

基于发光二极管光源的远距离可见光通信

张宇飞¹, 张洪明^{1,2}, 王鹏¹, 刘涛¹, 孙德栋³, 宋健^{1,2}

¹清华大学信息科学技术学院电子工程系信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;

²深圳清华大学研究院深圳市数字电视系统重点实验室广东省数字电视系统重点实验室, 广东 深圳 518057;

³国网信息通信产业集团有限公司, 北京 100031

摘要 基于商用单个发光二极管(LED)光源进行室外远距离通信实验, 实验中对 LED 光源采用二进制键控(OOK)调制方式, 在接收端采用低密度奇偶校验(LDPC)纠错编码。在晴朗的白天环境下, 当 LED 发出的光以 3° 束散角发射且调制速率为 23 MHz(净数据传输速率为 11.5 Mbit/s)时, 实现了传输距离为 1 km 的室外光通信实验, 误码率为 10^{-6} 。实验表明, 当误码率为 10^{-4} 时, 采用 LDPC(4000, 2000)编码的净数据传输速率是未编码时的 2.4 倍。该实验系统对光准直要求低, 可较好地抵抗刮风晃动和大气湍流等环境因素的影响。

关键词 光通信; 自由空间光通信; 二进制键控; 可见光通信; 低密度奇偶校验; 发光二极管

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.050602

Long-Distance Visible Light Communication Based on Light Emitting Diode Source

Zhang Yufei¹, Zhang Hongming^{1,2}, Wang Peng¹, Liu Tao¹, Sun Dedong³, Song Jian^{1,2}

¹*Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, School of Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

²*Key Laboratory of Digital TV System, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China;*

³*State Grid Information and Telecommunication Co., Ltd., Beijing 100031, China*

Abstract A long-distance outdoor communication experiment based on a commercial light-emitting diode (LED) source is carried out. In the experiment, the LED source is modulated by on-off keying (OOK) modulation. The low-density parity-check (LDPC) error-correcting code is used at the receiver. The outdoor light communication experiment with communication distance of 1 km is accomplished at clear daytime when the beam of LED is launched with divergence angle of 3° and modulation rate of 23 MHz (net data transmission rate is 11.5 Mbit/s), and the bit error rate of 10^{-6} is achieved. The experimental result shows that the data transmission rate with LDPC (4000, 2000) code is 2.4 times than that without coding when the bit error rate is 10^{-4} . The experimental system is not need to accurate collimation and can overcome the negative environmental consequences such as the wind shaking and the atmospheric turbulence.

Key words optical communications; free-space light communication; on-off keying; visible light communication; low-density parity-check; light emitting diode

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 230.3670

收稿日期: 2016-12-12; **收到修改稿日期:** 2017-01-12

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGHAZZ00FCJS1500238)、深圳市基础研究基金(JCYJ20150630153033409)、广东省自然科学基金(2015A030312006)

作者简介: 张宇飞(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事远距离可见光通信技术方面的研究。

E-mail: zhangyf15@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 张洪明(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事可见光通信以及大气、水下无线光通信技术方面的研究。

E-mail: zhhm@tsinghua.edu.cn

1 引言

传统以激光器二极管作为发射器的地面自由空间光通信系统已实现在近红外波段(750~1600 nm)、通信速率为 10^9 bit/s 量级的远距离数据传输^[1-2]。近年来,发光二极管(LED)因其具有成本低、寿命长、系统设计相对简单^[3]等优点,逐渐成为一种新型发射光源,并受到研究人员的广泛关注。

目前,390~700 nm 波段的氮化镓(GaN)或氮化镓铟/铝镓铟(InGaN/AlInGa)LED 因其绿色环保的特点广泛应用于照明系统中,国内外研究人员正积极致力于将 LED 应用于照明之外的无线光通信领域。虽然照明用 LED 的 3 dB 截止带宽仅有几兆赫兹,但最近已有研究人员提出将均衡、高阶调制等方法应用于室内可见光通信系统,该系统可以在几米的传输距离内实现 10^9 bit/s 的通信速率^[4-7]。Yahya 等^[8]实现了基于 LED 光源、速率为 10^7 bit/s 的全双工可见光通信,通信系统中使用的镜头口径为 130 mm,实现输出功率为 17 mW、中心波长为 625 nm、光束发散角约为 2~3 mrad 的输出光。Zhang 等^[9]使用了 30 个功率为 2.8 W 的 LED 阵列,实现了传输距离为 10.7 km、速率为 28.8 kbit/s 的通信。Chen 等^[10]使用了功率为 1 W 的 LED 实现了距离为 90 m 的通信,并采用预增强和后均衡技术得到了较高的通信速率。低密度奇偶校验(LDPC)编码在传统无线通信中已得到广泛应用,将其应用于无线光通信成为新的研究热点^[11-12]。二进制键控(OOK)调制具有较低的带宽需求,适用于可见光通信系统^[13]。

本文报道了将波长为 390~405 nm 的单个商用蓝紫光 LED 作为发射光源的室外可见光通信实验系统,在晴朗的白天条件下,进行了调制速率为 23 MHz(净数据传输速率为 11.5 Mbit/s)、通信距离为 1 km 的通信信号传输实验,接收端接收到的信号经 LDPC 纠错编码后,测得的误码率为 10^{-6} 。在所提系统中,发射光源的光束发散角约为 3° ,系统中采用了较大的光束发射角和接收角,有利于降低通信系统对准操作的难度,并且降低了系统复杂性。实验结果表明,该系统能较好地抵抗刮风晃动和大气湍流等不利环境因素的影响。

2 实验系统

基于 LED 的远距离室外通信的实验装置如图 1 所示。发送端采用由表面贴装的商用蓝紫光 LED (SMBB395V-1100, epitex 公司)和可调焦手电筒组成光学准直系统。接收端采用改装后的望远镜,接收口径为 60 mm。在接收光探测器前插入了一片带通滤光片(FF01-400/40-2, Semrock),滤光片的中心波长为 400 nm,滤波带宽为 40 nm,用以滤除背景光噪声,接收端采用光电倍增管(PMT)接收和放大经长距离传输后微弱的光信号。将所提系统固定在一个可调节且稳固的支架平台上,以保证测试的稳定性并抵御户外实验中大风和湍流的影响。

基于 LED 的远距离通信实验系统示意图如图 2 所示,在发送端生成的二进制伪随机码经过 LDPC 编码器编码,将编码后的数据通过信号发生器转换为 OOK 调制波形并将其加载于 LED 上。实验中所用 LED 光源的中心波长为 395 nm,光谱宽度为 12 nm,调整 LED 和透镜的相对位置,可使其光束发散角在 $3^\circ \sim 45^\circ$ 之间变化。光束发散角越大,能量愈加分散,因此为了实现更远的传输距离,本实验中发射端光束的发射角选定为 3° 。在接收端,PMT 将接收到的微弱光信号转换为电信号,通过放大器放大电信号并通过高速模数

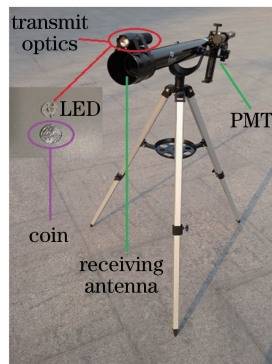


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

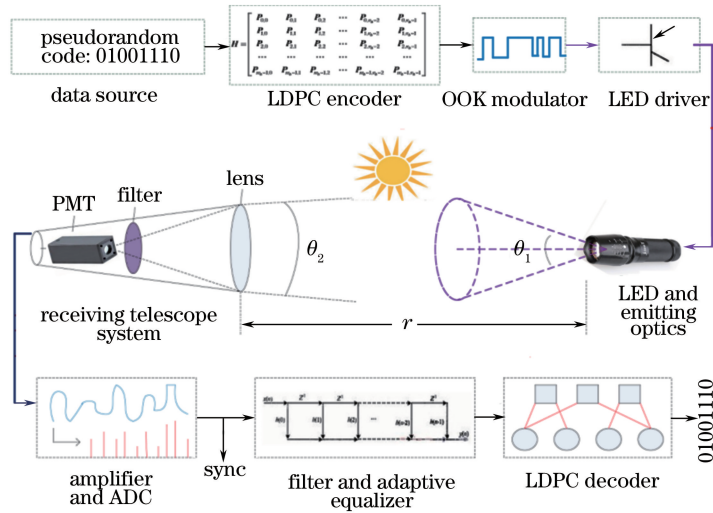


图 2 基于 LED 的远距离通信实验系统示意图

Fig. 2 Schematic of long-distance communication experimental system based on LED

转换器(ADC)实现电信号的数字化,由数字存储示波器(型号 WR104Xi-A,力科,美国)采集数字信号。实验中采取离线方式处理实验数据,在计算机中经过自适应均衡及 LDPC 译码,可计算得到传输误码率。

测得实验中所用 LED 在 0~45 MHz 频率范围内的频率响应为 -0.45 dB/MHz, 3 dB 带宽约为 6.67 MHz;在 45~100 MHz 频率范围内的频率响应为 -0.14 dB/MHz, 10 dB 带宽约为 22 MHz。

实验中使用的 LDPC 编码的设计如下:采用渐进边增长算法^[14]构造宽度为 n 、高度为 k 的 (n, k) LDPC 编码的校验矩阵(记为 \mathbf{H})。设计的符号度的分布如表 1 所示,其中 d_s 为符号的度, λ_d 为分布的概率。例如 $(400, 200)$ LDPC 编码的校验矩阵如图 3 所示,图中白色的点代表 1,黑色的点代表 0。

LDPC 译码器采用消息传递算法^[15],根据接收到符号的对数似然比(LLR)进行译码。用 R_{LLR} 表示 LLR,有

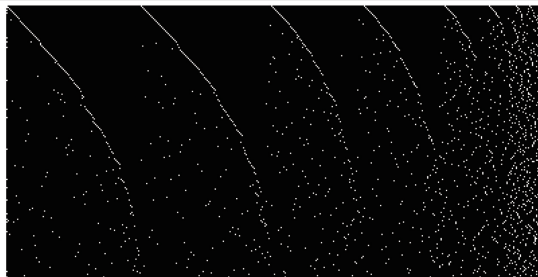
$$R_{LLR}(i) = \lg \left[\frac{P(c_i = 0 | \omega_i)}{P(c_i = 1 | \omega_i)} \right], \quad (1)$$

式中 ω_i 为输入为 c_i 时 PMT 输出电流的一个样本值,为服从混合泊松-高斯分布或近似高斯分布的随机变量^[16]; $P(c_i = 0 | \omega_i)$ 为输入为 $c_i = 0$ 时被正判的概率; $P(c_i = 1 | \omega_i)$ 为输入为 $c_i = 1$ 时被正判的概率。这里假设 ω_i 服从高斯分布,其均值和方差在自然环境大气信道中随时间动态变化。因此,在实验方案中采用了一种自适应设计,假设在每一个数据帧内信道的传输特性均恒定,在该数据帧内,大气条件不会显著改变传输信道,在该假设下每一个数据帧均使用训练序列用以估计 ω_i ,再计算该帧的 LLR。

表 1 LDPC 编码符号度分布

Table 1 Symbol degree distributions of LDPC coding

d_s	2	3	4	6	7	8	9	19	20
λ_d	0.458	0.324	0.021	0.059	0.039	0.025	0.009	0.018	0.047

图 3 实验中采用的 $(400, 200)$ LDPC 编码的校验矩阵Fig. 3 Check matrix of $(400, 200)$ LDPC coding used in experiment

由于 LED 光源的有限频率响应会带来信号的高频损耗,因此实验中应用自适应均衡方法处理接收信号。自适应均衡方法中使用了 10 阶有限长单位冲激响应(FIR)滤波器,滤波器的使用主要包括两个步骤:首先通过训练序列中每个数据包进行归一化最小均方算法^[17]迭代,对该滤波器的权系数进行调节,再用训练好的 FIR 滤波器处理数据序列。

3 实验结果与讨论

实验环境为天气晴朗的白天,实验地点为清华大学校园内两楼顶之间,图 4 为实验信道图片,展示了接收端、发射端和实验环境。当日风力为 3~4 级,实验装置的接收端和发送端均置于 11 层楼,收发端镜筒难免出现轻微的抖动,实验中选取的光束发散角 $\phi = 3^\circ$,通信距离 $r = 1$ km,此时光斑直径约为 50 m。实验过程中,由于采用了较稳定的平台结构和较大的光束发散角,实验装置始终保证连通,并且信号稳定,对实验没有产生不良影响,可见此系统对刮风和大气湍流等因素有一定的抵抗能力。信道的路径损耗 L_{CPL} 由大气衰减 $\exp(k_i r)$ 和几何衰减 $[d_L / (r\phi + d_T)]^{2[3]}$ 组成,式中 k_i 为消光系数, d_L 为接收机口径, d_T 为发射孔直径。由于 $r\phi = 52$ m,远大于 d_T ,因此 d_T 可以忽略。根据当日北京气象台数据得到平均能见度为 7 km,使用 MODTRAN5 软件的“urban, 5 km-visible”条件可以得到 $\exp(k_i r) \approx 0.319$, $-10\lg L_{\text{CPL}}$ 的估计值约为 63.9 dB。接收端滤光片和透镜的透射系数 η_L 和 η_F 分别为 0.7 和 0.6。接收到的信号光功率可以表示为

$$P_R = P_T \exp(k_i r) [d_L / (r\phi)]^2 \eta_L \eta_F, \quad (2)$$

式中 P_T 为实验中测得的平均发光功率。实验中 $P_T \approx 7.5$ mW,根据上式计算可得接收到的信号光功率约为 1.32 nW,实验中在接收端测得的实测值为 0.8~3 nW,计算结果与实测数据吻合。实验测试时间为 11:30—14:30,无接收信号时,背景光的平均光功率 P_n 的范围为 5~10 nW。

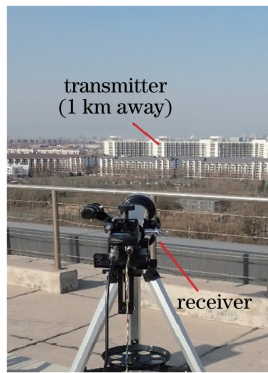


图 4 实验信道图

Fig. 4 Figure of experimental channel

实验结果的误码率与 OOK 调制速率 R_c 的关系如图 5 所示,为了说明采用 LDPC 编码的效果,图中选取了 (7,4) 汉明码与两组 LDPC 编码进行比较。由图 5 可见,当数据传输中没有采用任何信道编码时, R_c 在 5~40 MHz 的频率范围内的误码率均高于 10^{-4} ;使用了简单的 (7,4) 汉明码后,系统性能得到了改善(带 * 曲线)。当使用了 LDPC 编码时, R_c 低于某一阈值后,误码率迅速下降到 10^{-6} 以下。对于 LDPC(4000, 2000) 编码,阈值约为 25 MHz;对于 LDPC(400, 200) 编码,阈值约为 20 MHz。假设误码率以 10^{-4} 为门限,数据传输中没有采用任何信道编码、采用 (7,4) 汉明码、采用 LDPC(400, 200) 编码和采用 LDPC(4000, 2000) 编码时的最高数据传输速率分别为 5, 6.28, 11, 12 Mbit/s。使用 LDPC(4000, 2000) 编码的最高数据传输速率可以达到未进行编码时的 2.4 倍,在 10^{-6} 误码率时达到 11.5 Mbit/s 的数据传输速率($R_c = 23$ MHz)。由上述分析可以发现,在同等条件下,采用 LDPC 编码比未编码和采用简单的 (7,4) 汉明码时的通信性能更优。

除了可采用 LDPC 信道编码在接收端进行纠错以提高通信系统性能外,由 (2) 式可知,接收光功率 P_R 正比于发送端 LED 光功率 P_T ,因此为了提高通信系统性能,在带内背景噪声 P_n 一定的情况下,可以通过增大 P_T 来获得更高的信噪比或者更远的传输距离,以及提高 LED 的调制带宽。目前实验中采用的 LED

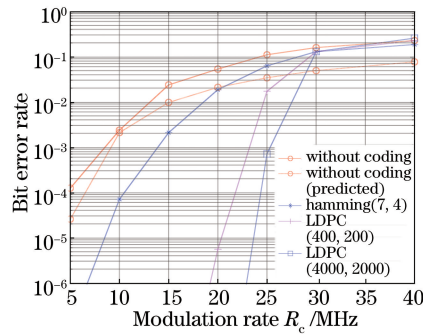


图5 误码率与OOK调制速率的关系

Fig. 5 Relationship between bit error rate and OOK modulation rate

的3 dB带宽仅为6.7 MHz,严重限制了调制速率 R_c ,而新型的基于III-V族半导体材料的LED(如GaAs LED),理论带宽可以达到2 GHz,已有研究人员设计了基于更高带宽的LED(如GaN μ LED,3 dB带宽为60 MHz)的室内可见光通信系统^[18]。此外,采用更效率的调制方案,如正交频分复用,也可以提高带宽的利用率,提升系统性能。

4 结 论

报道了应用单个商用LED光源和LDPC编码的室外长距离无线光通信系统,输出光功率为7.5 mW,光束发散角为 3° ,接收天线透镜直径为60 mm;实现了传输距离为1 km、最高调制速率为23 MHz(净数据传输速率为11.5 Mbit/s)的可见光通信实验,误码率为 10^{-4} 。采用接收端自适应均衡算法可有效拓宽系统的带宽。实验表明,采用LDPC(4000,2000)编码时可达到的数据传输速率是同等条件下未编码时的2.4倍。在净数据传输速率为11.5 Mbit/s时,误码率为 10^{-6} 。采用输出光功率更高、调制带宽更宽的性能优良的LED器件,有望进一步改善信噪比,实现更高的数据传输速率和更远距离的通信,且这种LED可应用于城市楼宇间无线通信等场景。

参 考 文 献

- [1] Willebrand H A, Ghuman B S. Fiber optics without fiber[J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(8): 40-45.
 - [2] Fenner W R. Future trends in crosslink communications[C]. SPIE, 1993, 1866: 1-8.
 - [3] Soni G, Malhotra J. Free space optics system: Performance and link availability[J]. International Journal of Computing and Corporate Research, 2011, 1(3): 2249-054X.
 - [4] Tsonev D, Videv S, Haas H. Light fidelity (Li-Fi): Towards all-optical networking[C]. SPIE, 2013, 9007: 900702.
 - [5] Azhar A H, Tran T, O'Brien D. A gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2): 171-174.
 - [6] Wang Y Y, Huang X X, Zhang J W, *et al.* Enhanced performance of visible light communication employing 512-QAM N-SC-FDE and DD-LMS[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15328-15334.
 - [7] Wang Y G, Huang X X, Tao L, *et al.* 4.5-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing CAP modulation and RLS based adaptive equalization[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13626-13633.
 - [8] Yahya M, Salleh M K, Akib N A M, *et al.* Link performance analysis of experimental led based free space optics[C]. TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference, IEEE, 2011: 1298-1302.
 - [9] Zhang M L, Yuan X G, Huang Y Q. A 10.7 km visible light communications experiment [C]. Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, 2016: 16227634.
 - [10] Chen Y C, Wen S S, Wu Y X, *et al.* Long-distance visible light communication system based on LED collimating lens [J]. Optics Communications, 2016, 377: 83-88.
 - [11] Du Jinsong, Zhou Tianhua, Chen Weibiao, *et al.* Performance analysis of underwater optical communication based on LDPC and PPM[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120605.
- 杜劲松, 周田华, 陈卫标, 等. 基于LDPC和PPM的水下光通信性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12):

120605.

- [12] Lin Zhiguo, Bai Peng, Fan Wentong, *et al.* Research on a novel construction method of full rank QC-LDPC codes for optical communication systems[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1005003.
林志国, 柏 鹏, 范文同, 等. 光通信系统中一种新颖的满秩 QC-LDPC 码的构造方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1005003.
- [13] Liu Yang, Zhang Guoan. Study on modulation scheme of visible light communications and its performance[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090601.
刘 洋, 章国安. 可见光通信调制方式及其性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090601.
- [14] Hu X Y, Eleftheriou E, Arnold D M. Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(1): 386-398.
- [15] Richardson T J, Urbanke R L. The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 599-618.
- [16] Gagliardi R M, Karp S. Optical communications[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [17] John G P, Masound S. Digital communications[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [18] Chun H, Manousiadis P, Rajbhandari S, *et al.* Visible light communication using a blue GaN μ LED and fluorescent polymer color converter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2035-2038.