

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：32644
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2013～2014
課題番号：25709031
研究課題名(和文)Hybrid Approach for Generating High-order QAM

研究課題名(英文)Hybrid Approach for Generating High-order QAM

研究代表者
呂 国偉 (Lu, Guo-Wei)

東海大学・創造科学技術研究機構・准教授

研究者番号：30599709
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の主目的は、柔軟QAM送信機を実現し、光通信システムに適用することである。このプロジェクトでは、柔軟QAM送信機は共通のハードウェアにおいて、動作方法を簡単に変更することにより、柔軟に異なる次数のQAM信号を生成できる、という、重要な役割を持つ。本研究で達成したことは、この柔軟QAM送信機の実用製を実証したこと、またこの送信機の光通信応用を実証したことである。成果の要点は、以下の通りである。
1) 柔軟な高次光QAM送信機の実証；2) 高次光QAM信号のための高性能波長変換の実証；3) 高次光QAM信号の位相雑音無依存波長交換；4) 高次光QAM信号の位相雑音無依存マルチキャスト

研究成果の概要(英文)：The research work mainly focuses on the realization and application of flexible high-order Quadrature-Amplitude Modulation (QAM) transmitter in optical communication systems. In future high-speed elastic optical networks, flexible high-order QAM transmitter plays an important role to adaptively generate different high-order QAM signals with simply changing the configurations and sharing the same optical hardware. We have successfully verified the feasibility of our proposed flexible high-order QAM transmitter and demonstrated the application of such transmitter in optical communication systems. In details, the achievement of the research work mainly includes the following four parts: 1) realization of flexible high-order QAM transmitter; and experimental demonstrations of 2) high-performance wavelength conversion for high-order QAM signals, 3) pump-phase-noise-free wavelength exchange for high-order QAM signals, and 4) pump-phase-noise-free Multicast for high-order QAM signals.

研究分野：情報工学

キーワード：情報通信工学 コヒーレント光通信 多値光変調 光変調器

1. 研究開始当初の背景

将来の高速光通信システムを支えるために、32QAM, 64QAM といった高次の光 QAM フォーマットの適用が提案、実証されている。単位シンボルあたり、複数のビットを伝送することにより、伝送容量を拡大できる。64QAM 信号生成の手法はいくつか報告されており、

- ① 電気的アプローチ: 8 レベルの駆動電気信号を用いた直交変調器によるもの
- ② 光学的アプローチ: バイナリ電気信号を用いた 6 つの集積型 MZM 変調器によるもの

これらの方法は、明らかに光学的あるいは電氣的に複雑な系となる。さらに、将来のエラスティック光ネットワークにおいては、異なる高次光 QAM 信号を生成する機能を持った柔軟な送信機の開発が重要となってくる。従って、将来のエラスティック光ネットワークのための、光学的にも電氣的にもバランスの取れた複雑性を持った高次光 QAM 送信機の開発が求められる。

2. 研究の目的

この研究の目的は以下の通りである。

- (1) 適度な電気的・光学的複雑性により、様々な異なる変調方式の信号を適応的に生成出来ることを提案、実証する。
- (2) 線形位相雑音に対する耐性を持った波長変換や波長マルチキャストといった、高次光 QAM 信号のための全光信号処理技術を開発する。

3. 研究の方法

本研究の目標を達成するために、まずは数値計算を行い、次に実験検証を行う。

- (1) 数値計算:
提案する、ハイブリッド方式による柔軟送信機証明するために、市販のシミュレーターを用い、数値計算を行う。

- (2) 実験検証:
提案方式を実証するために、実験検証を行う。実験検証は 10Gbaud で行う。主要なコンポーネントは以下の通りである。

- ① 異なる光 QAM 信号を発生するための、直列された直交変調器;
- ② コヒーレントポンピングのために使用する、光変調による 2 トーン信号発生器;
- ③ コヒーレントマルチキャリアポンプのための、キャリア間隔可変のコヒーレントマルチキャリア光源。

4. 研究成果

本研究の主目的は、柔軟高次光 QAM 送信機を光通信システムに適用することである。この

プロジェクトでは、柔軟高次光 QAM 送信機は共通のハードウェアにおいて、動作方法を簡単に変更することにより、柔軟に異なる次数の QAM 信号を生成できる、という、重要な役割を持つ。本研究で達成したことは、この柔軟 QAM 送信機の実用製を実証したこと、またこの送信機の光通信応用を実証したことである。

成果の要点は、以下の通りである。

- (1) 柔軟な高次光 QAM 送信機の実証:

我々は、二つの直交変調器を直列接続した構成による高次光直交振幅変調 (Quadrature-Amplitude Modulation; QAM) を提案し、その実証に成功した。光 QAM 等の多値信号は、単一波長での高速伝送に適している。データの使用量に適応して、次数の異なる光 QAM 信号を発生できれば、柔軟な高次光 QAM 送信機を実現できる。同一の光送信機構成を使用し、異なるタイプの高次 QAM 信号 (6QAM, 32QAM, 36QAM, 64QAM 等) の生成を実証した。シンボルレート 10Gbaud において符号誤り率測定を行い、良好な受信感度が確認された。また、この実験により、高性能、高柔軟性等の特徴が示された。

- (2) 高次光 QAM 信号のための高性能波長変換の実証:

将来の光ネットワークにおいて、波長変換は重要な機能となる。高次光 QAM 信号を波長変換する際、2 値の光強度変調信号の場合と異なり、透明性を確保した波長変換機能が求められる。高次光 QAM 信号を波長変換する際に、雑音や光信号歪み等の印加を回避しなくてはならない。我々は、光信号歪みや光位相雑音の増大を避けるための直感的な方法として、EVM 測定に基づく手法を提案した。更に、励起光からの位相雑音の転換を避けるための方法として、コヒーレントポンプによる、励起光の位相雑音無依存な高次 QAM 信号の波長変換を提案し、これを実証した。

- (3) 高次光 QAM 信号の位相雑音無依存波長交換:

光 QAM 信号は、特に高次の場合は、位相雑音に非常に敏感となる。従って、位相雑音の問題は、高次光 QAM 信号を用いたシステムでは、大きな問題となる。本研究では、コヒーレントポンピングの手法を用いた波長交換の方法を提案し、ポンプ光からの位相雑音を導入せずに QAM 信号の波長交換を行う。PPLN 導波路を用いた従属二次非線形効果を用い、16QAM 信号と QPSK 信号の波長交換の実験的実証に成功した。

- (4) 高次光 QAM 信号の位相雑音無依存マルチキャスト:

我々は、このコヒーレントポンピングの手法をポンプ光位相雑音を排した波長マルチキャストの概念に拡張、適用する。非線形ファイバ中の四光波混合を用い、16QAM 信号のマルチキャストを実験的に実証した。全てのマルチキャスト信号光の受信感度劣化はほぼ無視できる程度となった。

5. 主な発表論文等
(研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- (1) Jun Qin, Yuefeng Ji, Hongxiang Wang, Danshi Wang, Min Zhang, and Guo-Wei Lu, “Multichannel wavelength multicasting for two QPSK signals based on FWM in SOA,” *Chinese Optics Letter*, 査読有, vol. 13, pp. 010601-010601 (2015). DOI: COL 13(1), 010601(2015)
- (2) Jun Qin, Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, Danshi Wang, Cheng Wang, Hongxiang Wang, Min Zhang, Tetsuya Kawanishi, and Yuefeng Ji, “Simultaneous multichannel wavelength multicasting and XOR logic gate multicasting for three DPSK signals based on four-wave mixing in quantum-dot semiconductor optical amplifier,” *Optics Express*, 査読有, vol. 22, pp. 29413-29423 (2014), DOI:10.1364/OE.22.029413.
- (3) Danshi Wang, Min Zhang, Jun Qin, Guo-Wei Lu, Hongxiang Wang, and Shanguo Huang, “Multifunctional switching unit for add/drop, wavelength conversion, format conversion, and WDM multicast based on bidirectional LCoS and SOA-loop architecture,” *Opt. Express*, 査読有, vol. 22, pp. 21847-21858 (2014), DOI:10.1364/OE.22.021847
- (4) Jun Qin, Hongxiang Wang, Danshi Wang, Min Zhang, Yuefeng Ji, and Guo-Wei Lu, “QPSK wavelength multicasting based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier,” *Chinese Optics Letters*, 査読有, vol. 12, no. 11, pp. 1106011-1106015 (2014). DOI: COL 12(11), 110601(2014)

- (5) Toshiaki Kuri, Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, “Laser-Phase-Fluctuation-Insensitive Optical Coherent Detection Scheme for Radio-over-Fiber System,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 査読有, vol. 32, no. 20, pp. 3803-3809 (2014), DOI: 10.1109/JLT.2014.2313620
- (6) Guo-Wei Lu, André Albuquerque, Benjamin J. Puttnam, Takahide Sakamoto, Miguel Drummond, Rogério Nogueira, Atsushi Kanno, Satoshi Shinada, Naoya Wada, and Tetsuya Kawanishi, “Pump-line width-tolerant optical wavelength conversion for high-order QAM signals using coherent pumps,” *Optics Express*, 査読有, vol. 22, no. 5, pp. 5067-5075 (2014), DOI: 10.1364/OE.22.005067.
- (7) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, and Tetsuya Kawanishi, “Wavelength conversion of optical 64QAM through FWM in HNLF and its performance optimization by constellation monitoring,” *Optics Express*, 査読有, vol. 22, no. 1, pp. 15-22 (2014). DOI:10.1364/OE.22.000015
- (8) Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, and Tetsuya Kawanishi, “Multi-tone parallel coherent matched detection for demultiplexing of superchannels,” *Optics Express*, 査読有, vol. 21, no. 16, pp. 18602-18610 (2013) DOI: 10.1364/OE.21.018602.
- (9) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, and Tetsuya Kawanishi, “Flexible high-order QAM transmitter using tandem IQ modulators for generating 16/32/36/64-QAM with balanced complexity in electronics and optics,” *Optics Express*, 査読有, vol. 21, no. 5, pp. 6213-6223 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.006213

[学会発表] (計 26 件)

- (1) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Pump-Phase-Noise-Tolerant Wavelength Multicasting for QAM

- Signals using Flexible Coherent Multi-Carrier Pump,” paper M2E.2, in Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), March, 2015, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, USA.
- (2) Danshi Wang, Ming Zhang, Guo-Wei Lu, Jun Qin, Takahide Sakamoto, Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, “Multifunctional All-optical Signal Processing Scheme for Simultaneous Multichannel WDM Multicast and XOR Logic Gates Based on FWM in QD-SOA, ” paper Th2A.5, Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), March, 2015, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, USA.
- (3) Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, “Loop-Assisted Multi-Input-Multi-Output Coherent Matched Detector for Ultra High-Bandwidth Parallel Optical Time-Frequency Domain Sampling,” paper M2E.6, in Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), March, 2015, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, USA.
- (4) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Flexible High-Order QAM Transmitters for Elastic Optical Networks,” **(Invited Paper)**, paper M12.2, in Proc. 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), November, 2014, Suzhou Marriott Hotel, Suzhou, China.
- (5) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Wavelength Conversion of High-Order QAM Signals for Future Transparent All-Optical Networks” **(Invited Paper)**, paper S32.4, in Proc. 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), November, 2014, Suzhou Marriott Hotel, Suzhou, China.
- (6) Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, “Conjugated-Paired Radio-on-Fiber Transmission Scheme Highly Tolerant against Optical Fiber Nonlinearity,” in Proc. of International Topical Meeting on Microwave Photonics/Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (MWP/APMP), pp.399 - 402, October, 2014, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan.
- (7) Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, “Electro-Optic Dual-Channel Coherent Signal Emulator,” paper TuG2.2, in Proc. of IEEE Photonics Conference (IPC), October, 2014, Hyatt Regency La Jolla, San Diego, California USA.
- (8) Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, “Phase-Conjugated Twin Signals Generation with Oppositely-Biased Paired IQ Modulators,” paper TuG1.4, in Proc. of IEEE Photonics Conference (IPC) October, 2014, Hyatt Regency La Jolla, San Diego, California USA.
- (9) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Data Overlay in Optical Networks through Level-Scalable Flexible Modulation and its Application in Multicast Overlay for WDM-PON,” paper MD2.4, in Proc. of IEEE Photonics Conference (IPC) October, 2014, Hyatt Regency La Jolla, San Diego, California USA.
- (10) Guo-Wei Lu, André Albuquerque, Benjamin J. Puttnam, Takahide Sakamoto, Miguel Drummond, Rogério Nogueira, Atsushi Kanno, Satoshi Shinada, Naoya Wada, and Tetsuya Kawanishi, “Pump-Linewidth-Tolerant Optical Data Exchange between 16QAM and QPSK with 50-GHz Channel-Spacing using Coherent DFB Pump,” paper P.2.18, in Proc. of European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), September, 2014, Palais des Festivals et des Congrès, Cannes, France.

- (11) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, "Coherently-Pumped FWM in HNLFFree of Phase Noise from Pumps," paper P.1.16, in Proc. of European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), September, 2014, Palais des Festivals et des Congrès, Cannes, France.
- (12) Guo-Wei Lu, "Pump-linewidth tolerant wavelength conversion for high-order QAM signals," (**Invited paper**) paper OTh3B.2, in Optoelectronic Devices and Integration (OEDI), June, 2014, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, China.
- (13) Guo-Wei Lu, André Albuquerque, Benjamin J. Puttnam, Takahide Sakamoto, Miguel Drummond, Rogério Nogueira, Atsushi Kanno, Satoshi Shinada, Naoya Wada, and Tetsuya Kawanishi, "Coherently-Pumped 20Gbaud 16QAM Optical Wavelength Shifting Free of Phase Noise from Pumps," in Optoelectronics and Communications Conference (OECC), July, 2014, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia.
- (14) Guo-Wei Lu, André Albuquerque, Benjamin J. Puttnam, Takahide Sakamoto, Miguel Drummond, Rogério Nogueira, Atsushi Kanno, Satoshi Shinada, Naoya Wada, and Tetsuya Kawanishi, "Pump-Linewidth-Tolerant Wavelength Conversion with Coherent Pumps," paper SW3J.1, in Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June, 2014, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA.
- (15) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, "Experimental Investigation of Sampling Phase Sensitivity in Baud-Rate Sampled Coherent Receiver for Nyquist Pulse-Shaped High-Order QAM Signals," paper SW1J.2, in Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June, 2014, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA.
- (16) Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, and Tetsuya Kawanishi, "Time-Interleaved Carrier-Suppressed Return-to-Zero QPSK for Filter-less Dual-Carrier Transmission" paper Th 2A.63, in Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), March, 2015, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, USA.
- (17) Toshiaki Kuri, Takahide Sakamoto, Guo Wei Lu, and Tetsuya Kawanishi, "Error-Free and Laser-Phase-Noise-Insensitive Optical Coherent Transmission of Uplink Radio-over-Fiber signal" paper M3D.8, in Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), March, 2015, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, USA.
- (18) Toshiaki Kuri, Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, "Phase-noise-insensitive optical coherent detection with two-tone local light and digital signal processing technique for uplink radio-over-fiber signal transmission," paper Th3-4, in Proc. IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October, 2013, Hotel Monaco Alexandria, Alexandria, VA, USA.
- (19) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, "Wavelength Conversion of Optical 64QAM and its Performance Optimization by Constellation Monitoring," paper We.2.A.4, in Proc. of European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), September, 2013, ICC Capital Suite, London, UK.
- (20) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, "Experimental Demonstration of Wavelength Conversions of Optical 36QAM and 64QAM through FWM in HNLFFree of Phase Noise from Pumps," paper ThG1.4, in Proc. IEEE Photonics Conference, September, 2013, Hyatt

Regency Bellevue, Washington, USA.

(21) Toshiaki Kuri, Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, “Digital-signal-processing-assisted optical coherent detection of uplink radio-over-fiber signal and its phase noise cancellation effect,” paper TuC2.3, in Proc. IEEE Photonics Conference, September, 2013, Hyatt Regency Bellevue, Washington, USA.

(22) Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, “Traceback Equalization against Modulation Non-Uniformity in QAM Transmitters,” paper MR1-5, in Proc. the 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and the 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching (CLEO-PR&OECC/PS), July, 2013, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan.

(23) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Wavelength Conversion of 36QAM through Four-Wave Mixing in HNLF,” paper M01-2, in Proc. the 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and the 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching (CLEO-PR&OECC/PS), July, 2013, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan.

(24) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Generation of Optical 32QAM using Two Tandem IQ Modulators with Simplified Electronics,” paper CM1G.1, in Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June, 2013, San Jose Convention Center, San Jose, USA.

(25) Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Optical 36QAM Transmitter based on Two Tandem IQ Modulators with Simplified Driving Electronics,” paper CI-1.3, in Proc. CLEO/Europe-IQEC, May, 2013, ICM Centre, Munich, Germany.

(26) Takahide Sakamoto, Guo-Wei Lu, Tetsuya Kawanishi, “Traceback Equalization for Non-Uniformly Synthesized Optical QAM Signals,” paper CI-1.4, in Proc. CLEO/Europe-IQEC, May, 2013, ICM Centre, Munich, Germany.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

呂 國偉 (Guo-Wei LU)

東海大学・創造科学技術研究機構・准教授

研究者番号：30599709