

学位論文題名

# Study of Signal Processing and Wavelength Path Control in Photonic Networks

(フォトニックネットワークにおける信号処理と  
波長パス制御に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

近年、アクセス回線の高速化や企業通信分野におけるレイヤ2・レイヤ3仮想専用網サービスの普及に基づき、Internet Protocol (IP) データトラフィック量の増大が顕著である。これらの需要を満足するためには、基幹ネットワークが扱うビットレートの高速化が不可避となり、ネットワーク機器における信号処理を電気領域で行うことが困難かつ非効率となる。このため、将来の基幹ネットワークでは、送受信端局やクロスコネク装置における信号処理を光化するとともに、波長ベースでのパス制御を主体とすることによる、フォトニックネットワークの実現が期待されている。更に、トラフィックのIP化を背景として、フォトニックネットワークにおいては、IPネットワークとの親和性が高いアーキテクチャを実現することにより、柔軟な波長サービスを効率的に提供することも期待されている。

このような背景から、将来のフォトニックネットワークを実現するためには、具体的に、次に挙げる課題を解決する必要がある。まず、時分割多重による信号の高速化や3R (Retiming, Reshaping, Re-amplification) 処理といった、高速性が要求される信号処理を光領域で実現することにより、電氣的処理技術が有する速度や装置規模上の制約を回避する必要がある。一方、ビットレートが高速化することにより、1波長パスが有する情報量が肥大化するため、波長パスに求められる品質と信頼性は極めて高くなる。そのため、高速な信号特有の品質劣化要因となる偏波モード分散を、動的に補償することにより、高い信号品質を維持することが必須となる。また、高速な信号を効率的に方路制御するためには、クロスコネク装置が多数の波長パスを収容すると共に、光領域で処理する必要がある。その際、クロスコネク装置が適切なプロテクション機能を具備することにより、波長パスの信頼性を十分高く維持する必要がある。更には、柔軟な波長サービスを実現するためには、フォトニックネットワークとIPネットワーク間において、統合的な制御プレーンを実現する必要があるだけでなく、データプレーン上での連携技術も必須となる。

本論文は、フォトニックネットワークを実現する際に課題となる、送受信装置における光領域での信号処理技術と、クロスコネク装置における波長パス制御技術に関する研究結果を述べる。具体的には、送受信装置における信号処理技術として、光領域での時分割多重処理によるビットレートの高速化技術、偏波モード分散の補償技術、および、光領域で3R処理を実現する際に課題となるジッタ特性について述べる。次に、クロスコネク装置における波長パス制御技術として、波長パスの信頼性向上に不可欠であるスイッチ回路のプロテクション技術、フォトニックネットワーク-IPネットワーク間のデータプレーン上での連携技術、および、Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) 技術を用いた統合制御プレーンの高信頼化技術について述べる。以下に、本論文の概要を示す。

第1章は、本論文の背景、目的および構成について述べる。

第2章は、将来のフォトニックネットワークアーキテクチャと、それを実現する上での課題を整理する。まず、Synchronous Digital Hierarchy (SDH)/Synchronous Optical Networks (SONET) ハイアラキに基づく光トランスポート技術、IP/MPLS ネットワーキング技術など、フォトニックネットワークの基盤となる技術の特徴や課題を整理する。更に、ネットワークアーキテクチャの基本構成となる、ピアモデルとオーバレイモデルについて整理したうえで、IP ネットワークとトランスポートネットワークの有機的な接続を目的とした、将来のフォトニックネットワークアーキテクチャについて述べる。

第3章は、光領域での時分割多重 (TDM) 技術として、WDM-TDM 変換技術に関する研究結果を述べる。具体的には、電界吸収型変調器の過飽和吸収効果による、相互吸収変調を用いた WDM-TDM 変換技術の検討を行った。WDM-TDM 変換技術により、従来の光 TDM 技術における、隣接トリビュタリ間のコヒーレントクロストークによる品質安定性上の問題を回避し、33%から 74%の広範囲なデューティ比の条件下において、極めて安定した品質の高速信号を光領域で生成可能であることを実験的に明らかにした。

第4章は、伝送後の信号に重畳する速軸成分と遅軸成分を分離し、一つの Principal state of polarization (PSP) 成分を抽出することによる、PMD 補償技術に関する研究結果を述べる。具体的には、伝送後の任意の偏波状態を偏波コントローラにより直線偏波に変換した後に、偏光子を利用して一つの PSP 成分を抽出し、直交する PSP 成分を除去する方式を検討した。この補償技術により、ベースライン Q 値が 24.6 dB の 40 Gbit/s 信号に対して 36 ps までの PMD を与えた結果、Q 値ペナルティを 0.5 dB 以下に抑圧可能な実験的に明らかにした。また、PMD 補償技術の自動化のため、電気スペクトルの低周波数帯を用いた監視制御方式を提案し、フィールド環境へ適用した結果、長期に渡って良好な Q 値が高安定に得られることが明らかとなった。

第5章は、光 3R 装置のジッタ特性に関する研究結果を述べる。具体的には、ITU-T 規格に基づく 80 MHz までのジッタに対して、40 Gbit/s ベースの光 3R 装置が示すジッタ抑圧特性とジッタトレランス特性を実験的に評価し、両特性の関係を解析した。その結果、殆ど抑圧されない低周波数のジッタに対しては、光 3R 装置を挿入しない場合と比較して、トレランスに変化が見られないものの、ジッタが抑圧される高周波数帯では、トレランスが 3 dB 程度低下することが明らかとなった。これにより、光 3R 装置は、ジッタ抑圧とジッタトレランスの間にトレードオフの関係を有することを、実験的かつ定量的に明らかにした。

第6章は、フォトニックネットワークにおける波長パスの信頼性に関する研究結果を述べる。具体的には、クロスコネクタ装置が有するスイッチ回路のプロテクション技術が波長パスの信頼性に及ぼす影響を解析した。16 ノード構成のネットワークにおいて、スイッチ回路を 1+1 方式で冗長化した場合、波長パスの年間アウトエージは 210 秒程度と信頼性に問題があることがわかった。そこで、現用系と予備系のスイッチ回路を独立に制御するプロテクション方式を提案し、波長パスのアウトエージが 0.3 秒に減少することを明らかにした。更に、MEMS 技術を用いて、提案方式に基づくスイッチ回路の試作を行い、有効性を検証した。

第7章は、IP/optical ネットワークにおいて、基幹ネットワークで実現されるプロテクション動作が IP ネットワークに及ぼす影響と、データプレーン上でのレイヤ間連携動作に関する研究結果を述べる。具体的には、SDH レイヤとフォトニックレイヤのプロテクションが IP レイヤに与える影響を実験的に比較した。その結果、SDH レイヤのプロテクションに関しては、Path Alarm Indication Signal (P-AIS) と Line-AIS との識別により、IP レイヤとの連携が実現できることを示した。一方、フォトニックレイヤプロテクションの場合は、物理リンク障害に関する保護時間を IP ルータに適用することで、レイヤ間の連携が可能となり、IP ネットワークにおける高速な障害復旧動作が実現可能なことを明らかにした。

第8章は、フォトニッククロスコネクタ装置から構成されるネットワークにおいて、アウトバンドの制御チャンネルを構築し、それらを異なる媒体を用いて冗長化することで、信頼性の高い制御プレーンを実現する手法を検討した。具体的には、アウトバンド制御プレーンに GMPLS 技術を適用し、障害復旧とプロビジョニングに関する波長パス制御特性を実

験的に評価した。通常時はインファイバ制御チャンネルを使用して GMPLS 制御による高速な波長パス制御を実現し、ファイバ障害の発生時には、アウトオブファイバ制御チャンネルの利用により、GMPLS 制御プレーンの信頼性を高く維持することが可能であることを示した。

第9章は、本研究で得られた成果の総括を行う。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則  
副 査 教 授 宮 永 喜 一  
副 査 教 授 野 島 俊 雄  
副 査 教 授 小 川 恭 孝

学 位 論 文 題 名

## Study of Signal Processing and Wavelength Path Control in Photonic Networks

(フォトリックネットワークにおける信号処理と  
波長パス制御に関する研究)

近年、アクセス回線の高速化や企業通信分野におけるレイヤ2・レイヤ3仮想専用網サービスの普及に基づき、Internet Protocol (IP) データトラフィック量の増大が顕著である。これらの需要を満足するためには、基幹ネットワークが扱うビットレートの高速化が不可避となり、ネットワーク機器における信号処理を電気領域で行うことが困難かつ非効率となる。このため、将来の基幹ネットワークでは、送受信端局やクロスコネク装置における信号処理を光化するとともに、波長ベースでのパス制御を主体とすることによる、フォトリックネットワークの実現が期待されている。さらに、トラフィックのIP化を背景として、フォトリックネットワークにおいては、IPネットワークとの親和性が高いアーキテクチャを実現することにより、柔軟な波長サービスを効率的に提供することも期待されている。

こうした状況の下で、本論文は、フォトリックネットワークを実現する際に課題となる、送受信装置における光領域での信号処理技術ならびにクロスコネク装置における波長パス制御技術に関する研究結果をとりまとめたものである。具体的には、送受信装置における信号処理技術に関して、光領域での時分割多重処理によるビットレートの高速化技術と偏波モード分散の補償技術を新たに考案するとともに、光領域で3R (Retiming, Reshaping, Re-amplification) 処理を実現する際に課題となるジッタ抑圧特性とジッタトレランス特性との間の関係を実験的に明らかにしている。一方、クロスコネク装置における波長パス制御技術に関しては、波長パスの信頼性向上に不可欠であるスイッチ回路のプロテクション技術、フォトリックネットワーク-IPネットワーク間のデータプレーン上での連携技術、および Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) 技術を用いた統合制御プレーンの高信頼化技術のそれぞれにおいて新方式を案出し、その有効性を検証している。以下に、本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、将来のフォトリックネットワークアーキテクチャと、それを實現する上での課題を整理している。まず、Synchronous Digital Hierarchy

(SDH)/Synchronous Optical Networks (SONET) ハイアラキに基づく光トランスポート技術、IP/MPLS ネットワーキング技術など、フォトニックネットワークの基盤となる技術の特徴や課題を述べている。さらに、ネットワークアーキテクチャの基本構成となる、ピアモデルとオーバーレイモデルについて整理したうえで、IP ネットワークとトランスポートネットワークの有機的な接続を目的とした、将来のフォトニックネットワークアーキテクチャについて述べている。

第3章では、光領域での時分割多重 (TDM) 技術として、WDM-TDM 変換技術に関する研究結果を述べている。具体的には、電界吸収型変調器の過飽和吸収効果による、相互吸収変調を用いた WDM-TDM 変換技術の検討を行い、極めて安定した品質の高速信号を光領域で生成可能であることを実験的に明らかにしている。

第4章では、伝送後の信号に重畳する速軸成分と遅軸成分を分離し、一つの Principal State of Polarization (PSP) 成分を抽出することによる、PMD 補償技術に関する研究結果を述べている。具体的には、伝送後の任意の偏波状態を偏波コントローラにより直線偏波に変換した後に、偏光子を利用して一つの PSP 成分を抽出し、直交する PSP 成分を除去する方式を考案している。

第5章では、光 3R 装置のジッタ特性に関する研究結果を述べている。具体的には、ITU-T 規格に基づく 80 MHz までのジッタに対して、40 Gbit/s ベースの光 3R 装置が示すジッタ抑圧特性とジッタトレランス特性を実験的に評価し、ジッタ抑圧とジッタトレランスの間にトレードオフの関係を有することを、実験的かつ定量的に明らかにしている。

第6章では、フォトニックネットワークにおける波長パスの信頼性に関する研究結果を述べている。具体的には、クロスコネクタ装置が有するスイッチ回路のプロテクション技術が波長パスの信頼性に及ぼす影響を明らかにし、現用系と予備系のスイッチ回路を独立に制御するプロテクション方式を提案し、その有効性を検証している。

第7章では、IP/Optical ネットワークにおいて、基幹ネットワークで実現されるプロテクション動作が IP ネットワークに及ぼす影響と、データプレーン上でのレイヤ間連携動作に関する研究結果を述べている。具体的には、SDH レイヤとフォトニックレイヤのプロテクションが IP レイヤに与える影響を実験的に明らかにしている。

第8章では、GMPLS 技術を用いた統合制御プレーンの高信頼化技術について述べている。具体的には、フォトニッククロスコネクタ装置から構成されるネットワークにおいて、アウトバンドの制御チャンネルを構築し、それらを異なる媒体を用いて冗長化することで、信頼性の高い制御プレーンを実現する手法を考案している。

第9章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

これを要するに、著者は、送受信装置における光領域での信号処理とクロスコネクタ装置における波長パス制御の高速化、高信頼化、高性能化を達成するためのデバイスレベルからネットワークレベルにわたる広範な技術開発を行い、将来のフォトニックネットワーク実現に向けた有益な知見を得ており、光通信工学の分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。