

Transmissão Óptica DWDM de 8,8Tb/s (79x112Gb/s NRZ-DP-QPSK) por até 3200 km com Análise da Pré-Filtragem Óptica

Júlio C. R. F. Oliveira, Edson P. Silva, Luis H. H. Carvalho, Juliano R. F. Oliveira, Reginaldo Silva, Pedro P. Gondim e Alberto Paradisi

Resumo - Neste trabalho é apresentada e analisada uma transmissão óptica experimental de 8,8 Tb/s utilizando 79 canais modulados a 112 Gb/s com o uso do formato de modulação NRZ-DP-QPSK e detecção coerente. Um alcance máximo de 3200 km é obtido em uma estrutura de propagação baseada em fibras de sílica pura e EDFAs como estrutura de amplificação. Os impactos da pré-filtragem óptica em 25 GHz são mensurados, sendo obtido um alcance (79 x 112G) de 2750 km com o dobro da eficiência espectral 4,48 b/s/Hz.

Palavras-Chave—Sistemas ópticos de alta velocidade, eficiência espectral, redes ópticas, filtragem óptica, formatos de modulação.

Abstract—In this work is presented and analyzed an experimental optical transmission at 8.8 Tb/s using 79 channels modulated at 112 Gb/s with NRZ-DP-QPSK modulation format with coherent detection. A maximum reach of 3200 km was obtained in a pure silica fiber recirculation loop using EDFAs as amplification structure. A pre-filtering analysis at 25 GHz is performed, obtaining for 79 x 112G a maximum reach of 2750 km with twice spectral efficiency (4,48 b/s/Hz).

Keywords—High speed optical systems, spectral efficiency, optical networks, optical filtering, modulation formats.

I. INTRODUÇÃO

Impulsionada pelo crescente aumento de tráfego nas redes de comunicações, em sua maioria tráfego de dados advindos de aplicações associadas à internet e vídeo, a infra-estrutura de telecomunicações de altas taxas, em sua maioria baseada em fibras ópticas, vem atravessando um profundo processo de evolução [1]. As redes ópticas evoluíram de redes baseadas em sistemas ponto a ponto com taxas de 2,5 Gb/s para redes ópticas reconfiguráveis capazes de operar a 100 Gb/s [2], se encontrando em contínua e veloz evolução na direção de sistemas capazes de operar em 400 Gb/s ou até mesmo em 1 Tb/s por canal [3].

Desde o início de sua existência, os sistemas de transmissão óptica foram baseados em modulação de intensidade (OOK), porém com o avanço das taxas de transmissão, a ocupação espectral necessária para a manutenção da grade de sinais com multiplexação densa por divisão de comprimento de onda, DWDM (50 GHz), forçou a evolução das estruturas de transmissão e recepção no intuito de aumento da eficiência espectral. Neste contexto, a partir da operação em taxas de 40 Gb/s foram utilizadas estruturas de transmissão com modulação de fase e codificação diferencial com dois bits por símbolo (DQPSK), enquanto que a estrutura de recepção passou a necessitar de um interferômetro para a realização da

recepção de forma diferencial, extraindo a informação da diferença de fase entre bits sucessivos [4]. Nestes sistemas a eficiência espectral evoluiu de 0,5 b/s/Hz (sistemas OOK) para 1 b/s/Hz, tornando possível a transmissão de sinais a 40 Gb/s na grade DWDM (50 GHz). Porém, para sistemas operando a 100 Gb/s, é necessária uma eficiência espectral de 2 b/s/Hz para garantir uma ocupação espectral de um sinal óptico modulado a 100Gb/s na grade DWDM. Para obter esta eficiência espectral, os sistemas de transmissão óptica adotaram um formato de modulação baseado na multiplexação de polarização com modulação em fase. A utilização da modulação por chaveamento de fase em quadratura com duas polarizações, DP-QPSK, induz nos sistemas ópticos a necessidade de detecção coerente, devido à necessidade estrita de recuperação da fase do sinal.

Por meio do uso de moduladores DP-QPSK em conjunto com o mecanismo de detecção coerente, torna-se possível a transmissão de sinais a 100 Gb/s na grade DWDM. O uso da detecção coerente, que possibilita a recuperação integral do campo elétrico do sinal recebido, torna possível o uso de algoritmos de processamento digital de sinais para minimização dos efeitos lineares e não lineares do canal de comunicação [5].

Neste trabalho é demonstrada experimentalmente a maior transmissão em taxa e alcance reportada na América Latina através da transmissão de 8,8 Tb/s por meio de uma estrutura de transmissão composta por 79 x112 Gb/s NRZ-DP-QPSK e detecção coerente com processamento digital de sinais *off-line*. Foi demonstrado um alcance máximo de 3200 km em um anel de recirculação composto por 6 amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio, EDFAs, e um multiplexador óptico insere/deriva reconfigurável, ROADM WSS, para o sinal sem pré-filtragem. Ainda neste trabalho, é demonstrado que mesmo suprimindo metade do espectro na transmissão, através do uso da pré-filtragem em 25 GHz, é obtido um alcance, com os mesmos parâmetros de transmissão, de 2750 km, porém, dobrando a eficiência espectral (4,48b/s/Hz).

II. ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental utilizado em laboratório para a realização dos experimentos pode ser dividido em três conjuntos: transmissão, anel de recirculação e recepção, assim como ilustrado na Fig. 1.a, 1.b e 1.c, respectivamente. A transmissão consistiu-se de duas partes distintas: a primeira parte foi definida pelos 78 lasers de realimentação distribuída, DFB, com largura de linha menor do que 2 MHz, espaçados de 50 GHz em frequência de forma a cobrir grade C e grade H do

padrão DWDM. Todos os lasers desse conjunto são direcionados a um mesmo modulador, cada um cumprindo o papel de portadora óptica para um canal 112 Gb/s DP-QPSK; a segunda parte referiu-se ao canal de teste, para o qual utilizou-se outro modulador DP-QPSK e um laser de cavidade externa (ECL) com largura de linha da ordem de 100 kHz. Cada modulador recebeu continuamente a repetição de quatro sequências binárias pseudo-aleatórias (PRBS) de comprimento $2^{15}-1$ na taxa de 28 Gb/s, onde 25 Gb/s são de dados efetivamente transmitidos e os 3 Gb/s adicionais são compostos pelo código corretor de erro (FEC) e protocolos das camadas de rede, codificadas eletricamente num sinal com $7,0 V_{pp}$ no formato NRZ, fornecidas pelo conjunto formado pelo gerador de PRBS, MUX e amplificadores elétricos. Os moduladores receberam informações descorrelacionadas entre si. O canal de teste foi agrupado com os demais por meio de um acoplador óptico, como ilustrado na Fig. 1. Desse modo, cada um dos 79 canais continha 100 Gb/s de informação, mais a carga adicional dos códigos corretores de erro e dos cabeçalhos de protocolo das camadas superiores da rede, totalizando uma taxa de 112 Gb/s por canal. Um filtro óptico passa-faixa tipo porta (não representado na Fig. 1) com largura de banda variável foi utilizado também no arranjo da transmissão. Esse filtro serviu à mensuração do desempenho do canal sob teste quando este, cuja ocupação espectral é de 56 GHz, é submetido a uma filtragem, nesse caso restringindo sua largura espectral a 50 GHz e posteriormente aplicando uma pré-filtragem em 25 GHz. Outro ponto de interesse nessa análise reside no fato de esse sistema com pré-filtragem da ordem de 25 GHz duplicar a eficiência espectral do sistema original.

aberta e a chave AO LS é fechada permitindo a recirculação do sinal. O enlace de fibra é composto por quatro trechos de 50 km e um trecho de 26 km todos de fibra de sílica pura, cuja atenuação média é 0,176 dB/km em 1550 nm, área efetiva de $80 \mu m^2$, dispersão cromática de 18,664 ps/nm em 1550 nm e dispersão de modo de polarização (PMD) abaixo de 0,0665 ps/ \sqrt{km} .

A perda por trecho de 50 km de fibra é da ordem de 9dB, sendo compensada por EDFAs com bombeio co-propagante de 980 nm, potência máxima de saída de 21dBm e figura de ruído máxima de 7,0 dB. São adicionados três filtros equalizadores de ganho, de forma a diminuir o desnível de potência dos canais ao passarem pelo percurso e amplificadores do anel. Estes amplificadores operam em modo de controle de potência. Uma chave óptica reconfigurável de *grid* flexível (WSS *flex grid*) é inserida ao final do percurso em anel com a finalidade de equalizar o espectro de potência dos canais em cada volta. É importante ressaltar que essa estrutura não é ótima, ou seja, a figura de ruído agregada pelo sistema não é a mínima possível, capaz de permitir o máximo alcance. Em geral, a figura de ruído de amplificadores EDFA utilizados em anéis de recirculação de desempenho ótimo é da ordem de 4,5 dB. Porém, com o aumento do número de canais e, conseqüentemente, da potência de saída requisitada para cada amplificador, as restrições de projeto dos EDFAs tornam-se bem mais dispendiosas, de modo que essa abordagem não foi considerada para esse conjunto de experimentos. Todavia, a configuração de recirculação utilizada está mais próxima das condições existentes nas redes atuais, nas quais um canal 112 Gb/s passará por amplificadores com figura de ruído maiores que 4,5 dB, o que nos permite avaliar o comportamento de um sistema de alta capacidade de transmissão agregada em condições mais realistas. Um sistema síncrono de gatilho das chaves AO permite que o receptor adquira amostras do sinal no instante em que o mesmo percorre um número determinado de voltas no anel. Dessa forma é possível avaliar o desempenho da transmissão ao longo de múltiplos do comprimento total do percurso de recirculação. A saída do anel é amplificada por um EDFA, que cumpre o papel de pré-amplificador da recepção.

Na Figura 1.c pode ser visto, por fim, o diagrama de blocos representativo da estrutura de recepção coerente utilizada para recuperar a informação transmitida. Essa estrutura pode ser entendida em três partes principais: conversão opto - elétrica, conversão analógico-digital (A/D) e tratamento digital dos sinais. A conversão opto - elétrica é realizada pelo conjunto de dispositivos: oscilador local, híbrida 2 x 8 e fotodiodos balanceados. Esse esquema é responsável por trazer o sinal modulado à banda básica, converter a informação óptica ao domínio elétrico, demultiplexando as polarizações do sinal e separando as componentes em fase e quadratura de cada polarização. Em seguida é efetuada a conversão A/D do sinal elétrico, a uma taxa de 40 G amostras/s. Por fim, o sinal convertido é tratado *offline* por um conjunto de algoritmos de processamento digital de sinais de modo a compensar os efeitos impostos pelo canal ao sinal transmitido (dispersão cromática, perdas dependentes de polarização, imperfeição de construção dos dispositivos, etc). Ao fim, obtêm-se as estimativas e contagens de taxa de erro de bits, para avaliação da qualidade da transmissão.

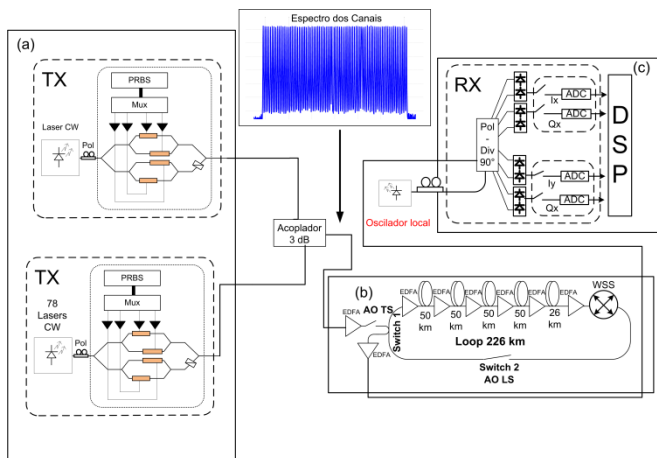


Fig. 1 - Diagramas de blocos das estruturas do sistema óptico: (a) transmissor; (b) anel de recirculação; (c) receptor.

Na Fig. 1. é ilustrada em detalhe a estrutura do anel de recirculação óptica utilizado nesse experimento. Na entrada do sistema de recirculação utilizou-se um amplificador óptico à fibra dopada com Érbio (EDFA) para compensar a atenuação de alguns dispositivos óticos passivos e adequar o nível de potência dos canais na entrada do anel de recirculação. O funcionamento do sistema de recirculação é controlado por duas chaves acusto-ópticas (AO). Estas chaves operam de modo complementar, ou seja, no instante em que uma está aberta a outra está fechada. A chave AO TS é fechada por um tempo conhecido como tempo de injeção, em seguida esta é

III. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

A partir do uso da detecção coerente, sendo necessário o batimento do sinal modulado com um oscilador local, a amostragem do sinal em banda base torna possível a aplicação de técnicas de processamento digital de sinais para minimizar os efeitos de camada física impostos pelo canal de comunicação, até a completa recuperação da fase do sinal.

A Figura 2 ilustra a sequência de algoritmos usualmente aplicada na unidade DSP. O bloco de normalização e ortogonalização compensa distorções na híbrida de 90° e diferenças de potência entre as componentes em fase e quadratura usando o algoritmo de Gram-Schmidt [7]. O bloco Equalizador Estático faz a compensação da dispersão cromática, CD, acumulada durante a transmissão no domínio do tempo como em [8]. Um filtro de resposta ao impulso finita (FIR – *finite impulse response*) é usado para equalizar o sinal, com os coeficientes e tamanho calculados para corresponder à função de transferência inversa à da CD total. O bloco recuperação de sincronismo usa o algoritmo de Gardner [9] para recuperar o tempo de símbolo corretamente. O bloco Equalizador Dinâmico é responsável por demultiplexar as polarizações, a CD residual e efeitos que variam com o tempo como a PMD. O algoritmo utilizado nesse bloco é o CMA na configuração MIMO 2x2 (*multiple input multiple output*) usando quatro filtros FIR [5]-[8], como mostrado na Fig. 2.

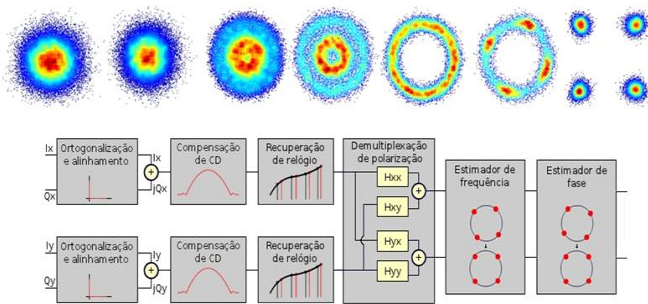


Fig. 2. Diagrama funcional da unidade DSP.

Após a equalização dinâmica, que realiza a demultiplexação das polarizações, é realizada a estimação de frequência [10], seguida pelo bloco de estimação de fase, através do algoritmo FFPE (*feed-forward phase estimation*) [11]. Posteriormente ao estimador de fase é feita a decisão nos símbolos de cada polarização. A parte superior da Figura 2 ilustra a evolução da constelação ao longo do processamento digital de sinais. O sinal recebido após a propagação é penalizado pelos efeitos da camada física, sendo a dispersão cromática e a PMD os principais fatores que contribuem para o alargamento temporal do sinal, compensados pela filtragem digital.

IV. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos. A Fig. 3 apresenta as curvas de desempenho em termos de taxa de erro de bit (BER) por relação sinal-ruído óptica (OSNR) em configuração *back-to-back* para sinais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s sem e com pré-filtragem em 50 e 25 GHz. Na Fig. 3 observa-se a degradação do sinal com a diminuição da largura de banda da pré-filtragem óptica. O sinal pré-filtrado em 25 GHz apresenta penalidade de OSNR de 2,9

dB no limite do FEC, enquanto não é acrescentada penalidade ao sinal com pré-filtragem em 50 GHz. As medidas acima do limite do FEC indicam perda de sincronismo do sinal, enquanto as medidas abaixo do limite do FEC indicam uma transmissão sem erro. A Fig. 4 ilustra os espectros ópticos de um sinal 112 Gb/s DP-QPSK com e sem pré-filtragem em 25 GHz.

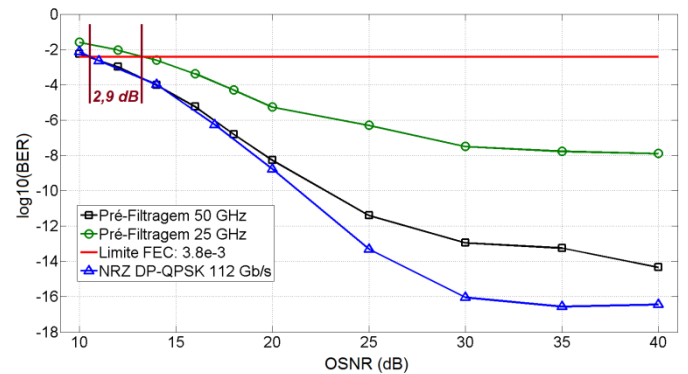


Fig. 3. BER em função da OSNR @ (0.1 nm) para sinais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s sem e com pré-filtragem em 50 e 25 GHz em configuração *back-to-back*.

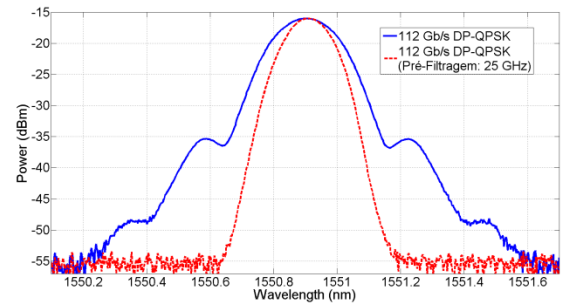


Fig. 4. Espectros ópticos de um sinal 112 Gb/s DP-QPSK sem e com pré-filtragem em 25 GHz.

Um parâmetro importante em um sistema DWDM é a potência lançada na fibra. Um experimento foi realizado para determinar a potência ótima por canal que deve ser lançada na fibra usada em um sistema DWDM com 79 canais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s.

Neste breve experimento o sinal DWDM percorreu 72 km de fibra de sílica pura e, mantendo a OSNR na recepção em 20 dB, foi variada a potência óptica de lançamento na fibra. O sinal foi recebido e a BER obtida foi usada para determinar a penalidade de OSNR em relação à curva de desempenho em *back-to-back* da Figura 3. A Fig. 5 apresenta uma curva de penalidade de OSNR em função da potência por canal lançada na fibra. É verificado que a potência por canal ótima é de 0 dBm, pois apresenta a menor penalidade de OSNR.

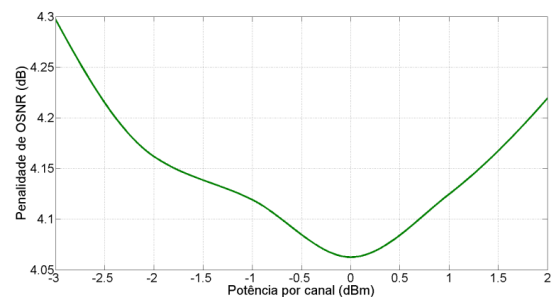


Fig. 5. Penalidade de OSNR em função da potência por canal lançada na fibra para um sistema DWDM com 79 canais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s.

A Fig. 6 apresenta os resultados da transmissão de um sistema DWDM com 79 canais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s em termos de BER em função do alcance e da OSNR para sinais sem e com pré-filtragem em 50 GHz e 25 GHz. Os valores de OSNR da Fig. 6 indicam as medidas do sinal após diferentes números de voltas no anel de recirculação, desde a primeira volta até a oitava volta. É verificado o alcance máximo de 3200 km para o sinal sem pré-filtragem e de 2750 km para o sinal com pré-filtragem em 25 GHz. Como esperado, o sinal sem pré-filtragem apresentou um melhor desempenho, alcançando o limite do FEC com uma OSNR mínima de 14,7 dB enquanto o sinal pré-filtrado chegou ao limite com uma OSNR mínima de 15,5 dB.

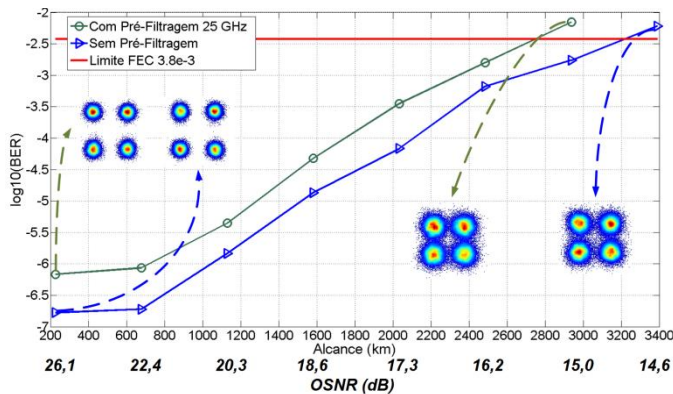


Fig. 6. BER em função do alcance e da OSNR @ (0.1 nm) para sinais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s sem e com pré-filtragem em 25 GHz.

Apesar de apresentar um pior desempenho em termos de alcance máximo, a comparação entre os sistemas com e sem pré-filtragem é injusta, pois o uso da pré-filtragem dobra a eficiência espectral do sistema. Um sistema DP-QPSK 112 Gb/s com 28 GBd pré-filtrado em 25 GHz apresenta uma eficiência espectral de 4,48 b/s/Hz e pode ser comparado com um sistema DP-16QAM 224 Gb/s com 28 GBd na grade DWDM de 50 GHz. No entanto, são mais críticos os requerimentos para formatos de modulação de maiores ordens, tais como ruído de fase e OSNR mínima na recepção, além de serem mais susceptíveis aos efeitos não-lineares da fibra óptica. Devido aos fortes requerimentos dos formatos de modulação de maiores ordens, a pré-filtragem óptica compõe uma solução simples e eficiente para aumentar a capacidade dos sistemas ópticos atuais.

V. CONCLUSÕES

É apresentada a primeira demonstração experimental na América Latina de um sistema óptico WDM 79 x 112Gb/s NRZ-DP-QPSK. Verificou-se um alcance máximo de 3200 km para o sistema sem pré-filtragem e de 2750 km para o sistema

com pré-filtragem em 25 GHz. Esse resultado foi obtido utilizando um sistema de recirculação não ótimo para minimizar a inserção de ruído, evidenciando a robustez do sistema ao operar em condições próximas àquelas encontradas em redes reais.

A pré-filtragem aumenta a eficiência espectral do sistema, possibilitando a alocação de um número maior de canais, mantendo o formato de modulação, ao custo da penalização do desempenho da transmissão devido à interferência entre símbolos adicionada ao sinal. Desse modo, sistemas que utilizam pré-filtragem devem ser projetados obedecendo uma negociação entre eficiência espectral, desempenho e, conseqüentemente, alcance máximo. Esse é um fator importante quando se considera que o futuro da camada física das redes óticas tende para arquiteturas cada vez mais flexíveis em termos de taxa de transmissão, formatos de modulação e ocupação espectral dos canais.

AGRADECIMENTOS

Ao FUNTTEL no âmbito do projeto PAR100GETH e ao CPqD pelo financiamento e apoio.

REFERENCES

- [1] - Renaudier, J., Bertran-Pardo, O., Charlet, G., Salsi, M., Mardoyan, H., Tran, P. e Bigo, S., "8 Tb/s long haul transmission over low dispersion fibers using 100 Gb/s PDM-QPSK," *Bell Labs Technical Journal* 14(4), 27-46 (2010).
- [2] - A. Nag, M. Tornatore, e B. Mukherjee, "Optical Network Design with Mixed Line Rates and Multiple Modulation Formats", *IEEE/OSA J. of Lightwave Technology*, V. 28, N. 4, pp.466 - 475, 2010.
- [3] - S. Chandrasekhar e Xiang Liu, "Terabit Superchannels for High Spectral Efficiency Transmission", *ECOC 2010, Tu.3.C.5*, Sep. 2010.
- [4] - Chandrasekhar, S. and Liu, X., "40 Gb/s DBPSK e DQPSK formats for transparent 50 GHz DWDM transmission," *Bell Labs Technical Journal* 14(4), 11-26 (2010).
- [5] - 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.
- [6] - Chang, F., Onohara, K. e Mizuochi, T., "Forward Error Correction for 100 G Transport Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 48-55 (2010).
- [7] - S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th Ed., Prentice Hall, 2001.
- [8] - S. J. Savory, "Digital filters for coherent optical receivers," *Opt. Express* 16, 804-817 (2008).
- [9] - F. Gardner, "A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-34, no. 5, pp. 423-429, May 1986.
- [10] - Z. Li et al., "Wide-Range and Fast-Convergence Frequency Offset Estimator by BER-Aiding..." *OSA/ACP 2009, ThT2*, (2009).
- [11] - 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*, pp.95-96, 20-22 July 2009.