

Desafios Tecnológicos em Comutação Óptica de Pacotes

João Paulo Madaleno, António Teixeira e Susana Sargento

Resumo – As redes ópticas de comutação de pacotes (OPS – *Optical Packet Switching*) são cada vez mais uma alternativa credível às outras redes ópticas. O OPS promete trazer a flexibilidade e eficiência da Internet para as redes ópticas com taxas de transferência além das disponíveis actualmente. Neste artigo descreve-se o estado da arte das tecnologias inerentes às redes OPS e os aspectos que ainda se encontram em estudo e desenvolvimento.

Index Terms— Optical packet switching, optical label swapping, contention resolution

I INTRODUÇÃO

O tráfego da Internet está a crescer de forma exponencial: o aparecimento de novos serviços e aplicações com características e requisitos de transmissão cada vez mais exigentes, assim como a crescente afluência de novos utilizadores às tecnologias da informação, tem aumentado em grande escala a quantidade de tráfego a fluir na rede Internet. O crescente congestionamento da rede em alturas de maior tráfego e o aumento dos atrasos na transmissão da informação são indicadores de que a infra-estrutura de rede actual não está preparada para suportar tais exigências de crescimento. Deste modo, é de grande necessidade que a próxima geração de redes IP (*Internet Protocol*) apresentem maiores capacidades das suas ligações, melhor desempenho e maiores taxas de transmissão da informação.

Do ponto de vista conceptual, as redes de comutação óptica de pacotes (OPS) são muito semelhantes às redes electrónicas de comutação de pacotes. Estas são caracterizadas pela elevada capacidade de transmissão (*throughput*), fácil adaptação a situações de congestionamento ou de falhas da rede. Actualmente, a grande limitação na implementação de redes OPS é o facto de não haver unidades de armazenamento ópticas (*buffers*) e equipamento óptico capaz de extrair e adicionar com precisão cabeçalhos de controlo ópticos (*Label Swapping*) [1]. Nas redes OPS, os dados são transmitidos em pacotes ópticos (de tamanho fixo) juntamente com a informação de controlo (cabeçalho - *label*), que é extraída e processada em cada nó.

II COMUTAÇÃO ÓPTICA DE PACOTES

Actualmente, há grandes expectativas depositadas sobre as redes OPS relativamente ao futuro das telecomunicações ópticas. Nos últimos anos têm-se realizado alguns projectos nesta área, nomeadamente, os projectos pioneiros OPERA e KEOPS [2]-[3].

Na figura 1 encontra-se um diagrama de blocos de um nó OPS genérico, que consiste de uma unidade de controlo de comutação, uma série de desmultiplexadores e multiplexadores, interfaces de entrada e saída, um comutador, uma unidade de armazenamento (*buffer* óptico que pode ser implementado de diversas formas, por exemplo linha de atraso em fibra – FDLs – *Fiber Delay Lines*) e/ou conversores de comprimento de onda. Os pacotes ópticos que chegam ao nó OPS são desmultiplexados e enviados para o interface de entrada. Os pacotes ópticos de OPS são constituídos pelos dados (incluindo o cabeçalho IP) e por um cabeçalho óptico, que contém a informação necessária para efectuar o encaminhamento destes no domínio óptico. A interface de entrada tem, entre outras funções, as de extrair o cabeçalho óptico e encaminhá-lo para a unidade de controlo de comutação. A unidade de controlo de comutação processa a informação desse cabeçalho, determinando a porta de saída e o comprimento de onda a atribuir ao respectivo pacote, dando instruções ao comutador para efectuar o seu encaminhamento. Para que os dados não sejam perdidos devido à existência de colisões, é necessário recorrer a estratégias que permitem evitar a colisão de pacotes. Algumas das técnicas mais utilizadas são a retenção dos dados por algum tempo no nó OPS ou o efectuar de uma conversão de comprimento de onda. Finalmente, o pacote é direccionado para o interface de saída, onde é adicionado um novo cabeçalho e encaminhado para a porta de saída predeterminada.

III COMUTAÇÃO/ ENCAMINHAMENTO DE PACOTES

O controlo de comutação de pacotes, conversão de comprimento de onda e encaminhamento para a porta de saída, pode ser efectuado electrónica [2]-[3] ou opticamente [4]-[10]. No entanto, o facto de o controlo de comutação de pacotes ser efectuado electronicamente tem limitações devido à disparidade de ritmos entre a transmissão de sinais WDM (*Wavelength Division*

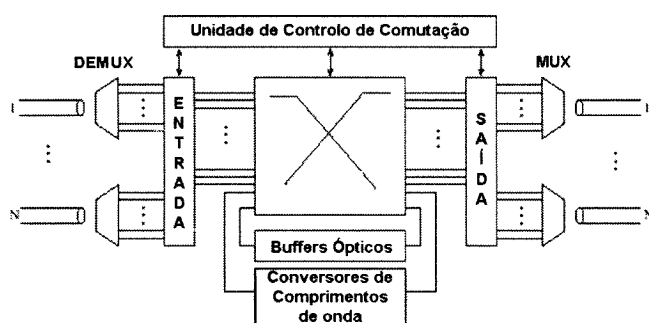


Fig. 1. Diagrama de blocos de um nó OPS genérico [8].

Multiplexing - multiplexagem no comprimento de onda e a capacidade de efectuar o encaminhamento (processamento electrónico), principalmente quando as taxas de transferência aumentam (eg. >40Gbit/s) [10].

Seguidamente, descrevem-se tecnologias e funcionalidades necessárias em nós de redes totalmente ópticas para possibilitar a comutação óptica de pacotes:

Troca de Cabeçalho Óptico (Optical Label Swapping)

Este processo é complexo, pois pressupõe a existência de elementos de processamento integralmente ópticos, elementos estes que actualmente ainda estão em estado embrionário. No entanto, recentemente têm sido amplamente estudadas abordagens do tipo AOLS (*All-Optical Label Swapping*) [4]-[10], onde o cabeçalho de controlo é processado totalmente no domínio óptico. AOLS é uma abordagem promissora para resolver o encaminhamento em redes ópticas. Em cada nó da rede, o cabeçalho é extraído e processado e os pacotes são encaminhados em função da informação existente nestes. De seguida, o cabeçalho é apagado, reescrito e anexado novamente ao respectivo pacote. Note-se que o AOLS deve considerar a utilização de cabeçalhos ópticos para identificar os pacotes IP na camada óptica, ou seja, deve interagir de forma semelhante com sistemas WDM e TDM (*Time Division Multiplexing* - multiplexagem temporal).

Os cabeçalhos ópticos podem ser anexados aos dados de diversas formas: em série (bit-serial) [3] e [16], multiplexados numa sub-portadora (SCM - *SubCarrier Multiplexing*) [4], [9]-[12], utilizando métodos de modulação ortogonal (por exemplo, IM/FSK) [5] ou em paralelo noutro comprimento de onda (*out of band*) [13]. Nos dois primeiros casos a taxa de transferência do cabeçalho é independente e inferior à do pacote, tipicamente 2,5Gbit/s e 10Gbit/s, respectivamente. No caso do cabeçalho óptico em série, este é colocado no mesmo comprimento de onda do pacote à frente do respectivo pacote, separados por uma banda de guarda (OGB - *Optical Band Guard*) que permite remover e reinserir o cabeçalho sem necessidade de recorrer a unidades de armazenamento [10] (figura 2.a). No sistema paralelo, o cabeçalho é multiplexado numa sub-portadora eléctrica ou óptica do pacote IP mantendo por isso o mesmo comprimento de onda (figura 2.b). Uma outra

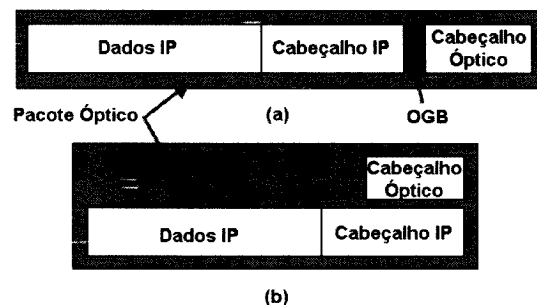


Fig. 2. Formatos de Cabeçalhos Ópticos. a) Em série. b) Multiplexado em subportadora [10].

técnica apresentada em [13] é baseada em cabeçalhos OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) colocados em bandas de comprimentos de onda diferentes do comprimento de onda onde circulam os pacotes.

A tecnologia que permite realizar o processamento do cabeçalho totalmente no domínio óptico está ainda numa fase muito experimental [7],[13], pelo que é necessário encontrar soluções tecnológicas aplicáveis em comutadores ópticos de pacotes. Este último sistema de anexação do cabeçalho tem vantagens sobre o primeiro pelo facto de o cabeçalho poder ser removido e substituído de forma assíncrona relativamente ao pacote. Por outro lado, uma das suas desvantagens tem origem nos seus problemas de susceptibilidade à dispersão na fibra.

Demux/Mux Ópticos e OADMs (Optical Add/Drop Multiplexers)

A Desmultiplexagem e a multiplexagem (Demux/Mux) óptica são tecnologias fundamentais no WDM. Apesar de o WDM ser uma tecnologia bastante madura e robusta, o desenvolvimento de sistemas de Demux/Mux a taxas de transferência elevadas ainda tem alguma margem de evolução. Por outro lado, as tecnologias ópticas de multiplexagem e desmultiplexagem temporal (OTDM - *Optical Time-Division Multiplexing*) estão ainda a amadurecer. Actualmente, existem diversas tecnologias baseadas: em elementos não lineares (TOAD - *Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer*¹ ou SESHG - *Surface-Emitted Second-Harmonic Generation*) [35], [36], em portas ópticas (UNI - *Ultrafast Nonlinear Interferometer*) [37], ou em MEMS (*Micro-Electro-mechanical System*) [38]. Apesar de algumas destas propostas permitirem elevadas taxas de transferência, são ainda pouco flexíveis, pouco transparentes à taxa de transferência, dependendo demasiado da variação do atraso dos pacotes, ou necessitam de funções de gestão centralizadas de recursos e de recuperação precisa de sinal de relógio.

Os OADMs (*Optical Add/Drop Multiplexers*) têm como funções inserir (*add*) ou extrair (*drop*) canais ópticos (comprimentos de onda) em ou *bits* de uma sequência de sinais ópticos. Desta forma, usando OADMs, os canais de

¹ Elemento não linear colocado assimetricamente num *loop* de uma fibra.

um sinal de múltiplos comprimentos de onda podem ser adicionados ou descartados sem recorrer a processamento electrónico [39].

As tecnologias mais utilizadas para implementar OADMs no comprimento de onda são as redes de difracção de Bragg (FGB – *Fiber Gratings Bragg*) e matrizes de difracção de guias de onda (AWGMs – *Arrayed Wavelength Gratings Multiplexers*) [40], [41], por serem as mais divulgadas e maduras. No entanto, são utilizadas também outras opções tecnológicas, nomeadamente, redes de difracção ajustáveis, matrizes de micro-espelhos, filtros ajustáveis acústico-óptico e anéis ressonantes [40].

Encaminhamento / Comutação

As tecnologias de comutação são muito importantes na implementação de redes ópticas. O aspecto mais atractivo dos comutadores ópticos é o facto de permitirem efectuar encaminhamento de sinais ópticos, sem recorrer a conversões dos sinais para o domínio da electrónica. As soluções totalmente ópticas para comutadores são ainda objecto de estudo e desenvolvimento. Num comutador existem vários parâmetros importantes: o tempo de comutação, as perdas de inserção, intermodulação, razão de potência na saída na comutação *ON-OFF* (*extinction ratio*) e perdas de dependência de polarização (PDL – *Polarization-Dependent Loss*) [39].

Actualmente, as principais tecnologias de comutadores ópticos existentes apresentam-se de seguida [39].

Comutadores opto-mecânicos consistiram na primeira tecnologia de comutadores ópticos a ser comercializada, onde a comutação é efectuada por meios mecânicos, prismas, espelhos ou acopladores direccionais. Este tipo de comutadores apresentam baixas perdas de inserção, baixas perdas dependentes da polarização, baixa intermodulação e são relativamente baratos. No entanto, são também limitados no número de portas e, consequentemente, pouco adaptáveis ao aumento das exigências de capacidade e de complexidade em sistemas escaláveis. O tempo de comutação é da ordem de alguns milissegundos, por isso bastante limitados para redes de ritmos elevados.

Os MEMS (*Micro-Electrical Mechanical Switch*) incluem todas as suas vantagens da tecnologia anterior, mas permitem uma maior agregação e menores tempos de comutação. Dadas as suas dimensões e propriedades, podem ser colocados em PLCs (*Planar Lightwave Circuits*), resultando em comutadores muito compactos. Há duas sub-categorias deste tipo de comutadores: MEMS de duas dimensões ou digitais, MEMS 2-D [43], [43], e MEMS de três dimensões ou analógicos, MEMS 3-D [44]. Nos MEMS 2-D o posicionamento do espelho é biestável (ON/OFF). O limite prático do número de portas neste tipo de comutador é de 32x32 [39]. Devido à sua simplicidade têm perdas ópticas elevadas. Nos MEMS 3-D encontra-se um espelho ajustável funcionando analogicamente, permitindo inclinação variável segundo os dois eixos. Por estas razões os MEM 3-D podem ser considerados como uma tecnologia promissora para a

implementação de comutadores OXC (*Optical Cross-Connect*) com um número elevado de portas (>1000). No entanto, apresentam um custo elevado. Os MEMSs podem ser utilizados em multiplexadores de adição/remoção de comprimentos de onda, serviço de monitorização óptica e protecção óptica. Os desafios futuros encontram-se no desenvolvimento dos espelhos, no algoritmo de controlo dos mesmos e na sua implementação.

Os comutadores eléctrico-ópticos utilizam um acoplador direccionado e a sua relação de acoplamento é alterada, variando o índice de refração do material do acoplador. Apesar da sua fiabilidade, os seus tempos de comutação destes comutadores são elevados, dependentes da capacidade dos eléctrodos, apresentando ainda elevadas perdas de inserção e PDL; são também mais caros do que os MEMSs [39].

Os comutadores térmico-ópticos consistem na variação do índice de refração do material dieléctrico por variação da sua temperatura. Estes comutadores são normalmente pequenos, mas têm problemas com a dissipação de potência, limitações na densidade de integração e intermodulação e perdas de inserção inaceitáveis para determinadas aplicações. A maior parte dos comutadores térmico-ópticos existentes no mercado necessitam de refrigeração. Uma vantagem destes comutadores é o facto de poderem ser integrados com atenuadores e AWGMs [39].

Os comutadores Bolha (*bubble*) podem ser considerados uma sub-categoria dos comutadores térmico-ópticos: têm o mesmo princípio de funcionamento das impressoras de jactos de tinta e apresentando alguma escalabilidade. No entanto, em sistemas de telecomunicações não há certezas quanto à sua fiabilidade e perdas de inserção [39].

Os comutadores de cristal líquido são baseados na variação da polarização de luz incidente, por variação de um campo eléctrico aplicado ao cristal líquido. Estes comutadores não têm partes móveis, são muito fiáveis e têm um desempenho satisfatório. Apresentam limitações no seu projecto, podendo ser afectados por temperaturas extremas [39].

Os comutadores acústico-ópticos baseiam-se na interacção entre som e a luz. Neste caso, são viáveis comutações de múltiplos comprimento de onda, dado que é possível ter várias ondas acústicas no material (várias frequências ao mesmo tempo). No entanto, o tempo de comutação é limitado à velocidade do som, na ordem dos microsegundos.

Os comutadores SOA (*Semiconductor Optical Amplifiers*), são dispositivos muito versáteis, podem ser usados em vários módulos de redes ópticas, por exemplo, como simples comutadores ON-OFF, através de variação da tensão de polarização. São dispositivos caros, mas que permitem a implementação de comutadores de grande capacidade (integrando os SOAs e acopladores passivos).

Conversão de Comprimento de Onda

Uma das possíveis funções da conversão de comprimento de onda é resolver problemas de disputa de recursos (que será descrito no ponto 0), permitindo melhorar a eficiência de utilização dos recursos de uma rede óptica, principalmente em sistemas com tráfego tão dinâmico como o das redes baseadas em OPS. Sendo assim, os conversores de comprimento de onda são uma peça essencial e indispensável em comutadores em redes OPS. A conversão do comprimento de onda pode ser obtida através de uma conversão OEO - Optica-Electrica-Optica. No entanto, o desejável é, obviamente, realizá-la totalmente no domínio óptico, devido à sua maior largura de banda e flexibilidade, tempos curtos de configuração, elevada relação sinal-ruído e transparência da taxa de transferência [14].

Os conversores totalmente ópticos são tipicamente baseados em dispositivos altamente não lineares. Exemplo de conversores que se encontram na literatura são: SOAs, que tiram partido dos efeitos não lineares de intermodulação de ganho (XGM - *Cross Gain Modulation*) [17], [18], de intermodulação de fase (XPM - *Cross Phase Modulation*) [17] e também (mas menos frequente) de modulação de mistura de quarta onda (FWM - *Four Wave Mixing*) [19], [20]; configurações de interferométrico que exploram o efeito XPM, tais como MZI [17], TOAD [21], UNI [22], DI (*Differential Delay Interferometer*) [23] e Interferométrico Sagnac Integrado Monolítico (*Monolithically Integrated Sagnac Interferometer*) [24]; guias de onda LiNbO₃ (MgO-doped LiNbO₃ QPM, quasi-phase-matched) [25], [26]. As configurações interferométricas tiram proveito da XPM, requerendo baixa potência de entrada. De notar que com a configuração interferométrica DI conversão a ritmos superiores aos obtidos com SOAs [27].

Em [28], através da realização de uma nova configuração de interferométrico DI, conseguiram-se taxas de transferência da ordem de 100 Gbit/s e transmissão com cascata de regeneradores 3R bem sucedida a um milhão de quilómetros. Este método consiste em aproveitar ambos os efeitos de intermodulação XPM e XGM, permitindo converter a aproximadamente o dobro da velocidade dos SOAs convencionais. Outro tipo de configuração é baseado num elemento não linear e num filtro óptico RSOF (*Red-Shifted Optical Filter*) com um interferométrico DI. Finalmente, os mesmos autores apresentam uma nova configuração com um SOA seguido de um filtro PROF (*Pulse Reformatting Optical Filter*) [27]. O modo de funcionamento é muito semelhante ao do RSOF, mas com resultados ainda melhores. Os autores afirmam que com esta configuração baseada em SOAs é possível obter a melhor eficiência na conversão de comprimento de onda e na regeneração.

Optical 3R Regeneration

A Regeneração 3R óptica (O3R) consiste num processamento altamente não linear do sinal óptico, de modo a conseguir-se reamplificação, retemporização e

reformatação do sinal degradado. É de extrema importância que essa funcionalidade seja realizada totalmente no domínio óptico, pois a utilização de soluções com processamento electrónico tendem a ser mais problemáticas, limitativas e mais caras. O3R é uma funcionalidade essencial em redes totalmente ópticas, principalmente em redes de longa distância e/ou em redes com um número elevado de nós, de modo a evitar efeitos acumulados devido a distorção de sinal e processamento de sinal realizado nos nós da rede.

Um grande número de implementações de O3R propostas na literatura são baseadas no comutador interferométrico semiconductor Simétrico *Mach Zehnder* (SMZ) [46]. No entanto, nestes casos, a O3R resulta numa perda de potência de sinal de 3 a 4 dB. Os autores de [46] conseguiram reduzir essa perda para aproximadamente 0dB, usando uma estrutura PD-SMZ (*Polarization-Discrimination-SMZ*) a uma taxa de 84 Gbit/s. Utilizando um interferométrico não linear ultra-rápido (UNI) conseguiram-se O3R a taxas de transferência acima de 80 Gbit/s [45]. Em [47] propõe-se uma configuração mais simples baseada no conversor de comprimento de onda SOA-DI (*Delayed Interference*), com perdas de inserção inferiores a 1 dB, uma taxa de 40 Gbit/s e uma relação sinal-ruído muito boa.

Outra abordagem diferente surge a 40 Gbit/s, utilizando moduladores de electro-absorção [48]. C. Schubert et al. [49] conseguiram implementar o O3R mais rápido até esta data, a uma taxa de 160 Gbit/s, utilizando uma HNL-DSF (*Highly NonLinear Dispersion-Shifted Fiber*). Em [50], os autores recorrem a uma configuração de Interferométrico de Sagnac com SOA (*SOA-Assisted fiber Sagnac interferometer*) para 10 Gbit/s.

IV DISPUTA DE RECURSOS (CONTENTION RESOLUTION)

Outra questão que merece alguma atenção são as estratégias de resolução de disputa de recursos: se dois pacotes provenientes de duas entradas diferentes (portas e/ou comprimentos de onda) forem encaminhados para a mesma porta de saída (porta e comprimento de onda), o comutador deverá tomar uma decisão que evite a perda de um dos pacotes.

Há três estratégias possíveis para a resolução deste problema: um dos pacotes deve ser convertido para outro comprimento de onda disponível, deve ser retido em unidades de armazenamento ópticos; ou deve ser encaminhado para um trajecto alternativo [8]. A tecnologia de conversão de comprimento de onda foi discutida na alínea 0; as duas últimas estratégias serão abordadas de seguida.

Por outro lado, existem alguns estudos que abordam este problema de uma forma global, ou seja, apresentam configurações experimentais que permitem combinar as três estratégias [29]-[31]. Num destes estudos concluiu-se que o esquema mais eficiente de resolução de disputa de recursos passa por, primeiro, efectuar conversão de comprimento de onda, a seguir, reter os pacotes em

unidades de armazenamento e, em último lugar, recorrer ao encaminhamento alternativo [31].

Unidades de armazenamento Ópticas

A maior dificuldade no projecto de nós OPS é a ausência de uma tecnologia expedita para armazenamento e acesso a dados no domínio óptico. A investigação tem-se direccionado no sentido de obter dispositivos, do ponto de vista conceptual, semelhantes às RAMs (*Random Access Memory*) electrónicas, não havendo, no entanto, RAMs ópticas. Actualmente a alternativa óptica mais usual para realizar esta funcionalidade são as FDLs. As FDLs são fibras ópticas de comprimento fixo que permitem guardar um pacote durante o tempo que este leva percorrê-la à velocidade da luz; sem recorrer a técnicas alternativas, o pacote não pode ficar armazenado por tempo indefinido. Por outro lado, as FDLs são extremamente caras, ocupam bastante espaço e têm pouca flexibilidade. Portanto, esta é uma área que requer muita investigação.

Os *buffers* ópticos podem ter um único nível ou vários níveis, com um ou mais elementos em paralelo. As arquitecturas de *buffers* podem ter ou não realimentação, *feed-forward* ou *feedback*, respectivamente. O número de FDLs pode ser minimizado se forem utilizados algoritmos eficientes para projectar os *buffers* ou se utilizarem conversores de comprimento de onda. Há várias configurações de FDLs diferentes que tentam resolver uma determinada questão, nomeadamente, o armazenamento de vários pacotes em simultâneo [32], com atrasos variáveis [33] ou considerando modelo híbrido de memória (optico-eléctrico) [34].

Encaminhamento Deflexivo

Este método explora a dimensão espacial da rede para resolver o problema de disputa de recursos. Um pacote que perca a disputa de recursos, com outro(s) pacote(s), é encaminhado por um trajecto alternativo (normalmente, mais longo) até ao seu destino. A utilização deste método pode causar atrasos, o que resultará na chegada ao destino de pacotes fora de ordem. Por outro lado, a eficiência deste método depende directamente do padrão de tráfego e da topologia da rede [14].

A grande vantagem desta estratégia é o facto de a sua utilização não implicar a necessidade de grande esforço na implementação, nem de algoritmos de controlo, nem de dispositivos de *hardware* suplementares [39].

No entanto, não se pode efectuar encaminhamento alternativo em nós sucessivos de uma forma aleatória, pois o pacote pode regressar ao mesmo nó onde iniciou a resolução do problema de disputa de recursos, podendo desta forma ficar indefinidamente na rede. Portanto, terão que ser impostas regras que permitam utilizar esta estratégia eficientemente e aumentar, consequentemente, a eficiência da própria rede (por exemplo, o número de saltos - *hops* deve ser limitado e quando excedido o pacote deve ser descartado [31]).

V CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

Neste artigo foram apresentados alguns aspectos gerais do funcionamento das redes OPS. As redes OPS têm limitações tecnológicas que impedem a sua implementação efectiva e eficiente. O tratamento e processamento de cabeçalhos de controlo, o encaminhamento e a questão da disputa de recursos são questões que merecem um estudo mais aprofundado. Uma das tecnologias mais limitativas das redes OPS são o armazenamento óptico de dados, pois, actualmente, as soluções amadurecidas têm claras limitações do ponto de vista de utilização e funcionalidade.

Um outro aspecto de grande importância para trabalho futuro é o estudo dos parâmetros de desempenho da rede ao nível físico (óptico) que têm impacto no desempenho da rede IP e de camadas superiores, tendo em conta os requisitos dos serviços e aplicações emergentes.

REFERÊNCIAS

- [1] T. Battestilli. "Optical Bust Switching: a survey". Technical Report TR-2002-10, NC State Univ., Comp. Sci. Dept., July 2002.
- [2] A. Carena, D. Vaughn, R. Guadino, M. Shell and D. J. Blumenthal. "OPERA: an Optical Packet Experimental Routing Architecture with Label Swapping Capability". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, Issue 12, pp. 2135-2145, December 1998.
- [3] C. Guillemot et al.. "Transparent Optical Packet Switching: The European ACTS KEOPS project approach". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, Issue 12, pp. 2117-2133, December 1998.
- [4] M. Yong Jeon et al.. "Demonstration of All-Optical Packet Switching routers with optical label swapping and 2R regeneration for scalable Optical label switching networks applications". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 11, pp. 2723-2733, November 2003.
- [5] K. Vlachos et al.. "An Optical IM/FSK Coding Technique for the Implementation of a Label-Controlled Arrayed Waveguide Packet Router". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 11, pp. 2617-2628, November 2003.
- [6] X. C. Yuan V. O. K. Li, C. Y. Li and P. K. A. Wai. "A novel self-routing address scheme for all-optical packet-switched networks with arbitrary topologies". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 2, pp. 329-339, November 2003.
- [7] H. J. S. Dorren et al.. "Optical packet switching and buffering by using all-optical signal processing methods". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 1, pp. 2-12, January 2003.
- [8] J. Yu, G. Chang and Q. Yang. "Optical Label Swapping in a Packet-Switched Optical Network Using Optical Carrier Suppression, Separation, and Wavelength Conversion". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, Issue 9, pp. 2156-2158, September 2004.
- [9] Y. M. Lin, W. I. Way and G. K. Chang. "A Novel Optical Label Swapping Technique using erasable optical single-sideband subcarrier label". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, Issue 8, pp. 1088-1090, August 2000.
- [10] D. J. Blumenthal et al.. "All-Optical Label Swapping Networks and Technologies". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, Issue 12, pp. 2058-2074, December 2000.

- [11] D. J. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri and S. Humphries. "All-Optical Label Swapping wavelength conversion for WDM-IP Networks with subcarrier multiplexed addressing". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, Issue 11, pp. 1497-1499, November 1999.
- [12] Z. Zhu, V. J. Hernandez, M. Y. Jeon, J. Cao, Z. Pan and S. J. Ben Yoo. "RF photonics signal processing in subcarrier multiplexed Optical Label switching communication systems". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 12, pp. 3155-3166, December 2003.
- [13] Teixeira, A.; André, P.; Monteiro, P.; Lima, M.; Nogueira, R.; Da Rocha, J.; "All-optical routing based on OCDMA Headers", LEOS04, Tucson, USA, pp. 1046-1047
- [14] G. N. Rouskas and L. Xu. "Optical Packet-Switching". Optical WDM Networks: Past Lessons and Path Ahead, (Krishna Sivalingam and Suresh Subramaniam, Editors), Kluwer, Norwell, Massachusetts, 2004
- [15] W. Hung, C. Chan, L. Chen and F. Tong. "A bit-serial optical packet label-swapping scheme using DPSK encoded labels". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, Issue 8, pp. 1088-1090, August 2000.
- [16] S. Xiao, Q. Zeng, J. Wang, J. Xu and Y. Wang. "Realization of a multiwavelength label optical packet switching". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, Issue 4, pp. 605-607, April 2003.
- [17] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen and K. E. Stubkjaer. "All-Optical Wavelength Conversion by Semiconductor Optical Amplifiers". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, Issue 6, pp. 942-954, June 1996.
- [18] S. Rangarajan, Z. Hu, L. Rau and D. J. Blumenthal. "All-optical contention resolution with wavelength conversion for asynchronous variable-length 40Gb/s optical packets". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, Issue 2, pp. 689-691, February 2004.
- [19] Z. Li, Y. Dong, J. Mo, Y. Wang and C. Lu. "Cascaded All-optical Wavelength conversion for RZ-DPSK signal based on four-wave mixing in Semiconductor Optical Amplifiers". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, Issue 7, pp. 1685-1687, July 2004.
- [20] J. H. Lee, W. Berlardi, K. Furusawa, P. Petropoulos, Z. Yusoff, T. M. Monro and D. J. Richardson. "Four-wave mixing based 10Gb/s tunable wavelength conversion using a holey fiber with a high SBS threshold". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, Issue 3, pp. 440-442, March 2003.
- [21] J.P. Sokoloff, P.R. Prucnal, I. Glesk and M. Kane. "A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD)". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 5, Issue 7, pp. 787-790, July 1993.
- [22] C. Bintjas, K. Vlachos, N. Pleros and H. Avramopoulos. "Ultrafast Nonlinear Interferometer (UNI)-Based Digital Optical Circuits and Their Use in Packet Switching". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 20, Issue 11, pp. 2629-2637, November 2002.
- [23] Y. Ueno, S. Nakamura, K. Tajima, S. Kitamura. "3.8-THz wavelength conversion of picosecond pulses using a semiconductor delayed-interference signal-wavelength converter (DISC)". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, Issue 3, pp. 346-348, March 1998.
- [24] V. M. Menon, W. Tong, C. Li, F. Xia, I. Glesk, P. R. Prucnal and S. R. Forrest. "All-optical wavelength conversion using a regrowth-free monolithically integrated Sagnac interferometer". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, Issue 2, pp. 254-256, February 2003.
- [25] J. A. Braken and C. Q. Xu. "All-optical wavelength conversion based on MgO-doped LiNbO₃ QPM waveguides using an EDFA as a Pump Source". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, Issue 7, pp. 954-956, July 2003.
- [26] B. Olsson, P. Ohlen, L. Rau and D. J. Blumenthal. "A simple and robust 40-Gb/p Wavelength Converter using fiber cross-phase modulation and Optical filtering". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, Issue 7, pp. 846-848, July 2000.
- [27] J. Leuthold, D. M. Marom, S. Cabot, J. J. Jaques, R. Ryf and C. Randy Giles. "All-optical wavelength conversion using a pulse reformatting optical filter". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, Issue 1, pp. 186-192, January 2004.
- [28] J. Leuthold, B. Mikkelsen, R. E. Behringer, G. Raybon, C. H. Joyner and P. A. Besse. "Novel 3R Regenerator Based on Semiconductor Optical Amplifier Delayed-Interference Configuration". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, Issue 8, pp. 860-862, August 2001.
- [29] F. Xue, Z. Pan, Y. Bansal, J. Cao, M. Jeon, K. Okamoto, S. Kamei, V. Akella and S. J. B. Yoo. "End-to-end contention resolution schemes for an optical packet switching network with enhanced edge routers". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 11, pp. 2595-2604, November 2003.
- [30] Z. Pan, H. Yang, Z. Zhu, J. Cao, V. Akella, S. Butt and S. J. B. Yoo. "Demonstration of variable-length packet contention resolution and packet forwarding in an optical-label switching router". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, Issue 7, pp. 1772-1774, July 2004.
- [31] S. Yao; B. Mukherjee, S.J.B. Yoo and S. Dixit. "A unified study of contention-resolution schemes in optical packet-switched networks". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 3, pp. 672- 683, March 2003.
- [32] Y. Liu, M. T. Hill, G. D. Khoe and H. J. S. Dorren. "All-Optical buffering using laser neural networks". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, Issue 4, pp. 596-598, April 2003.
- [33] Y. Liu, M. T. Hill, N. Calabretta, H. de Waardt, G. D. Khoe and H. J. S. Dorren. "Demonstration of a Variable Optical Delay for a Recirculating Buffer by Using All-Optical Signal Processing". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, Issue 7, pp. 1748-1750, July 2004.
- [34] R. Takahashi, T. Nakahara, K. Takahata, H. Takenouchi, T. Yasui, N. Kondo and H. Suzuki. "Photonic Random Access Memory for 40-Gb/s 16-b Burst Optical Packets". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, Issue 4, pp. 1185-1187, April 2004.
- [35] K. Deng, R. J. Runser, P. Toliver, I. Glesk, and P. R. Prucnal. "A highly-scalable, rapidly-reconfigurable, multicasting-capable, 100-Gb/s photonic switched interconnect based upon OTDM technology". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, Issue: 12, pp. 1892-1904, December 2000.
- [36] T. G. Ulmer, M. C. Gross, K. M. Patel, J. T. Simmons, P. W. Juodawlkis, B. R. Washburn, W. S. Astar, A. J. Spring Thorpe, R. P. Kenan, C. M. Verber, and S. E. Ralph. "160-Gb/s optically time-division multiplexed link with all-optical demultiplexing". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, Issue 12, pp. 1964-1977, December 2000.
- [37] S. A. Hamilton, B. S. Robinson, T. E. Murphy, S. J. Savage and E. P. Ippen. "100 Gb/s optical time-division multiplexed networks". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 20, Issue 12, pp. 2086 – 2100, December 2002.
- [38] S. Pau, M. De Angelis and B. Holland. "Time-multiplexed signals and parallel signal analysis/switch optimization for MEMS-based optical cross-connect". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 3, pp. 609-613, March 2003.
- [39] G. I. Papadimitriou, C. Papazoglou and A. S. Pomportsis. "Optical Switching: Switch Fabrics, Techniques, and Architectures". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 2, pp. 384- 405, February 2003.
- [40] S.D. Dods and R. S. Tucker. "A comparison of the homodyne crosstalk characteristics of optical add-drop multiplexers". IEEE

- Journal of Lightwave Technology, Vol. 19, Issue 12, pp. 1829 - 1838, December 2001.
- [41] D. Mechin, P. Grosso, D. Bose. "Add-drop multiplexer with UV-written Bragg gratings and directional coupler in SiO₂-Si integrated waveguides", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.: 19, Issue: 9, pp. 1282 – 1286, September 2001.
 - [42] G. Shen, T. H. Cheng, S. K. Bose, C. Lu, and T. Y. Chai. "Architectural Design for Multistage 2-D MEMS Optical Switches". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 20, Issue 2, pp. 178-187, February 2002
 - [43] T. Y. Chai, T. H. Cheng, S. K. Bose, C. Lu, and G. Shen. "Array Interconnection for Rearrangeable 2-D MEMS Optical Switch" IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, Issue 5, pp. 1134-1140, May 2003
 - [44] V. Kaman, X. Zheng, R. J. Helkey, C. Pularla and J. E. Bowers. "A 32-element 8-bit photonic true-time-delay system based on a 288 /spl times/ 288 3-D MEMS optical switch". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, Issue: 6, pp. 849-851, June 2003.
 - [45] A. E. Kelly, I. D. Phillips, R. J. Manning, A. D. Ellis, D. Nasset, D. G. Moodie and R. Kahsyap. "80 Gbit/s all-optical regenerative wavelength conversion using semiconductor optical amplifier based interferometer". Electronics Letters, Vol. 35, Issue 17, pp. 1477-1478, August 1999.
 - [46] Y. Ueno, S. Nakamura and K. Tajima. "Penalty-Free Error-Free All-Optical Data Pulse Regeneration at 84 Gb/s by Using a Symmetric-Mach-Zehnder-Type Semiconductor Regenerator". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, Issue 5, pp. 469-471, May 2001.
 - [47] J. Leuthold, B. Mikkelsen, R. E. Behringer, G. Raybon, C. H. Joyner and P. A. Besse. "Novel 3R Regenerator Based on Semiconductor Optical Amplifier Delayed-Interference Configuration". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, Issue 8, pp. 860-862, August 2001.
 - [48] T. Otani, T. Miyazaki and S. Yamamoto. "40-Gb/s Optical 3R Regenerator Using Electroabsorption Modulators for Optical Networks". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 20, Issue 2, pp. 195-200, February 2002.
 - [49] C. Schubert, R. Ludwig, S. Watanabe, F. Futami, C. Schmidt, J. Berger, C. Boerner, S. Ferber, and H. G. Weber. "160 Gbit/s wavelength converter with 3R regenerating capability", Electronics Letters, Vol. 38, Issue 16, pp. 903-904, August 2002.
 - [50] G. Gavioli and Polina Bayvel. "Novel 3R Regenerator Based on Polarization Switching in a Semiconductor Optical Amplifier-Assisted Fiber Sagnac Interferometer". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, Issue 9, pp. 1261-1262, September 2003.