

一种对 CCSDS 删除卷积码的盲解码方法*

戚林^{1,2}, 郝士琦^{1,2}, 王磊^{1,2}

(1. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

2. 电子工程学院 安徽省电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 介绍了 CCSDS 标准的删除卷积码的编译码原理, 以理论推导出的等效校验矩阵为先验知识, 通过构造线性方程组, 识别出删除卷积码的删除图案和码头, 进而提出了一种删除卷积码的盲解码方法。仿真结果表明, 在信噪比大于 5 dB 的加性高斯白噪声信道中, 能实现所有 CCSDS 标准删除卷积码的盲解码。

关键词: CCSDS; 删除卷积码; 盲解码

中图分类号: G202

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)19-0055-04

A blind decoding method of CCSDS punctured convolutional codes

QI Lin^{1,2}, HAO Shi Qi^{1,2}, WANG Lei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. Anhui Province, Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei 230037, China)

Abstract: This paper introduces the CCSDS punctured convolutional codes encoding/decoding principle and deduce its identical parity-check matrix looked as a priori knowledge. And the puncture map and code head are identified by solving the linear system equation. At last, a blind decoding method is developed. The simulation results show that the all kinds of CCSDS punctured convolutional codes can be blind decoded in AWGN channels when its SNR above 5 dB.

Key words: CCSDS; punctured convolutional codes; blind decoding

在空间数据通信中, 由于噪声干扰及信号衰落等因素的影响, 通信质量得不到保障。为此, 通常采用信道编码技术来降低传输中的误码率, 提高通信质量。国际空间数据系统咨询委员会 CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) 根据空间数据通信的特点, 制定了适合空间数据传输的信道编码标准, 其中规定的删除卷积码是通过删除 (2, 1, 6) 卷积码的码字中某些特指位置的码元而得到的, 具有编码方式灵活、带宽利用率较高、编码冗余较低等特点, 在空间数据通信中得到了广泛的应用。美国国防部的天基红外系统 SBDRS-High、法国国防部的卫星星座 ESSAIM、英国国防部的战术光学卫星 TopSae 等^[1]都采用了 CCSDS 的编码标准。

在空间数据信号截获分析领域中, 实现 CCSDS 标准的删除卷积码的盲解码, 主要是要知道删除卷积码的删除图案和删除位置。参考文献[2]中介绍了一种对 (2, 1, 6)

卷积码的识别和码字同步方法, 可以将这种方法推广到删除卷积码中。参考文献[3]介绍了一种对删除卷积码的删除图案的识别方法, 但不能识别码头。本文对此方法加以改进, 通过理论推导得出删除卷积码的等效校验矩阵, 再以等效校验矩阵为先验知识, 来识别删除卷积码的参数, 并进一步提出了删除卷积码的盲解码方法。

1 CCSDS 删除卷积码编译码原理

1.1 编码原理

CCSDS 选择的删除卷积码是以码率为 1/2, 约束长度为 7, 生成多项式矩阵为 $G(D)=[g^{(1,1)}, g^{(1,2)}]$ 。(其中, $g^{(1,1)}=1+D+D^2+D^3+D^6$, $g^{(1,2)}=1+D^2+D^3+D^5+D^6$) 的 (2, 1, 6) 卷积码作为源码, 再按照删除图案分别对 C_1 、 C_2 两组码序列删除后得到的^[4]。CCSDS 标准的删除卷积码的编码器框图如图 1 所示, 删除图案如表 1 所示。

删除图案中“1”表示这一位不删除, “0”表示这一位删除。如当码率 $r=2/3$ 时, 如果输入序列 $M=$

* 基金项目: 国家自然科学基金 (60902017)

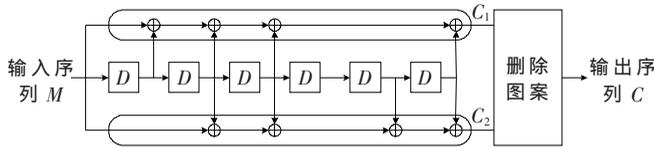


图1 CCSDS 标准删除卷积码的编码器框图

表1 不同码率的删除图案

删除图案	码率 r	输出序列 $(C_1(t), C_2(t))$ 代表时间 t 时的信息码
$C_1=10$ $C_2=11$	2/3	$C_1(1)C_2(1)C_2(2)\dots$
$C_1=101$ $C_2=110$	3/4	$C_1(1)C_2(1)C_2(2)C_1(3)\dots$
$C_1=10101$ $C_2=11010$	5/6	$C_1(1)C_2(1)C_2(2)C_1(3)$ $C_2(4)C_1(5)\dots$
$C_1=1000101$ $C_2=1111010$	7/8	$C_1(1)C_2(1)C_2(2)C_1(3)$ $C_2(4)C_1(5)C_2(6)C_1(7)\dots$

1101100111, 源码的输出序列为 $C_1=1001101100, C_2=1111000100$, 经过删除图案删除后, 源码的输出序列是 $C_1=10110, C_2=1111000100$, 删除卷积码的输出序列 $C=111011100101000$ 。

1.2 译码原理

删除卷积码的译码过程是: 将接收的码序列安装发送端的删除图案, 在删除图案为“0”的位置插入“0”, 然后输入(2,1,6)卷积码的 Viterbi 译码器进行译码^[5], 删除卷积码的译码框图如图2所示。在分析截获的删除卷积码时, 并不知道删除图案, 同时也不能确定截获的码段的起始位置即为发送码字的起始位置, 进而即使在知道删除图案的情况下也不能明确插入比特的位置。因此, 实现删除卷积码的盲解码的关键是识别删除图案和定位删除位置。



图2 删除卷积码译码器框图

2 CCSDS 删除卷积码的盲解码方法

2.1 删除卷积码的等效校验矩阵

参考文献[6]中, 通过将码率为 $(n_0-1)/n_0$ 的删除卷积码等效成码率为 $(n_0-1)/n_0$ 的卷积码, 按照求解卷积码校验矩阵的方法, 求得删除卷积码的等效校验矩阵, 并且证明每个码率为 $(n_0-1)/n_0$ 的删除卷积码只有唯一的等效校验矩阵。采用这种方法, 可以求得 CCSDS 标准的删除卷积码的等效校验矩阵, 如表2所示。由于等效校验矩阵与各种删除图案是一一对应的, 因此, 可以将对删除图案的识别转化为对等效校验矩阵的识别。

表2 各码率的等效校验矩阵

码率 r	等效校验多项式矩阵 $H(D)$	等效校验矩阵 H
2/3	$\begin{bmatrix} 1+D^2+D^3+D^5+D^6 \\ 1+D^4+D^6 \\ D+D^2+D^3+D^6 \end{bmatrix}$	1011011 1000101 0111001
3/4	$\begin{bmatrix} 1+D^2+D^3+D^5+D^6 \\ 1+D+D^3+D^4+D^5+D^6 \\ D+D^2+D^4+D^6 \\ D+D^5+D^6 \end{bmatrix}$	1011011 1101111 0110101 0100011
5/6	$\begin{bmatrix} 1+D^3+D^6 \\ 1+D+D^3+D^5+D^6 \\ D+D^3+D^4+D^6 \\ D+D^3+D^5+D^6 \\ D+D^3+D^5 \\ D+D^3+D^4+D^5+D^6 \end{bmatrix}$	1001001 1101011 0101101 0101011 0101010 0101111
7/8	$\begin{bmatrix} 1+D^5+D^6 \\ 1+D^2+D^3+D^5+D^6 \\ D^2+D^3+D^4+D^5+D^6 \\ D+D^2+D^3+D^6 \\ D+D^2+D^3+D^4+D^5+D^6 \\ D+D^3+D^4 \\ D+D^5+D^6 \\ D+D^3+D^6 \end{bmatrix}$	1000011 1011011 0011111 0101101 0111111 0101100 0100011 0101001

2.2 删除图案和码头识别

建立码率为 $(n_0-1)/n_0$ 的删除卷积码识别的模型如图3所示。模型中在时间 $t=i$ 时输出 n_0 个码字, $(n_0-1)/n_0$ 卷积码的校验多项式矩阵为: $H(D)=[H^{(1,1)}(D), H^{(1,2)}(D), \dots, H^{(1,n_0)}(D)]$, 其中, $H^{(1,i)}(D)=h_{0i}+h_{1i}D+h_{2i}D^2+\dots+h_{Li}D^L$, (其中 L 为编码存储)。由卷积码的性质^[7]可知: $C(D)H^T(D)=0$, 则:

$$C(D)H^T(D)=[(c_{01}, \dots, c_{0n_0})+(c_{11}, \dots, c_{1n_0})D+\dots] \begin{bmatrix} H^{(1,1)}(D) \\ \vdots \\ H^{(1,n_0)}(D) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^{\infty} c_{i1}D^i, \sum_{i=0}^{\infty} c_{i2}D^i, \dots, \sum_{i=0}^{\infty} c_{in_0}D^i, \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^L h_{j1}D^j \\ \vdots \\ \sum_{j=0}^L h_{jn_0}D^j \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^{n_0} (\sum_{i=0}^{\infty} c_{ij}D^i \cdot \sum_{j=0}^L h_{ij}D^j) = 0$$

将其转化为矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} c_{L1} & \dots & c_{01} & c_{L2} & \dots & c_{02} & \dots & c_{Ln_0} & \dots & c_{0n_0} \\ c_{(L+1)1} & \dots & c_{11} & c_{(L+1)2} & \dots & c_{12} & \dots & c_{(L+1)n_0} & \dots & c_{1n_0} \\ \vdots & \vdots \\ c_{(L+N)1} & \dots & c_{N1} & c_{(L+N)2} & \dots & c_{N2} & \dots & c_{(L+N)n_0} & \dots & c_{Ln_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{01} \\ \vdots \\ h_{L1} \\ \vdots \\ h_{0n_0} \\ \vdots \\ h_{Ln_0} \end{bmatrix}$$

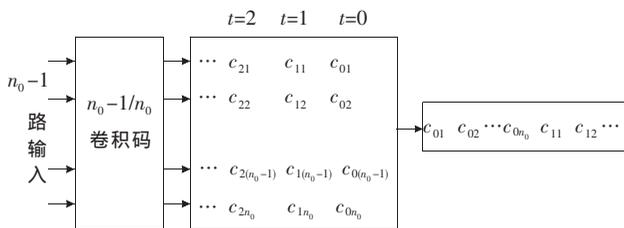


图3 删除卷积码识别模型

$$=0 \tag{1}$$

可以将上式看成 $C \cdot H=0$ 的形式，矩阵可以通过接收到的码序列进行构造，因此通过高斯消元法^[8]求解式(1)即可得到矩阵 H ，进而得到删除卷积码的等效校验矩阵，然后再按表2中等效校验矩阵与删除图案的关系，就能识别出删除图案。

如果接收到的码段不同步，假设接收到的码段列是：

$$c_{0m} c_{0(m+1)} c_{0(m+2)} \cdots c_{0n_0} c_{11} c_{12} \cdots c_{1m} c_{1(m+1)} c_{1(m+2)} \cdots c_{1n_0} \cdots$$

在分析时，按照已同步的码序列构造矩阵，得：

$$C' = \begin{bmatrix} c_{Lm} & \cdots & c_{0m} & c_{L(m+1)} & \cdots & c_{0(m+1)} & \cdots & c_{L(m-1)} & \cdots & c_{0(m-1)} \\ c_{(L+1)m} & \cdots & c_{1m} & c_{(L+1)(m+1)} & \cdots & c_{1(m+1)} & \cdots & c_{(L+1)(m-1)} & \cdots & c_{1(m-1)} \\ \vdots & \vdots \\ c_{(L+N)m} & \cdots & c_{Nm} & c_{(L+N)(m+1)} & \cdots & c_{N(m+1)} & \cdots & c_{(L+N)(m-1)} & \cdots & c_{N(m-1)} \end{bmatrix}$$

将矩阵代入式(1)中，解得：

$$H' = [h_{0m}, h_{1m} \cdots h_{Lm}, h_{0(m+1)}, h_{1(m+1)}, \cdots, h_{L(m+1)}, \cdots, h_{0(m-1)}, h_{1(m-1)}, \cdots, h_{L(m-1)}]^T$$

由此可以看出，以 c_{0m} 开头的接收码段，所求解出的 H' 正好是以 c_{0m} 开头的码段所解出的 H 向前周期循环 $m \times (L+1)$ 位。反过来看，在分析截获的码段时，解出的 H' 与表2中的 H 对比，发生了 $m \times (L+1)$ 位周期循环，即可判断接收的码字是以 c_{0m} 开头。

2.3 盲解码算法

综合上述，CCSDS 标准卷积码的盲解码算法步骤为：

(1) 理论计算 CCSDS 标准卷积码各码率的校验矩阵 H ，将其作为先验知识。

(2) 初始化，取 $n_0=8, L \geq 6$ ，构造矩阵 C' 。

(3) 计算式(1)，求得接收的码段的等效校验矩阵 H' 。

(4) 将 H' 与(1)求得的码率为 7/8 的 H 进行比较。如果不匹配，则返回(2)，再取 $n_0=6, 4, 3$ ，直到求得的 H' 与(1)求得的对应该码率的 H 匹配为止。此时，接收码段的删除图案即为 H 对应的删除图案。

(5) 将 H' 与 H 进行比对，可以得到 H' 的循环量为 $m \times (L+1)$ ，则接收码段的第 (n_0-m) 位即为码头，再按照(4)识别出来的删除图案插入虚拟比特，然后输入(2, 1, 6)卷积码的 Viterbi 译码器，最终实现 CCSDS 标准的删除卷积码的盲解码。

3 仿真结果分析

选取码率为 $r=2/3$ 的 CCSDS 标准的删除卷积码来

验证上述算法。假设信息序列 $M=1011100011 \cdots$ 经过编码后得到 $r=2/3$ 删除卷积码 $C=111000101011111 \cdots$ 。如果截获到的数据为 $C'=00101011111 \cdots$ ，应用 MATLAB 进行仿真。由于并不知道编码存储，取较大的 $L=8, n_0$ 从 8 开始取值，取到 $n_0=3$ 时，计算结果如图 4 所示。

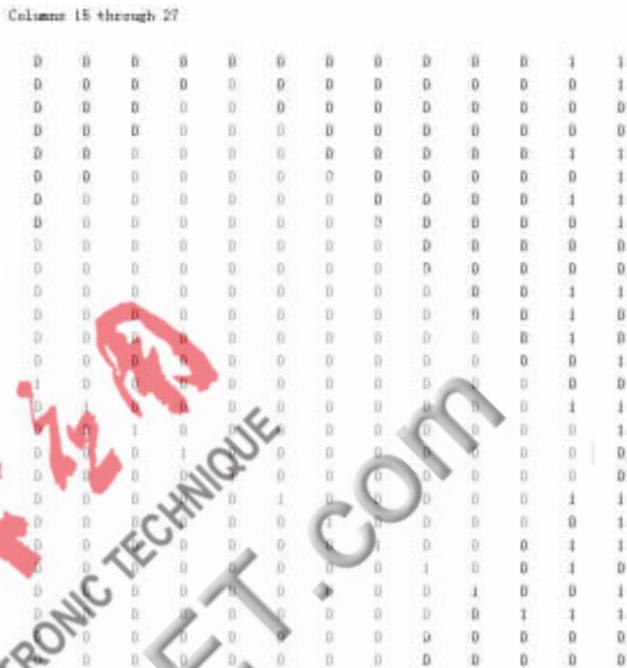


图4 仿真结果

图 4 中倒数第二列即为计算出的校验矩阵 H' 100010100011100100010110110。将 H' 平均分成 3 组，每组有 9 位， $H'=[100010100 011100100 010110110]$ ，很显然与 $r=2/3$ 的删除卷积码的校验矩阵 $H=[1011011 1000101 0111001]$ 相匹配，且刚好发生了 9 位循环，这样接收到的码段的第 2 位即为码头。此时的删除矩阵 $P=[1 1 0 1]$ ，插入虚拟码字后为 $C'=000100101011101 \cdots$ ，将其输入 (2, 1, 6) 卷积码的 Viterbi 译码器即可实现解码。由式(1)可知，构造矩阵 C 需要截获连续 $(L+1) \times (n_0+1) \times n_0 - n_0$ 位没有误码的码段，对于 CCSDS 标准的删除卷积码，需要的最长无误码位数是 496 位，而数字通信系统的误码率一般为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。因此，可以通过依次截取获得的码序列来构造矩阵 C ，再运用上述方法，必然能找到无误码码段的正确解。本方法在高斯信道下对该盲解码算法进行了仿真，得到不同码率下的盲解码误码率如图 5 所示。当不能识别传输的码率时，设盲解码的误码率为 0.5，从仿真结果可以看出，每种码率的删除卷积码在能识别的临界信噪比处，误码率值有个阶跃，这是由该方法需要搜索一定长的连续无误码码段导致的，当信噪比较低时不能找到满足条件的码段。当 $SNR > 5$ dB 时，能对所有 CCSDS 标准的删除卷积码进行盲解码，而一般的数字通信系统要求信噪比要达到 10 dB，因此该方法在实际中具有较高的实用性。

本文分析了 CCSDS 标准的删除卷积码的编译码原

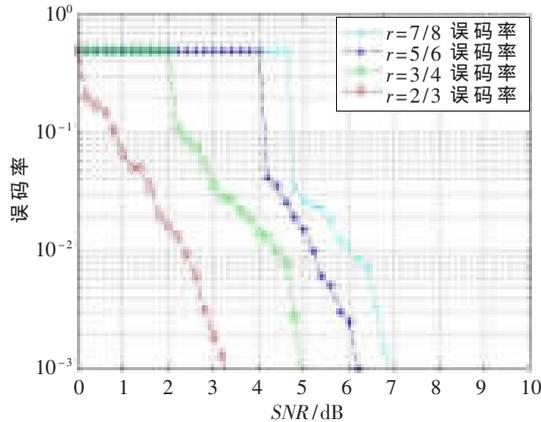


图5 高斯信道的盲解码误码率

理,给出了该类删除卷积码的等效校验矩阵,并利用等效校验矩阵与各种码率间唯一对应的特点,提出了一种盲解码的方法。仿真结果表明,该方法在信噪比较低的信道中也能实现盲解码,稍加修改还可以推广到其他码率为 $(n_0-1)/n_0$ 的删除卷积码的盲解码上,具有较高的实用价值。

参考文献

[1] 谭维炽,顾莹琦.空间数据系统[M].北京:中国科学技术出版社,2004.

- [2] 睦惠巧.基于校验矩阵的卷积码识别和码字同步[J].无线电通信技术,2008,34(1):26-28.
- [3] 韩国宾.删除卷积码的识别技术[D].成都:电子科技大学,2009.
- [4] CCSDS 131. 0-B-1 Blue Book. TM synchronization and channel coding[S]. CCSDS Press, 2003.
- [5] CAIN J B. Punctured convolutional codes of rate $(n-1)/n$ and simplified maximum likelihood decoding[J]. IEEE Trans. on IT, 1979(1):97-100.
- [6] 陈发新.删除卷积码生成矩阵及最简信息恢复式的求法[J].无线电通信技术,2009(2):5-10.
- [7] 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.
- [8] 陈大新.矩阵理论[M].上海:上海交通大学出版社,1997.

(收稿日期:2010-04-02)

作者简介:

戚林,男,1984年生,硕士研究生,主要研究方向:卫星通信信号处理、信道编码识别。

郝士琦,女,教授,主要研究方向:非线性信号处理、卫星通信及对抗。

王磊,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向:卫星通信信号处理、卫星通信协议分析。