文章编号:1001-5078(2023)07-1066-07　　·光纤传感及光通讯技术·

无人机全光中继系统误码率性能分析

唐翰玲[1],李勇军[1],邵　龙[1],韩　健[2]
(1. 空军工程大学信息与导航学院,陕西 西安 710077;2. 空军石家庄飞行学院,河北 石家庄 050000)

摘　要:研究了大气湍流信道下无人机全光中继(optical amplify-and-forward, OAF)激光通信的误码率性能。为了减小大气湍流的影响,改善系统的误码率性能,同时实现较远距离的数据下传,本文基于掺饵光纤放大器(Erbium Droped Fiber Amplifier, EDFA)和光学硬限制器(optical hard-limiter, OHL)结合的无人机平台,同时采用高空水平传输和单输入多输出(single input multiple output, SIMO)技术斜程传输的两跳中继模式。在基于正态分布和双伽马(Gamma-Gamma)湍流模型下,分析了指向误差、中继距离、天顶角、束散角及平台高度等对误码率性能的影响。仿真结果表明,无人机 OAF 系统可以有效改善较远距离通信的数据下传误码率性能;当发射功率 $P_t = 19$ dBm,阈值功率 $P_{th} = -31$ dBm, $N = 3$ 时,最优发散角为 0.8 ~ 1.2 mrad,天顶角控制在 45°内时,可以在 6 km 的中继系统中得到 10^{-6} 系统误码率性能。

关键词:激光通信;无人机;全光中继;大气湍流;误码率
中图分类号:TN929.12　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.013

BER analysis of UAV all-optical relay

TANG Han-ling[1], LI Yong-jun[1], SHAO Long[1], HAN Jian[2]
(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Shijiazhuang Flight College of PLA Air Force, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In this paper, the bit error rate performance of UAV all-optical relay laser communication system under atmospheric turbulence channel is studied. In order to reduce the influence of atmospheric turbulence, improve the bit error rate performance of the system, and realize the long-distance data transmission, a two-hop relay mode based on a combination of Erbium Droped Fiber Amplifier (EDFA) and optical hard-limiter (OHL) is adopted for UAV platform with both high-altitude horizontal transmission and single input multiple output (SIMO) technology for ramped transmission. Besides, based on a normal distribution and double gamma turbulence model, the effects of pointing error, relay distance, zenith angle, beam scatter angleand platform height on BER performance are analyzed. Simulation results show that UAV OAF system can effectively improve the BER error rate performance of data transmission over long distance. When the transmitting power = 19dBm, threshold power = −31 dBm, N = 3, the optimal divergence angle is 0.8 ~ 1.2 mrad, and zenith angle is controlled within 45°, 10^{-6} system BER performance can be obtained in 6km relay system.

Keywords: laser communications; unmanned aerial vehicles; all-optical relay; atmospheric turbulence; BER

1　引　言

机载航空光通信技术作为激光通信的重要分支,由于其大容量、宽带宽及安全性高的优点,已经受到国内外的广泛关注[1]。同时随着无人机的快

基金项目:空军工程大学创新实践基金项目(No. CXJ2021078)资助。
作者简介:唐翰玲(1989 -),男,硕士研究生,主要从事航空激光通信方面的研究。E-mail: thl18932934017@163.com
通讯作者:李勇军(1979 -),男,副教授,博士生导师,主要从事光通信与网络方面的研究。E-mail: tz_228@163.com
收稿日期:2022-08-30;**修订日期:**2022-09-01

速发展,其低成本、组网方便快捷的特点使无人机为平台的空－地光通信成为一种极具潜力和发展前景的通信方式[2-3]。无人机空－地斜程光通信受大气湍流影响明显,同时由于无人机平台载荷小、稳定性差等因素使得远距离的光通信质量有待进一步提高。研究表明,无线光中继通信有利于提升远距离激光通信的性能,特别是对于缓解大气湍流引起的衰落和信道损耗[4-5],但这些研究多集中于弱湍流条件下的水平中继研究;文献[6]~[7]研究了多输入多输出(multiple input multiple output,MIMO)技术在光链路中的应用可以有效克服大气湍流给信道带来的不利影响,提高信道质量,但天顶角过大时,信道湍流情况复杂,误码率高,难以实现远距离的通信。

本文研究了复杂战场环境下以无人机为中继平台的空－空－地两跳激光通信系统误码率性能。利用高空湍流影响小的特点进行远距离的空－空水平激光通信,减小大气湍流对信道的影响,同时用较小的天顶角实现中继平台与地面站数据的下传,并采用 SIMO 技术对空－地斜程光通信性能进行优化,从而最大限度的避免大气湍流对系统性能的影响,如图 1 所示。

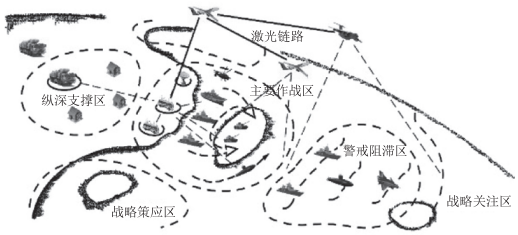


图 1　无人机全光中继示意图

Fig. 1 The Schematic diagram of UAV relay laser communication

2　无人机全光中继通信模型

2.1　系统链路

由图 1 知无人机中继系统中包含水平传输段和斜程传输段,由源节点(source node,SN)、中继节点(relay node,RN)和目的节点(destination node,DN)组成,如图 2 所示。

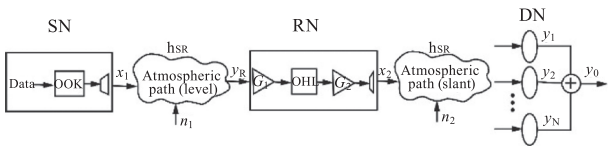


图 2　无人机全光中继系统图

Fig. 2 The system diagram of UAV relay laser communication system diagram

系统在信源 SN 节点对数据进行开关键控的强度调制(OOK)后进行发射传输。RN 节点采用 OAF 模式,有利于降低对高速电子器件和光电器件的要求。RN 节点对接收到的信号先进行前置放大,再通过 OHL 后再放大传递给 DN 节点。RN 节点输入接收透镜的光信号不仅包括数据信号,还包括不受欢迎的后地面辐射(也称为背景噪声或环境噪声)。OHL 是一种用于限制光功率的光无源器件,OHL 的输入如果大于阈值,则输出为常数,否则为 0[8],因此可以有效防止放大器产生的自发辐射噪声(amplified spontaneous emission,ASE)和信道传输过程中的背景噪声在中继传输过程中的累积。OHL 理想模型的输出响应可用数学表达式为:

$$P_{\text{out}} = \begin{cases} P_{\text{th}}, & P_{\text{in}} \geqslant P_{\text{th}}(\text{"1"}) \\ 0, & 0 < P_{\text{in}} < P_{\text{th}}(\text{"0"}) \end{cases} \tag{1}$$

P_t 和 0 分别是信源发送“1”和“0”时的功率响应,假设水平段和斜程段信号传输过程中产生的背景噪声分别为噪声是方差为 $\sigma_n^2 = N_0/2$ 的 n_1 和 n_2。信号经过大气信道时水平段衰减系数为 h_{SR},得出 RN 处接收到的信号为:

$$y_R = h_{SR}x_1 + n_1 \tag{2}$$

假设信源等概发送“1”和“0”信号,平均发射功率为 P_t,那么可得 $x_1 \in \{0, 2P_t\}$。

在目的节点,接收到的信号通过 PIN 光电探测器转换成光电流,再通过决策电路对信号进行二进制数据恢复。由于无人机载荷有限,采用 SIMO 技术的单天线无人机平台,既可以降低功率、减小体积,同时也能有效改善大气湍流带来的不利影响,提高通信质量。假设 DN 节点设置 N 个信号接收器对信号进行接收处理,可以得出第 n 个接收窗口输出的信号为[9]:

$$y_n = \eta h_n x_2 + n_2 \tag{3}$$

其中,$x_2 \in \{\text{ASE}, P_{\text{th}}G_2 + ASE\}$,$\eta$ 为光电转换系数;h_n 为斜程段第 n 条信道的衰减系数,假设 $h_n = h_{RD}(n = 1,2,\cdots,N)$。

斜程链路采用合并信号复杂但接收信号利用率高的最大比合并(maximum ratio combining,MRC)[10],可以得出总信号为[11]:

$$y_D = \frac{\eta x}{\sqrt{N}}\sqrt{\sum_{n=1}^{N} h_n^{\,2}} + z \tag{4}$$

其中,噪声 z 包含了放大器产生的自辐射噪声,背景

噪声等。其中背景噪声是主要噪声[12]，那么忽略其它噪声有 $x_2 \in \{0, P_{th}G\}$，可得信噪比为：

$$\gamma = \frac{\eta^2 G_2^2 P_{th}^2 \sum_{n=1}^{N} h_n^{\ 2}}{NN_0} \tag{5}$$

2.2 信道模型

信号经过大气信道时受到的系统衰减 $h = h_l h_p h_a$，其中 h_l、h_p、h_a 分别为大气信道路径损耗、指向误差、大气湍流带来的系统衰减。

2.2.1 路径损耗

激光在大气中传输时受到固体颗粒、气溶胶等物质的影响，产生散射、折射、吸收等效应使激光信号产生衰减，根据经验公式可知路径损耗的表达式为[9]：

$$h_l = \exp(-\sigma_l L) \tag{6}$$

其中，L 为通信距离；σ_l 为与波长及能见度有关的衰减系数，其表达式为[13]：

$$\sigma_l = \frac{3.912}{V}\left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q} \tag{7}$$

其中，V 为能见度(km)；λ 为信号光的波长(nm)；q 是波长的修正因子其取值为：

$$q = \begin{cases} 1.6, & V > 50\ \text{km} \\ 1.3, & 6\ \text{km} < V < 50\ \text{km} \\ 0.585V^{1/3}, & V < 6\ \text{km} \end{cases} \tag{8}$$

2.2.2 指向误差

假设接收器是面积为 S 的圆形探测孔径，那么对于高斯光束，可以得出距离 L 处指向误差引起的衰减 h_p 的分布函数为[13-14]：

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\zeta^2}{A_0^{\zeta^2}} h_p^{\ \zeta^2-1}, 0 \leqslant h_p \leqslant A_0 \tag{9}$$

其中，$A_0 = [erf(v)]^2$，为 $r = 0$ 处收集的光强，$v = \sqrt{2S}/w_z$，$w_z \approx \theta L$ 为距离 L 处大气湍流中传播的高斯光束宽度；θ 为激光束的束散角；$\zeta = w_{eq}/2\sigma_j$，$\sigma_j = \sigma_\theta L$ 是指向误差位移；σ_θ 为抖动误差角标准差；$w_{eq}^2 = w_z^2 \frac{\sqrt{\pi} erf(v)}{2v\exp(-v^2)}$ 为等效的波束宽度。

由系统模型 $h = h_l h_p h_a$ 及公式(9)可得指向误差和大气湍流联合下的链路衰减系数的概率分布函数：

$$f_h(h) = \int f_{h|h_a}(h \mid h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a \tag{10}$$

其中：

$$f_{h|h_a}(h \mid h_a) = \frac{1}{h_a h_l} f_{h_p}\left(\frac{h}{h_a h_l}\right) = \frac{\zeta^2}{h_a h_l A_0^{\zeta^2}}\left(\frac{h}{h_a h_l}\right)^{\zeta^2-1},$$

$$0 \leqslant h \leqslant A_0 h_a h_l \tag{11}$$

2.2.3 大气湍流

随着高度的增高，大气湍流的影响逐渐减小。以某典型无人机参数为例，其巡航高度为 10 km，采用正态分布的弱湍流模型为[15]：

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{1}{2h_a\sqrt{2\pi\sigma_x^2}}\exp\left(-\frac{(\ln h_a + 2\sigma_x^2)^2}{8\sigma_x^2}\right) \tag{12}$$

其中，$\sigma_x^2 = 0.30545k^{7/6}C_n^2L^{11/6}$ 为光强的对数振幅方差；$k = 2\pi/\lambda$ 表示波数；C_n^2 表示大气折射率结构常数，本文采用 Hufnagel-Valley 模型描述随高度变化的大气折射率常数[16]：

$$C_n^2(h') = 8.148 \times 10^{-56} v_c^{\ 2} h'^{10} \exp\left(\frac{-h'}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16}\exp\left(\frac{-h'}{1500}\right) + C_0^2\exp\left(\frac{-h'}{100}\right) \tag{13}$$

式中，v_c 为垂直路径风速，本文假定 $v_c = 21$ m/s，C_0^2 为近地面大气折射率结构常数。

Gamma-Gamma 分布能较全面准确地描述各种强度湍流，经实验验证，适合于描述大气条件复杂的斜程激光链路大气湍流信道[17]：

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}(h_a)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) \tag{14}$$

其中，$\Gamma(*)$ 为 Gamma 函数；$K_{\phi-\beta}(*)$ 为第二类贝赛尔函数；ϕ、β 分别表示小尺度和大尺度湍流引起的光强起伏参数。ϕ、β 和大气条件有关，在平面波情况下分别表示为[17]：

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_I^2}{(1 + 1.11\sigma_I^{12/5})^{7/6}}\right) - 1\right]^{-1} \tag{15}$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_I^2}{(1 + 0.69\sigma_I^{12/5})^{5/6}}\right) - 1\right]^{-1} \tag{16}$$

其中，σ_I^2 是平面波光强起伏的闪烁指数，由三层高度谱模型可以推导出斜程闪烁指数的表达式为[18]：

$$\begin{cases} \sigma_I^2 = -1.30k^{7/6}L^{5/6}\sec\psi \\ \mathrm{Re}\left[\int_{h_0}^{h_0+H} i^{\tau/2-1}\chi^{\tau/2-1}C_n^2(h')\Gamma(1-\tau/2)dh'\right] \end{cases} \tag{17}$$

其中，L 是激光传输距离；ψ 是天顶角；H 是机载平台的飞行高度；h_0 是地面接收器的海拔高度，本文中假设其值为 0；τ 是关于随海拔高度 h' 的幂率谱指数函数，通常可以表示为[19]：

$$\tau(h') = \frac{\tau_1}{1 + (h'/H_1)^{b_1}} + \frac{\tau_2(h'/H_1)^{b_1}}{1 + (h'/H_1)^{b_1}}$$

$$\frac{1}{1+(h'/H_2)^{b_2}}+\frac{\tau_3\,(h'/H_2)^{b_2}}{1+(h'/H_2)^{b_2}} \tag{18}$$

其中，$\tau_1=11/3$、$\tau_2=10/3$ 及 $\tau_3=5$ 分别表示三层高度谱模型中对应的边界层、对流层和平流层的幂率谱指数，$H_1=2000$ m、$H_2=8000$ m 为垂直方向分层界限，$b_1=8$、$b_2=10$ 为数值系数。

2.3　误码率性能计算

系统采用 OOK 强度调制直接检测时，则误码率可表示为[20]：

$$P_e=\int_0^{\infty}P_e(e\mid h)f_h(h)\,dh \tag{19}$$

其中，

$$P_e(e\mid h)=Q(\sqrt{\gamma/2}),$$

$$Q(x)=\frac{1}{2}erfc(x/\sqrt{2})$$

$$=\int_x^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-t^2/2}dt。$$

源节点到中继节点处的误码率为 P_{e1}，中继节点到目的节点处的误码率为 P_{e2}，那么整个系统的误码率为：

$$\begin{aligned}P_e&\leqslant 1-(1-P_{e1})(1-P_{e2})\\&=P_{e1}+P_{e2}-P_{e1}P_{e2}\approx P_{e1}+P_{e2}\end{aligned} \tag{20}$$

水平段误码率可表示为：

$$P_{e1}=\frac{1}{2}[P(0\mid 1)+P(1\mid 0)]$$

$$=\frac{1}{4}\left[\int_0^{\infty}erfc\left(\frac{2P_tG_1h_{SR}-P_{\text{th}}}{2\sigma_n}\right)f_{h_{SR}}(h_{SR})\,dh_{SR}+erfc\left(\frac{P_{\text{th}}}{2\sigma_n}\right)\right] \tag{21}$$

由公式(6)、公式(11)和公式(12)可以得出水平链路衰减因子的分布函数：

$$f_{h_{SR}}(h_{SR})=\frac{\zeta^2}{(A_0h_l)^{\zeta^2}}h_{SR}^{\zeta^2-1}\int_{h_{SR}/A_0h_l}h_a^{-\zeta^2-1}\frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma_x^2}}\exp\left(-\frac{(\ln h_a+2\sigma_x^2)^2}{8\sigma_x^2}\right)dh_a \tag{22}$$

根据 $erfc(x)=1-erf(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^{\infty}e^{-\eta^2}d\eta$，可以得出：

$$f_{h_{SR}}(h_{SR})=\frac{\zeta^2h_{SR}^{\zeta^2-1}}{2(A_0h_l)^{\zeta^2}}erfc\left(\frac{\ln\left(\frac{h}{A_0h_l}\right)+2\sigma_x^2+4\sigma_x^2\zeta^2}{2\sqrt{2}\sigma_x}\right)\cdot\exp(2\sigma_x^2\zeta^2+2\sigma_x^2\zeta^4) \tag{23}$$

斜程链路误码率可表示为：

$$P_{e2}=\int_0^{\infty}Q(\sqrt{\gamma/2})f_{h_{RD}}(h_{RD})\,dh_{RD} \tag{24}$$

由公式(6)、公式(11)和公式(14)可以得出斜程链路衰减因子的分布函数：

$$\begin{aligned}f_{hRD}(h_{RD})&=\frac{2\zeta^2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{(h_lA_0)^{\zeta^2}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}h_{RD}^{\zeta^2-1}\cdot\\&\int_{h_{RD}/A_0h_l}h_a^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-\zeta^2-1}K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a})\,dh_a\\&=\frac{\alpha\beta\zeta^2}{h_lA_0\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}G_{1,3}^{3,0}\left[\frac{\alpha\beta}{h_lA_0}h_{RD}\middle|\begin{matrix}\zeta^2\\ \zeta^2-1\quad\alpha-1\quad\beta-1\end{matrix}\right]\end{aligned} \tag{25}$$

由文献[21]知：

$$Q(x)\approx\frac{1}{24}\left[5\exp(-2x^2)+4\exp\left(-\frac{11x^2}{20}\right)+\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right] \tag{26}$$

根据 $\exp(x)=G_{0,1}^{1,0}\left[-x\middle|\begin{matrix}-\\0\end{matrix}\right]$ 及 Meijer 函数性质，由公式(24)、公式(25)和公式(26)有：

$$\begin{aligned}P_{e2}\approx&\frac{5}{24}\prod_{n=1}^{N}\frac{\zeta^2 2^{\phi+\beta-3}}{\pi\Gamma(\phi)\Gamma(\beta)}G_{6,3}^{1,6}\left[\frac{16\eta^2G_2^2P_{\text{th}}^2h_l^2A_0^2}{N(\phi\beta)^2}\middle|\begin{matrix}\frac{1-\zeta^2}{2}&\frac{2-\zeta^2}{2}&\frac{1-\phi}{2}&\frac{2-\phi}{2}&\frac{1-\beta}{2}&\frac{2-\beta}{2}\\0&&\frac{-\zeta^2}{2}&\frac{1-\zeta^2}{2}&&\end{matrix}\right]\\&+\frac{4}{24}\prod_{n=1}^{N}\frac{\zeta^2 2^{\phi+\beta-3}}{\pi\Gamma(\phi)\Gamma(\beta)}G_{6,3}^{1,6}\left[\frac{22\eta^2G_2^2P_{\text{th}}^2h_l^2A_0^2}{5N(\phi\beta)^2}\middle|\begin{matrix}\frac{1-\zeta^2}{2}&\frac{2-\zeta^2}{2}&\frac{1-\phi}{2}&\frac{2-\phi}{2}&\frac{1-\beta}{2}&\frac{2-\beta}{2}\\0&&\frac{-\zeta^2}{2}&\frac{1-\zeta^2}{2}&&\end{matrix}\right]\\&+\frac{1}{24}\prod_{n=1}^{N}\frac{\zeta^2 2^{\phi+\beta-3}}{\pi\Gamma(\phi)\Gamma(\beta)}G_{6,3}^{1,6}\left[\frac{4\eta^2G_2^2P_{\text{th}}^2h_l^2A_0^2}{N(\phi\beta)^2}\middle|\begin{matrix}\frac{1-\zeta^2}{2}&\frac{2-\zeta^2}{2}&\frac{1-\phi}{2}&\frac{2-\phi}{2}&\frac{1-\beta}{2}&\frac{2-\beta}{2}\\0&&\frac{-\zeta^2}{2}&\frac{1-\zeta^2}{2}&&\end{matrix}\right]\end{aligned} \tag{27}$$

3 仿真及结果分析

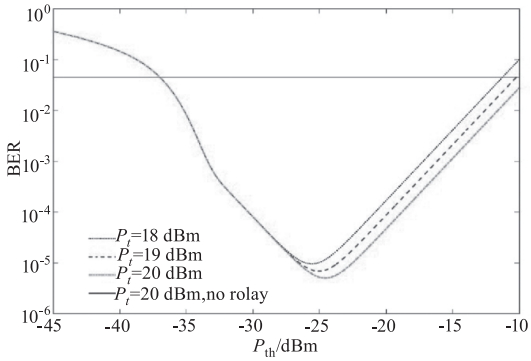
对无人机全光中继系统的的误码率进行仿真计算,基本参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

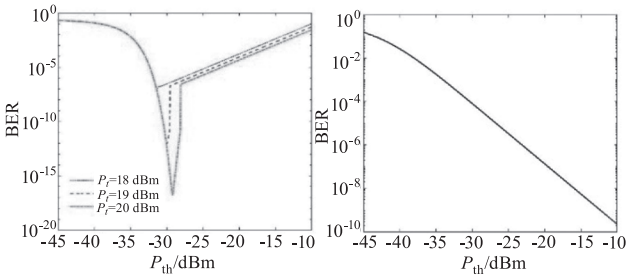
Tab. 1 Simulation parameters

参数	符号	数值
波长/nm	λ	1550
增益/dB	G_1	17.8
	G_2	30
接收口径/m	a	0.25
近地面大气折射率常数/$m^{-2/3}$	C_0^2	1.7×10^{-14}
光电转换效率	η	0.8
噪音方差/($A\cdot Hz^{-1}$)	σ_n^2	10^{-7}

图 3(a)展示了 $L=20$ Km,$H=5$ Km,$N=1$ 时在不同发射功率情况下,系统误码率随着 OHL 理想模型的阈值功率变化曲线。根据仿真结果可知,在 $\sigma_\theta=0.4$ mrad,没有中继的情况下,远距离的空 - 地激光通信误码率较高,而采用中继系统后则可以有效的改善系统的误码率性能。图 3(b)和图 3(c)分别为水平段和斜程段的误码率,随着阈值的增大,水平段误码率先减小,当阈值达到临界值后急剧增大,斜程段误码率随阈值增大而减小。在该全光中继系统中,OHL 阈值功率较小时,受背景光等噪音的影响,系统将部分“0”判定为“1”,水平段误码率较大,此时系统误码率中水平段占比大;随着 OHL 阈值功率的增大,误判的概率减小,水平段误码率快速减小,此时斜程段误码率对系统误码率性能起主导作用,系统误码率性能进一步改善,但速率放缓;当阈值功率达到临界值后,随着阈值功率的增加,会将部分“1”判为“0”,水平段误码率开始急剧恶化,使系统误码率性能变差。因此,当阈值过高或过低时,都会使水平段的误码率增大,甚至高于没有中继时的误码率,并主导系统的误码率性能变差。同时随着发射功率的增大,临界阈值增大。



(a) 系统总误码率



(b) 水平段误码率 (c) 斜程段误码率

图 3 系统误码率在不同发射功率情况下随 OHL 阈值功率 P_{th} 的变化曲线

Fig. 3 The variation curve of system BER with the threshold power P_{th} for the different transmitted power from SN

图 4 展示了 $L=20$ km、$P_{th}=-31$ dBm、$H=5$ km、$\sigma_\theta=0.4$ mrad 时在不同数量接收器情况下系统误码率随束散角变化的曲线。从图中可以看出:近地面大气折射率结构常数增加时系统的误码率增大;随着束散角的增大,系统误码率先减小,后增大,当束散角在 0.8 ~ 1.2 mrad 时系统误码率性能较好;同时,随着接收器数量的增加,系统误码率性能得到了明显改善,但是,随着 N 值的增加系统性能的改善效果逐渐减弱,当束散角为 1 mrad 时,N 从 1 增加到 3,系统性能提高了 4 个数量级,从 3 增加到 5 只提升了 2 个数量级。工程实践中随着 N 值得增加建设成本及系统复杂度会进一步增加,因此应根据工程实际需要选取合适的接收器数目达到最大的效能。

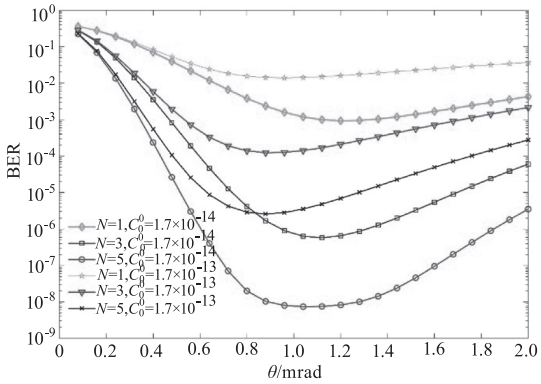
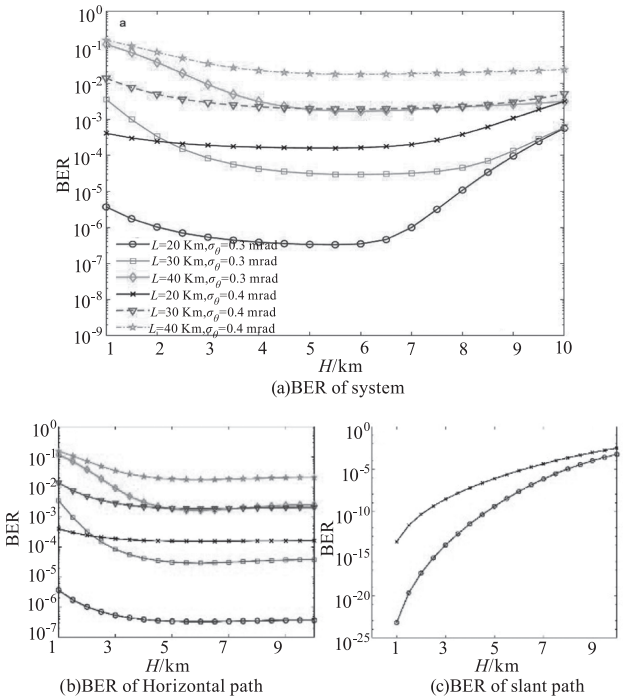


图 4 系统误码率随束散角的变化曲线

Fig. 4 The variation curve of system BER with divergence angles

图 5 为不同距离及指向误差影响下误码率随平台高度的变化曲线。图 5(a)表明系统随着高度的升高,误码率先减小,后增大。这是因为高度较低时,斜程链路长度短,误码率低,系统性能取决于水平链路的变化,由于大气湍流随着高度的升高而减弱,对水平链路的影响减小。如图 5(b)所示,随着

高度的升高，水平链路误码率性能得到改善，但改善的效果逐渐减小，超过 4 km 后误码率主要受链路距离影响，趋于平缓。同时高度升高，斜程链路长度增加，湍流影响增大，误码率增大，如图 5(c)所示。当达到一定高度后，斜程信道误码率性能恶化程度开始逐渐影响系统的误码率性能，使系统误码率逐渐增加，例如当 $L = 20$ km，高度超过 6 km 后，系统误码率增加，变化趋势逐渐与斜程链路误码率变化一致。从图 5 还可以看出，无人机平台振动特性带来的指向误差会严重影响了激光通信的误码率性能，因此提高无人机稳定性是提升无人机光通信性能及实践应用不可忽视的一个方面。



(a)BER of system

(b)BER of Horizontal path　　(c)BER of slant path

图 5　误码率随中继高度的变化曲线

Fig. 5 The variation curve of system BER with relay height

图 6 为 $N = 3$、$L = 20$ km、$P_{th} = -31$ dBm、$\sigma_\theta = 0.3$ mrad 时中继高度和斜程天顶角影响下系统误码率的变化图。随着天顶角的增大，斜程链路通信距离增加，湍流作用增强，误码率增强，系统误码率增大。由图 5 知平台高度同时影响水平和斜程链路的误码率性能，且作用相反，当高度达到一定值时，系统误码率主要受斜程段的影响。因此在高高度进行无人机中继通信时，须控制天顶角的范围以达到所需要的误码率性能，例如当中继高度为 6 km 时，天顶角控制在 45°以内，就可以得到优于 10^{-6} 量级误码率性能。

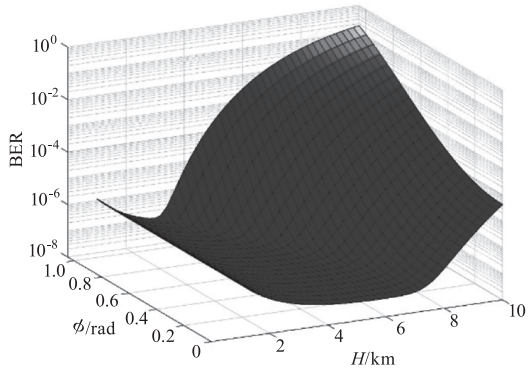


图 6　系统误码率随中继高度及斜程天顶角变化图

Fig. 6 The variation curve of system BER with relay height and sloping zenith angle

4　结　论

利用无人机可以方便快捷的实现空中激光链路的搭建，但在无中继的情况下，远距离空－地光通信受湍流影响大，信道恶劣，误码率高，难以达到所需要的性能指标。为了进一步增大激光通信的覆盖范围以及稳定的数据下传，利用高空湍流影响小的特点实现数据的远距离激光传输，并使用 OHL、EDFA 元件以及 SIMO 技术有效降低发射功率、体积重量来提升无人机空中作业能力，同时有效减小斜程链路湍流的影响，改善通信质量，实现可靠的数据下传。通过仿真分析，当接收天线为 3 时，选取合适的系统参数，就可以在 6 km 的中继平台得到 10^{-6} 的系统误码率性能指标。本研究为远距离的激光通信提供了参考，下一步将对系统参数不同条件下的智能化优化进行研究，并尝试开展机载实验。

参考文献：

[1]　Yan Lusheng, Wang Feng, Wu Wei, et al. Current status and key technologies of unmanned aerial vehicle laser communication payloads[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080005.

[2]　Li Ming, Huang Yong, Cao Yang, et al. Outage performance for mobile MIMO free-space optical systems[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, (7): 1310 – 1310. (in Chinese)
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，(7)：1310 – 1310.

[3]　Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun, et al. Present situation and development trend of satellite laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9):

092801. (in Chinese)
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.

[4] Akella J, Yuksel M, Kalyanaraman S. Error analysis of multi-hop free-space optical communication[C]//Proc. of IEEE International Conference on Communication, 2005: 1777 – 1781.

[5] Safari M, Uysal M. Relay-assisted free-space optical communication[J]. IEEE Trans. Wireless Comm., 2008, 12(7):5441 – 5449.

[6] Alexander, Vavoulas, Harilaos, et al. Weather effects on FSO network connectivity[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(10):734 – 740.

[7] Bhatnagar M R, Ghassemlooy Z. Performance analysis of gamma-gamma fading FSO MIMO links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(9): 2158 – 2169.

[8] Ohtsuki T, Sasase I, Mori S. Effects of hard-limiter and error correction coding on performance of direct-detection optical CDMA systems with PPM signaling[C]//Proceeding of the 1995 International Conference on Communication. Part 1(of 3), Seattle, WA, USA, 1995.

[9] Azman A A, Rahman A K, Rashidi C B M, et al. Investigation of haze effects via utilizing different wavelength on free space optical communication[C]//International Conference on Electronic Design. IEEE, 2017:1 – 6.

[10] Li KN, Ma J, Aniceto Belmonte, et al. Performance analysis of satellite-to-ground downlink optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. Applied Optics, 2015, 54(25):7575 – 7585.

[11] Pham T V, Thang T C. Average achievable rate of spatial diversity MIMO-FSO over correlated gamma-gamma fading channels[J]. Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of, 2018, 10(8):662 – 674.

[12] Razavi M, Shapiro J H, Wireless optical communications via diversity recep-tion and optical preamplification[J]. IEEE Trans. Wirel. Commun, 2005, 4(3):975 – 983.

[13] Yang F, Julian C, Theodoeos A. Tsiftsis. 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]. Lightw. Technol, 2007, 25:1702 – 1710.

[15] Yang F, Cheng J, Tsiftsis T A. Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62 (2): 713 – 725.

[16] 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.

[17] 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.

[18] Ji Yao, Yue Peng, Yan Ruiqing, et al. BER performance analysis of the atmospheric laser communication system on the slant path in weak turbulence[J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(1):66 – 70. (in Chinese)
姬瑶,岳鹏,闫瑞青,等. 弱湍流下斜程大气激光通信误码率分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(1):66 – 70.

[19] Yue P, Wu L, Yi X, et al. Performance analysis of a laser satellite-communication system with a three-layer altitude spectrum over weak-to-strong turbulence[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 148: 283 – 292.

[20] 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.

[21] Zhang Q, Cheng J, Kapagiannidis G K. Block error rate of optical wireless communication systems over atmospheric turbulence channels [J]. IET Communications, 2013, 8(5):616 – 625.