

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209657

# 基于非特定图像的红外成像系统调制 传递函数自动测量方法<sup>\*</sup>

唐荻音<sup>1</sup>, 崔润昊<sup>1</sup>, 邸军伟<sup>2</sup>, 于劲松<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191; 2. 中国航空工业集团公司  
洛阳电光设备研究所 洛阳 471000)

**摘 要:** 机载红外成像系统的性能评估对于战机任务执行效能具有重要意义。调制传递函数 (MTF) 是衡量红外成像系统性能的典型指标。现阶段 MTF 的测量依赖于特定的图像特征与人工操作, 难以实现实时与批量评估。为此, 提出了一种基于非特定图像的 MTF 自动测量方法, 以倾斜刃边法为基础, 通过图像刃边检测、目标区域提取以及改进的刃边计算方法, 从不含有特定景物特征的实拍图像中自动获得 MTF 点值, 并构造红外成像系统等效物理模型以实现 MTF 曲线的拟合, 进一步滤除随机误差。最后, 以某型号无人机红外成像系统作为验证对象, 将实验室测得的 MTF 与基于非特定实拍图像计算的 MTF 进行对比, 两者的绝对误差在 0.06 以内, 证明了方法的可行性与有效性。该自动测量方法能够较为准确且实时地得到系统的 MTF, 为不便进行地面实验的红外成像系统提供了一种新的性能测试思路。

**关键词:** 红外成像系统; 调制传递函数; 非特定图像; 自动测量

**中图分类号:** TH744 TN216 TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

## Automatic measurement method for modulation transfer function in infrared imaging system based on non-specific images

Tang Diyin<sup>1</sup>, Cui Runhao<sup>1</sup>, Di Junwei<sup>2</sup>, Yu Jinsong<sup>1</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;  
2. Avic Luoyang Institute of Electrooptical Equipment (Avic Optronics), Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The performance evaluation of the airborne infrared imaging system is very important for the task performance of aircraft. modulation transfer function (MTF) is a typical index to measure the performance of the infrared imaging system. At present, MTF measurement depends on specific image features and manual operation. Hence, it is difficult to achieve real-time and batch evaluation. In this article, an automatic MTF measurement method based on non-specific images is proposed. The method can automatically obtain MTF values from actual scene images without any specific features, which is realized through image edge detection, target region extraction, and the improved slanted edge method. Then, an equivalent physical model of the infrared imaging system is established to achieve MTF curve fitting and filter out random errors. Finally, a certain type of UAV infrared imaging system is taken as the verification object, and the absolute error between the MTF measured in the laboratory and the MTF calculated based on non-specific actual scene images is less than 0.06, which proves the feasibility and effectiveness of the proposed method. This automatic measurement method not only can evaluate the MTF accurately in real time, but also provide a new performance testing idea for infrared imaging system which is inconvenient to conduct ground experiments.

**Keywords:** infrared imaging system; modulation transfer function; non-specific images; automatic measurement

## 0 引 言

红外成像系统能够接收并会聚环境中的红外辐射,通过红外探测器和放大电路将人眼不可见的红外线转化为可见光图像<sup>[1]</sup>。在航空工业中,红外成像系统是机载光电系统的重要组成部分,早已装备在我国第三代和第四代战斗机上,主要用于地面目标的跟踪、精确制导以及敌方战机的探测<sup>[2]</sup>。由于红外成像系统在战机中发挥关键的作用,对其进行及时准确的性能评估,进而实施剩余寿命预测和健康管理,对于保障在役红外成像系统的可靠运行和作战任务的顺利完成具有重要意义。

调制传递函数(modulation transfer function, MTF)可以反映光学系统在不同空间分辨率下的成像质量,是衡量红外成像系统性能的典型指标。目前获取成像系统 MTF 的方法主要依靠实验室静态靶板测量。其测量方法包括条状周期靶板法、辐射状靶标法、点源法、线状脉冲法以及倾斜刃边法<sup>[3]</sup>。这些方法虽然能够得到准确的结果,但由于红外成像系统不易拆卸、服役周期长的特性,且研究人员更希望了解其在执行任务时的性能表现,因此实验室条件下的 MTF 测量并不能满足实际需求。

为了摆脱对实验环境的依赖,国内外学者提出了两类成像系统运行或在轨过程中的 MTF 评估方法,分别为目标靶板法<sup>[4-6]</sup>和景物刃边法<sup>[6-9]</sup>。目标靶板法多用于在轨卫星光谱成像仪 MTF 的测试,将成像仪对准地面预先铺设好的大型、高对比度的靶板,拍摄图像以计算 MTF。吴泽鹏等<sup>[10]</sup>利用地面条状周期靶标,通过改进测量方法以得到光学遥感相机的准确 MTF;郭世一等<sup>[11]</sup>设计了一款辐射状周期靶标,使用无人机的航拍靶板图像计算成像系统的 MTF。目标靶板法虽然能够测量成像系统实际运行中的 MTF,但该方法铺设靶板的过程复杂繁琐、对场地要求高,实现实时测量较为困难。

相比之下,景物刃边法无需依赖目标靶板,它以倾斜刃边法为基础,在成像系统拍摄的实际景物图像中寻找与倾斜刃边靶标相近似的目标区域,从而得到 MTF。郭玲玲等<sup>[12]</sup>运用刃边法,成功地从大洲与海洋交界海岸线处的遥测图像得到卫星光谱成像仪的 MTF。Choi 等<sup>[13]</sup>开发了一种基于月球轮廓的 MTF 算法,提取 Terra 航天器拍摄的月球与太空分界处的边缘像素,通过滤波和插值消除中间量的噪声,对在轨航天器上的光谱成像仪进行 MTF 估计。Nugent 等<sup>[14]</sup>通过拍摄多云天气下的屋顶边缘线,获得刃边法所需的高对比度区域,进而计算出高精度的成像仪 MTF。随着人工智能技术的发展,一些智能化 MTF 算法不断涌现而来<sup>[15]</sup>。Bauer 等<sup>[16]</sup>提出一种估计数字照相机 MTF 的新型方法,该方法将自然场景的照片集分解为若干块,由卷积神经网络处理以估计局部

MTF,随后使用高斯过程回归将这些局部估计值聚合成总体的 MTF 曲线。

对于机载红外成像系统的性能评估而言,景物刃边法更加简便与快捷,适合作为实时计算系统 MTF 的方法。但上述现有方法仍存在如下问题:1)文献分析 MTF 所用的目标区域均依靠人眼直觉获取,并非整个图像中能体现系统 MTF 的最佳区域,这极有可能导致较大的估计误差;2)手动提取计算区域需要耗费研究人员大量的时间和精力,不利于测量方法的实际应用;3)现有景物刃边法都需要依赖特定的目标图像,如靶板、海岸线、屋顶线等,为测试过程带来很大的不便。另一方面,人工智能算法的估计方式需要成像系统拍摄大量的图片样本以及系统的 MTF 数值,且抵抗环境噪声的能力较差,因此也不适合作为机载红外成像系统的 MTF 测量方法。

针对上述问题,本文提出了一种基于非特定图像的红外成像系统 MTF 自动测量方法。该方法能够自动找寻红外实拍图像中最合适的刃边计算区域,利用改进的刃边法计算 MTF 数值点,并使用系统 MTF 等效模型消除噪声,从而提高 MTF 数值计算的准确性,克服了现有方法只能针对特定目标图像进行 MTF 测试的局限,实现红外成像系统 MTF 的实时测量。采用实际机载红外系统拍摄图片进行验证,并将算法结果与实验室测试数值比对,证明了 MTF 自动测量方法的有效性。

## 1 MTF 与倾斜刃边法

### 1.1 性能评估指标——MTF

调制传递函数是衡量光学系统成像品质好坏的物理量,实际的物理意义为光学系统在不同空间频率下理想像与实际像的调制度之比<sup>[17]</sup>。MTF 体现了系统复现不同频率信号的能力,当红外成像系统出现性能退化时,系统对所有空间频率信号的响应变差,这会导致系统的 MTF 曲线整体左移,输出图像会变得模糊,图像细节难以分辨,如图 1 所示。

为了准确地对红外成像系统进行性能评估,量化系统退化的影响,本文引入基于 MTF 的数值参数——等效平方带宽  $N_e$ ,用以度量成像的质量。等效平方带宽描述的是图像的视在清晰度,用成像系统 MTF 平方的频率积分来表示<sup>[18]</sup>:

$$N_e = \int_0^{f_{N_q}} MTF^2(f_{sp}) df_{sp} \quad (1)$$

式中:  $N_e$  为等效平方带宽;  $f_{N_q}$  为红外成像系统中光学子系统的奈奎斯特频率。奈奎斯特频率  $f_{N_q}$  可由  $1/2a$  计算得到,其中  $a$  为探测器面元间距。

$N_e$  可以作为空间频率域中衡量分辨率的量度,以单个数值表达系统总体的响应效果。大量实验证明它是一

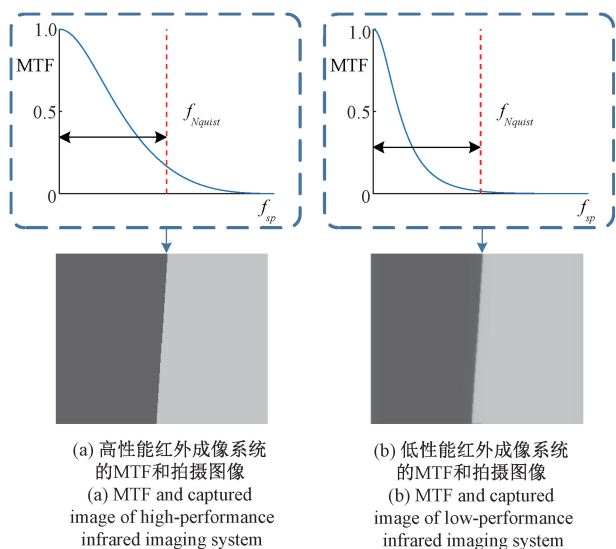


图 1 红外成像系统的成像质量与 MTF 的关系

Fig. 1 The relationship between imaging quality and MTF in the infrared imaging system

个很好的评估参量,针对具有相同分辨率、不同 MTF 曲线形式的系统,  $N_e$  有很好的一致性,即具有相似性能的光学系统,其  $N_e$  的数值也大致相同。

## 1.2 倾斜刃边法

倾斜刃边法是目前唯一一种可以不依赖于实验设备和目标靶板,直接从实拍图像中有效估计 MTF 的测量方法。图像中的刃边是指两个具有一定对比度区域的交界边缘线段。对于理想的刃边图像,在空间中它相当于一个二维阶跃函数  $u(x, y) = \text{step}(x) \cdot 1(y)$ 。假设系统脉冲响应函数为  $h(x, y)$ ,以刃边作为输入,根据光学系统的成像原理,红外成像系统输出图像  $g(x, y)$  为<sup>[3]</sup>:

$$g(x, y) = u(x, y) * h(x, y) = \text{step}(x) 1(y) * h(x, y) \quad (2)$$

图像函数  $g(x, y)$  即为系统的边缘扩散函数 (edge spread function, ESF)  $ESF(x, y)$ 。

以水平方向  $x$  上的响应为例,脉冲响应函数  $h(x, y)$  与常数  $1(y)$  卷积生成线扩散函数  $LSF(x)$ <sup>[19]</sup>,对上式两侧分别求导,可得:

$$\frac{d(ESF(x))}{dx} = \frac{d(\text{step}(x) * LSF(x))}{dx} = \frac{d\left(\int_{-\infty}^x LSF(x') dx'\right)}{dx} = LSF(x) \quad (3)$$

由于  $LSF(x)$  函数经过傅里叶变换后得到的是系统光学传递函数  $OTF(x, y)$  的一个剖面,因此,红外成像系统在  $x$  方向上的 MTF 可由刃边像函数 ESF 求导并进行傅里叶变换后得到式(4)。

$$MTF(x) = |OTF(x, 0)| = \left| \mathcal{F} \left[ \frac{d(ESF(x))}{dx} \right] \right| \quad (4)$$

根据国际标准 ISO12233<sup>[20]</sup>,基于目标靶板的倾斜刃边法计算过程如图 2 所示。

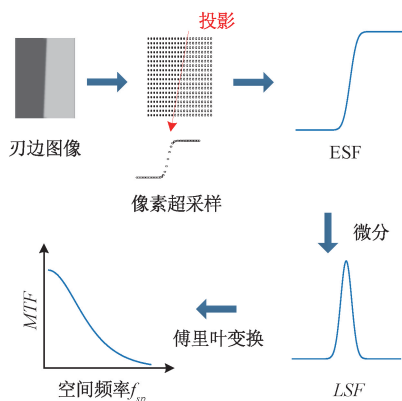


图 2 倾斜刃边法的主要步骤

Fig. 2 The main steps of the slanted edge method

将红外成像系统对准倾斜刃边靶板,拍摄清晰的靶标图像,并人工选取一小块包含有刃边的像素区域作为目标区域。对目标区域的刃边进行直线拟合,计算目标区域中各像素中心到刃边拟合直线的欧式距离,得到整个目标区域的刃边距离矩阵。其次,将目标区域中所有像素延刃边拟合直线的方向进行投影,投影至水平轴上。对水平轴上的投影像素点进行 4 倍超采样,采样的像素容器 (bin) 宽度为图像像素宽度的 0.25 倍。以每个像素容器的编号作为自变量,容器内的采样平均值作为因变量,得到 ESF 的图像计算值。最后,对 ESF 求导、加窗滤波、离散傅里叶变换 (DFT) 以及取模值并归一化后,最终获得红外成像系统在整个空间频率范围内的 MTF。

## 2 基于非特定图像的 MTF 点值估计方法

基于倾斜刃边法标准计算过程,本文提出的 MTF 自动测量方法分为 MTF 点值估计和 MTF 函数曲线估计两部分,步骤如图 3 所示。前者通过目标区域自动提取算法以及改进的刃边法,在红外实拍图像中获取 MTF 点值;后者通过红外成像系统等效模型进一步滤除噪声干扰和计算误差。二者结合最终实现非特定图像下红外成像系统 MTF 的实时、自动精确测量。

### 2.1 目标区域自动提取算法

目标区域自动提取算法的目的是找到任意非特定实拍图像中与倾斜刃边靶板最相似的区域,以供后续 MTF 的计算。理想情况下,该区域应包含居中的倾斜边缘,其两侧的直角梯形区域灰度值均匀且有一定的对比度,另外该区域得到的 MTF 在系统奈奎斯特频率内至少有

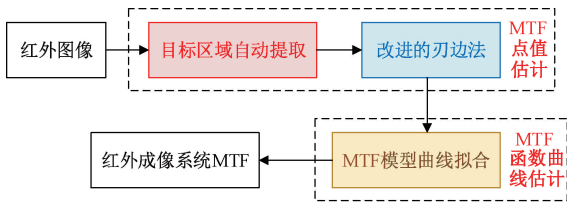


图 3 基于非特定图像的 MTF 自动测量方法步骤  
Fig. 3 Steps of automatic measurement method for MTF based on non-specific images

16 个采样点<sup>[20]</sup>。算法从直线检测和区域搜寻两个角度出发,开展一系列的搜索过程。目标区域自动提取过程如图 4 所示。

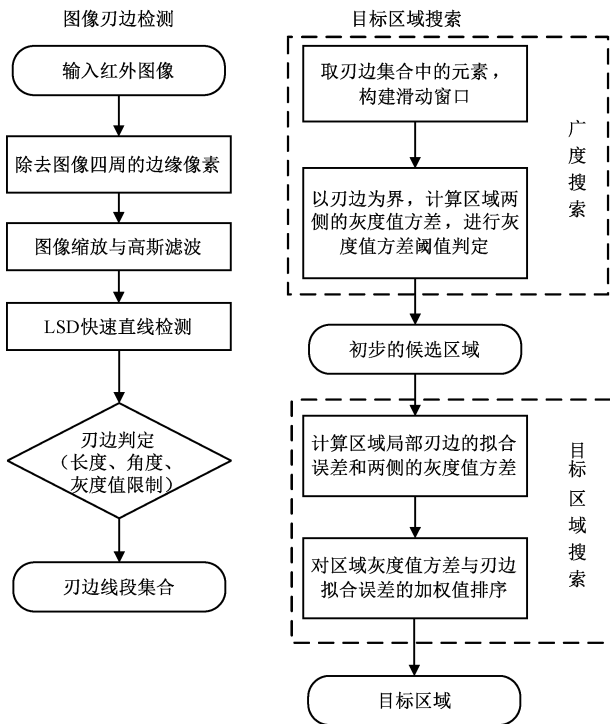


图 4 目标区域自动提取算法的流程

Fig. 4 Flowchart of the automatic target region extraction algorithm

### 1) 红外图像中的直线检测

目标区域的确定从检测红外图像中的有效直线开始。为缩短直线查找时间,先对图像进行预处理。截取  $d$  个红外图片四周的边缘像素,以保证后续算法步骤中的滑动检测窗口不会移动到图像外;然后,设置图像缩小为原来的  $k$  倍,并进行标准差  $\sigma$  的高斯低通滤波,避免红外图像的噪声干扰所带来的误检,使相邻满足共线条件的直线尽可能融合为 1 条。本文实验部分  $d$ 、 $k$  和  $\sigma$  分别取经验值 15、2 和 0.5。直线检测在 Von 等<sup>[21]</sup>提出的线段检测器(line segment detector, LSD)基础上实现。该算

法通过计算每个像素的水平线矢量场,将每一组矢量相同的方向划分为一个直线区域,再利用区域增长、直线验证、矩形区域近似等算法,有效地从图像中得到所有直线端点的坐标,具有很强的鲁棒性和准确性。对预处理后的图像使用 LSD 算法,获得图像中所有直线线段。

### 2) 倾斜刃边的筛选

LSD 得到的直线线段大部分不能直接算作刃边,还需要进行二次筛选。筛选算法主要从 3 个方面对直线加以限制,长度、角度和两侧灰度值差值。通过直线端点坐标数据,依次计算这些线段的长度、线段与水平轴夹角,将长度小于  $length$  像素,角度不符合表达式(5)的线段去除。

$$\begin{cases} -angle < \theta < angle, & axis = 0 \\ 180^\circ - angle < \theta < 180^\circ - angle, & axis = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\theta$  为线段与图像水平轴夹角;  $axis = 0/1$  分别代表线段的朝向竖直或水平方向;  $angle$  为阈值角度。

线段两侧灰度值差值是检验刃边的重要标准,将  $axis = 0$  的线段分别以该线段的 3 个三等分点为基准,向左、向右各 10 个像素取一对特征点  $\{\Phi_{Li}, \Phi_{Ri}\}$ , 同理  $axis = 1$  的线段向上、下各取特征点  $\{\Phi_{Ui}, \Phi_{Di}\}$ , 灰度值条件如图 5 所示。当特征点像素的灰度值差值满足式(6)且线段满足长度、角度要求时,本模块认定该线段符合刃边条件,其可以被用作区域搜索的基准线段。

$$\begin{cases} |\Phi_{Li} - \Phi_{Ri}| > D \quad (i = 1, 2, 3; axis = 0) \\ |\Phi_{Ui} - \Phi_{Di}| > D \quad (i = 1, 2, 3; axis = 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $D$  为灰度值差值阈值,一般应大于 50。

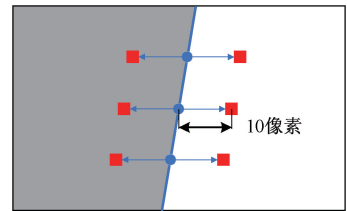


图 5 灰度值条件判定示意图

Fig. 5 Schematic diagram of gray value condition

### 3) 广度候选区域搜索

采用上述步骤获得图像中的刃边后,应在刃边附近进一步寻找符合倾斜靶板特征的目标区域。为此,提出了一种基于滑动窗的广度搜索判断方法,从海量区域中筛选出计算 MTF 的初步候选区域。取上一步骤中获得的刃边,在其两侧构造大小为  $w \times h$  (宽  $\times$  高) 像素的矩形滑动窗口,以步长  $step$  滑动截取刃边附近区域,如图 6 所示。目标区域的大小需根据实际图像情况谨慎选择,过小的目标区域会导致 MTF 采样点不足,无法有效反映系统曲线的变化趋势和细节,但过大的目标区域会增加计算时间。本文实验选取的目标区域最小为  $30 \times 30$  pixel,刃



边长度阈值  $length$  取矩形窗长、宽中较大的一项。

滑动窗口每沿刃边线段前进一个步长,算法会自动截取该窗口区域,并利用基准刃边将区域分为两部分,分别通过式(7)、(8)计算灰度值标准差。

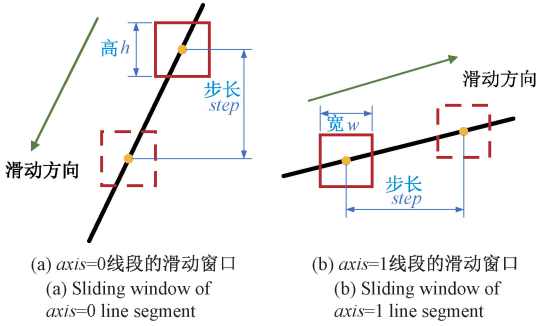


图6 线段滑动窗口的构建

Fig. 6 Sliding window of line segment

$$mean = \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{N} \quad (7)$$

$$stddev = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_i - mean)^2}{N}} \quad (8)$$

式中:  $z_i$  为一个像素点的灰度值;  $N$  为区域内像素的总个数;  $mean$  为区域内灰度值平均值;  $stddev$  为灰度值标准差。

计算灰度值标准差时应避免加入灰度值变化剧烈的刃边像素,假设选中窗口区域的刃边宽度为  $\varepsilon$  像素,则计算区域选择由直角边为窗口边缘、斜边为距刃边  $\varepsilon/2$  像素与刃边平行的直线所组成的直角梯形,如图7所示。在成像系统没有出现性能退化的情况下,清晰实拍图像的刃边宽度一般为6~8个像素。窗口区域的总灰度值标准差为两部分直角梯形的灰度值标准差之和,当总灰度值标准差小于标准阈值  $stddev_{th}$  时,此窗口区域会被选为初步的候选区域。依据筛选经验,为了平衡窗口噪声和搜索困难程度,本文算法中取  $stddev_{th} = 20$ 。

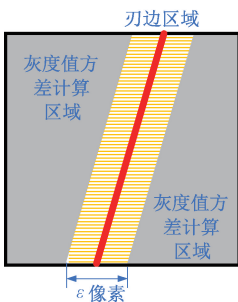


图7 计算灰度值标准差的直角梯形区域

Fig. 7 The rectangular trapezoidal region for calculating the standard deviation of gray values

#### 4) 目标区域搜索

目标区域搜索是对初步候选区域的二次提炼,旨在挑选出最终能够使用刃边法进行MTF计算的目标区域。该步骤求取候选区域每条横向像素的灰度值变化率,再通过式(9)得到一系列灰度值梯度质心的点集,并进行最小二乘拟合获得局部刃边的直线表达式。

$$C(x) = \frac{\sum_{x=1}^{W-1} p[\phi(x+1, y) - \phi(x, y)]}{\sum_{x=1}^{W-1} [\phi(x+1, y) - \phi(x, y)]} \quad (9)$$

式中:  $C(x)$  为每行像素灰度值梯度质心;  $(x, y)$  为每个像素在图像  $\phi$  中的坐标;  $W$  为目标区域宽度。

为了避免刃边拟合结果较差的区域被选为目标区域,引入均方根误差(RMSE)作为衡量拟合直线好坏的量化指标,它是指拟合值  $\hat{y}(x)$  与真实点值  $y$  偏差的平方和与拟合点数  $n$  比值的平方根,如式(10)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}(x) - y)^2} \quad (10)$$

此外,再次根据局部刃边拟合直线计算每个窗口的总灰度值标准差,该结果称为候选区域的真实灰度值标准差。令候选区域排序的标准衡量参数为  $STD$ , 其表达式为:

$$STD = stddev_R \cdot k_1 + RMSE \cdot k_2 \quad (11)$$

式中:  $stddev_R$  为候选区域的真实灰度值标准差,由式(8)算得,  $k_1$ 、 $k_2$  为相应权重,本文算法中两权重均取值为1。

计算所有候选区域的衡量参数  $STD$ , 并将候选区域按照  $STD$  从小到大顺序排列,  $STD$  越小排名越靠前,取综合排名的前十名作为目标区域输出。

#### 2.2 基于改进刃边法的MTF计算方法

由于本文算法的处理对象为红外成像系统实际拍摄的图像,在其中提取的刃边区域与倾斜刃边靶板有一定的差别,所以不能完全按照ISO12233规定的标准方法计算MTF。为此,本文提出了针对非特定图像特点的改进倾斜刃边法。

##### 1) ESF数据处理的改进

标准刃边法中要求靶板刃边的倾斜角度为  $5^\circ$ ,但是在非特定实拍图像中小角度的刃边很难遇到,且这种刃边容易受到噪声干扰,导致ESF平滑程度下降。Xie等<sup>[22]</sup>实验证实了采用  $25^\circ$  以内刃边计算所得MTF的误差相对较小,因此在本文算法中,参数  $angle$  的推荐取值为  $5^\circ \sim 25^\circ$ 。然而增大倾斜角度会使得标准刃边法4倍超采样时像素容器的数目过多,有些容器中可能没有落入像素点,程序算得此点的  $ESF = 0$ ,如图8所示。为了避免此类情况,保持刃边两侧像素灰度值的均匀性,本文采用限幅滤波法和递推平均滤波法对ESF数据进行处理。首先滤除没有像素灰度值的空点,将其赋予前一个

或后一个 ESF 数据点的值。其次在 ESF 的 0.2 倍总长度  $L$  处和 0.8 倍总长度  $L$  处分别向左、右两端进行滤波,处理过程如式 (12) 所示。

$$ESF(i) = \begin{cases} \frac{ESF(i-1) + ESF(i-2) + ESF(i-3)}{3}, & i < 0.2L, ESF(i) - ESF(i-1) > 10 \\ \frac{ESF(i+1) + ESF(i+2) + ESF(i+3)}{3}, & i > 0.8L, ESF(i) - ESF(i+1) > 10 \end{cases} \quad (12)$$

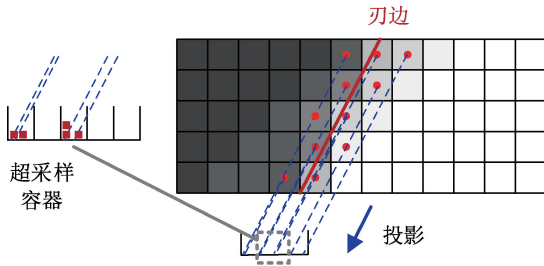


图8 采样容器无像素点落入的情形

Fig. 8 Condition of no pixel falling into the sampling container

## 2) 标准目标区域的选取

经过自动目标区域提取算法的搜索,虽然最终目标区域的灰度值标准差均满足要求,但刃边区域两侧的 ESF 值由于刃边直线拟合不准确或噪声的缘故可能会有较大波动,这样的 ESF 结果不符合 ISO12233 规定的标准,应该舍去,如图 9 (a) 所示数据点。因此,本文对 ESF 进行曲线拟合,舍去与标准拟合曲线相差过大的 ESF 数值,筛选出标准目标区域。Tzannes 等<sup>[6]</sup>于 1995 年提出了一种高精度 MTF 测量方法,实验验证了三次费米函数对于 ESF 的拟合效果最好,解决了微分后线扩展函数两端出现波动的情况。然而对于非特定图像中提取的目标区域而言,计算出的 ESF 夹杂很多噪声,三次费米函数需要拟合的参数过多,很容易出现发散的情况,如图 9 (b) 所示。所以本文选用简化版本一次费米函数进行 ESF 拟合,拟合函数如式 (13) 所示。

$$y = d + \frac{a}{1 + e^{\frac{x-b}{c}}} \quad (13)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为待拟合参数。

对 ESF 两侧灰度值平均区域的数据点分别求取拟合曲线的均方根误差,当两个误差同时小于阈值  $ESF\_error$  时,该区域符合标准 ESF 条件,允许进行下一步 MTF 的计算,否则舍弃该区域。由于刃边区域宽为  $\varepsilon$ ,所以从距离 ESF 中心  $2\varepsilon$  的采样点到 ESF 左右端点的数值区域为每侧均方根误差的计算范围。将筛选后的 ESF 按照标准刃边法的步骤求得 MTF 数值。此外,为防止 ESF 有尖峰

现象出现,当存在有两个及以上归一化后的 MTF 数据点大于 1 时,舍去该目标区域和对应的 MTF。

经由上述步骤,在剩余目标区域中按  $STD$  排名最靠前的 MTF 作为该实拍图像所反映的红外成像系统 MTF 点值。若目标区域全部不符合要求,则在该图中无法找到合适的计算区域,需要更换新的红外图再进行 MTF 测量。

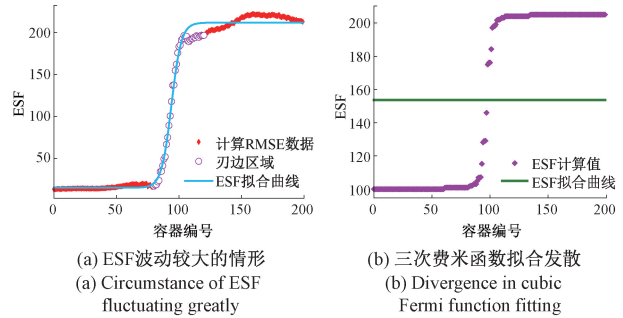


图9 传统 ESF 拟合步骤中的缺陷

Fig. 9 Defects in traditional ESF fitting steps

## 3 红外成像系统 MTF 的函数曲线估计

通过上述方法获得 MTF 点值后,为消除图像噪声和随机误差的影响,本文采用红外成像系统 MTF 的等效模型对数值点进行拟合,并将拟合后的曲线作为系统 MTF 的最终测量值。实际红外成像系统由 3 个子系统组成,分别为光学子系统、探测器子系统和信号处理子系统<sup>[1,18]</sup>,显示系统一般作为外接信号接收设备,不集成于红外成像系统之中。各个子系统之间的关系如图 10 所示。红外成像系统 MTF 的等效模型由各子系统等效模型的乘积构成。

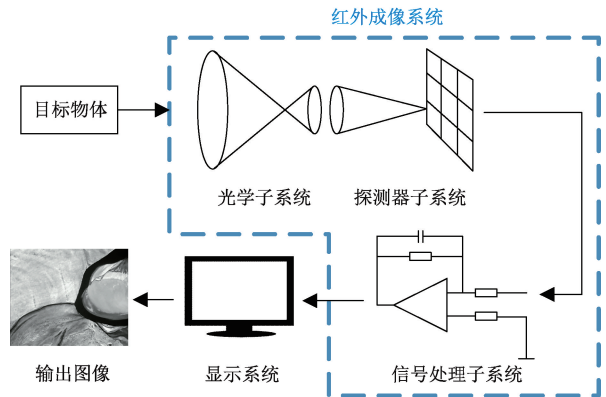


图10 红外成像系统的构成

Fig. 10 Composition of the infrared imaging system

理想情况下,含有圆孔径的光学子系统为衍射限系统,其 MTF 模型如式 (14) 所示<sup>[3]</sup>。

$$MTF_{diff}(f_{sp}) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \frac{f_{sp}}{f_{spc}} - \frac{f_{sp}}{f_{spc}} \sqrt{1 - \left( \frac{f_{sp}}{f_{spc}} \right)^2} \right] \quad (14)$$

式中:  $f_{sp}$  是焦平面上测量的空间频率;  $f_{spc}$  是透镜的截止频率, 可以被视作一个设计时的固有参数。

$$f_{spc} = \frac{1}{\lambda F_{\#}} \quad (15)$$

式中:  $\lambda$  是非相干光的中心波长, 通常为系统工作波长的平均值  $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$ ,  $(\lambda_1, \lambda_2)$  为光学系统的工作波长范围;  $F_{\#}$  是红外成像系统镜头的  $F/\#$  数。

实际红外成像系统中不可避免地会出现像差干扰, 需要在模型中加入光学系统像差项。Shannon<sup>[23]</sup> 提出了一种 MTF 经验公式, 其能够描述透镜系统的像差, 但公式中仍有一些参数需要进行估计。由于光学系统的像差对 MTF 曲线的影响很小, 为简化拟合模型, 本文假设由像差引起的弥散斑光强分布是圆对称的高斯分布, 则 MTF 等效模型为<sup>[1,24]</sup>:

$$MTF_{aberration}(f_{sp}; \sigma_0) = \exp[-2\pi^2 \sigma_0^2 (f_{spx}^2 + f_{spx}^2)] \quad (16)$$

式中:  $f_{spx}$  和  $f_{spx}$  为空间频率在水平方向和竖直方向的分量, 空间频率可表示为  $f_{sp} = \sqrt{f_{spx}^2 + f_{spx}^2}$ ;  $\sigma_0$  为光斑能量分布的标准差, 可以由式(17)确定<sup>[1]</sup>。

$$\sigma_0 = 0.25d = \frac{2.44f_0\lambda}{4D_0} = 0.61\lambda F_{\#} \quad (17)$$

式中:  $d$  为弥散斑直径;  $f_0$  为像方焦距;  $D_0$  为光学系统的有效孔径。

探测器子系统建模时考虑采用红外焦平面阵列的凝视型红外成像系统, 加入二维凝视器件采样特性的影响后, 探测器子系统的 MTF 可以表示为<sup>[3]</sup>:

$$MTF_{det}(f_{spx}, f_{spx}) = \text{sinc}^2(af_{spx}) \text{sinc}^2(bf_{spx}) \quad (18)$$

信号处理子系统由放大器、滤波器等电子电路构成, 从频域的角度看, 该系统可等效为低通滤波器。为了简化 MTF 模型, 本文使用一阶的 RC 低通滤波网络来模拟红外成像系统中多个电子元件对 MTF 的影响<sup>[18]</sup>:

$$MTF_{ele}(f_{sp}; R, C, v) = \sqrt{1 + (2\pi f_{sp} RC \cdot v)^2} \quad (19)$$

式中:  $R, C$  分别为信号处理子系统的等效电阻和等效电容;  $v$  代表红外成像系统在像平面上对信号的拾取速度。

由于刃边法在 ESF 计算过程中将像素点投影到  $x$  轴上, 所以本文仅在水平扫描方向上讨论 MTF, 即  $f_{spx} = 0$ ,  $f_{sp} = f_{spx}$ 。综合式(14)~(19)可得, 红外成像系统的 MTF 等效模型为:

$$MTF(f_{sp}) = MTF_{diff} \cdot MTF_{aberration} \cdot MTF_{det} \cdot MTF_{ele} = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \frac{f_{sp}}{f_{spc}} - \frac{f_{sp}}{f_{spc}} \sqrt{1 - \left( \frac{f_{sp}}{f_{spc}} \right)^2} \right] \cdot \exp[-2\pi^2 \sigma_0^2 f_{sp}^2] \cdot$$

$$\text{sinc}^2(af_{sp}) \cdot \sqrt{1 + (2\pi f_{sp} K)^2} \quad (20)$$

式中:  $K$  为拟合曲线参数;  $a$  为红外成像系统的探测面元间距。

## 4 实验部分

本文实验验证仪器采用某型号无人机实际装载的 22~75 双视场热成像设备, 整机外形如图 11 所示。该设备是具有 22、75 mm 两种镜头焦距的红外成像系统, 可以利用大、小两种视场拍摄景物的红外视频, 其主要的技术参数如表 1 所示。

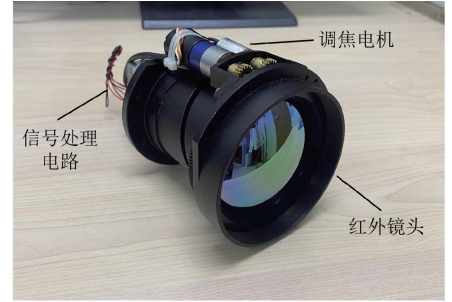


图 11 22~75 双视场热成像设备

Fig. 11 22~75 dual field thermal imaging equipment

表 1 22~75 双视场热成像设备技术参数

Table 1 Technical parameters of 22~75 dual field thermal imaging equipment

| 参数                     | 数值                                  |
|------------------------|-------------------------------------|
| 焦距/mm                  | 22 和 75                             |
| 工作波段/ $\mu\text{m}$    | 8~14                                |
| F/数                    | 1.2                                 |
| 探测器面元数量                | 640×512                             |
| 探测器面元间距/ $\mu\text{m}$ | 17                                  |
| 采样频率/Hz                | 25                                  |
| 视场角                    | 29°×21° (22 mm) 和 8.3°×6.2° (75 mm) |
| 输入电压                   | DC 8.4~12 V                         |
| 工作温度/°C                | -20~+60                             |

在具备测试条件的光电研究所, 本文完成了实验仪器的 MTF 实验室数值测量。实验室测量 MTF 的过程如图 12 所示, 实验仪器选用焦距为 75 mm 的小视场进行拍摄, 倾斜半月靶板使用双黑体准直仪测试系统产生。测试实验开始后, 将热成像设备放置于转台上, 使镜头垂直正对于整机测试系统热源中心。设置测试系统背景黑体温度为 23℃, 目标黑体和背景黑体温差为 8℃, 调整热成像设备方位, 使半月板图像出现在视野中心。通过上位



机向实验仪器发送调焦控制指令,反复调节镜头焦距,直到上位机视频窗口中出现靶板最清晰的像。实验过程中共采集 60 帧图像,目标区域的大小选择为  $64\times 32$  像素,用配套测试软件分析采集的靶板图像并计算 MTF。数据处理的过程中,使用分段三次样条插值平滑 MTF 的数值点,以得到实验室测量 MTF 的近似轮廓曲线,并通过数值积分得到等效平方带宽  $N_e$ 。本文以该实验室测量的 MTF 作为实验仪器的 MTF 真实值,与自动测量方法通过实拍图像测得的 MTF 做对比。

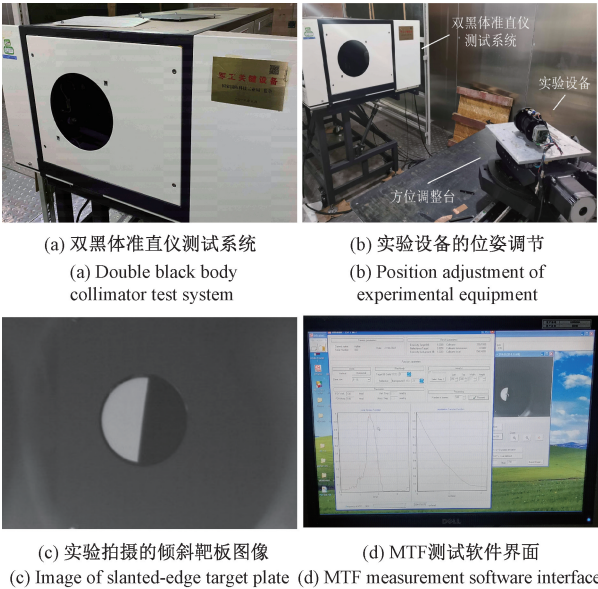


图 12 MTF 的实验室测量

Fig. 12 Laboratory measurement of MTF

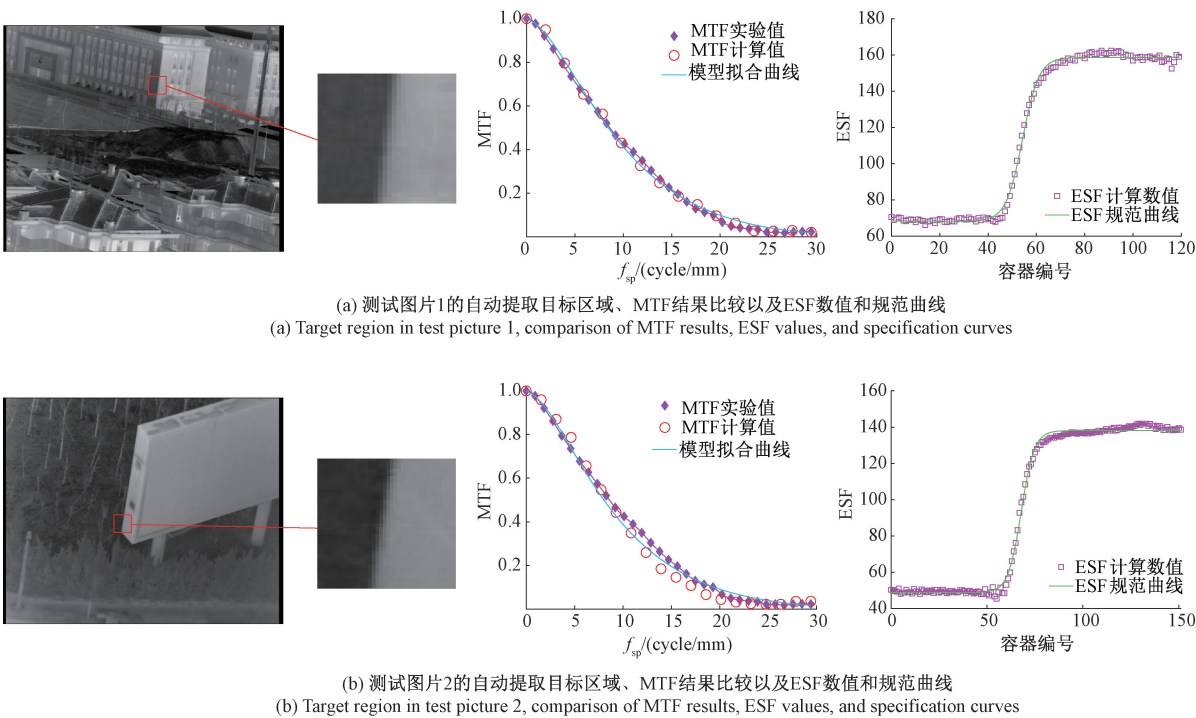
为了模拟红外成像系统在战机上实际拍摄的图片,实验过程中将实验仪器放置于多幢大厦的顶层,选用仪器的 75 mm 焦距,以不同的角度俯拍周围景物,如图 13 所示。每次测试拍摄 20 s 的视频,采用中间帧 10 s 处的红外图像作为采样结果,用以消除抖动和仪器自动调节对比度的影响。选取 8 幅互不相同、景物清晰且不包含特定目标特征的红外图像,利用本文提出的基于非特定图像的 MTF 自动测量方法进行处理,其检测到的目标区域、MTF 数值的计算结果与实验室测量的 MTF 结果比较、红外成像系统模型拟合曲线、中间变量 ESF 计算数值以及拟合曲线如图 14 所示。



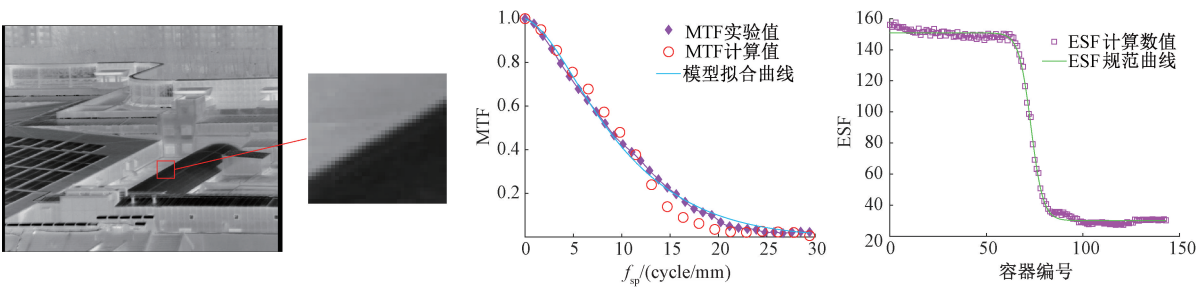
图 13 采集样本测试图片的过程

Fig. 13 Collection of sample test pictures

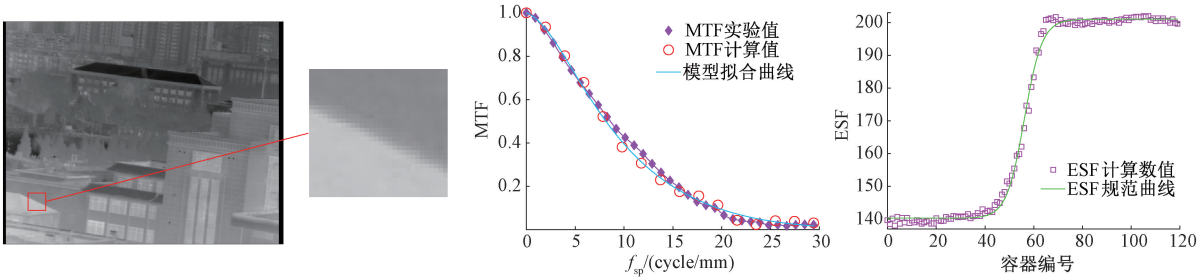
由图 14 可以看出,MTF 自动测量方法从 8 张细节复杂、不包含特定景物的红外图像中能够找出合适的目标区域,并且不同图片的 MTF 计算结果大致相同、ESF 数值和变化趋势均符合要求,这表明了算法的可行性。除



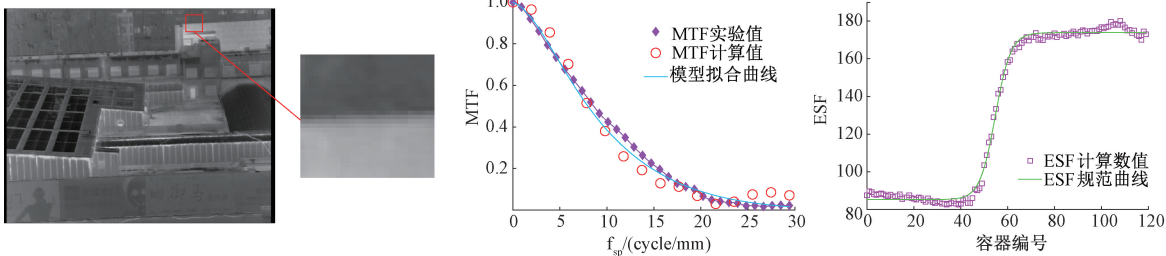




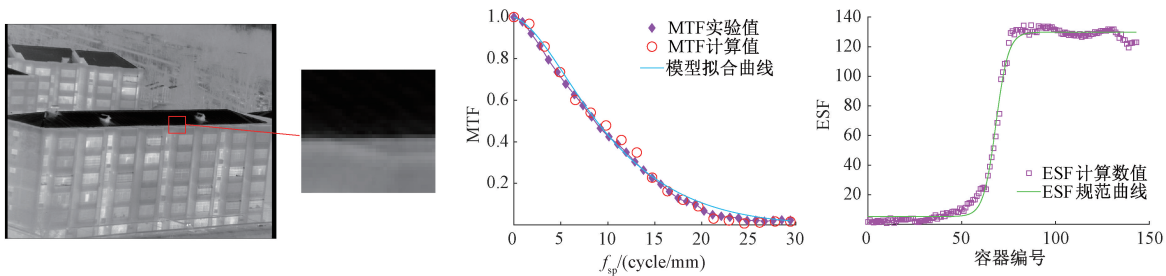
(c) 测试图片3的自动提取目标区域、MTF结果比较以及ESF数值和规范曲线  
(c) Target region in test picture 3, comparison of MTF results, ESF values, and specification curves



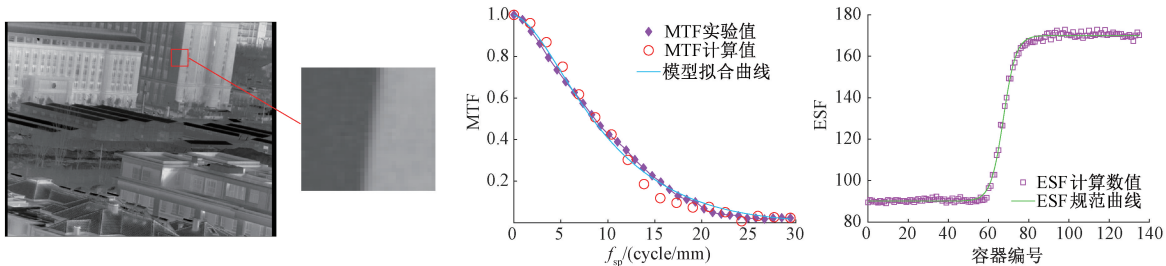
(d) 测试图片4的自动提取目标区域、MTF结果比较以及ESF数值和规范曲线  
(d) Target region in test picture 4, comparison of MTF results, ESF values, and specification curves



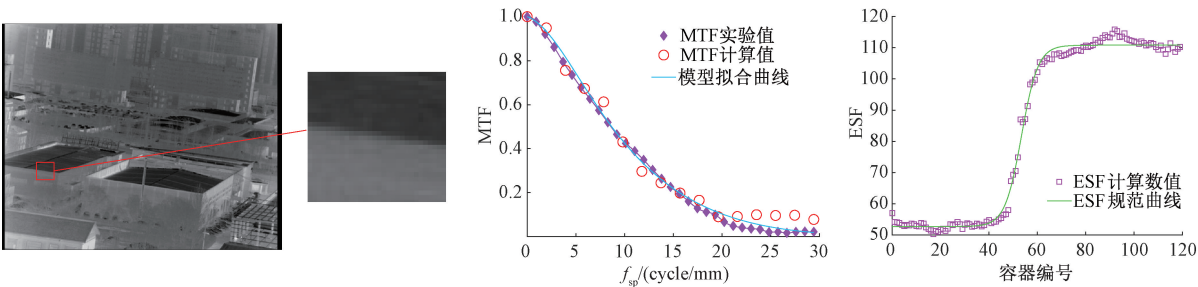
(e) 测试图片5的自动提取目标区域、MTF结果比较以及ESF数值和规范曲线  
(e) Target region in test picture 5, comparison of MTF results, ESF values, and specification curves



(f) 测试图片6的自动提取目标区域、MTF结果比较以及ESF数值和规范曲线  
(f) Target region in test picture 6, comparison of MTF results, ESF values, and specification curves



(g) 测试图片7的自动提取目标区域、MTF结果比较以及ESF数值和规范曲线  
(g) Target region in test picture 7, comparison of MTF results, ESF values, and specification curves



(h) 测试图片8的自动提取目标区域、MTF结果比较以及ESF数值和规范曲线  
(h) Target region in test picture 8, comparison of MTF results, ESF values, and specification curves

图 14 测试图片的算法处理结果同实验室 MTF 的测量结果比较

Fig. 14 The comparison between MTF calculated from test pictures and MTF measured in the laboratory

此之外,自动测量方法所得的 MTF 数据点集中分布在真实 MTF 曲线附近,模型拟合曲线同真实 MTF 曲线几乎完全一致,该结果充分证实了本文算法的有效性。值得注意的是,整个 MTF 测试过程不需要人工参与,完全由计算机通过运行算法自动完成。

MTF 的实验室测量值与本文算法得到的 MTF 曲线在相同空间频率下取值的绝对误差如图 15 所示。在实验仪器奈奎斯特频率以内的范围,使用本文算法估计的 MTF 与真实值的差值全部在 0.06 内。利用式(1)计算实验室测量以及本文算法测量的等效平方带宽  $N_e$ ,如表 2 所示。从表 2 数据可知,所有测试图片的  $N_e$  数值与实验室测量值非常接近,相对误差最大不超过 6%。因此,本文提出的 MTF 自动测量方法具有较高的计算精度,能够准确地从非特定实拍图像中自动得到红外成像系统的性能指标。其中 MTF 微小的测量误差主要由环境噪声、大气 MTF 的影响以及 MTF 拟合模型的不全面性所致。

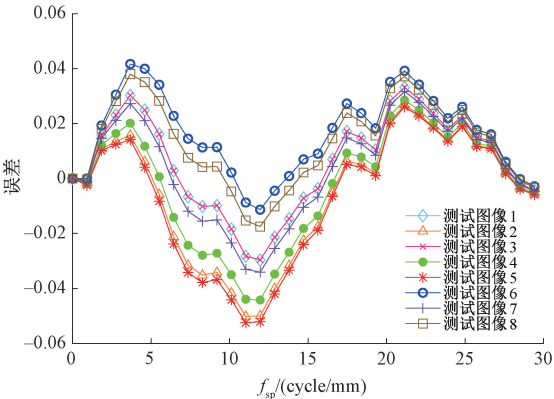


图 15 模型拟合 MTF 曲线与实验室测量 MTF 的绝对误差  
Fig. 15 The absolute error between model fitting MTF curve and laboratory measurement MTF

表 2 目标靶板与测试图片的等效平方带宽

Table 2 The equivalent bandpass of the target plate and the test pictures

| 数据源    | $N_e$   | 相对误差/% |
|--------|---------|--------|
| 实验室测量  | 6.132 0 | —      |
| 测试图片 1 | 6.223 3 | 1.49   |
| 测试图片 2 | 5.941 9 | 3.10   |
| 测试图片 3 | 6.223 9 | 1.50   |
| 测试图片 4 | 6.022 5 | 1.79   |
| 测试图片 5 | 5.911 9 | 3.59   |
| 测试图片 6 | 6.472 2 | 5.58   |
| 测试图片 7 | 6.162 6 | 0.50   |
| 测试图片 8 | 6.389 1 | 4.19   |

本文 MTF 自动测量方法仍存在一定的局限性,该方法不能对所有任意的红外图像都有效,只能在包含刃边特征的红外图像中测量 MTF。在实际机载红外成像系统执行任务的过程中,含有本文标准目标区域的图像可能只占拍摄图像的一部分。此外计算结果容易受到图像质量的影响。如果采集图像时红外成像系统发生剧烈的抖动,使图像变得模糊,这很可能造成 MTF 测量曲线劣于真实曲线,甚至导致算法无法自动提取合适的计算区域以评估 MTF。以上局限性是本文所提方法亟待解决的问题,在日后的工作中将会开展相关研究。

5 结 论

本文提出了一种基于非特定图像的红外成像系统 MTF 自动测量方法,该方法以任意实拍景物图像作为输入,通过目标区域自动提取算法、改进的刃边法以及等效物理模型的拟合,自动得到红外成像系统实际运行时的 MTF 数值。采用某型号无人机红外成像设备验证了本文

所提方法的有效性和准确性,算法通过测试图片的计算结果与实验室测量结果的绝对误差小于0.06。该方法显著提高了MTF的测量效率,对于机载红外成像系统的实时性能评估具有关键意义。

## 参考文献

- [1] 张建奇. 红外系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2018.  
ZHANG J Q. Infrared system [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2018.
- [2] 任涛,于劲松,唐荻音,等. 基于数字孪生的机载光电探测系统性能退化建模研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(2):75-80.  
REN T, YU J S, TANG D Y, et al. Performance degradation prediction theory and method for airborne Electro-Optical detection system based on digital twin model[J]. Aero Weaponry, 2019, 26(2):75-80.
- [3] BOREMAN G D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [4] 徐伟伟,张黎明,杨宝云,等. 光学卫星相机在轨调制传递函数检测方法[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 194-200.  
XU W W, ZHANG L M, YANG B Y, et al. On-orbit modulation transfer function estimation of optical satellite camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 194-200.
- [5] VIALLEFONT-ROBINET F, HELDER D, FRAISSE R, et al. Comparison of MTF measurements using edge method: Towards reference data set[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 33625-33648.
- [6] TZANNES A P, MOONEY J M. Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras [J]. Optical Engineering, 1995, 34(6): 1808-1817.
- [7] KOHM K. Modulation transfer function measurement method and results for the Orbview-3 high resolution imaging satellite [C]. Proceedings of ISPRS, 2004: 12-23.
- [8] 陈林,陈海龙,张鹏,等. 基于月球目标的FY-2G在轨调制传递函数评估[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12):3012-3018.  
CHEN L, CHEN H L, ZHANG P, et al. On-orbit modulation transfer function measurements based on lunar limb for FY-2G[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12):3012-3018.
- [9] 闫钧华,吕向阳,时萌玮,等. 遥感成像耦合典型误差源反演方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 200-210.  
YAN J H, LV X Y, SHI M Y, et al. Research on the

inversion method of coupled typical error source in remote sensing imaging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6):200-210.

- [10] 吴泽鹏,曲耀斌,赵庆广,等. 基于地面周期靶标的光学遥感相机在轨调制传递函数测量方法[J]. 光学学报, 2019, 39(7):389-398.  
WU Z P, QU Y B, ZHAO Q G, et al. On-orbit measurement of modulation transfer function for optical remote sensing cameras based on periodic ground targets[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7):389-398.
- [11] 郭世一,买莹,钱旭,等. 一种基于辐射状靶标场的成像系统MTF计算方法[J]. 中国科技论文, 2013, 8(4):287-290.  
GUO SH Y, MAI Y, QIAN X, et al. A MTF calculation method of imaging system based on radial target field[J]. China Science Paper, 2013, 8(4):287-290.
- [12] 郭玲玲,吴泽鹏,赵其昌,等. 中分辨率光谱成像仪在轨调制传递函数测量方法[J]. 光学学报, 2016, 36(4):315-320.  
GUO L L, WU Z P, ZHAO Q CH, et al. On-orbit modulation transfer function measurement of medium resolution spectral imager [J]. Acta Optica Sinica, 2016,36(4):315-320.
- [13] CHOI T, XIONG X, WANG Z. On-orbit lunar modulation transfer function measurements for the moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(1): 270-277.
- [14] NUGENT P W, SHAW J A, KEHOE M R, et al. Measuring the modulation transfer function of an imaging spectrometer with rooflines of opportunity [J]. Optical Engineering, 2010, 49(10): 103201.
- [15] DELVIT J M, LEGER D, ROQUES S, et al. Modulation transfer function estimation from nonspecific images[J]. Optical Engineering, 2004, 43(6): 1355-1365.
- [16] BAUER M, VOLCHKOV V, HIRSCH M, et al. Automatic estimation of modulation transfer functions[C]. IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 2018: 1-12.
- [17] 庄松林,钱振邦. 光学传递函数[M]. 北京:机械工业出版社, 1981.  
ZHUANG S L, QIAN ZH B. Optical transfer function [M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [18] HOLST G C, 闫吉祥,俞信,等译. 光电成像系统性能[M]. 第4版. 北京:国防工业出版社, 2015.  
HOLST G C, YAN J X, YU X, et al. Electro-Optical imaging system performance[M]. 4th Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.



- [19] WILLIAMS C S, BECKLUND O A. Introduction to the optical transfer function[M]. Bellingham: SPIE Press, 2002.
- [20] International Organization for Standardization. Photography: Electronic still picture imaging-resolution and spatial frequency responses[S]. ISO, 2017.
- [21] VON GIOI R G, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: A fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 32(4): 722-732.
- [22] XIE X, FAN H, WANG H, et al. Error of the slanted edge method for measuring the modulation transfer function of imaging systems[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): B83-B91.
- [23] SHANNON R R. Aberrations and their effects on images[C]. Geometrical Optics, SPIE, 1985, 531: 27-48.
- [24] WIGREN C. Model of image generation in optronic (electro-optical) sensor systems (IGOSS)[C]. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing IX. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3377: 89-96.

## 作者简介



唐荻音, 2008 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2015 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京航空航天大学副教授, 主要研究方向为航空航天复杂系统的状态监测、故障预测与维护保障。

E-mail: tangdiyin@buaa.edu.cn

**Tang Diyin** received her B. Sc. and Ph. D. degrees both from Beihang University in 2008 and 2015, respectively. She is currently an associate professor at Beihang University. Her main research interests include condition monitoring, failure

prognostics and maintenance strategy of aeronautic and aerospace systems.



崔润昊, 2021 年于北京航空航天大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理、光电系统的健康管理和性能预测。

E-mail: cuirunhao@buaa.edu.cn

**Cui Runhao** received his B. Sc. degree from Beihang University in 2021. He is currently a M. Sc. candidate at Beihang University. His main research interests include digital image processing and prognostic and health management of electro-optical system.



邸军伟, 2010 年于中南大学获得学士学位, 2013 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 现为中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所工程师, 主要研究方向为光电探测与对抗。

E-mail: dijunwei2009@163.com

**Di Junwei** received his B. Sc. degree from Central South University in 2010 and M. Sc. degree from Beihang University in 2013. He is currently an engineer at Avic Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment (Avic Optonics). His main research interests include electro-optical system detection and countermeasures.



于劲松 (通信作者), 2004 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京航空航天大学教授, 主要研究方向为自动测试、预测与健康健康管理。

E-mail: yujs@buaa.edu.cn

**Yu Jinsong** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Beihang University in 2004. He is currently a professor at Beihang University. His main research interests include automatic testing, prognostic and health management.