

# 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究

姜会林<sup>1,2</sup> 江 伦<sup>1,2\*</sup> 宋延嵩<sup>1,2</sup> 孟立新<sup>1,2</sup> 付 强<sup>1,2</sup> 胡 源<sup>1,2</sup> 张立中<sup>1,2</sup> 于笑楠<sup>1,2</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** 为了实现一点对多点同时空间激光通信,对系统的光学跟瞄技术进行了研究。简述了系统总体方案,推导了捕获、瞄准、跟踪(APT)系统工作流程、捕获对准和粗跟踪过程中脱靶量与反射镜转动之间的关系。对跟瞄过程中的多执行器联动控制、图像处理识别与定位和双镜交接低误码控制等关键技术进行了深入研究。介绍了多点同时激光通信原理样机与实验。实验结果表明:原理样机的同时空间激光通信终端达3个,通信范围方位角为360°,俯仰角为 $\pm 19^\circ$ ,从而验证了光学原理与跟瞄技术的可行性。

**关键词** 光通信;一点对多点;激光通信;跟瞄控制

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0405008

## Research of Optical and APT Technology in One-Point to Multi-Point Simultaneous Space Laser Communication System

Jiang Huilin<sup>1,2</sup> Jiang Lun<sup>1,2</sup> Song Yansong<sup>1,2</sup> Meng Lixin<sup>1,2</sup> Fu Qiang<sup>1,2</sup> Hu Yuan<sup>1,2</sup>  
Zhang Lizhong<sup>1,2</sup> Yu Xiaonan

<sup>1</sup>*NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022 China*

<sup>2</sup>*Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022 China*

**Abstract** In order to realize one-point to multi-point simultaneous space laser communication technology, the optical principle and APT (acquisition point and track) technology are studied. The overall scheme is introduced, and then the working process of APT system and relationship between miss distances and mirror rotation angle in the acquisition and coarse tracking process are analyzed. Then, the key technologies such as multi-actuator linkage control, image processing recognition and location, low error control when two mirror handover is in acquisition and coarse tracking process are analyzed. Finally, the prototype and experiment of one-point to multi-point simultaneous laser communication are introduced. Experimental results show that three terminals can communicate simultaneous, and the communication angle is 360° in azimuth and  $\pm 19^\circ$  in pitch. This indicates that the optical principle and APT technology can meet the requirements of one-point to multi-point space simultaneous laser communication.

**Key words** optical communications; one-point to multi-point; laser communication; tracking control

**OCIS codes** 060.4510; 060.4250; 060.4230

## 1 引 言

空间激光通信具有通信速率高、抗干扰和抗截获能力强、保密性好、光端机轻小型等突出优点。美国、日本和欧洲等已开展了卫星-卫星、卫星-地面、卫星-飞机、飞机-飞机、飞机-地面、飞艇-地面等多种链路的

收稿日期: 2014-10-29; 收到修改稿日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91338116)

作者简介: 姜会林(1945—),男,博士,教授,主要从事空间光电技术方面的研究。E-mail: HLJiang@cust.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jlciomp@163.com

激光通信实验。但是,目前空间激光通信的研究与实验的形式基本上都是一点对一点<sup>[1-7]</sup>,不仅影响了多平台间高速信息传输与中继,而且影响了天空地一体化信息网络的建设。如何实现一点对多点空间激光通信,已受到国际上的高度重视。

日本提出激光与微波通信相结合的双层低轨道(700 km 和 2000 km)全球通信组网方案,其上层采用激光通信,下层采用微波通信<sup>[8]</sup>;美国提出 TSAT(Transformational Satellite Communications Systems)计划<sup>[9]</sup>,其中的激光通信即是一对二、一对三和一对多,预计通信速率为 10~40 Gb/s,但都没有涉及具体激光通信一对多技术。2002 年和 2005 年有两个美国专利提出激光通信组网的方案,其中专利一在反射元件放置多个收发端,通过调整收发端位置,实现不同点、不同距离的空间激光通信<sup>[10]</sup>;专利二利用 Ritchey-Chrétien(R-C)望远结构,焦面处放置  $N \times N$  的光纤阵列,提供较大的焦平面,实现单个光学望远结构的一点对多点空间激光通信<sup>[11]</sup>。这两种方案视场扩大有限,至今尚未见到其实验结果的报道。

本文在分析了多种可能的光学原理基础上,提出了一对多同时空间激光通信方案<sup>[12-13]</sup>,重点阐述了光学跟瞄技术这个主要难题。

## 2 一对多同时激光通信光学方案

### 2.1 总体组成与各分系统功能

在提出以旋转抛物面为基底的光学天线原理的基础上,进而提出一点对多点同时激光通信的光学总体方案,如图 1 所示,图中 PZT 为压电陶瓷。

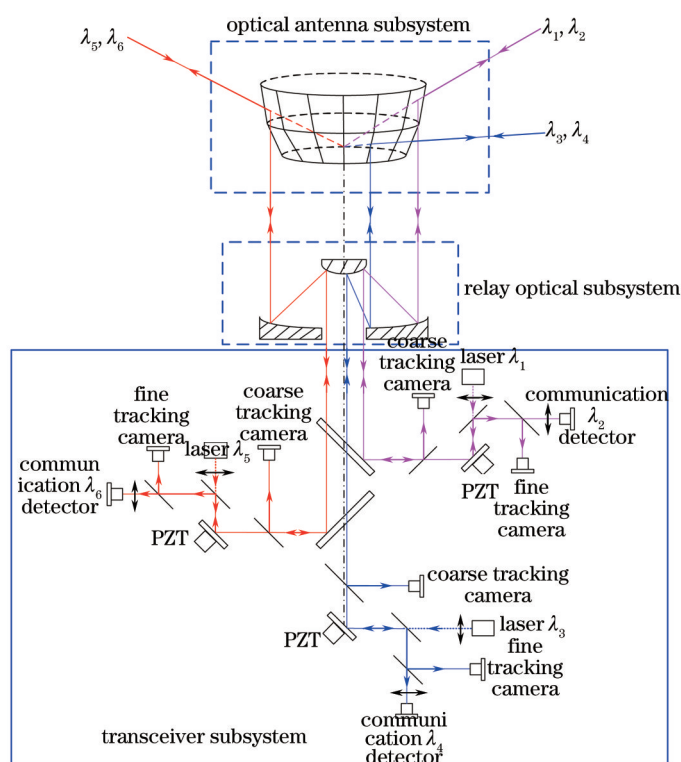


图 1 一点对多点同时激光通信光学总体方案图

Fig.1 Overall scheme of one-point to multi-point simultaneous space laser communication system

光学总体方案中含三个分系统,一是光学天线分系统,二是中继光学分系统,三是收发分光分系统。光学天线分系统将不同方向的入射光线都反射成与抛物面对称轴平行的平行光束,并完成目标的捕获对准和跟踪;中继光学分系统将光学天线反射的平行光束缩束,使光束进入收发分光系统,收发分光系统将不同方向(波长)入射光分光,分别完成各自链路的发射与接收。

### 2.2 性能指标

系统可实现的性能指标如表 1 所示。

表 1 系统性能指标

Table 1 Technology parameters of system

Parameter	Value
Terminal number of multi-point communication system	$\geq 3$
Communication range /( $^{\circ}$ )	360 (azimuth); 30~100 (pitch)
Communication wavelength /nm	1550
Communication rate /(Gb/s)	2.5
Communication error rate	$10^{-7}$

### 3 一对多通信跟瞄总体技术

#### 3.1 捕获、瞄准、跟踪(APT)总体技术分析

一对多同时激光通信系统的捕获、瞄准、跟踪(APT)分系统的工作流程,主要分为引导指向、捕获对准、粗跟踪、精跟踪和通信等五个阶段。

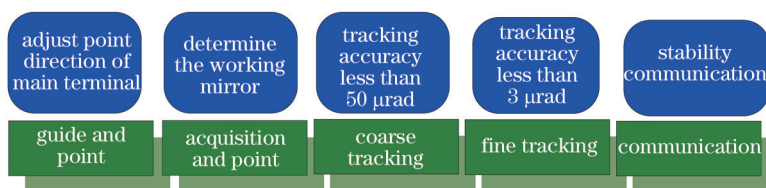


图 2 一对多同时激光通信工作流程图

Fig.2 Work process of one point to multi-point simultaneous space laser communication system

1) 明确任务需求,即多点通信的目标数量和要求。借助 GPS/INS(Global Positioning System/Inertial Navigation System)等确定各目标的位置、姿态与运动轨道,进而调整主光端机的空间指向,以便适应“一对多”同时通信的任务需求。

2) 进行捕获对准,即根据多目标的位置、姿态和运动轨道,确定和粗调对应的工作反射镜,实现捕获并对准(其原理见下文)。

3) 在捕获对准的基础上,进行粗跟踪,即使得工作反射镜的旋转能跟上通信目标的运动及振动与姿态变化,粗跟踪精度可达到约  $50 \mu\text{rad}$ (其原理见下文)。

4) 由于粗跟踪伺服带宽等限制,对相对运动引起的动态滞后误差和平台振动残差等抑制能力有限,粗跟踪精度不能直接满足通信要求,需要在收发分系统中增加精跟踪单元,以便对粗跟踪残余误差进一步抑制,精跟踪精度可达到约  $3 \mu\text{rad}$ 。

5) 在稳定跟踪的前提下,实现双向动态通信。

#### 3.2 捕获对准分析

根据多目标的当前位置、姿态、运动轨道等,确定对应的工作反射镜(包括主反射镜和“协助”反射镜),如图 3 所示。

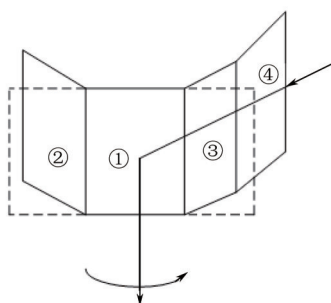


图 3 卫星相对镜面运动关系示意图

Fig.3 Kinematic relationship between satellite and the mirror

以反射镜 1 作为当时的主反射镜,2 和 3 作为“协助”反射镜,分别转动  $\pm\theta$  角,与 1“共面”平行。然后,假设对方目标在水平方向上转动  $\beta$  角,如图 3 所示,则反射镜 1、2、3 都同方向转动  $\beta$  角。

当目标运动到一定角度时,反射镜3成为主反射镜,1和4为“协助”反射镜,而2已达到极限转角,完成了“协助”作用,返回到其原始位置。

再分析对方目标在垂直方向上的运动或振动。若在垂直方向上产生的角度变化为 $\gamma$ 时,则对应的反射镜在垂直方向上转动 $\gamma/2$ 即可补偿,仍然保持对准状态。其理由是根据反射定律,当入射光线方向改变 $\gamma$ 时,镜片转动 $\gamma/2$ ,则反射光线方向不变。

经过上述捕获对准过程,使对方目标运动中发来的光束,能够基本通过旋转抛物面的焦点,从而能使其近似平行于旋转轴反射后进入后续光学系统中,即对于运动目标,基本上“捕得着”,“对得准”。

### 3.3 粗跟踪分析

3.2节实现的“捕得着”,“对得准”,即对方目标的信标光进入了主光端机收发分光分系统的视场。下面讨论如何进行闭环跟踪,使入射光束到达视场中心。

先分析脱靶量的表达式。如图4所示,若测出的脱靶量 $\Delta$ ,则其形成的像方视场角为 $u'_p$ ,且 $\tan u'_p = \frac{\Delta}{f}$ 。进一步推出对应卡式系统主镜物方视场角为 $u_p$ ,即 $\tan u_p = \frac{\tan u'_p}{\Gamma}$ ,其中 $\Gamma$ 为卡式系统倍率。对应光学天线反射后的光束也有 $u_p$ 偏折角,称此时的 $u_p$ 为角度脱靶量。

如果光学天线的反射光线转角为 $-u_p$ ,即补偿了脱靶量 $u_p$ ,故需求反射镜转动多大角度可能实现补偿。

下面分析反射镜微量转动引起的反射光线变化规律。

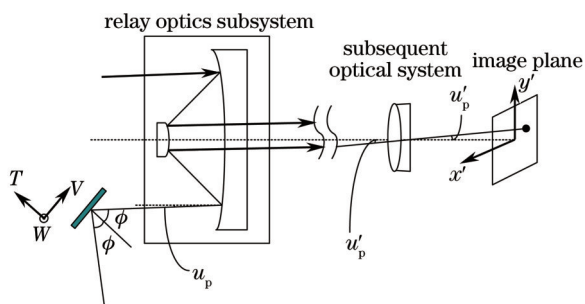


图4 脱靶量与反射镜转动之间的关系示意图  
Fig.4 Kinematic relationship between miss distance and the mirror rotation

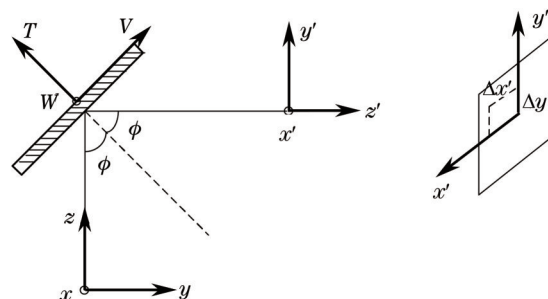


图5 平面反射镜及反射光坐标变化图  
Fig.5 Coordinates transforms of plane mirror and reflected light

由平面镜微量转动定理<sup>[14-15]</sup>:

$$\Delta A' = (-1)^{n-1} \cdot \Delta\theta \cdot P' + \Delta\theta \cdot P, \quad (1)$$

式中 $\Delta\theta$ 为平面反射镜微量转角; $P$ 为反射镜转轴矢量; $P'$ 为 $P$ 在像空间的共轭矢量; $n$ 为反射次数。

1) 当反射镜绕 $W(x)$ 轴转,此时: $P = x = x' = P'$ ,  $n = 1$ ,则

$$\Delta A'_{(w,x)} = 2 \cdot \Delta\theta \cdot W' = 2 \cdot \Delta\theta \cdot x'. \quad (2)$$

由图3可知,产生了 $y'$ 方向的光轴偏,即

$$\mu_{y'} = 2 \cdot \Delta\theta. \quad (3)$$

2) 当反射镜绕 $V$ 轴转,此时: $P = V = V' = P'$ ,  $n = 1$ ,则

$$\Delta A' = 2 \cdot \Delta\theta \cdot V', \quad (4)$$

式中 $V' = y' \cos \phi + z' \sin \phi$ ,其中绕 $y'$ 转,产生 $x'$ 方向的光轴偏,即

$$\mu_{x'} = 2 \cdot \Delta\theta \cdot \cos \phi, \quad (5)$$

绕 $z'$ 转,产生像倾斜,即

$$\mu_{z'} = 2 \cdot \Delta\theta \cdot \cos \phi, \quad (6)$$

式中 $\phi$ 为入射到反射镜上的光线入射角,像倾斜可不予考虑(1)式表示反射镜转 $\Delta\theta$ 时,产生的光轴偏角 $\mu_{y'}$ 和 $\mu_{x'}$ ,即对应的角度脱靶量 $u_p$ 的 $y'$ 和 $x'$ 方向分量。

由此分析可知,只要测出了探测器上的脱靶量,就可计算出反射镜应补偿的转角。

## 4 一对多通信跟瞄关键技术

### 4.1 单探测器多执行器联动控制跟踪技术

在对目标进行跟踪时,为保证通信能量利用率,需要使用多反射镜同时对同一目标进行跟踪。如果两镜面平行度不够则会产生多光斑现象,增加系统的误码率,因此单探测器多执行器联动控制跟踪技术很重要。其实现策略是其中一片反射镜作为主跟踪器对光斑进行跟踪,其余镜片作为从跟踪器,随动主跟踪器转动。如果从跟踪器和主跟踪器存在误差、或从跟踪器间存在误差,在图像系统中将会出现光斑破碎或多光斑现象。通过微调从控制器,使图像中光斑近似成高斯分布,保证主镜和从镜的平行性。

本文提出的单探测器多执行器工作模式,其唯一的探测器只为主反射镜提供脱靶量形成闭环系统,从反射镜由主反射镜的角度传感器提供角度偏转信息,整个系统的结构框图如图6所示。

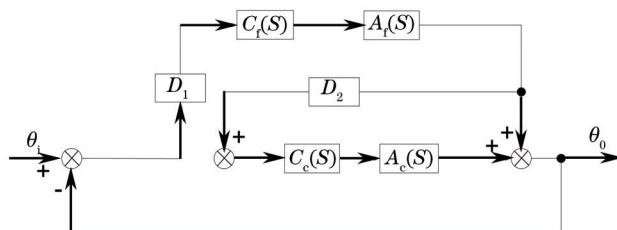


图6 单探测器多执行器系统结构框图

Fig.6 Single detector control system structure diagram

令  $G_c = C_c \times A_c$ ,  $G_r = C_r \times A_r \times D_1$ ,  $C_c$ 、 $C_r$  分别为每一回路中的补偿函数,  $A_c$ 、 $A_r$  分别为反射镜控制器模型函数,  $D_2$  为角度检测模型函数,  $D_1$  为探测器模型函数。

整个系统的传递函数如(7)式所示

$$\Phi(S) = \frac{G_c + G_r D_2 G_c + G_r}{(1 + G_c)(1 + G_r)} \quad (7)$$

为保证从跟踪器与主跟踪器之间误差很小,需要从跟踪镜片与主跟踪镜片在跟踪过程中保持一致,由于从跟踪器和主跟踪负载基本一致,只需保证其实时控制一致即可。本文提出理想相关模型匹配方法,整个伺服控制模型如图7所示。

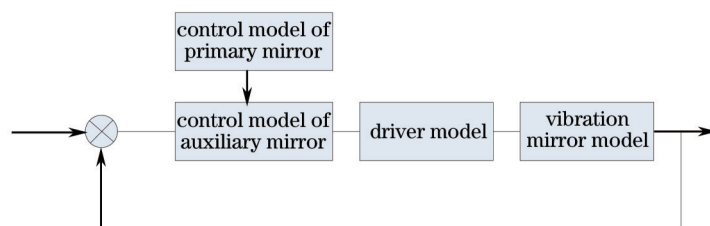


图7 多执行器伺服控制系统图

Fig.7 Multi-actuator servo control system diagram

可以将跟踪稳定回路二阶传递函数状态方程设为

$$\dot{x}' = Ax + Bu, \quad (8)$$

假设主跟踪回路的传递函数状态方程模型为

$$\dot{x}_n' = A_n x_n + B_n r, \quad (9)$$

式中  $x' \in \mathbf{R}^n$  是对象的状态参量,  $x_n' \in \mathbf{R}^n$  是理想模型的状态参量,  $u \in \mathbf{R}^n$  是控制参量,  $r \in \mathbf{R}^n$  是输入参量。假设  $A$  与  $B$  可以自由设置,要使理想模型稳定,就要求  $A_n$  的特征根具有负实部,理想模型和对象之间的跟踪误差  $[e(t) = x(t) - x_n(t)]$  满足渐进趋于零。

理想模型和对象间误差微分后得

$$e'(t) = x'(t) - x_n'(t), \quad (10)$$

可求得模型与对象之间的参考误差动态方程如下:

$$e'(t) = x'(t) - x_n'(t) = Ax(t) + Bu(t) - A_n x_n(t) - B_n r(t). \quad (11)$$

经过整理后可以得到:

$$e'(t) = Ae(t) + (A - A_n)x_n(t) + Bu(t) - Br(t). \quad (12)$$

对于任意给定的对象和理想模型,达到完全模型跟踪的充分条件是误差的任意阶微分在任何时间都为零。对应误差零阶微分则有

$$x_n = x(t),$$

如果有

$$(BB^+ - I)(A - A_n) = 0, \quad (13)$$

$$(BB^+ - I)B_n = 0, \quad (14)$$

在任意时间都成立,则该误差的所有零阶和高阶微分都将为零,即被控对象的状态能够完全跟踪参考模型,(13)和(14)式是实现完全模型跟踪的充分必要条件,其中  $B^+$  是矩阵  $B$  的伪逆。本文在设计上根据完全模型的匹配条件,实现了理想相关模型匹配,即从控制器和主控器的伺服控制模型一致,保证了组网单探测器多执行器联动控制跟踪精度。

### 4.2 基于 FPGA 光斑识别定位技术

FPGA(Field-Programmable Gate Array)具有高集成度、高可靠性、灵活性强等特点,已经被越来越广泛的应用在复杂算法的实现过程。通过 FPGA 处理芯片采集 CCD(Charge-Coupled Device)传感器图像信息,实现图像的滤波、光斑提取、中心判断、脱靶量输出和图像显示等,图 8 为整个功能实现流程图,图中 VGA 为视频图形阵列。

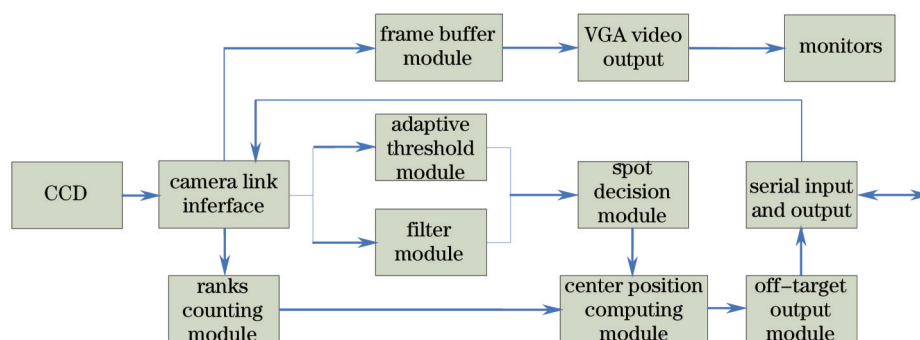


图 8 图像处理算法流程图

Fig.8 Image processing algorithm flow chart

为实现光斑中心位置的准确判读,采用带阈值比较的质心算法。该算法在背景不是特别复杂、弱湍流影响条件下,比较行之有效;不足之处是在很短的时间内需要解析一帧所有像素信息后才能计算质心,对处理器的运算能力要求较高;同时在复杂背景下,如果图像中混入强度足够大的噪声(覆盖范围不一定大),或者在强湍流影响下,光束在探测器上形成的是散斑,质心计算会产生较大的误差,造成跟踪性能严重下降。由于传感器一般放置在透镜的焦点附近,所接收的光斑强度分布往往接近高斯分布。设探测器接收到的光斑图像由  $m \times n$  个像素组成,则光斑质心  $(X, Y)$  计算公式可表示为

$$X = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_i [p_{ij}(x, y) - T]}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (p_{ij} - T)}, \quad (15)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} y_i [p_{ij}(x, y) - T]}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (p_{ij} - T)}, \quad (16)$$

式中  $x_i, y_i$  为每个像素所对应的探测器靶面坐标;  $p_{ij}(x, y)$  为每个像素所对应的灰度值,由原始图像灰度值和图像噪声两个部分构成;  $T$  为系统所设定的阈值,为提高光斑质心算法检测精度,需要使阈值电平与背景电平一致。对于高斯光斑其质心估值误差方差由(17)和(18)式决定:

$$\sigma_x = \frac{X^2 m \sigma_0^2 + \sigma_0^2 \sum_i x_i^2}{(S_{\max} 2\pi a_x a_y)^2 + m \sigma_0^2} + \frac{1}{48\pi a_x a_y}, \quad (17)$$

$$\sigma_y = \frac{Y^2 m \sigma_0^2 + \sigma_0^2 \sum_i y_i^2}{(S_{\max} 2\pi a_x a_y)^2 + m \sigma_0^2} + \frac{1}{48\pi a_x a_y}, \quad (18)$$

式中  $a_x, a_y$  为光斑长轴、短轴,  $\sigma_0^2 = \text{Var}[n_i]$  为噪声方差,  $S_{\max}$  为灰度最大值,  $m$  为图像像素总和。

通过上述中心算法,得到准确的光斑脱靶量,为伺服系统的准确跟踪奠定基础。

### 4.3 双镜交接低误码控制技术

在双镜交接过程中首先考虑能量利用率问题,反射镜先交接平行,然后预停止工作的镜片再进行偏转,回到初始位置。在镜片交接过程中,会出现两镜片先后交接离开过程,也会出现两次双光斑情况。为了增加通信的可靠性,在双镜交接过程加入了滤波策略,即使出现干扰光斑,也可以正确实现位置移动,保证在整个双镜交接过程中有较好的通信。整个预测过程采用了相关卡尔曼滤波策略,具体实现过程如下。

已知组网目标源以恒定速度运动,反射镜1运动位置为  $x(k)$ ,反射镜2运动位置为  $y(k)$ ,则可得其状态方程:

$$X(k+1) = \Phi X(k) + G W(k), \quad (19)$$

式中  $X(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ x'(k) \\ y(k) \\ y'(k) \end{bmatrix}$  为对应反射镜的速度和位置当前值,参数矩阵  $\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,增益矩阵  $G = \begin{bmatrix} T/2 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & T/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,

$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$  为现在状态控制量,  $T$  为系统传递参数。

观测方程

$$Z(k) = H X(k) + V(k), \quad (20)$$

其中参数  $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $V(k)$  为状态控制量。

根据前一次反射镜位置与速度估计值,计算预测值

$$X(k|k-1) = \Phi X(k-1|k-1), \quad (21)$$

$$v(k) = Z(k) - H X(k|k-1). \quad (22)$$

根据前一次得到的滤波误差协方差,计算预测误差方差

$$P(k|k-1) = \Phi P(k-1, k-1) \Phi^T + \Gamma Q(k-1) \Gamma^T, \quad (23)$$

计算滤波增益

$$K(k) = P(k|k-1) H^T [H P(k|k-1) H^T + R(k)]^{-1}, \quad (24)$$

得到当前时刻状态最佳估计:

$$X(k|k) = X(k|k-1) + K(k) v(k), \quad (25)$$

得到当前时刻滤波误差协方差:

$$P(k|k) = [I - K(k) H] P(k|k-1). \quad (26)$$

将(24)式作为初始估计,开始新一轮递推。以此递推,则可实现位置误差的预测,在组网系统反射镜交接过程中,需要对目标位置和反射镜位置进行预测,卡尔曼滤波适用于此种条件,可有效提高精度与可靠性。

### 4.4 取得的跟瞄准效果

根据以上技术方案,通过原理样机的伺服系统进行了跟踪测试,其动态跟踪精度优于  $50 \mu\text{rad}$ ,拼接镜面的联动精度优于  $5 \mu\text{rad}$ ,交接误码率优于  $1 \times 10^{-9}$ 。实验测试图如9所示。图10为反射镜交接过程中光斑位置变化情况。

## 5 原理装置与实验测试

### 5.1 原理装置

装置采用“1主”“2从”的方式,“1主”包括多反射镜拼接天线、中继光学分系统和收发分光分系统组件

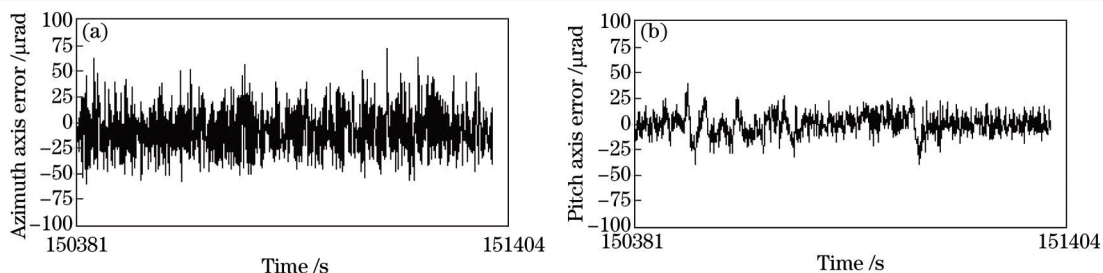


图9 光斑跟踪误差曲线。(a);方位轴;(b)俯仰轴

Fig.9 Spot track error curves. (a) Azimuth axis; (b) pitch axis

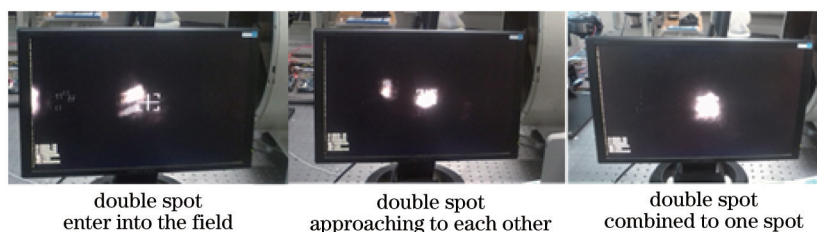


图10 组网跟踪图像效果图

Fig.10 Tracking net image renderings

等;“2从”包括808 nm波段运动通信目标和1550 nm波段运动通信目标,两个运动通信终端发射通信光信号,由主通信终端(1主)同时与两个运动通信终端进行通信。系统中运动通信终端一个是采用口径为150 mm光管作为目标源,模拟第一个运动通信终端。另一个采用口径为200 mm的目标源,模拟第二个运动通信终端。既要实现检验单个反射镜驱动机构性能,还要模拟相邻反射镜驱动机构交接功能和“协助”功能,由此实现对多点激光通信的原理验证。实验室原理演示验证装置如图11所示。

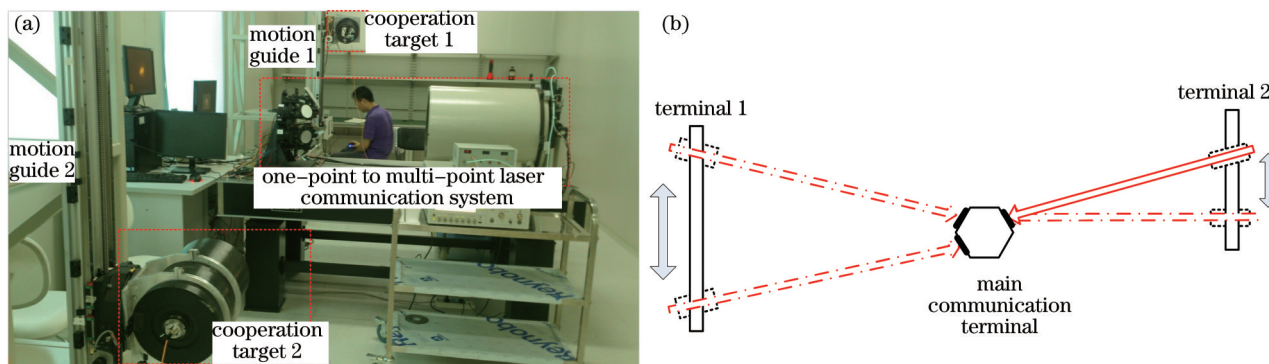


图11 (a)原理演示装置现场与(b)“一对二”示意图

Fig.11 (a) Demonstration device and (b) schematic diagram of “one-to-two”

## 5.2 实验测试

经过专家测试,系统实验结果如表2所示。

表2 系统实验结果

Table 2 Experiment results of the system

Parameter	Value
Terminal number of multi-point communication system	3
Communication range (limited by device) / (°)	360 (azimuth) 38 (pitch)
Communication wavelength / nm	1550
Communication rate / (Gp/s)	2.5
Communication error rate	$4.03 \times 10^{-10}$

## 6 结 论

开展了一点对多点同时空间激光通信方案与跟瞄技术研究,在光学原理、关键技术、原理实验等方面取



得了重要进展,其目的就是为了在利用空间激光通信速率高、抗干扰性好、轻小型化等优点的同时,克服其只能点对点通信的瓶颈,将激光通信更好地应用到实际工程中去。其应用前景主要有以下几个方面:

1) 可直接应用于小卫星群“一对多”的激光通信,有利于形成小卫星之间的通信网络;

2) 可用于预警机群“一对多”激光通信中,有利于提高飞机间的通信安全性;

3) 还可以拓展到太空中的地球静止轨道(GEO)、低地球轨道(LEO)、空间站、临近空间的浮空器、大气层中的飞机以及地面站和舰船,形成天空陆海一体化的立体空间通信网络,对于我国提高信息化水平、保障空间信息安全,具有重大的军事意义和经济社会效益。

### 参 考 文 献

- 1 Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. High data-rate space laser communication system and its application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 649-654.  
佟首峰,姜会林,张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 649-654.
- 2 Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(1): 1-18.  
刘立人. 卫星激光通信终端 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, 34(1): 1-18.
- 3 Jiang Huilin, Tong Shoufeng. *Space Laser Communication Technology and System*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 9-22.  
姜会林,佟首峰. *空间激光通信技术与系统*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 9-22.
- 4 Liu Hongzhan, Sun Jianfeng, Liu Liren. Analyzing the trends of space laser communication[J]. *Optical Communication Technology*, 2010, 34(8): 39-42.  
刘宏展,孙建锋,刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析[J]. *光通信技术*, 2010, 34(8): 39-42.
- 5 Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.*. Experiment design and development of the lunar laser communication demonstration in USA[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 040004.  
宋婷婷,马晶,谭立英,等. 美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 040004.
- 6 Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.*. Lunar laser communication demonstration in USA: Terminal design[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 050003.  
宋婷婷,马晶,谭立英. 美国月球激光通信演示验证——终端设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 050003.
- 7 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhu Yanan, *et al.*. Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706017.  
马小平,孙建锋,朱亚楠,等. DPSK 调制/自动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706017.
- 8 Qiu Qi, Long Zuli, Tian Jiang. Microwave signal transmission over space optical communication system[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 43-45.  
邱琪,龙祖利,田江,等. 微波信号在空间光通信系统中的传输[J]. *激光技术*, 2005, 29(1): 43-45.
- 9 Yin Zhizhong, Chen Jingyi, Zhou Xianwei. Development and technology of U.S. military satellite communications systems[J]. *Communications Technology*, 2009, 41(11): 55-58.  
尹志忠,陈静毅,周贤伟. 美军卫星激光通信系统的发展及其技术研究[J]. *通信技术*, 2009, 41(11): 55-58.
- 10 S W Sparrold, E L Opton, A Ookorogu, *et al.*. Free Space Point-to-Multipoint Optical Communication System and Apparatus[P]. US Patents, 6912360B1, 2005-6-28.
- 11 Sherman Melvin Presby, John A Tyson. Point-to-Multipoint Free-Space Wireless Optical Communication System[P]. US Patents, 6445496B1, 2002-9-3.
- 12 Jiang Huilin, Hu Yuan, Song Yansong, *et al.*. Rerearch on space laser communication network[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 52-59.  
姜会林,胡源,宋延嵩. 空间激光通信组网光端机技术研究[J]. *航天遥感与返回*, 2011, 32(5): 52-59.
- 13 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.
- 14 Yuan Xucang. *Applied Optics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: P124.  
袁旭沧. *应用光学*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: P124.
- 15 Wang Zhijian, Wang Peng, Liu Zhiying. *The Principle of Optical Engineering*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 100.  
王志坚,王鹏,刘智颖,等. *光学工程原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 100.

栏目编辑: 王晓琰