

称号及び氏名 博士（工学） 山本 貴司

学位授与の日付 平成 30 年 11 月 20 日

論文名 「Study on High-Speed and Large-Capacity Signal Transmission Technology  
(高速大容量信号伝送技術に関する研究)」

論文審査委員 主査 大橋 正治  
副査 山田 誠  
副査 石亀 篤司  
副査 久保田 寛和

## 論文要旨

インターネットの利用拡大を背景として、光通信システムのトラヒックの需要は高まり続けており、信号の時間領域での多重 (time division multiplexing, TDM) 並びに波長領域での多重 (wave division multiplexing, WDM) による伝送容量の拡大が行われてきた。光領域での時間多重 (optical TDM, OTDM) 伝送においては伝送後の多重分離が必須となる。一般に多重分離は光ファイバ中の非線形現象を用いて実現されるが、励起光-信号光パルス間の遅延差に起因するウォークオフが存在すると、チャンネル間クロストークが発生し OTDM の高速化が制限されてしまう。また、OTDM 伝送路の波長分散及び分散スロープを補償する分散補償ファイバの非線形性、損失、偏波分散は OTDM 伝送の高速化を制限する要因となる。さらに、フェムト秒信号光パルスを用いた超高速 OTDM 伝送を実現するためには 4 次分散の補償も行う必要があるが、これを異なる種類のファイバの組み合わせで実現することはできない。一方、WDM 伝送において究極的な大容量化を目指すためには、チャンネル間クロストークの発生を抑制するために光周波数の安定した多くのキャリア光が必要であるが、波長安定化回路を含むレーザ光源を必要なキャリア数だけ用意すると装置構成が大掛かりになるという問題がある。

本論文の目的は、これらを鑑みて、OTDM 並びに WDM 伝送による高速大容量化を実現することである。この目的を達成するための課題としては、高速 OTDM 信号の多重分離技術、フェムト秒信号光パルスを波長分散・高次分散による波形歪みなく長距離伝搬させる技術、世界で初めての単一キャリアでのテラビット OTDM 伝送の実現、更に、WDM 伝送用のマルチキャリア光源としてパワー偏差が小さく光周波数が安定した多くのキャリア光が出力される光源の 4 点がある。

本論文は、テラビット OTDM 信号の多重分離を行うために、短尺の分散フラットファイバをそのウォークオフの正負が交互に入れ替わるように接続して全体のウォークオフを 1 ps より十分小さくすることができる超高速非線形光ループミラー (nonlinear optical loop mirror, NOLM) を初めて実現している。また、フェムト秒信号光パルスを長距離伝搬させるために、従来の分散スロープ補償ファイバ (dispersion slope compensation fiber, DSCF) よりも非線形性、損失、偏波分散の小さい逆分散ファイバ (reverse dispersion fiber, RDF) による分散及び分散スロープ補償、並びに、位相変調器を用いた 3 次、4 次分散同時補償を実現している。更にこれらの多重分離技術及び高次分散補償技術を組み合わせることにより世界初のテラビット OTDM 伝送に成功している。また、WDM 伝送用のマルチキャリア光源としては、連

続波 (continuous wave, CW) 光源、位相変調器、チャープファイバグレーティングからなるマルチキャリア光源を初めて提案し、CW 光を種光として低損失で平坦な光スペクトルのマルチキャリア光を発生させる技術を確立している。

本論文は以下の 6 章で構成されている。以下に各章の構成と概要を示す。

第 1 章では、本論文の研究の背景及び目的について述べ、さらに目的を実現するための課題を述べている。

第 2 章では、OTDM 伝送における多重分離技術について検討結果を述べている。

まず、OTDM 信号を一括して多重分離を行うために、光ファイバ中の四光波混合による波長変換を利用する多重分離技術を提案した。この方法は、まず OTDM 信号の各チャンネルに異なる波長の制御光パルス同期させて合波した後、分散シフトファイバ中の四光波混合を利用してチャンネル毎に異なる波長に変換する。波長変換後の信号光を複数のファイバグレーティングと光サーキュレータを組み合わせた波長ルータへ入射し、変換後の波長に応じて異なるポートへ出力させる。この構成により OTDM 信号の一括多重分離が可能であることを示した。

次に、四光波混合の波長変換効率の向上について明らかにした。本章では非線形性を高めるためにモードフィールド径  $4.2\ \mu\text{m}$  の細径コアファイバを用い、励起光の波長をこの細径コアファイバの零分散波長よりも  $9.2\ \text{nm}$  長波長側に設定することにより、 $8\ \text{nm}$  以上の広い励起波長範囲において変換光の利得が  $5\ \text{dB}$  以上となる高効率波長変換が可能になることを明らかにし、本手法により利得を伴う波長変換が可能であることを示した。

さらに、テラビット OTDM 伝送信号の多重分離を行うために、NOLM を用いた多重分離法について提案した。NOLM による多重分離は、ループファイバ中で特定のチャンネルの OTDM 信号光が励起光パルスとの相互位相変調によって位相変化を受けることで実現される。NOLM において相互位相変調を発生するためには十分な長さのループファイバ長が必要であるが、信号光と制御光の間のファイバ伝搬速度差に起因するウォークオフが蓄積すると、チャンネル間のクロストークが発生してしまう。本章は、それぞれ異なる群遅延特性を持った長さ  $50\ \text{m}$  の分散フラットファイバを 9 本接続してループ長  $450\ \text{m}$  の NOLM を構成し、これらの 9 本のファイバをウォークオフの正負が交互に変わるように接続することにより、NOLM 全体のウォークオフを  $\pm 100\ \text{fs}$  以内に抑えることが可能となった。本 NOLM を用いて  $640\ \text{Gbps}$  OTDM 信号の多重分離に成功し、フェムト秒信号光パルスからなる超高速 OTDM 信号の多重分離の実現が可能であることを明らかにした。

第 3 章では、超高速 OTDM 伝送のフェムト秒信号光パルスを波形歪みなく長距離伝搬させるために、伝送ファイバの分散特性の評価及び分散制御技術を述べている。

光ファイバ通信の伝送速度が増大するにしたがい、伝送路の波長分散による信号光のパルス広がりも顕著になるため、波長分散を正確に測定する技術が重要となる。波長分散の測定法として位相シフト法が広く用いられているが、波長可変レーザ、若しくは複数の波長のレーザが不可欠であり、また群遅延の波長依存性のデータに対するフィッティング式が適当でないと正しい分散値が得られないという問題もある。本章では、単一波長のレーザと位相変調器のみを用いた波長分散の測定法について提案した。本測定法は、正弦波位相変調された CW 光を波長分散媒質に入射した場合、特定の位相変調周波数においては媒質後の波形が CW に戻るという現象を利用している。本測定法は、シンプルな構成で高精度の波長分散測定を可能とし、高速 OTDM 信号伝送システムの構築の簡易化に寄与するものである。

次に、伝送ファイバの波長分散と分散スロープの両方を十分低減するために、複数種類のファイバの組み合わせによる分散マネジメント技術について提案した。OTDM 伝送が高速化するに従い、伝送ファイバの高次の波長分散による信号光波形歪みの影響が大きくなる。分散スロープはパルス波形を非対称に歪ませ、さらに裾に振動を発生させることによりチャンネル間のクロストークを引き起こす。本章では、標準シングルモードファイバ (standard single-mode fiber, SSMF)、RDF、分散シフトファイバ (dispersion-shifted fiber, DSF) をそれぞれ最適な長さで組み合わせることで超高速 OTDM 伝送用の分散マネジメント伝送路を実現した。RDF は、従来において SSMF の分散及び分散スロープの補償に使用されていた DSCF と比較してモードフィールド径が大きく比屈折率差が小さいため非線形性や損失が低減されており、さらに偏波分散や分散スロープも小さいという特長がある。

さらに、伝送路の 4 次分散及びエルビウム添加光ファイバ増幅器等の追加によって発生する残留分散スロープによる信号光の波形歪みを同時に抑制するために、正弦波位相変調を用いた高次分散補償法について提案した。フェムト秒信号光パルスは、その光周波数帯域の広さから 4 次分散による波形歪みも生じやすい。4 次分散はフェムト秒パルスの時

間波形を左右対称に広げ、且つ、長い裾を発生させることよりチャネル間のクロストークを引き起こす。本章では、1台の位相変調器を用いた4次分散及び残留分散スロープの同時分散補償技術について提案した。本補償法は、伝送前のフェムト秒信号光パルスに対して、まず適当な長さのSSMFを伝搬させて線形チャープを与え、続いて位相変調器により振幅とタイミングを最適化した正弦波位相変調を与えることにより、伝送路の分散スロープ（3次分散）及び4次分散で生じるチャープと逆のチャープが与えられる。これにより、フェムト秒信号光パルスの長距離伝搬が可能となることをシミュレーションにより明らかにした。

第4章では、第2章及び第3章で述べた多重分離技術及び分散補償技術を用いた超高速OTDM伝送技術のフィージビリティの確認のために行った1.28 Tbps-70 km OTDM伝送実験の結果を述べている。フェムト秒信号光パルス列は、再生モード同期ファイバレーザによるピコ秒光パルス列発生、分散フラット-分散減少ファイバによるパルス圧縮、dispersion imbalanced NOLM (DI-NOLM) によるパルス波形整形を組み合わせ発生させた。10 Gbps信号光を128多重した後に第3章で述べたSSMF、DSF、RDFからなる70 km伝送路を用いて伝送させ、同じく第3章で述べた位相変調器を用いた3次、4次分散同時補償法によって信号光の波形歪みを補償した。伝送後に第2章で述べたNOLMを用いて多重分離を行い、全チャネルにわたって誤り率が $1 \times 10^9$ 以下であることを確認した。この実験により本論文で述べた多重分離技術と分散制御技術を用いた超高速OTDM伝送のフィージビリティを確認した。また本実験は、世界で初めて単一キャリアでのテラビット伝送を実現したものである。

第5章では、大容量WDM伝送システムの構築において重要なマルチキャリア光源について、各キャリア光のパワー偏差の低減並びに光周波数の安定化技術について述べている。新規の構成として、出力光周波数の安定なCW光源、位相変調器、チャープファイバグレーティングからなるマルチキャリア光源を提案した。本構成のマルチキャリア光源を試作し、25 GHz間隔、強度偏差8 dB以下の61個のキャリア光の発生を実現した。キャリア間の位相がロックされたマルチキャリア光をWDM伝送に適用することにより、各光周波数チャネル間の非線形相互作用によるクロストークを受信後に補償することが可能となり、WDM伝送の長距離大容量化に寄与できることを明らかにした。

第6章では、本論文の結論を述べている。

本研究は、WDM伝送におけるチャネル間の群遅延が問題となるような状況において、群遅延の補償が不要な超高速OTDM伝送システムを実現したものである。また、本研究で実現された超高速信号の多重分離技術は、超高速現象を観察する光サンプリングシステムへの応用が期待される。さらに、WDM伝送においては線形または非線形のクロストークの問題を克服するために正確に制御された光周波数および光位相を将来的に利用することも視野に入れられており、本研究で実現されたマルチキャリア光源はそのようなコヒーレントフォトニックネットワークにおいて重要な役割を果たすものと期待される。

## 審査結果の要旨

本論文は、光時分割多重（OTDM）並びに波長分割多重（WDM）伝送を用いた高速大容量化の実現を目的として、高速OTDM信号の多重分離技術、フェムト秒信号光パルスを波長分散・高次分散による波形歪みなく長距離伝搬させる技術、世界で初めての単一キャリアでのテラビットOTDM伝送の実現、更に、WDM伝送用のマルチキャリア光源としてパワー偏差が小さく光周波数が安定した多くのキャリア光が出力される光源の4点についての検討を行ったものであり、以下の成果を得ている。

(1) OTDM信号を一括して多重分離するために、光ファイバ中の四光波混合による波長変換を利用した多重分離技術を提案し、OTDM信号に一括多重分離が可能であることを示した。また、四光波混合による波長変換効率の向上のための光ファイバおよび励起光波長等に関して検討を行い、高効率波長変換の可能性を示した。また、テラビットOTDM信号の多重分離を行うための非線形ループミラー（NOLM）について検討を行い、フェムト秒光パルスからなる超高速OTDM信号の多重分離が実現可能であることを示した。

(2) 超高速 OTDM 伝送において、フェムト秒信号光パルスを波形歪なく長距離伝送するために、伝送ファイバの分散特性の評価及び分散制御技術について検討している。単一波長レーザと位相変調器を組み合わせた波長分散測定法を提案しており、高精度の波長分散評価が可能であることを示した。また、伝送ファイバの波長分散と分散スロープの両方を低減するための分散マネジメント技術について検討しており、通常のシングルモードファイバ、分散補償ファイバおよび分散シフトファイバを適当な長さの組み合わせることにより超高速 OTDM 伝送用の分散マネジメント伝送路を実現した。さらに、高次分散補償法について提案し、フェムト秒信号光パルスの超距離伝搬が可能となることをシミュレーションで示した。

(3) 多重伝送技術および分散法相技術を用いて超高速 OTDM 伝送技術のフィジビリティ確認のための 1.28Tbps で 70 km の OTDM 伝送実験を行っている。この実験により、世界で初めて単一キャリアでのテラビット伝送を実現した。

(4) 大容量 WDM 伝送システムの構築で重要なマルチキャリア光源を提案した。また、マルチキャリア光源を試作し、25 GHz 間隔、強度偏差 8 dB 以下の 61 個のキャリア光の発生を実現した。

以上の研究成果は、超高速 OTDM 信号を用いた今後の大容量伝送技術や、超高速現象を観察する光サンプリングシステムへの応用に大いに寄与するものであり、当該分野の学術的、産業的な発展に大いに貢献すると考えられる。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学力確認試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。