

云南天文台月球激光测距研究与实验

李语强^{1,2}, 伏红林¹, 李荣旺^{1,2*}, 汤儒峰¹, 李祝莲^{1,2}, 翟东升^{1,2},
张海涛¹, 皮晓宇¹, 叶贤基³, 熊耀恒¹

¹中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

²中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210034;

³中山大学物理与天文学院天琴引力物理研究中心, 广东 珠海 510275

摘要 为了实现嫦娥四号中继星的激光测距, 需要开展月球激光测距(LLR)进行技术验证。中国科学院云南天文台基于 1.2 m 的望远镜研制了共光路 LLR 系统, 在攻克了多项技术难题后, 于 2018 年 1 月 22 日成功探测到 Apollo 15 月面反射器的回波信号, 实现了 LLR。多次重复实验结果表明, 该 LLR 系统具备极弱激光信号探测能力, 系统测量精度达到米级。

关键词 测量; 激光测距; 激光测月; 单光子探测技术; 月面角反射器

中图分类号 P228.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0104004

Research and Experiment of Lunar Laser Ranging in Yunnan Observatories

Li Yuqiang^{1,2}, Fu Honglin¹, Li Rongwang^{1,2*}, Tang Rufeng¹, Li Zhulian^{1,2},
Zhai Dongsheng^{1,2}, Zhang Haitao¹, Pi Xiaoyu¹, Ye Xianji³, Xiong Yaoheng¹

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China;

²Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences,
Nanjing, Jiangsu 210034, China;

³Tianqin Research Center for Gravitational Physics, School of Physics and Astronomy,
Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong 510275, China

Abstract In order to realize the laser ranging of Chang'e-4 repeater satellite, the study of lunar laser ranging (LLR) is needed to be carried out for technical verification. Yunnan Observatories of Chinese Academy of Sciences develops a common optical path LLR system based on the 1.2 m telescope. After many technical difficulties are overcome, the echo signal from the Apollo 15 reflector on the lunar surface was successfully detected on January 22, 2018, and the LLR is realized. Repeated experimental results show that the LLR system has the ability to detect very weak laser signals, and the measurement accuracy of the system reaches meter level.

Key words measurement; laser ranging; lunar laser ranging; single photon detecting technique; lunar surface retro-reflector

OCIS codes 120.1880; 120.4820

1 引言

作为最精确的地月测量手段, 月球激光测距(LLR)至今已有近 50 年历史, 其原理是通过精确测量激光脉冲在地面测站与月面激光后向反射器

(Apollo 15, Apollo 14, Apollo 11, Lunakhod 1 和 Lunakhod 2)之间的飞行时间, 结合光速计算得到距离^[1]。地面测站与月面激光后向反射器之间的距离及其变化包含了十分丰富的信息, 对天文地球动力学、地月科学、月球物理学和引力理论等诸多科学

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2018-09-03; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(U1431116, U1631134, U1731112, 11403102, 10778705, 11655001)、中国科学院青年创新促进会(2015044, 2014048)

* E-mail: lirw@ynao.ac.cn

研究有着重要的价值^[2-3],如测定月球的形状、大小、表面特征和内部结构^[2,4],引力理论和广义相对论效应的检验,等效原理的验证,万有引力常数的变化以及日月系统潮汐等^[2,5]。

LLR代表单光子探测技术的高峰,经过近50年的常规观测运行和技术发展,LLR依然是一项技术难度高的复杂任务。目前,国际上有近50个台站可以进行人造卫星激光测距,高精度的卫星激光测距数据得到了广泛应用^[6-7],然而,能够开展常规LLR工作的仅有美国的MLRS(McDonald laser ranging station,口径为0.76 m的望远镜)、Apollo(3.5 m望远镜)^[8-9]、法国的Grasse^[10](1.5 m望远镜)和意大利的MLRO(马特拉激光观测天文台,1.5 m望远镜)等4个观测站。因受激光测距望远镜口径和激光器等众多因素的限制,前期国内开展LLR实验的台站较少。20世纪末,中国科学院云南天文台的1.2 m望远镜是在当时国内口径最大的测距望远镜,是最具潜力的激光测月望远镜之一^[1],昆明测距台站从20世纪80年代末至今一直致力于LLR的研究^[11-12]。近年来,国内其他测站亦陆续开始进行LLR技术研究。地月距离约为384000 km,而常规卫星激光测距所对应的卫星从近地轨道到地球同步轨道,距离对于LLR来说较近。在卫星激光测距与LLR中,回波光子数与距离的4次方成反比;在同样条件下,进行LLR时回波光子数小于地球同步轨道卫星激光测距的1/10000,故LLR比常规卫星激光测距难得多。为了使发射出去的激光能量更集中,在进行LLR时,需要激光发散角尽量小,这对望远镜的跟踪和指向精度提出了更高的要求。

经过多年不断的研究和探索,在攻克了LLR的多项技术难题后,中国科学院云南天文台建立了1.2 m望远镜10 Hz共光路激光测月系统,并于2018年1月22日成功探测到了Apollo 15月面反射器的回波,率先在国内实现了LLR。对1.2 m望远镜激光测月系统以及实验结果进行了详细的介绍和分析。在提高望远镜跟踪精度和指向精度的基础上,对测月回波信号识别进行了深入研究,为中国即将开展的嫦娥四号中继星激光测距奠定了基础。

2 云南天文台LLR系统

LLR通过精确测定激光脉冲从地面观测站到月面激光反射器间的往返时间 Δt ,计算出地面观测站至月面激光反射器间的距离 R 。 R 和 Δt 之间的关系为

$$R = \frac{1}{2}c\Delta t, \quad (1)$$

式中 c 为光速。

相比于常规卫星激光测距,LLR的距离非常遥远,回波光子数稀少,根据激光雷达测距方程估算,回波光子数甚至达到了亚单光子量级^[11]。图1所示为云南天文台1.2 m望远镜10 Hz的LLR系统框图,其中CMOS为互补金属氧化物半导体,GPS为全球定位系统。LLR系统主要包括1.2 m望远镜及其跟踪控制系统、激光器、激光发射光路、回波接收光路、单光子探测器(SPAD)、事件计时器、时间频率系统、测距控制系统、目标成像系统、环境监测系统、激光测月软件系统等,通过各部分协调工作,完成月面反射器的精密指向跟踪和激光测距等。

2.1 光学系统

2.1.1 望远镜

云南天文台1.2 m望远镜采用地平式机架,高度轴采用力矩电机直接驱动,方位轴采用双力矩电机摩擦传动方式驱动。望远镜的主要参数如表1所示,有效通光孔径为1060 mm,主镜、副镜均为抛物面,主镜焦距为1800 mm,副镜焦距为-240 mm,两镜共焦,组成焦比为7.5的无焦望远镜光学系统。方位轴保精度跟踪速度为 $0.004\sim 3$ ($^\circ$)/s,高度轴保精度跟踪速度为 $0.004\sim 1$ ($^\circ$)/s。

2.1.2 激光发射光路

激光发射光路由激光器、转镜、反射镜 $M_5\sim M_8$ 、扩束镜和分光镜等组成,如图2所示。发射激光时,激光束穿过转镜,经反射镜反射进入扩束光路,被扩束为准直光,再经分光镜反射进入望远镜向目标发射,最终激光发散角达到 $2''$ 。

激光器是发射光路中的重要设备之一,本研究使用北京镭宝光电技术有限公司生产的SGR-Extra-10型氙灯泵浦激光器,其参数如表2所示。激光器输出纳秒脉冲激光,单脉冲能量为3 J,光束能量分布为超高斯型,平均能量密度为 0.8 J/cm²,峰值能量密度约为 2 J/cm²。

2.1.3 回波接收光路

回波进入望远镜后被转镜反射进入接收光路,接收光路如图3所示,由转镜、反射镜、聚焦透镜、分光镜和探测器等组成。接收光路有两个作用,一是将回波光束变换为适合探测器要求的光束,二是尽可能地滤除噪声光子。LLR回波信号微弱,月球背景光又非常强,故有效地滤除噪声是LLR的关键步骤之一。云南天文台1.2 m望远镜LLR系统采用

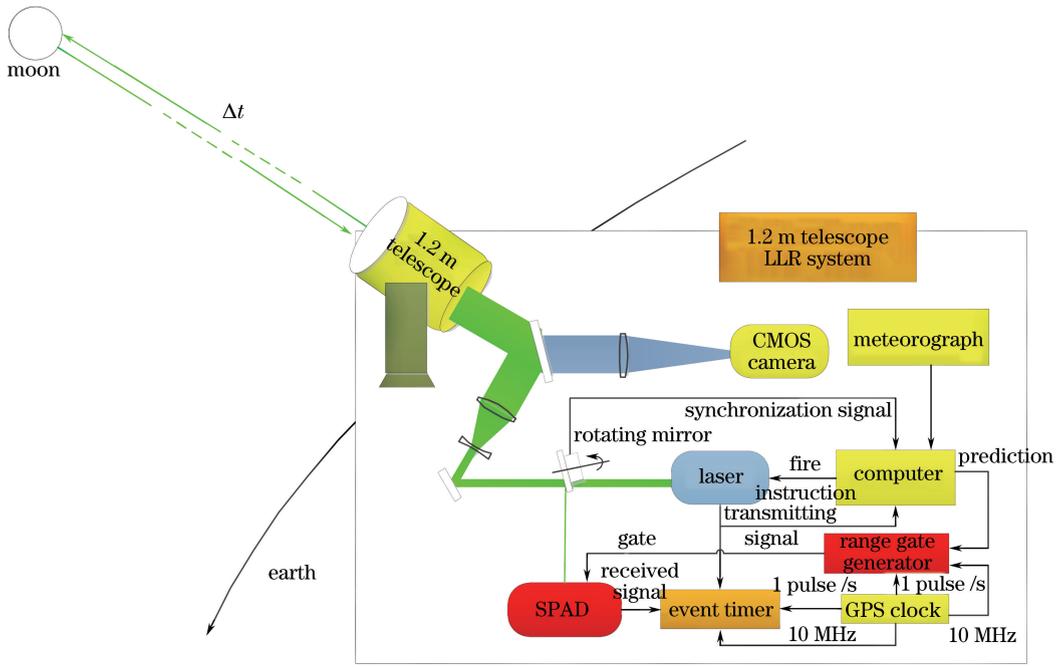


图 1 1.2 m 望远镜激光测月系统框图

Fig. 1 Block diagram of 1.2 m telescope based lunar laser ranging system

表 1 望远镜主要参数

Table 1 Main parameters of telescope

Parameter name	Value
Effective aperture /mm	1060
Primary mirror focal length /mm	1800
Secondary mirror focal length /mm	-240
Pointing accuracy /(")	1
Accuracy-ensured tracking speed-azimuth /[(°)/s]	0.004-3
Accuracy-ensured tracking speed-altitude /[(°)/s]	0.004-1
Max angular velocity-azimuth /[(°)/s]	6

表 2 激光器主要参数

Table 2 Main parameters of laser

Parameter name	Value
Wavelength /nm	532
Pulse energy /J	3
Repetition rate /Hz	10
Pulse width /ns	10
Divergence angle /mrad	0.5
Beam diameter /mm	22

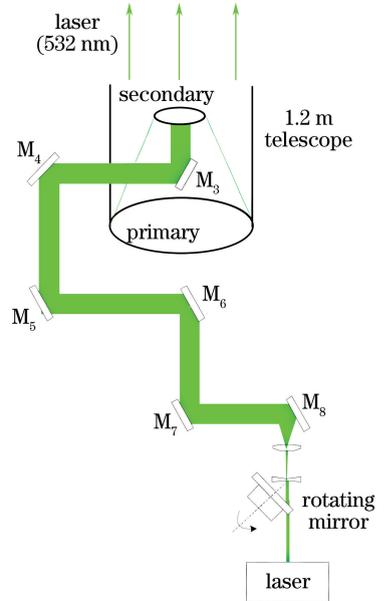


图 2 激光发射光路

Fig. 2 Optical path for laser transmitting

续可调,视噪声情况选用不同的接收视场;超窄带滤光片的带宽为 0.2 nm,峰值透过率为 65%。适当的接收视场配合超窄带滤光片可有效地滤除 LLR 的绝大部分背景噪声。

CMOS 相机作为目标监测光路终端接收器件,用于建立望远镜指向模型和在 LLR 时对月面成像以确认望远镜指向,其光谱响应如图 4 所示,详细参数如表 3 所示。在接收光路中,高量子效率单光子

准直滤光光路来滤除噪声光子,如图 3 所示,由聚焦透镜、准直透镜、小孔光阑、窄带滤光片组成。聚焦透镜和准直透镜组合使回波光束与探测器口径匹配;小孔光阑可减小接收视场,以达到滤除与回波方向不同的噪声光子的效果;窄带滤光片可滤除与回波光波长不同的噪声光子。接收视场为 5"~30"连

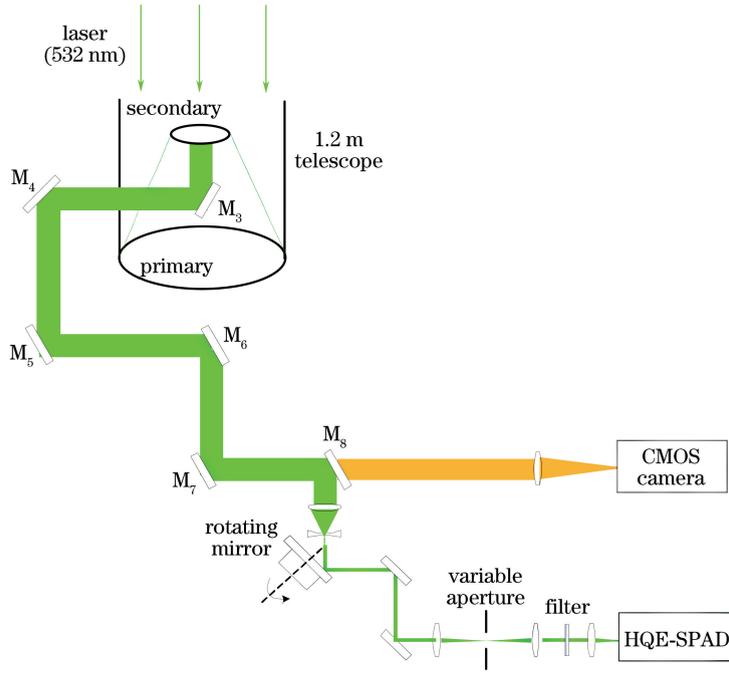


图 3 接收光路

Fig. 3 Optical path for receiving

雪崩探测器 (HQE-SPAD) 用来探测从月面返回的亚单光子信号, 其详细参数如表 4 所示。

表 4 探测器主要参数

Table 4 Main parameters of detector

Parameter name	Value
Photosensitive area diameter / μm	500
Quantum efficiency at 532 nm /%	>60
Dark count at 1 kHz	15
Recovery time /ns	50
Time jitter /ps	160

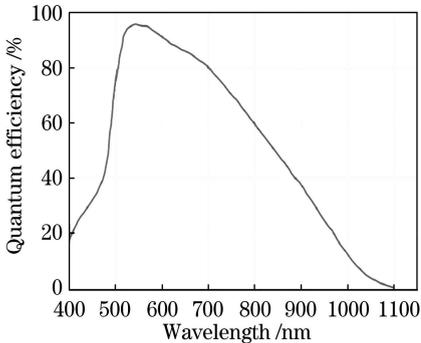


图 4 HQE-SPAD 的量子效率

Fig. 4 Quantum efficiency of HQE-SPAD

表 3 CMOS 相机主要参数

Table 3 Main Parameters of CMOS camera

Parameter name	Value
Photosensitive area /($\text{mm} \times \text{mm}$)	13.2×13.2
Detecting efficiency at 500-600 nm /%	>78
Number of pixels /($\text{pixel} \times \text{pixel}$)	2048×2048
Dark current at $-10, -20, -30\text{ }^\circ\text{C}$ / ($\text{electrons} \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.061, 0.02, 0.006
Exposure time /s	0.001-10
Reading speed /($\text{frame} \cdot \text{s}^{-1}$)	30-100

2.2 测距控制与数据采集

2.2.1 测距控制

如图 5 所示, 月球测距控制系统包括转镜、HQE-SPAD、事件计时器、PIN 主波探测器、激光器、时统和控制计算机等。进行 LLR 时, 转镜产生测距同步信号(sync), 控制计算机在收到该信号后根据用户指令选择是否发送激光点火指令(fire)。激光器收到点火脉冲指令后发射激光, 激光经发射光路进入发射望远镜, 发射望远镜将光束准直后瞄准月面反射器。激光器发射激光时, 分极少一部分光给 PIN 主波探测器用于产生主波信号(trans)并传送至事件计时器以记录激光发射时刻, 即主波时刻; 同时送回控制计算机计算距离门控时刻, 结果传至距离门发生器。在回波快到达时, 由距离门发生器产生门控信号(gating signal)并传送给 HQE-SPAD 以探测回波信号, 并由事件计时器记录回波到达时刻, 即回波时刻。同时将主波/回波时刻送至控制计算机进行数据初步处理及显示, 用于测距时实时回波信号的监测。

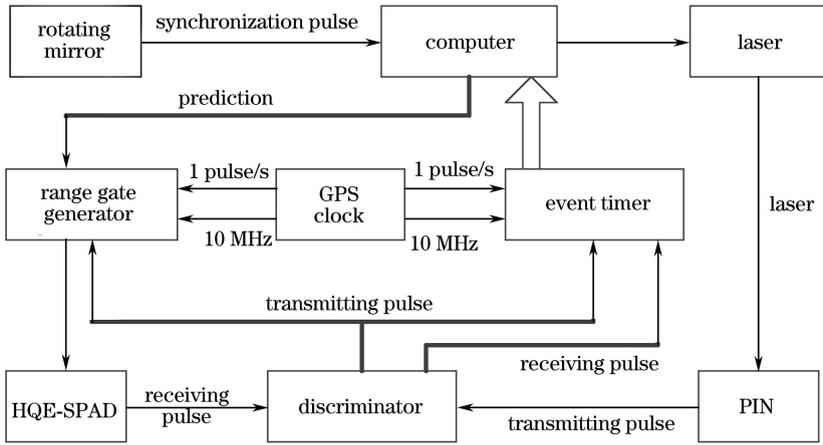


图 5 激光测距控制框图

Fig. 5 Block diagram of control system for laser ranging

10 Hz 测距控制系统的电路时序如图 6 所示。转镜产生 10 Hz 同步信号,利用每个同步信号的上升沿控制计算机产生一个激光发射指令信号,激光器接收指令信号后发射激光;PIN 主波探测器探测

每次发射的激光信号并输出主波脉冲;一旦接收到主波信号,控制计算机就根据观测目标轨道距离信息计算回波到达时刻,结果传送至距离门发生器,由它在回波快到达时传送门控信号给 HQE-SPAD。

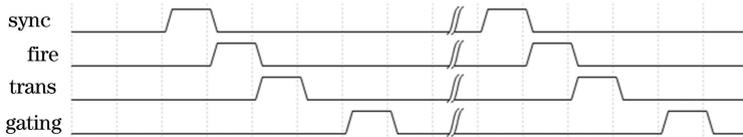


图 6 LLR 系统工作时序图

Fig. 6 Operational time sequences of LLR system

2.2.2 数据采集

在测月实验中采用 A033-ET 事件计时器[分辨率小于 1 ps,精度小于 5 ps,死时间(dead time)为 50 ns]进行数据采集。如图 7 所示,计时器通过并

口数据线(EPP)与计算机连接,观测时,控制计算机发送采集数据控制命令至事件计时器,并实时取回测量数据,测量结果在计算机屏幕上显示,用于指示是否测到回波信息。

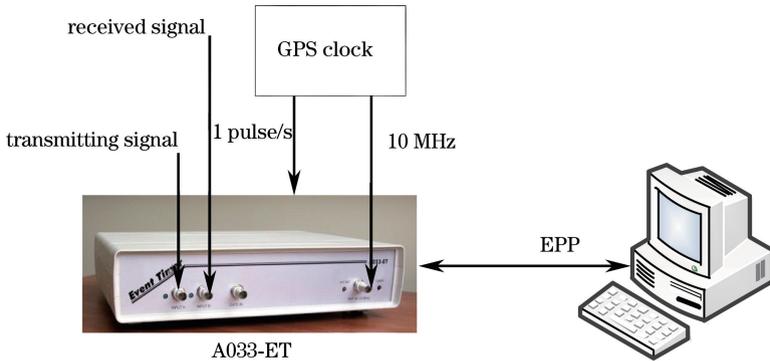


图 7 数据采集框图

Fig. 7 Block diagram of data acquisition

3 LLR 实验与数据分析

3.1 观测实验

1.2 m 望远镜 10 Hz 共光路 LLR 系统研制完

成后,于 2017 年 11 月中旬开始激光测月实验,并于 2018 年 1 月 22 日晚的三个时段成功测到 Apollo 15 角反射器的回波数据,以下将每个观测时间段的数据称为一组。此后,于 1 月 23 日测得 3 组 Apollo

15、1 组 Apollo 14 和 2 组 Apollo 11 数据;于 1 月 24 日测得 1 组 Apollo 15 和 1 组 Apollo 14 数据;于 1 月 26 日测得 3 组 Apollo 15、2 组 Apollo 14、1 组 Apollo 11 数据。图 8 所示为于 2018 年 1 月 23 日测得的 Apollo 15 残差数据情况,横坐标为激光发射时刻(世界时间代码,UTC),纵坐标为测量距离与预报距离之间的偏差(残差)。实验期间共成功测量 35 组数据,其中包括 26 组 Apollo 15 数据、3 组 Apollo 11 数据、6 组 Apollo 14 数据,测距实验结果统计如表 5 所示。

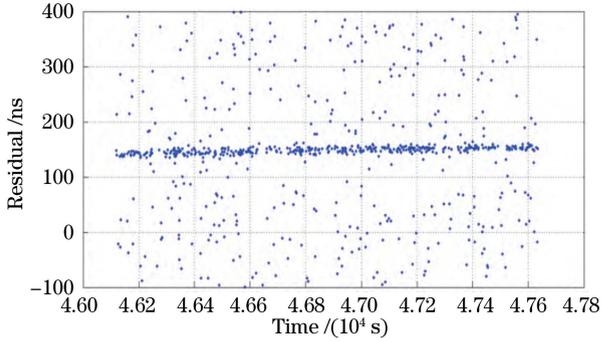


图 8 Apollo 15 测距残差数据

Fig. 8 Residual of Apollo 15 reflector

表 5 LLR 实验观测数据统计

Table 5 Data statistics from experimental observation of LLR

Date	Apollo 15	Apollo 11	Apollo 14
2018/1/22	3	0	0
2018/1/23	3	2	1
2018/1/24	1	0	1
2018/1/26	3	1	2
2018/1/27	1	0	0
2018/1/28	1	0	0
2018/2/20	1	0	0
2018/2/21	2	0	0
2018/2/22	3	0	0
2018/2/23	1	0	0
2018/2/24	2	0	0
2018/2/25	1	0	1
2018/3/23	2	0	0
2018/3/24	2	0	1

3.2 数据分析

对激光测月实验获得的数据进行信号识别和预处理分析,可得到数据的精度、回波率及信噪比,形成标准点数据,并对其进行有效性验证。

3.2.1 信号识别

对测距残差数据在距离门内的分布进行网格划分,用直方图统计每个网格内的数据点数。网格的

宽度(残差方向)为 10 ns(或 15 ns),长度为整个观测数据段的时间跨度,得到直方图统计图,信号可能出现在数据点数最多的网格。图 9 所示为图 8 中测距残差数据的直方统计图,横轴为网格所处的残差位置,纵轴为网格的数据点数。

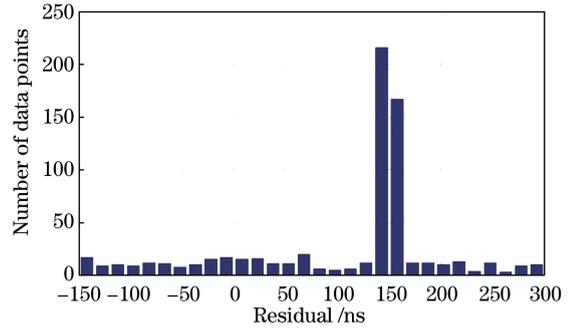


图 9 直方统计图

Fig. 9 Histogram

对直方统计的结果进行 Poisson 概率分析^[13],对所有网格内的数据点数进行平均,以此平均值 λ 作为 Poisson 分布的特征值,此时每个网格出现点数 n_k ($n_k = 0, 1, 2, 3, \dots$) 的概率为

$$P(n_k) = \frac{\lambda^{n_k}}{n_k!} \exp(-\lambda). \quad (2)$$

设定合适的阈值 T ,若某个网格的数据点数概率 $P(n_k)$ 小于阈值 T ,即认为该网格内包含了回波信号,识别该网格内的数据为信号点数据,回波信号识别的结果如图 10 所示。

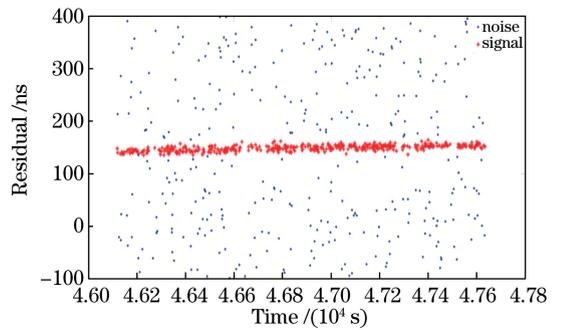


图 10 回波信号识别结果

Fig. 10 Recognition results of echo signal

3.2.2 数据处理

在识别出信号数据后,通过低阶多项式拟合计算数据内符合精度的点,并统计分析数据的信噪比和回波率。

对测月数据进行 20 s 的分时段统计,即统计 20 s 内的信号回波点数及对应时段内的噪声点数和激光脉冲个数。该 20 s 内的信噪比(SNR)和回波率可以分别表示为

$$S_{\text{SNR}} = \frac{N_{\text{signal}}}{\sqrt{N_{\text{signal}} + N_{\text{noise}}}}, \quad (3)$$

$$E_{\text{rate}} = \frac{N_{\text{signal}}}{N_{\text{pulse}}}, \quad (4)$$

式中： N_{signal} 为该时段内的信号点数； N_{noise} 为噪声点个数； N_{pulse} 为该时段内的激光发射脉冲数。以图 10 测得的 Apollo 15 反射器的观测数据为例，计算得到分时段统计的信噪比和回波率如图 11、12 所示。

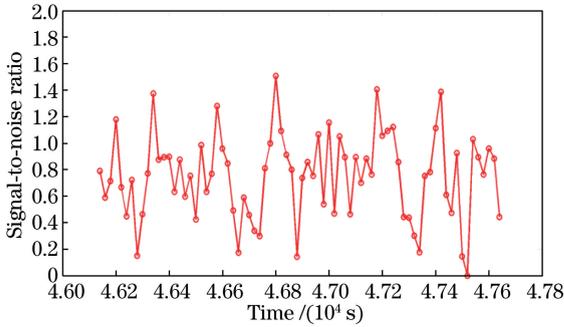


图 11 分时段信噪比统计

Fig. 11 Time-interval SNR statistics

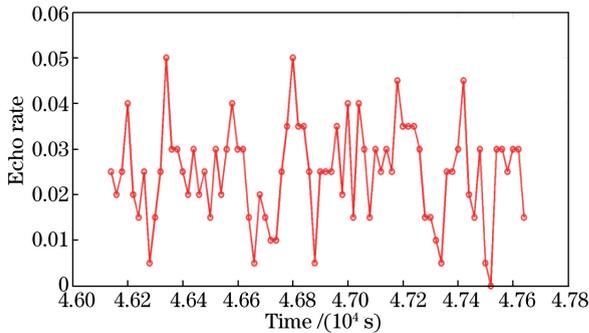


图 12 分时段回波率统计

Fig. 12 Time interval echo rate statistics

进行分时段统计，由(3)式与(4)式计算整段数据的总信噪比与总回波率。图 10 中测量数据的时间跨度约为 1500 s，共测到 376 个回波点数，数据单次测量精度约为 119 cm，整段数据的信噪比约为 6.5，回波率约为 2.5%。

3.2.3 数据验证

按照国际激光测距网给出的标准点算法，将测量数据生成标准点。标准点数据主要包括测距日期、时刻、激光飞行时间、反射器编号、测站编号、回波点个数、数据信噪比、气象参数、激光波长等信息。测量数据生成标准点后，上传至由 Paris Observatory Lunar Analysis Center 开发的 Lunar Laser Ranging Service^[14] 网站上进行验证。2018 年 1 月 23 日 13 点(UTC)观测的 Apollo 15 数据的验证结果表明，该测量数据的距离偏差为 0.196 m。

实验期间共获得 35 个标准点数据，对所有的标准点数据进行了验证，结果表明，测量偏差的标准偏差分别为 0.752 m(Apollo 11)、0.375 m(Apollo 14)和 0.329 m(Apollo 15)。可见，云南天文台 LLR 系统对 Apollo 11、Apollo 14、Apollo 15 反射器阵列的测距精度优于米级。

4 结 论

随着探月活动的不断升温，对月球的探测再次成为天文观测领域的研究热点之一。通过 LLR 数据的积累和分析，进行天文地球动力学、地月科学、月球物理学和引力理论等学科的研究，是其中重要的科研活动。云南天文台经过多年的理论研究与技术攻关，在中山大学“天琴计划”的促进下，在 LLR 领域上取得了重大突破，为我国即将开展的嫦娥四号中继星激光测距技术奠定了良好基础。本研究对云南天文台 1.2 m 望远镜共光路 LLR 系统及其最初期的观测实验数据处理方法进行了介绍和有效性验证。目前，受激光器脉冲宽度的影响，测量精度达米级。下一步，将使用窄脉宽激光器进行 LLR 实验，力争将 LLR 精度提高到厘米级。

参 考 文 献

- [1] Ye S H, Huang C. Astrodynamics [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2000: 154-157.
叶叔华, 黄城. 天文地球动力学 [M]. 济南: 山东科技出版社, 2000: 154-157.
- [2] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H, *et al.* Lunar laser ranging science: Gravitational physics and lunar interior and geodesy [J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 67-71.
- [3] Zerhouni W, Capitaine N, Francou G. The contribution of LLR data to the estimation of the celestial pole coordinates [J]. *Proceedings of the 16th International Workshops on Laser Ranging*, 2008: 302-304.
- [4] Müller J, Biskupek L, Hofmann F. Earth orientation and relativity parameters determined from LLR data [J]. *Proceedings of the 19th International Workshop on Laser Ranging*, 2014: 3033.
- [5] Battat J B, Murphy T W, Adelberger E G, *et al.* The Apache point observatory lunar laser-ranging operation: Testing general relativity with millimeter-precision measurements of the earth-moon separation [J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2006: 1108.

- [6] Zhang Z P, Cheng Z E, Zhang H F, *et al.* Global laser ranging observation of Beidou satellites and data application[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0404004.
张忠萍, 程志恩, 张海峰, 等. 北斗卫星全球激光测距观测及数据应用[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0404004.
- [7] Liu T, Chen H, Shen M, *et al.* Spinning satellite laser ranging data analysis and processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0504001.
刘通, 陈浩, 沈鸣, 等. 旋转卫星激光测距数据分析与处理[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0504001.
- [8] Murphy T W, Adelberger E G, Battat J B R, *et al.* The apache point observatory lunar laser-ranging operation: instrument description and first detections [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2008, 120(863): 20-37.
- [9] Battat J B R, Murphy T W, Adelberger E G, *et al.* The apache point observatory lunar laser-ranging operation (APOLLO): Two years of millimeter-precision measurements of the earth-moon range[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2009, 121(875): 29-40.
- [10] Veillet C, Mangin J F, Chabaudie J E, *et al.* Lunar laser ranging at CERGA for the ruby period (1981-1986) [M]. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1993: 189-193.
- [11] Xiong Y H. Research on a new technical method for the lunar laser ranging [D]. Kunming: Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2001.
熊耀恒. 月球激光测距的新技术方法研究[D]. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2001.
- [12] Guo R, Xiong Y H. The detection and computation of atmospheric tip-tilt in lunar laser ranging when adaptive optics technology is used [J]. Acta Astronomica Sinica, 2004, 45(4): 413-421.
郭锐, 熊耀恒. 自适应光学技术应用于激光测月中大气波前倾斜量的探测与计算[J]. 天文学报, 2004, 45(4): 413-421.
- [13] Abbot R I, Shelus P J, Mulholland J D, *et al.* Laser observations of the moon: Identification and construction of normal points for 1969-1971[J]. The Astronomical Journal, 1973, 78: 784.
- [14] Barache C, Bouquillon S, Carlucci T, *et al.* Web interface for lunar laser ranging observations [C]. Systèmes de Référence Spatio-Temporels 2010, 2011: 81-82.