

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360171

研究課題名 (和文) 多波長一括全光信号再生の研究

研究課題名 (英文) Simultaneous All-Optical Regeneration of Multi-Wavelength Signals

研究代表者

松本 正行 (MATSUMOTO MASAYUKI)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10181786

研究成果の概要 (和文) : 波長が異なる複数の光信号を一括して処理できる全光信号再生器の実現を目指して、光ファイバ中の四光波混合の飽和を利用した光振幅雑音除去の研究を行った。本方式では、光の位相がほぼ保持されるので、位相が変調された光信号の振幅雑音除去に適している。本研究では、(1) 毎秒 10 ギガビット×3 チャンネルの差動位相変調信号の同時雑音除去と非線形位相雑音の低減の実証、(2) 高次の四光波混合を利用した毎秒 10 ギガビット×2 チャンネルの強度変調信号全光再生の実証、(3) 最適な時間多重のための適応的な遅延制御方式の基礎実験による検証、を行った。

研究成果の概要 (英文) : Regeneration of multi-wavelength-channel signals, using saturation of four-wave mixing in fiber, was studied. Because the signal phase is almost preserved in this scheme, it is suitable for amplitude noise reduction of phase-modulated signals. In this study, (1) simultaneous noise reduction of 10Gbps x 3ch differential phase shift keying signals and consequent reduction of nonlinear phase noise, (2) regeneration of 10Gbps x 2ch OOK signals using higher-order four-wave mixing, and (3) a scheme of adaptive delay control for achieving suitable time multiplexing of channels, were demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2009 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

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：フォトニックネットワーク、先端的通信、超高速情報処理、光スイッチ、非線形光学

1. 研究開始当初の背景

基幹系光ファイバ通信システムにおいて、大量のデータを効率良く伝送するためには 1 チャンネルあたりの信号速度が大きいほうが望ましく、実用システムにおいては毎秒 10 ギガビットから 40 ギガビットへと高速化が進みつつあり、さらには毎秒 100 ギガビット以上の超高速信号伝送を目指した研究が進

展している。信号伝送速度が増すと、伝送にともなう信号波形歪みや雑音累積の度合いが大きくなり、信号伝送距離が厳しく制限される。この制限を超えて長距離の信号伝送を行うためには、信号品質が劣化する前に信号再生を行う必要がある。特に毎秒数十ギガビット以上の高速伝送では光信号のまま再生を行う全光信号再生が有効である。また、

全光信号再生は距離依存性の小さな信号伝送を可能にし、経路が動的に変化するネットワークにおける信号品質制御の単純化をもたらす。

全光信号再生器の主要な働きは、信号レベルのランダムなばらつきを除去することである。光信号に対してこのような操作を施すためには、何らかの光非線形媒質を用いることが不可欠である。しかしながら、非線形効果の利用は、波長多重された信号の処理において、非線形性に起因するクロストークがチャンネル間に生ずることを意味する。そのため、これまで提案されてきたほとんどの全光信号再生器は単一波長チャンネルの信号を再生するものであった。システムの単純化、低コスト化を達成するためには、複数の波長チャンネルの信号を一つの非線形媒体を用いて一括して再生処理できることが強く望まれている。

2. 研究の目的

本課題では、波長が異なる複数チャンネルの高速光信号の再生を一つの光非線形媒体を用いて一括して行う手法を研究する。ファイバ中の四光波混合の飽和効果を利用した光信号再生方式を取り上げ、時間インターリーブにより多波長信号を同時に再生することを試みる。具体的には、(1) 単一波長動作における、四光波混合飽和特性の信号波長依存性やポンプデプレッションの時間幅などの基礎特性の把握、(2) 2波長信号の同時振幅雑音除去特性の測定、(3) 本信号再生方式を用いた 10GSymbol/s 2波長多重 DPSK および DQPSK 信号再生・伝送実験、(4) 本方式による複数波長信号再生の前処理として必要な時間インターリーブを自動的・適応的に行う手法の検討、を行う。

3. 研究の方法

ファイバ中の四光波混合の飽和効果を利用した多波長一括全光信号再生器(リミタ)の構成の概略を図1に示す。時間インターリーブした複数波長の光信号をポンプ光と共に高非線形性ファイバに入力し、四光波混合相互作用を起こさせる。入力信号光電力がポンプ光電力と同程度以上になると、信号から他の周波数成分への電力の移行が生じ、ファイバ出力における信号光電力が飽和する。この四光波混合相互作用の飽和の応答時間はフェムト秒オーダーであり、この効果を利用することによって原理的には数百 Gb/s 程度の速度の超高速光信号の振幅雑音除去(振幅再生)が可能になる。

本研究ではまず、単一波長動作における四光波混合飽和特性の信号波長依存性や、信号が短パルスの場合に生ずるポンプデプレッションの時間幅を把握する。次に、これらの検

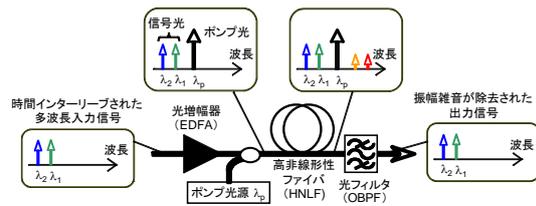


図1 ファイバ中の四光波混合の飽和を利用した多波長一括全光信号再生(波長数2の場合)

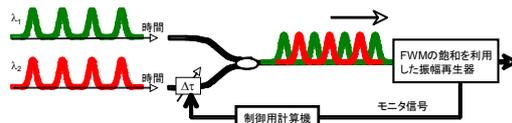


図2 遅延時間の制御による2波長信号の時間インターリーブング

討結果をもとに信号-ポンプ間波長間隔やポンプ電力の最適値を求め、2~3波長信号の同時振幅雑音除去の実験を行う。さらに、2波長差動位相変調(DPSK)信号の振幅再生と伝送実験を行う。ここでは、送信器直後で振幅再生(振幅雑音除去)を行い、その後約50kmの伝送用ファイバを伝送させる。振幅雑音の除去が効果的に行われている場合は、伝送中に振幅揺らぎが位相揺らぎに変換されることによって生ずる非線形位相雑音が低減されるので伝送後の符号誤り率が低下する。伝送路ファイバへの信号入力電力の大きさを変えながら受信端での符号誤り率を測定することによって、信号再生の有効性を確認する。

本研究で取上げる多波長信号再生方式では各チャンネルの信号を適切な時間間隔でインターリーブする必要がある。例えば、チャンネル数が2の場合、図2に示すように2つの波長のパルスが重ならないようにタイミングを調節して2つの信号を時間多重した後再生器に入力する必要がある。多くの伝送システムにおいては、2つのチャンネル間のタイミングが時間的に緩やかに変化する。この場合、一方のチャンネルの信号に与える時間遅延を適応的に変化させる必要がある。2つのチャンネルのパルス間に重なりがないことを示すモニタ信号として、異なるチャンネルの信号間の四光波混合成分の電力を用いることを検討する。

4. 研究成果

次の研究成果を得た。

(1) 10Gbit/s×3波長チャンネル DPSK 信号の同時振幅再生実験を行った。実験系を図3に

示す。振幅再生（リミティング）前後の信号波形を図4に示す。四光波混合によるパラメトリック増幅の波長特性が平坦でないため、出力パルスの振幅がチャンネルによってばらつくが、いずれのチャンネルも振幅雑音が減少することがわかる。さらに、リミタ後の信号を40kmの伝送ファイバを伝送させた後にビット誤り率を測定した。振幅雑音除去を行うことによって伝送中の生ずる非線形位相雑音が小さくなり、伝送路に入力できる信号電力を各チャンネルにつき4dB以上大きくすることができることを示した。

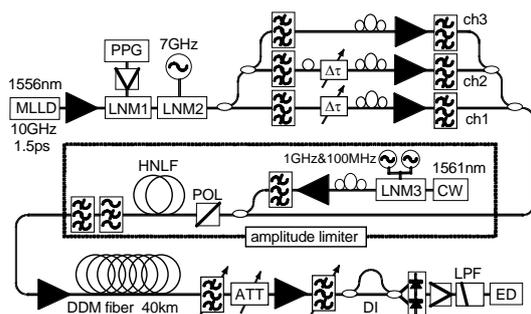
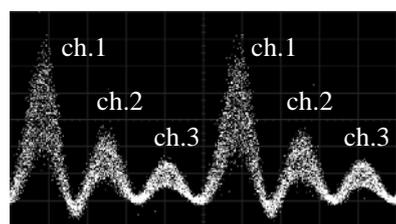
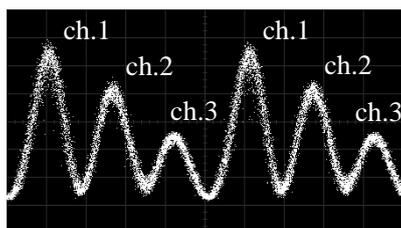


図3 10Gbit/s×3波長チャンネルDPSK信号再生・伝送実験系



(a) 振幅リミタ前の信号波形



(b) 振幅リミタ後の信号波形

図4 振幅リミタによる3波長信号の雑音除去（横軸：時間（20ps/div））

(2) 10Gbit/s×2波長チャンネル強度変調(OOK)信号の同時信号再生実験を行った。ここでは高次四光波混合成分を出力光として用いた。高次四光波混合成分を用いることによりゼロ振幅レベルの雑音も除去できることを示した。また、数値解析により、本方式が40Gbit/s×3波長チャンネル程度のOOK信

号の再生にまで拡張できる（通常の高非線形光ファイバを用いた場合）ことを明らかにした。

(3) 10Gbit/sのOOK信号とDPSK信号を時間インターリーブ多重化した20Gbit/sの信号に対する振幅雑音除去実験を行った。時間インターリーブが正しく行えていれば2つの信号は相互作用することなく振幅雑音が除去され、両信号ともパワーペナルティが減少することを示した。つまり、この信号振幅再生方式は変調形式が混在した信号に対しても有効であることを明らかにした。

(4) 実際の伝送系では信号光の偏波状態が時間的に変化する。したがって、信号再生器の入力偏波依存性を極力小さくする必要がある。そこで、直交2ポンプ構成による振幅リミタの偏波無依存性の検討を行った。利得が飽和する条件下でマナコフ方程式を解くことによって偏波依存特性を調べた結果、リミタ出力信号電力は信号偏波状態によって変化するが、出力信号の振幅揺らぎが最小になる入力信号電力の大きさは偏波状態によって大きく変化することはないことを明らかにした。このことは、偏波変動が時間的に緩やかならば偏波依存性の小さな動作が可能であることを示すものである。

(5) 本研究で提案する多波長同時振幅再生を実際の伝送系で用いるためには、時間インターリーブを適応的に行う手法を見出す必要がある。異なるチャンネルのパルス間に重なりがないことを示すモニタ信号として、信号同士の高次四光波混合成分の電力を用いることが有効なことをシミュレーションによって示すと同時に、このモニタ信号を用いた自動時間インターリーブの実験を行った。

以上の研究により、光ファイバ中の四光波混合の飽和を利用した多波長一括全光信号再生方式の利点、可能性、および現実のシステムへの導入に向けた課題が明らかになったと言える。

信号再生器に入力される複数チャンネル間の時間制御を高速で適応的に行う手法を見出すことが今後の大きな課題である。

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6件)

① M. Matsumoto, "Fiber-based all-optical signal regeneration"(invited), IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 査読有, Vol. 17, 2011, in press.

② N. S. Mohd Shah and M. Matsumoto, “Analysis and experiment of all-optical time-interleaved multi-channel regeneration based on higher-order four-wave mixing in a fiber”, Optics Communications, 査読有, 2011, in press.

③ N. S. Mohd Shah, A. Furutani, D. Yang, and M. Matsumoto, “Amplitude-noise reduction of time-interleave-multiplexed OOK and DPSK signals based on four-wave mixing in fiber”, Jurnal Teknologi, 査読有, 2011, in press.

④ N. S. Mohd Shah and M. Matsumoto, “2R regeneration of time-interleaved multi-wavelength signals based on higher-order four-wave mixing in a fiber”, IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, Vol. 22, 2010, pp. 27-29.

⑤ M. Matsumoto, “All-optical signal regeneration using fiber nonlinearity”, European Physical Journal, Special Topics, 査読有, Vol. 173, 2009, pp. 297-312.

⑥ M. Matsumoto, “Phase-noise reduction in an amplitude limiter using saturation of a fiber-optic parametric amplifier”, Optics Letters, 査読有, Vol. 33, 2008, pp. 1638-1340.

[学会発表] (計 1 1 件)

① M. Matsumoto, “Optical parametric regeneration for phase-modulated signals” (invited), Conference on Lasers and ElectroOptics (CLEO2011), May 4, 2011, Baltimore.

② N. S. Mohd Shah, D. Yang, and M. Matsumoto, “Amplitude limiting of time-interleave-multiplexed OOK and DPSK signals based on four-wave mixing in a fiber”, Photonics Global Conference 2010, Dec. 15, 2010, Singapore.

③ M. Matsumoto, “Regeneration of phase encoded signals: Different schemes and future issues” (invited), Workshop on All-Optical Processing of Advanced Modulation Format Signals, 36th European Conference on Optical Communication (ECOC2010), Sep. 19, 2010, Torino.

④ M. Matsumoto, “All-optical regeneration of phase-encoded signals in transmission systems” (invited), IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting on Nonlinear Fiber Optics, July 21, 2010, Riviera Maya.

⑤ M. Matsumoto, “Interpulse gain modulation in a high-speed all-optical amplitude limiter using saturation of parametric amplification in fiber”, The 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2010), July 8, 2010, Sapporo.

⑥ N. S. Mohd Shah and M. Matsumoto,

“Multi-channel all-optical regeneration based on time-interleaving and higher-order four-wave mixing in fiber”, 電子情報通信学会 2010 年総合大会, 2010 年 3 月 16 日, 東北大学.

⑦ S. Tanabe and M. Matsumoto, “Amplitude limiting of time-interleaved multi-wavelength optical signals using saturation of four-wave mixing in a fiber”, European Conference on Optical Communication (ECOC2009), Sep. 24, 2009, Vienna.

⑧ N. S. Mohd Shah and M. Matsumoto, “All-optical regeneration of time-interleaved multi-wavelength signals based on higher-order four-wave mixing”, 2009 IEEE/LEOS Summer Topical Meeting on Signal Processing in Optical Communications, July 21, 2009, Newport Beach.

⑨ M. Matsumoto, “Multi-wavelength all-optical signal reshaping in a nonlinear fiber using time interleaving”, 11th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT2008), Nov. 12, 2008, Hangzhou.

⑩ 佐藤大, 松本正行, “ファイバ中の四光波混合を用いた全光振幅リミタのポンプ光電力最適化”, 電子情報通信学会 2008 年ソサイエティ大会, 2008 年 9 月 19 日, 明治大学.

⑪ 紙尾哲司, 佐藤大, 松本正行, “全光振幅リミタを用いた DQPSK 信号伝送特性の改善”, 電子情報通信学会光通信システム研究会, 2008 年 7 月 17 日, 山梨大学.

[図書] (計 1 件)

① M. Matsumoto (分担執筆), Springer Verlag, Optical regenerators for novel modulation schemes in Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications, S. Kumar Ed., 2011, pp. 415-450.

[その他]

<http://www1b.comm.eng.osaka-u.ac.jp/com02adm/project-matsumoto.htm>

に学会発表スライドなどを掲載

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 正行 (MATSUMOTO MASAYUKI)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10181786

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし