

# 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验

宋延嵩<sup>1</sup> 常 帅<sup>1\*</sup> 佟首峰<sup>1</sup> 张立中<sup>2</sup> 姜会林<sup>1,2</sup> 董 岩<sup>1</sup> 董科研<sup>1</sup> 赵 馨<sup>1</sup> 张 雷<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 航空平台是天、空、地一体化立体空间网络的重要节点,建立空星、空空、空地激光通信链路是实现机载激光通信的关键。介绍了机载激光通信实验系统的组成与工作原理;进行了机载激光通信系统特殊性分析,包括大气附面层、平台随机大幅度扰动、平台高频振动、大气信道等外界约束环境对激光通信系统性能的影响以及相关抑制技术;具体介绍了飞艇-船舶间空地激光通信实验、双直升机间空空快速捕获实验以及双固定翼飞机间空空远距离激光通信的实验成果。

**关键词** 光通信; 空间激光通信; 机载光端机; 双动态捕获; 大气附面层; 大气信道

中图分类号 TN929.13

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1206004

## Feature Analysis of Aeronautical Laser Communication System and Airborne Laser Communication Experiment

Song Yansong<sup>1</sup> Chang Shuai<sup>1</sup> Tong Shoufeng<sup>1</sup> Zhang Lizhong<sup>2</sup> Jiang Huilin<sup>1,2</sup>  
Dong Yan<sup>1</sup> Dong Keyan<sup>1</sup> Zhao Xin<sup>1</sup> Zhang Lei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Aviation platform is the critical node of the space-air-ground integration stereo-space network. The establishment of space-to-air, space-to-space and space-to-ground laser communication links is the key to achieving airborne laser communication. The composition and working principle of the airborne laser communication experimental system are introduced. The particularity analyses for the airborne laser communication are carried out, including the influence of the atmospheric boundary layer, substantially random perturbation, platform high-frequency vibration, atmospheric channel and other external constraint environments on the performance of the airborne laser communication system, and the related suppression technologies are studied. The experimental results of the space-to-ground laser communication between airship and ship, the space-to-space rapid capture between helicopters and the space-to-space remote laser communication between fixed wing airships are introduced.

**Key words** optical communications; space laser communication; airborne optical terminal; double-dynamic capture; atmospheric boundary layer; atmospheric channel

**OCIS codes** 060.4510; 060.3510

收稿日期: 2016-08-08; 收到修改稿日期: 2016-09-12

作者简介: 宋延嵩(1983—),男,博士研究生,主要从事空间激光通信系统高精度光束伺服技术方面的研究。

E-mail: songyansong2006@126.com

导师简介: 佟首峰,男,博士,教授,主要从事光学遥感、光电跟踪、光电测试、光电系统仿真和空间激光通信等方面的研究。E-mail: tsf@cust.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: cs0617@126.com

# 1 引 言

随着人们对航空、临近空间有效载荷的高速、大容量侦查信息传输的要求越来越高,机载激光通信技术越来越受到研究者的关注,其在空间立体信息网络中的重要作用也越来越突显。近十几年来,国外许多机构投入大量的人力、物力进行机载激光通信相关技术的研究和通信实验。目前国内开展空间激光通信研究的机构较多,其中长春理工大学开展了飞艇-船舶空地激光通信实验、双直升机间空空激光通信实验以及双固定翼飞机间空空激光通信实验。本文以野外激光通信实验为基础,介绍了实验过程及实验中的难点,重点分析了飞机附面层影响、大气信道影响、大幅度姿态扰动影响以及随机运动对捕获策略的影响,最后分析了上述三种实验的实验过程及实验数据,为机载激光通信的发展提供了实验及理论依据<sup>[1-3]</sup>。

## 2 机载激光通信实验系统简介

### 2.1 机载激光通信样机组成与工作原理

机载激光通信原理样机从功能上分为光束捕获、跟踪、对准(ATP)分系统,通信收发分系统,光学分系统三个组成部分,工作原理示意图如图1所示。

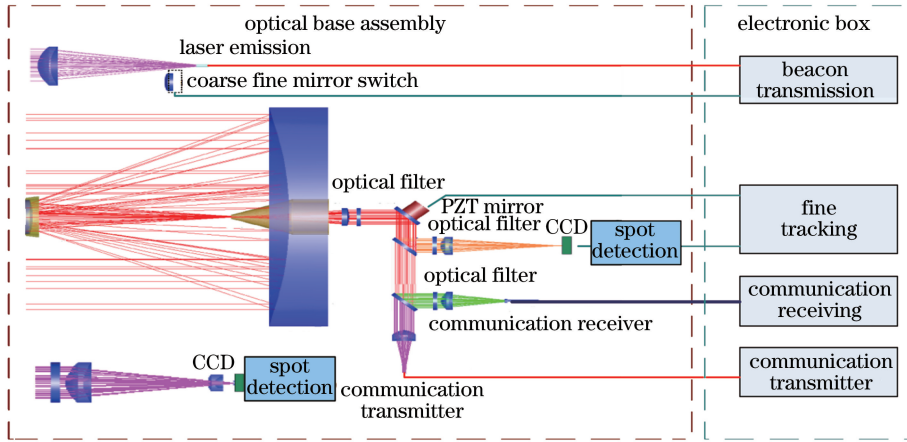


图1 机载激光通信机工作原理示意图

Fig. 1 Schematic of working principle of airborne laser communication

机载激光通信原理样机各个分系统的作用如下。

1) 光束 ATP 分系统:实现对两个具有相对运动的振动平台的快速捕获和精密跟踪。由粗跟踪 CCD 相机、粗跟踪伺服控制单元以及两轴四框架伺服转台构成的粗跟踪伺服环完成视轴的初始指向、开环捕获以及动态粗跟踪。粗跟踪环具有较大的跟踪视场(0.01 rad),在捕获不确定区域为 0.008 rad、信标束散角为 0.002 rad 的条件下,采用凝视扫描模式和  $5 \times 5$  的光栅扫描,完成快速捕获。由于粗跟踪精度受 CCD 分辨率和伺服带宽的限制,初步实现的跟踪精度为  $1.5 \times 10^{-4}$  rad( $3\sigma$ ,  $\sigma$  为正态分布的标准差)。精跟踪伺服环由二维快速倾斜压电陶瓷(PZT)振镜、具有高采样频率的光斑中心检测单元和数字伺服跟踪单元构成,具有较小的跟踪视场( $3.2 \times 10^{-4}$  rad)、高伺服带宽(300 Hz)和高跟踪精度(室内跟踪精度优于  $3 \times 10^{-6}$  rad,室外跟踪精度优于  $2 \times 10^{-5}$  rad),可进一步抑制粗跟踪残差,以满足通信窄束散角的对准要求。

2) 通信收发分系统:从通信带宽和链路功率这两个方面的要求考虑,采用幅度调制和直接探测技术(IM/DD)实现高调制速率、高功率宽带的激光发射和高灵敏度探测。为有效解决高码速率与大功率输出的矛盾,利用掺铒光纤放大器将功率为几毫瓦的信号放大为瓦量级的信号发射出去。对于通信接收单元,为实现高码率和高灵敏度接收,通信检测器件为基于振幅频率分布(APD)的探测器(钢镓砷材料)。通过优化设计,适当选择基于 APD 的探测器的最佳倍增因子,并采用多模光纤的过渡耦合技术,在通信速率为  $2.5 \times 10^9$  bit/s、误码率为  $10^{-7}$  的条件下,通信接收单元接收灵敏度可达  $-33$  dBm。

3) 光学分系统:整个激光通信系统为六光轴系统,其中通信收、发轴和精跟踪轴对同轴度的要求最高,因此这三个轴共用卡塞格林望远单元和高速振镜。只要 ATP 视轴对准,则通信收发光轴也视为对准。使

用具有窄带、高抑制比的双色分光片实现精跟踪、通信接收、通信发射的隔离与组合;通信接收通过光纤耦合至探测器。粗信标发射光轴和粗跟踪视轴对于同轴度的要求不苛刻,因此采用独立小口径发射和接收。考虑到系统的体积、重量、功耗,采用粗精信标合一方案;此外,光学分系统还包括可见光监视成像单元<sup>[10-20]</sup>。

## 2.2 激光通信系统与机载平台适配

为了缩短机载激光通信系统的研制时间且满足机载环境适应性要求,在实验中使用两个在结构、组成、功能上完全相同的激光通信实验样机。每个实验样机的总质量为 68 kg,峰值功耗为 350 W,可搭载于大型无人机和飞艇等平台。为了方便实验的顺利开展,分别对机载光端机的窗口适配、零位标校和视场可视度进行设计:1) 窗口适配,用特研光学窗口代替飞机窗口,以有效保证收发光束的质量;2) 零位标校,系统安装后视轴归为零位,利用全球定位系统测得自身位置坐标和一个远点目标,将两个坐标代入指向模型,解算出转台方位和俯仰角度,以此值控制转台执行,使系统指向目标,并修正存在的指向误差;3) 视场可视度,为保证通信视轴的工作角度范围,光端机与飞机实验窗口应尽量靠近,光端机的回转中心与光学玻璃中心轴线的重合保证了光端机上下及左右具有相同的可视角度。

利用三维模型分别对右侧窗口和左侧窗口的可视角度进行了分析,得到右侧窗口的倾斜角和方位角分别为 $\pm 18^\circ$ 和 $\pm 18^\circ$ ,左侧窗口的倾斜角和方位角分别为 $\pm 13^\circ$ 和 $\pm 18^\circ$ 。

光端机与窗口的位置关系如图 2 所示。

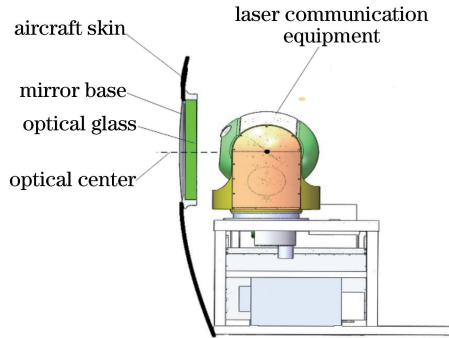


图 2 光端机与窗口的位置关系

Fig. 2 Position relationship between optical terminal and window

## 3 机载激光通信系统特性分析

机载激光通信系统不仅应具有高速率、远距离的信息传输,还应在大气信道干扰、剧烈平台扰动、强烈大气附面层等不利条件下实现快速捕获、精密跟踪和可靠通信。

### 3.1 飞机附面层影响分析

航空光端机搭载飞机高速飞行时,高速气流将形成大气附面层,对光束传播产生一定的影响。大气附面层光束传播的影响程度与飞行速度、飞行高度、安装位置和窗口结构形式等因素有关。这里以精跟踪光斑成像为例,分析大气附面层对光束的影响,并提出了抑制大气附面层影响的有效方法。

飞行实验中,飞机的飞行高度为 4700 m,链路距离为 135 km,信标光能量为 500 mW。受大气附面层的影响,精跟踪探测光斑出现弥散现象,直径为整个靶面的三分之一(约为  $267 \mu\text{m}$ ),并且出现中心空洞。该现象在地面动静态实验(地面静态和地面-船舶动态)以及低空低速动态实验(飞艇-地面和直升机-直升机)中未曾出现,光斑情况如图 3 所示,表现为典型的离焦现象。产生该现象的原因为窗口附近的空气密度分布不均匀引起负透镜效应。

针对附面层对光斑的影响情况,加入透镜以补偿光斑的离焦现象。在整个补偿过程中,应先分析光斑的离散程度,再依据此条件进行补偿设计。对光斑形状进行仿真,引起的光斑弥散和中心空洞现象等效为前端附加了焦距为  $-500 \text{ m}$  的透镜。原始理想状态的光斑接近艾里斑。

根据仿真结果,这里可采用平凸透镜进行光斑离焦现象的补偿,在卡塞格林系统遮光罩前端安装平凸透镜,如图 4 所示。补偿后的精跟踪光斑效果如图 5 所示。



图 3 受附面层影响的精跟踪光斑

Fig. 3 Fine tracking spot influenced by boundary layer

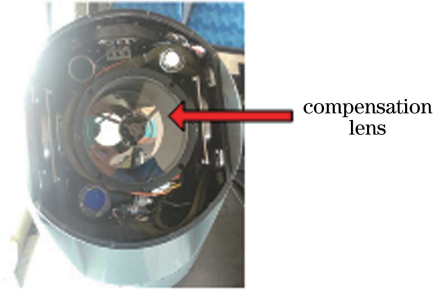


图 4 补偿透镜安装位置实物图

Fig. 4 Physical map of mounting position of compensation lens



图 5 不同曲率透镜补偿后的光斑。(a)曲率为  $6.5 \times 10^5$  ; (b)曲率为  $5.5 \times 10^5$  ; (c)曲率为  $4.5 \times 10^5$

Fig. 5 Spots compensated by different curvature lenses. (a) Curvature is  $6.5 \times 10^5$  ;

(b) curvature is  $5.5 \times 10^5$  ; (c) curvature is  $4.5 \times 10^5$

### 3.2 大气信道影响分析

#### 3.2.1 大气散射衰减影响分析

##### 1) 平均衰减

气溶胶粒子散射和大气分子散射等共同形成了大气散射,其中米氏散射为引起光波衰减的主要因素。由米氏散射产生的衰减系数为

$$\sigma = \beta_a = 3.91 (\lambda/550)^{-q} / V, \quad (1)$$

式中  $\beta_a$  为米氏散射引起的衰减系数,  $V$  为大气能见度(当工作波长为 550 nm、目标和背景的对比度降低为 2% 时可观测的最大距离),  $q$  为修正因子(随能见度变化),  $\lambda$  为工作波长。由(1)式可知,增加大气能见度或增加工作波长都可有效减小由大气散射引起的光波衰减。由大气散射引起的光功率衰减  $I_r$  与光波在大气中传播的距离  $L$  之间的关系为

$$I_r = I_0 e^{-\sigma L}, \quad (2)$$

式中  $I_0$  为初始光强。

在实际应用中,通常使用每公里衰减的分贝数来恒量大气散射程度,因此大气散射程度可表示为

$$\beta = 10 \lg(I_r / I_0) = -10 \sigma. \quad (3)$$

由(3)式可知,激光的波长越长,在大气中传输时受大气散射的影响越小。

##### 2) 不同海拔高度的衰减系统



能见度与海拔高度之间的正比关系可表示为

$$V = V_0 \exp[1.25(h - h_0)], \quad (4)$$

式中  $h$  为实际位置的海拔高度,  $h_0$  为地面处基准海拔高度,  $V_0$  为高海拔处对应的能见度。由(4)式可知, 大气能见度随海拔高度的升高呈指数增加。不同海拔和不同能见度对应的空间光通信中的光功率衰减如图 6 所示。以波长为 800 nm 的信标激光为例, 在能见度为 20 km 条件下, 当海拔为 3 km 时, 光功率衰减系数为 0.5 dB/km; 当海拔为 5 km 时, 光功率衰减系数为 0.05 dB/km; 当海拔高度为 10 km 时, 光功率衰减系数很小, 接近真空状态。

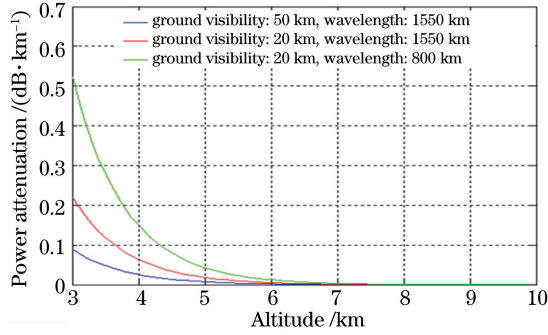


图 6 不同海拔高度的信道散射衰减仿真曲线

Fig. 6 Channel scattering attenuation simulation curves at different altitudes

### 3.2.2 大气湍流散斑影响

大气湍流使得光束波面发生畸变并产生散斑效应, 降低了光学天线与探测器的耦合效率, 对小靶面探测器的影响更加明显, 同时影响跟踪精度。受大气湍流的影响, 到达接收端的光束波前相位发生畸变, 低频变化使光斑中心产生光漂移现象, 高频变化使光斑产生扩散现象, 如图 7(a) 所示。在较强湍流条件下产生的光斑破碎和光斑空洞现象如图 7(b) 所示。

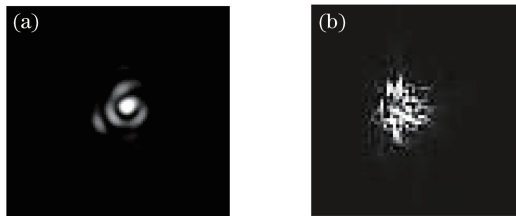


图 7 大气湍流造成的(a)光斑和(b)散斑

Fig. 7 (a) Light spot and (b) speckle caused by atmospheric turbulence

受大气湍流的影响, 到达接收端的光束波前相位发生畸变, 低频变化使光斑中心产生光漂移现象, 高频变化使光斑产生扩散现象; 在较强湍流条件下, 甚至产生光斑破碎和光斑空洞现象。大气散斑引起的视轴抖动方差  $\sigma_\beta^2$  与链路距离  $L$ 、接收口径  $D$ 、大气折射率结构常数  $C_n$  之间的关系为

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

由(5)式可知, 大气湍流散斑效应不仅与链路距离和接收光学口径等参数有关, 还与大气折射率结构常数有关, 即受海拔高度的影响较大。

### 3.2.3 大气湍流闪烁影响

大气湍流对光传输最主要的影响为大气湍流闪烁效应, 由于大气折射率的波动, 激光传输的相位和幅度发生变化, 因此产生散射强度波动现象。对上述现象进一步分析可得, 光强起伏是由相同光源发射的光经过略有不同的路径后产生的随机干涉造成的。

若光波振幅为  $A$ , 光强度  $I = A^2$ , 则光强度波动方差  $\sigma_{\ln I}^2$  可定义为

$$\sigma_{\ln I}^2 = (\ln I - \ln I_0)^2. \quad (6)$$

根据经典大气闪烁理论, 弱湍流区中光强的对数方差可近似表示为

$$\sigma_{\text{inl}}^2 = aC_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (7)$$

式中  $k$  为波数;  $a$  为常数, 球面波对应  $a = 0.496$ , 平面波对应  $a = 1.23$ 。

通常使用闪烁指数  $\sigma_I^2$  表征大气湍流光强起伏的强弱,  $\sigma_I^2$  (也称为 Rytov 方差) 可表示为

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2}, \quad (8)$$

式中  $\langle I \rangle$  为接收激光信号的总体平均辐射度。对光强的对数方差进行理论分析, 分析结果可以较好地反映大气闪烁的快慢; 在  $\sigma_{\text{inl}}^2 \leq 1$  条件下, 闪烁指数  $\sigma_I^2$  与  $\sigma_{\text{inl}}^2$  成正比。随着大气结构常数和传输距离的增加, 闪烁指数不会无限制增加。针对闪烁指数的测量实验表明, 随着湍流强度的增加, 闪烁指数出现饱和现象; 当  $\sigma_I^2 < 0.3$  时, 湍流较弱; 当  $\sigma_I^2 > 1$  时, 湍流较强。

根据同一光端机在不同飞行高度下通信光与信标光的闪烁情况, 得到飞行高度对激光传输的影响规律为: 在发射功率、飞行距离一定的条件下, 接收光斑闪烁方差随飞行高度的增加而减小<sup>[4-9]</sup>。

### 3.3 大幅度姿态扰动影响分析

由于飞机的振动远比卫星的振动严重, 因此需验证激光通信设备的稳瞄能力。采用振动测试仪测量固定翼飞机的振动情况, 测得结果如图 8 所示。

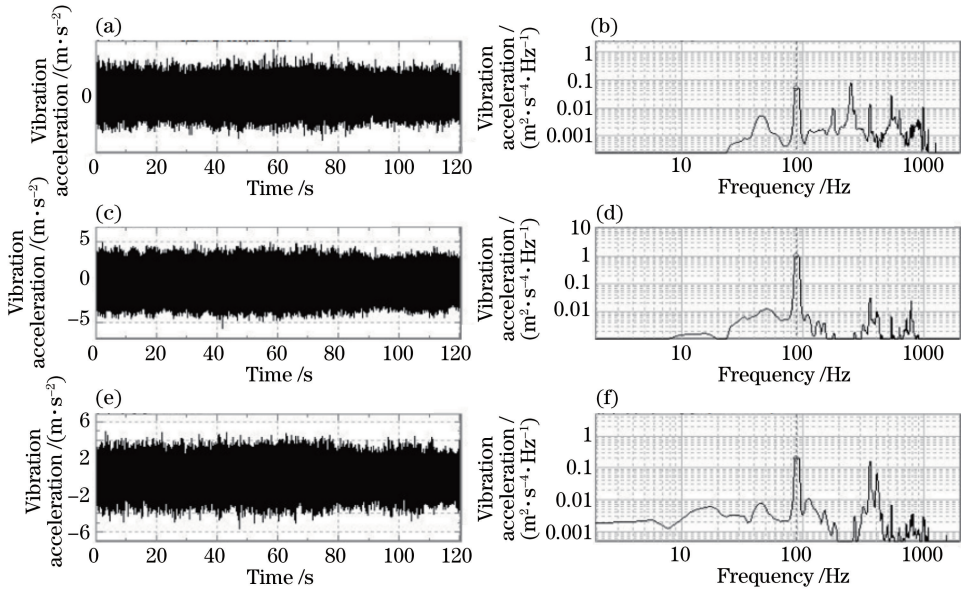


图 8 时域和频域测试曲线。(a) X 方向最大振动加速度为  $3.8 \text{ m/s}^2$  时飞机方位加速度; (b) 振动频率为  $100 \text{ Hz}$  左右时飞机的方位加速度; (c) Y 方向最大振动加速度为  $5.7 \text{ m/s}^2$  时飞机俯仰加速度; (d) 振动频率为  $100 \text{ Hz}$  左右时飞机的俯仰加速度; (e) Z 方向最大振动加速度为  $5.7 \text{ m/s}^2$  时飞机横滚加速度; (f) 振动频率为  $100 \text{ Hz}$  左右时飞机的横滚加速度

Fig. 8 Test curves of time domain and frequency domain. (a) Aircraft azimuth acceleration when the maximum vibration acceleration is  $3.8 \text{ m/s}^2$  in X direction; (b) aircraft azimuth acceleration when vibration frequency is about  $100 \text{ Hz}$ ; (c) aircraft pitch acceleration when the maximum vibration acceleration is  $5.7 \text{ m/s}^2$  in Y direction; (d) aircraft pitch acceleration when vibration frequency is about  $100 \text{ Hz}$ ; (e) aircraft transverse roll acceleration when the maximum vibration acceleration is  $5.7 \text{ m/s}^2$  in Z direction; (f) aircraft transverse roll acceleration when vibration frequency is about  $100 \text{ Hz}$

从图 8 可以看出, 飞机振动主振动点位于  $87.89 \text{ Hz}$  左右, 最大振动频率约为  $1000 \text{ Hz}$ , X 方向、Y 方向、Z 方向的最大振动加速度分别为  $3.8, 5.7, 5.7 \text{ m/s}^2$ , 振动较为强烈。为有效抑制振动特性, 需采用 ATP 系统控制带宽, 使带宽高于平台扰动频率的数倍, 以获得较小的平台振动残差。机载激光通信实验系统采用了粗精复合轴控制系统, 双机在飞艇过程中的粗、精跟踪抑制曲线如图 9、10 所示。粗跟踪的跟踪误差小于  $5 \times 10^{-5} \text{ rad}(3\sigma)$ , 精跟踪的跟踪误差小于  $1.6 \times 10^{-5} \text{ rad}(3\sigma)$ , 可保证飞机在飞行过程中通信视轴的精确对准。

### 3.4 随机运动对捕获策略的影响分析

在机载激光通信实验中, 为了实现高精度指向和减小捕获扫描范围, 优化设计测姿单元与飞机安装的位置关系, 优选高精度双频全球定位系统单元, 合理设计基线长度, 以减小姿态和位置测量误差; 采用高效编码

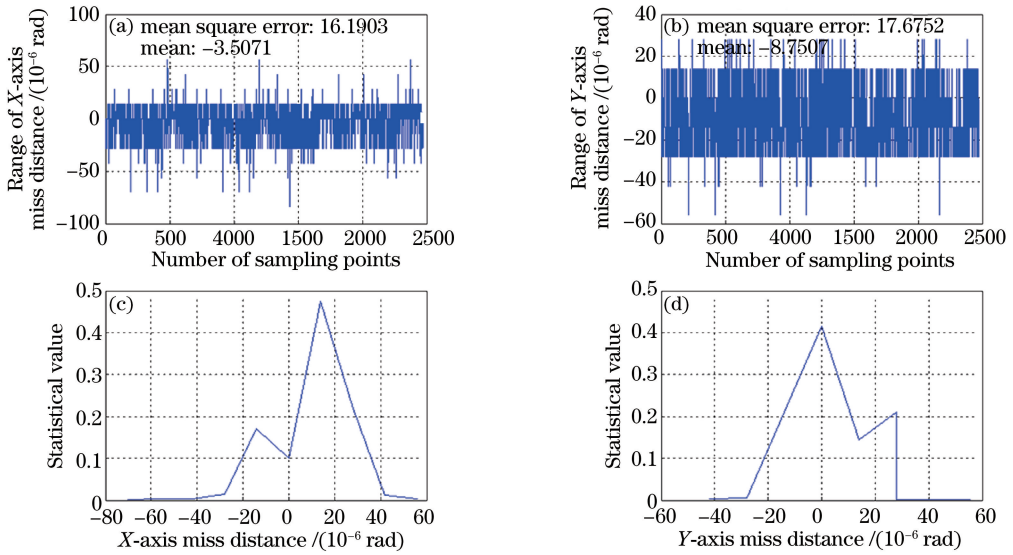


图 9 粗跟踪抑制曲线。(a)(b)粗跟踪误差;(c)(d)图 9(a)、(b)对应的粗跟踪误差统计值

Fig. 9 Coarse tracking inhibition curves. (a)(b) Coarse tracking error; (c)(d) statistical values of coarse tracking error corresponding to Fig. 9(a) and Fig. 9(b)

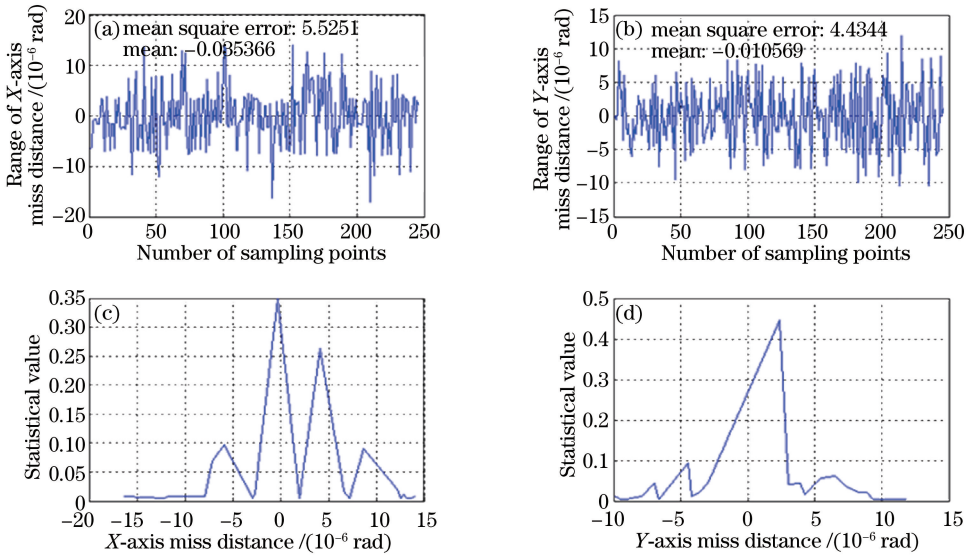


图 10 精跟踪抑制曲线。(a)(b)精跟踪误差;(c)(d)图 10(a)、(b)对应的精跟踪误差统计值

Fig. 10 Fine tracking inhibition curves. (a)(b) Fine tracking error; (c)(d) statistical values of fine tracking error corresponding to Fig. 10(a) and Fig. 10(b)

算法,以缩短数据传送时间和减小动态滞后误差;应用飞行轨迹预测算法,以减小平台高速运动引入的动态误差;多次进行地面静态标校和空中远距离标校,以有效减小系统误差;最终实现的指向精度高于  $5 \times 10^{-3}$  rad。

图 11 为双飞机初始指向阶段对方信标光在观靶相机中的位置图,可以看出,指向后对方信标光在观靶相机上的成像位置距中心距离约为视场对角线距离的 1/12,观靶相机视场角为 3°(对角线),因此指向误差约为 0.25°(4.36 × 10<sup>-3</sup> rad)。由于信标光光斑在粗跟踪视场中的位置只能从照片中测量得到,捕获不确定区域的指向角最大不超出  $5 \times 10^{-3}$  rad。由于飞机的航迹和姿态变化比卫星的随机性强,通过双机动态激光通信野外实验可以有效验证机载光端机的捕获能力。



图 11 初始指向阶段对方信标光在观靶相机中的位置图

Fig. 11 Location map of opposite side beacon in view target camera at initial direction phase

## 4 双动态机载激光通信实验

为确保双机动态机载激光通信实验的顺利开展,首先开展了飞艇与船舶间激光通信实验,验证了光端机的通信性能;然后开展了双直升机间激光通信实验,重点验证了光端机的捕获跟踪能力;成功完成上述实验后,开展了双固定翼飞机间远距离动态激光通信实验。

### 4.1 飞艇与船舶间激光通信实验

飞艇与船舶间激光通信属于斜程信道条件下的空地通信,在空中平台的高度保持不变的条件下,随着距离的增加,自由空间损耗呈平方衰减,飞艇与船舶之间夹角逐渐降低,而大气引起的衰减非线性逐渐增强。

2011年8月—9月,在新疆某地区进行了飞艇与船舶间激光通信验证实验。实验中,将一个光端机安装于飞艇吊舱下,另一个光端机放置在船上,完成了双动态飞艇对船的高速率激光通信演示实验。整个通信距离为20.8 km,通信路线示意图如图12所示。通信速率为1.5 Gbit/s,发射功率为500 mW,接收到的通信光功率如图13所示,计算得到平均误码率为 $0.33 \times 10^{-7}$ 。

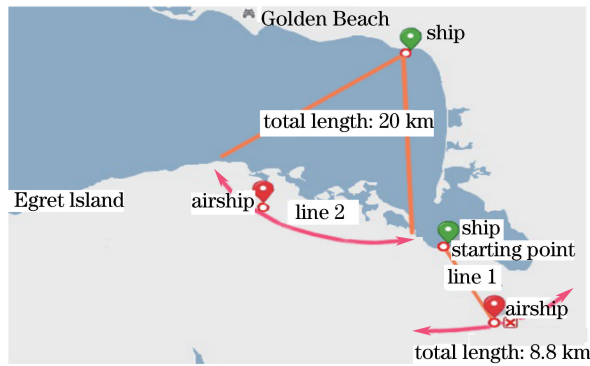


图 12 飞艇与船舶间激光通信路线示意图

Fig. 12 Diagram of laser communication line between airship and ship

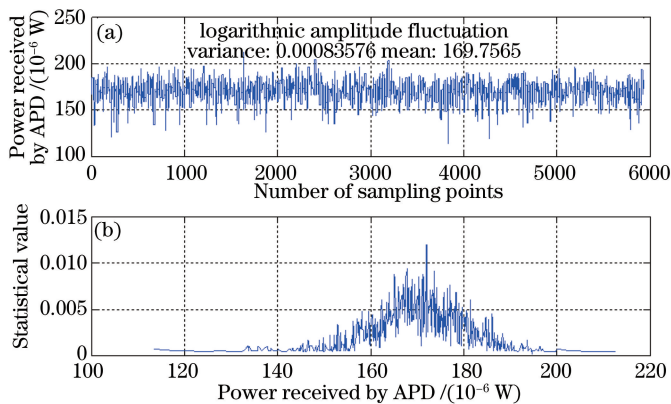


图 13 飞艇与船舶间动态激光通信接收能量分布图。(a)探测器接收到的功率;(b)功率统计值  
Fig. 13 Received energy distribution of dynamic laser communication between airship and ship.

(a) Power received by detector; (b) statistical value of power



### 4.2 双直升机间激光通信实验

与固定翼飞机相比,直升机平台的航迹、姿态更复杂,振动条件更恶劣,双直升机间的快速捕获以及精确跟踪为固定翼飞机间激光通信提供良好的基础。

2011年09月,在黑龙江省某机场进行了双直升机间动态激光通信野外实验,将两台激光通信实验样机分别安装于两台小松鼠直升机机舱内,进行双机飞行实验。两台飞机在指定的高度和距离位置(5 km左右)时开始捕获、跟踪,并进行通信实验,实验过程中逐渐增加通信距离至20 km。双直升机捕获准跟踪实验共进行了6次,全部成功,系统捕获平均时间为18 s,粗跟踪系统跟踪精度高于 $6.2 \times 10^{-5}$  rad,精跟踪系统的跟踪精度高于 $1.6 \times 10^{-5}$  rad。当双直升机高度为800 m、双直升机之间的距离为17 km时,在双直升机运动条件下进行稳定跟踪。实验结果显示,X方位粗跟踪的均方差为 $6.045 \times 10^{-5}$  rad,俯仰跟踪均方差 $6.166 \times 10^{-5}$  rad;精跟踪方位的均方差为 $1.377 \times 10^{-5}$  rad,俯仰跟踪均方差 $1.479 \times 10^{-5}$  rad,如图14、15所示。

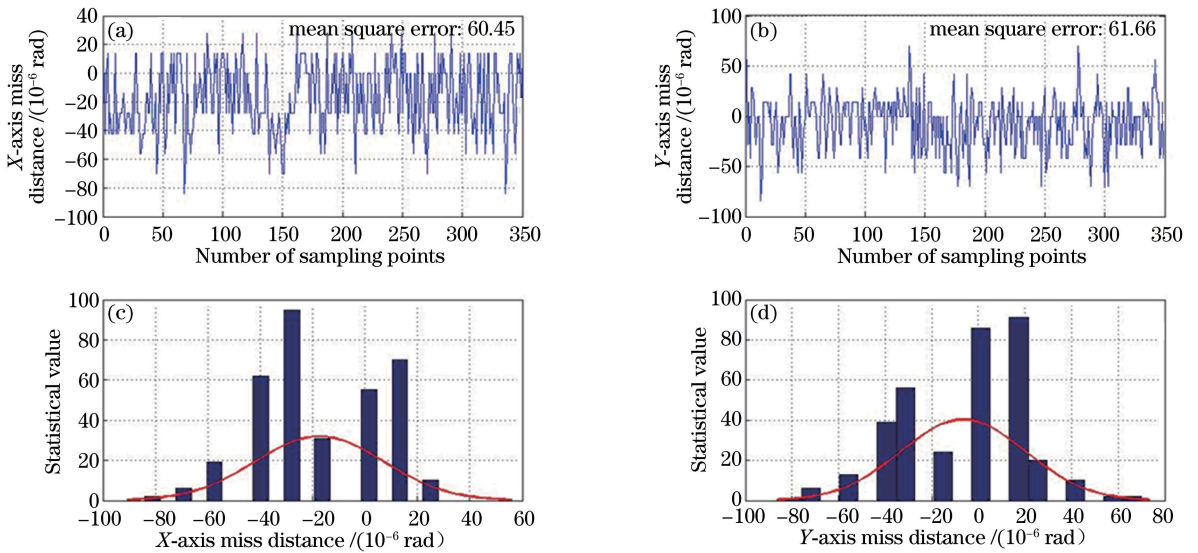


图14 双飞机动态粗跟踪精度。(a)(b)粗跟踪误差;(c)(d)图14(a)、(b)对应的粗跟踪误差统计值

Fig. 14 Dynamic coarse tracking accuracy of double airships. (a)(b) Coarse tracking error; (c)(d) statistical values of coarse tracking error corresponding to Fig. 14(a) and Fig. 14(b)

### 4.3 双固定翼飞机间激光通信实验

2013年8月—9月,在黑龙江省某地区进行了双固定翼飞机间动态远距离激光通信野外实验,实验主要测试了双飞机间远距离捕获跟踪能力和通信性能,双固定翼飞机间激光通信路线示意图如图16所示。整个实验双飞机升高至4.7 km,通信距离为144 km,平均捕获时间小于20 s,通信速率为2.5 Gbit/s,误码率为 $6.2 \times 10^{-5}$ 。

采用惯性导航系统(INS)测量飞机的低频姿态变化,测量结果如图17所示,图17(a)为飞机在横滚方向的姿态角速度,图17(b)为飞机在航向方向的姿态角速度。由图17可知,姿态变化较为明显,横滚方向飞机最大姿态角速度为 $5 (^{\circ})/s$ ,航向方向飞机最大姿态角速度为 $6 (^{\circ})/s$ 。飞机的横滚方向对应转台的俯仰运动,飞机的航向对应转台的方位运动,因此双固定翼飞机间动态远距离激光通信对ATP子系统要求较高,通过粗精复合轴共同作用,最终的跟踪精度高于 $1.65 \times 10^{-5}$  rad。图18、19为双固定翼飞机在双飞机升高至4.7 km、通信距离为144 km的实验条件下实现双稳定跟踪和通信。由18图中测试结果可知,精跟踪方位跟踪均方差为 $1.615 \times 10^{-5}$  rad( $3\sigma$ ),俯仰跟踪均方差为 $1.562 \times 10^{-5}$  rad( $3\sigma$ )。由图19中测试结果可知,探测器的平均接收功率为 $4.209 \times 10^{-5}$  W,接收功率对数振幅起伏方差为 $5.96 \times 10^{-4}$ 。

实验中各项技术指标与美国于2009年10月开展的94 km双飞机间激光通信技术实验相当,且通信距离大于美国双飞机通信距离。因此上述实现的双固定翼飞机间激光通信实验的总体水平与国外实验中的指标相当,达到国际先进水平。

上述3种实验搭载于不同平台。飞艇与船舶间激光通信实验中实验平台的运动特点为低频和中高频扰

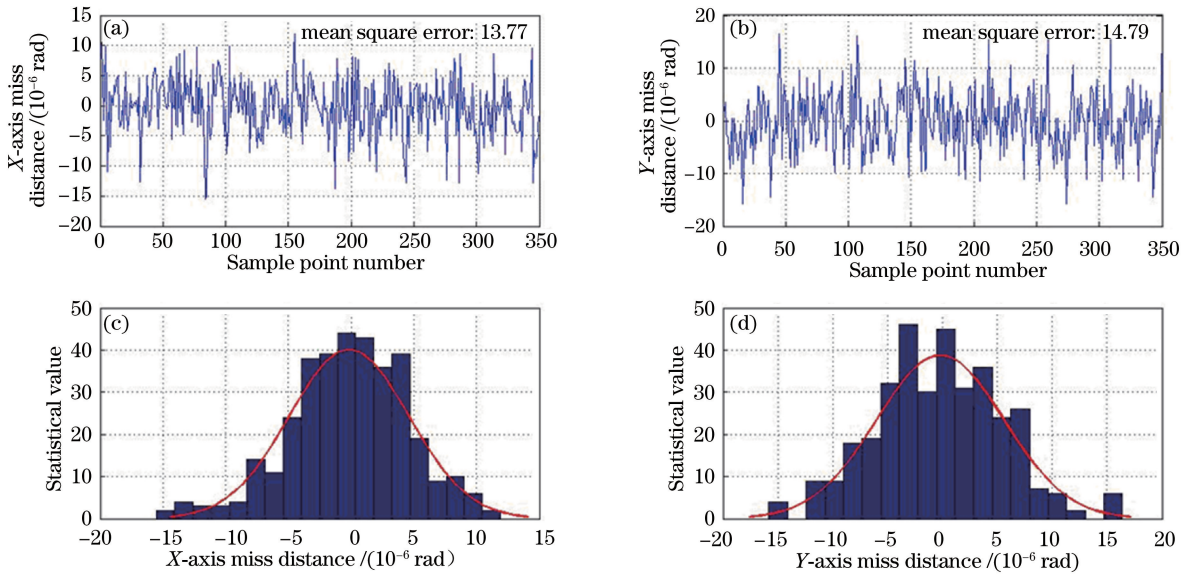


图 15 双飞机动态精跟踪精度。(a)(b)精跟踪误差;(c)(d)图 15(a)、(b)对应的精跟踪误差统计值

Fig. 15 Dynamic fine tracking accuracy of double airships. (a)(b) Fine tracking error; (c)(d) statistical values of fine tracking error corresponding to Fig. 15(a) and Fig. 15(b)

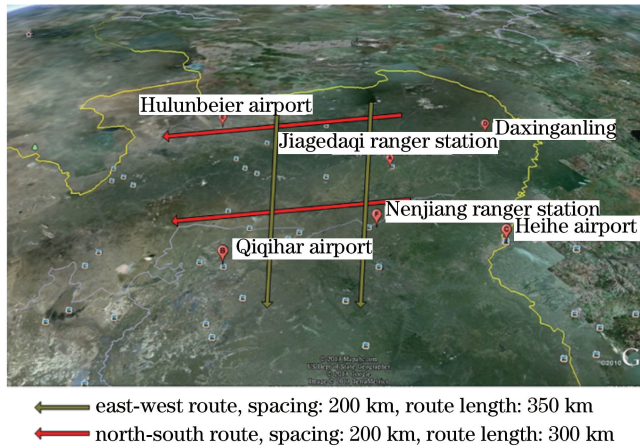


图 16 双固定翼飞机间激光通信路线示意图

Fig. 16 Diagram of laser communication line between double fixed wing airships

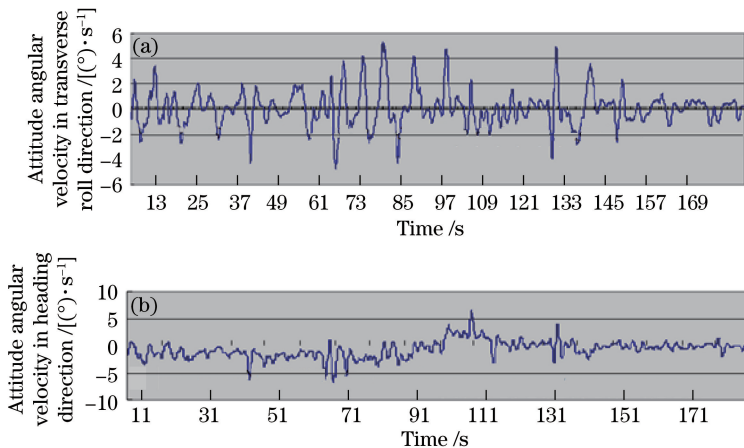


图 17 INS 测得的飞机低频姿态变化。(a)横滚方向;(b)航向方向

Fig. 17 Airship low-frequency attitude variations measured by INS. (a) Transverse roll direction; (b) heading direction

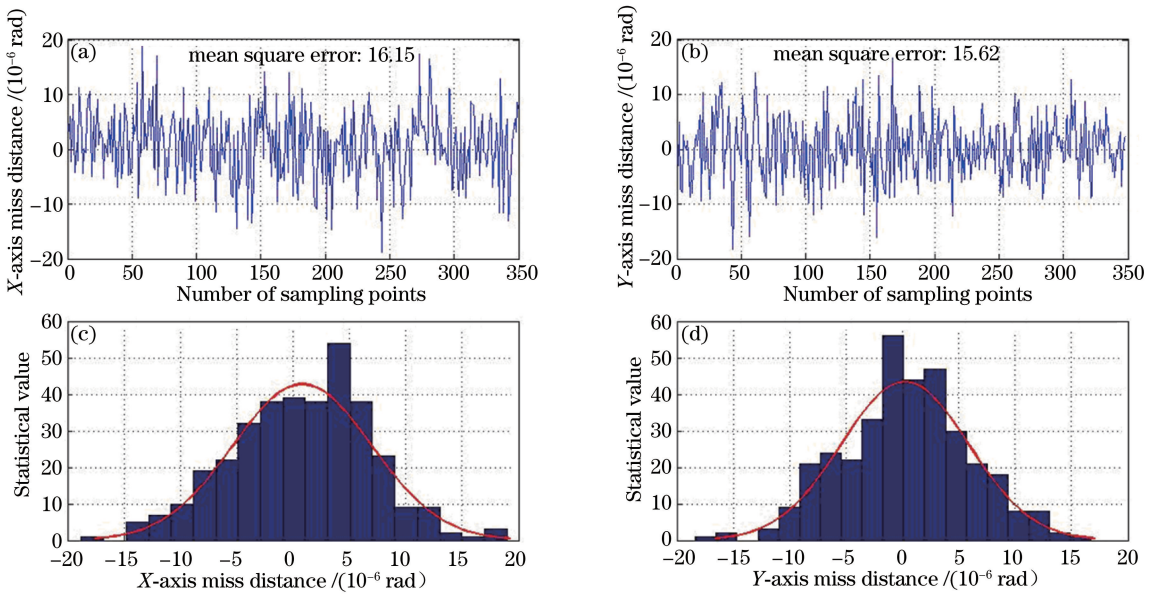


图 18 双飞机动态精跟踪精度。(a)(b)精跟踪误差;(c)(d)图 18(a)、(b)对应的精跟踪误差统计值

Fig. 18 Dynamic fine tracking accuracy of double airships. (a)(b) Fine tracking error; (c)(d) statistical values of fine tracking error corresponding to Fig. 18(a) and Fig. 18(b)

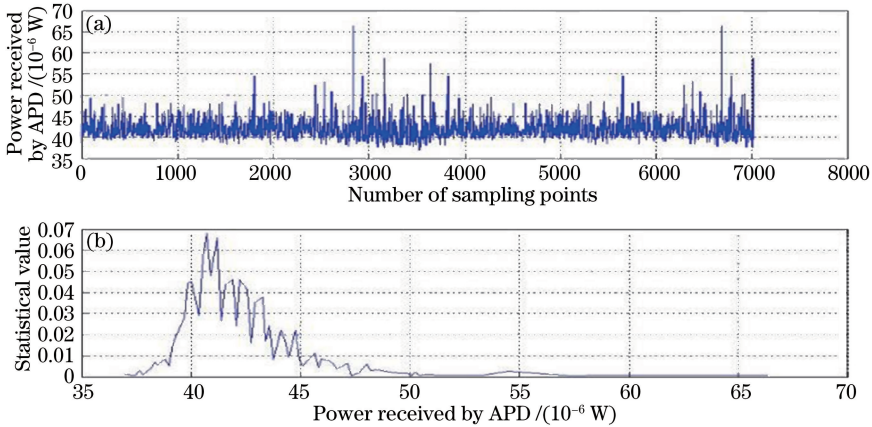


图 19 4.5 km 高度处 APD 接收的光功率分布。(a)探测器接收到的功率;(b)功率统计值

Fig. 19 Optical power distribution received by APD at the height of 4.5 km. (a) Power received by detector; (b) statistical value of power

动都较小,需要粗跟踪系统具有较强的抑制能力。双直升机间激光通信实验中实验平台的运动特点为低频和中高频扰动都较大,该实验的平台运动环境最差,对 ATP 单元要求最高。双固定翼飞机间激光通信实验中实验平台的运动特点为低频扰动适中,中高频扰动较大,对精跟踪控制要求较高;但该激光通信系统中 ATP 单元经过 3 次实验,完全满足不同平台的捕获和跟踪要求,具有较好的工作性能,为建立通信链路提供坚实的基础。

## 5 结 论

以机载激光通信实验为基础,介绍了激光通信实验中的技术难点并提出解决方案。本文实验为国内首次机载激光通信实验,填补了国内机载远距离高速率激光通信实验方面的空白,为空间激光工程化应用提供了技术基础。



## 参 考 文 献

- 1 Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0314001.  
王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0314001.
- 2 Cao Yang, Zhao Mingfu. Research on tracking theory between airborne platforms for free space optical communications [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(2): 255-258.  
曹 阳, 赵明富. 机载空间激光通信平台间跟踪理论研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(2): 255-258.
- 3 LÜ Chunlei, Tong Shoufeng, Song Yansong. 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.
- 4 Xing Jianbin, Xu Guoliang, Zhang Xuping, *et al.* Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1850-1852.  
邢建斌, 许国良, 张旭莘, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1850-1852.
- 5 Liu Houtong, Chen Liangfu, Su Lin. Theoretical research of Fernald forward integration method for aerosol backscatter coefficient inversion of airborne atmosphere detecting lidar[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 064204.  
刘厚通, 陈良富, 苏 林. Fernald 前向积分用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演的理论研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 064204.
- 6 Xiang Jingsong, Hu Yu. Study on characteristics of distributed array receiver for satellite to ground laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1297-1302.  
向劲松, 胡 渝. 星地激光通信中分布式接收阵列的特性研究[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1297-1302.
- 7 Masahiro T. Acquisition and tracking control of satellite-borne laser communication systems and simulation of downlink fluctuations[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 4-12.
- 8 Louthain J A, Schmidt J D. Anisoplanatism in airborne laser communication[J]. Optics Express, 2008, 16(14): 10769-10785.
- 9 Skormin V A, Tascillo M A, Busch T E. Adaptive jitter rejection technique applicable to airborne laser communication systems[J]. Optical Engineering, 1995, 34(5): 1263-1268.
- 10 Nikulin V, Khandekar R, Sofka J, *et al.* Acousto-optic pointing and tracking systems for free-space laser communications [C]. SPIE, 2005, 5892: 58921C.
- 11 Sofka J, Nikulin V. Bit error rate optimization of an acousto-optic tracking system for free-space laser communications [C]. SPIE, 2006, 6105: 61050L.
- 12 Tolker-Nielsen T, Oppenhaeuser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4 SILEX[C]. SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- 13 Ho T H, Milner S D, Davis C C. Fully optical real-time pointing, acquisition, and tracking system for free space optical link[C]. SPIE, 2005, 5712: 81-92.
- 14 Cao Y, Guo J, Huang L W. Variable structure multiple model tracking for airborne laser communication systems[C]. SPIE, 2013, 8906: 890607.
- 15 Louthain J A, Schmidt J D. Integrated approach to airborne laser communication[C]. SPIE, 2008, 7108: 71080F.
- 16 Maynard J A, Begley D. Airborne laser communications: past, present, and future[C]. SPIE, 2005, 5892: 58920A.
- 17 Jiang H, Liu G, Yin F, *et al.* Laser communications technology with airborne platform[C]. SPIE, 2006, 6031: 603102.
- 18 Biswas A, Page N, Neal J, *et al.* Airborne optical communications demonstrator design and pre-flight test results[C]. SPIE, 2005, 5712: 205-216.
- 19 Bagley Z C, Hughes D H, Juarez J C, *et al.* Hybrid optical radio frequency airborne communications [J]. Optical Engineering, 2012, 51(5): 055006.
- 20 Meng L, Wang C, Qian C, *et al.* Method of high speed flow field influence and restrain on laser communication[C]. SPIE, 2013, 8906: 890623.