

弱湍流条件下无人机逆向调制激光通信系统的链路性能

陈阳*, 赵尚弘, 赵静, 王翔

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 研究了弱湍流条件下无人机逆向调制激光通信系统的链路传输性能,并进行了仿真验证。考虑指向误差对系统的影响,利用高斯-厄米特积分方法推导出系统双向信道衰落概率密度函数和其累积分布函数的闭合表达式,进一步推导出系统平均误码率和中断概率的闭合表达式。研究结果表明,在弱湍流和指向误差的共同影响下,入射角度、调制阶数和角隅棱镜材料折射率对系统误码性能影响较大;当发散角为 $3\sim 10\ \mu\text{rad}$ 时,系统误码率会达到一个最优值;当发散角分别为 $6, 8, 10\ \mu\text{rad}$ 时,在较高信噪比阈值条件下系统中断概率可降到 10^{-9} 数量级。

关键词 大气光学; 无人机光通信; 链路传输性能; 高斯-厄米特积分; 调制回复反射器

中图分类号 TN92

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.060101

Link Performance of Unmanned Aerial Vehicle Retro-Modulating Optical Communication System Under Weak Turbulence Condition

Chen Yang*, Zhao Shanghong, Zhao Jing, Wang Xiang

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

Abstract The link transmission performance of the unmanned aerial vehicle (UAV) retro-modulating optical communication system under the weak turbulence condition is studied and verified by simulation. The influence of pointing error on the system is considered, and the Gauss-Hermite integral method is used to derive the bidirectional channel fading probability density function and the closed expression of its cumulative distribution function for this system. The closed expressions of system average bit error rate and the outage probability are further derived. The research results show that under the joint influences of weak turbulence and pointing error, and the incident angle, modulation order and refractive index of the corner cube retro-reflector have great influences on the error performance of this system. When the divergence angle is $3\sim 10\ \mu\text{rad}$, the system error rate reaches an optimal value. When the divergence angles are $6, 8$ and $10\ \mu\text{rad}$, respectively, the outage probability is reduced to 10^{-9} orders of magnitude under the condition of relatively high signal-to-noise ratio threshold.

Key words atmospheric optics; UAV optical communications; link transmission performance; Gauss-Hermite integral; modulating retro-reflector

OCIS codes 010.1330; 010.1290; 010.3310; 250.4110

1 引言

与传统的空间光通信终端相比,调制回复反射器因其具有体积小、质量小、功耗低等诸多优点而被广泛关注。在基于调制回复反射器结构的通信系统中,发送端首先发送询问光束,经过自由空间传播后

到达调制回复反射器(MRR),MRR对接收到的询问光束进行调制并加载数据后,将光束朝发射端的方向反射回去,当调制回复反射光束到达接收端后,光束被解调,获得数据信息,具有这种通信特点的光通信系统也被称为逆向调制光通信系统^[1]。随着无人机(UAV)在空间激光通信领域越来越广泛的应

收稿日期: 2018-09-12; 修回日期: 2018-10-06; 录用日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61571461)

* E-mail: chenyangbabm@126.com

用和发展,无人机激光通信系统对通信设备的载荷、功耗提出了越来越高的要求,因此,构建无人机逆向调制激光通信系统已成为国内外无人机激光通信领域研究的前沿和热点之一^[2]。

文献[2]详细介绍了基于调制回复反射器结构的通信系统的工作原理和无人机逆向调制激光通信系统模型,并对该种通信系统的性能特点和 MRR 技术进行了阐述;文献[3]研究了弱湍流条件下机载平台上搭载的 MRR 进行激光通信时光强闪烁系数的变化规律;文献[4]报道了在美国海军实验室进行的无人机与地面基站间的逆向调制双向激光通信实验,最大通信距离为 2.5 km,双向链路数据传输速率均为 2 Mb/s;文献[5]也报道了无人机逆向调制激光通信的实验,目的是为了实现逆向调制端质量、体积和功耗的最小化,并利用反射光的特性确认无人机的位置;文献[6]通过波动光学仿真的方法研究了弱湍流条件下逆向调制光通信系统双向信道特性;文献[7]通过仿真验证的方法比较了传统的空间光通信系统与逆向调制光通信系统的误码性能,研究发现逆向调制光通信系统的误码性能在由弱至强湍流范围内普遍优于传统光通信系统,并且在强湍流条件下优势更加明显;文献[8]建立了逆向调制系统中高斯光束经过角偶棱镜回复反射器(CCR)反射后出射光束的数学模型,分析了大气湍流对逆向调制系统光链路的影响,研究了 CCR 多光束反射特性对大气湍流信道的补偿作用;文献[9]通过仿真分析了不同通信距离、不同大气能见度条件下的逆向调制激光通信系统误码率,并且结合“眼图”特征得出不同条件下可实现的逆向调制光通信距离;文献[10]对“猫眼”逆向调制自由空间光通信原理进行分析,介绍了“猫眼”光学系统和逆向调制器等核心元件的作用及特点,重点对“猫眼”光学系统优化方法及多量子阱电吸收型调制器和微电子机械系统(MEMS)调制器的特点做了介绍;文献[11]提出采用逆向调制阵列技术抑制大气湍流对逆向调制系统链路性能的不利影响,并通过仿真得出中等大气湍流条件下传输距离为 1 km 时,采用 3 个逆向调制器组成的逆向调制阵列的通信误码率比单个逆向调制器时低 4 dB。国内对于无人机逆向调制系统的研究基本处于空白状态,较国外研究进展有较大差距。无人机逆向调制激光通信系统通常采用开关键控(OOK)调制方式,这种调制方式虽然简单,但易受大气湍流影响并且传输速率相对较低,而文献[12]采用相移键控(PSK)调制方式抑制湍流的

影响,并且大幅提高了通信时信息传输速率,通过比较可知,PSK 调制方式优于 OOK 调制方式,目前,该领域研究正逐步向 PSK 调制方式转换,本文激光通信系统中也同样在采用 PSK 调制方式开展研究。

当前,无人机逆向调制光通信系统链路性能的理论研究还处于发展和完善阶段。由于在通信过程中机身抖动造成的光束指向性误差,以及 CCR 材料属性的差异都会影响返回链路性能,所以为了更加完整地理解系统链路特性,针对无人机逆向调制光通信系统的理论研究与建模时,需要同时考虑这两种因素的影响,然而目前国内外学者针对相关方面的理论研究却并未将上述因素考虑在内。因此,本文研究无人机逆向调制激光通信系统的链路性能,研究过程中综合考虑了大气湍流和平台震动造成的指向误差对系统的影响,建立了弱湍流条件下无人机逆向调制光通信系统信道模型,推导出了系统链路误码率和中断概率的解析表达式;结合 CCR 反射光强分布,通过仿真,对比分析了 CCR 材料折射率、前向链路光束入射角、反射光束发散角、信道相关系数和调制阶数对链路误码和中断性能造成的影响,并且将仿真结果与国内外仿真和实验数据进行了对比分析。

2 系统模型

2.1 通信系统模型

典型的无人机逆向调制激光通信系统如图 1 所示^[2],通信系统通过发射天线发射连续的询问光束至 MRR,MRR 由角偶棱镜回复反射器和调制器组成,当 MRR 接收到询问光束时先对其进行调制并加载数据,随后通过回复反射器实现激光的定向反射,反射光束到达接收端后首先被接收器接收,然后进行解调。为方便分析,假定从发射天线到达 MRR 的通信链路称为上行链路,而从 MRR 反射回接收端的通信链路为下行链路。无人机平台在激光通信时由机身晃动与不稳定造成的平台间光束的指向性误差,成为影响无人机之间光链路性能的重要因素之一。大气湍流中的光束漂移和光斑拓展效应均会对指向误差的计算造成影响,其中光斑拓展效应还会造成光束半径增大,因此,本研究采用 Farid 等^[13]提出的一种综合考虑指向误差、大气湍流和光束拓展的信道模型来分析系统的误码性能。假设探测器的响应度为 1,接收信号 y 可以表示为

$$y = \rho h s + n', \quad (1)$$

式中: ρ 为接收端的光电探测器的响应度; h 为双向

信道的信道衰落系数; s 为信号传输光强; n' 为接收端的加性噪声源, 设其为热噪声, 其模型是方差为 σ^2 的高斯白噪声。信道衰落系数 h 包括由光束指向误差导致的衰落系数 h_p 和由大气湍流导致的衰落系数 h_d , h 的表达式为

$$h = h_p h_d \quad (2)$$

接收端每比特信号的电信噪比 R_{SN} 可以表

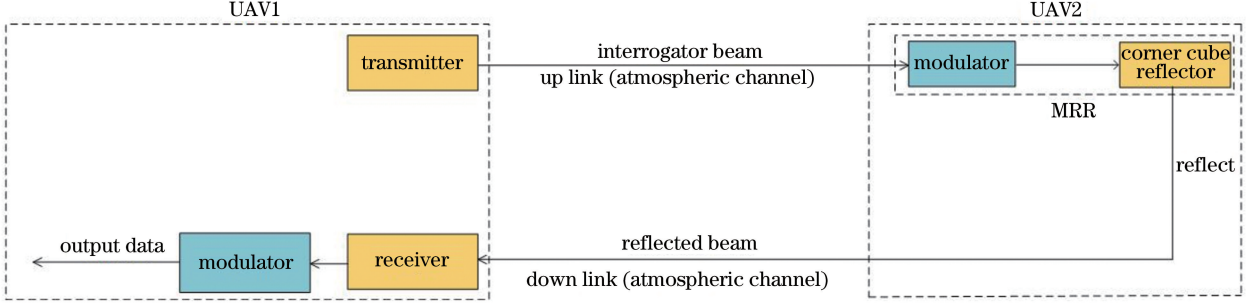


图1 典型的基于调制回复反射器结构的无人机激光通信系统模型

Fig. 1 Model of typical UAV laser communication system based on modulated retro-reflector structure

2.2 信道模型

系统湍流模型采用 Log-Normal 函数模型, 系统上行链路和下行链路光束服从对数振幅高斯分布, 则双向大气湍流信道衰落系数 h_d 的概率密度函数表示为^[6]

$$f(h_d) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}h_d\sigma_{Xd}} \times \exp\left[-\frac{(\ln h_d - \ln Q - 2\mu_{Xd})^2}{8\sigma_{Xd}^2}\right], \quad (4)$$

式中: Q 表示 CCR 的归一化反射率, μ_{Xd} 和 σ_{Xd} 分别为接收端光信号对数振幅的均值和方差, 可表示为

$$\begin{cases} \mu_{Xd} = \mu_{Xs1} + \mu_{Xs2}, \\ \sigma_{Xd} = \sqrt{\sigma_{Xs1}^2 + \sigma_{Xs2}^2 + 2\rho_{Xd}\sigma_{Xs1}\sigma_{Xs2}}, \end{cases} \quad (5)$$

其中 μ_{Xs1} , μ_{Xs2} 和 σ_{Xs1} , σ_{Xs2} 分别为单向信道(上行信道/下行信道)接收端光信号对数振幅的均值和方差, 1 代表上行信道, 2 代表下行信道。 μ_{Xs} 和 σ_{Xs} 的表达式为

$$\begin{cases} \mu_{Xs} = \frac{1}{2} \ln \mu_{hs} - \frac{1}{4} \ln \left(\frac{\sigma_{hs}^2}{\mu_{hs}^2} + 1 \right), \\ \sigma_{Xs} = \frac{1}{2} \sqrt{\ln \left(\frac{\sigma_{hs}^2}{\mu_{hs}^2} + 1 \right)} \end{cases}, \quad (6)$$

且令

$$\rho_{Xd} = \frac{1}{4\sigma_{Xs1}\sigma_{Xs2}} \cdot$$

$$\ln \left\{ \frac{\rho_h \sigma_{hs1} \sigma_{hs2}}{\exp[2(\mu_{Xs1} + \mu_{Xs2} + \sigma_{Xs1}^2 + \sigma_{Xs2}^2)]} + 1 \right\}, \quad (7)$$

式中: ρ_h 为双向信道衰落相关系数; μ_{hs} 和 σ_{hs} 分别为

示为^[13]

$$R_{SN} = \frac{\rho^2 P_{av}^2 m^2 h^2}{\ln K \sigma^2} = \gamma h^2, \quad (3)$$

式中: $\gamma = \rho^2 P_{av}^2 m^2 / (\ln K \sigma^2)$, 表示在无湍流作用下每比特信号上的信噪比, P_{av} 为平均传输光功率, K 为信号调制阶数, m 为光调制系数(OMI)。为了简化计算, 令 $m = 0.9$ 。

单向信道接收端光信号归一化光强的均值和方差。

在同时考虑光探测器孔径尺寸、光束发散角, 以及抖动标准差等条件下, 系统抖动误差衰落系数 h_p 服从瑞利分布。在系统通信过程中, 由于光源发射端装有自动跟踪对准系统, 为了方便研究, 假设抖动误差仅发生在下行链路过程中, 其概率密度表达式为^[13]

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma_1^2}{A_0^2} h_p^{\gamma_1^2 - 1}, \quad 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (8)$$

式中: $\gamma_1 = \frac{w_{zeq}}{2\sigma_s}$, $w_{zeq}^2 = w_z^2 \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$, $v = \frac{\sqrt{\pi} a}{\sqrt{2} w_z}$, w_{zeq} 为接收端等效光束半径, w_z 为接收端光束半径, σ_s 为接收端光束抖动标准差, a 为接收端探测器半径; A_0 为接收端平面中心处的光功率, $A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2$, $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数。通过以上分析, 综合考虑大气湍流和指向误差条件下双向信道衰落系数 h 的概率密度函数可以表示为

$$f_h(h) = \int f_{h|h_d}(h | h_d) f_{h_d}(h_d) dh_d, \quad (9)$$

$$\text{式中: } f_{h|h_d}(h | h_d) = \frac{1}{h_d} f_{h_p}\left(\frac{h}{h_d}\right) = \frac{\gamma_1^2}{A_0^2 h_d} \left(\frac{h}{h_d}\right)^{\gamma_1^2 - 1}.$$

将(4)式和(8)式代入(9)式可得

$$f_h(h) = \frac{\gamma_1^2}{A_0^2} h^{\gamma_1^2 - 1} \int_{h/A_0}^{\infty} h_d^{-\gamma_1^2} \frac{1}{2\sqrt{2\pi}h_d\sigma_{Xd}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln h_d - \ln Q - 2\mu_{Xd})^2}{8\sigma_{Xd}^2}\right] dh_d. \quad (10)$$

通过变量代换和使用误差补余函数 $\operatorname{erfc}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy$, 可以求得(10)式的闭合表达

式为

$$f_h(h) = \frac{\gamma_1^2}{2A_0^2} \exp(2\gamma_1^4 \sigma_{Xd}^2 - 2\gamma_1^2 \mu_{Xd}) h^{\gamma_1^2-1} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \frac{h}{A_0} - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right). \quad (11)$$

对概率密度函数积分可推导出累积分布函数为

$$F(h) = \frac{c}{b} \left\{ \exp \left[\frac{\ln \left(\frac{h}{A_0} \right) - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln \left(\frac{h}{A_0} \right) - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right] - \exp \left(\frac{b^2}{4} \right) \operatorname{erf} \left[\frac{b}{2} - \frac{\ln \left(\frac{h}{A_0} \right) - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right] \right\}, \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} c = \sqrt{8} m_0 A_0^2 \sigma_{Xd} \exp[(2\mu_{Xd} - 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2) \gamma_1^2] \\ b = \sqrt{8} \sigma_{Xd} \gamma_1^2 \end{cases}.$$

如图 2 所示,在双向通信链路中,当 CCR 的 3 个两面直角有一定夹角时,反射出去的光将分成

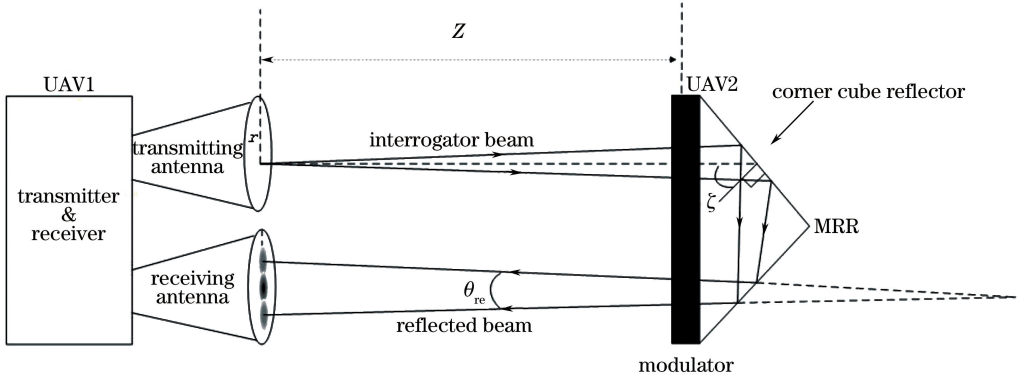


图 2 CCR 反射光束发散角示意图

Fig. 2 Schematic of divergence angle of reflected beam of CCR

3 通信系统链路性能分析

3.1 多进制相移键控 (MPSK) 调制下基于调制回复反射器结构的无人机光通信链路误码性能分析

系统采用 M 阶 PSK 调制 (MPSK) 方式,接收端采用相干探测零差解调,条件误码率表达式为

$$P_B^{\text{MPSK}}(h) = \frac{1}{\ln M} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\ln M \cdot R_{\text{SN}}} \sin \frac{\pi}{M} \right]. \quad (14)$$

以 CCR 轴心为中心、两两对称且均匀分布的 6 束细光束,中心对称的两光束的夹角称为 CCR 的发散角,记为 θ_{re} , θ_{re} 的大小由 3 个两面直角的误差决定^[8]。在 CCR 反射过程中,除了回复反射光,还存在少量的衍射光和漫反射光,其中对光场强度分布起主要作用的仍是 6 束回复反射光束。当传输距离较长时,高斯光束可近似为平面波,根据统计光学理论分析,在轴向距离为 z ,径向距离为 r 处的 CCR 反射光强度分布可表示为

$$\begin{aligned} \langle h_2(r, z) \rangle &= R \frac{2P_{\text{Re}}}{\pi w_z^2} \exp \left(-\frac{2r^2}{w_z^2} \right) \cdot \\ &\left\{ \exp \left[-2 \left(\frac{\chi(z)}{w_z} \right)^2 \right] \psi \left(\frac{4r\chi(z)}{w_z^2} \right) + \frac{2P_{\text{Re}}}{\pi \omega_0^2} \right\} \cdot \\ &\exp \left[1.12 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} \int_0^z C_n^2(L-x)^{5/6} dx \right] \cdot \\ &(1 - \tan \phi / 2) \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{8} \tan \phi \right) \cos^2 \zeta, \quad (13) \end{aligned}$$

式中: R 表示 CCR 的反射效率; P_{Re} 为 CCR 接收的总功率; $\chi(z) = z \tan \theta_{re} / \omega_0$, ω_0 为 $z=0$ 处的光束腰半径; $\phi = \arcsin(\sin \zeta / n)$, ζ 为光束入射角, n 为 CCR 材料折射率; C_n^2 为折射率结构函数; L 为链路距离; $\psi(x) = \exp(-x) + \exp(x)$ 。

系统平均误码率 (BER) 可以表示为

$$P_B = \int_0^\infty P_B^{\text{MPSK}}(h) f_h(h) dh. \quad (15)$$

将 (11) 式和 (14) 式代入 (15) 式可得

$$\begin{aligned} P_B &= \int_0^\infty \frac{1}{\ln M} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\ln M \cdot R_{\text{SN}}} \sin \frac{\pi}{M} \right] \cdot \\ &\frac{\gamma_1^2}{2A_0^2} \exp(2\gamma_1^4 \sigma_{Xd}^2 - 2\gamma_1^2 \mu_{Xd}) \cdot \\ &h^{\gamma_1^2-1} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \frac{h}{A_0} - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right) dh, \quad (16) \end{aligned}$$

利用高斯-厄米特积分和变量代换,可以求出(16)式的闭合表达式,为

$$P_B \approx \sum_{l=1}^{20} w_l \frac{1}{\ln M} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{\ln M \cdot \gamma k^2(x)} \sin \frac{\pi}{M}}{8A_0 \sigma_{Xd}^2} \right] m_0 k(x_l) \gamma_1^{2l-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \ln \left(\frac{k(x_l)}{A_0} \right) - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}} \cdot \exp(\sqrt{8} \sigma_{Xd} x_l + 2\mu_{Xd} - 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2), \quad (17)$$

式中: $k(x) = A_0 \exp(\sqrt{8} \sigma_{Xd} x + 2\mu_{Xd} - 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2)$; x_l 和 w_l 分别为 l 阶厄米特多项式的根和对应的权重值。

3.2 K-PSK 调制下基于调制回复反射器结构的无人机光通信链路中断性能分析

中断概率的定义是系统的 R_{SN} 低于某一目标信噪比阈值时的概率,中断概率 P_{outage} 的表达式为

$$P_{\text{outage}} = \Pr(R_{SN} \leq \mu_0), \quad (18)$$

式中: $\Pr(\cdot)$ 为概率函数; μ_0 为信噪比阈值。将(3)式代入(18)式可得信道的平均中断概率为

$$P_{\text{outage}} = \Pr(\gamma h^2 \leq \mu_0). \quad (19)$$

令 $h_0 = \sqrt{\mu_0/\gamma}$, 则(19)式可表示为

$$P_{\text{outage}} = \Pr(h \leq h_0) = \int_0^{h_0} f_h(h) dh. \quad (20)$$

将(12)式代入(20)式可得(20)式的闭合表达式为

$$P_{\text{outage}} = F(h_0) = \frac{c}{b} \left\{ \exp \left[\frac{\ln(h_0/A_0) - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln \left(\frac{h_0}{A_0} \right) - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right] - \exp \left(\frac{b^2}{4} \right) \operatorname{erf} \left[\frac{b}{2} - \frac{\ln(h_0/A_0) - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right] \cdot \left[\frac{\ln(h_0/A_0) - 2\mu_{Xd} + 4\gamma_1^2 \sigma_{Xd}^2}{\sqrt{8} \sigma_{Xd}} \right] \right\}. \quad (21)$$

4 仿真与讨论

为了进一步分析无人机逆向调制激光通信系统链路性能,根据(13)式、(17)式、(21)式,对链路误码性能和中断概率进行数值仿真分析,同时进行蒙特卡罗仿真来验证公式的正确性。蒙特卡罗仿真中,通过系统累积分布函数的反函数,对自变量在 $[0, 1]$ 内随机取值,计算得到关于自变量符合累积分布函数的样本,为了降低仿真中的统计不确定性,在

每次仿真中产生 10^8 个随机数进行计算,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Simulation parameter	Value
OMI / m	0.9
Wavelength λ / nm	1550
Link distance L / km	100
Refractive index structure parameter C_n^2	5×10^{-18}
Photo-detector responsivity R	1
Receiver load resistance R_L/Ω	50
Temperature T / K	300
Corresponding jitter standard deviation σ_s / cm	10, 20
Corresponding beam radius $w_{z_{eq}}$ / cm	10

不同的 CCR 材料折射率 n 与入射角 ζ 条件下平均误码率随信噪比变化规律如图 3 所示,图中折射率数值取自 3 种不同的 CCR 材料^[8],分别为 BK glass($n=1.52$), Crystal($n=2$) 和 GaP($n=3.31$)。可以看出蒙特卡罗仿真与数值仿真基本吻合,验证了(17)式的正确性。分析图中曲线可知,在相同折射率的条件下,增大入射角会使系统误码性能降低,例如:当 R_{SN} 为 25 dB 且 $n=1.52$ 的条件下, ζ 为 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时的系统误码率分别为 $9.1 \times 10^{-7}, 1.1 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-4}$, 这是因为 CCR 的反射性能会随着入射角的增大而减小,而 CCR 的反射性能减小,系统误码率会随之升高。同时,从图 3 可见,在相同入射角的情况下,CCR 材料折射率越高系统误码性能越好,这是因为在相同入射角的情况下,折射率越高,CCR 的反射性能越好,从而系统误码率会随之降低,例如:当 $\zeta=40^\circ, R_{SN}$ 为 5 dB 的条件下,折射率 n 为 1.52, 2, 3.31 时的系统误码率分别为

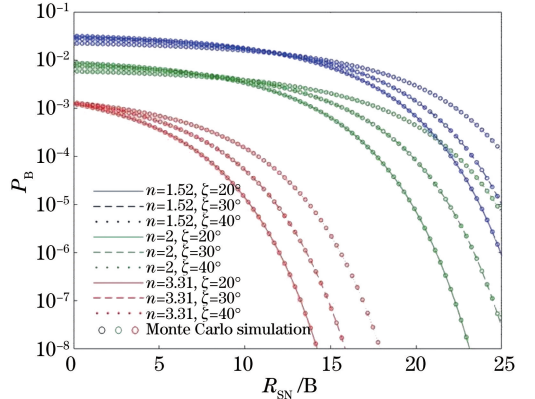


图 3 不同 CCR 折射率与入射角下平均 BER 随 R_{SN} 的变化 ($\rho_h=0.5$)

Fig. 3 Average BER versus SNR under different refractive indexes of CCR and incident angles ($\rho_h=0.5$)

1.3×10^{-2} , 2.1×10^{-3} 和 2.5×10^{-6} 。分析 CCR 材料折射率不同时的误码性能数据可以知道, CCR 材料折射率对系统链路的误码性能影响可以达到数个数量级级别。

图 4 为弱湍流条件下当调制阶数与前向链路光束入射角变化时平均误码率随信噪比的变化。分析图 4 中数据可知, 在相同阶数的调制方式下, 随着 ζ 的增大, 误码率升高, 例如, 分析图中数据可以看出, 采用正交相移键控 (QPSK) 调制且 $\zeta = 20^\circ$, R_{SN} 为 25 dB 时, $P_B = 1.2 \times 10^{-6}$, 而当 $\zeta = 30^\circ$ 时, $P_B = 2.3 \times 10^{-5}$ 。当入射角度相同时, P_B 还会随着调制阶数的升高而升高, 例如 $\zeta = 30^\circ$, R_{SN} 为 25 dB, 采用 QPSK 调制时 $P_B = 2.3 \times 10^{-5}$, 采用 8PSK 调制时 $P_B = 8.7 \times 10^{-4}$, 采用 16PSK 调制时 $P_B = 5.5 \times 10^{-3}$ 。由此可知, 在调制阶数相同时, 随着入射角的增大, 系统误码率会升高, 当入射角度相同时, 系统误码率会随着调制阶数的升高而升高, 同时, 在仿真条件下, 相邻调制阶数之间系统误码性能的差异可以达到 1 个数量级。总结图 3 和图 4, 可以发现, 当入射角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 范围内变化时, 入射角度改变对系统误码性能的影响也约为 1 个数量级。

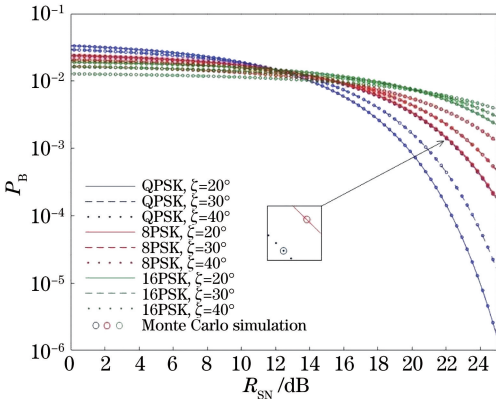


图 4 不同调制阶数与入射角下平均 BER 随 R_{SN} 的变化 ($\rho_h = 0.5, \theta_{re} = 6 \mu\text{rad}$)

Fig. 4 Average BER versus R_{SN} under different modulation orders and incident angles ($\rho_h = 0.5, \theta_{re} = 6 \mu\text{rad}$)

图 5 为不同抖动标准差 σ_s 条件下平均误码率随信噪比的变化仿真结果, 仿真过程中将 MPSK 方式下的仿真结果与文献[6]中所采用的 OOK 调制方式下的仿真结果进行了比较。从仿真结果中可以看出, 随着抖动标准差的增大, 相同调制方式下的系统误码率均有所升高, 并且 MPSK 调制方式下的系统误码率普遍低于 OOK 调制方式下的系统误码率, 例如: 当 σ_s 为 10 cm, R_{SN} 为 20 dB 时, 系统采用 QPSK、8PSK、16PSK 和 OOK 调制方式下的系统

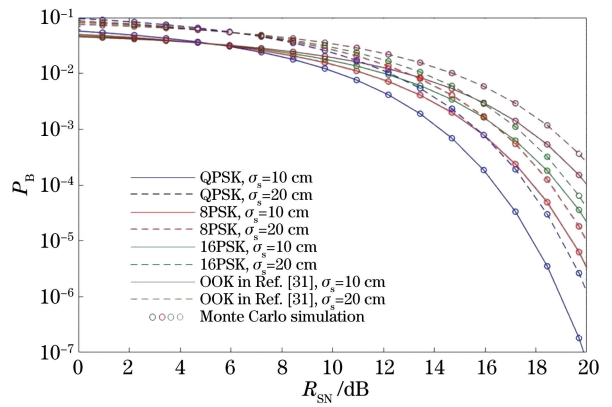


图 5 不同抖动标准差下平均 BER 随 R_{SN} 的变化 ($\rho_h = 0.1$)

Fig. 5 Average BER versus R_{SN} under different jitter standard deviations ($\rho_h = 0.1$)

误码率分别为 1.1×10^{-7} , 3.1×10^{-6} , 2.2×10^{-5} 和 1.1×10^{-4} , 当 σ_s 为 20 cm, R_{SN} 为 20 dB 时, 系统采用 QPSK、8PSK、16PSK 和 OOK 调制方式下的系统误码率则分别为 1.5×10^{-6} , 9.7×10^{-6} , 4×10^{-5} , 2.9×10^{-4} 。此外, 通过查阅目前所公布的有关无人机逆向调制光通信方面的实验资料, 按照美国海军实验室在 2001 和 2009 年进行的无人机逆向调制光通信实验链路性能标准 (弱湍流条件下链路误码率低于 10^{-6}) [15], 发现在本文仿真条件下当 R_{SN} 小于等于 20 dB 时, 系统采用 QPSK、8PSK 调制方式时是可以达到该链路性能标准, 而采用 16PSK 调制方式和 OOK 调制方式则需要系统提供高于 20 dB 的信噪比才可以达到该链路性能标准。需要说明的是, 在该实验中, 由于美军采用了“像素化”的方法, 即将逆向调制器分割为阵列, 因此实验中的信道相关系数是非常小, 在本次仿真中将 ρ_h 取值为 0.1 较为合适。

图 6 为在不同的调制阶数与 ρ_h 条件下误码率随光束发散角的变化, 分析图中数据可得, 在 R_{SN} 为 15 dB, 调制方式为 QPSK 的条件下, θ_{re} 为 $3 \mu\text{rad}$ 时, ρ_h 分别为 0.5, 0.7, 0.9 时, P_B 分别为 3.1×10^{-5} , 6.3×10^{-5} , 8.7×10^{-5} ; 在同样条件下, 当 θ_{re} 为 $5 \mu\text{rad}$ 时, P_B 分别为 1.2×10^{-5} , 4.3×10^{-5} , 7.6×10^{-5} ; 在同样条件下, 当 θ_{re} 为 $10 \mu\text{rad}$ 时, P_B 分别为 1.5×10^{-4} , 3.6×10^{-4} , 6.9×10^{-4} 。从以上数据中可以看出 P_B 随 θ_{re} 的增大均表现出先降低后升高的趋势, 这是因为: 根据统计光学理论和指向误差理论, θ_{re} 在一定范围内增大时, 接收面上的平均光功率会表现出先升高后降低的规律, 这说明当发散角为 $3 \sim 10 \mu\text{rad}$ 范围内的某个数值时, 系统误码率会

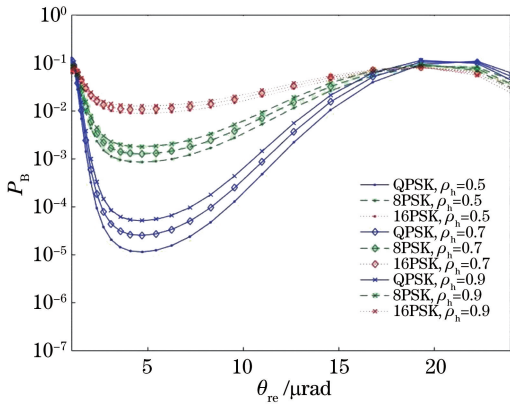


图6 不同调制方式与相关系数下平均 BER 随光束发散角的变化 ($R_{SN} = 15$ dB)

Fig. 6 Average BER versus beam-divergence angle under different modulation modes and correlation coefficients ($R_{SN} = 15$ dB)

达到一个最优值。分析仿真结果并将其与之前仿真数据比较还可发现,当调制阶数相同时,随着信道相关系数的增大,误码率也会升高,但是信道相关系数对系统误码性能的影响比入射角、调制阶数和 CCR 材料折射率对系统误码性能的影响要小;同时可以从图 6 中曲线的变化规律发现,随着调制阶数的升高,系统受 θ_{re} 影响减小。

图 7 为不同发散角条件下中断概率随信噪比的变化,可见蒙特卡罗仿真与数值仿真基本吻合,验证了(21)式的正确性。当 h_0 为 5 dB, θ_{re} 分别为 3, 4, 6, 8, 10, 20 μrad 时, P_{outage} 分别为 2.4×10^{-3} , 8.9×10^{-4} , 3.1×10^{-8} , 5×10^{-10} , 9.1×10^{-7} , 2.7×10^{-3} 。分析数据可以得出,当 h_0 一定时, θ_{re} 在一定范围增大, P_{outage} 也出现先降低,随后升高的现象,这也是由接收面上的光功率的变化规律所致,当发散角分别为 6, 8, 10 μrad 时,系统中断概率可在较高信噪比

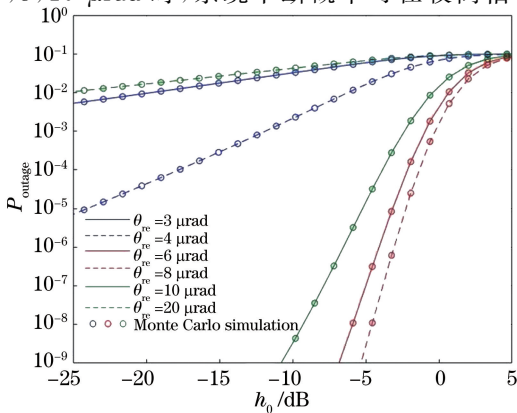


图7 不同发散角下中断概率随 R_{SN} 的变化

Fig. 7 Outage probability versus R_{SN} under different beam-divergence angles

阈值的条件下达到 10^{-9} 数量级。

5 结 论

研究了弱湍流条件下的无人机逆向调制光通信系统链路性能,并且考虑了指向误差对系统链路性能的影响。发现在弱湍流和指向误差的共同影响下,入射角度、调制阶数和 CCR 材料折射率的改变会对系统误码性能产生较大影响。其中 CCR 材料折射率对系统误码性能的影响在三者中最大,信道相关系数对系统误码性能的影响较小,同时系统误码性能和中断性能会在反射光束发散角为某个数值时达到最优。通过与领域内实验数据比较发现,在本文仿真条件下,当 R_{SN} 为 20 dB 时,系统采用 QPSK 和 8PSK 调制方式时,系统可以达到实验链路性能标准,所以在设计实际无人机逆向调制通信系统时,CCR 材料的折射率应作为重点考虑的因素,并且从低功耗的角度设计实际系统时也可以考虑采用 QPSK 和 8PSK 调制方式进行通信。

本文只对弱湍流条件下的系统性能进行了研究,对中湍流和强湍流条件下的系统链路性能未进行探讨,同时本文为了方便研究,假设指向误差只发生在下行链路中,在实际通信时上行链路同样可能出现指向误差,在上、下两条链路中若均考虑指向误差带来的影响,则会使系统的理论模型更加完善。此外,目前针对系统采用高阶 MPSK 调制方式时的链路性能研究甚少,本文的对比与研究结论主要基于仿真验证,如果能够通过实验进行相关方面的验证,则可更加明确高阶 MPSK 调制方式对于无人机逆向调制光通信系统的实用价值。以上两点应当作为未来的研究方向。

参 考 文 献

- [1] Achour M. Free-space optical communication by retromodulation: Concept, technologies, and challenges[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5614: 52-64.
- [2] Majumdar A K. Advanced free space optics (FSO) [M]. New York: Springer, 2015.
- [3] Mahon R, Moore C I, Ferraro M, *et al.* Atmospheric turbulence effects measured along horizontal-path optical retro-reflector links [J]. Applied Optics, 2012, 51(25): 6147-6158.
- [4] Peter G G, William S R, Mahon R, *et al.* Modulating retro-reflector lasercom systems at the Naval Research Laboratory[C]// MILCOM 2010

- MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 31 October-3 November 2010, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 1601-1606.
- [5] Carrasco-Casado A, Vergaz R. Design and early development of a UAV terminal and a ground station for laser communications[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8184: 81840E.
- [6] Yang G W, Li Z P, Bi M H, *et al.* Channel modeling and performance analysis of modulating retro-reflector FSO systems under weak turbulence conditions[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1-10.
- [7] Yang G W, Li C Y, Li J, *et al.* Performance analysis of full duplex modulating retro-reflector free-space optical communications over single and double gamma-gamma fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(8): 3597-3609.
- [8] Ding D Q, Ke X Z. Performance of asymmetrical retro-reflected free space optical link[J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(4): 337-341.
丁德强, 柯熙政. 非对称回复反射自由空间光通信链路性能[J]. 应用科学学报, 2010, 28(4): 337-341.
- [9] Ren J Y, Sun H Y, Zhao Y Z, *et al.* Analysis on distance and BER of modulating retro-reflector laser communication [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(10): 1206-1210.
任建迎, 孙华燕, 赵延伸, 等. 逆向调制激光通信作用距离及误码率分析[J]. 激光与红外, 2016, 46(10): 1206-1210.
- [10] Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X. Free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(1): 98-102.
任建迎, 孙华燕, 张来线. “猫眼”逆向调制自由空间光通信技术[J]. 激光与红外, 2017, 47(1): 98-102.
- [11] Zhang T Q, Fan G H, Zhang L X. Analysis on the BER of atmosphere laser communication with modulating retro-reflector array [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(5): 560-564.
张天齐, 樊桂花, 张来线. 逆向调制阵列大气激光通信的误码率分析[J]. 激光与红外, 2018, 48(5): 560-564.
- [12] Wang X Y, Feng X L, Zhang P, *et al.* Single-source bidirectional free-space optical communications using reflective SOA-based amplified modulating retro-reflection[J]. Optics Communications, 2017, 387: 43-47.
- [13] 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.
- [14] Gilbreath G C, Rabinovich W S, Meehan T J, *et al.* Large-aperture multiple quantum well modulating retroreflector for free-space optical data transfer on unmanned aerial vehicles [J]. Optical Engineering, 2001, 40(7): 1348-1356.