

称号及び氏名 博士（工学） 橋本 道夫

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 31 日

論文名 「Design and Performance Studies on Reconfigurable Optical
Add/Drop Multiplexers for IP-over-WDM Networks」

(波長多重光IPネットワーク用の再構築可能な光アッド/ドロップ
多重装置の設計と評価に関する研究)

論文審査委員 主査 勝山 豊
副査 山下 勝己
副査 大橋 正治

論文要旨

光ファイバネットワークは、その大容量性と低損失性により、年々増加するトラフィックを収容できる有望な方式として、今後その利用がさらに増加すると考えられている。高速大容量通信のための光伝送技術は、ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication Sector) において、SDH (Synchronous Digital Hierarchy) として規格化されている。SDH は、TDM (Time-Division Multiplexing: 時分割多重) により高速大容量化する方式であり、STM-1 (Synchronous Transport Module -1) を多重化の基本単位として、STM-1、STM-4、STM-16、STM-64、STM-256 の 5 つの規格が定められている。STM-256 におけるビットレートは 39.81312Gbps であり、約 50 万の電話回線数に等しい。このような回線数が 1 心の光ファイバを通して 1 つの波長により伝送できる。

他の高速大容量伝送技術として、WDM (Wavelength-Division Multiplexing: 波長分割多重) 方式があり、広く使われている。WDM 技術によって異なる波長の光を合波し、1 心の光ファイバで複数の光波を同時に伝送できる。CWDM (Coarse WDM: 低密度波長分割多重) 方式においては、1291nm を始点として 16 の波長を 20nm 間隔で用いる方式が標準化されている。DWDM (Dense WDM: 高密度波長分割多重) 方式においては、C、L 帯などの波長帯で、より狭い波長間隔を用いた方式が標準化されている。WDM に関する研究は数多く行われ、100 以上の波長を多重した結果が報告されている。1 つの波長によって STM-256 標準のビットレートで伝送し、100 波長多重すれば、約 5,000 万の回線に相当し、莫大な数の電話回線を 1 心のファイバに多重することができる。このように、光通信はトラフィックが大きいコアバックボーンネットワークに最適であ

り、広く使われている。

アクセスネットワークや地域ネットワークでは、電話の銅線ケーブルから光ケーブルへの更改が進んでいる。需要の大小により、FTTB (Fiber-to-the-Building)、FTTC (Fiber-to-the-Curb)、FTTP (Fiber-to-the-Premises)、FTTH (Fiber-to-the-Home)のように区別されている。ビジネス用の FTTB は大口需要が予想されるため、光ファイバの導入は効果的である。一方、FTTH はホームユーザ用であり、ビジネス用に比べて小口であることから、経済的な観点から解決すべき技術的課題がある。このため、PON (Passive Optical Network) などの共有型光ファイバネットワークが適用されている。これらの適用形体のうち、都市部のビル間のビジネス用通信や、地方自治体や研究機関を結ぶ地域ネットワークや、キャンパスネットワークなどのビジネス用の地域ネットワークでは、光ファイバを借用するダークファイバによりネットワークを構成し、ユーザが管理する形態が有利な場合が多く、どのようなネットワークが適するかという観点から種々の研究が行われている。

このようなダークファイバを用いるビジネス用地域ネットワークでは、ユーザ自身でネットワークを管理することが必要であり、ネットワーク管理者が遠隔地から行う業務をサポートする管理システムの開発と、トラフィック変動に対応する光パスの再構築性を与える装置を開発する必要がある。また、今後の通信がすべて IP (Internet Protocol) ネットワークに統合されることから、広帯域な WDM ネットワーク上で IP 伝送を行う波長多重光 IP (IP-over-WDM) ネットワークを上記の地域ネットワークなどに適用することが有効である。

本研究では、上記のような技術的背景を元に、波長多重光 IP ネットワークのトラフィックの変動を制御するため、ネットワーク管理者が容易に制御できる再構築可能な光アッド/ドロップ多重装置 (ROADM: Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) の設計と評価に関する研究を行った。経済性が重視される地域ネットワークに適用することから、光トランシーバの波長安定化制御が不要な CWDM を採用することとし、対象とする波長多重光 IP ネットワークの設計と、ROADM を制御する設計制御システムを実装し、管理システムを開発した。また、対応する ROADM を提案し、実験ネットワークで光パスの再構築が可能であることを実証した。本論文は、これらの結果をまとめたもので、5章からなる。

第1章は、本論文の緒言であり、研究の背景と目的、および本論文の概要について述べている。

第2章では、ROADM を適用する波長多重光 IP ネットワークにおいて、想定されるノード間のトラフィックを与えると、必要な光パス数と波長数を算出するアルゴリズムを検討し、この機能をウェブ上で動作するよう実装した。また、算出した光パスのノード間接続状態から、各光パスがノードでアッド/ドロップするか通過するかを求め、対応する ROADM の構成図を出力する機能を実装し、合わせて設計機能とした。次いで、ネットワーク上で ROADM を制御する機能を実装し、設計制御システムとした。

ROADM は、光波長を合分波する光カップラと光スプリッタ、およびアッド/ドロップするか通過するかを切り替えるスイッチからなる構成とし、複数ノードに設置された ROADM 内のスイッチを1か所から遠隔制御できるよう制御方式を定めた。ROADM には、制御信号を送受信するネットワークインターフェースを設け、ここに IP アドレスを付与することで、システムから一般の IP パケットと同様に制御パケットを送信できる構成とした。このような構成の ROADM のプロトタイプを作成し、基本機能を評価した結果、複数ノード間で光パスが切り替えられること、切り替え時間は 0.1 秒程度であることなどの基礎データを明確にした。

第3章では、光パスの再構築を双方向に対応させたことを述べている。すなわち、最初の ROADM は、信号伝送方向が単方向の構成であったが、一般的には光ファイバを2心とする双方

向伝送に対応する必要がある。このため、双方向伝送に適した双方向性 ROADM (B-ROADM: Bidirectional ROADM) の構造を提案し、より一般的に光パスを再構築できる機能を実現した。提案した B-ROADM を含む双方向光リングネットワークを構築し、双方向の光パス再構築特性を評価した。この結果、B-ROADM により光パスを再構築すると、汎用的な LAN (Local Area Network) で用いられる標準ルーティングプロトコル OSPF (Open Shortest Path First) により、パケット転送が動的に変更されることを明確にしている。

第 4 章では、光パスの再構築に伴う伝送品質劣化を防止する手法について述べている。光パスの再構築に伴うパケット転送は、光パスを追加する場合と光パスを削除する場合の両方で動的に変更されたが、光パスを削除する場合には、OSPF が新たな転送パスを見つけ、ルーティングテーブルを再計算する時間を要するため、パケット転送の中断が数秒間認められた。OSPF は最善努力型の通信のプロトコルであるため、このような転送中断は起こり得るが、伝送品質向上のためには転送の中断を防止することが望ましい。このため、光パスの再構築時に行うルーティングの設定において、中断を防止する手法として静的一時ルート追加法を提案し、その有効性を実験ネットワークで試験した。その結果、提案手法を適用すれば、転送の中断をなくすことができることが確認でき、光パスの再構築に伴う伝送品質劣化を防止できることを実証した。

第 5 章では、本研究で得られた結果を総括している。

審査結果の要旨

本論文は、今後のブロードバンド通信の主流である光 IP (Internet Protocol) ネットワークを、大規模 LAN (Local Area Network) やキャンパスネットワーク、地域ネットワークなどに適用することを取り上げ、トラフィック変動が生じたときに柔軟に対応できる ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) を含むネットワークの設計・制御を行う手法と、ROADM を双方向に対応させる構造の提案、およびその評価結果を示したものである。得られた主な結果は、以下の項目に要約できる。

(1) ROADM を光 IP ネットワークに適用する場合に、与えられたトラフィックを収容するように光パスを設定し、波長を割り当てる光パス設計と、ネットワーク使用中に生じたトラフィック変動に対応するよう ROADM を制御する機能を検討し、必要なアルゴリズムを明確にしている。さらに、その機能を実装した設計制御システムを動作させ、設計結果を元に ROADM の構造を表す図面を表示するなどの機能をウェブ上で動作させ、システムの機能を明確にしている。

(2) 波長依存性のカプラ、スプリッタと光スイッチからなる ROADM を IP ネットワーク上で制御するため、必要な制御データの形式を定めて ROADM に実装している。さらに、1 か所の制御システムから、ネットワーク上の複数の ROADM を制御する方法を明確にし、この機能をシステムに実装してネットワーク上で動作する試験を行い、光パスの制御が可能であることを実証している。

(3) 上記の ROADM は単方向伝送で使用可能であるが、より一般的に光パスを再構築できるように双方向の ROADM の構造を提案している。提案した双方向 ROADM を作成し、5 ノード実験ネットワークにおいて、双方向の光パス再構築実験を行い、提案した ROADM が所要の双方向光パス再構築性を有することを明確にしている。

(4) パケット転送に標準のルーティングプロトコル OSPF (Open Shortest Path First) を用いる場合、光パスを削除する再構築時には、パケット転送に 4~6 秒程度の中断が発生する。この中断を除去する静的ルーティング一時追加法を提案し、再構築時に良好な伝送品を保つ具体的な手法を明確にしている。

以上の結果は、光 IP ネットワークを広く適用する上で必要となる技術を進展させており、本分野の学術および産業上の発展に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識とを有することを証したものである。

学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士 (工学) の学位を授与することを適当と認める。