

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06056

研究課題名(和文) 混合フォーマット光通信システムにおける複数フォーマット一括再生機能の研究

研究課題名(英文) Studies for regenerative conversion functions for several format signals in mixed-format optical communication systems

研究代表者

來住 直人 (Kishi, Naoto)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：10195224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本計画においては、異なる変調フォーマットの信号が混在する光ファイバ通信システムにおいて動作する、光信号波形再生機能を始めとする光信号処理機能の実現が主題である。対象とした信号処理機能は、可変パルス幅機能を有する波形再生パルス幅変換、単一波長信号を多波長信号に分配する波長マルチキャスト、波長信号を時分割信号に変換する多重方式変換、光信号歪みの補正機能を有する光信号の遅延を制御する光可変遅延線等で、これらの機能を、強度変調に加えて位相変調信号に対して適用し、特性の検証と評価を行った。その結果、これらの機能の多くが、変調信号の種類に依存せず良好に動作することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)： There are different signal formats in optical fiber communication networks. In such networks, processing function in network node should work independently from the signal formats, such as intensity- and phase-modulations.

In this project, regenerative optical signal processing functions, such as pulsewidth tunable regenerative pulsewidth conversion, optical multicasting function to distribute a single-channel signal to multiple-wavelength channels, conversion of a wavelength-division multiplexing signal to a optical time-division multiplexing signal, and distortion-compensating variable optical delay line to change the timing of the signal, are studied. These processing functions are investigated for phase-modulated signal as well as conventional intensity-modulated signals. The results of the study suggest that most of these functions are applicable independent from the signal formats.

研究分野：光ファイバ光学

キーワード：光通信システム 光ノード機能 光信号処理 光信号再生 多重方式変換 光信号可変遅延 光波形変換

1. 研究開始当初の背景

近年の光通信システムには強度変調に加えて位相変調形式の信号の導入が進んでいる。一方、将来の光ネットワークのノードにおいては、省電力で大容量の信号処理を行うために、電気信号への変換を行わずに動作する「光信号処理」の導入が有望視されている。したがって、それらの処理機能は信号の変調方式に依存せず動作する事が要請されている。さらに、それらのノード機能が劣化した信号に対しても有効となるために、信号波形の歪みを補正する機能も必要となる。

そこで、変調フォーマットに依存せずに、光信号処理を行い、信号の劣化を補正する事が可能なノード機能の着想に至り、本計画の提案に結実した。

2. 研究の目的

上記の背景に基づき、光信号の変調フォーマットに依存せずに動作する光ノードの実現のための、光信号波形再生機能を始めとする光信号処理機能の提案と特性の評価を行うことを本研究計画の目的とする。以下に、本計画の主要な研究課題を示す。

(1) 単一チャンネル光信号の複数波長へマルチキャスト

強度変調もしくは位相変調信号の単一波長の信号を複数波長チャンネルへ分配する手法を光ファイバの非線形効果を用いて実現し、信号品質や信号波形再生機能を評価する。

(2) 光波長多重信号から光時分割多重信号間への多重方式変換

光波長多重信号から光時分割多重信号に多重方式を変換する手法を強度変調信号と位相変調信号に適用するために、光ファイバの非線形効果を用いる手法を検討し、その変換特性を評価する。

(3) 波長変換と光フーリエ変換を用いた歪み補償光可変遅延線

光波長変換と光フーリエ変換を組合せて実現される光可変遅延線は信号の歪み補償機能を有している。本計画では、可変遅延線を強度変調信号に加えて波長多重位相変調信号に対して適用を試み、遅延特性と信号品質を評価する。

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。

(1) 単一チャンネル光信号の複数波長へマルチキャスト

光ファイバ中ラマン散乱と光ファイバの四光波混合による波形変換機能の組み合わせにより、非零復帰 (NRZ) 強度変調信号を、零復帰 (RZ) 信号に変換して複数波長へマルチキャストする機能と、信号光と二波長クロック光に光ファイバの四光波混合を用いるマルチキャスト機能を実現する。これらの機能の特性は、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) 光波長多重信号から光時分割多重信号間への多重方式変換

RZ 位相変調信号を光時分割 (OTDM) 信号に変換するために必要な光信号パルス幅圧縮機能を光ファイバ中のラマン散乱により実現し、さらに、光ファイバの非線形現象によるスペクトル広がりを利用した波長多重信号から時分割多重信号への多重方式変換を、劣化した強度変調信号と位相変調信号に対して適用する。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。

(3) 波長変換と光フーリエ変換を用いた歪み補償光可変遅延線

信号の時間タイミングを低歪みで可変調整するための光フーリエ変換を利用した光ファイバ遅延線を構成する際には位相変調器が必要となるが、この機能を光ファイバの相互位相変調により実現し、単一の強度変調信号と位相変調信号に加え、複数波長の強度変調信号と位相変調信号に対して適用する。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

(1) 単一チャンネル光信号の複数波長へマルチキャスト

光ファイバ中のラマン散乱による光パルス圧縮機能と光ファイバの四光波混合による波

形変換機能の組合わせにより、ビットレート 10 Gb/s の非零復帰 (NRZ) 強度変調信号から、信号のパルス幅を 12.17 ps から 4.68 ps の間で可変して周波数間隔 400 GHz の 4 波長信号にマルチキャストを行う機能を実現し、信号品質を向上させる波形再生を併せ持つ波長マルチキャストを実証した。次に、前記と同様な光パルス圧縮機能と波形変換機能の組合わせにより、零復帰 (RZ) 強度変調信号を周波数間隔 400 GHz の 6 波長信号へ波形変換を行いマルチキャストを行う機能を構成し、ビットレート 10 Gb/s の RZ 強度変調信号入力に対して、変換後のパルス幅を 8.42 ps から 2.67 ps の間で可変出来るパルス幅可変波長マルチキャストを実現した。

上記に加えて、ビットレート 10 Gb/s の非零復帰強度変調 (NRZ-OOK) 信号もしくは非零復帰差動位相偏移変調 (NRZ-DPSK) の入力信号と二波長の零復帰 (RZ) クロック信号を用いることで、NRZ 信号から RZ 信号への波形変換と、より多数のチャンネルへの波長マルチキャストを試みた。強度変調信号に対しては 19 波長、位相変調信号に対しては 10 波長への波長マルチキャストを、高い信号品質で実現することが出来た。これらの波長数は、先行研究のそれぞれ 6 波長、3 波長を大きく上回っている。図 1 に位相変調信号に対する波長マルチキャスト信号のスペクトルを示す。入力信号 (ch5) を含めて 10 波長の信号が得られている。

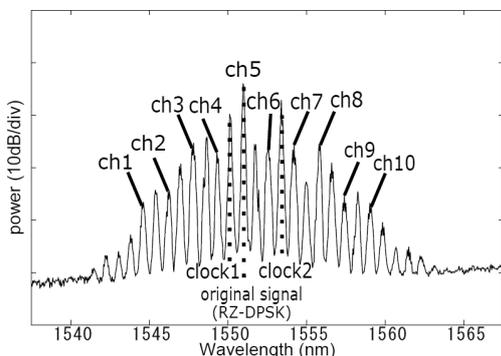


図 1 位相変調信号に対する波長マルチキャスト出力のスペクトル

(2) 光波長多重信号から光時分割多重信号間の多重方式変換

光ファイバの非線形現象により発生する広帯域パルス光のスーパーコンティニウム光を用いた、波長多重信号から時分割多重信号への強度変調方式に対する多重方式変換を、光

ファイバ伝送により信号品質が劣化した波長多重信号に対して適用を試みた。ビットレート 10 Gb/s の二波長強度変調信号を長さ 10 km 以上の汎用単一モードファイバ伝送後に変換したところ、片方のチャンネルに関しては信号品質が大幅に劣化していることが判明した。同じ多重方式変換方式を、二波長の位相変調信号に対して適用したところ、強度変調信号に対する多重方式変換と比較して信号品質の大きな劣化が見られた。図 2 に、入力信号と変換後の信号の符号誤り率 (BER) 特性を示す。これは、スーパーコンティニウム光生成過程で加わる位相雑音が位相変調信号の品質を劣化させるためであり、変調方式に依存する雑音特性を有することが判明した。

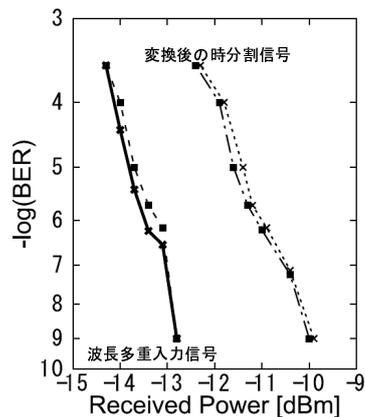


図 2 二波長位相変調信号を多重方式した際の信号の符号誤り率特性

光ファイバのもうひとつの非線形現象である四光波混合を用いた波長多重信号から時分割多重信号へ変換する手法も試みた。入力には二波長の信号とし、合わせて二波長のクロック信号を高非線形ファイバに入力することで、信号光を同一の波長に変換することにより時分割多重信号を生成した。この手法においては、強度変調信号に対して良好な多重方式変換が可能であることがわかった。位相変調信号に対する本手法の適用は今後の課題となる。

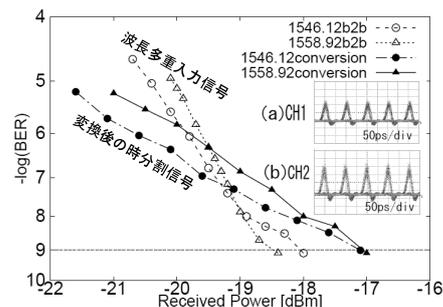
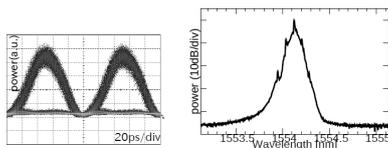


図 3 四光波混合による多重方式変換の際の信号の符号誤り率特性

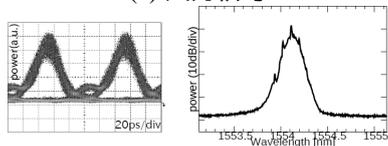
図3に、本手法による多重方式変換前後の信号の各チャンネルの符号誤り率(BER)特性を示す。符号誤り率 = 10^{-9} において変換後の信号の品質劣化が1 dB以下の小さな値となっている。

(3) 波長変換と光フーリエ変換を用いた歪み補償光可変遅延線

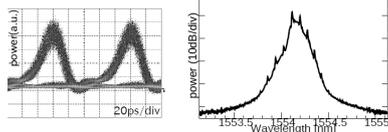
光可変遅延線において用いられる光フーリエ変換は、位相変調器と適切な波長分散の値を持つ光ファイバで実現される。従来のような市販の位相変調器を用いる代わりに、光パルスと信号が非線形ファイバを伝搬する際に生じる相互位相変調を用いることで、信号に対する位相変調を行う手法を試みた。



(a) 入力信号



(b) 22 km 汎用単一モードファイバ伝送後



(c) 22 km 光フーリエ変換器透過後

図4 光フーリエ変換に関する光信号の波形とスペクトル

図4に、入力と、汎用単一モードファイバ伝送後、光フーリエ変換器透過後の強度変調光信号波形とスペクトルを示す。汎用単一モードファイバ伝送においては光信号波形に歪みが見られるが、これを光フーリエ変換器で置換えることにより、波形歪みが補償され、代わりにスペクトルに歪みが転嫁されていることがわかる。

ビットレート 10 Gb/s の強度変調もしくは位相変調形式の光信号に対して、波長変換を組合せたフーリエ変換を行うことで信号の時間遅延の可変を試み、波長変換の際の波長を 20 nm 可変することによって、時間遅延量を最大 3 ns まで可変出来ることを示した。さらに、ビットレート 10 Gb/s の差動位相偏移変調(RZ-DPSK)の三波長信号に対して可変遅延特

性を評価したところ、全チャンネルに対してパワーペナルティ 2 dB 以下の良好な変換特性を実現した。図5に、その中のひとつのチャンネルの符号誤り率(BER)特性を示している。×が入力信号、□が波長変換器の出力、○がフーリエ変換を行わない伝送のみ、△がフーリエ変換を行った信号に対応する。信号品質はフーリエ変換を行った後に改善されていることがわかる。

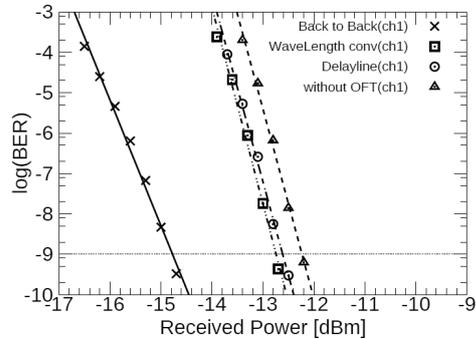


図5 歪み補償光可変遅延線を用いた信号の誤り率特性

図6は、波長可変量と時間遅延量の関係を示す。各チャンネルの遅延量の測定値が理論値と良い一致を示しており±2000 psの最大遅延量が得られた。

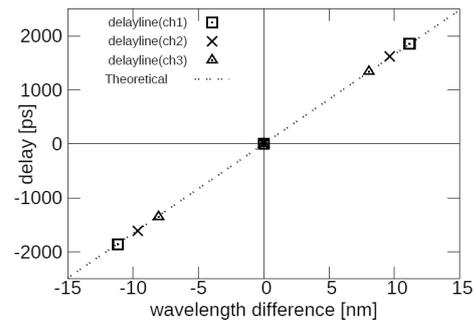


図6 遅延量と波長可変量の関係

(4) 成果のまとめ

本計画においては、変調方式に依存せず動作する光信号機能の実証が目的である。波長マルチキャスト及び歪み補償光可変遅延線については、強度変調と位相変調の二種の変調方式に対して、共に動作することが実証された。しかしながら、多重方式変換については、検討方式において位相雑音による信号品質の劣化が見られ、変調方式無依存動作や、品質が劣化した信号に対する変換が困難であることがわかった。位相変調方式や劣化した信号に対しても良好に動作する多重方式変換手法の追求が今後の課題となる。歪み

補償可変遅延線については、強度変調信号と位相変調信号に対して同等の遅延特性が得られ、変調方式無依存の動作が実証された。さらに、波長多重信号に対しても変調方式無依存の可変遅延が可能であることがわかった。

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 6 件:全て査読あり)

- [1] I.Ismail, N.Kishi, W.Z.W.Ismail, M.Sahrim, J.Jamaludin, S.R.Balakrishnan, and A.F.N.Rasedee, "DPSK OTDM demultiplexing using flexible pulse clock from Raman amplifier-Soliton compressor," *Advanced Science Letters*, Vol.24, pp.1676-1679 (2018), DOI: 10.1166/asl.2018.11135.
- [2] Q.N.Q.Nhu, H.N.Tan, Q.N.The, M.Matsuura, and N.Kishi, "Performance of an inline RZ-DPSK pulse compressor using Raman amplifier and its application to OTDM tributary," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.E99-C pp.227-234 (2016), DOI: 10.1587/transele.E99.C.227.
- [3] Q.N.Q.Nhu, Q.N.The, H.N.Tan, M.Matsuura, and N.Kishi, "Waveform conversion and wavelength multicasting with pulsewidth tunability using Raman amplification multiwavelength pulse compressor," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.E98-C, pp.824-831 (2015), DOI:10.1587/transele.E98.C.824.
- [4] I.Ismail, Q.N.The, M.Matsuura, and N.Kishi, "One to six wavelength multicasting of RZ-OOK based on picosecond-width-tunable pulse source with distributed Raman amplification," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.E98-C, pp.816-823 (2015), DOI:10.1587/transele.E98.C.816
- [5] G.M.Sharif, Q.N.The, M.Matsuura, and N.Kishi"All-optical pulsewidth tunable wavelength conversion of return-to-zero differential-phase-shift-keying signal," *Optical Review*, Vol.22, pp.553-559 (2015), DOI:10.1007/s10043-015-0094-5
- [6] I.Ismail, Q.N.The, M.Matsuura, G.M.Sharif, and N.Kishi"Wide range operation of an all-optical NRZ-DPSK-to-RZ-DPSK regenerative waveform-wavelength conversion with flexible width-tunability," *Optical Review*, Vol.22, pp.489-495 (2015), DOI:10.1007/s10043-015-0089-2.

[学会発表]

(計 9 件:文献 [8],[9] は査読あり)

- [1] 横田嶺, 高久優斗, 來住直人 "波長多重信号における光フーリエ変換を用いた歪補償可変遅延線," 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2017-73, 沖縄県立博物館 (沖縄市) (2018 年 2 月 15 日).
- [2] 松本浩希, 來住直人, "高次の四光波混合を用いた NRZ-to-RZ 変換及び波長マルチキャスト," 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2017-40, 高知県民文化センター (高知市) (2017 年 10 月 12 日).
- [3] 張インイ, 來住直人, "NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-OTDM 変換," 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2017-39, 高知県民文化センター (高知市) (2017 年 10 月 12 日).
- [4] 浅野航也, 來住直人, "劣化した信号に対する WDM to OTDM 変換の特性検証," 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2017-14, 島根大学 (島根市) (2017 年 5 月 25 日).
- [5] 小林竜也, 來住直人 "光ファイバの四光波混合を用いた DPSK 光信号の WDM-to-OTDM 変換," 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2017-11, 島根大学 (島根市) (2017 年 5 月 25 日).
- [6] 横田嶺, 高久優斗, 來住直人, "相互位相変調による光フーリエ変換を用いた歪補償可変遅延線," 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2016-34, 長崎商工会館 (長崎市) (2016 年 11 月 11 日).
- [7] 島崎興平, 來住直人, "ファラデー回転ミラーとマイケルソン干渉計を用いた DPSK 受信機の検討," 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2015-57, 沖縄大学 (沖縄市) (2016 年 2 月 18 日).
- [8] Q.N.Q.Nhu, Q.N.The, H.N.Tan, M.Matsuura, and N.Kishi, "Wavelength

multicasting of RZ-DPSK signal with tunable pulsewidth using Raman amplification pulse compressor,” *Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2015)*, 14-AM2-C-3, Kyoto, Japan (2015年10月14日).

- [9] I.Ismail, M.Matsuura, Q.N.The, and N.Kishi, “Raman amplifier-soliton compressor and its application to all-channel hybrid OTDM demultiplexing,” *OptoElectronics and Communication Conference (OECC2015)*, PWe.35, Shanghai, China (2015年7月1日).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

來住 直人 (Kishi, Naoto)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・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・大学院情報理工学研究科・准教授
研究者番号: 40456281

(3) 研究協力者

Quang Nguyen-The
Le Quy Don Technical University(ベトナム)
・講師
Irneza Ismail
Universiti Sains Islam Malaysia(マレーシア)
・講師
Nguyen Quang Nhu Quynh
Danan University of technology(ベトナム)
・講師

島崎 興平 (Shimazaki, Kouhei)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・大学院生
横田 嶺 (Yokota, Ryou)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・大学院生
小林 竜也 (Kobayshi, Tatsuya)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・大学院生
浅野 航也 (Asano, Kouya)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・大学院生
張 インイ (Zhang, Yingy)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・大学院生
松本浩希 (Matsumoto, Hiroki)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・大学院生