

〈材料与器件〉

红外焦平面阵列特性参数定义和测试方法的讨论

王术军^{1,2}

(1.北京师范大学天文系 北京市重点应用光学实验室, 北京 100875; 2.中科院国家天文台天文探测器实验室, 100012)

摘要: 对目前国内正在使用的《红外焦平面阵列特性参数测试技术规范》所包含的部分参数的定义和测试技术方法进行了分析, 对其中可能引起混淆的参数定义进行了讨论, 并提出了与这个规范不同的定义和测试方法。

关键词: 红外焦平面阵列; 特性参数; 测试技术规范

中图分类号: TN215, TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2007)04-0211-04

The Study of the Definition and Measurement Methods of Characteristic Parameters of IRFPA

WANG Shu-jun^{1,2}

(1.Astronomy Department of Beijing Normal University, Beijing Key Laboratory of Applied Optics, Beijing 100875, China;

2.Research Labs F. Astronomy of NAOC, CAS, 100012, China)

Abstract: The technical norms being used in China for measurement and test of characteristic parameters of IRFPA was introduced, the definition and measuring technical methods of some characteristic parameters of IRFPA were analyzed, and some definition and measuring technical methods which are different from norms were are given out.

Key Words: IRFPA; characteristic parameters; technical norms for measurement

引言

红外成像是多学科、多领域技术综合发展的产物, 其关键技术包括: 红外敏感材料、半导体器件工艺、集成电路设计、封装技术、测试技术、真空技术和可靠性技术等等。近十年来伴随着各门技术的高速发展, 红外成像技术得到了迅速发展, 并在军事、空间技术、生物医学以及工业检测等领域得到日益广泛的应用。红外成像系统的核心器件是红外焦平面阵列(IRFPA)。IRFPA不同于单元探测器, 是多像素积分型的光电探测器件, 描述IRFPA的性能参数也与单元探测器不同。另外由于IRFPA的空间均匀性较差, 其性能参数测试方法比CCD复杂得多。对IRFPA最通用的特性参数是读出噪声、阱容和响应率。通过它们器件可测的最大信号、最小信号、动态范围和信噪比参数都可计算出。针对科学应用的IRFPA, 常用的参数还有光谱量子效率、均匀性、线性、暗电流等。

目前关于IRFPA的性能参数系统性定义和测试方法的文献很少, 国内IRFPA特性参数测试标准还是1998-07-18发布, 1999-05-01开始实施的《红外焦平面阵列特性参数测试技术规范》(GB/T 17444-1998)^[1](以下简称《规范》), 它系统性地给出了用于评价IRFPA的参数定义和测试方法, 对红外成像器件的研究和应用很有意义。由于IRFPA应用领域的不同, 所要求的参数的种类、定义和测量方法不完全相同, 另外由于IRFPA的快速发展, 其评价参数也需要逐渐完善。作者经过多年对天文用IRFPA性能参数和测试方法的试验研究, 认为《规范》中有些参数定义已不再适用于焦平面阵列, 推荐的测试方法也值得商榷, 文献[8]对此规范已进行过讨论。本文参考国内外文献^[3-7], 针对天文等科学应用提出一些与《规范》不同的IRFPA性能参数的定义和测试方法。

1 噪声

收稿日期: 2007-03-14

作者简介: 王术军(1966年-), 男, 博士, 高级工程师。现从事光电探测技术研究和光电仪器研发。Email: shujunw@bnu.edu.cn

基金项目: 中国科学院重点支持和资助项目

万方数据

1.1 噪声的定义

关于对 IRFPA 噪声的评价,《规范》只提供了噪声电压这个参数。按照《规范》定义,噪声电压就是焦平面在背景辐照条件下像元输出信号电压涨落的均方根值,即背景图像信号的总噪声。此定义既不包含积分时间的概念,也没有规定背景温度。对于 IRFPA,背景辐照条件下探测器输出电压除包含背景辐射信号,还包含暗电流信号和各种噪声。信号大小以及噪声大小都与背景温度和积分时间有关,因此单独用噪声电压描述探测器的性能意义不大,现在阵列器件噪声性能描述很少用它。

IRFPA 的图像系统各像元输出信号的噪声主要有光子噪声、热噪声(或暗流噪声)、产生复合噪声、1/f 噪声、复位噪声(kTC 噪声)、放大器噪声、A/D 转换器量化噪声等^[2-3]。根据这些噪声的性质和权重,可将它们分成二部分,一部分与读出信号大小有关(包含光子噪声、热噪声、背景噪声),统称为散粒噪声 σ_s ,服从泊松统计分布规律;一部分与读出信号强度无关(包括产生-符合噪声、复位噪声、单元内场效应管等读出电路的噪声、后放大器噪声和量化噪声等等),称之为读出噪声 σ_r ,即噪声基底(Read noise 或 Read noise floor)。这二者彼此独立,其平方之和构成像元总噪声:

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_r^2 \tag{1}$$

由于散粒噪声与信号大小有关,因此 CCD 等阵列探测器件常用不随信号变化的读出噪声来评价器件的噪声水平。各像元的读出噪声会略有差别,通常用平均像素读出噪声作为器件的读出噪声参数。

1.2 读出噪声的测试方法

IRFPA 的读出噪声通常利用其输出的图像测试计算,方法主要有两种^[2-3]。

1) 偏置帧法

如果系统工作很好,那么偏置帧 F (积分时间为零时输出的本底图像)中包含的噪声以读出噪声为主,因此可直接利用多幅偏置帧图像计算出单像素总噪声,进而计算出平均像素读出噪声。或者通过计算两幅偏置帧图像点对点相减得到的差图像在某一区域像元的均方差,进而按(2)式得到以 rms(DN)表示的读出噪声 σ_r 。将 σ_r 乘以系统增益因子得到用电子数表示的读出噪声 rms(e)。

$$\sigma_r = \left[\frac{1}{m \times n - N_b} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=m_1}^{m_2} \sum_{j=n_1}^{n_2} (F_{1ij} - F_{2ij})^2 \right]^{1/2} \quad (DN) \tag{2}$$

N_b 为计算区域 $(m_2 - m_1) - (n_2 - n_1)$ 中包含的缺陷像元数,求和时不包括缺陷像元。对于不能采集零积

分时间的偏置帧图像的成像系统,不能采用此方法,需要用下面的光子转移曲线法。

2) 光子转移曲线法^[4-6]

式(1)中表示的噪声关系是应用于电子数(e),不是数字量(DN),而由图像测得量 $S(DN)$ 和 $\sigma(DN)$ 是数字量。用 g^2 去除式(2)中每个噪声项得到:

$$\left(\frac{\sigma}{g}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_s}{g}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_r}{g}\right)^2 \tag{3}$$

g 为增益因子,第一项即为 $\sigma^2(DN)$,第三项为 $\sigma_r^2(DN)$ 。由于散粒噪声符合泊松统计分布,按照统计规律,光电子噪声方差等于光电子数,有 $\sigma_p^2(e) = n_e = g \cdot S(DN)$ 。所以有:

$$\sigma^2(DN) = \frac{1}{g} S(DN) + \sigma_r^2(DN) \tag{4}$$

这是一个很重要的公式,用它直接将总噪声、读出噪声和输出信号联系起来,表明了以数字量表示的总噪声和信号的直线关系。

分别在不同曝光量(改变光强或积分时间)情况下采集图像,计算出一个点在各种曝光量下的噪声 $\sigma^2(DN)$ 和信号平均值 $S(DN)$,以 $S(DN)$ 为横坐标, $\sigma^2(DN)$ 为纵坐标画图。二者之间应为线性关系,通过拟合得直线方程,方程的截距即为读出噪声 $\sigma_r^2(DN)$,斜率的倒数即为增益 g 。即

拟合曲线如果为:

$$\hat{\sigma}^2 = A + B \cdot S \tag{5}$$

增益 $g = 1/B$, 读出噪声为:
 $\sigma_r = \sqrt{A(DN)} = g \cdot \sqrt{A(e)}$ 。

2 像元响应率

2.1 像元响应率定义

《规范》中的像元响应率定义为:焦平面在一定帧周期或行周期条件下,在动态范围内像元每单位辐射功率产生的输出信号电压,即:

$$R(i,j) = V_s(i,j)/P, \text{ 单位为: (V/W)。}$$

对于单元探测器件,信号电流或电压是实时输出的,定义的响应率暗含了 1 s 时间的概念,单位入射辐射功率(相同光谱分布)产生的信号电压是一定的,即 R 为确定值。但对于积分型阵列器件,输出电压信号与积分时间有关。如果积分时间不同,上式中算得的响应率不同,这种不确定性对描述器件性能没有意义。同样原因,《规范》中附录 A 定义的电荷响应率(C/W)也没有意义。因此笔者建议对积分型阵列器件,不使用这样的定义。由于电流是单位时间的概念,所以附录 A(1)中常用于评价单元探测器的电流响应率(A/W)可以使用。能量响应率(V/J)定义包含了积分

时间, 也比较合理。文献[4]是 SPIE 出版的一本很有影响的工具书, 它采用(6)式定义, 即像元响应率定义为探测器像元接收单位曝辐量(辐照度与积分时间的乘机, 与光学波段的曝光量对应)产生的输出电信号大小, 即:

$$R(i,j)=\frac{S(i,j)}{He}=\frac{S(i,j)}{E\cdot t_{int}} \tag{6}$$

式中: 信号 S 可以用电压单位或数字量 ADU 表示, 也可以用电荷数。上述定义也可理解为单位辐照度、单位积分时间时像元输出电信号的大小, 比《规范》定义的能量响应率多了像元面积项, 似乎更合理一些, 所以本文建议《规范》推广采用此定义。

2.2 像元响应率测试方法

像元响应率也称为积分响应度, 是器件对入射其上的所有波长辐射响应程度的度量。《规范》给出的像元响应率测试方法中, 像元响应电压 V_s 和入射功率 P 的计算公式为:

$$V_s(i,j)=\frac{1}{K}\{V_{DS}[(i,j),T_{黑体}+T_{0背景}]-V_{DS}[(i,j),T_{0背景}]\} \tag{7}$$

$$P=\frac{\sigma(T^4-T_0^4)\times d^2\times A_D}{4\times L^2} \tag{8}$$

式中: K 为系统增益, L 为黑体出射孔到焦平面的垂直距离。

式(7)表示 V_s 仅为像元对黑体辐射信号的响应电压, 而式(8)的结果表示参与计算的辐射功率比黑体辐射的实际功率小(被减掉背景辐射功率), 二者不对称。式(8)中不应当有 $\times T_0^4$ 项。

另外, 由于黑体的温度不同, 其光谱功率分布就不同。式(8)给出的是黑体全波长的总辐射功率, 而探测器对不同波长辐射的响应是不同的, $(T^4-T_0^4)$ 不可能与 V_s 成正比, 按此定义, 用不同温度黑体测得的响应率是不同的, 出现测试结果的不确定性。由于目前实际应用当中很少用积分响应率作为评价 IRFPA 的参数, 本文没有讨论其合理的测试方法。

3 光谱响应度和量子效率

上面的像元响应率是对波长的积分响应率。科学应用中常用光谱响应度和量子效率表示探测器对不同波长辐射响应的灵敏程度, 根据它可知道器件响应带宽、峰值波长等。《规范》给出了 IRFPA 像元相对光谱响应的定义和测试方法, 在附录 C 中作为备用参数给出量子效率的定义, 但没有给出绝对光谱响应和量子效率的测试方法, 本文对此做些补充。

与像元响应率对应, IRFPA 像元光谱响应度是指

一个像元接收到波长 λ 处单位波长间隔内单位入射曝辐量时输出的电压信号的大小, 与式(6)对应, 有:

$$R(\lambda)=\frac{V_s}{He(\lambda)}=\frac{V_s}{E(\lambda)\cdot t_{int}} \tag{9}$$

$E(\lambda)$ 表示探测器光敏面处的光谱辐照度, $R(\lambda)$ 用 $V/[J/cm^2]$ 表示, 有时也用 $A/[W/cm^2]$ 表示。 $He(J/cm^2)$ 称为曝辐量^[4], 为辐照度 $E(W/cm^2)$ 与积分时间 t_{int} 的乘积。平均光谱响应是指阵列探测器的所有有效像元的光谱响应的平均值。其常用测量方法是: 首先利用辐射源和单色仪在被测 IRFPA 处产生均匀单色辐射, 由已知光谱响应度的标准探测器测量出被测 IRFPA 所在处的单色辐射照度 $E(\lambda)$, 此时 IRFPA 输出的电信号为 V_s , 根据式(9)计算出光谱响应。文献[2]给出了 IRFPA 光谱响应测试的具体方法。

量子效率是评价光辐射探测器对不同波长入射辐射响应程度的另一种表示方式, 是指入射到探测器上的某波长光子产生读出光电子的概率, 即:

$$\eta=\frac{\text{产生的可读出的光电子数}n_e}{\text{接收到的光量子数}n_p}\times 100\% \tag{10}$$

由于不同波长单位辐射能量包含的光子数不同, 用光谱响应表征器件光谱特性好坏不是很直观, 而用量子效率则可以直接看出器件光谱响应性能优劣。量子效率越接近 100%, 表示响应度越高。因此天文等科学应用上常需要给出器件的量子效率参数。

根据探测器接收到的辐射功率和光谱响应度可推导出:

$$\eta(\lambda)=\frac{n_e}{n_p}=\frac{R(\lambda)\cdot h\cdot c}{e\cdot \lambda\cdot A_p} \tag{11}$$

如果 λ 和 $R(\lambda)$ 分别用 μm 和 $A/[W/cm^2]$ 作单位, 像元面积 A_p 用 cm^2 作单位, 则上式可表示为:

$$\eta(\lambda)=1.24\cdot R(\lambda)/(\lambda\cdot A) \tag{12}$$

根据式(12), 只要测得光谱响应, 即可计算出量子效率。因此量子效率的测量原理和方法与光谱响应相同。

由于探测器的工作温度不同, 电子的扩散长度不同, 因而二极管节区对电子的收集效率不同, 所以探测器的量子效率随器件的工作温度不同而不同^[9]。因此测量量子效率和光谱响应需指明器件的工作温度。

4 噪声等效温差 (NETD)

噪声等效温差是指红外器件可分辨的最小温差, 主要用于评价中远红外热像仪的性能, 天文上很少用。《规范》中给出的 NETD 的测试方法是采用图 1 所示的测试装置, 条状孔板作为目标, 经透镜成像在焦平面上, 条状孔板的孔内温度为面源黑体的温度 T ,

条状板的温度为 T_0 ，故目标温差为 $T - T_0$ 。利用焦平面上条状图像某一行的输出信号得到孔和条的信号差 $V_s = V_b - V_g$ ，根据公式 $NETD = (T - T_0) / (V_s / V_N)$ ，计算出 NETD。式中 V_N 为噪声电压。

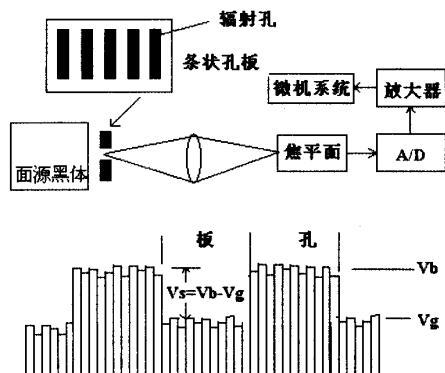


图1 《规范》中 NETD 测试装置和焦平面信号波形

Fig.1 The test device and output waveform for NETD of IRFPA

根据普朗克公式，焦平面上得到的黑体辐射功率不与温度成正比，响应电压差 V_s 也不可能与温差成正比，这样在不同温度 T 下测得的 NETD 会不同，即 NETD 是黑体温度的函数，所以应该指明在什么温度条件下的测量结果。另外，所用的公式当中的噪声 V_N 值得商榷。按照《规范》， V_N 是背景辐照条件下的噪声电压，而信噪比不应当用测试条件下的信号与背景条件下的噪声之比。笔者认为方法采用的黑体改用面阵差分黑体，并配置靶标，靶标和黑体背景的温差不能过大，此时噪声应当为背景温度等于 T_0 时对应图像信号的平均噪声。

5 缺陷像元

缺陷像元是指其响应度偏离像元平均响应度较大的像元，包括不能产生电荷的死像元、响应度过小的过冷像元、响应度过大的过热像元以及噪声过大的像元。IRFPA 由于工艺的复杂性，缺陷像元比 CCD 多，因此缺陷像元的比率是 IRFPA 的常用指标。不同厂家有不同的定义，《规范》中将像元响应率小于平均响应率 1/10 的像元为死像元，噪声电压大于平均噪声电压 10 倍的像元为过热像元。作者认为此定义需要完善。

首先《规范》用像元响应率作为判别条件不利于统计操作，因为计算像元响应率比较复杂，需要测量辐照度；另外《规范》没有明确说明背景条件，即噪声电压不确定，这样的测试结果没有可对比性。实验证明，曝辐量不同，输出信号的噪声电压不同，计算出的过热像元数也随着变。

其次，《规范》也没有将响应率过高的像元列为缺陷像元，因为有的像元虽然噪声电压不高，但是如果其响应率比平均响应率高出许多（一倍以上），当平均曝辐量刚达到饱和值的一半时，它们已经达到饱和，成为无效像元。如果按《规范》中给定的判别计算 IRFPA 的缺陷像元率，结果会明显低于实际比率。

第三，按照《规范》定义，需要在背景辐照条件和均匀辐照条件两种情况下统计坏像元，测试和计算均较繁琐。作者建议将 IRFPA 在平场（均匀辐照）情况下输出信号达到满阱一半作为曝辐量条件，规定偏离平均值某一比例（例如 20%）以外的像元作为缺陷像元，在进行参数计算和图像处理时对其剔除或替换。这样定义对于测试者和使用者都便于操作，更加实用。

6 结论

目前国内外许多技术人员仍然从各自的需要和理解定义一些参数，存在参数的不统一。随着红外成像器件的广泛应用，迫切需要统一的特性参数定义和测试方法来评价器件。因为虽然应用领域不同，对参数的要求和测试方法不同，但是许多相关参数的定义方法还是可以统一的，因此有必要对现有规范进行探讨，提出合理修改建议，使得作为国家标准的技术规范更加严密，易于操作，能够发挥其应有作用。本文提出了一些可行的改进方法，期望使国家标准更好地适应红外成像器件的飞速发展，真正发挥国标的指导作用。

参考文献:

- [1] 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S] (GB/T 17444-1998) 北京: 中国标准出版社. 1991
- [2] 王术军. 天文红外成像器件的性能检测方法与技术的研究[D]. 北京师范大学博士学位论文. 2007.
- [3] Lan S. Mclean. *Electronic Imaging in Astronomy*[M]. USA: John Wiley & Sons Ltd in association with PRAXIS PUBLISHING Ltd. 1989: 214
- [4] Gerald C. Holst. *CCD ARRAYS CAMERAS and DISPLAYS*[A]. *SPIE*[C]. 1998.
- [5] J. Janesick, T. Elliott, S. Collins, M. Blouke, and J. Freeman. Scientific charge-coupled devices[J]. *Optical Engineering*. 1987, 26(8): 692~714.
- [6] P. Amico, T. Bohm. ESO's New CCD Testbench[J]. *Exp. Astronomy*. 1998, (8): 1~8.
- [7] C.R.Costanzo, C.L.Kauffman. Characterization of IR focal plane test stations[A]. *SPIE*[C]. 1990, 1308.
- [8] 崔敦杰. 关于红外探测器与红外焦平面阵列探测器性能参数描述方法的商榷[J]. *光学精密工程*. 2003, 11(3): 265~269.
- [9] M. J. Rieke, G. S. Winters, etc. Characterization of NICMOS detectors for space astronomy[A]. *SPIE*[C]. 1993, 1946: 214~224.