

空间目标激光瞄准偏差的测量评估方法研究

康文运, 宋小全, 侯军燕, 王云萍
(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要:针对光电系统对空间目标激光瞄准偏差测量评估难题,从激光瞄准偏差基本概念入手,提出了一种测量评估光电系统对空间目标激光瞄准偏差的可行方法,给出了激光瞄准偏差的计算公式,并对影响评估准确性的主要误差进行了分析。该测量评估方法可用于光电系统对空间目标激光跟踪能力评价等方面。

关键词:光电系统;空间目标;激光瞄准偏差;评估方法

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.14

Study on measuring and evaluating method of laser pointing error for space target

KANG Wen-yun, SONG Xiao-quan, HOU Jun-yan, WANG Yun-ping
(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the measurement and evaluation problem of electro-optic system's laser pointing error for space target, a feasible method of measuring and evaluating electro-optic system's laser pointing error for space target is proposed, the calculation formula of laser pointing error is given, and the main error of affecting evaluation veracity is analyzed. The laser tracking and pointing ability of electro-optic system for space target can be evaluated by this measuring and evaluating method.

Key words: electro-optic system; space target; laser pointing error; evaluation method

1 引言

随着空间光通信、光电探测等技术的快速发展,激光在空间目标测量方面的应用受到国内外广泛关注,并且取得了很大进展^[1-2],其核心技术是如何实现激光对空间目标的高精度跟瞄,提高到达空间目标表面的激光功率密度,以便实现对遥远空间目标的探测、测量和通信。

对空间目标的激光瞄准偏差是光电系统一项重要技术指标,如何测量评估光电系统对空间目标的激光瞄准偏差是一项技术难题。目前,围绕这个问题已开展了不少探索研究^[3-5],但以静态测试为主,没有综合考虑光电系统动态跟踪目标及整层大气对

激光传输的影响,因此,有必要进一步深化这方面的研究工作。

本文围绕如何测量评估光电系统对空间目标激光瞄准偏差进行了分析研究,提出了一种可行方法。

2 激光瞄准偏差的定义

在光电系统发射激光对空间目标进行跟踪照射过程中,将激光光斑质心平均位置与瞄准点的偏差相对地面光电系统的张角定义为激光瞄准偏差^[6]。激光瞄准偏差概念图如图1所示。

作者简介:康文运(1965-),男,硕士,高级工程师,主要从事光电对抗试验总体技术研究。E-mail:cts_kangwenyun@sina.com
收稿日期:2013-04-25

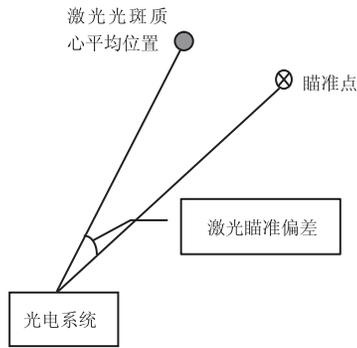


图1 激光瞄准偏差概念示意图

Fig. 1 Diagram of laser pointing error concept

3 测量评估方法

由上述激光瞄准偏差的定义可知:要测量光电系统对空间目标的激光瞄准偏差,需要测量跟瞄照射激光在空间目标处的光斑质心平均位置,激光经远距离传输到达遥远的空间目标处其光斑已经很大,显然要直接测量空间目标处的激光光斑质心平均位置是一件十分困难的事。因此,采用对等直接测量的方法是不可行的,应采用等效缩比的方法测量评估光电系统对空间目标的激光瞄准偏差。

3.1 测量评估系统构成

为了能够测得激光光斑的质心需获得较完整的光斑,可行的办法是降低目标与光电系统间的距离,因此,可利用无人机为模拟目标进行等效缩比测量。

测量评估系统主要包括:无人机平台、激光靶板仪载荷、光学合作目标载荷和地面飞控站等组成。

无人机平台搭载激光靶板仪和光学合作目标飞行,模拟空间目标与地面光电系统间的飞行角速度,激光靶板仪用于测量激光光斑质心位置,光学合作目标用于模拟空间目标的光学特性,地面飞控站用于对无人机平台进行测控、接收激光靶板仪测量数据并对测量数据进行综合处理。

3.2 测量评估试验设计

首先,将激光靶板仪和光学合作目标加装在无人机平台上,使两者的偏离量在测量试验飞行弧段内相对地面光电系统的张角等于激光瞄准偏置角。由于空间目标距离光电系统很远,同时空间目标运动速度较快,因此,激光发射时应相对光电系统的跟踪轴有一个瞄准提前角^[6],瞄准提前角为 $2v/c$,其中 v 为空间目标相对光电系统的速度, c 为光速。另外,若发射激光波长不在光电系统的跟踪探测光波段内,由于大气对不同波长光的折射率不同,激光瞄准偏置角还应在瞄准提前角上叠加一个蒙气色差角。

其次,设置无人机飞行航路、航速和航高,在测量试验段,使无人机相对光电系统的跟踪仰角和角

速度与对空间目标激光跟瞄照射时基本一致,并且激光靶板仪确保能够测得完整光斑。测量评估试验布局如图2所示。

在试验后对测量数据进行处理,计算激光瞄准偏差。

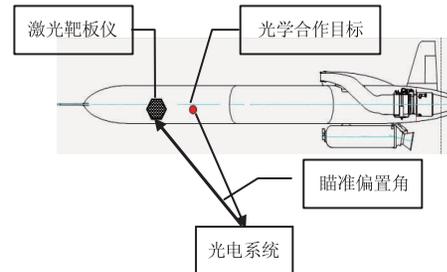


图2 测量评估试验布局示意图

Fig. 2 Diagram of measuring and evaluating test composition

3.3 瞄准偏差计算公式及实例计算

利用上述测量评估试验激光靶板仪测量数据,可计算出光电系统对模拟目标的激光瞄准偏差,光斑质心按照以下公式计算:

$$\begin{aligned} x_{qj} &= \frac{\sum_{i=0}^n P(x_i, y_i) x_i}{\sum_{i=0}^n P(x_i, y_i)} \\ y_{qj} &= \frac{\sum_{i=0}^n P(x_i, y_i) y_i}{\sum_{i=0}^n P(x_i, y_i)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, x_{qj} 为第 j 帧光斑质心在靶斑仪上横坐标; y_{qj} 为第 j 帧光斑质心在靶斑仪上纵坐标; $P(x_i, y_i)$ 为激光靶板仪上 (x_i, y_i) 处的功率密度; n 为功率密度探测单元点的个数。

光斑质心与靶斑仪中心(瞄准点)的偏差除以发光时刻靶目标相对光电系统的距离得到该时刻的瞄准偏差角,整个发光过程中瞄准偏差角的平均值为激光瞄准偏差。激光瞄准偏差按照以下公式计算:

$$\Delta_x = \frac{\sum_{j=1}^m x_{qj}}{m}, \Delta_y = \frac{\sum_{j=1}^m y_{qj}}{m}, \Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} \quad (2)$$

式中, Δ_x 为 x 方向的瞄准偏差; Δ_y 为 y 方向的瞄准偏差; (x_{qj}, y_{qj}) 为第 j 帧光斑质心在靶斑仪上坐标,靶斑仪中心坐标为 $(0, 0)$; R_j 为与第 j 帧光斑对应时刻靶目标相对光电系统的距离; m 为激光光斑帧数; Δ 为瞄准偏差。

利用上述公式对一组测量数据进行处理,就可算得其激光瞄准偏差,其光斑质心在靶板仪上的分布如图3所示。

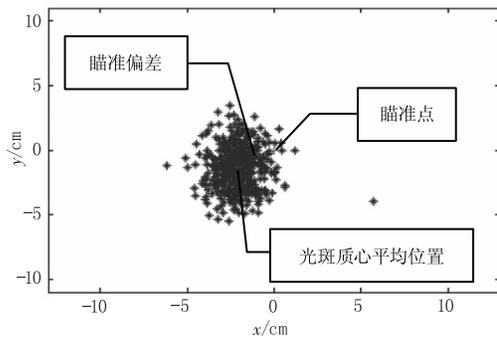


图3 激光光斑质心在靶板仪上的分布图

Fig. 3 Diagram of laser facula centroid distribution on the target

4 影响评估结果的主要因素分析

在上述的测量评估试验设计中综合考虑了跟瞄仰角、跟踪角速度、激光瞄准提前角、整层大气蒙气色差等因素,其中跟瞄仰角、跟踪角速度、激光瞄准提前角这三项可以较准确设置,能够较准确模拟实际跟瞄过程,因此,其对激光瞄准偏差评估的影响有限。

蒙气色差角设置存在一定不确定性,蒙气色差角一般是通过大气光学参数测量数据和蒙气色差角计算模型推算出来的,和实际情况存在一定偏差,由于实际应用中一般关注的是光电系统在较高仰角激光瞄准能力,而在高仰角区域蒙气色差本来就较小,如在 60° 仰角以上可见光和中短波红外光的蒙气色差角约 $3 \mu\text{rad}$ ^[6-7],因此,其带来的误差应不大约 $1 \mu\text{rad}$ 。

另外,激光经整层大气输出后其光斑质心可能发生漂移,在测量光斑质心时也存在测量误差,这些因素对激光瞄准偏差评估也有影响。一般通过增加靶板仪上探测器布设密度和采用数据插值处理可以降低光斑质心测量误差。若靶板仪上探测器间隔为 1 cm ,经数据插值处理后其光斑质心测量误差可小于 0.5 cm ,若测量试验时靶目标与光电系统相距 5 km ,其误差小于 $1 \mu\text{rad}$,因此,光斑质心测量误差可控并且较小。并且经过公式(2)的平均计算,基本可消除大气对光斑质心位置随机影响以及靶板仪测量的随机误差。

综合上述分析,影响评估结果准确性的主要因素为测量评估试验时对蒙气色差角的设置,若光电系统的跟踪探测光波段与发射激光波长不一致,采用该测量评估方法获得的激光跟瞄偏差值(在 60° 仰角以上)约存在 $1 \mu\text{rad}$ 的误差。

5 结束语

长期以来如何评价光电系统对空间目标的激光跟瞄能力一直是该领域一个棘手问题。本文提出的等效缩比测量评估方法,在模拟目标飞行特性、光学特性的基础上,还考虑了跟瞄仰角、激光瞄准提前角、

整层大气蒙气色差等因素的影响,基本模拟了光电系统对空间目标激光跟瞄的主要环节,是一种可行并准确性较高的测量评估方法,在实际应用中也得到了试验的验证。但是在测量评估试验中需高空高速无人机的配合,试验规模大费用较高,还不够简约,今后还需不断探索更加简便准确的测量评估方法。

参考文献:

- [1] M Kovacs, G Dryden, R Pohle, et al. Hi-Class on aeos: a large aperture laser radar for space surveillance/situational awareness investigations [C]. Proceedings of SPIE, 2011, 4490: 298 - 305.
- [2] Yang Fuming, Xiao Chikun, Chen Wanzhen, et al. Design and test result of satellite laser ranging at the daytime [J]. China Science (A part), 1998, 28 (11): 1048 - 1056. (in Chinese)
杨福民,肖焯琨,陈婉珍,等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. 中国科学(A辑), 1998, 28 (11): 1048 - 1056.
- [3] Wang Jianmin, Qin Yi, Xu Quan, et al. Study on the measurement of tracking and pointing accuracy used for the terminals of free space laser communication [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19 (8): 1054 - 1059. (in Chinese)
王建民,秦谊,徐泉,等. 卫星激光通信端机跟瞄精度测试技术研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19 (8): 1054 - 1059.
- [4] Qin Yi, Wang Jiangming, Wang Lili, et al. Tracking target simulator and measuring techniques for the free space laser communication [J]. Optical Technique, 2007, 33 (4): 557 - 563. (in Chinese)
秦谊,王建民,王丽丽,等. 卫星激光通信跟瞄精度测试方法及其实验研究[J]. 光学技术, 2007, 33 (4): 557 - 563.
- [5] Li Anhu, Sun Jianfeng, Liu Liren. Design principle of performance testing device for laser beam microradian pointing and tracking in intersatellite laser communications [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26 (7): 975 - 979. (in Chinese)
李安虎,孙建锋,刘立人. 星间激光通信光束微弧度跟瞄性能检测装置的设计原理[J]. 光学学报, 2006, 26 (7): 975 - 979.
- [6] Su Yi, Wan Min. High energy laser system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 157 - 164. (in Chinese)
苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 157 - 164.
- [7] Yang Chenhua, Mei Suisheng, Lin Junting. The laser & infrared technology handbook [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 77 - 79. (in Chinese)
杨臣华,梅遂生,林钧挺. 激光与红外技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 77 - 79.