

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760352

研究課題名（和文）Special Optical IQ Modulator

研究課題名（英文）Special Optical IQ Modulator

研究代表者

呂 國偉（Guo-Wei LU）

独立行政法人情報通信研究機構・光ネットワーク研究所光通信基盤研究室・研究員

研究者番号：30599709

研究成果の概要（和文）：

特別な直交（IQ）変調器を用いて高機能な多値光変調信号を生成する方法を3種類提案するとともに、住友大阪セメントの協力を得てその変調器を試作し、実験で確認した。(1) 矩形 QPSK に基づく光 8PSK 送信器、(2) 8PSK と 8QAM を両方生成できる変調フォーマット可変 8 値送信器、(3) 16QAM、32(36)QAM、および 64QAM 信号を合成できる変調フォーマット可変 QAM 送信器、の3種である。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we proposed a special in-phase/quadrature (IQ) modulator. Through the collaboration with Sumitomo Osaka Cement (SOC), the special IQ modulator was successfully fabricated. Based on this special IQ modulator, we proposed and experimentally demonstrated several schemes for generating advanced optical modulation formats, including: (1) optical 8PSK transmitter based on rectangular QPSK; (2) flexible 8-ary transmitter for generating 8PSK and 8QAM; (3) flexible high-order QAM transmitter for synthesizing 16QAM, 32(36)QAM, and 64QAM. We have published 10 refereed international conference papers, including top-tier conferences like OFC and CLEO, and 2 refereed papers in top-tier international journals (OSA Optics Express).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：情報通信工学、コヒーレント光通信、多値光変調、集積光変調器

## 1. 研究開始当初の背景

M 相位相シフトキーイング (M-PSK) や M 相直交振幅変調 (M-QAM) のような高度な光多値変調フォーマットは、次世代の超高速超高密度光ネットワークの有望な候補として多くの研究者の関心を惹きつけてきた。ここでは、高性能な高次多値変調フォーマットを生成するための光送信器に関する研究は必須となる。QAM フォーマットを生成するために既にいくつかの方式が提案されてお

り、それらは、(1) 多値電気信号で駆動される単一のマツハツェンダー変調器 (MZM) または直交 (IQ) 変調器、(2) 2 値電気信号で駆動される高集積型変調器、(3) 位相変調器と IQ 変調器あるいは複数 MZM の縦続接続、の3つのグループに分類できる。

これらの方式の中で、集積型変調器方式には他の方式と比べて、(1) 位相チャープが小さい、(2) 電氣的な不完全性に対する許容度が高い、(3) 残余色分散に対する耐性が高い、

(4) 2 値しか必要ないため駆動電気回路の構成が簡単である、という4つの利点がある。集積型変調器におけるこれらの利点は、主に集積されたサブ MZM が全てフル駆動されることから生じている。従って、QAM あるいは他の多値信号送信器としての性能面では高集積型変調器が最適解となる。しかし、集積デバイス中にパワー減衰機能を導入するには、通常は LiNbO3 光導波路と平面光波回路 (PLC) デバイス間を接続する複雑なハイブリッド集積技術が必要となる。例えば、1 枚の基板上に最低限集積しなければならないサブ MZM の個数として、16QAM の場合は4、64QAM の場合は6、となる。高集積技術には未だに多くの課題が残っており、短期間に商業化することは難しい。つまり現在の製造技術およびコストの観点からは、高集積技術は未だ十分に成熟しておらず、現在の市場に対応した量産技術としては未だ準備ができていない。

## 2. 研究の目的

高集積方式とは異なる選択肢として、我々は単純で特別な IQ 変調器の開発と、この変調器を多値変調フォーマットの生成に適用することに注力している。本研究の目的は、次世代の超高速光通信システムにおいて有用となる多値位相変調や直交振幅変調 (M-ary PSK, M-ary QAM) 等の多値光変調を実現するための新しい光変調器構造の開拓である。具体的には、新しい集積光変調器の作製、ならびにこれを用いた多値光変調信号の生成についての実験的実証である。

特に、8 値位相変調 (8PSK) 光信号や、8 値直交振幅変調 (8QAM) 光信号等の生成に適した IQ 光変調器の設計に焦点を当て、主に申請者の所属機関に於いて光変調器の設計・デバイス作製・システム性能評価を一貫して進める。

## 3. 研究の方法

実際の研究は NICT と住友大阪セメント (SOC) の協力の下で遂行された。その内容は次のとおりである。

### (1) 数値シミュレーション

我々は最初に IQ 変調器の2つのサブ MZM 間に強度差を導入した特別な構造の IQ 変調器を提案した。その性能を評価するために、市販のシミュレータ (OptiSystem) を用いて数値シミュレーションを行なった。

### (2) デバイス作製

SOC の協力を得て、2つのサブ MZM 間に 6dB の強度差を持つ特別な IQ 変調器の試作に成功した。この変調器は SOC で作製された。

### (3) サブシステム実験

特別に設計された IQ 変調器を用いることで、

8PSK や 8QAM のような様々な多値変調フォーマットを生成するサブシステム実験を行なった。我々の知る限りでは世界で初めて”矩形” QPSK の概念を提案し、8PSK の生成に適用した。そして、変調フォーマット可変 8 値送信器を将来のダイナミック光ネットワークに適用することを提案した。これらの実験は全て NICT で行なった。

## 4. 研究成果

本プロジェクトでは、住友大阪セメントの協力の下で、特別な IQ 変調器を作製することに成功した。その成果を以下にまとめる。

(1) 世界で初めて、非平衡の特別な IQ 変調器を用いた矩形 QPSK の概念を提案した。この矩形 QPSK と標準 QPSK 変調器を従属接続することで、光 8 相 PSK (8PSK) 信号を合成することに成功した。提案した 8PSK 送信器は既に報告されている位相変調器に基づいた方式に比べてチャープが小さいという特長を有する。図 1 に、提案した非平衡の特別な IQ 変調器による 8PSK 送信器の構造、動作原理、および実験結果を示す。

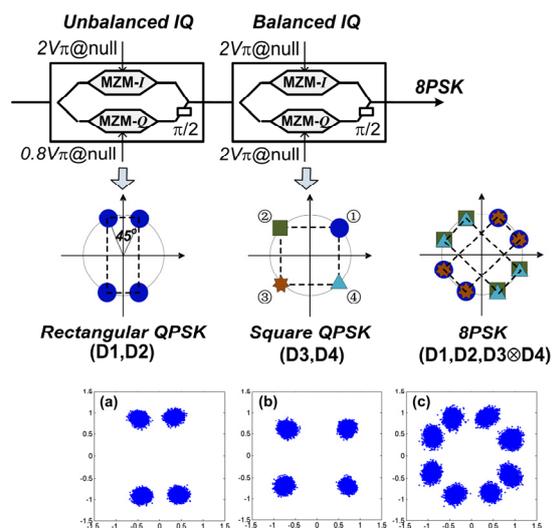


図1 “矩形” QPSK に基づく 8PSK 送信器

(2) また、我々は提案した特別な IQ 変調器に基づく“任意の 2 値 QAM”の概念を提案した。任意の 2 値 QAM 信号を生成するために、その IQ 変調器は一對の相補的な 2 値電子回路で駆動される。2 値 PSK あるいは 2 値 QAM は、それぞれ平衡および非平衡駆動信号を供給することで生成される。この後に標準 QPSK 変調器を従属接続すると、8PSK あるいは 8QAM 信号が生成できる。提案した送信器は、単に異なる条件で変調器を駆動するだけで異なる変調フォーマットの信号を生成することができ、フォーマット可変 8 値送信器としても動作する。図 2 に、提案したフォーマット可変 8 値送信器の動作原理と実験結果を示す。

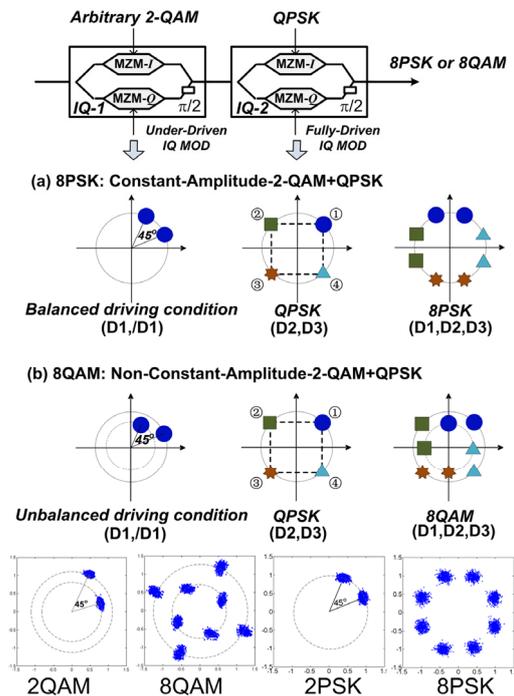


図 2 1 組の光変調器を用いる同一の構成で、8PSK と 8QAM を生成できる変調フォーマット可変 8 値送信器

(3) 提案した送信器の方式を更に拡張するため、2つの従属接続された IQ 変調器に基づく変調フォーマット可変高次 QAM 送信器を提案した。その 1 段目は多値電子回路で駆動されてオフセット QAM 信号を生成しており、2 段目は標準 QPSK 送信器として動作することで、最終的に高次 QAM 信号を生成することに成功した。図 3 に、16QAM、32QAM、および 64QAM のような様々な高次 QAM 信号を生成するために提案した変調フォーマット可変高次 QAM 送信器の動作原理を示す。

我々はトップレベルの国際論文誌 (OSA Optics Express) で 2 件の査読付き論文を出版するとともに、OFC および CLEO のようなトップレベルの査読付き国際会議で 10 件の発表を行なった。

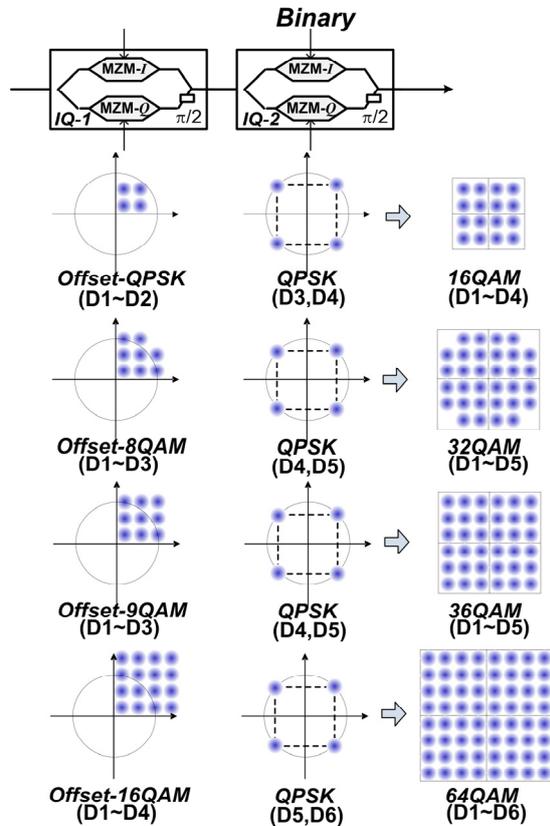


図 3 16QAM, 32(36) QAM, 64QAM を生成するための変調フォーマット可変高次 QAM 送信器

## 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 2 件)

- ① 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," Opt. Express 21, 6213-6223 (2013) 査読有  
DOI: 10.1364/OE.21.006213
- ② Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, "Rectangular QPSK for generation of optical eight-ary phase-shift keying," Opt. Express 19, 18479-18485 (2011) 査読有  
DOI: 10.1364/OE.19.018479

[学会発表] (計 10 件)

- ① 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 2013), Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 30 Jun.-4 July, 2013.
- ② 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 2013), San Jose Convention Center, San Jose, USA, 9-14 June, 2013.
- ③ 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, ICM Centre, Munich, Germany, 12-16 May, 2013.
- ④ Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Optical 64QAM Transmitter using Tandem IQ Modulators with Balanced Complexity in Electronics and Optics,” paper OM3C.2, in Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), Anaheim Convention Center, Anaheim, USA, 17-21 March, 2013.
- ⑤ Guo-Wei Lu, Yukiyoshi Kamio, Tetsuya Kawanishi, “PS-QPSK with Duobinary-Shaping and MLS D Reception for Constructing Power- and Spectrum-Efficient Superchannel,” paper OTu3B.5, in Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), Anaheim Convention Center, Anaheim, USA, 17-21 March, 2013.
- ⑥ Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Experiment Investigation of Nonlinear Distortion in QAM Constellation due to Imbalance in Intradyne Coherent Receiver,” paper SC2\_1079, in Proc. 17th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2012), BEXO, Busan, Korea, 2-6 July, 2012.
- ⑦ Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Reconfigurable optical 8-ary transmitter based on arbitrary 2-QAM for generating 8PSK and 8QAM,” paper JTh2A.22, in Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), Los Angeles Convention Center, Los Angeles, USA, 4-8 March, 2012.
- ⑧ Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Two optical-8PSK transmitter schemes based on tandem IQ modulators,” paper 762.00, in Proc. International Quantum Electronics Conference / Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (IQEC/CLEO PR) 2011, Sydney Convention and Exhibition Center, Australia, 28 August- 1 September, 2011.
- ⑨ Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Generation of optical 8PSK using cascaded IQ modulators and binary Electronics,” paper 7B4\_5, in Proc. OptoElectronics Communications Conference (OECC), The Splendor Kaohsiung, Kaohsiung, Taiwan, 4-8 July, 2011.
- ⑩ Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Tetsuya Kawanishi, “Optical 8PSK Transmitter using Tandem IQ Modulators with Binary Driving Electrical Signals,” paper CThH5, in Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, USA, 3-5 May, 2011.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

呂 國偉 (Guo-Wei LU)

独立行政法人情報通信研究機構・光ネットワーク研究所光通信基盤研究室・研究員

研究者番号：30599709

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：