

## 一种基于邻域的小像元红外焦平面阵列串音测试方法

刘敬 王霞\* 金伟其 徐超

(北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室 北京 100081)

**摘要:** 串音是评价红外焦平面阵列(InfraRed Focal Plane Array, IRFPA)性能的重要参数之一, 随着 IRFPA 技术的发展, 探测器单元尺寸逐渐减小, 传统小光点测试方法的光斑尺寸已接近甚至大于探测器单元尺寸, 需要采用新的测试理论和方法。论文分析了红外光斑照射到 IRFPA 上的典型分布情况, 研究了小像元情况下探测器单元的信号电荷及其相互关系, 建立了基于八邻域的小像元 IRFPA 串音测试的理论模型, 并将四邻域串音模型和传统串音模型作为八邻域串音模型的特例, 给出了相应的测试方法。数值模拟表明: 在小像元情况下光斑尺寸对串音系数的测量具有明显的影响; 采用基于邻域的小尺寸像元 IRFPA 串音测试方法, 可在现有测试设备上通过测试软件的修改, 实现小像元 IRFPA 串音的测试。

**关键词:** 红外焦平面阵列; 串音; 邻域; 衍射光斑

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)09-2231-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00919

## Crosstalk Model Based on Neighboring Elements for Small Element IRFPA

Liu Jing Wang Xia Jin Wei-qi Xu Chao

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System,

Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Crosstalk is one of the important parameters for InfraRed Focal Plane Array (IRFPA) performance evaluation. As the size of IRFPA element reduces, the size of testing spot of traditional small spot test method is close to or even greater than that of IRFPA element, wherein new theory and method for crosstalk measurement is required. First, typical situations are analyzed when infrared spot illuminates onto IRFPA. Then the electrical signals of adjacent IRFPA elements are studied, and new crosstalk model for small element IRFPA is proposed based on 8 neighboring elements. 4 neighboring elements and traditional situation are two special cases of crosstalk model based on 8 neighboring elements. Mathematical analysis shows: the size of testing spot affects crosstalk apparently in small element IRFPA; crosstalk model based on neighboring elements can realize small element IRFPA crosstalk measurement using existing equipment, given that the software is modified.

**Key words:** InfraRed Focal Plane Array (IRFPA); Crosstalk; Neighboring elements; Diffraction spot

### 1 引言

红外热成像技术利用目标场景自身的红外辐射特性差异实现对目标的搜索、探测、跟踪和识别等<sup>[1]</sup>, 具有抗干扰能力强, 作战隐蔽性好, 生存能力强等特点<sup>[2]</sup>, 被广泛应用于侦察、制导、跟踪、预警等领域, 成为国内外竞相重点发展的关键技术之一。

红外焦平面阵列(InfraRed Focal Plane Array, IRFPA)探测器作为热成像系统的核心部件, 其性能直接关系到系统的成像质量。对于以半导体 p-n 结为光敏元的红外探测器, 光生过剩载流子具有扩散效应<sup>[3,4]</sup>, p-n 结存在着横向收集效应, 横向收集的范围与光生

过剩载流子的扩散长度相当。在 IRFPA 上这种载流子的横向扩散将造成探测单元与其相邻单元信号的串音干扰, 造成成像质量的下降<sup>[5]</sup>。因此, 串音成为评价 IRFPA 性能的重要参数之一, 其描述了景物辐射入射到某一探测器单元时, 与其相邻未被照射的探测器单元存在信号输出的现象<sup>[6]</sup>。串音的大小与探测器的材料、工艺和结构设计等有关, 并直接造成 IRFPA 的调制传递函数(MTF)降低, 降低红外热成像系统的性能。因此, 串音测试成为 IRFPA 设计和研制必备的性能测试环节。

目前串音测试技术主要有检测图形测试法<sup>[7]</sup>、激光诱导电流(Laser Beam Induced Current, LBIC)测试法<sup>[8]</sup>和红外小光点测试法。检测图形测试技术采用

2010-08-27 收到, 2011-07-01 改回

\*通信作者: 王霞 angelniumiu@bit.edu.cn

遮挡的方法,用于分析 IRFPA 的串音,只能测出电学串音,不能测出光学串音。LBIC 测试技术只能测出串音的有无,不能测出串音的大小,因而不能用于图像校正。红外小光点技术利用红外聚焦光学系统或光纤<sup>[9]</sup>将红外小光点聚焦投射在探测器单元上,通过测试该探测器单元及其周边相邻未被照射探测器单元的信号,实现串音的测量<sup>[10]</sup>。2009 年美国的 Jeffrey 等人<sup>[11]</sup>用红外小光点扫描的方法,测试中波红外 HgCdTe 电子注入型雪崩光电二极管的串音,测试结果显示,中心象元对其 8 邻域的串音各不相同,并且,随着探测器单元尺寸的减小,串音有增大的趋势。在探测器串音理论分析方面,文献[12]用 Monte Carlo 法模拟 InSb 阵列的串音。文献[13]用 2 维模拟电流近似串音。文献[14]建立了 HgCdTe 焦平面阵列的串音模型并与实测数据进行了比较,由于红外光束的尺寸、形状未知,模型假定红外光束是半径 1.5 mm 的点。文献[15]用 1  $\mu\text{m}$  激光红外小光点和光学微扫描技术研究了光电二极管红外探测器阵列的串音特性。2009 年 Wu 等人<sup>[16]</sup>用有限元分析法建立模型用于预测不同气压下的热串音,并进行了实验验证。

近年来应用需求和工艺进步促进了 IRFPA 技术的发展,IRFPA 阵列规模越来越大,而探测器单元尺寸(已达到 20~30  $\mu\text{m}$ )和间隔越来越小,在使热成像系统性能提高的同时,也直接影响 IRFPA 的串音性能,不仅相邻探测器单元间的影响变得更加突出,而且探测器单元尺寸已进入光学衍射限,即难以将红外小光点的尺寸限制在一个探测器单元之内(例如对于长波红外,若假设平均波长  $\lambda=9 \mu\text{m}$ ,则艾丽斑直径  $D_a \approx 21.96F_{\#}$ ,当光学系统  $F_{\#}=2$  时,  $D_a \approx 43.92 \mu\text{m}$ ),传统的红外小光点测试方法和设备在原理上已面临失效的危险。因此,需要研究新的串音测试方法和设备,实现对高性能 IRFPA 的性能测试和评价。本文将基于红外探测器及串音产生的基本原理,研究红外小光

点尺寸大于探测器单元情况下 IRFPA 探测器单元的信号电荷特点,以研究建立一种基于邻域的小单元尺寸 IRFPA 串音模型。

## 2 IRFPA 的串音

图 1 给出小光斑入射到探测器上的典型分布情况。图 1(a)为  $d < a$  即光点尺寸小于探测器单元,属于传统小光点测试的情况;图 1(b)中  $a < d \leq \sqrt{2}a$ ,探测器单元  $(i, j)$  及其上/下/左/右 4 个探测器单元  $(i-1, j)$ ,  $(i, j-1)$ ,  $(i, j+1)$ ,  $(i+1, j)$  均有入射辐射照射,这里称为四邻域状态;图 1(c)为  $d > \sqrt{2}a$ ,探测器单元  $(i, j)$  及其周围 8 个探测器单元  $(i-1, j-1)$ ,  $(i-1, j)$ ,  $(i-1, j+1)$ ,  $(i, j-1)$ ,  $(i, j+1)$ ,  $(i+1, j-1)$ ,  $(i+1, j)$ ,  $(i+1, j+1)$  均有入射辐射照射,这里称为八邻域状态。对于小光点光斑大于探测器单元尺寸的串音测试,本文将以八邻域作为普遍情况进行研究,并将四邻域和传统小光点测试作为其特例。

串音使探测器单元  $(m, n)$  对入射辐射  $\Phi_{(m, n)}$  的响应信号  $q_{(m, n)}$  并不等于可直接测量的单元输出信号  $Q_{(m, n)}$ 。由于响应信号  $q_{(m, n)}$  是不能直接测量的中间参量,串音测试是通过测试探测器输出信号  $Q_{(m, n)}$ , 得到探测器单元的串音系数  $\eta_x (x=U, D, R, L)$ 。

接收到辐射的第  $m$  个探测器单元响应信号的大小记为  $Q_m$ , 由于串音使得与其相邻的未接受辐射的第  $n$  个探测器单元产生的输出信号为  $Q_n$ ,  $m$  对  $n$  串音定义为<sup>[11,13,17]</sup>

$$\eta = Q_n / Q_m \quad (1)$$

### 2.1 八邻域小单元尺寸 IRFPA 串音模型

图 1(c)中,如果忽略二次串音信号的影响,对每个探测器单元的响应信号  $q$  仍然满足电荷守恒定律,即探测器单元  $(i, j)$  及其八邻域的输出信号  $Q$  分别是本单元辐射响应信号与相邻单元对本单元的串音信号之和

$$\left. \begin{aligned} Q_{(i-1, j-1)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i-1, j-1)} + \eta_U q_{(i, j-1)} + \eta_L q_{(i-1, j)} \right] \\ Q_{(i-1, j)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i-1, j)} + \eta_U q_{(i, j)} + \eta_R q_{(i-1, j-1)} + \eta_L q_{(i-1, j+1)} \right] \\ Q_{(i-1, j+1)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i-1, j+1)} + \eta_U q_{(i, j+1)} + \eta_R q_{(i-1, j)} \right] \\ Q_{(i, j-1)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i, j-1)} + \eta_D q_{(i-1, j-1)} + \eta_L q_{(i, j)} + \eta_U q_{(i+1, j-1)} \right] \\ Q_{(i, j)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i, j)} + \eta_D q_{(i-1, j)} + \eta_R q_{(i, j-1)} + \eta_L q_{(i, j+1)} + \eta_U q_{(i+1, j)} \right] \\ Q_{(i, j+1)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i, j+1)} + \eta_D q_{(i-1, j+1)} + \eta_R q_{(i, j)} + \eta_U q_{(i+1, j+1)} \right] \\ Q_{(i+1, j-1)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i+1, j-1)} + \eta_L q_{(i+1, j)} + \eta_D q_{(i, j-1)} \right] \\ Q_{(i+1, j)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i+1, j)} + \eta_D q_{(i, j)} + \eta_R q_{(i+1, j-1)} + \eta_L q_{(i+1, j+1)} \right] \\ Q_{(i+1, j+1)} &= \left[ \left( 1 - \sum \eta \right) q_{(i+1, j+1)} + \eta_R q_{(i+1, j)} + \eta_D q_{(i, j+1)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

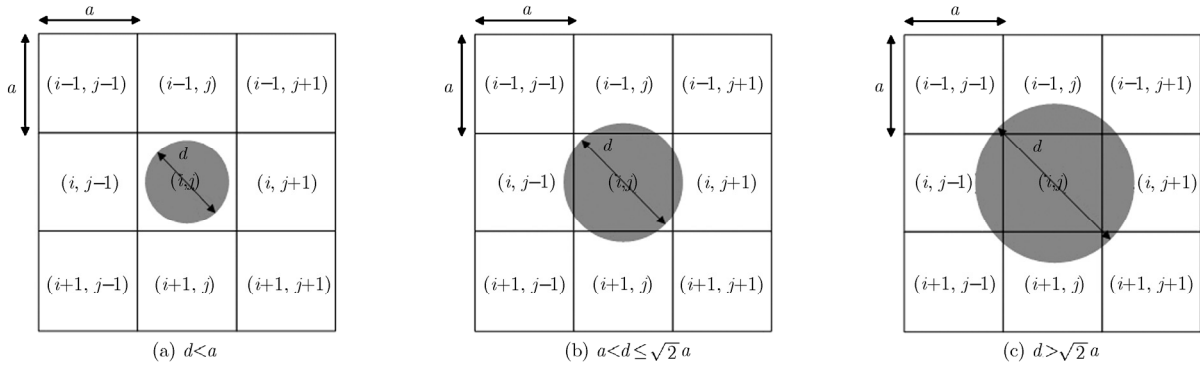


图 1 光束入射到探测器上的几种典型情况

整理成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} Q_{(i-1,j-1)} - q_{(i-1,j-1)} \\ Q_{(i-1,j)} - q_{(i-1,j)} \\ Q_{(i-1,j+1)} - q_{(i-1,j+1)} \\ Q_{(i,j-1)} - q_{(i,j-1)} \\ Q_{(i,j)} - q_{(i,j)} \\ Q_{(i,j+1)} - q_{(i,j+1)} \\ Q_{(i+1,j-1)} - q_{(i+1,j-1)} \\ Q_{(i+1,j)} - q_{(i+1,j)} \\ Q_{(i+1,j+1)} - q_{(i+1,j+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{(i,j-1)} - q_{(i-1,j-1)} & q_{(i-1,j)} - q_{(i-1,j-1)} & -q_{(i-1,j-1)} & -q_{(i-1,j-1)} \\ q_{(i,j)} - q_{(i-1,j)} & q_{(i-1,j+1)} - q_{(i-1,j)} & q_{(i-1,j-1)} - q_{(i-1,j)} & -q_{(i-1,j)} \\ q_{(i,j+1)} - q_{(i-1,j+1)} & -q_{(i-1,j+1)} & q_{(i-1,j)} - q_{(i-1,j+1)} & -q_{(i-1,j+1)} \\ q_{(i+1,j-1)} - q_{(i,j-1)} & q_{(i,j)} - q_{(i,j-1)} & -q_{(i,j-1)} & q_{(i-1,j-1)} - q_{(i,j-1)} \\ q_{(i+1,j)} - q_{(i,j)} & q_{(i,j+1)} - q_{(i,j)} & q_{(i,j-1)} - q_{(i,j)} & q_{(i-1,j)} - q_{(i,j)} \\ q_{(i+1,j+1)} - q_{(i,j+1)} & -q_{(i,j+1)} & q_{(i,j)} - q_{(i,j+1)} & q_{(i-1,j+1)} - q_{(i,j+1)} \\ -q_{(i+1,j-1)} & q_{(i+1,j)} - q_{(i+1,j-1)} & -q_{(i+1,j-1)} & q_{(i,j-1)} - q_{(i+1,j-1)} \\ -q_{(i+1,j)} & q_{(i+1,j+1)} - q_{(i+1,j)} & q_{(i+1,j-1)} - q_{(i+1,j)} & q_{(i,j)} - q_{(i+1,j)} \\ -q_{(i+1,j+1)} & -q_{(i+1,j+1)} & q_{(i+1,j)} - q_{(i+1,j+1)} & q_{(i,j+1)} - q_{(i+1,j+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_U \\ \eta_L \\ \eta_R \\ \eta_D \end{bmatrix} \quad (3)$$

从物理意义和数学表达式来看，式(3)右端的系数矩阵属于强对角线矩阵且可逆，因此，若能得到响应信号  $q_{(m,n)}$  和输出信号  $Q_{(m,n)}$ ，求解式(3)的矩阵可解得八邻域串音系数  $\eta_x (x=U,D,R,L)$ 。

### 2.2 四邻域小单元尺寸 IRFPA 串音模型

$$\begin{bmatrix} Q_{(i-1,j)} - q_{(i-1,j)} \\ Q_{(i,j-1)} - q_{(i,j-1)} \\ Q_{(i,j)} - q_{(i,j)} \\ Q_{(i,j+1)} - q_{(i,j+1)} \\ Q_{(i+1,j)} - q_{(i+1,j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{(i,j)} - q_{(i-1,j)} & -q_{(i-1,j)} & -q_{(i-1,j)} & -q_{(i-1,j)} \\ -q_{(i,j-1)} & q_{(i,j)} - q_{(i,j-1)} & -q_{(i,j-1)} & -q_{(i,j-1)} \\ q_{(i+1,j)} - q_{(i,j)} & q_{(i,j+1)} - q_{(i,j)} & q_{(i,j-1)} - q_{(i,j)} & q_{(i-1,j)} - q_{(i,j)} \\ -q_{(i,j+1)} & -q_{(i,j+1)} & q_{(i,j)} - q_{(i,j+1)} & -q_{(i,j+1)} \\ -q_{(i+1,j)} & -q_{(i+1,j)} & -q_{(i+1,j)} & q_{(i,j)} - q_{(i+1,j)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_U \\ \eta_L \\ \eta_R \\ \eta_D \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 2.3 传统 IRFPA 串音模型

图 1(a)中，传统小光点情况，入射辐射照射在探测器单元  $(i, j)$  内部。从探测器单元  $(i, j)$  转移到  $(i-1, j)$ ,  $(i, j-1)$ ,  $(i, j+1)$ ,  $(i+1, j)$  的信号等于  $(i-1, j)$ ,  $(i, j-1)$ ,  $(i, j+1)$ ,  $(i+1, j)$  的输出信号，即  $Q_{(i,j \rightarrow i-1,j)} = Q_{(i-1,j)}$ ,  $Q_{(i,j \rightarrow i,j-1)} = Q_{(i,j-1)}$ ,  $Q_{(i,j \rightarrow i,j+1)} = Q_{(i,j+1)}$ ,  $Q_{(i,j \rightarrow i+1,j)} = Q_{(i+1,j)}$ 。  $Q_{(i,j)} \neq 0$ ,  $q_{(i,j)} \neq 0$ ,  $Q_{(i-1,j)} \neq 0$ ,  $Q_{(i,j-1)} \neq 0$ ,  $Q_{(i,j+1)} \neq 0$ ,  $Q_{(i+1,j)} \neq 0$ , 其余信号全部为 0。式(3)简化为

$$\begin{bmatrix} Q_{(i-1,j)} \\ Q_{(i,j-1)} \\ Q_{(i,j)} - q_{(i,j)} \\ Q_{(i,j+1)} \\ Q_{(i+1,j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{(i,j)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{(i,j)} & 0 & 0 \\ -q_{(i,j)} & -q_{(i,j)} & -q_{(i,j)} & -q_{(i,j)} \\ 0 & 0 & q_{(i,j)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{(i,j)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_U \\ \eta_L \\ \eta_R \\ \eta_D \end{bmatrix} \quad (5)$$

图 1(b)中，只有探测器单元  $(i, j)$  及其四邻域  $(i-1, j)$ ,  $(i, j-1)$ ,  $(i, j+1)$ ,  $(i+1, j)$  有入射辐射照射，因此  $Q_{(i-1,j-1)}=0$ ,  $Q_{(i-1,j+1)}=0$ ,  $Q_{(i+1,j-1)}=0$ ,  $Q_{(i+1,j+1)}=0$ ,  $q_{(i-1,j-1)}=0$ ,  $q_{(i-1,j+1)}=0$ ,  $q_{(i+1,j-1)}=0$ ,  $q_{(i+1,j+1)}=0$ 。式(3)简化成

### 3 响应信号 $q_{(m,n)}$ 的获取

由理论分析可知，探测器响应信号  $q_{(m,n)}$  是串音系数测量的关键，因此，有必要进一步分析其获取方法。

记探测器单元响应率  $R$  均匀，则探测器单元的响应信号  $q_{(m,n)}$  可以转化为单元入射辐射能量  $\Phi_{(m,n)}$

$$q_{(m,n)} = R\Phi_{(m,n)} \quad (6)$$

不失一般性，本文假设小光点的能量分布(如图 2)为 2 维高斯分布  $z(x, y)$

$$z(x, y) = z(\rho) = \frac{C}{2\pi\mu^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2\mu^2}\right) \quad (7)$$

其中  $C$  为红外小光点的总能量； $\mu$  是正态分布的标

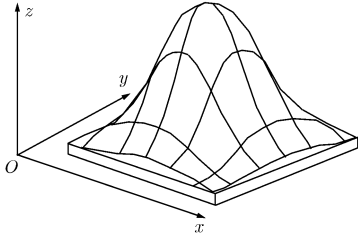


图2 2维高斯分布

准差:  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  为离光点中心的半径;  $\rho = \sqrt{2}\mu$  处红外照射能量将至中心光斑中心能量的  $1/e$ 。

需要指出:小光点的实际分布情况可采用光学系统设计分析软件模拟或实际测量得到,在计算机视觉和模式识别领域已有较多有关光斑中心的亚像素定位研究,较常见的方法有质心法、高斯分布拟合和椭圆拟合、高斯累积分布等方法<sup>[18]</sup>;采用远小于光斑的小孔和单元光电传感器在2维光场扫描,可避免采用凝视光电传感器离散采样引入的测量误差,获得较精细的光斑能量分布信息<sup>[19]</sup>。

#### 4 数值模拟及其分析

以高斯红外光斑  $z(x, y)$  相对  $a \times a$  探测器单元  $(i, j)$  中心对称分布为例,对邻域串音模型进行分析。在探测器单元  $(i, j)$  及其邻域的入射辐射表示为  $(k, l = -1, 0, +1)$

$$\begin{aligned} \Phi_{(i+k, j+l)} &= \iint_{(x,y) \in \text{pixel}(i+k, j+l)} z(x, y) dx dy \\ &= \frac{C}{2\pi\mu^2} \int_{(k-1/2)a}^{(k+1/2)a} \exp\left[-\frac{x^2}{2\mu^2}\right] dx \\ &\quad \cdot \int_{(l-1/2)a}^{(l+1/2)a} \exp\left[-\frac{y^2}{2\mu^2}\right] dy \\ &= \frac{C}{4} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{(k+0.5)a}{\sqrt{2}\mu}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{(k-0.5)a}{\sqrt{2}\mu}\right] \right\} \\ &\quad \cdot \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{(l+0.5)a}{\sqrt{2}\mu}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{(l-0.5)a}{\sqrt{2}\mu}\right] \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

其中  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$  为高斯误差函数。

可以看出:信号大小决定于探测器单元尺寸  $a$  与光斑特征尺寸  $\mu$  的比值。在下面的分析中,选取  $C=1$  的标准正态分布表示入射辐射,并假定探测器的响应率  $R=1$ 。

##### 4.1 光斑尺寸对输出信号的影响

给定  $a$  和  $\mu$  的数值关系,由式(8)确定入射辐射  $\Phi_{(m,n)}$ ,由式(6)确定响应信号  $q_{(m,n)}$ ,给定  $\eta_U = 0.0170$ ,  $\eta_L = 0.0190$ ,  $\eta_R = 0.0180$ ,  $\eta_D = 0.0160$ ,按四邻域模型式(4)计算输出信号  $Q_{(m,n)}$ ,图3给出  $a/\mu$  从 1.8 → 4.4 的  $q_{(m,n)}$  和  $Q_{(m,n)}$ 。可以看出:串音系数一定时,

随着  $a/\mu$  的增加(单元  $a$  不变时光斑  $\mu$  减小或  $\mu$  不变时  $a$  增大),中心单元  $(i, j)$  信号单调增加(图 3(c)),且  $Q < q$  (即  $(i, j)$  因串音损失大于从四邻域得到的电荷信号),两者差异逐步增加;四邻域单元信号(图 3(a)、图 3(b)、图 3(d)和图 3(e))单调减小,且  $Q > q$  (即由  $(i, j)$  单元得到的串音信号大于自身信号电荷的流失),两者差异逐步增加;随着探测器  $a$  的减小,各探测元的信号较实际响应信号的偏差逐渐增大。

##### 4.2 给定输出信号时光斑尺寸对串音系数的影响

由于需要确定光斑尺寸变化时  $Q_{(m,n)}$  的值,设定串音系数设定为  $\eta_{U0} = 0.0170$ ,  $\eta_{L0} = 0.0190$ ,  $\eta_{R0} = 0.0180$ ,  $\eta_{D0} = 0.0160$ ,采用传统的串音模型式(5),由  $q_{(m,n)}$  确定出  $Q_{(m,n)}$ 。显然,在这种  $q_{(m,n)}$  和  $Q_{(m,n)}$  条件下,用式(4)四邻域模型确定的串音系数  $\eta_x$  与  $\eta_{x0}$  ( $x=U, D, R, L$ ) 有所差别,这种差异反映了传统的串音测试方法和基于四邻域串音模型的差异。表1给出了光斑尺寸变化时按四邻域模型确定的串音系数。可以看出:

(1)  $a/\mu$  的数值越大,光斑尺寸相对探测器越小,照射到中心探测器单元  $(i, j)$  上的能量越集中,入射辐射占总入射辐射的比重越大;

(2)  $\Phi_{(i,j)} / \Phi_{\text{total}} = 100\%$  时,入射辐射全部照射到中心单元  $(i, j)$  上,计算得到串音系数与设定值  $\eta_{x0}$  一致,即四邻域串音模型与传统模型等价;

(3) 随着  $a/\mu$  的减小,光斑尺寸逐渐加大,能量分布变得分散;在  $a/\mu > 2.4$  时,串音系数  $\eta_x$  相对设定值  $\eta_{x0}$  逐渐增大,表明四邻域串音模型的有效性;但当  $a/\mu < 2.4$  后,  $\eta_x$  随着  $a/\mu$  减小呈减小趋势,这是由于四邻域的能量占总能量的比例已小于 94.70% 且迅速下降,表明四邻域串音模型已存在较大偏差,应采用八邻域串音模型。当然,  $a/\mu$  进一步减小时,光斑明显超过  $3 \times 3$  邻域时,八邻域也将出现较大的偏差,但在实际应用中,目前的探测器单元尺寸尚未达到这种水平。

#### 5 结束语

小单元尺寸红外焦平面阵列的串音测试已逐渐成为工业部门面临的问题,本文研究了一种基于邻域的小像元红外焦平面阵列串音测试方法,建立了邻域串音模型;对四邻域模型的模拟分析表明:随着测试光斑尺寸相对探测器单元尺寸增加,传统的串音模型和基于邻域的串音模型之间的差异增大,即传统串音测试方法的测试误差将逐步增大。当光斑较大时,八邻域模型比四邻域模型具有更高的精度,但如果光斑尺寸超出  $3 \times 3$  邻域时,本文模型也将不再适用,需要研究更准确的模型。

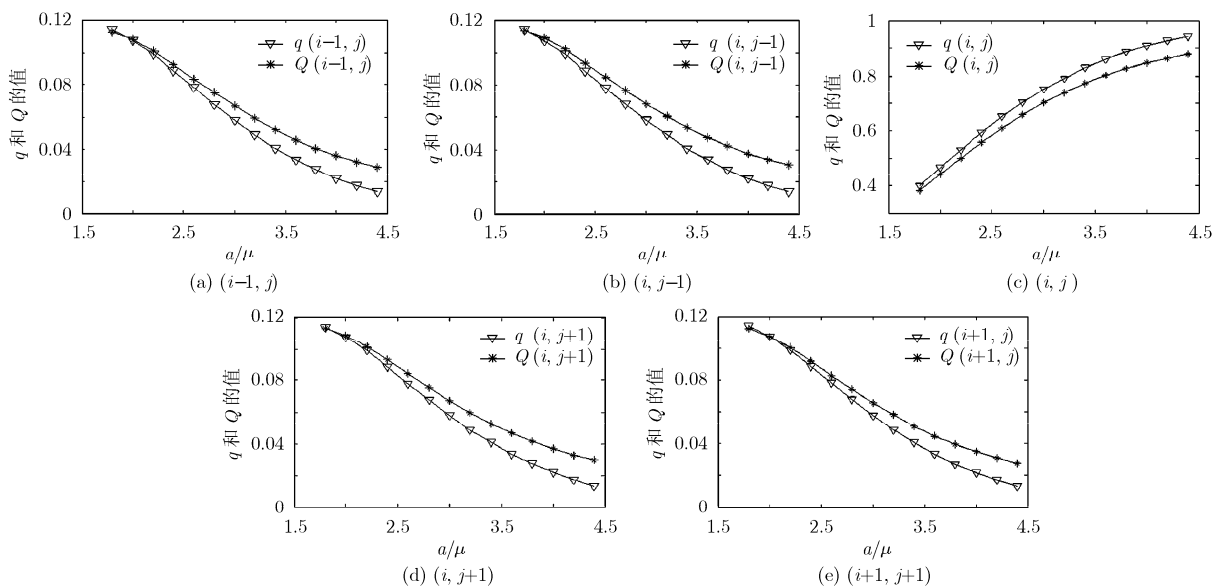


图3 四邻域响应信号及输出信号

表1 基于四邻域模型的串音测试参数

$a / \mu$	$\Phi_{(i,j)} / \Phi_{total}(\%)$	$\Sigma\Phi_{(m,n)} / \Phi_{total}(\%)$	$\eta_U$	$\eta_L$	$\eta_R$	$\eta_D$
1.8	39.92	85.56	0.0161	0.0175	0.0168	0.0154
2.0	46.59	89.57	0.0175	0.0191	0.0183	0.0167
2.2	53.09	92.63	0.0180	0.0196	0.0188	0.0172
2.4	59.26	94.70	0.0181	0.0198	0.0190	0.0173
2.6	65.03	95.54	0.0180	0.0198	0.0189	0.0172
2.8	70.29	97.39	0.0179	0.0197	0.0188	0.0170
3.0	75.06	98.22	0.0178	0.0196	0.0187	0.0168
3.2	79.28	98.80	0.0176	0.0195	0.0186	0.0167
3.4	82.96	99.20	0.0175	0.0194	0.0185	0.0166
3.6	86.16	99.48	0.0174	0.0193	0.0184	0.0164
3.8	88.85	99.67	0.0173	0.0193	0.0183	0.0164
4.0	91.09	99.79	0.0173	0.0192	0.0182	0.0163
4.2	92.97	99.87	0.0172	0.0192	0.0182	0.0162
4.4	94.52	99.92	0.0172	0.0192	0.0182	0.0162
	100	100	0.0170	0.0190	0.0180	0.0160

本文测试方法允许测试光斑具有较探测器单元更大的尺寸，避免了传统串音测试时对红外长波光点技术的依赖，为在现有测试装备上实现小像元红外焦平面阵列的串音性能测试提供了一种理论和方法，进一步完善方法理论和测试系统软件后，有望解决目前测试面临的问题。

参考文献

[1] 刘斌, 金伟其, 董立泉. 热成像系统前置栅网结构的衍射效应分析[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5578-5583.

Liu Bin, Jin Wei-qi, and Dong Li-quan. The diffraction effect in a thermal imaging system with a front wire grid[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(9): 5578-5583.  
 [2] 缪同军. 红外焦平面探测器非均匀性校正算法及仿真[D]. [硕士学位论文], 国防科技大学, 2006.  
 Miu Tong-jun. IRFPA detector's algorithm and simulation in nonuniformity correction[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2006.  
 [3] Redfern D A, Thomas J A, Musca R E, et al. Diffusion length measurements in p-HgCdTe using laser beam induced

- current[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, 30(6): 696-703.
- [4] McLevige W V, Williams G M, Dewames R E, *et al.* Variable-area diode data analysis of surface and bulk effects in MW IR HgCdTe/CdTe/sapphire photodetectors[J]. *Semiconductor Science Technology*, 1993, 8(6S): 946-952.
- [5] 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.  
Li Yan-jin, Wei Jun, and Xu Xue-rong. Image processing method of linear infrared focal plane array[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(2): 91-93.
- [6] 应承平. 红外焦平面阵列串音测试技术研究[J]. *计测技术*, 2006, 26(21): 24-28.  
Ying Cheng-ping. A study of crosstalk measurement technologies of IRFPA[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2006, 26(21): 24-28.
- [7] 曾戈红. 光伏焦平面器件串音效应的检测图形测试方法[J]. *红外技术*, 1994, 16(4): 9-12.  
Zeng Ge-hong. Test pattern method for the crosstalk measurement of photovoltaic FPAs[J]. *Infrared Technology*, 1994, 16(4): 9-12.
- [8] 吕衍秋, 乔辉, 韩冰. LBIC技术研究InGaAs线列探测器串音及光敏感区[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5): 708-710.  
Lü Yan-qiu, Qiao Hui, and Han Bing. Crosstalk and photoactive area of InGaAs linear detector by LBIC technique[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 708-710.
- [9] Li Yong-fu, Tang Heng-jing, Zhang Ke-feng, *et al.* Analysis of crosstalk in front-illuminated InGaAs PIN hetero-junction [C]. *Proceedings SPIE*, 2009, 7383: 73831Z1-73831Z6.
- [10] Dang K V, Kauffman C L, and Derzko Z I. Infrared focal plane array cross talk measurement[C]. *Proceedings SPIE*, 1992, 1686: 125-135.
- [11] Jeffrey B, Richard S, Billy S, *et al.* Performance and modeling of the MWIR HgCdTe electron avalanche photodiode [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(8): 1579-1592.
- [12] Fastow R and Strum A. Monte Carlo simulation of the cross talk in InSb matrices[C]. *Proceedings SPIE*, 1994, 2274: 136-146.
- [13] Dhar V, Bhan R K, and Ashokan R. Effect of built-in electric field on crosstalk in focal plane arrays using HgCdTe epilayers[J]. *Infrared Physics and Technology*, 1998, 39(6): 353-367.
- [14] Sanders T J and Caraway E L. Modeling and test of pixel cross talk in HgCdTe focal plane array[C]. *Proceedings SPIE*, 2001, 4369: 458-466.
- [15] Wang W W and Kwor R Y. Cross talk characterization in photodiode detector array using a 1- $\mu\text{m}$  optical scanning spot laser beam[C]. *Proceedings SPIE*, 1994, 2274: 64-67.
- [16] Wu H, Emadi A, Grabarnik S, *et al.* Static and dynamic analysis of thermal cross-talk in an thermopile detector array for use in an microspectrometer [C]. *Proceedings of the Eurosensors XXIII Conference*, Lausanne Switzerland, 2009: 1139-1142.
- [17] 李大宇, 段星辉, 魏焕东. 多元红外光导探测器电子学串音研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(9): 952-955.  
Li Da-yu, Duan Xing-hui, and Wei Huan-dong. Study on electrical crosstalk of multi-element infrared photoconductive detectors[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(9): 952-955.
- [18] 唐冠群. 几种激光光斑中心定位算法的比较[J]. *北京机械工业学院学报*, 2009, 24(1): 61-64.  
Tang Guan-qun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center[J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2009, 24(1): 61-64.
- [19] 刘玉周, 赵斌. 无衍射微光斑能量分布测量系统的研究[J]. *半导体光电*, 2007, 28(2): 287-289, 293.  
Liu Yu-zhou and Zhao Bin. Study on energy distribution measurement system with non-diffracting spots[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(2): 287-289, 293.
- 刘敬: 女, 1986年生, 博士生, 研究方向为光电成像理论、光电图像处理技术.
- 王霞: 女, 1972年生, 副教授, 研究方向为光电成像技术、光电检测技术、微光与热成像技术.
- 金伟其: 男, 1961年生, 教授, 研究方向为夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器.
- 徐超: 男, 1979年生, 讲师, 研究方向为光电成像系统、视频处理技术.