

doi: 10.3788/gzxb20154407.0706001

振动与远场湍流对机载精跟踪终端的影响

刘彦飞, 代永红, 周浩天, 单欣, 艾勇

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘 要: 为了实现机载光通信终端小型化、高准确度的要求, 依据机载平台振动功率谱特点设计了以 FPGA 为核心的小型机载精跟踪光通信终端. 分别通过室内模拟跟踪与扰动抑制、远场信标探测与通信评估实验对精跟踪系统的性能进行了验证. 分析了精跟踪系统对机载平台振动的抑制效果以及不同湍流强度对跟踪造成的影响. 在远场 3.4 km 进行大气湍流验证实验, 通过角速度模拟了飞机到地面距离 20~30 km, 飞行速度 700~900 km/h 时的通信实验. 实验表明, 精跟踪系统对机载平台的振动具有较强的抑制能力, 系统跟踪准确度为 3 μ rad 左右; 精跟踪可以使机载光通信模拟运动时的接收光功率提高 4~5.9 dB. 系统搭建灵活, 跟踪准确度高.

关键词: 自由空间光通信; 机载光通信; 精跟踪系统; 跟踪误差; 复合轴系统; 大气湍流; 伺服系统

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0706001-8

Effect of Vibration and Far Field Turbulence on the Fine Tracking of Airborne Optical Communication Terminal

LIU Yan-fei, DAI Yong-hong, ZHOU Hao-tian, SHAN Xin, AI Yong
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to reduce the volume and power consumption and improve the tracking accuracy, a small airborne fine tracking system with FPGA based on the characteristics of airborne platform vibration power spectral density was designed and developed. To verify the fine tracking system ability, simulation tracking and disturbance rejection experiments, far-field beacon detection and communication experiments were carried out, the airborne platform vibration suppressed effect and turbulence impact on fine tracking in various intensity were analyzed. In 3.4km far-field atmospheric turbulence experiment, a aircraft to ground communication through angular velocity was simulated. Simulation distance was about 20~30 km and flight speed was about 700 ~ 900 km/h. The experimental results show that, the fine tracking system has strong rejection effect on airborne platform vibration, the tracking accuracy is about 3 μ rad. The receiving signal power can be improved 4~5.9 dB in simulated aircraft to ground communication experiment. The fine tracking system has the characteristics of flexibility and high accuracy.

Key words: Space communication; Airborne optical communication; Tracking system; Tracking error; Compound axis system; Atmospheric turbulence; Servo system

OCIS Codes: 060.4510; 010.1330; 030.7060

0 引言

空间光通信(Free-space Optical Communication, FSO)是利用光频作载波的一种宽带无线通信方式,具有小型化、高速率以及性能可靠等优点^[1]. 随着空间技

术的发展,从空间站、卫星到地面海量数据传输的需求日益迫切^[2-3],空间光通信成为了各国发展的热点. 空间光通信包括星间、星地、卫星与飞机、飞机与飞机、地面等方式,而飞机及地面移动平台的光通信(机载光通信)由于其在战术、战略上的重要性,20世纪70年开始

基金项目:航空科学基金项目(No. 201351S5002)和国家自然科学基金项目(No. 11204220)资助

第一作者:刘彦飞(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为目标识别与跟踪控制、相干激光通信. Email:liuyf@whu.edu.cn

导师:艾勇(1958-),男,教授,博导,主要研究方向为自由空间光通信及空间探测. Email:aiyong09@163.com

收稿日期:2015-01-16;录用日期:2015-03-17

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

各国对其开展了广泛的研究与演示验证工作^[4-7].

最早的机载光通信试验是美国赖特帕特森实验室1981年在新墨西哥州的白沙导弹靶场进行的^[8],采用YAG激光器(532 nm)进行了最远100 km的飞机-地面的激光通信实验,通过偏振极化与脉冲位置编码实现了1 Gbps通信速率.2003年美国航空航天局下属的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)进行了2.5 Gbps无人机-地面的光通信捕获、瞄准与跟踪(Acquisition Pointing and Tracking, APT)与通信试验^[9],飞机飞行高度18 km,通信距离50 km,信号光1 550 nm,跟踪准确度18 μ rad.2010年为了模拟火星探测卫星与火星地面设备之间的光通信,JPL实验室分别在白天和晚上进行飞机-地球表面的光通信实验,通信速率是270 Mbps倾斜距离是5~9 km^[10].

国内在开展机载光通信的研究需求也非常迫切,文献[11]分析了机载光通信的趋势及关键技术,文献[12]设计了复合轴控制的机载终端,并进行了17.5 km的空-地实验,文献[13-14]进行了机载光通信的初始指向建模与验证,并开展了飞机-飞机、船舶的APT实验.重庆理工大学的曹阳研究了机载光通信跟踪算法^[15].机载光通信的前期研究说明国内工程化实现的可行性,但由于机载平台相对运动速度、姿态变化快且激光发散角小(几百 μ rad),受到大气湍流及气动光学的影响,实现高准确度、小型化机载光通信终端仍然是机载光通信的主要研究目标.

本文分析了机载光通信振动功率谱的特点,研制了高精度、小型化的机载精跟踪系统.通过平台振动功率谱密度的方法分析了精跟踪的抑制能力,进行了室内模拟验证.分析了不同湍流强度对信标的影响,并开展了实验.

1 机载光通信精跟踪系统结构

光通信终端采用复合轴控制,即粗跟踪实现低速、大惯量的瞄准与跟踪,精跟踪完成实时高精度对准与扰动补偿.精跟踪系统决定复合轴控制系统的准确度与抑制扰动的能力,复合轴控制结构如图1.

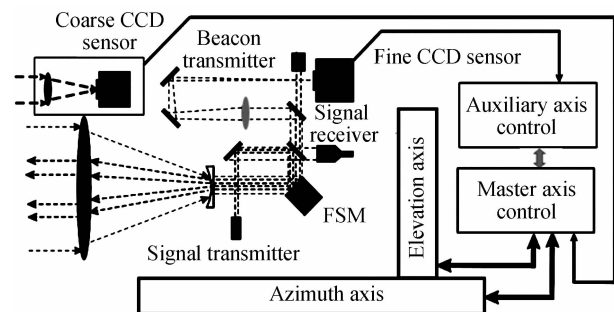


图1 机载光通信终端结构

Fig. 1 Diagram of the airborne communication terminal system design communication distance of 20~30 km within the aircraft-aircraft,

机-地通信,信号光波长为1 550 nm,功率为2 W,设计通信速率为1.25 Gbps.精跟踪与通信的主要参量如表1.

表1 机载终端主要参量

Table 1 Parameters of the airborne terminal

Parameter	Value
Telescope diameter/mm	100
Signal wavelength/nm	1 550
Signal beam divergence angle/ μ rad	200 \pm 20
Signal power/dBm	33
Beacon wavelength/nm	808
Beacon divergence angle/mrad	1 \pm 0.1
Beacon power/dBm	30
Main lens focal length/mm	200
Fine tracking field of view/ μ rad	890
FSM angular range/mrad	10
FSM resolution/ μ rad	0.5
CMOS detector frames frequency/fps	2 200

机载光通信系统需要考虑尺寸、复杂性、功耗和重量^[6],以现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)为核心的精跟踪系统具有运算速度快、集成性好、开发方便等优点.精跟踪系统主要以FPGA、高帧频相机单元、微处理器单元和精跟踪执行机构组成,如图2. FPGA单元集成了高速数据传输、图像处理、控制运算、高速相机接口、相机控制接口与人机交互接口等功能.微处理器完成对相机的控制,包括曝光时间、开窗大小等.

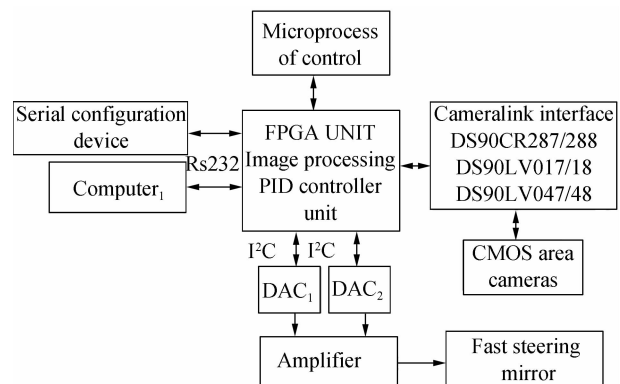


图2 精跟踪控制系统结构

Fig. 2 Structure of fine tracking system

高帧频 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)相机采用PhotonFocus的MV-D1024E-160相机,像素10.6 μ m,感光区10.9 μ m \times 10.9 μ m,采用光强对数压缩其动态范围可以达到120 dB.支持任意开窗,灵活设定工作区域位置及曝光时间,开窗256 \times 256时最高帧频达2 200 frame/s.精跟踪执行机构采用压电陶瓷(Piezoelectric Transducer, PZT)快速倾斜镜(Fast Steering Mirror, FSM),偏转范围10 mrad,输入电压范围为-2 V~+12 V,精跟踪主要部件及参量见表2.

表 2 精跟踪系统主要部件及参量

Table 2 Equipment parameters of Fine Tracking system

Equipment & character	Parameters
CMOS camera	MV-D1024E-160
	Pixel size:10.6 μm×10.6 μm FPS:2 200 Hz@256×256 pixels
	Data interface:cameralink
Controller	FPGA: EP2K20Q240C6
	Processing frequency:40 MHz 16 bit DAC, ±2LSB
Output rise time	~1.6 ms
Output range	5±5 V
Execution unit	PZT,S-330.8SL
	Angular range:10 mrad
	Resolution: ~0.5 μrad

2 机载平台振动功率谱分析

2.1 机载平台角度振动的功率谱密度

精跟踪系统主要补偿机载平台振动、大气湍流造成的角度误差,角度误差的功率谱密度是评价精跟踪系统的有效手段之一.精跟踪系统要在一定的跟踪准确度下保证精跟踪带宽高于机载平台振动谱的范围.由文献[9,16]获得了多种国外通信卫星平台的振动功率谱,如图 3、4.

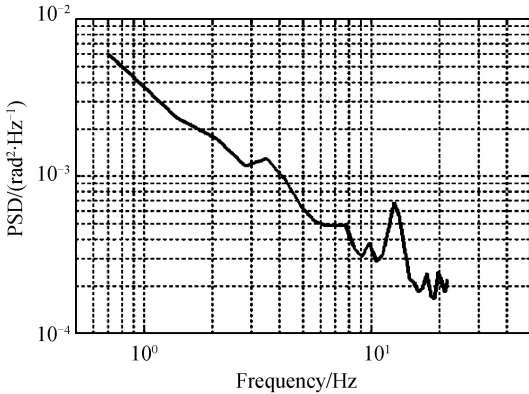


图 3 典型汽车平台的振动功率谱

Fig. 3 Typical spectral response of the moving platform

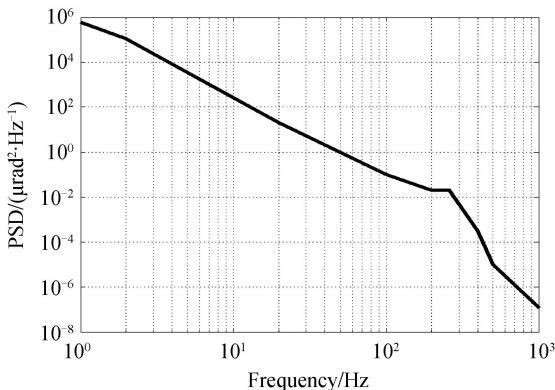


图 4 典型机载平台振动功率谱

Fig. 4 Typical spectral response of the airborne platform

由图 3、4 可知无论车载平台还是机载平台,振动功率谱为宽带有色噪音,低频范围内幅度高,高频范围内幅度低.又因为谱密度函数与相关函数是一对傅里叶变换,测试获得了机载平台的振动功率谱后,平台振动造成的角度均方差可以表示为

$$\sigma_{\theta}^2 = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (1)$$

即为指向误差的方差 σ_{θ}^2 与功率谱密度 $S(f)$ 的关系,功率谱密度函数可以表示成

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

$R(\tau)$ 为机载平台角度振动的自相关函数,根据图 3 可以看到对于车载平台其振动谱强度与频率都要远小于图 4 的机载平台振动功率谱.车载平台 0.5~10 Hz 的振动幅度约为 5.4 mrad,10~30 Hz 的振动幅度约为 2.3 mrad.对机载平台振动谱的计算可知 1~70 Hz 的振动幅度约为 4.2 mrad,70~200 Hz 的振动幅度约为 7.4 μrad,200~1 000 Hz 的振动幅度约为 4.5 μrad.机载平台振动功率谱既有幅度较大的低频振动,也有频率较高但是振动幅度较小的高频振动.

2.2 平台振动对跟踪准确度的影响

平台振动会造成跟踪系统的指向误差,也会对系统跟踪准确度产生影响.精跟踪系统实际上是一个采样伺服系统,平台振动造成的跟踪残差可以表示为

$$\sigma_{TR}^2 = \int_0^{\infty} S_{\theta}(f) \left| \frac{G_F(f)}{1 + G_F(f)} \right|^2 df \quad (3)$$

式中, $G_F(f)$ 为精跟踪系统的开环传递函数,通过测试系统开环幅频特性曲线与相频特性曲线,辨识系统开环传递函数为

$$G_F(s) = \frac{-1.298 \times 10^4 s + 3.092 \times 10^7}{s^2 + 2165s + 1.433 \times 10^9} \quad (4)$$

图 5 给出了精跟踪系统的开环频率特性,根据功

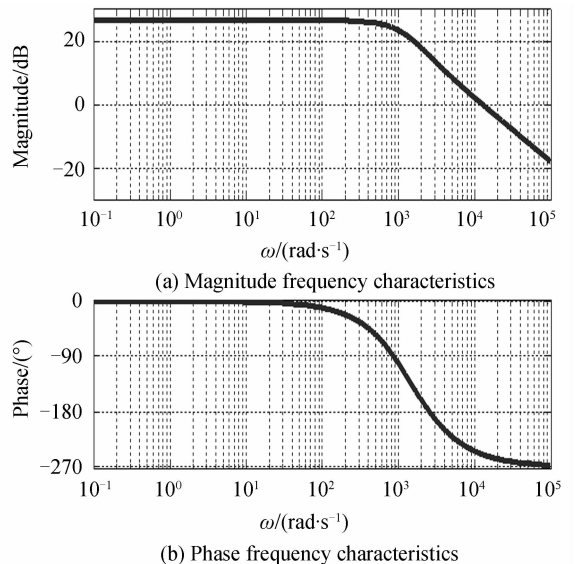


图 5 精跟踪系统开环频率特性

Fig. 5 The open-loop frequency response of fine tracking

率谱曲线以及式(3)、(4),可以计算出精跟踪对平台振动产生的残差,见表3.

表3中,低频大幅度的振动超出了精跟踪的工作范围,需要在粗跟踪的基础上进行精跟踪,通常通过APT系统的减震措施来抑制.而对于机载平台频率较高的振动,精跟踪有着较好的抑制效果,其中31~100 Hz精跟踪可以将振动误差抑制到1.07 μrad ,对于100~200 Hz的高频振动,精跟踪可以将振动误差抑制到0.348 μrad .

表3 车载平台与机载平台的振动残差

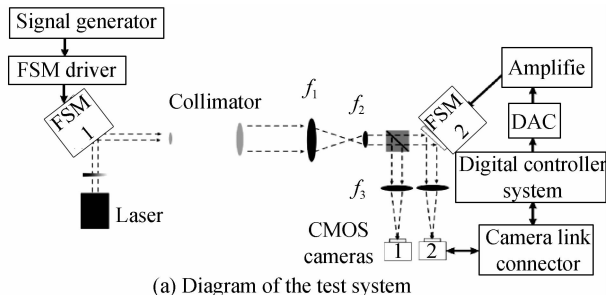
Table 3 Residual vibration of moving and airborne platform

Frequency domain/Hz	Moving platform Residual error	Aircraft platform Residual error
1~30	2.20 mrad	2.74 mrad
31~100	—	1.07 μrad
100~200	—	0.348 μrad

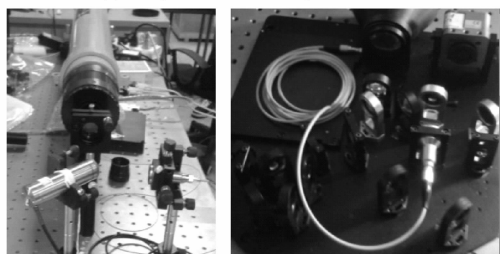
3 精跟踪高频扰动与湍流抑制实验

3.1 精跟踪系统扰动抑制性能验证

为了对精跟踪系统性能进行实验验证,搭建如图6的实验系统,FSM1用来模拟信标光的角度起伏,FSM2与CMOS camera2、Digital controller system等构成了跟踪控制系统,CMOS camera1用来记录光斑抖动评估系统补偿效果,CMOS camera2为位置传感器,记录图像以及光斑的分布.



(a) Diagram of the test system



(b) FSM1 and collimator (c) Communication terminal

图6 室内验证实验结构组成

Fig. 6 Diagram of the test system indoor

模拟实验使用2 mW的650 nm激光器,经过衰减片与平行光管扩束为平行光模拟远场信标光.接收端采用透镜变换的方法,系统压缩比为12,透镜 f_3 焦距为300 mm,系统等效焦距 f 为3.6 m,像素对应角度分辨率为 $\theta=d/f=2.86 \mu\text{rad}$.

FSM1中输入不同频率的正弦扰动信号,评估系统的跟踪与补偿效果.图7给出了扰动幅度约为140 μrad ,频率30 Hz、100 Hz扰动下的系统补偿效果,上下对应的分别为不启动跟踪与启动跟踪时的光斑轨迹,及其对应其统计直方图.数据表明30 Hz时的跟踪准确度均方差约为3.1 μrad ,100 Hz时的跟踪准确度均方差约为17.0 μrad .

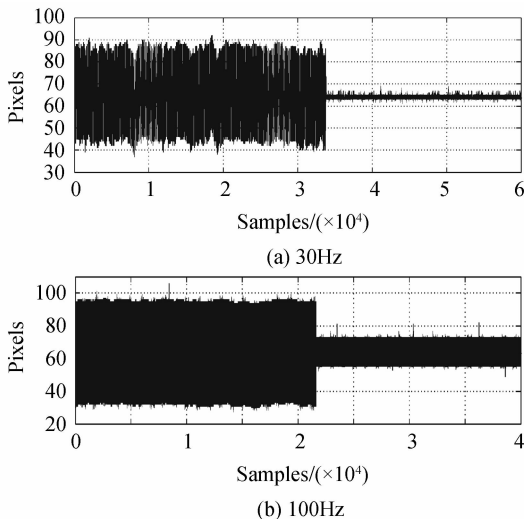


图7 不同频率扰动的跟踪补偿

Fig. 7 Tracking curve of the system in various frequency

3.2 外场大气湍流实验

大气湍流会引起光强波动,严重时会导致探测器上的通信中断^[9].湍流对激光的传输效应主要表现为光束漂移、到达角起伏、光强起伏、光束扩展、光斑弥散等现象^[17].

光束漂移引起的视轴抖动方差与链路距离、接收口径、大气折射率结构常量满足^[17]

$$\sigma_\beta^2 = \frac{1.093LC_n^2}{D^{1/3}} \quad (5)$$

式中, L 通信距离, D 为接收光学口径, σ_β^2 为视轴抖动方差, C_n^2 为大气折射率结构常量.图8分析了在 $D=0.1$ m时,不同 C_n^2 条件下, L 与 σ_β 的关系.

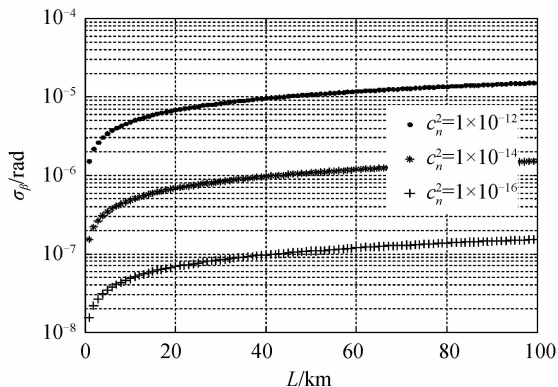


图8 光束漂移 σ_β 与传播距离 L 的关系($D=0.1$ m)
Fig. 8 The relationship between σ_β and L ($D=0.1$ m)

当 $C_n^2=10^{-16}$ 时,湍流较弱,20 km时大气引起的

视轴抖动方差 $\sigma_\beta^2 < 1 \mu\text{rad}$; 当 $C_n^2 = 10^{-12}$ 时, 湍流较强, 大气引起的视轴抖动方差 $\sigma_\beta \approx 10 \mu\text{rad}$, 对跟踪准确度产生较强的影响.

到达角起伏是指相位起伏的倾斜分量使光波的总体入射方向发生的变化, 会导致光学接收机焦平面上的聚焦光斑产生抖动, 影响接收跟踪准确度. 在弱湍流条件下, 当满足 $D \geq (L/k)^{1/2}$ 时, 平面波到达角起伏方差可近似写为 $\sigma_\alpha^2 = 2.91C_n^2 L D^{-1/3}$.

为验证湍流对机载终端的影响以及精跟踪的实际效果, 2014年3月23日至29日在武汉大学工学部开展了室外光通信实验. 试验当天的气候条件为能见度4.5 km, 平均气温22℃, 风速9 km/h. 信标光采用50 mW、650 nm 半导体激光器, 信号光为1550 nm, 经过500 mW的掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大后通过天线准直发射. 信道大气湍流的影响与跟踪都是在3.4 km信道中进行的.

图9给出了实测的到达角起伏, 由图可见其幅度最大可达20 μrad 左右. 湍流会导致光束光强起伏, 使入射到探测器上的光强变化造成信噪比变化, 从而影

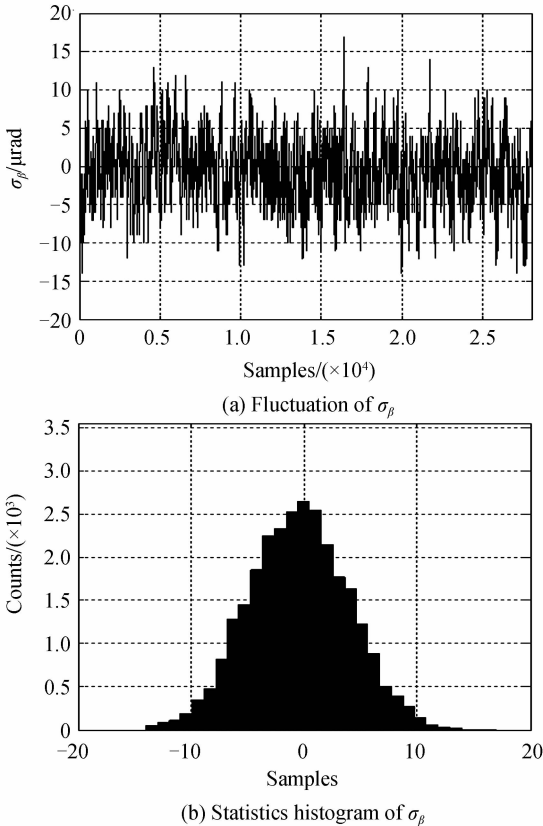


图9 3.4 km 到达角起伏 σ_β 与统计直方图($D=0.1 \text{ m}$)
Fig. 9 3.4 km the arriving angle σ_β and measurement statistics($D=0.1 \text{ m}$)

响跟踪准确度. 假设高斯光束传播使用 Rytov 修正, 光强起伏方差可表示为

$$\sigma_I^2(l_0, L_0, C_n^2, D) = \exp [\sigma_{\text{Inx}}^2(l_0, C_n^2, D) + \sigma_{\text{Iny}}^2(l_0, L_0, C_n^2, D) + \sigma_{\text{Iny}}^2(l_0, C_n^2, D)] - 1 \quad (6)$$

式中 σ_I^2 为光强起伏方差, l_0 为湍流内尺度, L_0 为湍流外尺度, σ_{Inx}^2 、 σ_{Iny}^2 分别为大尺度起伏方差和小尺度起伏方差. 可知 σ_I^2 与湍流内尺度, 湍流外尺度、大气折射率结构常量和接收器孔径有关, 大孔径接收可有效抑制湍流的影响. 图10是验证试验中进行的光强起伏采集, 可见3.4 km湍流对接收光功率的影响为5 dB.

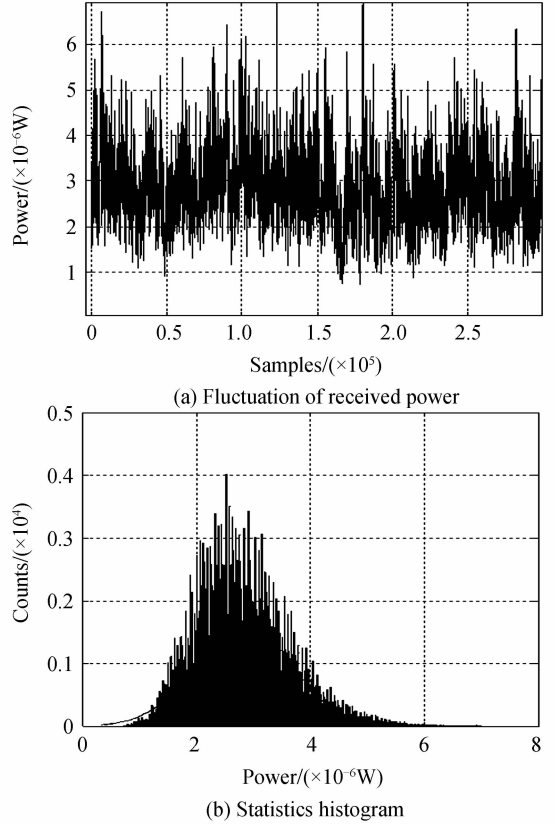


图10 1550 nm 信号光功率起伏(3.4 km)
Fig. 10 The received power of 1550 nm(3.4 km)

3.3 外场精跟踪与通信实验

采用运动仿真平台通过角速度等效的方法模拟了飞机与地面跟踪、通信的效果, 假设飞机速度为220~660 km/h, 通信距离为20~30 km, 推算出对应的角度变化范围为0.12~0.56°/s, 故设定运动仿真平台在不同的运动速率下对比跟踪效果, 同时通过NI探测器与LABVIEW软件采集信号光功率, 图11~13给出了不同运动速度下的精跟踪补偿效果. 表4给出了跟踪与接收光功率的实验试验数据.

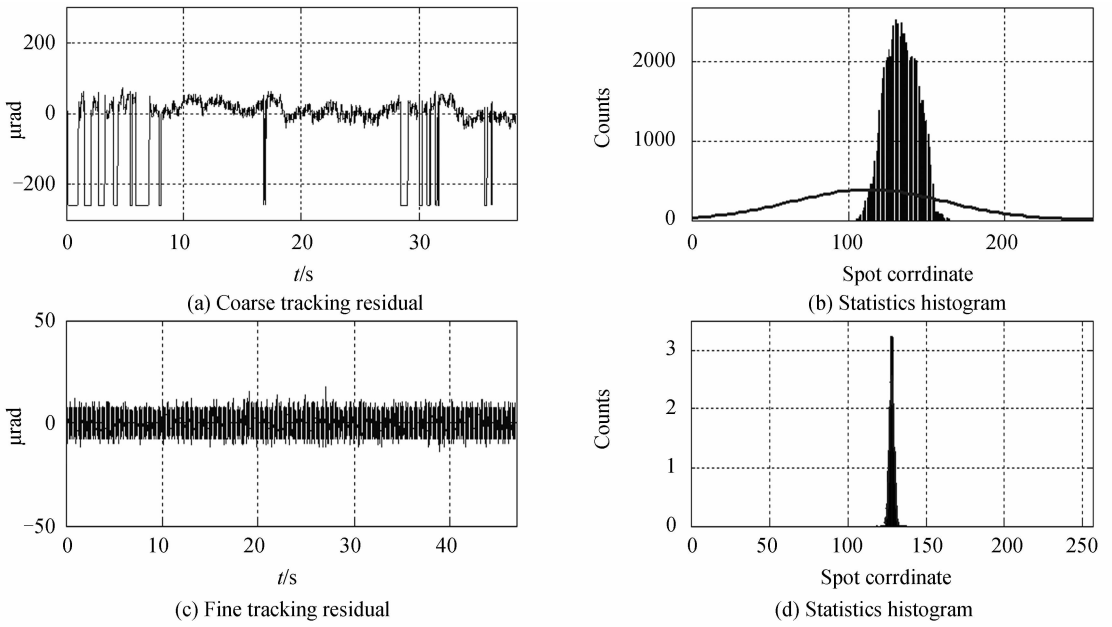


图 11 仿真速度为 $0.2^\circ/\text{s}$ 精跟踪残差与统计直方图
 Fig. 11 Fine tracking curve and histogram at the rate of $0.2^\circ/\text{s}$

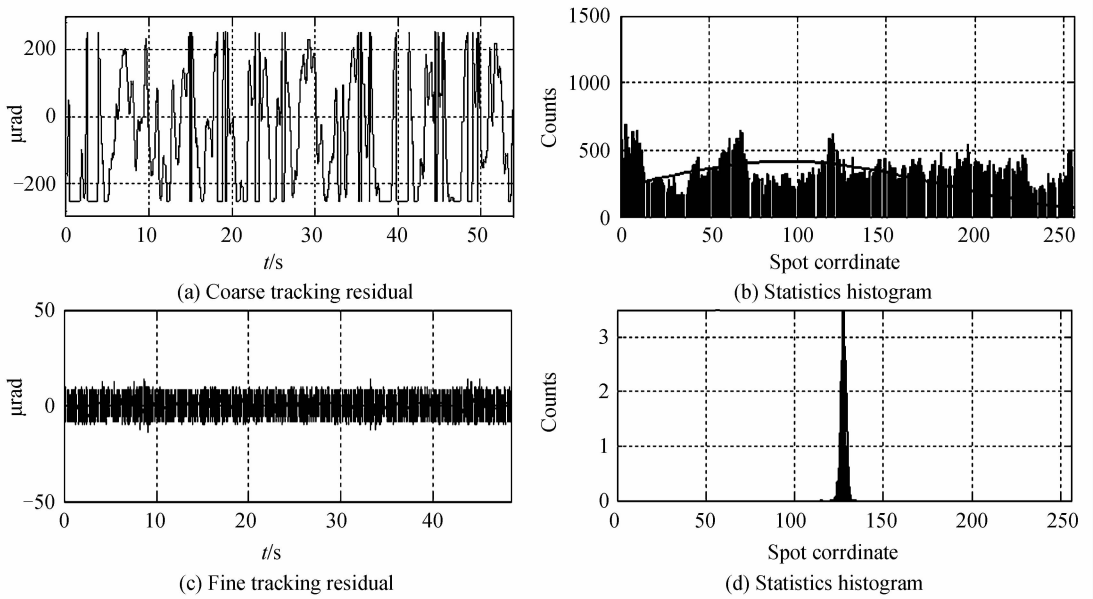
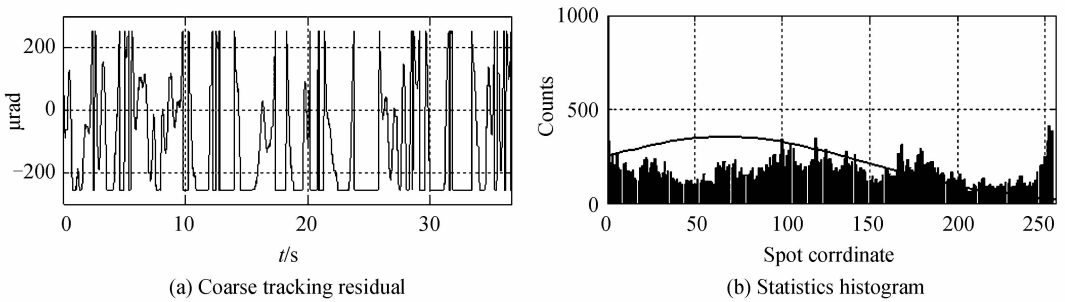


图 12 仿真速度为 $0.4^\circ/\text{s}$ 精跟踪残差与统计直方图
 Fig. 12 Fine tracking curve and histogram at the rate of $0.4^\circ/\text{s}$



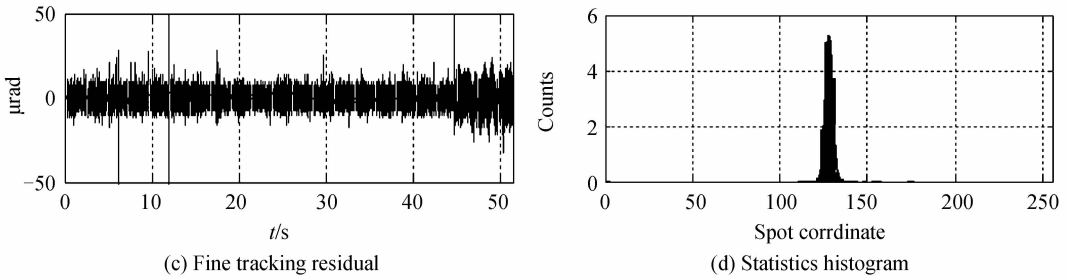


图 13 仿真速度为 $0.6^\circ/s$ 精跟踪残差与统计直方图

Fig. 13 Fine tracking curve and histogram at the rate of $0.6^\circ/s$

表 4 精跟踪时跟踪残差与接收功率

Table 4 The tracking residuals and receiving power when fine tracking off and tracking on

The speed of motion($^\circ/s$)		0	0.2	0.4	0.6
Fine tracking off	Tracking error/ μrad	189.2	188.6	214.3	207.8
	Receiving power/dBm	-25.5	-25.4	-27.0	-28.2
Fine tracking on	Tracking error/ μrad	3.7	3.7	3.6	5.6
	Receiving power/dBm	-21.3	-21.4	-21.4	-22.3

4 结论

基于机载光通信振动功率谱的特点研制了以FPGA为核心的高精度、小型化的精跟踪系统,在远场3.4 km的通信实验中,通过角速度模拟了飞机到地面距离20~30 km,飞行速度700~900 km/h时的通信实验.实验结果表明,精跟踪系统对机载平台的振动具有较强的抑制能力,系统跟踪准确度为3 μrad 左右.机载光通信会受到大气湍流的影响,较强湍流会造成20 μrad 左右的扰动误差,这将是系统最终实现的一个难点.在模拟运动实验中精跟踪可以使机载光通信模拟运动时的使接收光功率提高4~5.9 dB.受实验条件限制未能对较强气流的影响进行摸底实验,但已进行的地面远场验证对下一步开展机载实验具有重要参考与指导意义.

参考文献

[1] HYDE G, EDELSON B I. Laser satellite communications: current status and directions[J]. *Space Policy*, 1997, **13**(1): 47-54.

[2] TOYOSHIMA M. Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications invited[J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, **4**(6): 300-311.

[3] TOYOSHIMA M, MUNEMASA Y, TAKENAKA H, et al. Introduction of a terrestrial free-space optical communications network facility: IN-orbit and Networked Optical ground stations experimental Verification Advanced testbed (INNOVA) [C]. *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI*, 2014, **8971**: 89710R.

[4] CHAN V, ARNOLD R. Results of 1 GBPS aircraft to ground lasercom validation demonstration[C]. *SPIE*, 1997, **2990**: 52-

59.

[5] GANGL M E, FISHER D S, ZIMMERMANN J, et al. Airborne laser communication terminal for intelligence, surveillance and reconnaissance [C]. *Free-Space Laser Communications IV. Proceedings of SPIE*, 2004, **5550**: 92-103.

[6] LOUTHAIN J A, SCHMIDT J D. Anisoplanatism in airborne laser communication [J]. *Optics Express*, 2008, **16** (14): 10769-85.

[7] JUMPER E J, ZENK M A, GORDEYEV S, et al. Airborne aero-optics laboratory[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(7): 071408.

[8] FENNER W R. Future trends in crosslink communications [C]. *SPIE*, 1993, **1866**: 1-8.

[9] ORTIZ G G, LEE S, MONACOS S, et al. Design and development of a robust ATP subsystem for the altair UAV-to-ground lasercomm 2.5 Gbps demonstration [C]. *Laser Communication Technologies XV, SPIE*, 2003, **4975**: 103-114.

[10] BISWAS A, KOVALIK J, REGEHR M W, et al. Emulating an optical planetary access link with an aircraft [C]. *Free-Space Laser Communications Technologies XXII, SPIE*, 2010, **7587**: 75870B.

[11] JIANG Hui-lin, LIU Zhi-gang, TONG Shou-feng, et al. Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**: 299-302. 姜会林, 刘志刚, 佟首峰, 等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**: 299-302.

[12] 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): 649-653. 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): 649-653.

[13] ZHAO Xin, LIU Yunqing, TONG Shou-feng. Line-of-sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(5): 151-156. 赵馨, 刘云清, 佟首峰. 动态空间激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. *中国激光*, 2014, **41**(5): 151-156.

[14] 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): 131-136. 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): 131-136.

[15] CAO Yang, RONG Jian, ZHANG Hong-min, et al. Fuzzy variable structure multiple-model tracking for airborne laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**

(1): 1-6.

曹阳, 荣健, 张红民, 等. 机载激光通信终端的模糊变结构跟踪方法研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(1): 1-6.

- [16] NIKULIN V V, KHANDEKAR R M. Demonstration of a mobile tracking system for laser communications[C]. IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 2010, 000781-000785.

- [17] LIU Yun-qing, JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng. Stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 972-977.

刘云清, 姜会林, 佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪技术研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(7) 972-977.