

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04384

研究課題名(和文) 直接検波器アレーの空間的冗長性を用いた位相回復型光コヒーレントレシーバ

研究課題名(英文) Optical coherent detection based on phase retrieval

研究代表者

吉田 悠来 (Yoshida, Yuki)

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所フォトニックICT研究センター・主任研究員

研究者番号：50573036

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)：超高速光ファイバ通信で用いられる光コヒーレント受信機の簡素化を目指し、高速光検出器アレーと位相回復技術を用いた計算的同期検波方式を新たに提案した。画像処理分野で知られる位相回復アルゴリズムを援用し、受信信号の散乱パターンから光位相を逆算することで、高精度なレーザ光源や光集積回路なしに、光位相変調信号の受信を実現する。

位相回復受信のためのロバストな位相回復アルゴリズムを導出し、光16QAM信号など多様な光位相変調信号の受信が可能であることを実証した。さらに、提案受信方式を応用した簡便な光信号モニタリング手法についても提案、400Gbps 16QAM信号を用いた実証実験に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

基幹系光ファイバ伝送システムでは、光の強度だけでなく位相にも情報をのせることで超高速伝送を実現するが、光位相情報の検出、すなわちコヒーレント受信には、高精度なレーザ光源や複雑な光集積回路が必要となる。本研究ではこうした複雑な光デバイスを廃し、計算的に光位相を検出する新たな受信方式を提案した。提案手法により、光コヒーレント受信機の小型・簡素化が期待でき、今後、光コヒーレント方式による超高速光伝送システムが、アクセス系など我々のより身近なところに応用するための要素技術となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Towards an ultra-compact coherent transceiver solution, a novel optical coherent detection technique only by using a high-speed photodetector array has been proposed based on the idea of phase retrieval (PR). The optical phase information is reconstructed computationally from the scattering pattern of the received signal via PR; neither a local light nor an optical hybrid is needed.

We developed a low-complexity and robust RR algorithm and demonstrated the carrier-less detection of optical QPSK, 16QAM, and OFDM signals experimentally. In addition, the proposed PR-based coherent detection has been adopted to the optical signal monitoring. The proposed single-pixel optical modulation analyzer was demonstrated experimentally with a 400Gbps DP-16QAM signal.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：光コヒーレント通信 位相回復 光信号品質評価

1. 研究開始当初の背景

今日の基幹系光ファイバ通信網では、光の強度だけでなく位相にも情報を乗せて高効率な情報伝送を実現する光コヒーレント伝送方式が主流となっている。近年では、メトロ網やアクセス網といった、我々のより身近なネットワークにおいてもその採用が盛んに検討されている。しかし、光コヒーレント伝送方式では、光位相情報の受信に、高精度なローカル光源と複雑な光干渉回路が必要となるため(図 1a)、コスト要件の厳しい、近・中距離光ファイバ通信システムへの採用に向けては、この受信機の小型・簡素化が強く望まれている。

また、マルチモード・コアファイバを用いた超大容量光空間多重伝送や、光コヒーレント方式を用いた光無線通信などの次世代光通信システムでは、空間的に広がりを持つ(シングルモードではない)入力信号に対しても、コヒーレント受信を行う必要があることから、従来にはない空間方向の拡張性・柔軟性も求められる。

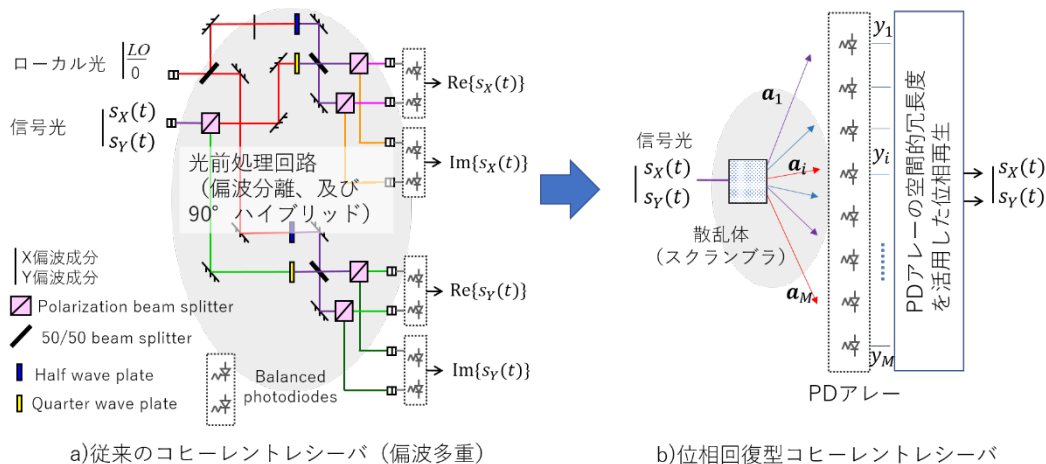


図 1 従来及び提案コヒーレントレシーバの構成図

2. 研究の目的

メトロアクセス網や光センシングといった、ユーザにより身近な領域への光コヒーレント方式の応用を加速するため、従来用いられてきたイントラダイン型光コヒーレント受信機(図 1 a)の簡素化と空間的な柔軟性の向上を目指す。回折イメージングなどの分野で広く知られる位相回復(Phase retrieval)技術を援用し、ローカル光源や光前処理回路を極力廃した、新たな位相検波方式の提案とその要素技術の確立に取り組む。

3. 研究の方法

回折パターンからの光強度分布から入力光電界の位相を推定する位相回復問題は、回折顕微法、波面センシング、天体スペックル干渉など広い分野において、重要な逆問題であり、解の一意性に関する理論や効率的な数値アルゴリズムが盛んに研究されてきた[1]。一方、我々はこれまで、広い受光面積と高速応答を両立する光検出器として、高集積 2 次元光検出器アレイ (2D-PDA) の研究開発を行ってきた(図 2)。2D-PDA は、画素数こそ限定的であるものの、超高速のイメージセンサと見なすこともできる。従って、光位相変調信号を画像として受信し、位相回復問題を解くことで、ローカル光源や干渉回路なしに光位相情報を受信することができるのではないかとこの発想に至った(図 1b)。特に、散乱体を用いたコヒーレント回折イメージング技術を応用することで、シングルモードではない光信号や空間的に多重された光信号なども一括受信可能な、空間的拡張性に優れたコヒーレント受信機の実現が期待できる。

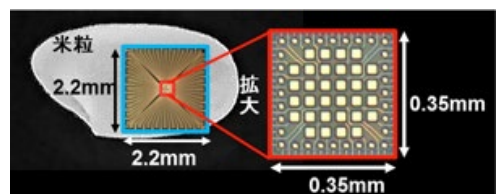


図 2 「高速集積型受光素子」(NICT プレスリリース, 2017 年 9 月)

しかしながら、2D-PDA は光検出器 (PD) 数=画素数が限定的であること、実際には画像ではなく高速の時系列に対する位相回復であるため散乱体への要件がイメージング分野のそれと異なること、ビット誤り率 (BER) など性能評価指標も異なることなど、回折イメージングの手法を直接的に応用することは難しい。そこで、本研究では、特に 2D-PDA と高速光コヒーレント伝送実験系を用いた実験的検証を中心として、位相回復型コヒーレントレシーバのためロバストな位相回復アルゴリズム、散乱体の要件及び現実的な実装方法等の各要素技術の評価・検討した。

4. 研究成果

(1) 伝送路中のモード分散及び変調信号の離散性の活用による位相回復受信の実現[2]

時系列に対する位相回復では、光散乱体が十分なメモリ機能を持ち、時間方向の情報を空間方向に展開できなければならない。受信機構造の複雑化なしにメモリ機能を実現するため、我々は本来信号歪みとして扱われるマルチモードファイバ伝送路中のモード分散及びモード間干渉を積極的に活用することを考えた。ただし、マルチモードファイバを含め、ファイバ通信路応答は一般に線形畳み込みシステムとして表現され、位相回復問題としては観測行列（ここでは散乱体の応答）が強い構造 (Toeplitz 構造) をもつ不良設定な位相回復問題となる。これを克服するため、変調信号が離散的な値をとることに注目し、離散性に基づく正則化を用いたロバストな位相回復受信アルゴリズム Discreteness-aware reweighted amplitude flow (DRAF) を提案した。これらのアプローチを統合し、位相回復型コヒーレント受信の実証実験を行い、高速光コヒーレント方式信号を、ローカル光源を用いずに受信することに世界で初めて成功した。

図3は実証実験系である。光信号フォーマットは10Gbaud QPSK, 16QAM, OFDM また偏波多重 QPSK とし、1-1.5 km のマルチモードファイバ (GI50) を伝送路かつ散乱体と見なした。受信機は、2D-PDA 及びファイバとの結合のためのコリメート系のみである。16 個の光検出器 (PD) からなる 2D-PDA で受信された強度パターンをオフライン処理することで位相回復受信を行った。図4aはQPSK及び16QAM信号に対するBER特性対位相回復アルゴリズムの反復回数である。図中、 N_r は位相回復に用いたサンプル数 (PD数の2倍にあたる) である。多様なフォーマットの光位相変調信号において、20%冗長度の誤り訂正符号 (FEC) を前提としたエラーフリー伝送 ($BER < 2.0 \times 10^{-2}$) を達成した。さらに図4bは、偏波多重 QPSK 信号の場合の BER 特性である。受信機構成の特段の変更なく偏波多重信号、すなわち空間多重された2チャンネルの光信号の分離・受信に成功している。このことは、位相回復型コヒーレントレシーバが従来にない空間的な拡張性・柔軟性を有していることを示している。

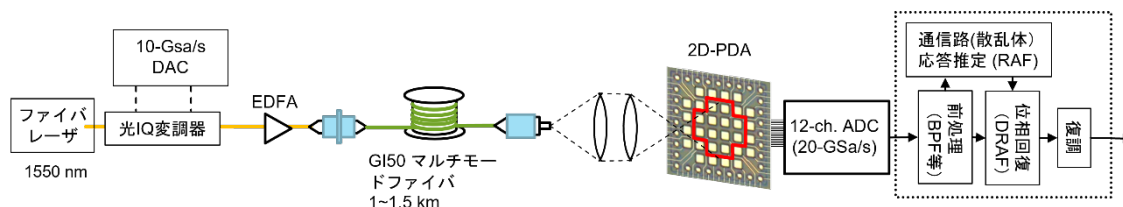


図3 マルチモードファイバと2D-PDAによる10Gbaud位相回復型コヒーレント受信実験系

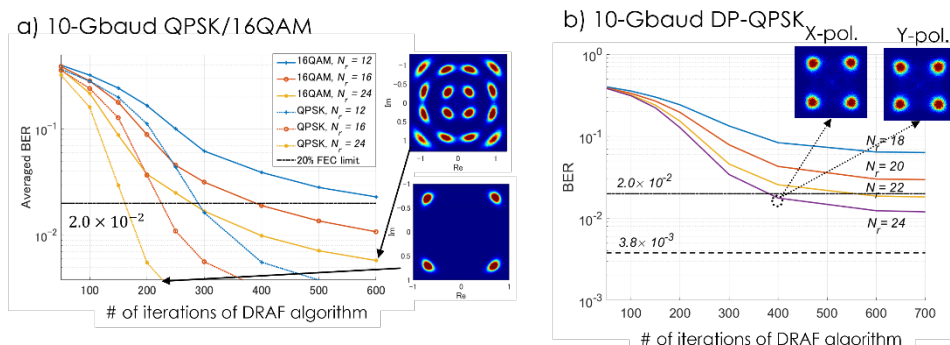


図4 10-Gbaud QPSK, 16QAM, 偏波多重 QPSK 信号の位相回復受信の BER 特性

(2) 位相回復型コヒーレントレシーバのさらなる簡素化[3]

位相回復問題では、複数の強度情報から未知変数 (信号) の位相情報を回復する。一意な位相回復に必要な未知変数あたりの強度情報の数は、サンプル複雑度 (SC: Sample complexity) と呼ばれ、位相回復問題の難易度を左右する重要なパラメータである。位相回復受信においては、SCは必要となるPD数 (厳密には、PD数とオーバーサンプリング率の積) に対応しており、実装コストの観点からも重要となる。一般に、雑音のない環境では、ランダムな写像を介して、未知変数数の4倍程度のサンプル (即ち、 $SC=4$) が得られれば位相情報を一意に回復できることが知られている [4]。しかしながら、前述の実証実験では $SC=12$ 前後であり、理論との乖離が大きい。そこで、位相回復型コヒーレントレシーバの簡素化に取り組んだ。

散乱体において、より効率的にランダム写像を生じる手法を検討し、また、不良設定となりやすい低 SC 領域においてもロバストな位相回復アルゴリズムを新たに提案するなど、ハード・ソフト両面から改良を行った。結果、40Gbps 16QAM 信号において、 $SC=6$ (6 PD あるいは、2倍オーバーサンプリングを用いる3 PD) を達成した。

図5は実験結果の一例である。ここでは、従前と同じくマルチモードファイバを散乱体としているが、適切にオフセット励振することで、モード分散・干渉をより効率的に発生させている。図5aはファイバ伝搬後のモードフィールドの遠視野像、図5bは12素子2D-PDAで観測された

散乱体のインパルス応答である。高次モードが積極的に励振されることで、よりランダムな写像が実現されている。図 5c は、実験データに基づく数値シミュレーションによって得られた、各位相回復アルゴリズムの BER 特性を表している。従来の勾配法ではなく、新たに交互方向乗数法 (ADMM) と信号の離散性を考慮した正則化を組み合わせたアルゴリズム (D-ADMM) を採用することで、SC=6 においても、40 反復程度でエラーフリー伝送 (20% FEC) を達成している。このとき、位相回復の要求演算量 (乗算数) は、ローカル光源を用いる従来のコヒーレントレシーバの 10 倍程度であり、近い将来にハードウェア実装も可能であると考えられる。

位相回復型コヒーレント受信については、我々の散乱体と 2D-PDA を用いた実証実験以降、様々なアプローチが提案されているが、本実験結果は、米 Bell Labs. のファイバ色分散と遅延干渉計を用いるアプローチ [5] などともよく一致しており、位相回復型コヒーレント受信方式のある種の現実的な性能限界を示唆するものとしても興味深い。

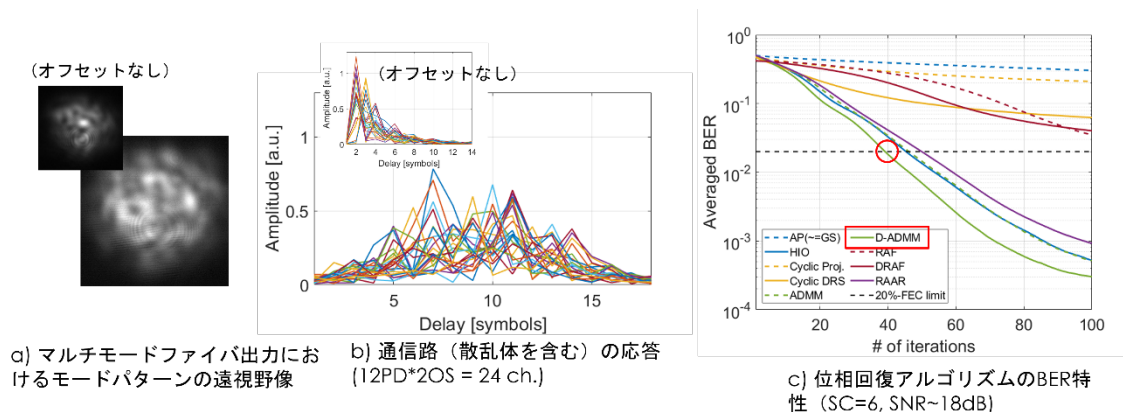


図 5 40-Gbps 16QAM 信号の位相回復受信実験結果 (サンプル複雑度:SC=6 の場合)

(3) 位相回復受信技術に応用した光変調モニタリング技術 [6]

散乱体を用いた位相回復受信では、事前に散乱体の応答をその位相成分まで含め知る必要がある。先行研究では、既知のパイロット信号系列と位相回復により、散乱体の応答を強度情報のみから推定する手法を提案した。この手法は、散乱体に限らず、一般にシステムのインパルス応答推定に適用可能である。特に、応答推定に係る位相回復問題のサンプル複雑度は、PD 数ではなく、パイロット信号の系列長で決定されることから、パイロット長が十分であれば、単一 PD のみの簡素な構成で応答推定が可能である。従って、光コヒーレント受信機を必要としない、安価な光コヒーレント伝送システム向けのモニタリング技術としての応用が期待できる。

我々は、この技術を用いた光 IQ 変調器のモニタリング技術、シングルピクセル光変調アナライザ (SP-OMA) を提案し、原理検証実験を行った。50Gbaud 超の高速かつ高多値数の光 QAM フォーマットを用いる次世代の光ファイバ通信システムにおいては、光 IQ 変調器内の実相・同相経路間の微小な不均衡 (IQ 不均衡) が特性劣化の大きな要因となる。特に、高速変調で問題となる周波数選択的な IQ 不均衡の測定には、従来、較正された光コヒーレント受信機、あるいは特別のトーン信号を入力・掃引する必要があった。これら従来法では、サービス中のリアルタイムモニタリングが困難であり、温度変化や経年劣化の影響に追従できない。SP-OMA では、光変調器と集積化、あるいは送受信機ユニット内に配されたモニタ PD のみで周波数選択制 IQ 不均衡をモニタリングすることが可能となる (図 6a)。

図 6b は、64-Gbaud 16QAM 信号を用いた実証実験結果の一例である。ここでは、送信機側デジタル回路において意図的に周波数選択制 IQ 不均衡を生じ、不均衡成分を従来のコヒーレント受信機を用いる手法 (CO-OMA) 及び提案する SP-OMA で測定した。結果の可視化のため、推定された IQ 不均衡パラメータを基に、数値シミュレーションにより歪んだ光信号を模擬したものが図 6b である。3つのパターンの IQ 不均衡について、いずれの場合も、SP-OMA は強度情報のみから、CO-OMA と遜色のない精度で信号歪を再現している。実際、理論的には、SP-OMA の推定精度は CO-OMA と比較して雑音電力換算で 3dB 程度低いと考えられる。しかし、実用上は、コヒーレント受信機側の IQ 不均衡により CO-OMA の精度が制限されるため、SP-OMA は簡素なハードウェア構成にもかかわらず、CO-OMA と同程度の精度を達成可能である。

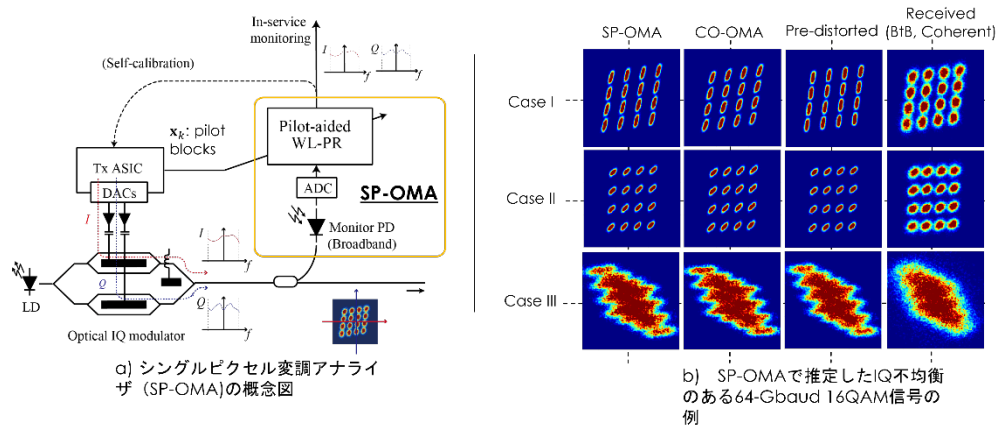


図 6 a) シングルピクセル光変調アナライザの概念図、及び b) 64-Gbaud 16QAM 信号を用いた実証実験結果

- [1] Y. Shechtman, Y. C. Eldar, O. Cohen, H. N. Chapman, J. Miao, and M. Segev, "Phase Retrieval with Application to Optical Imaging: A contemporary overview," *IEEE Signal Process. Mag.* 32(3), 87-109 (2015).
- [2] Y. Yoshida, T. Umezawa, A. Kanno, and N. Yamamoto, "A Phase-Retrieving Coherent Receiver Based on Two-Dimensional Photodetector Array," *J. Lightwave Technol.* 38(1), 90-100 (2020).
- [3] Y. Yoshida, "Phase retrieval for optical communication (tutorial)", in 47th European Conference on Optical Communication, Sep. 2021, paper We4C2.1.
- A. S. Bandeira, J. Cahill, D. G. Mixon, and A. A. Nelson, "Saving phase: Injectivity and stability for phase retrieval," *Appl. Comput. Harmon. Anal.* 37(1), 106-125 (2014).
- [4] A. S. Bandeira, J. Cahill, D. G. Mixon, and A. A. Nelson, "Saving phase: Injectivity and stability for phase retrieval," *Appl. Comput. Harmon. Anal.* 37(1), 106-125 (2014).
- [5] H. Chen, N. K. Fontaine, R.-J. Essiambre, H. Huang, M. Mazur, R. Ryf, and D. T. Neilson, "Space-Time Diversity Phase Retrieval Receiver," in *Optical Fiber Communication Conference 2021*, paper. Th4D.3.
- [6] Y. Yoshida, S. Yoshida, S. Oda, T. Hoshida, N. Yamamoto, and A. Kanno, "Single-pixel optical modulation analyzer: a low-complexity frequency-dependent IQ imbalance monitor based on direct detection with phase retrieval," *Opt. Express* 29(20), 31115-31129 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshida Yuki, Yoshida Setsuo, Oda Shoichiro, Hoshida Takeshi, Yamamoto Naokatsu, Kanno Atsushi	4. 巻 29
2. 論文標題 Single-pixel optical modulation analyzer: a low-complexity frequency-dependent IQ imbalance monitor based on direct detection with phase retrieval	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 31115 ~ 31115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.433148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Yuki, Umezawa Toshimasa, Kanno Atsushi, Yamamoto Naokatsu	4. 巻 38
2. 論文標題 A Phase-Retrieving Coherent Receiver Based on Two-Dimensional Photodetector Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 90 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2019.2947305	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 5件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Yuki Yoshida
2. 発表標題 Phase retrieval for optical communication (tutorial)
3. 学会等名 47th European Conference on Optical Communication (ECOC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yoshida, S. Yoshida, S. Oda, T. Hoshida and N. Yamamoto,
2. 発表標題 Simultaneous Monitoring of Frequency-dependent IQ Imbalances in a Dual-polarization IQ Modulator by using aSingle Photodetector: A Phase Retrieval Approach
3. 学会等名 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Yoshida
2. 発表標題 Single-Pixel IQ Monitor via Computational Coherent Reception with Widely Linear Phase Retrieval
3. 学会等名 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Yoshida
2. 発表標題 Phase-Retrieving Coherent Reception and its Sample Complexity
3. 学会等名 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田悠来, 梅沢俊匡, 菅野敦史, 山本直克
2. 発表標題 高速光検出器アレーを用いた位相回復型コヒーレント受信方式
3. 学会等名 電子情報通信学会 LQE/ OCS/ OPE研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshida Yuki、Umezawa Toshimasa、Kanno Atsushi、Yamamoto Naokatsu
2. 発表標題 Experimental demonstration of nural network based demodulation for on-off encoded eigenvalue modulation," in proc. ECOC
3. 学会等名 The 45th European Conference on Optical Communication (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田悠来
2. 発表標題 位相回復信号処理を用いたキャリアレス光コヒーレント受信技術
3. 学会等名 レーザー学会第40回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshida Yuki
2. 発表標題 Carrierless coherent receivers based on phase retrieval
3. 学会等名 Photonics West（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshida Yuki, Umezawa Toshimasa, Kanno Atsushi, Inagaki Keizo, Yamamoto Naokatsu, Kawanishi Tetsuya
2. 発表標題 On the Sample Complexity of Phase-Retrieval Receiver Based on 2-D Arrayed Photodetectors
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 位相再生型光同期検波器	発明者 吉田 悠来、梅沢 俊 匡、菅野 敦史、山本 直克	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、19-030P	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 位相回復に基づく光変調器評価技術	発明者 吉田 悠来、山本 直 克	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、20-036P	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

報道発表：世界初、光コヒーレント伝送方式のための新しい受信方式を開発
<https://www.nict.go.jp/press/2019/04/25-1.html>

受賞：第67回（令和3年度）前島密賞奨励賞
<https://www.nict.go.jp/publicity/topics/2022/04/28-3.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------