

基于 Raptor10 码的自由空间光通信系统设计

敖 珺,谈新园,马春波,唐承鹏

(桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

摘要: 大气湍流是自由空间光通信系统的主要限制因素,会造成光束的强度闪烁和相位起伏。为了应对大气湍流及背景光对无线激光通信的影响,设计并实现了一套无线激光通信系统。该系统采用数字喷泉码 Raptor10 码来提高通信系统的可靠性及抗干扰能力。此外还使用了巴克码作为帧头以及脉冲位置调制(PPM)方式,并以现场可编程门阵列(FPGA)为核心完成了数据的编码、调制、帧同步、解调及译码。其发射光源为波长 532 nm 激光,探测器采用 Silicon Sensor 公司的单点 APD。最后在 2 km 的自由空间对整个无线激光通信系统进行测试,测试结果稳定可靠。

关键词: 自由空间光通信; 信道编码; Raptor 码; 无速率码; FPGA

中图分类号: TN914.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0918004

Design of free space optical communication system based on Raptor10 code

Ao Jun, Tan Xinyuan, Ma Chunbo, Tang Chengpeng

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

Abstract: Atmospheric turbulence is a major limiting factor in free-space optical communication systems, causing intensity flicker and phase fluctuations in the beam. In order to cope with the influence of atmospheric turbulence and background light on wireless laser communication, a wireless laser communication system was designed and implemented. The system used the digital fountain code Raptor10 code to improve the reliability and anti-interference ability of the communication system. In addition, the Barker code was used as the frame header and pulse position modulation (PPM) mode, and the data coding, modulation, frame synchronization, demodulation and decoding were completed with the field programmable gate array (FPGA) as the core. The emission source was a 532 nm laser and the detector used a single point APD from Silicon Sensor. Finally, the entire wireless laser communication system was tested in 2 km of free space, and the test results were stable and reliable.

Key words: free-space optical communication; channel coding; Raptor code; rateless code; FPGA

收稿日期:2019-04-05; 修订日期:2019-05-03

基金项目:广西自然科学基金(2018JJA170092)

作者简介:敖珺(1978-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事通信信号处理方面的研究。Email:jununaol@263.net

0 引言

自由空间光(Free Space Optical, FSO)通信在诸多领域具有很强竞争力,其数据传输速率高、低干扰、易部署和免许可证操作等优势使得它在与骨干网络的最后一公里连接方面极具优势^[1]。但是,在长距离自由空间光通信中通信的稳定性和可靠性受到大气传输介质的影响。大气湍流会使光束穿过自由空间时发生光束漂移、相位起伏、闪烁等畸变^[2]。利用前向纠错码(Forward Error Correction, FEC)和自动重传请求(Automatic Repeat reQuest, ARQ)可以解决湍流引入的时域相关性。但是在信道状况比较恶劣时,ARQ重传容易出现反馈风暴,致使吞吐量迅速减小;FEC技术(如LDPC码^[3])又存在编码速率固定,译码复杂度高的缺陷,很难应对实时变化的大气激光信道^[4]。

FSO通信的实际应用场景往往是收发两端信道不确知的,此外还要应对复杂的空时变特性与空时域相关约束以及各种噪声源(背景光,镜头和热噪声)的影响。数字喷泉码是一种无编码速率的约束码,它的自适应链路速率适配、无码率属性使它不需要收发双方确知任何信道状态信息就能自动消除干扰的影响,动态适配通信链路的变化。为了进一步提升系统性能可以将数字喷泉码(Luby Transform, LT^[5]码)与FEC技术相结合。Raptor10码通过在LT码前端

级联预编码(LDPC码)矩阵,可有效提升源数据译码成功率,并降低译码开销和译码复杂度。目前Raptor10码已被包括便携/手持终端数字视频广播传输标准和第三代通信合作伙伴计划(3GPP)在内的多项国际标准采纳,成为近几年来编码领域的研究热点。

国内对信道编码在FSO通信中的应用研究已经有比较深入的研究。赵春明等分别为RF/FSO信道以及泊松-脉冲位置调制信道对LDPC码进行优化设计;柯熙政等对FSO通信中的空时网格码、分层空时码、差分空时码开展了一系列研究。国内的通信学者也对数字喷泉码的应用和研究提供了很多创新思路并取得了不错的进展。但是,关于数字喷泉码在自由空间光通信的研究大都停留在理论研究和算法性能改进方面。

文中设计了一套基于FPGA平台的无线激光通信系统,并在2km的距离上进行了测试。测试结果表明,Raptor10码结合强度调制/直接检测技术^[6]以及使用巴克码序列做为帧头可以有效提升系统在大气湍流环境下的性能,可有效对抗湍流引起的时域扰动。

1 无线激光通信系统总体设计

基于Raptor10码的无线激光通信系统整体框图如图1所示,主要包括FPGA模块、激光器驱动模块、连续激光器、光电检测模块、滤波放大模块和数

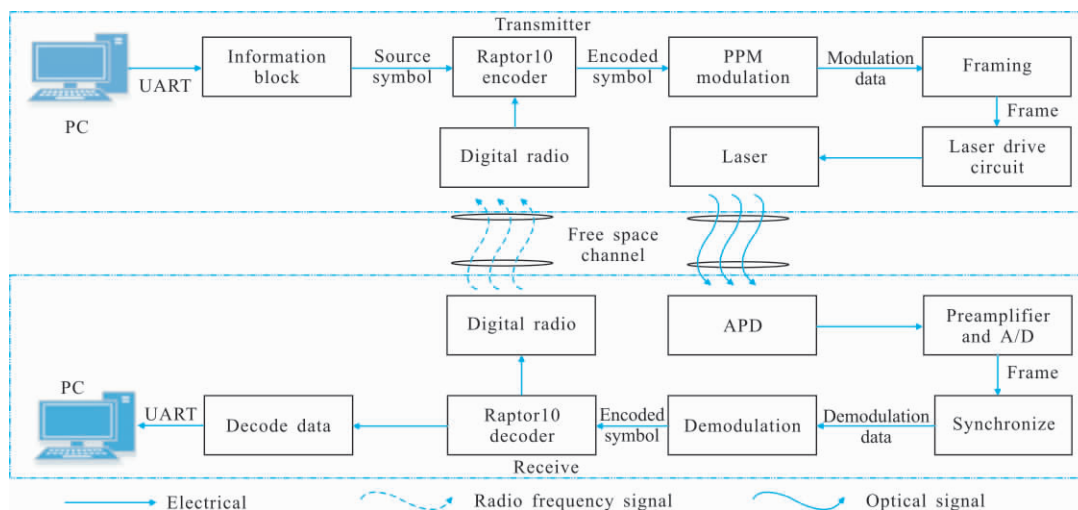


图 1 大气激光通信系统框图

Fig.1 Atmospheric laser communication system block diagram

传电台模块。发射端 FPGA 模块将来自 PC 的信息平分为 k 个源符号,接着对其进行 Raptor10 码编码,再对每组编码数据加上 ESI(Encoding symbol ID)后添加循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)并加入帧头数据进行组帧。最后对整帧数据进行脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)后通过激光器驱动模块驱动激光器发射出去。接收端光电探测模块先将激光信号转换为电信号并送入滤波放大模块对其滤波放大,然后对其进行模数转换并送入 FPGA 进行同步和解调得到数据帧,之后对数据帧进行 CRC 校验,结果正确则保留此帧否则丢弃。当正确接收到 $k+e$ 个编码数据后开始译码, e 是冗余符号数量。译码成功则将译码数据通过串口传回 PC 端做误码对比并通过数传电台向发送端发送反馈信息,发送端接收到反馈信息后重新开始下一次编译码;若失败则重新接收 e 个编码符号与之前的接收的编码数据一起重新译码,此过程最多重复 3 次,连续译码 3 次依然失败,则跳过此次译码并发送反馈信号告诉发射端重新开始下一次编译码。

2 Raptor10 码编译码算法

Raptor10 码编码过程^[7]包括两个阶段:生成预编码符号和编码符号。先将编码数据 C' 分为 k 个源符号,接着生成大小为 $l=k+s+h$ 的预编码符号 C 。参数 s 和 h 分别表示低密度奇偶校验(LDPC)符号的数量和高密度奇偶校验(High-density Parity-check, HDPC)符号的数量。最后使用预编码符号进行 LT 编码,即可不断生成编码符号 S ,并按顺序为每个编码符号生成编码符号 ID(ESI)。将编码符号与 ESI 一起作为数据传输的有效载荷。通常采用循环冗余校验(CRC)码来确保接收端数据有效载荷的正确性。假设每个编码符号没有错误且 ESI 已知。给定 $n'(n'=k+e)$ 个接收的编码符号,通过从已知的预编码矩阵 A 中恢复出预编码符号 C 来启动解码,该预编码矩阵 A 取决于接收的 ESI,以及 $D(D=(0, \dots, n'))$,其由 $s+h$ 个 0 符号和 n' 个接收的编码符号组成。预编码符号 C 由对预编码矩阵 A 求逆后和 D 相乘可得,如公式(1)和(2)所示。

$$C=A_{m \times l}^{-1} \times D \quad (1)$$

$$A_{m \times l}^{-1} = \begin{pmatrix} G_{LDPC} & I_s & 0_{s \times h} \\ & G_{HDPC} & I_h \\ & & G_{LT(1, \dots, n')} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $m=s+h+n'$,子矩阵 I_s 和 I_h 为单位矩阵; $0_{s \times h}$ 是全 0 子矩阵; G_{LDPC} 是由 LDPC 编码符号生成的 $s \times k$ 矩阵; G_{HDPC} 是由 HDPC 编码符号生成的 $h \times (k+s)$ 矩阵; G_{LT} 是由 LT 编码符号生成的 $n' \times l$ 矩阵,其中第 i 行由第 i 个接收的编码符号的 ESI 确定。由公式(1)得到预编码符号 C 后,源符号 C' 计算如下:

$$C'=G_{LT(1, \dots, k)} \times C \quad (3)$$

3 基于 FPGA 的发射端/接收端模块设计

与其他硬件平台相比,FPGA 可定制、可重构以及可以并行处理数据的特点,使得其具有运行速率快、设计周期短、开发成本小和可靠性高等优势^[8]。系统信号处理板的主控芯片采用 ALTERA 公司 EP3C40Q240C8。文中构建的无线激光通信系统的编译码、存储、帧同步、调制解调等处理均是基于 FPGA 开发平台实现的,主要从发射端和接收端两方面展开。

发射端 FPGA 设计模块主要完成编码数据的接收、Raptor10 码编码、对编码数据加入 CRC 校验位、成帧、PPM 调制及采集接收端发出的反馈信号等工作。接收端 FPGA 设计模块主要完成数据的采样、同步、解调、Raptor10 码译码和产生反馈信号等工作。

4 系统帧结构设计与帧同步方式

此系统采用 PPM 调制,PPM 调制使用脉冲的位置来承载信息。与 OOK 调制相比,其具有功率利用率高、抗干扰能力强以及实现电路简单等优势,是目前无线激光通信常用的调制方式之一。发送端使用的帧结构如图 2 所示。帧头数据采用性能良好且广

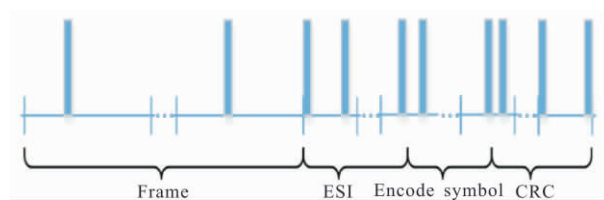


图 2 帧结构示意图
Fig.2 Frame structure

泛使用的巴克码序列^[9]。该序列具有 PPM 结构和尖锐的自相关特性,为了更好应对自由空间中大气环境和湍流对光信号的影响,采用 12 个 16-PPM 巴克

码符号作为帧头数据,符号序列越多容错率越高,相应的会降低通信效率,具体的符号为{3,8,15,2,3,16,6,9,5,15,4,15},其中数字代表每个 16-PPM 符号中脉冲的位置。为了提高信息传输效率以及帧头在数据流中的唯一性,后续信息采取 4-PPM 调制方式。

在长距离激光通信链路中,受大气湍流的影响,到达光电探测器的光脉冲会严重衰减。传统的应对方式是将光电转换后的电信号经过脉冲恢复电路得到标准的脉冲信号。这种方式简单易实现,但是,该电路是需要一个固定的判决门限,只有脉冲幅值大于该门限时才能输出正常的脉冲信号,当信号脉冲幅值低于门限时就会判错。针对上述问题,采用一种比较采样累加值的方式来原因脉冲的位置。该方法无须设定判决门限,因此可以避免因脉冲幅值低于判决门限而导致的误判。

基于比较采样累加值判别帧头的方式^[10]如图 3 所示。因为帧头符号中脉冲位置是已知的,当帧头完全匹配时存储帧头信息的移位寄存器中存储帧头脉冲的地址也是已知的。简而言之,只要能正确判断出存储帧头脉冲地址里存储的是 PPM 脉冲信息即帧同步成功。系统的 A/D 采样时钟是信号的 5 倍,因此 PPM 信号的每个时隙都会有 5 个采样值,采用宽度为 5 个采样点的滑动窗口分别从存储脉冲信息的位置向左右移位一个采样点进行取值并累加。只要中间采样点的累加值大于左右两侧即可代表当前时隙具有信号脉冲,为了防止误判,可以使滑窗向左右多移几次扩大比较范围,当帧头中所有脉冲同时满足判决条件时即帧同步成功。数据位采用比较 4-PPM 信号 4 个时隙中 5 个采样点的累加值并找出最大值所在时隙的位置,该位置即信号脉冲的位置所在。

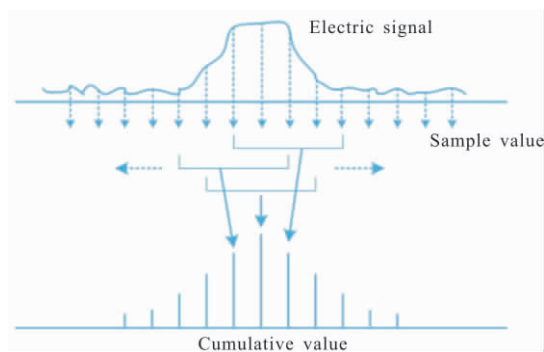


图 3 基于采样累加值的两端比较判别方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of two-way comparison discrimination method based on sampled accumulated value

5 系统测试分析

此次测试按照图 4 设计方案搭建了系统,在大约 2 km 的距离上进行了误码率以及吞吐量的测试,表 1 总结了 Raptor10 编解码和通信系统的参数。使用误码分析软件可以设定发送数据的时间间隔和每次发送的字节数,并进行误码对比。测试系统误码率可以达到 10^{-7} ,计算结果表明此系统的性能完全满足通信需要。



图 4 实验装置框图

Fig.4 Block diagram of the experiment

表 1 Raptor10 编解码系统参数

Tab.1 System parameters of Raptor10-codes

Parameter	Symbol	Value
Number of source symbol	K	10
Symbol size/bit	n	32
Column size of matrix	L	23
Row size of matrix	m	26
Encoding symbol ID/bit	ESI	13
Decoding clock frequency/MHz	clk	100

此次测试中专门将译码成功时用到的最后一个编码数据包的 ESI 由串口传输给误码分析工具显示并保存。理论上译码端正确收到 $K+e$ 个编码数据包就可以正确译码,测试中 K 为 10, e 为 3。在接收端 FPGA 将数据解调之后需进行 CRC 校验,若数据出错会直接将整帧数据丢弃,因此当误码分析软件中的 ESI 为 12(ESI 从 0 开始计数)说明在这次通信中没有丢帧和出错,ESI 大于 12 表明在此次通信中有丢帧或数据出错存在,序号值越大出错越多。因此可以根据

ESI 的大小来反映当前通信过程中信道的优劣。

图 5 展示了在实际天气条件下 Raptor10 编码在 FSO 链路的实时吞吐量以及译码成功时最后一个 ESI。测试在 2018 年 4 月 15 日晚 10 点~4 月 16 下午 8 点,持续时间约为 22 小时,期间天气状况良好。从图 5 观察可得测试期间解码器大致工作在两种状态下:链路稳定和链路不稳定。在中午九点到下午五点期间由于背景光噪声和大气湍流的影响使得接收光信号发生畸变导致丢包率增加,此时该链路不稳定吞吐量差别很大。晚上背景光和大气湍流对信号光的影响很小此时可以看到整个通信链路很稳定,丢帧少,吞吐量也很稳定。如图 5 所示,链路吞吐量与最后一个 ESI 序号值统计趋势正好相反,ESI 值越大说明通信中因信道干扰而出错的编码数据包越多,链路吞吐量越小。这说明 Raptor10 码在信道比较糟糕的情况下可通过自动牺牲通信效率来保证通信的可靠性,由此可知 Raptor10 编码的无码率特性使链路能跟踪信道的变化,从而在保证可靠性的同时最大限度提高信道利用率。此外,从 ESI 序号统计曲线可以看出在白天因数据出错而丢弃编码数据包的频率和数量始终维持一个较高的状态,这说明在此期间不加信道编码的系统误码率会相当高,通信可靠性极差。

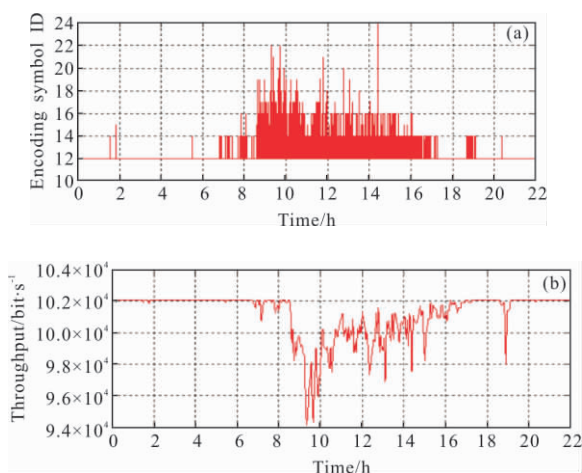


图 5 Encoding symbol ID(a)和吞吐量统计(b)

Fig.5 Encoding symbol ID (a) and throughput statistics (b)

6 结论

文中介绍了一种基于 FPGA 的 Raptor10 编码在 FSO 链路上的激光通信系统,并在 2 km 的距离上测

试了系统的稳定性和可行性。该系统采用 Raptor10 编码、PPM 调制以及使用巴克码帧头相结合的设计方案并通过误码率测试验证了系统的可行性。与此同时从译码成功时最后一个 ESI 和吞吐量的统计数据可以发现,Raptor10 编码的无码率特性使链路能完美跟踪信道的变化来最大化信道利用率。未来的工作重点在于优化矩阵求逆算法,因为它消耗大量的硬件资源,这限制了源符号 k 的数量。此系统参数(如译码开销、符号大小和分组大小)是根据硬件平台的资源量而选择的,接下来可以优化系统参数或者采用更多资源的硬件平台进一步提高系统的通信性能。

参考文献:

- [1] Lu Min, Liu Linyang, Hranilovic Steve. Raptor coded free space optical communications experiment [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(6): 398-407.
- [2] Wang Yi, Yang Shuai, Ma Jing, et al. Performance analysis of coherent OFDM system in free space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0722003. (in Chinese)
- [3] Ao J, Liang J, Ma C, et al. Optimization of LDPC codes for PIN-based OOK FSO communication systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(9): 727-730.
- [4] Zedini E, Chelli A, Alouini M S. Unified performance analysis of hybrid-ARQ with incremental redundancy over free-space optical channels [C]//IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, 2014: 774-778.
- [5] Luby M. LT codes [C]//Proceedings of 43rd Annual IEEE Symposium On Foundations of Computer Science (FOCS), 2002: 271-280.
- [6] Han Liqing, Wang Qi, Shaida Katsounri. Performance of free space optical communication over gamma-gamma at atmosphere turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1318-1332. (in Chinese)
- [7] Shokrollahi A, Luby M. Raptor codes [J]. *Foundations and Trends in Communications and Information Theory*, 2011, 6(3/4): 213-322.
- [8] Shriharsha Koila, Goutham Simha G D, Muralidhar Kulkarni, et al. FPGA implementation of a BCH Codec for free space optical communication system [C]//International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics

- (ICACCI), 2014: 1822–1826.
- [9] Gagliardi R, Robbins J, Taylor H. Acquisition sequences in PPM communications[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1987, 33(5): 738–744.
- [10] Mohammad Asaduzzaman, Mohammad Asif, Ibna Mustafa, et al. Performance analysis of a multi-hop free space optical link over weak atmospheric turbulence channel for M-Ary PPM modulated signal [C]//IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP), 2017: 247–251.