

# Remoção Óptica de Rótulos de Pacotes Quaternários

Marcelo L. F. Abbade, Ricardo S. Braga, Eric A. M. Fagotto, Gustavo Grossklauss Neto, Renato L. Cassiolato, Edson Moschim e Iguatemi E. Fonseca

**Resumo**—Trabalhos recentes sugerem que o efeito de Mistura de Quatro-Ondas pode ser utilizado para multiplexar opticamente um cabeçalho a um sinal binário de dados, formando um pacote óptico quaternário. Neste trabalho, nós propomos uma nova técnica que permite a remoção óptica desses rótulos e a recuperação do sinal de dados binário através de uma porta óptica (*optical gate*). Nossos resultados de simulações indicam que essa técnica de remoção de rótulos pode ser efetuada mesmo após o pacote quaternário ter se propagado por escalas de redes metropolitanas.

**Palavras-Chave**— Rótulos ópticos, remoção de rótulos, mistura de quatro ondas, portas ópticas, sinais quaternários.

**Abstract**—Recent works suggest that the four-wave mixing effect may be used to multiplex a label into a binary payload, thus, generating a quaternary optical packet. In this work, we propose a new technique that allows for the label swapping and the consequent recover of the binary payload with the aid of optical gates. Our simulation results indicate that this label removal technique may be performed even after the quaternary packet has been propagated through metropolitan network scales.

**Index Terms**— Optical labels, four-wave mixing, label swapping, optical gates, quaternary signals.

## I. INTRODUÇÃO

Um cenário provável para o futuro das redes ópticas é a utilização do protocolo de Internet (*Internet Protocol- IP*) sobre redes que operem por multiplexação por divisão de comprimento de onda (*wavelength division multiplexing-WDM*) [1], tal cenário é conhecido como IP sobre WDM, que pode vir a ser implementado em uma rede de chaveamento de pacotes ópticos (*optical packet switching*). Numa rede desse tipo existe a necessidade de que os pacotes ópticos sejam roteados e transmitidos de um nó para outro [2-3], como acontece nas redes IP convencionais. A fim de permitir a formação desses pacotes, vários estudos recentes têm proposto técnicas para a inserção óptica de rótulos nos sinais que contêm a informação dos usuários (*payload*). Entre estas propostas, destacam-se a inserção seqüencial de bits [3], a

multiplexação por sub-portadora (*subcarrier multiplexing-SCM*) [4] e a utilização de códigos ortogonais [5].

Neste trabalho, nós abordaremos um novo tipo de técnica de geração de pacotes ópticos, que utiliza o efeito de mistura de quatro ondas (*four-wave mixing- FWM*) para multiplexar opticamente um rótulo binário a um sinal de dados binário [6-9]. Como resultado dessa multiplexação, que ocorre em termos das amplitudes dos sinais binários, temos um pacote óptico quaternário que pode trafegar por distâncias da ordem de 350 km, com uma taxa de erro de  $10^{-12}$  [6]. Nossa proposta é mostrar que além de gerar os pacotes quaternários, a FWM também pode ser utilizada para remover o rótulo óptico e recuperar o sinal binário de dados. Isso é possível a partir de um dispositivo fotônico chamado porta óptica (*optical gate*) [10] que vem sendo bastante estudado para a implementação de regeneradores ópticos [10-12].

O nosso artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção II apresenta uma revisão da técnica de geração de pacotes ópticos quaternários e discute como esses pacotes poderiam ser detectados e comutados em uma rede totalmente óptica. A Seção III aborda o funcionamento das portas ópticas e explica como é possível utilizar esses dispositivos para realizar a remoção do rótulo dos pacotes ópticos quaternários. A Seção IV apresenta resultados de simulações nos quais a penalidade de olho causada pela remoção dos rótulos ópticos é medida em função da distância de propagação de pacotes quaternários sobre fibras de dispersão não-nula (non-zero dispersion- NZD). Finalmente, nossas conclusões e observações finais são apresentadas na Seção V.

## II. MULTIPLEXAÇÃO DE AMPLITUDES ATRAVÉS DA FWM

Esta seção apresenta um resumo dos processos de geração, detecção e comutação desses pacotes discutidos em [6], úteis para a compreensão do processo de remoção de rótulos ópticos discutido na próxima seção..

### A. Geração dos Pacotes Ópticos Quaternários

No caso degenerado da mistura de quatro ondas [13], dois canais sendo co-propagados nas frequências ópticas  $f_1$  e  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ ) serão submetidos às não-linearidades da fibra e gerarão dois canais laterais localizados nas frequências  $f$  e  $f_+$ , dadas

M.L.F. Abbade, R.S. Braga, E.A. M. Fagotto, G.Grossklauss e R.L. Cassiolato, Faculdade de Engenharia Elétrica, PUC-Campinas, Brasil, E-mails: abbade@puc-campinas.edu.br. Edson Moschim Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, Brasil e Iguatemi E. Fonseca, Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande – PB, Brasil.

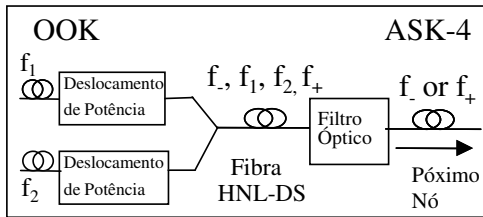


Fig. 1: Diagrama ilustrativo da multiplexação óptica de amplitudes gerada pela mistura de quatro ondas.

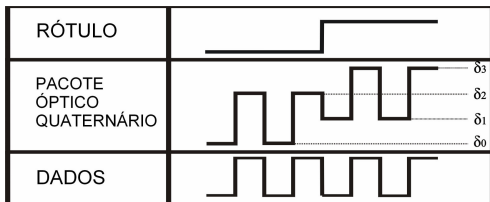


Fig. 2: Relação entre os níveis de amplitude do pacote óptico e do sinal de dados com os níveis de amplitude do pacote óptico.

por:

$$f_{-,+} = 2f_{1,2} - f_{2,1} \quad (1)$$

Se os canais principais ( $f_1$  e  $f_2$ ) possuem a mesma polarização e forem fracamente depletados, os canais gerados ( $f_-$  e  $f_+$ ) receberão uma potência óptica que pode ser estimada por [14]:

$$P_{-,+} = \eta\gamma^2 P_{1,2}^2 P_{2,1} \exp(-\alpha L) \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \right]^2 \quad (2)$$

na qual  $P_1, P_2, P_-$  e  $P_+$  são, respectivamente, a potência óptica dos canais em  $f_1, f_2, f_-$  e  $f_+$ ,  $L$  é o comprimento da fibra,  $\alpha$  é a atenuação da fibra,  $\gamma$  é o coeficiente não-linear da fibra e  $\eta$  é a eficiência de geração da FWM [15], que depende do comprimento de onda e da intensidade da transmissão e que será discutida na Seção III.

Se os canais principais forem codificados com uma potência não nula para representar os bits 0, a Eq. (2) prevê que os sinais gerados podem assumir quatro níveis diferentes, que designaremos, em ordem crescente de potência, por  $\delta_0, \delta_1, \delta_2$  e  $\delta_3$ . Estes quatro níveis são consequência das combinações de bits (00, 01, 10 e 11) que podem ser transmitidas pelos canais principais e caracterizam uma codificação ASK-4.

A discussão anterior sugere que as fibras podem operar como multiplexadores ópticos, de acordo com o diagrama ilustrado na Fig. 1. Os dois canais principais com codificação OOK têm as potências do bit 0 deslocadas para um valor não-nulo e são inseridos em uma fibra que, devido à ação da FWM, atuará como um multiplexador de amplitudes. Após a propagação por um determinado comprimento, que deve ser de alguns décimos do comprimento de atenuação [7], ao longo da fibra multiplexadora um dos canais ASK-4 gerados (em  $f_+$  ou  $f_-$ ) pode ser selecionado por um filtro passa-faixa e encaminhado para o próximo nó óptico.

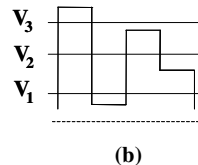
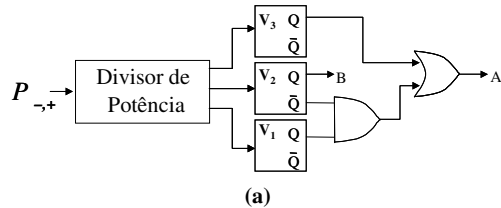


Fig. 3: (a) Circuito de Decisão responsável pela recuperação dos Tributários Binários; (b) Limiares de tensão para recuperação dos tributários binários.

Essa multiplexação de amplitudes será válida mesmo se o sinal em  $f_1$  possuir taxa de transmissão diferente do sinal em  $f_2$  [6]. Assim, se  $f_2$  transportar um sinal de dados a uma taxa  $B_D$  e inserirmos um rótulo em  $f_1$  a uma taxa  $B_R$ , obteremos a formação de um pacote óptico (dados + rótulo) em  $f_+$  (ou  $f_-$ ). A Fig. 2 ilustra esse processo para o caso em que  $B_D = 4 B_R$ .

### B. Recepção dos Pacotes Ópticos

A detecção direta pode ser utilizada no receptor para converter o sinal quaternário óptico, modulado em intensidade, para um sinal ASK-4 elétrico. Os tributários binários, transmitidos por  $f_1$  e  $f_2$  podem, então, ser recuperados a partir do circuito decodificador ilustrado na Fig. 3a [16]. Este circuito contém três circuitos de decisão independentes, para os quais:

$$Q = \begin{cases} 1 & \text{se } v > V_i \\ e & \\ 0 & \text{se } v < V_i \end{cases} \quad (3)$$

sendo  $v$  a tensão elétrica associada à potência elétrica de entrada do sinal ASK-4 e  $V_i$  ( $i=1, 2$  ou  $3$ ) as tensões de limiar indicadas na Fig. 3b. A saída A fornecerá o bit recebido em  $f_1$  e a saída B fornecerá o bit recebido em  $f_2$ .

### C. Comutação dos Pacotes Ópticos Quaternários

Após a inserção dos rótulos ópticos descrita no item A dessa seção, o pacote ASK-4 resultante pode trafegar e ser comutado através da rede. Essa comutação pode ser realizada da seguinte forma. Ao atingir um dado nó o pacote seria dividido por um divisor de potência, sendo que parte do sinal seria transmitida para uma linha de atraso e a outra parte seria utilizada para a leitura do rótulo óptico. A detecção do rótulo ocorreria da forma descrita na Seção III e determinaria a porta de saída a ser utilizada pelo pacote que trafega pela linha de atraso. Após passar pelo comutador óptico, este último pacote deve ser amplificado a fim de compensar as perdas experimentadas na linha de transmissão e no processo de comutação.

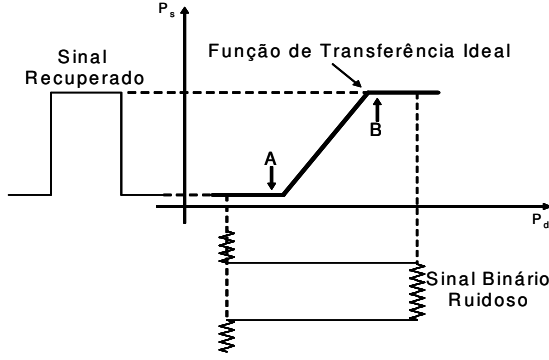


Fig. 4: Função de transferência ideal de uma porta óptica e ilustração da aplicação de remoção de ruído.

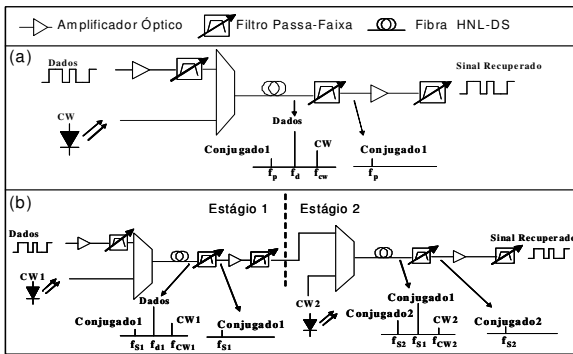


Fig. 5: Esquemas de uma porta óptica com (a) um estágio e (b) dois estágios.

Essa estratégia de comutação pode ser usada enquanto a informação do rótulo óptico tiver validade em um determinado domínio de rede. No entanto, assim como ocorre nas redes IP tradicionais, pode ser que um determinado nó necessite alterar o rótulo de um pacote ou, ainda, que esse rótulo precise ser removido para que os sinais de dados sejam transmitidos para um novo domínio de rede, no qual os rótulos não possuem significado. A próxima seção sugere como as portas ópticas podem ser utilizadas para remover opticamente esses rótulos.

### III. PORTAS ÓPTICAS E REMOÇÃO DE RÓTULOS

#### A. Portas Ópticas

As portas ópticas são dispositivos cuja função de transferência ideal está ilustrada na Fig. 4. Existem vários trabalhos [10] que estudam a aplicação desses dispositivos como regeneradores de sinais. A pertinência desses estudos advém do fato que se um sinal binário ruidoso for a entrada de uma porta óptica, as variações de potência do bit 0 e do bit 1 serão mapeadas na saída do dispositivo para, respectivamente, uma potência baixa e constante e para uma potência alta e constante. Dessa forma, essa saída representaria uma cópia idealmente limpa do sinal de entrada, como também sugere a Fig. 4.

Uma implementação possível para esse dispositivo consiste em utilizar o fenômeno de FWM em uma fibra, inserindo um sinal de dados em  $f_d$ , com potência  $P_d$ , e um sinal cw em  $f_{cw}$ , com potência  $P_{cw}$ , de acordo com o ilustrado na Fig. 5a. Segundo (2), a potência do produto da FWM localizado em  $f_p = 2f_d - f_{cw}$  será dada por:

$$P_{saída} = \eta \gamma^2 P_d^2 P_{cw} \exp(-\alpha L) \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \right]^2 \quad (3a)$$

com  $\eta$  dada por [15]:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\kappa^2} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\kappa' L / 2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\} \quad (3b)$$

e

$$\Delta\kappa' = \Delta\kappa + \gamma(2P_d - P_{cw}) \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha L_{ef})}{\alpha L_{ef}} \right], \quad (3c)$$

$$\Delta\kappa \equiv \frac{2\pi c^2}{f_d^4} \frac{dD(\lambda)}{d\lambda} (f_d - f_{cw})^2 (f_d - f_0) \quad (3d)$$

sendo  $\Delta\kappa'$  e  $\Delta\kappa$ , respectivamente, os fatores de casamento de fase independente e dependente da potência,  $L_{ef} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$  é o comprimento efetivo da fibra e  $f_0$  é a frequência associada ao comprimento de onda de dispersão nula da fibra. A Eq. (3c) é uma aproximação válida quando os comprimentos de onda envolvidos estão a menos de 10 nm do comprimento de dispersão nula [10, 16], como é o caso dos sinais que serão considerados nesse trabalho. Analisando as equações (3), verificamos que  $P_s$  tenderá a zero quando  $P_d$  tender a zero e que, devido à saturação da FWM,  $P_s$  tenderá a uma constante quando  $P_d$  for suficientemente alta e  $\Delta\kappa' L \approx \pi$ . Na prática, a função de transferência ( $P_s$  em função de  $P_d$ ) gerada pela FWM não apresentará regiões planas como a função de transferência ideal. As características da função de transferência ideal podem ser melhor aproximadas [10] ao se conectar em série dois estágios de portas ópticas, como sugere a Fig. 5b.

A seguir, argumentaremos como as portas ópticas podem ser utilizadas para remover opticamente o rótulo do pacote quaternário descrito na Seção II. Esta é a principal contribuição deste trabalho.

#### B. Remoção Óptica do Rótulo do Pacote Quaternário

Inspecionando os níveis de potência da Fig. 2, verificamos que os bits 0 (1) do rótulo do pacote quaternário são representados pelos níveis  $\delta_0$  e  $\delta_2$  ( $\delta_1$  e  $\delta_3$ ). De forma análoga, os bits 0 e os bits 1 do sinal de dados são representados, respectivamente, pelos dois níveis mais baixos e pelos dois níveis mais altos do pacote quaternário. Assim, para removermos os rótulos dos pacotes quaternários e recuperarmos o sinal de dados binário, precisamos mapear os dois níveis inferiores do pacote quaternário em um único nível de potência baixa (bit 0) e os dois níveis superiores do pacote em um único nível de potência alta (bit 1). Comparando as figuras 2 e 4, observamos que isso pode ser obtido fazendo os

pontos A e B da Fig. 4 coincidirem, respectivamente, com  $\delta_2$  e  $\delta_3$ .

#### IV. SIMULAÇÕES

Essa seção apresenta os resultados de simulações concernentes à geração e transmissão dos pacotes ópticos quaternários e à remoção óptica dos rótulos. Para isso, consideramos que o pacote quaternário gerado pelo multiplexador de amplitudes da Fig. 1 foi propagado por sucessivos enlaces ao final dos quais a remoção de rótulos era realizada. Ao término de cada enlace a penalidade de olho foi medida relativamente ao diagrama de olho para uma configuração *back-to-back* na qual o dispositivo de remoção de rótulo (Fig. 5b) estava diretamente conectado à saída do multiplexador de amplitudes da Fig. 1.

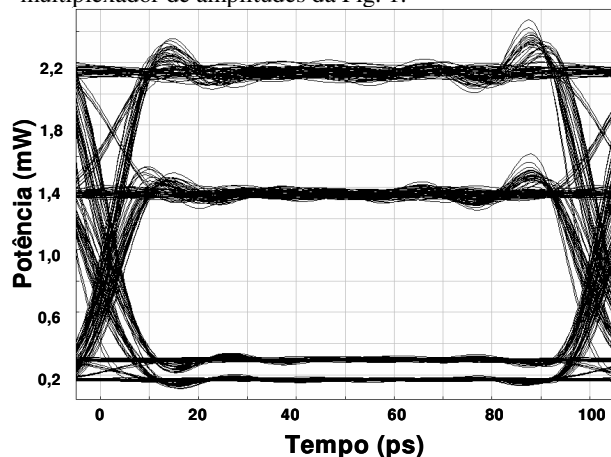


Fig. 6: Diagrama de olho do pacote óptico quaternário.

Todas as simulações foram feitas em um *software* comercial e as propagações pelas fibras foram realizadas através do método de *split-step* Fourier aplicado à solução da Equação Não-Linear de Schrödinger. Também se admitiu que a polarização de todos os sinais está orientada ao longo do eixo x.

##### A. Geração dos Pacotes Ópticos Quaternários

O pacote óptico quaternário considerado neste trabalho foi obtido a partir de um rótulo de 2,5 Gb/s com 64 bits, colocado em  $f_1 = 192,65$  THz e de um sinal de dados com 256 bits, colocado em  $f_2 = 192,75$  THz. Esses sinais binários foram submetidos a um deslocamento do nível de potência do bit 0 de 5 mW e as potências do nível do bit 1 foram ajustadas para, respectivamente, 8,3 e 14,7 mW. A fibra HNL-DS utilizada para a multiplexação de amplitudes era caracterizada pelos seguintes parâmetros:  $\alpha = 0,61$  dB/km,  $\gamma = 13,8$  (W.km)<sup>-1</sup>, inclinação de dispersão  $S_0 = 0,03$  ps/(nm<sup>2</sup>.km), comprimento de onda de dispersão nula  $\lambda_0 = 1550$  nm e  $L = 5$  km. O diagrama de olho do pacote obtido em  $f_c = 192,85$  THz está apresentado na Fig. 6 e apresenta uma potência média de 1 mW. As escolhas de  $f_1$  e  $f_2$  foram feitas com base na função de transferência descrita a seguir.

##### B. Transmissão dos Pacotes Ópticos Quaternários

O pacote descrito na sub-seção anterior foi propagado por enlaces compostos por segmentos de 50 km de fibra NZD, seguidos por amplificadores ópticos com um ganho ajustado para compensar a atenuação acumulada ao longo da propagação (10 dB) e por um filtro passa-faixa gaussiano com largura de banda em  $-3$  dB de  $B_{-3dB} = 50$  GHz. As fibras NZD eram caracterizadas por  $\alpha = 0,2$  dB/km,  $\gamma = 1,3$  (W.km)<sup>-1</sup>, inclinação de dispersão  $S_0 = 0,06$  ps/(nm<sup>2</sup>.km), e dispersão de 1 ps/nm/km em  $f_c$ . Além disso, admitiu-se que os amplificadores ópticos possuíam uma figura de ruído de 5 (NF- *noise figure*) dB.

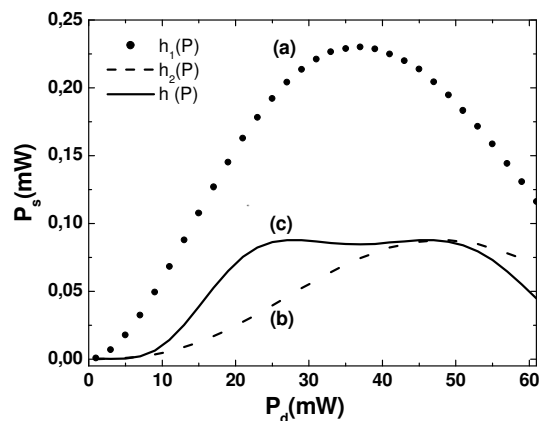


Fig. 7: Funções de transferência (a) do primeiro estágio, (b) do segundo estágio e (c) dos dois estágios acoplados para o dispositivo responsável pela remoção de rótulos ópticos.

##### C. Remoção dos Rótulos Ópticos

A fim de obtermos uma função de transferência mais próxima da ideal, optamos por realizar a remoção dos rótulos através de um dispositivo de dois estágios, como o ilustrado na Fig. 5b. A potência de saída do primeiro estágio será dada por

$$P_{s1} = h_1(P_d), \quad (4)$$

na qual  $h_1(P)$  é a função de transferência do primeiro estágio. Dessa forma, a potência de saída do dispositivo, estará relacionada com a potência de entrada através de:

$$P_s = h_2(G_1 P_{s1}) = h_2[G_1 h_1(P_d)], \quad (5)$$

na qual  $h_2(P)$  é a função de transferência do segundo estágio e  $G_1$  é o ganho do amplificador entre o primeiro e o segundo estágio. Infelizmente, não é possível obter  $h_1(P)$  e  $h_2(P)$  através das equações (3). Isso ocorre porque essas equações não levam em conta os efeitos de depleção nos canais de dados e de rótulo, que são relevantes na implementação das portas ópticas através da FWM [10]. Assim, admitida uma função de transferência para o primeiro estágio, a determinação de  $h(P)$  demanda a realização de várias simulações a fim de encontrar uma função de transferência para o segundo estágio e um ganho  $G$  que permitam a obtenção de uma função próxima à ideal.

Após exaustivos testes, encontramos as funções de transferência indicadas na Fig. 8, que aproximam a função de transferência ideal dentro de certos limites exigidos pelo sinal quaternário da Fig. 7. Os estágios do dispositivo utilizado para remover os rótulos ópticos foram ajustados da seguinte maneira: a) Estágio 1:  $G= 12,8$  dB,  $NF= 5$  dB,  $f_{cw}= 192,48$  THz,  $P_{cw}= 1$  mW,  $f_{saída}= 193,22$  THz e  $B_{-3dB}= 385$  GHz e b) Estágio 2:  $G= 23,62$  dB,  $NF= 5$  dB,  $f_{cw}= 192,79$  THz,  $P_{cw}= 1$  mW,  $f_{saída}= 193,66$  THz e  $B_{-3dB}= 450$  GHz. Os parâmetros das fibras dos dois estágios foram  $\alpha= 0.21$  dB/km,  $\gamma= 10.5$  (W.km) $^{-1}$ , inclinação de dispersão  $S_0= 0.03$  ps/(nm $^2$ .km),  $\lambda_0= 1557$  nm e  $L= 4,5$  km.

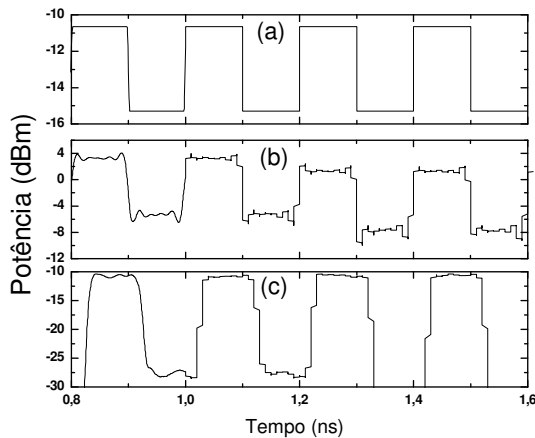


Fig. 8: Comparação entre (a) o sinal de dados original, (b) o pacote óptico quaternário, e (c) o sinal de dados regenerado..

A Fig. 8 compara uma seqüência de 8 bits do (a) sinal binário de entrada em  $f_2$ , com (b) o pacote quaternário gerado e com (c) sinal binário após a remoção do rótulo óptico na configuração *back-to-back*. As distorções observadas no sinal binário recuperado são devidas ao processo de multiplexação óptica de amplitudes e, também, às diferenças entre  $h(P)$  e a função de transferência ideal. Observa-se também que a taxa de extinção do sinal binário recuperado é superior à 20 dB. Esse valor relativamente alto é consequência do caráter regenerativo [17-18] da FWM gerado pelo dispositivo de 2 estágios utilizado.

A Fig. 9 mostra o diagrama de olho do sinal binário na configuração *back-to-back*. Após o sinal se propagar pelas fibras NZD, o sinal representado por esse diagrama de olho será degradado, principalmente, pela ação da dispersão e pelo acúmulo do ruído ASE. Para a potência média de 1 mW do pacote óptico utilizado nesse trabalho, a ação da automodulação de fase é desprezível [19]. A Fig. 10 ilustra o aumento da penalidade de olho em função da distância, admitindo que o diagrama da Fig. 9 possui uma penalidade nula. Observa-se que a distância máxima de propagação é da ordem de 150 km, para 1 dB de penalidade máxima.

Por fim, é importante observar que o método de *split-step* Fourier utilizado nas simulações anteriores é válido apenas

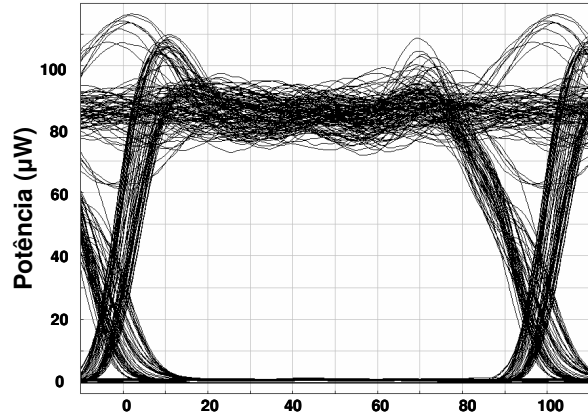


Fig. 9: Diagrama de olho do sinal recuperado na configuração *back-to-back* (gerador do pacote quaternário diretamente conectado ao dispositivo responsável pela remoção dos rótulos).

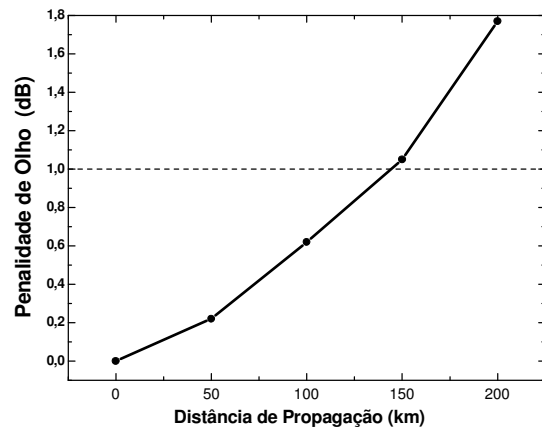


Fig. 10: Penalidade de olho do sinal binário recuperado em função da distância de propagação.

para propagações unidirecionais. Assim, o efeito de retroespalhamento Brillouin que ocorreria experimentalmente para as potências acima de 10 mW consideradas nesse trabalho [13] não está sendo considerado. No entanto, o retroespalhamento Brillouin pode ser minimizado através da utilização de moduladores de fase [18] e, assim, podemos considerar que nossos resultados são válidos desde que o dispositivo responsável pela remoção do rótulo (Fig. 6b) tenha esses moduladores conectados entre os filtros e as fibras altamente não-lineares.

## V. CONCLUSÕES

Nós apresentamos uma nova técnica que permite a remoção óptica de rótulos de pacotes quaternários. Para um sinal de dados de 10Gb/s e considerando uma penalidade máxima tolerável de 1 dB, os resultados apresentados sugerem que essa remoção possa ser feita após o pacote ter se propagado por distâncias de até 150 km por fibras NZD. No entanto, é bastante provável que um estudo mais detalhado sobre as

funções de transferência do dispositivo proposto possa prolongar esse alcance.

Um ponto importante para a determinação dessa função de transferência é que a Eq. (2) impõe restrições aos níveis de potência do pacote óptico quaternário. De fato, pode-se mostrar [9] que essa equação implica  $\delta_1/\delta_0 = \delta_2/\delta_3$ . Assim, ao aumentarmos  $\delta_1/\delta_0$  para minimizar a taxa de erros entre os símbolos dos níveis  $\delta_0$  e  $\delta_1$ , estaremos aumentando  $\delta_2/\delta_3$  e, conseqüentemente, precisaremos prorrogar as regiões planas inferior e superior da função de transferência.

Como os valores de potência requeridos pela FWM em fibras altamente não-lineares mostram-se relativamente altos, uma outra possibilidade a ser considerada é a utilização do efeito de FWM em amplificadores ópticos a semiconductor. Nesse caso, os valores de potência exigidos são da ordem de décimos de mW [21] mas a função de transferência não é tão similar à função ideal ilustrada na Fig. 4.

Embora, a técnica proposta tenha sido apresentada para a remoção de rótulos de pacotes ópticos gerados pela FWM, ela pode ser prontamente estendida para outros tipos de sinais quaternários, como os gerados eletronicamente [22]. Os próximos passos desse trabalho são a verificação da taxa de erro imposta pela técnica de remoção de cabeçalhos e a determinação de funções de transferência mais eficientes que a apresentada neste artigo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] C. Skoufis, S. Sygletos, N. Leligou, C. Matrakidis, I. Pountourakis, and A. Stavdas, "Data Centric networking using multiwavelength Headers/Labels in Packet over WDM Networks: A Comparative Study," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 10, Oct. 2003.
- [2] N. Ghani, "Lambda-labeling: A Framework for IP-over-WDM using MPLS," *Opt. Networks Mag.*, vol. 1, no. 2, pp. 45-58, 2000.
- [3] D. J. Blumenthal, "All-optical label swapping networks and technologies," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, pp. 2058-2075, Dec. 2000.
- [4] D. J. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri, and S. Humphries, "All-optical label swapping with wavelength conversion for WDM-IP networks with subcarrier multiplexed addressing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 1497-1499, Aug. 1999.
- [5] N. Chi, J. Zhang, P. V. Holm-Nielsen, C. Peucheret, P. Jeppensen, "Transmission and Transparent Wavelength Conversion of an Optically Labeled Signal Using ASK/DPSK Orthogonal Modulation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 5, May 2003.
- [6] M.L.F. Abbade, E.A.M. Fagotto, R.S. Braga, I.E. Fonseca, E. Moschim, F.R. Barbosa, "Inserção de Rótulos Ópticos Através da Mistura de Quatro Ondas", in Portuguese, XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Belém- PA, Brazil, Sept. 2004.
- [7] M.L.F. Abbade, E.A.M. Fagotto, R.S. Braga, I.E. Fonseca, E. Moschim, F.R. Barbosa, "Optical amplitude multiplexing through four-wave mixing in optical fibers", *IEEE Photon. Technol. Letters*, vol. 17, no 1, pp. 151-153, Jan. 2005.
- [8] M.L.F. Abbade, E.A.M. Fagotto, R.S. Braga, I.E. Fonseca, E. Moschim, F.R. Barbosa, "Quaternary Optical Packet Data Generated by Four-Wave Mixing", to be submitted to *IEEE Photon. Technol. Letters*.
- [9] M.L.F. Abbade, E.A.M. Fagotto, R.S. Braga, C.H. Volpato, E. Moschim, I.E. Fonseca, "Quaternary Optical Packet Data Generated by Four-Wave Mixing: Power Level Optimization", to be submitted to *Microwave and Optical Technol. Letters*.
- [10] A. Bogris, D. Syvridis, "Regenerative Properties of a Pump -Modulated Four Wave Mixing Scheme in Dispersion Shifted Fibers", *J. Lightwave Tech.*, vol. 21, no 9, Sept 2003.
- [11] E. Ciaramella, F. Curti, "All-optical signal reshaping via four-wave mixing in optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Letters*, vol. 12, pp. 849-851, July 2000.
- [12] P. S. Cho, P. Sinha, D. Mahgerefteh, G.M. Carter, "All-optical regeneration at the receiver of 10-Gb/s RZ data transmitted over 30000 km using an electroabsorption modulator", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 205-207, Feb. 2000.
- [13] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed., San Diego, N.Y., U.S.A.: Academic Press, 2001.
- [14] N. Shibata, R.P. Braun, R.G. Waarts, "Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber," *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-23, no 7, pp. 1205-1210, Jul. 1987.
- [15] S. Song, C. Allen, K. Demarest, R. Hui, "Intensity-dependent effects on FWM in optic fibers," *J. of Lightwave Technology*, vol. 17, no 11, pp. 2285-2290, Nov. 1999.
- [16] K. Inoue, "Four-wave mixing in optical fiber in the zero-dispersion wavelength region," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 1553-1561, Nov. 1992.
- [17] A. Argyris, H. Simos, A. Ikiades, E. Roditi, D. Syvridis, "Extinction Ratio Improvement by Four Wave Mixing in a Dispersion-Shifted Fiber", *IEE Electron. Lett.*, vol 39, pp. 230-232, 2003
- [18] M.L.F. Abbade, E.A.M. Fagotto, R.S. Braga, E. Moschim, I.E. Fonseca, "Extinction Ratio Improvement Using the Regenerative Properties of Four-Wave Mixing," *International Conference on Microwave and Optics, IMOC 2005*, July- 2005.
- [19] M.L.F. Abbade, E.A.M. Fagotto, R.S. Braga, V.I. Teles, R.M. da Assumpção, E. Moschim, I.E. Fonseca, "Transmission Performance of Quaternary Packet Data Generated by Four-Wave Mixing Multiplexing," *International Conference on Microwave and Optics, IMOC 2005*, July- 2005.
- [20] S. K. Korotky, P. B Hansen, L. Eskildsen and J. J. Vaselka, "Efficient Phase Modulation Scheme for Suppressing Stimulated Brillouin Scattering", *IOOC 95*, 110-111.
- [21] H. Simos, A. Argyris, D. Kanakidis, E. Roditi, A. Ikiades, and D. Syvridis, "Regenerative properties of wavelength converters based on FWM in a semiconductor optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, pp. 566-568, 2003.
- [22] S. Walklin, J. Conradi, "Multilevel signaling for increasing the reach of 10 Gb/s lightwave systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no 11, pp. 2235-2248, Nov. 1999.