pois a matriz de ortonormalização deve ser recalculada a cada nova amostra no receptor. Essa questão é ainda mais evidente quando utilizamos o LOP, pois precisamos fazer a inversão de uma matriz a cada nova amostra. Em compensação, a necessidade de um acúmulo de amostras tende a zero (restando apenas os próprios elementos da matriz). Esta alternativa também acompanha mais precisamente as alterações nas condições do sistema, principalmente no tocante ao desequilíbrio de potência e atinge níveis mais satisfatórios de ortonormalidade ao longo prazo.

C. Método Misto

O método misto é uma combinação dos dois métodos anteriores: realizamos a média móvel exponencial com as esperanças e correlações de conjuntos de dados acumulados no receptor, ou seja, X_t passa a ser a média de um conjunto de amostras, não mais a amostra em si. Esse conjunto de dados é

bem menor que o utilizado no caso acumulativo. Este método representa um compromisso entre o gasto de memória e a complexidade computacional: quanto maior a quantidade de amostras acumuladas no receptor, menor é a complexidade e maior é o gasto com memória.

Para estabelecermos um α adequado, partimos do pressuposto de que quanto maior o conjunto de dados, mais próxima é a esperança deste conjunto de dados da esperança real das componentes do sinal. Portanto, quanto maior o tamanho do conjunto de dados, maior a necessidade de atualização da média móvel exponencial com o novo conjunto de dados e, portanto, maior o α .

V. RESULTADOS

Inicialmente utilizamos o método acumulativo e comparamos o comportamento dos procedimentos de Gram-Schmidt e de Löwdin. Como critério de comparação, analisamos a variação da BER, estimada a partir do fator Q , com o aumento do erro da híbrida. A acumulação de amostras foi de 1100 no caso do GSOP e 2000 no caso do LOP, por polarização. Podemos perceber na Fig. 3. que, nestas condições, os dois procedimentos mantiveram a BER aproximadamente constante. Esta insensibilidade ao erro da híbrida é sem dúvida uma característica vantajosa para aplicações em sistemas reais, pois permite que a quantidade de amostras acumuladas se mantenha inalterada. Observamos também que o GSOP apresentou uma qualidade superior ao LOP no quesito avaliado.

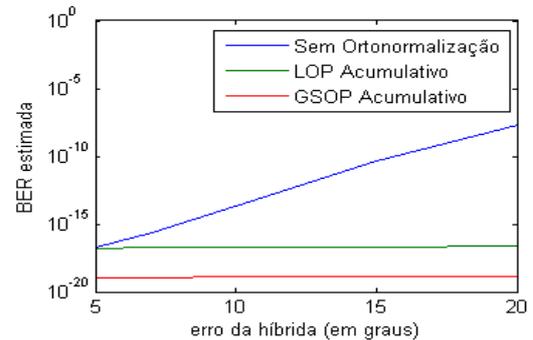


Fig. 3. Comparação entre os procedimentos utilizando o método acumulativo

Na realização do método adaptativo, precisamos acrescentar outro fator a ser considerado: o coeficiente de atualização α . Com o intuito de verificar a variação do comportamento do método com o α apresentamos a seguir a aplicação do GSOP sobre um mesmo conjunto de amostras com erro de híbrida constante em 5°, variando-se o α .

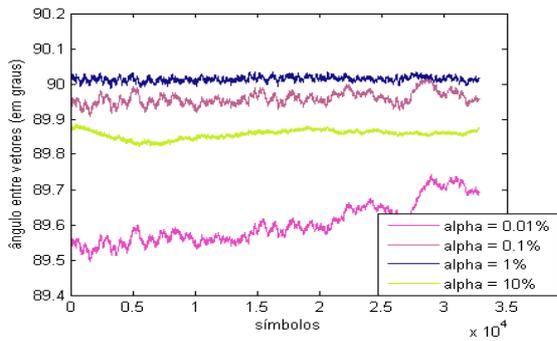


Fig. 4. Convergência do GSOP com método adaptativo para diferentes valores de α

A Fig. 4. mostra o ângulo entre as componentes em fase e em quadratura de uma das polarizações à medida que as amostras chegam ao receptor. O gráfico foi gerado com os valores em regime permanente, após a passagem de 70 mil amostras para que fosse removido o transiente inicial. Podemos perceber que o método solucionou o problema da não-ortogonalidade para todos os valores de α , mantendo as componentes ortogonais com um erro de até $0,5^\circ$. Dentre os valores de α estudados, o melhor em termos de convergência para a ortogonalidade foi 1%.

Para verificar como o método se comporta com a variação do erro da híbrida, fixamos o valor de α em 0.01% e analisamos a convergência para a ortogonalidade.

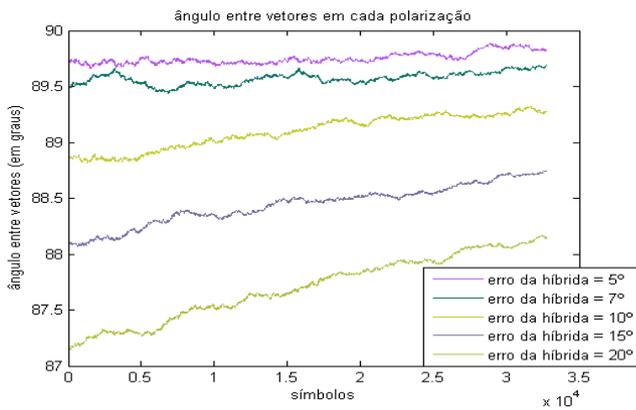


Fig. 5. Convergência do GSOP com método adaptativo para diferentes erros da híbrida

A Fig. 5. mostra que mesmo com um erro de híbrida tão grande quanto 20° , o método tende a tornar as componentes ortogonais. Como no caso anterior, o gráfico foi gerado após a passagem de 70 mil amostras.

Concluída a análise do α , fazemos a comparação entre o GSOP e o LOP com método adaptativo através da BER estimada.

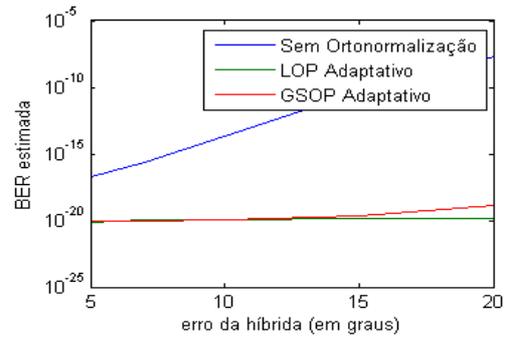


Fig. 6. Comparação entre os procedimentos utilizando o método adaptativo

Fica claro pela Fig. 6. que os dois procedimentos apresentam uma BER muito parecida, sendo que o desempenho do GSOP é levemente piorado com erros de híbridas elevados. No entanto, é preciso levar em consideração o fato de que o LOP apresenta uma complexidade computacional muito maior.

Como mencionado na seção IV.C, o método misto oferece um compromisso entre a complexidade computacional do método adaptativo e a necessidade de memória do método acumulativo. A figura Fig. 7. mostra a comparação em termos de BER entre o GSOP utilizando o método misto e os procedimentos que apresentaram melhor qualidade com os métodos acumulativo e adaptativo. Como esperado, a BER estimada para o método misto assume um valor intermediário entre o método adaptativo e acumulativo. Para os dois algoritmos utilizamos blocos de 10 símbolos como conjunto de dados e $\alpha = 1\%$.

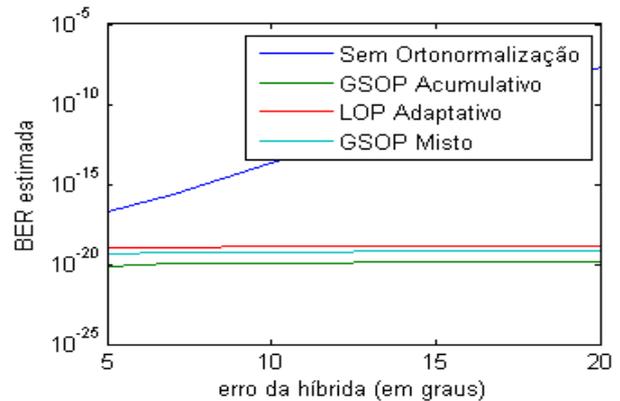


Fig. 7. Comparação entre os métodos propostos

O método de Gram-Schmidt misto apresentou o resultado em termos de BER levemente pior que o acumulativo, como mostra a Fig. 7. Esse fato pode estar ligado à escolha do α , que é dependente do tamanho do bloco utilizado. No entanto, para um número de símbolos muito grande espera-se que essa situação se inverta.

Finalmente, apresentamos dados gerados na configuração *back-to-back*, obtidos a partir de um sistema experimental de

transmissão óptica a 100Gbs/s, utilizando modulação DP-QPSK e detecção coerente.

Neste momento passamos a considerar o problema de desequilíbrio de potência entre r_I e r_Q , que não existia no sistema simulado. Esse desequilíbrio é corrigido pela normalização das componentes por parte do GSOP e do LOP.

A Fig. 8. mostra que as componentes podem chegar ao receptor com um desequilíbrio de potência de até 45% para o caso estudado. Podemos perceber que todos os métodos propostos compensaram satisfatoriamente esse desequilíbrio, com destaque para o LOP Misto que mantém o desequilíbrio praticamente nulo.

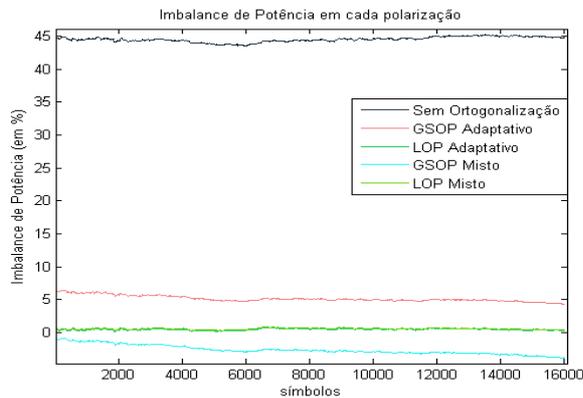


Fig. 8. Comparação entre os desequilíbrios de potência para cada método

Quando comparamos a ortogonalidade entre as componentes do sinal, percebemos que a híbrida utilizada em laboratório tem um erro muito baixo ($< 2^\circ$). A Fig. 9. comprova novamente que o LOP Misto é a melhor combinação de procedimento e método, mantendo as componentes mais aproximadamente ortogonais dentre os algoritmos propostos. Dos resultados obtidos podemos perceber

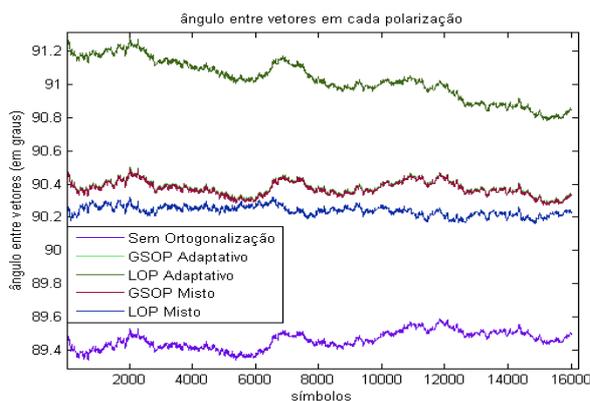


Fig. 9. Comparação de ortogonalidade para cada método

De forma geral o método misto apresentou características de convergência muito boas para o GSOP e para o LOP, tendo esse último eficiência levemente superior. Com a escolha de um α adequado, espera-se que o desempenho do método misto quanto a BER estimada pelo fator Q seja superior ao do método acumulativo e inferior à do método adaptativo.

VI. CONCLUSÕES

As imperfeições de front-end desequilibram as componentes em fase e em quadratura do sinal recebido degradando a qualidade do sistema e o desempenho do algoritmos de DSP. Os métodos de ortogonalização apresentados solucionaram o problema no contexto de processamento on-line. Existem um trade-off entre complexidade e uso de memória na comparação dos métodos adaptativo e acumulativo. Um compromisso entre os métodos é a utilização do método misto. O Procedimento de Löwdin apresentou qualidade superior em relação ao de Gram-Schmidt, embora tenha uma clara desvantagem em termos computacionais. Para um sistema de recepção óptico limitado por capacidade de processamento, aconselha-se a utilização do procedimento de Gram-Schmidt com método misto.

AGRADECIMENTOS

Ao FUNTTEL e ao CPqD pelo financiamento e apoio.

REFERENCES

- [1] L. A. Pivato e D. A. A. Mello, "Quadrature Imbalance Compensation Techniques for DP-QPSK Coherent Systems", 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Jun.-Jul. 2010.
- [2] 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.
- [3] C.R.S. Fludger, et al., "Coherent Equalization and POLMUX-RZ-DQPSK for Robust 100-GE Transmission", Journal of Lightwave Technology, vol. 26, no. 1, Jan. 1, 2008.
- [4] S.J. Savory, "Digital Filters for Coherent Optical Receivers", Opt. Expr., vol.16, no. 2, pp. 804-817, 2008.
- [5] I. Roudas et al., "Compensation of coherent DQPSK receiver imperfections," in Proc. LEOS Summer Topical Meetings, pp. 19-20, 2007.
- [6] C.S. Petrou, et al., "Quadrature Imbalance Compensation Algorithms for Coherent PDM QPSK Systems", LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS'09, pp. 642-643.
- [7] S. Haykin, Adaptive Filter Theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2001.
- [8] S.H. Chang, H.S. Chung, and K. Kim, "Impact of Quadrature Imbalance in an Optical QPSK Coherent Receiver," IEEE Photom. Technol. Lett., vol. 21, no. 11, pp. 709-711, Jun. 1, 2009.
- [9] I. Mayer, "On Löwdin's Method of Symmetric Orthogonalization," Int. J. Quantum Chem., vol. 90, no. 1, pp. 63-65, Oct. 5, 2002.
- [10] D. Sconfield, "Note on Löwdin Orthogonalization and Square Root of a Positive Self-Adjoint Matrix," Int. J. Quantum Chem., vol. 7, no. 3, pp. 561-568, 1973.