

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04386

研究課題名(和文) 長距離光ファイバ伝送における符号化変調方式を応用した非線形光学効果の低減・補償法

研究課題名(英文) Nonlinear optical effect compensation method applying coding modulation method in long distance optical fiber transmission

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：非線形光学効果の低減機能を有しかつ高感度な新規符号化変調信号を提案した。また、長距離光ファイバ伝送における伝送特性を評価し、信号処理による非線形光学補償を最大化する光ファイバ伝送路条件について知見を得た。

符号化変調方式の1つであるPAS(Probability Amplitude Shaping)方式にBICM-ID(Bit Interleaved Coded Modulation-Iterative Detection)技術を適用した符号化変調方式を提案し、この方式特有のバースト誤り低減方法の提案などの研究成果結果を得て、論文3件、国際会議1件、学会発表12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、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さらに発展させ、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 proposed a novel coded modulation signal that has a function of reducing nonlinear optical effects and is highly sensitive. We also evaluated the transmission characteristics of long-distance optical fiber transmission and found optical fiber transmission line conditions that maximize nonlinear optical compensation by signal processing.

We proposed a method to apply BICM-ID (bit interleaved coded modulation-repetitive detection) to the amplitude distribution shaping method (PAS method: stochastic amplification type shaping), which is one of the coding modulation methods. We have also proposed a method to reduce burst errors peculiar to the PAS. These research results were presented externally as 3 papers, 1 international conference, and 13 conference presentations.

研究分野：光通信

キーワード：非線形光学効果 符号化変調

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、その5～6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 波長通信システムをさらに発展させ、高速化・大容量化する技術の確立が課題となっていた。そして、その課題を解決する一つの有望な技術として、情報理論をベースにしたPAS(Probability Amplitude Shaping)方式が提案され、各研究機関で研究開発確立が進められていた。

研究代表者は、当時、多次元符号化技術に着目し、その技術に情報理論を応用することにより、BICM-ID に適用する符号化変調方式を考案して光ファイバ伝送における特性評価を行うなど大容量・高感度な特性を併せ持つ超高密度光波長多重伝送方式に取り組み、研究成果を上げていた。これらの研究活動で培った研究手法により、新たな符号化変調方式の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、非線形光学効果の低減機能を有しかつ高感度な新規符号化変調信号方式を考案し、数値解析による定量評価を通して、その方式の長距離光ファイバ伝送への適用の有効性を確認することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、符号化変調方式の1つであるPAS方式にBICM-ID(Bit Interleaved Coded Modulation-Iterative Detection)技術を適用した符号化変調方式新規符号化方式を提案する。数値解析評価には、汎用数値計算ソフトウェア Matlab による自作プログラムと市販光伝送シミュレータを用いる。Matlab では、PAS 方式による変復調信号の生成、LDPC を用いた符号化、復調器とLDPC復号器間の軟判定情報の交換の計算などの機能を持つプログラムを作成する。また、市販光伝送シミュレータでは、光増幅中継伝送システムを模擬する伝送系を作成し、総合的な光ファイバ伝送特性の評価を行う。

4. 研究成果

(1)PAS方式の変復調特性評価と多次元変調方式の情報理論に基づく特性比較

64QAMをベースとしたPAS方式の特性を、PAS方式の整形率とLDPC符号の符号化率をパラメータとして数値解析により評価し、整形率と符号化率に応じた信号対雑音比に対する通信容量の特性が理論値と一致することを確認し、また、多次元変調方式と比較して同等以上の特性が得られることを確認した。

今回用いたPAS方式は、64QAMをベースとし、確率分布を形成するために、振幅がMaxwell-Boltzmann分布を持つよう $(k, n)=(12, 10)$ 、 $(10, 10)$ の2種類のDistribution Matcher(DM)を作成した。なお、 (k, n) は入力 k ビット、出力 n シンボルを表す。復調器では、生成した確率分布に基づいて重み付けを行うことにより、64QAMを形成する6ビットの各軟判定値(LLR: log-likelihood ratio)を算出した。

多次元光変復調方式には、8次元の16QAM信号をセット分割して4096個の信号点を持つ8D-SP4096-16QAM[3]を用い、2次元16QAMのグレイ符号ベースのbinary信号を割り当てた。BICM-IDは、最大10回の外部繰返しを行った。また、比較対照のため、グレイ符号を割り当てた2次元の2D-16QAM信号についても評価した。

全ての方式に、符号器としてDVB-S.2規格の符号語長64,800、内部繰返し20回のLDPC符号を用いた。表1の通り、各変調方式にLDPC符号の符号化率 R_c を複数設定し、LDPCの検査ビット部を含まないEnd-to-Endの送信信号に対する2次元1シンボル当りの伝送ビット数を調整した。表1の通り、各変調方式にLDPC符号の符号化率 R_c を複数設定し、LDPCの検査ビット部を含まないEnd-to-Endの送信信号に対する2次元1シンボル当りの伝送ビット数を調整した。

表1 各方式に適用した符号化率 R_c と伝送ビット数

変調方式		R_c	伝送ビット数/symbol
PAS	$(k, n)=(12, 10)$	4/5, 2/3	3.2, 2.4
	$(k, n)=(10, 10)$	5/6, 2/3	3.0, 2.0
8D-SP4096-16QAM		4/5, 2/3	2.4, 2.0
2D-16QAM		4/5, 3/4	3.2, 3.0

図1に、復調器出力のLLRの数値解析値から統計処理を用いて算出した1シンボル当りの通信路容量について、シンボルあたりSN比(E_s/N_0)の依存性を示す。なお、各方式の通信容量は、復号器入力前のLLRを用いて算出するため、LDPCのパラメータである R_c には依存しない。

2D-16QAMの通信容量は、4bitに漸近する理論値とほぼ一致し、計算精度の正確さが確認できる。8D-SP4096-16QAMは、正方のm-QAMでは実現できない3bit/symbol信号を、高い受信感度で構成可能なことが判る。

PAS方式の $(k, n)=(12, 10)$ 、 $(10, 10)$ は、確率分布の整形により、 E_s/N_0 が12dB程度より小さい範囲ではシャノン限界と同程度の通信路容量となり、 E_s/N_0 の大きい範囲では、各々のエントロピー値4.80及び4.37bit/symbolに漸近した。

図 2 に、表 1 の各条件における BER 特性を示す。PAS 方式では、符号器直後の出力(DM 逆演算前)の LDPC 出力の特性と、DM⁻¹出力ビットと正負号ビットを結合して復号した End-to-End での特性をそれぞれ示す。伝送ビット数 3.2 及び 3.0bit/symbol の PAS 方式は、2D-16QAM 方式とほぼ同等の特性を示した。また、8D-SP4096-16QAM は 2つの符号化率共に PAS 方式よりも良好な BER 特性を示した。

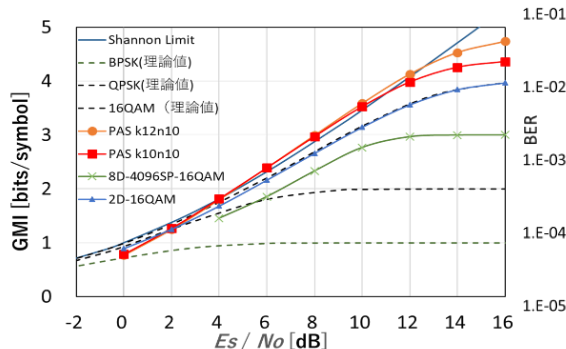


図 1 各変調方式の通信路容量

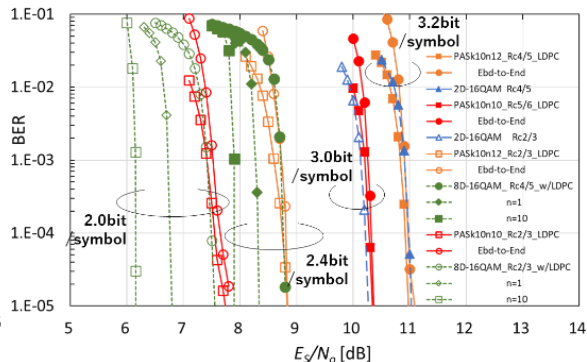
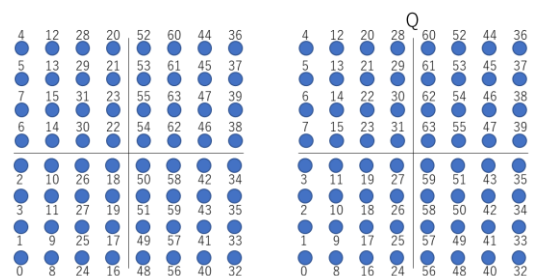


図 2 BER の SNR 依存性

(2) BICM-ID を適用した PAS 方式の特性

ビット-シンボルのマッピングを、通常用いられるグレイ符号方式に加え、非グレイ符号である自然二進符号方式とした。図 3 に 10 進法で表した各マッピングを示す。

確率分布を形成する確率整形器として、CCDM (constant composition Distribution Matcher) 法を用い、 $(k,n)=(720,600)$, $(600,600)$ の 2 種類のブロック変換を行った。ただし、 (k,n) は、1 ブロックあたりの入力 k ビット数、出力 n 振幅列数を表す。それぞれの振幅列が、可能な限り Maxwell-Boltzmann 分布となり、かつ平均振幅の大きさが小さくなるように調整し、64QAM の I/Q 成分に対応する振幅(1,3,5,7)の確率分布を、25.17%, 3.17%, 0.17%)とした。



(1)グレイ符号 (2) 自然二進符号

図 3 ビット-シンボルのマッピング

白色雑音重畳した信号を受信した復調器では、整形した確率分布に基づいて重み付けして受信シンボルの確率分析を行うことにより、64QAM を形成する 6 ビットの各軟判定値(LLR: log-likelihood ratio)を算出した。符号器には DVB-S.2 規格の符号語長 64,800、内部繰返し 20 回の LDPC 符号を用い、LDPC 符号の符号化率を 2/3 とした。このとき、2 種類の確率分布の情報容量は、それぞれ 2.4 及び 2.0bit/symbol となる。BICM-ID では、復調器と復号器間の LLR 情報交換を行う外部繰返しを最大 3 回行った。

図 4 に、LDPC 復号後のビット列符号誤り率(BER)特性を示す。2 種類の確率分布共に、非グレイ符号を適用した PAS では、BICM-ID の外部繰返しに依り BER 特性が改善し、特性改善がほとんど無いグレイ符号適用の PAS の特性より良い特性が得られた。

図 5 に、復号器および 4 つの復調器の相互情報量の入出力を表す EXIT チャートの解析結果を示す。各復調器の特性は、図 1 においてビット誤りが生じない信号対雑音比を条件としている。グレイ符号適用の PAS では、入力の相互情報量に対しほぼ出力の相互情報量が一定となるのに対し、非グレイ符号適用時の PAS では、入力に対して単調増加となり、BICM-ID による特性改善が予見される。

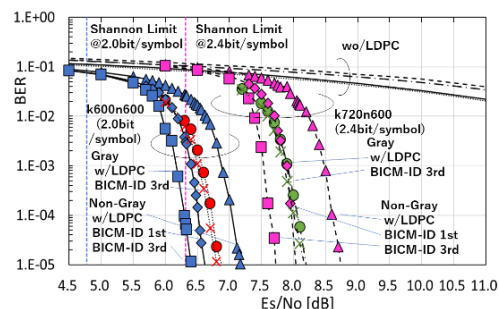


図 4 LDPC 復号後のビット列の BER 特性

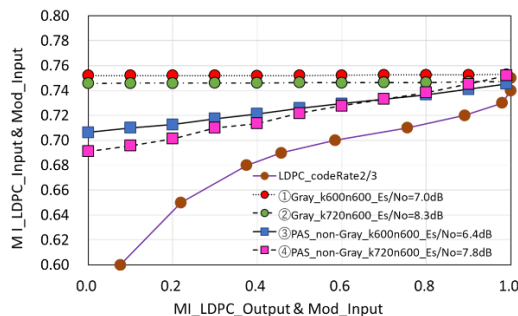


図 5 確率逆整形出力のビット列の BER 特性

(3) PAS 方式におけるバースト誤り特性と特性改善方法の提案

図6に、今回用いた PAS 方式の構成を示す。外符号となる BCH 符号 (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem code) の複数フレームをインタリーブして信号列を生成した。次に LUT を用いた整形器にて、この信号列を、ブロック変換により変調後の振幅の生成確率が調整された信号列に変換した。グレイ符号にマッピング後、内符号となる LDPC 符号器に入力し、出力信号列の情報ビットを 64QAM の振幅に、また検査ビットを正負号にそれぞれに割り当てた。

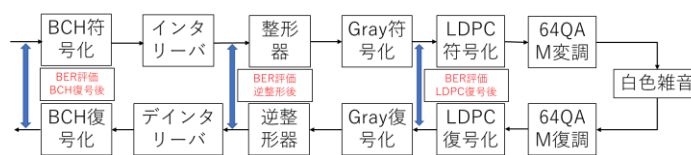


図6 PAS方式の構成

図6に、今回用いた PAS 方式の構成を示す。外符号となる BCH 符号 (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem code) の複数フレームをインタリーブして信号列を生成した。次に LUT を用いた整形器にて、この信号列を、ブロック変換により変調後の振幅の生成確率が調整された信号列に変換した。グレイ符号にマッピング後、内符号となる LDPC 符号器に入力し、出力信号列の情報ビットを 64QAM の振幅に、また検査ビットを正負号にそれぞれに割り当てた。

整形器では、LUT を用いて $(k,n)=(10,10)$ のブロック変換を行った。ただし、 (k,n) は、1 ブロックあたりの入力 k ビット数、出力 n 振幅列数を表す。それぞれの振幅列が、可能な限り Maxwell-Boltzmann 分布に近付き、かつエントロピーが小さくなるよう調整した。評価に用いた 64QAM の同相および垂直成分の振幅(1,3,5,7)の確率分布は (67.41%, 27.64%, 4.63%, 0.32%) である。

LDPC 符号器及び BCH 符号器は、共に DVB-S.2 規格に準拠する符号器を適用した。LDPC 符号は、符号語長 64,800、符号化率を $2/3$ とし、内部繰返しを 20 回とした。また、BCH 符号は、PAS のブロック変換と内符号器の符号化率に整合するよう符号長 21,600、符号化率 99.1% の符号を適用した。このときの誤り訂正能力は 12 となる。

LUT を用いる逆整形器において、LDPC 硬判定値の振幅列に判定誤りがあり、LUT に存在しない振幅列、或いは誤った振幅列と認識した場合にバースト誤りが生じる。今回、硬判定値の振幅列が LUT に存在しない場合、軟判定値を用いて最も不確かなビットを反転し、振幅列を再設定して逆整形を試みる新たな提案手法を適用した。外符号器と整形器間のインタリーブのサイズ N を 1~100 の値に設定し、10,000 個のフレームを用いて BER 特性評価を実施した。なお、 $N=1$ はインタリーブを適用しない条件に相当する。

図7に、信号対雑音比(E_s/N_0)に対する BER 特性を、従来の硬判定のみの逆整形器(deDM1)と、提案手法の逆整形器(deDM2)を適用した場合でそれぞれ示す。逆整形後、LDPC 特性に起因する BER フロアに逆整形時のバースト誤りが付加されるが、提案手法により、付加されるビット誤りは約 80%に低減されている。また、大きなサイズ N のインタリーブを適用することにより、BCH 復号後の BER 特性が大きく改善されるが、サイズ N に関わらず deDM1 に対する deDM2 の BER 特性の優位性は保たれる。

図8に、 $E_s/N_0=7.57\text{dB}$ における BER 特性のインタリーブサイズ依存性を示す。LUT の出力 n 振幅列数に応じたインタリーブサイズを設定することにより、バースト誤りによる BER 特性劣化を大きく緩和できることが判る。

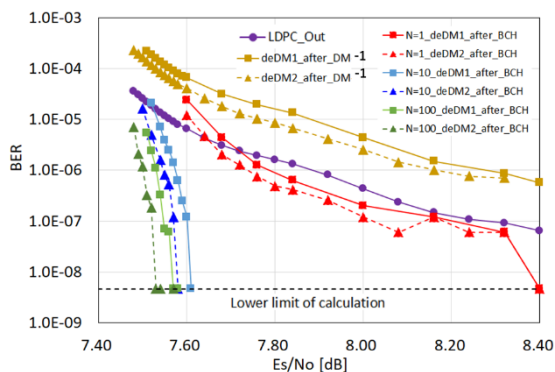


図7 BER - E_s/N_0 特性

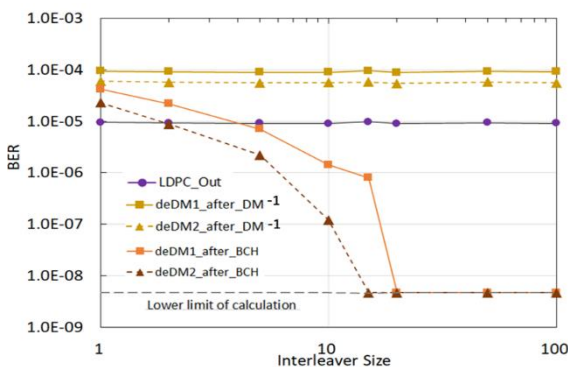


図8 BER - インタリーブサイズ特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Naka Akira	4. 巻 57
2. 論文標題 Performance of Probabilistic Amplitude Shaping with BICM-ID	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electron. Letters	6. 最初と最後の頁 226-228
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/ell2.12093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Naka Akira	4. 巻 9
2. 論文標題 Performance Comparison of Probabilistic Amplitude Shaping and Multidimensional Modulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 105-110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2019XBL0156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Naka Akira	4. 巻 10
2. 論文標題 Burst error characteristics in Probabilistic Constellation Shaping	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 775-779
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021XBL0117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Naka Akira
2. 発表標題 Performance of Probabilistic Amplitude Shaping with a single LUT Distribution Matcher
3. 学会等名 OECC2020 VP44, Taipei, October 4-8. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 那賀明
2. 発表標題 BICM-ID を適用したProbabilistic Amplitude Shaping 方式の特性
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-10-18
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 位田菜奈美、那賀明
2. 発表標題 PAS(Probabilistic Amplitude Shaping)方式におけるBER特性の振幅分布依存性
3. 学会等名 2021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47
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野崎暁、那賀明
2. 発表標題 伝送路の光ファイバ特性に伴う4次元変調方式(4D-PS-QPSK)の非線形伝送特性
3. 学会等名 2021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61
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関口友浩、那賀明
2. 発表標題 BICM-ID を適用した 4D-32SP-2A8PSK 変調方式のBER特性評価及びEXIT チャート解析
3. 学会等名 2021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64
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 那賀明
2. 発表標題 Probabilistic Amplitude Shaping方式と多次元変調方式の特性比較
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-10-32
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶谷 諒介、 那賀 明
2. 発表標題 光ファイバの非線形学効果を考慮した4次元変調方式(4D-PS-QPSK)の伝送方式
3. 学会等名 2020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122
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西組 誠、 那賀 明
2. 発表標題 多次元符号化変調におけるBER 特性及びEXIT チャート解析
3. 学会等名 2020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124
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 那賀明
2. 発表標題 PAS方式におけるバースト誤り特性と特性改善方法の提案
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-10-24
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松 衛、那賀明
2. 発表標題 BICM-IDを適用したPAS方式の特性評価
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-10-25
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木 歩、那賀明
2. 発表標題 多次元変調方式における光ファイバ波長分散のゆらぎ及び非線形効果による伝送特性
3. 学会等名 2022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46
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花島 颯、那賀明
2. 発表標題 BICM-IDを適用した 8D-4096SP-16QAM 変調方式の BER 特性評価 および EXIT チャート解析
3. 学会等名 2022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51
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松 衛、那賀明
2. 発表標題 BICM-IDを適用したPAS方式におけるインターリーバの効果
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会通信総合大会 B-10-37
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------