

误码条件下 LDPC 码参数的盲估计

陈泽亮, 彭 华, 巩克现, 于沛东, 王伟年

(信息工程大学信息工程学院, 河南郑州 450002)

摘 要: 针对非合作信号处理中 LDPC 码(Low-Density Parity-Check)的盲识别问题,提出了一种容错能力较强的开集识别算法.该算法通过对码字矩阵进行高斯约旦消元找到汉明重量较小的“相关列”,并根据“相关列”中所包含的约束关系求得 LDPC 码的校验向量,然后剔除“相关列”中为“1”位置对应的错误码字.若根据高斯约旦消元求校验向量和剔除错误码字进行迭代无法得到更多校验向量,则对得到的这些校验向量进行稀疏化,再进行译码纠错.最后,综合利用校验向量的求解,错误码字的剔除,校验向量稀疏化,LDPC 码译码进行迭代,实现 LDPC 码校验矩阵的有效重建.仿真结果表明,对于 IEEE 802.16e 标准中的(576,288) LDPC 码,在误比特率为 0.0022 时,本文算法仍可以达到较好的识别效果.

关键词: 信道编码; LDPC 码; 盲识别; 校验向量; 稀疏化; 开集识别; 误比特率

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)03-0652-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.021

A Method for Blind Recognition of LDPC Codes in a Noisy Environment

CHEN Ze-liang, PENG Hua, GONG Ke-xian, YU Pei-dong, WANG Wei-nian

(Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: A strong fault tolerance algorithm was proposed for LDPC (Low-Density Parity-Check) code reconstruction without a candidate set in a non-cooperative context. The algorithm uses Gauss Jordan elimination to find related columns with low Hamming weight and obtains the parity-check vector of LDPC codes according to the constraint relationship contained in the related column. Then the error code corresponding to the “1” position in the related column is removed. If the iteration according to Gauss Jordan elimination and the removing of error code can not get more parity-check vectors, then it makes these resulting parity-check vectors to be sparse and uses the sparse vectors to error correction. Finally, it reconstructs LDPC parity-check matrix effectively by making comprehensive use of parity-check vector solution, error code elimination, parity-check matrix sparsity and LDPC codes decoding to iterate. Simulation results show that, for the (576, 288) LDPC codes in IEEE 802.16e standard, the proposed algorithm can provide good performance even when the bit error rate is 0.0022.

Key words: channel coding; LDPC codes; blind recognition; parity-check vector; sparse; open set recognition; bit error rate

1 引言

信道编码参数识别^[1]是指在编码参数未知的情况下,对接收信息进行分析,获取发送方所使用的编码参数,从而实现译码、恢复信息的一项技术. LDPC 码是一种由稀疏校验矩阵定义的线性分组码,在低信噪比环境中具有优异性能,目前广泛应用于现代通信系统中,

是一种最具潜力的编码方案(已确定为 5G 标准的长码编码方案).但由于其码长较长,构造方法随机多样,且仅由一个稀疏校验矩阵来定义,使得传统的编码分析方法纷纷失效^[1](传统的识别方法应用到 LDPC 码的识别上,往往会遇到计算复杂度太高,所需存储量太大等问题),使该问题成为信道编码分析中的一个难点.特别是对于信号截获方而言,接收信号的信噪比更低,这

就要求相关的识别算法具有较强的容错能力. 这些都给 LDPC 码编码参数的分析带来了困难与挑战, 因此对该类问题进行研究具有重要理论意义和实用价值.

然而, 目前针对 LDPC 码盲估计的研究成果较少. 主要限于闭集识别, 对于它的开集识别算法很少, 且抗噪性能不理想. 文献[2~4]利用解调软信息计算校验关系的对数似然比, 较好地实现了 LDPC 码的识别, 但其仅适应于闭集识别的应用环境. 文献[5]利用无误码字高斯消元得到非稀疏校验矩阵, 然后对其稀疏化实现 LDPC 码的识别, 该方法在开集识别环境下能较好地识别 LDPC 码, 但其要求用于重构的码字必须无误码. 文献[6]通过列消元找到疑似校验矩阵, 然后根据码字剔除错误校验向量, 同时通过校验向量剔除错误码字, 最终将得到的校验向量稀疏化, 实现 LDPC 码的识别, 该算法考虑了误码条件下 LDPC 码的开集识别问题, 但其容错能力比较有限.

本文提出了一种容错能力较强的开集识别算法. 该算法通过对码字矩阵进行高斯约旦消元^[7]得到汉明重量较小的“相关列”, 并记录该“相关列”由那些列向量线性组合而成, 则每得到一个“相关列”, 就得到了一个 LDPC 码的校验向量; 然后剔除该“相关列”中为“1”位置对应的码字(即错误码字); 若根据高斯约旦消元求校验向量和剔除错误码字进行迭代无法得到更多校验向量, 则对得到的这些校验向量进行稀疏化, 再进行译码纠错; 最后, 综合利用校验向量的求解, 错误码字的剔除, 校验向量稀疏化, LDPC 码译码进行迭代, 实现 LDPC 码的识别.

2 线性分组码及问题模型介绍

一个 (n, k) 线性分组码是一种代数编码, 每个码字包含 k 个信息位和 $n - k$ 个校验位, 其校验位和信息位之间是一种线性约束关系. 若假设生成矩阵为 \mathbf{G} , 输入信息为 \mathbf{m}_i , 则码字 $\mathbf{c}_i = \mathbf{m}_i \mathbf{G}$, 这称为编码约束关系; 若假设校验向量为 \mathbf{h}_j , 则与码字 \mathbf{c}_i 满足 $\mathbf{c}_i \mathbf{h}_j^T = 0$, 这称为校验约束关系.

实际中, 编码后的序列需经信道进行传输, 传输中会叠加噪声. 本文问题模型的原理图如图 1 所示.

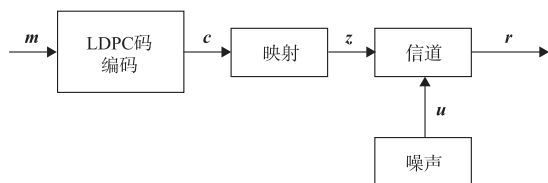


图1 LDPC码的问题模型

图 1 是实际信号传输的简化模型, 模型中省去了信号层面上的调制过程. 假设映射为简单的 BPSK 映射(0

$\leftrightarrow +1, 1 \leftrightarrow -1$), 对应的接收序列为 $\mathbf{r} = \mathbf{z} + \mathbf{u}$, \mathbf{u} 为高斯白噪声. 对于接收方来说, 已知的是解调软判决序列 \mathbf{r} . 本文要解决的问题就是利用已知的解调软信息 \mathbf{r} 对 LDPC 码参数(主要针对 LDPC 码校验矩阵和码字信息长度 k)进行盲识别.

3 LDPC 码参数估计的原理

3.1 校验向量的求解

LDPC 码是一种线性分组码, 对于线性分组码而言, 同一码组内的校验码元与信息码元具有线性相关性, 下面利用该特性实现校验向量的识别.

首先对解调软判决序列 \mathbf{r} 进行硬判决得到码字序列 $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_M)$, 其中 M 表示接收端得到的码字数, $\mathbf{v}_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n})$ 为接收端得到的第 i 个 LDPC 码字($1 \leq i \leq M$). 然后将这些码字构造成矩阵形式

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots & v_{1,n} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots & v_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{M,1} & v_{M,2} & \cdots & v_{M,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

利用二元域上的高斯约旦消元法对 \mathbf{V} 进行初等列变换化成一个下三角矩阵 \mathbf{L} , 取出其下半部分矩阵 \mathbf{L}^d (由 \mathbf{L} 的第 $n+1$ 行到第 M 行的所有行向量组成), 并计算 \mathbf{L}^d 中每列列向量汉明重量的值, 记为 $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 其具体步骤参见文献[7]. 若假设第 u 列为信息码元“非相关列”, 由于 w_u 服从二项分布, 则 w_u 的均值为

$$\bar{w} = \frac{1}{2} \cdot (M - n) \quad (2)$$

则经高斯约旦消元后, 汉明重量较小列(相关列)的集合可由下式判定

$$Q = \{j | \varphi(j) = w_j / \bar{w} < \beta, j = 1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

其中 β 为检测门限. 在无误码时, 校验码元所在的“相关列”可化为全0列, 因此, 只要 $\beta > 0$ 即可. 但当存在误码时会出现门限效应, 若 β 太大, 则可能将信息码元“非相关列”判断为校验码元“相关列”, 引起误报; 若 β 太小, 则可能会将“相关列”判断为“非相关列”, 引起漏报. 实际上, 高斯约旦消元后“相关列”的汉明重量远远小于“非相关列”, 也就是说“相关列”的汉明重量一定有 $w_j < \bar{w}$ (即 $\beta = 1$), 但是为了不引起误报, β 的值应适当地小于1.

若定义单位矩阵为 $\mathbf{E} = (\mathbf{e}_1^{(n)}, \mathbf{e}_2^{(n)}, \dots, \mathbf{e}_n^{(n)})$, 其中 $\mathbf{e}_j^{(n)} = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T$ 表示一个长为 n 的单位列向量, 其元素“1”在第 j 个位置. 为了记录 \mathbf{L}^d 中汉明重量较小的“相关列”由哪些列线性组合而成, 可在矩阵 \mathbf{V} 高斯约旦消元过程中, 对矩阵 \mathbf{E} 进行与矩阵 \mathbf{V} 相同的列操作. 若假设矩阵 \mathbf{E} 经相关的列变换后为 $\mathbf{H}' =$

$(\mathbf{h}'_1, \mathbf{h}'_2, \dots, \mathbf{h}'_n)$, 则可得 LDPC 码校验向量的集合为

$$H^d = \{\mathbf{h}'_j | j \in Q\} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,通过高斯约旦消元,每得到一个“相关列”,就对应的得到了一个 LDPC 码的校验向量.虽然高斯约旦消元法具有一定的容错能力,但当误码较严重时,由于 LDPC 码码字中的相关性破坏较严重,通过高斯约旦消元并不能得到所有的校验向量.为了得到更多的校验向量,下节将根据高斯约旦消元的结果提出一种剔除错误码字的方法.

3.2 错误码字的剔除

由 3.1 节可知,经高斯约旦消元后会得到下三角矩阵 \mathbf{L} ,若记矩阵 $\mathbf{L} = (\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, \dots, \mathbf{L}_n)$,其中 $\mathbf{L}_j = (l_{1,j}, l_{2,j}, \dots, l_{M,j})^T$ 表示矩阵 \mathbf{L} 中的第 j 列.又记矩阵 $\mathbf{L}^d = (\mathbf{L}_1^d, \mathbf{L}_2^d, \dots, \mathbf{L}_n^d)$,则有 $\mathbf{L}_j^d = (l_{n+1,j}, l_{n+2,j}, \dots, l_{M,j})^T$, \mathbf{L}_j^d 为矩阵 \mathbf{L}^d 中的第 j 列 ($1 \leq j \leq n$).则由式(3)可知汉明重量较小的“相关列”集合为

$$L^c = \{\mathbf{L}_j^d | j \in Q\} \quad (5)$$

由于高斯约旦消元对矩阵 \mathbf{V} 进行的是初等列变换,若码字矩阵 \mathbf{V} 中不存在误码,则经高斯约旦消元后,所有“相关列”的汉明重量应该为 0.然而存在误码的情况下,很难出现汉明重量为 0 的“相关列”,这是由于码字中的误比特引起的.也就是说,若在“相关列”中哪个位置出现“1”元素,则证明该位置对应的 LDPC 码字中必然存在误码,若定义

$$s_i = \sum_{j \in Q} l_{i,j}, i = n+1, n+2, \dots, M \quad (6)$$

式(6)表示将第 i 行(第 i 个码字)中所有“相关列”的元素进行求和.则错误码字索引的集合如下

$$O_{\text{err}} = \{i | s_i > 0, i = n+1, n+2, \dots, M\} \quad (7)$$

根据式(7)中得到的错误码字索引剔除码字矩阵 \mathbf{V} 中对应的错误码字,然后再对这些保留的码字进行高斯约旦消元,以期得到更多的校验向量.

然而在误码率较高时,通过高斯约旦消元求校验向量和剔除错误码字进行迭代也可能得不到所有的校验向量.为了进一步提高算法的容错能力,下节将式(4)中得到的校验向量稀疏化后进行 LDPC 码译码纠错.

3.3 矩阵稀疏化和 LDPC 码译码

当通过 3.1 节和 3.2 节的方法得到较多校验向量后,可对得到的这些校验向量进行稀疏化,然后利用稀疏化后的校验向量进行 LDPC 码译码纠错,降低码字中的误比特率.

由 3.1 节和 3.2 节可知,通过高斯约旦消元求校验向量和剔除错误码字,可将得到的 M 个码字分为“剔除码字组”和“保留码字组”两部分.但由于“保留码字组”中的每一个码字都符合式(4)中的所有校验向量,所以

利用得到的这些校验向量对“保留码字组”进行纠错,不会得到额外的信息,即不会得到更多的校验向量.所以本节仅对“剔除码字组”中的码字利用式(4)得到的校验向量稀疏化后进行译码纠错.

假设通过式(4)得到 N 个校验向量,并记为

$$H^d = \{\mathbf{h}_1^d, \mathbf{h}_2^d, \dots, \mathbf{h}_N^d\} \quad (8)$$

其中 $\mathbf{h}_i^d = (h_{i,1}^d, h_{i,2}^d, \dots, h_{i,n}^d)^T$,然后将这些校验向量构成矩阵形式

$$\mathbf{H}^c = \begin{bmatrix} h_{1,1}^d & h_{1,2}^d & \dots & h_{1,n}^d \\ h_{2,1}^d & h_{2,2}^d & \dots & h_{2,n}^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1}^d & h_{N,2}^d & \dots & h_{N,n}^d \end{bmatrix} \quad (9)$$

则可通过文献[5]中行间线性变换算法对矩阵 \mathbf{H}^c 进行稀疏化,具体步骤参见文献[5].假设稀疏化后校验向量的集合为 $H^s = \{\mathbf{h}_1^s, \mathbf{h}_2^s, \dots, \mathbf{h}_N^s\}$,则可通过集合 H^s 中的校验向量对剔除的解调软判决码字序列 \mathbf{r} 进行译码.本文采用的是专利[8]中的 LDPC 译码算法,该译码算法在每次迭代中,对每个校验方程仅涉及一次,即可对各个校验方程依次分开进行处理;而传统的译码算法在每次迭代中需多次涉及同一个校验方程(在校验结点运算中被涉及一次,在变量结点运算中被涉及的次数等于该校验方程的汉明重量),即基于 Tanner 图进行交叉处理.所以利用专利[8]中的译码算法可有效减少计算量,且其译码性能与传统译码算法相当.

3.4 算法总结及复杂度分析

LDPC 码盲识别的目标是实现其稀疏校验矩阵的重建.码长 n 和码组起点的正确识别是矩阵重建的基础,本文可通过遍历码长 n 和码组起点进行高斯约旦消元,然后统计高斯约旦消元后矩阵秩的变化实现 n 和起点的识别,其识别思想与普通线性分组码相同,具体可参见文献[9,10],在此不再赘述.为了简化讨论和分析,本文假设 n 和码组起点已经识别(实际中的 LDPC 码字前面一般加有同步头,所以码字起点和码字长度可较容易得到),即本文算法主要针对 LDPC 码的稀疏校验矩阵和信息长度 k 进行盲估计.整个算法的流程如算法 1 所示.

算法 1 LDPC 码稀疏校验矩阵和信息长度的识别流程

输入:码长,码组起点和码字矩阵 \mathbf{V}

输出:LDPC 码的稀疏校验矩阵和信息长度

算法流程:

步骤 1 利用二元域上的高斯约旦消元法对码字矩阵 \mathbf{V} 进行初等列变换,找到“相关列”对应的校验向量;

步骤 2 根据高斯约旦消元的结果,并结合式(7)剔除错误码字;

步骤 3 利用步骤 1 中校验向量求解和步骤 2 中错误码字剔除进行反复迭代,直到“相关列”的个数不再增加,迭代停止,转到步骤 4

(由于高斯约旦消元的结果受前 n 行码字的影响较大, 所以当剔除错误码字后, 若高斯约旦消元的结果不理想, 即“相关列”的个数没有增加, 可对前 n 行码字进行更换^[11]);

步骤 4 利用式(4)得到“相关列”对应的校验向量, 然后将这些校验向量稀疏化;

步骤 5 根据步骤 4 中得到的稀疏校验向量对剔除后的接收软判决码字序列 r 进行译码纠错;

步骤 6 综合利用步骤 1 中的校验向量求解, 步骤 2 中的错误码字剔除, 步骤 4 中的校验向量稀疏化, 步骤 5 中的 LDPC 码译码纠错进行反复迭代, 直到校验向量的个数不再增加, 迭代终止. 此时假设得到的校验向量数为 r , 则信息长度 $k = n - r$.

本文算法的计算复杂度主要集中在“高斯约旦消元”, “校验矩阵的稀疏化”和“LDPC 码译码”. 对于高斯约旦消元, 其复杂度约为 $O(n^2M)$ 次比特异或操作, 其中 n 为码字长度, M 为参与高斯约旦消元的码字个数. 对于校验矩阵稀疏化, 每迭代一次其复杂度约为 $O(N^2n)$ 次比特异或操作, 假设总共迭代 y_1 次, 则其总复杂度约为 $O(y_1N^2n)$, 其中 N 表示参与稀疏化的校验向量个数. 对于 LDPC 码译码, 每迭代一次其复杂度约为 $O(Nt_i)$ 次实数域乘法操作, 同时调用双曲正切函数 $\tanh(\cdot)$ 和反双曲正切函数 $\operatorname{atanh}(\cdot)$ 各约 $O(Nt_i)$ 次, 假设总共迭代 y_2 次, 则总计算复杂度约为 $O(y_2Nt_i)$, 其中 t_i 表示第 $i(1 \leq i \leq N)$ 个校验向量的汉明重量.

下面将对影响算法性能的因素进行分析, 从而起到理论指导的作用. 对于信息码元“非相关列”, 由式(3)可知

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \phi(u) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{w_u^P}{w} \rightarrow 1 \quad (10)$$

其中 \rightarrow^P 表示依概率收敛.

而对于校验码元“相关列”, 则有

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \phi(u) \rightarrow 2 \cdot \left(1 - \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t_u}{2} \rfloor} C_{t_u}^{2j} P_e^{2j} (1 - P_e)^{t_u - 2j}\right) \quad (11)$$

其中 t_u 为该“相关列”对应校验向量的汉明重量, P_e 为信息传输过程中的误比特率, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整.

从式(10)和式(11)可知, 当 t_u 和 P_e 较小时, 可通过设定检测门限 β 将“相关列”和“非相关列”区分开. 但随着 t_u 或 P_e 的增大, “相关列”和“非相关列”中 $\phi(u)$ 的差别会越来越小, 从而无法实现 LDPC 码的识别.

本文算法通过“剔除错误码字”和“LDPC 码译码纠错”一定程度上降低了误比特率 P_e 对算法产生的影响. 但本文算法在高斯约旦消元过程中得到的校验向量并不是稀疏的, 这在一定程度上限制了算法的识别性能.

4 仿真实验及性能分析

本节仿真实验以 IEEE 802.16e 标准^[12] 和 IEEE 802.11n 标准^[13] 为例展开算法测试, 实验中采用的调制

方式为简单的 BPSK 调制.

图 2 给出了不同检测门限 β 的条件下, IEEE 802.16e 标准中的 (576, 288) LDPC 码的正确识别率曲线. 设所用码字个数 $M = 10n = 5760$ 个, 误比特率分别为 0.0022 和 0.0027 时, β 从 0.1 到 0.9 变化, 步长为 0.1, 不同 β 值下独立进行 300 次蒙特卡洛仿真实验. 从图 2 可以看出, 最佳检测门限的设置会受误比特率的影响, 但只要其值设置不要太极端, 不会对 LDPC 码的识别造成很大影响, 其值设置在 0 和 1 的中间位置稍向右偏较为合适. 所以可将 β 的范围设置为 $0.5 \leq \beta \leq 0.7$ (下文仿真实验 β 设为 0.65).

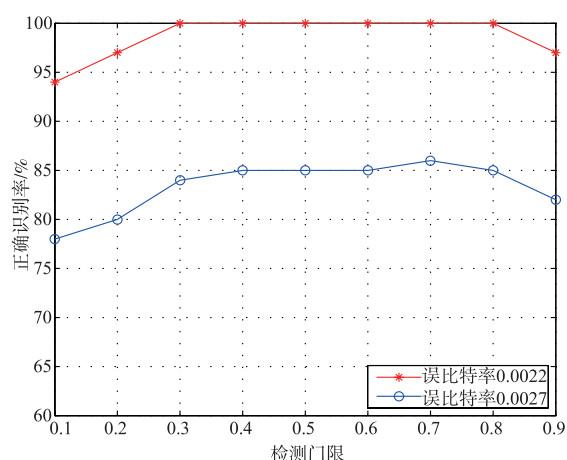


图2 不同检测门限下LDPC码的正确识别率

为了更好地展示本文算法的性能, 将与文献[6]中算法作比较. 在不同误比特率的条件下, 针对 IEEE 802.16e 标准中的 (576, 288) LDPC 码和 IEEE 802.11n 标准中的 (648, 324) LDPC 码进行 300 次仿真实验. 针对 (576, 288) LDPC 码, 本文和文献[6]算法所用码字数都为 $M = 10n = 5760$ 个, 而针对 (648, 324) LDPC 码, 本文和文献[6]算法所用码字数都为 $M = 10n = 6480$ 个, 其正确识别率的变化曲线如图 3 所示.

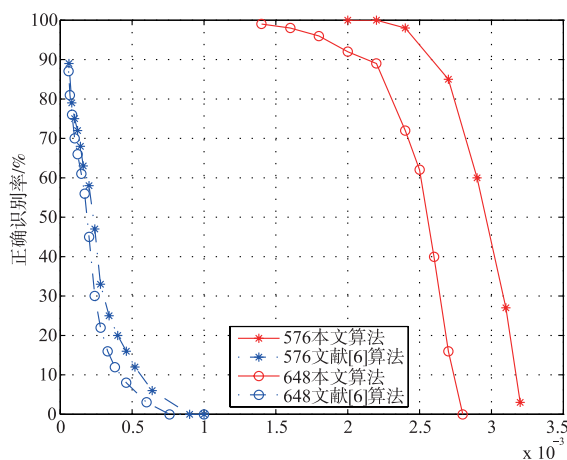


图3 不同误比特率下LDPC码的正确识别率

从图3可看出,本文和文献[6]算法两种LDPC码的正确识别率都随着误比特率的增加而减小.且本文算法的抗误码能力要远强于文献[6]算法,对于(576,288)和(648,324)LDPC码,本文算法当其误比特率分别不超过0.0025和0.0022时,其正确识别率在90%以上,而文献[6]算法当误比特率不超过0.00015时,其正确识别率才可以达到80%以上.分析其原因可以知道,文献[6]算法在 k 阶列消元过程中,通过 k 个构造矩阵相乘得到疑似校验矩阵集合,只要其中某个构造矩阵出现错误,就会造成错误扩散;而本文算法通过高斯约旦消元找到“相关列”,然后通过“相关列”直接找到正确的校验向量,这在一定程度上减少了算法出错的可能性.另一方面,文献[6]算法只通过剔除疑似校验向量和剔除错误码字进行迭代,当码字中的误比特率较高时,很难将所有的校验向量找全,从而最终无法重构LDPC码的稀疏校验矩阵.同时,从图3可以看出,本文算法中(576,288)LDPC码的识别效果要比(648,324)LDPC码好,这是因为在同样的误比特率下,码长越长的LDPC码,其每个码字中的误比特个数越多,从而使校验码元与信息码元之间的相关性破坏更严重.

最后对本文算法和文献[6]算法的计算复杂度进行对比分析.文献[6]算法分四步完成,对于 k 阶列消元运算,其需要 $O(k^2n^2)$ 次二元域乘法运算和 $O(k^2n(n-1))$ 次比特异或运算,其中 k 是码字信息长度, n 是码字长度;对于有效校验向量的获取,需要 $O((n-k)N'n)$ 次二元域乘法运算和 $O((n-k)N'(n-1))$ 次比特异或运算,其中 N' 表示参与迭代的码字数;对于剔除错误码字,需要 $O(lN'n)$ 次二元域乘法运算和 $O(lN'(n-1))$ 次比特异或运算,其中 l 表示参与迭代的有效校验向量个数;对于校验矩阵稀疏化,每迭代一次其复杂度约为 $O(n^3)$ 次比特异或操作,假设总共迭代 y_3 次,则其总复杂度约为 $O(y_3n^3)$.本文算法的高斯约旦消元是对所有的 M 个码字进行列消元,而文献[6]算法是进行 k 次 k 阶列消元,其复杂度要低于本文算法,但本文算法通过一次高斯约旦消元的计算复杂度可同时完成正确校验向量的求解和错误码字的剔除两个过程,其效果相当于文献[6]中“ k 阶列消元”,“有效校验向量的获取”和“剔除错误码字”这三个过程,从这个角度来说,其复杂度要低于这三者的复杂度之和.对于校验向量的稀疏化,本文算法和文献[6]算法的复杂度相同,但本文算法在迭代过程中需多次进行矩阵稀疏化,而文献[6]算法只需得到所有校验向量后进行一次矩阵稀疏化,同时本文算法增加了LDPC码译码纠错的过程,所以总的来说,本文算法的复杂度要高于文献[6]算法.但本文算法的复杂度在可以承受的范围里,且从上述实验结果来看,虽然本文算法牺牲了部分计算量,但

其性能得到了较大的提高.

在不同数据量的条件下,针对IEEE 802.16e标准中的(576,288)LDPC码,误比特率分别为0.0032,0.0027和0.0019条件下进行300次仿真实验,其正确识别率的变化曲线如图4所示;以及IEEE 802.11n标准中的(648,324)LDPC码,误比特率分别为0.0024,0.0019和0.0014条件下,进行300次仿真实验,其正确识别率的变化曲线如图5所示.从图4和图5可看出,不管是(576,288)LDPC码还是(648,324)LDPC码,本文算法的正确识别率都随数据量的增加而增加,也就是说,当接收数据的误比特率较高时,可适当地增加码字数来换取算法的容错性能.

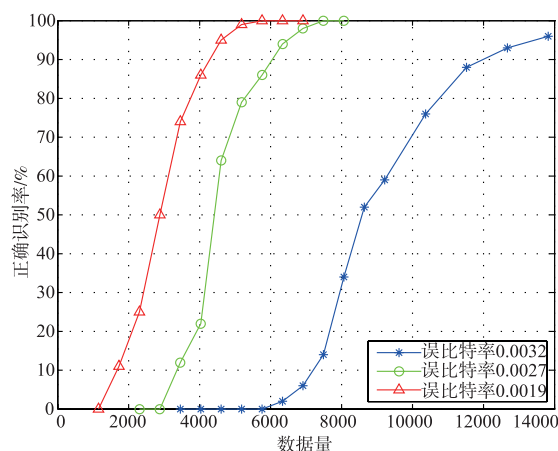


图4 不同数据量下(576,288)LDPC码的正确识别率

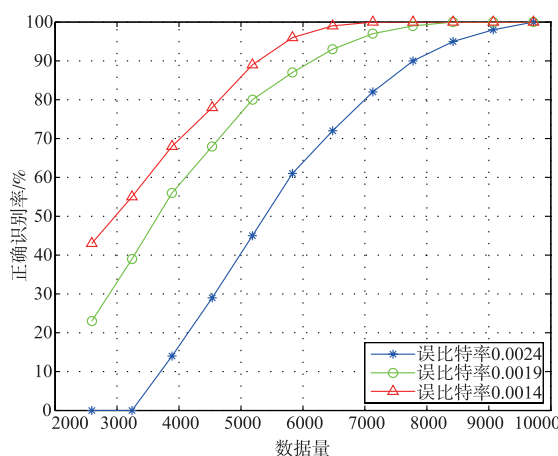


图5 不同数据量下(648,324)LDPC码的正确识别率

为了得到数据充足条件下,本文算法的容错能力,在数据量为 $M=100n$ (100倍码字长度)的条件下,针对IEEE 802.16e标准中的(576,288)LDPC码;以及IEEE 802.11n标准中的(648,324),(648,432)和(1944,972)LDPC码进行仿真实验.表1给出了本文算法在有效实现LDPC码识别的情况下,所能承受的最大误比特率.

表 1 LDPC 码识别所能承受的最大误比特率

LDPC 码类型	(576,288)	(648,324)	(648,432)	(1944,972)
误比特率	0.0051	0.0039	0.0024	0.00092

从图 4 和图 5, 以及表 1 可以看出, 虽然本文算法通过增加数据量可在一定程度上提高算法的容错性能, 但通过增加数据量并不能带来容错性能的无限改善, 即本文算法存在一个极限误比特率的要求。

针对 IEEE 802.16e 标准中的 (576,288) LDPC 码和 IEEE 802.11n 标准中的 (648,324), (1944,972) LDPC 码, 误比特率分别为 0.0022, 0.0018 和 0.0006 进行仿真实验, 实验中所用码字个数为 $M = 10n$ 个. 其识别过程中所得校验向量的个数占校验向量总数的百分比随迭代次数的变化情况如图 6 所示. 图 6 中三种变化曲线的前半部分 (即标有“*”号) 表示利用校验向量的求解和错误码字的剔除进行迭代 (3.4 节步骤 3), 所得校验向量个数变化的情况; 后半部分 (即标有“o”号) 表示综合利用校验向量的求解, 错误码字的剔除, 校验向量稀疏化和 LDPC 码译码进行迭代 (3.4 节步骤 6), 所得校验向量个数变化的情况。

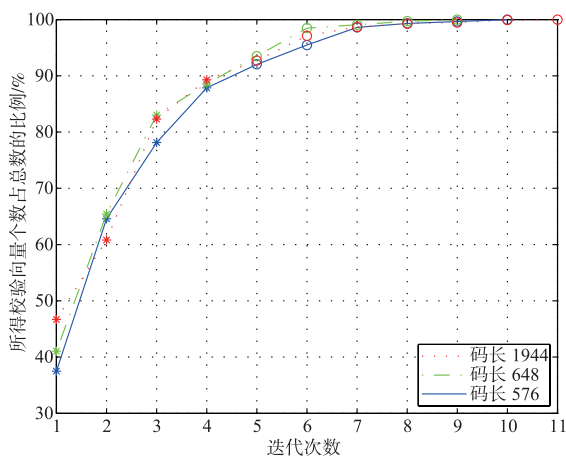


图 6 不同迭代次数下所得校验向量数

从图 6 可以看出, 通过步骤 3 进行迭代可得到大部分校验向量, 且在迭代过程中, 当已经得到的校验向量较多时, 通过步骤 3 进行迭代, 每次都可以得到较多新的校验向量, 这是由于得到的校验向量达到一定数量后, 通过式 (7) 可剔除较多错误码字, 从而参与高斯约旦消元的保留码字误比特率较低, 高斯约旦消元后可得到较多的“相关列”. 当通过步骤 3 迭代无法得到更多校验向量时, 本文算法会采用步骤 6 进行迭代, 虽然最终可得到所有的校验向量, 但迭代过程中校验向量增加的速度较慢, 这是因为参与高斯约旦消元的码字中存在误码, 当校验向量接近找全时, 越往后, 找到新的校验向量难度越大。

针对 IEEE 802.16e 标准中的 (576,288) LDPC 码和

IEEE 802.11n 标准中的 (648,324), (648,432), (1944,972) LDPC 码, 误比特率分别为 0.0022, 0.0018, 0.0014 和 0.0006 进行仿真实验, 实验中所用码字个数为 $M = 10n$ 个 (即分别为 5760, 6480, 6480, 19440). 表 2 给出了在 3.6GHz Intel i7-4790 处理器上进行仿真实验所消耗的时间. 从表 2 的实验结果可看出, 本文算法的计算复杂度在现有的计算条件下可以接受。

表 2 LDPC 码识别所消耗的时间

LDPC 码类型	(576,288)	(648,324)	(648,432)	(1944,972)
识别时间/秒	93.1	136.4	104.8	3643.8

5 结束语

本文针对误码情况下 LDPC 码的开集识别问题, 提出了一种容错能力较强的识别算法. 该算法通过利用校验向量的求解, 错误码字的剔除, 校验向量稀疏化和 LDPC 码译码进行迭代, 较好地实现了 LDPC 码的开集识别. 仿真结果表明, 本文算法相对于现有算法, 其容错能力提高了约一个数量级, 且复杂度在可以承受的范围内. 总而言之, 本文所提算法识别性能良好, 具有较强的容错能力, 可更好地适用于实际环境。

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 Zhi-tao, WANG Feng-hua. Research progress of blind recognition of channel coding [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1166-1176. (in Chinese)
- [2] 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 Pei-dong, LI Jing, PENG Hua. A novel algorithm for channel coding recognition using soft-decision [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 301-306. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 包昕. 基于软解调序列的 LDPC 码闭集识别方法 [J]. 电讯技术, 2015, 55(1): 55-60.
BAO Xin. A finite set recognition algorithm of LDPC coding by using soft-demodulation sequence [J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(1): 55-60. (in Chinese)
- [5] 包昕, 周磊珂, 何可, 游凌. 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): 192-196.
BAO Xin, ZHOU Lei-ke, HE Ke, YOU Ling. A method of restructuring LDPC parity-check matrix [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(2): 192-196. (in Chinese)

- [6] 包昕,周磊珂,何可,等. 误码条件下的 LDPC 码盲识别算法[J]. 西安交通大学学报,2015,49(12):54-58.
BAO Xin,ZHOU Lei-ke,HE Ke,et al. A recognition algorithm for LDPC codes of blind in a noisy environment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2015,49(12):54-58. (in Chinese)
- [7] SICOT G,HOUCKE S. Blind detection of interleaver parameters[J]. Signal Processing,2009,89(4):450-462.
- [8] Patrick A. Owsley. LDPC Architecture[P]. United States Patent:US7353444,2005-05-06.
- [9] BARBIER J,SICOT G,HOUCKE S. Algebraic approach for the reconstruction of linear and convolutional error correcting codes[J]. Proceedings of World Academy of Science Engineering & Technology,2006,2(3):113-118.
- [10] 甘露,刘宗辉,廖红舒,李立萍. 卷积交织参数的盲估计[J]. 电子学报,2011,39(9):2174-2177.
GAN Lu,LIU Zong-hui,LIAO Hong-shu,LI Li-ping. Blind estimation of the parameters of convolutional interleave[J]. Acta Electronica Sinica,2011,39(9):2174-2177. (in Chinese)
- [11] Marazin M,Gautier R,Burel G. Dual code method for blind identification of convolutional encoder for cognitive radio receiver design[A]. Proceedings of the 5th IEEE Broadband Wireless Access Workshop[C]. Honolulu, Hawaii, USA:IEEE GlobeCom,2009. 1-6.
- [12] IEEE P802. 16e. Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems[S]
- [13] IEEE P802. 11n. Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications[S]

作者简介



陈泽亮 男,1992年4月出生于湖南岳阳. 信息工程大学硕士生,主要研究方向为信道编码识别分析.
E-mail:zelchen@163.com



彭 华 男,1973年8月出生于江西萍乡. 信息工程大学教授、博士生导师,主要研究方向为软件无线电、通信信号处理等.
E-mail: Peng_Hua@163.com