

用于 CMMB 的低运算复杂度 LDPC 解码算法

姜小波, 聂正华

(华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510641)

摘要: 本文提出了两种基于变量节点可靠度的 LDPC 解码算法. 第一, 针对传统的可靠度判决算法会产生比较严重的误判现象, 导致译码性能降低. 本文提出了一种改进的可靠度判决算法, 它降低了变量节点的误判概率. 在 AWGN 和瑞利信道仿真中, 性能都有显著的提高, 性能超过了标准 BP 算法. 第二, 提出了分层可靠度算法. 和标准 BP 算法相比较, 性能提高了 0.1dB, 收敛速度提高了一倍, 计算复杂度降低大约 65%.

关键词: LDPC; CMMB; 分层译码; 瑞利衰落信道

中图分类号: TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1612-04

Low Computational Complexity Algorithms of LDPC Decoder for CMMB

JIANG Xiao-bo, NIE Zheng-hua

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: In the paper, two LDPC decoding algorithms based on reliability are proposed. First, the conventional early detection method is poor performance due to misjudgment. A new early detection method is proposed, which reduces the probability of misjudgment and lead to performance improvement. At AWGN and Rayleigh fading channel simulation, the performance of the new algorithm exceed standard BP algorithm. Second, the layered reliability decoding algorithm is proposed. Compared with standard BP algorithm, the performance is increased by 0.1dB, velocity of the convergence is twice faster and computational complexity is decreased by 65%.

Key words: low density parity check (LDPC); China mobile multimedia broadcasting (CMMB); layered decoding; rayleigh fading channel

1 引言

中国移动多媒体广播 CMMB (China Mobile Multimedia Broadcasting) 传输系统采用 LDPC (Low Density Parity Check) 码技术作为信道编解码方案. 并指定采用码长为 9216, 码率为 1/2 和 3/4 的高度结构化的 LDPC 码作为编解码标准. 不像 Turbo 码, LDPC 码可以很容易的实现并行解码, 只需要执行一些简单的运算操作像加法、比较、查找表^[1]. 而且可以很容易地通过调整解码并行度来对解码吞吐率和解码复杂度进行折中. 然而 CMMB 的 LDPC 的解码需要比较多的迭代次数去接近香农限, 也就产生比较多的运算操作, 比较大的功耗^[2]和比较长的延时. 所以进一步降低运算复杂度是十分必要的. 在文献[3,4]中, 通过分析变量节点的伪后验概率和非法校验方程数目, 提前终止可靠度高的变量节点参与后续迭代更新来降低运算复杂度. 但是如果变量节点被错误地终止, 后续的译码过程将无法修正它们, 导致译码性能较差. 本文提出了一种改进的可靠度判决算法来减少

变量节点被误判的概率, 同时还可以保证高的可靠度变量节点所输出的信息更为可靠, 有助于邻近的其它节点更新, 改进的算法性能超过了标准 BP 算法.

在文献[5~7]中介绍了一种分层译码法, 理论和仿真表明: 分层算法的收敛的速度比标准 BP 算法快一倍, 但分层算法在每次迭代过程中的运算量并没有降低. 本文采用改进的可靠度判决算法对分层算法进行改进, 提出了分层可靠度算法来减少运算复杂度.

2 改进的可靠度判决算法

在文献[3,4]中给出了可靠度判决算法, 采用变量节点的可靠度结合非法校验方程数来判决变量节点的可靠度. 通过提前终止部分高可靠度变量节点参与后续迭代来降低计算复杂度. 在校验矩阵 H 中, 每一行代表一个校验方程, 正确的码字必须满足所有的校验方程. 记 $r_i (i = 0, 1, 2, \dots, M)$ 为第 i 个校验方程的结果, 满足则为 0, 否则为 1. 在迭代译码过程中, 第 j 个变量节点所参与的非法校验方程数 S_j 可以这样表示:

$$s_j = \sum_{i \in M(j)} r_i$$

如果 $S_j = 0$ 且 $|q_j^0 - q_j^1| > TH$, 则认为节点 j 为高可靠度变量节点, TH 为一个预先设定的阈值, 称这一算法为 Reliability Criteria Belief Propagation (RCBP). 这个算法比较容易产生误判的现象^[4]. 一旦有变量节点被误判, 则这个码字在后续的迭代中再也不可能被正确解码了, 导致译码性能的下降.

本部分提出一种改进的可靠度判决算法: 在每次迭代过程中, 对前面已经判决为高可靠度变量节点再次判决它们可靠度来减少误判的概率. 判决为高可靠度的变量节点停止参与校验节点的更新, 但判决为高可靠度变量节点每次都进行变量节点更新. 可能存在这样的变量节点, 在某次迭代中被错误地判决为高可靠度变量节点, 但在后续的迭代中通过接受来自邻近节点的校验信息而得到更正, 使得误判的变量节点可以被更正. 把这一算法记为 Improved RCBP (IRCBP) 算法. 仿真结果表明 IRCBP 算法可以较大地提高译码性能. 因为: 第一, 误判概率降低了. 第二, 可以保证高可靠度的变量节点所输出的信息更为可靠, 有助于加快邻近的其它节点更新. 接下来在理论上证明它的合理性.

以规则 (d_v, d_c) LDPC 码为例, 来分析两种算法的误判概率大小. 在文献[8]中有对 RCBP 算法的误判概率的推导. 定义一下事件: 记事件 E_j 为: 根据伪后验概率对变量节点 j 的判决结果是错误的. 记事件 T_j 为: 第 j 个变量节点的伪后验概率满足 $|q_j^0 - q_j^1| > TH$. 记事件 A_j 为: 变量节点 j 所参与的校验方程都满足. 记事件 B_j 为: 变量节点 j 后验概率译码错误但被判为高可靠度节点而停止更新. 在每次迭代后, 对于任意变量节点 j , 事件 E_j 发生的概率为 $P(E_j) = P_e$, 事件 T_j 发生的概率为 $P(T_j) = P_{th}$. 对某一变量节点 j , 事件 B_j 发生的概率为:

$$P(B_j) = P(E_j T_j A_j) \tag{1}$$

而 T_j 与其他两个事件是独立的, 因此式(1)可以写为:

$$P(B_j) = P(T_j) P(E_j) P(A_j/E_j) \tag{2}$$

在事件 E_j 发生的情况下, 对于 j 参与的每一个校验方程, 只要另外再有奇数个变量硬判决错误, 则校验方程同样满足. 因此对于可靠性准则 RCBP, 事件 B_j 发生的概率为:

$$P(B_j) = P_{th} P_e \left[\sum_{j=1}^{(d_c-1)/2} C_{d_c-1}^{2j-1} P_e^{2j-1} (1-P_e)^{d_c-2j} \right]^{d_c} \tag{3}$$

对于 IRCBP 算法, 记事件 D_j 为: 误判为高可靠度的变量节点 j 被修正, 记事件 b_j 为: 变量节点 j 后验概率译码错误但被判为高可靠度节点. 对于事件 D_j 发生的概率为 $P(D_j) = P_d$. 事件 b_j 发生的概率为:

$$P(b_j) = P(B_j) - P(D_j/B_j) < P(B_j) \tag{4}$$

采用对数域的具体译码步骤如下:

令 $u_{i,j} = \ln(r_{ij}^0/r_{ij}^1)$, $v_{i,j} = \ln(q_{ij}^0/q_{ij}^1)$, $v_j = \ln(q_j^0/q_j^1)$

(1) 初始化

$$v_{i,j} = 2\gamma_j/\sigma^2, \text{ stop}[j] = 0 (j = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

(2) 校验节点更新

$$u_{i,j}(t+1) = 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{k \in M(i) \setminus j \text{ 且 } \text{stop}[k]=0} \tanh(v_{i,k}(t)/2) \right]$$

(3) 变量节点更新

$$v_{i,j}(t+1) = u_j(0) + \sum_{k \in M(j) \setminus i} u_{k,j}(t+1)$$

(4) 后验概率计算

$$v_j = u_j(0) + \sum_{k \in M(j)} u_{k,j}(t+1)$$

(5) 非法校验方程数计算

$$s_j = \sum_{i \in M(j)} r_i$$

(6) $\text{stop}[j] = 0 (j = 0, 1, 2, \dots, N-1)$

(7) 如果 $S_j = 0$ 且 $|v_j| > Tb$, 则 $\text{stop}[j] = 1$.

(8) 迭代终止判断

若 $v_j > 0$, 则 $x_j = 0$, 否则 $x_j = 1$. 若 $H^T x = 0$ 或者迭代次数达到最大迭代次数, 则结束本次译码. x 作为译码输出, 否则转到步骤(2)继续迭代.

定义运算量为: 迭代次数乘以平均参与迭代的变量节点个数. 由图 1 可知, IRCBP 和 RCBP 算法平均参与迭代的变量节点个数几乎相等, 也即运算量几乎相等, 但都比标准 BP 算法的运算量低, 而且迭代次数越大运算

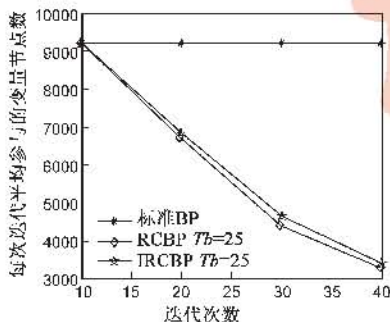


图1 参与运算的变量节点数(信噪比为1.6dB)

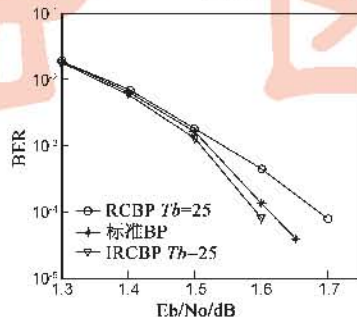


图2 不同算法在AWGN信道中的性能

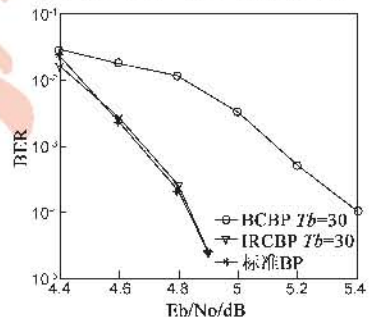


图3 不同算法在瑞利衰落信道中的译码性能

量越低.由图2中的仿真结果可知:IRCBP算法在性能上优于RCBP算法.在误码率为 10^{-4} 时,提高大约0.08dB.以上仿真结果基于AWGN(Additive White Gaussian Noise)信道,采用BPSK调制,接受信息6位均匀量化,中间信息9位均匀量化,并采用CMMB标准所定义的规则LDPC码(9216,4068),行重为6,列重为3,最大迭代次数为30次.本文同时给出了基于瑞利衰落信道^[9]的定点^[10,11]仿真结果,接受信息采用6位均匀量化,中间信息采用9位均匀量化,结果如图3,在误码率为 10^{-4} 时,IRCBP算法比RCBP算法在性能上提高大约0.55dB.

3 分层可靠度算法

在文献[5]中给出了一种分层译码算法,和标准BP算法区别在于:在迭代中当更新完 H 矩阵中某一行非零元素的校验信息后,马上更新每个非零元素对应列的所有非零元素的比特信息,然后再对 H 矩阵的下一行进行译码.这样可以提前用到已经更新好了的变量节点信息,加快收敛速度.但是分层算法每次迭代的运算量跟标准BP算法一样大.

基于分层算法每次迭代的运算量还是很大.本部分给出了一种改进的算法——分层可靠度算法,是通过采用本文第二部分所提出的IRCBP算法对分层算法进行改进.通过分析分层算法的变量节点的伪后验概率和非法校验方程数目,提前终止可靠度高的变量节点参与后续迭代更新,来降低运算复杂度.这个算法同时具有IRCBP算法运算量低和分层算法收敛速度快的优势.

采用对数域的具体译码步骤如下:

(1)初始化

$$v_{i,j} = 2\gamma_j/\sigma^2, stop[j] = 0 \quad (j = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

(2)校验节点和变量节点更新,按下面程序更新

For $i = 0, 1, \dots, M-1$

For $j \in N(i)$

$$u_{i,j}(t+1) = 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{k \in N(i) \setminus \{j\} \text{且} stop[k]=0} \tanh(v_{i,k}(t)/2) \right]$$

End

For $j \in N(i)$

$$v_j = v_j - u_{i,j}(t) + u_{i,j}(t+1)$$

End

End

(3)计算非法校验数

$$s_j = \sum_{i \in M(j)} r_i$$

(4) $stop[j] = 0$ ($j = 0, 1, 2, \dots, N-1$)

(5)如果 $S_j = 0$ 且 $|v_j| > Tb$, 则 $stop[j] = 1$.

(6)迭代终止判断

若 $v_j > 0, x_j = 0$, 否则 $x_j = 1$. 若 $H^T x = 0$ 或者迭代次

数达到最大迭代次数,则结束本次译码. x 作为译码输出,否则转到步骤(2)继续迭代.

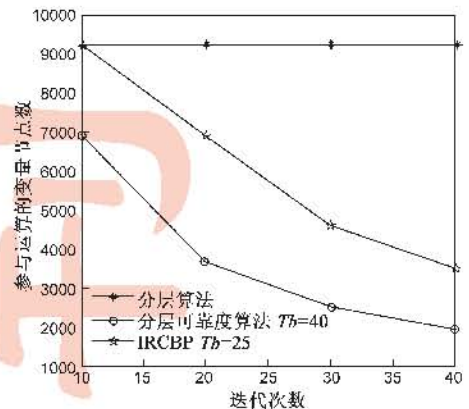


图4 参与运算的变量节点数(信噪比1.6dB)

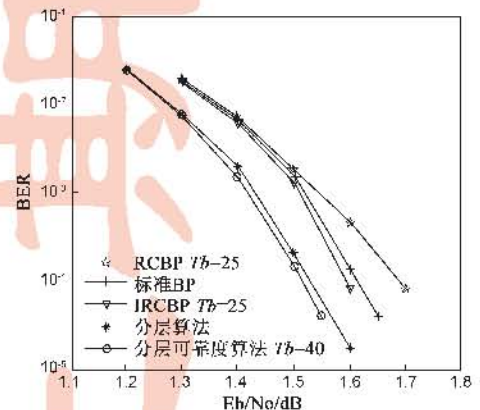


图5 不同算法在AWGN信道中的译码性能

由图4可知:当信噪比为1.6dB,迭代次数为20时,分层可靠度算法每次迭代的平均运算量比标准BP算法降低大约65%.由图5可知:分层可靠度算法比标准BP算法在性能上得到了很大的提高.当误码率为 10^{-4} 时,性能提高大约0.1dB.由图7可知:分层可靠度算法比标准BP算法在迭代次数上降低大约一倍.以上仿真结果基于AWGN信道,采用BPSK调制,接受信息6位均匀量化,中间信息9位均匀量化,并采用CMMB标准

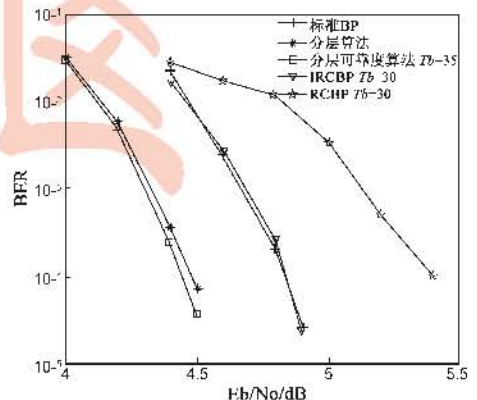


图6 不同算法在瑞利衰落信道中的译码性能

所定义的规则 LDPC 码(9216,4068),行重为 6,列重为 3,最大迭代次数为 30 次.本文同时给出了基于瑞利衰落信道的定点仿真结果,接受信息采用 6 位均匀量化,中间信息采用 9 位均匀量化,结果如图 6,在误码率为 10^{-4} 时,分层可靠度算法在性能上比标准 BP 算法提高大约 0.45dB.

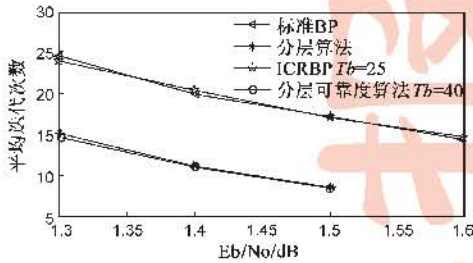


图7 不同信噪比情况下的译码平均迭代次数

4 总结

传统的可靠度判决算法的性能之所以不太高的原因是误判的概率比较大.本文提出的 ICRBP 通过判断为高可靠度的变量节点在下次迭代中重复进行判断,以减低码字被误判的概率,从而大大的提高了译码性能,超过了标准 BP 算法.另外一种算法是通过用 ICRBP 对分层算法进行改进而提出了分层可靠度算法,这样大大减少了分层算法的运算量.和标准 BP 算法比较,计算复杂度比标准 BP 降低大约 65%;性能提高了 0.1dB;收敛速度提高了一倍.而且,仿真结果表明,改进的两种算法在 AWGN 和瑞利信道中都有效.

参考文献:

- [1] R G Gallager. Low density parity check code[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21 - 28.
- [2] Yang Sun, Joseph R Cavallaro. A low power 1-Gbps reconfigurable LDPC decoder design for multiple 4G wireless standards [A]. Proceedings of IEEE International SOC Conference [C]. Newport Beach, CA, United states, Sept 2008. 367 - 370.
- [3] Eun-A Choi, Dae-IK Chang, Deock-Gil Oh, Ji-Won Jung. Low computational complexity algorithms of LDPC decoder for DVB-S2 Systems [A]. Proceedings of the IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC-2005-Fall) [C]. IEEE Press, Sept 2005. 536 - 539.
- [4] 郭锐,刘济林. LDPC 码的一种低复杂度 BP 译码算法[J]. 浙江大学学报, 2008, 42(3): 450 - 455.
Guo Rui, Liu Ji-Lin. New low complexity belief propagation decoding of low density parity check codes [J]. Journal of Zhejiang University, 2008, 42(3): 450 - 455. (in Chinese)
- [5] Rovini M, Rossi F, Cio P, Linsalata N, Fanucci. Layered decoding of non-layered LDPC codes [A]. Proceedings of the 9th Euromicro Conference on Digital System Design [C]. Dubrovnik, Croatia, August 2006. 537 - 544.

- [6] Zhang J, Wang Y, Fossorier M, Yedidia J S. Replica shuffled Iterative decoding [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory [C]. Adelaide, Australia, September 2005. 454 - 458.
- [7] Radosavljevic P, De Baynast A, Cavallaro J R. Optimized message passing schedules for LDPC decoding [A]. Proceedings of the Thirty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C]. Pacific Grove, CA, USA, 2005. 591 - 595.
- [8] 陈昕, 门爱东. 基于可靠性更新的低复杂度 BP 译码 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2421 - 2426.
Chen Xin, Men Ai-dong. Low complexity BP decoding algorithm based on reliability updating schedule [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(10): 2421 - 2426. (in Chinese)
- [9] 林家儒, 吴伟陵. 非规则 LDPC 码在 RICE 信道中的性能分析 [J]. 电子学报, 2005, 33(1): 43 - 46.
Lin Jia-ru, Wu Wei-ling. Performance of irregular LDPC codes on rician fading channels [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(1): 43 - 46. (in Chinese)
- [10] Liu Binbin, Bai Dong, Mei Shunliang. Min-sum approximation decoding of LDPC codes with adaptive non-uniform quantization [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 17(3): 503 - 506.
- [11] 孙韶辉, 孙蓉, 王新梅. 低密度校验码 BP 译码算法中量化问题的研究 [J]. 电子学报, 2003, 33(2): 217 - 220.
Sun Shao-hui, Sun Rong, Wang Xin-mei. Some quantization issues for decoding of low density parity check codes with BP algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 33(2): 217 - 220. (in Chinese)

作者简介:



姜小波 男, 2004 年中科院微电子所获得博士学位, 1997 年、1994 年分别从浙江大学硅材料国家重点实验室、浙江大学获得硕士和学士学位. 2004 ~ 2006 年在韩国三星电子从事移动多媒体基带芯片设计. 目前在华南理工大学电子信息学院从事教学科研工作. 主要研究方向为差错控制编码设计、低功耗集成电路设计、通信基带芯片设计. E-mail: xbjiang@gmail.com



聂正华 男, 1984 年 6 月出生于江西抚州. 2008 年进入华南理工大学电子与信息学院. 现为在读硕士生, 主要从事于 LDPC 译码算法及硬件实现等方面的研究. E-mail: 351610856@qq.com