

ターボ符号用ローテーション・ブロックインタリーバの検討

廣井 満* 中島繁雄** 佐藤栄一***

(平成17年10月31日受理)

A Study on Rotation-Block Interleaver for Turbo codes

Mitsuru HIROI* Shigeo NAKAJIMA** Eiichi SATO***

We propose a rotation-block interleaver for turbo codes, which has advantage of a simple implementation as compared to conventional interleavers. The Hamming distance property and the bit-error-rate of turbo codes are examined for three types of interleaves: a pseudo-random, an S-random, and our rotation-block interleaver. We can see from our studies that the proposed rotation-block interleaver is a strong candidate among these ones when the interleaving size is less than 2000 bits.

Key words: Turbo codes, Hamming distance, Iterative decoding, Interleaver

1. はじめに

近年、強力な誤り訂正符号の1つとしてターボ符号^[1]が注目され、移動体通信、衛星通信などの無線通信システムへの適用がはかられつつある。ターボ符号に用いるインタリーバ(IL)として、単純にランダムな方式のIL(Random IL^[1])を用いると、誤り率が低い領域においてエラーフロア現象が発生する。この現象を改善するILとして、S-random IL^[2]やCode Mismatched IL^[3]が提案され、優れた特性を実現することが報告されている。しかし、これらのILは、探索的な手法で最適化を行うことにより実現されるため、交差パターンを記憶するメモリ容量の増加が避けられない欠点を有する。また、探索的な手法を用いずにS-random ILと同等の特性を実現する方式としては、Prime IL^[4]が提案されているが、その生成方法は必ずしも容易ではない。

本稿では、簡易な生成方法でエラーフロアを低減するILの開発を目的に、Rotation-block IL(R-block IL)を提案し、その生成原理を説明する。また、従来¹⁾のRandom IL, S-random IL, 及び提案するR-block ILの各方式についてエラー発生の原因となるクリティカルパターン、

* 日本精機株式会社 (元新潟工科大学大学院工学研究科 大学院生)

** 情報電子工学科 教授

*** 情報電子工学科 助教授

ハミング距離特性、ビット誤り率特性を比較評価した結果を示す。これらの結果により、R-block IL が有力な IL の 1 つであることを明らかにしている。

2. シミュレーションモデル

本稿で対象としたシミュレーションモデルを図 1 に、シミュレーション条件を表 1 に示す。変復調方式は 2 相 PSK・同期検波、通信路は AWGN 回線、ターボ符号器の要素符号器は状態数 4，生成多項式 $(1+D^2)/(1+D+D^2)$ の再帰的組織畳み込み符号器、復号法には Log-Map アルゴリズムを用いた。

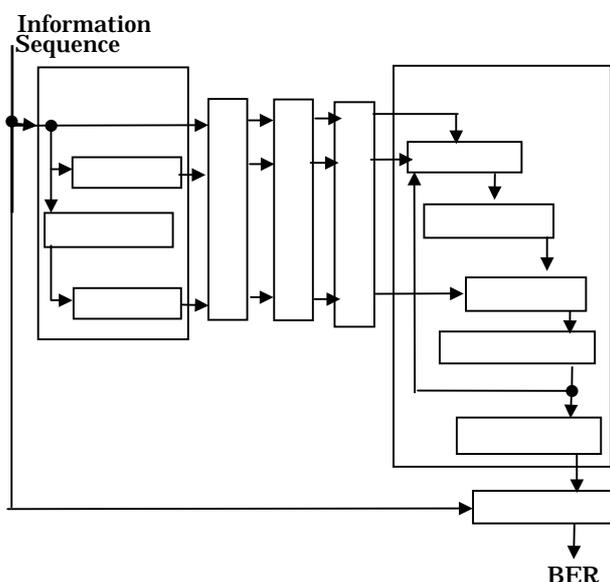


図 1 Block diagram of Turbo coder and decoder.

表 1 The conditions of simulation.

Channel	AWGN 回線
Modulation	BPSK 同期検波
Turbo coder	符号化率 : 1/2, 1/3 要素符号器 : RSC state 4
Interleaver	Random IL S-random IL R-block IL
Turbo decoder	Log-Map アルゴリズム
IL size:	500[bits]近傍 : 8 回
Iteration numbers	1000[bits]近傍 : 10 回 2000[bits]近傍 : 12 回 4000[bits]近傍 : 16 回

3. Random IL^[1]の特性と評価

Random IL(1024[bits])を用いたターボ符号の E_b/N_0 対 BER 特性をシミュレーションにより求めた結果を図 2 に示す。ここで、Random IL は、混合合同法により求めた擬似乱数を使用した。図 2 より E_b/N_0 が大きくなると BER 改善率が小さくなるエラーフロア現象が確認できる。

表 2 に図 2 に使用した Random IL を用いたターボ符号のハミング距離特性を示す。

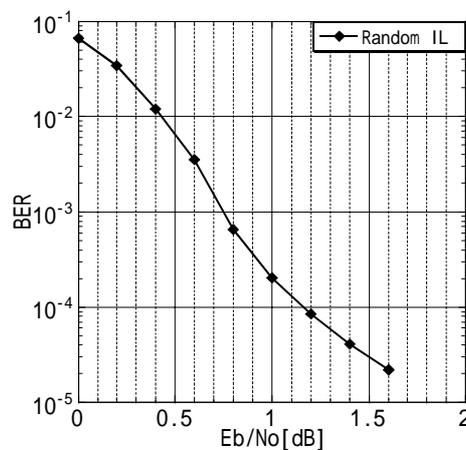


図 2 BER performance(Random IL).

表 2 より、Random IL を用いたターボ符号の最小ハミング距離は 10 である。このハミング距離 10 の符号語を生成する IL の交錯パターンの例を図 3 に示す。図 3 の交錯パターンは Random IL のクリティカルパターンと呼ばれ、ターボ符号において低い重みの符号語を生成し、エラーフロア現象の原因となる。

表 2 Hamming distance
(Random IL).

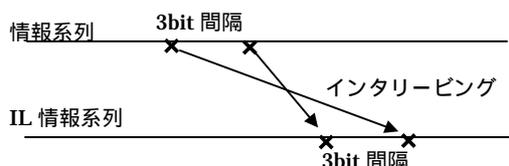


図 3 Critical Pattern(Random IL).

4. S-random IL^[2]の特性と評価

図 3 に示されるクリティカルパターンを回避するために S-random インタリーバが提案された。S-random IL は、最初に Random IL を求めた後、図 4 に示すように距離の近いビットを拡散するように、交錯パターンを探索的に並べ替えたものである。S-random IL の生成パラメータである S 値はビットの拡散の大きさに対応する。

S-random IL を用いたターボ符号において、S 値と BER の関係についてシミュレーションにより求めた結果を図 5 に示す。ここで S=0 は Random IL に対応する。図 5 において符号化率 1/2 は破線、符号化率 1/3 は実線で示してある。なお、S-random IL の生成については S 値の増加によってその計算量が指数的に増加するため、S 値の上限を 24 とした。図 5 より S 値が 0~15 の範囲では符号化率 1/2, 1/3 とともに S 値の増加に伴って BER が減少していき、

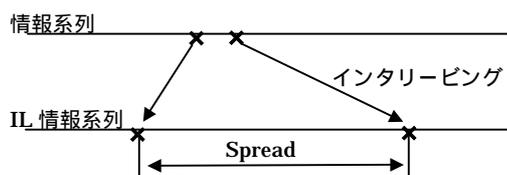


図 4 Interleaving pattern
(S-random IL)

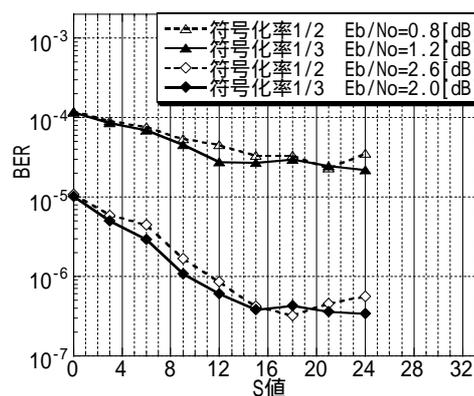


図 5 Relation of S versus BER.

S 値が 15 以上では S 値の増加による BER の改善が認められなくなることが確認できる。図 6 に S-random IL 及び Random IL を用いたターボ符号の E_b/N_0 対 BER 特性の比較を示す。なお、S-random IL の S 値は 24 とした。図 6 より、S-random IL を用いたターボ符号はエラーフロア現象を改善していることがわかる。表 3 に S-random IL を用いたターボ符号のハミング距離特性を示す。表 3 より、S-random IL を用いたターボ符号の最小ハミング距離は 20 となり、Random IL を用いた場合に比べて大きくなることわかる。これは S-random IL が Random IL のクリティカルパターンを回避できていることを表わす。図 7 に、S-random IL を用いたターボ符号においてハミング距離 20 の符号語を生成する交錯パターンの例を示す。

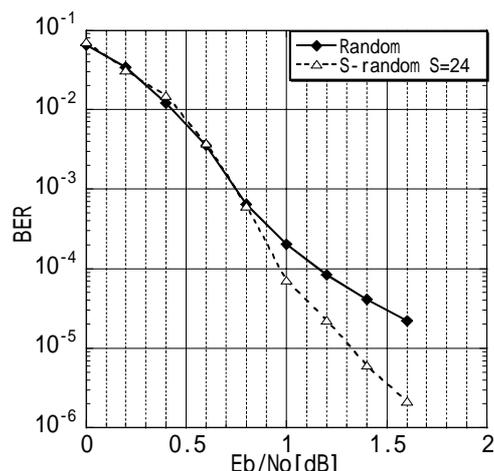


図 6 BER performance (S-random IL).

これは S-random IL が Random IL のクリティカルパターンを回避できていることを表わす。図 7 に、S-random IL を用いたターボ符号においてハミング距離 20 の符号語を生成する交錯パターンの例を示す。

表 3 Hamming distance (S-Random IL).

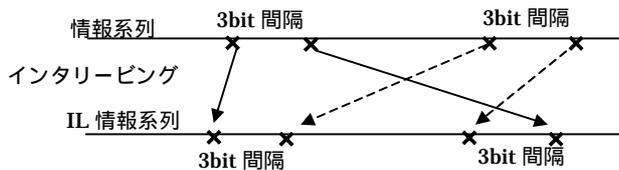


図 7 Critical Pattern(S-random IL).

S-random IL では、その生成条件により単独的な Random IL のクリティカルパターンの成立は回避される。しかし、図 7 に示すように複合的に Random IL のクリティカルパターンを成立してしまう。この交錯パターンを S-random IL のクリティカルパターンと呼ぶ。この交錯パターンは S 値の大きさに関わらず成立するため、この事が図 5 に示したように S 値がある程度大きくなると S 値の増加による BER の改善が認められなくなると考えられる。

5. R-block IL の生成方法と特性評価

(1)生成方法

提案する R-block IL の生成方法を、IL サイズ $N(=m \cdot n)$ について、図 8 を用いて説明する。図 8 の(a)Step 1 は情報系列を (m,n) 配列表に横方向に書き込むことを示し、(b)Step 2

は書き込まれた配列表の情報ビット番号を各列毎に回転することを示し、(c)Step 3 は(b)Step 2 で得られた配列表の情報ビット番号を横方向に読み出す事を示す。この3つのステップにより、R-block IL を生成する事ができる。次に、図8の(b)Step2 の各列の回転ビット数(回転量)について考察する。回転量が不適切に設定されると、Random IL や S-random IL のクリティカルパターンが発生し、BER の改善がはかられなくなる。ここで、R1 を i 列目の回転量、R2 を (i+3) 列目の回転量、R3 を (i+6) 列目の回転量、R4 を (i+9) 列目の回転量とする。これらの R1 から R4 の回転量に対し、次式の関係式が成立すると、図9のクリティカルパターンが発生する。

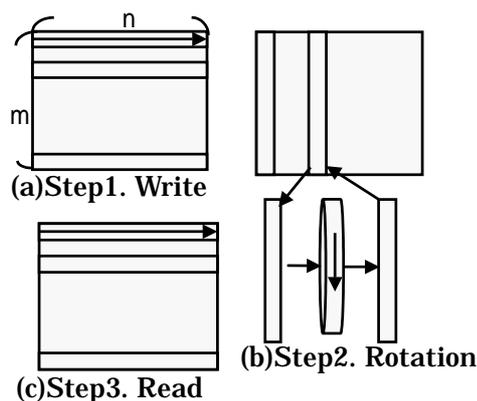


図8 Method of R-block IL.

$$\begin{aligned}
 2 \times |R1 - R2| &= m & (1): & & |(R2 - R1) + (R3 - R1)| &= m \text{ or } 0 & (2): \\
 |(R1 - R2) + (R3 - R2)| &= m \text{ or } 0 & (3): & & |(R1 - R3) + (R2 - R3)| &= m \text{ or } 0 & (4): \\
 R1 - R2 + R3 - R4 &= 0 \text{ or } |m| & (5): & & R1 - R2 - R3 + R4 &= 0 \text{ or } |m| & (6): \\
 R1 + R2 - R3 - R4 &= 0 \text{ or } |m| & (7): & & & &
 \end{aligned}$$

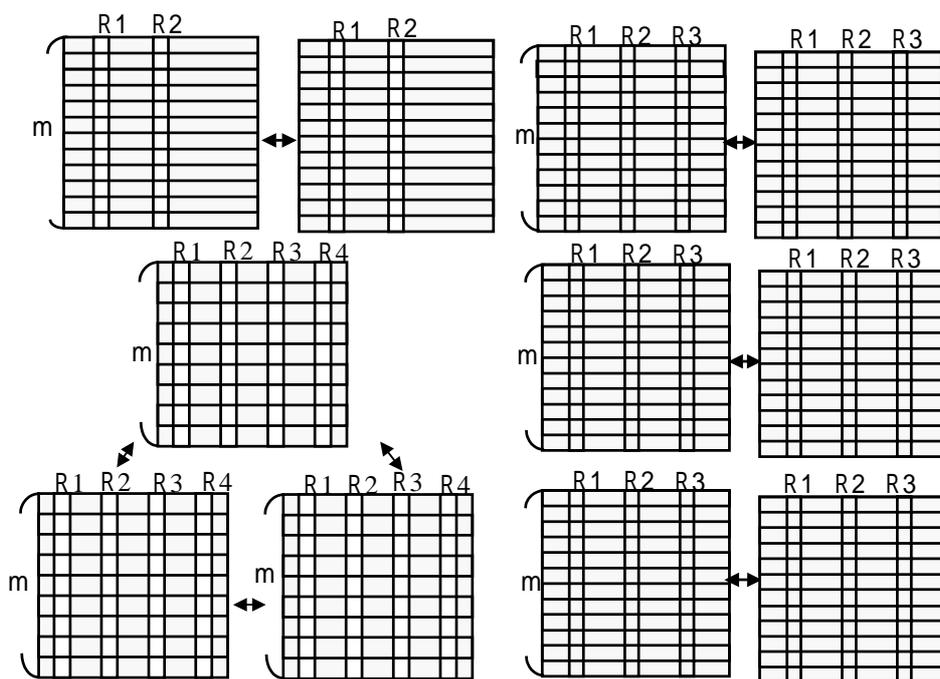


図9 S-random IL critical pattern in R-block IL

本 IL の設計においては、上式を満足しないように各列の回転数を設計する事が重要である。しかしながら、IL サイズ $N = m \cdot n$ ビットに対して、上式の条件を満足しない回転数を設定することは一般に不可能である。このため、以下の検討では $2(n-1) < m$ を満足する配列表を選択しクリティカルパターンの個数を減らす方法を用いている。

(2)R-block IL の特性

R-block IL を用いたターボ符号の BER 特性を計算機シミュレーションにより解析し、Random IL 及び S-random IL を用いたターボ符号の BER 特性との比較を行った結果を図 10 に示す。IL サイズは 500、1000、2000、4000[bits]近傍を対象とした。

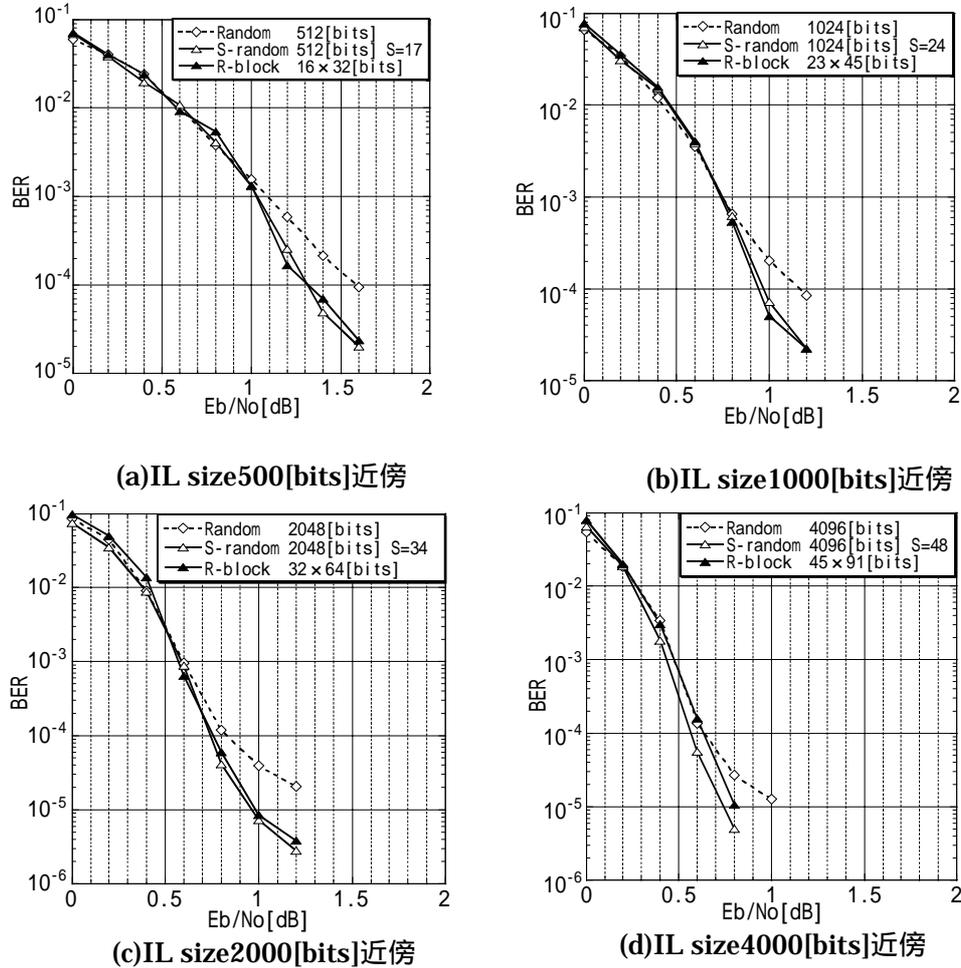


図 10 BER performance

シミュレーション結果より、IL サイズが 2000[bits]以下の時、R-block IL を用いたターボ符号は、S-random IL を用いたターボ符号と同等の BER 特性となることが確認できた。しかし、IL サイズが 2000[bits]を超えると、R-block IL を用いたターボ符号は S-random IL を用いたターボ符号に比べて BER 特性が劣化することが分かった。表 4 から表 6 に各 IL のハミング距離特性を示す。表より Random IL 及び S-random IL を用いたターボ符号は IL サイズが変化しても最小ハミング距離となる符号語の個数に大きな変化がないことが分かる。しかし、R-block IL を用いたターボ符号では、IL サイズの拡大に比例して最小ハミング距離となる符号語の個数が増加していることが確認できる。この事が、IL サイズを拡大すると R-block IL を用いたターボ符号が S-random IL を用いたターボ符号に比べ

BER 特性が劣化する原因となっていると考えられる。また、R-block IL を用いたターボ符号において、最小ハミング距離となる符号語が IL サイズ拡大に伴い増加する現象は、R-block IL 生成時に行う回転操作による交錯パターンの一様性が原因となっている。そのため、大きな IL サイズに対応するためには回転操作ではなく、疑似乱数によるマッピング等を検討する必要があると考えられる。

表 4 Hamming distance(Random IL).

最小ハミング距離	個数 (IL サイズ 2048)	個数 (IL サイズ 8192)
10	4	4

表 5 Hamming distance(S-random IL).

最小ハミング距離	個数 (IL サイズ 2048)	個数 (IL サイズ 8192)
20	17	20

表 6 Hamming distance(R-block IL).

最小ハミング距離	個数 (IL サイズ 2048)	個数 (IL サイズ 8192)
32	2024	11230

6. まとめ

簡易な生成方法でエラーフロアを低減することを可能とするターボ符号用 IL として、R-block IL を提案し、IL サイズが 2000[bits]以下の条件において R-block IL を用いたターボ符号は S-random IL を用いたターボ符号と同等の BER 特性を示すことを明らかにした。また、S-random IL において、最適な S 値が存在するのか、また S の増加に伴って BER の改善が見られるかどうかをモンテカルロシミュレーションによって検討した。その結果、S 値がある程度大きい場合 ($S > 15$) には、S 値による BER の変化があまり大きくないことを示した。

参考文献

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes(1)," in Proc. ICC'93, May 1993, pp. 1064-1070
- [2] S. Dolinar and D. Divsalar, "weight distribution for turbo codes using random and nonrandom permutations," TDA Progress Report 42-122, pp. 56-65, August 1995
- [3] Wen Feng, Jinhong Yuan, Branka S. Vucetic, "A code-matched interleaver design for turbo codes", IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 6, Jun 2002 pp. 926-937
- [4] 須田博人, 渋谷彰, 今井秀樹, "素体を利用したターボ符号用インタリーバ", 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J85-A No. 11 pp. 1168-1181
- [5] 廣井満, 村井敦志, 中島繁雄, 佐藤栄一, "ターボ符号における S ランダムインタリーバに関する検討", 2003 年情報電子通信学会ソサエティ大会 A-6-8
- [6] 廣井満, 山岸邦彦, 中島繁雄, 佐藤栄一, "搬送波位相誤差のターボ符号への影響", 2003 年電子情報通信学会信越支部大会 G2