

直升机降落引导中无线紫外光通信性能分析

赵太飞 刘一杰 王秀峰

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 针对无线紫外光通信特点及直升机降落过程中的信道特征,设计无线紫外光通信方法,利用LED阵列结构,实现对直升机的降落区域引导及空地紫外光通信。基于紫外光在真实空间的传输特点,从路径损耗、信噪比等方面探索无线紫外光通信在不同收发仰角条件下的性能差异。使用日盲紫外光LED光源及光电倍增管作为收发器件,对提出方法进行实验验证,获得不同收发仰角条件下紫外光传输的路径损耗及信噪比。直视通信性能最佳,收发仰角在 30° 以内的通信性能更适用于实际情况,收发仰角大于 30° 时通信性能快速下降。

关键词 光通信; 紫外光通信; 路径损耗; 信噪比; 直升机; 辅助降落

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.060602

Analysis of Wireless Ultraviolet Communication Performance in Application of Helicopter Landing Assistance

Zhao Taifei Liu Yijie Wang Xiufeng

Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract According to characteristics of wireless ultraviolet communications and channel model of the helicopter landing process, a method of wireless ultraviolet communication to assist helicopter landing system is designed with LED array structures. Based on the ultraviolet propagation characteristics in real space, the performance differences of wireless ultraviolet communication at various transmitting elevations and receiving elevations are explored in terms of path loss and signal-to-noise ratio. The proposed method is verified experimentally with solar blind ultraviolet LEDs and photomultiplier tubes as transmitting and receiving devices, and the path loss and the signal-to-noise ratio in the ultraviolet propagation are obtained. The results show that the performance of line-of-sight communication is the best, the communication performance with elevation lower than 30° is more applicable to actual situations, and that with the elevation higher than 30° degenerates rapidly.

Key words optical communications; ultraviolet communications; path loss; signal-to-noise ratio; helicopter; landing assistance

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.1310; 260.7190

1 引言

随着低空空域试点城市开放数量的增加,国家“十二五”规划积极推动通用航空领域的发展,中国民用直升机市场将迎来井喷时代,直升机的应用将越来越广泛,与此同时直升机使用过程中暴露的安全问题也越发突出。因此如何克服直升机野外定点降落困难,保证其降落安全性,仍然是一个亟待解决的问题。无线紫外光辅助起降技术是利用日盲紫外光进行复杂环境下全天候通信的一种直升机应急通信安全保障手段,可实现直升机起降阶段的降落点定位引导及空地通信。

紫外光(UV)是一种波长为 $10\sim 400$ nm的光波,紫外光通信主要采用日盲波段的紫外光作为信息传输

收稿日期: 2015-12-17; **收到修改稿日期:** 2016-01-02; **网络出版日期:** 2016-05-25

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)、陕西省科技计划工业公关项目(2014K05-18)、陕西省教育厅产业化培育项目(2013JC09)、西安市科学计划(CXY1435(4))

作者简介: 赵太飞(1978—),男,博士,副教授,主要从事紫外光通信网络和无线光通信等方面的研究。

E-mail: year623@163.com

载体,利用大气中的粒子、气溶胶、灰尘等微粒对紫外光的散射进行信息传递。目前的直升机辅助降落技术,无论是舰面还是陆地,基本都是基于可见光的引导方式,再辅以无线电通信指挥。利用紫外光进行助降引导,与传统方式相比,具有抗干扰能力强、宽视场接收、高保密性和无需捕获对准跟踪等优点^[1-3]。在复杂天气环境下,紫外光通信能够克服老式可见光引导方式受视线及能见度等条件制约的缺点,特别是在强干扰环境或需要无线电静默的情形中,其散射传播与保密性强的特点表现得更加突出。

2 紫外光传输模型

2.1 无线日盲紫外光直视通信模型

无线日盲紫外光通信按照工作方式可以分为直视(LOS)和非直视(NLOS)方式^[4-6],直视通信方式类型如图1所示。

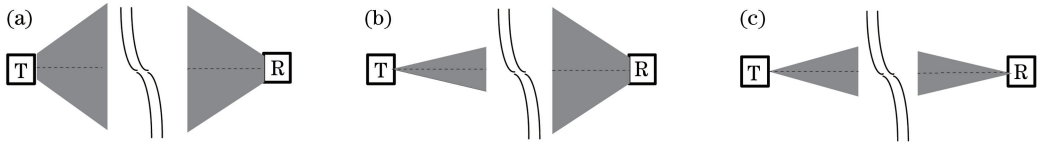


图1 三种日盲紫外光直视通信类型示意图

Fig. 1 Schematic of three UV LOS communication types

无线日盲紫外光 LOS 通信中紫外光的功率会发生指数衰减,在自由空间中路径损耗与传输距离的平方成反比,大气衰减表示为 $\exp(-K_e r)$,探测器接收增益为 $\frac{4\pi A_r}{\lambda^2}$,其中 r 为通信距离, λ 为波长, K_e 为大气信道衰减系数, $K_e = K_a + K_s$, K_a 为大气吸收系数, K_s 为大气散射系数, A_r 为接收孔径。因此紫外光 LOS 链路的接收光功率可表示为^[7]

$$P_{r,LOS} = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \exp(-K_e r) \frac{4\pi A_r}{\lambda^2}, \quad (1)$$

化简为

$$P_{r,LOS} = \frac{P_t A_r}{4\pi r^2} \exp(-K_e r), \quad (2)$$

式中 P_t 为发射功率。

在紫外光通信中,路径损耗定义为发送功率与接收功率的比值,因而 LOS 链路路径损耗表示为

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \frac{4\pi r^2}{A_r \exp(-K_e r)}. \quad (3)$$

2.2 无线日盲紫外光 NLOS 通信模型

无线日盲紫外光 NLOS 可以分为三种通信方式^[8],如图2所示。

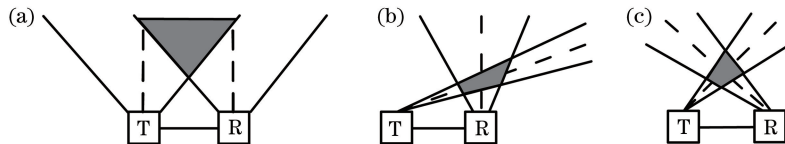


图2 紫外光 NLOS 通信的三种方式

Fig. 2 Three UV NLOS communication types

在无线日盲紫外光 NLOS 通信的单次散射模型中 T_x 为发送端, R_x 为接收端, φ_T 为发送端发散角, φ_R 为接收端视场角, θ_T 为发送仰角, θ_R 为接收仰角, V 为有效散射体区域, r 为发送端到接收端的基线距离, r_1 和 r_2 分别为发送端和接收端到有效散射体的距离。 T_x 以 φ_T 和 θ_T 向空间发射光信号,光信号在有效散射体内散射后, R_x 以 φ_R 和 θ_R 进行光信号接收^[9]。理论上有效散射体体积越大,传输效果越好。在不同的收发仰角和偏轴角下,可以利用体积微元的方法对覆盖范围进行积分,得到散射体的体积^[10]。

紫外光 NLOS 单次散射通信接收端接收光功率计算公式为^[7]

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t A_r K_s P_s \varphi_r \varphi_t^2 \sin(\theta_T + \theta_R)}{32\pi^3 r \sin \theta_T [1 - \cos(\varphi_T/2)]} \exp\left[-\frac{K_e r (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)}\right], \quad (4)$$

式中 P_s 为散射角 θ_s 的相函数。

由于发射端功率有限,所以计算发射端的覆盖范围,其发射方向角为^[11]

$$\theta = 2\arctan\left[\frac{\tan(\varphi_T/2)}{\cos \theta_T}\right]. \quad (5)$$

发射端单颗 LED 的覆盖范围可以由其发散角及仰角决定,有助于 LED 阵列中 LED 的排列结构设计。

根据自由空间路径损耗公式 $L = P_t/P_r$, 无线日盲紫外光 NLOS 通信的路径损耗可表示为

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \frac{32\pi^3 r \sin \theta_T \left(1 - \cos \frac{\varphi_T}{2}\right)}{A_r K_s P_s \varphi_r \varphi_t^2 \sin(\theta_T + \theta_R) \exp\left[-\frac{K_e r (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)}\right]}. \quad (6)$$

在通信理论中,信噪比(SNR)定义为 $10\lg \frac{P_s}{P_n}$, 其中 P_s 和 P_n 分别为信号功率和噪声功率。虽然紫外光通信中发生多次散射,但以第一次散射为主^[12], 无线紫外光通信中量子极限条件下的信噪比为^[13]

$$R_{SN} = \frac{\eta_t \eta_r P_t \lambda}{2hcBL}, \quad (7)$$

式中 η_r 和 η_t 分别表示滤光片透射率和光电倍增管的探测效率, h 为普朗克常数, B 为信道带宽, L 为路径损耗。

3 直升机定位引导方法

为了帮助飞行员寻找降落点,引导直升机抵达降落点上空,将紫外光 LED 组成阵列,在半球型结构上将若干 LED 按一定规则排布。每层每列均单独编号,每层为纬线,每列为经线,每条经线与其基准线存在已知的固定夹角 α_n , 每条纬线与其基准线有夹角 β_n , $n=0,1,2,3,\dots$, 如图 3 与图 4 所示。位于纬线和经线交点的每一个 LED 均有一个独立的 ID, 此 ID 的前一位代表其经线号, 后一位代表其纬线号, 每颗 LED 被点亮时, 该 LED 即通过一定的编码方式发送包含有自身 ID 的信息。

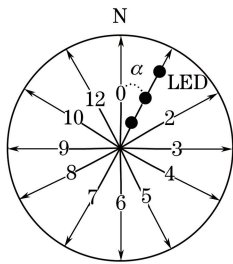


图 3 LED 阵列经线方向示意图

Fig. 3 LED array in longitudinal direction

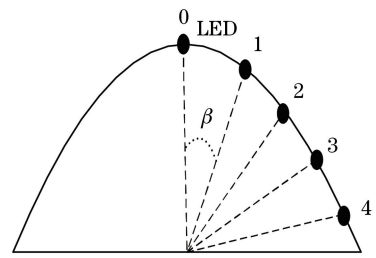


图 4 LED 阵列纬线方向示意图

Fig. 4 LED array in latitudinal direction

当直升机上的接收端接收到 LED 发送的紫外光信号时,即可获得该 LED 编号,即得到两个角度 α_n 与 β_n 。收发端距离 r 在以发射端为原点的直角坐标系 xoy 平面内的投影为 $r' = r \sin \beta_n$, 直升机在 x 轴的投影为 $x = r \sin \beta_n \sin \alpha_n$, 在 y 轴的投影为 $y = r \sin \beta_n \cos \alpha_n$, 在 z 轴的投影为 $z = r \cos \beta_n$, 得到直升机的坐标 (x, y, z) , 如图 5 与图 6 所示。

因此,直升机相对于降落点的坐标 (x, y, z) 为

$$\begin{cases} x = r \sin \beta \sin \alpha \\ y = r \sin \beta \cos \alpha, \\ z = r \cos \beta \end{cases} \quad (8)$$

此时的问题转变为如何通过接收到的信号获得发射端与接收端的距离 r 。考虑直升机降落应用场景特点的同时也考虑先将问题简化处理。在 $0 \sim 50$ m 距离内,将 LED 阵列结构的发射端与直升机携带接收端的通信方式规定为 LOS 通信,而且实际中 LOS 通信的信号强度大于 NLOS 通信,因此在直升机助降应用中首先

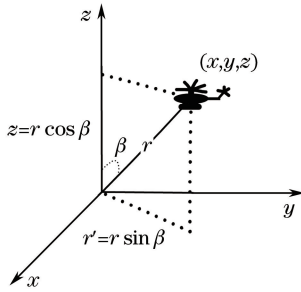


图5 直角坐标系示意图

Fig. 5 Schematic of rectangular coordinate system

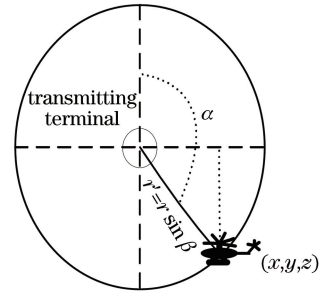


图6 直升机坐标示意图

Fig. 6 Schematic of helicopter coordinate system

考虑简单的 LOS 通信情况。由于单颗 LED 的发射功率有限,导致传输距离很短,所以将通过实验证明在一定发射功率、一定仰角下的路径损耗和信噪比可满足低传输速率下的实际使用要求。在保证设备便携性、低功耗且不考虑成本的前提下,可以考虑多个阵列结构中中继转发的方法,有效增加引导距离^[14]。

在 LOS 通信中,由(2)式可知,在发射功率、大气吸收系数和接收孔径面积等参数一定时,接收功率 P_r 是关于 r 的函数,求解该函数的反函数,即

$$P_r = f(r), r = f^{-1}(P_r). \quad (9)$$

在其他参数一定的情况下,如果已知 P_r ,利用公式可以计算得到 LOS 的通信距离 r ,问题再次转变为如何方便、简单地得到接收端的接收光功率 P_r 。

若以光电倍增管(PMT)作为接收器件,可通过其输出信号估算入射光功率的大小。PMT 信号以电流的形式输出,其输出电流表达式为^[13]

$$I = \frac{N_r \eta_a \eta_i G e}{T}, \quad (10)$$

式中 N_r 为接收到的入射光子数, η_a 为 PMT 的光电转换效率, η_i 为滤光片对紫外光的透射率, G 为 PMT 增益, e 为电子电荷量, T 为时间。可得入射光子数量为

$$N_r = IT / (\eta_a \eta_i G e). \quad (11)$$

单个光子的能量 $E = h\nu$, h 为普朗克常数, $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, ν 为频率。则接收光功率为

$$P_r = EN_r / T = EI / (\eta_a \eta_i G e). \quad (12)$$

只要得到接收端输出信号,即可估算得到接收光功率的大小,从而得到 LOS 通信中发射端与接收端的距离 r 。

4 紫外光通信链路硬件平台实验及结果分析

在无线日盲紫外光链路模型的基础上,结合直升机助降应用的背景,搭建了紫外光通信链路硬件实验平台及飞行模拟演示平台,针对共面 LOS、NLOS 通信链路进行实测。实验目的是为了验证利用无线紫外光在直升机辅助降落场景中建立空地通信链路及利用接收端输出信号估算发送端与接收端距离,计算直升机位置坐标的可行性。下面从路径损耗、接收功率、信噪比等方面进行实验分析^[15-16]。

硬件平台主要器件使用 R7154 型 PMT(滨松光子学株式会社,日本)及 UVTOP 系列 LED(SET 公司,美国)^[16],具体参数如表 1、2 所示。

表1 R7154 型 PMT 主要参数

Table 1 Parameters of R7154 PMT

Parameter	Value
Spectral response	160~320 nm
Maximum response wavelength	230 nm
Effective area	8 mm×24 mm
Gain	10^7
Cathode sensitivity	62 mA/W (at 254 nm)
Anode sensitivity	6.2×10^5 A/W (at 254 nm)
Quantum efficiency η_p	25%

表2 UVTOP260LED 主要参数

Table 2 Parameters of UVTOP260LED

Parameter	Value
Peak wavelength	265 nm
Typical optical power	0.30 mW
Minimum optical power	0.18 mW
Lens type	HS
Typical emission pattern	6°

其他实验参数选取如下:大气消光系数 $K_e = 1.255 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, 温度 $T = 10 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。测试选取空旷室外场地,在晴朗的低光夜晚,滤光片 $\eta_t = 35\%$ 。

为了验证实验方案的可行性,先在 5~10 m 距离范围内进行特定角度的实验验证。图 7 和图 8 为接收仰角 θ_R 和发射仰角 θ_T 均为 15° 时测试得到的路径损耗和接收功率与经典理论仿真结果的对比,路径损耗平均差值约为 3 dB,接收功率差值在 0.1~1 个量级以内,基本符合预期规律,反映了一定的紫外光传输特性规律,验证了提出的利用 PMT 输出信号推算接收功率和路径损耗这一方法的正确性。

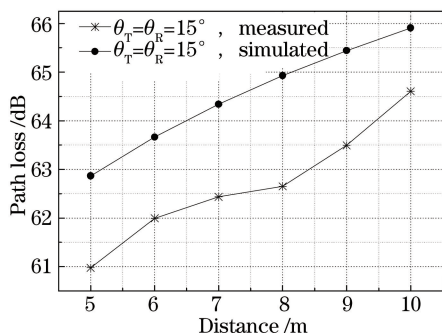


图 7 实测路径损耗与仿真结果的对比
Fig. 7 Comparison of measured and simulated path loss results

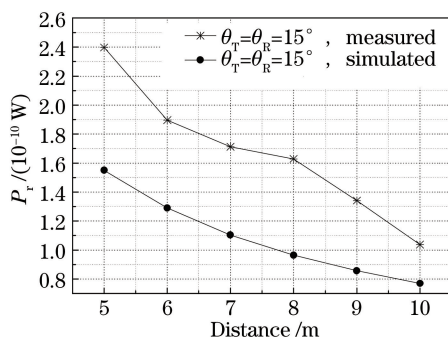


图 8 实测接收功率与仿真结果的对比
Fig. 8 Comparison of measured and simulated received power results

分析验证实验结果中理论仿真数据与实测数据的差异来源。由于使用的滤光片具有带通滤光特性,且 LED 发射的紫外光线并非只有单一波长,发射和入射的光线均为在一个波长范围但具体波长不同的光线,所以接收光的光功率和相应的路径损耗必定大于理论仿真中单一波长光线入射的情形,一般认为路径损耗差值为 2~3 dB。

验证实验方案的正确性后,在 0~50 m 距离范围内,不同的接收仰角和发射仰角条件下,对无线日盲紫外光传输系统进行实验测试。主要测量背景光噪声及紫外光信号接收光功率大小,计算得到同一天气状态下紫外光实际传输的路径损耗以及环境中的信噪比。

图 9 为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 收发仰角范围内的无线日盲紫外光传输路径损耗。分析可知,UVTOP 系列紫外光 LED

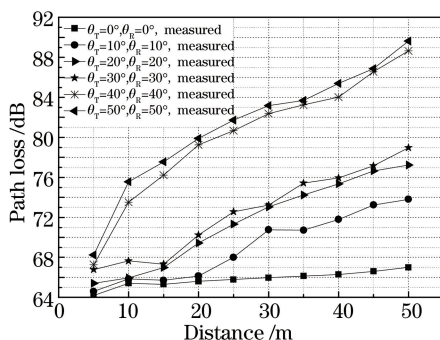


图 9 不同接收仰角和发射仰角条件下实测路径损耗
Fig. 9 Measured path loss at different receiving elevations and transmitting elevations

以 0.3 mW 的功率发射光信号, LOS 通信模式下 $\theta_T=0^\circ$ 、 $\theta_R=0^\circ$ 时接收信号强度最高, 在 50 m 以内的距离内功率损耗很小, 性能较好。

$\theta_T=10^\circ$ 、 $\theta_R=10^\circ$ 时, 在 0~20 m 范围内与 LOS 方式的路径损耗差值在 2 dB 以内, 当距离大于 20 m 后路径损耗上升较为明显。主要原因为 10° 的仰角很小, 与直视相比变化不大, 基本上属于小仰角下的类 LOS 通信, 在一定距离内性能与 LOS 相同, 当距离增大时, 散射体积变化的影响加剧, 使得其性能又不同于 LOS 通信。

与 $\theta_T=20^\circ$ 、 $\theta_R=20^\circ$ 时, 实测路径损耗与模拟结果相差很小, 约为 1~3 dB, 但与 LOS 方式的性能差异变大, 15 m 距离以内路径损耗变化较为平缓, 15 m 距离以上变化加剧。

$\theta_T=40^\circ$ 、 $\theta_R=40^\circ$ 时与 $\theta_T=50^\circ$ 、 $\theta_R=50^\circ$ 时的性能非常接近, 但与 LOS 及小仰角的性能差异较大。 40° 仰角与 50° 仰角下路径损耗随距离的变化明显, 与 20° 和 30° 仰角差异较大。

所有环境噪声都会进入接收端, 因此发射端未发射紫外光信号时, 接收端可以对环境噪声进行大致测量。图 10 为不同收发仰角下, 同一信道中紫外光传输信噪比的测试结果, 可以发现 30° 仰角以内信噪比为正值, 即信号接收功率大于噪声功率, 但收发仰角大于 40° 时, 只在 15 m 距离内信号功率大于噪声功率, 即发射功率一定的情况下, 远距离、大收发仰角条件的传输性能相对更差。

在直升机降落场景中, 旋翼的旋转会在机身下方产生一定风速的风, 为了探求单一方向的风是否会对紫外光传输性能产生影响, 针对横向风(垂直于收发端水平连线)及纵向风(平行于收发端水平连线)两种情况进行了实测。实验发现, 单一方向的风对路径损耗的影响十分微弱, 纵向风几乎对性能没有影响, 而横向风对路径损耗的影响有限, 结果如图 11 所示。实验在平均风速为 20 m/s 条件下进行, 该风速标准是对已有 6 旋翼飞行器实验平台的翼下最大风速进行测量后所选取。

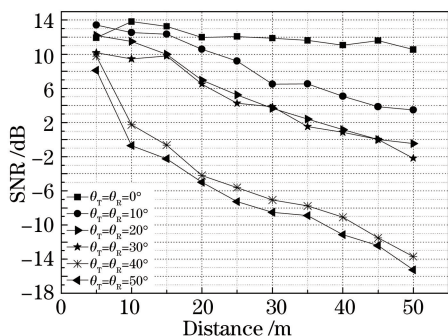


图 10 不同接收仰角和发射仰角条件下实测信噪比

Fig. 10 Measured SNRs at different receiving elevations and transmitting elevations

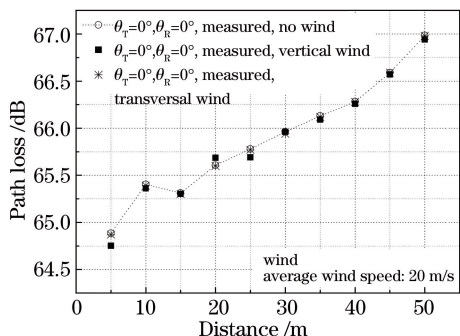


图 11 不同风向条件下紫外光传输性能实测结果

Fig. 11 Measured path loss under different wind directions

从图 11 可知, 在直升机助降场景中, 直升机旋翼产生的单一方向的风未对紫外光传输性能造成强烈干扰。通过实验发现日盲紫外光在大气中的路径损耗并不低, 如何解决传播损耗以提高系统性能是一个关键问题。单颗 LED 功率非常有限, 所以将多颗 LED 组成阵列结构, 由多颗 LED 组成阵列结构上的一个点, 能够有效提高紫外光的发射功率, 同时不同的扫描方式也能够扩大信号的覆盖范围, 在某些特殊要求下可以考虑使用中继方案增大发射距离^[16]。虽然真实大气对紫外光信号的吸收作用不可忽略, 但是通过增大发射功率从而增加传播距离, 依旧是一种直接而有效的方法。而且本文涉及到的系统预期主要用于 0~50 m 距离内对飞行器进行视距引导, 只需要传送 LED 点的 ID 序号, 对传输速率的要求并不高。通过信噪比实验分析可以发现, 在低传输速率下实现较远距离的信号传送是可以实现的。同时接收端使用高灵敏度的光电接收器件, 利用微弱信号探测放大电路对小信号进行放大, 则在保证设备便携性的前提下, 满足系统性能的要求并非不可实现。

5 结 论

针对无线日盲紫外光通信模型的特点, 设计了一种基于无线日盲紫外光 LED 阵列的直升机引导助降方

法,将紫外光通信应用于直升机降落场景中,并且针对紫外光散射通信模型,对大气传输特点进行了实验测试,从路径损耗、信噪比等方面对大气紫外光传输特性进行了分析。

利用 PMT 的输出信号实现直升机定点引导降落具有一定的可行性,在探索传输特性过程中发现,直视或者小收发仰角情况下通信性能最佳;20°或 30°收发仰角条件下性能略低于直视情况;单颗 LED 发射功率一定时,大收发仰角通信性能随着距离的增加急剧下降。通过实验手段获得一定风速影响下的通信性能,分析可知在单一方向的风的作用下,通信性能并未受到较大影响,但是风所引起的其他环境改变对通信性能造成的影响不能忽视。对不同仰角下传输性能的实测结果可以为 LED 阵列排列方式提供参考,且不建议以 30°以上仰角发射信号。

参 考 文 献

- 1 Tang Y, Ni G Q, Wu Z L, *et al.*. Research on channel character of solar blind UV communication[C]. SPIE, 2008, 6829: 682907.
- 2 Xu Z Y, Sadler B M. Ultraviolet communications: Potential and state-of-the-art[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(5): 67-73.
- 3 Shaw G A, Siegel A M, Greisokh D. Recent progress in short-range ultraviolet communication[C]. SPIE, 2005, 5796: 214-225.
- 4 Zhang H L, Yin H W, Jia H H, *et al.*. Study of effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links [J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21216-21226.
- 5 Zuo Y, Xiao H F, Wu J, *et al.*. Closed-form path loss model of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation [J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2116-2118.
- 6 Ding H, Chen G, Majumdar A K, *et al.*. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 27(9): 1535-1544.
- 7 Xu Z Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007, 3: 577-580.
- 8 Shaw G A, Siegel A M, Mode J. Recent progress in short-range ultraviolet communication[C]. SPIE, 2005, 5796: 214-225.
- 9 Zhao Taifei, Jin Dan, Song Peng. Channel capacity estimation and analysis of wireless ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. Chinese J Lasers, 2015, 24(6): 0605001.
赵太飞, 金丹, 宋鹏. 无线紫外光非直视通信信道容量估算与分析[J]. 中国激光, 2015, 24(6): 0605001.
- 10 He Hua. Research on volume scattering phase function under ultraviolet non-line-of-sight single scattering link[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030603.
何华. 紫外光非视距单次散射链路中体散射相函数的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030603.
- 11 Zhao Taifei, Li Qiong, Wang Yidan, *et al.*. Fast channel allocation method in wireless ultraviolet network based on particle swarm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0106002.
赵太飞, 李琼, 王一丹, 等. 基于粒子群的无线紫外光网络快速信道分配方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0106002.
- 12 Zhao Taifei, Zhang Aili, Jin Dan, *et al.*. Research on the inter-link interference model in wireless ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706023.
赵太飞, 张爱利, 金丹, 等. 无线紫外光非视距通信中链路间干扰模型研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706023.
- 13 Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Research on multi-channel access technology in wireless UV scattering communication[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306001.
赵太飞, 王小瑞, 柯熙政. 无线紫外光散射通信中多信道接入技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306001.
- 14 Li Jibo, Wu Xiaojun, Wang Hongxing, *et al.*. Anti-interference relayed link method and power requirement analysis for ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030601.
李济波, 吴晓军, 王红星, 等. 紫外光非直视通信抗干扰中继链路方法及其功率需求分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030601.
- 15 Xu Z Y, Chen G, Abou-Galala F, *et al.*. Experimental performance evaluation of non-line-of-sight ultraviolet communication systems[C]. SPIE, 2007, 6709: 67090Y.
- 16 Chen G, Abou-Galala F, Xu Z Y, *et al.*. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links [J]. Optics Express, 2008, 16(19): 15059-15068.