

基于飞艇平台激光通信系统的捕获性能研究

滕云杰¹, 宋延嵩^{2*}, 佟首峰², 张敏²

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学空地激光通信国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 针对飞艇平台的运动特性, 优化设计了飞艇-船激光通信系统的捕获方案; 针对小束散角远距离通信系统捕获时间长的难题, 提出了粗精复合扫描策略。重点分析了粗精复合扫描的工作原理和捕获过程中的影响因素, 同时依据飞艇的运动速度和平台振动特性, 设计了粗精复合扫描策略中重叠区域、捕获视场、扫描速度、运动补偿等重要参数; 通过仿真分析, 并结合外场飞艇对船舶实验进行了验证, 在束散角为 $400 \mu\text{rad}$ 的条件下, 捕获时间达到 62.7 s 。

关键词 光通信; 飞艇平台; 运动补偿; 粗精复合扫描

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0606005

Acquisition Performance of Laser Communication System Based on Airship Platform

Teng Yunjie¹, Song Yansong², Tong Shoufeng², Zhang Min²

¹ Institute of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China;

² Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In this paper, we design and optimize the ship-to-airship capture scheme of laser communication system according to the motion characteristics of an airship platform. A composite scanning strategy, consisting of coarse scanning and fine scanning, is proposed to solve the problem of the long capture time under conditions of small beam divergence angle and far distance. The working principle of the composite scanning strategy and the influencing factors in the capture process are analyzed emphatically, meanwhile, the important parameters in the coarse-fine composite scanning capture process, such as overlap area, capture field, scanning speed and motion compensation are optimized in detail. The simulation results show that the acquisition time reaches 62.7 s when the divergence angle is $400 \mu\text{rad}$. Finally, we also validate the results by performing the outdoors airship experiment.

Key words optical communication; airship platform; motion compensation; coarse-fine composite scanning

OCIS codes 060.2605; 120.4820; 350.4600; 140.7010

1 引 言

临近空间平台多为飞艇和飞机, 该平台具有长达数月的滞留和监视能力以及快速的反应能力, 并具有较高的布防效率、较高的安全性能、可恢复性、

地面支持设备需求简单等优点。所以, 临近空间的军事开发和利用备受国际重视, 其中临近空间的激光通信系统是研究的热点之一。目前国内开展激光通信研究的机构较多, 其中长春理工大学开展了飞艇-船舶空地研究实验、双直升机间空空激光通信实

收稿日期: 2017-11-13; 收到修改稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(91438024)

作者简介: 滕云杰(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事空间激光通信瞄准捕获跟踪方面的研究。

E-mail: 1297891415@qq.com

导师简介: 佟首峰(1972—), 男, 教授, 博士生导师, “长江学者”特聘教授, 主要从事空间遥感与激光通信方面的研究。

E-mail: tsf1998@sina.com

* 通信联系人。E-mail: songyansong2006@126.com

验和双固定翼飞机间空空激光通信实验^[1]。因为飞艇平台自身的振动范围大,所以需要分析其振动功率谱,并针对平台振动设计合理的重叠区域,才能完成高视场覆盖率的捕获^[2]。飞艇平台的相对运动对整个捕获的成功率和捕获时间有显著影响,所以需要对其进行合适的运动补偿^[3-4]。

本文针对远距离激光通信的飞艇平台,提出了小束散角分子区域的复合扫描,分析了飞艇平台捕获过程的影响因素,将陀螺作为传感器来抑制飞艇平台的振动,通过伺服转台建立稳定的跟踪系统,对复合扫描进行优化设计,详细分析各参数及其与复合扫描过程的匹配问题;对此方式的捕获时间、平台相对运动后的轨迹与运动补偿的轨迹逐一进行了仿真,最后通过外场实验对设计的参数与仿真分析进行验证。

2 基于飞艇平台捕获的影响因素分析

飞艇平台捕获不确定区域、平台振动、捕获概率是评价捕获系统性能的重要指标,三者间的平衡和统一是捕获系统设计的关键。

2.1 飞艇捕获不确定区域分析

飞艇捕获不确定区域的主要来源是初始指向误差,过大的指向误差会导致捕获不确定区域增大,同时延长捕获过程的扫描时间。这里,视轴的初始指向误差 σ 可以表示为^[5]

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\lambda}^2 + \sigma_{\rho}^2 + \sigma_{\text{R}}^2 + \sigma_{\text{C}}^2 + \sigma_{\text{G}}^2 + \sigma_{\text{E}}^2}, \quad (1)$$

其中

$$\sigma_{\text{A}} = \sqrt{\sigma_{\psi}^2 + \sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\varphi}^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{P}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}, \quad (3)$$

式中: σ_{A} 为平台姿态误差,由偏航(σ_{ψ})、俯仰(σ_{θ})和滚转姿态角测量误差(σ_{φ})构成; σ_{P} 为平台定位误差,由经度(σ_x)、纬度(σ_y)和高程位置测量误差(σ_z)构成; σ_{R} 为系统装调误差; σ_{C} 为指向解算误差; σ_{G} 为转台执行误差; σ_{E} 为其他的小误差。初始指向误差可视服从高斯分布的随机变量,捕获不确定区域(θ_{uc})应当满足

$$\frac{\theta_{\text{uc}}}{2} \geq 3\sigma. \quad (4)$$

根据飞艇激光通信系统的实验测试所获得的相关经验,飞艇平台捕获不确定区域一般在 30~40 mrad 之间。

2.2 飞艇平台振动与重叠区域的关系分析

飞艇平台自身的振动较大,如果在系统设计过

程中忽略平台自身振动带来的影响,就会导致捕获过程中出现漏扫区域,降低整个系统的捕获概率。所以,需要对平台的振动特性进行分析,并在捕获策略中选择合理的重叠区域,抑制振动的影响,防止漏扫^[6-8]。

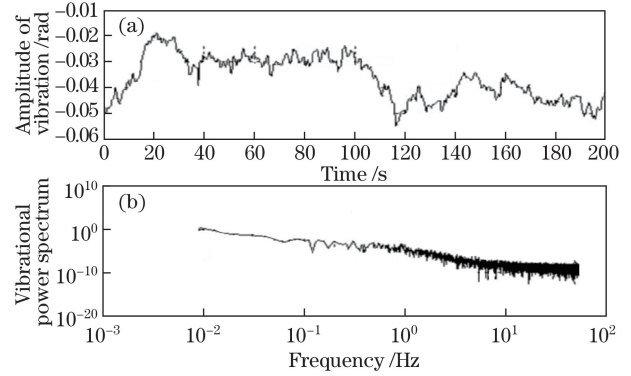


图 1 浮空飞艇的(a)时域曲线和(b)振动特性谱线

Fig. 1 (a) Time domain curve and (b) vibration characteristic spectrum of airship

图 1 为浮空飞艇的时域振动曲线及振动特性曲线。首先将飞艇飞升至离地面 1500 m 高度处,然后保持此高度,以 10 km 为半径进行画圆飞行,通过惯性导航系统来测试飞艇在飞行过程中的振动谱线,最后保存谱线进行分析。根据飞艇的振动谱线特点可以看出,飞艇平台主要的几种振动在低频范围,最大的抖动幅值可以达到 20 mrad,所以在飞艇的动态跟踪系统设计中,需要对其低频振动进行有效抑制,因此针对飞艇的跟踪系统设计,需要抑制能力强的低频信号,以保证最终的跟踪精度。

飞艇平台的姿态变化很大,为了抑制平台的振动,以采样频率为 1000 Hz 的陀螺为传感器,通过伺服转台建立稳定的跟踪系统,传递函数如下:

$$G(S) = \frac{2054 \left(1 + \frac{S}{9.4}\right)}{S \left(1 + \frac{S}{0.5}\right) \left(1 + \frac{S}{500}\right)^2}, \quad (5)$$

式中: $G(S)$ 为传递函数; S 为复变量。图 2 为经过分析校正后的伺服系统位置环开环幅频特性曲线,其系统剪切频率为 104 rad/s,对应相位裕量为 61.47°,因此整个校正的位置环系统稳定。

对位置环伺服系统进行闭环仿真分析,如图 3 所示,伺服系统的位置环带宽为 8 Hz,其闭环响应峰值小于 1.25,闭环带宽是开环带宽的 1.6 倍,系统有较强的稳定性。

通过位置环抑制飞艇平台的抖动可以有效地将平台抖动抑制在合理的范围内;结合扫描过程重叠

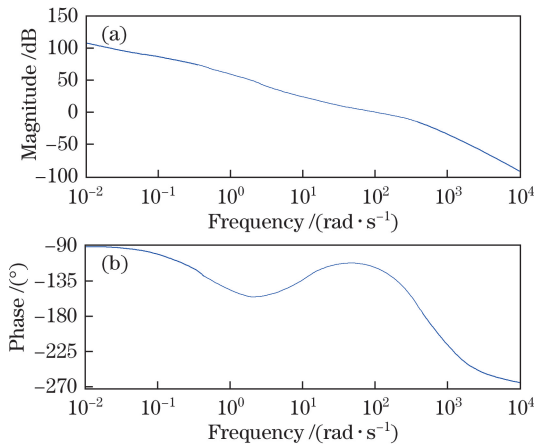


图 2 稳定补偿后的开环传递函数 Bode 图。
(a) 幅值; (b) 相位

Fig. 2 Open-loop transfer function Bode diagram after compensation. (a) Magnitude; (b) phase

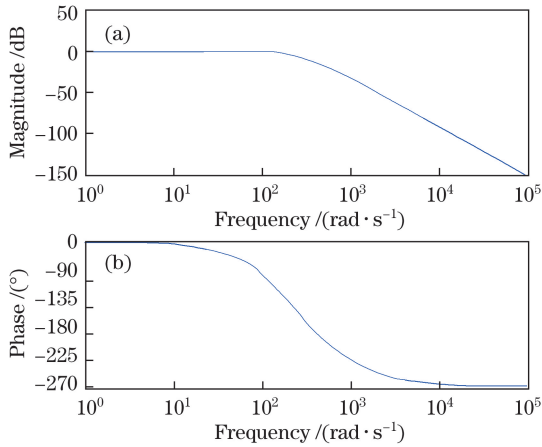


图 3 稳定补偿后的闭环传递函数 Bode 图。
(a) 幅值; (b) 相位

Fig. 3 Closed-loop transfer function Bode diagram after compensation. (a) Magnitude; (b) phase

区域等参数的优化设计,既可以防止漏扫,又可以提高伺服系统的捕获概率。

2.3 捕获概率

本研究采用小束散角信标光对通信系统的不确定区域进行扫描,结合平台振动等干扰因素,合理选取相关参数,并进行优化设计,以提高捕获系统的扫描效率与捕获概率^[9-10]。

捕获概率 P_{acq} 可以表示为

$$P_{acq} = P_u \cdot P_s \cdot P_d, \quad (6)$$

其中

$$P_u = 1 - \exp\left[-\frac{(\theta_{uc})^2}{8\sigma^2}\right], \quad (7)$$

式中: P_u 为不确定区域对目标视场覆盖概率的简化表达式, $P_u = 98.9\%$; P_s 为扫描过程中的视场覆盖

率; P_d 为探测概率,由探测器本身决定。由于平台抖动会产生漏扫,故需引入重叠区域以降低漏扫概率。对于经典信标捕获系统,根据以往的经验,覆盖重叠区域大于抖动方差的 6 倍时, $P_s > 99.7\%$ 。对于捕获探测器来说,力求在信噪比较小的情况下,提高探测概率。

飞艇平台采用 CCD 作为捕获探测器,其在帧级上的捕获概率为

$$P_d = (1 - P_{nd})(1 - P_{fa}), \quad (8)$$

式中: P_{nd} 为漏检概率,根据经验可知其为 1%; P_{fa} 为虚警概率,为 2%。在工程上,用于捕获的 CCD 的探测概率约为 97%。综上所述,飞艇平台激光通信捕获系统的总捕获概率 P_{acq} 为

$$P_{acq} = P_u \cdot P_s \cdot P_d = 0.989 \times 0.997 \times 0.970 = 0.95. \quad (9)$$

3 基于飞艇平台复合扫描的优化设计

3.1 飞艇平台复合扫描的原理研究

在飞艇与船的激光通信系统中,两光端机初始指向误差会产生不确定区域,一般产生的不确定区域为几十毫弧度。针对远距离传输,为了实现降低功耗、小型化的目的,常常采用小束散角发射,束散角一般在几百微弧度,如果无目的地使用信标光扫描整个不确定区域,就会耗用大量的捕获时间,而且获得的捕获概率非常低^[11]。在飞艇-船的激光通信系统设计中,本研究提出了粗精复合扫描策略,具体为采用振镜与转台相结合的捕获方式。由于振镜执行范围受限,需要将不确定区域进行分区,然后振镜与转台在若干个子区域中实现复合扫描,因振镜的执行带宽较大,所以在每个子区域中振镜可以进行快速扫描,使光束偏转,这个过程可以看成是“扩束”。相邻子区域之间用机械转台进行步进矩形螺旋扫描,如图 4 所示。

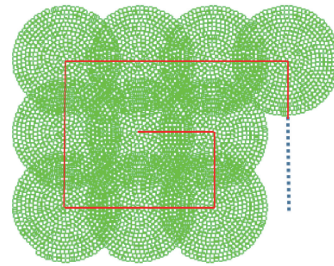


图 4 复合扫描运动轨迹

Fig. 4 Trajectory of composite scanning

因为本研究选用的是大视场(视场可以完全覆盖捕获不确定区域),故选择视场凝视-信标扫描。

在视场凝视-信标扫描策略中,A 为飞艇平台,B 为地面接收探测器,B 光端机利用大视场覆盖不确定区域,A 光端机使用信标光在不确定区域内进行如图 4 所示的步进矩形螺旋扫描,直到 A 光端机与 B 光端机实现双方对准和跟踪,该方案示意图如图 5 所示^[12],FOU 为不确定区域,FOV 为视场。

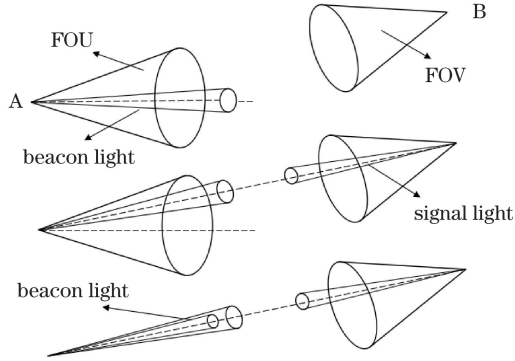


图 5 视场凝视-信标扫描

Fig. 5 Field view-beacon scanning

3.2 复合扫描的设计分析

本研究采用分子区域复合扫描,子区域大小的选择会影响整个不确定区域中子区域的数量,进而影响整个复合扫描的时间,所以子区域的最优选取是实现快速扫描的关键。针对此问题,首先推导子区域内螺旋扫描的公式和步进模式下相邻子区域内矩形螺旋扫描的公式,进而推导出复合扫描的公式,最后通过仿真分析选取复合扫描过程中的子区域、优化分区方法,以获得最优的捕获时间。

振镜在子区域中执行快速螺旋扫描的公式为^[13]

$$V_r = \sqrt{\frac{(1-k)\theta_{uc}\theta_{div}^2}{2\pi + (\theta_{uc} - \theta_{div})T_{dwell}}}, \quad (10)$$

$$V_\theta = \sqrt{\frac{2\pi(\theta_{uc} + \theta_{div})}{(1-k)\theta_{uc}tT_{dwell}}}, \quad (11)$$

$$X = V_r + \cos(V_\theta t), \quad (12)$$

$$Y = V_r + \sin(V_\theta t), \quad (13)$$

式中: V_r 为径向速度; V_θ 为角速度; T_{dwell} 为驻留时间; θ_{uc} 为捕获不确定区域; θ_{div} 为束散角; k 为束散角的重叠区域; X 为光斑在 x 轴方向上的位置; Y 为光斑在 y 轴方向上的位置; t 为螺旋扫描的时间。子区域内扫描示意图如图 6 所示。

子区域的扫描时间 T_{scan} 为

$$T_{scan} = \frac{\pi T_{dwell}}{2(1-k)} \left[\left(\frac{\theta_{sub}}{\theta_{div}} \right)^2 - \left(\frac{\theta_{sub}}{\theta_{div}} \right) \right] N_{scan}, \quad (14)$$

式中: θ_{sub} 为子区域的大小; N_{scan} 为扫描的圈数。

相邻子区域之间采用步进模式的矩形螺旋扫描,步进模式是指使用信号光对目标终端机可能所

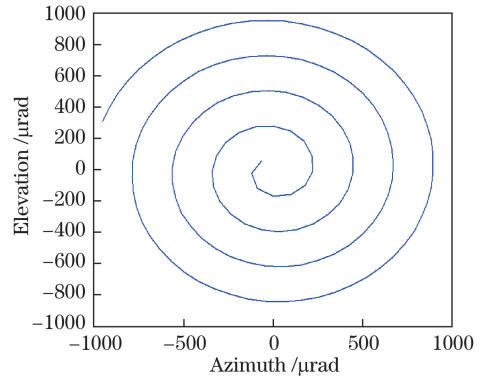


图 6 螺旋扫描的运动轨迹

Fig. 6 Trajectory of spiral scanning

在的位置进行逐点扫描,在扫描过程中每个扫描点驻留足够长的时间,以探测目标终端机的回光信号,当捕获探测器探测到回光信号时停止扫描,否则继续扫描下一点,扫描时间必须包括光束来回传播的时间^[14]。步进扫描公式为

$$\Delta t = \frac{2L}{c} + \frac{1}{F_{ac}} + 2t_{res}, \quad (15)$$

式中: Δt 为步进扫描的总时间; L 为通信距离; c 为光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s; F_{ac} 为扫描执行机构的带宽; t_{res} 为捕获探测器的响应时间。

分子区域扫描的子区域个数 N_{sub} 为

$$N_{sub} = \left[\frac{\theta_{uc}}{(1-k)\theta_{sub}} \right]^2. \quad (16)$$

通过(14)、(15)式可推出分子区域扫描的公式为

$$\Delta t = \frac{2L}{c} + \frac{1}{F_{ac}} + 2t_{res} + T_{scan} \times N_{sub}. \quad (17)$$

由(15)式可知, F_{ac} 为扫描执行机构的带宽,故 $\frac{1}{F_{ac}}$ 步进扫描每移动一步的时间为

$$t_{move} = \frac{1}{F_{ac}} = 3 \sqrt{\frac{(1-k)\theta_{sub}}{2a}}, \quad (18)$$

式中: a 为转台的最大加速度。

所以,扫描整个不确定区域需要移动的步数 S 为

$$S = \left[\frac{\theta_{uc}}{(1-k)\theta_{sub}} \right]^2 - 1. \quad (19)$$

联立(18)、(19)式可得

$$t_{total\ move} = 3 \sqrt{\frac{(1-k)\theta_{sub}}{2a}} \times \left\{ \left[\frac{\theta_{uc}}{(1-k)\theta_{sub}} \right]^2 - 1 \right\}. \quad (20)$$

通过推导得出振镜扫描子区域的时间公式与步进模式下转台移动所有子区域的时间公式,根据(14)~(20)式可推出分子区域扫描的总时间公

式为

$$\Delta t_{\text{total time}} = \frac{2L}{c} \times \left\{ \left[\frac{\theta_{uc}}{(1-k)\theta_{sub}} \right]^2 - 1 \right\} + 3\sqrt{\frac{(1-k)\theta_{sub}}{2a}} \left\{ \left[\frac{\theta_{uc}}{(1-k)\theta_{sub}} \right]^2 - 1 \right\} + t_{res} \left\{ \left[\frac{\theta_{uc}}{(1-k)\theta_{sub}} \right]^2 - 1 \right\} + T_{scan} \left[\frac{\theta_{uc}}{(1-k)\theta_{sub}} \right]^2 \quad (21)$$

通过上述分析可知,假设初始指向误差 $\sigma_s = 6.5 \text{ mrad}$,则捕获不确定区域 $\theta_{uc} = 40 \text{ mrad}$,信标光束散角 $\theta_{div} = 400 \mu\text{rad}$,实验中转台最大角加速度 $a = 80 \text{ (}^\circ\text{)/s}^2$,为了在系统设计中留有一定的安全余量,所以将转台最大角加速度控制在 $a = 40 \text{ (}^\circ\text{)/s}^2$,子区域内螺旋扫描振镜的带宽为 1000 Hz ,扫描执行机构超前瞄准镜的带宽为 100 Hz ,捕获探测器的响应时间为 10 ms ,通信距离为 20 km ,光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,通过伺服系统位置环的设计,可以把平台振动抑制在 $60 \mu\text{rad}$ 以内,束散角为 $400 \mu\text{rad}$;为了不漏扫,重叠区域选择 20% 。选择振镜扫描范围为 8 mrad ,卡式系统为 5 倍扩束,通过扩束光学系统的最大扫描范围可以达到 3.2 mrad ,所以子区域的可选范围在 $0.4 \sim 3.2 \text{ mrad}$ 之间(图 7 仿真的横坐标在子区域可选择的范围内进行讨论)。

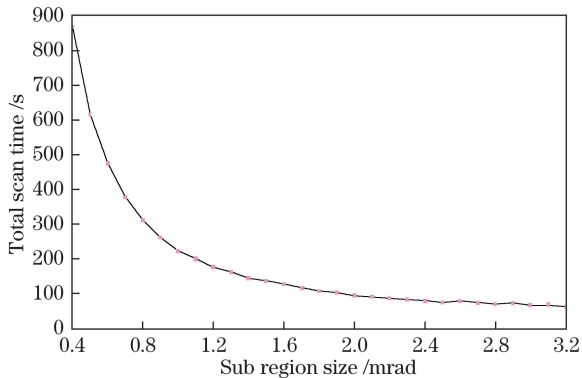


图 7 子区域大小与扫描总时间的关系

Fig. 7 Relationship between sub region size and total scan time

子区域大小与整个复合扫描总时间的关系如图 7 所示。可见,在振镜可选择的范围内,扫描时间随子区域大小的增加而缩短,故在子区域选择 3.2 mrad 时,可以获得最优的捕获时间,捕获时间为 63.4 s 。在子区域选择为 3.2 mrad 时,通过(16)式可得子区域有 256 个。为了覆盖整个捕获不确定区域,复合扫描是一个 16×16 的矩阵,如图 8 所示。

3.3 针对复合扫描飞艇平台的运动补偿

在飞行过程中,飞艇平台与地面之间存在相对运动,两者之间的相对速度会对捕获过程的设计产

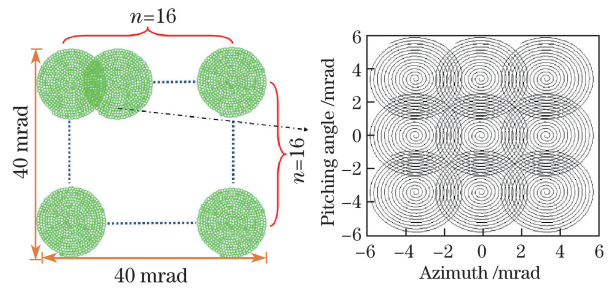


图 8 16×16 的复合扫描图

Fig. 8 Composite scan figure of 16×16

生很大影响,需要对飞艇与地面进行相对运动仿真,设计相应的运动补偿。

对复合扫描的轨迹进行仿真得出的轨迹如图 9 所示,图 9 为没有相对运动的捕获轨迹。假设飞艇平台与地面之间存在水平向右的匀速相对运动,相对运动速度 $v = 2 \text{ mard/s}$,则扫描轨迹如图 10 所示。

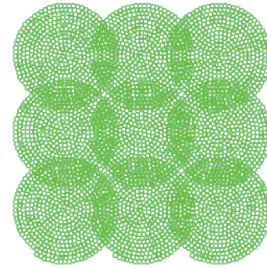


图 9 无相对运动时的复合扫描轨迹

Fig. 9 Composite scanning without relative motion

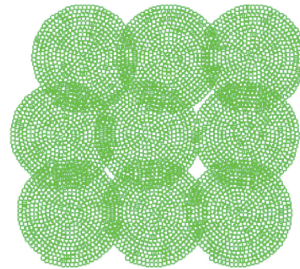


图 10 带匀速运动的复合扫描轨迹

Fig. 10 Composite scanning with uniform motion

通过图 9 和图 10 的对比可以看出,两平台间存在相对运动时,复合扫描的扫描轨迹会向运动方向偏移。从图 10 可以看出,运动轨迹已经完全偏移了理想的扫描轨迹,子区域之间已经出现很大范围的漏扫,因此需要对飞艇的相对运动进行运动补偿。为了抑制飞艇平台水平向右的匀速相对运动,在仿真中加入一个方向向左、速度为 2 mard/s 的匀速运动,对其产生的相对运动进行补偿,补偿后的结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,通过运动补偿,扫描范围基本覆盖整个视场,不会产生漏扫。

虽然飞艇平台的自身振动很大,但通过位置环

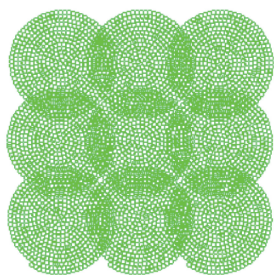


图 11 对存在相对运动进行运动补偿后的复合扫描轨迹

Fig. 11 Composite scanning based on the constant motion with motion compensation

抑制可以将振动控制在 $60 \mu\text{rad}$; 当飞艇与船舶平台在产生相对运动时, 可以通过运动补偿使整个系统达到 95% 的捕获概率; 采用复合扫描的方式, 可以在 63.4 s 内完成对不确定区域的扫描。

4 飞艇对船激光通信演示验证实验测试

图 12 为飞艇终端实物图。在新疆某地区进行了飞艇与船舶的激光通信演示验证实验, 将一个光端机安装在飞艇的吊舱下, 另一个光端机放置在船上(考虑到水面大气湍流情况较好), 整个实验示意如图 13 所示。随着飞艇逐渐升空, 根据传输回来的位置信息, 地面光端机随动指向, 直到飞艇升到指定高度和距离(首先开展近距离 8 km 的演示验证), 启动单端捕获、跟踪。当地面接收到飞艇的工作参数并且正常后, 保持飞行高度, 将通信距离增加到 20 km, 开展相同的实验, 此时飞艇飞行高度为 2000 m。

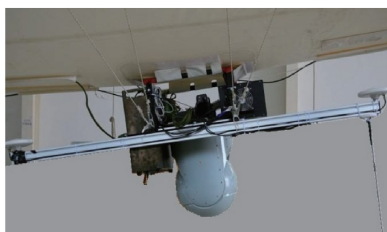


图 12 飞艇终端实物图

Fig. 12 Airship terminal physical drawing



图 13 飞艇对船激光通信实验图

Fig. 13 Experiment diagram of airship laser communication for ships

在实验中, 信标光束散角 $\theta_{\text{div}} = 400 \mu\text{rad}$, 转台最大角加速度 $a = 40 (\text{°})/\text{s}^2$, 扫描执行机构超前瞄准镜的带宽为 100 Hz, 捕获探测器的响应时间为 10 ms, 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。在通信距离增加到 20 km 时, 进行 6 次测量, 得到信标光扫描整个不确定区域的平均时间为 62.7 s, 与仿真结果的 63.4 s 非常相近。

5 结 论

本研究重点开展飞艇与船间激光通信捕获技术的优化设计, 在远距离通信时, 采用小束散角对大视场进行扫描, 提出了分子区域的复合扫描方式; 相比直接用小束散角扫描整个视场, 提出的复合扫描方式节省了大量的扫描时间; 定量分析捕获影响因素, 并针对其特点进行针对性设计; 通过仿真进行原理性和指标正确性验证, 同时开展了野外实验, 对优化指标进行了详细测试。在实验过程中, 飞艇与船同时运动, 距离为 20 km, 捕获束散角为 $400 \mu\text{rad}$, 不确定区域为 40 mrad , 实验 6 次, 平均捕获时间为 62.7 s, 与仿真结果的 63.4 s 非常接近, 捕获策略满足飞艇与船间动态激光通信捕获要求, 实现了最优设计。

参 考 文 献

- [1] Song Y S, Chang S, Tong S F, *et al.* Feature analysis of aeronautical laser communication system and airborne laser communication experiment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1206004. 宋延嵩, 常帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206004.
- [2] Jiang H L, Liu Z G, Tong S F, *et al.* Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 299-302. 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, 36(s1): 229-302.
- [3] Wang L H, Meng L X, Li Y H, *et al.* Research on compensation technology for uncertain region scanning in intersatellite laser communications[J]. Study on Optical Communications, 2012, 38(4): 64-66. 王利辉, 孟立新, 李咏豪, 等. 星间激光通信不确定区域扫描补偿技术研究[J]. 光通信研究, 2012, 38(4): 64-66.
- [4] Li B, Tong S F, Zhang L, *et al.* Influence of

- horizontal atmospheric visibility on deep-space laser communication rate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1006003.
- 李勃, 佟首峰, 张雷, 等. 水平大气能见度对深空激光通信速率的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1006003.
- [5] Wang J J, Xu L J, Li X L. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0314001.
- 王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0314001.
- [6] Tong S F, Jiang H L, Liu Y Q, *et al.* Study on platform vibration simulation experimental system for free space laser communication system[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(8): 1001-1003.
- 佟首峰, 姜会林, 刘云清, 等. 自由空间激光通信平台振动模拟实验系统研究[J]. *兵工学报*, 2008, 29(8): 1001-1003.
- [7] Han C, Bai B X, Yang H M, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(1): 89-94.
- 韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪准确度主要外界影响因素研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(1): 89-94.
- [8] Liu Y, Song Y S, Tong S F, *et al.* Simulation design of vibration source in satellite optical communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1206006.
- 刘洋, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 卫星光通信系统振动源的模拟设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1206006.
- [9] Yu S Y, Ma J, Tan L Y. Future trends in free-space laser communication technology[J]. *Optical Communication Technology*, 2004, 28(12): 47-50.
- 于思源, 马晶, 谭立英. 自由空间激光通信技术发展趋势分析[J]. *光通信技术*, 2004, 28(12): 47-50.
- [10] Zhao X, Wang S F, Tong S F, *et al.* Initial alignment of antenna for laser communication system between aircraft and ground station[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(7): 1190-1195.
- 赵馨, 王世峰, 佟首峰, 等. 飞机-地面间激光通信天线的初始对准[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1190-1195.
- [11] Han C, Bai B X, Yang H M, *et al.* Study and simulation of laser communication acquisition system in mobile platform-to-satellite[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(18): 5923-5926.
- 韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 机动平台与卫星间激光通信捕获系统仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(18): 5923-5926.
- [12] Li X. Optimization research on link and communication performance for inter-satellite laser communications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 15-18.
- 李鑫. 星间激光通信中链路性能及通信性能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 15-18.
- [13] Hindman C, Robertson L. Beaconless satellite laser acquisition-modeling and feasibility[C]. *Military Communications Conference*, 2004: 8613733.
- [14] Xue Z Y, Qi B, Ren G. Study on rapid acquisition technology for intersatellite optical communications[J]. *Optical Communication Technology*, 2015, 39(6): 53-56.
- 薛正燕, 亓波, 任戈. 星间光通信中快速捕获技术研究[J]. *光通信技术*, 2015, 39(6): 53-56.