

軟判定を用いた畳み込み・消失リードソロモン接続符号の 繰り返し復号法による性能向上に関する検討

平安名常寛[†] 平良文紀[†] レンソー[†] 和田 知久[†]

[†] 琉球大学大学院理工学研究科 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地

E-mail: †{tsunenori,renzo}@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, †wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし 日本の地上波向けデジタル放送サービス (ISDB-T) 規格で、“畳み込み・リードソロモン接続符号”が用いられている。その接続符号の復号法において、繰り返し復号法を行う事により性能の向上が可能であると報告されており、以前の報告 [1] で Viterbi-RS 復号器を用いた繰り返し復号器での性能評価を行った。今回、文献 [1] で用いた繰り返し復号器を Max-Log-MAP アルゴリズムと消失訂正 RS 復号器を用いた復号器に改良し、更なる性能向上の検討を行った。シミュレーションより、変調方式 16QAM、畳み込み符号化率 1/2、繰り返し復号 2 回での BER を測定した結果、従来の手法より約 0.5dB の SN 比の改善が確認できた。

キーワード ビタビ復号法, Max-Log-MAP アルゴリズム, 接続符号, 繰り返し復号法, ISDB-T, バイトインターリーブ

Performance improvement by an iterative decoding of Max-Log-MAP - Erasure RS code

Tsunenori HENNA[†], Yoshinori Rensō TAIRA[†], and Tomohisa WADA[†]

[†] Department of Information Engineering, University of the Ryukyus Senbaru 1, Nishihara, Okinawa,
903-0213 Japan

E-mail: †{tsunenori,renzo}@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, †wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

Abstract Reed-Solomon-Convolutional Concatenated Codes is used by the digital terrestrial broadcasting standard of Japan (ISDB-T). This paper present an iterative decoding algorithm for concatenated codes consisting of a Reed-Solomon and a conventional code, focusing on the code of the ISDB-T standard. A new procedure is proposed to define the feedback signal from the output of the Reed-Solomon decoder to the input of the convolutional decoder that provides a significant improvement over existing solutions. Simulation show that proposed algorithm provides large reductions in the bit error rate compared with the classic decoder (e.g. about 0.5 dB at BER=10⁻⁵ for the second iteration).

Key words Viterbi Algorithm, Max-Log-MAP Algorithm, Concatenated Codes, iterative Decoding, ISDB-T

1. ま え が き

デジタル放送や、デジタル無線通信では、ワイヤレスでデジタル通信を行っており、空間を伝送路として使用している。空間には、明確な伝送路がないので電波は四方八方に拡散してゆくため、受信する電波は非常に弱い上、空間は共用スペースである事から外来ノイズも多い。そのため情報が欠落する可能性が非常に高い通信である。従って、誤り訂正が重要な技術となる。日本の地上波向けデジタル放送サービス (ISDB-T) 規格では、誤り訂正符号化方式として“畳み込み・リードソロモン接続符号”が用いられている。奈良先端科学技術大学院大学の村田

らが、畳み込み・リードソロモン接続符号の繰り返し復号法によって、性能の向上が可能であることを示し [2]、以前の報告で Viterbi-RS 復号器を用いての繰り返し復号法の評価を行った [1]。今回は、文献 [1] で用いた繰り返し復号器を Max-Log-MAP アルゴリズムと消失訂正 RS 復号器を用いた消失訂正繰り返し復号器に改良し、更なる性能向上の検討を行った。

本稿では、2 節において ISDB-T 規格における送受信系の概要を示す。3 節では接続符号で用いられている外符号及び内符号を説明する。4 節では、従来の復号方式と提案手法のアーキテクチャについて説明する。5 節ではシミュレーションによる結果を示し、提案手法の評価を行い、6 節でまとめとする。

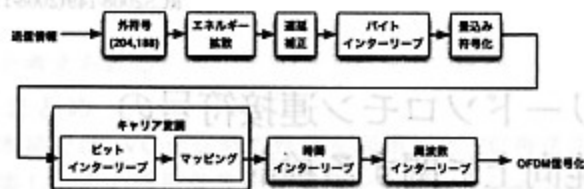


図1 ISDB-T 規格対応：送信系

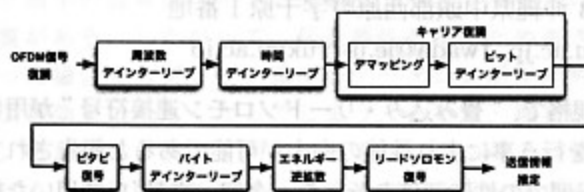


図2 ISDB-T 規格対応：受信系

2. ISDB-T 送受信システム

情報を伝送するシステムでは雑音等により誤って伝送される場合がある。双方向の通信路では、誤りや情報の欠落を検出した場合、再送を要求するなど品質の保証が可能である。しかし、放送のように一方通信であり、更に受信者が様々な環境で数多く存在する場合には、再送のような方法を用いることはできない。

そのためデジタル放送では、送信側でデジタル信号 0,1 にあらかじめ誤り訂正符号処理を行うことによって冗長な情報を付加し、伝送中に発生した誤りを受信側で訂正するという方法をとっている。これによって、CN 比がある程度低い状態でも安定な受信を行うことが可能であり、デジタル放送では重要な技術となっている。

地上波デジタル放送では、畳み込み符号とリードソロモン符号を組み合わせた方法をとっている。これを接続符号化と呼ぶ。この2種類の誤り訂正の間に、インターリーブという処理を行い、畳み込み符号で発生する連続した誤りを分散させて訂正能力を高めている。

図1にISDB-T規格の送信系のブロック図を、図2に受信系のブロック図を示す。送信側では、上で述べたように誤り訂正符号化や種々のインターリーブなどの処理を行う。そして、受信側ではそれらに対応した、デインターリーブや復号などの処理を行い送信信号を推定する。

3. 接続符号

接続符号は一般的には、2つの符号(内符号、外符号)を直列に並べて配置したものである。接続符号の特徴は、内符号と外符号の組み合わせでいろいろな特性を持つ符号を設計しやすいということにある。

ISDB-T規格では、外符号としてTSP毎に短縮化リードソロモン(204,188)、内符号に畳み込み符号が用いられている。また、これらの符号の間にはインターリーブが用いられる。これにより、シンボルの順序を変え、互いの訂正能力を向上させる事

ができる。

3.1 外符号(リードソロモン符号)

デジタル放送で用いられる外符号は短縮化リードソロモン(204,188)符号である。これはリードソロモン(255,239)の短縮符号で、符号長255バイトの先頭51バイトが0であると想定して短縮化を行った符号である。既約多項式 $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ で与えられるガロア体 $GF(2^8)$ の元で1バイトを表す。そうすることにより255個の要素の中で閉じた集合となり、線形に演算が可能になる。それを利用してリードソロモン符号では誤り訂正を行う。

また生成多項式は次式となる。

$$g(x) = \prod_{i=1}^{16} (x - a_i) \quad (1)$$

(N,K) リードソロモン符号の符号間最小距離 d は $d = N - K + 1$ である。この最小距離 d と訂正能力 t は $d \geq t + 1$ の関係を満たす。

3.2 内符号(畳み込み符号)

畳み込み符号は、リードソロモン符号などのブロック符号とは異なり、データの区切りがなく1つのデータをその周辺にばらまき、その情報を使って統計的な方法で復号を行う。1つの情報が一回の符号のみに影響を与えるのではなく、数ビットに影響を与える。すなわち、情報に対して時間的な依存性が長ければ長いほど誤りに対して強くなり、それを表す指標として拘束長が用いられる。ISDB-T規格では、拘束長=7の畳み込み符号器が用いられている。

4. 復号器アーキテクチャ

現在のISDB-T規格対応の受信器では、回路規模や計算時間を考慮し、畳み込み符号の復号には回路規模が小さくてすむ“ビタビ復号”、リードソロモン復号には計算時間が少ない“BMアルゴリズム”が採用されている。どちらの復号法も出力は硬判定出力である。

文献[1]において、従来通りの硬判定出力のみを用いた復号法を応用した“単純繰り返し復号法”を提案した。図3に単純繰り返し復号法の受信器のブロック図を示す。今回の報告では、畳み込み符号の復号を“Max-Log-MAPアルゴリズム”、リードソロモン復号を消失訂正を含む復号アルゴリズムに変更した“消失訂正繰り返し復号法”を提案する。消失訂正繰り返し復号法の受信器のブロック図を図4に示す。

4.1 リードソロモン復号器

4.1.1 従来手法

従来のリードソロモン符号の復号処理は以下に示す5段階の処理からなる。

- (1) 受信語からエラーシンドローム計算
- (2) 誤り位置多項式の導出
- (3) 誤り位置の計算
- (4) 誤り値の計算

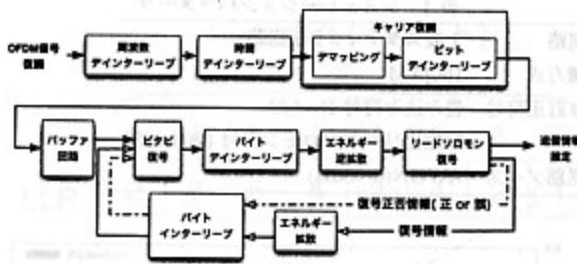


図3 単純繰り返し復号法：受信器ブロック図

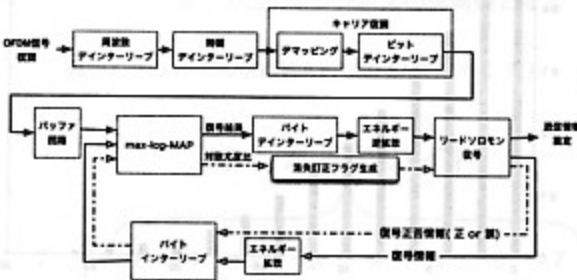


図4 提案手法（消失訂正繰り返し復号法）：受信器ブロック図

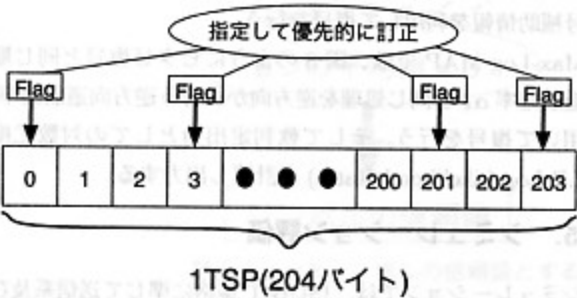


図5 消失訂正

(5) 誤りの訂正

リードソロモン復号処理で最初に行われる計算はシンδροーム演算である。その後、シンδροーム演算で求めたシンδροーム値を用いて、誤り位置多項式の導出を行っていく。そして、誤り位置多項式から誤り位置と誤り数値多項式を求め、最後に誤り数値を求め訂正する。

4.1.2 提案手法

単純繰り返し復号法では、従来の5段階の復号処理が終わった後、再びシンδροーム演算を行う。これにより、シンδροーム値がゼロになった場合は“訂正成功”、そうで無かった場合は“訂正失敗”と判断し、それぞれに対応した訂正可否情報を復号データ系列と共に出力する。消失訂正繰り返し復号法は、単純繰り返し復号法に消失訂正を加えたものである。

● 消失訂正

消失とは位置がわかっているが、誤りパターンがわからない誤りのことである。誤り数を e 個、消失個数を v 個としたとき、

$$2e + v \leq 16 \quad (2)$$

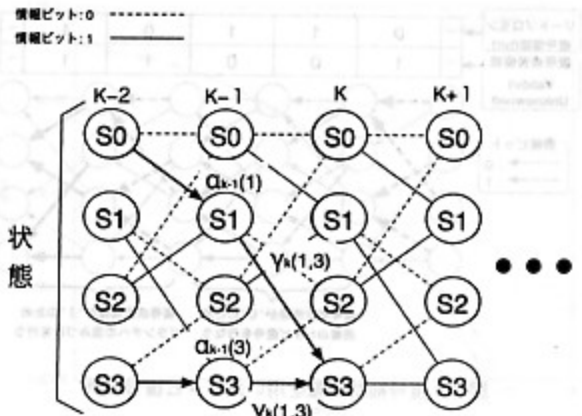


図6 ビタビ復号の例（拘束長=3）

の範囲内で訂正することができる。リードソロモン復号のBMアルゴリズムでは、1TSP中8シンボル（バイト）のエラーまでしか訂正できないが、消失訂正を使えば最大16シンボルのエラーが訂正可能である。しかし、消失訂正を使用するには誤りの位置を示す情報が必要である。

消失訂正を含む復号処理は以下の6段階の処理となる。

- (1) エラーシンδροーム計算
- (2) 修正シンδροームの導出
- (3) 誤り位置多項式の導出
- (4) 誤り位置の計算
- (5) 誤り値の計算
- (6) 誤りの訂正

消失訂正は通常の復号法に消失の位置情報を表す消失多項式 $\lambda(x)$ を用いて復号を行う。消失多項式 $\lambda(x)$ は消失の個数を v 、位置 m_0, m_1, \dots, m_{v-1} とすると、

$$\lambda(x) = \prod_{i=0}^{v-1} (1 - \alpha^{m_i} x) \quad (3)$$

で表される。この消失多項式とシンδροームから修正シンδροームを得て、修正シンδροームから誤り位置多項式を求める。その後、誤り位置多項式と消失多項式から誤り位置と誤り数値を求めて、誤り数値を訂正する。

消失訂正繰り返し復号法では、Max-Log-MAPアルゴリズムからフィードバックされる軟判定情報を用いて消失訂正を行う。フィードバックされる軟判定情報は、対数尤度比(LLR)と呼ばれ、シンボル毎の誤りの確率を示したものである。この情報に基づき誤りの可能性の高いシンボルにフラグを立てて優先的に訂正を行っていく(図5)。

4.2 畳み込み復号器

4.2.1 従来手法

従来手法では、畳み込み復号器にはビタビアルゴリズムが用いられている。ビタビ復号は、トレリス線図に基づいて復号を行う。ビタビ復号の例を示す。トレリス線図が $K-1$ の位置まで求まっていると仮定し、 K の状態に至るパスを求める。図6の

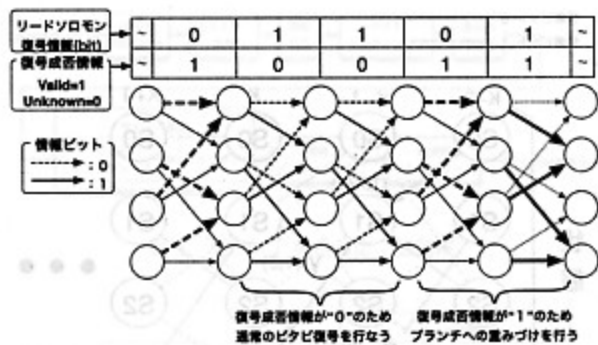


図7 復号補助情報を用いたビタビ復号の例

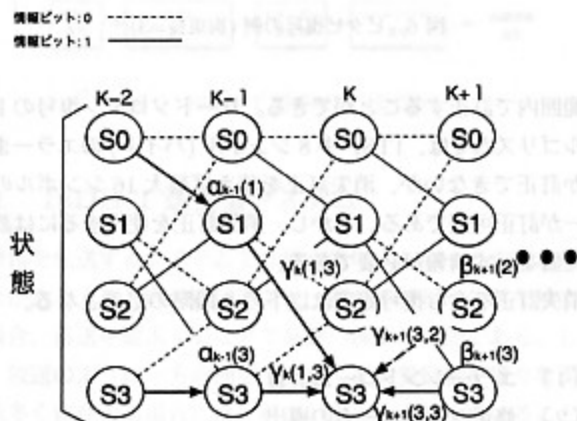


図8 Max-Log-MAP 復号の例

ように、状態 S3 に至る 2 つのパスから 1 つを選ぶ。位置 K-1 の状態 S1 でのパスメトリック $\alpha_{k-1}(1)$ に S1 から S3 に至るブランチメトリック $\gamma_k(1,3)$ を加えたものと、位置 K-1 の状態 S3 でのパスメトリック $\alpha_{k-1}(3)$ に S3 から S3 に至るブランチメトリック $\gamma_k(1,3)$ を加えたものを比較し、より誤りの少ないもの（確率が高いもの）を選び位置 K での状態 S3 でのパスメトリックとする。同様のことを全部の状態に対して行う。そして、この処理を繰り返すと 4 つの生き残りパスのある時点以前のパスが全て同じものになる。ビタビ復号では、この状態をデータがデコードできたものと判断する。

4.3 提案手法

単純繰り返し復号法では、従来のビタビ復号に加えて、リードソロモン復号器からの“復号情報 (204 × 8bit)”及び“復号正否情報 (204byte)”の 2 つの“復号補助情報”を利用し、復号を行っていく手法を用いた。

図 7 に単純繰り返し復号法で提案したビタビ復号の例を示す。リードソロモン復号器から出力された復号補助情報は、図 7 に示す様にトレリス線図とのビット情報単位での対応づけが行われる。そして、復号補助情報を元に、ブランチの値を強制的に指定し、正しいパスを通る確率を高くすることで訂正能力の向上を図っている。

消失訂正繰り返し復号法では、畳み込み復号器を“ビタビアルゴリズム”から“Max-Log-MAP アルゴリズム”に変更し、更に単純繰り返し復号法と同様にリードソロモン復号器からの

表1 シミュレーションパラメータ

伝送路	1 波スタティック伝送路
変調方式	16QAM
誤り訂正符号	畳み込み符号 R=1/2 短縮化リードソロモン符号 (204,188)
伝送路ノイズ	AWGN(0~8dB)

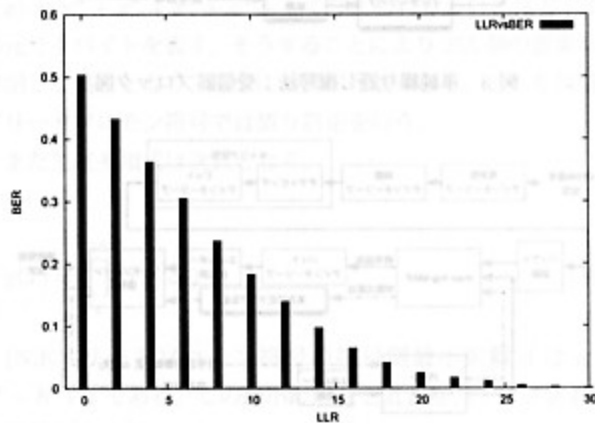


図9 LLR と BER の関係

復号補助情報を利用して復号を行う。

Max-Log-MAP では、図 8 のようにビタビ復号と同じ順方向道筋確率 α_k と同じ処理を逆方向から行う逆方向道筋確率 β_k を用いて復号を行う。そして軟判定出力としての対数尤度比 (LLR:Log Likelihood Ratio) を計算し出力する。

5. シミュレーション評価

シミュレーションでは、ISDB-T 規格に準じて送信系及びそれに対応した受信系を C 言語を用いて作成し評価した。なお、今回のシミュレーションでは、送信側からの出力を周波数インターリーブ出力までとしており、それ以降の OFDM フレーム化や IFFT 等の処理は省略している。設定したパラメータを表 1 に示す。

5.1 対数尤度比 (LLR) と消失訂正訂正フラグ

今回の提案手法である消失訂正繰り返し復号法では、Max-Log-MAP アルゴリズムからの軟判定情報である LLR に基づき誤りの可能性の高いシンボルに対して消失訂正フラグを立て、リードソロモン復号器で消失訂正を行う。LLR はビット毎に出力される。図 9 は SN 比を 0~8dB まで変化させたときの LLR の絶対値と BER の関係を示したものである。LLR は Max-Log-MAP によってデコードされた信号のビット毎の信頼性を示し、絶対値が大きくなればなるほどデコードされたビットが正しい確率が高くなり、絶対値が小さいと誤りの可能性が高くなり信頼性が低くなる。図 9 より LLR が大きくなれば、エラー率が低くなっているのが分かる。

Max-Log-MAP からの出力は、1 ビット毎の LLR であるが、リードソロモン復号では 1 シンボルが 1 バイト (8 ビット) であり 1 バイト毎の処理となるため、ビット毎の LLR からバイト毎の誤りの可能性を予測し、どのシンボルに消失訂正フラグを立てるか、またフラグをいくつ立てるかを決める。今回はシ

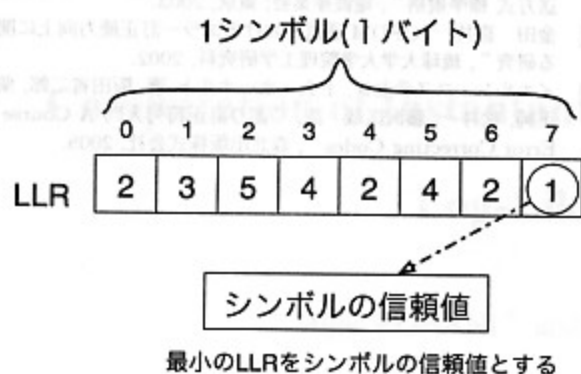


図 10 シンボルの信頼値を最小の LLR とする手法

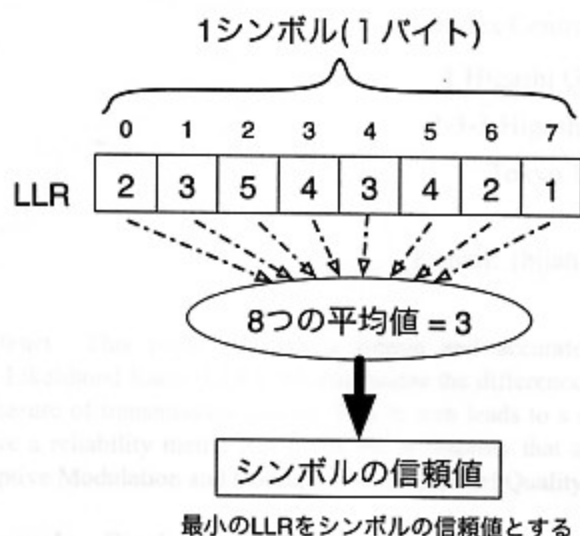


図 11 シンボルの信頼値を LLR の平均値とする手法

ンボル中の各ビットに対応する 8 つの LLR の中で最小の LLR をそのシンボルの誤りの確率の基準 (信頼値) とする手法 (図 10) と 8 ビットの LLR の平均値をそのシンボルの信頼値とする手法 (図 11) とをシミュレーションで比較した。今回はシンボル毎の信頼値が低いもの 2 つに消失訂正フラグを立ててシミュレーションを行った。その結果が図 12 である。図 12 中の "Minimum Value" が LLR の最小値をシンボルの信頼値とした場合の結果、"Average Value" が LLR の平均値をシンボルの信頼値とした場合の結果である。図 12 より、シンボル中の最小値の LLR をシンボルの信頼値とした場合の結果の方が良いことが確認できる。

次に、消失訂正フラグの本数と訂正能力の関係について検証を行った。式 (2) より、消失訂正フラグは最大 16 まで立てることができるが、消失訂正フラグの数が増えると通常のエラー訂正で訂正可能なエラー数が減ってしまう。そのため、通常のエラー訂正とのバランスを考慮して消失訂正フラグの数を設定する必要がある。図 13 は、消失訂正フラグの数を変化させたときの訂正能力の検証を行ったものである。BER が $1.0E^{-5}$ の点で見ると消失訂正フラグ数 2 本の場合が最も良い結果となった。

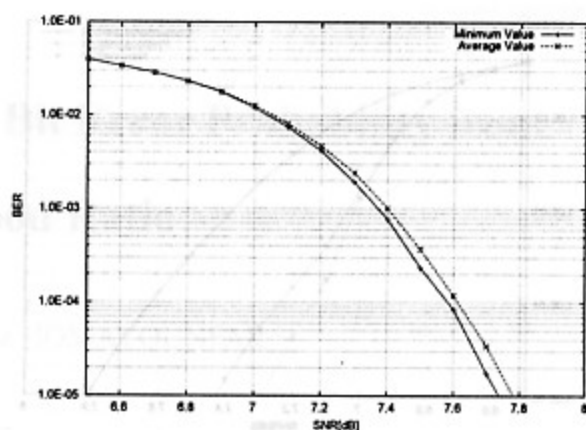


図 12 最小を信頼値とした場合と平均値を信頼値とした場合の比較

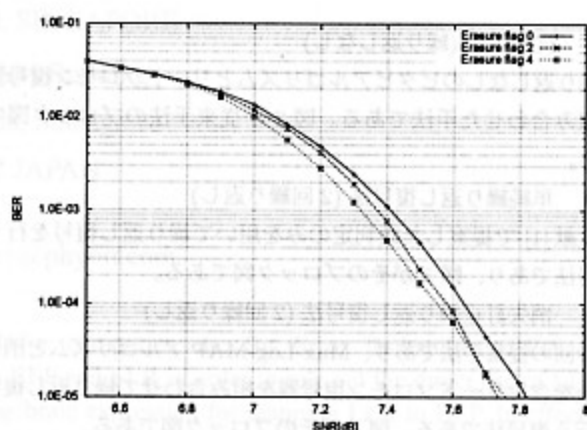


図 13 消失訂正フラグの本数による性能の変化

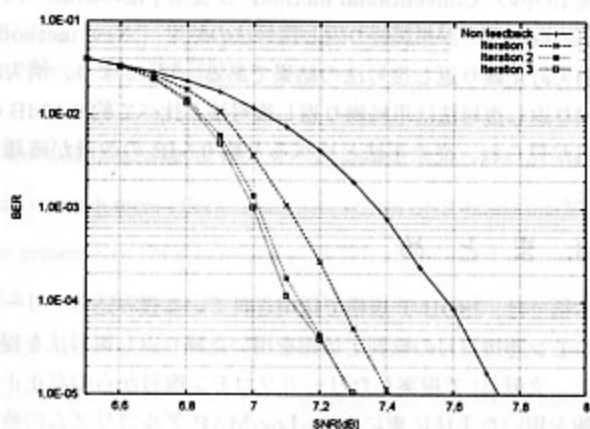


図 14 繰り返しによる性能変化

5.2 繰り返し復号

次に、繰り返し回数による性能の向上の評価を行った。図 14 は、0 ~ 3 回の繰り返しを行った際の性能を示したグラフである。図 14 の結果を見ると、1 回、2 回の繰り返しでは復号性能が向上しているが 3 回繰り返した結果は 2 回繰り返した場合とほぼ変わらず、BER $1.0E^{-5}$ で見ると 2 回繰り返しの方が良い結果となっている。

5.3 従来手法と提案手法の比較

次に、以下の 3 つの手法の比較を行った。

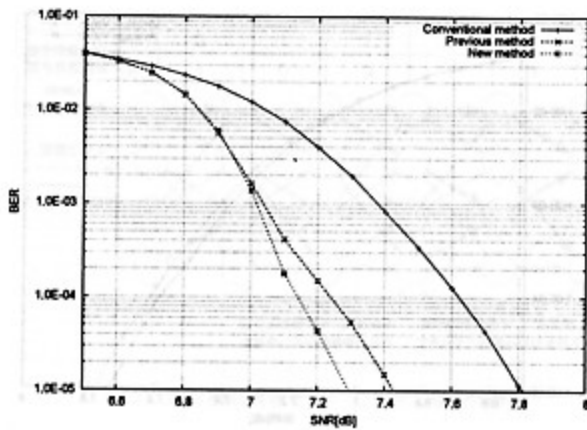


図 15 従来手法と提案手法の比較

● 従来手法 (繰り返しなし)

繰り返しなしのビタビアルゴリズムとリードソロモン復号器を組み合わせた手法である。図 2 が従来手法のブロック図である。

● 単純繰り返し復号法 (2 回繰り返し)

文献 [1] で提案した硬判定のみを用いて繰り返し復号を行う復号法であり、図 3 がそのブロック図である。

● 消失訂正繰り返し復号法 (2 回繰り返し)

今回の提案手法であり、Max-Log-MAP アルゴリズムと消失訂正を含むリードソロモン復号器を組み合わせて繰り返し復号を行う復号法である。図 4 がそのブロック図である。

図 15 中の“Conventional method”が従来手法の結果、“Previous method”が単純繰り返し復号法の結果、“New method”が消失訂正繰り返し復号法の結果である。図 12 より、消失訂正繰り返し復号法は単純繰り返し復号法と比べて約 0.13dB の改善が見られ、従来手法と比べると約 0.5dB の改善が確認できた。

6. まとめ

本稿では、ISDB-T 規格で採用されている畳み込み・リードソロモン連接符号の軟判定情報を用いた繰り返し復号法を提案した。文献 [1] で提案したリードソロモン復号からの訂正正否情報を用いた手法に更に Max-Log-MAP アルゴリズムの軟判定補助情報 (LLR) とリードソロモン復号の消失訂正を加えたアルゴリズムを提案し、その性能が向上することを示した。

シミュレーションでは、2 回繰り返し復号で従来手法より約 0.5dB の SN 比改善が確認できた。

文 献

- [1] 平良文紀レンソー, 平安名常寛, 和田知久, “畳み込み・リードソロモン連接符号の繰り返し復号法による性能向上に関する検討”, 電子情報通信学会, RCS110, 2008.
- [2] 村田真一, 岡田実, “ISDB-T 受信機の誤り訂正復号器における繰り返し復号法”, 電子情報通信学会総合大会, B-5-156, 2008.
- [3] 井上徹, “実践 誤り訂正技術”, 株式会社トリケップス, 東京, 1996.
- [4] 西村芳一, “デジタル・エラー訂正技術入門”, CQ 出版社, 東京, 2006.
- [5] ARIB STD-B31 1.5 版, “地上デジタルテレビジョン放送の伝

送方式 標準規格”, 電波産業会, 東京, 2003.

- [6] 金田 喜共, “OFDM 通信におけるエラー訂正能力向上に関する研究”, 琉球大学大学院理工学研究科, 2002.
- [7] イエルン・ユステセン, トム・ホーホルト 著, 阪田省二郎, 栗原正純, 松井一, 藤沢匡哉 訳, “誤り訂正符号入門 A Course In Error Correcting Codes”, 森北出版株式会社, 2005.

