

瞄准轴和发射轴平行度误差对探测率的影响

陈玉丹¹, 周冰¹, 钱仙妹², 殷建玲¹, 王元铂¹, 谢大兵³

(1. 军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031; 3. 军械技术研究所, 河北 石家庄 050003)

摘要:分析了在大气湍流影响下,目标激光光斑的功率密度及质心的分布情况,说明了目标激光光斑的功率密度分布的随机性。分别从目标大小不小于或者小于激光光斑两种情况建立了激光测距装备接收功率模型。在此基础上,重点讨论了发射轴和瞄准轴的平行度误差对探测率的影响,给出了探测率随平行度误差变化的曲线,得出了探测率只与平行度误差的大小有关,与偏差的方向无关的结论。

关键词:平行度误差;探测率;大气湍流;激光测距装备

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.06.004

Effect of deviation between sighting axis and receiving axis on detecting probability

CHEN Yu-dan¹, ZHOU Bing¹, QIAN Xian-mei², YIN Jian-ling¹, WANG Yuan-bo¹, XIE Da-bing³

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China

2. Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy

of Sciences, Hefei 230031, China; 3. Ordnance Technology Research Institute, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract:Power-density distribution and the centroid distribution of target laser sparkle in turbulent atmosphere are analyzed, which explains the randomness of power-density distribution. The receiving models of laser rangefinders with two conditions that the area of the target is not smaller or smaller than the area of the sparkle are built respectively. Then, the effect of deviation between sighting axis and receiving axis on detecting probability is discussed. The curve of detecting probability varying with deviation between sighting axis and receiving axis is showed. The results show that the detecting probability is only related with the size of deviation and isn't related with direction of deviation.

Key words: deviation between axis of sighting and receiving; detecting probability; atmosphere turbulent; laser rangefinders

1 引言

激光测距装备作为激光装备中的元老,在现代武器控制系统中发挥着越来越重要的地位。当激光测距装备的瞄准光轴、发射光轴和接收光轴之间出现偏差时,会使接收系统接收到的能量降低,从而使激光测距装备的探测率下降,严重时甚至无法进行测距。文献[1]、[2]在不考虑大气湍流的条件下分

析了三轴偏差对激光测距装备测距能力的影响,其方法和结论对研究三轴偏差对测距装备测距能力的影响具有重要意义。然而事实上,当激光在大气中传输时,大气不仅会对激光能量造成衰减,还会引起光束漂移、扩展和光强起伏等^[3]。因此,本文主要研究在大气湍流的影响下,三轴偏差对激光测距装备探测率的影响。

限于篇幅,本文假设激光瞄准光轴和接收光轴平行,只讨论瞄准轴和激光发射光轴之间的平行度对激光测距装备探测率的影响。

2 目标的激光光斑功率密度分布

激光在大气中的传输问题一直是人们研究的重点,而由于理论研究的局限性和实验条件的不可控性,数值模拟计算成为研究激光大气传输的一个有效手段^[4-6]。本文采用数值模拟计算的方法,对激光在大气中的传输特性进行分析,方法的具体步骤参考文献[6],这里只给出与本文研究相关的结论。

以高斯光束为例,当光束在真空中传播一定距离后,其光斑功率密度分布仍旧满足高斯分布。当光束在湍流大气中传输,在其他模拟条件相同的情况下,当大气折射率结构常数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 传输距离分别为 1 km 和 3 km 时,光斑的功率密度分布如图 1 所示。

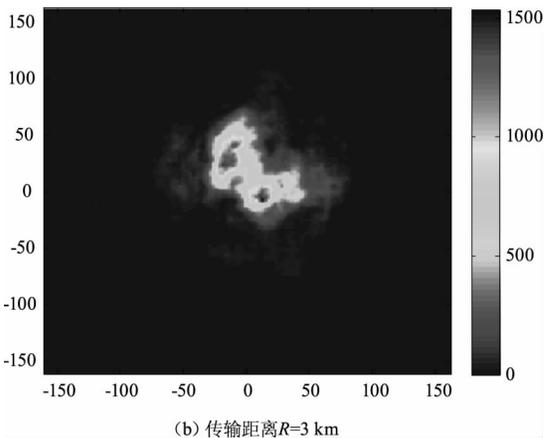
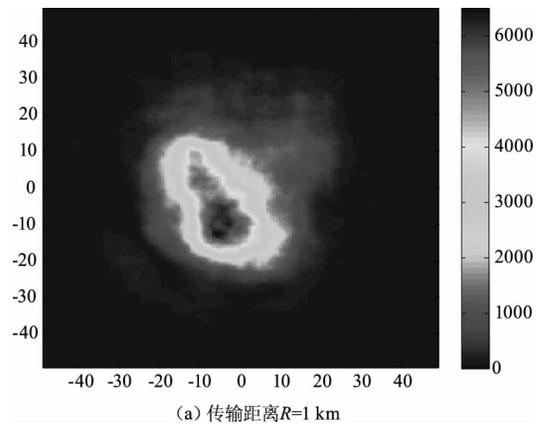


图 1 光斑功率密度分布 ($C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)

Fig. 1 Power-density distribution ($C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)

由图 1 可看出,由于大气湍流的影响,光斑功率密度分布不再符合高斯分布,而是出现了质心漂移,扩展等现象,光斑的质心已经偏离了中心,不完全在 (0,0) 的位置上,而且通过多次数值模拟,发现其分布呈现随机性和不规则性。且随着大气折射率结构

常数的增加,也就是湍流强度的增大,和传播距离的增加,光斑的破碎和漂移更加的严重,如图 2 所示。图 2(b)中,光斑已经破碎成许多的小斑块。所以说经过大气中传输后的高斯光束,不能再用高斯模型进行描述,只能通过数值模拟的方法来获取目标上的光斑功率密度分布。

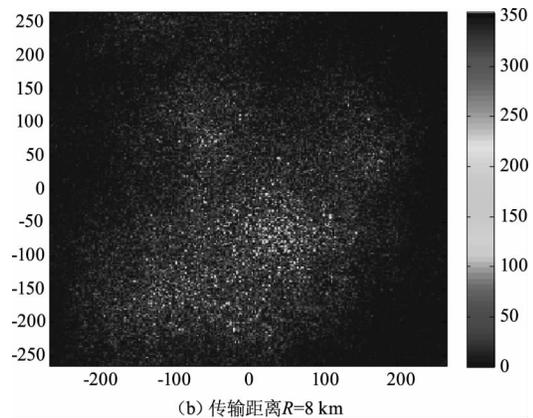
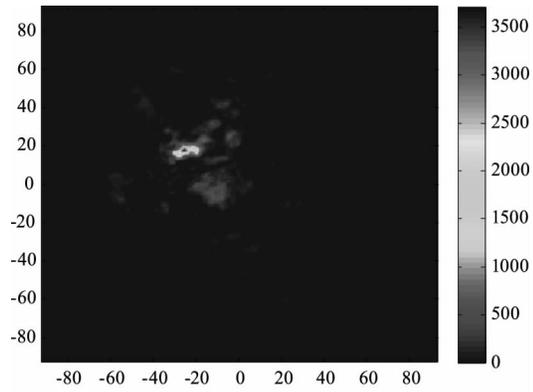


图 2 光斑功率密度分布 ($C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$)

Fig. 2 Power-density distribution ($C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$)

3 激光测距装备接收功率模型

假设漫反射目标接收到的功率为 P , 推导可得测距装备接收系统接收到的功率为:

$$P_r = \frac{P \rho \cos \phi A_r e^{-\alpha R} K_r}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中, P 为目标接收功率; ρ 为目标漫反射系数; A_r 为接收孔径面积; ϕ 为目标表面法线与激光接收轴夹角; K_r 为接收光学系统的透过系数; α 为大气衰减系数; R 为目标距离; P_r 为测距装备接收系统探测功率。

当接收系统接收到的功率大于探测器的探测阈值, 即 $P_r > P_{\min}$, 测距装备可有效测到距离, 否则, 无法测距。因此, 测距装备的探测率与接收系统所接收到的功率相关, 而如果要知道测距装备在一定距离 R 上所接收到的功率, 由式(1)可知, ρ, A_r, A_s 已知, ϕ 在瞄准轴与接收轴平行的条件下, 一般使

目标表面法线与激光接收轴垂直,也就是 $\phi = 0^\circ$, 大气衰减系数 α 可根据气候条件,由通用辐射大气软件计算出来,这样,要计算 P_r 还必须知道目标上的接收功率 P ,目标上接收到的功率与目标和光斑的相对大小有关。

(1) 目标大小大于等于光斑

当目标大小大于等于光斑,且接收视场覆盖整个光斑时,如图3所示,可以认为光斑上的能量全部被接收系统所探测。这时,只考虑大气对激光能量的衰减,因此,式(1)中的目标接收功率 P 为:

$$P = P_0 e^{-\alpha R} \tag{2}$$

其中, P_0 为激光发射窗口前的功率。

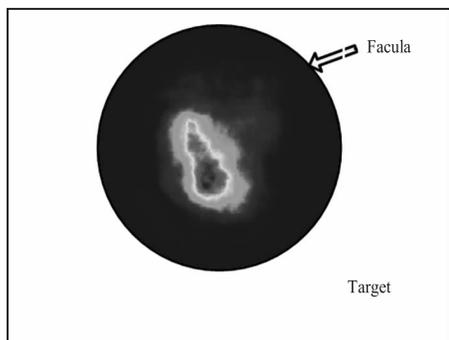


图3 目标大小大于等于光斑大小示意图
Fig.3 Area of target larger than facula

(2) 目标大小小于光斑

当目标大小小于光斑时,这时目标接收到的功率与目标所处的位置有关系。如图4所示,由于光斑的不均匀性,很显然,目标位于位置1和位置2所接收到的功率 P 是不一样的,而且由于光斑的不规则性,很难用解析式进行描述,本文采用数据模拟的方式计算目标所接收到的功率大小。假设 (x,y) 点的功率密度值为 $I(x,y)$,则大小为 $a \times b$ 的目标所接收到的功率为:

$$P = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} I(x,y) dx dy \tag{3}$$

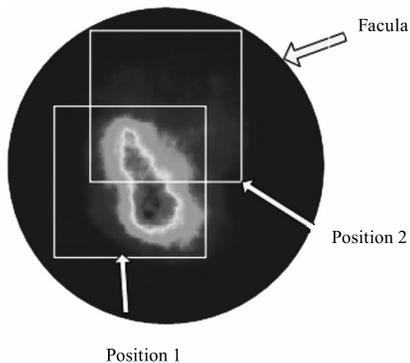


图4 目标大小小于光斑大小示意图
Fig.4 Area of target smaller than facula

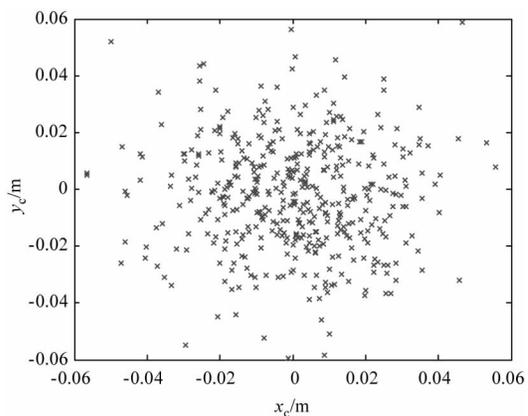
4 发射轴和瞄准轴的平行度误差对探测率的影响

由于大多数激光测距装备在检验最大测程时所用靶板的大小只有该距离处激光光斑直径的 $1/3 \sim 2/3$ ^[7],因此,目标面积小于激光光斑面积,公式(1)中的目标接收功率 P 采用公式(3)进行求解。由公式(3)可知,目标接收功率 P 与 (x,y) 处的功率密度值 $I(x,y)$ 有关,受大气湍流的影响,功率密度值 $I(x,y)$ 由前面分析可知,分布是不规律而且在多次的数值模拟过程中,其结果是不相同的。目标面上光斑功率分布对于目标接收功率的大小有很大的影响,假如目标正好位于激光光斑功率密度分布整体较高的位置处,如图4中的 position1,这时目标所接收的功率要远远大于目标位于 position2 处所接收到的功率,那么在同样的距离处,这时的探测率也要大于 position2 处的探测率。为了对大气湍流中的激光光斑的功率密度分布的规律进行研究,文章采用光斑的质心来表示功率分布的平衡点,可用下式表示^[8]:

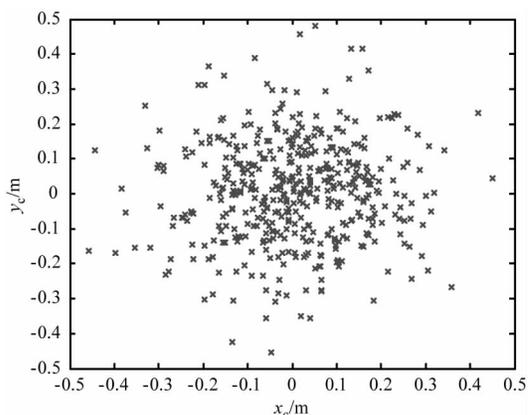
$$\begin{cases} x_c = \frac{\iint xI(x,y) dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \\ y_c = \frac{\iint yI(x,y) dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \end{cases} \tag{4}$$

式中, (x_c, y_c) 表示光斑质心坐标。

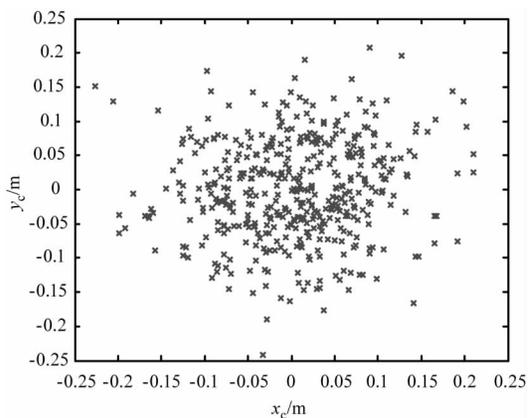
文章采用数值模拟的方式来求解光斑的质心位置,当大气湍流的内外尺度分别为 1 mm 和 1 m 时,在中等起伏条件下,模拟计算多次,其结果如图5(a)、(b)所示。从图中可以看出,虽然在每次的模拟中,光斑质心漂移的大小不尽相同,但是基本符合以中心点 $(0,0)$ 为原点的正态分布,而且这种趋势在不同传输距离时也是相同的。图5(a)传输距离是 1 km,图5(b)传输距离是 3 km,虽然随着传输距离的增加,质心的偏移量也增大,但是其质心的分布是基本一致的。图5(c)是在弱起伏条件下,当传输距离为 6 km 时的模拟结果,图5(d)是在强起伏条件下,传输距离为 8 km 的模拟结果。从图中可看出,随着湍流强度的增加,质心的偏移量也在增大,但是其总体的分布趋势也是基本符合以原点 $(0,0)$ 为中心的正态分布。因此,可以预测,虽然每次质心的位置不一致,但是从概率上来讲,当目标位于光斑中心时,其探测率应该较大。



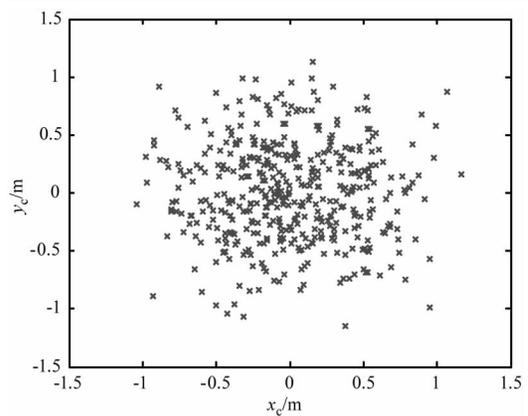
(a) 传输距离 $R=1$ km



(b) 传输距离 $R=3$ km



(c) 传输距离 $R=6$ km



(d) 传输距离 $R=8$ km

图 5 质心的分布图

Fig. 5 Distribution of centroid

当瞄准轴与发射轴平行时,瞄准轴瞄准的是目标的中心,同时也是发射光斑的中心,但是当瞄准轴和发射轴有了大小为 ω 的平行度误差,光斑中心相对于目标中心产生了 $r = \omega R$ 的位置偏差,如图 6 所示。为讨论方便我们假设是在 y 轴方向上产生了偏差,光斑全部覆盖着目标,以光斑的中心为圆心,建立直角坐标系,如图 7 所示。

则公式(3)可表示为:

$$P = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} I(x, y - \alpha R) dx dy \quad (5)$$

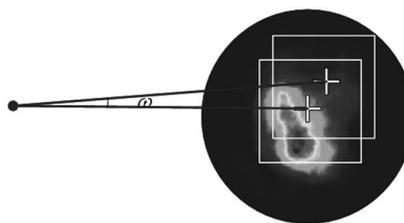


图 6 位置偏差

Fig. 6 Position deviation

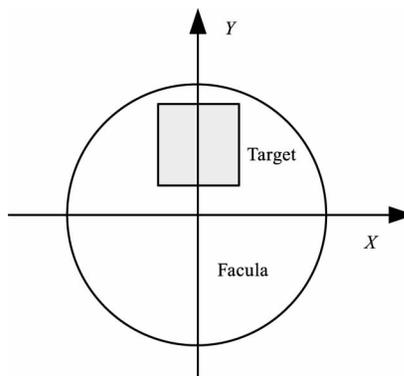


图 7 目标与光斑的相对位置关系

Fig. 7 Position between target and facula

将 $I(x, y)$ 值代入式(5) 计算得到目标接收功率 P_r , 将功率 P 代入式(1), 求出 P_r , 模拟多次, 得到 $P_r > P_{\min}$ 的次数, 从而求出可探测率。当传输距离为 3 km, 激光初始半径为 25 mm, 激光发散角为 0.5 mrad, 内、外尺度分别为 1 mm、1m, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$, 求出探测率与平行度误差角 ω 之间的关系, 如图 8 所示。当激光装备瞄准轴和发射轴平行时, 探测率为 96%, 随着平行度误差角的增加, 探测率逐渐减少, 在平行度误差角 ω 小于 0.06 mrad 时, 探测率的变化趋势是比较平缓的, 不平行性对探测率的影响较小。当平行度误差角 ω 在 0.07 ~ 0.2 mrad 时, 探测率下降趋势较为明显, 到了 0.2 mrad 探测率基本处于 10% 以下。从图中可看出, 在文中的条件下, 如果要保证探测率在 80% 以上, 激光测距装备的瞄准轴和发射轴的平行度误差角不能超过 0.08 mrad。

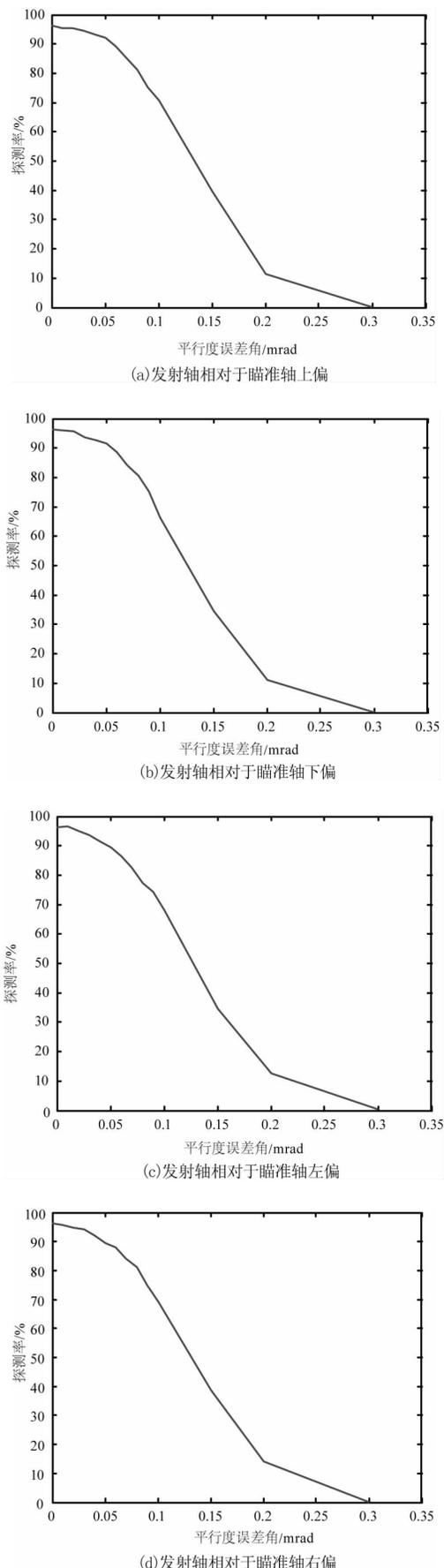


图8 探测率随平行度误差角的变化关系

Fig. 8 Relationship between Detecting probability and deviation of axis

图8(a)、(b)、(c)、(d)分别是在发射轴相对于瞄准轴在X、Y轴系中上偏、下偏、左偏、右偏时探测率与平行度误差角的关系。从图中可看出,当发射轴相对于瞄准轴在上偏、下偏、左偏、右偏的条件下,探测率随平行度误差角的变化规律基本是一致的,可以得出结论,激光测距装备的探测率与平行度误差角的大小有关,而偏离的方向影响不大。

5 结论

本文主要讨论在大气湍流影响下,当激光测距装备的瞄准轴和发射轴之间出现平行度误差后,对装备探测率的影响,可为装备在设计阶段和维修时,设定平行度误差的范围提供思路。文章研究前提是假定激光测距装备瞄准光轴和接收光轴平行,事实上接收光轴和瞄准光轴的平行性也会对探测率造成的一定的影响,下一步的工作主要研究接收光轴和瞄准光轴的平行性对探测率的影响。

参考文献:

[1] ZHANG Chu, SHEN Hongbing, ZHOU Bing, et al. Study on evaluating maximum range of laser range finder[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(12): 1196 - 1198. (in Chinese)
张维, 沈洪斌, 周冰, 等. 激光测距机最大测程评估方法研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1196 - 1198.

[2] SU Meikai. Effect on the range ability of laser range finder by optics axis error[J]. Laser Journal, 2001, 22(3): 39 - 40 (in Chinese)
苏美开. 光轴偏差对激光测距机测距能力的影响[J]. 激光杂志, 2001, 22(3): 39 - 40.

[3] RAO Ruizhong. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science press, 2012: 370 - 374. (in Chinese)
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 370 - 374.

[4] QIAN Xianmei, ZHU Wenyue, RAO Ruizhong. Numerical simulation of turbulent effects of laser propagation along a ground-space slant atmospheric path[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 787 - 792. (in Chinese)
钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 地空激光大气斜程传输湍流效应的数值模拟分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 787 - 792.

[5] QIAN Xianmei, RAO Ruizhong. Spatial distribution of gaussian-beam scintillation in atmosphere by numerical

- simulation[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(3): 320-324. (in Chinese)
钱仙妹, 饶瑞中. 高斯光束大气闪烁空间分布的数值模拟研究[J]. 量子电子学报, 2006, 23(3): 320-324.
- [6] ZHU Wenyue, HUANG Yinbo, QIAN Xianmei, et al. Code for laser atmospheric propagation and its applications[J]. Journal of atmospheric and environmental optics, 2007, 2(6): 451-457. (in Chinese)
朱文越, 黄印博, 钱仙妹, 等. 激光大气传输模拟程序 CLAP 及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 451-457.
- [7] ZHANG Chu, SHEN Hongbin, XU Chunmei. Energy distribution of ranging laser and effect on the correction of optical axis[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10): 971-973. (in Chinese)
张雏, 沈洪斌, 徐春梅, 等. 测距激光的能量分布及其对光轴校正的影响[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 971-973.
- [8] Yahui Yan, Bingqi Liu, Bing Zhou, et al. Characteristic size of a collimated Gaussian beam in turbulent atmosphere[J]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4706-4714.