

文章编号 1004-924X(2016)02-0260-08

基于有效回波概率估计空间碎片 激光测距系统作用距离

李明^{1*}, 薛莉¹, 黄晨¹, 王亮亮¹, 刘翌²

(1. 北京跟踪与通信技术研究所空间目标测量重点实验室, 北京 100094;

2. 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 基于回波光子数方程估计空间碎片激光测距系统作用距离时, 最小可接受回波光子数很难确定。本文提出了通过改变空间碎片实测数据回波稀疏性获得精度变化曲线的退化模型, 以“精度不变”作为衡量条件, 确定保精度情况下系统最小可识别有效回波概率, 从而估算系统作用距离的方法。首先, 根据单光子雪崩探测器“关门”特性, 得到了有效回波概率与测量距离关系。然后, 建立实测数据的稀疏性退化模型得到测量精度与有效回波概率的跃变曲线, 根据精度曲线中“保精度平台”的“跳变点”获得最小可识别有效回波概率。最后, 根据最小可识别回波概率获得系统对不同大小典型空间碎片的作用距离。分别处理了有效截面积为 3.884 0, 6.391 2 和 9.855 5 m² 的 3 种典型空间碎片的实验数据, 结果表明: 系统在满足 m 级测距精度的前提下, 可识别的最小有效回波概率为 0.02~0.044, 对上述不同特性典型空间碎片相应的最大作用距离分别为 820, 1 520 和 2 250 km。提出的模型在精度不变情况下解决了系统最小可识别有效回波概率难以确定的问题, 大大减少了实验成本。

关键词: 空间碎片激光测距系统; 作用距离; 有效回波概率; 测距精度; 数据稀疏性; 退化模型

中图分类号: P228.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0260

Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability

LI Ming^{1*}, XUE Li¹, HUANG Chen¹, WANG Liang-liang¹, LIU Yi²

(1. Key Laboratory for Space Target Measurements, Beijing Institute of
Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;

2. China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

* Corresponding author, E-mail: limingbittt@163.com

Abstract: Echo photon number equation is usually used to estimate the detection distance of a space debris laser ranging system. However, it can not exactly determine the minimum recognizable echo number threshold. In this article, a degradation model was proposed by degrading the echo sparsity of measured data to obtain a precision curve and to effectively evaluate the minimum recognizable echo probability with the precision guaranteed, and then to estimate the detection distance of the ranging system. Firstly, the relationship of efficient echo probability and ranging distance was obtained based

收稿日期: 2015-11-02; 修订日期: 2015-12-07.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AAXX0110)

on the “shutting down” effect of Single Photon Avalanche Diodes (SPADs). After that, the jumping curves of ranging precision and efficient echo probability were drawn based on experimental data. From the “jumping threshold” on “precision plateau” in jumping curves, the minimum recognizable echo probability was calculated and the detection distance for typical space debris with different sizes was obtained. The experiments for three typical space debris with Radar Cross Sections (RCSs) of $3.884\ 0\ \text{m}^2$, $6.391\ 2\ \text{m}^2$ and $9.855\ 5\ \text{m}^2$ were performed. The results show that the minimum recognizable efficient echo probability is $0.02\text{--}0.04$ with the meter-level precision guaranteed and the maximum detection range for these typical space debris are $820\ \text{km}$, $1\ 520\ \text{km}$ and $2\ 250\ \text{km}$ correspondingly. This proposed degradation model effectively solves the problem for determining minimum recognizable echo probability, and reduces experimental costs.

Key words: space debris laser ranging system; detection distance; efficient echo probability; data sparsity; degradation model

1 引言

激光测距具有高亮度、单色性好和方向性佳等优点,是目前空间测量中单次测量精度最高的方式,在空间碎片监测和预警中发挥着重要作用^[1-2]。高重复率激光测距系统能够以 kHz 发射重复频率对空间碎片进行探测,提高了漫反射目标数据的观测量,有助于从随机无规律噪声信号中提取出目标回波信号^[3]。自 2002 年奥地利 Graz 站首次实现 kHz 激光测距以来^[4-5],英国 Herstmonceux 站^[6],以及我国上海天文台^[7]、云南天文台^[8-9]、长春人造卫星观测站^[10]和武汉站^[11]等,均已具备高重频激光测距能力。2013 年,Graz 测站已具备对 $600\sim 2\ 500\ \text{km}$ 处 $0.3\sim 15\ \text{m}^2$ 空间碎片的激光测距能力^[12]。

有效估计系统的作用距离是激光测距的一项重要工作,可以提高测量的针对性和有效性。目前,激光测距站点主要通过参考雷达方程^[13]和实际观测大量碎片来估算空间碎片的作用距离。例如,某激光测距系统对预报轨道高度为 $800\sim 2\ 000\ \text{km}$ 的空间碎片进行跟踪探测,分析测量数据是否包含回波,发现只能识别出 $1\ 500\ \text{km}$ 以内的空间碎片,则认为系统对空间碎片的作用距离为 $1\ 500\ \text{km}$,不过该方法的实验成本较高。

2002 年,Schael 等人利用像素定向方法实现了无扫描激光成像雷达的系统作用距离估计^[14]。2009 年,Steinvall 基于雷达方程,给出了不同大气环境下系统设计参数和目标特性对于雷达系统

作用距离的影响关系^[15]。在理论上,脉冲式激光测距系统的作用距离估计通常基于回波光子数方程,即通过计算不同距离目标的回波光子数,预测系统的作用距离。2013 年,Luo 等人据此研究了脉冲式激光测距系统的作用距离,并讨论了回波强度、噪声水平和目标位置等因素的影响^[16-17],然而该方法对于系统最小可接受回波光子数(最小可接受有效探测概率)的设定具有较高要求。

本课题组在分析激光测距实测数据时发现,在满足精度的情况下,数据密集度往往过高而存在回波冗余,这意味着降低回波信号稀疏性仍可能在满足精度要求的情况下测到目标,系统的作用距离可以更远。本文从精度、有效回波概率、作用距离三者的关系入手,以精度不变为前提,获得了系统最小可识别有效回波概率,并以此估计系统的最大作用距离。

2 激光测距系统的作用距离分析

高重复率激光测距大大提高了测量数据量,有助于回波的有效识别。图 1 展示了有效截面积为 $6.391\ 2\ \text{m}^2$ 空间碎片 NORAD 10861 的实测数据,观察数据稀疏性可发现回波较为密集,存在一定的回波数据冗余。一方面,特性相同的目标距离越远,有效回波概率越小,回波密集度越低。另一方面,回波密集度越低表示回波越难以从噪声中识别出,可能引起测距精度的变化。因此,这里选取精度不变作为衡量条件,确定系统作用距离估计时需要的最小可接受回波光子数(最小可

识别有效回波概率)。通过研究测量精度随有效回波概率的变化关系来分析系统的作用距离。

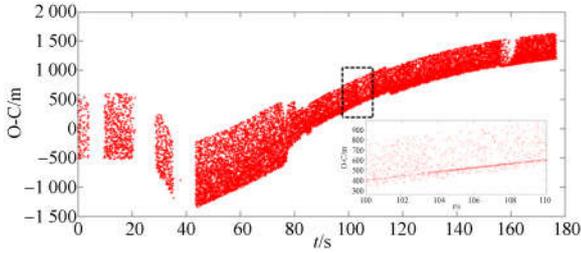


图 1 原始空间碎片测量数据的稀疏性(NORAD 10861),插图为对第 100~110 s 的数据进行放大后的结果

Fig. 1 Ranging data sparsity of space debris NORAD 10861(inset figure is a magnified view of data from 100 s to 110 s)

2.1 有效回波概率与测量距离的关系

如图 2 所示,空间碎片激光测距与合作式卫星激光测距不同,不存在使激光原路返回的角反射器,只能依靠目标本身的漫反射特性将入射激光反射到 4π 空间,其回波光子数方程为^[18]:

$$n_0 = \eta \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot E_t \cdot T^2 \cdot K_t \cdot K_r \cdot \frac{D^2 \rho \sigma}{8\pi R^2 (D/2 + R\theta/2)^2}, \quad (1)$$

其中: λ 为激光波长, η 为探测器的量子效率, h 为 Planck 常数, c 为光速, E_t 为激光发射能量, D 为望远镜口径, ρ 为目标反射系数, σ 为目标的有效散射面积, θ 为激光发散角, R 为目标距离, T 为大气透过率, K_t , K_r 分别为发射系统和接收系统的光学效率。在理论层面,可根据系统参数获得不同特性目标在不同距离 R 时系统接收的回波光子数 n_0 ,但是难以确定最小可接受回波光子数。目前,没有准确的方法能够保证设定的最小可接受回波光子数可以在满足测距精度的要求下仍可识别目标。

单光子雪崩探测器(Single Photon Avalanche Detector, SPAD)是高重频激光测距系统的重要组成部分,用于探测目标反射回的光子。其光电转换产生的光电子数服从泊松分布^[19],即在平均光子数为 n_0 的情况下,产生 m 个光电子的概率为^[20]:

$$P(m, n_0) = \frac{n_0^m}{m!} \cdot e^{-n_0}. \quad (2)$$

因此,可得回波信号产生一个光电子以上的

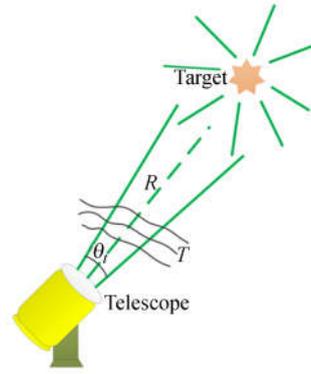


图 2 空间碎片激光测距示意图

Fig. 2 Scheme of laser ranging for space debris

概率为^[21]:

$$P_0 = \sum_{m=1}^{\infty} P(m, n_0) = 1 - P(0, n_0) = 1 - e^{-n_0}. \quad (3)$$

进入望远镜的天光背景噪声同样会引起 SPAD 响应从而引发虚警。天光背景速率^[22]可由观测天空星等来估算:

$$v_{\text{sky}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{N_{\text{zero}}}{2.512^G} \cdot K_r \cdot A_{\text{SPAD}} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \frac{\Delta\lambda}{0.3}, \quad (4)$$

其中: N_{zero} 表示零等星在可见光范围内的天光背景光子数, G 表示天空背景星等, A_{SPAD} 表示探测器的探测面积, $\Delta\lambda$ 为滤光片带宽。在一个距离门时间 t_{gate} 内,天光背景光子数为:

$$N_{\text{sky}} = v_{\text{sky}} \cdot t_{\text{gate}}. \quad (5)$$

虚警概率为^[23]:

$$P_{\text{sky}} = 1 - e^{-N_{\text{sky}}}. \quad (6)$$

因此探测到回波光电子的有效回波概率为:

$$P_{\text{echo}} = (1 - P_{\text{sky}}) \cdot P_0. \quad (7)$$

有效回波概率 P_{echo} 表示一次测量中探测器能够响应大于等于一个目标回波的概率,例如,发射 100 个脉冲,处理事件计时器记录数据后得到 5 个回波光电子,则说明有效回波概率为 5%^[24]。根据上述关系可以得到不同天光背景噪声和距离门下有效回波概率 P_{echo} 与测量距离 R 的关系。图 3(a)、3(b)展示了随着天光背景速率 v_{sky} 或者距离门 t_{gate} 的增加,虚警概率增加,有效回波概率逐渐降低,目标探测距离也减小。图 4 展示了距离门内噪声光子数对 P_{echo} 的影响,对应单个脉冲天光背景噪声数达到 10 个时信号几乎被噪声淹没,有效回波概率为零。该结果表明,在天光背景

较强的情况下回波探测概率非常低,因此空间碎片激光测距往往选择在视宁度良好的天光地影环境下进行,其天光背景亮度近似为 16 星等。由于目前对空间碎片的预报精度远低于卫星预报精度,所以距离门一般设置为 $10 \mu\text{s}$,以确保回波落在距离门的范围内。

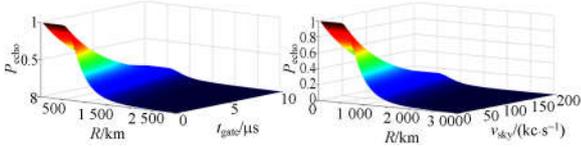


图 3 不同天光背景噪声和距离门的情况下,探测目标距离随有效回波概率的变化关系(假定目标的有效截面积为 3 m^2 ,反射率为 0.15)

Fig. 3 Target range versus efficient echo probability under different sky background noise ratios and different gating periods respectively. Assuming that $t_{\text{gate}} = 10 \mu\text{s}$, $v_{\text{sky}} = 2 \times 10^5 \text{ c/s}$, $\sigma = 3 \text{ m}^2$, $\rho = 0.15$.

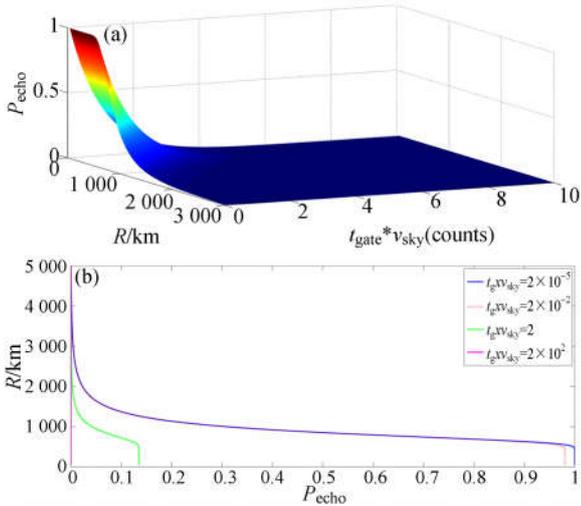


图 4 距离门内不同噪声个数情况下,探测目标距离随有效回波概率变化的三维图(a)和典型值二维图(b)(假定目标的有效截面积为 3 m^2 ,反射率为 0.15)

Fig. 4 Target range versus efficient echo probability under different noise numbers within range gate, where (a) is 3D figure and (b) is 2D figure for typical values. Assuming that $\sigma = 3 \text{ m}^2$, $\rho = 0.15$.

2.2 有效回波概率退化模型

由有效回波概率 P_{echo} 与作用距离 R 之间的关系曲线,只要确定最小可识别有效回波概率

$P_{\text{echo_min}}$,便可获得系统的最大作用距离 R_{max} 。为此,这里建立了有效回波概率退化模型,获得精度与有效回波概率的变化曲线,根据精度跳变点确定最小可识别有效回波概率。

有效回波概率退化模型基于实测数据,在保持噪声点数目不变的情况下逐渐降低目标的回波点数,改变数据稀疏性以降低有效回波概率,计算出每次退化后的测量精度,得到精度变化曲线。退化流程如图 5 所示。计算方法如下:

$$N_{\text{od}} = N_{\text{od}} - \Delta N, \quad (8)$$

$$N_{\text{noi}} = N_{\text{noi}}, \quad (9)$$

$$N = t_{\text{mea}} \cdot f_{\text{rep}}, \quad (10)$$

其中: N_{od} 表示事件计时器实测数据中的回波光子数, N_{noi} 表示事件计时器实测数据中的噪声光子数,数据中去除 N_{od} 之外的数据认为是噪声; ΔN 表示退化步长, N 表示观测重复次数; t_{mea} 表示观测时长; f_{rep} 表示激光发射的重复频率。则有效回波概率可以表示为:

$$P_{\text{echo}} = \frac{N_{\text{od}}}{N}. \quad (11)$$

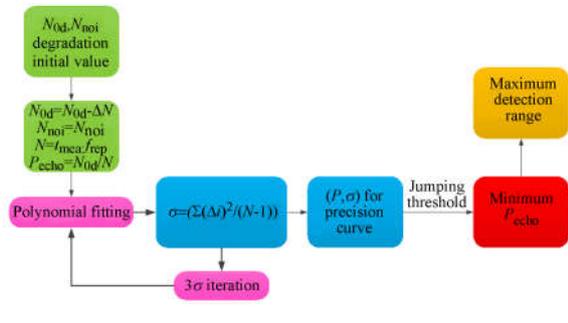


图 5 回波点数稀疏性退化模型

Fig. 5 Schematic diagram of degradation model for echo sparsity

使用多项式拟合和 3σ 迭代求解测距内符合精度,拟合多项式为:

$$OC_i = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + a_n t_i^n, \quad (12)$$

其中: OC_i 表示第 i 个残差值, t_i 为测量主波时刻。多项式拟合得到方差为:

$$\Delta'_i = OC_i - (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 t_i + \hat{a}_2 t_i^2 + \dots + \hat{a}_n t_i^n), \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta'_i)^2}{N-1}}. \quad (14)$$

经过 3σ 迭代不断剔除噪声点,最后得到的 σ 值为测距内符合精度。在每次回波稀疏度退化后,计算有效回波概率,并经过多项式拟合和 3σ

迭代获得测距精度,退化过程结束后便可得到精度随有效回波概率的变化曲线。再由曲线中精度的跳变点可以得到最小可识别有效回波概率,从而得到系统的最大作用距离。

3 空间碎片实测数据退化结果及分析

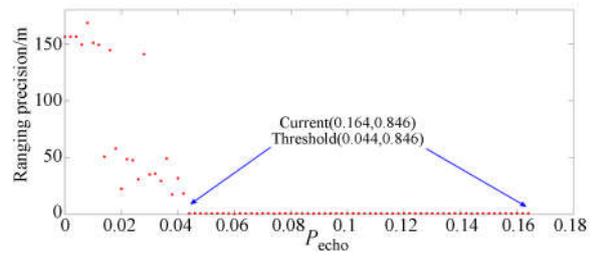
以上海天文台空间碎片激光测距系统为例,其系统参数如表 1 所示,其中大气透过率、光学系统效率和目标反射率为经验值,实际测量时它们会随观测条件而有一定的偏差。以 Space-track.org 提供的空间碎片目标特性及预报轨道信息,选取有效截面积分别为 3.884 0, 6.391 2 和 9.855 5 m² 的典型空间碎片 NORAD 25530、10861、20453 分别进行了跟踪和测量。如图 6 所示,在退化过程开始前所有回波点都存在时,空间碎片的有效回波概率分别为 0.164, 0.256 和 0.098, 测量精度分别为 0.846, 1.073 和 0.772 m, 满足对空间碎片 m 级的测距精度要求,但回波数据存在大量冗余(如图 1 所示)。

表 1 上海天文台激光测距系统参数

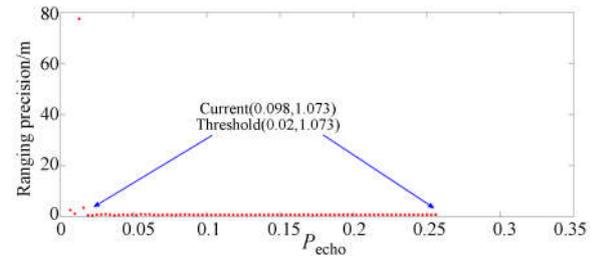
Tab. 1 Key parameters of Shanghai laser ranging system

参数	值	含义
λ	532 nm	激光波长
E_t	300 mJ	单脉冲能量
f_{rep}	200 Hz	激光发射重复频率
D	0.57 m	望远镜口径
θ_t	10"	激光束发散全角
A_{SPAD}	100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$	SPAD 探测面积
$\Delta\lambda$	10 nm	滤光片带宽
η	20%	探测器量子效率
T	0.8	大气透过率
K_t	0.8	发射光学系统效率
K_r	0.5	接收光学系统效率
N_{zero}	$2.82 \times 10^{10} / \text{m}^2 \cdot (")^2$	零等星时的背景光通量
G	16	天光背景星等
h	$6.626\ 069\ 3 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	普朗克常数
c	299 792 458 m/s	真空中光速

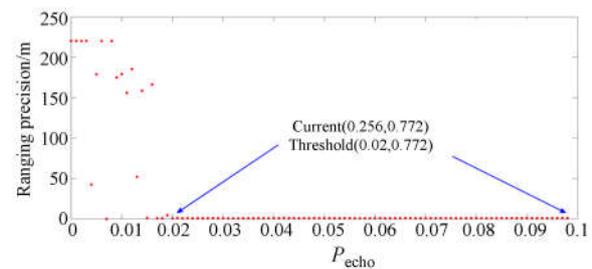
经过多项式拟合和 3σ 迭代将测量数据区分为目标回波和噪声,保持噪声不变,逐步减少回波点数。随着退化过程的进行,有效回波概率不断降低,然而内符合精度并非缓慢下降,而是呈现出一种阶跃式变化,如图 6 所示。图中箭头所指分



(a) NORAD 25530



(b) NORAD 10861



(c) NORAD 20453

图 6 空间碎片 NORAD25530、10861、20453 的有效回波概率退化结果

Fig. 6 Degradation results of space debris NORAD 25530, 10861 and 20453

别为退化之前目标的有效回波概率和退化过程中精度即将发生变化时的有效回波概率。在有效回波概率降至一定范围以内时,精度保持不变,随着有效回波概率进一步降低至其阈值时,精度曲线到达跃变点,内符合精度突然跃变为几百米甚至更差,不再满足目标测距和跟踪的要求,该有效回波概率阈值即为系统的最小可识别回波概率。曲线中跃变点的产生是因为在数据处理的 3σ 迭代过程中,当回波点数与噪声水平近似时,无法从随机噪声中分辨回波点, σ 因不再收敛而变大。

结合不同目标探测距离 R 和有效回波概率 P_{echo} 曲线(如图 7 所示),得到如表 2 所示的系统最小可识别有效回波概率和不同目标的最大作用距离。由此可知,保留当前测距系统目标回波点

数在 25% 以下时,即实验系统的最小可识别有效回波概率为 0.02~0.044 时,亦能满足 m 级的精度要求。对于不同特性的目标的最大作用距离为 820,1 520 和 2 250 km,与上海台对大量碎片的实测数据相符。因此,通过对回波稀疏性进行退化获得存在跳变点的精度曲线,可以得到系统的最小可识别有效回波概率,从而实现系统作用距离的有效估计。

这种基于精度及有效回波概率的实测数据稀疏性退化模型具有两个优点:(1)以精度不变为标准,能够在保证精度不变的情况下确定出系统的最小可识别回波概率;(2)只需要测量若干典型的空

间碎片,即可估计不同特性目标的最大作用距离,合理判断该目标是否在系统的可识别能力范围内,提高了对不同目标测量的针对性和有效性,同时节约了实验成本。

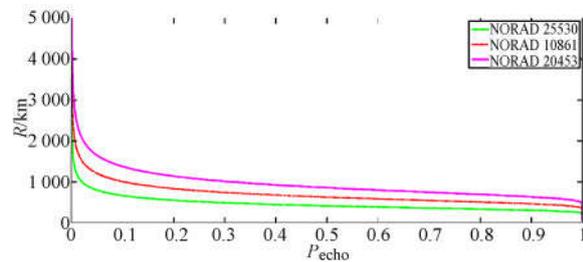


图 7 空间碎片 NORAD 25530、10861、20453 目标探测距离随有效回波概率的变化关系

Fig. 7 Target range versus efficient echo probability of NORAD 25530, 10861 and 20453

表 2 典型空间碎片最小可识别有效回波概率及系统最大作用距离

Tab. 2 Minimum recognizable echo probabilities and system detection ranges for three typical space debris

NORAD	RCS/m	Current P_{echo}	Current R/km	Threshold P_{echo}	Threshold R/km
25530	3.884 0	0.164	570	0.044	820
10861	6.391 2	0.256	820	0.020	1 520
20453	9.855 5	0.098	1 400	0.020	2 250

4 结 论

激光测距系统的最大作用距离估计对于有效实现目标测量具有重要意义。本文提出了一种基于实测数据降低回波点数的退化模型,以精度不变作为衡量条件,在保证噪声点数目不变的前提下,逐渐减少目标的回波点个数,从而模拟相同探测条件下有效回波概率的降低,获得了精度随有效回波概率的变化曲线。根据精度曲线中的精度跳变点可有效确定系统的最小可识别回波概率,从而结合有效回波概率和系统作用距离的关系获得系统对不同特性目标的最大作用距离。利用上海天文台空间碎片激光测距系统获得的典型空间碎片实测数据,对有效截面积分别为 3.884 0, 6.391 2 和 9.855 5 m^2 的典型空间碎片 NORAD 25530、10861、20453 的实测数据进行退化分析,

得到该系统的最小可识别回波概率为 0.02~0.044,相应目标的最大作用距离分别为 820, 1 520 和 2 250 km,与上海天文台报道的实验结果相一致。

这种基于实测数据冗余量的退化方式,可以在保证测距精度的前提下解决最小可识别回波概率(最小可接受回波光子数)难以确定的问题,且不需要耗费大量实验成本,有助于根据估计的系统最大作用距离来提高空间碎片激光测距的针对性和有效性,从而为评价系统测距能力提供了一种新思路。

5 致 谢

作者对上海天文台张忠萍研究员、张海峰工程师提供的高重频激光测距实测数据以及实验系统参数等表示感谢。

参考文献:

[1] GREENE B, GAO Y, MOORE C. Laser tracking of space debris[C]. 13th International Workshop on

Laser Ranging Instrumentation, Washington DC, 2002.

[2] ZHANG Z P, YANG F M, ZHANG H F, *et al.*. The use of laser ranging to measure space debris

- [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(2): 212-218.
- [3] 潘秋娟, 房庆海, 杨艳. 高重复率卫星激光测距的关键技术及其进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(7): 33-39.
- PAN Q J, FANG Q H, YANG Y. Key technique and its progress in satellite laser ranging at high repetition rate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(7): 33-39. (in Chinese)
- [4] KIRCHNER G, HAUSLEITNER W, CRISTEA E. Ajisai spin parameter determination using Graz kilohertz satellite laser ranging data[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2007, 45(1): 201-205.
- [5] KIRCHNER G, KOIDL F, Friederich F, et al.. Laser measurements to space debris from Graz SLR station[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 21-24.
- [6] GIBBS P, APPLEBY G, POTTER C. A reassessment of laser ranging accuracy at SGF Herstmonceux, UK[C]. *Proceedings of 15th International Workshop on Laser Ranging, Canberra*, 2007: 154-158.
- [7] 张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果[J]. *科学通报*, 2011, 56(15): 1177-1183.
- ZHANG ZH P, ZHANG H F, WU ZH B, et al.. kHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(15): 1177-1183. (in Chinese)
- [8] 张海涛, 李祝莲. 共光路高重频激光测距主回波重叠现象的计算机仿真[J]. *天文研究与技术*, 2013, 10(2): 147-151.
- ZHANG H T, LI ZH L. Simulation of overlapping between main wave and echo in common optical-path high-repetition rate laser ranging [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2013, 10(2): 147-151. (in Chinese)
- [9] 李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 154-158.
- LI Y Q, LI ZH L, FU H L, et al.. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 154-158. (in Chinese)
- [10] 董雪. 高重复频率空间碎片激光测距系统研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- DONG X. *Research on High Repetition Space Debris Laser Ranging System*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2014. (in Chinese)
- [11] 李欣, 王培源, 邹彤, 等. kHz 激光器在武汉卫星观测站的测距实验[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 367-370.
- LI X, WANG P Y, ZOU T, et al.. Experiment on kHz laser ranging at Wuhan satellite laser ranging station[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(2): 367-370. (in Chinese)
- [12] KIRCHNER G, KOIDL F, FRIEDERICH F, et al.. Laser measurements to space debris from Graz SLR station [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 21-24.
- [13] 王卫兵, 王挺峰, 郭劲. 基于星载光电成像跟踪测距的空间目标定轨[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 528-539.
- WANG W B, WANG T F, GUO J. Orbit determination for space target based on opto-electrical imaging, tracking and ranging on satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 528-539. (in Chinese)
- [14] SCHAEEL U, ROTHE H. Advanced system model for 1574nm imaging, scannerless, eye-safe laser radar[C]. *International Symposium on Optical Science and Technology*, 2002: 107-114.
- [15] STEINVALL O. Laser system range calculation and the lambert W function[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): B1-B7.
- [16] LUO H, XU B, XU H, et al.. Maximum detection range limitation of pulse laser radar with Geiger-mode avalanche photodiode array[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(9): 761-768.
- [17] 罗韩君, 詹杰, 丰元, 等. 基于盖革模式 APD 的光子计数激光雷达探测距离研究[J]. *光电工程*, 2013, 40(12): 80-88.
- LUO H J, ZHAN J, FENG Y, et al.. Detection range of photon counting laser radar based on Geiger-mode APD[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2013, 40(12): 80-88. (in Chinese)
- [18] 薛莉, 李明, 李希宇, 等. 激光测距多光子分立时刻的反卷积解算方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0702007.
- XUE L, LI M, LI X Y, et al.. Multi-photon time-of-flight resolution enhancement by deconv-

- lution in laser ranging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0702007. (in Chinese)
- [19] 赵帅, 郭劲, 刘洪波, 等. 多像素光子计数器在单光子探测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 972-976.
ZHAO SH, GUO J, LIU H B, *et al.*. Application of multi-pixel photon counters to single photon detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 972-976. (in Chinese)
- [20] 何伟基, 司马博羽, 程耀进, 等. 基于盖革-雪崩光电二极管的光子计数成像[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1831-1837.
HE W J, SIMA B Y, CHENG Y J, *et al.*. Photon counting imaging based on GM-APD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1831-1837. (in Chinese)
- [21] 刘丽娜, 张国青. 利用多像素光子计数器的光学串话效应提高光子探测效率[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 205-210.
LIU L N, ZHANG G Q. Increasing the photon detection efficiency by the optical crosstalk effect of multi-pixel photon counter[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 205-210. (in Chinese)
- [22] 徐文清, 詹杰, 徐青山. 天空背景亮度测量系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 46-51.
XU W Q, ZHAN J, XU Q SH. Development of measuring instrument for sky background brightness[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 46-51. (in Chinese)
- [23] 黄宇, 张晓芳, 俞信. 光子成像静止点目标的管道滤波探测方法[J]. *中国光学*, 2013, 6(1): 73-79.
HUANG Y, ZHANG X F, YU X. Pipeline filtering detection of stationary point targets in photon images[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 73-79. (in Chinese)
- [24] 尼启良. 使用曲面微通道板和感应电荷位置灵敏阳极的软X射线-极紫外光子计数成像探测器研究[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 847-872.
NI Q L. Soft X-ray and extreme ultraviolet photon-counting imaging detector with curved surface micro-channel plate and induced charge position-sensitive anode[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 847-872. (in Chinese)

作者简介:



李明(1964—),男,河南周口店人,博士,研究员,1984年于郑州大学获得学士学位,1987年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2005年于清华大学获得博士学位,主要从事光电测量技术和空间碎片观测等方面的研究。E-mail: limingbittt@163.com



薛莉(1990—),女,山东青岛人,硕士研究生,2013年于上海交通大学获得学士学位,主要从事空间碎片激光测距技术的研究。E-mail: xuelishirley1129@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)