

基于迭代消元的卷积码快速识别

吴昭军^{1,3}, 张立民¹, 钟兆根², 刘仁鑫¹

(1. 海军航空大学信息融合研究所, 山东烟台 264001; 2. 海军航空大学航空基础学院, 山东烟台 264001;
3. 西南电子电信研究所, 四川成都 610041)

摘要: 针对现有算法在卷积码参数识别过程中存在计算量大、容错性差的缺点, 提出了一种基于迭代消元的快速识别方法. 算法首先在理论上分析了基于传统高斯消元识别算法的性能, 验证并给出了可靠出现一次校验向量的最少消元迭代次数; 其次, 通过遍历可能的最小校验约束长度和卷积码码率, 构建消元矩阵, 求解疑似校验向量; 最后基于最小错误判决准则设定判决门限, 实现在高误码率下校验多项式矩阵快速识别. 仿真结果表明, 推导的理论性能与仿真结果一致, 提出的算法具有较强的容错性能. 与现有方法相比, 复杂度明显降低. 在智能通信或通信侦察领域具有较好的应用前景.

关键词: 智能通信; 卷积码; 迭代消元; 最小错误判决准则; 硬判决; 盲识别

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1108-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200478

Fast Recognition of Convolutional Codes Based on Iterative Elimination

WU Zhao-jun^{1,3}, ZHANG Li-min¹, ZHONG Zhao-gen², LIU Ren-xin¹

(1. Department of Information Fusion, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264001, China;

2. School of Aviation Basis, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264001, China;

3. Southwest Institute of Electronics and Telecommunications, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of high computational complexity and low fault tolerance of the existing algorithms for recognition of convolutional codes, a fast convolutional code identification method based on iterative elimination is proposed. Firstly, the proposed algorithm analyzed the performance of the traditional Gauss elimination method, and the minimum number of iterations was given to ensure the presence of check vectors. Secondly, by traversing the possible minimum constraint length and convolutional code rate, the elimination matrix was constructed, and as a result, the suspected check vectors were obtained. Finally, we set the decision threshold based on the minimum error decision criterion, which realized fast identification of check polynomial matrix at high bit error rate. The simulation results show that the theoretical performance is consistent with the simulation results, and the proposed algorithm has strong fault-tolerant performance. Compared with the existing algorithms, the proposed algorithm has advantages in computational efficiency, and it has a good prospect in application of intelligent communication or communication reconnaissance.

Key words: intelligent communication; convolutional code; iterative elimination; minimum error decision criterion; hard decision; blind recognition

1 引言

由于维特比译码算法的发现以及硬件的快速发展, 卷积码得到了大量应用. 对于非合作通信而言, 卷积码的盲识别问题是编码识别问题中最重要的问题之一^[1]. 在恶劣信道环境下, 实现卷积码的快速识别, 对于现有的大部分通信链路逆向分析具有重要的作用.

目前针对卷积码的识别, 可分为基于硬判决和基于软判决的识别方法. 从基于硬判决的识别算法来看, 文献[2~4]利用卷积码之间的校验关系, 构造出线性方程组, 然后利用高斯消元法求解线性方程组的解, 该方法虽然计算复杂度低, 但是容错性较差. 文献[5, 6]利用卷积码的代数结构, 提出了基于欧几里得算法的识别方法, 该方法虽然计算量很小, 但是容错性差, 且仅

适用于 $1/n$ 码率的卷积码. 文献[7]同样是从降低参数识别的复杂度出发,提出了基于快速双合冲的识别算法,该方法利用了卷积码的编码结构,但是其容错性仍然不好. 为了适应恶劣的信道环境. 文献[8~12]提出了基于 Walsh-Hadamrd 变换识别算法,该方法将校验方程成立个数与不成立个数之差作为参数识别的依据,由于考虑到了全体码字成立情况,故该方法具有较强的容错性,但是算法复杂度会随着编码器中寄存器个数成指数倍增加. 此外,还有基于智能群算法的识别方法^[13,14],这些方法在约束长度较小时,往往具有较好的识别性能,但是一旦约束长度增加,算法将很难收敛. 从基于软判决的识别算法来看,文献[15~17]引入了对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR)概念,将二元域中的校验关系等价于实数域中,相比较于 Walsh-Hadamrd 变换方法,基于 LLR 算法的参数识别性能进一步提高,但是由于运算在实数域中,其计算复杂度也成倍增加. 文献[18]将码字之间的校验关系用校验符合度进行度量,软判决信息得到了更加充分的利用,参数在低信噪比下的识别性能具有较好的提升,但是复杂度高的问题没有从根本上改变. 从目前卷积码识别现状来看,算法复杂度高的问题还需要进一步改进.

基于此,本文提出了一种基于迭代消元的识别方法. 该方法无须对校验向量进行遍历,不仅具有较好的容错性能,而且还克服了传统算法计算复杂高的缺点.

2 卷积码定义以及问题描述

卷积码伴随着维特比译码算法的出现而被广泛应用于各个通信协议中. 通常卷积码以 (n, k, m) 来表示,其中 n 为每时钟节拍编码输出比特数, k 为每时钟节拍输入比特数, m 为卷积码生成多项式中最高幂次数,其生成多项式矩阵可表示为:

$$\mathbf{G}(D) = \begin{bmatrix} g_{1,1}(D) & g_{1,2}(D) & \cdots & g_{1,n}(D) \\ g_{2,1}(D) & g_{2,2}(D) & \cdots & g_{2,n}(D) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{k,1}(D) & g_{k,2}(D) & \cdots & g_{k,n}(D) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中,

$$g_{i,j}(D) = g_{i,j}^0 + g_{i,j}^1 \cdot D + \cdots + g_{i,j}^m \cdot D^m \quad (2)$$

其中, $g_{i,j}^l \in \text{GF}(2)$, $0 \leq l \leq m$.

不妨设输入的信息序列多项式为 $\mathbf{S}(D) = [S_1(D), S_2(D), \cdots, S_k(D)]$, 其中, $S_i(D) = s_{i,0} + s_{i,1} \cdot D + \cdots + s_{i,L} \cdot D^L$ ($1 \leq i \leq k$, L 为待编码的序列长度); 设输出的 n 路编码序列为 $\mathbf{C}(D) = [C_1(D), C_2(D), \cdots, C_n(D)]$, 其中, $C_i(D) = c_{i,0} + c_{i,1} \cdot D + \cdots + c_{i,L} \cdot D^L$ ($1 \leq i \leq n$). 则 $\mathbf{S}(D)$ 与 $\mathbf{C}(D)$ 满足:

$$\mathbf{C}(D) = \mathbf{S}(D) \cdot \mathbf{G}(D) \quad (3)$$

设 $\mathbf{H}(D)$ 为 (n, k, m) 卷积码的校验矩阵,其维度为 $(n-k) \times n$, 即:

$$\mathbf{H}(D) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(D) & h_{1,2}(D) & \cdots & h_{1,n}(D) \\ h_{2,1}(D) & h_{2,2}(D) & \cdots & h_{2,n}(D) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n-k,1}(D) & h_{n-k,2}(D) & \cdots & h_{n-k,n}(D) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $h_{i,j}(D) = h_{i,j}^0 + h_{i,j}^1 \cdot D + \cdots + h_{i,j}^{m'} \cdot D^{m'}$, $h_{i,j}^l \in \text{GF}(2)$, $0 \leq l \leq m'$, m' 为校验矩阵多项式的最高幂次.

生成多项式与校验矩阵之间满足约束关系为:

$$\mathbf{G}(D) \cdot \mathbf{H}^T(D) = \mathbf{0} \quad (5)$$

联立式(3)与式(5),可以得到:

$$\mathbf{C}(D) \cdot \mathbf{H}^T(D) = \mathbf{0} \quad (6)$$

在实际的通信系统中,码字 $\mathbf{C}(D)$ 会受到噪声的干扰而产生误码,本文要解决的问题就是存在误码情况下,恢复出卷积码编码参数. 在实际工程中,为了尽可能快的传输数据,卷积码的码率会尽可能的高,故 k 与 n 一般满足 $k = n - 1$, 所以本文从工程实际出发,重点研究高误码率下 $(n-1, n, m)$ 卷积码的快速识别问题.

3 基于迭代消元的识别模型建立

3.1 有误码条件下高斯消元算法性能

传统的高斯消元方法是将截获的比特序列构建二元域中的线性方程组,采用消元法得到解空间的基,最终得到校验向量,这种方法虽然不用逐个遍历对偶空间中元素,但是容错性却很差. 本节重点研究在有误码条件下,基于高斯消元算法的性能.

不妨设截获的比特数目为 len , 截获的序列为 $x_1, x_2, \cdots, x_{\text{len}}$. 当构建的系数矩阵 \mathbf{A} 列数正好等于编码约束长度 $n \cdot (m' + 1)$ 时,编码约束长度才有可能成立,即 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{n(m'+1)} \\ x_{n+1} & x_{n+2} & \cdots & x_{n(m'+2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(N-1)n+1} & x_{(N-1)n+1} & \cdots & x_{n(m'+N)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $N = \lfloor \text{len}/n \rfloor - n(m' + 1) + 1$, 符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整.

为了方便研究误码对校验关系的影响,现将式(7)中第 i 行单独提取出来讨论,由于码率为 $(n-1)/n$, 校验矩阵为一维的向量,不妨设:

$$\mathbf{X}_i = [x_{(i-1)n+1}, x_{(i-1)n+2}, \cdots, x_{n(m'+i)}] \quad (8)$$

$$\mathbf{h} = [h_{1,1}^{m'}, h_{1,2}^{m'}, \cdots, h_{1,n}^{m'}, h_{1,1}^{m'-1}, \cdots, h_{1,n}^{m'-1}, \cdots, h_{1,1}^0, \cdots, h_{1,n}^0] \quad (9)$$

则需要考察在误码率为 P_e 条件下, $\mathbf{X}_i \cdot \mathbf{h}^T = 0$ 的概率,不妨设其概率为 P_0 . 当 \mathbf{X}_i 中元素出现误码时,欲使校

验关系依旧成立,则必须满足两个条件之一,其一, X_i 出现误码的位置对应于 \mathbf{h} 中元素为 0;其二, \mathbf{h} 中元素为 1 的位置对应于 X_i 中元素出现误码的个数为偶数个. 由此可知,在误码为 P_e 条件下,校验关系依然成立的概率为:

$$P_0 = \sum_{i=0}^{\lfloor w/2 \rfloor} C_w^{2 \cdot i} \cdot P_e^{2 \cdot i} \cdot (1 - P_e)^{w - 2 \cdot i} \quad (10)$$

其中, w 为校验向量 \mathbf{h} 的码重,符号 C 表达组合数运算.

当进行高斯消元时,由于是随机选取式(7)中 $n(m' + 1)$ 行构成系数方阵,所以下面进一步分析 $n(m' + 1) \times n(m' + 1)$ 的系数方阵能够通过高斯消元得到校验向量 \mathbf{h} 的概率.

在误码率为 P_e 条件下,式(7)中 N 个系数方程,存在 i 个方程满足校验关系且正好选出 $n(m' + 1)$ 个系数方程能够求解出校验向量的概率为 $C_N^i P_0^i \cdot (1 - P_0)^{N-i} \frac{C_i^{n \cdot (m' + 1)}}{C_N^{n \cdot (m' + 1)}}$,由于能够通过消元求解出校验向量,故 $i \geq n \cdot (m' + 1)$. 将所有情况叠加在一起,得到矩阵 \mathbf{A} 通过一次高斯消元,就能得到校验向量的概率为:

$$P_1 = \sum_{i=n \cdot (m' + 1)}^N C_N^i P_0^i \cdot (1 - P_0)^{N-i} \cdot \frac{C_i^{n \cdot (m' + 1)}}{C_N^{n \cdot (m' + 1)}} \quad (11)$$

又因为

$$\frac{C_i^{n \cdot (m' + 1)}}{C_N^{n \cdot (m' + 1)}} = C_{N-n \cdot (m' + 1)}^{i-n \cdot (m' + 1)} \quad (12)$$

故式(11)化简为:

$$P_1 = \sum_{i=n \cdot (m' + 1)}^N C_{N-n \cdot (m' + 1)}^{i-n \cdot (m' + 1)} P_0^i \cdot (1 - P_0)^{N-i} \quad (13)$$

令 $i' = i - n$,作变量替换,化简后得到:

$$P_1 = P_0^{n \cdot (m' + 1)} \quad (14)$$

由式(14)可知,传统的高斯消元法性能会随着编码约束长度以及误码率的增加而急剧下降.

3.2 基于迭代消元的参数识别算法

由上节分析可知,传统消元法受到编码约束长度以及信道环境的影响极大,主要原因在于传统消元法能够有效利用到的比特数据仅仅为式(7)中前 $n \cdot (m' + 1)$ 行数据,而本文的思路是通过多次随机抽取 \mathbf{A} 中 $n \cdot (m' + 1)$ 行构成消元方阵进行消元,然后对得到的疑似校验向量进行判决,这样不仅继承了高斯消元法的高效性,同时还具有较好的容错性. 首先研究在信道误码为 P_e 条件下,可靠出现一次正确校验向量的最小迭代次数 iter .

当信道噪声为 P_e ,一次高斯消元得到正确校验向量的概率 P_1 已由式(14)给出,当总的迭代为 iter 时,则通过消元法成功得到校验向量的次数 t 应满足伯努利分布即: $t \sim B(\text{iter}, P_1)$,当迭代次数 iter 比较大时,由中

心极限定理可知:

$$\frac{t - \text{iter} \cdot P_1}{\sqrt{\text{iter} \cdot P_1 \cdot (1 - P_1)}} \sim N(0, 1) \quad (15)$$

其中, $N(0, 1)$ 表示均值为 0,方差为 1 的正态分布.

为了得到正确的校验向量,则在 iter 次迭代过程中,至少要出现 1 次正确的结果,同时为了保证能够可靠出现,由统计学中事件发生概率为 0.997 为大概率事件,故选定分布的下分位点为 $\alpha_{0.003}$,通过查询正态分布表可知 $\alpha_{0.003} = -2.7$,故迭代次数 iter 满足条件为:

$$\frac{1 - \text{iter} \cdot P_1}{\sqrt{\text{iter} \cdot P_1 \cdot (1 - P_1)}} \leq -2.7 \quad (16)$$

解得 iter 应满足:

$$\text{iter} \geq \frac{9.29P_1 - 7.29P_1^2 + \sqrt{53.14P_1^4 - 135.45P_1^3 + 82.3P_1^2}}{2P_1^2} \quad (17)$$

在总数为 iter 的迭代消元过程中,得到的解向量仅仅能够满足参与消元序列的校验关系,本文将其定义为疑似校验向量,对于疑似校验向量还需要进一步综合考虑整体码字的校验关系成立情况,判定的思路为:在真实校验向量和非校验向量下,利用编码方程成立的概率差异进行区分. 不妨设疑似校验向量为 \mathbf{v} ,首先构建以下两类假设检验:

$H_0: \mathbf{v}$ 不是卷积码的校验向量;

$H_1: \mathbf{v}$ 为卷积码的校验向量.

设 \mathbf{v} 的码重为 w_v ,在假设条件为 H_1 ,信道误码率为 P_e 条件下,由式(10)可知,校验关系成立的概率为:

$$P_{v_1} = \sum_{i=0}^{\lfloor w_v/2 \rfloor} C_{w_v}^{2i} P_e^{2i} (1 - P_e)^{w_v - 2i} \quad (18)$$

在假设条件为 H_0 情况下,由于 \mathbf{v} 不是真实的校验向量,故编码方程成立随机,故约束关系成立概率为 $P_{v_0} = 0.5$. 将校验关系成立个数与不成立个数之差的均值作为统计量 T ,不妨设构成的方程数目为 N_0 ,当 N_0 较大时,在假设条件 H_0 下, T 近似服从均值为 0,方差为 $1/N_0$ 的高斯分布;在假设条件为 H_1 下, T 近似服从均值为 $(2P_{v_1} - 1)$,方差为 $4P_{v_1}(1 - P_{v_1})/N_0$ 的高斯分布. 为方便描述,记 $\mu_0 = 0$, $\sigma_0^2 = 1/N_0$, $\mu_1 = (2P_{v_1} - 1)$, $\sigma_1^2 = 4P_{v_1}(1 - P_{v_1})/N_0$,设判决门限为 Λ ,则漏警概率 P_f 为:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\Lambda} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma_1^2}} dx \quad (19)$$

虚警概率 P_a 为:

$$P_a = \int_{\Lambda}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} dx \quad (20)$$

综合两者得到平均误判概率为 $P_{er} = (P_f + P_a)/2$.

为了取得 P_{er} 的最小值,将 P_{er} 对 Λ 求导数,并令其等于零,得到:

$$\frac{1}{\sigma_1} e^{-\frac{(A-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} = \frac{1}{\sigma_0} e^{-\frac{(A-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (21)$$

两边取对数,化为一元二次方程,求解方程,得到最小误判门限为:

$$A_{opt} = \frac{\sigma_0^2 \cdot \mu_1 - \sigma_1^2 \mu_0 - \sigma_0 \sigma_1 \cdot \sqrt{(\mu_0 - \mu_1)^2 + (\sigma_1^2 - \sigma_0^2) \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)}}{(\sigma_0^2 - \sigma_1^2)} \quad (22)$$

对疑似校验向量进行判决时,首先求解统计量 T ,然后计算门限 A_{opt} ,一旦 $T > A_{opt}$,则停止迭代,输出识别的参数.

3.3 卷积码参数识别流程

按照前面的分析可知,通过遍历编码器每时钟节拍输出比特数 n 以及最小编码约束长度 L_{min} ,来构造消元矩阵 A ,然后利用迭代消元方法求取疑似校验向量,当疑似校验向量的统计量 T 大于设定的门限时,即可停止迭代,完成卷积码编码参数的识别,具体步骤如下:

算法 1 卷积码参数识别

输入: $n_{min}, n_{max}, l_{min}, l_{max}$, 截获数据以及数据长度 len

输出: En, EL, h_0

1. 初始化 $flag = 0, En = 0, EL = 0$
2. for $n = n_{min}$ to n_{max} do
3. for $L_{min} = l_{min}$ to l_{max} do
4. $h_0 = \text{zeros}(1, L_{min})$
5. 按照式(7)构造矩阵 A
6. 计算最小迭代次数 $iter$
7. for $i = 1$ to $iter$ do
8. 将 A 的行随机打乱,提取前 L_{min} 行构建 $A'_{L_{min} \times L_{min}}$
9. 对 $A'_{L_{min} \times L_{min}}$ 进行高斯消元,得到疑似校验向量 v
10. 求解统计量 T 以及门限 A_{opt}
11. if $T > A_{opt}$ do
12. $h_0 = v, En = n, EL = L_{min}, flag = 1$
13. break;
14. endif
15. endfor
16. if $flag = 1$ do
17. break;
18. endif
19. endfor
20. if $flag = 1$ do
21. break;

22. endif
23. endfor

3.4 计算复杂度分析

设识别过程中最大迭代次数为 $iter_{max}, n$ 的遍历范围为 n_{min} 到 n_{max} , 最小编码约束长度 L_{min} 遍历范围为 l_{min} 到 l_{max} , 由于高斯消元的计算复杂度近似与矩阵行数三次方成正比,故本文算法在最不利情况下,计算复杂度近似为

$$\frac{n_{max} - n_{min} + 1}{4} \cdot [l_{max}^2 \cdot (l_{max} + 1)^2 - l_{min}^2 \cdot (l_{min} + 1)^2],$$

忽略低次项,可得到本文算法的计算复杂度为 $O(n_{max} \cdot l_{max}^4)$;文献[8]采用 Walsh-Hadamard 变换,求解卷积码的 Walsh 谱,需要穷尽整个对偶空间,其计算复杂度为

$$\sum_{i=n_{min}}^{n_{max}} \sum_{l=l_{min}}^{l_{max}} 2^{4l},$$

忽略低次项,得到 Walsh-Hadamard 变换的计算复杂度近似为 $O(n_{max} \cdot 2^{4 \cdot l_{max}})$,而文献[9,10]采用蝶形运算,实现快速 Walsh-Hadamard 变换(Fast Walsh-Hadamard Transform, FWHT),计算复杂度变为 $O(n_{max} \cdot 2^{2 \cdot l_{max}})$;针对基于软判决的识别算法而言^[16],不妨设截

获的序列长度为 len ,则需要在实数域中进行 $\sum_{i=n_{min}}^{n_{max}} \sum_{l=l_{min}}^{l_{max}} len \cdot 2^l$ 次乘法运算, $\sum_{i=n_{min}}^{n_{max}} \sum_{l=l_{min}}^{l_{max}} len/l$ 次加法运算,

为了方便比较,这里将 1 次实数域中乘法等价于 6 次二元域运算,1 次实数域中加法等价于 4 次二元域中运算,忽略低次项,则基于软判决算法的复杂度近似为 $O[12 \cdot len(n_{max} - n_{min} + 1) \cdot 2^{l_{max}}]$. 由此可知,本文提出的算法复杂度仅仅与 l_{max}^4 成正比,而现有算法计算复杂度与 l_{max} 成指数倍增加. 由此可知,本文提出的算法计算复杂度远远低于现有的方法. 当卷积码的编码约束长度很大时,本文算法的优势将会非常明显.

4 仿真分析

4.1 算法可行性验证

在 3.1 节中,研究了在不同误码率情况下,完成一次高斯消元得到正确校验向量的概率,所得结果的正确性对后续迭代次数的计算具有重要影响,所以有必要验证推导的理论结果正确性. 仿真选取的卷积码参数如表 1 所示,信道误码设定范围为 0.005 到 0.1,间隔 0.005 取值,得到校验向量检测概率与误码率之间的关系如图 1 所示.

表 1 校验向量检测概率验证参数设定

m	生成多项式	校验多项式	校验长度 L_{min}	码重 w
2	$[1 + D^2, 1 + D + D^2]$	$[1 + D + D^2, 1 + D^2]$	6	5
4	$[1 + D^4, 1 + D^3 + D^4]$	$[1 + D^3 + D^4, 1 + D^4]$	10	5
6	$[1 + D^6, 1 + D^5 + D^6]$	$[1 + D^5 + D^6, 1 + D^6]$	14	5
6	$[1 + D^6, 1 + D + D^2 + D^5 + D^6]$	$[1 + D + D^2 + D^5 + D^6, 1 + D^6]$	14	7
6	$[1 + D^2 + D^3 + D^5 + D^6, 1 + D + D^2 + D^3 + D^6]$	$[1 + D + D^2 + D^3 + D^6, 1 + D^2 + D^3 + D^5 + D^6]$	14	10

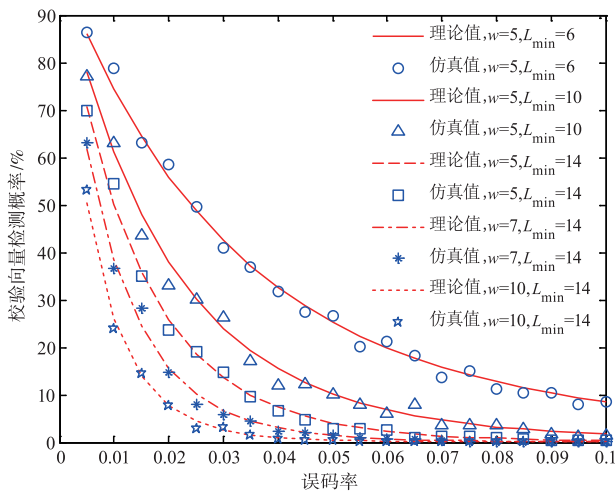


图1 校验向量检测概率

从图1结果来看,理论与仿真结果能够很好的吻合,这说明在有误码条件下,推导的通过一次高斯消元,就能得到校验向量的概率是正确的;同时校验向量的正确率随着误码率的增加会急剧下降,这进一步证

明了传统高斯消元的容错性能较差;其次从图1中还能得到,随着校验码重 w 以及最小校验约束长度的增加,得到的校验向量正确率会下降,这说明卷积码校验矩阵自身的属性会对算法具有一定影响,这在后面的仿真中会进一步定量分析。

4.2 算法容错性能验证

在本节中,研究了不同因素对算法性能的影响. 首先考察了不同校验约束长度以及校验向量码重对算法性能的影响;其次研究了截获数据量对算法性能的影响;再次考察了在不同卷积码码率条件下,算法对参数的正确识别率;最后为进一步考察算法推导的迭代次数合理性,在不同的固定迭代次数与动态计算的迭代次数下,进行了算法性能对比。

仿真1 不同校验约束长度和码重的影响

由4.1节中结论可知,不同校验约束长度 L_{min} 以及校验向量码重 w 对算法具有较大影响,故在仿真1中,重点考察这两个因素. 仿真1设定的卷积码编码器参数如表2所示。

表2 仿真1编码器参数设定

m	生成多项式	校验多项式	L_{min}	w
3	$[1 + D^3, 1 + D^2 + D^3]$	$[1 + D^2 + D^3, 1 + D^3]$	8	5
4	$[1 + D^4, 1 + D^3 + D^4]$	$[1 + D^3 + D^4, 1 + D^4]$	10	5
3	$[1 + D^2 + D^3, 1 + D + D^2 + D^3]$	$[1 + D + D^2 + D^3, 1 + D^2 + D^3]$	8	7
4	$[1 + D^3 + D^4, 1 + D + D^2 + D^4]$	$[1 + D + D^2 + D^4, 1 + D^3 + D^4]$	10	7
7	$[1 + D + D^2 + D^5 + D^7, 1 + D^3 + D^4 + D^5 + D^6 + D^7]$	$[1 + D^3 + D^4 + D^5 + D^6 + D^7, 1 + D + D^2 + D^5 + D^7]$	16	11
8	$[1 + D^2 + D^3 + D^4 + D^8, 1 + D + D^2 + D^3 + D^5 + D^7 + D^8]$	$[1 + D + D^2 + D^3 + D^5 + D^7 + D^8, 1 + D^2 + D^3 + D^4 + D^8]$	18	12
9	$[1 + D^3 + D^4 + D^5 + D^7 + D^8 + D^9, 1 + D + D^3 + D^4 + D^7 + D^9]$	$[1 + D + D^3 + D^4 + D^7 + D^9, 1 + D^3 + D^4 + D^5 + D^7 + D^8 + D^9]$	20	13

仿真中设定截获的码元序列长度为2000bit,信道误码率范围为0~0.3,间隔0.005取值,蒙特卡洛仿真次数为1000次数,得到不同误码率值下参数的正确识别概率如图2所示。

从图2结果来看,校验约束长度以及校验码重对算法性能具有较大的影响. 首先在同一校验码重情况下,算法性能随着校验约束长度的增加而下降;其次对比在相同校验约束长度和不同校验码重下算法性能可知,随着校验码重的增加,算法会逐渐下降,这与4.1节中的结论相吻合;最后从图2中还能看出,本文提出的算法具有较强的容错性能,在误码 10^{-2} 量级上,表2中的卷积码编码器识别概率能够达到95%以上正确识别率。

仿真2 不同码率的影响

在仿真2中,研究卷积码码率对算法性能的影响. 由于在实际工程中常常通过删余方法来提高卷积码码率,故仿真2以1/2码率的 $[1 + D^3 + D^4, 1 + D + D^2 +$

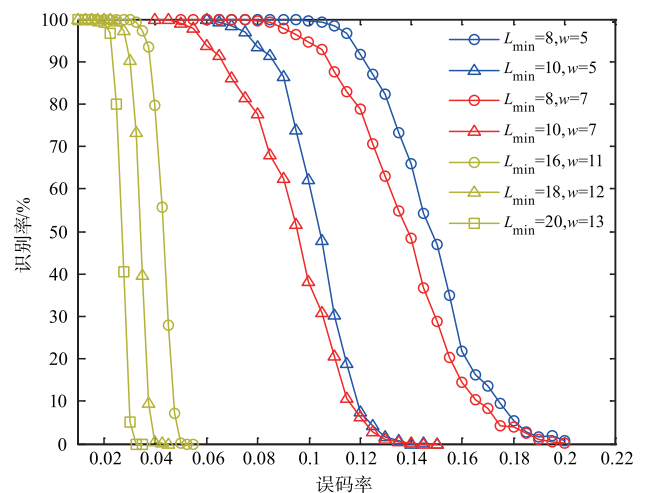


图2 校验约束长度以及校验码重对算法影响

$D^4]$ 为母码,构造2/3,3/4,4/5以及5/6码率的卷积码,具体参数如表3所示。

设定信道误码率为从0到0.12,间隔0.005取值。

采用 1000 次蒙特卡洛仿真,统计在不同码率以及误码率条件下,参数的正确识别概率如图 3 所示.

表 3 构造的卷积码参数

码率	删余模式	校验长度	校验码重
1/2	1 1	10	7
2/3	11 10	15	11
3/4	101 110	20	11
4/5	1010 1101	25	16
5/6	10111 11000	30	19

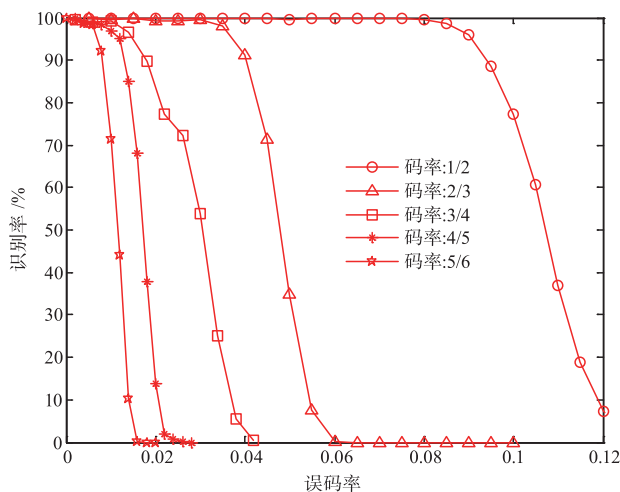


图3 不同码率对算法影响

从图 3 结果来看,卷积码码率对算法具有较大的影响.算法的性能会随着码率的增加而急剧恶化.主要原因在于,当卷积码码率增加后,相应的校验约束长度以及校验向量的码重也会增加,从而导致校验向量正确识别概率下降,但是同仿真结果来看,本文提出的算法对于码率具有较好的鲁棒性能,在码率为 5/6,误码率在 10^{-2} 量级上,参数识别率能够达到 95% 以上.

仿真 3 不同迭代次数的影响

在 3.2 节中,式 (17) 给出了算法随不同信道误码率下的动态迭代次数,为了验证算法设置的合理性,仿真 3 将固定迭代次数与式 (15) 动态迭代次数下的参数识别性能进行对比,仿真中设定固定迭代次数分别为: 10, 30, 50, 80, 100 以及 200 次. 设定卷积码编码器为 $[1 + D^4, 1 + D + D^2 + D^3 + D^4]$, 信道误码率范围为 0 ~ 0.12, 间隔 0.005 取值, 蒙特卡洛试验次数为 1000, 统计不同固定迭代以及动态迭代次数下, 参数正确识别的概率如图 4 所示.

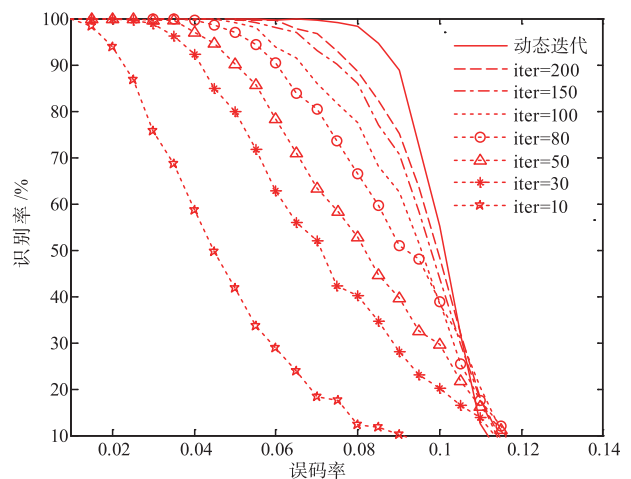


图4 不同迭代次数对算法影响

从图 4 结果来看,随着迭代次数的增加,参数正确识别概率逐渐提升,在迭代次数比较小时,性能提升更为明显;对比固定迭代与动态迭代次数下算法的性能,很明显可以看出,在本文设定的动态迭代次数下,参数正确识别率最高,这充分说明式 (15) 求解的动态迭代次数更为合理.

4.3 与其它算法对比

在本节中,将现有算法与本文算法进行综合性能对比. 首先将基于硬判决下,具有较强容错性的 FWHT 算法^[9,10]与本文算法进行对比;其次将基于软判决的 LLR 算法^[15,16]以及文献[18]中符合度算法与提出的算法进行对比;最后从实时性角度出发,记录完成一次卷积码参数识别的时间消耗.

仿真 4 与硬判决方法对比

在现有的硬判决识别方法中,FWHT 算法具有较强的高误码率容错性能,在仿真 4 中,将该算法与本文方法在容错性方面进行对比. 设定截获的数据量为 2000bit,选取的卷积码编码器为 5 种,参数如表 4 所示.

表 4 选择的卷积码参数

m	生成多项式	校验长度 L_{\min}	码重 w
2	$[1 + D^2, 1 + D + D^2]$	6	5
3	$[1 + D + D^3, 1 + D + D^2 + D^3]$	8	7
4	$[1 + D^3 + D^4, 1 + D + D^2 + D^4]$	10	7
5	$[1 + D^2 + D^4 + D^5, 1 + D + D^2 + D^3 + D^5]$	12	9
6	$[1 + D^2 + D^3 + D^5 + D^6, 1 + D + D^2 + D^3 + D^6]$	14	10

统计在不同信道误码率条件下,两种算法对参数的正确识别率,结果如图 5 所示.

从图 5 结果来看,本文算法识别性能要好于 FWHT 算法,且编码器中寄存器 m 个数越少,本文算法的性能优势就越明显. 主要原因在于当 m 越小时,对应于校验

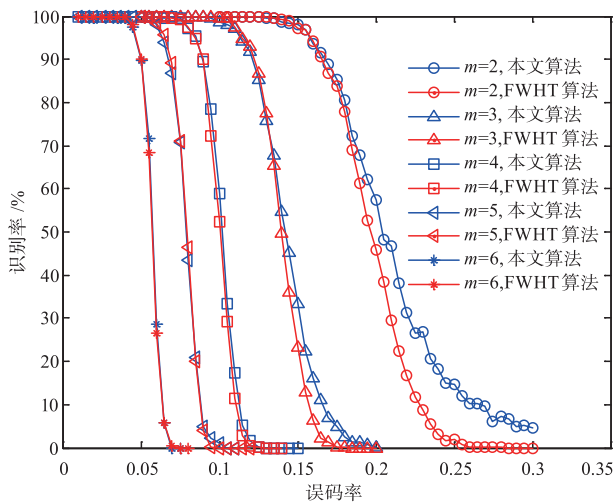


图5 与硬判决算法对比

约束长度 L_{\min} 就越小,在迭代高斯消元过程中就越容易得到校验向量;其次本文提出的算法是通过迭代消元方法求取校验向量,而 FWHT 算法本质上是通过遍历的方法求取,从一定程度上本文算法减少了 FWHT 方法在遍历过程中非校验向量造成的虚警概率,故提出的方法要好于目前 FWHT 算法。

仿真 5 与软判决方法对比

在仿真 5 中,选取了两种基于软判决的识别方法进行比较,首先是经典的基于 LLR 算法^[15,16],其次是文献[18]中基于校验符合度的识别方法.仿真中选取的编码器为寄存器个数 $m=3$ 的 $(1+D+D^3, 1+D+D^2+D^3)$,以及寄存器个数 m 为 4 的 $(1+D^3+D^4, 1+D+D^2+D^4)$,假定调制方式为 BPSK,定义信噪比为 $\text{SNR} = 10 \cdot \lg[A^2/(2\sigma^2)]$,其中, A 为调制波形幅度, σ^2 为信道高斯噪声方差,设定截获的数据量为 2000bit,在不同信噪比下,记录 LLR 算法、基于校验符合度算法以及本文算法对参数的正确识别率,结果如图 6 所示。

从图 6 结果来看,本文算法性能要差于基于软判决的识别方法,这是由于本文算法利用的是解调后的硬判决序列,不可避免会造成一定的信息损失,这是目前基于硬判决方法不可克服的缺点.从与软判决的差距来看,本文算法与 LLR 方法性能相差 0.75dB,而与符合度算法相比,相差大约 1.75dB,由此可知本文算法在性能上已经相当接近软判决的方法,同时本文方法通过迭代的方式求取校验向量,完全不同于基于软判决穷尽遍历的方式,故从计算复杂与运行所需要的内存空间来看,要远远好于基于软判决的方法,结合 3.5 节中计算复杂度分析可知,相比较于软判决方法,本文算法在牺牲了一定的识别性能的前提下,使计算效率大大提升。

仿真 6 算法的实时性对比

在仿真 6 中,主要将上述 3 种算法与本文算法就实

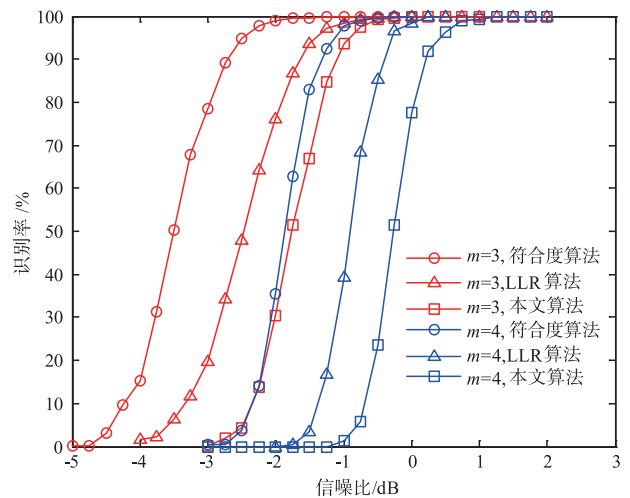


图6 与软判决算法对比

时性方面进行对比,选取的卷积码编码器参数如表 4 所示.仿真的环境为:主频 2GHz,运行内存为 4GB, I3 处理器(双核).记录在不同的卷积码编码器下,4 种算法完成一次参数识别的耗时,结果如表 5 所示。

表 5 4 种算法耗时对比(s)

m	本文算法	FWHT 算法	LLR 算法	校验符合度算法
2	0.1200	0.0649	0.0281	0.1138
3	0.1700	0.1842	0.1435	0.7072
4	0.2505	0.4571	0.7934	4.1416
5	0.3061	0.9602	2.7603	13.0882
6	0.4099	3.9238	14.7803	68.9055

从表 5 结果来看,本文算法 1s 之内可完成卷积码参数识别,同时随着 m 的增加,算法耗时增幅不大,而其它三种算法都是随着 m 的增加,耗时急剧增加,同时软判决算法的耗时明显高于硬判决 FWHT 算法,这在 m 较大时,对比更为明显.由此可知,本文提出的算法兼顾了容错性与实时性两个方面,其工程实用性更强。

5 结论

本文从卷积码编码结构出发,建立起卷积码参数识别模型;然后从理论上深入分析了基于传统高斯消元识别算法的容错性能,给出了出现一次校验向量的最少迭代次数;其次,基于最小错误判决准则,通过设定校验向量判决门限,实现了在高误码下疑似校验向量的判决;最后利用校验矩阵与生成多项式矩阵之间的约束关系,实现生成矩阵的求解,最终实现卷积码的识别.仿真结果表明,本文算法具有较强的容错性和实时性,与基于 FWHT 算法相比,提出的算法在实时性与容错上均具有较大优势;与基于软判决方法相比,本文算法虽然牺牲了一定容错性能,但是计算效率显著提

升,更具工程实用性.

参考文献

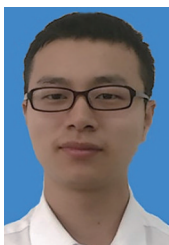
- [1] 谢辉,黄知涛,王峰华. 信道编码盲识别技术研究进展[J]. 电子学报,2013,41(6):1166-1176.
XIE Hui, HUANG Zhi-tao, WANG Feng-hua. Research progress of blind recognition of channel coding[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6):1166-1176. (in Chinese)
- [2] BARBIER J, SICOT O, HOUCHE S. Algebraic approach for the reconstruction of linear and convolutional error correcting codes[J]. Proceedings of World Academy of Science Engineering & Technology, 2006, (2):113-118.
- [3] SOTEH A, BIZAKI H. On the analytical solution of rank problem in the convolutional code identification context[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(3):442-445.
- [4] MARAZIN M, GAUTIER R, BUREL G. Blind recovery of k/n rate convolutional encoders in a noisy environment[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011, 168(1):1-9.
- [5] 解辉,王峰华,黄知涛,张锡祥. 基于改进欧几里得算法的卷积码快速盲识别算法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6):159-162.
XIE Hui, WANG Fenghua, HUANG Zhitao, et al. A fast method for blind recognition of convolutional codes based on improved Euclidean algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(6):159-162. (in Chinese)
- [6] 刘建成,杨晓静,张玉. 基于改进欧几里德算法的 $(n, 1, m)$ 卷积码识别[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(1):64-68.
LIU Jiancheng, YANG Xiaojing, ZHANG Yu. Recognition of $(n, 1, m)$ convolutional code based on improved Euclidean algorithm[J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(1):64-68. (in Chinese)
- [7] 邹艳,陆佩忠. 关键方程的新推广[J]. 计算机学报, 2006, 29(5):711-718.
ZOU Yan, LU Peizhong. A new generalization of key equation[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(5):711-718. (in Chinese)
- [8] 刘健,王晓军,周希元. 基于 Walsh-Hadamard 变换的卷积码盲识别[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4):884-888.
LIU Jian, WANG Xiaojun, ZHOU Xiyuan. Blind recognition of convolutional coding based on Walsh-Hadamard transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(4):884-888. (in Chinese)
- [9] 林晓娴,王维欢. SIMD-BF 模型上的并行 FWHT 算法研究[J]. 计算机时代, 2011, (1):30-32.
LIN Xiaoxian, WANG Weihuan. A study of parallel FWHT algorithm based on SIMD-BF model[J]. Computer Era, 2011, (1):30-32. (in Chinese)
- [10] 张立民,刘杰,钟兆根. 基于改进 Walsh-Hadamard 变换的 $(n, 1, m)$ 卷积码盲识别[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4):839-845.
ZHANG Limin, LIU Jie, ZHONG Zhaogen. Blind recognition of $(n, 1, m)$ Convolutional codes based on modified Walsh-Hadamard Transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(4):839-845. (in Chinese)
- [11] 钟兆根,刘杰,张立民. 基于极大极小准则下的 (n, k, m) 卷积码识别[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(5):1133-1142.
ZHONG Zhaogen, LIU Jie, ZHANG Limin. Recognition of (n, k, m) convolutional codes based on maximum and minimum criterion[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(5):1133-1142. (in Chinese)
- [12] 姚智刚,解辉,韩壮志,等. 基于分段 Walsh-Hadamard 变换的卷积码盲重建算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9):2047-2054.
YAO Zhigang, XIE Hui, HAN Zhuangzhi, et al. Blind recognition of convolutional code based on partitioned Walsh-Hadamard transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(9):2047-2054.
- [13] 张立民,吴昭军,钟兆根. 一种基于遗传算法的 RSC 码盲识别方法[J]. 航空学报, 2017, 38(11):277-286.
ZHANG Limin, WU Zhaojun, ZHONG Zhaogen. Blind identification of RSC code based on genetic algorithm[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2017, 38(11):277-286. (in Chinese)
- [14] 吴昭军,张立民,钟兆根,等. 基于离散 PSO 算法的 RSC 码识别[J]. 电子学报, 2018, 46(7):1644-1651.
WU Zhao-jun, ZHANG Li-min, ZHONG Zhao-gen, et al. Blind recognition of RSC based on discrete PSO[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(7):1644-1651. (in Chinese)
- [15] 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):302-305.
YU Pei-dong, LI Jing, PENG Hua. A novel algorithm for channel coding recognition using soft-decision[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2):302-305. (in Chinese)
- [16] MOOSAVI R, LARSSON E G. Fast blind recognition of channel codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(5):1393-1405.
- [17] 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):352-355.

[18] 于沛东,彭华,巩克现,等. 基于最小二乘代价函数的卷积码盲识别方法[J]. 电子学报, 2018, 46(7): 1545 - 1552.

YU Pei-dong, PENG Hua, GONG Ke-xian, et al. Blind

recognition of convolutional codes based on least-square cost-function[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 7(46): 1545 - 1552. (in Chinese)

作者简介



吴昭军 男,1992年9月出生于四川蓬溪县. 现为西南电子电信研究所工程师. 主要研究方向为:信道编码盲识别.

E-mail:wuzhaojun1992@qq.com



钟兆根 男,1984年出生于江西南昌,博士. 现为海军航空大学讲师,主要研究方向为通信信号盲分离与统计信号处理.

Email:zhongzhaogen@163.com



张立民(通信作者) 男,1966年出生于辽宁开原. 现为海军航空大学教授、博士生导师. 主要研究方向为卫星信号处理及应用.

E-mail:iamzlm@163.com



刘仁鑫 男,1995年生,山东潍坊人,海军航空大学硕士研究生,研究方向为信道编码识别.

E-mail:iamlrxin@163.com