

卫星激光测距的新进展

张 忠 萍 杨 福 民

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

扼要综述了近几年国际上卫星激光测距的进展,介绍了国内激光测距网的现况,展望了未来卫星激光测距的发展。

关键词 卫星激光测距 — 白天测距 — 光电接收器 — 激光器 — 计数器 —
卫星质心改正 — 中国激光测距网

分类号 P129

1 概 述

经过 30 多年的发展,卫星激光测距技术在各方面都得到了很大的提高,特别是近几年,光电子、电子技术、计算机等学科日新月异的发展推动着激光测距技术的进步。目前,卫星激光测距的单次测距精度已达到亚厘米级,正在向第四代(毫米级)激光测距发展。不少台站具有白天观测能力,测距范围从几百 km 到二万多 km。测距系统普遍采用计算机控制,实现了自动跟踪。观测点数和圈数成倍增加,有效地提高了标准点精度。通常观测只需一人操作。有些站正在试验全自动观测,并取得了一些结果。

随着 SLR 的测距精度的提高,SLR 在许多领域中得到应用,其中包括:测站的三维地心坐标精确测定、精确的地球参考系的建立、精确测定地球引力场模型及其时变性、研究地球质心的位置变化以及精确测定地球自转参数等。同时,还帮助各类应用卫星的精密定轨,开展全球海洋学和地球物理学等研究。此外,还用于相对论的检验^[1]和洲际时间比对^[2]。

近几年来,在各国科学家的努力下,全球台站分布有所改进,尤其是增加了南半球台站^[3]。美国 NASA 同法国合作,将一台流动站搬到南太平洋 Tahiti 岛上;美国又与南非合作,在南非的 Hartebeesthoek 建一个测距站,成为在非洲大陆的第一个基准站;德国计划将流动型的多种技术综合观测设备 TIGO 安置到智利,其中包括 SLR 测距系统;中国与阿根廷合作将于 2001 年底在阿根廷西部 San Juan 建一个测距站;美国也将在阿

根廷东部 La Plata 建立 SLR 测距系统。

随着 SLR 在空间地球动力学研究中的作用日益显著,国际合作更加广泛。除 NASA 网外,欧洲、西太平洋地区相继成立了 EUROLAS 和 WPLTN 区域网,有力推动了区域网的发展。中国参加了 WPLTN 区域网。为了组织国际联合观测、加强合作和协调,于 1998 年 11 月在德国第 11 届国际激光测距会议上成立了“国际激光测距服务(International Laser Ranging Service, 简称 ILRS)”^[3],中央局设在 NASA/GSFC,下设五个专业组。该组织与 IGS、IVS(国际 VLBI 服务)、IERS 一样隶属于 IAG,目前该组织下属有 50 余个观测站,其中包括约 10 个流动站。

目前,可观测的带有后向反射器的卫星有 30 余颗。这些卫星中有专门用于激光测距的卫星,更多的是应用科学卫星,如欧洲遥感卫星 ERS,海洋卫星 TOPEX 等,目的是通过激光测距技术来支持和完成各种科学目标。近几年,发射了不少在前期获得大批成果的卫星的姐妹星如 LAGEOS-2、STELLA、ERS-2。它们与前期卫星相比,除倾角外,重量、直径以及轨道高度都相近,这种发射方式使激光测距数据的分布更加均匀和及时,有利于地球自转参数、地球引力场和有关参数的快速和精确计算。今后,还将发射 TOPEX 的后续星 JASON。

2 卫星激光测距技术的发展特点

2.1 具有白天测距能力的台站增多

白天测距可延长观测弧段,增加观测圈数,对卫星精密定轨非常有用。但白天天空背景噪声比晚上高几个数量级,观测难度比晚上要大得多。是否具备白天测距能力是评价 SLR 站水平的重要指标。近几年来,通过对卫星预报的改进,卫星的位置和距离预报精度有很大提高。Lageos 的位置预报可达 $10\sim 20''$,距离预报精度可达到 5m 左右。近地星的预报基本也能达到白天测距的精度要求。为了进一步提高卫星预报精度,ILRS 要求每个观测站在测距完毕后,立即向国际数据中心发送测距结果,以便及时作出更精确预报。欧洲网已开始有部分站试验准实时交换测距结果,这对于及早捕获目标有重要作用。在技术上采用实时检测和调整激光光束方向漂移的方法来提高瞄准精度。同时还通过改进实时跟踪软件,利用回波信号残差判断法,从白天的强烈背景噪声中检测出卫星回波信号^[4]。通过这些技术改进,目前,国际上约一半观测站已具有白天测距能力。

2.2 多功能高精度自动化

新建的测距系统正朝多功能、高精度和高度自动化发展,如德国的多种技术综合测量设备 TIGO 和美国 NASA 的 SLR2000 系统^[5]。为了减少人力和物力的消耗,增加竞争力,新建的测距系统更加重视系统的自动化程度。澳大利亚 Stromlo 站试验的全自动观测已初步获得成功^[6],领先于 SLR2000。有的站实现了远程控制激光观测,如瑞士 Zimmerwald 站。

2.3 重视大气延迟修正和卫星质心改正

随着测时精度的提高,今后影响 SLR 精度进一步提高的将是大气延迟修正和卫星质心改正^[7]。因此,这两个问题近几年引起了 SLR 界的高度重视。

迄今为止, 大气延迟均根据测距站测距时刻的地面气压、温度等大气参数进行修正。为了提高大气延迟修正精度, 有的站开展了双色激光测距的研究。利用双色激光测距的测量结果可直接修正大气延迟, 而不再依赖模型, 而且测距精度更高。如果双色测距的返回脉冲的间距可以测到皮秒 ($\text{ps}, 10^{-12}\text{s}$) 级, 则大气延迟修正可以精确到毫米级。

卫星质心改正 (CoM) 是卫星激光测距的一个重要参数, 它是卫星激光反射器的分布效应的结果。其效应是由反射器的特性和反射器阵列分布所决定^[8]。质心改正误差影响到卫星轨道的计算。因此, 必须开展激光反射器的分布效应的研究, 对使用中的卫星给出更准确的 CoM 值。同时, 国际激光测距界很重视新型的激光其反射器设计, 以适应毫米级激光测距的需要。1997 年发射的“西太平洋卫星 WESTPAC”, 其反射器的设计精度达到毫米级^[9]。1998 年俄罗斯提出用 Luneburg 透镜原理设计的新型反射器^[10], 估计精度比 WESTPAC 还高。

3 SLR 的几个关键技术

3.1 高精度计时器的研制和应用

20 世纪 80 年代, 国际上普遍采用测时分辨率为 20ps、测时精度为 35ps 的惠普 HP5370 计数器以及后来出现的比较廉价的 STANFORD 公司生产的 SR620 计数器, 测距精度达到 7~10mm。为了改进计数器的稳定性, 提高测时精度, 近几年一些站采用了多台计数器同时测量的技术^[10], 减少了单个计数器的偶然误差, 依靠多次平均使测距精度有了提高。但是, 上述计时器都只能测量时间间隔, 不能用于高重复率的测量。为此, 美国等国家开展事件计时器的研制。经过数年不断改进, 美国研制出精度达 5ps 事件计时器, 并在一些站得到应用, 但这仅是实验室产品。直到 90 年代后期, 出现了精度达到 3ps 商品化的事件计时器, 这是法国 Thomson 公司为航天用途而研制的。因该计时器精度达到皮秒级, 故又称为皮秒事件计数器 (Pico-Event-Timer, 简称 PET), 该计时器不仅精度高, 而且稳定性也很好 (0.1ps/K), 被认为是第四代 SLR 系统的必备部件之一。目前此计时器已在德国、奥地利等观测站使用, 地靶测距精度达到 2mm^[11], 是目前所见报道的最好结果。但该设备价格昂贵, 全套需 20 万美元。

3.2 高灵敏度光电接收器件应用

近几年, 国际上广泛采用单光子雪崩二极管 (SPAD) 和微通道板 (MCP) 光电倍增管作为光电接收器件。这些器件极间间距小, 电子渡越时间短, 因此游动时间也大为减少。目前, 捷克技术大学研制的以硅为光敏面材料的 SPAD 接收器, 因量子效率高 (可达 20%(532nm))、时间游动仅 20ps 而广受欢迎。之后, 在奥地利 GRAZ 站协助下研制成功带有时间游动 (time walk) 补偿和外壳恒温控制的 C-SPAD, 解决了 SPAD 受回波信号幅度变化而引起系统距离偏差的问题, 使该接收器具有更大的动态范围^[12]。该器件已广泛应用于 SLR 站, 包括绝大部分的欧洲、澳大利亚、日本以及全部中国站, 被认为是最有前途的 SLR 和 LLR(激光测月) 的器件。另外, 一种以锗为光敏面材料的新型光电接收器件正在试验中。这种器件响应时间更快、频谱范围更宽, 具有更好的输出波形和更高的量子效率。相信该器件不久会在 SLR 中得到很好的应用。

NASA 的 SLR 站和部分欧洲站使用微通道板 (MCP) 光电倍增管作为光电接收器件。此器件光阴极面大, 光学系统准直容易。在多光子接收情况下, 测距精度可达到 8~10mm。主要缺点是量子效率低, 一般只有 10%。另外比较娇嫩, 工作寿命有限。正在研制中的 NASA/GSFC 的 SLR2000 系统计划采用四象限的 MCP-PMT(光阴极面为四象限光敏区), 除了具有普通管子的功能外, 还可以探测回波信号在光阴极面上的位置, 以实现闭环自动位置跟踪。

3.3 激光器件的改进和提高

80~90 年代, 各测距站普遍采用脉冲氙灯泵浦的被动或主被动锁模 YAG 器件。这种器件结构较简单, 输出稳定。之后, 一些站用自滤波非稳腔 (SFUR) Nd:YAG 器件应用于 SLR。此器件结构更简单, 光学元件少, 放大级数少。缺点是脉冲波形和能量的稳定性较差, 对测距精度有一定影响。为了提高工作效率和改善激光器件的稳定性, 近年来, 新设计的器件采用了半导体激光来代替脉冲氙灯泵浦^[12]。用这种器件研制的激光器体积小、重量轻, 重复频率可高达 1~2kHz 其效率比氙灯泵浦高, 因而可延长激光器件的寿命, 很适合高重复率激光测距。目前有三种此类器件: 一种是澳大利亚 EOS 公司的, 采用半导体激光泵浦锁模振荡器和再生放大级, 氙灯泵浦二级功率放大级, 输出脉宽为 25ps。重复率为 10Hz, 全功率输出时为 50mJ(532nm)。如仅使用振荡器和再生放大级, 则重复率为 1kHz、输出能量为 150 μ J(532nm), 也可进行测距。一种是法国 B.M.Industries 公司为德国 Wettzell 站的 TIGO 大型流动站和瑞士 Zimmerwald 站制造的激光器。采用半导体激光泵浦 Cr:LiSAF 主动锁模振荡器, 然后再经过 Nd:YAG 调 Q 激光器泵浦的 Ti:Sapphire 再生放大级和二级多通放大级, 输出为双波长, 846nm 和 423nm, 重复率为 10Hz, 脉冲能量 40mJ。还有一种是 NASA/GSFC 为 SLR2000 研制的全部用半导体激光泵浦的小型 Nd:YAG 被动调 Q 器件, 采用振荡级和多通放大级配合, 脉冲能量为 100 μ J(532nm), 重复率达 2kHz。此系统技术先进, 光学元件较少, 体积小, 成本较低。预期稳定性和可靠性都较好。

4 中国 SLR 网的现状^[14]

中国 SLR 网由 5 个固定站和 2 个流动站组成。固定站分布于上海、长春、北京、武汉和昆明。其中上海、长春和昆明属于中国科学院, 北京属国家测绘局, 武汉由国家地震局和中国科学院共管。在国家攀登项目、国家重大科学工程—地震网络工程以及创新工程的有力支持下, 近几年, 取得了很大的成绩。单次测距精度提高到 10~20mm; 观测圈数逐年增加。中国科学院的长春人卫站每年观测圈数约 2600 圈, 在全球 50 个台站中进入前十名; 中国科学院上海天文台和北京的国家测绘研究所每年观测圈数也在 1500 圈左右; 资料的质量得到明显改善, 资料可用率在 95% 以上; 系统的短期和长期稳定性得到显著改进, 在国际 SLR 界占据了一席之地。作为中国网组织协调的中国科学院上海天文台, 经过多年的努力, 通过采用多种先进的滤波技术, 改进了预报软件等方法, 首先在国内实现了白天测距, 达到了国际先进水平^[15]。目前, 国内各站都在加强技术改造, 为实现白天测距作准备。云南天文台拥有口径 1.2m 的望远镜, 具有很强的测距能力, 有

可能成为国际上为数不多的激光测月站。

两台 SLR 流动站分属于西安测绘研究所和国家地震局地震研究所。地震所的流动站已流动到北京, 与北京 SLR 固定站并置观测, 取得了很好的结果。两台流动站计划在 3 年内流动测量十多个站点, 用于监测中国地壳运动。

上海天文台作为亚太地区 SLR 数据中心和数据分析中心, 负责国内 SLR 资料的归档观测资料的评估, 每周发表全球观测资料的评估报告。同时, 利用国内及国际的 SLR 资料, 进行天文地球动力学和大地测量等应用研究。

5 未来 SLR 技术的展望

(1) 测距精度将提高一个量级。新一代 SLR 系统将采用短脉冲、可靠性好的双波长激光器件和皮秒事件计时器。同时, 卫星激光反射器采用新的设计方法。有可能使单次测距精度提高到 2~3mm, 标准点精度提高到 0.5mm。

(2) 实现高度自动化 SLR 系统, 无人值守的全自动运行。

(3) 使用对人眼安全的、重复率达 1~2kHz、绿光 532nm 输出能量为 100~200 μ 激光测距系统。因而, 对飞行的飞机不会造成影响。

(4) 发展非同步激光应答器, 实现对行星探测器的精确激光测距。

(5) 利用卫星上安装的铯原子钟或氢原子钟、激光反射器、光子接收器和高精度事件计时器等, 配合现有地面的 SLR 站, 实现全球范围的高精度时间传递。最高传递精度有可能达到 20ps。

参 考 文 献

- 1 Ciufolini I et al, Science, 1998, 279. 2100
- 2 Fridelance P, Veillet C. Metrologia, 1995, 32: 27
- 3 Pearlman M et al. eds. 1999 ILRS Annual Report, NASA/GSFC
- 4 Kirchner G et al. In: Yang Fumin ed. Proceedings of 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 1996: 545
- 5 Degnan J. In: Schlueter W ed. Proceedings of 11th International Workshop on Laser Ranging, Frankfurt Germany: Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 389
- 6 Luck J et al. In: Bianco G ed. Proceedings of 12th International Workshop on Laser Ranging, Mater Italy: ASI, Center for Space Geodesy, 2000(in press)
- 7 Degnan J. Geodynamics Series, 1993, 25: 133
- 8 范建兴. 博士论文, 杭州: 浙江大学, 2000
- 9 Burmistrov V B et al. In: Schlueter W ed. Proceedings of 11th International Workshop on Laser Ranging, Frankfurt, Germany: Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 292
- 10 Kirchner G et al. In: Yang Fumin ed. Proceedings 10th International Workshop on Laser Ranging, Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 1996: 414
- 11 Kirchner G et al. In: Bianco G ed. Proceedings of 12th International Workshop on Laser Ranging, Mater Italy: ASI, Center for Space Geodesy, 2000(in press)
- 12 Kirchner G et al. In: Schlueter W ed. Proceedings of 11th International Workshop on Laser Ranging, Frankfurt, Germany: Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 521
- 13 杨福民, 《卫星激光测距原理和发展》, 内部教材, 2001

- 14 Yang Fumin. *Surveys of Geophysics*, 2000 (in Press)
15 杨福民等. *中国科学 (A 辑)*, 1998, 28(11): 1048

The Progress in Satellite Laser Ranging

Zhang Zhongping Yang Fumin

(*Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences 200030*)

Abstract

This paper presents the newly progress in satellite laser ranging (SLR) and current status of the Chinese SLR network. The prospects of SLR development in the future are also described.

Key words Satellite Laser Ranging (SLR)—daylight tracking—photo-receiver—laser—timer (Pico-Event-Timer)—CoM—Chinese SLR network