

文章编号: 1672-8785(2020)03-0016-12

## 红外热像仪成像评估系统设计

张志强<sup>1,2</sup> 王 萍<sup>1</sup>

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

2. 中科和光(天津)应用激光技术研究所有限公司, 天津 300304)

**摘 要:** 红外热像仪在军民应用领域发展迅速。如何客观评价红外热像仪的成像效果, 为红外热像仪的成像性能提供定量的数学描述, 同时也为研究红外成像系统的图像清晰度、目标探测距离和目标跟踪性能提供支撑依据, 成为必须解决的问题。本文提出的红外热像仪成像评估(质量评价)系统具有红外图像数据采集与处理功能。通过将它与红外成像评估的靶标系统(由黑体、辐射靶标控制台、准直光学系统、数显精密转台组成)配合使用, 可以对红外图像数据进行测试评估。该系统设计了图像评估的主要性能指标, 并提出了数学模型及其实现步骤。主要评价技术指标包括图像不均匀性(Non-uniformity, NU)、信号传递函数(Signal Transfer Function, SiTF)、噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)、角线性度(Angular Linearity, AL)和目标成像定位角误差(Target Imaging Positioning Angle Error, TIPAE)等。测试结果表明, 该系统的性能非常优越, 可成为红外热像仪研制过程中必备的调试与测试设备。

**关键词:** 红外热像仪; 图像质量评价; 图像不均匀性; 信号传递函数; 噪声等效温差; 角线性度; 定位角误差

中图分类号: TN21 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.03.003

## Design of Imaging Evaluation System for Infrared Thermal Imager

ZHANG Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Harglo Institute of Applied Laser Technology, Tianjin 300304, China)

**Abstract:** Infrared thermal imager has developed rapidly in the field of military and civilian applications. How to objectively evaluate the imaging effect of the infrared thermal imager has become a problem that must be solved, which not only provides quantitative mathematical description for the imaging performance of the infrared thermal imager, but also provides the supporting basis for the study of the image sharpness, target detection distance and target tracking performance of the infrared imaging system. The imaging evaluation system of thermal infrared imager proposed in this paper has the functions of infrared image data acquisition and processing. It is used in conjunction with a target system for infrared imaging evaluation (composed of a black body, a radiation target console, a collimating optical system, and a digital display precision turntable) to test and evaluate infrared image data. The system has designed the main performance indexes, mathematical model and

收稿日期: 2019-04-25

作者简介: 张志强(1979-), 男, 河北唐山人, 高级工程师, 博士, 主要从事电气工程、机器视觉、激光与红外系统研究。E-mail: zqz411@163.com

steps of image evaluation. The main performance indicators including image non-uniformity (NU), signal transfer function (SiTF), noise equivalent temperature difference (NETD), angular linearity (AL), target imaging positioning angle error (TIPAE) and other main evaluation technical indexes. After testing, the performance of the system is very superior and it becomes the necessary debugging and testing equipment in the development of infrared thermal imager.

**Key words:** thermal infrared imager; image quality evaluation; image non-uniformity; SiTF; NETD; angular linearity; positioning angle error

## 0 引言

自 20 世纪 50 年代起, 红外热成像技术主要在航空航天、制导反导、卫星遥感、搜索跟踪等军事领域得到了应用和发展。至今, 该技术已经在冶金、石油化工、安防、消防、建筑、医疗、电力、警用执法、汽车辅助驾驶、泛舟和狩猎等民用领域取得了极大的进展, 并且有着巨大的发展前景和潜力。

红外热成像系统由光学镜头、探测器、读数电路、A/D 采集电路、图像处理电路和图像显示装置等组成。其中每一部分都会对红外热成像系统的成像性能造成影响。随着红外热成像技术的高速发展, 人们对系统成像的要求越来越高。因此需提出一些能客观评价红外热成像系统成像性能的合理指标, 为研究系统图像的清晰度、目标探测距离和目标检测跟踪精度等指标提供重要的数据支撑。

红外热成像的图像质量评价方法可分为两大类: 一类是主观评价, 即由观察者通过人眼直接观察得到, 包括最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) 和最小可探测温差 (Minimum Detectable Temperature Difference, MDTD); 另一类是客观评价, 即通过辐射测量或电子参数测量得到, 包括反映噪声与响应的参数 (如 NETD、

图像不均匀性 (也称非均匀性)) 以及反映信号传递特性的参数 (如 SiTF、调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 等)。由于红外热成像技术突飞猛进, 以前的图像评估技术不再适用或者存在不足。本文提出的红外热像仪成像评估反映系统的主要功能是评估用于反映红外热像仪噪声与响应特性的图像不均匀性、SiTF、NETD 三个指标和评估用于反映红外热像仪图像分辨特性的角线性度、目标成像定位角误差两个指标。测试结果表明, 该系统的性能非常优越, 可成为红外热成像仪研发过程中必备的调试与测试手段。

## 1 红外热像仪成像评估系统

红外热像仪成像评估系统主要由专业图形处理工作站、图像显示器、红外视频图像专用采集卡、计算机图形操作系统、红外成像数据采集程序、红外图像数据处理程序、数学模型的调试检测程序、图像数据的显示和存储程序组成。系统连接图如图 1 所示。

专业图形处理工作站是整个系统的载体, 提供硬件平台。本文采用高性能双 GPU 的专业图形处理工作站。计算机图形操作系统是所有图像处理软件的运行平台, 基于 WINDOWS 系统工作。红外视频图像专用采集卡用于红外热像仪的视频信号的硬件采集。它可采集

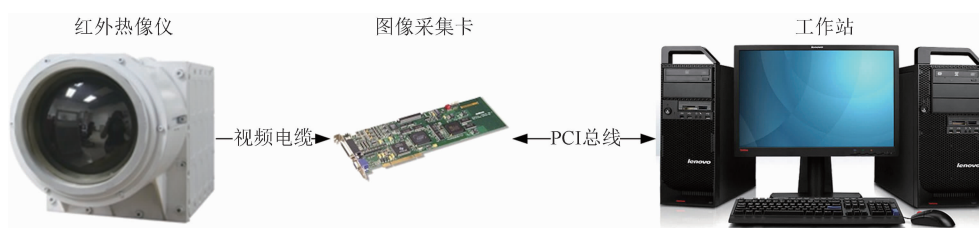


图 1 红外热像仪成像评估系统的连接图

PAL 的模拟视频,也可以采集 CAMERALINK 等数字视频信号。

采集处理分析软件包括红外成像数据采集程序、红外图像数据处理程序、数学模型的调试检测程序、图像数据的显示和存储程序等,用于实现热成像仪的性能指标分析。

## 2 软件流程

利用红外图像数据处理平台程序构造一个运行平台,无缝衔接各个模块和调用程序,实现参数传递,并提供完善的平台接口以及友好的人机运行界面。红外图像数据处理平台的工作流程如图 2 所示。

### 2.1 红外图像数据采集程序(模块)设计

利用数据采集程序驱动视频采集卡,使其将物理信号转换成数字信号。通过 PCI 总线将该信号传输到计算机内存中,然后将其还原为图像数据,生成红外热像图。处理流程如图 3 所示。

### 2.2 红外图像数据处理程序(模块)设计

采集模块采集数据并将其放入内存,然后由数据处理程序对图像数据进行处理。首先,

对数据进行有效组织,并将图像保存到硬盘,以实现历史数据分析功能。然后对数据进行预处理,取出并分析数据,生成数学模型所需的数据,以便数学模型调试检测程序对数据进行运算处理。另外,数据处理程序还对数据区域的选择进行设定,通过提供鼠标拖拉等易于操作的方式来对各种参数进行操作,并提供友好的人机操作界面。具体的处理流程如图 4 所示。

### 2.3 红外图像数据回放显示程序(模块)设计

图像采集模块把采集到的数据保存到内存(硬盘)后,由红外图像数据回放显示程序对图像数据进行处理,并将图像显示到显示器中。这里支持图像数据的图形化显示,可提供图形缩放、区域选取显示、特定区域的放大或缩小、滑动窗口(可通过鼠标拖拉滑动窗口)、时间的定位显示、灰度值(温度值)提取等功能以及友好的人机操作界面。红外图像数据回放流程如图 5 所示。

## 3 红外图像评估参数模型的建立与处理

图像评估需要构造正确的数学模型并将

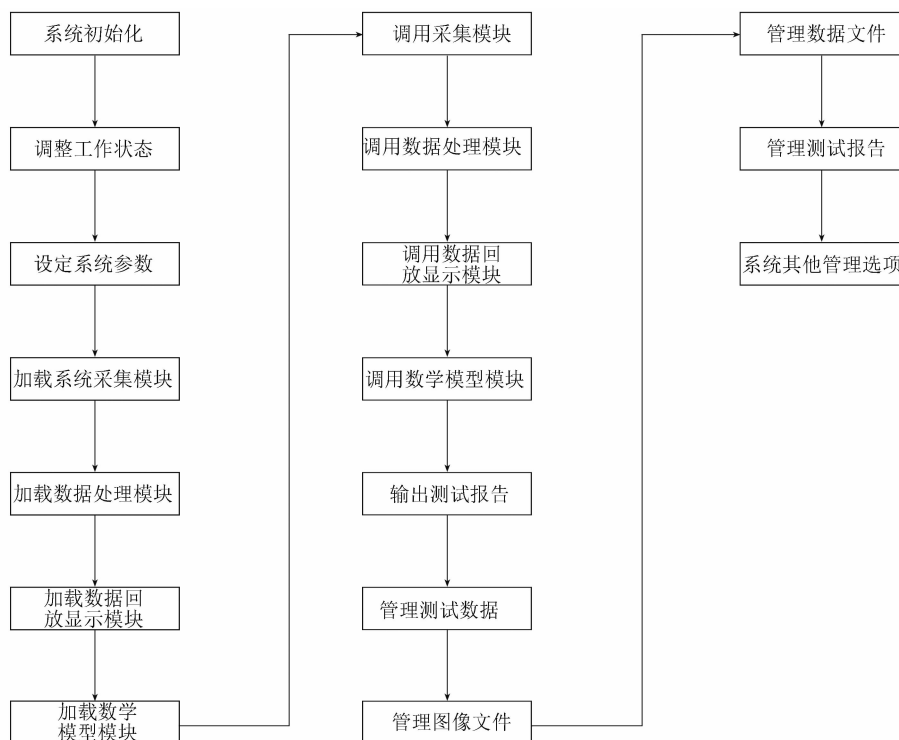


图 2 红外图像数据处理平台的流程图

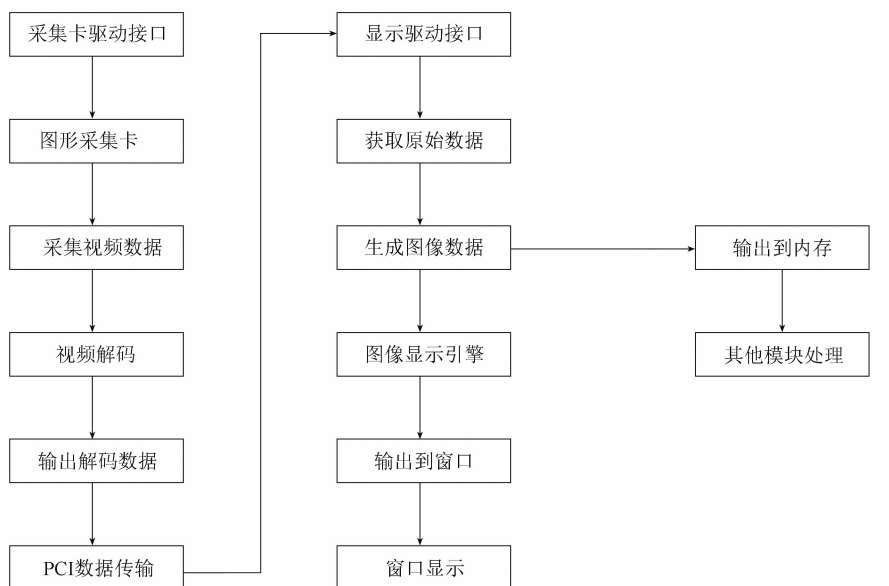


图 3 红外图像数据采集模块的流程图

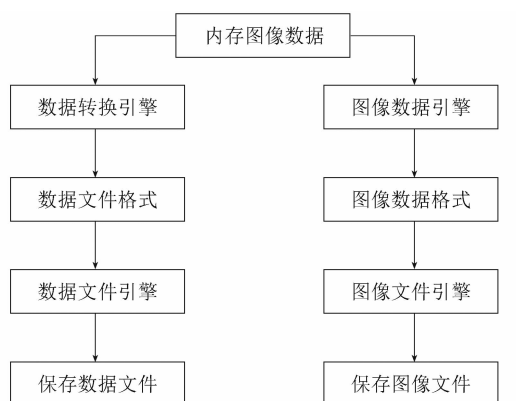


图 4 红外图像数据处理模块的流程图

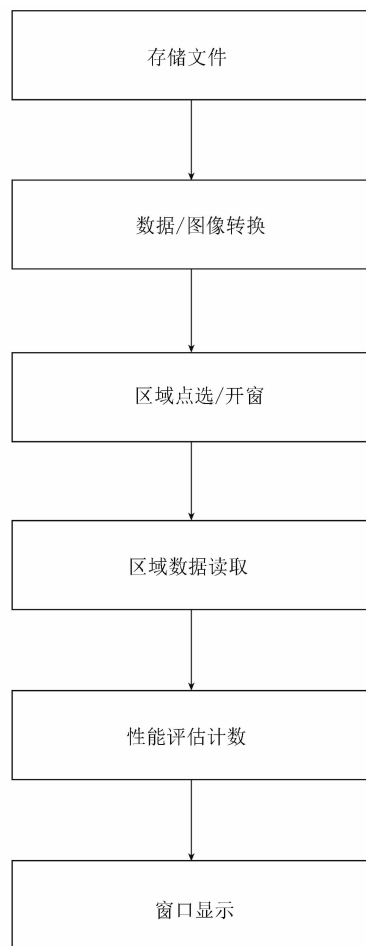


图 5 红外图像数据回放模块的流程图

其转换为相应的算法，即将其编写成计算机程序可执行代码。由数据处理程序生成数据，传入到数学模型中，经过运算处理后输出需要的性能指标数据。主要有以下五个评估参数：图像不均匀性、SiTF、NETD、角线性度和目标成像定位角误差。

### 3.1 图像不均匀性

由于红外探测器各像元对热响应的不一致性，红外热像仪在成像时有很多或明或暗的斑点或条纹。利用图像不均匀性指标，可以分析出图像不均匀的程度，从而查验探测器指标是否合格以及图像的处理程序是否完善。

图 6 为图像不均匀性的处理流程图，其具体步骤如下：

- (1) 采用图像平滑算法，将 7 帧图像均匀平滑为 1 帧图像；

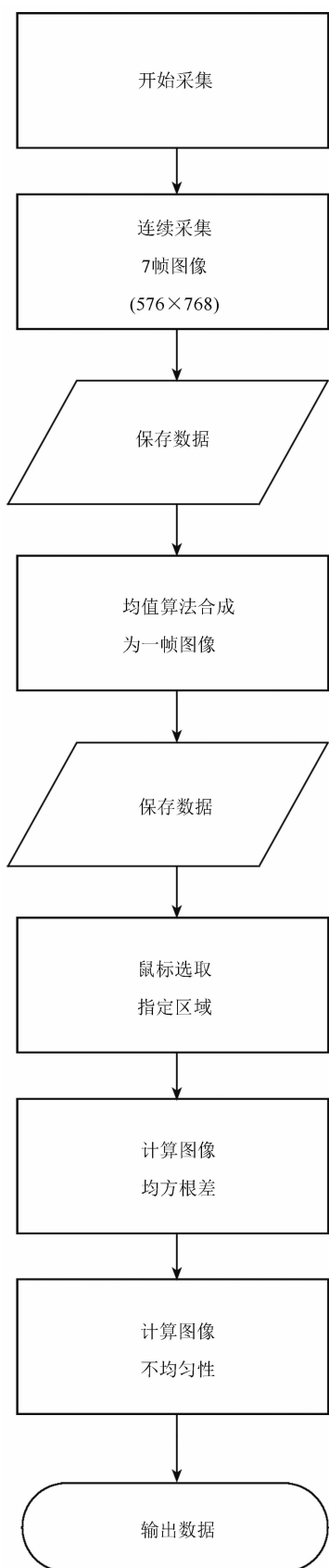


图 6 图像不均匀性的处理流程图

(2) 采用公式  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  计算处理区域图像的均值;

(3) 根据  $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$  计算处理区域的均方根差;

(4) 计算比值  $U_R: U_R = \frac{s}{\bar{x}}$ 。

### 3.2 SiTF

SiTF 是指被测系统对准一个方形或圆形测试靶标时, 系统的输出亮度(发光率)与输入的目标背景等效黑体温差之间的关系。它反映了热像仪可调节的动态范围, 其大小会影响热成像系统探测强弱目标的能力。对于弱小目标的探测, 热成像系统需要具有大增益功能, 否则就会因目标信号太弱而探测不到。

图 7 为信号传递函数的处理流程图, 其具体步骤如下:

(1) 采集有温差的半圆黑体靶标(2 度、1 度、0 度、-1 度、-2 度等)的图像数据;

(2) 用鼠标分别选取目标和背景区域, 求出目标和背景区域均值的差值;

(3) 采集一幅均匀场景的图像, 并选择一定区域, 求出其均方根差;

(4) 以温度值为横坐标, 以算得的均值差为纵坐标, 画出一条曲线, 并利用这些数据拟合出一条直线, 其中直线的斜率即为 SiTF。

### 3.3 NETD

NETD 是一个用于描述红外热成像系统探测灵敏度的物理量。被测物体的温度变化会引起辐射到热像仪探测器上的辐射功率发生变化。当此辐射变化所引起的系统输出电压与由系统噪声引起的信号输出电压相等时, 该温度变化被定义为 NETD。此时, 热成像系统输出电压信号的信噪比为 1。NETD 也可用  $NE\Delta T$  表示。

图 8 为 NETD 的处理流程图, 其具体步骤如下:

(1) 采集有温差的半圆黑体靶标(2 度、1

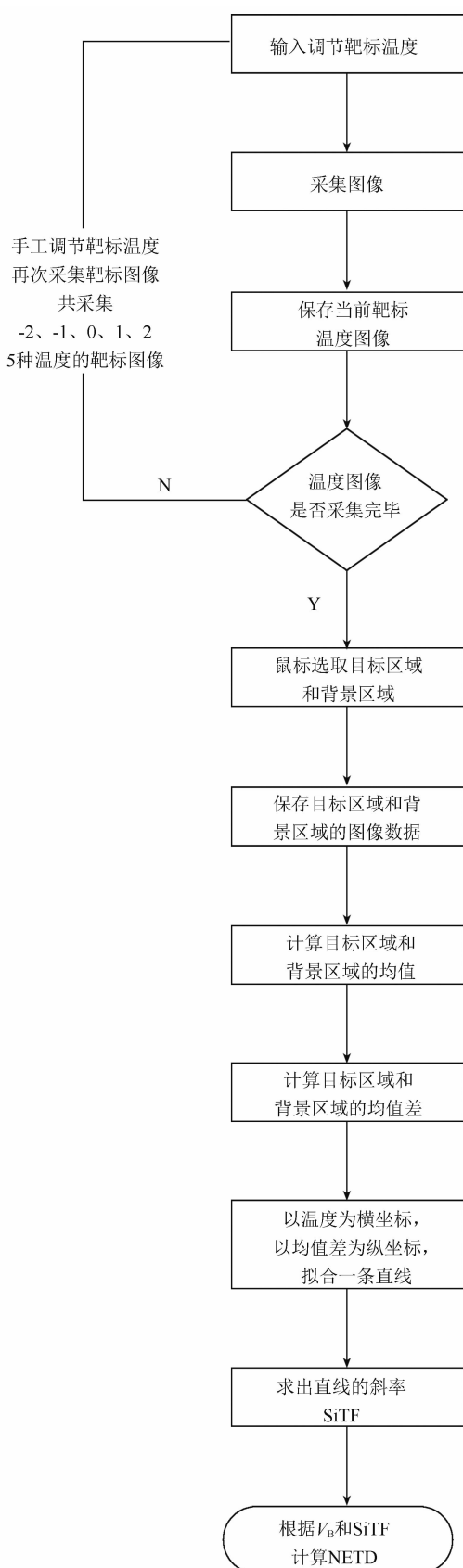


图 7 信号传递函数的处理流程图

度、0 度、-1 度、-2 度等)的图像数据;

(2)用鼠标分别选取目标和背景区域, 求出目标和背景区域均值的差值;

(3)采集一幅均匀场景的图像, 并选择一定区域, 求出其均方根差;

(4)以温度值为横坐标, 以算得的均值差为纵坐标, 画出一条曲线, 并用这些数据拟合出一条直线, 其中直线的斜率为  $SiTF$ ;

(5)均方根差  $V_B$  与所求出的  $SiTF$  的比值即为 NETD:  $NETD = \frac{V_B}{SiTF}$ 。

### 3.4 角线性度

利用角线性度和成像定位角误差可评估图像的分辨及几何特性。图 9 为角线性度的处理流程图, 其具体步骤如下:

(1)水平方向上以 8 度为周期读入一组亮点图像 ( $f_{x_1}$ 、 $f_{x_2}$ 、 $f_{x_3}$ ……)数据, 然后依次处理这些数据。

(2)求出图像矩阵数据的最大值序列, 并将坐标值序列的中值视为亮点附近位置。

(3)选择以该位置为中心的方框, 计算出该方框的质心。为减少背景噪声的影响, 将此方框的矩阵数据都减去一个背景均值。该背景均值可通过将与  $15 \times 15$  同中心的  $19 \times 19$  框去除  $15 \times 15$  框部分剩下的灰度值均值求出。

(4)通过坐标转换对应到整个图像的质心坐标。

(5)依次求出上面所有数据, 即  $f_{x_1}$ 、 $f_{x_2}$ 、 $f_{x_3}$ 、……数据的质心。

(6)将方位数显表的数值转换成秒。以其为横坐标, 以算得的 Y 方向位置为纵坐标, 画出一条曲线, 并利用这些数据拟合出一条直线。拟合公式如下: 使  $\sum_i (y_i - ax_i - b)^2$  最小, 即对  $a$  和  $b$  分别求偏导, 即得  $a = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - \sum x_i \cdot \sum x_i}$ ,  $b = \frac{\sum y_i - a \cdot \sum x_i}{n}$ 。

(7)算出计算值与拟合直线对应值的差值, 即  $\Delta_i = y_i - ax_i - b$ , 并求其均方根差  $std$

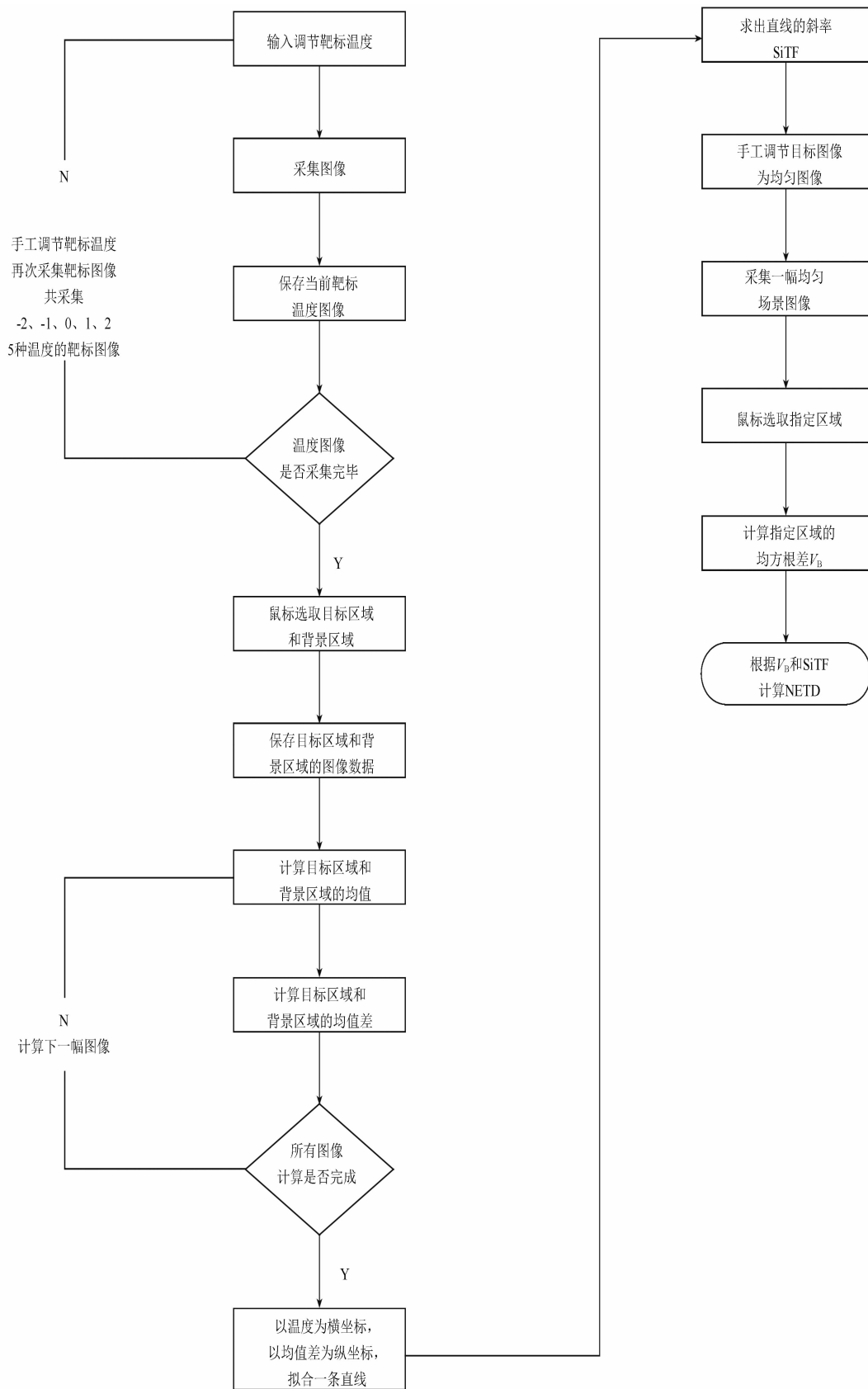


图 8 NETD 的处理流程图

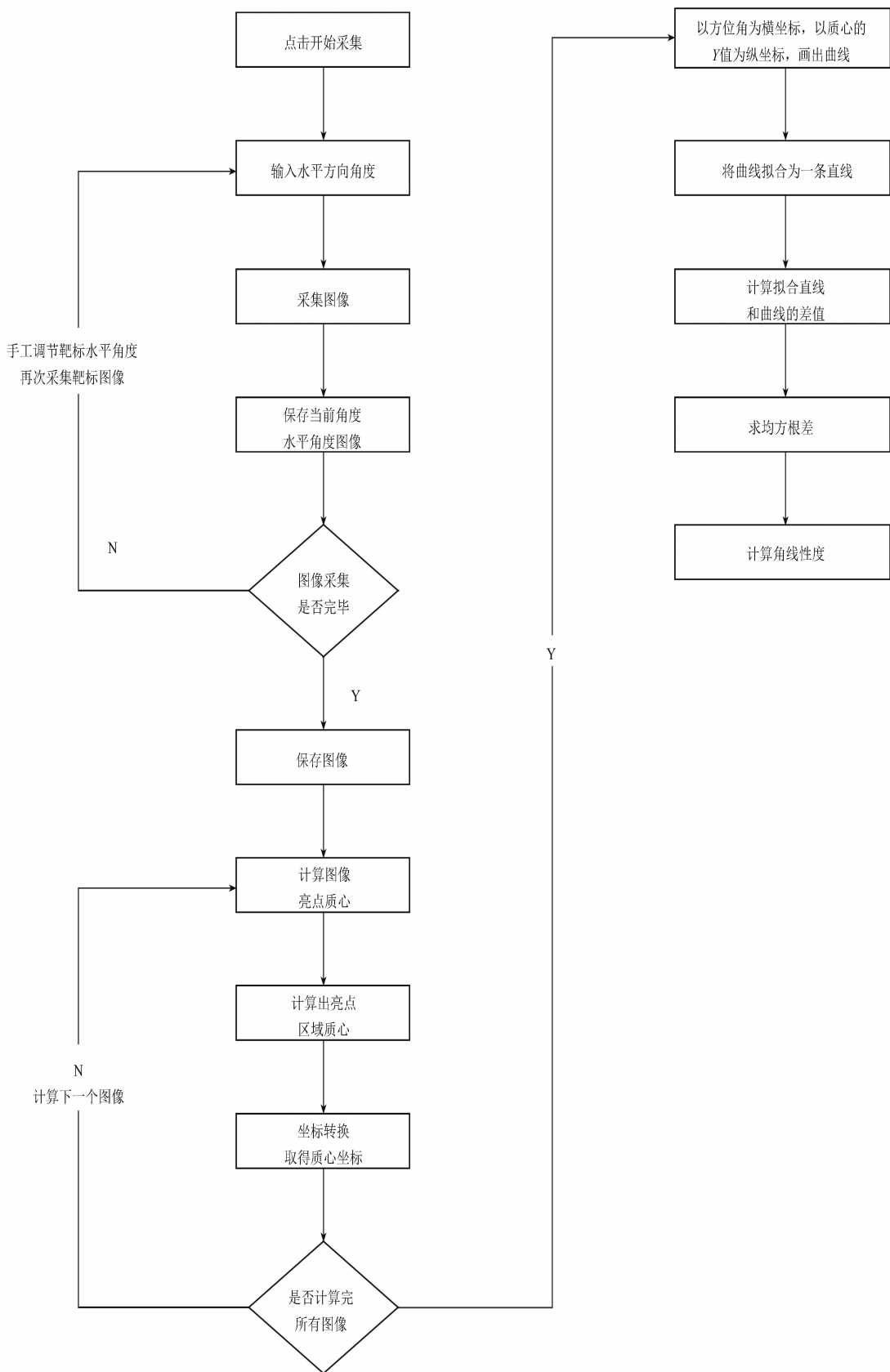


图 9 角线性度的处理流程图



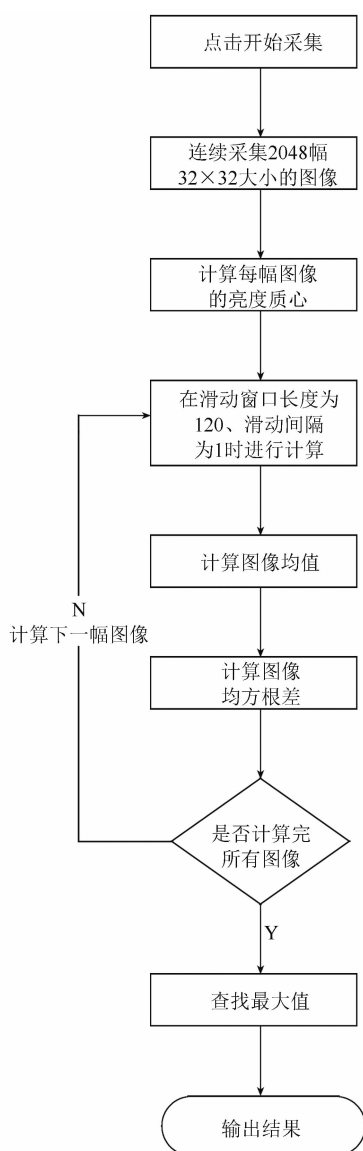


图 10 目标成像定位角误差的处理流程图

$$= \sqrt{\frac{\sum(\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2}{n-1}}, \text{ 其中 } \bar{\Delta}_i = \frac{\sum \Delta_i}{n}.$$

### 3.5 目标成像定位角误差

图 10 为目标成像定位角误差的处理流程图，其具体步骤如下：

(1) 采集一组覆盖亮点  $32 \times 32$  大小的 2048

帧图像数据；

(2) 采用同角线性度的方法计算出每帧  $32 \times 32$  图像的质心；

(3) 用长度  $L=128$ 、滑动间隔  $n=1$  的滑动窗口来平滑质心坐标序列，求出该窗口内的均值  $\mu_{ei} = \frac{1}{L} \sum_{j=i}^{i+L} \delta \epsilon_j$  ( $i=0, 1, 2, \dots, N/n$ ) 和均方根差  $\sigma_{ei} = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{j=i}^{i+L} (\delta \epsilon_j - \mu_{ei})^2}$  ( $i=0, 1, 2, \dots, N/n$ )。  $\sigma_{ei}$  的最大值即为所求值。

## 4 实验与测试

图 11 和图 12 所示分别为红外热像仪成像评估系统的外观图及操作界面。图 13 和图 14 所示分别为图像不均匀性的菜单和参数分析数据。图 15 和图 16 所示分别为信号传递函数的菜单和参数分析数据。

## 5 结论

红外热像仪成像评估系统可以采集和分析各型号红外热像仪的视频，在红外热像仪的研制生产过程中起到不可或缺的作用。通过处理 NU、SiTF、NETD、AL 和 TIPAE 等参数，可以评估红外成像系统的性能，进而在分析和计算该系统的空间分辨率、探测距离、成像质量、视觉效果等方面提供有效的数据支持，同时也可用于对该系统的探测器、读出电路、光学设计、机械加工精度、图像处理等方面进行优化。经航天科工某重点型号任务测试应用后，该系统达到了非常好的分析效果，因此可成为红外热像系统研制的必备工具。

## 参考文献

- [1] 寇小明. 红外成像观测系统性能评价方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.



图 11 红外热像仪成像评估系统的外观图



图 12 红外热像仪成像评估系统的操作界面

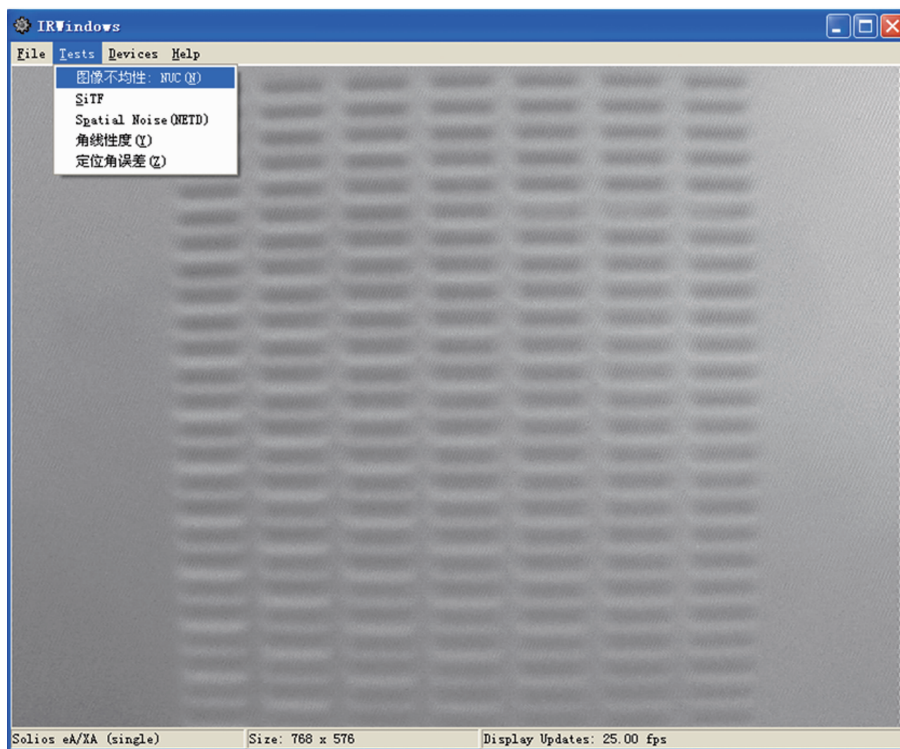


图 13 图像不均匀性菜单

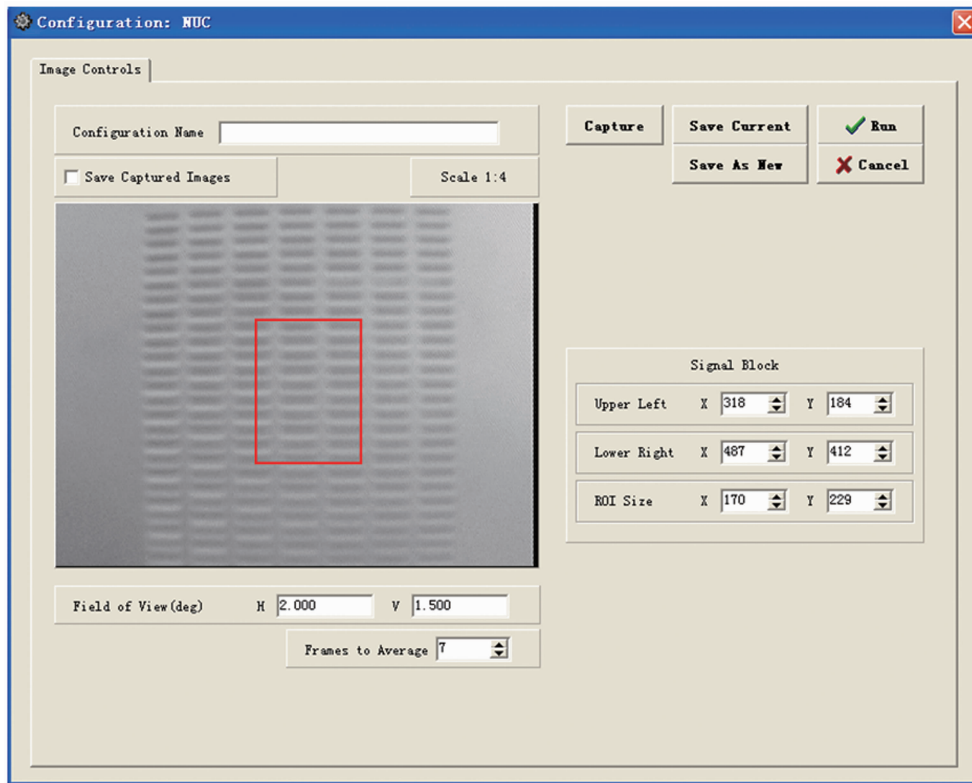


图 14 图像不均匀性参数窗口

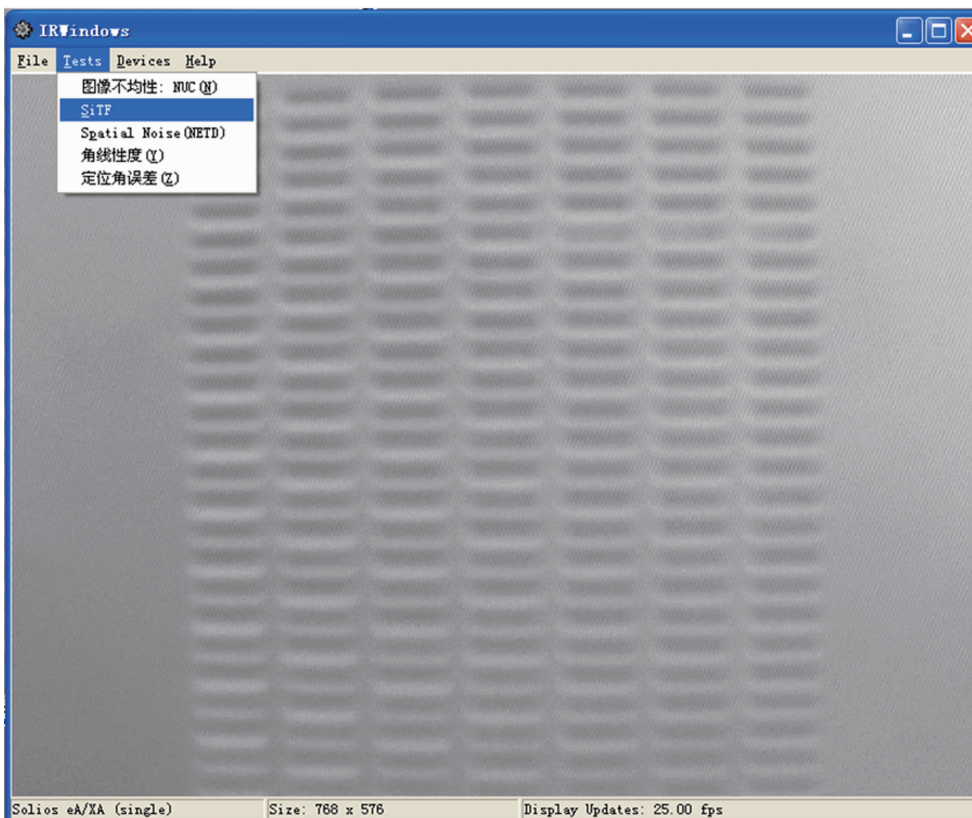


图 15 SiTF 菜单

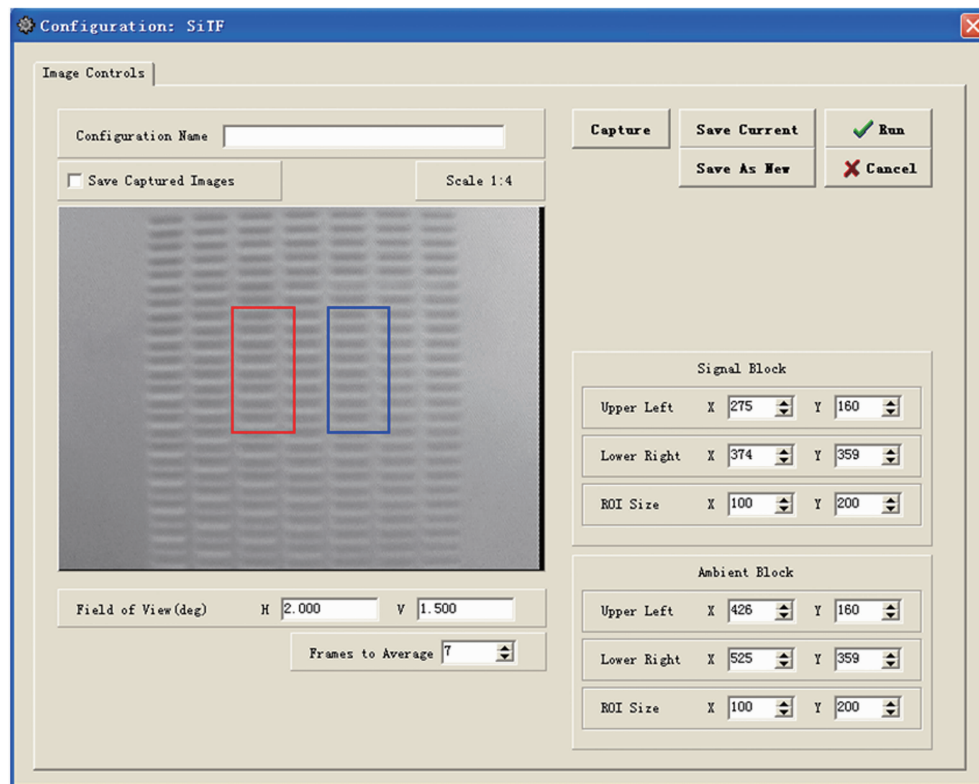


图 16 SiTF 参数窗口

- [2] 陆明, 李良玉, 吴健. 一种远距离高分辨率的红外成像监控系统的设计 [J]. 西南民族大学学报 (自然科学版), 2005, 31 (4): 565-569.
- [3] 童默颖, 常本康, 钱芸生, 等. 红外焦平面阵列调制传递函数研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 365-367.
- [4] 李旭东, 艾壳聪, 张安锋. 热成像系统 MRTD 数学模型的研究 [J]. 应用光学, 2004, 25 (6): 38-42.
- [5] 陈立学. 采样成像系统的传递性能分析 [J]. 光学学报, 1995, 15 (11): 1547-1551.
- [6] 张冬阳. 红外成像系统模拟器研制及其在系统性能评估中的应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [7] 胡方明, 王晓蕊, 张建奇, 等. 运动效应和背景杂波对红外成像系统性能评估的修正 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23 (1): 59-63.
- [8] 杨正兴, 谈新权, 尚小冬. 红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究与实现 [J]. 红外技术, 2004, 26 (3): 11-14.
- [9] Richard H, Vollmerhausen R, Eddie J. The Targeting Task Performance (TTP) Metric A New Model for Predicting Target Acquisition Performance [R]. NVESD Technical Report AMSEL-NV-TR-230, 2003.
- [10] 金伟其, 王吉辉, 王霞, 等. 红外成像系统性能评价技术的新进展 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 7-13.
- [11] Chen A J. Mathematical Morphology and Its Application in Image Analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S4): 465-468.
- [12] 同武勤, 凌永顺, 黄超超, 等. 数学形态学和小波变换的红外图像处理方法 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 138-144.
- [13] 孙志君. 红外焦平面阵列技术的军用市场展望 [J]. 传感器技术, 1999, 5(5): 1-8.
- [14] 王春勇. 红外系统中的扫描型和凝视型 FPA [J]. 红外技术, 2000, 25(1): 1-6.
- [15] 皮代军. 基于 FPGA 的高精度实时数据采集系统设计 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [16] 钱芸生, 张俊举, 孙恋君, 等. 非制冷红外热成像系统图像算法评估技术 [J]. 红外技术, 2007, 27(10): 612-616.