

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2007～2008

課題番号：19686024

研究課題名 (和文) 320 Gbit/s-500 km OTDM 伝送技術に関する研究

研究課題名 (英文) Research on 320 Gbit/s-500 km OTDM Transmission Technology

研究代表者

廣岡 俊彦 (HIROOKA TOSHIHIKO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：40344733

研究成果の概要：

本研究では 320 Gbit/s 光時分割多重(OTDM)信号の 500 km にわたる長距離伝送の基盤技術の実現を目的として、高速化・長距離化に必要な基盤技術の研究開発に取り組んできた。160 Gbit/s 伝送技術の研究開発を通じて培われた技術的蓄積をもとに、サブピコ秒パルス光源、変復調方式、伝送路および波形歪み補償技術、ならびにクロック抽出および超高速多重分離などの要素技術を実現した。これらを結集して 320 Gbit/s OTDM 伝送実験を行ない、525 km の長距離伝送に世界で初めて成功した。さらに、OTDM 伝送のさらなる高速化を念頭に、640 Gbit/s OTDM 信号発生ならびに多重分離技術に関する基礎検討を行なった。320 Gbit/s 信号の多重分離に用いた SMZ スイッチにおいて、制御光として用いる光パルスの幅を 720 fs まで狭くすることにより、640 Gbit/s 多重分離のエラーフリー動作を初めて実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2008年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：高速光伝送、光時分割多重、超短光パルス、フーリエ変換限界パルス、DPSK、光多重分離

## 1. 研究開始当初の背景

ブロードバンド回線の急速な普及と多種多様なアプリケーションによる帯域需要の拡大に伴い、基幹伝送網の高速化に対する要求が高まっている。波長多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)によるネットワークの大容量化が進む一方で、ノードにおける波長制御の容易さという点から

今後は 1 波長あたりの高速化が重要となる。このため超短光パルスを光領域で時間多重する OTDM (Optical Time Division Multiplexing) 伝送技術が超高速光通信システムの実現に向けて精力的に研究されている。最近では 160 Gbit/s OTDM 伝送の現場実験が日本・ヨーロッパから数多く報告され、実用性の高い高速システムの実現に向けた

取り組みが国内外で積極的に進められている。このように 160 Gbit/s OTDM 伝送の実用化に向けた研究開発が着実に進展している一方で、160 Gbit/s を上回る高速 OTDM 伝送に関しては未だ十分な検討が行われていない。このような高速システムを実際に国内の基幹伝送系に適用するためには、少なくとも東京・大阪間の距離に相当する 500 km 以上の長距離伝送が必須である。しかし、このような長距離化を視野に入れた超高速伝送技術の実験的・理論的検討はこれまで十分にされていない。

## 2. 研究の目的

160 Gbit/s を上回る高速伝送システムの実現に向けて、本研究では 40 Gbit/s の信号を 8 時分割多重した 320 Gbit/s OTDM 伝送を対象とし、500 km にわたる長距離伝送の基盤技術の実現を目的とする。160 Gbit/s 伝送技術については実用化に向けた研究開発が精力的に行なわれているが、本研究ではそこで培われた技術的蓄積をもとに 320 Gbit/s への高速化に必要な要素技術を開発し、それらをデバイス単体としてだけでなく、実際に 500 km 伝送実験系に組み込み、その詳細な性能評価を実施する。

## 3. 研究の方法

320 Gbit/s への高速化ならびに 500 km への長距離化に必要な基盤技術として、光源技術、変復調方式、伝送路および波形歪み補償技術、ならびにクロック抽出および超高速多重分離技術の研究開発に取り組む。さらにこれらの要素技術を結集して 320 Gbit/s OTDM 伝送総合実験を行ない、各要素技術のデバイス性能を最大限に発現させるための条件を抽出し、システム化への基盤を築く。

## 4. 研究成果

### (1) 320 Gbit/s OTDM 送受信系および 525 km 伝送路の構築

320 Gbit/s 伝送においては、隣接するビットの間隔が 3 ps と非常に狭いため、伝送に用いる光パルスは 1 ps 以下のパルス幅が要求される。そこで、従来のピコ秒モード同期ファイバレーザを改良して FM モード同期を用いることにより、繰り返し 40 GHz、パルス幅 0.72 ps の超短光パルスを発生させ、この信号を DPSK (Differential Phase Shift Keying) 変調しさらに 8 倍に時間多重することにより、320 Gbit/s DPSK 信号を発生させた。レーザの構成、出力パルス波形、ならびに発生させた 320 Gbit/s OTDM-DPSK 信号の波形を図 1 に示す。

受信部では、高速動作が可能な対称マッハツェンダー (SMZ: Symmetric Mach-Zehnder)

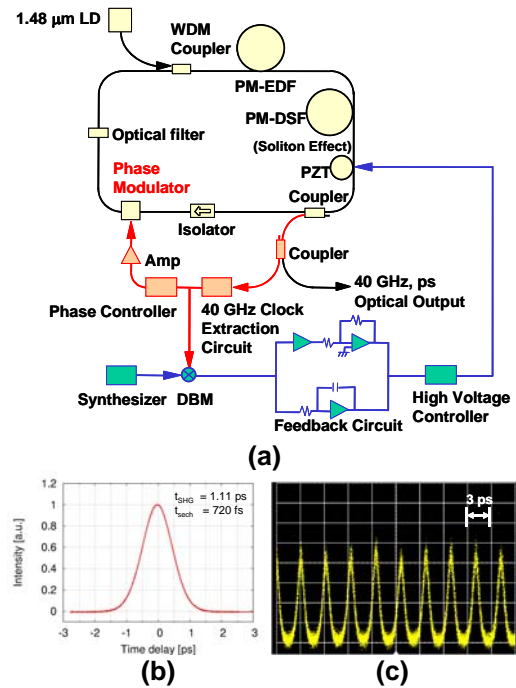


図 1 40 GHz FM モード同期ファイバレーザの構成 (a)、出力パルスの自己相関波形 (b)、ならびに発生させた 320 Gbit/s OTDM-DPSK 信号波形

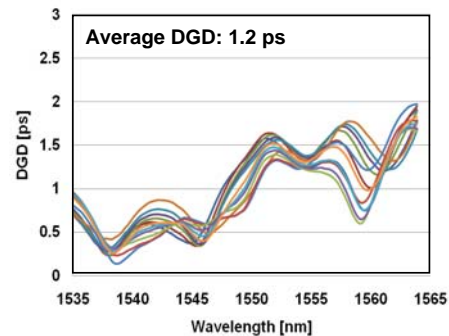


図 2 525 km 伝送路の PMD 特性

型半導体光スイッチによる OTDM 多重分離回路を構築した。これにより光スイッチに用いる制御光パルスのパラメータを 320 Gbit/s 多重分離用に最適化することにより、消光比の高い多重分離を実現した。これらの送受信系を用いて Back-to-back 状態での符号誤り率を測定した結果、-29 dBm の受光感度でエラーフリー動作を実現し、320 Gbit/s 送受信の基本性能を実証した。

これと並行して、2 次、3 次の分散をほぼ完全に補償する長距離分散マネージファイバ伝送路を設計した。実際に 320 Gbit/s 信号を伝送させパルス波形を詳細に評価した結果、その伝送特性がファイバ伝送路の偏波モード分散 (PMD: Polarization-Mode Dispersion) およびその時間変動に極めて敏感であることが明らかになった。実際に構築した 525 km 伝送路の PMD の測定結果を図 2 に示す。同図は 2 つの直交する偏波モード間

の群遅延差(DGD: Differential Group Delay)を15分間隔で3時間連続して測定したものである。同図より、DGDは波長依存性を有しており、さらに時間とともに変動していることがわかる。320 Gbit/s OTDM信号に用いるサブピコ秒パルスは信号帯域が大変広いことから、このことは320 Gbit/s長距離伝送において、従来は問題とならなかった高次のPMDならびにその時間変動が伝送性能の大きな劣化要因となることを示している。

### (2) 320 Gbit/s-525 km OTDM 伝送実験

(1)で述べた320 Gbit/s OTDM送受信系ならびに分散マネージファイバ伝送路を組み合わせ、525 kmの直線路伝送実験を行った。(1)で述べたようにこのような超高速・長距離伝送においては伝送路のPMDが大きな問題となることから、本実験ではPMDの影響を最小限に抑えるために、伝送後の信号の偏光度(DOP: Degree of Polarization)をモニターし、DOPの値が常に最大になるよう、伝送路に入射する光信号の偏波状態を最適化した。さらに、光位相変調と分散を用いた独自のPMD適応等化技術を導入した。伝送実験系を図3に、525 km伝送後の符号誤り率測定結果を図4に示す。全てのチャンネルの誤り率

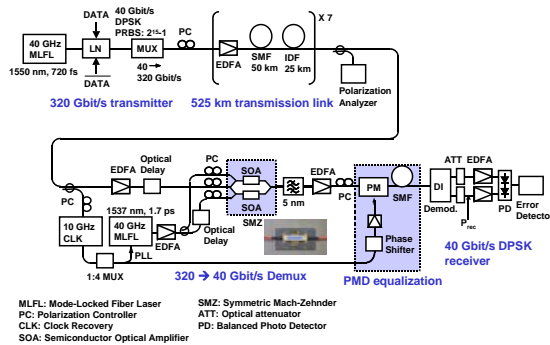


図3 320 Gbit/s-525 km 伝送実験系

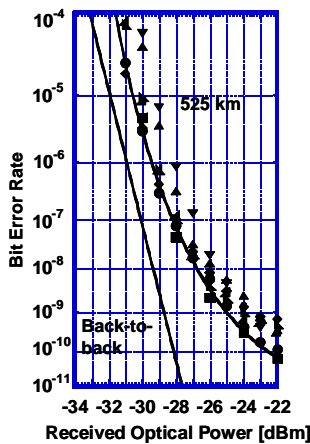


図4 320 Gbit/s-525 km 伝送結果 (符号誤り率特性)

を測定した結果、 $10^{-9}$ の誤り率を4~5.5 dBのパワーペナルティで実現することに成功した。本成果は、単一偏波320 Gbit/s伝送としては最長の伝送距離を実現したものであり、所期の目標を達成した。

### (3) 640 Gbit/s OTDM 信号の全光多重分離

本研究では、さらに新たな取り組みとして、OTDM伝送のさらなる高速化を念頭に、640 Gbit/s OTDM信号発生ならびに多重分離技術に関する基礎検討を行った。

640 Gbit/s OTDM信号の送受信系の構成を図5に示す。送信部においては、まず40 GHzモード同期ファイバレーザから出力されるパルス幅1.6 psのパルスを、正常分散を有する高非線形分散フラットファイバと以上分散ファイバを用いて380 fsまで圧縮し、40 Gbit/sでDPSK変調した後、640 Gbit/sへOTDM多重化を行っている。受信部では、320 Gbit/s信号の多重分離に用いたSMZスイッチにおいて、制御光として用いる光パルスの幅を720 fsまで狭くすることにより、640 Gbit/sから40 Gbit/sへの多重分離を行っている。

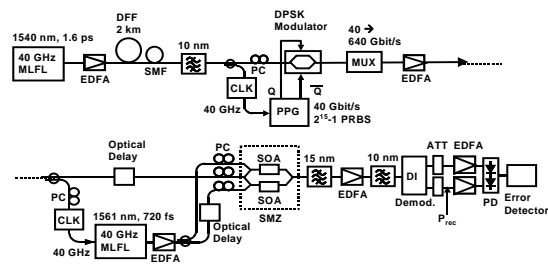


図5 640 Gbit/s OTDM 信号の送受信系

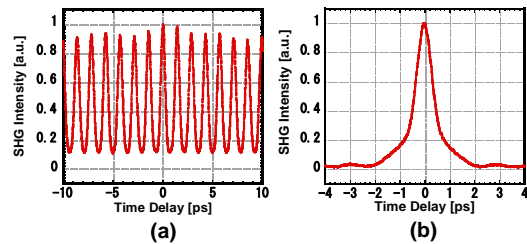


図6 発生させた640 Gbit/s OTDM信号 (a)および多重分離後の40 Gbit/s信号 (b)の自己相関波形

発生させた640 Gbit/s OTDM信号および多重分離後の40 Gbit/s信号の自己相関波形を図6に示す。隣接パルスが僅かに残留しているものの、15 dB以上の高い消光比で多重分離できていることがわかる。多重分離後の符号誤り率測定結果を図7に示す。同図には全てのOTDMチャンネルに対して誤り率 $10^{-9}$ となる受光パワーを併せて示している。全てのチャンネルに対して40 Gbit/s Back-to-back時と2~4 dBの差で多重分離を実現できている

ことがわかる。将来展望として、この 640 Gbit/s 送受信系を用いた 300~500 km の超高速長距離伝送の実現が期待される。

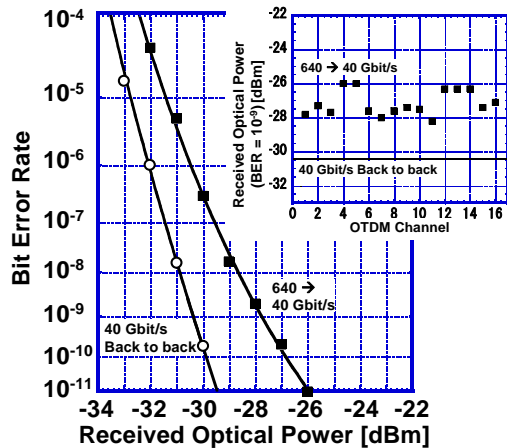


図 7 640→40 Gbit/s 多重分離の符号誤り率測定結果

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] 中沢正隆, 廣岡俊彦, “次世代光通信基盤技術の展望,” ケミカルエンジニアリング, vol. 54, pp. 51-57, 2009. 査読無
- [2] 中沢正隆, 廣岡俊彦, “モード同期ファイバーレーザーと超高速光通信,” 光技術コンタクト, vol. 45, pp. 580-587, 2008. 査読無
- [3] T. Hirooka, M. Okazaki, P. Guan, and M. Nakazawa, “320-Gb/s single-polarization DPSK transmission over 525 km using time-domain optical Fourier transformation,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 20, pp. 1872-1874, 2008. 査読有
- [4] T. Hirooka, K. Osawa, M. Okazaki, M. Nakazawa, and H. Murai, “Stimulated Brillouin scattering in ultrahigh-speed in-phase RZ and CS-RZ OTDM transmission,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 20, pp. 1694-1696, 2008. 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- [1] 岡崎勝伝, 関鵬宇, 平野敏行, 廣岡俊彦, 中沢正隆, 中村滋, “超高速半導体SMZスイッチによる全光 640 Gbit/s OTDM信号の多重分離,” 2009年電子情報通信学会総合大会, 2009年3月19日, 松山.
- [2] T. Hirooka, M. Okazaki, P. Guan, and M. Nakazawa, “320 Gbit/s single-polarization DPSK transmission over 525km using time-domain optical Fourier transformation,” ECOC 2008, 2008年9月24日, Brussels, Belgium.
- [3] T. Hirooka, K. Osawa, M. Okazaki, M. Nakazawa, and H. Murai, “Observation of stimulated Brillouin scattering in ultrahigh-speed in-phase and carrier-suppressed RZ OTDM transmission,” ECOC 2007, 2007年9月19日, Berlin, Germany.
- [4] 廣岡俊彦, 大澤耕, 岡崎勝伝, 中沢正隆, 村井仁, “超高速RZおよびCS-RZ光伝送における誘導ブリルアン散乱の観測,” 2007年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2007年9月10日, 鳥取.
- [5] T. Hirooka and M. Nakazawa, “Ultrahigh-speed signal transmission / processing technologies,” OECC 2007, 2007年7月10日, 横浜

[その他]

ホームページ等

<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣岡 俊彦 (HIROOKA TOSHIHIKO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号: 40344733