

内埋式光电搜索瞄准指示系统的广域扫描控制技术

陆红强 张 刘超 吴玉敬 刘莹奇 王亚楠

Wide-area scanning control technology of embedded photoelectric search aiming and indication system

LU Hongqiang, ZHANG Jingyue, LIU Chao, WU Yujing, LIU Yingqi, WANG Ya'nan

引用本文:

陆红强, 张, 刘超, 等. 内埋式光电搜索瞄准指示系统的广域扫描控制技术[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 1–5. DOI: 10.5768/JAO202344.0101001

LU Hongqiang, ZHANG Jingyue, LIU Chao, et al. Wide-area scanning control technology of embedded photoelectric search aiming and indication system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 1–5. DOI: 10.5768/JAO202344.0101001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广域视网膜成像技术研究

Research of wide-area retinal imaging technique

应用光学. 2018, 39(1): 35–39 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101006>

基于RTX64的激光目标模拟系统实时控制软件设计

Design of real-time control software for laser target simulation system based on RTX64

应用光学. 2019, 40(2): 186–192 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201002>

采用凝视器件的搜索跟踪系统中的扫描补偿光学技术

Optical de-scanning technique in search and track systems using focal plane array detectors

应用光学. 2017, 38(4): 521–525 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401001>

一种新型光电侦察系统目标数据观测方法

Novel method for observing object data of photoelectric reconnaissance system

应用光学. 2018, 39(4): 447–452 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0401001>

多维立体化高速摄影测量系统实时精准控制技术

Real-time precise control technology of multidimensional and stereoscopic high-speed photogrammetry system

应用光学. 2021, 42(6): 1062–1066 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603001>

影响光电侦察系统目标定位精度因素分析

Analysis and study on influence factors of target geo-locating accuracy for electro-optical reconnaissance system

应用光学. 2018, 39(1): 1–6 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0001-05

内埋式光电搜索瞄准指示系统的广域扫描控制技术

陆红强¹, 张璟玥¹, 刘超², 吴玉敬¹, 刘莹奇¹, 王亚楠¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 陆装驻西安地区第八军代室, 陕西 西安 710065)

摘要: 研制了一款适用于隐身机载平台的内埋式光电搜索瞄准指示系统, 该系统具备广域侦察、凝视监视、激光测距、激光照射等功能。推导并验证了地理稳定结合快调反射镜光学像移补偿的广域扫描控制技术, 基于样机在实验室和外场开展算法验证。试验结果表明, 该系统在成像清晰前提下实现了二维无缝广域扫描搜索功能, 能够对扫描视频图像进行实时拼接和显示, 满足信息化战争对目标侦察、监视和指示的功能要求。

关键词: 光电搜索瞄准指示系统; 广域扫描控制; 实时拼接; 目标侦察

中图分类号: TN29; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0101001

Wide-area scanning control technology of embedded photoelectric search aiming and indication system

LU Hongqiang¹, ZHANG Jingyue¹, LIU Chao², WU Yujing¹, LIU Yingqi¹, WANG Ya'nan¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. The Eighth Military Representative Office of Army Armaments Department in Xi'an Region, Xi'an 710065, China)

Abstract: An embedded photoelectric search aiming and indication system suitable for stealth airborne platforms was developed, which has the functions of wide-area reconnaissance, staring surveillance, laser ranging and laser irradiation. The wide-area scanning control technology for the optical image motion compensation of geographical stability combined with fast-steering mirrors was deduced and verified, and the algorithm verification was carried out in the laboratory and outfield based on the prototype. The test results show that under the premise of clear imaging, the proposed system realizes the two-dimensional seamless wide-area scanning search function, which can splicing and display the scanned video images in real time and meets the functional requirements of information warfare for target reconnaissance, surveillance and indication.

Key words: photoelectric search aiming and indication system; wide-area scanning control; real-time splicing; target reconnaissance

引言

现代信息化战争中战场信息瞬息万变, 作为机载平台主要任务载荷之一的光电系统, 应具备大范围高分辨率态势感知、实时目标捕获跟踪、高精度目标打击引导等能力。传统机载光电系统具备连续变焦探测视场, 可通过大视场实现态势感知, 小视场实现远距离探测和精确辨识, 但大范围高分辨率态势感知、实时目标捕获跟踪、高精度目标

打击引导无法同时兼顾。美军研制的EOTS(electro-optical targeting system)采用内埋式光机布局, 具备中波红外高分辨率成像、红外搜索跟踪、激光指示、激光测距和激光照射等功能^[1-2]。长春光机所等单位对内埋式光电观瞄系统开展了设计分析, 采用离轴三反系统光学架构, 实现可见光、中波红外、激光发射/接收共口径设计, 并且重点对像旋特征进行分析和验证^[3-4]。据了解, 目前国内设计的

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 某十三五预研项目

作者简介: 陆红强 (1979—), 博士, 研究员, 主要从事机载光电系统总体设计研究。E-mail: lhq205205@163.com

内埋式光电系统,尚不具备对地海面目标广域搜索和实时拼接能力。

针对信息化作战需求,在国内研制了一款具备雷达波隐身,包含广域侦察、凝视监视、激光测距、激光照射等多种工作模式的光电搜索瞄准指示系统,可在广域侦察模式下获得目标区域宽覆盖高分辨率图像,在凝视监视模式下对目标进行辨识和跟踪,同时可以实现激光测距、目标定位和激光照射。不同于机载航空侦察相机采用的推扫成像和下视摆扫成像^[5-7],本系统采用了前视摆扫成像,即光电系统光轴沿飞机的航向重复进行左右运动来实现对侦查成像区域扫描。前视摆扫成像能保证探测距离和细节分辨能力始终相同,避免下视摆扫在一个扫描条带内成像细节分辨能力随探测距离急剧变化,分辨率急剧变化导致对探测目标漏警等问题。

1 系统设计与实现

光电搜索瞄准指示系统具备地海面目标广域侦察、凝视监视、激光测距、激光照射等功能,探测波段包含 $0.7\ \mu\text{m}\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 、 $1.064\ \mu\text{m}$ 和 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 。系统采用多谱段共光路设计,扫描反射镜实现光束在俯仰向扫描控制,无焦望远系统实现对入射光束压缩,经过各分光镜后输入至各个光电探测组件,共用光路包括扫描反射镜、望远系统、快调反射镜组件、反射镜等,系统光机布局如图1所示。

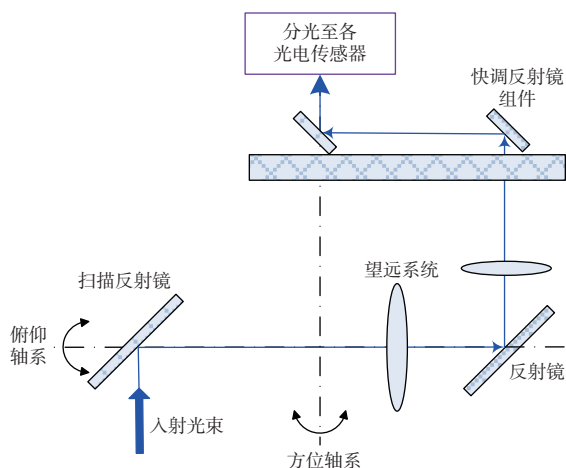


图1 光电搜索瞄准指示系统光机布局示意图

Fig.1 Optical machine layout of photoelectric search aiming and indication system

光电搜索瞄准指示系统样机在地面和空中开展了多轮次试验验证,完成了相关功能和性能的

验证和测试,如图2所示。



图2 光电搜索瞄准指示系统挂飞验证

Fig.2 Flight experiment of photoelectric search aiming and indication system

2 广域地面扫描控制原理

载机在执行工作任务时沿设定航线飞行,机载光电搜索瞄准指示系统以扇扫方式执行广域扫描任务。根据观察区域设定方位扫描角度范围和俯仰角,依据载机速高比、扫描幅宽、传感器视场角、成像帧频等信息设置系统在方位向扫描速度^[8]。进入广域搜索模式时,机载光电搜索瞄准指示系统光轴首先指向扫描起始位置,粗稳定平台以特定速度在方位向转动扫描,快调反射镜以特定速度相对于粗稳定平台运动方向反向扫描补偿。快调反射镜扫描速度 ω_m 与粗稳定平台扫描速度 ω_p 、光学系统放大倍率 M 之间满足 $\omega_m = -\omega_p \times M/2$,从而保证在成像传感器曝光时刻光轴对应的物空间指向不变,实现清晰曝光成像^[9-11]。

光电搜索瞄准指示系统在俯仰方向会根据载机的姿态信息产生一个地理稳定的飞机前向运动的补偿运动^[12-15],保证扫描区域在地理坐标系下是一个水平条带。系统结束某条带扫描后,俯仰向快速步进至地理坐标系统下的固定位置,如图3所示,在结束1条带扫描后,俯仰向由1条带快速步进至2条带的位置。方位向开始以相同速度和方式扫描下一水平条带,直至完成整个区域的扫描侦察。

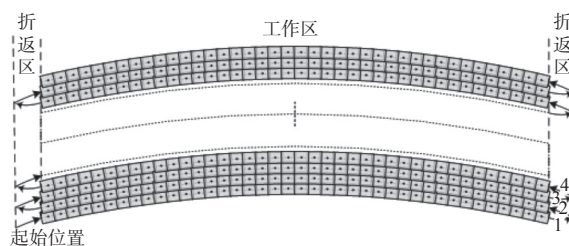


图3 广域地理扫描流程

Fig.3 Scanning process of wide-area geography

该广域扫描控制方式采用地理稳定结合快调反射镜光学像移的补偿方法, 可实现清晰成像前提下的二维大区域扫描搜索功能, 对飞机前向飞行和方位摆扫带来的像移进行补偿。目标相对瞄准线的运动速度主要由两部分引起: 一是方位轴向的摆扫, 二是飞机的平动, 整个扫描控制被定义在载机滤波坐标系下。经过坐标系转换和理论推导, 扫描控制指令如下式所示:

$$\omega_n^s = \begin{bmatrix} \frac{\phi_{fov}(1-S_o)}{\Delta T} \\ 0 \\ z \end{bmatrix} - C_{LL}^s C_{LL}^{LL} \begin{bmatrix} V_E/R \\ V_N/R \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{R}/R \end{bmatrix}$$

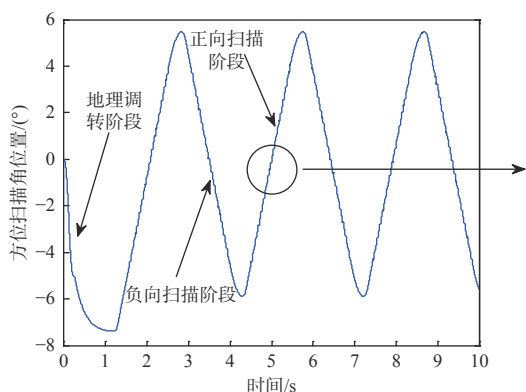
式中: ω_n^s 为扫描速度向量; ϕ_{fov} 为方位向视场角度; S_o 为图像帧与帧之间的重叠率; ΔT 为扫描周期; C_{LL}^{LL} 为导航坐标系到滤波坐标系转换矩阵; C_{LL}^s 为滤波坐标系到瞄准线坐标系的转换矩阵; V_E 和 V_N 为东北天速度; R 为载机到地面目标的斜距, $\dot{R}$ 为载机相对于地面目标的径向速度。

3 试验验证

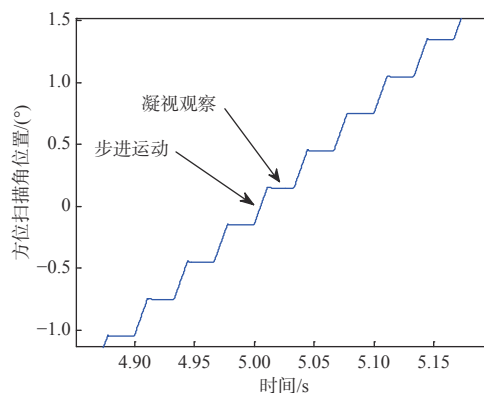
3.1 反扫补偿控制仿真分析

对方位向 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 扫描范围进行仿真分析, 粗稳定平台以 $10^\circ/s$ 速度扫描, 快调反射镜反向转动补偿。当快调反射镜反扫速度稳定后, 通过时序控制成像传感器曝光, 曝光积分时间内物空间在成像传感器靶面上相对静止, 实现扫描状态下当前帧的清晰成像, 瞄准线的运动轨迹如图 4、图 5 所示。

图 4(a) 为光电搜索瞄准指示系统方位向扫描轨迹, 在初始阶段首先通过地理调转进入扫描起始位置, 加速到设定扫描速度后开始匀速扫描, 在指定扫描范围内进行往复扫描运动。图 4(b) 为匀



(a) 方位向多条带扫描轨迹图



(b) 瞄准线方位向单条带局部扫描轨迹

图 4 方位向扫描位置曲线

Fig. 4 Azimuth-oriented scanning position curves

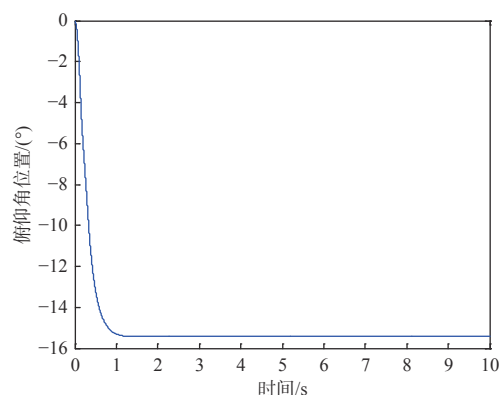


图 5 俯仰向位置曲线

Fig. 5 Pitch-oriented scanning position curve

速扫描过程中瞄准线的轨迹, 曝光成像阶段为粗稳定平台匀速扫描, 而快调反射镜以特定的速度反向运动, 从而在探测器上达到物空间的相对静止, 探测器在此阶段曝光成像, 可保证成像清晰。图 5 表示光电搜索瞄准指示系统进入扫描的整个俯仰向扫描轨迹, 在初始阶段首先通过地理调转进入扫描起始位置, 然后根据载机状态解算进行反向补偿, 从而实现地理稳定。

3.2 中波红外通道反扫补偿成像测试试验

在实验室对中波红外通道反扫补偿进行成像测试试验, 分别在凝视和扫描状态下对中波红外通道最小可分辨温差 (MRTD) 进行对比测试, 在扫描状态下, 粗平台以 $10^\circ/s$ 扫描速度转动, 反扫镜反向转动补偿, 被测靶标空间频率为 6.67 cy/mrad , 在凝视状态下中波红外通道测试 MRTD 为 0.16 K , 扫描状态下 MRTD 为 0.19 K , 试验结果表明中波红外通道探测性能下降至凝视状态的 84.2% , 能够满足使用要求, 结果如图 6 所示。

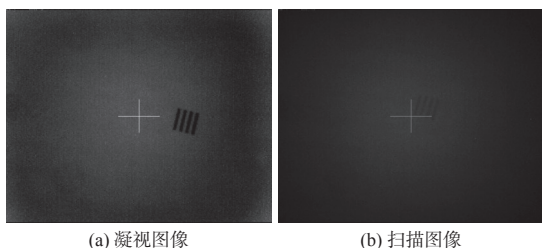


图6 中波红外通道凝视和扫描状态下 MRTD 测试对比
Fig. 6 Comparison of MRTD tests in gaze and scanning states in mid-wave infrared channel

3.3 电视通道反扫补偿成像测试试验

在凝视和扫描状态下对电视通道分辨率对比测试,测试平行光管焦距为 2 073 mm,扫描状态时,粗平台以 10 %/s 扫描速度转动,快调反射镜反向转动补偿,测试结果如图 7 所示。从图 7 可知,凝视状态下电视通道能够分辨 5-2 靶标,对应的空间频率为 54 cy/mrad,扫描状态下电视通道能够分辨 5-1 靶标,对应的空间频率为 48 cy/mrad,试验结果表明电视通道探测性能下降至凝视状态的 88.9%。图 8(a)和图 8(b)是电视探测通道外场凝视和扫描对比图像,从图中可以看出,成像细节上略有损失,和靶标测试结果相符,能够满足使用要求。

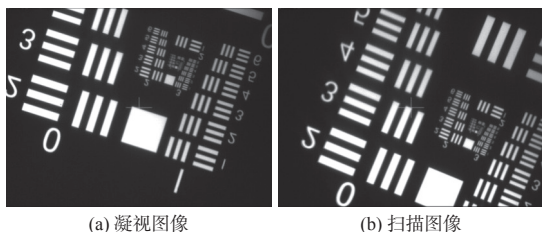


图7 电视通道凝视和扫描状态下分辨率测试对比
Fig. 7 Comparison of resolution tests in gaze and scanning states in visible television channel

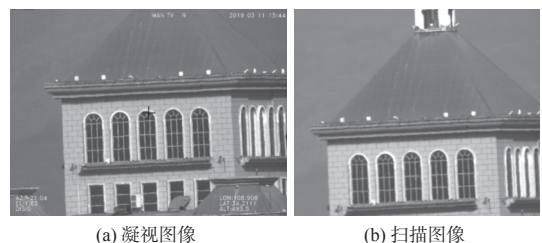


图8 电视通道凝视和扫描状态下外场成像对比
Fig. 8 Comparison of outfield imaging in gaze and scanning states in visible television channel

3.4 跑车状态下广域扫描成像测试试验

在地面跑车扰动条件下,采用基于地理稳定结合快调反射镜光学像移补偿的广域扫描控制技术

对被侦察区域进行扫描,光电搜索瞄准指示系统粗稳平台以 10 %/s 速度扫描,快调反射镜反向转动补偿,扫描拼接效果如图 9 所示。图 9(a)为每个条带 30 幅图像,共 8 个条带的拼接图;图 9(b)为每个条带 9 幅图像,共 6 个条带的拼接图。通过试验证明:在地面跑车扰动条件下,光电搜索瞄准指示系统可以实现广域扫描稳定清晰成像和实时拼接,验证了地理稳定结合快调反射镜光学像移补偿的广域扫描控制技术。

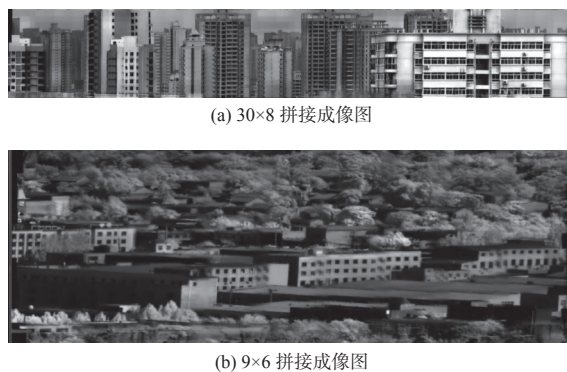


图9 广域扫描拼接图
Fig. 9 Splicing image of wide-area scanning

4 结论

为了满足信息化战争对目标侦察、监视和指示的功能要求,光电搜索瞄准指示系统需要同时具备隐身、广域侦察、凝视监视、激光测距、激光照射等功能。为了使光电搜索瞄准指示系统适应内埋式外廓,又在原有功能上兼具广域扫描功能,本论文介绍了一种适用于内埋式光电搜索瞄准指示系统的广域扫描控制技术。论文首先介绍了该内埋式光电搜索瞄准指示系统的光学设计形式,该共口径光学系统中集成了快调反射镜组件,根据光学特点设计了地理稳定结合快调反射镜光学像移补偿的广域扫描控制算法,对基于该技术研制的样机在实验室和外场开展了试验验证。试验结果表明,该内埋式样机可实现二维无缝广域扫描搜索功能,可以满足信息化战争的要求。

参考文献:

- [1] Lockheed Martin. F-35 Lightning II electro-optical targeting system(EOTS)[EB/OL]. (2021-12-22)[2022-09-05]. <http://www.lockheedmartin.com/en-us/products/f-35-lightning-ii-eots.html>.

- [2] 陈健, 王伟国, 刘廷霞, 等. 美军新型机载光电瞄准系统工作原理分析[J]. *中国光学*, 2017, 10(6): 777-782.
CHEN Jian, WANG Weiguo, LIU Tingxia, et al. The operational principle analysis of new airborne electro-optical targeting system(EOTS) of US army[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 777-782.
- [3] 王平, 田大鹏, 徐宁, 等. 航空光电侦察平台内藏式扫描系统像旋分析及补偿[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0908001-1-0908001-9.
WANG Ping, TIAN Dapeng, XU Ning, et al. Analysis and compensation of image rotation in internally mounted scanning system for aerial electric-optical reconnaissance platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0908001-1-0908001-9.
- [4] 邢振冲. 灵巧型长焦多波段共口径光学系统的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
XING Zhenchong. Research on miniature telefocal multiband common aperture optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [5] 田海英, 刘明. 基于扫描反射镜的航空相机前向像移补偿[J]. *光电工程*, 2014, 41(9): 20-24.
TIAN Haiying, LIU Ming. The forward image motion compensating scheme of aerial camera based on scanning mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(9): 20-24.
- [6] 匡海鹏, 王德江, 孙崇尚. 航空相机扫描像移片上补偿技术[J]. *激光与红外*, 2015, 45(4): 415-421.
KUANG Haipeng, WANG Dejiang, SUN Chongshang. On-chip compensation technology for scanning image motion of integrated reconnaissance and attack aerial camera[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(4): 415-421.
- [7] 刘立国. 姿态变化对推扫式相机成像质量影响分析与补偿方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
LIU Ligu. Research on the influence of the attitude change to the areial push-brooming camera imaging quality and compensation method[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [8] 陆红强, 张璟玥, 王惠林, 等. 一种适用于二维广域扫描的稳定成像方法: CN105588564A[P]. 2016-05-18.
LU Hongqiang, ZHANG Jingyue, WANG Huilin, et al. A imaging method for two-dimensional wide-area scanning: CN105588564A[P]. 2016-05-18
- [9] 洪华杰, 王学武, 翁干飞. 光电侦察装备中的反射镜稳定技术[J]. *应用光学*, 2011, 32(4): 591-597.
HONG Huajie, WANG Xuewu, WENG Ganfei. Mirror stabilization in electro-optical reconnaissance system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 591-597.
- [10] 王琦, 孙广利, 黎纯宁, 等. 基于半捷联的反射镜视轴稳定技术[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 3070-3075.
WANG Qi, SUN Guangli, LI Chunling, et al. Inertial line-of-sight stabilization technique of semi-strapdown control using mirrors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3070-3075.
- [11] 王震, 程雪岷. 快速反射镜研究现状及未来发展[J]. *应用光学*, 2019, 40(3): 373-379.
WANG Zhen, CHENG Xuemin. Research progress and development trend of fast steering mirror[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 373-379.
- [12] 闫明, 刘栋, 王惠林, 等. 机载光电观瞄系统的光轴指向线性运动补偿方法[J]. *应用光学*, 2016, 37(1): 1-5.
YAN Ming, LIU Dong, WANG Huilin, et al. Linear motion compensation algorithm for airborne electro-optic sighting system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(1): 1-5.
- [13] 张璟玥, 纪明, 王惠林. 机载稳瞄控制系统模型及仿真分析[J]. *应用光学*, 2006, 27(6): 491-496.
ZHANG Jingyue, JI Ming, WANG Huilin. Modeling and simulation of airborne stabilized sighting system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(6): 491-496.
- [14] 刘栋, 王惠林, 雷亮, 等. 基于机载光电系统的瞄准线广域扫描控制方法: CN111026165A[P]. 2020-04-17.
LIU Dong, WANG Huilin, LEI Liang, et al. Wide area scanning method of airborne photoelectric system: CN111026165A[P]. 2020-04-17.
- [15] 孙崇尚. 基于快速反射镜的高精度_宽频带扫描像移补偿技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
SUN Chongshang. Research on the scanning image motion compensation technology based on fast steering mirrors with high precision and wide frequency range[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2016.