

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：16101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06443

研究課題名（和文）柔軟かつ高効率なネットワークのための全光変調変換技術による省電力光ノードの研究

研究課題名（英文）Studies of energy efficient optical nodes by all-optical modulation format conversion technologies for flexible and highly efficient networks

研究代表者

岸川 博紀 (Kishikawa, Hiroki)

徳島大学・大学院理工学研究部・助教

研究者番号：00759722

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：大容量かつ高効率な光通信網を実現を目指し、所望の伝送容量・距離に応じて光信号の変調方式を最適化する適応変復調技術を確立するため、変調フォーマット変換技術を確立することを目的とする。研究の結果、特に将来の400ギガ・1テラ級伝送に適した変調方式において、受動デバイスで構成する簡易な方法で省電力かつ高効率である点に独創性がある変換技術を考案した。また具体的実装法、変換特性、信号品質に与える影響を解析検討および計算機シミュレーションにより明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to establish modulation format conversion methods to realize modulation adaptation, which optimizes the utilizing formats depending on the desired transmission capacity and reach, for future high capacity and highly efficient optical communication networks. One of the achievements of this study is that establishing a novel conversion technology between formats expected to be employed in the future 400-Gbps and 1-Tbs capacity transmission by constructing a simple architecture with passive optical devices. This study has made clear the detailed implementation of the conversion methods, conversion characteristics, and signal quality upon conversion by analytical investigation and numerical simulation.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：変調フォーマット フォトニックネットワーク エネルギー効率化 光ノード 偏波多重 波長多重

1. 研究開始当初の背景

我が国の通信トラフィック（通信データ量）の状況は、総務省報道資料を引用すると 2014 年 11 月時点の総ダウンロードトラフィックは前年比 37.5%増の約 3.5Tbps と年々増加している。またトラフィックの変動も大きくなっており、2014 年 11 月時点の昼夜のダウンロードトラフィック変動は約 1.8Tbps で 2 年前に比べ 2 倍に到達している。このような通信を支えるネットワークへの要求条件として、更なる大容量化に加え、トラフィック変動に対応する柔軟性を持たせ、高効率に運用することが求められる。

大容量化と柔軟性、高効率性の実現技術としてエラスティック光ネットワーク技術[1]がある。所望の伝送容量や伝送距離に応じて光信号の変調フォーマットを最適化する適応変復調技術により、波長資源を有効活用し周波数利用効率を向上させ、大容量かつ高効率なネットワークが実現できる。一方で適応変復調技術の実現には課題があり、あらゆる変調方式に対応する送受信機 LSI はコストや消費電力が問題となること、ネットワークのすべての送信・受信・中継ノードに導入するには非効率であること、また既存の固定変調フォーマットの伝送装置を有効活用しつつ導入すること、などの解決すべき事項がある。

[1] 盛岡 他, 将来の革新的光トランスポートネットワーク技術, NTT 技術ジャーナル, Vol. 23, No. 3, pp. 32-36, 2011 年 3 月。

2. 研究の目的

本研究では上記課題を解決するため、変調フォーマットの変換技術を確認することを目的とする。本変換技術が確認できれば、既存の伝送装置を新規に置き換えることなく、必要なノードに適材適所に配置することで、所望の変調フォーマットによる光伝送が実現可能になる。

表 1 に変調フォーマット変換に関する本研究と先行研究の位置づけを示す。同表の見方は、縦方向に変換前、横方向に変換後の変調フォーマットを示し、表中の数字は我々がこれまで報告している文献及び代表的な先行文献の番号を示す。変調フォーマットの種類として、光信号の振幅に情報を載せる振幅キーイング(OOK: On-Off Keying)、位相に情報を載せる位相シフトキーイング(PSK: Phase Shift Keying)、光の振幅と位相の両方に情報を載せる直交振幅変調(QAM: Quadrature Amplitude Modulation)がある。PSK は位相の分割量の違いで 2 相 PSK (BPSK: Binary PSK)、4 相 PSK (QPSK: Quadrature PSK) に細分している。

これまで我々は表 1 の [6] BPSK から QPSK、[8] QPSK から BPSK への変換技術を報告している。[6] では従来法と異なり受動デバイスで構成する簡易な変換技術を実験的に実証している。また [8] では従来法と異なり波長変

化を伴わず、かつ情報の欠落が無い変換技術を提案しており、計算機シミュレーションによる原理確認ができています。

表 1 の数字がない部分が未解決領域であり、特に将来の 400 ギガ・1 テラ級伝送に適した QAM に関する変換技術が未確立であるため、本研究で技術確立する。加えて、表 1 の変換方式でも偏波多重や波長多重信号へ適用可能な技術は未確立であるため、本研究で技術確立する。

表 1. 変調フォーマット変換に関する先行研究と本研究の位置づけ

変換前	変換後の変調フォーマット			
	OOK	BPSK	QPSK	QAM
OOK	[2]	[3]	[3]	-
BPSK	[4]	[2]	[5][6]	[5]
QPSK	-	[7][8]	-	-
QAM	-	-	-	-

[2] J. Wang et al., Quantum Electronics, Vol. 45, pp. 195-205, Feb. 2009.

[3] K. Mishina et al., Optics Express, Vol. 15, pp. 8444-8453, Jun. 2007.

[4] A. Zhang et al., Opt. Lett., Vol. 10, pp. 228-231, May 2014.

[5] F. Parmigiani et al, Opt. Exp, Vol. 20, pp. B322-B330, Dec. 2012.

[6] H. Kishikawa et al., IPC2011, No. W02, pp. 513-514, Oct. 2011.

[7] G.W. Lu et al., J. Lightwave Technol., Vol. 29, pp. 2460-2466, Aug. 2011.

[8] R. Ando et al., OECC2014, No. TUPS1-8, pp. 440-441, July 2014.

3. 研究の方法

未確立である偏波多重信号や波長多重信号に適用可能な変調フォーマット変換技術を確認すること、ならびに表 1 で数字がない未解決領域のうち、特に将来の 400 ギガ・1 テラ級伝送に適した伝送方式であるが、技術が未確立である QAM に関する変調フォーマット変換技術を確認することを目的とし、以下の項目を研究することで当該技術の具体的実装法、変換特性、信号品質に与える影響を明らかにする。

- (1) 偏波多重信号に対する BPSK から QPSK への変換技術
- (2) 偏波多重信号に対する QPSK から BPSK への変換技術
- (3) 波長多重信号に対する (1) (2) の変換技術
- (4) QPSK から QAM への変換技術
- (5) QAM から QPSK への変換技術

順に研究方法を具体的に示す。

- (1) 偏波多重信号に対する BPSK から QPSK への変換技術

我々が報告した非偏波多重信号に対する BPSK から QPSK への変換技術[6]では、遅延干渉計と強度変調器を使用していた。遅延干渉

計は偏波無依存であるため、偏波多重信号にも直ちに適用できる。一方で強度変調器は偏波依存性があり偏波間で消光特性が異なるため、変換特性に影響を与えると予想できる。そこで偏波多重信号に適用するため、図1のように偏波分離器で偏波毎に信号を分け、各々で偏光角度を調整し強度変調器の消光特性を一定に保ち変調変換を行い、偏波合成する。

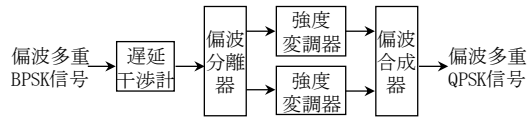


図1. 偏波多重信号に対する BPSK から QPSK への変換

(2) 偏波多重信号に対する QPSK から BPSK への変換技術

我々が提案した非偏波多重信号に対する QPSK から BPSK への変換技術[8]では、位相共役器と方向性結合器を使用していた。方向性結合器は偏波無依存であるが、位相共役器は原理上片方の偏波にのみ対応し、且つ偏光角度の変化に敏感であるため、変換特性に影響を与えると予想できる。そこで偏波多重信号に適用するため、図2のように偏波ダイバーシティ構成を導入し位相共役器の偏波無依存化を行い偏光角度の変化に頑健にし、(1)と同様に偏波毎に信号を分けて各々で変調変換を行った後に合成する。

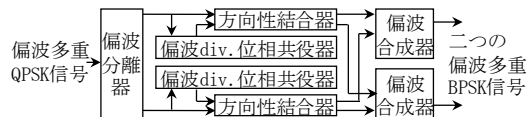


図2. 偏波多重信号に対する QPSK から BPSK への変換

(3) 波長多重信号に対する (1) (2) の変換技術

(1)を波長多重信号に適用するためには、遅延干渉計と強度変調器を波長無依存化する必要がある。強度変調器は広帯域に使用可能で問題ないが、遅延干渉計は波長依存性があるため変換特性に影響を与えると予想できる。そこで波長多重信号に適用するため、波長依存性が小さい遅延干渉計、例えば我々が検討してきた非対称 X 結合器で構成することを考えている。一方で(2)を波長多重信号に適用するためには、位相共役器および方向性結合器とも波長無依存化が必要である。方向性結合器は同様に非対称 X 結合器で波長無依存化が可能である。位相共役器は波長変化を伴わない四光波混合を原理としており波長無依存化が困難であるため、本原理とは異なる位相共役器の新規技術確立を行う。

(4) QPSK から QAM への変換技術

我々が提案した BPSK から QPSK への変換技術[6]の原理は、二つの BPSK 信号をベクトル加算するものであった。この原理を応用する

ことで、図3に示すように振幅の異なる二つの QPSK 信号のベクトル加算により QAM 信号に変換する仮説が立てられる。この仮説を検証するため、変換動作の理論解析、変換回路の考案、計算機シミュレーション及び基礎実験による動作検証を行う。

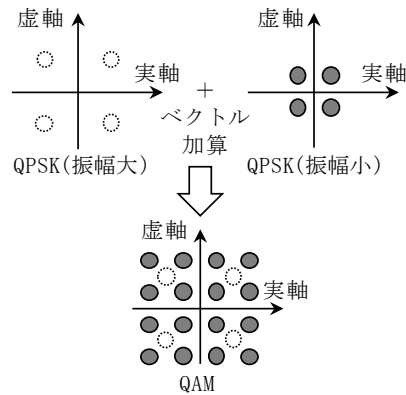


図3. 振幅の異なる二つの QPSK 信号のベクトル加算で QAM 信号へ変換

(5) QAM から QPSK への変換技術

先行研究がなく実現可能か分かっていないため、光信号処理に応用できる各種の光学現象・光学効果を用いた変換原理を見出すことから始める。我々が提案した QPSK から BPSK への変換技術[8]の原理が応用できる仮説を立て、変換動作の理論解析を行うことで検証する。その後、変換回路の考案、計算機シミュレーション及び基礎実験による動作検証を行う。

4. 研究成果

(1) 偏波多重信号に対する BPSK から QPSK への変換技術

机上検討の結果、図1の回路構成で実現可能であることを理論解析より明らかにした。

(2) 偏波多重信号に対する QPSK から BPSK への変換技術

方法に記載の通りの偏波ダイバーシティ構成を考案しその実装法、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。本成果は学会発表③⑥等で成果報告した。

また本技術を発展させ、任意の偏光角度を持つ偏波多重信号に適用可能な変調フォーマット変換技術を考案し、学術誌論文①、学会発表④で成果報告した。

(3) 波長多重信号に対する (1) (2) の変換技術

理論検討の結果、当初の計画より優先すべき技術課題が判明した。具体的には、変調フォーマット変換後の光信号の占有帯域をフォーマットに合わせて可変することが、波長多重信号に適用し周波数効率を維持するために必要であることが分かった。この技術課題は(4)を実施した際に検討し、帯域制限フィルタを用いて信号帯域を制限することで

周波数効率を維持できることを見出した。本成果は学会発表⑤等で成果報告した。

#### (4) QPSK から QAM への変換技術

図 3 の通り、振幅の異なる二つの QPSK 信号のベクトル加算により 16QAM 信号に変換できることを理論解析で明らかにした。具体的な変換回路は、我々が過去に報告した BPSK から QPSK への変換技術[6]をもとに、図 4 に示すように遅延干渉計を用いた構成を考えた。

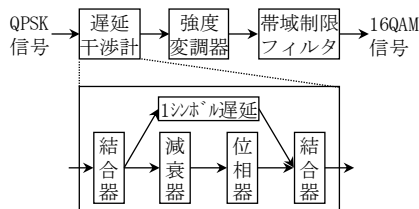


図 4. QPSK から 16QAM への変換回路構成

図 4 の遅延干渉計では、1 つ目の結合器で QPSK 信号が二つに分離され、上側では 1 シンボル遅延を与え、下側では振幅を 6dB 減衰し位相を 180 度変化させ、それぞれを 2 つ目の結合器で結合することで 16QAM 信号に変換している。強度変調器では変換後の 16QAM 信号に含まれる冗長な信号を除去し、帯域制限フィルタは(3)で述べた周波数効率維持のため使用している。

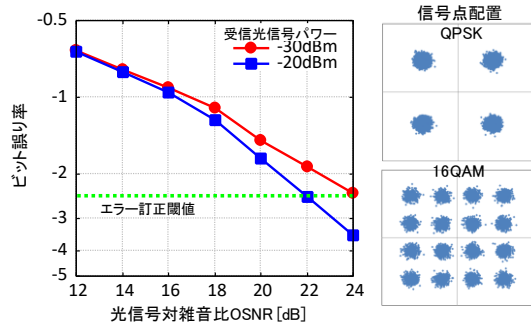


図 5. 信号品質評価と信号点配置

図 5 に計算機シミュレーションで信号品質を評価した結果および変換前後の変調フォーマットの信号点配置を示す。詳細な計算条件は学会発表②⑤に記載しているため割愛する。図 5 より、光信号対雑音比 OSNR が大きくなると、信号品質を示すビット誤り率が低下し、エラー訂正閾値を下回っていることから、エラーフリーの変換動作が実現可能であることを示している。また信号点配置より、QPSK 信号が 16QAM 信号に変換できていることが分かる。本成果は学会発表②⑤等で成果報告した。

#### (5) QAM から QPSK への変換技術

過去に我々が提案した QPSK から BPSK への変換技術[8]の原理は、高非線形ファイバ中の非線形光学現象である四光波混合及びベ

クトル合成を用いたものであった。理論検討の結果、16QAM から QPSK への変換にも本原理を応用できることを見出した。

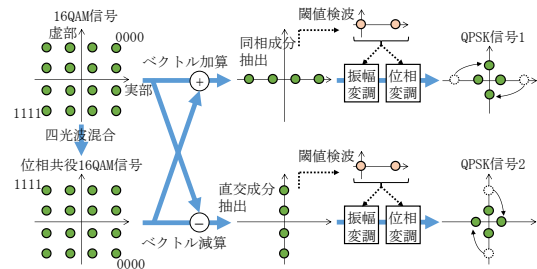


図 6. 16QAM から QPSK への変換原理

図 6 に 16QAM から QPSK への変換原理を示す。左上の 16QAM 信号に対し、四光波混合により位相共役 16QAM 信号を生成し、それらをベクトル加算およびベクトル減算することで同相成分・直交成分をそれぞれ抽出する。それらを閾値検波し振幅を低レベル・高レベルに分離した電気信号を生成し、それを用いて同相成分・直交成分それぞれにおける光信号の振幅と位相を調整することで、16QAM 信号を構成する二つの QPSK 信号に変換している。

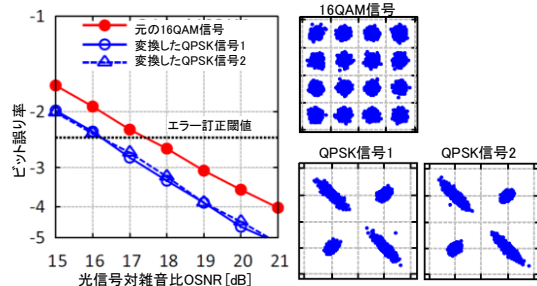


図 7. 信号品質評価と信号点配置

図 7 に計算機シミュレーションで信号品質を評価した結果および変換前後の変調フォーマットの信号点配置を示す。詳細な計算条件は学会発表①に記載しているため割愛する。図 7 より、光信号対雑音比 OSNR が大きくなると変換後 QPSK 信号 1, 2 のビット誤り率が低下し、エラー訂正閾値を下回っていることから、エラーフリーの変換動作が実現可能であることを示している。また信号点配置より、16QAM 信号が二つの QPSK 信号に変換できていることが分かる。本成果は学会発表①で成果報告した。

本研究では、偏波多重信号や波長多重信号に適用可能な変調フォーマット変換技術を確立すること、ならびに将来の 400 ギガ・1 テラ級伝送に適した伝送方式であるが、技術が未確立である QAM に関する変調フォーマット変換技術を確立することを目的とし、具体的実装法、変換特性、信号品質に与える影響を明らかにした。特に(3)の QPSK から 16QAM への変換技術は、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。

本研究の変調フォーマット変換技術が結実すると、所望の伝送容量や伝送距離に応じて光信号の変調フォーマットを最適化する適応変復調技術が確立でき、大容量かつ高効率なエラスティック光ネットワークが実現可能となる。また本技術を異なるネットワークを結ぶゲートウェイノードに配置することで、各ネットワークで個別最適化されている変調フォーマットにも柔軟に対応し、電気的な処理を解さずにそれらのネットワークを跨ぐ通信も実現可能になる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① Hiroki Kishikawa, Nobuo Goto and Lawrence R. Chen, All-Optical Wavelength Preserved Modulation Format Conversion From PDM-QPSK to PDM-BPSK Using FWM and Interference, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 34, No. 23, pp. 5505-5515, Dec. 2016. 査読有. DOI:10.1109/JLT.2016.2620170
- ② Rina Ando, Hiroki Kishikawa, Nobuo Goto, Shin-ichiro Yanagiya and Lawrence R. Chen, Performance Analysis of All-Optical Wavelength-Shift-Free Format Conversion from QPSK to Two BPSK Tributaries Using FWM and Interference, IEICE Transactions on Electronics, Vol. E99-C, No. 2, pp. 219-226, Feb. 2016. 査読有. DOI:10.1587/transele.E99.C.219

他4件

[学会発表] (計29件)

- ① Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto, Modulation Format Conversion from 16QAM to QPSK Using FWM and Modulation of Amplitude and Phase, Third International Forum on Advanced Technologies (IFAT 2017), No. D1, 10th Mar. 2017. [Hualien (Taiwan)]
- ② Kazuya Mori, Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto, Time and Wavelength Dependency on QPSK to 16QAM Modulation Format Conversion Using Delay Line Interferometer, Third International Forum on Advanced Technologies (IFAT 2017), No. FS17, 10th Mar. 2017. [Hualien (Taiwan)]
- ③ Naho Yoshioka, Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto, Dependency of States of Polarization in All-Optical Modulation Format Conversion from QPSK to BPSK Using Four Wave Mixing with Polarization-Diversity Configuration, Optics & Photonics Taiwan, the International Conference (OPTIC 2016),

No. 270127, 3rd Dec. 2016. [Taipei (Taiwan)]

- ④ Hiroki Kishikawa, Nobuo Goto and R. Lawrence Chen, Modulation Format Conversion From PDM-QPSK to PDM-BPSK Using FWM and Interference, 29th Annual Conference of the IEEE Photonics Society (IPC2016), No. WE1.4, 2nd Oct. 2016. [Waikoloa, HI (USA)]
- ⑤ Kazuya Mori, Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto, Modulation Format Conversion from QPSK to 16QAM Using Delay Line Interferometer and Spectral Shaping Filter, 21st Optoelectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching 2016 (OECC/PS 2016), No. MF1-4, 4th Jul. 2016. [朱鷺メッセ新潟 (新潟県・新潟市)]
- ⑥ Naho Yoshioka, Rina Ando, Hiroki Kishikawa and Nobuo Goto, Polarization-Diversity All-Optical Modulation Format Conversion from QPSK to BPSK Using FWM, Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2015, No. ASuE.2, 22nd Nov. 2015. [Hong Kong (China)]
- ⑦ Rina Ando, Hiroki Kishikawa, Nobuo Goto and Shin-ichiro Yanagiya, Noise Tolerance in Modulation Format Conversion from QPSK to BPSK Using Four-Wave-Mixing in Highly Nonlinear Fiber, Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2015, No. ASu4H.4, 22nd Nov. 2015. [Hong Kong (China)]

他22件

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岸川 博紀 (KISHIKAWA, Hiroki)  
徳島大学・大学院理工学研究部・助教  
研究者番号：00759722

### (2) 研究協力者

後藤 信夫 (GOTO, Nobuo)  
柳谷 伸一郎 (YANAGIYA, Shin-ichiro)  
チェン ローレンス (CHEN, Lawrence)