

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.009

引用格式:张立民,刘杰,钟兆根. $(n,1,m)$ 递归系统卷积码的盲识别[J]. 电讯技术,2014,54(9):1220-1225. [ZHANG Li-min, LIU Jie, ZHONG Zhao-gen. Blind Recognition of $(n,1,m)$ Recursive System Convolutional Code[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9):1220-1225.]

$(n,1,m)$ 递归系统卷积码的盲识别*

张立民,刘 杰**,钟兆根

(海军航空工程学院 电子信息工程系,山东 烟台 264001)

摘 要:递归系统卷积码(RSC 码)是 Turbo 码子编码器常采用的编码形式。针对 $(n,1,m)$ 递归系统卷积码的盲识别问题,给出了完整的编码参数和生成多项式识别方法。首先,采用矩阵分析法先求得卷积码参数,避免后续识别生成多项式时因参数循环估计带来的额外计算量。然后,根据 RSC 码的特性推导出生成多项式识别模型,给出了模型的具体求解步骤,并对所采用的 Walsh-Hadamard 变换算法进行了介绍。最后,运用 Matlab 平台进行仿真验证。仿真结果表明,该方法容错性能明显优于常规方法,在误码率为 10^{-2} 条件下成功识别概率能达到 90%,对于 Turbo 码的进一步研究具有重要意义。

关键词:数字通信;信道编码;递归系统卷积码;盲识别;Walsh-Hadamard 变换

中图分类号:TN911.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)09-1220-06

Blind Recognition of $(n,1,m)$ Recursive System Convolutional Code

ZHANG Li-min, LIU Jie, ZHONG Zhao-gen

(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Recursive system convolutional code (RSC code) is the commonly used encoding form of Turbo sub-encoders. For the blind recognition problem of $(n,1,m)$ RSC code, a method based on Walsh-Hadamard transform is proposed. Firstly, code parameters are estimated by analyzing matrix constructed by the received codeword. Then, the mathematical recognition model is derived according to RSC code's characteristics, the specific implementation steps are provided and the principle of the method is introduced. The simulation results from Matlab show that the performance of the method is obviously more excellent in comparison with other methods. The recognition probability reaches 90% when bit error rate (BER) is as high as 10^{-2} , which indicates the great significance of the proposed method for further research on Turbo code.

Key words: digital communication; channel coding; recursive system convolutional code; blind recognition; Wlash-Hadamard transform

1 引 言

在数字通信中,为了提高信息传输的可靠性,往往采用信道编码。其中, Turbo 码^[1-2]在中等误码率和长分组的情况下,性能能够逼近香农限,在卫星通信和深空探测中都得到了广泛的应用。在 Turbo 码

编码系统中,递归系统卷积码(RSC 码)是子编码器常采用的编码形式。因此,对 RSC 码进行识别是 Turbo 识别的基础。

目前卷积码识别方法主要有高斯消元法^[3]、快速双合冲算法^[4]、基于欧几里德算法^[5]、矩阵分析

* 收稿日期:2014-04-23;修回日期:2014-06-12 Received date:2014-04-23;Revised date:2014-06-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102167)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61102167)
** 通讯作者: iamliu1573@163.com Corresponding author: iamliu1573@163.com

法^[6]。其中, 高斯消元法必须在误码率极低的情况下才能有效识别; 快速双合冲算法只适用于 $(2,1,m)$ 卷积码; 基于欧几里德算法最开始用于研究 $(2,1,m)$, 文献[7]将其推广到了 $(n,1,m)$ 的识别, 但其对误码率的适应性有待进一步研究。

以上方法仅对一般的卷积码进行了研究, 而对于 RSC 码的识别问题, 研究成果较少。另外, 这些方法有的是在码参数已知的前提下进行识别, 不是真正意义上的盲识别; 有的通过对参数进行循环估计, 最终达到识别, 增加了计算量。为解决以上问题, 本文首先利用接收码字构造矩阵, 采用矩阵分析法识别出编码参数, 以方便后续生成多项式的识别。然后, 根据 RSC 码的结构特性, 建立生成多项式识别模型, 给出求解步骤。同时, 为了应对高误码率带来的影响, 采用 Walsh-Hadamard 变换算法求解识别方程。

2 问题描述

卷积码一般表示为 (n,k,m) , 其中, k 称为信息位长度, n 为码字长度, m 为编码记忆长度^[8], 表示其 $(n-k)$ 个校验元不仅与本组的信息位有关, 而且与前 m 段信息元有关。由于卷积码是线性系统, 因此编码方程的每个序列可以用相应的多项式代替。对于 $(n,1,m)$ 卷积码, 编码方程可表示为

$$V(D) = u(D)G(D) \tag{1}$$

其中, $u(D)$ 为信息序列, $V(D)$ 为码字序列, $G(D)$ 为生成矩阵, 且满足

$$u(D) = u_0 + u_1D + \cdots + u_jD + \cdots \tag{2}$$

$$V(D) = [v^{(1)}(D) \quad v^{(2)}(D) \quad \cdots \quad v^{(n)}(D)] \tag{3}$$

$$v^{(i)}(D) = v_0^{(i)} + v_1^{(i)}D + \cdots + v_j^{(i)}D + \cdots, 1 \leq i \leq n \tag{4}$$

$$G(D) = [g^{(1)}(D) \quad g^{(2)}(D) \quad \cdots \quad g^{(n)}(D)] \tag{5}$$

$$g^{(i)}(D) = g_0^{(i)} + g_1^{(i)}D + \cdots + g_m^{(i)}D^m, 1 \leq i \leq n \tag{6}$$

设卷积码校验矩阵为 $H(D)$, 则

$$G(D)H^T(D) = 0 \tag{7}$$

其中, $H(D)$ 为 $(n-1) \times n$ 维矩阵,

$$H(D) = \begin{bmatrix} h_1^{(1)}(D) & h_1^{(2)}(D) & \cdots & h_1^{(n)}(D) \\ h_2^{(1)}(D) & h_2^{(2)}(D) & \cdots & h_2^{(n)}(D) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n-1}^{(1)}(D) & h_{n-1}^{(2)}(D) & \cdots & h_{n-1}^{(n)}(D) \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$h_j^{(i)}(D) = h_{j,0}^{(i)} + h_{j,1}^{(i)}D + \cdots + h_{j,l}^{(i)}D^l, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n-1 \tag{9}$$

其中, l 为校验多项式的最高阶数, 且 $l \leq m$ 。

对于 $(n,1,m)$ 递归系统卷积码, 其生成矩阵可表示为

$$G(D) = [1 \quad g^{(2)}(D)/g^{(1)}(D) \quad \cdots \quad g^{(n)}(D)/g^{(1)}(D)] \tag{10}$$

对应的校验矩阵可表示为

$$H(D) = \begin{bmatrix} h_1(D) & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ h_2(D) & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n-1}(D) & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g^{(2)}(D)/g^{(1)}(D) & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ g^{(3)}(D)/g^{(1)}(D) & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g^{(n)}(D)/g^{(1)}(D) & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

上式右边的 $(n-1)$ 列为 $(n-1) \times (n-1)$ 维单位矩阵。

由式(1)和式(7)得

$$V(D)H^T(D) = u(D)G(D)H^T(D) = 0 \tag{12}$$

因此, 可以先由式(12)求得校验矩阵, 进而得到生成多项式。

考虑到误码的存在, 在误码多项式 $e^{(i)}(D) = e_0^{(i)} + e_1^{(i)}D + \cdots + e_j^{(i)}D^j + \cdots, i = 1, 2, \cdots, n$ 的影响下, 令

$$E(D) = [e^{(1)}(D) \quad e^{(2)}(D) \quad \cdots \quad e^{(n)}(D)] \tag{13}$$

则接收序列可表示为

$$C(D) = V(D) + E(D) \tag{14}$$

所求即最大程度满足 $C(D)H^T(D) = 0$ 的校验矩阵。

3 编码参数的识别

由于卷积码是一种特殊的线性分组码, 因此也具有类似线性分组码的性质, 通过接收的码字构建矩阵并进行变换, 可以得到卷积码的码长、码字起点等参数。

首先需要估计码长值 n_0 。由于在实际应用中, 卷积码码长一般不超过 8, 因此不妨估计 $n_0 = 8$ 。然后构建一个 x 行 y 列的矩阵, 为了保证矩阵每行有相同的卷积码码字起点, 取每行的第一个元素对应位置相差 840 (从 2 到 8 的最小公倍数是 840), 且列数 y 大于编码约束长度 $N_0 = n(m+1)$, 行数 $x > y$ 。

根据文献[9], 建立上述模型后, 对矩阵进行初等变换, 得到类似如下的矩阵

$$A = \begin{bmatrix} I_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v & & & & & \\ 0 & & I_k P_{n-k,1} & & & & \\ 0 & & & I_k P_{n-k,2} & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \\ 0 & & & & & I_k P_{n-k,w} & \\ 0 & & & & & & I_u \end{bmatrix} \tag{15}$$

其中, I_a 、 I_v 、 I_k 和 I_u 均为单位矩阵。

通过矩阵 A 中 I_k 的维数,可以得到 k ;由 $I_k P_{n-k}$ 的间隔分布规律,可以得到 n ,进而求出码率 k/n ; I_a 维数为 $(n-i)$, i 为码字起点; I_v 和 I_k 的维数之和为 $n(m+1)-1$,又 n 已经求出,可以得到记忆长度 m 。

4 生成多项式的识别

首先推导出求解的模型,然后给出具体的求解方法。

4.1 求解模型的构建

根据文献[10],RSC 码和与其对应的非递归系统卷积码具有相同的码字集,区别仅在于 RSC 码的寄存器实现是一个无限冲激响应(IIR)线性系统。因此,为了求解的方便,先研究对应的非系统递归卷积码,再对求出的生成多项式系统化即可。对式(11)进行变换,得

$$H(D) = \begin{bmatrix} g^{(2)}(D) & g^{(1)}(D) & 0 & \cdots & 0 \\ g^{(3)}(D) & 0 & g^{(1)}(D) & \cdots & 0 \\ \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g^{(n)}(D) & 0 & 0 & \cdots & g^{(1)}(D) \end{bmatrix} \tag{16}$$

由式(12)、(14)和(16)可得

$$\begin{aligned} C(D)H^T(D) &= [c^{(1)}(D) \ c^{(2)}(D) \ \cdots \ c^{(n)}(D)] \cdot \\ &\begin{bmatrix} g^{(2)}(D) & g^{(1)}(D) & 0 & \cdots & 0 \\ g^{(3)}(D) & 0 & g^{(1)}(D) & \cdots & 0 \\ \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g^{(n)}(D) & 0 & 0 & \cdots & g^{(1)}(D) \end{bmatrix}^T = \\ &\begin{bmatrix} c^{(1)}(D) \cdot g^{(2)}(D) + c^{(2)}(D) \cdot g^{(1)}(D) \\ c^{(1)}(D) \cdot g^{(3)}(D) + c^{(3)}(D) \cdot g^{(1)}(D) \\ \vdots \\ c^{(1)}(D) \cdot g^{(n)}(D) + c^{(n)}(D) \cdot g^{(1)}(D) \end{bmatrix}^T = \\ &[0 \ 0 \ \cdots \ 0] \end{aligned} \tag{17}$$

对上述方程的求解,当误码率较低时,可以采用

基于欧几里德的算法;但在高误码率情况下,本文采用 Walsh-Hadamard 变换算法。

4.2 Walsh-Hadamard 变换算法原理

Walsh 函数是一组定义在 $[0,1]$ 上的完备、正交的矩形函数系。以 Walsh 函数为基础的 Walsh 变换是对信号与系统分析的变换域方法的重要补充,且更容易实现快速变换。Hadamard 对其进行了改进,又形成了 Hadamard 变换。Walsh 变换和 Hadamard 变换统称为 Walsh-Hadamard 变换。

根据文献[11],对于 m 维向量 u_m 和 v_m ,其二进制相乘的结果可以用 $2^m \times 2^m$ 维 Hadamard 矩阵的每个元素 h_{uv} 表示,其中 u 、 v 分别为 u_m 和 v_m 对应的十进制数。若 $h_{uv} = 1$,则 $u_m \cdot v_m^T = 0$;若 $h_{uv} = -1$,则 $u_m \cdot v_m^T = 1$ 。因此,求解形如 $u_m \cdot x = 0$ 的方程时,只需在 $2^m \times 2^m$ Hadamard 矩阵中找到第 u 行 1 元素对应的位置,即为方程的解。如果是求解方程组,则找到所有方程解的公共解即可。

对于本文的情况,考虑到误码的存在,采用统计学方法,其步骤为:

- (1)将所求方程组矩阵中的 m 维行向量实数域相加,再将结果转换为一个 2^m 维的二进制行向量;
- (2)将上面得到的向量与 Hadamard 矩阵实数域相乘。此时,各谱系数的数值表示将该位置对应的向量代入原方程后成立方程个数与不成立个数之差;
- (3)从谱系数中找到最大值所对应的向量,即为方程组的可能的解;
- (4)置信度分析,进一步确定解的可靠性。令 k 为谱系数中最大的数,当方程个数 N 足够大时,方程成立个数满足高斯分布,出现 $(N+k)/2$ 频次的概率为

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{(k/2)^2}{2\delta^2}} df \tag{18}$$

其中, $\delta = \sqrt{N}/2$ 。计算置信度

$$t = \frac{k}{\sqrt{N}} \tag{19}$$

当 $|t| \geq 3$ 时,错误发生的概率为 0.001 35,可以判定所求的解正确。

4.3 求解具体步骤

式(17)包含 $n-1$ 个方程,首先可根据第一个方程求出 $g^{(1)}(D)$ 和 $g^{(2)}(D)$,将求出的 $g^{(1)}(D)$ 代入后面的 $n-2$ 个方程,求出剩余的校验多项式,具体步骤如下:

(1)将接收到的码字构建如下式所示的矩阵,其中 $N \gg 2m$ 。

$$\begin{bmatrix} c_0^{(1)} & \cdots & c_m^{(1)} & c_0^{(2)} & \cdots & c_m^{(2)} & \cdots & c_0^{(n)} & \cdots & c_m^{(n)} \\ c_1^{(1)} & \cdots & c_{m+1}^{(1)} & c_1^{(2)} & \cdots & c_{m+1}^{(2)} & \cdots & c_1^{(n)} & \cdots & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_N^{(1)} & \cdots & c_{m+N}^{(1)} & c_N^{(2)} & \cdots & c_{m+N}^{(2)} & \cdots & c_N^{(n)} & \cdots & c_{m+N}^{(n)} \end{bmatrix}$$

(20)

(2)对式(17)中的第一个方程,从矩阵(20)中抽取数值,构建如下方程,按 Walsh-Hadamard 变换法进行求解。

$$\begin{bmatrix} c_0^{(1)} & \cdots & c_m^{(1)} & c_0^{(2)} & \cdots & c_m^{(2)} \\ c_1^{(1)} & \cdots & c_{m+1}^{(1)} & c_1^{(2)} & \cdots & c_{m+1}^{(2)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_N^{(1)} & \cdots & c_{m+N}^{(1)} & c_N^{(2)} & \cdots & c_{m+N}^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_m^{(2)} \\ \vdots \\ g_0^{(2)} \\ g_m^{(1)} \\ \vdots \\ g_0^{(1)} \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

(21)

(3)将步骤 2 中得到的 $g^{(1)}(D)$ 代入后面的方程,构建如下方程组,按 Walsh-Hadamard 变换法对 $g^{(3)}(D), \cdots, g^{(n)}(D)$ 进行求解。

$$\begin{bmatrix} c_0^{(1)} & \cdots & c_m^{(1)} & \sum_{j=0}^m c_j^{(i)} \cdot g_{m-j}^{(1)} \\ c_1^{(1)} & \cdots & c_{m+1}^{(1)} & \sum_{j=1}^{m+1} c_j^{(i)} \cdot g_{m-j+1}^{(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_N^{(1)} & \cdots & c_{m+N}^{(1)} & \sum_{j=N}^{m+N} c_j^{(i)} \cdot g_{m-j+N}^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_m^{(i)} \\ \vdots \\ g_0^{(i)} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{0},$$

$i=3,4,\cdots,n$
(22)

(4)设求得的生成矩阵为

$$\mathbf{G}'(D) = [g^{(1)}(D) \ g^{(2)}(D) \ \cdots \ g^{(n)}(D)]$$

(23)

则其对应的 RSC 码生成矩阵为

$$\mathbf{G}(D) = [1 \ g^{(2)}(D)/g^{(1)}(D) \ \cdots \ g^{(n)}(D)/g^{(1)}(D)]$$

(24)

5 仿真验证

选取生成矩阵为

$$\mathbf{G}(D) = [11 + D^2 + D^4 + D^5 / 1 + D^3 + D^4 + D^5 \\ 1 + D + D^2 + D^3 + D^5 / 1 + D^3 + D^4 + D^5]$$

的(3,1,5)系统反馈卷积码为研究对象。首先验证识别方法的正确性,然后与其他文献中的方法进行

性能比较。

按第 2 节的方法构建矩阵,进行初等变换。由于文章篇幅的限制,现只给出截取的部分数据,如图 1 所示。



图 1 码参数识别结果
Fig. 1 Recognition result of code parameters

由子矩阵的分布情况可知,码长 $n=3$,码率为 $1/3$ 。左上角的 I_a 维数 $(n-i)=2$,则码字起点为 $i=1$ 。又 $n(m+1)=18$,可知记忆长度 $m=5$ 。因此,识别方法有效。

仍以上面(3,1,5)系统反馈卷积码为研究对象,对生成多项式进行识别。首先,构建 $2^{12} \times 2^{12}$ 阶 Hadamard 矩阵,选取方程个数为 $N=500$,对方程(21)进行求解,结果如图 2 所示,其中, K 值为对应的谱系数数值。

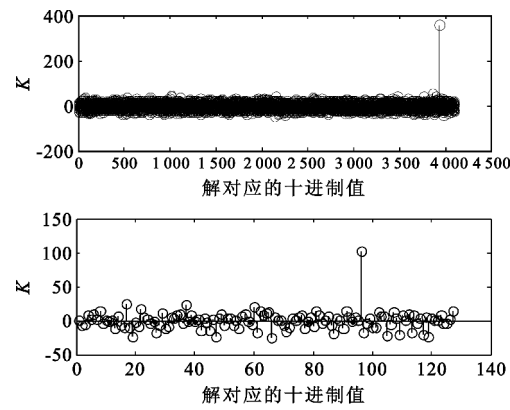


图 2 生成多项式识别结果
Fig. 2 Recognition result of generator polynomial

由图 2 可知,在3 940位置出现最大值,其对应的二进制向量为[1 1 110 1 1 0 0 0 1 1],因此

$$\begin{aligned} g^{(1)}(D) &= 1 + D^3 + D^4 + D^5 \\ g^{(2)}(D) &= 1 + D^2 + D^4 + D^5 \end{aligned} \tag{25}$$

对应的置信度 $t_1 = 362 / \sqrt{500} \approx 16.2 > 3$ 。

同理,取 $N = 200$,对方程(22)进行求解,得

$$g^{(3)}(D) = 1 + D + D^2 + D^3 + D^5 \tag{26}$$

对应的置信度 $t_2 = 102 / \sqrt{200} \approx 7.2 > 3$ 。

因此,生成矩阵为

$$G'(D) = \begin{bmatrix} 1 + D^3 + D^4 + D^5 & 1 + D^2 + D^4 + D^5 \\ 1 + D + D^2 + D^3 + D^5 \end{bmatrix} \tag{27}$$

将其化为递归系统卷积码形式,有

$$G(D) = \begin{bmatrix} 1 + D^2 + D^4 + D^5 / 1 + D^3 + D^4 + D^5 \\ 1 + D + D^2 + D^3 + D^5 / 1 + D^3 + D^4 + D^5 \end{bmatrix} \tag{28}$$

识别正确。

下面,将本文的方法与文献[2]中的高斯直接法和文献[6]中的欧几里德方法进行性能对比。在实际应用中,卷积码码长一般不超过 8,因此码字长度 n 从 2 到 8 变化,分别验证各种方法成功识别概率为 90% 时所对应的最高误码率;同时,为了研究编码记忆长度对识别的影响,取 m 等于 5 和 7 进行两组仿真,结果如图 3 所示。可以看出,随着码字长度和编码记忆长度的增加,所有方法的性能都随之降低,但本文方法的误码适应能力明显优于以上两种方法,能在误码率高达 10^{-2} 量级下有效进行识别。

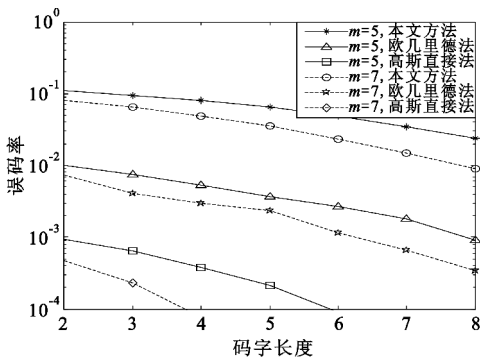


图 3 本文方法与其他常规方法的容错性能比较
Fig. 3 Comparison of fault tolerance between different methods

最后,对本文方法的复杂度进行分析,并与高斯直接法和欧几里德方法对比。根据文献[4],本文定义二元域的加和乘均为 1 次运算,十进制加为 1 次运算,十进制乘为 4 次运算。通过 4.3 节的求解步骤可知,对于 $(n, 1, m)$ 卷积码,其计算量为 $2(m+1) \cdot 2^{2(m+1)} + (n-2) [(m+2) \cdot 2^{m+2} + 2m+1]$ 。

可以发现,计算量的变化主要来自于 m 。而对于高斯直接法和欧几里德算法,列方程组所需的码元 $M \geq (n+1)(m+1)$,前者计算量为 $O(M^3)$,后者最多需要 $M^2/2$ 次多项式加法和乘法。取 $n=3$,3 种方法计算量随 m 值的变化如图 4 所示。结果表明,本文方法的计算量较其他两种方法略大,且 m 值越大,差距越明显。但是,计算量的牺牲带来了性能的提高。因此,在后续的研究中,需要对算法进行优化,在保证性能的前提下,降低计算量。

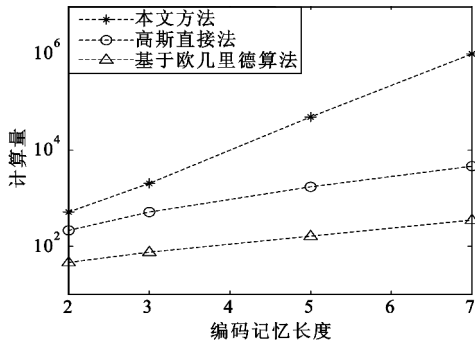


图 4 本文方法与其他常规方法的计算量比较
Fig. 3 Comparison of computation complexity between different methods

6 结 论

本文针对 Turbo 码中子编码器常用的 $(n, 1, m)$ RSC 码的盲识别问题,给出了一种有效的方法。首先利用接收的码字构造矩阵并进行分析,对编码的码长、码字起点、码率、编码记忆长度等参数进行识别,再利用 Walsh-Hadamard 变换对生成多项式识别模型进行求解。与其他常规方法相比,本文方法在误码率为 10^{-2} 量级下有效识别概率达到 90%,且无需任何先验条件,克服了现有卷积码识别方法的不足,对 Turbo 的进一步识别具有重要意义。在未来的研究中,将对 Walsh-Hadamard 算法进行优化,减小计算复杂度。

参考文献:

[1] Berrou C, Glavieux A. Near Shannon limit error correct coding and decoding: Turbo codes [C] // Proceedings of 1993 International Conference on Communications. Geneva; IEEE, 1993: 1064-1070.
[2] 李思佳,毛玉泉,郑秋荣.等. Turbo 码的 Taylor-Log-MAP 译码算法[J]. 电讯技术, 2011, 51(9): 131-132.
LI Si-jia, MAO Yu-quan, ZHENG Qiu-rong, et al. A Taylor-Log-MAP Decoding Algorithm for Turbo Codes

- [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(9): 131–132. (in Chinese)
- [3] Marazin M, Gautier R, Burel G. Blind recovery of k/n rate convolutional encoders in a noisy environment[J]. Wireless Communications and Networks, 2011, 2011(1): 1186–1187.
- [4] 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): 1167–1168.
XIE Hui, HUANG Zhi-tao, WANG Feng-hua. Research Progress of Blind Recognition of Channel Coding[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1167–1168. (in Chinese)
- [5] Xie Hui, WANG Feng-hua, HUANG Zhi-tao. A method for blind recognition of rate $1/2$ convolutional code based on improved Euclidean algorithm [C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2012: 1307–1309.
- [6] 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): 2364–2366.
LIU Jian-cheng, YANG Xiao-jing. Blind recognition of $(n, 1, m)$ convolutional code based on solving check-sequence[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(10): 2364–2366. (in Chinese)
- [7] 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): 65–66.
LIU Jian-cheng, YANG Xiao-jing, ZHANG Yu. Recognition of $(n, 1, m)$ convolutional code based on improved Euclidean algorithm[J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(1): 65–66. (in Chinese)
- [8] Tom Richardson, Ruediger Urbanke. Modern Coding Theory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [9] 薛国庆, 常逢佳, 柳卫平, 等. $1/n$ 卷积码盲识别[J]. 无线通信技术, 2009, 38(3): 38–42.

XUE Guo-qing, CHANG Feng-jia, LIU Wei-ping, et al. Blind identification of $1/n$ convolutional codes[J]. Wireless Communication Technology, 2009, 38(3): 38–42. (in Chinese)

[10] Shu Lin, Costello D J. Error Control Coding[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Press, 2007.

[11] 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(增刊): 28–29.
YOU Ling, ZHU Zhong-liang. The application of walsh function in resolving $F(2)$ equations[J]. Signal Processing, 2000, 16(Suppl): 28–29. (in Chinese)

作者简介:



张立民(1966—), 男, 辽宁开原人, 2005 年于天津大学获博士学位, 现为教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星信号处理及应用;

ZHANG Li-min was born in Kaiyuan, Liaoning Province, in 1966. He received the Ph. D. degree from Tianjin University in 2005. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor.

His research concerns signal processing for satellite communications and its application.

刘杰(1990—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为现代信号处理技术及应用;

LIU Jie was born in Yichang, Hubei Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns modern signal processing technology and application.

Email: iamliu1573@163.com

钟兆根(1984—), 男, 江西南昌人, 2013 年获博士学位, 主要研究方向为通信信号盲分离与统计信号处理。

ZHONG Zhao-gen was born in Nanchang, Jiangxi Province, in 1984. He received the Ph. D. degree in 2013. His research concerns blind signal separation for wireless communication and statistical signal processing.