

# 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  $2 \times 8$  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.

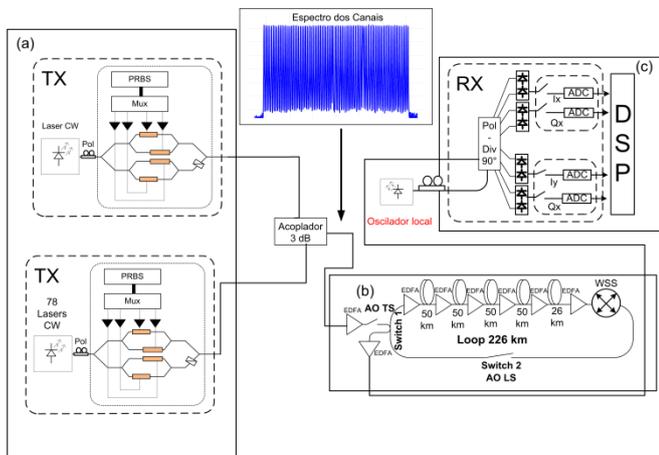


Fig. 1 - Diagramas de blocos das estruturas do sistema óptico: (a) transmissor; (b) anel de recirculação; (c) receptor.

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 seqüência 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.

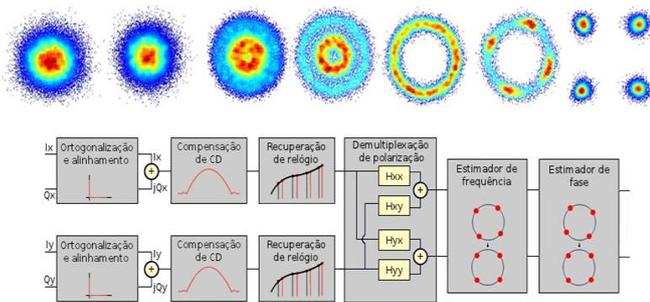


Fig. 2. Diagrama funcional da unidade DSP.

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.

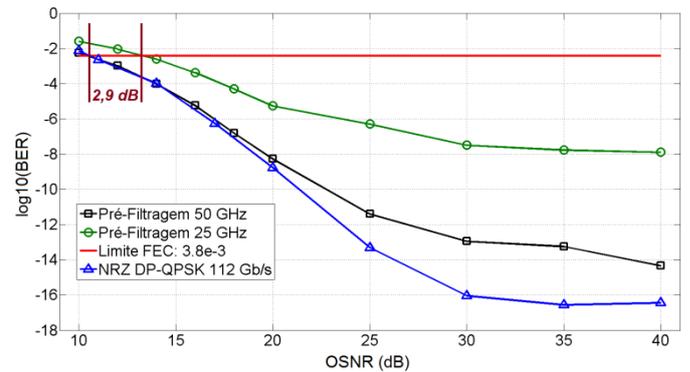


Fig. 3. BER em função da OSNR @ (0.1 nm) para sinais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s sem e com pré-filtragem em 50 e 25 GHz em configuração *back-to-back*.

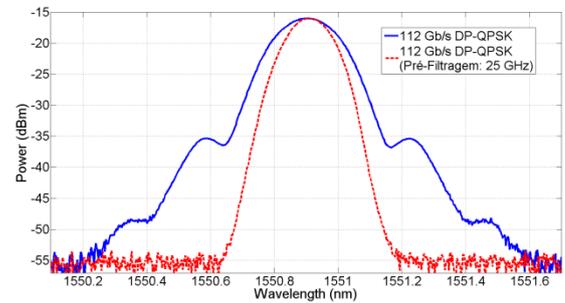


Fig. 4. Espectros ópticos de um sinal 112 Gb/s DP-QPSK sem e com pré-filtragem em 25 GHz.

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.

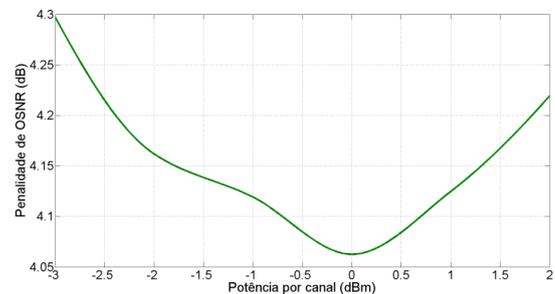


Fig. 5. Penalidade de OSNR em função da potência por canal lançada na fibra para um sistema DWDM com 79 canais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s.

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.

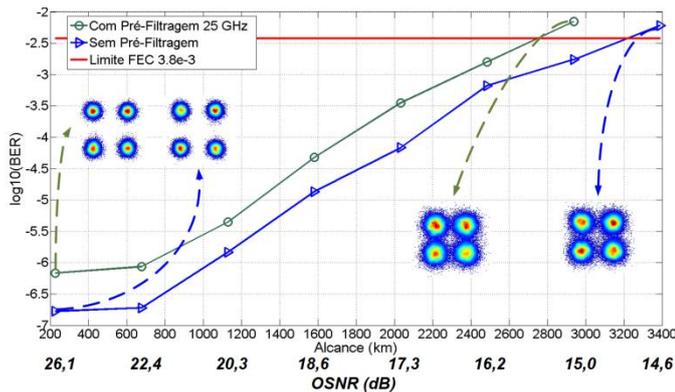


Fig. 6. BER em função do alcance e da OSNR @ (0.1 nm) para sinais NRZ-DP-QPSK 112 Gb/s sem e com pré-filtragem em 25 GHz.

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.