

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760289
 研究課題名（和文） ターボ符号を用いる通信システムの性能評価と最適設計に関する研究
 研究課題名（英文） A study on performance evaluation and design scheme for communication systems with turbo codes
 研究代表者
 吉川 英機（YOSHIKAWA HIDEKI）
 東北学院大学・工学部・准教授
 研究者番号：60259885

研究成果の概要：

通信路の状態が劣悪な環境においては、通信システムに畳込み符号を適用した誤り性能改善効果について理論的には明らかにされていない。本研究では、まず、ターボ符号の復号に用いられる Max-log-MAP 復号法を用いた畳込み符号の誤り率の厳密解析を行った。次に、畳込み符号を並列接続するターボ符号の誤り性能評価を行うために、畳込み符号の重み分布の一般式を導出し、ターボ符号のインターリーブに依存しない形の誤り性能解析結果を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	120,000	2,420,000

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：情報通信工学、移動体通信

1. 研究開始当初の背景

誤り訂正符号の一つである畳込み符号は衛星通信や移動体通信において不可欠な基盤技術であり、応用面では幅広い研究が行われている。しかし、その通信品質の改善効果は通信路の状態が良好な場合を除いて理論的にはあまり明らかにされていない。また、最近ではターボ符号をはじめとする繰り返し復号を用いる符号の有効性が注目されて

おり、次世代移動体通信におけるキーテクノロジーとなっている。しかし、ターボ符号は畳込み符号を基礎としているため、繰り返し符号を用いる通信システムの厳密な性能評価法や最適設計法は知られていない。

2. 研究の目的

通信システムの設計のためには誤り訂正符号の適用が有効となる領域における性能

評価が不可欠であるが、現状ではシミュレーション評価に依存せざるを得ず、低SN比領域における最良の誤り訂正符号の構成法は知られていない。

そこで、成果報告者は通信路の状態に関わらない畳込み符号の性能解析法の提案とその解析結果を得ることを目的とした研究を行い、符号理論の基礎研究における課題の一つである畳込み符号の誤り改善効果を理論的に明らかにしたうえで、畳込み符号を基礎とする誤り訂正技術を適用した次世代移動体通信システム等の通信品質の評価や、最適な設計を実現する理論体系の確立を目指すべく研究を続けてきた。

3. 研究の方法

成果報告者は、本研究に着手する以前に畳込み符号にビタビ復号を適用した場合の誤り性能解析についての成果を報告しており、学会論文誌や国内外で発表している。この手法を基礎として、本研究ではターボ符号の要素復号器に適用される Max-log-MAP 復号法の誤り率解析を行える。

この解析手法は、畳込み符号の復号で用いる状態メトリックと呼ばれる値の確率密度関数の反復演算により確率密度関数を収束させて誤り領域で積分することにより誤り率を得る方法である。しかし、この手法は畳込み符号の拘束長が長くなると解析に必要な計算量が急激に増大するが、拘束長が3までの値であれば比較的容易に導出することができることを確認している。

次に、誤り訂正符号の性能解析法として、符号語の重み分布による手法が広く知られているが、任意の符号長の重み分布を導出することは困難であり、これまで、ごく限られた符号長の短い符号の解析報告のみが行われてきた。本研究では畳込み符号の符号器の状態遷移行列 P を用いた次の式 (1) に基づく重み分布 $A(w)$ の解析を行った。

$$A(w) = IP^L I^T \quad (1)$$

ここで、 $A(w)$ はハミング重み w の符号語数であり、 L は情報記号の長さ、 I は単位行ベクトル、 I^T は単位列ベクトルである。しかし、上式の方法では重み分布の計算量は符号長は L に依存することになるが、 L を変化させたときの各重みの変化量に注目したときに一般式で表せる場合があることを見出し、符号長に依存しない形の重み分布が得られることを示した。これを用いれば、複数の

符号を組み合わせさせた接続符号やターボ符号の性能評価に適用できる。

4. 研究成果

まずはじめに、拘束長が2, 3の畳込み符号に Max-log-MAP 復号を適用した場合における解析による誤り率の結果について述べる。拘束長が2の畳込み符号において、受信側で硬判定復号を適用した場合はビット誤り率が次の式 (2) のように簡単な数式で表せることを発表し、この結果は [雑誌論文] ④に掲載されている。

$$P_b = \frac{q^2(7-6q+9q^3-12q^4+4q^5)}{(1+3q^2-2q^3)^2} \\ = 7q^2 - 6q^3 - 42q^4 + O(p^5) \quad (2)$$

ここで、 q は2元対称通信路における記号反転確率を示している。また、拘束長が3の畳込み符号において、受信側で軟判定復号を適用した場合のビット誤り率を解析結果をシミュレーションと比較した性能評価を図1に示す。これは [雑誌論文] ②の論文に掲載されている結果である。ここで、横軸は信号対雑音(SN)比で縦軸は誤り率を表す。通信路の状態に関わらず性能解析が行えることが確認できる。より、拘束長が長い畳込み符号についての解析結果は今後の課題として現在も研究課題の一つとしている。

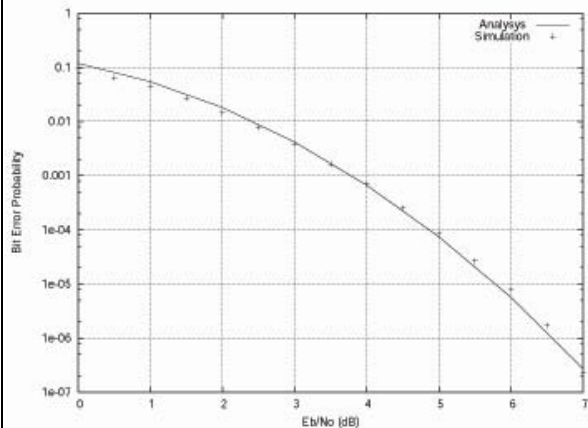


図1 : Max-log-MAP 復号を適用した畳込み符号の誤り性能 (拘束長3)

次に、畳込み符号の重み分布の導出結果と、それを用いた誤り性能評価の結果についてを示す。拘束長が短い場合は長さ x の関数として一般式で与えられることを示している。一例として拘束長が2の畳込み符号の重み分布は式 (3) で与えられることを [学会発表] ①③において報告している。

$$A_{w,h}^{(2)}(x) = \begin{cases} \binom{w-1}{s-1} \binom{x-w+1}{s} & \text{if } w = h - 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 w は符号語の入力ハミング重み、 h は出力ハミング重みである。このように、長さ x の関数となれば複数の符号を接続した場合にもインターリーブのサイズに依存せず重みが得られるので、性能評価の計算量が符号長に依存しない。同様に、拘束長が3の畳込み符号や再帰的組織畳込み符号などの畳込み符号の解析結果を得ており、これらを直列接続、および、ターボ符号のように並列接続したトータルの符号の重み分布 $A_{w,h}^C(x)$ は式 (3) のような要素符号の重み分布を用いて次の式 (4) で得られる。

$$A_{w,h}^C(x) = A_{w,h}^2 / n C_w \quad (4)$$

このように導出した重み分布を用いてターボ符号の誤り性能の上界式を解析した結果とシミュレーション結果と比較した結果を図2に示す。これは [学会発表] ①⑥において報告しているものである。インターリーブのサイズ x を256から65536の範囲で変化させて、要素符号として拘束長が3の再帰的組織畳込み符号を採用したものであり、縦軸がビット誤り率、横軸はSN比を示している。また、実線は数値解析により求めてビット誤り率、点はシミュレーションのビット誤り率である。

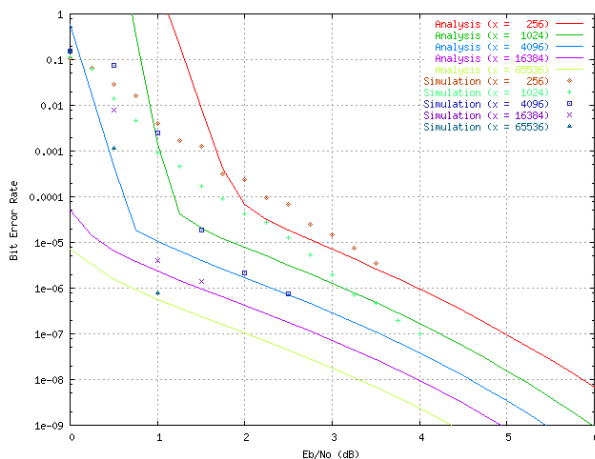


図2：ターボ符号における誤り性能結果 (要素符号：拘束長3の畳込み符号)

この図より、ターボ符号の特性であるインターリーブ利得やエラーフロアがインターリーブサイズ、つまり符号長によらず近似できていることが確認できる。これらの解析手法はターボ符号だけでなく、直列接続符号においても同様に得ることができ、この結果については [学会発表] ③で報告した。

拘束長が4を超える場合については重み分布の一般式を得られていないため、引き続き研究課題として進めているところである。

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)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Hideki Yoshikawa, "On the weight distribution of recursive systematic convolutional codes," Proceedings of ISITA2008, pp.1384-1388, 2008 (査読有) .
- ② Hideki Yoshikawa, "Theoretical analysis of bit error probability for 4-state convolutional code with Max-log-MAP decoding," IEICE Transactions on Fundamentals, E91-A, no.10, pp.2887-2890, 2008 (査読有) .
- ③ Hideki Yoshikawa, "On the input-output weight distribution of serial concatenated convolutional codes," Proceedings of ICICS2007, P0800 (CDROM), 2007 (査読有) .
- ④ Hideki Yoshikawa, "Theoretical analysis of bit error probability for Max-log-MAP decoding," IEEE Transactions on Information Theory, vol.53, no.5, pp.1935-1939, 2007 (査読有) .
- ⑤ Hideki Yoshikawa, "Theoretical analysis of bit error probability for convolutional code with Max-log-MAP decoding," Proceedings of ISITA2006, pp.119-123, 2006 (査読有) .

[学会発表] (計 6 件)

- ① Hideki Yoshikawa, "On the weight distribution of recursive systematic convolutional codes," 2008 International symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2008), Auckland, New Zealand, Dec. 10, 2008.
- ② 吉川 英機, "非線形差分方程式を用いた畳込み符号の重み分布の解析," 電子情報通信学会非線形問題研究会, 神戸大学, 2008年3月27日.
- ③ Hideki Yoshikawa, "On the input-output weight distribution of serial concatenated convolutional

codes,” 6th International Conference on Information, Communication and Signal Processing, Singapore, Dec. 11, 2007.

④ 吉川 英機, “フェージング通信路における並列接続符号の誤り上階に関する一報告,” 第29回情報理論とその応用シンポジウム, 函館, 2006年11月30日.

⑤ Hideki Yoshikawa, “Theoretical analysis of bit error probability for convolutional code with Max-log-MAP decoding,” 2006 International symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2006), Seoul, Korea, Nov. 1, 2006.

⑥ 吉川 英機, “再帰的畳込み符号の入出力重み分布について,” 電子情報通信学会情報理論研究会, 東京大学, 2006年7月28日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 英機 (YOSHIKAWA HIDEKI)

東北学院大学・工学部・准教授

研究者番号: 60259885

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし