

文章编号:1001-5078(2017)09-1102-06

· 激光应用技术 ·

# 高自动化卫星激光测距系统研究与设计

丁仁杰<sup>1</sup>, 吴志波<sup>1,2</sup>, 邓华荣<sup>1</sup>, 汤凯<sup>1</sup>, 张忠萍<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 卫星激光测距(SLR)技术因测量精度高而广泛应用,但由于涉及多门学科领域使得系统复杂,制约了自动化水平提高,影响着该技术的发展和推广应用。基于上海天文台SLR系统平台,分析了SLR的操作流程,提出光学系统、伺服系统、控制系统及远程监控管理系统等自动化发展方向,设计了角秒级精度光束指向瞄准方法,研制了精度为1"的小型化伺服控制系统,实现了观测模式的快速切换,并搭建远程监控管理系统,使整个SLR系统的自动化能力得到提高,减少了人力操作,提高了观测效率。应用上述研究成果,在国内成功进行了SLR的远程控制实验,实现了SLR系统的异地操作和监控,为SLR的全自动化及远程控制应用奠定了技术基础。

**关键词:** 卫星激光测距; 自动化; 远程控制

**中图分类号:** TN247    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.09.008

## Research and design of high automation satellite laser ranging system

DING Ren-jie<sup>1</sup>, WU Zhi-bo<sup>1,2</sup>, DENG Hua-rong<sup>1</sup>, TANG Kai<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-ping<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Satellite laser ranging(SLR) technology is widely used because of its high precision. But the system is complex because it involves multi-disciplines. This restricts its automation level, and influences the development and application of the technology. Based on Shanghai observatory SLR system, the operation process was analyzed, and the automation development direction of optical system, servo system, control system and remote monitoring management system was analyzed. A method of beam pointing with second of arc precision was designed. A small size servo control system with 1" accuracy was developed. The rapid switching of observation model was achieved, and the remote monitoring management system was set up. This improves the automation ability of the system, reduces the human operation burden and improves the efficiency of the observation. The SLR remote control experiment has been successfully carried out in domestic by the application of the research results above. The research lays a technical foundation of the full automation and remote control application of SLR.

**Key words:** satellite laser ranging; automation; remote control

### 1 引言

卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)是一种利用窄脉冲激光、高效率光学发射和接收系

统以及高精度计时系统,通过测定地面台站和装有角反射器的人造卫星之间的光行时间从而得到精确距离的测距技术。目前,SLR单次测量精度

基金项目:国家自然科学基金项目(No. U1631240; No. 11503068)资助。

作者简介:丁仁杰(1991-),男,硕士研究生,主要从事卫星激光测距自动化的研究。E-mail: drj@shao.ac.cn

收稿日期:2017-03-13

已达毫米级,被公认为空间目标测量手段中精度最高的技术,在卫星的精密定轨、确定地球自转参数、建立和维护全球地球参考框架以及实现全球范围的高精度时间传递等方面获得广泛应用<sup>[1]</sup>。SLR 技术涵盖激光、电子、微光探测、自动控制、精密光学机械、天文测量和卫星轨道计算等多个学科领域,是一项复杂的综合技术。系统复杂制约了该技术的自动化发展,使得系统工作效率依赖于人工操作水平,也不利于站点的流动工作,影响了该技术的发展和推广应用,发展高自动化 SLR 系统具有十分显著的意义。

国际上 SLR 领域对于自动化发展非常重视。美国在 1996 年提出发展新一代全自动化卫星激光测距系统,简称 SLR2000,旨在实现对卫星的全天候全自动化高重复率观测<sup>[1]</sup>。澳大利亚 EOS 公司依靠强大的技术实力,将 Mt Stromlo 站改造成世界上唯一的自动化 SLR 站点<sup>[2]</sup>。欧洲德国 Wettzell 站、瑞士 Zimmerwald 站近些年也提出发展自动化台站,目前已取得阶段性进展<sup>[3-4]</sup>。国内台站在自动化能力提高上的研究起步较晚,但在相关技术不断推动下,国内站点都完成了探测能力强的高重复频率化 SLR 系统,可实现所有 ILRS 卫星的全天时观测,提高自动化水平将是下一阶段的重点目标。

卫星激光测距流程涉及光、机、电等系列操作,自动化发展对光学系统、伺服系统、测距控制系统以及监控管理系统等提出高要求。以上海天文台 SLR 系统为平台,分析了各子系统的具体操作,提炼了高自动化 SLR 系统的重点发展方向和技术途径。提出一种应用光斑位置探头设计的角秒级精度光束指向瞄准方法;研制了基于 PC104 的小型化伺服控制系统;利用偏振光学解决了卫星测距和地靶校准模式的快速切换;搭建了网络远程监控管理系统,使整个 SLR 系统的自动化能力得到提升,减少了人力操作,保障了系统安全。应用上述研究成果,在国内成功进行了卫星激光测距的远程控制实验,实现了 SLR 系统的异地操作和监控,为 SLR 的自动化及远程控制应用奠定了技术基础,具有很好的推广应用价值。

## 2 SLR 系统介绍

### 2.1 系统组成

卫星激光测距系统由激光器与发射系统、望远

镜与跟踪机架、光子接收与精密计时、测距控制、卫星预报与数据预处理等系统组成。各组成部分需在激光测距控制系统统一协调下有序协同开展工作,以完成对卫星台站预报、精密跟踪、激光发射瞄准、回波信号探测接收、数据采集显示存储及预处理等工作。上海台 SLR 系统的组成框图如图 1 所示。

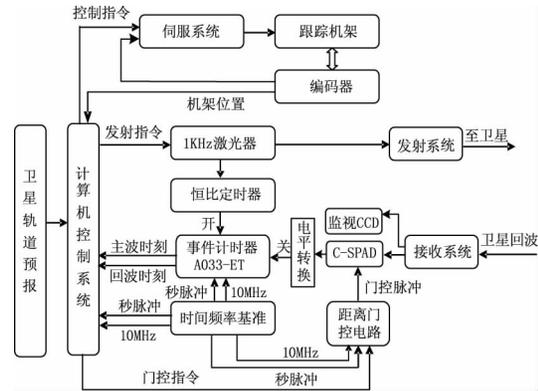


图 1 卫星激光测距系统框图

Fig. 1 Satellite laser ranging system diagram

### 2.2 工作流程

激光测距需要按照一定的工作流程进行,如图 2 所示。

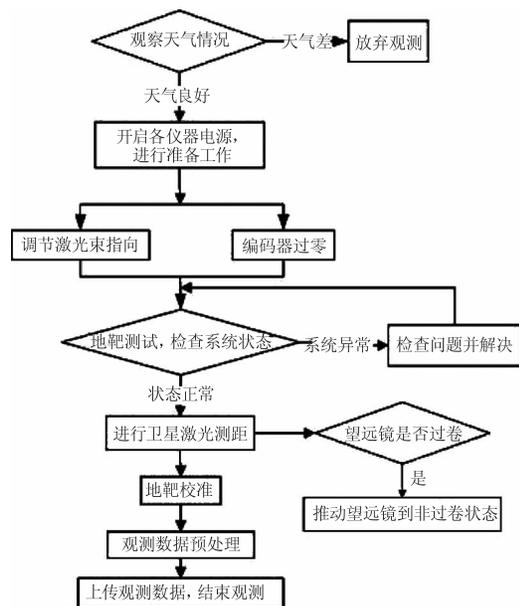


图 2 卫星激光测距工作流程

Fig. 2 Satellite laser ranging flow chart

观测前:首先确认天气状况,良好后即启动系统中各设备或系统,预热并做好出初始化工作,主要包括激光器及光路初始化,望远镜及伺服系统零点校准,以及观测目标的轨道预报和任务表生成等。观

测中:实时修正预报位置偏差以及光束指向偏差,完成空间目标捕获及测距数据采集。观测结束:开展地面靶目标测量完成系统延时标校,进行测量数据处理并上传用户。

### 2.3 自动化研究内容

从卫星激光测距工作流程分析得出,如果系统自动化能力不高,在系统初始化过程和观测过程中观测人员都要进行一定的人工操作,包括光束指向调节、编码器过零、观测模式手动切换等,主要涉及光学系统、伺服系统、测距控制系统等。为此,本文基于典型的 SLR 系统(上海台)平台,针对各 SLR 系统自动化能力不足的共同部分:光学系统、伺服系统、测距控制系统和远程监控与管理系统,开展自动化研究,研究内容如下:

- 1) 设计高精度的光束指向瞄准系统,保证激光光束指向精准;
- 2) 研制小型化的高精度伺服控制系统;
- 3) 对测距控制系统进行优化,解决测星模式与地靶校准模式的自动快速切换;
- 4) 搭建远程监控与管理系统,主要起到系统状态监控和系统安全保护的作用,包含飞机监控、气象监控、视频监控、信号检测、电源远程管理等。

## 3 高自动化 SLR 系统设计

### 3.1 高精度光束指向瞄准系统

激光光束瞄准空间目标是 SLR 成功开展的重要条件,对于发射/接收望远镜分离的 SLR 系统,一般通过判断光束指向与目标星象重合来实现光束瞄准目标。但光束指向的判断基于 CCD 监视发射激光所形成的后向散射图形(光尖),受天气条件、光斑形状、激光功率等多因素影响,即使应用计算机判别,其定位精度仍有限,还需进行人工搜索。此外,目标星象和光束指向重合,对于目标星象的提取造成影响,也不利于自动化工作的开展。光束指向瞄准问题已成为制约 SLR 系统自动化发展的主要因素之一。

上海 SLR 站作为国内典型的 SLR 系统,其发射/接收光路图如图 3 所示。

激光束由激光器发出,经镜片 3 反射,进入望远镜转台的反射镜 4,多次反射后最后经发射望远镜准直输出。出射的光束经大气后向散射后进入监视 CCD,形成光尖图像,用于光束指向检测。考虑到激光发散角一般为  $10''$  量级,如发射轴和接收轴平行度在  $10''$  以内,只要卫星星象闭环进入探测视场,即可使光束准确指向目标,实现激光测距,大幅提高

SLR 系统的自动化水平。

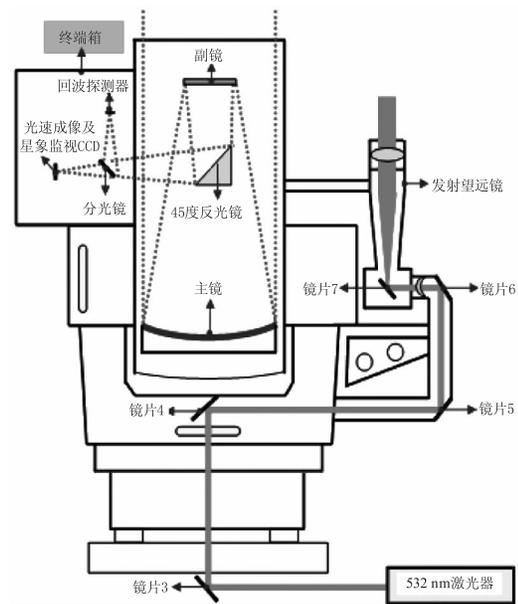


图 3 SLR 系统的发射/接收光路图

Fig. 3 Transmitting and receiving optical path of SLR system

但由于激光光路经过静止平台和望远镜转动平台,如果光路不与转台的旋转轴重合,则激光光束指向与接收轴的平行度会随着望远镜的转动而不断变化。由于镜架的热胀冷缩、实验平台的振动以及望远镜水平的变化,很难保持光路与旋转轴的重合,为此,提出了基于位置探头(PSD)的光束指向瞄准系统。如图 4 所示。

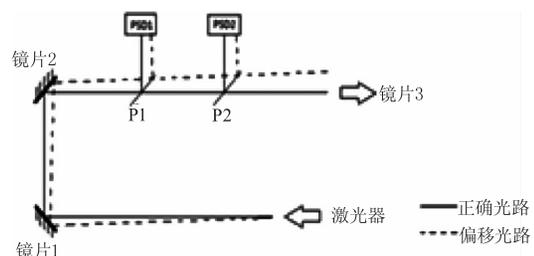


图 4 光路偏离理想情况

Fig. 4 Optical path shift

如图 4 所示,由 P1、P2 确定的光路为理想状态的激光路径。当激光偏离理想路径时,即实际光路相对于 P1、P2 基准点会存在一定的偏移距离,这表现在 PSD 探头上的光斑位置相对基准点发生了偏移,通过几何光学基本理论可得镜片 1、镜片 2 的调节量,然后调节镜片 1 和镜片 2 的俯仰和偏摆使光路自动调整到理想情况。目前已经利用 Aligna 的激光束指向稳定系统在上海天文台 SLR 站的光路系统中进行了实验测试,将 PSD 位置探头运用到光路中后,结合光束稳定算法,可以保证激光光束指向

稳定在基准点处,精度达到 $1''$ 以内。

由于望远镜水平的偏移,导致了光路会偏离上垂足,可以通过监测望远镜的水平,计算光束指向的偏移量,进而通过驱动偏转镜,实现发射轴和接收轴的高度平行,最终实现光学系统的自动化。

### 3.2 小型智能化伺服控制系统

高自动化的 SLR 系统要求涉及的设备少且可控,基于 PC 机构建的伺服控制系统由于体积较大且不能作为模块化单机工作的特性使其难以满足新型 SLR 系统尤其是 SLR 流动站的要求。因此构建小型化的伺服控制系统成为了必要。PC104 为层叠式插针结构,具有小型化、高性能的特点,同时由于 PC104 具有 PC 开放式总线结构,所以基于 PC104 构建的小型化伺服控制系统也具备软件兼容性<sup>[8]</sup>。

以 PC104 为框架,设计了一套小型化伺服控制系统,系统主要由 4 部分构成:PC104 工控主板,拥有多个通讯接口,作为编程平台,负责数据处理和信息交互;PC104 编码器接口卡,读取方位、高度编码器值,其中方位采用两个位置对称的读数头来降低偏心率对编码器读数的影响,使方位编码器读数精确<sup>[10]</sup>;PC104 计数器卡,为伺服系统提供单独的高精度时间系统,与 UTC 时间进行同步;PC104 模拟输出卡,采用 16 位 DA 输出高精度的模拟电压控制伺服驱动器,进而驱动电机使望远镜转动;

PC104 伺服控制系统拥有小型化的特点,研制后经实验测试跟踪精度达到 $1''$ 以内,满足激光测距要求。

### 3.3 测距控制系统

测距控制系统是卫星激光测距的控制中枢和信息交互中心,卫星激光测距整个观测过程都由测距控制系统操作完成。SLR 中常用的观测模式是卫星测量模式与地靶校准模式。卫星测距模式用以完成过境卫星的激光测距,地靶校准模式用以完成系统内部延时标定<sup>[9]</sup>。由于地靶校准模式和卫星测距模式的光路状态不同,切换时需调整光路,为提高测距控制系统的自动化能力,实现了卫星测距模式和地靶校准模式的自动快速切换。

在地靶校准时,考虑 SLR 中激光一般为线偏振光,可采用半波片-偏振片组合调能装置来替代中性吸收片实现功率衰减,在卫星测量模式与地靶校准模式切换时采用半波片旋转不会引入额外的光路延时。实际应用中,两种模式会根据望远镜的实际方位、仰角完成自动切换,大大减少了人力操作并且系统可靠性更高。

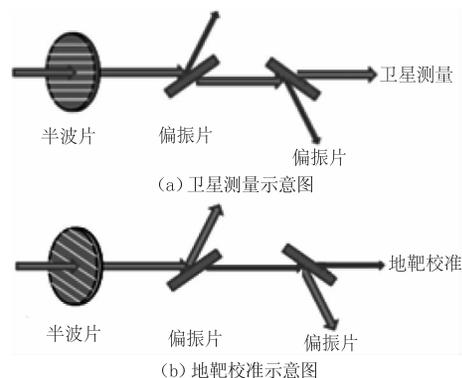


图5 观测模式切换示意图

Fig. 5 Observation mode switch

### 3.4 远程监控与管理系統

远程监控与管理系統的作用是为远程端提供 SLR 台站的状态信息,同时可以让观测人员在远程端对系統进行管理,是系統安全的重要保障。

#### 3.4.1 飞机自动避让系統

SLR 采用高峰值功率密度的窄脉冲 532 nm 激光,对空间飞行器如飞机造成很大的危险,有必要开发飞机避让系統。

考虑到飞机一般携带 ADS-B 信息,因此,应用虚拟雷达接收过境飞机的 ADS-B 信息,通过解算飞机目标的实时位置,与望远镜的当前位置进行比较,可实现飞机的实时规避,此方法具有实现简易和低成本的优点<sup>[10]</sup>。本文应用虚拟雷达 TRX-1500,设计了激光测距飞机规避软件。系統能够实时监测过境航班,当雷达扫描到望远镜指向区域附近有飞机经过时利用半波片-偏振片组合调能装置自动切换到地靶校准模式来降低发射激光功率,避免激光全功率直射到飞机。

#### 3.4.2 气象监测系統

天气状况直接决定了卫星激光测距能否进行,采用气象仪和 Allsky-340 相机构建气象监测系統,可以监测雨量、风速和台站上空的云层分布。在观测过程中通过云层分布监视相机画面结合卫星分布图来规划观测任务,提高观测效率。

在进行卫星激光测距时,激光束传输经过大气层,由大气折射引起的大气传播延迟误差成为测距精度的主要误差源之一,主要受大气的密度、压强和温度等各种气象参数影响<sup>[11]</sup>,通过气象监测系統获取气象参数来进行大气延时修正,减小测距误差,提高测量精度。

#### 3.4.3 视频监控系統

为了便于在远程端监视 SLR 台站的各个关键

设备的状况以及事件回放,使观测人员能够远程了解到系统的运行状况,采用 IP 摄像头搭建远程视频监控。在任何地方通过网络远程登录查看望远镜、激光室、控制室画面。

#### 3.4.4 信号监测系统

系统发生故障而导致卫星激光测距无法进行时,通过查看系统内各信号波形可以很快地检测出系统故障发生的位置。信号监测系统用于将系统中的信号采集到电脑端并显示实时波形,当系统发生故障时,观测人员在电脑端查看各信号波形状况判断系统故障发生位置,迅速修复系统故障。基于高速数据采集卡搭建信号监测系统,可采集高带宽,高频率的信号,满足激光测距系统的需求。

#### 3.4.5 远程电源管理系统

为了保障 SLR 系统的安全,同时能够在远程端控制系统内各仪器的电源的开关,需要搭建远程电源管理系统。目前市面已有许多技术成熟、功能稳定的远程电源管理产品。考虑到产品的功能性和安全稳定性,本文基于网络 PDU 控制模块设计了 SLR 系统的电源管理系统。远程 PDU 模块可以在远程端通过网络对各端口的电源进行控制和管理,同时可以监测各端口的实时电流和功率,通过设定阈值和自动断电功能,起到系统电源保护的作用。

### 4 高自动化 SLR 系统的远程控制测试

#### 4.1 远程控制需求分析

SLR 系统的自动化研究的首要目的是远程观测的应用,即在远程端控制 SLR 系统来完成观测任务。

在远程端进行观测时,分析 SLR 系统与远程端的数据交互内容包括:CCD 相机星象与光尖监视画面;实时过境卫星信息,选择卫星指令;伺服跟踪和激光器使能控制指令;望远镜当前位置信息;事件计时器主回波 O-C 数据点图监视;卫星搜索指令。

本文基于远程桌面实现远程端对 SLR 系统的远程控制。远程桌面架构主要由 3 部分组成,被控端、远程客户端、以及二者通讯的图像压缩编码协议。被控端将实际桌面进行渲染运算,并获取实时的显示图像更新,通过图像压缩编码协议将更新图像数据压缩后传输给远程客户端,同时远程客户端和被控端直接交互鼠标和键盘的信息。这种方式的极大的降低了数据传输量<sup>[12]</sup>。

设图像分辨率为  $800 \times 600$ ,色彩位数为 16 位,则单张图像大小为:

$$\frac{(800 \times 600 \times 2)}{(1024 \times 1024)} = 0.92 \text{ MB} \quad (1)$$

以 JPEG 图像压缩格式为例, JPEG 对 16 位色彩数图像的压缩率可以达到 20:1<sup>[13]</sup>,经 JPEG 压缩后的图像大小为 47 kB。设传输帧数为 30,则每秒传输的数据量为:

$$47 \times 30 = 1410 \text{ kB} = 1.37 \text{ MB} \quad (2)$$

在进行卫星激光测距时,图像更新频率较大的分别是 CCD 相机监视画面和事件计时器主回波点数图,因此在应用获取更新区域图像数据传输的方法,会进一步降低传输速度需求。通过以上分析可知,基于远程桌面进行 SLR 的远程观测应用的网络传输速度要求为 1 MB/s。

Anydesk 远程桌面软件相比其他软件的传输速度更快,且功能丰富,操作简便。因此选用 Anydesk 远程桌面软件,在传输速度为 1 MB/s 的网络环境下进行测试,在保证传输图像质量满足 SLR 远程观测的情况下,可以流畅进行远程桌面操作。

#### 4.2 远程观测实验

以上海天文台 SLR 站为平台,在距离观测站 30 KM 位置进行远程观测实验。由于基建原因,上海 SLR 站的圆顶无法远程开启,因此在远程观测实验前,需要值守人员打开圆顶。

图 6 为 SLR 系统目前的网络配置,远程端通过 Anydesk 软件登录到 SLR 站控制台视频工控机,视频工控机利用 mstsc (Windows 自带远程桌面软件)通过内部局域网登陆到观测工控机,打开激光器管理软件设置激光器参数,下载星历进行卫星预报,打开 CCD 软件监视星象与光尖,打开测距控制软件。界面布局如图 7 所示,左侧为 CCD 监视画面,右侧为观测控制软件界面,通过观测控制软件控制望远镜进行自动过零、选星跟踪、打激光、卫星搜索、地靶校准。成功观测到不同轨道高度的卫星,包括近地星 Sara1、Jason3,远地星 Glonass122、Galileo205、G1 等。整个观测过程的所有操作都在远程端进行,包括卫星预报、望远镜自动过零、卫星测距模式和地靶校准模式的切换、数据预处理、数据上传等。

远程控制试验验证了本文的高自动化 SLR 系统设计的有效性,下一步将配合测距控制软件,完成观测任务自动规划、卫星自动搜索等,实现 SLR 系统的进一步自动化提高。



图6 SLR系统网络配置

Fig. 6 Network configuration of SLR system

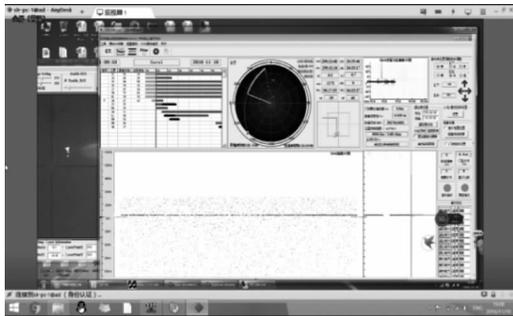


图7 远程观测界面与结果

Fig. 7 Remote observing interface and results

## 5 结 语

本文开展了高自动化SLR系统的研究与设计。应用光斑位置探头(PSD)设计了角秒级精度光束指向瞄准方法,使激光束可稳定瞄准目标;基于PC104研制了精度为1"的小型化伺服控制系统;使用偏振光学解决了卫星测距和地靶校准模式的快速切换,提高了观测数据质量并使模式自动切换;搭建网络远程监控管理系统,实现了必要因素的实时查看,提高了观测效率。成功开展了国内首次远程卫星激光测距实验,实现了多颗不同距离卫星的远程测量,初步验证自动化的效果,为卫星激光测距的远程控制的下一步工作提供了基础,同时对下一步实现全自动的卫星激光测距系统具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Zhongping, YANG Fumin. The progress in satellite laser ranging [J]. Progress in Astronomy, 2001, 19(2): 283 - 288. (in Chinese)  
张忠萍, 杨福民. 卫星激光测距的新进展[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 283 - 288.
- [2] C Moore. Recent progress at Mt Stromlo SLR station [C]. 16th International Workshop on Laser Ranging, Poznan, Poland, 2008.
- [3] A Neidhardt, J Eckl, et al. Current status of automation of the SLR-systems at the geodetic observatory Wettzell [C]. 20th International Workshop on Laser Ranging, Potsdam, Germany, 2016.
- [4] S Riepl, J Eckl, et al. Autonomous tracking with high repetition rate systems [C]. 20th International Workshop on Laser Ranging, Potsdam, Germany, 2016.
- [5] J McGarry, H Donovan, et al. Designing NASA's next generation SLR stations with the goal of full automation [C]. 20th International Workshop on Laser Ranging, Potsdam, Germany, 2016.
- [6] SHI Amiao. The study on the pointing stability control system for laser beam [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)  
史阿苗. 激光束的指向稳定控制系统研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2014.
- [7] Orzechowski P, Chen N, Gibson S, et al. Adaptive control of jitter in a laser beam pointing system [C]. American Control Conference, IEEE, 2006.
- [8] Tan Yuan, Yang Yong, et al. Design of servo system in C-band automatic velocity-measured radar based on PC104 [C]. International conference on information, electronic and computer science 2009, 2009.
- [9] CAO Hong, Song Lianke, et al. The study of the relationship between polarized light's incident azimuth and intermediary reflectance [J]. Laser Technology, 2005, 25(1): 104 - 105. (in Chinese)  
曹鸿, 宋连科, 等. 线偏振光入射方位角与介质反射率关系研究[J]. 激光技术, 2005, 25(1): 104 - 105.
- [10] D Lacovone, G Bianco. The new ADS-B based aircraft avoidance system at the MLRO [C]. 18th International Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan, 2013.
- [11] WANG Huan, LI Song, ZHOU Hui. Correction of atmosphere delay for geoscience laser altimeter system [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 169 - 171. (in Chinese)  
王欢, 李松, 周辉. 地球科学激光测高系统大气延迟修正算法[J]. 激光技术, 2007, 31(2): 169 - 171.
- [12] ZHU Yongqiang, TANG Xiong. Research and analysis of remote desktop transfer protocol based on VNC [J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(11): 284 - 287. (in Chinese)  
朱永强, 汤雄. 基于VNC的远程桌面传输协议分析与研究[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(11): 284 - 287.
- [13] XIAO Daoju, LIU Hongfeng, CHEN Xiaosu. Image compression and transmission method for remote screen monitoring [J]. Computer Engineering and Design, 2005, 26(12): 3356 - 3357. (in Chinese)  
肖道举, 刘洪峰, 陈晓苏. 面向远端屏幕监控的一种图像压缩传输方法[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(12): 3356 - 3357.
- [14] M Sawabe, T Uchimura, et al. Remote operation of GUTS-SLR [C]. 14th International Workshop on Laser Ranging, San Fernando, Spain, 2004.