

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12612
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2012～2014
課題番号：24360148
研究課題名(和文)多フォーマット光通信ネットワークのためのフォーマットフリー光信号処理機能の研究

研究課題名(英文)Studies on format-free optical signal processings for multi-format optical communication networks

研究代表者
來住 直人(Kishi, Naoto)
電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：10195224
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：光通信ネットワークの信号の伝送経路中途に存在し、信号の形式変換や歪みを補正を行うノード機能は、同一の変調方式の信号を前提としていたが、複数の異なる変調方式の信号が混在して伝送される可能性に対応するため、変調方式に依存せず動作することが望ましい。本研究においてはそのようなノード機能の実現と評価を目的としている。

位相変調信号に対する波形変換機能や、複数の変調方式が混在する場合の信号の波長変換や信号波形歪み補正を可能とする機能、光信号波形を変調方式や光の偏波状態に無関係に変換可能な機能、複数の光波長からなる光波長分割多重信号を単一の光時分割多重信号に変換する機能の実現などの成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In optical communication networks, optical node functions are very important which convert the signal wavelength and waveform and/or compensate signal distortions. So far, such optical node functions have assumed the same signal format. On the other hand, there are many signal formats according to the properties of the signal sources and destinations. In this study, optical node functions which allow multiple signal formats were investigated. The research results include realization of (1) wavelength/waveform conversion and waveform reshaping function applicable to various signal modulation formats, (2) polarization- and signal format-independent waveform conversion function, and (3) OTDM(optical time-division multiplexing) to WDM(wavelength-division multiplexing) conversion function.

研究分野：工学

キーワード：光ノード 光波長変換 光波形変換 光偏波特性 信号波形再生

1. 研究開始当初の背景

将来の光通信システム/光ネットワークに存在する光ノードにおいては、光信号に対する信号処理を電気信号への変換を介さずに行う「光信号処理」を行うことで、電気処理に比較してより広帯域で省電力のシステムを構築することが考えられている。また、1本の光ファイバに複数波長信号を伝送することで伝送帯域を拡大する波長多重方式が採用されているため、光ノードの機能は複数信号を同時に処理する能力が欠かせない。さらに、送信者によって異なる変調フォーマットを採用している可能性があるため、光信号処理機能は、信号の波長や変調フォーマットに依存せずに動作する必要がある。

そこで、変調フォーマットが異なる複数波長の光信号を一括して処理する機能の着想に至り、本計画の提案に結実した。

2. 研究の目的

本研究課題においては前記の背景に基づいて、光信号の変調フォーマットに依存せず動作し、複数波長信号を一括処理する機能の構築に有用な、いくつかの光信号処理方式の提案と実現・それらの特性の評価を行うことを目的とする。なお、以下において(0)は準備的な実験であり、主要な課題は(1)~(3)となる。

(0) DPSK 変調方式の評価系の構築と動作確認

対象とする変調方式のひとつである differential phase-shift keying(DPSK)方式の評価系を構築し、系の動作確認を行う。

(1) NRZ から RZ 変調方式へのパルス幅可変フォーマット変換

non return-to-zero(NRZ)変調方式の信号をreturn-to-zero(RZ)変調方式の信号に変換する手法を半導体光増幅器を用いた光回路もしくは高非線形光ファイバによって構築し、そのパルス幅可変変換特性を評価する。

(2) 光波長多重信号と光時分割多重信号間の多重方式相互変換

光波長多重信号と光時分割多重信号間で多重方式を変換する手法を光ファイバの非線形効果の組み合わせによって構築し、その変換特性を評価する。

(3) 強度変調と位相変調を混合した光波長多重信号の一括処理

半導体光増幅器もしくは高非線形光ファイバを用いた光回路を用いて、強度変調信号と位相変調信号が混在した多波長信号のパルス幅を一括して変換する機能や、それらの伝送に伴う信号品質劣化を補正する機能を構築し、それらの特性を評価する。

3. 研究の方法

前記の目的の達成のための方法を項目別に以下に示す。

(0) DPSK 変調方式の評価系の構築と動作確認

既存の強度変調信号に加えて、differential phase-shift keying(DPSK)変調信号の発生・伝送・検出・評価を行うための実験系を構築し、動作確認を行う。

(1) NRZ から RZ 変調方式へのパルス幅可変フォーマット変換

半導体光増幅器を用いた光回路を構成し、これに変換対象のRZ信号及び波形変換のための光クロック信号を加えることで、光信号のパルス幅を可変する機能を実現する。この機能の特性は、(1)で構築したDPSK実験系を併用し、変換後の光信号の波形や波長・偏波状態の観測および信号の符号誤り率特性などの手段により評価する。

(2) 光波長多重信号と光時分割多重信号間の多重方式相互変換

多波長光信号源によって光波長多重信号を生成し、これに高非線形光ファイバによるいくつかの信号処理を適用することで、信号源と同一の情報を有する光時分割多重信号に変換する。逆に、単一波長の光時分割多重信号と光クロック信号に高非線形光ファイバ信号処理を適用することで、信号源と同一の情報を有する光波長多重信号に変換する。この機能の特性は、変換後の光信号の波形や波長観測および信号の符号誤り率特性などの手段により評価する。(1)で構築したDPSK実験系については、光波長多重信号から光時分割多重信号への変換に適用する。

(3) 強度変調と位相変調を混合した光波長多重信号の一括処理

複数波長の光信号源を用いて、強度変調信号と位相変調信号が混在した光波長多重信号を生成し、半導体光増幅器を用いた光回路によって、NRZ変調入力信号をRZ変調出力信

号に一括して変換することを試みる。さらに、この光波長多重信号を光ファイバ伝送した際の信号品質劣化を、量子ドット半導体光増幅器を用いた位相共役波発生器によって再生することを試みる。これらの機能の特性は、変換後の光信号の波形や波長観測および信号の符号誤り率特性などの手段により評価する。

4. 研究成果

(0) DPSK 変調方式の評価系の構築と動作確認

DPSK 信号の評価系の動作確認を行い、既存の発生・伝送・検出・評価を行うための実験系を構築し、動作確認を行った。その結果、既存の強度変調信号の評価系と同様に、DPSK 信号の評価も良好に出来ることを確認した。

(1) NRZ から RZ 変調方式へのパルス幅可変フォーマット変換

入力信号としてビットレート 10 Gb/s の NRZ 強度変調信号を用い、半導体光増幅器を用いた光回路と、高非線形光ファイバ中のラマン散乱によるパルス圧縮機能を組み合わせることで、入力信号の偏波状態に無依存のパルス幅可変 NRZ-RZ 変換機能を実現した。変換後のパルス幅可変範囲 10 ps ~ 2 ps で、信号品質劣化の極めて小さい変換特性が達成できた。

上述の機能は信号周波数の変化を伴うため、再び元の波長に変換する必要が生じてしまう。そこで、そのような波長変換を不要とするパルス幅可変 NRZ-RZ 変換機能を位相変調信号 (DPSK 信号) に対して実現した。半導体光増幅器を用いた光回路における時間遅延の可変により、変換後の光信号パルス幅を 16 ps ~ 30 ps の範囲で可変することが可能となり、信号波長の変化を伴わない変換特性を実現した。

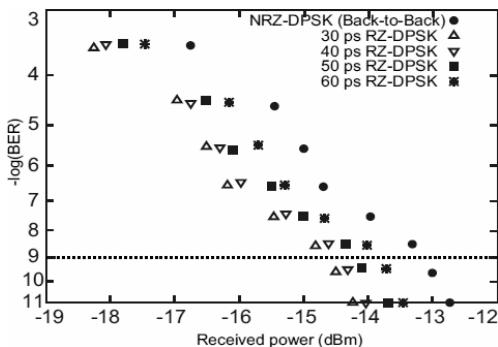


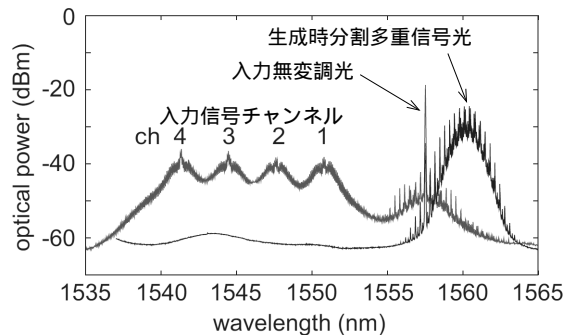
図 1 NRZ-DPSK から RZ-DPSK 信号への変換の符号誤り率特性

図 1 に、変換前 (NRZ-DPSk) と変換後 (RZ-DPSK) の信号の符号誤り率 (BER:bit error rate)

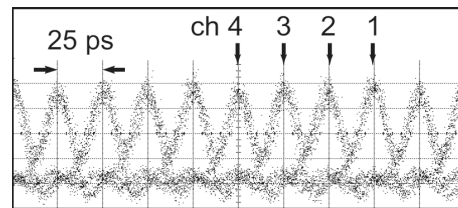
特性を示す。変換後のパルス幅に関わらず良好な変換特性が得られており、変調フォーマットに依存しない動作が確認された。

(2) 光波長多重信号と光時分割多重信号間の多重方式相互変換

光波長多重信号を光時分割多重信号に変換する手法を二種類考案した。第一の手法としては、多波長パルス光源と光ファイバ中のラマン散乱を利用したパルス圧縮、光ファイバ中の相互位相変調効果を組み合わせることでこの機能を実現した。ビットレート 10 Gb/s、波長間隔 3.2 nm の 1550 nm 帯の 4 波長信号を単一の 40 Gb/s の光時分割多重信号に、信号の品質を維持した状態で変換することに成功した。図 2(a) に、4 チャンネルの波長多重信号と相互位相変調を起すための無変調光、生成された光時分割多重信号のスペクトルを示し、図 2(b) には光時分割多重信号の時間波形を示す。



(a) 各信号のスペクトル分布



(b) 時分割信号の波形

図 2 光波長多重から光時分割多重への変換

第二の手法としては、光波長多重信号のスペクトルを高強度化して高非線形光ファイバに入力することで生成されるスーパーコンティニューム光のスペクトル広がりを利用することでこの機能を実現した。これによって波長間隔 1.6 nm の 1550 nm 帯の 4 波長信号を、第一の手法同様に単一の 40 Gb/s の光時分割多重信号に、信号の品質を維持した状態で変換することに成功した。以上は強度変調信号を対象としているが、この手法を位相変調信号からなる光波長多重信号の光時分割多重信号への

変換に試みた。その結果、波長間隔 1.6 nm 及び 3.2 nm のビットレート 10 Gb/s の二波長からなる DPSK 信号を、単一波長のビットレート 20 Gb/s の光時分割多重信号への高品質変換に成功し、強度変調信号に加え、位相変調信号の多重化変換に対しても本手法が有効であることを示した。

上記とは逆の、光時分割多重信号を光波長多重信号に変換する手法についても検討した。これは高非線形光ファイバにおいて生じる、光時分割多重信号と多重分離用クロック間の相互位相変調を利用することによって実現することが出来た。波長 1550 nm 帯のビットレート 20 Gb/s の強度変調光時分割多重信号と繰り返し周期 10 Gb/s のクロック信号間の相互位相変調により、光時分割多重信号を波長間隔 1.6 nm の二つのビットレート 10 Gb/s の光波長多重信号に高品質で変換出来ることを実証した。

(3) 強度変調と位相変調を混合した光波長多重信号の一括処理

まずは、ノード機能のひとつである光波形変換について取り上げ、強度変調信号と位相変調信号が混在した波長多重信号を一括して波形変換する機能の検証を行った。波長 1550 nm 帯のビットレート 10 Gb/s のひとつの NRZ 強度変調信号と二つの NRZ-DPSK(位相変調) 信号からなる波長間隔 2.4 nm の光波長多重信号を、半導体光増幅器の相互位相変調によって波形変換し、RZ 信号に一括して変換することを試みた。ここで、相互位相変調は波長 1550 nm 帯の別のクロック信号を入力信号と共に半導体光増幅器に入力することで発生させた。

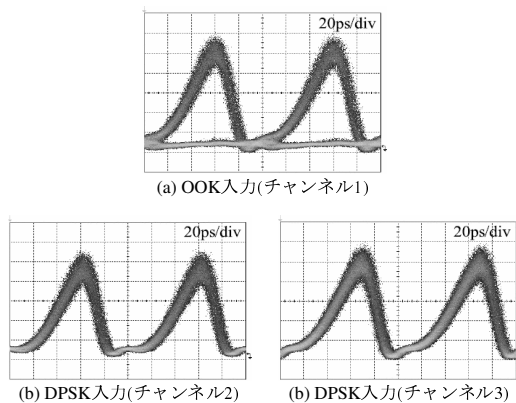


図3 混合フォーマット波形変換の出力波形

図3に示すように、波形変換後の三波長の信号のパルス幅はおよそ 24 ps ~ 25 ps となり、

変調フォーマットに依存しない高品質な波形変換が可能となることを明らかにした。

さらに、量子ドット半導体光増幅器における四光波混合を利用して実現される位相共役波発生器を用いて、強度変調信号と位相変調信号が混在した波長多重信号が伝送過程で受ける信号歪みを一括して補正する機能の検証を行った。波長 1550 nm 帯のビットレート 10 Gb/s の NRZ 強度変調信号と NRZ-DPSK(位相変調) 信号からなる波長間隔 0.8 nm の計三波長からなる光波長多重信号を、距離 100 km の汎用単一モード光ファイバ伝送路で伝送し、その中間地点に位相共役波発生器において信号波形歪みの補正を試みた。その結果、変調信号形式の組合せにかかわらず、全ての波長において信号の歪み補正が可能であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者及び研究分担者、連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件:全て査読あり)

- [1] Q.N.The, M.Matsuura, and N.Kishi, “WDM-to-OTDM conversion using supercontinuum generation in a highly nonlinear fiber”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.26, pp.1882-1885 (2014), DOI: 10.1109/LPT.2014.2339932.
- [2] G.M.Sharif, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “All-optical wavelength-shift-free NRZ-DPSK to RZ-DPSK format conversion with pulsewidth tunability by an SOA-based switch”, *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.E97-C pp.755-761 (2014), DOI: 10.1587/transle.E97.C.755.
- [3] Md.N.S.Bhuiyan, M.Matsuura, H.N.Tan, and N. Kishi, “Use of state of polarization transparent scheme for polarization shift keying signal as optical phase conjugator to improve the transmission performance”, *Optical Review*, Vol.21, pp.48-53 (2014).
- [4] G.M.Sharif, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “All optical polarization-insensitive non-return-to-zero-to-pulsewidth tunable return-to-zero conversion”, *Optical Review*, Vol.20, pp.266-270 (2013).

- [5] M.Matsuura and N.Kishi, “Multichannel transmission of intensity- and phase-modulated signals by optical phase conjugation using a quantum-dot semiconductor optical amplifier”, *Optics Letters*, Vol.38, pp.1700-1702 (2013), DOI: 10.1364/OL.38.001700.
- [6] Q.N.The, H.N.Tan, M.Matsuura, and N.Kishi, “All-optical WDM-to-OTDM conversion using a multi-wavelength picosecond pulse generation in Raman compression”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.24, pp.2235-2238 (2012), DOI:10.1109/LPT.2012.2224856.
- [7] H.N.Tan, M.Matsuura, and N.Kishi, “Parallel WDM signal processing in mixed NRZ and RZ transmission networks using a single optical gate with multiple switching windows”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.18m pp.926-934 (2012), DOI:10.1109/JSTQE.2011.2151832

[学会発表]

(計 19 件:文献 [1]-[8], [14]-[16], [19] は査読あり)

- [1] I.Ismail, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “Multichannel-mixed OOK and DPSK format transmission performance between midspan TDCM and OPC system”, *Asia Communications and Photonics Conference (ACP2014)*, ATh3A.137, Shanghai, China (2014 年 11 月 13 日).
- [2] Q.N.Q.Nhu, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “Parametric NRZ-to-RZ wavelength multicasting with pulsewidth tunability using Raman amplification multi-wavelength pulse compressor”, *2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics / The 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (MWP/APMP2014)*, TuEG-10, Sapporo, Japan (2014 年 10 月 21 日).
- [3] H.Sakamoto, Q.N.The, G.M.Sharif, and N. Kishi, “All-Optical NRZ to RZ format

conversion with pulse compression by using only one highly nonlinear fiber”, *Optoelectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology (OECC/ACOFT 2014)*, WEPS2-54, Melbourne, Australia (2014 年 7 月 9 日).

- [4] I.Ismail, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “6-Fold wavelength multicasting using tunable-width picosecond pulse source from Raman adiabatic-soliton compressor”, *Optoelectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology (OECC/ACOFT 2014)*, WE7F-2, Melbourne, Australia (2014 年 7 月 9 日).
- [5] G.M.Sharif, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “Wavelength conversion of RZ-DPSK signal with pulsewidth tunability using four wave mixing and Raman amplifier based pulse compressor”, *Optoelectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology (OECC/ACOFT 2014)*, WE7F-1, Melbourne, Australia (2014 年 7 月 9 日).
- [6] I.Ismail, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “Multichannel tunable pulsewidth NRZ-to-RZ conversion of intensity- and phase-modulated signals using raman adiabatic-soliton compressor”, *Optoelectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology (OECC/ACOFT 2014)*, WE7B-4, Melbourne, Australia (2014 年 7 月 9 日).
- [7] Q.N.The, Q.N.Q.Nhu, N. Kishi, and M.Matsuura, “All-optical OTDM-to-WDM conversion based on cross phase modulation in highly nonlinear fiber”, *Optoelectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology (OECC/ACOFT 2014)*, TUPS1-18, Melbourne, Australia (2014 年 7 月 8 日).
- [8] Q.N.Q.Nhu, Q.N.The, H.N.Tan, M.Matsuura, and N. Kishi, “All-optical waveform sampling using Raman amplification multiwavelength pulse compressor”,

Optoelectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology (OECC/ACOFT 2014), TUPS1-17, Melbourne, Australia (2014年7月8日).

- [9] I.Ismail, Q.N.The, M.Matsuura, G.M.Sharif, and N. Kishi, “Novel picosecond width-tuning NRZ-DPSK-to-RZ-DPSK conversion using a Raman amplification compressor and HNLF-based switch”, 2014年電子情報通信学会総合大会, B-10-65, 新潟大学(新潟市)(2014年3月20日).
- [10] Q.N.Q.Nhu, Q.N.The, N.T.Hung, M.Matsuura, and N. Kishi, “All-optical 4×10 Gb/s ultra-short pulsewidth NRZ-to-RZ format conversion and wavelength multicasting using Raman amplifier multi-wavelength pulse compressor”, 2014年電子情報通信学会総合大会, B-10-64, 新潟大学(新潟市)(2014年3月20日).
- [11] 鈴木亮太, ゲン テ クワン, 來住直人, “スーパーコンティニューム光を用いた DPSK 信号の WDM-to-OTDM 変換”, 2014年電子情報通信学会総合大会, B-13-17, 新潟大学(新潟市)(2014年3月19日).
- [12] 土居祐太, 來住直人, “半導体光増幅器の光波形変換において制御光に RZ-DPSK を用いた場合の特性検証”, 2014年電子情報通信学会総合大会, B-10-27, 新潟大学(新潟市)(2014年3月18日).
- [13] 土居祐太, 松浦基晴, 來住直人, “半導体光増幅器の光波形変換において制御光に RZ-DPSK を用いた場合の特性検証” 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2013-24, エルトピア奈良(奈良市)(2013年10月24日).
- [14] Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “All-optical WDM-to-OTDM conversion based on supercontinuum generation in a highly nonlinear Fiber”, *10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and the 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR&OECC/PS 2013)*, MO1-5, Kyoto, Japan (2013年7月1日).
- [15] G.M.Sharif, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “NRZ-DPSK to RZ-DPSK format conversion with wavelength shift free and pulsewidth tunable operations”, *10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and the 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR&OECC/PS 2013)*, MO1-3, Kyoto, Japan (2013年7月1日).
- [16] M.Matsuura and N. Kishi, “Simultaneous multichannel transmission of intensity- and phase-modulated signals based on optical phase conjugation using quantum-dot SOA”, *Optical Fiber Communication Conference(OFC2013)*, OTh1C.7, Anaheim, California, USA (2013年3月21日).
- [17] G.M.Sharif, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “Pulsewidth tunable and polarization-insensitive NRZ-to-RZ conversion by using fiber nonlinearity based circuits”, 電子情報通信学会技術研究報告, OCS2012-42, ホテルメリージュ(宮崎市)(2012年10月25日).
- [18] 井上翔太, 松浦基晴, 來住直人, “半導体光増幅器と光ファイバ中の自己位相変調を用いた光信号波形変換” 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-57, 富山大学(富山市)(2012年9月12日).
- [19] G.M.Sharif, Q.N.The, M.Matsuura, and N. Kishi, “Polarization-insensitive NRZ-to-RZ conversion with pulsewidth tunability”, *17th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2012)*, 6F1-2, Busan, Korea (2012年7月2日).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

來住 直人 (Kishi Naoto)

電気通信大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号: 10195224

(2) 連携研究者

松浦 基晴 (Matsuura Motoharu)

電気通信大学・情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 40456281