

文章编号: 1001-4322(2006)08-1233-06

星地激光链路中光束发散角与跟瞄误差的最佳比值*

马 晶, 潘 锋, 谭立英

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 实际星地光通信系统的发射光束为高斯型的情况下,跟瞄误差和大气闪烁是星地激光链路中的主要信道噪声源。在结合两者对系统性能影响的前提下,对星地激光通信链路进行了理论分析和模型建立。基于该模型对星地激光链路中光束发散角与跟瞄误差之比的优化选择问题进行了研究。结果表明:对于上行链路,在不同误码率需求下都存在一个光束发散角与跟瞄误差的最佳比值,使得上行链路余量最大;对于下行链路,在不同误码率要求下均存在一个光束发散角与跟瞄误差的最佳比值,使得下行发射光功率的需求最小。利用最优化方法和最小二乘法拟合,得到星地激光链路中光束发散角与跟瞄误差的最佳比值和系统误码率的经验公式。

关键词: 星地光通信; 光束发散角; 误码率; 大气闪烁; 跟瞄误差

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A

卫星光通信与微波通信相比,具有超大通信容量、较小的终端体积、较轻的终端重量等优点,是卫星通信技术一个重要的发展方向。星地光通信是卫星光通信的重要环节之一,美国、日本、欧洲等一些国家已全面开展了此方面的研究和试验^[1-5]。

卫星终端与地面终端在完成瞄准和捕获之后,进入空间跟踪。由于卫星定位误差、探测器噪声、终端间的相对运动以及卫星平台的微振动等因素,使得两终端不能精确对准。在跟踪过程中,存在瞄准误差角,其大小和方向均随机变化。在发射光束为高斯型的情况下,跟瞄误差将导致接收功率损耗^[6-7],与此同时大气闪烁引起的接收光功率起伏也造成链路损耗。由于大气闪烁与瞄准偏差角相关^[8-9],即大气闪烁强度在跟踪过程中也随机变化,因此跟瞄误差和大气闪烁是星地链路中的主要噪声源,且对系统误码率的影响相互关联、相互叠加。V. N. Vladimirov, Morio Toyoshima, L. C. Andrews 等人对星地激光链路进行了研究^[5-9],但已有的星地激光链路模型忽略了两者对系统性能影响的相关性。

本文对星地激光链路进行了理论分析并建立更符合实际情况的信道模型。在星地激光通信系统设计中,光束发散角是一个关键性参数。对于跟瞄精度和大气湍流强度一定的情况下,发射光束发散角的大小直接影响跟瞄误差损耗、接收光功率起伏强度和发射天线增益。因此需要对光束发散角进行合理选择。基于本文建立的信道模型,对星地激光链路中发散角与跟瞄误差比值的优化选择问题进行了研究。

1 星地激光链路信道模型

在发射光束为高斯型的情况下,归一化光强表示为^[10]

$$I(\varphi) = \exp\left[-2 \frac{(\rho + \varphi)^2}{\theta^2}\right] \quad (1)$$

式中: ρ 为静态跟瞄偏差角; φ 为动态跟瞄偏差角; θ 是光束发散角(半角)。由(1)式可以看出,由于跟瞄过程中存在瞄准误差,即瞄准偏差角在一定范围内随机变化,使得接收光强的随机起伏,进而导致平均接收光强衰落。根据实验测量结果,卫星终端的瞄准偏差角的概率密度为瑞利分布^[6]

$$p(\varphi, \rho) = \frac{\varphi}{\sigma_\varphi^2} I_0\left(\frac{\rho\varphi}{\sigma_\varphi^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{\varphi^2 + \rho^2}{2\sigma_\varphi^2}\right)\right] \quad (2)$$

式中: σ_φ^2 是动态跟瞄偏差角的方差; $I_0(x)$ 是零阶第一类修正贝塞尔函数。

定义跟瞄损耗因子 M 为存在跟瞄误差时的平均接收光强与无跟瞄误差下的平均接收光强之比。在静态跟瞄偏差较小的情况下,由(1)和(2)式,得到损耗因子

* 收稿日期:2006-05-23; 修订日期:2006-07-08

作者简介:马 晶(1956—),男,哈尔滨工业大学教授,博导,主要从事卫星光通信、光信息处理的研究;majing@hit.edu.cn。

$$M = \frac{\gamma}{1+\gamma} \exp\left(-\frac{1}{\xi} \frac{\gamma}{1+\gamma}\right) \quad (3)$$

式中: $\xi = \theta^2 / 2\rho^2$; $\gamma = \theta^2 / 4\sigma_\varphi^2$ 。

由式(1)和(2), 得到跟瞄误差引起的接收光强起伏的概率密度

$$p_{I_g}(I_g) = \gamma I_0 (2 \sqrt{-\eta \gamma \ln I_g}) \exp(\gamma \ln I_g - \eta), \quad (0 \leq I_g \leq 1) \quad (4)$$

式中: $\eta = \rho^2 / 2\sigma_\varphi^2$ 。

伴随着跟瞄抖动, 大气闪烁是星地激光链路中另一主要噪声源。由理论和实验研究可知, 当星地激光链路的传输天顶角较小 ($\zeta < 60^\circ$) 时, 大气闪烁引起的接收光强度起伏服从对数正态分布

$$p_{I_s}(I_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln I_s}^2}} \frac{1}{I_s} \exp\left[-\frac{(\ln I_s - \langle \ln I_s \rangle)^2}{2\sigma_{\ln I_s}^2}\right] \quad (5)$$

式中: $\langle \ln I_s \rangle = -\sigma_{\ln I_s}^2 / 2$ 。

研究表明, 对于高斯型光束大气闪烁指数和瞄准偏差角相关^[6]。因此, 在瞄准偏差角在一定范围内随机变化的同时, 大气闪烁也随机变化。此时, 式(5)中的 $\sigma_{\ln I_s}^2 = \langle \sigma_{I_s}^2 \rangle$, 即平均闪烁指数。同时考虑静态和动态跟瞄误差时, 大气闪烁指数表示为

$$\sigma_{I_s}^2 = A + B(\rho + \varphi)^2 \quad (6)$$

式中: A 是轴上闪烁方差; B 是离轴附加闪烁方差。它们均与发射光束参数有关。

由式(2)和(6), 得到平均闪烁指数

$$\langle \sigma_{I_s}^2 \rangle = A + B(C_1 + C_2 + C_3) \quad (7)$$

式中: $C_1 = 4\sigma_\varphi^2 \eta (1 + \eta) \exp(-\eta)$; $C_2 = 2^{5/2} \Gamma(3/2) (\sigma_\varphi^2)^{3/2} (1 + 3\eta/2) \exp(-\eta)$; $C_3 = 2\sigma_\varphi^2 (1 + 2\eta) \exp(-\eta)$ 。

由于大气闪烁和跟瞄误差是两个相互独立的随机过程, 实际接收光强起伏概率密度函数为

$$p_I(I) = \int_0^\infty p_{I_s}(x) p_{I_g}(I/x) \frac{1}{x} dx \quad (8)$$

将(4)和(5)式代入(8)式, 得

$$p_I(I) = \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{I} \exp\left[\gamma \ln I + \frac{1}{2} \sigma_{\ln I}^2 (\gamma + \gamma^2) - \eta\right] \times \int_0^\infty I_0(2 \sqrt{\eta \gamma \langle \sigma_{I_s}^2 \rangle x}) \exp\left[-\left(x + \frac{\ln I}{\langle \sigma_{I_s}^2 \rangle} + \langle \sigma_{I_s}^2 \rangle / 2 + \gamma \langle \sigma_{I_s}^2 \rangle\right)^2 / 2\right] dx \quad (9)$$

式中: $\sigma_{\ln I}^2 = \frac{2(\eta+1)}{\gamma} + \langle \sigma_{I_s}^2 \rangle + 2 \ln\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right) - \frac{2\eta}{\gamma+1}$ 。

根据对数正态分布的性质, 式(9)近似为

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln I}^2}} \frac{1}{I} \exp\left\{-\frac{[\ln I + (\eta-1)/\gamma + \langle \sigma_{I_s}^2 \rangle / 2]^2}{2\sigma_{\ln I}^2}\right\} \quad (10)$$

若接收端是采用开关键控(OOK)强度调制/直接探测的未编码二进制系统。在最佳判决门限的条件下, 由式(3)和(10)得到系统平均误码率

$$\bar{R}_{BE}(R_{SN}) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(I) Q(I \sqrt{MR_{SN}}) dI \quad (11)$$

式中: $P(I)$ 是归一化接收光度的概率密度函数; $Q(x)$ 是互补误差函数; R_{SN} 是检测信噪比^[11]。

2 上行链路最佳光束发散角

对于上行链路, (6)式中的 A 和 B 分别为^[10]

$$A = 8.702 \mu_3 k^{7/6} (H - h_0)^{5/6} \sec^{11/6}(\zeta) \quad (12)$$

$$B = \frac{14.508 \mu_1 \Lambda^{5/6} k^{7/6} (H - h_0) \sec^{23/6}(\zeta)}{\omega_0^2 (\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)} \quad (13)$$

式中: H 是卫星轨道高度; h_0 是光学地面站的高度; $k = 2\pi/\lambda$ 是波数; ω_0 是发射光束束腰(半径); Λ 是光束的传输参数; Θ_0 和 Λ_0 是发射光束参数; μ_1 和 μ_3 为大气折射率结构常数上行路径的积分值。

依据现有系统的参数^[1,12], 选取上行光波长 $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ 、卫星轨道高度 $H = 1500 \text{ km}$ 、光学地面站的海拔

$h_0 = 100 \text{ m}$, 传输天顶角 $\zeta = 0^\circ$, 静态跟瞄误差 $\rho = 2 \text{ } \mu\text{rad}$, 动态跟瞄误差的均方根 $\sigma_\varphi = 8 \text{ } \mu\text{rad}$ 。大气折射率结构常数采用 Hufnagel-Valley 模型^[13], 即

$$C_n^2(h) = 0.0059(v/27)^2(10^{-5}h)^{10}\exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16}\exp(-h/1500) + C\exp(-h/100) \quad (14)$$

式中: h 是距离地面的高度; C 是地面的折射率结构常数; v 是高空临界风速。

图 1 给出了上行发射光束为基模高斯光束的情况下, 在不同发散角与跟瞄误差之比下信噪比和误码率的关系曲线。从图中可以看出, 在满足相同误码率的条件下, 随着发散角与跟瞄误差之比的增加, 系统信噪比 R_{SN} 逐渐减小。为了进一步研究发散角与跟瞄误差之比对信噪比的影响, 定义信道损耗因子为

$$L_j = \left(\frac{R_{SN} |_{R_{BE}=C'}}{R_{SN} |_{R_{BE}=C}} \right) \quad (15)$$

式中: $R_{SN} |_{R_{BE}=C'}$ 是系统误码率要求为 C' 下无信道噪声时的信噪比; $R_{SN} |_{R_{BE}=C}$ 是满足相同误码率要求且同时存在跟瞄误差和大气闪烁下的信噪比。图 2 给出了信道损耗因子和发散角与跟瞄误差之比的关系曲线。从图中可以看出, 随着误码率要求的提高, 信道损耗因子增加。随着发散角与跟瞄误差之比增大, 信道损耗因子逐渐减小。由图 1 和图 2 可知, 增大发散角与跟瞄误差之比, 可以降低跟瞄误差和大气闪烁对系统性能的影响。

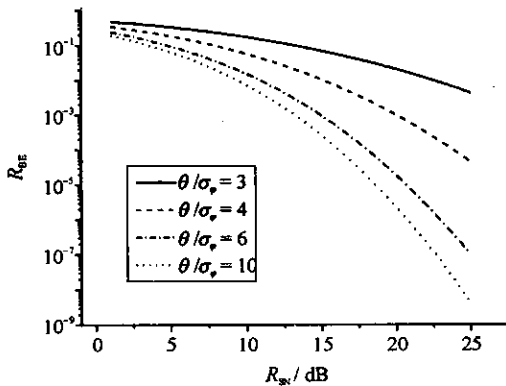


Fig. 1 R_{SN} vs R_{BE} at various ratio of beam divergence angle to pointing error

图 1 不同发散角与跟瞄误差之比下的信噪比和误码率的关系

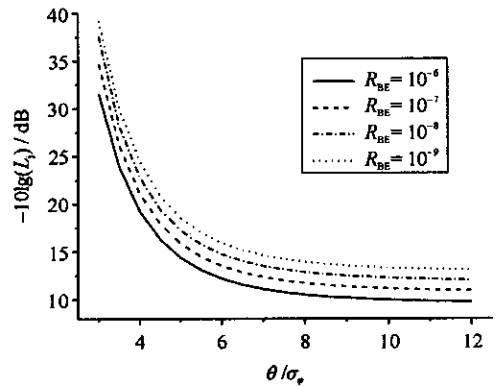


Fig. 2 Power penalty vs ratio of beam divergence angle to pointing error

图 2 发散角与跟瞄误差之比和功率代价的关系

根据链路预算方程^[6], 在给定发射功率、传输距离、接收天线孔径和大气条件的情况下, 链路余量(L_m)与发射天线增益、信道损耗相关, 即

$$L_m \propto 10\lg \frac{8}{\rho^2} + 10\lg L_j \quad (16)$$

由(16)式可知, 选择光束发散角和跟瞄偏差的比值受信噪噪声和发射天线增益的制约。从物理意义上解释, 当光束发散角和跟瞄偏差的比值过小, 则信道噪声过强; 当光束发散角和跟瞄偏差的比值过大, 则天线增益过低。因此, 确定光束发散角与跟瞄误差之比需要权衡信道损耗和发射天线增益, 是一个最优化问题。

根据(11)式及链路预算方程, 图 3 给出了不同误码率需求下, 链路余量和光束发散角与跟瞄误差之比的关系曲线。从图中可以看出, 各曲线均存在一个极大值点。这说明在满足不同误码率要求的条件下, 均存在一个最佳的发散角与跟瞄误差之比值, 使得上行链路余量最大。

进而利用下降迭代算法, 对不同误码率条件下的发散角和跟瞄误差之比进行最优化搜索。基于最优化结果, 利用离散数据的最小二乘法拟合, 得到发散角和跟瞄误差的最佳比值的经验公式

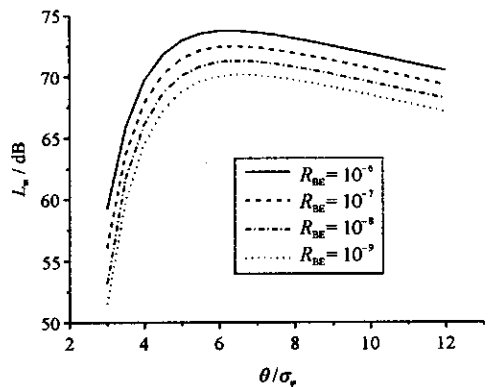


Fig. 3 Link margin vs ratio of beam divergence angle to pointing error at various R_{BE}

图 3 不同误码率需求下链路余量和光束发散角与跟瞄误差之比的关系

$$(\theta/\sigma_\varphi)_{opt} = 4.4032 - 0.4527x - 0.0375x^2 - 0.0013x^3 \tag{17}$$

式中： $x = \lg R_{BE}$ 。图 4 给出误码率和 $(\theta/\sigma_\varphi)_{opt}$ 的关系曲线，图中的圆点为最优计算结果。由 (17) 式计算得到的最佳 θ/σ_φ 取值与仿真优化结果之间误差为 1.5×10^{-4} 。利用式 (17)，在给定系统误码率要求和跟瞄误差的条件下，可以确定上行光束的最佳发散角，此时上行链路余量最大。

3 下行链路最佳光束发散角

对于下行链路，A 和 B 的表达式为^[10]

$$A = 8.702\mu_4 k^{7/6} (H - h_0)^{5/6} \sec^{11/6}(\zeta) \tag{18}$$

$$B = \frac{14.508\mu_2 \Lambda^{5/6} k^{7/6} (H - h_0)^{17/6} \sec^{23/6}(\zeta)}{\omega_0^2 (\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)} \tag{19}$$

式中： μ_2 和 μ_4 为大气折射率结构常数下行路径的积分值。

选取在下行光波长 $\lambda = 830 \text{ nm}$ ，地面接收孔径 $D_r = 50 \text{ cm}$ ，卫星轨道高度 $H = 1500 \text{ km}$ ，传输天顶角 $\zeta = 0^\circ$ ，静态跟瞄误差 $\rho = 2 \text{ } \mu\text{rad}$ ，动态跟瞄误差的均方根 $\sigma_\varphi = 8 \text{ } \mu\text{rad}$ 。利用 (11) 式、信噪比计算公式^[11] 及链路预算方程^[6]，进行数值计算。

图 5 给出了在不同光束发散角与跟瞄误差之比下信噪比与误码率的关系曲线。图 6 给出了光束发散角与跟瞄误差之比和信噪比的关系。由图 5 和图 6 可知，确定下行光束发散角也受信噪比和发射天线增益的制约。其物理过程与上行链路相似。与上行链路不同的是，下行链路的发射端位于星上，其发射光功率受卫星公用平台功耗的限制。因此，下行光束发散角与跟瞄误差的最佳比值定义为在满足相同误码率的前提下使得所需的发射光功率最小。

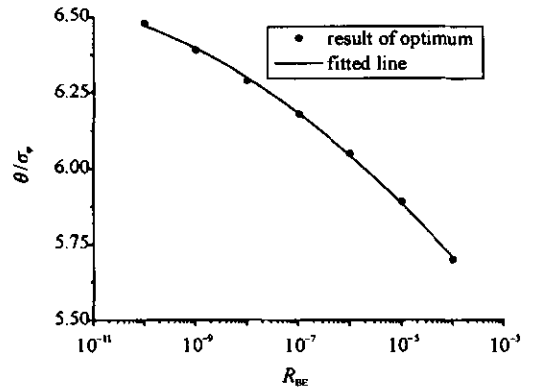


Fig. 4 R_{BE} vs optimum ratio of beam divergence angle to pointing error

图 4 误码率与光束发散角和跟瞄误差最优比值的关系

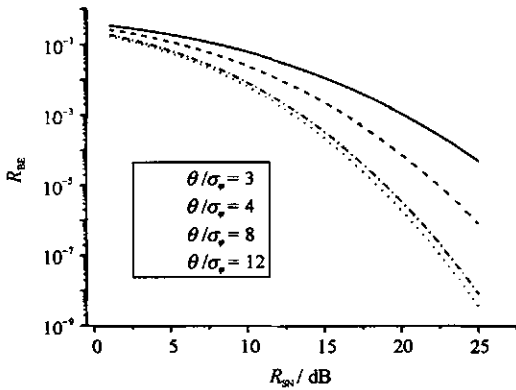


Fig. 5 R_{SN} vs R_{BE} at various ratio of beam divergence angle to pointing error

图 5 不同发散角与跟瞄偏差比值下的信噪比和误码率的关系

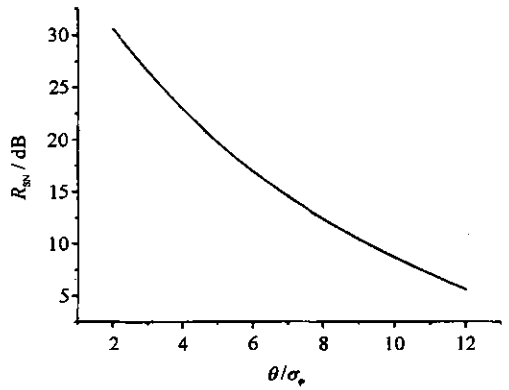


Fig. 6 R_{SN} vs ratio of beam divergence angle to pointing error

图 6 不同发散角与跟瞄偏差比值和信噪比的关系

利用数值计算方法，图 7 给出了光束发散角与跟瞄误差之比和发射光功率的关系曲线。从图中可以看出，各曲线均存在一个极小值点。这说明在满足不同误码率要求的条件下，均存在一个光束发散角和跟瞄误差的最佳比值，它使得星上终端所需的发射光功率最小。

利用下降迭代算法及离散数据的最小二乘法拟合，得到下行光束发散角和跟瞄误差的最佳比值的经验公式

$$(\theta/\sigma_\varphi)_{opt} = 2.7472 - 0.3082x - 0.0224x^2 - 0.0008x^3 \tag{20}$$

式中： $x = \lg_{10}(R_{BE})$ 。图 8 给出误码率和 $(\theta/\sigma_\varphi)_{opt}$ 的关系曲线，图中的圆点为最优计算结果。由 (20) 式计算得到的最佳 θ/σ_φ 取值与仿真优化结果之间误差为 3×10^{-4} 。利用式 (20)，在给定系统误码率要求和跟瞄系统精度的条件下，可以确定使得星上发射功率需求最小的光束发散角。

4 结 论

基于发射光束为高斯型的情况下，分析了星地激光信道中的主要噪声源——跟瞄误差和大气闪烁对系统

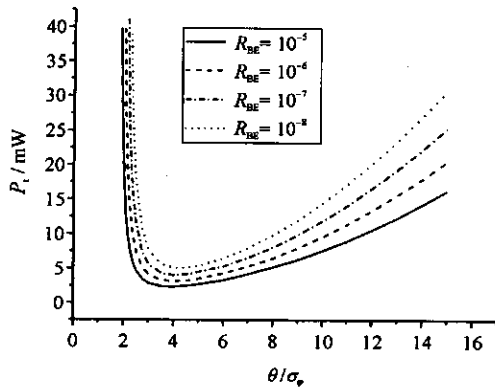


Fig. 7 Transmitting power vs ratio of beam divergence angle to pointing error at various R_{BE}

图 7 不同误码率要求下光束发散角和跟瞄误差比值与发射功率的关系

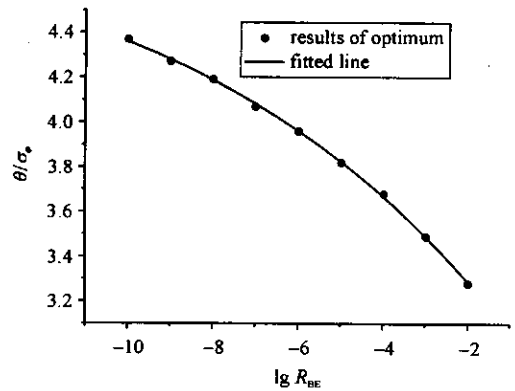


Fig. 8 R_{BE} vs optimum ratio of beam divergence angle to pointing error

图 8 误码率与光束发散角和跟瞄误差最优比值的关

性能的影响,建立了更符合实际情况的星地激光通信链路模型。在此基础上,对上行和下行链路中光束发散角与系统跟瞄误差之比的优化选择问题进行了研究。结果表明,对于上行链路,均存在一个最佳的发散角与系统跟瞄误差比值,使得链路余量最大。同时给出了不同系统误码率要求下的上行光束发散角与跟瞄误差最佳比值的经验公式。对于下行链路,在满足不同误码率要求下均存在一个光束发散角与跟瞄误差的最佳比值,使得下行发射光功率的需求最小。进而给出下行光束发散角与跟瞄误差最佳比值的经验公式。从而进一步完善了星地激光通信的理论基础,为实际系统的优化设计提供理论依据。需要说明的是,文中给出的经验公式是在一般的大气模型下得到的,因此在实际设计中应根据具体大气条件作适当的修正。

参考文献:

- [1] Araki K, Arimoto Y, Shikatani M, et al. Performance evaluation of laser communication equipment on board the ETS-VI satellite[C]//Proc of SPIE. 1996, **2699**: 52-60.
- [2] Romba J, Sodnik Z, Reyes M, et al. ESA's bidirectional space-to-ground laser communication experiments[C]//Proc of SPIE. 2004, **5550**: 287-298.
- [3] Toyoshima M, Yamakawa S, Yamawaki T, et al. Ground-to-satellite optical link between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS[C]//Proc of SPIE. 2004, **5338**: 1-15.
- [4] Kim I I, Riley B, Wong N M, et al. Lessons learned from the STRV-2 latellite-to-ground lasercom experiment[C]//Proc of SPIE. 2001, **4272**: 1-15.
- [5] Vladimir V N, Rahul K. Performance of laser communication uplinks and downlinks in the presence of pointing errors and atmospheric distortions[C]//Proc of SPIE. 2005, **5712**: 37-45.
- [6] Toyoshima M, Arki K. Far-field pattern measurement of an onboard laser transmitter by use of a space-to-ground optical link[J]. *Appl Opt*, 1998, **37**(10): 1720-1729.
- [7] Toyoshima M, Araki K. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the Engineering Test Satellite VI using laser communication equipment[J]. *Opt Eng*, 2001, **40**(5): 827-832.
- [8] Shelton J D. Turbulence-induced scintillation on Gaussian-beam waves: theoretical predictions and observation from a laser-illuminated satellite[J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, **12**(10): 2172-2181.
- [9] Andrews L C, Phillips R L, Yu P T. Optical scintillations and fade statistics for a satellite communication system[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(33): 7744-7746.
- [10] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random median[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998: 73-78.
- [11] Gagliardi R, Karp S. Optical telecommunications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998.
- [12] Toyoshima M, Yamakawa S, Yamawaki T, et al. Long-term statistics of laser beam propagation in on optical ground-to-geostationary satellite communications link[J]. *IEEE Tansactions on Antennas and Propagation*, 2005, **53**(2): 842-850.
- [13] Beland R R. The infrared and electro-optical systems handbook[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 221-224.

Optimum ratio of beam divergence angle to pointing error for satellite-ground laser link

MA Jing, PAN Feng, TAN Li-ying

(*National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: The transmitter beam is Gaussian for real satellite-ground laser communication system. The pointing jitter and atmospheric scintillation are the main noise sources for satellite-ground laser link. The channel model of satellite-ground laser communication link is presented in presence of the effects of atmospheric scintillation and pointing jitter on the quality of communication. The problem of the optimum ratio of beam divergence angle to pointing error is analyzed. The results indicate that there is an optimum ratio of beam divergence angle to pointing error that maximizes the link margin for different requirement of bit error rate for uplink, and there is an optimum ratio of beam divergence angle to pointing error that minimizes the required transmitter power to satisfy the bit error rate. By the optimization method and the least-squares fit, an experimental formula of the optimum ratio of beam divergence angle and pointing error and bit error rate is proposed for satellite-ground laser link.

Key words: Satellite-ground laser communication; Beam divergence angle; Bit error rate; Atmospheric scintillation; Pointing error