

机载稳瞄系统稳定精度与视距关系的研究

王 晶, 纪 明, 张 冲, 姜世洲, 鲁 华, 田 力
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:直升机在飞行过程中由于发动机和旋翼的强烈振动给机载稳瞄系统带来强烈扰动,严重影响光电系统的作用距离。在稳瞄系统伺服控制的补偿下,残余的扰动量可以用稳定精度来表示,稳定精度所表示的残余扰动量对视距的影响仍然不可忽视。稳定精度和作用距离是机载稳瞄系统的关键技术指标,找到稳定精度与作用距离之间的关系是机载稳瞄系统设计的关键。本文基于红外系统作用距离计算的原理,建立红外成像系统动态调制传递函数和动态最小可分辨温差的数学模型,并设计一套实验装置和实验方法,通过实验模拟直升机载稳瞄系统的扰动状态,测试红外成像系统的动态最小可分辨温差,根据最小可分辨温差曲线计算不同扰动量下红外成像系统的作用距离,最后分析出机载稳瞄系统稳定精度与作用距离之间的关系,为机载稳瞄系统稳定精度的设计奠定了坚实的理论基础。

关键词:稳定精度;视距;最小可分辨温差;调制传递函数

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.15

Study on relation between stabilization precision and sight range of airborne stabilized sighting system

WANG Jing, JI Ming, ZHANG Chong, JIANG Shi-zhou, LU Hua, TIAN Li
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Helicopter stabilization-aiming system is disturbed strongly by the strong vibration of the engine and rotated wing during the helicopter flight, which seriously affects the sight range of the electro-optical system. Because of the compensation of the stabilized sighting system servo control, the residual disturbing quantity can be expressed as the stabilization precision, the sight range is still affected by this disturbing quantity. The stabilization precision and sight range are the critical technical index, the relation between them is the important issue to design the stabilization-aiming system. After the sight range calculation principle is analyzed, the dynamic modulation transfer function model and dynamic minimum resolvable temperature difference model are established. The experimental method and installation are designed, the vibration of helicopter stabilized sighting system is simulated by experimentation, and in order to get the MRTD of infrared imaging system under vibration, the sight range under vibration can be calculated according to the MRTD curve of the system, finally, the relation between stabilization precision and sight range can be obtained, which provide the theoretical foundation for the design of the stabilized sighting system.

Key words: stabilization precision; sight distance; MRTD; MTF

1 引 言

机载稳瞄系统是精确打击战术武器系统的重要组成部分。稳瞄系统的作用是实现运动载体上对目标进行搜索、发现、识别、瞄准、跟踪、测角、测距。载体扰动会对光电成像系统的性能产生影响,因此需要隔离扰动,稳定成像系统的视轴。视距是光电

成像系统至关重要的性能之一,因此,载体扰动会如何影响光电成像系统的视距成为急需解决的问题。本文通过动态测试红外热像仪最小可分辨温差

作者简介:王晶(1984-),女,博士,主要从事机载光电系统总体设计工作。E-mail:jing1984929@163.com

收稿日期:2013-03-10;修订日期:2013-03-15

(MRTD)将载体扰动量与红外成像系统视距联系在一起,通过一系列的实验和分析定量地测试出动态情况下的最小可分辨温差(MRTD),最后通过MRTD曲线得到载体扰动量与红外成像系统视距之间的关系,为设计机载稳瞄系统奠定了坚实的理论基础^[1]。

2 动态调制传递函数(MTF)和动态最小可分辨温差(MRTD)模型

静态MRTD的理论公式为:

$$MRTD(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} SNR_{DT} f \frac{NETD}{MTF_S(f)} \left[\frac{\alpha\beta}{\tau_d t_e f_p \Delta f_n} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式(1)中,SNR_{DT}为观察者能分辨线条的阈值视觉信噪比;*f*为目标空间频率;NETD为待测热像系统噪声等效温差; $\left[\frac{\alpha\beta}{\tau_d t_e f_p \Delta f_n} \right]^{1/2}$ 为人眼滤波函数, α, β 分别为瞬时视场;*t_e*为人眼的积分时间; Δf_n 为噪声等效带宽; τ_d 为驻留时间;*f_p*为帧频;MTF_S为红外成像系统的调制传递函数。

当红外成像系统处于扰动状态下时,系统的调制传递函数将由于扰动的引入变为:

$$MTF_0 = MTF_S \cdot MTF_{vibration}$$

其中,MTF_{vibration}是由于扰动而引起的调制传递函数^[2]。

根据光学传递函数的物理意义,假设一个光强沿*x*轴分布的正弦波光栅,空间周期分布如图1所示,于是其波形可表示为:

$$i(x) = I_0 + I_a \cos 2\pi f x(t) \quad (2)$$

式中,*I₀*表示正弦波光栅平均光强;*I_a*表示正弦波振幅,它表示交变强度的大小;*f*为空间频率,表示在单位空间长度内正弦波光栅的周期数,单位为线对/毫米(lp/mm)。

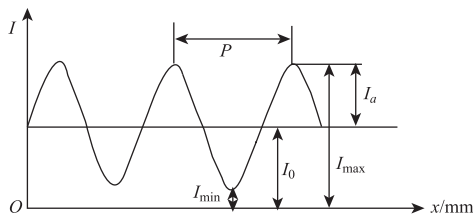


图1 正弦光栅空间周期分布示意图

当光电成像系统处于运动状态时,这里假设运动为线性运动,于是

$$x(t) = x_0 + vt \quad (3)$$

于是新的光强分布为:

$$i(x) = I_0 + I_a \cos 2\pi f(x_0 + vt) \quad (4)$$

于是在光电成像系统的曝光时间*t_e*内平均光强为:

$$\begin{aligned} \overline{i(x,t)} &= \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} [I_0 + I_a \cos 2\pi f(x_0 + vt)] dt \\ &= I_0 + I_a \frac{\sin(\pi f v t_e)}{\pi f v t_e} \cos 2\pi f(x_0 + \frac{v t_e}{2}) \end{aligned} \quad (5)$$

根据调制度的定义,像面运动时的调制度为:

$$MC_i = \frac{I_a \sin \pi f v t_e}{I_0 \pi f v t_e} = \frac{I_a}{I_0} \text{sinc}(\pi f v t_e) \quad (6)$$

由此可得光电成像系统处于线性运动状态时的调制传递函数为:

$$MTF_{linear} = \frac{MC_i}{MC_0} = |\text{sinc}(\pi f v t_e)| \quad (7)$$

由于机载稳瞄系统的稳定精度描述的是光电成像系统被稳定后的残余扰动量,而这部分扰动量主要是低频的正弦运动,当载体的角扰动为正弦运动时,积分时间内载体的扰动量与扰动频率相关,当扰动周期小于探测器积分时间时,积分时间内的扰动量为正弦运动的峰峰值,当扰动周期大于探测器积分时间时,积分时间内的扰动量是随机的。

目前所使用的凝视型热成像系统的积分时间大约在3ms左右,线列阵的热成像系统积分时间则更低,而机载稳瞄系统稳定精度所表征的低频正弦运动的频率很低,最高的频率也只有二十几赫兹,于是,稳瞄系统稳定残余扰动对光电成像系统的影响属于扰动周期大于探测器积分时间的情况,在这段积分时间内的扰动量是随机的,它的大小则取决于积分时间的起始点^[3]。然而,尽管该种情况下积分时间内的扰动量随机,但是由于积分时间很短,所以在积分时间内的位移量也是很微小的,即稳瞄系统稳定残余扰动的幅值很小,因此,相对于一个周期的正弦运动而言,在探测器积分时间内的这一小段的运动可以近似为线性运动,于是,低频正弦运动的动态调制传递函数可以近似为:

$$MTF_{low-sine} = |\text{sinc}(\pi f d)| \quad (8)$$

式中,*d*表示积分时间内的光电成像系统扰动的位移量。探测器积分起始时间示意图如图2所示。

其中,*d*的大小与探测器积分时间的起始位置有关,计算如下:

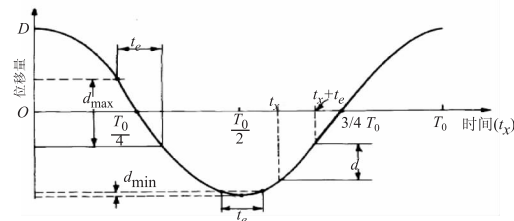


图2 探测器积分起始时间示意图

$$d = D \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos \frac{2\pi}{T_0} t_x - \cos \frac{2\pi}{T_0} (t_x + t_e); 0 \leq t_x < \frac{T_0}{2} - t_e \\ 1 + \cos \frac{2\pi}{T_0} t_x; \frac{T_0}{2} - t_e \leq t_x < \frac{T_0}{2} - \frac{t_e}{2} \\ 1 + \cos \frac{2\pi}{T_0} (t_x + t_e); \frac{T_0}{2} - \frac{t_e}{2} \leq t_x < \frac{T_0}{2} \\ \cos \frac{2\pi}{T_0} (t_x + t_e) - \cos \frac{2\pi}{T_0} t_x; \frac{T_0}{2} \leq t_x < T_0 - t_e \\ 1 - \cos \frac{2\pi}{T_0} t_x; T_0 - t_e \leq t_x < T_0 - \frac{t_e}{2} \\ 1 - \cos \frac{2\pi}{T_0} (t_x + t_e); T_0 - \frac{t_e}{2} \leq t_x < t_x \end{array} \right. \quad (9)$$

其中, D 为低频正弦运动的幅值; T_0 为正弦运动的周期; t_x 为积分的起始位置; t_e 为积分时间。

于是, 当红外成像系统处于低频正弦运动状态时的 MRTD 公式可以表示为^[4]:

$$\text{MRTD}(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} \text{SNR}_{\text{DTF}} \frac{\text{NETD}}{\text{MTF}_s(f) \cdot \text{MTF}_{\text{low-sine}}} \left[\frac{\alpha\beta}{\tau_d t_a f_p \Delta f_n} \right]^{1/2} \quad (10)$$

3 动态 MRTD 的测试

图 3 为动态 MRTD 测试装置示意图, 主要包括标准目标辐射准直系统、准直辐射源控制系统、待测热像系统、图像数据采集与处理系统、以及由电机驱动的镀银反射镜等五部分组成。标准目标辐射准直系统在控制系统的控制下提供一个标准的四杆靶差分红外辐射信号, 经由反射式摆镜的反射提供给待测热像系统, 图像数据采集与处理系统接收来自待测热像系统的视频输出信号, 经由计算机自动处理给出最终的测试结果^[5]。

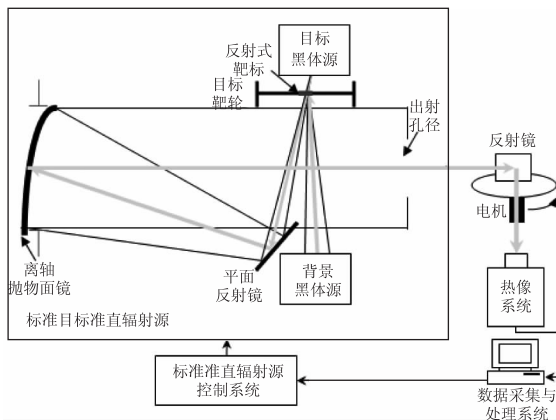


图 3 测试装置示意图

整套测试系统由计算机控制。如图 3 所示, 计算机发送指令给标准目标辐射源系统的高精度温控器和靶轮, 受温控器控制的目标黑体和背景黑体产生稳定的差分信号 ΔT , 经靶标、反射镜和离轴抛物面镜

反射后形成无限远的标准靶差分温度信号, 该信号经过由电机控制的反射镜抖动, 形成动态无穷远四杆靶目标, 供待测热成像系统接收。在待测热成像系统中, 标准辐射准直系统提供的红外场景入射辐射经过光学系统聚焦在探测器上, 然后探测器把光信号转换成电信号, 经过后续电路放大和处理, 再被显示在监视器或显示器上形成一幅灰度图像^[6]。

受待测系统本身空间分辨率限制, 选取 5 个低频空间频率目标 (0.33; 0.71; 1.67; 2.00; 2.50) cyc/mrad 作为测试对象, 反射镜抖动频率采用 3、6、12、18Hz, 反射镜左右正弦摆动的振幅为 0.012、0.024、0.035、0.047、0.07 (mrad), 热像仪在不同空间分辨率目标、不同振动频率、不同振动振幅、不同温差点, 采集目标图像, 温度范围从目标图像不能识别的状态温度 T_0 , 以 0.05℃ 温差为步长, 到目标图像完全可以识别的温度 T_1 。MRTD 评价热成像系统性能方法为主观测试方法, 受测试人员和测试条件影响很大, 动态测试时受影响更大, 为尽可能消除动态测试时主观因素的影响, 利用热像仪图像采集软件, 在不同空间频率、不同振动频率、不同振动振幅下的每个温差点采集 100 幅目标图像, 分析每幅图像的静态可分辨特征, 用统计学的方法, 得到动态 MRTD 曲线。测试结果如图 4~9 所示。其中图 4 为静态曲线, 图 5~9 均是 3、6、12、18Hz 频率下测试得到的曲线。具体测试条件见图标^[7]。

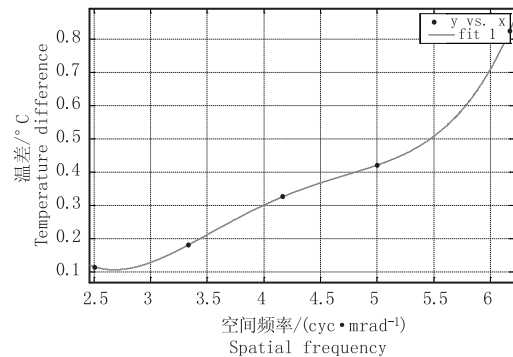


图 4 静态 MRTD 曲线

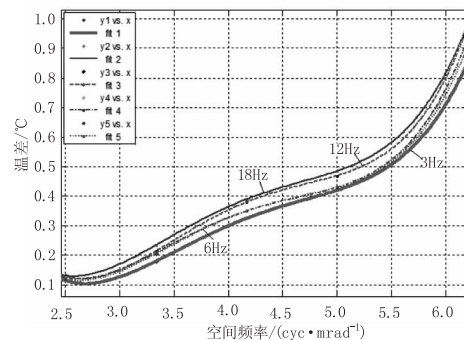


图 5 各频率下, 0.012 mrad 时, MRTD 曲线

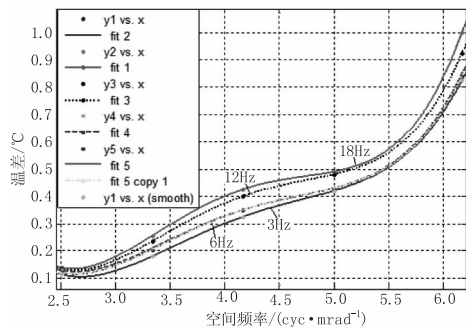


图6 各频率下,0.024 mrad时,MRTD曲线

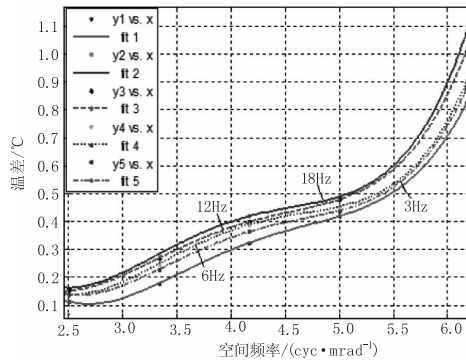


图7 各频率下,0.035mrad时,MRTD曲线

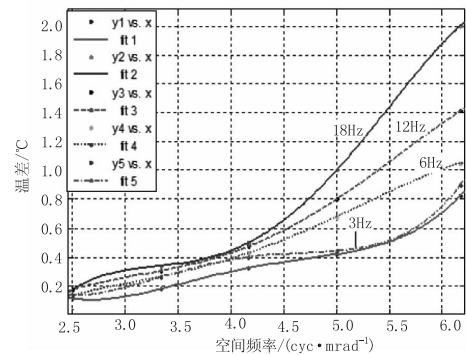


图8 各频率下,0.047 mrad时,MRTD曲线

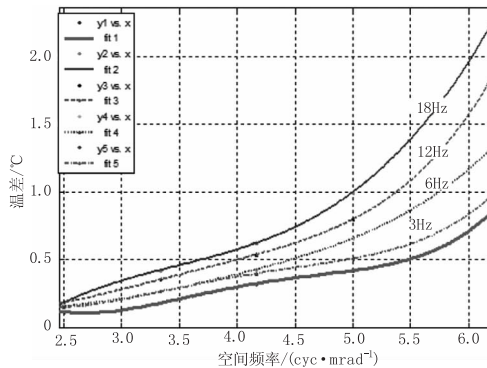


图9 各频率下,0.07 mrad时,MRTD曲线

4 红外成像系统视距计算

根据最小可分辨温差 (MRTD) 曲线,可以计算红外成像系统的作用距离。

采用 MONTRAN 软件计算大气透过率。实际作战环境:能见度 23 km,大气湿度 80%,环境温度 28°C,红外波长 3 ~ 5 μm。于是大气透过率如表 1 所示。

表 1 大气透过率表

距离 (km)	大气透过率
2	0.4750
4	0.3675
6	0.3045
8	0.2607
10	0.2276
12	0.2013

根据作战指标可知,目标与背景的温差一般取 3K 或 5K,但根据所设计的实验装置可知,平行光管的能量并未直接被热像仪全部接收,而是通过面积有限的反射镜反射后进入热像仪。在此情况下,进入热像仪的能量会被衰减,通过计算最终目标与背景的温差为 0.2235 K 或 0.3725 K。接下来按 0.3725 K 计算。假设目标是 2.3m × 2.3m 的坦克,于是可得到表观温度曲线,如图 10 所示。

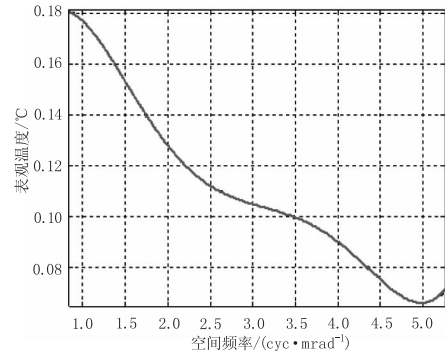


图 10 表观温度与空间频率曲线

接下来根据表观温度曲线与 MRTD 曲线图求解红外热像系统的极限识别距离。

于是通过上述计算得到的数据,根据公式:作用距离 = 最高频率 × 目标大小,可以得到不同扰动条件下红外热像仪的作用距离,最后得到稳定精度和视距之间的关系曲线图,如图 11 ~ 14 所示。

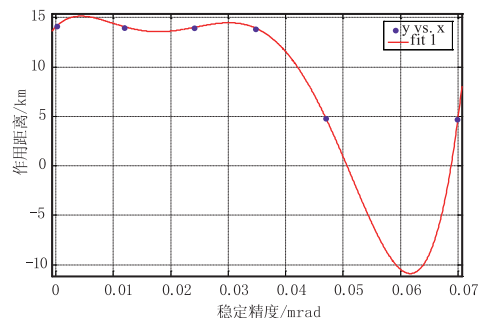


图 11 3 Hz,稳定精度与作用距离关系曲线

根据测试得到的 MRTD 曲线和图 10 所示的曲线,采用 MATLAB 软件计算某红外热像仪的最高空间分辨率为表 2。

表 2 某型热像仪最高分辨率表

扰动状态 (mrad) Hz	静态	0.012				1pix 0.024				1.5pix 0.035				2pix 0.047				0.07			
		3	6	12	18	3	6	12	18	3	6	12	18	3	6	12	18	3	6	12	18
最高空间频率 (cyc/mrad)	6.11	6.11	6.11	6.07	6.05	6.08	6.08	6.06	6.04	6.03	6	5.8	5.7	2.1	2.1	2	2	2.06	2.05	2	1.9

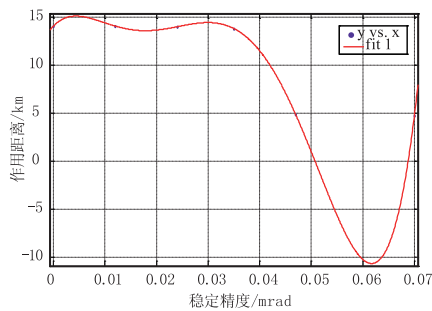


图 12 6 Hz, 稳定精度与作用距离关系曲线

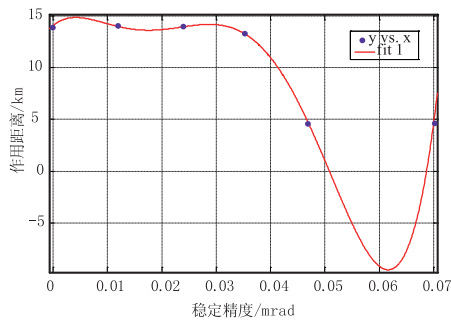


图 13 12 Hz, 稳定精度与作用距离关系曲线

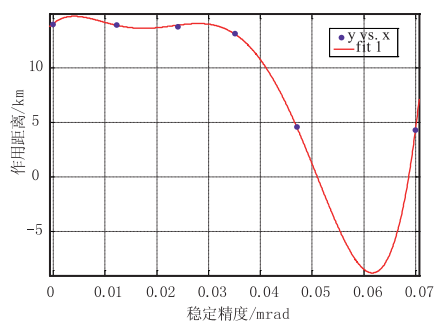


图 14 18 Hz, 稳定精度与作用距离关系曲线

从各频率下,稳定精度与作田距离关系曲线图可知,随着稳定精度的增大,红外成像系统的作用距离是逐渐缩短的,不同低频率下变化趋势不尽相同,但是区别不是很大,从以上四个图可以发现,随着稳定精度的不断增大,红外成像系统作用距离在某一个时刻突然严重下降,从图中可以发现此稳定精度在 0.03mrad 左右,因此,针对所采用的红外成像,在进行机载稳瞄系统设计时,要将系统的稳定精度至少控制在 0.03 mrad 的范围内。

5 结论

本文针对直升机载稳瞄系统的两个关键技术指标进行研究,即稳定精度和视距。在机载稳瞄系统的设计过程中,设计者一般根据上级指标视距对系统的各项技术指标进行设计,因此,找到视距与稳定精度的关系将给机载稳瞄系统的设计提供坚实的理论依据。论文根据研究目的,推导了动态最小可分辨温差的理论模型,并设计了动态 MRTD 的测试实验,得到不同扰动量下 MRTD 的曲线,接着根据实验结果计算了不同扰动条件下红外系统的视距,最终得到了系统稳定精度与视距之间的关系曲线,可以得出结论:随着稳定精度的增大,红外成像系统的作用距离是逐渐缩短的,不同低频率下变化趋势不尽相同,但是区别不是很大,随着稳定精度的不断增大,红外成像系统作用距离在某一个时刻突然严重下降,此稳定精度在 0.03 mrad 左右,即因此在进行机载稳瞄系统设计时,要将系统的稳定精度至少控制在 0.03 mrad 左右,即 1 个像素左右。

参考文献:

- [1] Zhou Liwei, Liu Yuyan. Target identification and recognition [M]. Beijing: Beijing institute of technology press, 2002:348-349. (in Chinese)
周立伟,刘玉岩. 目标探测与识别 [M]. 北京:北京理工大学出版社,2002:348-349.
- [2] Sadot D, Kopeika N S. Thermal imaging through the atmosphere: atmosphere MTF theory and verification [J]. Opt. Eng., 1994, 33(3):880-887.
- [3] Zhang Jinquan. Current and development of the Helicopter in FLIR [J]. Modern Weaponry, 2001, 3:21-23. (in Chinese)
张金全. 武装直升机机载前视红外系统的现状与发展 [J]. 现代兵器, 2001, 3:21-23.
- [4] Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. Low-light and infrared imaging system [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995, 226-242. (in Chinese)
张敬贤,李玉丹,金伟其. 微光与红外成像技术 [M].

- 北京:北京理工大学出版社,1995,226-242.
- [5] Zhang Jingyue, Ji Ming, Wang Huilin. Modeling and simulation of airborne stabilized sighting system [J]. Journal Applied Optics, 2006, 27(6): 491-496. (in Chinese)
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.
- [6] Kou Xiaoming, Liu Shangqian, Hong Ming, et al. Objective evaluation and implementation for overall performance of thermal imaging system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 9: 123-125. (in Chinese)
寇小明, 刘上乾, 哄鸣, 等. 红外热像仪综合性能的客观评价及实现技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 9: 123-125.
- [7] Wang Jing, Ji Ming et al. Performance of infrared imaging system under perturbation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 12: 62-66. (in Chinese)
王晶, 纪明, 等. 扰动状态下红外成像系统性能的测试与分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 12: 62-66.