

長距離光ファイバ伝送用高光非線形耐力符号化変調方式に関する研究

Research on high-nonlinearity-tolerant coded modulation for long distance optical fiber transmission

今宿 亙 (Wataru Imajuku, Ph. D.)

近畿大学 産業理工学部 教授

(Professor, Humanity-Oriented-Science and Technology, Kindai University)

電子情報通信学会 米国電気電子学会 米国光学会

電子情報通信学会学術奨励賞(2000年) OECC2007 Best Paper Award

(2007年) APNOMS 2014 Best Paper Award (2014年) 他

研究専門分野: 光通信工学、情報ネットワーク

あらまし

光ファイバ伝送システムの長距離化には、光ファイバ伝送路で発生する非線形光学効果による光信号品質の劣化を抑制する必要がある。特に、直交位相変調方式などを採用した偏波/波長多重コヒーレント光伝送システムは、相互位相変調を起因とする光信号品質劣化が伝送可能距離を制約する最大の要因となっている[A]。本研究は、偏波/波長多重コヒーレント光伝送システムにおける相互位相変調を抑制できる符号化変調方式の探索を進めてきた。その過程で、相互位相変調の抑制手段として、①光符号のピーク対平均電力比(Peak-to-Average Power Ratio: PAPR)を抑制して相互位相変調の発生を抑制する符号化変調、②光ピーク電力を一定にして相互位相変調の発生を抑制する符号化変調に注目し、伝送性能比較を行う。①の伝送路符号として定包絡線連続位相 MPSK 符号化変調、②の伝送路符号として両偏波全体でのピーク電力を一定に保つ Dual Mode-RZ-8PSK/QPSK 符号化変調の検討を進めた。

1. 研究の目的

これまでに社会実装されている偏波/波長多重コヒーレント光伝送システムは、 M 値直交位相振幅符号化変調方式で光シンボルを生成し、デジタル信号処理回路を用いたイントラダイン光検波方式により受信光シンボルを復号するいわゆるデジタルコヒーレント光伝送技術で実現されている[1]。

デジタルコヒーレント光伝送システムにおける光ファイバ伝送路の分散、偏波分散、偏波依存損失は、前述のデジタル信号処理回路に組み込まれた分散補償器により補償され、これらの要因による伝送可能距

離の制限は、大幅に緩和されている。そのため、デジタルコヒーレント光伝送システムは、光ファイバ伝送路の非線形光学効果が主な伝送制限要因となっており、その中でも波長多重チャンネル間で発生する相互位相変調効果が、最大の制限要因となっている。

本研究は、相互位相変調を抑制できる符号化変調方式の探索を進める。その過程で、相互位相変調の発生する手段として、①光符号のピーク対平均電力比(Peak-to-Average Power Ratio: PAPR)を抑制して相互位相変調の発生を抑制する符号化変調方式、②光ピーク電力を一定にして相互位相変調の発生を抑制する符号化変調方式に注目し、伝送性能比較を行う。本研究は、①の設計思想に従った符号化変調方式として定包絡線連続位相 MPSK 変調、②の方式として、位相平面上で二重信号点配置構造を有する Dual Mode-RZ-8PSK/QPSK 変調に注目して伝送性能の優位性を評価する。

2. 研究の背景

現代の伝送システムにおいて、複数ビットの符号を一つのシンボルにマッピングする伝送路符号化と各シンボルを複素振幅にマッピングさせる変調は、実質的に一体となっていることが多く、符号化変調と呼ばれる。光ファイバ伝送システムにおいても、四値位相シフトキーイング(QPSK)方式を皮切りに社会実装され、最新の研究では M 値直交位相振幅変調(MQAM)を用いた 4096QAM[1]や 16384QAM [2]符号化変調方式の実証が進んでいる。

しかしながら、このような光信号を並列伝送する波長多重伝送システムは、様々な振幅を有する光信号が混在することにより波長チャンネル間の相互位相変調がより大きな信号品質劣化要因となる。この相互位相変調による信号品質劣化については、付加的ガウス雑音でモデル化した理論研究が存在し、変調方式が相互位相変調に及ぼす影響度が定式化されている[3]。また、実験研究でも位相共役光伝送方式の研究[4]、機械学習による相互位相変調信号の信号品質劣化補償[5]などの研究が存在する。さらに、本研究と同様の観点で、伝送路符号の工夫によって相互位相変調を抑制しようとする研究[6]など数多く存在する。

長距離光ファイバ伝送用高光非線形耐力符号化変調方式に関する研究

Research on high-nonlinearity-tolerant coded modulation for long distance optical fiber transmission

3. 研究の方法

本研究は、50GHz 間隔で配置された偏波多重 8 波長多重信号について、図 1 に示す構成を前提とした多中継光ファイバ伝送システムの光信号伝送品質を評価した。このシステムは、送信器の出力に後置光増幅器、受信器の入力に前置光増幅器、光ファイバ伝送線路の光損失を補償する光増幅中継器を 80km 間隔で配備した多中継光増幅中継構成となっている。光ファイバ伝送線路は、偏波/波長多重光伝送信号の伝搬波形分析が可能となるようマナコフ方程式でモデル化し、表 1 の条件を適用してビーム伝搬法により数値解析した。

従来の研究では、光伝送信号品質は、品質指標値として Error Vector Magnitude(EVM)や信号対雑音比(SNR)を用いて評価されてきている。しかし、近年、軟判定誤り訂正器が標準的に採用されている。この軟判定誤り訂正器において、ビット単位で尤度判定を行うビットメトリック復号システムでは一般化相互情報量(Generalized Mutual Information: GMI)が、シンボル単位で尤度判定を行うシンボルメトリック復号システムでは相互情報量 (Mutual Information: MI) が、誤り訂正後のシステム性能を推定する上で、汎用的な評価指標となる点が指摘されている [7]。本研究は、一連のビーム伝搬法によるマナコフ方程式の数値計算ツール、GMI/MI 評価ツールを C 言語で開発し、次節以降の符号化変調方式に対する光信号品質評価を行った。

3.1 CP-QPSK 符号化変調信号

本研究は、波長チャンネル間の相互位相変調効果による信号波形劣化を抑圧することを目的に、各波長チャンネルの振幅を一定にする定包絡線連続位相(CP)-MPSK 符号化変調の光伝送品質特性を評価した。評価の際は、比較対象として、RZ 符号の PSK 符号化変調信号を選定した。図 2(a)に示すように、定包絡線連続位相 QPSK 符号化変調信号は、Minimum Shift Keying と同様に複素平面上に定義された信号点間を結ぶ円周上に軌跡を残しながら変調される。一方、比較対象とした RZ-QPSK 符号化変調信号は、各信号点と原点を通過する軌跡を残しながら変調される。

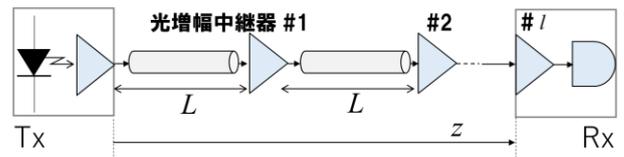


図 1 システム構成

定数	記号	数値・単位
システム		
シンボルレート	R	25 Gsymbol/sec
波長チャンネル間隔	W	50 GHz
伝送路		
損失係数	α	-0.25 dB/km
分散係数	β_2	3, -3, -17 ps ² /km
二次分散係数	β_3	0.1143 ps ³ /km
偏波モード分散係数	PMD	3ps/ $\sqrt{\text{km}}$
偏波モード分散相関長	Lcorr	0.1 km
複屈折ビート長	Λ_{beat}	0.05 km
非線形係数(DSF)	γ	2.16 1/mW/km
" (SMF)		1.43 1/mW/km
光増幅器		
増幅率	G	100
雑音指数	NF	3 dB
受信器		
フィルタ帯域幅	B	12.5

表 1 計算条件

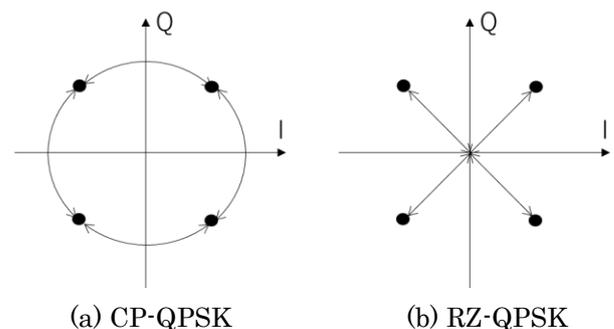


図 2 変調時の信号点間軌跡

図 3 に、1200km 伝送時の CP-QPSK 符号化変調信号と RZ-QPSK 符号化変調信号の GMI と各光増幅器出力端における波長チャンネルあたりの平均光信号電力の関係を示す。CP-QPSK 符号化変調信号は定電力であることから、相互位相変調を抑制できより高い平均送信光電力での伝送が可能となり、より高い GMI が

長距離光ファイバ伝送用高光非線形耐力符号化変調方式に関する研究

Research on high-nonlinearity-tolerant coded modulation for long distance optical fiber transmission

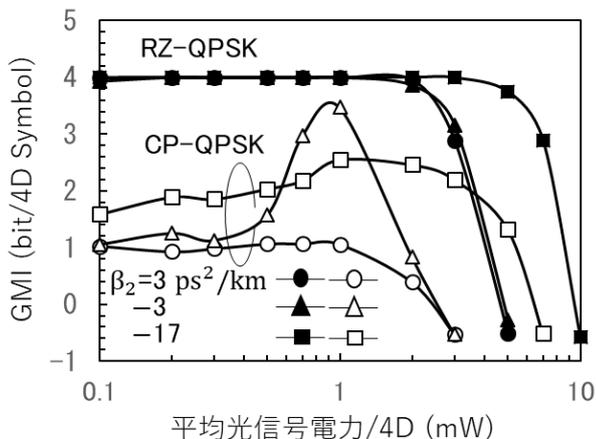


図3 GMI と平均光信号電力の関係 (L=1500 km)

得られることを期待したが、結果的には期待動作が得られない。むしろ、CP-QPSK 符号化変調信号は、位相変化の不連続性によりスペクトル広がりが発生する。RZ-QPSK 符号化変調信号は、位相変化の発生時に光電力を消去するためスペクトル広がりを抑える効果がある。さらに、より高い光ピーク電力が得られる分、そのタイミングのサンプル値で軟判定した方が高い GMI が得られることが分かった。

3.2 四次元 Dual Mode-RZ-MPSK/NPSK 変調信号

前節の結論を踏まえ、RZ 符号をベースに多値化の検討を進めた。多値化にあたっては、相互位相変調による光信号品質劣化を抑制するために、両偏波面全体の四次元空間において光信号電力を一定値とする四次元空間定ピーク電力符号化変調方式に注目する。その一つである四次元 2A-8PSK 符号化変調方式 [6]を参考にしつつ、本研究は、Dual Mode RZ-MPSK/NPSK 符号化変調方式[8]に注目した。

図4に四次元 Dual Mode 8PSK/QPSK 符号化変調方式の信号点を示す。本方式は、外郭リングの各信号点間と内郭リングの各信号点間のユークリッド距離に大きな差が出ないように工夫された信号点シェーピング設計がされている。同時に、同一平均信号電力において、外郭リング上の信号点間距離は、8PSK のものと比較して 26%拡大できる。

四次元 Dual Mode 8PSK/QPSK 符号化変調方式は、

多段復号器構造で復号させる必要がある。その場合、性能指標は、シンボルメトリック復号システムの性能評価指標がふさわしいとされていることから、本評価では、GMI ではなく MI で性能比較を行った。図5に各符号化変調方式の MI と信号対雑音比の関係を示す。四次元 Dual Mode 8PSK/QPSK 符号化変調方式は、誤り訂正限界を与える条件（規格化 MI 0.9 に相当）の 5.3 bit/4DSymbol で、8PSK 符号化変調方式に対して信号対雑音比で 0.8 dB の余裕度を与えることが分かった。

図6に、2000km 伝送時の四次元 Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調、四次元 2A8PSK 符号化変調、RZ-16QAM 符号化変調の各方式の性能比較を示す。RZ-16QAM 符号化変調方式以外は、両偏波面の合計ピーク電力が一定となる。両偏波面全体の光ピーク電力は一定となるように設計された効果もあり、正常分散条件の $\beta_2 = 3 \text{ ps}^2/\text{km}$ では、規格化 MI が最大となる平均光信号電力は、RZ-16QAM 符号化変調信号のものよりも、四次元 Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調信号、四次元 2A8PSK 符号化変調信号の方が高い値になっている。特に、四次元 Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調方式は、誤り訂正限界を与える条件（規格化 MI 0.9 に相当）の 5.3 bit/4DSymbol よりも高い規格化 MI を達成していることがわかる。

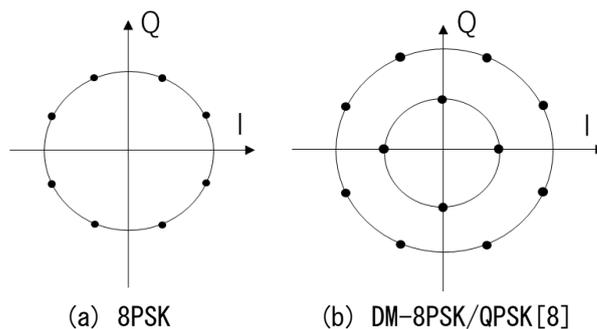


図4 検討する符号化変調方式の信号点

長距離光ファイバ伝送用高光非線形耐力符号化変調方式に関する研究

Research on high-nonlinearity-tolerant coded modulation for long distance optical fiber transmission

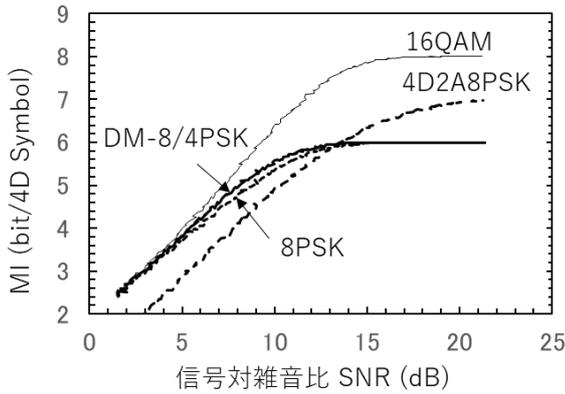


図5 検討する符号化変調方式の相互情報量

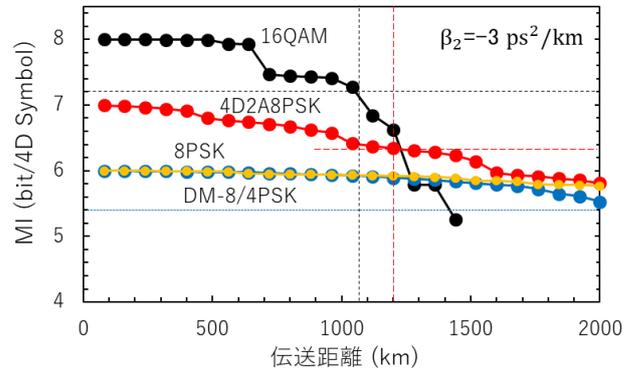
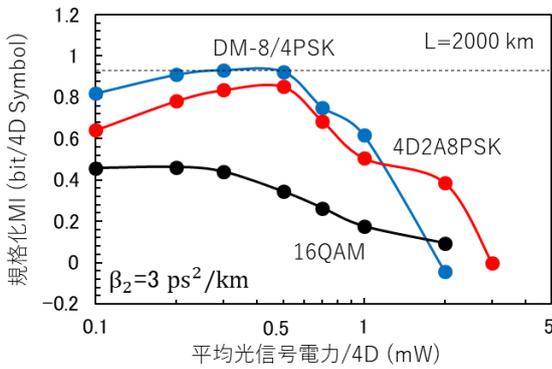
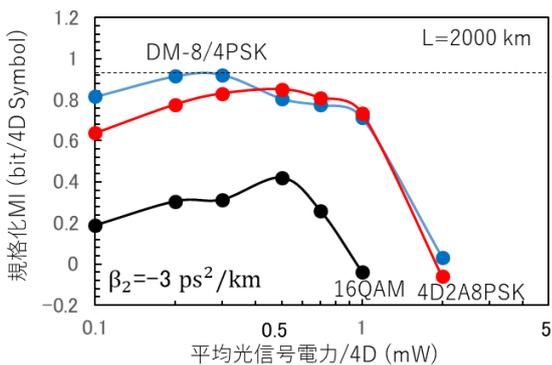


図7 MI と伝送距離の関係
($\beta_2 = -3 \text{ ps}^2/\text{km}$)



(a) DSF S 帯伝送時



(b) DSF L 帯伝送時

図6 規格化 MI と平均光信号電力の関係

図7は、の四次元 Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調、四次元 2A8PSK 符号化変調、RZ-16QAM 符号化変調の各方式の MI と伝送距離の関係を示す。図7に示すように、誤り訂正限界条件を加味すると1040 km までは RZ-16QAM 符号化変調方式が、1200 km までは四次元 2A8PSK 符号化変調方式がより大きな通信容量を提供できるが、それ以上の伝送距離では、四次元 Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調方式が有利になっている。四次元 Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調方式の相互情報量は、8PSK 符号化変調方式のものと比較すると、図5で示す結果程の優位性は示されず、偏波分散の影響を受けて若干劣化する条件も見られるものの、ほぼ同等の性能を示している。このように、ピーク電力を一定とする四次元空間定ピーク電力符号化変調方式は、同じくピーク電力が一定である 8PSK 符号化変調方式などの MPSK とほぼ同レベルの相互位相変調抑圧効果を発揮できることが再確認できたと言える。

4. 将来展望

今後、MQAM 変調信号のさらなる多値化を通じて光ファイバ伝送システムの大容量化が進展すると考えられる。多値化にあたっては、原則として既存システムで実現されている伝送可能距離の維持確保が引き続き求められるものの、伝送可能距離について全ての要求を満足できなくなる場合も発生すると想定される。そのような場合、システム利用条件や伝送路状態に合

長距離光ファイバ伝送用高光非線形耐力符号化変調方式に関する研究

Research on high-nonlinearity-tolerant coded modulation for long distance optical fiber transmission

わせフレキシブルに設備の構築と運用を行うことも選択肢の一つとなる。文献[6]で初めて提案され、本研究の四次元 Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調方式の評価でも追認できた四次元空間定ピーク電力符号化変調方式は、システム仕様のフレキシブル化に対する解決策として一つの有力な選択肢となると考えている。

おわりに

本研究は、①光符号のピーク対平均電力比 (Peak-to-Average Power Ratio: PAPR) を抑制して相互位相変調の発生を抑制する伝送路符号、②光ピーク電力を一定にして相互位相変調の発生を抑制する伝送路符号に注目した。具体的には、①CP-MPSK 符号化変調符号、②Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調に注目して伝送性能の優位性を明確化した。CP-MPSK 符号化変調符号の採用による相互位相変調の抑圧効果と比較して、RZ 符号ではピーク電力が増加する分高い SNR が得られることを明らかにした。その上で、相互位相変調の発生を抑制する RZ 符号として四次元 Dual Mode RZ-8PSK/QPSK 符号化変調方式の通信容量評価を初めて実施し、四次元空間定ピーク電力光信号伝送方式の有用性を示した。

参考文献

[1] M. Terayama, S. Okamoto, K. Kasai, M. Yoshida, and M. Nakazawa, "4096 QAM (72 Gbit/s) Single-Carrier Coherent Optical Transmission with a Potential SE of 15.8 bit/s/Hz in All-Raman Amplified 160 km Fiber Link," Proc. Of Optical Fiber Communication Conference 2018, Th1F, March, 2018.

[2] Xi Chen, et al., Proc. of 45th European Conference on Optical Communication (ECOC'2019), Sep. (2019).

[3] R. Dar, M. Feder, A. Mecozzi, and M. Shtaif, "Properties of nonlinear noise in long, dispersion-uncompensated fiber links," Opt. Exp., vol. 21, pp. 25685–25699, (2013).

[4] T. Umeki, T. Kazama, A. Sano, K. Shibahara, K. Suzuki, M. Abe, H. Takenouchi, and Y. Miyamoto,

"Simultaneous nonlinearity mitigation in 92 × 180-Gbit/s PDM-16QAM transmission over 3840 km using PPLN-based guard-band-less optical phase conjugation," Opt. Exp., vol. 24, No. 15, pp. 16945-16951, July 2016.

- [5] M. Nakamura, N. Sumimoto, Y. Takanashi, and R. Nakagawa, "XPM and phase-noise compensation using a polarization-multiplexed and intensity-modulated pilot carrier," IEICE Com. Exp., vol. 10, No. 1, pp. 18-23, Jan. 2021.
- [6] K. Kojima, T. Yoshidam T. K. Akino, D. AS. Millar, K. Parsons, M. Pajovic and V. Arlunno, "Nonlinearity-Tolerant Four-Dimensional 2A8PSK Family for 5–7 Bits/Symbol Spectral Efficiency," J. Lightwave Technol., vol. 35, No. 8, pp. 1383-1391, Aug. (2017).
- [7] G. Liga, A. Alvarado, E. Agrell, and P. Bayvel, "Information rates of nextgeneration long-haul optical fiber systems using coded modulation," J. Lightwave Technol., vol. 35, No. 1, pp. 113-123, Jan. (2017).
- [8] M. Nakao, T. Ishihara, and S. Sugiura, "Dual-mode time-domain index modulation for Nyquist-criterion and faster-than-Nyquist single-carrier transmissions," IEEE Access., vol. 5, No. 12, pp. 27659-27667, Dec. (2017).

関連文献

[A] W. Imajuku, "Eigenvalue equation of optical transmission fiber considering cross-phase modulation (XPM) induced instability, " Reports of Humanity Oriented Science and Engineering, Kindai University, pp. 11-20, May. 2017.

この研究は、平成30年度SCAT研究費助成の対象として採用され、令和元年度～令和2年度に実施されたものです。