

文章编号:1002-2082(2007)02-0201-04

# 紫外激光通信中PPM与Turbo联合编码调制研究

曹付允, 徐 军, 朱桂芳, 李喜来

(第二炮兵工程学院 基础实验中心, 西安 710025)

**摘要:** 为提高紫外激光通信系统中的编码效率和频带利用率, 提出采用PPM(pulse position modulation)调制和Turbo编码相结合的技术来提高效率。此方法不仅能提高频带的利用率, 也能提高码间抗干扰能力、纠错能力和降低误码率, 并对PPM调制模式下的Turbo码译码公式进行了推导, 最后利用Matlab软件实现了该技术的仿真, 仿真结果表明: 在紫外激光通信中采用PPM和Turbo统一调制编码的技术能进一步降低系统的效率和误码率。

**关键词:** 紫外激光通信; PPM; Turbo联合编码; 仿真技术

中图分类号: O434.2; TN929.1

文献标志码: A

## Technology to unite PPM with Turbo code in ultraviolet laser communication

CAO Fu-yun, XU Jun, ZHU Gui-fang, LI Xi-lai

(Center of Basic Experiment, Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to improve the coding efficiency and the availability of frequency band in ultraviolet laser communication system, a technique is put forward, which integrates PPM(pulse position modulation) and Turbo code. This technique can improve the availability of frequency band, anti-jamming capability between codes, error correction and error bit rate. The coding formula of Turbo code is derived in PPM mode. The technique was simulated with Matlab software. The simulation result shows that this solution can reduce the bit error rate and improve the efficiency of the whole communication system.

**Key words:** ultraviolet laser communication; PPM; Turbo code; simulation technology

## 引言

紫外激光通信有多种调制和编码方式, OOK(on off key)作为一种最早的调制方式且易于实现而被广泛应用, 但与PPM相比, 它的功率利用率不高。由于PPM的高能量效率、高灵敏度和功率利用率而被广泛应用于无线光通信中。也可采用差分频谱幅度编码的双极性码来降低系统的误码率<sup>[1]</sup>。常用的信道纠错编码有很多种: 线性分组码、循环码、纠错分组码、卷积码、网格编码和Turbo码等, 其中线性分组码和循环码主要针对随机错误, 纠错分组

码针对突发错误, 而卷积码是一种连环码, 网格编码是集调制一体的一种编码方法, Turbo码是一种新型的编码方式, 它接近香农极限的纠错能力。因此如果把PPM调制和Turbo编码结合起来将能极大地提高系统性能。

Turbo码虽易受外界环境的干扰和影响, 但具有极强的纠错能力, 因此有望在光PPM通信中提高通信性能。通过对PPM通信中Turbo码的研究, 推导出相应系统模型下的译码计算公式, 并且用计算机对其性能进行了仿真。结果显示: 在光PPM通

收稿日期: 2006-07-15; 修回日期: 2006-09-20

作者简介: 曹付允(1979—), 男, 山东成武人, 第二炮兵工程学院硕士研究生, 研究方向为紫外通信。E-mail: caofuyun000@163.com

信中,Turbo码不仅具有良好的纠错能力而且能降低系统的误码率。

### 1 Turbo码编译码原理及其在PPM模式中译码原理推导

在无线紫外光信道PPM通信中,信号受到的干扰较大,有时甚至具有比较低的信噪比,因此采用何种编码纠错技术将直接影响到通信的性能。根据香农理论,增加分组码的码长或卷积码的约束长度可以改善码的性能。然而这样会使最大似然译码ML算法的复杂度增加。当长度增加到一定程度时,译码很难实现<sup>[2]</sup>。Turbo码是由法国Berrou等人于1993年在国际通信会议上提出的。Turbo码的提出是纠错码发展中的一个里程碑,它标志着人们向高增益低复杂度编码方法的研究迈出了一大步。这种码也被称为并行级联卷积码,其性能可以接近香农纠错性能的极限。当使用递归系统卷积码(RSC)和交织器为256×256的1/2率的Turbo码经过18次迭代译码后,比特误码率可达到10<sup>-5</sup>,此时误码率距香农极限只有0.7dB。

Turbo码实质上是一种级联卷积编码技术。采用级联编码技术,译码器必须按照一定的顺序进行译码,所采用的任何最优和次最优译码必须能够使内层产生合适的统计信息供外层译码使用。对于并行级联卷积码(Turbo码),这意味着需要在并行支路上的并行译码器之间交换信息。如此通过往复译码并且交换信息,最终可输出译码结果。由于Turbo码具有较高的编码增益,当Turbo码的编码效率为1/2时,可使得编码增益达到0.5dB,而编码效率为1/3时,编码增益可达到为0.7dB<sup>[3]</sup>。故可在给定误比特率和误符号率的条件下,大大降低需要发送的信号能量,这样在能量受限信道中的通信系统依然能够保持可靠的通信能力。在激光通信系统中,有效地降低发射激光能量还可以延长系统的使用寿命。所以如能在PPM通信系统中合理引入Turbo码技术,将会使系统的性能大为改善。如果提高编码效率,就可进一步调高编码增益,而使用更高进制编码可能进一步减少存储量,从而使得这种编码方式更加实用化。

#### 1.1 Turbo码编译码原理

Turbo码是一种随机交织的并行级联码,其编码器结构如图1所示。它由2个或多个二元反馈递归系统卷积码(RSC, Recursive systematic

convolution)经交织器并行级联而成。其中2个RSC码可以相同,也可以不同。采用RSC码基于以下2个原因:1)并行级联码只能由系统码组成;2)在低信噪比和高编码效率下,RSC码比具有相同编码存储容量的非系统卷积码(NSC)的误比特性能好。

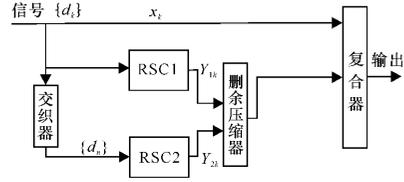


图1 Turbo码编码原理图

Fig. 1 Principle of Turbo coding

Turbo码编码过程如下:2个RSC码接收相同的输入信息序列{d<sub>k</sub>},编码器RSC1直接接收{d<sub>k</sub>},并产生编码输出Y<sub>1k</sub>;而编码器RSC2接收的是经过交织器扰乱后的信息序列{d<sub>n</sub>},产生编码输出Y<sub>2k</sub>。显然,在某一时刻,输入{d<sub>k</sub>},Turbo码编码器输出为{d<sub>k</sub>Y<sub>1k</sub>Y<sub>2k</sub>}。因此,标准的Turbo码的编码效率为1/3。为了获得更高的编码速率<sup>[4]</sup>,可采用收缩法,其收缩过程是让Y<sub>1k</sub>和Y<sub>2k</sub>按P矩阵定义选择收缩模式输出。

Turbo码的译码过程是迭代译码,这是Turbo码译码中至关重要的组成部分。有了软信息后,组成Turbo码的各个子译码器之间才能互相传递信息。假定Turbo码方案中只有2个子译码器,典型的Turbo码译码原理框图如图2所示<sup>[5]</sup>。译码器1根据输入的信息进行译码,译码得到软输出信息和外部信息,其中的外部信息送至下一级译码器2。译码器2则参照前一个译码器的结果进行译码,得出更准确的输出信息和外部信息,至此才算是一次完整的译码过程。紧接着进行第2次迭代译码,将译码器2的外部信息反馈至译码器1的输入端,重复上述过程。每一次迭代,都将输出一个更可靠的结果。最后,根据译码器2的软输出信息进行判决,得

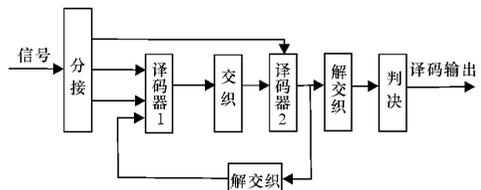


图2 Turbo码译码原理图

Fig. 2 Principle of Turbo decoding

到译码输出。这种迭代, 充分利用了码元符号内含的信息。目前, Turbo 码译码器中子译码单元所采用的译码算法主要有 2 种: MAP 算法和 SOVA 算法。SOVA 算法虽然运算量较小, 但译码性能比 MAP 算法大约有 (0.5~1) dB 的劣化。同时, 简化的 MAP 算法如 Max-Log-MAP 算法, 已大大简化了 MAP 算法的运算量。因此, 实际的 Turbo 码译码器大多采用 Max-Log-MAP 算法。

SOVA 算法的公式推导过程见参考文献[6], 对于常用的 Max-Log-MAP 算法[6], 其最后输出为  $\Lambda(\mu_k) \approx 2x/\delta^2 + L_{e1,k} + L_{e2,k}$ , 式中  $L_{ei,k}$  ( $i=1, 2$ ) 为译码器输出的外部信息。此时,

$$\ln p(R_{k/s_k} = m, s_{k-1} = m') = \frac{x_k(2i-1)}{\delta^2} + \frac{y_k[2b(i, m_i', m) - 1]}{\delta^2} + \frac{1}{2}L_{e2,k}(2i-1) \quad (1)$$

式中:  $\Lambda(\mu_k)$  为软判决输出;  $\delta^2$  为高斯加性白噪声方差; 经信道后接收到的系统信息比特序列、编码单元 1 的校验比特序列和编码单元 2 的校验比特序列分别为  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n)$ ,  $y_1 = (y_{1,1}, y_{1,2}, \dots, y_{1,n})$ ,  $y_2 = (y_{2,1}, y_{2,2}, \dots, y_{2,k}, y_{2,n})$ ;  $R_k = (x_k, y_{1,k}, L_{e2,k})$  表示译码单元 1 在  $k$  时刻的全部输入信息,  $R = (R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_n)$ ;  $L_{ei,k}$  ( $i=1, 2$ ) 为译码器输出的外部信息;  $m$  为输入输出的比特数。

## 1.2 PPM 与 Turbo 码联合编码的译码推导

联合编码模型需对图 1 进行修正, 在输出端加上 PPM 调制器。假定有 2 个交织器, 从图 1 可以看出, 此时信源产生的信号为服从均匀分布的二进制符号, 交织器和 RSC 作用于二进制符号序列。删余压缩器的作用是对各 RSC 输出进行截取, 以获得合适速率的 Turbo 码码流, 并且按照一定的方式将 Turbo 码码流复合成  $M$  进制信号串行输出。这时, 如果仅仅是简单地在发送端将各 RSC 输出的码复合为比特流, 则每  $\log_2 M$  比特映射成一个 PPM 帧, 在接收端进行译码时, 取  $M=4$ ,  $R=1/3$ 。( $x_k^s, x_k^{p1}$ ) 和 ( $x_k^s, x_k^{p2}$ ) 分别映射成为 PPM 的帧, 将接收端对应 ( $x_k^s, x_k^{p1}$ ) 的 PPM 帧光脉冲记为 ( $y_{k1}^{sp1}, y_{k2}^{sp2}, y_{k3}^{sp3}, y_{k4}^{sp4}$ ) [7], 于是有:

$$P(y_k/x_k^s, x_k^{p1}) = \frac{\exp(-K_s - 4K_b)}{y_{k1}^{sp1}! y_{k2}^{sp2}! y_{k3}^{sp3}! y_{k4}^{sp4}!} \prod_{i=1}^4 (K_b + K_s \times \delta(i-j))^{y_{ki}^{sp1}} \quad (2)$$

式中:  $x^s$  为输入序列;  $x_k^{pi}$  为译码器输出序列;

$y_{ki}^{sp1}$  为接受到的光子数;  $K_b$  为无信号时背景干扰光子数;  $K_s$  为有效信号数。而

$$j = x_k^s \times 2 + x_k^{p1} + 1, \quad \delta(i) = \begin{cases} 0 & i \neq 0 \\ 1 & i = 0 \end{cases}$$

对上述数据采用比值求对数方法, 可简化为

$$P(y_k/x_k^s, x_k^{p1}) \propto \prod_{i=1}^4 [K_b + K_s \times \delta(i-j)]^{y_{ki}^{sp1}} \quad (3)$$

假设 PPM 帧传信段在第一个时隙发射光脉冲, 则

$$P(y_k/x_k^s = 0, x_k^{p1} = 0) \propto (K_b + K_s)^{y_{k1}^{sp1}} \times (K_b)^{y_{k2}^{sp2} + y_{k3}^{sp3} + y_{k4}^{sp4}} \propto (1 + \frac{K_s}{K_b})^{y_{k1}^{sp1}} (K_b)^{y_{k1}^{sp1} + y_{k2}^{sp2} + y_{k3}^{sp3} + y_{k4}^{sp4}}$$

因此可以得到  $P(y_k/x_k^s, x_k^{p1}) \propto (1 + \frac{K_s}{K_b})^{y_{k1}^{sp1}}$ 。由此可以看出, 对于译码器 1, 其输出为内部信息  $L_{1k}$  和传给译码器 2 的外部信息  $L_{e2,k}$  之和, 则译码器 1 的输出为

$$L_1(x_k^s) = L_{e2,k}(x_k^s) + L_{1k} \quad (4)$$

同理有:

$$L_2(x_k^s) = L_{e1,k}(x_k^s) + L_{2k} \quad (5)$$

## 2 计算机仿真及结果

在编码效率为 1/2 情况下, 运用 Matlab 软件、二进制 Turbo 码 (译码采用迭代算法 Max-log-map) 和 256 阵列 PPM 调制, 仿真结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在提高频带利用率方面, 运用 PPM 和 Turbo 码统一的编码调制技术比使用 RS 码能极大地降低误码率。

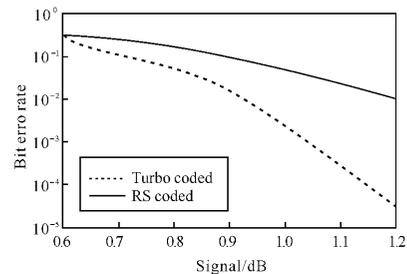


图 3 256 PPM 时 Turbo 码和 RS 码编码对比图

Fig. 3 256 PPM Turbo coded by contrast to RS coded

## 3 结束语

在紫外激光通信中比较适合的方式是采用 PPM 调制手段, 但采用单一方式不能很好地使系统的性能达到最优, 因此提出采用 PPM 与 Turbo 统一编码调制技术的紫外激光通信系统, 它能在不增加信道传输带宽的前提下, 通过提高频带利用率

大大降低系统的误码率。

参考文献:

[1] 周秀丽,胡渝,谭庆贵,等.光谱幅度编码OCDMA系统研究[J].应用光学,2005,26(6):19-26.  
 ZHOU Xiu-li. HU Yu. TAN Qing-gui, et al. Performance research of spectrum encoding OCDMA system[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(6): 19-22. (in Chinese)

[2] 周海燕,敖发良. Turbo码在光PPM通信系统中的性能分析[J]. 桂林电子工业学院学报, 2002, 22(3): 1-4.  
 ZHOU Hai-yan. AO Fa-liang. The performance of Turbo codes in optical PPM communication systems [J]. Journal of Guilin Institution of Electronic Technology, 2002, 22(3): 1-4. (in Chinese)

[3] HAMKINS J. Performance of binary Turbo-coded 256-parray pulse-position modulation [J]. TMO Progress Report, 1999, 8(2): 1-15.

[4] 达新宇,陈树新,王瑜,等. 通信原理教程[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.  
 DA Xin-yu. CHEN Shu-xin. Wang Yu, et al.

Tutorial of Communication Theory [M]. Beijing: Beijing Posts and Telecommunications Publishing Company, 2005. (in Chinese)

[5] 王嘉梅. Turbo码各种译码算法复杂度研究[J]. 无线电通信技术, 2001, 27(1): 59-62  
 WANG Jia-mei. Study on all decoding algorithms of turbo[J]. Radio Communications Technology, 2001, 27(1): 59-62. (in Chinese)

[6] 张焕明, 叶梧, 冯穗力. Turbo码的并行迭代译码[J]. 科学与技术工程, 2005, 5(7): 444-446.  
 ZHANG Huan-ming, YE Wu, FENG Hui-li. Turbo code parallel iteration decoding method [J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5(7): 444-446. (in Chinese)

[7] 李亚军, 邹传云. 光PPM通信的Turbo编解码及性能[J]. 桂林电子工业学院学报, 1999, 19(4): 44-47.  
 LI Ya-jun, ZOU Chuan-yun. The coding, decoding and performance of turbo code in PPM communication [J]. Journal of Guilin Institution of Electronic Technology, 1999, 19(4): 44-47. (in Chinese)

## 环球通用技术公司开发出“无声士兵”监视系统

2006年10月30日,环球通用技术公司(Global General Technologies, GLGT)宣布,其下属的H7安全系统公司已建成第一代“无声士兵”视频监视(Silent Soldier Video Surveillance)系统生产线,实现了“无声士兵”高技术智能监视系统的研发、生产和维护。

“无声士兵”系统以智能视频、先进传感器和无缝通讯技术为基础,通过远距离威胁探测和识别来提供保护,对远距离入侵进行“提前”告警,以便在预防恐怖分子袭击时作出快速反应。该系统不同于现今的安全系统,提早告警装置是预防性的安全系统,而不是对抗袭击的系统。“无声士兵”以预定标准为基准,运用它的目标跟踪和智能视频软件来判断是否是潜在威胁。该系统具有360°视场,可以在白天和夜晚都有效工作。

全球通用技术公司负责人称,新一代“无声士兵”将使得H7公司的产品成为对抗全球恐怖分子更有效的威慑。“无声士兵”已经应用于重要设施的保护。

(昌 强)