

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560444

研究課題名(和文)線形符号に対する汎用復号アルゴリズムの構築に関する研究

研究課題名(英文)Study on development of universal decoding algorithm for linear codes

研究代表者

正本 利行(Shohon, Toshiyuki)

香川高等専門学校・通信ネットワーク工学科・准教授

研究者番号：10242455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：無線LANで使われているパンクチャード畳み込み符号をSum-Product Algorithmで復号することを可能にした。畳み込み符号のSum-Product Algorithmによる復号特性の理論解析を可能にした。BCH-Accumulate符号のSum-Product Algorithmによる復号特性を改善した。

研究成果の概要(英文)：This research has made it possible to decode the punctured convolutional code for the wireless LAN with Sum-Product Algorithm. This research has provided the theoretical analysis of the decoding performance of a convolutional code in which Sum-Product Algorithm was used. This research has improved the decoding Performance which used Sum-Product Algorithm of the BCH-Accumulate code.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：Sum-Product Algorithm 畳み込み符号 BCH符号 BCH-Accumulate符号

1. 研究開始当初の背景

これまで、ハミング符号、BCH (Bose Chaudhuri Hocquenghem) 符号、RS (Reed Solomon) 符号、畳み込み符号など、多くの符号化方法が提案されている。そして、その復号アルゴリズムは、個々の符号に対応したものが提案され利用されている。残念ながら、これまでに、どの符号に対しても適用できる汎用的な復号アルゴリズムは提案されていない。もし、どの符号に対しても適用できる汎用的な復号アルゴリズムができれば、符号化の研究への寄与は非常に大きいと考えられる。なぜなら、復号方法を考えずに符号化の研究を進められるようになるからである。

2. 研究の目的

本研究では、線形符号のクラスに対する高速高性能な汎用復号アルゴリズムを構築することを目的としている。本研究が目指す汎用復号アルゴリズムは次のような要件を満たすものである。

- ・ 汎用性：線形符号のクラスの符号全てに適用可能であること。
- ・ 高速性：専用復号アルゴリズムと同等か高速であること。
- ・ 高性能：専用復号アルゴリズムと遜色のない復号特性が得られること。
- ・ SISO 復号：SISO(Soft-Input Soft Output：軟入力軟出力) 復号が可能であること。

3. 研究の方法

そこで、申請者らは、そのような復号アルゴリズムとして、LDPC (Low-Density Parity-Check：低密度パリティ検査) 符号の復号アルゴリズムとして知られているSPA(Sum-Product Algorithm) に着目した。このアルゴリズムは、符号のパリティ検査行列に基づいて処理を行うアルゴリズムとなっている。つまり、パリティ検査行列によって記述できる符号、即ち、線形符号のクラスに属する全ての符号に対して適用可能なアルゴリズムになっている。また、復号処理が単純であることと並列処理が可能であることから、高速な復号アルゴリズムとして適している。さらに、SISO 復号アルゴリズムとなっている。このような理由から、SPA をベースとして、これを改良・発展させることで、汎用復号アルゴリズムの構築を図った。

4. 研究成果

(1) 無線 LAN に使われているパンクチャード畳み込み符号に対する Sum-Product Algorithm (SPA) の適用

① 背景

SPA は、タナーグラフに沿って、メッセージ交換を繰り返すアルゴリズムである。タナーグラフは、パリティ検査行列を表

現した 2 部グラフで、ビットノードとチェックノードから成っている。無線 LAN に使われている畳み込み符号は、非組織形の畳み込み符号なので、情報ビットに対応する受信信号が得られない。この場合、ビットノードからのメッセージの初期値はゼロとなる。チェックノードでは、ビットノードからのメッセージに 2 つ以上、ゼロが含まれている場合には、チェックノードからのメッセージもゼロとなる。この場合、メッセージ交換を繰り返しても、復号特性は改善されない。そこで、SPA による復号で用いるパリティ検査行列を変形し、情報ビットを含まないものにし、それを用いた SPA によって、一旦、パリティビットを復号し、その結果を用いて情報ビットを求める 2 段階復号法を既に提案している。この方法を用いると、 $E_b/N_0=5[\text{dB}]$ において、ビット誤り率を従来法の $1/1500$ にできた。さらに等価な次数の高いパリティ検査多項式(高次元パリティ検査多項式)に基づいて SPA を行うことで、更なる特性改善が得られている。

パンクチャード畳み込み符号も無線 LAN の規格に含まれている。これに対して、上記の方法をそのまま適用しても、良い復号特性が得られなかった。

② 提案法(1)

パンクチャード畳み込み符号を従来法で復号した際に良い特性が得られない理由として、以下のことが考えられる。パンクチャビットの受信信号が得られないため、このビットノードからのメッセージの初期値はゼロとなる。このため、チェックノードへのメッセージに 2 つ以上、ゼロが含まれ、SPA を繰り返しても、特性改善が得られないためであると考えられる。そこで、パンクチャビットを 2 ビット以上含まないような高次元パリティ検査多項式を探索することを考えた。そのため、まず、そのようなパリティ検査多項式が満たすべき条件を明らかにした。その条件は、以下の通りとなった。

- ・ 符号化率 $2/3$ の場合、パリティ 2 のみがパンクチャされる。この場合、パリティ 2 の奇数次数項が 1 つしかないパリティ検査多項式または、パリティ 2 の偶数次数項が 1 つしかないパリティ検査多項式。このいずれかを満たすものを用いればよい。
- ・ 符号化率 $3/4$ の場合、パリティ 1 とパリティ 2 の両方がパンクチャされる。このため、パリティ 1 のための高次元パリティ検査多項式と、パリティ 2 のための高次元パリティ検査多項式の両方が必要となる。パリティ 1 のための高次元パリティ検査多項式が満たすべき条件は、パリティ

1の $3n+1$ 次の項が1つ、かつ、パリティ2の $3m+2$ 次の項が0個の場合である。パリティ1のための高次元パリティ検査多項式が満たすべき条件は、この他に2つあり、そのいずれかを満たせばよい。

パリティ2のための高次元パリティ検査多項式が満たす条件は、パリティ1の $3n+1$ 次の項が0個、かつ、パリティ2の $3m+2$ 次の項が1つの場合である。パリティ2のための高次元パリティ検査多項式が満たすべき条件は、この他に2つあり、そのいずれかを満たせばよい。

これらを満たすものの中から、最も特性の良いものを実験的に求めた。その結果、得られた高次元パリティ検査多項式は、以下の通りである。

- ・ 符号化率 $2/3$ の場合

$$(D^{16} + D^{15} + D^{14} + D^{13} + D^{11} + D^7 + D + 1)P_1 + (D^{16} + D^{10} + D^3 + 1)P_2 = 0 \quad (1)$$

- ・ 符号化率 $3/4$ の場合
式(2)、式(3)の2つのパリティ検査多項式を用いる。式(2)、式(3)は、それぞれ、パリティ1、パリティ2のための高次元パリティ検査多項式である。

$$(D^{21} + D^{20} + D^{19} + D^{18} + D^{12} + D^5 + D^3 + D^2 + 1)P_1 + (D^{21} + D^{16} + D^{12} + D^{10} + D^6 + D + 1)P_2 = 0 \quad (2)$$

$$(D^7 + D^6 + D^4 + 1)P_1 + (D^7 + D^5 + D^4 + D^2 + D + 1)P_2 = 0 \quad (3)$$

③ 提案法(1)の特性改善効果

符号化率 $2/3$ の場合の特性を図1に示す。縦軸は、ビット誤り率を表しており、低いほど特性が良いことを示している。提案法(1)のビット誤り率は、 $E_b/N_0=5$ [dB]において、従来法の $1/330$ となっており、大幅な改善が得られている。ビット誤り率 10^{-5} と比較すると、提案法は、従来法に比べて、 1.28 [dB]の改善が得られている。

符号化率 $3/4$ の場合の特性を図2に示す。提案法(1)のビット誤り率は、 $E_b/N_0=6$ [dB]において、従来法の $1/50$

となっており、改善が得られている。しかし、 8 [dB]では、従来法と同程度であり、 10 [dB]では、従来法の $1/9$ となっている。このことから、特性改善は、得られているものの、符号化率 $2/3$ のときほどの改善は得られていないことがわかる。

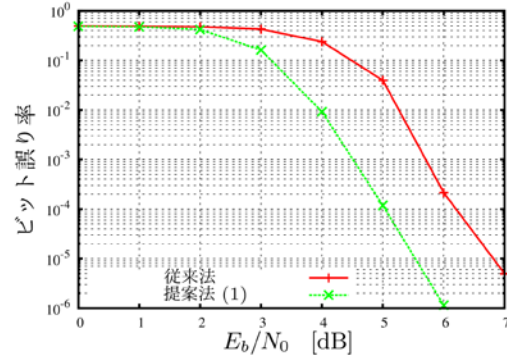


図1 提案法(1)の特性(符号化率 $2/3$)

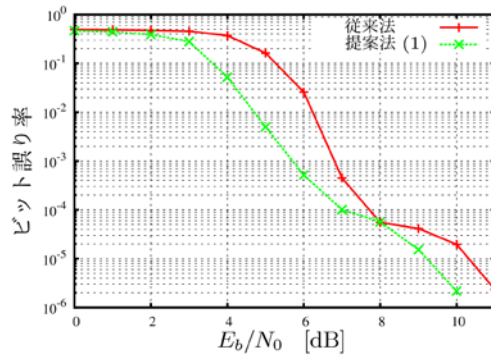


図2 提案法(1)の特性(符号化率 $3/4$)

④ 提案法(2)

符号化率 $3/4$ の場合の特性改善方法として、SPA 繰り返し $1, 2$ 回目と 3 回目以降で、復号に用いる高次元パリティ検査多項式を切り替える方法を提案した。計算機実験によって、次の高次元パリティ検査多項式を用いると良い特性が得られることがわかった。

繰り返し 1 回目は、式(2)、繰り返し 2 回目は、式(4)、繰り返し 3 回目以降は、式(5)を用いる。

$$(D^{21} + D^{17} + D^{15} + D^{14} + D^5 + D^3 + D^2 + 1)P_1 + (D^{21} + D^{20} + D^{16} + D^{13} + D^{10} + D^6 + D + 1)P_2 = 0 \quad (4)$$

(4)

$$(D^{15} + 1)P_1 + (D^{15} + D^{14} + D^{11} + D^9 + D^7 + D^2 + D + 1)P_2 = 0 \quad (5)$$

⑤ 提案法(2)の特性改善効果

提案法(2)の特性を図3に示す。対象としたパンクチャは符号化率3/4の場合のみである。図3から、提案法(2)のビット誤り率は、 $E_b/N_0=6$ [dB]において、従来法の1/1500となっており、大幅な改善が得られている。また、提案法(1)と比較した場合、特に高い E_b/N_0 において、大幅な特性改善が得られることがわかる。ビット誤り率 10^{-5} で比較すると、提案法(2)は従来法に比べて、4.13[dB]の改善が得られている。

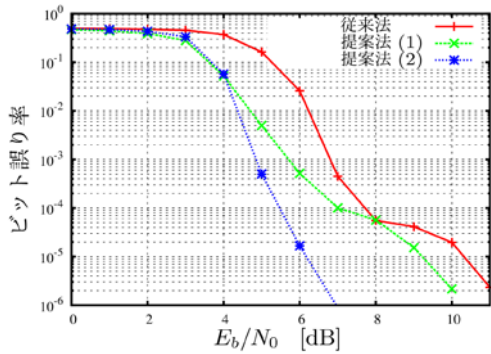


図3 提案法(2)の特性(符号化率3/4)

⑥ まとめ

この研究によって、無線LANに用いられている畳み込み符号の復号にSum-Product Algorithmを適用することが可能となった。

(2) 畳み込み符号の Sum-Product Algorithm による復号特性の理論解析

① 背景

SPAはパリティ検査行列に基づく復号アルゴリズムであるので、同じ符号でも用いるパリティ検査行列によって、その特性が異なる。これまでに提案した特性改善方法は、SPA復号特性のよいパリティ検査行列を求める方法である。しかし、その方法は、実験的に求めたものであり、理論的な根拠が十分に確立されていない。そこで、畳み込み符号のSPA復号特性の解析的評価方法を構築することによって、特性改善の理論的根拠を与える。また、その評価方法に基づいて、更に特性改善

を図る。

畳み込み符号のビット誤り率の解析方法としては、上界値評価が一般的である。しかし、それは、最尤復号を行った場合の上界を与えるものである。即ち、SPA復号ビット誤り率の評価としては、使えない。そこで、新たにSPA復号ビット誤り率の解析的評価方法を構築する。

② 提案法

SPAは、簡単な復号処理であるが、そのまま解析するのは難しいので、その近似となるMin-Sum Algorithm(MSA)に基づいて考える。MSAは、最小値探索と加算処理のみであり、SPAよりも解析が容易となる。さらに、解析を容易にするため、受信した符号語の各ビットが持っている信頼度の大きさが一定であると仮定する。そうすると、MSAの復号処理は、変則的な多数決論理復号に帰着できる。これに対するビット誤り率の評価方法を構築する。

③ 提案法と計算機実験の比較

図4に提案法によって求めたビット誤り率と計算機実験によって求めたビット誤り率の比較を示す。複数のプロット点があるのは、復号に用いたパリティ検査多項式が異なるためである。この図から、提案法によって求めたビット誤り率と計算機実験によって求めたビット誤り率は、良好な対応関係がみられることがわかる。ただし、提案法で導入した仮定により、実際よりも高めのビット誤り率となっている。このため、計算機実験よりも、ビット誤り率は高くなっていると考えられる。しかし、相対的な評価には、十分に使うことができる。

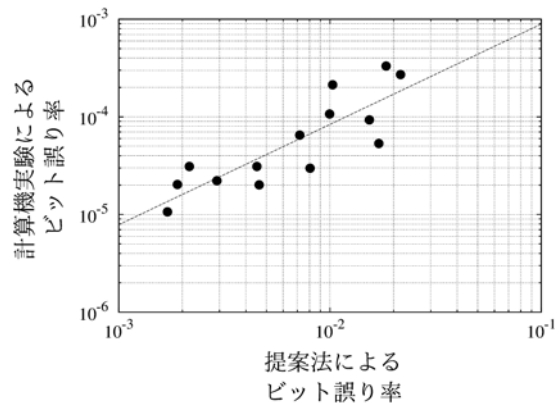


図4 提案法と計算機実験の比較

④ まとめ

この研究によって、畳み込み符号のSPA復号特性の理論解析が可能となった。今後、これを使って、さらに特性の良いパ

リティ検査多項式を探索することが期待できる。

(3) 接続符号化/繰り返し復号系への拡張 (BCH-Accumulate 符号の Sum-Product Algorithm による復号)

① 背景

これまで畳み込み符号、BCH 符号、RS 符号それぞれに対する SPA 復号特性を改善することはできたが、これらを要素符号とする接続符号化/繰り返し復号系に対して、提案した SPA 復号特性改善方法では、期待したほどの改善が得られていない。ここでは、接続符号化/繰り返し復号系として、BCH-Accumulate 符号をとりあげ、その SPA 復号特性の改善を図る。

② 提案法(1)

BCH 符号を単独で用いる場合の SPA 復号特性改善方法として、方法が 3 つ提案されている。これまでに、そのうちの 2 つを BCH-Accumulate 符号の復号に適用している。ここでは、これまでに適用していない方法、複数のパリティ検査行列を用いた復号を適用して特性改善を試みた。

その結果を図 5 に示す。この図から、提案法(1)により、特性改善は、得られるが、その改善は、わずかであることがわかる。実際、ビット誤り率 10^{-4} と比較すると、提案法(1)は従来法よりも 0.05[dB]良い特性である。

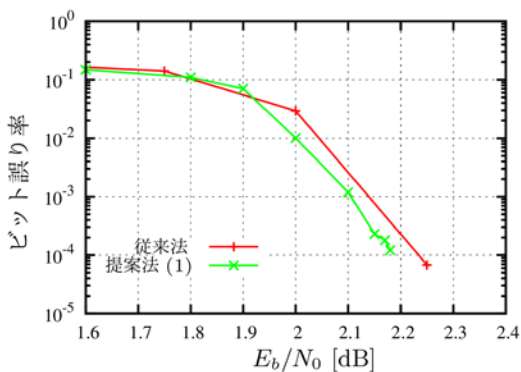


図 5 提案法(1)による特性改善効果

③ 提案法(2)

提案法(1)は、ほとんど効果がなかったもので、別の特性改善方法について検討を行った。ここでは、BCH-Accumulate 符号の特性改善方法として、スケーリングに着目し、外符号の復号と内符号の復号を協

調して動作させることを考えた。それは、外復号器と内復号器の復号結果が一致しなかった場合には、スケーリング値を小さくすることで、その信頼度を下げるというものである。この方法は、復号結果に応じてスケーリング値を変えるので、これを適応的スケーリングと呼ぶことにする。

計算機実験の結果を図 6 に示す。この図から、提案法(2)は、提案法(1)よりも大きな特性改善効果が得られることがわかる。実際、ビット誤り率 10^{-4} と比較すると、提案法(2)は提案法(1)よりも 0.2[dB]良い特性が得られている。また、提案法(2)は従来法よりも 0.25[dB]良い特性が得られている。

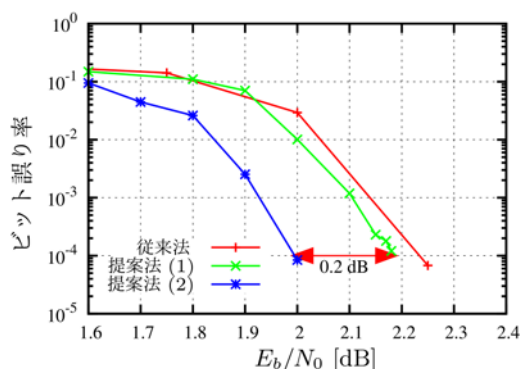


図 6 提案法(2)による特性改善効果

④ まとめ

適応的スケーリングを提案した。これによって、BCH-Accumulate 符号の SPA 復号特性を改善できた。

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 正本利行、畳み込み符号の Sum-Product 復号特性の一検討、第 35 回情報理論とその応用シンポジウム、2012 年 12 月 11 日~14 日、大分県
- ② 正本利行、BCH-Accumulate 符号の Sum-Product 復号、2014 年電子情報通信学会総合大会、2014 年 3 月 18 日~21 日、新潟県

[図書] (計 1 件)

- ① 正本利行、Ha Cheol Lee, 他 10 名、INTECH、ADVANCED WIRELESS LAN、2012 年、136 ページ(1-22 ページ)、査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

正本 利行 (SHOHON, Toshiyuki)
香川高等専門学校・通信ネットワーク工
学科・准教授
研究者番号：10242455

(3) 連携研究者

荻原 春生 (OGIWARA, Haruo)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：30185532