

# 一种用于头盔式水下无线光通信的卷积码研究

邓 荣<sup>1</sup>, 饶炯辉<sup>1</sup>, 张晓晖<sup>1</sup>, 严 杰<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 海军92854部队军械修理厂, 广东 湛江 524005)

**摘 要:** 为了提高头盔式水下无线光通信系统的可靠性, 设计了一种新的(3,1,1)卷积码。介绍了水下光通信模型及其对编码的要求, 计算了未编码系统在水下高斯白噪声信道下的误比特率。给出了此卷积码的具体的编译码方法, 推导了编码后系统误比特率计算公式。在不同系统参数、水质和传输距离的情况下, 对未编码系统和编码系统分别进行了仿真。仿真结果表明: 编码能够改善系统的误码性能; 系统参数越大, 编码改善系统性能的能力越强; 水体衰减系数或传输距离越大, 编码改善系统性能的能力越弱。

**关键词:** 水下光通信; 卷积码设计; 系统参数; 衰减系数; 传输距离; 误比特率

**中图分类号:** TN919      **文献标识码:** A

## Design of convolutional code in underwater helmet optical wireless communication system

DENG Rong<sup>1</sup>, RAO Jiong-hui<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-hui<sup>1</sup>, YAN Jie<sup>2</sup>

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Military Equipment Repair Depot of Navy 92854 Army Unit, Zhanjiang 524005, China)

**Abstract:** In order to improve the reliability of underwater helmet optical wireless communication system, a new (3,1,1) convolutional code is designed. Underwater optical communication model and its requirement for code are introduced, the bit error rate of uncoded system in underwater AWGN channel is calculated. The methods of encoding and decoding are presented; the calculated formula of bit error rate of encoded system is obtained. Both the uncoded system and the encoded system were simulated in different system parameter, water quality and transmission distance. The simulation results indicate that the bigger system parameter, the stronger ability of improving system capability by code; the bigger attenuation or transmission distance, the lower ability of improving system capability by code.

**Key words:** underwater optical communication; convolutional code design; system parameter; attenuation coefficient; transmission distance; bit error rate

### 1 引言

激光通信具有通信频带宽, 数据传输能力强, 不受电磁辐射和核辐射干扰等优点<sup>[1]</sup>, 在军事和民用通信中具有重大应用潜力。头盔式水下无线光通信系统是一种单兵短距离、设备简单、携带方便的水下通信系统。光信号在水下衰减极大, 增大发射功率可以改善通信性能, 但受体积和载重的限制, 激光器的功率有限。为了保证通信数据传输的可靠性, 必须采用信道编码技术<sup>[2]</sup>。

卷积码是目前通信系统中应用十分广泛的编码

之一, 在同样的编码效率下, 卷积码的性能优于分组码, 至少不低于分组码<sup>[3]</sup>。其中(2,1,6)卷积码和最大似然的Viterbi译码已经成为IEEE 802.15.3协议规定的差错控制方案<sup>[4]</sup>。另外, 光在水下传输过程中因水体的散射作用在时间域上会有延迟展宽,

**基金项目:** 海军工程大学自然科学基金项目 (No. HGDJJ044) 资助。

**作者简介:** 邓 荣 (1985 - ), 男, 硕士研究生, 现主要从事水下光通信纠错编码的研究。E-mail: 674433932@qq.com

**收稿日期:** 2010-07-13

使得水下信道不是单纯的无记忆信道,而卷积码正好能够适应这一特点,它的监督位不但能监督当前信息也能监督过去的信息,这是分组码所不能及的。需要注意的是,在码元传输中恶性码可能使接收序列发生无穷多个比特错误,所以设计的编码不能出现恶性码;由于卷积码译码设备复杂度随约束长度成指数增长,故应尽量设计约束长度低的卷积码。

国内外对大气无线光通信纠错编码研究较多,对水下光通信编码研究较少。文献[2]和文献[5]分别研究了RS码和卷积码结合PPM调制在水下光信道的应用。本文针对OOK调制方式设计了一种(3,1,1)卷积码,此码约束长度很低,主要应用于头盔式水下无线光通信系统。基于水下光通信模型,计算了未编码系统在AWGN信道下的误比特率,给出了编码方法和译码方法,推导了编码后系统误比特率公式,通过仿真得到了不同系统参数、水质和传输距离时未编码和编码系统的误比特率曲线。

2 水下无线光通信模型

水下无线光通信中,编码信号调制激光器发出光信号,经过水下信道的传输部分光信号到达探测器,探测器将光信号转化成电信号,在经过放大电路后进行译码。整个系统如图1所示。



图1 水下光通信系统示意图

Fig.1 the sketch map of underwater optical communication system

由于海水对光波的吸收和散射作用,光信号在水下的衰减很大,包括光学衰减和漫衰减。光学衰减是对水中准直射光的衰减,它是水对光的吸收和前向散射、后向散射作用的结果。漫衰减是对水中发散射光的衰减,它是水对光的吸收和后向散射作用的结果。设激光器的发射功率为 $P_s$ ,水对光的总衰减系数为 $C$ ,经过距离 $Z$ 的传输,功率衰减为:

$$P_r = P_s e^{-CZ} \tag{1}$$

无线光通信普遍采用强度调制/直接光检测(IM/DD)系统,主要调制方式有开关键控(OOK)和脉冲位置调制(PPM)<sup>[6]</sup>。OOK带宽利用率较高,抗码间干扰能力最强,是一种最容易实现的调制方式<sup>[7]</sup>。采用OOK调制的光信号经过水下信道的传输,在接收机上产生的电压 $U(t)$ 可以表示为:

$$U(t) = \begin{cases} RP_s e^{-CZ} + n(t) & \text{发射“1”时} \\ n(t) & \text{发射“0”时} \end{cases} \tag{2}$$

式中, $R$ 表示接收机电压响应度; $n(t)$ 是由背景散粒噪声、信号光散粒噪声、探测器暗电流散粒噪声

和前置放大器噪声组成的系统噪声<sup>[8]</sup>,它是一个均值为0,标准差为 $\sigma$ 的高斯白噪声。发送“1”时和发送“0”时, $U(t)$ 的概率密度 $p_1(U), p_0(U)$ 分别为:

$$\begin{cases} p_1(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(U - RP_s e^{-CZ})^2}{2\sigma^2}\right) \\ p_0(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{U^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases} \tag{3}$$

若系统未编码,选择最佳门限直接进行硬判决,则误判概率为:

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} RP_s e^{-CZ} / \sigma\right) \tag{4}$$

其中,  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2} du$ 。

3 编码方法

卷积码编码器由移存器、模2加法器和旋转开关组成。本文设计的(3,1,1)编码器如图2所示,码长 $n=3$ ,信息位长 $k=1$ ,码率 $1/3$ ,约束长度 $N=1+1=2$ ,移存器共有2级。每个时隙中,1 bit的信息进入移存器,移存器暂存内容右移1位,开关旋转一周输出3 bit。

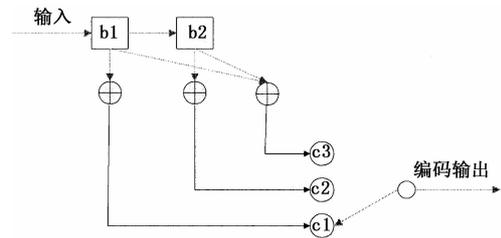


图2 编码器方框图

Fig.2 the sketch map of encoder

输入和输出的关系如下:

$$c1 = b1, c2 = b2, c3 = b1 \oplus b2 \tag{5}$$

式中, $b1$ 是当前输入信息位; $b2$ 是移存器存储的前一个信息位。输出序列中信息位在前,监督位在后,故这是一种系统码,也一定是非恶性码。设编码器初始状态的 $b1$ 和 $b2$ 是00,输入信息位是101100,则编码器的工作状态变化如表1所示。

表1 编码器的工作状态变化

Tab.1 the variety in the work state of encoder

$b1$	1	0	1	1	0	0
$b2$	0	1	0	1	1	0
$c1c2c3$	101	011	101	110	011	000

由表1可见,当输入为101100时,输出为101 011 101 110 011 000。其中,000,011,101和110是许用码组,001,010,100和111是禁用码组。码组间最小Hamming距离为2,能检测1个错码。

4 译码方法

卷积码的译码可采用逐字译码和 Viterbi 译码。本文设计的(3,1,1)卷积码,如采用逐字译码,将接收到的码元每3个分一组,对每一码组逐个进行判决。若接收到的是000,011,101或110,认为它们是正确的接收码组,若接收到的是001,010,100或111,则认为它们接收有误,需要重新发送。

Viterbi 译码结合了信道的统计特性,是一种最大似然译码。

4.1 状态图和网格图

由表1,将输入信息位、移存器状态和输出码元之间的关系归纳于表2中。

表2 移存器状态和输入输出码元的关系

Tab.2 the relationship between shift register state and input-output codes

前一状态 <i>b2</i>	当前输入 <i>b1</i>	输出 <i>c1c2c3</i>	下一状态 <i>b2</i>
0	0	000	0
	1	101	1
1	0	011	0
	1	110	1

由表2可知,无论前一状态是0还是1,下一状态只与当前输入有关。按照表中的规律,可以画出状态图如图3所示。图中,虚线表示输入信息位为0时的状态转变路线;实线表示输入信息位为1时的状态转变路线。线条旁的3位数字是编码输出比特。

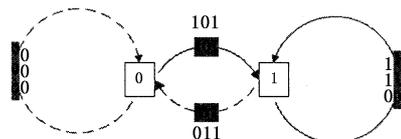


图3 (3,1,1)卷积码状态图

Fig.3 the state picture of(3,1,1)convolutional code

将状态图在时间上展开,可以得到网格图,如图4所示。图中画出了3个时隙,可以看出,第3个时隙的网格图形完全重复第2个时隙的图形,反映了此(3,1,1)卷积码的约束长度为2。

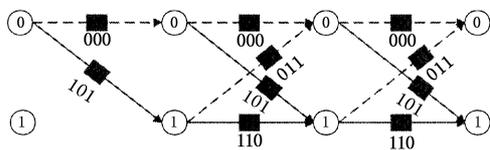


图4 (3,1,1)卷积码网格图

Fig.4 the resseau picture of(3,1,1)convolutional code

4.2 Viterbi 译码算法

Viterbi 译码算法是 A. J. Viterbi 于 1967 年提出

的,它的基本原理是将接收到的信号序列和所有可能的发送信号序列作比较,选择其中 Hamming 距离最小的序列作为估计的发送信号序列<sup>[9]</sup>。以发送信息位 101100 为例,编码后的发送序列为 101 011 101 110 011 000。设接收序列为 101 101 101 100 011 000,其中第4,5和11码元为错码。

第一步考察接收序列前6位“101 111”。由于此卷积码的约束长度为2,故先从前2个信息段开始考察。每种状态有两条路径到达,2种状态共有4条到达路径。比较网格图中4条路径和接收序列之间的 Hamming 距离,结果列于表3中。将到达每个状态的两条路径中 Hamming 距离较小的路径保留为幸存路径。若两条路径的 Hamming 距离相同,可以任意保留一条。于是,两种状态一共剩下两条路径留着下一步继续考察。

表3 Viterbi 算法译码第一步计算结果

Tab.3 the first compute results of Viterbi decoded arithmetic

序号	路径	对应序列	Hamming 距离	幸存否?
1	000	000 000	4	否
2	010	101 011	2	是
3	001	000 101	2	否
4	011	101 110	2	是

第二步继续考察接收序列中的后继3位“101”。上一步剩下的两条路径增加一级后就变成4条可能路径,分别计算它们与接收序列的 Hamming 距离,计算结果列于表4中。

表4 Viterbi 算法译码第二步计算结果

Tab.4 the second compute results of Viterbi decoded arithmetic

序号	路径	原幸存路径的距离	新增路径段	新增距离	总距离	幸存否?
1	010+0	2	00	2	4	是
2	011+0	2	10	2	4	否
3	010+1	2	01	0	2	是
4	011+1	2	11	2	4	否

重复第二步的考察直到接收序列的最后3位,选出最后4条路径中 Hamming 距离最小的路径,它对应的序列作为估计发送序列。这样得到的幸存路径网格图如图5所示。图中粗线是 Hamming 距离最小的路径 0101100,对应的序列也即是估计发送序列 101 011 101 110 011 000。

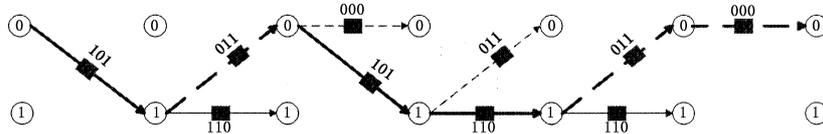


图5 一种对应信息位 101100 的幸存路径网格图

Fig. 5 the reseau picture of survive path when send 101100

5 性能分析

把图3中状态0拆分成起始状态0和终止状态e,同时把0状态上的自环删除,在每个分支上标上分支增益  $D^iN^j$ ,  $i$  表示此分支上长度为  $n$  的输出序列的质量,  $j$  表示相应输入  $k$  比特消息的质量,这样得到的修正状态图如图6所示。

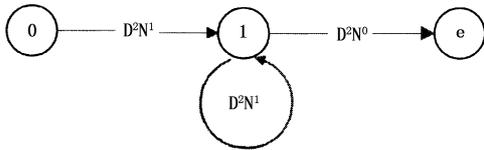


图6 修正状态图

Fig. 6 the modified state picture

由图6可以解出此码的多元生成函数:

$$T(D, N) = \frac{D^4 N}{1 - D^2 N} \quad (6)$$

根据文献[10],编码后系统误比特率:

$$p_b \leq \left. \frac{\partial T(D, N)}{\partial N} \right|_{N=1, D=Z} = \frac{Z^4}{(1 - Z^2)^2} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} Z &= \sum_r \sqrt{p_1(U) p_0(U)} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \\ &\quad \exp\left(-\frac{U^2 - URP_s e^{-CZ} + R^2 P_s^2 e^{-2CZ}/2}{2\sigma^2}\right) dU \\ &= e^{-\frac{R^2 P_s^2 e^{-2CZ}}{8\sigma^2}} \end{aligned}$$

即:

$$p_b \leq e^{-0.5R^2 P_s^2 e^{-2CZ}/\sigma^2} / (1 - e^{-0.25R^2 P_s^2 e^{-2CZ}/\sigma^2})^2 \quad (8)$$

6 仿真研究

为了对本文设计的卷积码进行验证,按照实际水下信道设置参数,对未编码系统和编码系统分别进行性能仿真。从式(4)和式(8)可知,激光器发射功率、接收机电压响应度,系统噪声水体衰减系数和传输距离对水下光通信的性能都有影响。其中激光器发射功率,接收机电压响应度和系统噪声可以当着一个整体称为系统参数,令其为  $r = RP_s/\sigma$ 。设水体衰减系数  $C = 0.15$ ,传输距离  $Z = 10$  m,仿真得到系统参数与误比特率的曲线,如图7所示。由图可

以看出,同样的系统参数下,编码系统的误比特率低于未编码系统的误比特率;系统参数  $r$  值越大区别越明显,编码系统的性能表现得更好。在误比特率为  $10^{-3}$  处,编码系统的发射功率是未编码系统的60%,在误比特率为  $10^{-6}$  处,编码系统的发射功率是未编码系统的55%。

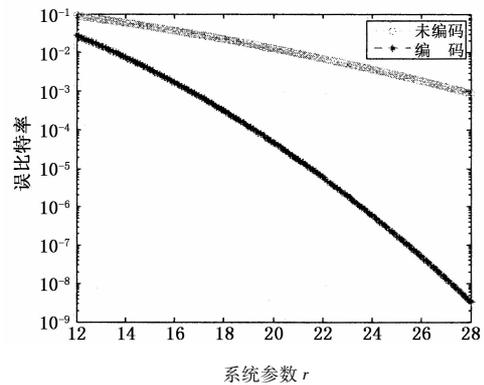


图7 系统参数与误比特率关系图

Fig. 7 bit error rate vs r

设系统参数  $r = 12$ ,水体衰减系数  $C = 0.15$ ,仿真得到传输距离与误比特率的曲线,如图8所示。由图可以看出,同样的传输距离下,编码系统的误比特率低于未编码系统的误比特率;但是随着系统的传输距离的增大,编码系统和未编码系统的误比特率都会增大,编码对系统性能的改善作用越来越小。

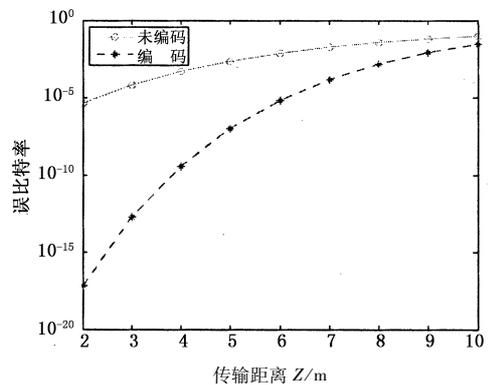


图8 传输距离与误比特率关系图

Fig. 8 bit error rate vs Z

设系统参数  $r = 15$ ,传输距离  $Z = 8$  m,仿真得到水体衰减系数与误比特率的曲线,如图9所示。由

图可以看出,当水体衰减系数在 0.1 ~ 0.2 之间时,编码系统的误比特率明显比未编码系统的误比特率低;但当水体衰减系数高于 0.25 时,编码系统与未编码系统的误比特率相当,说明此时编码很难改善系统的误码性能。

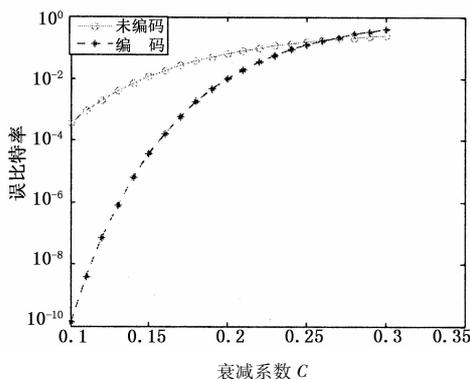


图9 衰减系数与误比特率关系图

Fig.9 bit error rate vs C

## 7 结 论

本文设计的(3,1,1)卷积码是一种系统码,约束长度小,用Viterbi算法译码简单,硬件实现容易,符合头盔式水下光通信系统对器件简单、容易和低功耗等要求。具有一定地纠错能力,编码后的系统能降低误码率。

## 参考文献:

- [1] Zhao Ying jun, Wang Jiang an, Ren Xi chuang, et al. Effect of the atmospheric turbulence on the bit error rate of laser communication among the ships [J]. Laser Technology, 2010, 34(2): 261 - 264. (in Chinese)  
赵英俊, 王江安, 任席闯, 等. 舰船激光通信中大气湍流对误比特率的影响[J]. 激光技术, 2010, 34(2): 261 - 264.
- [2] Yang Min, Huang Benxiong, Wang Fuchang, et al. The application of error-correcting codes in an underwater laser-com PPM system [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech, 1997, 25(7): 11 - 12. (in Chinese)  
杨敏, 黄本雄, 王福昌, 等. 激光水下通信中纠错码的应用[J]. 华中科技大学学报, 1997, 25(7): 11 - 12.
- [3] Tian Lihua. Information theory, code & cryptology [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 268 - 288. (in Chi-

nese)

田丽华. 信息论、编码与密码学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 268 - 288.

- [4] Liu Yangmei, Yu Ningmei, Song Lianguo, et al. FPGA design of serial viterbi decoder [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2007, 30(5): 1890 - 1893. (in Chinese)  
刘阳美, 余宁梅, 宋连国, 等. 一种串行 viterbi 译码器的 FPGA 的设计与实现[J]. 电子器件, 2007, 30(5): 1890 - 1893.
- [5] Forestieri E, Gangopadhyay R, Parti G. Performance of convolutional codes in a direct detection optical PPM channel. [J]. IEEE Trans on Commun, 1989, 37(12): 1303 - 1317.
- [6] Hu Zongmin, Tang Junxiong. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications [J]. Journal on Communications, 2005, 26(3): 75 - 79. (in Chinese)  
胡宗敏, 汤俊雄. 大气无线光通信系统中数字脉冲间隔调制研究[J]. 通信学报, 2005, 26(3): 75 - 79.
- [7] Pang Zhiyong, Piao Dazhi, Zou Chuanyun, et al. Performance comparisons for several modulation schemes used in optical wireless communications [J]. Journal of Gulin Institute of Electronic Technology, 2002, 22(5): 1 - 4. (in Chinese)  
庞志勇, 朴大志, 邹传云, 等. 光通信中几种调制方式的比较[J]. 桂林电子工业学院学报, 2002, 22(5): 1 - 4.
- [8] Giles, J W, et al. Giles. Underwater optical communications systems part2: basic design considerations [C]. IEEE, 2005, 3: 1700 - 1705.
- [9] Fan Changxin. Lectures on communication principles [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Press, 2006: 258 - 263. (in Chinese)  
樊昌信. 通信原理教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 258 - 263.
- [10] Qiu Peiliang, Chen Huifang, Xie Lei. Fundamentals of digital communications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Press, 2007: 353 - 385. (in Chinese)  
仇佩亮, 陈惠芳, 谢磊. 数字通信基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 353 - 385.