

中国地上デジタルTV放送でのLDPCレイヤーデコーディングの検討

島袋 宗斗[†] 鄭 志安[‡] 和田 知久[†]

[†] 琉球大学大学院理工学研究科 〒903-0213 沖縄県西原町字千原1番地
[‡] 株式会社マグナデザインネット 〒901-0142 沖縄県那覇市字鏡水崎原地先

自由貿易地域那覇地区2号棟2階

E-mail: [†] muneto@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, [‡] zheng@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, [†] wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

あらまし 中国の地上デジタルTV放送規格のFEC(Forward Error Correction)では、LDPC(Low Density Parity Check)符号とBCH符号が使用されている。LDPC符号では、従来方式としてTPMP(two-phase message-passing algorithm)と呼ばれる複合方式が用いられているが、計算量が多い。

そこで本稿では、中国規格にて、複合の際の繰り返し回数を減らす為に、レイヤーデコーディングを用いたコンピュータシミュレーションを行った。シミュレーション結果より、従来のBER性能は保持しつつ、TPMPの場合と比べて二倍の収束スピードが得られ、計算量(complexity)の向上も確認できた。

キーワード LDPC, TPMP, 地上デジタルTV放送中国規格 (DMBT), レイヤーデコーディング

Layer decoding multi-rate LDPC codes for Chinese Digital Broadcasting

Muneto SHIMABUKU[†] Zhian ZHENG[‡] and Tomohisa WADA[†]

[†] Department of Information Engineering, University of the Ryukyus 1-2-3 Senbaru 1, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

[‡] Magna Design Net, Inc. 2nd Fl. 2nd Bld., Free Trade Zone Naha Region, Sakihara-chisaki, Aza-Kagamizu, Naha, Okinawa, 901-0142 Japan

E-mail: [†] muneto@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp, [‡] {zheng, wada}@lsi.ie.u-ryukyu.ac.jp

Abstract In China standard for FEC (Forward Error Correction) of terrestrial multimedia broadcasting, LDPC (Low Density Parity Check) code and BCH code be used as connecting code. The LDPC decoder is performed by TPMP (two-phase message-passing) algorithm, but have more complexity.

Therefore, in China standard, this paper evaluate the iteration number and the complexity by computer simulation to adopted layer decoding. Simulation results show that layer decoding indicate fast the convergence speed almost 2 times than TPMP and improvement of the complexity, keeping performance of traditional TPMP.

Keyword LDPC, TPMP, DMBT, terrestrial multimedia broadcasting, Layer decoding

1. まえがき

地上デジタルTV放送の中国規格(DMBT)[1]のFEC部では、内符号としてLDPC符号、外符号としてBCH符号の組み合わせが使用されている。LDPC符号[2][3]は他のエラー訂正符号と比べ、シャノン限界に非常に近い性能を示した符号であり、Gallagerが提唱した。またLDPC符号はTPMPで構成されており、check node (CN)とvariable node (VN)と呼ばれる異なる二つのノード間で、メッセージを繰り返し更新することにより復号が行われる。最適なアルゴリズムとして、sum-product algorithm (SPA) [4]が知られている。

LDPC符号は非常に高い性能を示すが、その一方で復号の際の複雑さも大きいという一面がある。DMBT

におけるLDPCの復号では、20回の繰り返しが必要であり、各繰り返し毎に大きい計算量が要求されている。そこで今回は、レイヤーデコーディング[5]を適応し復号の際の繰り返し回数を減らし、複雑さを軽減させることを目的としてシミュレーションを行い、その性能を評価した。

本稿では、2節において地上デジタルTV放送の中国規格の概要を示す。3節では、LDPC符号の従来方式、と今回用いたレイヤーデコーディングについて説明する。4節でシミュレーションによる結果を示し、5節にてまとめを行う。

2. DMBT

DMBTでは、内符号としてLDPC符号、外符号としてBCH符号を採用しており、その構成を図1に示す。

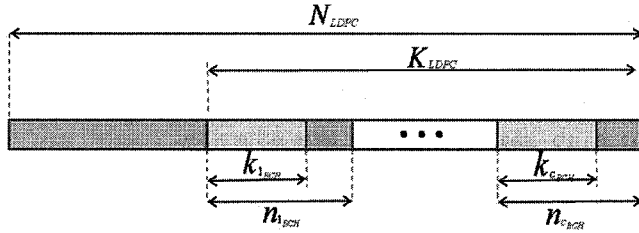


図1 LDPC符号とBCH符号の構成

図1にある k_{cBCH} はBCH符号のコーディング前のビットを表しており、 n_{cBCH} はコーディング後のビットを意味している。また、 K_{LDPC} はLDPC符号のコーディング前、 N_{LDPC} はコーディング後のビットを示している。

FEC全体でのコードレートは、0.4、0.6、0.8の三種類あるが、BCH符号は(762, 752)の一つのみであり、どのコードレートに対しても(762, 752)が使用されている。内符号であるLDPC符号はquasi-cyclic (QC) LDPC符号であり、QC-LDPC(m, n)の検査行列は(m/b, n/b)の巡回行列となっている。ここでbとは、 $b \times b$ 行列であり、ゼロ行列もしくは循環シフト単位行列にて構成されている。DMBTでは、LDPC符号は(7493, 3048)、(7493, 4572)、(7493, 6069)の3つが用意されており、また、 $b=127$ となっている。

3. LDPC デコーディング

3.1. TPMP

TPMPはタナグラフで表されるCN、VN間でメッセージの受け渡し処理が行われ、メッセージはLog Likelihood Ratio (LLR)として表される。CNとVNをそれぞれ繰り返し更新することによりデコーディングが行われる。まず前回の繰り返し処理により得られたVNのメッセージ値を利用してCNが計算され、次に、更新されたCNを利用して次回繰り返し時のVNが更新される。このような処理を繰り返すことで処理が進められていく。図2は大まかな処理の流れを表している。

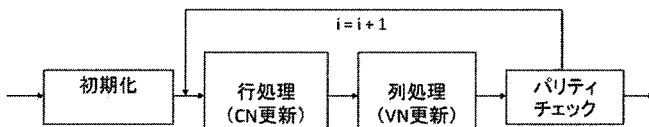


図2 処理の流れ

以下にTPMPの代表例であるSPAの処理を示す。各式において、文字式右上にある(i)内は繰り返し

回数を意味している。

1) 行処理

行処理では、CNのメッセージ情報 L_{mn} が式(1)により更新される。このとき、 Z_{mn} はVNから得られたLLR情報である。また、図3は行処理を表している。

$$L_{mn_x}^{(i)} = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{n' \in N(m) \setminus n_x} \tanh \left(\frac{Z_{mn'}}{2} \right) \right) \quad (1)$$

$$v(X) = 2 \tanh \left(\frac{X}{2} \right) = \ln \frac{\exp(X)-1}{\exp(X)+1}$$

$$\text{逆関数 } v^{-1}(t) = \ln \frac{1+t}{1-t}$$

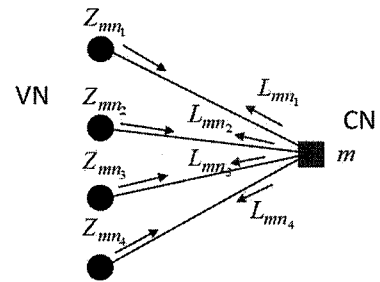


図3 行処理

2) 列処理

列処理では、VN情報の Z_{mn} が式(2)によって更新される。列処理を表したのが図4である。

$$Z_{m_x n}^{(i+1)} = Z_n^{(i)} + \sum_{m' \in M(n) \setminus m_x} L_{m' n}^{(i)} \quad (2)$$

ここでn個の各VNは式(3)により Z_n を更新する。

$$Z_n = Z_n^{(i)} + \sum_{m' \in M(n)} L_{m' n}^{(i)} \quad (3)$$

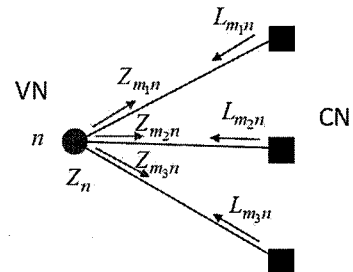


図4 列処理

以上のような行処理、列処理の後に式(4)により推定語が得られ、

$$c_n^{(i)} = \begin{cases} 0, & Z_n^{(i)} \geq 0 \\ 1, & Z_n^{(i)} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

最後にパリティチェックにより、 $H^T \times c_n^{(i)} = 0$ もしくは $i = I_{\max}$ となればデコーディングが終了する。この条件を満たさない場合、 $i = i + 1$ として再び行処理から繰り返し処理が行われる。ここで H^T は検査行列 H の転置を意味し、 I_{\max} は繰り返し回数の最大値を意味する。

3.2. レイヤーデコーディング

レイヤーデコーディングは複数のレイヤに分けられており、1つのレイヤ毎に CN と VN の更新処理が実行される。各レイヤは1つ、もしくは複数の CN で構成されており、各レイヤの CN 情報を利用して全ての VN が更新される。図 5 は 6×10 の検査行列を3つのレイヤ構成にした例である。この図の場合、各レイヤは2つの CN で構成されている。

図 6 はレイヤーデコーディングにおける処理の流れを表している。図 6 から分かるように、各レイヤ毎に行処理、列処理が行われる。例えば、あるレイヤにおいて行処理が実行され、次に列処理により各ビットが更新された後、次のレイヤの処理に移る。このとき、次のレイヤでは前レイヤで更新された情報を使って行処理が行われる。

次にレイヤーデコーディングの処理を示す。

図 6 のようなレイヤーデコーディングの各 sub-iteration における行処理は、TPMP での行処理と同じである。列処理は TPMP での処理と異っており、式(5)により列処理が実行され、VN が更新される。

$$\begin{aligned}
 Z_n^{(i)} &= L_n^{(0)} + \sum_{m \in M'(n)} L_{mn}^{(i)} + \sum_{m \in M(n)} L_{mn}^{(i-1)} \\
 &= Z_n^{(old)} + L_{mn}^{(i)} + L_{mn}^{(i-1)} \quad (5)
 \end{aligned}$$

列処理が終わると次のレイヤに移り、再び行処理、列処理が実行され、全てのレイヤが処理される。

レイヤーデコーディングにおいて、1つのレイヤ内での列重みは1を超えないのが好ましい。また、ある1つの VN は、多くてもレイヤ内の1つの CN と接続される。

本稿において、1レイヤは127行で構成されており、全体で $\frac{N_{LDPC} - K_{LDPC}}{b}$ のレイヤに分けられている。

| | VN | | | | | | | | | |
|-------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| レイヤH1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| レイヤH2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| レイヤH3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

図 5 検査行列を3レイヤ構成にした例

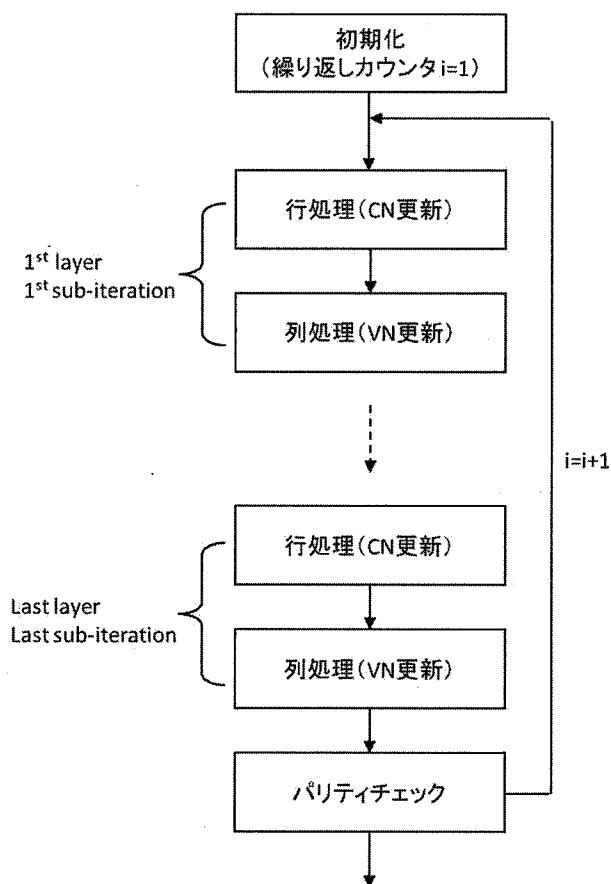


図 6 処理の流れ (レイヤーデコーディング)

4. シミュレーション

4.1. シミュレーション条件

今回は、Log-SPA、Min-sum algorithm (MSA) について、それぞれ TPMP とレイヤーデコーディングを適応した。このコンピュータシミュレーションにより、 E_b/N_0 に対する BER 性能を比較した。シミュレーションは、加法性ホワイトガウスノイズ (AWGN) 通信路、QPSK 変調を仮定した。

また、シミュレーション環境は表 1 のようになっている。

| | |
|-----|---------------------------------------|
| OS | Ubuntu 10.04 |
| メモリ | 2.0Gbyte |
| CPU | Intel® Core™2 Duo CPU E7400 @ 2.08GHz |

表 1 シミュレーション環境

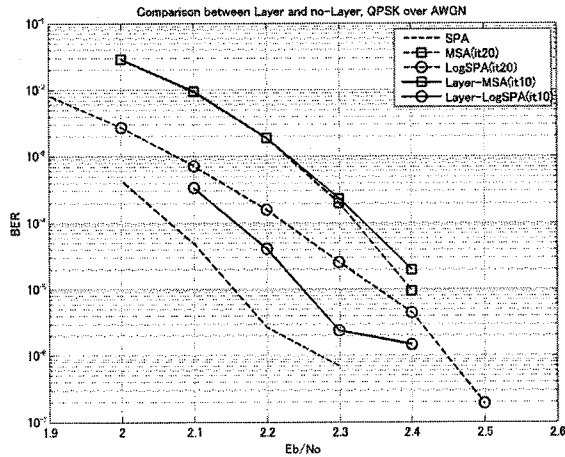


図 7 TPMP と Layer decoding の比較(0.4)

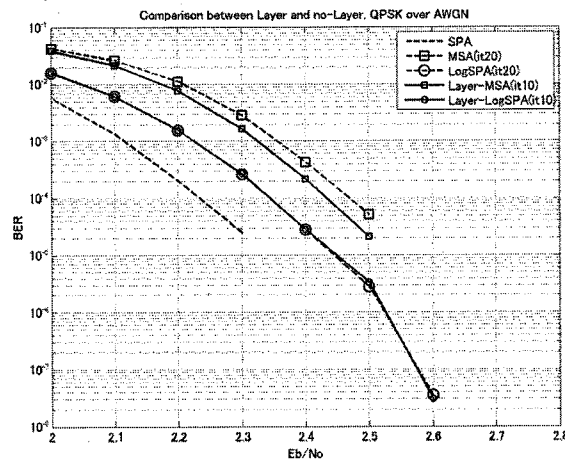


図 8 TPMP と Layer decoding の比較(0.6)

4.2. シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 7 から図 10 と表 2 に示す。今回は TPMP とレイヤーデコーディングの BER 性能を比較した。各図共に破線は TPMP、実線はレイヤーデコーディング、また、四角のマークは MSA、丸のマークは Log-SPA となっている。

また、参考値として、TPMP の最適なアルゴリズムである SPA を図 7 から図 9 に記載しておく。

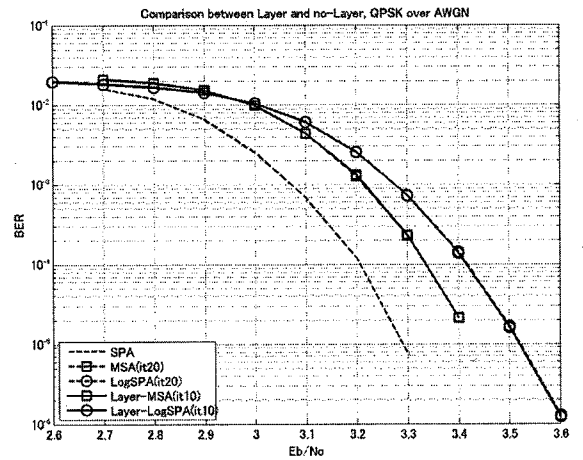


図 9 TPMP と Layer decoding の比較(0.8)

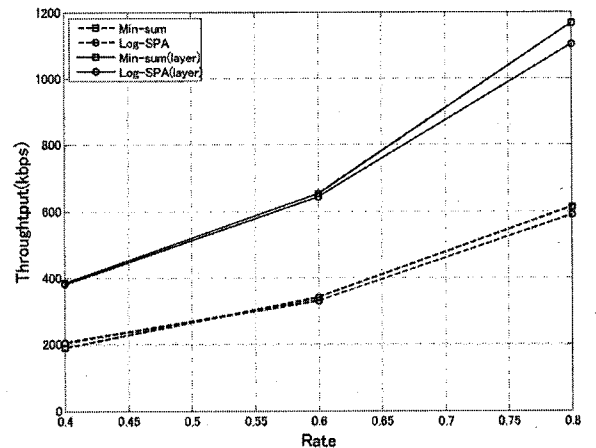


図 10 各レートの復号処理における複雑さ

| Code Rate | Throughput(kbits/sec) | |
|-----------|-----------------------|----------------|
| | TPMP(no-Layer) | Layer decoding |
| MSA | 0.4 | 190.5 |
| | 0.6 | 341.19 |
| | 0.8 | 613.03 |
| Log-SPA | 0.4 | 205.95 |
| | 0.6 | 331.3 |
| | 0.8 | 589.22 |

表 2 復号処理における複雑さ

図 7 はコードレート 0.4 のシミュレーション結果を表している。この図から、MSA において TPMP とレイヤーデコーディングの BER 性能はほぼ同じであり、さらに、レイヤーデコーディングの繰り返し回数は TPMP の半分であることがわかる。Log-SPA ではレイヤーデコーディングの方が TPMP よりも若干性能が良いという結果となった。このときの繰り返し回数も MSA のときと同様に TPMP の半分である。

図 8、図 9 はそれぞれコードレート 0.6、0.8 の結果である。これらの図からも図 7 と同様の結果が読み取れる。

図 10 は復号処理の複雑さを比較したものであり、表 2 はその数値を表にしたものである。図、又は表から明らかなように MSA、Log-SPA 共に各コードレートにおいて、TPMP よりもレイヤードコーディングの方がスループットが高く、復号による複雑さが改善されている。

5. まとめ

本稿では DMBT の LDPC 符号において、レイヤードコーディングを適応し、シミュレーションを行った。シミュレーションでは MSA と Log-SPA の 2 つのアルゴリズムを使用し、その結果、両アルゴリズムにおいて TPMP よりもレイヤードコーディングの方が復号処理における複雑さが向上した。それに伴い、収束速度が TPMP に比べほぼ 2 倍の速度になったことが確認できる。

文 献

- [1] National Special working group for Chinese DTTB standard, Chinese National Standard GB20600-2006, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2006
- [2] R.G. Gallager, Low Density Parity Check Codes, Monograph, M.I.T. Press, 1963
- [3] David J.C. MacKay and Radford M. Neal, Near Shannon Limit Performance of Low Density Parity Check Codes, Electronics Letters, July 1996
- [4] T.J. Richardson and R. Urbanke, The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding, IEEE Trans. Inf. Theory, vol.47, pp.599-618, Feb 2001
- [5] Zhian Zheng, Tomohisa Wada, Layer decoding of LDPC codes for DVB-S2, IEICE Technical Report, vol. 110, no. 369, RCS2010-230, pp.185-189, 2011