

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820166

研究課題名(和文)訂正能力が可変なLDPC符号の設計および性能解析

研究課題名(英文)Design and Analysis for Rate-Compatible Punctured LDPC Codes

研究代表者

細谷 剛 (HOSOYA, GOU)

東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：60514403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：訂正能力を可変にする低密度パリティ検査(LDPC)符号に関する符号化および復号法を開発した。主に得られた成果として、(i)複数の部分グラフを組み合わせることで復元可能なパンクチャドビット数を保証するLDPC符号の設計方法を提案した。提案した符号に対しパンクチャドビットの選択方法を提案し、ガウス近似法による解析結果より通常のLDPC符号より反復閾値が大きくなり、符号化率ごとに最適なパンクチャド次数分布を導出した。(ii)確率伝播型(BP)復号法の性能劣化要因であるループ着目したBP復号法を提案し、正しい事後確率を計算ができない場合でも、より正確に計算できるようにする方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Coding and decoding schemes for rate-compatible punctured low-density parity-check (LDPC) codes have been developed. The main results are as follows: (i) We proposed a new class of LDPC codes which consist of subgraphs. The codes guarantee the number of recoverable punctured bits. We proposed the puncturing schemes for the proposed codes. By performing the Gaussian approximation, we have derived the optimal puncturing distribution for each coding rate and have shown that iterative threshold of the proposed codes are greater than those of the conventional codes. (ii) We proposed a new belief-propagation (BP) decoding algorithm for rate-compatible LDPC codes which enables to calculate more accurate a posterior probability even if the loops of Tanner graph exist.

研究分野：工学

キーワード：LDPC符号 レート可変符号 BP復号法 誤り訂正符号

### 1. 研究開始当初の背景

現在最も注目を浴びている誤り訂正符号と復号法は、R. G. Gallager によって発明された低密度パリティ検査 (LDPC) 符号とその代表的な復号法である確率伝播型 (BP) 復号法の組み合わせである。誤り訂正符号は符号化率訂正能力がトレードオフの関係にあるため、符号化率が低い符号のパリティを削除 (パンクチャ) して送信せず符号化率が高い符号として用いる手法が知られており、ハイブリッド ARQ 方式で用いられる。復号では送信されていないパンクチャされたビットをいかに訂正 (推定) するかが重要である。LDPC 符号に対するパンクチャ方法やパンクチャされたビット (パンクチャドビット) を復元する方法は様々なものが検討されているが、パンクチャに適した符号の構成法は十分に明らかにされていない。

### 2. 研究の目的

本課題は訂正能力を可変にする新しい誤り訂正方式を開発する。通信路での雑音発生が刻々と変化する環境に応じて訂正能力を変化させる符号の構成法や符号化法、またそのような符号に適した復号化法の開発を目的とする。このような可変性をもたせることで、本来は無数の誤り訂正符号を用意するために必要なメモリ量を減らせると期待できる。

またシミュレーションによる実験とともに情報理論的に性能が向上することを示し、新たに提案する方式が有効であることを明らかにしたい。

### 3. 研究の方法

本計画においては、計算機実験による評価、および復号誤り確率を理論的に導出し数値計算によって評価する2通りがある。提案となるアイデアを計算機実験によって検証し、理論式による導出なども可能な限り行った。

### 4. 研究成果

(1) 構造化された LDPC 符号を用いた効果的なパンクチャ方法の開発

符号の一部に確定的な構造をもたせて構成することで、パンクチャに効果的な符号の構成法とパンクチャドビットの選択方法の開発に取り組んだ。提案した符号は、複数の部分グラフから構成される構造をもち、効果的にパンクチャドビットを復元可能かつ復元できるパンクチャドビットの数が保証できた。ガウス近似法による解析により通常の LDPC 符号より反復閾値が大きくなり、符号化率ごとに最適なパンクチャ方法 (パンクチャド次数分布) を導出した。(雑誌論文6)

(2) BP 復号法の改良とパンクチャドビットの復元法

BP 復号法の性能劣化要因である、LDPC 符

号に存在するループによって従来の BP 復号法が正しい事後確率を計算ができない場合でも、より正確に計算できるようにする方法を提案した。具体的にはループがあるグラフ上で正しく事後確率を計算するために、従来1つの確率変数の事前分布から事後確率を計算していたステップを複数の確率変数を用いて計算し周辺化を行う方法に切り替えた。適切にパンクチャドビットを選択することによって、従来手法より高い復号性能が得られた。(雑誌論文2)

(3) 無線通信における効率の良い復号法の開発

無線通信においても用いられるレイリーフェージング通信路において対数尤度比の計算法の近似手法を提案した。ビット置換符号化変調を用いたとき、ビットごとに導出される対数尤度関数が微分可能であることに注目し、様々な変調方式に対し非常に精度のよい結果が得られた。計算機実験および密度発展法による数値計算結果から提案手法の有効性を示した。(雑誌論文5)

(4) その他

光符号分割多元接続方式において、多元接続干渉の影響が持続することを考慮したビット誤り確率 (BER) の解析を行った。解析にあたって、所望ユーザに対する干渉ユーザ数をマルコフ連鎖モデルの各状態とおき、各送信時点において干渉の影響を求めることで、干渉の持続性を考慮した解析式を導出した。その結果、所望ユーザの送信開始時点の干渉ユーザ数によって送信区間内の BER は、従来求められていた BER と大きく異なる場合があることを示した。(雑誌論文1)

二値判別器を組み合わせ、多値判別を行う場合に様々な拡張性が望める一般化 Bradley-Terry (GBT) モデルに対し、各判別器の精度を導出し、重み付けを行うことで GBT モデルに精度のばらつきを考慮した手法を提案した。(雑誌論文4)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- [1] 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.
- [2] G. Hosoya, "An Improved Iterative Decoding Algorithm of Rate-Compatible Punctured LDPC Codes," Far East Journal of Electronics and Communications, vol. 15, no. 2, pp. 133--149, Dec. 2015.
- [3] 五十嵐保隆, 大野光平, 寺尾優史, 細谷剛, 八嶋弘幸, "次世代ネットワークを支える暗号, 誤り訂正符号, OCDMA および UWB と情報通信技術の最近の発展動向,"

- 信号処理, vol.18, no.1, pp.1--15, Jan. 2014.
- [4] T. Ogihara, K. Mikawa, M. Goto, and G. Hosoya, "Multi-valued document classification based on generalized Bradley-Terry classifiers utilizing accuracy information," *China-USA Business Review*, vol.12, No.9, pp.911--917, Sep. 2013.
- [5] G. Hosoya and H. Yashima, "Log-likelihood ratio calculation for iterative decoding on Rayleigh fading channels using Padé's approximation," *Journal of Applied Mathematics*, vol.2013, Article ID 970126, pp.1--10, Aug. 2013.
- [6] G. Hosoya, K. Osada, and M. Goto, "Rate-compatible punctured LDPC codes with two subgraphs," *Far East Journal of Electronics and Communications*, vol.10, no.2, pp.83--104, Jun. 2013.
- 〔学会発表〕(計 23件)
- [1] 柴田 凌, 細谷 剛, 八嶋 弘幸, "Insertion/Deletion/Substitution 通信路に対する確定シンボルを用いた同期処理法," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol.115, no.500, IT2015-108, pp.43--48, Mar. 2016.
- [2] F. Sato, G. Hosoya, and H. Yashima, "All-optical NOR gate using XPM and XGM in QD-SOA based MZI," *Proc. 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16)*, pp.351--354, Honolulu, Hawaii, Mar. 2016.
- [3] M. Nishino, G. Hosoya, and H. Yashima, "All optical CDMA using all optical device," *Proc. 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16)*, pp.359--362, Honolulu, Hawaii, Mar. 2016.
- [4] K. Iwamoto, G. Hosoya, and H. Yashima, "All-optical error correcting system using (7,4) Hamming code," *Proc. 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16)*, pp.558--561, Honolulu, Hawaii, Mar. 2016.
- [5] T. Matsumoto, G. Hosoya, and H. Yashima, "All Optical error correcting system using horizontal and vertical parity checks," *Proc. 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16)*, pp.550--553, Honolulu, Hawaii, Mar. 2016.
- [6] G. Hosoya and H. Yashima, "Constellation shaping for non-uniform signals in bit-interleaved coded modulation combined with multi-stage decoding," *Proc. 2016 Australian Communications Theory Workshop (AusCTW2016)*, pp.175--180, Melbourne, Australia, Jan. 2016.
- [7] 佐藤文也, 細谷 剛, 八嶋弘幸, "QD-SOA における XPM と XGM を用いた全光 NOR ゲート," *2015 年電子情報通信学会ソサエティ大会*, B-12-2, 仙台, Sep. 2015.
- [8] 吉田光範, 原田裕生, 細谷 剛, 八嶋弘幸, "干渉期間をシフトした 2 つの FSR-MZI を用いる全光 OFDM 受信機," *2015 年電子情報通信学会ソサエティ大会*, B-12-3, 仙台, Sep. 2015.
- [9] Y. Furuya, G. Hosoya, and H. Yashima, "Noise suppression effects on QD-SOA-based MZI --Simulation Results for Ultrafast Optical Signals--," *Proc. 2015 International Workshop on Vision, Communications and Circuits (IWCC'15)*, pp.71--74, Yokohama, Japan, Oct./Nov. 2015.
- [10] Y. Furuya, G. Hosoya, and H. Yashima, "All-Optical noise suppression by QD-SOA based MZI," *Proc. 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'15)*, pp.122--125, Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 2015.
- [11] H. Harada, M. Yoshida, G. Hosoya, and H. Yashima, "All-Optical OFDM receiver using Odd-Even separator based on double Mach-Zender interferometers and optical switching," *Proc. 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'15)*, pp.130--133, Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 2015.
- [12] S. Takeuchi, H. Terao, G. Hosoya, and H. Yashima, "OCDMA using code shift keying and interference cancellation," *Proc. 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'15)*, pp.138--141, Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 2015.
- [13] M. Nishino, H. Terao, G. Hosoya, and H. Yashima, "Theoretical analysis of OPPM OCDMA with consecutive MAI," *Proc. 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'15)*, pp.567--570, Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 2015.
- [14] Y. Taniguchi, G. Hosoya, and H. Yashima, "Coded modulation with constellation shaping for QAM," *Proc. 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'15)*, pp.575--578, Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 2015.
- [15] G. Hosoya and H. Yashima, "Box-Plus BP-Based algorithm by linear approximation," *Proc. 37th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2014)*, pp.403--408, Toyama, Japan, Dec. 2014.
- [16] G. Hosoya and H. Yashima, "An improvement of approximate BP decoding,"

- Proc. 2014 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2014), pp.186--190, Melbourne, Australia, Oct. 2014.
- [17] F. Sato, K. Iwamoto, Y. Furuya, T. Irie, G. Hosoya, and H. Yashima, "All-Optical AND gate using optical hard limiter with QD-SOA based on self-phase modulation," Proc. 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), pp.213--216, Luzern, Switzerland, Sep. 2014.
- [18] K. Iwamoto, F. Sato, Y. Furuya, T. Irie, G. Hosoya, and H. Yashima, "Multiple connected optical hard limiter and optical power equalizer using Quantum-Dot semiconductor," Proc. 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), pp.304--307, Luzern, Switzerland, Sep. 2014.
- [19] T. Irie, G. Hosoya, and H. Yashima, "8-input all-optical XOR circuit using QD-SOA-Based MZIs and AOWCs," Proc. Optics & Photonics Taiwan, the International Conference 2013 (OPTIC 2013), S0206-O003, Taipei, R.O.C., Dec. 2013.
- [20] K. Ogawa, Y. Furuya, T. Irie, G. Hosoya, and H. Yashima, "All optical NOR gate using QD-SOA based on cross gain modulation," Proc. Optics & Photonics Taiwan, the International Conference 2013 (OPTIC 2013), P0201-P005, Taipei, R.O.C., Dec. 2013.
- [21] 寺尾優史, 細谷 剛, 八嶋弘幸, "疑似乱数による符号を用いた CDMA システムの BER 特性評価," 第 36 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.323--328, 静岡, Nov. 2013.
- [22] 入江孝憲, 細谷 剛, 八嶋弘幸, "QD-SOA MZI と全光波長変換器を用いた 8 入力全光 XOR 回路," 2013 年電子情報通信学会ソサエティ大会, B-12-12, 福岡, Sep. 2013.
- [23] 古谷侑菜, 小川顕太郎, 入江孝憲, 細谷 剛, 八嶋弘幸, "QD-SOA を用いた XGM 型全光 NOR ゲート," 2013 年電子情報通信学会ソサエティ大会, B-12-13, 福岡, Sep. 2013.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

細谷 剛 (HOSOYA GOU)  
東京理科大学・工学部・助教  
研究者番号：60514403