

報告番号	※ 甲 第 11047号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Development of Large Capacity
Photonic Network Technologies
(大容量フォトニックネットワーク
構成技術の研究)

氏 名 沈 志舒

論 文 内 容 の 要 旨

様々な情報通信サービスが発展し広く社会に普及する中で、情報通信サービスのみではなく社会全体のインフラとしての役割を担う通信ネットワークの大容量化並びに低消費電力化の要求が高まっている。本論文は、将来の大容量通信網を構築するための新たなフォトニックネットワークアーキテクチャである多階層光パスネットワーク及びエラスティック光パスネットワークに関して、効率的なネットワークアーキテクチャ並びにネットワーク設計手法を提案し、上記光パスネットワークの実現性と有効性を明らかにしたものである。

インターネットの急速な普及、さらにADSLやFTTHなどのブロードバンドアクセスサービスの進展により、通信需要が大幅に増加し続けている。従来の広域通信ネットワークは、信号を中継・送受信する「ノード」、及び各ノードを接続する「リンク」により構成されている。リンクに敷設された光ファイバでは、異なる波長の光信号を複数束ねて同時に伝送可能である波長分割多重技術 (WDM: Wavelength Division Multiplexing)により、大容量の伝送が実現されている。一方、信号を中継・送受信するノードにおいては、光電気信号変換を介して電気領域での転送処理が主体であった。しかし、この電気処理に関わる莫大な消費電力は、通信需要の増加に伴い深刻な課題となってきた。この課題を解決する技術として、フォトニックネットワークの導入が始まっている。フォトニックネットワークでは、中継ノードにおいて、各通信路 (光パス)の波長を識別ラベルとして、光信号のまま中継処理を行うことで、電気処理を可能な限り省略する。既に導入が始まっている基本的なフォトニックネットワーク (固定グリッド型一階層光パスネットワーク、以降では「従来型ネットワーク」と呼ぶ)により一定の性能を実現しているが、超高精細映像配信サービスをはじめとする映像サービスの高度化は、将来の通信需要の一層の増加をもたらすと予測され、従来型ネットワーク技術によるノードの大規模化、リンクの大容量化では十分対応できないと考えられる。そこで、ノード・リンク両者の大幅なコスト削減を達成するため、従来型ネットワークの限界を超える新たなフォトニックネットワーク、波長群パスを導入した多階層光パスネットワーク、並びに細粒度のグリッド幅を導入したエラスティック光パスネットワーク (フレキシブルグリッド光パスネットワーク)が盛んに研究されている。多階層光パスネットワークでは、従来型ネットワークで用いられている波長粒度のパスに加え、複数の波長パスを論理的に束ね一括して伝送する波長群パスを導入し、ノードにおけるスイッチのポート数を大幅に削減できる。一方、従来型ネットワークでは光ファイバの利用可能な周波数帯域を比較的大きな一定幅

のグリッド単位 (50 GHz等, ITU-Tグリッド)に分割し, 各単位に一つの通信チャネルを収容している. これに対し, エラスティック光パスネットワークでは, 各光パスに対してより細粒度の帯域幅 (12.5 GHz)を単位として, ビットレートや伝送距離に応じて必要最小限の帯域割当を行なうことが可能であり, その結果として光ファイバ帯域を効率的に利用できる. これまでに, 各々のネットワークの特性に応じた設計手法の重要性と, これらのネットワークの基本的な有効性が確認されている. しかしながら, ハードウェアの特性も考慮した各ネットワークの運用・設備コストの最小化を含めた重要な課題が十分議論されてはいなかった. そこで本論文は, 各ネットワークの効率的な実現を目指し, 新たなネットワークアーキテクチャの開発に加えて, その特性を検証するため, 新しいネットワーク設計手法の開発に取り組んだ. 以上の本論文の研究背景の基, 第一章では, これまでのフォトニックネットワーク技術の進展及び課題についてまとめる. 第二章, 第三章では, 多階層光パスネットワーク, エラスティック光パスネットワーク各々の基本的な概念と関連する先行研究についてまとめる.

第四章では, 波長変換・波長群変換の何れかまたは双方の機能を具備した多階層光パスネットワークの設計法について述べる. 多階層型光パスネットワークの設計においては, 同一波長(群)を割当てられた複数の波長(群)パスは同一ファイバを共有できない (波長衝突・波長群衝突) という制約のため, 波長パス数が少ない領域, 即ちトラフィック量が小さい領域では多階層型光パスネットワークは不効率であった. 波長(群)変換器は任意の波長(群)から所望の波長(群)へ変換することが可能であり, そのため変換器の導入により, 波長・波長群衝突を解消し, ファイバ利用率を向上することができる. 一方, 変換器以外の設備コストは大きく削減されるが, 場合によっては多数の変換器を必要とするため, これまでの設計手法では設備コスト面での優位性は実現されていなかった. そこで, 波長変換・波長群変換器のいずれかまたは双方を導入した多階層光パスネットワークの新たな設計法を提案する. この手法では, 波長変換器・波長群変換器の特性を鑑み, 導入変換器数の削減と波長・波長群衝突に起因するファイバ数の増加とのトレードオフを考慮し, ネットワーク全体での設備コストを最小化する. 提案法は, NP 完全問題である極めて計算困難な設計問題であるため, 二段階の ILP (整数線形計画法)として定式化した. 即ち波長パス・波長群パスの経路決定問題及び, 最低限の波長・波長群変換器の導入を許し増設コストを抑制する波長・波長群番号割当問題に分割し, 各々の部分問題を適確に解く方法を確認した. とりわけ波長群番号割当問題は, 各変換器の導入効果数に大きな影響を与えるため, ILP 及びヒューリスティック(比較的短い計算時間内で準最適解を探索する手法)を併用し, 計算コストと解精度とのトレードオフの解決を計った. 数値実験では, 波長変換・波長群変換のいずれかまたは双方の機能を具備した多階層光パスネットワークが, 従来型光パスネットワークと比べ, 幅広いトラフィック領域でコスト削減効果を達成できることを確認し, 同時に多階層光パスネットワークがコスト面で優位になる, 波長変換器・波長群変換器コストの上限値を明らかにしている.

第五章では, 著者が提案している準フレキシブルグリッドネットワークについて述べる. フレキシブルグリッドネットワークでは, 高い光ファイバ帯域利用率が達成される反面, 送受信側双方で高度な周波数のチューナビリティが要求され, システムコストを押し上げる要因となっている. この問題を解決するため, 提案ネットワークでは, フレキシブルグリッドネットワークが用いる6.25 GHz間隔のグリッド上に, 各光パスが専有する帯域幅 (ビットレートや伝送距離に応じて決まる12.5 GHzの整数倍)毎に, その帯域幅をグリッド幅とする専用グリッドを定義する. 各帯域幅についてのグリッドは, アンカー周波数と呼ぶ共通の周波数を含むように整列される. 提案ネットワークでは, 各送受信器における波長可変レーザーのチューナビリティが, 相対的に粗なグリッドに限定される他, 受信側において必要となるチューナブルフィルタのチューナビリティも送受信信号毎に限定された固定帯域幅で, 中心周波数のみ可変となるものでよい. すなわち提案ネットワークは, 従来のフレキシブルグリッドネットワークと比べ, コスト面で優位となる.

第六章では, 前章で提案した準フレキシブルグリッドネットワークを含むフレキシブルグリッドネットワーク一般において, 瞬断を最短化した切替が実現可能となる光パス再配置法を提案する. 動的に光パスの設立と解放を繰り返すことにより, ネットワーク上の光パスは, その時点での最適割当から乖離するということがフォトニックネットワークでの根本的な課題である. さらに準フレキシブルグリッドネットワークを含むフレキシブルグリッドネットワークでは, 光パスの占める周波数帯域が不均一であるため, 未使用の周波数領域が断片化されることで, 特に使用

帯域の広い高ビットレートの光パスが高い確率でブロック(設立要求の棄却)される傾向にある。前者の問題については、ネットワーク内の既存の通信需要の経路・周波数スロットの再最適化手順を導入して効率低下を軽減している。この際、再最適化時のサービス断を防ぐため、変更先の光パスを事前に設立してから変更元の光パスから最短の瞬断で切り替えるMBBR(make-before-break rerouting)を前提とする。一方、後者の問題については、高ビットレート信号専用の周波数帯域を導入することで、異なるビットレート信号の不均一なブロッキング率の傾向を改善している。以上の二つの施策の導入効果を様々なネットワーク形状にて評価した。数値実験の結果、提案方針の導入により、フレキシブルグリッドネットワーク・準フレキシブルグリッドネットワーク双方における実質的なネットワーク容量が大きく向上することを示すと共に、提案準フレキシブルグリッドネットワークが、従来のフレキシブルグリッドネットワークとほぼ同等の特性を持つことを明らかにしている。即ち、準フレキシブルグリッドネットワークは、ハードウェアコストとネットワーク容量のトレードオフを効率的に解決することに成功しており、次世代の経済的な大容量フォトニックネットワークの候補として有望であることが示された。第七章では、本研究のまとめと今後の課題を述べる。