

文章编号: 1001-3806(2011)02-0222-04

水下光通信防恶性码卷积码设计

邓荣¹, 饶炯辉^{1*}, 张晓晖¹, 高巍², 魏巍¹

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033; 2. 蚌埠海军士官学校 兵器系, 蚌埠 233011)

摘要: 为了防止在水下光通信系统中激光器发送长“0”或长“1”信号序列, 避免通信系统发生无穷多个比特错误, 采用一种新的卷积码编码方案, 进行了编码设计和 Viterbi 译码理论分析与误比特性能仿真验证, 用 VHDL 语言实现了编码器现场可编程门阵列设计, 得到了编码系统与未编码系统的误比特率和达到同样误码性能所需的信噪比。结果表明, 这种编码能够降低水下无线光通信系统的误比特率, 提高通信的可靠性, 降低系统对信噪比的需求。

关键词: 光通信; 水下光通信; 卷积码; 现场可编程门阵列; 误比特率

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.022

Convolutional code design avoiding malignant codes in underwater optical communication systems

DENG Rong¹, RAO Jiong-hui¹, ZHANG Xiao-hui¹, GAO Wei², WEI Wei¹

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Department of Weaponry, Bengbu Navy Non-commissioned Officers School, Bengbu 233011, China)

Abstract: In order to prevent laser sending a long “0” or “1” signal list, avoid communication system making infinite bit errors in underwater wireless optical communication systems, a new convolution encoding scheme was adopted. The encoding method was designed and Viterbi decoding theory was analyzed. The simulative demonstration of bit error rate performance was carried out. The field programmable gate array (FPGA) design of encoder was implemented with VHDL language. The bit error rates of encoded and uncoded system, the signal noise ratio demanded to attain the same bit error rate was received. The result show that this code can reduce the bit error rate of the system, improve communication reliability, and reduce the need of the signal noise ratio in underwater wireless optical communication systems.

Key words: optical communication; underwater optical communication; convolutional code; FPGA; bit error rate

引言

相比极低频和甚低频的通信方式, 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^[1,2], 但是激光水下通信中水下信道对光信号的衰减极大, 达到 -120dB ~ -150dB。为了保证通信数据传输的可靠性, 须采用信道编码技术。这样既可以改善通信质量, 又可以在保持同样误比特率的前提下将编码获得的增益转化为节省发射功率^[3,4]。

光在水下传输过程中, 因水体的散射作用在时间域上有延迟展宽的特点, 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^[5]。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^[6]。译码采用的 Viterbi 译码器在商业上已经做得非常成熟。由于编码发送的长“0”序列容易出现恶性码^[7], 既可能使接收序列发生无穷多个比特错误, 又容易使通信中断。另一方面, 激光器连续发送长“1”序列难以实现, 对器件损害较大。因此, 设计一种防恶性卷积码, 在达到提高系统误码性能的同时, 有利于激光器的实现和通信的顺畅进行, 也有利于防止恶性错误的出现。

目前, 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。本文中直接给出了所需卷积码的编码方法, 详细介绍了针对编码方法的译码方法, 用 VHDL 语言实现编码器的现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 设计, 最后对比未编码系统和编码系统进行了性能分析。

基金项目: 海军工程大学自然科学基金资助项目 (HGDJJ044)

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。

* 通讯联系人。E-mail: rainman_rao@163.com

收稿日期: 2010-06-29; 收到修改稿日期: 2010-07-17

1 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。作者设计的(3,1,1)编码器如图 1 所示,码长 $n = 3$,

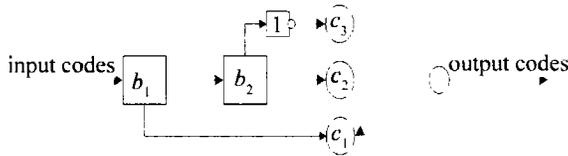


Fig. 1 Sketch map of an encoder

信息位长 $k = 1$, 比特率 $1/3$, 约束长度 $N = 1 + 1 = 2$, 移存器共有 2 级。每个时隙中, 1bit 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 3bit。

输入和输出的关系如下:

$$c_1 = b_1, c_2 = b_2, c_3 = \overline{b_2} \quad (1)$$

式中, b_1 是当前输入信息位, b_2 是移存器存储的前一个信息位, $\overline{b_2}$ 表示取反。设编码器初始状态的 b_1 和 b_2 是 00, 输入信息位 111000, 则编码器的工作状态变化如表 1 所示。

Table 1 The variety in the work state of an encoder

b_1	1	1	1	0	0	0
b_2	0	1	1	1	0	0
$c_1 c_2 c_3$	101	110	110	010	001	001

由表 1 可见, 当输入为 111000 时, 输出为 101110110010001001。其中 001, 010, 101 和 110 是许用码组, 000, 011, 100 和 111 是禁用码组。无论输入信息有多少个连续“0”或连续“1”出现, 发送序列都不会出现超过 3 位连续“1”或连续“0”。

2 Viterbi 译码

Viterbi 译码算法是 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^[8]。Viterbi 译码算法结合了信道的统计特性, 是一种最大似然译码算法, 也可以说是一种最佳的译码算法。

2.1 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。

Table 2 The relationship between shift register state and input-output codes

last state b_2	input b_1	output $c_1 c_2 c_3$	next state b_2
0	0	001	0
	1	101	1
1	0	010	0
	1	110	1

按照表中的规律, 画出状态转移图, 用虚线表示输入信息为“0”时的状态转变路线, 实线表示输入信息为“1”时状态转变路线, 线条旁的 3 位数字是编码输出比特, 如图 2 所示。

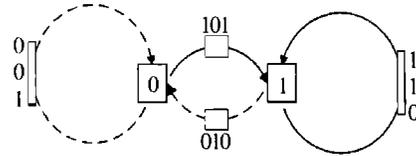


Fig. 2 Transfer picture of state

将状态图在时间上展开, 可以得到网格图, 如图 3 所示。图中画出了 3 个时隙, 可以看出, 第 3 个时隙的

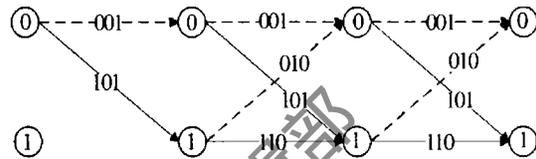


Fig. 3 Reseau picture

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。

2.2 译码方法

若发送信息为 111000, 则编码后的发送序列为 101110110010001001。假设接收序列为 101100110011001001, 其中, 第 5 位和第 12 位码元为错码。由于此卷积码的约束长度为 2, 故先对比前 2 个信息段的 6 位“101010”。将网格图中的 4 条路径和接收序列比较, 选择到达每个状态 Hamming 距离最小的路径作为幸存路径(相同则任意保留一条)。比较结果列于表 3 中。

Table 3 The first compare results of Viterbi decoded arithmetic

serial number	path	corresponding list	Hamming distance	survive?
1	000	001001	3	no
2	010	101010	2	yes
3	001	001101	2	no
4	011	101110	1	yes

第 2 步继续考察接收序列中的后继 3 位“110”。上一步剩下的两条路径增加一级后又有 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。

Table 4 The second compute results of Viterbi decoded arithmetic

serial number	path	last survive path distance	new path	new distance	total distance	survive?
1	010 + 0	2	00	3	5	no
2	011 + 0	1	10	1	2	yes
3	010 + 1	2	01	2	4	no
4	011 + 1	1	11	0	1	yes

重复第 2 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, 把它对

应的序列作为估计发送序列。这样得到的幸存路径网格图见图4。图中粗线是 Hamming 距离最小的路径

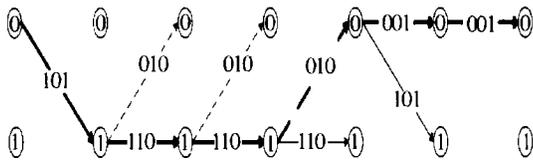


Fig. 4 Reseau picture of survive path when send 101100

011100, 对应的序列也即是估计发送序列 101110110010001001。

3 编码器的 FPGA 设计

VHDL 是一种硬件描述语言,具有多层次描述系统硬件功能的能力^[9]。把编译好的 VHDL 程序下载到 FPGA 芯片上,芯片就具有对应程序所描述的硬件功能。设计所用 VHDL 编译、仿真平台是 Altera 公司的 Quartus II 5.1 软件。由于 Viterbi 译码器在商业上已经比较普及,可以直接购买,所以,只需对编码器设计。

用 Quartus II 5.1 编译后生成的编码器图形符号如图5所示。

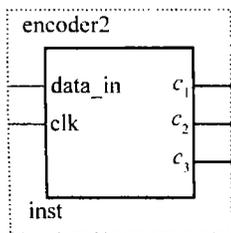


Fig. 5 Symbol of encoder compiled by VHDL

4 性能分析

4.1 未编码系统误比特率

无线光通信通常采用强度调制/直接光检测系统^[10],开关键控调制方式带宽利用率较高,抗码间干扰能力最强,是一种最容易实现的调制方式^[11]。设探测器的输入译码器的电流为:

$$I(t) = \begin{cases} I_0 + n(t), & (\text{发射“1”时}) \\ n(t), & (\text{发射“0”时}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, I_0 是信号光产生的电流, $n(t)$ 是分布为 $N(0, \sigma^2)$ 高斯噪声,它包括背景散粒噪声、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。 t 为时间, σ 为高斯噪声标准差,发送“1”时和发送“0”时, $I(t)$ 的概率密度分别为:

$$\begin{cases} p_1(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma^2}\right] \\ p_0(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{I^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

若系统不进行编码,选择最佳门限直接进行硬判决,可以求得误判概率为:

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}/2) \quad (4)$$

式中, $r = I_0^2 / (2\sigma^2)$ 表示信噪比, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2} du$, u 为一个自变量。

4.2 编码系统误比特率

把图2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 $D^i N^j$, i 表示此分支上长度为 n 的输出序列的重量, j 表示相应输入 k 比特消息的重量,这样得到的修正状态图如图6所示。



Fig. 6 Modified state picture

由此图可以解出此码的多元生成函数:

$$T(D, N) = \frac{D^3 N}{1 - D^2 N} \quad (5)$$

式中, D, N 为两个分支增益的一般表示符号。

根据参考文献[4],编码后系统误比特率为:

$$p_b \leq \left. \frac{\partial T(D, N)}{\partial N} \right|_{N=1, D=Z} = \frac{Z^3}{(1 - Z^2)^2} \quad (6)$$

式中, $Z = \sum_I \sqrt{p_1(I)p_0(I)} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp[-(I^2 - I_0 + I_0^2/2)/(2\sigma^2)] dI = e^{-r/4}$, 即:

$$p_b \leq e^{-0.75r} / (1 - e^{-0.5r})^2 \quad (7)$$

4.3 未编码系统与编码系统误比特性能比较

由(4)式和(7)式,可得未编码和编码系统在不同信噪比时的误比特率,如图7所示。

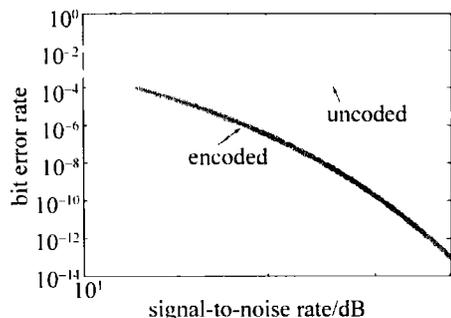


Fig. 7 Bit error rate of uncoded and encoded system when different SNR

从图7大致可以看出,信噪比相同,编码系统的误比特率比未编码系统低;信噪比增大,编码系统和未编码系统的误比特率都会降低,但是编码系统的误比特率下降得更快,体现出越来越强的误码控制能力。要想控制在同样的误比特率,未编码系统所需信噪比更

高。例如,误比特率为 10^{-6} ,未编码系统的信噪比是编码系统的2.5倍。

5 结论

本文中设计的(3,1,1)卷积码避免了出现长“0”或“1”的发送序列,无论输入信息有多少个连续“0”或连续“1”,发送序列都不会超过3位连续“0”或连续“1”出现,防止了恶性码的出现,避免了系统由编码导致的出现无穷多错误的可能。同时,这种卷积码约束长度小,用Viterbi算法译码简单,硬件实现容易,符合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,能改善系统的通信质量。

参考文献

- [1] ZHAO Y J, WANG J A, REN X C, *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).
- [2] YI M, LI T S, CHEN M S, *et al.* Frame synchronization for multi-pulse position modulation in optical communication [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 164-167 (in Chinese).
- [3] YANG M, HUANG B X, WANG F C, *et al.* The application of error-correcting codes in an underwater lasercom PPM system [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology*, 1997, 25(7): 11-12 (in Chinese).
- [4] ZHAO L, KE X Zh, REN A H. Research and simulation of the influence of the scattering effect on FSO-OFDM system [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 185-188 (in Chinese).
- [5] FORESTIERI E, GANGPOPADHYAY R, PARTI G. Performance of convolutional codes in a direct detection optical PPM channel [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1989, 37(12): 1303-1317.
- [6] TIAN L H. *Information Theory, code & cryptology* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 268-288 (in Chinese).
- [7] QIU P L, CHEN H F, XIE L, *et al.* *Fundamentals of digital communications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Press, 2007: 353-385 (in Chinese).
- [8] FAN C X. *Lectures on communication principles* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Press, 2006: 258-263 (in Chinese).
- [9] HAN X Ch, HAN X Ch. Vhdl realization of encoder and decoder for convolutional code in communication system [J]. *Communication Technology*, 2009, 42(10): 72-74 (in Chinese).
- [10] ZHU X M, KAHN J M. Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(8): 1233-1239.
- [11] PANG Z X, PIAO D Z, ZHOU C Y. Performance comparisons for several modulation schemes used in optical wireless communications [J]. *Journal of Guilin Institute of Electronic Technology*, 2002, 22(5): 1-4 (in Chinese).

(上接第221页)

高的功率和良好的波形特性。本文中首先介绍了激光调Q技术的基本原理,并在此基础上分析了调Q开关各要素对输出脉冲功率的影响;进而在不同调Q开关函数模型下,对其输出脉冲进行了数值模拟,并将模拟结果与升余弦信号进行了比较分析。结果表明,调Q开关开启前后激光器腔内损耗的“落差”、抽运功率和开关时间对输出脉冲的峰值光子数密度和脉冲宽度均有影响;调Q激光器输出脉冲有较好的波形特性,能够有效地抑制码间串扰。

参考文献

- [1] HUANG Y B, WEI H L, MEI H P, *et al.* Effects of atmospheric channel on system performance of infrared laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 646-651 (in Chinese).
- [2] WU F T, YAO G Q, ZHANG J R, *et al.* Theoretical and experimental study on the enhancement of Q-switched laser output [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science Edition)*, 2005, 26(1): 43-46 (in Chinese).
- [3] CHEN P F, LAN X J. Technology to reduce pulse-width of Q-switched pulse [J]. *Laser & Infrared*, 1994, 21(1): 36-37 (in Chinese).
- [4] LIU W J, LI H J, QU Sh L, *et al.* Fem to second pulse compressing in external cavity [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 665-670 (in Chinese).
- [5] PANG Ch L, SU Y, ZHENG Zh R. The stability of ultra short pulse output in self mode-locked lasers [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 271-273 (in Chinese).
- [6] DA X Y, CHEN Sh X. *The course of communication principles* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 117-124 (in Chinese).
- [7] CHEN J B. *Laser principle and application* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004: 49-165 (in Chinese).
- [8] LAN X J. *Laser technology* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 68-77 (in Chinese).
- [9] LI R X, HE Zh Q. *The numerical resolution of differential equations* [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2005: 1-29 (in Chinese).
- [10] LIU Q, LI Y C, ZHOU X, *et al.* The relation between the output pulse energy and width characteristics experiment [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(1): 20-21 (in Chinese).
- [11] ZHANG Y L, WANG M G, ZHANG J Y, *et al.* Experiment and analysis of 10Gbit/s optical wireless communication systems [J]. *Optical Communication Technology*, 2007, 31(3): 57-58 (in Chinese).
- [12] YANG Y J, SUN P Y. Intersymbol interference of frequency band transmission [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2004, 23(1): 188-189 (in Chinese).