

瑞利信道下基于广义阈值函数的 LDPC 译码算法

陈海强^{1,2,3}, 梁 奇¹, 黎相成^{1,2,3}, 孙友明¹, 覃团发^{1,2,3}, 李道丰¹

(1. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004; 2. 广西大学广西多媒体通信与网络技术重点实验室培育基地, 广西南宁 530004;
3. 广西大学广西高校多媒体通信与信息处理重点实验室, 广西南宁 530004)

摘 要: 现存的 LDPC 译码算法, 其节点处理依据主要遵循大数逻辑准则和完全处理准则, 对应的阈值参数一般是固定不变的, 在性能和复杂度之间的均衡不够灵活. 本文首先提出一种广义阈值函数, 能应用于大多数基于可靠度的二元 LDPC 译码算法. 通过调整阈值参数, 可方便地控制参与迭代处理的节点队列. 其次, 本文提出一种基于伴随式和星座映射信息的非均匀量化译码算法, 可进一步降低复杂度和存储负荷. 实验结果显示, 在瑞利信道下, 本文算法能够在较低的量化比特下获得优良的译码性能; 结合广义阈值函数, 只有约 30% 的变量节点参与迭代运算, 译码复杂度可显著降低.

关键词: LDPC 码; 阈值函数; 迭代译码; 译码复杂度; 非均匀量化

中图分类号: TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)01-0016-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.01.003

LDPC Decoding Algorithm with Generalized Threshold-Function over Rayleigh Fading Channel

CHEN Hai-qiang^{1,2,3}, LIANG Qi¹, LI Xiang-cheng^{1,2,3}, SUN You-ming¹, QIN Tuan-fa^{1,2,3}, LI Dao-feng¹

(1. School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, Guangxi University
Cultivating Base, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Multimedia Communications and Information Processing,
Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: There exist two criterions for the existing LDPC decoding algorithms at node-processing, majority-logic processing and fully processing. The algorithms can't make flexible tradeoffs between performance and complexity, since their threshold parameters are usually set to be unvaried. This paper first presents a generalized threshold-function, which can apply to most of the existing binary LDPC decoding algorithms to control the participating-nodes in the iterations by adjusting the threshold parameters. Then a new non-uniform quantization decoding algorithm combined with syndrome and constellation mapping information is presented, which can further reduce the complexity and memory load. Simulation results show that the presented algorithm can obtain excellent decoding performances with very low quantization level over the Rayleigh fading channel. Furthermore, it is shown that only 30% variable nodes are involved in the iterations when combined with the presented threshold-function, which can remarkably reduce the complexity.

Key words: LDPC code; threshold-function; iterative decoding; decoding complexity; non-uniform quantization

1 引言

在 LDPC 译码算法中, 控制其迭代过程中参与运算

处理的各种活动单元(例如图模上的节点、Trellis 上的状态和边等)是降低译码复杂度的一个有效手段. 实际上, 典型的基于大数逻辑的译码算法可归类到这个范

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-06-15; 责任编辑: 蓝红杰

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61102090, No. 61261023, No. 61362010); 广西自然科学基金(No. 2012GXNSFAA053217, No. 2014GXNSFBA118276)

畴. 例如, 一步大数逻辑和它的改进译码算法 (W/OSMLGD)^[1], 在阈值函数控制下, 只有超过半数满足条件的节点才进入处理队列, 即所谓的大数逻辑处理准则. 该准则能获得很低的译码复杂度, 但其译码性能损失太大, 不足以体现 LDPC 码强大的纠错能力. 文献[2]设计了一种基于比例逻辑的阈值函数, 能更方便地控制节点处理队列, 且译码性能得到了一定的提升. Zhang 等在文献[3]中提出一种基于可靠度的阈值控制策略, 译码过程只处理部分“活”状态的节点从而降低译码复杂度. 在多元 LDPC 译码方面, 经典的 EMS 译码算法通过配置集来控制参与的节点处理队列^[4]. 类似地, Ma 等在文献[5]中使用信息截断技术来减少 Trellis 上参与处理的状态和边, 达到降低复杂度的目的. 文献[6]基于节点可靠度构造迭代过程满足条件的处理节点子集.

在上述工作基础上, 本文设计了一种参数可调的广义阈值函数, 能够应用于当前大多数的基于可靠度的译码算法. 通过引入伴随式和星座映射信息, 本文进而提出一种使用了非均匀量化策略的低复杂度二元 LDPC 译码算法. 仿真结果分析显示, 本文算法应用广义阈值函数后, 仅有约 30% 的变量节点进入处理队列; 同时, 在瑞利信道下能够获得与文献[7]的 RBI-MSD 算法相当的译码性能, 但复杂度可明显降低.

2 传输模型及量化处理

2.1 传输模型

考虑一个规则 (n, k) LDPC 码, 其列重为 γ , 行重为 ρ , 对应的校验矩阵为 $\mathbf{H} = (h_{i,j})_{m \times n}$. 定义下标集合 $N_i = \{j | 0 \leq j \leq n-1, h_{i,j} = 1\}$ 为第 i 行非零列的序号; $M_j = \{i | 0 \leq i \leq m-1, h_{i,j} = 1\}$ 为第 j 列非零行的序号. 信息序列 $\mathbf{u} = (u_0, u_1, \dots, u_{k-1}) \in F_2^k$ 经编码后得到码字 $\mathbf{c} = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) \in F_2^n$, 调制后得到实数向量 $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$, 其中 $x_j = \varphi(c_j)$ 是系统的星座映射规则. 信号 \mathbf{x} 通过瑞利衰落信道进行传输, 接收信号为 $\mathbf{y} = (y_0, y_1, \dots, y_{n-1})$. 其中, $y_j = a_j x_j + n_j$, a_j 是衰落因子, n_j 是均值为 0, 方差 $\sigma^2 = 1$ 的高斯变量. 本文使用充分交织的瑞利慢衰落信道^[8], $a_j = K \sqrt{x^2 + y^2}$, 其中 x, y 是均值为 0, 方差 $\sigma^2 = 1$ 的独立分布高斯变量, $K = \sqrt{1/2}$. 此时, 平均衰落功率为 1, 接收信号的平均信噪比为

$$\psi_b = \frac{E_b}{N_0} E[a^2] = \frac{E_b}{2\sigma_n^2} (2\sigma^2 K^2) = \frac{E_s}{2\sigma_n^2 R_c} \quad (1)$$

2.2 量化处理

在译码之前, 来自信道的接收信息序列 \mathbf{y} 可由以下函数量化为整数输出, 得到整数可靠度序列 $\mathbf{q} = (q_0, q_1, \dots, q_{n-1})$. 本文使用文献[9]中的非均匀量化策略, 设计如下

$$q_j = \begin{cases} \text{sgn}(y_j) (2^b - 1), & |y_j|/y_{th} \geq r^0 \\ \text{sgn}(y_j) (2^b - 1 - p), & r^{p+1} \leq |y_j|/y_{th} < r^p \\ \text{sgn}(y_j), & 0 \leq |y_j|/y_{th} < r^{2^b-2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $0 \leq j \leq n-1, p = 0, 1, \dots, 2^b - 3$. q_j 是取值在 $[-(2^b - 1), +(2^b - 1)]$ 范围内的整数, y_{th} 是最大截取电平. 该量化函数的输出呈非均匀分布, 对小接收信号采取更为精细的量化间隔, 减少量化噪声. 量化解析度可以方便地通过量化参数 r 进行调整. 引入非均匀量化函数可使得本文提出的译码算法能够在低量化水平 (3~4 比特) 下有效工作, 减少存储负荷.

需要指出的是, 上述量化方案可看作是对现有量化处理方法的一种补充, 建议在较低量化比特场合下使用; 对于大于 4-比特的量化电平, 则均匀/非均匀量化方案均可使用. 此外, 对于非均匀量化方案, 提高量化比特并不会获得明显的性能提升.

3 阈值函数

本节提出一个广义的阈值译码函数, 能应用于当前大多数基于可靠度的译码算法. 假设第 k 次迭代的硬判决序列为 $\mathbf{z}^{(k)} = (z_0^{(k)}, z_1^{(k)}, \dots, z_{n-1}^{(k)})$, 相应的伴随式序列是 $\mathbf{s}^{(k)} = (s_0^{(k)}, s_1^{(k)}, \dots, s_{m-1}^{(k)})$, 其中, 第 i 个校验和 $s_i^{(k)}$ 的计算如下:

$$s_i^{(k)} = \sum_{j \in N_i} \oplus z_j^{(k)} \quad (3)$$

其中, $0 \leq i \leq m-1$. 在迭代过程中, 变量节点会根据相应的阈值函数来判断是否进行信息处理 (比特翻转/迭代更新). 对于某种译码算法, 定义对应的阈值函数向量 $\mathbf{F} = (f^0, f^1, \dots, f^{n-1})$ 来表征变量节点信息处理状态. 本文在文献[2]的基础上, 提出一种基于广义阈值的判决函数, 用于定义变量节点的处理状态集合. 令 $w^{(k)i-j}$ 表示第 k 次迭代时, 从第 i 个校验节点传递到第 j 个变量节点的校验和可靠度的绝对值, 则基于校验和定义如下阈值函数

$$f^{(k)j} = \sum_{i \in M_j} (2s_i^{(k)} - 1) w^{(k)i-j} \quad (4)$$

直观看, 函数 $f^{(k)j}$ 就是所有链接到变量节点 j 的校验节点可靠度值之和; 当校验正确时, 为负累加; 当校验错误时, 为正累加. 对于基于大数逻辑的算法而言, 某个变量节点 j 是否需要处理, 跟与该变量节点链接的错误校验个数有关. 一般来说, 错误的校验个数越多, 该变量节点越倾向于处理. 因此, 当函数 $f^{(k)j}$ 大于某个阈值时 (相当于错误的检验大于某个阈值) 时, 即激活变量点的处理. 定义阈值判决函数如下

$$f^{(k)j} = \sum_{i \in M_j} (2s_i^{(k)} - 1) w^{(k)i-j} \geq (2\lambda - 1) \sum_{i \in M_j} w^{(k)i-j} \quad (5)$$

令满足上式的变量点集合为 J , 即

$$J = \{j \mid f_i^{(k)j} \geq (2\lambda - 1) \sum_{i \in M_j} w_i^{(k)i-j}\} \quad (6)$$

当选择合适的参数 λ 时,该函数可适用于多种译码算法.

3.1 大数处理准则

当 $\lambda = 1/2$ 时,代入式(5)可得到如下的阈值判决函数

$$\sum_{i \in M_j} (2s_i^{(k)} - 1)w_i^{(k)i-j} \geq 0 \quad (7)$$

为了更好地剖析其内在涵义,上式进一步变换如下

$$\sum_{i \in M_j} s_i^{(k)} w_i^{(k)i-j} \geq \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \sum_{i \in M_j} w_i^{(k)i-j} \quad (8)$$

当 $w_i^{(k)i-j} = w_{\text{OSMLGD}}^{(k)i-j} = 1$,则阈值函数可应用于一步大数逻辑译码算法(OSMLGD)^[1];当应用于其修正版本时(MOSMLGD),校验和可靠度定义为

$$w_{\text{WOSMLGD}}^{(k)i-j} = \min_{j' \in \mathcal{N}_j} |y_{j'}| \quad (9)$$

其中, $y_{j'}$ 是与第 j' 个变量节点对应的信道接收值. 上述阈值函数的内在涵义是:当链接到第 j 个变量节点的校验失败校验节点的可靠度值之和,大于所有链接到第 j 个变量节点的校验节点可靠度值之和的一半时,该变量节点执行信息处理. 在这种情况下,该函数正好符合大数逻辑的处理准则.

3.2 完全处理准则

当 $\lambda = 0$ 时,代入式(5),阈值判决函数为

$$\sum_{i \in M_j} (2s_i^{(k)} - 1)w_i^{(k)i-j} \geq - \sum_{i \in M_j} w_i^{(k)i-j} \quad (10)$$

类似地,上式可变换为

$$\sum_{i \in M_j} s_i^{(k)} w_i^{(k)i-j} \geq (0) \cdot \sum_{i \in M_j} w_i^{(k)i-j} = 0 \quad (11)$$

由于 $w_i^{(k)i-j}$ 是可靠度绝对值,因此上式左边总是取得非负值,意味着该不等式是无条件成立的,即所有变量节点都需进行信息处理更新. 上述阈值判决可应用于迭代大数逻辑译码算法(RBI-MLGD)^[10],则校验和可靠度 $w_i^{(k)i-j} = w_{\text{RBI-MLGD}}^{(k)i-j} = 1$;也可应用于迭代大数逻辑最小和算法(RBI-MSD)^[7]时,相应的校验和可靠度定义为

$$w_{\text{RBI-MSD}}^{(k)i-j} = \min_{j' \in \mathcal{N}_j} |R_j^{(k)}| \quad (12)$$

其中, $R_j^{(k)}$ 表示第 k 次迭代变量点 j' 的可靠度.

从上面的分析可知,阈值 $\lambda = 0$ 对应完全处理准则,迭代过程中所有变量节点都需要处理,其性能最好,但处理复杂度最高; $\lambda = 1/2$ 对应大数逻辑处理准则,只有满足条件的部分变量节点参与处理,可降低复杂度,但在性能上会有所损失. 显然,这两个固定取值不是最佳的. 我们可以对阈值 λ 在区间 $[0, 1/2]$ 内进行优化,则理论上可得到性能/复杂度更趋于合理和均衡的阈值判决函数.

3.3 阈值参数的选取

对阈值 λ 在区间 $[0, 1/2]$ 内的选取主要根据 BER 和译码收敛性能,在一定的 SNR 范围内进行二维搜索.

具体的选取步骤如下:(1)在某个 SNR 值下确定一个初始阈值(可取为 0);(2)启动算法,并记录迭代结束后的 BER 和平均迭代次数;(3)以一定的步进精度更新阈值,如果更新后的阈值不超过 $1/2$,转到步骤(2),否则停止搜索. 在一定范围的 SNR 内启动上述搜索过程,则可得与某个 SNR 值对应的阈值参数序列、BER 序列和平均迭代次数序列. 假设某个阈值参数 λ^* 被选为次优(由于精度问题,这里的优化结果一般是次优解),则它应具有以下特性:(1)在 $[0, \lambda^*]$ 范围内,算法对应的 BER 和平均迭代次数平缓波动变化;(2)在 $[\lambda^*, 1/2]$ 范围内,算法对应的 BER 和平均迭代次数都急剧恶化.

4 迭代策略

本文基于伴随式和星座映射信息对迭代处理策略进行描述.

4.1 校验节点迭代处理

根据文献[10],校验节点 i 所需要计算的外信息如下

$$\sigma^{(k)i-j} = s_i^{(k)} \oplus z_j^{(k)} \quad (13)$$

可见,对于第 i 个校验节点,需要进行行重(ρ)个 XOR 操作,才能完成外信息的计算. 考虑所有校验节点,则共需 $m\rho = n\gamma$ 个 XOR 操作. 然而,对于大数逻辑译码而言,其列重一般都是较大的. 因此,由此产生的二元操作不容忽视. 基于此,本文在校验节点只计算伴随式信息 $s_i^{(k)}$,然后直接传递到变量节点,其余计算操作在变量节点完成;同时,本文将使用上述提出的阈值函数,使得大部分变量节点在迭代过程中不参与信息迭代处理,从而显著降低译码复杂度.

4.2 变量节点迭代处理

考虑变量节点 j ,其执行的操作主要是对相邻校验节点传递过来的信息进行类似投票统计的处理操作. 假设在第 k 次迭代,包含硬信息 $z_j^{(k)}$ 的伴随式有 $\gamma_j^{(k)}$ 个. 其中,校验成功($s_i^{(k)} = 0$)的个数为 $\gamma_j^{(k)c}$,校验失败($s_i^{(k)} = 1$)的个数为 $\gamma_j^{(k)e}$,即 $\gamma_j^{(k)} = \gamma_j^{(k)c} + \gamma_j^{(k)e}$. 结合星座映射规则,可以将基于外信息的操作转换为基于伴随式的处理. 此时,变量节点 j 的总外信息收集如下

$$\xi_j^{(j)(k)} = \sum_{i \in M_j} (2\sigma^{(k)i-j} - 1)w_i^{(k)i-j} \quad (14)$$

由公式(13)可知,若伴随式 $s_i^{(k)}$ 校验成功,则 $\sigma^{(k)i-j}$ 和 $z_j^{(k)}$ 取值相同;否则, $\sigma^{(k)i-j}$ 和 $z_j^{(k)}$ 的取值相反. 基于此,上式可变换为

$$\xi_j^{(j)(k)} = \sum_{i=1}^{\gamma_j^{(k)c}} (2z_j^{(k)} - 1)w_i^{(k)i-j} - \sum_{i=1}^{\gamma_j^{(k)e}} (2z_j^{(k)} - 1)w_i^{(k)i-j} \quad (15)$$

引入星座映射信息后,得

$$\xi_j^{(j)(k)} = \sum_{i=1}^{\gamma_j^{(k)c}} \varphi(z_j^{(k)})w_i^{(k)i-j} - \sum_{i=1}^{\gamma_j^{(k)e}} \varphi(z_j^{(k)})w_i^{(k)i-j} \quad (16)$$

变量节点 j 的信息迭代更新如下

$$\begin{aligned} R_j^{(k+1)} &= R_j^{(0)} + [\alpha (\sum_{i=1}^{\gamma_i^{(k)}} \varphi(z_j^{(k)}) w_i^{(k)i-j} - \sum_{i=1}^{\gamma_i^{(k)}} \varphi(z_j^{(k)}) w_i^{(k)i-j})] \\ &= R_j^{(0)} + [\alpha \xi^{(j)(k)}] \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $R_j^{(k+1)}$ 是第 k 次迭代完成后变量节点 j 的可靠度, $R_j^{(0)} = q_j$ 是来自信道的初始可靠度值; α 是修正系数, 可用密度进化等方法获得, 详细过程可参考文献[7]. 与校验节点端相比, 本文算法在变量节点端需要承担更多的信息处理操作, 包括实数乘法等. 因此, 我们将结合阈值处理机制, 降低变量节点的处理复杂度.

5 算法描述

基于以上分析, 在迭代处理过程中, 校验节点处仅需计算伴随式 $s_i^{(k)}$, 可节省一定的 XOR 操作; 变量节点基于星座映射和伴随式进行投票判决机制和信息收集; 在进行可靠度迭代更新之前, 通过阈值判决函数选取适当的参数, 使得只有部分变量节点参与处理, 由此可得到一种新的算法, 即基于广义阈值函数的迭代译码算法, 描述如下:

算法 1 基于广义阈值函数的迭代译码算法

输入: 信道接收序列 y , 最大截取电平 y_{th} , 量化比特 b , 量化参数 r , 比例系数 λ , 修正系数 α 和最大迭代次数 I_{max} ;

量化: 根据(2)式对接收值进行量化处理, 得到量化序列 $q = (q_0, q_1, \dots, q_{n-1})$;

初始化: 初始可靠度设置为 $R_j^{(0)} = q_j$, 初始循环次数设置为 $k=0$, 根据星座映射规则 $\varphi(\cdot)$ 进行硬判决, 可得到序列 $z^{(0)} = (z_0^{(0)}, z_1^{(0)}, \dots, z_{n-1}^{(0)})$.

译码迭代: 当 $k < I_{max}$ 时, 执行以下步骤

步骤 1: 计算硬判决序列 $z^{(k)} = (z_0^{(k)}, z_1^{(k)}, \dots, z_{n-1}^{(k)})$;

步骤 2: 对 $0 \leq i \leq m-1$, 根据式(3)计算伴随式序列 $s_i^{(k)} = (s_0^{(k)}, s_1^{(k)}, \dots, s_{n-1}^{(k)})$; 若 $s_i^{(k)} = 0$, 则退出迭代;

步骤 3: 对 $0 \leq j \leq n-1$, 根据式(5)计算阈值函数 $f^{(k)j}$; 同时根据式(6)计算进入处理队列的变量点集合 J ;

步骤 4: 对 $j \in J$, 根据式(15)计算总信息; 同时根据式(17)进行信息更新处理, 得到 $R_j^{(k+1)}$;

步骤 5: 将迭代次数 k 加 1;

输出: 迭代过程结束, 最终译码输出为 $z^{(k)}$.

6 复杂度和性能分析

6.1 译码复杂度

本文所提出算法的计算复杂度可分析如下: (1) 获取硬判决向量时, 需要进行 n 次二元逻辑操作; (2) 在计算伴随式向量时, 需要进行 $m(\rho-1)$ 次二元逻辑操作; (3) 计算可靠度信息权值时, 需要 $m\rho(\rho-2)$ 次整数比较; 计算总外信息值时, 需要 $n(\gamma-1)$ 次整数加法; (4) 计算 J 集合, 需要 n 次实数比较; (5) 更新可靠度信息时, 需要进行 n' 次整数加法; 乘以修正因子时, 需要

n' 次实数乘法; 其中 n' 为集合 J 的阶 (即参与迭代处理的变量节点数量). 综合以上几个步骤, 本文出算法一次迭代计算需要消耗 $n + \rho(m-1)$ 次二元逻辑操作, $n(\gamma-1) + n'$ 次整数加法, $m\rho(\rho-2)$ 次整数比较, n 次实数比较和 n' 次实数乘法, 如表 1 所示. 为便于比较, 表 1 也给出了其他几种相关译码算法的复杂度. 由表可见, 与文献[7]的 RBI-MSD 相比, 本文算法在二元操作、整数加法、实数乘法 (与 J 的阶有关) 的计算量都减少了. 与广义阈值策略结合后, 复杂度将进一步降低.

表 2 给出了本文算法在变量节点的数值统计结果. 由表可见, 迭代过程中实际参与迭代处理的变量节点处只占总变量节点 30% 左右. 由于本文算法相当一部分的译码复杂度产生在变量节点端, 包括实数乘法和实数比较等. 然而, 当引入阈值可调判决函数后, 参与运算的变量节点个数只占很少一部分, 因此算法的译码复杂度可明显降低.

6.2 译码性能分析

仿真实验 1 考虑一个基于有限域构造的 (961, 721) 规则 LDPC 码^[11], 其行重列重都为 30, 码率为 0.75. 仿真信道为瑞利信道, 仿真参数设置如下: (1) 对 RBI-MLGD 算法, $b=8$ 比特时, 量化参数 $\Delta = 0.015625$;

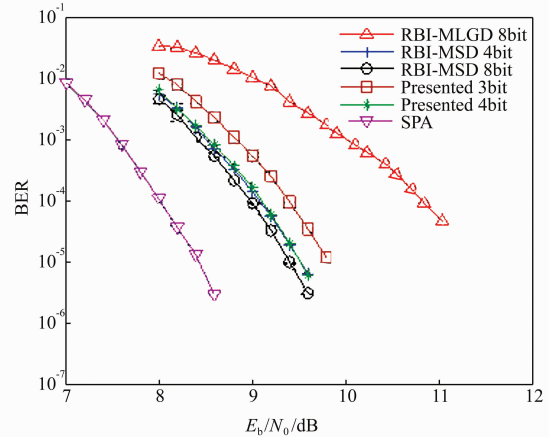


图1 (961,721)准循环LDPC码译码性能

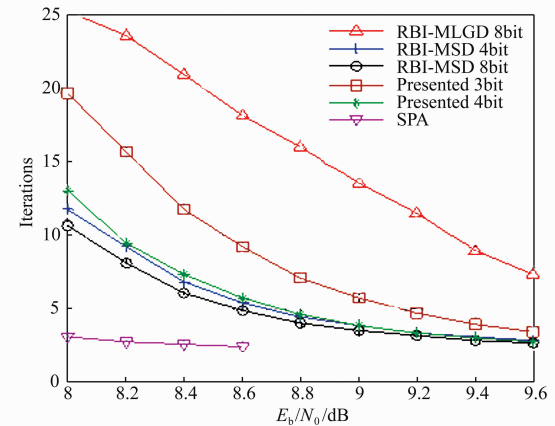


图2 (961,721)准循环LDPC码译码速度

(2) 对 RBI-MSD 算法, $b = 4$ 比特时, 量化参数 $\Delta = 0.0625$, 修正因子 $\alpha = 0.25$; 当 $b = 8$ 比特时, 量化参数 $\Delta = 0.015625$, 修正因子 $\alpha = 0.25$; (3) 对本文提出的算法, $y_{th} = 1.0$, $b = 4$ 比特时, 阈值参数 $\lambda = 0.35$, 量化参数 $r = 0.88$, 修正因子 $\alpha = 0.45$; 当 $b = 3$ 比特时, 阈值参数 $\lambda = 0.35$, 量化参数 $r = 0.79$, 修正因子 $\alpha = 0.55$. 作为比较, 我们还给出了 SPA 算法的性能曲线. 所有算法的最大迭代次数都为 50. 图 1 给出了误比特率性能, 图 2 给

出的是算法的译码收敛情况. 由仿真结果可知:

(1) 在量化比特为 4bit 时, 本文算法与原 RBI-MSD 算法性能几乎一致, 但明显好于 RBI-MLGD 算法 (在 $BER = 10^{-4}$ 可获得约 1.6dB 的增益); (2) 4bit 的本文算法与 8bit 的原 RBI-MSD 算法性能差异很小, 例如在 $BER = 10^{-4}$ 时, 差异在 0.2dB 以内; (3) 本文算法的平均迭代次数和原 RBI-MSD 算法相当. 例如, 在 $E_b/N_0 = 9.0$ dB 时, 其迭代次数分别为 3.88 和 3.83 次.

表 1 一次迭代的计算复杂度统计表

译码算法	一次迭代计算的复杂度					
	二元操作	整数加法	整数比较	实数加法	实数比较	实数乘法
OSMLGD	$mp - m + 2n$	$n\gamma - n$				
WOSMLGD	$mp - m + 2n$			$n\gamma - n$	$mp - m$	
RBI-MLGD	$2pm - m + n$	$n\gamma$				
RBI-MSD	$\gamma n + (\rho - 1)m + n$	$n\gamma$	$m\rho(\rho - 2)$			n
PRESENTED	$n + (\rho - 1)m + n'$	$n\gamma - n + n'$	$m\rho(\rho - 2)$		n	n'

表 2 变量节点数值统计表

$\lambda = 0.35$ $\alpha = 0.45$ $y_{th} = 1.0$ $b = 4$ $r = 0.88$, 瑞利信道, (961, 721) LDPC 码							
SNR	帧数	总迭代次数	平均迭代	BER	总变量节点	参与处理变量节点	比例
8.4	16012	117128	7.32	1.70×10^{-3}	112560008	45999659	40.87%
8.6	30924	176537	5.71	8.50×10^{-4}	169652057	63115927	37.20%
8.8	69928	322702	4.61	3.78×10^{-4}	310116622	105197577	33.92%
9.0	159966	620481	3.88	1.62×10^{-4}	596282241	185229155	31.06%
9.2	422563	1423071	3.37	6.0×10^{-5}	1367571231	393703238	28.79%
9.4	1235495	3718095	3.01	2.02×10^{-5}	3573089295	969574745	27.14%

仿真实验 2 考虑一个基于有限几何方法构造的 (255, 175) 的规则 LDPC 码^[1], 其行重列重都为 16, 码率为 0.69. 仿真信道为瑞利信道, 仿真参数设置为下: (1) 对 RBI-MLGD 算法, $b = 8$ 比特时, 量化参数 $\Delta = 0.015625$; (2) 对 RBI-MSD 算法, $b = 4$ 比特时, 量化参数 $\Delta = 0.0625$, 修正因子 $\alpha = 0.45$; 当 $b = 8$ 比特时, 量化参数 $\Delta = 0.015625$, 修正因子 $\alpha = 0.45$; (3) 对本文提出的算法, $y_{th} = 1.0$, $b = 4$ 比特时, 阈值参数 $\lambda = 0.35$, 量化参数 $r = 0.88$, 修正因子 $\alpha = 0.50$; 当 $b = 3$ 比特时, 比例因子 $\lambda = 0.35$, 量化参数 $r = 0.79$, 修正因子 $\alpha = 0.55$. 作为比较, 我们还给出了 SPA 算法的性能曲线. 所有算法的最大迭代次数都为 50, 仿真结果由图 3 和图 4 可看出:

(1) 在量化比特为 4bit 时, 本文译码算法与原 RBI-MSD 算法性能非常接近 (在 $BER = 10^{-4}$ 时, 差异仅为 0.2dB 左右); (2) 在量化比特为 3bit 时, 本文算法也可正常工作. 例如, 在 $BER = 10^{-4}$ 时, 其译码性能与 4bit 量化时相差不到 0.1dB; (3) 本文算法的平均迭代次数和

原 RBI-MSD 算法相当. 例如, 在 $b = 4$, 在 $E_b/N_0 = 9.0$ dB 时, 其对应的迭代次数分别为 1.88 和 1.73 次.

7 结论

控制 LDPC 译码迭代过程中参与运算处理的各种活动单元, 例如图模上的节点、Trellis 上的状态和边等, 是降低译码复杂度的一个有效手段. 本文提出一种广义阈值函数, 能够应用于当前大多数基于可靠度的译码算法. 通过设置合适的参数, 该阈值函数能够在保证译码性能前提下, 有效减少迭代过程中参与运算处理的节点数. 同时, 本文结合广义阈值函数, 提出一种基于伴随式和星座映射信息的非均匀量化译码算法, 可进一步降低复杂度和存储负荷. 实验结果显示, 在瑞利信道下, 本文算法能够获得与文献[7]的 RBI-MSD 算法相当的译码性能, 但本文算法的译码复杂度更低. 最后, 我们指出, 本文算法同样也适用于高斯白噪声 (AWGN) 信道, 其结论与瑞利信道相类似.

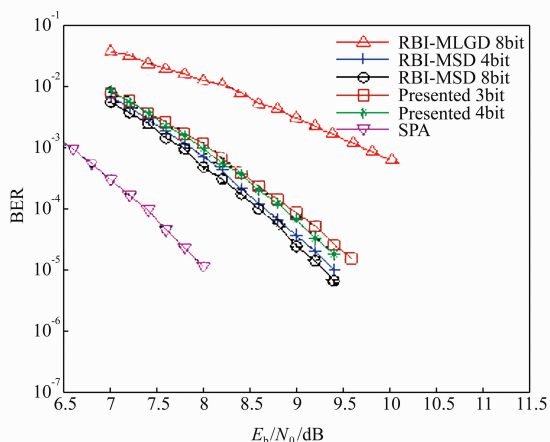


图3 (255,175)循环LDPC码译码性能

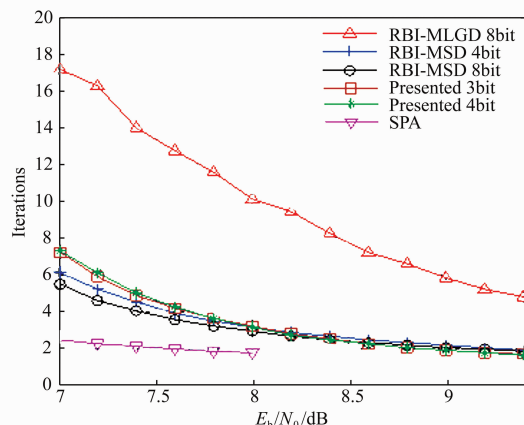


图4 (255,175)循环LDPC码译码速度

参考文献

- [1] Kou Y, Lin S, Fossorier M P C. Low-density parity-check codes based on finite geometries: A discovery and new results[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2001, 47(2): 2711 – 2736.
- [2] Sun Y, Chen H, Li X, et al. Reliability-based iterative proportionality-logic decoding of LDPC codes with adaptive decision[J]. J Commun NetW, 2015, 17(3): 213 – 220.
- [3] Zhang K, Chen H, Ma X. Adaptive decoding algorithms for LDPC codes with redundant check nodes[A]. Proceedings of IEEE Int Symp Information Theory (ISIT) [C]. Göttingen, 2012. 175 – 179.
- [4] Declercq D, Fossorier M P C. Decoding algorithms for non-binary LDPC codes over GF(q) [J]. IEEE Trans Commun, 2007, 55(4): 633 – 643.
- [5] Ma X, Zhang K, Chen H, Bai B. Low complexity X-EMS algorithms for non-binary LDPC codes [J]. IEEE Trans Commun, 2012, 60(1): 9 – 13.
- [6] Han G, Guan Y L, Huang X. Check node reliability-based scheduling for BP decoding of non-binary LDPC codes [J]. IEEE Trans Commun, 2013, 61(3): 877 – 885.

- [7] Chen H, Zhang K, Ma X, Bai B. Comparisons between reliability-based iterative min-sum and majority-logic decoding algorithms for LDPC codes [J]. IEEE Trans Commun, 2011, 59(7): 1766 – 1771.
- [8] 孙韶辉, 贺玉成, 王新梅. 低密度校验码在瑞利衰落信道中的性能分析[J]. 计算机学报, 2002, 25(10): 1077 – 1082.
SUN Shao-hui, HE Yu-cheng, WANG Xin-mei. Performance of low-density parity-check codes over rayleigh fading channels [J]. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(10): 1077 – 1082. (in Chinese)
- [9] Li X, Qin T, Chen H, Sun Y. Hard-information bit-reliability based decoding algorithm for majority-logic decodable nonbinary LDPC codes [J]. IEEE Commun Letters, 2016, 20(5): 866 – 869.
- [10] Huang Q, Kang J Y, Zhang L. Two reliability-based iterative majority-logic decoding algorithms for LDPC codes [J]. IEEE Trans Commun, 2009, 57(12): 3597 – 3606.
- [11] Lan L, Zeng L Q, Tai Y. Construction of quasi-cyclic LDPC codes for AWGN and binary erasure channels: A finite field approach [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2007, 53(7): 2429 – 2458.

作者简介



陈海强 男, 1976 年出生于广西苍梧. 2011 年获中山大学博士学位, 广西大学计算机与电子信息学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为编译码理论与 Relay 系统等.
E-mail: haiqiang@gxu.edu.cn



梁奇 男, 1991 年出生于广西南宁, 广西大学硕士研究生. 主要研究方向为信道编码技术等.



覃团发 (通信作者) 男, 1966 年出生于广西宾阳. 1997 年获南京大学博士学位, 广西大学计算机与电子信息学院副院长、教授、博士生导师. 主要研究方向为多媒体通信、无线传感器网络等.
E-mail: tfqin@gxu.edu.cn