

文章编号: 1671-5896(2010)02-0119-05

RS 码及卷积码在 PDS 水声通信体制中的应用

陈 凯, 赵安邦, 陈 阳, 解立坤

(哈尔滨工程大学 水声技术国防科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: Pattern 时延差编码 (PDS: Pattern time Delay Shift coding) 水声通信体制能有效地抑制水声通信中多途扩展引起的信号波形畸变对通信性能的影响, 而 RS 码具有与 PDS 通信体制结合的先天优越性。为进一步降低水声通信系统的误比特率, 提出将 RS 码与 PDS 通信体制结合, 并对 RS 码在 PDS 水声通信体制中的性能进行研究。对挑选的 RS 码与常用的卷积码在 PDS 通信体制中的性能进行了仿真对比。结果表明, RS 码在 PDS 通信体制中的性能远优于卷积码, 对系统性能有明显提高。

关键词: 水声通信; Pattern 时延差编码; RS 编码; 卷积码

中图分类号: TN911

文献标识码: A

Application of RS Code and Convolution Code in Underwater Acoustic Pattern Time Delay Shift Coding Communication System

CHEN Kai, ZHAO An-bang, CHEN Yang, XIE Li-kun

(National Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: PDS (Pattern time Delay Shift coding) scheme can decrease the aberrance of the signal caused by the channel multipath effectively, and RS code has the superiority combining with the PDS scheme congenitally. Integrating RS code with PDS scheme is achieved, and the performance of selected RS code utilized in underwater acoustic pattern time delay shift coding communication system is discussed. The performance of RS code and Convolution code used in PDS system is compared. The simulation results show that the performance of RS code is much better than convolution code in PDS system. Lake trial results prove its superiority.

Key words: underwater acoustic communication; pattern time delay shift coding (PDS); RS code; convolution code

引 言

水声通信技术无论在军事还是民用上都有十分重要的意义。水声信道是随机时变、空变的^[1], 其多途扩展产生的码间干扰直接影响了水声通信的质量。如何构建有效、稳健的水声通信网络是当前水声通信研究的热点^[2], 而性能优良的水声通信体制是其研究的基础课题之一。

Pattern 时延差编码 (PDS: Pattern time Delay Shift coding) 通信体制^[3], 将信息编码技术和信道编码技术融于信号码元的设计中, 采用码元分割, 使每个携带信息的码元均具有抗水声多途干扰能力, 有效地降低了水声通信中的误码率。RS 码是一类有很强纠错能力的多进制 BCH 码, 也是一类典型的代数几何码, 在当今通信领域特别是移动通信中应用十分广泛。

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 重点实验室基金资助项目 (9140C2001010801); 国家自然科学基金资助项目 (60802060); 哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目 (HEUFT07072)

作者简介: 陈凯 (1984-), 男, 河南南阳人, 哈尔滨工程大学硕士研究生, 助理工程师, 主要从事水声通信研究, <http://www.cnki.net> 15104545496 (E-mail) chenkaikai@sina.com; 赵安邦 (1978-), 男, 山东郓城人, 哈尔滨工程大学副教授, 硕士生导师, 主要从事水声通信研究, (Tel) 86-13845117603 (E-mail) zhaoanbang@hbeu.edu.cn

研究发现, RS码先天具有与 PDS通信体制结合的优势, 它是一种扩展的非二进制 BCH 码。笔者通过仿真对 RS码与 PDS通信体制结合的性能进行了研究, 并与卷积码在 PDS通信体制中的性能进行了对比。结果表明, RS码与 PDS通信体制的结合具有优异的性能。

1 Pattem时延差编码水声通信原理

PDS通信体制^[4]属于脉位编码, 信息调制码元出现在码元窗的时延差信息中, 原理如图 1所示。图 1中 T_0 为发送的每个码元长度, T_p 为 Pattem长度, $\Delta\tau$ 为编码量化单位, $k = 0, 1, \dots, 2^n - 1$; n 为每个码元所携带的信息比特位数, $\Delta\tau = (T_0 - T_p) / (2^n - 1)$ 。从图 1可看出, PDS编码的调制方式属于脉位调制, 每个码元通过 Pattem码的起始位置不同, 即 $k\Delta\tau$ 的不同, 携带的信息也不同^[5]。由于每个长为 T_0 的码元携带 n bit的信息, 故 PDS通信体制的通信速率 $N = (n/T_0)$ bit/s 在发射端利用 Pattem脉冲的时延值编码, 接收端采用时延估计进行时延解码。系统采用码元的多种不同波形 (Pattem) 进行码元分割, 优点是占用频带较窄且能稳健地适应水声多途信道通信。若 Pattem码有 L 个, 且相互正交, 则相邻的同一 Pattem码型出现的时间间隔为 LT_0 , 即达到最大抗多途的能力。PDS编码波形可表示为^[6]

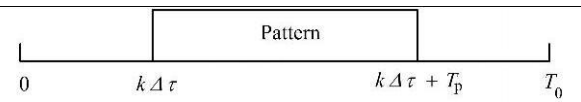


图 1 PDS编码原理

$$s(t) = \sum_{i=0}^{+\infty} \sum_{j=1}^{L-1} p_j[t - (j+Li)T_0 - k_j\Delta\tau], \quad k_j = 0, 1, \dots, 2^n - 1 \tag{1}$$

其中 $p_j(t)$ 为第 j 号 Pattem波形; k_j 为第 $(Li+j+1)$ 号 Pattem码元的时延差数值。Pattem码型选择要求自相关峰尖锐, 互相关性弱, 以便保证足够好地抑制码间干扰效果, 具体论述可参考文献 [7]。

2 RS码和卷积码编码在 PDS中的应用

RS码以其发现者 Reed-Solomon的姓氏第一个字母命名^[8], 是 BCH 码最重要的一个子类, 也是 CCITT协议中的编码方式之一。RS码具有优异的性能, 是一个极大最小距离码 (MDC: Maxim ized Distance Code), 所以 RS码在无线通信和磁、光介质存储系统中应用广泛, 特别是在移动信道, 是 BCH 码中已成为工业标准的编码方式^[9]。航天领域中, RS码和卷积码是一对黄金搭配, 在“探险者”号 (Voyager) 飞向木星和土星的旅途中, 信息就是以 RS码为外码、卷积码为内码的级联码实现信道编码的。在 RS码中, 输入信号分成 mn 比特一组, 每组包括 n 个符号, 每个符号由 m 个比特组成。在伽罗华域 $GF(2^n)$ 中, 符号 $RS(n, K)$ 的含义如下: m 表示符号的大小, 如 $m=4$ 表示符号由 4位二进制数组组成; n 表示码块长度; K 表示码块中信息的长度; $n-K=2t$ 表示校验码的符号数, t 表示能纠正的错误数目。

本原 RS码的基本参数为: 码长 $n = q - 1$, 校验位 $n - K = 2t$, 最小距离 $d_{min} = 2t + 1$ 。生成多项式

$$g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2) \cdots (x - \alpha^{2t}) = \alpha_{n-K} x^{n-K} + \alpha_{n-K-1} x^{n-K-1} + \cdots + \alpha_1 x + \alpha_0 \tag{2}$$

其中, 对于 $g(x)$ 的各次系数 α_i 有 $\alpha_i (i = 0, 1, \dots, n - K) \in \{0, 1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{q-2}\}$

下面举例说明 RS码的构造。设码的符号取自 $GF(q) = GF(2^3)$ 中的元素, $\alpha \in GF(2^3)$ 是本原域元素, 它是 $x^3 + x + 1$ 的根, 构造实际码距 $D=5$ 的 RS码。

要求码的 $D=5$, 则码必须以 $\alpha, \alpha^2, \alpha^3, \alpha^4$ 为根, 由式 (2)可知码的生成多项式 $g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2)(x - \alpha^3)(x - \alpha^4) = x^4 + \alpha^3 x^3 + \alpha^2 x^2 + \alpha x + \alpha^3$

由此生成了一个 $GF(2^3)$ 上的 8进制 (7, 3, 5) 本原 BCH 码, 即 RS码, 其系统码生成矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha^4 & 1 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & 1 & 0 & \alpha^2 & 1 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & 1 & \alpha^3 & 1 & \alpha & \alpha^3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

相应的校验多项式

$$h(x) = \frac{x^7 - 1}{g(x)} = x^3 + \alpha^3 x^2 + \alpha^2 x + \alpha^4 \quad (6)$$

“探险者”号采用了 (255, 223)RS码, 码块长度共 255个符号, 其中信息代码的长度为 223, 校验码有 32个校验符号。在这个由 255个符号组成的码块中, 可纠正在该码块中出现 16个分散或连续符号错误, 但不能纠正大于 16个符号的错误。当误比特率 $P_b = 10^{-6}$ 时“探险者”号采用的 (255, 223)RS码与仅用卷积码相比可获得 2.5 dB的额外编码增益。

卷积码是较基本且应用广泛的纠错码, 它通常用 (n, K, N) 表示, 是把 K 个信息比特编成 n 个信息比特, N 为编码的约束长度, 说明编码过程中相互约束的码段个数。卷积码编码后的 n 个码元不仅与当前组的 K 个信息比特有关, 还与前 $N-1$ 个输入组的信息比特有关。 $R = K/n$ 为卷积码的码率。水声通信中也有人对卷积码的应用进行了研究, 本文中卷积码的参数设置参考文献 [10] 的结论, 将信源二进制信息进行卷积码编码, 再通过 PDS编码送给发射换能器。

PDS体制信源编码属于多进制编码, 将要发送的二进制比特信息按要求进行多进制编码。每个 Pattern码元携带 n bit信息, 编码时首先对二进制信源每 n 位一组转换成 2^n 进制信息, 然后进行 PDS调制。可以发现, 参数 $q = 2^n$ 的 RS码先天具有与 $n=m$ 的 PDS编码体制结合的优势。PDS调制时把每 n 位一组的二进制信源转换成 2^n 进制信息, 此时每个 Pattern码元携带 n bit信息, 正好可调制参数为 $q = 2^n$ ($n = m$) 的 RS校正码信源。笔者结合 PDS水声通信的实际参数, 挑选了 RS(15, 7)码与 RS(7, 3)码进行纠错编码, 并对其性能进行了对比。RS(15, 7)码纠错编码的码率 $R = 15/7$, $q = 2^4$, 可纠正 $t = (n - K)/2 = 4$ 个差错。同理, RS(7, 3)码码率 $R = 7/3$, $q = 2^3$, 可纠正 $t = (n - K)/2 = 2$ 个差错。

卷积码属于二进制编码, 应用于 PDS体制中, 首先对二进制信源信息进行卷积码编码, 然后再进行 PDS编码。笔者采用 (2, 1, 3)卷积码, 码率 $R = 1/2$, 约束长度 $N = 3$, 回溯长度 15。通过以上选择的编码参数可知, 采用 RS(15, 7)码和 (2, 1, 3)卷积码编码时, 每个 Pattern携带 4位信息, 而 RS(7, 3)码携带 3位信息, 则编码时延缩短一半, 通信速率不变。

3 系统仿真

系统参数设置: $T_0 = 20\text{ ms}$ $T_p = 10\text{ ms}$ 每个码元携带的信息比特数: RS(15, 7)和卷积码为 4, RS(7, 3)码为 3。系统占用频带为 3 700~5 620 Hz 采样频率 $f_s = 48\text{ kHz}$ 系统仿真流程如图 2所示。PDS通信体制中采用帧发送, 帧结构如图 3所示。

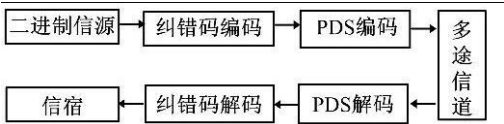


图 2 系统仿真流程图

Fig.2 The flow chart of system simulation

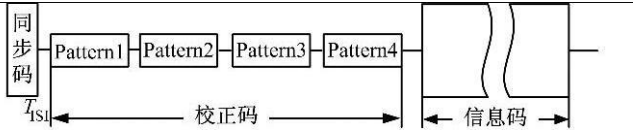


图 3 帧结构图

Fig.3 Frame structure

采用线性调频信号的同步码和其后的时隙 T_{sf} 时长均为 50 ms 校正码为 4 挑选出的 Pattern信号, 信息码段长 3 s RS(15, 7)码和卷积码包含 150个 Pattern码元, RS(7, 3)码为 200个 Pattern码元, 卷积码译码采用纠错能力较强的软判决 Viterbi译码方式^[11]。通信速率为 $(200/R)\text{ bit/s}$ 仿真采用的信道冲激响应如图 4所示。

通信中数字调制方式的选择往往是频带利用率、误比特率 E_b/N_0 (或 S/N) 和设备复杂性等因素的综合结果, 必须根据具体使用条件进行比较。 E_b 为单位比特信号的能量, N_0 为噪声的单边功率谱密度。在实际系统中能直接测量到的是平均信号功率 S 和噪声功率 N , 由此得信噪比 S/N 。若接收机带宽

为 B 符号传输速率为 R_b , 可推出 E_b/N_0 和 S/N 的关系为

$$\frac{E_b}{N_0} = \left(\frac{S}{N} \right) \left(\frac{R_b}{B} \right)$$

(7)

其中 R_b/B 为单位频带的比特率, 即频带效率。

笔者对 3 种纠错码在不同 E_b/N_0 下的误比特率 BER (Bit Error Rate R_{BER}) 进行了仿真统计, 结果如图 5 所示。

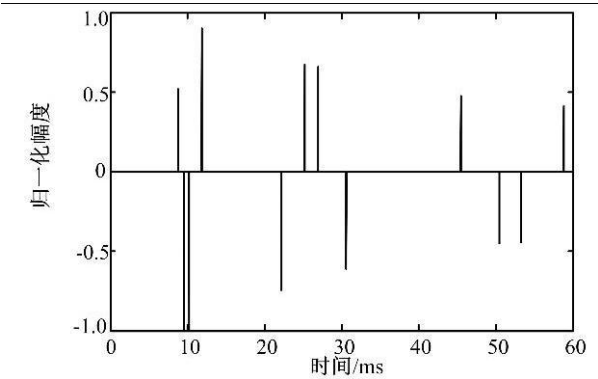


图 4 信道冲激响应

Fig.4 The impulse response used

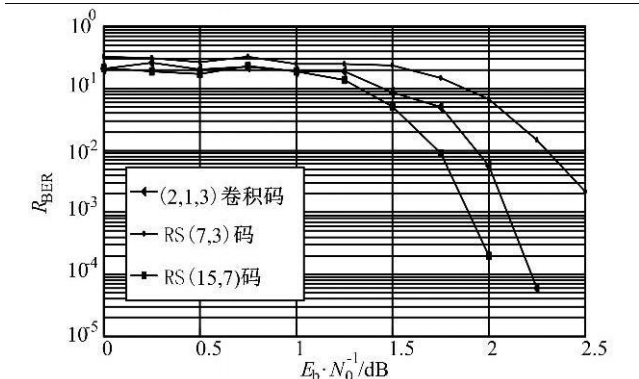


图 5 3 种不同纠错编码性能

Fig.5 The performance of three error correcting codes

由仿真结果可知, 与 PDS 体制结合, RS(7,3)码性能最差, RS(15,7)码性能最好, 在 $E_b/N_0 > 2$ dB 时, RS(15,7)码的误比特率 $R_{BER} = 0$ (图 5 中不显示), 在 $R_{BER} = 10^{-4}$ 时, RS(15,7)码较卷积码可提高大约 0.3 dB 的增益, $E_b/N_0 = 2$ dB 时, RS(15,7)码 BER 比卷积码 BER 低约 1.5 个数量级。

4 试验结果

为验证 RS(15,7)码与 (2,1,3)卷积码在 PDS 水声通信系统中的性能, 2009 年 10 月 28 日上午在吉林省松花湖进行了两组定点通信试验, 原始未编码信息为 10^4 bit。试验时湖面浪较大, 发射船与接收船径向漂移速度约 1 m/s。发射换能器深 1.5 m, 接收水听器深 6 m, 均垂直吊放, 换能器工作频带为 1~9 kHz。图 6 为距离 1 000 m 通信时接收到的同步码进行拷贝相关后得到的声信道多途扩展情况, 可以看出通信时信噪比较低, 多途扩展约 30 ms 幅度影响较大。

经过后续的数据处理发现, 试验时信道的时变性明显, 每帧数据间隔 3 s 后的信道与前一帧的信道相关性衰落明显。由于随机噪声影响, 个别帧的同步码相关性较为恶劣, 开窗时基误差较大,

造成该帧解码时的原始误比特率 (PDS 解码后的误比特率) 较高。由于船的漂移, 接收信号出现一定的多普勒频移。两组通信试验的误比特率统计如表 1 所示。可以看出, RS 段的原始误比特率是卷积码段的 2 倍多, 而纠错译码后 RS(15,7)码的

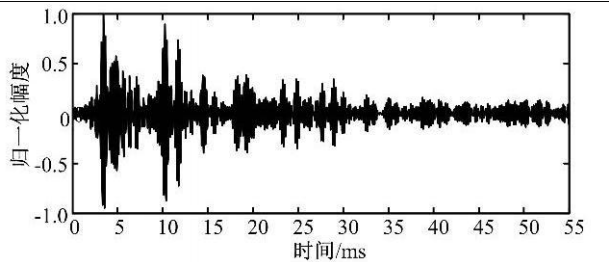


图 6 同步码拷贝相关

Fig.6 The copy correlation of synchronous code

表 1 通信试验误比特率统计

Tab.1 Bit error rate statistics of communication trial

水平距离 /m	纠错码类型	原始 R_{BER} /%	纠错译码后 R_{BER} /%
1 000	卷积码	0.130 0	0.040 1
	RS 码	0.353 8	0.039 9
1 500	卷积码	0.260 0	0.150 2
	RS 码	0.595 9	0.149 6

误比特率低于卷积码的误比特率, 可知应用在 PDS 体制中, RS(15,7)码的纠错能力明显比 (2,1,3) 卷积码强, 验证了仿真的结果。

5 结 语

PDS通信体制是一种稳健的水声通信体制,能有效地对抗水声通信中严重的多途干扰,将 RS纠错码加入到该体制中能进一步提升通信系统的稳健性。仿真结果表明,RS(15,7)码与 PDS编码结合的性能远优于(2,1,3)卷积码和 RS(7,3)码,而三者码率接近。此外,RS(15,7)码与 PDS编码体制结合较为方便,也易于实现,它能进一步降低 PDS通信体制的误比特率,最后通过试验结果验证了该结论,为进一步提高 PDS通信体制性能,构建稳健的水声通信系统打下了基础。

参考文献:

- [1] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道 [M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 1992: 37-40.
HUI Jun-ying SHENG Xue-li Underwater Acoustic Channel [M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industrial Press, 1992: 37-40.
- [2] MILICA STOJANOVIC. Underwater Acoustic Communication [M]. San Francisco: Wiley, 2002: 688-698.
- [3] 殷敬伟. 多途信道中 Pattern时延差编码水声通信研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 18-21.
YIN Jingwei A Study of Pattern Time Delay Shift Coding Communication in Underwater Acoustic Multipath Channel [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 18-21.
- [4] 温周斌, 冯海泓, 惠俊英. 一种新的水声通信体制 [J]. 声学学报, 1993, 18 (5): 345-351.
WEN Zhou-bin FENG Hai-hong HUI Jun-ying A New Underwater Acoustic Communication Method [J]. Chinese Journal of Acoustics, 1993, 18 (5): 345-351.
- [5] 惠俊英, 刘丽, 刘宏, 等. Pattern时延差编码通信研究 [J]. 声学学报, 1999, 24 (6): 561-573.
HUI Jun-ying LIU Li LIU Hong et al Research on Pattern Time Delay Shift Coding Communication [J]. Chinese Journal of Acoustics, 1999, 24 (6): 561-573.
- [6] 殷敬伟, 惠俊英, 王逸林, 等. M元混沌扩频多通道 Pattern时延差编码水声通信 [J]. 物理学报, 2007, 56 (10): 5915-5921.
YIN Jingwei HUI Jun-ying WANG Yi-lin et al M-Ary Chaotic Spread Spectrum Pattern Time Delay Shift Coding Scheme for Multichannel Underwater Acoustic Communication [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56 (10): 5915-5921.
- [7] YIN Jingwei HUI Jun-ying HUI Juan et al Underwater Acoustic Communication Based on Pattern Time Delay Shift Coding System [J]. China Ocean Engineering, 2006, 20 (3): 499-508.
- [8] 张宗澄. 纠错编码原理和应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 96-99.
ZHANG Zong-cheng Theory and Application of Error Correcting Codes [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 96-99.
- [9] REED IS HUANG JB TRUONG TK et al Fast Transforms for Decoding Reed-Solomon Codes [J]. IEEE Proc, 1981, 128 (1): 9-14.
- [10] 许肖梅, 朱培斌. 浅海水声信道下卷积码性能仿真研究 [J]. 水声信号处理技术, 2007, 10 (5): 136-138.
XU Xiao-mei ZHU Pei-bin Simulation Study of Convolutional Codes for Shallow Water Acoustic Channel [J]. Technology of Acoustic Signal Processing, 2007, 10 (5): 136-138.
- [11] TODD K M. Error Correction Coding Mathematical Methods and Algorithms [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005: 583-587.

(责任编辑: 何桂华)