

ターボ形等化器の収束性解析

Convergence Analysis of Turbo Coding, Decoding and Equalization Under Fading

竹村 守章[†] 中山 謙二[‡] 平野 晃宏[‡]
Moriaki Takemura Kenji Nakayama Akihiro Hirano

[†]金沢大学大学院 自然科学研究科 電子情報システム専攻
Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa Univ.
[‡] 金沢大学大学院 自然科学研究科 電子情報科学専攻
Division of Electrical Engineering & Computer Science, Kanazawa Univ.
E-mail: nakayama@t.kanazawa-u.ac.jp

あらまし

誤り訂正符号において、最尤復号を繰り返し行うターボ符号は通信路において誤りなく符号を送ることができる限界であるシャノン限界に迫る誤り率を達成する符号として注目されている。しかし、ターボ符号を実環境において応用する場合は、フェージング通信路による符号間干渉や、ターボ符号の特徴である繰り返し復号による計算量の大きさが問題である。本稿ではフェージング通信路がターボ符号復号の誤り訂正精度に及ぼす影響について解析する。

ABSTRACT

In a field of error correcting encoding and decoding, a turbo encoding, in which maximal likelihood decoding is repeated, is a hopeful approach, which has possibility of exceeding the upper bound proposed by Shannon for transmitting symbols in a communication channel without any transmission error. When the turbo encoding and decoding is applied to real world, inter symbol interference caused by fading, a large number of computations due to the repetition process and so on should be overcome. In this paper, effects of fading channel on accuracy of the turbo encoding and decoding is analyzed.

1 まえがき

W-CDMA や CDMA2000 といった第三世代 (3G) 移動通信システムは最大で数百 bps から数 Mbps の無線

区間信号伝送を可能とし、これによって移動通信環境においてもマルチメディア通信が実現できる。

フランスの C.Berrou らにより提案されたターボ符号 [1] は、通信路において誤りなく符号を送ることができる限界であるシャノン限界に迫る誤り率を達成する符号として、ターボ符号に関する研究が盛んに行なわれている。従来の技術と比較して特性を犠牲にせずにアルゴリズムの複雑さの大幅低減を可能にするターボ符号の復号の原理を導入し、それにより特性の改善とアルゴリズムの複雑さの低減を図ることが試みられている。

ターボ符号復号の原理を導入したターボ形等化器は、信号雑音比が小さい通信が要求される深宇宙通信、次世代移動通信などへの応用に検討されている。

2 Turbo 符号

2.1 Turbo 符号器

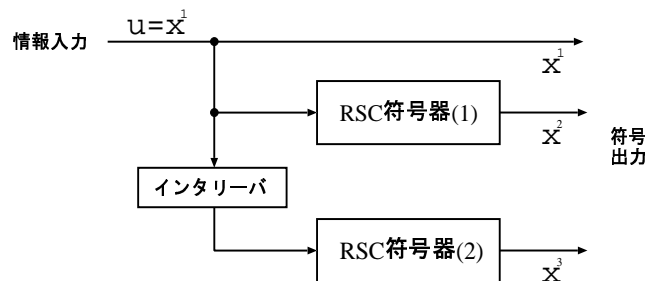


図 1: Turbo 符号器の構成

ターボ符号器はその基本要素符号器の並列接続に特徴があり、図 1 のターボ符号器では情報系列に対し、2 個の RSC (Recursive Systematic Convolutional: 再帰

的組織畳み込み) 符号器 (図 2) が並列接続されている。この符号化方式を並列接続符号化といい、ターボ符号に用いられる符号化器として実現される。

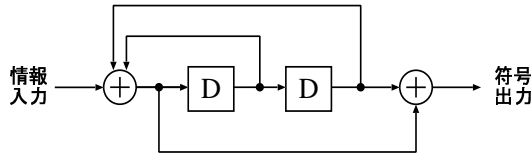


図 2: RSC 符号器の構成例

情報ビット系列 $u (= x^1)$ は RSC 符号器 1 に入力され、パリティビット系列が作られる。また、同じ情報ビット系列はインタリーバによる符号の並び替え処理のあと、その出力 u' を RSC 符号器 2 へ送る。符号の並び替え処理により、通信路における符号の連続的な誤りを防ぐことが可能となる。

ここで通信路入力を $\{x^1, x^2, x^3\}$ とする。

2.2 Turbo 復号器

通信路入力 $\{x^1, x^2, x^3\}$ に対する復号器入力を $\{y^1, y^2, y^3\}$ とする。SISO (Soft Input Soft Output: 軟入力軟出力) 復号器 1 は、ターボ符号器における RSC 符号器 1 に関連付けられており、SISO 復号器 2 においても同様である。

それぞれの復号器において SISO を行なうことにより、従来の硬判定硬出力と比較して尤度を伝搬するため、強力な誤り訂正を可能としている。

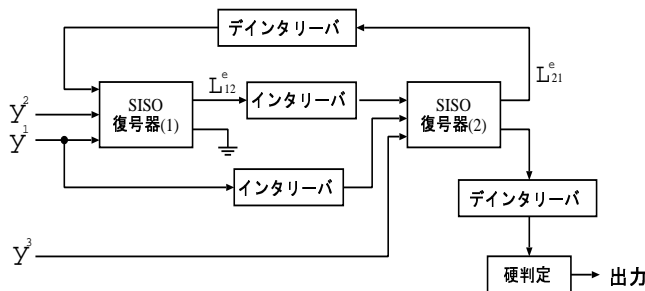


図 3: Turbo 復号器の構成

SISO 復号器 1,2 は、それぞれ最尤復号法である MAP アルゴリズムによる復号処理が行なわれ、外部値 (シンボルの信頼度の増分) が出力される。

$$\begin{aligned}
 \underbrace{L(u_k)}_{\text{事後値}} &= \log \frac{P[u_k = +1 | \mathbf{y}]}{P[u_k = -1 | \mathbf{y}]} \\
 &= \log \frac{p[\mathbf{y} | u_k = +1]}{p[\mathbf{y} | u_k = -1]} + \log \frac{P[u_k = +1]}{P[u_k = -1]} \\
 &= \underbrace{L_c y_k^s}_{\text{通信路値}} + \underbrace{L^e(u_k)}_{\text{事前値}} + \underbrace{L^e(\hat{u}_k)}_{\text{外部値}}
 \end{aligned}$$

ここで事前値とは前の復号器から与えられた u_k についての値、外部値とは後の復号器に通すことができる値を表している。

外部値は前方繰り返し演算 α 、後方繰り返し演算 β 、状態遷移確率 γ を用いて次式で表せる。

$$L^e(\hat{u}_k) = \log \left(\frac{\sum_{S+} \tilde{\alpha}_{k-1}(s') \cdot \gamma_k(s', s) \cdot \tilde{\beta}_k(s)}{\sum_{S-} \tilde{\alpha}_{k-1}(s') \cdot \gamma_k(s', s) \cdot \tilde{\beta}_k(s)} \right)$$

α, β, γ の求め方のフローチャートを以下のように表すことができる。

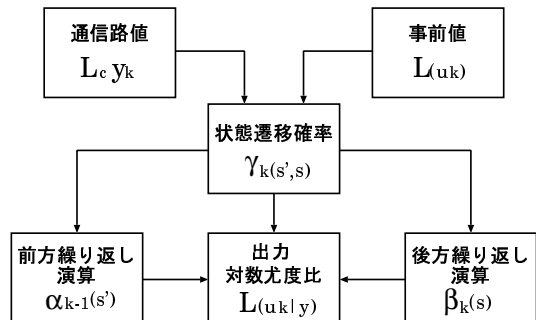


図 4: MAP アルゴリズムの操作フロー

外部値の計算は図 5 のように前方演算 α 、後方演算 β 、状態遷移確率 γ の積和となる。

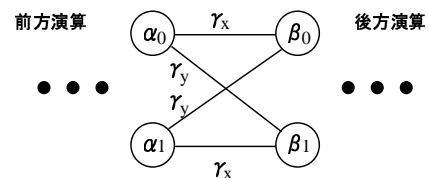


図 5: 外部値算出

$$L^e(0) = (\alpha_0 \beta_0 + \alpha_1 \beta_1) \gamma_x$$

$$L^e(1) = (\alpha_0 \beta_1 + \alpha_1 \beta_0) \gamma_x$$

MAP アルゴリズムはトレリスダイアグラム上で前方演算 α ・後方演算 β により構成されており、挟み込むことで尤度を算出する(図6)。ターボ復号において尤度の算出を全ての符号ビットで行う。

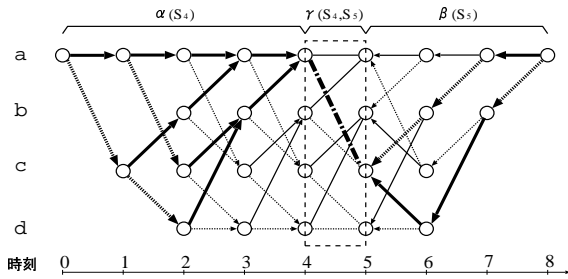


図 6: MAP アルゴリズム

外部値が、インタリーバで符号化器と同様の配列に並べ替えられ、事前値(図3: L_{12}^e)としてSISO復号器2に入力される。第1回目の繰り返しでは、復号器2での復号が行われていない。SISO復号器2は、同じくインタリーバで並べ替えられた情報ビットに対応した受信信号と事前値が入力され復号処理を行ない外部値(図3: L_{21}^e)を出力する。これは、符号化器のインタリーバに対応するデインタリーバでインタリーバによる並べ替えを戻す操作を受け、事前値としてSISO復号器1に入力され、繰り返し復号が行なわれる。

数回の繰り返し後、復号器2は、対数事後確率比として定義される事後値を

$$\hat{u}_k = \text{sign}(L(u_k))$$

で表される硬判定(ビット本来の値に判定)することで、最終判定結果を出力する。

3 シミュレーション

信号雑音比(SNR)は、

$$\text{SNR(dB)} = 10 \log \frac{1}{2\sigma^2}$$

となる。ここで σ^2 は分散である。

ビットエラー率(BER)は

$$\text{BER} = \frac{\text{ビットエラー数}}{\text{ビット総数}}$$

で計算する。

3.1 雑音のみを加えた状態の特性

情報ビットを400ビットを符号器、復号器を介した出力のエラー数を数える。同じシミュレーションを繰り返

し、そのエラー数の和が15を越えるまで行って、その和からビットエラー率を求める。シミュレーション条件を以下に示す。

- 情報ビット数 : 400
- 復号方法 : log-MAP
- RSC 符号器 : $g_1 = [110]$, $g_2 = [111]$ (図2)
- 符号化率 : 1/2 (puncture)
- インタリーバ : S-random

インタリーバは情報ビット数と同サイズのものを用いた。RSC符号器は遅延器を増すほど特性が良くなるが、その改善量は1dB未満となるため、計算量を小さくするため上記の符号器を用いた。図3の $\{y^1, y^2, y^3\}$ に白色雑音のみを付加した場合において、復号繰り返しを5回まで行なった時の特性を示す。(図7)

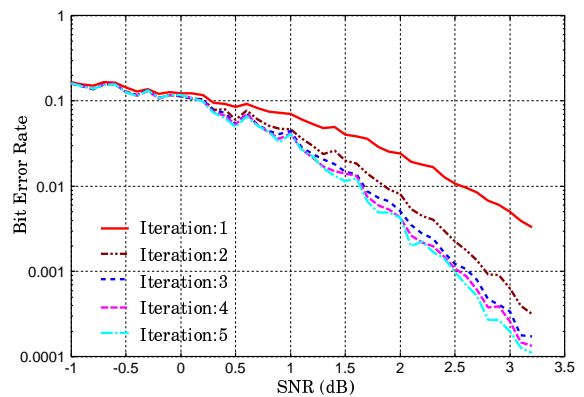


図 7: ターボ符号の BER 特性 1

繰り返しの回数が増すほど、ビットエラー率がよくなっている。ターボ復号の繰り返しを5回程度で特性の改善は小さくなる。

ターボ符号は復号器(1),(2)のそれぞれの他の軟入力軟出力による不完全な復号出力で動作しており、それによって繰り返し回数が増すとともにBER特性が改善されていることが認められる。

3.2 フェージング下における特性

通信路において、特に移動体通信の場合は受信器が移動していることと建物などによる反射波のため符号間干渉(ISI)が生じ、ビットエラー率が悪化してしまう。3.1のシミュレーション条件に加えて、以下の値のインパルス応答を符号に畳み込み、シミュレーションを行

なった。

[0.01 0.08 -0.126 -0.25 0.7047 0.25 -0.02 0.016 0.0]

n 時間における受信信号 $y(n)$ は次のように表すことができる。

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} b(n-l)h(n;l) + \sigma v(n)$$

ここで $n = 0, 1, \dots, N - 1$ (N =ブロックサイズ) であり, $b(n)$ は送信シンボル, $h(n;l)$ はチャネルタップ重み係数, $v(n)$ は雑音である。

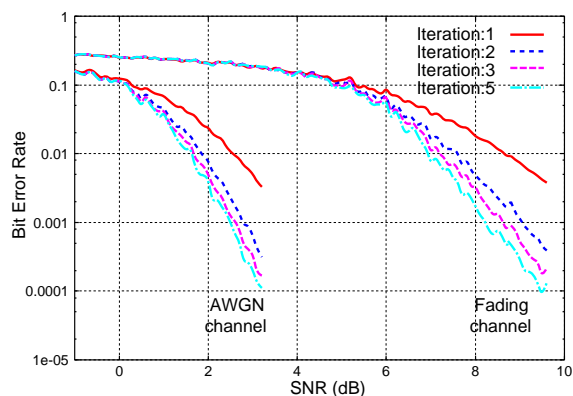


図 8: ターボ符号の BER 特性 2

符号間干渉がない BER 特性 (AWGN のみ) と比較して, フェージング通信路におけるターボ符号の特性は, 繰り返し復号によりビットエラー率は改善されるが, 著しく特性が悪化することがわかる。

3.3 Rayleigh フェージング

無相関な Rayleigh フェージング, Jake チャネルモデルの Rayleigh フェージングにおけるターボ符号の BER 特性を調べる。図 9, 図 10は各フェージングの振幅の波形である。

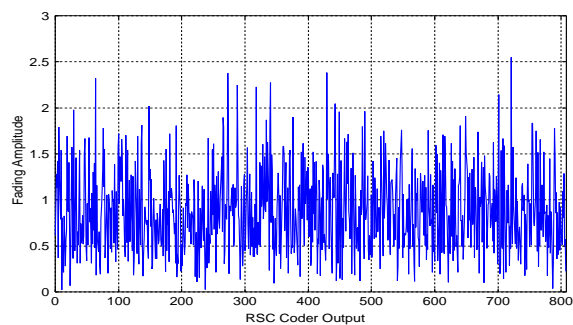


図 9: Rayleigh フェージング振幅

Jake チャネルモデルのシミュレーション条件を次のようにした。

- 移動体の速度 : 60mph
- キャリア周波数 : 2×10^9
- サンプル間隔 : 0.0001

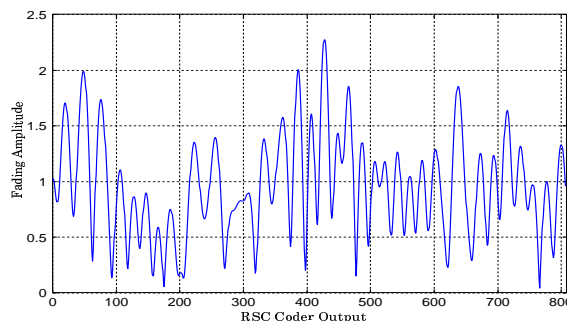


図 10: Jake モデルフェージング振幅

この値を情報ビット数をターボ符号化したブロック長の符号に乗算し, 白色雑音を付加してターボ復号を行った結果は図 11となった。

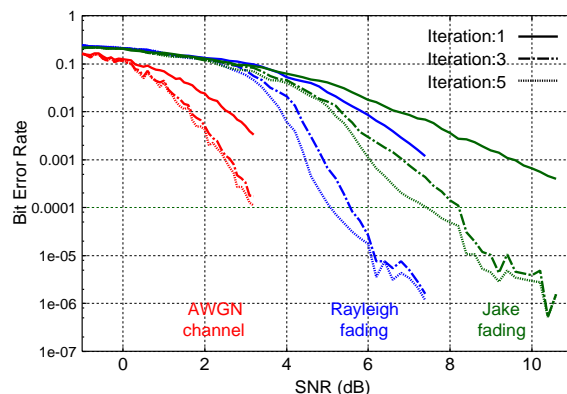


図 11: ターボ符号の BER 特性 2

Jake チャネルモデルのフェージング環境下において BER 特性は非常に悪くなった。ターボ符号を移動体通信において用いる場合, 高速な移動による厳しい干渉を受けることが考えられるので, それによる信号の破壊を防ぐことが求められる。

4 ターボ等化

4.1 SC/MMSE 等化器

符号間干渉 (ISI) 成分を除去し, 良好な BER 特性が得られるのが SC/MMSE (Soft Cancel followed by Minimum Mean Square Error) 等化器である [3]。

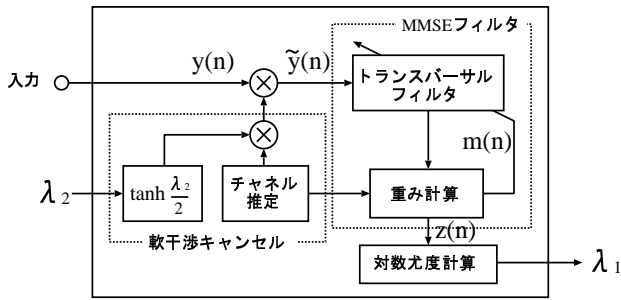


図 12: SC/MMSE

軟干渉キャンセル部でISI成分を低減し、MMSE フィルタ部で残留 ISI 成分を除去する。このエコライザは、図 3 の SISO 復号器 (1) の部分に組み込まれる。

パイロットシンボルによるチャネル推定をし、その特性 H を $\tanh(\lambda_2/2)$ で得られたビットの期待値で畳み込むことにより ISI の軟キャンセルができる。その畳み込んだ値を受信信号 $y(n)$ と差し引くことにより、信号と残留符号間干渉と雑音が算出できる ($\tilde{y}(n)$)。この $\tilde{y}(n)$ を MMSE フィルタによって残留符号間干渉成分を減少させる。MMSE フィルタ出力 $z(n)$ から対数尤度比計算した λ_1 を図 3 の復号器 (2) に送って MAP 復号を行ない、以下 2.2 の復号法と同様に繰り返す。

4.2 チャネル推定

チャネル推定精度をアルゴリズムや構成の違いについて調べた。チャネルのインパルス応答は 3.2 と同様の値を用いた。

RLS アルゴリズムを用いたチャネル推定において、SNR を固定し忘却係数 λ を変化させた場合と、 λ を固定で SNR を変化させた場合は以下になる。

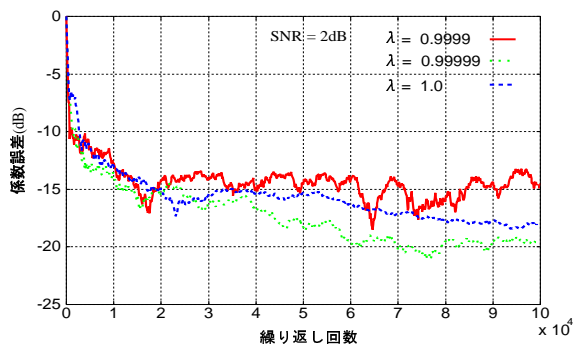


図 13: RLS アルゴリズムによるチャネル推定精度 1

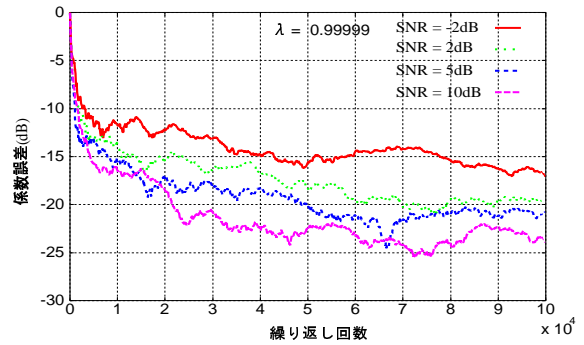


図 14: RLS アルゴリズムによるチャネル推定精度 2

NLMS アルゴリズムを用いたチャネル推定において、SNR を固定しステップサイズ μ を変化させた場合と、 μ を固定で SNR を変化させた場合は以下になる。

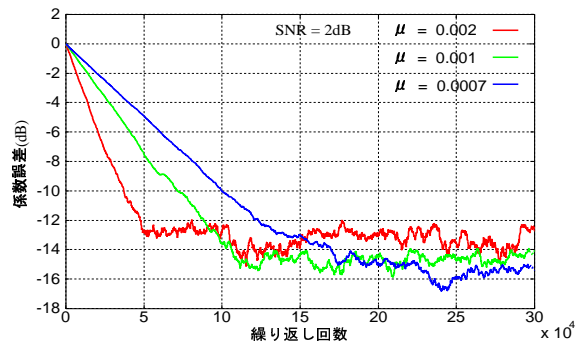


図 15: NLMS アルゴリズムによるチャネル推定精度 1

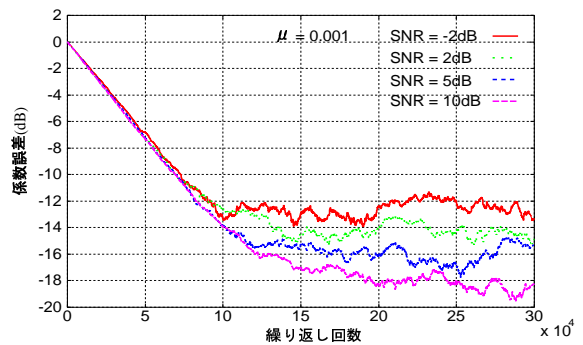


図 16: NLMS アルゴリズムによるチャネル推定精度 2

いずれの場合においても推定精度に大きな差はなかった。ターボ等化に適用する場合は計算量が小さく収束の速いものを用いれば良いと考えられる。

5 むすび

ターボ符号のフェージングによる影響を解析した。特に移動体通信にターボ符号を応用した場合は、受信器移動による厳しいフェージングによる信号の破壊を受け、特性が著しく悪くなってしまう。実環境におけるターボ符号の適用は、雑音の影響よりも、符号間干渉による信号の破壊の影響が大きい。厳しい環境下における時変モデルによるターボ等化を行い、良好な BER 特性を得ることが今後の課題である。

参考文献

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes", Proc. 1993 Int. Conf. Comm., pp.1064-1070.
- [2] Xiaodong Wang, *Member*, "Iterative (Turbo) Soft Interference Cancellation and Decoding for Coded CDMA" IEEE Transactions on Communications, Vol.47, No.7, July 1999
- [3] Daryl Reynolds, Xiaodong Wang, "low Complexity Turbo-Equalization for Diversity Channels" Electrical Engineering Department, Texas A&M University
- [4] 松本正, "無線信号処理の新しい流れ -ターボ原理とその広帯域移動通信への応用-", SITA 情報理論とその応用学会ニューズレター No. 44, pp. 8-14, July 2002