

文章编号: 1672-8785(2024)09-0017-06

# 一种红外焦平面串音测试方法

刘 璇 王 亮

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 作为红外成像设备的核心部件, 红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)探测器的性能直接影响设备的成像质量。无法避免的衍射效应会导致像元间存在串音现象, 严重影响探测器的性能。提出了一种基于狭缝光学系统的串音测试方法。利用高精度狭缝光学测试设备获取狭缝范围内探测像元与其横向相邻像元的电平数据, 同时实现对串音现象的定量评价。使用中波  $320 \times 256$  碲镉汞( $30 \mu\text{m}$ )探测器、中波  $320 \times 256$  碲镉汞( $50 \mu\text{m}$ )探测器和中波  $320 \times 256$  碲化铟( $30 \mu\text{m}$ )探测器的测试数据验证所提出的串音测试方法。结果表明, 所提出的方法可准确描述串音现象并定量分析串音现象对探测器性能的影响。与现有小光点测试方法相比, 该方法更易聚焦, 得到的串音量化结果更准确, 提高了测试效率。

**关键词:** 红外焦平面; 衍射; 串音; 狭缝; 定量分析

**中图分类号:** TN362 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.09.003

## A Method for Measuring Infrared Focal Plane Crosstalk

LIU Xuan, WANG Liang

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** As the core component of infrared imaging equipment, the performance of the infrared focal plane array (IRFPA) detector directly affects the imaging quality of the equipment. The unavoidable diffraction effect can lead to crosstalk between pixels, seriously affecting the performance of the detector. A crosstalk testing method based on slit optical system is proposed, which uses high-precision slit optical testing equipment to obtain the level data of the detection pixels and their horizontally adjacent pixels within the slit range, and at the same time achieves quantitative evaluation of crosstalk phenomenon. This article uses test data from medium wave  $320 \times 256$  mercury cadmium telluride ( $30 \mu\text{m}$ ) detector, medium wave  $320 \times 256$  mercury cadmium telluride ( $50 \mu\text{m}$ ) detector, and medium wave  $320 \times 256$  indium antimonide ( $30 \mu\text{m}$ ) detector to verify the proposed crosstalk testing method. The verification results demonstrate that the proposed method can accurately describe the crosstalk phenomenon and quantitatively analyze the impact of crosstalk on detector performance. Compared with existing small light point testing methods, the proposed method is easier to focus and obtains more accurate crosstalk quantification results, achieving an improvement in testing efficiency.

**Key words:** infrared focal plane; diffraction; crosstalk; slit; quantitative analysis

收稿日期: 2023-10-19

作者简介: 刘璇(1996-), 女, 河北秦皇岛人, 硕士, 主要从事红外探测器测试技术及系统研究。

E-mail: 1943984655@163.com

## 0 引言

红外探测器因被动成像、不受气候环境影响等优点受到广泛关注,其应用遍布军事和民用多个领域<sup>[1]</sup>。近年来,红外焦平面探测器趋向大面阵、小像元、多谱段等方向发展<sup>[2]</sup>。为保证红外探测器的成像质量,拓展其应用场景,性能评价已成为红外探测器生产的必要工艺流程。对于主要以半导体 p-n 结为光敏元的红外探测器,由于进入某一探测像元的光子或电子会通过衍射效应被相邻像元接收<sup>[3]</sup>,产生串音现象,严重影响探测器的成像质量<sup>[4]</sup>。因此,如何描述串音现象成为评价红外探测器性能的新要求。

目前常见的串音测试方法有小光点测试法。该方法对系统要求较高,测试过程中光信号难以聚焦到某一探测像元上。针对上述问题,本文提出一种基于狭缝光学系统的光学串音测试方法。利用高精度狭缝光学测试设备将光信号通过窄带光阑打在狭缝范围内的探测像元上,获取该范围内探测像元与其横向相邻像元的电平数据,更方便、更快捷地获取串音数据。然后对其进行处理,实现对串音现象的定性描述与定量分析,同时能提高测试效率。

## 1 原理

对于红外探测器而言,光信号向电信号转换的本质是单个探测像元接收光信号并输出相应电信号的过程<sup>[6]</sup>。然而光信号具备波动性,因此在传播过程中受探测器结构的影响,会发生衍射现象,导致光信号不再以单个光子的形式被单个探测单元接收,而是形成一个衍射光斑,如图 1 所示。

图 1 中,中心处的白色圆点为探测像元,即理论上接收该方向全部光信号的像元。然而,受衍射效应影响,该方向的光信号呈波纹状向四周扩散衰减,导致相邻像元接收到不同强度的光信号,进而产生亮度不同的环状光斑<sup>[7]</sup>。

如前所述,光信号入射至探测像元时呈现



图 1 衍射光斑<sup>[7]</sup>

多方向扩散衰减现象,导致相邻像元对光信号有不同幅度的响应输出,造成宏观角度的串扰现象,即串音<sup>[6-7]</sup>。

## 2 测试系统

串音会导致红外探测器输出电信号存在误差。小光点法虽然可以对串音进行测试,但聚焦问题使其具有无法避免的误差。由于该问题无法避免,因此如何准确地定量分析串音现象成为亟待解决的问题<sup>[8]</sup>。本文提出一种基于狭缝光学系统的串音测试方法,利用高精度狭缝光学测试设备获取狭缝范围内探测像元与其横向相邻像元的电平数据,同时实现对串音现象的定性描述与定量分析。本节介绍所提方法使用的狭缝光学测试系统,为后续方法介绍提供硬件基础。

串音现象的直观表现是,光信号照射至探测像元时,探测像元及其相邻像元均产生电信号。因此,为表征并量化串音现象,需使用专用设备将光信号聚焦至狭缝范围内的探测像元,并获取探测像元及其相邻像元的输出电信号。本文采用狭缝光学测试系统完成光信号的聚焦以及像元电信号的采集。所使用的测试系统结构如图 2 所示。狭缝光学测试系统由红外焦平面探测器、光学系统、均匀辐照黑体、数据采集卡和计算机组成。

狭缝光学测试系统的主要作用是将发散的平行光信号聚焦到狭缝范围内的探测像元上。

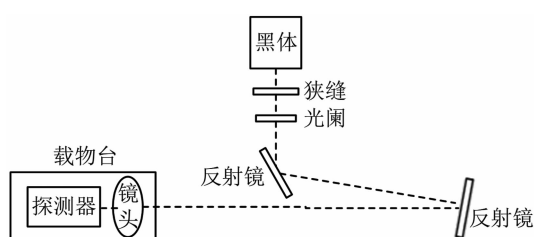


图 2 狭缝光学测试系统的结构框图

而红外探测器对均匀辐照黑体的响应较强, 且具备较强的抗干扰特性。因此, 均匀辐照黑体成为狭缝光学测试系统的首选光源。然而, 辐照黑体并非理想光源, 其发射的光信号为大面积平行光, 无法保证对狭缝内探测像元的准确照射。为保证光信号聚焦至狭缝范围内的探测像元, 需要一种光学系统将平行光汇聚至狭缝内。

所用光阑的光孔为一条竖直的线孔。通过该窄带光阑将辐照黑体发射的光信号限制为极细的光信号, 实现光线对单列像元的照射。除光信号的汇聚外, 需要保证辐照黑体发出的光信号垂直照射至狭缝范围内的探测像元, 且不影响其相邻像元, 以降低所获取数据中潜在的误差。综上所述, 本文所使用的狭缝光学测试系统是具备准直和聚焦两种功能的光学系统, 保证辐照黑体的出射光信号垂直照射至狭缝范围内的探测像元。其中, 准直部分为双反射镜结构, 以保证光路垂直; 聚焦部分为镜头设计, 保证当探测像元位于镜头焦点处时, 平行光汇聚至探测像元。

探测器接收到经光学系统处理的光信号后, 会将其转换为可被采集的电信号输出。为实现后续对串音现象的量化, 数据采集卡成为狭缝光学测试系统的必要组成部分。所使用的数据采集卡具备模拟数据采集功能, 其采集速率最高可达 20 MHz, 保证数据采集的真实、准确、有效。

数据采集卡获取到的电信号数据无法直接用于串音现象的量化, 需使用计算机对所获取的数据进行处理计算。此外, 为保证探测像元位于聚焦镜头的焦点位置, 需使用计算机内嵌

的成像软件实时显示光点汇聚位置及其聚焦程度, 从而保证光信号垂直照射至狭缝范围内的探测像元, 且不影响其相邻像元。

### 3 基于狭缝光学系统的串音测试方法

在上述测试系统的基础上, 计算机可实时获取探测器准确输出的电平数据, 为串音现象的量化提供数据支撑。由此, 本文提出一种基于狭缝光学系统的串音测试方法, 用于对串音现象的定性描述与定量分析。

#### 3.1 计算原理

光信号入射至狭缝范围内的探测像元时, 除狭缝范围内的像元外, 其相邻像元对光信号存在不同幅度的输出电平变化。串音测试原理如图 3 所示。

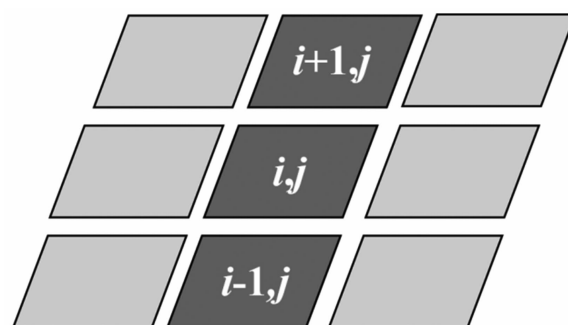


图 3 串音测试原理示意图

以狭缝范围内的探测像元有 3 个为例(见图 3), 光信号入射至第  $i$  行第  $j$  列、第  $i-1$  行第  $j$  列以及第  $i+1$  行第  $j$  列的探测像元时, 该范围内的探测像元输出电平分别为  $V(i, j)$ 、 $V(i-1, j)$  和  $V(i+1, j)$ 。此时, 该狭缝内探测像元相邻左右两个像元的信号为  $V(i, j-1)$ 、 $V(i, j+1)$ ,  $V(i-1, j-1)$ 、 $V(i-1, j+1)$  和  $V(i+1, j-1)$ 、 $V(i+1, j+1)$ , 狭缝范围内探测像元与其相邻像元的串音倍数及其计算方法为

$$CT(i \pm m, j \pm 1) = \frac{V(i, j)}{V(i \pm m, j \pm 1)} \quad (1)$$

式中,  $i \pm m$  表示与狭缝范围内探测像元横向相邻的像元行数,  $CT(i \pm m, j \pm 1)$  表示狭缝范围内探测像元与其相邻像元的串音倍数。

在理论情况下,  $CT(i \pm m, j-1)$  和  $CT(i \pm m, j+1)$  的计算结果应相同。然而, 测试系统

存在无法避免的误差或噪声,因此用于量化探测像元与其相邻像元的串音现象的公式为

$$\begin{aligned} \overline{CT}(i \pm m, j \pm 1) = & \frac{1}{n} \frac{V(i-1, j)}{V(i-1, j-1)} \\ & + \frac{V(i-1, j)}{V(i-1, j+1)} + \frac{V(i, j)}{V(i, j-1)} + \frac{V(i, j)}{V(i, j+1)} \\ & + \frac{V(i+1, j)}{V(i+1, j-1)} + \frac{V(i+1, j)}{V(i+1, j+1)} \quad (2) \end{aligned}$$

式中,  $n$  表示狭缝范围内与探测像元相邻的像元的总数,  $\overline{CT}(i \pm m, j \pm 1)$  表示狭缝范围内探测像元与其横向相邻像元串音倍数总和的平均值。

### 3.2 测试流程

基于前面的串音计算原理,本文所提出的串音测试方法流程如图 4 所示。

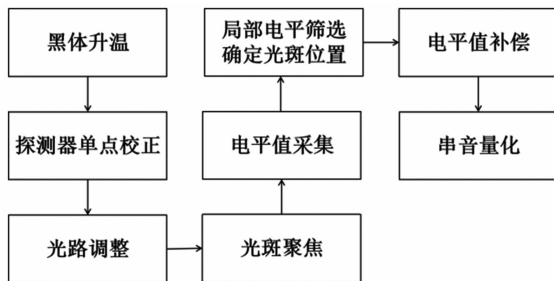


图 4 串音测试流程图

首先将黑体温度升高至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为凸显探测像元与其相邻像元的串音现象,照射至探测像元的光信号需与环境光存在显著差异。因此,需尽可能地升高黑体温度,提高照射光信号的强度。受限于均匀辐照黑体的温度上限,本文将黑体温度设置为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

其次,对探测器进行单点校正。受探测器结构的影响,探测器实时图像存在视场角偏差,导致各像元输出的电平值存在差异。为抑制视场角偏差对输出电平的影响,需对探测器进行单点校正,保证全面阵各像元的输出电平相对一致。

随后对光路进行调整。调节探测器的位置,使辐照黑体发出的光信号透过光阑,通过折射镜与聚焦镜头后汇聚到狭缝范围内的探测像元上,形成窄带光斑,如图 5 所示。通过调

整聚焦镜头的前后微调旋钮,使窄带光斑聚焦;调整聚焦镜头顶端的上下微调旋钮,使光斑单方向集中对称;调整聚焦镜头内侧的左右微调旋钮,使窄带光斑左右对称,如图 6 所示。调整过程中要保持探测器窗片与聚焦镜头、光阑中心处于同一高度。若窄带光斑不对称,其两侧的电平值会呈现一高一低,严重降低串音测试精度。

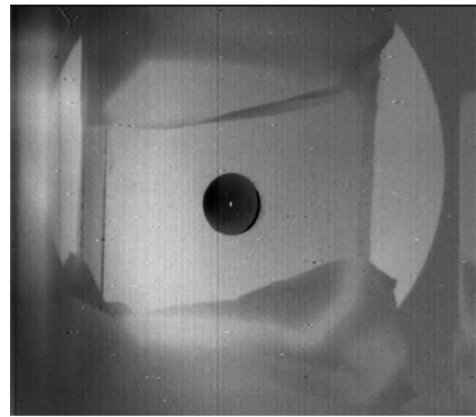


图 5 探测像元图

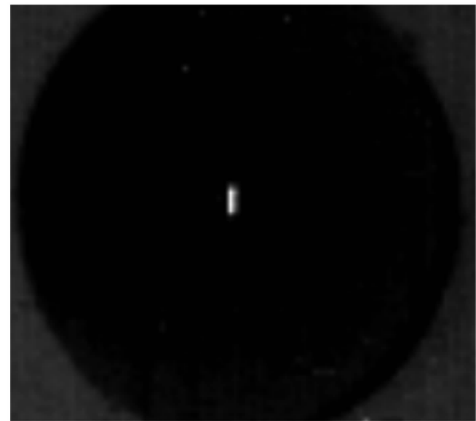


图 6 探测像元的放大对称图

最后,采集探测器的输出电平并使用式(1)和式(2)量化串音现象。采集的电平如图 7 所示,其中黑色斑点表示狭缝范围内的探测像元。找到探测像元后,以探测像元及其周围 8 个像元作为计算依据,对除狭缝范围内的探测像元及其横向相邻的其余像元进行补偿,保证其余像元的输出电平值近似为  $0\text{ V}$ 。补偿完毕后,依次使用式(1)和式(2)计算探测像元与其横向相邻方向像元的电平比值。

表 1 MCT 材料(像元间距为 50  $\mu\text{m}$ )的串音结果

| 探测器编号 | 阵列尺寸             | 材料  | 像元间距/ $\mu\text{m}$ | 光阑/ $\mu\text{m}$ | 黑体温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 串音倍数 |
|-------|------------------|-----|---------------------|-------------------|--------------------------|------|
| 1     | 320 $\times$ 256 | MCT | 50                  | 20                | 100                      | 25   |
| 2     | 320 $\times$ 256 | MCT | 50                  | 20                | 100                      | 64   |
| 3     | 320 $\times$ 256 | MCT | 50                  | 20                | 100                      | 14   |
| 4     | 320 $\times$ 256 | MCT | 50                  | 20                | 100                      | 23   |
| 5     | 320 $\times$ 256 | MCT | 50                  | 20                | 100                      | 45   |
| 6     | 320 $\times$ 256 | MCT | 50                  | 20                | 100                      | 19   |

表 2 MCT 材料(像元间距为 30  $\mu\text{m}$ )的串音结果

| 探测器编号 | 阵列尺寸             | 材料  | 像元间距/ $\mu\text{m}$ | 光阑/ $\mu\text{m}$ | 黑体温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 串音倍数 |
|-------|------------------|-----|---------------------|-------------------|--------------------------|------|
| 1     | 320 $\times$ 256 | MCT | 30                  | 20                | 100                      | 5    |
| 2     | 320 $\times$ 256 | MCT | 30                  | 20                | 100                      | 20   |
| 3     | 320 $\times$ 256 | MCT | 30                  | 20                | 100                      | 11   |
| 4     | 320 $\times$ 256 | MCT | 30                  | 20                | 100                      | 24   |
| 5     | 320 $\times$ 256 | MCT | 30                  | 20                | 100                      | 13   |
| 6     | 320 $\times$ 256 | MCT | 30                  | 20                | 100                      | 18   |

表 3 InSb 材料(像元间距为 30  $\mu\text{m}$ )的串音结果

| 探测器编号 | 阵列尺寸             | 材料   | 像元间距/ $\mu\text{m}$ | 光阑/ $\mu\text{m}$ | 黑体温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 串音倍数 |
|-------|------------------|------|---------------------|-------------------|--------------------------|------|
| 1     | 320 $\times$ 256 | InSb | 30                  | 20                | 100                      | 8.7  |
| 2     | 320 $\times$ 256 | InSb | 30                  | 20                | 100                      | 4.3  |
| 3     | 320 $\times$ 256 | InSb | 30                  | 20                | 100                      | 5.3  |
| 4     | 320 $\times$ 256 | InSb | 30                  | 20                | 100                      | 4.4  |
| 5     | 320 $\times$ 256 | InSb | 30                  | 20                | 100                      | 4.0  |
| 6     | 320 $\times$ 256 | InSb | 30                  | 20                | 100                      | 16.0 |
| 7     | 320 $\times$ 256 | InSb | 30                  | 20                | 100                      | 6.4  |
| 8     | 320 $\times$ 256 | InSb | 30                  | 20                | 100                      | 4.5  |

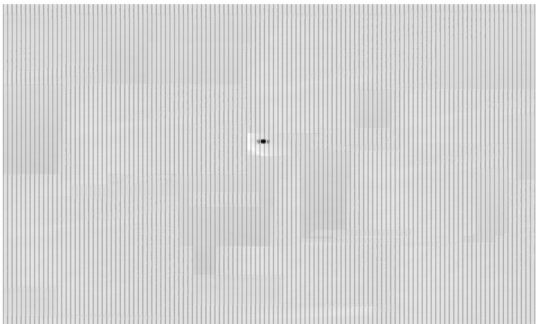


图 7 像素点分布图

4 测试结果及讨论

由于材料和像元间距对串音的影响有明显差异，所使用的串音测试方法主要针对红外焦平面探测器组件。基于碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)、锑化铟(InSb)两种不同材料，采用 30  $\mu\text{m}$  和 50  $\mu\text{m}$  两种不同像元间

距对该实验方法的可行性进行验证。实验结果如表 1、表 2 和表 3 所示。

4.1 不同像元间距

通过对比表 1 和表 2 可知，在其他条件相同的情况下，随着像元间距减小，串音倍数减小。由此，该测试方法对 15  $\mu\text{m}$  以上像元间距的探测器可用；对 15  $\mu\text{m}$  以下像元间距的探测器，可尝试其他方法，目前还在数据积累阶段，为保证方法的可行性暂不列出。

4.2 不同材料

通过对比表 2 和表 3 可知，相同条件下，MCT 材料的串音倍数整体大于 InSb 材料的串音倍数，即前者性能优于后者。这也是 MCT 材料在红外焦平面探测器领域应用更广泛的原因，符合理论预期，验证了该测试方法的有效性。

通过 3 种像元间距的实验结果对比可以得出, 像元间距越大, 光斑越容易聚集到同一像元上, 串音越小, 性能越好。

## 5 结束语

针对红外探测器串音现象的量化问题, 本文提出一种基于狭缝光学系统的串音测试方法。该方法以狭缝光学测试系统为硬件支撑, 较现有红外探测器串音测试方法更快捷方便。通过计算狭缝范围内探测像元与其横向相邻像元的输出电平差异倍数, 更快速、更高效地实现串音现象的量化。经大量实验数据验证, 所提出的方法适用于 MCT 和 InSb 红外探测器。此外, MCT 红外探测器的串音现象弱于 InSb 红外探测器。而对于不同像元间距的红外探测器而言, 像元间距越大, 串音倍数越大, 即像元间的光信号扩散衰减越弱, 探测器性能越好, 所提出的串音测试方法可以用于红外探测器串音测试。由于小像元红外探测器串音更难聚焦, 不易测试, 在下一步计划中, 我们将基于现有测试方法, 简化测试流程, 优化测试方法, 降低测试难度, 以提高其针对不同阵列探测器的使用灵活性和兼容性。

## 参考文献

- [1] 叶振华, 李辉豪, 王进东. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, **41**(1): 15–39.
- [2] 张莹, 刘塑. 国外红外焦平面探测器组件可靠性研究综述 [J]. *红外技术*, 2012, **34**(3): 134–139.
- [3] 刘敬, 王霞, 金伟其. 一种基于邻域的小像元红外焦平面面阵串音测试方法 [J]. *电子与信息学报*, 2011, **33**(9): 2231–2236.
- [4] 李言谨, 危峻, 胥学荣. 一种线阵红外焦平面的图像处理方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(2): 91–93.
- [5] 应承平. 红外焦平面面阵串音测试技术研究 [J]. *计测技术*, 2006, **26**(21): 24–28.
- [6] Schuster J, Pinkie B, Tobin S, et al. Numerical Simulation of Third-generation HgCdTe Detector Pixel Arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(5): 1–15.
- [7] 王忆锋, 马钰. 论红外焦平面器件的串音 [J]. *红外*, 2014, **35**(1): 1–8.
- [8] 汪洋, 刘大福, 徐勤飞. 红外光导探测器组件的串音研究 [J]. *红外*, 2014, **35**(7): 16–20.