

RS 码在水声数据无线传输中的应用研究

宁永海,夏晓剑,沈 森

(河南科技大学 电子信息工程学院,河南 洛阳 471003)

摘 要: 在介绍 RS 纠错编码原理的基础上,将其应用于水声数据的无线传输中。在仿真环境以及联机实验中,对 RS 码应用前后的纠错效果进行了分析比较。结果表明,在纠错范围内,水声数据无线传输的可靠性得到了有效提高。

关键词: 纠错码;RS 码;DSP5502

中图分类号: TP311.5

文献标识码: A

The application of RS code in wireless transmission of acoustic data

NING Yong Hai, XIA Xiao Jian, SHEN Sen

(Electronic and Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: At the foundation of Reed-Solomon correct error code principle, the paper introduced RS codes to the wireless data transmission of acoustic data. In the simulation environment and on-line experiment, the error-correcting effects of pre-application and post-application were compared and analyzed, and the result indicated that the error-correcting performance in wireless data transmission was improved effectively in the scope of error-correcting ability.

Key words: error-correcting code; RS code; DSP5502

在航空反潜过程中,水听器采集的水声数据通过发射机发送。水声数据在无线传输过程中不同于语音、图像,其对传输速率要求不高,但对准确性要求很高,在传输中不希望有错误发生。但通常的无线传输如果传输距离过长,或者中间有障碍物,就会有一些不可避免的错误发生,因此,在传输中必须有容错措施来增加传输数据的可靠性。针对这些特点,本文介绍的系统使用了 DSP5502 芯片作为处理器构建水声数据发射机电路,并将水听器采集到的数据通过调制无线发送。同时在数据处理过程中加入了 CRC 校验,但是由于 CRC 只能用来检错,而不能纠错。因此,在这套系统中应用 RS 纠错编码来控制差错,并使之和 CRC 校验结合使用,结果使水声数据传输的可靠性得以改善。

1 Reed-Solomon(RS)码原理^[1]

RS 码是多元 BCH 码的 1 个特殊子类,其码字的符号取值域与 $g(x)$ 的根所在域相同,均在 $GF(q)$ 上。1 个纠错 t 个差错的 RS 码有如下参数:

$$\begin{cases} n=q-1 \\ k=n-2t \end{cases} \quad (1)$$

由于线性码的最大可能的最小距离是校验元的个数加 1,而 RS 码恰好做到了这一点,因此,RS 码是一种极大最小距离可分码(MDS 码),即在所有 $(n, n-2t)$ 的线性分组码中,没有 1 个码的最小距离比 RS 码更大,故 RS 码的纠错能力是最强的。

当 $q=2^m$ 时,码组符号取自有限域 $GF(2^m)$,这时的码组符号可以表示成相应的二元数组,与通常的二进制序列相对应,所以有限域 $GF(2^m)$ 上的 RS 码应用相当广泛。也正是为此,在本系统中采用了有限域 $GF(2^8)$ 上的纠错 8 个差错的 RS(255, 239)码,其本原多项式为:

$$F(x)=x^8+x^4+x^3+x^2+1 \quad (2)$$

1.1 RS 码的时域编码过程

编码之前需要计算出生成多项式,RS 码的生成多项式一般为: $g(x)=\prod_{i=1}^{2t}(x-\alpha^i)$, 其中, α 为本元多项式的 1 个根, t 为纠错个数。生成多项式系数也可以由 MATLAB 的功能函数 RSGENPOLY(255, 239)求得,求出的多项式系数是按降幂排列的。RS 码属于循环码的一

网络与通信 Network and Communication

种,因此它的编码过程可以通过循环码的 k 级或 $n-k$ 级编码电路来完成。为了取得系统码和简化计算量,采用 $n-k$ 级除法电路来完成,也就是用信息位多项式和 x^{n-k} 相乘后除以生成多项式求出校验位的过程,其原理如图 1 所示。

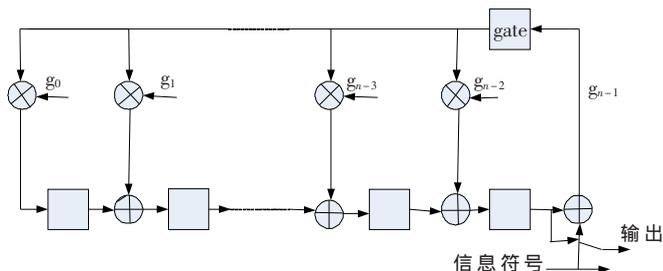


图 1 RS(255, 239) 码编码电路

在编码电路中, $g_0 \cdots g_{n-1}$ 为生成多项式的各项系数,按降幂排列,信息符号高次项系数首先进入编码电路,与最右侧的移位寄存器内容相“异或”,然后作为 1 个反馈,与前端乘法器系数相乘,乘积与前一级移位寄存器内容相“异或”得出后一级内容,依次类推。在输出端首先输出信息位,然后按照顺序输出出校验位,完成编码过程。

1.2 RS 码的译码过程

假设要传输的码多项式为 $C(x) = \sum_{i=1}^{n-1} c_{n-i} x^{n-i}$, 由于信道干扰的存在,使接收到的码多项式为 $R(x) = \sum_{i=1}^{n-1} r_{n-i} x^{n-i}$, 则差错图样多项式为 $E(x) = \sum_{i=1}^{n-1} e_{n-i} x^{n-i} = R(x) - C(x)$ 。本系统译码的主要任务就是如何从 $R(x)$ 中得到正确的估计错误图样 $\hat{E}(x) = E(x)$, 然后得到 $C(x)$, 并由此得到信息组 $m(x)$ 。

针对整个译码过程,RS 码的译码存在很多算法,这些算法根据不同的特点得以广泛的应用。但总的来说,RS 码的译码一般是通过以下 5 步来完成:

(1) 计算伴随式,以形成伴随式多项式

根据接收字多项式 $R(x)$, 可得到可纠正 $2t$ 个错误的 RS 码的伴随式:

$$S_j = R(\alpha^j) = \sum_{i=1}^{n-1} r_i \alpha^{ji}, b \leq j \leq b+2t-1 \quad (3)$$

式中, $r_i (0 \leq i \leq n-1)$ 是接收字图样, α 是有限域 $GF(2^m)$ 的本原元。

由以上的伴随式可形成伴随式多项式:

$$S(x) = \sum_{i=1}^{2t} S_i x^i \quad (4)$$

(2) 计算差错定位多项式

RS 码译码的关键就是差错定位多项式 $\sigma(x)$ 的求

取,常用的算法既有时域算法,也有变换域算法。本文所使用的是应用较广泛且相对实现简单的时域 BM 迭代算法。

根据伴随式多项式 $S(x)$, 得到 $S(x)\sigma(x) = \omega(x) \pmod{x^{2t+1}}$, 这就是求差错多项式的关键方程(Key Equation)。其中差错定位多项式 $\sigma(x) = \sum_{i=0}^l \sigma_i x^i$, 多项式 $\omega(x)$ 是在求差错定位多项式时的辅助多项式。

为了从关键方程中解出 $\sigma(x)$, 可以首先选择 1 组或 2 组合理的初值如 $\sigma^{(0)}(x)$ 和 $\omega^{(0)}(x)$, 然后开始第 1 次迭代运算求得 $\sigma^{(1)}(x)$ 和 $\omega^{(1)}(x)$, 并用 $\sigma^{(0)}(x)$ 和 $\omega^{(0)}(x)$ 表示它们。这样依次进行,由 $\sigma^{(i)}(x)$ 及 $\omega^{(i)}(x)$ 求得 $\sigma^{(i+1)}(x)$ 和 $\omega^{(i+1)}(x)$, 也就是首先计算出满足关键方程的 $\sigma(x)$ 和 $\omega(x)$ 的低次项,然后通过迭代逐步求得 $\sigma(x)$ 和 $\omega(x)$ 的高次项,最后解出满足要求的 $\sigma(x)$ 和 $\omega(x)$ 。其具体步骤如下:

① 由初值

$$\sigma^{(-1)}(x) = 1, \omega^{(-1)}(x) = 0, D^{(-1)} = 0, d_{-1} = 1$$

$$\sigma^{(0)}(x) = 1, \omega^{(0)}(x) = 1, D^{(0)} = 0, d_0 = s_1$$

开始迭代

② 按 $d_j = s_{j+1} + \sum_{i=1}^{j-1} s_{j+1-i} \sigma_i^{(j)}$ 计算 d_j , 若 $d_j = 0$, 则有

$$\begin{aligned} \sigma^{(j+1)}(x) &= \sigma^{(j)}(x) \\ \omega^{(j+1)}(x) &= \omega^{(j)}(x) \\ D^{*(j+1)} &= D^{*(j)} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $D^{*(j)}$ 是第 $j+1$ 次迭代过程中得到的最低次数的 $\sigma^{(j)}(x)$ 的次数,并计算 d_{j+1} , 再进行下一步迭代。

如果 $d_j \neq 0$, 则找出 j 之前的某一行 i , 它在所有 j 行之前各行中的 $i - D^{*(i)}$ 最大, 且 $d_j \neq 0$, 然后分别计算 $\sigma^{(j+1)}(x)$ 和 $\omega^{(j+1)}(x)$:

$$\begin{cases} \sigma^{(j+1)}(x) = \sigma^{(j)}(x) - d_j d_i^{-1} x^{j-i} \sigma^{(i)}(x) \\ \omega^{(j+1)}(x) = \omega^{(j)}(x) - d_j d_i^{-1} x^{j-i} \omega^{(i)}(x) \end{cases} \quad (6)$$

这就是第 $j+1$ 步的解。

③ 计算 d_{j+1} , 重复②进行下一次迭代。这样 $2t$ 次迭代后得到的 $\sigma^{(2t)}(x)$ 和 $\omega^{(2t)}(x)$ 即为所求的 $\sigma(x)$ 和 $\omega(x)$ 。

$\omega(x)$ 是在求解过程中得到的辅助多项式, 在求解错误值时将用到, 故也称为错误值多项式。

(3) 求差错位置

求差错位置也就是求 $\sigma(x)$ 的根, 一般使用钱(Chien)搜索算法: 依次将 $\alpha^0, \alpha, \dots, \alpha^{n-1}$ 代入得到的 $\sigma(x)$ 方程中, 若 α^l 是方程 $\sigma(x) = 0$ 的根, 则可以判断 α^{n-l} 是差错位置数。

(4) 计算差错值

网络与通信 Network and Communication

利用以上的计算结果,根据 Forney 算法可以很快得到差错的估计值 \hat{e}_l ,由于本文选用的生成多项式的连续根中 $b \neq 1$,因此采用下式计算:

$$\hat{e}_l = \frac{-\beta_l^{-b+2} \omega(\beta_l^{-1})}{\sigma'(\beta_l^{-1})} \quad (7)$$

式中, β_l^{-1} 是 $\sigma(x)$ 根, $l=1,2,\dots,t$ 。

(5) 纠正错误

求得错误位置和错误值后,与接收的 RS 码的相应位进行“异或”即可实现纠错。

2 RS 编、解码模块在 DSP 中的实现

数字信号处理器(DSP)是整个发射机系统的核心和灵魂所在。编、解码的功能都是通过 DSP 上软件实现的。编码模块主要采用 TI 公司的 TMS320VC5502 芯片来实现,解码模块是采用 TI 公司的 6000 系列芯片实现。这里着重介绍发射模块以及 RS 编码模块的实现过程。

系统发射机流程框图如图 2 所示。

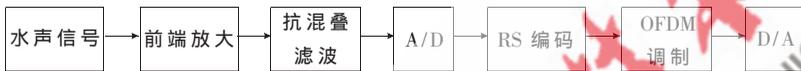


图 2 水声发射机框图

前端水听器采集到的水声信号非常微弱,需要经过放大器将信号放大,这里采用两级放大,将信号放大 50 倍,然后经过抗混叠滤波滤除信号中的混叠成分,将滤波后的水声信号经过 A/D 转换,将模拟信号转换为数字信号。项目中采用的是 24 bit 高精度 A/D 转换器。由于 RS 编码模块每个字节是 8 bit 数据,所以在进入 RS 编码模块之前需要将 24 bit 数据拆分成 3 个 8 bit 数据,形成连续的数据流,然后依次进入 RS 编码模块进行编码。

RS 编码过程主要是采用在 DSP 中用软件映射硬件电路的方法来实现。正如图 1 所示,在内存中分配若干个单元作为移位寄存器,存放每次循环后得到的余数。由于 RS 编码的乘法和加法必须在伽罗华域中进行,所以需要构造单独的乘法和加法函数,以备在程序执行时调用^[4]。由于 DSP 有专门的硬件——乘加器,所以在进行乘法和加法时大大提高了运算速度,这也是采用 DSP 进行 RS 编码的优势所在。实现编码的核心算法如下:

```
feedback=rs_add(m_xi[ii],r[3]);
for(j=3;j>=1;j--)
{
if(gx[j]!=0)
r[j]=r[j-1]^rs_mul(gx[j],feedback);
if(gx[j]==0)
r[j]=r[j-1];
}
r[0]=rs_mul(gx[0],feedback);
```

《微型机与应用》2009 年第 23 期

3 实验结果

3.1 MATLAB 仿真实验

在 MATLAB 环境下输入一段长为 33 的数据(1~33)。即信息位长 33,码长 37,此为 RS(63,59)的截短码。经 RS 编码后,向数据中加入 2 个错误,如图 3 中“加错后数据”中的凸起部分,此图末端的折线为校验数据。经纠错后数据如图中“纠错后数据”所示。从仿真图可以清晰

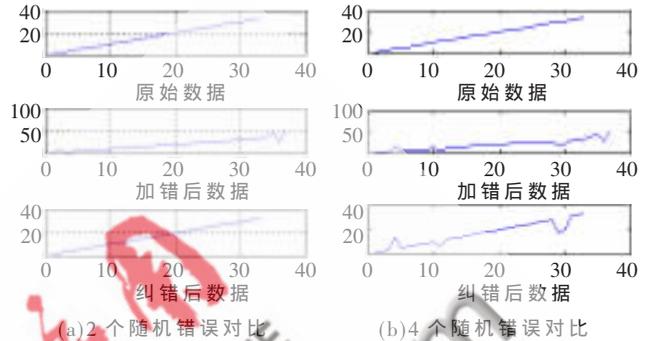
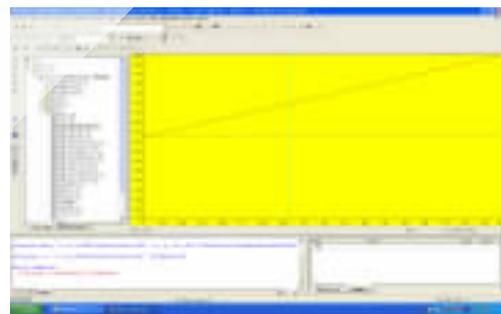


图 3 加入随机错误对比图

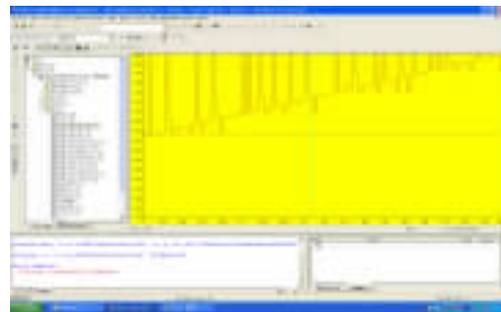
地看出,如果不采用 RS 码纠错,数据传输中的错误在接收端无法纠正。实验表明,在纠错范围之内,RS 码可以完全纠错。但 RS 码也存在一定弊端,即超出纠错范围之后,RS 码不能纠错,且有时会出现错误增加的情况,即产生成片随机错误。

3.2 现场联机实验

在实验室环境下,进行联机实验,将水听器采集得到的数据编码后调制发出,在发送过程中每帧数据添加随机错误,图 4 为在 6000 系列 CCS 下采集到的加入不



(a) 加入 2 个随机错误纠错图



(b) 加入 4 个随机错误纠错图

图 4 加入随机错误纠错图

欢迎网上投稿 www.pcachina.com

53

同错误、纠错后的波形,观察解码端得到的数据情况。

实验发现,纠错性能与MATLAB仿真的结果是一致的。如果加入的随机错误在纠错范围之内,错误能够完全纠正,达到了很好的纠错效果。但是超出了纠错能力,不但不能纠正错误,反而有错误增加的情况出现。所以,在信道状况良好的情况下,且错误在纠错范围之内,RS码有较好的纠错效果,能够很大程度地提升水声数据的传输准确性。但为了在无线传输过程中达到更好的纠错效果,保证水声数据传输的可靠性,最好采用级联码实现纠错,即RS码+交织+卷积编码。实验发现,使用级联码可以大大提高系统的纠错性能。

参考文献

- [1] KIM C H, OH S, LIM J. A new hardware architecture for operations in GF (2^n)[J]. IEEE Transactions on Computers, Jan. 2002, 51(1).
- [2] PROAKIE J G. 数字通信(第四版)[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 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,1991.
- [4] 向茜,刘钊. 伽罗华域上代数运算的最简实现[J]. 电子科技大学学报,2000,29(1).

(收稿日期:2009-07-10)

电子技术应用
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.chinaAET.com