

空间碎片漫反射激光测距试验

李语强^{1,2} 李祝莲¹ 伏红林¹ 郑向明¹ 何少辉¹ 翟东升¹ 熊耀恒¹

(¹中国科学院国家天文台云南天文台, 云南 昆明 650011)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 空间碎片的存在严重影响了在轨航天器的安全,国际上很多国家开展了空间碎片探测技术的研究,利用漫反射激光测距技术对空间碎片进行探测是一个新的发展趋势。根据空间碎片漫反射激光测距的特点以及国内外漫反射激光测距技术的发展趋势和现状,研究了云南天文台的空间碎片漫反射激光测距系统。分析了云南天文台进行空间碎片漫反射激光测距探测成功的概率以及该技术所需要具备的系统组成和关键技术,并通过空间碎片漫反射激光测距实测试验方法验证了该技术的可行性。实测数据结果表明空间碎片漫反射激光测距精度为 50~250 cm。

关键词 测量;卫星激光测距;漫反射;空间碎片

中图分类号 P228.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0908001

Experimentation of Diffuse Reflection Laser Ranging of Space Debris

Li Yuqiang^{1,2} Li Zhulian¹ Fu Honglin¹ Zheng Xiangming¹ He Shaohui¹

Zhai Dongsheng¹ Xiong Yaoheng¹

(¹National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences,
Kunming, Yunnan 650011, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Spacecrafts in orbit are being threatened by space debris, so many countries have developed detection technique for space debris, and the diffuse reflection laser ranging of space debris is a new technology. According to the characteristic, the development and the status in the world of space debris diffuse reflection laser ranging, we research the diffuse reflection laser ranging system at Yunnan Observatory. The probability of detecting space debris by diffuse reflection laser ranging at Yunnan Observatory and the structure of systems and the key techniques for diffuse reflection laser ranging are analyzed. The feasibility of space debris diffuse reflection laser ranging at Yunnan Observatory is confirmed by experimentation method. Measurement data indicate that the precision of diffuse reflection laser ranging is 50~250 cm.

Key words measurement; satellites laser ranging; diffuse reflection; space debris

OCIS codes 120.1880; 120.3930; 120.6085; 280.3400

1 引 言

空间碎片是人类遗留在空间的废弃物,包括完成任务的火箭箭体和卫星本体、火箭的喷射物、在执行航天任务过程中的抛弃物、空间物体之间碰撞产生的碎片等^[1,2]。空间碎片的存在严重地威胁着在轨运行航天器的安全,同时空间碎片的不断产生对

有限的轨道资源也构成了严重的威胁^[3]。我国是空间大国,今后的空间活动将越来越多,特别是要发展载人航天和天基信息网,为了航天活动的安全和持续地开发利用空间资源,就必须不断发展对空间碎片跟踪监视的新技术,增强对空间碎片环境的分析预警能力。

收稿日期: 2011-03-09; 收到修改稿日期: 2011-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(10803019)和云南省自然科学基金(2008CD154)资助课题。

作者简介: 李语强(1978—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事卫星激光测距和空间目标精密定轨等方面的研究。

E-mail: lyq@ynao.ac.cn

导师简介: 熊耀恒(1955—),男,博士,研究员,主要从事天文仪器与方法、自适应光学和卫星激光测距等方面的研究。

E-mail: xyh@ynao.ac.cn

目前空间目标地基观测手段主要有光电探测^[4]、雷达、电子篱笆^[5]和卫星激光测距(SLR),其中SLR技术单次测量精度已提高到亚厘米级,目前正向毫米级发展^[6,7],是空间大地测量中精度最高的技术之一。但常规激光测距是指对合作目标(装有角反射器的空间目标,如Ajisai,Lageos-1卫星等)进行卫星激光测距,而空间碎片以及大部分人造卫星或航天器不携带角反射器(均属于非合作目标),只能采用漫反射激光测距技术进行测距。漫反射激光测距与常规卫星激光测距的原理基本相同,均是通过测量激光信号从地面站到空间目标的往返时间,从而获得空间目标的距离,区别在于合作目标的反射器将绝大部分入射激光按原路反射回去,而空间碎片对入射的激光束仅靠其表面漫反射,能够返回到地面观测站的激光光子比例远比常规测距的小。所以对于漫反射激光测距系统来说,大口径、高效率的接收系统,稳定性好的高功率激光器及高灵敏度光子探测器是必要的,这样才有可能使观测站收到足够的回波信号,进行有效测距^[6]。漫反射激光测距技术比常规卫星激光测距可以探测的空间目标范围更广,同时漫反射激光测距技术比单纯的光电探测手段测量速度快、精度高,在观测时段上也具有优势,可为空间碎片的精密定轨提供有利条件。本文研究了云南天文台的空间碎片漫反射激光测距系统。

2 漫反射激光测距国内外发展现状

由于空间碎片和某些非合作卫星的精密定轨的重要性,国外对空间碎片和非合作空间目标激光测距的研究十分重视,但是仅有少量报道。例如,美国空军在新墨西哥州的Starfire口径3.5 m的望远镜一直在进行这方面研究。1994年Fugate在堪培拉第9届国际激光测距会议上报告可对1000 km的非合作目标卫星进行激光测距。近年来利用漫反射激光测距对空间碎片进行探测是一个新的发展方向,2000年澳大利亚EOS公司开始在澳大利亚堪培拉的Stromlo激光测距站进行过这方面的工作。2002年10月该公司的Greene^[8]在华盛顿的第13届国际激光测距会议上首次发表了题为“Laser Tracking of Space Debris”的报告,简单介绍了研究进展。他们利用Stromlo激光测距站口径76 cm的望远镜和高能量激光器,实现了对1250 km远的大小为15 cm的空间碎片的激光测距。该站于2003年1月由于森林火灾付之一炬。2004年重建后的空间碎片测距望远镜口径为1.8 m。激光器从氙灯抽运

改进为半导体激光抽运的Nd:YAG器件,平均输出功率增大到230 W,计划继续增大。望远镜采用自适应光学倾斜镜技术,补偿了大部分大气湍流的影响。目前已可以对1000 km以内的几厘米的空间碎片进行测距。

国内,上海天文台与中国电子科技集团公司第十一研究所合作,在上海佘山观测站建立了大能量高功率的Nd:YAG测距试验系统,开始非合作目标卫星和空间碎片的激光跟踪和测距试验,于2008年7月获得了3个火箭残骸的漫反射激光测距数据^[9]。此外,云南天文台从2008年1月开始积极开展空间碎片漫反射激光测距研究,并于2010年6月7日收到火箭残骸的回波,到目前已经获得数十圈空间碎片回波。

3 空间碎片漫反射激光测距成功概率分析

漫反射试验过程中的探测器为单光子雪崩二极管探测器(C-SPAD),时间间隔测量设备为SR620,测时精度可以达到25 ps,其计时精度可优于100 ps^[10,11]。对云南天文台1.2 m漫反射激光测距系统的探测能力进行了分析,其中对低轨空间碎片漫反射激光测距回波光子数 n 可估算为^[7,9,12]

$$n = \frac{N\eta E_i A_r \rho r^2 \cos \theta}{\theta_i^2 R^4} T^2 K_t K_r \alpha, \quad (1)$$

式中 N 为每焦耳激光光子数(波长532 nm),取 2.7×10^{18} ; η 为光电接收器件的量子效率,取0.2; E_i 为激光发射脉冲的能量,取4.5 J; A_r 为接收望远镜有效接收面积,取主镜有效口径1100 mm,则 $A_r = 0.95 \text{ m}^2$; ρ 为空间碎片的表面反射率,取0.16; r 为空间碎片(假定为球形)的半径,取0.5 m; 假定空间碎片为球形, θ 角为0, $\cos \theta = 1$; θ_i 为激光发散角,取 $10''$; R 为卫星距离,取800 km; T 为大气的透射率,取0.6; K_t 为激光发射光学系统的效率,取0.5; K_r 为接收光学系统的效率,取0.5; α 为衰减因子(由于大气湍流引起远场激光能量衰减等),取0.1。将上述参数及取值代入(1)式得: $n = 0.85$ (光电子)。

光子接收器的光敏面产生光电子的光电效应服从泊松分布,可以计算出获得1个光电子以上的概率为

$$P = 1 - \exp(-n) = 1 - \exp(-0.85) = 0.58. \quad (2)$$

这就表明,如果按10 Hz发射频率,1 min可发射600次,探测成功的次数为 $600 \times 0.58 = 348$ 次。但

是回波探测成功率受很多因素影响^[6]，例如望远镜的跟踪精度的影响，激光能量波动、大气湍流、发射和接受光轴不平行等因素的影响。较大空间碎片一般为废弃卫星或者火箭残骸，空间目标常用的材料有铝板、银色镀铝聚酯薄膜、黄色镀铝聚酯薄膜、太阳能电池板等^[13]。对于 532 nm 的激光，黄色镀铝聚酯薄膜的反射率约为 0.05，太阳能电池板反射率约为 0.1，铝板反射率约为 0.2，而银色镀铝聚酯薄膜最高约为 0.4，所以空间碎片不同的材料反射率也不同，空间目标表面的反射特性对激光测距回波有很大的影响^[14]，这样也会导致实际情况与理论分析存在一定的差别。

表 1 是漫反射测距系统对不同距离、不同大小的空间碎片可收到的平均光电子数和单光子探测概率的估算结果，为了估算方便，假定空间碎片为球形，表 1 中表头数据为空间碎片半径，表中数据格式：(平均光电子数/探测概率)。

表 1 对不同距离、不同大小的空间碎片收到平均光电子数和单光子探测概率的估算

Table 1 Received photoelectron and probability of detection from different space debris

Distance /km	0.3 m	0.5 m	1 m
400	4.93/0.99	13.70/1.00	54.81/1.00
500	2.02/0.87	5.61/0.99	22.45/1.00
600	0.97/0.62	2.71/0.93	10.82/1.00
700	0.53/0.41	1.46/0.77	5.84/0.99
800	0.31/0.26	0.85/0.58	3.43/0.97
900	0.19/0.18	0.53/0.41	2.14/0.88
1000	0.13/0.12	0.35/0.30	1.40/0.75

理论估算结果表明，云南天文台漫反射测距试验系统可对 400~1000 km 远的大小为 1~2 m 的空间碎片有效地进行漫反射激光测距。

4 云南天文台漫反射激光测距控制系统与光学系统

4.1 控制系统

漫反射激光测距控制系统如图 1 所示。收/发转镜产生同步信号，控制计算机在收到该信号时刻根据用户指令选择激光发射频率和判断是否发送激光点火指令给激光器；激光经主波探测器(PIN)产生主波信号送时间间隔计数器(SR620)，同时送回控制计算机计算 C-SPAD 门控时刻，结果送距离门发生器；在回波快到达时刻由距离门发生器产生门控信号给 C-SPAD 单光子探测器探测回波信号，并由 SR620 测量它与主波间的时间间隔；将测量结果

传输给控制计算机进行数据初步处理及显示，用于实时测距监测。

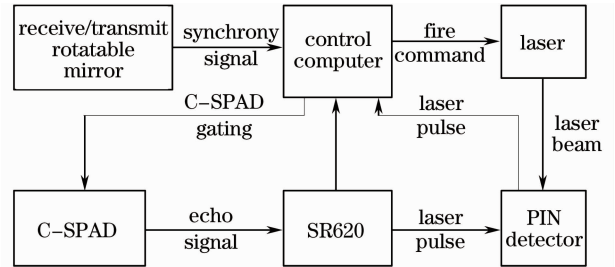


图 1 漫反射激光测距控制系统框图

Fig. 1 Control system of diffuse reflection of satellite laser ranging

4.2 光学系统

空间碎片漫反射激光测距关键器件——高能激光器的具体技术参数：输出波长为 532 nm，输出能量大于等于 4.5 J，重复频率为 10 Hz，脉冲宽度约 10 ns，调 Q 方式为主动调 Q，光束直径小于等于 20 mm，发散角小于等于 0.5 mrad，持续工作时间大于等于 30 min。

云南天文台漫反射激光测距光学系统采用了收/发共光路工作模式，用 1.2 m 口径望远镜发射激光比用小口径望远镜发射可以将激光发散角压缩得更小，另外，发射光路和接收光路的共轴性非常好，这些条件都有利于空间碎片漫反射激光测距成功探测。漫反射试验光路示意图如图 2 所示。

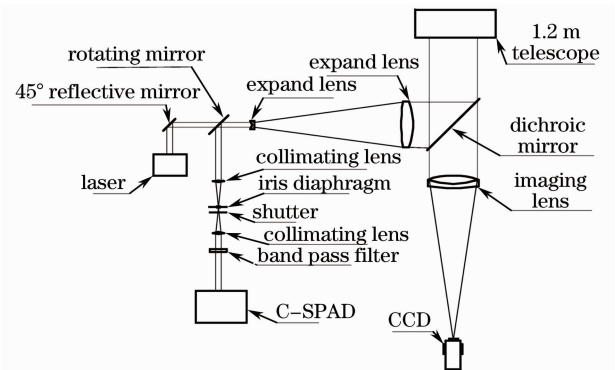


图 2 漫反射激光测距系统光路示意图

Fig. 2 Light system of diffuse reflection laser ranging

漫反射激光测距光路分为光路转换装置、激光发射和回波接收光路 3 部分。转镜是激光发射与回波接收光路的转换装置，转镜开有小孔并以一定速度旋转。激光发射时，光束穿过转镜小孔，经过一对正负透镜组扩束后进入望远镜，望远镜再对激光扩束 7.5 倍向空间目标发射，激光扩束总倍率为 48.5 倍。其中负透镜沿光轴移动可以调整激光发散角，调整范围为 $5'' \sim 1'$ 。回波到达时，转镜的反射面转

入光路将回波反射进入接收光路,经准直透镜及小孔和滤光片滤除噪声后进入 C-SPAD,产生回波信号。其中设有快门、光闸等探测器保护装置。图 2 中 CCD 主要是在测距过程中,如果目标可见,就用该 CCD 对空间碎片进行跟踪成像,并将目标引导至望远镜视场中心,有助于提高空间碎片漫反射激光测距探测成功概率。

5 空间碎片漫反射激光测距试验及数据分析

在开展试验前,先用合作目标进行测距试验来验证漫反射测距系统的性能,很容易就收到激光回波,证明漫反射激光测距系统是正常的、有效的。在 2010 年 6 月 7 日针对一些火箭残骸进行了漫反射激光测距试验,首次收到空间碎片测距回波。因为目标截面积比较大,在初次试验过程中激光器脉冲能量只用到 3 J。为了验证漫反射激光测距的稳定性,随后又进行了多次试验,到目前为止已经测到数十圈火箭残骸的漫反射测距回波。空间碎片观测对象的选择及其轨道根数是通过网站 Heavens Above (<http://www.heavens-above.com>) 和 Space Track (<http://www.space-track.org>) 等获取的,试验过程中,选取了一些体积较大的火箭残骸进行激光测距,将激光脉冲能量调为 3.4 J,脉冲频率为 10 Hz。其中漫反射测距

试验收到的回波截图如图 3,4 所示。

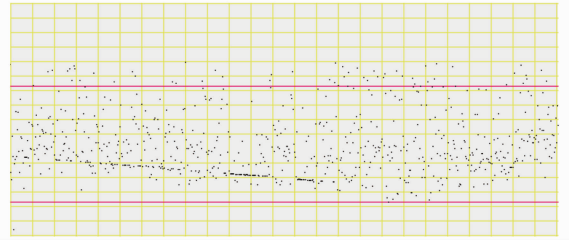


图 3 空间碎片 23769 漫反射测距回波截图
Fig. 3 Echo of diffuse reflection laser ranging of space debris 23769

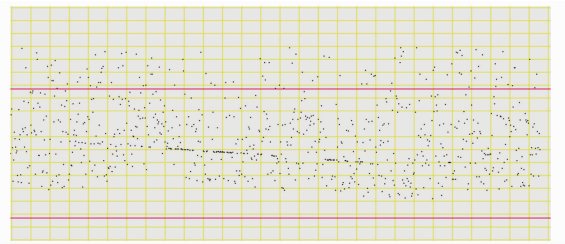


图 4 空间碎片 25400 漫反射测距回波截图
Fig. 4 Echo of diffuse reflection laser ranging of space debris 25400

由图 3,4 可以看出空间碎片漫反射激光测距收到回波的情况,图中黑色的点表示信号和噪声,其中形成有规律的、可连接成线的点就是有效回波数据,其余为随机分布的测距噪声点。漫反射激光测距试验中部分空间碎片参数及试验结果如表 2 所示。

表 2 空间碎片漫反射激光测距试验结果

Table 2 Results of space debris diffuse reflection laser ranging

Objects	Date	Time interval	Perigee /km	Apogee /km	Size /m	Ranging /km	Echo	Precision /cm
17590	20110124	21:42:52~21:47:03	832.1	842.3	10.4×3.9	965~1625	42	199.3
10517	20110124	22:03:05~22:05:33	477.4	1784.0	6.4×2.0	841~1489	73	79.3
17590	20110125	21:28:40~21:31:08	832.1	842.3	10.4×3.9	1146~1824	75	245.3
27387	20110125	22:29:46~22:32:10	750.9	796.4	10.0×2.5	1086~1256	32	198.0
25400	20110126	12:39:44~12:43:32	801.3	814.9	10.4×3.9	1171~1616	76	243.1
18403	20110127	12:46:15~12:49:18	934.9	1020.0	6.0×2.4	1162~1741	31	91.2
24809	20110130	12:03:39~12:09:48	654.8	1652.0	5.9×2.4	1240~1960	36	118.9
10793	20110130	12:16:18~12:20:20	568.1	1926.0	6.0×1.4	977~1858	39	122.5
23769	20110130	12:36:03~12:40:02	358.3	850.8	5.9×2.4	827~1187	104	126.8
23769	20110205	11:59:19~12:01:26	358.3	850.8	5.9×2.4	860~1233	60	53.5
18586	20110206	12:24:08~12:29:41	757.0	787.0	6.0×2.4	867~1567	64	73.3
20509	20110208	11:42:21~11:44:46	948.2	1013.0	6.0×2.4	1001~1520	57	89.5
18313	20110208	12:48:12~12:53:02	942.0	956.0	2.6×2.2	1048~1473	39	60.9
29713	20110208	12:56:20~12:59:43	610.2	651.4	4.0×2.0	787~1533	56	114.0

表 2 中第 1 列为空间碎片北美防空联合司令部 (NORAD) 编号;第 2 列为试验观测日期;第 3 列为试验观测时间段[采用世界协调时间(UTC),包括搜索卫星的时间和实际测得回波信号的时间];第 4 列和第 5 列分别为空间碎片近地点和远地点距离,

因为空间碎片轨道会随时间变化而发生改变,所以近地点和远地点在一段时间后会发生改变,这里的数据仅为试验提供参考;第 6 列为空间碎片尺寸,试验中选取的空间碎片均为火箭残骸,形状为圆柱体,表中数据为圆柱体长度和直径;第 7 列为观测目标

在测距时段距离变化范围;第8列为有效回波点数;第9列为漫反射激光测距数据测量精度。其中空间碎片近地点、远地点、尺寸等信息均通过网站 Calsky (<http://astroinfo.org/calsky>) 获得。数据处理过程是先对测量数据采用屏幕处理的办法,即通过直观的办法,将明显不是回波的点剔除,然后再对剩余的数据采用拉格朗日多项式拟合,并剔除2.5倍标准偏差以外的噪声点,结果表明在收到回波信号的时间段内回波率均高于14%。至于测距精度,云南天文台试验系统的光子接收器、计时器的测时精度很高,可以达到1 cm水平,故测距系统的测距精度主要取决于激光器的脉宽。现有大功率大能量激光器的脉宽约为10 ns,对测距精度的影响为2~2.5 ns,相应于30~40 cm。由表2可以看出漫反射激光测距误差范围为50~250 cm,可能是空间碎片体积较大,由空间碎片不同位置的回波形成不同的距离值而导致测距误差偏大,即测距误差包含了空间碎片几何尺度的信息。测距误差分布也基本符合体积越大误差越大的规律,所以对于尺寸未知的空间碎片,可以通过测距误差来初步判定空间碎片的尺寸。另外空间碎片的实时姿态对漫反射激光测距精度也有很大的影响。

6 结 论

通过理论分析,估算了云南天文台1.2 m望远镜进行漫反射激光测距的成功概率,计算结果表明,云南天文台漫反射测距试验系统可对400~1000 km远的大小为1~2 m的空间碎片进行有效的漫反射激光测距。漫反射激光测距实测试验结果验证了理论分析的正确性,同时也表明云南天文台已经具备了空间碎片漫反射激光测距能力,测距误差范围为50~250 cm。对漫反射测距误差来源进行了分析,指出测距误差主要是因为空间碎片不同位置的回波形成不同的距离值而造成的,也就是测距误差包含了空间碎片的几何尺度信息。提出对于尺寸未知的空间碎片,可以通过测距误差来判定其几何尺寸的推论。

空间碎片漫反射激光测距试验中获得了空间碎片较为精确的距离值,利用这些距离可以精确测定空间碎片的位置和轨道,有利于空间碎片的监测和规避。在此基础上,提出切实可行的方案,进一步发展国内空间碎片漫反射激光测距网,为空间碎片探测提供一种有效的技术手段。

致谢 感谢上海天文台杨福民研究员在试验初期给予的帮助和有益讨论。同时感谢鞠德华、何超在数据采集方面给予的支持。

参 考 文 献

- Liu Jing, Wang Ronglan, Zhang Hongbo *et al.*. Space debris collision prediction research [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, **24**(6): 462~469
刘静, 王荣兰, 张宏博等. 空间碎片碰撞预警研究[J]. 空间科学学报, 2004, **24**(6): 462~469
- Du Heng, Liu Jing. Manned spaceflight and space debris [J]. *Aerospace China*, 2002, (2): 18~23
都亨, 刘静. 载人航天和空间碎片[J]. 中国航天, 2002, (2): 18~23
- Qi Xianfeng. The observation summarize of space debris [J]. *Aerospace China*, 2005, (7): 24~26
祁先锋. 空间碎片观测综述[J]. 中国航天, 2005, (7): 24~26
- Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1178~1182
张己化, 姚东升, 谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1178~1182
- Cao Zhibin, Xu Jin, Ma Jianbo *et al.*. Research on orbit determination with sparse data of electronic fence [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2008, **49**(4): 444~454
曹志斌, 徐劲, 马剑波等. 电子篱笆稀疏资料定轨方法研究[J]. 天文学报, 2008, **49**(4): 444~454
- Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Yang Fumin *et al.*. Statistical analysis of successful detection probability of the returns in satellite laser ranging [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, **31**(3): 28~29
吴志波, 张忠萍, 杨福民等. 卫星激光测距回波探测成功概率统计分析[J]. 测绘科学, 2006, **31**(3): 28~29
- Ye Shuhua, Huang Cheng. *Astrogeodynamics* [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House, 2000. 91~118
叶叔华, 黄城. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000. 91~118
- Ben Greene. Laser Tracking of Space Debris [R]. 13th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2002
- Yang Fumin, Zhang Zhongping, Chen Juping *et al.*. Preliminary results of laser ranging to un-cooperative targets at Shanghai SLR Station [C]. Proc. of 16th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2008. 695~699
- Li Zhulian, Xiong Yaoheng. Timing device used in Kunming satellite laser ranging station [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, **5**(2): 161~166
李祝莲, 熊耀恒. 云南天文台卫星激光测距中的测时仪器[J]. 天文研究与技术, 2008, **5**(2): 161~166
- Li Zhulian, Xiong Yaoheng, He Miaochan *et al.*. Principle of 1.2 m telescope satellite laser ranging system [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, **5**(3): 248~252
李祝莲, 熊耀恒, 何妙婵等. 云南天文台人造卫星激光测距系统原理[J]. 天文研究与技术, 2008, **5**(3): 248~252
- Feng Hesheng, Xiong Yaoheng, Jiang Chongguo *et al.*. The height of detection technique for single photo-lunar laser ranging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(Z1): 29~33
冯和生, 熊耀恒, 姜崇国等. 单光子探测技术的高峰——月球激光测距[J]. 光子学报, 2000, **29**(Z1): 29~33
- Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli. Waveband selection for space target detection and identification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 67~71
李雅男, 孙晓兵, 乔延利. 空间目标探测与识别的波段选择[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 67~71
- Zhang Leihong, Yang Yan, Zang Huaguo *et al.*. Reflective characteristics of target in laser rangefinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1001~1004
张雷洪, 杨艳, 臧华国等. 目标反射特性对激光测距的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1001~1004