

令和元年5月12日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18108

研究課題名(和文) 誤り訂正符号を用いた高効率な符号化変調方式の開発

研究課題名(英文) High Efficient Coded Modulation Schemes Using Error Correcting Codes

研究代表者

細谷 剛 (Hosoya, Gou)

東京理科大学・工学部情報工学科・講師

研究者番号：60514403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本課題ではビット置換符号化変調(BICM)に対するシェーピング符号化・復号法の開発を行った。

衛星通信方式 DVB-S2 などに用いられている振幅位相変調(PSK)を用いたBICMに対して、パイロットビットを用いたシェーピング手法を開発した。また送信系列に擬似乱数を挿入することで、送信系列の発生を一様分布からガウス分布へ変換し、変調・符号化方式を提案した。有限の信号点をもつPSKに対し新しい信号点配置設計法を提案した。削除ガウス分布を用いることにより、有限の信号点をもつ場合はガウス分布にしたがって信号点を配置した場合の問題点である高SNR領域での達成レートが大きくなることを解消した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度情報化社会の発展により高速な通信への需要が増している。本課題の対象である符号化変調・誤り訂正符号化に関する研究は衛星通信方式である DVB-S2 で実用化されているものであり、今後さらに高速かつ大容量で信頼性の高い通信を実現するために必要不可欠な技術である。高次元な変調方式の開発にあたって本課題で提案した削除ガウス分布によって高速な通信が実現可能であり、高い訂正能力をもつ空間結合符号を用いたシェーピング法を組み合わせることが有用であることが示されたと考えている。

研究成果の概要(英文)：In this program, we first propose a constellation shaping scheme for amplitude phase shift keying (APSK) with Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM). We propose two schemes, i.e. using pilot bits and a novel probabilistic shaping scheme with pseudorandom sequence which are concatenated with an input sequence of the encoder. Simulation results show that our proposed schemes can achieve better performance over additive white Gaussian noise (AWGN) channel compared with conventional scheme.

We also consider a coded modulation for the AWGN channel. Instead of applying Gaussian distribution, we take the truncated Gaussian distribution in the design of signal constellations. We study peak-to-average power ratio (PAPR) reduction for one-dimensional signal constellation. From the numerical results, we show that achievable rate of the proposed modulation is almost identical to the Gaussian constellation, while keeping the expansion of PAPR small.

研究分野：情報理論，符号理論，通信理論

キーワード：空間結合符号 符号化変調 ビット置換符号化変調

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

通信システムを設計するうえで、符号化変調方式と誤り訂正符号を同時に取り組むことは重要である。多元の誤り訂正符号を用いればこのような問題は理論的には解決するが、計算量が大きくなることが問題である。一方で2元の誤り訂正符号を用いてトレリス符号化やマルチレベル符号化・マルチステージ復号を行うこと方法が従来よく知られている。しかし設計の難しさや、符号化・復号が多段階になって複雑になる問題があるため、近年ビット置換変調(BICM)が注目されている。BICMを用いた復号はミスマッチド復号と呼ばれ、マルチステージ復号より性能が劣るため、BICMの性能向上を図る研究も盛んに行われている。また近年誤り訂正符号では、通信路容量にほぼ達する高い性能をもつ空間結合LDPC(SC-LDPC)符号が注目されている。BICMと誤り訂正符号を統合的に組み合わせた研究は少なくBICMによるミスマッチにより性能劣化を可能な限り少なくする方法を同時に検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究はビット置換変調(BICM)を用いた符号化変調と空間結合低密度パリティ検査(SC-LDPC)符号を組み合わせて統合した通信方式の開発を行う。従来、トレリス符号化など誤り訂正符号と変調方式の組み合わせは議論されているが、設計の難しさや計算量的な問題もあり、BICMとSC-LDPC符号を用いて、様々な通信環境に応じて訂正能力を可変にした方式を扱う。すなわち変調方式、誤り訂正符号それぞれについて性能向上を図り、それらの組み合わせが良好に動作することを心がけることである。計算機シミュレーションによる実験とともに通信路容量の導出によって提案した通信方式によって性能が向上することを示し、有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

ビット置換変調に対するシェーピング法を取り組む。ガウス分布にしたがう信号点配置（幾何的シェーピング）として、与えられた信号点数のもとでガウス分布に近い信号点配置を構成する。これは幾何的シェーピングのアプローチであるといえるが、ガウス分布のままであると最大電力に対する平均電力の比が大きくなると予想されるため、クリッピングによって最大電力の信号点を低い値に補正する。補正の際には性能の劣化をできるだけ抑えるようすることを図る。信号の発生確率分布を不均一な確率分布に変換する（確率的シェーピング）信号の発生確率分布を等確率から不均一な分布に変換する。これは確率的シェーピングのアプローチであるといえるが、誤り訂正符号によって符号化を行った後の系列（符号語）に対して実行するシェーピング符号化とは異なるアプローチを取る。すなわち、情報系列に対して実行した後に信号の発生確率分布の変換を行うことがシェーピング符号化と異なる点である。これは情報源符号化における算術符号化のアプローチに近いものである。従来のシェーピング符号に対する復号では非線形符号に対する復号を行うため、計算量が膨大なものになるが、この操作を実行せずに済むこととなり、大幅な計算量の低減が見込まれる。またどのような確率分布にすることが望ましいのか、数値計算による結果のみでなく、その分布の特徴を明らかにする。APSKに対するシェーピングAPSKの信号点配置におけるリング数と各リングの信号点数をガウス分布にしたがって決定できるようにする。またBICMと相性のよいグレイ符号化が可能な信号点配置を検討する。通信路容量を目的関数として最適なリング数と各リングの信号点数を求める。デジタルブロードキャストリングで用いられているAPSK方式と比較対象とし、性能向上を図る。またシェーピングされたビット置換変調方式の誤り訂正符号への適用することを検討する。導出された不均一な確率分布をもつ系列に対し誤り訂正符号（線形符号）による符号化を実行する。高い符号化率の誤り訂正符号でかつ組織符号を用いれば、情報系列とパリティ系列を分離することができ、情報系列は元々の不均一な確率分布、パリティ系列は均一な確率分布になるようにする。

4. 研究成果

本課題で得られた成果としてまずガウスシェーピングを実現するために送信系列に擬似乱数ビットを挿入することで、通信路へ入力される系列の生成をガウス分布へ変換する変調・符号化方式を提案した。情報ビットとパリティビットごと異なる信号点配置を用いることで、全体としてみるとガウス分布になるよう調整されており、擬似乱数を用いた方式と通信路容量を比較することで提案する変調・符号化方式の有効性を確認した。また空間結合符号の非送信ビットを利用することで擬似乱数ビットの数を低減することができ高効率な通信が可能となることをシミュレーションおよび密度発展法によって評価した。

次に高密度と低遅延を兼ね備えた不揮発性磁気メモリを対象とした挿入／削除誤り通信路に対するプロトグラフ型低密度パリティ検査符号の構成法を提案した。プロトグラフ符号は小さいグラフからコピー・置換を行って符号を構成する方法でエラーフロア性能がよく符号化も容易に実行できる。挿入／削除誤り通信路に対しては誤り訂正符号に加え送信系列に一定間隔でマーカー符号を挿入し符号化を行う。本課題では基本形となるプロトグラフにマーカーも組み込み、密度発展法によってマーカーと符号化の最適化を行った。提案する符号の性能をシミュレーションおよび密度発展法によって評価し、有効性を確認した。

また分散配置された記憶装置の特徴を考慮した空間結合低密度パリティ検査(LDPC)符号の構成

法を提案した。従来のブロック型の LDPC 符号では性能が改善する場合と劣化する場合があったが、空間結合 LDPC 符号で構成すれば性能向上が達成できることをシミュレーションおよび密度発展法による理論評価それぞれで示した。また従来の LDPC 符号と提案した LDPC 符号の符号化率の上界を比較することによって提案する符号が常に従来の符号より本質的に性能が勝っていることを明らかにした。

最後に、高密度と低遅延を兼ね備えた不揮発性磁気メモリであるレーストラックメモリ (RM) が複数の読み込みヘッドをもつという特徴を考慮した挿入・削除誤りを確率モデルで定義し、定義した確率モデルに対して挿入・削除の推定を行いつつ LDPC 符号の復号を行う結合型復号法を提案した。計算機シミュレーションでは、読み込みヘッドの数や、読み込みデータ数による性能比較を行い、RM におけるデータ読み込み方法の特徴を考慮せず通信路状態の推定と復号を行う場合に比べ、提案したアルゴリズムが高い挿入・削除誤り訂正能力を持つことを示した。また密度発展法による性能解析を行い、読み込みヘッド数を変化させた場合や様々な読み込み方法で評価を行い、効果的な符号化・復号法を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

①K. Komatsu, G. Hosoya, and H. Yashima, Ultrafast all-optical digital comparator using quantum-dot semiconductor optical amplifiers, *Optical and Quantum Electronics*, 51: 39, pp. 1-16, Jan. 2019.

DOI: 10.1007/s11082-019-1756-5

②R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima, Joint iterative decoding of spatially coupled low-density parity-check codes for position errors in racetrack memories, *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E101-A, no.12, pp.2055-2063, Dec. 2018.

DOI: 10.1587/transfun.E101.A.2055

③G. Hosoya and H. Yashima, Spatially coupled low-density parity-check codes on two-dimensional array erasure channel, *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E101-A, no.12, pp.2008-2017, Dec. 2018.

DOI: 10.1587/transfun.E101.A.2008

④T. Matsumoto, K. Komatsu, G. Hosoya, and H. Yashima, Performance of all-optical AND gate using photonic-crystal QDSOA at 160 Gb/s, *Electronics Letters*, vo.54, no.9, pp.580-582, May 2018.

DOI: 10.1049/el.2018.0371

⑤K. Komatsu, G. Hosoya, and H. Yashima, All-optical logic NOR gate using a single quantum-dot SOA-assisted an optical filter, *Optical and Quantum Electronics*, 50: 131, pp. 1-18, Feb. 2018.

DOI: 10.1007/s11082-018-1384-5

⑥寺尾優史, 細谷 剛, 八嶋弘幸, OCDMA における MAI の持続性を考慮した BER の解析, *電子情報通信学会論文誌 (A)*, vol. J99-A, no.5, pp.185-193, May, 2016.

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j99-a_5_185&category=A&year=2016&lang=J&bst=

[学会発表] (計 40 件)

①鈴木 優太朗, 柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 2次元消失モデルにおける Progressive Edge-Growth アルゴリズムを用いた非正則 LDPC 符号の構成法性, 2019年電子情報通信学会総合大会予稿集, A-2-5, 東京, Mar. 2019.

②二見 恭平, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 豪雨時光無線通信路の光強度減衰特性, 2019年電子情報通信学会総合大会予稿集, B-12-12, 東京, Mar. 2019.

③鍋山 昂, 古松 幸輔, 細谷 剛, 八嶋弘幸, RZ-BPSK 信号を入力とする AND/NOR 切替機能付き全光論理回路, 2019年電子情報通信学会総合大会予稿集, B-12-13, 東京, Mar. 2019.

④K. Komatsu, G. Hosoya, and H. Yashima, Simulation of all-optical OR gate using quantum-dot semiconductor optical amplifier, *Proc. 2019 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP' 19)*, pp.197--200, Hawaii, USA, Mar. 2019.

⑤細谷 剛, 2次元消失モデルにおける LDPC 符号, 第3回情報理論と符号理論の応用ワークショップ, 久高島, 沖縄, Feb. 2019.

⑥G. Hosoya, A study on decoding performance of nonbinary LDPC codes on two-dimensional array erasure model, *Proc. 41th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2018)*, pp.7--12, Iwaki, Fukushima, Japan, Dec. 2018.

⑦R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima Joint Optimization of Protograph-Based LDPC Coded System for Position Errors in Racetrack Memories, *Proc. 41th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2018)*, pp.291--296, Iwaki, Fukushima, Japan, Dec. 2018.

⑧由利 昌司, 柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 擬似乱数系列と空間結合 LDPC 符号を用いたビツ

- ト置換符号化変調に対するシェーピング, 第 41 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集 (SITA2018), pp.19--24, いわき, 福島, Dec. 2018.
- ⑨石山 巧, 柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, Expect ripple size を考慮した LT 符号の次数分布設計, 第 41 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2018) ポスターセッション, いわき, 福島, Dec. 2018.
- ⑩鈴木 優太郎, 柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 二次元消失通信路における Progressive Edge-Growth アルゴリズムを用いた非正則 LDPC 符号の構成法, 第 41 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2018) ポスターセッション, いわき, 福島, Dec. 2018.
- ⑪橋本 大輝, 柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, レーストラックメモリにおけるスライド窓復号法, 第 41 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2018) ポスターセッション, いわき, 福島, Dec. 2018.
- ⑫K. Komatsu, G. Hosoya, and H. Yashima, Multiple-input all-optical OR gate by cascaded logic gates based on quantum-dot semiconductor optical amplifier, Proc. Latin America & Optics and Photonics Conference, (LAOP-2018), Th4A.8, Lima, Peru, Nov. 2018.
- ⑬M. Yuri, R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima, Probabilistic shaping for BICM with pseudorandom sequence, Proc. 2018 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2018), pp.493, Singapore, Oct. 2018.
- ⑭T. Ishiyama, R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima, Improved LT code degree distribution and its performance evaluation, Proc. 2018 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2018), pp.492, Singapore, Oct. 2018.
- ⑮K. Futami, G. Hosoya, and H. Yashima, Channel model divided into cylinder for free-space optical links in rain, Proc. 2018 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2018), pp.503, Singapore, Oct. 2018.
- ⑯R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima, Structured concatenation of protograph LDPC codes and markers for Insertion/Deletion channels, Proc. 2018 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2018), pp.374--378, Singapore, Oct. 2018.
- ⑰K. Komatsu, G. Hosoya, and H. Yashima, All-optical two-bit magnitude comparator using quantum-dot semiconductor optical amplifier, Proc. Asia Communications and Photonics Conference, paper 122, Hangzhou, China, Oct. 2018.
- ⑱古松 幸輔, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 160Gb/s で動作する量子ドット半導体光増幅器を用いた全光 OR ゲート, 2018 年電子情報通信学会ソサイエティ大会予稿集, B-12-2, 金沢, Sep. 2018.
- ⑲二見 恭平, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 連続ポアソン分布を用いた降雨時光無線通信路の光強度減衰特性, 2018 年電子情報通信学会ソサイエティ大会予稿集, B-12-1, 金沢, Sep. 2018.
- ⑳石山 巧, 柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 次数分布を改良した LT 符号の提案と性能評価, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.118, no.139, IT2018-21, pp.51--56, Jul. 2018.
- ㉑由利昌司, 柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 擬似乱数系列を用いたビット置換符号化変調に対するシェーピング, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.118, no.139, IT2018-20, pp.45--50, Jul. 2018.
- ㉒T. Matsumoto, G. Hosoya, and H. Yashima, All-optical AND gate with photonic crystal quantum-dot semiconductor optical amplifiers, Proc. 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP' 18), pp.651--654, Hawaii, USA, Mar. 2018.
- ㉓R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima, Performance analysis of spatially-coupled low-density parity-check codes based on reading ratio in racetrack memory, Proc. 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP' 18), pp.643--646, Hawaii, USA, Mar. 2018.
- ㉔柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, レーストラックメモリにおける空間結合 LDPC 符号の性能解析, 第40回情報理論とその応用シンポジウム予稿集 (SITA2017), pp.529--534, 新発田, 新潟, Nov.-Dec. 2017.
- ㉕G. Hosoya and H. Yashima, Analysis of spatially-coupled low-density parity-check codes on two-dimensional array erasure channel, Proc. 40th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2017), pp.511--516, Shibata, Niigata, Japan, Nov.-Dec. 2017.
- ㉖G. Hosoya and H. Yashima, Spatially-coupled LDPC codes for two dimensional erasure channel, Proc. 2017 IEEE Information Theory Workshop (ITW2017), 1570369470, pp.1--5, Kaohsiung, Taiwan, Nov. 2017.
- ㉗細谷 剛, IDS 通信路における誤り訂正符号化と最近の研究動向, 2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会予稿集, AT-1-4, 東京, Sept. 2017.
- ㉘柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, レーストラックメモリに対する低密度パリティ検査符号の復号法, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.117, no.208, IT2017-45, pp.37--42, Sep. 2017.
- ㉙K. Komatsu, G. Hosoya, and H. Yashima, Simulation of all-optical NOR gate, Proc. CLEO PR, OECC & PGC 2017, Singapore, Aug. 2017.
- ㉚宇治 佳紀, 細谷 剛, 八嶋弘幸, QD-SOA-MZI で構成した光ハードリミッタ, 2017 年電子情報通信学会総合大会予稿集, B-12-4, 名古屋, Mar. 2017.

- ③①古松 幸輔, 細谷 剛, 八嶋弘幸, 1つの QD-SOA と光フィルタを用いた全光 NOR ゲート, 2017 年電子情報通信学会総合大会予稿集, B-12-5, 名古屋, Mar. 2017.
- ③②M. Nishino, G. Hosoya, and H. Yashima, Interference suppression in an SSFBG OCDMA using a QD-SOA-based MZI, Proc. 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), pp.349--352, Guam, USA, Mar. 2017.
- ③③Y. Taniguchi, G. Hosoya, and H. Yashima, A novel constellation shaping scheme using pilot bit for bit-interleaved coded modulation, Proc. 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), pp.293--296, Guam, USA, Mar. 2017.
- ③④西野 真弘, 細谷 剛, 八嶋弘幸, OCDMA における QD-SOA で構成した干渉抑圧, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.116, no.402, OCS2016-64, pp.1--4, Jan. 2017.
- ③⑤G. Hosoya and H. Yashima, Constellation shaping for non-uniform signals based on truncated Gaussian distribution, Proc. 2016 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2016), pp.686--690, Monterey, CA, USA, Oct. 2016.
- ③⑥R. Shibata, G. Hosoya, and H. Yashima, Fixed-symbols-based synchronization for insertion/deletion/substitution channels, Proc. 2016 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2016), pp.557--561, Monterey, CA, USA, Oct. 2016.
- ③⑦Y. Taniguchi, G. Hosoya, and H. Yashima, Constellation shaping with pilot bit for bit-interleaved coded modulation, Proc. 2016 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2016), pp.548, Monterey, CA, USA, Oct. 2016.
- ③⑧西野 真弘, 細谷 剛, 八嶋弘幸, SSFBG を用いた OCDMA における QD-SOA-MZI で構成した干渉除去デバイス, 2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会予稿集, B-10-30, 札幌, Sep. 2016.
- ③⑨谷口 裕暉, 細谷 剛, 八嶋弘幸, ビット置換符号化変調に対するパイロットビットを用いたシェーピング手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.116, no.206, IT2016-34, pp.1--6, Sep. 2016.
- ④⑩柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋弘幸, IDS 通信路における確定シンボルを用いた同期処理法, The 5th Workshop on Error Correcting Codes, 佐賀, Aug. 2016.
- [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

<https://researchmap.jp/read0138990>

6. 研究組織

※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。