



Y3535282



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

碲镉汞红外焦平面调制传递函数表征方法研究

作者姓名: 张 瞳

指导教师: 林春 研究员 陈洪雷 正高工

中科院上海技术物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 微电子学与固体电子学

培养单位: 中科院上海技术物理研究所

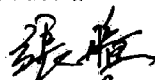
2018 年 6 月

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：



日

期：

2018-6.4

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解中国科学院大学有关保留，使用学位论文的规定，即：学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存学位论文。

本人同意《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》出版章程的内容，愿意将学位论文提交《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社，编入CNKI学位论文全文数据库并充实到“学位论文学术不端行为检测系统”比对资源库，同意按章程规定享受相关权益。

保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名：



指导教师签名：



日期：2018年6月4日



Y3535282

Study on modulation transfer function characterization
methods of HgCdTe infrared focal plane

By

Tong Zhang

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Philosophy

In the field of electronic science and technology

Shanghai Institute of Technical Physics

June, 2018

摘 要

红外探测器调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)是连接器件制备与整机应用的关键参数。其本质是信号频率分量经过光电成像系统后在截止空间频率范围内的衰减程度,能够真实的反映出红外探测器空间分辨率和成像质量。MTF 已经逐渐成为衡量红外探测器成像性能优劣的重要指标。本文针对自制的 HgCdTe 红外焦平面探测器 MTF 的测试要求,分别对面阵和线列器件的 MTF 测试方法以及影响器件 MTF 的结构等进行了深入研究,搭建并实现了利用倾斜刀口法测试面阵/线列 HgCdTe 红外焦平面探测器 MTF 的测试系统,主要研究内容如下所示:

1. 面阵 HgCdTe 红外探测器成像条纹噪声的去除。面阵器件因材料生长、器件制备工艺水平及读出电路等原因,生成图像存在条纹噪声,其对面阵器件的盲元检测精度和后续面阵 MTF 计算造成干扰。利用双密度双树复数小波将黑体均匀辐射图像由时域空间转换到频域空间,经过小波分解后的高频系数服从高斯分布从而对高频小波系数进行判别,将高频小波系数按照条纹噪声相关性赋予不同权值再分别进行单支重构去除条纹噪声。实验证明了该方法的有效性。

2. 面阵 HgCdTe 红外探测器 MTF 计算。对去除了条纹噪声干扰的黑体辐射图像进行盲元检测,使用全局 3σ 准则对面阵像元进行盲元检测。由于全局检测方法存在较大误差,对全局 3σ 准则法进行改进,利用带有滑动窗口的局部 3σ 准则进行盲元检测。实验证明该方法检测出的盲元精度比全局检测法更为准确。在刀口靶标成像采集时由于电路系统的影响,输出图像存在随机噪声。传统的中值滤波算法在去除随机噪声的同时会将刀口刃边细节模糊,改为采用带有自适应的中值滤波法进行去噪。其对每个像素是否为噪声点进行判断,对是随机噪声的点进行滤波而非噪声点进行保留。该方法能够在去除噪声的同时很好的保留刀口刃边像的细节。最后利用 Canny 算子和 Hough 变换分别检测出刀口刃边位置和刃边倾斜角度,再将刃边进行投影并计算出面阵器件的 MTF 值。

3. 线列 HgCdTe 红外探测器 MTF 计算。使用倾斜刀口法测试线列红外探测器 MTF 时,首先需要解决如何准确使得刀口靶标像的刃边位置刚好横跨过线列

器件,从而输出计算 MTF 所需的边缘扩散函数(Edge Spread Function, ESF)。将靶标改造为‘K’字型,移动探测器并通过数据采集软件观察像元输出值,当线列像元输出形状为阶跃状时则刃边像正好跨过整个线列像元。此时对线列器件的输出值进行采集得到 ESF 曲线,并用投影法计算 MTF。但由于串音的存在不能将所有像元输出作为有效计算像元,对采集数据进行有效输出像元判断后再计算线列 MTF 值。并将改进倾斜刀口法与狭缝扫描法进行对比。

4. 测试不同结构探测器对 MTF 影响。串音是造成探测器 MTF 数值降低的主要因素之一。针对串音的抑制设计有金属框结构和离子注入框结构的线列 HgCdTe 红外探测器。两种框结构可以对横向扩散的载流子有效吸收以减小电学串音。利用改进的倾斜刀口法分别对无框结构、金属框结构、离子注入框结构的线列探测器进行了 MTF 测试,并对测试结果进行分析对比。

关键词: HgCdTe 红外焦平面, 调制传递函数, 倾斜刀口法, 串音抑制

Abstract

Modulation transfer function (MTF) of infrared detector is the key parameter to connect device fabrication and whole system application. Its essence is the attenuation degree of the signal frequency component in the cut-off space frequency range after the photoelectric imaging system, which can truly reflect the spatial resolution and imaging quality of the infrared detector. MTF has gradually become an important index to measure the imaging performance of infrared detectors. In this paper, in view of the test requirements of the self-made HgCdTe infrared focal plane detector MTF, The MTF test method for array and line array devices as well as the structure of the device MTF are studied in depth, and the test system for testing the MTF of the array / line HgCdTe infrared focal plane detector by the slant knife edge method is built and implemented. The main research contents are as follows:

1. The array HgCdTe infrared detector imaging eliminates stripe noise. Due to the material growth, device fabrication level and readout circuit, there are stripe noise in output array. The blind pixel detection accuracy of the array device and the subsequent array MTF computation cause interference. By using dual-density double-tree complex wavelet transform the array detector imaging of black body uniform radiation from time domain to frequency domain, the high-frequency coefficients are submitting to Gauss distribution after wavelet decomposition, and the high frequency wavelet coefficients are given different weights according to the correlation of stripe noise and single branch reconstruction is carried out. The experiment proved the effectiveness of the method.

2. The array HgCdTe infrared detector MTF calculation. Blind pixels detection of blackbody radiated image after striped noise is removed, the global 3σ criterion is applied to blind pixels detection. Due to the large error of the global detection method, to improved this method, using the local 3σ rule with sliding window is used for blind pixels detection. Experiments show that the accuracy of the blind pixels detected by this method is more accurate than that of the global detection.

Because of the influence of circuit system, there is random noise in output image when collecting knife edge target. The traditional median filtering algorithm blurs the edge details of the knife while removing the random noise, and uses an adaptive median filter to judge whether each pixel is a noise point or not. The method can remove noise and preserve the details of edge. At last, the Canny operator and Hough transform are used to detect the edge position of the knife edge and the angle of the knife edge, then the edge is projected and the MTF value of the array detector is calculated.

3. The linear HgCdTe infrared detector MTF calculation. When using the slanted knife edge method to measurement the linear infrared detector, it is necessary to solve the problem of how to make the edge position of the target image exactly cross the pixel of the linear device, so as to output the ESF function required for the calculation of MTF. The target is transformed into a 'K' type, when to move the detector while observe the output pixel value through the data acquisition platform, then the edge across the pixel until the shape of the line of output pixels is shaped as a step. The output of the linear device values are acquired by ESF curve. When the MTF is calculated by the projection method, the output of all pixels can not be used as an effective pixel to calculate the MTF value of the line. The improved slanted knife edge method is compared with the slit scanning method.

4. MTF of different structure detectors are measured. Crosstalk is one of the main factors to reduce the MTF value of the detector. To suppress crosstalk with metal frame structure and ion implantation structure of HgCdTe infrared detector array are designed. The two structures absorb the transverse diffusion carriers effectively to reduce electrical crosstalk. The MTF measurement was carried out on the linear detector without-frame structure, metal-frame structure and ion-injection-frame structure by the improved slanted knife edge method, and the measurement results were analyzed and compared.

Key Words: HgCdTe Infrared FPA, Modulation transfer function, Slant edge, Crosstalk suppress

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 红外焦平面技术及应用	1
1.1.1 红外光电探测器发展进程	1
1.1.2 红外探测器的结构和分类	2
1.1.3 碲镉汞红外探测器	5
1.2 红外探测器调制传递函数	7
1.2.1 红外探测器性能参数	7
1.2.2 调制传递函数的定义	8
1.2.3 光学传递函数	10
1.2.4 红外焦平面的调制传递函数	11
1.2.5 调制传递函数国内外研究现状	14
1.3 焦平面调制传递函数测试方法	15
1.3.1 正弦光栅靶标法	15
1.3.2 点扩散函数测试法	16
1.3.3 狭缝扫描测试法	17
1.3.4 刀口扫描测试法	17
1.3.5 倾斜刀口测试法	18
1.3.6 方波靶标测试法	19
1.4 本论文的研究目的和内容结构	20
第 2 章 测试系统平台的搭建	23
2.1 HgCdTe 焦平面 MTF 测试方案的选择	23
2.1.1 测试器件	24
2.1.2 测试镜头标定	24
2.2 测试系统搭建	25
2.2.1 黑体选择	25
2.2.2 靶标选择	26
2.2.3 平行光管选择	26
2.2.4 三维位移平台	28
2.2.5 红外焦平面 MTF 测试方案	28
2.3 基于 Labview 的线列/面阵 MTF 数据采集系统	29
2.3.1 数据采集系统硬件搭建	30
2.3.2 红外焦平面器件驱动时序	31
2.3.3 数据采集系统软件	31
2.4 本章小结	33
第 3 章 面阵碲镉汞探测器 MTF 测试	35
3.1 条纹噪声去除	35
3.1.1 二维小波变换	36
3.1.2 双密度双树复数小波变换	39
3.1.3 小波去除条纹噪声算法	41
3.2 面阵器件盲元检测	44
3.2.1 3σ 标准差检测法	45

3.2.2	滑动窗 3σ 检测法	45
3.2.3	盲元检测对比	46
3.3	靶标刀口角度计算	48
3.3.1	随机噪声去除	48
3.3.2	刀口边缘检测	50
3.3.3	刀口倾斜角度计算	53
3.4	面阵器件 MTF 计算	56
3.4.1	边缘扩散函数的提取	56
3.4.2	MTF 计算	61
3.4.3	相同条件 MTF 重复测试	63
3.4.4	不同角度 MTF 测试	63
3.4.5	不同温度 MTF 测试	64
3.5	本章小结	64
第 4 章	线列碲镉汞探测器 MTF 测试	65
4.1	线列器件 MTF 测试原理	65
4.2	线列器件位置定位	66
4.3	线列器件 MTF 计算	70
4.3.1	ESF 曲线生成	70
4.3.2	线列 MTF 计算	71
4.4	线列器件 MTF 测试	73
4.4.1	狭缝扫描法与改进倾斜刀口法测试对比	73
4.4.2	线列器件 MTF 重复测试	76
4.4.3	线列器件不同温度 MTF 测试	77
4.4.4	框结构线列器件	78
4.4.5	不同结构线列器件 MTF 对比	81
4.4.6	不同像元尺寸 MTF 对比	83
4.5	本章小结	84
第 5 章	器件不稳定像元和 $1/f$ 噪声分析	85
5.1	不稳定像元分析	85
5.1.1	不稳定像元的定义	85
5.1.2	不稳定像元硬件采集系统	85
5.1.3	不稳定像元的判定	86
5.1.4	不稳定像元的分类	87
5.2	器件 $1/f$ 噪声分析	89
5.2.1	器件 $1/f$ 噪声	89
5.2.2	不稳定像元 $1/f$ 噪声对比	91
5.3	本章小结	93
第 6 章	总结与展望	95
6.1	本文总结	95
6.2	本文展望	96
参考文献		97
致 谢		107
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果		109

第1章 引言

1.1 红外焦平面技术及应用

从200年前红外辐射被发现开始,人们就开始了红外探测器的研究^[1],尤其是二战后红外探测器技术的研究得到了蓬勃的发展。近30年以来,红外探测器技术的发展更加迅猛,使其在军事技术、地质勘探、农业生产、卫生医疗及汽车智能驾驶等方面都有广泛的应用。红外焦平面技术也从最初的第一代、现在主流应用的第二代逐渐向第三代技术发展。调制传递函数(Module Transfer Function, MTF)作为连接红外器件制备与应用开发的关键参数,越来越多受到重视。

本章将主要介绍HgCdTe红外探测器的发展进程及研究现状,并介绍了探测器MTF的测试方法,最后对本文的研究目的及内容结构进行阐述。

1.1.1 红外光电探测器发展进程

从18世纪威廉·赫舍尔发现红外线开始,红外探测器技术得到了迅猛的发展^[2-4]。红外探测器技术也经历了以电子扫描为基础的第一代线列(Linear)焦平面到第二代凝视型(Staring)型焦平面技术,正在向高性能低成本的第三代红外探测器发展。

第一代的线列焦平面是通过推扫或者机械扫描的方式来进行探测器成像,其线列的构成有1行或者N行(常用4-8行)。N行的方式称为延时积分型(Time Delay Integration, TDI),当用于扫描成像时,每1行在扫描的时候对同一个视场仅从探测和信号累加积分,使得探测率提高了 $\sqrt{N}$ 倍。当用于推扫成像时由于其搭载系统一般驻留时间较长,单行的线列就可以满足要求。

在二代红外焦平面技术发展中,凝视焦平面器件是二维电扫描器件,积分时间较长。中波红外探测器积分时间通常为几微秒到数十毫秒级,长波器件则可达数十微妙到几百微秒级,探测器灵敏度得到了有效的提高了。在焦平面探测芯片技术应用中,主要有HgCdTe、InSb等为代表的光伏型探测器,PtSi为代表的光导型探测器和AlGaAs/GaAs为代表的量子阱型子带间迁跃型探测器。二代焦平面的发展,也推动了器件向大规模技术发展,大大降低了红外探测系统的成本。

因此在 20 世纪 90 年代中期,制冷型和非制冷型红外探测器进入了工业化生产的时代。

上个世纪 90 年代出现了第三代红外探测器成像技术的概念,主要围绕着高性能和低成本两个基本内涵构成,不同材料的探测器技术迅速发展^[5-12]。其技术目标主要有高性能的红外探测器要具有极高的探测器温度分辨率和极高的探测速度,器件规模达到百万级像素;实现小尺寸、高探测率及低成本的非制冷型探测器。

总结红外探测器的发展,下图概括了红外探测器走过的技术发展历程以及发展趋势。

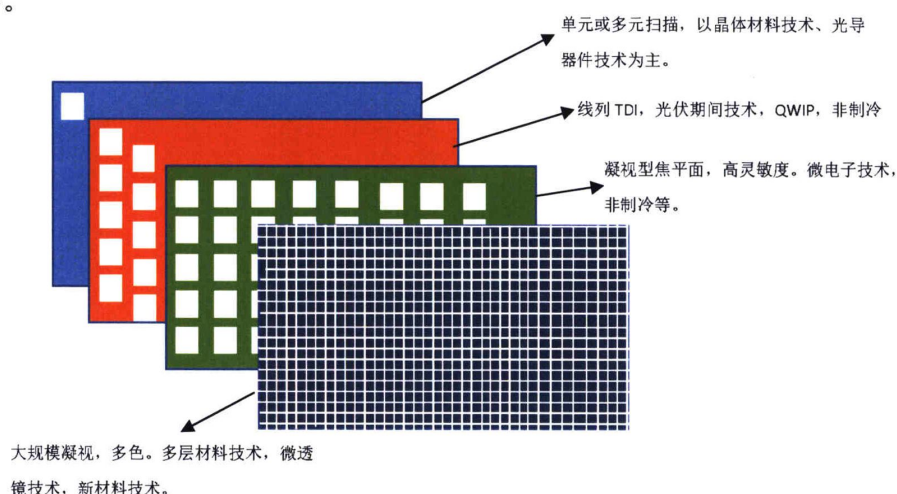


图 1.1 红外探测器发展趋势

Figure 1.1 Development trend of infrared detector

高性能成像红外探测器的发展日新月异,多种方法和概念不断的提出、演示和更新。回顾红外探测器的发展历史,可以看到新技术进步背后的推动力是对探测器技术的最基本、不断增长和提高的实际需求,即要求探测器具有更远的探测距离,更高的探测率,更快的探测速度及更小的体积、功耗等。正是这些需求才促使了红外探测器技术的持续进步。

1.1.2 红外探测器的结构和分类

红外探测器根据不同用途和工作方式分为不同种类。如根据器件的波长范围可分为近红外(短波)、中红外(中波)、和远红外(长波)探测器^[13],其对应的波长分别为 $1\sim3\mu\text{m}$, $3\sim5\mu\text{m}$, 和 $8\sim15\mu\text{m}$; 根据工作温度范围又可分为制冷型和非制冷

型探测器。根据器件结构又可分为线列和凝视型面阵探测器。按照工作原理又可分为热探测器和光电探测器。

(1) 热探测器

热探测器^[14]吸收红外辐射后,随着温度的升高而发生某种物理性质的变化。对这些物理变化量如温差电动势、电阻率等的测量能够计算出探测器所吸收的红外辐射能量。热探测器类型主要有热释电探测器和微测辐射热计两类。

① 热释电探测器

热释电探测器的原理是通过检测由于红外辐射热效应引起的敏感元表面电荷随温度的变化来探测红外辐射的器件^[15-16]。在一切极性分子构成的晶体中,极性分子正负电荷中心偏离形成分子电矩,分子电矩的有序排列形成宏观的电极化。当晶体吸收红外辐射时两端会产生电极性相反电荷数相等的电极化现象,称之为热释电效应。使用这种具有自发极化的热释电晶体作为介质做成一个电容器,那么电容器吸收红外辐射后引起的升温会使自发极化发生变化,从而输出电流。由于它的输出电流是与自发极化的变化成正比,因此在使用时常常需要在探测器前加斩波器以调制入射的红外辐射。

热释电探测器具有很宽的光谱响应范围,可以工作在非制冷条件下,广泛的应用于辐射测量。由于其探测器性能均匀、功耗低,热释电探测器正在向焦平面方向发展。

② 微测辐射热计

微测辐射热计也称为热敏电阻,当红外辐射被探测器材料吸收后会使探测器的温度随之变化,进而使探测器的其他物理性质发生变化的原理制成的热探测器阵列。微测辐射热计可在非制冷的温度下工作。测辐射热计是在硅片上采用淀积技术生长具有高温系数和高阻的热敏材料,使其随着红外辐射的强度变化而引起电阻值的变化。与热释电探测器相比,其具有生产成本低、响应范围广、像元串音低、1/f 噪声低、灵敏度高等特点,此技术在上世纪 90 年代为热点。

③ 热电堆

热电堆是一种利用温度差的电效应将多个热电偶串联在一起的热探测器件。当两种不同材料的金属或半导体构成闭合回路形成热电偶时,当两个相邻节点中一个受到入射辐射后温度升高,而另一结点未受到入射辐射而温度保持不变,则

两个结点处于不同的温度而使闭合电路中产生温差电动势，测量该温差电动势便可以得到待测辐射的能量或功率大小。

热电堆通常为薄膜状，其优点为响应率高、性能稳定、均匀性高和探测波长范围广等，且工作条件不需要制冷，现已广泛的应用于热成像技术领域。

(2) 光电探测器

某些材料在受到红外辐射后，红外辐射能量会被其中的电子直接吸收而使其运动状态改变，从而该材料的电学参量也发生改变，这种电学性质的改变称为光电效应。利用光电效应制成的红外探测器也称为光电探测器^[17-21]。该类型探测器利用内部电子吸收红外辐射改变状态，具有反应快、适用场合范围广等特点。主要分为以下两种类型：

① 光电导探测器

光电导型红外探测器简称为光电导红外探测器，当半导体器件接受到红外辐射时，会使内部一些电子和空穴从原来不导电的束缚状态转变到能导电的自由状态，从而使半导体的电导率增加。这种现象称之为光电导效应。如图所示：

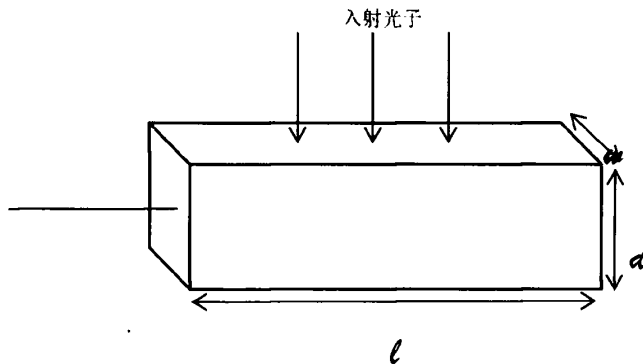


图 1.2 光电导探测器

Figure 1.2 Photoconductive detector

光电导探测器根据材料可分为单晶型和多晶薄膜型两种。薄膜型的探测器常见的有 PbS 和 PbSe 光电导探测器。PbS 主要用于 1~3 μm 波段的大气窗口，PbSe 适用于 3~5 μm 波段的大气窗口。单晶型主要又分为本征型和掺杂型两类。本征型最早只限于 7 μm 以下波段，主要有 InSb 探测器，它是 3~5 μm 窗口比较优良的探测器。还有三元半导体材料的 HgCdTe，全面覆盖了短波、中波、长波的范围。其在短波 1~3 μm 的性能超过其余探测器，中波 3~5 μm 可以在室温下进行应用。

在长波 $8\sim 15\mu\text{m}$ 大气窗口中探测器可工作在液氮温度。

② 光伏探测器

光伏型探测器是利用半导体的 p-n 结受到红外辐射在其两端产生电压的光伏效应来探测红外辐射的器件，也称为光伏二极管。光伏探测器的特征是在 P 型半导体和 N 型半导体的交界处形成一个 p-n 结。由于 n 区的电子和 p 区的空穴的相互扩散运动，在 p-n 结边界附近形成一个空间电荷区。空间电荷区产生的内建电场将阻止载流子继续扩散，称为耗尽层。

当探测器受到辐照后，入射光子在 p-n 结处或 p-n 结附近被吸收，产生的电子空穴对被结电场所分开。在结电场的作用下空穴向 p 侧迁移，电子向 n 侧迁移。在探测器输出开路的情况下，可形成正向的光电压，这种现象称为光生伏效应。利用该效应制成的红外探测器称之为光伏探测器。

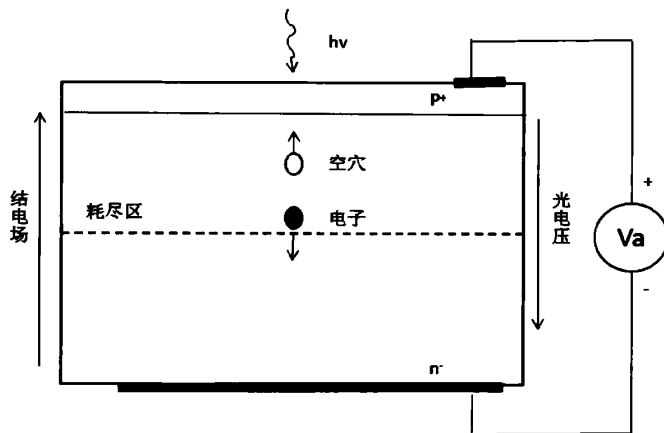


图 1.3 光伏探测器

Figure 1.3 Photovoltaic detector

光伏探测器具有很高的响应速度可用于高速探测。其结构有利于排成二维阵列，与 CCD 或 CMOS 耦合组成红外焦平面阵列。

1.1.3 碲镉汞红外探测器

碲镉汞材料物理与技术的发展已经历了 60 年的历史，从上世纪的 1959 年由英国皇家信号与雷达研究院的 Lawson^[22]等人发明了碲镉汞(HgCdTe)材料开始，标志着红外成像技术进入了一个新纪元。上个世纪 70 年代，美国提出基于碲镉

汞(HgCdTe)的焦平面阵列(Focal Plane Arrays, FPA)概念, 从此红外成像探测开始围绕 HgCdTe 的外延材料技术、光伏阵列芯片及碲化镉钝化等技术展开研究。碲镉汞最大的特征是其带隙可以通过镉的组份进行调节, 其探测范围能够很好的覆盖整个红外波段。碲镉汞已经成为红外成像的一个标准, 在近几十年得到了广泛的应用。

碲镉汞(HgCdTe)是由正禁带宽度的碲化镉(CdTe)和负禁带宽度的碲化汞(HgTe)混合而成的二元化合物材料, 这两种材料都是闪锌矿结构, 因此晶格常数较为接近, 能形成任意配比的连续固溶体, 也就是 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 。调节 Cd 组份 x 值, 可以实现碲镉汞器件的不同波段长度对红外波段的全覆盖, 同时兼具量子效率高、探测响应速度快、电子迁移率高、少子寿命长等特点。

碲镉汞探测器技术发展也经历了由最初的单元探测到现在的超大规模面阵的制备。从上个世纪碲镉汞材料被发现, 各个国家都投入到了碲镉汞红外探测器的研究及应用, 尤其是在军事领域的应用。其主要的发展历程如下图(1.4)所示。

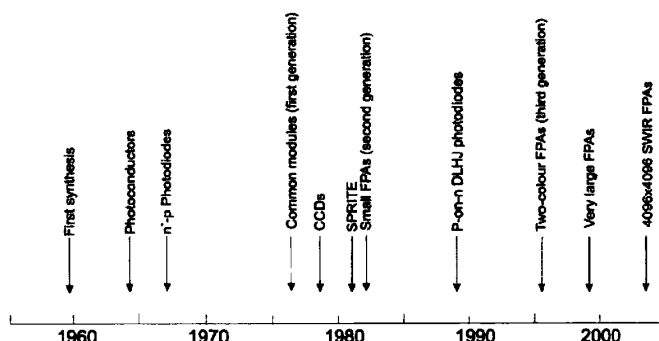


图 1.4 碲镉汞红外探测器发展史^[13]

Figure 1.4 History of the development of HgCdTe infrared detectors

早期的碲镉汞红外探测器主要在上个世纪 60 年代被发明及使用的, 主要是光导型碲镉汞器件的应用。其生产制备工艺难度较小, 可以实现较长波段的探测, 但该类响应速度较慢。直到 70 年代, 出现了碲镉汞的单元扫描和线列扫描成像, 即第一代的线列扫描碲镉汞红外探测器。后期也开始了对碲镉汞光伏器件的研究。到了八十年代, 以凝视型碲镉汞红外焦平面的第二代探测器开始出现, 因为不用扫描的方式进行成像, 并且与读出电路可以互联, 所以它大幅度的提高了探测的灵敏度, 同时也带来了应用较小光学口径系统的可能性, 从而极大降低了红

外探测器的系统成本和空间成本。1999年,唐纳德·里高等人提出了第三代红外成像探测器的概念^[23-27],主要围绕着高性能和低成本两个方向进行展开。第三代的碲镉汞红外探测器主要有以下目标:

① 高性能的红外探测器。要求具有极高的探测温度分辨率和较高的探测速度,噪声等效温差达到 1mk。

② 发展更大规模、更长波段的焦平面探测器技术^[28]。发展 $8\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ 长波波段的探测技术^[29-30],提高目标探测距离和灵敏度;发展百万级像素以上的超大规模焦平面探测技术,以提高目标分辨力;发展芯片集成 AD 转换技术,提高探测数据的传输速度;提高器件的均匀性和温度分辨率;发展多层读出电路技术。

③ 发展双色(双波段探测)和多色(多波段探测)技术,提高在复杂背景的条件下探测器的识别能力^[31-32]。

④ 发展超光谱以及主动成像探测技术,以提高对伪装目标的识别。

⑤ 发展高性能非制冷碲镉汞红外探测器^[33-34]。实现探测器工作在室温或者更高的工作温度,减小围绕探测器的组件的规模,为红外探测器的应用范围扩大提供良好的支撑。

总之,碲镉汞红外探测器正在向着更远的探测距离、更高的探测速率、更小的体积功耗等方向迅速发展。

1.2 红外探测器调制传递函数

随着红外探测器的迅猛发展,如何评价探测器的性能逐渐成为衡量一款探测器探测能力的重要标准。探测器的性能标准中,主要用响应率来衡量单位辐照下探测器产生的电压响应率和电流响应率;探测率也即噪声等效功率的倒数,是用来度量探测器的探测能力也称为 D^* ,是用来测试探测器噪声性能的指数。在探测器成像性能方面主要有信号传递函数(SITF)、最小可分辨温差(MRTD)、调制传递函数(Module Transfer Function, MTF)等参数来对探测器的成像质量进行全面的评价^[35-36]。

1.2.1 红外探测器性能参数

信号传递函数(SITF)反映了红外成像系统的线性响应程度,是客观的评价红外成像系统的主要参数之一。其值能够提供红外成像系统的增益、线性度、动态

范围及饱和度等信息。信号传递函数是输出电压差与温度变化差曲线的斜率。信号传递函数的响应曲线通常是呈“S”型。

最小可分辨温差(MRTD)定义为对在已知空间频率的 4 杆靶标进行成像, 靶标图像恰好能被观测者分辨出时的目标温度与背景温度的差值。该参数不但反映了探测器温度的灵敏度特性, 同时也反映了系统空间分辨率特性。但该参数测试方法有人的主观性参与, 误差较为明显。而调制传递函数则更加客观的反映了红外成像系统的连续空间频率特性和系统的成像性能。

1.2.2 调制传递函数的定义

从理论上讲, 任何线性不变系统都可以用频谱分析的方法进行描述, 光学成像系统满足于对输入信号的线性响应且响应不随时间或空间变化, 该系统是具有时间不变的线性系统, 其信号传递的保真度可以用它们在时间域的脉冲响应或阶跃响应去描述, 也可用频率域响应进行描述。

当用频谱分析理论分析信号时, 时间频率的单位为 Hz, 用频谱分析光学成像时应采用空间频率, 空间频率定义为物面或像面上单位长度内正弦波光栅条纹的线对数或周期数, 单位为 lp/mm。

正弦波光栅条纹可看做是由无数条线光源或线像组成, 其亮度在一维方向上按正弦波规律调制。如下图(1.5)所示, 一个正弦光栅条纹像沿着 x 方向的亮度分布, 亮度正弦调制的频率为 f_x , 调制的振幅为 L_a , 条纹像的平均亮度为 L_0 。

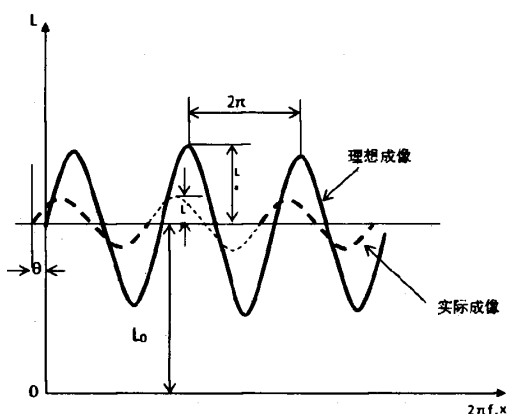


图 1.5 正弦光栅条纹像的亮度分布

Figure 1.5 Luminance distribution of the stripe image of a sinusoidal grating

如上图所示, 理想成像和实际成像时的条纹亮度为

$$L(x)=L_0+L_a\cos 2\pi f_x x \tag{1.1}$$

实际成像表达式为

$$L'(x)=L_0+L'_a\cos(2\pi f_x x-\theta) \tag{1.2}$$

在上式中： f_x 为亮度沿 x 方向正弦调制的频率，单位为 lp/mm; θ 为理想成像与实际成像条纹之间的相位差。与理想成像的条纹相比，实际成像条纹的平均亮度和调制频率均不变，但幅度已经下降，如下图(1.6)所示。正弦波幅度的下降表现为像条纹对比度下降，而正弦波相位的移动表现为像条纹位置的移动，像条纹对比度的下降是关注的重点^[37]。

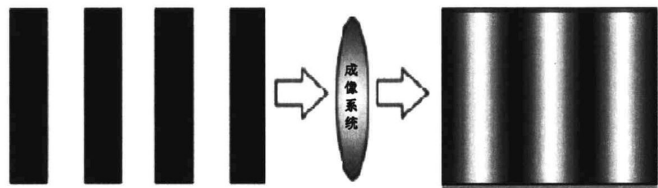


图 1.6 正弦光栅条纹像的亮度分布

Figure 1.6 Luminance distribution of the stripe image of a sinusoidal grating

正弦光栅条纹的对比度称为调制度 M ，定义为亮度正弦调制的振幅与平均亮度之比， $M=(L_{\max}-L_{\min})/(L_{\max}+L_{\min})$ 。其中 $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 为正弦光栅条纹亮度的峰值和峰谷。则 MTF 的定义为：

$$MTF(f)=\frac{M'(f)}{M(f)} \tag{1.3}$$

上式中， $M'(f)$ 和 $M(f)$ 分别为信号经过光学系统后输出信号的调制度和输入信号的调制度。调制传递函数常用来表征经过光学系统后调制度衰减的程度，如下图(1.7)所示。

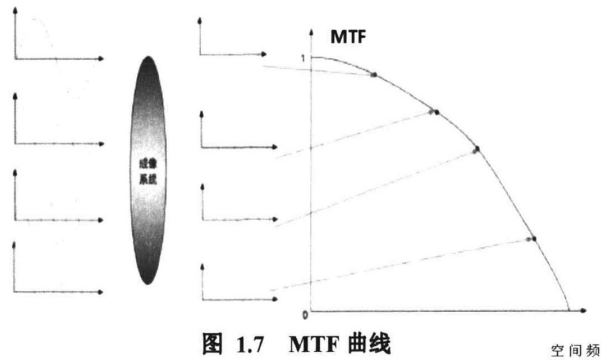


图 1.7 MTF 曲线
Figure 1.7 MTF curve

通过 MTF 曲线可以看到, 经过光学系统后实际成像与理想像在频率空间的调制比值 MTF 在空间频率处的值越大, 则代表在该频率下的成像质量越好。其值始终在 0 到 1 之间变化。当在低频时, 其 MTF 输出值接近于 1, 说明成像质量较高, 图像失真较小。随着空间频率的增大, 传递函数曲线降低, 则光学成像质量也随之逐渐下降。

1.2.3 光学传递函数

一个物体可视作有无数个光源组成的扩展面源, $o(\xi, \eta)$ 是物面亮度的分布函数称之为物函数。 $i(x, y)$ 是像面亮度分布函数, 称为像函数。假设光学系统可视为空间不变的线性系统, 即物面各点发出的光是不相干的, 并且具有相同的点扩散函数。则像面上 (x, y) 点的亮度是物面上所有点的点扩散函数在该点的叠加。

$$i(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} o(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad (1.4)$$

在上式中, 像函数 $i(x, y)$ 是点扩散函数 $h(x, y)$ 和物函数 $o(\xi, \eta)$ 的卷积, 即为:

$$i(x, y) = h(x, y) * o(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} o(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad (1.5)$$

根据傅里叶变换的性质, 两个函数卷积的傅里叶变换等于这两个函数傅里叶变换之积。

$$I(w_x, w_y) = H(w_x, w_y) \bullet O(w_x, w_y) \quad (1.6)$$

在上式中, $I(w_x, w_y)$ 和 $O(w_x, w_y)$ 分别为像和物的空间频率; $H(w_x, w_y)$ 为点扩散函数的傅里叶变换, 称之为光学传递函数; w_x, w_y 为空间二维频率。

对点扩散函数进行光学傅里叶变换, 可以得到光学传递函数。

$$H(w_x, w_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) \exp[-2\pi i(xf_x + yf_y)] dx dy \quad (1.7)$$

$H(w_x, w_y)$ 即为光学传递函数, 可记作 $OTF(w_x, w_y)$ 。OTF 是个复数可表达为

$$OTF(w_x, w_y) = \frac{I(w_x, w_y)}{O(w_x, w_y)} = |H| e^{i\psi} \quad (1.8)$$

上式中: $|H|$ 为复数 OTF 的模, 称为调制传递函数 MTF; ψ 为复数 OTF 的

辐角，称为相位传递函数。

1.2.4 红外焦平面的调制传递函数

在光学成像系统这个空间不变的线性系统中，在空间域的脉冲响应即点扩散函数，点扩散函数可以用来分析光学成像的图像质量。在频率域中，可以用傅里叶变换的方法在空间频率域的频率响应对图像质量进行评价。由于衍射、像差、探测器工艺缺陷等多种因素的影响，实际的光学系统对点光源所成像不是理想的几何点，而是扩散的弥散像斑^[38]，如下图(1.8)所示。

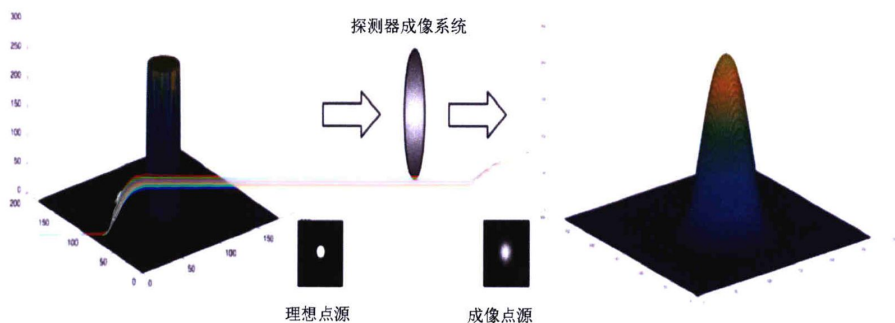


图 1.8 点扩散函数^[37]

Figure 1.8 Point Spread Function

以三维坐标来表示像平面上弥散斑的亮度分布，可得如上所示图像的亮度分布函数 $h(x, y)$ ，称之为点扩散函数(Point Spread Function, PSF)^[39-40]，点扩散函数可以认为是光学系统对点光源的脉冲响应，点光源可以看做是能量无限小的几何点源，数学上用 δ 函数表示理想的输入。

$$PSF(x, y) = h(x, y) * \delta(x, y) \quad (1.9)$$

又因为根据时域卷积等于频域相乘，则可表示为：

$$PSF(w_x, w_y) = H(w_x, w_y) \bullet \delta(w_x, w_y) \quad (1.10)$$

由于在频率域中 $\delta(w_x, w_y)$ 的值为 1，则

$$PSF(w_x, w_y) = H(w_x, w_y) \quad (1.11)$$

计算 PSF 的二维傅里叶变换可得到：

$$H(w_x, w_y) = PSF(w_x, w_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) \exp(-2\pi i (xw_x + yw_y)) \quad (1.12)$$

$$OTF(w_x, w_y) = MTF(w_x, w_y) e^{iPTF(w_x, w_y)} \quad (1.13)$$

其中 PTF 为相位传递函数。则 PSF 经过傅里叶变换后模值为 MTF。

理想点光源的获取十分困难，当一根亮度均匀的线光源经光学系统所成线状的像其亮度在沿截面方向也会扩散，其相当于点光源像的叠加。其亮度分布函数 $h(x, y)$ 称之为线扩散函数(Line Spread Function, LSF)^[41-42]，其效果如图(1.9)所示。

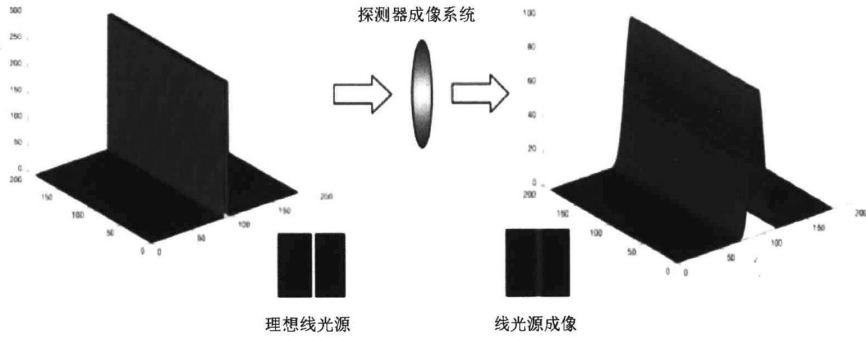


图 1.9 线扩散函数^[37]

Figure 1.9 Line Spread Function

由于线光源是由无数个点光源组成，故线光源所成像为每个点光源像的亮度叠加而最终得到了 LSF。根据叠加原理可得：

$$LSF = \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) dy \quad (1.14)$$

由一维傅里叶变换在 x 方向上可得：

$$OTF(w_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} LSF(x) e^{-i2\pi w_x x} dx \quad (1.15)$$

$$OTF(w_x) = MTF(w_x) e^{iPTF(w_x)} \quad (1.16)$$

在光学系统满足的空间线性不变时，用刀口靶标作为目标物进行成像时其所成的像的能量分布为类似于信号系统中的阶跃响应，称之为边缘扩散函数(Edge Spread Function, ESF)，如下图(1.10)所示。其所成像可以看作 LSF 在 x 方向上的叠加。

$$ESF(x) = \int_{-\infty}^x LSF(x) dx \tag{1.17}$$

由此可得要求取刀口 ESF 函数的 MTF 值必须先求出 LSF。

$$\frac{d}{dx}ESF(x) = LSF(x) \tag{1.18}$$

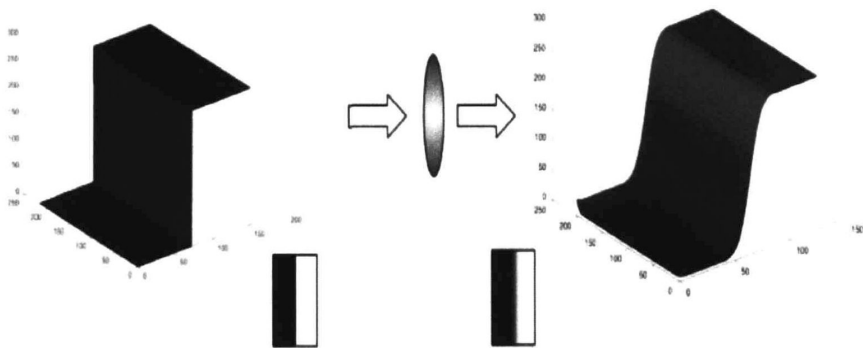


图 1.10 边缘扩散函数^[37]

Figure 1.10 Edge Spread Function

通过上述推导，可得到 PSF、LSF 与 ESF 之间的相互关系图如(1.11)所示：

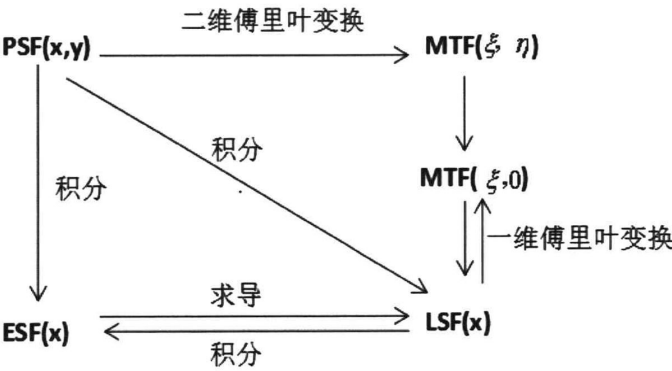


图 1.11 PSF、LSF、MTF 关系图

Figure 1.11 PSF、LSF、MTF relationship diagram

对于探测器的调制传递函数^[43]有以下定义。假设探测器光敏元为矩形，其宽度为 α ，系统在扫描方向上可以等效为一个宽度为 α 的扫描狭缝，探测器对物面上的一个点光源的脉冲响应是宽度等于 α 的矩形函数。则探测器采样的 MTF 为该矩

形函数的傅里叶变换, 为 sinc 函数。

$$MTF = \frac{\sin \pi f a}{\pi f a} = \text{sinc}(\pi f a) \quad (1.19)$$

上式中, f 为扫描方向的空间频率。则探测器即以光敏元尺寸 a 进行周期的空间采样。探测器相当于空间频率域的低通滤波, 探测器有两个重要的特征频率, 一个是 sinc 函数的第一个零点的频率 $f_c = \frac{1}{a}$, 称为探测器的采样 MTF 的截止频率。

$$MTF(f_c) = MTF\left(\frac{1}{a}\right) = 0 \quad (1.20)$$

另一个特征频率 f_0 等于探测器采样 MTF 截止频率的一半, 称为奈奎斯特频率。

$$f_0 = \frac{f_c}{2} = \frac{1}{2a} \quad (1.21)$$

由公式可见, sinc 是一个连续的函数, 当信号的频率超过截止频率时仍然会有探测器的 MTF 响应值。但是根据奈奎斯特定义, 当信号的频率大于二倍的采样频率时, 信号会产生混叠, 严重影响到器件的 MTF 的测量。

1.2.5 调制传递函数国内外研究现状

凭借调制传递函数在评价器件成像质量性能的客观性和有效性, 从上世纪 70 年代以来, 对 MTF 测试 CCD 器件的研究^[44-47]和实际工程测试逐渐展开, 并逐渐过渡到其它的诸如 CMOS 器件^[48-51]、红外焦平面器件及各种新型材料生成的光电成像器件中。上述的研究主要是针对于可见光器件的研究。

由于红外器件在军事用途上的重要性, 故对红外焦平面器件 MTF 测试于上个世纪 90 年代展开了研究。Luigi de Luca 建立了典型的高斯模型并对线列的红外扫描辐射计进行了测量^[52]。同年, KJ Barnard 和 GD Boreman 提出了一种测量 HgCdTe 探测器的调制传递函数的方法, 该方法采用了 3.39-micron HeNe 激光产生的不同空间频率的杨氏条纹, 扫描了整个探测器元件测量了器件的 MTF, 其结果与理论模型相一致^[53]。1992 年, Stanley J. Pruchnic 等实现了利用狭缝扫描法获得了离散采样的线扩散函数, 并测试了 3~5 μm , 8~12 μm 的线列红外器件 MTF^[54]。1993 年, A.H. Lettington 等人通过在 MTF 计算中引入离散傅里叶变换 (DFT), 解决了非等晕等问题^[55]。1995 年, Alexis P. Tzannes 和 Jonathan Martin

Mooney 等人采用改进的倾斜刀口法测试了 PtSi 面阵器件红外焦平面在两个方向的 MTF 值^[56]。1999 年,美国军方夜视研究人员发表了综述性文章分别描述了利用扫描狭缝法和倾斜刀口法等对红外热像仪的 MTF 进行了测试^[57]。2000 年 Bouchra Harchaoui 等利用具有八个衍射光栅的测试平台对红外焦平面进行了测试^[58]。2018 年, J. Schuster 对影响红外器件 MTF 的优化进行了仿真,利用已有的工艺参数对 MTF 进行预测^[59],在未来器件工艺越来越复杂的情况下预估器件 MTF 是一个很好的方法。

与国外相比,国内对 MTF 的研究和测试主要是针对镜头及可见光 CCD 等方面的测试研究^[60-65]。对于红外焦平面探测器 MTF 测试方法的研究比较少见,多为采购国外已有的整套商业测试系统。自行研制方面已报道出来的主要有南京理工大学和中电 41 所国防计量站。从 2000 年开始,南京理工大学的常本康教授领导的小组开始研制针对红外器件的 MTF 测试设备,测试方法采用扫描刀口法,光学系统采用黑体加平行光管,并最终完成了对长波 HgCdTe 单元器件的 MTF 测试^[66-68]。2013 年,中电 41 所利用双刀口扫描法对 320*256 的中波面阵红外器件进行了测试^[69]。同年,上海技术物理研究所的许中华搭建了短波 InGaAs 红外焦平面 MTF 的测试平台,主要集成了狭缝扫描法、刀口扫描法和双刀口扫描法,对 InGaAs 红外焦平面器件进行了测试^[70]。

随着红外探测器像元规模越来越大,像元尺寸越来越小,红外探测器 MTF 的测试方法和手段也越来越多,但有些方法将逐渐不再适用。如何将小尺寸像元的红外焦平面 MTF 测得准确以及如何通过工艺参数准确的预估器件 MTF 是未来测试的重点研究领域。

1.3 焦平面调制传递函数测试方法

1.3.1 正弦光栅靶标法

正弦光栅靶标法是使用一组不同频率的反射/透射正弦波模式的靶标来测量器件的 MTF^[71-74],常用的方法是直接基于 MTF 的定义,利用已知靶标的输入调制度和空间频率,直接成像后用输出的调制度来进行计算。靶标由多个不同频率的正弦光栅组成,但每次只能对一个空间频率值进行测试,一条完整的 MTF 曲线需要进行多次不同频率的测试。其缺点是正弦光栅靶标的制作难度较大,高质

量的正弦光栅靶标对于准确测量器件 MTF 具有重要意义。

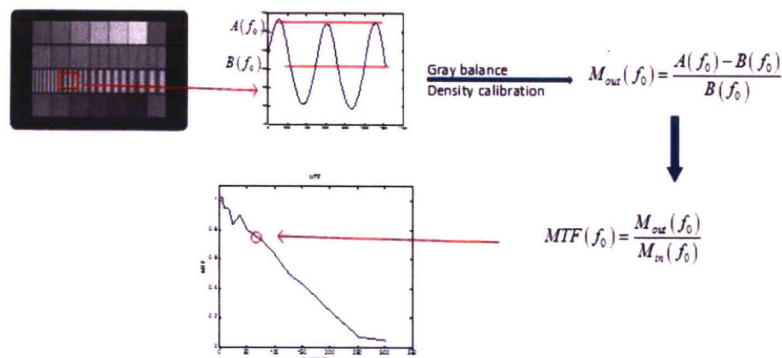


图 1.12 正弦光栅靶标测试 MTF^[71]

Figure 1.12 MTF of sinusoidal grating target test

1.3.2 点扩散函数测试法

一个理想点光源函数可以看作是二维脉冲函数，由于衍射和相差等影响，其在像面上的响应为一个弥散光斑，如下图（1.13）所示。其能量分布即称为点扩散函数(PSF)^[75-78]。脉冲函数在整个频率范围内是均匀的，系统输入一个单位冲击函数相当于给系统输入调制度为单位一的各种频率的正弦光栅。点光源测试探测器 MTF 时，将点光源成像在探测器的焦平面上，利用采集系统对焦平面上点扩散函数的能量分布进行采集后求导并经过傅里叶变换后可计算探测器 MTF 值。并且一次测试可以得到 x, y 两个方向上的 MTF 值。但在实际中，理想的点光源很难得到，因此其计算的 MTF 值需要修正，故此方法并不常用。

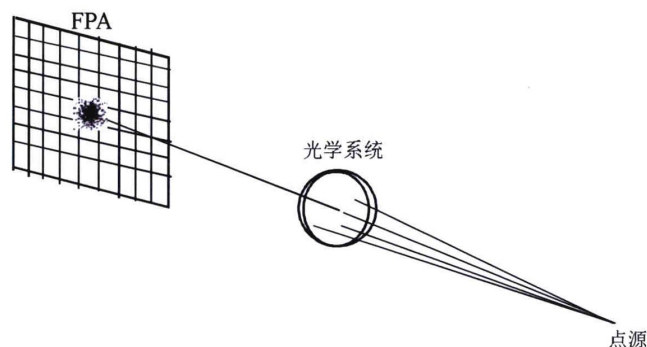


图 1.13 点扩散函数法测试 MTF

Figure 1.13 Testing MTF by PSF method

1.3.3 狭缝扫描测试法

假设一个均匀线光源经过探测器成像光学系统后成像,则在像面上所成像的形状在沿横截面方向也会扩散,即形成线扩散函数(LSF)。其可以视为一系列点光源所形成的点扩散函数在垂直于线方向上的叠加。在测试中,用一个宽度合适的狭缝来代替理想的线源,如下图(1.14)所示。线扩散像的函数是被测光学系统的光学传递函数和线光源的谱函数的乘积,由于线光源的频谱函数值恒为1,可得系统光学函数即线扩散函数的傅里叶变换。在实际测量中,利用位移平台将探测器某个像元相对于狭缝像进行移动并采集,得到 LSF 函数再计算探测器 MTF^[79-83]。该方法缺点为精准的狭缝制作难度较大,狭缝宽度不能太小,否则容易发生衍射。不能够很好的适用于日益减小的像元尺寸的探测器 MTF 测量。

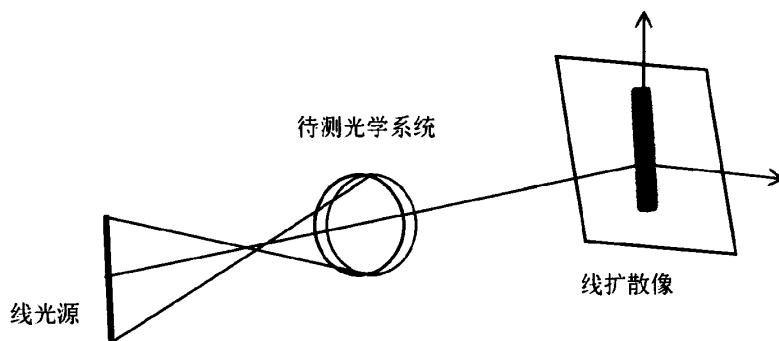


图 1.14 狭缝扫描法测试 MTF

Figure 1.14 Testing MTF by slit scanning method

1.3.4 刀口扫描测试法

刀口扫描法是使用光源照射刀口靶标,使得刀口靶标成像在探测器像元上。开始扫描时,使得探测器位于在刀口成像的暗区,以亚像素级的步进移动刀口或探测器,使得刀口处像元上的光通量逐渐增加,最后输出保持恒定。此时光通量与刀口位置的函数关系称为边缘扩散函数(ESF),如下图(1.15)所示。通过采集扫描过程中探测器的响应值,可以获得边缘扩散函数,再经过归一化求导得出探测器的 MTF 值^[84-87]。该方法测试时需要注意刀口刃边与探测器的像元严格平行。

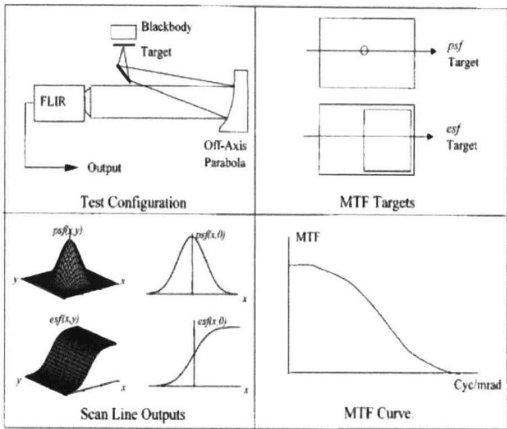


图 1.15 刀口扫描法测试 MTF^[71]

Figure 1.15 Testing MTF by edge scanning method

1.3.5 倾斜刀口测试法

基于刀口扫描法的测量标准较高、操作难度大等原因，提出了倾斜刀口法 [88-92]，该方法是对刀口扫描法的一个改进方法。倾斜刀口法的测试原理如下图 (1.16)所示，利用刀口倾斜一定的角度。此时刀口刃边横跨过探测器的一系列或几列像元，行数为 N 。当探测器的均匀性较高时，横跨过的像元近似为对一个像元进行了间隔为 $1/N$ 的扫描,对探测器实现了超采样。再将所横跨像元的输出值进行由暗到亮的排列生成 ESF 曲线，通过求导可计算出面阵器件的 MTF 值。该测试方法不用严格的将刀口对齐像元，简单且容易操作。但该方法多用于面阵器件，对于线列器件 MTF 测试需要进一步研究。

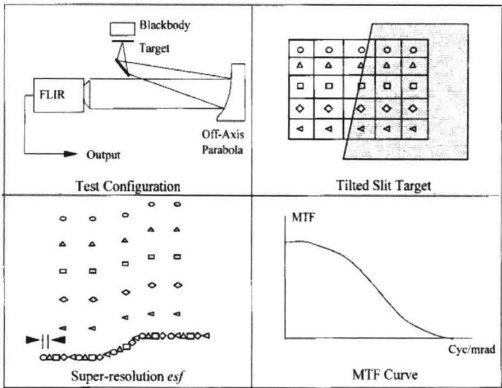


图 1.16 倾斜刀口法测试 MTF^[71]

Figure 1.16 Testing MTF by slanting knife edge method

1.3.6 方波靶标测试法

方波靶标是在一个靶标上由等间距的4个透光的狭缝组合而成。其中狭缝的高度、宽度和间距之间的关系满足7:1:1的比例关系，如下图所示。当黑体源的辐射以准直的平行光束从狭缝中透过时，入射至被测探测器。此时狭缝的宽度等于狭缝的间距，方波靶标的空间频率是狭缝中心距与平行光管焦距之比的倒数。

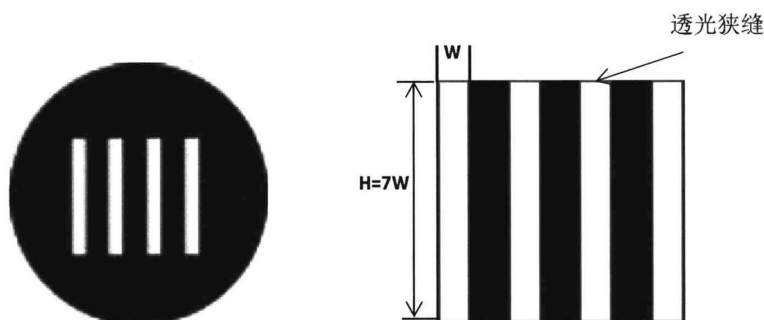


图 1.17 方波靶标法测试 MTF

Figure 1.17 Testing MTF by square wave target method

当红外扫描成像系统扫描过方波靶标盘的狭缝时，透射过的光束使得像元生成的电压输出与黑体温度对应的峰值为 $V_{\max}$ ，继续扫描至靶标盘的盘面不透光处时此时与盘面温度对应的谷值为 $V_{\min}$ 。信号波动的幅度与平均信号电平之比称为对比度传递函数 $CTF(f_x)$ 。

$$CTF(T_x) = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} \quad (1.22)$$

由于方波信号可用傅里叶级数展开为它的基频及倍频的交流信号之和，对比度传递函数也可表示为方波信号的基频及其倍频的 MTF 之和^[93-95]。如已测得方波信号的基频及其倍频的对比度传递函数，即可换算为该基频的 MTF，如下式所示：

$$MTF(T_x) = \frac{\pi}{4} [CTF(f_x) + \frac{CTF(3f_x)}{3} - \frac{CTF(5f_x)}{5} + \frac{CTF(7f_x)}{7} \dots] \quad (1.23)$$

当方波信号的频率大于 1/3 截止频率时，CTF 的高次项均可忽略。

$$MTF(T_x) = \frac{\pi}{4} CTF(f_x) \quad (1.24)$$

1.4 本论文的研究目的和内容结构

调制传递函数(MTF)是红外探测器的重要参数之一,可反映出器件所成像的质量优劣。随着红外焦平面的应用越来越广泛,测试红外探测器 MTF 的数值也更加受到重视,很多空间探测项目对红外探测器 MTF 值提出了明确的要求。本文以如何准确的测量 HgCdTe 红外焦平面线列及面阵器件的 MTF 值,以及器件结构对 MTF 的影响为目的开展了以下内容的研究。

首先利用现有的光学成像系统及各种硬件设备搭建 HgCdTe 红外焦平面的 MTF 测试系统。该系统要求能够同时满足线列探测器及面阵探测器的 MTF 测试。软件部分使用 Labview 进行编程实现了线列器件的像元输出采集及面阵器件的图像采集、显示和存储。

其次利用倾斜刀口法对面阵 HgCdTe 红外探测器进行了图像采集并进行了 MTF 计算。在面阵成像时对于出现的如盲元、非均匀性噪声、刀口靶标的倾斜角度计算及边缘扩散函数的拟合等问题都做出了研究。

最后针对倾斜刀口法只适合于测试面阵器件 MTF 值,对该方法进行改进,提出了‘K’字型靶标定位线列探测器及准确的计算倾斜角度以获得精确的 MTF 值进行了研究。使得该方法不仅可以测试面阵器件也可以对线列器件 MTF 值进行测试。

本论文的文章结构如下:

第一章引言,主要介绍了红外探测器的发展情况以及 HgCdTe 红外探测器的发展历程及趋势。并对调制传递函数的定义做了介绍,列举了红外探测器 MTF 测试的国内外现状及红外探测器 MTF 测试常用的方法,最后提出了本文的研究目的及内容结构。

第二章测试系统平台的搭建,分别介绍了测试平台中平行光管、黑体、位移平台、数据采集卡等测试系统硬件的构成。软件部分介绍了如何使用 Labview 进行面阵器件输出采集系统和线列器件输出采集系统的编程实现。

第三章面阵碲镉汞探测器 MTF 测试,首先介绍了面阵器件成像时条纹噪声对测试的干扰情况,提出基于多向小波对条纹噪声的去除方法。其次针对测试中盲元检测进行了算法优化,最后对面阵 MTF 的计算过程进行了阐述。

第四章线列碲镉汞探测器 MTF 测试,针对现有的倾斜刀口法测试设备只适用于面阵器件的测试,提出了测试线列器件 MTF 的改进方法。首先解决了刀口

刃边像与线列器件的相对位置的定位问题，其次对线列器件 MTF 的计算过程进行了改进。并与其他测试平台进行 MTF 测试和对比，以及将不同器件结构对探测器 MTF 值的影响做了测试及分析。

第五章器件的不稳定像元和 $1/f$ 噪声分析，本章主要针对红外焦平面器件长时间运行时有些像元会随机的产生阶段性跳跃的不稳定元现象。对探测器进行多帧采集分析并对不稳定元进行判别。将不稳定元与正常元的 $1/f$ 噪声进行了对比分析。

第六章总结与展望，对本文的成果进行了总结并对未来的研究方向进行了展望。

第 2 章 测试系统平台的搭建

2.1 HgCdTe 焦平面 MTF 测试方案的选择

在第一章中对测试红外探测器 MTF 的常用方法已经做了详细的介绍。每种测试方法都存在着其自身的优缺点，如下表(2.1)所示：

表 2.1 MTF 测试方法

Table 2.1 Measurement of the MTF

MTF 测试方法	优缺点
正弦光栅靶标法	调制度是按照正弦光栅的特定的频率定义的，采用透射光亮度正弦变化的光栅作为目标靶标，光栅的制作较为困难。
点扩散函数测试法	一次测试可以获得两个方向的 MTF 值。但理想点源的获得较为困难，红外探测器接受到的信号较弱，不利于能量分布的采集。
狭缝扫描法	可以经过扫描得到器件的 LSF 函数。但狭缝尺寸要与器件大小适配。
刀口扫描法	经过扫描可得到器件 ESF 函数。刃边区域要与器件严格平行。
倾斜刀口法	利用倾斜刀口获得超分辨率采样。该方法只适用于面阵器件。
方波传递函数法	测试方法简单，靶标容易制作。但一次测试只能获得一个空间频率的 MTF 值。

由上表可以看出，正弦光栅靶标法因为其制作过程难度较大，并且一条完整的 MTF 曲线需要制作多个正弦光栅，测试过程也较为繁琐；点扩散函数法在实际的测试中因为理想点源的获得较为困难，且红外探测器能够接受到的点源能量较弱，不能很好的提取出 PSF 的能量分布，不利于后续的 MTF 计算；狭缝扫描法在实际的测试中存在下面的问题，首先狭缝的宽度要求小于像元尺寸，但随着像元尺寸的越来越小，狭缝宽度若太小的话容易发生衍射。其次要求测试时狭缝与探测器要严格的对齐，测试准确性要求较高；刀口扫描法需要器件与刀口严格对齐，该方法的测试受到噪声的干扰较大^[96]；方波传递函数法存在着一次只能测试一个空间频率的 MTF 值，要多次进行靶标切换，测试方法复杂。

综合考虑，最终选取倾斜刀口法对 HgCdTe 红外焦平面器件 MTF 值进行测试。倾斜刀口法在使用过程中刀口不需要严格的与器件像元对齐，测试方法简单。虽然该方法只适用于面阵器件的测试，在论文第四章节对该测试方法进行了改进

使得该方法可用于线列器件的 MTF 测试，并对测试结果进行了对比。

2.1.1 测试器件

本文所选用的测试对象为上海技术物理研究所材器中心所研制的 HgCdTe 系列红外焦平面探测器。本次选取的测试对象有面阵器件和线列器件，面阵器件的大小为 320*256，线列器件为一字型排列不同工艺结构的焦平面器件，现将器件规格列下表(2.2)所示：

表 2.2 测试器件

Table 2.2 Test device

器件规格	器件波长	像元尺寸	中心距
320*256	4.8μm	28μm*28μm	30μm
1024*1	4.5μm	14μm*14μm	28μm
512*1	4.6μm	28μm*28μm	56μm
80*1	4.6μm	45μm*56μm	56μm

2.1.2 测试镜头标定

在测试线列/面阵器件 MTF 中所用到的中波红外镜头响应波段为 3~5 μ m，焦距为 110mm，F#=2 的中波红外镜头镜头 MTF 值测试标定如下图（2.1）所示。T 和 S 分别为切线方向和弧矢方向的 MTF 值。

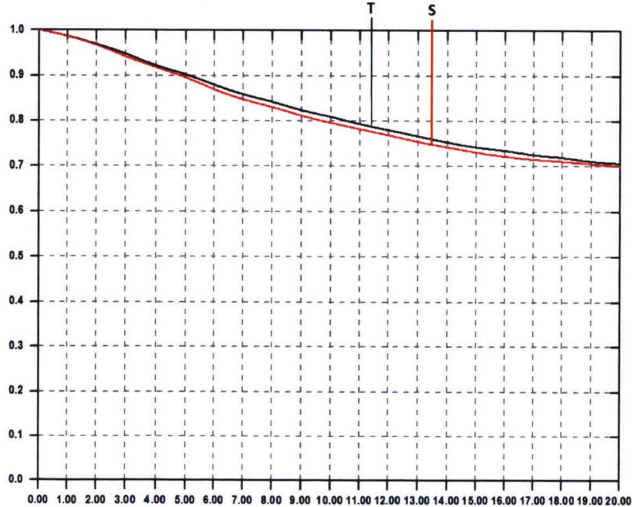


图 2.1 红外镜头 MTF 标定

Figure 2.1 MTF calibration of infrared lens

2.2 测试系统搭建

利用倾斜刀口法测试器件 MTF 的原理如下, 面源黑体对靶标盘上的刀口靶标进行辐射并生成刀口像, 刀口像光源经过一个平面反射镜和离轴抛物面镜使得刀口靶标像落在红外探测器的焦平面上, 再通过三维位移平台的移动对探测器进行调焦和刀口刃边位置的对准, 通过数据采集系统对有效 ESF 曲线进行采集存储, 最后经过求导和傅里叶变换计算出探测器 MTF 值。

2.2.1 黑体选择

测试系统的面源黑体采用以色列 CI 公司 8 英寸的 SR-800R 型面源黑体, 如下图(2.2)所示。其通过两个温度传感器控制温差, 分别测量室温(称为目标)和发射温度。该面源黑体具有升降温度速度快、温度控制精度高及均匀性好。通过视窗操作的触屏界面可对黑体的辐射温度进行设定。



图 2.2 面源黑体

Figure 2.2 Plane blackbody

该面源黑体参数如下表(2.3)所示:

表 2.3 黑体参数

Table 2.3 Plane blackbody parameter

技术指标	参数范围
绝对温度范围℃	0~125
温差范围℃	-25~100
均匀度℃	± 0.010
温度精度℃	0.015@ $\Delta T < 0$, 0.007@ $0 < \Delta T < 50$, 0.015@ $\Delta T > 50$
稳定度℃	± 0.003 @ $\Delta T < \pm 10$
发射率	0.97± 0.02

2.2.2 靶标选择

CI 具有专业的光电测试系统的红外靶标制造技术，其红外靶标具有较高精度。该靶标由薄的铂材料制成，其一面涂有高发射率黑色涂层，另一面正对为高效反射能量抛光镜，避免热量的聚积。在测试 MTF 时分别用到了两个靶标，方形靶标用来调整焦距使得靶标成像落在红外探测器焦平面上，半月型靶标用来测试探测器 MTF。靶标如下图(2.3)所示。

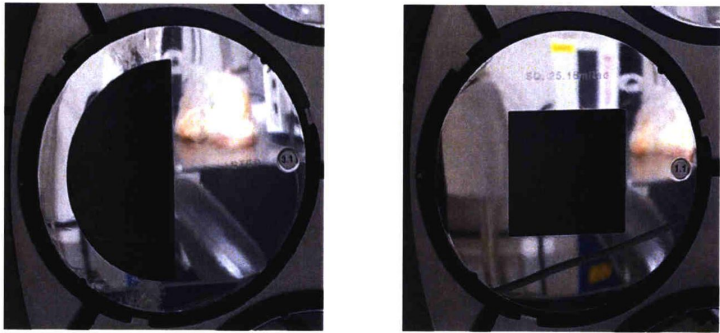


图 2.3 测试靶标

Figure 2.3 Test target

2.2.3 平行光管选择

本文选择了 CI 公司的离轴抛物面镜式平行光管，如下图(2.4)所示。靶标位于离轴抛物面镜的焦点上，靶标经黑体辐射后的光线经过一个与水平轴 45°的平面反射镜反射后再经抛物面反射镜后成为平行光。可将短波红外到长波红外靶标

所成的红外图像清晰地投影在无限远处,再经过红外镜头后聚焦在红外探测器焦面上。由于反射系统受材料限制较小,完全没有色差,系统透过率高;离轴系统不存在中心遮拦且焦点被引到主反射镜之外。计算 MTF 所用到的方型靶标和半月型靶标的孔径尺寸分别为 $\phi_s=40\text{mm}$ 和 $\phi_h=70\text{mm}$ 。平行光管焦距为 $f_c=1778\text{mm}$,对镜头实际焦距利用放大率法进行计算:

$$f_{len} = f_c \frac{\phi_I}{\phi_O}$$

其中 ϕ_I 和 ϕ_O 分别为靶标像的大小和靶标大小。对方型靶标进行计算可得:测试用成像红外镜头的焦距为 $f_{len}=112\text{mm}$,根据下式可计算出靶标所成像尺寸D:

$$D = \frac{\phi}{f_c} f_{len}$$

其中方型靶标和半月型靶标像的大小分别为2.5mm和4.4mm。满足于测试器件中规格为80元中心距为56 μm 的总长约为4.5mm尺寸的器件。

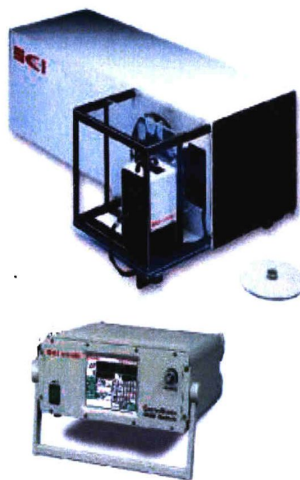


图 2.4 红外平行光管

Figure 2.4 Infrared collimator

其参数如下表(2.4)所示:

表 2.4 红外平行光管参数

Table 2.4 Infrared collimator parameter

平行光管参数	数值
孔径直径	254mm
焦距长度	1778mm
视场大小	1.6°
波长范围	0.4μm~15μm

2.2.4 三维位移平台

采用了法国 HGH 品牌的三维位移平台，该电动三维位移平台是一款无刷直线伺服电机驱动的电动直线三维位移台，融合了高速高精度的特点，具有亚微米的定位精度，其可以提供高负载能量和大驱动力；三维移动水平行程可达到 300mm，垂直行程可达 70mm，重复定位的精度可达 1μm。如下图(2.5)所示：

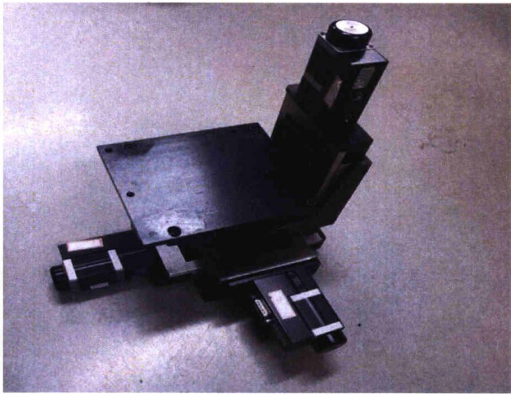


图 2.5 三维位移平台

Figure 2.5 3D displacement platform

2.2.5 红外焦平面 MTF 测试方案

HgCdTe 红外焦平面测试系统方案如下图（2.6）所示，测试靶标放置在面源黑体的正前方，光源采用差分面源黑体对靶标进行辐照，靶标位于平行光管中离轴抛物面反射镜的焦点处，通过平行光管形成无限远处的靶标像，靶标像经过红外镜头后聚焦在 HgCdTe 红外探测器的焦面上，IRFPA 在三维精密位移移动平台

的驱动下，对靶标进行聚焦调试。在利用 NI 高速发射卡对读出电路进行驱动，使红外焦平面器件正常工作输出电压信号，最后经 A/D 转换后送到计算机中处理数据，最后通过对采集数据的计算得到 HgCdTe 红外焦平面 MTF 曲线。

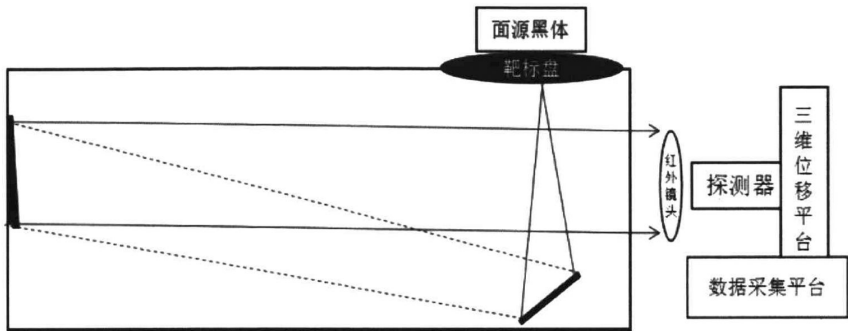


图 2.6 MTF 测试系统

Figure 2.6 MTF test system

2.3 基于 Labview 的线列/面阵 MTF 数据采集系统

基于红外焦平面 MTF 测试系统的搭建主要由两个部分组成，分别是硬件电路数据采集系统以及有效数据采集软件部分。硬件系统主要采用 NI 采集板卡、安捷伦直流电源、及 NI 的数据发送卡组成；软件采集显示部分主要采用 NI 的 Labview 软件编程实现，最后实现了对面阵器件及线列器件的数据采集、存储、显示等功能。其数据采集原理图如下图(2.7)所示：

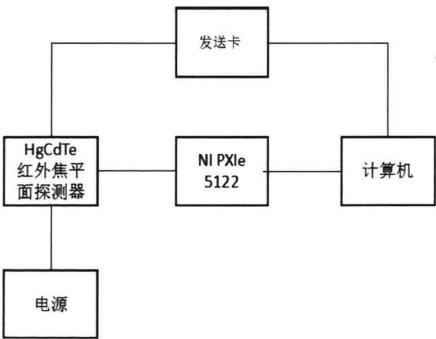


图 2.7 数据采集系统

Figure 2.7 Data acquisition system

2.3.1 数据采集系统硬件搭建

在测试系统的硬件搭建, 选择使用了 NI 公司的 PXIe-1708 型号的机箱, 它具有基于 NI Scope 实时数据采集系统设计有 5 个混合插槽, 3 个 PXI Express 插槽, 工作温度范围为 0°C 到 50°C , 总功率达 300W, 每插槽高达 250MB/s 的带宽和 1 GB/s 的系统带宽。可满足各种测试和测量应用的需求。它每个插槽中都接受 PXI Express 模块, 最多 5 个插槽支持可兼容标准 PXI 混合总线的模块。由机箱中嵌入的 NI PXIe-5122 高速数字采集模块搭建了数据采集硬件平台。与传统的测控技术相比, PXI 平台具有模块化特点, 因此一个系统中往往需要集成机箱、控制器、以及多种不同的模块, 不仅可以确保系统模块之间的兼容性, 也可以缩短用户系统开发的时间, 开发灵活性高。其核心为部分为 PXI-5122 高速数字采集卡, 其具有双输入通道, 单个通道的实时采样率达到 100MS/s, 具有 14bit 的分辨率、动态范围大、板上存储容量大的特点。电源部分采用安捷伦的 N6700B 型号电源, 其可以提供恒定的直流电平, 并且具有很低的噪声输出, 更重要的是采用侧面通风, 因此可以与其他仪器叠加放置, 节省了测试空间, 如下图(2.8)所示。

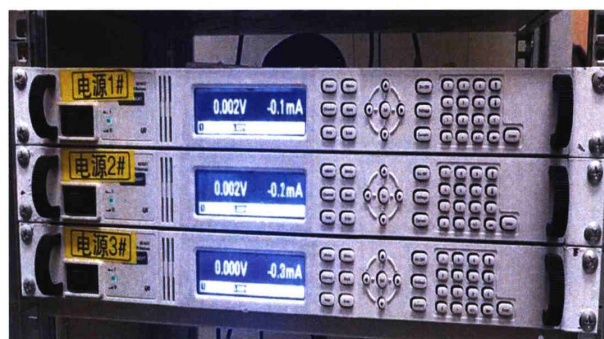


图 2.8 安捷伦电源

Figure 2.8 Agilent power supply

其测试流程为, 由上位机中的 NI 公司的 HSDIO 逻辑可编程软件将探测器读出电路的时序经过发送卡发送至探测器上的驱动电路板上, 对读出电路进行时序的驱动, 使得探测器正常工作。同时将电源也连接到探测器上的电路板上, 给探测器提供稳定的工作电压。探测器正常工作后, 将采集到的信号经过与之相连的电路板上的输出端口发送到 PXIe-5122 采集卡中, 采集卡将采集到的数据传送到上位机端进行显示和存储。整个硬件采集系统如下图(2.9)所示。

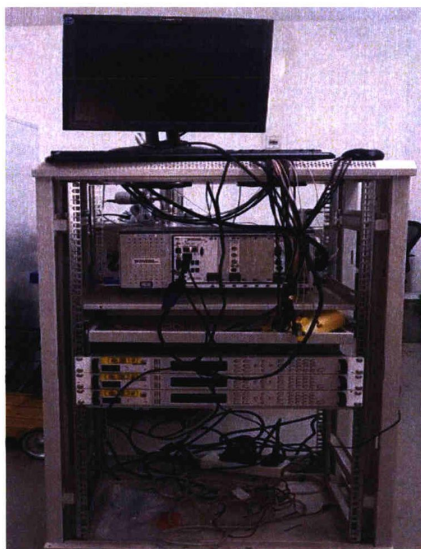


图 2.9 数据采集系统硬件

Figure 2.9 Data acquisition system hardware

2.3.2 红外焦平面器件驱动时序

HgCdTe 红外焦平面探测器工作时需要利用时序对读出电路进行驱动以使器件正常工作。其工作模式有两种积分模式，分别是 IWR（边积分边读出模式）和 ITR（先积分后读出模式）两种模式，积分时间控制通过帧同步时序来进行控制。当 REST_B 为器件上电复位控制，在器件上电时要求保持低电平，在正常工作时必须为高电平。其中 DATA 为控制时序，为 1Bit START+31DaTA Bits 组成，其中一组为窗口控制，另一组为工作模式、增益等，命令控制。命令控制可以调节功耗、调节总电流、调节偏压及设置输出通道的选择等作用。时须通过 NI HSDIO 高速数字发送卡进行发送至探测器的连接电路中。

2.3.3 数据采集系统软件

本系统软件平台的测试编程主要由 Labview 软件实现^[97-98]。LabVIEW 是一种程序开发环境，是 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench 的缩写，由美国国家仪器（NI）公司研制开发，与 C 语言和 BASIC 开发环境较为相似，但 LabVIEW 语言与其他计算机语言具有显著区别：其他计算机语言多是采用文本语言编写代码，而 LabVIEW 使用的是图形化 G 语言编写程序，程序表达形式为框图的形式。和标准的实验室仪器相对比，Labview 具有更高的灵活性，并且

可以定义仪器的功能，可以根据需要创建所需要的任何类型的虚拟仪器。

Labview 程序由一个或者多个虚拟仪器(VI)组成，之所以称为虚拟仪器是因为它们的外观和操作通常是模拟了实际的物理仪器。每一个 VI 都由三个主要的部分组成：前面板、框图和图标。前面板是 VI 的交互式用户界面，它模拟了物理仪器的前面板，包含有常见的物理仪器的旋钮、按钮、图形、和指示器等，用户通过鼠标和键盘进行输入，在输出的屏幕控件上观察程序运行的结果。

框图是 VI 的程序源代码，由 Labview 的图形化编程语言构成，框图是实际可执行的程序。框图的构成由子 VI、内置函数、常量和程序执行控制结构。对象之间使用连线来定义它们之间的数据流向。前面板上的对象对应框图上的终端，这样数据可以从用户传送到程序并可再回传给用户。使一个 VI 能作为子程序用于另外一个 VI 的框图中使，该 VI 必须使用连接器图标。图标是 VI 的图形表示形式，在另外的 VI 框图中使用时作为一个对象。当 VI 作为子 VI 使用时，其连接器用于从其他框图中连线数据到当前 VI，作用类似于函数中的参数。

面阵器件的 Labview 数据采集系统主要是对探测器输出的刀口靶标像进行数据采集以及实时显示并进行存储；线列器件主要实现了线列器件输出值曲线的实时显示及存储，对于后续观察线列器件与刀口靶标刃边的相对位置起到了准确判断作用，后续的 MTF 计算都在 Matlab 语言中完成。软件界面上可以对采集过程中的触发延时、帧周期、采样频率及采集帧数和像元显示个数等做出配置。面阵及线列采集软件如下图(2.10)所示：

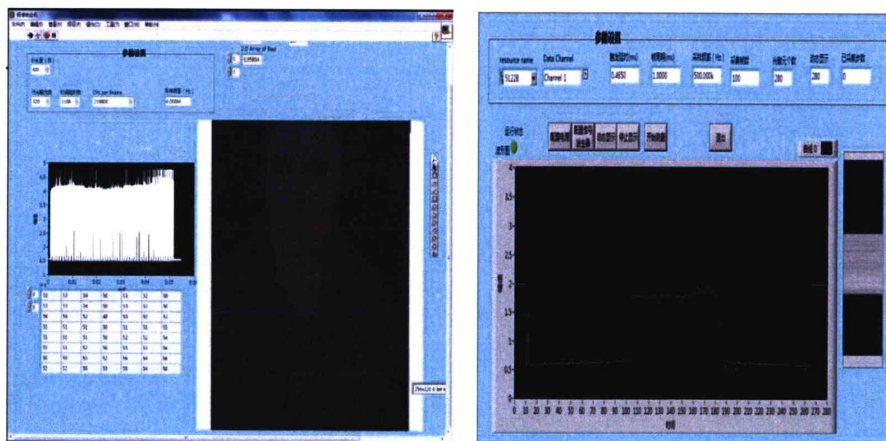


图 2.10 数据采集系统软件

Figure 2.10 Data acquisition system software

数据采集系统软件流程图如下图(2.11)所示:

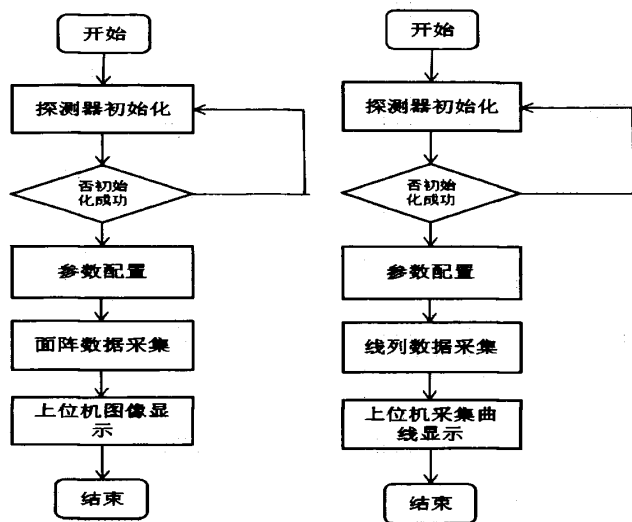


图 2.11 数据采集系统流程图

Figure 2.11 Data acquisition system flow diagram

2.4 本章小结

本章主要对测试系统的方案和软硬件系统的搭建分别进行了介绍。首先对各种常用器件 MTF 测试方法进行了对比, 分析和对比了每种方法的优点和缺点, 最后结合实际测试器件选取了倾斜刀口法作为本课题研究的重点。其次对系统搭建中所用到的硬件设备逐一进行了介绍。在软件部分主要简单介绍了 Labview 软件的作用和主要组成部分, 并对面阵器件和线列器件的软件流程做了描述。最后实现了面阵器件对红外图像的采集及实时显示, 以及线列器件对线列响应值的输出和实时显示功能。完成了计算 MTF 前期数据采集、存储部分的准备工作。

第3章 面阵碲镉汞探测器 MTF 测试

倾斜刀口法是测试面阵器件调制传递函数的主要方法之一。其原理是利用焦平面面阵器件对刀口靶标进行成像，再对成像的刀口刃边区域数据进行采集，在获得刃边像区域的边缘扩散函数后再进行 MTF 的计算。

准确边缘扩散函数的获取对于后续 MTF 计算至关重要。本章主要是针对计算面阵碲镉汞红外器件 MTF 过程中存在的固定图形噪声、焦平面盲元检测、随机噪声及边缘扩散函数拟合等问题进行研究，以获取更加精准的 MTF 值。

3.1 条纹噪声去除

红外焦平面探测器 (IRFPA) 在制备过程中由于器件工艺水平如钝化、光刻、倒焊及读出电路等影响，存在着如图(3.1)所示固定系统条纹噪声以及响应值很高和无响应的器件盲元。在实际的探测器盲元检测应用中，系统条纹噪声的存在会对盲元检测精度造成较大干扰，会导致盲元检测的误判。精准的盲元检测^[99-101]对于后续利用红外图像计算探测器 MTF 极其重要。

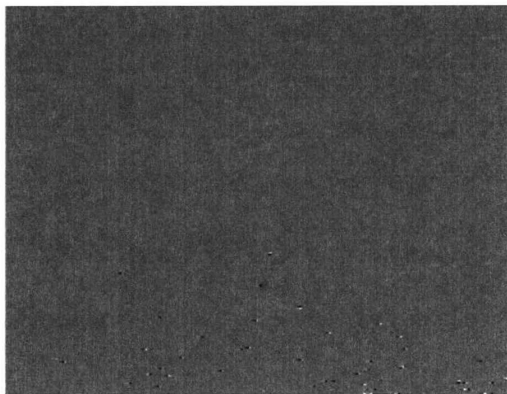


图 3.1 条纹噪声图

Figure 3.1 Stripe noise diagram

为了尽可能的去除条纹噪声对盲元检测的干扰，引入小波变换方法将红外焦平面成像从时域空间变换到频域空间，在频域空间中利用噪声存在于高频部分而可以更好的对条纹噪声予以去除。

3.1.1 二维小波变换

(1) 小波背景

离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 不仅具有有效、高度直观的描述框架外, 相比较于傅里叶变换更加有利于深入了解图像的空间和频域特性。离散小波变换指的是围绕变换核对循环出现, 不仅使用的变换核不同, 而且所使用的的展开函数的核对和它们的应用方法也不同。因为 DWT 包含了各种独特但相关的变化, 不能写出单一的完全描述公式。而是可以用变换核对或定义这些变换核对的一组参数来表征每个 DWT。各种变换核对与变换展开函数是变换频率和持续时间受限制的“小波”, 如图 (3.2b) 所示。

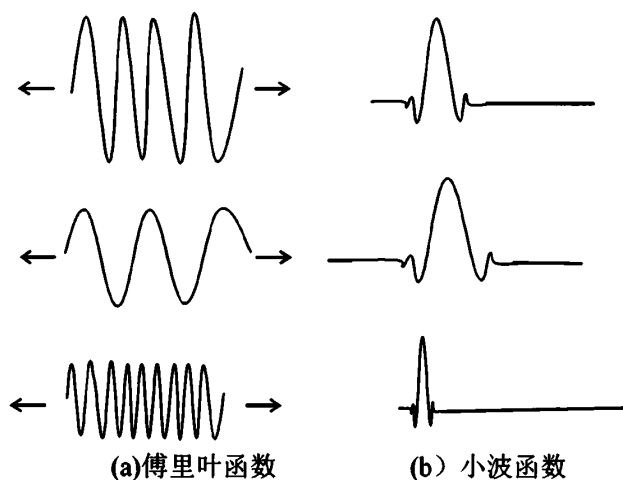


图 3.2 傅里叶变换函数和小波函数

Figure 3.2 Fourier transform function and wavelet function

离散小波变换具有一下性质:

①可分离性, 可伸缩性和平移不变性。变换核可用三个可分的二维小波来表示:

$$\begin{aligned}
 \psi^H(x,y) &= \psi(x) \varphi(y) \\
 \psi^V(x,y) &= \varphi(x) \psi(y) \\
 \psi^D(x,y) &= \psi(x) \psi(y)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

其中, $\psi^H(x,y)$ 、 $\psi^V(x,y)$ 和 $\psi^D(x,y)$ 分别被成为水平、垂直和对角小波, 并且是二维可分的尺度函数。

$$\varphi(x,y) = \varphi(x) \varphi(y) \tag{3.2}$$

每个二维函数都是两个一维实函数的平方可积的尺度和小波函数的乘积：

$$\varphi_{j,k}(x)=2^{j/2} \varphi(2^j x-k) \quad (3.3)$$

$$\psi_{j,k}(x)=2^{j/2} \psi(2^j x-k) \quad (3.4)$$

平移参数 k 决定了一维函数沿 x 轴方向的位置, 尺度 j 决定一维函数的宽度, 即沿 x 轴方向有多窄和多宽, 并且按 $2^{j/2}$ 控制它们的高度或者振幅。

②多分辨率的兼容性。

1) $\varphi_{j,k}$ 对整数平移是正交的。

2) 在低尺度或低分辨率下, 以一系列 $\varphi_{j,k}$ 的展开函数来描述的一组函数包含在可以用高尺度描述的函数中。

3) 唯一可在每个尺度上描述的函数是 $f(x)=0$ 。

4) 在 $j \rightarrow \infty$, 任何函数都可以任意的精度来描述。

③正交性。对于一组一维可测的、平方可积函数, 展开函数形成正交或双正交基。之所以称为基, 是因为对于每个可描述函数必须有唯一一组展开系数。正如傅里叶核介绍中说明的那样, 对于实数正交核, 有 $g_{u,v}=h_{u,v}$ 。对于双正交情况:

$$\langle h_r, g_s \rangle = \delta_{rs} = \begin{cases} 1 & r = s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3.5)$$

g 被称为 h 的对偶。对于带有尺度和小波函数 $\varphi_{j,k}(x)$ 和 $\psi_{j,k}(x)$ 的双正交小波变换来说, 对偶分别表示为 $\tilde{\varphi}_{j,k}(x)$ 和 $\tilde{\psi}_{j,k}(x)$ 。

(2) 快速小波变换

上述性质的重要推论 $\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 可以用它们自身的双分辨率的线性组合来表示。经过级数展开为:

$$\varphi_{j,k}(x) = \sum_n h_\varphi(n) \sqrt{2} \varphi(2x-n) \quad (3.6)$$

$$\psi_{j,k}(x) = \sum_n h_\psi(n) \sqrt{2} \varphi(2x-n) \quad (3.7)$$

其中系数 h_φ 和 h_ψ 分别被称为尺度和小波矢量。它们是快速小波变换 (Fast Wavelet Transform, FFT) 滤波器的系数, DWT 的迭代计算方法显示在图 (3.3) 中。 $W_\varphi(j, m, n)$ 和 $W'_\psi(j, m, n)$ ($i=H, V, D$) 输出是在尺度 j 处的 DWT 系数。方框中包括时间反转尺度和小波矢量, $h_\varphi(-n)$ 和 $h_\psi(-m)$ 分别是低通和高通分解滤波器。包含 2 和向下箭头的单元表示下取样, 即从点的序列中每隔一个点提取一点。

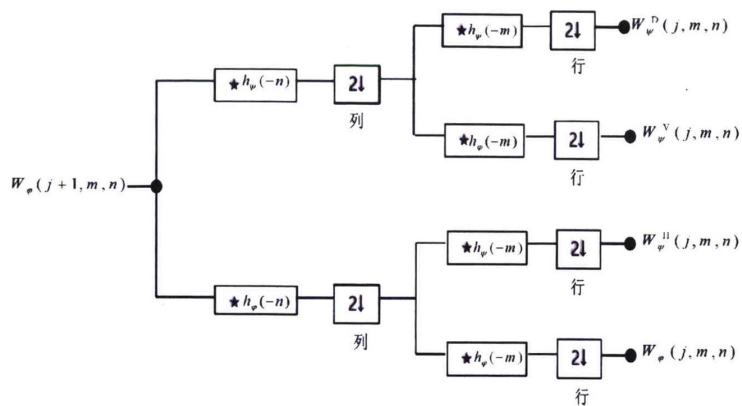


图 3.3 二维快速小波变换

Figure 3.3 2D fast wavelet transform

上图中的滤波器把输入分解为 4 个低分辨率(或低尺度)分量， W_φ 系数通过两个低通滤波器产生并被称为近似系数； $\{W_\varphi^i(j, m, n), i=H, V, D\}$ 分别是水平、垂直和对角线细节系数。在方框中，输出 $W_\varphi(j, m, n)$ 可用作后来的输入 $W_\varphi(j+1, m, n)$ ，用于创建低分辨率分量。图像分解后的示意图如下图(3.4)所示。

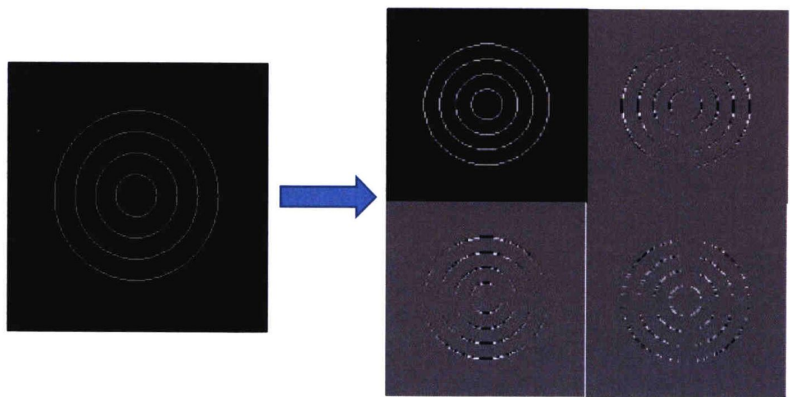


图 3.4 二维小波分解图

Figure 3.4 2D wavelet decomposition diagram

(3) 快速小波反变换

与相对应的正向变换一样，快速小波反变换也可以用数字滤波器迭代地计算

出来。如图(3.5)所示,利用重建滤波器组进行迭代,每次迭代时,尺度 j 的4个近似和细节子图像被上取样,即通过在每个元素间插入零,并通过两个一维滤波器卷积而成,一个执行子图像的列操作,另一个执行行操作。将两个结果相加后就产生了 $j+1$ 尺度的近似值,一直重复到直到原始图像被重构为止。在卷积中应用的滤波器是正在变换中使用的小波函数。

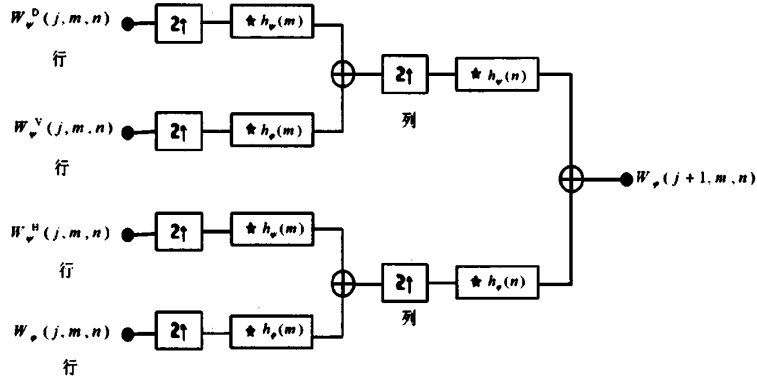


图 3.5 二维快速小波逆变换

Figure 3.5 2D fast wavelet inverse transform

3.1.2 双密度双树复数小波变换

二维离散小波虽然是在时频空间中分析信号的有效工具^{[109]36-42},但其仍然具有以下缺点:(1)较差的方向性。二维离散小波将信号分解为水平、垂直、对角三个方向的高频小波系数,不足以表达更高维的频域信息。(2)计算冗余度较大,计算代价大。1999年,Kingsbury提出了双树复数小波变换(Dual-tree Complex Wavelet Transform, DTCWT)^[102],其具有6个方向的能量分布信息及更高的近似平移不变性和更少的冗余度。2004年,Ivan Selesnick将双密度小波(Double-density Wavelet)和双树小波结合提出了双密度双树复数小波变换(Double-density Dual-tree Complex Wavelet Transform, DD-DTCWT)^[103]。该小波结合了双密度小波和双树复数小波各自的特点和优势。

双密度双树复数小波变换是基于两个不同尺度函数和四个不同的小波而设计的同时具有双密度小波和双树小波变换性质的小波变换。其中两个小波函数是将另外的一个函数进行偏置一半得到的:

$$\psi_{h,1}(t) \approx \psi_{h,2}(t-0.5); \quad \psi_{g,1}(t) \approx \psi_{g,2}(t-0.5) \quad (3.8)$$

其中 $\psi_{g,1}(t)$, $\psi_{h,1}(t)$ 及 $\psi_{g,2}(t)$, $\psi_{h,2}(t)$ 互为近似希尔伯特变换对。

$$\psi_{g,1}(t) \approx H\{\psi_{h,1}(t)\}, \quad \psi_{g,2}(t) \approx H\{\psi_{h,2}(t)\} \quad (3.9)$$

二维双密度双树小波是由两个过采样滤波器组进行分解, 第一滤波器组 $h_i(n)$, 和第二滤波器组 $g_i(n)$, $i=0,1,2$, 如图(3.6)所示。

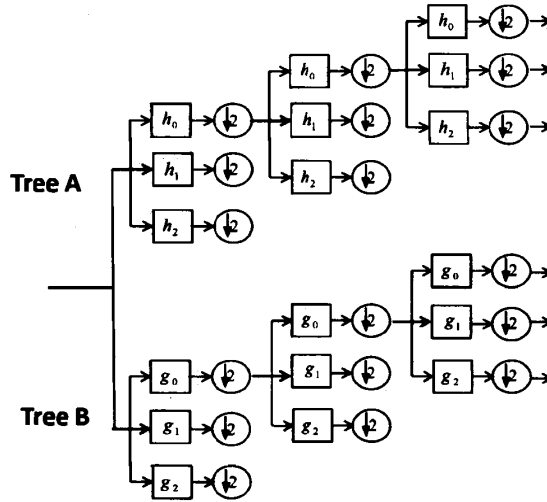


图 3.6 二维双密度双树小波变换

Figure 3.6 2D double density double tree wavelet transform

针对双密度双树小波只是对低频部分进行分解而忽略了高频部分信息, 二维双密度双树复小波变换对高频信息也进行了行和列的分解, 这种变换是对同一个输入数据通过两个平行的二维双密度双树小波进行变换, 对行和列用不同的滤波器组进行分解。这意味着它产生了两倍于二维双密度双树小波变换后的能量分布方向。其中一个小波变换可以被解释为复数二维小波函数的实部, 而另一个可以解释为虚部。其所用迭代滤波器组如下图(3.7)所示:

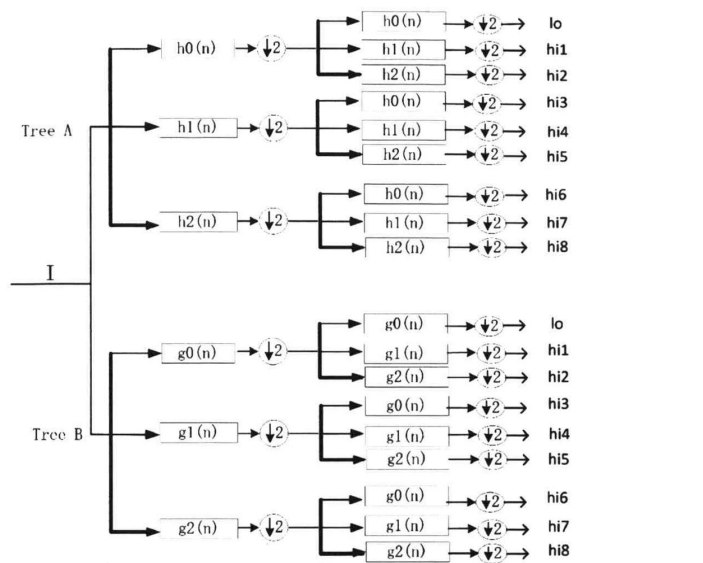


图 3.7 二维双密度双树复数小波变换

Figure 3.7 2D double density double tree complex wavelet transform

输入图像经过滤波器的分解后在每一分解层上生成 16 个小波系数，其中的主方向的小波系数为 12 个，每个方向对应两个小波系数，分别为该方向的实部和虚部。相比双密度双树小波变换小波系数多了 6 个方向。因此 DD-DTCWT 较普通二维小波变换相比具有更多的方向选择性及更加精确的高频细节信息。如下图(3.8)所示。

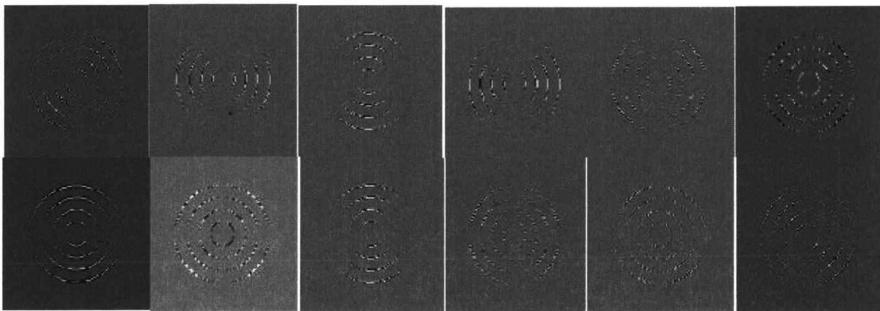


图 3.8 DD-DCWT 分解图

Figure 3.8 DD-DCWT decomposition diagram

3.1.3 小波去除条纹噪声算法

图像经过小波变换后，Mallat 指出小波系数在各个尺度的统计直方图可以用概率密度函数来近似，其直方图的分布近似的满足广义高斯函数的分布。因此利

用小波分解的高频小波系数直方图分布,找出条纹噪声影响较大的小波系数,并利用子带间的小波系数的 KLD (Kullback-Leibler Distance) 距离[104-105],对包含条纹噪声较大的小波系数在进行单支重构时赋予不同的权重值。

(1) 小波系数的广义高斯分布函数

广义高斯分布函数的表达式为:

$$P(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{2\alpha\Gamma(1/\beta)} e^{-(|x|/\alpha)^\beta} \quad (3.10)$$

其中, Γ 函数为:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt \quad (3.11)$$

其中 α , β 分别称为广义高斯函数的尺度参数和形状参数。经过 DD-DTCWT 分解的小波系数统计直方图也满足广义高斯函数的分布如(图 3.9)所示。在高频中找出一幅明显具有竖直条纹噪声的小波系数图像,利用 KLD 距离,计算出其余小波系数与具有噪声条纹的距离,即相似度。根据距离给每个小波系数在进行单支重构时赋予不同权值。

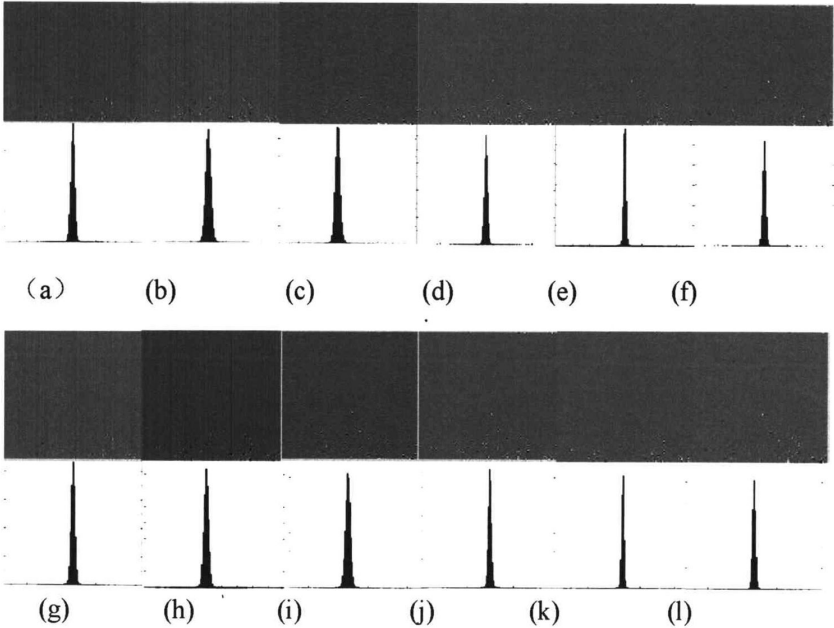


图 3.9 DD-DCWT 分解图和高斯分布图

Figure 3.9 DD-DCWT decomposition diagram and Gauss distribution diagram

KLD 距离表示如下:

$$D(p(;\alpha_1,\beta_1)\|p(;\alpha_2,\beta_2))=\log\left(\frac{\beta_1\alpha_2\Gamma(1/\beta_2)}{\beta_2\alpha_1\Gamma(1/\beta_1)}+\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\left(\frac{\Gamma((\beta_2+1)/\beta_1)}{\Gamma(1/\beta_1)}\right)-\frac{1}{\beta_1}\right) \quad (3.12)$$

在上式中, 利用 DD-DTCWT 的小波系数服从广义高斯分布计算可得每个小波子系数的 α , β 。将两个小波系数的形状参数和尺度参数分别代入式后可得两幅小波系数图像之间的距离。

(2) 小波系数的权值

下表为计算相应竖条纹噪声明显的 DD-DTCWT 高频子系数所对应的广义高斯分布的尺度函数和形状参数。

表 3.1 典型条纹噪声小波系数分布参数值

Table 3.1 Distribution parameter values of typical stripe noise wavelet coefficient

小波子系数图像	α	β	d
a	0.6360	0.2767	$d_{aa} = 0$
b	0.6180	0.2754	$d_{ab} = 0.0592$
h	0.6510	0.2949	$d_{ah} = 0.0413$
g	0.6140	0.2590	$d_{ai} = 0.0346$
c	0.5865	0.2268	$d_{ac} = 1.2387$
f	0.5213	0.2015	$d_{af} = 1.5821$

利用小波系数的单支重构可以很好的去除条纹噪声的影响。其公式如下:

$$\bar{I} = I - \bar{D}_j^a, \quad n=1 \dots 16; j=1, 2 \quad (3.13)$$

其中, I 为原始图像, $\bar{D}$ 为各个尺度下单支重构不同高频子系数的图像之和。

(n 为各个方向的高频小波系数, j 为小波变换尺度)。

$$\bar{D} = D^1 + D^2 + \dots + D^{15} + D^{12} \quad (3.14)$$

$$\begin{cases} D^1 = W_1^1 D_1^1 + W_2^1 D_2^1 \\ D^2 = W_1^2 D_1^2 + W_2^2 D_2^2 \\ \dots \\ D^{11} = W_1^{11} D_1^{11} + W_2^{11} D_2^{11} \\ D^{12} = W_1^{12} D_1^{12} + W_2^{12} D_2^{12} \end{cases} \quad (3.15)$$

在上式中， W 为单支小波重构的权值。权值的大小决定了小波重构后去除条纹噪声的效果。故采用为高频小波系数在不同尺度下与具明显竖条纹噪声小波系数的 KLD 距离来判定。

$$\begin{cases} W=1, KLD \leq 1 \\ W=-1, 1 < KLD \leq 10 \\ W=0, KLD > 10 \end{cases} \quad (3.16)$$

W 的取值准则为：将与竖条纹小波噪声子系数 KLD 距离小于等于 1 的系数权值取 1；将距离大于 1 小于 10(针对该器件实验得出数值)的系数权值取-1；距离大于 10 的完全不相关的系数赋 0。通过 KLD 的判断，可将噪声条纹影响大的子系数准确找出，并经过系数单支重构后在时域中能够的到更加“干净”的去条纹噪声的图片，为后面的“ 3σ ”准则精确盲元检测提供较好的预处理图像。

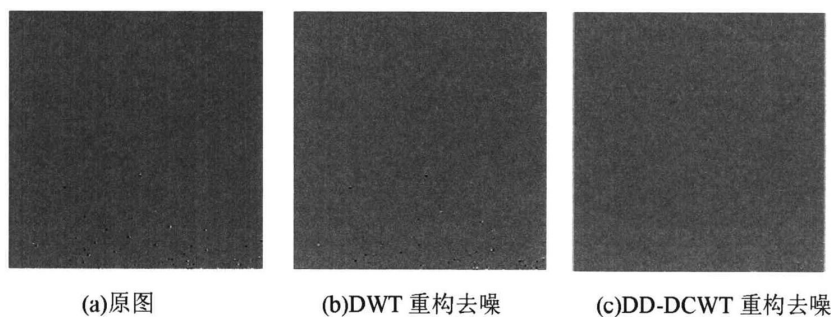


图 3.10 DWT 和 DD-DCWT 去噪效果图

Figure 3.10 DWT and DD-DCWT denoising diagram

通过上述的计算方法及结果图所示，基于双密度双树复数小波的单支重构去除条纹噪声的方法因其高频系数的多方向性，相比于普通的二维小波变换去除条纹噪声的效果明显，残留的条纹噪声几乎消失。实验证明，该方法对于条纹噪声消除具有良好的有效性和可行性。

3.2 面阵器件盲元检测

红外焦平面探测器由于材料缺陷和制备工艺水平等影响，会造成探测器中的像元出现盲元，即输出值很高的热像元和输出值很低的死像元。盲元的准确检测对于后续的红外图像处理至关重要。盲元的判定准确度直接影响到图像信息的完

整性,对盲元过判会造成图像的细节信息损失,而少判盲元则会影响图像的成像效果。 3σ 准则是焦平面盲元检测的主流方法之一,该计算方法简单,检测结果准确有效。

3.2.1 3σ 标准差检测法

盲元又称为失效元,类型有死像元和过热像元。其中死像元是像元响应率小于平均响应率的 $1/10$ 的像元;而过热像元是像元噪声电压大于平均噪声电压 10 倍的像元。

由红外焦平面探测器在均匀背景下所成的红外图像的像素值在时域空间中的统计直方图服从近似的高斯分布,运用数理统计中的 3σ 准则[106-108]可对图像中的盲元进行检测。盲元检测公式如下:

$$| (I(i, j) - \mu) | \geq 3\sigma \quad (3.17)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - \mu)^2}{M \times N}} \quad (3.18)$$

其中 $I(i, j)$ 为图像中每个像素灰度值, μ 为图像像素平均值, σ 为标准方差。由上式可知,当均匀辐射下的红外焦平面所成像的像素值满足上式判定准则时即为盲元。 M, N 分别为图像的行列数。

3.2.2 滑动窗 3σ 检测法

运用 3σ 准则的盲元检测方法是以前全部像元的平均值作为全局阈值去判断盲元,在这种方法中当全局阈值过大时容易造成误判,当全局阈值过小时又会造成盲元的漏判。

针对全局阈值的判定缺点,在 3σ 准则的基础上提出改进一种滑动方窗 W 的有效算法。该方窗 W 的大小取值为 $(2m+1) \times (2m+1)$, 对方窗内的像素值求取平均值,并对方窗内的中心点运用 3σ 准则进行盲元判断。

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\frac{\sum_{c=i-m}^{i+m} \sum_{d=j-m}^{j+m} (W(c, d) - u(i, j))^2}{(2m+1) \times (2m+1)}} \quad (3.18)$$

在上式中, $\sigma(i, j)$ 为窗口 W 中的坐标为 (i, j) 处的标准差。其中 m 的大小为窗口的一半。这种方法在基于均匀辐射的背景下,可以有效的降低固定图形噪声所

造成的干扰。

$$\mu = \frac{\sum_{c=i-m}^{i+m} \sum_{d=j-m}^{j+m} W(c,d)}{(2m+1)^2} \tag{3.19}$$

$\mu(i,j)$ 是以 (i,j) 为中心的窗口 W 内的所有像素值的算数平均值。其滑动窗口示意图计算的过程如下图(3.11)所示：

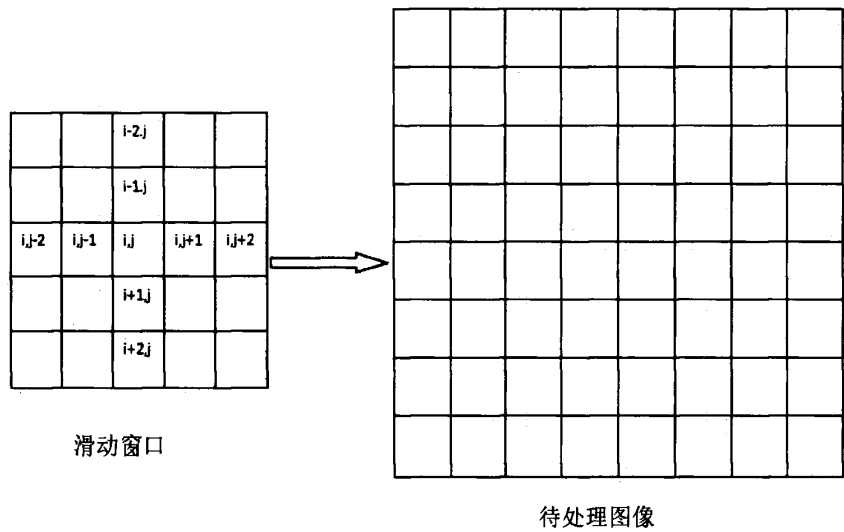


图 3.11 滑动窗口盲元检测

Figure 3.11 Bad pixel detection based on window

3.2.3 盲元检测对比

将经过两种小波去除条纹噪声后的图像再分别与 3σ 准则和具有滑动窗口的 3σ 准则相结合^[109]，其对比效果图如下图(3.12)所示。

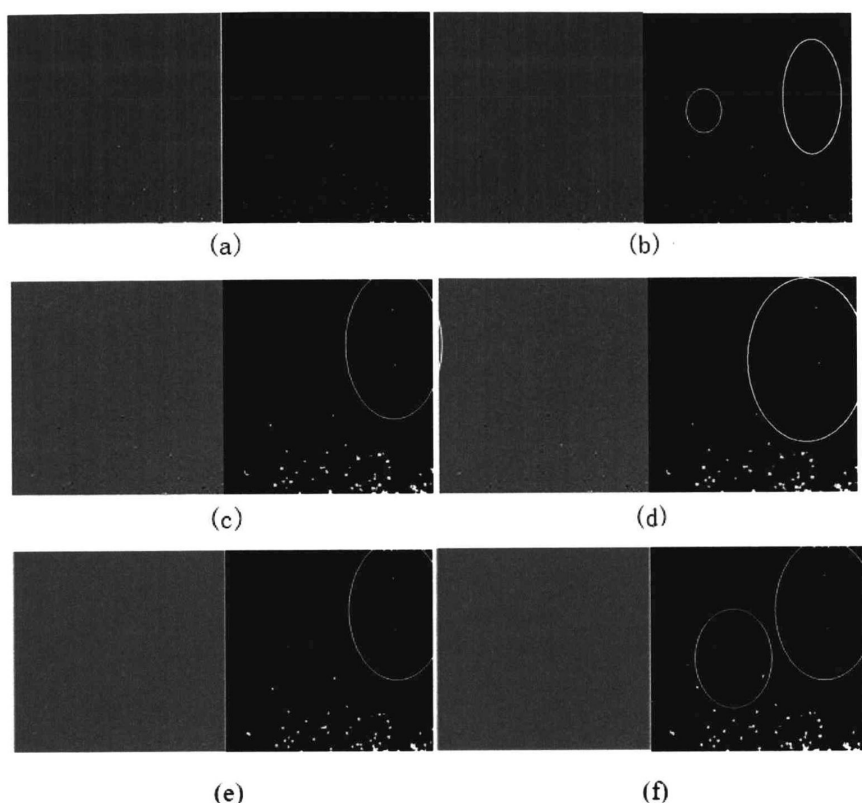


图 3.12 盲元检测对比

Figure 3.12 Comparison of bad pixel detection

如上图所示，(a)、(b)的左边图像为探测器在均匀黑体辐射下所成的原始像，(a)、(b)的右边分别为所对应的 3σ 准则和滑动 3σ 准则进行的盲元检测结果。从原始图可以看出，器件成像受材料、工艺等影响非均匀性条纹较为明显。从盲元检测的效果可以看出，滑动窗口的 3σ 准则因其算法优越性，检测出的盲元数目较 3σ 准则更加准确。图(c)、(d)的左图为经过普通 Haar 小波后单支重构的去条纹噪声图像，相比于原始成像条纹噪声得到了很好的抑制，但仍可以看见少量残余条纹噪声，条纹噪声的存在会对后续的盲元检测造成干扰。(c)、(d)的右图分别对应着 3σ 准则和滑动窗口的 3σ 准则进行的盲元检测结果，从结果可以看出滑动窗口的 3σ 准则所检测出的盲元数优于 3σ 准则，且因为条纹噪声干扰减小的原因，将很多受到条纹噪声干扰的未检测出的盲元检测出来。图(e)、(f)的左图为利用双数复数小波变换后单支重构去除条纹噪声的效果图，相比于 Haar 小波，去除条纹噪声干扰效果更加明显，几乎看不见条纹噪声。图(e)、(f)的右图分别对应着

3 σ 准则和滑动窗口的 3 σ 准则进行的盲元检测结果,从结果可以看出,相比于 Haar 小波的残余条纹噪声对盲元检测的影响,其检测盲元效果更加准确,消除条纹噪声的影响更彻底。下表(3.2)为基于以上各种方法的盲元统计。

表 3.2 盲元检测结果

Table 3.2 Bad pixel detection result						
	原图	Haar	DD-DTCWT	原图加窗	Haar 加窗	
DD-DTCWT 加窗						
盲元数	206	387	511	286	453	602
盲元率%	0.3143	0.5905	0.7797	0.4364	0.6912	0.9186

经过以上的对比分析,可以得出利用双密度双树复数小波与滑动窗口 3 σ 准则相结合的盲元检测方法最为有效,在最大程度去除成像条纹噪声影响的同时明显提升了盲元检测精度,具有一定的实用价值。

3.3 靶标刀口角度计算

对于面阵器件的 MTF 计算来说,倾斜刀口法中倾斜角度的计算精度对于面阵器件 MTF 准确计算具有重要的意义。

3.3.1 随机噪声去除

在经过去除条纹噪声和盲元检测及补偿等算法处理后,当用黑体对刀口靶标进行辐射时,红外面阵器件受到电路及采集系统的影响,在所成图像上出现随机噪声。如下图(3.13)所示:

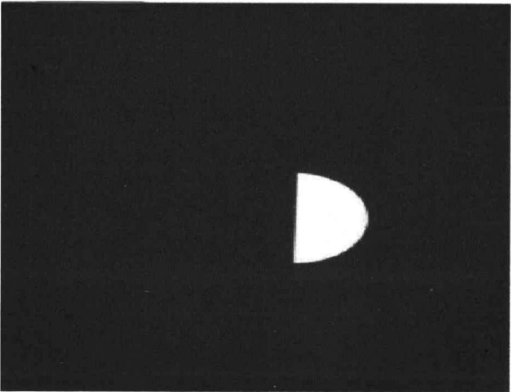


图 3.13 靶标图像随机噪声

Figure 3.13 Random noise of target image

由上图可见,采集到的刀口靶标图像中存在着随机的亮噪声和暗噪声。倘若

随机噪声出现在刀口靶标的刃边区域,则对后续的边缘检测和角度计算等造成极大的干扰,亦严重影响器件 MTF 值的计算。对于随机噪声,常用的处理方法为中值滤波法,其计算原理如下:

取一个二维滑动模板,一般模板大小有 3×3 、 5×5 或者 7×7 等,根据实际二维图像的大小取合适模板。对二维图像进行扩展,使二维模板在扩展后的图像中滑动。以每次滑动后的模板的中心点为核心,将模板内的像素值按照大小排序,生成单调下降的二维数组序列。将模板中心的点用排好序的数组中间值进行代替,以达到去除随机噪声的目的。下图(3.14)是利用以上中值滤波算法对红外靶标图像进行的去除随机噪声效果。

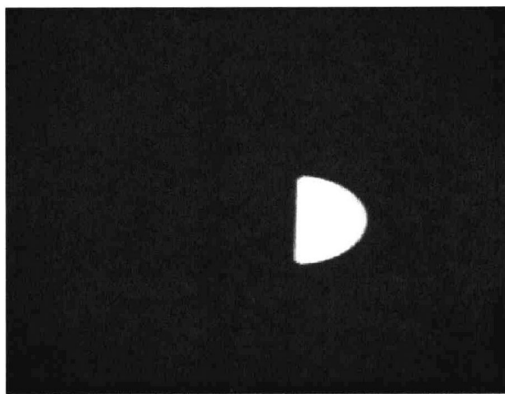


图 3.14 中值滤波去噪

Figure 3.14 Median filtering denoising

通过上述算法可以看到,图中的随机噪声得到了很好的抑制。但在该算法中,每次滑动模板时对每一个模板中心点都进行一次中值滤波,循环结束时原始图像的每一个点都进行了一次中值滤波计算。该算法的缺点是在进行中值滤波时并没有对模板中心点进行是否为噪声点进行判断,这样的结果造成了在去除随机噪声的同时也模糊了图像的边缘细节信息。通过上图(3.14)可以看到在半月型靶标的上下角处呈现出圆弧状,刀口刃边的细节在滤波时被改变。这对于后续刀口刃边提取精确及 MTF 计算形成干扰。

针对以上问题,在利用模板做中值滤波时做出以下改进。

(1) 取一个二维滑动模板,一般模板大小有 3×3 、 5×5 或者 7×7 等,根据实际二维图像的大小取合适模板。

(2) 对二维图像先进行扩展，使二维模板在扩展后的图像中开始逐点的滑动，计算模板中所有点的平均值及标准差。

(3) 判断模板中心点减去平均值后的绝对值是否大于三倍标准差。若大于三倍标准差则转去步骤 4；否则转去步骤 2。

(4) 以每次滑动后的模板的中心点为核心，将模板内的像素值按照大小排序，生成单调下降的二维数组序列。

(5) 将模板中心的点用排好序的数组中间的值进行代替，以达到去除随机噪声的目的。

下图(3.15)是利用以上算法对每个点进行噪声判断后并针对噪声点用中值滤波算法对红外靶标图像进行的去除随机噪声效果。

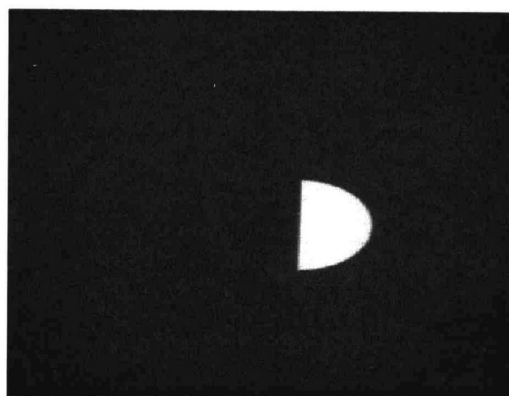


图 3.15 自适应中值滤波去噪

Figure 3.15 Adaptive median filtering denoising

通过以上算法可以看到，随机噪声被很好抑制的同时刀口靶标的边缘也得到了很好的保护，刃边细节信息几乎没有损失。该算法很好的改善了直接使用中值滤波去噪时对靶标边缘的模糊情况，为后续的 MTF 计算提供了更高的准确度。

3.3.2 刀口边缘检测

在得到清晰的靶标像后需要对半月靶标的刀口边缘进行检测。边缘提取方法常用微分算子进行边缘提取，该方法存在一个问题就是如何选择合适的阈值使边缘被提取出来。阈值大小的选取决定了所提取出的边缘信息会有差异。这就对边缘提取效果的评价存在不同标准。

Canny 对边缘检测的定位可靠性和提取出的边缘有效性做了研究，指出了边

缘检测的最佳效果需要满足以下三点：

(1) 边缘检测需要较高的信噪比，所检测出的边缘点应为真正的边缘点，非边缘点的误判概率应该低。

(2) 检测出的边缘点要尽可能的位于边缘线的中心，即要求定位准确。

(3) 对出现单个边缘产生多个响应的情况要求概率较低，以及虚假响应边界要减小。

总之在准确检测出景物边缘的同时减小噪声的干扰才是最佳的边缘检测方法。高斯函数的一阶导数就是一个能够在边缘检测与抑制噪声之间的最佳折中方法。高斯函数与图像卷积可以抑制噪声，高斯函数的导数可以有效检测景物的边缘。

设二维高斯函数为：

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.20)$$

在上式中， σ 是高斯函数的分布参数，用来控制图像的平滑程度。而最佳的边缘检测算子是用卷积 $\nabla G * f(x, y)$ 作为基础， $|\nabla G * f(x, y)|$ 为边缘的强度， $\rho = \nabla G * f(x, y) / |\nabla G * f(x, y)|$ 为边缘方向。高斯函数在实际应用时需要将模板截断为有限的尺寸 N ，当 $N = b\sqrt{2}\sigma + 1$ 时，实验证明了此值时边缘检测结果较佳。以下为 Canny 算子的实现过程，通过高斯函数可分离特点，将 ∇G 的两个滤波卷积模板分解为一维的行列滤波器：

$$\frac{\partial G}{\partial x} = kx \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(x)h_2(y) \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} = ky \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(y)h_2(x) \quad (3.22)$$

其中

$$h_1(x) = \sqrt{k}x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad h_1(y) = \sqrt{k}y \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.23)$$

$$h_2(x) = \sqrt{k} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad h_2(y) = \sqrt{k} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.24)$$

$h_1(x) = xh_2(x)$ ， $h_1(y) = yh_2(y)$ ，其中 K 为常数。将以上两式分别与图像 $f(x, y)$ 卷积后得到输出：

$$E_x = \frac{\partial G}{\partial x} * f(x, y), \quad E_y = \frac{\partial G}{\partial y} * f(x, y) \quad (3.25)$$

令

$$A(i, j) = \sqrt{E_x^2(i, j) + E_y^2(i, j)}, \alpha(i, j) = \arctan\left[\frac{E_y(i, j)}{E_x(i, j)}\right] \quad (3.26)$$

其中 $A(i, j)$ 为图像上 (i, j) 处的边缘强度值, $\alpha(i, j)$ 是图像的点 (i, j) 处的法向矢量。由 Canny 算子准则可得, 算子 G 与图像 $f(x, y)$ 的卷积为在边缘梯度方向上的区域中的最大值即为边缘的中心点。故可以根据每一点的梯度方向上来判断该点强度是否为其领域中的最大值, 若为最大值则该点判断为边缘点。当一个像素满足以下条件时可认为是边缘点。

(1) 该点的边缘强度较两领域的像素点的边缘强度更大, 方向为沿该点梯度方向。

(2) 沿该点梯度方向上两领域点的方向之差小于 45° 。

(3) 将该点作为中心, 在 3×3 的领域中的边缘强度极大值小于某个设定阈值。

条件(1)(2)同时得到满足时, 则沿梯度方向上的相邻像素就排除出边缘点, 这一过程消除了许多虚假的边缘点。

综上所述 Canny 算子的具体算法步骤如下:

(1) 利用高斯滤波器进行图像的去噪。

(2) 高斯算子的一阶微分用来对图像进行滤波而得到图像的梯度强度和方向。

(3) 对梯度算子进行“非极大值抑制”: 梯度方向被标识为 1, 2, 3, 4 的四个区域。各个区用相邻像素通过比得出最大值。

(4) 对梯度取两次阈值, 即取阈值 $Th1$ 和 $Th2$, 两者关系为 $Th1 = 0.4 \cdot Th2$ 。对梯度值小于 $Th1$ 的像素灰度值设置为 0, 标记为图 1。再把梯度值小于 $Th2$ 的像素灰度设为 0, 标记为图 2。图 2 的阈值较高, 在大部分噪声被去除的同时也损失了的图像的边缘细节。图 1 的阈值较低, 大部分信息得以保留。则以图 2 为参照对图 1 作为补充图像的边缘进行链接。

(5) 图像边缘的链接。对图 2 进行逐点扫描, 从第一个非零灰度像素 P 开始跟踪以 P 为起点的轮廓线直至终点。考察图 1 与图 2 里和 Q 点位置所对应的点 Q' 的 8 个近邻域。若在 Q' 点的 8 邻域中存在非零像素 R' , 即将其包含到图 2 里为 R 点。再从 R 开始, 重复扫描, 直到两图都无法继续为止。

在完成了对 P 包含的轮廓线链接之后将该线标记为已访问。从第(1)步开始继续搜寻轮廓线，直到找不到新的轮廓线位置。



图 3.16 Canny 算子边缘检测

Figure 3.16 Canny operator edge detection algorithm

上图是使用 Canny 算子得到的刀口靶标的边缘提取图。从图中可以看到，除了刃边的直线区域，对于半圆形的边也进行了提取。而刃边的倾斜角度是后续计算所需要的重要前提。

3.3.3 刀口倾斜角度计算

Hough 变换是图像处理中用来从图像中分离出具有某种相同特征的几何形状（通常，直线，圆等）的常用方法。经典的 Hough 变换常用来检测直线^[110-111]、圆等。Hough 变换的基本思想是点——线的对偶性，所谓线的对偶性就是点与线的某种变换之后的对应或者映射关系，实际上将原始图像空间中所给定得曲线表达式转化为了参数空间中的一个点。同时也把原始图像中给定曲线检测问题变为了求参数空间中的峰值问题。比如直线、椭圆、圆、弧线等，其原理如下。

在图像 XY 里，所有过点 (x,y) 的直线的方程为

$$y=px+q \quad (3.27)$$

其中 p 为斜率， q 为截距，它也可以改写成如下式的形式：

$$q=-px+y \quad (3.28)$$

由上式可看作在参数空间 PQ 中的一条过点 (p,q) 直线。则在下图(3.17)中 XY 坐标系中过点 (x_i,y_i) 的直线方程为 $y_i=px_i+q$ ，或 $q=-px_i+y_i$ 。后者在参数空间 PQ 坐标系中也可表示为一条直线。同理对于 (x_j,y_j) 也可以写成上式形式。如下图(3.17)

所示:

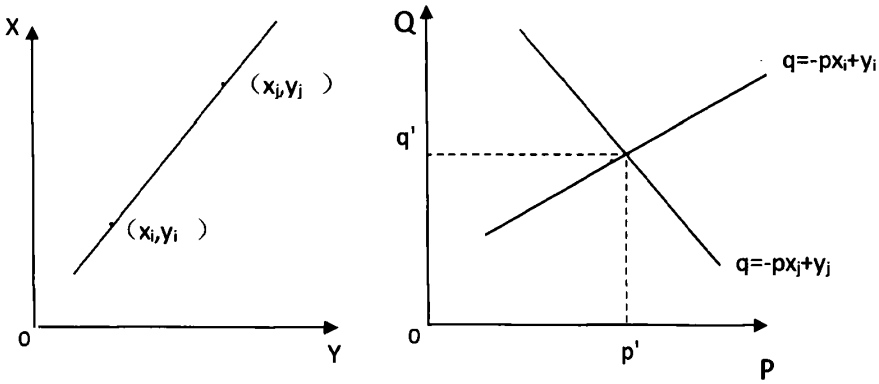


图 3.17 Hough 变换算法

Figure 3.17 Hough transform algorithm

故在参数空间里面相交的线与图像空间中共线的点相互对应,反之在图像空间里面都有共线的点与在参数空间里面相交于同一个点的线相互对应,这就是点-线的对偶性。Hough 变换就是利用点线对偶将空间检测转换到参数空间再进行简单的统计累加和来实现直线检测。

在运算式(3.28)直线方程时候,为避免当直线接近竖直方向时造成 p 的值趋于无穷故使用直线的极坐标方程对直线进行表示,方程式如下:

$$\lambda = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3.29)$$

在方程中任意一组 (λ, θ) 都分别对应着一条直线。对应关系由原来的点-线对偶性转为了点-正弦曲线对偶性,如图(3.18)所示,图(3.18 a)为图像空间 XY 中的 5 个参数点,在图(3.18 b)参数空间分别与之对应的是 5 条曲线,这里的 θ 为 $[-90, +90]$, λ 的取值范围为 $[-\frac{\sqrt{2}N}{2}, +\frac{\sqrt{2}N}{2}]$, N 为图像的宽度。

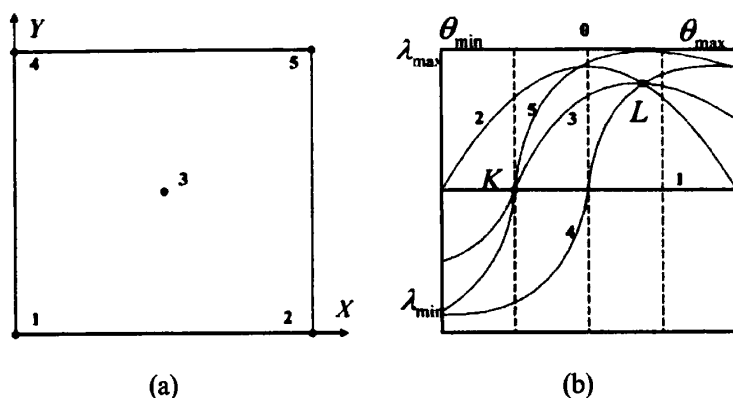


图 3.18 点——正弦曲线对偶性

Figure 3.18 The duality of the point sinusoidal curve

由上图可得图像空间中各个点在参数空间里分别为所对应的曲线。在图(3.18 b)中, 1, 3, 5号曲线都经过参数空间中的K点, 则对应应在图(3.18 a)中表示为1, 3, 5点位于同一直线, 同样在图(3.18 a)中点2, 3, 4处于同一条直线上, 则相对应的在图(3.18 b)中曲线2, 3, 4对的都通过同一个点L。

Hough 变换的具体实现步骤如下:

- (1) 对参数(λ , θ)空间设置累加器数组存储二维数据。
- (2) 对图像二值化后的白色边缘目标进行顺序扫描, 并找到其在参数空间中的位置对累加器进行加1计数。
- (3) 计算出累加器中最大值并找出其所在位置(λ' , θ')。
- (4) 根据式(3.29)将参数空间位置(λ' , θ')转化为所对应的图像空间中的直线。

对于直线 Hough 变换过程, 可以这么认为。对所有图像的像素进行扫描, 若满足某个特定条件则经过该像素的所有直线所属的区域的累加器加1。像素的所有直线区域一般取 θ 的可能取值(如 θ 以1度为增量, 从0度取到180度), 再依据(3.29)式求出所有的 λ 值, 此时有多组(λ , θ)数值, 就对应了所有经过此像素的直线。其边缘检测效果如下图(3.19)所示。

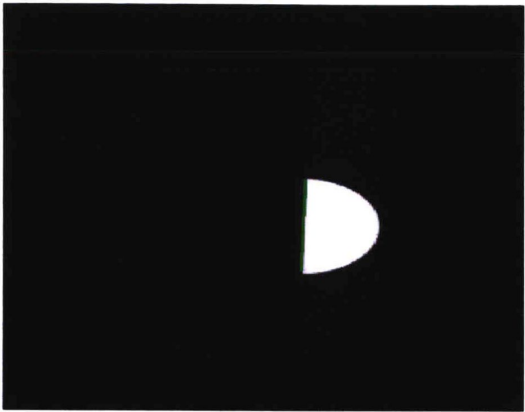


图 3.19 Hough 边缘检测结果

Figure 3.19 Hough edge detection result

通过 Hough 变换，可准确的提取出刃边直线位置及计算出刃边的倾斜角度。

3.4 面阵器件 MTF 计算

3.4.1 边缘扩散函数的提取

经过上述的一系列算法处理，获得了面阵红外探测器对半月型靶标成像的刃边倾斜角度。现在利用倾斜刃边法来进行 MTF 值的计算。倾斜刃边投影生成边缘阶跃函数的示意图如下图(3.20)所示。

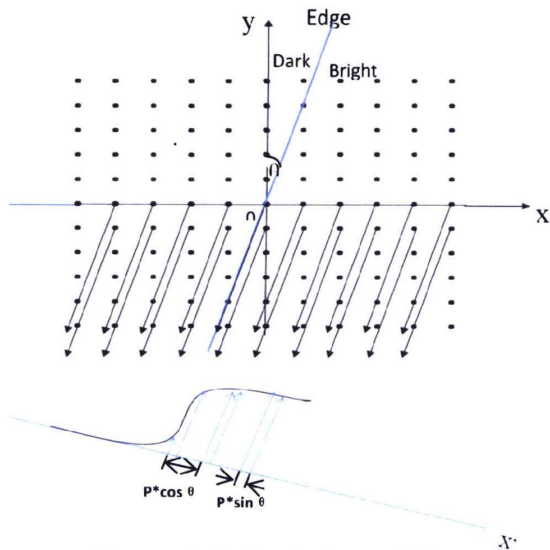


图 3.20 刃边投影生成 ESF 曲线

Figure 3.20 Edge projection to generate ESF curve

如上图所示,将刀口靶标相对于红外面阵器件倾斜一定的角度 θ ,沿着靶标刃边倾斜的角度将面阵所成刃边像进行投影,投影所在的坐标轴 x' 与刀口刃边垂直。从上图(3.20)可以看到,若将面阵所成像按照列方向进行投影,则根据夹角为 θ ,像元之间的间距为 P ,则投影到坐标轴 x' 后的采样间隔变为 $P \cdot \sin\theta$;若按照行方向进行投影,则投影到坐标轴 x' 后的采样间隔则变为 $P \cdot \cos\theta$ 。经过投影后的采样间隔由原来的 P 变为现在的 $P \cdot \sin\theta$ 或者 $P \cdot \cos\theta$,理论上只要角度足够小,则采样间隔也可以足够小,且相对于传统的垂直刀口扫描法,其在测试时不需要严格的将器件与刀口对齐。

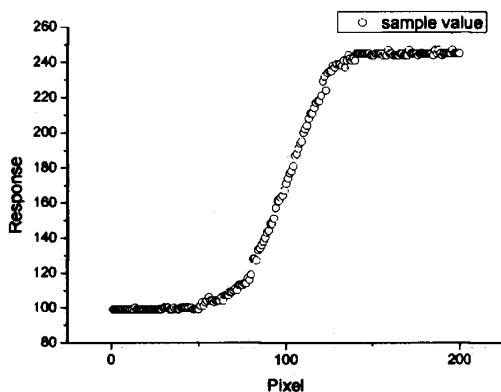


图 3.21 ESF 曲线

Figure 3.21 ESF curve

如上图(3.21)所示,该图是选取半月型靶标部分刃边区域按照从无辐射的暗区域到有辐射的亮区域按照列的顺序进行的像元排序。由此提取出了完整的半月形靶标的刀口边缘扩散函数曲线(ESF)^[112-113]。该曲线的形成由于在图像采集过程中受到不可避免的噪声及像元非均匀性的影响,直接对该 ESF 曲线使用一阶差分求 LSF 曲线会造成该曲线的严重失真,对后续的 MTF 计算形成严重误差。

对于提取出的 ESF 曲线,不能直接用求导数的方法去求取 LSF 函数。一般采用曲线拟合的方法将代表器件的边缘扩散函数拟合出后再此进行求导计算。常用的曲线拟合方法主要有多项式拟合方法,其原理如下:

假定给定数据点 $(x_i, y_i) (i=0, 1, \dots, m)$, Φ 为次数不超过 $n (n \leq m)$ 的多项式所组成的函数类,求 $P_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k \in \Phi$, 使得

$$I = \sum_{i=0}^m [p_n(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=0}^m \left(\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i \right)^2 = \min \quad (3.30)$$

当所拟合的函数为多项式表示时称为多项式拟合。而上式中的 $P_n(x)$ 为最小二乘拟合多项式。

$$I = \sum_{i=0}^m \left(\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i \right)^2 \quad (3.31)$$

上式中的 I 为 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 的多元函数，问题转为求解关于 $I = I(a_0, a_1, \dots, a_n)$ 的极值问题。由求解极值可得

$$\frac{\partial I}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=0}^m \left(\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i \right) x_i^j = 0 \quad j=0, 1, \dots, n \quad (3.32)$$

整理上式可得：

$$\sum_{k=0}^n \left(\sum_{i=0}^m x_i^{j+k} \right) a_k = \sum_{i=0}^m x_i^j y_i \quad j=0, 1, \dots, n \quad (3.33)$$

则关于 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 的线性方程组，用矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} m+1 & \sum_{i=0}^m x_i & \dots & \sum_{i=0}^m x_i^n \\ \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \dots & \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=0}^m x_i^n & \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} & \dots & \sum_{i=0}^m x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^m y_i \\ \sum_{i=0}^m x_i y_i \\ \dots \\ \sum_{i=0}^m x_i^n y_i \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

该方程组存在唯一解，故可解除 $a_k (k=0, 1, \dots, n)$ ，从而可得多项式 $P_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k$ 为所求解的拟合多项式。它的拟合准则是找出 $\sum_{i=0}^m \|p_n(x_i) - y_i\|^2$ 的最小值。对 ESF 函数利用多项式拟合如下图所示：

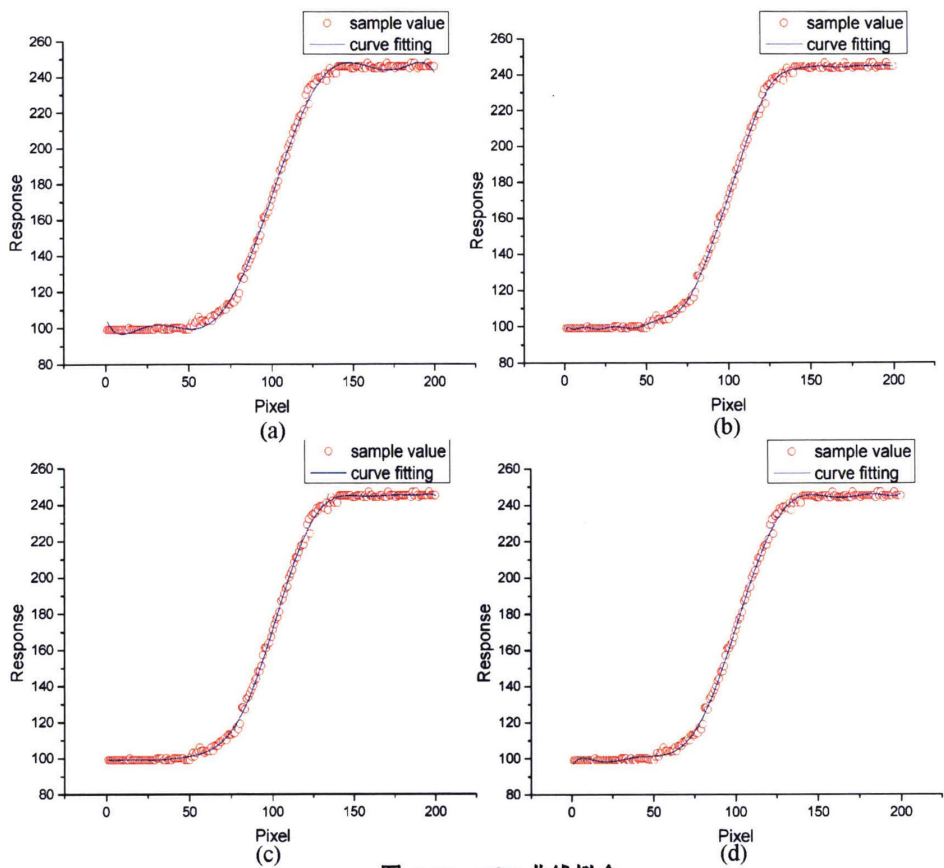
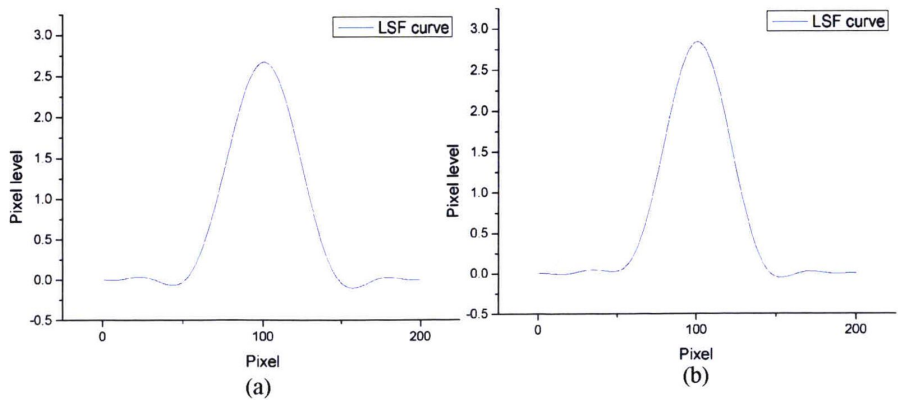


图 3.22 ESF 曲线拟合

Figure 3.22 ESF curve fitting

上图(a)(b)(c)(d)分别对应的是多项式的系数为 7、9、14、20 项时所拟合出来的曲线。可以看到，14 项时的拟合曲线最优，但仍然在两边的平坦区域仍有小段的跳跃。对以上的拟合曲线分别求导计算 LSF 曲线，如下图(3.23)所示。



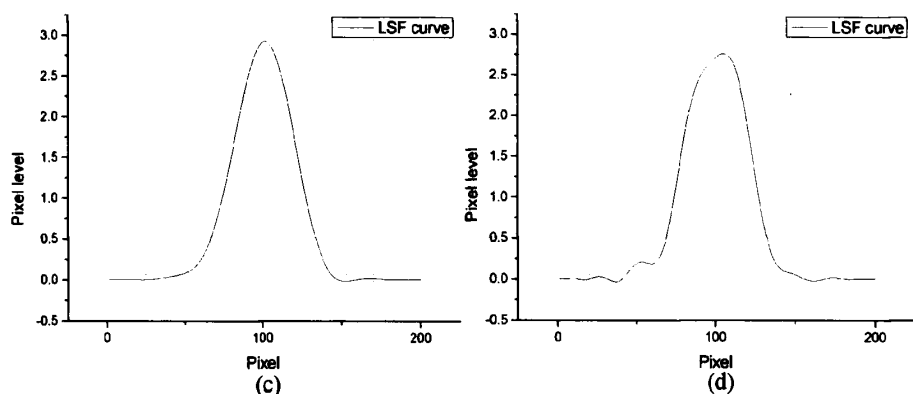


图 3.23 LSF 曲线

Figure 3.23 LSF curve

由上图可知，求导的过程本身会对原有的噪声有所增强，故求导后计算的 LSF 函数曲线由于多项式在拟合时未能完全平滑，导致最终的 LSF 函数有明显的波动造，即使拟合程度较高的 14 项拟合计算出的 LSF 曲线图（3.24c）所示在右侧部分仍然不平滑。

为了避免在对拟合曲线求导计算时噪声的增强，采用和边缘扩散函数的形状有着高度相似性的费米函数对 ESF 曲线进行拟合^[114-115]，费密函数的公式如下。

$$f(x) = \frac{a}{\exp[(x-b)c] + 1} \quad (3.35)$$

因为大多的边缘扩散函数在上升或者下降的边缘处相对于阶跃曲线的中点没有很好地连续性和对称性，因此要利用多个费密函数的累加和对 ESF 进行拟合。采用三个费米函数的累加可以很好的完成对 ESF 的拟合。拟合函数的公式如下：

$$F(x) = D + \sum_{i=0}^2 \frac{a_i}{\exp[(x-b_i)/c_i] + 1} \quad (3.36)$$

其中 D , a_i , b_i 和 c_i 都是常量，对应的 i 的取值范围为 $0 \leq i \leq 2$ ，一共有十个参数。在得到拟合 ESF 曲线后，通过对上式进行求导得出所对应的 LSF。因为 ESF 曲线与选取刀口区域相关，有上升型和下降型，故对 LSF 求导时采用绝对值表示，公式如下：

$$LSF = \left| \frac{dF(x)}{dx} \right| = \left| \sum_{i=0}^2 \frac{a_i \exp[(x-b_i)/c_i]}{c_i \{\exp[(x-b_i)/c_i] + 1\}^2} \right| \quad (3.37)$$

由上式可得 LSF 完全由 a_i, b_i, c_i 三个参数组成，避免了直接对 ESF 曲线表达式求导而增加了噪声。

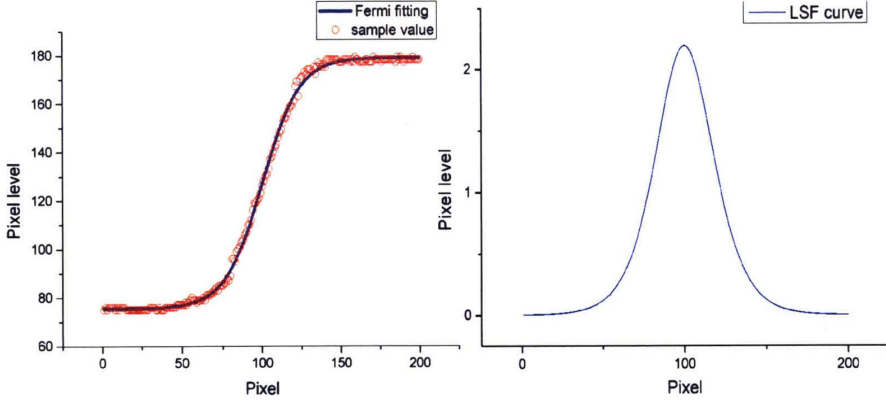


图 3.24 费米拟合 ESF 和 LSF 曲线

Figure 3.24 Fermi fitting ESF and LSF curve

由上图(3.24)可以看到，三项费密函数的拟合曲线与 ESF 曲线拟合度很高，其由式计算出的 LSF 曲线光滑并且对称，为后续 MTF 计算提供了准确的数值。

3.4.2 MTF 计算

在得到准确的 LSF 曲线后，利用离散傅里叶变换对 LSF 曲线进行 MTF 计算。其过程如下：

$$Y_k = \sum_{m=0}^{M-1} x_m e^{-j2\pi km/M} \quad m=0,1,2,\dots,M-1 \quad (3.38)$$

其中 x 取 LSF 曲线的序列值， M 是序列中的数值个数， Y 是经过离散傅里叶变换后的结果。其中 Y 值的频率域的分辨率是计算 MTF 值的关键参数。

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (3.39)$$

其中 f_s 是系统的采样频率，其值为投影后实际的采样间隔 $D=P*\sin\theta$ 决定。 N 为所选择区域的行数。

$$f_s = 1/D \quad (3.40)$$

经过傅里叶变换后的频域坐标轴的取值分别为 $0, 0, \Delta f, 2\Delta f, \dots$ 。

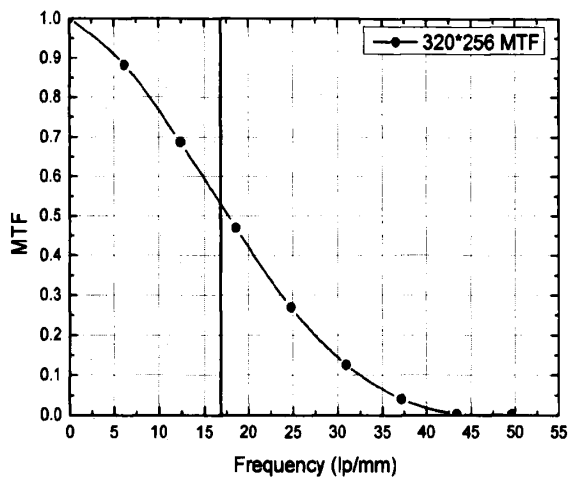


图 3.25 面阵 MTF 曲线

Figure 3.25 Array detector curve

如图(3.25)为采用上海技术物理研究所研制的 320×256 面阵器件，像元尺寸为 28×8μm 的制冷型中波 HgCdTe 红外探测器，像元中心距为 30μm。其奈奎斯特频率处的 MTF 值为除去镜头的 MTF 的值 0.72 后在相同条件测试十次后的平均值约为 0.52。面阵器件 MTF 值的全部过程可用以下流程图来进行计算。

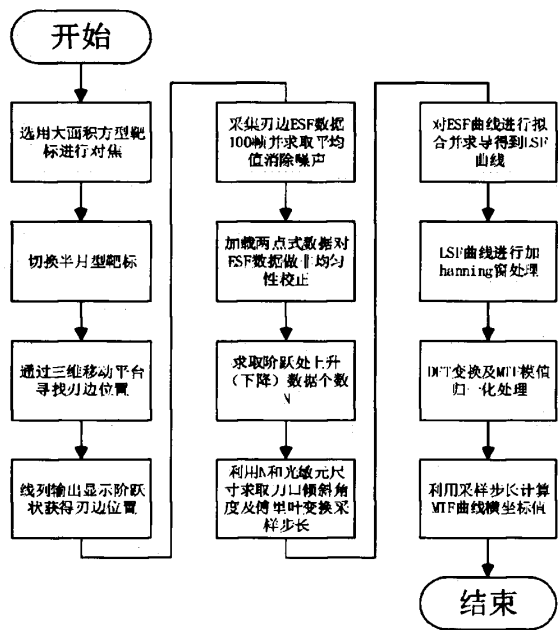


图 3.26 面阵 MTF 计算流程图

Figure 3.26 MTF of array detector flow chart

3.4.3 相同条件 MTF 重复测试

在保持测试条件不变、测试人员不变和测试方法不变的条件下，分别利用面阵器件对半月形靶标进行 10 次数据采集，并使用相同的计算方法对该面阵 HgCdTe 器件进行了 MTF 计算。其测试计算结果如下图 (3.27) 所示，可以看到在高频部分有一定的差异，在奈奎斯特频率处差异较小。

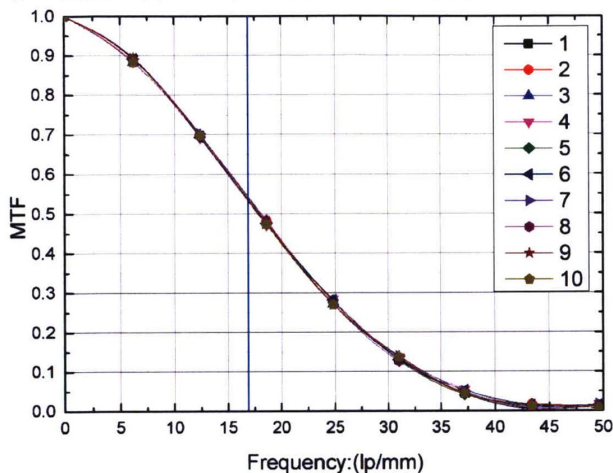


图 3.27 MTF 重复测试

Figure 3.27 MTF repeated test

3.4.4 不同角度 MTF 测试

保持测试条件不变，将刀口靶标旋转产生不同的倾斜角度，分别计算不同角度下该面阵器件对半月形刀口靶标的 MTF 响应。其计算结果如下图 3.28 所示。

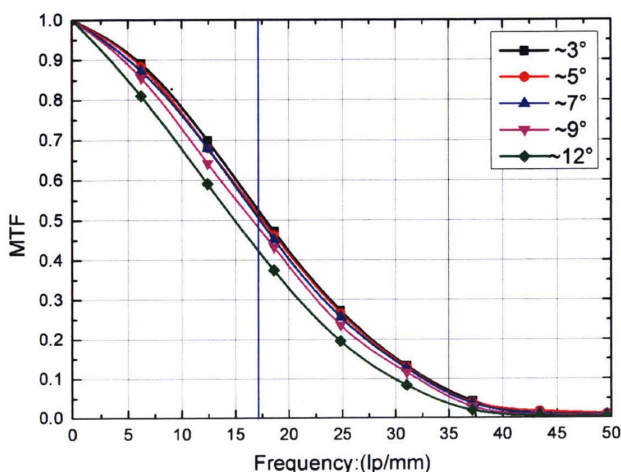


图 3.28 不同倾斜角度 MTF 测试

Figure 3.28 Different angle of MTF test

如上图所示,当刀口靶标随着倾斜角度增大时,其 MTF 测试值逐渐衰减。当角度大于 7° 时,其 MTF 数值逐渐衰减。

3.4.5 不同温度 MTF 测试

保持其余测试条件不变,将黑体升高不同的温度对半月形靶标进行辐照。在不同的温度时对该面阵器件 MTF 进行测试。在探测器的线性响应度范围内逐渐升高温度,直到器件到达饱和此时器件 MTF 值衰减明显。当器件未到达饱和状态时与黑体辐照温度无关。其值如下图 3.29 所示。

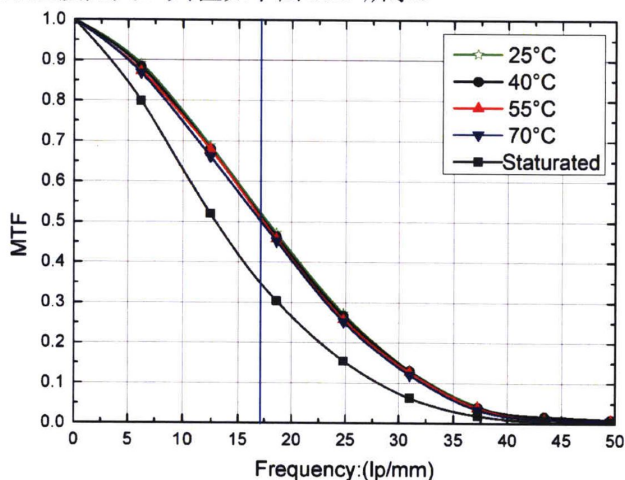


图 3.29 不同辐照温度 MTF 测试

Figure 3.29 MTF test with different irradiation temperatures

3.5 本章小结

本章主要介绍了面阵 HgCdTe 红外焦平面探测器的 MTF 测试方法。首先对在面阵探测器测试时出现的条纹噪声进行了去除,利用双密度双树复数小波的高频系数具有更多方向性的特点,在小波变换后进行单支重构并去除条纹噪声。其次对图像中出现的盲元进行检测,利用带有滑动窗口的 3σ 准则对盲元进行了检测,检测效果准确,较好的解决了盲元漏检和过检的问题。在面阵数据采集过程中因采集系统问题出现的随机噪声,采用了自适应的中值滤波,在去除噪声的同时很好的保护了刀口像的边缘细节,提高了后续计算 MTF 的精度。最后通过边缘检测 Canny 算子和 Hough 变换等算法计算出刀口靶标的倾斜角度。利用倾斜角度对刃边部分进行投影后计算出实际的采样间隔,并使用费密函数拟合了 ESF 曲线,最后求导并计算出面阵探测器的 MTF 值。

第4章 线列碲镉汞探测器 MTF 测试

利用倾斜刀口法测试 MTF 的方法适用于面阵探测器的测量，线列探测器的测量多使用小光点法、狭缝扫描法等。这些方法对线列器件中的一元或多元进行 MTF 测试，其结果代表了整个线列器件的 MTF 值。本章主要研究对倾斜刀口法进行改进，使得倾斜刀口法既可以测试面阵器件也可以测试线列器件^[116]。

4.1 线列器件 MTF 测试原理

与倾斜刀口法测试面阵器件 MTF 相同，测试线列器件的方法同样采用将刀口靶标成像的刃边从上到下横跨过线列器件像元阵列，同时刀口倾斜一定的角度并且横跨过的线列器件的元数为有限元 N 。其测试原理图如下图(4.1)所示。

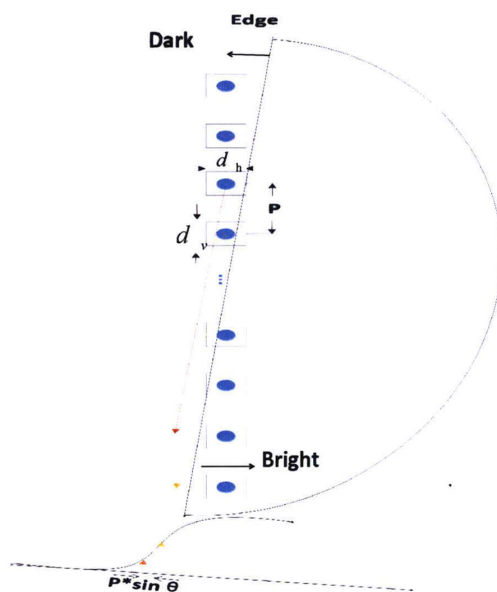


图 4.1 线列探测器 MTF 测试方法

Figure 4.1 Linear detector MTF test method

如上图所示，倾斜刀口法测试线列器件时，倾斜一定的角度 θ ，使得刃边从上到下横跨过线列器件的像元阵列，此时被横跨的像元的输出为从全暗过渡到全亮，像元输出的过渡部分的曲线对应为 ESF 函数。在像元均匀性较高时，相当于对一个像元形成了等间距的扫描。

将像元的输出沿着刃边的方向进行投影，投影后的横坐标垂直于刃边，则投影后的等效扫描步长为 $P \cdot \sin\theta$ ，投影像元的输出为边缘扩散函数 ESF。与倾斜刀口法测试面阵器件相同，在测试线列探测器时刀口倾斜角度对于后续的 MTF 计算非常重要。

倾斜刀口法的角度计算如上图所示， d_v 和 d_h 分别为光敏元的高度和宽度， P 为光敏元的中心距，角度 θ 的计算公式如下：

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d_h}{(N-1) \cdot P + d_v} \right) \quad (4.1)$$

其中 N 为刀口刃边像横跨过的像元个数。

4.2 线列器件位置定位

相对于倾斜刀口法测试面阵探测器 MTF 时，通过测试平台可以清楚的看到刀口靶标的成像在面阵探测器中的所在位置，从而通过数字图像处理的方法计算面阵器件的 MTF 值。但是在线列器件中，因为器件只有一列，如何使得刀口成像的刃边部分准确的横跨过像元阵列成为倾斜刀口法测试线列器件的难点之一。

为了获得准确的线列器件相对于刀口靶标刃边的相对位置，对刀口靶标进行改造后对刀口靶标像再进行定位。其方法如下：

(1) 先使用黑体对面积较大的方形靶标进行辐照，移动三维平台，使得线列器件正常工作且有像元响应输出。方形靶标如下图(4.2)所示：



图 4.2 方形靶标

Figure 4.2 Square target

(2) 缓慢调节位移平台的微调旋钮，观察线列器件的输出值，直到输出值随着旋钮的调节输出为最大时则为方形靶标成像的位置在探测器的焦平面上。其输出值如下图（4.3）所示：

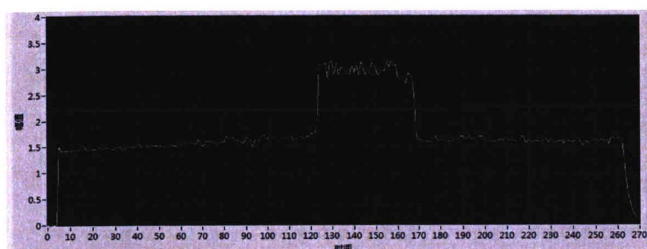


图 4.3 方形靶标输出

Figure 4.3 Square target output

(3) 切换靶标。此时将靶标由方型靶切换为半月型靶标，此时半月型靶标成像恰好也落在的焦面上，半月形靶标如下图(4.4)所示。

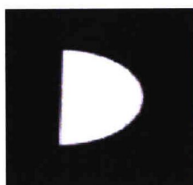


图 4.4 半月形靶标

Figure 4.4 Half-moon target

(4) 对半月形靶标进行改造。

线列器件只有一列，将线列器件的像元排列顺序与刃边方向一致。当通过采集平台去观察线列器件的输出时，从输出曲线信息很难得到线列器件相对于刀口刃边成像位置的信息，更无法清楚获得何时刃边像正好横跨线列器件的像元。因此将刀口靶标进行改造，将半月形改造为‘K’字型，如下图(4.5)所示。

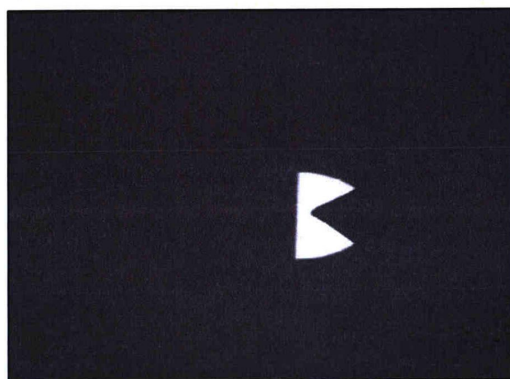


图 4.5 ‘K’字形靶标

Figure 4.5 Half-moon target

(5) 通过移动三维位移平台，观察器件采集输出窗口有输出值时判断线列器件与‘K’字型靶标的相对位置，其判断过程如下：

① 移动装载探测器的三维位移平台，当观察到采集输出窗口的输出曲线为如下图所示的‘凹’字型时停止。

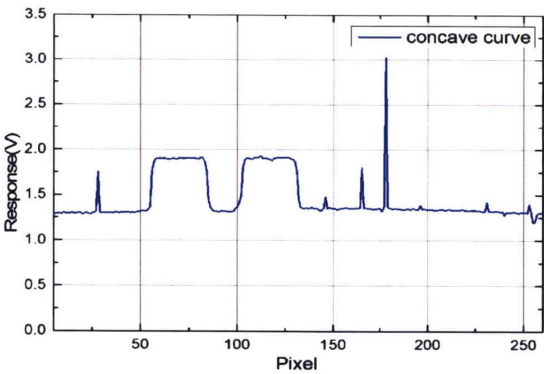


图 4.6 凹字形曲线

Figure 4.6 Concave curve

此刻线列探测器相对于靶标成像的位置位于下图（4.7）所示的‘1’位置处。

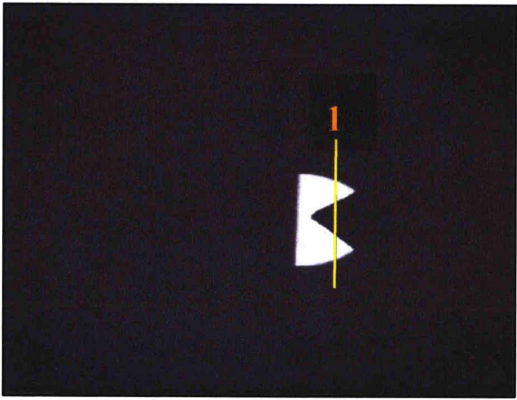


图 4.7 线列器件相对靶标位置‘1’

Figure 4.7 The position ‘1’ of the target relative to the linear device

② 继续移动三维位移平台，当观察到采集输出窗口的输出曲线为如下图(4.8)所示的‘一’字型时停止。

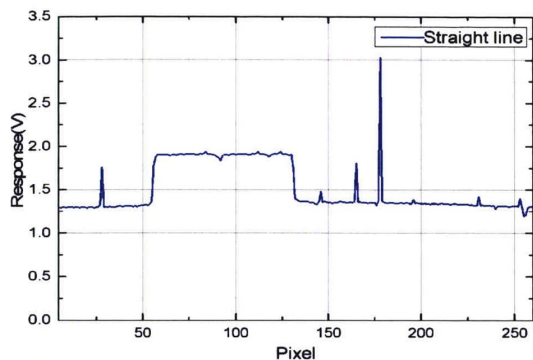


图 4.8 一字形曲线

Figure 4.8 Straight line

此刻线列探测器件相对于靶标成像的位置位于下图(4.9)所示的‘2’位置处。

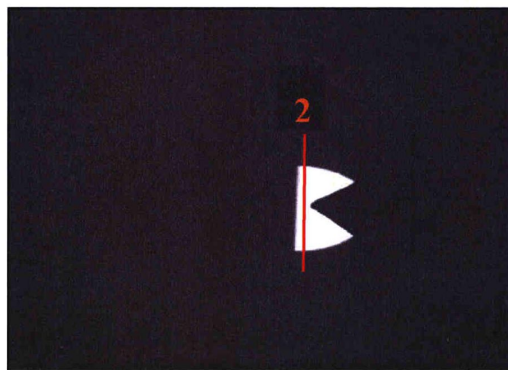


图 4.9 线列器件相对靶标位置‘2’

Figure 4.9 The position ‘2’ of the target relative to the linear device

③ 继续移动三维位移平台，当观察到采集输出窗口的输出曲线为如下图(4.10)所示的阶跃状时停止。

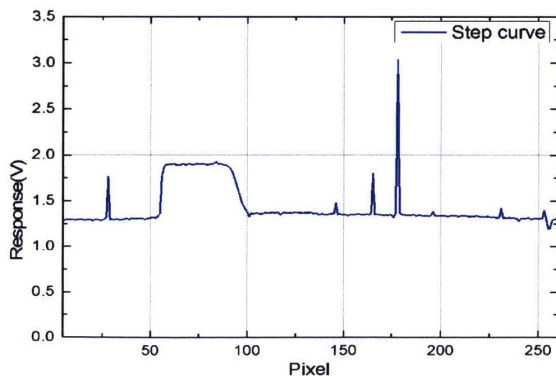


图 4.10 阶跃曲线

Figure 4.10 Step curve

此刻线列探测器件相对于靶标成像的位置如下图（4.11）所示‘3’位置处。

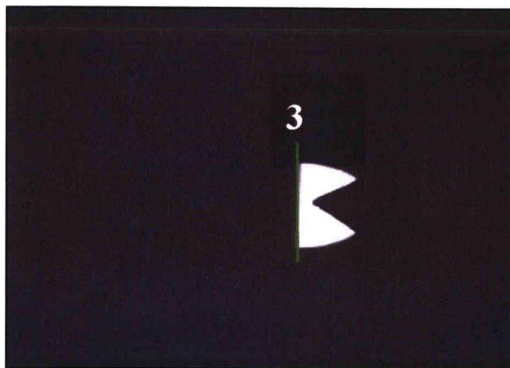


图 4.11 线列器件相对靶标位置‘3’

Figure 4.11 The position ‘3’ of the target relative to the linear device

3 号位置是采集输出曲线呈阶跃状时即为刀口成像的刃边横跨过线列探测器像元，即找到了所需要的数据采集的准确位置。

4.3 线列器件 MTF 计算

4.3.1 ESF 曲线生成

当采集输出值的曲线为阶跃状时，此刻刃边像正好跨越了线列器件的像元。刀口刃边的倾斜角度为 θ ，此时线列器件像元的输出为从全暗过渡到全亮，光敏元输出的过渡部分曲线对应为 ESF 函数，将像元的输出沿着刃边的方向进行投影，投影坐标垂直于刃边，则投影后的等效扫描步长为 $P \cdot \sin \theta$ ，倾斜刀口法的投影过程如图(4.12)所示。

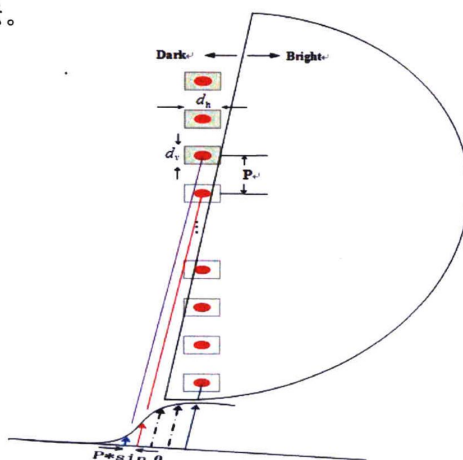


图 4.12 线列器件输出投影

Figure 4.12 Linear device output projection

将线列器件的输出值投影到垂直于刀口刃边方向的坐标轴上,并将线列器件的输出值按照从暗到亮的顺序进行排列,由此提取出了完整的线列器件对刀口靶标刃边成像的边缘扩散函数曲线(ESF)。

对线列器件的 ESF 曲线的拟合,依然采用处理面阵器件时的三项 Fermi 函数进行拟合,效果如下图(4.13)所示。

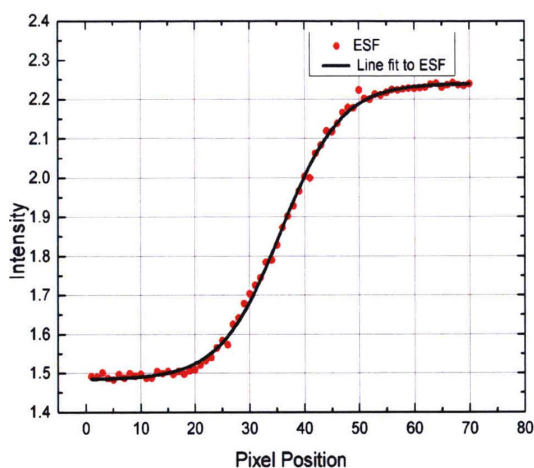


图 4.13 线列器件 ESF 曲线

Figure 4.13 ESF curve of linear device

4.3.2 线列 MTF 计算

得到线列器件对刀口靶标响应的 ESF 曲线后,需要再进行求导和傅里叶变换等计算 MTF 值。按照式(4.1)所示,角度计算公式中的参数只有 N 为未知的参数,线列探测器倾斜角度的准确与否关系到后续 MTF 值的精确程度,故 N 值的选取对于角度的计算至关重要。

线列探测器在受到黑体辐射时,光敏元产生电压值并输出。但因为串音的存在,即出现下列的情况:

- (1) 当线列探测器某些像元没有在刀口刃边靶标所辐射的区域但比较接近刃边辐射区域时,因为串音的缘故,该像元仍然会有电压值的输出,且满足像元与刃边辐射区域距离越远则输出电压值越小。
- (2) 当线列探测器某些像元完全在刀口刃边所辐射的区域且距离刃边比较近

时,也会因为受到串音的缘故,该像元仍然会有串音造成的额外电压值,则像元输出电压值依然递增,当像元与刃边辐射区域距离越远且完全在刀口辐射范围内时则输出电压区域不变。

故经过以上分析,在选择像元数 N 计算刀口靶标的倾斜角度时,不能完全按照从采集像元输出形成的边缘扩散函数来取像元的个数 N 。对于 N 的选取其计算步骤如下:

- ① 对线列器件输出值进行采集 100 帧,消除噪声的干扰。
- ② 求取 100 帧输出值平均数。
- ③ 将输出的 ESF 曲线中由暗到亮的部分进行数据间的等差计算并求取绝对值。将相减后的数据进行观察,找出变化相差较小的像元,即为真正的刃边所横跨的像元数 N 。
- ④ 得到像元数 N 后利用公式 (4.1) 计算出刀口刃边的倾斜角 θ 。

通过三项费米函数拟合 ESF 函数后,并求导得出准确的 LSF 曲线,利用离散傅里叶变换对线列 LSF 曲线进行 MTF 计算。其过程如下:

$$Y_k = \sum_{m=0}^{M-1} x_m e^{-j2\pi km/M} \quad m=0,1,2,\dots,M-1 \quad (4.2)$$

其中 x 取 LSF 曲线的序列值, M 是序列的数值个数, Y 是经过离散傅里叶变换后的结果。其中 Y 值的频率域的分辨率是计算 MTF 值的关键参数。

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (4.3)$$

其中 f_s 是系统的采样频率,其值为投影后实际的采样间隔 $D=P*\sin\theta$ 决定。 N 为经过计算得出的有效输出像元个数。

$$f_s = 1/D \quad (4.3)$$

经过傅里叶变换后的频域坐标轴的取值分别为 $0, 0, \Delta f, 2\Delta f \dots$ 。为了保证线列器件 MTF 值尽可能的反应器件的成像性能,在对 LSF 曲线使用方窗进行截取。线列红外探测器的 MTF 值的求解过程如下图(4.14)所示。

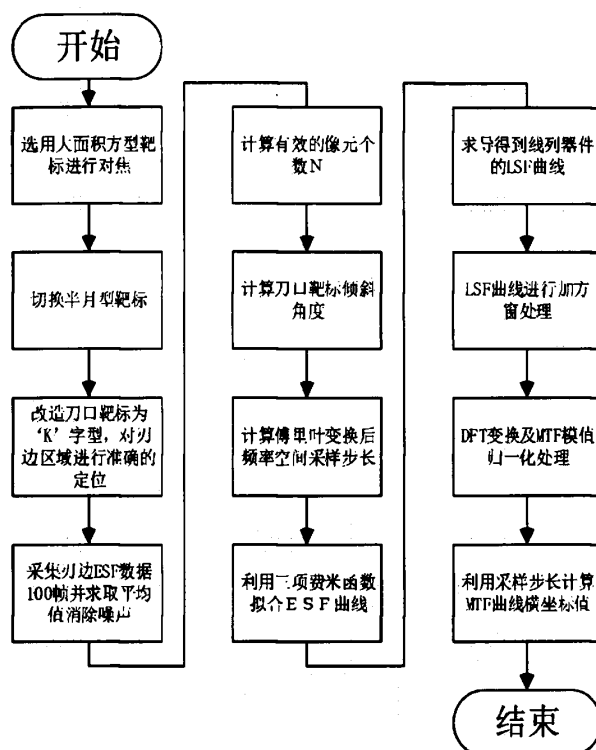


图 4.14 线列器件 MTF 计算流程图

Figure 4.14 MTF of linear detector flow chart

4.4 线列器件 MTF 测试

4.4.1 狭缝扫描法与改进倾斜刀口法测试对比

为了验证倾斜刀口法对 HgCdTe 红外线列器件的测试准确性，将倾斜刀口法与狭缝扫描法进行了对比测试。狭缝测试系统选择了法国 HGH 的红外焦平面测试系统，采用的狭缝宽度为 $10\mu\text{m}$ ，黑体经过狭缝对器件进行辐射，系统自动控制三维位移平台对线列探测器像元完成扫描并计算 MTF 数值。

采用测试器件的规格为 1024 元的中波 HgCdTe 线列红外探测器，其像元尺寸为 $14\mu\text{m}\times 14\mu\text{m}$ ，呈一字型排列，像元中心距为 $28\mu\text{m}$ 。在剔除盲元后随机选取其中的 3 个像元分别进行测试，采用 $2\mu\text{m}$ 步进完成扫描。三个像元的扫描 LSF 曲线和 MTF 计算结果分别如下图 (4.15) 所示。

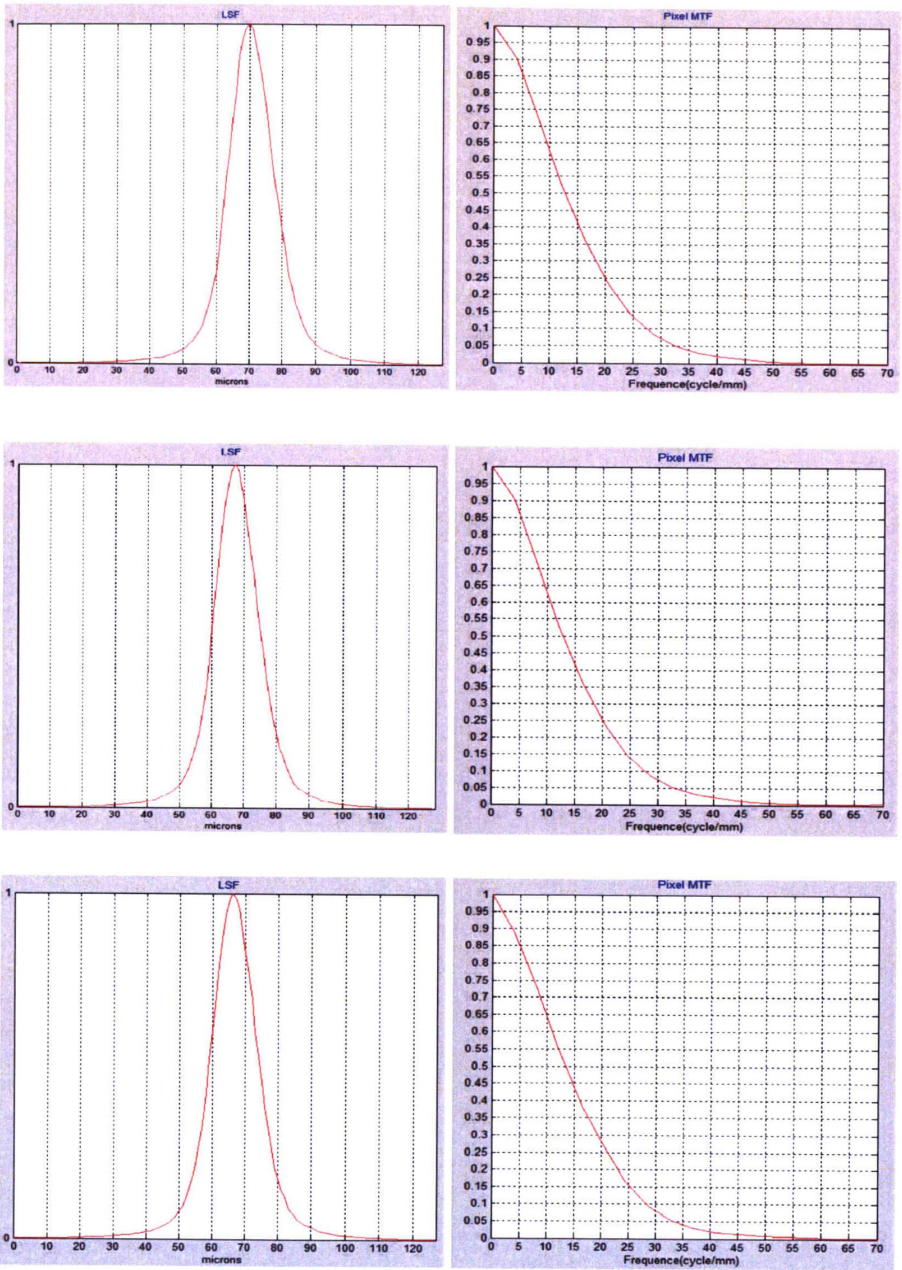


图 4.15 狭缝扫描法测试 LSF 和 MTF 曲线

Figure 4.15 LSF and MTF curves of slit scanning method

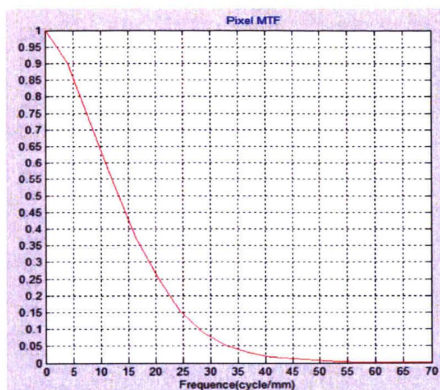


图 4.16 平均 MTF 曲线

Figure 4.16 Average MTF curves

如图（4.16）所示为三个测试像元的平均 MTF 曲线。根据该探测器像元尺寸，其像元中心距为 $28\mu\text{m}$ ，则其奈奎斯特频率为 $1/2 \cdot \text{pitch}$ ，可得其奈奎斯特频率频率约等于 17.8lp/mm ，其所对应的 MTF 值约为 0.33。对该红外器件利用改进倾斜刀口法进行测试，其 ESF 曲线和 LSF 曲线如下图（4.17）所示：

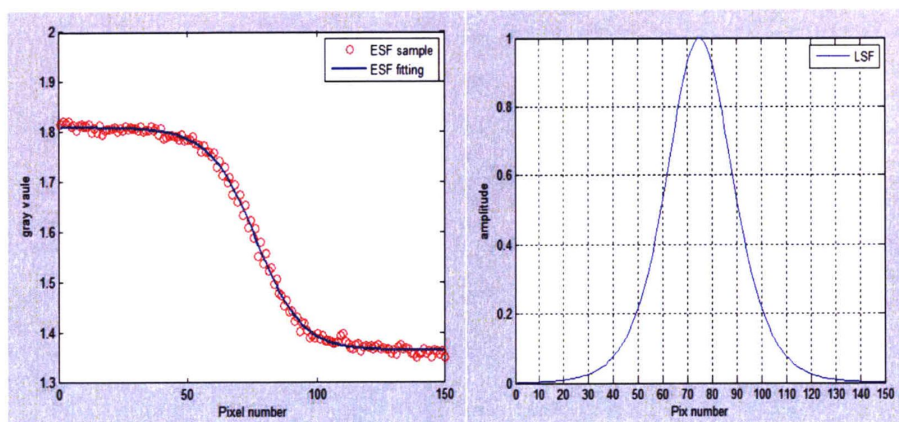


图 4.17 倾斜刀口法测试 ESF 和 LSF 曲线

Figure 4.17 LSF and MTF curves of slant knife edge method

HGH 红外焦平面测试系统在傅里叶变换时采取的加方窗的处理，故利用倾斜刀口法测试的 LSF 曲线进行离散傅里叶变换时，也采用方窗截取，最大程度的保留了探测器的 MTF 值的计算精度。两种测试方法 MTF 的测试结果如下图（4.18）所示。

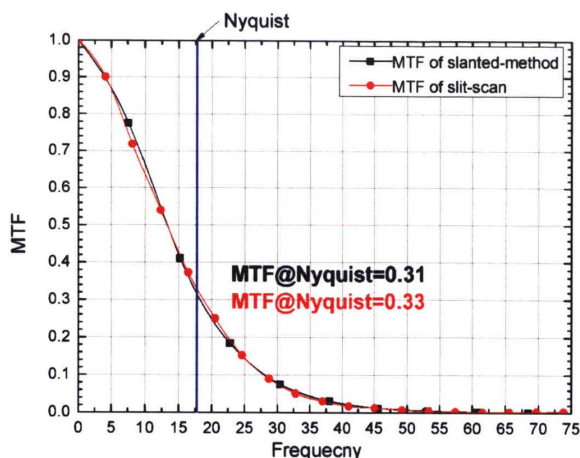


图 4.18 两种方法测试 MTF 对比

Figure 4.18 Two methods testing MTF contrast

将上图倾斜刀口法 MTF 测试结果与狭缝测试系统进行对比, 其中黑色方形线为改进倾斜刀口法测试结果, 红色圆形线为狭缝扫描法测试结果。将改进倾斜刀口法的结果进行十次测量后求取平均值, 并且除去镜头在奈奎斯特频率处的值 0.74, 则两者在奈奎斯特频率 17.8lp/mm 处值分别约为 0.31 和 0.33。分析该测试结果, 线列器件按照一字型排列, 狭缝扫描法在进行测试时为随机选取其中三个正常输出像元来进行扫描测试并求取平均值, 故用三个像元的平均值代表了该线列器件的 MTF 数值。倾斜刀口法的测试方法是利用一字型中的多个像元进行测试, 其结果为该线列器件的平均 MTF 值。故两种方法的测试结果不可能完全一致, 存在一定的误差。但在狭缝测试时会对像元通过示波器进行筛选, 选取出的像元为非盲元和输出值在正常范围内的像元。由结果可得, 倾斜刀口法对线列器件的测试结果与狭缝扫描法相近, 改进的倾斜刀口法对线列器件的测试切实可行。

4.4.2 线列器件 MTF 重复测试

在保持测试条件不变、测试人员不变和测试方法不变的条件下, 选定之前由面阵器件标定过的倾斜角度为 3° 时分别对线列器件进行 10 次数据采集, 并使用相同的计算方法对该线列 HgCdTe 器件进行了 MTF 计算。其测试计算结果如下图 4.19 所示, 在奈奎斯特频率处存在较小的差异, 高频处有一定的偏差。

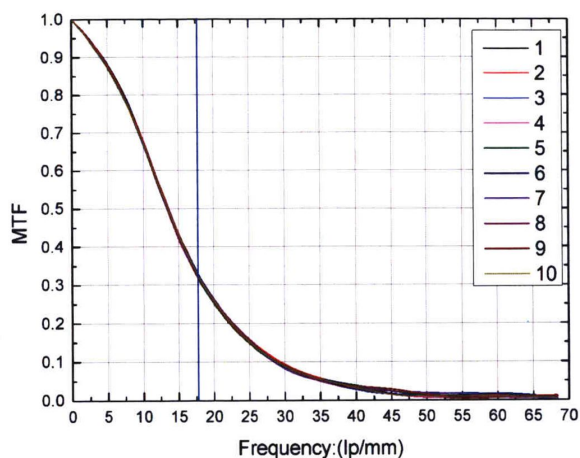


图 4.19 线列 MTF 重复测试

Figure 4.19 Liner MTF repeat test

4.4.3 线列器件不同温度 MTF 测试

保持测试条件不变，将差分面源黑体升高不同的温度对半月形靶标进行辐照。在不同的温度时对该线列器件 MTF 进行计算。在探测器的线性响应度范围内逐渐升高温度，直到器件到达饱和时器件 MTF 值衰减明显。在器件线性度的范围内未饱和时与辐照温度相关性不大，其值如下图（4.20）所示。

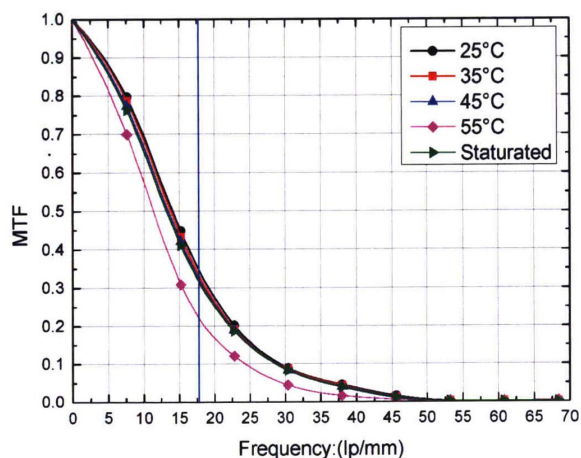


图 4.20 线列 MTF 重复测试

Figure 4.20 Liner MTF repeat test

4.4.4 框结构线列器件

调制传递函数能够如实地展现出红外探测器空间分辨能力和成像质量优劣。串音是造成红外探测器 MTF 数值降低的主要原因之一。串音主要由光学串音和电学串音共同构成,其中电学串音占总串音的主要部分。串音的存在会衰减器件输出的对比度,造成探测器 MTF 值降低。串音表现为当器件内某个特定光敏元受到入射光照射时,与之相邻的无照射光敏元有电信号输出,其本质是当光照射产生光生载流子横向扩散到相邻的光敏元区域被相邻像元吸收所致。故由载流子的横向扩散、漂移到相邻像元形成电学串音,会使探测器 MTF 值降低及成像质量严重退化。而串音与红外探测器结构的设计紧密相关,合理的结构器件结构设计可以有效降低电学串音的干扰。

针对 HgCdTe 红外探测器分别设计了包围像元的金属框结构^[117-120]和离子注入框结构对像元进行隔离并对串音进行抑制,并与无注入框的器件结构进行对比分析。

(1) 金属框器件结构

针对光生载流子的横向扩散,设计了一种给光敏元加金属框的结构对横向扩散载流子进行有效的吸收,在像元之间形成一定的隔离,有效减小光生载流子的横向扩散效应并降低了电学串音的干扰。其俯视结构如下图(4.21)所示:

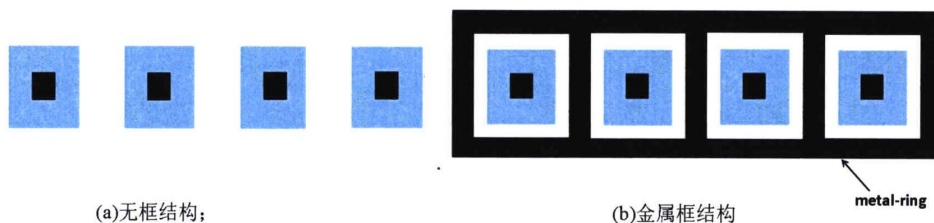


图 4.21 无框结构和金属框结构

Figure 4.21 Without guard-ring and guard-ring structure

如上图所示,所采用的两种结构的器件均为液相外延法生长非本征 P 型 HgCdTe,再通过离子注入形成背照式 N-on-P 型结构的器件。器件的制备工艺主要步骤有以下几步,首先是材料表面的清洗和腐蚀,再生长 ZnS 阻挡层减小材料表面损伤。经过光刻后在材料表面形成图形,在图形区域进行离子注入形成结区,主要是 B⁺离子的高能量注入到 P 型材料使其表面反型,形成 N-on-P 平面结。最后再经过 ZnS 和 CdTe 的双层钝化工艺、金属电极的制备和钢柱与读出电路的

互联完成最终器件的制备。图(4.21 a)为无金属框结构，图(4.21 b)中的黑色框为设计的金属框结构，其环绕在像元四周并连接到电路公共电极端，起到像元隔离及吸收载流子作用。其剖面结构如下图（4.22）所示：

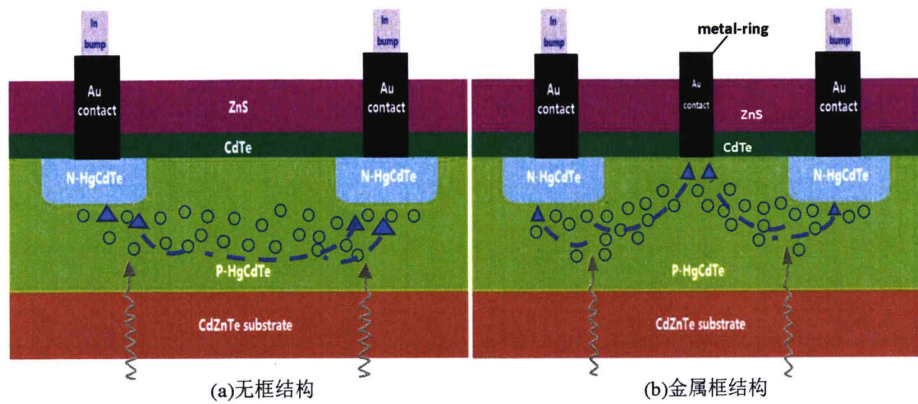


图 4.22 无框结构和金属框结构剖面图

Figure 4.22 Profile of Without guard-ring and guard-ring structure

在上图中，两种结构均为三种材料在 $\text{CdZnTe}^{[12]}$ 衬底上生成。前两层分别是厚度为 $2200 \text{ \AA}$ 的 ZnS 钝化层和 $1200 \text{ \AA}$ 的 CdTe 钝化层。第三层分别为 $1 \mu\text{m}$ 的 N-HgCdTe 和 $7 \mu\text{m}$ 的 P-HgCdTe 组成。第四层是厚度为 $350 \mu\text{m}$ 的 CdZnTe 衬底。PN 结区的面积大小为 $28 \times 28 (\mu\text{m}^2)$ 。金属框结构的 PN 结边缘距金属框的距离为 $9 \mu\text{m}$ ，金属框宽度为 $10 \mu\text{m}$ 并且与电路公共电极连接。如图(4.22 a)无金属框结构所示，当入射光产生的光生载流子会被距离较近的 PN 结所吸收，但是由于光生载流子横向扩散效应，产生在某光敏元附近的部分光生载流子会通过横向扩散被其相邻光敏元吸收，这种电学串音的现象造成了器件 MTF 值的降低。为了有效抑制电学串音的干扰，如图(4.22 b)金属框结构图所示，对器件光敏元四周采用金属框的环绕结构，此时通过横向扩散形成串音的部分光生载流子在横向扩散途中会被位于两个相邻像元中间的金属框所吸收，有效的降低了横向漂移到相邻像元的载流子数目，起到了有效抑制了电学串音的作用。

(2) 离子注入框结构

针对串音的干扰，设计了另一种离子注入框的结构对横向扩散载流子进行有效的吸收，并降低了电学串音的干扰。其俯视结构如下图（4.23）所示。

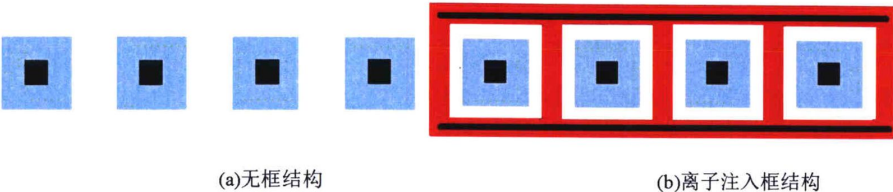


图 4.23 无框结构和离子注入框结构

Figure 4.23 Without guard-ring and ion implantation guard-ring structure

如上图所示，所采用的两种结构的器件均为液相外延法生长非本征 P 型 HgCdTe，再通过离子注入形成背照式 N-on-P 型结构的器件。图(4.23 a)为无金属框结构，图(4.23 b)中包围在像元周围的红色框代表离子注入框结构，其环绕在像元四周并连接到电路公共电极端，起到像元隔离并且吸收横向扩散载流子的作用。两器件的剖面图结构如下图（4.24）所示：

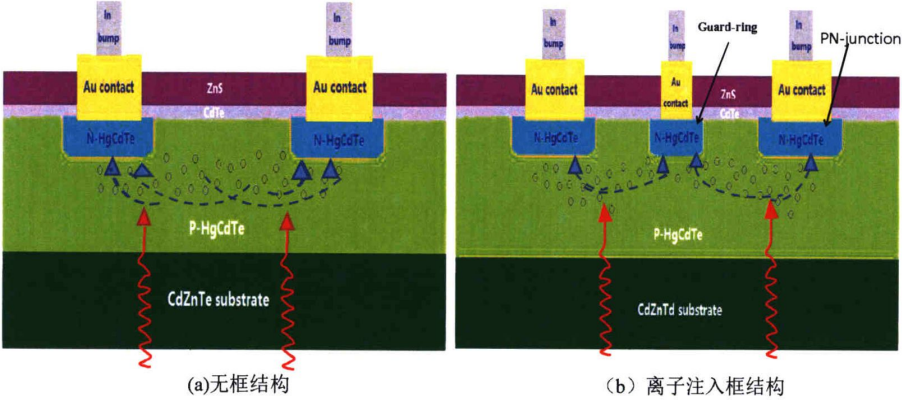


图 4.24 无框结构和离子注入框结构剖面图

Figure 4.24 Profile of Without guard-ring and ion implant guard-ring structure

如上图所示，离子注入框结构为三种材料在 CdZnTe 衬底上生成。前两层分别是厚度为 $2200\text{ \AA}$ 的 ZnS 钝化层和 $1200\text{ \AA}$ 的 CdTe 钝化层。第三层分别为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 N-HgCdTe 和 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的 P-HgCdTe 组成。第四层是厚度为 $350\text{ }\mu\text{m}$ 的 CdZnTe 衬底。PN 结区的面积大小为 $28\times 28(\text{ }\mu\text{m}^2)$ 。离子注入框结构的 PN 结边缘距金属框的距离为 $11\text{ }\mu\text{m}$ ，离子注入框与电路公共电极连接。离子框结构如图(4.24 b)所示，通过离子注入的方式对器件光敏元四周进行环绕，此时通过横向扩散形成串音的部分光生载流子在横向扩散途中会被位于两个相邻像元中间的离子框吸收，有效的降低了横向漂移到相邻像元的载流子数目，起到抑制了电学串音的作用。

4.4.5 不同结构线列器件 MTF 对比

本文选用上海技术物理研究所自行研制的三款背照式中波线列 HgCdTe 红外探测器。三款器件结构分别为无框结构、金属框结构和离子注入框结构。像元尺寸为 $28\mu\text{m}\times 28\mu\text{m}$ ，像元中心距为 $56\mu\text{m}$ ，截止波长像元为 $4.6\mu\text{m}$ ，规格为 512×1 。本文对上述三种结构的 HgCdTe 红外探测器分别使用了改进倾斜刃边法进行了 MTF 测试。首先使用粗调旋钮使得器件对平行光管出来的靶标图像有响应，再微调聚焦旋钮使的输出值最大时即探测器处于镜头焦面上，继续调节探测器响应位置寻找刃边位置直到所需阶跃曲线出现并采集 100 帧数据。三种结构的 ESF 曲线如下图（4.25）所示：

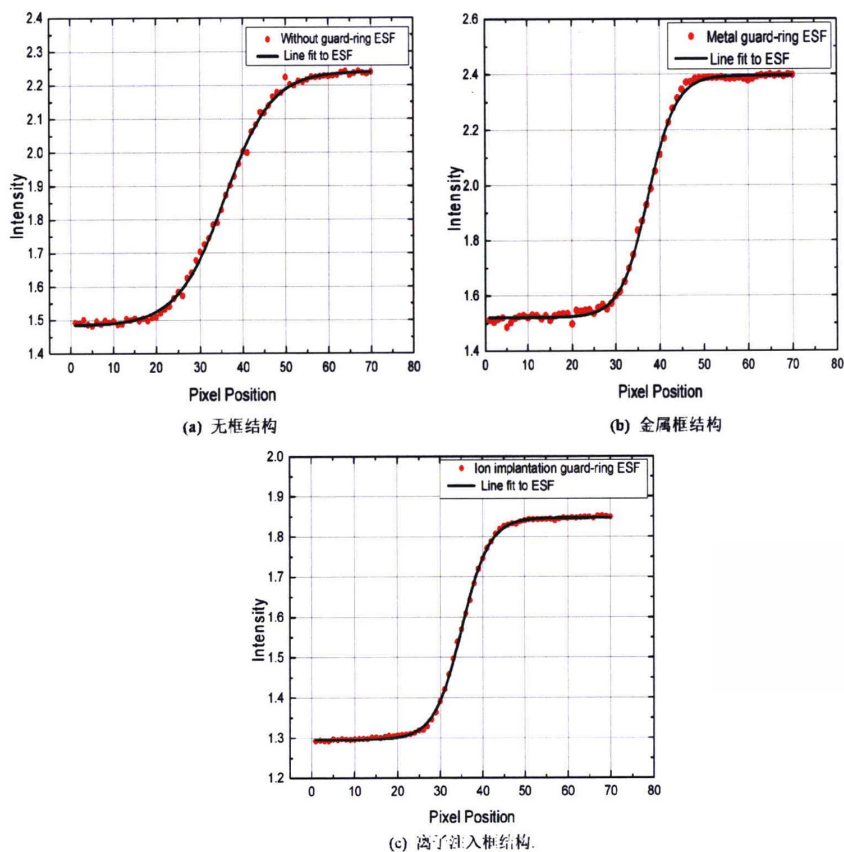


图 4.25 三种结构 ESF 曲线图

Figure 4.25 ESF curves of three structure

在曲线拟合时仍然采用和 ESF 曲线形状相似的三个费密函数进行拟合。MTF 曲线^[12-13] 如下图(4.26)所示，通过求取 LSF 傅里叶变换的模值进行计算^[14]，本

文为了得到更加准确的器件 MTF 数值，在计算傅里叶过程中依然对信号采取加方窗计算。

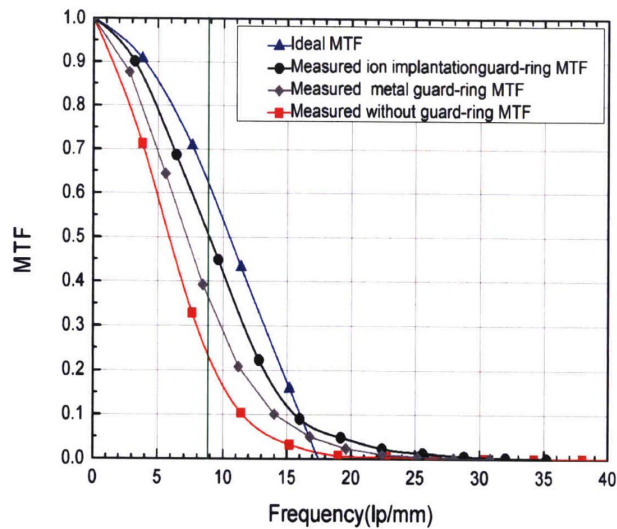


图 4.26 三种线列结构 MTF 对比

Figure 4.26 Comparison MTF of three line array structure

在测试中已知所用中波红外镜头奈奎斯特频率处的 MTF 值约为 0.82，因此在最终测试所得的系统 MTF 中需要除去镜头 MTF 值。在上图中黑圆线和菱形灰线分别代表了离子注入框结构和金属框结构的 MTF 曲线，红色方块线代表了无框结构的 MTF 曲线。三角形蓝色线代表了理想像元的 MTF 曲线，其计算公式为可以用 $\text{sinc}(\pi \times f \times \text{pitch})$ 函数表示。根据像元尺寸，奈奎斯特频率为 1/2 的像元间距，约为 8.9lp/mm。在频率轴上从低频部分到高频部分观察，可以看到两种带框结构的 MTF 值明显优于无框结构。而离子注入框因为其深入到器件的内部，而金属框只是位于器件的外部去隔离像元，又因横向载流子是在器件内部进行扩散，所以离子注入框对于横向扩散载流子的吸收效果要优于金属框结构，故其对串音的抑制作用要优于位于器件外部的金属框结构，体现在 MTF 数值上则为离子注入框的 MTF 值高于金属框结构，并且更接近与理想像元的 MTF 值。离子注入框和金属框在奈奎斯特频率处的 MTF 值分别约为 0.42lp/mm 和 0.29lp/mm，除去镜头后的 MTF 值约为 0.51lp/mm 和 0.35lp/mm，而无框结构在奈奎斯特频率处的值约为 0.19lp/mm，除去镜头的 MTF 值约为 0.23lp/mm。可以得到离子注入框是三种器件中 MTF 值最高的结构。同时，MTF 曲线也指出了无

框结构受到串音的影响较大,对于无框结构而言,光敏元有可能会收集到相邻处光敏元处扩散过来的横向载流子,导致了 MTF 数值的衰减。最终可得出框结构能够有效的降低这种载流子横向扩散的作用,提升器件的 MTF 值。

4.4.6 不同像元尺寸 MTF 对比

对上海技术物理研究所研制的 80×1 元线列 HgCdTe 探测器进行 MTF 测试,该器件的截止波长为 $4.6\mu\text{m}$,像元尺寸为 $45\mu\text{m} \times 56\mu\text{m}$,结构为无框结构。将其与 512×1 的无框线列器件像元尺寸为 $28\mu\text{m} \times 28\mu\text{m}$ 进行 MTF 测试对比,两款器件中心距都为 $56\mu\text{m}$ 。其中 512×1 线列器件的像元尺寸面积比 80×1 线列器件的面积大了近 2 倍。其测试结果如下图 (4.27) 所示:

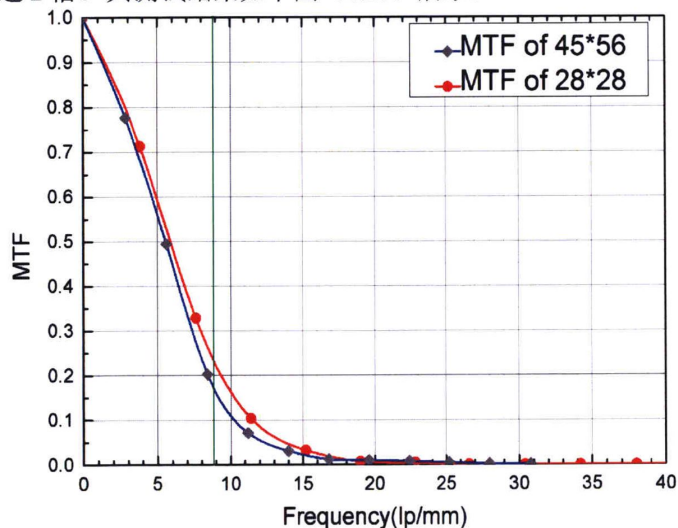


图 4.27 三种线列结构 MTF 对比

Figure 4.27 Comparison MTF of three line array structure

由上图得,除去镜头 MTF 值后 80 元测试所得 MTF 值在奈奎斯特频率处的值约为 0.18,512 元的在奈奎斯特频率处的 MTF 值约为 0.23。两者相比较可得,当像元中心距固定时,大的像元使得相邻间像元距离间隙减小,从而吸收来自相邻像元的横向扩散载流子的数量增大,则电学串音对 MTF 的衰减程度也越大。小尺寸的像元实际距离间隙较大,则电学串音对 MTF 值的影响也较小,故其 MTF 值较高。

4.5 本章小结

本章首先介绍了线列 HgCdTe 红外探测器的 MTF 测试原理, 针对倾斜刀口法只适用于面阵器件的 MTF 测试, 对比分析了面阵测试方法, 提出了改进倾斜刀口法对线列器件进行测试, 并阐述了线列器件的测试原理。

其次针对线列红外探测器在利用倾斜刀口法时很难准确获得线列相对于刀口刃边成像的相对位置, 提出了将刀口靶标进行改造为‘k’字型靶标。经过调焦和移动三维位移平台, 观察数据采集平台的器件输出响应曲线, 当分别为‘一’字形, ‘凹’字形和阶跃状时可清楚获得线列器件与靶标的相对位置。很好的解决了线列器件的定位问题。利用线列器件的 ESF 函数进行 MTF 值的计算。并对计算的方法做出了修正, 并与其它测试方法进行了对比。

最后利用该方法对三个相同规格单不同结构的 HgCdTe 红外线列探测器件进行了 MTF 的测试和对比。结果表明离子注入框结构对于形成电学串音的横向扩散载流子吸收作用最为明显, 对串音干扰有较好的抑制。故其 MTF 曲线较金属框结构和无框结构值为最优。

第 5 章 器件不稳定像元和 1/f 噪声分析

5.1 不稳定像元分析

HgCdTe 红外焦平面探测器由于材料生长、制备工艺水平等原因，故不可避免的存在着一些缺陷，缺陷的存在导致不能形成理想的晶体结构。这种缺陷的存在，使得红外焦平面探测器在均匀背景辐射下正常工作时，某些像元会产生持续的无规则的输出电压值的跳跃、漂移等现象。不稳定像元的存在，对于后续的红外探测器应用于小目标跟踪时，会对跟踪算法的有效性造成破坏，造成跟踪目标的丢失。

5.1.1 不稳定像元的定义

不稳定像元是由探测器在工艺制备过程中的器件内在缺陷引起的，其表现为探测器正常工作时采集到的像元输出值无规律的持续阶段性跳跃和缓慢跳跃等现象，跳跃时的输出值幅度远远大于其像元平均输出值的 8 倍标准差以上，且跳跃次数大于 5 次以上时可定义为不稳定像元。下图(5.1)所示为不稳定像元的在均匀背景下的一种典型输出值。

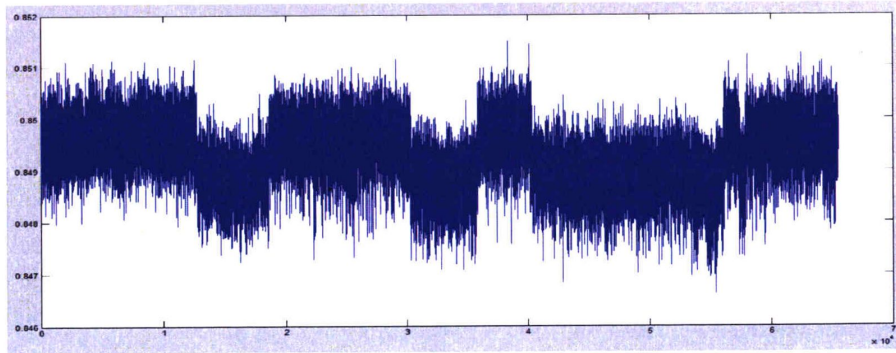


图 5.1 典型不稳定像元

Figure 5.1 Typical unstable pixel

5.1.2 不稳定像元硬件采集系统

对截止波长为 12 μm 的线列长波 HgCdTe 红外焦平面正常工作的情况下进行数据采集。探测器被封装在温度为 80k 的杜瓦中，黑体温度选择为 293K 对准探

测器进行不稳定元的采集。其硬件采集系统主要采用高速度的数据采集卡，能够实时的将前端数据采集到的像元输出值传送到上位机显示系统并将数据存储在硬盘上。其硬件采集卡部分主要包括了模拟前端处理电路、模拟采集板、数字控制板。模拟前端处理电路是用于采集前端的驱动电路，单端转差分以及放大偏置电路等功能。模拟采集板的主要作用是通过 18bits 的 ADC 将前端模拟信号转换为 LVDS；信号数字控制板主要通过 LVDS 信号高速抓取模拟采集板的信号，同时通过高速的 usb2.0 接口上传到上位机。其硬件测试平台框图如下图(5.2)所示：

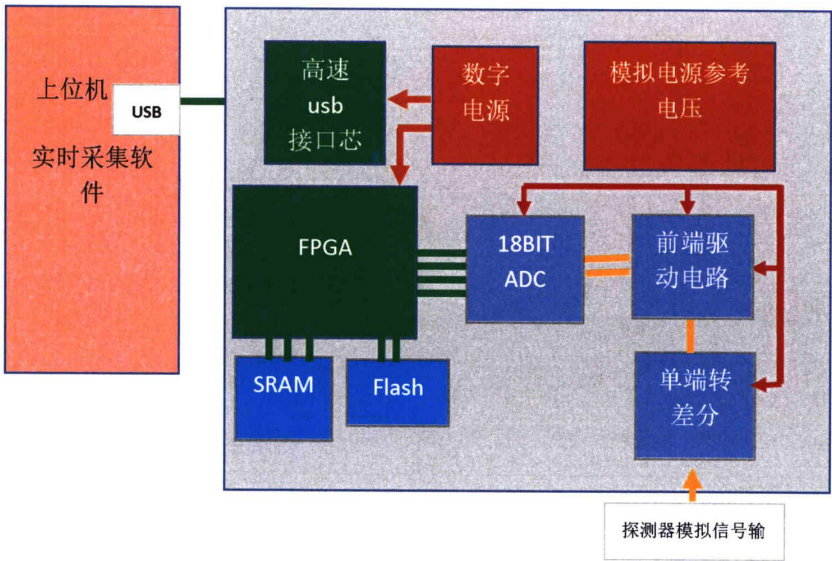


图 5.2 数据采集系统

Figure 5.2 Data acquisition system

5.1.3 不稳定像元的判定

对探测器正常工作时不稳定像元的判定是研究不稳定像元的前提条件。判定不稳定像元的方法主要有以下步骤：

(1) 通过红外焦平面性能（不稳像元）测试系统使线列焦平面探测器工作在正常状态下。调整工作点、积分时间等测试条件使探测器组件的工作状态处于最佳模式，并保持测试条件不变，对输出信号电压进行数据采集。

(2) 在高背景状态下对不稳定像元测试时,采用 8~12.5 μm 滤光片,黑体温度为 293K 的测试条件。进行两点矫正后连续采集不低于 50000 帧数据。

(3) 统计每个像元 50000 帧下的电压平均值 $\bar{V}_i$,

$$\bar{V}_i = \frac{1}{50000} \sum_{j=1}^{5000} V_{i,j} \quad (5.1)$$

其中 $V_{i,j}$ 为第 i 个像元在第 j 帧的输出电压值。

(4) 计算像元是否为不稳像元的判定阈值 σ_i

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{50000 - 1} \sum_{j=1}^{50000} (\bar{V}_i - V_{i,j})^2} \quad (5.2)$$

(5) 确定不稳像元的阈值 σ_i 时,要分别先去除像元噪声的异常点和盲元后再计算时域噪声平均值。

(6) 不稳定像元判定标准:统计 50000 帧中每一帧与当前帧平均输出电压相差的绝对值大于 $n\sigma_i$ 的像元(n 推荐为 5~8), F 帧中出现 N 次(推荐 5 次)以上即为不稳定像元。

5.1.4 不稳定像元的分类

利用数据采集系统对 512*1 的线列长波 HgCdTe 红外焦平面进行了采集,根据不稳定像元的定义和判定标准进行了判定。按照其形状特征主要分类为以下几种类型:

(1) 电报噪声型不稳定元,如下图(5.3)所示。

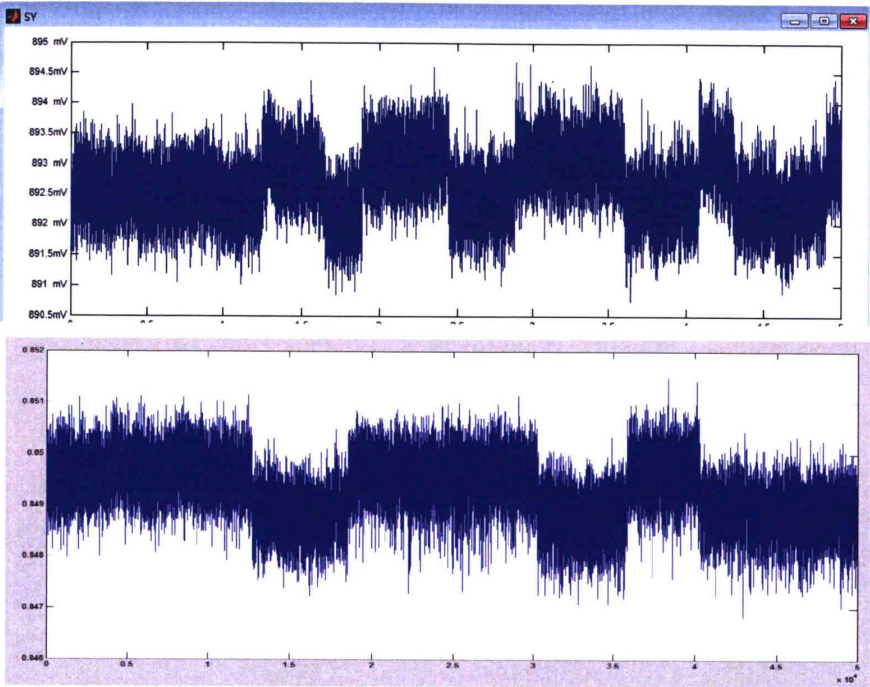


图 5.3 电报型不稳定元

Figure 5.3 Telegraph unstable pixel

(2) 梳子型不稳定元，如下图(5.4)所示。

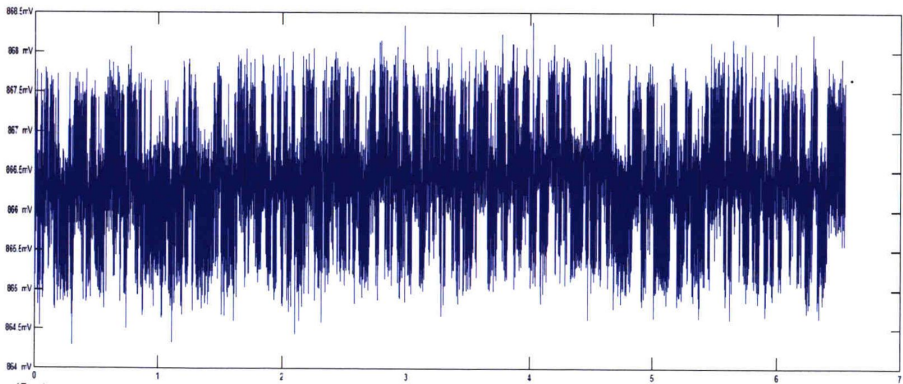


图 5.4 梳子型不稳定元

Figure 5.4 Comb shaped unstable pixel

(3) 波动型不稳定元，如下图(5.5)所示。

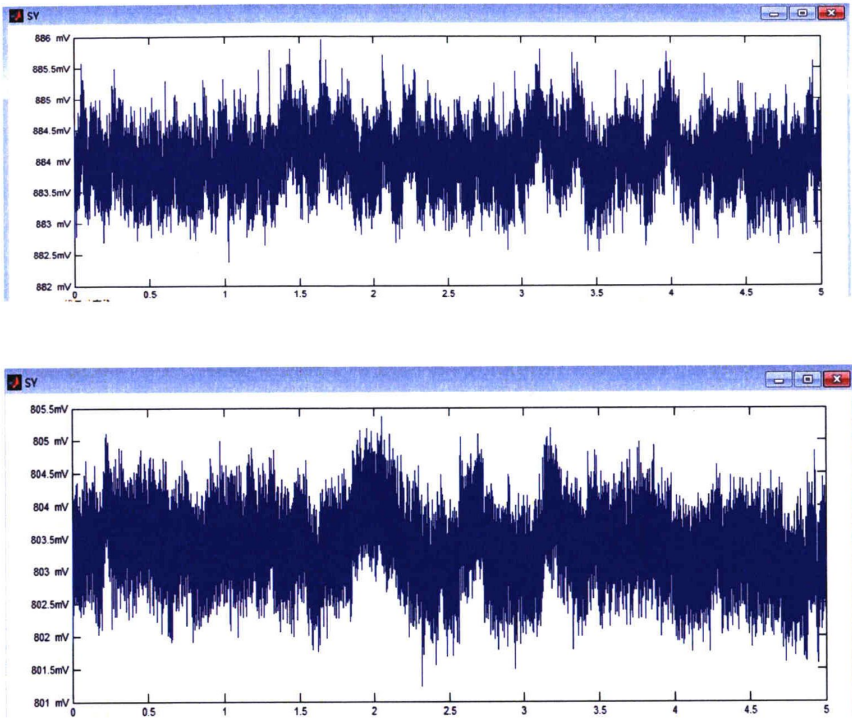


图 5.5 波动型不稳定元

Figure 5.5 Wave shaped unstable pixel

由上述不稳定像元判定得到的图像结果可知，根据超过指定倍数的标准差，可以看出在所有采集到的 5 万帧数据中电报噪声型不稳定像元跳动的频率最低，大约 5 千帧到一万帧输出像元值跳动一次，但像元输出值偏离平均电压值幅度较大。而梳子状的不稳定像元跳动频率最高，约 1000 帧就跳动一次，此类不稳定像元的频繁跳动对于探测器应用于目标追踪时对算法造成极大地干扰。波动型不稳定像元的跳动频率介于前两类像元之间，但其像元输出整体偏离平均值的幅度最小，对于后续的应用算法造成的干扰最小。

5.2 器件 1/f 噪声分析

5.2.1 器件 1/f 噪声

HgCdTe 红外焦平面的内部噪声与其器件内部结构和器件工艺水平有着之间

的关系。其内部噪声主要由低频噪声和白噪声两部分组成，其中低频噪声分为 $1/f$ 噪声^[122-124]和 G-R 噪声，而白噪声由热噪声和散粒噪声构成。其噪声组成如下图所示(5.6)所示：

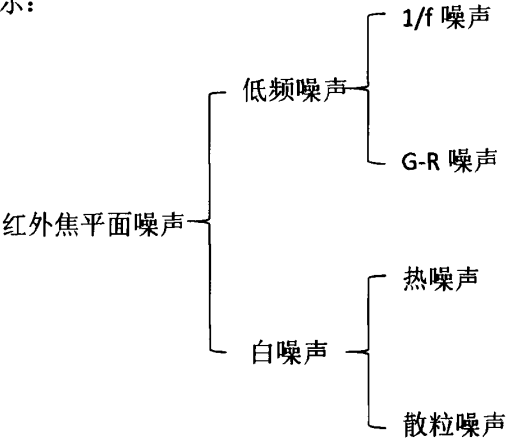


图 5.6 红外探测器噪声组成

Figure 5.6 Noise of IR detector

以上四类噪声功率谱所对应的频率分别为如下图(5.7)所示：

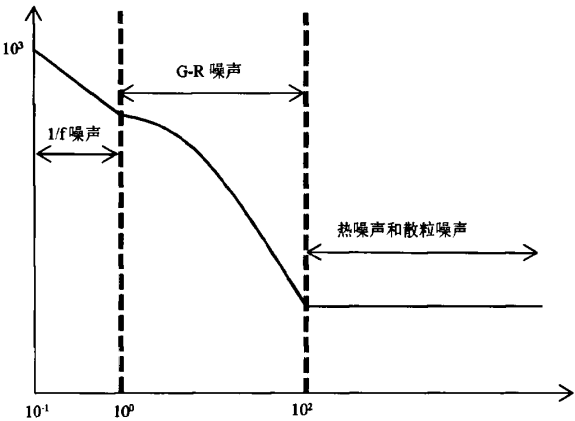


图 5.7 噪声功率谱

Figure 5.7 Noise power spectrum

$1/f$ 噪声最早是由约翰逊在 1925 年在电子管中发现的，次年肖特基对其进行了定义的解释。 $1/f$ 噪声的特点是其噪声功率谱密度随着频率的增加而减小，呈现出负指数型的变换趋势，其数学表达式为：

$$S(f) = \frac{A}{f^\gamma} \tag{5.3}$$

其中 A 表示为 1/f 噪声功率谱的振幅，为一个常数。 γ 为频率指数因子，其值一般约等于 1。

G-R 噪声也成为产生复合噪声，是受器件中陷阱、杂质等形成的产生-符合中心随机对载流子的发射和俘获而造成的电压电流的涨落现象。是一种常用来评估红外器件可靠性的重要指标。G-R 噪声功率谱的表达式如下所示：

$$S_{g-r}(f) = \frac{A}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (5.4)$$

其中 A 为幅值， f_0 为特征频率。

热噪声是指探测器中载流子由于热运动而产生的噪声，其大小与器件等效电阻和温度相关，由于布朗运动的存在即是在器件不工作时也仍然存在。热噪声的功率谱密度函数公式如下：

$$S = 4KTR \quad (5.5)$$

其中 K 为玻尔兹曼常数，T 为温度，R 是等效电阻。

5.2.2 不稳定像元 1/f 噪声对比

1/f 噪声与红外探测器件的可靠性相关，故对不同类型的不稳定像元进行了的 1/f 噪声分析并且与正常像元作出对比。

(1) 电报噪声型不稳定元与正常元 1/f 噪声对比，如下图(5.8)所示。

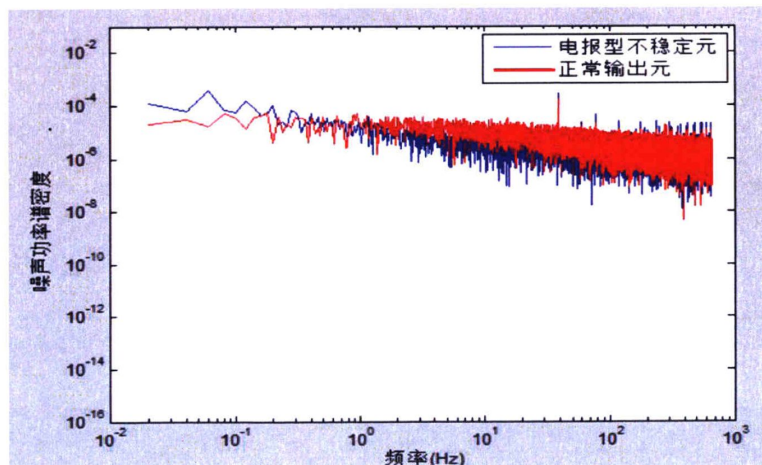


图 5.8 电报噪声型不稳定元与正常元 1/f 噪声

Figure 5.8 1/f noise of Telegraph unstable pixel and normal pixel

(2) 梳子型不稳定元与正常元 $1/f$ 噪声对比，如下图(5.9)所示。

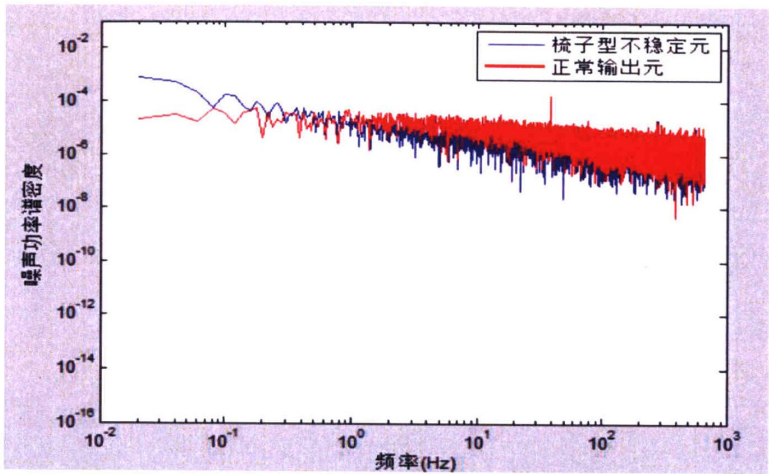


图 5.9 梳子型不稳定元与正常元 $1/f$ 噪声

Figure 5.9 $1/f$ noise of comb unstable pixel and normal pixel

(3) 波动型不稳定元与正常元 $1/f$ 噪声对比，如下图(5.10)所示。

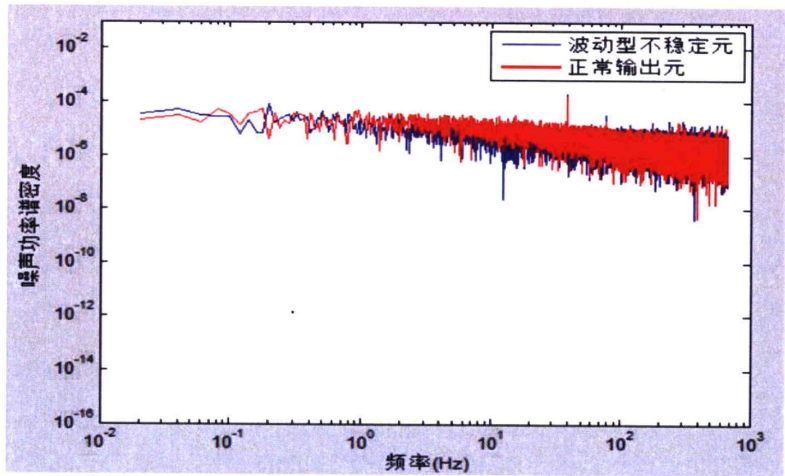


图 5.10 波动形不稳定元与正常元 $1/f$ 噪声

Figure 5.10 $1/f$ noise of wave unstable pixel and normal pixel

由以上各元的噪声功率谱的分析对比，可以看出，所测试器件在双对数坐标系中所表现出的曲线并无明显的‘驼峰’，即所测试器件无明显的附加 G-R 噪声。在低频处时梳子型不稳定像元与正常像元 $1/f$ 噪声相比其输出幅值相差最大，

电报型不稳定像元输出值与正常像元 $1/f$ 噪声相比相对于梳子型幅值差相对较小，而波动型不稳定元与正常元 $1/f$ 噪声输出在低频处的幅值输出相差最小。分析结果与实际工作中不稳定像元跳动的相对频率及偏离平均输出值大小的情况较为符合。

5.3 本章小结

本章主要分析了 HgCdTe 探测器在工作时会有不稳定像元的产生，对于不稳定像元出现的原因尚不明确。利用简单的判定算法对不稳定像元进行判定，根据不稳定像元所表现出的形态将其进行了分类，不稳定元大体分为了电报噪声型、梳子型、波动型三类。并针对不稳定像元与正常输出元做了简单的 $1/f$ 噪声分析，通过计算可得出在低频段不稳定像元的 $1/f$ 噪声幅值比正常元稍高。

第6章 总结与展望

6.1 本文总结

本文针对 HgCdTe 红外焦平面探测器应用有明确的测试调制传递函数要求,搭建了利用倾斜刀口法测试探测器 MTF 的测试平台。主要工作总结如下:

1. 搭建了基于倾斜刀口法的硬件测试平台及数据采集的软件编程。实现了对不同规格 HgCdTe 红外焦平面的线列器件和面阵器件的 MTF 测试。

2. 针对面阵红外探测器存在的条纹噪声问题,应用双密度双树复数小波对红外图像进行了频域变换,在频域中对条纹噪声幅值大的高频系数进行单支重构进行去噪,去噪效果较为明显。

3. 运用带滑动窗口的 3σ 准则提高了对盲元的检测精度。选用自适应中值滤波对采集时出现的随机噪声进行去除的同时较好的保持了图像边缘的细节。通过 Canny 算子和 Hough 变换等最后计算出准确的刃边的倾斜角度。

4. 对刃边输出值进行投影获得边缘扩散函数,对函数曲线使用费密函数进行拟合后再分别进行求导和傅里叶变换计算 MTF 值。利用获得的已知角度计算采样步长并获频率横坐标值。完成了中波面阵 HgCdTe 红外焦平面的 MTF 测试。

5. 对线列器件相对于刃边的位置定位问题提出了改造‘K’字型靶标进行定位的方法,可以准确获知线列器件与刃边像的相对位置。对线列器件进行投影并选取合适的像元进行角度计算,完成了使用倾斜刃边法对线列探测器的 MTF 的测试。

6. 对相同尺寸无框结构、金属框结构和离子注入框结构的中波线列 HgCdTe 红外焦平面 MTF 进行了测试分析。由 MTF 数值可分析得出,框结构对于横向载流子的扩散起到明显的抑制作用,三种结构中离子注入框结构对电学串音抑制效果最好。

7. 对探测器工作中的某些不稳定元做出了判定,并将不稳定元与正常输出像元做了简单的 $1/f$ 噪声的分析对比。

6.2 本文展望

本文利用倾斜刀口法完成了对 HgCdTe 红外焦平面 MTF 的测试，通过对测试方法的改进使得该方法可同时适用于面阵和线列器件的 MTF 测试，但还有一些问题需要进一步探讨。

1. 对于倾斜刀口法测试 MTF 的方法，不论对是面阵器件还是线列器件，倾斜角度的准确计算对于后续的 MTF 精确度至关重要。面阵的角度计算仍需要更加精细的图像处理算法获得更加准确的倾斜角度，线列器件的有效角度计算也需要更加深入研究。

2. 国外针对红外探测器的 MTF 模拟仿真的研究已有很多，根据红外器件的制备工艺利用工艺参数对器件的 MTF 值进行建模计算，并将最终的器件实测值与模拟值进行了对比。未来应进一步研究器件的模拟 MTF 值，对于指导器件的制备工艺具有重要的意义。

3. 本文虽然针对线列及面阵 MTF 测试方法进行了研究，但因为两种测试方法中用到的计算方法和数据处理方法不尽相同，后续需要进一步将计算方法准确度提高并能够嵌入到 Labview 测试软件平台中形成采集与计算于一体的软件平台。

参考文献

- [1] A Rogalski Infrared detectors: an overview[J]. Infrared Physics & Technology: 2002 ,43 (3-5) :187-210.
- [2] William Herschel. Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Vol. 90 (1800), pp. 284-292.
- [3] A Rogalski. History of infrared detectors[J]. Opto-Electronics Review: 2012, 20 (3):279-308.
- [4] L Becker. Current and future trends in infrared focal plane array technology[C]. Proc of SPIE: 2005, 5881:588105.
- [5] A Rogalski. Infrared detectors: status and trends[J].Progress in Quantum Electronics: 2003, 27(2):59-210.
- [6] A Rogalski. Material considerations for third generation infrared photon detectors[J]: 2007 ,50(2-3):240-252.
- [7] H Schneider, P.Koidl, M.Walther ,et al. Ten years of QWIP development at Fraunhofer IAF[J]. Infrared Physics & Technology: 2001, 42 (3) :283-289.
- [8] A Rogalski. Quantum well photoconductors in infrared detector technology[J]. Journal of Applied Physics: 2003, 93 (8):4355-4391.
- [9] A Rogalski, P Martyniuk. InAs/GaInSb superlattices as a promising material system for third generation infrared detectors[J]. Infrared Physics & Technology: 2006, 48 (1) :39-52.
- [10] A Rogalski, J Antoszewski, L Faraone. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. Journal of Applied Physics: 2009, 105 (9) :4-348.
- [11] A. Rogalski. Recent progress in third generation infrared detectors[J]. Journal of Modern Optics: 2010, 57 (18) :1716-1730.
- [12] A Rogalski. New material systems for third generation infrared photodetectors[J]. Opto-Electronics Review: 2008, 16 (4) :458.
- [13] A Rogalski. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook. Rep Prog Phys[J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68 (10):2267-2236.
- [14] 汤定元, 糜正瑜.光电器件概论[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1989.
- [15] A Rogalski. Infrared detectors[M]. CRC Press,2011.

- [16] 张德银.热释电钽酸锂薄膜红外探测器原理和制备研究[D]. 电子科技大学, 2008.
- [17] PR Bratt, SM Johnson, DR Rhiger, et al. Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems[C]. Proc Of SPIE 7298, 1-35(2009).
- [18] G Sullivan, E Aifer, M Razeghi et al. Comparison of type-II superlattice and HgCdTe infrared detector technologies[C]. Proc. of SPIE, (1-8)2007, 6542.
- [19] GJ Brown. Type-II InAs/GaInSb superlattices for infrared detection: an overview[C] Proc.of SPIE5783 65-77(2005).
- [20] E Theocharous, J Ishii, NP Fox. A comparison of the performance of a photovoltaic HgCdTe detector with that of large area single pixel QWIPs for infrared radiometric applications[J]. Infrared Physics & Technology, 2005, 46 (4): 309-322.
- [21] 何力, 杨定江, 倪国强,等. 现金焦平面技术导论[M]. 上海: 国防工业出版社, 2010 年.
- [22] WD Lawson, S Nielsen, EH Putley et al. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe[J]. Journal of Physics & Chemistry of Solids, 1959, 9 (3):325-329.
- [23] J Ziegler, D Eich, M Mahlein. The development of 3rd gen IR detectors at AIM[C]. Proc. of SPIE: 2011, 8012 (2) :150-154.
- [24] P .Bensussan, G Destéfani, M Sirieix. Fifty years of successful MCT research and production in France[J]. Proc. of SPIE: 2009, 7298 :72982N-72982N-31.
- [25] W Cabanski, J Ziegler. HgCdTe technology in Germany: the past, the present, and the future[C]. Proc. of SPIE: 2009, 7298:72982O-72982O-13.
- [26] MA Kinch Fifty years of HgCdTe at Texas Instruments and beyond[C]. Proc. of SPIE: 2009,7298:72982T.
- [27] WA Radford, EP Smith, R Graham, et al. Third generation FPA development status at Raytheon Vision Systems[C]. Proc. of SPIE: 2005, 24 (24) :241-247.
- [28] LA Paden, JW Bangs, RM Emerson, et al. Achieving Manufacturing Readiness for 6-Inch HgCdTe on Silicon[J]. Journal of Electronic Materials: 2010, 39 (7) :1007-1014.
- [29] R Wollrab, A Bauer, H Bitterlich,et al. Planar n -on- p HgCdTe FPAs for LWIR and VLWIR Applications[J]. Journal of Electronic Materials: 2011, 40 (8):1618-1623.
- [30] N Baier, C Cervera, O Gravrand, et al. Latest Developments in Long-Wavelength and Very-Long-Wavelength Infrared Detection with p -on- n HgCdTe[J]. Journal of Electronic Materials: 2015 ,44 (9) :1-7.

- [31] Y Reibel, F Chabuel, C Vaz, et al. Infrared dual-band detectors for next generation[C]. Proc. of SPIE: 2011, 8012 (2) :107.
- [32] MF Vilela, KR Olsson, EM Norton, et al. High-Performance M/LWIR Dual-Band HgCdTe/Si Focal-Plane Arrays[J]. Journal of Electronic Materials: 2013, 42 (11) :3231-3238.
- [33] HF Schaake, MA Kinch, D Chandra, et al. High-Operating-Temperature MWIR Detector Diodes[J]. Journal of Electronic Materials: 2008, 37 (9) :1401-1405.
- [34] P Martyniuk, A Koźniewski, A Kęblowski. MOCVD grown MWIR HgCdTe detectors for high operation temperature conditions[J]. Opto-Electronics Review: 2014, 22 (2) :118-126.
- [35] 樊翔, 倪旭翔. 光学传递函数测试仪的现状和发展趋势[J]. 光学仪器: 2003, 25(5):48-52
- [36] GD Boreman Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems[J]. Russ.chem.rev , 2001, 71 (2) :159-179.
- [37] 鄢天川. 摄像模组的解像力检测方法研究[D]. 西安理工大学, 2017.
- [38] CS Williams, OA Becklund. Introduction to the Optical Transfer Function[M]. SPIE Press: 2002, 36 (6): 515-516.
- [39] A Nakamura, Y Tanizaki, M Takeuchi. Impact of point spread function correction in standardized uptake value quantitation for positron emission tomography images: a study based on phantom experiments and clinical images[J]. Nihon Hōshasen Gijutsu Gakkai Zasshi, 2014, 70 (6) :542.
- [40] OL Munk, LP Tolbod, SB Hansen. Point-spread function reconstructed PET images of sub-centimeter lesions are not quantitative[J]. Ejnmmi Physics: 2017, 4 (1) :5.
- [41] J Parravicini, L Tartara, E Hasani. Fast calculation of the line-spread-function by transversal directions decoupling[J]. Journal of Optics, 2016, 18 (7) :075609.
- [42] HR Wilson, G Phillips, I Rentschler. Spatial probability summation and disinhibition in psychophysically measured line-spread functions[J]. Vision Research: 1979, 19 (5) :593-8.
- [43] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [44] Y Zhang, Y Li, H Wang. Analysis of the MTF of the TDI-CCD Camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34 (10):1590-1592.
- [45] LY Liu, BH Zhang, LI Ying cai. Analysis of the MTF and image quality of TDI-CCD camera[J]. Optical Technology, 2000, 26:481-483, 485.
- [46] 李进, 邢飞, 王翀. 空间 CCD 相机高精度在轨调制传递函数估算[J]. 光学学报: 2015

- (2):134-143.
- [47] LI Jin, YW Chen, C Hong-Bin. Research on MTF Measurement Technique for CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics: 2009, 30 (4):531-533.
- [48] M Estribeau, P Magnan. Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12333 slanted-edge methodology[C]. Proc. of SPIE: 2004, 5251 :243-252.
- [49] D Grois, I Shcherback, T Danov. Theoretical approach to CMOS APS PSF and MTF modeling - evaluation[J]. IEEE Sensors Journal: 2006, 6 (1) :118-124.
- [50] C Liu. Design of CMOS sensor fill factor for optimal MTF and SNR[C]. Proc. of SPIE: 2010,7826 (2) :78261N-78261N-10.
- [51] R Segal, I Shcherback, O Yadid-Pecht. CMOS Image Sensors: Two-Dimensional MTF for Anisotropic Resolution Characterization[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7 (6) :947-952.
- [52] L. Deluca, G. Cardone. Modulation Transfer-Function Cascade Model For A Sampled IR Imaging-System[J]. Applied Optics, 1991, 30:1659-1664.
- [53] K. J. Barnard, G. D. Boreman, A. E. Plogstedt, et al. Sine wave measurements of SPRITE detector MTF. Proc. of SPIE: 1991:426-431.
- [54] S. J. Pruchnic, G. P. Mayott, P. A. Bell. Measurements of optical transfer function of discretely sampled thermal imaging systems.in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers[C]. Proc. of SPIE: 1992:368-378.
- [55] A. H. Lettington, Q. H. Hong, J. Macdonald, et al. Measurement of the MTF and MRTD for focal plane array. Proc. of SPIE: 1993:217-224.
- [56] A. P. Tzannes, J. M. Mooney. Measurement Of The Modulation Transfer-Function Of Infrared Cameras[J]. Optical Engineering: 1995, 34:1808-1817.
- [57] R. G. Driggers, C. M. Webb, J. Pruchnic. Laboratory measurement of sampled infrared imaging system performance[J]. Optical Engineering: 1999, 38:852-861.
- [58] B Harchaoui, N Guerineau, M Caes. Modulation transfer function measurement of an infrared focal plane array using a nondiffracting array generator[C]. Proc. of SPIE: 2000 ,4130 (4) :631-637.
- [59] J Schuster. Numerical simulation of the modulation transfer function (MTF) in infrared focal plane arrays: simulation methodology and MTF optimization[J]. Physics & Simulation of Optoelectronic Devices, 2018 :53.

- [60] 周昕, 程新路, 黄援朝, 等. 利用激光散斑测试 CCD 的调制传递函数[J]. 四川大学学报: 1999, 36 (6) :1068-1071.
- [61] 杨桦, 焦文春, 朱永红, 等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数[J]. 光学学报, 2002, 22 (3) :313-316.
- [62] 王耀祥, 田维坚, 汪丽, 等. 矩形波板法测试光锥与 CCD 耦合器件的光学传递函数[J]. 光子学报: 2005, 34(6): 923-926.
- [63] 宋敏, 郑亚茹, 王玉新, 等. 利用 Michlshon 干涉仪测试 CCD 的调制传递函数[J]. 光学技术, 2006, 32 (1) :50-52.
- [64] 李金, 陈于伟, 陈红兵, 等. 矩形光栅法测试 CCD 调制传递函数的研究[J]. 半导体光电: 2009, 30 (4) :531-533.
- [65] 张晓琳, 杜国浩, 邓彪, 等. 刀口法高精度测试 X 射线 CCD 调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2010, 30. (6) :1680-1687.
- [66] 刘滨, 刘玉凤, 张保民, 等. 线扩散函数法用于 SPRITE 探测器调制传递函数测试[J]. 红外与激光工程: 1999, 28 (6) :58-76.
- [67] 陈冰. HgCdTe 致冷红外焦平面阵列 MTF 测试技术研究[D]. 南京理工大学硕士论文: 2002.
- [68] 张志恒. 红外焦平面阵列 MTF 测试系统和技术研究[D]. 南京理工大学硕士论文: 2004.
- [69] Cheng-ping Ying, Bin Wu, Heng-fei Wang, et al. MTF measurement of IRFPA based on double-knife edge scanning method[C]. Proc. of SPIE: Vol. 8907 890746-1~890746-7.
- [70] 许中华. 短波红外 InGaAs 焦平面调制传递函数测试技术研究[D]. 中国科学院大学, 2013.
- [71] X. Zhang, T. Kashti, D. Kella, et al. Measuring the modulation transfer function of image capture devices: what do the numbers really mean? Proc. of SPIE: 2012, 8293:829307-1~829307-11.
- [72] S Inoue, N Tsumura, Y Miyake. Measuring MTF of Paper by Sinusoidal Test Pattern Projection[J]. J.imaging Sci.technol:1997,41 (6) :657-661(5).
- [73] JM Boone, T Yu, JA Seiber. Sinusoidal modulation analysis for optical system MTF measurements. Medical Physics: 1996, 23 (12) :1955.
- [74] M Song, Y Li, Y Sun, et al. Acquiring sine grating pattern of dynamic varying frequency for

- p>measuring MTF of CCD Detectors[C]. Proc. of SPIE: 1998, 3553.
- [75] SM Niemi, M Cropper, M Szafraniec, et al. Measuring a charge-coupled device point spread function[J]. Experimental Astronomy: 2015, 39 (2) :1-25.
- [76] KJ Ando. MTF and point-spread function for a large-area CCD imager[C]. Proc. of SPIE: p 192-215 (SEE N75-28824 19-70).
- [77] I Shcherback, O Yadidpecht. CMOS APS MTF Modeling[J]. Electron Devices IEEE Transactions on, 2001, 48 (12) :2710-2715.
- [78] SB Rafol, E Cho. Modulation transfer function measurement on QWIP focal plane array[C]. Proc. of SPIE: 2008, 6941 :69410X-69410X-12.
- [79] XD Liu, X Zhang, LJ Wang. The Improvement of Slit Method in MTF Testing of Optical Systems[J]. Infrared Technology: 2009, 31 (9) :521-524.
- [80] JL Smith Fast slit-scan method for MTF and MRTD characterization in the HITL environment[J]. Proc. of SPIE: 1996, 142 :29-48.
- [81] F Zuo, Z Gao, M Su. Approach for MTF measurement of discrete imaging system[C]. Proc. of SPIE: 2002, 4925 (3) :668-673.
- [82] MA Chambliss, JA Dawson, EJ Borg, et al. Measuring the MTF of undersampled staring IRFPA sensors using 2D discrete Fourier transform[C]. Proc. of SPIE: 1995, 2470 (3) :312-324.
- [83] H Li, LY Chen, G Lei. Analysis and implementation on canted slit-method for the test of MTF of infrared imaging systems[J]. Infrared & Laser Engineering: 2004, 33 (2) :201-203.
- [84] B Wu, X Shi. MTF measurement of IRFPA based on double-knife edge scanning method[C]. 2013 ,8907 (2) :890746.
- [85] F Bu, Y Qiu, X Yan. Improvement of MTF measurement and analysis using knife-edge method[J]. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9 (3) :987-994.
- [86] C Ying, B Wu, H Wang. MTF measurement of IRFPA based on double-knife edge scanning method[C]. Proc. of SPIE: E Vol. 8907 890746-1~890746-1.
- [87] MY Tong, BK Chang, YS Qian. Study for modulation transfer function on infrared focal plane array[J]. Journal Infrared Millimeter & Wave: 2003, 22 (5) :365-367.
- [88] H Li, C Yan, J Shao. Measurement of the Modulation Transfer Function of Infrared Imaging System by Modified Slant Edge Method[J]. Journal of the Optical Society of Korea: 2016,

- 20 (3):381-388.
- [89] JKM Roland. A study of slanted-edge MTF stability and repeatability[J]. Proc. of SPIE: 2015, 9396:93960L-1~93960L-9.
- [90] M Guan, X Zhang, N Zhang. MTF measurement of CCD digital camera based on improved slanted-edge method[J]. Journal of Applied Optics: 2016, 37 (1) :100-104.
- [91] SB Rafol, E Cho. Modulation transfer function measurement on QWIP focal plane array[C]. Proc. of SPIE: 2008, 6941 :69410X-69410X-12.
- [92] S Najafi, K Madanipour. Measurement of the modulation transfer function of a charge-coupled device array by the combination of the self-imaging effect and slanted edge method[J]. Applied Optics: 2013, 52 (19) :4724.
- [93] A Gopal, SS Samant. Validity of the line-pair bar-pattern method in the measurement of the modulation transfer function (MTF) in megavoltage imaging[J]. Medical Physics, 2008, 35 (1) :270-279.
- [94] SD Jr, JS Goddard, RK Ferrell. Method for the measurement of the modulation transfer function of sampled imaging systems from bar-target patterns[J]. Applied Optics, 1995, 34 (4) :746.
- [95] T Jin, Y Wang. Method for the measurement of the modulation transfer function of charged-coupled device imaging systems from bar-target patterns[J]. Journal of Astronautics: 2001, 01(22):59-64.
- [96] 郝群, 沙定国, 郑乃梅. 光学传递函数测量仪刀口和狭缝两种扫描方法比较分析[J]. 光学技术: 2001, 27 (1) :41-43.
- [97] 陈颖, 李实, 王枫. 基于 LabVIEW 的 EAST 高速数据采集系统[J]. 计算机应用, 2012, 32 (s2):199-202.
- [98] 廖晶, 周卫星, 廖欢. 基于 NI Scope 实时数据采集系统设计[J]. 现代电子技术, 2009, 32 (20) :178-180.
- [99] 张科, 赵桂芳, 崔瑞青, 等. 一种提高红外焦平面阵列盲元检测精度的方法[J]. 红外与激光工程: 2007, 36 (4):453-456.
- [100] 安广齐, 赵剡, 张海峰. 红外探测器盲元检测及补偿[J]. 航空兵器, 2016 (3) :54-58.
- [101] 张熙宁. 一种改进的红外焦平面阵列盲元检测算法[J]. 激光与红外, 2010, 40 (10) :1149-1153.

- [102] N Kingsbury. Image Processing with Complex Wavelets[J]. Philosophical Transactions Mathematical Physical & Engineering Sciences: 1999, 357 (1760):2543-2560.
- [103] IW Selesnick. The double-density dual-tree DWT[J]. Signal Processing IEEE Transactions on, 2004, 52 (5) :1304-1314.
- [104] 尚赵伟, 张明新, 沈钧毅. 基于 KL 距离和双密度小波变换的纹理图像检索[J]. 微电子学与计算机: 2006, 23 (2):13-15.
- [105] 杨家红, 许灿辉, 王耀南. 基于 Contourlet 广义高斯模型的纹理图像检索[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12 (4) :691-694.
- [106] 黄英东, 安建波, 曹礼宝. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测与补偿方法[J]. 弹箭与制导学报: 2010, 30 (6) :39-41.
- [107] 顾国华. 基于滑动窗口与多帧补偿的自适应盲元检测与补偿算法[J]. 红外技术, 2010, 32 (7) :420-423.
- [108] 李言俊, 崔瑞青, 赵桂芳. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测方法[J]. 激光与红外, 2007, 37 (1) :51-52.
- [109] 张瞳, 林春, 陈洪雷, 等. 基于多方向小波提升 IRFPA 盲元检测精度方法[J]. 红外与激光工程. 2018, 47 (2): 204001-0204001(6).
- [110] 滕今朝, 邱杰. 利用 Hough 变换实现直线的快速精确检测[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13 (2) :234-237.
- [111] 段汝娇, 赵伟, 黄松岭. 一种基于改进 Hough 变换的直线快速检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (12) :2774-2780.
- [112] 卞江, 马冬梅, 孙鸽. 红外光电成像系统 MTF 测试技术分析[J]. 应用光学, 2013, 34 (5) :748-753.
- [113] 朱志亮, 刘富国, 陶向阳. 改进的倾斜刃边法获取边缘扩展函数[J]. 南昌大学学报(工科版): 2013, 35 (1) :78-82.
- [114] A P Tzannes, J M Mooney. Measurement of the modulation transfer function on infrared cameras [J]. Optical Engineering, 1995, 34 (6):1808-1817.
- [115] J Zhu, Y Pan, XU Tao. The Algorithm for Computing MTF of Remote Sensing Image in Mid-low Spatial Resolution and with Curve Edge[J]. Remote Sensing Information: 2009.03.
- [116] T Zhang, C Lin, H L Chen, et al. MTF measurement and analysis of linear array HgCdTe infrared detectors[J]. Infrared Physics & Technology: 2018, 88 :123-127.

- [117]张瞳, 林春, 陈洪雷. 金属框结构对 HgCdTe 红外焦平面 MTF 的影响研究[J]. 光学学报: 2018,38 (05): 0504001.
- [118]Hyun K.S, Paek. Y, Kwon. YH. Pre-breakdown suppression in planar InP/InGaAs avalanche photodiode using deep floating guard ring. [J]. Applied Physics Letters: 2004, 85 (23):5547-5549.
- [119]J Ziegler, WA Cabanski. Improved HgCdTe technology for high-performance infrared detectors[C]. Proc. of SPIE: 2002, 4721 :242-251.
- [120] N Golshani, J Derakhshandeh, CIM Beenakker, R Ishihara. PureB multi-guard ring structures for detector applications [J]. Microelectronic Engineering: 2016, 160 (C):54-62.
- [121] Fourreau, Y, Pantzas, K. Patriarche, G. Nondestructive. Characterization of Residual Threading Dislocation Density in HgCdTe Layers Grown on CdZnTe by Liquid-Phase Epitaxy [J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(9): 1-6.
- [122] A Kerlain, A Brunner, D Sam-Giao. Mid-Wave HgCdTe FPA Based on P on N Technology: HOT Recent Developments. NETD: Dark Current and 1/f Noise Considerations[J]. Journal of Electronic Materials: 2016, 45 (9) :4557-4562.
- [123] MA Kinch, CF Wan, JD Beck. 1/f noise in HgCdTe photodiodes[J.] Journal of Electronic Materials, 2005, 34 (6) :928-932.
- [124] Sun Tao, Chen XingGuo, Hu XiaoNing. Analysis of surface leakage and 1/f noise on long-wavelength infrared HgCdTe photodiodesHgCdTe[J]. Acta Physica Sinica: 2005, 54 (7) :3357-3362.

致 谢

申城四月，天气晴朗，花香四溢，满园春色。时光如白驹过隙，蓦然回首，三年的学习生涯转瞬即逝，博士阶段的学习生活也即将画上一个圆满的句号。在这段时光中，收获满满，感受良多。

首先感谢我的导师林春老师！林春老师学识渊博、作风严谨、对待学生平易近人。在课题中遇到问题每与他讨论时，林老师总能够剥茧抽丝、透过问题的现象找出问题的本质。解决问题的思路和方法总是别出心裁，办法总比问题多。这对我科研能力的提升、专业能力的锻炼等方面有极大的帮助。还要感谢我的导师陈洪雷老师！在课题进行的过程中为我提供了良好的实验条件。他对待实验分析和数据处理严谨的治学态度使我受益匪浅。我课题的每一步进展都离不开两位老师的悉心指导和谆谆教诲，再次致以我诚挚的感谢！

感谢丁瑞军老师、杨建荣老师、胡晓宁老师、叶振华老师等在我课题研究给予的建议和指导；感谢林加木、周松敏、李辉、黄爱波、陈星、樊华、孙常鸿等在实验中给予的热情帮助！

感谢研究生部的汪骏发老师、李淑薇老师、朱晓琳老师、黄曦老师在学习和生活上的帮助。感谢王溪、陈奕宇、李浩、朱欢、卢琪等同学在课题研究中的建议和帮助。

最重要的感谢父母、妻儿对我这三年求学经历的默默付出，你们是我前进道路中最强大的动力！

最后感谢各位专家百忙之中对本论文的评阅和审议！

张 瞳

2018.4

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

1981 年 11 月出生于陕西省宝鸡市

2000 年 9 月——2004 年 7 月, 在西安理工大学电子信息工程专业获得学士学位。

2005 年 9 月——2008 年 4 月, 在西安理工大学模式识别与智能系统专业获得硕士学位。

2015 年 9 月——2018 年 7 月, 在中国科学院上海技术物理研究所攻读博士学位。

已发表(或正式接受)的学术论文:

1. **T Zhang**, C Lin, H L Chen, et al. MTF measurement and analysis of linear array HgCdTe infrared detectors[J]. Infrared Physics & Technology: 2018, 88 :123-127.

2. **张瞳**, 林春, 陈洪雷, 等。基于多方向小波提升 IRFPA 盲元检测精度方法[J]. 红外与激光工程. 2018, 47 (2): 204001-0204001(6).

3. **张瞳**, 林春, 陈洪雷, 等。金属框结构对碲镉汞红外焦平面调制传递函数的影响[J]. 光学学报: 2018,38 (05): 0504001.