

光ネットワークにおける トラヒックエンジニアリング技術

荻野 長生

1. はじめに

近年、多数の異なる波長の信号を1本のファイバー中に多重化して大容量な信号伝送を行う波長多重伝送技術の発展が目覚ましい。また光伝送される信号が通る広帯域な通信路である光パスを動的に設定・交換することができる光クロスコネクタ装置 (OXC) の開発も進められている。これらの技術によって、光パス単位の接続サービスを動的に提供できるバックボーンネットワークである光コアネットワークの導入が現実のものとなりつつある。図1に示したように、光コアネットワークを通して設定された光パスを使って、例えば、中継ルータ装置を介さずにIPトラヒックをカットスルー転送でき、高速・大容量なバックボーンネ

트워크を構築することができる[1]。

現在、このような光コアネットワークをIPベースのルーティングプロトコルやシグナリングプロトコルを使って制御するためのGMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) の標準化が、ITU-TやIETF (Internet Engineering Task Force) 等の標準化団体で進められている[2, 3]。GMPLSは、元々インターネット用に開発されたパケット交換ネットワークのためのパス設定技術であるMPLS (Multiprotocol Label Switching)[4]を、回線交換ネットワークにおけるパス設定にも適用できるように拡張したものである。ここでパスとは、データグラム転送の場合等とは異なり、通信開始から終了まで経路が固定されているような通信路を指す。GMPLSによって、回線交

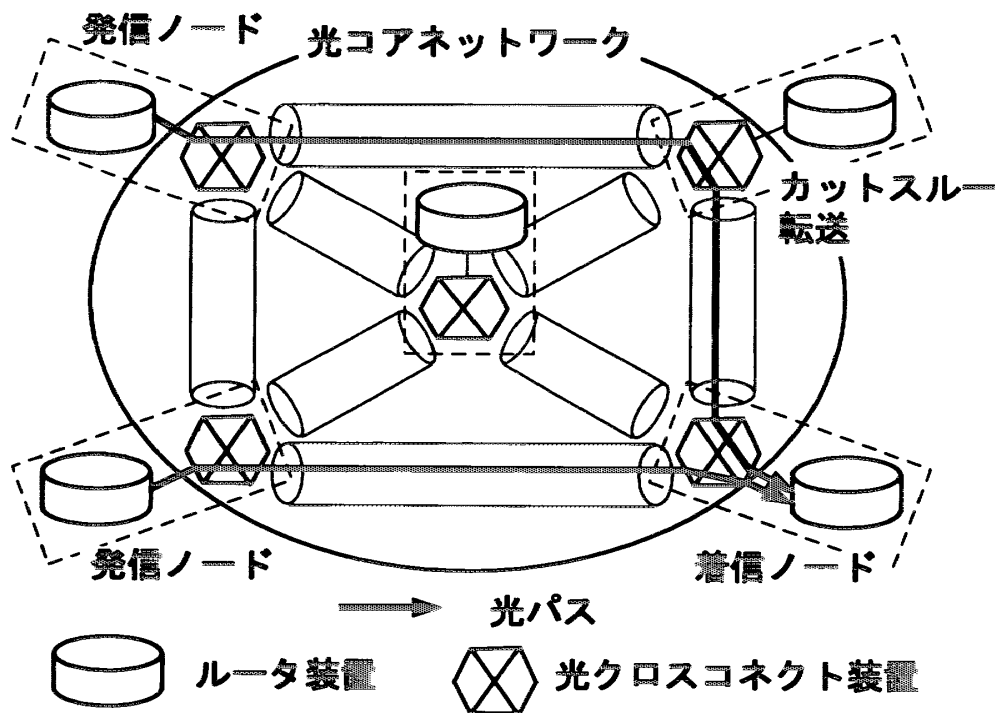


図1 光ネットワーク構成例

おぎの なおお
株式会社 KDDI 研究所
〒356-8502 上福岡市大原 2-1-15

表1 トラヒックエンジニアリング対象と手法

トラヒックエンジニアリング対象		設計フェーズ	運用フェーズ
光パス	経路選択	混合整数計画法	最短経路アルゴリズム
	波長割り当て	グラフ配色問題	発見的手法
高価光パス	経路選択	最短経路アルゴリズム 混合整数計画法	制約付き最短経路アルゴリズム
	波長割り当て	混合整数計画法	発見的手法
マルチレイヤネットワーク		混合整数計画法	グルーミングアルゴリズム 最短経路アルゴリズム

換される通信路である回線交換パスを、光ネットワークを通して動的に設定することができる。GMPLSを使用して光ネットワーク中に設定できる回線交換パスとしては、各伝送路における一つの時分割チャネルを使って設定される時分割パス、各伝送路中の一つの波長を使って設定される波長パス、各伝送路において1本のファイバーを使って設定される空間パス等が存在する。またGMPLSによって、従来のMPLSネットワークと光ネットワークの制御を統合化することもできる。

本稿では、このようなOXCをベースとした光ネットワークにおけるトラヒックエンジニアリング技術について説明する。ここでいう光パスとは、時分割パスや波長パス、空間パス等の光ネットワークを通して設定することができる回線交換パスを意味する。すなわち将来の高速光ネットワークとして期待されている光バースト交換ネットワーク[5]は、本稿の対象外とする。表1に、光ネットワークにおけるトラヒックエンジニアリングの対象とそこで用いられる手法を要約して示す。本稿では、表1に沿って、トラヒックエンジニアリング技術の解説を行う。

2. 光パスの経路選択と波長割り当て

2.1 ネットワーク設計フェーズ

光ネットワークにおける設計フェーズあるいはオフラインモードでのトラヒックエンジニアリングの主な目的は、光パスへの需要があらかじめ与えられたときに、光パスの経路選択および波長割り当てを最適化して、必要リソース数あるいは設備コストを最小化することである。光ネットワークにおいては、中継ノードが波長変換機能を持たない場合、波長パスは各リンク

において同一の波長を使用する必要があり、波長パスへの波長割り当てが問題となる。

一般に、波長パスの経路選択および波長割り当て問題は、設備コストを目的関数とし、波長ごとのフロー保存則やリンクおよびノードの最大容量等を制約条件とする混合整数計画法で表現される[6]。しかし本問題は、NP完全であり、そのままの形で解くのは非常に困難である[7]。そのため、例えば、リンク上のある波長を波長パスが使用するか否かを表すバイナリ変数を実数に変換することにより、混合整数計画問題を線形計画問題に変形し、内点法等の高速な求解法を利用して問題を解き、求まった実数解を後から何らかの方法でバイナリ化する方法が用いられる[8]。また波長パスの経路選択問題と波長割り当て問題を分離して、2段階の問題として解くことが行われている[9]。

波長パスの経路は、混合整数計画法を解くことによって求めることができる。この場合、波長割り当ては考慮していないので、波長ごとのフロー保存則は不要であり、制約条件としては、多数の波長が多重化されたリンクレベルでのフロー保存則のみでよい。すなわち混合整数計画法の規模が小さくなり、比較的簡単に解くことができるようになる。一方、必要波長数を最小化するような波長パスへの波長割り当て問題は、グラフ配色問題に帰着させられる[9]。グラフ配色問題もNP完全であるが、比較的効率的な逐次アルゴリズムが知られている[10]。

2.2 ネットワーク運用フェーズ

光ネットワークにおける運用フェーズあるいはオンラインモードでのトラヒックエンジニアリングの主な目的は、光パスの設定要求が到着したときに、最適な

光パスの経路選択および波長割り当てを行い、リソース使用効率を最大化することである。あらかじめ需要として与えられた複数光パスに対して逐次的に適用することにより、ここでの手法をネットワーク設計フェーズのトラヒックエンジニアリング手法として利用することも可能である。一般に、トラヒックエンジニアリングを行う際は、光パスの経路選択および波長割り当ては、運用サーバや発信ノードにおいて、ネットワーク全体の情報を利用して集中的に行われる。

光パスの経路選択法としては、固定ルーチング法、迂回ルーチング法、適応ルーチング法等がある。固定ルーチング法は、各ノードペアに対して、ダイクストラ法[11]やベルマン・フォード法[12]を使用して、一つの最短経路を決めておく方法である。これに対して、迂回ルーチング法は、各ノードペアに対して、複数の経路を決めておく方法である[13]。複数の経路は、複数の最短経路を求めるアルゴリズム[14]や、互いに disjoint で経路長の和が最小となるような複数経路を求めるアルゴリズム[15, 16]を使って求める。

適応ルーチング法は、光パスの設定要求が到着した時点での各リンクの状態等を考慮して、経路選択を行う方法である[17]。一般に、空きリソースの有無や、全光ネットワークの場合には光伝送品質等を制約条件として[18]、リンクリソースコストやリンク使用率[19]を反映したリンク距離を用いた制約付き最短経路アルゴリズム (CSPF: Constrained Shortest Path First) によって、光パス経路を求める。光パスはリソース保証型パスであるため、ベストエフォート型パスの場合のように、最小負荷経路を選択して転送品質の改善を図るよりも、リソースの有効利用を図ることがより重要である。したがって光ネットワークにおいては、リンク使用率よりもリンクリソースコストをより強く反映させたリンク距離を用いる方法が、より有利である[20]。近年、これらのリンク情報を広告することができるトラヒックエンジニアリング用に拡張されたルーチングプロトコル OSPF-TE (Open Shortest Path First—Traffic Engineering) の標準化が、IETF で進められている[21]。

波長パスへの波長割り当てに関しては、様々な発見的手法が提案されている。ランダム割り当て法は、経路上で利用できる波長からランダムに使用する波長を選択する。First-Fit 法は、利用できる波長の中で最も番号の若い波長を選択する。Least-Used 法は、利用できる波長の中で、その波長が使用されているリン

クの数最も少ない波長を選択する。逆に Most-Used 法は、その波長が使用されているリンクの数最も多い波長を選択する。First-Fit 法と Most-Used 法は、経路上あるいは平面的に、波長のパッキング効果を図るものであり、ランダム割り当て法や Least-Used 法よりも効率的である[22]。

リンクが複数のファイバーで構成されている場合の波長割り当て法として、使用ファイバー数の減少を狙った Min-Product 法と Least-Loaded 法がある。Min-Product 法では、利用できる各波長面において、経路上の各リンクにおける使用ファイバー数の積を計算し、積が最小で番号が最も若い波長を選択する[23]。Least-Loaded 法では、利用できる各波長面において、経路上の各リンクにおける未使用ファイバー数の最小値を求め、最小値が最大となる番号が最も若い波長を選択する[24]。波長割り当て効率は、Min-Product 法、拡張 First-Fit 法、Least-Loaded 法の順番に良くなる。

将来到着する波長パス設定要求の損失低減を目的とした波長割り当て法として、Max-Sum 法と Relative Capacity Loss 法がある。これらの方法では、各ノードペアによって利用される経路が既知であることが前提になっている。Max-Sum 法では、ある波長面において各経路上に設定できる波長パス数の総和を、その波長面における容量と定義して、波長パスの設定による容量の減少値が最小となるような波長を選択する[25]。これに対して、Relative Capacity Loss 法では、ある波長面上での波長パス設定による、その波長面における各経路上に設定できる波長パス数の減少率の総和を、その波長面における相対容量損失と定義して、相対容量損失が最小となるような波長を選択する[26]。本方法によって、将来到着する波長パス設定要求の損失率増加を、より厳密に抑えることができる。

一般に、ホップ数の多い波長パス程、各リンク上で同一の波長を選択することが困難になり、損失になる確率が高くなる。これを避けるために、Wavelength Reservation 法や Protection Threshold 法が提案されている[27]。前者は、特定リンク上の特定波長を特定マルチホップ波長パスのために留保して置く方法、後者は、より一般的に、ある数の波長をマルチホップ波長パスのために留保して置く方法である。これらの方法は、シングルホップ波長パスの損失率を犠牲にして、マルチホップ波長パスの損失率を改善するものである。またこれらの方法は、他の波長割り当て法と組

み合わせて使用される。

以上、ネットワーク運用フェーズにおける光パスの経路選択および波長割り当てについて述べたが、最終的なリソース使用効率は、経路選択法によって大きく影響される[28]。したがって、まず効率的な経路選択法を導入し、それに合った波長割り当て法を選択することが重要である。一方、中継ノードに波長変換機能があった場合のリソース利用効率への影響に関して、解析的に評価した研究例がある[29, 30]。また限られたノードにのみ波長変換機能が存在する場合[31]や変換できる波長レンジに制約がある場合[32]等についても、リソース利用効率の評価が行われている。

2.3 ネットワーク再構成

ネットワーク運用フェーズにおいて、光パスの経路選択および波長割り当てを逐次的に行っていくと、ネットワーク設計フェーズで得られた初期の最適なネットワーク構成から乖離していくことが予想される。このため、ネットワーク運用中に光パスの再配置を行って、最適なネットワーク構成に近付ける方法が研究されている。文献[33]では、再配置する光パス数を新たな目的関数として、新しい光パス需要の下でも従来の目的関数値が変わらないという制約条件を加えた混合整数計画法を解く手法を提案している。また再配置する光パス数と必要波長数等の従来の目的関数とのトレードオフを考慮して、混合整数計画法を变形する手法も提案されている[34]。これに対して、再配置する光パス数を減らすために、例えば、トラヒック負荷の平滑化を目標にして、再配置する光パスを1本ずつ選択する方法等も提案されている[35, 36]。

3. 高信頼光パスの経路選択と波長割り当て

3.1 ネットワーク設計フェーズ

光ネットワークをコアネットワークとして用いる場合、いったん障害が発生したときの影響は広い範囲に及ぶことが予想される。このため、光パスの稼働率を高めるために、光パスに対する様々な障害回復法が検討されている[37]。障害回復単位としては、リンク単位に障害回復を行うリンクリカバリーや光パス単位に障害回復を行うパスリカバリー、またその中間の方法等が存在する。特に、光パスがトランスペアレントである場合、品質劣化はパスの受信端でしか検出できないため、光パス単位の障害回復が必須になる。

予備リソースを用意しておく方法として、あらかじめ

予備光パスを設定しておくプロテクション、予備光パスの経路や波長だけをあらかじめ決めておき、障害発生後に予備光パスの設定を行うプリプラン型レストレーション、障害発生後に予備光パスの経路計算から始めるポストプラン型レストレーション等がある。ポストプラン型レストレーションは、予備光パスを確実に設定できる保証はないが、多重障害にも対応できる。予備リソースと現用リソースの対応関係には、1+1, 1:1, M:N等がある。1+1プロテクション以外の障害回復法では、予備リソースを使って、障害時に割り込みを許す低優先のトラヒックが運ばれる場合もある。

単一のリンク障害またはノード障害のみを考えた場合、現用光パスと予備光パスは、link-disjoint または node-disjoint であればよい。したがって高信頼光パスの経路選択においては、互いに disjoint な経路をできるだけ多く発見しなければならない。互いに node-disjoint で経路長の和が最小となるような複数経路を求めるグラフアルゴリズムは既に存在する[15]。この場合、link-disjoint な経路を求める問題は、図2に示したように、各ノードをそれぞれ入力リンクと出力リンクに対応したノードに分割することによって、node-disjoint な経路を求める問題に帰着できる。また2本の node-disjoint な経路を求める場合には、リンクコストを非負にしてダイクストラ法を利用することが可能であり、高速に経路を計算することができる[16]。このようなグラフアルゴリズムを用いて、できるだけ多くの互いに node-disjoint で経路長の総和が最小となるような経路を求めてもよいが、同様な問題を、混合整数計画法を使って解くこともできる[38]。またリンクリカバリーを用いる場合には、光ネットワーク内に仮想的なリングネットワークを複数配置することにより、各リンクに対する予備経路を効率的に決定することができる[39]。

経路候補が与えられたときに、混合整数計画法を用

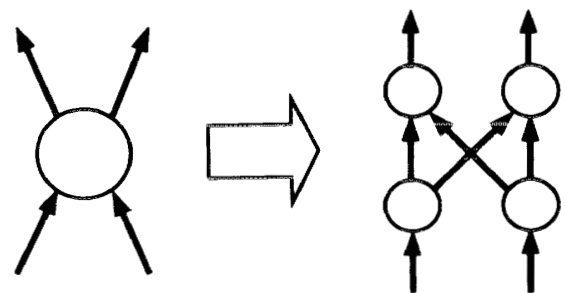


図2 Link-disjoint 経路を求めるためのノードの分割

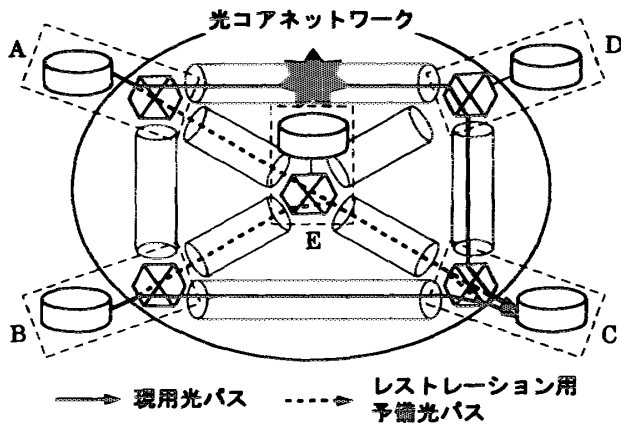


図3 予備光パスによるリソース共用例

いて、必要リソース数あるいは設備コストを最小化するような現用波長パスおよび予備波長パスへの波長割り当てを行う手法も提案されている。文献[40, 41]では、リンクリカバリーやパスリカバリー等、様々な障害回復法を対象にして、必要リソース数の最小化を図っている。文献[41]では、現用波長パスへの波長割り当てを行った後、予備波長パスのためのスペア容量が最小となるように、予備波長パスへの波長割り当てを行っている。図3に示した例のように、一般に、同時に障害とはならない現用パスに対するレストレーション用予備パスは、リソースを共用することができる。文献[41, 42]では、障害発生箇所ごとの制約式を設けることにより、レストレーション用予備波長パスによる波長リソースの共用を考慮に入れて、設備コストの最小化を図っている。

ネットワーク設計フェーズでは、あらかじめ光パスに対する需要がある程度予測できることが前提になっている。しかし光パスに対する需要の大きさは、一般に光パス価格に依存すると考えられる。文献[43]では、光パスの価格需要曲線が与えられたときに、光ネットワークから得られる利益が最大となるような光パス価格と光パス配置を求める手法を提案している。そして、光パスに対する様々な障害回復法を提供することにより、得られる利益が大きくなることを示している。

3.2 ネットワーク運用フェーズ

単一障害を前提としたとき、予備光パスの経路は、現用光パスの経路と disjoint でなければならない。予備光パスのための disjoint な経路を求める際には、現用光パスが通過するリンクやノードを除いて、経路を選択する必要がある。IETF で標準化が進められてい

SRLG (障害リンク)	空き帯域
A-D	8.0
D-C	8.0
B-C	9.0
その他	10.0

リンクE-Cの帯域 = 10.0
 光パスA-Cの帯域 = 2.0
 光パスB-Cの帯域 = 1.0

図4 リンク E-C の空き帯域情報

る OSPF-TE[21]では、各リンクが所属する SRLG (Shared Risk Link Group) と呼ばれる同時に障害となり得るリンクグループに関する情報も広告することができる。したがって制約付き最短経路アルゴリズム (CSPF: Constrained Shortest Path First) によって、現用光パスが通過するリンクと同じ SRLG に所属するリンクを除いて、予備光パス用の最短経路を求めることができる。

レストレーション用予備光パスにリソースを割り当てる際には、他の予備光パスとのリソース共用を考慮することにより、効率的なリソース割り当てが可能になる。これを利用して、他の予備光パスとのリソース共用が図れるようなリンクのコストを通常よりも小さく見積もって、予備光パスの経路選択を行う方法が提案されている[44]。ただし、このような経路選択法を実現するためには、図4に例を示したような各 SRLG に対応したリンク空き帯域情報の広告がルーティングプロトコルによって行われることが前提になる[45]。障害時を除いて、予備光パスにはトラヒックが流れないため、予備光パスの再配置ならば、一般にトラヒック断を生じさせない。文献[46]では、予備光パスのみを対象にしたネットワーク再構成を、比較的頻繁に行う方法を提案している。

4. マルチレイヤネットワークにおけるトラヒックエンジニアリング

4.1 ネットワーク設計フェーズ

GMPLS 技術[3]を用いることにより、空間パス、波長パス、時分割パス等の回線交換パスだけでなく、従来の LDP (Label Distribution Protocol)[47]と呼ばれるシグナリングプロトコルによって設定される LSP (Label Switched Path) や RSVP-TE

(Resource Reservation Protocol—Traffic Engineering) [48]と呼ばれるシグナリングプロトコルによって設定される帯域保証されたLSP等のパケット交換パスも統合的に制御できるようになる。最近では、データグラム転送を行うIPレイヤも含めて、このような複数のスイッチングレイヤから構成されるネットワークにおけるトラヒックエンジニアリング技術に関して、研究が開始されている。

文献[49]では、混合整数計画法を用いて、障害回復可能帯域を指標にして、IP over WDM ネットワークにおける光レイヤでのプロテクションとIPレイヤでのレストレーションの比較を行っている。ルータ装置のポート数が少なければ、前者の障害回復法が有利になり、ルータ装置のポート数が多ければ、後者の障害回復法が有利になる。

文献[38]では、数値計画法を用いて、MPLS over WDM ネットワークにおいて、光レイヤで障害回復を行ったときの設備コストとMPLSレイヤで障害回復を行ったときの設備コストを比較している。予備LSPのホップ数が1に制限されているときは、予備LSPをエンドルータ装置で收容するコストの分だけ、MPLSレイヤで障害回復を行ったときの設備コストは、M:N光プロテクションを行ったときの設備コストよりも大きくなる。予備LSPのホップ数に制限がないときは、予備LSPをエンドルータ装置や中継ルータ装置で收容するコストの分だけ、MPLSレイヤで障害回復を行ったときの設備コストは、プリプラン型光パスレストレーションを行ったときの設備コストより大きくなる。

4.2 ネットワーク運用フェーズ

現在の所、リング型ネットワークを対象にした研究が多い。例えば、TDM over WDM リングを対象にして、全体の設備コストに対して支配的な電氣的TDMスイッチ装置等のコストを最小化できるような、低ビットレートTDMパスの波長パスへの効率的收容法等に関して、研究が行われている[50, 51]。

メッシュ型のTDM over WDM ネットワークを対象にしたパス設定要求損失率の解析法に関する研究も行われている[52]。また現用および予備TDMパスの波長パスへの收容法とパス設定要求損失率の関係についても検討が行われている[53]。リング型ネットワークの場合には、現用TDMパスと予備TDMパスを一つの波長パスの中に混在させる方法が、またメッシュ型ネットワークの場合には、両者を異なる波長パ

スに收容する方法が、それぞれ有利になる。

文献[54]では、MPLS over 光ネットワークにおいて、LSPに要求される稼働率等のサービスレベルに応じて、適切な光パスを選択あるいは設定する方法について評価が行われている。

5. おわりに

本稿では、OXCをベースとした光ネットワークにおけるトラヒックエンジニアリング技術に関して、ネットワーク設計フェーズとネットワーク運用フェーズに分けて解説した。設計フェーズにおけるトラヒックエンジニアリングの主な目的は、需要が与えられたときの必要リソース数あるいは設備コストの最小化である。一方、運用フェーズにおけるトラヒックエンジニアリングの主な目的は、リソース使用効率の最大化である。光ネットワークに特徴的な問題としては、波長パスへの波長割り当てや予備光パスに対するトラヒックエンジニアリング等が挙げられる。IETFにおけるGMPLS関連プロトコルの標準化を受けて、今後は、マルチレイヤネットワークのためのトラヒックエンジニアリング技術に関する研究開発の活発化が期待される。

謝辞 日頃御指導戴く(株)KDDI 研究所浅見所長、松島副所長、鈴木執行役員、並びに光ネットワークグループの田中リーダーに深謝します。

参考文献

- [1] Moral A. R., Bonenfant P. and Krishnaswamy M.: "The optical Internet: Architectures and protocols for the global infrastructure of tomorrow", *IEEE Commun. Mag.*, 39, 7, pp. 152-159 (2001.07).
- [2] ITU-T Rec. G. 807: "Requirements for automatic switched transport networks (ASTN)" (2001.05).
- [3] Benerjee A., Drake J., Lang J., Turner B., Awduche D., Berger L., Kompella K. and Rekhter Y.: "Generalized multiprotocol label switching: An overview of signaling enhancement and recovery techniques", *IEEE Commun. Mag.*, 39, 7, pp. 144-151 (2001.07).
- [4] IETF RFC 3031: "Multiprotocol label switching architecture" (2001.01).
- [5] Qiao C. and Yoo M.: "Optical burst switching (OBS): A new paradigm for an optical Internet", *J. High Speed Networks*, 8, pp. 69-84 (1999).
- [6] Ramaswami R. and Sivarajan K. N.: "Routing and

- wavelength assignment in all-optical networks”, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 3, 5, pp. 489-500 (1995.10).
- [7] Chlamtac I., Ganz A. and Karmi G.: “Lightpath communications: An approach to high-bandwidth optical WAN’s”, *IEEE Trans. on Comm.*, 40, 7, pp. 1171-1182 (1992.07).
- [8] Mukherjee B.: *Optical communication network*, McGraw-Hill, (1997).
- [9] Banerjee D. and Mukherjee B.: “A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength-routed optical networks”, *IEEE JSAC*, 14, 5, pp. 903-908 (1996.06).
- [10] Matula D. W., Marble G. and Isaacson J. D.: “Graph coloring algorithms”, in *Graph Theory and Computing*, Read R. C. ed., pp. 109-122, Academic Press (1972).
- [11] Dijkstra E. W.: “A note on two problems in connexion with graphs”, *Numerische Mathematik*, 1, pp. 269-271 (1959).
- [12] Garcia-Luna-Aceves J. J.: “Distributed routing with labeled distances”, *Proc. of IEEE INFOCOM '92*, 2, pp. 633-643 (1992.05).
- [13] Harai H., Murata M. and Miyahara H.: “Performance of alternative routing methods in all-optical switching networks”, *Proc. of IEEE INFOCOM '97*, pp. 516-524 (1997.04).
- [14] Yen J. Y.: “Finding the k-shortest loopless paths in a network”, *Management Science*, 17, 11, pp. 712-716 (1971.07).
- [15] Suurballe J. W.: “Disjoint paths in a network”, *Networks*, 4, pp. 125-145 (1974).
- [16] Suurballe J. W. and Tarjan R. E.: “A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths”, *Networks*, 14, pp. 325-336 (1984).
- [17] Mokhtar A. and Azizoglu M.: “Adaptive wavelength routing in all-optical networks”, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 6, 2, pp. 197-206 (1998.04).
- [18] Ramamurthy B., Datta D., Feng H., Heritage J. P. and Mukherjee B.: “Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks”, *IEEE JSAC*, 17, 10, pp. 1713-1723 (1999.10).
- [19] Chan K. and Yum T. P.: “Analysis of least congested path routing in WDM lightwave networks”, *Proc. of IEEE INFOCOM '94*, 2, pp. 962-969 (1994.04).
- [20] Hsu C-F., Liu T-L. and Huang N-F.: “On adaptive routing in wavelength-routed networks”, *Optical Networks Mag.*, 3, 1, pp. 15-24 (2002.01/02).
- [21] Internet-Draft, “Traffic engineering extensions to OSPF version 2”, draft-katz-yeung-ospf-traffic-07.txt, Work in progress.
- [22] Subramaniam S. and Barry R. A.: “Wavelength assignment in fixed routing WDM networks”, *Proc. of IEEE ICC '97*, 1, pp. 406-410 (1997.06).
- [23] Jeong G. and Ayanoglu E.: “Comparison of wavelength-interchanging and wavelength-selective cross-connects in multiwavelength all-optical networks”, *Proc. of IEEE INFOCOM '96*, 1, pp. 156-163 (1996.03).
- [24] Karasan E. and Ayanoglu E.: “Effects of wavelength routing and selection algorithm on wavelength conversion gain in WDM optical networks”, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 6, 2, pp. 186-196 (1998.04).
- [25] Barry R. A. and Subramaniam S.: “The MAX-SUM wavelength assignment algorithm for WDM ring networks”, *Proc. of IEEE OFC '97* (1997.02).
- [26] Zhang X. and Qiao C.: “Wavelength assignment for dynamic traffic in multi-fiber WDM networks”, *Proc. of 7th Int. Conf. on Computer communications and Networks*, pp. 479-485 (1998.10).
- [27] Birman A. and Kershenbaum A.: “Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking”, *Proc. of IEEE INFOCOM '95*, 2, pp. 431-438 (1995.04).
- [28] Ramamurthy S. and Mukherjee B.: “Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks”, *Proc. of IEEE GLOBECOM '98*, 4, pp. 2295-2302 (1998.11).
- [29] Kovacevic M. and Acampora A.: “Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks”, *IEEE JSAC*, 14, 5, pp. 868-880 (1996.06).
- [30] Barry R. and Humblet P.: “Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changes”, *IEEE JSAC*, 14, 5, pp. 858-867 (1996.06).
- [31] Subramaniam S., Azizoglu M. and Somani A. K.: “All-optical networks with sparse wavelength conversion”, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 4, pp. 544-557 (1996.04).
- [32] Yates J., Lacey J., Everitt D. and Summerfield M.: “Limited-range wavelength translation in all-optical

- networks”, *IEEE INFOCOM '96*, 3, pp.954-961 (1996.03).
- [33] Banerjee D. and Mukherjee B.: “Wavelength-routed optical networks: Linear formulation, resource budget tradeoffs and a reconfiguration study”, *IEEE/ACM Trans. of Networking*, 8, 5, pp. 598-607 (2000.10).
- [34] Ramamurthy B. and Ramakrishnan A.: “Virtual topology reconfiguration of wavelength-routed optical WDM networks”, *Proc. of IEEE GLOBECOM '00* (2000.11).
- [35] Labourdette J-F. P., Hart F. W. and Acampora A. S.: “Branch-exchange sequences for reconfiguration of lightwave networks”, *IEEE Trans. on Comm.*, 42, 10, pp. 2822-2832 (1994.10).
- [36] Narula-Tam A. and Modiano E.: “Dynamic load balancing in WDM-based packet networks with and without wavelength constraints”, *IEEE JSAC*, 18, 10, pp. 1972-1979 (2000.10).
- [37] Zang H. and Mukherjee B., “Connection management for survivable wavelength-routed WDM mesh networks”, *Optical Networks Mag.*, 2, 4, pp. 17-28 (2001.07/08).
- [38] Ogino N. and Suzuki M.: “Cost analysis in survivable IP/MPLS over WDM networks”, *Proc. of ECUMN '02*, pp. 195-207 (2002.04).
- [39] Fumagalli A. and Valcalenghi L.: “Survivable networks based on optimal routing and WDM self-healing rings”, *Proc. of IEEE INFOCOM '99*, pp. 726-733 (1999.03).
- [40] Ramamurthy S. and Mukherjee B.: “Survivable WDM mesh networks, Part I—Protection”, *Proc. of IEEE INFOCOM '99*, pp. 744-751 (1999.03).
- [41] Canegem B. V., Parys W. V., Turck F. D. and Demeester P. M.: “Dimensioning of survivable WDM networks”, *IEEE JSAC*, 16, 7, pp. 1146-1157 (1998.09).
- [42] Miyao Y. and Saito H.: “Optimal design and evaluation of survivable WDM transport networks”, *IEEE JSAC*, 16, 7, pp. 1190-1198 (1998.09).
- [43] Ogino N. and Suzuki M.: “Optimum light-path pricing in survivable optical networks”, *Proc. of NFOEC '02*, pp. 56-67 (2002.09).
- [44] Li G., Kalmanek C. and Doverspike R.: “Fiber span failure protection in mesh optical networks”, *Optical Networks Mag.*, 3, 3, pp. 21-31 (2002.05/06).
- [45] Doshi B. T., Dravida S., Harshavardhana P., Hauser O. and Wang Y.: “Optical network design and protection”, *Bell Labs Tech. J.*, pp. 58-84 (1999.01-03).
- [46] Arakawa S. and Murata M.: “Lightpath management of logical topology with incremental traffic changes for reliable IP over WDM networks”, *Optical Networks Mag.*, 3, 3, pp. 68-76 (2002.05/06).
- [47] IETF RFC 3036: “LDP specification” (2001.01).
- [48] IETF RFC 3209: “RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP tunnels” (2001.12).
- [49] Sahasrabudde L., Ramamurthy S. and Mukherjee B.: “Fault management in IP over WDM networks: WDM protection versus IP restoration”, *IEEE JSAC*, 20, 1, pp. 21-33 (2002.01).
- [50] Gerstel O., Ramaswami R. and Sasaki G.: “Cost-effective traffic grooming in WDM rings”, *Proc. of IEEE INFOCOM '98*, pp. 69-77 (1998.04).
- [51] Chiu A. L. and Modiano E. H.: “Reducing electronic multiplexing costs in unidirectional SONET/WDM ring networks via efficient traffic grooming”, *Proc. of IEEE GLOBECOM '98* (1998.11).
- [52] Thiagarajan S. and Somani A. K.: “A capacity correlation model for WDM networks with constrained grooming capabilities”, *Proc. of IEEE ICC '01* (2001.06).
- [53] Thiagarajan S. and Somani A. K.: “Traffic grooming for survivable WDM mesh networks”, *Optical Networks Mag.*, 3, 3, pp. 88-98 (2002.05/06).
- [54] Pongpaibool P. and Kim H. s.: “Integrated service provisioning in IP-over-optical networks”, *Proc. of NFOEC '02*, pp. 2026-2036 (2002.09).