

湍流大气中激光通信系统接收光功率的优化研究

高铎瑞^{1,2} 付强¹ 赵昭²

¹长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 以部分相干高斯-谢尔模型(GSM)光束为例,对湍流引起的漂移方差和扩展角进行模拟,综合考虑由光束漂移引起的瞄准误差和光束扩展引起的接收光功率密度的整体下降,对激光通信链路中接收端光功率进行数值计算和分析,找出激光通信系统中最佳发射光束的参数。研究表明,湍流大气中激光通信系统最佳发射光束的参数与光束的束腰半径、空间相干长度、波长、传播距离和湍流强度有关。部分相干GSM光束接收端光功率随着波长、光束束腰、空间相干长度和传输距离的变化存在一最优值。

关键词 激光通信;功率损耗;大气湍流;光束漂移;光束扩展

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.050601

Optimal Selection of Receiving Optical Power in Laser Communication System in Atmospheric Turbulence

Gao Duorui^{1,2} Fu Qiang¹ Zhao Zhao²

¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Space-Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Taking partially coherent Gaussian-Schell model (GSM) beam as an example to get the best launch parameters of laser communication system, considering overall decline of the alignment adaption loss caused by beam drift and decrease of receiving optical power density induced by beam expanding, some numerical calculation and analysis on the receiving power in the laser link are necessary. Results represent that in atmospheric turbulence the best launch parameters of laser communication system are related to beam waist radius, spatial coherent length, wavelength, propagation distance and turbulence intensity. There exists an optimal value when the receiving power density of the partially coherent GSM beam changes with the variance of the wavelength, beam width, degree of coherence and transmission distance.

Key words laser communication; power loss; atmosphere turbulence; beam drift; beam expanding

OCIS codes 060.2605; 010.1330; 010.3310

1 引言

光束在大气湍流中传输时,光束的漂移和扩展会导致通信两端对准困难,同时降低接收端接收平面上的能量密度。激光大气传输湍流效应导致的光束扩展与激光通过湍流大气传输后的功率下降紧密关联,是激光大气传输研究和实际工程应用的重要问题^[1-7],特别是在窄光束远距离的星地链路中,漂移和扩展效应甚至会导致通信无法进行。因此,为了保证星地链路能够建立,必须对漂移和扩展效应进行研究。Gbur等^[8]给出了部分相干光受到大气湍流影响的条件。Shira等^[9]以高斯-谢尔模型(GSM)光束为例,用相干叠加方法研究了

收稿日期: 2013-09-22; 收到修改稿日期: 2013-11-06; 网络出版日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(60677009)、国防重点基础科研项目

作者简介: 高铎瑞(1989-),男,硕士研究生,主要从事激光大气传输特性及光学系统设计方面的研究。

E-mail: gaoduorui@126.com

导师简介: 姜会林(1945-),男,教授,博士生导师,主要从事光学系统设计、光电检测技术和激光通信技术等方面的研究。

E-mail: hljiang@cust.edu.cn

部分空间相干光在湍流大气中的光束扩展问题。范承玉^[10]利用 Mellin 变换技术,给出了弱起伏条件下高斯准直光束扩展半径和漂移角方差的表达式。韦宏艳等^[11]根据推广 Huygens-Fresnel 原理推导斜程链路的波束扩展半径与高度的关系。以上工作涉及到部分相干光的光束扩展和漂移问题。

本文根据部分相干 GSM 光束漂移方差和角扩展表达式,与激光通信链路传输方程结合,在只考虑湍流作用中光束扩展和漂移的影响的情况下,通过数值模拟定量研究了部分相干光束通过大气湍流后的接收功率。对光束参数进行了优化选取,并对其结果给出了合理的物理解释。

2 光束漂移

由于湍流的影响,大气折射率梯度随机变化,使得光束整体偏折,统计平均的中心位置发生随机跳动,导致接收机探测器接收到的信号功率减弱。强湍流环境下,光束可能分裂成多束较细的光束,这种情况极易造成系统通信中断。

GSM 光束通过湍流大气后的光强为^[9]

$$I(\rho, L) = \frac{A}{\Delta^2(L)} \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w_0^2 \Delta^2(L)}\right), \quad (1)$$

式中 A 为常数, $\rho = (\rho_x, \rho_y)$ 为源平面的二维坐标矢量, w_0 为发射光束初始半径, L 为传输距离。在 Rytov 相位结构函数二次近似下

$$\Delta^2(L) = 1 + \frac{4}{w_0^2 k^2} \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2}\right) L^2 + \frac{8(0.545 C_n^2)^{6/5} k^{2/5} L^{16/5}}{w_0^2}, \quad (2)$$

式中 σ_0 表示 $L=0$ 面上的空间相干长度(即束腰处的横向相干长度), $k = 2\pi/\lambda$ 是光波波数, C_n^2 是大气折射率结构函数(表征湍流的强弱)。

质心的漂移方差为

$$\sigma_\rho^2 = \frac{\iint (\rho_1 \cdot \rho_2) I(\rho_1) I(\rho_2) d\rho_1 d\rho_2}{\left[\int I(\rho) d\rho\right]^2}. \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式,可以得出光束的漂移方差。图1显示了光束漂移方差 σ_ρ^2 随传输距离 L 的变化关系,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $\sigma_0 = 2 \text{ cm}$, $w_0 = 5 \text{ cm}$ 。随着传输距离 L 的增加,漂移方差 σ_ρ^2 逐渐增大,弱湍流情况下漂移方差增加较为缓慢,湍流强度越强,漂移方差随距离增加得越快。

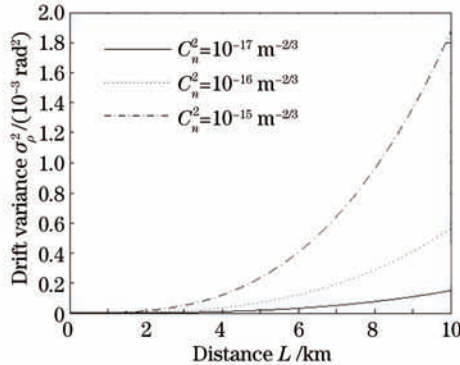


图1 漂移方差 σ_ρ^2 随传输距离 L 的变化

Fig.1 Variation of drift variance σ_ρ^2 with distance L

3 光束扩展

光束扩展由衍射和湍流漩涡的扩展引起,光斑面积的变化造成光束展宽大于衍射展宽。光束扩展降低了光束截面内的功率密度,使接收机接收到的光功率降低,恶化了系统性能。

在 Rytov 相位结构函数二次近似下,部分相干 GSM 光束在湍流大气中的角扩展表达式为^[12]

$$\theta_{\text{GSM turb}} = \sqrt{\frac{2}{k^2} \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} \right) + 4(0.545 C_n^2)^{6/5} k^{2/5} L^{6/5}}, \quad (4)$$

式中右边根号下第一项表示部分相干 GSM 光束在自由空间中的扩展角,与空间相干长度 σ_0 、束腰宽度 w_0 和波长 λ 有关,但不随传输距离 L 变化;第二项表示大气湍流引起的角扩展,与折射率结构常数 C_n^2 、波长 λ 和传输距离 L 有关,这与自由空间的角扩展不同。当传输距离足够长时,湍流引起的角扩展将起主要作用。

令 $C_n^2 = 0$, 得到 GSM 光束在自由空间的角扩展公式

$$\theta_{\text{GSM free}} = \sqrt{\frac{2}{k^2} \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} \right)}. \quad (5)$$

为了便于直观和定量地描述光束抗拒湍流扩展的能力,引入相对角扩展

$$\frac{\theta_{\text{GSM turb}}}{\theta_{\text{GSM free}}} = \sqrt{1 + \frac{4(0.545 C_n^2)^{6/5} k^{2/5} L^{6/5}}{\frac{2}{k^2} \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} \right)}}, \quad (6)$$

用以定量比较光束参数变化时在湍流大气中光束角扩展受湍流影响的大小。

图 2 给出了在不同传播距离下,部分相干光束和完全相干光束角扩展 θ 随束腰半径 w_0 的变化情况,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $\sigma_0 = 2 \text{ cm}$, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。由图 2 曲线可知,当 $w_0 < 1 \text{ cm}$ 时,光束的角扩展 θ 随光束初始发射半径 w_0 的增加而急剧下降;而当 $w_0 > 1 \text{ cm}$ 时,随着光束初始发射半径 w_0 的增加,光束扩展角 θ 基本保持不变。在同一初始发射光束半径 w_0 条件下,光束传播距离 L 越大,光束扩展角 θ 越大。并且部分相干光经湍流后的扩展角比完全相干光小,表明部分相干光受大气湍流的影响小于完全相干光。

图 3 比较了 GSM 光束在大气湍流和自由空间中角扩展和相对角扩展随束腰的变化,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $\sigma_0 = 2 \text{ cm}$, $L = 25 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。由图 3 可以看出束腰半径 w_0 越大,相对角扩展越大,说明束腰宽度越大,光束扩展角受湍流大气的影响越大。

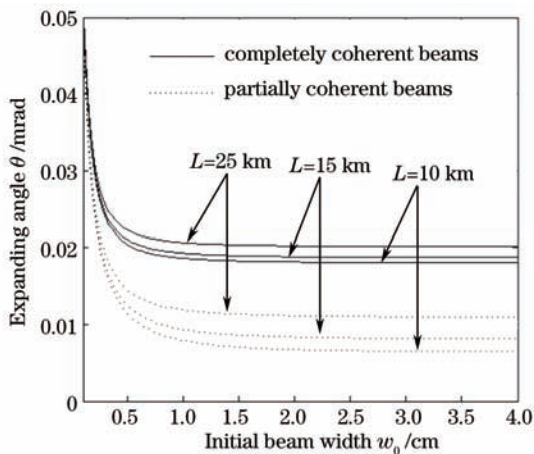


图 2 光束扩展角 θ 随束腰半径 w_0 的变化

Fig.2 Variation of beam expanding angle θ with beam width w_0

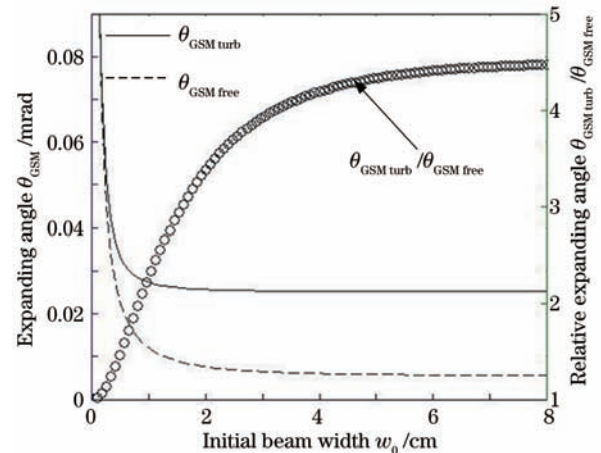


图 3 角扩展 θ_{GSM} 及相对角扩展 $\theta_{\text{GSM turb}}/\theta_{\text{GSM free}}$ 随束腰半径 w_0 的变化

Fig.3 Variations of expanding angle θ_{GSM} and relative expanding angle $\theta_{\text{GSM turb}}/\theta_{\text{GSM free}}$ with beam width w_0

图 4 展示了不同湍流强度下,部分相干光角扩展 θ 随空间相干长度 σ_0 的变化,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $w_0 = 5 \text{ cm}$, $L = 25 \text{ km}$ 。由图 4 可知,随着 σ_0 的增加,部分相干 GSM 光束的扩展角减小,相对角扩展 $\theta_{\text{GSM turb}}/\theta_{\text{GSM free}}$ 增大,表明部分相干 GSM 光束的角扩展受湍流大气的影响增大。在同一 σ_0 下,湍流强度增加,光束扩展角增大,在自由空间中 ($C_n^2 = 0$),光束的扩展角最小,表明光束的空间相干长度越大、湍流越强,角扩展越明显。

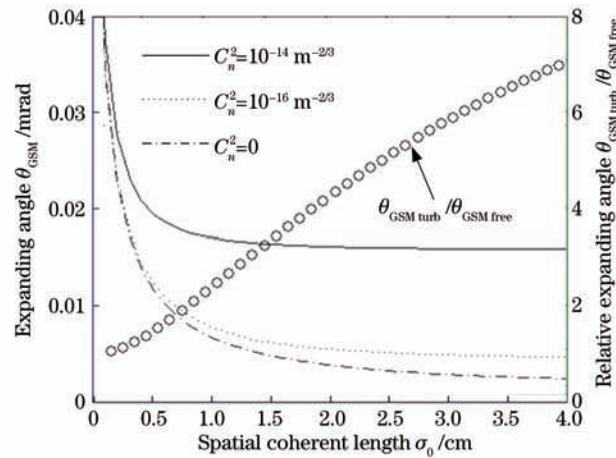


图4 部分相干光角扩展随空间相干长度 σ_0 的变化

Fig.4 Variation of expanding angle of partially coherent beam with the spatial coherent length σ_0

4 接收光功率

远场通信光接收单元所接收的光功率与扩展角和漂移引起的瞄准误差关系式为^[13]

$$P_r \propto \exp\left[-8\left(\frac{\sigma_p^2}{\theta}\right)^2\right] \times \frac{1}{\theta^2} \left[\frac{2J_1\left(\frac{2.44\pi\sigma_p^2}{\theta}\right)}{\frac{2.44\pi\sigma_p^2}{\theta}} \right]^2, \quad (7)$$

式中右边第一项的含义是光束漂移产生的瞄准误差所引起的光功率下降,第二项表示远场激光光斑功率分布与扩展角和瞄准误差的关系。

图5为利用(7)式进行数值模拟所得结果。计算所取参数为： $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $w_0 = 5 \text{ cm}$, $L = 5 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 。由图5可以看出,随着瞄准误差 σ_p^2 的增大,接收光功率 P_r 严重下降。空间相干长度的增加不一定使接收光功率下降, σ_0 为 8 cm 时的接收功率反而大于 σ_0 为 2 cm 和 5 cm 时的情况,说明综合考虑时空间相干长度 σ_0 并不是越小越好,它存在一个最优值。

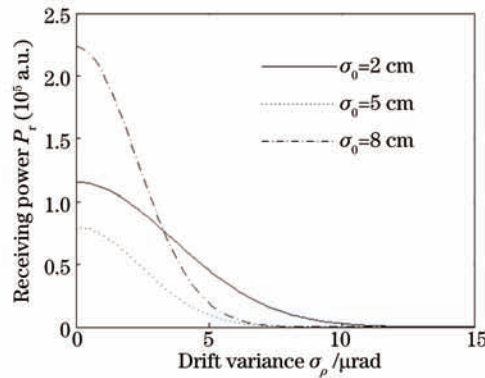


图5 接收光功率 P_r 随瞄准误差 σ_p^2 的变化

Fig.5 Variation of receiving power P_r with drift variance σ_p^2

5 数值计算结果与分析

图6展示了接收光功率 P_r 随束腰半径 w_0 的变化,计算参数为： $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$, $L = 5 \text{ km}$, $\sigma_0 = 10 \text{ cm}$ 。由图6可以看出,当束腰半径为 2.7 cm 时接收光功率达到最大值,说明通信激光的束腰半径存在一个最佳取值。根据不同的初始条件确定光束束腰半径,可以使接收到的光功率损耗减小。

图7显示了部分相干 GSM 光束接收光功率 P_r 随空间相干长度 σ_0 的变化,计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$, $L = 5 \text{km}$ 。由图7可以看出,在 σ_0 为 3.7 cm 时接收光功率达到最优值,且不同束宽对应最大功率的 σ_0 值大致相同。

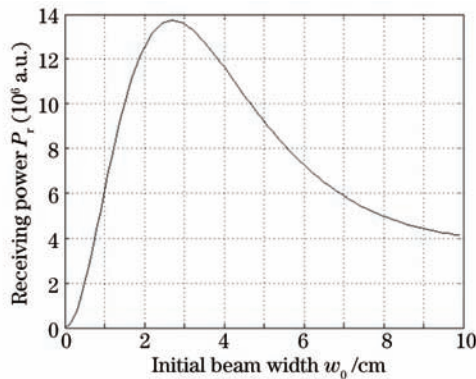


图6 接收光功率 P_r 随束腰半径 w_0 的变化

Fig.6 Variation of receiving power P_r with beam width w_0

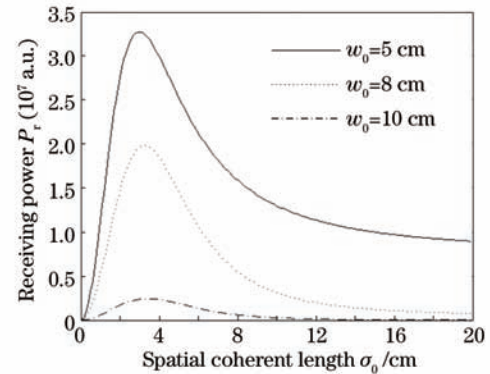


图7 接收光功率 P_r 随空间相干长度 σ_0 的变化

Fig.7 Variation of receiving power P_r with the spatial coherent length σ_0

图8展示了接收光功率 P_r 随通信波长 λ 的变化情况,计算参数为 $C_n^2 = 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$, $L = 5 \text{km}$ 。从图8可以看出,波长 λ 有一最优值,随光束束宽 w_0 和空间相干长度 σ_0 的不同波长的最优值也不同。束腰宽度增大,接收功率也增大,说明此时光束漂移引起的功率损耗高于接收端的功率密度整体下降的损耗。随着 σ_0 的增加,波长最优值增加,但整体接收功率下降。

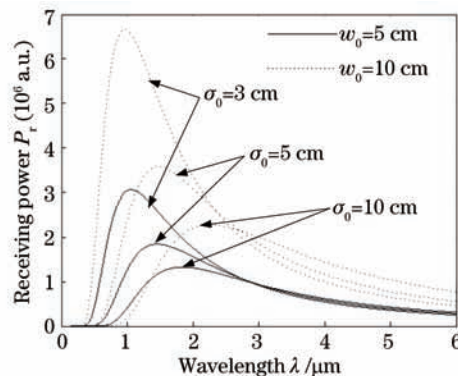


图8 接收光功率 P_r 随波长 λ 的变化

Fig.8 Variation of receiving power P_r with wavelength λ

6 结 论

根据部分相干 GSM 光束漂移方差和角扩展表达式,对漂移方差和扩展角度进行模拟,并结合激光通信链路传输方程,在只考虑由光束漂移引起的瞄准误差和光束扩展引起的接收端功率密度整体下降的基础上,定量地对激光通信系统接收到的光功率进行分析。研究表明,部分相干 GSM 光束接收端的光功率随空间相干长度、光束束腰半径、波长和传播距离的变化而变化。激光大气通信系统存在最佳发射光束参数,其取值与光束的束腰半径、空间相干长度、波长、传播距离和湍流强度有关,通过适当地调节通信激光的初始参数,可以使接收端光功率达到一最优值。

参 考 文 献

- 1 Tatarskii. Wave Propagation in a Turbulent Medium [M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong, et al. Transl.. Beijing: Science Press, 1978.
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩,宋正方,曾宗泳等译. 北京: 科学出版社, 1978.
- 2 Dan Youquan, Zhang Bin. Beam propagation factor of partially coherent flat-topped beams in a turbulent atmosphere

- [J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(3): 426–434.
- 3 Wang Yingjian. Some Study on the Laser Propagation in the Atmosphere and Its Phase Compensation [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996.
王英俭. 激光大气传输及其相位补偿的若干问题探讨[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 1996.
- 4 Guo Jing, Zhang He, Wang Xiaofeng. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0113001.
郭婧, 张合, 王晓峰. 激光引信在降雨中的光束扩展特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0113001.
- 5 Zhang Xiaoxin, Dan Youquan, Zhang Bin. Spreading of partially coherent flat-topped beams propagating along a slant path in turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1201001.
张晓欣, 但有全, 张彬. 湍流大气中斜程传输部分相干光的光束扩展[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1201001.
- 6 Chen Feinan, Chen Yanru, Zhao Qi, *et al.*. Change of propagation quality factor of partially coherence Hermite-Gaussian beams traveling through oceanic turbulence [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0413002.
陈斐楠, 陈延如, 赵琦, 等. 部分相干厄米高斯光束在海洋湍流中光束传输质量的变化[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0413002.
- 7 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing, *et al.*. Propagation of truncated coherent cosh-Gaussian beam in non-Kolmogorov turbulence [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0502008.
陶汝茂, 司磊, 马阎星, 等. 截断部分相干双曲余弦高斯光束在非Kolmogorov湍流中的传输[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0502008.
- 8 Gbur G, Wolf E. Spreading of partially coherent beams in random media [J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(8): 1592–1598.
- 9 Shira T, Dogariu A, Wolf E. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence [J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20(6): 1094–1102.
- 10 Fan Chengyu. The effect of Gaussian-beam wave in slant propagation on atmospheric turbulence [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 1999, 16(6): 519–525.
范承玉. 高斯束状波斜程传输的大气湍流效应[J]. *量子电子学报*, 1999, 16(6): 519–525.
- 11 Wei Hongyan, Wu Zhensen. Spreading and wander of laser beam propagation on slant path through atmospheric turbulence [J]. *Chinese J Radio Science*, 2008, 23(4): 611–615.
韦宏艳, 吴振森. 大气湍流中激光波束斜程传输的展宽、漂移特性[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(4): 611–615.
- 12 Xiang Ningjing, Wang Mingjun, Wang Tairong. Average intensity and spreading of a partially coherent Gaussian Schell model beam propagation through atmospheric turbulence [J]. *Laser Journal*, 2012, 33(5): 4–6.
向宁静, 王明军, 王太荣. 部分相干高斯-谢尔光束在大气湍流中的平均强度与展宽[J]. *激光杂志*, 2012, 33(5): 4–6.
- 13 Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong. *The Technologies and Systems of Space Laser Communication* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 78–81.
姜会林, 佟首峰, 张立中. *空间激光通信技术与系统*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 78–81.