

一种新颖的 LDPC 编码系统码率识别方法

罗路为 雷迎科 廖锡畅

(国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037)

摘要: LDPC 码编码识别是信道编码识别中的难点。随着 LDPC 码在通信领域的广泛应用, LDPC 码编码识别技术也引起越来越多的关注。针对在低信噪比条件下, 现有算法对 LDPC 码编码参数识别率低的问题, 首先利用信道输出的软信息, 将编码校验关系映射到对数似然比域, 并定义编码校验对数似然比(Check log-likelihood ratio, CLLR)。然后, 分析 CLLR 模值的统计特性, 建立 CLLR 与待识别 LDPC 码参数之间的联系。最后, 充分利用在不同校验矩阵下 CLLR 统计特性的区别, 设计一种综合 CLLR 均值和方差特征的最大均方比判决器。从仿真结果看, 在给定先验编码集合的闭集应用模式下, 本文算法明显优于已有算法, 识别增益在低信噪比环境下可达 2~5 dB。而且对于高码率 LDPC 码的识别, 本算法可以显著提高识别性能。

关键词: LDPC 码; 编码识别; 均方比; 校验对数似然比(CLLR)

中图分类号: TN919.3 **文献标志码:** A

Novel Coding Identification Algorithm for LDPC Codes

Luo Luwei, Lei Yingke, Liao Xichang

(School of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei, 230037, China)

Abstract: LDPC code recognition is a difficult issue in channel coding recognition. With the widespread application of LDPC code in communication field, LDPC code recognition technology has been attracted more and more attention. Aiming at the problem that the existing methods have been suffering weak identification performance in low SNR environment, a LDPC coding method with maximum mean square ratio is proposed in this paper. Firstly, the coded verification relation is mapped to the log-likelihood ratio domain using the soft information output in the channel, and the parity check log-likelihood ratio (CLLR) is defined. Then, the modulus statistical properties of CLLR are analyzed, and the relationship between CLLR and the parameters of LDPC code is established. Finally, using the difference of statistical properties of CLLR under different check matrices, a method of maximum mean and variance ratio based decision device is proposed. The simulation results show that the proposed algorithm is superior to the existing algorithms in the finite set application model, and the recognition gain can reach 2 dB to 5 dB in the low SNR environment. Moreover, for the recognition of high bit rate LDPC codes, the algorithm can significantly improve the recognition performance.

Key words: LDPC code; coding recognition; mean square ratio; check log-likelihood ratio(CLLR)

引言

近年来,在非合作信号处理领域,信道编码识别分析技术成为一个新的研究热点,其在智能通信、信息截获和信息对抗等领域有越来越广泛的应用^[1]。在智能通信中已经广泛采用了自适应调制编码技术。该技术可以根据信道质量随时间的变化,随时改变信道编码方式,使其获得最佳的通信效率和服务质量。然而在实际情况中,由于在传输过程中会受到时延、干扰、中断等因素的影响,有时候发送方就不能准时或正确地将相关控制信息传送到接收端,从而造成通信无法建立。这就需要接收方仅根据接收的未知数据快速识别出信道编码的体制、参数,以达到智能通信的目的^[2-3]。在各类信道编码方式中,LDPC码具有接近香农极限的纠错能力,以及译码简单,译码错误可检测等优异性能,十分有利于高速信息传输,从而成为了信道编码理论新的研究热点^[4]。在下一代5G通信系统中,由于LDPC码较强的纠错性能,可以较好地实现协作中继传输和多小区协作传输。这对LDPC码编码识别算法的研究提出了迫切需求。

针对自适应编码中LDPC码识别技术,国内外已经展开了研究。于明等研究了关于LDPC码码长和码率的识别算法^[5],该算法结合信道输出的硬判决接收序列,依次搜索信道编码集合里的全部码长和码率,把伴随式Hamming重量最小的参数组合作为识别结果,但是这种方法需要接收序列中有足够长的无误码序列,因此,在噪声环境复杂的识别过程中该算法的识别性能十分有限,识别效果也不尽人意^[6]。为提高算法对于低信噪比信号的识别率,Xia等提出了利用平均校验对数似然比的识别算法^[7]。该算法通过对接收序列校验对数似然比求平均值,然后通过设计最大均值判决器的判决门限来对LDPC码进行识别。然而,由于该方法并没有充分考虑数据的可靠度概率信息,对于低码率LDPC码识别时,该方法性能较好;但针对高码率LDPC码,该算法的识别效果仍需要进一步提高。

本文针对现有算法在低信噪比条件下,对LDPC码编码参数识别率低以及对于高码率LDPC码识别性能不足的问题,提出一种利用最大均方比的LDPC码编码识别方法。首先利用信道输出的软信息,将编码校验关系映射到对数似然比域,并定义编码校验对数似然比(Check log-likelihood ratio, CLLR)。然后,分析CLLR模值的统计特性,建立CLLR与待识别LDPC码参数之间的联系。最后,充分利用CLLR在不同校验矩阵下统计特性的区别,找到识别LDPC码编码参数的特征,设计一种综合CLLR均值和方差特征的最大均方比判决器。随后,本文结合IEEE802.11n协议,从算法的可行性分析、均方比判决器的识别性能分析、与原算法的对比分析3个方面,对本文的LDPC码识别算法进行了仿真实验。实验结果显示,在低信噪比环境下,本文算法仍能够高效地完成对LDPC码的识别。特别是在针对高码率LDPC码识别率低的问题,本文算法的识别性能明显优于文献[8]中的算法。

1 LDPC码的编码识别模型

图1给出了本文识别算法所应用的基本通信模型。针对本文LDPC码编码的识别问题,设置调制方式为BPSK,传输信道是噪声功率为 σ^2 的AWGN信道。记码型集合 $\Theta = \{\theta^r | r = 1, 2, \dots, M\}$ 为闭集空间的M种LDPC码,其中每一种码型和校验矩阵构成一一映射的关系,与 θ^r 型LDPC码相对应的校验矩阵记为 \mathbf{H}^r ,矩阵大小为 $m^r \times n^r$ 。

在发送端,发送者采用 θ^l 型LDPC码编码方式,对长度为 k 的发送信息序 $\mathbf{b}_i = (\mathbf{b}_{i,0}, \dots, \mathbf{b}_{i,j}, \dots, \mathbf{b}_{i,k-1})^T$ 进行信道编码,其中 $\mathbf{b}_{i,j} \in \text{GF}(2)$, $\text{GF}(2)$ 表示2元伽罗华域, i 表示第 i 个信息序列。编码后的码字序列为 $\mathbf{c}_i^l = (\mathbf{c}_{i,0}^l, \dots, \mathbf{c}_{i,j}^l, \dots, \mathbf{c}_{i,n^l-1}^l)^T$, $\mathbf{c}_{i,j}^l \in \text{GF}(2)$,其码字序列的码长为 n^l 。将 \mathbf{c}_i^l 按照BPSK映射后

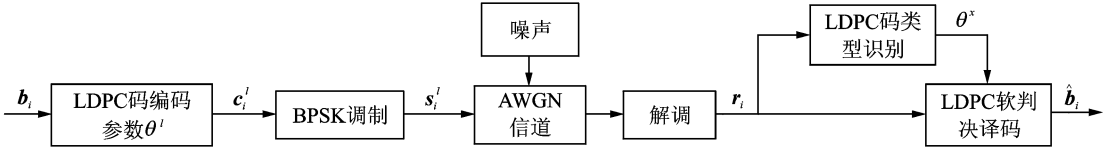


图 1 识别问题的基本通信模型

Fig. 1 Basic communication model for recognition problem

得到基带序列 $s^l = (s_{i,1}^l, \dots, s_{i,j}^l, \dots, s_{i,n-1}^l)^\top, s_{i,j}^l \in \{-1, 1\}$ 。最后将信号发送至信道上进行传输^[9]。

在接收端,首先对接收的信号进行软解调,然后对其进行采样,得到软判决序列为 $\mathbf{r} = (r_{i,1}, \dots, r_{i,j}, \dots, r_{i,n-1})^\top$,其中 $r_{i,j} \in \mathbf{R}$, \mathbf{R} 表示实数域。最后对软判序列进行 LDPC 译码。本文的研究问题是:对不同参数下的软判决序列 \mathbf{r}_i 的特征进行分析,建立其校验关系对数似然比,找到识别的特征参数。对集合 Θ 中采用不同编码类型 θ^l 的 LDPC 码进行识别,根据识别的编码参数,为 LDPC 码译码提供先验条件。

2 基于最大均方比的 LDPC 码编码识别算法

记校验向量 $\mathbf{h}_v^x = (h_{v,0}^x, \dots, h_{v,j}^x, \dots, h_{v,n-1}^x)$ 为 \mathbf{H}^x 中第 v 行向量, $1 \leq v \leq m^x, m^x$ 为 \mathbf{H}^x 的行数, $x \in \Theta$ 。当且仅当 $x=l$,即参数选择正确时,对任意的 \mathbf{h}_v^x ,码字 \mathbf{c}_i^l 与 \mathbf{h}_v^x 总有如下关系成立

$$\mathbf{h}_v^x \mathbf{c}_i^l = \sum_{t: h_{v,t}^x = 1} \oplus c_{i,t}^l = 0 \tag{1}$$

式(1)是在无误码条件下,对于 GF(2)域上识别 LDPC 码编码参数 θ^l 的基本方程(式中 \oplus 为 GF(2)域上的加法运算)。但是,由于 LDPC 码优异的纠错性能,使其多用于低信噪比环境中,信号通常会有噪声的干扰,导致接收序列中不可避免地含有错误。因此需要分析含错序列中的校验关系。本文的接收方得到的是实数序列,接下来定义 $c_{i,j}^l$ 的后验对数似然比

$$L(c_{i,j}^l | r_{i,j}) = \ln \frac{\Pr(c_{i,j}^l = 0 | r_{i,j})}{\Pr(c_{i,j}^l = 1 | r_{i,j})} \tag{2}$$

由 Bayes 理论,式(2)可以做如下恒等变形

$$L(c_{i,j}^l | r_{i,j}) = L(r_{i,j} | c_{i,j}^l) + L(c_{i,j}^l) \tag{3}$$

式(3)中先验对数似然比 $L(c_{i,j}^l) = \ln \frac{\Pr(c_{i,j}^l = 0)}{\Pr(c_{i,j}^l = 1)}$ 。由信道编码理论可知^[10],对于任何信道编码,码

字 \mathbf{c}_i^l 中 0 和 1 的概率几乎相等,所以 $L(c_{i,j}^l) = \ln \frac{\Pr(c_{i,j}^l = 0)}{\Pr(c_{i,j}^l = 1)} = 0$ 。因此式(3)可以化简为 $L(c_{i,j}^l | r_{i,j}) = L(r_{i,j} | c_{i,j}^l)$ 。由信道编码理论,在噪声功率为 σ^2 的 AWGN 信道模型中,采用 BPSK 调制,此时对应的 LLR 有如下等式成立

$$\begin{aligned} L(r_{i,j} | c_{i,j}^l) &= \ln \Pr(r_{i,j} | c_{i,j}^l = 0) - \ln \Pr(r_{i,j} | c_{i,j}^l = 1) = \ln \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(r_{i,j} - 1)^2}{2\sigma^2} \right) \right) - \\ &\ln \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(r_{i,j} + 1)^2}{2\sigma^2} \right) \right) = \frac{2r_{i,j}}{\sigma^2} \end{aligned} \tag{4}$$

下面定义 CLLR。在接收软判决序列 \mathbf{r}_i 条件下,校验关系 $\mathbf{h}_v^x \mathbf{c}_i^l$ 的 CLLR 记为 $\gamma_{i,v}^x$,则有

$$\gamma_{i,v}^x = L(\mathbf{h}_v^x \mathbf{c}_i^l | \mathbf{r}_i) = L \left(\sum_{t: h_{v,t}^x = 1} \oplus c_{i,t}^l | r_{i,t} \right) \tag{5}$$

式(5)中 $(\sum_{i: h_{i,v}^x=1} \oplus c_{i,t}^l | r_{i,t})$ 涉及到有限域运算, 实现较为困难。由于接收序列 r_i 中各个比特相互

独立的特性, 对式(5)进行推导后, 可以将式(5)近似为

$$\gamma_{i,v}^x \approx \left(\prod_{i: h_{i,v}^x=1} \text{sign}(L(\tilde{r}_{i,t} | c_{i,t}^l)) \right) \min_{i: h_{i,v}^x=1} (|L(\tilde{r}_{i,t} | c_{i,t}^l)|) \quad (6)$$

由式(6)可以看出, $\gamma_{i,v}^x$ 由 c_i^l 中被 h_v^x 校验比特的 LLR 值所决定, 当且仅当 $x=l$, 即参数识别正确时, 码字 c_i^l 与校验矩阵 h_v^x 存在校验关系, 此时 $\gamma_{i,v}^x$ 将以很大的概率为正数; 当 $x \neq l$, 即参数识别不正确时, 码字 c_i^l 与校验矩阵 h_v^x 之间没有约束关系, 此时 $\gamma_{i,v}^x$ 的取值时正时负。因此, 可以由 $\gamma_{i,v}^x$ 的正负情况来判别 $h_v^x c_i^l$ 的结果。更进一步分析, 由 LLR 函数的物理意义可知, 判别 $h_v^x c_i^l$ 结果的可靠性可以由 $|\gamma_{i,v}^x|$ 的模值大小来确定, $|\gamma_{i,v}^x|$ 越大, 判别 $h_v^x c_i^l$ 结果的可靠性就越高。

式(6)中, 由于 $\gamma_{i,v}^x$ 的定义较为复杂, 对 $\gamma_{i,v}^x$ 的概率分布函数精确求解就变得十分困难。为了简化计算量, 使算法更易于实现, 根据文献[11]以及在信道编码分析中对类似问题的处理, 本文将 $\gamma_{i,v}^x$ 的概率分布设定为正态分布。下面对此设定的合理性进行分析。

假设 $H_1: x=l$, 即码字 c_i^l 与校验矩阵 h_v^x 存在校验关系, 此时参数识别正确; 假设 $H_2: x \neq l$, 即码字 c_i^l 与校验矩阵 h_v^x 不存在校验关系, 此时参数识别不正确。由式(6)可知, 在假设 H_1 时, $\gamma_{i,v}^x$ 为正数的概率很大。此时, $\gamma_{i,v}^x$ 的取值取决于 $\min_{i: h_{i,v}^x=1} (|L(\tilde{r}_{i,t} | c_{i,t}^l)|)$ 。由于式(4)中常数项 $2/\sigma^2$ 的影响非常小, 可以不考虑, 因而 $\gamma_{i,v}^x$ 的值取决于 $\min |r_{i,t}|$ 。如图 2 所示, 接收比特 $r_{i,t}$ 服从于双峰正态的概率分布, 对 $r_{i,t}$ 取绝对值后, $|r_{i,t}|$ 的概率分布近似于正态分布。所以, 当 $x=l$ 时, 可以对 $\gamma_{i,v}^x$ 进行近似正态分布处理。

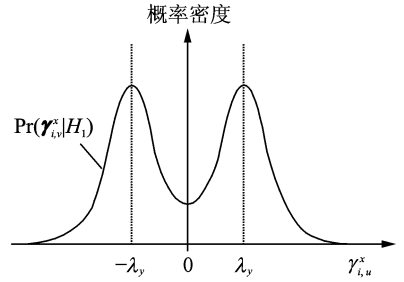


图 2 $\text{Pr}(\gamma_{i,v}^x | H_1)$ 的概率密度函数示意图
Fig. 2 A schematic of probability density function of $\text{Pr}(\gamma_{i,v}^x | H_1)$

从式(6)可知, $|\gamma_{i,v}^x|$ 的大小取决于校验比特中的最小 LLR 模值。根据最小值概率分布函数理论^[12], 由于每个校验比特都是独立同分布的, 因此 $|\gamma_{i,v}^x|$ 的概率分布函数 $F_U(u)$ 能够表示为

$$F_U(u) = 1 - \prod_{i: h_{i,v}^x=1} \text{Pr}(|L(\tilde{r}_{i,t} | c_{i,t}^l)| > u) = 1 - [1 - F_W(\omega)]^T \quad (7)$$

式中: $F_W(\omega)$ 由信道特性决定, 它表示 $|L(\tilde{r}_{i,t} | c_{i,t}^l)|$ 的概率分布函数, ω 则表示 h_v^x 中“1”的个数。由式(7)中可知, $|\gamma_{i,v}^x|$ 的值在区间 $[0, u]$ 内的概率与 ω 正相关。如果 ω 取值特别大, 使得 $u \rightarrow 0$, $|\gamma_{i,v}^x|$ 的值落入区间 $[0, u]$ 之内的概率依然很大^[13]。所以当 ω 的值越大, $|\gamma_{i,v}^x|$ 的取值通常会越小。由编码理论可知, 在高码率 LDPC 码的校验向量中其码字的校验位数较少。在对信息位进行校验时, 为了充分利用较少的校验位, 高码率 LDPC 码的校验向量中会含有比较多的“1”。因此, 相对于低码率 LDPC 码, 在高码率 LDPC 码识别中, 对应的 $|\gamma_{i,v}^x|$ 将会接近于 0。通过式(6), 能够获得 H^x 中每个校验向量的 CLLR, 而 H^x 与接收序列 r_i 是相对应的^[14]。

$$\gamma_v^x = (\gamma_{i,1}^x, \gamma_{i,2}^x, \dots, \gamma_{i,N}^x) \quad (8)$$

式中: N 表示校验矩阵 H^x 中校验向量的数目。定义 γ_v^x 的两个参数 σ_1^x, σ_2^x 如下

$$\sigma_1^x = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N |\gamma_{i,v}^x|, \sigma_2^x = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (\gamma_{i,v}^x - \sigma_1^x)^2$$

其中 σ_1^x 表示 $\gamma_{i,v}^x$ 中元素的均值, 而 σ_2^x 表示 $\gamma_{i,v}^x$ 中元素与 σ_1^x 的偏离程度。定义均方比 φ^x 为

$$\varphi^x = \frac{\sigma_1^x}{\sigma_2^x} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N |\gamma_{i,v}^x|}{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (\gamma_{i,v}^x - \sigma_1^x)^2} = \frac{\sum_{v=1}^N |\gamma_{i,v}^x|}{\sum_{v=1}^N (\gamma_{i,v}^x - \sigma_1^x)^2} \quad (9)$$

结合式(1—6)可知:在 $x=l$ 的情况下,码字 c_i^l 与校验向量 h_v^x 满足校验关系,此时 $h_i^x c_i^l = 0$ 成立,因此,应有 $\sigma_1^x > 0$,根据式(9),此时 $\varphi^x > 1$;而在 $x \neq l$ 的情况下,码字 c_i^l 与校验向量 h_v^x 并没有约束关系。在对 γ_i^x 中所有元素求均值的过程中, γ_i^x 中时正时负的元素相互抵消^[15],此时 $\varphi^x \approx 1$ 。

更进一步, φ^x 不仅可以体现 σ_1^x 的取值特征,而且由 σ_1^x 与 σ_2^x 的物理意义可知, φ^x 还能够表征 γ_i^x 在 0 和 l^x 邻域内集中程度的比值大小,当 l^x 的值固定时, φ^x 越大, γ_i^x 在 σ_1^x 邻域内的集中程度越高^[16]。因此,在对高码率 LDPC 码的识别问题中,尽管当 σ_1^x 接近于 0,如果 γ_i^x 在 σ_1^x 邻域内的分布更加集中,就可以获得较大的均方比值。所以,针对低信噪比条件下的高码率 LDPC 码的识别,即使 σ_1^x 已经接近于 0,均方比可以通过综合利用数据的分布特性,充分区分 γ_i^x 之间的差异,实现对高码率 LDPC 码的识别^[17]。

通过以上分析推导,定义最大均方比判决器为

$$\hat{\theta}_i = \operatorname{argmax}_{\theta' \in \Theta} \eta^x \quad (10)$$

为了提高识别算法的运算效率,这里采用 H^x 中部分校验向量定义均方比。记校验矩阵 H^x 中前 p ($1 \leq p \leq N$) 行校验向量定义的均方比 $\varphi^x(p)$ 表示为

$$\varphi^x(p) = \frac{\sigma_1^x(p)}{\sigma_2^x(p)} = \frac{\sum_{v=1}^N |\gamma_{i,v}^x|}{\sum_{v=1}^N (\gamma_{i,v}^x - \sigma_1^x(p))^2} \quad (11)$$

式中 $\sigma_1^x(p) = 1/p \times \sum_{v=1}^p \gamma_{i,v}^x$ 。从式(11)中可以看出,相对于最大均值判决器,最大均方比判决器综合考虑了更多的数据特征,通过以部分计算复杂度为代价来获得识别性能上的提升。然而这个计算复杂度是完全可以接受的^[18]。从识别性能和计算复杂度两个角度来考虑,最大均方比判决器很好地实现了这两者之间的平衡^[19]。

3 仿真分析

通过上文的分析讨论,本节利用 Matlab 软件进行仿真实验,通过 1 000 次蒙特卡洛实验,对本文的算法进行实验验证。仿真时,利用 IEEE 802.11n 协议中的 LDPC 码以及文献[12]的编码算法,对信息序列进行信道编码。在 IEEE 802.11n 协议中,LDPC 码的编码参数有:码长 $n=648, 1\ 296, 1\ 944$,码率 $R=1/2, 2/3, 3/4, 5/6$ ^[20]。

3.1 利用均方比特性的可行性分析实验

对均方比 $\varphi^x(p)$ 的特性进行考察。在不同 p 值下,采用不同编码方式,分析均方比 $\varphi^x(p)$ 的变化。仿真中,信噪比为 5 dB,编码参数集合 Θ 是码长为 648, $R=1/2, 2/3, 3/4, 5/6$ 时 4 种不同码率的 LDPC 码。图 3—6 分别表示当 c_i^l 分别采用 $\theta^1: n=648, R=1/2$ 。 $\theta^2: n=648, R=2/3$ 。 $\theta^3: n=648, R=3/4$ 和 $\theta^4: n=648, R=5/6$ 时,相应的均方比 $\varphi^x(p)$ 随 p 的变化情况。

从图中明显可以看出,如果 $x=l$,即编码方式识别正确时,与 θ^l 对应的均方比 $\varphi^l(p)$ 明显比其他 $\varphi^l(p)$ 的值要大,而且随着 p 数量的递增, $\varphi^l(p)$ 的值将趋近于一个大于 1 的常数,而其他 $\varphi^l(p)$ 的值则趋近于 1,这个结果与文中的理论分析相一致。因此,利用不同编码方式下均方比 $\varphi^x(p)$ 之间的显著差别,可以有效地完成对 LDPC 码编码方式的识别。

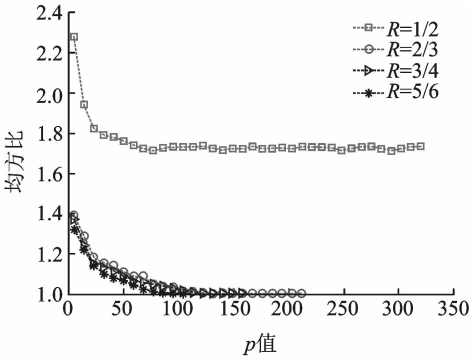


图3 编码方式 θ^1 : $n=648, R=1/2$ 时, $\varphi^x(p)$ 随 p 取值的变化情况

Fig. 3 $\varphi^x(p)$ changing with the value of p using encoding method θ^1 : $n=648, R=1/2$

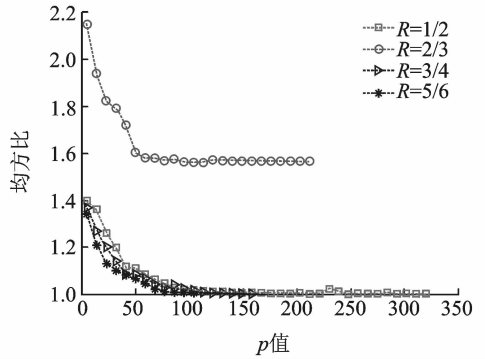


图4 编码方式 θ^2 : $n=648, R=2/3$ 时, $\varphi^x(p)$ 随 p 取值的变化情况

Fig. 4 $\varphi^x(p)$ changing with the value of p using encoding method θ^2 : $n=648, R=2/3$

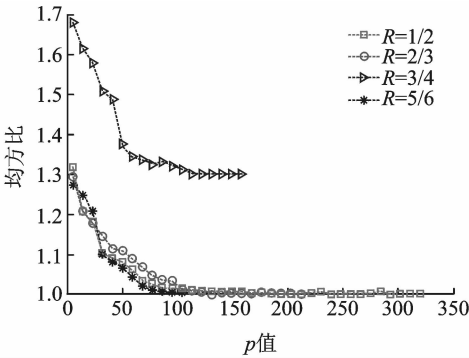


图5 编码方式 θ^3 : $n=648, R=3/4$ 时, $\varphi^x(p)$ 随 p 取值的变化情况

Fig. 5 $\varphi^x(p)$ changing with the value of p using encoding method θ^3 : $n=648, R=3/4$

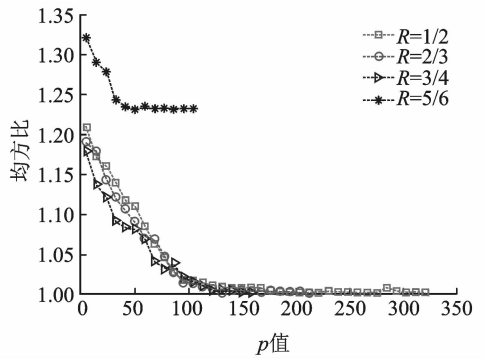


图6 编码方式 θ^4 : $n=648, R=5/6$ 时, $\varphi^x(p)$ 随 p 取值的变化情况

Fig. 6 $\varphi^x(p)$ changing with the value of p using encoding method θ^4 : $n=648, R=5/6$

3.2 利用均方比判决器的识别性能分析

本节通过实验,对均方比判决器的识别性能进行分析。信噪比范围为 $-4 \sim 6$ dB,编码参数集合 Θ 为 4 种码率下码长分别为 648 和 1 944 的 LDPC 码。图 7,图 8 分别表示码长为 648 和 1 944 时,均方比判决器的识别正确率随信噪比的变化情况,此时取 $p=N$ 。

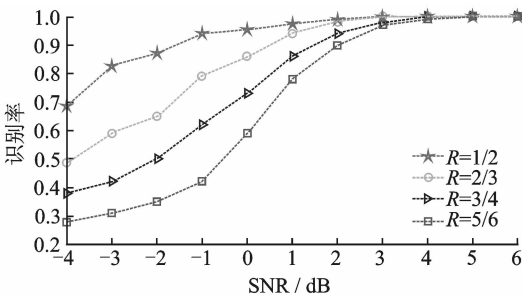


图7 码长 648 时 4 种码率的识别正确率变化曲线
Fig. 7 Recognition rate change curves of four code rates at 648 code length

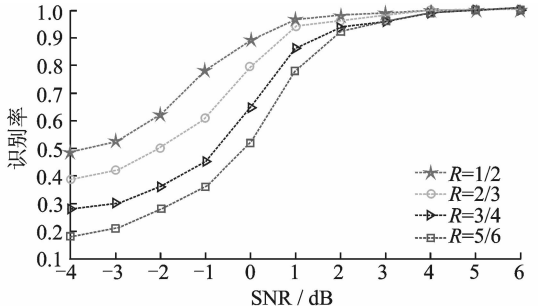


图8 码长 1 944 时 4 种码率识别正确率变化曲线
Fig. 8 Recognition rate change curves of four code rates at 1 944 code length

从图 7 和图 8 中可以看出,当信噪比高于 4 dB 时,码长为 648 和 1 944 的任何码率的 LDPC 码都能够被高效地识别出来,识别率达到 99% 以上。在信噪比 -4~4 dB 时,随着信噪比的提高,算法的识别正确率逐渐上升,识别有效性保持较高水平。从图 7 和图 8 的对比可以看出,利用最大均方比判决器进行识别,无论是对低码长的 LDPC 码还是较高码长的 LDPC 码都有较好的识别性能。

3.3 与最大均值算法的对比实验

为考察本文算法在识别高码率 LDPC 码时的性能,本节将本文算法与文献[8]的算法进行对比分析。实验采用的码率 $R=5/6$,针对 3 种不同码长,对两种算法 LDPC 码的识别正确率进行对比分析。仿真中,信噪比范围为 -4~6 dB,取 $p=N$ 。图 9 给出了两种算法识别正确率的变化曲线。

从图 9 中可知,对于相同的 3 种码长,本文算法对高码率 LDPC 码的识别正确率明显高于文献[8]的算法。而且当识别正确率达到 95% 时,相对于文献[8]的算法,本文算法对信噪比的要求降低了约 1 dB。

这是由于本文的算法能够更加充分地利用 γ_i^r 所蕴含的统计信息,文献[8]的最大均值算法仅仅利用了数据的均值特性,而高码率的 LDPC 码在信噪较低时, γ_i^r 的均值已经接近于 0,因此仅利用均值特征不能有效地完成对高码率 LDPC 的识别。本文算法中的最大均方比特征参数,综合利用了 γ_i^r 的均值和方差特性,使得不同参数的 LDPC 码之间的区分度更为明显,因此识别效果也就更加理想。

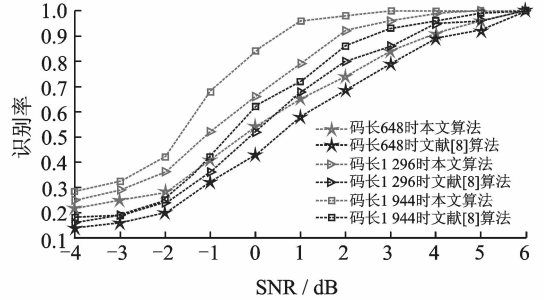


图 9 本文算法与文献[8]算法识别正确率变化曲线
Fig. 9 Recognition rate change curves of the proposed algorithm and the algorithm in Ref. [8]

4 结束语

在信道编码识别体系中,针对现有算法在低信噪比条件下对 LDPC 码编码参数识别率很低的问题,本文提出了基于最大均方比的 LDPC 码识别算法。该算法利用信道输出的软信息,将编码校验关系映射到对数似然比域,并定义 CLLR。然后,分析 CLLR 模值的统计特性,建立 CLLR 与待识别 LDPC 码参数之间的联系。最后,充分利用 CLLR 在不同校验矩阵下统计特性的区别,利用最大均方比判决器,进而完成了对 LDPC 码的闭集识别。该算法综合利用了数据均值和方差的统计特性,有效地避免了传统算法在信噪比低时识别效果不理想的缺陷。而且,针对高码率的 LDPC 码,均方比判决器的区分度十分明显,进而可达到较为理想的识别效果。最后采用 IEEE 802.11n 协议中的 LDPC 码对所提算法进行了仿真实验。同时从利用均方比特性的可行性分析、均方比判决器的识别性能分析、与原算法的对比实验分析 3 个方面对本文的算法进行实验验证。从实验结果可以看出,相对于已有算法,本文算法在低信噪比环境下仍能获得较好的识别效果,识别增益可达 2~5 dB。而且当信噪比高于 5 dB 时,识别正确率可以达到 99%。针对高码率 LDPC 码的识别,本文算法的识别效果也明显优于现有算法。

参考文献:

[1] 解辉, 黄知涛, 王丰华. 信道编码盲识别技术研究进展[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1166-1176.
Xie Hui, Huang Zhitao, Wang Fenghua. Research progress of blind recognition of channel coding[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1166-1176.

[2] 于沛东, 彭华, 巩克现, 等. 基于寻找小重量码字算法的 LDPC 码开集识别[J]. 通信学报, 2017, 38(6): 108-117.
Yu Peidong, Peng Hua, Gong Kexian, et al. LDPC code reconstruction based on algorithm of finding low weight code-words [J]. Journal of Communication, 2017, 38(6): 108-117.

[3] 朱宏鹏, 程磊, 张剑. 可变码长 LDPC 码的 GAU 构造算法[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(6): 1240-1245.
Zhu Hongpeng, Cheng Lei, Zhang Jian. GAU construction algorithm for variable-length LDPC codes[J]. Journal of Data

Acquisition and Processing, 2015, 30(6):1240-1245.

- [4] 李歆昊, 张旻, 史英春, 等. 基于游程特征的线性分组码与卷积码类型识别[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(6):1205-1214.
Li Xinhao, Zhang Min, Shi Yingchun, et al. Linear block code and convolutional code type identification based on range features [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(6):1205-1214.
- [5] 于明, 高新华, 杜宇峰. 一种容误码的 LDPC 码编码码长和码率的识别方法[P]. 中国: 201210384717. 2013-02-06.
Yu Ming, Gao Xinhua, Du Yufeng. A error-toleration code length and rate identification algorithm for LDPC codes[P]. China: 201210384717. 2013-02-06.
- [6] 阔永红, 曾伟涛, 陈健. 基于概率逼近的本原 BCH 码编码参数的盲识别方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2):332-339.
Kuo Yonghong, Zeng Weitao, Chen Jian. Blind identification of primitive BCH codes parameters based on probability approximation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(2):332-339.
- [7] Xia T, Wu H C. Blind identification of non-binary LDPC codes using average LLR of syndrome a posteriori probability[J]. IEEE Communications Society, 2013(7):1301-1304.
- [8] Xia T, Wu H C. Novel blind identification of LDPC codes using average LLR of syndrome a posteriori probability[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):632-640.
- [9] 刘骏, 李静, 于沛东. 一种 Turbo 码随机交织器的迭代估计方法[J]. 通信学报, 2015, 36(6):201-206.
Liu Jun, Li Jing, Yu Peidong. An iterative estimation method for random interleaver of Turbo codes[J]. Journal on Communications, 2015, 36(6):201-206.
- [10] Moosavi R, Larsson E G. A fast scheme for blind identification of channel codes[C]// Global Telecommunications Conference. [S.l.]: IEEE, 2011:1-5.
- [11] 包昕, 周磊珂, 何可, 等. LDPC 码稀疏校验矩阵的重建方法[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(2):191-196.
Bao Xin, Zhou Leike, He Ke, et al. A method of restructuring LDPC parity-check matrix[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(2):191-196.
- [12] Cluzeau M, Tillich J P. On the code reverse engineering problem[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. Toronto, Canada: [s. n.], 2008:634-638.
- [13] 刘海达, 李静, 彭华. 利用最大偏差比的 LDPC 码识别算法[J]. 信号处理, 2014(8):908-913.
Liu Haida, Li Jing, Peng Hua. LDPC code recognition algorithm with maximum deviation ratio[J]. Journal of Signal Processing, 2014(8):908-913.
- [14] 张岱, 张玉, 杨晓静. 一种高误码(n, k, m)非系统卷积码盲识别算法[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(3):636-645.
Zhang Dai, Zhang Yu, Yang Xiaojing. A blind recognition algorithm for high error (n, k, m) non-systematic convolutional codes[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(3):636-645.
- [15] 刘海达. 基于解调软判决的信道编码参数识别技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2014:56-59.
Liu Haida. Research on channel coding parameter identification technology based on demodulation soft decision [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2014:56-59.
- [16] 于沛东, 李静, 彭华. 一种利用软判决的信道编码识别新算法[J]. 电子学报, 2013, 41(2):301-306.
Yu Peidong, Li Jing, Peng Hua. A novel algorithm for channel coding recognition using soft-decision[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2):301-306.
- [17] Chabot C. Recognition of a code in a noisy environment[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. Nice, France: [s. n.], 2007:2211-2215.
- [18] Li C, Sun F, Cioffi J M, et al. Energy efficient MIMO relay transmissions via joint power allocations[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs, 2014, 61(7):531-535.
- [19] Sala F, Schoeny C, Kabir S. On nonuniform noisy decoding for LDPC codes with application to radiation-induced errors[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(4):1438-1450.
- [20] Jung J, Park I C. Multi-bit flipping decoding of LDPC codes for NAND storage systems[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(5):979-982.

作者简介:



罗路为(1993-),男,硕士研究生,研究方向:信道编码识别与分析、通信信号处理, E-mail: llwlushang@163.com.



雷迎科(1975-),男,博士,副教授,研究方向:模式识别、通信信号处理、机器学习。



廖锡畅(1994-),男,硕士研究生,研究方向:通信信号处理、信号盲解调。