HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	波長多重光トランスポートシステムにおける長距離、高速大容量伝送に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	前田, 英樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14121号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78291
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hideki_Maeda_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　前田英樹

学 位 論 文 題 名

波長多重光トランスポートシステムにおける長距離、高速大容量伝送に関する研究
（Study on long-distance, high-speed and large-capacity transmission in wavelength-division multiplexing optical transport systems）

近年の通信トラヒックの急激な需要増加に伴い, ネットワーク基盤を支えるトランスポートシステムにおいては今後更なる大容量化と高機能化が求められている。国内ブロードバンドのインターネットトラヒックは、年率約 20% で増加している。特に、スマートフォンなどのモバイル端末の普及によるモバイルトラヒックの増加が世界的にも顕著である。今後の第 5 世代移動通信システム (5G) の商用化後は、さらなるトラヒック増加が見込まれる。このトラヒックの増加に対応するために、1 波長当たり 100 Gbps の波長多重 (WDM) 光伝送システムが 2013 年から中継網に導入され商用運用されている。今後、さらなる大容量化に対応するためには、既存光ファイバにも適用可能な 1 波長当たり 100 Gbps を超える Beyond 100G 大容量伝送技術を確立する必要がある。また、トラヒックの変動に応じ動的に波長の分岐・挿入、方路の切替を行うために光クロスコネクト、光アドドロップ装置が用いられる。これらは、光合分波器を用いており、その光フィルタ特性により WDM 信号の特性を劣化させる。本研究では、中継網の波長多重伝送システムにおける長距離、高速大容量伝送技術として、Beyond 100G を実現する要素技術と WDM 光伝送方式を確立するとともに、光合分波器、光監視信号による伝送特性劣化を評価し、その劣化抑圧技術を確立することを目指す。

第 1 章では、本研究の背景および狙いを明らかにし、本研究の意義および目的を示す。研究の背景として、中継網における長距離、高速大容量化の課題をまとめ、本研究の目的を述べる。

第 2 章では、光増幅中継伝送系における長距離、高速大容量伝送技術として、信号波形最適化技術、および、新規デジタルコヒーレン光伝送技術とマルチキャリア光伝送方式を用いた高速大容量 WDM 光伝送方式について提案する。信号波形最適化技術は、10Gbps の 2 値の強度変調方式を用いた場合における信号波形のデューティーファクタによる伝送特性依存性を明らかにし、デューティーファクタが 0.5 以下で WDM 光伝送特性が改善されることを明らかにする。1 波長当たり 100 Gbps を超える Beyond 100G 大容量伝送技術の要素技術となる新規デジタルコヒーレント光伝送技術は、光ファイバの非線形光学効果による波形劣化を低減する機能と高性能な符号誤り訂正機能を有し、従来のデジタルコヒーレント技術よりも約 3dB 特性が優れていることを明らかにする。また、本技術を適用したマルチキャリア 400Gbps 信号と 100Gbps 信号との混在光伝送を実施し、混在光伝送においても 100Gbps ならびに 400Gbps 信号に劣化が無いことを実証する。さらに、従来のシングルモードファイバ (SMF) よりもコアを拡大したコア拡大光ファイバを用いることで、マルチキャリア 400Gbps 信号に対し、1,900km の高速大容量 WDM 光伝送が可能であることを示す。

第 3 章では、超高速 400Gbps/λ 光増幅中継伝送技術として、高ボーレートデジタルコヒーレント光伝送技術、デバイス特性補正技術、および高出力ラマン光増幅技術を用いた超高速大容量 WDM

光伝送方式について提案する。高ボーレートデジタルコヒーレント光伝送技術は、従来 32G ボーの変調速度で多値変調を実現していたが、従来の倍以上の速度となる 67G ボーにて変調を行うことにより、1 波長当たり 400Gbps/λ を実現する。さらに、送受信特性改善のため、送受信機デバイスの特性補正技術を適用し、超高速大容量光増幅中継技術を確立する。送受信機デバイス特性補正技術は、送受信機のデバイスの周波数特性やばらつきを予等化により補正し、その特性改善結果を実験によって示す。高出力ラマン光増幅技術は、IEC 規定に基づく光ファイバ通信システムに要求される光パワー、シャットダウン規定に基づき、コア拡大光ファイバを用いた場合における新規の高出力ラマン光増幅特性を明らかにし、従来よりも高光出力かつ低い雑音指数の光増幅が可能であることを示す。さらに、上記技術を用いて 400Gbps/λ 信号に対し、 2,000km の超高速大容量 WDM 光伝送が可能であることを示す。

第 4 章では、WDM 光ネットワークにおいて、光クロスコネクト装置、光アドドロップ装置の光合分波器による伝送特性劣化のメカニズムを解明するとともに、伝送特性劣化を改善する新規の光合分波器を用いた光クロスコネクト装置について提案する。さらに、長距離 WDM 光伝送実験により、提案の光クロスコネクト装置の効果を実証する。光合分波器によるフィルタリングに起因する伝送特性劣化について、10Gbp×8 チャネル WDM 光伝送実験に新規の周回実験系を適用し、光合分波器の挿入位置を変化させて評価を行う。これにより、光合分波器が受信機の近くに挿入された場合、もしくは、光合分波器の間隔が小さい場合に、伝送特性劣化が顕著であることを明らかにした上で、本伝送特性劣化を改善する新規の光合分波器を提案する。この光合分波器を適用した光クロスコネクト装置は、原理的には通過信号に対して伝送特性劣化を生じさせない。10Gbp×8 チャネル WDM 光伝送実験により、従来の光合分波器を用いた光クロスコネクト装置に対して、約 1.5dB 伝送特性を改善できることを示す。さらに、光合分波器の波長分散に対する影響を、6,000km 光伝送実験およびシミュレーションにより評価する。これにより、広いフラットな信号帯域を有する光合分波器であっても、光合分波器の波長分散特性で伝送特性が劣化すること、一方、それが許容累積分散の範囲であれば、受信端で一括分散補償することにより特性改善が可能であることを示す。また、システム化において必須となる光監視信号が WDM 光主信号に与える影響を実験ならびにシミュレーションにより評価し、主信号の伝送特性に、光監視信号の信号パターン依存性、パワー依存性があることを明らかにする。100Gbps の WDM 光信号と 100Mbps の 2 種類の信号パターン (100Mbps-Ethernet、OC-3) の光監視信号を用いて実験的に評価した結果、0/1 交番信号が多く含まれている 100M-Ethernet 信号を用いた場合、顕著に WDM 信号に劣化が見られた。これは、OSC 信号の 0/1 交番信号が WDM 信号に相互位相変調を誘発させ、軟判定前方誤り訂正 (SD-FEC) 特性を劣化させるためと考え、これに対して、光監視信号に 0/1 交番が多く含まれない疑似ランダムビットストリーム (PRBS) 信号パターンを用いることを提案する。さらに、シミュレーションにより、光監視信号を 0/1 交番信号と PRBS 信号とした場合について比較し、PRBS 信号を光監視信号に用いた方が相互位相変調による光位相変調成分の抑圧効果が高く、WDM 光伝送に適していることを明らかにする。

以上の検討により、本研究では、中継網における WDM 光トランスポートシステムの長距離化、高速大容量伝送技術の確立を目的として、Beyond 100G を実現する要素技術と光伝送方式を提案してその有効性を示すとともに、光合分波器、光監視信号による伝送特性劣化を評価し、その劣化抑圧技術を提案して有効性を示した。本提案した技術を適用することにより、中継網においてトラ

ヒック需要に対応した高速大容量な光伝送システムが実現され、ネットワークの高度化、経済的な通信ネッワークの構築、利用者の品質安定に貢献できると確信する。