

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.006

直升机助降湍流信道中紫外光通信性能分析

赵太飞, 刘园, 王玉, 金丹

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 无线紫外光通信具有全天候、非直视、高可靠性的特点, 可以实现复杂环境下的通信。利用直升机助降过程中的无线紫外光通信链路模型, 研究了直升机助降场景中可能存在的水平通信、垂直通信和斜程通信, 分析了大气湍流对无线紫外光通信信号强度概率密度函数方差的影响。计算机仿真结果表明: 湍流强度对紫外光通信性能影响很大, 随着通信距离、垂直高度差和收发仰角的增大, 信号强度概率密度方差和能量衰减逐渐增大。

关键词: 紫外光通信; 直升机助降; 大气湍流

中图分类号: TN926

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)02-0163-06

Performance analysis of ultraviolet communication in helicopter assisted landing

ZHAO Taifei, LIU Yuan, WANG Yu, JIN Dan

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Ultraviolet (UV) communication has the characteristics of all-weather, non-line-of-sight and high reliability, which can satisfy communication in complex environments. In this paper, using the helicopter assisted landing by wireless UV communication model, the research is conducted on the turbulence channel performance of different communication scenarios, including horizontal transmission, vertical transmission and slant path transmission. Finally, the variance of the probability density function of the received irradiance fluctuation with turbulence is analyzed. The computer simulation results show that turbulence has a great influence on the performance of UV communication. UV signal can hardly be received with strong turbulence. The variance of probability density function and energy attenuation increases, while the range, height difference, or transceiver elevation angle increases.

Key words: ultraviolet communication; helicopter assisted landing; atmospheric turbulence

近年来,随着直升机应用范围的不断扩大,如何解决其降落过程中突发状况导致的安全着陆问题变得尤为重要,因此直升机应急起降辅助技术成为新的研究热点^[1]。紫外光引导直升机助降技术可以实现全天候、复杂环境、可靠性高的直升机起降,该技术是利用紫外光散射特性进行复杂环境下全天候通信的一种直升机应急安全保障手段,其非直视的工作特点能够更好的适应复杂的地理环境,因此,无线紫外光通信辅助起降技术在实际中得到了更广泛的应用。

大气湍流是影响紫外光通信效果的重要天气因

素,文献[2]中提出一种全天候的无线紫外光辅助起降通信系统,以解决直升机起降过程中的飞机引导、信息获取、通信建立等重要问题。文献[3]给出了各种衰减的评估,给出了不同种类大气状况和系统参数的理论计算结果,认为湍流相对较强时,闪烁衰减随着距离的增加而增加。文献[4]在分析散射功率和随机湍流介质特性关系的基础上,建立了单次散射传播模型,分析了不同折射率结构和收发范围情况下非直视紫外光通信接收功率的依赖性。上述文章研究了无线紫外光辅助起降系统湍流情况下,闪烁衰减与距离的关系以及随机湍流介质下的单次散

收稿日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金资助项目(U1433110);陕西省科技计划工业公关资助项目(2014K05-18);陕西省教育厅产业化培育资助项目(2013JC09);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013JC2-15);西安市科学计划资助项目(CXY1435(4));西安市碑林区科技计划资助项目(GX1302)

作者简介: 赵太飞,男,副教授,博士,研究方向为紫外光通信和物联网。E-mail:zhaotaifei@163.com

射模型,但都未对大气湍流对直升机助降的影响做出分析研究。因此,本文对直升机助降场景下的水平通信、垂直通信以及斜程通信方式中的紫外光通信性能进行研究,分析这三种通信方式下,大气湍流以及通信距离等因素对紫外光通信性能的影响。

1 直升机助降中的紫外光通信原理

1.1 直升机助降中紫外光单次散射链路

在直升机助降系统使用过程中,发送端将其携带的传感器所测风力、风向及降落环境等地面信息发送给直升机,飞行员根据地面实际降落条件,操作直升机安全降落。将紫外光用于直升机助降时,由于收发端存在一定的高度差,故需要考虑大气湍流对通信性能的影响,本文主要研究不同通信场景下大气湍流对紫外光通信性能的影响。

图1是直升机助降下紫外光斜程通信的几何链路。当垂直高度差 $h=0$ 时,收发端在同一水平高度,即为水平通信;当水平距离 $r=0$ 时,收发端之间只存在高度差,此时为垂直通信;当 $r \neq 0$ 且 $h \neq 0$ 时,收发端之间既存在水平距离也存在高度差,此时即为斜程通信。图1中,发送端光源T向空间发送光信号,接收器R进行光信号接收,收发端的水平距离差为 r ,高度差为 h ,发送仰角为 θ_1 ,接收仰角为 θ_2 , V 为有效散射体区域,即发送光束与接收视场在空间的重叠区域。斜程通信下,由于T与R不在同一高度上,此时收发端之间的直线距离为 $r' = \sqrt{r^2 + h^2}$,它们之间的连线与水平面不平行,发送仰角 θ_1 与接收仰角 θ_2 分别变成了图中的 θ_1' 与 θ_2' [5,6]。

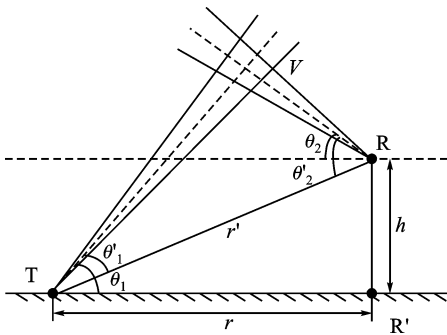


图1 直升机助降下紫外光斜程通信几何链路
Fig.1 UV slant path communication model in helicopter assisted landing

以T、R以及R在垂直平面下的投影R'所确定的平面为参考,在图中发送仰角由 θ_1 减小到 θ_1' ,变化量记为 $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_1'$;接收仰角由 θ_2 增加到 θ_2' ,变化量记为 $\Delta\theta_2$,而 $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1$ 。发送端发

散角与接收端视场角等其他参数保持不变,则:

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = \arcsin\left(\frac{h}{r'}\right) \quad (1)$$

$$\theta_1' = \theta_1 - \Delta\theta_1 = \theta_1 - \arcsin\left(\frac{h}{r'}\right) \quad (2)$$

$$\theta_2' = \theta_2 + \Delta\theta_2 = \theta_2 + \arcsin\left(\frac{h}{r'}\right) \quad (3)$$

1.2 大气折射率结构常数垂直分布

一般在水平路径上,大气折射率结构常数 C_n^2 为常数,而在斜程传输路径中 C_n^2 是不均匀的,受高度、温度、风速、气压等因素影响。国际电信联盟提出了 C_n^2 随高度变化的模型[7]:

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{\text{RMS}}^2 h^2 \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + C_0^2 \exp(-h/100) \quad (4)$$

式中, C_0^2 是地平面附近的大气结构常数; $v_{\text{RMS}} = \sqrt{v_g^2 + 30.69v_g + 348.91}$,是垂直路径上的均方根风速; v_g 是近地面风速, $v_g = 3 + 17 \exp[-(h/1000 - 12.5)^2/16]$ 。 C_n^2 是表征大气湍流强弱的参数,一般随着高度的不断增加,大气密度相应下降,大气湍流强度同时随之减弱, C_n^2 垂直分布如图2所示。

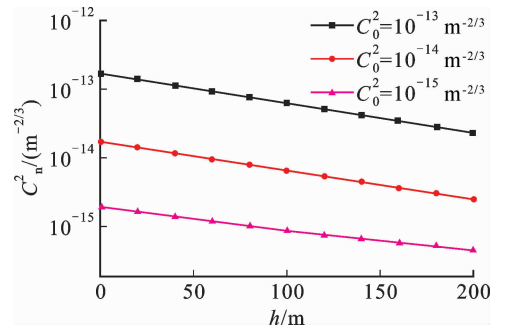


图2 大气折射率结构常数垂直分布
Fig.2 Index of refraction structure parameter vertical distribution

大气湍流会引起接收信号的强度产生随机起伏,而信号强度的随机起伏会降低通信系统的可靠性,严重时甚至会引发通信中断。因此,为了有效减小湍流效应,改善系统性能,必须减弱信号强度起伏。

2 紫外光通信下的大气湍流模型

大气湍流对无线紫外光通信性能的影响非常大,大气湍流理论中信号强度分布模型均是建立在点对点直视链路基础上,对于紫外光非直视通信不能直接计算收发两端的信号强度分布,对此,可以将非直视通信用过程看成两段直视链路通信,利用两个直视链路通信接续过程来计算接收端的信号强度

分布。

紫外光单次散射通信模型如图 3 所示。其中发送端与接收端位于同一水平面上, φ_1 为发送端发散角, φ_2 为接收端视场角, δV 为有效散射体的微分元。

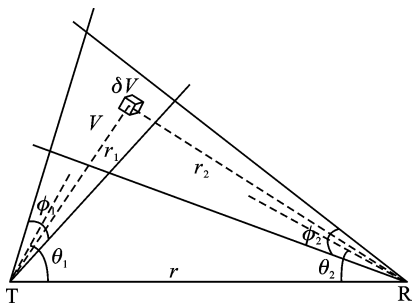


图 3 紫外光单次散射通信模型

Fig. 3 Ultraviolet single scattering link model

假设光子从发送端到达散射体的路径为路径 1 且传输距离为 r_1 , 光子从散射体到达接收端为路径 2 且传输距离为 r_2 , 该非直视散射过程可以看作是两段直视链路传输。令 i_{o1} 是从发送端到达散射体的平均信号强度, i_{r1} 是在湍流影响下到达散射体的信号强度, C_0^2 是湍流条件下到达接收端的信号强度, i_{o2} 是到达接收端的平均信号强度。 i_{o2} 可以表示为^[8]:

$$i_{o2} = i_{r1} A_r P_s \frac{K_s \exp(-K_e \cdot r_2)}{4\pi r_2^2} \quad (5)$$

式中, A_r 是有效接收孔径面积, K_s 是散射系数, P_s 是散射相函数, K_e 是大气消光系数。

弱湍流情况下, 紫外光的信号强度分布服从对数正态分布模型, 其概率密度函数为^[9]:

$$f(I) = \frac{1}{I \sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \exp\left(-\frac{(\ln I + \frac{\sigma_I^2}{2})^2}{2\sigma_I^2}\right) \quad (6)$$

式中, I 为光强起伏, σ_I^2 为紫外光信号对数光强起伏方差, 其表达式为^[10]:

$$\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_X^2) - 1 \quad (7)$$

式中, σ_X^2 为平面波的对数振幅方差, X 是光波的正态分布对数振幅变量^[10], 其表达式为:

$$\sigma_X^2 = 0.56k^{7/6} \int_0^L C_n^2(h) (L-h)^{5/6} dh \quad (8)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为紫外光波长, L 表示传播距离。

归一化信号强度分布概率密度函数可以采用对数正态分布模型计算, 即^[10]:

$$f_0\left(\frac{I}{\langle I \rangle}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I} I / \langle I \rangle} \exp\left[-\left(\ln \frac{I}{\langle I \rangle} + \frac{1}{2}\sigma_I^2\right)^2 / (2\sigma_I^2)\right] \quad (9)$$

式中, $\langle I \rangle$ 表示光强起伏均值, $I/\langle I \rangle$ 表示归一化的信号强度。

从发送端到达有效散射体积(即路径 1)的信号强度概率密度函数为:

$$f(i_{r1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{I1}} i_{r1}} \exp\left[-\left(\ln \frac{i_{r1}}{i_{o1}} + \frac{1}{2}\sigma_{I1}^2\right)^2 / (2\sigma_{I1}^2)\right] \quad (10)$$

式中, σ_{I1}^2 是路径 1 上的紫外光信号对数光强起伏方差, σ_{I1} 是路径 1 上的紫外光信号光强闪烁指数, 本文为方便计算, 令 $i_{o1} = 1$ 。

从有效散射体到接收端(即路径 2)的信号强度的条件概率密度函数为^[10]:

$$f(i_{r2} | i_{r1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{I2}} i_{r2}} \exp\left[-\left(\ln \frac{i_{r2}}{i_{o2}} + \frac{1}{2}\sigma_{I2}^2\right)^2 / (2\sigma_{I2}^2)\right] \quad (11)$$

式中, σ_{I2}^2 是 2 路径上的紫外光信号对数光强起伏方差, σ_{I2} 是 2 路径上的紫外光信号光强闪烁指数。

则接收端信号强度的边缘分布概率密度函数为^[8]:

$$f(i_{r2}) = \int f(i_{r2} | i_{r1}) \cdot f(i_{r1}) d(i_{r1}) \quad (12)$$

3 不同场景下通信的仿真性能分析

3.1 水平通信和垂直通信

在直升机垂直起降或者平移过程中, 水平通信和垂直通信是两种常见方式。对于水平通信, 紫外光通信性能主要受水平通信距离的影响, 对于垂直通信, 通信性能受高度和湍流强度的影响。本节主要分析三种典型大气湍流, 即弱湍流($C_0^2 = 7 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$)、中等湍流($C_0^2 = 7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)、强湍流($C_0^2 = 7 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$)对通信的影响。仿真过程中, 当水平通信时, 以 C_n^2 表示湍流强度, 而垂直通信时, 由于 C_n^2 随高度变化, 因此采用 C_0^2 表示湍流强度。

当大气湍流强度从 $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 增大到 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, 收发端仰角 $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$ 时, 紫外光通信中信号强度分布的概率密度函数如图 4 所示。图 4(a)、图 4(b) 是水平通信下, $r = 200 \text{ m}$ 时, 不同大气湍流强度下的紫外光直视(line-of-sight, LOS)、非直视(non-line-of-sight, NLOS)通信; 图 4(c)、图 4(d) 是垂直通信下, $h = 100 \text{ m}$ 时, 不同大气湍流强度下的紫外光 LOS、NLOS 通信。

由图 4 可知, 在紫外光 LOS、NLOS 条件下, 随着湍流强度的增大, 信号强度概率密度函数方差逐渐增大, 信号能量衰减也随之增大。水平通信下, 当

收发仰角和 h 固定时,随着 C_n^2 的增大,信号强度概率密度函数方差逐渐增大;在相同湍流强度下,NLOS 通信较 LOS 通信信号能量衰减更大。垂直通信下,在 h 以及收发仰角保持不变的条件下,随着 C_n^2 的增大,信号能量衰减增大,强湍流条件下几乎无法进行通信。

水平通信下,湍流强度 $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,收发仰角 $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$ 时, r 对紫外光直视和非直视通信的影响如图 5(a)、图 5(b)所示。垂直通信下, $C_n^2 = 7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,收发仰角 $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$ 时, h 对紫外光直视和非直视通信的影响,如图 5(c)、图 5(d)所示。

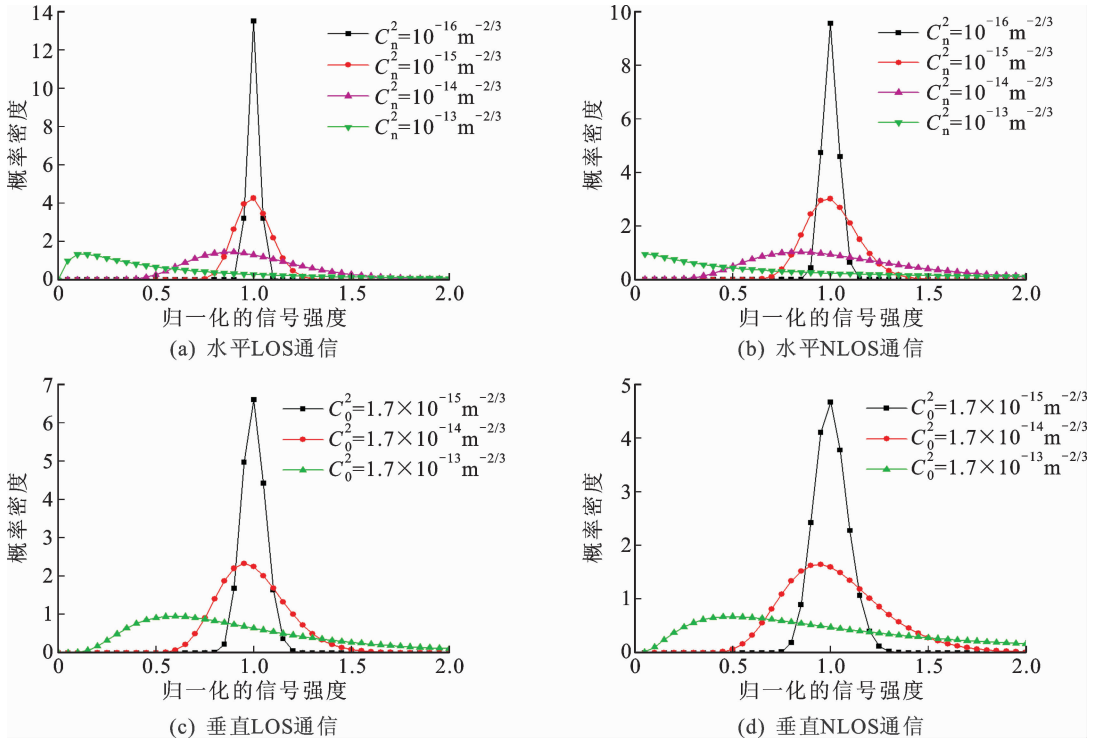


图4 不同大气湍流强度对紫外光通信的影响

Fig. 4 UV communication for varying turbulence intensities

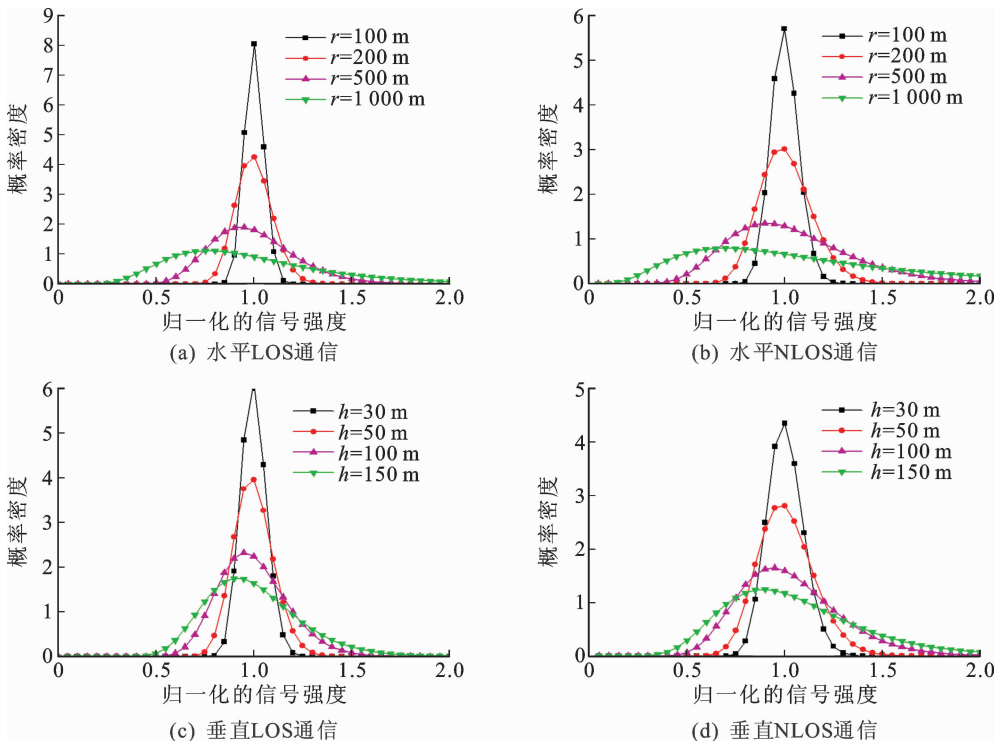


图5 r' 对紫外光通信的影响

Fig. 5 UV communication for varying r'

由图 5(a)、(b)可知,水平通信下,当 r 为 100m 和 200m 时,信号强度概率密度函数方差较小,且信号能量衰减较小; r 为 500m 和 1000m 时,信号强度概率密度函数方差较大;当 r 为 1000m 时,信号能量衰减很严重,即随着 r 的增大,信号能量衰减也逐渐增大。由图 5(c)、(d)可知,垂直通信下,当湍流强度一定,相较 h 为 100m 和 150m, h 为 30m 和 50m 时,信号强度概率密度函数方差更小,能量衰减减小,即随着 h 的增大,信号强度概率密度函数方差也逐渐变大,能量衰减增加。总体看来, r' 的不断增大,使信号强度概率密度函数方差随之变大,信号能量衰减不断增加,从而使通信质量下降。两种通信方式下,LOS 通信均比 NLOS 通信信号强度概率密度函数方差更小,信号能量衰减更小。

湍流强度 $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r=500 \text{ m}$ 时,不同收发仰角对紫外光通信的影响如图 6 所示。在湍流强度和 r 一定的情况下,当 $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ 和 $\theta_1 = \theta_2 = 40^\circ$ 时,信号强度概率密度函数方差均较小,且能量衰减较小;但当 $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$ 时,信号能量衰减比较严重,即随着 θ_1 和 θ_2 的同步增大,信号强度概率密度函数方差逐渐增大,且能量衰减逐渐增大。

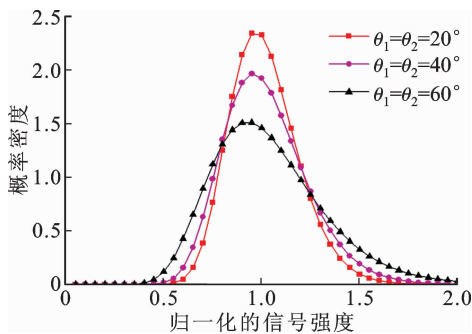


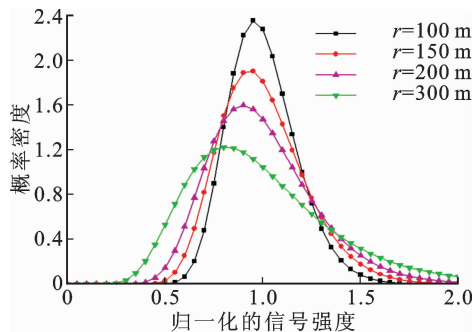
图 6 不同角度对紫外光通信的影响

Fig. 6 UV communication for varying angles

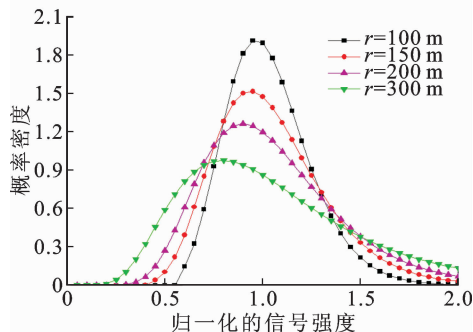
3.2 斜程通信

当 $h=100 \text{ m}$, $C_n^2 = 7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$ 时,采用 LOS、NLOS 两种通信方式,在不同 r 的条件下,对紫外光通信中信号强度分布的概率密度函数进行仿真,如图 7 所示,此时 r' 随 r 的增大而增大。

由图 7 可知,LOS 通信中, r 为 100m 和 150m 时的信号强度概率密度函数方差较 r 为 200m 和 300m 时小; r 从 100m 增大到 300m 过程中,信号能量衰减近一半,即随着 r 增大,信号强度概率密度函数分布越分散,方差越大,说明信号能量衰减也逐渐增大; r 相同时,相比于 LOS 通信,采用 NLOS 通信时信号强度概率密度函数分布较为分散,能量衰减更为严重,更不利于通信。



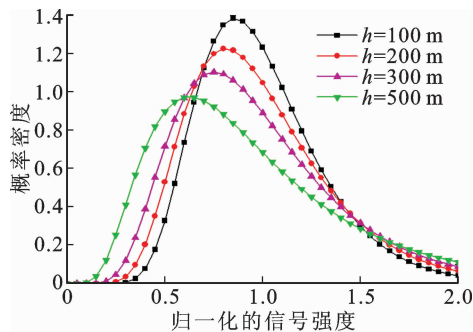
(a) 水平LOS通信



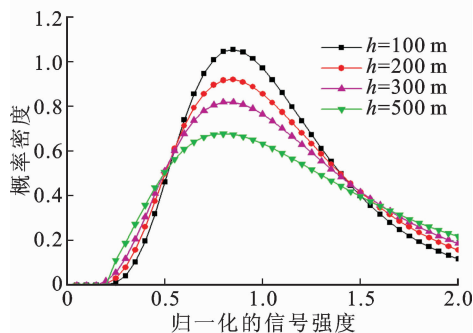
(b) 水平NLOS通信

图 7 r 对紫外光通信的影响Fig. 7 UV communication for varying r

当 $r=200\text{m}$, $C_n^2 = 7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$ 时,采用 LOS、NLOS 两种通信方式,在不同 h 的条件下对紫外光通信中信号强度分布的概率密度函数进行仿真,如图 8 所示,此时 r' 随 h 的增大而增大。



(a) 垂直LOS通信



(b) 垂直NLOS通信

图 8 h 对紫外光通信的影响Fig. 8 UV communication for varying h

从图 8 中可以看出,随着收发端 h 的增大,信号

强度概率密度函数方差逐渐增大,信号能量衰减逐渐增大,且 NLOS 通信相较于 LOS 通信信号能量衰减得更严重。主要原因是随着 h 的增大,湍流强度虽然大大减弱,但是 h 对信号强度的影响大于湍流强度对其的影响。

总体看来,斜程通信中湍流强度、垂直高度差 h 以及收发仰角均确定时,随着 r 的增大,信号强度概率密度函数分布越分散,即方差越大,说明能量衰减越大,进而导致通信质量下降;当水平距离 r 、收发仰角以及湍流强度确定时,信号能量衰减随着 h 的增大而增大,且 h 对通信的影响强于湍流。

4 实验数据比较

实验于 2015 年 11 月在西安理工大学操场进行,天气晴朗,实测风速为 20m/s。在垂直通信、水平通信以及斜程通信三种情况下,利用六旋翼飞行器对紫外光接收功率与 r' 之间的关系进行测量,测量结果如图 9 所示。

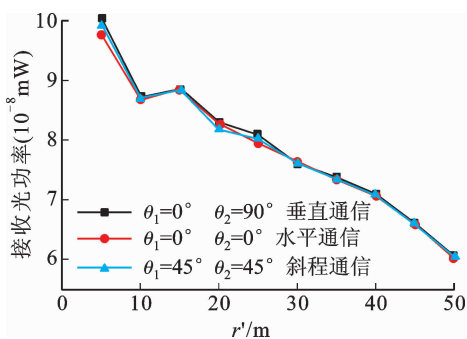


图 9 r' 对接收光功率的影响

Fig. 9 Influence on r' of received light power

从图 9 中可以看出,随着距离 r' 的增大,三种通信条件下,紫外光接收光功率整体均呈现减弱的趋势,即信号能量衰减不断增大;在 r' 小于 20m 时,接收光功率变化起伏,在 r' 大于 20m 时,接收光功率趋于线性减小;且 r' 对水平通信的影响最大,对斜程通信的影响次之,对垂直通信的影响最小。

5 结语

本文利用无线紫外光散射通信的原理,分析了直升机助降下的通信链路和基于高度差的紫外光通信模型,讨论了直升机助降下可能存在的水平通信、垂直通信和斜程通信等方式,研究了紫外光通信在大气湍流信道下的信号强度分布概率密度函数,以及收发端距离对不同场景下紫外光通信信号强度分布的影响。最后实测了三种通信场景下,收发端距离对紫外光接收光功率的影响,结果表明,接收光功

率随着收发端距离的增大呈减小的趋势,且通信质量随之下降。

参考文献:

- [1] ZHANG Hailiang, YIN Hongwei, JIA Honghui, et al. Study of effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links [J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21216-21226.
- [2] 赵太飞,吴鹏飞,宋鹏. 无线紫外光直升机辅助起降通信技术研究[J]. 激光杂志, 2014, 35(10): 9-13. ZHAO Taifei, WU Pengfei, SONG Peng. Research on the wireless ultraviolet communication technology in helicopter launching and landing guidance[J]. Laser Journal, 2014, 35(10): 9-13.
- [3] XIAO Houfei, ZUO Yong, FAN Cheng, et al. Non-line-of-sight ultraviolet channel parameters estimation in turbulence atmosphere [C]// IEEE, Communications and Photonics Conference (ACP), Guangzhou, 2012: 1-3.
- [4] XIAO Houfei, ZUO Yong, WU Jian, et al. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation model in random turbulent medium[J]. Optics Letters, 2013, 38 (17): 3366-3369.
- [5] 何华,柯熙政,赵太飞. 基于高度的紫外光 NLOS 单次散射链路模型的研究[J]. 激光技术, 2011, 35(4): 495-498. HE Hua, KE Xizheng, ZHAO Taifei. Research of NLOS ultraviolet single scattering link model with height information[J]. Laser Technology, 2011, 35 (4): 495-498.
- [6] 何华. 无线紫外光通信及其组网的关键技术研究[D]. 西安:西安理工大学, 2011. HE Hua. Study on key technology of ultraviolet communication and ultraviolet networking [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [7] 马保科. 湍流大气中(光)波束传播的相关问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2008:1-100. MA Baoke. Study on the related problems of (light) beam propagation in the atmospheric turbulence [D]. Xi'an: XiDian University, 2008: 1-100.
- [8] ZUO Yong, XIAO Houfei, WU Jian. Effect of atmospheric turbulence on Non-line-of-sight ultraviolet communications [C]// 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, Sydney, NSW, 2012: 1682-1686.
- [9] MAJUMDAR A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel [J]. Journal of Optical and Fiber Communications Research, 2005, 2(4): 345-396.
- [10] DING Haipeng, CHEN Gang, MAJUMDAR A K, et al. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels [J]. SPIE Defense, Security and Sensing, 2011, 8038(1):73-81.