

DOI: 10.7652/xjtuxb201512009

误码条件下的 LDPC 码盲识别算法

包昕, 周磊珂, 何可, 王桂良, 游凌

(盲信号处理重点实验室, 610041, 成都)

摘要: 为解决误码条件下信道编码校验矩阵难以逆向重建的问题,提出了一种新颖的 LDPC 码盲识别算法,简称迭代筛选(IS)算法。首先,由被截获数据构造含错矩阵,通过实施列消元运算获取其对偶向量;接着,利用校验向量判定准则从对偶向量中筛选出 LDPC 码的有效校验向量;进而再对被截获数据中的含错码组进行辨识和剔除;迭代进行以上操作,不断提高被截获数据内无误码码组的比例,直至将原问题退化为无误码时的简单场景;最终使用渐进行变换算法,实现 LDPC 码校验矩阵的稀疏化。仿真和实测均显示,IS 算法对于 802.16e、802.11n、DVB-S2、GJB7296、GB20600 等公开标准均有效,能够在误码率不高于 10^{-4} 条件下的非合作场合实现 LDPC 码的盲识别,LDPC 码校验矩阵获得了完整重建。

关键词: 变换信道编码;LDPC 码;盲识别;误码率

中图分类号: TN911.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)12-0053-06

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

BAO Xin, ZHOU Leike, HE Ke, WANG Guiliang, YOU Ling

(Science and Technology on Blind Signals Processing Laboratory, Chengdu 610041, China)

Abstract: A novel recognition algorithm (called iterative screening, IS) for LDPC codes of blind is proposed to solve the problem that the parity-check matrix of Channel Coding is hard to reconstruct in a noisy environment. A matrix with the intercepted data is constructed, and then dual vectors of the matrix are obtained by using column elimination operation. Effective parity-check vectors of the dual-space of the LDPC code are selected and error code blocks are recognized and deleted from the intercepted data. These steps are iteratively carried out until the original problem is reduced to a simple problem, i. e., blind recognition of some error-free codes. The sparse parity check matrix is finally obtained by using Gradual Row Transformation. Simulation and experimental results show that the IS algorithm can apply to most LDPC standards, such as 802.16e, 802.11n, DVB-S2, GJB7296 and GB20600. It is able to be used in the non-cooperative context with the bit error rate less than 10^{-4} , and reconstructs the sparse parity check matrix of LDPC codes.

Keywords: channel coding; LDPC codes; blind recognition; error bit rate

信道编码是一种保证通信可靠性的技术手段,是现代通信系统的重要组成部分。在非合作条件下,展开对信道编码的有效识别,具有重要的军事意义和情报价值。信道编码盲识别问题力求解决,如何通过含噪序列 $\mathbf{R}$ 重建编码 $\mathbf{C}$,而 LDPC 码盲识别问题是其子问题。

收稿日期: 2015-04-23。 作者简介: 包昕(1986—),男,博士生;游凌(通信作者),男,高级工程师,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172140)。

网络出版时间: 2015-10-03 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151003.1918.004.html>

对于传统信道编码, Valembois 证明了其盲识别问题是一种 NP 完全问题^[1], 基于此结论, 相关研究成果均将快速搜索次优解作为解决问题的途径。较有代表性的有: Cluzeau 提出了一种有效的对偶码组搜索策略^[2], 该策略借鉴了 Canteaut 提出的最小码重搜索算法^[3]和 Gallager 提出的置信度传播概率译码思想^[4]; 游凌利用 Walsh-Hadamard 变换, 提高了误码条件下短码校验关系的穷举速度^[5]; 陆佩忠基于 Grönber 基理论, 将卷积码识别问题等价于线性移位寄存器的综合^[6]。然而, 以上方法均不适用于 LDPC 码识别问题。

LDPC 码是一种由校验矩阵定义的分组码, 具有码长长、校验矩阵稀疏、性能逼近香农限的特点。自 1995 年 LDPC 码被重新发现以来, 人们围绕其构造、编码、译码方法展开了深入的研究, 当前已应用于卫星、深空、移动、无线、光纤在内的各种通信系统, 成为最具潜力的信道编码解决方案。

然而, 针对 LDPC 码盲识别问题的研究成果极为有限。Cluzeau 证明, 足够多的 LDPC 码码组是确保多项式时间内重建 LDPC 码的充要条件^[7]。文献[8-9]通过计算后验概率对数似然比(LLR), 将实数域上的软解调序列与 LDPC 码的校验关系联系在一起。文献[10]在此基础上, 形成闭集识别算法。遗憾的是, 这些研究成果远不能满足非合作背景下 LDPC 码盲识别的现实需求。

本文着重解决误码条件下的 LDPC 码开集识别问题, 尝试综合利用列消元运算、校验向量判定准则及渐进行变换等方法, 以发现正确校验向量和剔除含误码码组作为手段, 最终将原问题成功退化为无误码条件下的稀疏校验矩阵重建问题, 实现了误码条件下的 LDPC 码盲识别。

1 问题描述与分析

LDPC 码盲识别的最终目标, 是实现稀疏校验矩阵的正确重建。码长 n 和码组起点的正确识别, 是该目标得以实现的基础, 文献[11-12]以矩阵二元域上的秩作为统计判决量, 重点研究了此问题。考虑到该问题的复杂性和独立性, 本文为简化讨论和分析, 假设码长和码组的起点已知。

在无误码情况下, 对 LDPC 码接收序列进行高斯消元, 总能够获取码字空间的一组基, 即生成矩阵 G , 进而方便地获取至少一个非稀疏校验矩阵 H_d 。在此基础上, 利用足够多次数的线性行变换运算, 可实现稀疏校验矩阵的正确重建。图 1 给出了无

误码条件下的盲识别流程。

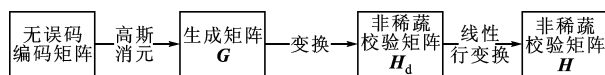


图1 无误码条件下的校验矩阵重建

在误码条件下, 由于高斯消元法对误码极为敏感, 此时已不可能通过使用高斯消元运算获取 LDPC 码码字空间的基。因此, 需寻找新的解决思路。本文将稀疏校验矩阵的重建问题分解为 3 个相对独立的子问题: ①获得含错码组的正交向量; ②对码字空间 C 的有效校验向量进行辨识; ③稀疏化有效校验向量。其中, 问题 2 将在第 3 节中详细讨论, 问题 3 的解决方案将在其余文章中专门讨论。问题 1 是本文重建问题的核心。一种朴素的正交向量发现思想是, 通过穷举 n 维空间内的所有 2^n 组向量, 搜索满足正交性的校验向量。但是, 无论是使用 Canteaut 方法、Walsh-Hadamard 变换或者是借助巨型机, 该思想都不现实。本文引入的 k 阶列消元运算, 将方便地解决问题 1。

图 2 给出了本文所提出的解决方案: 首先, 使用 k 阶列消元运算, 获取含误码码组的大量正交向量, 称作疑似校验向量; 接着, 利用统计判定准则, 从正交向量中遴选出码字空间的有效校验向量; 然后, 利用以上有效校验向量, 辨识和剔除接收序列中被发现的含误码码组; 迭代进行以上一系列操作, 不断提高接收序列内无误码码组的比例, 只要待识别码组数量足够多, 经过有限次迭代, 总能找到足够多的有效校验向量, 同时剔除所有含误码码组。此时, 误码条件下的盲识别问题, 已退化为前述无误码时的情况。

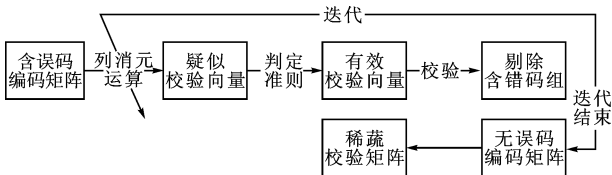


图2 误码条件下的校验矩阵重建方案框图

至此, 本文给出了一种误码条件下的 LDPC 码有效盲识别方法, 后续章节将对具体实现技术展开讨论。

2 k 阶列消元运算

k 阶列消元运算的目标, 是将任意给定的二元矩阵 M , 通过 k 步操作, 变换为形如下式的下阶梯型矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_{2,1}^{(k)} & 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{k,1}^{(k)} & \cdots & \alpha_{k,k-1}^{(k)} & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{k \times n} \quad (1)$$

并得到 M 的对偶矩阵 Θ 。

设 M 经 $i-1$ 步运算后记为 $M^{(i-1)}$, 可构造形如下式的矩阵

$$\Psi^{(i)} = \begin{bmatrix} 1 & & & 1 & \cdots & 1 \\ & \ddots & & \vdots & & \vdots \\ & & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ & & & \alpha_{i,i+1}^{(i-1)} & \cdots & \alpha_{i,n-i}^{(i-1)} \\ \hline 0_{(n-i) \times i} & & I_{(n-i) \times (n-i)} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2)$$

并计算 $M^{(i)} = M^{(i-1)} \Psi^{(i)}$ 。经 k 步运算后, $M^{(k)}$ 可最终变换为形如式(1)所示的下阶梯形矩阵。设 $\Psi^{(1)} \Psi^{(2)} \cdots \Psi^{(k)} = [\Gamma_{n \times k} \quad \Theta_{n \times (n-k)}]$, 则矩阵 Θ 正是矩阵 M 的对偶矩阵。

针对由 (n, k) 线性分组码 C 的任意 N 个码组所形成的编码矩阵 $M_{N \times n}$, 使用列消元运算。将 M 分块表示为 $M_{N \times n} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix}$, 其中 M_1 规模为 $k \times n$, M_2 规模为 $(N-k) \times n$ 。本文按照是否存在误码进行以下 2 种分类讨论。

(1) 无误码的情况。设 $M_{N \times n} = mG$, 其中 m 为 $N \times k$ 维信息矩阵, G 为 C 的生成矩阵, 易得

$$M = mG \Leftrightarrow \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} G \quad (3)$$

若对 M 进行 k 阶列消元运算, 必然存在矩阵 $\Theta_{n \times (n-k)}$, 使得 $0 = M_1 \Theta$, 即

$$0 = m_1 G \Theta \Leftrightarrow 0 = G \Theta \Leftrightarrow 0 = m_2 G \Theta \Leftrightarrow 0 = M_2 \Theta \quad (4)$$

因此, 存在矩阵 Θ , 使得 $M\Theta$ 为全 0 阵。

(2) 存在误码的情况。设 $M_{N \times n} = mG + E_{N \times n}$, E 为错误图样。易得

$$M = mG + E \Leftrightarrow \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} G + \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对 M 进行 k 阶列消元运算, 必然存在矩阵 $\Theta_{n \times (n-k)}$, 使得 $0 = M_1 \Theta$, 即

$$0 = (m_1 G + E_1) \Theta \Leftrightarrow G = m_1^{-1} E_1 \quad (6)$$

因此

$$M_1 \Theta = (m_2 m_1^{-1} E_1 + E_2) \Theta \quad (7)$$

所以, 存在矩阵 Θ , 使得 $M\Theta$ 的前 k 行为全 0 阵, 而当且仅当 $m_2 m_1^{-1} E_1 + E_2 = 0$ 时, $M\Theta$ 的余下 $N-k$ 行为全 0 阵。

图 3 给出了对 M 进行 k 阶列消元后的变化结果, 其中 M 由 100 组 $(40, 25)$ 分组码组成。可见, 经 k 阶列消元运算后, 当 M 无误码时, $M\Theta$ 为全 0 阵; 当 M 存在误码时, $M\Theta$ 前 k 行为全 0 阵, 余下 $N-k$ 行存在非零元素。由此, k 阶列消元运算一方面可用于快速获取编码矩阵 M 的正交矩阵, 另一方面可方便地判定矩阵 M 是否存在误码。

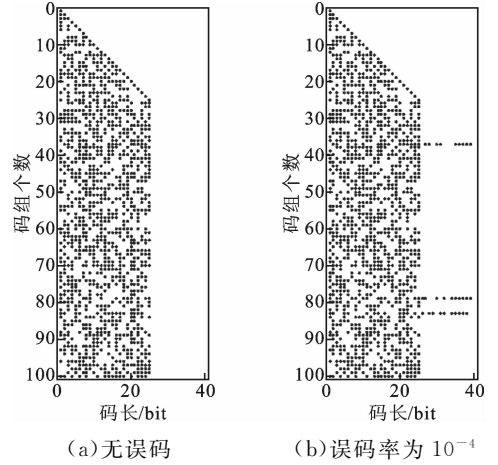


图 3 对某 $(40, 25)$ 分组码的列消元处理结果

3 疑似校验向量的判定

Gallager 指出, 若 n 维二元向量中元素为 1 的概率记做 p , 则该向量中存在偶数个 1 的概率为 $[1 + (1 - 2p)^n] / 2^{[4]}$ 。Chabot 给出了如下结论^[12]。

定理 1 令向量 $p, q \in R$, 且 w 表示 q 中非零元素个数, 则 p, q 正交概率 $p_r(\langle p, q \rangle = 0)$ 为

$$p_r(\langle p, q \rangle = 0) = \begin{cases} [1 + (1 - 2p_b)^w] / 2, & q \in R^\perp \\ 1/2, & q \notin R^\perp \end{cases} \quad (8)$$

式中: $R^\perp$ 表示空间 R 的对偶空间; p_b 为 p 中非零元素的出现概率。当 p 表示校验向量 h , q 表示含噪接收向量 r 时, 该定理可用于判定 r 是否属于码字空间 C ; 同理, 当 p 表示编码向量 c , q 表示任意向量 h 时, 该定理可用于判定 h 是否属于校验空间 $C^\perp$ 。

因此, 疑似校验向量 h 的判定方法为: 给定误码率为 p_e 的编码集合 $r_1, r_2, \dots, r_N$, 当 $Z \leq T$ 时, 则 h 可判定为属于校验空间 $C^\perp$, 否则, h 可判定为一个随机向量。其中统计量 $Z = \sum_{j=1}^N \langle h, r_j \rangle$, T 为判决门限。作为一个二元假设检验问题, 容易证明, 当 N 足够大时, Z 将符合如下正态分布

$$Z \sim \begin{cases} N(\tau N, \tau(1 - \tau)N) \\ N(N/2, N/4) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\tau = [1 - (1 - 2p_e)^{w(h)}] / 2$ 。

4 矩阵的稀疏化

(n,k) 分组码码字空间 $\mathbf{C}$ 由 2^k 个码字 c 组成, 可看作由 2^k 个信息向量 $\mathbf{m}$ 通过生成矩阵 $\mathbf{G}$ 的线性表出。若 $\mathbf{G}$ 由 k 个 n 维线性无关向量组成, 则 $\mathbf{G}$ 称作码字空间 $\mathbf{C}$ 的一组基; 相似地, 若校验矩阵 $\mathbf{H}$ 由 $n-k$ 个 n 维线性无关向量组成, 由于 $\mathbf{H}$ 与 (n,k) 分组码的所有 2^k 个码字 c 正交, 则由 $\mathbf{H}$ 张成的空间必定与码字空间 $\mathbf{C}$ 正交, 该空间称为 $\mathbf{C}$ 的校验空间 $\mathbf{C}^\perp$, $\mathbf{H}$ 称为 $\mathbf{C}^\perp$ 的一组基。因此, 恢复 (n,k) 分组码的生成矩阵 $\mathbf{G}$, 就是寻找码字空间 $\mathbf{C}$ 的某组基; 而恢复校验矩阵 $\mathbf{H}$, 就是寻找码字校验空间 $\mathbf{C}^\perp$ 的某组基。

渐近行变换(gradual row transform, GRT), 是一种以非稀疏检验矩阵行作为优化对象的矩阵稀疏化算法, 能够有效实现无误码条件下 LDPC 码的矩阵重建。

5 误码条件下的盲识别算法

5.1 算法描述

前述章节依次解决了对偶向量的获取、有效校验向量的辨识、矩阵的稀疏化 3 个问题。这些问题的综合, 即为误码条件下的 LDPC 码盲识别问题。将 N 个接收码组 $\mathbf{r}_i, i=1, 2, \dots, N$ 逐行排列形成矩阵 $\mathbf{M}$, 则盲识别算法步骤如下。

(1) 迭代, 获取足够多的正确码组:

从 $\mathbf{M}$ 中选择 $\mathbf{M}_j$, 并做列变换获得 $\boldsymbol{\Theta}_j$;

如果 $\sum_{i=1}^{|\mathbf{M}|} \langle \mathbf{r}_i, \mathbf{h}_q \rangle \leq T$, 则 $\boldsymbol{\Theta}_j = \boldsymbol{\Theta}_j \setminus \mathbf{h}_q$;
for $i \in \{1, |\mathbf{M}|\}$

如果 $\langle \mathbf{r}_i, \mathbf{h} \rangle \neq 0, \mathbf{h} \in \boldsymbol{\Theta}$, 则 $\mathbf{M} = \mathbf{M} \setminus \mathbf{r}_i$ 。

(2) 采用 GRT 算法, 获得如下稀疏矩阵:

对 $\mathbf{M}$ 进行高斯消元获得 $\mathbf{G}$;

对 $\mathbf{G}$ 使用 GTT 算法获得 $\mathbf{M}$ 。

表 1 给出了算法复杂度分析。可见算法的计算复杂度最多为 $O \approx 2Nn^3 + O_{\text{GRT}}$ 。

表 1 算法复杂度分析

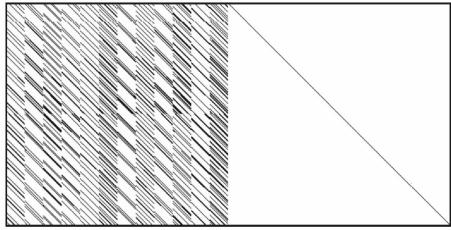
运算内容	计算量
k 阶列消元运算	$k^2 n^2 \approx n^4$
获取有效校验向量	$(n-k)N'n^2 < Nn^3$
剔除 $\mathbf{M}$ 中含错码组	$lN'n^2 < Nn^3$
GRT 运算	O_{GRT}

注: N' 表示一次迭代中 $\mathbf{M}$ 的码组个数; l 表示一次迭代获取的有效校验向量个数; O_{GRT} 表示 GRT 运算级计算量。

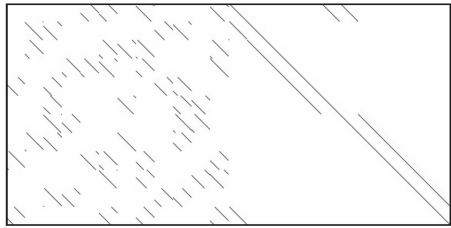
5.2 算法测试

当前, LDPC 码已应用于卫星、深空、移动、无线、光纤在内的各种通信系统。本节仅以无线城域网 IEEE 802.16e 标准^[13]为例展开算法测试。

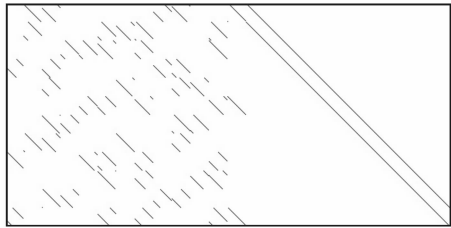
例 1 给定 $(576, 288)$ LDPC 码, 误码率 $p_e = 10^{-4}$ 时, 设定码组个数 $N = 3k = 864$ 。测试显示, 经 4 次迭代运算, 可获得 807 组无误码码组 c 和 528 组有效校验向量 $\mathbf{h}$ 。对以上无误码码组采用 GRT 算法, 所获得的非稀疏矩阵及重建后的稀疏矩阵分别如图 4a、图 4b 所示, 经与真实校验矩阵(图 4c)比对, 可确认稀疏校验矩阵 $\mathbf{H}$ 获得了正确重建。



(a) 非稀疏校验矩阵



(b) 重建后的稀疏校验矩阵



(c) 真实校验矩阵

图 4 例 1 中 $(576, 288)$ LDPC 码仿真情况

例 2 保持码组数 $N = 864$ 不变, 将误码率提高到 $p_e = 3 \times 10^{-4}$ 。此时, 经 6 次迭代后, 共获得 750 组无误码码组 c 和 354 组有效校验向量 $\mathbf{h}$ 。经 GRT 算法处理后, 所重建的矩阵如图 5 所示。

经统计, 该矩阵包含非零元素 1 852 个、4 环 1 个、6 环 46 个, 而在图 4c 所示的真实矩阵中, 以上参数分别为 1 824、0 和 24。可见, 测试中所获取的 354 组有效校验向量 $\mathbf{h}$ 还未能完整张成 $(576, 288)$ 编码的对偶空间, 校验矩阵重建失败。

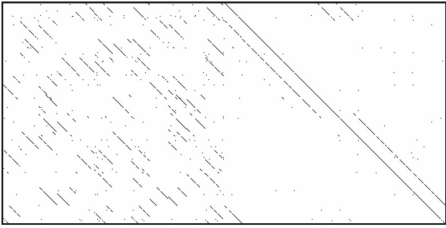


图 5 例 2 中(576,288)LDPC 码仿真情况

例 3 保持误码率 $p_e=3\times 10^{-4}$,将码组数提高到 $N=5k=1\,440$ 。经 7 次迭代后,共获得 1 188 组无误码码组 c 和 1 152 组有效校验向量 h ,稀疏校验矩阵 H 再次获得重建。

表 2 给出了此次测试时,迭代过程的中间变量。可见,首次迭代所获取的有效校验向量可以极少,随着迭代的进行,越来越多的有效校验向量 h 将被发现,越来越多的误码码组将被剔除,最终,含误码码组比例由最初的 16.53%收敛至 0%,同时有效校验向量个数正好等于 288 组。

表 2 例 2 中(576,288)LDPC 码的仿真中间变量

迭代次数	有效校验向量数	被保留码组数	含误码码组比例/%
初始		1 440	16.35
1	9	1 412	14.52
2	17	1 394	13.41
3	27	1 375	12.22
4	65	1 321	8.63
5	146	1 275	5.33
6	237	1 235	2.28
7	240	1 232	2.03
8	282	1 214	0.58
9	288	1 207	0

例 4 扩大码长,选取(1 152,864)LDPC 码,测试参数为 $p_e=10^{-4}$, $N=10k=8\,640$ 。经 3 次迭代运算,共获得 7 590 组无误码码组 c 和 4 608 组有效校验向量 h 。校验矩阵重建结果如图 6 所示。

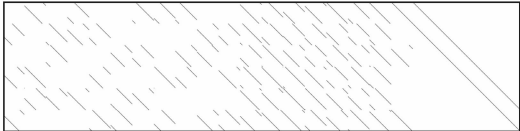


图 6 例 4 中(1 152,864)LDPC 仿真情况

本文还对 DVB-S2^[14]、IEEE 802.11n^[15]、GJB 7296 及 GB 20600^[16] 等标准/协议进行了测试。测试结果显示,本文算法具备较好的通用性。

5.3 讨论

由仿真可以发现,通过增加码组数量 N ,在一定层面上可提高算法的容错性能。本算法成功的关键是能否通过若干次 k 阶列消元运算,凑齐足够多的无误码码组。一方面,参与算法的 N 个码组中应当确实存在至少 k 个无误码码组,即

$$N > k(1 - p_e)^{-n} \tag{10}$$

此为 N 的一个松弛下限。另一方面,即使 N 个码组中存在 k 个无误码码组,能否将其发现也存在不确定性。由于一次 k 阶列消元运算仅能获取子矩阵 M_i 的 $n-k$ 个正交向量,而其中并不保证存在编码 C 的有效校验向量 h 。将一次 k 阶列消元运算中有效校验向量 h 的产生概率称为发现概率 p_h 。

图 7 以仿真形式给出了不同编码的发现概率,可见: p_e 越大、码率越高、码长越大, p_h 就越小。因此,至少提供 $\lceil 1/p_h \rceil$ 个码组,才可能得到一个 h ,而凑齐全部 $n-k$ 个 h ,则 N 的一个紧致下限为

$$N > (n - k) \lceil 1/p_h \rceil \tag{11}$$

特别地,当 $p_h \rightarrow 0$ 时, $N \rightarrow \infty$,算法等价于失效。

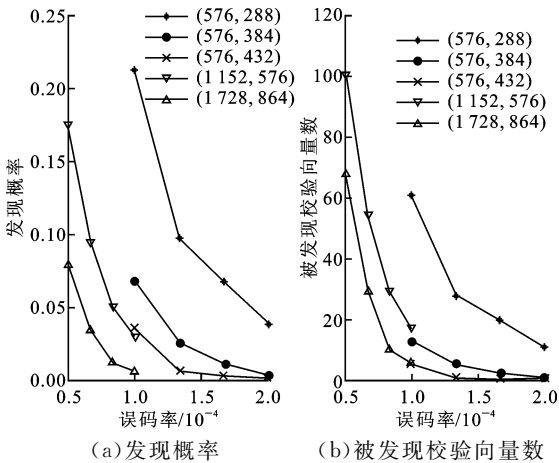


图 7 不同编码时误码率与发现概率和被发现校验向量数关系的仿真曲线

至此,分别得出了算法有效时所需码组数量 N 与误码率 p_e 的两种表述方法,为算法复杂度与容错性能的折中问题提供了一定依据。

6 结 论

针对误码条件下的 LDPC 码开集盲识别问题,本文提出了一种有效的解决方案。测试结果显示,算法适用于包括 802.16e、802.11n、DVB-S2、GJB7296、GB20600 在内的多种 LDPC 标准/协议,实用性强。本文算法通过将原本棘手的研究对象分解为 3 个相对独立的子问题,综合利用 k 阶列消元运算、基于统

计学原理的校验向量判定准则和渐进行变换算法, 成功地将问题退化为无误码条件下的 LDPC 码盲识别问题, 最终实现了 LDPC 码稀疏校验矩阵的完整重建。特别是本文得出了利用增加码组数量换取算法容错性能的结论, 具有一定的现实指导意义。

参考文献:

- [1] VALEMBOIS A. Detection and recognition of a binary linear code [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2001, 111(1): 199-218.
- [2] CLUZEAU M. Block code reconstruction using iterative decoding techniques [C] // *Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway NJ, USA: IEEE, 2006: 2269-2273.
- [3] CANTEAUT A, CHABAUD F. A new algorithm for finding minimum-weight words in a linear code: application to McEliece's cryptosystem and to narrow-sense BCH codes of length 511 [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1998, 44(1): 367-378.
- [4] GALLAGER R G. Low-density parity-check codes [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(1): 21-28.
- [5] 游凌, 朱中梁. Walsh 函数在解二元域方程组上的应用 [J]. *信号处理*, 2000, 16(S1): 27-30.
YOU Ling, ZHU Zhongliang. The application of Walsh function in resolving of GF(2) equations [J]. *Signal Processing*, 2000, 16(S1): 27-30.
- [6] 陆佩忠. 删除卷积码的盲识别 [J]. *中国科学学: E 辑*, 2005, 35(2): 173-185.
LU Peizhong. Blind recognition of punctured convolutional codes [J]. *Science in China: Series E*, 2005, 35(2): 173-185.
- [7] CLUZEAU M, TILLICH J. On the code reverse engineering problem [C] // *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 634-638.
- [8] 于沛东. 一种利用软判决的信道编码识别新算法 [J]. *电子学报*, 2013(2): 301-306.
YU Peidong. A novel algorithm for channel coding recognition using soft decision [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013(2): 301-306.
- [9] XIA T. Novel blind identification of LDPC codes using average LLR of syndrome: a posteriori probability [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62: 632-640.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] CHABOT C. Recognition of a code in a noisy environment [C] // *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 2211-2215.
- [13] LAN/MAN Standards Committee of IEEE Computer Society. Draft IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: Part 16 Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems amendment for physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed bands [S]. New York, USA: IEEE Standards Activities Department, 2005.
- [14] European Broadcasting Union. Digital video broadcasting (DVB): second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications [S]. Geneva, Switzerland: European Telecommunications Standards Institute, 2006.
- [15] LAN/MAN Standards Committee of IEEE Computer Society. IEEE standard for information technology telecommunications and information exchange between systems: local and metropolitan area networks specific requirements: Part 11 Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications [S]. New York, USA: IEEE Standards Activities Department, 2009.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 数字电视地面广播传输系统帧结构, 信道编码和调制 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

(编辑 刘杨)