

文章编号: 1672-2892(2011)02-0165-04

## 级联码在遥测系统中的应用

宋成

(海军驻绵阳地区特种装置军事代表室, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 遥测信道是一种典型的时变衰落信道, 为弥补信道衰落对信息传输质量的影响, 通常采用纠错编码的方法比单纯依靠加大系统功率裕量的方法更有意义。根据 RS 码的相关理论及编译码原理, 结合遥测信道的特点, 提出了 RS 码与卷积码级联的编译码方案, 最后对该级联码的方案进行了软件仿真和硬件设计。实现结果表明级联码的增益要优于单纯的卷积码 2 dB。

**关键词:** 遥测; RS 码; 卷积码; Viterbi 译码

**中图分类号:** TN911.72

**文献标识码:** A

## Application of concatenated codes in telemetry system

SONG Cheng

(Military Representative Room of Navy Special Equipment in Mianyang area, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** The telemetry channel is a typical time-varying and fading channel. For the purpose of compensating the information quality in the receiver, the method of error-coding is more significant than increasing system power. Based on the theory of RS code and the characteristics of the telemetry channel, the concatenated code scheme of RS code and convolution code was put forward. The scheme was simulated and its hardware was designed. The result shows that the gain of the concatenated code is larger than that of the convolution code by 2 dB.

**Key words:** telemetry; RS code; convolution code; Viterbi decode

早期的编码理论<sup>[1]</sup>主要应用于深空通信和卫星通信中。1987年, 空间数据系统顾问委员会采用(255,223)RS (Reed 和 Solomond)码和(2,1,7)卷积码构成串行级联码作为标准。其外码采用 RS 码<sup>[2]</sup>, 内码为卷积码。外码使用软输入译码算法, 因其译码算法较复杂, 内码只能用软输入/硬输出的维特比算法<sup>[3]</sup>。遥测信道通常是典型的高斯信道, 存在突发干扰, 因此采用纠正突发错误能力极强的 RS 码及交织技术, 可纠正 Viterbi 译码可能产生的突发性错误, 这样在误码率为  $10^{-5}$  下, 采用约束长度为 7 的 8 电平软判决 Viterbi 译码与(255,223)RS 码级联, 可以获得 7.4 dB 的编码增益<sup>[4]</sup>。因此对现有的遥测系统, 在进一步扩大通信容量或加大作用距离时, 可以在基本不增加射频系统投入的情况下, 采用信道编码即可达到目的。

### 1 级联码的相关理论基础

#### 1.1 RS 码的编译码原理

##### 1.1.1 RS 码的编码原理

RS 码的编码主要是围绕码的生成多项式  $g(x)$  进行的。

设  $GF(2^m)$  上, 1 个系统码的码矢为:

$$C = (C_{n-1}, C_{n-2}, \dots, C_1, C_0) = (m_{k-1}, m_{k-2}, \dots, m_1, m_0, r_{2t-1}, r_{2t-2}, \dots, r_1, r_0)$$

其中,  $m_i (0 \leq i \leq k-1)$  为信息位,  $r_i (0 \leq i \leq 2t-1)$  为校验位。有:

$$C(x) = m(x)x^{n-k} + r(x)$$

$C(x)$  为码多项式:  $C(x) = C_{n-1}x^{n-1} + C_{n-2}x^{n-2} + \dots + C_1x + C_0$ ,  $C_i \in GF(2^m)$

$m(x)$  是信息多项式:  $m(x) = m_{k-1}x^{k-1} + m_{k-2}x^{k-2} + \dots + m_1x + m_0$ ,  $m_i \in GF(2^m)$

$r(x)$ 是校验多项式： $r(x)=r_{2t-1}x^{2t-1}+r_{2t-2}x^{2t-2}+\dots+r_1x+r_0 \equiv m(x)x^{n-k} \pmod{g(x)}$ ， $m_i \in GF(2^m)$ ，即  $r(x)$ 是  $g(x)$ 除以  $m(x)x^{n-k}$ 后的余式，其系数就是校验位。

1.1.2 RS 码的译码原理

RS 码的译码具体步骤为：1) 由接收多项式  $R(x)$ 计算伴随式  $S_j(j=1,2,3,\dots,2t)$ ；2) 用 BM(Boyer-Moore)算法或 Euclid 算法，由  $S_j$ 求出错位置多项式  $\dot{E}(x)$ ；3) 用 Chien 搜索法求  $\dot{E}(x)$ 的根，其倒数为错误位置数；4) 计算错误值；5) 接收多项式减去错误多项式，完成纠错。

1.2 级联码

级联码<sup>[5-8]</sup>有极强的纠正突发错误和随机错误的能力，更重要的是利用级联码的构造方法，能达到信道编码理论所给出的码限(即 Shannon 码)。图 1 是 1 个级联码的差错控制系统。该级联码由内码  $C_i$ 和外码  $C_0$ 组成， $i$ 为级联。内码  $C_i$ 是  $GF(2)$ 上的 1 个  $[n,k]$ 码，外码  $C_0$ 是  $GF(2^k)$ 上的 1 个  $[N,K]$ 码，并按照以下的方法进行编码：

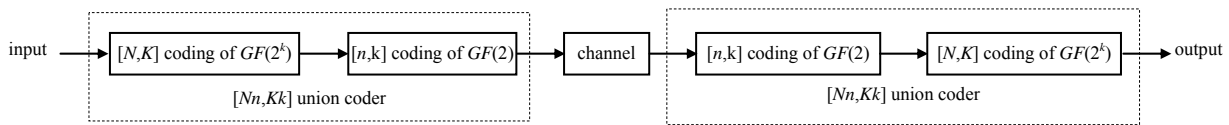


Fig.1 System of union coder  
图 1 级联码系统

- 1) 把  $Kk$  个信息码元，划分成  $K$  段，每段  $k$  个码元。
- 2) 把 1 组有  $k$  个信息码元的段，看成是  $GF(2^k)$ 上的 1 个符号(元素)。将  $K$  个符号按照外码  $C_0$ 的编码规则编成 1 个码字。码长为  $N$ ，有 1 个信息符号， $N-K$  个校验符号，最小距离为  $d_0$ ，码率为  $R_0=K/N$ 。
- 3) 再把外码  $C_0$ 的每 1 个符号，看成是  $k$  个二进制码元的信息组，输入内码  $C_i$ 的编码器，得到内码的 1 个码字。它的码长为  $n$ ，有  $n-k$  个校验元，最小距离为  $d_i$ ，码率为  $R_i=k/n$ ，由此得到  $[n,k]$ 内码的  $N$  个码字序列。因此，总共有  $Nn$  个二进制码元和  $Kk$  个信息元，组成了  $[Nn, Kk, d_0, d_i]$ 级联码的码字。

可知，两级级联码是 1 个  $[Nn, Kk, d_0, d_i]$ 二进制线性分组码，码率  $R_c=R_0R_i$ 。级联码的译码采用分级处理：先按内码  $C_i$ 的译码规则，得到  $N$  个有  $k$  个码元组成的符号后，再送入外码译码器，按外码  $C_0$ 的译码规则译码，最后得到  $K$  个信息符号，每个符号含有  $k$  个二进制信息元。所以，由外码译码器输出的是经过纠错的  $Kk$  个信息元。

2 纠错编码系统仿真实验

对图 2 所示的信道纠错编码系统进行仿真。

二进制数据信源经 RS(255,223)编码后，进行交织深度为  $I=5$ 的块交织单元，然后再通过(2,1,7)的卷积编码器，得到纠错编码后的数据源；采用 PSK 调

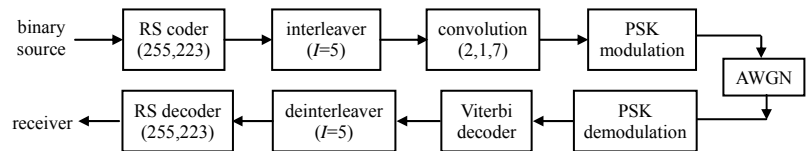


Fig.2 Simulation model of the error-coding system  
图 2 遥测信道纠错编码系统仿真模型

制(调制后的频谱见图 3)，使编码后的数据源在 AWGN 信道中传输，最后经过解调和解码，恢复出原始数据。

表 1 列出了不同信噪比的条件下，实验仿真的数据结果，其中 Union Bound 表示级联码。

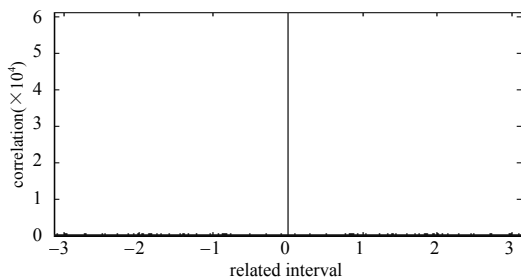


Fig.3 PSK signal spectrum after the error code  
图 3 纠错编码后的 PSK 信号频谱

表 1 误码率情况表  
Table1 Error code rate

$E_b/N_0$	Viterbi decoder	RS decoder	Union Bound
1.0	0.311 3	0.308 5	—
1.5	0.221 4	0.219 1	—
2.0	0.181 3	0.177 8	—
2.5	0.090 8	0.087 2	—
3.0	0.056 0	0.054 4	0.613 7
3.5	0.023 8	0.020 4	0.232 3
4.0	0.010 0	0.009 4	0.080 3
4.5	0.004 3	0.002 2	0.025 3
5.0	0.000 8	—	0.007 3
5.5	0.000 2	—	0.001 9
6.0	—	—	0.000 5
6.5	—	—	0.000 1

程序仿真得到的译码性能曲线见图 4。从仿真曲线可以看出，在  $10^{-3}$  误码率情况下，级联码比 Viterbi Decoder 有 0.3 dB 的编码增益，也就是说，在低误码率的信道环境下，RS 编、译码对整个系统的编码增益贡献明显。

### 3 级联编译码系统的硬件实现

利用 Xilinx Virtex-II Pro(见图 5 硬件平台),在 ISE10.1 的集成综合环境下,通过优化系统的全局时钟和流水线设计,将 GF 域上的乘法运算变换成组合电路来实现,可大大降低乘法器的需求个数,LUTs 的使用率也仅在 20%左右,最终系统的编码效率能达到 85%。

级联码的部分模块如下:

```

RS_Enc My_RS_Enc(
    Start(Start),
    Reset(Reset),
    Clk(Clk),
    Info(Info),
    Bypass(Bypass),
    Data_in(Data_in),
    Data_out(Data_out));
Viterbi_Enc My_Viterbi_Enc(
    Clk(Clk),
    Data_in(Sdata_in),
    Data_out_v(Sdata_out));

```

图 6 为编译码模块综合后的 RTL 结构图,其中编译码模块在 V-II Pro 上最大时钟频率可达到 28.637 MHz。图 7 为 RS(60,28)与(2,1,7)卷积的级联编译码模块的时序图。其中 Source 代表输入的待编码数据,RS\_data\_out 为 RS(60,28)编码后数据,Conv\_In 为卷积编码的输入数据,Conv\_Out 为 Viterbi 译码后的输出数据。

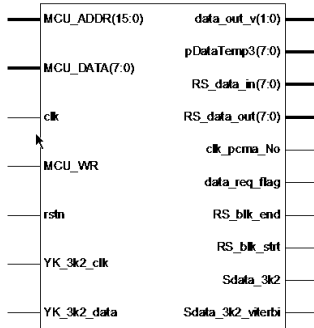


Fig.6 Structure of RTL after the synthesis (XST)  
图 6 编译码模块综合后得到的 RTL 结构图

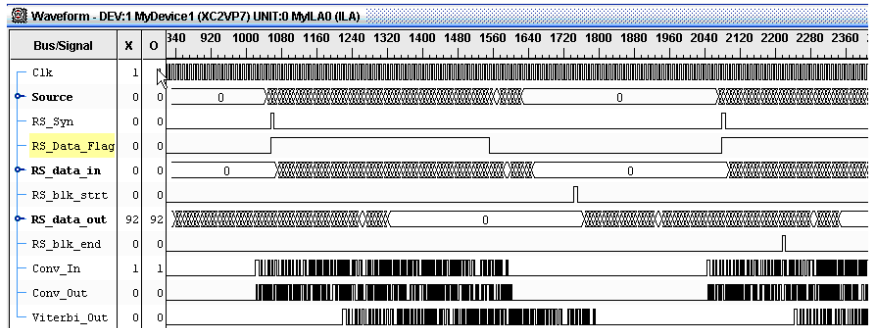


Fig.7 ChipScope result of the encode and decode module  
图 7 编译码模块的 ChipScope 结果

### 4 结论

本文首先简述了纠错编码的相关理论,特别对 RS 编码及卷积编码的相关知识进行了回顾;然后针对无线通信信道中存在噪声的情况,对纠错编码模型进行了分析仿真,即利用 RS 编码+分组交织,再与卷积编码相级联,最后在 VII Pro 上实现了速率为 28 MHz 的级联编译码系统,为级联码在遥测通信系统中的应用提供了一定的借鉴作用。

#### 参考文献:

[ 1 ] Clark George C Jr,J Bibb Cain. Error-Correction Coding for Digital Communications[M]. New York:Plenum Press, 1981.

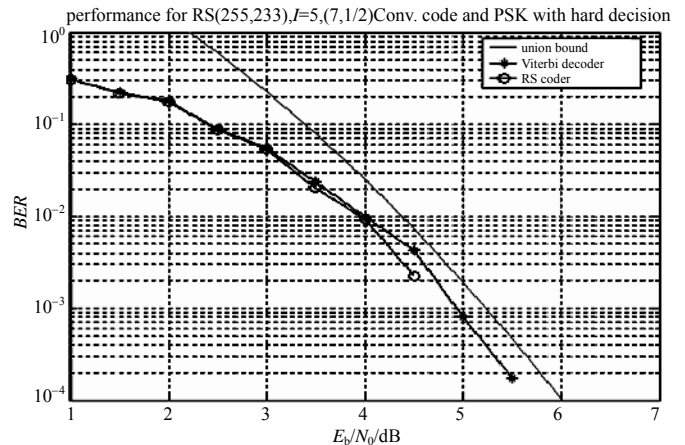


Fig.4 Performace curve of decode by the simulation  
图 4 程序仿真得到的译码性能曲线

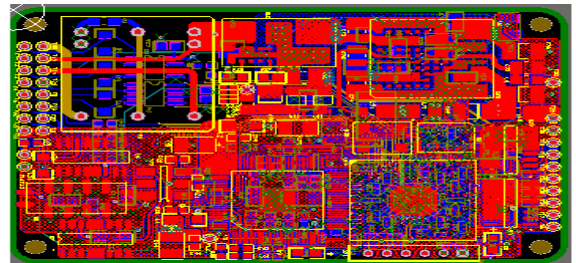
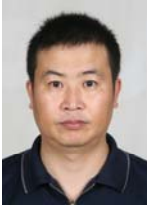


Fig.5 Hardware platform of the encode-decode system  
图 5 编译码系统的硬件平台

- [2] 刘剑锋,霍效新. 一种基于RS码序列的软扩频系统及其Simulink仿真[J]. 信息与电子工程, 2007,5(6):441-443,480.
- [3] 刘少阳,邹永. (2,1,7)卷积编码及其维特比译码算法的软件实现[J]. 信息与电子工程, 2006,4(6):467-469.
- [4] 刘蕴才,房鸿瑞,张仿. 遥测遥控系统(上册)[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [5] 谢铭勋. 再入遥测技术(下册)[M]. 北京:国防工业出版社, 1992.
- [6] LIN Shu, Daniel J Costello Jr. Error Control Coding: Fundamentals and Applications[M]. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1983.
- [7] Peterson W Wesley, E J Weldon Jr. Error-correcting Codes[M]. 2nd ed. Cambridge, Mass: MIT Press, 1972.
- [8] van Lint J H. Introduction to Coding Theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1982.

#### 作者简介:



宋成(1965-),男,河北省徐水市人,高级工程师,1987年毕业于第二炮兵工程学院,从事专业武器工程研究. email: bai\_bo0816@163.com.

(上接第151页)

多目标识别,就是找出每个目标在每一族内对应的椭球面。简单、有效的方法就是枚举法。将不同族的椭球面之间的组合全部枚举出来,逐个计算每个组合是否能够交会于一点。若能,则作为1个目标;否则,丢弃该组合继续枚举,直至筛选出所有目标。

枚举筛选次数最多为:

$$sum = m^2 + (m-1)^2 + \dots + 1^2 = \frac{m(m+1)(2m+1)}{6} = 2870 \text{ 次} \quad (16)$$

式中  $m=20$ , 为多目标个数。

实战中,为了更快提升多目标定位速度,可采用事先计算和实时筛选相结合的方法。在布站之初,各站根据发射台位置、布站几何,将警戒空域内的任一假想目标与对应的三族椭球面计算出来。根据测距分辨力( $\Delta R=3 \text{ km}$ )和空间遍历步进( $\Delta r=0.1 \text{ km}$ ),将整个空域划分为一个个蜂窝,将每个蜂窝质心对应的三族椭球面逐个计算出来,再将椭球面换算为时延差,存入(蜂窝,三族时延差)映射数据库。实战时,将测得的时延差代入数据库,直接查询出蜂窝定位信息,实时定位多目标。

## 5 结论

探讨基于广播电台的无源测距定位雷达的小型化实现方法,基本原理还适用于其他形如调幅、调相等广播和电视信号等系统。虽然侦测距离方面逊于静默哨兵系统,但方法简洁,造价低廉,机动灵活,对提高实战能力有一定参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 张军华. “静默哨兵”一种新型无源反隐身雷达[J]. 现代防御技术, 2000,28(1):63-64.
- [2] 郭环球. 基于相关函数理论的滤波器设计与仿真[J]. 上海电机学院学报, 2005,26(3):14-17.
- [3] 徐世友. 基于直播卫星发射信号的空间目标被动探测技术[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2003.
- [4] [美]MI 斯科尔尼克. 雷达手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1978.

#### 作者简介:



胡晋东(1969-),男,河南省信阳市人,高级工程师,获神舟载人航天工程个人三等功,获国防科学技术奖二等奖和部级科学技术奖一等奖,主要研究方向为航天测控及卫星地面应用系统. email: mathdreamer@yahoo.com.cn.