

Agregação de Tráfego em Redes Ópticas com Multiplexação por Comprimentos de Onda

André Costa Drummond¹, Nelson Luís Saldanha da Fonseca¹

¹Instituto de Computação – Universidade de Campinas (UNICAMP)

Resumo. *Em redes ópticas com multiplexação por comprimento de onda (WDM), a alocação de banda passante ocorre em múltiplos da capacidade de um comprimento de onda. Para a utilização eficiente da grande capacidade disponível em redes WDM, agrega-se diversos fluxos com pequenas demandas de banda em comprimentos de onda. Por outro lado, aplicações emergentes em e-Ciência e novas aplicações multimídia demandam banda passante superior à capacidade de um comprimento de onda, requerendo que o fluxo seja transmitido em vários caminhos ópticos, possivelmente por rotas distintas, o que traz novos desafios, inclusive para os mecanismos de agregação de tráfego. Esta tese investiga diversos problemas em agregação de tráfego e propõe soluções originais para os mesmos. Propõe-se solução para o problema de coloração de grafo auxiliar para a resolução do problema RWA, através da recente Teoria de Complexidade Parametrizada. Introduzem-se, também, algoritmos para a resolução do problema de agregação dinâmica de tráfego que consideram, parcialmente, a topologia da rede e promovem bloqueio balanceado entre os diversos pares comunicantes na rede. Propõem-se, por último, algoritmos para agregar tráfego quando os fluxos demandam maior quantidade de banda passante do que a capacidade de um canal, através do roteamento por múltiplos caminhos, tanto para cenários envolvendo um único domínio como para cenários envolvendo múltiplos domínios. Os algoritmos propostos permitem a efetivação de mecanismos de agregação de tráfego que possibilitam o uso eficiente da capacidade da Internet baseada em rede ópticas pelas aplicações emergentes bem como pelas aplicações legadas.*

Palavras-chave: Redes ópticas, Sistemas WDM, Agregação de tráfego, RWA.

1. Motivação

Surgiram nos anos 80 as primeiras redes de comunicação óptica que transmitiam informação através de sinais de luz trafegando em fibras ópticas. A capacidade de banda passante dos enlaces ópticos foi expandida, posteriormente, com a introdução da tecnologia de multiplexação por comprimento de onda (WDM), que permitiu a multiplexação de diversos sinais ópticos em uma mesma fibra através da utilização de diferentes comprimentos de onda. Além disso, a introdução de novos elementos comutadores, chamados OXCs, permitiu a comutação de comprimentos de onda entre fibras ópticas; Surgiram, assim, as redes ópticas transparentes, nas quais um fluxo atravessa toda a rede sem que haja comutação eletrônica nos nós intermediários, o que permitiu o barateamento das redes, levando a tecnologia WDM a ser adotada amplamente no núcleo da Internet.

Um caminho óptico é composto por uma rota (sequência de enlaces de fibra) e um comprimento de onda. Para estabelecê-lo, é preciso, portanto, resolver o problema

de roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA). Atualmente, o estado da arte da tecnologia WDM suporta transmissões com largura de banda de 40 Gbps por comprimento de onda. Em laboratórios, já se atinge taxas de transmissão de 160 Gbps. Em contraste, a grande maioria dos fluxos de pacotes existente na Internet, não demandam mais do que centenas de megabits por segundo. Para reduzir o custo da rede, é necessária a agregação de tráfego de baixa velocidade em caminhos ópticos de forma que o custo com equipamentos de conversão opto-eletrônica seja minimizado. Essa técnica é denominada agregação de tráfego (*traffic grooming*).

Em muitos trabalhos na literatura, assumem-se que as demandas de tráfego da rede são estáticas, sendo modeladas através de uma matriz de tráfego. No entanto, a medida em que as redes ópticas WDM vêm sendo implementadas em redes geograficamente dispersas, em redes metropolitanas e em redes locais, as características do tráfego tendem a se tornar mais dinâmicas. Em tais redes, as demandas de tráfego são apropriadamente modeladas como funções no tempo. Neste contexto, o problema de agregação de tráfego deve ser generalizado, definindo um novo problema de agregação dinâmica de tráfego (*Dynamic Traffic Grooming*).

Com o surgimento dos novos paradigmas de computação tais como grades e nuvens, possibilitou-se uma nova gama de aplicações que não eram possíveis anteriormente, tais como, aplicações da chamada e-Ciência. Essas aplicações demandam processamento e transmissão de dados em grande escala e somente o uso eficiente dos recursos da rede permitirá sua utilização. Os novos desafios impostos por essas aplicações demandam soluções de engenharia de tráfego para o problema de agregação dinâmica de tráfego e RWA que sejam rápidas, robustas e escaláveis.

A técnica de agregação de tráfego tem evoluído como descrito no resumo a seguir. Os artigos [Huang et al. 2006, Dutta et al. 2008] revisam a maioria dos trabalhos de pesquisa recentes em agregação dinâmica de tráfego e descrevem os esforços de pesquisa realizados, ao longo dos últimos anos, em busca de soluções para diversos cenários de redes ópticas WDM. Em [Huang et al. 2006], destaca-se a necessidade da realização de estudos que considerem soluções de baixa complexidade. A literatura de agregação de tráfego tem evoluído do estudo do caso estático de agregação para o caso dinâmico [Dutta and Rouskas 2002], bem como do estudo de redes com topologia em anel ou restritas [Liu and Tobagi 2005, Huang et al. 2006] para topologias em malha [Xin 2007a, Palmieri et al. 2007]. A realização de cenários de roteamento de salto único (*single-hop*) [Xin 2007a, Palmieri et al. 2007] e múltiplos saltos (*multi-hop*) [Xin and Qiao 2003], bem como a mudança dos estudos com cenários de tráfego homogêneo para cenários heterogêneos e mais realistas [Doumith and Gagnaire 2007, Tornatore et al. 2008]. Recentemente, tem surgido trabalhos que consideram soluções de baixa complexidade [Xin 2007b, Jaekel et al. 2007, Ho and Lee 2007].

Com o intuito de avançar o estado da arte descrito anteriormente, esta Tese tem como objetivo a criação de algoritmos eficientes para diferentes aspectos de agregação de tráfego em redes WDM, a fim de que se possa desenvolver mecanismos eficientes que permitam prover apoio ao surgimento em larga escala de novas aplicações com grande demanda de banda passante e que estas possam conviver, de forma eficiente, com as aplicações legadas.

2. Contribuições

A Tese apresenta um estudo abrangente sobre questões em aberto do problema de agregação de tráfego em redes ópticas WDM. Primeiramente (Cap. 4), realizou-se um estudo para obtenção de solução *exata* de baixa complexidade computacional para o problema de alocação de comprimentos de onda que visa tornar o problema RWA tratável para cenários realistas de rede e de tráfego. A busca por tal solução utiliza uma teoria moderna sobre a complexidade de algoritmos (Teoria da Complexidade Parametrizada) bem como resultados recentes de sua aplicação na construção de algoritmos de coloração para a família de grafos cordais. A solução proposta diferencia-se por ser o primeiro estudo na literatura a utilizar essa nova teoria para a resolução prática de problemas RWA.

Um levantamento bibliográfico (Cap. 3) evidenciou as limitações dos algoritmos que representam o estado da arte em agregação de tráfego na literatura, mostrando-se que tais algoritmos são incapazes de balancear o tráfego gerando gargalos na rede. Apresentou-se uma nova solução de baixa complexidade com o intuito de sanar as deficiências apresentadas. O Algoritmo proposto (Cap. 5) é capaz de balancear o bloqueio de forma justa sem onerar o seu desempenho, bem como a complexidade da solução. A investigação foi estendida, buscando preparar os algoritmos apresentados para implantação em cenários reais, de forma a se obter uma solução ainda mais rápida com o menor impacto na qualidade da mesma. O algoritmo proposto destaca-se por ser capaz de reduzir a taxa média de bloqueio na rede em até 3 ordens de grandeza em relação a melhor solução existente na literatura, além de balancear de forma justa as taxas de bloqueio entre os pares de comunicação na rede, o que lhe confere as condições necessárias para seu uso em cenários reais.

Em seguida, em uma nova investigação (Cap. 6), o problema de agregação de tráfego foi analisado, adicionalmente, para cenários nos quais as demandas por conexões possuem requisições de banda passante superiores à capacidade de um comprimento de onda, como ocorre com várias aplicações da e-Ciência. Foram propostos dois algoritmos RWA com diferentes mecanismos de roteamento: um tradicional que tenta alocar múltiplos comprimentos de onda em uma mesma rota; e outra que aplica uma nova abordagem que utiliza múltiplos caminhos. Este último é capaz de melhor balancear o tráfego na rede, o que aumenta a capacidade de alocação de recursos além de tornar as conexões estabelecidas menos vulneráveis à falhas na rede. A abordagem proposta é original e não se tem conhecimento de trabalhos anteriores com essa proposta na literatura. Apesar de não constar na tese, derivou-se a prova de NP-completude para esse problema, atestando-se formalmente sua alta complexidade.

A última investigação realizada (Cap. 7) considera redes ópticas multidomínio com conexões com alta demanda por banda passante e requisitos de QoS, que reflete também os ambientes de redes para aplicações da e-Ciência. Foram propostas soluções de agregação de tráfego específicas para um ambiente multidomínio com alocação antecipada de recursos, e para um cenário no qual o tráfego interdomínio disputa recursos de cada domínio com o tráfego local do mesmo. Os algoritmos propostos implementam um mecanismo de alocação de banda passante ajustável, o que permite um melhor balanceamento do tráfego e também a minimização do impacto do tráfego interdomínio sobre o tráfego local de cada domínio. No cenário multidomínio, os custos tornam-se ainda mais relevantes e portanto buscaram-se soluções capazes de minimizar a necessidade de

realocações de recursos, o que permitiu que o tráfego interdomínio de alta capacidade pudesse compartilhar os recursos de caminhos ópticos previamente reservados com o tráfego local de cada domínio atravessado pelo caminho óptico.

A seguir encontram-se especificadas as contribuições originais da Tese:

- Avaliação crítica do estado da arte de algoritmos de agregação dinâmica de tráfego em redes ópticas WDM;
- Utilização da Teoria da Complexidade Parametrizada na solução do problema de alocação de comprimentos de onda para prover solução exata com complexidade computacional reduzida;
- Um algoritmo baseado em zona para a solução do problema de agregação dinâmica de tráfego capaz de balancear o tráfego na rede de forma justa e com redução de complexidade computacional;
- Avaliação do compromisso entre o desempenho e a complexidade computacional de algoritmos de agregação baseados em zona;
- Um algoritmo para a alocação de multicaminhos ópticos para aplicações com altíssima demanda de banda passante;
- Um algoritmo para a alocação de multicaminhos ópticos em redes multidomínio para aplicações com alta demanda de banda e requisitos de QoS;
- Implementação e disponibilização de um simulador para avaliação de algoritmos de agregação/RWA em redes ópticas WDM.

3. Publicações

As publicações científicas decorrentes da pesquisa realizada durante o doutorado foram amplamente aceitas pela comunidade acadêmica especializada, o que é evidenciado pelo grande número de publicações geradas, totalizando 4 artigos em revistas e 11 artigos em conferências, listados a seguir por capítulo da tese. Além dessas publicações, André Drummond foi co-autor de mais 9 publicações realizadas pelo grupo de pesquisa em redes ópticas do Instituto de Computação.

Cap. 4: Alocação de comprimentos de onda através da teoria da complexidade parametrizada

- Drummond, A. C.; Fonseca N. L. S. da; Gyurek, R.; *A Fixed-Parameter Tractable Algorithm for the Wavelength Assignment in WDM Mesh Networks*. In: IEEE ICC - International Conference on Communications, 2008.
- Drummond, A. C.; Fonseca N. L. S. da; *Um Algoritmo Tratável por Parâmetro-Fixo para a Alocação de Comprimentos de Onda em Redes WDM*. In: SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2008.
- **[Revista]** Drummond, A. C.; Fonseca N. L. S. da; *A Fixed-Parameter Tractable Approach for the Wavelength Assignment Problem in Transparent Networks*. In: IEEE Communications Letters, 2008.

Cap. 5: Algoritmos justos e de baixa complexidade para agregação de tráfego

- Drummond, A. C.; Fonseca, N. L. S. da; *On-Line Dynamic Traffic Grooming Algorithms for WDM Mesh Networks*. In: IEEE ICC - International Conference on Communications, 2009.

- Drummond, A. C.; Fonseca, N. L. S. da; *Um Algoritmo Eficiente e Justo para Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes WDM*. In: SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2009.
- Drummond, A. C.; Fonseca, N. L. S. da; *Fair and Efficient Dynamic Traffic Grooming Algorithm for WDM Mesh Networks*. In: IEEE GLOBECOM - Global Communications Conference, 2009.
- Drummond, A. C.; Fonseca, N. L. S. da; *On the Effectiveness of Expansion Mechanisms in Zone-Based Dynamic Traffic Grooming Algorithms*. In: IEEE ICC - International Conference on Communications, 2010.
- [Revista] Drummond, A. C.; Fonseca, N. L. S. da; *Um Algoritmo Rápido, Eficiente e Justo para Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes WDM*. In: Revista Brasileira de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2009.
- [Revista] Drummond, A. C.; Fonseca, N. L. S. da; *Fairness in Zone-Based Algorithms for Dynamic Traffic Grooming in WDM Mesh Networks*. In: IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2010.

Cap. 6: Roteamento multicaminho em redes com requisições de alta capacidade

- Chen, X.; Drummond, A. C.; Jukan, A.; Fonseca, N. L. S. da; *A Multipath Routing Mechanism in Optical Networks with Extremely High Bandwidth Requests*. In: IEEE GLOBECOM - Global Communications Conference, 2009.

Cap. 7: Roteamento multicaminho para provisão eficiente de recursos interdomínio com qualidade de serviço

- Chen, X.; Chamania, M.; Jukan, A.; Drummond, A. C.; Fonseca, N. L. S. da; *On the Benefits of Multipath Routing for Distributed Data-intensive Applications with High Bandwidth Requirements and Multidomain Reach*. In: IEEE Conference on Communication Networks and Services Research, 2009.
- Chen, X.; Chamania, M.; Jukan, A.; Drummond, A. C.; Fonseca, N. L. S. da; *QoS-Constrained Multi-path Routing for High-End Network Applications*. In: IEEE High-Speed Networks Workshop, 2009.
- Drummond, A. C. ; Fonseca, N. L. S. da ; Chen, X. ; Jukan, A.; *Roteamento multicaminho para provisão eficiente de recursos interdomínio com qualidade de serviço*. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2011.
- [Revista] Chen, X.; Drummond, A. C.; Jukan, A.; Fonseca, N. L. S. da; *Multipath Routing with Advance Reservation for Scalable Inter-domain Service Provisioning in Optical Networks*. In: Optical Switching and Networking, 2011 (Submetido).

Apêndice A: WDMSim

- Drummond, A. C.; Silva, R. T. R.; Rosa, S. R. A. S.; Fonseca, N. L. S. da; *IP over WDM module for the NS-2 Simulator*. In: CAMAD - IEEE ICC - International Conference on Communications, 2008.

4. Software

A necessidade do desenvolvimento de um ambiente de simulação no qual os algoritmos de agregação e RWA propostos pudessem ser implementados e avaliados em diferentes cenários de redes ópticas WDM motivou o desenvolvimento do simulador WDMSim.

O WDMSim é um simulador de eventos discretos para redes ópticas desenvolvido em Java, capaz de simular tráfego com chegadas e partidas de requisições de conexão em uma rede WDM com capacidade de agregação. Para cada chegada, o simulador executa o algoritmo de agregação/RWA avaliado, que é responsável pela aceitação ou bloqueio da chamada. Todas as operações necessárias para a obtenção de informações sobre o estado da rede, a alocação de caminhos ópticos e aceitação ou bloqueio das chamadas são acessíveis através de uma interface simples, o que facilita a adição de novos algoritmos ao simulador. O simulador WDMSim foi disponibilizado para a comunidade através do endereço eletrônico:

<http://www.lrc.ic.unicamp.br/wdmsim>

Referências

- Doumith, E. A. and Gagnaire, M. (2007). Impact of traffic predictability on wdm exc/oxc network performance. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25(5):895–904.
- Dutta, R., Kamal, A. E., and Rouskas, G. N. (2008). *Traffic Grooming for Optical Networks: Foundations, Techniques and Frontiers*. Springer.
- Dutta, R. and Rouskas, G. N. (2002). Traffic grooming in wdm networks: Past and future. *IEEE Network*, pages 46–56.
- Ho, Q.-D. and Lee, M.-S. (2007). A zone-based approach for scalable dynamic traffic grooming in large wdm mesh networks. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 25(1):261–270.
- Huang, S., Dutta, R., and Rouskas, G. N. (2006). Traffic grooming in path, star, and tree networks: Complexity, bounds, and algorithms. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(4):66–82.
- Jaekel, A., Bari, A., Chen, Y., and Bandyopadhyay, S. (2007). New techniques for efficient traffic grooming in wdm mesh networks. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications and Networks*, pages 303–308.
- Liu, H. and Tobagi, F. (2005). Traffic grooming in wdm sonet upsr rings with multiple line speeds. In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pages 718–729.
- Palmieri, F., Fiore, U., and Ricciardi, S. (2007). Spark: A smart parametric online rwa algorithm. *Journal of Communications and Networks*, 9(4):368–376.
- Tornatore, M., Baruffaldi, A., Zhu, H., Mukherjee, B., and Pattavina, A. (2008). Holding-time-aware dynamic traffic grooming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(3):28–35.
- Xin, C. (2007a). Blocking analysis of dynamic traffic grooming in mesh wdm optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 15(3):721–733.
- Xin, C. (2007b). Dynamic traffic grooming in optical networks with wavelength conversion. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25(9):50–57.
- Xin, C. and Qiao, C. (2003). Performance analysis of multi-hop traffic grooming in mesh wdm optical networks. In *Proceedings of International Conference on Computer Communications and Networks*, pages 237–242.