

## 激光与光电子学进展

## 大气湍流和指向误差对无人机激光通信误码率的影响

唐翰玲\*, 李勇军, 李怡, 赵尚弘

空军工程大学信息与导航学院通信系统教研室, 陕西 西安 710077

**摘要** 基于无人机(UAV)平台特性和飞行环境建立了包含视轴误差和抖动误差引起的指向误差模型,基于Gamma-Gamma分布的大气湍流信道传输模型得到湍流和指向误差影响下UAV激光通信的误码率,并分析了发射功率、束散角以及飞行高度对误码率的影响规律。仿真结果表明:当束散角为1 mrad,指向误差较小时,湍流对系统误码率的影响显著;当指向误差超过0.2 mrad时,系统的性能由指向误差决定,单独调整某个参数很难使系统的误码率小于 $10^{-6}$ 。最后,分析了系统参数对信道和误码率的影响,为工程设计参数选取提供了思路和参考。

**关键词** 光通信; 无人机; 指向误差; 大气湍流; 误码率

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1306002

## Influence of Atmospheric Turbulence and Pointing Error on Bit Error Rate of Unmanned Aerial Vehicle Laser Communication

Tang Hanling\*, Li Yongjun, Li Yi, Zhao Shanghong

Department of Communication, Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, Shaanxi, China

**Abstract** In this paper, the pointing error model, which includes the axis and jitter errors, is established based on the unmanned aerial vehicle (UAV) platform and flight environment. Using the atmospheric turbulence model with Gamma-Gamma distribution as the channel transmission model, the bit error rate of UAV laser communication under the influence of turbulence and pointing error is obtained, and the effects of transmitting power, divergence angle, and flight altitude on bit error rate are analyzed. The simulation results showed that when the beam divergence angle is 1 mrad and the pointing error is small, the turbulence had a significant effect on the system's bit error rate. When the pointing error is more than 0.2 mrad, the system performance is determined by the pointing error. It is even difficult to meet the requirement of the bit error rate of less than  $10^{-6}$  simply by adjusting a certain parameter. Finally, the influence of system parameters on channel and bit error rate is analyzed, which provides ideas and references for engineering design parameter selection.

**Key words** optical communications; unmanned aerial vehicle; pointing error; atmospheric turbulence; bit error rate

## 1 引言

当前战场上的通信方式大都采用无线电射频通信模式,随着未来战场的多元化发展,战场数据会海量增加,这种通信模式的数据处理方法将难以满足战场需求。此外,射频通信易受外来信号的干扰且易被窃听,受地形影响,高原、山地、海洋等复杂环境下基站架设困难,大幅增加了通信组网的成本和难度。随着无人机成本的不断降低,利用激光通信特有的宽带宽、大容量、抗截获和抗电磁干扰能力强等特征<sup>[1-3]</sup>,通过无人

机执行任务或将其作为通信中继平台实现对应区域的快速组网成为一种最具发展前景的通信方式<sup>[4]</sup>,且激光通信荷载材料质量轻、功耗低,符合无人机平台低载重、低功耗的要求。

无人机的通信环境受大气湍流影响较大,信道状态不稳定,指向误差也会对激光通信的性能产生显著影响。指向误差主要包括视轴误差和抖动误差,目前主要研究了抖动对自由空间激光链路性能的影响<sup>[5-6]</sup>、地面湍流和地面抖动对激光通信系统的影响<sup>[7]</sup>、Lognormal湍流模型下无人机和卫星之间激光通信的

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-07-25; 录用日期: 2021-08-13

通信作者: \*530510353@qq.com

误码率 (BER)<sup>[8]</sup>、Gamma-Gamma 湍流模型下的误码率性能<sup>[9]</sup>、大气湍流与平台微振动相结合对星地激光通信系统误码率性能的影响<sup>[10]</sup>。对于无人机集群之间的通信也有了初步研究<sup>[11]</sup>,但对无人机在湍流和指向误差影响下的误码率性能鲜有报道。为了降低湍流的影响,同时避免激光通信过程中受到高山等地形的影响,本文综合分析了无人机与空中大型平台(飞艇、预警机、指挥机等)激光通信系统在指向误差影响下基于 Gamma-Gamma 大气湍流模型的误码率,重点研究了视轴误差、抖动误差、发射功率、束散角以及通信高度对通信链路误码率的影响。

## 2 无人机激光通信模型

### 2.1 系统模型

高阶调制的光通信系统实现起来比较复杂,二进制开关键控(OOK)调制方式具有实现简单、所需带宽小、传输容量大、无需符号同步与时隙同步等优点<sup>[12]</sup>,在实际光通信系统中得到了广泛应用。实验研究了大气层中带有强度调制/直接检测(IM/DD)的 OOK 无人机平台激光通信系统,通过发射器将数据

直接调制到光束强度上,在存在指向误差的情况下通过大气湍流通道传播数据。接收到的信号模型可表示为

$$y = \eta I_s x + n, \quad (1)$$

式中: $x \in \{0, 1\}$ 为等概率的二进制符号, $n$ 为零均值加性高斯白噪声; $\eta$ 为光电转换系数,与电子器件的性能有关,为便于分析,实验中取 $\eta$ 为 1; $I_s = hI$ 为接收平面接收到的有效光功率, $h = h_p h_a$ 为信道的随机衰减因子, $h_p$ 和 $h_a$ 分别为相互独立的指向误差和大气湍流引起的衰减, $I$ 为发射机发射的光功率,平均光功率值为 $P_1$ ,发射光功率值为 $2P_1$ 。

### 2.2 指向误差

激光通信是一种点到点的通信,不同于传统的射频通信方式,当机载激光通信的距离较远时,对机载激光通信端机指向的要求较高,指向误差较大时会使激光束产生较大的偏离,如图 1 所示。其中, $\sigma_\theta$ 、 $A_\theta$ 分别为抖动误差和视轴瞄准误差对应的角度偏差, $d$ 为接收平面半径, $w_z$ 为接收平面处的光束半径,当光束偏离接收平面的距离为 $r$ 时,接收到的光强就会受到影响,导致通信不稳定甚至中断。

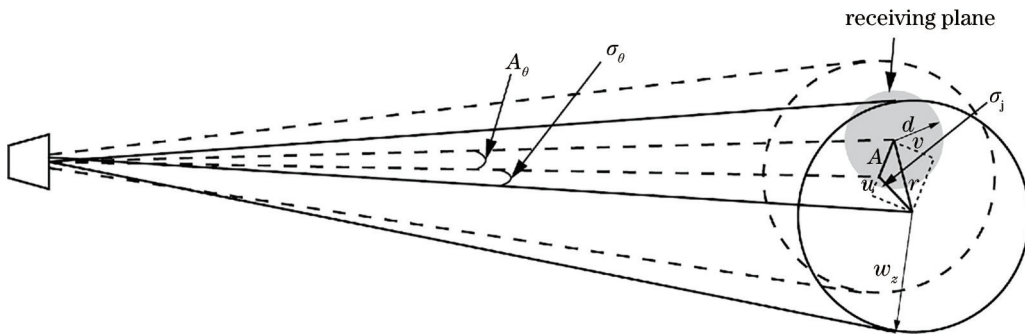


图 1 指向误差的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pointing error

无人机平台的指向误差主要由机械对准误差即视轴瞄准误差和抖动随机误差组成,是影响激光链路性能的重要因素之一。视轴瞄准误差 $A$ 是硬件装配中不可避免的固定误差,抖动误差 $\sigma_j$ 可以看成是一个具有独立分量的二维随机变量 $u, v$ ,以视轴误差方向为指向误差的横轴,从而将每个随机样本的坐标表示为 $(A+u, v)$ ,指向误差 $r = \sqrt{(A+u)^2 + v^2}$ 。由于 $u, v$ 可以看作两个独立的高斯分量,对 $v^2$ 和 $(A+u)^2$ 的概率分布函数(PDF)进行卷积<sup>[13-14]</sup>,得到

$$f_p(r) = \frac{r}{\sigma_j^2} \exp\left[-\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma_j^2}\right] I_0\left(\frac{Ar}{\sigma_j^2}\right), \quad (2)$$

式中, $\sigma_j = \sigma_\theta L, A = A_\theta L, L$ 为信号源到接收器的光链路距离, $I_0(*)$ 为修正后的第一类零阶贝塞尔函数。

假设链路距离 $L = 100 \text{ km}$ ,根据式(2)仿真得到视轴误差和抖动误差对光束中心偏离量的影响如图 2 所

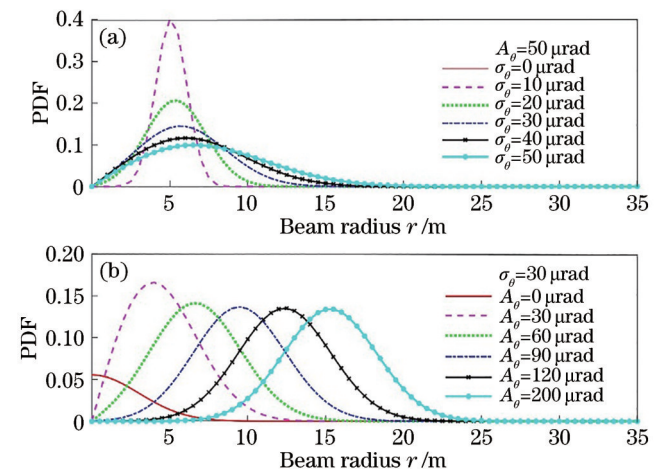


图 2 指向误差下径向位置 $r$ 的概率分布。(a)  $A_\theta = 50 \mu\text{rad}$ ;  
(b)  $\sigma_\theta = 30 \mu\text{rad}$

Fig. 2 Probability distribution of the radial position  $r$  under pointing error. (a)  $A_\theta = 50 \mu\text{rad}$ ; (b)  $\sigma_\theta = 30 \mu\text{rad}$

示。可以发现,视轴瞄准误差和抖动误差对指向误差的影响方式不同:当视轴瞄准误差角  $A_\theta = 50 \mu\text{rad}$  时,随着抖动误差角  $\sigma_\theta$  的增大,指向误差  $r$  的 PDF 曲线集中度降低,指向误差基本不变;当抖动误差角  $\sigma_\theta = 30 \mu\text{rad}$  时,随着视轴瞄准误差角  $A_\theta$  的增大,指向误差  $r$  的 PDF 曲线右移,指向误差  $r$  增大,但 PDF 曲线集中度基本不变。

### 2.3 大气湍流

大气湍流对激光通信的影响包括散射、吸收等,其中影响最大的是强度闪烁效应。强度闪烁模型经过长时间发展已经相对成熟,当传播路径较长,湍流条件较弱时,考虑 Lognormal 模型<sup>[15]</sup>,湍流条件较强时可使用 K 分布模型<sup>[16]</sup>。Gamma-Gamma 模型是 Lognormal 模型的后续发展,也是一种双参数分布,计算出的数值与不同湍流情况下实测的数据相符。Gamma-Gamma 模型下衰减系数  $h_a$  的 PDF<sup>[17]</sup> 可表示为

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (h_a)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}), \quad (3)$$

式中,  $\Gamma(*)$  为 Gamma 函数,  $K_{\alpha-\beta}(*)$  为第二类贝塞尔函数,  $\alpha$  为小尺度湍流引起的光强起伏参数,  $\beta$  为大尺度湍流引起的光强起伏参数。  $\alpha, \beta$  参数与大气条件有关,在平面波情况下<sup>[18]</sup> 可分别表示为

$$\alpha = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (4)$$

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

式中,  $\sigma_R^2 = 1.23k^{7/6} C_n^2 L^{11/6}$  为平面波的 Rytov 方差,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数。  $C_n^2$  为与温度、高度等环境因素相关的大气折射率结构常数,实验中采用国际电信联盟-无线电通信部 (ITU-R) 提出的随高度  $H$  变化的模型<sup>[19]</sup>, 可表示为

$$C_n^2(H) = 8.148 \times 10^{-56} v_c^2 H^{10} \exp(-H/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-H/1500) + C_0 \exp(-H/100), \quad (6)$$

式中:  $v_c$  为垂直路径风速,实验中假定  $v_c = 21 \text{ m/s}$ ;  $C_0$  为近地面大气折射率结构常数,通常认为  $C_0$  介于  $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$  和  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$  之间(中强湍流),实验中取  $C_0 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。

## 3 通信链路的误码率模型

对于高斯光束,在距离发射机  $L$  处强度的归一化空间分布  $I(r')$ <sup>[20]</sup> 可表示为

$$I(r') = \frac{2}{\pi\omega_z^2} \exp\left(-\frac{2r'^2}{\omega_z^2}\right), \quad (7)$$

式中,  $r'$  为高斯光束中心的径向分量,  $\omega_z \approx \theta L$  为距离  $L$  处大气湍流中传播的高斯光束宽度,  $\theta$  为激光束的束散角。假设接收器是接收天线孔径为  $a$  的圆形探测孔径,则距离  $L$  处由指向误差  $r$  引起的衰减  $h_p(r)$  可表示为

$$h_p(r) = \int_S I(r' - r) dr', \quad (8)$$

式中,  $S$  为探测器的面积。在  $L$  处有

$$h_p(r) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_{\text{eq}}^2}\right), \quad (9)$$

式中,  $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$  为  $r=0$  处收集的光强,  $v = (\sqrt{\pi} a)/(\sqrt{2} \omega_z)$ ,  $\omega_{\text{eq}}^2 = \omega_z^2 \frac{\sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$  为等效的波束宽度。由式(2)和式(9)得到  $h_p$  的分布函数为

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0^{\gamma^2}} \exp\left(\frac{-A^2}{2\sigma_j^2}\right) h_p^{\gamma^2-1} I_0\left(A \frac{\gamma}{\sigma_j} \sqrt{-2\ln \frac{h_p}{A_0}}\right), \quad 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (10)$$

式中,  $\gamma = \omega_{\text{eq}}/2\sigma_j$ 。由系统模型得到  $h = h_p h_a$ , 则  $h$  的分布函数为

$$f_h(h) = \int f_{h|h_a}(h|h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a, \quad (11)$$

其中,

$$f_{h|h_a}(h|h_a) = \frac{1}{h_a} f_{h_p}\left(\frac{h}{h_a}\right) = \frac{\gamma^2}{h_a A_0^{\gamma^2}} \exp\left(\frac{-A^2}{2\sigma_j^2}\right) \left(\frac{h}{h_a}\right)^{\gamma^2-1} \times I_0\left(A \frac{\gamma}{\sigma_j} \sqrt{-2\ln \frac{h}{h_a A_0}}\right), \quad 0 \leq h \leq A_0 h_a, \quad (12)$$

$$f_h(h) = \frac{2\gamma^2 h^{\gamma^2-1} (\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{A_0^{\gamma^2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \exp\left(\frac{-A^2}{2\sigma_j^2}\right) \times \int_{h/A_0}^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-\gamma^2-1} h_a^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-\gamma^2-1} I_0\left(A \frac{\gamma}{\sigma_j} \sqrt{-2\ln \frac{h}{h_a A_0}}\right) \times K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) dh_a. \quad (13)$$

采用 OOK 强度调制直接检测时,系统的误码率<sup>[12]</sup> 可表示为

$$P_e(e|h) = Q\left(\frac{P_t h}{\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{P_t h}{\sqrt{2} \sigma_n}\right), \quad (14)$$

式中,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ ,  $\sigma_n$  为高斯白噪声的方差。包含指向误差在内的平均误码率可表示为

$$P_e = \int_0^\infty P(e|h) f_h(h) dh = \int_0^\infty \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{P_t h}{\sqrt{2} \sigma_n}\right) \frac{2\gamma^2 h^{\gamma^2-1} (\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{A_0^{\gamma^2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \exp\left(\frac{-A^2}{2\sigma_j^2}\right) \times \int_{h/A_0}^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-\gamma^2-1} h_a^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-\gamma^2-1} \times I_0\left(A \frac{\gamma}{\sigma_j} \sqrt{-2\ln \frac{h}{h_a A_0}}\right) K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) dh_a dh. \quad (15)$$

### 4 仿真结果及分析

利用式(14)对近距离中强湍流和指向误差情况下的误码率进行仿真计算,基本参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数  
Table 1 Simulation parameter

Parameter description	Symbol	Value
Transmission power /mW	$P_t$	1
Laser wavelength /nm	$\lambda$	1550
Communication distance /m	$L$	1000
Receiver diameter /m	$a$	0.1
Refractive index structure parameter / $m^{-2/3}$	$C_n^2$	$1.7 \times 10^{-14}$
Divergence angle /mrad	$\theta$	1
Noise variance /( $A \cdot Hz^{-1}$ )	$\sigma_n$	$10^{-7}$

#### 4.1 发射功率和误码率的变化关系

指向误差  $\sigma_\theta$ 、 $A_\theta$  随发射功率的变化曲线如图 3 所示。可以发现,系统误码率随着发射功率的增大而减小,视轴误差和抖动误差增大时,误码率逐渐升高。此外,视轴误差引起的指向误差增大会使曲线上移,导致误码率增大,而抖动引起的指向误差增大会使误码率曲线的曲率明显变小,导致误码率增大。

在相同的功率下,视轴误差和抖动引起的指向误差都会增大系统的误码率。由于无人机平台的特性,安装大功率的发射器需要更大的有效载荷,同时增加能耗,影响留空作业时间。因此需要在提高平台稳定性的同时选取合适的最优发射功率,从而提高系统的效能。

#### 4.2 束散角和误码率的变化关系

指向误差条件下误码率随束散角的变化曲线如

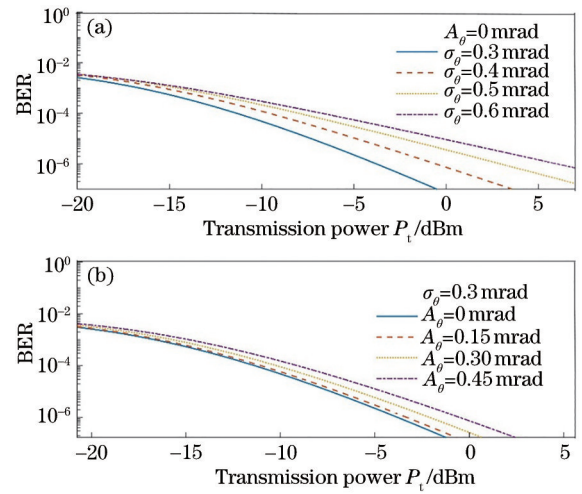


图 3 BER 随发射功率的变化曲线。(a)  $A_\theta=0$  mrad; (b)  $\sigma_\theta=0.3$  mrad

Fig. 3 Variation curve of BER with transmission power.

(a)  $A_\theta=0$  mrad; (b)  $\sigma_\theta=0.3$  mrad

图 4(a) 所示。可以发现:当束散角较小时,误码率随着束散角的增大急剧增大;当束散角超过 0.1 mrad 后,误码率随束散角的增大逐渐减小,减小的快慢主要受抖动的影响,减小的程度受视轴误差的影响;当束散角达到一定值后会平缓的增加,最终达到一个相对稳定的状态。从图 4(b)~图 4(e) 可以发现:PDF 随束散角的增大集中度有明显增加,在衰减因子  $h$  较小时,PDF 随束散角的增加而增大;当  $h$  值超过 0.01 左右后,PDF 值急剧减小,且束散角越大,PDF 值衰减得越快。视轴误差的增加会使 PDF 剖面向左移动,曲线集中度和峰值明显增加,即  $h$  减小,误码率增加,系统性能变差。当发散角较小时,视轴误差的增大对光束的

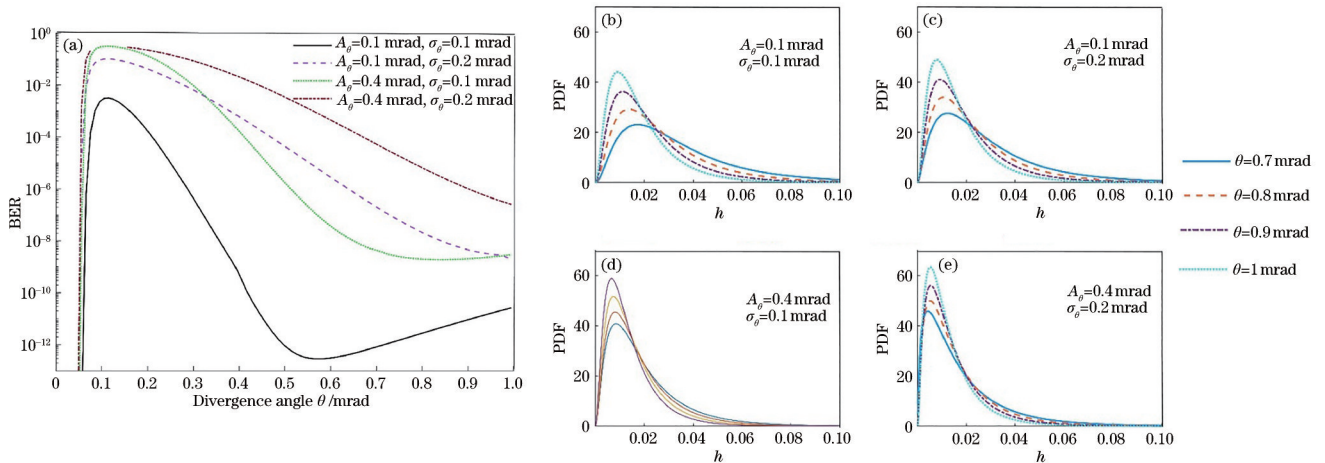


图 4 BER 与束散角、衰减因子的关系。(a) BER 随束散角的变化曲线; (b)  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.1$  mrad 时衰减因子  $h$  的概率分布曲线; (c)  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad 时衰减因子  $h$  的概率分布曲线; (d)  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.1$  mrad 时衰减因子  $h$  的概率分布曲线; (e)  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad 时衰减因子  $h$  的概率分布曲线

Fig. 4 Relationship between BER and beam divergence angle and time attenuation factor. (a) Variation curve of BER with beam divergence angle; (b) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.1$  mrad; (c) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad; (d) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.1$  mrad; (e) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad

影响较大。抖动的增加会使 PDF 峰值和曲线集中度略有增加,即较小  $h$  的 PDF 值增大,系统的误码率增大,性能变差,且抖动较低时,这种影响较弱。

理论上来说,束散角越小,链路性能越好,但束散角越小,对指向误差越敏感,不利于建立稳定的通信链路,同时对于光学器件和跟瞄系统(ATP)的要求也相对较高,极大增加了系统的设计成本。不考虑束散角特别小的情况:当指向误差  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.1$  mrad 时,达到空间光通信误码率要求指标  $P_e < 10^{-6}$  需要的最小束散角  $\theta$  为 0.3 mrad;继续增大指向误差,即  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad 时,仅增大束散角很难满足系统误码率的指标要求。因此,在满足通信指标要求的情况下,需要提高无人机的稳定性,减小指向误差,设计一个最优的发散角,从而进一步提高系统的通信性能。

### 4.3 无人机高度和误码率的变化关系

假定无人机与空中平台进行 5 km 的水平链路激光通信时,误码率随无人机高度的变化曲线如图 5 所示。从图 5(a)可以发现,随着无人机高度的升高,误码率降低,当高度达到一定值后,误码率曲线逐渐趋于平缓,原因是随着高度的升高,大气折射率常数  $C_n^2$  减小,大气湍流的影响减弱。当指向误差中视轴误差一致,抖动误差增大时,误码率曲线变化比较平缓。以  $A_\theta=0$  rad 为例:当  $\sigma_\theta=0.2$  mrad 时,在 0~800 m 高度变化范围内,系统的误码率从  $10^{-1}$  降到了  $10^{-4}$ ;当  $\sigma_\theta=0.3$  mrad 时,系统的误码率从  $10^{-1}$  降低到  $10^{-2}$  且趋于稳定。从图 5(b)~图 5(e)可以发现,无人机高度升高,衰减因子  $h$  曲线右移, $h$  的 PDF 峰值先减小后增大,原因是低飞行高度下,高度升高时湍流影响减弱,但湍流影响总体上依旧很明显,曲线右移的同时峰值

有所减小,信道的整体性能有所提高,即:高度较低时,误码率有所减小,但减小缓慢;高度较高时,湍流的影响急剧减小,曲线右移且峰值增大,误码率迅速减小。此外,视轴误差的增加会使信道衰减因子  $h$  的 PDF 剖面略有收窄,峰值略有增加,而抖动的增加会使 PDF 剖面左移。仿真结果表明,高度越低,湍流效应越明显,达到一定高度后湍流效应可以忽略,信道主要受到指向误差的影响。

一般情况下,无人机的飞行高度为 1 km 左右,部分性能突出的大型无人机飞行高度可以达到 10 km 甚至更高,因此,中空作业时湍流影响较小,主要需克服指向误差的影响,提高无人机的稳定性,尤其是抑制抖动误差。而低高度时湍流作用明显,可以在克服指向误差影响的同时利用信道编码技术在不改变发射机或接收机构造的情况下抵抗湍流效应引起的衰减<sup>[21]</sup>。

### 4.4 接收天线孔径和误码率的变化关系

指向误差条件下误码率随接收天线孔径的变化曲线如图 6 所示。从图 6(a)可以发现:当接收天线孔径  $a$  较小时,误码率随  $a$  的增加快速减小,当  $a$  超过一定值后误码率逐渐减小;视轴误差和抖动误差形成的指向误差对系统误码率的影响类似,随着误差值的增大,误码率曲线随接收天线孔径增大而减小的速度逐渐降低。从图 6(b)~图 6(e)可以发现,PDF 随着  $a$  增大,集中度迅速减小。视轴误差的增加会使 PDF 剖面向左移动,且峰值和集中度都有增加,使  $h$  减小,误码率增加,系统性能变差。抖动的增加会使 PDF 峰值增加,即较小  $h$  的 PDF 值增大会使系统误码率增大,系统性能变差,且抖动较低时,这种影响较弱:当  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad 时,  $a=0.1$  m 就可以使  $P_e < 10^{-6}$ ;  $\sigma_\theta$  增大到 0.4 mrad 时,要达到误码率要求,  $a$  需要增大到

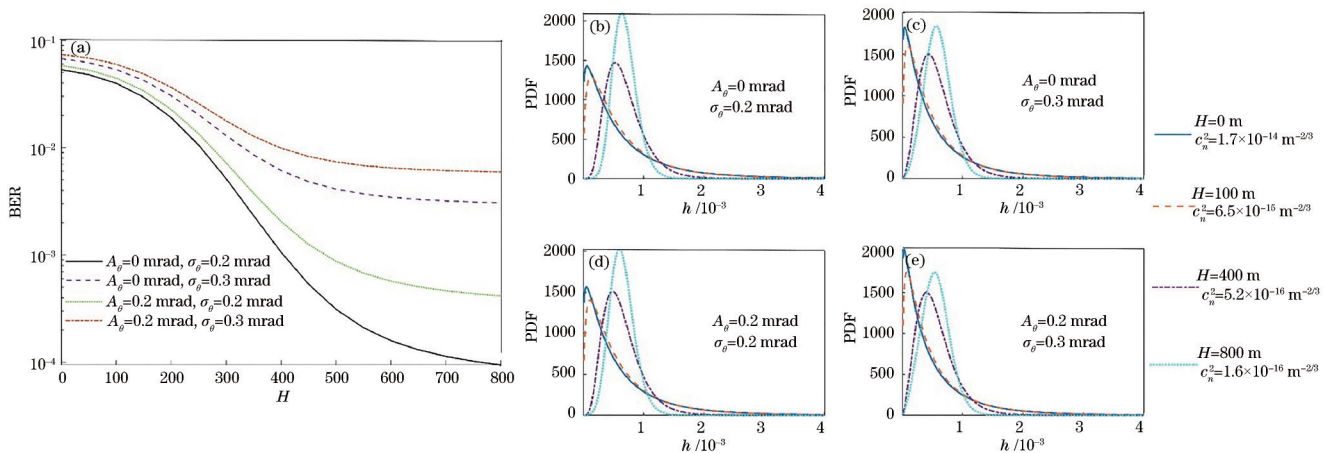


图 5 BER 与高度、衰减因子的关系。(a) EBR 随高度变化曲线;(b)  $A_\theta=0$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad 时衰减因子  $h$  的概率分布曲线;(c)  $A_\theta=0$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad 时衰减因子  $h$  的概率分布曲线;(d)  $A_\theta=0.2$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad 时衰减因子  $h$  的概率分布曲线;(e)  $A_\theta=0.2$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad 时衰减因子  $h$  的概率分布曲线

Fig. 5 Relationship between BER with height and attenuation factor. (a) Variation curve of BER with height; (b) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad; (c) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad; (d) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.2$  mrad,  $\sigma_\theta=0.2$  mrad; (e) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.2$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad

0.4 m 左右。随着指向误差的增大,理论上只要无限增大接收器面积就能达到系统要求的误码率。实际工程设计中,由于无人机平台限制,接收器不可能很大,

这就需要减小指向误差,提高平台稳定性,从成本效益的角度考虑提高系统性能和增大接收机直径的优化效果,选取合适的接收器平面半径。

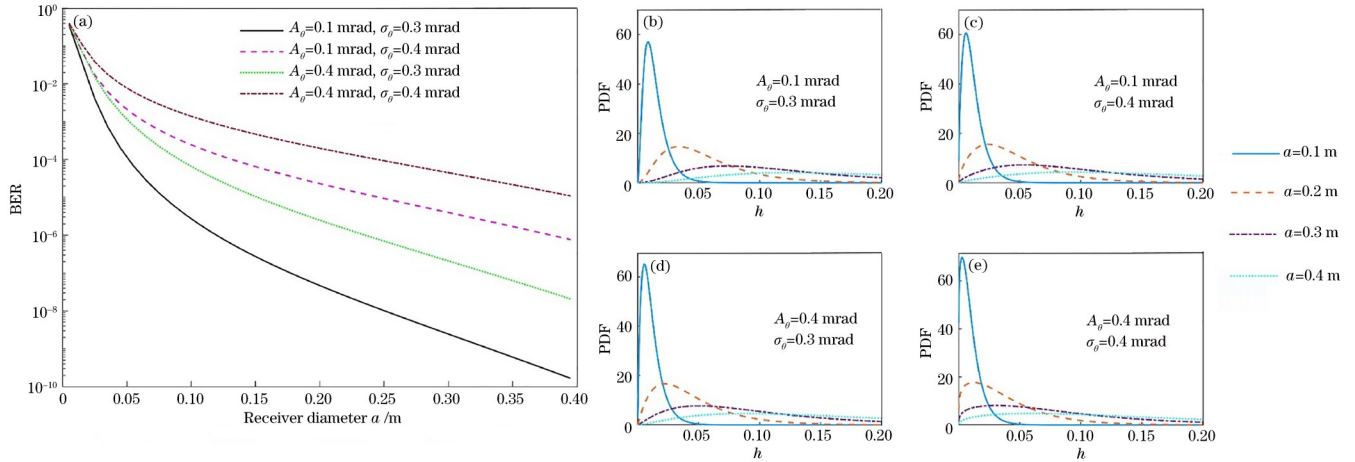


图6 BER与接收天线口径、衰减因子的关系。(a)BER随接收天线孔径的变化曲线;(b)  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad时衰减因子  $h$  的概率分布曲线;(c)  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.4$  mrad时衰减因子  $h$  的概率分布曲线;(d)  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad时衰减因子  $h$  的概率分布曲线;(e)  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.4$  mrad时衰减因子  $h$  的概率分布曲线

Fig. 6 Relationship between BER with receiver diameter and attenuation factor. (a) Variation curve of BER with receiver diameter; (b) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad; (c) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.1$  mrad,  $\sigma_\theta=0.4$  mrad; (d) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.3$  mrad; (e) probability distribution curve of attenuation factor  $h$  when  $A_\theta=0.4$  mrad,  $\sigma_\theta=0.4$  mrad

## 4 结 论

针对近距离 Gamma-Gamma 湍流模型给出了指向误差影响下水平激光链路中衰减因子的联合概率分布模型,分析了系统误码率随系统参数选择的变化规律。研究表明:当束散角为 1 mrad,指向误差较小时,湍流对系统误码率的影响显著;当指向误差中视轴误差和抖动误差超过 0.2 mrad 时,指向误差决定了系统的性能,单靠调整某个参数很难达到系统误码率小于  $10^{-6}$  的要求。进一步分析了视轴瞄准误差和抖动误差对信道影响,增大视轴误差会使信道 PDF 曲线左移、集中度增加,从而使误码率峰值升高;增大抖动误差会使信道 PDF 曲线的集中度增加,误码率曲线更加平缓,从而增加了降低误码率的难度。为了使发射功率、束散角、无人机平台高度以及接收天线孔径等参数的选取留有更多余地,需要提高无人机平台的稳定性。在实际设计中,受制造工艺及成本的限制,空中平台的指向误差很难限制在一个较小的水平,为工程设计带来一定的困难。因此,需要根据各参数的影响规律,从成本效益的角度出发,引入高精度的稳定系统,综合考量设计参数。由于 Gamma-Gamma 模型的广泛适用性,该研究结果同样适用于弱湍流情况。同时,对于无人机集群、垂直链路、远距离通信以及引入机器学习、智能算法<sup>[22]</sup>、高效的调制和编码方式等手段还需进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] 陈阳, 赵尚弘, 赵静, 等. 弱湍流条件下无人机逆向调制激光通信系统的链路性能[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 060101.  
Chen Y, Zhao S H, Zhao J, et al. Link performance of unmanned aerial vehicle retro-modulating optical communication system under weak turbulence condition [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 060101.
- [2] 黎明, 黄勇, 曹阳, 等. 移动平台上空间光通信系统性能研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(7): 1310-1314.  
Li M, Huang Y, Cao Y, et al. Outage performance for mobile MIMO free-space optical systems[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(7): 1310-1314.
- [3] 赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 092801.  
Zhao S H, Wu J L, Li Y J, et al. Present status and developing trends of satellite laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 092801.
- [4] 闫鲁生, 王峰, 吴畏, 等. 无人机激光通信载荷发展现状与关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080005.  
Yan L S, Wang F, Wu W, et al. Current status and key technologies of unmanned aerial vehicle laser communication payloads[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080005.
- [5] Arnon S, Kopeika N S. Laser satellite communication network-vibration effect and possible solutions[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(10): 1646-1661.
- [6] Odeyemi K O, Owolawi P A, Srivastava V M. Optical

- spatial modulation over Gamma-Gamma turbulence and pointing error induced fading channels[J]. *Optik*, 2017, 147: 214-223.
- [7] Arnon S. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(2): 129-131.
- [8] Li M, Hong Y F, Zeng C, et al. IEEE journal on selected areas in communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 2128-2138.
- [9] 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.
- [10] 孙晶, 黄普明, 么周石. 大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0301003.  
Sun J, Huang P M, Yao Z S. Performance of satellite-to-ground laser communications under the influence of atmospheric turbulence and platform micro-vibration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0301003.
- [11] Zhao T F, Liu P, Ma Q W. Wireless ultraviolet guided method of unmanned aerial vehicle matching terrain flight [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0206001.  
赵太飞, 刘萍, 马倩文. 无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0206001
- [12] Borah D K, Voelz D G. Pointing error effects on free-space optical communication links in the presence of atmospheric turbulence[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(18): 3965-3973.
- [13] Yang F, Cheng J L, Tsiftsis T A. Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(2): 713-725.
- [14] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [15] Zhu X M, Kahn J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(8): 1293-1300.
- [16] Sandalidis H G, Tsiftsis T A, Karagiannidis G K, et al. BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors[J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(1): 44-46.
- [17] Sandalidis H G, Tsiftsis T A, Karagiannidis G K. Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(20): 4440-4445.
- [18] Ma J, Li K N, Tan L Y, et al. Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(25): 7575-7585.
- [19] Andrews L C, Phillips R L, Wayne D, et al. Near-ground vertical profile of refractive-index fluctuations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7324: 732402.
- [20] Mai V V, Kim H. Beam size optimization and adaptation for high-altitude airborne free-space optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 7902213.
- [21] 曹阳, 李岳, 李小红. 无线光通信中极化码构造方法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2106003.  
Cao Y, Li Y, Li X H. Research on construction method of polarization code in wireless optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2106003.
- [22] Mu D, Meng W, Zhao S H, et al. Intelligent optical communication based on Wasserstein generative adversarial network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106005  
牟迪, 蒙文, 赵尚弘, 等. 基于 Wasserstein 生成对抗网络的智能光通信[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106005.