

令和元年6月25日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04366

研究課題名(和文)弱結合モード多重伝送技術に関する研究

研究課題名(英文)Weakly-coupled mode-multiplexed fiber transmission

研究代表者

五十嵐 浩司(Igarashi, Koji)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80436534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、モード間結合を制限することで、MIMO回路規模の削減が可能となる弱結合モード多重伝送技術を確立し、その伝送性能を明らかにすることが目的である。実時間MIMO光受信器を実現し、それを用いて世界で初めて波長多重・10モード多重・両偏波QPSK光信号の弱結合10モードファイバ伝送の実時間評価を行った。その結果、FPGA実装可能な実時間MIMO信号処理を使用したとしても、弱結合モード多重方式を採用することで10モード多重が可能となり、モード数に対する伝送容量のスケール則が成り立つことがわかった。弱結合モード多重伝送方式は伝送容量拡大に極めて有効である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モード多重伝送の実時間評価に関しては、2015年に3モード多重伝送実験が報告されただけであったが、本報告で10モード多重伝送実験が達成された。これは極めて大きな進展である。さらに、実験後にBERを計算するオフライン信号処理に比べて、実時間では瞬時にBER測定結果が得られる。この伝送性能を実時間で評価できる良さを実感できたのは、伝送ファイバ入力パワーを大きくしたときにBER劣化に直ぐに気づいた点である。これは10モードファイバにおける非線形効果によるものであり、世界で初めてモード多重伝送における非線形歪みを実時間で観測した瞬間であった。

研究成果の概要(英文)：We numerically and experimentally investigated the performance of the weakly-coupled mode-multiplexed technique, which is possible to reduce drastically the computational complexity of the MIMO signal processing. We implemented an optical MIMO receiver based on a FPGA board, a mode demultiplexer, and two optical coherent receivers. With the MIMO receiver, we experimentally demonstrated real-time weakly-coupled 10-mode fiber transmission of wavelength-multiplexed 10-mode-multiplexed dual-polarization QPSK optical signals. The results suggest that weakly-coupled mode-multiplexed technique make possible to increase the transmission capacity in proportional to the mode-multiplexed number, and the weakly-coupled mode-multiplexed technique is effective to enhance the transmission capacity of the optical fiber transmission systems.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：モード多重伝送 デジタル信号処理 光ファイバ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

従来の単一モード光ファイバ伝送では、100 Tbit/s 付近に大容量化の限界がある。その限界を打開するのが、異なるファイバモードに異なる信号を多重するモード分割多重を用いた光空間多重伝送技術である。原理的には、モード数に比例して伝送容量を増加させることが可能である。最大の問題が、モード間結合を補償するために光受信器に巨大な回路規模の MIMO 信号処理が必要となる点である。例えば、10 モード多重伝送では、MIMO 信号処理の行列サイズが  $20 \times 20$  に増大し、デジタル電子回路による実時間実装が非現実的となる。このようにモード数の 2 乗に比例して回路規模が大きくなる MIMO が必須なアプローチでは、モード多重数に対する伝送容量増大におけるスケール則が成り立たない。現状のモード多重伝送実験では、受信信号を PC に取り込み、オフライン信号処理で復調している報告がほとんどである。実システムでは実時間信号処理が必須であることは言うまでもなく、本来は実時間 MIMO 光受信器を用いたモード多重伝送性能評価が必要不可欠である。

これに対して、伝送ファイバや光デバイスでのモード間結合を完全抑圧することは困難であるものの、可能な限り抑圧するアプローチが考えられる。この場合、受信器側で全モード間結合を補償する必要はなく、最も大きなモード間結合が生じる縮退モード間結合のみを MIMO で補償する。これを弱結合モード多重伝送方式と呼ぶ。この場合、MIMO 行列が分割されることで回路規模の大幅削減が期待される。例えば、10 モード多重伝送の場合、MIMO 信号処理の行列サイズは  $4 \times 4$  もしくは  $2 \times 2$  に大幅に削減される。これは、現状 100 Gbit/s システムの 4 倍程度の回路規模であり、FPGA 実装も現実的である。すなわち、この手法ではモード多重数と伝送容量にスケール則が成り立つ。ただし、モード多重分離器・光増幅器といった光デバイスや伝送用数モードファイバなどの光領域でのモード間結合を可能な限り抑圧する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、モード間結合を制限することで、MIMO 回路規模の削減が可能となる弱結合モード多重伝送技術を確立し、その伝送性能を明らかにする。ここではモード間結合が抑圧されたモード多重分離器とモード多重光アンプを実現する。そして、光領域でのモード間遅延補償器を実現する。これらを用いた弱結合モード多重伝送実験を行い、弱結合モード多重伝送方式の性能を明らかにする。

### 3. 研究の方法

弱結合 10 モード多重伝送実験のために試作した 10 モードファイバ(10 mode fiber: 10MF)とモード多重分離器を試作する。FPGA(field programmable gate array)デジタル電子回路を用いて実時間 MIMO 信号処理を実装した実時間 MIMO 光受信器を実現する。それらを組み合わせ、実時間 MIMO 光受信器を用いた実時間弱結合 10 モード多重伝送実験を行う。弱結合モード多重伝送方式の有効性を明らかにする。

### 4. 研究成果

弱結合モード多重伝送システムでは、異種直線偏光(linearly polarized: LP)モード間での結合を可能な限り抑圧し、縮退モード間結合のみを受信器側 MIMO で補償する。この場合、MIMO 信号処理に求められる行列サイズが最大で  $4 \times 4$  まで削減される。本研究では、MIMO 信号処理を FPGA ボードで実装し、実時間 MIMO 光受信器を実現する。ただし、新規 FPGA ボードの設計・試作には一千万円の予算でも足りない。本研究では予算的制約から、各社から提供されている評価ボードを活用する工夫を行う。また、受信電気信号を FPGA ヘストアするためにはアナログ・デジタル変換器(analog-to-digital convertor: ADC)が必要となる。光通信では一般的に取り扱っている 10 Gbaud を超える高速光信号を受信するには、10 GSample/s を超える ADC が必要となる。これは一台で 500 万円を超えてしまい、本予算規模では入手困難である。ここでは、一波長当たりの信号帯域が 12.5 GHz でもサブキャリア変調方式を採用することで、1.25 GSample/sec 動作の ADC を使用できるように工夫した。以上の工夫によって予算制約があるものの符号速度やモード数などターゲットを下方修正することなく MIMO 実装を実現している点に注目されたい。以上のフレームワークのもと、商用 FPGA 評価ボードと ADC カードを選定し、実時間 MIMO 信号処理回路を試作した。この MIMO 信号処理の心臓部は、受信信号に適応して最適等化を行う適応制御である。一般的な手法である LMS(least mean square)アルゴリズムでは、実装による演算遅延によって MIMO 信号処理性能が著しく劣化する。この回路では、光源の位相揺らぎが大きなコヒーレント光受信方式への適用が困難であることがわかった。この課題を解決するために適応等化にキャリア位相を補償する機構を追加実装し、コヒーレント光受信方式にも適用可能な復調動作が実現できるかを明らかにした。

縮退モード二つを復調する MIMO 信号処理を FPGA で実装した実時間 MIMO 信号処理回路、モード多重分離器、そしてコヒーレント光受信器を組み合わせ、試作した実時間 MIMO 光受信器の構成を図 1 に示す。伝送後の 10 モード・偏波多重四位相シフトキーイング(quadrature phase shift keying: QPSK)光信号をモード多重分離し、縮退モード 2 つを同時にホモダイン光受信する。1.25 GS/s 4 チャンネル ADC カードと Xilinx 製 Vertex 7 FPGA 評価ボード VC707 の 2 式を用いて、受信器出力電気信号 8 チャンネルを FPGA にストアする。この FPGA ボードでは、高速フーリエ変換(fast Fourier transformation: FFT)を用いた周波数領域信号処理を基本とするフィルタリング・オフセット周波数抑圧を実装した。ブロックサイズは 1024 であり、時間領域の中央サン

プル 512 をピックアップするオーバーラップ FFT ベースの信号処理である。この前処理を縮退モード 2 信号に対して行った後、次段 Xilinx 製 Vertex 7 FPGA 評価ボード VC7215 に転送し MIMO 信号処理を行う。その MIMO 信号処理の構成を図 2(a) に示す。受信された縮退モード 2 信号・両偏波成分の実時間信号 8 チャンネルをタップ係数  $c_1(k)$  および  $c_2(k)$  を有する MIMO によって等化する。等化後にキャリア位相補償に相当する 1 タップ等化器  $p(k)$  および  $f(k)$  を乗算し、出力等化サンプルとする。この  $p(k)$  と  $f(k)$  によって MIMO とは独立にキャリア位相を補償する点が本研究で新規なところである。これらタップ係数は適応制御によってアップデートされる。ここで重要なのは、実際の信号処理ではアップデートするフィードバック制御において演算遅延が生じる点である。フィードバック制御における遅延は動作不安定性を生じさせる。我々が実装した FPGA ボードでは遅延量を 20 サンプルまで抑圧した。この遅延がある場合の BER の信号対雑音比 (signal-to-noise ratio: SNR) 計算結果を図 3 に示す。我々が提案するキャリア位相補償機構を付けた場合の結果を図 3(a) である。比較のために通常の LMS アルゴリズムの結果を図 3(b) に示す。通常の LMS アルゴリズムの MIMO 適応制御ではスペクトル線幅 5 kHz の光源を用いると大きな BER 劣化が生じる。つまり、一般の光源は少なくとも 10 kHz 以上の線幅を有す

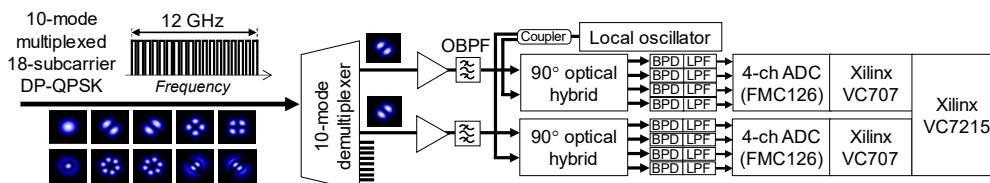


図 1 実時間 MIMO 光受信器の構成。

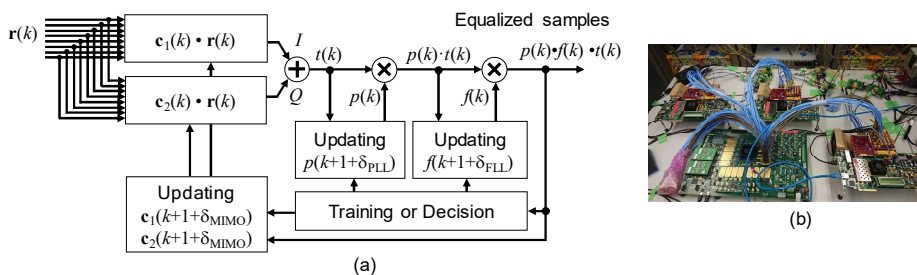


図 2 実時間 MIMO 信号処理の (a) ブロック図と (b) 外観写真。

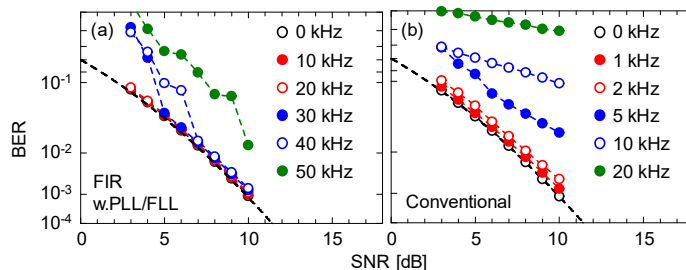


図 3 (a) キャリア位相補償機構内蔵型 MIMO を用いた場合と (b) 通常の LMS アルゴリズムを用いた場合の BER の SNR 依存性計算結果。パラメータは光源のスペクトル線幅を表す。

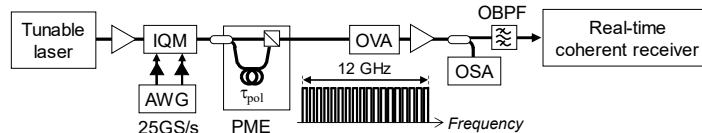


図 4 偏波多重 18 サブキャリア QPSK 光信号の BER 実時間測定系。

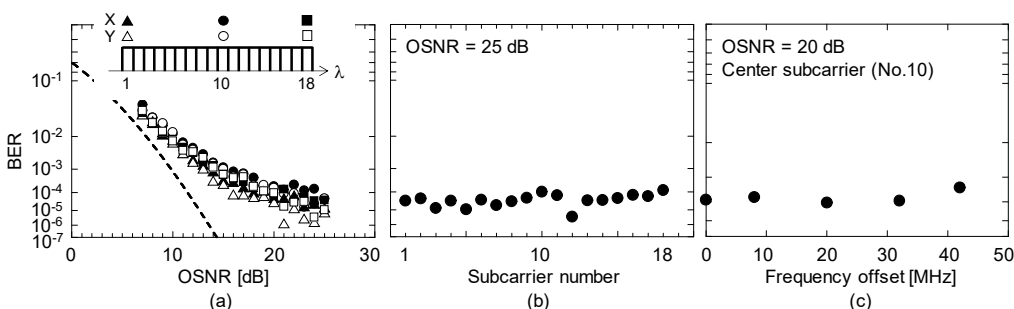


図 5 (a) 中央サブキャリアと両端サブキャリアの BER 測定結果。(b) OSNR = 25 dB における全サブキャリアの BER 測定結果。(c) 中央サブキャリア BER の周波数オフセット依存性。

ることから、コヒーレント光受信器では動作しないことがわかる。一方、我々の方式ではスペクトル線幅 50 kHz の光源を用いても復調動作が可能であることがシミュレーションによって示されている。このキャリア位相補償機構を内蔵した MIMO 信号処理で等化されたサンプルを QPSK 復調し、BER を実測する回路も FPGA ボードに実装している。実現した実時間信号処理回路の外観図を図 2(b) に示す。

試作した実時間 MIMO 受信器の基礎特性を評価するために、モード多重のない単一モード偏波多重 QPSK 光信号の受信特性を測定した。その実験系を図 4 に示す。波長可変光源から得られる線幅 5 kHz の連続光を光 IQ 変調器で変調した。この光 IQ 変調器は任意電気信号波形整形器 (arbitrary waveform generator: AWG) から得られる 12.5 GHz 帯域 18 サブキャリア QPSK ベースバンド信号 2 チャンネルによって駆動される。その変調光信号を偏波多重することで偏波多重 18 サブキャリア QPSK 光信号を得た。光信号対雑音比 (optical signal-to-noise ratio: OSNR) を調整した後、実時間 MIMO 光受信器で両偏波成分・全サブキャリアの BER を実時間測定した。その代表的な結果を図 5(a) に示す。中央サブキャリア、両端サブキャリアの  $x$  偏波・ $y$  偏波の結果をそれぞれ黒丸・白丸、黒三角・白三角、そして黒四角・白四角でプロットした。BER が  $10^{-4}$  付近にフロアが見られたものの、安定な復調動作が実現された。また、OSNR が 25 dB における BER のサブキャリア依存性を図 5(b) に示す。サブキャリア依存性がみられるものの、実時間 MIMO 信号処理動作には大きな影響はなかった。また、実時間 MIMO 光信号処理の安定性を評価するための、周波数オフセットを大きくした際の動作を確認した。その結果として、中央サブキャリア BER の周波数オフセット依存性を図 5(c) に示す。周波数オフセットが 30 MHz まで大きくしても BER 劣化はなく安定した動作が得られた。40 MHz 以上にすると多少 BER が劣化した。これは ADC 前に使用している電気低域通過フィルタの帯域制限による劣化である。以上から、実装した実時間 MIMO 光受信器は極めて安定に動作可能であることが示された。

実現した実時間 MIMO 光受信器を用いて、波長多重・10 モード多重・偏波多重 QPSK 光信号の弱結合 10 モードファイバ伝送実験を行った。その実験系を図 6 に示す。光源から得られる波長 1550 nm の連続光を光 IQ 変調器に入力した。AWG から得られる 12.5 GHz 帯域 18 サブキャリア QPSK 信号を用いて光 IQ 変調器を駆動した。その変調光を偏波多重および波長多重することで、3 チャンネル波長多重・偏波多重 18 サブキャリア QPSK 光信号を得た。それを 10 分岐し、信号相関をなくすために遅延させた後、10 モード多重器に入力し波長多重・10 モード多重・偏波多重 QPSK 光信号を得た。この 10 モード光信号を 48 km の弱結合モード多重伝送用 10 モードファイバで伝送した後、実時間 MIMO 光受信器で各モードを検波し、全波長・全モード・全サブキャリアの BER を測定した。

単一波長伝送における 10 モード各信号の BER 測定結果を図 7 に示す。ここには 18 サブキャリア全ての BER の平均値をプロットしている。黒丸および白丸がそれぞれ  $x$  偏波及び  $y$  偏波の

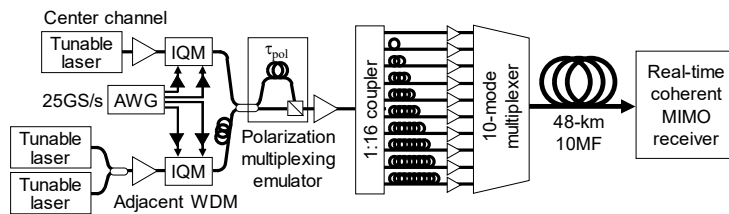


図 6 実時間 MIMO 光受信器を用いた波長多重・10 モード多重・偏波多重 QPSK 光信号の弱結合 10 モードファイバ伝送実験系。

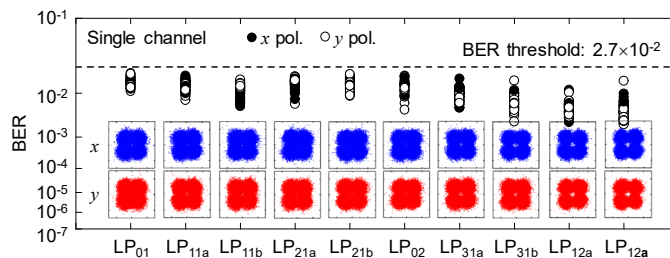


図 7 単一波長時における全モードの BER 測定結果。復調されたコンステレーション波形も示す。

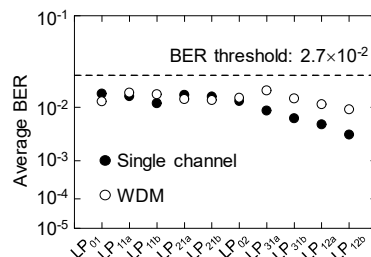


図 8 単一波長および波長多重時における全モードの BER 測定結果。

実験結果である。参考のために復調された QPSK 信号のコンステレーション波形も併記する。48 km 伝送によって生じる異種 LP モード間結合によるクロストークで BER 特性が劣化するものの、20%オーバーヘッドを有する前方誤り訂正 (forward error correction: FEC) を用いてエラーフリー動作が得られる閾値  $2.7 \times 10^{-2}$  以下の値が得られた。次に、単一波長および 3 チャネル波長多重における中央チャネルの平均 BER 測定結果を、それぞれ図 3 黒丸と白丸でプロットする。波長多重時でも FEC 閾値以下の BER 特性が得られた。この伝送実験において、誤り訂正オーバーヘッド 20%を仮定した際の一波長当たりの伝送容量は 375 Gbit/s となる。

FPGA 実装可能な実時間 MIMO 信号処理を使用したとしても、弱結合モード多重方式を採用することで 10 モード多重が可能となり、モード数に対する伝送容量のスケール則が成り立つことがわかった。このことから、弱結合モード多重伝送方式は伝送容量拡大に極めて有効であることがわかる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件、全て査読あり)

① (Invited) K. Igarashi, K. J. Park, T. Tsuritani, I. Morita, and B. Y. Kim, "All-fiber-based selective mode multiplexer and demultiplexer for weakly-coupled mode-division multiplexed systems," *Optics Communications*, vol. 408, pp. 58-62, February 2018.

DOI: 10.1016/j.optcom.2017.08.049

② S. Yuan, K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, "Bit-Error Ratio Performance Improvement Using Iterative Decoding for Polybinary-shaped Super-Nyquist Wavelength Division Multiplexed Signals," *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, vol. 35, no. 21, pp. 4605-4612, Nov. 2017.

DOI: 10.1109/JLT.2017.2753819

③ K. Igarashi, D. Soma, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, N. Yoshikane, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "Ultra-dense spatial-division-multiplexed optical fiber transmission over 6-mode 19-core fibers," *Opt. Express*, vol. 24, No. 9, pp. 10213-10231, May 2016.

DOI: 10.1364/OE.24.010213

④ (invited paper) K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, "Polybinary Shaping for Highly-Spectral-Efficient Super-Nyquist WDM QAM Signals," *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, vol. 34, no. 8, pp. 1724-1731, April 2016.

DOI: 10.1109/JLT.2016.2524200

[学会発表] (計 3 8 件)

以下には国際会議発表 (③⑦⑩以外査読あり) のみを示す。これ以外に、国内会議発表は 2 2 件である。

① S. Yuan and K. Igarashi, "MAP Decoder for Nonlinear Compensation in WDM DP-QPSK Systems," *Asia Communications and Photonics Conference (ACP2018)*, S4C.6, Hangzhou, China, October 2018.

② (invited) K. Igarashi, "Signal Processing for Ultra-dense WDM/SDM Transmission Systems," *2018 IEEE Photonics Conference (IPC2018)*, MA1.3, Reston, VA, USA, October 2018.

③ (invited) K. Igarashi, "Signal Processing for Mode Multiplexed Transmission in the Optical Domain and Digital Domain," *Photonics in Switching and Computing (PSC2018)*, Workshop 3: Space Division Multiplexing - Systems, Devices, Fibers and Networking, Limassol, Cyprus, September 2018.

④ K. Igarashi, Y. Wakayama, D. Soma, T. Tsuritani, I. Morita, K. J. Park, J. Ko and B. Y. Kim, "Low-loss and Low-crosstalk All-fiber-based Six-mode Multiplexer and Demultiplexer for Mode-Multiplexed QAM Signals in C-band," *Conference on Optical Fiber Communication (OFC 2018)*, Th1K.3, San Diego, CA, USA, March 2018.

⑤ S. Yuan and K. Igarashi, "Improvement on Post-FEC BER Performance by Iterative Decoding Between a Feed-forward Carrier-Phase Estimator and an FEC Decoder," *Asia Communications and Photonics Conference (ACP2017)*, S3B.6, Guangzhou, Guangdong, China, November 2017.

⑥ K. Igarashi, "Suppression of IQ Modulation Error Based on Single-Sideband Modulation to Generate Ultrahigh Order QAM Optical Signals," *Asia Communications and Photonics Conference (ACP2017)*, M2C.1, Guangzhou, Guangdong, China, November 2017.

⑦ (invited) K. Igarashi, "What is the best fibre for the development of space-division multiplexing systems? Topics: SDM Transmission Experiments," *43rd European Conference on Optical Communication (ECOC2017)*, workshop, Gothenburg, Sweden, September 2017.

⑧ K. Igarashi, "Adaptive Equalization Combined with Maximum Likelihood Decoder for

Trellis Code Modulation based on High-order QAM Signals,” 22nd Optoelectronics and Communications Conference (OECC2017), P3-030, Singapore, August 2017.

⑨ S. Yuan and K. Igarashi, “Iterative Decoding Between Feed-forward Carrier Recovery and FEC Decoding to Compensate for Laser Phase Noise,” 22nd Optoelectronics and Communications Conference (OECC2017), P3-032, Singapore, August 2017.

⑩ (invited) K. Igarashi, T. Kobayashi, T. Hayashi, T. Sakamoto, and K. Imamura, “Making the Case for SDM in 2027,” Conference on Optical Fiber Communication (OFC 2017), workshop, Los Angeles, CA, USA, March 2017.

⑪ (invited) K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, “Ultra-high Capacity Transmission Based on Ultra-dense WDM/SDM Techniques,” Asia Communications and Photonics Conference (ACP2016), AF1D.3, Wuhan, China, November 2016.

⑫ S. Yuan, K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita “Improvement on FEC performance by Turbo Equalization for Super-Nyquist WDM systems,” 42nd European Conference on Optical Communication (ECOC2016), W.2.C.4, Dusseldorf, Germany, September 2016.

⑬ S. Yuan, K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita “Turbo Equalization with 20%-overhead Turbo Code in Super-Nyquist WDM Systems,” Signal Processing in Photonic Communications 2016 (SPPCom2016), SpW2G.7, Vancouver, Canada, July 2016.

⑭ K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, “Bit-error Rate Performance of Six-mode-multiplexed DP-64QAM signals,” IEEE Summer Topicals Meeting Series 2016 (SUM2016), WE3.2, Newport Beach, CA, USA, July 2016.

⑮ S. Yuan and K. Igarashi, “Turbo Equalization for Duobinary-shaped Signals in Super-Nyquist WDM Systems,” 21st Optoelectronics and Communications Conference (OECC2016), TuB4-4, Niigata, Japan, July 2016.

⑯ (invited) K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, “Ultra-high-capacity Transmission over Few-mode Multi-core Fibers,” 21st Optoelectronics and Communications Conference (OECC2016), S2-5, Niigata, Japan, July 2016.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

## 6. 研究組織

研究代表者のみ

※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。