

令和 2 年 8 月 16 日現在

機関番号：12701

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0145

研究課題名（和文）符号化変調およびアクセス方式を融合した大容量無線通信システムの研究（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Research on high throughput wireless communications through unification of coding, modulation, and multiple access schemes(Fostering Joint International Research)

研究代表者

落合 秀樹 (OCHIAI, HIDEKI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20334576

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円

渡航期間： 11ヶ月

研究成果の概要（和文）：無線通信システムのさらなる大容量化を実現するためには、その根幹をなす物理層技術のさらなる進化が必須である。本研究では、2008年にArikanにより提案された、符号長の増大とともに理論限界に近接する特性を簡易な逐次除去復号法を用いて達成できるポーラ符号に着目し、その課題であった非常に長い符号長における符号の設計手法を明らかにした。符号長が20万ビット以上と非常に長い場合に対しても、理論限界に近接するブロック誤り率特性を達成できるポーラ符号を提案設計手法を用いて少ない計算量で実装するとともに、計算量シミュレーションによりその有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周波数資源の逼迫した環境において、無線通信システムのさらなる大容量化を達成し、さらにより多くのユーザをサポートするためには、物理層技術の一層の高度化が欠かせない。本研究では、デジタル通信の大容量化と高信頼化の根幹をなす符号化技術に着目し、より優れた特性を低演算で達成できる誤り訂正符号の設計手法を明らかにした。今後、設計した符号を多値変調技術およびアクセス技術と組み合わせることで、より高速かつ多ユーザにも対応できるフレキシブルな無線通信システムの実現に寄与していく。

研究成果の概要（英文）：Physical layer technology continues to play a critical role in the realization of wireless communications systems with even higher data rate under limited spectral resources. In this research, focusing on the polar codes proposed by Arikan in 2008, we have developed a practical approach for constructing specific codes with very long codeword lengths with capacity-approaching behavior. Through computer simulations, we demonstrate that the block error rate performance of the polar codes with block lengths larger than two hundred thousand bits designed by the proposed scheme shows capacity approaching behavior even with a simple successive cancellation decoding.

研究分野：工学

キーワード：誤り訂正符号 符号化変調 大容量通信

1. 研究開始当初の背景

逼迫した周波数資源下において、移動通信システムに対する大容量化への需要を満たしつつ、より多くのユーザをサポートするためには、無線通信の物理層における技術革新が必須である。これまで、移動通信システムの進展とともに高度な物理層技術が導入され、その大容量化の一翼を担ってきた。例えば、1990年代にBerrouらにより提案されたターボ符号や、1960年代に既にGallagerにより提案され、1990年代後半に再発見された低密度パリティ検査(LDPC: Low-Density Parity-Check)符号は、Shannonにより示された理論限界である通信路容量に近接する誤り訂正符号として注目されるとともに急速に研究開発が進み、2000年代初期に実用化された第三代移動体通信規格(3G)において実装されるに至った。またその後もこれらの符号と多値変調技術、ならびに送受信アンテナ数を増加させたMIMO技術を組み合わせることで、物理層をコアとした大容量化の実現が着実に進められてきた。

一方で2020年に本格導入がスタートした次世代移動体通信規格(5G)では、未開拓であった新たな周波数帯の活用や古典的技術であるビームフォーミングの高度な実用化に重点が置かれ、物理層技術自体において大きな技術革新がもたらされるには至っていない。5Gにおける誤り訂正符号に着目すると、データ通信においては既に無線LANなどで実用化されているLDPC符号がターボ符号に置き換わり採用されるに留まっている。しかしながら2008年にArıkanにより提案されたポーラ符号[1]が5Gの制御チャネルに用いられた点は注目に値する。ポーラ符号は、簡易な逐次除去復号法により通信路容量に漸近する特性を達成できることが理論的に明らかになっている唯一の符号であるが、同じ符号長で比較した場合にはターボ符号やLDPC符号に匹敵する特性をポーラ符号と逐次除去復号法の組み合わせでは達成できないことも知られている。一方、ポーラ符号に誤り検出符号を接続し、逐次除去リスト復号法を適用することで、比較的短い符号長でもこれらの符号を上回る特性を達成できることがTalとVardyにより示され[2]、これがポーラ符号を5G採用に導いた理由の一つとされている。しかし逐次除去リスト復号法は、復号に要する演算量がリスト数に比例して大きくなるため、ポーラ符号の最大の利点の一つである復号の低演算性を犠牲にする必要がある。よって、簡易な復号法を維持しつつ高い信頼性を達成できる符号化変調技術の創出が今後、より重要な役割を担うと考えられる。

2. 研究の目的

以上の背景より、本研究では復号演算量とその誤り率特性において、より優れたトレードオフ特性を達成し得る誤り訂正符号化技術を明らかにすることで、今後の移動通信システムの大容量化と高信頼化、およびサポート可能なユーザ数の増大に寄与することを目的とした。

3. 研究の方法

上記目的を達成する具体的な手法として本研究ではポーラ符号に着目し、Arıkanによる簡易な逐次除去復号法を用いつつ、あらゆる信号対雑音電力比(SNR: Signal-to-Noise Power Ratio)においてシャノン限界に接近し得る設計手法の導入を試みた。ポーラ符号の設計段階における計算量が極めて低いガウス近似法(GA: Gaussian Approximation)をベースとしつつ、その過程において経験的に導出された従来の近似式を利用するのではなく、新たに理論的に導出した近似式を用いることで、非常に長い符号長のポーラ符号においても、理論限界に近接する優れた特性を達成できることを示した。今後、本手法を多値変調技術へ拡張することで、信頼性を保証しつつ通信路状況に応じた柔軟なレート設計の実現が期待できる。

4. 研究成果

ポーラ符号は符号化率1の2元線形ブロック符号を元に構成される。入力ビット列 \mathbf{u} を長さ N の2元(ビット)系列とし、 \mathbf{G} を $N \times N$ の生成行列、また \mathbf{x} をその出力ビット列とすると、これらには $\mathbf{x} = \mathbf{u} \mathbf{G}$ の関係がある。ここで \mathbf{u} を構成する N ビットのうち $(N-K)$ ビットを凍結ビットとして既知のビットを割り振り、残りの K ビットを情報ビット列とすることで符号化率 $R = K/N$ のポーラ符号が構成される。従ってポーラ符号の設計においては、符号長 N と所望の符号化率 R が与えられたとき、情報ビットの位置をどのように選ぶかが鍵となる。最適な情報ビットの集合は通信路における雑音の分散(つまりSNR)に依存し、適切に情報ビットの集合を選択しなければ、ポーラ符号の特性は大きく劣化する。

加法的白色ガウス雑音(AWGN: Additive White Gaussian Noise)通信路におけるポーラ符号の設計では、雑音が付加された受信信号系列 \mathbf{y} の確率分布から入力系列である \mathbf{u} の対数尤度比(LLR: Log-Likelihood Ratio)の確率分布を求め、信頼度の最も高い(つまり推定ビット誤り率の最も低い) K ビットを情報ビット列に選ぶことで最適な符号を構築できる。LLRの分布を求めるには、LDPC符号の設計で導入された密度発展法を適用できることが知られているが、一般に分布を求める際に要する計算量はその符号長に依存する。符号長 N のポーラ符号に対して密度発展法を適用すると、必要となるメモリのオーダーは $O(N^2)$ であり、また確率分布の算出に要する演算量のオーダーは $O(N^2 \log N)$ となる。よって密度発展法を用いた符号の設計は符号長の長いポーラ符号に対しては適用が困難である。一方、LDPC符号の設計において、LLRの分布がガウス分布に従うと仮定し、密度発展法で確率分布を追従するかわりにLLRの平均値のみを追従するガウス近似法(GA)がChungらにより提案された[3]。GAにおいては、LLRの平均値を求めるために非線形関数の広義積分で定義される関数とその逆関数を計算する必要があるが、これら

の関数演算を積分を必要としない簡易な関数で近似することにより、メモリおよび演算量ともにそのオーダを $O(N)$ に抑えることができる。Chung らにより提案された近似関数を用いた GA は、比較的長い符号長のポーラ符号の設計に対しても有効であるが、符号長が $2^{14}=16384$ 程度となると、所望符号化率が低くなるにつれて近似誤差の影響から無視できない特性劣化を示すことになる。ポーラ符号の最大の特徴が簡易な逐次除去復号法でも符号長が長くなると通信路容量に近接できることに対し、Chung らの近似手法を用いてもその特性を確認することができない。これは Chung らの近似手法が経験的な数値近似に基づいていることによる。そこで本研究では、LLR の平均値を求める非線形関数の広義積分値の漸近的な特性を理論的に解析することで、低 SNR 領域においてもポーラ符号の分極特性をより高い精度で捉える手法を提案した。またその結果をもとに推定ブロック誤り率 (BLER: Block Error Rate) 特性を導出することで、計算機シミュレーション結果の妥当性を評価した。特に提案設計手法により、符号長が非常に長い場合 ($2^{18}=262144$) でも従来手法にみられる特性劣化を伴わないことを示すとともに、通信路容量に近接することを確認した [4]。

符号長 $N = 2^{13}, 2^{14}, 2^{15}$, および符号化率 $R = 1/2, 1/4$ に対してそれぞれ設計したポーラ符号を 2 元位相シフト変調 (BPSK: Binary Phase Shift Keying) により送信し、逐次除去復号法により復号したポーラ符号の AWGN 通信路における BLER 特性を計算機シミュレーションにより評価した結果を図 1 に示す。比較のため、Chung らの近似法に基づいて設計したポーラ符号を従来設計として示した。また提案設計に基づいて計算した BLER の推定値も示す。同図より、符号化率が低く符号長が長くなると、従来設計手法においては符号長が短い場合よりもその BLER 特性が劣化することがわかるが、これは GA に用いる近似誤差により、分極特性を高い精度で捉えられていないことが原因である。一方、提案設計手法では、符号長が長くなるほど特性が改善しており、通信路容量に近接していくことがわかる。同様に符号長を 2^{18} まで長くした場合のシミュレーション結果を図 2 に示す。同図(a)では符号化率が $1/2$ 以上の例を、同図(b)ではさらに低レートの場合の BLER 特性を示した。また比較のため、符号化率と同じ伝送レートの通信路容量を達成するための理論 SNR を各図に示した。本結果より提案設計手法が幅広い符号化率において、通信路容量に近接する特性を達成できていることがわかる。今後は、本手法の適用を移動通信路モデルおよび可変レート符号化変調へ拡張することで、さらなる大容量移動通信の実現可能性を探究する予定である。

<引用文献>

- [1] E. Arkan, "Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, pp. 3051–3073, 2009.
- [2] I. Tal and A. Vardy, "List decoding of polar codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 61, pp. 2213–2226, 2015.
- [3] S.-Y. Chung, T. Richardson, and R. Urbanke, "Analysis of sum-product decoding of low-density parity-check codes using a Gaussian approximation," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, pp. 657–670, 2001.
- [4] H. Ochiai, P. Mitran, and H. V. Poor, "Capacity-approaching polar codes with long codewords and successive cancellation decoding based on improved Gaussian approximation," (arXiv に掲載済み)

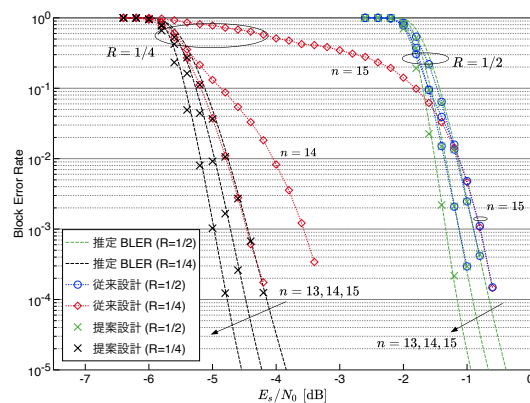
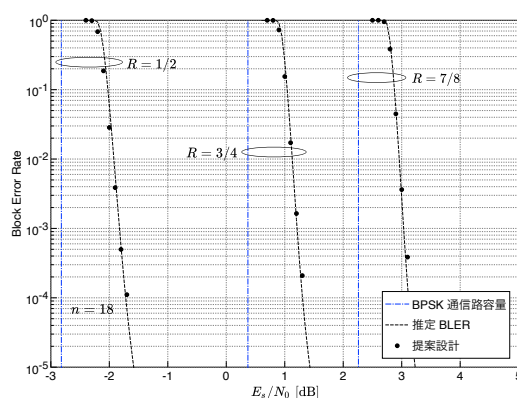
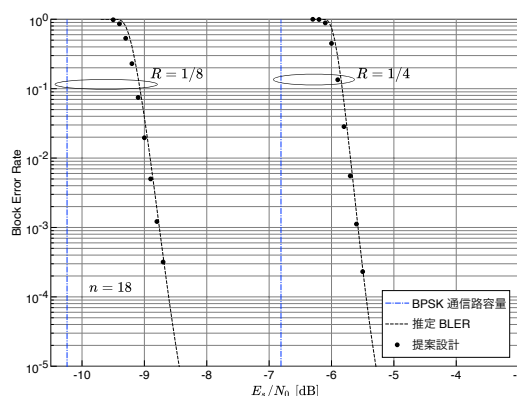


図 1 従来設計と提案設計によるポーラ符号のブロック誤り率特性の比較(符号長 $N = 2^n$)



(a) 高符号化率の例



(b) 低符号化率の例

図 2 提案設計によるポーラ符号のブロック誤り率特性 (符号長 $N = 2^{18} = 262144$)

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 0件）

1. 著者名 Hama Yuto, Ochiai Hideki	4. 巻 67
2. 論文標題 Performance Analysis of Matched-Filter Detector for MIMO Spatial Multiplexing Over Rayleigh Fading Channels With Imperfect Channel Estimation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 3220 ~ 3233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCOMM.2019.2892758	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takizawa Shun, Ochiai Hideki	4. 巻 8
2. 論文標題 PAPR Reduction of OFDM With Trellis Shaping Based on p-Norm Minimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 988 ~ 991
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2019.2903247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsumine Toshiki, Ochiai Hideki	4. 巻 23
2. 論文標題 A Novel PAPR Reduction Scheme for Polar-Coded OFDM Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Communications Letters	6. 最初と最後の頁 2372 ~ 2375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCOMM.2019.2943334	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
主たる 派 航 先 の 主 たる 海 外 共 同 研 究 者	ミットラン パトリック (Mitran Patrick)	ウオータールー大学・Department of Electrical and Computer Engineering・Professor	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	プア ヴィンセント (Poor H. Vincent)	プリンストン大学・Department of Electrical Engineering・Professor, Interim Dean	