

## 弱湍流中紫外光非直视分集接收技术的研究

赵太飞<sup>1,2</sup>, 王秀峰<sup>1</sup>, 王 花<sup>1</sup>, 余叙叙<sup>1</sup>, 李永明<sup>1</sup>

- (1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;  
2. 西南科技大学 特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 根据弱湍流信道中对数正态分布模型, 建立了紫外光非直视分集接收系统。采用开关键控(OOK)调制, 在不同闪烁指数和接收天线数下, 分别对比分析了最大比合并(MRC)、等增益合并(EGC)和选择性合并(SC)的误码性能。仿真结果表明, 相比于无分集情况, 采用三种合并方式的误码率性能有明显提升。在接收天线数相同的情况下, 三种合并方式中, MRC 的性能最优, 其次是 EGC, SC 的性能最差。对比分析了不同接收天线数时的误码率性能, 随着接收天线数的增加, 三种合并方式的误码性能得到了较大改善。在弱湍流信道中, 采用分集接收技术能够减轻衰落的影响, 提高分集增益。

**关键词:** 紫外光; 非直视; 分集接收; 闪烁指数; 合并技术

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1222002

## Research on ultraviolet non-line-of-sight diversity reception technology in weak turbulence

Zhao Taifei<sup>1,2</sup>, Wang Xiufeng<sup>1</sup>, Wang Hua<sup>1</sup>, Yu Xuxu<sup>1</sup>, Li Yongming<sup>1</sup>

- (1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;  
2. Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** Based on the log-normal model in the turbulence channel, ultraviolet Non-Line-of-Sight (NLOS) diversity reception system was established. Using on-off keying (OOK) modulation, the bit error rate (BER) performances among three linear combining technologies as maximal ratio combining(MRC), equal gain combining (EGC) and selection combining (SC) for different scintillation indices and different receiving antennas were analyzed. The simulation results show that the BER performance of the three merge methods has been significantly improved compared with the case of no diversity. In the case of the same number of receiving antennas, the performance of the system by MRC is the best, followed by EGC, and SC is poor. The BER performance of different receiving antennas has been compared and analyzed, three linear combining technologies have strong ability to improve the performance with the increase of receiving antennas. In weak turbulence channel, the diversity reception technology can reduce the influence of fading and increase diversity gain.

**Key words:** ultraviolet; non-line-of-sight; diversity reception; scintillation index; combining technologies

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-08-13

基金项目: 国家自然科学基金-中国民航局民航联合研究基金(U1433110); 西安市碑林区科技计划项目(GX1617);

陕西省教育厅服务地方专项计划项目(17JF024); 特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金(17kftk04)

作者简介: 赵太飞(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事紫外光通信技术方面的研究。Email: zhaotaifei@163.com

## 0 引言

紫外光通信具有非直视、全天候、宽视场、背景光干扰小等特点,近年来备受关注<sup>[1-5]</sup>。但紫外光在大气湍流传输过程中,紫外光信号在传输过程中会受到反射、折射、散射等影响,到达接收端的信号往往是不同路径信号的叠加,使得接收到的信号幅度随机变化,形成多径衰落。这种衰落会对接收到的有用信号产生干扰,使得接收到的信号波形产生失真、时延、叠加,严重影响系统的通信性能。大量文献资料表明,可以采用分集技术<sup>[6]</sup>来提高接收信号的质量,有效抑制信号衰落对紫外光通信产生的影响。2013年,左勇等<sup>[7]</sup>为了改善紫外光非直视通信系统的性能,将分集接收技术引入到紫外光通信系统中。实验结果表明,分集接收技术将紫外光非直视通信系统的信噪比提升了大约 12 dB。2015年,M.A.El-Shimy 等<sup>[8]</sup>为了减少紫外光通信过程中大气散射造成的延迟,提出了在紫外光通信系统中使用空间分集技术。研究结果表明,空间分集技术可以将紫外光通信系统的传输速率提升 50%左右。柯熙政等<sup>[9]</sup>建立了强湍流模型-K 分布模型下无线光通信空间接收分集系统模型,分别对比分析了最大比合并、等增益合并和选择合并的差错性能。文中研究了弱湍流

中紫外光非直视分集接收技术,对比分析了不同接收天线数下三种分集合并技术的误码率性能。

## 1 紫外光分集接收技术

紫外光非直视链路分集接收示意图如图 1 所示,发射端采用多个发射机将信号发射出去,为了提高传输信号的质量,每个发射机的发射仰角都不一样,可以采用小角度的发射仰角。接收端采用多个接收机进行接收,为了减少路径损耗,降低误码率,接收机可以采用小角度的接收仰角,这样就完成了紫外光非直视链路的分集接收。

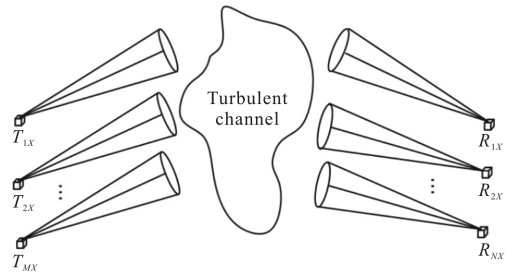


图 1 紫外光非直视链路分集接收示意图

Fig.1 Schematic diagram of diversity reception in UV NLOS link

具体的无线紫外光副载波分集通信系统框图<sup>[10]</sup>如图 2 所示。无线紫外光副载波分集通信系统中,发射端首先把信源产生的二进制信息送入到电调制器

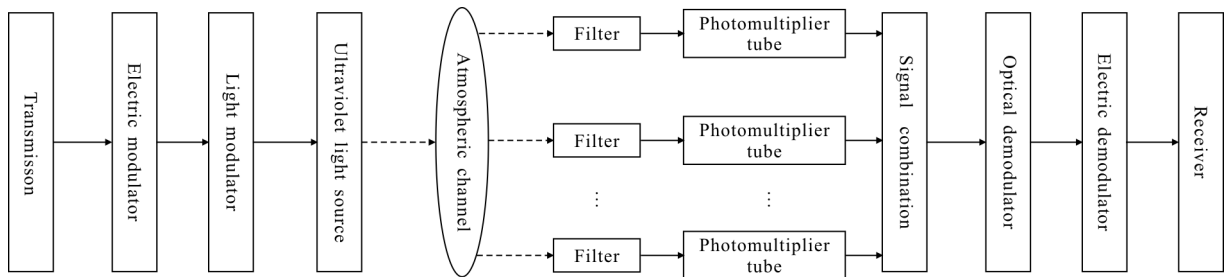


图 2 无线紫外光副载波分集通信系统框图

Fig.2 Block diagram of wireless UV subcarrier diversity communication system

进行电调制,然后将电信号送入到光解调器进行强度调制,最后加载到多个紫外光源上发射出去。接收端首先通过滤光片对紫外光进行滤波,减少背景光的干扰。然后经过多个光电倍增管把紫外光信号变成电信号送入光解调器进行光解调,再送入到电调制器进行电调制,最终还原出原始信息。

## 2 湍流模型与公式推导

### 2.1 湍流模型

光波经过不同强度的大气湍流后,由于大气折射率的起伏导致光强发生起伏。一般认为光波通过

大气弱湍流后光强起伏服从对数正态分布。该分布是由 Rytov 近似得到的, 根据中心极限定律得到光强起伏服从正态分布规律。在弱湍流情况下, 光强  $I$  服从对数正态分布, 其概率密度函数为<sup>[11-13]</sup>:

$$f(I) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln I}} \exp\left\{-\left(\ln \frac{I}{I_0} - \frac{1}{2} \sigma_{\ln I}^2\right)^2 / 2\sigma_{\ln I}^2\right\} \quad (1)$$

式中:  $I_0$  为光强的均值;  $\sigma_{\ln I}^2$  为对数强度方差。

在无线紫外光通信时, 大气湍流导致光强起伏, 使得入射到接收器上的光信号忽强忽弱, 影响接收机的阈值判决, 无线紫外光在大气中传输时, 光强闪烁指数  $\sigma_s^2$  为:

$$\sigma_s^2 = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1 \quad (2)$$

式中:  $I$  为光强;  $\langle \cdot \rangle$  表示系统平均。平面波的对数光强起伏方差  $\sigma_{\ln I}^2$  为:

$$\sigma_{\ln I}^2 = (\ln I - \langle \ln I \rangle)^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (3)$$

式中:  $k$  为波数;  $C_n^2$  为大气折射率常数;  $L$  为发射器与接收器之间的距离。光强闪烁指数  $\sigma_s^2 < 0.5$  时属于弱湍流情况,  $\sigma_s^2 > 1$  时属于强湍流, 居于两者之间的为中等强度湍流<sup>[14]</sup>。

## 2.2 公式推导

弱湍流信道下, 采用开关键控(OOK)调制, 接收端经过光电转换后, 接收到的光强  $y(t)$  可以表示为:

$$y(t) = I(t)P(t) + n(t) \quad (4)$$

式中:  $I(t)$  为等概率情况下引起的光强闪烁;  $P(t)$  为无湍流情况下的接收功率;  $n(t)$  为加性高斯白噪声。

### 2.2.1 MRC 合并技术

最大比合并对接收到的各支路信号进行同相加权处理后, 采用最大似然检测对信息进行还原。各支路的加权系数由该支路的信号幅度与噪声功率的比值所决定, 最大比合并的输出信噪比等于各支路的信噪比之和。紫外光非直视链路采用 MRC 合并方式时, 假设紫外光通信系统有  $M$  条分集支路, 每条支路的平均信噪比  $\overline{SNR}_{NLOS}$  相等, 对于 MRC 合并方式而言, 合并后解调器输入端的平均信噪比为<sup>[15]</sup>:

$$\overline{SNR}_{MRC, NLOS} = M \overline{SNR}_{NLOS} \quad (5)$$

紫外光非直视链路通信过程中, 采用 MRC 合并方式系统的误码率为:

$$P_{MRC, NLOS} = \int_0^\infty f(I) Q(M \overline{SNR}_{NLOS}) dI \quad (6)$$

式中:  $f(I)$  为参考文献[16]接收端强度分布概率密度函数;  $Q(a) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dy$ 。平均信噪比  $\overline{SNR}_{NLOS}$ <sup>[17]</sup> 为:

$$\overline{SNR}_{NLOS} = \frac{SNR_{NLOS}}{\sqrt{\frac{P_r}{P_r} + \sigma_s^2 SNR_{NLOS}}} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_s^2$  为光强闪烁指数;  $y_0$  为无湍流时的接收功率;  $SNR_{NLOS} = \sqrt{\frac{y_0 \lambda}{2R_b h c}}$  为无湍流时的信噪比,  $R_b$  为数据速率,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $\lambda$  为波长;  $P_r$  为无湍流时的平均接收功率;  $\overline{P_r}$  为弱湍流时的平均接收功率。

### 2.2.2 EGC 合并技术

等增益合并比较容易实现, 是最大比合并一种简单实现方式。等增益合并各支路的加权系数是一个常数, 等于 1。紫外光非直视链路采用 EGC 合并方式时, 假设紫外光通信系统有  $M$  条分集支路, 每条支路的平均信噪比  $\overline{SNR}_{NLOS}$  相等, 对于 EGC 合并方式而言, 合并后解调器输入端的平均信噪比为<sup>[15]</sup>:

$$\overline{SNR}_{EGC, NLOS} = \left(1 + (M-1) \frac{\pi}{4}\right) \overline{SNR}_{NLOS} \quad (8)$$

紫外光非直视链路通信过程中, 采用 EGC 合并方式系统的误码率为:

$$P_{EGC, NLOS} = \int_0^\infty f(I) Q\left(\left(1 + (M-1) \frac{\pi}{4}\right) \overline{SNR}_{NLOS}\right) dI \quad (9)$$

式中:  $\overline{SNR}_{NLOS}$  为公式(5)平均信噪比。

### 2.2.3 SC 合并技术

选择性合并三种合并技术中比较简单, 也容易实现。选择性合并把信噪比最高的支路信号作为输出, 各支路加权系数中, 只有一个为 1, 其余都为 0。紫外光非直视链路采用 SC 合并方式时, 假设紫外光通信系统有  $M$  条分集支路, 每条支路的平均信噪比  $\overline{SNR}_{NLOS}$  相等, 对于 SC 合并方式而言, 合并后解调器输入端的平均信噪比为<sup>[15]</sup>:

$$\overline{SNR}_{SC, NLOS} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{k} \overline{SNR}_{NLOS} \quad (10)$$

紫外光非直视链路通信过程中, 采用 EGC 合并

方式系统的误码率为:

$$P_{SC,NLOS} = \int_0^{\infty} f(l) Q \left( \sum_{k=1}^M \frac{1}{k} \overline{SNR}_{NLOS} \right) dl \quad (11)$$

式中:  $\overline{SNR}_{NLOS}$  为公式(7)平均信噪比。

### 3 性能仿真

根据上述理论分析,文中仿真分析了弱湍流条件下紫外光非直视分集接收技术误码性能,仿真过程中,系统部分参数取值如表 1 所示。

表 1 系统部分仿真参数

Tab.1 Part of simulation parameters in the system

Parameter	Value
Receiving aperture $A_r/cm^2$	1.77
Detection efficiency of the detector $\eta_r$	0.2
Wavelength $\lambda/nm$	250
Extinction coefficient $K_e$	$1.961 \times 10^{-3}$
Scattering coefficient $K_s$	$0.759 \times 10^{-3}$
Scattering phase function $P_s$	1
Photoelectric response $R/mA \cdot W^{-1}$	48

图 3 仿真分析了紫外光非直视通信时不同闪烁指数对三种合并方式误码性能的影响,其中发射功率  $P_t=15\text{ mW}$ ,数据速率为  $R_b=500\text{ Kbps}$ ,发端发散角  $\phi_1=10^\circ$ ,接收视场角  $\phi_2=30^\circ$ ,收发仰角  $\theta_1=\theta_2=20^\circ$ ,接收天线个数  $N=4$ ,图 3(a)中闪烁指数  $\sigma_s^2=0.01$ ,图 3(b)中闪烁指数  $\sigma_s^2=0.3$ 。

在图 3(a)中,当通信距离为 100 m 时,无分集、MRC、EGC、SC 的误码率分别为  $1.73 \times 10^{-4}$ 、 $9.12 \times 10^{-11}$ 、 $1.28 \times 10^{-9}$ 、 $4.43 \times 10^{-7}$ 。当通信距离小于 150 m 时,随着通信距离的增大,误码率明显增大,当通信距离大于 150 m 时,随着通信距离的增大,误码率的变化不明显。在误码率为  $10^{-3}$  时,无分集、MRC、EGC、SC 四种方式的通信距离分别为 110、150、140、125 m。

图 3(b)中,当通信距离为 100 m 时,无分集、MRC、EGC、SC 的误码率分别为  $1.58 \times 10^{-2}$ 、 $1.25 \times 10^{-3}$ 、 $1.83 \times 10^{-3}$ 、 $4.72 \times 10^{-3}$ 。当通信距离小于 100 m 时,随着通信距离的增大,误码率明显增大,当通信距离大于 100 m 时,随着通信距离的增大,误码率的变化不

明显。在误码率为  $10^{-3}$  时,无分集、MRC、EGC、SC 四种方式的通信距离分别为 75、100、95、90 m。

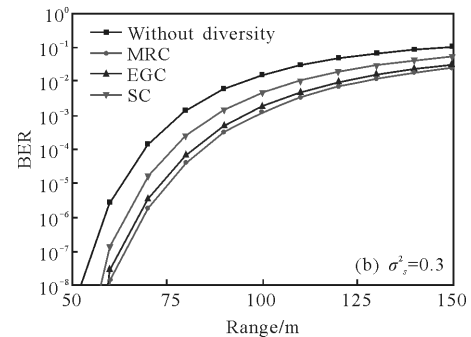
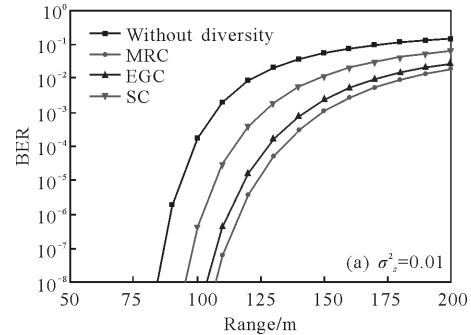


图 3 不同闪烁指数对误码率的影响

Fig.3 Effects of different scintillation indices on BER

对比图 3(a)和图 3(b)可以看出:在通信距离相同时,随着闪烁指数  $\sigma_s$  的增大,三种合并方式对应的误码率明显增大。在达到相同的通信距离时,三种合并方式中,采用 MRC 的误码率最低,其次是 EGC、SC 的误码率性能最差。

图 4 仿真分析了紫外光非直视通信时不同接收天线数对 MRC 误码性能的影响,其中发射功率  $P_t=15\text{ mW}$ ,数据传输速率  $R_b=500\text{ kbps}$ ,发端发散角  $\phi_1$ ,

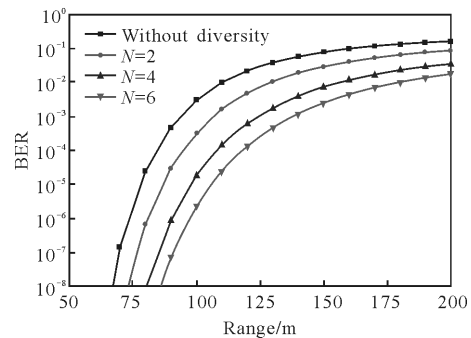


图 4 不同接收天线数下 MRC 误码率

Fig.4 BER of MRC on different receiving antennas

接收视场角  $\phi_2$ , 收发仰角  $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ , 闪烁指数  $\sigma_s = 0.01$ 。当通信距离为 100 m 时, 无分集、 $N=2、4、6$  的误码率分别为  $2.92 \times 10^{-3}、3.15 \times 10^{-4}、1.74 \times 10^{-5}、2.26 \times 10^{-6}$ 。从图 4 中可以看出, 随着通信距离的不断增大, MRC 误码率逐渐增大。随着接收天线数逐渐增大, 相比无分集 MRC 的误码性能得到了较大改善。

图 5 仿真分析了紫外光非直视通信时不同接收天线数对 EGC 误码性能的影响, 其中发射功率  $P_t = 15 \text{ mW}$ , 数据传输速率  $R_b = 500 \text{ Kbps}$ , 发散角  $\phi_1 = 10^\circ$ , 视场角  $\phi_2 = 30^\circ$ , 收发仰角  $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ , 闪烁指数  $\sigma_s^2 = 0.01$ 。当通信距离为 100 m 时, 无分集、 $N=2、N=4、N=6$  的误码率分别为  $2.92 \times 10^{-3}、4.74 \times 10^{-4}、3.88 \times 10^{-5}、6.27 \times 10^{-6}$ 。从图中可以看出, 随着通信距离的不断增大, EGC 误码率逐渐增大。随着接收天线数逐渐增大, 相比无分集 EGC 的误码性能得到了较大改善。

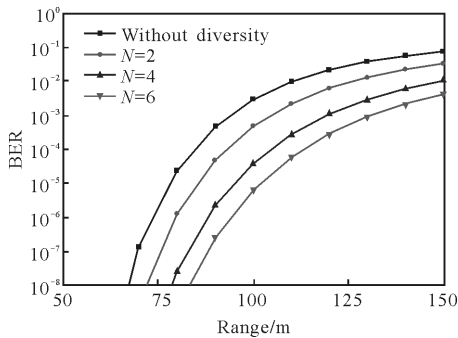


图 5 不同接收天线数下 EGC 误码率

Fig.5 BER of EGC on different receiving antennas

图 6 仿真分析了紫外光非直视通信时不同接收天线数对 SC 误码性能的影响, 其中发射功率  $P_t = 15 \text{ mW}$ , 数据传输速率  $R_b = 500 \text{ Kbps}$ , 发散角  $\phi_1 = 10^\circ$ , 视场角  $\phi_2 = 30^\circ$ , 收发仰角  $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ , 闪烁指数  $\sigma_s^2 =$

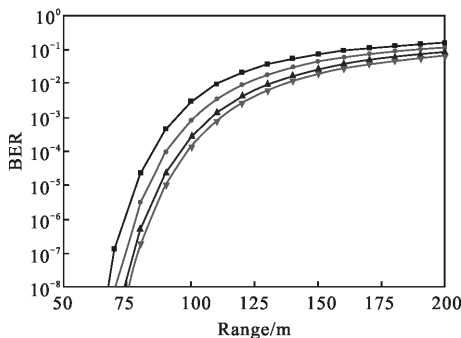


图 6 不同接收天线数下 SC 误码率

Fig.6 BER of SC on different receiving antennas

0.01。当通信距离为 100 m 时, 无分集、 $N=2、4、6$  的误码率分别为  $2.92 \times 10^{-3}、8.58 \times 10^{-4}、2.71 \times 10^{-4}、1.45 \times 10^{-4}$ 。从图中可以看出, 随着通信距离的不断增大, SC 误码率逐渐增大。随着接收天线数逐渐增大, 相比无分集 SC 的误码性能得到了较大改善。

以 2 分集为例, 采用 MRC、EGC、SC 三种合并方式的误码率性能如图 7 所示, 由图 7 可以看出, 随着通信距离的增大, 误码率增大, 三种合并方式具有相同的变化趋势。在相同的通信距离下, 2 分集时, MRC 的误码率性能最好, 其次是 EGC、SC 的误码率性能最差。

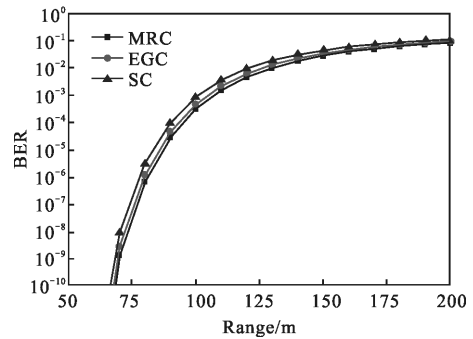


图 7 2 分集时三种合并方式误码率

Fig.7 BER of three combining methods at 2 diversity

## 4 结 论

文中研究了弱湍流信道下的紫外光非直视分集接收技术, 给出了紫外光非直视通信过程中三种合并技术的误码率公式, 并进行了仿真分析。结果表明: 随着闪烁指数的不断增大, 三种合并方式的误码率逐渐增大。当通信距离相同时, 三种合并方式中, MRC 的性能最优, 其次是 EGC、SC 的性能最差。随着接收天线数的增加, 相比无分集 MRC、EGC、SC 的误码性能均越来越好。在实际的工程应用中, 可以考虑采用 MRC、EGC 合并方式提高紫外光非直视通信的性能。

研究弱湍流信道下的紫外光非直视通信分集接收技术, 对于提升无线紫外光通信的性能具有重要的意义。未来的研究可从以下几个方面入手: (1) 进一步研究湍流信道中的紫外光通信分集接收技术; (2) 研究适用于湍流信道的无线紫外光通信收、发端机结构; (3) 对紫外光非直视通信分集接收技术进行实验验证。

## 参考文献:

- [1] Qiang R, Zhao S, Wang X, et al. Ultraviolet multipath scattering link model under the influence of high altitude turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 108-114.
- [2] Chen G, Xu Z, Sadler B M. Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-line-of-sight communication channels [J]. Optics Express, 2010, 18(10): 10500-10509.
- [3] Han D, Liu Y, Zhang K, et al. Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system [J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15833-15842.
- [4] Xiao H, Zuo Y, Wu J, et al. Bit-error-rate performance of non-line-of-sight UV transmission with spatial diversity reception.[J]. Optics Letters, 2012, 37(19): 4143-4145.
- [5] Zhang H, Yin H, Jia H, et al. Study of effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links [J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21216-21226.
- [6] Zhang H, Li H, Xiao D, et al. Performance analysis of spatial-diversity reception over combined effects of atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0405002. (in Chinese)
- [7] Fan C, Zuo Y, Wu Z, et al. Research on diversity reception in ultraviolet communication system [J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(12): 44-46.
- [8] Elshimy M A, Hranilovic S. Spatial-diversity imaging receivers for Non-line-of-sight solar-blind UV communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(11): 2246-2255.
- [9] Ke X, Liu M. Diversity reception technology over turbulence channels in wireless optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 80-87.
- [10] Chen D, Ke X. Research on diversity receive technology on wireless optical communication using subcarrier modulation. [J]. Journal on Communications, 2012, 33(8): 128-133.
- [11] Liu Y, Zhang G. Combination of spatial diversity receiving technology of wireless optical communication in weak turbulence atmosphere channel [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 698-702.
- [12] Shao J, Ke X, Chen Q. A suitable polar coding modulation scheme for atmospheric weak turbulence channel [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1831-1836.
- [13] Wang H, Hu H, Zhang Y, et al. Modeling and simulating of error performance for free space optical communication system through weak turbulence atmosphere [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(4): 788-792.
- [14] Chen C, Yang H, Jiang H, et al. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(6): 779-791. (in Chinese)
- [15] Fan C. Research on diversity technology in ultraviolet communication system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)
- [16] Zhao T, Wang X, Liu Y. Modulation research of helicopter landing using ultraviolet guiding technology in atmospheric turbulence[J]. Laser Technology, 2017, 41(3): 411-415. (in Chinese)
- [17] Ding H, Chen G, Majumdar A K, et al. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels [C]//Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2011, 8038(1): 73-81.