

論文の内容の要旨

論文題目 **Studies on the Network Control and Logical Topology Design
in WDM Optical Networks**

(和訳 **WDM 光ネットワークにおけるネットワーク制御と
論理トポロジーの設計に関する研究**)

氏 名 徐 蘇 鋼
 じょ そ こう

異なる複数の情報を1本の伝送路で効率良く伝送する目的で、古くから分割多重伝送が用いられてきた。光ファイバ伝送では、時間領域における多重伝送に加えて、波長多重伝送(WDM: Wavelength Division Multiplexing)という多重伝送が可能である。波長多重伝送は、波長の異なる複数の光信号を1本の光ファイバを用いて伝送するものであり、広い波長域にわたる光ファイバの低損失性を有効に利用できる利点がある。光ファイバを用いた大容量通信を実現するために、波長分割多重(WDM)システムは不可欠になってきている。

広域ネットワークでは大部分の接続関係がマルチホップ、すなわち伝送する間に多くのルータが介在するが、現在のWDMシステムでは各IPルータ間のポイントポイント間通信にWDM技術を利用することで通信回線の大容量化を図っている。しかし、ノードで波長を電子的に処理することは非効率かつコストが高く、電子デバイスにかかる費用によって制限を受けることになる。この場合、ルータがボトルネックになる可能性は大きい。これに対しては光ADM(add/drop multiplexer)と光クロスコネクタを用いてルータ内の所望の波長信号を分岐・挿入する方法がある。WDMネットワーク上において、ソースと目標ノードの間に複数の物理リンクにまたがって同一波長を割当てたライトパスを設定すれば、ルータが扱うべきトラフィック量を減らすことが可能になる。そのため、ライトパス上の途中ノードではトラフィックは電氣的な処理が行われることなく通過することになる。このようなWDM光ネットワークはWavelength Routed Networksとも呼ばれているが、本研究はこのWavelength Routed Networksに関する研究である。

ネットワーク中で発生したコネクション要求の類型には主として2つがある。1つは動

的に発生した短期的な要求であり、もう1つはより長期的なコネクション要求である。そこで、研究の目標は、ネットワーク中の波長資源を有効に利用し、発生したコネクションに対してライトパスを設定すること、さらに、より長期的なトラヒックのパタンによってネットワークの最適化を行うことである。ここで、本研究は構成上、大きく2つに分けている。まず、発生したコネクションに対してライトパスを設定するためのネットワークの制御を研究し、次に、より長期的なトラヒックのパタンによるネットワークの最適化に対する論理トポロジーの設計に関する研究を行った。

I. WDM 光ネットワークにおけるネットワーク制御に関する研究

WDM 光ネットワークにおけるネットワーク制御の一つ目的はコネクション要求によるライトパスを設定することである。即ち、WDM 光ネットワークにおける光ルーティングと波長割当 (Routing and Wavelength Assignment—RWA) である。光ネットワークでは交換ノード内で光信号の波長変換を行なうことができれば、より柔軟なルーティングが可能になる。しかし、光・電子変換を行わず波長変換を行なうことは、現在の技術では困難である。交換ノードで波長変換を行わない場合、コネクションを設定するパスの各リンク上では同一の波長を用いなければならない。本研究は波長変換を行わない **Single-fiber** また **Multi-fiber** を持つ WDM ネットワークに注目し、光ルーティングと波長割当問題を研究している。研究の内容はまず静態トラヒックにおける RWA 問題を研究し、次に動態トラヒックにおける RWA 問題を研究している。

1. 静態トラヒックにおける RWA 問題の研究

理想的な光ネットワークは全てのソースと目標ノード間にライトパスが用意されている。このような静態トラヒックは N 個ノードのネットワークに対して $N(N-1)$ 個のソースと目標ノードのペアがある。この $N(N-1)$ 個のコネクションに対して波長資源を有効に利用しライトパスを設定することが目標である。そこで、本研究は **Grid** と **Shufflenet** 2つ規則的なネットワークに注目し、2つのネットワークとも持つ特性——対称性を利用し、対称的なルーティング手法を提案した。また **Grid** ネットワークに対して特別な波長割当手法を提案した。この提案手法によって、 $N(N-1)$ 本のライトパスを設定する際、必要となる波長の数量は従来の手法より大幅に減らすことが出来る。

2. 動態トラヒックにおける RWA 問題の研究

動態トラヒックのパタン情報を用いて RWA を行う際、ライトパス設定の呼損性能を改善することが考えられる。そこで、まず動態トラヒックのパタン情報を利用し、最適な静態ルーティングを行う。そして、各リンク上でのコネクション量がわかる。コネクションの数量指定されたスレッシユホールドより多いリンクが **hot spot link** と呼ばれる。これらの **hot spot link** はよく利用されているが、輻輳しやすいリンクである。そのため、**hot spot**

link の使用は注意を要する。リンク上のチャンネル保留手法を用いて、呼損性能を改善することによって、本研究は動態トラヒック下の hot spot link と見るリンクのみ波長チャンネルを保留する手法を提案した。これにより、Single-fiber また Multi-fiber を持つネットワークに対して、呼損性能を改善することが可能になる。また、従来の手法のように全てのリンクではなく、hot spot link と見る部分的なリンク上のみ波長チャンネルを保留することによって、ネットワークの制御が簡化された。

II. WDM 光ネットワークにおける論理トポロジーの設計に関する研究

ネットワークには長期的なコネクション要求が存在している。これらの長期的なコネクションのためにライトパスを設定する際、ネットワークリソース（トランスミッタ・レシーバや波長など）を有効に利用しなければならない。この問題は論理トポロジーの設計と見られている。ネットワークの物理トポロジーはノードとファイバーによって構成されており、IP over WDM の場合、論理トポロジーは各波長による IP ルータ間の仮想リンク＝ライトパスによって構成される上位レイヤ（IP）のトポロジーを指す。論理トポロジーは各ノードにおける光 ADM やトランスミッタ・レシーバの配置によって決まることから、これらの構成要素を用いてネットワークの論理トポロジーの再配置が可能になる。これにより、各波長のチャンネルにおけるトラヒックパターンや負荷に従ってルータにおけるトラヒック負荷を減らすことが出来る。さらに、ライトパスを中継するルータでの電気処理により生じる遅延を減らすことが出来、上位レイヤ（IP レイヤなど）ネットワークの通信品質を改良することが可能となる。従来の論理トポロジー構築の手法としては、主にネットワークのスループットを増大させるように設計されてきた。しかし、これらの手法ではライトパスを中継するルータでの電気処理により生じる遅延についてはほとんど考慮されていない。そこで本研究では、ホップ数を低く抑えることで、ルータにおける電気処理による遅延をできるだけ小さくするための論理トポロジーの設計を目指している。

1. 新たな混合整数線形計画法モデル

論理トポロジーの設計方法によって、P2Pでの遅延を軽減し、ネットワークのスループットを向上させることが出来る。理想的な論理トポロジーの公式は、多くの場合、混合整数線形計画法から得ることが出来る。本研究はまず P2Pでの遅延を軽減し、ネットワークのスループットを向上させる混合整数線形計画法で新たなモデルを提案した。ここで、新たなモデルを提出する目的は論理トポロジー設計問題に対して従来の方法より新しい定義の構築を目指しているためである。混合整数線形計画法はネットワークサイズが大きくなるにつれて急速に計算量が増大して解答不能に陥ってしまう。事実、これを含めた系列問題の中には NP 困難として知られているものもあるため、サイズの大きなネットワークではこの問題を厳密に解こうとするのは現実的ではない。ここに、適切な近似を得るための発見的な方法が必要になってくる。

2. 発見的な論理トポロジー設計アルゴリズム

本研究は上位レイヤネットワークの平均ホップ数を低く抑えること、また、論理リンクでの輻輳を軽減することに注目し、最短の平均ホップ数手法を提案した。従来の手法との比較により、提案手法—最短の平均ホップ数法を従来の手法とも適用領域があることが判明した。そこで、提案手法と従来の方法の相互の利点を用いて新たな方法を提案した。提案手法によって従来の設計手法よりもホップ数の少ない、かつ輻輳の小さい論理トポロジーの設計が可能となった。またソースと目標間での電気処理により生じる遅延を抑えることができる。

3. リンクの輻輳と中継ルータでの処理遅延に注目した IP トラヒックルーティング

従来の公式的な論理トポロジー設計方法の中では、リンクの輻輳しか考えられていないが、提案した新たなモデルでは、リンクの輻輳と中継ルータでの処理負荷に注目した IP トラヒックルーティングを利用した。これにより、設計した論理トポロジー上では輻輳の小さく、かつソースと目標間での電気処理により生じる遅延の小さい静的な IP ルーティングが可能となった。

今後の課題

より上位のレイヤ、具体的には IP レイヤでの品質制御と、波長レベルでのネットワーク制御との連携について研究を展開して行きたい。類似研究として GMPLS 等が実用化されつつある現在、GMPLS を超克した新たな波長制御と IP レイヤの品質制御の連携手法の枠組みを創出することは緊急の研究課題である。波長制御は、ネットワークトポロジーの再構築や、物理的リンク増設などのネットワークプランニング、また障害時のネットワークの回復手法と継続的なリンク接続の保持方法などとも密接に関連するものであり、これらとの関連を視野に入れた幅広い視点での波長制御と IP 品質制御との統合的な取り扱いについての枠組みを創出することを考えている。