

激光与光电子学进展

大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能

孙晶*, 黄普明, 么周石

西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100

摘要 大气湍流与平台微振动的存在会导致星地激光通信链路的随机信道衰减,使通信质量无法得到保证。为了研究大气湍流与平台微振动共同影响下的星地激光通信性能,建立了联合星地激光链路随机衰减模型,并基于二进制相移键控调制、外差相干接收给出了该模型下系统平均误码率的闭合表达式。仿真分析了不同星地激光通信系统参数对系统误码率性能的影响,研究结果可为实际星地激光通信系统的设计提供一定的理论参考。

关键词 大气光学; 大气湍流; 相干光通信; 星地激光通信; 误码率

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0301003

Performance of Satellite-to-Ground Laser Communications Under the Influence of Atmospheric Turbulence and Platform Micro-Vibration

Sun Jing*, Huang Puming, Yao Zhoushi

Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an, Shaanxi 710100, China

Abstract The existence of atmospheric turbulence and platform micro-vibration will cause the random channel attenuation of the satellite-to-ground laser communication links, which leads to the unstable communication quality. To further analyzes the performance of satellite-to-ground laser communications with the influence of atmospheric turbulence and platform micro-vibration, a random attenuation model of joint satellite-to-ground laser link is established. Based on binary phase shift keying modulation and heterodyne coherent reception, the closed form expression of system average bit error rate under the model is given. The influence of different satellite-to-ground laser communication system parameters on the bit error rate performance is analyzed by simulation. The research results can provide a theoretical reference for the design of practical satellite-to-ground laser communication system.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; coherent optical communication; satellite-to-ground laser communications; bit error rate

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 060.1660

1 引言

与传统空间微波通信技术相比,以激光作为通信载体的自由空间光通信(FSO)具有传输速率高、

通信容量大、安全保密性好、终端低质量和低功耗等优势,在未来卫星空间组网中具有广阔的应用前景^[1-2]。星地链路作为卫星空间组网的重要组成部分,受大气湍流、收发平台微振动的影响,接收端接

收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-06-15; 录用日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61231012)

*E-mail: sjtiandi@126.com

收的光信号微弱且不稳定,通信质量无法得到保证,严重时会导致通信链路中断^[3]。一方面大气湍流会导致接收平面的接收光信号强度发生闪烁;另一方面大气湍流会破坏传输光束的相干性,进而影响接收端的空间光-光纤耦合效率。此外,发射平台的微振动会带来光束失准,即指向误差,导致接收到的光信号功率下降;还会导致接收平面存在到达角起伏,影响接收端的空间光-光纤耦合效率。

目前关于大气湍流及平台微振动对空间光通信系统性能的研究大多是针对水平激光通信链路系统,针对星地激光链路的分析与研究较少,且大多仅考虑了指向误差和光强闪烁两个因素。Borah 等^[4]研究了光强闪烁与指向误差共同影响下的激光链路通信性能,给出了误码率(BER)的解析表达式并分析了系统最优化的问题。García-Zambrana 等^[5]基于 Gamma-Gamma 大气湍流信道分布模型,研究了存在指向误差时强度调制/直接检测系统的 BER 性能,并给出了 BER 的近似表达式。Yang 等^[6]在正态分布信道模型、Gamma-Gamma 分布信道模型下,分别推导了存在光束失准时的系统 BER 及中断概率近似表达式。

本文在现有研究的基础上,建立了大气湍流与平台微振动共同影响下的星地激光链路复杂信道模型。对基于二进制相移键控(BPSK)调制的相干接收系统性能进行了研究,并推导出系统的平均 BER 闭合表达式;通过数值仿真与 Monte Carlo (MC) 仿真,对比分析了不同星地激光通信系统参数对通信性能的影响。

2 系统与信道模型

2.1 接收系统模型

对于传统的单输入单输出(SISO)星地激光通信系统,其接收系统的结构如图 1 所示。首先,落入接收孔径的空间光信号通过接收望远镜聚焦后耦合到单模光纤(SMF)中进行传输;然后,单模光纤中的光与本振(LO)激光器经 90°光混频器进行混频,输出光信号通过两个平衡光电探测器(BPD)完成下变频及光电转换;最后,对 BPD 输出的同向支路电信号(I)及正交支路电信号(Q)进行载波恢复处理。

当相干接收机工作在量子噪声极限下时,接收系统仅受到散粒噪声的影响,此时判决输入的瞬时

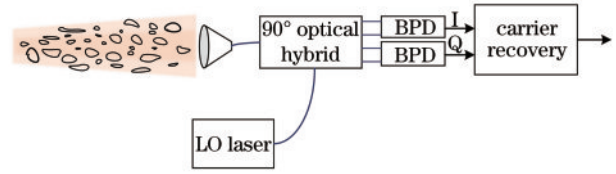


图 1 接收系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the receiver system

信噪比(SNR)可表示为^[7]

$$\gamma(t) = \frac{2R_d^2 P_s(t) P_{LO}}{2qR_d P_{LO} \Delta f} = \frac{R_d h(t) P_T}{q \Delta f}, \quad (1)$$

式中, R_d 为光电探测器的响应度, Δf 为平衡光电探测器的等效噪声带宽, q 为介电常数。 $P_s(t) = h(t) P_T$ 为落入接收孔径的光信号功率, P_T 为发射光信号功率, P_{LO} 为本振激光器的输出光信号功率, $h(t)$ 为星地激光链路信道引起的瞬时光强衰减。实验主要考虑的是瞬时状态,因此(1)式中的时间参数 t 可以忽略。

2.2 信道模型

发射平台微振动引起的指向误差会造成接收光强随机衰减,因此可以将其与大气湍流带来的光强闪烁合并,联合建立光强闪烁模型。大气湍流会破坏传输光束的相干性,影响接收端的光纤耦合效率;而接收平台微振动引起的到达角(AOA)起伏会导致接收光信号的光轴相对于 SMF 的标称轴有一个不确定的瞬时位移,也会影响接收光束耦合到 SMF 的效率。因此可以考虑建立大气湍流和 AOA 起伏共同影响下的空间光-光纤耦合效率模型。

联合光强闪烁模型方面, García-Zambrana 等^[5]基于 Gamma-Gamma 大气湍流分布信道模型给出了存在指向误差时的联合光强闪烁模型,即随机信道衰减 h_1 模型为

$$f(h_1) = \frac{\alpha\beta}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\epsilon^2}{A_0} \times G_{1,3}^{3,0} \left(\alpha\beta \frac{h_1}{A_0} \middle| \epsilon^2 - 1 \quad \alpha - 1 \quad \beta - 1 \right), \quad (2)$$

式中, α 与 β 分别为大气湍流中大尺度涡流和小尺度涡流参数, $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ 为 Meijer G 函数, $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数, $\epsilon = \omega_{Leq}/2\sigma_r$ 为接收光束等效半径与指向位移的尺度参数之比,其中, $\sigma_r = L\sigma_{\beta_r}$, σ_{β_r} 为随机指向误差方差, L 为传输距离。接收光束等效半径 ω_{Leq} 及无指向误差时入射到接收孔径内的能量占总能量的比例 A_0 可表示为^[8]

$$\omega_{L,eq}^2 = \omega_L^2 \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}, A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2, \quad (3)$$

$$v = \frac{\sqrt{\pi} D_R}{2\sqrt{2} \omega_L},$$

式中, D_R 为接收光学天线孔径, ω_L 为大气湍流中传输距离为 L 处的高斯光束束腰半径, 可表示为^[9]

$$\omega_L \approx \omega_0 \sqrt{1 + \epsilon_0 (\lambda L / \pi \omega_0^2)^2}, \quad (4)$$

式中, ω_0 为 $L=0$ 处的光束束腰, λ 为光波长, $\epsilon_0 = (1 + 2\omega_0^2 / \rho_c^2)$, ρ_c 为大气相干长度, 对于星地链路激光通信系统, ρ_c 可表示为^[10]

$$\rho_c = \left[1.46k^2 \frac{1}{\cos \zeta} \int_{h_0}^H C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (5)$$

式中, ζ 为星地激光通信链路的天顶角, $k = 2\pi/\lambda$ 为传输光的波数, h_0 为地面站接收系统的海拔高度, $H = h_0 + L \cos \zeta$ 为卫星的轨道高度, $C_n^2(h)$ 为大气折射率结构常数。在空间光通信技术的应用中, Hufnagel-Valley (H-V) 模型是应用最广泛的随高度变化大气折射率结构常数模型, 可表示为^[11]

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{\omega}{27} \right)^2 (10^{-5} h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + B_0 \exp\left(-\frac{h}{100}\right), \quad (6)$$

式中, h 的单位为 m, ω 为垂直于传输路径的风速 (伪风速), 单位为 m/s, B_0 为发射端海拔为 0 时的折射率构常数, 单位为 $m^{-2/3}$ 。大气湍流中大尺度涡流和小尺度涡流参数 α 与 β 可表示为^[12]

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

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_{R,sp}^2}{(1 + 0.69\sigma_{R,sp}^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (7)$$

式中, $\sigma_{R,sp}^2$ 为斜程光传输链路的 Rytov 方差即闪烁指数, 具体推导过程可参考文献^[10]。星地下行链路对应的闪烁指数可表示为

$$\sigma_{R,sp}^2 = 2.25k^{7/6} \sec^{11/6} \zeta \int_{h_0}^H C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh. \quad (8)$$

联合空间光-光纤耦合效率方面, 同时考虑接收平台引起的 AOA 起伏和大气湍流的影响, 通过理论推导, 得到空间光-光纤的平均耦合效率为^[13]

$$\eta_c = 8\alpha_p^2 \int_0^1 \int_0^1 \exp\left[-(x_1^2 + x_2^2) \left(\alpha_p^2 + \frac{2\pi\sigma_\beta^2 A_R}{\lambda^2} + \frac{A_R}{A_c} \right)\right] I_0\left(\frac{2A_R x_1 x_2}{A_c}\right) x_1 x_2 dx_1 dx_2, \quad (9)$$

式中, $I_0(\cdot)$ 为零阶第一类修正 Bessel 函数, 接收系统参数 $\alpha_p = D_R k \omega_m / 4f$ 可等效为接收孔径与 SMF 反向映射在接收平面 A 处的模场直径之比, ω_m 为 SMF 模场束腰半径, f 为接收系统的等效焦距。 $A_R = \pi D_R^2 / 4$ 为接收孔径面积, $A_c = \pi \rho_c^2$ 为接收器孔径平面上的空间相干区域面积, σ_β^2 为接收平台微振动带来的 AOA 起伏方差。

基于(2)式和(6)式, 得到大气湍流及平台微振动共同影响下的信道衰减 $h_s = h_1 \eta_c$ 分布模型

$$f(h_s) = \frac{\alpha\beta}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\epsilon^2}{A_0 \eta_c} \times G_{1,3}^{3,0} \left(\alpha\beta \frac{h_s}{A_0 \eta_c} \middle| \epsilon^2 - 1 \quad \alpha - 1 \quad \beta - 1 \right). \quad (10)$$

3 星地激光通信系统性能分析

BPSK 调制下, 外差相干探测接收系统的 BER 可表示为^[12]

$$P_{BPSK}(\gamma) = \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\gamma/2}\right) / 2, \quad (11)$$

接收系统的平均 BER 可表示为

$$P_e = \int_0^\infty P_{BPSK}(\gamma) f(\gamma) d\gamma. \quad (12)$$

将(1)式代入(10)式, 得到光电转换后信号信噪比的概率密度函数 $f(\gamma)$ 为

$$f(\gamma) = \frac{\alpha\beta}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\epsilon^2}{A_0 \eta_c} \frac{1}{R_d P_T} \times G_{1,3}^{3,0} \left(\alpha\beta \frac{q\Delta f}{A_0 \eta_c R_d P_T} \gamma \middle| \epsilon^2 - 1 \quad \alpha - 1 \quad \beta - 1 \right). \quad (13)$$

参考文献^[14], 将 MeijerG 函数通过级数展开表示为

$$G_{1,3}^{3,0} \left(z \middle| a_1 \quad b_1, b_2, b_3 \right) = \sum_{k=1}^3 \frac{\prod_{j=1, j \neq k}^3 \Gamma(b_j - b_k)}{\Gamma(a_1 - b_k)} \times z^{b_k} {}_1F_2 \left\{ 1 - a_1 + b_k; [1 + b_k - b]^{+}; z \right\}, \quad (14)$$

式中, $[\cdot]$ 为行向量, $\mathbf{b}=[b_1, b_2, b_3]$, $[1+b_k-\mathbf{b}]^+$ 为忽略向量 \mathbf{b} 中的 b_k 项。 ${}_1F_2(\cdot; \cdot, \cdot; \cdot)$ 为广义超几何函数, 可表示为

$${}_1F_2(a_1; b_1, b_2; z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(a_1)_n}{(b_1)_n (b_2)_n n!} z^n, \quad (15)$$

式中, $(a_1)_n$, $(b_1)_n$ 及 $(b_2)_n$ 为阶乘幂运算。信噪比 γ 的概率密度函数可进一步表示为

$$f(\gamma) = X_{0,\gamma} \gamma^{\varepsilon^2-1} + \sum_{n=0}^{\infty} Y_{n,\gamma} \gamma^{n+\alpha-1} + \sum_{n=0}^{\infty} Z_{n,\gamma} \gamma^{n+\beta-1}, \quad (16)$$

其中,

$$X_{0,\gamma} = \frac{\varepsilon^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \Gamma(\alpha-\varepsilon^2) \Gamma(\beta-\varepsilon^2) \left(\frac{\alpha\beta q \Delta f}{A_0 \eta_c R_d P_T} \right)^{\varepsilon^2}, \quad (17)$$

$$Y_{n,\gamma} = \frac{\varepsilon^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\Gamma(\varepsilon^2-\alpha)\Gamma(\beta-\alpha)}{\Gamma(1+\varepsilon^2-\alpha)} \frac{(\alpha-\varepsilon^2)_n}{(1+\alpha-\varepsilon^2)_n (1+\alpha-\beta)_n n!} \left(\frac{\alpha\beta q \Delta f}{A_0 \eta_c R_d P_T} \right)^{n+\alpha}, \quad (18)$$

$$Z_{n,\gamma} = \frac{\varepsilon^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\Gamma(\varepsilon^2-\beta)\Gamma(\alpha-\beta)}{\Gamma(1+\varepsilon^2-\beta)} \frac{(\beta-\varepsilon^2)_n}{(1+\beta-\varepsilon^2)_n (1+\beta-\alpha)_n n!} \left(\frac{\alpha\beta q \Delta f}{A_0 \eta_c R_d P_T} \right)^{n+\beta}. \quad (19)$$

由文献[15]得到

$$\frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc}(\sqrt{x/2}) x^b dx = \frac{\Gamma\left(b + \frac{3}{2}\right) 2^b}{(b+1)\sqrt{\pi}}. \quad (20)$$

将(16)式代入(20)式, 利用 $\Gamma(n+\alpha) = \Gamma(\alpha)(\alpha)_n$, 得到星地激光通信系统平均 BER 的闭合表达式为

$$P_e = \frac{1}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left\{ C_p^{\varepsilon^2} \Gamma(\alpha-\varepsilon^2) \Gamma(b-\varepsilon^2) \Gamma\left(\frac{1}{2} + \varepsilon^2\right) + C_1 \left[\frac{{}_2F_2\left(\alpha, \frac{1}{2} + \alpha; 1+\alpha, 1+\alpha-\beta; C_p\right)}{\alpha} - \frac{{}_2F_2\left(\alpha-\varepsilon^2, \frac{1}{2} + \alpha; 1+\alpha-\varepsilon^2, 1+\alpha-\beta; C_p\right)}{\alpha-\varepsilon^2} \right] + C_2 \left[\frac{{}_2F_2\left(\beta, \frac{1}{2} + \beta; 1+\beta, 1+\beta-\alpha; C_p\right)}{\beta} - \frac{{}_2F_2\left(\beta-\varepsilon^2, \frac{1}{2} + \beta; 1+\beta-\varepsilon^2, 1+\beta-\alpha; C_p\right)}{\beta-\varepsilon^2} \right] \right\}, \quad (21)$$

式中, $C_p = \frac{2\alpha\beta q \Delta f}{A_0 \eta_c R_d P_T}$, $C_1 = (C_p)^\alpha \Gamma(1/2+\alpha) \Gamma(b-\alpha)$, $C_2 = (C_p)^\beta \Gamma(1/2+\beta) \Gamma(\alpha-\beta)$ 。

4 仿真结果与分析

根据上文推导的星地下行激光通信信道模型、系统平均 BER, 对不同系统参数下的平均 BER 进行了数值仿真。为了验证数值推导的准确性, 运用 MC 仿真算法进行仿真对比, 样本数为 10^6 。选取基于 BPSK 调制的地球同步轨道卫星对地相干激光通信系统进行数值仿真分析, 大气湍流模型选择理论研究常用的 H-V_{5/7} 湍流模型, 系统仿真参数如表 1 所示。

图 2 为发射功率 $P_T = 20$ dBm 时, 基于 BPSK 调制的星地下行相干激光通信系统 BER 随天顶角 ζ 的变化曲线。假设指向误差方差为 $0.1\theta_{div}$, θ_{div} 为光束发散角, 接收天线孔径为 1 m。可以发现, 当 $\zeta \leq 20^\circ$ 时, 随着 ζ 的增大, BER 的增加比较缓慢; 当 $\zeta > 20^\circ$ 时, 随着 ζ 的增大, BER 有明显恶化, 呈近似指数增加。原因是随着天顶角的增加, 光束在大气信道中传输的距离逐渐变大, 落入接收孔径的光信号功率越小, 链路对应的大气湍流越强, 指向误差引起的接收信号幅度抖动越明显, 空间光-光纤平均耦合效率更低, 从而影响星地激光通信性能。此外, 数值仿真结果与 MC 仿真的数据基本一致, 这证明了实验推导的平均 BER 闭合表达式是准确的。

表 1 星地下行链路仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the satellite-to-ground downlink

Parameter description	Symbol	Value
Laser wavelength/nm	λ	1550
Altitude of the satellite/km	H	38000
Transmitter aperture diameter/cm	D_T	20
Beam divergence	θ_{div}	$4\lambda/\pi D_T$
Transmit power/dBm	P_T	20
Altitude of the optical ground station/km	h_0	0
Noise equivalent bandwidth of the photodetector/GHz	Δf	2
Mode field radius at the fiber end face/ μm	W_m	5
Equivalent focal length of the receiver system/m	f	3
Photodetector responsivity/ $(\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$	R_d	1
Wind velocity/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	w	21
Refractive index parameter/ $\text{m}^{-2/3}$	B_0	1.7×10^{-14}
Zenith angle/rad	ζ	$0 - \pi/2$

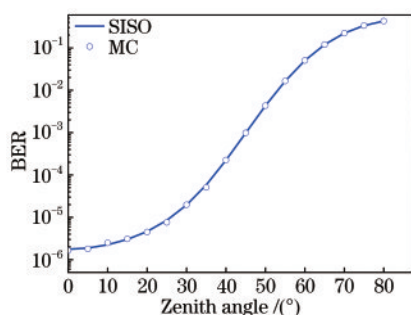


图 2 BER随天顶角的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of the BER with the zenith angle

图 3 为其他系统参数固定,天顶角 $\zeta = 30^\circ$, 基于 BPSK 调制的星地下行相干激光通信系统 BER 随发射光学天线孔径 D_T 的变化曲线,可以发现,系统的 BER 随 D_T 的增加而减小。但随着误码率的减小, D_T 的增加对 BER 的改善效果逐渐减弱。如当 D_T 从 6 cm 增加到 10 cm 时,对应的 BER 从 0.025 下

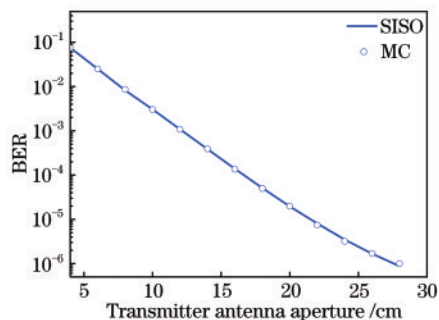


图 3 BER随发射光学天线孔径的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of the BER with the transmitting optical antenna aperture

降到 0.003,减小了 12%;当 D_T 从 14 cm 增加到 18 cm 时,对应的 BER 从 3.9×10^{-4} 下降到 5.1×10^{-5} ,减小了 13%;当 D_T 从 24 cm 增加到 28 cm 时,对应的 BER 从 3.5×10^{-6} 下降到 8.7×10^{-7} ,减小了 24.8%。其次,增大光学天线孔径 D_T 会增加星上光学终端的质量和体积,相应的造价也会指数上升。因此在实际工程中需要权衡光学天线孔径的选择。

图 4 为天顶角 $\zeta = 30^\circ$ 时基于 BPSK 调制的星地下行相干激光通信系统 BER 随接收光学天线孔径 D_R 的变化曲线。可以看出,平均 BER 不会随着 D_R 的增加一直减小,在其他系统参数固定的情况下,理论上存在一个最优的 D_R 使系统平均 BER 最小。原因是当接收孔径 D_R 特别小时,落入孔径内的光信号功率非常小,使接收系统无法准确恢复数据;随着 D_R 的增加,落入孔径内的光信号功率也逐渐提升,BER 逐步减小至最优;之后 D_R 的持续增加虽然也会增加接收光信号功率,但由于大气湍流的影响,对应的空间光-光纤耦合效率会急剧下降,此时增加 D_R 不再对系统性能有所改善,反而会增加 BER。

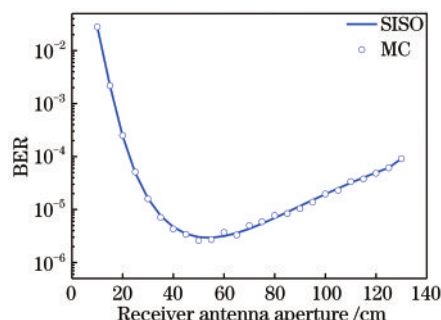


图 4 BER随接收光学天线孔径的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of the BER with the receiving optical antenna aperture

图 5 为天顶角 $\zeta = 30^\circ$ 、接收孔径 $D_R = 60$ cm 时,指向误差对基于 BPSK 调制的星地下行相干激光通信系统 BER 性能的影响。可以看出,平均 BER 对指向误差的增加十分敏感,指向误差方差增加一倍,可能会使 BER 恶化近 3 个数量级。原因是对于远距离的同步卫星对地激光通信, μrad 量级的指向误差方差会导致接收平面光束足迹中心相对于接收孔径中心的随机偏移方差增加超过 30 m,远大于接收孔径的尺寸,导致落入接收孔径的光信号功率抖动明显增强,通信系统性能无法得到保证。因此,在实际工程中,星地激光通信系统对捕捉跟踪子系统的精度要求特别高,为了保证星地激光通信链路的稳定性,指向误差方差应尽可能小于 0.1 倍的发射光束发散角全角。

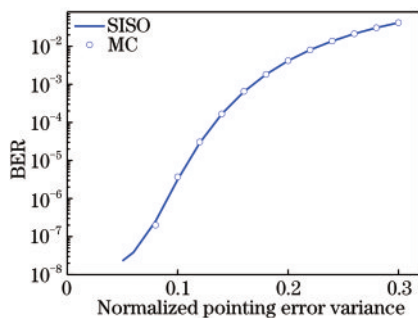


图 5 BER 随归一化指向误差方差的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of BER with normalized pointing error variance

4 结 论

主要研究了大气湍流及收发平台微振动共同影响下的星地下行激光通信链路性能,建立了大气湍流及收发平台微振动影响下的星地激光链路信道随机衰减模型。基于该信道模型,推导了星地激光通信系统平均误码率的闭合表达式。通过数值仿真、MC 仿真,对比分析了不同星地激光通信链路参数对通信性能的影响。数值仿真结果证明,为了保证星地激光通信链路的通信性能,链路天顶角应尽量小于 20° ; 捕跟子系统应尽可能地保证指向误差角方差小于 0.1 倍的发射光束发散角全角。此外,当其他系统参数固定时,理论上存在一个最优的接收光学天线孔径使系统平均 BER 最小。本研究结果在实际的星地激光通信系统设计中具有一定的理论参考价值。

参 考 文 献

- [1] Yao Z S. Space coherent laser data transmission system and multi-order correction [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 1-12. 么周石. 相干激光空间数据传输系统及其多阶波前校正研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 1-12
- [2] Zhang X Y, Cui S, Liu D M, et al. Performance analysis of multi-aperture coherent optical receiver for satellite-to-ground downlink[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 210101. 张晓玉, 崔晟, 刘德明, 等. 星地下行链路中多孔径相干光接收机性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 210101.
- [3] Lao C Z, Sun J F, Zhou Y, et al. Performance of coherent beam combining system with multiple aperture receiver [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0705003. 劳陈哲, 孙建锋, 周煜, 等. 多孔径接收相干合束系统性能研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0705003.
- [4] 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.
- [5] García-Zambrana A, Castillo-Vázquez B, Castillo-Vázquez C. Asymptotic error-rate analysis of FSO links using transmit laser selection over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels with pointing errors[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2096-2109.
- [6] 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.
- [7] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Diversity reception technology in coherent optical communication over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0706002. 孙晶, 黄普明, 么周石. Gamma-Gamma 大气湍流下相干光通信分集接收技术研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0706002.
- [8] Huang S J, Safari M. Free-space optical communication impaired by angular fluctuations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11): 7475-7487.
- [9] Ricklin J C, Davidson F M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication [J]. JOSA A, 2002, 19(9): 1794-1802.
- [10] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham, Washington: SPIE, 2005.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground laser links with angle-of-arrival fluctuations[C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT), October 16-19, 2019, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2019: 705-709.
- [14] Jin Y M. Practical points table[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2006. 金玉明. 实用积分表[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.
- [15] Ng E W, Geller M. A table of integrals of the error functions [J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section B: Mathematical Sciences, 1969, 73B(1): 1-24.