

報告番号	甲 第 12772 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 高効率空間・波長多重光ネットワーク実現法に関する研究
(Realization of Efficient Space/Wavelength Division Multiplexing Optical Networks)

氏 名 竹下 仁士

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、増加傾向に終わりが見えない通信トラフィックを、波長・空間多重ネットワーク技術を利用することにより、将来的にわたって効率的に収容していくことを可能とする光ネットワークの実現方法の一つを明らかにした。

第 1 章では、現在の光ネットワークをとりまく環境と、解決すべき課題について説明している。通信ネットワークは、今や生活インフラの一部と言える。高精細ビデオサービスをはじめとして、VR (Virtual Reality) や AR (Artificial Reality) 等動的かつ表現力豊かな通信サービスが世界中で次々に開発され、普及している。最近では IoT (Internet of Things) 技術や自動車の自動運転技術が注目され、AI (Automatic Intelligence) 技術と深く連携した進展が予想される。これらの新しい技術は、ネットワークへの接続なしには実現し得ない。従来の固定的な特性の通信トラフィックに加え、多様な特性を有する通信トラフィック需要が今後伸びていくことが想定される。しかし、これらを実現・運用していくための通信帯域、電力、人材、機器の設置スペースといった資源には限りがある。そのために、扱う通信トラフィック量を制限することは生活の利便性を著しく阻害することとなる。即ち、少しでも効率的な通信ネットワークを実現していくことが極めて重要な課題となっている。

第 2 章では、第 1 章で説明した困難な問題を解決するため、光ネットワークのフレキシビリティを向上させ、波長および空間多重技術を駆使することによってネットワークにおける様々な効率を向上させていくことが極めて重要であることを、最新の研究動向に触れ

ながら説明している。爆発的な通信トラフィック増に備えるためには、空間多重技術による通信容量拡大が現実的である。さらに、波長多重技術によって波長軸上で最大限に多重密度を上げた上で空間多重技術を適用することが効果的である。本研究では、それらの中でトラフィック収容効率や光増幅電力効率の向上にフォーカスしている。

第3章では、第2章で説明したフレキシブルな光ネットワーク構成を可能にするための光ノードシステムのひとつである多方路 CDC-ROADM (Colorless, Directionless, Contentionless Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer) の実現法を検討した。高効率な波長・空間多重光ネットワークを実現する上では、フレキシブルな光パス接続が必要不可欠である。多方路 CDC-ROADM は、このフレキシブルな光パス接続を実現するものである。ここで言うフレキシブルな光パス接続とは、多方路 CDC-ROADM による CDC 機能によって実現されるものである。この CDC 機能は、基本的には光信号を切り換える機能であり、光スイッチをベースとして実現される。ただし、その実現は容易ではない。光信号品質を大きく劣化させることなく CDC 機能を実現し、なおかつ比較的大規模な光スイッチサイズを実現する必要があるためである。第3章では、ベースとなる光スイッチとして、シリコンフォトニクス技術を適用した 8×8 集積光スイッチに着目した。広く普及した CMOS 製造プロセスができるため、将来的に低コスト化が期待できる。また、シリコンは他の材質と比較して光学的に安定した特性を有しているため、扱う光信号に与える影響が少なく済む。このシリコンフォトニクス技術適用の 8×8 集積光スイッチを複数個連結した構成の 8×48 トランスポンダ集約光スイッチ (TPA : TransPonder Aggregator) の試作を行い、CDC 機能の実現性を検証した。連結は、8×8 集積光スイッチが有する特性を阻害することなく、8×48 光スイッチとして CDC 機能が実現できる構成を考案した。また、8×8 集積光スイッチは、約 150 個の MZ 型 TO (Mach-Zehnder Thermo Optic) スイッチ素子から構成されており、8×48 TPA 全体としての TO スイッチ素子数は約 2000 個にもものぼる。この 2000 個以上の TO スイッチ素子を同期して適切に制御し、8×48 TPA として動作させるためのドライバ回路が重要となる。ドライバ回路を含めて 8×48 TPA の主要な特性評価を行った結果、試作機は商用 CDC-ROADM への搭載が可能な性能を有していることが確認された。これにより、高効率な波長・空間多重光ネットワーク実現に向けて重要な基盤技術の実現性が確認された。

第4章では、波長分割多重 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) ネットワークにおいて、ガードバンド (GB : GuardBand) に必要となる波長スロットによって光ネットワークの波長利用効率が低下してしまう問題に着目した。従来の WDM ネットワークでは、波長チャンネルが 50GHz の固定グリッド間隔で配置されていた。限られた波長帯域で、爆発的に増大する通信トラフィック増の要求に経済的に応えていくために、従来 WDM ネットワークの波長利用効率を向上させる研究開発が進んだ。特に、デジタルコヒーレント技術の進展は波長利用効率向上に大きく貢献した。このような技術の進展を背景に、12.5GHz を 1 単位として波長チャンネル間隔を自由に設定できるフレキシブルグリッドが ITU-T にて

標準化された。波長によるルーティングを伴わないポイント・ツー・ポイントの WDM 光伝送システムでは、フレキシブルグリッドによる恩恵を受けることができている。ところが、波長によるルーティングを伴う WDM ネットワークでは、必ずしも波長利用効率が向上するわけではないという問題があることが研究の進展によって明らかになってきた。その問題の一つがガードバンドが必要になることである。波長ルーティングは、光バンドパスフィルタ (OBPF : Optical BandPass Filter) によって実現される。WDM ネットワークにおいては、ある波長の光信号が多数の光ノードで波長ルーティングされることにより、任意の地点間の通信が実現される。つまり、光信号は多段カスケード接続された OBPF を通過することになる。このとき、OBPF の通過帯域が狭窄されることによって光信号帯域が削られて波形が歪むため、到達可能な距離が制限されることになる。この通過帯域狭窄効果による光信号品質劣化を回避するため、ガードバンドを配置する必要が生じる。ガードバンドは、通信トラフィック収容に何ら寄与しない。そのため、必要なガードバンド量が増えるほど、WDM ネットワークの波長利用効率が低下することになる。これではフレキシブルグリッド導入によるメリットを十分に活かすことができなくなってしまう。このように WDM ネットワークでは波長によるルーティングを行うために必要となるガードバンドによって波長利用効率が低下するという課題が有る。しかしながら、将来的な通信トラフィック増に備えていくためには、解決しなければならない問題である。第 4 章では、この問題を解決するため、通過帯域オーバーラップ光フィルタ (PBOF : PassBand Overlapped Filter)、適応スペクトルプロファイル等化器 (ASPE : Adaptive Spectral Profile Equalizer)、適応ガードバンド割り当て方式 (AGBA : Adaptive GuardBand Assignment) の提案を行い、これらによる GB 削減効果を実験およびシミュレーションによって検証した。4×4 メッシュトポロジーネットワークモデルの場合、提案方式を適用することにより 4 ホップまで GB 用途の波長スロットが不要にできると、ネットワーク全体で必要な GB 用途の波長スロット総量を 3.3%削減し、信号用途の波長スロットを 5.8%増加できることを明らかにした。この結果は、実在する PEN (Pan-European Network)および JPN ネットワークトポロジーモデルや、リンクディスジョイントといった制約条件が加わったプロテクションを導入した場合についても同様であった。プロテクションを用いた場合には、収容可能なトラフィック量を最大 13%増加可能であることが確認された。これらの結果から、提案したガードバンド削減方式を適用することで、高波長利用効率の波長多重光ネットワークを実現可能であることを明らかにした。

第 5 章では、第 4 章で説明したような、波長多重光ネットワークにおいて高波長利用効率を実現することで生じる新たな問題として、光ネットワークの消費電力に着目した。高波長利用効率な波長多重光ネットワークでは、光リンクにおいて高い波長多重密度が実現されている。そのため、光リンク中に配置される中継光増幅器は、波長多重密度が高くなった分だけ多くの光信号増幅を行わなければならない。光信号増幅を増大させるためには、増幅を行うための励起レーザ出力を高くすることが必要となる。即ち、光リンクにおける

波長多重密度が上がると、中継光増幅器の消費電力が高くなる。注意すべき点として、ある一定の光利得を実現する中継光増幅器における波長多重密度と消費電力の関係は必ずしも線形でないということがある。波長多重密度が高くなると、求められる光利得を実現するためにより多くの励起レーザ出力、すなわち消費電力を要する場合がある。したがって、高波長利用効率を実現された WDM 光ネットワークにおいては、中継光増幅器の消費電力が想定以上に大きくなることが予想される。帯域資源と同様、許容される消費電力にも限りがある。この問題を解決するため、マルチコアファイバ (MCF : Multi Core Fiber) を用いた空間分割多重 (SDM : Spatial Division Multiplexing) と WDM の併用を用いることとした。クラッド励起方式を適用した MC-EDFA (Multi-Core Erbium Doped Fiber Amplifier) を利用することにより、光増幅に係わる消費電力削減が期待できる。本研究ではクラッド励起方式による光増幅電力効率を向上させるターボ型クラッド励起方式 (TCP : Turbo Cladding Pumping) を提案した。TCP 方式適用の 7 コア MC-EDFA を試作し、平均 2dB の光学利得向上を安定的に実現可能であることを実証した。また、TCP 方式適用 MC-EDFA を SDM/WDM ネットワークに適用することにより、最大 33.5%削減できることを示した。また、光パス設計の観点から、光リンクあたりの波長多重キャリア数を低減することを優先するアルゴリズムを開発し、一般的な最短経路優先アルゴリズムよりも消費電力削減効果が 50%程度高くなる結果を得た。これらの結果から、提案する TCP 方式および光リンク波長多重キャリア数優先アルゴリズムを利用することにより、光増幅器に係わる高い消費電力削減効果、すなわち高い光増幅電力効率の波長・空間多重光ネットワークの実現が可能であることを明らかにした。