

基于 Beckmann 分布的星间光通信最优 输入信号概率分布

宛雄丰, 郝士琦[✉], 赵青松, 徐晨露

(国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥, 230037)

摘要 针对瞄准误差影响下的星间光通信非对称信道, 存在最优输入信号概率分布使链路的互信息达到最大, 考虑瞄准误差服从 Beckmann 分布, 结合接收天线孔径大小、波束宽度和瞄准误差分布参数, 给出了星间光通信的信道矩阵, 建立了互信息优化模型, 并利用拉格朗日乘数法对模型进行了求解, 得出了使互信息最大时的输入信号概率分布的闭合表达式。通过数值仿真, 给出了最优输入信号概率分布、信道容量和互信息差值随着归一化判决阈值、光束束腰半径以及瞄准误差分布参数的数值变化关系。仿真分析结果表明: 最优输入信号概率分布下输入信号与输出信号之间的互信息值要明显高于等概率分布时。利用数值仿真的结果, 可在明确瞄准误差分布规律的基础上, 选择最优的信源输入, 使星间光通信信道实现最大的信息传输能力。

关键词 光通信; 瞄准误差; 信道容量; 输入信号概率分布; Beckmann 分布; 信道矩阵

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.011

中图分类号 TN929.12 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0065-06

Optimum Signal Input Probability Distribution for Inter-Satellite Optical Communications Based on Beckmann Distribution

WAN Xiongfeng, HAO Shiqi[✉], ZHAO Qingsong, XU Chenlu

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In the light of the asymmetric channel of inter-satellite optical communication subject to pointing errors, an optimal signal input probability distribution can be found to maximize the mutual information of the link. Considering the aperture size of receiving antenna, beam width and the parameters of pointing errors distribution, the channel matrix of inter-satellite optical communication is given, and the optimization model of mutual information is established, when the pointing errors obey Beckmann distribution. The Lagrange multiplier method is used to solve the model, and the closed expression of the signal input probability distribution is obtained when the mutual information is maximized. Through numerical simulation, the optimal signal input probability distribution, channel capacity and the difference of mutual

收稿日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61571446); 国家重点实验室 2016 年度主任基金(SKL2016ZR03)

作者简介: 宛雄丰(1995—), 男, 安徽合肥人, 硕士生, 主要从事星间激光通信研究。E-mail: 479850854@qq.com

通信作者: 郝士琦(1963—), 女, 安徽芜湖人, 教授, 主要从事大气激光通信、卫星通信研究。E-mail: liu_hsq@126.com

引用格式: 宛雄丰, 郝士琦, 赵青松, 等. 基于 Beckmann 分布的星间光通信最优输入信号概率分布[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 65-70. WAN Xiongfeng, HAO Shiqi, ZHAO Qingsong, et al. Optimum Signal Input Probability Distribution for Inter-Satellite Optical Communications Based on Beckmann Distribution[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 65-70.

information vary with the normalized decision threshold, beam width and the parameters of pointing errors distribution are analyzed numerically. The simulation results show that the mutual information between input signal and output signal under the optimal signal input probability distribution is obviously higher than that under the equal probability distribution. Using the results of numerical simulation, the optimal source input can be selected on the basis of known distribution of pointing errors, so that the inter-satellite optical communication channel can achieve the maximum information transmission capacity.

Key words: optical communication; pointing errors; channel capability; signal input probability distribution; Beckmann distribution; channel matrix

星间光通信相比于微波通信具有通信容量大、光束发散角小、保密性好以及抗干扰能力强等优点,在民用和军事领域受到越来越多的重视。由于光束发散角较窄,卫星平台振动引起的瞄准误差是影响系统性能的最主要因素。目前,在实际卫星应用中,瞄准误差角通常可以控制在 $100 \mu\text{rad}$ 以内,但是由于传输距离通常非常远,瞄准误差仍然会造成系统性能恶化^[1-3]。

目前,已有大量的学者对瞄准误差影响下的系统性能进行了分析讨论,并提出了几种抑制瞄准误差影响的方法。其中,Toyoshima M等^[4]提出在已知瞄准误差分布的情况下,通过数值计算给出系统最优光束发散角;丁涛等^[5]提出通过控制接收端光斑形状和大小来抑制振动的影响;Song T等^[6]提出了采用动态束腰控制技术来抑制瞄准误差的影响。但是以上方法中的系统性能衡量指标均为误码率。随着编码技术的发展,已经出现了接近香农(Shannon)容量的编码方式,在 Shannon 信息论中,信道容量是衡量系统性能的重要标准。吴继礼等^[7]在已知最大似然检测的相干脉冲位置调制信道具有对称性的基础上,推导出了相干脉冲位置调制信道的信道容量;Ho K P等^[8]给出了光放大器噪声占主导地位时,光纤信道的最优输入信号概率分布的数值结果。但是,以上研究均未考虑瞄准误差影响下的星间光通信信道具有非对称性^[9],存在最佳的信源输入使链路的互信息达到最大。且在已有的文献中,通常采用 Rayleigh 分布来描述瞄准误差,但考虑到卫星平台振动的随机性和不确定性,以及可能存在的静态偏移误差,Boluda-Ruiz R等^[10]给出了一种基于 Beckmann 分布的广义瞄准误差分布模型。当瞄准误差服从 Beckmann 分布时,综合考虑星间光通信链路参数的最优输入信号分布设计尚未见报道。

针对 OOK 调制系统,当瞄准误差服从 Beckmann 分布时,结合探测器尺寸、波束宽度以及瞄准误差分布参数,给出了星间光通信的信道矩阵,并建立了互信息优化模型,利用拉格朗日乘法对模型

进行了求解,给出了使互信息最大的输入信号概率分布的闭合表达式,并通过数值仿真,给出了最优输入信号概率分布和信道容量随归一化判决阈值以及光束束腰半径的变化规律。仿真计算的结果为实际的星间光通信链路提供了一定的理论参考。

1 基本原理

1.1 基于 Beckmann 分布的瞬时信道状态模型

星间光通信系统中,当发射光束为高斯光束,接收天线为半径为 a 的圆形孔径时,考虑到几何扩展和瞄准误差的影响,此时接收孔径收集到的光功率占总功率的比值,通常称为瞬时信道状态,用 h_p 表示^[11-12]:

$$h_p(r; z) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_{zq}^2}\right) \quad (1)$$

式中: r 为接收端瞄准误差径向偏移量; $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$; A_0 表示 $r=0$ 时接收孔径收集到的光功率占总功率的比值; 令 $v = \frac{\sqrt{\pi}a}{\sqrt{2}\omega_z}$, 则有: $\omega_{zq}^2 = \omega_z^2 \frac{\sqrt{\pi}\text{erf}(v)}{2v\exp(-v^2)}$, ω_{zq} 为等效的波束宽度, ω_z 为传输距离为 z 处的波束宽度 ($1/e^2$), $\omega_z = \omega_0 \sqrt{1 + (\lambda z / (\pi\omega_0^2))^2}$, ω_0 为发射端波束宽度, λ 为波长。已有的研究表明,当 $\omega_z/a > 6$ 时,式(1)的近似计算结果与准确值基本吻合,这在星间光通信中几百到几千千米的传输距离条件下是完全能够满足的^[8]。

假设接收平面上的瞄准误差径向偏移量 $\mathbf{r} = [r_x, r_y]^T$, 其中 r_x 和 r_y 分别表示方位向和俯仰向的偏移量,可分别用均值非零的独立高斯分布变量来描述, $r_x \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$, $r_y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$, μ_x 和 μ_y 分别表示接收平面上方位向和俯仰向的静态偏移误差 ($\mu = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}$), σ_x^2 和 σ_y^2 分别表示接收平面上方位向和俯仰向的抖动方差,此时瞄准误差下探测区域与接收光束截面之间的关系如图 1 所示。此时,瞄准误差径向偏移量 $r = |\mathbf{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ 服从 Beck-

mann 分布^[10]:

$$f_r(r) = \frac{r}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \int_0^{2\pi} \exp\left(-\frac{(r\cos\phi - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(r\sin\phi - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) d\phi \quad (2)$$

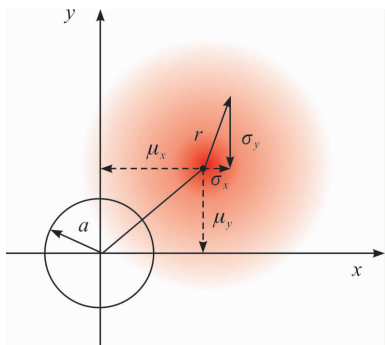


图1 瞄准误差下接收孔径与光束截面示意图

当瞄准误差服从 Beckmann 分布时,利用三阶中心距法,可将贝克曼函数等效为修正后的 Rayleigh 分布^[9],其概率密度函数(Probability Density Function, PDF)可近似表示为:

$$f_r(r) \approx \frac{r}{\sigma_{\text{mod}}^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_{\text{mod}}^2}\right), r \geq 0 \quad (3)$$

式中:

$$\sigma_{\text{mod}} = \left(\frac{3\mu_x^2\sigma_x^4 + 3\mu_y^2\sigma_y^4 + \sigma_x^6 + \sigma_y^6}{2}\right)^{1/6} \quad (4)$$

结合式(1)和式(3)可得,瞬时信道状态 h_p 的 PDF 为:

$$f(h_p) = \frac{\gamma_{\text{mod}}^2}{A_0^2} h_p^2 \exp(-\gamma_{\text{mod}}^2 h_p^2), 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (5)$$

式中: $\gamma_{\text{mod}} = \omega_{\text{req}} / 2\sigma_{\text{mod}}$

1.2 瞄准误差影响下的信道矩阵

星间光通信光束传输过程中,传输信道主要是由自由空间、发射端和接收端的捕获、瞄准和跟踪(Acquisition Pointing and Tracking, APT)系统组成,因此,瞄准误差是影响信道状态的主要因素。在信息理论中,通常采用信道矩阵来描述输入和输出信号之间的关系^[14]。为了确定星间光通信的信道容量,必须要先确定信道矩阵。

考虑到在实际星间光通信系统中普遍采用的调制样式为强度调制直接探测(IM/DD)开关键控(On-Off Keying, OOK),本文针对 OOK 调制系统展开研究。在 OOK 系统中,发射端利用有无信号脉冲来表示二进制传输信号, $x \in \{0, 1\}$,接收端将接收到的信号强度与预先设置好的阈值作比较,当接收光信号强度大于阈值时判定为“1”,小于阈值时则判定为“0”, $y \in \{0, 1\}$,此时,系统的信道矩阵可以表示为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} P(y=0|x=0) & p(y=1|x=0) \\ P(y=0|x=1) & P(y=1|x=1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

随着光电探测器件的发展,在实际的系统应用中可以较好的抑制探测器噪声^[15]。此时,可以通过合理的设置判决阈值,使得发射信号为“0”时,输出信号为“0”的概率:

$$P(y=0|x=0) = 1 \quad (7)$$

当发射信号为“1”时,考虑到瞄准误差影响下的接收端光强起伏,此时接收端输出信号为“0”的概率:

$$P(y=0|x=1) = \int_0^{h_T} \frac{\gamma_{\text{mod}}^2}{A_0^2} h_p^2 \exp(-\gamma_{\text{mod}}^2 h_p^2) dh_p = \left(\frac{h_T}{A_0}\right)^2 \exp(-\xi^2) \quad (8)$$

式中: ξ 为归一化判决阈值, $\xi = h_T / A_0$, h_T 为预先设定好的判决阈值,满足 $0 < h_T < A_0$ 。

此时,考虑瞄准误差影响下的信道矩阵可表示为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \xi^2 \exp(-\xi^2) & 1 - \xi^2 \exp(-\xi^2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

2 最优输入信号概率分布设计

针对 OOK 调制系统,根据 Shannon 信息论的相关知识,信道容量 C 可以定义为输入信号 x 和输出信号 y 之间的最大互信息 $I(x, y)$,可表示为^[16]:

$$C = \max_{P(x_i)} I(x, y) \quad (10)$$

$$I(x; y) = - \sum_{j=1}^2 P(y_j) \log P(y_j) +$$

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 P(x_i) P(y_j | x_i) \log P(y_j | x_i) \quad (11)$$

式中: $P(x_i)$ 为输入信号概率; $P(y_j)$ 为输出信号概率; $P(y_j | x_i)$ 为输入信号为 x_i 时输出信号为 y_j 的概率,在式(11)中可以通过调整输入信号 x 的概率分布使 x 和 y 之间的互信息达到最大值, $P(x_i)$ 需要满足限制条件:

$$\sum_{i=1}^2 p(x_i) = 1 \quad (12)$$

信道容量的求解问题可以看作一个约束优化问题,在此引入拉格朗日乘数法对其进行求解^[17]。通过拉格朗日乘数法将问题转化为:

$$F = I(x; y) + \lambda \left(\sum_{i=1}^2 p(x_i) - 1 \right) \quad (13)$$

对 F 求偏导可得:

$$\frac{\partial F}{\partial P(x_i)} = - \sum_{j=1}^2 [P(y_j | x_i) \log P(y_j) +$$

$$P(y_j | x_i) \log P(y_j | x_i) + \sum_{j=1}^2 P(y_j | x_i) \log P(y_j | x_i) - \lambda = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = - \sum_{i=1}^2 p(x_i) + 1 = 0 \quad (15)$$

联立式(14)和式(15),并将式(9)代入其中可得使互信息最大的输入信号 x 的概率分布:

$$P(x=0) = \frac{1 - \xi^2 \xi_{\text{mod}}^2 / (1 - \xi_{\text{mod}}^2)}{1 + (1 - \xi_{\text{mod}}^2) \xi_{\text{mod}}^2 \xi_{\text{mod}}^2 / (1 - \xi_{\text{mod}}^2)} \quad (16)$$

$$P(x=1) = \frac{1}{1 - \xi_{\text{mod}}^2 + \xi_{\text{mod}}^2 \xi_{\text{mod}}^2 / (1 - \xi_{\text{mod}}^2)} \quad (17)$$

将式(16)和式(17)代入到式(10)中,即可得到此时的信道容量 C ,可表示为:

$$C = \log[1 + (1 - \xi_{\text{mod}}^2) \xi_{\text{mod}}^2 \xi_{\text{mod}}^2 / (1 - \xi_{\text{mod}}^2)] \quad (18)$$

3 数值仿真

为了分析比较星间光通信系统中最优输入信号概率分布和信道容量 C 随系统各参数的变化规律,利用式(16)和式(18)进行了数值仿真分析实验。仿真参数设置如下^[18]:传输距离 $z=20\,000$ km,波长 $\lambda=1\,064$ nm,接收机孔径直径 $2a=0.25$ m,光束束腰半径 $\omega_0=4$ mm,归一化判决阈值 $\xi=0.4$,已有的研究表明星间激光通信中瞄准误差角 θ 的变化范围为 0 到 100 μrad ,在此,设置方位向瞄准误差角的抖动标准差 $\sigma_{\theta_x}=10$ μrad ,方位向的静态偏移误差角 $\mu_{\theta_x}=10$ μrad ,考虑到星间传输距离 z 的影响,则此时接收端瞄准误差偏移量的抖动标准差 $\sigma_x = \sigma_{\theta_x} \cdot z = 200$ m,接收端的静态偏移误差 $\mu_x = 200$ m, σ_y/σ_x 分别取 $\{0.5, 1, 1.5\}$, μ_y/μ_x 分别取 $\{1, 2\}$ 。

图2给出了瞄准误差在方位向和俯仰向上存在不同静态偏移误差和不同抖动方差时系统的最优输入信号概率(以 $P(x=0)$ 为例)随着归一化判决阈值的变化规律。从图2中可以看出,随着归一化判决阈值的增大,最优输入信号概率 $P(x=0)$ 与 0.5 之间相差越来越大,而当归一化判决阈值很小时,此时最优输入信号分布趋近于等概率分布,但是考虑到星间传输距离较远以及探测器噪声的影响,归一化判决阈值并无法做到很小。当瞄准误差存在不同静态偏移误差和不同抖动方差时,系统最优输入信号概率之间相差较大,瞄准误差越大,最优输入信号概率偏离 0.5 的程度越大,数值仿真结果表明,当归一化判决阈值取 0.6 时,受到瞄准误差的影响,使传输信息率最大的输入信号为“0”的概率最高可以达到 0.54 。

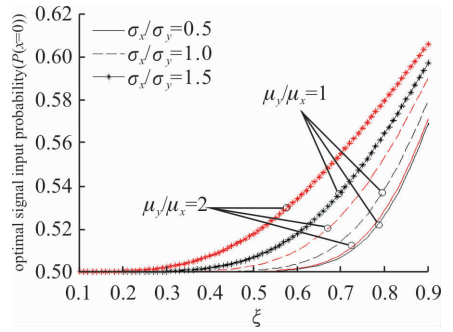


图2 $P(x=0)$ 与归一化判决阈值的关系

图3给出了系统的最优输入信号概率(以 $P(x=0)$ 为例)随着光束束腰半径 ω_0 的变化规律。从图3可以看出,光束束腰半径 ω_0 越大,最优输入信号概率 $P(x=0)$ 偏离 0.5 的程度越大。由光束在自由空间传输的规律可知, $\omega_z = \omega_0 \sqrt{1 + (\lambda z / (\pi \omega_0^2))^2}$,当 ω_0 增大时, ω_z 随之减小,即接收端的光斑尺寸越小,此时最优输入信号概率分布受瞄准误差的影响越大。因此,可以通过适当的减小光束束腰半径来削弱瞄准误差的影响,但是在归一化判决阈值一定的情况下,减小 ω_0 ,即增大 ω_z ,为达到同样的系统性能需要增大发射端功率。

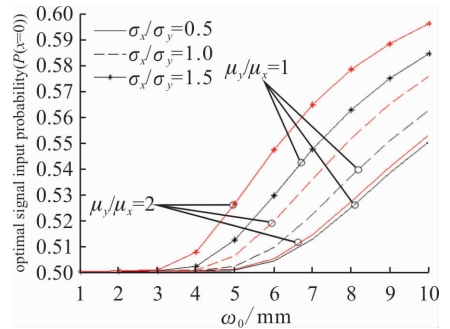


图3 $P(x=0)$ 与光束束腰半径的关系

图4和图5分别给出了在最优输入信号分布下香农信道容量随着归一化判决阈值和光束束腰半径的变化规律,从图中可以看出,受到瞄准误差的影响,此时系统的香农信道容量小于“1”,且随着归一化判决阈值和光束束腰半径的增大,香农信道容量都呈现下降的趋势,且瞄准误差越大时,性能下降的速度越快。当方位向和俯仰向存在不同静态偏移误差和不同抖动方差时,系统性能同样相差较大。

为了比较最优输入信号分布和等概率分布下输入信号与输出信号之间互信息的差异,图6和图7分别给出了2种输入信号分布下互信息的差值随归一化判决阈值和光束束腰半径的变化规律,从图中可以看出,最优输入信号分布下的互信息要高于等概率分布时,并且随着归一化判决阈值和光束束腰半径的增大,2种分布下的性能差异越大,当瞄准误差越大时,这种差异越明显,从数值仿真的结果可以

看出,2种分布下互信息的差值最高可以达到0.011 (bit/symbol)。因此,采用本文所提出的最优输入信号概率分布可以在一定程度上提高系统的通信性能。

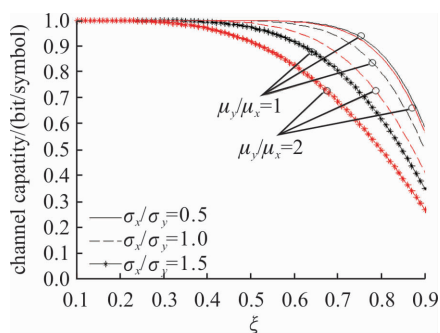


图4 信道容量与归一化判决阈值的关系

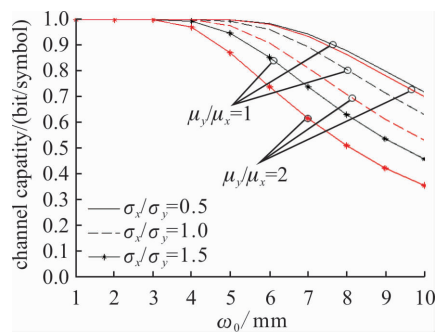


图5 信道容量与光束束腰半径的关系

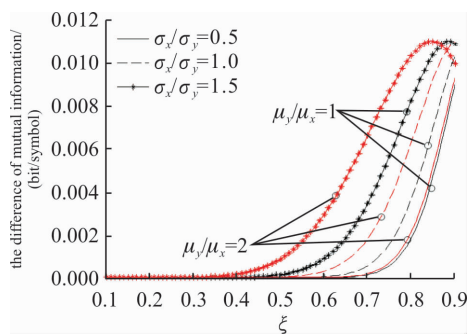


图6 互信息的差值与归一化判决阈值的关系

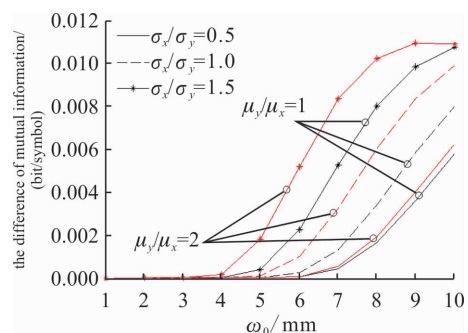


图7 互信息的差值与光束束腰半径的关系

4 结语

考虑到瞄准误差影响下的星间光通信信道是非对称的,针对 OOK 调制系统,此时使互信息最大时

的输入信号分布不再是等概率分布。本文给出了当瞄准误差服从 Beckmann 分布时,结合接收天线孔径大小、波束宽度和瞄准误差分布参数的星间光通信的信道矩阵,建立了互信息优化模型,并利用拉格朗日乘法对模型进行了求解,得到了使互信息最大的最优输入信号概率分布。通过数值仿真,分析了最优输入信号概率分布、信道容量和信息传输速率差值随着归一化判决阈值、光束束腰半径以及瞄准误差分布参数的变化规律。仿真分析结果表明:在光束束腰半径一定的情况下,随着归一化判决阈值的增大,最优输入信号概率 $P(x=0)$ 与 0.5 相差越大,且最优输入分布下的传输信息率要高于等概率分布时;在归一化判决阈值一定的情况下,随着光束束腰半径的增大,最优输入信号概率 $P(x=0)$ 与 0.5 相差越大,可以通过适当的减小光束束腰半径来削弱瞄准误差的影响;当瞄准误差在方位向和俯仰向上存在不同的静态偏移误差和抖动方差时,最优输入信号概率分布同样相差较大。因此可在明确瞄准误差分布规律的基础上,选择最优的信源输入,使星间激光信道实现最大的信息传输能力。本文的结论可为星间激光通信系统的设计提供了一定的理论参考。

参考文献(References):

- [1] 王红星, 宋博, 吴晓军, 等. 指向误差对海上无线光通信误码率性能的影响分析[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 901001.
WANG H X, SONG B, WU X J, et al. Influence of Pointing Error on Bit Error Rate of Free Space Optics System at Sea[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 901001. (in Chinese)
- [2] 韩立强, 游雅晖. 大气湍流及瞄准误差联合效应下自由空间通信的性能[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106005.
HAN L Q, YOU Y H. Performance of Free Space Optical Communication with Combined Effects from Atmospheric Turbulence and Pointing Errors[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106005. (in Chinese)
- [3] SANDALIDIS H G. Optimization Models for Misalignment Fading Mitigation in Optical Wireless Links [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(5): 395-397.
- [4] 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.
- [5] TOYOSHIMA M, JONO T, NAKAGAWA K, et al. Optimum Divergence Angle of a Gaussian Beam Wave in the Presence of Random Jitter in Free-Space Laser

- Communication Systems[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2002, 19(3): 567.
- [6] 丁涛, 许国良, 张旭莘, 等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. 中国激光, 2007, 34(4): 499-502.
- DING T, XU G L, ZHANG X P, et al. Control of Bit Error Rate Introduced by Platform Vibration for Free Space Optical Communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(4):499-502. (in Chinese)
- [7] SONG T, WANG Q, WU M W, et al. Performance of Laser Inter-Satellite Links with Dynamic Beam Waist Adjustment [J]. Optics Express, 2016, 24(11):11950.
- [8] 吴继礼, 赵尚弘, 胥杰, 等. 相干光脉冲位置调制信道容量及传信率最大化研究[J]. 光学学报, 2008, 28(4):643-647.
- WU J L, ZHAO S H, XU J, et al. Study of Capacity of Coherent Pulse-Position Modulation Channel and Maximization of Information Transmitting Rate[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4):643-647. (in Chinese)
- [9] HOO K P. Exact Evaluation of the Capacity for Intensity-Modulated Direct-Detection Channels with Optical Amplifier Noises[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(4):858-860.
- [10] ANGUITA J, DJORDJEVIC I, NEIFELD M, et al. Shannon Capacities and Error-Correction Codes for Optical Atmospheric Turbulent Channels[J]. Journal of Optical Networking, 2005, 24(9):586-601.
- [11] BOLUDA-RUIZ R, GARCIA-ZAMBRANA A, CASTILLO-VAZQUEZ C, et al. Novel Approximation of Misalignment Fading Modeled by Beckmann Distribution on Free-Space Optical Links[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22635.
- [12] 南航, 张鹏, 佟首峰, 等. 大气湍流下带有跟踪误差的空间相干光通信性能分析[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 50-55.
- NAN H, ZHANG P, TONG S F, et al. Performance Analysis of Free Space Coherent Optical Communication in Atmosphere Turbulence with Tracking Error [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 50-55. (in Chinese)
- [13] YANG F, CHENG J, TSIFTISIS T A. Free-Space Optical Communication with Nonzero Boresight Pointing Errors [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 713-725.
- [14] 王惠琴, 曹明华, 陈海燕, 等. 无背景噪声时光多输入多输出系统的信道容量[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 28-33.
- WANG H Q, CAO M H, CHEN H Y, et al. Channel Capacity of Optical Multiple Input Multiple Output System Without Background Noise [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3):28-33. (in Chinese)
- [15] 姜义君. 星地激光通信链路中大气湍流影响的理论和实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010: 2-15.
- JIANG Y J. Theoretica and Experimental Researches on Influences of Atmosphere Turbulence in the Satellite-to- Ground Laser Communication Link[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 2-15. (in Chinese)
- [16] PROAKIS J G. Digital communication[M]. [S. l.]: McGraw-Hill Book Co, 1989.
- [17] 刘剑锋, 李宏伟, 刘智慧. 拉格朗日乘法求解极值点的讨论[J]. 高等数学研究, 2017, 20(2):13-14.
- LIU J F, LI H W, LIU Z H. Discussion on Lagrange Multiplier Method in Solving Extreme Value Point Problems[J]. Studies in College Mathematics, 2017, 20(2): 13-14. (in Chinese)
- [18] SONG T, WANG Q, WU M W, et al. Impact of Pointing Errors on the Error Performance of Inter-Satellite Laser Communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(14):3082-3091.

(编辑: 徐楠楠)