

# Transmissão de um supercanal OFDM de 1,12 Tb/s por 452 km com eficiência espectral de 4 b/s/Hz

Daniel Moutinho Pataca, Luis Henrique Hecker de Carvalho, Cristiane Brandani Ferrari Adami, Fábio Donati Simões e Júlio C. R. F. Oliveira

**Resumo**—Neste artigo apresenta-se a transmissão experimental por 452 km de um supercanal NGI-CO-OFDM de 1,12 Tb/s, com 10 portadoras e eficiência espectral de 4 b/s/Hz. As portadoras OFDM, geradas num gerador *comb* RFS, foram moduladas em 112 Gb/s DP-QPSK, transmitidas por um anel de recirculação de 226 km, detectadas por um receptor óptico coerente e processadas *offline*. Observou-se que as taxas de erro obtidas para as portadoras testadas ficaram abaixo do limite do FEC de  $3,8 \times 10^{-3}$  para até duas voltas no anel de recirculação.

**Palavras Chave**—Comunicações ópticas, supercanal, transmissão óptica OFDM, modulação DP-QPSK, detecção óptica coerente

**Abstract**—This paper describes the experimental transmission, through a 452 km long fiber link, of a 1.12 Tb/s NGI-CO-OFDM signal, with 10 carriers in a single channel leading to a spectral efficiency of 4 b/s/Hz. The OFDM carriers, generated in a RFS *comb* generator, were modulated at 112 Gb/s with a DP-QPSK format, transmitted by a 226 km long recirculating ring, detected by a coherent optical receiver and processed *offline*. It was observed that the BER values obtained for the tested carriers were below the FEC limit of  $3.8 \times 10^{-3}$  for up to two round trips inside the recirculating loop.

**Keywords**—Optical communication, superchannel, optical OFDM transmission, coherent optical reception

## I. INTRODUÇÃO

O aumento crescente, nas redes de acesso banda larga, do uso de aplicações que consomem grandes quantidades de dados, por exemplo, vídeo sob demanda e em tempo real, cria a necessidade de se desenvolver sistemas ópticos de alta capacidade para o núcleo da rede. Este aumento de capacidade dos enlaces tronco, de modo a suprir o crescimento do tráfego da Internet de mais de 50% ao ano [1], demanda que os sistemas ópticos de próxima geração utilizem redes de transmissão com taxas superiores a 100 Gb/s por canal. Este incremento na taxa de transmissão será obtido, principalmente, pelo aumento da eficiência espectral de cada um dos canais dos sistemas WDM.

O principal e maior desafio para a implementação de sistemas com taxas superiores a 100 Gb/s por canal é obter, pelo desenvolvimento de diferentes técnicas de modulação, multiplexação e recepção, a transmissão óptica por longas distâncias (centenas de quilômetros) de taxas de 400 Gb/s e 1 Tb/s por canal. Em linhas gerais, os desafios relacionam-se aos métodos de geração e recepção de novos formatos de modulação e multiplexação, às técnicas de amplificação óptica de banda larga e baixo ruído e à redução dos ruídos e distorções gerados no transmissor e receptor em combinação

com os efeitos lineares e não lineares de propagação por fibra óptica.

Nos últimos anos, com o advento de lasers semicondutores de largura de linha estreita e estáveis, foram desenvolvidos, para os sistemas ópticos, receptores coerentes que detectam a amplitude e a fase dos sinais ópticos recebidos. Com estas informações é possível, depois da conversão de analógico para digital, o processamento desses sinais para a compensação no domínio elétrico das deformações, impostas pelo meio transmissor, e para a demodulação e demultiplexação com maior eficiência. Por outro lado, esta técnica de recuperação dos dados transmitidos é limitada pela velocidade dos conversores analógico digital, ADC, e digital analógico, DAC, que limita a taxa máxima de transmissão de símbolos.

Entre as técnicas em análise para contornar a limitação imposta pela velocidade da eletrônica, pelo aumento da eficiência espectral e pela robustez dos sinais ópticos transmitidos destaca-se a multiplexação por divisão de frequências ortogonais, OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*), já amplamente utilizada nas redes de acesso com e sem fio. Esta técnica divide a banda disponível por canal em múltiplas portadoras em vez de uma única, como nos sistemas ópticos atuais. Este aumento do número de portadoras por canal diminui a taxa de modulação de cada uma, reduzindo o problema da limitação imposta pela velocidade dos ADCs e DACs. Além disso, este tipo de multiplexação utiliza uma menor taxa de símbolo por portadora, aumentando a duração dos bits e facilitando sua detecção, o que reduz o impacto das limitações impostas pelo meio transmissor.

Neste artigo, apresenta-se o desenvolvimento experimental da transmissão por 452 km de um supercanal de 1,12 Tb/s, composto de 10 portadoras NGI-CO-OFDM (*no-guard interval coherent* OFDM). Na geração do supercanal foi utilizado um gerador *comb* com deslocador de frequência em anel [2,3]. As portadoras, separadas de 28 GHz, foram moduladas a uma taxa de 112 Gb/s no formato DP-QPSK (*dual polarization, quadrature phase shift keying*) e transmitidas por um anel de simulação de enlace óptico, constituído de seis amplificadores a fibra dopada por érbio, EDFA, e por cinco enlaces de fibra de sílica pura, quatro com 50 km e um com 26 km. Na recepção, utilizou-se um receptor óptico coerente para a recuperação da amplitude e fase do sinal e um osciloscópio de alta velocidade para a conversão do sinal analógico em digital. O processamento das amostras do sinal de diferentes portadoras foram realizadas *offline*.

Este artigo está estruturado da seguinte maneira: na seção 2, apresenta-se uma breve descrição do sistema óptico NGI-CO-OFDM, destacando seu princípio de funcionamento e principais características; na seção 3, o detalhamento do *setup*

experimental para a transmissão do supercanal de 1,12 Tb/s; na sessão 4, os resultados obtidos e sua análise e na sessão 5 as conclusões finais.

## II. SISTEMAS ÓPTICOS CO-OFDM

Nos primeiros sistemas ópticos o aumento de capacidade foi obtido pelo incremento da taxa de transmissão, técnica essa limitada pela velocidade da eletrônica disponível na época e pelos efeitos limitantes da fibra. Numa segunda fase, com o advento dos sistemas WDM e amplificadores ópticos, esse incremento foi realizado pelo aumento do número de canais de transmissão por fibra óptica. Esse aumento de capacidade dos sistemas WDM é limitado pela banda disponível dos amplificadores ópticos e pela interferência entre os canais adjacentes, sendo reduzida pelo aumento do espaçamento entre eles o que provoca uma redução da densidade espectral de informação. Diferentes técnicas estão sendo desenvolvidas para o aumento desta densidade, dentre elas, pode-se destacar; os vários formatos de modulação, a redução das limitações das fibras, as tecnologias corretoras de erro FEC (*forward error corrector*) e o aumento no número de canais. Este aumento de canais, para a mesma largura espectral, pode ser obtido pela utilização de múltiplas portadoras ópticas ortogonais, reduzindo-se a interferência entre elas.

Os sistemas OFDM são implementados pela aplicação no transmissor da transformada inversa de Fourier na sequência de bits de informação, gerando um conjunto de portadoras ortogonais no domínio da frequência, e fazendo o processo inverso na recepção para a recuperação dos dados pelo uso da transformada direta de Fourier. Os sistemas ópticos OFDM podem ser classificados em três grupos:

- 1) Geração de múltiplas portadoras no domínio elétrico. Neste tipo de sistema, o sinal OFDM elétrico é convertido para analógico antes de modular a portadora óptica e se tem como principais vantagens: a grande tolerância à dispersão cromática, CD, e dos modos de polarização, PMD, alta sensibilidade, menor complexidade do processador digital de sinais, DSP, quando comparado com as equalizações no domínio do tempo, uso de intervalos de guarda, GI, e de símbolos para treinamento, TS. Como desvantagens destacam-se: o *overhead* provocado pelo GI e TS, as limitações impostas pelas não linearidades da fibra devido à alta relação entre a potência de pico e a média do sinal OFDM e a limitação imposta pela velocidade dos dispositivos eletrônicos DAC e ADC, *drivers* e moduladores ópticos.
- 2) Geração de múltiplas portadoras no domínio óptico. Neste grupo, cada uma das portadoras ópticas, que compõem o sinal OFDM, é modulada individualmente e separadas em frequência com o mesmo valor da taxa de dados de modulação. As principais vantagens deste tipo de sistema são: menor velocidade dos dispositivos eletrônicos DAC e ADC, *drivers* e moduladores e uso mais eficiente do espectro. Como desvantagens tem-se: maior necessidade de integração fotônica e complexidade. Neste tipo de sistema, existe um compromisso entre o número de portadoras e a taxa de modulação de cada uma. Quanto maior for a taxa de modulação menor

será o número de portadoras e mais dispendioso o sistema eletrônico, por outro lado, quanto menor a taxa maior o número de portadoras e mais sofisticada a integração fotônica.

- 3) Geração de múltiplas portadoras no domínio elétrico e óptico. Este sistema é uma combinação dos dois anteriores onde se busca uma maximização das vantagens de cada um e uma minimização das desvantagens ao custo de uma maior complexidade.

O experimento apresentado neste artigo pertencente ao grupo da geração de múltiplas portadoras no domínio óptico. Neste grupo, entre as técnicas pesquisadas para a transmissão de vários Tb/s por fibra encontra-se a utilização de sistemas multiportadoras coerentes e ortogonais, CO-OFDM, que fazem uso de um gerador óptico *comb* e exploram as técnicas de processamento paralelo, com velocidades moderadas por portadora e alta eficiência espectral [4][5]. Este sinal de altas taxas, conhecido como supercanal, é produzido por um único laser semente e é composto por múltiplas portadoras amarradas em frequência e moduladas de uma maneira síncrona. Neste tipo de sistema, a separação das portadoras na recepção pode ser realizada no domínio óptico ou elétrico. No nosso caso, optou-se pela técnica elétrica, por sua simplicidade e disponibilidade e por não se possuir no laboratório dispositivo em óptica integrada para a separação das portadoras.

É demonstrado que uma portadora entre várias pode ser detectada com a mínima penalidade, provocada pela interferência entre elas, quando as seguintes condições são satisfeitas [6]: o espaçamento entre elas é igual à taxa de símbolos das portadoras moduladas, os símbolos entre portadoras são alinhados no tempo, o transmissor possui uma largura de banda suficiente e são aplicadas na recepção uma taxa de amostragem suficiente e uma filtragem *anti-aliasing* apropriada.

Uma característica importante do supercanal é que quanto maior for o número de portadoras menor deverá ser a diferença entre a frequência de separação entre elas e a taxa de transmissão de símbolos de cada uma. Ou seja, para a construção de sistemas ópticos que utilizem a técnica supercanal é fundamental a geração de portadoras estáveis e sem variação do intervalo de frequência entre elas.

## III. EXPERIMENTO

Os principais objetivos buscados nos experimentos, reportados neste artigo foram: conhecer as principais características da propagação de um supercanal de 1,12 Tb/s por centenas de quilômetros, desenvolver uma fonte óptica coerente de múltiplas portadoras estável e determinar que melhorias precisam ser realizadas nos algoritmos de processamento do sinal para a detecção do supercanal.

O arranjo experimental é apresentado na Fig. 1. Ele é composto por quatro blocos funcionais; gerador *comb*, modulador DP-QPSK, meio de transmissão (anel de recirculação) e receptor óptico coerente.

O gerador *comb* produziu 10 portadoras espaçadas de 28 GHz, como mostrado no espectro de saída apresentado na Fig. 1. O gerador utiliza a técnica *Recirculating Frequency Shifting*, RFS, que é baseada na conversão de frequência produzida pela modulação de banda lateral única com

portadora suprimida, SSB-SC. O gerador *comb* do experimento utiliza como semente um laser sintonizável, ECL (*external-cavity diode laser*), e um anel de recirculação composto por um acoplador óptico de 3 dB, um modulador Mach-Zehnder

*single-drive* QPSK, IQ, dois amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio, EDFA, e um *wavelength selective switching*, WSS.

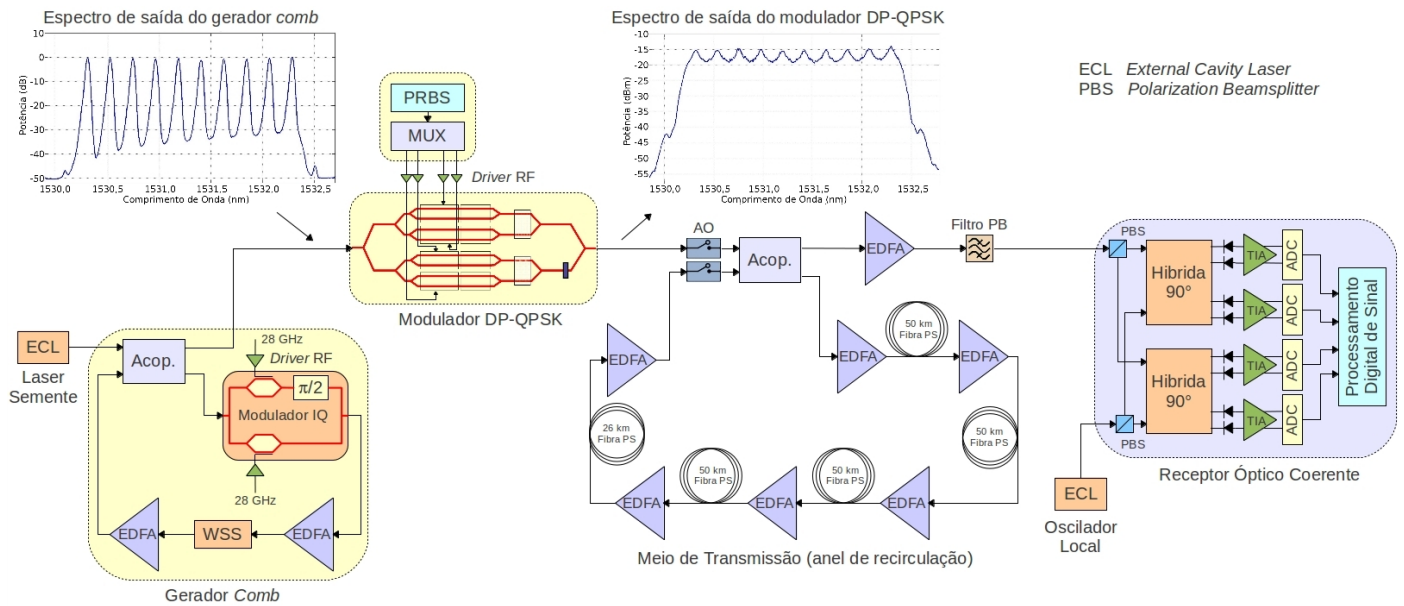


Fig. 1. Arranjo experimental do sistema óptico NGI-CO-WDM.

O laser semente do gerador *comb*, centrado no comprimento de onda de 1530,334 nm (195,9 THz), é conectado a uma das entradas do acoplador, que divide metade da potência para a saída do gerador e metade para o anel. Um sinal RF de 28 GHz é aplicado aos braços I e Q do modulador que, usando atrasos apropriados, modula no formato SSB-SC (*single side band suppressed carrier*) o sinal óptico presente no anel. Através desta modulação o sinal é deslocado em frequência de 28 GHz sendo então amplificado pelo primeiro EDFA, filtrado pelo WSS, para limitar a banda de geração de portadoras, e novamente amplificado. O sinal no anel é então aplicado à outra entrada do acoplador, onde é somado ao sinal semente. A cada ciclo, o sinal dentro do anel é deslocado em frequência e somado ao sinal do ECL, até que a última portadora seja filtrada pelo WSS.

As seqüências de dados elétricos IX, QX, IY e QY de 28 Gb/s, utilizadas para modular o sinal óptico de saída do gerador *comb*, são criadas por uma placa composta de um gerador de *pseudo random binary sequence*, PRBS, e um MUX 20:4. As seqüências de dados IX e QX modulam o sinal óptico com polarização na direção X e as seqüências IY e QY na direção Y.

As seqüências de dados de saída da placa, depois de alinhadas e amplificadas por um *driver* RF quadruplo, alimentam um modulador Mach-Zehnder *single-drive* DP-QPSK de Ti:LiNbO<sub>3</sub>. Este modulador é composto de um acoplador de 3 dB, dois moduladores QPSK, um *polarization rotator* e um *polarization beam combiner*.

O simulador do meio de transmissão, anel de recirculação, é composto de cinco enlaces de fibra de sílica pura, G.654, quatro de 50 km e um de 26 km, seis EDFAs, duas chaves acústico ópticas, AO, e um acoplador óptico de 3 dB. No anel

de recirculação, inicialmente, a chave óptica de entrada é habilitada para carregar o anel com uma seqüência de bits até o seu preenchimento, quando é interrompida. Após o término da carga do anel, a chave óptica interna é fechada e o sinal propagado por quantas voltas forem necessárias para simular o comprimento do enlace desejado. A cada volta, parte do sinal propagado sai do anel pelo acoplador e chega ao receptor, que faz a aquisição dos dados, a partir de um sinal de sincronismo, quando é completado o número de voltas desejadas.

Um pré-amplificador EDFA e um filtro óptico sintonizável passa banda de 200 GHz são colocados antes do receptor óptico coerente para melhorar a sensibilidade da recepção.

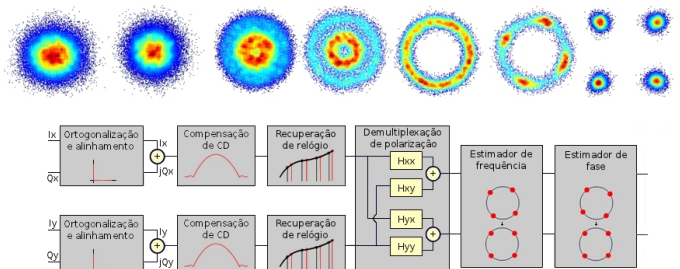


Fig. 2. Diagrama de blocos do processamento digital de sinais.

Na entrada do receptor o sinal óptico é dividido em duas polarizações ortogonais e cada uma misturada com o sinal do oscilador local, ECL, numa híbrida de 90°. A seguir, é detectado por quatro pares de fotodetectores diferenciais, cada par dedicado a uma das seqüências de dados. As quatro seqüências de dados elétricos, depois de amplificadas pelos amplificadores de transimpedância, TIA, são digitalizadas pelos ADCs de um osciloscópio de alta velocidade com banda elétrica de entrada de 30 GHz.

As seqüências de dados digitalizadas são processadas *offline* utilizando os algoritmos representados pelo diagrama de blocos da Fig. 2. O processamento digital do sinal maximiza a independência entre os sinais, controla automaticamente o ganho, compensa as deformações do sinal, como dispersão cromática e PMD, determina e ajusta os erros de temporização do receptor e os causados pelos erros de fase entre a fase do sinal e a do oscilador local [7].

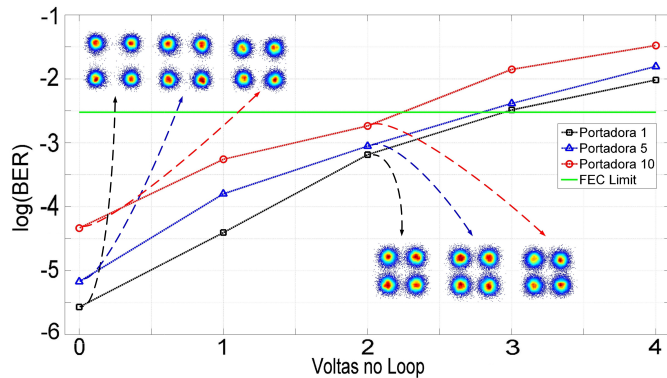


Fig. 3. BER e constelações em função do número de voltas no anel de recirculação de três portadoras do supercanal de 1,12 Tb/s.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para se caracterizar a transmissão do supercanal de 1 Tb/s por centenas de quilômetros, calculou-se na recepção as taxas de erro de bit, BER, e as constelações de três portadoras para diferentes números de voltas no anel. As três portadoras escolhidas foram: a #1, por apresentar a melhor relação sinal ruído em *back-to-back*, a #5, por estar próxima do centro do espectro do supercanal e sofrer interferências de portadoras adjacentes de ambos os lados e a #10, por possuir a pior relação sinal ruído. Os resultados da BER e constelações em função do número de voltas no anel para as três portadoras são apresentados na Fig. 3.

A conversão do sinal óptico em elétrico de cada uma das portadoras escolhidas foi realizada sintonizando-se no receptor óptico coerente o laser do oscilador local no comprimento de onda equivalente ao de cada uma delas. Os sinais elétricos correspondentes a cada uma das seqüências de dados das portadoras foram amostrados, pelos ADCs do osciloscópio de alta velocidade, numa taxa de 80 GS/s e armazenados com um tamanho de amostra de 80 kS cada.

Para o cálculo da BER de cada uma das portadoras em função do número de voltas no anel, foi realizado o processamento *offline* das amostras utilizando-se algoritmos padrões para sinais monoportadoras de 112 Gb/s DP-QPSK. Dez amostras foram processadas para cada ponto das curvas correspondentes a cada volta e as médias dos resultados apresentadas na Fig. 3, como também as constelações obtidas em *back-to-back* e após duas voltas no anel.

Observa-se na Fig. 3 que a BER obtida para as portadoras testadas ficaram abaixo do limite do código corretor de erro, FEC, de  $3,8 \times 10^{-3}$  para até duas voltas no anel de recirculação, o que representa uma transmissão sem erro por 452 km. A partir de três voltas no anel de recirculação a BER medida para todas as portadoras testadas estiveram acima do limite do FEC e, portanto, apresentando valores de erro acima do aceitável para os sistemas de comunicação.

#### V. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste artigo a geração, transmissão e recepção de um supercanal com 1,12 TB/s de taxa e eficiência espectral de 4 b/s/Hz. O supercanal apresentou taxas de erro abaixo do limite do FEC para a propagação por até 452 km num anel de recirculação.

De nosso conhecimento, esta é a primeira vez no Brasil que é realizada a transmissão de um supercanal na taxa, distância e eficiência espectral obtidas no experimento aqui reportado.

Dos resultados obtidos, concluiu-se que maiores distâncias e taxas poderão ser obtidas melhorando-se a qualidade das portadoras geradas e os algoritmos de processamento dos dados, para uma melhor separação das portadoras na recepção e redução das interferências entre elas.

#### AGRADECIMENTOS

Em especial aos colegas de laboratório Edson Porto da Silva e José Paulo Krause Perin pela ajuda na montagem e calibrações do experimento.

Ao FUNTEL/FINEP no âmbito dos projetos GIGA Fase 2 e PAR100GETH e ao CPqD pelo financiamento e apoio.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Cisco Press Release, "Annual Cisco Visual Networking Index Forecast Projects Global IP Traffic to Increase More Than Fourfold by 2014", Disponível em: [http://newsroom.cisco.com/dlls/2010/prod\\_060210.html](http://newsroom.cisco.com/dlls/2010/prod_060210.html), Acessado em: 03 de Abril de 2012.
- [2] D. M. Pataca, F. D. Simões e M. L. Rocha, "Optical Frequency Comb Generator for Coherent WDM System in Tb/s Applications", *IMOC 2011*, Outubro 2011.
- [3] F. D. Simões, D. M. Pataca e M. L. Rocha, "Design of a Comb Generator for High Capacity Coherent-WDM Systems", *IEEE-LATINCOM 2011*, Outubro 2011.
- [4] A. D. Ellis, F. C. G. Gunning, "Spectral Density Enhancement Using Coherent WDM," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, No. 2 Feb. 2005.
- [5] B. Zhu, X. Liu, S. Chandrasekhar, D. W. Peckham, R. Lingle Jr., "Ultra-Long-Haul Transmission of 1.2-Tb/s Multicarrier No-Guard-Interval CO-OFDM Superchannel Using Ultra-Large-Area Fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 22, No. 11, June 2010.
- [6] S. Chandrasekhar e Xiang Liu, "Terabit Superchannels for High Spectral Efficiency Transmission", *ECOC 2010*, Tu.3.C.5, Sep. 2010.
- [7] V. B. Ribeiro, E. S. Rosa, J. C. Diniz, A. C. Bordonalli e J. C. R. F. de Oliveira, "Equalização Dinâmica via CMA e DPC-CMA com Adaptação de Ganho em Sistemas Ópticos Coerentes PDM-QPSK a 112 Gb/s", *SBRT 2011*, Out. 2011.