# 激光测月回波探测器位置控制系统设计

李祝莲 何少辉 伏红林 黄 涛 张海涛

(中国科学院云南天文台,云南 昆明 650011)

**摘要**激光测月(LLR)具有测量距离远和回波光子少的特点,观测中需要适当更新回波探测器的位置以提高回波 探测概率。采用现场可编程门阵列(FPGA)技术研制多步进电机同步控制系统,并结合 VC++软件开发工具开发 其计算机控制程序,最终实现回波探测器在 xoy 探测平面上位置的计算机控制。测试结果表明,两个步进电机可 以各自单独运行或同时运行,使回波探测器可以单独沿着 x 轴或 y 轴移动,也可以同时沿着 x 轴和 y 轴移动,最小 移动步长为 2.5 μm,实现对探测器位置的精准控制。

关键词 测量;激光测月;步进电机;现场可编程门阵列;计算机控制 中图分类号 P129; P111.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.051201

# Position Control System Design of Return Laser Pulse Detector for Lunar Laser Ranging

Li Zhulian He Shaohui Fu Honglin Huang Tao Zhang Haitao

(Yunnan Astronomical Observatory of Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunan 650011, China)

Abstract Lunar laser ranging (LLR) has the characteristics of far measurement range and small number of return laser photons, so the position of detector receiving return photons should be adjusted properly during LLR observation to improve the detection success probability. Synchronization control system for multiple step motors is researched and realized with the technique of field programmable gate array (FPGA), and control interview program is developed with VC++ software developing instrument. Finally, computer control of the detector position is realized on *xoy* detecting plate. Test result indicates that two step motors can run separately or simultaneously, so that the detector could move along x axis or y axis alone, or along x axis and y axis at the same time. The minimal step length is 2.5  $\mu$ m, which allows for precise detector position control.

Key words measurement; lunar laser ranging; step motor; field programmable gate array; computer control OCIS codes 120.6085; 040.1880

# 1 引 言

在激光测距中,采用 C-SPAD 单光子探测器探测被卫星反射回观测站并进入激光测距系统接收光路的 激光回波信号,但因其视场小(视场角仅 53'),对回波光路的准直要求非常高,故将它用于激光测距系统中 时需要专门的调整机构对其位置进行精细调整<sup>[1]</sup>。对于卫星激光测距,因激光脉冲在卫星及测站之间的飞 行时间<sup>[2,3]</sup>仅为几毫秒到上百毫秒且回波信号较强,故回波探测器位置调整好后在测距过程中可以固定不 变。然而在月球激光测距中,激光脉冲在月面反射器与测站之间的飞行时间较长(接近 2.6 s),且经过长距 离传输后回波信号被大大地衰减至亚单光子水平<sup>[4]</sup>。因此,在月球激光测距时,需要适时改变 C-SPAD 单 光子回波探测器的位置以提高回波探测概率。本文采用现场可编程门阵列(FPGA)技术研制多步进电机同 步控制系统,并开发了计算机控制程序,完成了激光测月(LLR)回波探测器位置控制系统的设计。

收稿日期: 2011-10-25; 收到修改稿日期: 2011-12-23; 网络出版日期: 2012-02-24

基金项目:国家自然科学基金(10778705)资助课题。

**作者简介:**李祝莲(1978—),女,博士,高级工程师,主要从事空间目标光电探测控制技术方面的研究。 E-mail: lzhl@ynao.ac.cn

# 2 系统设计

如图 1 所示, C-SPAD 单光子回波探测器的探测面 在 xoy 平面上, 而从月面反射器回来的激光脉冲沿着 z 轴方向到达回波接收平面 xoy, 通过移动探测器在 xoy 面上的位置来有效探测回波信号。具体调整方法是:通 过测量 C-SPAD 单光子探测器的暗噪声来设定其初始位 置 P(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>), 并测量激光测距卫星验证该初始位置的可 靠性。在进行激光测月时, 根据实际情况(如是否有回波 信号) 对探测器位置进行实时调整, 即在初始位置的基础 上分别沿 x 轴和 y 轴方向做微量移动。

步进电机是将电脉冲信号转化为角位移或线位移的 执行机构,因具有无积累误差(100%精度)、成本低和控 制简单等特点,故被广泛应用于各种开环控制中。这里 采用两个步进电机分别控制探测器沿 *x* 轴和 *y* 轴运动, 并采用 FPGA 技术实现多电机的运动控制,包括各电机 的单独运动和同时运动,最终实现在月球激光测距中回 波探测器位置的实时精密调整。

#### 2.1 系统组成

系统组成如图 2 所示,主要包括步进电机、计算机和 FPGA 等。计算机采集用户控制指令并将其传给 FPGA;根据接收到的指令信息,FPGA 将产生步进电机 控制信号,包括电机使能信号、运行方向信号和脉冲控制

信号等;步进电机驱动器接收到使能信号和方向信号后,一旦再接收到控制脉冲信号就按设定的方向运行控制脉冲数步位移。根据用户的要求,系统可实现单个指定电机运行控制、部分电机运行控制或全部电机运行 控制。

用户通过计算机键盘或鼠标等设备输入电机控制指令,计算机采集用户指令信息后将其送至 FPGA,由 其产生电机控制指令信号。这就是本文设计的控制系统的工作过程。

#### 2.2 系统软硬件设计

根据步进电机的工作原理和控制时序,在 FPGA 器件中进行电路设计以实现硬件构建,并通过软件编程实现控制目标。这里选用的是 Altera 公司的 FPGA 器件,故整个开发过程是通过 Quartus(硬件电路设计)和 Nios IDE(软件编程)两个开发环境完成的<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.1 步进电机

步进电机控制时序如图 3 所示,其中"en"为电机使 能信号,例如为高电平电机控制有效,否则无效;"dir"为 方向电平信号,由其决定电机的旋转方向,可以设置该信 号为高电平时步进电机顺时针运行,否则步进电机逆时 针运行;"cp"为电机运行控制脉冲。

当电机使能信号 en 有效时,步进驱动器每接收到一个脉冲信号 cp,便驱动步进电机按给定的 dir 方向运行



图 3 步进电机控制时序



一个固定的角度(称为"步距角"),即按控制脉冲以固定的角度一步一步运行。角位移量可以通过控制脉冲 个数来控制,从而达到准确定位的目的;同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度,从而 达到调速的目的<sup>[6,7]</sup>。

2.2.2 硬件构建

根据 2.2.1 中所述步进电机的时序特征,构建系统的硬件电路如图 4 所示。Nios 2 为在 FPGA 中生成



图 1 激光测月中的探测器位置





图 2 系统组成框图 Fig. 2 Block diagram of the system

的片上系统,包括并行输入/输出接口(PIO)、串口(UART)和用户自定义接口(UDI)。PIO 用来输出 dir, en,cp 等信号,UDI 用来读取电机位置数据(即图中的 data),UART 用来响应计算机的控制指令信号和传 送电机位置数据给控制计算机。



图 4 系统硬件构建框图

Fig. 4 Block diagram of system hardware

Nios 2 系统的工作频率设为 50 MHz,故需要将 10 MHz 提高至 50 MHz,图 4 中的锁相环(PLL)可以 实现该功能。

2.2.3 软件编程

构建了硬件电路后,需要在 Nios 2 软核中编程实现系统各控制信号的实时有效控制。采用 C 语言进行编程,软件流程如图 5 所示。



图 5 软件流程 Fig.5 Flow chart of software

程序运行过程如下:由中断查询子程序检测是否有用户输入指令信息,如果有则识别指令信息,否则继 续等待输入信息。如果是电机使能指令信息则设置电机使能从 PIO 口输出给电机驱动器,如果为电机方向 设置信息则设置电机运动方向从 PIO 口输出给电机驱动器,如果为电机控制脉冲信息则产生控制脉冲并从 PIO 口输出送步进电机驱动器,如果为电机位置读取信息则从 UDI 口读电机位置并将其通过 UART 串口 送给控制计算机显示和存储。

#### 2.3 系统控制精度

系统控制精度跟步进电机的步距角大小及其均匀性、丝杆加工精度和丝杆间隙等多种因素有关,步距角 越小越均匀、丝杆加工精度越高、间隙越小,则系统控制精度越高。本系统选用了 35BYG250B 型号的步进 电机,对于每个脉冲控制信号,步进电机走一步,步距角为1.8°,电机转动一周时在丝杆上移动了 0.5 mm 的 距离,此时需给它发送 200 个脉冲控制信号。由此可见,理论上控制精度可达 2.5 μm。实际使用时,因存在 步进电机步距角不均匀性和丝杆间隙等误差,故精度将略微低于该精度,但仍然可以满足需求。

#### 49,051201

## 3 计算机控制

因计算机控制的主要任务是采集用户输入的指令信息和将所获得的用户指令信息传输给 FPGA,故需要设计计算机控制应用程序便于人机交互以及控制数据和电机位置数据传输等。

该系统采用 Visual C++进行控制应用程序开发。Visual C++提供的 MFC(Microsoft Fundamental Class)封装了大量的 Windows API 和 Windows 的开发元素而使得开发任务简化。使用 MFC 类库同时配合 Visual C++提供的 AppWizard、ClassWizard 和 AppStudio 可以大幅提高开发效率<sup>[8]</sup>。

用户通过应用程序界面控制 x 和 y 两轴步进电机的运动以实现 C-SPAD 探测器位置的精密控制。电机当前位置显示于静态文本框中;电机方向通过组合框控件设置(该系统中,由它同时给出电机使能信息),控制脉冲数可以从文本框控件中输入,上述各信号设置完毕即可点击"送电机脉冲"按钮。Nios 2 软件编程时,设置每次送完控制脉冲都去读电机位置数据并送回控制计算机显示,同时,如果用户需要读取电机位置,则可以通过点击"读电机位置"按钮。根据用户实际需要,可以通过发送"电机位置归零"按钮控制电机运行到设定的零位置。计算机与 FPGA 的通信通过 MSComm 控件完成<sup>[9]</sup>。

# 4 结 论

采用 FPGA 技术和 VC++软件开发工具实现了 C-SPAD 单光子回波探测器位置控制系统,理论上控制精 度可达 2.5 μm。近年来,中国科学院云南天文台实现了 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统<sup>[10]</sup>,但 是在卫星观测过程中回波探测器的位置固定不变,所以实现探测器位置的计算机实时控制是进行月球激光测 距试验的关键技术之一。另外,该系统也可以直接用于卫星激光测距中探测器最佳位置的寻找,即根据测量的 暗噪声情况通过计算机直接改变探测的位置,提高了测量探测器暗噪声的工作效率。

#### 参考文献

- 1 Fu Honglin, Zheng Xiangming, He Miaochan *et al.*. Exact adjustment of single photon avalanche diode detector for the Yunnan Observatory laser ranging system[J]. *Astron. Res. Technol.*: *PNAOC*, 2004, (4): 307~311 伏红林,郑向明,何妙婵等. 云台激光测距系统单光子雪崩二极管探测器的精确调整[J]. 天文研究与技术——国家天文 台台刊, 2004, (4): 307~311
- 2 Li Zhulian, Xiong Yaoheng. Realization and design of high-accuracy event timer[J]. Chinese J. Lasers, 2008, 35(12): 2022~2025

李祝莲, 熊耀恒. 高精度事件计时器的设计与实现[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 2022~2025

3 Lei Linjun, Yang Yan, Chen Weibiao. High-accuracy time-interval-unit for spaceborne laser range finder [J]. Chinese J. Lasers, 2007, **34**(10): 1422~1426

雷琳君,杨 燕,陈卫标. 星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1422~1426

4 Xiong Yaoheng, Feng Hesheng. Status and possible improvement of lunar laser ranging [J]. Publications of Yunnan Observatory, 2002, (3): 117~122

熊耀恒,冯和生.月球激光测距的现状及可能的改进方法[J].云南天文台台刊,2002,(3):117~122

- 5 Altera International Limited. Stratix II Device Handbook [EB/OL]. http://www.altera.com.cn/literature/lit-stx2.jsp
- 6 Jiang Demei, Xie Shouyong, Gan Luping. Designing the control-algorithm of the stepping motor startuping [J]. J. Southwest University (Natural Science Edition), 2007, 29(5): 128~132

姜德美,谢守勇,甘露萍.步进电机启动控制算法设计[J].西南大学学报(自然科学版),2007,29(5):128~132

7 Jia Minzhong, Zhan Youji. Speed control of stepping motor based on Windows[J]. J. Fujian University of Technology, 2005, **3**(6): 619~621

贾敏忠, 詹友基. Windows 平台上步进电机的速度控制[J]. 福建工程学院学报, 2005, 3(6): 619~621

- 8 Yao Lingtian. Master MFC Program Design[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2006 姚领田. 精通 MFC 程序设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2006
- 9 Gao Jianyun, Zhu Zhongming. Communication realization between PC and motor using VC++ [J]. Information Science, 2010, (21): 22

高建云, 祝忠明. 用 VC++实现 PC 与电机的数据通信[J]. 信息科学, 2010, (21): 22

10 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin et al. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002

郑向明, 李祝莲, 伏红林 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002