

基于全光捕获法的机载激光通信跟踪控制系统设计

姜 锋

(中国人民解放军 92941 部队 45 分队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为了保证机载激光通信的质量和稳定性, 基于全光捕获方法优化设计机载激光通信跟踪控制系统; 加设激光器、激光告警器和运动转台设备, 为全光捕获方法的运行提供硬件支持; 改装目标跟踪探测器、跟踪控制器、AD 数据转换器和电机驱动器, 通过系统供电电路的连接实现硬件系统的优化; 根据机载激光通信原理, 从发送模块、激光通信接收模块等方面, 构建机载激光通信模型; 利用全光捕获法生成机载激光通信链路, 根据机载激光通信跟踪目标相对信息的计算结果, 确定通信光斑中心的位置, 实现系统机载激光通信的跟踪和控制功能; 通过系统测试实验得出结论: 综合室内和外场两个应用环境, 机载激光通信跟踪控制系统的平均跟踪偏移量为 0.875 m, 通信误码率和丢包率分别为 0.275% 和 0.384%, 均高于预设值。

关键词: 全光捕获法; 机载激光通信; 通信跟踪; 通信控制系统

Design of Airborne Laser Communication Tracking Control System Based on All-Optical Acquisition Method

JIANG Feng

(Unit 41 of 92941, Huludao 125001, China)

Abstract: In order to ensure the quality and stability of airborne laser communication, based on the all-optical capture method, an airborne laser communication tracking control system is optimally designed. Lasers, laser alarms and motion turntable equipment are added to provide the hardware support for the operation of the all-optical capture method. The target tracking detector, tracking controller, AD data converter and motor driver are modified to realize the optimization of the hardware system through the connection of the system power supply circuit. According to the principle of airborne laser communication, the airborne laser communication model is constructed from the aspects of sending module, laser communication receiving module and so on. The all-optical capture method is used to generate the airborne laser communication link. According to the calculation results of the relative information of the tracking target by the airborne laser communication, the position of the center of the communication spot is determined, and the tracking and control functions of the airborne laser communication of the system are realized. Through the system test experiment, it is concluded that the average tracking offset of the airborne laser communication tracking control system is 0.875 m, and the communication bit error rate and packet loss rate are 0.275 % and 0.384% respectively, which are higher than the preset value.

Keyword: all-optical capture method; airborne laser communication; communication tracking; communication control system

0 引言

激光通信是通过激光进行信息传送的一种通信手段, 它由发射与接收两部分构成。传输系统主要由激光器、光调制器、光发射天线组成。接收系统由接收天线, 光学滤波器, 光电探测器组成。要传输的讯息被送至连接于激光的光电调制器, 光调制器把讯息以激光调制, 再经由光发射天线传输^[1]。激光束的定向能力强, 需要在两个终端之间没有障碍, 以确保发送和接收端的准确定位。因此目前激光通信大多采用机载激光通信方式, 也就是将通信的发送端与接收端安装在飞机设备上, 降低通信环境中的障碍物数量。与传统通信方式相比, 机载激光通信具有速率高、容量大、功耗低、保密性好、抗干扰能力强等优势, 因此被广泛应用到多个领域当中。

激光通信实现无线激光通信终端之间捕获、跟踪功能。捕获过程是指激光通信端机接收端搜索开环不确定区域, 寻找发射端信标光的过程。跟踪过程是指根据接收到的信标光通过位置解算判断其位置, 调整光斑至其视轴中心并实时跟踪监测的过程。为保证机载激光通信工作的顺利进行, 有必要设计通信跟踪控制系统作为通信链接建立的约束辅助工具, 以实现通信功能。机载激光通信跟踪控制主要是在接收端检测到发射端的信标光, 再进行捕获、跟踪、控制, 最后将一信标光束送至发射机, 实现了发送和接收端的数据传输。当前。国内外相关领域研究学者纷纷对机载激光通信跟踪控制系统做出了研制。文献 [2] 提出基于精、粗系统的激光通信跟踪控制系统。摒弃了传统的精、粗系统分别设计的思路, 将两个层次的子系统结合起来, 使系统的设计自由度得到了最大程度的发挥。通过对这些

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-06-07。

作者简介: 姜 锋 (1981-), 男, 安徽芜湖人, 大学本科, 工程师, 主要从事光通信方向的研究。

引用格式: 姜 锋. 基于全光捕获法的机载激光通信跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 93-98, 106.

自由度的综合优化,可以使系统在抑制阶跃干扰、抑制复杂干扰、不敏感极点配置、控制增益最小等方面的设计需求,使激光通信跟踪精度得到明显的改善。文献 [3] 提出了一种高数据速率的多波束自由空间光通信系统。已使用改进的 G-G 分布模拟具有中等湍流的通道,此外,与单波束自由空间光通信相比,多波束自由空间光通信表现出衰减减少,使用空间多样化的发射机,能够实现自由空间光通信链路长度、信噪比和功率的显著增强。

然而在实际的应用过程中,上述方法存在系统适应性低、跟踪控制效果不佳的问题,为此引入全光捕获法。

捕获是机载激光通信的第一步,利用全光捕获法替换传统跟踪控制系统的捕获方式,在提高捕获速度的同时,最大程度地提升激光捕获的精度,间接实现机载激光通信跟踪控制系统控制功能的优化。

1 机载激光通信跟踪控制硬件系统设计

1.1 激光器设计

图 1 表示的是全光捕获法的工作原理。

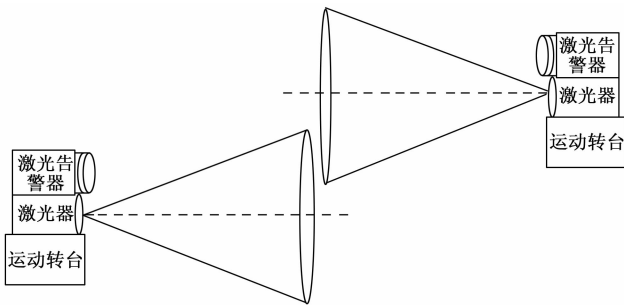


图 1 全光捕获法工作原理图

为了给全光捕获法的工作提供硬件支持,需要在传统控制系统的基础上,加设激光器、激光告警器以及运动转台设备。其中激光器也就是激光的发射装置,在发射和接收端,激光的工作波长分别为 635 nm 和 532 nm。采用自动温控及自动光功率调节的光源驱动模块,可调节 0~200 mW 的功率。非球面 K9 型准直镜头,直径为 6 mm,焦距为 11 mm,准直发散角度为 1 mrad,为近单模式。

1.2 激光告警器设计

根据其工作原理,可以将其划分为光谱识别、成像识别和相干识别三种类型。在此次机载激光通信跟踪控制系统的优化设计过程中,根据全光捕获法的运行要求,采用成像式的激光告警器,它的探测区域为周向 120°,相邻的探测器的视野重叠 5°,分辨率不小于 35°。

1.3 运动转台设备设计

从图 1 中可以看出,运动转台设备是激光器、相机以及激光告警器的支撑设备,主要承担全光捕获的扫描,其驱动部件和传动部件的合理设计是保证系统平稳运行的关键。由于系统的负载很小,因此由步进电机进行驱动控制^[4]。为保证系统的跟踪性能和换向响应速度,把电脉冲信号转换成角度位移值的输出,驱动机构采用蜗轮蜗杆,通过蜗杆轴与电动机轴之间的耦合作用实现了能量输送,

为系统的快速响应提供保障。根据转速及所需扭矩,选择 MRS105 型精密电控转动平台,可任意调节角度,并可设置零点光电转换,必要时可调至伺服电机。在运动转台设备上安装一个角度传感器用于对转台的速度进行监视和检测。

1.4 目标跟踪探测器设计

优化设计的机载激光通信跟踪控制系统采用 CMOS 探测器作为面阵元件,为避免信标光干扰,信标信号源选择 10 kHz 脉冲。在这种情况下,4QD 的脉冲输出要进行一个复杂的展宽维持过程,以满足取样闭环的要求。CMOS 探测器是一种集成元件,它的帧频比脉冲频率低,对它的性能没有明显的影响^[5]。为了降低系统的延迟,采用现场可编程门阵列,实现了探测器驱动、图像预处理和信号位置计算的集成。为有效地降低卫星平台的振动,要求探测器的帧频率必须达到 2 kHz 以上,并且在保证探测分辨率和探测视野的前提下,将读取窗设置为 128 pixel * 128 pixel,从而达到 2.5 kHz 的峰值。在跟踪探测器的探测中,主机与跟踪探测器的串行通讯,实现对跟踪器的启动、锁定和释放。当主机发出启动命令后,跟踪探测器就会进入搜寻状态。在目标锁定状态下,目标进入探测视野后,由计算机对跟踪探测器发送捕获命令,由跟踪探测器进行捕获,利用图像处理算法对物体进行扫描,并实时地记录物体与探测视角之间的角偏离,并将跟踪误差作为模拟电压信号输出^[6]。在进行跟踪时,存在着产生振动的可能性,从而使目标偏离视野。而在目标再次进入视野后,跟踪探测器仍能确保其位置。在主机下达命令后,跟踪探测器返回到搜寻状态。

1.5 跟踪控制器设计

在主机和通信终端之间,跟踪控制器是数据的中转站。首先,主机向终端发送特定旋转命令。接着,该跟踪控制器向对应的终端发送该控制命令,使该控制电机按规定的转速旋转至该位置^[7]。同时,利用跟踪控制器,将各个控制器和电动机的运行状况反馈给主机。在实际应用中,主机仅向跟踪控制器发出定位误差,并将其嵌入到跟踪控制器中,通过跟踪控制器对各个电动机的运动进行协调,实现对目标的跟踪。为提高跟踪控制系统的实时性,同时方便以后系统的扩展,选用 DSP 芯片 TMS320LF2407A 作为控制器的运算处理器件,优化设计的跟踪控制器硬件结构如图 2 所示。

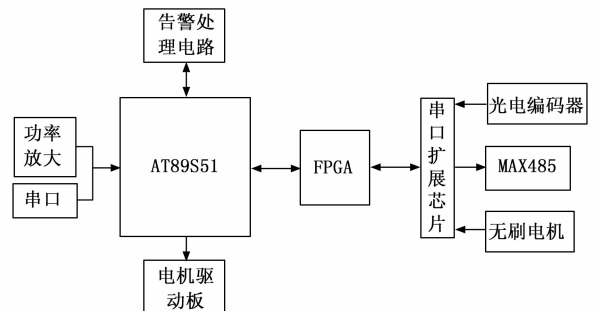


图 2 跟踪控制器硬件结构图

在控制器接口上设置一个通用的输入/输出端口，它可以通过输入/输出端口来触发事件^[8]。所以，在控制电路的设计中，增加了 15 个通用的输入/输出插头，以备使用。

1.6 AD 数据转换器设计

在目标跟踪探测器中，利用相机捕捉目标场景，并将目标影像经由无线影像传送至 XH-AVT01 型电视追踪装置，XH-AVT01 电视追踪装置对所产生的目标影像进行处理，获得物体的形态和相应的方向资讯，并以模拟信号的形式输出该信息^[9]。由于模拟信号不能直接输入到电脑中进行操作，所以需要 A/D 变换模块来实现。A/D 数据转换器的电路连接情况，如图 3 所示。

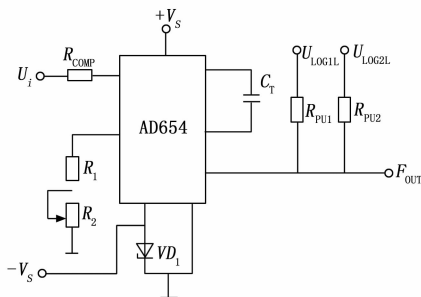


图 3 AD 数据转换电路图

在 A/D 转换模块中，目标信号的采集板主要包括 A/D 变换两个部分。该系统采用 IS61LV6416 芯片作为 A/D 数据和程序存储器。在 TMS320LF2407A 中，完成了调试后的程序。并选择了 A/D 转换专用芯片 ADS774 为其核心。为了避免在 DSP 芯片未发出接收命令的情况下，A/D 数据传输的结果被传输至数据总线，从而对 A/D 数据变换模块产生一定的影响。ADS774 连接到 DSP 的数据总线中，采用 74LVC24 的数据锁存器，用于对 A/D 变换的数据传输进行控制。

1.7 电机驱动器设计

电机驱动器包括逻辑电路、H 桥驱动电路、H 桥等组成部分。在执行机构工作时，控制器将方向、停止、PWM 三个方向信号传送到逻辑电路，从而产生一个控制信号来驱动 H 桥。通过 H 桥型驱动电路对控制信号进行放大，并将其传输至 H 桥型，并通过 H 桥型电源开关的接通来驱动电动机的工作^[10]。该电源模块将 12 V 的电压变换成 5 V 的电压，用于控制逻辑和 H 桥的驱动。

除了上述元件外，数据采集器、系统存储器等设备均沿用传统机载激光通信跟踪控制系统的硬件设备。

2 机载激光通信跟踪控制系统软件功能设计

2.1 构建机载激光通信模型

机载激光通信模型主要由激光通信发送模块、激光通信接收模块以及通信传输信道三个部分组成，机载激光通信工作原理如图 4 所示。

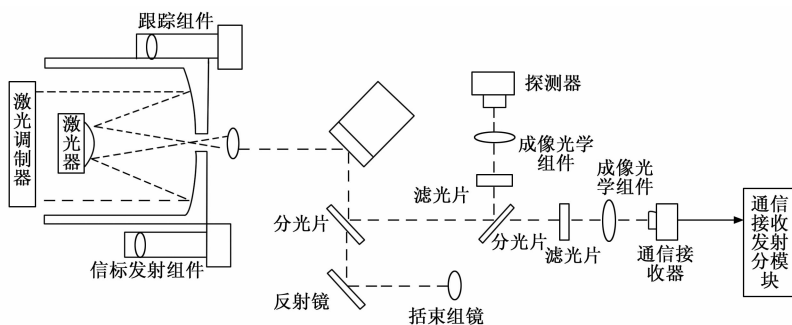


图 4 机载激光通信工作原理图

激光通信发送需要经历数据编码、脉冲以及调制三个步骤，首先利用编码工作将待通信的数据信号转换成模拟电信号，并将处理完成的数据加入到机载激光通信传输队列中。为实现接收信号的同步与均衡，必须在发送信息块中加入训练序列、保护间隔、尾位等附加信息，从而形成突发脉冲，并在突发脉冲下调制激光通信发送任务^[11]。调制程序运行过程中，串口接收模块对起始位的高电平下降边缘进行检测，并且在该水平值是 0 时采集数据位，并且数据位采集结果传输给 PPM 调制模块。PPM 调制模组进行时隙计数，首先输出 3 比特的起始位，当计数值与串口数据位的数据相等时，计数值的时隙输出高电平，余下的时隙输出低电平。完成了机载激光通信数据的 PPM 调制^[12]。通信数据通过机载激光通信信道到达通信接收端，通过预留存储空间、数据验证以及解调等步骤完成一次机载激光通信任务。

2.2 利用全光捕获法生成机载激光通信链路

在机载激光通信模型中，激光信号捕获分为数据引导、视轴初始指向、开环不确定区域扫描到目标轴中心位置三个阶段，在初始指向捕捉阶段，一般使用大的信标束散角进行扫描，在两个视轴中心位置后，通过更小的束散角发送^[13]。在长程飞机上，两翼俯仰高度相差不大的情况下，全光捕捉的先决条件是成立的。在激光器、激光告警器以及运动转台等硬件设备的支持下，假设激光器 A 为通信发送方，B 为通信接收方，则利用全光捕获法捕获机载激光通信信号^[14]。在激光告警器 B 检测到通信发送者的信标光时，进行定位计算，判断其不确定范围，将通信接收者指向不确定区域，由通信接收者 B 发射的粗信标光进行扫描，并且以与通信发送者 A 不同的速度扫描。如果由光学终端 A 上的激光告警 A 检测到通信接收者 B 所发出的粗信标光，则通信发送者 A 停止全周扫描，计算通信接收者 B 的位置，判断激光通信终端 B 的不确定区域，将指示通信发送者 A 对准不确定区域，由通信发送者 A 发射的粗信标光在捕捉不确定区域中进行扫描，完成数据引导^[15]。视轴初始指向的处理目的是确定通信目标端的大致方位，利用方向校准点，完成初始指向。记录通信发射端的的空间位置坐标，并以此位置为中心，在适当的距离内找一个圆点作为定标点，并将定标点的空间坐标进行记录，并对伺服转盘进行校正，以使信标光轴对准标定点。根据本端、准点、目标端的空

间位置坐标, 通过坐标变换, 得到信标光轴从准点到目标端的位置所需要的方位角和俯仰角, 角度求解公式如下:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \\ \Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \end{cases} \quad (1)$$

公式 (1) 中变量 α_1 和 α_2 分别为表示的是当前位置与目标端以及与校准点之间的角度, 而 β_1 和 β_2 对应的是校准点与目标端的变换坐标后与当前位置形成的夹角。控制伺服转台, 使信标光光轴由校准点指向目标端, 完成初始指向^[16]。利用激光器设备将不确定区域扫描到目标轴中心位置, 得出接收视场为:

$$S_r = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \theta_r \cdot \Delta t_{\text{capture}} \quad (2)$$

其中: θ_r 表示的是激光器视场立体角, $\Delta t_{\text{capture}}$ 为全光捕获法的连续捕获时间, 该变量的具体计算公式如下:

$$\Delta t_{\text{capture}} = \frac{2L}{c} + \frac{1}{d_{ac}} + 2t_{\text{res}} \quad (3)$$

式中, L 和 d_{ac} 分别表示的是通信距离和执行机构的伺服带宽, c 为机载激光在大气环境中的传输速度, t_{res} 表示的是激光器的响应时间^[17]。将公式 (3) 的求解结果代入到公式 (2) 中, 即可得出机载激光通信接收视场结果, 完成通信信息的扫描。根据机载激光通信的全光捕获结果, 按照图 5 流程生成机载激光通信链路。

目标和载机在地面坐标系中的位置坐标。另外目标的移动速度可以表示为:

$$v_c = \frac{d_t}{\Delta t_{\text{move}}} - T(\alpha, \beta) v_t \quad (5)$$

其中: v_t 为载机移动速度, d_t 为 t 时刻目标和载机之间的距离, Δt_{move} 为通信目标的移动时间, $T(\alpha, \beta)$ 表示的是由地面坐标系到视线坐标系的转换矩阵, 通过公式 (1) 的计算可以得出变量 α 和 β 的具体取值^[18]。由此得出机载激光通信跟踪目标相对信息的计算结果。

2.4 光斑中心定位与实时跟踪

机载激光通信光斑中心跟踪的目的是保持光通信链路不受外界因素的影响而中断, 提高光通信系统的稳定性。利用公式 (6) 判定捕获的通信光斑中心位置的变化趋势。

$$\begin{cases} \delta_x = \frac{(U_A + U_D) - (U_B + U_C)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \\ \delta_y = \frac{(U_A + U_B) - (U_C + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \end{cases} \quad (6)$$

其中: U_A 、 U_B 、 U_C 和 U_D 分别表示激光光源照射在光敏面四个象限所形成光斑信号光电压值, 计算结果 δ_x 和 δ_y 表示目标光斑的中心位置在水平和竖直两个方向上的变化量。当系统处于跟踪状态时, 针对目标点偏移量、跟踪阈值以及 CCD 摄像机视野范围等因素, 采用了三种跟踪模式。如果光点偏移比跟踪门限小, 表明目前机载激光通信链路无阻, 而接收端继续探测光点的偏移, 而发射端无需对光束进行定位。当光点偏移比光束跟踪门限大, 且比激光器视场范围小时, 由接收端主机对激光光点进行图像处理, 获取光点大小和形状中心的位置信息, 利用这些信息作为反馈信号, 由发射端的 2D 瞄准镜或压电微动平台来控制天线指向, 使光点与靶心的偏差最小化, 从而实现再次的校准^[19]。如果光点偏移比激光视野范围大, 则光通链路完全中断, 进入开环, 激光接收端不能探测到光点, 必须再次进行捕获对准。结合光斑中心实时位置的预测结果, 利用目标跟踪探测器, 实现机载激光通信跟踪。

2.5 实现机载激光通信跟踪控制

将机载激光通信跟踪目标信息的计算结果输入到控制器中, 输出控制信号的输出值为:

$$u_k = K_p e_k + K_I \sum_{j=0}^k e_k + K_D (e_k - e_{k-1}) + u_0 \quad (7)$$

其中: K_p 、 K_I 和 K_D 分别为比例系数、积分系数和微分系数, e_k 和 e_{k-1} 对应的是第 k 和 $k-1$ 次采样时刻的输入偏差值, 另外变量 u_0 为控制器的初始值^[20-22]。将机载激光通信模型的实时运行数据以及跟踪信号结果输入到公式 (7) 中, 在控制器的作用下实现系统的机载激光通信跟踪控制功能。

3 系统测试

以测试基于全光捕获法的机载激光通信跟踪控制系统的跟踪与控制功能为目的, 设计系统测试实验, 实验的基本思想就是以人为控制的方式让机载激光通信两端按一定的幅度和周期进行往复运动, 观察系统的通信跟踪效果,

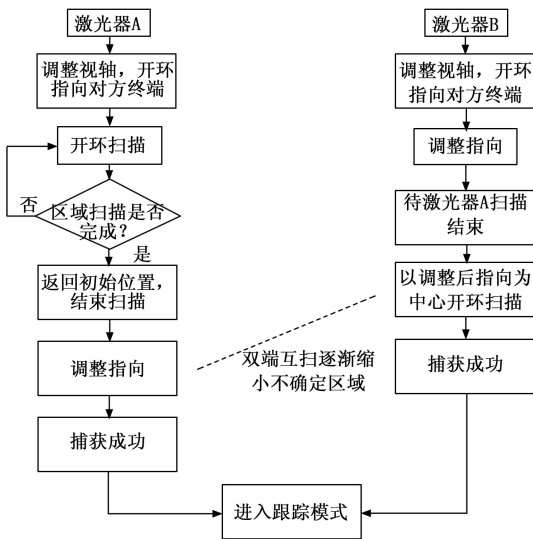


图 5 机载激光通信链路建立流程图

按照上述方式, 通过实时机载激光通信信号的捕获结果得出机载激光通信链路的生成结果。

2.3 计算机载激光通信跟踪目标相对信息

根据机载激光通信跟踪目标的典型运动形式, 计算相对几何关系, 为后续跟踪与控制提供数据。根据机载激光通信跟踪目标和载机的位置坐标, 计算两者之间的相对距离, 计算结果如下:

$$d_{\text{target-carrier}} = \sqrt{(x_t - x_c)^2 + (y_t - y_c)^2 + (z_t - z_c)^2} \quad (4)$$

其中: (x_t, y_t, z_t) 和 (x_c, y_c, z_c) 分别对应的是通信跟踪

在控制程序的作用下判断机载激光通信任务是否能够正常进行，由此验证优化系统的跟踪与控制功能是否能够达到预期效果。

3.1 配置系统测试与开发平台

为充分考虑室内和外场两种机载激光通信情况，此次实验设置两个实验环境，室内通信环境中 850 nm 激光束在平行光管的作用下，发出符合实验要求的信号光。将两个同型号的激光发射器安装在飞机设备上，两飞机之间的距离为 500 m，设置通信串口的比特率为 9 600 bps，中间无视轴遮挡。在机载激光通信系统中，发射端先用高清摄像机采集传送时所需的影像，再由影像编码器将其转换成数字讯号，再进行压缩。然后，把视频信号通过视频传送系统输入到调制器中，经过电光调制，这时激光的输出就会产生一个具有视频信号的激光。如果是短距离传送，激光会直接发射，如果是长距离传送，激光会先经过马卡天线，然后再发射。在机载控制接收端，当反射镜上有光点信息时，由二维马达旋转台控制反射镜的倾角和方向，把激光信号反射到四象限检测器上，再由四象限检测器的通孔将激光信号送至四象限检测器，再由通信检测器接收，从而建立通信信道。将基于全光捕获法的机载激光通信跟踪控制系统中的硬件设备进行定标和连接，连接方式如图 6 所示。

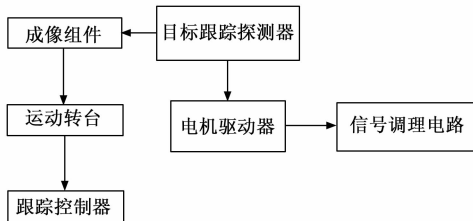


图 6 机载激光通信跟踪控制系统硬件设备连接结构图

按照相同的方式，将飞机以及激光发射器设备移动到外场环境中，在无遮挡前提下将设备之间的距离延长至 2 000 m，形成外场机载激光通信环境。

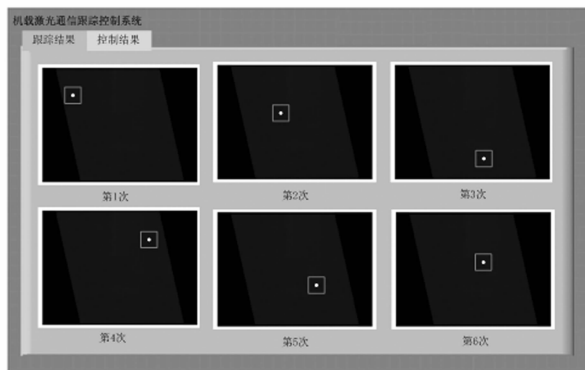
3.2 设定全光捕获法工作参数

由于优化设计的机载激光通信跟踪控制系统应用了全光捕获法，为保证该方法能够在实验环境中正常运行，需要在系统运行之前对相关工作参数进行设定。设置全光捕获的作用距离为 8 km，捕获时间和捕获概率分别为 2 min 和 98%，信标光波长为 800 nm，信标光束散角为 5×30 mrad。在机载激光通信跟踪控制系统开发过程中，导入上述设定的全光捕获工作参数。

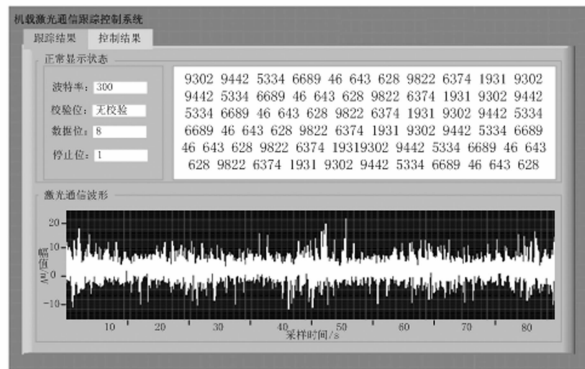
3.3 描述实验过程

在室内环境中利用二维光电平台和驱动设备对移动的物体进行跟踪测试。对实验过程中随机生成光斑漂移量，并根据生成结果确定光斑移动位置，以此作为机载激光通信的跟踪位置。同时启动机载激光通信任务以及跟踪控制系统，将一个具有 ± 4 mrad 的随机变量添加到接收机的上位机初始指向程序中，并将接收端的潜望式转台的方向和倾角轴线分别指向该随机点。瞄准完毕，定时启动，发送

方在接收端不确定的位置用旋转台和振镜组合进行分子区扫描。在接收端检测到目标信号光后，将根据反馈的位置偏差进行修正，在整个采集过程中，收发双端将会通过交叉扫描方式不断地优化视角对齐，减小捕捉不确定性，减小扫描角，直至信号束到达检测器视野，停止扫描，并记录全光捕获结束。启动机载激光通信跟踪控制系统，根据全光捕获结果得出通信跟踪与控制结果，图 7 表示的是室内激光通信环境中的跟踪控制结果。



(a) 机载激光通信跟踪界面



(b) 机载激光通信控制界面

图 7 机载激光通信跟踪控制系统输出结果

同理可以得出外场环境中机载激光通信的跟踪控制输出结果，为了保证实验结果的可信度，在各个实验环境中设置多次实验。

3.4 设置系统测试指标

此次系统测试实验分别从跟踪功能和控制功能两个方面进行测试，设置跟踪偏移量作为跟踪功能的测试指标，其数值结果为：

$$\begin{cases} \epsilon = \epsilon_x + \epsilon_y \\ \epsilon_x = \sum_{i=1}^{Num} |x_{act-i} - x_{track-i}| \\ \epsilon_y = \sum_{i=1}^{Num} |y_{act-i} - y_{track-i}| \end{cases} \quad (8)$$

式中， (x_{act-i}, y_{act-i}) 和 $(x_{track-i}, y_{track-i})$ 分别为机载激光通信目标的实际位置坐标和跟踪结果坐标，Num 表示的是系统测试过程中输出跟踪结果的次数。另外系统控制功能设置的量化测试指标为通信误码率和丢包率，系统的控制效果越好对应机载激光通信误码率和丢包率越低，控制效果测试

指标的数值结果为：

$$\begin{cases} \eta_{\text{bit}} = \frac{W_{\text{receive}} - (W_{\text{send}} \cap W_{\text{receive}})}{W_{\text{receive}}} \times 100\% \\ \eta_{\text{loss}} = \frac{W_{\text{send}} - W_{\text{receive}}}{W_{\text{send}}} \times 100\% \end{cases} \quad (9)$$

其中： W_{send} 和 W_{receive} 分别为机载激光通信数据的发送量和接收量， $W_{\text{send}} \cap W_{\text{receive}}$ 表示的是接收数据中的正确通信数据量。为了保证基于全光捕获法的机载激光通信跟踪控制系统的优化效果，要求通信跟踪偏移量不得高于 2 m，通信误码率和丢包率均不得高于 2%。

3.5 系统测试结果分析

通过相关数据的提取与比对，得出系统机载激光通信跟踪功能的测试结果，如表 1 所示。

表 1 机载激光通信跟踪控制系统跟踪功能测试结果

实验次数	室内通信环境				外场通信环境			
	机载激光通信目标实际位置		机载激光通信跟踪控制系统跟踪位置		机载激光通信目标实际位置		机载激光通信跟踪控制系统跟踪位置	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	179	46	179	45	240	157	240	156
2	164	59	164	59	225	123	225	123
3	203	66	202	65	189	98	188	97
4	256	174	256	174	162	84	160	84
5	145	183	145	183	94	107	94	106
6	162	98	161	98	117	149	116	149
7	180	107	180	107	135	188	134	188
8	92	112	92	111	274	213	274	212

将表 1 中的数据代入到公式 (8) 中，得出机载激光通信跟踪控制系统在室内和外场通信环境下的平均跟踪偏移量分别为 0.625 m 和 1.125 m。与预设值相比，偏移量分别降低了 1.375 m 及 0.875 m，体现了其良好的优化效果。另外系统机载激光通信跟踪控制系统控制功能的测试结果，如表 2 所示。

表 2 机载激光通信跟踪控制系统控制功能测试数据表

实验次数	室内通信环境			外场通信环境		
	数据发送量/GB	数据接收量/GB	正确通信数据量/GB	数据发送量/GB	数据接收量/GB	正确通信数据量/GB
01	20.00	19.80	19.50	20.00	19.77	19.72
02	16.00	15.95	15.92	16.00	15.92	15.90
03	19.50	19.44	19.41	19.50	19.40	19.35
04	27.10	27.07	27.03	27.10	27.05	27.01
05	26.40	26.32	26.28	26.40	26.25	26.22
06	25.00	24.97	24.88	25.00	24.90	24.87
07	16.90	16.88	16.81	16.90	16.50	16.46
08	35.40	35.36	35.32	35.40	35.32	35.29

通过公式 (9) 的计算，得出室内和外场通信环境下系统的平均通信误码率分别为 0.381% 和 0.168%，平均丢包

率为 0.028% 和 0.739%，均低于 2%，相较预设值的通信误码率和丢包率均得到了较好的优化。由此证明，优化设计的基于全光捕获法的机载激光通信跟踪控制系统具有良好的跟踪和控制功能。

4 结束语

通过分析机载激光通信的特性以及跟踪控制需求，利用全光捕获法对机载激光通信跟踪控制系统进行优化，并经过测试验证了系统的功能，使机载激光通信跟踪控制系统在满足精度要求的同时又具有一定的自适应性。实验结果表明，本文设计的机载激光通信跟踪控制系统在室内和外场通信环境下的平均跟踪偏移量分别为 0.625 m 和 1.125 m，平均通信误码率分别为 0.381% 和 0.168%，平均丢包率为 0.028% 和 0.739%，较预设值均表现出了良好的优化效果，有效提升了机载激光通信跟踪控制系统的应用性能。

在未来研究中，将以机载激光通信的多目标跟踪控制为研究方向，进一步完善机载激光通信跟踪控制系统的设计，使其能够实现多目标机载激光通信的跟踪控制，提升系统效率。

参考文献：

- [1] 张敏, 佟首峰, 滕云杰. 空间激光通信单探测器复合跟踪控制技术[J]. 激光与红外, 2019, 49 (8): 983-986.
- [2] 段广仁, 王建宇, 赵天一, 等. 卫星光通信精确跟踪控制系统的参数化综合优化设计[J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (3): 469-480.
- [3] KUMAR S, PAYAL. Design of multi-beam free space optical communication system for mitigation of atmospheric and geometric nonlinearities [J]. Journal of Optics, 2021, 50 (4): 664-670.
- [4] 张敏, 李勃, 滕云杰. 基于迭代学习控制的潜望式激光通信终端系统的动态跟踪设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49 (10): 203-210.
- [5] 曲正, 常帅, 董岩, 等. 基于改进加速度惯量反馈的机载激光通信平台稳定策略[J]. 光学学报, 2021, 41 (23): 75-84.
- [6] 郭超勇, 刘继奎, 程俊波, 等. 卫星激光通信粗跟踪系统复合控制策略[J]. 光学精密工程, 2020, 28 (4): 946-953.
- [7] 刘睿禹, 吴红兰, 陶旭东. 基于成本的机载通信系统可靠性安全性一体化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53 (4): 637-647.
- [8] 王晓艳, 徐高魁. 高隔离度激光通信终端光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50 (7): 228-232.
- [9] 张敏, 李勃, 滕云杰, 等. 潜望式激光通信终端的扰动抑制与动态跟踪方法[J]. 兵工学报, 2020, 41 (12): 2486-2494.
- [10] 牟冉, 张燕革, 陈晶, 等. 无线激光通信线性自抗扰控制研究与实验[J]. 光通信技术, 2020, 44 (1): 39-43.
- [11] 金梦轩, 于雷, 房孝俊, 等. 一种单镜筒双光束激光通信方法及应用[J]. 激光与红外, 2021, 51 (4): 454-459.

(下转第 106 页)