

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04149

研究課題名（和文）移動体通信における通信路情報に基づくポーラ符号化法とその応用

研究課題名（英文）Polar Coding Method Based on Channel State Information in Mobile Communications and Its Applications

研究代表者

佐波 孝彦（SABA, Takahiko）

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：60293742

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）：本研究では、次世代無線通信の分野で注目を集めているポーラ符号について、限られた符号語長の場合に誤り訂正能力の低下を抑えられる符号化法および復号法を確立することを目的として、次の3つを柱に研究を行った。1つ目は、通信路の状態に応じたビットの並び替えを用いるポーラ符号化であり、2つ目は、半凍結ビットの概念を導入したポーラ符号化である。最後にパンクチャリングを用いる際のパンクチャドビットの生成法に関する研究である。いずれの研究も、通信路分極特性を強調することに注目しており、誤り訂正能力を改善を可能であることを明らかにしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポーラ符号は、符号語長が長いほど復号誤り率が小さく、シャノン限界に近い容量を達成可能（高速化・高信頼性化に寄与）であり、かつ線形複雑度の高速な復号が可能（省電力化・低遅延化に寄与）であるという、魅力的な特徴を有する。しかしながら、ポーラ符号がその性能を発揮するのは、符号語長が長い場合に限られ、符号語長が制限されるシステムでは、その性能を十分に発揮できない。本研究により、符号語長が制限された環境での、性能低下を抑制できれば、さまざまな用途にポーラ符号を適用できるようになる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we studied polar codes, which have attracted attention in the field of next-generation wireless communications. The following three studies were mainly conducted to establish coding and decoding methods that can suppress the degradation of error correction capability in the case of limited codeword length. The first is polar coding, which uses a reordering of input bits according to the channel state. The second is polar coding that introduces the concept of half-frozen bits. The last is a study on the generation of punctured bits when puncturing is used. All of the studies focus on emphasizing the channel polarization property and show that it is possible to improve the error correction capability.

研究分野：通信工学

キーワード：ポーラ符号 通信路分極 パンクチャリング

1. 研究開始当初の背景

インターネット技術や各種センサーデバイスの進化を背景に、パソコンやスマートフォンといった従来のインターネット接続端末に加え、家電、自動車、医療機器、ビルや工場設備など、世界中の様々なモノがインターネットに繋がりはじめている[1]。シスコシステムズやインテルによると、このような IoT (Internet of Things) デバイスは、2020年には500億台に達すると見積もられ、第5世代(5G)以降の移動体通信方式では、利用形態に応じて以下の3つに分類される要件が考えられている。

1つ目は、第4世代のLTEやLTE-Advancedよりもさらに高速・大容量のデータ通信の提供である。10~20 Gbpsといった超高速なピークレートだけでなく、どのような場所でも100 Mbps程度の高速通信を維持可能な性能が求められている。2つ目は、大量の接続への対応である。現在の100倍以上の端末を収容するには、同時接続端末数の増加に対応できる多元接続技術が必須であり、更には接続端末数の増大に伴うエネルギー消費を抑えるための省電力性能も求められている。3つ目は、超低遅延・超高信頼性通信の実現である。誤りのない低遅延の通信は、自動車の自動制御に関係する場合などには必須の要件である。加えて上記いずれの場合にも、情報漏洩を防ぐセキュアな通信の実現も益々重要になっている。これらの観点から次世代の移動体通信に相応しい誤り訂正符号として、ポーラ符号が注目されている[2][3]。

2. 研究の目的

ポーラ符号は、符号語長が長いほど復号誤り率が小さく、シャノン限界に近い容量を達成可能(高速化・高信頼性化に寄与)であり、かつ線形複雑度の高速な復号が可能(省電力化・低遅延化に寄与)であるという、前述の3つの要件を達成するのに魅力的な特徴を有する。しかしながら、ポーラ符号がその性能を発揮するのは、符号語長が長い場合に限られる。大容量のデータを大きいパケットサイズで高速に送るといった用途に向いており、実際に利用が検討されているシステムの多くは、5Gなどにおける高速伝送を対象としている。一方で、符号語長を長くできない場合には、利用が難しい符号なのか?との疑問がおこる。ポーラ符号の復号は、受信機が符号語を全て受信するまで開始できないため、復号処理遅延を短くしたい場合、あるいはセンサーデバイスなどが取得したデータを小さなサイズのパケットで送る場合など、符号語長を短くせざるをえないが処理遅延や計算負荷を考えるとポーラ符号を利用したい状況というのは、数多く存在する。そこで、本研究ではポーラ符号において、符号語長に制限がある場合に誤り訂正能力の低下を抑えられる符号化法および復号法を確立することを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 通信路の状態に応じたビットの並び替えを用いるポーラ符号化

ポーラ符号の復号は、通信路の分極特性による誤りの偏りを利用しており、符号語長が無限の場合、復号結果の各ビット位置の復号誤り率は0(誤り無し)または0.5(誤りがランダム)に二極化される。そこで、復号誤り率が高いビット位置に寄与する符号化器の入力ビット位置に、凍結ビットと呼ばれる送受信機間で値が既知のビットを割り当てる。受信機では、既知の凍結ビットの値を用いて復号演算を行うことで、誤りを効果的に低減できる。しかし符号語長が有限の場合、通信路分極が十分に行われなため、復号結果は二極化されず、復号誤り率が0から0.5の間に分布してしまう。そこで、本研究課題では最初に移動体通信の通信路特性を利用して通信路分極を強調することによりポーラ符号の誤り訂正能力を改善する手法について検討を行った。

近年の移動体通信では、サブキャリアと呼ばれる複数の搬送波を用いてデータを並列伝送する広帯域マルチキャリア伝送が主流である。広帯域伝送は、周波数選択性フェージングの影響を受けるため、サブキャリア毎に受信電力が異なる。本手法では、ポーラ符号における各ビット位置の復号誤り率の分布(通信路分極特性)をサブキャリア毎の受信電力の違い、すなわち復調誤り率の違いにより強調しようとするものである。具体的には、ポーラ符号の各ビットごとの復号誤り率を順位づけ(符号化器の構成が決まると一意に決まる)し、各サブキャリアの受信電力の順位と同順になるように入力ビットを並び替えることで、各ビット位置の復号誤り率の分布がより分極されるように強調する。これにより、ポーラ符号の誤り訂正能力の改善が期待できる。

(2) 半凍結ビットの概念を導入したポーラ符号化

有限な符号語長のポーラ符号の場合、通信路分極が十分に行われなため、復号結果は二極化されず、復号誤り率が0から0.5の間に分布する。そのため、有限符号語長のポーラ符号では、

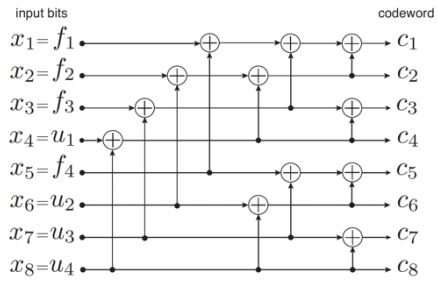
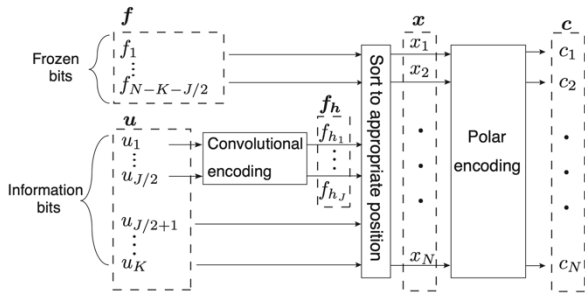


図 1：半凍結ビットを導入したポーラ符号化器 図 2：符号語長 8，符号化率 1/2 のポーラ符号化器

達成したい符号化率と復号誤り率に応じて、凍結ビットの数を決めることになる。符号語長 N のポーラ符号化器の場合、入力 N ビットに対して出力も N ビットとなるため、情報ビットを K ビット、凍結ビットを $(N-K)$ ビットとすることで、符号化率は K/N となる。このとき情報ビットは、誤りにくい（すなわち復号誤り率が低い）位置に配置されるが、通信路分極が十分に行われない状況では、誤りやすさに違いが生じている。同様に、凍結ビットの位置でも誤りやすさに違いが生じている。ポーラ復号では、あるビットの復号はそれまでに復号したビットと凍結ビットの情報を用いて行われるため、直前に復号されたビットが誤っていた場合、以降の復号において誤り伝播が生じてしまう。そのため、情報ビットが割り当てられた位置のビットの中でも復号誤り率の高いビットは、ポーラ符号全体の性能を劣化させる要因となるビットといえる。

そこで、二極化されていない通信路において、情報ビットが割り当てられている位置のビットの中でも復号誤り率の高いビット位置の誤り率を低減する手法の検討を行った。具体的には、情報ビットを割り当てる「復号誤り率が低いビット位置」と凍結ビットを割り当てる「復号誤り率が高いビット位置」という従来の分類に対して、「復号誤り率が中程度のビット位置」という分類を新たに加え、ここに分類されるビット位置の誤りを低減するための処理を行う。本手法では、3つ目に分類される位置に割り当てるビットを半凍結ビットと呼ぶことにする。

今、半凍結ビットの数を J とすると、半凍結ビットには元の分類で「情報ビットを割り当てるビット位置」のうち誤り率の高い $J/2$ ビットと「凍結ビットを割り当てるビット位置」のうち誤り率の低い $J/2$ ビットの位置が選択される。こうして選択された半凍結ビット位置に対して符号化率 1/2 の任意の誤り訂正符号化を施した情報ビットを割り当てることで、有限長のポーラ符号化において誤り訂正能力低下の主な原因であった「情報ビットを割り当てた位置の中で誤り率の高いビット位置」の誤り率を低減することができる（図 1）。半凍結ビットの誤り訂正は、ポーラ符号の復号処理の途中で行われる。半凍結ビットが全て復号された段階で一度ポーラ復号処理を中断し、半凍結ビットの誤り訂正処理を行う。その後、ここで訂正された半凍結ビットを既知情報である凍結ビットと同様に扱って復号を継続することで、誤り伝播を抑えることができる。

(3) ポーラ符号における生成行列に基づくパンクチャリング

ポーラ符号において、符号語長に制限がある場合に符号語長をさらに短くする方法にパンクチャリングがある。ポーラ符号は符号語長が $N=2^n$ (n は正数) となる符号である。したがって、 2^n 以外の符号語長を実現する場合にも、パンクチャリングが必要となる。パンクチャリングとは送信機において符号語の一部のビットを間引く操作である。通常、受信機はパンクチャリングされたビット（パンクチャドビット）の位置のみを既知であり、値は知らないため、パンクチャドビットの位置に任意の値を挿入して復号を行う。そのため復号誤りが増加してしまう。

このパンクチャリングに起因する復号誤りを抑制するために、符号語の中でパンクチャリングするビットを凍結ビットのみで構成することで、パンクチャドビットの値を受信機で既知とする方法が提案されている[4]。パンクチャドビットの値を既知とすることで、受信機における復号誤りを低減することができる。しかし、この手法ではパンクチャドビットを凍結ビットのみで構成するようにビットの割り当て位置を制御するため、本来であれば情報ビットを割り当てるべき復号誤り率が低い入力ビット位置に凍結ビットを割り当てる必要が出てくる。したがって、情報ビットが誤りやすいビット位置に割り当てられてしまい、結果としてパンクチャリングによる性能低下は抑制できるものの、情報ビットの割り当て位置による劣化が生じてしまうというジレンマが生じる。

そこで、本研究ではパンクチャリングする場合の復号誤りを低減するために、符号語の構成ビット数とビット位置ごとの復号誤り率を考慮したパンクチャリング手法を検討する。ここでは、符号語内の構成ビット数が少ないビット位置をパンクチャリングするビット位置とし、対応する行の入力ビット位置に凍結ビットを割り当てる。構成ビット数のが同じ符号語のビット位置が複数存在する場合、復号誤り率が高い入力ビット位置と対応している符号語のビット位置をパンクチャリングするビット位置とする。図 2 は、通常のポーラ符号化器の例 (u が情報ビット

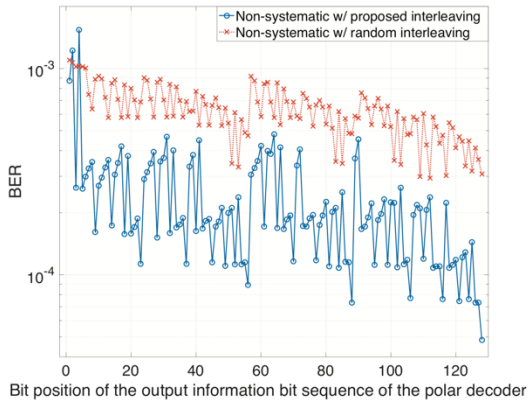


図 3 : 情報ビット出力位置ごとの誤り率 ($E_b/N_0 = 12$ dB)

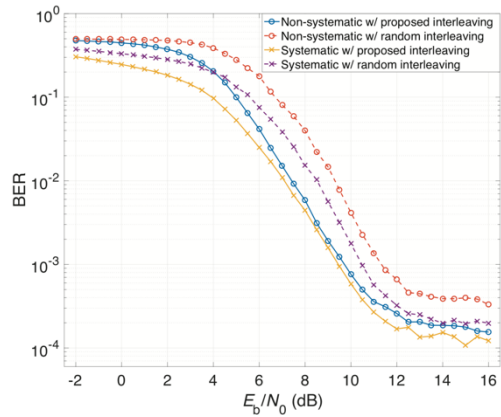


図 4 : E_b/N_0 対ビット誤り率

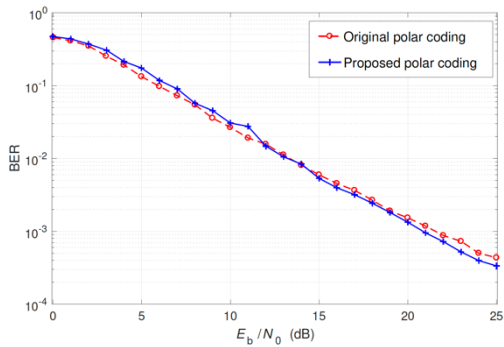


図 5 : E_b/N_0 対ビット誤り率

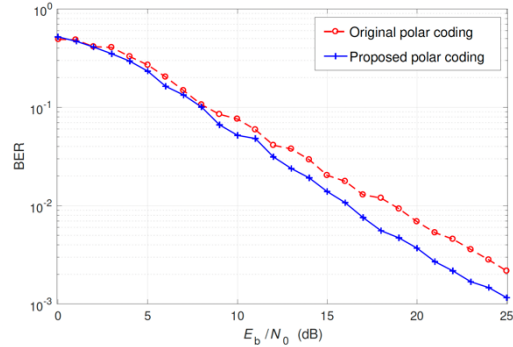


図 6 : 情報ビットおよび半凍結ビット位置のビット誤り率

で f が凍結ビット) であるが、出力ビット c_1 の値は 8 つの入力ビットによって決まるのに対し、 c_8 の値は x_8 のみで決まる。このとき提案手法では、 c_4, c_6, c_8 をパンクチャリングするビットとして選び、凍結ビットは x_1, x_4, x_6, x_8 に配置する。このように、パンクチャリングする符号語のビットを凍結ビットのみで構成する場合でも、復号誤り率が高い入力ビット位置に凍結ビットを割り当てるため、復号誤りを低減することができる。

4. 研究成果

(1) 通信路の状態に応じたビットの並び替えを用いるポーラ符号の性能

図 3 に符号化率 1/2、符号語長 256 のポーラ符号を用いた場合の本研究によるビットの並び替えの有無による復号器出力の情報ビット位置ごとのビット誤り率 (BER: Bit Error Rate) 特性の例を示す。図 3 より復号器の情報ビット出力位置全体にわたり BER が大幅に低下していることが分かる。図 4 は、通常のポーラ符号[2]および組織ポーラ符号[3]に本研究による並び替えを適用した場合の BER 特性である。図 4 より、BER = 5×10^{-4} を達成するのに必要な E_b/N_0 が通常のポーラ符号の場合で約 2dB、組織ポーラ符号の場合で約 1.5dB ほど改善可能なことが分かる。ただし、本手法は周波数選択性フェージングという通信路の特性を利用するため、その改善量は通信路の状況に左右される。しかし、本手法は符号化器の構造そのものは変えておらず、入力ビット列を並び替えるだけであるため、本研究で検討する他の方式との併用が可能である点は大きなメリットになる。

(2) 半凍結ビットの概念を導入したポーラ符号の性能

図 5 に符号化率 1/2 の畳み込み符号を適用した半凍結ビット ($J=24$) を用いた場合の BER 特性を示す。図 5 より、半凍結ビットの導入により、BER = 5×10^{-4} を達成するのに必要な E_b/N_0 を約 1dB 改善できていることが分かる。これが半凍結ビットによる効果であることを確認するために、図 6 に情報ビットおよび半凍結ビット位置での復号誤り率特性を示す。図 6 では、BER = 3.5×10^{-3} を達成するのに必要な E_b/N_0 を約 3dB 改善できていることが分かる。したがって、通常のポーラ符号で、情報ビットを割り当てる「復号誤り率が低いビット位置」の中で、比較的誤りが多くなる位置の復号誤り率特性を改善できていることが分かる。よって、符号語長が制限される環境において、半凍結ビットの導入は有効であるといえる。ただし、本検証では、半凍結ビットの符号化に畳み込み符号を用いたが、さらに最適な符号化についての検証が望まれる。

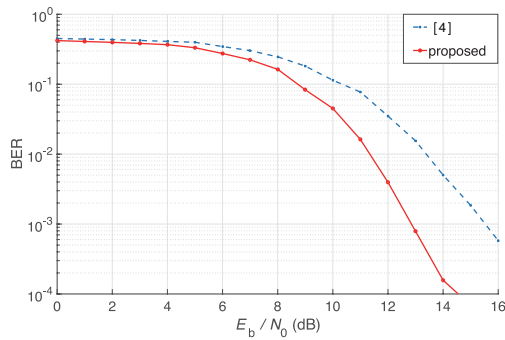


図 7: E_b/N_0 対ビット誤り率

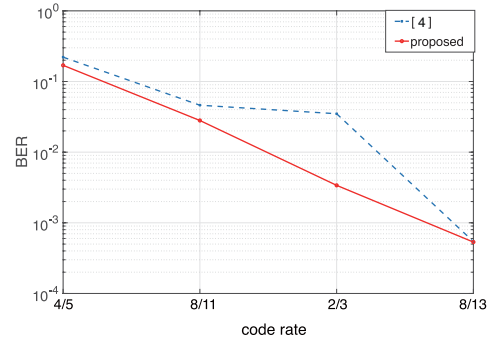


図 8: E_b/N_0 対ビット誤り率

(3) ポーラ符号における生成行列に基づくパンクチャリング

図 7 に文献[4]と本研究で検討した方式の BER 特性を示す。符号語長は 1536 とし、符号化率は $2/3$ とした。図より $BER = 1 \times 10^{-3}$ を達成するのに必要な E_b/N_0 を約 2.3dB 改善できていることが分かる。これは、凍結ビットのみで構成される符号語のビットを生成する場合において、情報ビットを復号誤り率が低い入力ビット位置に割り当てており、復号誤りを低減できたためである。

最後に符号化率（パンクチャドビット数）の違いによる影響を確認するために、図 8 に $E_b/N_0 = 12\text{dB}$ で符号化率を変化させた場合の BER 特性を示す。図 8 の横軸は符号化率、縦軸は BER を表す。図 8 より、符号化率が $8/13$ の場合では提案手法と文献[4]の手法の BER はほとんど変わらないことがわかる。これは、符号化率が $8/13$ の場合はパンクチャリングするビット数が少なく、凍結ビットのみで生成できる符号語のビット位置に限られるからである。そのため提案手法を用いても誤りにくいビット位置に凍結ビットが割り当てられてしまい BER がほとんど同一になってしまう。

一方、符号化率を $2/3$ より大きくする（横軸で左方向）と、提案手法の方が低い BER を達成していることがわかる。これは、パンクチャリングビット数が増えるほど凍結ビットのみで生成できる符号語のビット位置が増加し、誤りにくいビット位置に割り当てる情報ビットの割合を増やすことができたためである。以上より、パンクチャリングする符号語のビットを凍結ビットのみで構成する場合にも、誤りにくい入力位置に割り当てる情報ビットの割合を増やすことで、ポーラ符号の誤り訂正能力の劣化を低減させ、ポーラ符号全体の誤り率特性を改善できることがわかる。

(4) まとめ

以上、本研究は符号語長を制限する必要があるシステムでは、特性を発揮しにくいというポーラ符号の本質的な性能に対し、実際の通信路に応じたシステム設計という観点から解決策を複数検討してきた。これらの方式は、ポーラ符号のもつ分極特性をさらに強調するものであり、いずれもその有効性を確認することができた。次世代の移動体通信は、IoT デバイスの爆発的な普及に対応するために、従来のシステムの拡張ではなく、抜本的に新たなシステムを検討する必要がある。本研究で提案した方式は、いずれも単独の使用だけでなく、複数の手法を組み合わせることが可能であり、高速大容量だけでなく、低遅延、低負荷といった様々な要件に対応可能となる。本研究の技術の応用により、システムの利用用途に応じてポーラ符号の適切な実装が可能になれば、無線通信分野への貢献は非常に大きいと考えられる。

<引用文献>

- [1] 総務省, “情報通信白書平成 28 年版,” 2017 年 7 月.
- [2] E. Arıkan, “Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.55, no.7, pp.3051-3073, Jul. 2009.
- [3] E. Arıkan, “Systematic polar coding,” IEEE Commun. Lett., vol.15, no.8, pp.860-862, Aug. 2011.
- [4] R. Oliveira and R. Lamare, “Puncturing based on polarization for polar codes in 5G networks,” International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Aug. 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Takayuki Shinomiya and Takahiko Saba
2. 発表標題 SVD-MIMO transmission scheme for enhancing channel polarization of polar codes
3. 学会等名 IEICE International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takumi Kandatsu and Takahiko Saba
2. 発表標題 Generator Matrix Based Puncturing in Polar Coding
3. 学会等名 International Conferences on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Oda and Takahiko Saba
2. 発表標題 Polar coding with enhanced channel polarization under frequency selective fading channels
3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumasa Nagano and Takahiko Saba
2. 発表標題 Polar Coding with Introducing Half-Frozen Bits
3. 学会等名 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps) (国際学会)
4. 発表年 2018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			