

文章编号:1004-4213(2011)04-0526- 3

星载激光测距系统点目标探测方程研究

狄慧鸽^{1,2}, 黄庚华², 舒嵘², 王建宇²

(1 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

(2 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要:激光测距系统的最大测程是其主要技术指标和进行系统设计时的主要依据,它随探测目标的性质而发生变化. 本文推导并给出了激光测距系统对点目标的实用探测方程. 分析了激光远场光束分布对探测能力的影响,并利用所得探测方程对某星载激光测距机的探测能力进行了评估. 结果表明由于受到光束质量分布的影响,其探测能力在 15.05~20.6 km 之间变化. 对结果进行了分析和讨论,在不改变系统参量的前提下,如果光束质量为平顶分布,则系统整体探测能力可提高至 18.9 km.

关键词:激光测距;最大测程;点目标;远场光束质量分布

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114004.0526

0 引言

激光测距系统的探测方程衡量了系统对一定特征目标的探测能力,当探测目标发生变化时,探测方程也会发生变化. 根据探测目标相对于激光光束横截面的大小不同,探测目标可分为面目标和点目标两种. 当探测目标为点目标时,探测能力与目标相对于激光束的位置有很大关系. 受到这些影响,激光测距系统对于点目标的探测能力变得难以评估和实际测量. 已经有不少专家学者对激光测距系统的探测方程进行了研究,但是其探测方程不实用,没有充分考虑激光远场光束分布对探测能力的影响,难以应用到实际的测试评估中. 本文推导了激光测距系统对点目标的探测方程,给出了实用的探测方程式,分析了激光远场光束分布对探测能力的影响,并且利用所得探测方程对某星载激光测距机的探测能力进行了评估,最后对提高激光测距机的探测能力提出了方法.

1 激光测距系统探测方程

目前的星载激光测距系统大多数为脉冲非相干探测,利用调 Q 技术可以产生峰值功率高达兆瓦量级的激光脉冲,再配合高灵敏度的光电探测器件和高带宽的前置放大电路,脉冲激光测距机可以探测距离上百公里外的目标^[1].

激光测距系统对点目标的最大探测方程^[2-3]为

$$R_{\max} = \left(\frac{K P_t \tau_0 \tau^2 A_r \sigma}{\pi^2 \theta_i^2 P_{r\min}} \right)^{1/4} \quad (1)$$

式中, R_{\max} 是系统探测到的最远距离, K 为光束分布函数, P_t 是激光器输出功率, τ_0 是光学系统效率, τ 为系统到目标距离上激光大气透过率, σ 为被探测目标的雷达截面, A_r 是接收光学系统孔径面积, θ_i 是发射光束发散角, $P_{r\min}$ 是激光测距系统的最小可探测功率,也即系统探测灵敏度.

由式(1)可以看出,当外界环境和仪器参量都已经确定后,激光测距系统所能探测到的最远距离就与激光的光束质量分布 K 有关. 随着探测目标所在光束横截面位置的不同,最大探测距离也会随之发生变化. 当探测目标落在激光峰值点处时, $K=1$, 激光测距机的可探测距离达到最远;当激光无照射到探测目标时, $K=0$, 这时可探测距离为零.

2 光束质量分布的获得与求解

当激光测距系统发射激光为 TEM_{00} 模时,其能量的空间分布呈高斯形. 但是由于受到外界因素的影响,激光的模式并不总是 TEM_{00} 模,光束分布函数 K 很难用公式表达.

为使光束分布函数便于求解和获得,令式(1)中 $K P_t / \theta_i^2 = f(\theta/2)$ (2)

则最大测程可以改写为

$$R_{\max} = \left[\frac{f\left(\frac{\theta}{2}\right) \tau_0 \tau^2 A_r \sigma}{\pi^2 P_{r\min}} \right]^{1/4} \quad (3)$$

基金项目:上海市科委重大基础研究项目(No. 08dz1400701)资助

第一作者:狄慧鸽(1981-),女,博士后,主要研究方向为电检测技术. Email: dihuige@gmail.com

导师(通讯作者):王建宇(1959-),男,研究员,主要研究方向为空间遥感技术. Email: jywang@mail.sitp.ac.cn

收稿日期:2010-08-19;修回日期:2010-11-04

根据辐射度学定理可知, $f(\theta/2)$ 实际上就是激光的辐射强度分布, $\theta/2$ 为激光光轴到目标所在点的夹角。

激光的辐射强度分布可以通过在实验室中室内远场光束分布的方法测试和分析出来. 激光光束的远场分布是发射端的夫琅和费衍射场, 傅里叶变换透镜可实现光束近场分布到远场分布的转换^[4]. 所以激光的远场光束分布可以采用将面阵 CCD 或 CMOS 放置在长焦距平行光管的焦面上, 获取光束分布信息, 测试原理图如图 1.

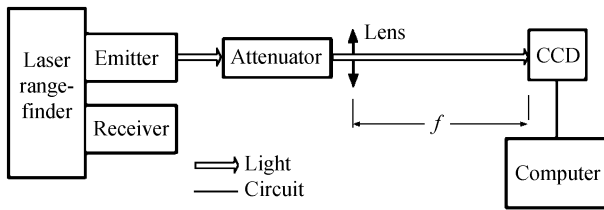


图1 激光远场光束变换原理

Fig.1 Laser's far-field distributing measurement

根据图 1, 激光光斑落在 CCD 光敏面上时, 根据光斑能量分布的不同, 探测元可以获得相应光敏元所对应的灰度值 $\xi_{(i,j)}$, 假若已知激光的功率值 P_1 , 则根据式(4)可以得到不同光敏元所对应的功率密度值 $\kappa_{(i,j)}$.

$$\kappa_{(i,j)} = P_1 \frac{\xi_{(i,j)}}{\sum_{i,j} \xi_{(i,j)} S_{(i,j)}} \quad (4)$$

式中 $\xi_{(i,j)}$ 为 CCD 光敏元的面积, $\kappa_{(i,j)}$ 是实验室中探测面上的功率密度值, 激光在传输的过程中, 不同距离处其功率密度值是发生变化的, 所以需要求出激光在空间的辐射强度分布 $f(\theta/2)$.

根据辐射度学公式 $\kappa_{(i,j)}$ 和 $f(\theta/2)$ 两者之间关系为

$$f\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\kappa_{(i,j)} \times S_{(i,j)}}{(\Delta\theta)^2} \quad (5)$$

式中 $\Delta\theta$ 为光束张角, 且 $\Delta\theta = d/f$, d 为像元尺寸.

$$f\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\kappa_{(i,j)} \times S_{(i,j)} \times f^2}{d^2} = \kappa_{(i,j)} \times f^2 \quad (6)$$

式中 f 为平行光管焦距.

在室内利用光电探测器和傅里叶变换透镜求取激光的辐射强度分布时, 测试准确度和分辨率受到透镜焦距和探测器性质的影响. 所以在测试时宜选取焦距长的透镜, 同时探测器的像素尺寸尽量小. 探测器本身对测试结果的影响主要表现在测试时的背景噪声、CCD 本身的暗电流噪声和每一个光敏元响应的不均匀性. 在测试时需使用暗室环境, 并且需对背景做归一化处理.

3 实例

某星载激光测距机, 单脉冲激光能量为 63.3

mJ, 脉宽为 5 ns. 根据上述理论推导计算该测距机在光束发散角为 0.8 mrad 范围内对雷达截面为 0.15 m² 的空间目标的探测能力.

1) 系统参量确定

接收望远镜直径 $d = 75$ mm, 接收系统透过率 $\tau_0 = 0.8$. 由于该测距机为星载仪器, 其探测目标为空间点目标, 所以大气对激光影响可以忽略, $\tau^2 = 1$. 最小可探测功率 P_{\min} 可通过消光比模拟测试或直接模拟测试方法获得^[5], 根据文献[6]中的直接模拟测试法, 测得该测距机的系统探测灵敏度 $P_{\min} = 110^{-8}$ W.

2) 发射光束参量确定

采用 Spiricon 公司的 LBA-1000 光束质量分析仪作为探测器, 焦距为 2 m 的平行光管作为傅里叶变换镜, 按图 1 对该激光测距机的发射光束进行测试. 该光束质量分析仪像元尺寸为: $13.5 \times 13.5 \mu\text{m}^2$; 最大像素数: 632×480 . 由于激光能量较强, 为了避免探测器饱和, 在激光发射光路里添加中性密度滤光片衰减激光能量, 衰减至探测器刚好不饱和. 获取的激光光束质量分布如图 2.

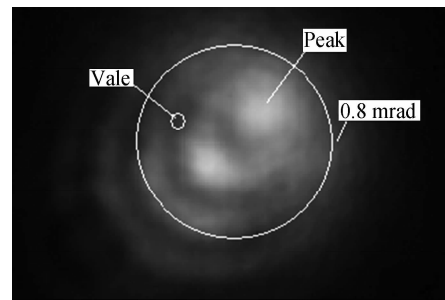


图2 激光测距机发射光束远场光束质量分布

Fig.2 Laser's far-field distributing

0.8 mrad 所对应的区域是直径为 1.6 mm 的圆面. 根据公式(4)~(6)计算得到在 0.8 mrad 范围内的最低点辐射强度为 9.55×10^{12} W/sr, 峰值点处的辐射强度为 3.51×10^{13} W/sr.

3) 最大测程

根据点目标最大测程公式(3)和本文测试结果, 可得当目标落在激光束 0.8 mrad 的能量最低点时, 激光测距机的最大可探测距离为 15.05 km, 当目标落在激光束的峰值点处时, 其具有的最大可探测距离为 20.6 km.

4 讨论

影响星载激光测距系统探测能力的主要因素有雷达截面、发射激光脉冲功率、接收口径、光束质量分布情况及系统探测灵敏度.

雷达截面是由被测目标的特性所决定的, 不能被改变. 提高脉冲功率和口径可以提高系统探测能

力,但是由于星载仪器功耗和体积的限制,激光器的脉冲能量和接收系统口径不可能做到很大,并且高峰值功率的激光输出对激光器内的光学元件寿命和可靠性也都提出了很高的要求.另外脉冲功率的提高同时制约着激光器重复频率的提高.

根据第2和第3节计算,一定发散角内的能量密度最低值影响到系统对点目标的探测能力,如果激光光束分布不均匀,则会造成能量的损失和浪费,可能达不到任务要求的目标.图3(a)为激光测距机实际光束质量分布的二维示意图.光束0.8 mrad内峰值点的能量密度是最低值点的4倍,峰值点的探测距离是最低值点的1.4倍.如果通过光束整形使出射激光为平顶分布,减小出射激光峰值点和最低值点的差距,如图3(b),光束0.8 mrad内最低值点的能量密度就会比原先提高1.5倍,探测能力可达18.9 km,这样就可以在不增大激光器能量的情况下大大提高激光测距系统的探测能力.

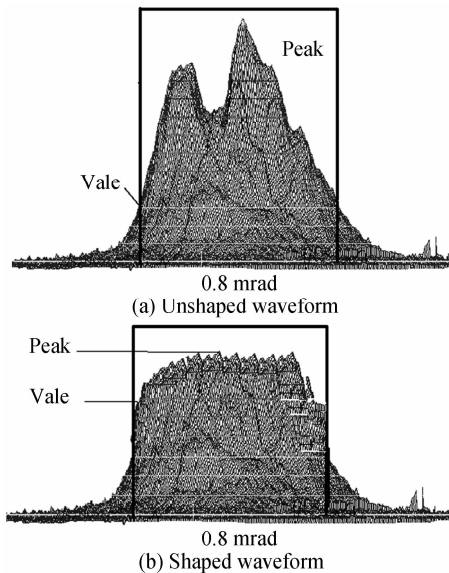


图3 激光整形前后波形

Fig. 3 Waveform of the laser pulse

系统探测灵敏度主要取决于激光测距系统光电转换器件的探测效率.目前星载激光测距系统的探

测器件一般采用硅基雪崩光电二极管(Si:APD),采用线性探测体制,在探测体制下,系统的探测灵敏度可达到 10^{-8} W.如果改变接收系统探测体制,采用光子计数探测体制,可以将系统探测灵敏度提高100倍以上,则系统探测能力可以提高3倍以上.

5 结论

激光的远场光束分布严重的影响了激光测距机对点目标的探测能力.本文推导出了实用的激光测距机对点目标的探测方程,并根据此方程对某激光测距机的最大测程进行了测试,该测距机的最大可探测距离为15.05 km.并且提出了提高最大测程的方法,在不改变系统其它参量的前提下,改变激光的远场光束质量分布为平顶分布,可以将系统的最大测程提高至18.9 km.

参考文献

- [1] RAMOS-IZQUIERDO L, SCOTTI V, SCHMIDT S, *et al.* Optical system design and integration of the Mercury Laser Altimeter[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(9):1748-1760.
- [2] TAN Xian-yu. Research on ranging equation for laser radar[J]. *Electronics optics and control*, 2001, **1**(81):12-18.
谭显裕, 激光雷达测距方程研究[J]. *光电与控制*, 2001, **1**(81):12-18.
- [3] OU-YANG Jun-hua. The high-precision measurement of speed and range about little-goal[D]. Shanghai: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008:36-39.
欧阳俊华, 小目标高精度测速测距技术研究[D]. 上海:中国科学院研究生院, 2008:36-39.
- [4] LIU Li-ren, Wang Li-juan LUAN Zhu, *et al.* Mathematical and physical basis for pointing, acquisition and tracking testing of Inter-Satellite laser communication terminals[J]. *Acte Optica Sinica*, 2006, **26**(9):1329-1334.
刘立人, 王丽娟, 栾竹等, 等. 卫星激光通信终端跟踪检测的数理基础[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9):1329-1334.
- [5] ZENG Chang-e, Wang Qian-qian, Chang Gang, *et al.* Novel method for maximum of pulse laser range range measure finder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(6):664-672.
曾嫦娥, 王茜茜, 常岗, 等. 脉冲激光测距机最大测程测试方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(6):664-672.
- [6] ZHANG Hai-hong. Research on the testing technology of the space-borne laser altimeter [D]. Shanghai: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005: 33-43.
张海洪. 星载激光高度计地面定标与测试技术研究[D]. 中国科学院研究生院, 2005:33-43.

Detecting Equation of Spaceborne Laser Rangefinder to Particle-target

DI Hui-Ge^{1,2}, HUANG Geng-hua², SHU Rong², WANG Jian-Yu²

(1 State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(2 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Maximum range is one of the major parameters of laser rangefinder and a basic guideline in system design. It will change with the detected goal. The detecting equation of lidar to particle-target was deduced in this paper, and it could be used easily in practice. Laser's far-field distributing affect maximum range. According to the practical detecting equation, the maximum range of a laser rangefinder was estimated, and it changed among 15.05 ~ 20.6 km with laser's far-field distributing. The result was analyzed and discussed. It was found that if laser's far-field distributing is flat and other parameters of the laser rangefinder is not changed, the system's maximum range can be improved to 18.9 km.

Key words: Laser rangefinder; Maximum range; Particle-target; Laser far-field distributing