

基于贝克曼分布的星间激光通信链路性能优化

宛雄丰^{**}, 郝士琦^{*}, 张岱, 赵青松, 徐晨露, 唐进迎

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, 安徽 合肥 230037

摘要 针对星间激光通信系统易受瞄准误差影响的问题,在瞄准误差服从贝克曼分布的条件下,利用三阶中心矩法将其等效为修正后的 Rayleigh 分布,分别在中断概率一定和发射功率一定的假设下,建立了发射功率优化模型和中断概率优化模型,并计算出了两种假设条件下高斯光束经天线发射时的最优均方根宽度。通过数值仿真,给出了考虑瞄准误差时的系统中断概率、最小发射功率与最优均方根宽度之间的关系。根据该数值分析结果,在明确瞄准误差分布规律的基础上,选择最优的高斯光束均方根宽度,以实现最优星间激光通信链路性能。

关键词 光通信; 自由空间光通信; 瞄准误差; 中断概率; 贝克曼分布; 均方根宽度

中图分类号 TN929.13

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0206003

Link Performance Optimization for Inter-Satellite Laser Communications Based on Beckmann Distribution

Wan Xiongfeng^{**}, Hao Shiqi^{*}, Zhang Dai, Zhao Qingsong, Xu Chenlu, Tang Jinying

State Key Laboratory of Pulse Power Laser Technology, College of Electronic Countermeasures,
National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract Aiming at the problem that the inter-satellite laser communication system is easily affected by the pointing errors, the method of third-order central moment is used to make the pointing error equivalent to the modified Rayleigh distribution under the condition that the pointing errors obey the Beckmann distribution. Under the assumptions that the outage probability and the transmission power are fixed, the optimal model of transmitter power and the optimal model of outage probability are established, respectively. The optimal root mean square width of the Gaussian beam emitted by the antenna under the above two assumptions is calculated. Through the numerical simulation, the numerical relationship of the outage probability and the minimum transmitting power with the optimal root mean square width is given. According to the numerical analysis results, the optimal root mean square width of a Gaussian beam can be selected based on the definite pointing error distributions, so that the optimal link performance for the inter-satellite laser communications is obtained.

Key words optical communications; free space optical communication; pointing errors; outage probability; Beckmann distribution; root mean square width

OCIS codes 060.2605; 010.3310; 060.4256

1 引 言

在星间激光通信过程中,必须确保发射端与接收端的光路对准,才能进行有效的数据传输。然而,受星上平台振动、星间相对运动和系统内部噪声等因素的影响,对准的光路发生了偏移,使得发射机和接收机之间存在一定的瞄准误差^[1]。在实际应用中,由于光束发散角极窄且通信距离通常非常远,因此造成系统性能恶化的主要因素是瞄准误差^[2]。

为了抑制瞄准误差对星间激光通信系统性能的影响,当前热门的解决方案是采用捕获、瞄准、跟踪(APT)技术。比如,郑燕红等^[3]提出采用控制混合灵敏度设计方法对控制器进行设计,以抑制干扰并解决受控对象不确定性问题;倪小龙等^[4]设计并构建了基于反射式液晶光调制器的星载平台振动补偿系统,满足了星际激光通信系统的高动态跟踪精度的要求。但以上方法所采用的技术复杂、成本过高,实现起来比较困难。为此,

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-09-08; 录用日期: 2018-09-25

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(SK12016ZR03)

* E-mail: liu_hsq@126.com; ** E-mail: 479850854@qq.com

学者们希望通过优化设计系统参数以降低瞄准误差的影响。丁涛等^[5]提出通过控制接收端光斑的形状和大小来抑制振动的影响,但是该方法仅适用于短距离的通信环境;Toyoshima 等^[6]在瞄准误差服从 Rayleigh 分布时,通过数值计算给出了系统最优光束发散角,但并没有给出闭合的表达式;Song 等^[7]提出了采用动态束腰控制技术来抑制瞄准误差的影响,但需要在系统发射端增加高速束腰控制模块。在已有的研究中,均假设瞄准误差在方位向和俯仰向是理想同分布的,没有考虑静态偏置误差的影响,无法精确地描述实际卫星平台的随机振动特性,且没有给出解析形式的参数优化方法,系统实现比较困难。

本文在瞄准误差服从贝克莱曼分布的情况下,结合星间激光通信链路传输方程,给出了系统中断概率的闭合表达式,并分别在中断概率一定和发射功率一定的条件下,建立了发射功率优化模型和中断概率优化模型,通过模型求解,计算出了这两种条件下的高斯光束最优均方根宽度。最后通过数值仿真,给出了不同瞄准误差角分布情况下的最优高斯光束均方根宽度。

2 星间激光通信基本原理

2.1 星间激光通信信号模型

假定星间激光通信系统采用强度调制直接探测,调制样式为开关键控(OOK)调制,发射光束为高斯光束,此时的星间链路传输方程可以表示为^[8]

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \eta_T \eta_R L_T(G_T, \theta), \quad (1)$$

式中: P_R 为接收到的光功率; P_T 为发射功率; G_T 为发射天线增益,当发射光束为高斯光束时, $G_T = (2\pi W/\lambda)^2$, W 为信号高斯光束经天线往外发射时的均方根宽度, λ 为激光波长; $G_R = (\pi D_R/\lambda)^2$ 为接收天线增益, D_R 为接收天线的孔径直径, d 为链路传输距离; η_T 和 η_R 分别为发射天线效率和接收天线的效率; $L_T(G_T, \theta) = \exp(-G_T \theta^2)$ 为瞄准误差损耗因子, θ 为瞄准误差偏离角。

在系统接收端,探测器会将接收到的光功率转化为信号电流 I ,其表达式为

$$I = R P_R, \quad (2)$$

式中: R 为光电响应度, $R = \eta q \lambda / (hc)$,其中, h 为普朗克常量, q 为电子电荷, η 为量子效率, c 为光波频率。

综上,光电探测器输出的信号电流为

$$I = R P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \eta_T \eta_R \exp(-G_T \theta^2). \quad (3)$$

2.2 基于贝克莱曼分布的瞄准误差模型

卫星平台振动等因素将会导致星间激光通信发射机与接收机之间存在瞄准误差。假定指向光束的径向瞄准误差角向量 $\theta = (\theta_x, \theta_y)^T$,其中 θ_x 和 θ_y 分别表示方位向和俯仰向的瞄准误差角分量,分别用均值非零的高斯分布变量来描述, $\theta_x \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$, $\theta_y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$,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。图中 $\mu = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}$ 表示光通信终端的光学系统轴线和天线法向之间存在的一个夹角,称为静态偏差角。则此时径向的瞄准误差角 $\theta = |\theta| = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$ 服从贝克莱曼分布^[9],即

$$f_\theta(\theta) = \frac{\theta}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{(\theta\cos\phi - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(\theta\sin\phi - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] d\phi, \quad (4)$$

式中: μ_x 和 μ_y 分别表示方位向和俯仰向的静态偏移误差; σ_x 和 σ_y 分别表示方位向和俯仰向的瞄准误差抖动标准差。

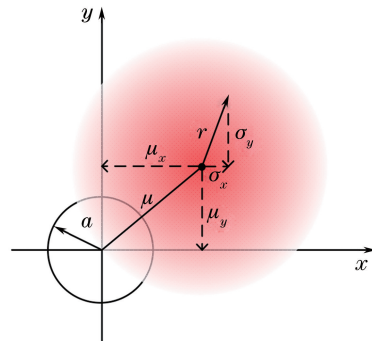


图 1 瞄准误差下探测区域与接收光束截面之间关系示意图
Fig. 1 Schematic of relationship between detection area and beam cross section of receiving beam under pointing errors

假设将贝克莱曼分布近似等效成参数为 σ_{mod} 的修正 Rayleigh 分布, σ_{mod} 的表达式可以通过三阶中心矩法给出。通过数值比较可以看出,利用三阶中心矩法可以比较准确地计算出 σ_{mod} 的值,使得修正后的 Rayleigh 分布与贝克莱曼分布基本保持一致^[10]。

随机变量 χ 的 m 阶中心矩可以表示为

$$\Omega_m^\chi = E\{[\chi - E(\chi)]^m\}, \quad (5)$$

式中 $E(\cdot)$ 表示期望。

为了方便起见,令 $u = \theta^2$,此时,当瞄准误差角 θ 服从修正后的 Rayleigh 分布时, u 的概率密度函数为

$$f(u) = \frac{1}{2\sigma_{\text{mod}}^2} \exp\left(-\frac{u}{2\sigma_{\text{mod}}^2}\right). \quad (6)$$

u 的三阶中心矩 Ω_3^u 可以表示为

$$\Omega_3^u = 16\sigma_{\text{mod}}^6. \quad (7)$$

此时, θ^2 的三阶中心矩 $\Omega_3^{\theta^2}$ 同样可以用两个正态随机变量平方和的三阶中心矩来表示, 即

$$\Omega_3^{\theta^2} = 8\sigma_x^4(3\mu_x^2 + \sigma_x^2) + 8\sigma_y^4(3\mu_y^2 + \sigma_y^2). \quad (8)$$

利用(7)、(8)式, 则可以给出 σ_{mod}^2 的表达式, 即

$$\sigma_{\text{mod}}^2 = \left(\frac{3\mu_x^2\sigma_x^4 + 3\mu_y^2\sigma_y^4 + \sigma_x^6 + \sigma_y^6}{2}\right)^{1/3}. \quad (9)$$

最终, 可以将贝曼分布等效为修正后的 Rayleigh 分布, θ 的概率密度函数(PDF)可近似表示为

$$f_{\theta}(\theta) \approx \frac{\theta}{\sigma_{\text{mod}}^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_{\text{mod}}^2}\right), \theta \geq 0, \quad (10)$$

其中,

$$\sigma_{\text{mod}} = \left(\frac{3\mu_x^2\sigma_x^4 + 3\mu_y^2\sigma_y^4 + \sigma_x^6 + \sigma_y^6}{2}\right)^{1/6}. \quad (11)$$

通过计算, θ 的累计分布函数(CDF)为

$$F_{\theta}(\theta) \approx 1 - \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_{\text{mod}}^2}\right). \quad (12)$$

3 星间激光通信系统优化模型

3.1 中断概率分析

根据信息理论的相关知识, 存在一定的概率使信道容量 C 不足以满足传输速率 R_0 的需求, 通常称此时的情况为中断, 可用中断概率^[11] P_{out} 来衡量, 即

$$P_{\text{out}} = P[C(S) \leq R_0], \quad (13)$$

式中 S 为信噪比(SNR)。

由于 $C(\cdot)$ 是随 SNR 单调递增的, 故中断概率可表示为

$$P_{\text{out}} = P(S \leq a), \quad (14)$$

式中: $a = C^{-1}(R_0)$ 为预先设定好的阈值, $C^{-1}(\cdot)$ 为 $C(\cdot)$ 的反函数。

在星间激光通信中, 系统接收端经光电探测器后得到的信号 w 可以表示为 $w = RP_{\text{R}}X + n$, 其中 X 表示发送的信号, n 表示加性高斯白噪声, 噪声均值为 0, 方差为 σ_{N}^2 , 结合(3)式可得系统接收到的电信号的瞬时信噪比 S 为

$$S = \frac{I^2}{2\sigma_{\text{N}}^2} = B \exp(-2G_{\text{T}}\theta^2), 0 < S \leq B, \quad (15)$$

其中

$$B = \frac{1}{2\sigma_{\text{N}}^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^4 (RP_{\text{T}}G_{\text{T}}G_{\text{R}}\eta_{\text{T}}\eta_{\text{R}})^2. \quad (16)$$

为了求出系统的中断概率, 需要先求出瞬时信

噪比 S 的 CDF, 其表达式为

$$\begin{aligned} F_S(s) &= P(S \leq s) = P[B \exp(-2G_{\text{T}}\theta^2) \leq s] = \\ &P\left[\theta \geq \sqrt{\frac{1}{2G_{\text{T}} \ln \frac{B}{s}}}\right] = 1 - F_{\theta}\left[\sqrt{\frac{1}{2G_{\text{T}} \ln \frac{B}{s}}}\right] = \\ &\left(\frac{s}{B}\right)^{\frac{1}{4G_{\text{T}}\sigma_{\text{mod}}^2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

在给定阈值 a 时, 可得系统的中断概率为

$$P_{\text{out}} = P(S \leq a) = \left(\frac{a}{B}\right)^{\frac{1}{4G_{\text{T}}\sigma_{\text{mod}}^2}}. \quad (18)$$

3.2 星间激光通信链路优化模型

从(16)式中可以看出, 在星间激光通信链路性能计算中涉及到的系统参数比较多, 其中, 发射功率和发射天线增益是其中相对比较重要的系统参数, 为了综合考虑所有涉及到的系统参数, 在此定义了两个新的变量^[12]: 归一化发射功率 ($y = \alpha P_{\text{T}}/\sigma_{\text{mod}}^2$) 和归一化发射天线增益 ($x = G_{\text{T}}\sigma_{\text{mod}}^2$), 其中 α 可以表示为

$$\alpha = \frac{1}{2\sqrt{2}\sigma_{\text{N}}} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 R G_{\text{R}} \eta_{\text{T}} \eta_{\text{R}}, \quad (19)$$

将 $B = 4x^2y^2$ 代入 (18) 式中可得

$$P_{\text{out}} = \left(\frac{a}{4}\right)^{\frac{1}{4x}} \left(\frac{1}{xy}\right)^{\frac{1}{2x}}. \quad (20)$$

1) 发射功率优化模型。

为了使系统中断概率一定时所需的发射功率最小, 建立了发射功率优化模型, 可以表示为

$$\min y = f(x), \quad (21)$$

可以通过选取适当的 x 值使得 y 最小。由于 $y = \alpha P_{\text{T}}/\sigma_{\text{mod}}^2$ 中, α 和 σ_{mod} 都可以看作是定值, 此时所求的最小发射功率即可转化为使中断概率满足 $P_{\text{out}} = b$ 时最小的 y 值。

此时, 将 $P_{\text{out}} = b$ 代入(20)式中可得

$$\left(\frac{a}{4}\right)^{\frac{1}{4x}} \left(\frac{1}{xy}\right)^{\frac{1}{2x}} = b, \quad (22)$$

利用 y 对 x 进行求导可得

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\frac{a}{4}} \left[\frac{2x \ln(1/b) - 1}{x^2 b^{2x}} \right], \quad (23)$$

令 $\frac{dy}{dx} = 0$, 可得此时的极值点为

$$x = \frac{1}{2 \ln(1/b)}. \quad (24)$$

为了确定这个极值点是否为极小值点, 可以通过求 y 对 x 的二阶导数来确认, y 对 x 的二阶导数为

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \sqrt{\frac{a}{4}} \left\{ \frac{4x^2 \ln(1/b) [x \ln(1/b) - 1] + 2x}{x^4 b^{2x}} \right\}。 \quad (25)$$

将(24)式代入到(25)式中可得

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \sqrt{\frac{a}{4}} [2 \ln(1/b)]^3 b^{-\frac{1}{\ln(1/b)}}, \quad 0 < b < 1。 \quad (26)$$

因此,(24)式中的极值点即为所求的极小值点。

当中断概率满足 $P_{out} = b$ 时,最小的 y 值为

$$y_{min} = \sqrt{a} \ln(1/b) b^{(1/\ln b)}。 \quad (27)$$

由 $y = \alpha P_T / \sigma_{mod}^2$ 可得,此时最小的发射功率为

$$P_{Tmin} = \frac{2\sqrt{2a}\sigma_N \ln(1/b) b^{(1/\ln b)} \sigma_{mod}^2 (4\pi d)^2}{RG_R \eta_T \eta_R} \left(\frac{\lambda}{\lambda} \right)^2。 \quad (28)$$

由于 $x = G_T \sigma_{mod}^2 = (2\pi W / \lambda)^2 \sigma_{mod}^2$,此时高斯光束发射时的最优均方根宽度 W 为

$$W = \frac{\lambda}{2\pi\sigma_{mod}} \sqrt{\frac{1}{2 \ln(1/b)}}。 \quad (29)$$

2) 中断概率优化模型

为使在给定的发射功率条件下系统的中断概率最小,建立了系统中断概率优化模型,可以表示为

$$\min P_{out} = g(x), \quad (30)$$

可以通过选取适当的 x 值使得 P_{out} 最小。

在发射功率一定的情况下,令 $y = k$,将其代入(20)式中可得

$$P_{out} = \left(\frac{a}{4} \right)^{\frac{1}{4x}} \left(\frac{1}{xk} \right)^{\frac{1}{2x}}, \quad (31)$$

将 P_{out} 对 x 进行求导可得

$$\frac{dP_{out}}{dx} = - \left(\frac{a}{4x^2 k^2} \right)^{\frac{1}{4x}} \frac{2 + \ln \frac{a}{4x^2 k^2}}{4x^2}, \quad (32)$$

令 $\frac{dP_{out}}{dx} = 0$,可得此时的极值点为

$$x = \frac{\sqrt{a} e}{2k}, \quad (33)$$

式中 e 为自然常数,约为 2.71828。

为了确定所求的极值点是否为所需的极小值点,求 P_{out} 对 x 二阶导数为

$$\frac{d^2 P_{out}}{dx^2} = \left(\frac{a}{4x^2 k^2} \right)^{\frac{1}{4x}} \frac{\left(2 + \ln \frac{a}{4x^2 k^2} \right)^2 + 8x \left(2 + \ln \frac{a}{4x^2 k^2} \right) + 8x}{16x^4}。 \quad (34)$$

从(34)式中的可以看出,当 $x = \sqrt{a} e / 2k$ 时, $\{2 + \ln[a / (4x^2 k^2)]\} = 0$,此时有 $d^2 P_{out} / dx^2 > 0$, $x = \sqrt{a} e / (2k)$ 即为所求的极小值点。

此时的最小中断概率为

$$P_{O,min} = (1/e)^{\frac{k}{\sqrt{a}}}. \quad (35)$$

同样,由 $x = G_T \sigma_{mod}^2 = (2\pi W / \lambda)^2 \sigma_{mod}^2$,可得此时高斯光束经天线往外发射时的最优均方根宽度 W 为

$$W = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{\sqrt{a} e}{2k\sigma_{mod}^2}}。 \quad (36)$$

4 数值仿真

为了分析星间激光通信系统中各个参数对链路性能的影响,利用(28)、(29)、(35)、(36)式进行了数值仿真。仿真参数^[13]设置如下:传输距离 $d = 20000$ km,接收天线的直径 $D_R = 0.3$ m,激光波长 $\lambda = 1064$ nm,发射天线效率 $\eta_T = 0.5$,接收天线效率 $\eta_R = 0.35$,量子效率 $\eta = 0.7$,电子电荷 $q = 1.602176 \times 10^{-19}$ C,普朗克常量 $h = 6.626069 \times 10^{-34}$ J · s,光

波频率 $c = 3 \times 10^8$ m/s,高斯白噪声的方差 $\sigma_N^2 = 4.27 \times 10^{-12}$ A²,设定阈值 $a = 1 \times 10^{-7}$ 。瞄准误差角 θ 服从贝克莱曼分布,分别在 $\mu_x = \mu_y = 0$ 和 $\mu_x = 1 \mu\text{rad}$, $\mu_y = 0.5 \mu\text{rad}$ 这两种情况下,当 $\sigma_x = 1 \mu\text{rad}$, σ_y / σ_x 分别取 1, 2, 3/2 μrad 时进行了仿真分析实验。

图 2 所示为所需的最小发射功率随中断概率的变化情况,从图中可以看出,当系统需要满足的中断概率越大时,所需的发射功率越小,且随着中断概率的减小,所需的发射功率将迅速增大。从瞄准误差角的分布情况不同时的对比可以看出,静态偏差角为 0 ($\mu_x = \mu_y = 0$) 时所需的最小发射功率要明显小于静态偏差角不为 0 ($\mu_x = 1 \mu\text{rad}$, $\mu_y = 0.5 \mu\text{rad}$) 时的,并且当 σ_x / σ_y 的取值不同时,一定的中断概率下,系统所需的发射功率相差较大,如当系统中断概率为 0.01, $\mu_x = \mu_y = 0$, $\sigma_y / \sigma_x = 1$ 时,所需的发射功率要比 $\sigma_y / \sigma_x = 3/2$ 和 $\sigma_y / \sigma_x = 2$ 时分别小 12.13 mW 和 34.38 mW。

图 3 所示为系统所需发射功率最小时的高斯光束最优均方根宽度随中断概率的变化规律。从图中

可以看出,随着中断概率的增大,高斯光束的最优均方根宽度也随着增大,且当瞄准误差角的分布情况不同时,最优均方根宽度的取值差异较大;从图中还可以看出,当静态偏差角为0时的最优均方根宽度要明显大于静态偏差角不为0时的,并且当系统中断概率为0.01, $\mu_x = \mu_y = 0$, σ_y/σ_x 分别为1,3/2,2时的最优均方根宽度依次为55.8,41.1,31.2 mm。结果表明,瞄准误差角的分布情况对星间激光通信系统参数的选取影响很大,在中断概率一定时,为了使系统所需的发射功率最小,必须要在明确瞄准误差角的分布规律下,选择合适的高斯光束均方根宽度。

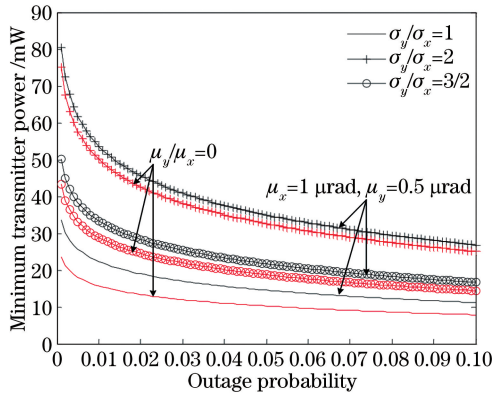


图2 最小发射功率与中断概率间的关系
Fig. 2 Minimum transmitter power versus outage probability

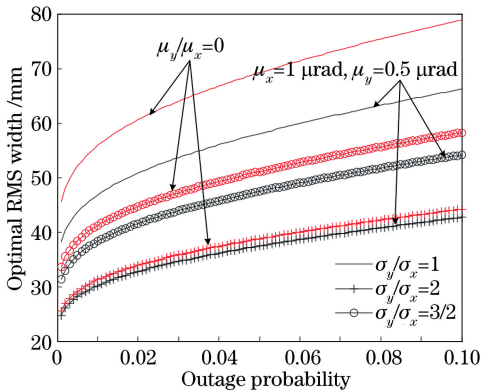


图3 最优均方根宽度与中断概率间的关系
Fig. 3 Optimal RMS width versus outage probability

图4、5所示为当发射功率固定时,系统可以达到的最小中断概率以及此时高斯光束的最优均方根宽度随发射功率的变化情况。从图4、5可以看出,随着发射功率的增大,系统的中断概率性能逐渐提升,此时最优均方根宽度也随之减小。从图5可以看出,当瞄准误差角的分布情况不同时,最优均方根宽度的取值分布产生差别,此时静态偏差角为0时

的最优均方根宽度要明显大于静态偏差角不为0时的,并且当系统发射功率为10 mW, $\mu_x = \mu_y = 0$, σ_y/σ_x 分别为1,3/2,2时的最优均方根宽度依次为35.1,25.9,19.7 mm。结果表明发射功率固定时,为达到最小的中断概率,必须要结合瞄准误差角分布情况,选择最优的高斯光束均方根宽度。

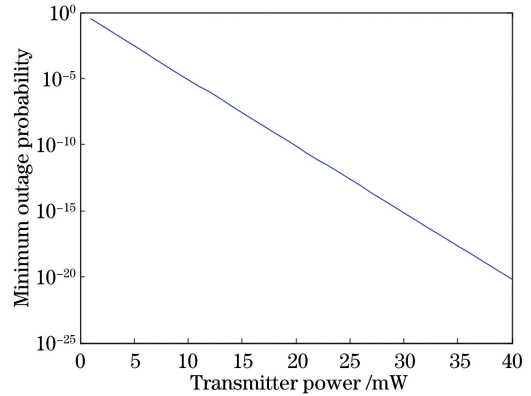


图4 最小中断概率与发射功率间的关系
Fig. 4 Minimum outage probability versus transmitter power

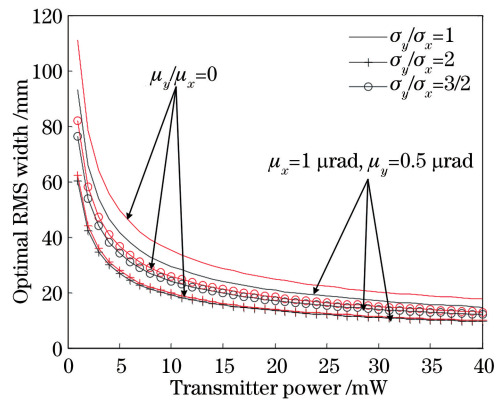


图5 最优均方根宽度与发射功率间的关系
Fig. 5 Optimal RMS width versus transmitter power

5 结 论

针对瞄准误差影响下的星间激光通信系统,结合星间链路传输方程,给出了当瞄准误差服从贝曼分布时的中断概率表达式,并分别在固定中断概率和发射功率的条件下建立了发射功率优化模型和中断概率优化模型,通过模型求解,分别给出了这两种假设条件下高斯光束发射时的最优均方根宽度。通过数值仿真,给出了当中断概率一定时,系统所需的最小发射功率和最优均方根宽度随中断概率的变化规律,以及当发射功率一定时,系统所能达到的最小中断概率和最优均方根宽度随发射功率的变化规律。从数值仿真结果可以看出,当瞄准误差角的分

布情况不同时,最优均方根宽度的取值相差较大,比如当系统中断概率为 0.01, $\mu_x = \mu_y = 0$, σ_y/σ_x 分别为 1, 3/2, 2 时的最优均方根宽度依次为 55.8, 41.1, 31.2 mm; 当系统发射功率为 10 mW, $\mu_x = \mu_y = 0$ 时, σ_y/σ_x 分别为 1, 3/2, 2 时的最优均方根宽度分别为 35.1, 25.9, 19.7 mm。因此,为了使系统性能最优,必须要结合瞄准误差角分布,选择最优的高斯光束均方根宽度。本研究可为星间激光通信系统的研究和设计提供理论依据,具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Zhou L L, Yun J P, Yang H F, *et al.* Outage probability analysis of coherent optical communication system with pointing error in exponentiated Weibull channel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 110602.
周凌林, 郑建平, 杨海峰, 等. 指数韦伯信道下带瞄准误差的相干光通信系统中断概率分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 110602.
- [2] Zhang H Y, Li H Z, Xiao D Y, *et al.* Performance analysis of spatial-diversity reception over combined effects of atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0405002.
张慧颖, 李洪祚, 肖冬亚, 等. 大气湍流综合效应下空间分集接收性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0405002.
- [3] Zheng Y H, Wang Y, Chen X L. H_∞ control applied for APT system of inter-satellite laser communications [J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2008, 30(6): 1619-1625.
郑燕红, 王岩, 陈兴林. 卫星光通信 APT 控制系统 H_∞ 设计[J]. *航空学报*, 2008, 30(6): 1619-1625.
- [4] Ni X L, Liu Z, Jiang H L, *et al.* Space laser communication vibration compensation system based on liquid crystal light modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(s1): s105007.
倪小龙, 刘智, 姜会林, 等. 基于液晶光调制器的星际激光通信平台振动补偿系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(s1): s105007.
- [5] 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.
丁涛, 许国良, 张旭苹, 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.
- [6] 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*, 2002, 19(3): 567-571.
- [7] Song T Y, Wang Q, Wu M W, *et al.* Performance of laser inter-satellite links with dynamic beam waist adjustment [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11950-11960.
- [8] Liu H Z, Ji Y F, Liu L R. Effect of aberration on performance of the bit error rate in an inter-satellite coherent optical communication receiving system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0106002.
刘宏展, 纪越峰, 刘立人. 像差对星间相干光通信接收系统误码性能的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0106002.
- [9] 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.
- [10] Boluda-Ruiz R, García-Zambrana A, Castillo-Vázquez C, *et al.* Novel approximation of misalignment fading modeled by Beckmann distribution on free-space optical links [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22635-22649.
- [11] Han L Q, Jiang H B. Outage probability analysis of a mixed cognitive RF and MIMO FSO system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0406001.
韩立强, 江红兵. 一种混合认知 RF 和 MIMO FSO 系统的中断概率分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0406001.
- [12] Chen C C, Gardner C S. Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and incoherent optical intersatellite communication links [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, 37(3): 252-260.
- [13] Song T Y, Wang Q, Wu M W, *et al.* Impact of pointing errors on the error performance of intersatellite laser communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(14): 3082-3091.