



无信标星间激光通信系统粗精复合扫描方法

梅博 杨中华 李梦男

Coarse-refined combined scanning method of beaconless inter-satellite laser communication system

Mei Bo, Yang Zhonghua, Li Mengnan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210434>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星间光通信无信标捕跟瞄技术

Beaconless acquisition tracking and pointing of inter-satellite optical communication

红外与激光工程. 2017, 46(10): 1022002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201786.1022002>

XY-2号卫星激光通信载荷PAT在轨测试

XY-2 satellite laser communication equipment PAT test in orbit

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20200327 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200327>

到达角起伏对上行星地激光通信系统性能的影响

Influence of angle-of-arrival fluctuations on ground-to-satellite laser uplink communication system

红外与激光工程. 2018, 47(1): 122001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0122001>

高隔离度激光通信终端光学系统设计

Design of optical system of high isolation laser communication terminal

红外与激光工程. 2021, 50(7): 20200521 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200521>

摆镜式激光通信终端光束指向与粗跟踪特性

Beam pointing and coarse tracking characteristics of Tip-Tilt mirror type laser communication terminal

红外与激光工程. 2021, 50(12): 20210146 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210146>

柔性轴在卫星光通信中的使用与优化设计

Application and optimum design of flexible shaft in satellite optical communication

红外与激光工程. 2019, 48(8): 818001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0818001>

无信标星间激光通信系统粗精复合扫描方法

梅 博, 杨中华, 李梦男

(重庆星网网络系统研究院有限公司, 重庆 401147)

摘要: 无信标星间激光通信系统无需额外设置信标光组件, 直接采用小束散角的信号光进行瞄准捕获跟踪, 有利于降低终端的质量、体积、功耗和制造成本等重要指标, 满足商业航天和低轨卫星空间激光网络的发展要求。为了克服现有无信标激光通信系统扫描时间长、捕获难度大的问题, 综合考虑星上姿态变化、测量精度和终端安装定位误差等因素, 对扫描不确定域进行了数值计算, 设计了无信标扫描捕获流程, 定量分析了粗精扫描机构控制带宽、扫描步长、规划路径与光束覆盖面积的耦合关系, 提出了一种简单可靠的无信标粗精复合螺旋扫描方法。典型环境仿真结果表明, 采用所提方法平均扫描捕获时长小于 20 s, 捕获概率大于 95%, 有效提升了无信标系统的扫描效率, 可满足未来低轨卫星空间激光网络的快速建链要求。

关键词: 星间激光通信; 低轨卫星; 无信标; 扫描方法

中图分类号: TN929.13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210434

Coarse-refined combined scanning method of beaconless inter-satellite laser communication system

Mei Bo, Yang Zhonghua, Li Mengnan

(Chongqing Satellite Network System Co., Ltd, Chongqing 401147, China)

Abstract: The beaconless inter-satellite laser communication system (BILCS) does not to configure beacon light components, and directly applies signal light with small divergence angle to pointing, acquisition and tracking (PAT), which is beneficial to reduce the weight, volume, power consumption and manufacturing cost of the terminal, and meet the development requirements of commercial spaceflight and LEO satellite space laser network. To overcome the existing shortcomings of long scanning time and difficult acquisition of BILCS, satellite attitude change, measurement accuracy and terminal positioning error were taken into consideration, the scanning field of uncertainty was numerically computed, the beaconless scanning-acquisition process was designed, the coupling relationship of the control bandwidth of the coarse and refined scanning mechanism, scanning step size, planning path and the light coverage area was quantitatively analyzed, a simple and reliable coarse-refined combined spiral scanning method based on beaconless was proposed. Simulation results of typical environment demonstrate that the average acquisition time is less than 20 s, and the acquisition probability is more than 95% by this method, which effectively improves the BILCS scanning efficiency, and can satisfy the requirements of the future LEO satellite space laser network to rapidly establish laser communication link.

Key words: inter-satellite laser communication; LEO satellite; beaconless; scanning method

收稿日期: 2021-12-25; 修订日期: 2022-02-20

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项 (cstc2019 jscx-dxwtBX0011)

作者简介: 梅博, 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事卫星激光通信技术、空间网络信息技术等方面的研究。

0 引言

卫星激光通信具有通信速率高、通信容量大、抗干扰能力强、保密性好和终端轻小型化等优点,星间激光互联可大幅度降低网络延迟,是卫星通信系统的重要发展方向之一^[1-3]。目前,中国、美国、欧洲都发布了以空间网络为背景的低轨卫星通信系统建设计划,并陆续开展了星间激光通信试验。2020年8月,美国SpaceX公司在Starlink星座上首次进行了星间激光在轨通信试验,标志着卫星激光通信向低成本商业化应用迈进。同年,我国航天科技集团公司八院与航天科工集团公司行云工程也相继成功开展了低轨星间激光通信试验^[4]。星间激光通信具有通信距离远,激光束散角小等特征,这对星间激光通信扫描技术提出了很高的要求^[5]。在现有技术条件下,如何平衡终端扫描性能与成本之间的关系,成了星间激光通信在空间网络实用化方面需要考虑的重要因素之一。

当前,星间激光通信扫描方法共分为有信标扫描和无信标扫描两大类。有信标扫描一般采用束散角较大的信标光在不确定区域内按照一定轨迹快速覆盖扫描,目标终端可在极短时间内捕获到信标光,待捕获完成后切换小束散角的信号光进行稳态跟踪建链,最终实现星间激光通信^[6-7]。目前,有信标扫描方法已得到了在轨技术验证,具备一定的工程化应用条件^[1]。然而,信标光束散角通常比信号光大几倍至十几倍,造成所需功率大,这对星载终端功耗提出了更严苛的要求^[8]。通常情况下信标光采用的波段与信号光不同,需要额外设置信标光组件,这又近一步增加了重量体积和光路复杂程度。有信标对终端轻小型与低成本化设计提出了挑战。

与有信标扫描方法相比,无信标扫描方法直接采用信号光进行扫描捕获,其优点是,无需额外设置信标光组件,有利于降低研制和发射成本^[9],满足商业航天的发展要求。然而,现阶段无信标扫描技术受信号光束散角小、卫星姿态变化、平台振动等因素的影响,存在扫描时间长、漏扫概率大等问题,制约了无信标扫描技术在空间网络实用化方面的发展,目前国际上也仅开展了少数几次无信标在轨扫描捕获试验,如德国Tesat^[4]。为了适应星间激光通信的发展趋势,更好地满足我国卫星通信系统建设与高速组网需求,开

展基于无信标的星间激光通信快速扫描方法的应用研究越发迫切。参考文献[10]建立并分析了无信标激光通信链路捕获模型,提出了一种可针对不同卫星姿态漂移速率定量预测最佳扫描场次的多场扫描捕获方法,提高了捕获概率,但该方法无法解决无信标扫描方法单场次扫描耗时长的问题。为了克服这一问题,参考文献[11-12]分别提出了各自的改进型无信标扫描方法,有效降低了无信标单场扫描时长。但均未充分考虑终端执行机构的实际偏转能力,使得所提方法均缺乏实用性。

综上所述,为了进一步降低无信标扫描时长,提高捕获概率,提升无信标扫描技术的实用化水平,文中结合激光通信终端的实际捕跟性能,利用粗瞄机构(电机)偏转范围大和精瞄机构(压电陶瓷偏摆镜)控制频率高的技术特征,开展无信标粗精复合扫描方法的研究。综合考虑星上姿态变化、姿态测量精度和终端安装定位误差等因素,对不确定域进行数值计算,设计无信标扫描捕获流程,定量分析粗精执行机构控制带宽、扫描步长、规划路径与光束覆盖面积的耦合关系,提出基于无信标的粗精复合扫描方法,并对所提方法进行仿真分析。

1 捕跟流程设计

文中激光通信终端粗瞄机构(Coarse scanning mechanism, CSM)选用高精度力矩电机,精瞄机构(Refined scanning mechanism, RSM)采用压电陶瓷偏摆镜(Piezoelectric ceramic mirror, PZT)。总体技术参数如表1所示,指标满足研究要求。根据卫星平台的姿态控制与安装定位指标要求,开展扫描不确定域(Field of uncertainty, FOU)的计算。

卫星姿态数据由星上综合电子通过总线进行分发,姿态更新周期为1 Hz,根据表1数据显示,由测量精度和姿态变化引入的误差为 $524 \mu\text{rad}(3\sigma)$ 。考虑到双星链路的距离,由卫星定位误差造成的最大偏差约为 $50 \mu\text{rad}(3\sigma)$ 。此外,终端装星误差、平台轴系误差、回转误差带来的偏差为 $365 \mu\text{rad}(3\sigma)$ 。综上,由卫星姿态稳定度、测量精度和终端安装定位引入的总偏差约为 $940 \mu\text{rad}$,近似为 1 mrad 。因此,计算得到FOU范围为 $\pm 1 \text{ mrad}$,大小为 2 mrad 。

根据表1所示,终端相机刷新频率高,并且终端探测视域(Field of vision, FOV)大于FOU,终端FOV

表 1 总体仿真参数

Tab.1 Overall simulation parameters

Parameter	Value
1 Communication distance/km	≥ 3000
2 Satellite attitude stability/ $(^\circ)\cdot s^{-1}$	$\leq 0.02(3\sigma)$
3 Attitude measurement accuracy/ $(^\circ)$	0.01
4 Satellite positioning error/m	$\leq 50(3\sigma)$
5 Signal light wavelength λ /nm	1550
6 Field of vision/mrad	± 2.5
7 Signal light divergence angle α / μ rad	50-70
8 CSM control frequency f_{motor} /Hz	≤ 10
9 CSM control error δ_{motor} / μ rad	$\leq 30(3\sigma)$
10 RSM control frequency f_{PZT} /Hz	≤ 800
11 RSM control error δ_{PZT} / μ rad	$\leq 8(3\sigma)$
12 Camera refresh rate f_{CCD} /Hz	≥ 120

可覆盖 FOU。因此，文中扫描方式选用连续扫描^[14]，即终端在扫描过程中无需在每个扫描点驻足足够长的时间来等待相机探测与处理对方卫星终端发来的光信号。进一步地，双星无信标终端的捕跟方式采用扫描-凝视方式，如图 1 所示，终端 A 和 B 分别为扫描端和凝视端，捕跟流程具体如下：

(1) 根据预定控制参数，终端 A 与终端 B 分别发出信号光并指向对方卫星终端。受姿轨预测精度和控制误差等因素影响，终端瞄准指向方向在 FOU 内随机分布，双方连线在 FOU 内；

(2) 终端 A 按照预定扫描方法在不确定区域内由内至外扫描，终端 B 保持凝视状态，一旦终端 A 发来的信号光扫描到终端 B 相机视域内，则立刻被终端 B 捕获；

(3) 终端 B 根据捕获到的光斑在其相机视域中心的偏移量，迅速调整位置指向终端 A 光束发来的方向。由于光束是双向可逆的，此时，终端 A 相机也能探测到终端 B 调整后的回光；

(4) 终端 A 一旦探测到终端 B 的回光信号，则完成扫描捕获过程，双方进入到链路跟踪阶段。

2 扫描时长分析

根据图 1 可知，扫描捕获过程实际从捕跟步骤 (2) 开始，无信标扫描捕获总时长 T_{total} 由三部分组成，表达式如下：

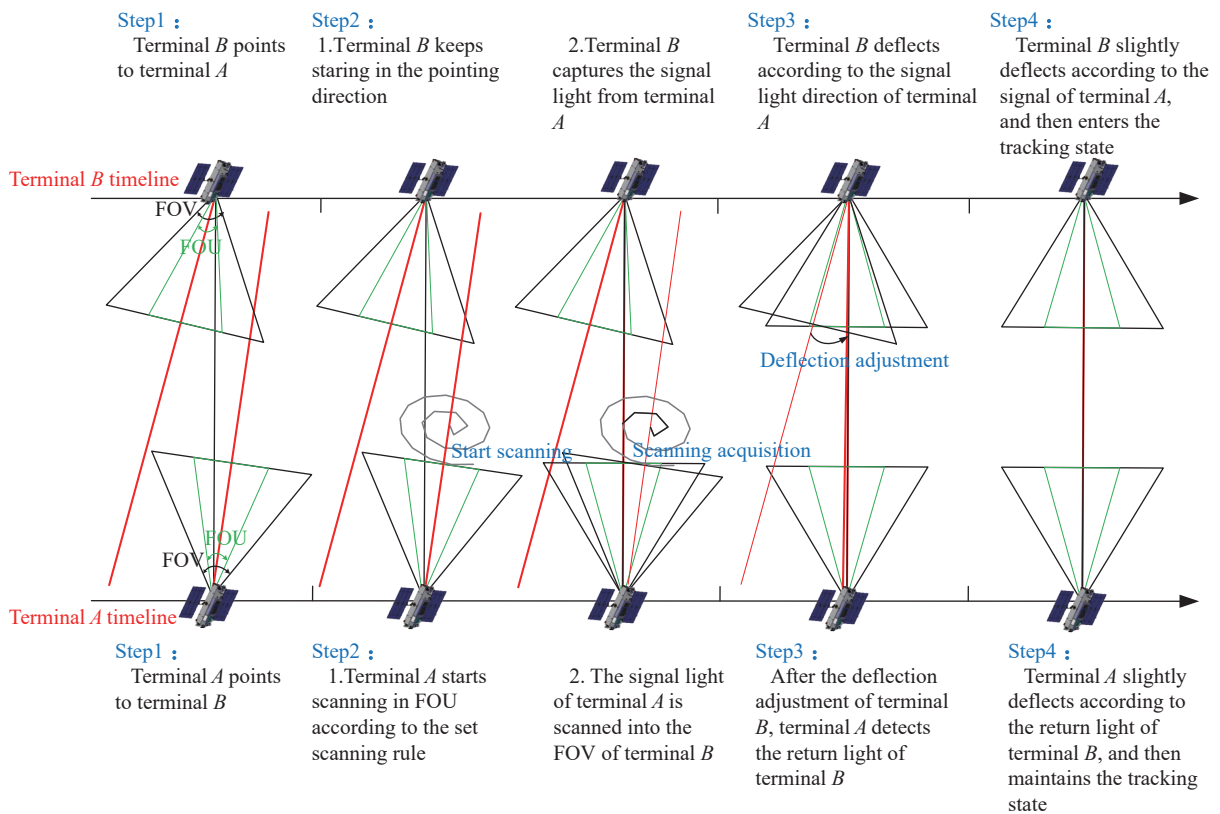


图 1 捕跟流程

Fig.1 Acquisition-tracking process

$$T_{total} = T_{Step2} + T_{Step3} + T_{Step4} \quad (1)$$

式中: T_{Step2} 、 T_{Step3} 、 T_{Step4} 分别为步骤 (2)~(4) 的时长。

与步骤 (2) 相比, 步骤 (3)、(4) 的耗时时长较短。步骤 (3) 时长主要由凝视端 B 转台偏转调整耗时、光束空间传输时延和扫描端 A 相机探测处理时延组成。转台偏转调整时间由电机控制带宽决定, 探测处理时延由相机刷新频率决定, 假设 2~3 个电机控制带宽内转台完成偏转调整, 步骤 (3) 用时如公式 (2) 所示:

$$T_{Step3} = n \cdot (f_{motor})^{-1} + \frac{D}{c} + (f_{CCD})^{-1} \quad (2)$$

式中: f_{motor} 为电机控制频率; D 为双星空间距离; c 为光束; f_{CCD} 为相机刷新频率; n 为电机控制带宽数量, 取值 2~3。

步骤 (4) 的时长主要由终端 B 机构微调耗时组成, 假设一个电机和 PZT 控制带宽内可完成微调, 步骤 (4) 用时表达式如下:

$$T_{Step4} = (f_{PZT})^{-1} + (f_{motor})^{-1} \quad (3)$$

式中: f_{PZT} 为 PZT 控制频率, 由于 PZT 需要和相机进行匹配控制, 因此, PZT 控制频率与相机刷新频率保持相同。

根据公式 (2)、(3) 计算, 步骤 (3) 和步骤 (4) 总耗时约为 0.4 s, 说明无信标扫描捕获时间主要由步骤 (2) 决定。

扫描端 A 的扫描方法是影响步骤 (2) 耗时的主要因素。首先, 采用在星间激光通信领域被广泛研究应用的扫描方法——等步长螺旋扫描方法^[15], 以几十微弧度束散角的信号光在 FOU 内进行全覆盖扫描仿真分析。考虑星上微振动环境, 单步扫描步长 I_θ 与信号光束散角 α 关系如图 2 所示, 其表达式如公式 (4) 所示:

$$I_\theta = \frac{\sqrt{2}}{2} \alpha - x \quad (4)$$

式中: x 为补偿星上微振动设置的重叠量, 大小与星上微振动幅值有关。

基于等步长螺旋扫描方法, 束散角假设为 60 μ rad, 全场螺旋扫描点超过 2300 个, 如图 3 所示。

单步扫描时长由执行机构控制带宽决定, 若按照传统方法, 将电机作为唯一的扫描执行机构, 则单步扫描时间约为 0.12 s, 全场扫描时间超过 276 s (4.6 min), 无法对光斑进行快速捕获。因此, 实现无信标快速扫描捕获主要有以下两种技术方案途径:

(1) 利用 PZT 控制频率高的特点, 采用 PZT 作为

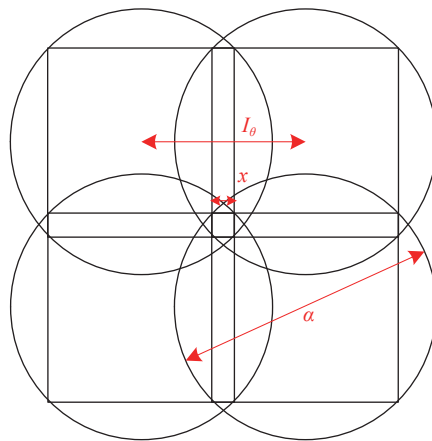


图 2 单步扫描步长与束散角关系

Fig.2 Relationship of single step scanning and divergence angle

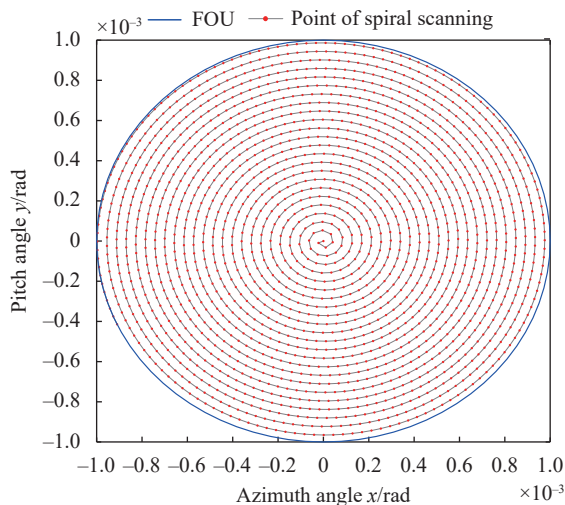


图 3 螺旋扫描结果

Fig.3 Result of spiral scanning

终端唯一扫描执行机构, 在 FOU 内完成高频快速全覆盖扫描;

(2) 利用电机扫描范围大和 PZT 控制频率高的特点, 采用粗精机构复合扫描的方法在 FOU 内完成快速全覆盖扫描。

将方案 (1) 应用到文中, 考虑终端光学压缩率, PZT 镜面与光路安装夹角、PZT 镜面在光路中的安装位置等因素。PZT 最大扫描走点距离 l_{PZT} , 如公式 (5) 所示:

$$l_{PZT} = \frac{\varphi_{PZT} \cdot \varepsilon}{\eta} \quad (5)$$

式中: φ_{PZT} 为 PZT 最大偏摆角度, 取值 1~1.5 mrad; η 为光路压缩率, 取值 8~10; ε 为光学反射传递系数, 数值与镜面与光路夹角和镜面安装位置有关, 文中取

值为 2。

根据公式 (5), 文中终端 PZT 最大走点距离不超过 300 μrad , 不能在 FOU 内单独完成全场扫描。基于方案 (1), PZT 最大偏摆角度要超过 4 mrad 才能实现全场快速扫描功能, 然而该类 PZT 尺寸较大, 需要更大体积的光学回转体进行内嵌安装, 从而增加了激光通信终端的体积重量, 这对终端轻量化设计产生不利影响。因此, 方案 (1) 无法适用于文中无信标扫描方法的应用研究。

根据上述分析, 方案 (2) 同样可实现无信标快速扫描捕获功能, 并且能适应终端低功耗、轻小型的设计要求。因此, 文中以上述等步长螺旋扫描为基础, 开展无信标粗精复合螺旋扫描方法设计工作。

3 扫描方法设计

根据方案 (2), 文中粗精复合螺旋扫描方法的设计原则为: 在 FOU 内规划大步长/大螺距螺旋线, 利用电机转动范围大的优势, 使电机按照螺旋点进行大角度走点; 以螺旋点为中心, 利用 PZT 控制频率高的特点, 使 PZT 快速扫描遍历各螺旋点周围区域。所提方法主流程如图 4 所示。

具体包括如下步骤:

(1) 以卫星终端初始指向角度为扫描原点, 终端方位角度和俯仰角度为坐标, 建立二维直角坐标系, 在二维坐标系内设置大螺距等步长螺旋扫描线, 各螺旋点为电机目标走点, 以各螺旋点为中心将 FOU 划分为多个扫描子区域;

(2) 在扫描子区域内以螺旋点为原点建立子区域极坐标系;

(3) 规划 PZT 在子区域内的扫描路径, 将 PZT 扫描路径坐标点参数从子区域极坐标系依次转换到终端极坐标系、终端二维坐标系, 最终得到 PZT 俯仰和方位角度实际控制量;

(4) 控制 PZT 在子区域内以实际角度扫描, 如扫描到对方卫星终端并捕获到对方回光, 则停止; 如没有扫描到对方卫星终端并捕获到对方回光, 则继续控制 PZT 在子区域内完成全覆盖扫描;

(5) 待 PZT 完成子区域扫描, 则控制电机按等步长螺旋线方式走点至下一个螺旋点, 如电机走点后扫描到对方卫星终端视域并捕获到对方回光, 则停止;

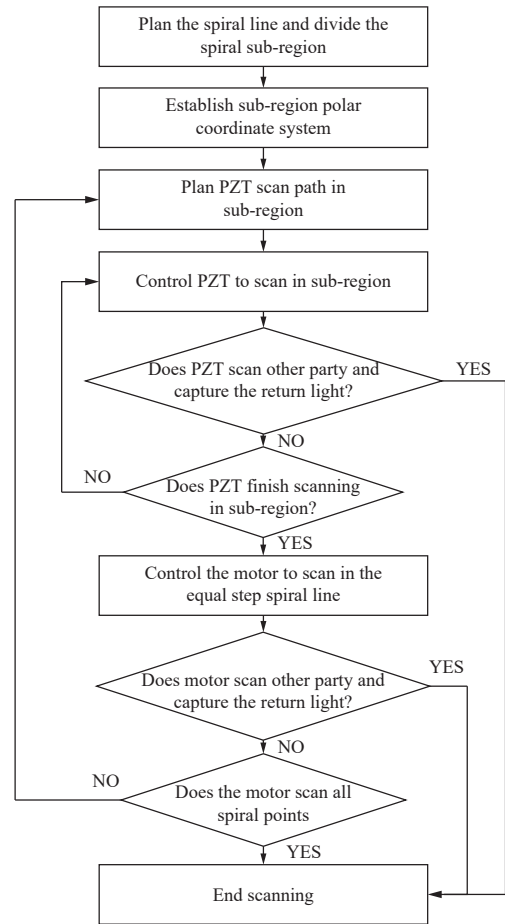


图 4 粗精复合螺旋扫描方法主流程

Fig 4 Main process of coarse-refined combined spiral scanning method

如电机没有扫描到对方卫星终端视域并捕获到对方回光, 则重复步骤 (3)、(4), 即控制 PZT 在下一个子区域内进行扫描;

(6) 当电机完成全部的螺旋线走点, 即完全遍历覆盖扫描 FOU, 仍未扫描到对方卫星终端视域并捕获到对方回光, 则停止, 重复步骤 (1), 重新进行粗精复合扫描。

螺旋线步长与子区域扫描路径是影响所提复合螺旋扫描方法扫描捕获性能的重要参数。针对上述所提方法, 对目标参数进行数值计算与优选。

FOU 内的等步长螺旋线总长度 l 表达式如下:

$$l = \frac{L}{4\pi} \left[\theta \sqrt{1 + \theta^2} + \ln(\theta + \sqrt{1 + \theta^2}) \right] \quad (6)$$

式中: L 为螺旋点步长; θ 螺旋角, 大小为 2π ; l 为螺旋线总长度。当 θ 大于 π 时, 可近似简化为:

$$l \approx \frac{\pi l_{FOU}^2}{L} = n \cdot L \quad (7)$$

式中: r_{FOU} 为 FOU 半角; n 为螺旋点总数。

螺旋点在 FOU 的极坐标表达式为:

$$\begin{cases} \rho_i = \sqrt{\frac{i}{\pi}} \cdot L & i > 2 \\ \theta_i = 2\sqrt{i} \cdot \pi \end{cases} \quad (8)$$

式中: ρ_i 为螺旋点极径; θ_i 为螺旋点极角; i 为第 i 个螺旋点。将螺旋点极坐标表达式转换为终端二维坐标系表达式, 如公式 (9) 所示:

$$\begin{cases} x_i = \sqrt{\frac{i}{\pi}} \cdot L \cos(2\sqrt{i} \cdot \pi) \\ y_i = \sqrt{\frac{i}{\pi}} \cdot L \sin(2\sqrt{i} \cdot \pi) \end{cases} \quad i > 2 \quad (9)$$

式中: x_i 为第 i 个螺旋点方位轴角度; y_i 为第 i 个螺旋点俯仰轴角度。

由于采用电机进行螺旋线走点, 因此, 扩大螺旋点步长, 减少电机螺旋线走点数量, 可降低整体扫描时间。然而, 在扩大螺旋点步长的同时, 每个螺旋点子区域的面积也在增加。子区域面积和受 PZT 最大走点距离和子区域扫描路径的制约, 并且 PZT 在扫描阶段结束后的跟踪阶段还担负着微调终端对准光斑的功能。因此, 在考虑 PZT 最大走点距离和最大偏摆角度范围的前提下需对 PZT 在扫描和跟踪阶段的偏摆角度进行分配, 如公式 (10) 所示:

$$\varphi_{PZT} = \varphi_{PZT_scan} + \varphi_{PZT_tracking} \quad (10)$$

式中: φ_{PZT_scan} 为扫描阶段 PZT 最大偏摆角度; $\varphi_{PZT_tracking}$ 跟踪阶段 PZT 最大偏摆角度。

文中假设 φ_{PZT_scan} 与 $\varphi_{PZT_tracking}$ 平均分配 PZT 最大偏摆角度量程 φ_{PZT} , 将 φ_{PZT_scan} 代入公式 (5) 进行计算, 得到所提复合扫描方法的 PZT 实际最大走点距离 l_{PZT} 小于 $150 \mu\text{rad}$ 。因此, 在考虑 l_{PZT} 不超过 $150 \mu\text{rad}$ 的前提下, PZT 的走点区域被约束在以螺旋点为中心, 半径小于 l_{PZT} 的圆内。同样地, 螺旋点子区域则是以螺旋点为中心的中心对称区域。

光栅-螺旋方法是一种高效遍历中心对称图形区域的规划方法^[16], 文中采用光栅-螺旋方法在子区域内进行扫描路径规划。基于该方法, 以 PZT 最大走点距离 l_{PZT} 为约束条件, PZT 在子区域内最多可扫描两圈, 共 24 步, 如图 5 所示。根据上述分析可知, 螺旋点步长越大, 则电机走点数量越少, 整体扫描时间也越少。根据这一论述, 在满足 PZT 实际走点距离小于 l_{PZT} 的前提下, 文中选取 PZT 在子区域内的光栅-

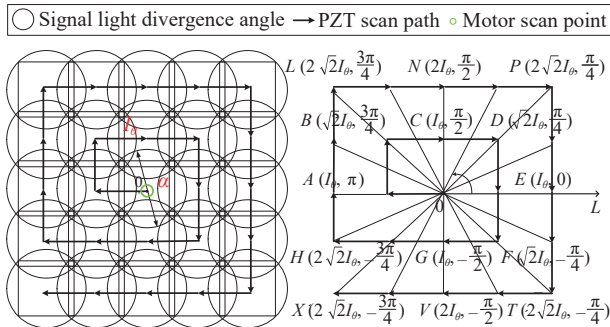


图 5 子区域扫描路径规划

Fig.5 Scanning path planning of sub-region

螺旋扫描走点数量为 24, 保证电机螺旋点数量最少, 整体扫描耗时最少。

子区域极坐标系下所规划的 24 个光栅-螺旋扫描路径坐标点矩阵 N_{matrix} 如下:

$$N_{matrix}(:, 1) = \rho'_{N_{matrix}}, N_{matrix}(:, 2) = \theta'_{N_{matrix}} \quad (11)$$

式中: $\rho'_{N_{matrix}}$ 为子区域极坐标系下 PZT 所有扫描点的极径; $\theta'_{N_{matrix}}$ 为子区域极坐标系下 PZT 所有扫描点的极角, 如图 5 所示。

考虑电机控制误差 δ_{motor} 和大螺距造成的相邻子区域径向漏扫, 螺旋点步长 L 需设置重叠量 β , 如图 6 所示, 其表达式为:

$$\begin{cases} L = 5l_{\theta} - \beta \\ \beta = \delta_{motor} + \varepsilon \end{cases} \quad (12)$$

式中: δ_{motor} 为电机控制误差; ε 为径向漏扫补偿量, 根据螺旋线步长、螺距和子区域面积等合理取值。

所提复合扫描方法在 FOU 内的全场最大扫描时间 T_{step2_max} 计算如下:

$$T_{step2_max} = n \cdot (F_{motor})^{-1} + 24 \cdot n \cdot (F_{PZT})^{-1}, \frac{\pi \cdot r_{FOU}^2}{L^2} = n \quad (13)$$

式中: r_{FOU} 为 FOU 半角。

将子区域极坐标系下的 PZT 扫描路径点坐标转

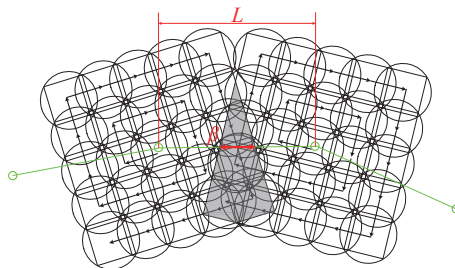


图 6 螺旋线步长重叠量

Fig.6 Overlap of spiral step size

换到终端二维坐标系,可转化为 PZT 的角度实际控制量,如图 7 所示,转换关系式如下:

$$\begin{cases} \rho_{N_{matrix}} \cos(\theta_{N_{matrix}}) = \rho_i \cdot \cos(\theta_i) + \rho'_{N_{matrix}} \cdot \cos(\theta_i + \theta'_{N_{matrix}}) \\ \rho_{N_{matrix}} \sin(\theta_{N_{matrix}}) = \rho_i \cdot \sin(\theta_i) + \rho'_{N_{matrix}} \cdot \sin(\theta_i + \theta'_{N_{matrix}}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_{N_{matrix}} = \rho_{N_{matrix}} \cos(\theta_{N_{matrix}}) \\ y_{N_{matrix}} = \rho_{N_{matrix}} \sin(\theta_{N_{matrix}}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\rho_{N_{matrix}}$ 为子区域内 PZT 所有扫描点在终端极坐标系下的极径; $\theta_{N_{matrix}}$ 为子区域内 PZT 所有扫描点在终端极坐标系下的极角; $x_{N_{matrix}}$ 为子区域内 PZT 所有扫描点在终端二维坐标系下的方位角度控制量; $y_{N_{matrix}}$ 为子区域内 PZT 所有扫描点在终端二维坐标系下的俯仰角度控制量。

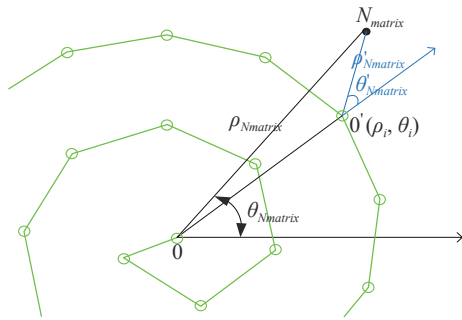


图 7 PZT 扫描点坐标转换

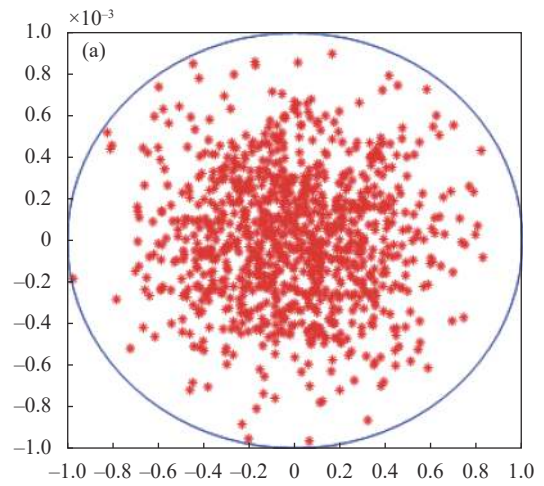
Fig.7 PZT scanning point coordinate transformation

4 仿真结果分析

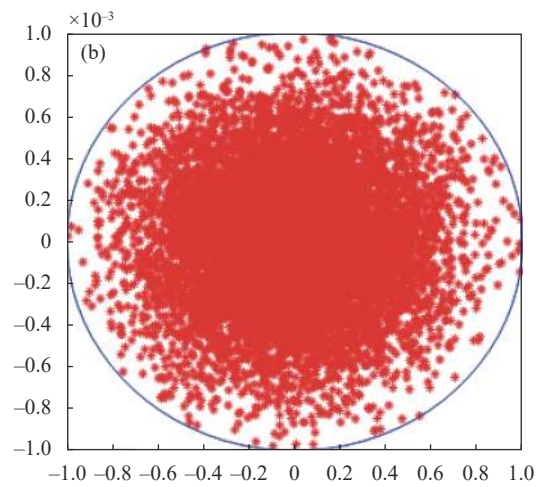
由于受到卫星姿态抖动等因素的影响,终端初始指向方向在 FOU 内呈正态随机分布^[13],相同地,对方卫星终端位置在 FOU 内也呈正态随机分布。以扫描端终端为例,当扫描端信号光扫到对方凝视端视域内,凝视端则根据信号光在其视域内的位置进行角度调整,并沿着信号光反方向发射回光,由于这一过程时间很短 ($T_{step3} < 0.4$ s),因此,可假设在 FOU 内,扫描端扫到凝视端视域的位置与凝视端回光位置近似相同。

文中仿真参数如表 1 所示,典型仿真环境为终端通信距离 3 000 km,星上微振动平均振幅 15 μ rad,凝视端视域位置与回光光斑位置相同,并且在扫描端 FOU 内呈正态随机分布。基于典型环境,开展所提复合扫描方法 1 000 次,10 000 次,100 000 次重复性捕获回光光斑的仿真测试,光斑在 FOU 的正态随机分布情况,如图 8 所示。

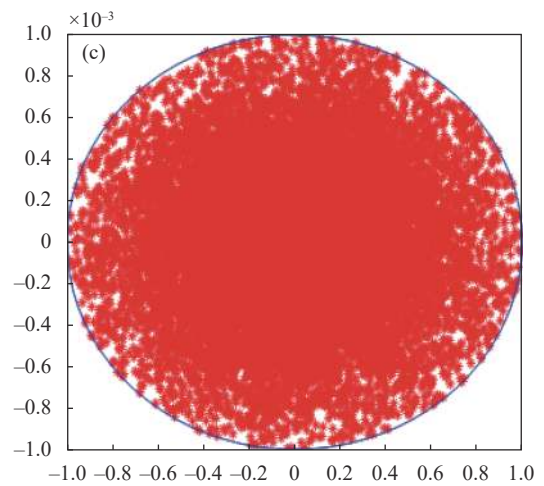
文中定义:捕获成功率=成功捕获次数/总扫描场次。1 000 次,10 000 次,100 000 次重复性扫描捕获仿



1 000 simulations



10 000 simulations



100 000 simulations

图 8 激光光斑正态随机分布情况

Fig.8 Normal random distribution of laser spot

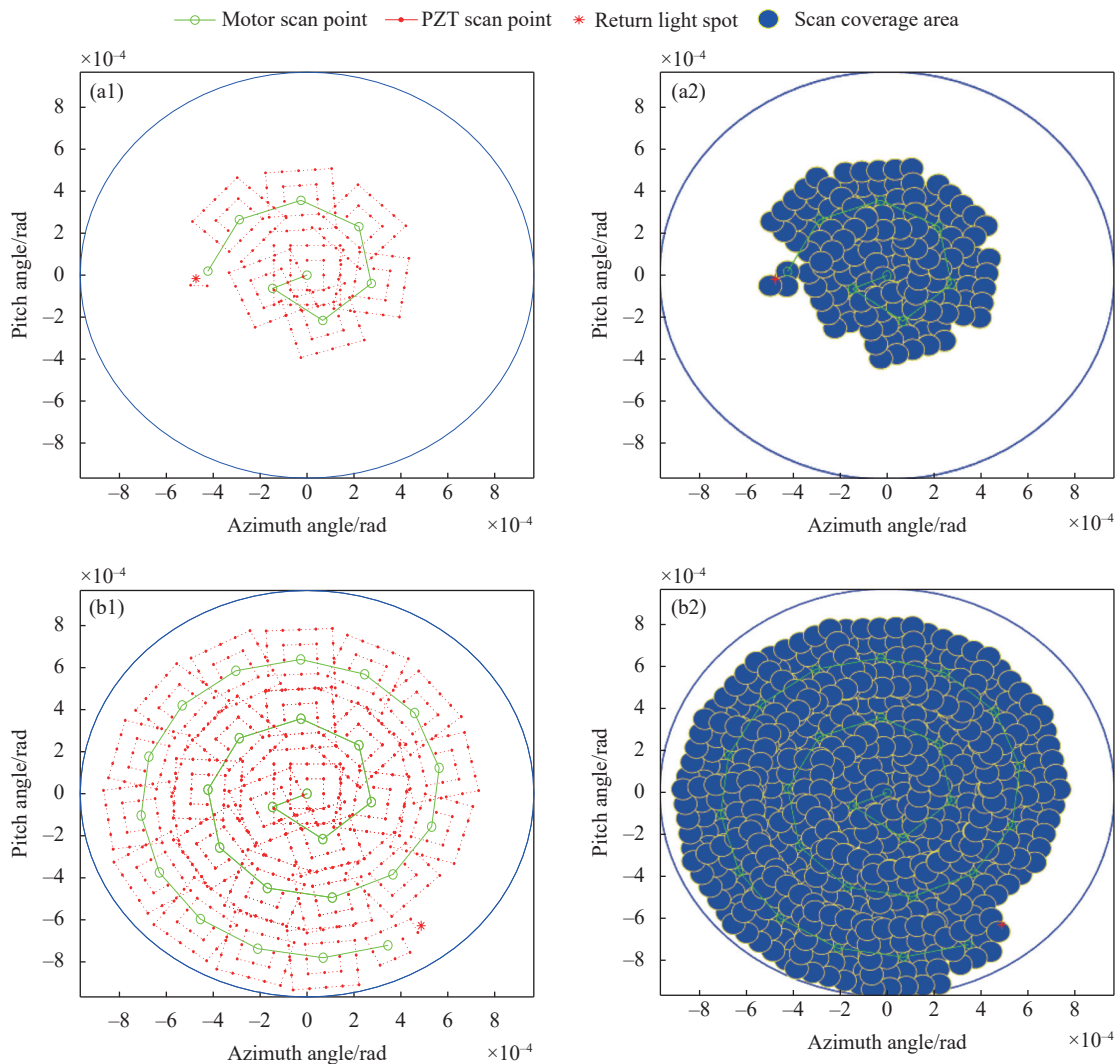
真测试结果,如表 2 所示。图 9(a1)~(a2)、(b1)~(b2) 为所提方法的部分仿真示意结果。由表 2 结果可知,所提方法平均捕获时长不高于 12.2 s,全场最大捕获时长不超过 36.5 s,最小捕获时长仅为 0.0083 s,捕获成功率大于 98.7%。根据第 2 节分析可知,步骤 (3) 和

步骤 (4) 共耗时约 0.4 s,与本节仿真得到的平均时长结果,即步骤 (2) 的平均时长累加,所提方法的整体平均耗时低于 12.6 s,极大地降低了无信标扫描捕获时长,可有效提升无信标星间激光通信终端的在轨建链效率。

表 2 文中所提方法仿真结果

Tab.2 Simulation results of the proposed method

No.	Simulation item	Average acquisition time/s	Minimum acquisition time/s	Maximum acquisition time/s	Acquisition probability
1	1000 simulations	12.142 1	0.016 5	36.310 0	99.1%
2	10000 simulations	12.123 9	0.008 3	36.480 0	98.7%
3	100000 simulations	12.124 1	0.008 3	36.480 0	98.7%



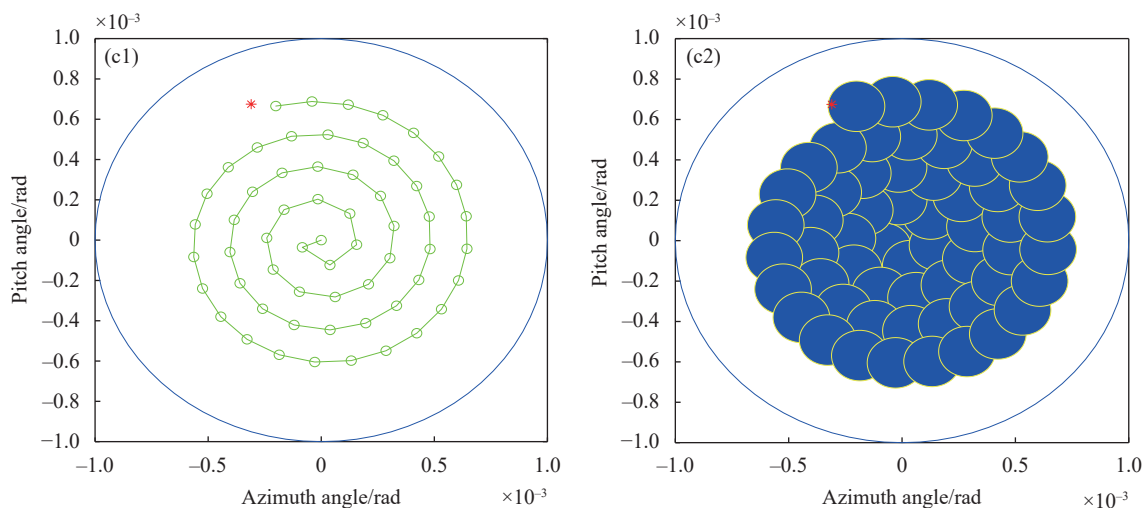


图 9 (a)~(b) 所提无信标方法的部分仿真结果; (c) 有信标方法的部分仿真结果

Fig.9 (a)-(b) Partial simulation results of the proposed beaconless method; (c) Partial simulation result of the beacon method

为了进一步证明文中所提方法的工程实用性,所提方法与经过在轨验证的有信标螺旋扫描方法进行仿真对比。信标光束散角为 $230 \mu\text{rad}$, 其余仿真参数与所提方法一致。仿真表明,有信标方法的最大捕获时间为 27.8333 s , 最小时间为 0 s , 捕获概率大于 99.0% , 图 9(c1)~(c2) 为有信标螺旋扫描方法的部分仿真示意结果。

与有信标扫描方法结果相比,在最大捕获时长这项指标上,所提方法比有信标方法平均多耗时近 9 s , 这是由于信号光比信标光小,导致全场走点数量比信标光多十几倍,造成了这项指标不能媲美有信标扫描方法。而在平均捕获时长、最小捕获时长和捕获成功率指标上,所提方法与有信标方法差距不大,进一步证明了所提方法的实用性和有效性。

5 结 论

为了进一步改善无信标星间激光通信系统的扫描性能,提升无信标扫描技术的实用化水平,文中对扫描不确定域进行了数值计算,设计了无信标扫描捕获流程,定量分析了粗精扫描机构控制带宽、扫描步长、规划路径与光束覆盖面积的耦合关系,提出了基于无信标的粗精复合螺旋扫描方法,并对所提方法进行了仿真对比分析。具体如下:

(1) 综合考虑星上姿态变化、姿态测量精度和终端安装定位误差等因素,设计了无信标扫描-凝视捕

跟方式,提出了一种无信标粗精复合螺旋扫描方法及其设计思路;

(2) 以星上微振动、PZT 最大扫描走点距离、粗精机构控制频率等为设计约束条件,对电机螺旋线走点步长、PZT 扫描路径、子区域扫描重叠量等进行定量计算,得到了所提无信标粗精复合螺旋扫描方法的优选参数;

(3) 对所提方法进行仿真,结果表明该方法平均扫描捕获时长不超过 20 s , 捕获成功率大于 95% , 有效提升了无信标星间激光通信系统扫描捕获效率。

参考文献:

- [1] Gao Shijie, Wu Jiabin, Liu Yongkai, et al. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(73): 7-17. (in Chinese)
- [2] Gu Jian, Ai Yong, Chen Jing, et al. Application of distribution observer for space optical communication PAT system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0122003. (in Chinese)
- [3] Zhang M, Tong S F, Song Y S, et al. Modeling and reality analysis of beaconless spatial acquisition for intersatellite laser communication system [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(10): 106108.
- [4] Yu Huilong, Bao Zhikang, Wang Xuan, et al. XY-2 satellite laser communication equipment PAT test in orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200327. (in Chinese)
- [5] Wang Junxiao, Song Yansong, Tong Shoufeng, et al. Linkage

- tracking control technology of space laser communication network mirror [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 537-546. (in Chinese)
- [6] Guo Chaoyong, Liu Jikui, Chen Junbo, et al. Compound control strategy of satellite laser communication coarse tracking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 195-202. (in Chinese)
- [7] Wen Tao, Wei Jibo, Ma Dongtang. A step method for laser acquisition in atmosphere laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 1007-2276. (in Chinese)
- [8] Yu S Y, Wu F, Tan L Y, et al. Static position errors correction on the satellite optical communication terminal [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(2): 026112.
- [9] Teng Y J, Zhang M, Tong S F. A novel approach for optimization control of dynamic tracking with platform vibration in the ground test of satellite laser communication systems [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 35049-35059.
- [10] Wu Feng. Research on fast acquisition and stable tracking method with narrow beacon in satellite optical communication link[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [11] Guo Aiyan, Gao wenjun, Zhou Aosong, et al. Beaconless acquisition tracking and pointing of inter-satellite optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1022002. (in Chinese)
- [12] Teng Y J, Zhang M, Tong S F. The optimization design of sub-regions scanning and vibration analysis for beaconless spatial acquisition in the inter-satellite laser communication system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1-11.
- [13] Yu Siyuan. Satellite Optical Communication Pointing, Acquisition and Tracking Technology[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [14] Xue Zhengyan, Qi Bo, Ren Ge. Vibration-induced jitter control in satellite optical communication[C]//Proc of SPIE, 2013, 8906: 89061.
- [15] Li Xin, Song Quanyou, Ma Jing, et al. Spatial acquisition optimization based on average acquisition time for intersatellite optical communications[C]//IEEE 10 th Russian-Chinese Symposium on Laser Physics and Laser Technologies (RCSLPLT) and 2010 Academic Symposium on Optoelectronics Technology (ASOT), 2010: 244-248.
- [16] Tu Bo, Liu Lu, Liu Yihui. Acquisition probability analysis of ultra-wide FOV acquisition scheme in optical links under impact of atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(14): 3147-3155.