

一种提高光电跟踪设备捕获概率的搜索方法

张海波¹, 马勇辉¹, 季东², 陈冬², 王华培²

(1. 光学辐射重点实验室, 北京 100854; 2. 北京环境特性研究所, 北京 100854)

摘要: 大型光电跟踪设备跟踪测量精度高、惯量大、视场小, 不具备大空域搜索目标能力, 一般依靠雷达等设备提供的引导信息发现捕获目标, 当目标引导误差超出光电设备视场后, 光电跟踪设备难于发现目标。提出了一种在引导信息基础上的小空域快速螺旋搜索方法, 通过系统建模仿真和外场试验验证, 此方法适用于在目标引导信息误差超出视场情况下, 快速搜索发现目标。在引导误差不超出两倍视场情况下, 此方法可使捕获目标概率从 20% 左右提高到 70% 左右。此方法搜索过程中转台运动平稳, 可根据不同光电设备系统性能、实际目标运动特征和引导误差灵活改变螺旋搜索参数, 大大提高光电跟踪设备目标捕获概率, 是大型光电跟踪设备小空域快速搜索发现目标的一种实用有效的方法, 具有很高的通用性。

关键词: 光电跟踪设备; 螺旋搜索; 系统仿真; 捕获概率

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0217003

Search method to improve acquisition probability for optoelectronic tracking device

Zhang Haibo¹, Ma Yonghui¹, Ji Dong², Chen Dong², Wang Huapei²

(1. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China;

2. Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100854, China)

Abstract: As the large optoelectronic tracking device has the features of high tracking and measuring precision, large inertia and small field, it has no ability to search targets in large sky scope. Generally, it depends on the leading information from radars to find targets. Once the information's error exceeds the field of the device, it's hard for the optoelectronic tracking device to find the target. A quick helical search method in small sky scope was proposed based on the leading information. According to system model simulation and experiments, the method helped the large optoelectronic tracking device to capture target quickly when the target's leading information error outranged the field. The acquisition probability of targets was increased from 20% to 70% when the leading information error was less than twice of the device field. The turntable runned smoothly when applying this search method, and the searching parameters can be changed flexibly according to properties of different optoelectronic devices, features of targets and targets guiding error. It greatly improves acquisition probability of targets, and it is a kind

收稿日期: 2015-06-10; 修订日期: 2015-07-10

作者简介: 张海波(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电精密伺服控制方面的研究。Email: haibo406@163.com

practical and effective method for large optoelectronic device to find targets quickly in small sky scope. This method has high versatility.

Key words: optoelectronic tracking device; helical search; system simulation; acquisition probability

0 引言

光电跟踪测量设备由于其具有观测目标直观清晰、可根据光学特性进行目标识别、跟踪测量精度高、不受电磁干扰的影响、对小目标具有过滤功能等特点,正越来越多地应用于飞行目标精密跟踪测量中。

大型光电跟踪测量设备要达到几百公里的作用距离,使得其自身口径大、视场小、惯量大,不具备大空域搜索发现目标的能力,必须依靠外部的引导信息先将目标引入视场后,才能对目标进行跟踪测量。外场试验中实时的目标引导信息一般来自搜索雷达或多台雷达测量的融合信息,雷达的角测量精度一般比光电设备低。另外不同测量设备之间的时间存在误差,引导数据传输链路也存在时延等误差。引导信息的空间指向误差和系统的时间误差共同构成目标引导误差,外场试验中当目标引导误差超过光电跟踪测量设备视场范围,则光电设备难于发现捕获目标,更无法进行跟踪测量。针对这一问题,文中提出了一种针对大型光电跟踪设备的小空域快速螺旋搜索方法,通过系统仿真和试验验证表明,该方法有效可行,可大大提高光电跟踪设备目标捕获概率。

1 搜索方法提出

1.1 搜索方法

目前针对光电设备的搜索方法有多种^[1-3],其本质是搜索路径的设置不同,常用的有定点搜索、扇形搜索等。定点搜索如图 1(a)所示,根据光学设备视场设定不同搜索点,使搜索视场拼在一起覆盖整个搜索区域,图中搜索点从 1~9 形成一个搜索周期。扇形搜索如图 1(b)所示,即设定搜索矩形范围后,在俯仰角上步进变化,进行方位上的一维搜索。定点搜索和扇形搜索路径规则,视觉上更容易接受,但两者路径上运动不连续,搜索过程都需要多次起停,适用于对低速目标观测的小型光电设备,不适用于大惯量对高速目标的跟踪测量。文中提出螺旋线搜索方法^[4],

其搜索路径为等距螺旋线,搜索路径如图 2 所示,从中心往外连续扫描。螺旋线方程为:

$$\begin{cases} s = s_{\max} \times t \\ \theta = t \times 360 \times n \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为极坐标半径; θ 为极坐标角度; n 为螺旋线圈数; s_{\max} 为螺旋线最大半径; t 为 0~1 变化的参数。

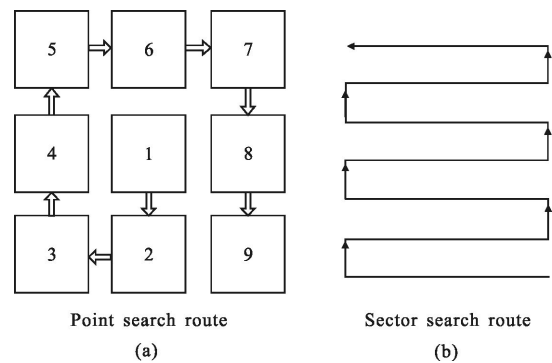


图 1 定点和扇形搜索路径示意图

Fig.1 Fixed points and sector search routes

螺旋搜索路径为等距螺旋线,由图 2 可以看出搜索过程运动连续,在螺旋搜索运动过程中速度不会突变,适用于大惯量的光电跟踪设备在小范围内对目标进行快速搜索,保证整个搜索过程中视场内图像的稳定性,有利于目标识别跟踪处理。

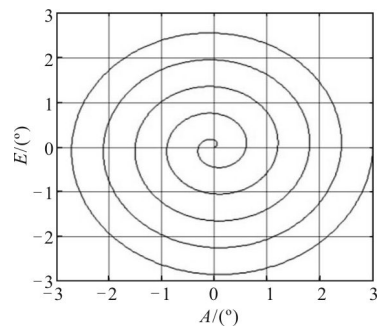


图 2 螺旋搜索路径图

Fig.2 Helical search route

1.2 螺旋搜索方法

整个搜索过程为,当光电跟踪设备收到目标引导信息后,若未能发现目标,则以引导位置为中心,

进行螺旋搜索目标,若搜索过程中未发现目标,则以当前引导位置为中心进入下一螺旋搜索过程重新进行搜索,直到发现捕获目标为止,图 3 为搜索过程示意图^[5]。搜索范围越大,目标落在搜索范围内的概率越大,但随着搜索范围的增大,单次搜索所用时间会增加,影响整个搜索过程的快速性,不利于快速目标的截获。假设引导数据方位俯仰误差符合正态分布,且标准偏差为 σ ,根据概率相关知识可知,目标落在 $\pm 3\sigma$ 范围内的概率为 99.7%。为保证大的目标截获概率和搜索的快速性,选取方位俯仰搜索范围为 $\pm 3\sigma$ 。

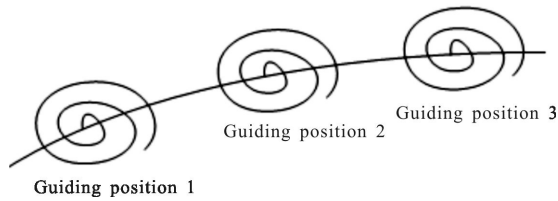


图 3 搜索过程示意图

Fig.3 Sketch map of search process

2 建模仿真

2.1 仿真计算

某光电跟踪测量设备方位系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.71}{(0.79s+1)(0.013s+1)} \quad (2)$$

校正以后的速度开环传递函数为:

$$G_{vo}(s) = \frac{1420(0.3s+1)}{(6.09s+1)(0.006s+1)(0.79s+1)} \quad (3)$$

引导跟踪位置回路校正正传函:

$$G_{Re}(s) = \frac{500(0.5s+1)(0.5s+1)}{(3.8s+1)(3.6s+1)} \quad (4)$$

引导跟踪具有速度前馈,根据方位系统模型,仿真框图如图 4 所示。

假设光电跟踪设备视场角为 $0.6^\circ \times 0.5^\circ$,最大加速度 $35^\circ/s^2$ 。由空间指向误差和系统时间误差导致的目标引导误差为 $0 \sim 1^\circ$ 之间的随机数,假设其误差标准差为 0.5° ,根据 3σ 原则结合伺服系统性能要

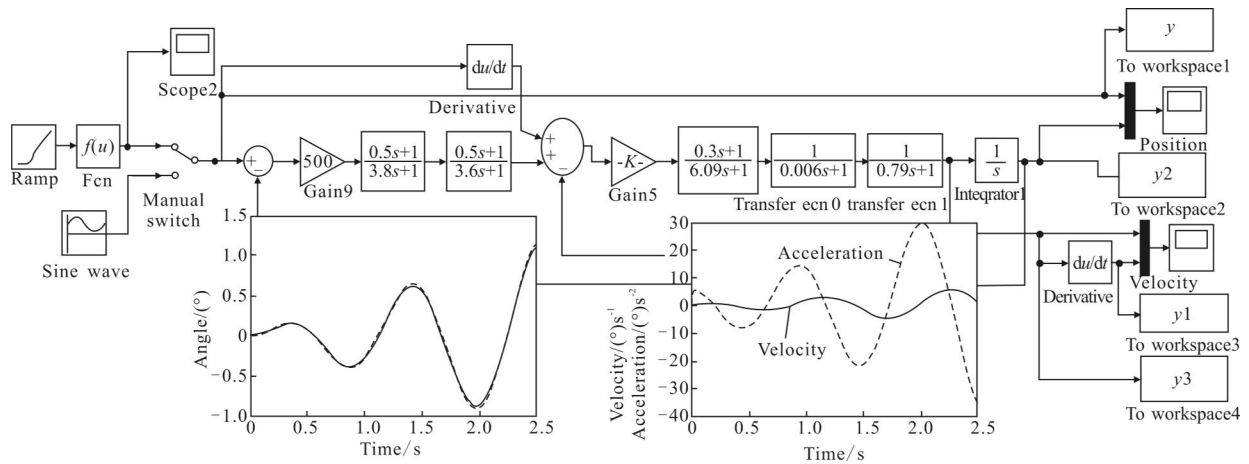


图 4 方位系统仿真框图

Fig.4 Simulation diagram of azimuth system

求,设计搜索螺旋线方程为:

$$\begin{cases} s=1 \times t \\ \theta=t \times 360 \times 2 \end{cases} \quad (5)$$

转换为方位俯仰直角坐标系为:

$$\begin{cases} \Delta A=s \times \cos(\theta) \\ \Delta E=s \times \sin(\theta) \end{cases} \quad (6)$$

此螺旋线螺距为 0.5° ,螺旋线圈数为 2,搜索视场约为 $2.25^\circ \times 2^\circ$,螺旋线如图 5 所示^[6]。 θ 以等角速度变化,设定一个螺旋搜索周期为 2.5 s,两次搜索间隔为 1.6 s,整个搜索过程曲线如图 6 所示。由图可以

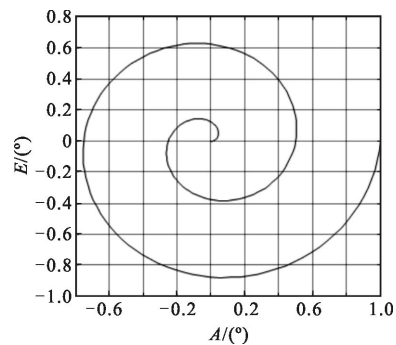


图 5 螺旋搜索曲线

Fig.5 Helical search curve

看出单次搜索过程中系统速度、加速度曲线变化平滑,保证搜索过程中系统运动平稳。

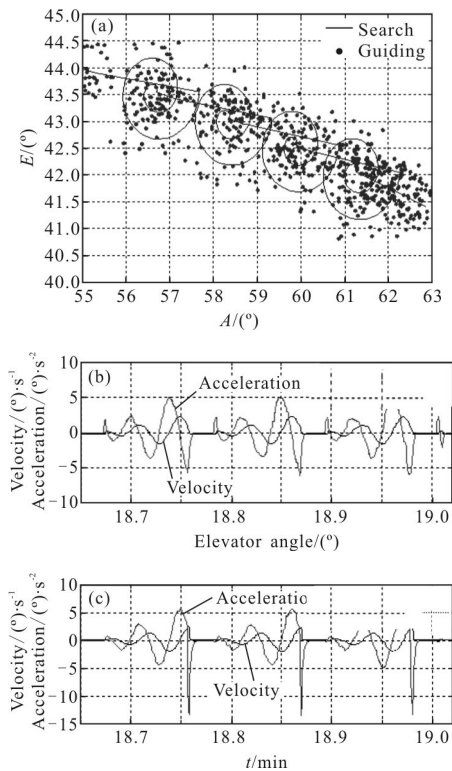


图 6 搜索过程曲线

Fig.6 Curves of search process

2.2 搜索方法优化

在一个搜索过程结束到跟随引导信息运动过程中,由于搜索结束位置并不在目标运动方向上,转台指向位置突变。由图 6 可以看出,单次搜索结束时加速度有急剧变化,使过渡过程运动不够平稳。为使每次搜索结束位置落在目标运动方向上,使过渡过程平稳,螺旋搜索起始角需要根据目标运动方向实时修正^[7-9]。文中采用最小二乘法进行二次拟合目标在方位俯仰平面的运动曲线,得到目标在方位俯仰平面实时运动方向,修改每次螺旋搜索的起始角,保证每次搜索结束位置基本在目标运动曲线上,消除过渡过程指向位置突变,大大提高过渡过程稳定性,使得视场内图像稳定,有利于目标识别跟踪处理^[9]。优化后搜索过程曲线如图 7 所示,系统速度、加速度在每次搜索结束时,变化更加平滑,使得系统运动更加平稳。

由仿真结果可以看出,采用螺旋线搜索时,搜索过程连续运动,没有停顿,速度、加速度平滑变化,转台不会出现急起急停,整个搜索过程会比较平稳,适

合光电跟踪设备小空域快速搜索目标。

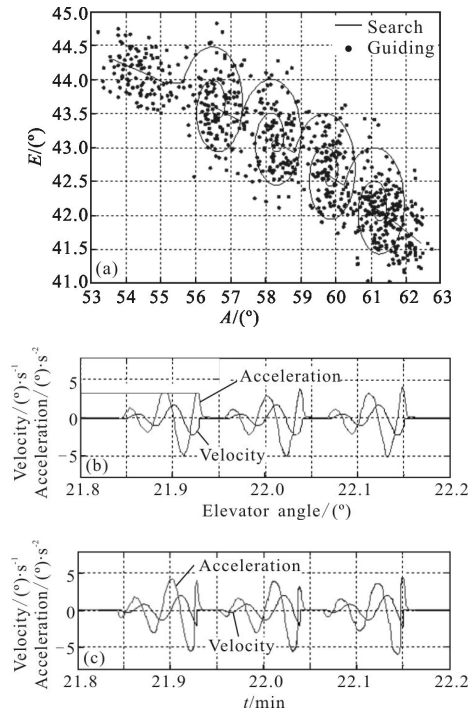


图 7 优化后搜索过程曲线

Fig.7 Optimized curve of searching process

3 试验验证

通过多次外场试验验证了此搜索方法有效可行,可根据目标引导误差和光电跟踪系统具体性能参数和精度要求,调整搜索时间、搜索螺旋线间距和螺旋线圈数。当引导目标为低速目标时,为便于观察,可设定更长的搜索周期。对于高速目标可在满足系统伺服性能(系统最大速度、最大加速度、精度等)前提下缩短搜索周期,提高搜索速度。根据多次外场试验结果统计,在目标引导误差不超过光电跟踪设备 2 倍视场角情况下,采用优化的搜索方法后,系统捕获目标概率由原来的 20% 提高到 70% 左右,大大提高了系统捕获目标概率^[10],更好地发挥了光电系统在空中目标跟踪测量中的作用。

4 结论

由于大型光电跟踪设备不具备大空域搜索目标能力,针对目标引导误差超出视场后,大型光电跟踪测量设备难于发现捕获目标的问题,文中提出了一种小空域的快速螺旋搜索方法。在目标引导误差不超过光电跟踪设备 2 倍视场角情况下,采用此搜索

方法后,系统捕获目标概率由原来的 20% 提高到 70% 左右。搜索过程中转台运动平稳,可根据不同光电跟踪系统性能、实际目标运动特点和引导误差灵活改变搜索螺旋线参数,此方法具有很高的通用性。在目标引导信息误差超出视场情况下,此方法可大大提高光电跟踪设备目标捕获概率,充分发挥光电设备对空中目标跟踪测量的作用,是大型光电跟踪设备小空域快速搜索发现目标的一种实用有效的方法。文中将螺旋搜索算法应用于大型光电跟踪设备,具有积极的工程意义。

参考文献:

- [1] Mi Rentai, Yu Cheng'an. Search Method for Target [M]. Beijing: The Military System Engineering Committee of China System Engineering Institute, 1982: 18–20. (in Chinese)
米仁太, 余承安. 搜索目标法 [M]. 北京: 中国系统工程学会军事系统工程委员会, 1982: 18–20.
- [2] Zhang Shengyun. A new search method for submarine and its efficiency analysis[J]. *Fire and Command Control*, 2001, 26(2): 23–26. (in Chinese)
张圣云. 一种新的对潜搜索法及其效能分析[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(2): 23–26.
- [3] Zhang Zhipei. Search Theory [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1992: 49–50. (in Chinese)
张之培. 搜索论 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992: 49–50.
- [4] Zhang Shengyun, Zhang An, Wang Wenhai, et al. Analysis on spiral search pattern for moving target [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(3): 229–342. (in Chinese)
张圣云, 张安, 王文海, 等. 对运动目标螺旋搜索模式分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(3): 229–342.
- [5] Champagne L R, Greg Carl, Raymond Hill. Search theory, agent-based simulation, and U-boat in the bay of Biscay [C]//Proceedings of Simulation Conference, 2003: 994.
- [6] Zhou Ying, Wang Xuesong, Feng Dejun, et al. Surveillance volume of phased array radar based on trajectory prediction [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(7): 1209–1214. (in Chinese)
周颖, 王雪松, 冯德军, 等. 基于弹道预报的相控阵雷达监视空域研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1209–1214.
- [7] Yang Wei, Zhao Di, Liu Qianjin. Moving targets' perception of static and dynamic double coordinate detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 279–283. (in Chinese)
杨卫, 赵迪, 刘前进. 针对运动目标感知的动静双坐标探测系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 279–283.
- [8] Liu Changjie, Liu Hongwei, Guo Yin, et al. Train speed measurement system based on the scanning laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 285–290. (in Chinese)
刘常杰, 刘洪伟, 郭寅, 等. 基于扫描激光雷达的列车速度测量系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 285–290.
- [9] Ge Bing, Gao Huibin, Yu Yi. LOS stabilization of optoelectro landing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1577–1583. (in Chinese)
葛兵, 高慧斌, 余毅. 光电着舰引导系统的视轴稳定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1577–1583.
- [10] Wang Mingming, Chen Tao, Wang Jianli, et al. Mean-shift tracking algorithm and its application in optoelectronic tracking system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 332–338. (in Chinese)
王铭明, 陈涛, 王建立, 等. Mean-shift 跟踪算法及其在光电跟踪系统中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 332–338.