

可变码长串行级联码的激光通信系统设计

马春波, 唐承鹏, 敖珺*, 谈新园

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对自由空间光通信易受大气环境的干扰和影响以及不同业务对编码长度的不同需求, 提出了一种可变码长串行级联码的光通信方案, 设计了一套基于现场可编程门阵列(FPGA)为编译码处理核心的大气激光通信系统, 并对系统进行了外场测试, 验证了其可行性。

关键词: 可变码长; 串行级联码; FPGA; 大气激光通信

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)05-0040-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of laser communication system with variable code length serial concatenated code

MA Chunbo, TANG Chengpeng, AO Jun*, TAN Xinyuan

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the interference and influence of free-space optical communication on the atmospheric environment and the different requirements of coding length for different services, an optical communication scheme with variable code length serial concatenated code is proposed. An atmospheric laser communication system based on field programmable gate array (FPGA) as the core of coding and decoding processing is designed, and the feasibility of the system is verified by field test.

Key words: variable code length; serial concatenated code; field programmable gate array (FPGA); atmospheric laser communication

0 引言

自由空间光通信(FSO)是一种新兴的无线通信方式。然而, 光信号在大气信道中传输时, 可能受到湍流、大气环境等干扰, 出现较低的信噪比和较高的误码率, 因此通过纠错编码来增加系统的抗干扰能力变得尤为重要。

香农定理表明卷积码长度越长, 得到的纠错能力越好, 但译码复杂度与计算量随着码长的增加而增大, 因此 Forney 等人^[1]提出串行级联码概念。2005 年, NASA 为了支持火星演示系统, 提出了串行级联脉冲

位置调制(SCPPM)的深空光通信编译码系统^[2]。串行级联码与其它纠错编码相比, 它通过 2 次或者更多次较短的编码组合形式的方法来获得长码, 类似 Turbo 码可以进行迭代译码处理, 具有更强的纠错突发和随机错误的能力。脉冲位置调制(PPM)是大气激光通信主要的调制方式, 具有较高的功率利用率和抗干扰能力强的优点。至今, 串行级联码在微波领域的 CDMA2000 和 WCDMA 语音编码中使用, 但是在光通信领域, 串行级联码的研究大多处于理论阶段。由于传统串行级联码的固定长度交织器不能动态地适应信息码长变化, 无法满足各应用领域(例如音频、视频和文件等)光通信码长的要求。针对以上缺点, 并同时应对 FSO 系统中外界环境的干扰引起随机错误和突发的情况, 本文提出一种基于可变码长串行级联码的光通信方案, 设计一套大气激光通信系统并进行外场测试。

收稿日期: 2018-12-03。

基金项目: 广西自然科学基金项目(项目编号: 2018JJA170092)资助。

作者简介: 马春波(1975-), 男, 教授, 博士后, 硕士研究生导师, 先后主持和承担国家自然科学基金、电子部重点和企、事单位合作等科研项目 20 余项; 主要从事光通信技术、通信系统安全技术、网络安全方面的研究工作。

* 通信作者: 敖珺(E-mail: junjunao1@263.net)。



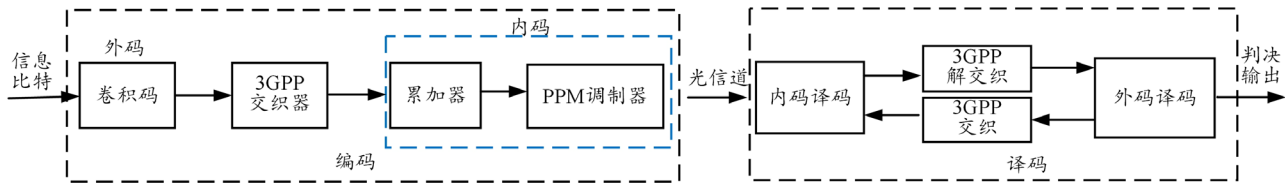


图1 串行级联码编译码原理框图

1 基于 PPM 串行级联码的编译码技术

串行级联码编码分别由外码结构、交织结构和内码结构串行组成。其中,外码结构为一个短约束长度的卷积码,交织结构位于外码和内码结构之间,内码结构为累加器和 PPM 组成的 APPM (Accumulate PPM)。译码分别由内码译码结构、解交织、交织和外码译码结构 4 部分组成。编译码原理框图如图 1 所示。

1.1 串行级联码编码

串行级联码外编码器最佳选择是递归系统卷积码,约束长度尽可能短,以减少不必要的译码开销^[3],因此串行级联码外码选择码率为 1/2 的 (2,1,2) 递归系统卷积码。内码是一个简单的累加器与 PPM 组合的结构,可以看成码率为 1 的特殊卷积码。PPM 降低了平均光功率要求,同时又具有较强的抗干扰能力,所以串行级联码在 FSO 领域的应用研究具有重要的现实意义^[4]。

交织器的选用是决定码长的关键,它的目的是将输入的数据打散来对抗信道的随机突发错误,最大限度地改变信息结构但不改变信息内容。它的形式多样,最常见的有随机交织、规则交织和不规则交织 3 种。在串行级联码系统中需要将信息比特尽可能长地关联,从而构成长码,我们选用的 3GPP 交织器^[5],它可以根据码长参数实时设定,提高了译码器设计的灵活性和适应了不同应用领域(音频、视频和文件等)通信的码长要求。在 3GPP 交织器算法中,确定码长的长度,可以得到串行级联码编译码的交织器算法,根据算法得到相应的交织参数。交织过程中经外码编码输入的比特按矩阵形式填充,分别进行行内和行间排列,最后按照一定规则从矩阵输出。

1.2 串行级联码译码

串行级联码译码器的结构如图 2 所示,它由 2 个

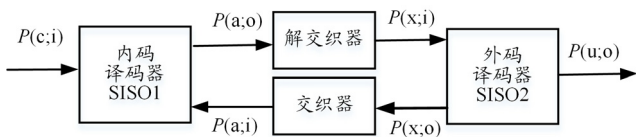


图2 串行级联码译码框图

软输入/软输出(SISO)译码模块、交织器和解交织器串行级联组成,采用最大后验概率译码算法。内码译码器将接收到的码字符号的对数似然比 $P(c;i)$ 作为输入,计算更新后得到信息符号的对数似然比 $P(a;o)$ 输出,经过解交织后成为外码译码器的码字符号的对数似然比 $P(x;i)$ 输入。外码译码器输入/输出结构与内码译码器一样,其中,外码译码器输出信息符号的对数似然比 $P(x;o)$ 经交织器后得到内码的信息符号的对数似然比 $P(a;i)$ 输入,从而实现迭代译码。最后对对数似然比 $P(u;o)$ 进行硬判决输出译码信息。

光电探测器的输出可以被建模为泊松过程^[6],当接收到 k 个光子数时,其中脉冲时隙光子数为 n_s ,噪声光子数为 n_b ,所以发送 0 和 1 接收到 k 个光子的概率密度分布为:

$$p(k|0) = \frac{n_b^k e^{-(n_s+n_b)}}{k!} \quad (1)$$

$$p(k|1) = \frac{(n_s+n_b)^k e^{-(n_s+n_b)}}{k!} \quad (2)$$

接收 PPM 时隙的信道对数似然比 $\pi(c_{k,j})$ 为:

$$\pi(c_{k,j}) = \ln \frac{p(y_{k,j} | c_{k,j}=1)}{p(y_{k,j} | c_{k,j}=0)} = y_{k,j} \ln \left(1 + \frac{n_s}{n_b} \right) \quad (3)$$

其中, $c_{k,j}$ 和 $y_{k,j}$ 分别表示第 k 个 PPM 序列中第 j 个时隙的脉冲符号和接收值,为了实现迭代译码算法的增益,需要计算和存储每个 PPM 符号时隙中的对数似然比。

最大后验概率译码算法是基于卷积码的网格路径图来实现的,其核心思想是通过计算路径矢量寻找最大路径得到译码序列,并可以纠正传输过程中的错误码字。以内码 4PPM 为例, S0 和 S1 分别表示寄存器的状态, 10/11 表示输入序列 10 经内码和调制输出序列 11, 内码译码网格路径如图 3 所示。可以看出,输入信息与输出的信息序列是有对应关系的。正是由于这种对应的关系,通过计算网格图各分支度量实现卷积码的译码,最终根据接收到的码字判断输出的信息序列。

内码译码网格图中共有 2 个状态节点,每个节点

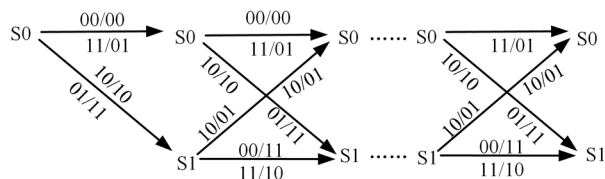


图3 内码译码网格路径图

分别有4条支路路径的输入和输出。在同一时刻不同状态节点中,我们分别计算0、1比特的最大对数似然函数的累加值,并对其进行比较,保留最大似然值对应的支路路径。以此类推,计算一帧数据不同时刻的支路路径,经过 $N-1$ 个结束信息后,即可得到与发送序列最相似的译码路径^[7]。同理,外码译码器根据卷积码编码得到译码网格路径,计算流程与内码相似。

2 可变码长串行级联码的大气激光通信系统的设计

2.1 系统方案设计

本文设计的激光通信系统由发送端和接收端两部分组成,系统框图如图4所示。发送端主要由现场可编程门阵列(FPGA)编码模块、激光器(LD)驱动模块、激光器和PC机组成;接收端主要由光电检测模块、模数转换(A/D)采样模块、FPGA译码模块和PC机组成。

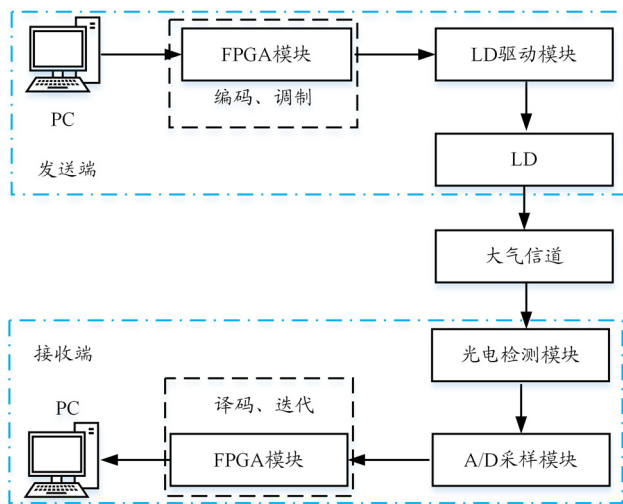


图4 光通信系统硬件框图

在发送端,PC机通过串口发送数据至FPGA处理板进行串行级联编码,将编码好的数据封装成帧并进行PPM后发送;在接收端,光电探测器将光信号转换为电信号,并对其进行滤波放大后送给FPGA进行时

隙同步、译码、迭代和判决,最后通过串口输出到上位机进行误码分析。

2.2 系统硬件设计

串行级联码激光通信系统选用ALTERA公司的EP3C40Q240C8型号的FPGA作为信号处理核心。A/D采样模块的芯片是CA3318,其量化位宽为8位,最大时钟采样频率为15MHz。光电检测模块采用HAMAMATSU公司高增益的雪崩光电二极管(APD)检测光信号,由于长距离激光通信要求和大气湍流影响,因此需要对光电检测模块输出的信号进行滤波和小信号放大处理。

2.3 软件设计与数据帧结构

本文设计的激光通信系统软件主要分为FPGA编码、译码两部分,整个系统的时钟工作频率为50MHz。在发送端,FPGA负责数据的缓存、编码、交织和调制,然后按照帧协议进行封装发送出去。在接收端,FPGA负责读取A/D采集的数据、帧头检测、时隙纠正、迭代译码和判决处理,最后将译码后的数据传入上位机进行误码分析。

数据帧格式包括巴克码帧头序列、时隙调整序列和信息序列。其中,巴克码帧头序列由10个16PPM符号{6,9,5,11,3,15,4,15,12,7}组成,数字代表脉冲信号在16PPM调制中的时隙位置^[8],具有尖锐自相关函数特性;时隙调整序列由8比特数据构成,用于纠正采样判决时产生偏移的时隙;信息序列由编码调制后的比特数据构成。帧结构如图5所示。

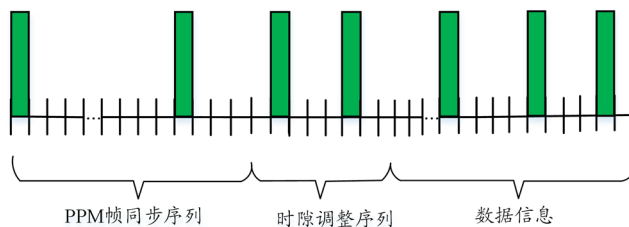


图5 数据帧结构

3 系统仿真及测试分析

为了对不同码长的串行级联码进行误码分析,仿真时采用4PPM、3GPP可变码长交织器和Max-Log-MAP译码算法,仿真性能如图6所示。结果表明:采用串行级联码的性能明显远远优于未编码的通信系统性能。

为了测试系统的稳定性和可行性,我们按照设计方案搭建了系统并进行了外场通信实验。测试通信链路长约2km,帧数据长度为6字节(可根据不同业务确

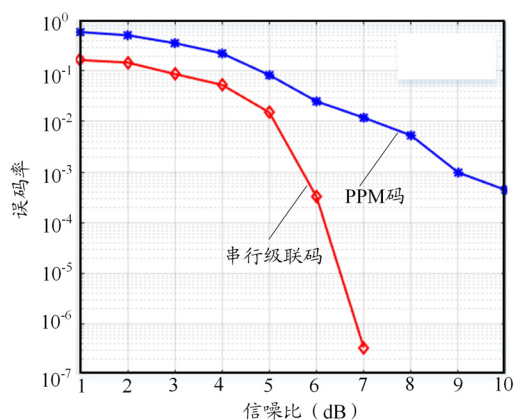


图6 串行级联码算法性能仿真

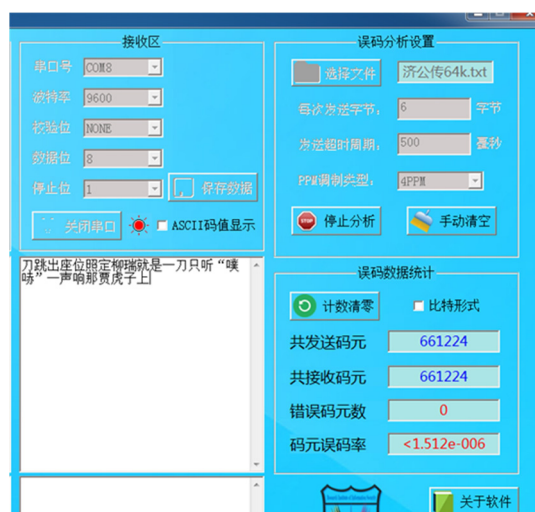


图7 误码率测试结果

定帧长),采用4PPM。为了准确测试系统误码率和丢帧率,基于本系统设计了误码测试的上位机软件,该软件可以设定发送的时间间隔和数据长度。在发送端设置好参数,然后加载发送信息文本,接收端加载同样的信息文本,并根据下位机传回的帧序号提取测试文本的数据与接收到的数据进行对比,判断得到实时

的误码率和丢帧数,误码测试结果如图7所示。测试结果表明:晚上至次日早晨的测试过程中误码率低于 10^{-6} ,白天正中午太阳光较强时误码率稳定在 10^{-5} 左右。

4 结束语

本文提出了一种可变码长的串行级联码编译码方法,该方法可以满足不同应用领域对光通信码长的需求,对比仿真了不同码长的串行级联码性能。同时,基于该编译码方法设计了一套大气激光通信系统,详细介绍了系统的软硬件设计,并对系统进行了外场通信测试,达到大气激光通信要求。

参考文献:

- [1] FORNEY, DAVID G. Concatenated codes [J]. Collection Iris, 1965, 4 (2):8374-8375.
- [2] 李皓. 深空光通信中的 SCPPM 编码性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [3] MOISION B, HAMKINS J. Deep-space optical communications down-link budget: modulation and coding [J]. IPN Progress Report, 2003, 42 (154): 1-28.
- [4] 朱乐君,张江鑫. 基于 FPGA 的无线光通信 PPM 调制系统的设计[J]. 光通信技术,2006,30(12):57-59.
- [5] 3GPP technical specification groups. GSM/EDGE channel coding: 3GPP TS 45.003 v14.2.0 [S]. Lucioles: 3GPP Mobile Competence Centre, 2017.
- [6] MOISION B, HAMKINS J. Coded modulation for the deep-space optical channel: serially concatenated pulse position modulation [J]. The Interplanetary Network Progress Report, 2005, 42(161): 1-25.
- [7] 赵宏宇. Turbo 编译码系统高效 MAP 译码,无数据辅助 SNR 估计与多项式交织器设计[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [8] GAGLIARDI R, ROBBINS J, TAYLOR H. Acquisition sequences in ppm communications [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1987, 33(5): 738-744.

2019 年征订启事

光通信技术 月刊

邮发代号: 48-126

定 价: 16 元/册;192 元/年

订 阅: 全国各地邮局

为增强读者的阅读舒适感,2019 年《光通信技术》全刊采用铜版纸彩色印刷。