

doi: 10.3788/gzxb20144304.0406001

# 基于现场可编程门阵列单探测器复合轴控制技术

宋延嵩, 佟首峰, 董岩, 赵馨

(长春理工大学 空地激光通信国防重点学科实验室, 长春 130022)

**摘要:**为了解决空间激光通信系统中单探测器复合轴结构的粗精解耦难题,通过分析二维关联控制矩阵,得出粗精跟踪解耦的必要条件,提出了一种单探测器复合轴结构的工作方式.在跟踪过程中,相机直接配合子轴执行器完成精跟踪工作,而主轴的跟踪信息由子轴的角度偏转器来提供,同时所有的图像处理算法、位置检测算法、以及粗精伺服控制算法都在现场可编程门阵列中实现,完成了系统的轻小型化设计.实验搭建了测试系统,并对现场可编程门阵列硬件和系统跟踪性能进行测试,结果表明单探测器复合控制系统可以实现跟踪准确度优于  $3 \mu\text{rad}$ ,为工程化奠定了良好的基础.

**关键词:**单探测器;复合轴控制;粗精解耦;控制矩阵;现场可编程门阵列;高精度;轻小型

中图分类号:TN929.12

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)04-0406001-7

## Technique of Compound Axis Control Using Single Detector Based on Field Programmable Gata Array

SONG Yan-song, TONG Shou-feng, DONG Yan, ZHAO Xin

(National Defence Key Laboratory of Air to Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** To solve the problem on coarse tracking and fine tracking of single detector multiple-axis in space laser communication, a necessary condition was obtained by analyzing the two-dimensional matrix associated control. Based on this condition, a single detector composite shaft structure was proposed that worked in a new way. In the process of tracking, the camera directly worked with a sub axis actuator to complete the fine tracking, while the spindle tracking information was provided by the shaft axis angle deflector of the sub axis actuator. And then the image processing algorithm, position detecting algorithm, and the coarse and fine servo control algorithm were implemented in field programmable gata array that effectively realized the light and compact design of the system. An experimental system was built in the laboratory, and the field programmable gata array hardware and the system tracking performance were tested. The results show that the accuracy of tracking by the single detector compound control system is better than  $3 \mu\text{rad}$ , which lays a certain foundation for the engineering.

**Key words:** One detector; Coarse and fine coupling; Multiple-axis controlling; Control matrix; Field Programmable Gata Array (FPGA); High precision; Miniaturization

**OCIS Codes:** 060.2380; 060.2605; 060.4510; 100.2960; 110.2960

## 0 引言

在激光通信系统中光束的捕获、对准和跟踪是核心和关键单元,文献[1-4]介绍了动态激光通信系统中的捕获、对准、跟踪的工作原理,以及在激光通信系统中起到的关键作用.需要将光束锁定在目标某一点上,

一般要求跟踪准确度小于波束角的  $1/5 \sim 1/6$ ,跟踪准确度达到微弧度量级.在这样高的跟踪准确度要求下,一般光电测量系统中的大惯量单轴跟踪架由于结构谐振频率的限制,不可能有足够的带宽对其进行校正,需要引入复合轴概念.文献[5]介绍了激光通信双探测器复合轴工作原理,并对粗跟踪系统进行详细论述.常用

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. XXXXXXXX)资助

第一作者:宋延嵩(1983-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为空间激光通信,光电跟踪. Email: songyansong2006@126.com

导师(通讯作者):佟首峰(1972-),男,教授,博导,主要研究方向为空间激光通信. Email: tongshoufeng@cust.edu.cn

收稿日期:2013-07-01;录用日期:2013-11-18

<http://www.photon.ac.cn>

的复合轴系统一般为双探测器复合轴系统,其优点是控制独立,容易实现高准确度跟踪,缺点是体积重量较大;单探测器复合轴系统虽然容易实现轻小型化设计,但耦合性较强,难实现高准确度跟踪,在工程中使用较少,文献[6]论述了单检测型复合轴控制原理.国外应用单探测器复合轴系统以美国的OCD系统最为成功,文献[7]介绍了OCD系统,介绍了美国单探测器复合轴系统工作原理以其特点,突出了轻小化,并展示了实物系统以及实验结果.国内外现有的单探测器复合轴系统中粗精跟踪两个伺服环都是与唯一探测器配合,通过解耦算法获得粗精跟踪环的角度位置信息完成粗精闭环,因此在准确度上很难达到双探测器复合轴的跟踪准确度,由于单探测器复合轴系统解耦难度较大,在国内应用几乎很少.

本文提出一种新工作方式的单探测器复合结构,首先采用唯一的CCD相机配合粗跟踪执行器形成闭环,完成捕获和粗跟踪过程,然后由该CCD相机与精跟踪执行器构成闭环,实现精跟踪控制.此时CCD提取的光斑信息将不再提供给粗跟踪环,而粗跟踪的角度执行信息将由精跟踪执行器的角度偏转传感器提供,同时整个单探测器复合轴系统从图像处理,位置解算到伺服控制等多种算法都将集成在一个现场可编程门阵列(Field Programmable Gata Array, FPGA)内来

实现,此种设计有效地保证了跟踪准确度(优于 $3 \mu\text{rad}$ ),又实现了复合轴轻小型化.

### 1 单探测器复合轴设计

传统的单探测器粗精复合轴工作模式是采用单个探测器对光斑位置进行探测,然后通过图像系统对光斑位置进行判断解耦,得出脱靶量信息.同时对粗精两个环路的控制系统进行跟踪控制<sup>[9-10]</sup>,这种控制方式要求粗精解耦算法准确度非常高.系统在实际工作过程中,往往因为解耦后的粗、精位置信息不够准确而造成子轴目标丢失以及整个伺服失锁情况,工程应用实现方面比较困难.

本文设计的单探测器粗精复合轴系统框图如1,在初始扫描捕获阶段,CCD相机工作在宽视场、低帧频(30 Hz即可)模式,配合粗跟踪的执行机构来实现捕获过程.当扫描到光斑后进入跟踪环节,粗跟踪稳定后光斑将被锁定在精跟踪的视场内,此时CCD相机将工作在窄视场、高帧频(2 000 Hz以上)模式.粗跟踪的伺服系统将停止对光斑脱靶量的采集,其脱靶量信息将由精跟踪执行器快速振镜的偏转位置传感器提供,而相机的脱靶量信息只提供给精跟踪伺服系统.此种模式的单探测器粗精复合轴系统在实际应用中可以有效地实现粗,精轴的闭环控制.

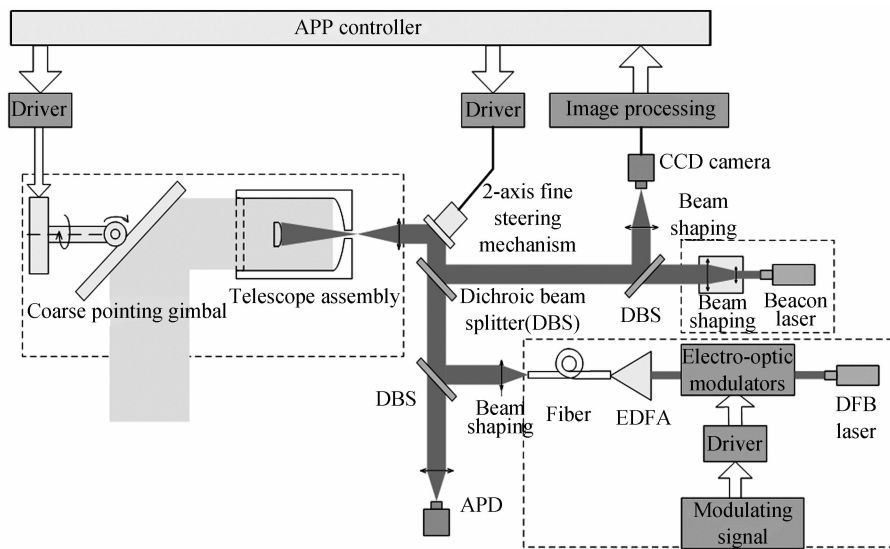


图1 单探测器粗精复合轴系统工作原理图  
Fig. 1 Single-detector multiple-axis system schematic block diagram

### 2 单探测器伺服系统实现

#### 2.1 复合轴解耦分析

复合轴伺服系统是二维关联控制系统的一种.其二维关联系统模型如图2.根据模型可以推导闭环传递矩阵 $\phi$ 为

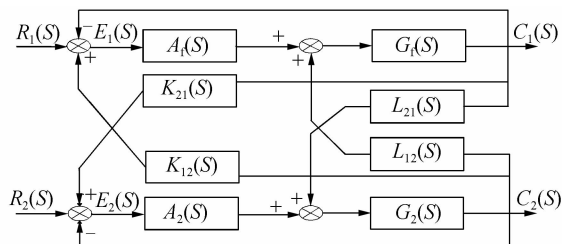


图2 二维关联控制系统  
Fig. 2 Two dimensional orthogonal control system

$$\phi = \frac{C}{R} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中

$$\phi_{11} = [A_1 G_1 (1 + A_2 G_2)] / [(1 + A_1 G_1) (1 + A_2 G_2) - G_1 G_2 (A_1 K_{12} + L_{12}) (A_2 K_{21} + L_{21})] \quad (2)$$

$$\phi_{12} = [A_1 G_1 G_2 (A_1 K_{12} + A_2 L_{12})] / [(1 + A_1 G_1) (1 + A_2 G_2) - G_1 G_2 (A_1 K_{12} + L_{12}) (A_2 K_{21} + L_{21})] \quad (3)$$

$$\phi_{21} = [A_1 G_1 G_2 (A_2 K_{21} + L_{21})] / [(1 + A_1 G_1) (1 + A_2 G_2) - G_1 G_2 (A_1 K_{12} + L_{12}) (A_2 K_{21} + L_{21})] \quad (4)$$

$$\phi_{22} = [A_2 G_2 (1 + A_1 G_1)] / [(1 + A_1 G_1) (1 + A_2 G_2) - G_1 G_2 (A_1 K_{12} + L_{12}) (A_2 K_{21} + L_{21})] \quad (5)$$

整个二维系统要实现系统解耦,需要使  $\phi$  的非对角线上的元素为 0,则可实现对角型解耦,而不必强求对角元素为 1.即

$$\begin{cases} \phi_{12} = 0 \\ \phi_{21} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

可推得

$$\begin{cases} A_1 K_{12} + L_{12} = 0 \\ A_2 K_{21} + L_{21} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2 单探测系统耦合性分析

传统的单探测器复合轴系统结构如图 3 所示,  $C_c$ 、 $C_f$  分别为主、子轴的补偿函数,  $A_c$ 、 $A_f$  分别为主、子轴的控制函数,  $D_2$  为解耦回路,  $D_1$  为探测器特性.

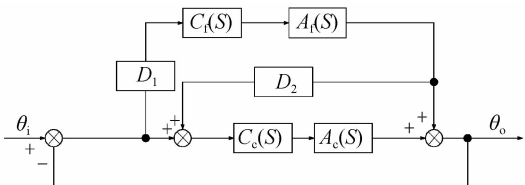


图 3 单探测器复合轴系统结构

Fig. 3 Single detector multiple-axis system structure diagram

令  $G_c = C_c \times A_c$ ,  $G_f = C_f \times A_f \times D_1$ , 则单探测器复合轴控制的闭环等效传递函数为

$$\phi(s) = \frac{G_c + G_f D_2 G_c + G_f}{(1 + G_c)(1 + G_f) + (D_2 - 1)G_f G_c} \quad (8)$$

单探测器复合轴系统的误差传递函数为

$$\phi(s) = \frac{1}{(1 + G_c)(1 + G_f) + (D_2 - 1)G_f G_c} \quad (9)$$

当  $D_2 = 1$  时,单探测器复合轴系统的特征方程变为:  $(1 + G_c)(1 + G_f)$ , 此时系统的耦合项被消除,系统为静态自主系统. 其误差传递函数变为

$$G_c = \frac{1}{(1 + G_c)(1 + G_f)} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,解耦后系统的误差传递函数与双探测器系统误差传递函数一致<sup>[8]</sup>,表明解耦后的单探测器复合轴控制系统可以实现与双探测器复合轴系统相同的跟踪准确度. 单探测器复合轴系统中粗精环路的解耦程度,将直接决定系统的跟踪准确度,所以在判定单探测器复合轴系统的解耦程度时,可以依据

跟踪准确度作为其评判依据.

本文提出的单探测器复合轴工作模式其唯一的探测器只为精跟踪系统提供脱靶量,与精跟踪执行器构成闭环系统,而粗跟踪的闭环传感器,由精跟踪执行器的角度偏转传感器实现,整个系统的结构框图如图 4.

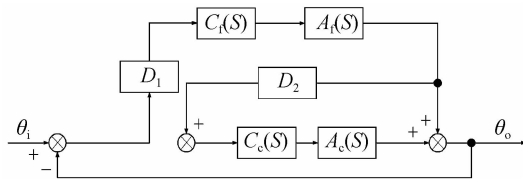


图 4 新型单探测器复合轴系统结构框图

Fig. 4 New Single detector multiple-axis system structure diagram

整个系统的传递函数如式(11)所示,整个单探测器系统的闭环传递函数有效的实现了解耦控制.

$$\phi(s) = \frac{G_c + G_f D_2 G_c + G_f}{(1 + G_c)(1 + G_f)} \quad (11)$$

### 2.3 单探测器系统建模分析

整个单探测器复合轴系统正常工作过程中,粗跟踪系统的角度位置信息由精跟踪的角度偏转器给出,采样周期为 100Hz,执行器为直流力矩伺服电机,而伺服系统由 FPGA 硬件来实现,整个粗跟踪系统校正后的模型函数为

$$G_c(s) = \frac{2054(1 + \frac{s}{12})}{s(1 + \frac{s}{0.5})(1 + \frac{s}{300})(1 + \frac{s}{400})^2} \quad (12)$$

通过 Matlab 仿真的伯德图如图 5.

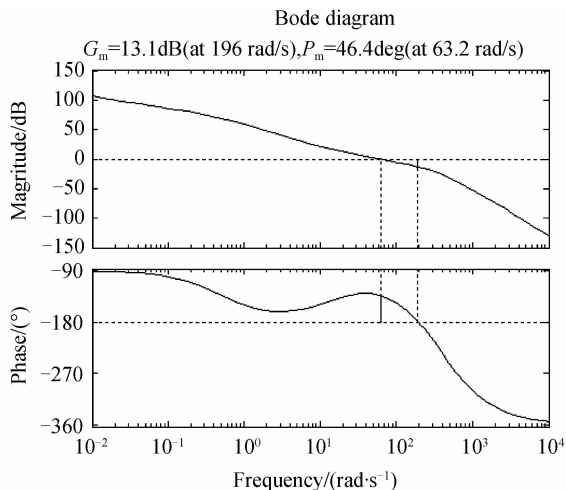


图 5 粗跟踪伺服系统开环幅频特性

Fig. 5 Open-loop amplitude-frequency characteristics of CTA

精跟踪系统的角度传感器采用高帧频 CCD 相机,采样速率达到 2 000 Hz,伺服执行器采用高速振镜来完成,而伺服系统则采用同一 FPGA 主控系统来实现. 整个精跟踪校正后的模型函数为

$$G_f(s) = \frac{8878 \left(1 + \frac{s}{377}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{80}\right) \left(1 + \frac{s}{3392}\right) \left(1 + \frac{s}{10000}\right)} \quad (13)$$

通过 Matlab 进行仿真得到的伯德图如图 6.

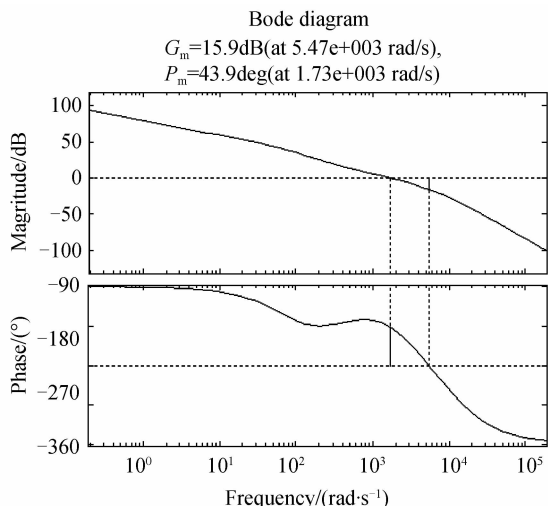


图 6 精跟踪伺服系统闭环幅频特性

Fig. 6 Open-loop amplitude-frequency characteristics of FTA

## 2.4 基于 FPGA 硬件实现单探测器系统

FPGA 具有高集成度、高可靠性、灵活性强等特点,已经被越来越广泛应用在复杂算法的实现过程.本系统中设计的所有控制逻辑、接口电路、算法实现都是在 FPGA 中利用硬件实现的,这样就保证了系统的实时性,以满足整个系统的处理要求.整个单探测器复合轴系统中包括粗跟踪角度检测单元,粗跟踪伺服控制单元,精跟踪图像处理单元以及精跟踪伺服控制单元,其各种数据算法利用同一片 FPGA 来处理实现.由于 FPGA 数据处理方式是并行操作,所以可以实现各个执行单元同时输出,相互之间独立控制,有效实现了整个系统的轻小型化设计,整个系统在 FPGA 内实现,如图 7.

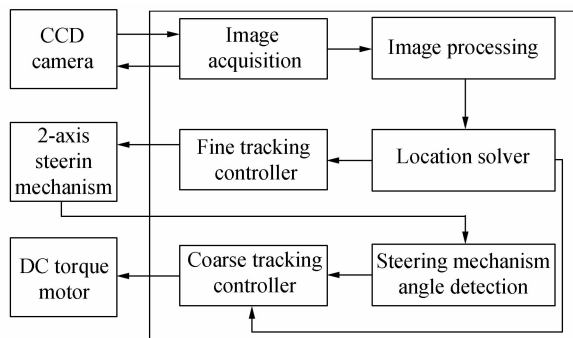


图 7 FPGA 内部功能框图

Fig. 7 The FPGA internal function block diagram

图像采集和处理单元主要从 CCD 图像传感器采集激光光斑图像,通过 CameraLink 接口将图像送入 FPGA,然后进行滤波,图像提取,中心判断,脱靶量输

出和图像显示等算法实现,图 8 为整个功能实现流程图.

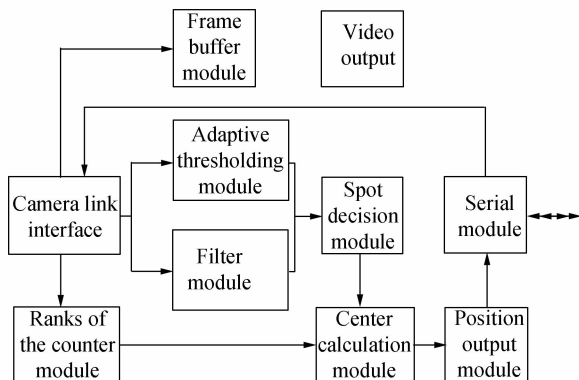


图 8 图像处理算法流程

Fig. 8 The image processing algorithm flow chart

### 1) 自适应阈值实现

本文采用自适应阈值策略,可以有效减小背景光的影响、提高信噪比,具体实现过程是将 CCD 靶面的所有感光像元的灰度值进行累加,然后除以感光像元数综合,即可得出平均的光能量灰度级,这样就可以确定系统的阈值.

### 2) 矩阵式图像滤波设计

本文采用图像空间域平均值滤波可以有效降低噪声方差,改善图像边缘,提高定位准确度,图像空域平均值滤波可以认为一个掩模作用于图像  $f(x, y)$  的低通空间滤波,其响应为  $H(r, s)$ ,用离散卷积表示滤波器输出数字图像为

$$g(x, y) = \sum_{r=-k}^k \sum_{s=-l}^l f(x-r, y-s) H(r, s) \quad (14)$$

$x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1$

整数  $k, l$  根据所选邻域大小决定,这里选  $3 \times 3$  邻域,  $k = l = 1$ , 选用掩盖模为

$$H = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

由 FPGA 来实现上述算法,可以实现一帧图像接收完毕,滤波也同时完成,提高了系统处理效率.

### 3) 光斑中心计算

本文采用带阈值质心算法,由于 CCD 输出的信号为背景与目标的叠加,带阈值的质心法相当于原始图像与二值化阈值相减,然后对相减后的图像求质心.它相对与普通的质心法,可将所示有像元的均匀背景信号剔除,进而等效信号的权值提高,所检测准确度更高.

质心计算公式为

$$X = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_i \cdot (p_{ij} - T)}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (p_{ij} - T)}, Y = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} y_i \cdot (p_{ij} - T)}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (p_{ij} - T)} \quad (16)$$

式中  $X, Y$  为目标像点质心坐标行列位置,  $T$  是当前图

像自适应阈值,  $p_g$  是光斑所占像元的灰度级值;

单探测器复合轴伺服系统主要实现粗精系统的位置脱靶量解算,控制补偿函数实现,驱动控制等,其工作流程图如图 9 所示.

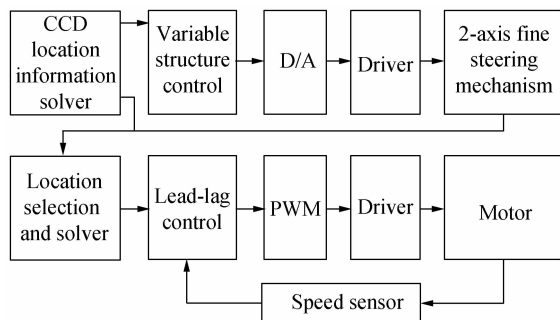


图 9 单探测器复合轴伺服跟踪算法流程图

Fig. 9 Single detector compound axis servo tracking algorithm flow chart

整个粗精跟踪系统采用变结构伺服系统设计方法完成数字补偿控制函数设计.位置伺服控制为 I 型系统,首先要对输入信号进行谱分析,确定需要抑制的频率段,然后根据控制带宽、闭环频率响应峰值等指标设计 I 型系统的各个转角频率,根据转角频率值给出模拟伺服控制函数.其校正后的模型分别如式(12)和式(13)所示,使用双线性变化法将模拟补偿控制函数进行数字化处理,得到数字控制补偿函数,在由 FPGA 完成粗精系统控制.

### 3 单探测复合轴系统实验

整个实验测试,主要验证基于 FPGA 来实现单探测器复合轴控制性能,包括粗精跟踪系统的稳定性以及粗精跟踪系统的跟踪准确度.整个实验设计在桌面搭建了实验系统,分为发射和接收两个部分.发射部分主要是产生跟踪所需要的激励信号,为跟踪测试提供可靠目标信号,而接收部分则搭建了单探测器粗精复合轴系统(见图 10 和图 11).



图 11 桌面系统实验实物图

Fig. 11 Desktop system experimental physical figure

发射系统由激光器、两级扩束系统、可变光阑、二维摆镜、计算机等构成.接收系统由接收光学系统、粗跟踪二维摆镜、开窗口 CCD 相机、精跟踪快速振镜、分光棱镜、FPGA 处理板等部分构成.激光从发射端射出,经过扩束 80 倍后,照射到二维摆镜上.通过计算机模拟卫星等平台振动功率谱控制摆镜摆动,再经过 40 倍扩束后以准平行光的形式发射出去.本系统所采用的激光器的束散角为 1 mrad,经过两次扩束后对束散角进行压缩(约 3 200 倍),输出的光束基本为平行光束(见图 12).

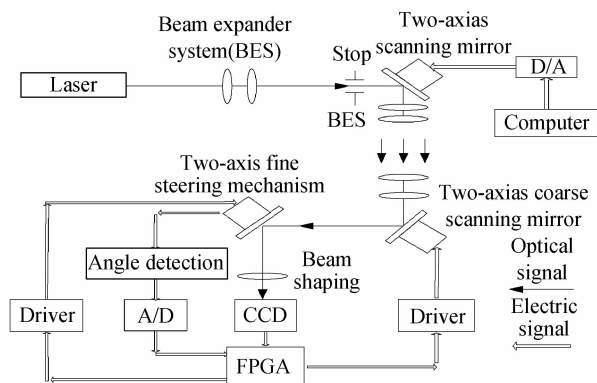


图 10 单探测器复合轴系统实验原理图

Fig. 10 Single detector compound axis system experimental schematic diagram

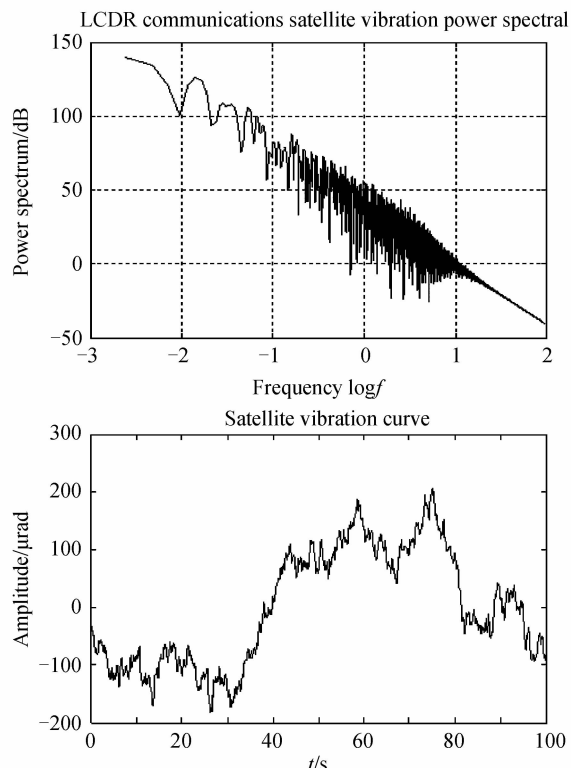


图 12 卫星振动功率谱和振动时域曲线

Fig. 12 Satellite vibration power spectrum and Vibration time domain traces

接收端模拟粗精复合轴系统,完成跟踪.接收光学

系统缩束  $\beta=16$  倍, 精跟踪二次成像物镜焦距  $f=350$  mm, 相机像元分辨率  $\delta_1=10.6$   $\mu\text{m}$ . 折算相机像元角度分辨率  $\delta_2$  为

$$\delta_2 = \delta_1 / (\beta \times f) = 1.9 \mu\text{rad} \quad (17)$$

测试过程首先由粗跟踪伺服系统和 CCD 相机构成闭环系统, 对光斑的抖动进行初步抑制, 此时相机帧频为 100 Hz, 分辨率为  $1\,024 \times 1\,024$ , 系统伺服带宽为 5 Hz 左右, 当粗跟踪稳定后, 相机帧频变为 2 000 Hz, 分辨率为  $100 \times 100$ , 与精跟踪伺服系统构成闭环实现精跟踪控制, 系统伺服带宽为 350 Hz 左右, 而粗跟踪此时与振镜的角度偏转检测单元构成闭环, 继续实现粗跟踪。

图 13 实验数据显示, 前半段 1 500 个数据点为相机与二维摆镜构成粗跟踪闭环系统测试粗跟踪残差的实验数据, 后半段数据是振镜角度检测器作为探测器与二维摆镜构成闭环系统测试的粗跟踪跟踪误差数据, 可以看出前者形成的闭环系统平均误差较小, 后者存在相对较大误差, 但整体误差情况可以满足精跟踪

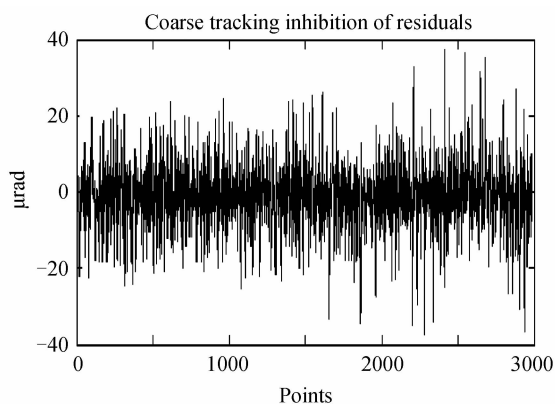


图 13 粗跟踪不同脱靶量反馈跟踪误差对比时域曲线  
Fig. 13 Time domain curve of feedback coarse tracking error comparison in different miss distance

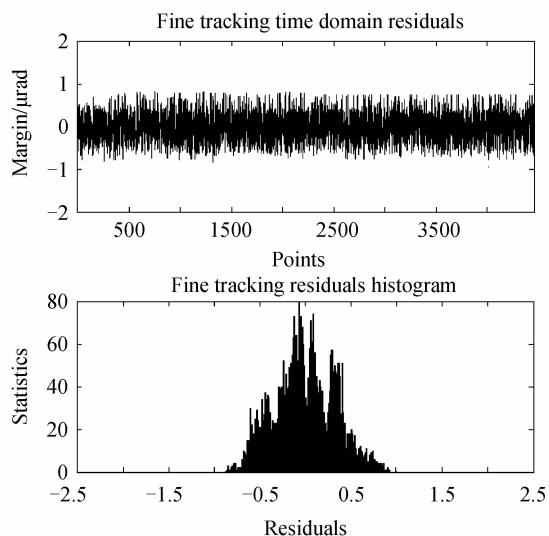


图 14 精跟踪残差时域曲线和统计直方图  
Fig. 14 The curve and histogram of FTA residual inhibition

的跟踪动态范围要求, 同时也可以看出粗跟踪系统在两种状态下都可以稳定工作. 图 14 精跟踪对粗跟踪残差进一步抑制, 可以看出粗跟踪在两个不同跟踪环节都可以保证光斑在精跟踪视场之内, 经过粗跟踪抑制后的光斑单边最大误差大约为 38 个像元, 而精跟踪伺服系统由于有较高的控制带宽, 如图 14 所示精跟踪单边最大跟踪误差为 1 个像元, 精跟踪系统对粗跟踪系统的抑制接近 38 倍, 系统最终的跟踪准确度为  $2 \mu\text{rad}$ . 从上述结果可以看出, 实验系统较好地完成了精跟踪任务, 达到了较高的跟踪准确度, 为其在空间激光通信中应用打下基础。

## 4 结论

本文根据单探测器粗精复合轴的特点, 以 FPGA 为核心器件, 将图像处理、脱靶量解算、以及粗精跟踪的伺服控制算法集成在同一芯片内, 代替了以往多个独立处理系统, 实现了激光通信跟踪系统轻量化设计. 同时采用振镜角度传感器代替传统 CCD 相机, 完成粗跟踪脱靶量解算, 有效实现了单探测器复合轴控制减少了系统的解耦难度. 本文对单探测器复合轴系统主轴和子轴进行了详细分析建模, 在桌面实验系统进行测试, 实验结论表明该系统可以很好地完成跟踪任务, 整个跟踪系统稳定, 最终的跟踪误差优于  $3 \mu\text{rad}$ . 接下来的主要任务是, 开展大气中单探测器复合轴跟踪实验, 对系统性能进行验证。

### 参考文献

- [1] SOFKA J, NIKULIN V V. Laser communication between mobile platforms[J]. *IEEE*, 2009, **45**(1): 336-346.
- [2] HAN Cheng, BAI Bao-xing, YANG Hua-min, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 89-94.
- [3] LUO Tong. The research on acquisition and tracking technologies of ATP system in optical intersatellite communications [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 12-36.
- [4] 罗彤. 星间光通信 ATP 中捕获、跟踪技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004, 33-36.
- [5] KOUJELEV A S, DUDELZAK A E. Three stage tracking approach in development of a free space laser communicator [C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 63041Q.
- [6] TONG Shou-feng, LIU Yun-qing, JIANG Hui-lin. Power analysis of APT coarse tracking link of free space laser communication system[J]. *Infrared and laser Engineering*, 2007, **34**(9): 16-20.
- [7] 佟首峰, 姜会林, 刘云清. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪伺服带宽优化设计[J]. *光电工程*, 2007, **34**(9): 16-20.
- [8] WANG Qiang, FU Cheng-yu, CHEN Ke, *et al.* Single detector compound axis control based on realtime predicted trajectory correcting method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(4): 17-21.
- [9] 王强, 傅承毓, 陈科, 等. 预测轨迹修正单检测型复合轴控制方

- 法[J]. 光电工程,2007,**34**(4):17-21.
- [7] GERARDO G, ORTIZ S. Design and development of a robust ATP subsystem for the Altair UAV-to-Ground lasercomm 2. 5Gbps demonstration[C]. SPIE, 2003, **4975**: 103-115.
- [8] 姜会林,佟首峰.空间激光通信技术与系统[M].北京:国防工业出版社,2010:215-291.
- [9] TONI T, GOTTHARD O. In orbit test result of an optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4,SILEX[C]. SPIE, 2003, **4635**: 1-15.
- [10] SOFKA J, NIKULIN V. Bit error rate optimization of anacousto-optic tracking system for free-space laser communications[C]. SPIE, 2006, **6105**: 1-9.
- [11] NIKULIN V, KHANDEKAR R, SOFKA J, *et al.* Acousto-optic pointing and tracking systems for free-space lasercommunications[C]. SPIE, 2005, **5892**: 1-15.
- [12] LU Ning, KE Xi-Zheng, ZHANG Hua. Research on APT coarse tracking in free-space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(5): 994-995.  
卢宁,柯熙政,张华.自由空间激光通信中 APT 粗跟踪研究[J].红外与激光工程,2010,**39**(5):994-995.
- [13] LÜ Chun-Lei, TONG Shou-feng, SONG Yan-song. Optical-path optimization design of compound axis and APT study of airborne laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 650- 653.  
吕春雷,佟首峰,宋延嵩.机载光通信复合轴光路优化设计和跟瞄技术研究[J].光子学报,2012,**41**(6):650-653.
- [14] CAO Yang, ZHAO Ming-fu, LUO Bin-bin, *et al.* Airborne platform's tracking algorithm for free space optical communication based on IMMPPF methods[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(11): 3065-3068.  
曹阳,赵明富,罗彬彬,等.机载空间光通信平台的交互多模型粒子滤波跟踪算法[J].红外与激光工程,2012,**41**(11): 3065-3068.
- [15] DONG Ran, AI Yong, XIAO Yong-jun, *et al.* Design and communication experiment of fine tracking system for free space optic[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(10): 2718 -2722.  
董冉,艾勇,肖永军,等.自由空间光通信精跟踪系统设计及其通信实验[J].红外与激光工程,2012,**41**(10):2718-2722.
- [16] CHRIS T, PENINA A. Formation design in eccentric orbits using linearized equations of relative motion[J]. *Journal of Guidance,Control and Dynamics*, 2006, **29**(1): 147-153.