

令和元年6月24日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04001

研究課題名(和文)超高速・高密度光通信ネットワークのための光時間周波数領域直交多重・分離器

研究課題名(英文)Optical time-frequency multiplexer for high-speed and high-density optical communication networks

研究代表者

坂本 高秀 (Sakamoto, Takahide)

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室・主任研究員

研究者番号：70392727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：将来の高速光通信を実現するためには、複数の通信用光チャンネルを束ねる、光多重技術の適用が不可欠である。光多重を行うために、高精細光フィルタなどの、高度かつ複雑な光制御技術の開発が検討されてきた。本研究では、光時間周波数領域直交多重器を新たに提案し、その機能を実証した。高精細光フィルタなどの従来型の光回路を用いずに、毎秒160ギガビットの超高速光多重通信の実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、超高速光通信に必要な光多重を、従来に無いシンプルな方法で実現出来ることを示したものである。得られた成果は、著名論文誌、国際会議に投稿、採択され報告を行った。また、招待論文、招待講演を受けるなど、その意義は広く認知されている。本技術は、将来の光通信システムの中核を支える技術となる潜在性を持ち、インターネット性能向上への貢献も十分に期待できるため、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：For future ultrafast optical communication, we need to realize practical optical multiplexing techniques, where multiple optical channels are bundled and multiplexed in a fiber. In conventional approaches, high-resolution optical filters like arrayed waveguide gratings (AWGs) are typically used for the optical multiplexing. In this research, we proposed and demonstrated a novel optical multiplexer called optical time-frequency multiplexer. By using the technology, we have successfully demonstrated optical multiplexing and transmission at 160 Gb/s.

研究分野：光通信

キーワード：光デバイス 光回路 光多重

1. 研究開始当初の背景

超大容量光通信ネットワーク構築に、光多重技術は不可欠である。近年の波長分割多重 (WDM) 方式に代表されるように、光波長・周波数軸上の光多重に主眼が置かれ、研究開発が進められてきた。アレイ導波路回折格子 (AWG) 等の高解像度光フィルタ技術の成熟により、光周波数間隔 10-100GHz、数 100 チャンネル以上の光信号多重・分離が可能となった。

しかしながら、現状の WDM 方式では、限られた光周波数帯域をより効率良く利用するために、光多重密度をこれ以上に高めることは困難である。光多重・分離操作は光フィルタ技術に依存しており、光フィルタ透過帯域のスロープ領域を避けた光信号波長配置を行う必要が生じる。その帯域分、光信号多重密度が低下する。

この問題を克服し、光周波数利用効率を極限にまで高めるためには、新たな光多重技術の開発が欠かせない。光周波数直交分割多重 (OFDM) 方式は、高密度光多重の有力候補として注目を集めている。問題は、その光多重・分離操作に、高速離散フーリエ変換 (FFT) 回路を要する点にある。電氣的、光学的アプローチが検討されているが、前者では、FFT 実装のために超高速・大規模デジタル信号処理 (DSP) 回路が必須となる。光多重信号速度は、DSP 処理速度により制約を受け、数 10Gb/s 以上の高速動作は望めない。一方、光学的アプローチでは、全光 FFT 回路を用い、光 OFDM 多重・分離が行われる。高速光多重に対応できるが、光フィルタの高度集積が求められ、開発は容易でない。光多重操作が波長依存性を持ち、光信号の波長割り当てが波長グリッドに縛られてしまう。

2. 研究の目的

「超高速・高密度光通信ネットワークのための光時間周波数領域直交多重・分離器」を新たに提案・開発し、その機能を実証する。導波路型光変調器等の光電子デバイスを用い、複数の高速光チャンネルを光時間・周波数領域に直交投影する光時間周波数直交多重器、及びその逆過程を実現する光時間周波数直交分離器を実証する。非線形光学効果等の超高速全光信号処理に頼らずに、従来の電氣的信号処理速度・帯域の限界を超えた超高速・広帯域光多重を実現する。元来光多重・分離に不可欠であった光周波数分解用光フィルタや高速フーリエ変換回路に依存せず、超高密度光多重・分離を実現する。光波長、グリッドに縛られない柔軟な光多重・分離器を提供することにより、複雑化・大規模化する光通信ネットワーク形態刷新に貢献する。

3. 研究の方法

本研究では、新たな超広帯域・超高密度光信号多重・分離技術として、光時間周波数直交多重器・分離器を提案する。この技術では、複数の光信号チャンネルを、光領域において、既存の時間、波長枠にとらわれず、時間周波数空間に直交多重する。光 OFDM 同等もしくはそれ以上の超高密度光多重につなげる。

光時間周波数直交多重器は、光多重数に相当した、 n 個の光パスを持ち、各パスには、直列された 2 つの電気光学効果型光変調器を設ける。初段にはマハツェンダ光変調器構造を設け、独自に導いた所定の条件での大振幅駆動により、スペクトル平坦性の良い広帯域光コム信号を生成する。後段では、多並列型変調器により、光多値変調等のデータ変調を施す。他のパスでも同様の光変調を行い、出力は、 $n \times 1$ の光カプラで合波する。この構成により、 n 個の高速信号チャンネルが、光時間周波数領域に投影され、直交多重される。コム発生器用の駆動クロック信号に、所定の位相差 $\theta_n = 2\pi i/n$ 、(i はチャンネル番号) を与えると、各チャンネルは光時間周波数空間において互いに直交し、干渉しない。光フィルタや FFT 回路を用いずに、単一偏光あたり 1 Baud/Hz、あるいはそれ以上の超高密度光多重が実現される。光多重信号速度は電気帯域を遥かに超えることができ、数 100 Gb/s ~ Tb/s に達することも可能となる。

一方、この信号を各チャンネルに分離する光時間周波数直交多重信号においては、まず、 $1 \times n$ 光カプラにより、それぞれの受信チャンネルパスに入力する。各パスは、マハツェンダ変調器型光コム発生器と、光多周波ホモダイン検出器 (ミキサ) から成り、光多重器側と同条件で生成される局発光コムと光多周波ミキシングを行う。局発光コム及び受信信号の持つ多周波キャリアの振幅・位相成分が互いに等しい場合には、一つのチャンネルが選択的に検出される。直交した他のチャンネルは、検出されない。この選択受信操作を n 並列に行うことにより、全チャンネルの検出・分離が実現される。

本研究では、「インコヒーレント多重型」「コヒーレント多重型」の 2 つのタイプを想定し、「光時間周波数領域直交多重・分離器」の開発を行った。光信号の多重形態に応じて 2 タイプに分類でき、「インコヒーレント多重型」は、(1) 各チャンネル間のコヒーレンスを制御しない場合 (インコヒーレント多重型) と、(2) 制御する場合 (コヒーレント多重型) の二通りが想定でき、それぞれに対して検討を行った。研究開発開始時には、コヒーレント多重型の多重・分離器を実現するためには、光位相レベルまで管理された並列光集積が必要となることが予想された。研究開発を進める上で、前者のインコヒーレント多重型においても、チャンネル間光位相差を管理することにより、コヒーレント多重が行えることが判明した。具体的には、光受信機側でのデジタル

信号処理により、チャンネル間光位相差を全てのチャンネルに対し推定を行うことにより、チャンネル間光位相差を確定した。これにより、時間周波数多重信号の多重、分離をコヒーレントに実施できることが判明した。並列集積構成に依存する必要がなくなり、実践的に光多重、分離が行えることになる。この構成を用い、20 Gb/s の光 QPSK 信号を 8 多重し、計 160 Gb/s の光時間周波数多重、及び、この光時間周波数多重信号の多重分離実験を行い、本方式の原理実証を行った。

4. 研究成果

超高速・高密度光通信ネットワークのための光時間周波数領域直交多重・分離器」を新たに提案し、その機能を実証することを目的として研究開発を行ってきた。複数の高速光チャンネルを光時間-周波数領域に光多重する光時間周波数多重器、及び光多重分離を実現する光時間周波数多重分離器を製作、実証した。20 Gb/s の光 QPSK 信号を 8 多重し、計 160 Gb/s の光時間周波数多重、及び、この光時間周波数多重信号の多重分離に成功した。既存の波長多重方式とは異なり、光多重・多重分離操作に光フィルタは不要であることを確認した。また、周波数利用率も 1 [baud/Hz] に達し、超高密度光多重性能を示せた。著名国際会議、論文誌における招待講演・論文発表を受けるなど、その成果は注目を集めている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T. Sakamoto, and A. Chiba, “Multiple Frequency-Spaced Flat Optical Comb Generation Using Multiple-Parallel Phase Modulator,” *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 21, pp. 4462-4465, Nov. 2017. 査読有 DOI: 10.1364/OL.42.004462
- ② T. Sakamoto, G.W. Lu, and N. Yamamoto, “Loop-Assisted Coherent Matched Detector for Parallel Time-Frequency Sampling (invited paper),” *OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 807-814, Jan. 2017. 査読有 DOI: 10.1109/JLT.2016.2645224 355.
- ③ 坂本高秀, 千葉明人 “並列型光変調器による生成光コムスペクトルの自己インターリーピング”, 電子情報通信学会光ファイバ技術研究会 (OFT), OFT 信学技報, vol. 117, no. 237, OFT2017-38, pp. 1-5, 2017 年 10 月.

[学会発表] (計 11 件)

- ① T. Sakamoto, and A. Chiba, “Even/Odd Mode-Selective Double Frequency-Spaced Optical Comb Generation by Quad-Parallel Phase Modulator,” the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim)/ The 22th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2017), 3-4B-7, Singapore, July 2017. 査読有
- ② A. Chiba, N. Kobayashi, Y. Moteki, T. Sakamoto, K. Takada, “Generation of Wide Frequency-Spacing Optical Frequency Comb Composed of Odd/Even Multiple Harmonics,” the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim)/ The 22th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2017), P1-071, Singapore, July 2017. 査読有
- ③ T. Sakamoto, I. Morohashi, and N. Yamamoto, “Non-uniform Operation of Cascaded Mach-zehnder Modulator Based Flat Comb Generators for Higher Spectral Bandwidth and Resolution,” OSA Fourier Transform Spectroscopy (FTS2016), FTh3B.3, Leipzig, Germany, Nov. 2016. 査読有
- ④ T. Sakamoto, G.-W. Lu, and T. Kawanishi, “Experimental Demonstration of Fiber-Nonlinearity-Tolerant Conjugated-Paired Radio-on-Fiber System Employing Asymmetric Photonic Heterodyne Down-Converter,” the 2016 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2016), Long Beach, USA, TuM1.7, Nov. 2016. 査読有
- ⑤ T. Sakamoto, “Dispersion Compensation Scheme for Time-Frequency-Domain Multiplexed 4x/8x Ultra-Wideband Multi-Carrier Signals,” The 21th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2016), WA2-26, Niigata, Japan, June 2016. 査読有
- ⑥ T. Sakamoto, “Dual Coherent Sampling with Low-Speed Digital Signal Processing for Monitoring Carrier-Phase-Drifted Constellations,” Conference on Laser and Electro Optics (CLEO 2016), San Jose, USA, SM2F.2, June 2016. 査読有
- ⑦ T. Sakamoto, “Opto-Electronic Time-Frequency Domain Sampling for Ultra High-Bandwidth Multi-Carrier Signal Detection (invited),” the 2016 Optical Fiber

- Communication Conference (OFC2016), Th3H.4, Anaheim, USA, Mar. 2016. 招待講演
- ⑧ T. Sakamoto, and I. Morohashi, “Investigation on electro-optic optical comb generation with higher spectral resolution and bandwidth”, SPIE Photonics West, San Francisco, USA, 9742-18, Feb. 2016. 査読有
 - ⑨ T. Sakamoto, “Radio over fiber systems: state of the art and perspectives (workshop, invited)”, 41th European Conference on Optical Communication (ECOC2015), Workshop - Microwave Photonics, Valencia, Spain, Sep. 2015. 招待講演
 - ⑩ T. Sakamoto, “Impact of Tight Optical Filtering on Orthogonal Time-Frequency Domain Multiplexed Signals in Wavelength-Selective Switching Systems,” The Photonics in Switching (PS2015), Florence, Italy, SC2-1, Sep. 2015. 査読有
 - ⑪ 坂本高秀, “光時間周波数サンプリングによる超高速コヒーレント光信号計測(招待講演)”, 第56回光波センシング技術研究会講演会, LST56-7, 2015年12月.(招待講演)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計5件)

名称：空間整合受信
発明者：坂本 高秀, 梅沢 俊匡, 山本 直克
権利者：国立研究開発法人情報通信研究機構
種類：特許
番号：特願 2017-053742
出願年：2017年
国内外の別：国内

名称：高速フォトディテクターアレー
発明者：梅沢 俊匡, 坂本 高秀, 菅野 敦史, 山本 直克, 川西 哲也
権利者：国立研究開発法人情報通信研究機構
種類：特許
番号：特願 2017-053741
出願年：2017年
国内外の別：国内

名称：間隔制御型光コム
発明者：坂本 高秀, 山本 直克, 松本 敦
権利者：国立研究開発法人情報通信研究機構
種類：特許
番号：特願 2016-195251
出願年：2016年
国内外の別：国内

名称：コヒーレントサンプリング
発明者：坂本 高秀
権利者：国立研究開発法人情報通信研究機構
種類：特許
番号：特願 2016-109633
出願年：2016年
国内外の別：国内

名称：光信号処理装置および光信号処理方法
発明者：久利 敏明, 坂本 高秀
権利者：国立研究開発法人情報通信研究機構
種類：特許
番号：特願 2016-014631
出願年：2016年
国内外の別：国内

○取得状況(計1件)

名称：一括取得型光検出装置及び光検出方法
発明者：坂本 高秀
権利者：国立研究開発法人情報通信研究機構
種類：特許
番号：特許 2014-139223
取得年：2018
国内外の別：国内

〔その他〕
ホームページ等

researchmap
<https://researchmap.jp/tsakatsakatsaka/>

Google Scholar
https://scholar.google.co.jp/scholar?hl=en&q=takahide+sakamoto&as_sdt=0

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：梅沢 俊匡
ローマ字氏名：Toshimasa Umezawa
所属研究機関名：国立研究開発法人情報通信研究機構
部局名：ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室
職名：主任研究員
研究者番号（8桁）：20636047

研究分担者氏名：久利 敏明
ローマ字氏名：Toshiaki Kuri
所属研究機関名：国立研究開発法人情報通信研究機構
部局名：耐災害 ICT 研究センター応用領域研究室
職名：室長
研究者番号（8桁）：30359070

研究分担者氏名：呂 国偉
ローマ字氏名：Guo-Wei Lu
所属研究機関名：東海大学
部局名：創造科学技術研究機構
職名：准教授
研究者番号（8桁）：30599709

研究分担者氏名：川西 哲也
ローマ字氏名：Tetsuya Kawanishi
所属研究機関名：早稲田大学
部局名：理工学術院
職名：教授
研究者番号（8桁）：40359063

研究分担者氏名：千葉 明人

ローマ字氏名：Akito Chiba

所属研究機関名：群馬大学

部局名：大学院理工学府

職名：助教

研究者番号（8桁）：30435789

(2)研究協力者

該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。