

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte
Mestrado em Ciência da Computação

Estratégias de Roteamento para Provimento de QoS em Redes
Ópticas Limitadas por Dispersão de Modo de Polarização

Alexsandra Ferreira Gomes
Orientador: Prof. DSc. Iguatemi Eduardo da Fonseca

Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
Dezembro de 2009

Estratégias de Roteamento para Provimento de QoS em Redes Ópticas Limitadas por Dispersão de Modo de Polarização

Alexsandra Ferreira Gomes

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e Universidade Federal Rural do Semi-Árido como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Infra-estrutura de Comunicação
Iguatemi Eduardo da Fonseca, D.Sc.
Orientador

Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
Dezembro de 2009

Estratégias de Roteamento para Provimento de QoS em Redes Ópticas Limitadas por Dispersão de Modo de Polarização

Alexsandra Ferreira Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada em Dezembro de 2009

Iguatemi Eduardo da Fonseca, D. Sc.
Orientador

Júlio César R. F. De Oliveira, D. Sc.

Helcio Wagner da Silva, D. Sc.

José Patrocínio da Silva, D. Sc.

Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Júlio Gomes da Silva e Antonia Ferreira Lima Gomes, por tudo que são na minha vida.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela saúde e disposição. Agradeço também de todo o coração aos meus pais, que me deram toda força e suporte para que eu pudesse chegar até aqui, que acreditaram na minha luta, participaram e incentivaram cada passo que eu dei nessa jornada. Muito obrigada, Pai e Mãe, pelo amor e dedicação! À minha avó Terezinha, ao meu irmão Júlio César e cunhada, Vanuza, por entenderem minha ausência. Sou muito feliz de ter vocês ao meu lado, sempre.

Um agradecimento especial a João Paulo, meu namorado, que não menos me ajudou e compreendeu. Que esteve presente nos momentos mais difíceis, me dando todo o apoio, carinho e o ombro que tanto precisei. E também a Edilson, D. Salete e Sr. Ferreira, por terem me acolhido e feito por mim como se eu fosse da família. Sem vocês tudo seria tão mais difícil.

Obrigada as minhas amigas-irmãs Agda e Rafaela, por fazerem parte da minha vida, pelo carinho e compreensão da minha ausência. E Rafa, sua presença na última semana antes da defesa foi muito importante. Nunca esquecerei do que você fez por mim.

Muito obrigada ao meu querido orientador, Iguatemi. Que me acolheu no meio da caminhada já, que depositou confiança no meu trabalho e que de fato me orientou nesse novo rumo que escolhi. Esteve presente em todos os momentos e dificuldades, compreendendo meus limites e incentivando a busca do conhecimento, apontando o caminho das pedras. Sua contribuição foi muito importante nessa minha vitória.

Obrigada, Perla. Companheira fiel do primeiro ano de curso, que dividiu comigo a casa, a comida, os momentos de aperreio e de descontração, que me deu a mão sempre que precisei. Serás sempre especial na minha vida.

Agradeço aos queridos amigos mestrado: Alexandre, Cassimiro, Ceres, Diego, Edsongley, Luana, Luíz, Sebastião, Max e em especial Ticiania, que tantas vezes me ajudou não apenas no mestrado, mas também a superar as dificuldades na nova cidade. Com vocês partilhei os momentos difíceis e os obstáculos superados, todos tiveram uma parcela de contribuição muito importante nesta conquista.

Também registro meu agradecimento aos companheiros de pesquisa Victor André e Carlos Evandro. Pela parceria no desenvolvimento de boa parte do trabalho e pela disponibilidade em me ajudar e cooperar com meus experimentos.

Aos professores do mestrado: Cláudia, Everton, Iguatemi, João de Deus, Lyrene, Marcelino, Milton, Patrocínio e Pedro. Todos vocês fizeram parte da minha formação como mestre. Agradeço especialmente ao professor Marcelino que foi mais do que o coordenador do curso nesse período. Muito obrigada pela atenção, incentivo, pelos conselhos e pelas palavras de apoio nas tantas vezes que o procurei.

Obrigada, Rosita. Que sempre me ajudou prontamente em tudo que precisei no mestrado, que torceu e ficou feliz com cada pequena conquista minha. Obrigada também à Manu, Fatinha e Marília que prontamente me ajudaram.

E por fim, obrigada à UFERSA e UERN, pela oportunidade de entrar no programa de pós-graduação. E também FAPERN e CAPES, pelo apoio financeiro.

Resumo

Esta dissertação propõe estratégias de roteamento através da implementação de um algoritmo de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda (RWA) que considera o efeito da Dispersão de Modo de Polarização (PMD), que é um importante obstáculo em sistemas de alta velocidade. O algoritmo avalia o impacto do efeito no desempenho de uma rede óptica transparente e, com isso, busca assegurar a qualidade do sinal, propiciando a melhor relação de compromisso entre a qualidade da transmissão e o desempenho global das redes clientes. Os resultados obtidos mostram que uma estratégia simples de roteamento pode melhorar significativamente o desempenho, além da facilidade de implantação em redes já em operação, com viabilidade de custo.

Palavras-chave: Redes ópticas, Dispersão do Modo de Polarização, Algoritmo de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda, Qualidade de Serviço, Qualidade de Transmissão.

Abstract

This work proposes a proposal of a Routing and Wavelength Assignment (RWA) algorithm that considers the Polarization Mode Dispersion (PMD), that is a important problem in high speed systems. The algorithm evaluates the impact of effect on performance of a transparent optical network and aims to achieve quality of signal, providing the best trade-off between transmission quality and overall performance of client networks. Numerical results shows that a simple strategy of routing can significantly improve the performance, in addition to easy deployment in networks already in operation, with feasible costs.

Keywords: Optical Networks, Polarization Mode Dispersion, Routing and Wavelegth Assignment Algorithm, Quality of Service, Quality of Transmission.

Conteúdo

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Proposta de pesquisa.....	5
Capítulo 2 - Arquitetura da rede óptica - Uma visão mais detalhada.....	8
2.1 Elementos de rede.....	11
2.1.1 Terminais Ópticos de Linha.....	12
2.1.2 Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação.....	12
2.1.3 Chaves Ópticas.....	14
2.1.4 Amplificadores Ópticos.....	15
2.1.5 Fibra Óptica Monomodo.....	16
2.1.5.1 Efeitos lineares.....	20
2.1.5.2 Efeitos não lineares.....	20
2.2 Limitações impostas pelos elementos da rede.....	21
2.2.1 Efeitos inerentes à escolha da Rota.....	21
2.2.1.1 Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE).....	21
2.2.1.2 Dispersão cromática.....	22
2.2.1.3 Dispersão de modo de polarização (PMD).....	24
2.2.2 Efeitos inerentes à escolha comprimento de onda.....	24
2.2.2.1 Saturação dos amplificadores ópticos.....	24
2.2.2.2 Modulação cruzada de fase (XPM).....	25
2.2.2.3 Mistura de quatro ondas (FWM).....	25
2.3 Sumário.....	26
Capítulo 3 - Dispersão do Modo de Polarização.....	27

3.1 Representação de PMD.....	29
3.2 Modelo de inclusão do efeito de PMD.....	32
3.3 Deficiências de transmissão causados pelo PMD	34
3.3.1 Aproximação de Poole.....	34
3.3.2 Penalidade PMD de primeira ordem em receptores reais.....	35
3.3.3 Probabilidade de interrupções de PMD induzida.....	36
3.4 Técnicas de compensação de PMD.....	37
3.4.1 Transmissão de Modo Principal de Polarização.....	38
3.4.2 Anulação de PMD.....	39
3.4.3 DGD Fixo.....	40
3.4.4 Compensação de Pulso.....	42
3.4.5 Compensação de alta ordem.....	42
3.4.6 Compensadores Multi-seção.....	43
3.4.7 Compensadores Multi-canais.....	43
3.5 Técnicas elétricas de Compensação de PMD.....	44
3.6 Sumário.....	45
Capítulo 4 - Estratégias de Roteamento.....	46
4.1 Algoritmo RWA e Contrato de Serviço Óptico (OSLA).....	46
4.2 Métricas de desempenho para algoritmos de roteamento.....	50
4.2.1 Probabilidade de Bloqueio.....	50
4.2.2 Probabilidade de Violação do Limiar (TVP).....	53
4.2.3 Equidade (Fairness).....	55
4.3 Estratégias de roteamento propostas.....	57
4.3.1 Algoritmo de Yen.....	58
4.3.2 RWA-Distância	59
4.3.3 RWA-PMD.....	60
4.4 Resultados.....	62

4.4.1 Cenário estudado.....	62
4.4.2 Impacto da estratégia de roteamento.....	64
4.4.3 Impacto do efeito de PMD.....	66
4.5 Sumário.....	74
Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros.....	5
Referências.....	77
Apêndice 1: Publicações relacionadas à Dissertação.....	83
Apêndice 2: Ambiente de Simulação.....	84

Lista de Acrônimos

ASE – *Amplified Spontaneous Emission*

BER – *Bit Error Rate*

CAC/RWA - *Connection Admission Control/ Routing and Wavelength Assignment*

DGD – *Differential Group Delay*

DICONET - *Dynamic Impairment Constraint Networking for Transparent Mesh Optical Network*

DOP – *Degree-of-polarization*

DSF - *Dispersion Shifted Fiber*

EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*

FEC – *Forward Error Correction*

FWM – *Four-Wave Mixing*

IA-RWA – *Impairment-aware RWA*

IP - *Internet Protocol*

MPLS – *Multi Protocol Label Switching*

MI – *Modulation Instability*

NZDF - *Non Zero Dispersion Fiber*

OADM – *Optical Add/Drop Multiplexers*

O-E-O – *Optical-to-Electrical-to-Optical*

OLT – *Optical Line Terminals*

OSI – *Open System Interconnection*

OSLA – *Optical Service Level Agreement*

OSNR – *Optical Signal Noise Ratio*

OXC – *Optical Crossconnect*

PC – *Polarization Controller*

PMD – *Polarization Mode Dispersion*

PSP – *Principal State of Polarization*

QoS – *Quality of Service*

RWA – *Routing and Wavelegth Assignment*

SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*

SDH/SONET - *Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Network*

SOA – *Semiconductor Optical Amplifiers*

SPM – *Self-Phase Modulation*

SRS – *Stimulated Raman Scattering*

STDF - *Standard Fiber*

TF – *Transversal Filter*

TON – *Transparent Optical Networks*

TVP – *Threshold Violation Probability*

WDM - *Wavelength Division Multiplexing*

XPM – *Cross Phase Modulation*

Lista de Tabelas

Tabela 1: Algoritmos CAC/RWA's e as limitações da camada física (<i>physical impairments</i>) consideradas.....	48
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Lista de Figuras

Figura 2.1: Interligação entre redes clientes e uma rede totalmente óptica.....	10
Figura 2.2: Interligação de clientes IP e SONET/ SDH com a rede óptica com uma representação física dos elementos da rede óptica.....	11
Figura 2.3: Diagrama de blocos de um OLT.....	12
Figura 2.4: Arquiteturas de OADMs. (a) Arquitetura paralela (b) Arquitetura serial.....	13
Figura 2.5: Diagrama de blocos do OXC.....	15
Figura 2.6: Fibra de grande área efetiva.....	18
Figura 3.1: Dispersão de Modo de Polarização.....	28
Figura 3.2: Modelos de fibra. (a) Modelo de Placa de Retardo. (b) A orientação dos vetores de birrefringentes variam a cada amostra. (c) Modelo de articulação.....	30
Figura 3.3: Demonstração do cálculo da penalidade de PMD de uma rota.....	33
Figura 3.4: Esquema geral de compensação de PMD óptico.....	38
Figura 3.5: Compensação de PMD, transmitindo de um PSP. O controlador de polarização (PC) na entrada da fibra ajusta o sinal para coincidir à entrada do modo de polarização.....	39
Figura 3.6: Anulação de PMD.....	40
Figura 3.7: (a) Atenuação de PMD utilizando um compensador DGD fixo. (b) Os dois modos de operação são indicados por diagramas vetor PMD.....	41
Figura 4.1: Probabilidade de Bloqueio mediante o tráfego.....	52
Figura 4.2: Probabilidade de bloqueio quanto à taxa de transferência.....	53
Figura 4.3: Probabilidade de bloqueio x TVP.....	55
Figura 4.4: Eqüidade para taxa de 10 Gbps.....	57
Figura 4.5: Eqüidade para taxa de 40 Gbps. (a) Tráfego de 30 Erlangs e (b) Tráfego de 100 Erlangs.....	57
Figura 4.6: Fluxograma do algoritmo RWA-PMD.....	61

Figura 4.7: Rede utilizada nas simulações.....	63
Figura 4.8: Comparação da probabilidade de bloqueio para rede com fibras de DPMD = 0,2 (F02), fibras de DPMD = 1,8 (F18) e fibras mistas (FM), utilizando o algoritmo RWA-PMD com 1 ou 2 rotas (k). Sendo, (a) B = 2,5 Gbps, (b) B = 10 Gbps e (c) B = 40 Gbps.....	66
Figura 4.9: Rede constituída de enlaces com fibras mistas. RWA-PMD x RWA-Distâncias.....	67
Figura 4.10: Rede com enlaces compostos com fibras de DPMD = 0,2 (F02), fibras de DPMD = 1,8 (F18) e fibras mistas (FM). RWA-PMD, considerando o tráfego de 100 Erlangs, com $k=1$	68
Figura 4.11: (a) Comportamento da probabilidade de bloqueio em fibras mistas e homogêneas na taxa de 10 Gbps. (b) Continuidade versus QoT.....	69
Figura 4.12: Bloqueio por quantidade de <i>hops</i> , na taxa de transferência de 10 Gbps, com tráfego de 100 Er. Redes mista e homogêneas.....	71
Figura 4.13: Probabilidade de bloq. numa rede operando a 10 Gbps e com $W=18$	72
Figura 4.14: Probabilidade de bloqueio x TVP. (a) Rede de fibras mistas e rede com fibras de DPMD=1,8 – B=10 Gbps. (b) Rede de fibras mistas e rede com fibras de DPMD=1,8 – B=40 Gbps.....	73