

令和元年6月6日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06333

研究課題名(和文) 波長信号間干渉を低減する多次元符号化光変調による超高密度光波長多重伝送方式

研究課題名(英文) Super-High-Density Optical Wavelength Division Multiplex Transmission System with Multi-dimensional Coded Modulation to Reduce Inter-Wavelength Signal Interference

研究代表者

那賀 明 (Naka, Akira)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：20765854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：デジタルコヒーレント光伝送技術のさらなる発展を目指し、偏波を信号空間として捉え、この空間を利用して多次元化を実現し、さらに変調信号点を選択することにより、位相・振幅の信号間ユークリッド距離を拡大する多次元符号化光変調方式の高度化に取り組んだ。
複数の多次元光変調信号方式にBICM-IDという符号化変調方式に適用し、デジタルコヒーレント光伝送における伝送評価を行った結果を、論文3件、学会発表7件として外部発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回取り組んだ多次元符号化光変調方式の高度化は、2010年代初めに登場したデジタルコヒーレント光通信技術を利用し、無線伝送分野でも研究が進んでいる情報理論に基づく符号化変調方式を、光ファイバ通信特有の条件を考慮して応用を試みる点に大きな学術的意義がある。今回得られた成果は、近年のインターネットを介した動画や音楽などの大容量コンテンツの普及に伴い、益々重要性を増している光通信ネットワークの超高速化・大容量化のための基盤技術を提供する。

研究成果の概要(英文)：We have been engaged in the multi-dimensional coded modulation method, in which the Euclidean distance is enlarged by a set-partitioning of a group of symbols composed of two polarization spaces, to achieve further development of digital coherent optical transmission technology.

We have applied the coded modulation method called BICM-ID to multiple multi-dimensional optical modulation signal and evaluated the transmission characteristics in digital coherent optical transmission. And we have presented the research results as 3 papers and 7 conference presentations.

研究分野：光通信

キーワード：デジタルコヒーレント光伝送技術 多次元符号化光変調方式

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、その2～3年前からデジタルコヒーレント光伝送技術を適用した100Gbit/s x 80～100 波長通信システムが実用化され、さらなる大容量化技術の確立が課題となっていた。2つの波長信号により1つのチャンネルを形成するサブキャリア多重技術方式による400Gbit/s 方式フィールド伝送実験が報告されており、実用化に向けた準備が着々と進められる一方、デジタルコヒーレントを応用した新たな変復調方式として、光の位相・振幅に加え、偏波・波長などの各信号空間を統合する多次元符号化技術が提案され、注目され始めていた。

研究代表者は、当時、サブキャリア多重を形成する隣接波長信号間で信号処理を行う MIMO デジタルコヒーレント信号処理技術を提案・実証し、ナイキストフィルタリング技術で達成される周波数利用をさらに高効率化した超高密度波長多重技術に取り組み、研究成果を上げており、デジタルコヒーレントを応用した新たな研究テーマに取り組む準備を整えていた。

2. 研究の目的

本研究は、多次元符号化技術に着目し、隣接する光波長間の符号間干渉に起因する光波長信号間ユークリッド距離を拡大し、多次元符号化変調技術の性能を高める技術の確立を目指す。更に、MIMO デジタルコヒーレント信号処理技術を融合することで、大容量・高感度な特性を併せ持つ超高密度光波長多重伝送方式の実現を目指す。

3. 研究の方法

新たに考案する多次元符号化光変復調技術を適用した光変調信号生成と、受信信号処理・復調の評価検証のため、Matlab ソフトウェアを利用したシミュレーションプログラムを作成する。さらに、市販光伝送シミュレータを活用し、総合的な計算機シミュレーション系を構築する。また、必要に応じ、実機を用いた光信号特性測定系により、光信号の基礎特性の把握を行う。

4. 研究成果

(1) MIMO 信号処理を適用した多次元光変復調方式の特性解析

4次元及び8次元変調信号に MIMO 信号処理を適用した変調方式の特性について、計算機シミュレーションにより解析した。3つの変調方式と、2つの種類の MIMO 信号処理を組合せ、5つの方式について比較を行った。①②は、2次元の DP(偏波多重)-QPSK とし、①には偏波多重を扱う 2x2MIMO 信号処理に対し、②には同一符号で変調した2つの波長信号を合成する波長ダイバシティ受信を行う 4x4MIMO 信号処理を適用した。また、③④は、QPSK をベースにセット分割を行う 4D-PS-QPSK とし、③は 2x2MIMO 信号処理、④は波長ダイバシティ受信を行う 4x4MIMO 信号処理を適用した。⑤は、2波長のサブキャリア多重により 8次元を構成する 4D-PS-QPSK を適用し、2つの波長それぞれで 2x2MIMO 信号処理を行った。

図1に信号品質を表す Q 値の光信号対雑音比 (OSNR) 依存性の計算結果を示す。この結果により、多次元変調信号においても、2次元変調信号同様、波長ダイバシティ方式の適用が可能であることを示した。さらに、多次元変調信号が、セット分割によるユークリッド距離拡大により、受信感度が良好になる基礎特性を確認すると共に、2次元変調信号と比較して Q 値が小さい範囲でより品質が劣化している特性が得られた。これは、多次元変調信号では、最小ユークリッド距離を持つ隣接信号点が多数となり、グレイ符号となる符号割当てが不可となることが要因であることを解明した。

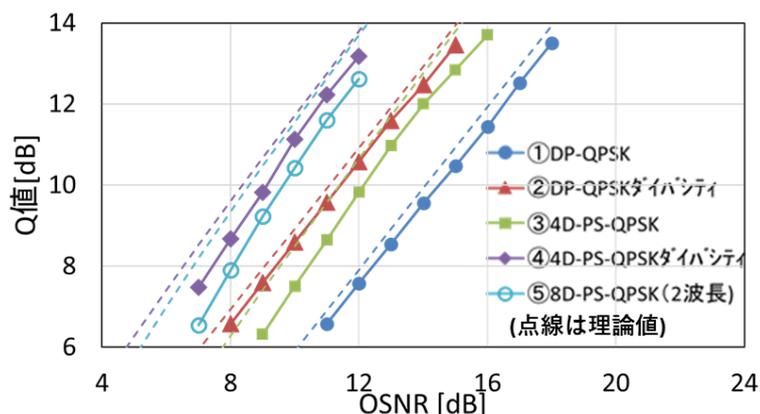


図1 各変調方式の Q 値の OSNR 依存性

(2) BICM-ID を適用した 4次元 PS-QPSK 光変復調方式の送受信特性解析

符号化と変調方式を融合する符号化変調方式の一つである BICM-ID (Bit Interleaved Coded Modulation-Iterative Detection) が、本質的に非グレイ符号となる多次元変復調方式の高感度化を実現することを、計算機シミュレーションにより実証した。なお、BICM-ID は、対数尤度比 LLR を、復調器と復号器の間で繰り返して感度を高める方法である。

変調方式には、①グレイ符号 QPSK、②自然二進符号 QPSK (非グレイ符号)、③ DP-QPSK のサブセットで構成される 4D-PS-QPSK を用いて解析を行った。

図2に誤り率(Bit Error Rate: BER)の OSNR 依存性を示す。

①グレイ符号 QPSK では、BICM-ID の効果がほとんど無い一方、②非グレイ符号である自然二進符号 8PSK では、非グレイ符号化に起因する特性劣化が大きく緩和された。これと同様に、③PS-QPSK は、BICM-ID により特性が改善した。また、雑音に対する感度と通信容量を総合的に評価する伝送効率 (パワー効率)の指標では、BICM-ID を③ PS-QPSK が、①の DP-QPSK と比較して、良好な特性となることも定量的に示した。

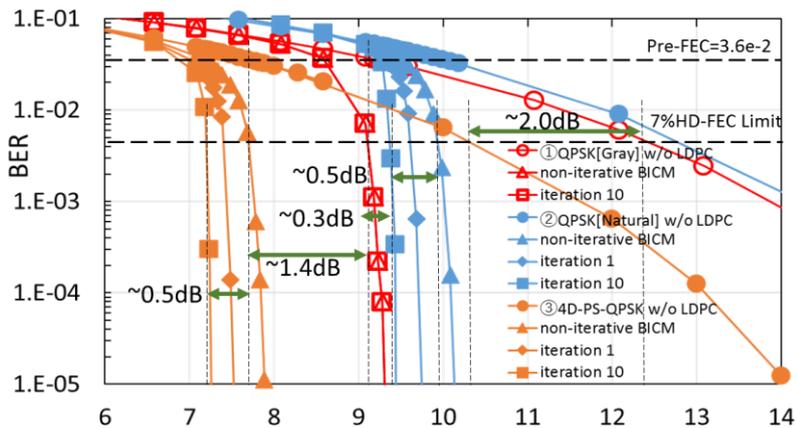


図2 各変調方式の誤り率特性

(3) 長距離光ファイバ伝送における4次元 PS-QPSK 信号への BICM-ID の有効性と最適 SNR 設定

波長分散値を零とした非線形現象が顕著な伝送条件を想定した波長多重伝送方式においても、4 D-PS-QPSK 信号に適用する BICM-ID が有効であることを示すと共に、BICM-ID に必要な復調器における SNR 設定の最適設定値および設定値の許容範囲について、数値解析により定量評価した

図3に、BER の光増幅中継器の光出力 (全8波長) 依存性を示す。光出力が小さい場合(線形領域)、大きい場合(非線形領域)それぞれ、累積光雑音或いは非線形現象により BER が劣化するが、光出力-2.5~-2.0dBm 或いは+2.3~+2.8dBm の範囲では、BICM-ID の外部繰り返しを行うごとに BER が改善されていることが判る。

図4に、光出力-2.5dBm および +2.8dBm における、BER の BICM-ID の設定 SNR 値依存性を OSNR 値に換算して示す。最適な SNR 値は、線形領域では、光増幅中継系で決定される OSNR 値と同じ程度になる一方、非線形領域では、OSNR では無く、FEC 適用前の硬判定 BER に対応する SNR とほぼ同じになった。また、SNR 設定値の許容範囲は、2つの領域共に、0.5dB ~1dB 程度であることが判った。

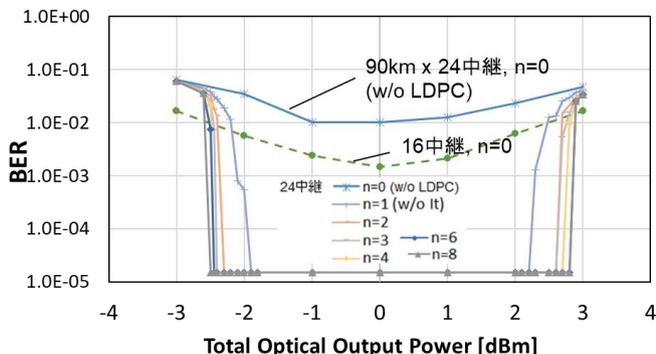


図3 BICM-ID 適用前および適用後の BER の光増幅中継器出力依存性

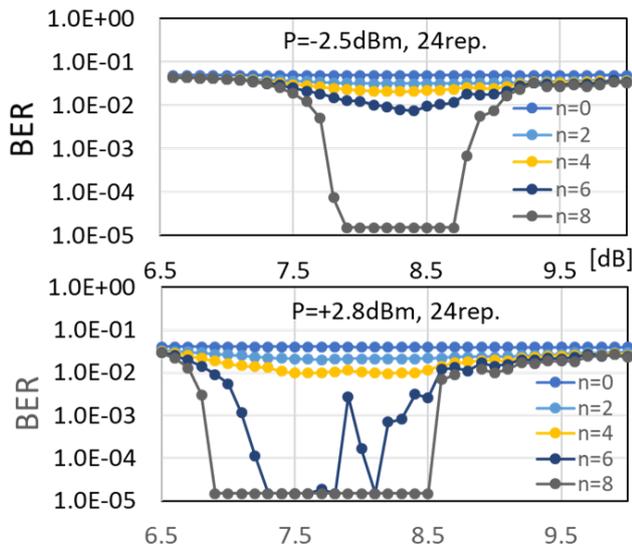


図3 BER の SNR 設定値依存性

(4) その他

偏波変動やレーザの位相雑音など、より実用環境に近い伝送条件での特性評価の手法を確立し、波長間クロストーク補償やダイバシティ方式での特性解析を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① 那賀明、富田 和希、村山 直駿、「無瞬断光波長信号切替えを実現する波長ダイバーシティ方式におけるレーザ位相雑音補償のための信号処理構成法と位相推定法」、『電子情報通信学会論文誌 B』(電子情報通信学会)、査読有、Vol. J101-B, No. 6, 454-462頁, 2018.
- ② A. Naka, “BER performance analysis of multi-dimensional modulation with BICM-ID”, IEICE Communications Express, 査読有, Vol.6, No.12, pp.645-650, 2017.
- ③ A. Naka and S. Yamada, “Characteristics of Multi-Dimensional Modulation with MIMO signal processing”, IEICE Communications Express, 査読有, Vol.5, No.12, pp.461-466, 2016.

〔学会発表〕（計7件）

- ① 那賀明, “長距離光ファイバ伝送における4次元PS-QPSK信号へのBICM-IDの有効性と最適SNR設定”, 2018年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-10-29.
- ② 村山 直駿、那賀明, “デジタルコヒーレント光通信技術を適用した波長ダイバーシティ方式におけるSOP変動の影響”, 2018年電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」講演番号44.
- ③ 布施 樹、那賀明, “多値変調における隣接波長間XT補償の特性解析”, 2018年電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」講演番号115.
- ④ 那賀明, “BICM-IDを適用した4次元PS-QPSK光変復調方式の送受信特性解析”, 2017年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-10-32.
- ⑤ 山田翔太、那賀明, “デジタルコヒーレント光通信技術を適用した隣接波長信号間XT補償方式の特性解析”, 2017年電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」講演番号115.
- ⑥ 富田和希、那賀明, “デジタルコヒーレント光通信技術を適用した波長ダイバーシティ方式における位相雑音の影響”, 2017年電子情報通信学会東京支部学生会「研究発表会」講演番号115.
- ⑦ 那賀明、山田翔太, “MIMO信号処理を適用した多次元光変復調方式の特性解析”, 2016年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-10-38.

〔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 該当無し

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 該当無し
- (2) 研究協力者 該当無し

※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。