

太极计划激光链路构建地面模拟控制系统研究

赵梦阳^{1,2,3}, 高瑞弘^{1,3}, 张强涛^{1,2,3}, 罗子人^{1,3*}¹国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 太极计划需要通过激光捕获指向系统实现两颗卫星之间超长距离(3×10^6 km)的激光链路构建,并且实现 $1 \mu\text{rad}$ 的捕获精度以及 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$) 的指向抖动控制精度。空间引力波探测提出利用星敏传感器 (STR)、互补金属氧化物半导体 (CMOS) 捕获相机以及四象限光电探测器 (QPD) 等三级探测器逐步构建双向激光链路的方案,并最终通过差分波前传感技术 (DWS) 测量的高精度姿态信息来实现超稳的激光指向抖动控制。目前该方案仍处于理论论证阶段。为了测试该方案,采用实验室现有激光捕获指向一体化的光学系统以及一块 ZYNQ 芯片的自研板卡,尝试实现整个激光链路构建过程的全自主控制流程。实验结果表明:在大气环境下,成功自主完成了双向激光链路的构建,最终对应到实际系统望远镜前的捕获精度达到了 $0.07 \mu\text{rad}$,指向控制过程的控制精度在太极计划的敏感频段内达到了 $9.7 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$,能够满足任务需求。实验成功验证了激光链路构建方案的可行性,为下一步太极计划激光链路构建控制系统工程实施阶段的板级实现奠定了基础。

关键词 光通信; 空间引力波探测; 双向激光链路构建; 全流程自主控制; 光斑质心定位

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221193

1 引言

随着地面引力波探测信号被成功探测^[1],为了实现更宽频段的引力波探测信号,空间引力波探测计划也在积极推进。目前的空间引力波探测任务,例如欧洲的激光干涉空间天线 (LISA) 计划^[2]以及我国的“太极计划”和“天琴计划”^[3-5],都采用三颗卫星构成等边三角形,通过测量同一个臂上相邻两颗卫星之间质量块的距离变化来实现引力波信号的探测。为了实现引力波信号的探测,对于两颗卫星之间激光链路的构建以及指向抖动的控制提出了较高的要求。以太极计划为例,两颗卫星之间相距 3×10^6 km,激光经过长距离的传输以后光功率变得非常微弱,仅有百皮瓦量级,而引力波探测要求指向抖动控制精度达到 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$)。超长距离、超低功率以及精度要求高等条件使得太极计划激光链路构建过程具有很大的挑战。为了实现三颗卫星的组网,整个激光链路建立过程需要依次建立三条双向激光链路。

激光链路构建的过程被称为激光捕获指向技术,在星间激光通信中大量运用^[6-7]。针对不同的目标以及任务要求,有着不同的实现方案。最典型的方案有: SILEX 采用含信标光扫描凝视方案,利用二维转

台与快速反射镜首次实现了星间激光通信^[8]; GRACE Follow-on 计划采用双星扫描干涉测量使得相距 220 km 的两颗卫星实现了 $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的指向精度^[9]。目前的捕获指向技术多针对实现激光通信组网、实现一对多通信进行研究^[10-11],并且多采用复合轴控制实现建链过程^[12]。但是由于空间引力波探测指向精度要求过高、星上载荷有限等原因,这些方案并不能直接用于空间引力波探测计划。针对单条激光链路的建立过程, LISA/太极提出了三级探测器方案来逐步构建激光链路,即利用星敏传感器 (STR)、互补金属氧化物半导体 (CMOS) 捕获相机以及四象限光电探测器 (QPD) 等三级探测器逐步构建双向激光链路,并最终通过差分波前传感技术 (DWS) 测量的高精度姿态信息来实现超稳的激光指向抖动控制。目前该方案还仅仅存在于方案模拟及验证阶段,例如 Maghami 等^[13-15]针对 LISA 捕获阶段基于卡尔曼滤波设计了捕获控制器,并进行了链路建立过程仿真;董玉辉 (Dong) 等^[16]搭建了精密指向系统,验证了 DWS 技术原理的可行性;高瑞弘等^[17-18]针对太极计划搭建了捕获指向地面模拟实验系统,完成了太极计划捕获方法学的可行性验证,但是目前还没有实现整个捕获指向一体化的自主控制流程。而“太极计划”拟于

收稿日期: 2022-08-30; 修回日期: 2022-10-08; 录用日期: 2022-10-19; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC2200104)

通信作者: *luoziren@imech.ac.cn

2025 年左右发射太极二号卫星,采用双星进行关键技术认证。星间捕获指向技术正是其中关键一环,对此开展地面模拟实验能够帮助我们更好地验证整个建链方案的可行性,暴露链路建立过程中可能存在的问题。星间激光链路地面模拟实验控制系统设计急需进行,而卫星实际捕获指向控制系统的设计也需要板级实现。为此本文基于 ZYNQ 芯片以实现激光链路构建地面模拟控制系统为目的进行了研究和设计。介绍了激光链路构建的基本原理,阐述了地面模拟实验系统的系统组成,包括光学系统以及电子学系统设计部分,并利用搭建的实验系统完成了地面模拟实验。

2 基本原理

太极计划单条激光链路构建过程如下。

(1) 卫星在到达预定轨道以后,首先借助搭载在卫星上的 STR 进行望远镜视线校正。然后利用 STR 探测器探测到的卫星姿态信息以及导航信息,进行初对准。但是由于导航精度有限,远端卫星处在一定范围的不确定区域内,因此卫星上出射的激光不能直接被远端卫星所捕获。

(2) 卫星 1 调整卫星姿态,使得卫星出射激光按照某种规律完整地扫描整个不确定区域。在此过程中的某一时刻,出射激光能够被卫星 2 上搭载的 CMOS 捕获相机探测器探测到,根据探测器上所形成的光斑位置,通过在地面提前标定好的光斑位置-卫星姿态角转化系数以及参考位置,能够确定卫星 1 相对卫星 2 的姿态信息。据此调整卫星 2 的姿态,使得卫星上的望远

镜中轴方向对准卫星 1。此时卫星 1 上也能接收到足够功率的激光信号,采用同样的方法调整卫星 1 的姿态,最终使得两颗卫星上的望远镜中轴方向相互对准。当两颗卫星上搭载的捕获相机都能接收到激光信号时进行精密闭环姿态控制,使得光斑质心位置与参考位置重合,如图 1 所示,最终激光指向误差被压制到 $1 \mu\text{rad}$, 小于 QPD 探测器的视场,使得 QPD 探测器能够接收到持续的干涉信号。

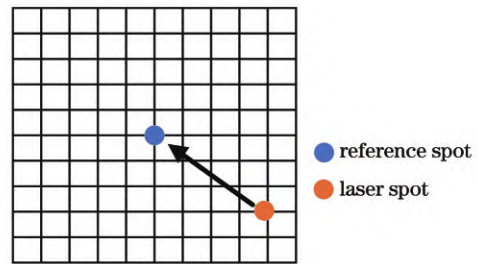


图 1 捕获原理

Fig. 1 Principle of acquisition

(3) 最后,利用 QPD 探测器进行激光精密指向。DWS 技术原理如图 2 所示,具体描述如下:通过 QPD 探测器测量干涉信号在四个象限的相位,在光束夹角不大的情况下,上下象限(或者左右象限)之间的相位差与两个光束俯仰(pitch)方向[或者偏航(yaw)方向]之间的夹角成正比,以此来精密地测量两束光之间的夹角。借助地面标定好的 DWS 测角-卫星姿态角转化系数,可以利用 DWS 技术获得两个卫星之间更高精度的相对姿态信息。通过闭环控制,将指向抖动压制在 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$)。

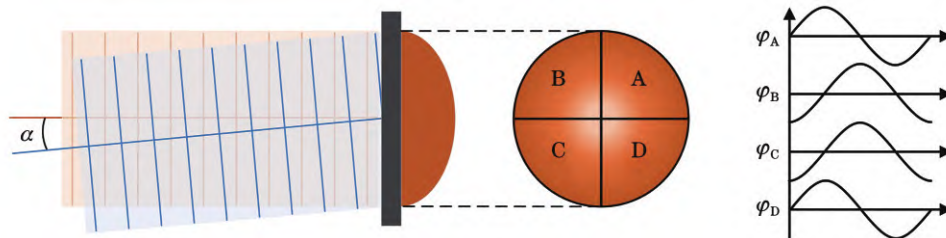


图 2 DWS 技术原理^[19]

Fig. 2 Principle of DWS technique^[19]

为了实现整个激光链路构建过程地面模拟实验,将整个地面模拟实验系统分为两部分展开分析:光学系统和电子学系统。其中光学系统部分还原了太极计划光学平台中的星间激光链路构建部分的实际光路,电子学系统部分实现了整个链路建立过程的全自主控制流程,并最终通过闭环控制维持稳定的双向激光链路。

2.1 光学系统

激光在每条链路中的传输过程如下。光束经过望远镜后传输到对面的卫星。激光链路的构建过程是收发同轴的,因此接收光束通过相同的望远镜传入卫星

光学平台。光学平台接收到的远端卫星发射的激光被一分为二:一束光传输到捕获相机处,在捕获阶段通过捕获相机上形成的光斑来判断对面卫星的相对姿态,以此来调整自身姿态;另一束光被传输到 QPD 探测器,当捕获阶段完成以后进入指向阶段,信号能够进入 QPD 探测器的视场范围,用于实现更高精度的姿态控制。为充分模拟实际的光学系统,设计的地面模拟实验光路图如图 3 所示。图 3 中, P1、P2 为两套光学平台,每个光学平台上均放置了 CMOS 捕获相机、QPD 探测器以及相应的光束折转元件。两套光学平台相距约 10 m,放置在隔振大理石平台上。激光器发出的

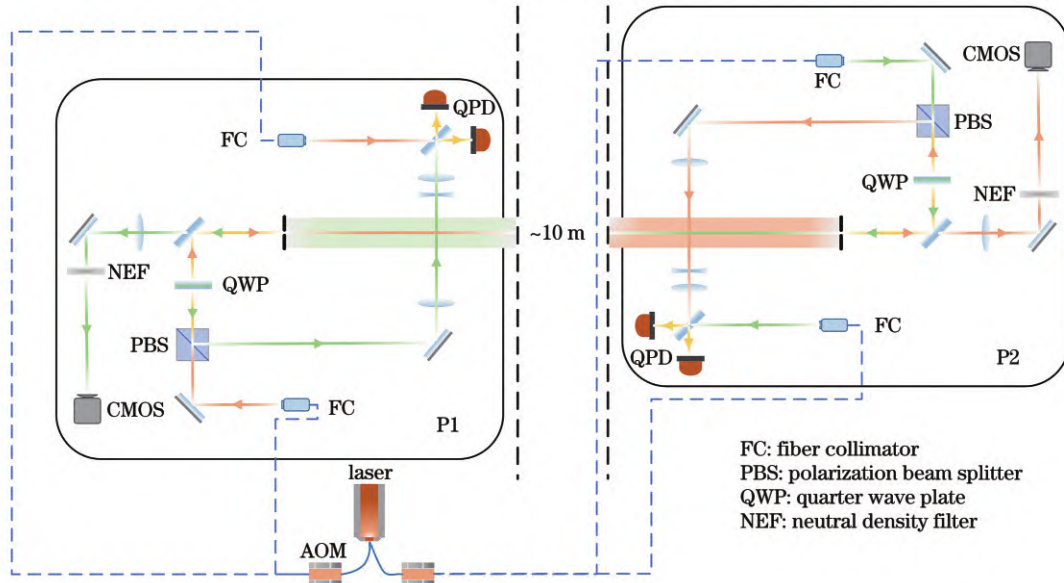


图 3 激光链路构建地面实验图

Fig. 3 Diagram of laser link construction on-ground experiment system

光一分为二以后,每一束光分别经过声光调制器(AOM)的调制,使得两束光之间产生 15 MHz 的频率差,然后这两束光再各自被一分为二,经光纤连接到两端光学平台,分别作为本地光以及发射到远端平台的出射光。

由于地面实验系统的距离限制,如果继续采用望远镜进行模拟,则无法模拟实际情况下接收到的远场波前,因此采用光阑取代望远镜来模拟实际情况下远场扫描接收情况^[14]。P1 平台出射激光经过 PBS、QWP 以及反射以后通过光阑小孔经空间传输到 P2 平台,P2 平台接收到的光经过光阑小孔截断后再经半反半透镜分光,一部分到达捕获相机,一部分到达 QPD 探测器并在 QPD 探测器表面与本地光干涉形成干涉信号。

在太极计划中,望远镜前的捕获精度要求是 $1 \mu\text{rad}$,指向抖动控制精度要求是 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。由于太极计划所选择的望远镜系统的放大倍数是 100 倍,QPD 探测器前的成像系统的放大倍数是 4 倍,因此在 QPD 探测器前的捕获精度指标为 $400 \mu\text{rad}$,指向抖动控制精度要求是 $4 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。这两套指标是针对同一链路上不同器件处的指标需求,它们本质上是等效的。由于模拟实验系统中取消了望远镜,我们选择采用第二套指标来评估系统性能。DWS 技术可以直接用来进行捕获精度的校验,而激光指向精度的校验要通过 DWS 读出信号的幅度谱密度(ASD)来评估。

2.2 电子学系统

整个实验的电子学系统如图 4 所示。图 4 中虚线框外部为与捕获指向控制系统开发板相连接的外部器件,虚线框内部为开发板所搭载的 ZYNQ 芯片内部所需实现的控制功能。为了实现链路构建过程的自主控

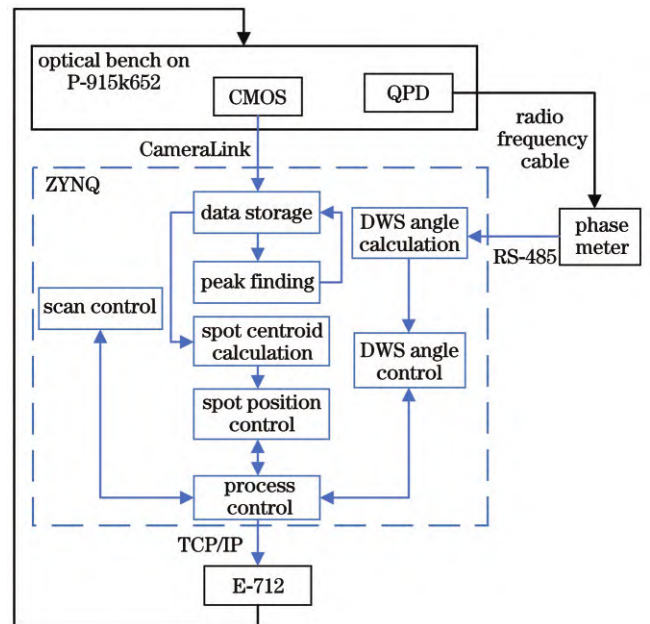


图 4 电子学系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of electronic system

制,电子学系统主要包括了扫描控制模块、光斑质心计算模块、光斑位置控制模块、DWS 角度控制模块以及过程控制模块。其中光斑位置控制模块和 DWS 角度控制模块均采用闭环控制来实现,在后文中将一起介绍。

2.2.1 扫描控制

扫描控制模块主要控制平台出射激光,使其能够完整扫描整个不确定区域。初始时刻,两套实验装置出射的激光无法被对面的捕获相机直接捕获。假设以平台 P1 作为扫描端,平台 P2 作为接收端。P1 平台进行式(1)^[20]所示的阿基米德螺线扫描,使得扫描端 P1 所发射的激光信号在某一时刻被 P2 上所搭载的

CMOS 相机接收到:

$$r = \frac{d}{2\pi} \phi \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix}, \quad \phi = 2\pi \frac{r_{\max}}{d} \sqrt{\frac{i}{N}}, \quad (1)$$

式中: r_{\max} 为螺旋线的最大半径; d 为相邻螺旋线之间的间距; N 为总的扫描点数。本文中不确定区域半径 $r_{\max} = 7 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, $N = 153$ 。

将相关量值转化为对应的姿态角可以得到如图 5 所示的扫描曲线。

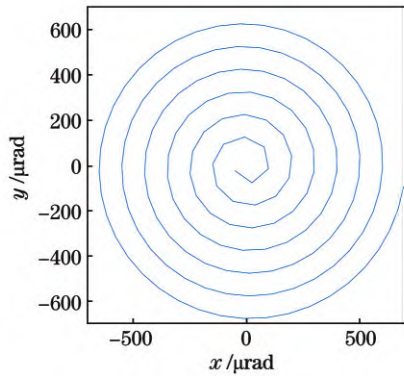


图 5 扫描曲线
Fig. 5 Scan curve

在实际的引力波探测过程中, 整个不确定区域的半角约为 $23.9 \mu\text{rad}$ ^[18], 整个不确定区域的半径约为 71.7 km , “太极计划”拟采用的激光发散半角约为 $2 \mu\text{rad}$, 激光经过 $3 \times 10^6 \text{ km}$ 的传输以后形成的光斑半径约为 6 km , 而望远镜尺寸为 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 。只有在扫描端所发射的激光被接收端接收到时, 才会在捕获相机上形成光斑。而在模拟实验中, 由于两端间距仅为 10 m , 扫描的动态范围有限, 扫描光束发散的距离是有限的, 因此在 P1 平台整个扫描过程中, P2 平台几乎都能接收到光斑信号。但是远端平台处于不同位置时, 本地平台上的光阑截取高斯光束位置不同, 在捕获相机处光斑呈现明暗交替变化, 因此我们以光斑信号的峰值大于某个阈值来模拟在实际情况下接收端成功接收到光斑信号。

2.2.2 光斑质心计算

如图 1 所示, 激光捕获阶段卫星姿态调整的核心原理是通过测量接收到的入射激光在 CMOS 探测器上形成的光斑位置与参考位置之间的偏差来计算入射光束的角度偏差, 以此来确定两颗卫星之间的相对位置并进行姿态调整, 最终通过闭环控制使得实际测得的光斑质心位置与参考位置重合。我们选择传统的质心算法来定位光斑位置:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad (2)$$

式中: x, y 为计算得到的光斑质心的横、纵坐标; x_i, y_i 为当前像素点的横、纵坐标; M_i 为对应像素点的像素数。

高精度的光斑定位对于“太极计划”实现 $1 \mu\text{rad}$ 的捕获精度至关重要。当激光经过百万千米距离的传输以后, 远端卫星所能够接收到的光强仅在百皮瓦量级。质心定位算法对于噪声比较敏感, 在信噪比较低的情况下难以实现高精度的定位^[21]。为了减小光斑质心计算过程中引入的探测器暗电流噪声电子数的影响^[22], 需在光斑峰值附近选取合适大小的窗^[18], 保证整个光斑位于窗内。因此, 光斑质心计算之前需要首先进行峰值查找, 找到整幅图像的像素最大值所对应的位置, 以确定窗内像素对应的位置。

ZYNQ 芯片内部 BRAM 资源有限, 采用 BRAM 缓存图像将占用整个芯片的全部资源。由于算法设计需要首先去寻找整个图像的峰值, 然后计算质心位置, 因此, CMOS 相机数据传输到 ZYNQ 芯片内以后, 需要首先存储到 DDR2 芯片内, 然后进行峰值查找, 读出峰值附近的窗内的像素数据并进行光斑质心位置的计算。

如图 6 所示, 从 CMOS 捕获相机的上位机软件内截取一帧图像, 对 ZYNQ 内部光斑质心计算过程进行仿真, 并与 MATLAB 计算结果进行对比, 结果一致, 验证了质心计算过程的准确性。图 6(b) 中 y 为计算得到的光斑质心纵坐标, Y 为查找到的峰值纵坐标。由

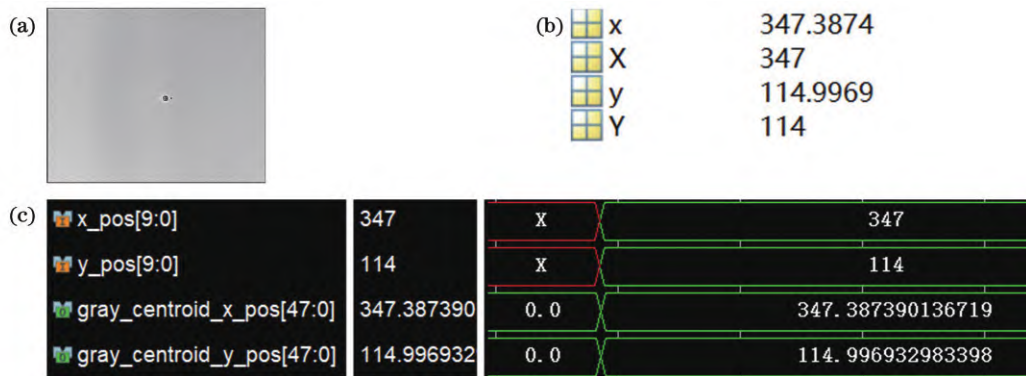


图 6 质心探测的结果验证。(a)原图像;(b)MATLAB 计算结果;(c)ZYNQ 仿真计算结果

Fig. 6 Result verification of spot centroid location. (a) Original image; (b) calculation result of MATLAB; (c) calculation result of ZYNQ simulation

于 ZYNQ 仿真能力有限, 因此在进行仿真计算时截去了图像的上 150 行及以下 150 行。

2.2.3 闭环控制

光斑质心位置控制以及 DWS 角度控制分别应用于精捕获过程以及激光指向过程(见 3.2 节)。其控制都选择采用经典的比例-积分-微分(PID)控制过程实现^[23], 控制规律如下:

$$u(n) = K_p \times e_n + K_i \times \sum_{j=0}^n e_j + K_d \times (e_n - e_{n-1}), \quad (3)$$

式中: $u(n)$ 为控制量; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数; e_n 为当前控制过程中期望值与实际测量值之间的偏差; e_{n-1} 为上一个控制过程的偏差量。

将两端平台对准以后, 利用 DWS 进行闭环控制, 通过对其施加扰动来进行闭环控制的测试, 结果如图 7 所示。可以发现施加扰动以后, DWS 的值首先被控制到超调, 然后缓慢地控制到 0 附近。

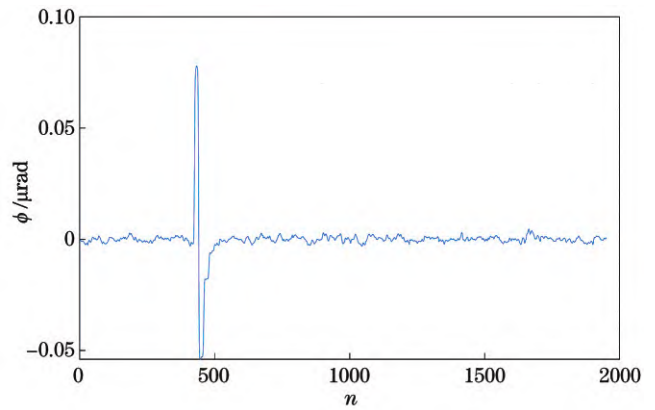


图 7 闭环控制测试结果

Fig. 7 Test result of closed-loop control

2.2.4 流程控制

流程控制的主要功能是实现整个链路建立过程的自主控制。整个控制过程的流程图如图 8 所示。

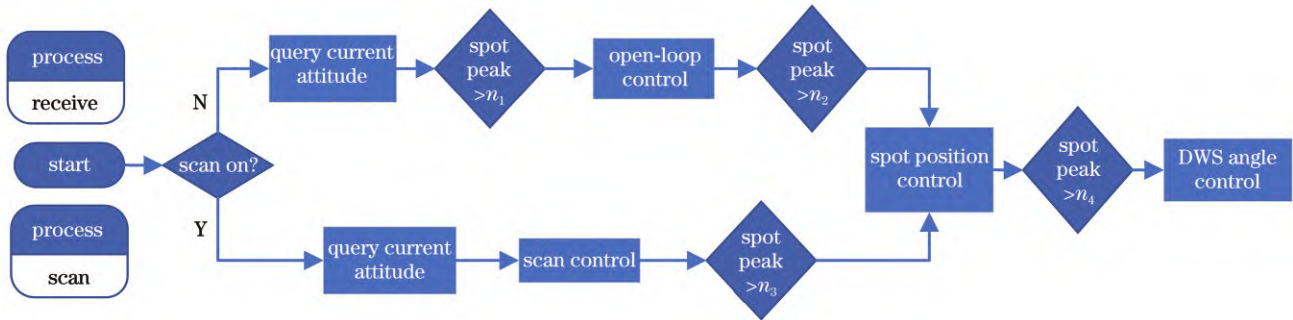


图 8 流程控制

Fig. 8 Process control

当 ZYNQ 开发板上电启动以后, 会首先判断程序是否被设定为扫描端。如果是, 则进入扫描控制的流程, 如果不是, 则进入接收端的流程。当进入扫描端流程时, 程序会首先查询本身平台所处位置, 然后进入扫描控制的过程, 直到扫描端平台上 CMOS 相机探测到的光斑峰值大于设定的光斑阈值后进入质心位置控制。当进入接收端流程时, 接收端开发板也会首先查询自身平台的姿态, 然后等待到某一时刻, 探测到的光斑峰值大于设定好的阈值以后, 就进行一次开环控制, 使得接收端平台初始对准扫描端。图 8 中 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 均为设定好的光斑阈值, 阈值的大小需要根据扫描端以及接收端光强的不同来灵活设置。两端平台的质心位置控制以及 DWS 角度控制程序基本相同, 因此并不加以区分。

以上即为整个建链过程控制系统的主要功能模块。下面将基于上述功能模块, 对整个实验流程进行介绍。

3 地面模拟实验

3.1 实验装置

基于上节所介绍的光学系统, 我们在实验室搭建

了如图 9 所示的实验装置。两个光学平台被分别放置在隔振大理石平台的两端。光学平台分别安装在六足位移台上, 六足位移台被安装在四轴手动位移平台上。可以通过调节手动位移平台来实现两边光学平台的初始对准。

捕获指向控制开发板选择 Xilinx 公司的 ZYNQ (XC7Z035) 芯片来接收 CMOS 捕获相机数据和相位计数据、控制图像存储、计算光斑质心数据以及控制六足位移台的运动。为了能够满足模拟实验过程中姿态调整精度的要求, 我们选择将光学平台搭载在 PI P-915K652 六自由度位移台上。P-915K652 的角度分辨率达到 70 nrad, 能够满足指向控制阶段的精度需求。CMOS 相机选择 TWKWIN 公司的 SH640 相机, 相机数据通过 CameraLink 接口传输到 ZYNQ 开发板, 实现 CMOS 与 ZYNQ 之间大量视频数据的高速传输^[24]。QPD 探测器选择中电 44 所的 GD4542-20M, 该 QPD 的噪声等效功率较低。QPD 探测到的干涉信号通过射频(RF)连接线传输到相位计, 相位计计算得到的角度数据通过 RS-485 传输给捕获跟瞄控制系统。由于六足位移台需要通过其配套的控制箱控制, 因此控制信号通过 TCP/IP 传输给 E-712 控

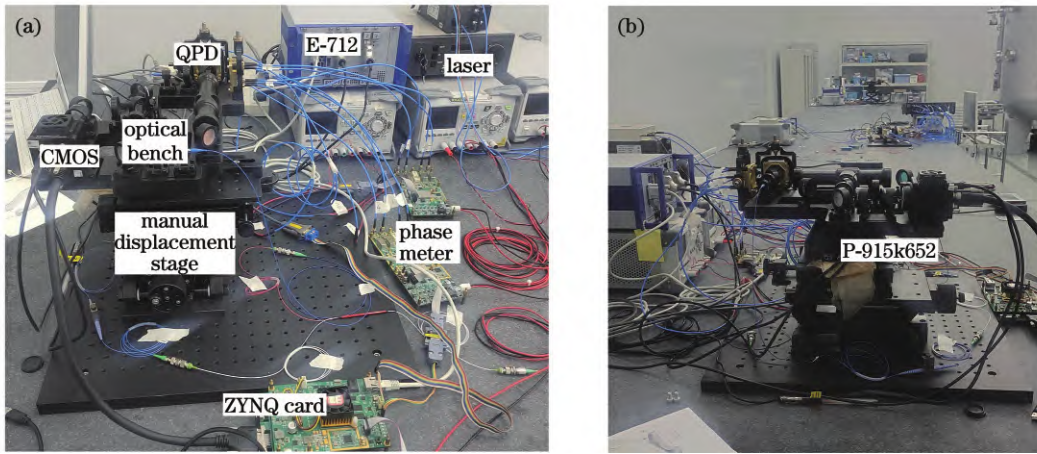


图 9 实验装置。(a)单端平台;(b)两个平台被放置在大理石平台两端

Fig. 9 Experimental setup. (a) Single platform; (b) two platforms placed on both ends of marble platform

制箱控制六足位移台的运动,实现整个激光建链过程的运动控制。实验所采用的设备的基本参数如 1 表所示。

表 1 设备基本参数
Table 1 Basic parameters of devices

Device	Parameter	Index
P-915k652	Travel range $\theta_x, \theta_y, \theta_z / \mu\text{rad}$	± 700
	Minimum incremental motion /nrad	70
	Maximum load /kg	5
	Resolution /pixel	640×512
SH640	Dark current electron number expectation at 25°C σ	1.5×10^5
	Dark current electron number variance at 25°C μ	4.5×10^3
	Pixel size / μm	15
GD4542-20M	Working wavelength /nm	1064
	Diameter of photosensitive surface /mm	1.2
	Quadrant gap / μm	≤ 40
	3 dB bandwidth /MHz	≥ 20
	Noise equivalent power density at 20 MHz / $(\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2})$	$\leq 4.5 \times 10^{-12}$

实验过程的核心实验参数如表 2 所示,通过在地面条件下尽可能模拟实际太极计划中的参数指标,达到验证太极计划激光链路建立方案可行性的目的。QPD 探测器前的光接收功率比“太极计划”实际光接收功率高的原因是 QPD 探测器器件性能限制,过度降低 QPD 探测器前的光接收功率会影响探测器读出干涉信号质量,导致相位计测量结果引入大量噪声。

表 2 核心实验参数

Table 2 Core experimental parameters

Parameter	Taiji program	Experiment
Platform separation	$3 \times 10^6 \text{ km}$	10 m
Half angle of scan range / μrad	24	700
Beam waist at receiving aperture	5 km	6.5 mm
Radius of uncertainty cone	72 km	7 mm
Beam waist radius /mm	200	0.5
Telescope radius /mm	200	-
Aperture radius /mm	-	0.5
Receiving power on QPD /nW	1.5	~ 1700
Receiving power on CMOS /pW	~ 100	~ 100

3.2 实验过程

3.2.1 标定

进行实验之前,先要完成 CMOS 相机参考位置的标定、六足位移台运动时 CMOS 相机质心位置的标定以及 DWS 角度测量结果与平台运动角度之间转化系数的标定。我们首先通过调节六足位移台的姿态将 DWS 测得的偏航以及俯仰方向的夹角闭环控制在夹角为 0 附近,然后在闭环控制过程中通过手动调节四轴位移平台使得六足位移台两个方向的姿态角也在 0 附近,将此时 CMOS 相机上测得的光斑质心位置作为捕获阶段的参考位置。

然后,通过在 PI 公司 PIMikroMove 软件分别在两个方向上施加三角波来控制两个方向的姿态,并在此过程中测得的光斑质心数据以及 DWS 夹角数据来标定两个平台不同方向的转化系数。

如图 10(a)所示,当对六足位移台施加 $\pm 700 \mu\text{rad}$ 的三角波时,计算出的光斑质心位置也呈三角波变化。在 MATLAB 中进行一阶线性拟合可以得到六足位移台姿态角以及光斑质心位置之间的角度-位置转化系数为 $0.0102 \text{ pixel}/\mu\text{rad}$ 。图 10(a)中的毛刺主要是因为

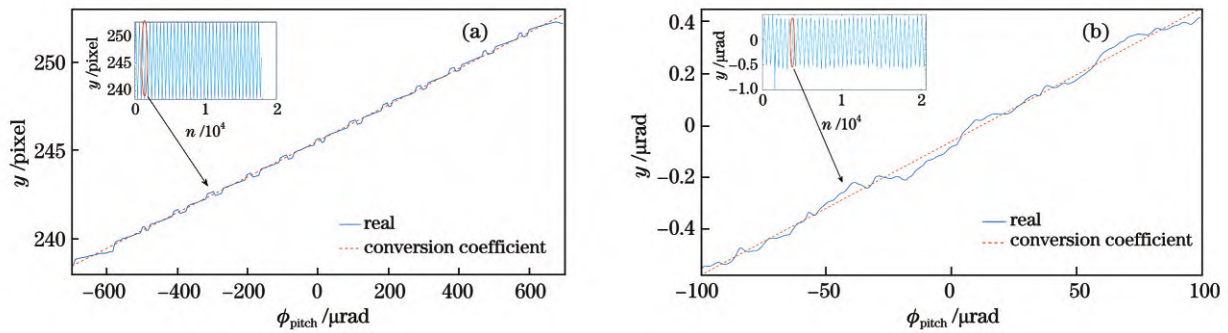


图 10 转化系数标定。(a)角度-位置转化系数标定;(b)角度-角度转化系数标定

Fig. 10 Calibration of conversion coefficients. (a) Calibration of angle-position conversion coefficient; (b) calibration of angle-angle conversion coefficient

光斑图像的峰值位于两个像素中间时,导致峰值坐标发生变化,选取的窗也随峰值坐标改变,扫描过程中的计算光斑质心会产生跃变。转化系数用于在开环控制过程中以及光斑质心位置控制过程中根据参考位置与实际质心位置的差值来计算六足位移台的控制量。同理,可以测得六足位移台姿态角以及DWS角度之间的角度-角度转化系数。但是由于DWS用于最后的激光指向过程,相应的调节范围较小,因此仅对其施加了 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 的三角波进行标定,如图10(b)所示,标定结果为 5143 rad/rad 。

3.2.2 实验流程

为了能够充分模拟激光链路,实验划分为初始化、粗捕获、精捕获、激光指向等阶段。图11为实验全流程示意图。

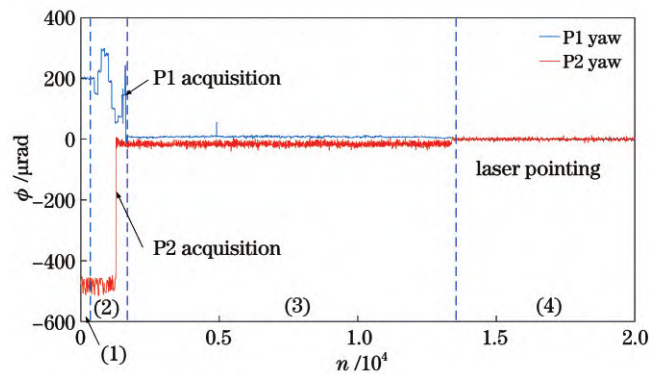


图 11 全流程示意图

Fig. 11 Whole-process diagram

(1) 初始化:所有设备初始化,完成以后将光学平台调整到位于不确定区域内的任意位置,等待进入捕获流程。

(2) 粗捕获:首先利用P1平台作为扫描发送端进行阿基米德螺旋线扫描,P2平台作为接收端并保持其初始姿态。在某一时刻,P2平台上的CMOS相机能够接收到足够功率的光斑信号。根据光斑质心位置计算的结果进行开环控制,调整P2平台的视轴方向以使其指向P1平台。P2平台指向P1平台后,P1平台上搭载的CMOS相机能够接收到足够功率的光斑信号,P1平台

结束扫描。

(3) 精捕获:粗捕获完成以后,两个平台相互对准。然后,根据两个平台上搭载的CMOS相机探测到的光斑信号进行闭环控制调节,将其光斑质心位置控制在标定好的参考位置附近。对于“太极计划”而言,在此过程中还需要进行频率扫描以在QPD探测器上获得干涉信号。因此在实际过程中,通过闭环控制一定的时间来模拟精捕获并借此检验捕获精度。

(4) 激光指向:在这个阶段,利用DWS测得的高精度的角度偏差信号来控制六足位移台自身姿态,使得两个方向的角度偏差一直在0附近。

3.2.3 实验与实验结果

首先通过手动调节四轴位移台将两边平台对准,然后通过上位机软件任意设定一个初始位置,P1平台六足位移台姿态角设为(200,200),P2平台为(-200,-500)。然后通过开发板来控制整个链路建立过程,如图12(a1)所示。

当两端平台进入精捕获阶段后,光斑质心控制效果由DWS信号读出值除以DWS角度位置-六足位移台角度转化系数来评估。图12(a2)所示为根据精捕获阶段采集的DWS时域信号计算得到的角数据,P1平台偏航方向读出值的均值不超过 $29.72 \mu\text{rad}$,相当于在望远镜处获得了 $0.07 \mu\text{rad}$ 的捕获精度。光斑质心控制效果的主要影响因素包括DWS标定时的标定误差以及手动四轴位移平台长期漂移等造成的位置误差。手动四轴位移平台的内部应力变化导致在俯仰和偏航两个方向的位置与实验前标定时的位置有较大的差别,导致实验时的光斑质心位置偏离六足位移台零点附近。因此,可以通过将手动四轴位移平台改为具有较大动态范围的电子位移平台来提高这个阶段的实验结果。

图12(a3)显示了激光指向阶段偏航方向的DWS角度测量结果ASD曲线,两个平台激光指向阶段的ASD最大值为 $3.88 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,在望远镜处达到了 $9.7 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的指向抖动控制,满足 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的指标要求。俯仰方向同理。

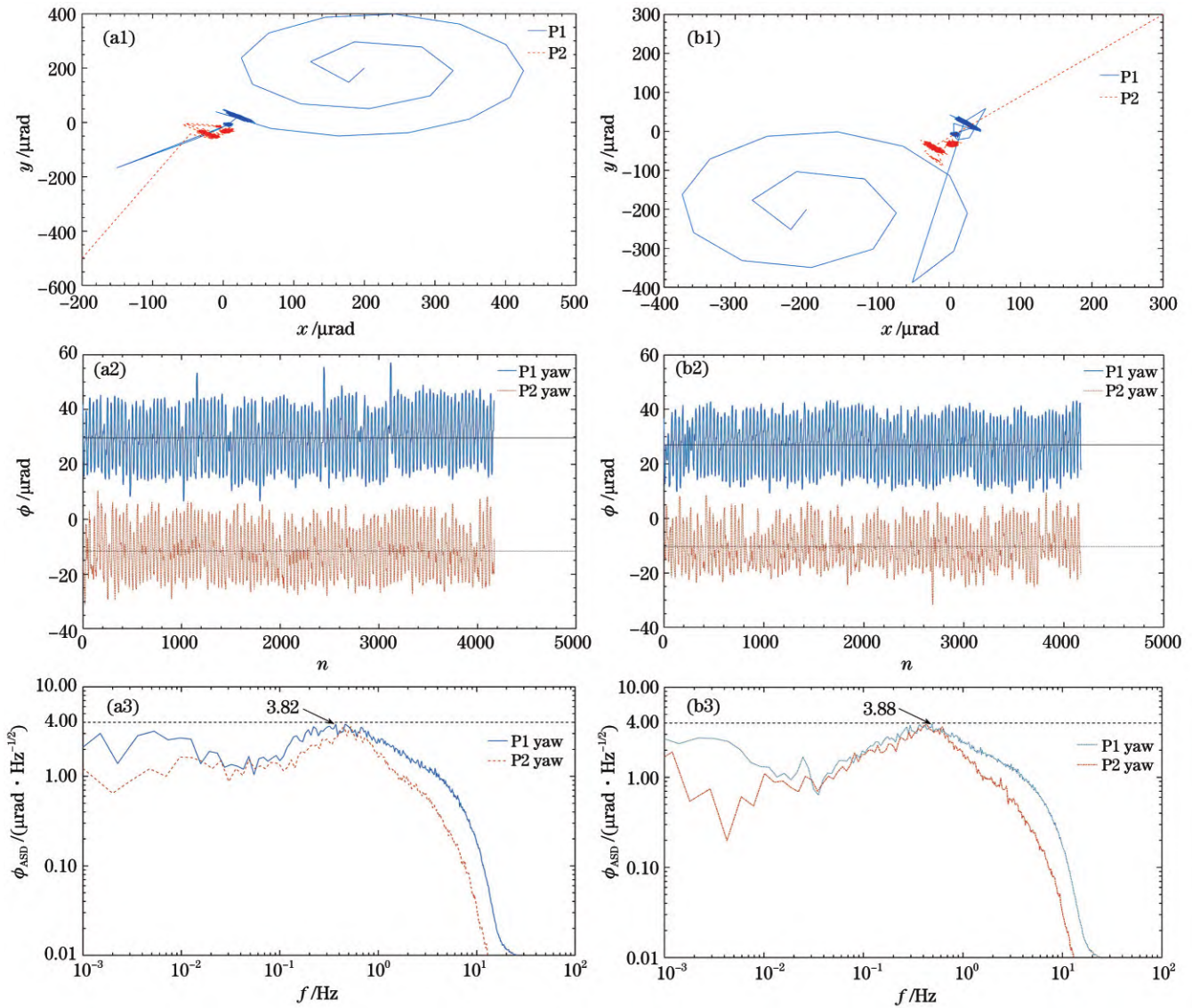


图 12 不同起点的实验结果。(a) P1 初始位置(200,200),P2 初始位置(-200,-500);(b) P1 初始位置(-200,-200),P2 初始位置(300,300)

Fig. 12 Experimental results from different starting points. (a) P1 starting at (200, 200) and P2 starting at (-200, -500); (b) P1 starting at (-200, -200) and P2 starting at (300, 300)

图 12(b)为 P1 平台初始位置位于(-200,-200), P2 平台位于(300,300)时的实验结果,同样验证了地面模拟实验系统能够完成整个激光链路建立过程,并

且捕获精度和激光指向抖动控制精度能够满足太极计划提出的指标要求。

图 13 为两端平台对准时,不对六足位移台进行

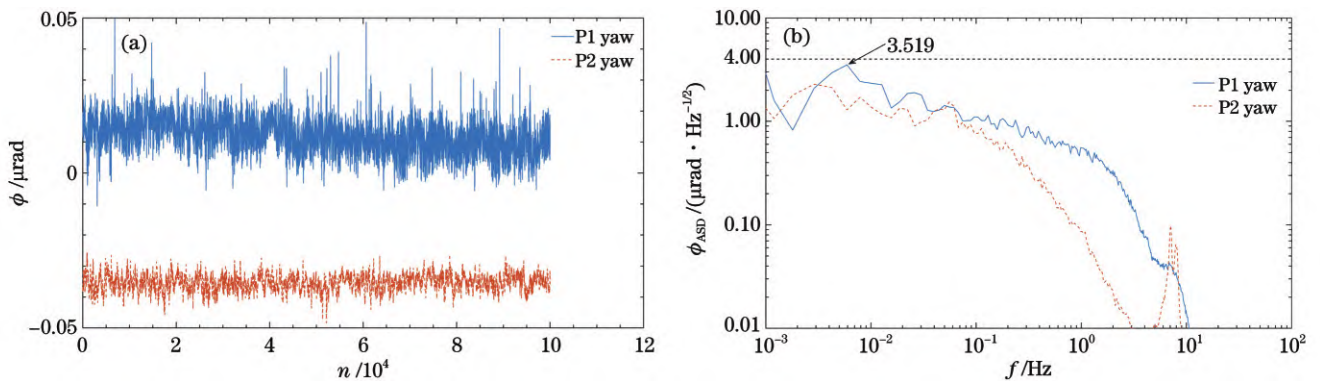


图 13 背景噪声。(a)时域;(b)频域

Fig. 13 Background noise. (a) Time domain; (b) frequency domain

控制而采集到的偏航方向 DWS 数据,说明了实验过程中影响控制精度的主要因素来自背景噪声,包括大气波动、温度偏移以及环境的振动等。因此,未来进一步提升控制精度的方向是:(1)实验是在较厚的隔振大理石平台上进行的,未来可通过将整个实验平台覆盖亚克力罩或者将实验放置在隔振的真空环境中来降低环境噪声;(2)在控制系统中加入滤波器,降低噪声的影响。

4 结 论

基于空间引力波探测以及太极计划要实现百万千米量级双向激光链路构建,并最终将激光指向抖动控制在 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以内的目标,本文采用 ZYNQ 板卡实现了整个激光链路的自主控制。对于接收端和扫描端位于不同初始位置的情况进行了测试,并对最终 DWS 控制阶段的数据进行分析。实验发现,两端的平台位于不同起始位置时均能完成双向激光链路构建过程,并且最终指向阶段的控制效果满足太极计划的需求。未来的主要方向是通过提高器件配置和改善实验环境来降低背景噪声水平,并在控制系统中加入滤波器,以进一步提高实验结果。

本文所进行的激光链路建立的实验对于 LISA/太极计划等项目星间建链过程的研究具有重要的意义。通过地面模拟实验,验证星间建链方案的可行性,并暴露建链过程中可能遇到的各种问题,为未来“太极二号”捕获指向技术控制系统的板级实现及太极计划三星系统之间三条激光链路构建系统的模拟等研究提供了实验基础。

参 考 文 献

[1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 061102.

[2] Wanner G. Space-based gravitational wave detection and how LISA Pathfinder successfully paved the way[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(3): 200-202.

[3] 罗子人,张敏,靳刚,等.中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试[J].*深空探测学报*, 2020, 7(1): 3-10.
Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 3-10.

[4] 罗子人,白嫻,边星,等.空间激光干涉引力波探测[J].*力学进展*, 2013, 43(4): 415-447.
Luo Z R, Bai S, Bian X, et al. Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(4): 415-447.

[5] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010.

[6] 董全睿,陈涛,高世杰,等.星载激光通信技术研究进展[J].*中国光学*, 2019, 12(6): 1260-1270.
Dong Q R, Chen T, Gao S J, et al. Progress of research on satellite-borne laser communication technology[J]. *Chinese Optics*,

2019, 12(6): 1260-1270.

[7] 刘立人.卫星激光通信 I:链路和终端技术[J].*中国激光*, 2007, 34(1): 3-20.
Liu L R. Laser communications in space I: optical link and terminal technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(1): 3-20.

[8] Tolker-Nielsen T, Oppenhausser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4635: 1-15.

[9] Wuchenich D M R, Mahrtdt C, Sheard B S, et al. Laser link acquisition demonstration for the GRACE Follow-on mission[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 11351-11366.

[10] 张若凡,张文睿,张学娇,等.高轨卫星激光中继链路研究现状及发展趋势[J].*激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500001.
Zhang R F, Zhang W R, Zhang X J, et al. Research status and development trend of high earth orbit satellite laser relay links[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500001.

[11] 徐森,史浩东,王超,等.空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J].*中国激光*, 2021, 48(12): 1206002.
Xu M, Shi H D, Wang C, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1206002.

[12] 白杨杨,岑远遥,孟立新,等.空间激光通信组网从光端机控制技术[J].*光学学报*, 2021, 41(14): 1406001.
Bai Y Y, Cen Y Y, Meng L X, et al. Control technology of slave optical transceiver in space laser communication network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1406001.

[13] Maghami P G, Hyde T T, Kim J. An acquisition control for the laser interferometer space antenna[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22(10): S421-S428.

[14] Cirillo F. Controller design for the acquisition phase of the LISA mission using a Kalman filter[D]. Pisa: University of Pisa, 2007.

[15] Cirillo F, Gath P F. Control system design for the constellation acquisition phase of the LISA mission[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 154: 012014.

[16] Dong Y H, Liu H S, Luo Z R, et al. Principle demonstration of fine pointing control system for inter-satellite laser communication [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(3): 449-453.

[17] Gao R H, Liu H S, Zhao Y, et al. Laser acquisition experimental demonstration for space gravitational wave detection missions[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 6368-6383.

[18] 高瑞弘.面向空间激光干涉引力波探测的激光捕获-指向技术研究[D].北京:中国科学院大学,2020.
Gao R H. The research on the laser acquisition-pointing technique of inter-satellite interferometer for the space-based gravitational wave detection[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

[19] 董玉辉.面向空间激光干涉引力波探测的精密指向和弱光锁相控制技术的研究[D].北京:中国科学院大学,2015: 16-19.
Dong Y H. Research on precise pointing and low-light phase-locked control technology for gravitational wave detection by space laser interference[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 16-19.

[20] Luo Z R, Wang Q L, Mahrtdt C, et al. Possible alternative acquisition scheme for the gravity recovery and climate experiment follow-on-type mission[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(5): 1495-1500.

[21] 陈兴林,郑燕红,王岩.光斑噪声对星间光通信的影响及抑制算法[J].*中国激光*, 2010, 37(3): 743-747.
Chen X L, Zheng Y H, Wang Y. Influence of spot noise in inter-satellite optical communications and suppression algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 743-747.

[22] 赵琦,郝士琦,张岱.改进阈值分割的光斑中心定位方法[J].*激光与红外*, 2018, 48(5): 633-637.
Zhao Q, Hao S Q, Zhang D. Location method of spot center based

- on improved threshold segmentation[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(5): 633-637.
- [23] 武凤, 于思源, 周洁, 等. 星间光通信链路双向光束稳定跟踪约束条件分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1105003.
Wu F, Yu S Y, Zhou J, et al. Analysis of the stability of bidirectional beam tracking in inter-satellite optical communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 1105003.
- [24] 黄海波. 复合轴光电精密跟踪伺服控制关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011: 94-95.
Huang H B. Research on key technology of servo control of composite photoelectric precision tracking[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011: 94-95.

Research on Simulated Laser Link Construction Control System of Taiji Program

Zhao Mengyang^{1,2,3}, Gao Ruihong^{1,3}, Zhang Qiangtao^{1,2,3}, Luo Ziren^{1,3*}

¹*Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, Zhejiang, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

Abstract

Objective The space-based gravitational wave detection mission needs to realize the construction of ultra-long distance (3×10^6 km) laser link between two satellites through the laser acquisition and pointing system, and realize the capture precision of $1 \mu\text{rad}$ and the pointing jitter control of $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ at $1 \text{ mHz} - 1 \text{ Hz}$. The laser power becomes very small after being transmitted over millions of kilometers. Ultra-long distance, ultra-low power and high precision requirements make the laser link construction process of Taiji program a great challenge. In order to realize the networking of three satellites, the whole laser link construction process needs to establish three bidirectional laser links in turn. Space-based gravitational wave detection proposes a scheme to gradually build a bidirectional laser link by using three-level detectors of star tracker (STR), complementary metal oxide semiconductor (CMOS) capture camera and quadrant photodiode (QPD), and finally realize the ultra-stable laser pointing jitter control through the high-precision attitude information measured by the differential wavefront sensing (DWS) technology. At present, the scheme is in the stage of theoretical demonstration. In order to test the scheme, we adopt the laboratory's laser acquisition and pointing integrated optical system and a card based on a ZYNQ chip, and expect to realize autonomous control of the whole laser link construction process.

Methods We use ground optical experiment to simulate the actual laser link construction progress between two satellites under the laboratory conditions. The whole experiment includes two optical benches which are actually realistic restoration of Taiji program acquisition and pointing light path (Fig. 3), and they are respectively mounted on two hexapod displacement tables to simulate the adjustment of satellite attitude. To fully simulate the whole progress of the actual laser link construction, the ground optical experiment is divided into four stages: initialization, coarse acquisition, fine acquisition and laser pointing. According to the scheme of laser link construction, we design the whole progress flow control, spiral scanning control, spot centroid location and closed-loop control by Verilog, and verify every module separately. And then we use ZYNQ card to control the whole experiment.

Results and Discussions The experimental results show that the bidirectional laser link is successfully constructed in the atmospheric environment. Finally, corresponding to the wavefront of the actual system's telescope, the acquisition precision reaches $0.07 \mu\text{rad}$ and the control accuracy of the final laser pointing control process reaches $9.7 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ in the sensitive frequency band of the Taiji program, which can meet the task requirements. The main influencing factors of the spot centroid control effect in the fine acquisition stage are the calibration error during the DWS calibration and the position error caused by the long-term drift of the manual four-axis displacement table. The internal stress change of the manual four-axis displacement table results in a large difference between the actual displacement table position and the position calibrated before the experiment in the pitch and yaw directions, which causes the position of the spot centroid during the experiment to deviate from the zero point of the hexapod displacement table. And the main factor affecting the control accuracy during the laser pointing stage is the background noise. By collecting the DWS data without controlling the hexapod displacement table when the platforms are aligned, it is found that the laser pointing precision is close to the background noise level (Fig. 13). Therefore, the background noise is the main noise source, which includes atmospheric fluctuation, temperature shift and environmental vibration.

Conclusions This paper describes the basic composition of the control system in detail for the ground simulation experiment of building the Taiji program inter-satellite laser link, and completes the overall design and board level implementation of the entire acquisition and pointing integrated experimental control system. In this paper, the receiver and scanner are tested at different starting locations, and the data in the final laser pointing control stage are analyzed. It can be found that the experiment can complete the bidirectional laser link construction process for the platforms of receiver and scanner at different starting positions, and the control effect of the final pointing stage meets the requirements of the Taiji program. The experiment successfully verifies the feasibility of the

laser link construction scheme, which meets the acquisition accuracy and the pointing jitter control accuracy in front of the telescope. It provides an experimental support for further ground simulation experiments. It also provides a basis for the realization of on-board control system of the laser link construction of Taiji program in the next step, and plays an important role in transferring the scheme from theoretical demonstration to engineering implementation.

Key words optical communications; space-based gravitational wave detection; bi-directional laser link construction; whole-process autonomous control; spot centroid location