

簡易型衛星中継器における制御信号の誤り制御について

齋木 俊輔[†] 桑村 秀嗣[†] 小川 明[†] 山里敬也[‡]

[†]名城大学理工学研究科 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501

[‡]名古屋大学エコトピア科学研究所 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

E-mail: [†] aogawa@ccmfs.meijo-u.ac.jp, [‡] yamazato@ieee.org

あらまし 本論文は、広帯域衛星アクセス通信を目指した簡易型衛星再生中継器における、ルーティング用制御信号の誤り制御に関するものである。衛星内ルーティングのための情報は、パケットの先頭にあるプリアンブル部分に置かれて差動 BPSK で送られ、遅延検波で復調される。本論文では、このような簡易再生中継器のルーティング用制御信号の誤り制御として簡易な 2 次元パリティ符号を採用する。これを軟判定繰返し復号し、その際、誤り訂正と誤り検出を併用する。そして、この場合の特性について、計算機シミュレーションによって算出した結果を論ずる。

キーワード パケット衛星通信, 制御信号の誤り制御, 2 次元パリティ符号, 繰返し復号

An error control scheme for the control signal onboard the simplified satellite repeater

Shunsuke SAIKI[†] Hidetsugu KUWAMURA[†] Akira OGAWA[†] and Takaya YAMAZATO[‡]

[†]Graduate School of Science and Technology, Meijo University

1-501 Siogamaguchi Tenpaku-ku Nagoya 468-8502, Japan

[‡]Eco Topia Science Institute, Nagoya University

Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-8603, Japan

E-mail: [†] aogawa@ccmfs.meijo-u.ac.jp, [‡] yamazato@ieee.org

Abstract This paper is concerned with performance evaluation for error control of the routing information onboard the simplified satellite repeater for broadband satellite communications. The necessary information for the onboard routing is carried on the preamble portion placed at the top of the packet and modulated with the differential binary PSK. In this paper, we adopt simplified two dimensional parity check code for the routing information onboard the simplified satellite repeater. It is decoded by iterated soft decision decoding, then the error correction is performed together with error detection. We describe the results obtained by computer simulation in terms of the block error rate.

Keyword Packet satellite communications, Error control for routing information,
Two dimensional parity check code, Iterated decoding

1. はじめに

高速で柔軟なインターネットアクセス衛星通信システムを実現するために、簡易な構成の衛星再生中継器を提案した[1]。この中継器では、受信入力が AD 変換され、蓄積されるが、データ部分の同期復調や誤り制御などの複雑な処理は行われず、地球局に任される。信号はパケット状で送られ、その情報データ部分は OFDM で変調される。衛星内ルーティングのための情報は、パケットの

先頭にあるプリアンブル部分に置かれて差動 BPSK で送られ、遅延検波で復調される。本論文では、このような簡易再生中継器の制御信号について、簡易な 2 次元パリティ符号化を採用する。これを軟判定繰返し復号し、その際、誤り訂正と誤り検出を併用する。そして、この場合の特性について評価する。

2. パケット

信号のパケットフォーマットを図 1 に示す.

PREAMBLE			
64	16	16	
CR	UW	CTRL	Information data

CR: clock recovery UW: unique word CTRL: control

図 1 パケットフォーマット

このパケットのうち, CTRL(=ルーティング用制御信号)部分の誤り制御を考える. 制御信号には, ルーティング情報, 及び, データ変調情報が含まれる. また, 変調方式は DBPSK で 16 シンボルにて構成される.

CTRL 部分は, 2 次元パリティ符号化し, 復号は対数尤度比 (Log-Likelihood Ratio) を用いた軟判定の繰り返し復号を行う. これは, 畳み込み符号のビタビ復号などに比べ復号が簡単に行え, ターボ符号や LDPC 符号のようにデータ長が長くなくとも比較的良好な特性が得られると考えられるからである. また, ハミング符号は単一誤りの訂正ができて, ブロック内に 2 つ以上誤りが生じた場合訂正不可能になってしまうため, その点からも 2 次元パリティの繰り返し復号は有効だと考えられる.

3. 2 次元パリティ符号の繰り返し復号

3.1. 2 次元パリティ符号

2 次元パリティ符号は, 4×4 の偶数パリティを使用した. つまり, 情報部分が 9 ビット, パリティ部分が 7 ビットで, 符号化率は $9/16$ となる.

3.2. 繰り返し復号 [2]

以下の説明は $N=3$ の 2 次元パリティを例にしているが, 実際には上記の通り $N=4$ の 2 次元パリティを用いてシミュレーションを行っている.

3.2.1. 尤度演算

$N=3$ 偶数パリティには次の関係がある.

$$\begin{aligned} d_i \oplus d_j &= p_{ij} \\ d_i &= d_j \oplus p_{ij} \\ d_j &= d_i \oplus p_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

この関係を対数尤度比(確からしさ)で表すために, 対数尤度比の和を定義する.

$$L(d_i \oplus d_j) \equiv \text{sgn}(L(d_i)) \cdot \text{sgn}(L(d_j)) \cdot \min(|L(d_i)|, |L(d_j)|) \quad (2)$$

ここで, $\text{sgn}(x)$ は x の符号(+/-)を返す関数である.

以上より, 情報ビットの対数尤度比はパリティビットを用いて次のように表すことができる.

$$L(d_i) \equiv \text{sgn}(L(d_j)) \cdot \text{sgn}(L(p_{ij})) \cdot \min(|L(d_j)|, |L(p_{ij})|) \quad (3)$$

$$L(d_j) \equiv \text{sgn}(L(d_i)) \cdot \text{sgn}(L(p_{ij})) \cdot \min(|L(d_i)|, |L(p_{ij})|) \quad (4)$$

3.2.2. 外部対数尤度比

パリティ符号化することによって, ある情報ビットは 2 度送られてくるものと考えることができる. 例えば d_1 は, それそのものが送られてくる他に, $d_2 \oplus p_{12}$ によっても送られてくると考えることができる. 復号時に得られる外部対数尤度比は, この後者の演算により求められる.

$$L_e(d_i) \equiv L_c(d_j \oplus p_{ij}) \quad (5)$$

また, d_i に関する事前確率を用いることで, 対数尤度比はその分確からしさが増す. なお, 式中の“+”は通常の加算である.

$$L_e(d_i) \equiv [L_c(d_j) + L(d_j)] \oplus L_c(p_{ij}) \quad (6)$$

3.2.3. 繰り返し復号の手順

L_c は通信路対数尤度比(Channel LLR), L_e は外部対数尤度比(Extrinsic LLR), L は事前対数尤度比(A posteriori LLR)を表す.

1. 受信系列から L_c を求める. +1, -1 の情報生起確率が等しいとすると,

$$L_c(r) = \frac{2}{\sigma^2} r \quad (7)$$

と表せる. ここで, r は受信ベクトル, σ^2 はガウス雑音の分散である.

2. $L(d)$ の初期値を 0 とする.
3. (6) 式より行方向の外部対数尤度比 L_{eh} を求める.
4. 外部 LLR を事前 LLR と見なし, $L(d) = L_{eh}$ とおく.
5. 3 の値を用いて列方向に L_{ev} を求める.
6. $L(d) = L_{ev}$ とおく.
7. 3~6 を十分な信頼性が得られるまで繰り返す.
8. 軟出力されたものを硬判定し, 最終的な復号結果を得る.

$$L(\hat{d}) = L_c(r) + L_{eh}(\hat{d}) + L_{ev}(\hat{d}) \quad (8)$$

また, 後述する繰り返し復号の計算機シミュレーションでは, 上記の基本となる復号の他に, 式 (9) のようにパリティビットの外部対数尤度比を求め, これも含めて更新していくものを行った.

$$L(p_{ij}) \equiv \text{sgn}(L(d_i)) \cdot \text{sgn}(L(d_j)) \cdot \min(|L(d_i)|, |L(d_j)|) \quad (9)$$

3.3. 誤り検出

衛星パケットのコントロール部分は、ルーティングに必要な情報が含まれている。そのため、もし復号後も誤りが残ったまま用いてしまうと、別の場所送到れる可能性があり、不都合が生じる。よって、誤り検出を行い、不確かなものを破棄した方が良くと考えられる。

誤り検出手法は次のようになる。まず、3.2.3 節の手順で繰り返し復号の軟出力を得る。この出力値は、行方向、および列方向の外部対数尤度比の加算によって求まっており、値の絶対値が大きいほど信頼性が高いことになる。一方、所定の回数繰り返し復号を行っても値が大きくなりえない場合、それは誤りが含まれている可能性が高い。そこで、ある閾値を定め、軟出力された情報ビットのうち、1 ビットでも閾値以下であればそれを誤り検出とする。

この手法は、本来正しく復号されたはずのブロックも、誤りとして誤検出してしまう可能性があるが、ブロック誤り率を抑えパケットの誤送を防ぐ方が重要であると考えた。

4. 計算機シミュレーション

衛星パケットのコントロール部分を 2 次元パリティ符号化し、それを繰り返し復号するものを計算機でシミュレーション、誤り率特性を評価した。

シミュレーション結果は、信号の E_b/N_0 に対するブロック誤り率で示した。

ブロック誤り率は、復号されたブロックの情報ビット 9 ビットの中に、1 ビットでも誤りがあればブロック誤りとした。これは、CTRL 部分には、パケットのルーティング情報であるため、ビット単位の誤りよりもブロック単位でどのくらい誤りが生じるかの方が、より重要になると考えたからである。

4.1. 繰り返し回数を変えた場合のシミュレーション

復号時に、対数尤度比計算の繰り返し回数によりブロック誤り率特性がどのように変わるかを調べた。

4.1.1. シミュレーション方法

まず、ランダムな送信ビット系列を生成する。その系列を 2 次元パリティ符号化し、BPSK 変調する。

ガウス雑音を付加し、それを繰り返し回数 1 回、3 回、6 回、9 回の 4 パターンで復号する。

最後にブロック誤り率を算出する。

4.1.2. シミュレーション結果

繰り返し回数を変えた場合のシミュレーション結果を図 2 に示す。

3 回繰り返しを行えば特性の向上が頭打ちになり、ほとんど変わらないことが分かった。

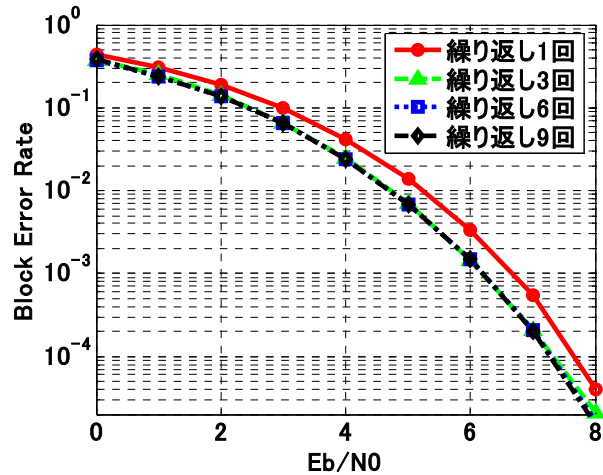


図2 繰り返し回数を変えた場合のシミュレーション結果

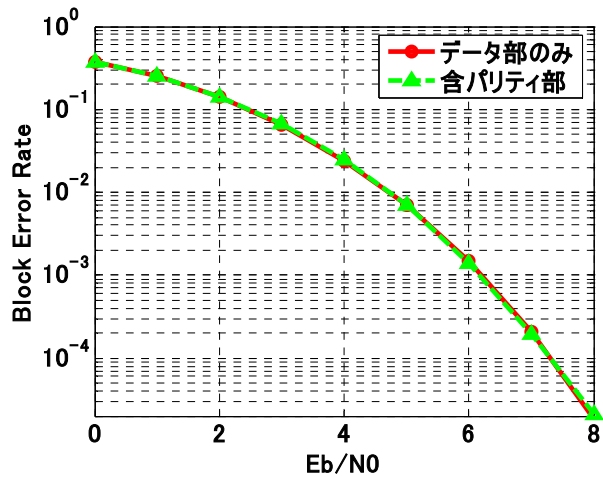


図3 繰り返す部分を変えた場合のシミュレーション結果

4.2. 繰り返す部分を変えた場合のシミュレーション

3 章で説明した基本となる手法では、情報ビットの外部対数尤度比のみを繰り返し更新していくものであった。しかし、これではパリティビットの確からしさは受信した値のまま更新されていかないことになる。そこで、パリティビットの外部対数尤度比も求め、これを含めて更新していく場合のブロック誤り率特性を調べ、情報ビットのみ対数尤度比計算を繰り返す場合と特性を比較した。

4.2.1. シミュレーション方法

4.1.1 と同様にデータ系列を作成し、符号化、変調、雑音付加を行う。

復号部分では情報ビットのみ繰り返す場合と、パリティビットも含めて繰り返す場合の 2 通りでシミュレーションを行った。また、繰り返し回数は 4.1.2 の結果を踏まえ 3 回とした。

4.2.2. シミュレーション結果

繰り返す部分を変えた場合のシミュレーション結果を図 3 に示す。

両者に大きな差がないことから、パリティ部分の対数尤度比を高めても、全体の確からしさには大きく影響しないことが分かった。

4.3. 誤り検出を行う場合のシミュレーション

誤り検出の判定閾値を変えてシミュレーションを行い、ブロック誤り率と誤り検出率(=情報を破棄する割合)の特性がどのようなになるかを調べた。

4.3.1. シミュレーション方法

4.1.1 と同様にデータ系列を作成し、符号化、変調、雑音付加を行う。

復号部分では、誤りとして検出する対数尤度比出力の閾値を1~5と変え、ブロック誤り率および誤り検出率がどのように変わるかを調べた。また、外部対数尤度比の更新は、情報ビットのみ行った。

4.3.2. シミュレーション結果

ブロック誤り率を図4に、誤り検出率を図5に示す。

判定閾値を1から5へ大きくしていくと、ブロック誤り率は、誤り検出と併用しない場合に比べて少なくとも1 [dB]向上することが分かった。しかし、正しく復号された情報も誤りとしてしまう可能性が大きくなるので誤り検出率(=情報を破棄する割合)も逆に大きくなる。

5. まとめ

本論分では、簡易再生中継器における制御信号について、2次元パリティ符号化しそれを軟判定で繰り返し復号する手法を提案し、計算機シミュレーションによってブロック誤り率特性を評価した。

復号の繰り返し回数や繰り返す部分を変えても、ブロックの確からしさに大きく影響しないことが分かった。

一方、誤り検出と組み合わせた場合、対数尤度比の閾値を大きな値に取れば、ブロック誤り率 10^{-5} で1[dB]ほど利得があることが分かった。

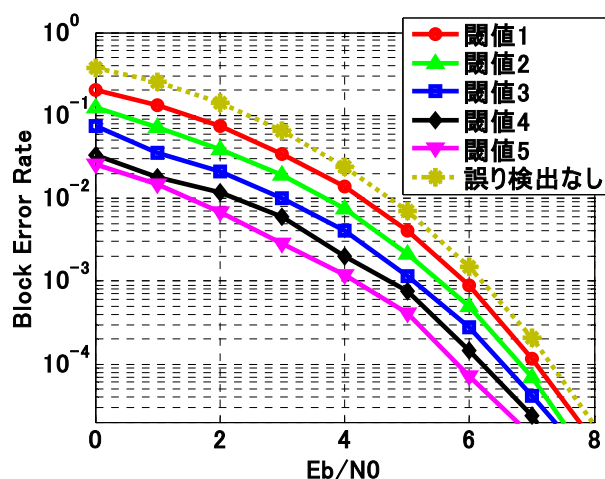


図4 誤り検出と組み合わせた場合のブロック誤り率

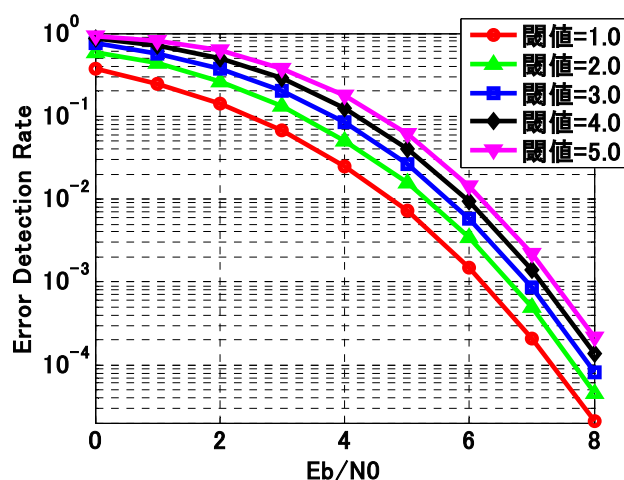


図5 誤り検出率

文 献

- [1] Hidetsugu Kuwamura et al, "Characterization of a simplified regenerative repeater for broadband satellite communications", Technical Report Of IEICE, October 2005
- [2] Bernard Sklar, "A Primer on Turbo Code Concepts", IEEE Communication Magazine, pp.94-102, December 1997