

# 强背景光下可见光大气湍流信道建模及分集接收技术

赵嘉琦 许银帆 李洁慧 王一光 迟楠

复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

**摘要** 可见光大气传输系统面临的主要问题在于由大气湍流引起的光强闪烁和来自日光及其他照明设备的强背景光干扰,为了克服大气湍流造成的信道衰落效应及强背景光带来的噪声干扰问题,对室外可见光通信(VLC)强背景光大气湍流信道进行了建模。在接收端采用分集接收技术,在相同的发射功率下提高系统误码率(BER)性能。构建了在强背景光大气湍流信道模型下基于强度检测脉冲位置调制(PPM)方式的室外长距离可见光分集接收系统模型,在几十微瓦功率背景光噪声下,实现了800 Mb/s PPM信号的仿真系统传输。基于此系统分别研究对比了最大比合并(MRC)、等增益合并(EGC)、选择性合并(SC)3种分集合并方式的误码率性能。结果表明,在相同的发射功率下,误码率性能提升最大的是MRC,其次是EGC,SC最差。以7%前向纠错码(FEC)误码门限作为参考,MRC能显著降低对LED发射功率的要求,并且随着分集支路个数的增多,分集效果越好。

**关键词** 大气光学;可见光通信;脉冲位置调制;信道建模;分集接收;大气湍流

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0301001

## Turbulence Channel Modeling of Visible Light Communication under Strong Background Noise and Diversity Receiving Technologies

Zhao Jiaqi Xu Yinfan Li Jiehui Wang Yiguang Chi Nan

*Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Science, Ministry of Education, Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China*

**Abstract** The scintillation caused by the atmosphere turbulence and strong background noise from sunlight and other lighting equipment are two main problems in visible light communication (VLC) atmosphere transmission system. In order to overcome the channel fading effect caused by the atmosphere turbulence and the noise interference caused by the strong background light, VLC atmosphere channel with strong background noise is modeled. Diversity receiving technologies are utilized to improve the bit error rate (BER) performance of the system at the same transmitting power. According to the channel model, outdoor long-distance VLC system based on intensity detection pulse position modulation (PPM) in turbulence atmosphere channel using diversity receiving technologies is finally set up. In our simulation, the system bandwidth is 400 MHz and bit rate is 800 Mb/s. The BER performances of three diversity receiving technologies: maximal ratio combining (MRC), equal gain combining (EGC), selection combining (SC) are also compared. The results show that under the same transmitting power, the improvement of BER performance by MRC is the best, followed by EGC and SC is poor. Taking 7% forward error correction(FEC) as the BER threshold, the required LED transmitting power is greatly decreased with MRC. Furthermore, with the increase of the number of diversity branches, the BER performance is better.

**Key words** atmosphere optics; visible light communication; pulse position modulation; channel modeling; diversity receiving; turbulence atmosphere

**OCIS codes** 010.1290; 010.1300; 010.1330; 040.1880

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(61177071)、国家863计划(2015AA016904)

作者简介: 赵嘉琦(1993—),女,硕士研究生,主要从事光通信系统方面的研究。E-mail: 15210720132@fudan.edu.cn

导师简介: 迟楠(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信系统方面的研究。

E-mail: nanchi@fudan.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

可见光通信(visible light communication, VLC)技术是一种新兴的无线光通信技术,它将LED照明与通信结合,将信号调制到高性能LED上进行传输。相比于传统的无线通信技术,VLC具有绿色环保、保密性好、无需频谱授权、不受电磁干扰以及能够提供更大的带宽与数据传输速率等优势。因此,VLC技术迅速得到各国学者们的广泛关注和研究,称为近年来的研究热点。

基于以上优点,VLC具有广泛的应用前景,包括室内的智能家居、室内定位、宽带接入等,室外应用包括深空通信、车联网、船联网等。目前,VLC室内通信系统的研究已经较为成熟和完备,调制方式多样且传输速率已达吉比特每秒(Gb/s)<sup>[1-2]</sup>,但对于VLC室外通信系统的研究还比较欠缺,目前只能实现室外短距离低速传输<sup>[3-4]</sup>,这是因为可见光处于太阳光辐射谱的主要辐射波段内,背景光干扰严重;且光信号在大气中传输时,必然受到大气散射、吸收以及湍流效应的影响,从而造成信道衰落,甚至会严重影响到系统的通信能力。目前,国际上针对VLC大气传输信道的研究成果鲜有发表。

本文对VLC强背景光大气湍流信道进行建模,分析了大气湍流模型并对背景光噪声进行了数值分析。根据信道模型,接收端采用分集接收技术,通过处理多个独立不相关信号,将有用信号最大化,从而克服强背景光大气随机信道对VLC系统的影响。构建了在强背景光大气湍流信道模型下基于强度检测脉冲位置调制(PPM)方式的室外长距离可见光分集接收系统模型。

## 2 信道模型

### 2.1 大气湍流模型

光信号在大气信道中传输时主要受到大气衰减和大气湍流的影响。大气衰减由大气分子的吸收与散射以及大气气溶胶粒子的散射引起,主要影响可见光通信的距离;大气湍流是由于空间温度场分布的不均匀性以及空气压力的波动性使得折射率产生变化而导致的,主要体现在接收端光强闪烁及中心光束的漂移。相比于大气衰减,湍流会随机改变光波参量而影响通信系统质量,因此分析可见光大气信道模型时主要考虑湍流带来的影响。

主要的大气湍流模型有3种:负指数(negative exponential)模型<sup>[5]</sup>、对数正态(log normal)模型<sup>[6]</sup>和Gamma-Gamma模型<sup>[7-8]</sup>。3种湍流模型的概率分布函数(PDF)曲线如图1所示。对数正态模型对应弱湍流状态<sup>[9]</sup>,负指数模型对应强湍流状态,Gamma-Gamma模型能够描述从弱到强不同强度的湍流状态。由于Gamma-Gamma模型能很好地与不同湍流条件下的测量值相吻合,适用面更广,故选取Gamma-Gamma模型作为主要的大气湍流模型。

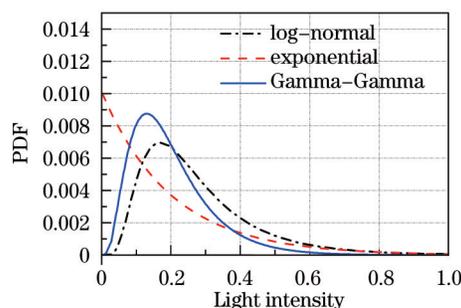


图1 3种大气湍流模型的PDF曲线

Fig.1 PDF curves of three atmosphere turbulence models

Gamma-Gamma模型,是Andrews.等<sup>[10]</sup>通过对光闪烁理论的分析而提出的一种更加精确的描述大气湍流中光强衰落的数学模型。在该理论中,光的场分布被定义为大范围及小范围的大气湍流效应所共同产生影响的扰动函数,归一化的光强衰落 $I_a$ 可以表示为2个随机过程变量的乘积,即 $I_a = I_x I_y$ ,其中 $I_x$ 和 $I_y$ 分别表示大范围大气湍流和小范围大气湍流的影响,两者都服从Gamma分布<sup>[4]</sup>。这就是Gamma-Gamma模型得名的原因。

Gamma-Gamma模型下,光强衰落 $I_a$ 服从的概率分布为<sup>[11]</sup>

$$f_{i_a}(i_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\cdot\Gamma(\beta)} \cdot i_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} \cdot K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}i_a), i_a \geq 0, \quad (1)$$

式中  $\Gamma(\cdot)$  是标准的伽马函数<sup>[12]</sup>,  $K_n(\cdot)$  表示以  $n$  为阶数的第二类修正贝塞尔函数<sup>[12]</sup>,  $\alpha$  和  $\beta$  代表散射环境下大小范围涡流的有效因子, 其计算表达式如下<sup>[11]</sup>:

$$\alpha = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 0.18d^2 + 0.56\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (2)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[ \frac{0.51\sigma_R^2(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{-5/6}}{(1 + 0.9d^2 + 0.62d^2\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (3)$$

式中  $\sigma_R^2$ 、 $d$  分别是 Rytov 方差和几何因子<sup>[13]</sup>,  $\sigma_R^2 = 0.5C_n^2\kappa^{7/6}L^{11/6}$ ,  $d = [\kappa D^2/(4L)]^{1/2}$ 。其中  $L$  代表传输距离,  $D$  代表接收机镜头的直径,  $\kappa = 2\pi/l$  是波长  $\lambda$  对应的波数,  $C_n^2$  是折射率结构常数。最常使用的  $C_n^2$  计算模型为 Hufnagle-Valley 模型<sup>[14]</sup>:

$$C_n^2 = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(h/1000) + 2.7 \times 10^{-6} \exp(-h/1500) + A \cdot \exp(-h/1000), \quad (4)$$

式中  $h$  是海拔高度,  $v$  是风速大小,  $A$  是地表的标称值。对于近地自由空间光通信(FSO)链路,  $C_n^2$  在日间可近似为  $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , 在夜间近似为  $8.4 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。

## 2.2 强背景光噪声模型

背景光噪声是影响空间光通信系统接收灵敏度的重要因素之一, 尤其在高背景光条件下。因此对背景光噪声的抑制便成为空间光通信系统的重要课题。

任何温度在绝对零度之上的物体均认为是背景辐射源, 如地面、建筑物、太阳、月亮等, 可用黑体辐射模型来描述, 辐射能力  $w(\lambda)$  如下:

$$w(\lambda) = \frac{c^2 h}{\lambda^5} \left\{ \frac{1}{\exp[hc/(k\lambda T)] - 1} \right\}, \quad (5)$$

式中  $c$  为光速大小,  $c=299792.458 \text{ km/s}$ ,  $h$  为普朗克常数,  $h=6.62606957(29) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $k = 1.3806488 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $T$  为辐射的开氏温度。

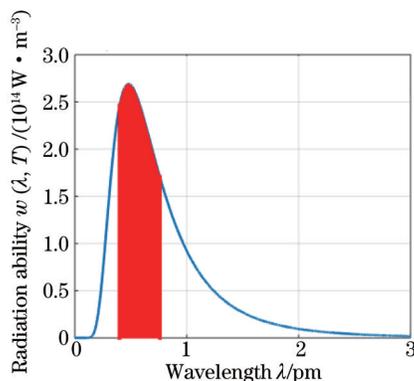


图2 太阳光辐射能力与波长的关系

Fig.2 Relationship between sunlight radiation ability and wavelength

对于日间室外白光通信系统, 其敏感波长在 400~760 nm 之间, 最主要的辐射干扰源为太阳。太阳表面温度约为 6000 K, 得到的黑体辐射谱如图 2 所示, 红色区域为可见光波段的辐射谱, 对其积分即可得到总的太阳光噪声功率。

对于可见光通信系统, 接收端进入视场内的光功率为

$$P_B = \eta_B \pi \left( \frac{D_r}{2} \right)^2 L_0 \Omega_r, \quad (6)$$

式中  $\pi(D_r/2)^2$  为接收镜的面积,  $L_0$  为近地天空光亮度, 对于非直射情况,  $L_0$  一般取  $10\sim 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ,  $\Omega_r$  为接收视场立体角,  $\Omega_r = \frac{\pi}{4} \theta_{r,\text{signal}}^2$ ,  $\eta_b$  为滤光片通带内的背景光功率占总功率的比值  $\theta_{r,\text{signal}}$  为视场角。

对某一特定波长内的辐射能量可以按(7)式计算:

$$\Delta E_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} w(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

通常把这种波段区间内的辐射能力表示成同温度下的黑体辐射力的百分数, 记为  $F_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$ :

$$F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} w(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty w(\lambda) d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} w(\lambda) d\lambda = \frac{1}{\sigma T^4} \left[ \int_0^{\lambda_2} w(\lambda) d\lambda - \int_0^{\lambda_1} w(\lambda) d\lambda \right], \quad (8)$$

式中  $\sigma T^4$  为总的黑体辐射力, 根据物理上著名的斯忒藩-玻尔兹曼定律,  $\sigma$  为斯忒藩-玻尔兹曼定律常量, 又称黑体辐射常数, 其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

综合式(6)、(8)可以得到最终进入视场内的背景光功率值为

$$P_B = F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} \cdot \pi \left( \frac{D_r}{2} \right)^2 L_0 \cdot \frac{\pi}{4} \theta_{r,\text{signal}}^2 \quad (9)$$

在可见光通信系统中, 可以通过改变滤光片带宽和波段范围以及减小接收视场角(FOV), 达到减少背景光噪声的目的。假设近地天空总亮度为  $80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ , 接收透镜直径为  $0.3 \text{ m}$ , 仿真得到接收背景光功率与滤光片带宽和接收视场角的关系如图3、图4所示, 接收到的背景光功率值大约在几十微米量级。假设接收视场角为  $20 \text{ mrad}$ , 图3显示, 滤光片带宽越窄, 接收光功率越小; 在相同的滤光片带宽下, 红光滤光片滤除噪声的效果最好。采用  $10 \text{ nm}$  红光滤光片, 图4显示, 随着接收视场角的增加, 背景光功率迅速增加, 这是因为接收到的背景光功率与接收视场角的平方呈正比关系, 因此减小接收视场角可以有效抑制背景光噪声的干扰。

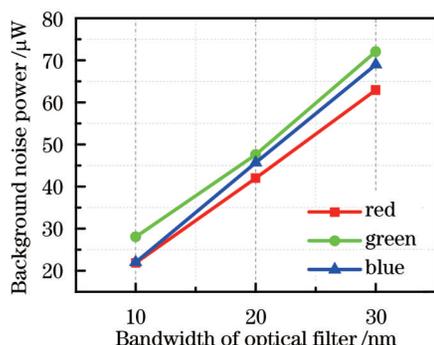


图3 接收端背景光功率与滤光片带宽的关系

Fig.3 Relationship between background noise power at the receiving end and the optical filter bandwidth

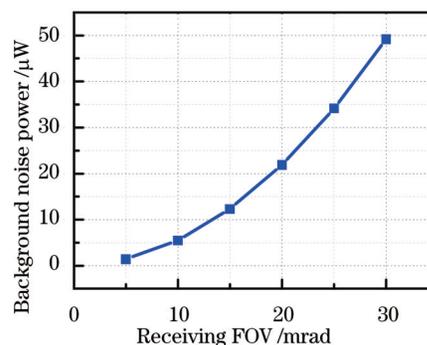


图4 背景光功率与接收视场角的关系

Fig.4 Relationship between background noise power and the receiver FOV

### 3 分集接收技术

分集接收技术是一种常用的抗衰落技术, 能在不牺牲带宽和保证信号传输速率的情况下获得分集增益, 提高系统的稳定性。可见光通信系统中的分集方法主要是空间接收分集, 即在接收端采用多个接收机接收, 然后将每个接收机接收到的信号进行适当的线性组合来提高系统的性能。

线性接收分集系统框图如图5所示, 其核心在于如何确定支路加权系数  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$ 。若只有一个系数不为0(信噪比最高), 其他系数均为0, 则为选择性合并; 若不管信号质量优劣, 加权系数都相等, 即  $A_1=A_2=\dots=A_n$ , 则为等增益合并; 若在最短时间内自动调节系数  $A_n$ , 使得合并后的信号信噪比最大, 则为最大比合并。

### 4 系统仿真结果与分析

针对强背景光大气湍流条件下的VLC系统进行了系统仿真, 估算满足7%前向纠错码(FEC)门限时系统所需要的最小发射功率, 系统框图如图6所示。在发射端, 信息比特流映射为PPM编码, PPM信号经过预均衡和

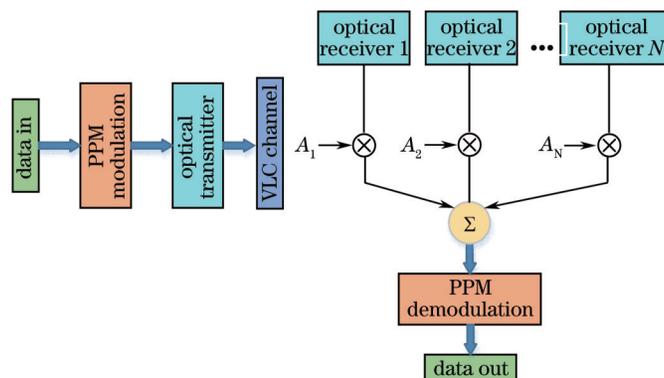


图 5 可见光线性分集接收系统框图

Fig.5 Block diagram of VLC linear diversity receiving system

上采样后被调制到高性能白光 LED 上,经过强背景光大气湍流信道到达接收端,接收端采用分集接收合并技术,将多个接收机接收到的信号进行线性组合后采样,并将 PPM 解码恢复原始数据。

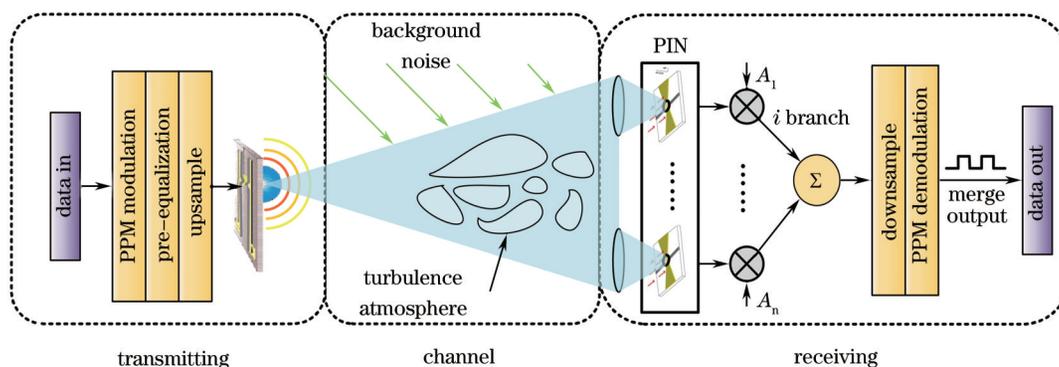


图 6 强背景光大气湍流条件下的 VLC 通信系统结构

Fig.6 Block diagram of VLC system in turbulence atmosphere channel with strong background noise

仿真条件见表 1,调制方式为 4PPM 调制,预均衡后系统带宽可达 400 MHz,发射端 LED 半功率角为 10 mrad,传输信道中的背景光噪声约 20~80  $\mu\text{W}$ ,采用的湍流模型为 Gamma-Gamma 模型,此时闪烁数为 0.2231,代表弱湍流状态,传输距离达 1000 m,接收视场角为 20 mrad。

表 1 系统仿真条件

Table 1 System simulation conditions

Parameter	Value
Bandwidth /MHz	400
Modulation	4PPM
Semi-angle at half illuminance of a LED /mrad	10
Background noise / $\mu\text{W}$	20~80
Turbulence atmosphere	Gamma-Gamma
Distance /m	1000
Receiving FOV /mrad	20

下面研究了不同噪声功率对所需 LED 发射功率的影响。当接收视场角为 20 mrad 时,采用滤光片后接收到的背景光功率值大约为几十微瓦,针对这一范围得到的误码率随发射功率变化曲线如图 7 所示。

从图中可以看出,背景光噪声功率对系统所需最小发射功率有极大的影响,以 7% FEC 误码门限为例,噪声功率越大,所要求的发射功率越高,几乎噪声每增加 20  $\mu\text{W}$ ,发射功率就要增加 15 W,功率代价较高。

为了减小功率代价,在接收端采用分集接收合并技术,最大化有用信号能量,来减少所需要的发射功率。当采用两路分集时,得到的仿真结果如图 8(a)所示,两路噪声值分别为 40  $\mu\text{W}$  和 80  $\mu\text{W}$ 。从图中可以看出,MRC 分集效果最佳,EGC 略差,SC 的效果最差。采用 MRC 分集接收,系统所需的最小发射功率为 23 W。对比图 7,

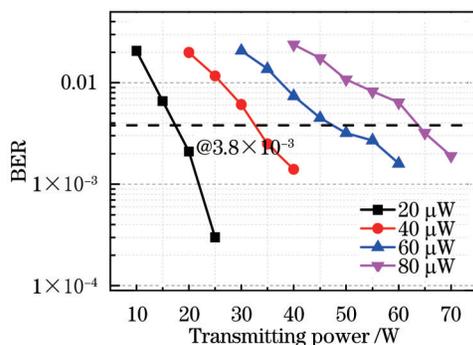


图 7 不同背景光噪声功率下,系统误码率随发射功率的变化曲线

Fig.7 BER versus transmitting power under different background noise powers

相比 40 μW 和 80 μW 噪声单路接收,所需最小发射功率分别降低了 11 W 和 41 W。将支路个数增加至 4 个,得到的仿真结果如图 8(b)所示,4 路信号的噪声分别为 40,40,80,80 μW,同样 MRC 的分集效果最好,且 4 路比 2 路的优化效果更明显。

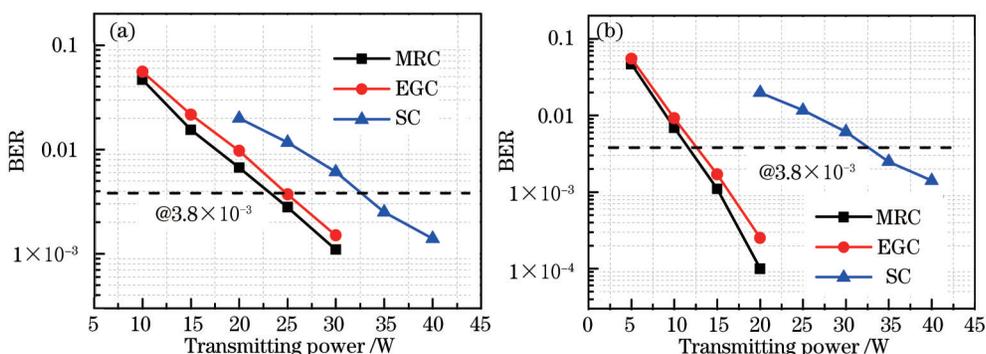


图 8 不同分集接收方式下,系统误码率随发射功率的变化曲线。(a) 2路分集接收;(b) 4路分集接收

Fig.8 BER versus transmitting power under different diversity receiving technologies. (a) With 2 branches; (b) with four branches

## 5 结 论

本文对室外可见光通信信道进行建模,选取 Gamma-Gamma 模型作为 VLC 大气湍流的主要模型,并对强背景光噪声功率进行了数值分析,其值大约在几十微瓦。提出在接收端采用分集接收合并技术提高系统误码率性能,从而降低对 LED 发射功率的要求。仿真结果表明,MRC 具有最佳的分集效果,其次是 EGC,最差的是 SC。以 7% FEC 误码门限作为参考,MRC 能显著降低对 LED 发射功率的要求,当 2 路噪声功率分别为 40 μW 和 80 μW 时,合并后系统所需的最小发射功率相比单路接收分别降低了 11 W 和 41 W,并且,随着分集支路个数的增加,分集效果越好。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Y, Huang X, Tao L, *et al.*. 45-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.
- 2 Wei C C, Wu F M, Chen Z Y, *et al.*. Indoor VLC system with multiple LEDs of different path lengths employing space-time block-coded DMT/CAP modulation[J]. Journal of Optical Communications & Networking IEEE/OSA, 2015, 7(3): A459-A466.
- 3 Lourenco N, Terra D, Kumar N, *et al.*. Visible light communication system for outdoor applications[C]. Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), 2012 8th International Symposium on IEEE, 2012: 1-6.
- 4 Liu Jianyu, Yu Lijuan. Research on short distance outdoor visible light digital transmission system[J]. Science Technology and Engineering, 2013, (3): 744-748.
- 刘建余, 于立娟. 短距离室外可见光数字传输系统研究[J]. 科学技术与工程, 2013, (3): 744-748.
- 5 Kiasaleh K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(9): 1455-1461.

- 6 Chen Dan, Ke Xizheng, Li Jianxun. Blind equalization algorithm of wireless optical communication using subcarrier modulation over turbulence channel[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(9): 1025–1030.  
陈 丹, 柯熙政, 李建勋. 湍流信道下无线光副载波盲均衡算法研究[J]. *光子学报*, 2013, 42(9): 1025–1030.
- 7 Zong Kang, Zhu Jiang. Performance analysis of ROFSO systems based on Gamma-Gamma atmospheric turbulence model[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(4): 682–686.  
宗 康, 朱 江. 基于 Gamma-Gamma 信道模型的 ROFSO 通信系统性能分析[J]. *半导体光电*, 2014, 35(4): 682–686.
- 8 Gappmair W, Muhammad S S. Error performance of PPM/poisson channels in turbulent atmosphere with Gamma-Gamma distribution [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(16): 880–882.
- 9 Guo Qiang. Performance analysis of improved T-PPM technology on atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 080605.  
郭 强. 改进的 T-PPM 编码在大气弱湍流下的性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 080605.
- 10 Berrou C, Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1996, 44(10): 1261–1271.
- 11 Bayaki E, Schober R, Mallik R K. Performance analysis of MIMO free-space optical systems in Gamma-Gamma fading[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(11): 3415–3424.
- 12 Gradshteyn I S, Ryzhik I M. *Table of Integrals, Series, and Products*(8<sup>th</sup> Edition)[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014: 1109–1114.
- 13 Al-Habash M A, Andrews L C, Philips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1554–1562.
- 14 Uysal M, Li J, Yu M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(6): 1229–1233.

栏目编辑: 王晓琰