

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18206038

研究課題名（和文）高非線形光ファイバを用いた超高速光信号処理に関する研究

研究課題名（英文）Ultrafast optical signal processing based on highly nonlinear optical fibers

研究代表者

菊池 和朗（KAZURO KIKUCHI）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 50134458

研究成果の概要：

160Gbit/s光伝送システムに適用可能な高品質かつ高安定な10 GHz パルス列発生法として、位相変調、チャープ補償、非線形フィルタリングと位相同期ループ（PLL）の組合せ方式を提案し、160 Gbit/s 時間多重にも十分な低ジッタ性・高消光比が得られることを実験的に示した。さらに、位相変調と光フィルタリングを用いる光周波数領域での信号処理を基本とする時間多重分離方式を提案し、160 Gbit/s から40 Gbit/s への良好な時間多重分離機能を実証した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	17,900,000	5,370,000	23,270,000
2007年度	15,500,000	4,650,000	20,150,000
2008年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	37,600,000	11,280,000	48,880,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：非線形光学，光信号処理，光ファイバ，光パルス，光変調

1. 研究開始当初の背景

フォトリックネットワークを流れる情報トラフィック量は、現在の増加率がそのまま続けば、4年で16倍という膨大な伸びが予測される。高精細画像など大容量コンテンツの流通は、この伸びをさらに加速させよう。このような情報トラフィックの急増に既存技術で対応することは困難であり、次世代光情報ネットワーク構築に貢献する新技術を開発することが強く求められている。このような新技術の一つが、電子回路技術の速度限界100Gbit/sを超える全光学的信号処理技術である。この技術により、ネットワーク上を

流れる光信号を、電気信号への変換を介さずに光のままに信号処理することが可能となる。

100Gbit/s を超える超高速で動作する光信号処理デバイスを実現する有効な方法として、光ファイバ中で生じる非線形光学効果を利用することが知られている。光ファイバは、高強度の光を入射すると光の屈折率が僅かに変化するという非線形性を有する。この非線形効果によって生じた光位相変化を、光フィルタなどを介して光強度に変換することにより、「光を光で制御する」超高速光信号処理デバイスが実現できる。このようなファ

イバ型光信号処理技術は、近年の高非線形光ファイバの出現に伴って大きな注目を集めている。高非線形ファイバとは、光信号処理を行なうことを目的として開発された特殊なファイバである。材料と構造を工夫することにより、従来のものに比べて非線形性を数100倍以上に高めたファイバが、申請者らにより最近相次いで報告されている。その結果、1m以下の短いファイバで十分な非線形効果が得られるようになり、ファイバ型光信号処理デバイスの実用化が一気に現実的なものとなった。

このような状況下で、高非線形光ファイバを駆使した超高速光信号処理回路を開発しその実用性を検証することを目的として、本研究を申請した。

2. 研究の目的

本研究の当初の目標は、高非線形光ファイバを駆使した超高速光信号処理回路を開発し、160Gbit/s 光時分割多重(OTDM)システム上で性能評価することにより、その実用性を検証することであった。

第一にこれまで申請者らが行ってきたBi₂O₃ ガラス高非線形光ファイバの研究をさらに推進する。ファイバ構造の最適化により低損失化、低分散化を進め、実用レベルの性能の達成を目指す。

本研究の第二の課題として、光ファイバの複屈折、分散、利得の長手方向の分布制御により、非線形性の限界までの向上を目指す。第三に、これらの新規開発光ファイバを用いて自己位相変調(SPM)および相互位相変調(XPM)効果を用いた全光スイッチを構成し、全光信号処理回路を試作する。160Gbit/s 用超短パルス光源、160Gbit/s 信号から40GHz光クロックパルス列を抽出する回路、160Gbit/s から40Gbit/s への時間多重分離回路、リタイミングおよびリシェーピングなどの再生中継回路がこれに含まれる。

最後に、実際に160Gbit/s 光時分割多重(OTDM)伝送システムを構築し、システム上での上記光信号処理回路の性能評価を行い、その実用性を検証して研究を完結させる。

3. 研究の方法

当初目標としては、Bi₂O₃ ガラス高非線形光ファイバの改良とその光スイッチングへの適用を狙ったが、Bi₂O₃ ガラス高非線形光ファイバの損失低減が極めて困難であり、実システムへの導入は不可能との判断に至った。このため、光変調器を用いたスイッチングに方針を変更し、この方式を用いて160Gbit/s から40Gbit/s への時間多重分離実験に成功した。実システムに適用しえる、極めて安定な特性が得られている。

(1)送信器用10GHzパルス発生器

10 GHz や40GHz 程度の繰返し光パルス列の発生技術は次世代160 Gbit/s 超高速光時分割多重(optical time division multiplexing)光ファイバ伝送システムにおける根幹技術の一つである。ここでは、3 ps 以下の時間幅、高消光比、そして低ジッタ性と言った高品質なパルス特性が要求されるだけでなく、システム応用の観点から、長期安定性、波長及び繰返し周波数の可変性や低コスト性なども重要となる。

ここでは、安定に160 Gbit/s 時間多重可能な10 GHz ピコ秒パルス列を発生させる方式として、位相変調、チャープ補償、非線形フィルタリングと位相同期ループ(phase locked loop: PLL)の組合せ方式を提案する。この提案方式を用いる光パルス列発生器を設計し、現状実現可能な動作条件における性能及び設計トレランスも評価する。その設計に基づき、実際に光パルス発生器を構成し、その出力パルス列特性を詳細に評価する。

(2)160Gbit/s信号の時間多重分離技術

次世代160 Gbit/s 光時間多重分離(optical time division multiplexed: OTDM)ファイバ伝送システムにおける光受信器にはクロック抽出機能と時間多重分離機能が必要不可欠である。クロック抽出は160 Gbit/s 光信号から電子デバイス帯域内の周波数のクロックを抽出する機能であり、時間多重分離はそのクロックのタイミングで160 Gbit/s 光信号を電子デバイス帯域内のビットレートの信号に多重分離する機能である。

本研究では、従来の時間ゲート方式とは全く異なる動作原理の方式として、光周波数領域における信号処理を基本とするクロック抽出方式及び光時間多重分離方式を提案する。本方式は位相変調と光フィルタリングを基本とし、その動作ビットレート周波数は位相変調周波数の4倍で決定される。したがって、入手が容易な安定性・信頼性に優れる40 Gbit/s 伝送システム用光部品を用いて160 Gbit/s 動作が実現可能となる。

本研究では、はじめに、本方式を用いる光位相比較器の性能を評価し、それを用いるクロック抽出用位相同期ループ(phase locked loop: PLL)の160 Gbit/s 信号からのクロック抽出に対する性能を明らかにする。次に、本方式の光時間多重分離機能への応用可能性を吟味する。動作確認実験の結果をもとに、そこで要求される動作条件を議論し、160 Gbit/s 信号の光多重分離動作に対する本方式の性能を明らかにする。最後に、本方式を用いるクロック抽出器と時間多重分離器から構成される160 Gbit/s OTDM 用光受信器の受信特性を明らかにする。

4. 研究成果

(1)送信器用10GHzパルス発生器

本方式の動作原理を図1に示されているパルス波形の変化を用いて説明する。波長 λ_{in} のCW光を周波数 f_{rep} かつ高変調度で正弦的に位相変調し、CW光にチャープを付加する。分散媒質を用いてそのチャープを補償することによって、位相変調が強度変調に変換され、その結果、繰返し周波数 f_{rep} のピコ秒程度のパルス列が得られる。ただし、そのパルスにはペDESTALが付随している。これを光ファイバの自己位相変調効果 (self phase modulation: SPM) を基本とする非線形フィルタによって除去する。SPMによってパルスのピーク成分の光スペクトルが拡大化される一方で、低パワー成分であるペDESTAL成分は λ_{in} に残留する。よって、 λ_{in} から離れた波長成分をフィルタリングすることによって、ペDESTALが極めて少ない高品質な光パルス列が得られる。また、出力パルス列と外部参照RFとの位相比較をし、その誤差信号に基づき位相変調周波数を調整するPLL構成によって、出力パルス列の位相ドリフトを抑圧する。以上の結果、高消光比を有し、位相ドリフトも抑圧されたピコ秒パルス列が得られる。

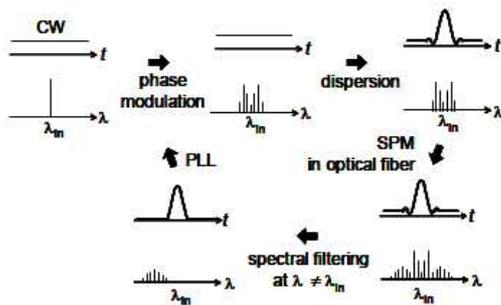


図1 パルス発生法の原理

波長可変光源からのCW光(波長 λ_{in})はLiNbO₃位相変調器($V > 5$ V)によって位相変調した。位相変調器は29 dBm, 10 GHz RF信号によって駆動された。その位相変調光を総分散-50 ps/nmの分散補償ファイバ(DCF)によりチャープ補償し、5.5 psパルス列を得た。そのパルス列をEDFAで24 dBmに増幅した後に、高非線形ファイバ(HNLF)に入力し、その出力光の一部を帯域1 nmの波長可変光フィルタ(BPF)によって抽出した。HNLFの2次分散値と非線形係数はそれぞれ-1 ps²/kmと<15 /W/kmである。BPFの中心波長は λ_{in} から2.5 nm離調された波長に設定される。

バックグランドフリー自己相関計及び波長分解能0.01 nmの光スペクトラルアナライザを用いて測定された典型的な出力パルス波形の自己相関波形と光スペクトル波形($\lambda_{in} =$

1557.4 nm)を図2に示す。ガウス波形を仮定したフィッティング曲線を(a)白丸及び(b)破線で示す。出力パルス列の時間幅 Δt と時間帯域幅積 $\Delta t \Delta \nu$ はそれぞれ5 ps及び0.48と計算され、ほぼフーリエ変換限界パルスが得られている。消光比も20 dB以上確保されている点に注目されたい。また、 Δt 、 $\Delta t \Delta \nu$ と出力平均パワー P_{out} の λ_{in} 依存性を図3に示す。光フィルタ損失の波長依存性の為に出力パワーは短波長側ほど低いものの3 dBm以上の P_{out} が確保されており、測定範囲において平坦な Δt と $\Delta t \Delta \nu$ の特性が得られた。

本方式により、Cバンド全域で良好なピコ秒パルス発生できることを示した。また、3 nm帯域光フィルタ2段を用いた場合には、3.5 psまでパルス幅を短縮することが可能である。

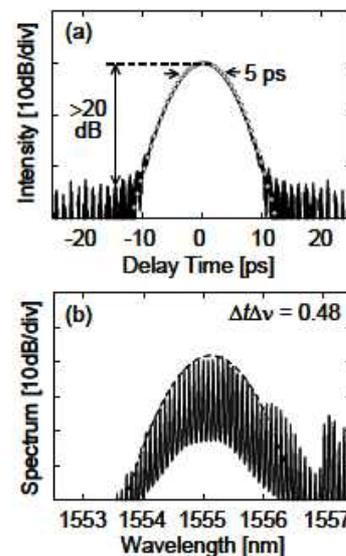


図2 パルス列の自己相関波形(a)およびスペクトル(b)

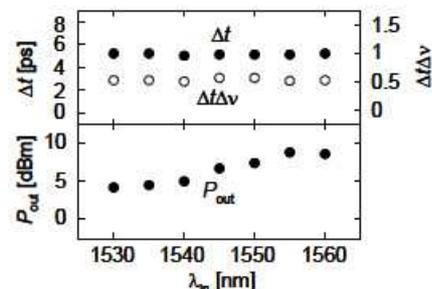


図3 出力パルス列の時間幅 Δt と時間帯域幅積 $\Delta t \Delta \nu$

図4は10Gbit/sの変調パルス列を16時間多重して得られた160Gbit/s信号のアイパターンである。時間多重後にも良好なアイ開口が得られていることがわかる。

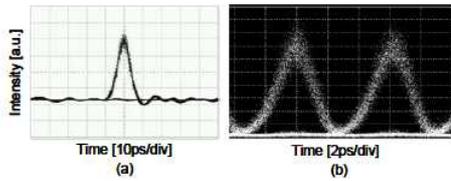


図4 10Gbit/s信号(a)と160Gbit/s時間多重信号(b)のアイパターン

(2) 160Gbit/s信号の時間多重分離技術

ファイバ伝送システムの受信器において必要不可欠な機能の一つが40Gbit/s以上の領域での光時間多重分離である。本方式の動作原理を図4に示す。ここでは、4チャンネルのOTDM信号(ビットレート f_{sig})の多重分離を考える。簡単の為に、このOTDM信号を周波数 f_{sig} の正弦波状強度変調光と仮定する(図4(a)と(b))。はじめに、OTDM信号を位相変調する(図4(c))。周波数及び変調度は $f_{sig}/4$ 及び m である。OTDM信号の一つのチャンネル(ここでは図4(a)内A)の時間スロットと位相変調の立上りスロープが一致するように、位相変調の位相を調整する。この位相変調によってOTDM信号は周波数チャープし(図4(d))、そのスペクトルの一部が $\pm f_{PM} = \pm mf_{sig}/4$ だけシフトする(図4(e)と(f))。ここで注目すべきは、 f_{PM} シフトした周波数成分はチャンネルAに対応する点である。ここでは、これを選択的波長シフトと呼ぶ。次に、 $f_{PM} + f_{sig}$ のオフセット周波数でフィルタリングし f_{PM} だけ周波数シフトした成分のみを抽出することによって、チャンネルAの多重分離が実現される。本方式の動作速度は位相変調周波数の4倍で決定される為に、40Gbit/s LiNbO₃(LN)位相変調器を用いることによって、本方式は160Gbit/s時間多重分離動作に適用可能である。

本方式の160Gbit/sシステムへの適用可能性を議論する為に、本方式を用いて160Gbit/sから40Gbit/sへの光時間多重分離実験を試みた。その実験系を図5に示す。10Gbit/sピコ秒パルス信号を時間多重することによって得られる160Gbit/s光信号を、LN位相変調器とBPFから構成される本多重分離器に入力した。160Gbit/s光信号は位相変調され、その位相変調によって周波数シフトされた成分のみをBPFによって抽出し、所望のチャンネルを時間多重分離した。LN変調器を30dBm・40GHzクロックによって駆動した。その変調度 m は1.5と算出される。BPFの光帯域は0.7nmであり、その中心波長を光信号中心波長から2nm離調されら波長に調整した。

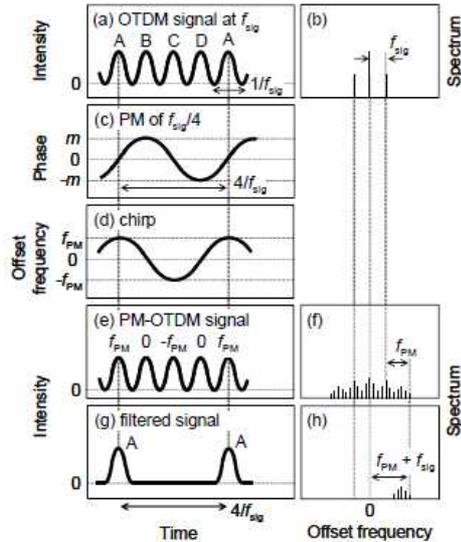


図4 光変調を用いた時間多重分離の原理

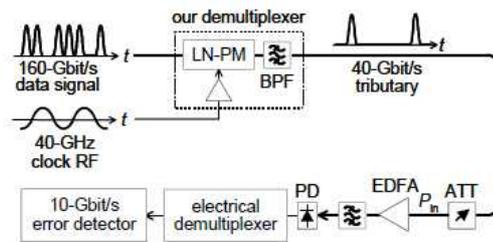


図5 実験系(a)と時間多重分離波形(b)

図6が典型的な多重分離された40Gbit/s信号のアイパターンである。比較の為に160Gbit/s光信号のアイパターンも示してある。若干の強度揺らぎが見られるものの、良好なアイパターンが得られている。その強度揺らぎは、時間多重において各チャンネルのパワー調整が不十分である為に発生する160Gbit/s光信号の強度揺らぎが主な原因である。

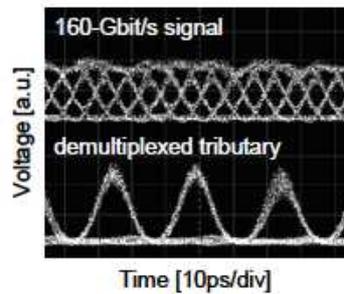


図6 160Gbit/s信号と多重分離されたトリビュタリのアイパターン

本時間多重分離における信号劣化をより詳細に議論するために、全チャンネルのビットエラーレート (bit error rate: BER) を測定した。多重分離された40 Gbit/s 光信号チャンネルを前置増幅した後に受光した。その後、更に電気時間多重分離回路を用いて40 Gbit/s 電気信号を10 Gbit/s に多重分離し、そのBERを測定した。ここでは、前置増幅入力40 Gbit/s 光信号チャンネルの平均パワー P_{in} に対するBER を評価した。図7 が最良と最悪の10 Gbit/s 信号チャンネルのBER である。白丸が40 Gbit/s 光信号を直接前置増幅して受光した際のback-to-back 実験の結果であり、破線はASE 信号ビート雑音から計算される値である。若干のペナルティとスロープ劣化が見られるものの、全チャンネルでエラーフリー動作が達成された。

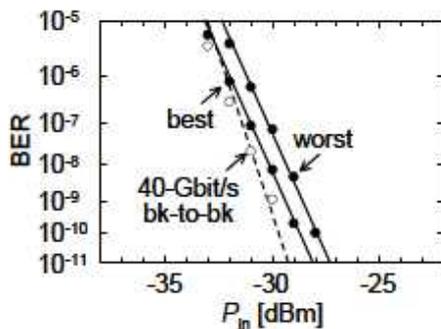


図7 多重分離された40Gbit/s 信号の符号誤り率特性

(3)まとめ

本研究により、160Gbit/s 伝送用光送受信器技術が開発された。これらは、当初目的とはことなり、光変調器をベースとしたサブシステムであるが、安定性に優れ、実システムへの導入が可能な完成度を持っている。今後、この送受信器を武器として、1,000km 超級の伝送システムを構築していく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] K. Igarashi and K. Kikuchi, "Optical signal processing by phase modulation and subsequent spectral filtering aiming at applications to ultrafast optical communication systems," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol.14, no.3, pp.551-565, 2008. (査読有)

- [2] K. Igarashi, K. Katoh and K. Kikuchi, "Optoelectronic time-division demultiplexing of 160-Gbit/s optical signal based on phase modulation and spectral filtering," Opt. Express, vol.15, no.3, pp.845-851, 2007. (査読有)
- [3] K. K. Chow, K. Kikuchi, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, and N. Sugimoto, "Four-wave mixing based widely tunable wavelength conversion using 1-m dispersion-shifted bismuth-oxide photonic crystal fiber," Optics Express, vol.15, no.23, pp.15418-15423 (2007) (査読有)
- [4] K. Igarashi, K. Katoh and K. Kikuchi, "Prescaled phase-locked loop using phase modulation and spectral filtering and its application to clock extraction from 160-Gbit/s optical-time-division multiplexed signal," Opt. Express, vol.14, no.9, pp.4087-4091, 2006. (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- [1] K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Generation of 10-GHz 2-ps optical pulse train over the C band based on an optical comb generator and its application to 160-Gbit/s OTDM systems," 34th European Conference on Optical Communication (ECOC2008), Tu3.D.1, Brussels, Belgium (21-25 Sep. 2008).
- [2] 五十嵐浩司, 加藤一弘, 菊池和朗, 「分散シフト Bi_2O_3 フォトニッククリスタルファイバにおける相互位相変調を用いる 160 Gbit/s 光信号の時間多重分離」2007 年電子情報通信学会ソサイエティー大会, B-10-19, 鳥取大学 (2007 年 9 月 10-14 日)。
- [3] K. Igarashi, K. Katoh, K. Kikuchi, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara and N. Sugimoto, "160-Gbit/s optical time-division demultiplexing based on cross-phase modulation in a 2-m-long dispersion-shifted Bi_2O_3 photonic crystal fiber," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2007), JTuC3, Baltimore, MA, U.S.A. (6-11 May 2007).
- [4] K. K. Chow, K. Kikuchi, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, N. Sugimoto, "Widely tunable wavelength conversion by four-wave mixing in 1-m dispersion-shifted bismuth-oxide photonic crystal fiber," Optical Fiber Communication Conference (OFC 2007), OTuI2, Anaheim, CA, U.S.A. (25-29 March 2007).
- [5] 五十嵐浩司, 加藤一弘, 菊池和朗, 「Fabry Perot 電気光学変調器と光フィルタを用いる 10 GHz ピコ秒光パルス

- 列発生」 2007 年電子情報通信学会総合大会, C 4 -28, 名城大学 (2007 年 3 月 20 -23 日)。
- [6] 五十嵐浩司, 加藤一弘, 菊池和朗, 「光周波数領域における信号処理を基本とする 160 Gbit/s OTDM 用光受信器」 2006 年電子情報通信学会ソサイエー大会, B -10 -65, 金沢大学 (2006 年 9 月 19 -22 日)。
- [7] K. Igarashi, K. Katoh and K. Kikuchi, “High-sensitive optoelectronic clock recovery circuit featuring GVD-independent operation,” 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC2006), Post deadline session Th4.3.2, Cannes, France (24-28 Sep .2006).
- [8] K. Igarashi, K. Katoh and K. Kikuchi, “160-Gbit/s OTDM receiver with optoelectronic clock-recovery and demultiplexing functions based on phase modulation and spectral filtering,” 32nd European Conference on Optical Communication (ECOC2006), Th3.5.2, Cannes, France (24-28 Sep. 2006).
- [9] K. Igarashi, K. Katoh and K. Kikuchi, “Optoelectronic time-division demultiplexing of 160-Gbit/s signal based on phase modulation and spectral filtering,” 11st Optoelectronics and Communications Conference (OECC2006), 4F2-2, Kaohsiung, Taiwan (3-7 July 2006).
- [10] K. Igarashi, K. Katoh and K. Kikuchi, “Optical time-division demultiplexer based on selective spectral shift and spectral filtering,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2006), CMAA1, Long Beach, CA, U.S.A. (21-26 May 2006).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

菊池 和朗 (KAZURO KIKUCHI)
東京大学 大学院工学系研究科 教授
研究者番号 : 50134458

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

加藤 一弘 (KAZUHIRO KATOH)
東京大学 大学院情報理工学系研究科
助教
研究者番号 : 00292897