

doi:10.3788/gzxb20174609.0901001

大气湍流对空间激光通信跟踪系统的影响

张雷^{1,3}, 李勃¹, 赵馨², 佟首峰^{1,3}, 姜会林^{1,3}

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022)

(3 长春理工大学 空间光电技术研究所, 长春 130022)

摘 要:基于大气信道内的空间激光通信演示验证实验,对系统光斑跟踪精度的影响因素进行了分析,研究了大气湍流对光斑跟踪精度的影响,建立了光斑质心检测模型,设计了一套信标光光斑粗精复合跟踪系统.搭建了室内测试实验系统,完成了大气湍流对光斑跟踪精度影响的测量,结果表明在中弱湍流时,跟踪精度随湍流增大有近似线性关系,系统整体跟踪精度在 5~15 μrad 之间,可较好地完成光斑跟踪功能.在野外环境开展的飞机-飞机激光通信演示实验中,对伺服系统的跟踪性能及跟踪精度进行实际测量,整体跟踪精度不大于 15 μrad ,与室内实验测试系统基本一致.

关键词:空间激光通信;大气湍流;粗精复合;跟踪精度

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)09-0901001-9

Influence of Atmosphere Turbulence to Tracking System in Space Laser Communication

ZHANG Lei^{1,3}, LI Bo¹, ZHAO Xin², TONG Shou-feng^{1,3}, JIANG Hui-lin^{1,3}

(1 School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(3 Institute of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A set of beacon tracking servo system based on coarse-fine composite control was designed, which was aimed at demonstration test of space laser communication in atmospheric channel. Influence factors of tracking accuracy were analyzed and the impacts caused by atmospheric turbulence were researched in detail. A laboratory measurement system was constructed and the test about the effects of atmospheric turbulence on the optical spot tracking accuracy was completed. The results showed that the tracking accuracy was approximately linear with turbulent intensity increasing in weak-medium-strength atmospheric turbulence, which achieved spot tracking function well with a total system precision varied from 5 μrad to 15 μrad . An actual measurement for the tracking performance and accuracy of servo system was conducted in an air-air laser communication demonstration. The total tracking accuracy was no more than 15 μrad and in accordance with the laboratory measurement system.

Key words: Laser communication system; Atmosphere turbulence; Coarse-fine composite; Tracking accuracy

OCIS Codes: 010.1330; 060.2605; 010.1290

基金项目:教育部博士点基金项目(No.20132216110006)和吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(No.2015JY0906008)资助

第一作者:张雷(1980-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为光通信技术及大气光学. Email:zhanglei_cust@163.com

导师:佟首峰(1972-),男,教授,博士,主要研究方向为空间激光通信及光电检测. Email:tsf1998@sina.com

收稿日期:2017-03-10;录用日期:2017-05-22

0 引言

指向、捕获、跟踪(Pointing Acquisition Tracking, PAT)伺服系统是空间激光通信链路中重要的组成部分,其所完成的高概率、快速捕获与高动态、高精度跟踪是光通信系统正常工作的前提与保障^[1-2].PAT 伺服系统从功能上可以分为粗、精跟踪两部分,而最终跟踪精度取决于精跟踪伺服单元性能.在自由空间激光通信中,日本星际间激光通信系统(Inter-satellite Laser Communication, ILC)于 1988 年在空间站与中继卫星间开展星际激光通信实验,其精跟踪伺服单元使用四象限探测器进行光斑探测,利用音圈驱动振镜完成光束精密伺服,跟踪精度为 $2 \sim 5 \mu\text{rad}$ ^[3];欧空局在 2001 年对半导体激光星间链路实验系统(Semiconductor-Laser-Inter-Satellite Link Experiment, SILEX)进行在轨测试,精跟踪伺服单元使用分辨率为 14×14 的专用小面阵、高帧频电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD),以及压电陶瓷(Piezoelectric ceramic, PZT)振镜,实现了 350 Hz 的系统跟踪带宽,跟踪精度为 $2 \mu\text{rad}$ ^[4];美国国家航天航空局的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)开展的激光通信验证计划(Optical Communications Demonstrator, OCD)中采用可以对感兴趣区域开窗口(Region Of Interest, ROI)的 CMOS 相机和音圈驱动振镜实现 400 Hz 的系统跟踪带宽,在实验室获得了 $2 \sim 3 \mu\text{rad}$ 的跟踪精度^[5-6].在大气激光通信中,大气附面层、湍流等效将对伺服跟踪系统性能产生严重影响^[7],甚至造成链路中断.附面层效应会使接收平面上光斑的斯特列尔比下降;大气湍流造成的光束扩展与光束漂移效应会导致平均接收光强降低;光强闪烁效应会降低系统的通信误码率,但是在湍流饱和没有出现时对跟踪系统性能影响不大;相位起伏效应的低阶分量可以被精跟踪单元有效地抑制,而高阶分量引起的光斑弥散是光斑脱靶量检测精度下降的主要原因,最终导致系统整体跟踪精度的降低.

本文在研究光斑弥散对跟踪系统影响的基础上,设计了一种航空用粗精复合跟踪系统,对系统组成及关键技术进行了详细论证.搭建了室内实验系统完成了湍流对跟踪精度影响测试,并在飞机-飞机激光通信演示验证实验中完成了大气湍流中系统跟踪精度的实际测量.相关理论分析与实验验证为大气湍流中跟踪系统设计、性能分析、精度提高提供了参考.

1 光斑弥散效应对跟踪精度的影响

PAT 伺服跟踪单元中跟踪误差主要来自:1)光斑质心检测误差;2)动态滞后误差;3)平台振动残差;4)视轴对准误差^[8].其中视轴对准误差可视为系统误差,为提前量伺服误差和系统装校误差之和;前三项误差为随机误差,其中动态滞后误差与伺服机构对控制指令执行速度相关,平台振动残差主要受激光发射/接收两端所在平台振动特性的影响,一旦激光通信系统各项参数指标确定,这两项误差受实验环境的影响较小,此时光斑质心检测误差成为影响整个系统跟踪精度的最主要原因.对于使用 CCD 探测器作为光斑质心脱靶量检测器件的伺服跟踪系统,假设接收到的光斑整体上服从高斯分布,则其光斑质心检测方差 σ_x^2, σ_y^2 为^[9]

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \frac{X^2 m \sigma_0^2 + \sigma_0^2 \sum_i x_i^2}{(S_{\max} 2\pi a_x a_y)^2 + m \sigma_0^2} + \frac{1}{48\pi a_x a_y} \\ \sigma_y^2 = \frac{Y^2 m \sigma_0^2 + \sigma_0^2 \sum_i y_i^2}{(S_{\max} 2\pi a_x a_y)^2 + m \sigma_0^2} + \frac{1}{48\pi a_x a_y} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (X, Y) 为光斑质心, m 为总像元数, σ_0^2 为图像噪声方差, (x_i, y_i) 为像素坐标, S_{\max} 为像素灰度最大值, (a_x, a_y) 为光斑长轴与短轴.式(1)表明光斑质心检测误差除了与图像噪声等因素有关外,还与光斑本身大小有关.在大气信道内工作的激光通信系统中,大气湍流引起的光斑弥散效应会造成精跟踪探测器上所成像的光斑大小发生变化,可见大气湍流会对空间激光通信系统的跟踪精度造成影响.

波长为 λ 的平面波入射时,理想情况下接收探测器上的光斑尺寸,由衍射极限分辨率决定,经过口径为 D 、焦距为 f 的薄透镜成像后,其光斑为艾利模式,光斑半径 $d = 1.22\lambda f/D$.大气信道中由于湍流对激光的调制作用,使得平面波经过薄透镜成像后,光斑半径增大.Fried 定义了大气湍流中光学系统分辨率,并根据此对长曝光和短曝光的情况进行了分析.其长曝光和短曝光的光学系统分辨率分别为^[10]

$$R_{\infty} = \frac{4D^2}{\lambda f} \int_0^1 x [\operatorname{acos} x - x(1-x^2)^{1/2}] \times \exp\left[-3.44\left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} x^{5/3}\right] dx \quad (2)$$

$$R_0 = \frac{4D^2}{\lambda f} \int_0^1 x [\operatorname{acos} x - x(1-x^2)^{1/2}] \times \exp\left[-3.44\left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} x^{5/3} \left(1 - \frac{1}{2}x^{1/3}\right)\right] dx \quad (3)$$

由光学系统分辨率与其能分辨最小角度之间的关系可知,湍流环境下光学系统所能分辨的最小角度为 $\theta_{\min} = 1/R_{\infty,0}$,当只考虑湍流引起的光斑弥散时,得到光斑半径为 $d = f\theta_{\min}$.可知湍流中光斑弥散与接收口径 D ,波长 λ ,系统焦距 f ,大气相干长度 r_0 相关.式(2)相当于受湍流低阶量影响的光斑弥散结果,式(3)相当于受湍流高阶量影响的光斑弥散结果.

在 PAT 伺服系统实际工作过程中,精跟踪伺服单元为了实现对粗跟踪残差的有效抑制,必须具有较高的跟踪带宽,这就对精跟踪探测器的采样速率提出了较高的要求(需要大于精跟踪带宽的 6~10 倍).就目前的 CCD 探测器来说,需要利用其 ROI 功能来实现高速采样,此时窗口内的有效像元数不能太多.在光学系统焦距不变的情况下,精跟踪视场内较少的像元数会导致单个像元所对应的空间分辨率无法满足光斑检测精度要求,这就需要对 CCD 进行亚像元细分来保证光斑脱靶量检测精度.工程应用中通常采用探测器的等效噪声角(Noise Equivalent Angle, NEA)来表示亚像元细分能力,光斑脱靶量检测精度的表达式可简化为^[8]

$$\text{NEA} = \frac{1}{\text{SF} \sqrt{\text{SNR}}} \quad (4)$$

式中,SNR 表示信标光斑在焦平面上成像的功率信噪比,通常应保证 $\sqrt{\text{SNR}}$ 达到 3~10;SF 为探测器斜率系数,对于 CCD 探测器而言,它直接与光斑的空间强度分布和光斑尺寸有关.对于艾利光斑,假设光斑直径为 θ_{beam} , $\text{SF} = 4.14/\theta_{\text{beam}}$;对于高斯光斑, $\text{SF} = 1.27/\theta_{\text{beam}}$.由此可见,大气湍流光斑弥散效应引起的 θ_{beam} 增大使跟踪探测器的等效噪声角减小,即降低了跟踪系统的脱靶量检测精度.

2 粗精跟踪单元组成

2.1 系统组成

一个完整的空间激光通信系统主要包括光机单元、PAT 伺服跟踪单元、通信收发单元及总控单元四个主要部分,其基本组成原理如图 1.针对航空平台激光通信系统,对其粗精复合跟踪单元进行了设计,为满足

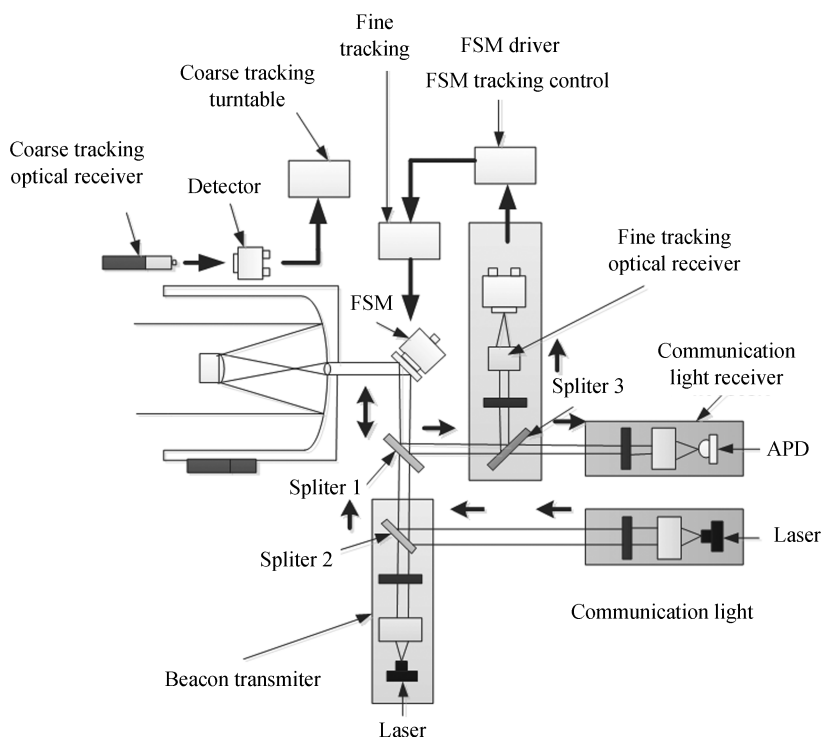


图 1 空间激光通信系统组成原理

Fig.1 Composition principle of space laser communication system

视轴初始指向、开环捕获、动态粗精跟踪要求,粗跟踪系统采用独立 20 mm 小口径接收设计,CCD 探测器接收 800 nm 波段粗信标光后与伺服转台系统构成闭环完成视轴指向与粗跟踪功能;精跟踪系统通过共用卡塞格林光学系统接收 800 nm 波段信标光后,与精跟踪 CCD 探测器、补偿控制系统、振镜构成伺服回路完成精跟踪功能.设计粗跟踪单元视场为 10 mrad,粗跟踪单元的检测精度即粗跟踪探测器的单个像素角分辨率为 25 μrad ;设计精跟踪视场为 160 μrad ,精跟踪 CCD 探测器采用 ROI 技术,令窗口分辨率大小为 80 \times 80,此时 CCD 采集帧频可达 3 000 Hz 以上,单个像素的角分辨率为 2 μrad ,在无湍流影响的理想状态下,假设入射光斑为艾利模式,覆盖了 CCD 探测器上 3 \times 3 个像素,根据式(4)可知,在一定的信噪比条件下(例如 $\sqrt{\text{SNR}}=6$),探测器等效噪声角 $\text{NEA}=3\times 2\ \mu\text{rad}/(4.14\cdot 6)=0.24\ \mu\text{rad}$,实现了 1/8 像素细分,精跟踪单元质心检测精度可达亚微弧度量级;伺服执行振镜的谐振频率大于 1 600 Hz 以上,可实现对航空平台振动抑制,跟踪系统整体带宽达到 300 Hz 以上^[11-12].

2.2 精跟踪单元设计

精跟踪相机采用开窗口技术以满足帧频要求,其窗口分辨率大小为 80 \times 80 像素;将光斑采集与处理、阈值设置、光斑位置计算、数字补偿控制函数、脱靶量输出等功能集成在一块现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)中完成,其基本功能组成如图 2^[13-14].

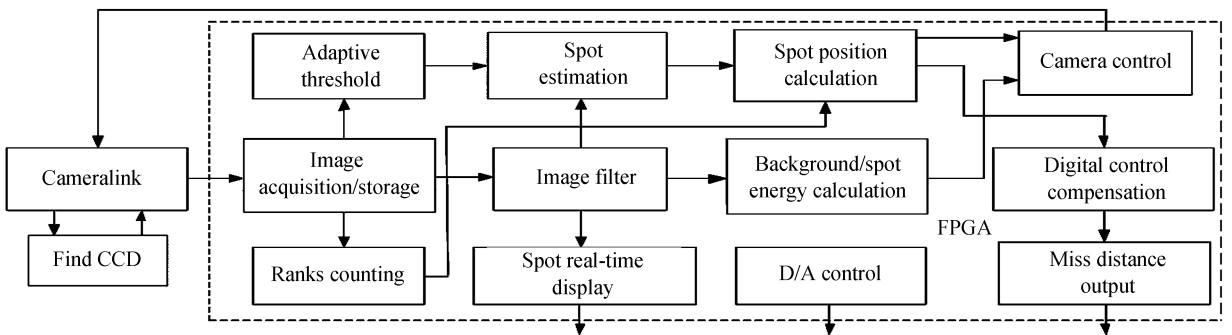


图 2 精跟踪单元工作流程

Fig.2 Workflow of fine tracking module

光斑位置计算使用质心公式完成,光斑位置坐标(X, Y)为^[9]

$$\begin{cases} X = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_i \times (p_{ij} - S_{i-1})}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (p_{ij} - S_{i-1})} \\ Y = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} y_i \times (p_{ij} - S_{i-1})}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (p_{ij} - S_{i-1})} \end{cases} \quad (5)$$

式中, p_{ij} 为像素灰度值, x_i 为像素行坐标, y_i 为像素列坐标, S_i 为判决阈值.采用自适应阈值设置用以提高系统信噪比,减小背景光、湍流闪烁等对光斑检测影响.光斑质心位置方差由式(1)求出.

图 2 中选用 PZT 振镜作为光束伺服执行器,其开环角度范围为 $-2.5\sim 2.5$ mrad;角度分辨率为 0.1 μrad .光束伺服执行器可等效为二阶系统,测量其传递函数如式(6)

$$G(s) = \frac{4710^2}{s^2 + 4710s + 4710^2} \quad (6)$$

为保证伺服系统稳定、快速工作,设计其数字补偿控制函数为

$$H(z) = \frac{0.5844z^2 - 1.041z + 0.4585}{z^3 - 2.739z^2 + 2.479z - 0.7397} \quad (7)$$

由于精跟踪 CCD 的光斑采样率在 3 000 Hz 以上,经过补偿控制函数控制后其开环幅频特性曲线如图 3,从特性曲线可以发现,精跟踪伺服系统的开环截止频率达到 300 Hz 以上,相位裕量为 65.4°,保证了系统的稳定性,同时系统的带宽和伺服刚度满足任务要求.这样实际上可以精跟踪系统完成对湍流低阶量的校正,即式

(2)的湍流长曝光对跟踪精度影响可以完全消除,湍流光斑弥散效应对跟踪精度的影响只由式(3)决定.

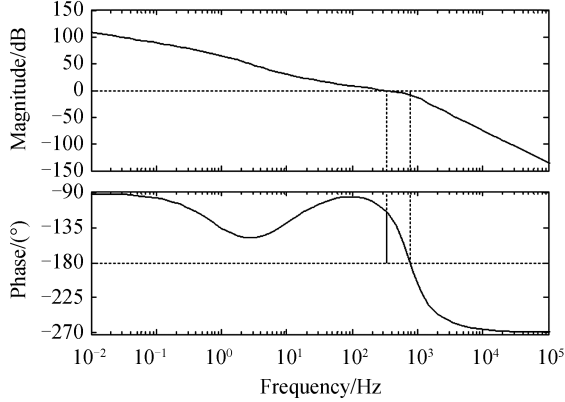


图3 精跟踪伺服系统幅频特性曲线

Fig.3 Amplitude-frequency characteristic curve of fine tracking module

3 PAT跟踪精度仿真实验及野外实验测试

为完成测试湍流对跟踪精度及跟踪效果的影响,搭建实验系统完成测试^[15],并在实际飞机-飞机激光通信演示实验中完成相应参数测量.

3.1 室内测试

测试系统由发射和接收两个部分构成,组成原理如图4.发射部分:激光器发射800nm波段的模拟信标光束,经过1/4偏振片后照射到分辨率为 256×256 的液晶空间光调制器上,调制的出射光束经过扩束系统后,照射到二维摆镜上,计算机模拟航空平台(飞机、飞艇等)振动功率谱控制摆镜摆动,再经过二次扩束后将受到湍流模拟调制的光束发射出去.

实验中由计算机模拟出相位屏控制液晶空间光调制器以产生不同强度的大气湍流^[16].湍流畸变波前 $\varphi(r)$ 被分解为在圆域内正交的Zernike多项式的形式^[17],即

$$\varphi(r) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j z_j(r) \quad (8)$$

式中, $z_j(r)$ 为各项Zernike多项式, a_j 为第 j 项多项系数.根据Noll定义,圆域Zernike多项式可以表示为径向多项式和角向多项式的乘积^[18],即

$$z_j = R_n^m(r) \Theta^m(\theta) \quad (9)$$

式中, $R_n^m(r)$ 为径向多项式, $\Theta^m(\theta)$ 为角向多项式,根据Guang-ming Dai给出了两项Zernike多项式 Z_i 和 Z_j 的系数协方差表达式^[19]为

$$\begin{cases} \overline{a_i a_j} = \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} \times \frac{2.246(-1)^{(n_i+n_j-2m_i)/2} [(n_i+1)(n_j+1)]^{1/2} \Gamma(14/3)}{\Gamma[(n_i-n_j+17/3)/2] \Gamma[(n_j-n_i+17/3)/2] \Gamma} \\ \frac{\Gamma((n_i+n_j-5/3)/2) \delta_{m_i m_j}}{[(n_i+n_j+23/3)/2]} & (i-j = \text{even}) \\ \overline{a_i a_j} = 0 & (i-j = \text{odd}) \end{cases} \quad (10)$$

根据式(8)、(9)、(10)模拟多个波长为800nm、分辨率为 256×256 的Kolmogorov相位屏,令 D/r_0 值从小到大,模拟从弱到强不同的大气湍流强度,其中典型值为 $D/r_0 = 2$ (弱湍流); $D/r_0 = 10$ (中湍流); D/r_0

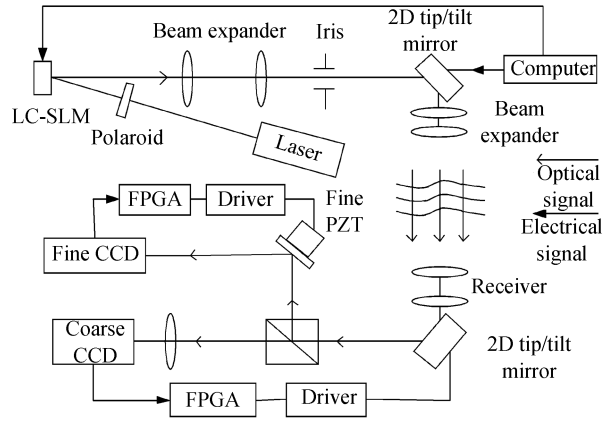


图4 测试系统组成原理

Fig.4 The composition principle of test system

=15(强湍流).

接收部分:模拟建立粗精复合接收系统,其中粗跟踪单元为完全模拟系统,精跟踪单元为自行设计系统,与实际野外飞行测试中所使用器件相同.粗跟踪单元由二维摆镜、粗跟踪 CCD、FPGA 处理器等构成粗跟踪闭环系统,通过粗跟踪 CCD 得到光斑脱靶量,控制二维摆镜完成粗跟踪功能;精跟踪单元由 PZT 振镜、精跟踪 CCD、FPGA 处理器构成精跟踪闭环系统,精跟踪系统通过精跟踪 CCD 相机获得脱靶量,经过补偿控制函数及振镜驱动器后,控制振镜摆动完成精跟踪功能.

图 5~8 为实验结果.

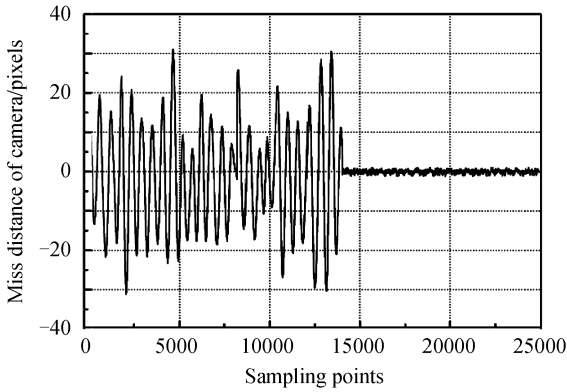


图 5 粗精跟踪结果
Fig.5 Results of coarse/fine tracking

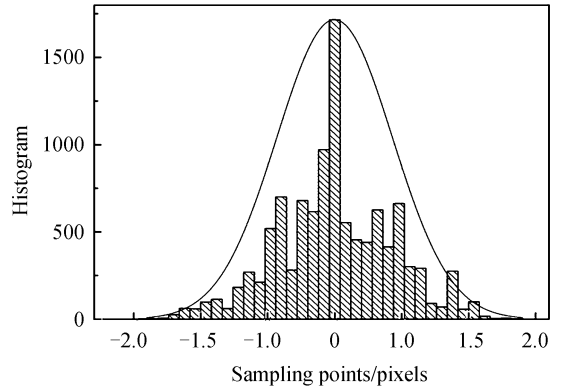


图 6 无湍流时精跟踪结果统计
Fig.6 Statistical results of coarse/fine tracking without turbulence

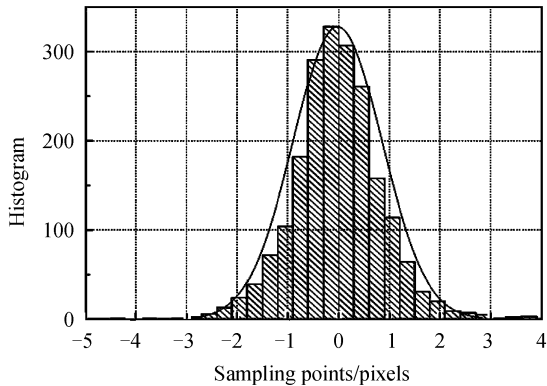


图 7 $D/r_0=2$ 时精跟踪结果统计
Fig.7 Statistical results of fine tracking with $D/r_0=2$

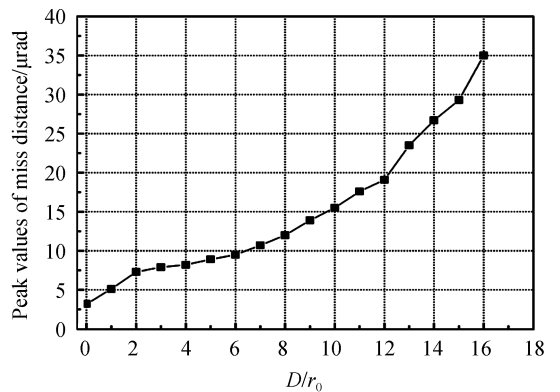


图 8 不同 D/r_0 时的脱靶量峰-峰值记录
Fig.8 Peak values of miss distance with different D/r_0

由图 5 可以看出,设计的粗精跟踪系统很好地完成了跟踪功能,经数据统计分析表明精跟踪对粗跟踪的抑制比接近 33 倍.系统设计时精跟踪单元单个像素的角分辨率为 $2 \mu\text{rad}$,图 6 为无湍流影响时精跟踪脱靶量统计结果,像素峰-峰值为 3.2 像素,均方根值为 $0.39(1\sigma)$.图 7 为弱湍流 $D/r_0=2$ 时精跟踪脱靶量统计结果,像素峰-峰值为 7.3 像素,均方根值为 $0.94(1\sigma)$.表明无湍流时系统跟踪精度为 $2.34 \mu\text{rad}$, $D/r_0=2$ 时跟踪精度为 $5.64 \mu\text{rad}$.图 8 为不同湍流条件下精跟踪单元跟踪精度变化情况,统计了 D/r_0 取值从 0 逐渐增加到 16 时,对应的精跟踪光斑质心脱靶量峰-峰值,对图 8 分析发现,随着湍流增强,系统跟踪精度下降,在 $0 < D/r_0 < 10$ 时(即中弱湍流时),跟踪精度近似成线性降低,基本在 $5 \sim 15 \mu\text{rad}$ 之间变化;当湍流进一步增强时,由于成像光斑形状恶化及整体探测信噪比下降等因素影响,系统跟踪精度降低趋势非常明显,测量值可以达到 $30 \mu\text{rad}$ 以上.

3.2 野外测试

在野外环境开展双固定翼飞机间激光通信演示实验,实验光端机如图 9,在完成通信系统性能指标测试的同时,对系统跟踪精度以及水平大气湍流参数进行了测试^[20].机载激光通信系统信标光源采用 800 nm 近红外半导体激光器,发射功率 $0 \sim 3 \text{ W}$ 可调;光学天线采用卡塞格林系统,主镜口径 200 mm ,焦距 1252 mm ;粗精跟踪单元选用的 CCD 探测器及伺服振镜等器件与室内实验系统一致.选择晴朗天气进行飞行实验,飞

机1与飞机2分别搭载激光发射光端机与接收光端机先后起飞,两机爬升到距离地面约海拔1 km 高度后水平拉开距离,根据机载GPS提供的位置信息,在达到机载光通信安全距离(约10 km)后启动PAT 伺服跟踪单元实现信标光捕获跟踪,同时启动机载水平大气湍流参数测量系统利用差分像运动法(Differential Image-motion Monitor, DIMM)对大气折射率结构常数 C_n^2 进行测量.飞机飞行高度从海拔1 km 逐渐爬升到海拔6 km,图10为大气湍流强度随海拔高度变化的趋势,实验过程中粗精跟踪单元跟踪精度如图11、图12,表1统计了不同海拔高度下系统跟踪精度的测量结果.



图9 飞行实验中的机载激光通信端机

Fig.9 Airborne laser communication system in air-air demonstration

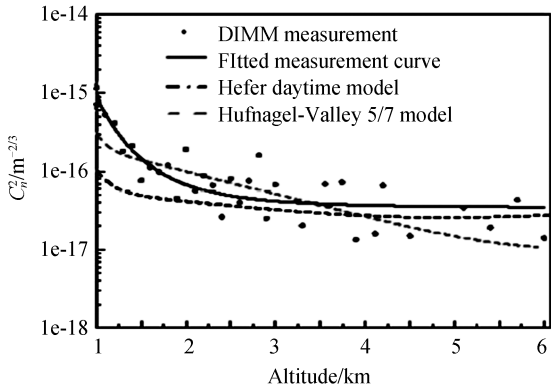


图10 C_n^2 随海拔高度变化趋势

Fig.10 Variation in C_n^2 with altitude

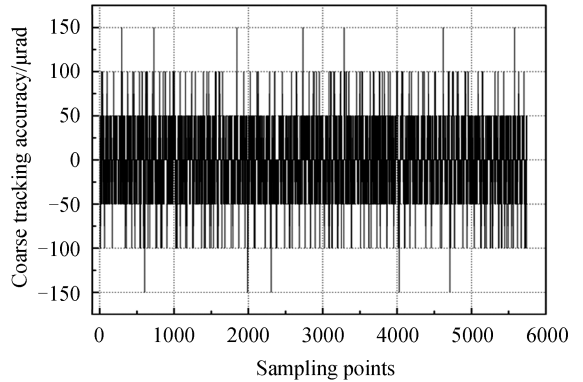


图11 粗跟踪精度记录

Fig.11 Coarse tracking accuracy

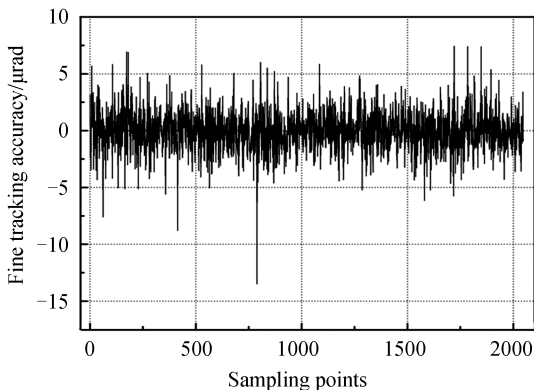


图12 精跟踪精度记录

Fig.12 Fine tracking accuracy

由图10可知,在海拔1~6 km 的空中大气湍流强度随海拔升高而逐渐减小,因此飞行实验过程中所受到的湍流影响都属于中弱湍流.从图11与图12可以看出,在中弱湍流环境中,系统粗精跟踪单元能够很好地完成信标光斑稳定跟踪.由于粗跟踪相机不具有亚像素细分能力,故图11中显示的光斑脱靶量检测精度为单个像素值的角分辨率即 $25 \mu\text{rad}$,可见中弱湍流对粗跟踪精度影响不大;而精跟踪单元明显受到大气湍流的影响,图12中跟踪精度的峰-峰值已经超过 $\pm 5 \mu\text{rad}$,远小于室内无湍流条件下的跟踪精度 $2.34 \mu\text{rad}$,可知大气湍流是影响系统跟踪精度的重要因素之一.表1列出了不同海拔

高度时,系统跟踪精度的统计值以及相对应的大气湍流参数,实验结果表明,系统跟踪精度随着湍流强度的减小而逐渐提高,野外中弱湍流环境中的PAT 伺服单元跟踪精度可以保持在 $15 \mu\text{rad}$ 以内,与室内实验结果基本一致.

表 1 系统跟踪精度测量结果

Table 1 System tracking accuracy measurement results

Altitude/km	Sample	$C_n^2/(m^{-2/3})$	Tracking accuracy/ μ rad
1	1 999	1.05e-15	13.2
2	2002	0.94e-16	8.9
3	1 982	0.42e-16	6.8
4	1 990	0.28e-16	6.2
5	2 000	0.24e-16	5.9
6	1 960	0.19e-16	5.3

4 结论

大气湍流是影响空间激光通信系统性能指标的重要因素之一,针对航空平台特点设计粗精复合跟踪系统,以保证通信正常进行.从光斑的长短曝光引起的光斑弥散效应出发,对跟踪单元性能影响进行了分析与研究.结合现有技术模拟粗精复合跟踪与湍流强度变化,搭建实验系统完成湍流中系统跟踪性能测试,结果表明在中弱湍流时,设计的粗精跟踪系统能够完成稳定跟踪功能,跟踪精度在 5~15 μ rad 之间.当湍流进一步增强时,系统虽然可以完成跟踪,但是跟踪精度已经不能满足系统通信要求,此时只有依靠外部措施抑制湍流影响才能进行稳定跟踪,例如使用自适应光学技术等.在开展的飞机-飞机通信演示实验中,对伺服系统的跟踪精度进行了测试,跟踪精度不大于 15 μ rad,与室内实验结果基本一致.实验结果表明,在中弱湍流中该 PAT 伺服跟踪单元可以很好地完成信标光斑跟踪功能,能够保证激光通信实验顺利进行.

参考文献

- [1] MARK G, FRANK H, HARTMUT K, *et al.* Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(3): 031202.
- [2] JIANG Hui-lin, JIANG Lun, SONG Yan-song, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(4): 0405008.
姜会林, 江伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, **42**(4): 0405008.
- [3] ARAKI T, NAKAMORI S. Present and future of optical inter-satellite communication research at the national space development agency of japan[C]. SPIE, 1994, **2123**: 34-42.
- [4] OPPENHAEUSER G. In orbit test result of an optical inter-satellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]. SPIE, 2003, **4635**: 15-23.
- [5] MONACOS S, ORTIZ G. Design of an event-driven random-access-windowing CCD-based camera[C]. SPIE, 2003, **4975**: 115-125.
- [6] JEGANATHAN M, PORTILLO A, RACHO C. Lessons learnt from the optical communications demonstrator (OCD) [C]. SPIE, 1999, **3615**: 23-30.
- [7] GAO Tian-yuan, HU Yuan, JIANG Hui-lin, *et al.* The effect of atmosphere boundary layer on airborne space laser communication and its compensation technology[J]. *Acta ArmanmentarII*, 2015, **36**(12): 2278-2283.
高天元, 胡源, 姜会林, 等. 机载激光通信大气附面层影响及补偿技术研究[J]. 兵工学报, 2015, **36**(12): 2278-2283.
- [8] JIANG Hui-lin. The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [9] LI Xiao-feng. The principle and technology of the satellite-to-ground laser communication links[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [10] ZHAO Xin, JIANG Hui-lin, HAN Cheng. Fiber coupling efficiency on focal plane spot extension caused by turbulence [J]. *Optik*, 2013, **124**(12): 1113-1115.
- [11] LI Xiao-ming, ZHANG Li-zhong, MENG Li-xin, *et al.* Research and experiment of pointing/acquisition/tracking system for airborne space laser communication[J]. *Acta ArmanmentarII*, 2016, **37**(6): 1044-1051.
李小明, 张立中, 孟立新, 等. 机载无线激光通信对准-捕获-跟踪系统及动态飞行试验研究[J]. 兵工学报, 2016, **37**(6): 1044-1051.
- [12] ZHAO Xin, SONG Yan-song, TONG Shou-feng, *et al.* Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(3): 0305005.
赵馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, **41**(3): 0305005.
- [13] 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.
- [14] LIU Yun-qing, JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng. Study on stabilizational racking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(5): 0505005.
刘云清,姜会林,佟首峰.大气激光通信中稳定跟踪器件及算法研究[J].*中国激光*,2011,**38**(5):0505005.
- [15] ZHAO Xin, TONG Shou-feng. Fine tracking system based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(7): 1642-1647.
赵馨,佟首峰.基于FPGA的精跟踪系统[J].*仪器仪表学报*,2011,**32**(7):1642-1647.
- [16] WANG Xiao-zhang, TANG Feng, YUAN Meng-jie, et al. Experimental simulation of circular-airy beam drift in atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(8): 0813001.
王晓章,唐峰,原勳捷,等.实验模拟环境艾里光束在大气扰动中的光束漂移[J].*中国激光*,2015,**42**(8):0813001.
- [17] PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media, second edition[M]. SPIE Press, 2005.
- [18] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, **66**(3): 207-211.
- [19] DAI G M. Wavefront simulation for atmospheric turbulence[J]. *Optical Engineering*, 1994, **35**(5): 245-252.
- [20] ZHANG Lei, ZHAO Xin, TONG Shou-feng, et al. Measurement of atmospheric turbulence parameters on airborne platform based on differential image motion method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(3): 0304002.
张雷,赵馨,佟首峰,等.基于差分像运动法的机载平台大气湍流参数测量[J].*中国激光*,2017,**44**(3):0304002.