

激光与光电子学进展

光测设备空间目标自动化测量方法

裴玉¹, 高策^{1*}, 曾祥斌², 马少峰³, 余毅¹¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;²中国人民解放军 95841 部队, 甘肃 酒泉 735000;³中国人民解放军 63791 部队, 四川 西昌 615000

摘要 为提高光测设备在空间目标测量过程的自动化程度,提出了一种自动化测量方法。介绍了系统组成及其自动化运行流程。以观测目标数最大化及观测时长可用于编目为准则,设计待优化函数,采用粒子群优化算法对观测计划进行编排。针对轨道预报数据误差较大时目标在视场外无法识别的问题,给出两种主动搜索策略。仿真计算表明,经过优化后的观测计划,解决了弧段重叠导致个别目标无法观测的问题,同时自动完成了对各目标观测时长的合理控制。对某型号光测设备在螺旋式扫描搜索模式下进行试验,偏移量速度最大值为 $0.126(^{\circ})/s$,加速度最大值为 $-0.053(^{\circ})/s^2$ 且连续稳定。采用扩张搜索与收缩搜索相结合的方式,不仅提高了目标的捕获概率,而且在结束搜索时可平稳切换到原始引导模式。实测试验表明,该方法可有效提高设备的自动化运行水平及设备的使用效能。

关键词 光学工程; 空间目标测量; 自动化运行; 观测计划优化; 主动搜索

中图分类号 P171.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1712001

Space Target Automated Measurement Method for Optical Measurement Equipment

Pei Yu¹, Gao Ce^{1*}, Zeng Xiangbin², Ma Shaofeng³, Yu Yi¹¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;*²*Unit 95841 of Chinese People's Liberation Army, Jiuquan 735000, Gansu, China;*³*Unit 63791 of Chinese People's Liberation Army, Xichang 615000, Sichuan, China*

Abstract To improve the automation of optical measurement equipment in space target measurement processes, an automated measurement method is proposed in this study. First, the composition and automatic operation process of the system are introduced. Second, the function to be optimized is designed by maximizing the number of observation targets. The observation time can be used for cataloging, and the particle swarm optimization algorithm is used to propose an observation plan. Finally, to address the problem that the target cannot be detected outside the field of view when the guidance data error is large, two active search strategies are proposed. Simulation calculation results show that the optimized observation plan enables the detection of individual targets with overlapping arc segments and automatically and reasonably controls the observation time of each target. The helical scanning search is simulated for a certain type of optical measurement equipment, achieving a maximum offset velocity of $0.126(^{\circ})/s$ and a maximum acceleration of $-0.053(^{\circ})/s^2$, and it is continuous and stable. The combination of expansion and contraction search strategies can improve the capture probability of the target and enable the switch to the original guidance mode smooth at the end of the search. Test results show that the proposed method can effectively improve the automatic operation level of equipment and enhance the equipment efficiency.

Key words optical engineering; space target measurement; automated operation; optimization of observation plan; active search

收稿日期: 2021-11-12; 修回日期: 2021-12-28; 录用日期: 2022-01-12

基金项目: 吉林省科技发展计划(20190302086GX)

通信作者: *50616636@qq.com

1 引言

空间目标包括在轨工作航天器和空间碎片,为了有效监控现有航天器轨道状态并为待入轨的航天器勘测碎片情况,需要不断对太空目标进行监测。2009 年美俄卫星的太空相撞事件也突显空间目标监测的重要性,随着人类航天活动的增加,航天器与空间碎片数量急增,空间目标监视任务日趋繁重,对每台监视设备长时间、高频率、全天候的工作能力提出了考验。光电观测(光测)设备定位精度高、成本低、能耗小且作用距离远^[1],在中高轨空间目标探测中有着独特优势,同时光电观测还能提供空间目标的光度与光谱信息,以供空间目标识别使用。因此,光电观测在空间目标监视技术中占有重要的地位。现服役的部分光测设备研制时间早、系统结构复杂、自动化程度低,需要较多的岗位人员相互配合,因此需要提高光测设备的自动化程度。

近年来,为提高空间目标监视系统的使用效率,文献[2]提出了一种基于约束满足问题(CSP)模型的随机搜索编目调度算法,文献[3]提出了一种遗传-模拟退火算法与窗口修建法结合的空间目标地基监视调度方法。对于多观测设备的地基空间目标监视网络所面临的大规模调度问题,上述方法可给出优化方案,但存在计算效率较低、收敛速度较慢、非最优解的问题。紫金山天文台^[4]对空间目标的调度策略及巡天策略做出大量研究,对待优化函数进行了线性化设计,但并未明确指出工程上使用何种优化方法。

在测控设备端,依托于光测设备的测量能力,可完成对空间目标的姿态估计^[5]和工作状态检测^[6],可使用激光与光学进行联合定位^[7],可对复杂星空背景下的目标进行快速识别^[8],并可对微小目标进行检测^[9]。但目前针对单台光测设备的自动化空间目标测量方法的

研究较少,图像处理端自动识别算法无法与全系统联动,以发挥最大效能。

作为空间目标测量的另一类设备,雷达已经有较为成熟的自动跟踪测量方法,并在防干扰技术方面进行了一定研究^[10]。为了更好地保障卫星长管任务的执行,光学测量设备在空间目标测量上的自动化执行程度亟待提升。

本文从光测设备执行空间目标测量任务的全流程出发,对空间目标自动化测量的流程及关键技术进行研究,提出了一套自动化测量方法。

2 自动化测量系统组成及工作流程

2.1 自动化空间目标测量系统组成

自动化空间目标测量系统即参与空间目标测量的光测设备。在常规测量系统基础上对相应分系统进行适应性拓展升级,增加传感器与逻辑控制器,可实现分系统状态实时监测及加去电控制。系统组成如图 1 所示,分为机上部分与机下部分。机上部分由雨量传感器圆顶、精密跟踪架、高灵敏探测器组成。雨量传感器圆顶在任务结束后或天气异常时对设备进行保护;精密跟踪架在伺服分系统控制下与高灵敏探测器完成指定空域的图像采集。机下部分由系统监控分系统、信息综合分系统、伺服分系统、图像处理分系统组成。系统监控分系统负责完成观测任务接收,观测计划的自动编排,引导数据自动下发及测量数据自动记录,并实时收集各分系统上传的状态信息;信息综合分系统完成各分系统的数据采集并将汇总数据组播发送至局域网内,提高系统集成度与信息的有效共享;伺服分系统根据引导数据控制跟踪架完成精密跟踪;图像处理分系统负责对采集到的图像进行目标提取。

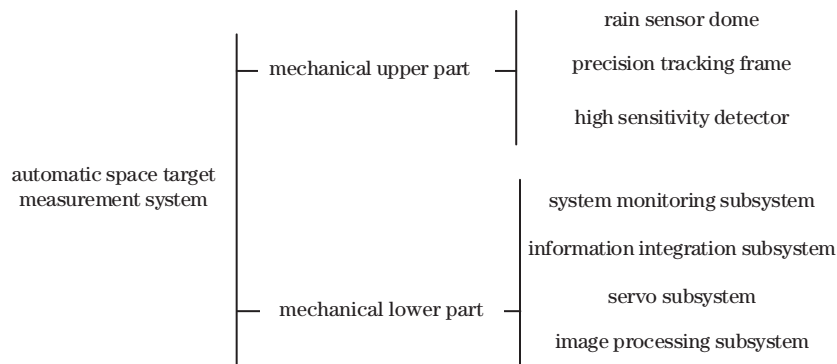


图 1 系统组成

Fig. 1 System composition

2.2 自动化空间目标测量系统工作流程

自动化空间目标测量系统的工作流程如图 2 所示。系统监控软件是本系统自动化运行的核心,实时监听中心是否下发新的观测任务,在接收到中心观测

任务后,自动解析各观测目标轨道数量,综合考虑观测目标数及每个目标的观测时长,自动编排观测计划。系统监控软件在任务开启前 30 min 自动开启所有分系统并检查各分系统状态,任务开始前 10 min 开启圆

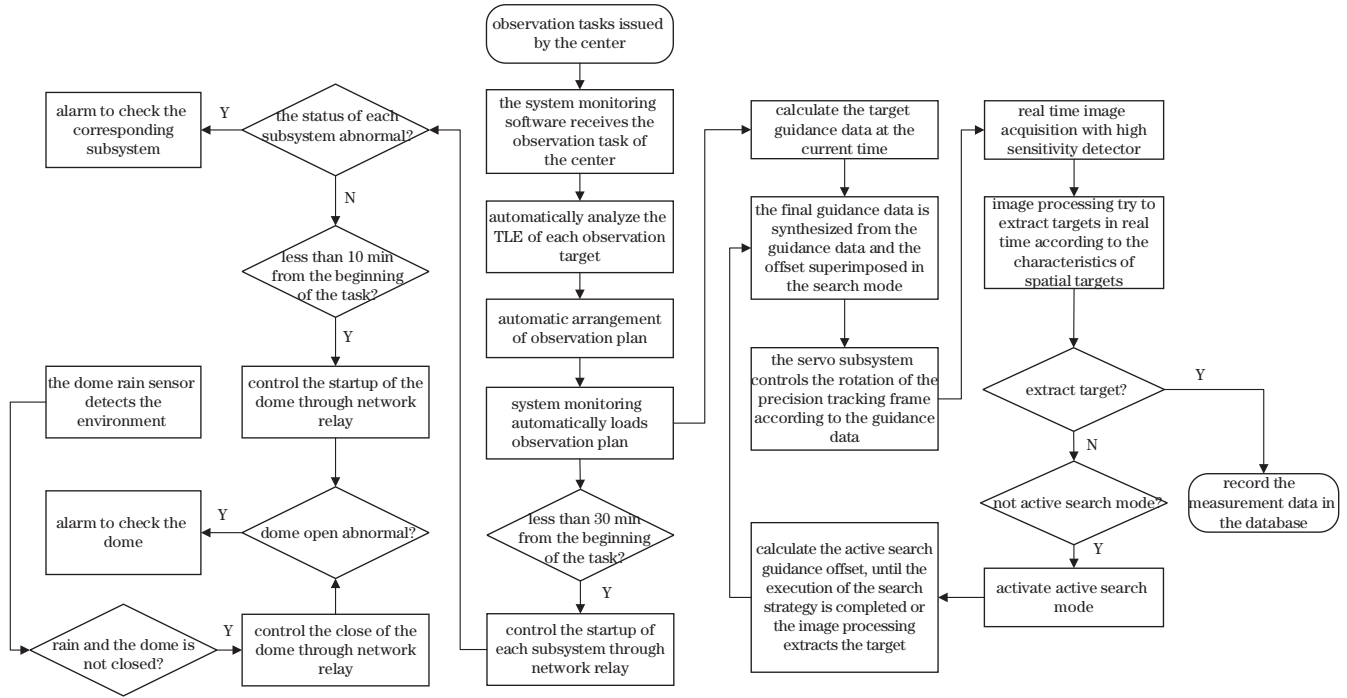


图 2 空间目标自动化测量系统的工作流程图

Fig. 2 Process of space target automatic measurement system

顶盖。系统监控软件具备自动化目标引导能力,通过信息综合分系统实时向伺服分系统转发引导数据。伺服分系统根据引导数据控制跟踪架转动,图像处理分系统对高灵敏探测器采集到的图像进行目标识别,如果未检测到目标,则进入主动搜索模式,直到搜索到目标或完成预设搜索过程。搜索到目标后,图像处理分系统将处理结果送至系统监控软件,系统监控软件保持该时刻下的引导偏移量,控制伺服分系统稳定跟踪目标,并将测量数据自动记录在数据库中。在设备防护方面,雨量传感器圆顶实时将环境数据上传至系统监控软件,如发生降雨,系统监控软件通过下发指令控制圆顶关闭并退出测量任务。

3 空间目标自动化测量的关键技术

3.1 计划的自动编排

3.1.1 问题描述

随着被观测目标数量的增多,如果对每个目标都进行全弧段跟踪,将会出现大量冲突弧段无法观测,极大影响测量效率。中心在编目时,短一些的测量弧段依旧可以完成编目,单圈次长时间观测数据对编目精度的提高并不显著^[11-12]。因此本文的自动编排以编目效率最优为准则,在保证目标观测数量最大的前提下,每个目标的观测时长满足编目需求。

3.1.2 目标函数

为避免单纯地以观测数量为观测目标造成的每个目标的弧段过短而无法实现目标编目,或单纯地以观测总时长最大为目标造成的目标选择过少的问题,设计了

以每个目标观测时长为变量的评价函数,通过合理设计评价函数,可得到目标数及弧长均合理分配的最优观测方案。本文的评价函数为

$$\begin{cases} E = 0.2L + 48, & L \geq 60 \\ E = \frac{-L^2}{60} + 2L, & 60 > L \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: E 为评价值; L 为观测时长。该评价函数为分段函数,以观测时长 60 s 为分界,观测时长大于 60 s 后评价值增长变缓,可以有效解决单个目标观测时间过长的的问题。由于低轨道目标过境时间较短,高轨道目标有较长的观测弧段,本文设计的以 60 s 为边界的评价函数适合观测低轨道目标较多的设备,后续可根据各设备实际观测任务类型的不同灵活调整分段函数的边界。

3.1.3 约束条件

光测设备同一时间只能观测一个目标,需要在目标函数中加入该限制条件。假设当天有 N_s 个目标需要观测,每个目标的可跟踪时长表示为 $l_i = [t_{Si}, t_{Ei}]$, $i = 1, \dots, N_s$, 其中 t_{Si} 、 t_{Ei} 分别为起始、终止时刻。 X_{Si} 、 X_{Ei} 分别为某一目标优化后的观测起始、终止时刻,在 l_i 中的取值。如果某一目标与其他目标优化后的观测弧段重叠,即该目标的起始时刻或终止时刻落在其他优化目标的观测弧段内,就将该目标的限制参数 P_i ($i = 1, \dots, N_s$) 设置为一个极大值,例如 $P_3 = 10000$ 表示目标 3 观测弧段的选取与其他弧段重叠。

最终的优化函数为

$$\max \left(\sum_{i=1}^{N_i} E_i - \sum_{i=1}^{N_i} P_i \right). \quad (2)$$

3.1.4 优化算法选择

所设计的优化函数,可利用粒子群优化算法寻找最优解^[13-14],最终获得计划编排方案。粒子群算法是一种随机优化算法,其初始化为一群随机粒子,粒子在解空间中根据自身和群体信息共同决定其运动的速度和方向,通过迭代来搜寻最优解。迭代求解时每个粒子通过跟踪 2 个“最优解”来更新自己的速度和位置,更新方式为

$$v_{id}^{(k+1)} = \omega v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 (g_d^{(k)} - x_{id}^{(k)}), \quad (3)$$

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)}, \quad (4)$$

式中: ω 为惯性权重; c_1, c_2 为加速因子; r_1, r_2 为(0,1)之间的随机数; $p_{id}^{(k)}$ 为第*i*个粒子在*k*时刻最优位置向量中的第*d*维分量; $g_{id}^{(k)}$ 为*k*时刻种群最优位置向量中的第*d*维分量。

同遗传算法比较,粒子群优化算法的优势在于速度快、效率高、算法简单且待调节参数少,易于工程实现。同时本问题的目标弧段选取范围可通过参数中的解空间进行控制,无需在约束函数中设计,降低了最终优化函数的复杂度。虽然有易收敛到局部最优的问题,但针对实际问题合理设计学习步长可有效避免该问题。

3.2 主动搜索策略

提出了两种主动搜索策略来解决光测设备视场较小和轨道数量预报误差较大时目标在视场外的问题,分别为步进式范围搜索策略和螺旋式扫描搜索策略。

步进式范围搜索策略的核心是,在不同阶段以当前引导数据为中心叠加一个固定的偏移量,通过分时方式实现图像视场的翻倍扩大,该偏移量的选取与设备的视场有关,保证在步进搜索时无遗漏区域。其示意图如图 3 所示,A 表示视场的横向即光测设备的方位方向,E 表示视场的纵向即光测设备的俯仰方向。

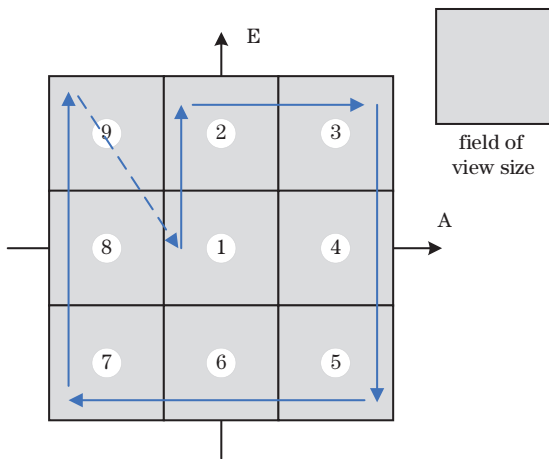


图 3 步进式范围搜索示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stepped range search

步进式范围搜索在视觉上更容易接受,对图像处理系统而言,引导偏移量叠加简单,且在每个搜索区域内停留一段时间,进行目标识别的方法与常规识别一致。但路径上运动不连续,搜索过程需要多次快速机动,虽然不适用于高速目标的搜索捕获,但对空间目标有较好的搜索效果。

螺旋式扫描搜索策略是在当前引导数据的基础上叠加一个随时间变化的偏移量,该偏移量的计算模型为圆锥扫描曲线,从而实现以当前引导数据为中心的动态放大的搜索过程。为解决在搜索结束后回到原始引导数据时加速度突跳、引导不稳定的问题,采用扩张螺旋搜索与等摆幅的收缩螺旋搜索相结合的方式,其示意图如图 4 所示。该方法一方面解决了搜索结束后引导值突跳的问题,同时在第二段收缩螺旋扫描搜索时对引导值附近的空域再次进行搜索识别,提高了目标捕获概率。

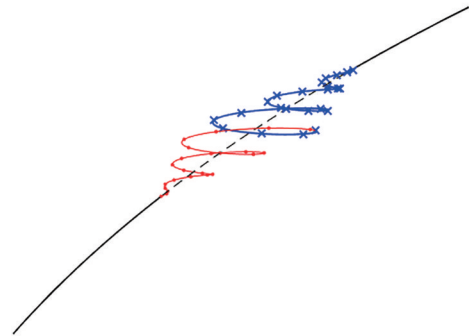


图 4 螺旋式扫描搜索示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spiral scan search

圆锥扫描偏移量曲线的计算模型为

$$\begin{cases} \Delta A(t) = (b\omega t) \cos(\omega t) \\ \Delta E(t) = (b\omega t) \sin(\omega t) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $b = a/(2\pi)$, a 为螺旋搜索一周后增长的角度值; $\omega = 2\pi/T$, T 表示螺旋搜索一周所用时间; t 表示从搜索开始经历的时间。

光测设备自动化运行前可以设置使用何种搜索策略,两种搜索策略各有优势。其中步进式范围搜索的引导数据叠加简单,在每个步进区域停留一段时间,便于图像处理进行目标识别,但切换过程中设备引导不稳定;螺旋式扫描搜索策略是一个连续动态过程,不存在步进式范围搜索分时切换过程中设备指向快速切换造成的图像识别失效的现象,不易丢失目标,适用于搜索快速运动目标,但图像处理提取目标难度较大。

4 试验与结果

对利用粒子群优化算法进行目标自动编排的效果进行仿真。粒子群算法的参数选择为:种群数为 60,惯性权重 $\omega=0.9$,并随着迭代次数线性递减到 0.4,学习因

子 $c_1 = c_2 = 2$, 最大速度 v_{max} 为可观测弧段范围的 $1/50$, 迭代次数为 2000。

表 1 给出某时间段待观测目标过境起止时刻, 目标采用北美防空联合司令部(NORAD)编号表示。

表 1 优化前目标可观测时段

Table 1 Target observable period before optimization

Target index	NORAD	Begin time	End time
1	22195	22:09:05	22:58:10
2	22490	22:07:30	22:14:00
3	22803	22:24:00	22:32:50
4	22830	22:16:50	22:24:20
5	49125	22:00:00	23:00:00
6	49222	22:18:20	22:20:30
7	49261	22:39:40	22:46:10
8	49262	22:37:50	22:44:20
9	49263	22:26:00	22:32:30
10	49264	22:25:00	22:31:30

图 5 为优化前目标可观测时段。从表 1 及图 5 可以看出, 优化前的目标可观测时段出现大量重叠弧段。使用本文的优化方法后, 所有目标都可进行测量并且观测时间得到平衡, 观测最短弧段为 64 s, 最长弧段为 1008 s, 累计跟踪 2730 s, 如表 2 及图 6 所示。所有目标

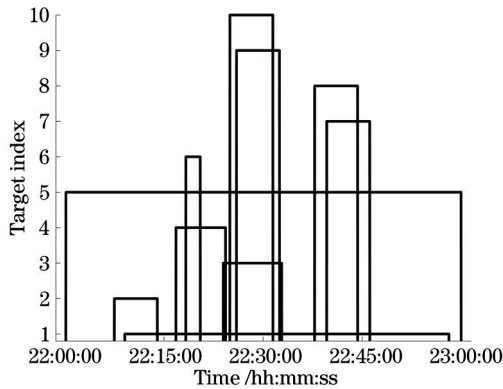


图 5 优化前目标可观测时段

Fig. 5 Target observable period before optimization

表 2 优化后目标观测计划

Table 2 Optimized target observation plan

Target index	NORAD	Begin time	End time
1	22195	22:41:21	22:58:10
2	22490	22:07:30	22:14:00
3	22803	22:24:01	22:26:41
4	22830	22:19:24	22:24:01
5	49125	22:30:40	22:38:45
6	49222	22:18:20	22:19:24
7	49261	22:40:07	22:41:21
8	49262	22:38:45	22:40:07
9	49263	22:28:34	22:30:40
10	49264	22:26:41	22:28:34

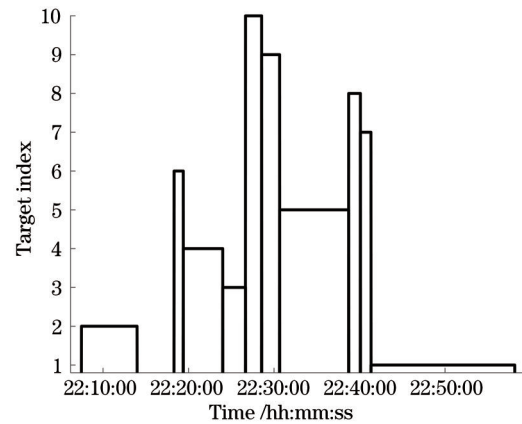


图 6 优化后目标观测计划

Fig. 6 Optimized target observation plan

均得到测量, 未出现因时间重叠未安排观测的问题, 完成了观测任务的自动化设计。

某部光电测量设备视场角为 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$, 设定螺旋搜索周期 T 为 15 s, 螺旋搜索一周后增长的角度值 α 为 0.15° , 扩张搜索与收缩搜索的周期各为 2 圈, 在螺旋搜索时增加的偏移量如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 在扩张搜索时, 偏移量逐渐增大, 最大值为 0.3° , 扩张搜索两个周期后进入收缩搜

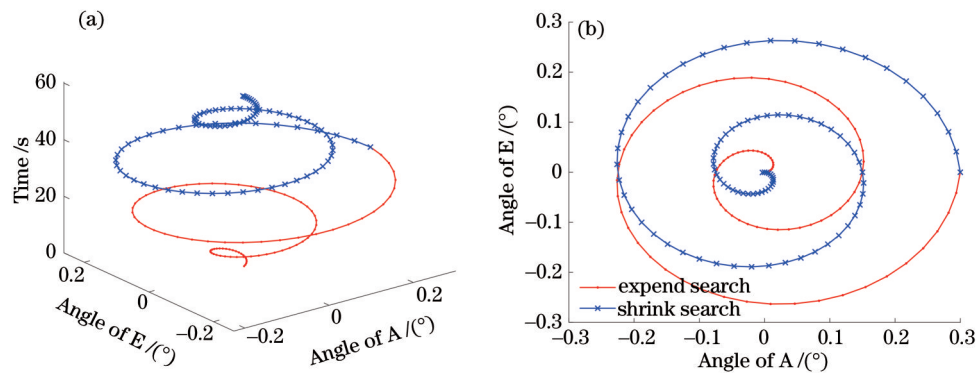


图 7 螺旋式搜索偏移量曲线。(a) 三维曲线; (b) 二维曲线

Fig. 7 Spiral search offset curves. (a) Three-dimensional curve; (b) two-dimensional curve

索,此时偏移量逐渐减小,两个周期后恢复无偏移量引导状态。在扩张搜索达到最大值的点,以图像中心为原点,方位探测范围由 $\pm 0.15^\circ$ 变为 $\pm 0.45^\circ$,搜索范围

扩大了3倍。从图8可以看出,整个过程中偏移量的速度最大值为 $0.126^\circ/\text{s}$,加速度最大值为 $-0.053^\circ/\text{s}^2$ 且连续稳定。

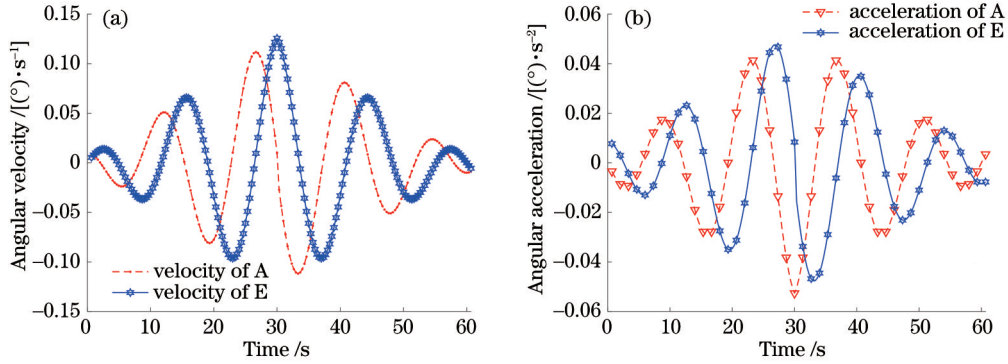


图8 螺旋式搜索偏移量速度与加速度曲线。(a)速度曲线;(b)加速度曲线

Fig. 8 Spiral search offset speed and acceleration curves. (a) Velocity curve; (b) acceleration curve

使用本文的自动化空间目标测量方法对某部高灵敏度电视视场角为 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 的设备进行改造,在对 NORAD 编号为 40135、43005 的太阳同步轨道空间目标进行观测时,为验证主动搜索方法的效果,在引导数据上人为增加偏移量,偏移量设置为:方位角为 0.4° ,俯仰角为 0.2° 。使用螺旋搜索方法对编号为 40135 的目标进行搜索,螺旋搜索参数如上文所述。使用步进搜索算法对编号为 43005 的目标进行搜索,由于步进搜索时引导数据存在阶跃,伺服系统的滤波算法处理该阶跃时会导致设备引导不平稳,因此步进到新位置后维持 3 s,用于伺服系统稳定控制跟踪架及图像处理系统进行目标提

取。同时为防止在切换步进区域时目标漏报,步进区域间存在 50% 重叠区域。

从图9、图10可以看出,采用螺旋搜索方法在第32 s时图像处理分系统捕获目标,采用步进搜索方法在第42 s时捕获目标,此后偏移量保持不变,使目标维持在视场内。如图9右下角所示,设备实际运转时编码器一阶差分量无阶跃量产生,整个螺旋搜索过程未对伺服工作性能产生影响,设备平稳地完成了螺旋搜索。如图10右下角所示,步进搜索过程设备实际编码器一阶差分量在切换观测区域时有阶跃量存在,在切换新的引导区域后设备存在一定抖动,因此该方法不适合长时间搜索目标。

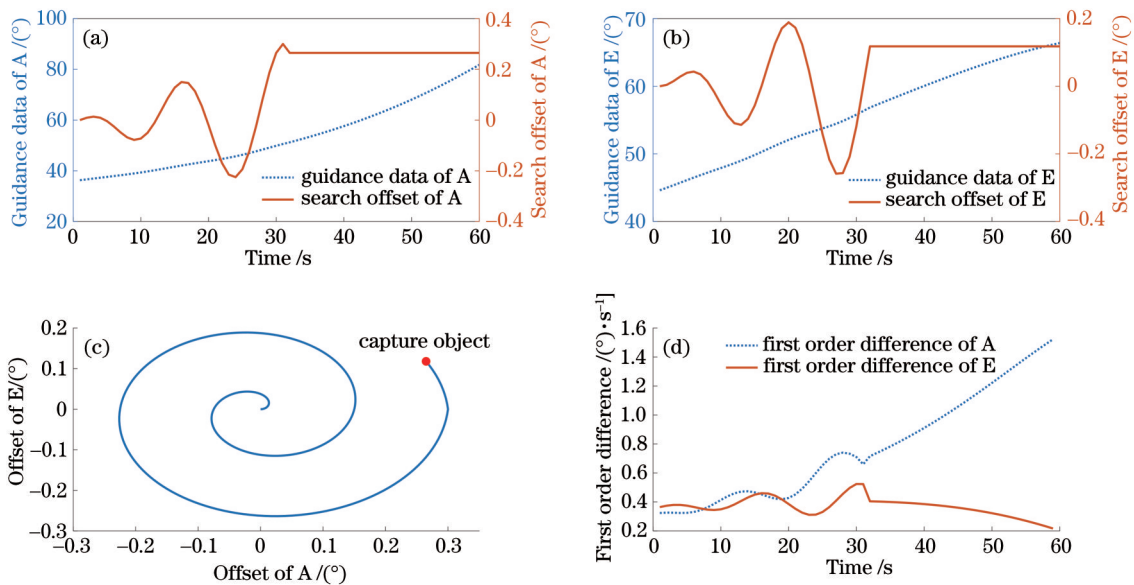


图9 螺旋搜索算法的搜索偏移量及引导数据(40135)。(a)螺旋搜索方位偏移量;(b)螺旋搜索俯仰偏移量;(c)螺旋搜索偏移量;(d)编码器的一阶差分

Fig. 9 Search offset and guidance data of spiral search algorithm (40135). (a) Spiral search azimuth offset; (b) spiral search elevation offset; (c) spiral search offset; (d) first order difference of coder

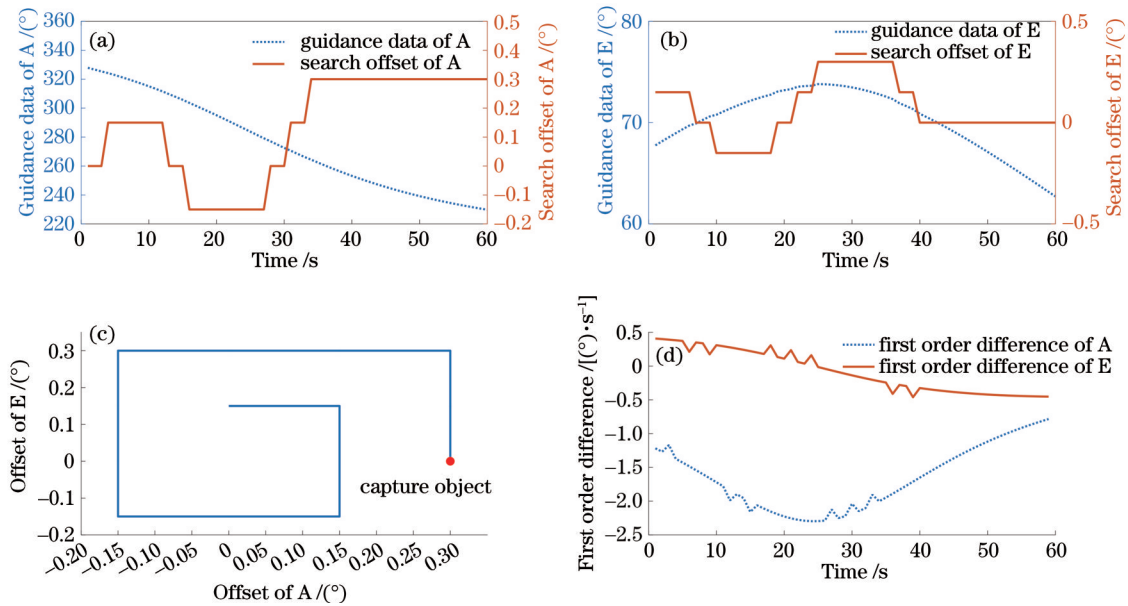


图 10 步进搜索算法的搜索偏移量及引导数据(43005)。(a)步进搜索方位偏移量;(b)步进搜索俯仰偏移量;(c)步进搜索偏移量;(d)编码器的一阶差分

Fig. 10 Search offset and guidance data of step search algorithm (43005). (a) Step search azimuth offset; (b) step search elevation offset; (c) step search offset; (d) first order difference of coder

5 结 论

以提高光测设备执行空间目标测量任务的自动化能力为目标,提出了一套自动化测量方法。从执行任务的全流程出发,将各分系统进行拓展升级,实现了在计划编排、实时引导、异常事件处理方面的自动化。

针对观测目标过境弧段大量重合问题,提出了以观测目标数量最大化且观测时长可用于编目为准则的目标编排优化方法。针对预报引导误差较大时目标在视场外的问题,提出了步进式范围搜索与螺旋式扫描搜索两种主动搜索方法。使用计划编排方法,各目标的观测时间得到平衡,对某次观测任务进行优化,观测最短弧段为 64 s,最长弧段为 1008 s,累计跟踪 2730 s,所有目标均得到测量,未出现因时间重叠未安排观测的问题。某型号光测设备螺旋式扫描搜索的整个过程中偏移量的速度最大值为 $0.126(^{\circ})/s$,加速度最大值为 $-0.053(^{\circ})/s^2$ 且连续稳定。对两种主动搜索策略的搜索能力进行仿真,相比步进式范围搜索,螺旋式扫描搜索引导数据速度与加速度平稳,系统可稳定搜索。

该自动化测量方法极大地提高了设备的自动化程度,尤其在计划编排、目标搜索等方面给出了有效方法。设备实现更全面的自动化还需要大量工作,后续要在设备的健康预测评估、主动搜索时目标识别算法优化等方面继续探索。

参 考 文 献

[1] 梁家辉, 李建, 胡绍林. 多套光学经纬仪联合跟踪的容

错最小距离平方和定位[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2596-2604.

Liang J H, Li J, Hu S L. Joint multiple optical theodolite tracking based outlier-tolerant least distance sum localization[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(12): 2596-2604.

[2] 梁华, 牛威. 空间目标编目测量资源调度策略设计与实现[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(1): 84-88.

Liang H, Niu W. Design and implementation of measurement resource scheduling for space object catalog [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 31(1): 84-88.

[3] 鄢青青, 沈怀荣, 邵琼玲. 基于遗传-模拟退火算法的空间目标地基监视调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(12): 2764-2771.

Yan Q Q, Shen H R, Shao Q L. Space object ground-based surveillance scheduling based on genetic-simulated annealing algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(12): 2764-2771.

[4] 王歆. 空间目标光电跟踪的调度策略[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(1): 89-94.

Wang X. Scheduling strategy for electro-optical tracking of space objects[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(1): 89-94.

[5] 李正炜, 王建立, 吴元昊, 等. 基于单站地基望远镜的空间目标姿态估计方法[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 371-378.

Li Z W, Wang J L, Wu Y H, et al. Method of attitude estimation for space object based on single ground-based telescope[J]. Chinese Optics, 2016, 9(3): 371-378.

[6] 杨小姗, 潘雪峰, 苏少杰, 等. 数据驱动的空间目标图像信息感知技术[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0315002.

Yang X S, Pan X F, Su S J, et al. Data-driven

- awareness technology for space target image information [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0315002.
- [7] 孙明国, 高鹏骐, 沈鸣, 等. 空间目标的激光和光学两种观测技术联合定位[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071203.
Sun M G, Gao P Q, Shen M, et al. Combined tracking and orbit determination for space objects using laser and optics measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071203.
- [8] 李振伟, 张涛, 孙明国. 星空背景下空间目标的快速识别与精密定位[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 589-599.
Li Z W, Zhang T, Sun M G. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 589-599.
- [9] 汪夏, 徐灿, 张峰, 等. 基于光度数据的低轨空间目标工作状态异常检测方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304005.
Wang X, Xu C, Zhang F, et al. Anomaly detection method for working status of low-orbit space objects based on photometric data[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304005.
- [10] 丁帅. 单脉冲机械扫描雷达空间目标自动化探测技术研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2015(10): 9-10, 12.
Ding S. Study on automatic detection technology of space target in single pulse machine[J]. *Automation & Instrumentation*, 2015(10): 9-10, 12.
- [11] 杨彪, 李迎春, 张廷华. 一种适用于相机阵列的空间目标初轨确定方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0504003.
Yang B, Li Y C, Zhang T H. Method suitable for initial orbit determination of space targets using camera array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0504003.
- [12] 陈龙, 刘承志, 李振伟, 等. LEO 空间目标的非协同共视观测及初轨确定[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1912003.
Chen L, Liu C Z, Li Z W, et al. Non-cooperative common-view observation of LEO space objects and initial orbit determination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1912003.
- [13] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. *电网技术*, 2014, 38(12): 3405-3411.
Wu X G, Liu Z Q, Tian L T, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [14] 徐世武, 吴怡, 王徐芳. 基于粒子群优化压缩感知的可见光定位算法[J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0306004.
Xu S W, Wu Y, Wang X F. Visible light positioning algorithm based on particle swarm optimization compressed sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0306004.