

空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验

赵 馨¹ 宋延嵩² 佟首峰² 刘云清³

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022
³ 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 捕获、对准、跟踪(APT)系统是空间激光通信重要组成部分,是通信正常进行的前提与保障。对 APT 系统组成原理、工作原理、关键技术、系统设计、工程实现等内容进行了详细的研究,在此基础上开展室内模拟实验及野外演示验证实验。室内模拟实验跟踪精度达到 $2\sim 3\ \mu\text{rad}$,表明本系统可应用在星间激光通信中。野外双端动态演示实验在飞艇-船舶间进行,结果表明系统捕获概率优于 95%,捕获时间小于 60 s,系统跟踪精度由于受到大气湍流影响而降低,多次实验测试表明在湍流中跟踪精度达到 $5\sim 25\ \mu\text{rad}$ 。APT 系统的成功研制为空间激光通信顺利进行奠定了基础。

关键词 光通信;空间激光通信;动态实验;捕获、对准、跟踪系统;捕获概率;跟踪精度

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0305005

Dynamic Demonstration Experiment of Acquisition, Pointing and Tracking System in Space Laser Communications

Zhao Xin¹ Song Yansong² Tong Shoufeng² Liu Yunqing³

¹ College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Institute of Space Photo-Electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

³ College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Acquisition, pointing and tracking (APT) system is an important part in space laser communication, which is the premise and guarantee for normal work. The composition principle of system, operational principle, key technology, system design and engineering implementation are researched in detail. The simulation experiment indoor and dynamic experiment outdoor are carried out, respectively. The tracking precision in simulation experiment is $2\sim 3\ \mu\text{rad}$, which proves this system can be used in inter-satellite laser communication. Dynamic demonstration experiment is achieved between airship and ship. The results prove that the acquisition probability is higher than 95%, and acquisition time is less than 60 s. Because of turbulence effect, tracking precision will decrease observably. The tracking precision in turbulence is $5\sim 25\ \mu\text{rad}$. Development of APT system establishes the foundation for space laser communication execution successfully.

Key words optical communications; space laser communications; dynamic experiment; acquisition, pointing and tracking system; acquisition probability; tracking precision

OCIS codes 060.4510; 030.7060; 010.1330; 040.1520

收稿日期: 2013-09-18; 收到修改稿日期: 2013-10-21

作者简介: 赵 馨(1977—),男,博士,副教授,主要从事空间激光通信、光电检测等方面的研究。

E-mail: gps.ins@163.com

1 引 言

由于具有高速率、体积小、低功耗、安全性能好、通信频带宽等优点,空间激光通信系统具有广泛发展前景。将飞机、高纬度浮空平台、卫星等应用系统获得的海量数据实时下传到地面终端是其主要应用领域^[1-2]。捕获、对准、跟踪(APT)子系统是空间激光通信系统的重要组成部分,是实现高概率、快速捕获、高动态、高精度跟踪的前提与保障。为实现既定的通信性能,捕获概率一般要求优于 95%;跟踪精度与具体使用环境有关,卫星间通信跟踪精度一般要求 2~3 μrad ,有大气湍流影响时,跟踪精度会下降。2001 年在低轨卫星终端 SPOT-4 与 ARTEMIS 卫星终端首次建立了星间激光通信链路,验证了 APT 系统工作性能可行性与可靠性^[3]。之后在光学地面站(OGS)做了大量实验,据统计,2003 年 3 月至 2009 年,在 OGS 与 ARTEMIS 之间做了 393 次双向链路实验,其中失败了 34 次,成功概率为 91.3%,链路保持的总时间为 78 h。2006 年在法国神秘 20 飞机与 ARTEMIS 卫星建立通信链路,并演示验证将卫星作为中继的可行性,完成飞机-高轨道卫星(GEO)、低轨道卫星(LEO)-GEO、GEO-Ground 的演示验证。2008 年德国宇航中心

(DLR)首次完成星间相干通信演示验证,该系统使用无信标光完成捕获,简化了 APT 系统结构,其组成结构一直沿用至今^[4]。

本文主要研究空间激光通信 APT 技术,对其组成原理、工作原理、关键技术、工程实现等内容进行系统研究,搭建室内实验并进行了原理验证及性能测试,借助飞艇与船舶之间双端动态演示实验,实际测试了通信终端的捕获概率与跟踪精度两个性能指标。

2 空间激光通信工作原理

APT 系统从结构上可以分为有信标和无信标两种结构,无信标 APT 结构应用在相干激光通信系统中,其捕获和跟踪采用复合结构,捕获和通信使用同一光源,使用象限探测器完成光斑捕获和通信接收功能,简化了系统硬件结构,但是增加了捕获算法复杂性^[5-6]。有信标 APT 系统,捕获、跟踪与通信没有复合,各自独立工作,捕获、跟踪光斑检测使用相互独立 CCD 完成,捕获、跟踪算法简单^[7]。本文主要研究有信标 APT 系统,有信标激光通信系统主要工作过程可以分为初始指向、快速捕获、粗精跟踪、动态通信四个主要阶段^[8],其工作过程原理如图 1 所示。

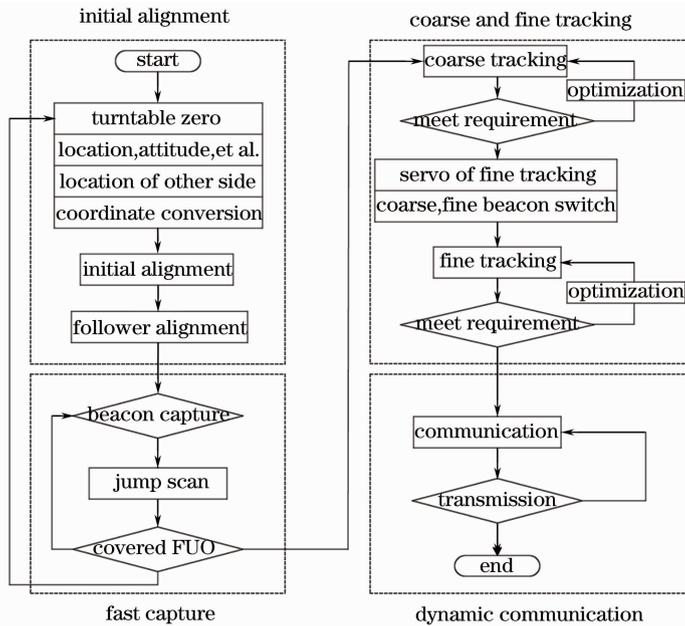


图 1 有信标系统工作过程原理

Fig.1 Process schematic with beacon in space laser communication

图 1 所示有信标系统工作原理中,前三个阶段属于 APT 系统。如果是星间激光通信,由于距离较远,还需增加专门的超前量指向单元。

3 APT 系统组成及工作原理

针对双端运动平台,飞艇-船舶间动态演示实验,通信双端采用对称结构,APT 系统组成及工作原理如下所述。

3.1 初始指向

初始指向前,通信终端位置(WGS-84 坐标系下的坐标)、姿态(航向角、俯仰角、横滚角)、速度(三维速度)、时间如何获取是关键,选用双天线 GPS/INS 组合导航定位系统,其精度指标直接与指向精度及不确定区域(FUO)大小相关。选用器件参数指标为:三轴综合姿态测量精度为 3 mrad;位置测量精度为 1.1 m;速度测量精度为 0.02 m/s。由于飞艇-船舶间相对运动速度较小,可将组合系统的数据更新率设置在 20 Hz 即可。

视轴初始方位角和俯仰角使用坐标转换矩阵计算完成。涉及到的坐标系有 WGS-84 坐标系、北东天坐标系、载体坐标系、视轴坐标系,具体公式有

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{C}_b^v \mathbf{C}_n^b \mathbf{C}_e^n \begin{pmatrix} X_1 - X_2 \\ Y_1 - Y_2 \\ Z_1 - Z_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha = 180^\circ \times \arctan(x/y)/\pi \\ \beta = 180^\circ \times \arctan(z/\sqrt{x^2 + y^2})/\pi \end{cases}, \quad (2)$$

式中 α 为视轴需要旋转的方位角, β 为视轴需要旋转的俯仰角; (x, y, z) 为视轴坐标系下坐标值, (X_1, Y_1, Z_1) 为己方位置坐标,即 WGS-84 坐标系下坐标值, (X_2, Y_2, Z_2) 为对方位置坐标, \mathbf{C}_e^n 为 WGS-84 坐标与北东天坐标之间坐标转换矩阵,与实时的经纬度值有关,通过 GPS 获得经纬度值, \mathbf{C}_n^b 为北东天坐标与载体坐标之间坐标转换矩阵,与载体的航向角、俯仰角、横滚角有关,姿态角通过 GPS/INS 组合系统获得, \mathbf{C}_b^v 为载体坐标与视轴坐标之间坐标转换矩阵,与视轴坐标系同载体坐标系三轴之间的夹角有关,三轴夹角值需要在视轴安装时标定给出^[9]。

初始指向中一项关键技术是系统零位标校,即双天线 GPS/INS 组合导航定位系统提供坐标基准与跟踪视轴坐标基准在三维方向上的重合度,直接关系到视轴指向精度及捕获不确定区域的大小。解决的方法是在远点处设置合作目标,其坐标位置通过 GPS 系统精确测量,并将合作目标成像在粗跟踪 CCD 视场中心;终端平台所在位置通过自身 GPS 系统得到。将上述两点构成基线,计算得到基线方位角(与真北方向的夹角),在终端平台已经调整水平的基础上,将基线方位角与双天线 GPS/INS 显示方位角作比较,得到二者差值,旋转视轴调整此差值,即可调整三轴重合,实践表明在解决系统零位标校时,这是一种非常简单、有效的方法。

3.2 粗跟踪单元

跟踪采用两轴四框架伺服结构,分为粗跟踪和

精跟踪两个单元。粗跟踪单元工作范围大、带宽较低、跟踪精度低。APT 系统的视轴初始指向、开环捕获和粗跟踪执行结构都是两轴伺服转台。光学基台作为伺服转台的负载,其前视有三个光学窗口,分别为卡塞格林望远镜、粗跟踪接收、粗信标发射窗口。使用中空杯直流力矩电机作为俯仰和方位执行元件,以提高机械系统的谐振频率;使用双通道旋转变压器做检测元件,以提高检测精度;在光学基台上装有二维速率陀螺,从而对各种低频扰动进行检测,并实现视轴稳定。

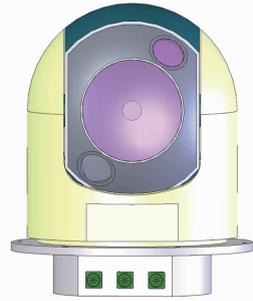


图 2 粗跟踪伺服转台原理图

Fig. 2 Schematic of coarse tracking servo turntable

3.3 精跟踪单元

该单元由 CCD 相机、信息处理单元、振镜伺服执行单元、补偿控制单元组成。影响精跟踪单元的主要误差源有光斑检测误差、动态滞后误差、平台振动残差。通过以下三个关键技术可实现高精度跟踪:1) 提高光斑检测精度,检测精度取决于光斑功率分布形式、光斑图形信噪比(SNR)、光斑大小、背景光、像素沟道宽度等多种因素,通过合理设置光斑大小、细分 CCD 亚像素、设置自适应阈值、自动调整积分时间可实现光斑高精度检测;2) 采用 CCD 相机开窗口技术实现高帧频光斑脱靶量输出,使 CCD 相机的帧频高于 3000 Hz,可以有效减小相机采样延迟引起的相位裕量滞后对控制单元稳定性的影响^[10];3) 攻关研究了高电压、大电流、低噪声、快速压电陶瓷(PZT)驱动技术,使其具有宽带驱动能力。同时,优化选取平面反射镜片的直径、厚度、材料,提高伺服单元的谐振频率。

精跟踪单元具有较小动态范围、高伺服带宽和跟踪精度等特点,它对粗跟踪残差进一步有效抑制,APT 系统最终的跟踪精度取决于精跟踪伺服单元性能,是跟踪系统的核心所在。精跟踪系统在理论上属于采样伺服系统,期望开环传递函数为典型 I 型系统。其伺服执行单元振镜为一个典型振荡环节,经过实验测试,本系统使用的振镜其等效模型可

表示为^[11]

$$G_F(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{4710^2}{s^2 + 4710s + 4710^2}, \quad (3)$$

式中 s 为拉普拉斯变量, $\omega_n = 2\pi f_n = 4710 \text{ rad/s}$, ζ 为阻尼系数。未补偿、补偿后期望的开环函数 Bode 图及其校正函数设计原理如图 3 所示, 图中 H , H_c 分别为系统未补偿控制函数和系统补偿控制函数。

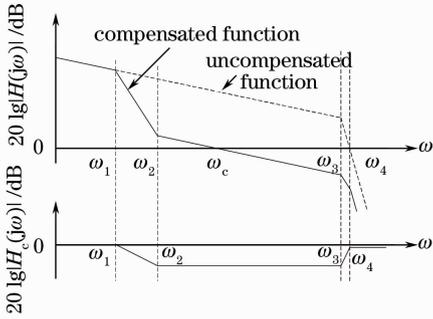


图 3 系统校正设计

Fig. 3 Compensation design of system

将精跟踪开环截止频率设置为 300 Hz , 考虑到伺服系统需要较高的稳定性, 幅度频率特性峰值 $M=1.25$, 则

$$\begin{cases} h = (M+1)/(M-1) \\ \omega_2/\omega_3 = 2h/(h+1) \\ \omega_2/\omega_c = 2/(h+1) \end{cases}, \quad (4)$$

按(4)式计算得 $\omega_3 = 3391 \text{ rad/s}$, 因为系统的固有特性在 $\omega_n = 4710 \text{ rad/s}$ 处有一拐点, 为了照顾系统的固有特性形状, 并简化校正补偿单元模型, 取 $\omega_3' = 4710 \text{ rad/s}$ 。但是 ω_3' 比按(4)式计算出来的 ω_3 要大。因此, 在考虑转角频率 ω_4 时, 不使 M 超过允许值, 并且考虑稳态裕度问题, 通过试凑, 取 $\omega_1 = 10000 \text{ rad/s}$ 。精跟踪系统的 ω_1 值尽量大于粗跟踪带宽, 这里取 $\omega_1 = 80 \text{ rad/s}$ 。系统开环增益为

$$K_v = \frac{\omega_1}{\omega_2} \omega_c. \quad (5)$$

根据图 3 校正原理得到系统补偿控制函数为

$$H_c(s) = \frac{K_v(s/377)(s/4710)}{(1+s/80)(1+s/10000)}, \quad (6)$$

对所设计系统进行仿真分析, 其闭环特性曲线如图 4 所示。可知, 精跟踪伺服系统的闭环带宽可以延伸至 600 Hz 附近。

精跟踪补偿控制器使用数字信号处理器(DSP)实现, 用双线性变化法将模拟补偿控制函数 $H_c(s)$ 数字化得到数字控制补偿函数 $H_c(z)$, 根据 $H_c(z)$ 得到其时域表示形式, 通过编程实现数字补偿控

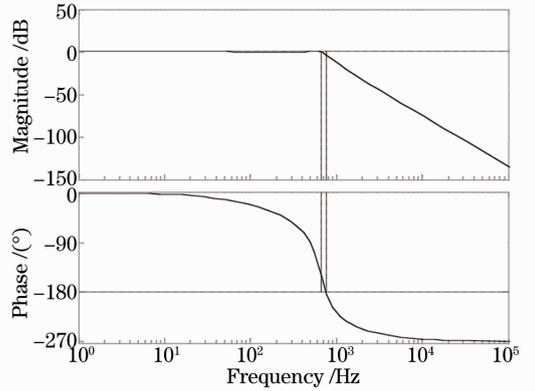


图 4 精跟踪系统闭环特性

Fig. 4 Closed loop performance of fine tracking system 制^[12]。为实现高带宽跟踪要求, 光斑脱靶量需要高于 3000 Hz , 采用现场可编程逻辑门阵列器件(FPGA)完成图像采集、滤波、脱靶量计算等功能, 研制后的精跟踪系统如图 5 所示。

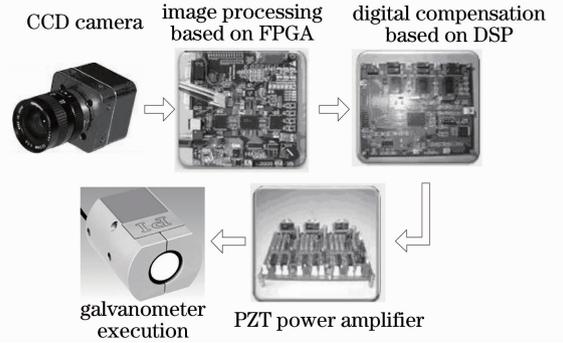


图 5 精跟踪系统组成实物图

Fig. 5 Schematic of fine tracking system

4 实验测试

开展室内模拟、野外动态演示验证实验, 对系统性能指标进行综合测试。室内进行系统原理设计, 并在模拟环境下完成性能测试。野外实验在飞艇-船舶间进行, 在完成通信演示验证的同时, 对系统的捕获概率、捕获时间、跟踪精度等性能指标进行了测试。

4.1 室内测试

室内测试系统组成原理如图 6 所示, 由发射和接收两个部分构成。发射系统由激光器、扩束系统、光阑、快扫描振镜(FSM)、计算机构成, 接收系统由光学系统、粗振镜、粗跟踪 CCD 相机、精振镜、精跟踪 CCD 相机、分光棱镜、DSP 补偿控制、FPGA 处理板、PZT 驱动等部分构成。激光从发射端射出, 经过扩束, 照射到振镜上, 通过计算机模拟卫星等平台振动功率谱控制振镜摆动, 再经过扩束后以平行光的形式发射出去, 接收端模拟粗、精接收系统, 完成跟踪。

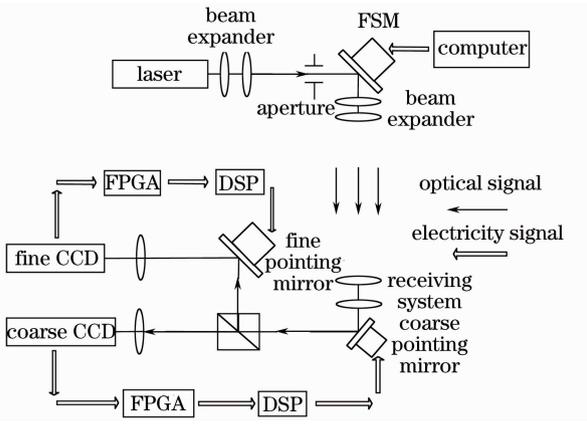


图 6 室内实验系统组成原理

Fig. 6 Schematic of experimental system indoor

图 7 为实验测试系统结果,数据前半段为经过粗跟踪抑制后的数据,没有开启精跟踪系统,数据为粗跟踪残差;后半段为开启精跟踪后的脱靶量数据,即精跟踪系统对粗跟踪残差进一步抑制的结果,数据为精跟踪残差。图 8 为精跟踪光斑脱靶量放大图。实验表明本系统可以很好地抑制粗跟踪后的残差,到达很高跟踪精度,系统跟踪带宽达到 400 Hz,满足跟踪指标要求。图 7 和图 8 中纵轴每个像素对应的跟踪精度为 $2 \mu\text{rad}$ 。数据分析表明,系统跟踪精度达到 $2\sim 3 \mu\text{rad}(3\sigma)$ 。

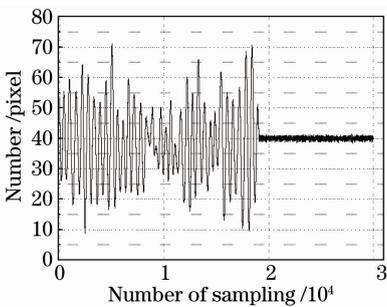


图 7 粗、精跟踪测试结果

Fig. 7 Test results of coarse and fine trackings

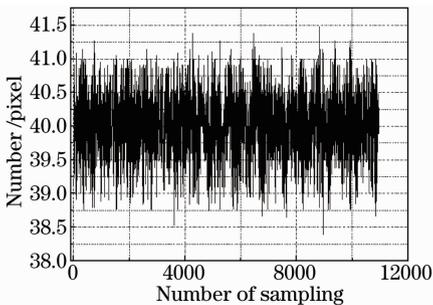


图 8 精跟踪测试结果

Fig. 8 Test results of fine tracking

实验时按抑制卫星平台振动功率谱进行设计,实际应用在飞艇平台和船舶平台其振动均小于卫星

平台振动,所以可将本系统应用于飞艇-船舶间激光通信演示。

4.2 野外测试

野外测试实验在飞艇-船舶间双端动态状态下完成,其运动路线及双端搭载平台如图 9 所示,图 10 为飞艇平台系统整体实物。



图 9 演示实验路线及搭载终端

Fig. 9 Demonstration experimental route and carrying platform

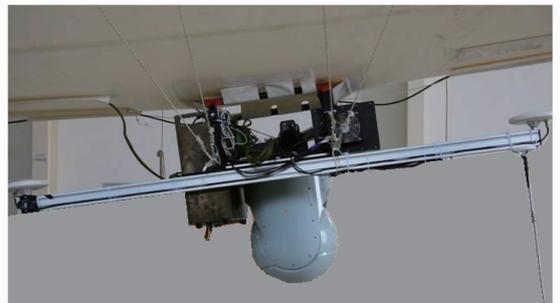


图 10 飞艇平台系统实物图

Fig. 10 Schematic of airship system

实验时飞艇绝对高度为 800~1200 m,两个动态终端斜程距离在 16.5~26.8 km 之间。经过多次实验测试表明,使用双天线 GPS/INS 组合导航定位系统构成的捕获系统,可以很好地满足捕获要求,系统的捕获概率优于 95%,捕获时间小于 60 s。

野外条件下跟踪测试实验数据如图 11 和图 12 所示。大气信道环境下跟踪精度会降低,由于大气湍流直接影响到光斑检测精度,从而对跟踪精度产生影响。通过数据分析可知,湍流对粗跟踪系统跟踪精度影响不大,因为粗跟踪系统像素检测精度低,像素检测精度已经超过湍流对其影响^[13];对精跟踪系统而言,由于像素检测精度高,湍流对整个系统引起的跟踪精度的下降不容忽视。图 11 和图 12 给出了野外实验为弱湍流环境下的测试结果,由图可知,随湍流强度增大跟踪精度明显下降。进行多次野外实际测试发现,湍流环境中本系统的精跟踪精度达到了 $5\sim 25 \mu\text{rad}$ 。图 11 中纵轴坐标每个像素对应的跟踪精度为 $50 \mu\text{rad}$;对于精跟踪单元而言,检测

精度高,图 12 中纵坐标每个像素对应跟踪精度为 $2 \mu\text{rad}$,与图 6 的实验结果对比可以发现,跟踪精度显著下降。

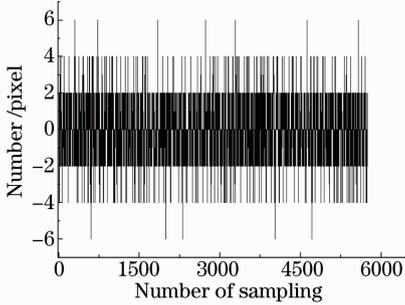


图 11 野外动态粗跟踪测试结果

Fig. 11 Outdoor dynamic test results of coarse tracking

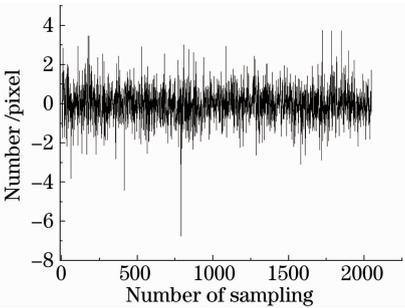


图 12 野外动态精跟踪测试结果

Fig. 12 Outdoor dynamic test results of fine tracking

5 结 论

APT 系统是空间激光通信系统的重要组成部分,对有信标 APT 系统进行了重点研究。将双天线 GPS/INS 组合导航定位系统引入到捕获中,借助其提供的高精度位置、姿态等信息提高了视轴初始指向精度,减小了系统捕获不确定区域,为高概率、快速捕获奠定了基础,在双端动态演示测试实验中系统捕获概率优于 95% ,捕获时间小于 60 s 。对精跟踪系统涉及关键技术、组成模型、控制算法、信号处理具体实现方法等内容进行了详细的研究。由于粗跟踪系统在结构原理、设计方法基本相似,这里没有给出其具体设计方法。搭建室内实验系统完成跟踪性能及跟踪精度测试,系统带宽达到 400 Hz ,跟踪精度为 $2\sim 3 \mu\text{rad}$ 。将此系统应用在双端动态野外通信演示验证实验中,在大气湍流环境中对系统跟踪精度进行测试,跟踪精度为 $5\sim 25 \mu\text{rad}$ 。实验证明设计的 APT 系统可以满足激光通信性能指标要求,为空间激光通信的顺利进行提供了保障。

参 考 文 献

- Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林, 胡 源, 丁 莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- R M Sova, J E Sluz, D W Young, *et al.*. 80 Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal[C]. SPIE, 2006, 6304: 630414.
- T Nielsen, G Oppenhäuser. In-orbit test result of an operational inter-satellite link between ARTEMIS and SPOT-4, SILEX[C]. SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- M Gregory, F Heine, H Kämpfner, *et al.*. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. Opt Eng, 2012, 53(3): 031202.
- Liu Dan, Liu Zhi, Wang Puyao, *et al.*. Anti-jamming modulation/demodulation technology of atmospheric laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0705004.
刘 丹, 刘 智, 王璞瑶, 等. 一种大气激光通信系统抗干扰调制/解调技术[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0705004.
- Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Liu Liren. Effect of aberration on performance of the bit error rate in an inter-satellite coherent optical communication receiving system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0106002.
刘宏展, 纪越峰, 刘立人. 像差对星间相干光通信接收系统误码性能的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0106002.
- A Shrestha, M Brechtelsbauer. Transportable optical ground station for high-speed free-space laser communication[C]. SPIE, 2012, 8517: 851706.
- W L Saw, H H Refai, J J Sluss. Free space optical alignment system using GPS[C]. SPIE, 2005, 5712: 571226.
- Zhao Xin, Wang Shifeng, Tong Shoufeng, *et al.*. Initial alignment of antenna for laser communication system between aircraft and ground station[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(7): 1190-1195.
赵 馨, 王世峰, 佟首峰, 等. 飞机-地面间激光通信天线的初始对准[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1190-1195.
- Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.*. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205007.
钱 锋, 贾建军, 张 亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.
- Zhao Xin, Tong Shoufeng. 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.
- Ren Bin, Tong Shoufeng, Song Yansong, *et al.*. Research on the driving technique of high precision and speedy piezo-electric ceramic transducer in fine tracking system of air laser communication[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 420-425.
任 斌, 佟首峰, 宋延嵩, 等. 空间激光通信精跟踪单元的高精度快速 PZT 驱动技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 420-425.
- Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, *et al.*. Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(1): 89-94.
韩 成, 百宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪精度主要外界影响研究[J]. 光子学报, 2010, 39(1): 89-94.

栏目编辑: 王晓琰