文章编号:1001-5078(2010)03-0241-05 ·激光技术与应用·

一种应用于卫星导航定位系统的SLR系统架构与实现

赵 赟,潘 峰,王茂磊,罗可可
(61081部队,北京100094)

摘 要:卫星激光测距(SLR)是一种高精度测量观测点与卫星之间距离的重要方法,它可以为卫星精密定轨和星地时间同步提供高精度观测数据。本文首先介绍了卫星激光测距基本原理,然后从系统架构角度深入分析了用于卫星导航定位系统的激光测距系统的组成和功能,详细阐述了激光测距中光学系统、控制系统等子系统原理及工作过程。最后,按照本文架构实现的激光测距系统给出了实际的测试结果和精度。实验表明,本文提出的激光测距系统具有较高的测量精度,能够满足我国导航定位系统的测距需求。

关键词:卫星激光测距;卫星导航定位;测量结果
中图分类号:TH761.2 **文献标识码:**A

SLR system framework and design based on satellite navigation position system

ZHAO Yun,PAN Feng,WANG Mao-lei,LUO Ke-ke
(61081 Unit,Beijing 100094,China)

Abstract: Satellite Laser Ranging(SLR) is an important method of high precise measuring distance between observation station and satellites. It can apply precise observed data for precise orbit-trimming and sat-ground timing synchronization. The paper firstly introduces the principle of SLR. Then the article analyzes the constituent parts and functions of SLRS on a system framework angle. The theory and course of laser subsystem,ranging optical subsystem,control subsystem etc. are explained in detail. At last,the testing results and precisions according to the system framework are given. The tests prove that SLR has higher position precision. It can satisfy the demands of national navigation and position system.

Key words:satellite laser ranging;satellite navigation and position;measuring

1 引 言

在卫星导航定位系统中,高精度星地距离测量是实现卫星精密定轨的基础,也是提高导航定位精度的必要条件。我国目前采用的是星地双向伪码无线电测距法来实现星地测距,由伪码测距原理可知,伪码在传输过程中的固定延时对测距系统影响不大,这部分延时可通过距离零值的测量得到校准,而伪码传输过程中时延的稳定性对测距的影响很大,测距精度为分米级[1]。为了确保星地测距的精度及可靠性,采用可能的外部比对手段对无线电测距系统进行精度检验是非常必要的。

卫星激光测距(satellite laser ranging,SLR)具有测距精度高、系统误差小、与星钟无关等优点,其测量精度至少好于星地双向伪码无线电测距法一个量级。因此,利用激光测距方法来进行星地距离测量,不仅可以作为检验卫星定轨结果的有效手段,也可不定期地标校无线电星地测距系统的时延变化量。

本文介绍的卫星激光测距系统的测距对象均为(20000~39000)km的人造卫星,且单次测距精度小于3 cm,其测距结果可为导航卫星的精密定轨提供高精密测距数据。

作者简介:赵 赟(1978-),女,本科,主要从事激光测距方面的研究。E-mail:zhaoyun00008@163.com
收稿日期:2009-11-05

2 SLR 基本测量原理

卫星激光测距系统工作原理是通过精确测定激光脉冲从地面观测点到装有反射器卫星的往返时间间隔(用 t 表示),从而算出地面观测点至卫星的距离(用 R 表示),则 R 和 t 有如下关系:

$$R=\frac{1}{2}\cdot c\cdot t$$

其中,c 为光速[2]。

由于激光具有高度相干性、高度单色性、方向性强、亮度高等特性,因此,激光测距技术具有对电磁干扰不敏感、抗干扰能力强、测量精度高、速度快等优点。

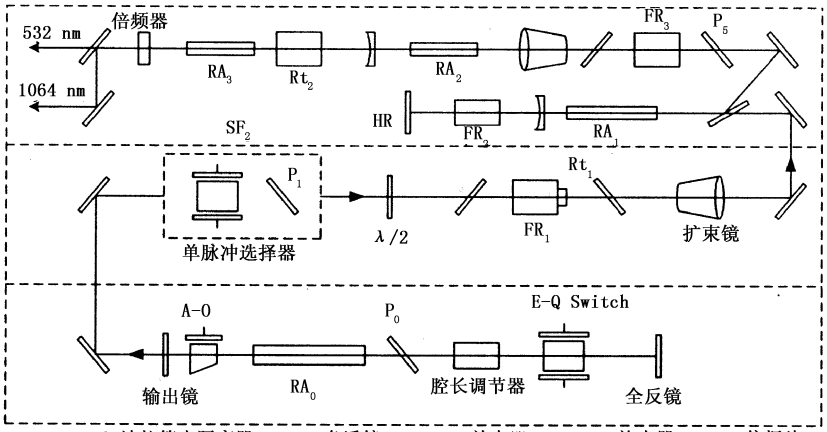
3 SLR 系统组成及实现原理

SLR 系统主要由激光器系统、望远镜伺服控制系统、光学系统、测距控制系统等四个部分组成。其中,激光器系统、望远镜伺服系统、光学系统是物理系统,测距控制系统则是控制 SLR 系统的工作时序和处理流程。

3.1 激光器系统

作为 SLR 系统的重要组成部分,激光器采用的是具有较高单脉冲能量、亚纳秒脉宽的高功率双主动锁模激光器。

图 1 为该激光器的内部光路示意图,激光器主要由主动脉冲锁模主振荡器、隔离系统、光束整形、多级放大系统和倍频器等部分组成,是一台较高能量、亚纳秒、高峰值功率的复杂激光系统。主振荡器采用声光调制器与电光普克尔盒相结合的主动脉冲锁模激光技术,输出单脉冲能量可到毫焦量级。输出的脉冲,经扩束、隔离、整型,经一级双程和两级单通组成的放大系统进行放大,经倍频器倍频后输出。其主要性能参数如表 1 所示。



FR_1-FR_3:45° 法拉第光隔离器;L_1-L_2: 负透镜;RA_1-RA_3: 放大器;Rt_1-Rt_2: 旋光器;P_1-P_6: 偏振片

图 1 激光器内部光路示意图

表 1 激光器主要性能参数

单脉冲能量/mJ	150(532 nm)
脉冲宽度/ps	≤250
光束发散角/mrad	≤0.8
输出光斑直径/mm	~13
重复频率/Hz	20
外触发与出光时间抖动/ns	±30

3.2 望远镜伺服控制系统

该激光测距系统中望远镜伺服系统的方位轴和高度轴均采用大力矩无刷电机直接耦合驱动的传动方式。高度轴和方位轴的电机力矩值如表 2 所示。

表 2 高度轴和方位轴的电机力矩值表

轴 \ 力矩	连续力矩/(N·m)	峰值力矩/(N·m)
高度轴	878	3522
方位轴	2010	6172

望远镜不加修正前的方位和高度指向误差分别为 1.75″和 5.06″,经过恒星(分布在方位角 360°,高度角 20°~80°)观测校准和指向模型修正后,静态指向精度小于 ±4″(RMS)。望远镜方位和高度的编码器分辨率为 0.01″,跟踪精度达 0.7″。远镜的指向精度和编码器分辨率达到角秒量级,这对于实现星地距离测量厘米级精度测量是不可缺少的,同时对白天激光测距时不可见卫星的盲跟踪也具有十分重要的意义[2]。

3.3 光学系统

3.3.1 发射光学系统

测距系统采用的是地平式跟踪望远镜,望远镜的发射口径为 0.3 m,接收口径为 1 m。该望远镜的激光发射光路中包括激光器、小孔装置、七块平面反光镜 M1~M7、目镜和物镜等。激光器位于温控室稳定平台上,使用折轴光学系统(Coude 系统)经发

射望远镜将激光发射出去。图 2 中的折轴光路是指激光器发光后经 3 倍扩束镜,再经 45°反光镜 M1 ~ M7 所通过的路程。折轴光路中激光束在望远镜跟踪过程中需始终与机架的竖直轴线和水平轴线保持重合,才能使望远镜在不同的方位和高度时发射出去的激光束在接收视场中的位置不变。其中反光镜 M3 和 M7 可由步进电机控制进行调节,M3 可保证激光束与望远镜竖直轴线(即方位转轴)重合,M6 可保证激光束与望远镜水平轴线(即高度转轴)重合。

在激光器发光后,调整 3 倍扩束镜,尽量使激光束全部穿过扩束镜,并使激光束位于反光镜 M1 的中心。在反光镜 M1 和 M2 之间的小孔装置,可根据实际激光束光斑大小来选择合适的小孔,并依次调整前一个反光镜使激光束位于后一个反光镜的中心,最终保证激光束从发射望远镜发射出去,此过程中反光镜 M3 和 M6 位置调整是关键部分,起到激光束与望远镜方位和高度转轴保持重合的作用。激光器产生激光后经一级准直后的发散角约为 60″,再经过二次准直后以 7″的发散角通过发射望远镜向卫星发射激光,如图 2 所示。

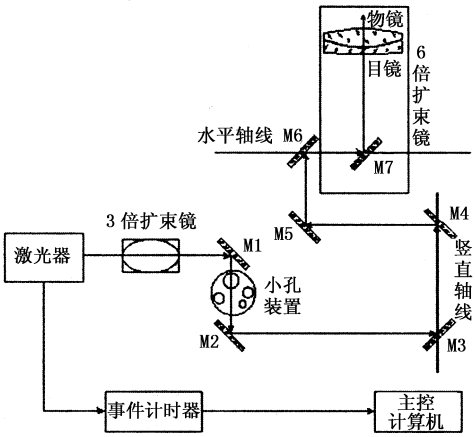


图 2　发射光学系统示意图

3.3.2　接收光学系统

接收光学系统由口径 1 m 的接收望远镜和接收终端箱组成,包括主镜、副镜、光阑、平面反光镜 M8 ~ M10、准直目镜、超窄带干涉滤光器、C - SPAD(单光子雪崩二极管接收器)和事件计时器等。接收望远镜将接收到的光会聚到接收终端箱内,经 45°反光镜 M8 分成两路,此反光镜对绿光的反射率为 90%,其余的光透过率为 95%,即终端箱内有两个主镜焦点,一个焦点位于光阑处;另外一个焦点位于夜间导星 CCD 处。接收终端箱中的光路可分成三大部分:

(1)SPAD 探测光路、夜间导星 CCD 光路、白天 CCD 激光束监视光路,如图 3 所示。卫星和激光束成像到夜间导星 CCD 处,所成的像被传由计算机进行采集并通过软件显示在计算机屏幕上;

(2)532 nm 绿光经反光镜 M8 反射到一个 30″ ~ 200″范围内可变的光阑上,光阑起到抑制背景噪声和空间滤波的作用,穿过光阑的光束再通过准直目镜和 1.5Å 的超窄带干涉滤光片入射到 C - SPAD 光敏面上,光信号(回波信号)转换为脉冲信号送给事件计时器,构成第二条光路;

(3)白天激光束监视 CCD 需要会聚光,需要将光阑处的焦点移至到白天 CCD 处,由目镜 2 和会聚光透镜实现。白天监视激光束时需将反光镜 M9 移至主光路上,再经目镜 2,反光镜 M10,会聚光透镜,构成第三条光路。

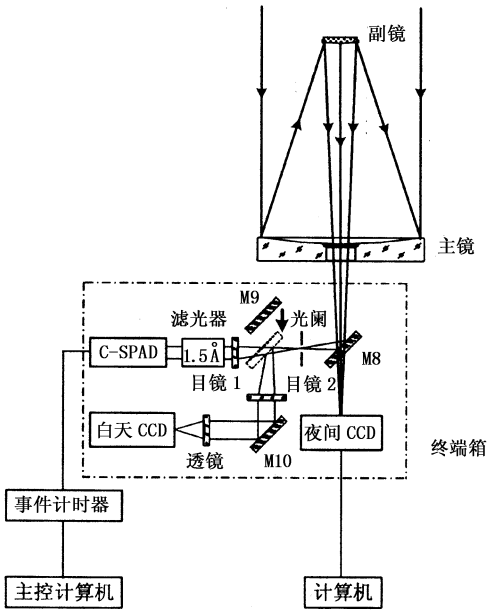


图 3　接收光学系统示意图

3.4　测距控制系统

激光测距控制系统框图如图 4 所示。

测距计算机从信息处理系统获取卫星轨道预报数据后,将其解算成望远镜站址地平坐标系下的目标距离、方位角和俯仰角数据,再加上激光延时时间信息;然后将所要跟踪的卫星代号和卫星预报数据发送给跟踪计算机,跟踪计算机根据所选择的卫星代号和预报数据驱动望远镜的方位和高度力矩电机,使之按预定的轨迹精确地运行,同时提供过流、过速和过卷保护。跟踪计算机还留有一路编码器数据输出接口,供圆顶罩伺服系统使用。此时,望远镜处于待命状态。

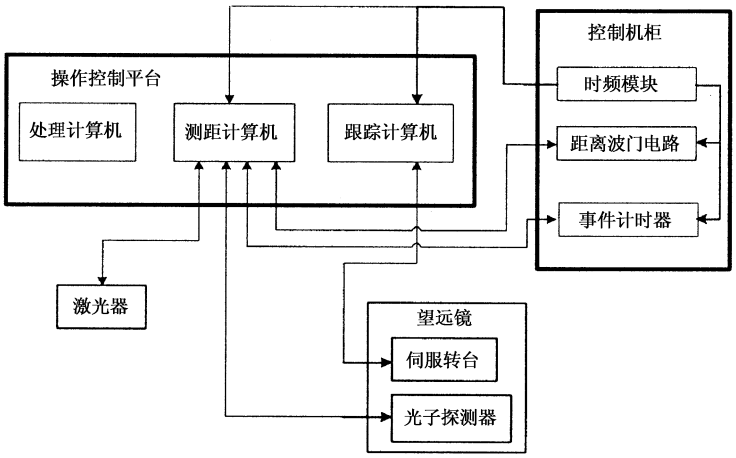


图 4 激光测距控制系统框图

激光器在获得由激光控制器所产生的点灯信号和调 Q 信号后发射激光,经导向光路引入发射望远镜,发射望远镜将光束准直后射向带有激光反射器的人造卫星。同时,在激光器出光孔处装有 PIN 管用于采集一小部分激光作为主波信号,由事件计时器记录主波发射时刻,并启动波门发生器,当波门发生器中的计数器值记录到激光信号往返时间时就向 C - SPAD 发送门控信号,使 C - SPAD 打开接收回波光子并将光信号转为电信号,由事件计时器记录回波信号到达时刻。事件计时器 A 通道记录激光主波信号,B 通道记录激光回波信号,由计算机识别相对应的主回波时刻,两者之差即为卫星距离测量值。

上述获得距离数据中还包含发射和接收光路及电路上的延迟时间,为了将此延时扣除,通常采用的方法是:在地面已知距离点设置地靶目标,然后通过测量地靶的距离,测量值与已知值差即为测距系统的延迟值。卫星距离观测值扣除测距系统延迟值后所得到的距离值即为卫星到望远镜参考点的真实值。

测距结束后,处理机对保存的原始观测数据进行预处理,并加入测距时获得的气象参数,以便为后续计算大气延时值提供有效参数。通过屏幕大噪声剔除和多项式拟合剔除相结合的方法进行噪声滤除,用均方差(RMS)来表征该观测弧段的内符精度,这里的均方差是指对距离残差(O - C)进行多项式拟合后的拟合残差均方差(RMS)。

4 观测结果

上述介绍的激光测距系统从 2009 年 4 月 21 日到 6 月 23 日期间,连续对某颗导航卫星进行有效测距,在天气晴朗或有薄云的情况下,共获得 17 圈观测数据,如表 3 所示。

表 3 2009.04.21 ~ 2009.06.23 激光测距结果统计表

日 期	开始时间(UTC)	弧段/min	点 数
4 月 21 日	12:42:22	38.8	243
4 月 24 日	12:17:31	96.5	3056
4 月 25 日	13:53:36	32.8	668
4 月 26 日	13:32:17	46.4	719
4 月 27 日	13:24:11	40.3	435
4 月 28 日	12:50:28	107.4	112
5 月 17 日	13:26:49	153.0	3082
5 月 18 日	14:32:23	82.7	2579
5 月 19 日	13:02:02	12.2	94
5 月 22 日	12:53:46	99.2	6100
5 月 23 日	12:36:29	87.0	3598
6 月 09 日	13:23:25	126.0	5424
6 月 10 日	12:48:19	249.6	13317
6 月 11 日	14:25:58	15.5	679
6 月 20 日	14:06:38	21.4	62
6 月 22 日	15:12:35	19.7	894
6 月 23 日	13:59:41	46.8	1096

卫星激光测距过程可近似地看成是等精度的多次测量。它反映测量值在平均值附近的分布,是测量精度的体现。举例说明:图 5 和图 6 分别对应的是 6 月 11 日的观测原始数据的距离残差图和处理后的距离图,记录数据点数为 2321 点,处理后有效点数为 679 点。同时图 5 中也给出了 TB,RB,TL 值。TB 为时间偏差,即实际测得的标定时间与预报时间的差值;RB 为距离偏差,即实际测得的距离值与预报距离值的偏差;TL 为观测弧段总长度,即实际测到数据的时间长度。

图 5 中形成黑色直线的数据点称为有效数据

点,其余数据点为噪声点。对该图的有效点数进行多项式拟合,拟合残差均方差(RMS)即为该弧段的测距精度,如图 6 所示。经过计算后得到本次测量的测量精度为 2.03 cm。

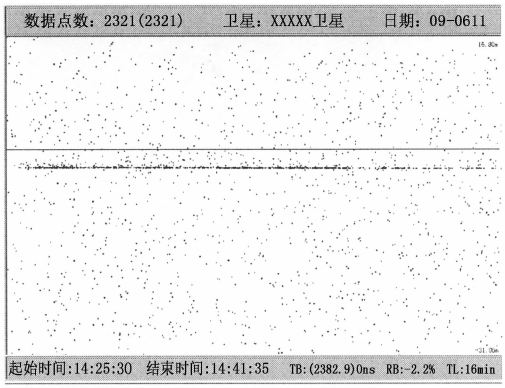


图 5　6 月 11 日测量的距离残差图

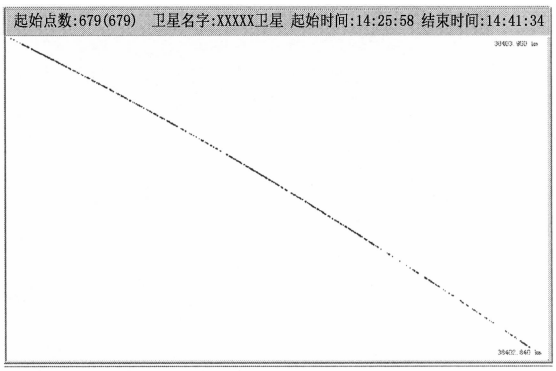


图 6　6 月 11 日处理后的距离图

5　总　结

卫星激光测距(SLR)是一种精密测量技术,在很多领域都广泛应用。本文提出的系统架构是国内首次实现应用于导航卫星激光卫星测距的 SLR 系统。测距实验结果表明,此 SLR 系统的单次测量精度小于 3 cm(换算为时间即 <0.1 ns)。这种精度可作为卫星导航系统的外部比对手段,对无线电测距系统进行精度检验,以达到检验卫星定轨结果的目的。

参考文献:

[1]　李秋娜,袁嗣杰,刘东华. 基于高级在轨系统的无线电测距方法研究[J]. 计算机测量与控制,2006,14(2):172 - 174.

[2]　齐炜胤,等. 激光测距技术在空间的应用[J]. 中国航天,2008,(5):38 - 42.

[3]　郑向明,王武,等. 1.2 m 地平式望远镜指向模型的研究[J]. 天文学报,2003,44(3):330 - 336.

[4]　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,(2):161 - 166.

[5]　吴志波,张忠萍,等. 事件计时器在卫星激光测距中的应用[J]. 中国科学院上海天文台年刊,2007:135 - 141.