

## 湍流大气空间非相干 LED 可见光通信系统性能

姬瑶<sup>1</sup>, 崔宗敏<sup>2</sup>, 程陈<sup>1</sup>

(1. 中国地震局 第二监测中心, 西安 710054; 2. 西安电子科技大学 通信工程学院, 西安 710071)

**摘要:** 为了研究光强闪烁对发光二极管(LED)可见光通信的影响, 基于空间非相干单色 LED 光源, 理论研究弱湍流下可见光通信的信道传输特性, 推导出单色 LED 可见光通信系统光强闪烁系数的闭合表达式, 对比分析了不同因素下 LED、激光可见光通信的系统特性。仿真结果表明: 弱湍流下 LED 可见光通信光强闪烁系数比激光可见光通信的闪烁系数更小, 因湍流扰动引起的系统误码率也更低; 此外, 随着光强闪烁系数和平均发射光功率的不断增大, 受湍流影响的 LED、激光可见光通信系统之间的误码率差距也逐渐增大。

**关键词:** 可见光通信; 空间非相干光源; 光强闪烁效应; 弱湍流

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)10-0024-04

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.007

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):** 

## Performance of incoherent LED visible light communication system in turbulent atmosphere space

JI Yao<sup>1</sup>, CUI Zongmin<sup>2</sup>, CHENG Chen<sup>1</sup>

(1. The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China;

2. School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to study the influence of light intensity flicker on the visible light communication of light emitting diode (LED), based on the spatially incoherent monochromatic LED light source, the channel transmission characteristics of visible light communication under weak turbulence are theoretically studied, and the closed expression of light intensity scintillation coefficient of monochromatic LED visible light communication system is deduced. The system characteristics of LED and laser visible light communication under different factors are compared and analyzed. The simulation results show that the scintillation coefficient of LED visible light communication is smaller than that of laser visible light communication under weak turbulence, and the system bit error rate caused by turbulence disturbance is also lower. In addition, with the increase of light intensity flicker coefficient and average transmitted light power, the bit error rate gap between LED and laser visible light communication systems affected by turbulence is gradually increased.

**Key words:** visible light communication; space incoherent light source; scintillation effect of light intensity; weak turbulence

## 0 引言

可见光通信波长分布在 380~780 nm 之间, 主要分为 2 种: 一种是激光可见光通信, 由半导体激光器发射激光光束, 激光属于相干光, 其发散角较小, 需要

快速跟踪瞄准设备以解决因光束漂移引起的光斑对准误差问题<sup>[1-2]</sup>; 另一种是以发光二极管(LED)作为光源的 LED 可见光通信, LED 属于非相干随机相位光源, 光束比较发散, 因此不需要解决光斑对准问题, 但由于 LED 发射光束相对分散, 能量衰减较严重, 因此更适合短距离通信。

目前, 国内许多高等院校和科研机构对 LED 可见光通信技术展开了一系列研究。例如, 北京邮电大学、复旦大学、东南大学、中国科学院半导体研究所、华中科技大学、信息工程大学、中国科学技术大学和桂林理工大学等科研小组在 LED 高速通信、LED 可见光通

**收稿日期:** 2020-03-02。

**作者简介:** 姬瑶(1992—), 女, 陕西西安人, 硕士, 毕业于西安电子科技大学通信工程学院光通信专业, 现任中国地震局第二监测中心地震大数据应用中心助理工程师。主要从事无线光通信信道建模、无线通信信道建模和网络安全等方面的研究。



信关键器件、水下 LED 可见光通信、LED 路灯可见光通信、可见光复用技术、抗干扰技术和调制方式等方面以理论研究和实验验证等方式展开了一系列研究<sup>[3-7]</sup>。然而, 很少见到有关可见光信道的研究报道。

大气中的气溶胶对传输光束的吸收和散射会引起信号衰减, 因湍流扰动引发的光学折射率的随机起伏会使传输光束在到达接收端时发生光束扩展、光束漂移和光强闪烁等现象, 尤其是光强闪烁对通信的影响最严重。光强闪烁会使接收光斑在光端机处发生随机的明灭变换, 严重影响着可见光通信系统的可靠性。

本文研究弱湍流下采用单色 LED 光源时的空间非相干可见光通信大气信道传输特性, 推导空间非相干单色 LED 光源光强闪烁系数的闭合表达式。

## 1 光强闪烁理论

可见光通信系统发射端采用空间非相干单色 LED 光源, 此光源的出射场表示为随机场  $u_r(s)$  与对应相干光源确定场  $u_d(s)$  之积  $u(s)=u_r(s)u_d(s)$ 。随机场  $u_r(s)=\exp[i\theta(s)]$ ,  $\theta(s)$  是随机相位,  $s=(x,y)$  是横向源坐标。单色相干光源的源场是确定的, 且服从振幅为 1、束腰半径为  $w_0$  的高斯分布<sup>[2]</sup>,  $u_d(s)=\exp(-|s|^2/w_0^2)$ ,  $|s|=\sqrt{x^2+y^2}$  是平面上任意一点  $s$  到光束中心的横向距离。通过对服从高斯分布的确定场  $u_d(s)$  引入具有随机相位的随机因子  $u_r(s)$ , 构成单色 LED 光源的空间非相干特性。根据惠更斯-菲涅尔原理, LED 光束传输  $L$  米距离后的光场表示为<sup>[2]</sup>:

$$u(L)=\frac{\exp(ikL)}{i\lambda L}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}u(s)\exp\left[\frac{ik|s|^2}{2L}+\psi(s)\right]d^2s \quad (1)$$

其中, 波束  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为光波长。随机复相位  $\psi(s)$  为对数振幅  $\chi(s)$  和随机波动相位  $S(s)$  的复函数  $\psi(s)=\chi(s)+iS(s)$ 。平均光强定义为  $\langle I(L) \rangle = \langle u(L)u^*(L) \rangle_m$ ,  $\langle \cdot \rangle_m$  表示统计平均。结合式(1), 单色 LED 光信号传输  $L$  米距离后的平均光强  $\langle I(L) \rangle$  表示为:

$$\begin{aligned} \langle I(L) \rangle &= \frac{1}{(\lambda L)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_2^s(s_1, s_2) \cdot \\ &\exp\left[\frac{ik}{2L}(|s_1|^2 - |s_2|^2)\right] \times \\ &\langle \exp[\psi(s_1) + \psi^*(s_2)] \rangle_m d^2s_1 d^2s_2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $I_2^s(s_1, s_2)$  表示光束到达接收端后, 接收面上两点  $s_1$  和  $s_2$  的二阶互相关函数, 有等式  $I_2^s(s_1, s_2) = \langle u_d(s_1) \times$

$u_r(s_1)u_d^*(s_2)u_r^*(s_2)\rangle_s = \lambda^2 \exp[-|s_1+s_2|^2/(2w_0^2)] \delta(s_1-s_2)$ <sup>[8]</sup>,  $w_0$  是服从高斯分布的确定场  $u_d(s)$  的束腰半径。复相位  $\psi(s)$  中的对数振幅  $\chi(s)$  服从高斯分布, 传输路径上由湍流引起的复相位的统计量  $\langle \exp[\psi(s_1) + \psi^*(s_2)] \rangle_m = \exp(-\rho_0^{-2}|s_1-s_2|^2)$ <sup>[2]</sup>,  $\rho_0$  是传输光束在湍流介质中传输的空间相干长度。代入式(2), 传输  $L$  米后的平均光强简化为:

$$\langle I(L) \rangle = \frac{1}{L^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2s_2 \exp\left(-\frac{2|s_2|^2}{w_0^2}\right) = \frac{\pi w_0^2}{2L^2} \quad (3)$$

同理, 传输  $L$  米距离后瞬时光强的二阶矩  $\langle F(L) \rangle$  表示为:

$$\begin{aligned} \langle F(L) \rangle &= \frac{1}{(\lambda L)^4} \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty}}_8 \times \\ &d^2s_1 d^2s_2 d^2s_3 d^2s_4 I_2^s(s_1, s_2) I_2^s(s_3, s_4) \times \\ &\exp\left[\frac{ik}{2L}(|s_1|^2 - |s_2|^2 + |s_3|^2 - |s_4|^2)\right] \times \\ &\langle \exp[\psi(s_1) + \psi^*(s_2) + \psi(s_3) + \psi^*(s_4)] \rangle_m \end{aligned} \quad (4)$$

弱湍流下, 用 Kolmogorov 谱描述各向同性的湍流统计特性, 对于服从高斯分布的对数振幅  $\chi(s)$ , 有近似关系  $\langle \exp[2\chi(s_1) + 2\chi(s_4)] \rangle \cong 4\sigma_\chi^2 \exp(-|s_2-s_4|^2/\rho_0^{-2}) + 1$ <sup>[9]</sup>,  $\sigma_\chi^2$  是对数振幅方差。对  $s_2, s_4$  依次积分, 瞬时光强二阶矩  $\langle F(L) \rangle$  简化为:

$$\langle F(L) \rangle = \langle I(L) \rangle^2 + \pi^2 \sigma_\chi^2 \frac{w_0^4}{L^4} (1 + w_0^2 \rho_0^{-2})^{-1} \quad (5)$$

根据光强闪烁系数的定义  $\sigma_I^2(L) = \langle F(L) \rangle / \langle I(L) \rangle^2 - 1$ , 弱湍流下空间非相干单色 LED 可见光通信光强闪烁系数的闭合表达式为:

$$\sigma_I^2(L) = 4\sigma_\chi^2 (1 + w_0^2 \rho_0^{-2})^{-1} \quad (6)$$

光波的对数振幅  $\chi$  与光强  $I$  的关系为  $\chi = 1/2 \times \ln(I/A_0^2)$ <sup>[2]</sup>, 采用 Rytov 近似法, 光强闪烁  $\sigma_I^2$  与对数振幅方差  $\sigma_\chi^2$  和对数光强方差  $\sigma_{\ln I}^2$  的关系为  $\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_\chi^2) - 1 = \exp(\sigma_{\ln I}^2) - 1$ ,  $\sigma_\chi^2 \ll 1$ 。弱湍流 ( $\sigma_{\ln I}^2 \ll 1$ ) 下, 有  $\sigma_I^2 \cong \sigma_{\ln I}^2 = 4\sigma_\chi^2$ , 平面波对数振幅方差  $\sigma_{\chi, \text{pl}}^2$  与平面波 Rytov 方差  $\sigma_R^2$  的关系为  $4\sigma_{\chi, \text{pl}}^2 \cong \sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ <sup>[2,9]</sup>,  $C_n^2$  是随高度变化的大气折射率结构参数。由于平面波的波结构函数为  $D(\rho_0, L) = 2.914 C_n^2 k^2 L \rho_0^{5/3}$ , 且空间相干半径  $\rho_0$  为波结

姬瑶,崔宗敏,程陈:湍流大气空间非相干 LED 可见光通信系统性能

构函数  $D(\rho_0, L)=2$  时的值<sup>[2]</sup>,即平面波空间相干半径  $\rho_0=(1.46C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$ 。因此,弱湍流下 LED 可见光通信平面波的光强闪烁系数闭合表达式为:

$$\sigma_{I,pl}^2(L)=1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \left[ 1+w_0^2 (1.46C_n^2 k^2 L)^{6/5} \right]^{-1} \quad (7)$$

近地通信中常采用 Hufnagel-Valley 模型<sup>[10-11]</sup>描述大气折射率的变化情况:

$$C_n^2(h)=3.59 \times 10^{-53} h^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \times \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + C_{n0}^2 \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \quad (8)$$

其中,  $C_{n0}^2$  是地表处的大气折射率结构参数,一般取值为  $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ;  $h$  为距离地面高度。

## 2 误码率理论

弱湍流下,LED 可见光通信系统常采用强度调制/直接检测,描述大气信道衰落的概率密度函数  $p_I(u)$  服从对数正态分布,采用二进制振幅键控(OOK)调制方式时的误码率(BER)表示如下:

$$\begin{cases} \langle BER \rangle_{\text{OOK}} = \int_0^\infty p_I(u) \times \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \eta R P_t u \sqrt{\frac{1}{2\sigma_n^2}} \right) du \\ p_I(u) = \frac{1}{u(2\pi\sigma_I^2)^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(u) + 1/2\sigma_I^2]^2}{2\sigma_I^2} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $P_t$  是平均发射光功率,  $\sigma_n^2$  是系统加性高斯白噪声方差,  $R$  是接收端 PD 光电响应度,  $\eta$  是收发天线光效率,  $\sigma_I^2$  是光强闪烁系数,  $u$  是归一化光强。对于强度调制/直接检测系统,典型值取  $\sigma_n^2=2.5 \times 10^{-13}$ ,  $R=0.5 \text{ A/W}$ 。

## 3 仿真与分析

本文以弱湍流下空间非相干单色 LED 可见光通信系统为假设背景环境。对不同条件下 LED 平面波光强闪烁系数以及采用 OOK 调制方式时受湍流影响产生的系统误码率进行仿真分析,并与基于相干光理论的激光可见光通信进行对比。激光通信平面波光强闪烁系数  $\sigma_R^2=1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ <sup>[2]</sup>,默认系统架设高度为 1 m,收发天线光效率  $\eta$  取 0.64。

图 1 是弱湍流下 LED 平面波光强闪烁系数随光波长的变化趋势图,并将其与激光可见光通信平面波光强闪烁系数进行对比,传输距离为 100 m。实线是激光通信平面波光强闪烁系数,虚线是空间非相干 LED 可见

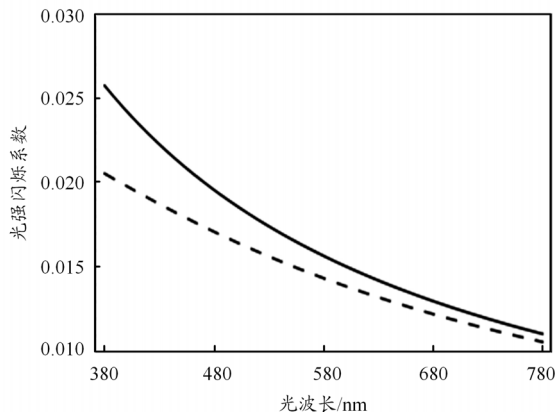


图 1 光强闪烁系数与光波长的变化关系

光通信平面波闪烁系数。可以看出,对于 380~780 nm 的任意光波长,LED 可见光通信平面波闪烁系数低于激光通信平面波的光强闪烁系数,即相同条件下 LED 光源发射的非相干光波因湍流影响而产生的信道衰落较小,相干光所受的信道衰落更严重。随着光波长的增大,第一菲涅尔区半径<sup>[2]</sup>增加,大尺度湍流占比减小,小尺度湍流占比增大,光强闪烁强度逐渐减小,二者闪烁强度之间的差距也随波长增大呈缩小趋势。

地表大气折射率结构参数为  $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  和  $1.7 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  时的光强闪烁系数变化趋势如图 2 所示。可以看出,对于同一种近地大气折射率结构参数,波长为 380 nm 的光束闪烁强度最大,600 nm 次之,780 nm 的光强闪烁强度最弱。这是因为大气折射率结构参数在一定程度上反映了大气湍流的扰动强度,地表大气折射率结构参数取值越大,湍流扰动越强,光强闪烁效应就越严重。

图 3 和图 4 分别为不同光传输距离和不同光波长下的 BER 随平均发射光功率的变化趋势,并将 LED

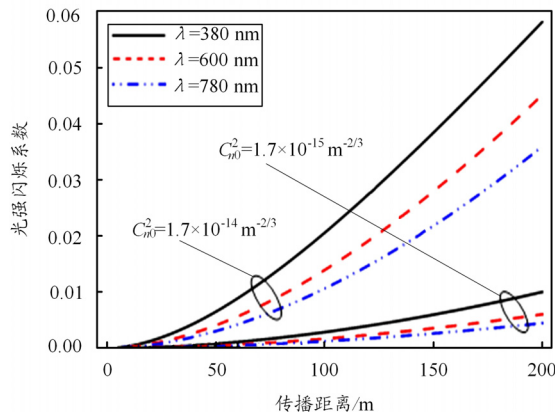


图 2 不同程度近地大气折射率结构参数下光强闪烁强度随传输距离的变化关系

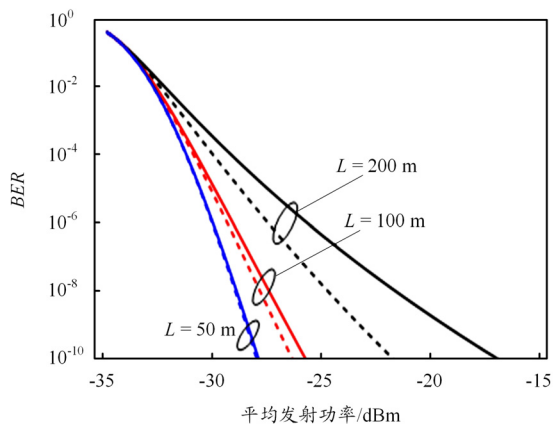


图3 不同传输距离BER与平均发射光功率的变化关系

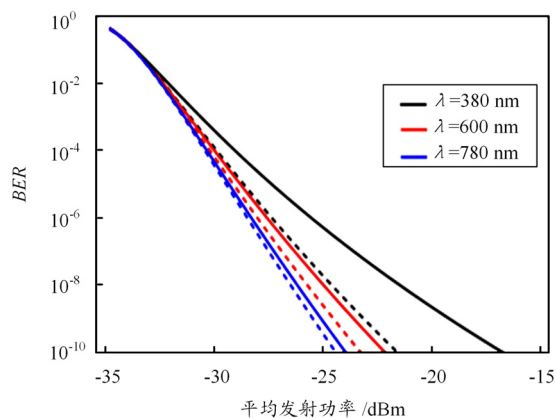


图4 不同波长BER与平均发射光功率的变化关系

可见光通信系统BER与激光通信系统BER进行对比。实线表示激光通信系统误码率,虚线表示LED光通信系统误码率。从图3、图4可知,相同参数条件下受湍流影响的LED可见光通信系统BER较激光通信系统更小;当光波长较长、光传输距离较短时,LED可见光通信和激光通信的闪烁强度均较小,受湍流影响的LED光通信系统与激光可见光通信系统之间的BER差距也相对较小。随着传输距离的增加、光波长的减小,激光通信系统的BER增长较快,LED光通信系统的BER增长缓慢,2种系统之间的BER差距也呈逐渐增大的趋势。此外,随着平均发射光功率的增长,BER数值逐渐降低,但相同参数条件下,受湍流影响的激光通信BER下降趋势较LED光通信更缓慢,即二者之间的BER差距随着平均发射光功率的增长逐渐增大。

#### 4 结束语

本文推导出弱湍流下空间非相干单色LED可见光通信系统光强闪烁系数的闭合表达式。对不同因素下LED平面波光强闪烁系数以及受湍流影响产生的系统BER进行仿真分析,并与激光可见光通信系统特性进行对比。研究结果表明:传输光波长越短、大气折射率结构参数取值越大、传输距离越远,因湍流扰动引起的LED可见光通信信道衰落越严重,光强闪烁系数越大;在相同参数条件下,LED可见光通信相比激光可见光通信信道衰落更小,光强闪烁系数更小,系统BER也更低;此外,随着闪烁强度增大、平均发射功率的增大,受湍流扰动影响的LED可见光通信系统和激光可见光通信系统之间的BER差距也逐渐增大。本文的理论研究和数值分析结果对大气环境下可见光通信系统的设计实现和场景应用提供有效理论支撑,具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 赵庆明. 星地上行激光通信光束漂移效应预补偿研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [2] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham, WA: SPIE press, 2005.
- [3] 迟楠, 王哲. 可见光通信复用技术研究进展[J]. 光通信技术, 2020, 44(4): 1-7.
- [4] 朱义君, 王超, 汪涛, 等. 水下单光子可见光通信技术研究[J]. 光通信技术, 2020, 44(6): 1-5.
- [5] 邓健志, 孙科壮, 程小辉. LED路灯可见光通信模型的研究[J]. 光通信技术, 2020, 44(5): 53-57.
- [6] 徐正元, 刘俊杰. 室外可见光通信抗干扰收发技术[J]. 光通信技术, 2020, 44(7): 1-6.
- [7] 迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于LED的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 7-18.
- [8] ISHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media[M]. New York: Academic press, 1978.
- [9] FANTE R L. Intensity fluctuations of an optical wave in a turbulent medium effect of source coherence[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1981, 28(9): 1203-1207.
- [10] SHANG J, NAN Z, LIU S, et al. Performance analysis of QPSK in free-space optical communications systems over combined channel with phase compensation error [J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(8): 2555-2563.
- [11] PRABU K, BOSE S, KUMAR D S. BPSK based subcarrier intensity modulated free space optical system in combined strong atmospheric turbulence[J]. Optics Communications, 2013, 305: 185-189.