

DOI: 10.7652/xjtuxb201712005

高容错 $(2,1,m)$ 卷积码快速盲识别方法

韩树楠^{1,2}, 张旻^{1,2}, 李歆昊^{1,2}

(1. 解放军电子工程学院网络系, 230031, 合肥; 2. 安徽省电子制约技术重点实验室, 230031, 合肥)

摘要: 针对现有的卷积码识别方法存在容错性不高,需已知编码参数且计算量大的问题,提出一种高容错的 $(2,1,m)$ 卷积码快速盲识别方法。首先建立以 $(2,1,m)$ 卷积码校验序列为解向量的含错校验方程组;然后基于校验方程系数的结构特性,循环利用校验序列的已知元素值递推估计其未知元素,在有误码条件下,进一步利用多个校验方程联合判决未知元素估计值,实现误码条件下校验序列的快速估计;最后基于卷积码自由距离特性及恒虚警准则检验校验序列估计值的正确性,并相应地识别出 $(2,1,m)$ 卷积码生成多项式矩阵。在编码参数未知的情况下,根据校验序列估计值的检测结果,快速识别编码参数。仿真实验表明:该方法具有较高的容错性和较低的计算复杂度,无需先验已知编码参数;当误码率为 0.08 时,识别正确率能达到 80% 以上,而此时矩阵分析识别法已无法正确识别卷积码。

关键词: 卷积码;盲识别;校验方程;高容错

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0028-07

A Fast Method for Blind Identification of $(2,1,m)$ Convolutional Codes under High Error Bit Ratios

HAN Shunan^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, LI Xinhao^{1,2}

(1. Department of Network, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230031, China;
2. Key Laboratory of Anhui Electronic Restricting Technique, Hefei 230031, China)

Abstract: A fast method for blind identification of $(2,1,m)$ convolutional codes in the case of high error bit ratios is proposed to solve the problems that the existing methods for blind identification of convolutional codes have low robustness and need to know encoder parameters a priori and large computation. First, a set of parity check equations is established and its solution is the parity check vector of a $(2,1,m)$ convolutional code. Then, based on the structural properties of coefficients of the parity check equations, unknown elements of the parity check vector are recursively estimated from values of the elements having been estimated. When there are errors in the received bits, the estimation of an unknown element is jointly determined by several parity check equations in each recursion. Finally, the correctness of estimations of the parity check vector is tested based on the property of free distance of convolutional codes and constant false-alarm criterion, and the generator matrix of the $(2,1,m)$ convolutional code is identified accordingly. When the encoder parameters are unknown, these parameters can be

quickly identified from the testing results of the parity check vector estimations. Simulation results show that the proposed method has good tolerance to error bits and low computational complexity, and does not need to know the encoder parameters a priori. When the error bit ratio is 0.08, the correct identification ratio of the method reaches 80%, while the method based on matrix analysis cannot achieve a correct identification.

Keywords: convolutional code; blind identification; parity check equation; high robustness

随着智能通信的发展和信息截获的迫切需求,信道编码盲识别已经成为研究的热点与难点问题^[1-4]。卷积码是一类具有较好纠错性能和较低编译码复杂度的纠错码,在卫星通信、深空通信、移动通信等多种通信系统中有着广泛的应用^[5]。在智能通信和信息对抗领域,卷积码的盲识别是一项关键技术。实际环境中,受噪声和干扰的影响,非合作方接收到的信号信噪比较低,盲解调输出的二进制序列中往往含有较多误码,且非合作方难以获知发送方的编码参数,并受到识别时效性的制约,因此研究高误码率下卷积码的快速盲识别方法具有非常重要的意义。

(2,1,m)卷积码是实际中常用码型,近年来(2,1,m)卷积码的识别问题引起了国内外研究者的广泛关注。陆佩忠等推广了 Berlekamp-Massey(BM)算法,提出了快速合冲算法^[6];王丰华等将整数的辗转相除拓展为多项式的辗转相除,提出了欧几里德识别法^[7];文献[8-10]利用矩阵变换将不同维数的接收序列矩阵化简为最简型,根据最简型矩阵的亏秩特性估计卷积码校验矩阵及编码参数。然而,上述方法存在的共性问题为容错性能不高,要求解调输出序列中无误码或者含有极少量误码。为了提高识别方法的容错性,文献[11]提出了基于 Walsh-Hadamard 变换(Walsh-Hadamard Transform, WHT)的识别方法,该方法遍历卷积码编码约束长度内的全部二进制向量,将使得校验方程成立个数最多的二进制向量识别为卷积码校验序列,再由校验序列得到生成矩阵。WHT 识别法需码字起始点和约束长度已知,且需要较大的存储空间和计算量。在文献[11]的基础上,文献[12]提出了分段抽取软判决加权 WHT 的识别法,该方法所需的存储空间较原 WHT 识别法减小,但未改变遍历搜索校验序列的算法实质,仍需先验已知编码参数。文献[13]从最大化方程成立联合概率的角度估计卷积码校验序列,该方法仍是基于校验序列的遍历搜索,需已知编码参数,且计算量是 WHT 法的若干倍。这 3 种

识别方法的容错性有所提高,但需要较多的先验知识和较大的计算量,因此无法实现非合作条件下的快速盲识别。

针对高误码率下(2,1,m)卷积码的识别问题,本文提出一种高容错的快速盲识别方法。首先建立以校验序列为解向量的含错校验方程组;然后基于校验方程系数的结构特性,循环利用校验序列的已知元素值递推估计其未知元素;最后基于卷积码自由距离特性及恒虚警准则检验校验序列估计值的正确性,并相应地识别出(2,1,m)卷积码生成多项式矩阵。该方法具有较高的容错性和较低的计算复杂度,无需先验已知编码参数。

1 (2,1,m)卷积码识别问题描述

(2,1,m)卷积码的编码结构可以用生成多项式矩阵 $\mathbf{G}(D)=[g_1(D), g_2(D)]$ 表示,其中 $g_i(D)=g_{i,0}+g_{i,1}D+g_{i,2}D^2+\dots+g_{i,m}D^m$, ($i=1,2$)。设信息序列为 $m(D)$,则编码序列 $c(D)$ 可表示为^[14]

$$c(D)=m(D)\mathbf{G}(D) \quad (1)$$

根据卷积码校验多项式矩阵 $\mathbf{H}(D)$ 与生成多项式矩阵 $\mathbf{G}(D)$ 间的校验关系 $\mathbf{G}(D)\mathbf{H}^T(D)=0$,再结合式(1)得到

$$c(D)\mathbf{H}^T(D)=0 \quad (2)$$

由式(2)可建立以校验多项式系数为未知数的方程组,该校验方程组的解向量称为卷积码的校验序列^[9,10]。(2,1,m)卷积码的校验多项式矩阵是其对偶码的生成矩阵,由于(2,1,m)卷积码的生成矩阵与对偶码一一对应,因此识别(2,1,m)卷积码可归结为求解校验方程组,即对偶码的识别。

对于(2,1,m)递归系统卷积码,其生成矩阵可表示为 $\mathbf{G}(D)=[1, g_2(D)/g_1(D)]$,令 $\mathbf{H}'(D)=[g_2(D), g_1(D)]$,那么结合式(1)得到

$$c(D)\mathbf{H}'^T(D)=m(D)\mathbf{G}(D)\mathbf{H}'^T(D)=0 \quad (3)$$

求解由式(3)建立的方程组可估计出递归系统卷积码的生成矩阵,因此递归系统卷积码的识别可转化为一般卷积码的识别。

2 对偶码的快速识别方法

2.1 基于校验方程系数特性的校验序列快速递推估计

对于 $(2,1,m)$ 卷积码,根据式(2),建立如式(4)所示的校验方程组

$$\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & \cdots & c_{1,m+1} & c_{2,m+1} \\ c_{1,m+2} & c_{2,m+2} & \cdots & c_{1,2(m+1)} & c_{2,2(m+1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ c_{1,N(m+1)+1} & c_{2,N(m+1)+1} & \cdots & c_{1,(N+1)(m+1)} & c_{2,(N+1)(m+1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{1,m+1} \\ h_{2,m+1} \\ \vdots \\ h_{1,1} \\ h_{2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

本节基于校验方程的系数特性,提出校验方程组的递推求解算法。该算法循环利用校验序列已知元素值递推估计其未知元素,实现校验序列的快速估计。令 $\hat{\mathbf{h}}_j$ 表示第 j 次递推运算时校验序列已知元素值矩阵,该递推算法的步骤如下。

(1)初始化 $\hat{\mathbf{h}}_1$ 。 $(2,1,m)$ 卷积码校验位编码器的末端含有抽头,相应地校验序列的第一个元素为1,因此在第一次递推运算时,可初始化 $\hat{\mathbf{h}}_1 = [\hat{h}_1]$,其中 $\hat{h}_1 = 1$ 。

(2)进行第1次递推运算。删除校验方程系数矩阵的第一列,在余下的子阵中寻找仅含有1个1元素的行向量,若该1元素为校验序列第 i 个元素 h_i 前的系数,那么根据该方程的系数特性得到

$$h_i \oplus c_1 h_1 = 0 \quad (5)$$

由式(5)估计校验序列第 i 个元素值为 $\hat{h}_i = c_1 h_1$,同时更新已知元素矩阵,得到 $\hat{\mathbf{h}}_2 = [\hat{h}_1, \hat{h}_i]^T$ 。

(3)进行第 j ($j \geq 2$)次递推运算。设此时校验序列 $\mathbf{h}$ 中有 k 个元素已知,即 $\hat{\mathbf{h}}_j = [\hat{h}_{i_1}, \hat{h}_{i_2}, \dots, \hat{h}_{i_k}]^T$,下标 $i_p, p=1,2,\dots,k$ 表示校验序列已知元素位置,那么任一校验方程 $c_1 h_1 \oplus c_2 h_2 \oplus \dots \oplus c_{2(m+1)} h_{2(m+1)} = 0$ 可表示为

$$\sum_{q=k+1}^{2(m+1)} c_{i_q} h_{i_q} \oplus \sum_{p=1}^k c_{i_p} \hat{h}_{i_p} = 0 \quad (6)$$

式中: $c_{i_q}, k+1 \leq q \leq 2(m+1)$ 为校验序列未知元素前的系数。寻找未知数系数中仅含有1个1元素的校验方程,若该1元素是校验序列第 i_{k+1} 个元素前的系数,即 $c_{i_{k+1}} = 1, c_{i_q} = 0, k+2 \leq q \leq 2(m+1)$,那么校验序列第 i_{k+1} 个元素的估计值为

$$\hat{h}_{i_{k+1}} = \sum_{p=1}^k c_{i_p} \hat{h}_{i_p} \quad (7)$$

更新已知元素矩阵,得到 $\hat{\mathbf{h}}_{j+1} = [\hat{h}_{i_1}, \hat{h}_{i_2}, \dots, \hat{h}_{i_k}, \hat{h}_{i_{k+1}}]^T$ 。

(4)重复步骤(3),直到估计出校验序列全部未知元素为止。

该递推算法从系数最稀疏的校验方程开始运行,而系数最稀疏的校验方程出现的概率最小。设接收序列的0,1 bit 的概率分布为 $P(c_t=0)=1/2+\epsilon, P(c_t=1)=1/2-\epsilon$,那么系数最稀疏的校验方程出现的概率为

$$p_s = C_{2(m+1)-1}^1 (1/2 - \epsilon)(1/2 + \epsilon)^{2m} \quad (8)$$

因此,当构建的校验方程数 N 满足条件 $N > 1/p_s$ 时,可保证在每次递推运算中存在满足系数特性的校验方程。

2.2 误码情况下的估计值判决方法

接收序列无误码时,利用2.1节算法可准确估计校验序列。然而,当接收序列有误码时,递推运算中仅利用一个校验方程估计某一未知元素的错误概率较大,考虑到校验方程组中正确方程数大于错误方程数,因此在递推运算中利用多个校验方程联合判决某一未知元素估计值,可以提高递推算法的容错性。

设估计未知元素 $h_{i_{K+1}}$ 时,校验方程组中满足系数特性 $c_{i_{K+1}} = 1, c_{i_q} = 0, K+2 \leq q \leq 2(m+1)$ 的校验方程数为 N_{eq} ,其中有 N_{eq}^1 个方程估计 $h_{i_{K+1}}$ 为1, N_{eq}^0 个方程估计 $h_{i_{K+1}}$ 为0。令 V_{eq} 为估计某一未知元素所需方程数的阈值,估计值 $\hat{h}_{i_{K+1}}$ 的判决方法如下。

(1)当 $N_{eq} \geq V_{eq}$ 时,有

$$\hat{h}_{i_{K+1}} = \begin{cases} 1, & N_{eq}^1 > N_{eq}^0 \\ 0, & N_{eq}^1 < N_{eq}^0 \\ \{0, 1\}, & N_{eq}^1 = N_{eq}^0 \end{cases} \quad (9)$$

(2)当 $N_{eq} < V_{eq}$ 时,有

$$\hat{h}_{i_{K+1}} = \{0, 1\} \quad (10)$$

式中: $\hat{h}_{i_{K+1}} = \{0, 1\}$ 表示将未知元素 $h_{i_{K+1}}$ 取0或1两种可能值。

在该判决方法中,方程数阈值 V_{eq} 与未知元素最大估计错误概率 p_{max} 满足关系

$$p_{max} = \sum_{i=\lceil V_{eq}/2 \rceil+1}^{2\lceil V_{eq}/2 \rceil} C_{2\lceil V_{eq}/2 \rceil}^i p_e^i (1-p_e)^{2\lceil V_{eq}/2 \rceil-i} \quad (11)$$

式中: $p_e = \sum_{i=1}^{\lceil w/2 \rceil} C_w^{2i-1} \eta^{2i-1} (1-\eta)^{w-2i+1}$ 为校验方程错

误概率^[11],其中 η 为接收序列的误码率, w 为校验序列的码重(即校验序列中 1 的数量)。

设定最大估计错误概率后,由式(11)可计算得到阈值 V_{eq} 。根据式(11)可知,增大阈值 V_{eq} 能够提高估计的正确率。

2.3 基于卷积码自由距离特性及恒虚警准则的校验序列检测

由递推算法得到校验序列估计值后,需检验估计值的正确性,以确定校验序列的识别结果。通常利用本文递推算法得到的(2,1,m)卷积码校验序列的估计值唯一,但也存在估计值不唯一的情况。当估计得到多个校验序列时,首先基于卷积码的自由距离特性选择最优的估计结果。卷积码自由距离的定义如下

$$d_f = \min_{m_1 \neq 0} w(\mathbf{M}_\infty \mathbf{G}_\infty) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{M}_\infty$ 为半无限的信息序列; $\mathbf{G}_\infty$ 为半无限生成矩阵。卷积码的自由距离定义为半无限长码序列的最小码重,而实际计算时,仅需要利用有限长的截段码字序列即可^[14]。(2,1,m)卷积码的自由距离 d_f 满足关系

$$d_m \leq d_f \leq w(g_1(D)) + w(g_2(D)) \quad (13)$$

式中: d_m 为 m 阶列距离,等于第 1 段信息序列为非零的、 $(m+1)$ 段截短码字的最小码重,即 $d_m = \min_{m_1 \neq 0} w(\mathbf{M}_{m+1} \mathbf{G}_{m+1}); w(g_i(D)), i=1,2$ 为生成多项式系数的码重。

相同约束长度下,最优的(2,1,m)卷积码具有最大的自由距离,根据这一特性,利用式(13)选择最优的校验序列估计值,再基于恒虚警准则检测该校验序列估计值的正确性。当由递推算法估计的校验序列唯一时,可省略其自由距离的计算,直接检测其正确性。

将校验序列估计值与接收序列矩阵相乘,输出向量中的 0 表示对应的校验方程成立,1 表示校验方程不成立。定义变量 $\xi_i, i=1,2,\dots,N$,若第 i 个校验方程成立, $\xi_i=1$,否则 $\xi_i=-1$ 。设概率 $P(\xi_i=-1)=p$,构建检验统计量 $\sum_{i=1}^N \xi_i$,由中心极限定理可知,当校验方程数 N 较大时, $\sum_{i=1}^N \xi_i$ 服从均值为 $N(2p-1)$ 、方差为 $4Np(1-p)$ 的高斯分布。假设 H_1 表示校验序列估计正确, H_0 表示校验序列估计错误,那么在不同假设下, $\sum_{i=1}^N \xi_i$ 的概率分布为

$$\left. \begin{aligned} H_1: \sum_{i=1}^N \xi_i &\sim N(N(2p_e-1), 4Np_e(1-p_e)) \\ H_0: \sum_{i=1}^N \xi_i &\sim N(0, N) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

设虚警概率为 p_f ,根据恒虚警检测准则,得到检测门限为

$$T = N^{1/2} \Phi^{-1}(1-p_f) \quad (15)$$

式中: $\Phi(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$ 。若校验序列估计值的检验统计量大于检测门限,说明估计正确。

建立式(4)的校验方程组需要已知编码参数,在码率、约束长度和码字起始点未知的情况下,首先假设码长为 2,然后逐步改变约束长度和码字起始点,约束长度的取值范围是 $2 \leq m \leq 7^{[15]}$,起始点位置为接收序列的第一个码元或第二个码元。在不同参数值下估计并检测校验序列,当且仅当编码约束长度和码字起始点正确时,能够估计得到统计量大于门限的校验序列,但此时实际的码长有可能为 2 的整数倍。为了检验码长是否为 2,将起始点依次向后移动两位,在每个起始点下估计并检测校验序列,若每次校验序列的识别结果相同,则说明码长为 2,码率为 1/2。

2.4 计算复杂度分析

本文方法的计算量集中在两部分:一部分是估计校验序列;另一部分是检测校验序列估计值的正确性。设校验序列的长度为 L ,校验方程数为 N ,由递推算法得到的校验序列估计值的个数为 K ,则估计校验序列的计算量的上界为 $N(L-1)K$ 。实际上仅估计校验序列最后一个未知元素的需要 $(L-1)$ 次运算,估计其他未知元素所需的运算次数均小于 $(L-1)$,且每个校验序列估计值的未知元素个数不同,因此实际估计校验序列的计算量远小于 $N(L-1)K$ 。检测校验序列估计值的正确性所需计算量为 $NL + 2^{(L/2-1)}(L/2-1)LK$ 。 K, L 取值较小,舍弃计算量小的部分,本文方法的计算复杂度为 $O(NL)$ 。

3 仿真结果与分析

本节通过仿真实验首先说明本文方法的有效性;然后与矩阵分析法进行对比,分析本文方法的容错性能;再讨论本文方法的识别正确率与阈值 V_{eq} 及校验序列码重的关系;最后计算本文方法在 Matlab 软件平台上的运算时间,说明本文方法的计算复杂度。

实验 1 验证本文方法的有效性。实验中卷积码为

(2,1,4)卷积码,生成矩阵的八进制表示为(21,37),数据量为2 000,误码率为3%,阈值 V_{eq} 设为2,虚警概率设为0.001。在不同约束长度和起始点下校验序列估计值的检验统计量与检测门限的差值,结果如图1所示。

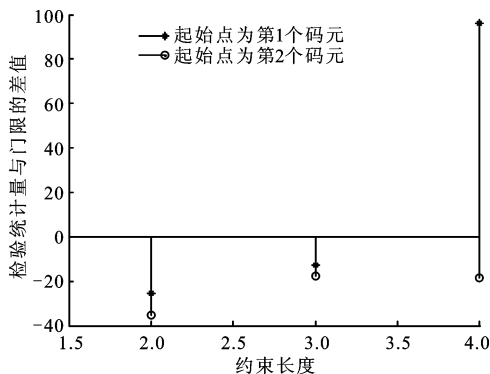


图1 不同约束长度及起始点下的校验序列检测结果

由图1可知,当约束长度为4、起始点为第1个码元时,校验序列估计值的检验统计量与检验门限的差值最大,此时检验统计量明显大于门限值。

进一步识别码率。将起始点依次取接收序列的第1、3、5、7码元,不同起始点下,校验序列估计值的检验统计量与检测门限的差值如图2所示。

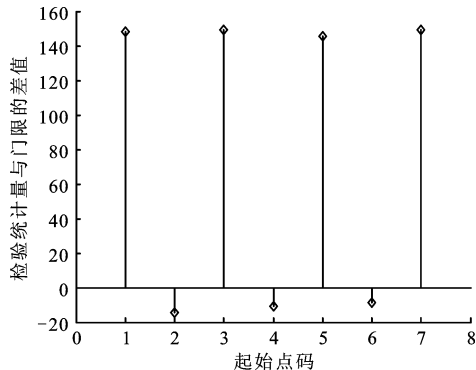


图2 不同起始点下的校验序列检测结果

由图2可知,当码字起始点相差2个码元时,校验序列估计值的检验统计量大于检测门限,且校验序列的估计值均为 $[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]^T$,由此识别卷积码的码率为1/2,生成多项式矩阵为 $[1+x^4 \ 1+x+x^2+x^3+x^4]$ 。编码参数与生成多项式矩阵的识别结果均与实验条件相符,说明本文方法能够有效地识别(2,1,m)卷积码。

实验2 比较在不同误码率下,本文方法和文献[10]矩阵分析法的识别正确率。实验中卷积码生成矩阵的八进制表示为(21,35),数据量为2 000,误码率的变化范围是0.01~0.1,相邻误码率间隔0.01,阈值 V_{eq} 设为4,虚警概率设为0.001。本文方法和

矩阵分析法的识别正确率随误码率变化曲线如图3所示。

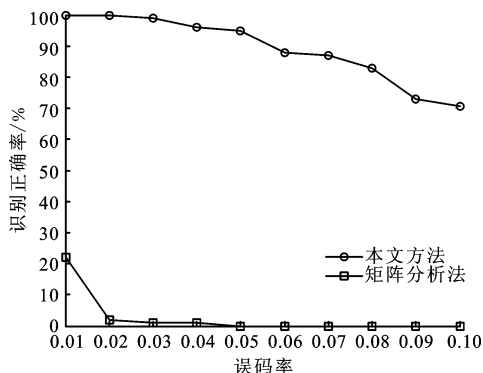


图3 (2,1,4)卷积码的识别正确率随误码率变化曲线

由图3可知,相同误码率下,本文方法的识别正确率明显高于矩阵分析法。该实验中当误码率为0.08时,本文方法的识别正确率能达到80%以上,而此时矩阵分析法已无法正确识别卷积。这表明本文方法具有较好的容错性能。

实验3 比较本文方法和矩阵分析法对递归系统卷积码识别的正确率。递归系统卷积码的生成矩阵为 $G(D)=[1 \ 1+D^2+D^3/1+D+D^3]$,其他条件同实验2,不同误码率下,本文方法与矩阵分析法识别的正确率如图4所示。

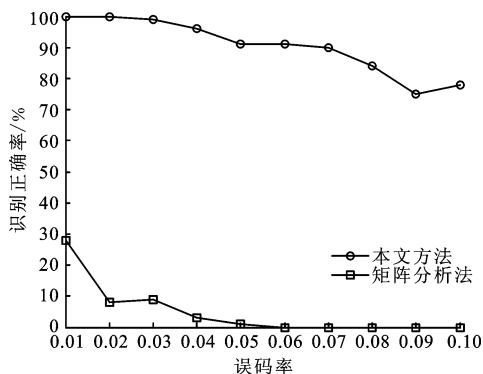


图4 递归系统卷积码的识别正确率随误码率变化曲线

由图4可知,在高误码率下,本文方法对递归系统卷积码有着较高的识别正确率,容错性明显高于矩阵分析法。

实验4 考察在一定误码率条件下,阈值 V_{eq} 对本文方法识别正确率的影响。实验中误码率为8%,阈值 V_{eq} 的取值范围是1~5,其他实验条件同实验2。识别正确率随阈值 V_{eq} 变化曲线如图5所示。

如图5所示,随着阈值的增大,本文方法的识别正确率逐渐提高,这与前文的理论分析结果相符。

实验5 考察校验序列的码重对识别正确率的影响。

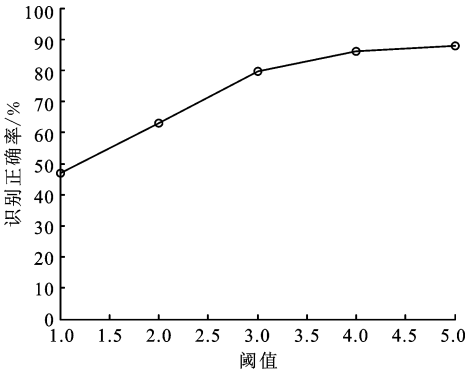


图 5 (2,1,4)卷积码的识别正确率随阈值变化曲线

响。实验中校验序列的码重分别为 4、5、6、7,其他实验条件同实验 2,在不同码重条件下,本文方法的识别正确率随误码率变化曲线如图 6 所示。

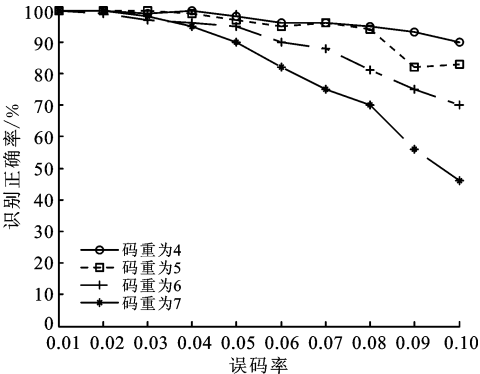


图 6 不同校验序列码重下识别正确率随误码率变化曲线

由图 6 可知,随着校验序列码重的增大,本文方法的识别正确率降低,原因是校验序列码重的增大使得校验方程的错误概率增大。

实验 6 确定本文方法的运算时间。本文方法分别在阈值 V_{eq} 为 2 和 5 的条件下,识别不同约束长度的 $(2,1,m)$ 卷积码,其他实验条件同实验 1。实验所用计算机的 CPU 为 core i3 M380,内存为 4 GB。本文方法在 Matlab 软件平台上运行 100 次,计算运行一次的平均时间,结果如表 1 所示。

表 1 本文方法的运算时间

码型	运算时间/s	
	$V_{eq}=2$	$V_{eq}=5$
(2,1,3)	0.008	0.010
(2,1,4)	0.020	0.028
(2,1,5)	0.100	0.139

由表 1 可知,本文方法的运算时间短,说明计算量小,与前面的计算复杂度的分析结果相符。当约束长度增大时,待估计的编码参数增多,运算时间随

之增大;当阈值 V_{eq} 增大时,运算时间也有所上升。

4 结 语

为实现高误码率下卷积码的有效识别,本文提出了一种高容错的 $(2,1,m)$ 卷积码快速盲识别方法。首先建立以校验序列为解向量的含错校验方程组;然后循环利用校验序列的已知元素值递推估计其未知元素;最后基于卷积码自由距离特性和恒虚警准则检验校验序列估计值的正确性,并识别出 $(2,1,m)$ 卷积码生成多项式矩阵。本文方法具有较好的容错性能,无需先验已知编码参数,且计算复杂度低。以本文方法为基础,可进一步实现 $(n,1,m)$ 卷积码、 $(n,n-1,m)$ 卷积码的盲识别。

参考文献:

[1] LI X H, ZHANG M, HAN S N, et al. Distinction of self-synchronous scrambled linear block codes based on multi-fractal spectrum [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(5): 968-978.

[2] 张旻, 陆凯, 李歆昊, 等. 归零 Turbo 码的盲识别方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1423-1428.

ZHANG Min, LU Kai, LI Xinhao, et al. Blind recognition method for the turbo codes on trellis termination [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(6): 1423-1428.

[3] 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): 53-58.

BAO Xin, ZHOU Leike, 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): 53-58.

[4] SOTEH A G, BIZAKI H K. On the analytical solution of rank problem in the convolutional code identification context [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(3): 442-445.

[5] 李相迎, 胡小春, 甄小龙, 等. CCSDS 链路帧识别技术 [J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 54-60.

LI Xiangying, HU Xiaochun, ZHEN Xiaolong, et al. Recognition technology for CCSDS data link frame [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 54-60.

[6] 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.
- [7] WANG F H, HUANG Z T, ZHOU Y Y. A method for blind recognition of convolutional code based on Euclidean algorithm [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1414-1417.
- [8] MARAZIN M, MAXIME C, GAUTIER R, et al. Dual code method for blind identification of convolutional encoder for cognitive radio receiver design [C]//Proceedings of IEEE Global Communications Workshops. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [9] MARAZIN M, GAUTIER R, BUREL G. Blind recovery of k/n rate convolutional encoders in a noisy environment [J]. *Wireless Communications and Networking*, 2011, 168(1): 1186-1192.
- [10] 刘建成, 杨晓静. 基于求解校验序列的 $(n, 1, m)$ 卷积码盲识别 [J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(10): 2363-2368.
- LIU Jiancheng, YANG Xiaojing. Blind recognition of $(n, 1, m)$ convolutional code based on solving check sequence [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(10): 2363-2368.
- [11] 刘健, 王晓君, 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.
- [12] 张岱, 张玉, 杨晓静, 等. 基于分段抽取软判决加权Walsh Hadamard变换的卷积码识别算法 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(12): 2298-2305.
- ZHANG Dai, ZHANG Yu, YANG Xiaojing, et al. An algorithm for convolutional codes recognition based on sectionally extracting soft-decision weighted Walsh Hadamard transform [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(12): 2298-2305.
- [13] 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.
- [14] 王新梅, 肖国镇. 纠错码: 原理与方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 407-409.
- [15] MAXIME C, NICOLAS S. Reconstruction of convolutional codes from noisy observation [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 546-550.

[本刊相关文献链接]

- 杨广振, 荆建平, 明阳, 等. 利用航空发动机信号特征的振动源盲分离算法. 2017, 51(6): 20-27. [doi:10.7652/xjtuxb201706004]
- 徐思雨, 蔡佳妮, 祝继华, 等. 自适应多位编码量化的哈希图像检索方法. 2017, 51(8): 19-25. [doi:10.7652/xjtuxb201708004]
- 刘杰, 张立民, 钟兆根, 等. 一种软判决下的本原BCH码盲识别方法. 2017, 51(6): 59-65. [doi:10.7652/xjtuxb201706010]
- 龙洋, 胡改玲, 蒙雁琦, 等. 快速的线结构光条纹骨架剪枝算法. 2017, 51(2): 60-64. [doi:10.7652/xjtuxb201702010]
- 滕鹏国, 陈亮, 袁德砦, 等. 稀疏随机纠删码: 一种大规模数据存储容灾方法. 2017, 51(5): 48-53. [doi:10.7652/xjtuxb201705008]
- 张威, 杨明磊, 陈伯孝. 抗距离遮挡的雷达相位编码信号设计方法. 2017, 51(2): 84-90. [doi:10.7652/xjtuxb201702014]
- 刘立, 张衡阳, 毛玉泉, 等. 变换域通信系统抗干扰编码幅度谱成型算法. 2017, 51(2): 91-96. [doi:10.7652/xjtuxb201702015]
- 刘文娟, 冯大政, 袁明冬. 利用参数结构的快速非酉联合对角化算法. 2016, 50(12): 106-113. [doi:10.7652/xjtuxb201612017]
- 王富平, 水鹏朗. 采用多尺度方向微分比率的角度点检测算法. 2016, 50(4): 68-75. [doi:10.7652/xjtuxb201604011]
- 程龙旺, 李为, 马东堂, 等. 一种利用OFDM系统无线信道相位响应的密钥提取方案. 2016, 50(12): 114-120. [doi:10.7652/xjtuxb201612018]
- 李彬, 李泉, 张若南, 等. 无线组播网络中应用网络编码的动态组合重传算法. 2016, 50(12): 38-44. [doi:10.7652/xjtuxb201612007]
- 张凤娜, 张天奎, 王东明, 等. 复杂快中子源编码成像高效模拟方法研究. 2016, 50(7): 118-124. [doi:10.7652/xjtuxb201607018]
- 徐磊磊, 臧会凯, 周生华, 等. 一种相位编码信号及其失配滤波器设计方法. 2016, 50(4): 54-59. [doi:10.7652/xjtuxb201604009]
- 包昕, 周磊珂, 何可, 等. 误码条件下的LDPC码盲识别算法. 2015, 49(12): 53-58. [doi:10.7652/xjtuxb201512009]
- 郭一鸣, 彭华, 张冬玲, 等. 联合串行干扰抵消与因子图的单通道混合信号盲分离算法. 2015, 49(10): 130-135. [doi:10.7652/xjtuxb201510021]
- 姚玉坤, 朱丽青, 余志龙, 等. 多跳无线网络中基于节点编码感知的组播路由协议. 2015, 49(10): 79-83. [doi:10.7652/xjtuxb201510013]
- 毛彦斌, 张选平, 杨晓刚. 伪DNA密码图像加密算法研究. 2015, 49(9): 91-98. [doi:10.7652/xjtuxb201509016]

(编辑 刘杨)