

Emprego de técnica FDMA-SCM em Redes Ópticas Passivas com o uso de RSOAs

Luiz Fernando Henning,¹ Paulo Miguel Nepomuceno Pereira Monteiro³ e Alexandre de Almeida Prado Pohl²

Resumo—Neste artigo é mostrado resultados de uma rede FDMA-SCM PON que utiliza uma única fonte óptica posicionada no terminal óptico de linha. Esta é uma opção muito atrativa para redes ópticas de acesso, que inclui a habilidade de dividir a largura de banda na transmissão da fibra óptica e que permite a utilização de esquemas avançados de modulação, que fazem com que a capacidade de transmissão das ONUs seja aumentada. Nesta arquitetura são utilizados canais de rádio frequência para o teste do sistema. A utilização de RSOAs com encapsulamento do tipo TO torna esta uma solução de baixo custo. Este rede foi testada no sentido de transmissão ascendente dos dados e foi comparado diversos tipos de modulação. Utilizando duas ONUs foi encontrada uma taxa efetiva de dados de 1.7Gbps.

Palavras-Chave—PON, RSOA e ONU.

Abstract—This paper demonstrates and shows experimental results of a FDMA-SCM PON by using an optical power supply system built with a single central light source positioned in the Optical Line Terminal. This configuration is an attractive option as an optical access network which includes the ability to efficiently divide the large bandwidth transmission of fiber optic and allows the use of advanced modulation schemes increasing the transmission capacity of ONUs. In this architecture, the devices use radio frequency to generate frequency channels, which the ONUs use to transmit and receive data. ONUs are built with cheap TO-uncooled RSOAs, and it is a low cost solution. This configuration was tested in the upstream data transmission, and it was compared with various types of modulation. It has been shown an effective data rate of 1.7Gbps with two ONUs.

Keywords—PON, RSOA and ONU.

I. INTRODUÇÃO

O acentuado crescimento da Internet e a intensa competição entre as empresas de telecomunicações estão fazendo com que os laboratórios de pesquisa procurem soluções mais econômicas para as atuais redes de acesso. É necessário que as atuais redes PON (Passive Optical Networks) utilizem componentes de baixo custo [1].

Nas atuais redes PONs são empregados diodos laser como fontes ópticas. Existem diversas opções para se obter uma ONU (Optical Network Unit) incolor, e comercialmente é possível achar muitas opções de diodos laser com encapsulamento TO (sem controle de temperatura), tais como os diodos laser DFB (Distributed Feedback Laser Diodes), diodos laser FP (Fabry-Perot Laser Diode) e os diodos laser VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes) [2]. Mas o comportamento do comprimento de onda em relação a

temperatura é o principal desafio a ser vencido nestes diodos que não possuem controle de temperatura [3].

Neste artigo optou-se pela utilização de RSOAs (Reflective Semiconductor Optical Amplifiers) de baixo custo por terem o encapsulamento do tipo TO. Nos RSOAs o comprimento de onda de sua saída depende unicamente do comprimento de onda do sinal que é recebido da OLT (Optical Line Terminal), assim ao se utilizar os RSOAs as ONUs tornam-se agnósticas ao comprimento de onda utilizado [4] [5] [6]. Em termos de custo, a opção de utilizar-se modulação SCM (subcarrier multiplexing) é uma excelente escolha em razão da simplicidade de sua implementação em relação a modulação com várias portadoras [7].

Uma rede óptica passiva utilizando técnicas de acesso por divisão em frequência e modulação SCM (FDMA-SCM PON) pode ser construída utilizando dois comprimentos de onda. Um para a transmissão descendente dos dados (da OLT para as ONUs) e outro comprimento de onda para a transmissão ascendente dos dados (das ONUs para a OLT). No sentido da descida dos dados uma solução simples é mostrada na Figura 1.

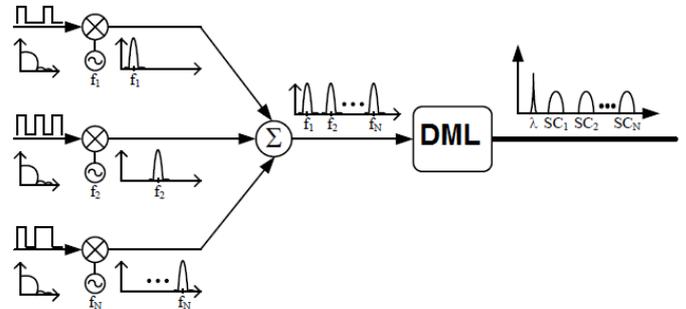


Fig. 1. Arquitetura de uma rede FDMA-SCM PON para a descida dos dados.

Os dados (1, 2, ..., N) são modulados utilizando subportadoras elétricas (f_1, f_2, \dots, f_N), e então estes sinais são somados (utilizando um multiplexador elétrico) para formar o sinal FDMA-SCM. Todo o tratamento de filtragem e equalização deste sinal é realizado no domínio elétrico e então é convertido para o domínio óptico usando um laser de modulação direta (Directly Modulated Laser - DML). No sentido de transmissão descendente dos dados, as redes PONs podem utilizar qualquer comprimento de onda na faixa de 1480 a 1500nm. Em [3] foi mostrado que mesmo com uma variação de temperatura entre 0 e 60°C, alguns modelos comerciais de lasers diretamente modulados com encapsulamento TO citados anteriormente (VCSEL, DFB ou FP) poderiam ser utilizados

¹Instituto Federal de Santa Catarina, IFSC – Jaraguá do Sul, Brasil;
²CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil e ³Instituto de Telecomunicações / Universidade de Aveiro – DETI, Portugal. E-mails: luizh@ifsc.edu.br, paulo.monteiro@ua.pt, pohl@utfpr.edu.br

nesta aplicação.

A Figura 2 mostra como é realizada a recepção destes dados nas ONUs. Após serem transmitidos pela fibra óptica, o sinal é dividido em N partes iguais e então remetidos para as ONUs. Após os diodos PIN, o sinal retorna para o domínio elétrico.

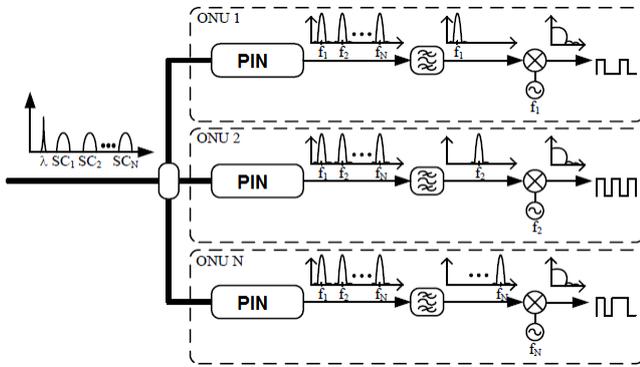


Fig. 2. Recepção do sinal de descida nas ONUs.

A próxima seção discutirá uma arquitetura de uma rede para ser utilizada no sentido de transmissão ascendente dos dados.

II. ARQUITETURA

A Figura 3 mostra o diagrama de blocos da solução proposta, onde é destacada a transmissão das ONUs para a OLT. Esta arquitetura foi primeiramente testada com duas ONUs para verificar a viabilidade do sistema. Os componentes digitais são implementados em uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*). A FPGA (placa da Xilinx modelo MWR1024RS IP core [8]), o ADC (Analog to Digital Converter) e o DAC (Digital to Analog Converter) são os mesmos utilizados em [9]. Os sinais SCM foram gerados por Vector Signal Generators implementados com FPGA e DACs.

Em ONUs refletivas, o sentido de subida dos dados exibe a estrutura loopback: a luz semente é enviada remotamente da OLT, percorre a SSMF até atingir o RSOA na ONU. Na ONU, o RSOA é modulado eletricamente e os dados ópticos são enviados ao receptor da OLT após propagar pela fibra óptica. Desta forma o sentido de subida dos dados percorre duas vezes a SSMF antes de ser detectado pela OLT: em um sentido sem dados, e no outro com dados.

Em virtude da estrutura loopback, efeitos de retroespalhamento Rayleigh e reflexões de Fresnel causam efeitos degradantes no desempenho do sinal de subida, limitando o alcance da rede. Por outro lado, essa estrutura centralizada permite a exclusão de fontes ópticas com comprimentos de onda específicos na ONU, propiciando um custo-benefício atrativo ao sistema.

Em um primeiro ensaio, optou-se por colocar a fonte da luz semente próxima as ONUs para uma verificação inicial do desempenho do sistema. Esta estrutura minimiza os efeitos de retroespalhamento Rayleigh e reflexões de Fresnel no desempenho no sentido de subida dos dados. Estes testes iniciais permitem a visualização do desempenho do sistema sem estes efeitos. Se os testes iniciais forem satisfatórios, em

uma segunda etapa a luz semente deve ser colocada na OLT para verificar as diferenças.

A luz semente do RSOA foi gerada por um laser sintonizável do tipo ECL, que gera um comprimento de onda com potência de até 13dBm e que pode cobrir toda a banda C do espectro. Esta luz semente vem da OLT e entra na ONUs através de circuladores ópticos. Foram utilizados dois enlaces de fibra SSMF com um comprimento total de 21400m .

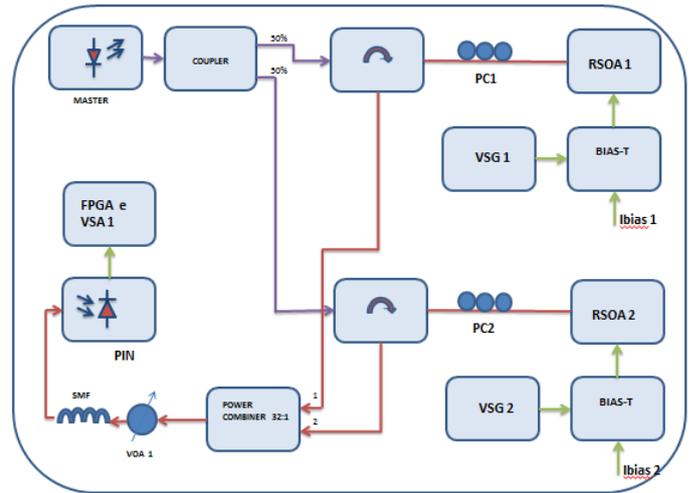


Fig. 3. Rede FDMA-SCM PON para o sinal de subida dos dados utilizando duas ONUs.

Implementação

A configuração proposta do tipo SCM tem a capacidade de agregar diversas portadoras para os canais, onde a largura de banda de cada subportadora pode ser ajustada e o tipo e ordem de modulação pode variar desde QPSK até QAM256. O ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) recomenda alguns valores para a largura de banda de canais em transmissão RoF, e estes valores situam-se desde 5MHz até 112MHz .

Foram realizadas diversas medidas de taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* - BER), sem a utilização de FEC, para se ter uma avaliação do desempenho do sistema. Assim, é possível obter esta limitação do desempenho do canal sem emprego do algoritmo de correção de erros. O FEC escolhido para este Modem foi o Reed–Solomon (252,228).

O RSOA escolhido foi o modelo sem refrigeração (encapsulamento TO) de baixo custo da Kamelian (modelo 18-TO-C-FA). Este modelo tem um ganho nominal de 18dB pois é fabricado com uma cavidade longa ($600\text{ }\mu\text{m}$). Estes RSOAs operam nas bandas C/L e podem ser usados em aplicações do tipo PtP WDM DS/US NGPON2 (desde 1524 até 1625 nm). A corrente de polarização (Ibias) aplicada ao dispositivo foi gerada por um controlador de corrente e ajustado em 50 mA . De forma a aumentar a largura de banda do RSOA, e assim melhorar a resposta em frequência o RSOA foi equalizado eletricamente utilizando um filtro passa alta do tipo Butterworth de um polo com uma constante de tempo de $0.39\text{ }\mu\text{s}$. Com este filtro a resposta em frequência atingiu 700 MHz com uma atenuação máxima de 3 dB (ver a Figura 4).



Fig. 4. Resposta em frequência do RSOA.

A potência óptica na entrada do RSOA (luz semente) foi ajustada em -20 dBm, o que faz com que o ganho seja de 18 dB aproximadamente. Assim, o nível de potência óptica na saída do RSOA é de -2 dBm e como o circulador óptico apresenta uma perda de inserção de 3 dB, o nível de potência óptica na saída de cada ONU é de -5 dBm. Os sinais das ONUs são colocados na entrada de um power combiner óptico (32:1 com perdas de inserção de 3.5 dB). A atenuação medida do enlace de fibra SSMF empregado (21400 metros) é de $8,4$ dB. Assim, a atenuação do VOA foi ajustada em $1,6$ dB para que junto com as perdas do enlace de fibra óptica chegassem a 10 dB, deste modo simulando um enlace de subida de dados de uma rede PON. Com estes ajustes, a potência medida do sinal na entrada da OLT (receptor PIN) foi de -15 dBm. Controladores de Polarização (PC) foram colocados nas saídas dos RSOAs de forma que as duas portadoras vindas das ONUs chegassem em fase na entrada da SSMF (descobriu-se posteriormente que o não casamento das fases deixava o sinal instável e oscilante).

Resultados Experimentais

Na configuração empregada, o número máximo de subportadoras depende principalmente da largura de banda de cada subportadora, da banda de guarda entre as subportadoras e também da própria largura de banda do RSOA. O DAC e o ADC possuem uma largura de banda muito maior que a do RSOA, não sendo portanto, um fator limitante neste aspecto. Um outro detalhe a ser observado neste espectro é o aparecimento de um nível de potência próximo ao lado esquerdo do primeiro canal SCM, que é devido a portadora óptica. Este fato requer uma banda mínima entre o primeiro canal e a portadora óptica. Como a frequência central da primeira portadora foi ajustada em 112 MHz, e a largura de banda máxima deste canal é de 112 MHz, então esta banda de guarda inicial ficou ajustada em 56 MHz. Para cinco canais SCM com uma largura de banda de 112 MHz cada um, as seguintes frequências das subportadoras foram utilizadas:

- No RSOA1: 112 MHz; 224 MHz; 336 MHz e 448 MHz;
- No RSOA2: 560 MHz.

Foi escolhido um gerador PRBS com comprimento de $2^{23} - 1$ para transmitir o sinal de subida dos dados. Um PRBS dife-

rente foi colocado em cada canal SCM. No início dos ensaios, o sinal obtido na entrada da OLT era instável e pulsante. Verificou-se que este sinal instável era devido ao descasamento de fase entre as duas portadoras recebidas no splitter. Foram colocados dois controladores de polarização nas saídas dos RSOAs para solucionar este problema.

Para a realização dos ensaios, foram considerados os seguintes critérios:

- (i) Como o FEC utilizado só consegue recuperar os dados quando a BER é menor que 10^{-3} , então este foi o valor limite adotado;
- (ii) Em cada ensaio o mesmo número de símbolos para um formato de modulação era empregado em todos os canais. Se o resultado obtido em um dos canais não respeitasse o limite da BER (normalmente o canal de frequência de subportadora mais alta que ficava no RSOA2), o número de símbolos era diminuído para todos eles;
- (iii) Os ensaios sempre começavam com a largura de banda maior (112 MHz). Se o limite da BER não fosse satisfeito, então a largura de banda era diminuída e os ensaios refeitos até que o limite da BER fosse respeitado.

A Tabela I mostra o tipo de modulação aplicada a cada um dos canais, que podia variar de QPSK até QAM64. A segunda coluna mostra a largura de banda utilizada nos canais testados. Finalmente, a terceira coluna mostra a taxa de dados efetiva obtida após o estágio de FEC que fica na OLT (implementado na mesma FPGA). Os resultados mostrados na Tabela I revelam que nem sempre o formato de modulação com o maior número de símbolos terá o melhor desempenho, pois muitas vezes este formato requer uma menor largura de banda para obedecer ao critério da BER. O melhor resultado empregando este RSOA foi encontrado quando foi utilizado o formato de modulação QAM16, obtendo-se uma taxa total de $1799,15$ Mbps (após o módulo de FEC).

TABELA I

COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE MODULAÇÃO E A TAXA DE DADOS EFETIVA.

Modulação	Canais BW (MHz)	Taxa de Dados Efetiva Mbit/s
QPSK	112	899,575
QAM16	112	1799,15
QAM64	5	120,464

Na Figura 4 pode-se observar que a amplitude de sinal diminui à medida que a frequência aumenta. Esta é a razão principal porque o canal com menor frequência apresenta um desempenho melhor quando comparado com o canal de maior frequência. A resposta espectral do RSOA é o principal fator limitante nos ensaios.

A Figura 5 mostra o diagrama de constelação do pior canal medido (560 MHz) no ensaio de maior índice de modulação conseguido (QAM64).

Algumas vezes durante os ensaios o sinal na entrada da OLT voltava a ficar instável, então era necessário recalibrar os controladores de polarização. Em tal configuração, o fato é

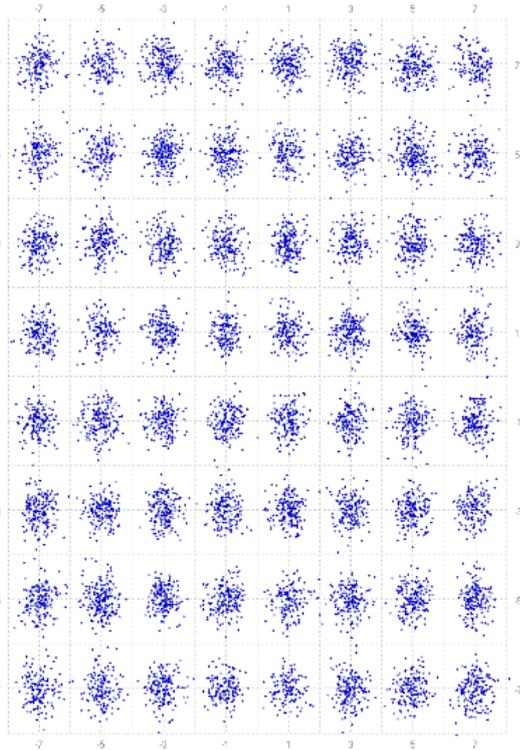


Fig. 5. Constelação recebida na OLT para modulação QAM64, considerando 21,4 Km de fibra SSMF.

que a entrada da SSMF terá o mesmo comprimento de onda oriundo de duas ONUs. Haverá interferência óptica dependendo das fases. Isto se deve pela diferença do caminho óptico entre ambos os enlaces de retorno. Verificou-se que apenas o controle de polarização não é suficiente para estabilizar o sistema. O problema da instabilidade na OLT deve-se à interferência entre as duas portadoras ópticas ascendentes, como a fase variava com o tempo, devido por exemplo à temperatura, umas vezes apresentava uma interferência construtiva e outras vezes destrutiva. E como a portadora é utilizada na detecção direta, a sua variação de amplitude (que se traduz em uma variação do índice de modulação) tem um efeito significativo no desempenho.

III. CONCLUSÃO

Neste artigo foi demonstrado experimentalmente a possibilidade de uma rede FDMA-SCM-PON ser utilizada na transmissão ascendente dos dados e que utiliza RSOAs de baixo custo com encapsulamento do tipo TO. Para esta rede, foram empregados cinco canais de até 112 MHz e foi encontrada uma taxa efetiva de dados de 1.799 Gbps na OLT.

REFERÊNCIAS

- [1] Wagner et al., "Impairment Analysis of WDM-PON Based on Low-Cost Tunable Lasers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 5300–5307, 2016.
- [2] Zhou et al., "Low-Cost E1-class 10-Gb/s Directly Modulation Laser in TO-can package with Optical filter for XG-PON Application," in *OFC - Optical Fiber Communications Conference*, 2017.
- [3] L. F. Henning, P. N. Monteiro, and A. A. Pohl, "Temperature and Bias Current Behavior of Uncooled Light Sources for Application in Passive Optical Networks," in *ICTON - 17th International Conference on Transparent Networks*, Budapest, 2015.
- [4] Parolari et al., "RSOA-based Self-Seeded transmitters: The ERMES project results and offsprings," in *19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2017.
- [5] K. Y. Cho, Y. J. Lee, H. Choi, A. Murakami, A. Agata, Y. Takushima, and Y. Chung, "Effects of Reflection in RSOA-Based WDM PON Utilizing Remodulation Technique," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 10, pp. 1286–1295, 2009.
- [6] S. Straullu, S. Abrate, F. Forghieri, G. Rizzelli, V. Ferrero, and R. Gaudino, "Characterization of uncooled RSOA for upstream transmission in WDM reflective PONs," *OPTICS EXPRESS*, vol. 20, no. 26, pp. B38–B44, Dec 2012.
- [7] J. Busset, E. Sahn, and D. Plant, "Experimental demonstration of a 10Gb/s 16QAM SCM WDM-PON with bandwidth-limited RSOA and IM/DD transceivers," in *ECOC European Conference and Exhibition on Optical Communication*. London: IET, 2013.
- [8] Xilinx, *Product Guide for MWR1024RS IP PG170 (Version 0.19)*, USA, Aug. 2013.
- [9] L.F. Henning et al., "High Spectral Wavelength Agnostic Multicarrier D-RoF Modem Based on Uncooled RSOA," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 28, pp. 1010–1013, 2016.