

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：16101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14985

研究課題名(和文) 光通信網の低遅延化のための変調方式及び波長チャネル数変換技術による光ノードの研究

研究課題名(英文) Studies on optical node with modulation format and wavelength channel number conversion technology for low latency in optical communication network

研究代表者

岸川 博紀(KISHIKAWA, Hiroki)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・准教授

研究者番号：00759722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではネットワーク間接続光ノードにおける処理遅延を1000分の1程度に低減するため、変調方式及び波長チャネル数変換技術を確立することを目的とする。複数の研究テーマを実施したが、特に将来のテラビット級伝送で適用される4相位相変調(QPSK)から16相直交振幅変調(16QAM)に関する変換技術として、光信号処理技術および電気光学効果を用いた手法を考案した。本提案の実装法、変換特性、信号品質を計算機シミュレーションで明らかにした。変換特性の数値目標である遅延時間5マイクロ秒以下、及び誤り訂正技術を使用することで誤りの無い光信号伝送が達成できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光通信網のノードでは、到着光信号を電気信号に変換し、宛先識別、経路選択、衝突回避等を施し、電気信号を光信号に変換して送信するという手順をとるため、処理遅延が問題となる。本成果は、送受信機における光信号と電気信号の変換部を無くし、更に光学的に信号処理を行うことで遅延を低減するための要素技術である。従来法は高非線形ファイバ等の非線形光学効果を用いた制御が行われており、消費電力や装置の複雑化といった問題があったが、本成果は受動デバイスで構成する簡易な変換技術であり、省電力かつ高効率である点に特色がある。多くの産業で将来利用が期待される遠隔操作や自動操縦といった情報通信技術の活用が広がると期待される。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to establish modulation format and wavelength channel number conversion technology to reduce the processing delay by a factor of about 1/1000 at the optical node connecting optical networks. Among several research themes, we have studied a conversion technique using optical signal processing techniques and electro-optic effects, especially for the conversion from quadrature phase-shift keying (QPSK) to 16-ary quadrature amplitude modulation (16QAM), which will be applied in future terabit-class transmission. The implementation method, conversion characteristics, and signal quality of the proposed method were clarified by computer simulation. The numerical target of the conversion characteristics is achieved with a delay time of less than 5 microseconds, and error-free optical signal transmission can be achieved by using the error correction technique.

研究分野：光通信

キーワード：光通信 変調方式 4相位相変調 16相直交振幅変調 遅延干渉計 相互偏波変調

## 1. 研究開始当初の背景

### ネットワークに対する低遅延化の要求

年々増加する通信データ量に対応するため、これまで移動通信・固定光通信ネットワークでは多値変調技術や多重化技術といった種々の高速・大容量化技術が導入されてきた。今後は多くの産業において遠隔操作や自動操縦といった情報通信技術(ICT)を活用した取り組みが広がると予想される。ICT利活用が広まるに従い注目されるようになった問題に「遅延」がある[文献A]。ネットワークの遅延とは、送信データが受信されるまでにかかる遅延時間のことで、サーバ間の距離やネットワーク機器の処理などが原因となっている部分もあり、単にネットワークが高速・大容量になれば解決するものではない。離れた場所にいながら手術ができる遠隔医療や、ロボットなどの遠隔操作、車の自動運転などでは微細な動きが求められるため、遅延によって操作がずれると致命的な状況に陥る可能性がある。ネットワークの低遅延化はこのようなサービスの普及には必要不可欠である。

### 実現技術と課題

次世代の移動通信方式である「5G」では遅延を1ミリ秒以下にすることを目指している。これは無線区間のみにおける値であり、固定光通信ネットワークを介したサーバとのやりとりにかかる遅延時間は考慮していない。固定光通信ネットワークには複数の光ノードが存在しており、特に異なるネットワーク間を接続する光ノードでは到着データを受信し、宛先識別、経路選択、衝突回避、多重分離等を施した後、再度送信するという手順をとる。現行の光ノードにおける受信処理だけで10ミリ秒程度かかることが報告されており[B]、ネットワークの規模にも依るがこれを当てはめると往復で100ミリ秒程度の遅延が想定されるため、低遅延化が課題である。一例として時速60kmの自動車は100ミリ秒で1.7m程度進むため、自動運転においても認知・判断の遅れが致命的な状況を作る可能性がある。

[A] マイナビ NewsInsight, 2017.3.27, URL: <https://biz.news.mynavi.jp/articles/-/739>

[B] 鈴木他, 光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発, 電子情報通信学会誌, vol. 95, no. 12, 2012.

## 2. 研究の目的

図1にネットワーク間接続ノードにおける処理遅延の問題及び光学的信号処理による解決法を示す。送受信機および信号処理部におけるデジタル信号処理による遅延が問題となる[C]ため、これを解決するため送受信機における光信号と電気信号の変換部を無くし、更に光学的に信号処理を行うことで遅延を低減する。低遅延光ノードに必要な機能のうち、特に変調方式変換技術を確認することを目的とする。理由は、アクセス・メトロ・コアの各ネットワークで使用される変調方式は、所望の伝送容量・距離に応じて異なり、ネットワーク間接続光ノードでは互いに変換する必要があるためである。この変調方式変換を送受信機を介さずに光学的に行うことで低遅延化を図る。

[C] 富澤他, Beyond 100G 光トランスポートネットワークに向けたデバイス技術開発, NTT 技術ジャーナル, vol. 14, no. 9, 2016.

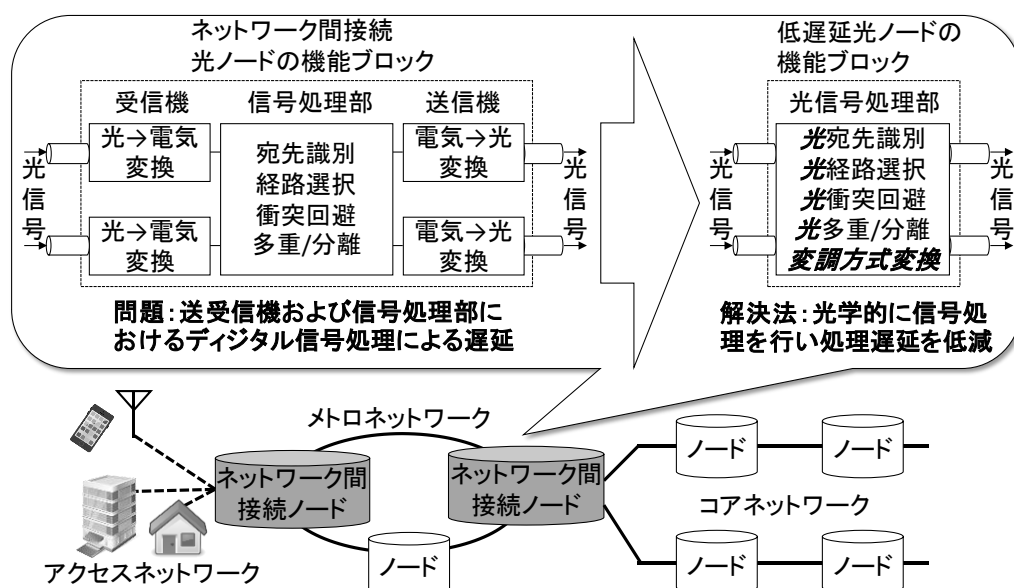


図1. ネットワーク間接続ノードにおける処理遅延の問題、及び光学的信号処理による解決法

### 3. 研究の方法

変調方式変換技術および波長・チャネル数変換技術を確立することを目的として研究を実施した。実施した内容のうち、ここでは以下の2つの方式について報告する。

#### (1) 四相位相変調 (QPSK) から 16 相直交振幅変調 (16QAM) への変換

図 2(a) に QPSK から 16QAM への変換の模式図を示す。異なる波長の 2 つの QPSK 信号から 1 つの 16QAM 信号を作るため、研究開始当初は高非線形ファイバ中の四光波混合 (FWM) を用いることを考えていた。しかし非線形光学効果を用いており消費電力が課題となるため、より省電力で実現できる原理を考案した。図 2(b) にその考案した原理を示す。波長の異なる 2 つの QPSK 信号を、遅延干渉計を用いて振幅が 4 段階ある信号に変換し、それらを受光して IQ 変調器の実軸側と虚軸側のドライブ電圧とすることで、任意の波長のレーザ光を変調し 16QAM 信号に変換するものである。

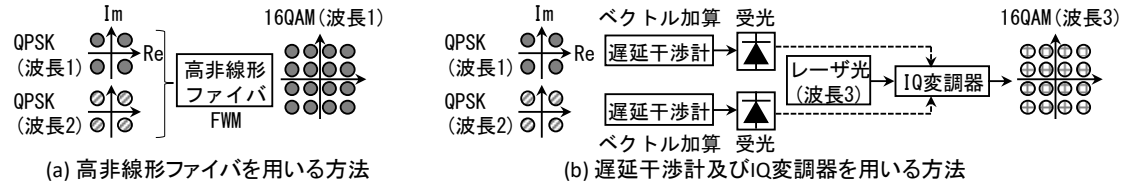


図2. QPSKから16QAMへの変調方式変換および波長・チャネル数変換

#### (2) 四相位相変調 (QPSK) から オンオフ変調 (OOK) への変換

図 3 に QPSK から OOK への変換の模式図を示す。1 つの QPSK 信号から 2 つの OOK 信号を作る。遅延干渉計で振幅が 2 段階ある信号に変換し、任意の波長のレーザ光に対し相互偏波変調を施すことで偏光状態を変え、偏光子で直線偏光成分を抽出することで OOK に変換するものである。もう一方にも同じ回路を用意し、最初の遅延干渉計で異なる位相回転を施すことで、QPSK 信号を構成する 2 つの OOK 信号を別々にかつ別波長に抽出することができる。

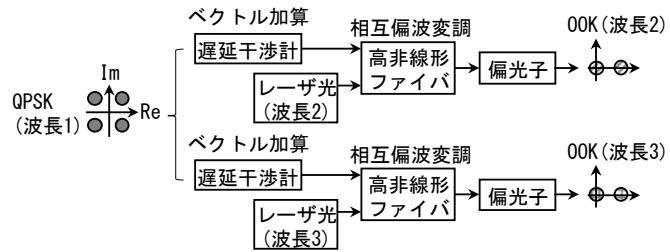


図3. QPSKからOOKへの変調方式変換および波長・チャネル数変換

### 4. 研究成果

#### (1) 四相位相変調 (QPSK) から 16 相直交振幅変調 (16QAM) への変換

本研究の主要アイデアは QPSK 信号を遅延干渉することで振幅が 4 段階ある信号に変換することである。図 4 に模式図を示す。遅延干渉計 (DLI) は入力光を 3dB 結合器で 2 つに分け、片側では信号を 1 シンボル遅延し、もう片側では信号の位相を調整し、再び 3dB 結合器で合波することでベクトル加算を行うものである。時間的に前後の信号パルスがベクトル加算されることになる。QPSK 信号を遅延干渉計に通し、位相シフトを適切に設定することで複素平面上の第 1~4 象限のそれぞれで傾いた QPSK 信号ができあがり、全体的に見ると振幅 (原点から各点までの距離) が 4 段階ある信号を作ることができる。これを受光器で受光することで 2 乗検波し、振幅が 4 段階ある電気信号が得られる。この操作を異なる波長の 2 つの QPSK 信号に施すことで、それぞれで振幅が 4 段階ある電気信号が得られる。これらの電気信号を IQ 変調器の実軸側と虚軸側のドライブ電圧とすることで新たな波長のレーザ光を変調し 16QAM 信号が得られる。この変換方式では DLI と受光器・IQ 変調器を光が通過する時間が変換に要する遅延時間となるが、導波路長が合計で 10m と考えて推定すると 50 ナノ秒程度となる。

計算機シミュレーションで変換特性を検証した。二つの QPSK 光信号はビットレート 5Gbit/s、線幅ゼロ、周波数 193.2 THz、パワー 8dBm とした。ビット誤り率 (BER) のノイズ耐性を評価するため、それぞれの QPSK 光信号にノイズを加えて光信号対雑音比 (OSNR) を変更する。遅延干渉計における位相シフト量は 12 度とした。図 5 に OSNR に対する BER 特性、および元の QPSK 信号と変換後 16QAM 信号の信号点配置図を示す。BER 特性のグラフから OSNR が 17.5dB 以上で前方エラー訂正 (FEC) 閾値である  $-2.42 = \log_{10}(3.8 \times 10^{-3})$  を下回るため、FEC を用いることで誤りのない変換動作が可能になることが分かる。また信号点配置図から QPSK 信号が 16QAM 信号に変換されていることがわかる。16QAM 信号の外側の点の厚みが薄い理由は、IQ 変調器の変調曲線の上端と下端に相当する駆動電圧であるためである。変調度を調整することで一般的な 16QAM 信号の信号点配置にすることも可能である。

本提案の方式で、変換特性の数値目標である遅延時間 5 マイクロ秒以下及びエラー訂正前のビット誤り率  $3.8 \times 10^{-3}$  以下は達成できることを明らかにした。受動回路である遅延干渉計のみで実現可能な構成を提案し、消費電力や制御の点で有意である。本研究の関連成果は国際会議で発表した[主な発表論文等[学会発表]の2件目,3件目]。

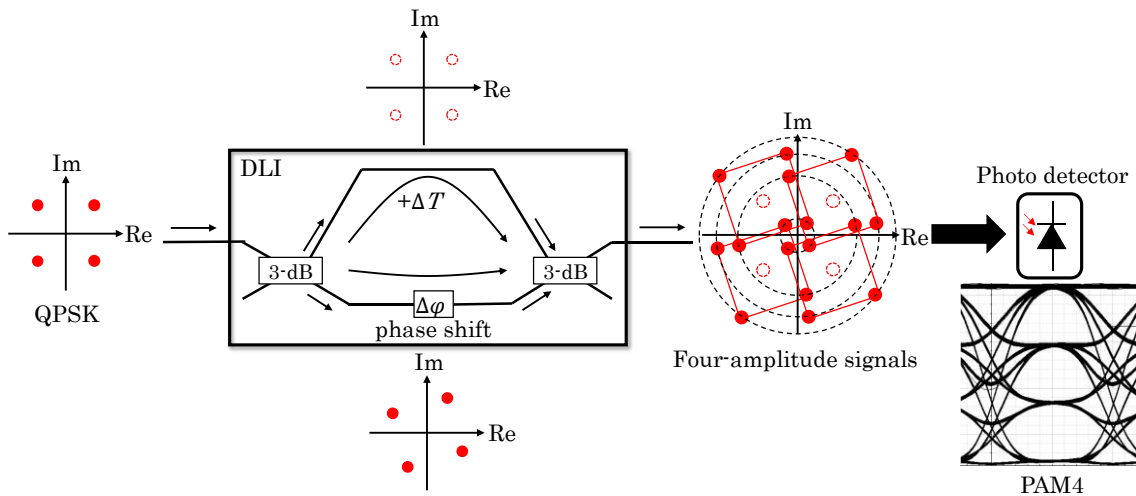


図4. QPSK信号を遅延干渉計によって振幅が4段階ある電気信号に変換する方法

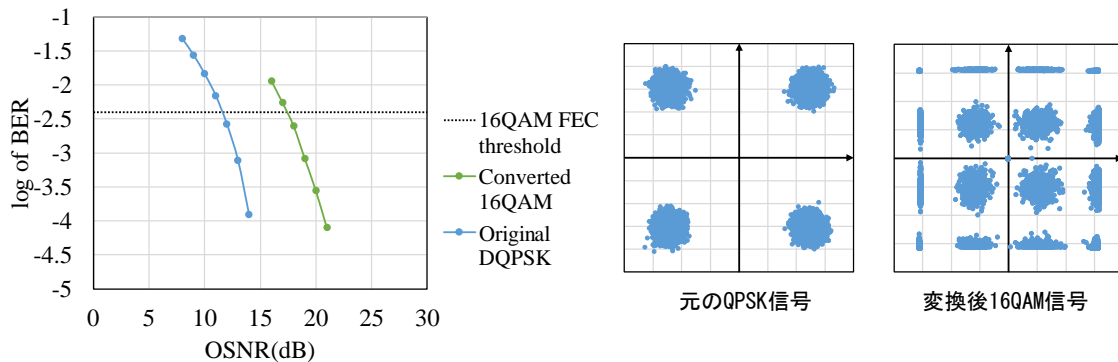


図5. 光信号対雑音比 (OSNR) に対するビット誤り率特性 (BER)、元のQPSKと変換後16QAM信号点配置

## (2) 四相位相変調 (QPSK) からオンオフ変調 (OOK) への変換

本研究の主要アイデアはQPSK信号を遅延干渉することによって振幅が2段階ある信号に変換することである。遅延干渉計 (DLI) については既に述べた。QPSK信号を遅延干渉計に通し、位相シフトを適切に設定する (図4下側の経路での位相シフトを45度にする) ことで複素平面上の第1~4象限のそれぞれで45度傾いたQPSK信号ができ上がり、全体的に見ると振幅 (原点から各点までの距離) が2段階ある光信号を作ることができる。この変換法では受光器では受光せず、光信号のままとする。図6にQPSKからOOKへの変換の模式図を示す。振幅が2段階ある光信号をX方向の直線偏光とし、別波長のレーザー光を45度方向の直線偏光とする。これらを高非線形ファイバに入射し、レーザー光に対し相互偏波変調を施す。その結果、小振幅で変調した場合は直線偏光の偏波状態をほぼ保ち、大振幅で変調した場合は楕円偏光状になる。これをマイナス45度方向の偏光子で抽出することで、小振幅で変調した場合の光強度は弱く、大振幅で変調した場合の光強度は強く出力されることになり、OOK信号に変換できる。この変換方式では高非線形ファイバを光が通過する時間が変換に要する遅延時間の支配要因となるが、後述のように長さ200mと考えると推定すると1マイクロ秒程度となる。

計算機シミュレーションで変換特性を検証した。QPSK光信号はビットレート10Gbit/s、線幅100kHz、周波数193.15THzとした。ビット誤り率 (BER) のノイズ耐性を評価するため、QPSK光信号にノイズを加えて光信号対雑音比 (OSNR) を変更する。2系統の遅延干渉計における位相シフト量は45度及びマイナス45度とし、振幅が2段階ある光信号に変換した。高非線形ファイバに入射するその光パワーは17dBmであり、別波長のレーザー光は周波数193THzでパワー7dBmとした。高非線形ファイバの長さは200m、非線形係数  $13.1 [W/km]$  とした。マイナス45度方向の偏光子でOOK信号に変換した。

図7に OSNR に対する BER 特性、変換後 OOK 信号のアイパターンを示す。BER 特性では変換後 OOK 信号の 2 本のグラフがほぼ重なっているが、いずれも OSNR が 10dB 以上で変換した OOK 信号が前方エラー訂正 (FEC) 閾値である  $-2.42 = \log_{10}(3.8 \times 10^{-3})$  を下回るため、FEC を用いることで誤りのない変換動作が可能になることが分かる。またアイパターンから OOK 信号に変換されていることがわかる。OSNR が大きい方がアイの開きが大きく、変換後 OOK 信号の品質が高い。

本提案の方式で、変換特性の数値目標である遅延時間 5 マイクロ秒以下及びエラー訂正前のビット誤り率  $3.8 \times 10^{-3}$  以下は達成できることを明らかにした。本研究成果は国際会議で発表した[主な発表論文等[学会発表]の1件目]。

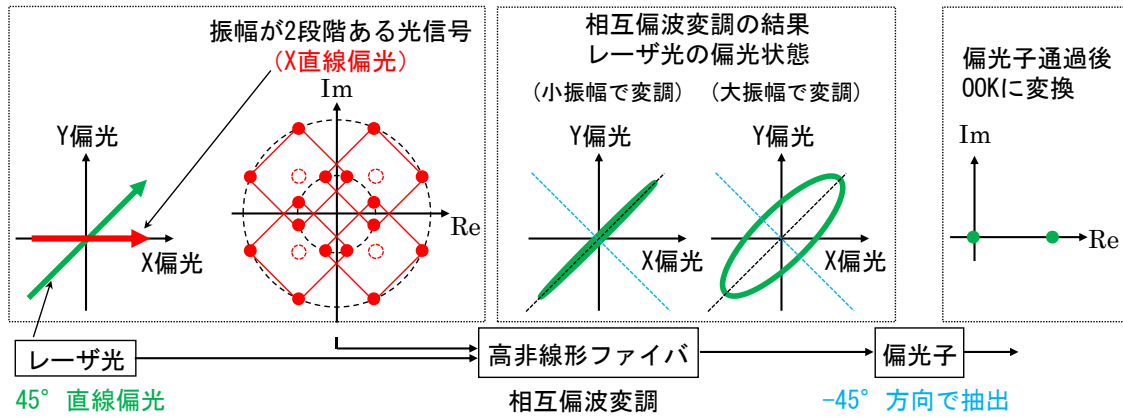


図6. QPSK信号を振幅が2段階ある光信号に変換し、相互偏波変調でOOK信号に変換する方法

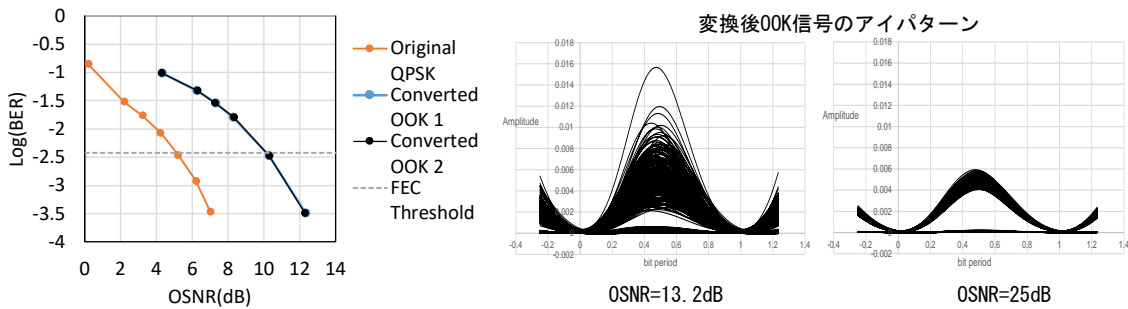


図7. 光信号対雑音比 (OSNR) に対するビット誤り率特性 (BER)、変換後 OOK 信号のアイパターン

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Kouki Iwama, Hiroki Kishikawa, Nobuo Goto, Jun-ichi Fujikata                                       |
| 2 . 発表標題<br>All-Optical Modulation Format Conversion From DQPSK to OOK Using Cross-Polarization Modulation     |
| 3 . 学会等名<br>The Annual Conference of the IEEE Photonics Society (IPC2021), No.WC4.4, Online, Oct. 2021. (国際学会) |
| 4 . 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto  |
| 2 . 発表標題<br>Modulation Format Conversion for Flexible and Spectrally Efficient Transmission                                |
| 3 . 学会等名<br>25th OptoElectronics and Communications Conference 2020 (OECC2020), No.T2-3.1, Taipei, Oct. 2020 (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Tomoki Amano, Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto   |
| 2 . 発表標題<br>Simple DQPSK Receiver Based on Format Conversion From DQPSK to 4PAM by Using a Delay Line Interferometer and a Photo Detector |
| 3 . 学会等名<br>25th OptoElectronics and Communications Conference 2020 (OECC2020), No.VP76, Taipei, Oct. 2020 (国際学会)                         |
| 4 . 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Kohshi Fujiwara, Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto   |
| 2 . 発表標題<br>Consideration of All-Optical Modulation Format Conversion from BPSK to QPSK in Free-Space Communication Using OAM Beam |
| 3 . 学会等名<br>24th MicroOptics Conference (MOC2019), Toyama, No.P-61, Toyama, Nov. 2019. (国際学会)                                      |
| 4 . 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Kishikawa, Masaki Uetai and Nobuo Goto   |
| 2. 発表標題<br>Modulation Format Conversion Between QPSK, OOK and 8QAM Using Optical Nonlinear Effects |
| 3. 学会等名<br>24th MicroOptics Conference (MOC2019), Toyama, No.P-15, Toyama, Nov. 2019. (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2019年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|