

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.230100.

光通信系统与网络技术

张晓乐,谭晓川,李哲. 空间激光通信中带 LDPC 编码的网络业务传输设计[J]. 光通信研究, 2024(6):230100.

Zhang X L, Tan X C, Li Z. Design of Network Service Transmission with LDPC Coding in Space Laser Communication [J]. Study on Optical Communications, 2024(6):230100.

空间激光通信中带 LDPC 编码的网络业务传输设计

张晓乐,谭晓川,李 哲

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 河北省光子信息技术与应用重点实验室,石家庄 050081)

摘要:【目的】无线激光通信受大气衰减和大气湍流等因素影响会产生一定程度的误码,往往需要增加纠错编码来提高信号传输质量。低密度奇偶校验码(LDPC)具有接近香农极限的性能,其纠错能力随码字长度的增加会显著提高。对于信息段长度较大的编码,每个编码对应一个以太网帧时,其编解码效率会受到严重影响。对以太网帧的传输方法进行设计,使得不同速率和长度的以太网帧均可充分发挥编解码效率,对于提高以太网数据源的传输速率至关重要。【方法】文章在数据位宽为 16 bit 的 LDPC(4 050, 2 700)编码基础上,对千兆网业务传输方法进行设计。对各个模块之间功能进行清晰划分,在模块内部采用状态机进行设计,使得设计过程中出现的问题可以快速定位,具有很好的开发效率。在发射端设定合适的操作周期对以太网帧进行处理,通过组帧、拼包和填充随机序列等操作,使得对于不同帧长和速率的以太网业务均可自适应匹配 LDPC 编码模块信息段长度,使 LDPC 编码的效率得到充分利用。在接收端通过解帧操作即可恢复出各个以太网帧。【结果】最后,文章在 XILINX 的现场可编程门阵列(FPGA)板卡上对设计方案进行了实物验证,使用千兆网测试仪,对不同帧长以太网数据的传输速率进行测试,结果表明其可达到千兆网的极限速率 1 Gbit/s。对视频和文件等不同业务进行测试,均可进行传输。【结论】文章针对信息段长度大于以太网帧长而设计的以太网业务传输方法,能够适应不同长度、速率和业务的以太网数据传输,并充分发挥编/解码模块的效率,满足无线激光通信中对于高速千兆以太网业务传输的需求。

关键词:以太网; 低密度奇偶校验码; 现场可编程门阵列; 激光通信; 高速率

中图分类号:TP393.11 **文献标志码:**A

Design of Network Service Transmission with LDPC Coding in Space Laser Communication

ZHANG Xiaole, TAN Xiaochuan, LI Zhe

(Hebei Key Laboratory of Photonic Information Technology and Application,
The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: 【Objective】Affected by factors such as atmospheric attenuation and atmospheric turbulence, wireless laser communication will produce a certain degree of bit error, and it is often necessary to add error correction codes to improve the signal transmission quality. Low Density Parity Check codes (LDPC) have performance close to the Shannon's limit, and their error-correcting ability will increase significantly with the increase of codeword length. For codes with a large length of information segment, when each code corresponds to an Ethernet frame, its encoding efficiency will be seriously affected. Designing the transmission method for Ethernet frames in a way that allows both different speeds and lengths of Ethernet frames to fully leverage the encoding and decoding efficiency is crucial for enhancing the transmission rate of Ethernet data sources. 【Methods】Based on the LDPC (4 050, 2 700) encoding with a data bit width of 16 bit, this paper designs a gigabit network service transmission method. The functions of each module are clearly divided, and the state machine is used in the design of the module. Therefore, the problems in the design process can be quickly located, and the development efficiency is very high. Setting an appropriate operational cycle at the transmitting end to process Ethernet frames, through operations such as framing, packet assembly, and filling with random sequences, enables Ethernet traffic of different frame lengths and rates to adaptively match the information segment length of the LDPC encoding module, thereby fully utilizing the efficiency of LDPC encoding. Each Ethernet frame can be finally recovered by deframing at the receiving end. 【Results】Finally, this article verified the design scheme on the Field Programmable Gate Array (FPGA) board of XILINX, and tested the transmission rate of Ethernet data with different frame lengths by using a gigabit network tester. The results show that the data rate can reach the limit rate of 1 Gbit/s. Afterwards, different services such as video and files are successfully tested. 【Conclusion】The article proposes an Ethernet service transmission method specifically designed for scenarios where the information segment length exceeds the Ethernet frame length, enabling it to accommodate Ethernet data transmission with varying lengths, rates, and types of services. The efficiency of the encoding module can be fully utilized to meet the demand for high-speed Gigabit Ethernet service transmission in wireless laser communication.

Key words: Ethernet; LDPC; FPGA; laser communication; high speed

收稿日期:2023-09-03; 修回日期:2023-10-14; 纸质出版日期:2024-12-10

作者简介:张晓乐(1994—),男,河北石家庄人。硕士,主要研究方向为无线激光通信和终端基带信号处理等。

通信作者:张晓乐,硕士。E-mail:zhang_xiaole309@163.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

0 引言

无线激光通信系统具有带宽宽、通信速率高和保密性好等诸多优点,可以传输不同速率的数据、语音和视频等信息,具有广阔的应用前景^[1-4]。然而,光信号在大气信道中传输时,可能会受到大气衰减效应和大气湍流效应等影响,使通信链路出现较低的信噪比和较高的误码率,限制通信的距离和性能,因此需要增加纠错编码来提高系统的抗干扰能力^[5-7]。低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check code, LDPC)编码具有接近香农极限的性能,是抑制大气湍流效应的有效手段之一,可以有效提高通信质量,被广泛应用于无线激光通信中^[8-11]。本文在数据位宽为 16 bit 的 LDPC(4 050, 2 700)编/解码基础上对基带传输系统进行了设计,采用对以太网数据透明传输的方式,解决了无线激光通信中需要传输视频和文件等各种类型千兆以太网业务的需求^[12]。

由于以太网业务的帧长小于编码模块信息段长

度,且不同以太网业务的帧长不同,若将每一帧以太网数据填充至编码模块信息段进行处理,则随着以太网业务帧长的降低,编/解码的利用率越来越低,会严重限制以太网数据的传输带宽。本文基于 XILINX 公司的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)硬件作为平台,对以太网数据的传输方式进行了设计。经实验验证,对于任意长度的以太网数据,均可达到 1 Gbit/s 的传输速率,并且当网络速率很低时,每一帧以太网数据均可单独进行发送,可实现视频和文件等不同业务的传输。

1 基带处理系统框架

无线激光终端基带处理系统框图如图 1 所示,主要包括千兆以太网数据源接口模块、跨时钟处理单元、组帧模块、拼包模块、位宽转换模块、加随机序列模块、LDPC 编/解码模块、解帧模块和千兆比特收发器(Gigabit Transceiver Extreme, GTX)天线接口模块。

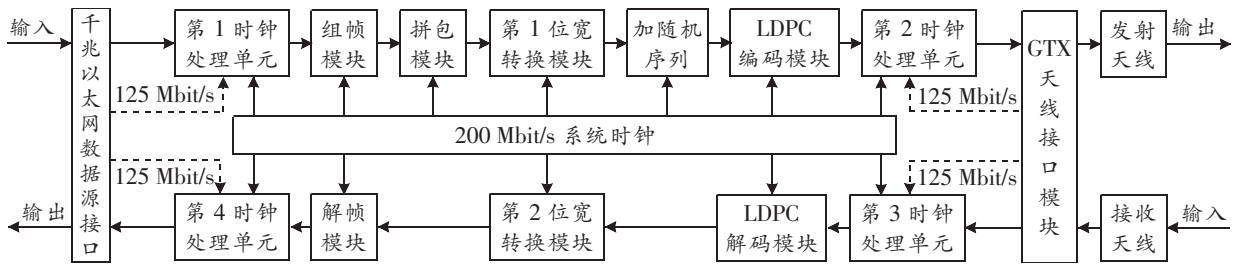


图 1 无线激光终端基带处理系统框图

Figure 1 Block diagram of wireless laser terminal baseband processing system

上位机的以太网数据通过以太网接口输入到 FPGA 内部的千兆网接口模块收端,千兆网接口模块输出时钟频率为 125 Mbit/s、位宽为 8 bit 的网络数据。网络数据通过第 1 时钟处理单元将数据转换到 200 Mbit/s 系统时钟进行后续处理。

组帧模块为网络数据帧添加帧头和帧尾,帧头用于接收端从每一包数据中恢复出各个网络数据帧。LDPC 编/解码模块位宽为双字节,当以太网数据帧长为奇数个字节时,在帧尾添加一个字节数据。

拼包模块将一个或多个网络数据帧拼为一个较大的网络数据包进行处理,提高了编解码模块的利用率。第 1 位宽转换模块将数据位宽由字节转换为字。加随机序列模块将每一包网络数据填充至 LDPC 编码模块信息段所需长度。

根据天线设计要求,GTX 天线接口模块空口速率为 2.5 Gbit/s,带有 8B/10B 协议,因此 GTX 天

线接口模块的有效数据速率最高为 2 Gbit/s。GTX 天线接口模块位宽选择 16 bit,其输出的用户时钟为 125 Mbit/s。在保证系统稳定性前提下,为提高编码速率和顺利对接 GTX 天线接口模块,LDPC 编码模块位宽选择 16 bit,工作时钟为 200 Mbit/s。根据数据源和天线的最高速率可知,LDPC 的编码效率需要大于 1/2,本文选取的 LDPC(4 050, 2 700)编码效率为 2/3。以太网帧的最大长度为 1 518 字节,当拼包模块的输入长度刚好大于 1 350 字节时,其拼包效率最低,约为 3/4,根据 GTX 最高速率可知,此时数据源可以达到的速率约为 1 Gbit/s。

第 2 时钟处理单元将 LDPC 编码后的数据由系统转换到 125 Mbit/s 的 GTX 天线接口模块时钟。GTX 天线接口模块发端将数据通过光纤发送给发射天线,发端天线将数据发送到无线信道。

接收天线将收到的数据通过光纤发送到 GTX

天线接口模块收端,GTX 天线收端数据时钟通过第 3 时钟处理单元转换到系统时钟。数据经过 LDPC 解码和解帧之后还原出原始以太网数据,以太网数据经过第 4 时钟处理单元转换到千兆网接口的时钟域下,通过以太网接口输出到上位机。

2 基带处理硬件设计

2.1 组帧模块设计

组帧模块用于给每一帧以太网数据添加帧头和帧尾,其输出帧格式如图 2 所示,依次为 2 字节帧长、2 字节帧号、4 字节循环冗余码校验(Cyclic Redundancy Check,CRC)计算信息、以太网数据和根据以太网帧长选择是否添加的 1 字节填充数据。

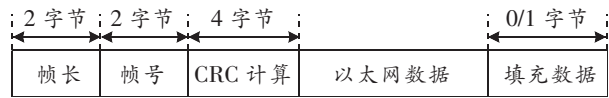


图 2 组帧模块输出帧格式

Figure 2 Output frame format of framing module

组帧模块的实现主要由以太网数据缓存模块、以太网帧长缓存模块、发端 CRC 计算模块和组帧状态机组成。当 1 帧以太网数据输入到组帧模块时,将该帧数据存入数据缓存模块,同时对帧长进行计数,当该帧结束时将帧长信息存入帧长缓存模块。

发端 CRC 计算模块包括 CRC 计算单元和位宽转换单元,其输入为帧长和帧号数据,输出为帧长、帧号和 4 字节 CRC 计算结果。CRC 计算单元的输入数据位宽为 8 bit,一般而言, N 位输出的 CRC 校验多项式校验错误的概率为 $1/2^N$, 输出位宽为 16 bit 的 CRC 校验公式的错误概率大约为 1.5×10^{-5} , 不满足设计要求。本文选取输出数据位宽为 32 bit 的标准 CRC 多项式: $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$, 输出数据通过位宽转换后,由低字节到高字节依次输出 4 个字节数据。

组帧模块状态机如图 3 所示,共包含 4 个状态,空闲、帧头添加、网络数据输出和数据填充状态。初始化时状态机处于空闲状态,在空闲状态下若帧长缓存模块的输出有效,则状态机跳转到帧头添加状态;在帧头添加状态,从帧长缓存模块中读取当前帧的帧长信息,将帧长与逐帧累加的帧号信息送入发端 CRC 计算模块;CRC 计算模块在进行 CRC 计算的同时输出帧长和帧号信息,当 CRC 计算完成后依次输出 4 字节 CRC 计算结果,CRC 计算结果输出

完成后状态机跳转到网络数据输出状态;在网络数据输出状态,当该帧数据全部输出时,若该帧帧长为偶数则跳转到空闲状态,否则跳转到数据填充状态;在数据填充状态,给帧尾添加 1 个字节数据,之后状态机跳转到空闲状态。

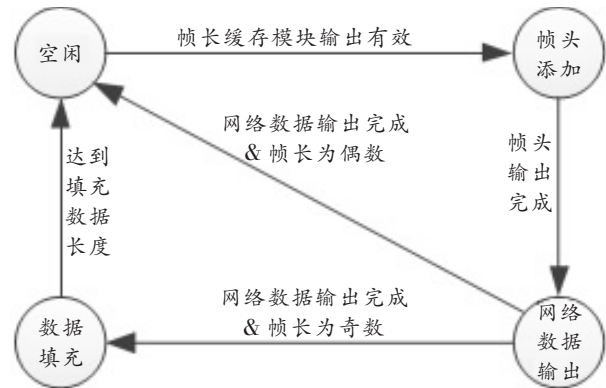


图 3 组帧模块状态机转移图

Figure 3 Transition diagram of framing module state machine

2.2 拼包模块设计

拼包模块主要由系统时钟计数模块、数据缓存模块、长度缓存模块和状态机组成。

LDPC 编码后的码字长度为 4 050 字,发端数据最终通过 GTX 天线接口模块输出,GTX 模块的数据时钟周期为 8 ns,因此完全输出 1 包码字至少需要 32 400 ns。在 200 Mbit/s 系统时钟下,时钟计数模块的计数周期值至少为 6 480,由于数据处理依然需要部分时钟,留有一定余量后,设置系统时钟计数周期为 6 528。当系统时钟计数器达到计数周期时,输出一个持续时间为一个时钟周期的启动脉冲信号,将此启动脉冲信号作为拼包模块状态机启动的指示信号。

当 1 帧数据到达拼包模块时,将数据存入数据缓存模块,同时将该帧长度的信息(包括帧头、以太网数据和帧尾)存入长度缓存模块。

拼包模块状态机转移图如图 4 所示,包含空闲、长度判断和数据输出状态。初始化时,状态机处于空闲状态,当有启动脉冲信号到来时,状态机跳转到长度判断状态。在长度判断状态下,若数据缓存模块非空,且已输出长度加待输出帧长之和不大于设定阈值 5 400(LDPC 编码模块信息段长度),则状态机跳转到数据输出状态,否则状态机跳转到空闲状态,同时输出包结束标志。在数据输出状态下,若一帧数据结束,则状态机跳转到长度判断状态。

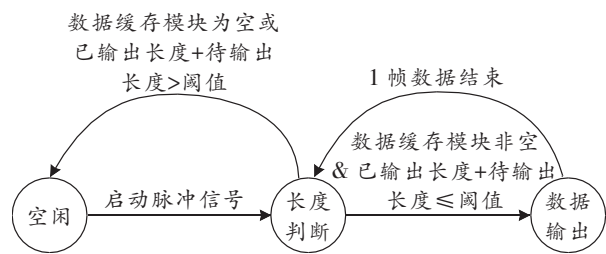


图 4 拼包模块状态机转移图

Figure 4 Transition diagram of bundle module state machine

2.3 解帧模块设计

解帧模块主要由收端 CRC 校验模块和解帧模块状态机组成。收端 CRC 校验模块公式与发端 CRC 计算模块公式相同。

解帧模块状态机转移图如图 5 所示,包含空闲、帧头提取、CRC 校验、以太网数据输出和删除填充数据状态等。

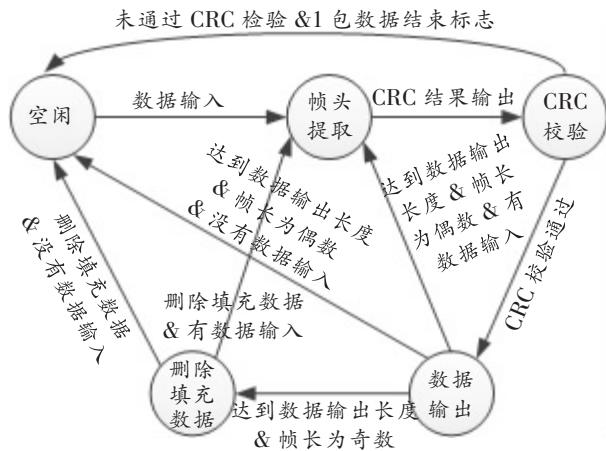


图 5 解帧模块状态机转移图

Figure 5 Transition diagram of deframing module state machine

初始化时,状态机处于空闲状态,当有数据输入到解帧模块时,状态机跳转到帧头提取状态。在帧头提取状态,前两个字节数据记录为帧长,第 3 和 4 字节数据记录为帧号,第 5~8 字节数据记录为发端 CRC 计算结果,记录数据同时将帧长和帧号信息输入到收端 CRC 校验模块进行 CRC 计算,当 CRC 计算完成时,状态机跳转到 CRC 校验状态。

在 CRC 校验状态,将发端 CRC 信息和收端 CRC 结果进行比较,若两者相同则 CRC 校验通过,状态机跳转到数据输出状态;若校验未通过,等到 1 包数据结束标志到来时,状态机跳转到空闲状态。

在数据输出状态,根据提取到的帧长信息将对应长度数据输出。当达到输出长度时,对帧长的奇偶性进行判断,若帧长为奇数,状态机跳转到删除填

充数据状态,若帧长为偶数且没有数据输入,则状态机跳转到空闲状态,若帧长为偶数且有数据输入,则状态机跳转到帧头提取状态。

在删除填充数据状态删除 1 个字节数据,之后若没有数据输入,则状态机跳转到空闲状态,若有数据输入,则状态机跳转到帧头提取状态。

3 基带系统测试与分析

3.1 传输速率测试

传输速率测试系统主要包括网络测试仪和 1 块 FPGA 板卡。网络测试仪数据通过网线发送至 FPGA 板卡,FPGA 发端模块对数据进行组帧、拼包和编码等操作后通过 GTX 天线接口模块的发端光纤输出。发端光纤与收端光纤相连,FPGA 收端模块对 GTX 天线接口模块收到的数据进行解码和解帧等操作后通过网线发送回网络测试仪。

设置网络测试仪的传输速率为 1 Gbit/s,该网络测试仪实际可达速率为 999.5 Mbit/s,当以太网帧长为 1 344 字节时,传输速率测试结果如图 6 所示,可以达到 1 Gbit/s。

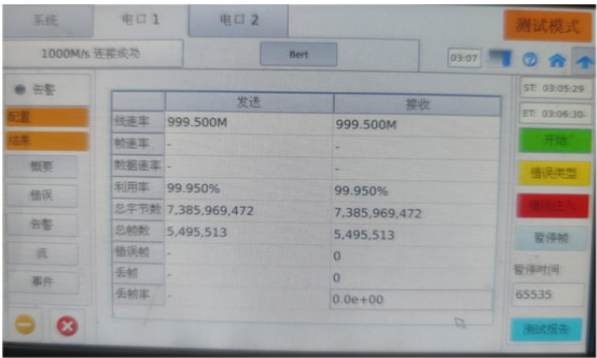


图 6 传输速率测试结果

Figure 6 The test results of the transmission rate

当数据源速率为 1 Gbit/s、长度为 1 344 字节时,通过组帧模块后,一帧长度变为 1 352 字节,通过拼包模块后,一包长度为 4 056 字节,经过加随机序列模块和编码模块后,长度变为 4 050 字节,此时拼包模块效率最低。考虑到由于数据处理所设置的系统时钟计数余量,GTX 天线接口模块有效数据的理论速率约为 2.012 Gbit/s,超过了 GTX 的理论最高速率 2 Gbit/s。但是经过实验验证,此时依然可以稳定传输,这可能是因为锁相环输出的系统时钟实际略小于 200 Mbit/s 或 GTX 天线接口模块输出的用户时钟实际略大于 125 Mbit/s,使得在实际应用过程中可达到的最大速率大于理论值。

3.2 视频传输测试

视频传输测试系统实物图如图 7 所示,发端上位机将视频通过网线发送至发端 FPGA 板卡,发端 FPGA 进行数据处理后通过发端光纤发出,收端光纤将收到的数据发给收端 FPGA 板卡,收端 FPGA 进行数据处理后将视频发送至收端上位机。

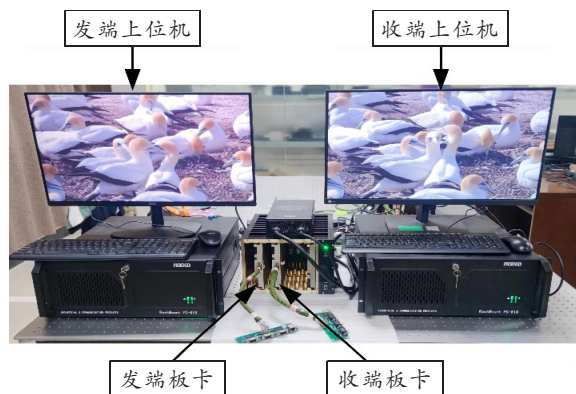


图 7 视频传输测试系统实物图

Figure 7 Physical picture of video transmission test system

视频业务传输过程中会发送不同类型、长度和速率的以太网帧,经过实验验证,视频业务可以稳定传输。视频业务传输速率往往只有几兆、几十兆,在相同的实验环境下进行了两个上位机之间的文件传输测试,传输速率根据文件类型的不同而不断变化,经网络速率监测,最高速率达到 700~800 Mbit/s 时依然可以进行稳定传输,可见该设计满足实际应用中不同场景下的业务传输需求。

4 结束语

无线激光通信中受信道环境的影响,收到的数据会产生不同程度的误码,为提高通信质量和传输各种类型的千兆以太网业务需求,本文基于固定编码长度的 LDPC(4 050,2 700)编码,对无线激光通信基带处理系统进行了设计。本文在 XILINX 平台的 FPGA 板卡上进行设计,对以太网数据采用透传模式,从而可以传输任意类型的以太网数据。为提高不同帧长以太网业务的传输速率,在发端对以太网数据进行了组帧、拼包和加随机序列等操作,在收端进行了逆过程的解帧操作。经过实验测试,对于不同帧长的以太网数据,最高传输速率可以达到 1 Gbit/s,可以传输视频和文件等各种以太网业务。

参考文献:

[1] 李菲,吴毅,侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. 光学学报,2012,32(6):0606002.

Li F, Wu Y, Hou Z H. Analysis and Experimental Research on Bit Error Rate for Free-space Optical Communication Systems through Turbulent Atmosphere[J]. Acta Optica Sinica,2012,32(6):0606002.

[2] Magdalena G, Agnieszka P, Izabela G, et al. Experimental Study of the Free Space Optics Communication System Operating in the 8~12 μm Spectral Range[J]. Electronics,2021,10(8):875.

[3] 贾科军,吕英,陈海燕,等. 无线激光通信系统中 LDPC 码的设计及性能分析[J]. 无线通信技术,2008,17(4):28-33.

Jia K J, Lü Y, Chen H Y, et al. Design and Simulation Research of LDPC in Wireless Optical Communication System[J]. Wireless Communication Technology,2008,17(4):28-33.

[4] 马春波,唐承鹏,敖珺,等. 可变码长串行级联码的激光通信系统设计[J]. 光通信技术,2019,43(5):40-43.

Ma C B, Tang C P, Ao J, et al. Design of Laser Communication System with Variable Code Length Serial Concatenated Code[J]. Optical Communication Technology,2019,43(5):40-43.

[5] 陈世文. 空间激光通信中湍流信道光束传输仿真[J]. 激光杂志,2015,36(12):153-155.

Chen S W. Beam Propagation Simulation of the Turbulence Channels in Free-space Laser Communication[J]. Laser Journal,2015,36(12):153-155.

[6] 吴琼,梅进杰. 大气激光通信中的 LDPC-BICM 技术研究[J]. 无线电通信技术,2012,38(3):26-28.

Wu Q, Mei J J. Research on LDPC-BICM in Atmosphere Laser Communication[J]. Radio Communications Technology,2012,38(3):26-28.

[7] 陈娅冰,赵尚弘,夏贵进. 大气光通信中的信道损耗分析[J]. 无线电通信技术,2003,29(1):62-64.

Chen Y B, Zhao S H, Xia G J. Analysis of Dissipation in Laser Atmospheric Transmission[J]. Radio Communications Technology,2003,29(1):62-64.

[8] 孙韩,郝士琦,赵青松,等. 大气激光通信自适应系统中 LDPC 的识别[J]. 光电子·激光,2016,27(6):620-624.

Sun H, Hao S Q, Zhao Q S, et al. Recognition of LDPC Codes in Atmospheric Laser Communication Adaptive System[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2016,27(6):620-624.

[9] 袁建国,刘文龙,黄胜,等. 光通信中基于有限域加群的一种 QC-LDPC 码[J]. 光电子·激光,2013,24(1):75-78.

Yuan J G, Liu W L, Huang S, et al. A Novel Construction Method of the QC-LDPC Code based on Fi-

nite Field Additive Group for Optical Communications [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(1): 75—78.

[10] 周建国,郝士琦,刘加林,等. 准循环 LDPC 码在大气激光通信中的应用研究[J]. 光通信研究, 2013(3): 18—21.

Zhou J G, Hao S Q, Liu J L, et al. Applications of Quasi-cyclic LDPC Codes in Atmospheric Laser Communications[J]. Study on Optical Communications, 2013(3): 18—21.

[11] MacKay D J C, Neal R M. Near Shannon Limit Performance of Low Density Parity Check Codes[J]. Electronics Letters, 1996, 32(18): 1645.

[12] 亢烨,柯熙政,邱昌佩. 基于以太数据的无线激光通信系统透明传输设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 700—707.

Kang Y, Ke X Z, Qu C P. Design of Data Transparent Transmission in WLC System based on Ethernet[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 700—707.