

基于机载激光通信的扫描捕获优化设计

丁泽均¹, 俞建杰^{2,3,4}, 陈怡¹, 郭佳杰³

(1. 湖州师范学院 工学院, 浙江 湖州 313000;

2. 浙江大学 生物医学工程与仪器科学学院, 杭州 310027;

3. 浙江大学湖州研究院, 浙江 湖州 313000;

4. 比羿激光科技(湖州)有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 为适应机载激光通信的平台特殊情况, 分析了各类扫描捕获方案并选取了最适合机载平台激光通信的方案; 为避免光斑在边缘捕获容易丢失的情况, 采用了设置进视场的方式对捕获的方法进行优化, 为避免扫描捕获时间过长, 采用了对扫描端分区提速的方法进行优化; 经理论分析该方案使得光斑最终捕获的位置更加靠近视场中心, 避免光斑因无人机振动等平台限制而出现光斑异常丢失的情况, 且随着双端距离的不同以及光斑相对于不确定区域中心的距离差异最终扫描捕获时间优化效果呈现正相关, 经实验测试该方案实现了一定程度的有益效果, 在避免光斑由于无人机抖动而意外丢失的前提下相较于传统方式加快 15% 左右的扫描捕获时间, 满足了实际应用需求。

关键词: 激光通信; 机载平台; 扫描; 捕获; 方案流程; 扫描时间

Optimal Design of Scanning Acquisition Based on Airborne Laser Communication

DING Zejun¹, YU Jianjie^{2,3,4}, CHEN Yi¹, WU Jiajie³

(1. College of Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, China;

2. College of Biomedical Engineering and Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Huzhou Institute of Zhejiang University, Huzhou 313000, China;

4. Beacomm Laser Technology (Huzhou) Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: In order to adapt to the special situation of airborne laser communication platform, various scanning acquisition schemes are analyzed and the most suitable scheme for airborne laser communication is selected. In order to avoid the loss of light spot at the edge of the capture, the method of setting the field of view is adopted to optimize the capture method. In order to avoid the long scanning capture time, the method of dividing the scanning speed is adopted to optimize the scanning end. Through theoretical analysis, the scheme makes the final location of spot capture closer to the center of the field of view, avoiding the abnormal loss of spot due to platform restrictions such as UAV vibration. Moreover, the optimization effect of the final scanning capture time presents a positive correlation with the difference of the distance between the two ends and the distance between the spot and the center of the uncertain area. The experimental test results show that this scheme achieves a certain degree of beneficial effect, and on the premise of avoiding the accidental loss of light spot due to the vibration of the UAV, the scanning and capturing time is accelerated by about 15% compared with the traditional method, which meets the actual application requirements.

Keywords: laser communication; airborne platform; scan; capture; scheme process; scan time

0 引言

随着激光通信技术的逐渐发展, 采用无人机平台作

为基础的机载激光通信越来越受到关注^[1-4]。与地面点对点等形式的激光通信系统相比, 机载激光通信具有机动性强、设备成本低的优点, 且机载激光通信可以在电

收稿日期:2024-12-13; 修回日期:2025-01-22。

作者简介:丁泽均(2001-),男,硕士研究生。

通讯作者:俞建杰(1980-),男,博士,副研究员。

引用格式:丁泽均,俞建杰,陈怡,等. 基于机载激光通信的扫描捕获优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(1):118-124,133.

磁干扰的环境下实现对目标的通信, 对于各个领域有着重大的意义; 与星载激光通信相比, 机载激光通信的灵活性也十分优秀, 可以在任意位置进行双端通信建链, 有着十分强大的便利性。

对于机载激光通信而言, 最具有挑战性的设计在于瞄准、捕获、跟踪 (PAT, pointing acquisition tracking) 系统的设计, 而 PAT 系统的设计也可以被认为是激光通信的核心设计。瞄准一般是指初始指向的操作程序, 其中瞄准的难度在于通过双端位置进行相应伺服系统控制量的转换; 捕获一般是指扫描与捕获的程序, 捕获的难度在于扫描与捕获系统的设计; 跟踪一般是指根据脱靶量控制使双端激光光斑稳定在一定范围内, 跟踪的难度在于运动平台之间如何保持稳定建链。

对于 PAT 系统的设计而言, 国内外学者更多关注的是捕获阶段的程序设计^[5-19], 对于扫描部分而言, 目前国内外的研究主要基于扫描方式与扫描模式的分析, 扫描方式主要分为光栅扫描、螺旋扫描、螺旋光栅扫描等形式, 扫描模式主要分为步进扫描和快速扫描; 对于捕获部分而言, 目前国内外的研究主要基于捕获方式的分析, 捕获方式主要分为凝视—凝视捕获方式、凝视—扫描捕获方式、跳步—扫描捕获方式, 以上各类方式的选取都有着不同的应用场景, 需要具体情况具体分析。

由于机载激光通信的平台限制, 无人机平台必然会出现抖动性较强的问题^[20], 因此可能会出现一些异常情况, 虽然相机在视场边缘捕获到了光斑, 但是由于机载平台的抖动而出现丢失光斑的情况。

文献 [21] 提出了常规机载激光通信的扫描捕获方案, 通过采用信标光的方案进行快速捕获, 但是该方案主要针对大型固定翼飞机, 并不具有普适性。文献 [22] 提出了粗瞄准机构和精瞄准机构相互结合的方法进行扫描捕获, 虽然精瞄机构对于抖动有一定的抑制作用, 但也增加了相应的成本。文献 [23] 提出了一种无信标捕获方法, 为激光通信小型化做出贡献, 从而可以更好地适应机载平台, 同时大大降低成本, 并给出分子区域扫描方式来解决平台振动问题, 但是该方案未能考虑光斑捕获时振动导致跟踪失效问题。文献 [24] 提出了一种高概率、快速扫描捕获方法, 利用全光捕获法进行光斑捕获, 并采用基于速率陀螺补偿进行扫描减少因为振动造成的漏扫概率, 但是该方案主要针对于扫描端的精准扫描, 同样未能解决针对抖动造成的光斑丢失的问题。

基于上述情况, 本文提出了一种设置进视场次数的方式用以在一定程度上避免出现上述问题, 但此方法同时也会导致出现扫描时间加长的问題, 这在机载激光通信的特殊环境上是一个需要重点关注的问题, 由于无人机平台的特殊性, 其飞行时间受电池容量的限制, 因此

前期扫描捕获时长过长会影响后续通信的时间, 基于此本文提出了一种改进的多次捕获扫描的优化方式, 用以缩短应用多次进视场方法时的扫描、捕获时间, 通过上述两种方法结合, 可以在最大程度上在不影响通信时长的前提下解决由于机载平台抖动问题造成的光斑丢失情况。

1 扫描捕获方案

1.1 扫描方法

大部分情况下, 激光通信系统的不确定区域都会大于激光发射束散角或是接收端视场角, 也就是说大部分情况下我们都需要采用扫描程序来确保最终接收端能收到光斑。对于扫描方式的选择, 常见的扫描方式有光栅扫描、螺旋扫描、螺旋光栅扫描等, 每种方式都有不同的特点, 下面对这三类扫描方式进行大致描述。

光栅扫描是指扫描轨迹本质是从一个方向向另一个方向的跳步, 其优点为实现起来较为容易, 但是由于其轨迹特性导致扫描时所需时间会比较长。光栅扫描示意图如图 1 所示。

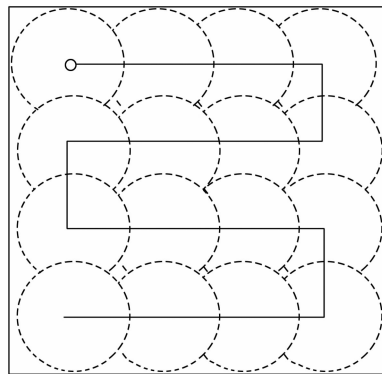


图 1 光栅扫描

螺旋扫描是一种由中心区域向四周进行螺旋状扫描的方法。这种方法的优点是从小概率区域向高概率区域扫描, 可以大大减少扫描时间, 但是其实现起来较为复杂, 需要考虑多重因素。具体示意图如图 2 所示。

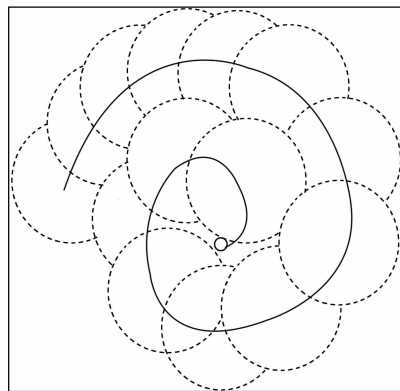


图 2 螺旋扫描

螺旋光栅扫描是一种基于螺旋扫描与光栅扫描优点的扫描方式,它不仅螺旋扫描从高概率处向低概率处扫描速度快的优点,还继承了光栅扫描均匀覆盖的特点,使其不太容易漏扫。但是其需要进行转向与急停操作,对于执行机构的要求比较高,在一定程度上增加了执行机构的成本。具体示意图如图 3 所示。

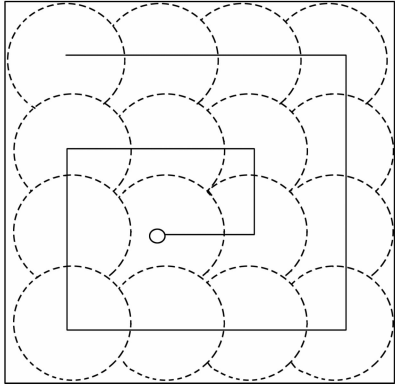


图 3 螺旋光栅扫描

1.2 扫描模式

除了扫描方法的区别,我们还需要关注扫描模式的区别,扫描模式一般分为步进扫描和快速扫描,二者同样有着不同的应用场景,下面对两种扫描模式进行大致描述。

步进扫描会在计算好的不确定区域之中,使用激光光束进行跳跃形式的推进,并且保证在推进时的任意一个点上都会等待通信另外一方发送反馈信号。如果该终端的接收机收到对方终端的反馈就不再扫描,反之接着跳步进行下一点。扫描时间的间隙含有通信双方之间传输光所需的时间、对方终端应答时间。步进扫描的优势是适用于大范围搜索和捕获目标,同时步进扫描可以通过调整多种参数,比如步进大小和扫描速度来适应不同的搜索需求,实现高精度的测量和定位。步进扫描用时表示为:

$$T = \left(\frac{2L}{c} + \frac{2}{fac} + 2T_{res} \right) \times N \quad (1)$$

其中: L 为双端的通信距离,单位为 m , c 为光的传输速度,一般是指每秒 $300\,000\,km$, N 为扫描点数, T_{res} 为图像探测器曝光时间,单位为 s , fac 为执行机构的带宽,单位为 Hz 。 T 为扫描总时长,单位为 s 。

快速扫描的操作流程与步进扫描区别比较大,其激光发射端在扫描的过程中不需要等待激光接收端的响应。发射端以双端初始指向的位置作为起始点进行一轮快速扫描,具体扫描位置以不确定区域大小作为界限,在扫描的过程中激光接收端处于凝视状态,并根据某一段时间发射端发射的激光在接收端红外相机成像画面中的运行轨迹进行计算,从而得出本端需要跳步的位置,

等待发射端进行一轮扫描结束之后,发射端返回初始扫描点的位置,接收端根据计算的跳步位置进行一次跳步;随后激光发射端进行第二轮快速扫描,激光接收端进行下二次的计算以及跳步操作。如此循环直到发射端与接收端都处于初始指向状态时,接收端的红外相机成像画面中可以观测到发射端发射的激光光斑。

执行一轮快速扫描所用扫描时间表示为:

$$T = \left(\frac{1}{f} + T_{res} \right) \times i + \frac{N}{c} \quad (2)$$

其中: f 为执行机构带宽; T_{res} 为图像探测器曝光时间; i 为驻留点数; N 为通信距离; c 为光的传输速度,一般是指每秒 $300\,000\,km$ 。扫描总时长即为快速扫描的总轮数乘以 T 。

1.3 捕获方式

在激光通信领域之中,常见的捕获方式有三种:凝视-凝视捕获方式、凝视-扫描捕获方式以及跳步-扫描捕获方式,下面对这三种方式进行简要描述。

凝视-凝视捕获方式:凝视-凝视捕获方式适用情况为激光通信终端的发射端束散角以及接收端的接收视场角均大于捕获不确定区域。由于凝视-凝视捕获方式不需要进行扫描程序的执行,可以很轻松地推断出凝视-凝视捕获方式相比于其他方式捕获的时间最短。

凝视-扫描捕获方式:凝视-扫描捕获方式可以根据发射端束散角与接收端视场角的不同细分为两种情况:1 对于不确定区域大于发射端束散角、小于接收端视场角来说,发射端采用小束散角进行扫描;接收端采用大视场接收角进行凝视接收。2: 对于不确定区域大于接收端视场、小于发射端束散角来说,接收端进行扫描程序;发射端进行凝视程序。

跳步-扫描捕获方式:跳步-扫描捕获方式需要保证接收端与发射端在同一个时序下面进行,一般情况下主光端机都会工作于跳步方式,而从光端机都会工作于扫描方式。主要工作次序为从光端机扫描结束后回到不确定区域中心点,即初始扫描点,主光端机则会进行一次跳步,随后进行下一次扫描。直至最后主光端机能够收到光斑。

对于捕获条件的判定,一般采取对连续几帧图像来判定,具体帧数由实际情况所决定,如若这几帧图像上都出现了光斑,且这些光斑可以通过相应的计算算出对应的质心,则可以判定为捕获到光斑。

1.4 扫描捕获流程

基于上述概述,对于机载激光通信而言,一般采用的扫描方式为螺旋扫描,因为其实现较为简单,且一般来说不确定区域的形式一般呈现为圆形,十分契合螺旋扫描的轨迹,漏扫概率相对较小;一般采用的扫描模式为步进扫描,由于机载平台的振动特性,无法确保初始

指向状态下对应转台执行机构的准确性, 而快速扫描对转台精度等要求较高, 因此难以精确计算步距距离, 不适合使用快速扫描程序, 且相比于快速扫描, 步进扫描程序实现更加容易, 一定程度上可以节省成本; 一般采用的捕获方式为凝视—扫描捕获方式, 这是因为机载激光通信一般距离较近, 对于能量要求相对较低, 可以采用相对大的视场或者束散角, 并且由于不确定区域受各种因素的影响, 导致其正常情况下都会大于接收端的接收视场角。而对于双端程序的选择, 需要根据实际情况进行选择。

下面根据上述选择进行机载激光通信扫描捕获常见流程进行概述。

阶段一: 发射端发射激光并根据螺旋扫描轨迹进行一个步长扫描, 随后进行等待, 接收端判断质心是否有效, 采取对连续几帧图像进行质心判定; 倘若接收端未接收到光斑或者判定质心无效, 则无需任何操作, 发射端等待一定时间后进入下一个步长扫描。该时间包括执行器执行时间、质心判断时间以及激光从发射端传输到接收端与接收端传输到发射端的时间之和, 该时间为一个固定的值。

阶段二: 接收端将光斑拉至红外相机视场中心, 此时根据同轴性发射端也能接收到光斑, 则发射端可以同样将接收到的光斑拉至红外相机视场中心, 并同时停止扫描。

经过上述两个阶段之后双端激光通信设备便可以进入跟踪以及通信程序。

2 扫描捕获技术优化

2.1 进视场次数调整

对于机载激光通信来说, 由于各类条件的限制, 比如空端无人机的抖动较为剧烈。由于捕获程序的限制, 会出现在相机视场的边缘处捕获到光斑时就停止扫描程序的情况, 这样就会带来一些问题, 比如受到无人机平台抖动的影响导致光斑会跳出红外相机视场的范围, 由于红外相机视场内光斑跳出视场而导致后续跟踪程序失效, 从而导致最终建链失败。

基于上述问题, 可以通过采取设置光斑进视场次数的方案。由于为了适配机载激光通信平台而选取的扫描轨迹为螺旋形的原因, 相机处视场捕获到光斑的位置基本都会出现在相机边缘, 此时通过设置二次进视场次数的调整, 可以确保在后续第二次捕获到光斑的时候, 光斑出现的位置可以尽可能的靠近到相机中心, 这样很好的解决了光斑受无人机抖动影响而跳出视场范围的问题。

调整完进视场次数后, 大部分情况光斑会在第一次进视场的基础上运行一个步长, 光斑依旧在红外相机的视场内, 且会更加靠近相机中心, 满足我们的预期目

标。但是也会有概率出现一个问题, 倘若步长设置较大或者红外相机视场较小, 在下一个步长运行时光斑可能跳出视场, 需要在原先轨迹的基础上进行第二圈螺旋扫描, 这样会导致扫描时间增加过多。基于此种情况我们考虑改进原先的步进扫描模式。

2.2 二次捕获扫描的优化

二次捕获扫描优化具体操作如下: 在接收端第一次捕获到光斑之后, 就可以考虑采用分区变速扫描的方式。具体操作方式为在扫描端与捕获端均添加一些操作, 捕获端在捕获到光斑的时候则通过数传电台给扫描端发送指令, 意在指示扫描端本端已经成功捕获到一次光斑, 扫描端根据计算算出在接收端捕获到一次光斑时的扫描点的坐标, 并将该坐标进行判断归类, 具体分区规则如下: 扫描端对应区域划分情况如图 4 所示。

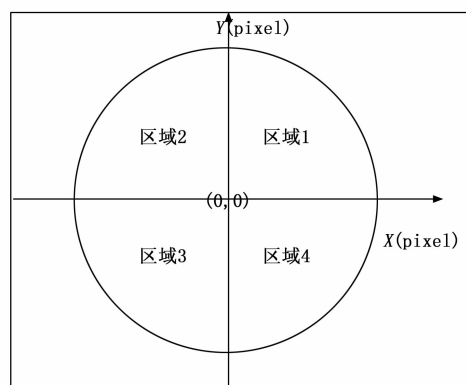


图 4 扫描端区域划分图

其中 $(0, 0)$ 代表的是坐标中心, 也是扫描的起始点。x 轴与 y 轴代表着以坐标中心为起始点划分的坐标轴, 其中 4 个区域可以按照如下规则进行划分:

$$\begin{cases} x \geq 0, y \geq 0 & a = 1 \\ x < 0, y \geq 0 & a = 2 \\ x < 0, y < 0 & a = 3 \\ x \geq 0, y < 0 & a = 4 \end{cases} \quad (3)$$

x 和 y 代表着对应扫描点所处的位置的 x 坐标与 y 坐标, a 代表当前扫描点所处的区域。

经过区域划分后, 可以将区域分为快扫区域与慢扫区域。倘若第一次在区域 1 处捕获到光斑, 则考虑在螺旋扫描轨迹的 2、3、4 区域处加快扫描, 同理第一次在区域 2 处捕获到光斑, 则考虑在螺旋扫描轨迹的 1、3、4 区域处加快扫描, 依此类推, 从而在确保多次捕获的情况下最大程度上加快扫描时间, 该方法相当于在光斑出现概率较低的区域进行一定程度的加速。快扫与慢扫区域主要以驻留时间长短为区别, 且该时间差值为发送端与接收端双端光传输时间, 即快扫区域发送端不等待接收端的信号即进行下一个步长的步进扫描。通过对快扫和慢扫的区域划分, 可以在很大程度上加快二次扫描

的速度，为后续建链通信让出时间。

倘若出现第二次光斑捕获区域位于快扫区域，驻留时间过短导致发射端不能立刻停止扫描进程，而是继续按照扫描路径执行，此时可以根据快速扫描和慢速扫描驻留时间的差值进行反向扫描补偿，具体执行流程如下，接收端在某一时刻收到光斑并随后向发射端发送指令，发射端接收到该指令之后按照相应的时间差值判断发射端行进了几个步长并随后反向行进对应数目的步长即可回到接收端捕获到光斑的位置。

经过上述分区操作后，可以很好解决进视场次数调整之后由于步长设置较大或者红外相机视场较小导致的光斑跳出红外相机视场进行第二圈扫描的时长过大问题，最小程度上影响后续通信时间。

2.3 扫描捕获优化流程

经过进视场次数调整以及二次捕获扫描优化之后，系统的扫描捕获流程会有些许变化，下面对系统扫描捕获流程按照机载激光通信的场景进行简要描述。

阶段一：发射端发射激光并根据螺旋扫描的轨迹进行一个步长扫描，随后进行凝视等待，接收端判断红外相机视场内是否有光斑出现，若有则进行判定质心是否有效，采取对连续几帧图像进行质心判定，如若这几帧图像上都出现了光斑，且这些光斑可以通过相应的计算算出对应的质心，则可以判定为捕获到一次光斑，随后向发射端发送捕获到一次光斑的指令；倘若接收端未接收到光斑或者判定质心无效，则无需任何操作，发射端等待一定时间后进入下一个步长扫描，该时间包括执行器时间、质心判断时间以及激光从发射端传输到接收端与接收端传输到发射端的时间之和，且该时间为一个定值。

阶段二：接收到指令后，发射端首先根据发射端发出指令的时间判断当前扫描区域并记录，并在判断的同时进行第二次的扫描，且在计算完区域之后根据所处区域的不同进行判断相应的驻留时间进行变速扫描，接收端同样按照阶段一的程序进行捕获判断，若捕获到光斑则进入阶段三；倘若接收端未接收到光斑或者判定质心无效，则无需任何操作，发射端等待一定时间后进入下一个步长扫描，这个时间相比阶段一的时间减少了发送端与接收端双端光传输的时间。

阶段三：倘若光斑出现在慢速扫描区域，接收端将光斑拉至红外相机视场中心，并发送停止扫描指令，此时根据同轴性发射端也能接收到光斑，发射端同样将光斑拉至红外相机视场中心，同时发射端停止扫描程序；倘若光斑出现在快速扫描区域，则接收端发送停止扫描指令，则发射端根据快速扫描和慢速扫描驻留时间的差值进行反向扫描补偿，并停止扫描，在此基础上接收端将光斑拉至红外相机视场中心，此时根据同轴性发射端

也能接收到光斑，发射端同样将光斑拉至红外相机视场中心。

经过上述 3 个阶段之后双端激光通信设备便可以进入跟踪以及通信程序。具体示意图如图 5 所示。

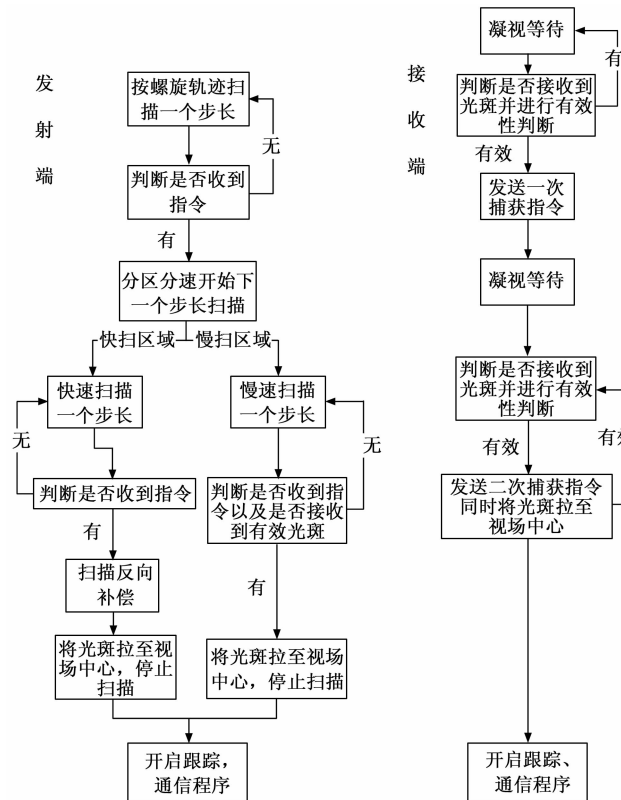


图 5 扫描捕获优化流程图

阶段三的分情况设置，不仅考虑了常规情况下的二次捕获情况，也考虑了二次光斑出现在快扫区域的异常情况，可以很好地确保程序的完善性。

3 实验结果与分析

3.1 仿真分析

3.1.1 参数设置

首先进行基础参数的设置。采用在不确定区域内生成一个固定点的坐标作为红外相机视场中心的实际位置，并使用步进扫描模式进行等螺旋等步长的螺旋扫描。这里为了实验的便捷性，人为控制整个红外相机接收视场都会位于不确定区域之内，确保每次扫描都能使接收端捕获到发射端发射的激光光斑，且忽略数传电台的传输时延，确保发射扫描端能实时判断第一次捕获到光斑时所处的扫描区域。设置光斑束散角为 55° ，重叠系数为 0.1，扫描不确定区域为 1 mrad，红外相机视场的大小为长 120 d、宽 80，其几何中心定义为相机的中心。双端距离模拟为 100 m，设置进视场次数为 2 次，即光斑需要被探测到两次才定义为光斑捕获。这里为了更好地显示二者的差异性，设置正常驻留时间为 1 ms，

快速扫描时的驻留时间为 0.5 ms, 在实际应用中, 双端距离越长, 分区变速扫描的优越性能越能够体现。

3.1.2 实验方法

对于实验的方法设置, 这里考虑首先使用普通步进扫描模式进行螺旋扫描, 随后选择二次捕获扫描的优化版本进行同样的实验, 将两次不同方法的扫描捕获实验结果进行对比。

3.1.3 实验结果

经过仿真得知该优化方案主要有两种情况, 第一种情况下优化方案时间基本不变, 这是由于红外相机视场足够大, 因此可以确保第一次捕获之后, 扫描进入下一个步长光斑依旧可以被红外相机所捕获。随机取一次仿真结果, 具体示意图如图 6 所示。

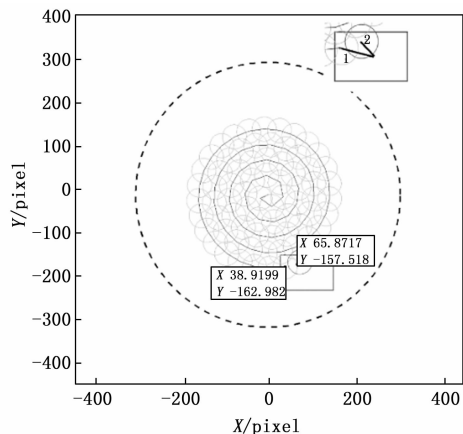


图 6 情况一示意图

由图 6 可知, 第一次捕获光斑位置为 (38.919 9, -162.982), 且第二次捕获位置为 (65.871 7, -157.518), 对于相机成像画面来说, 明显第二次比第一次更加靠近相机中心。

而大部分情况下大部分情况两种扫描程序会有几毫秒的差距, 这是由于光斑捕获位置位于红外相机视场边缘, 扫描端进行下一步长运动时会使得光斑跳出红外视场, 因此需要再次扫描多个步长才能进行二次捕获。随机取一次仿真结果, 具体示意图如图 7 所示。

由图 7 可知, 第一次捕获光斑位置为 (-131.286, -43.272), 第二次捕获光斑轨迹图颜色较深, 且第二次捕获位置为 (150.068, -84.363 6), 对于相机成像画面来说, 明显第二次比第一次更加靠近相机中心。

进行多次实验后, 具体实验对比结果如图 8 所示。

在图 8 中, 符号“三角形”代表的是未改进版本的二次扫描时间, 符号“圆形”代表的是改进版本的二次捕获扫描优化程序。

3.1.4 实验分析

根据实验结果来看, 整体相比于常规扫描方案会增加 15% 左右的时间, 但是该时间会随着扫描点的增加

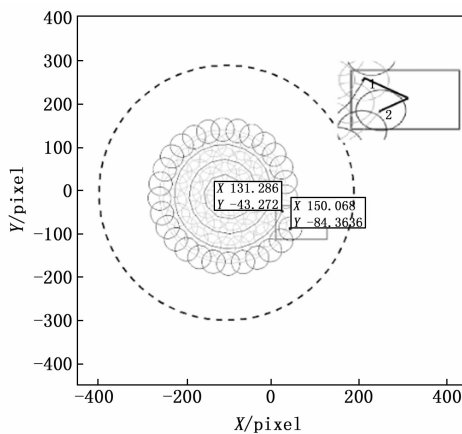


图 7 情况二示意图

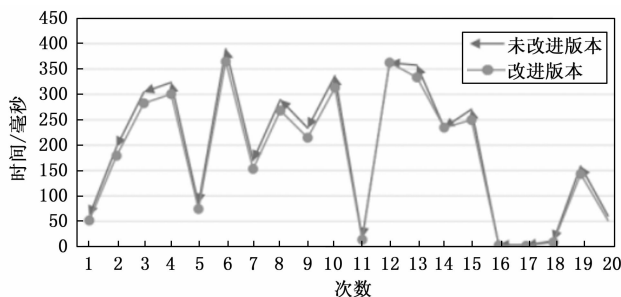


图 8 实验结果

而减少, 即在实际情况下则会根据驻留时间的长短展示出不同的效果, 即扫描捕获时间越长, 说明光斑位置离不确定区域中心越远, 此时使用改进后的程序对于扫描捕获时间的优化效果更好。同时更为重要的是, 经过理论分析该方案可以避免因为空端无人机抖动而导致的光斑跟踪失效情况, 从而避免进行重新扫描捕获的程序, 这会导致需要进行第二次重新扫描, 呈现几何倍数的时间增加。且根据多次实验结果显示, 二次捕获时光斑出现的位置都会存在于慢扫区域, 不必使用扫描反向程序进行补偿, 且这种情况对于系统精度要求较高, 对于代码复杂度也提出了不小的挑战, 因此可以暂时不考虑这类情况。上述仿真结果验证了该扫描捕获方法具有一定的实用性。

3.2 实物平台演示

3.2.1 实验场景设置

在实物平台模拟中, 选择将空端设备放置在电动转台上并进行振动模拟无人机振动环境, 地端设备正常放置于地面。对于此空地激光通信设备来说, 系统采用了无信标光模式, 即信号光代替信标光, 在接收端采用信标光与信号光按一定比例进行分束, 其中信标光用于双端设备进行瞄准捕获跟踪程序、信号光用于双端设备进行建链通信。双端设备距离约 100 m。具体模拟示意图如图 9 所示。

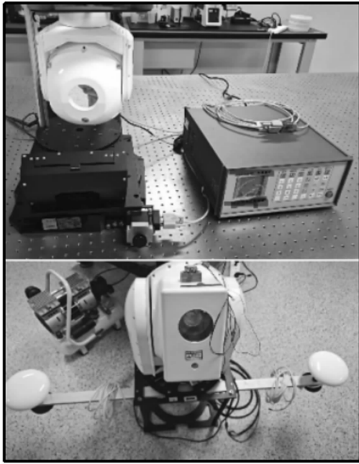


图 9 空地激光通信双端设备地面模拟示意图

3.2.2 实验操作步骤

双端设备上电,其中空端处增加仿真振动,设置视场次数为 2 次,并进行自检操作,自检完成后控制双端初始指向,随后打开激光,进行地端发光扫描,空端接收的操作程序,空端捕获到光斑后将光斑拉至相机中心并开启跟踪程序,此时根据同轴性地端也能捕获到空端发射的光斑,也同样进行捕获以及将光斑拉至中心的操作程序,随后开启跟踪模式。在双端稳定跟踪的前提下,开启通信模式。具体采用优化方案后的光斑捕获示意图如图 10 所示。

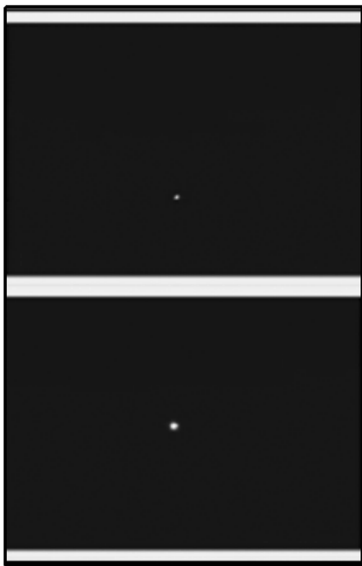


图 10 光斑捕获示意图

3.2.3 实验分析

根据多次对比仿真实验结果来看,倘若采用常规扫描捕获方案,会出现由于空端抖动等影响造成光斑捕获位置太过边缘而出现跟丢的情况,验证了空地激光通信采用二次进入视场操作的必要性。而经过了二次进视场

设置之后,光斑被捕获到的位置明显更加靠近中心,避免了上述意外情况,为后续跟踪提供了便利。且经过二次进视场后大部分情况下扫描捕获时间增加不太明显,基本上只会增加一个步长的驻留时间;小部分情况下应用二次捕获扫描的优化操作也在加快 15% 左右的扫描捕获的时间,为后续通信争取了宝贵的时间,且实测也不存在需要使用扫描反向补偿的情况。

4 结束语

机载激光通信对于振动导致的光斑丢失的情况需要着重考虑,采用二次进视场设置可以确保光斑最终被捕获的位置更加靠近红外相机视场中心,这样可以避免出现光斑丢失的情况;同时由于机载平台的限制,对于建链时间也有着很高的要求,而二次捕获扫描的优化可以在一定程度上加快扫描捕获的速度,且根据光斑出现在不确定区域的位置不同,优化效果也有不同的情况,整体呈现为随着光斑位置离不确定区域中心越远,该算法效果越好,且随着双端距离的增加,该算法的优越性也更加能够体现出来,这都可以为后续通信让出宝贵的时间。

对于后续研究的深入,需要考虑更多的因素,比如对于设备执行机构控制精度的研究。未来相信会有更多的措施用于解决机载激光通信建链阶段的光斑丢失的情况,同时也会有更多建链措施用于加快建链时间,提高机载激光通信的通信效率。总之,随着各类技术的提升,相信机载激光通信会有着更为广阔的应用市场。

参考文献:

- [1] 韩美苗,李雪,柯熙政. 飞行器中继无线光通信研究进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (11): 1-13.
- [2] 姜会林,刘志刚,佟首峰,等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析 [J]. 红外与激光工程, 2007 (s1): 299-302.
- [3] 祁锋. 机载激光通信系统发展现状与趋势 [J]. 数字通信世界, 2018, 157 (1): 128.
- [4] 赵志鹏. 机载激光通信系统发展现状与趋势探讨 [J]. 电子世界, 2019 (10): 85-86.
- [5] 赵勇. 陆军激光通信系统全光捕获技术实验研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [6] 李昕. 卫星光通信 APT 系统设计实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [7] 李文翰. 基于扫描振镜的无线光通信 ATP 机制研究 [D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [8] 温涛,魏急波,马东堂. 无线光通信中的步进扫描捕获方式研究 [J]. 红外与激光工程, 2006 (s1): 501-505.
- [9] 焦仲科. 星间激光通信若干关键技术研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.

(下转第 133 页)