

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630161

研究課題名(和文) 光多値変調信号のスーパーナイキスト波長多重伝送技術

研究課題名(英文) Super-Nyquist WDM technique for high-order QAM signals

研究代表者

五十嵐 浩司 (Igarashi, Koji)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80436534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：信号符号速度以下の周波数間隔で波長多重するスーパーナイキスト波長多重(wavelength-division multiplexed: WDM)伝送システムにおいて、偏波多重直交振幅変調信号に対するポリバイナリ整形の性能を明らかにした。ポリバイナリ整形を用いたスーパーナイキストWDM技術によって、ターゲットSNRと周波数利用効率を高粒度で最適化可能となることが示された。さらに、ポリバイナリ整形を用いたスーパーナイキストWDM技術と空間多重技術を組み合わせることで、世界で初めて2Pbit/sを超える伝送を実現し、世界レコードの周波数利用効率456bit/s/Hzを達成した。

研究成果の概要(英文)：We numerically and experimentally evaluated performance of polybinary shaping for optical high-order quadrature amplitude modulated signals in the Super-Nyquist wavelength-division multiplexed (WDM) system, in which WDM spacing is smaller than the baudrate of the signal, resulting in the extremely high spectral efficiency. The polybinary shaping technique is effective for optimization between spectral efficiency and required signal-to-noise ratio corresponding to the target transmission length. In addition, we applied the Super-Nyquist WDM technique to space-division multiplexed fiber transmission. The transmission capacity over 2 Pbit/s was achieved for the first time, and the record spectral efficiency of 456 bit/s/Hz was achieved.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：超大容量伝送 スペクトル整形 信号処理 波長多重

1. 研究開始当初の背景

波長多重(wavelength-division multiplexed: WDM)伝送システムにおいて周波数利用効率向上には、複数の光信号を可能な限り高密度に光周波数領域に多重することが有効である。近年、光 IQ 変調器とデジタル・アナログ(digital-to-analog: DA)変換器を用いることで、高精度でスペクトル整形が可能となり、スペクトルパワー密度が高い光信号生成が容易となった。特に、信号符号速度帯域の矩形スペクトル波形に整形した光信号(ナイキスト整形光信号と呼ぶ)を、符号速度の周波数間隔で波長多重するナイキスト WDM が提案・デモンストレーションされている[1-3]。

さらなる WDM 高密度化の方法として、符号速度以下の周波数間隔で波長多重する faster-than ナイキスト WDM 技術やスーパーナイキスト WDM 技術(本稿ではスーパーナイキスト WDM に統一する)が提案されている[4]。このスーパーナイキスト WDM システムでは、WDM クロストークを可能な限り抑圧するために、ナイキスト整形よりも狭帯域にスペクトル整形することが必須となる。そのようなスペクトル狭帯域化は著しい符号間干渉(inter-symbol interference: ISI)を生じさせるが、最尤系列推定(maximum likelihood sequence estimation: MLSE)によって補償可能である[5]。この MLSE の計算量を削減に最適な有限インパルス応答(finite impulse response: FIR)フィルタがポリバイナリ整形である。近年、最も簡易なポリバイナリ整形であるデュオバイナリ整形を用いたスーパーナイキスト WDM 伝送の大規模実験が報告されている[6,7,8]。

2. 研究の目的

本研究では、スーパーナイキスト WDM 直交振幅変調(quadrature amplitude modulation: QAM)信号に対するポリバイナリ整形の性能を定量的・実験的に評価する。四相位相シフトキーイング(quadrature phase shift keying: QPSK)および 16QAM 信号に対して、ポリバイナリ整形で最も簡易なデュオバイナリ整形と、それを二回行うトリバイナリ整形を適用させて、スーパーナイキスト WDM した場合のビット誤り率(bit-error rate: BER)を測定する。その結果から、周波数利用効率と要求信号雑音比(signal-to-noise ratio: SNR)の関係を明らかにする。また、この技術と空間多重(space-division multiplexing: SDM)技術を組み合わせることで達成された、2.05 Pbit/s 伝送実験の結果も示す[8]。

3. 研究の方法

MLSE とは、複数の受信サンプルに基づき、最も可能性の高い送信符号を推定することである。受信サンプルすべての受信確率が同じ場合、sample-by-sample での判定と同じであるが、受信サンプルが前後受信サンプルと相

関を有する場合は推定が可能となる。例えば、畳み込み符号のような相関符号で符号化された信号を受信する場合や、前後符号と干渉がある、言い換えると ISI がある伝送路の場合において、この MLSE は効果が生じる。後者に関して帯域狭帯域化(すなわちフィルタリング)によって生じた ISI を MLSE で補償することを考えるのが本研究である。

MLSE では、前後受信サンプルとの相関性を状態遷移図で記述される。この状態数が小さいほど MLSE の計算量が削減される。ここで、ISI を生じさせる符号間隔離散 FIR フィルタの中でも、タップ係数が対称で、最大のユークリッド距離となる出力符号を与えるものが、ポリバイナリ整形である。最も状態数が少ないものは図 1(a)で示される構成のデュオバイナリ整形である。前符号との和をとる FIR フィルタの後に矩形ナイキスト整形を行う構成である。例えば、2 値符号(± 1)を入力した場合、前符号との和が出力され、3 値信号が生成される。デュオバイナリ整形のインパルス応答を図 2(a)の実線で示す。破線で示す遅延した矩形ナイキスト整形のインパルス応答の和となる。この出力符号のスペクトルが図 3(a)であり、半値全幅(full-width half-maximum: FWHM)が符号速度 B の半分となる。したがって、高密度に波長多重しても隣接チャンネルからのクロストークを十分に抑圧可能となる。

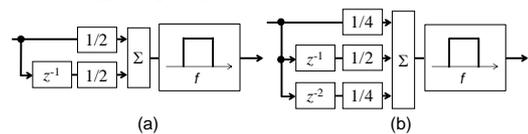


図 1 (a)デュオバイナリ整形と(b)ポリバイナリ整形の FIR フィルタ構成。

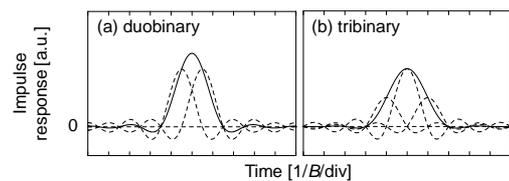


図 2 (a)デュオバイナリ整形と(b)トリバイナリ整形のインパルス応答。

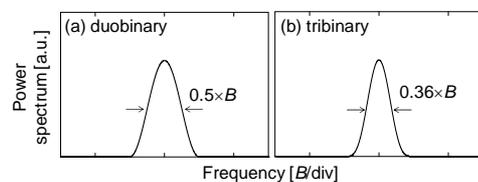


図 3 (a)デュオバイナリ整形と(b)トリバイナリ整形のパワースペクトル波形。 B は符号速度。

デュオバイナリ整形を 2 回行うのがトリバイナリ整形である。この FIR フィルタ構成を図 1(b)に示し、インパルス応答は図 2(b)となる。3 つの矩形ナイキスト整形インパルス応答の和となる。このときのパワースペクトル波形を図 3(b)に示す。デュオバイナリよりもスペクトル狭帯域化され、FWHM が $0.36 \times B$ まで減少する。

4. 研究成果

(1) シミュレーションによる評価

スーパーナイキスト WDM QPSK および 16QAM 信号に対するポリバイナリ整形の性能を評価するために、送受信対向構成でのスーパーナイキスト WDM ポリバイナリ整形 QAM 信号の BER を計算した。その計算モデルを図 4 に示す。周期 $2^{15} - 1$ の疑似ランダムビット系列 (pseudo random bit sequence: PRBS) を QPSK および 16QAM にマッピングし、2 sample/symbol にアップサンプリングした後、デュオバイナリ整形およびトリバイナリ整形する。整形サンプルの IQ 成分を用いて光領域に線形変調する。異なる波長でも同様に光信号を生成し、符号速度 B よりも小さい周波数間隔 Δf でスーパーナイキスト WDM 信号を得る。ここで隣接するチャンネル間に対して、線幅 200 kHz 以上の相対位相揺らぎを有するように、相対位相をランダム化した。得られたスーパーナイキスト WDM 信号に白色雑音を付加した後、中央チャンネルをコヒーレント受信する。本シミュレーションでは、符号速度 25 Gbaud に対して信号と局所光の線幅を 200 kHz として位相雑音を加えた。受信サンプルを適応等化した後、MLSE を用いて復号を行う。この適応等化では、タップ数は 80 タップとして、等化符号がポリバイナリ整形信号の符号になるようにタップ係数を適応制御した。適応アルゴリズムには最小二乗誤差 (least mean square: LMS) アルゴリズムを用いる。復号符号からビット誤りを算出した。

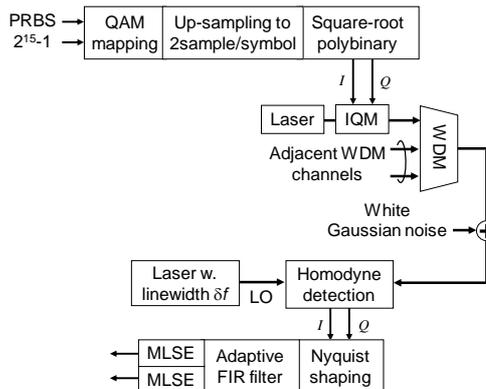


図 4 シミュレーションモデル。

紙面の都合上計算で得られた最終結果のみを示す。BER = 2×10^{-2} の要求 SNR の $\Delta f/B$ 依存性を図 5 にまとめる。QPSK 信号の結果を (a)、16QAM 信号の結果を (b) に示す。また、

それぞれナイキスト整形、デュオバイナリ整形、そしてトリバイナリ整形の結果をプロットしている。ポリバイナリ整形によってスペクトル狭窄化することで WDM クロストークによる SNR 劣化が抑圧可能である一方で、ポリバイナリ整形による ISI によって SNR ペナルティが生じる。

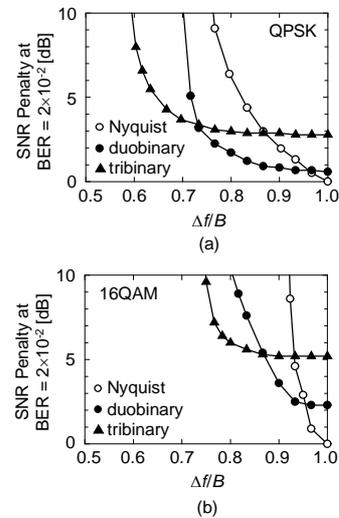


図 5 BER = 2×10^{-2} に対する要求 SNR の $\Delta f/B$ 依存性。(a) QPSK、(b) 16QAM。 Δf は WDM 周波数間隔、 B は符号速度。

(2) 実験による評価

次に、送受信器対向構成において、ポリバイナリ整形 QAM 信号の BER 測定を行った。その測定系を図 6(a) に示す。波長可変光源からの出力を 2 分岐し、一つを中央チャンネル、もう一つを隣接チャンネルに使用した。分岐光の一方は、サンプリング周波数 50 Gsample/sec の任意電気波形生成器 (AWG) から得られたポリバイナリ整形電気信号で駆動された光 IQ 変調器を用いて、中央チャンネルポリバイナリ整形 QAM 光信号を生成した。本実験では、符号速度を 25 Gbaud とした。AWG における信号処理を図 6(b) に示す。15 段 PRBS を QAM マッピングし、平方根ポリバイナリ整形を行った後のサンプルを DA 変換器に送り、電気信号波形を生成した。もう一方の分岐光は、初めに周波数 Δf の電気クロックでキャリア抑圧変調し、その変調側波帯を波長選択スイッチで取り出し、それらを中央チャンネルから Δf だけ離れた隣接チャンネルキャリアとした。それらを中央チャンネルと同様に光 IQ 変調器を用いて変調した。中央チャンネルと隣接チャンネルを合波し、偏波多重することで、3 チャンネルスーパーナイキスト WDM 偏波多重 (dual-polarization: DP) QAM 信号を生成した。この実験では、WDM 周波数間隔はキャリア抑圧変調の周波数 Δf で決定されるために、正確に調整することが可能となる。 Δf が 25 GHz 以下であるスーパーナイキスト WDM 条件でも、隣接 WDM チャンネルからのクロストークを正確に評価可能である。

受信器側において、生成した 3 チャンネルスーパーナイキスト WDM DP-QAM 信号の中央チャンネルをホモダイン検波した。ここでは局所光には、線幅 5 kHz 以下の波長可変光源を用いた。得られた受信電気信号をサンプリング周波数 50 GSample/sec のオシロスコープで測定した。そのストアデータをオフラインで信号処理することで BER を求めた。その信号

処理を図 6(c)に示す。はじめにアンプ雑音を除去した後、適応等化フィルタを用いることで偏波分離・クロック再生・キャリア再生、そして信号等化を行った。ここでは、タップ数は 80、タップ係数は LMS アルゴリズムを用いて適応的に制御した[10]。なお、ここでは等化符号がポリバイナリ整形符号になるように適応制御している。サンプルの I および Q 成分に対して MLSE を用いて復号化した後、BER を求めた。

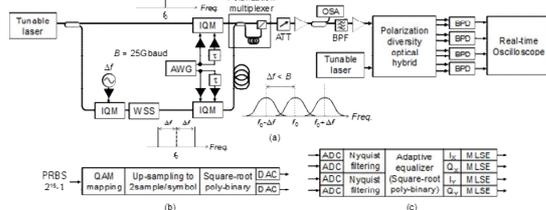


図 6 (a)実験系。(b)送信器側信号処理と(c)受信器側信号処理。

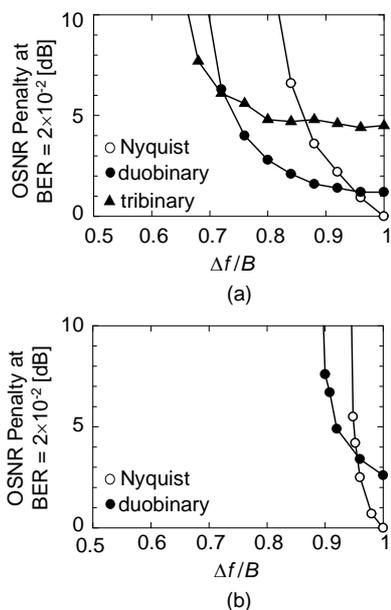


図 7 BER = 2×10^{-2} を達成する要求 SNR の $\Delta f/B$ 依存性実験結果。(a) DP-QPSK 信号と(b) DP-16QAM 信号。

紙面の都合上、詳細な実験結果は省き、まとめのグラフのみを示す。BER = 2×10^{-2} に対する要求 OSNR の $\Delta f/B$ 依存性を図 7 にまとめた。DP-QPSK 信号および DP-16QAM 信号の結果をそれぞれ(a)および(b)に示す。がナイキスト整形、デュオバイナリ整形、そしてトリバイナリ整形の結果である。トリバイナリ整形 16QAM 信号の BER に関しては、AWG から得られる電気信号における非線形な歪みが著しく、 2×10^{-2} 以下の BER を得ることができなかった。まず DP-QPSK 信号の結果に注目すると、ナイキスト整形に比べるとデュオバイナリ整形によって WDM クロストークが抑圧されるために、 $\Delta f/B$ を減少させて OSNR ペナルティが抑圧される。ただし、 $\Delta f/B=1$ のナイキスト WDM 条件においても、ISI によるペナルティが 2 dB 弱生じている。以上は、計算結果の図 5(a)と同様な傾向である。DP-16QAM

信号に関しては、ナイキスト整形に比べると、デュオバイナリ整形適用によって $\Delta f/B$ が減少に伴う WDM クロストークが抑圧される。このときのナイキスト WDM 条件における ISI 劣化はおよそ 2.5 dB であった。これらも、図 5(b)に示した計算結果と同様な傾向であるものの、実験結果における WDM クロストークによるペナルティが著しい。これは実験における電気・光部品の不完全性による波形歪みが原因と考えられる。

最後に、以上の BER 計算および測定結果から、BER = 2×10^{-2} に対する要求 SNR と周波数利用効率の関係を図 8 にまとめた。伝送路が光雑音で制限される一般的な伝送システムでは、要求 SNR と伝送距離が対応する点に注意されたい。実験結果に関しては、雑音帯域 0.1 nm で定義された OSNR から SNR へ変換してプロットした。がナイキスト整形、はデュオバイナリ整形、そして がトリバイナリ整形である。冗談がシミュレーション結果で下段が実験結果を示す。シミュレーション結果および実験結果は同様な傾向を示している。なお、シミュレーション結果にはナイキスト整形 8QAM の結果を追加した。QPSK から 8QAM や 16QAM を用いて周波数利用効率を向上させようと考え、ナイキスト整形のみの場合、大きな要求 SNR 劣化が生じる。デュオバイナリ整形やトリバイナリ整形を適用させることにより、ターゲットとなる要求 SNR、言い換えればターゲット伝送距離、に対して高粒度に周波数利用効率を最適化可能となる。以上から、ポリバイナリ整形は、ターゲット伝送距離に対して周波数利用効率を高精度に最適化するのに効果的であることが示された。

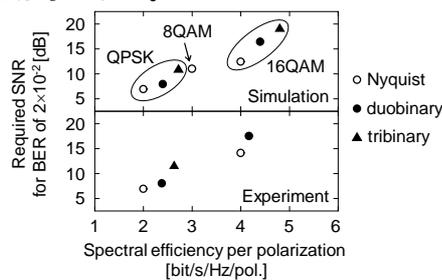


図 8 BER = 2×10^{-2} に対する要求 SNR と周波数利用効率の関係。

(3) 空間多重伝送実験への適用

上述のポリバイナリ整形を空間多重技術と組み合わせることによって、超高密度 WDM・SDM 伝送実験を行い、伝送容量 2.05 Pbit/s および世界最高周波数利用効率 456 bit/s/Hz を達成した。その結果を本章に示す。図 9 に伝送実験系を示す。紙面の都合上詳細は省くが、360 チャネルスーパーナイキスト WDM DP-QPSK 信号を生成し、6 つのモードと 19 コアを有する 6 モード 19 コアファイバを用いて伝送を行った。

外周コアと内周コアの典型例としてコア 1 とコア 13、そして中央コアであるコア 19 の

伝送後の BER 測定結果を図 10 に示す。LP₀₁、LP_{11a}、LP_{11b}、LP_{21a}、LP_{21b}、そして LP₀₂ の結果をそれぞれ黒丸、黒三角、白三角、黒四角、白四角、そして白丸でプロットした。また、典型的な IQ マップも示している。ここで、20%オーバーヘッド LDPC ベース FEC の BER 閾値 2×10^{-2} を破線で示しており、全チャンネルがこの破線を超えていないことがわかる。残りのコアに関して同様に測定を行い、WDM・SDM 全 41,040 チャンネルの BER は FEC 閾値以下であった。20%オーバーヘッド FEC の使用を仮定した場合、伝送容量は $50\text{Gbit/s} \times 360(\text{WDM}) \times 119(\text{SDM}) = 2.05 \text{Pbit/s}$ に達する。また、世界記録の周波数利用効率 456bit/s/Hz が実現された。

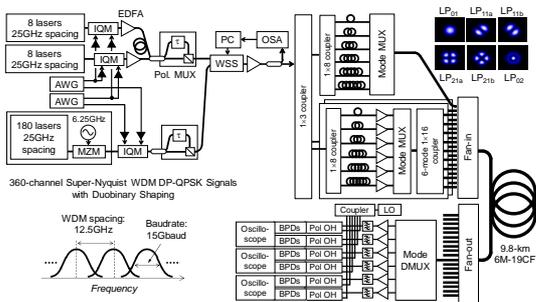


図 9 2.05 Pbit/s 伝送の実験系。

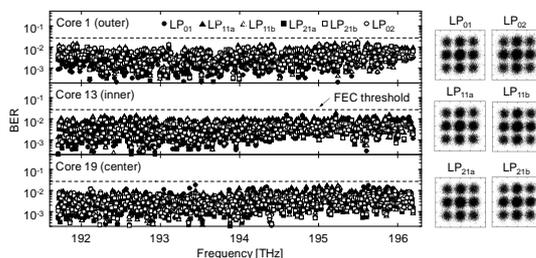


図 10 9.8 km 6M-19CF 伝送後のコア 1・13・19 における BER 測定結果。

(4) 結論

本研究では、超高密度 WDM QAM 信号に対するポリバイナリ整形の性能をシミュレーション並びに実験によって評価を行った。ポリバイナリ整形はターゲットとなる要求 SNR に対して高粒度に周波数利用効率を最適化可能とするのに極めて有効である。実際に、要求 SNR 劣化が小さく、20%の周波数利用効率向上が見込めるデュオバイナリ整形を空間多重伝送実験に適用することによって、世界記録となる周波数利用効率 456bit/s/Hz が達成された。

(5) 引用論文

- [1] G. Bosco, A. Carena, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "Performance limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in high-speed PM-QPSK systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 15, pp. 1129-1131, Aug. 2010.
- [2] M. Mazurczyk, "Spectral shaping in long haul optical coherent systems with high

spectral efficiency," *J. Lightw. Technol.* vol. 32, no. 16, pp. 2915-2961, Aug. 2014.

[3] J. X. Cai, H. G. Batshon, M. Mazurczyk, H. Zhang, Y. Sun, O. V. Sinkin, D. G. Foursa, and A. Pilipetskii, "64QAM based code modulation transmission over transoceanic distance with >60 Tb/s capacity," presented at the Optical Fiber Communication Conf., Los Angeles, CA, USA, 2015, Paper Th5C.8.

[4] J. Li, E. Tipsuwannakul, T. Eriksson, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, "Approaching Nyquist limit in WDM systems by low-complexity receiver-side duobinary shaping," *J. Lightw. Technol.* vol. 30, no. 11, pp. 1664-1676, Jun. 2012.

[5] G. D. Forney, Jr., "Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences and the presence of intersymbol interference," *IEEE Trans. Inf. Theory.*, vol. IT-15, no. 3, pp. 363-378, May 1972.

[6] J. Zhang, J. Yu, Z. Dong, Z. Jia, H. C. Chien, Y. Cai, C. Ge, S. Shi, Y. Chen, H. Wang, and Y. Xia, "Transmission of $20 \times 440\text{-Gb/s}$ Super-Nyquistfiltered signals over 3600 km based on single-carrier 110-Gbaud PDM QPSK with 100-GHz grid," presented at the Optical Fiber Communication Conf., Los Angeles, CA, USA, 2014, Paper Th5B.3.

[7] K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "1.03-Exabit/s \times km super-Nyquist-WDM transmission over 7,326-km seven-core fiber," presented at the European Conf. Optical Communication, London, U.K., 2013, Paper PD3.E.3.

[8] D. Soma, K. Igarashi, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, N. Yoshikane, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "2.05 Peta-bit/s Super-Nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C band," presented at European Conference on Optical Communication (ECOC 2015), paper PDP3.2.

[9] D. Chang, F. Yu, Z. Xiao, N. Stojanovic, F. N. Hauske, Y. Cai, C. Xie, L. Li, X. Xu, and Q. Xiong, "LDPC convolutional codes using layered decoding algorithm for high-speed coherent optical transmission," presented at Optical Fiber Communication Conference (Optical Society of America, 2012), paper OW1H.4.

[10] Y. Mori, C. Zhang, and K. Kikuchi, "Novel configuration of finite-impulse response filters tolerant to carrier-phase fluctuations in digital coherent optical receivers for higher-order quadrature amplitude modulation signals," *Opt. Exp.*, vol. 20, no. 24, pp. 26236-26251, Nov. 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

(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.

(Invited paper) K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "Ultra-long-haul High-capacity Super-Nyquist-WDM Transmission Experiment Using Multi-core Fibers," IEEE Journal of Lightwave Technol., vol.33, no.5, pp.1027-1036, March 2015.

(Invited paper) K. Igarashi, D. Souma, K. Takeshima, and T. Tsuritani, "Selective mode multiplexer based on phase plates and Mach-Zehnder interferometer with image inversion function," Opt. Express, vol.23, No.1, pp. 183-194, Jan. 2015.

K. Igarashi, D. Souma, T. Tsuritani, and I. Morita, "Performance evaluation of selective mode conversion based on phase plates for a 10-mode fiber," Opt. Express, vol.22, No.17, pp.20881- 20893, August 2014.

〔学会発表〕(計10件)

K. Igarashi, K. J. Park, D. Soma, Y. Wakayama, T. Tsuritani, and B. Y. Kim, "All-fiber-based Selective Mode Multiplexer and Demultiplexer for Six-mode Multiplexed Signals," Conference on Optical Fiber Communication (OFC 2016), W2A.38, Anaheim, CA, USA, March 2016.

(Invited) K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, "114 Space-Division-Multiplexed WDM Transmission Using 6-mode 19-core Fibers," 2015 IEEE Photonics Conference (IPC2015), MJ2.1, Reston, VA, USA, September 2015.

K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, "Experimental Study on Polybinary-Pulse-Shaped QAM Signals for Highly-Spectral-Efficient Super-Nyquist-WDM Systems," 41st European Conference on Optical Communication (ECOC2015), Mo.3.3.6, Valencia, Spain, September 2015.

(Invited) K. Igarashi, K. Takeshima, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "High-capacity Ultra-long-haul Transmission Experiments Using Multi-core Fibers," International Symposium on extremely advanced transmission technology (EXAT 2015), W3.1, Kyoto, Japan, July 2015.

(Invited) K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "Super-Nyquist-WDM Technique for Ultra-Long-Haul High-Capacity Optical Fiber Transmission Systems," 20th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2015), JMoA.22, Shanghai, China, June 2015.

(Invited) K. Igarashi, "Ultra-Long-Haul High-Capacity Multi-Core Fiber Transmission with Capacity-Distance Product over 1 Exabit/s·km," 2015 EMN optoelectronics Meeting, D18, Beijing, China, April 2015.

(Invited) K. Igarashi, "Super-Nyquist-WDM Multi-core Fiber Transmission with Capacity-Distance Product over 1 Exabit/s·km," 9th International Workshop on Optical Signal Processing and Optical Switching (IW002014), 25, Osaka, Japan, October 2014.

(Invited) K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, "1-Exabit/s×km Super-Nyquist-WDM Multi-Core-Fiber Transmission," 40th European Conference on Optical Communication (ECOC2014), Mo.3.3.1, Cannes, France, September 2014.

(Invited) K. Igarashi, T. Tsuritani, and I. Morita, "1-Exabit/s·km Super-Nyquist-WDM Transmission using Multi-Core Fibers," International Conference on Optical Internet (COIN2014), FB4-1, Jeju, Korea, August 2014.

(Invited) K. Igarashi, "Optical Pulse Shaping for Super-Nyquist WDM Transmission," Signal Processing to Photonics Communications (SPPCom2014), ST4D.3, San Diego, CA, USA, July. 2014.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

五十嵐 浩司 (IGARASHI, Koji)

大阪大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80436534