

中国新一代流动卫星激光测距系统研究

郭唐永¹ 李欣¹ 谭业春¹ 李翠霞¹

(1 中国地震局地震研究所地壳运动实验室, 武汉市洪山侧路40号430071)

摘要:我国新一代流动卫星激光测距(SLR)系统TROS-I于2000年建成,并成功地在新疆乌鲁木齐、拉萨西部地区进行了流动观测,弥补了国家SLR跟踪网在亚洲腹地的空缺。本文介绍了TROS-I的组成结构及其在中国西部对Lageos等卫星的观测情况。结果表明,观测标准点精度优于10 mm,最大测程达2万 km,可见,流动观测能有效地增强我国激光测距网的监测能力,对于我国自主卫星的精密定轨、中国大陆地壳现今运动的研究可发挥重要作用。

关键词:流动卫星激光测距;观测圈;流动运输

中图分类号:P228.5; P225.2

自1981年以来,我国上海、武汉、长春、北京、昆明等卫星激光测距站先后投入正常运行,观测精度从早期的dm级到目前的亚cm级^[1-5],实现了白天测距^[6],并作为国际SLR跟踪网的重要成员,参与全球重大观测计划,积累了大量观测资料^[7,8]。这些高精度观测对国际参考框架的维持、高精度全球重力场的测定、空间测地卫星、海洋动力卫星的精密定轨等具有重要意义^[9,10]。

1999年,中国地震局地震研究所研制了一台流动卫星激光测距仪CTRLS^[11],但由于多种原因,CTRLS没有进行流动观测。2000年,地震研究所又根据需求,研制了新一代的流动卫星激光测距系统TROS-I^[12]。本文介绍了这套观测系统的技术特点和观测试验情况。

1 TROS-I的设计

TROS-I采用车载与箱体相结合的结构,较适合我国的实际条件。重型固定设备安装于可移动的箱体内,见图1,轻型电子设备和人员活动空间设计在另一可移动的仪器车上。这种结构的优点是在进出测站时无需专门的移动导轨,箱体底部装配车轮,既可起到缓冲减振的作用,又可以方便近距离移动和调整。为美观起见,箱顶设计成

圆顶形,平时可作为防雨防风防尘等保护,观测时,圆顶可以完全翻开,不影响低高度卫星的观测操作。流动系统分成若干个单元固定于箱体内,箱体外加以防雨防尘的保护。电子设备仪器车选用IEV CO中型客车改装,固定时作为工作人员操作的控制室,并配备了工作台、空调等;运输时,可以挂接箱体车一并移动。

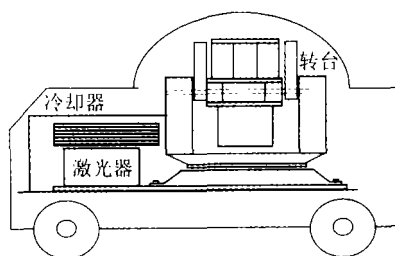


图1 安装转台和激光器的箱体车结构示意图

Fig. 1 Frame of Case with Laser and Mount Installed

1.1 电子接收和测时系统及其工作原理

卫星激光测距的基本原理是测量激光脉冲在测站到卫星之间的往返飞行时间,然后根据光速算出距离。由于卫星高速运动,距离随时间变化,因此,还必须记录所测距离的精确时间。对于cm级的测距精度,要求高稳定的时钟频率基准。由于很难为流动装置配备高稳定的原子时钟,因此,这是提高精度和稳定性要解决的问题。另外,流

收稿日期: 2005-10-12。

项目来源: 中国地壳运动观测网络资助项目; 国家自然科学基金资助项目(40474068); 中国地震局地震联合基金资助项目(105117)。

动系统的激光能量较小,接收孔径小,解决准确定位卫星反射的单光子级别的微弱激光信号是另一难点。目标的捕获、跟踪、精密系统的运输、防振、归心、通信等都是流动系统要专门解决的问题。

为提高时频系统的稳定性和可靠性,引进了 GPS 时间频率接收机。接收机以优良晶体为基础,通过锁定到 GPS 信号的方法,提供优于 5×10^{-12} 的频率标准,因而短期和长期稳定性均达到了较高水平,可靠性大大提高。接收机提供秒信号和 10 MHz 的频率标准,该频率信号一路作为时间间隔计数器的外频率标准,一路给计算机作为系统时钟的输入(见图 2),秒信号仅用于同步系统时钟(精度优于 100 ns)。主波采样是从激光发射光路中分出的极小部分光信号,由雪崩二极管 S-2381 转换成电信号,再经主波定比整形送至时间间隔计数器 SR620,作为起始信号启动计数器开始计时。根据卫星预报结果,在回波即将到来之前,打开计数器距离门控,准备接收回波。光回波信号由 SPAD 接收并转换为电信号,控制计数器关门,以此完成一次时间测量过程。

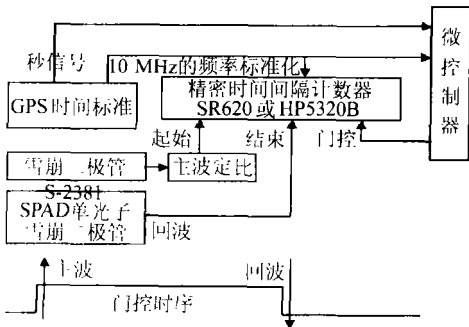


图 2 电子接收系统信号流程及时序图

Fig. 2 Flow Chart and Timing Waveforms of Receiver

由于流动站接收的有效面积比固定站小, SPAD 能否接收到有效的光子是流动 SLR 成败的关键。根据 Pletkin 测距方程,估算 SPAD 光敏面接收到的 Lageos 卫星反射的光子数:

$$E_r = E_t \cdot \frac{4\alpha}{\pi D^2 \theta_r^2} \cdot \frac{4S_r}{\pi D^2 \theta_t^2} \cdot T_A \cdot T_r \cdot T_t \cdot \alpha$$

式中, $E_t = 8.4 \times 10^{16}$ 是激光发射光子数; $\alpha = 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 是反射器的有效面积; $S_r = 9.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, 是接收器的有效面积; $T_A = 0.45$ 是波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 、高度角为 30° 时的大气透明度; $T_r = 0.40$ 是接收效率; $T_t = 0.85$ 是发射效率; $\theta_t = 1.5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 是发射激光发散角; $\theta_r = 10^{-4} \text{ rad}$ 是接收激光发散角; $D = 7.5 \times 10^6 \text{ m}$ 是测量距离; $\alpha = 0.63(2 \text{ db})$ 是大气衰减因子,计算得 $E_r \approx 20$ 。对 ETALON 卫星,考虑到距离的 4 次方反比关系和

卫星反射器有效面积的不同, $E_r \approx 4$, 只要 $E_r > 1$, SPAD 即可产生回波信号,只是探测概率不同而已。可见,此系统可以观测到 2 万 km 的 ETALON 卫星,但回波率比 Lageos 卫星低。

1.2 转台及其光路结构

激光器采用 Nd:YAG 晶体锁模倍频激光器。输出激光波长为 532 nm,第一个脉冲幅度最高,能量约为 15 mJ,70% 以上的主波和回波信号的产生是来源于这个激光脉冲的^[13]。转台安装的跟踪定位精度直接影响到观测命中率,它的可运载性、结构稳定性与检校方法、工具的完善程度又是流动型仪器必须考虑的问题。设计接收物镜的孔径为 38.5 cm,静态指向精度为 $\pm 15''$ 。光学系统的主要特点是:接收、发射光路分开;采用折射轴光路以提高接收的灵敏度,激光器与转台都固定在同一平台上;微光电视监视共用接收望远镜物镜(见图 3)。主镜采用地平式二轴对称性结构,由跟踪机架、镜筒、基座等几个主要部分组成,重量约为 1 t。

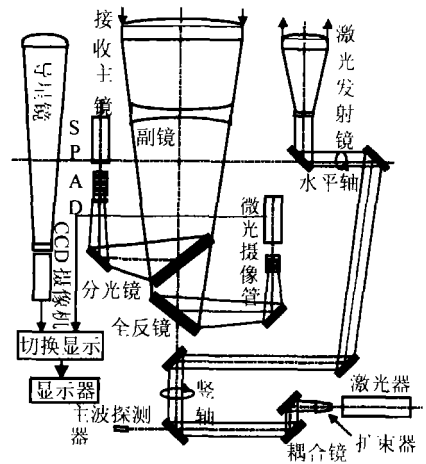


图 3 系统光路结构图

Fig. 3 Configuration of Optics Path

为提高跟踪精度,建立了转台高度角 H 和方位角 A 的指向误差模型修正:

$$\Delta A = (a_1 \cdot \sin A + a_2 \cdot \cos A) \tan H + a_3 \cdot \tan H + a_4 \cdot \sec H + a_0$$

$$\Delta H = h_1 \cdot \cos A + h_2 \cdot \sin A + h_0$$

该模型共含 8 个参数,其中零点常数 a_0 和 h_0 只要测量一次北极星就可以取得。为了确定所有模型的参数,选取一定数量的恒星进行观测,在微机内存储 FK4 星表 1 535 颗较亮恒星的位置,利用微机自动选星,对观测结果进行拟合,取出模型参数。经实时修正后的机架跟踪精度达到 $\pm 10''$ 以内。

1.3 跟踪控制系统

选用 PC 计算机作为控制主机,系统时钟、距

离门控制器、激光发射控制器、伺服系统控制信号、控制时序、数据接口全部集成安装。通过数据接口, 计算机可以与其他所有分系统联系, 获取数据和发出控制指令。控制时序提供所有控制执行的时间关系。时钟按照 UTC 时间进行设置, 跟踪开始和结束、地靶测量均依据此时间, 每次测量记录的激光发射时刻也由该时钟提供, 相应于 10 MHz 的钟频, 时钟精确到 0.1 μ s, 距离门控制范围为 10 ns~ 1.6 s, 分辨率为 10 ns。记录的观测数据包括时间、高度、方位、距离、距离 O-C、靶距、卫星号、日期、起始和结束时间、点数、气象参数、国际站号、激光波长和激光脉冲间隔。

1.4 软件系统

软件系统包括观测区预报、跟踪控制软件、数据预处理、北极星计算软件、系统管理软件、仪器测试校正软件^[14]。由于流动型仪器常要运输移动, 每到一个新站, 都应进行恒星观测来校正转台精度, 检测仪器的各个部分是否正常, 仪器中心定位点的确认等。

2 运载方式

TROS-I 采用车载与箱体相结合的结构, 其主要优点是: 流动性能较好。箱体可以由汽车、火车、飞机、轮船等工具运输, 不存在对专用汽车的依赖性, 可保证随时有效地流动至各测站。

仪器车的改造工作量少, 不需对车箱外形作大的改造。仪器流动至测站后, 其检校的空间较大, 利于检校工作的展开, 提高工作效率。不需设计专门的汽车和转台的落地装置。

3 系统主要性能指标

TROS 设计注重流动性能, 能以 30 km 的时速通过三级公路而不受损失。新到站的准备时间为 48 h。校准在内部进行, 无需安置外部合作目标, 靶距为 65 cm。系统其他的主要性能指标与固定站相当, 见表 1。

4 系统的测试和流动观测

2000 年 4 月, 整个系统按原设计全部安装到流动车上进行运输试验, 仪器车在通往纸坊的普通公路上往返行驶 100 多 km, 最后将其固定在九峰山上。经短暂的装调, 仪器即进入正常状态, 这证明了仪器的防震系统、固定系统设计合理, 能

表 1 系统主要性能指标
Tab. 1 Specifications of System

主要部分		型号或性能参数
转台	跟踪速度	5°/s
	跟踪精度	7'
	分辨率	1'
接收光学系统	口径	38.5 cm
	视场	20' ~ 120''
	滤波片带宽	3 nm
发射光学系统	口径	10 cm
	视场	20' ~ 120''
GPS 时间基准	型号	HP58503
	精度	100 ns
	稳定性	5×10^{-12}
激光器	波长	532 nm
	脉宽	50 ps
	主脉冲能量	15 mJ
电子接收和测时系统	发射速率	1~ 10/s
	单光电子雪崩管	SPAD
	定比鉴别器型号	TENNELEC TC453
	精密计数器型号	SR620
	精密计数器精度	10 ps
整体指标	精密计数器分辨率	4 ps
	测程	20 000 km
	单次精度	1~ 4 cm

很好地满足实际应用。之后进行了一系列的安装测试, 测北极星、定零点、测发散角、定粗略坐标等。2000 年 4 月 16 日, 在九峰第一次测到了 AJISAI(近地)、GLNS-80(远地) 两颗卫星, 其中靶距测试精度在 1.0~ 2.0 cm, 视激光器波形的好坏而定。之后, 测到全部激光卫星, 精度在 1~ 4 cm 左右, 达到了仪器整体的指标设计要求(测程 20 000 km, 单次精度 2~ 4 cm)。

2000 年 8 月, 首次流动 SLR 观测在北京房山 SLR 固定站并址进行。TROS 在北京共观测 52 d, 获得 344 圈数据, 其数据获取率比同期观测的许多固定站还高。表 2 列出了观测到的卫星和相应的圈数。由美国得克萨斯大学空间研究中心(CSR)公告的 Lageos-1 卫星的平均标准点精度为 9 mm, 达到 ILRS 组织制定的标准(10 mm)。数据利用率虽有 80%, 但未达到 95% 的标准。一

表 2 观测到的卫星和圈数

Tab. 2 Satellites and Passes Observed

卫星	圈数	卫星	圈数
LAGEOS-1, 2	42	CHAMP	8
GLONASS	44	TOPEX	53
ETALON	13	BE-C	43
ERS-2	17	AJISAI	60
GFO	15	STARLETT	22
STELLA	23	WESTPAC	4

个重要的原因是激光器的多脉冲选择问题,当激光器工作不稳定时,脉冲的选择就不确定,会导致1.2 m(激光器腔长)的距离偏差,不仅降低了精度,还会使整圈数据剔除。

在北京观测期间,国内对 ERS-2、CHAMP、GFO 三个卫星进行了一次联测。由于流动站计划的观测期较短,因而只参与了部分联测时间,即便在这种情况下,按联测标准综合评定结果,7343 流动站仍然排列第二,这说明 TROS 系统的工作

可靠,性能稳定,具有相当或超过部分固定站的水平。

2001 年至 2002 年,先后在乌鲁木齐(国际站号 7355)、拉萨(国际站号 7356)进行流动观测,分别取得了 44 圈和 120 圈 Lageos 卫星数据。这些资料由全球几个大的数据处理中心进行分析,计算了在 ITRF97 坐标参考框架下的地心坐标,其标准偏差都在 cm 级。各个流动观测站点用不同卫星计算的坐标结果列于表 3。

表 3 各个流动观测站点用不同卫星计算的地心坐标

Tab. 3 Coordinates Calculated by Some Satellites for Each Mobile SLR Sites

计算者	使用卫星数据	站号	X/m	Y/m	Z/m
Appleby(NERC)	Lageos1 和 2	7343	- 2 148 737. 797 3	4 426 710. 169 3	4 044 565. 023 5
Scharroo(DEOS)	ERS2	7343	- 2 148 737. 805±0.019	4 426 710. 171±0. 027	4 044 565. 159±0. 029
Appleby(NERC)	Lageos1 和 2	7355	184 608. 360	4 606 775. 313	4 393 723. 811
Scharroo(DEOS)	ERS2	7355	184 608. 398	4 606 775. 088	4 393 723. 973
Eanes(CSR)	Lageos1 和 2	7355	184 608. 973	4 606 775. 115	4 393 723. 985
Appleby(NERC)	Lageos1 和 2	7356	- 100 535. 761	5 550 605. 396	3 137 037. 869

5 结 语

从综合情况来看,尽管获得了相对较多的数据,但比国际上先进的站尚有较大差距,其原因是不能在白天观测,观测机会减少到 1/3 或 1/4。目前,国内已有几个固定站进行了白天观测技术试验^[6]。若能在流动站上实现白天观测技术,数据量将会大大增加。TROS 在这方面做了一些基础工作,如通过更精密的距离门降低噪声;提高转台修正精度等,为实现白天观测做好准备。随着 TROS 更多站点的观测以及部分站点的重复观测,相信会有更多好的应用结果出现。

参 考 文 献

- [1] 杨福民,谭德同,林钦畅,等. dm 级精度的人造卫星激光测距仪[J]. 科学通报,1981,26(12):738-740
- [2] 何妙福,杨福民,谭德同,等. 上海天文台 GEOS-3 激光测距精度的初步估计[J]. 科学通报,1982,27(11):674-677
- [3] 潘明. 中国地震局地震研究所 DZR- 型高精度人卫激光测距系统的精度估计[J]. 科学通报,1997,32(5):366-369
- [4] 杨福民,谭德同,肖焱昆,等. 上海天文台第三代卫星激光测距系统[J]. 中国科学(A 辑),1990,20(8):844-850
- [5] 杨福民,陈婉珍,张忠萍,等. 上海天文台亚 cm 级单次测距精度的卫星激光测距试验[J]. 中国科学(A 辑),2002,32(10):935-939
- [6] 杨福民,肖焱昆,陈婉珍,等. 白天卫星激光测距系
- [7] 杨福民,谭德同,肖焱昆,等. 上海天文台在国际自转联测期间的 LAGEOS 卫星激光观测和测距精度估计[J]. 科学通报,1996,31(15):1164-1164
- [8] 刘承志,赵有,范存波,等. 长春卫星激光测距站的性能和观测概况[J]. 科学通报,2002,47(8):406-408
- [9] Smith D E, Kolenkiewicz R, Dunn P J, et al. A Global Reference Frame from LAGEOS Ranging (SL5. 1AP) [J]. J. Geophys. Res., 1995, 90: 9 221-9 233
- [10] Tapley B D, Ries J C, Davis G W, et al. Precision Orbit Determination for Topex/Poseidon [J]. J. Geophys. Res., 1994, 99: 24 383-24 404
- [11] 郭唐永,王林华,蔡庆福,等. 流动人卫激光测距系统研制[J]. 地壳形变与地震,1997,18(增刊):66-72
- [12] Guo Tangyong. CMONOC Transportable SLR System[C]. The 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf, Germany, 1998
- [13] Sun Zhanao, Yang Xiangchun, Zhu Xiaolei, et al. A Compact Modified SFUR Passively Mode-Locked Nd: YAG Laser[C]. The 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai, 1996
- [14] Guo Tangyong. The New Software Package for SLR System[C]. The 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf, Germany, 1998

第一作者简介:郭唐永,研究员。现从事空间大地测量技术与应用研究。

E-mail: gouty@21.cn, com

(下转第 81 页)

的不确定性。

第一作者简介: 郭同德, 博士, 副教授。主要研究方向为空间数据

E-mail: guotd@zzu.edu.cn

Error Model of Curves in GIS and Its Digitizing Test

GUO Tongde^{1,2} WANG Jiayao² WANG Guangxia²

(1 College of Environmental & Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, 97 Wenhua Road, Zhengzhou 450002, China)

(2 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: An error model named the stochastic error process of curves is proposed to describe the errors of curves in GIS. In terms of the stochastic process, four characteristics concerning the local error of curves, namely, mean error function, standard error function, absolute mean error function and the correlation function of errors are put forward. The total error of a curve is expressed by a mean square integral of the stochastic error process. The probabilistic meanings and geometric meanings of the characteristics mentioned above are also discussed, and a scan digitizing test is designed. The result of the test shows that the system error in digitized map data is not negligible, and the errors of points on curves are chiefly dependent on the curvature and the concavity of the curves.

Key words: error model of curves; local error; whole error; digitizing test

About the first author: GUO Tongde, Ph. D, associate professor, majors in the uncertainties of the spatial date.

E-mail: guotd@zzu.edu.cn

(上接第 34 页)

New Generation Mobile SLR System TROS-I in China

GUO Tangyong¹ LI Xin¹ TAN Yechun¹ LI Cuixia¹

(1 Crustal Movement Laboratory, Institute of Seismology, CEA, 40 Hongshan Side Road, Wuhan 430071, China)

Abstract: The TROS-I is a new generation mobile SLR system in China. TROS-I has successfully obtained SLR data in Urumqi and Lhasa in middle western China where no SLR station existed before. In this paper, construction and observation result (to Lageos etc.) of TROS-I is introduced. The result is shown that the normal point precision of TROS-I is better than 10 mm, and its effective range is 20 000 km. So TROS-I can help upgrade tracking ability of Chinese SLR network, and it also has great potential in precise orbit determination of home made satellites, research of China crustal movement nowadays etc.

Key words: mobile SLR; observation pass; mobile transportation

About the first author: GUO Tangyong, researcher, majors in the space geodesy for technology and application

E-mail: gouty@21cn.com