

一种 LDPC 码的译码停止准则

温娜, 张平

(北京邮电大学 无线新技术研究所, 北京 100876)

摘要: 提出了一种实用的 LDPC 码译码停止准则, 利用信息节点的对数概率似然比(LLR)来控制迭代次数, 避开了设置停止准则门限, 可以很快判断出译码情况, 较其他方法省去了大量繁杂的计算。

关键词: 停止准则 LDPC 码

LDPC 码是近年来信道编码领域的一个研究热点, 其性能接近香农门限, 比 Turbo 码的译码复杂度低, 且可实现并行操作, 是实现高速通信的备选信道编码方案, 目前已经被 IEEE 802.3an、DVB-S.2、IEEE 802.16e 等标准所采纳。

LDPC 码之所以有很好的性能, 主要由于可以将它看成是一个单校验码和重复码的级联码, 中间由一个长的随机交织器相连, 利用迭代译码进行信息节点和校验节点的信息更新, 从而实现成功译码。研究表明, 迭代译码的性能接近最大似然译码, 应用于 Turbo 码、LDPC 码等可以达到很好的译码性能。然而, 当迭代达到一定次数后, 不再交换有用信息, 其纠错性能也就不再随着迭代次数的增加而改善^[1], 因此, 迭代译码需要译码停止准则来截止译码。

LDPC 码的译码通常按照经验值设置最大迭代次数以此作为停止准则, 每次迭代通过校验 $cH^T=0$ 来判断是否正确译码。采用这种方法的译码性能受最大迭代次数设置的影响。当信道译码出现问题, 迭代次数达到最大迭代次数但还不能正确译码时, 才判断译码失败, 此时没有提前预测译码趋势, 将耗费大量的计算量; 如果最大迭代次数设置过小, 则没有达到很好的性能就被截止。通常为避免后者发生, 最大迭代次数选取较大值。因此, LDPC 码的译码经常出现迭代多次误码率不再降低的情况。此时, LDPC 码需要采用一种停止准则, 判断译码趋势, 当认为在一定迭代次数后不能正确译码了, 就停止迭代。

通常设计的停止准则都是观察译码过程产生的一些信息, 例如外部信息的均值或方差, 设置一个门限 Th ^[2], 当达到门限时就停止迭代。这类方法的门限值受 E_b/N_0 、码率等因素的影响, 需要根据系统的实际情况决定。当系统参数发生改变时也需要进行相应的改变, 实现比较复杂。如果 LDPC 译码采用这类停止准则, 则会削弱 LDPC

码低译码复杂度的优势, 因此, 在实际通信系统中, LDPC 码不适宜采用设置门限的方法控制迭代次数。

本文基于大量的仿真实验, 提出了一种简单的 LDPC 码停止准则, 利用信息节点的对数概率似然比(LLR)来控制迭代次数, 这种方案避开了设置停止准则门限, 可以很快判断出译码情况, 继而避免了大量无用的计算。研究表明, 这种准则与系统参数无关, 具有通用性, 可应用于各种通信系统, 具有一定的实用价值。

1 迭代译码的 LLR 分析

LLR 表征了传递信息的正确程度, 迭代译码通过更新信息节点和校验节点的 LLR 来逐步提高节点信息的可靠程度, 最终 LLR 的值趋近于某个极限, 实现成功译码。因此, LLR 是决定迭代译码性能的关键因素。LLR 的变化趋势可以反映译码的性能, 可以利用这个有用信息对译码性能进行预测。因此, 下面将就 BP 算法讨论译码过程中 LLR 的变化特点。

为讨论译码性能和 LLR 的关系, 把 LDPC 码译码器看作一个非线性的信噪比增益器, 则在高斯假设的前提下, 第 l 次迭代信息外部信息对应的信噪比可以由其均值和方差定义^[1]:

$$SNR_l = \frac{E^2(L_e)}{D(L_e)} = \frac{m_u^2}{\sigma_e^2} \quad (1)$$

如果假设概率分布是平稳的, 则有:

$$\sigma_e^2 = 2m_u \quad (2)$$

从而公式(1)可以写成:

$$SNR_l = \frac{m_u}{2} \quad (3)$$

如果外部信息的概率分布并不服从理想的高斯分布, 例如信噪比低时校验节点的分布只是服从近似高斯分布, 则采用公式(1)来计算外部信息的信噪比。

SNR_l 是表征译码增益的参数, 随着迭代的进行, SNR_l 也不断增加。当 SNR_l 达到一定数值不再增加时, 或者已实现了正确译码或者出现错误地板, 再进行迭代已

经无益于译码性能的提高。由公式 (1)~(3) 可以看出, SNR_i 是外部信息的线性函数, 因此, 外部信息可以间接反映译码的进展情况。

设最大迭代次数是 $n_{\max}$, $L_k^{(i)}$ 是第 i 次迭代第 k 个信息节点的 LLR, 则第 i 次迭代 $L_k^{(i)}$ 绝对值的均值定义为:

$$M_{|L_i|}^i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |L_k^{(i)}| \quad (4)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n_{\max}$ 表示迭代次数, N 是码长。

图 1 是在不同信噪比下, 能够正确译码和不能正确译码两种情况下, $M_{|L_i|}$ 随迭代次数的变化曲线。曲线 1 和曲线 2 是成功译码情况, 曲线 3 是失败译码情况。

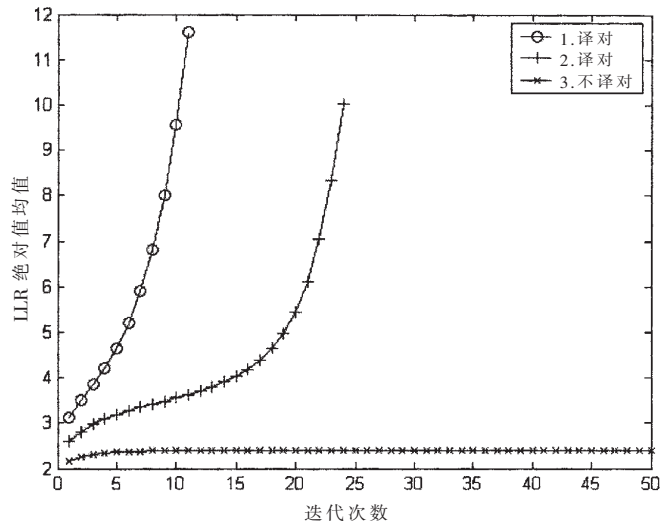


图 1 $M_{|L_i|}$ 随迭代次数的变化曲线

由图 1 可以看出, 如果正确译码, 则 $M_{|L_i|}$ 随着迭代次数的增加也不断增加, 而且迭代次数小的译码比迭代次数大的译码对应 $M_{|L_i|}$ 的增幅速度快; 如果不能正确译码, 则 $M_{|L_i|}$ 数值很小, 且增幅很小。

通常用方差来衡量一组参数的差异, 这里利用 $M_{|L_i|}$ 的方差来观察 $M_{|L_i|}$ 的变化。设定一个观测长度 m , 则前 m 次迭代的 $(M_{|L_i|}^1, M_{|L_i|}^2, \dots, M_{|L_i|}^m)$ 的方差 $\sigma_{M_{|L_i|}}^2$ 为:

$$\sigma_{M_{|L_i|}}^2 = \text{var}(M_{|L_i|}^m) \quad (5)$$

其中, var 运算符表示方差运算, 定义为:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

这里, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, n 是样本个数。

下面通过仿真研究 $\sigma_{M_{|L_i|}}^2$ 与译码的关系。采用了 802.16e 协议中提出的 1/2 码率、2304 码长的 A 型码, 最大迭代次数 50 次, 信道是 12 径 TU 信道, 理想信道估计, 码块数 4000, 车速 5km/h。图 2 和图 3 分别考察了 QPSK、16QAM、64QAM 调制方式下, 低信噪比和高信噪比时 $\sigma_{M_{|L_i|}}^2$ 与译码的累积错误概率的关系曲线, 样本点数为

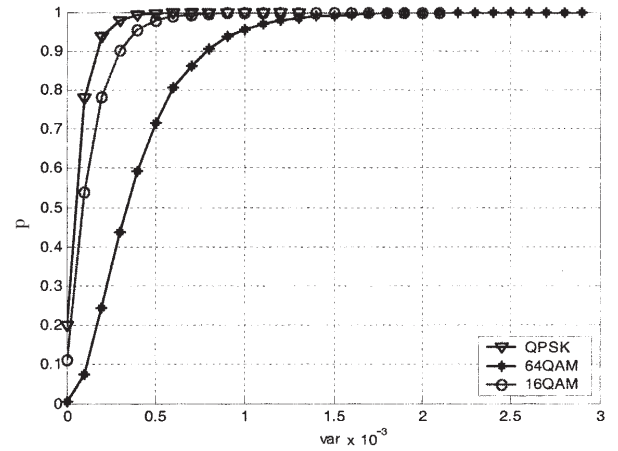


图 2 低信噪比下 $\sigma_{M_{|L_i|}}^2$ 与译码的累积错误概率关系曲线

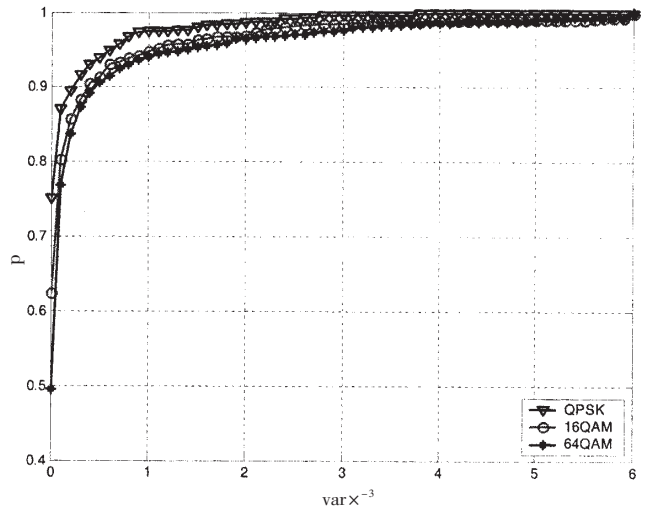


图 3 高信噪比下 $\sigma_{M_{|L_i|}}^2$ 与译码的累积错误概率关系曲线

1×10^6 。横轴是 $\sigma_{M_{|L_i|}}^2$, 纵轴是累积错误概率。由于几种调制方式的性能差异, 低阶调制需要的信噪比较低, 图 2 中 QPSK、16QAM、64QAM 分别采用的信噪比是 1dB、6.25dB、10dB。图 3 是高信噪比时 QPSK、16QAM、64QAM 分别采用的信噪比是 2.05dB、7.4dB、11.5dB。

由图 2 和图 3 可以看出, 在大量采集样本下, 几种调制方式无论是在低信噪比还是高信噪比情况, 当 $\sigma_{M_{|L_i|}}^2 < 1$ 时, 译码的累积错误概率均接近 1。这说明当 $\sigma_{M_{|L_i|}}^2$ 很小时译码失败的概率很大。由理论上分析, $\sigma_{M_{|L_i|}}^2 < 1$ 时 $M_{|L_i|}$ 随迭代次数的增加, 幅度增加缓慢, 译码的增益很小, 因此达到最大迭代次数仍然不能正确译码。基于上述仿真结果, 笔者提出一种新的迭代停止准则。

2 迭代停止准则的设计

首先进行译码, 迭代次数加 1, 然后判断是否 $cH^T=0$, 如果是, 则译码成功, 输出码字; 否则设置一个常数 m , m 小于最大迭代次数, 判断迭代次数是否大于等于 m , 当迭代次数大于或等于 m 时, 启动停止准则。此时分两种情况:

(1) 迭代次数 $\geq m$, 且 $\sigma_{M_{LLI}}^2 < 1$ 时

各次迭代 M_{LLI} 的增幅不大, 判断译码失败, 停止译码;

(2) 迭代次数 $\geq m$, 且 $\sigma_{M_{LLI}}^2 > 1$ 时

判断译码可以译对, 继续进行迭代, 直至迭代达到最大迭代次数, 若仍然没有译码正确, 停止译码。

这种停止准则当能成功译码的迭代次数小的时候, 仍然以原始的 $cH^T=0$ 为第一准则, 只有当译码达到一定次数, 判断为不可能译对的情况下停止译码。因此, 它可以明显节省平均迭代次数, 由后面的仿真结果验证, 尤其在低信噪比下, 误码率性能几乎没有损失。另外, 该停止准则的性能与设定的观测长度 m 有关, m 值设置过大, 当码字不能译对时将不能及时停止译码, 设置过小, 将可能影响纠错性能, 因此该值要根据系统复杂度和 BER 的要求权衡设置。

图 4 是采用设计的停止准则进行译码的流程图。

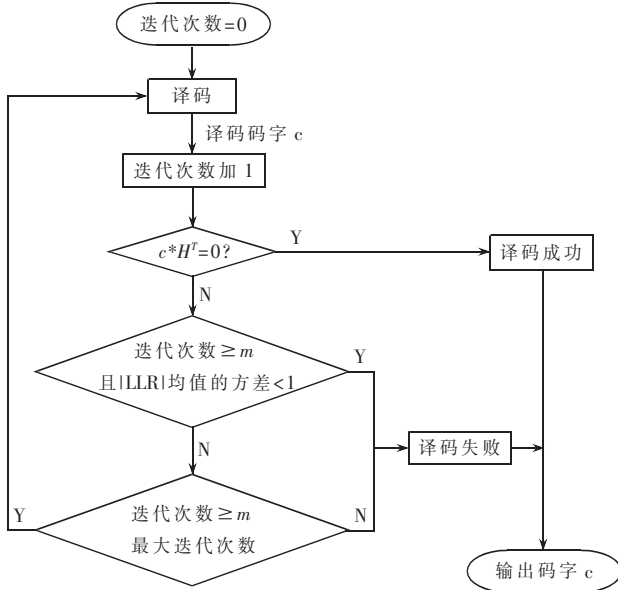


图 4 迭代译码的停止准则流程图

3 性能分析

在 802.16e 平台下仿真了该停止准则的性能。采用协议中提出的 1/2 码率、码长是 2 304 的 A 型码^[3], 调制方式 QPSK, 信道是 12 径 TU 信道, 理想信道估计, 码块数 4 000, 车速 5km/h。从误码率、误块率和平均迭代次数几个角度将提出的停止准则与原始准则进行对比, 分别仿真了该停止准则在 $m=15$ 和 $m=25$ 时的性能, 最大迭代次数为 50 次。

由图 5 可以看出, 在信噪比小于 5dB 时, 提出的停止准则和原始准则的 BER 曲线重合, 迭代次数减少没有带来误码率的提高; 当信噪比大于 5dB 时, 采用原始准则的 BER 比提出的停止准则 BER 低, 但是相差不大, $\text{BER}=10^{-5}$, $m=25$ 时, 信噪比相差不到 0.1dB。另外, m 值

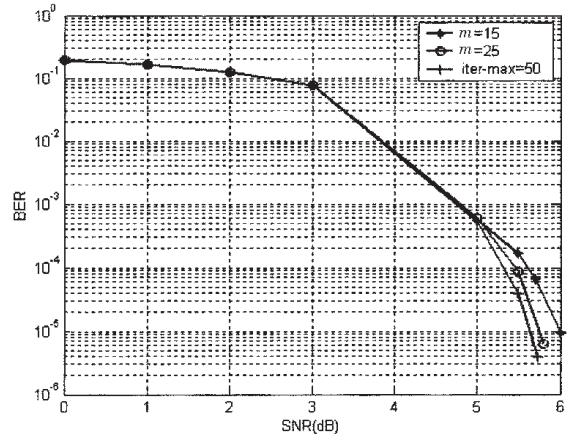


图 5 不同停止准则下信噪比(SNR)和误码率(BER)的关系曲线

的增大带来了性能的增益, $m=25$ 时 BER 低于 $m=15$ 时的 BER。

由图 6 可以出, 在 SNR 小于 3dB 时两种停止准则的误块率基本一致, 信噪比增大后, 原始准则的误块率低于提出的准则, 但是相差不大, 这个结论和图 5 结论一致。

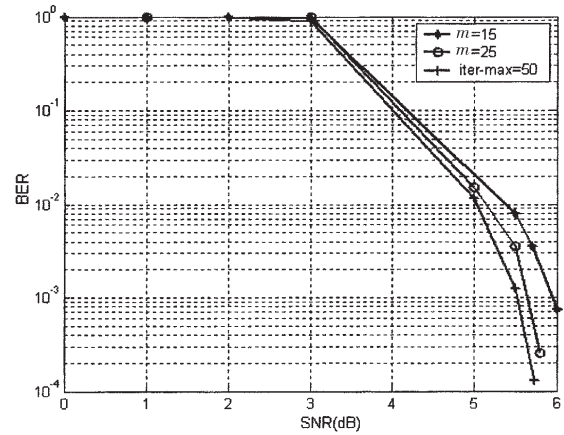


图 6 不同停止准则下信噪比(SNR)和误块率(BLER)的关系曲线

由图 7 可以看出, 不同停止准则需要的平均迭代次数有明显差异, 在信噪比低时提出的停止准则明显地降低了平均迭代次数, 只有当信噪比增加时, 平均迭代次数才可逐渐趋于一致。这是由于在信噪比高的时候, 能

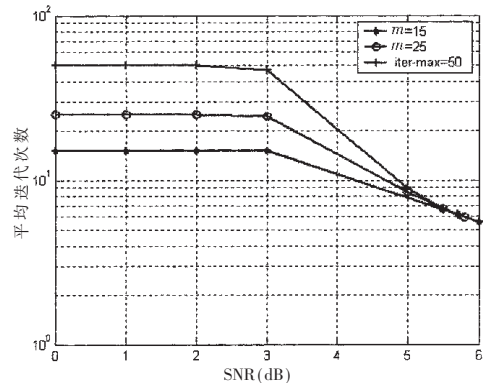


图 7 不同停止准则下信噪比(SNR)和平均迭代次数的关系曲线

够成功译码的概率比较大,不需要启动提出的停止准则就可以正确译码。

需要重点说明的是,该停止准则的设计原理利用了外部信息的统计量的变化规律,与仿真中的系统参数(如系统的调制方式、信噪比、码结构和信道)无关,具有通用性。与通常设计停止准则的思路比较,这种通过大量观察外部信息统计量随迭代次数的变化与译码结果的关系,从而得到经验值的思路具有实际应用价值。

参考文献

- [1] 刘东华.Turbo 码原理与应用技术,北京:电子工业出版社,2004.
- [2] FENQIN Z, FAIR I J. Techniques for early stopping and error detection in Turbo decoding. IEEE transactions on communications, 2003;51(10):1617-1623.
- [3] IEEE 802.16e 协议.

(收稿日期:2006-09-15)