

DOI: 10.12086/oe.2022.210439

## 无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展

梁静远<sup>1\*</sup>, 陈瑞东<sup>1</sup>, 姚海峰<sup>2</sup>, 白勃<sup>6</sup>,  
曹明华<sup>4</sup>, 赵黎<sup>5\*</sup>, 王怡<sup>3\*</sup>, 邓佳新<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

<sup>2</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130013;

<sup>3</sup>中国计量大学信息工程学院, 浙江 杭州 310018;

<sup>4</sup>兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050;

<sup>5</sup>西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;

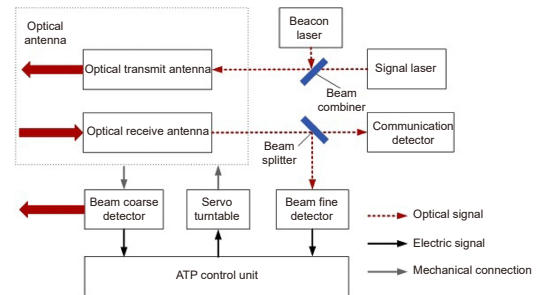
<sup>6</sup>西安电子科技大学通信工程学院, 陕西 西安 710119

**摘要:** 无线光通信是指以光波作为载体在自由空间中传递信息的技术, 具有带宽高、成本低和安全性高等优点。捕获、瞄准和跟踪 (acquisition, pointing and tracking, APT) 系统是建立无线光通信系统的前提, 简单、可靠、动态性能好的 APT 系统可以克服由机械平台震动及外界环境变化对无线光通信系统的影响。因此, 需要对 APT 系统进行较为深入的理论 and 实验研究, 从而设计出一种适合无线光通信的捕获、瞄准和跟踪方法。本文分析了国内外在捕获、瞄准、跟踪方面的研究成果, 同时介绍了西安理工大学在自动瞄准方面所做的工作, 主要包括初始捕获系统、非共视轴控制系统、光束检测系统等方面的进展, 以及 1.3 km、5.2 km、10.2 km、100 km 距离链路的外场实验, 验证了 APT 系统的有效性。最后展望了无线光通信中 APT 的发展。

**关键词:** 无线光通信; 捕获、瞄准和跟踪; 光束检测; 非共视轴控制

**中图分类号:** TN929.1

**文献标志码:** A



梁静远, 陈瑞东, 姚海峰, 等. 无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展 [J]. 光电工程, 2022, 49(8): 210439

Liang J Y, Chen R D, Yao H F, et al. Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(8): 210439

## Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system

Liang Jingyuan<sup>1\*</sup>, Chen Ruidong<sup>1</sup>, Yao Haifeng<sup>2</sup>, Bai Bo<sup>6</sup>,  
Cao Minghua<sup>4</sup>, Zhao Li<sup>5\*</sup>, Wang Yi<sup>3\*</sup>, Deng Jiabin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

<sup>2</sup>The School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130013, China;

<sup>3</sup>College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

收稿日期: 2022-01-17; 收到修改稿日期: 2022-03-28

基金项目: 西安市科技创新引导项目 (201805030YD8CG14(12)); 陕西省重点产业创新项目 (2017ZDCXL-GY-06-01)

\*通信作者: 梁静远, ljj@xaut.edu.cn; 赵黎, pilly\_lily@126.com; 王怡, wcy16@cjlu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

<sup>4</sup>School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

<sup>5</sup>Electronic Information Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

<sup>6</sup>School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract:** Optical wireless communication refers to the technology of transmitting information in free space using light waves as a carrier, which has the advantages of high bandwidth, low cost, and high security. The acquisition, pointing, and tracking (APT) system is the premise of establishing a wireless optical communication system. A simple, reliable, and dynamic APT system can overcome the impact of mechanical platform vibration and external environment changes on the wireless optical communication system. Therefore, it is necessary to conduct in-depth theoretical and experimental research on the APT system, so as to design a capture, aiming, and tracking method suitable for wireless optical communication. This paper analyzes the domestic and foreign research achievements in capturing, aiming, and tracking, and introduces the work done by Xi'an University of Technology in the field of automatic aiming. It mainly includes the progress of initial acquisition system, non-common visual axis control system, beam detection system, etc. At the same time, the field experiments of 1.3 km, 5.2 km, 10.2 km, and 100 km distance links are introduced to verify the effectiveness of the APT system. Finally, the development of APT in wireless optical communication is prospected.

**Keywords:** optical wireless communication; acquisition pointing and tracking; beam detection; non-common visual axis control

## 1 引言

无线光通信同时具有微波通信和光纤通信的优点<sup>[1]</sup>, 是在实现空基、天基和陆基等通信链路的重要手段之一<sup>[2]</sup>, 在军事保密通信、应急救援通信等领域具有广阔发展前景。但由于机械抖动和大气信道中各种不确定性因素(如大气湍流、雨、雪、扬尘等)的影响, 造成接收端光斑位置偏移甚至丢失光斑信息, 从而使系统误码率增大, 最终导致通信系统性能下降, 给无线光通信链路的建立和保持带来了困难<sup>[3]</sup>。因此, 需要建立一套捕获、瞄准和跟踪(acquisition, pointing and tracking, APT)系统来防止通信链路中断。在无线光通信系统中, 要求搭载发射端和接收端的两个平台上的光学元件实时共视轴, 这个过程通常称为自动瞄准<sup>[4]</sup>。无线光 APT 系统结构示意图如图 1 所示, APT 系统包括粗、精跟踪结构及其伺服单元, 在收发双方完成初始指向后, 信号光和信标光经过合束镜后通过发射天线准直发射输出, 由接收端的捕获装置开始扫描合成光束完成捕获工作; 位于接收端的分束镜将经过接收端的光束分别引导至跟踪探测器和通信探测器; 当光束照射在接收端探测器感光面上, 在伺服机构的驱动下使收发两端视轴瞄准; 最后根据接收端实时反馈的光斑信息, 粗跟踪结构调整光束的方向令其垂直入射探测器中心, 精跟踪结构进一步消除未经粗跟踪结构消除的跟踪残差, 保证收发两端视轴实时瞄准。

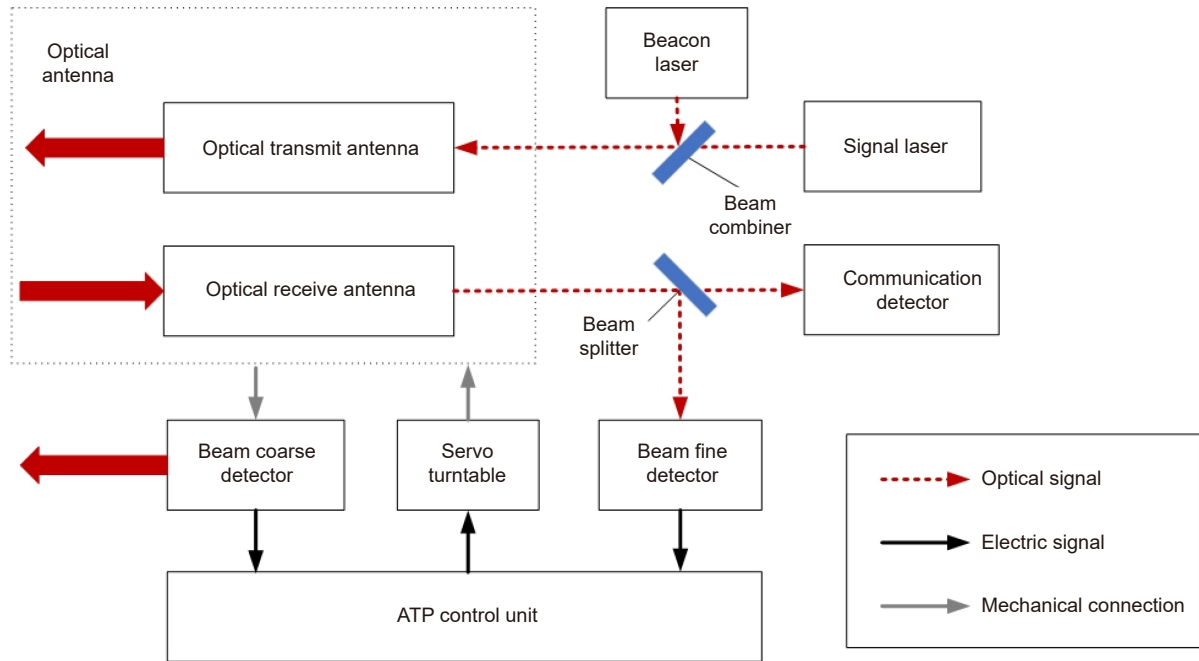
本文介绍了无线光通信系统 APT 方面的国内外研究进展和历程, 归纳总结了西安理工大学在该领域取得的研究成果, 并根据现有的研究理论对 APT 系统在无线光通信中的应用前景和研究方向进行了展望。

## 2 国外研究进展

APT 系统是无线光通信系统中不可或缺的一部分, 其作用是确保发射端与接收端光束完全实时瞄准, 从而建立稳定的无线光通信链路。APT 系统的发展历程与无线光通信系统的发展历程几乎是同步的。20 世纪 70 年代, 美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)就开展了关于空基无线光通信系统方面的实验研究, 德国宇航局(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、日本航天局(National Space Development Agency of Japan, NASDA)等机构都相继进行了星地、空地光通信链路实验。

1985 年, NASDA 研制了 LUCE (Laser Utilizing Communication Equipment) 系统, 该系统中用于对准和跟踪的探测系统由电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)和四象限探测器组成。实验表明该系统在强震动环境下其瞄准和跟踪精度均优于 1 mrad<sup>[6]</sup>。

1994 年, JPL 研发了激光通信演示(optical communication demonstrator, OCD)系统, 实现了光束的快速、精确瞄准和稳定跟踪, 数据传输速率为

图 1 无线光通信 APT 系统结构示意图<sup>[5]</sup>Fig. 1 Optical wireless communication APT system diagram<sup>[5]</sup>

250 Mb/s<sup>[7]</sup>。

1994 年, 日本邮政省 (Ministry of Posts and Telecommunications, MPT) 研发了激光通信设备 (laser communication equipment, LCE)。该系统粗跟踪结构采用面阵 CCD 探测, 粗跟踪精度  $32 \mu\text{rad}$ 。精跟踪结构利用四象限探测器测量光束的位置信息, 其精度可达  $2 \mu\text{rad}$ , 且具有 200 Hz 的抖动补偿能力<sup>[8]</sup>。

1999 年, Biswas 等人设计了一种卫星激光通信终端 (lasercom communication terminal, LCT), 其采用独立的发射和接收天线, 捕获传感器采用面阵 CCD, 使用伺服转台进行瞄准和跟踪, 该系统在跟踪模式下 CCD 工作的帧频可达 1.6 kHz<sup>[9]</sup>。

2002 年, ESA 利用半导体激光器星间链路实验 (semiconductor laser inter-satellite link experiment, SILEX) 系统建立了星间的光通信链路, 该系统采用粗精结合的复合轴对准系统, 分别由直流步进电机和快速反射镜组成, 其跟踪精度可达  $2 \mu\text{rad}$ <sup>[10]</sup>。

2004 年, Guelman 等人采用了一种两级的分层系统控制, 下层控制电光收发器的云台; 上层是一个快速闭环控制系统, 以控制波束宽度和方向, 实现了无人机对地面的激光通信<sup>[11]</sup>。

2004 年, 美国麻省理工学林肯实验室与 JPL 合作研发了火星激光通信演示系统 (Mars laser communications demonstration system, MLCD)。该系

统采用光子计数探测器和望远镜接收阵列结构。采用组合瞄准和跟踪系统, 提高了瞄准精度, 系统的通信速率最高可达 10 Mb/s<sup>[12]</sup>。

2010 年, DLR 设计了一种无信标激光通信终端 (laser communication terminal, LCT)。在瞄准和跟踪过程中不使用信标光, 只用二维伺服转台控制反射镜进行螺旋扫描捕获信号光, 降低了机载激光通信终端的复杂度, 平均跟踪误差为  $226 \mu\text{rad}$ <sup>[13]</sup>。

2012 年, Schmidt 等人设计了一种小型激光通信终端, 该系统由一个提供宽视场的物镜和用于控制光束转向镜的驱动器组成。该系统在能够实现快速瞄准的基础上, 提供  $46^\circ$  的宽视场<sup>[14]</sup>。

2013 年, DLR 进行了空对地无线光通信实验。机载激光终端包括粗瞄准结构和精瞄准机构。实验表明, 该系统可将湍流和微震动对跟踪精度的影响减小到  $200 \mu\text{rad}$  以下<sup>[15]</sup>。同年, DLR 进行了“狂风”战斗机与地面端之间的机载激光通信实验。通信链路距离为 50 km, 数据传输速率为 1.25 Gb/s, 飞机搭载的 APT 系统终端可实现 79 km 的稳定跟踪<sup>[16]</sup>。

2016 年, Quintana 等人设计了一种由 CCD 相机构成的粗跟踪模块以及由空间光调制器和位置传感器 (PSD) 构成的精跟踪模块协同工作的跟踪系统, 将该系统应用于空-地激光通信试验。最终在 300 m 范围内建立了 2 Mb/s 的光通信链路, 误码率约为

$2 \times 10^{-4}$ [17]。

2020年, Antonello 等人设计了一种用于在轨激光通信的高精度瞄准和跟踪系统。该系统采用粗、精两级瞄准结构, 重量为 1.8 kg, 通过模拟外部干扰环境, 测得系统的瞄准误差小于  $10 \mu\text{rad}$ [18]。

本文所引用的国外研究进展汇总如表 1 所示。

从上述研究进展可以发现, 自开展无线光通信 APT 系统研究以来, 其应用场景逐渐从地面站发展到机载光通信平台(文献 [7,11,13~17])和星间光通信平台上(文献 [4~6,8~9,10,12,18]), 对跟瞄系统的精度要求也随之提高。

### 3 国内研究进展

20世纪90年代起, 我国多家科研单位和高校在无线光通信领域展开了深入研究, 在快速瞄准系统、复合轴控制系统、机载激光通信系统取得了一定的成果。目前国内主要的研究机构有长春理工大学、哈尔滨工业大学、中科院长春光学精密机械与物理研究所、武汉大学和西安理工大学等。

1999年, 刘泽金等人设计了一种无线光通信系统自动瞄准方案。该方案利用反射镜作为光束稳定机构, 消除了系统中存在的光束漂移和机械震动造成的收发两端光轴偏差[4]。

2005年, 艾勇等人设计了一种空间光 APT 方案, 该方案利用 CCD 传感器作为图像处理器件, 以数字信号处理器件 DSP 控制驱动复合轴系统实现跟踪。实验结果表明, 角度测量的相对误差约为 1.3% [19]。

2007年, 佟首峰等人对复合轴粗跟踪伺服带宽

进行了优化设计, 模拟进行了星际间无线光通信实验。当伺服带宽为 16 Hz 时, 粗跟踪误差和精跟踪误差分别为  $60 \mu\text{rad}$  和  $4 \mu\text{rad}$ [20]。

2008年, 潘高峰设计了一种上、下行链路自动瞄准系统。通过调整倾斜反射镜的角度使发射端与 CCD 测角仪瞄准, 收发两端光轴的瞄准精度可达  $20.52 \mu\text{rad}$ [21]。

2011年, 宋延嵩等人分析了外界约束环境对机载激光通信系统的影响, 实现了两架飞机间的无线光通信实验, 飞机飞行高度为 700 m, 通信速率为 1.5 Gb/s [22]。

2013年, 钱锋等人提出了一种新型光斑探测相机的设计方案, 该方案以较高像元占空比的探测器为基础, 降低了噪声对探测器定位精度的影响。实验结果表明利用该方案可将噪声对系统的定位误差降低至 0.007 pixel 以下, 满足系统的要求[23]。

2015年, 孟立新等人设计了一种用于机载激光通信系统的粗、精复合跟踪机构, 可消除平台震动。仿真结果表明, 该系统的粗、精跟踪精度分别优于  $23.97 \mu\text{rad}$  和  $7.03 \mu\text{rad}$ [24]。

2017年, 张元生等人设计了一种复合跟踪系统进行机载激光通信实验, 利用单环比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)算法控制快速反射镜, 实验结果表明系统的跟踪精度为  $10 \mu\text{rad}$ [25]。

2019年, 蔡美华进行了关于单探测型复合轴系统粗精指向瞄准的研究, 通过建立一种解耦模型来实现收发两端的粗、精瞄准。实验结果表明利用该方法系统的跟踪精度可达  $9.69 \mu\text{rad}$ [26]。

表 1 国外研究进展

Table 1 Research progress abroad

| 文献   | 年份   | 人物/组织         | 研究进展                 | 优点/参数                                            |
|------|------|---------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| [6]  | 1985 | NASDA         | 激光通信设备 LUCE 系统       | 跟瞄精度均优于 $1 \text{ mrad}$                         |
| [7]  | 1994 | JPL           | 激光通信演示终端 OCD         | 通信速率 $250 \text{ Mb/s}$                          |
| [8]  | 1994 | MPT           | 激光通信设备 LCE           | 粗、精跟踪精度优于 $32 \mu\text{rad}$ 、 $2 \mu\text{rad}$ |
| [9]  | 1999 | A.Biswas      | 激光通信终端 LCT 系统        | CCD 工作帧频 $1.6 \text{ kHz}$                       |
| [10] | 2001 | ESA           | 复合轴瞄准系统应用于 SILEX 系统  | 跟踪精度可达 $2 \mu\text{rad}$                         |
| [11] | 2001 | M.Guelman     | 利用复合轴 APT 系统进行激光通信实验 | 首次采用复合轴 APT 系统                                   |
| [12] | 2004 | MIT NASA      | 火星激光通信演示 OLCD 系统     | 通信速率可达 $10 \text{ Mb/s}$                         |
| [13] | 2008 | DLR           | 激光通信终端 LCT           | 平均跟踪误差 $226 \mu\text{rad}$                       |
| [14] | 2012 | S.Christopher | 能够实现宽视场捕获和瞄准的小型激光终端  | 捕获视场 $46^\circ$                                  |
| [15] | 2013 | DLR           | “狂风”战斗机实现地对空激光通信实验   | 链路距离 $79 \text{ km}$ 、数据传输速率 $1.25 \text{ Gb/s}$ |
| [17] | 2016 | C.Quintana    | 应用于机载激光通信的粗精跟踪系统     | 空对地通信速率可达 $2 \text{ Mb/s}$                       |
| [18] | 2020 | A.Riccardo    | 应用于卫星通信的小型化高精度瞄准终端   | 瞄准误差小于 $10 \mu\text{rad}$                        |

2020年, 任斌等人研究了四象限探测器在光束捕获和跟踪系统中的应用, 通过计算四象限探测器上的光斑位置来实现稳定的跟踪。实验结果表明, 利用该方案系统的跟踪精度优于  $3 \mu\text{rad}$ <sup>[27]</sup>。

2021年, 李千等人针对粗、精跟踪的性能要求分别设计了一种反向传播 (backpropagation, BP) 神经网络位置检测算法和多单元阵列探测位置检测方法。实验结果表明, 光斑位置检测系统的角分辨率分别为  $0.187 \mu\text{rad}$  和  $0.903 \mu\text{rad}$ <sup>[28]</sup>。

西安理工大学在无线光通信捕获、瞄准和跟踪方面的研究进展<sup>[29-40]</sup> 将于本文第4章展开, 本文所引用的国内研究进展汇总如表2所示。

## 4 西安理工大学无线光通信系统中自动瞄准的研究进展

为了保持收发双方光端机收发视轴实时瞄准, 就需要设计快速、高精度的 APT 系统<sup>[29]</sup>。典型的无线光通信 APT 系统如图2所示<sup>[1]</sup>。主控制器根据收发两端的位置完成初始指向, 图像处理单元根据光斑位置信息解算出二维转台的偏转角; 角度控制系统实时反馈二维转台的偏转角信息; 主控制器再根据反馈信息向电机发出控制命令驱动二维转台, 以此实现光束的稳定对准和跟踪。2000年以来, 西安理工大学柯熙政教授团队在无线光通信 APT 系统设计、光束初始

表 2 国内研究进展

Table 2 Domestic research progress

| 文献   | 年份   | 人物/组织   | 研究进展                   | 特点/参数                                                    |
|------|------|---------|------------------------|----------------------------------------------------------|
| [4]  | 1999 | 刘泽金、舒柏宏 | 高能激光束自动瞄准系统            | 稳定有效带宽为50 Hz                                             |
| [30] | 2005 | 柯熙政、刘长城 | 光束自动捕获系统               | 建立ATP系统仿真模型                                              |
| [19] | 2005 | 艾勇、周亚霖  | 空间光APT系统               | 角度测量相对误差约为1.3%                                           |
| [20] | 2007 | 姜会林、佟首峰 | 复合轴粗跟踪伺服带宽优化设计         | 粗、精跟踪精度分别为60 $\mu\text{rad}$ 和4 $\mu\text{rad}$          |
| [21] | 2008 | 潘高峰、张景旭 | 共光路自动瞄准系统              | 瞄准精度可达20.52 $\mu\text{rad}$                              |
| [31] | 2011 | 柯熙政、胡启迪 | 信标光光斑检测系统              | 利用PSD和CCD两种探测器设计APT子系统                                   |
| [22] | 2011 | 宋延嵩、常帅  | 空空机载激光通信实验             | 通信速率1.5 Gb/s                                             |
| [23] | 2013 | 钱锋、贾建军  | 新型光斑探测相机               | 噪声对定位误差的影响降低至0.007 pixel                                 |
| [24] | 2015 | 孟立新、赵丁选 | 粗、精复合跟踪系统              | 粗、精跟踪精度分别优于23.97 $\mu\text{rad}$ 和 7.0 $\mu\text{rad}$   |
| [32] | 2016 | 柯熙政、杨沛松 | 同轴瞄准检测方法               | 角度跟踪精度为34.6 $\mu\text{rad}$                              |
| [33] | 2016 | 柯熙政、赵奇  | 初始捕获系统                 | 采用位置校准点方法, 减少系统设计成本                                      |
| [25] | 2017 | 张元生、仇振安 | 应用于机载激光通信的APT系统        | 跟踪精度可达10 $\mu\text{rad}$                                 |
| [36] | 2019 | 柯熙政、严希  | 光斑跟踪系统                 | 跟踪精度可达5.4 $\mu\text{rad}$                                |
| [26] | 2019 | 蔡美华、孔德聪 | 单探测型复合轴粗精瞄准系统          | 跟踪精度可达9.69 $\mu\text{rad}$                               |
| [35] | 2020 | 柯熙政、景永康 | 光斑图像检测算法               | 100 km实验中实现无信标光瞄准                                        |
| [38] | 2020 | 柯熙政、张璞  | 捕获、瞄准及调焦系统             | 10.2 km实验跟瞄精度为27.12 $\mu\text{rad}$                      |
| [27] | 2020 | 任斌、鲁倩   | 四象限探测器跟踪系统             | 跟踪精度优于3 $\mu\text{rad}$                                  |
| [39] | 2021 | 柯熙政、杨尚君 | 二位反射镜快速对准系统            | 发射端采用相机标定, 无需回传控制信息即可完成瞄准                                |
| [39] | 2021 | 柯熙政、梁韩立 | 机载激光自动跟踪控制系统           | 跟踪精度可达2.42 $\mu\text{rad}$                               |
| [28] | 2021 | 李千、吴志勇  | BP神经网络位置检测/多单元阵列探测位置检测 | 光斑位置检测系统角分辨率0.187 $\mu\text{rad}$ /0.903 $\mu\text{rad}$ |

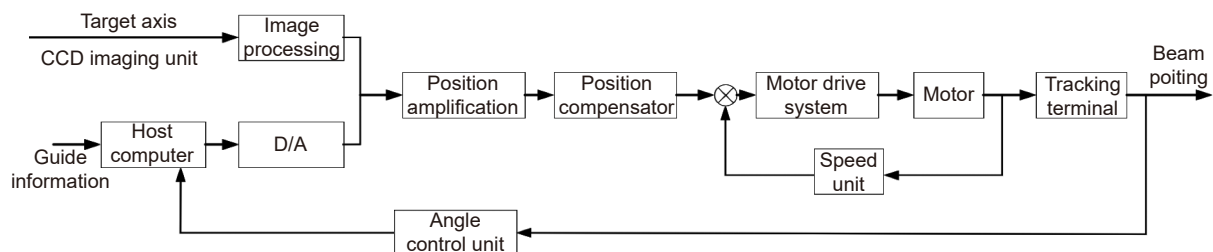


图 2 典型无线激光通信 APT 系统图<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Typical wireless laser communication APT system diagram<sup>[1]</sup>

捕获、光斑精确瞄准和远场光斑图像检测等典型无线光传输技术进行了深入的理论研究和实验验证, 并取得了长足进展。

2005年, 刘长城建立和分析了大气激光通信中 APT 系统内的仿真模型, 设计了一种光束自动捕获系统<sup>[30]</sup>;

2011年, 胡启迪设计了利用 CCD 进行的信标光光斑检测方案<sup>[31]</sup>;

2016年, 杨沛松提出了同轴瞄准检测方法, 根据该方法设计了瞄准控制系统和跟踪系统并进行了外场实验<sup>[32]</sup>; 同年, 赵奇设计了一种初始捕获系统, 并进行了 1.3 km 的外场实验<sup>[33]</sup>; 同年, 徐尉设计了一种光斑检测系统并提出了相应的图像处理算法<sup>[34]</sup>;

2017年, 李世艳提出了一种光轴瞄准方案, 利用该方案可以有效提高系统检测准确度和瞄准精度<sup>[35]</sup>;

2019年, 严希设计了一种光斑跟踪系统, 并进行了 5.2 km 的外场跟踪实验。实验结果表明系统的跟踪精度可达  $5.4 \mu\text{rad}$ <sup>[36]</sup>;

2020年, 景永康设计了一种光斑图像检测方法, 在此基础上进行了 100 km 激光通信实验<sup>[37]</sup>; 同年, 张璞在 APT 系统内嵌入高精度执行机构实现了高精度的瞄准和跟踪, 设计了调焦系统并进行了 10.2 km 和 100 km 的外场实验<sup>[38]</sup>。

2021年, 梁韩立设计了可搭载于无人机上的 APT 系统, 通过模拟机载实验平台进行了机载激光通信实验, 其跟踪精度可达  $2.42 \mu\text{rad}$ <sup>[39]</sup>; 同年, 柯熙政、杨尚君等人提出了一种快速瞄准方法。该方法无需将控

制信号由接收端反馈至发送端, 可同时完成上、下行链路的建立。并进行了 1.3 km 和 10.3 km 的外场实验验证<sup>[40]</sup>。

#### 4.1 初始捕获系统

初始捕获系统主要由信标光发射器、捕获相机、数据交换模块、伺服转台以及计算机等组成。为确定捕获不确定区域的大小, 做以下实验来大致估计出捕获不确定区域的大致范围。实验方位点如图 3 所示, 实验中有两个基准点 A 和 B, 在点 B 周围寻找 10 个点 C~L 作为校准点。

记录点 A~L 的经纬度、海拔高度数值, 分别从 10 个校准点指向基准点 B 的方位角与俯仰角大小, 与真实方位角与真实俯仰角作比较, 如表 3 所示<sup>[33]</sup>。为了提高捕获精度, 捕获不确定区域大概为算法误差的 3 倍<sup>[41]</sup>。通过计算求得系统的捕获不确定区域  $\theta_{\text{FOU}}$  约为 12 mrad。

#### 4.2 粗精分级控制系统

粗精分级控制系统由二维云台和压电微动平台组成<sup>[42-43]</sup>, 结构如图 4 所示。粗跟踪结构采用二维云台 TGMZ-01, 其方位调整范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 俯仰范围为  $-70^\circ \sim 70^\circ$ 。通过伺服电机控制两个方向上的角度调节, 控制算法采用增量式 PID (比例+积分+微分) 算法。

精跟踪结构采用压电微动平台, 其方位角和俯仰角可在 0 mrad~0.2 mrad, 0 mrad~0.4 mrad 范围内变化。

粗跟踪系统其测试结果如图 5 所示。为了抑制该系统的定位误差, 采用增量式 PID 算法进行控制。并



图 3 实验方位点示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of experimental azimuth<sup>[33]</sup>

表 3 捕获不确定区域求解实验数据记录表<sup>[33]</sup>

Table 3 Capture uncertain region to solve the experimental data record table<sup>[33]</sup>

| 位置 | 精度/(°)     | 纬度/(°)    | 海拔高度/m | 方位角(计算)   | 俯仰角(计算)   | 方位角(真实)   | 俯仰角(真实)   |
|----|------------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A  | 108.989047 | 34.254260 | 424    |           |           |           |           |
| B  | 108.986993 | 34.254459 | 421    |           |           |           |           |
| C  | 108.988018 | 34.253207 | 422    | 41.371093 | 0.014749  | 41.100764 | 0.010549  |
| D  | 108.987425 | 34.253136 | 421    | 30.354963 | -0.031860 | 30.194587 | -0.30598  |
| E  | 108.984030 | 34.252024 | 425    | 19.403518 | -0.036114 | 19.005784 | -0.500756 |
| F  | 108.984305 | 34.252335 | 425    | 17.402036 | -0.039703 | 17.315786 | -0.690475 |
| G  | 108.984095 | 34.252387 | 425    | 15.973571 | -0.029830 | 16.147860 | -0.712659 |
| H  | 108.983962 | 34.252302 | 424    | 13.204046 | -0.018559 | 13.185405 | -0.685246 |
| I  | 108.984022 | 34.252950 | 425    | 9.599473  | -0.009892 | 9.305784  | -0.684959 |
| J  | 108.984008 | 34.253207 | 424    | 6.655063  | 0.001487  | 6.512407  | -0.685026 |
| K  | 108.983992 | 34.253442 | 422    | 3.911638  | 0.014622  | 3.850078  | -0.685104 |
| L  | 108.983181 | 34.254314 | 417    | -5.185554 | 0.056791  | -4.990479 | -0.571054 |

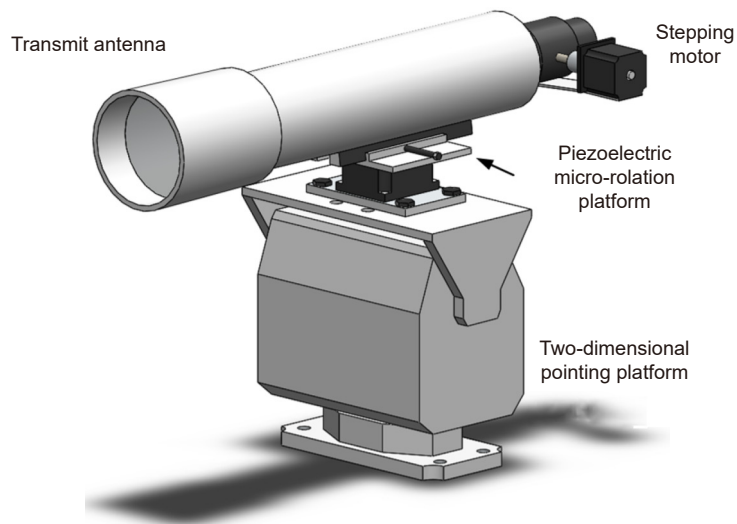


图 4 粗精分级控制系统<sup>[42-43]</sup>

Fig. 4 Composite axis pointing system<sup>[42-43]</sup>

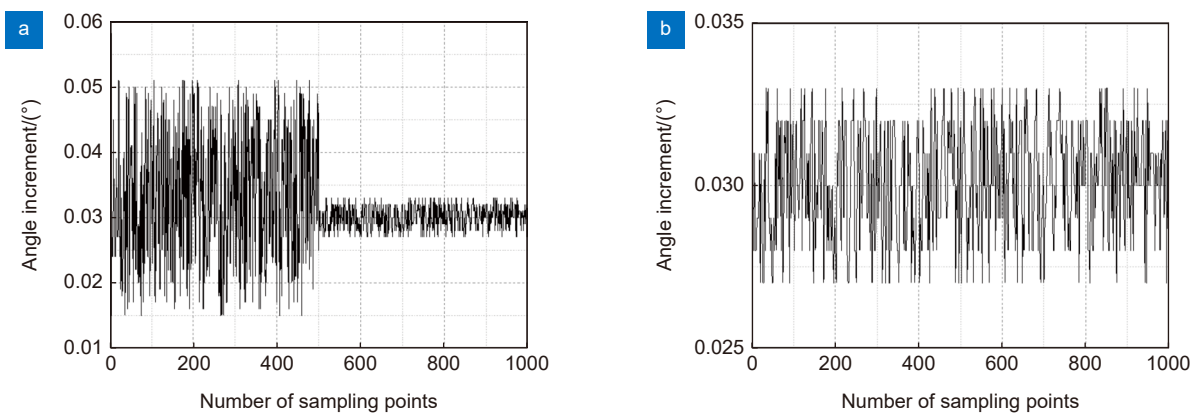


图 5 抑制误差前后角度增量<sup>[43]</sup>。

(a) 抑制误差前; (b) 抑制误差后

Fig. 5 Suppress the error before and after the angle increment<sup>[43]</sup>.

(a) Angle increment before error suppression; (b) Angle increment after error suppression

进行了目标角度增量为  $0.03^\circ$  时系统的抑制误差性能测试。

图 6 为粗跟踪结构的响应曲线, 从结果可以看出, 系统没有超调量和大幅度振荡, 控制性能较为理想。

压电微动平台输入电压与角度的关系曲线如图 7 所示, 其中图 7(a) 为  $\theta_x$  方向电压与角度关系曲线, 图 7(b) 为  $\theta_z$  方向电压与角度关系曲线。通过线性度计算公式  $\delta = (\Delta y_{\max} / y) \times 100\%$  可得  $\theta_x$  方向和  $\theta_z$  方向上的线性度分别为 0.15%、0.14%。结果可近似认为线性关系。其中  $\Delta y_{\max}$  为输入电压与角度位移关系曲线

与理想拟合曲线的最大偏差,  $y$  为满量程输出值<sup>[43]</sup>。

### 4.3 光束检测系统

光束瞄准检测系统光路图如图 8 所示, 光束经过一块分光棱镜后分为通信光束和位置检测光束。前者用来传递信息, 后者照射在光学背投幕上成像。

光束检测的四种情况分别如图 9 所示。其中  $\alpha$  表示入射光束与天线视轴的夹角,  $p$  表示光束偏移量。通过对系统进行离焦设计, 可以克服系统无法检测到光束偏移量的问题。

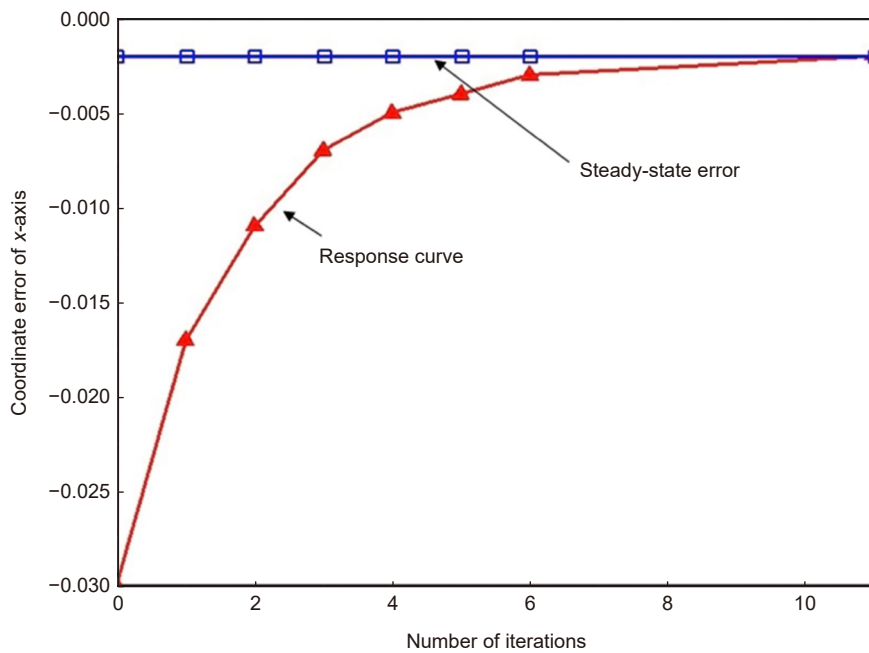


图 6 二维云台响应曲线<sup>[43]</sup>  
Fig. 6 Alignment response curve<sup>[43]</sup>

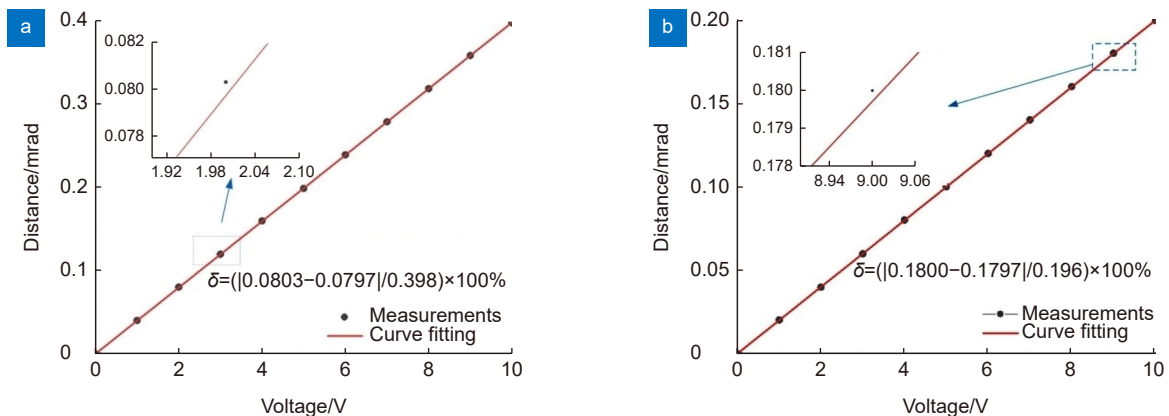


图 7 输入电压与角度关系曲线<sup>[43]</sup>。

(a)  $\theta_x$  方向控制电压与角度; (b)  $\theta_z$  方向控制电压与角度

Fig. 7 The relationship between input voltage and angle<sup>[43]</sup>.

(a) Control voltage and angle in  $\theta_x$  direction; (b) Control voltage and angle in  $\theta_z$  direction



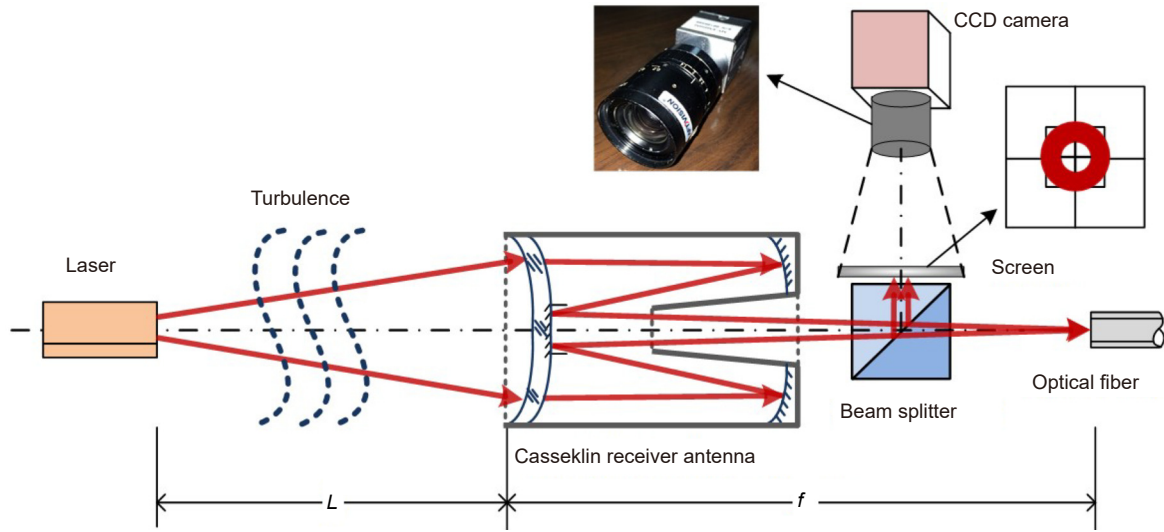


图 8 光束检测系统结构示意图<sup>[5]</sup>  
Fig. 8 Structure of beam detection system<sup>[5]</sup>

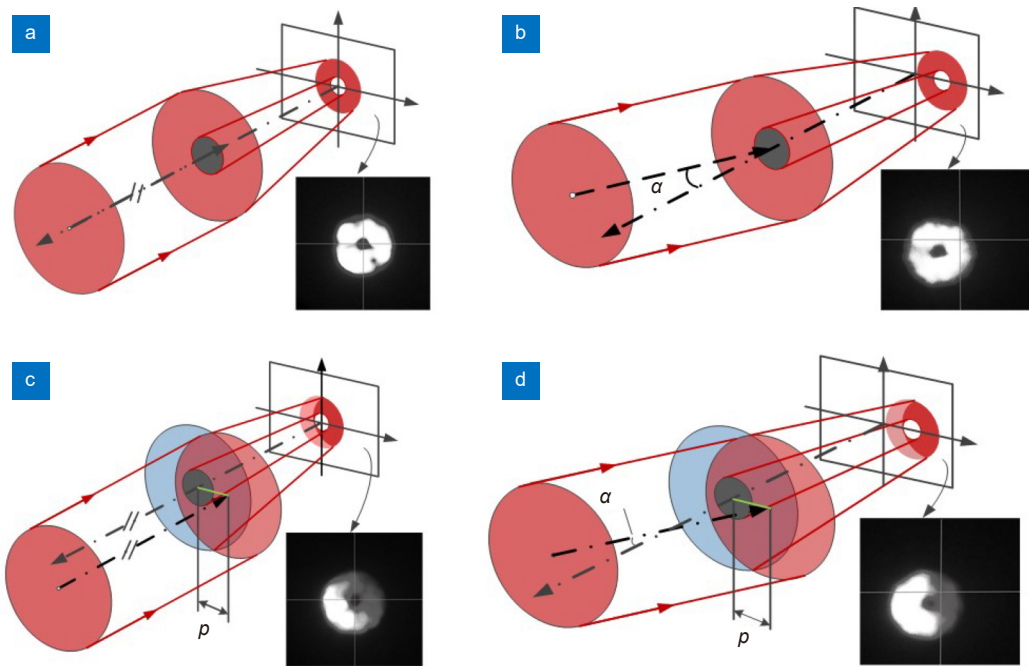


图 9 光束检测的四种情况<sup>[5]</sup>。  
(a)  $\alpha=0, p=0$ ; (b)  $\alpha \neq 0, p=0$ ; (c)  $\alpha=0, p \neq 0$ ; (d)  $\alpha \neq 0, p \neq 0$   
Fig. 9 Four kinds of situations of light beam detection<sup>[5]</sup>.  
(a)  $\alpha=0, p=0$ ; (b)  $\alpha \neq 0, p=0$ ; (c)  $\alpha=0, p \neq 0$ ; (d)  $\alpha \neq 0, p \neq 0$

#### 4.4 空基中继无线光通信自动跟踪控制系统

如图 10 所示为收发一体的无人机中继 APT 系统原理图。六旋翼无人机搭载二维反射镜和光学接收单元对地面端发出的信号进行捕获、瞄准和跟踪，最终使得两个地面端通过无人机中继平台实现双向通信。地面端 1 为发射端时，地面端 2 为接收端；同理，地

面端 2 为发射端时，地面端 1 为接收端。以此来实现收发一体化的无人机中继激光通信<sup>[44]</sup>。

实验中信号光波长为 650 nm，发射光功率为 2 mW，通信速率为 10 Mb/s。发射端采用 OOK 调制将视频信号加载到光源上并经过发射天线准直发射输出，二维反射镜控制激光束经过透镜聚焦到通孔型四

象限探测器上完成粗瞄准过程<sup>[46]</sup>。探测器再将接收到的光信号进行光电转换, 信号经解调后可在计算机上观察到接收端采集的图像信息。

如图 11 所示为接收端信号波形。发射端输出的

信号为 10 Mb/s 的方波信号, 从接收端信号的波形可以看出信号没有发生较大的畸变, 还是较为完整的方波信号。经过试验验证, 该系统满足工作在 10 Mb/s 速率的性能指标。

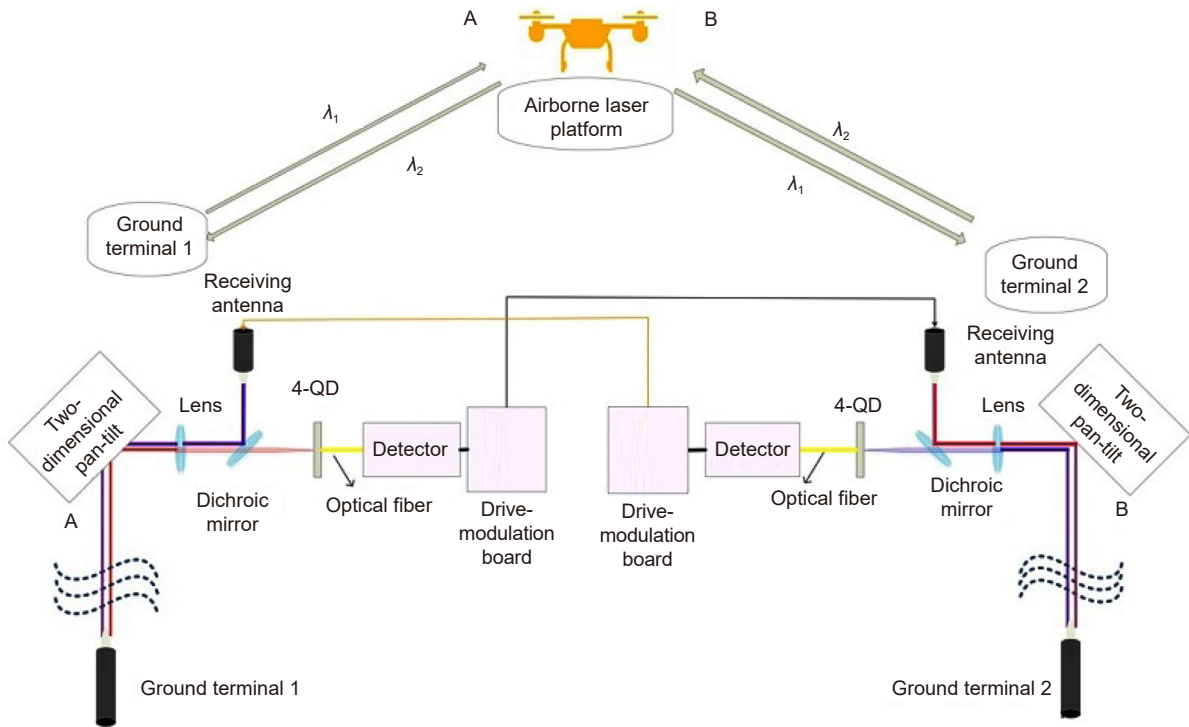


图 10 收发一体无人机中继 APT 系统<sup>[45]</sup>

Fig. 10 Transceiver integrated UAV relay APT system<sup>[45]</sup>



图 11 接收端示波器信号波形<sup>[45]</sup>

Fig. 11 The signal waveform of the oscilloscope at the receiving<sup>[45]</sup>

如图 12 所示为瞄准过程中光斑中心坐标位置分布。在 4500 次光斑漂移后进行重新瞄准, 采集光斑重新瞄准后的图像, 通过图像处理得到瞄准后的光斑中心位置坐标。图中黑色“+”为目标靶心位置, 蓝色坐标点为瞄准时刻光斑中心偏离目标靶心的位置。经过计算, 系统的瞄准精度可达  $2.42 \mu\text{rad}$ 。

#### 4.5 无线光通信捕获、瞄准和跟踪外场实验

##### 4.5.1 1.3 km 远场实验

1.3 km 远场实验系统装配结构图及实物图如图 13 所示。发射端位于西安理工大学金花校区的教学六楼 8 层, 接收端位于西安东二环凯森福景雅苑 11 层<sup>[5]</sup>, 通信链路距离为 1.3 km。该实验系统是以

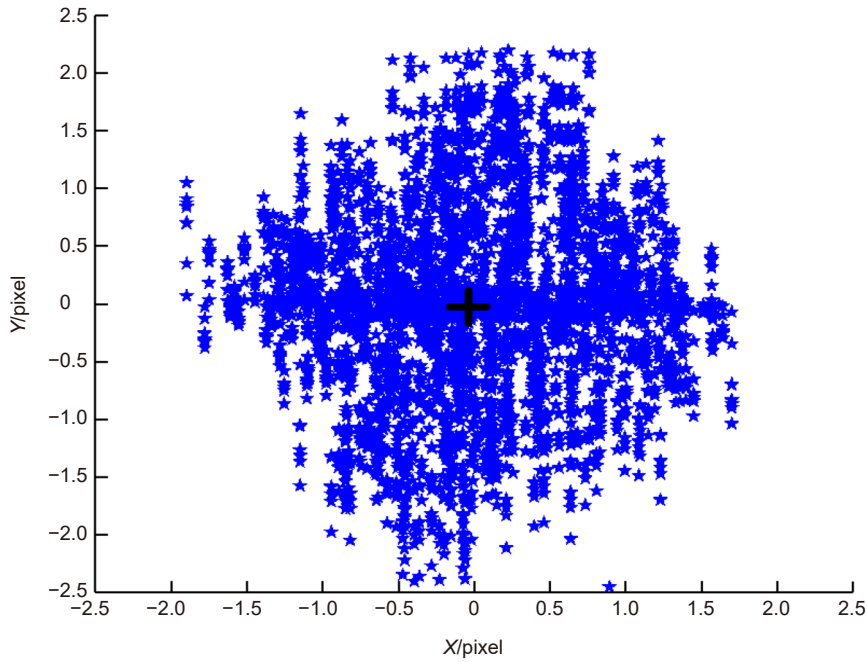


图 12 光斑中心坐标位置分布<sup>[45]</sup>

Fig. 12 Coordinate position distribution of spot center<sup>[45]</sup>

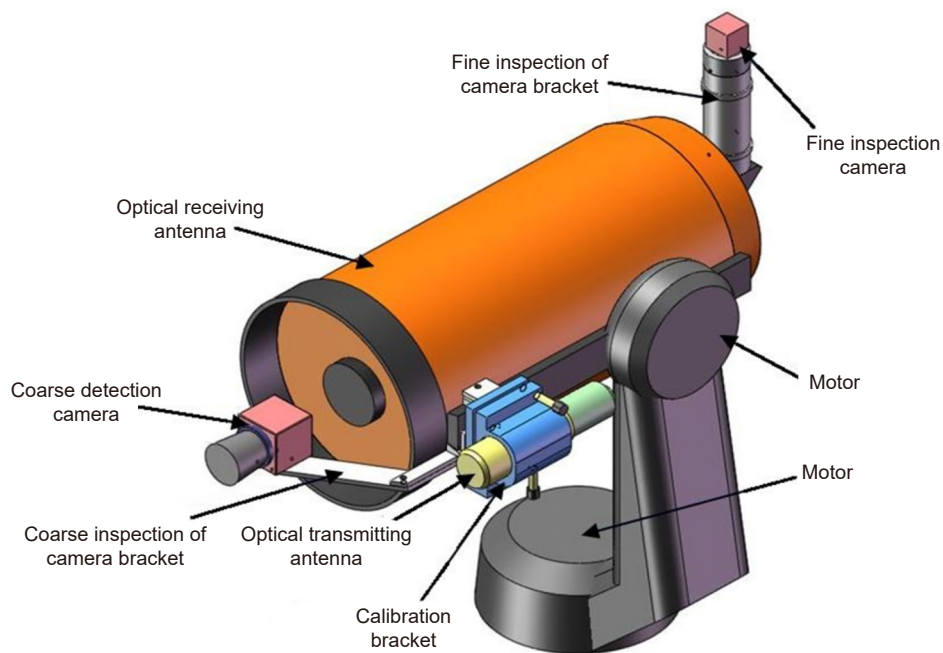


图 13 1.3 km 远场实验系统装配结构图<sup>[5]</sup>

Fig. 13 1.3 km far-field experimental system assembly structure diagram<sup>[5]</sup>

NexStar 8SE 天文望远镜为平台。接收天线前后分别放置一个相机用于捕获和跟踪, 整个系统置于单臂云台上。

实验所测光斑数据如图 14 所示。在光斑跟踪过程中, 光斑在方位和俯仰两个方向共有 11 次和 2 次漂出跟踪阈值。经系统调整后光斑均能重新返回坐标原点<sup>[43]</sup>。

#### 4.5.2 5.2 km 远场实验

5.2 km 远场实验系统原理图如图 15 所示<sup>[47]</sup>。计算机处理来自 CCD 相机采集到的光斑图像信息并获得光斑的位置坐标, 发送端接收到数据后根据光斑位置误差信息控制光学天线的指向, 以此实现对光束的稳定跟踪。

如图 16 所示为试验所测光斑数据<sup>[47]</sup>, 图 16(a)、16(b) 分别为方位、俯仰两个方向的光斑位置的漂移情况, 数据采样时间为 12 h。如图 17 所示为试验所测光斑位置误差统计数据, 图 17(a)、17(b) 分别为方位、俯仰两个方向的数据。

如图 17 所示, 从光斑漂移结果可以看出, 水平、

俯仰两个方向光斑分别有 23 次、14 次漂出阈值, 经过跟踪系统调整后光斑均能回到 CCD 相机中心点位置。

#### 4.5.3 10.2 km 远场实验

10.2 km 远场实验系统装配如图 18 所示, 发射端由激光光源、光纤放大器、发射天线、二维瞄准云台及其驱动器组成; 接收端由接收天线、红外 CCD 相机及其控制器组成。

实验过程中每隔 1 min 对当前光斑图像进行一次采样, 并经过图像处理后得到采样时刻光斑位置, 光斑的水平与俯仰偏差是指两个不同状态下的光斑位置中心的差值。

不同天气条件下的光斑图像检测曲线如图 19、20、21 所示。从结果可以看出, 光斑偏移量范围为 50 pixels~110 pixels<sup>[48]</sup>。

如图 22(a) 和图 22(b) 所示为实验过程中的光斑中心拟合曲线<sup>[48]</sup>。由结果可知光斑的中心位置坐标会随着外界环境的不同因素如温度、湿度和风速等而改变。

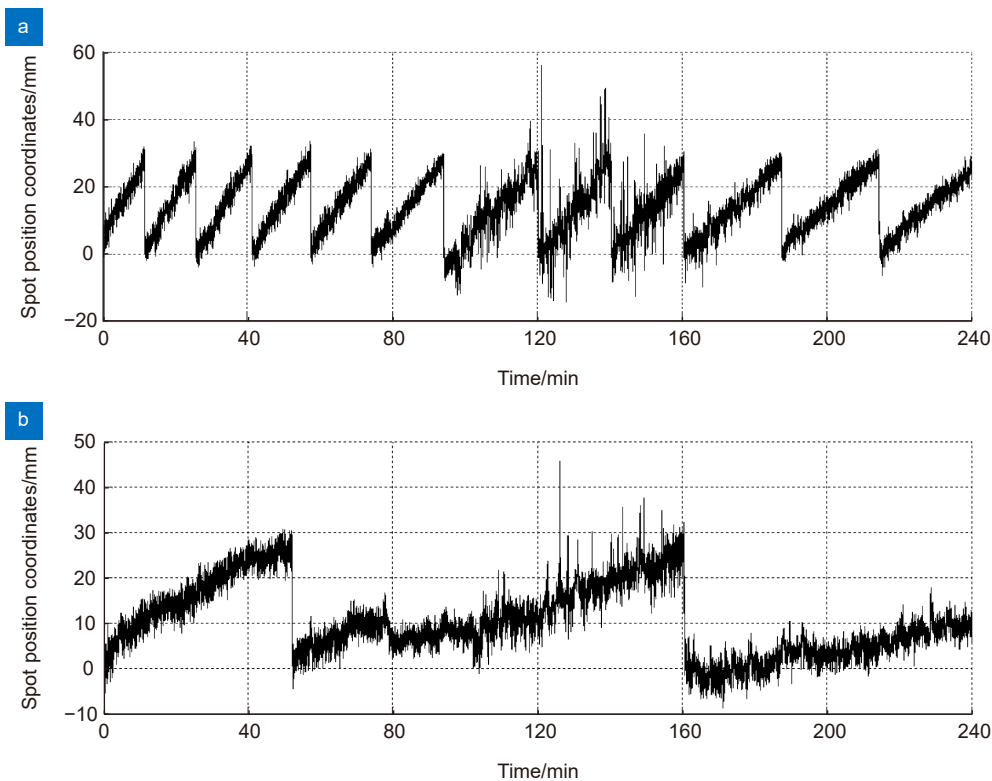


图 14 光斑位置坐标 (2016-05-25 22:46~2016-05-26 22:00, 小雨, 13 °C~18 °C)<sup>[5]</sup>。

(a) 方位方向; (b) 俯仰方向

Fig. 14 Spot position coordinates (2016-05-25 22:46~2016-05-26 22:00, rainy, 13 °C~18 °C)<sup>[5]</sup>。

(a) Azimuth direction; (b) Pitching direction

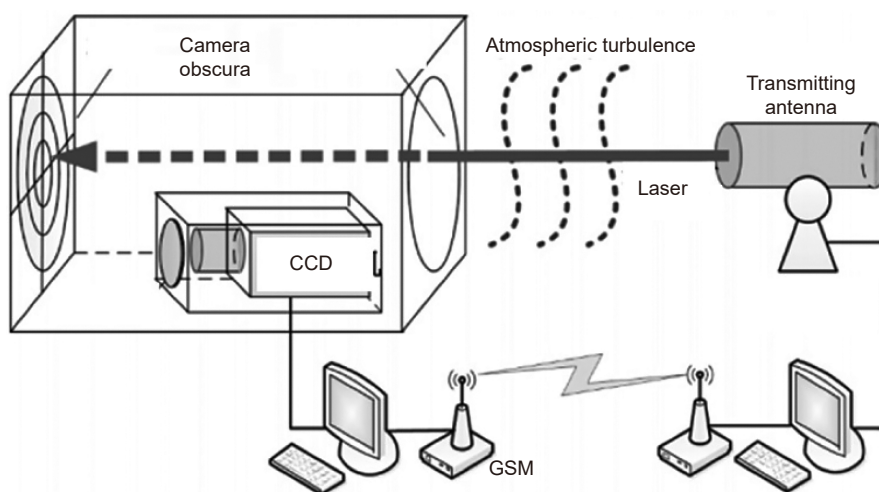


图 15 光斑跟踪系统原理图<sup>[47]</sup>  
Fig. 15 Schematic diagram of beam tracking system<sup>[47]</sup>

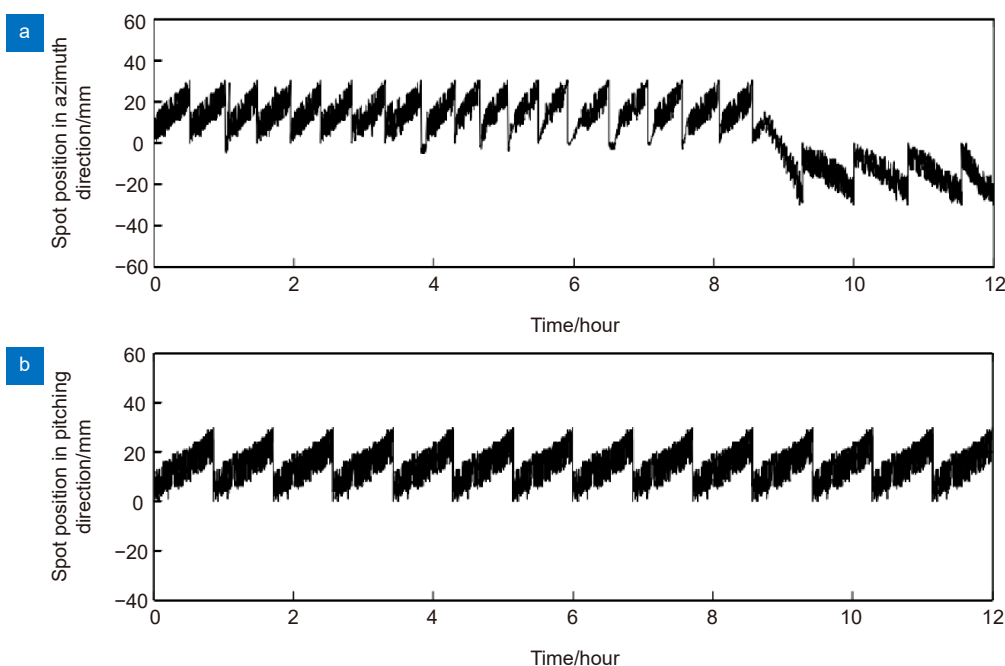


图 16 光斑跟踪曲线 (2017-12-05 18:00~2017-12-06 6:00, 多云, -1 °C~9 °C)<sup>[47]</sup>  
(a) 方位方向; (b) 俯仰方向  
Fig. 16 Tracking curve of beam (2017-12-05 18:00~2017-12-06 6:00, cloudy, -1 °C~9 °C)<sup>[47]</sup>  
(a) Azimuth direction; (b) Pitching direction

#### 4.5.4 100 km 远场实验

100 km 远场实验实物图及系统装配图分别如图 23 所示。实验采用粗精分级控制系统, 发射端位于青海湖南岸共和县二郎剑景区, 海拔高度 4015 m; 接收端位于青海湖北岸的刚察县泉吉乡, 海拔高度 3955 m<sup>[43]</sup>。信号光波长为 1550 nm, 系统采用双发单

收结构。

100 km 外场实验也采用矩形扫描的方式进行光束捕获, 瞄准和跟踪过程与 10.2 km 远场实验类似。

光斑中心位置的变化曲线如图 24、25 所示。从光斑中心位置变化结果可以看出: 由于大气湍流效应的影响和通信链路距离的增加, 系统的跟踪和瞄准也

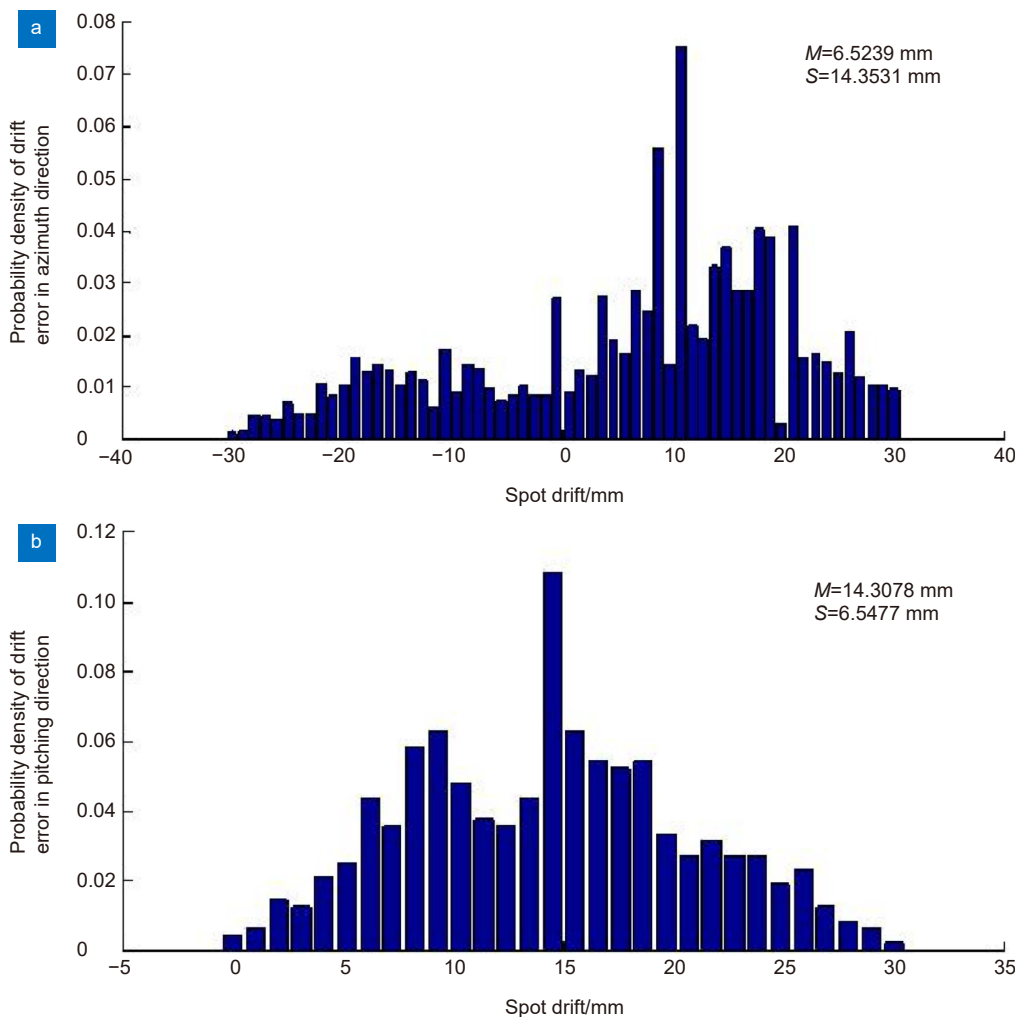


图 17 光斑位置误差统计 (2017-12-05 18:00~2017-12-06 6:00, 多云,  $-1^{\circ}\sim 9^{\circ}$ )<sup>[47]</sup>

(a) 方位方向; (b) 俯仰方向

Fig. 17 Statistical results of maintaining the beam position (2017-12-05 18:00~2017-12-06 6:00, cloudy,  $-1^{\circ}\sim 9^{\circ}$ )<sup>[47]</sup>

(a) Azimuth direction; (b) Pitching direction

更困难。

#### 4.6 收发非共视轴二维反射镜快速瞄准系统

如图 26 所示为快速瞄准系统原理图。通过改变二维反射镜的偏转角来实现光束扫描, 主控计算机获得光斑的位置信息后, 向电机发送控制命令, 电机驱动二维反射镜使光束与接收天线实时瞄准, 以此实现稳定的跟踪<sup>[40]</sup>。

利用该系统进行的远场实验通信链路如图 27 所示。发射端和接收端分别位于西安市白鹿原肖寨村和西安理工大学金花校区教学 6 楼, 通信链路长度 10.3 km。

如图 28 所示为二维反射镜位置坐标的光束跟踪

曲线, 其中  $X$  表示俯仰方向,  $Y$  表示水平方向, 二维反射镜在俯仰方向和水平方向分别调整了 4 次、2 次。

当光斑逐渐移动至相机中心点时, 计算俯仰和方位方向上光斑中心位置坐标变化的均值、方差以及功率谱密度估计 (power spectral density, PSD)。结果如图 29 所示, 由结果可以看出光斑的中心位置坐标在方位方向上漂移量大于俯仰方向上的漂移量。

如图 30 所示为跟踪过程中光斑的运动轨迹以及对应的 PSD。由结果可以看出光斑在俯仰和方位方向上的方差分别为  $14.4970 \text{ pixel}^2$ 、 $8.0287 \text{ pixel}^2$ 。

如图 31 为收发两端的信号波形。发射端功率为 200 mW, 当跟踪过程结束后, 探测器进行光电转换输出的信号波形幅值为 74.4 mV。

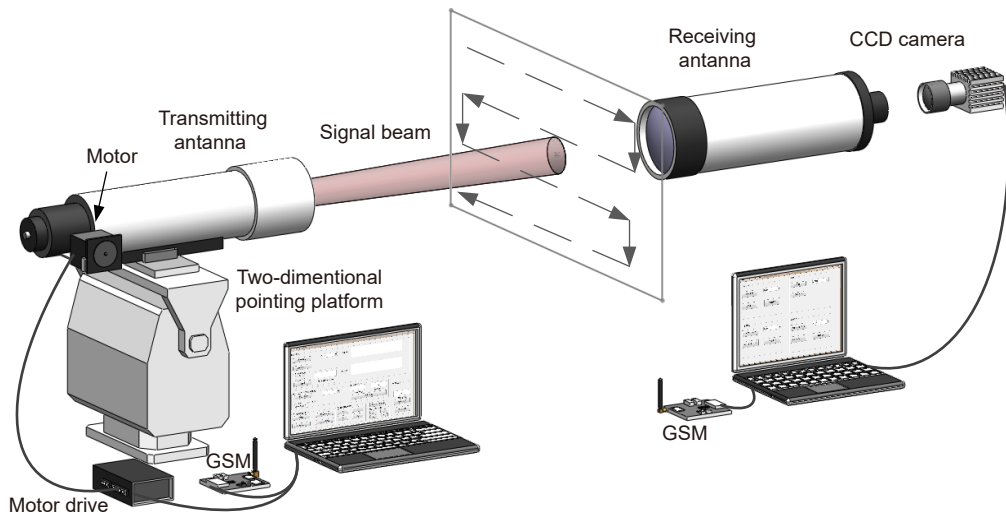


图 18 10.2 km 无信标光 APT 系统装配图<sup>[43]</sup>

Fig. 18 Assembly drawing of beacon free optical APT system of 10.2 km experiment<sup>[43]</sup>

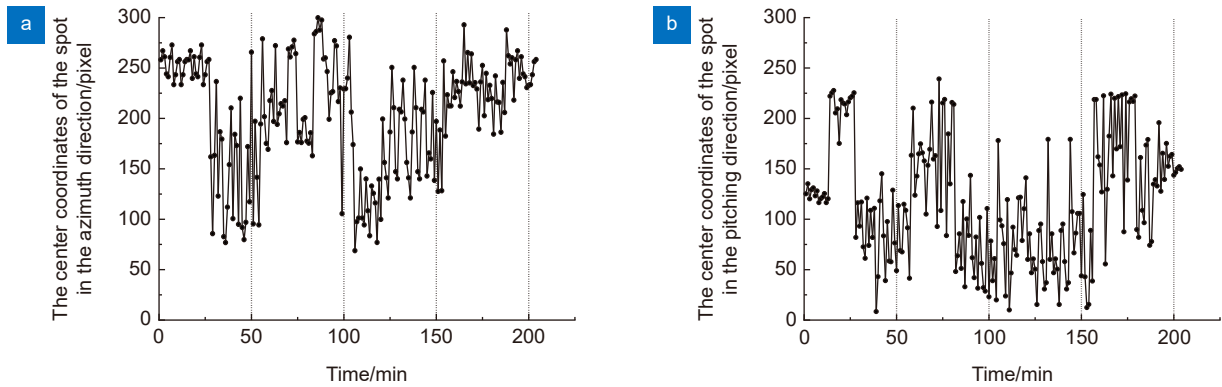


图 19 光斑中心坐标曲线 (2018-09-30 21:00~2018-10-01 00:00, 晴, 17 °C)<sup>[48]</sup>.

(a) 水平方向; (b) 俯仰方向

Fig. 19 Spot center coordinates curve (2018-09-30 21:00~2018-10-01 0:00, sunny, 17 °C)<sup>[48]</sup>.

(a) Azimuth direction; (b) Pitching direction

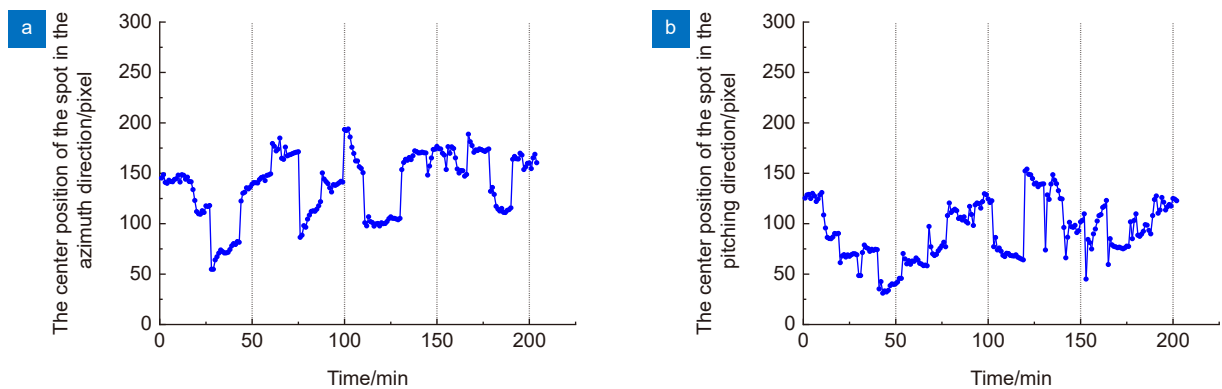


图 20 光斑中心坐标曲线 (2018-10-01 21:00~2018-10-02 0:00, 阴, 12 °C)<sup>[48]</sup>.

(a) 水平方向; (b) 俯仰方向

Fig. 20 Spot center coordinates curve (2018.10.1 21:00~2018.10.2. 0:00, cloudy, 12 °C)<sup>[48]</sup>.

(a) Azimuth direction; (b) Pitching direction

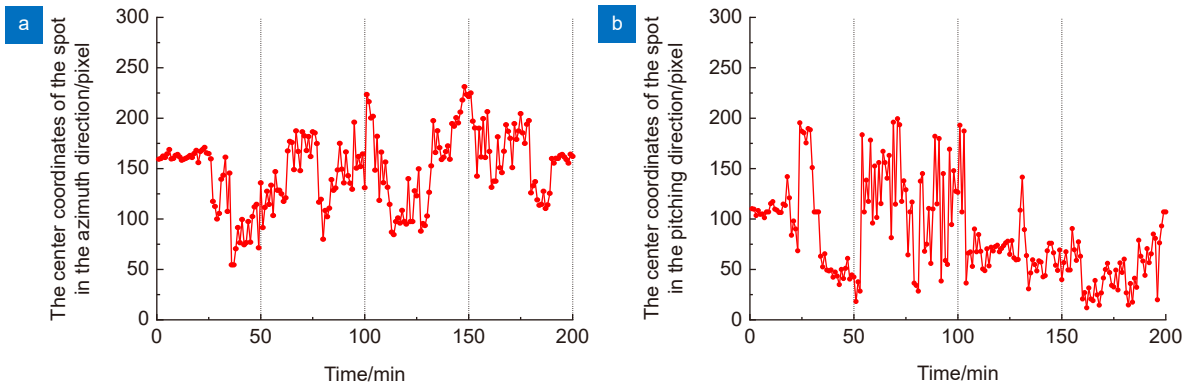


图 21 光斑中心坐标曲线 (2018-10-02 21:00~2018-10-02 0:00, 多云, 14 °C)<sup>[48]</sup>.

(a) 水平方向; (b) 俯仰方向

Fig. 21 Spot center coordinates curve (2018-10-02 21:00~2018-10-02 0:00, cloudy, 14 °C)<sup>[48]</sup>.

(a) Azimuth direction; (b) Pitching direction

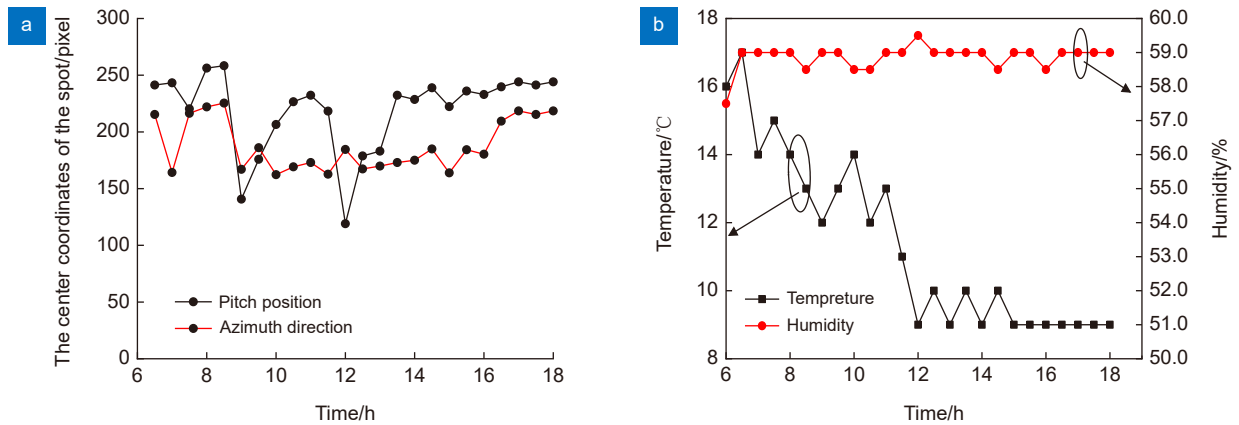


图 22 光斑中心拟合曲线<sup>[48]</sup>.

(a) 光斑中心位置变化曲线; (b) 温、湿度变化曲线

Fig. 22 Spot center fitting curve<sup>[48]</sup>.

(a) Change curve of spot center position; (b) Temperature and humidity curve

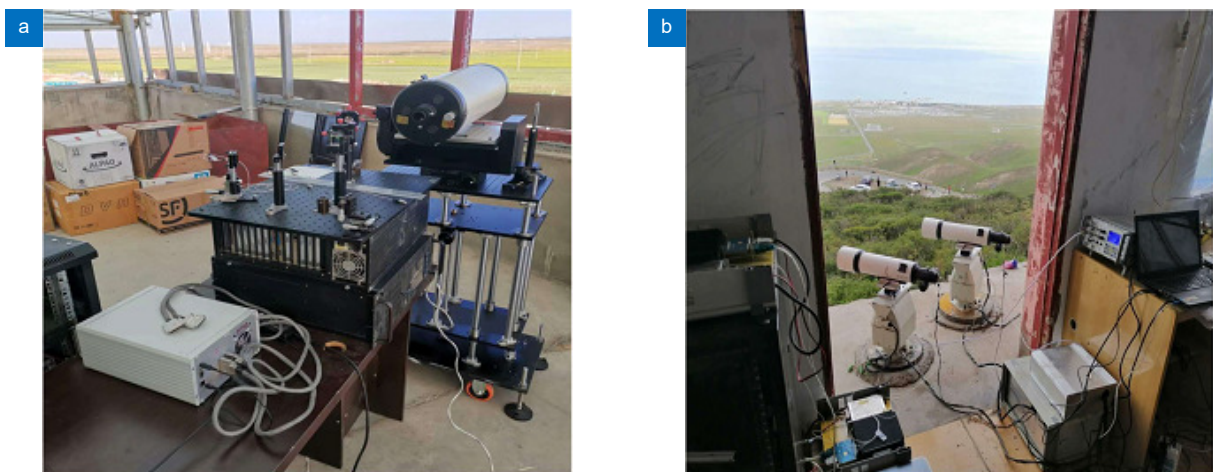


图 23 100 km 外场实验场景<sup>[48]</sup>.

(a) 接收端; (b) 发射端

Fig. 23 100 km field experiment scene<sup>[48]</sup>.

(a) Receiving terminal; (b) Transmitting terminal



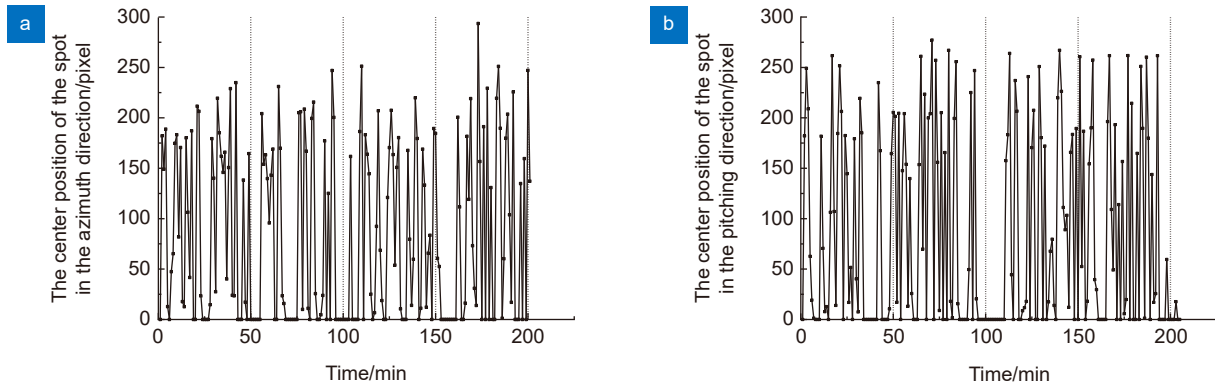


图 24 光斑中心坐标变化曲线(第一次实验)<sup>[48]</sup>. (a) 水平方向检测光斑中心坐标;  
(b) 俯仰方向检测光斑中心坐标 (2019-08-18 23:00~2019-08-19 02:00, 晴, 14 °C)

Fig. 24 Spot center coordinate change curve (The first experiment)<sup>[48]</sup>. (a) Spot center coordinates in horizontal direction;  
(b) Spot center coordinates in pitch direction (2019-08-18 23:00~2019-08-19 02:00, sunny, 14 °C)

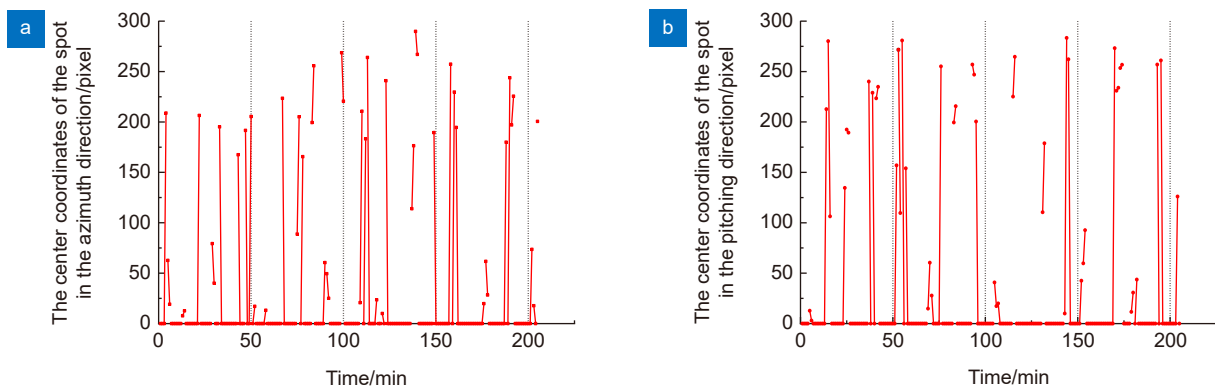


图 25 光斑中心坐标变化曲线(第二次实验)<sup>[48]</sup>. (a) 水平方向检测光斑中心坐标;  
(b) 俯仰方向检测光斑中心坐标 (2019-08-20 23:00~2019-08-20 02:00, 阴转小雨, 9 °C)

Fig. 25 Spot center coordinate change curve (The second experiment)<sup>[48]</sup>. (a) Spot center coordinates in horizontal;  
(b) Spot center coordinates in pitch direction (2019-08-20 23:00~2019-08-20 02:00, cloudy and rainy, 9 °C)

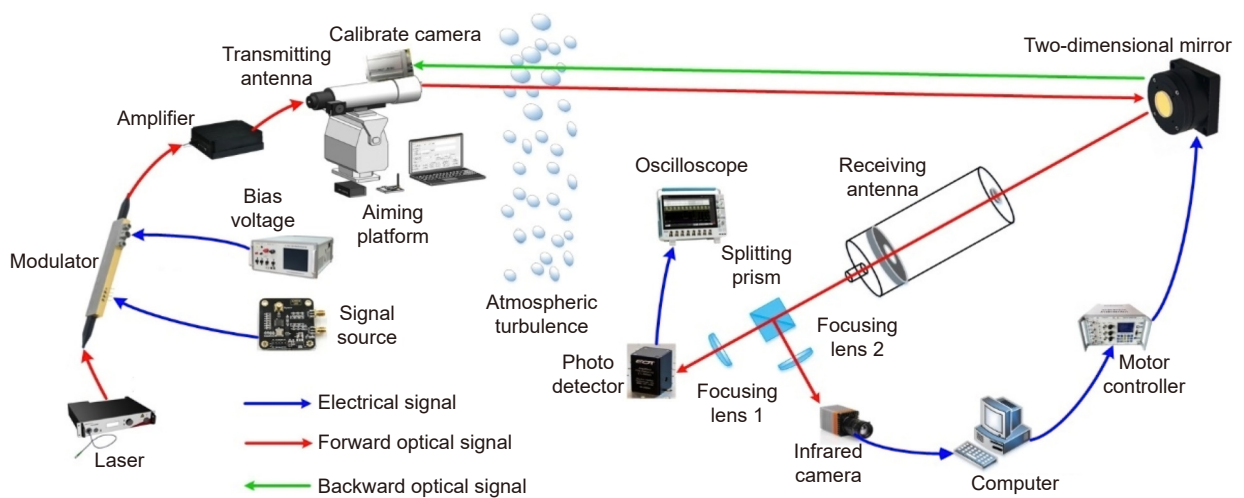


图 26 利用二维反射镜实现快速瞄准的 IM/DD 无线光通信系统<sup>[40]</sup>

Fig. 26 Wireless optical communication IM/DD system with fast alignment of two-dimensional mirror<sup>[40]</sup>

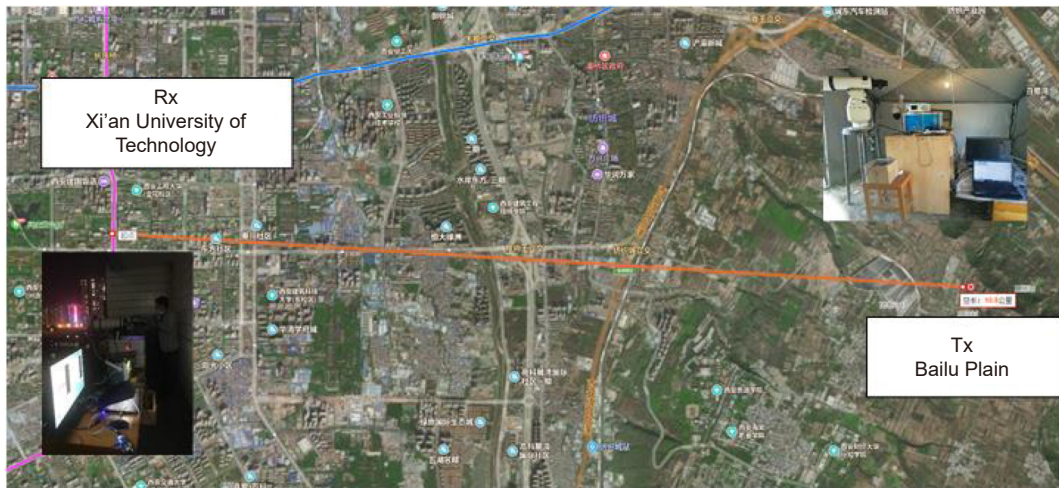


图 27 10.3 km 无线光通信实验链路图<sup>[40]</sup>

Fig. 27 Experiment of wireless optical communication for 10.3 km<sup>[40]</sup>

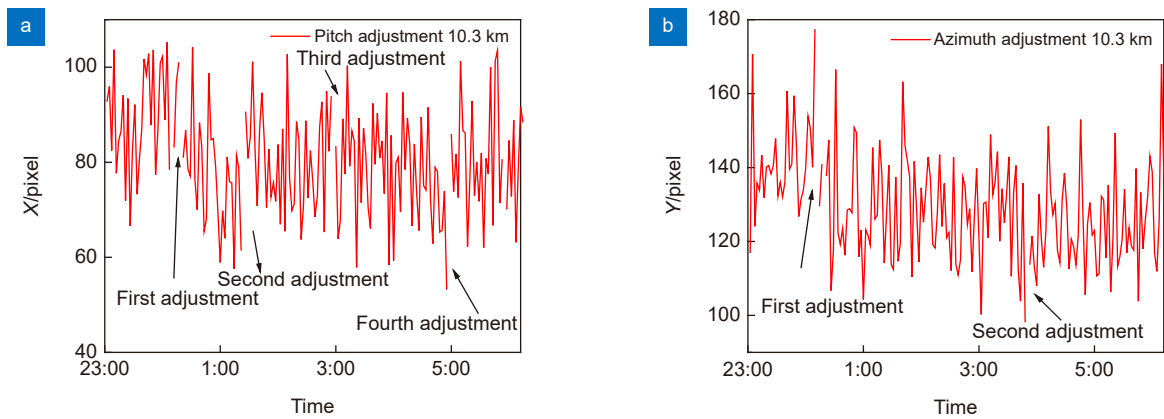


图 28 光束跟踪曲线 (2021-07-24 23:00~2021-07-25 6:00)<sup>[40]</sup>.

(a) 俯仰方向; (b) 水平方向

Fig. 28 Beam tracing curve (2021-07-24 23:00~2021-07-25 6:00)<sup>[40]</sup>.

(a) Pitching direction; (b) Azimuth direction

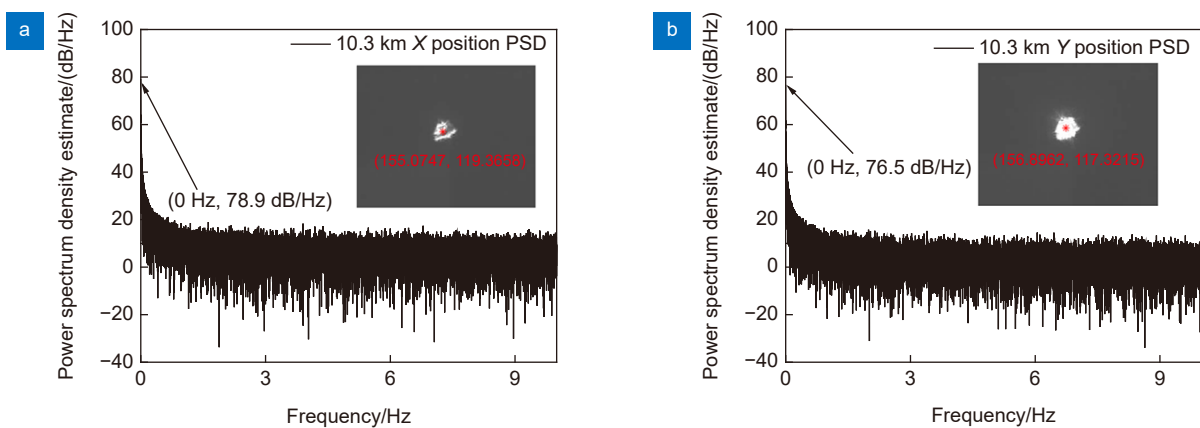


图 29 功率谱密度估计<sup>[40]</sup>. (a) X 方向; (b) Y 方向

Fig. 29 Power spectrum density estimate<sup>[40]</sup>. (a) X position; (b) Y position

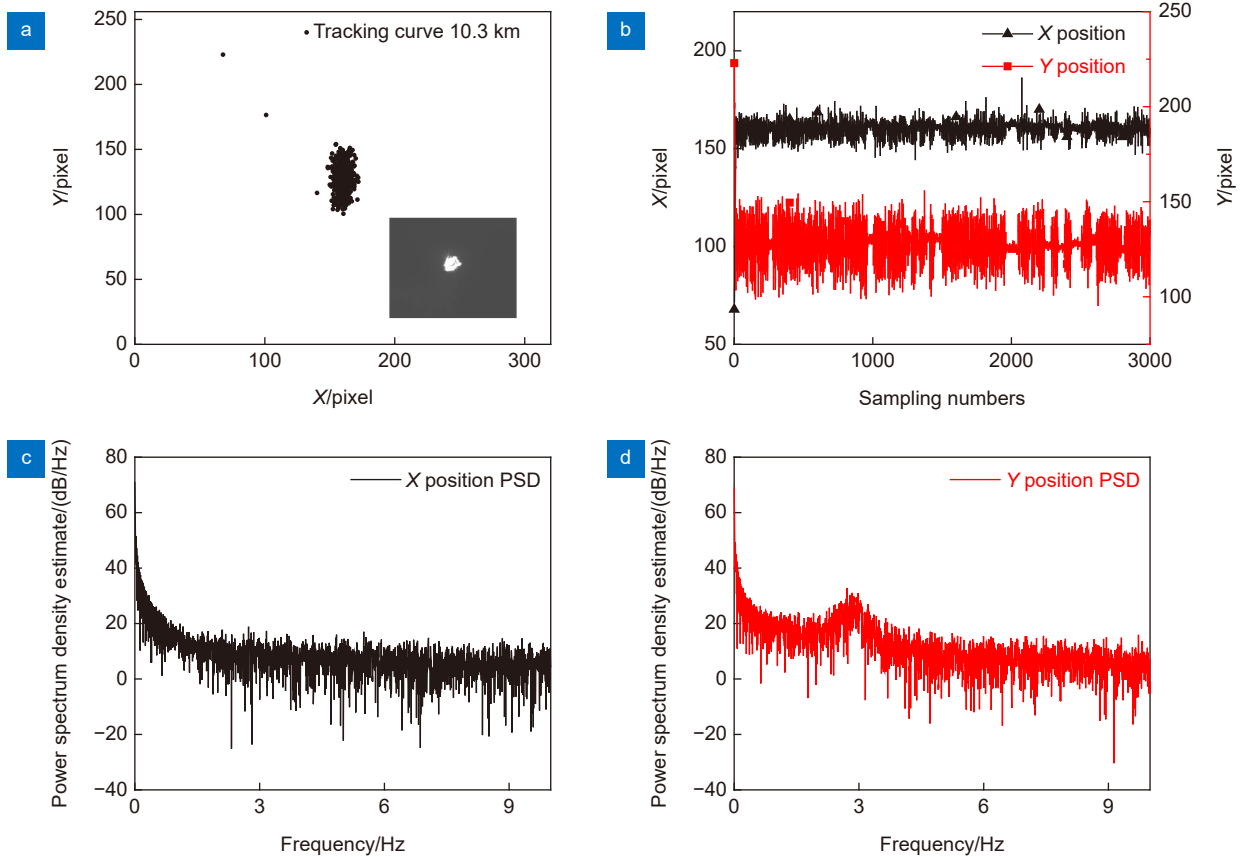


图 30 光斑跟踪曲线及 PSD<sup>[40]</sup>。(a) 光斑跟踪曲线; (b) 方向跟踪曲线;  
 (c) X 方向功率谱密度估计; (d) Y 方向功率谱密度估计  
 Fig. 30 Spot tracking curve and PSD<sup>[40]</sup>. (a) Curve of the beam tracking;  
 (b) Curve of the beam tracking in X and Y directions; (c) X PSD; (d) Y PSD

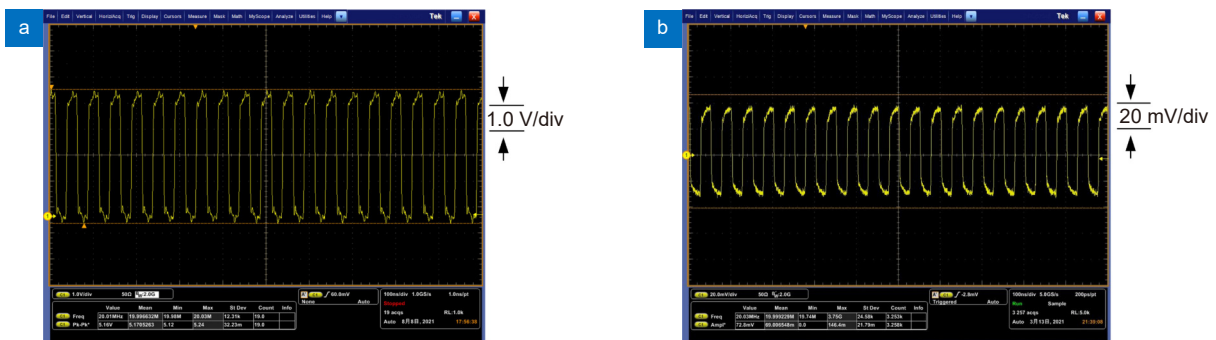


图 31 收发两端信号波形<sup>[40]</sup>。(a) 发射信号; (b) 接收信号  
 Fig. 31 Receive and transmit signal waveforms<sup>[40]</sup>. (a) Transmitting signal; (b) Receiving signal

#### 4.7 不同系统总结分析

本章节总结了西安理工大学在 APT 方面的研究进展, 分别介绍了初始捕获系统、粗精分级跟踪系统、光束检测系统、空基中继无线光通信自动跟踪控制系统、收发非共轴二维发射镜快速瞄准系统的工作原理及实验分析。根据其应用场景不同, 现将其总结

如下:

4.1~4.3 节分别针对捕获、瞄准和跟踪各个阶段的实际需求设计了初始捕获系统、粗精分级控制系统和光束检测系统。其中初始捕获系统通过位置校准法即可实现快速捕获, 无需传统捕获系统中的定位装置, 减少了捕获时间和系统设计成本; 粗精分级控制系统

采用“二维云台+压电微动平台”作为跟瞄执行机构, 可以抑制未经粗跟瞄机构消除的瞄准和跟踪残差, 进一步提高跟瞄精度, 其应用场景在 4.5.4 节中进行了详细介绍; 光束检测系统利用光斑质心、形心位置等数据, 可计算出试验过程中光束在俯仰、方位两个方向上的偏移量。

收发非共轴二维反射镜快速瞄准系统发射端采用相机标定, 接收端通过控制二维反射镜对光束进行扫描, 以光斑的位置信息作为反馈信号进行跟踪。传统的长轴瞄准将探测器处的光斑位置信息进行远距离回传反馈, 容易受到大气湍流的影响。该系统利用图像作为反馈信息调整发射天线的角度, 无需进行数据回传, 可以实现快速瞄准且受外界环境影响较小。

由不同距离下的无线光远场通信实验可以看出, 随着通信链路距离的增长, 对 APT 系统的伺服带宽、俯仰方向和方位方向的自由度和分辨率等都会有更高的要求, 这也是限制 APT 系统工作距离的主要原因。例如: 在 10.2 km 远场实验中, 发射端仅采用二维瞄准云台作为执行机构即可完成瞄准和跟踪, 其分辨率约为 17.45  $\mu\text{rad}$ ; 而在 100 km 远场实验中, 为了达到相应的精度要求, 采用二维云台和压电微动平台组成的粗精分级控制系统来完成瞄准和跟踪, 压电微动平台的分辨率约为 0.01  $\mu\text{rad}$ 。

## 5 无线光通信系统的 APT 发展展望

无线光通信系统的 APT 发展的方向包括以下几个方面:

- 1) 信标光与信号光合并为一路信号, 取消信标光;
- 2) 采用发射天线与接收天线非共光路结构, 抑制大气湍流对光束对准的影响;
- 3) 将发射端和接收端紧耦合对准变为发射端和接收端独立控制, 不需要将位置信息传送给对方;
- 4) 将发射端和接收端瞄准、捕获与跟踪功能分解, 发射端负责粗瞄准, 接收端负责精瞄准与跟踪, 接收方自主调整光路, 抑制大气湍流对光斑漂移的影响<sup>[40]</sup>。

本文系统地分析了无线光通信中 APT 系统的发展与应用, 并对西安理工大学在该领域的研究进展及成果进行了介绍。包括对设计的初始捕获系统、粗精分级控制系统和光束检测系统的性能进行了实验分析和验证。实验结果表明, 该系统可以有效地实现快速

捕获和瞄准, 系统的跟踪和瞄准精度都得到了极大改善, 提高了 APT 系统的有效性和可靠性。

## 参考文献

- [1] Ke X Z, Deng L J. *Optical Wireless Communication*[M]. Beijing: Science Press, 2016.  
柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] Yan L S, Wang F, Wu W, et al. Current status and key technologies of unmanned aerial vehicle laser communication payloads[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2016, **53**(8): 080005.  
闫鲁生, 王峰, 吴畏, 等. 无人机激光通信载荷发展现状与关键技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(8): 080005.
- [3] Mao Y C, Wang H Q, Zhang Y, et al. Research status and development of optical spatial modulation technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(3): 190712.  
毛一聪, 王惠琴, 张悦, 等. 光空间调制技术的研究进展[J]. *光电工程*, 2020, **47**(3): 190712.
- [4] Liu Z J, Shu B H, Wang Y Z, et al. Design for automatically aligning and stabilizing high energy laser beam[J]. *Opt Technol*, 1999(1): 19-20.  
刘泽金, 舒柏宏, 王永仲, 等. 高能激光束自动对准和稳定系统的结构设计[J]. *光学技术*, 1999(1): 19-20.
- [5] Yang P S. Research and design of acquisition pointing tracking system for free-space optical communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.  
杨沛松. 无线激光通信APT系统设计与实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [6] Nakagawa K, Yamamoto A, Toyoda M. Performance test result of LUCE (laser utilizing communications equipment) engineering model[J]. *Proc SPIE*, 2000, **3932**: 68-76.
- [7] Chen C C, Lesh J R. Overview of the optical communications demonstrator[J]. *Proc SPIE*, 1994, **2123**: 85-94.
- [8] Arimoto Y, Toyoshima M, Toyoda M, et al. Preliminary result on laser communication experiment using (ETS-VI)[J]. *Proc SPIE*, 1995, **2381**: 151-158.
- [9] Biswas A, Williams G, Wilson K E, et al. Results of the STRV-2 lasercom terminal evaluation tests[J]. *Proc SPIE*, 1998, **3266**: 2-13.
- [10] Tolker-Nielsen T, Oppenhausser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. *Proc SPIE*, 2002, **4635**: 1-15.
- [11] Guelman M, Kogan A, Kazarian A, et al. Acquisition and pointing control for inter-satellite laser communications[J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2004, **40**(4): 1239-1248.
- [12] Boroson D M, Biswas A, Edwards B L. MLCD: overview of NASA's Mars laser communications demonstration system[J]. *Proc SPIE*, 2004, **5338**: 16-28.
- [13] Walther F G, Michael S, Parenti R R, et al. Air-to-ground lasercom system demonstration design overview and results summary[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7814**: 78140Y.
- [14] Schmidt C, Horwath J. Wide-field-of-regard pointing, acquisition and tracking-system for small laser communication terminals[C]//*Proceedings of ICSOS 2012*, Ajaccio, 2012.
- [15] Moll F, Mitzkus W, Horwath J, et al. Demonstration of high-rate laser communications from fast airborne platform: flight campaign and results[J]. *Proc SPIE*, 2014, **9248**: 92480R.
- [16] Moll F, Horwath J, Shrestha A, et al. Demonstration of high-rate laser communications from a fast airborne platform[J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2015, **33**(9): 1985-1995.

- [17] Quintana C, Erry G, Gomez A, et al. Design of a holographic tracking module for long-range retroreflector free-space systems[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(25): 7173–7178.
- [18] Antonello R, Branz F, Sansone F, et al. High-precision dual-stage pointing mechanism for miniature satellite laser communication terminals[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2021, **68**(1): 776–785.
- [19] Zhou Y L, Ai Y, Zuo T, et al. Experimentation of real-time acquisition and tracking of free space laser beam and analysis of the result[J]. *Acta Photon Sin*, 2005, **34**(6): 943–947. 周亚霖, 艾勇, 左韬, 等. 空间光束实时捕获、跟踪实验与分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 943–947.
- [20] Tong S F, Jiang H L, Liu Y Q, et al. Optimum design of bandwidth for the APT coarse tracking assembly in free space laser communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2007, **34**(9): 16–20. 佟首峰, 姜会林, 刘云清, 等. 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.
- [21] Pan G F, Zhang J X, Chen J. Common path auto-alignment system[J]. *Chin J Lasers*, 2008, **35**(10): 1500–1504. 潘高峰, 张景旭, 陈娟. 一种共光路自动对准系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1500–1504.
- [22] Song Y S, Chang S, Tong S F, et al. Feature analysis of aeronautical laser communication system and airborne laser communication experiment[J]. *Chin J Lasers*, 2016, **43**(12): 1206004. 宋延嵩, 常帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验[J]. *中国激光*, 2016, **43**(12): 1206004.
- [23] Qian F, Jia J J, Zhang L, et al. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. *Chin 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.
- [24] Meng L X, Zhao D X, Zhang L Z, et al. The test of tracking accuracy and design of airborne laser communication stabilized pod[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, **36**(10): 1916–1923. 孟立新, 赵丁选, 张立中, 等. 机载激光通信稳瞄吊舱设计与跟踪精度测试[J]. *兵工学报*, 2015, **36**(10): 1916–1923.
- [25] Zhang Y S, Qiu Z A, Guo S, et al. Key technology analysis of airborne laser communication system and its verification[J]. *Electron Opt Control*, 2017, **24**(10): 80–84. 张元生, 仇振安, 郭帅, 等. 机载激光通信系统关键技术分析与试验验证[J]. *电光与控制*, 2017, **24**(10): 80–84.
- [26] Cai M H, Kong D C, Tong X G. Research and implementation of coarse fine pointing alignment for single composite shaft detection system[J]. *Electro-Opt Technol Appl*, 2019, **34**(1): 63–66. 蔡美华, 孔德聪, 佟鑫刚. 单探测型复合轴系统粗精指向对准的研究与实现[J]. *光电技术应用*, 2019, **34**(1): 63–66.
- [27] Lu Q, Ren B, Bian J Y. Research on acquisition and tracking technology for the four-quadrant detector[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(3): 190559. 鲁倩, 任斌, 边晶莹. 四象限探测器的信号光捕获与跟踪技术研究[J]. *光电工程*, 2020, **47**(3): 190559.
- [28] Li Q. Research on spot position detection technology of space laser communication based on array detector[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. 李千. 基于阵列探测器的空间激光通信光斑位置检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- [29] Ke X Z, Lu N, Zhao L. Automatic light beam capturing device and light beam capturing method: 201010185116.9[P]. 2010-10-06. 柯熙政, 卢宁, 赵黎. 一种光束自动捕获装置及光束捕获方法: 201010185116.9[P]. 2010-10-06.
- [30] Ke X Z, Xi X L, Liu C C. A new auto beam acquiring method for laser communication in atmosphere[J]. *Opt Commun Technol*, 2004, **28**(10): 39–41. 柯熙政, 席晓莉, 刘长城. 大气激光通信中一种新的光束自动捕获方法[J]. *光通信技术*, 2004, **28**(10): 39–41.
- [31] Hu Q D. Research on spot detection technology in process of beacon acquisition of laser communication in atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. 胡启迪. 大气激光通信信标光捕获过程中光斑检测技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [32] Ke X Z, Lei S C, Yang P S. Beam coaxial alignment detection in atmospheric laser communication[J]. *Chin J Lasers*, 2016, **43**(6): 0606003. 柯熙政, 雷思琛, 杨沛松. 大气激光通信光束同轴对准检测方法[J]. *中国激光*, 2016, **43**(6): 0606003.
- [33] Zhao Q. Design and implementation of initial acquisition system for wireless laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. 赵奇. 无线激光通信初始捕获系统设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [34] Xu W. Research and implement of the laser spot detection in ATP system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. 徐尉. 无线激光通信ATP系统光斑检测技术研究及实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [35] Ke X Z, Li S Y. Experimental study on optical axis alignment of the optical antenna under the spot broken[J]. *Acta Photon Sin*, 2017, **46**(4): 0406002. 柯熙政, 李世艳. 光斑缺碎情形下光学天线光轴对准实验研究[J]. *光子学报*, 2017, **46**(4): 0406002.
- [36] Ke X Z, Yan X, Yang Y Q, et al. 5.2 km distance wireless laser communication tracking experiment[J]. *Comput Meas Control*, 2018, **26**(11): 233–237. 柯熙政, 严希, 杨雅淇, 等. 5.2 km距离无线激光通信跟踪实验[J]. *计算机测量与控制*, 2018, **26**(11): 233–237.
- [37] Ke X Z, Jing Y K. Far-field laser spot image detection for use under atmospheric turbulence[J]. *Opt Eng*, 2020, **59**(1): 016103.
- [38] Ke X Z, Zhang P. Automatic focusing control in beaconless APT system[J]. *J Russ Laser Res*, 2020, **41**(1): 61–71.
- [39] Ke X Z, Liang H L. Airborne laser communication system with automated tracking[J]. *Int J Opt*, 2021, **2021**: 9920368.
- [40] Yang S J, Ke X Z, Wu J L, et al. Fast alignment of wireless optical communication using two-dimensional mirror[J]. *Chin J Lasers*, 2022, **49**(11): 1106001. 杨尚君, 柯熙政, 吴加丽, 等. 利用二维反射镜实现无线光通信快速对准[J]. *中国激光*, 2022, **49**(11): 1106001.
- [41] Zhao X. The APT initial capture and error analysis of space laser communication[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2012. 赵雪. 空间激光通信APT初始捕获及误差分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [42] Ke X Z, Zhang P. Tracking and aiming control system and tracking and aiming control method for wireless optical communication: 201910339487.9[P]. 2021-07-20. 柯熙政, 张璞. 一种无线光通信的跟踪控制系统及跟踪控制方法: 201910339487.9[P]. 2021-07-20.
- [43] Zhang P. Design of acquisition pointing and focusing system

for wireless laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

张璞. 无线激光通信捕获对准与调焦系统设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.

- [44] Ke X Z, Chen X Z, Wu J L. A relay laser communication system for an unmanned aerial vehicle: 201810919712.1[P]. 2018-08-14.

柯熙政, 陈晓展, 吴加丽. 一种无人机中继激光通信系统: 201810919712.1[P]. 2018-08-14.

- [45] Liang H L. Design and realization of airborne laser communication automatic tracking control system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.

梁韩立. 机载激光通信自动跟踪控制系统设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

- [46] Ke X Z, Wang J. Light spot aligning method based on four-

quadrant detector: 201611244466.1[P]. 2017-05-31.

柯熙政, 王姣. 一种基于四象限探测器的光斑对准方法: 201611244466.1[P]. 2017-05-31.

- [47] Yan X. Research on spot tracking system in APT system of wireless laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

严希. 无线激光通信APT系统中的光斑跟踪系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

- [48] Jing Y K. Experimental study on far-field spot image detection for wireless optical communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

景永康. 无线光通信远场光斑图像检测实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. 西安市科技创新引导项目 (NO: 201805030YD8CG14(12))、陕西省重点产业创新项目 (2017ZDCXL-GY-06-01).

## 作者简介



【通信作者】梁静远, 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事无线光通信系统调制解调技术的研究。

E-mail: ljj@xaut.edu.cn



【通信作者】赵黎, 女, 博士, 西安工业大学教授, 硕士生导师, 中国电子学会高级会员、中国电子教育学会研究生教育分会理事、陕西省光学学会会员。长期从事信号处理、无线光通信等领域研究工作。作为项目负责人, 在光通信领域承担了 10 多项科研项目。获得国家发明专利 3 项, 国家实用新型专利 1 项, 软件注册权 2 项。在光通信领域发表论文 50 余篇, 相关研究成果多次获得陕西省科学技术奖。

E-mail: pilly\_lily@126.com

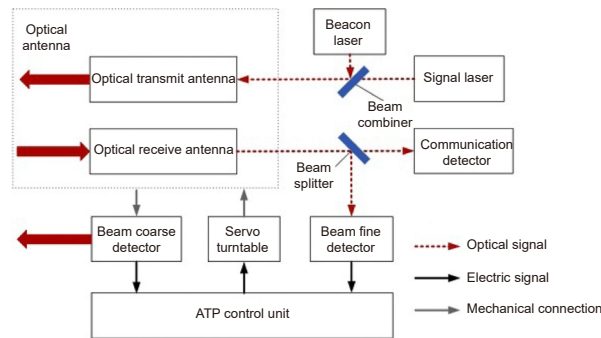


【通信作者】王怡, 女, 博士, 中国计量大学教授, 主要研究方向为自由空间光通信、石油矿山光信息探测、海洋光信息感知等。

E-mail: wcy16@cjlu.edu.cn

# Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system

Liang Jingyuan<sup>1\*</sup>, Chen Ruidong<sup>1</sup>, Yao Haifeng<sup>2</sup>, Bai Bo<sup>6</sup>,  
Cao Minghua<sup>4</sup>, Zhao Li<sup>5\*</sup>, Wang Yi<sup>3\*</sup>, Deng Jiaxin<sup>1</sup>



Optical wireless communication APT system diagram

**Overview:** Wireless optical communication refers to the technology of transmitting information in free space using light beams as carriers, which has the advantages of high bandwidth, low cost, and high security. Due to factors such as narrow signal beam and long transmission distance, it is difficult to establish and maintain a wireless optical communication link. Therefore, an acquisition, targeting, and tracking system needs to be established to prevent the communication link from being interrupted. In the wireless optical communication system, the optical components on the two platforms carrying the transmitter and the receiver are required to be coaxial in real time, and this process is usually called automatic aiming. In order to maintain the real-time aiming of the transceiver boresight of both transceivers, it is necessary to design a fast and high-precision APT system. A typical wireless optical communication APT system is shown in Figure 1. Liu Changcheng established and analyzed the simulation model in the APT system in atmospheric laser communication, and designed an automatic beam capture system; Hu Qidi designed a beacon light spot detection scheme using CCD; Yang Peisong proposed a coaxial aiming detection method, and designed the aiming control system and tracking system according to the method, and carried out field experiments; Zhao Qi designed an initial capture system and conducted a 1.3 km field experiment; Xu Wei designed a light spot detection system and proposed a corresponding image processing algorithm; Li Shiyan proposed an optical axis aiming scheme, which can effectively improve the detection accuracy and aiming accuracy of the system; Yan Xi designed a spot tracking system and conducted a 5.2 km field tracking experiment. The experimental results show that the tracking accuracy of the system can reach 5.4  $\mu\text{rad}$ ; Jing Yongkang designed a light spot image detection method, and conducted a 100 km laser communication experiment on this basis; Zhang Pu embedded a high-precision actuator in the APT system to achieve high-precision aiming and tracking, designed a focusing system and conducted field experiments of 10.2 km and 100 km. Liang Hanli designed an APT system that can be mounted on UAVs and conducted an airborne laser communication experiment through a simulated airborne experimental platform, and its tracking accuracy can reach 2.42  $\mu\text{rad}$ ; Ke Xizheng, Yang Shangjun and others proposed a fast aiming method. The method does not need to feed back the control signal from the receiving end to the transmitting end, and can complete the establishment of the uplink and the downlink at the same time. And carried out 1.3 km and 10.3 km field experiments to verify the method. This paper systematically analyzes the development and application of the APT system in wireless optical communication and introduces the research progress and achievements of Xi'an University of Technology in this field. Including the experimental analysis and verification of the performance of the designed initial capture system, compound axis control system and beam detection system Improvements have increased the effectiveness and reliability of the APT system.

Liang J Y, Chen R D, Yao H F, et al. Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(8): 210439; DOI: 10.12086/oe.2022.210439

Foundation item: The Xi'an Science and Technology Planning Project (201805030YD8CG14 (12)), and The Key Industrial Innovation Chain Project of Shaanxi Province (2017ZDCXL-GY-06-01)

<sup>1</sup>School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; <sup>2</sup>The School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130013, China; <sup>3</sup>College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; <sup>4</sup>School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; <sup>5</sup>Electronic Information Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an, Shaanxi 710021, China; <sup>6</sup>School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710119, China

\* E-mail: lly@xaut.edu.cn; pillily\_lily@126.com; wcy16@cjlu.edu.cn