

天文应用之红外器件性能与测试评估方法分析

蔡云芳¹, 李银柱¹, 许方宇¹, 徐稚¹, 郭杰²

(1. 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650011; 2. 云南师范大学, 云南 昆明 650031)

摘要: 简要介绍红外技术在天文观测中的意义、天文观测对红外探测器件以及红外光学系统的独特要求。重点归纳和总结了天文观测中所关注的主要性能指标, 并且给出部分指标的测试方法, 为红外技术运用于天文观测建立基础。

关键词: 红外天文观测; 天文红外探测器; 焦平面阵列

中图分类号: TN215, P111

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)11-0868-05

The Performance and Test Evaluation Method Analysis of Astronomy Application of Infrared Devices

CAI Yun-fang¹, LI Yin-zhu¹, XU Fang-yu¹, XU Zhi¹, GUO Jie²

(1. Yunnan astronomical observatories, Chinese academy of sciences, Kunming 650011, China;

2. Yunnan Normal University, Kunming 650031, China)

Abstract: This article briefly introduces the significance of infrared observation in astronomy and the unique requirements of infrared observation for the infrared focal plane detector and infrared optical system. We conclude and summarize the main observation parameters needed in astronomical observation and present testing methods for these parameters, which will provide some convenience for later astronomical observations.

Key words: infrared observation, infrared focal plane detector, focal plane array

0 引言

天文学不同于物理学的本质是天文学是一门实测的科学。而红外天文观测是天文实测中不可或缺的组成部分; 红外观测在天文学的很多研究领域里具有重要意义。例如研究银河系结构、恒星的形成、星际介质、星系及类星体、太阳结构等等, 在这些领域中都表现出了不可替代的重要作用。红外波是位于可见光波段及射电波段之间的一部分电磁波, 由于地球大气对天体辐射的影响有折射、散射、吸收和闪射的作用, 使得地面上只能在某些特定波段收到天体的辐射, 即大气窗口, 地基望远镜的红外观测主要集中在几个特定的波段。通常在天文观测中将波长在0.7~1 μm的称为近红外; 波长在1~3 μm的波段称为短波红外; 波长位于3~5 μm的波段成为中红外波段; 波长在8~14 μm的波段称为长波红外, 而波长大于16 μm的称为远红外波段。而对不同的波段的红外天

体辐射的观测对应不同的观测意义。近年来红外天文学经历了逐渐兴起和蓬勃发展阶段, 但是红外发现后长达一个半世纪的时期, 红外天文学技术的进展并不大, 其主要原因有: 第一, 红外波段的辐射非常弱, 早期没有高探测灵敏度的红外探测器来探测红外天体辐射。第二, 地球大气的背景辐射和仪器自身的辐射严重的限制了红外天文探测的发展。

红外天文观测迫切, 但是目前国内红外探测器技术的发展远远落后于国外, 天文红外探测器的研制还处于初期阶段, 现阶段所用的红外相机几乎都是国外进口的相机, 厂家提供的与天文实际观测所需要的性能参数不尽相同, 所以需要对相机进行重新测试和评估, 但是国内比较成熟的探测器测试方法大多不太适用于天文观测领域, 天文领域也没有一套完整全面的参数测试方法。本文首先讨论了天文红外观测对红外器件和红外光学系统的特殊要求, 其次为天文红外观测所需红外探测器的主要性能参数以及测试方法进

收稿日期: 2014-04-29; 修订日期: 2014-07-10。

作者简介: 蔡云芳(1989-), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要研究方向: 天文红外技术。E-mail: cyf2012@ynao.ac.cn。

基金项目: 物质科学前沿与交叉研究II“红外太阳物理”资助。

行了理论分析。

1 天文观测对红外器件和红外光学系统的特殊要求

影响天体红外观测的因素主要表现有两方面: 第一, 红外光学系统的影响, 天体的红外辐射与可见光相比非常微弱, 地面背景辐射很强, 且背景噪声随时在变化, 要达到一定的精度, 要对背景进行随时的减掉, 将观测目标和背景进行很快的切换, 统筹更耐用斩波或者调制(chopping)的方法; 光学设计使用很小的副镜, 把主镜边缘的辐射挡在外面, 且要对主副镜采取镀膜的方式, 提高红外发射系数及降低自身的热辐射等, 红外光学系统是为了提高观测质量, 尽可能的减少成像前端的影响, 使得红外成像器件发挥其最好性能。第二, 红外探测器件是决定能否实现红外观测的最主要的制约条件, 与可见光 CCD 性能比较, 主要表现在对微弱的天文辐射需极高的探测灵敏度; 同时, 探测器需要有极小的本底噪声和暗电流^[1]。如表 1 是国际上先进的天文红外器件参数指标, 由表 1 可以看出, 天文观测中对红外器件所关注的性能参数不同于军工和民用红外器件。天文观测一般是只在某个波段处进行的观测, 所以最主要的参数为该波长处其量子效率、读

出噪声、暗电流是天文学家最为关注的参数。由于天文红外辐射的特性, 一般随着天文红外观测目的, 不同波段探测器工艺的影响不同对探测的性能要求不同^[2], 如一般天体观测要求红外器件的读出噪声为几十个电子数, 而量子效率则要求在响应最大波长处在 70% 以上, 暗流一般在每秒 10 个电子数以内, 工作温度一般都处于超低温或低温状态, 红外制冷技术非常重要, 直接决定一个红外探测器件是否可以达到红外观测的性能要求, 所以在红外观测中, 不仅要对探测器进行制冷甚至连望眼镜本身也要制冷。

由此可见, 在天文红外观测中除了考虑红外光学系统的影响外, 最主要的是对红外器件的这些参数进行测试和评估, 由于与军工、民用所用参数不同, 从而测试评估方法也存在一定的差异, 以下为总结一套适合天文红外器件的测试评估方法。

2 天文红外焦平面探测器件的主要性能参数测试评估方法

天文观测最主要的是对天体进行成像, 所以对于成像应用来说, 有以下主要参数: 探测器的缺陷像元、增益、读出噪声、不均匀性、信噪比、量子效率、暗流、线性度。以下主要对这些参数测试方法进行探讨。

表 1 美国为天文观测提供的高性能红外焦平面探测器的主要性能指标

Table 1 The main performance index of high performance infrared focal plane detector for astronomical observation provided by America

性能参数	RVS	Teledyne	DRS Technologies		RVSJWST
	VIRGO/VISTA	H2RGJWST	RVS Orion	WISE	
种类	HgCdTe	HgCdTe	InSb	Si:As IBC	Si:As IBC
波长范围/ μm	0.85~2.5	0.6~5.3	0.6~5.5	5~28	5~28
阵列	2048×2048	2048×2048	2048×2048	1024×1024	1024×1024
像元大小/ μm	20	18	25	18	25
测试温度/K	78	37	32	7.8	6.7
读出噪声/ $(\text{e}^- \text{ rms})$	6 (慢速) 30~40 (快速)	6 (慢速) 30~40 (快速)	6	42	10
暗电流/ (e^- / s)	<0.1	<0.01	0.01	<5	0.1
阱容量/ e^-	1.4×10^5	8×10^4	1.5×10^5	$>10^5$	2×10^5
量子效率	>70%	>80%	>80%	>70%	>70%
输出	4, 16	1, 4, 32	64	4	4
频率/Hz	0.4, 1.5	0.1~30	10	1	0.3

天文红外器件的测试一般分为两种：即对探测器整体的测试和对敏感器件单独的测试。在天文领域，探测器整体，包括红外敏感器、读出电路和后处理电路，不包括前端光学系统，相当于“红外探测器组件”的概念；而敏感器件，仅指光电转换器和最简单的读出电路，不包括放大和后处理电路。对探测器整体的测试相对简单，因为探测器整体自带了后处理电路，可以通过AD转换推算出电子值，所以首先要测的探测器数模转换的增益值，方可对其他参数进行计算评估；可用来测试整体的、未经拆卸的天文红外成像器件。对敏感器件（焦平面）的测试则要加入采集和控制软件，对模拟信号（电压/电子）直接进行采集，从而可以直接对参数的性能计算评估^[3]。如果想自制符合特定观测目标的天文相机，则首先要对敏感器件进行测试。

云南天文台为了推动天文红外观测技术的发展，搭建了一套适合天文红外器件的测试方案。测试系统包括测试硬件设备，采集卡、驱动卡以及采集软件等^[4]，这套设备预计不仅可以满足对探测系统整体进行测试，又可以对敏感器件测试。以下将天文观测需要的参数及测试评估方法进行一些理论分析和总结。

2.1 缺陷像元

缺陷像元是指探测器的所有像元中偏离平均响应度比较大的像元，由响应过小甚至没有响应、响应过大、噪声过大等像元组成，这些缺陷像元大多数是在生产过程中形成的，也有是在后期使用过程中高能粒子辐射损坏的。在天文中规定输出信号偏离平均值10%的像元为缺陷像元。

过热像元：

$$S_D(i,j) > 10 \times \bar{S}_D \quad (1)$$

式中： $S_D(i,j)$ 为在暗场图像中每个像元的输出； \bar{S}_D 为暗场所有像元的平均值。

过冷像元：

$$S_H(i,j) < \bar{S}_H / 10 \quad (2)$$

式中： $S_H(i,j)$ 为平均输出达到满阱信号的一半时像元的输出信号； \bar{S}_H 为半阱是所有像元的平均值。

测试方法：将所有测试设备处于最佳工作状态，调节曝光时间，将探测器处于遮光状态，拍摄10组暗场求得平均暗场作为暗场；设定黑体的温度T，在与上相同的曝光时间下，使得探测器的响应达到半阱附近拍摄（50帧以上）求平均值作为半阱的相应图。按以上公式求的缺陷像元的数量及位置，缺陷像元的

存在会严重影响红外天体成像质量，通过拍摄的图像，找出缺陷像元的位置，在图像处理过程中需要替换等。

2.2 增益和读出噪声

天文红外焦平面探测器整机通过测试图像得到性能参数的大小，所测量用数字量（DN）表示。增益是模拟信号和数字信号转换的换算，表示一个数模转换单位所对应的电子数，单位e⁻/ADU。其大小决定了其他性能参数的评估。其测试一般是通过“像元光子转移曲线法”^[5]与探测器的读出噪声一起测试^[4]。

成像系统噪声主要包括：散粒噪声（光子噪声、暗流散粒噪声、背景噪声）；读出噪声（也叫芯片基底噪声：产生-复合噪声、复位噪声、场效应管的读出噪声、放大噪声、量化噪声）；固定模式噪声（焦平面像元的不均匀性噪声）^[6]。一般噪声的计算是从单个像元的噪声开始的，针对单个像元的噪声就不包含固定模式噪声，而且散粒噪声的大小与信号大小有关，因此IRFP的噪声水平常用不随输入信号大小而变化的读出噪声来评估^[7]。其原理是由于像元的总噪声是有散粒噪声和读出噪声组成的，散粒噪声是满足泊松分布的，所以有：

$$\sigma_{DN}^2(i,j) = \sigma_{DR}^2(i,j) + \frac{1}{G} S_D(i,j) \quad (3)$$

此处3个参量的单位为数字量表示， $\sigma_{DN}(i,j)$ 为总噪声； $\sigma_{DR}(i,j)$ 为系统读出噪声； G 为增益的大小； $S_D(i,j)$ 表示像元的平均信号大小。

测试方法：通过调节曝光时间，或者改变黑体源的温度来得到不同的曝光量，在每一组不同曝光量下拍到 $F \geq 500$ 组数据，选取焦平面上的某一个像元（保证不是盲元），计算和统计出在不同曝光量下的探测器的总噪声的方差值 $\sigma_{DN}^2(i,j)$ 以及平均响应值 $S_D(i,j)$ 。分别以 $S_D(i,j)$ 为横坐标， $\sigma_{DN}^2(i,j)$ 为纵坐标得到线性图像，通过拟合可以得到直线的截距为读出噪声的方差 $\sigma_{DR}^2(i,j)$ 的大小，而斜率的倒数为增益 G 的大小。

2.3 固定图形噪声及响应不均匀性

探测器的固定图形噪声指的是帧与帧之间不随时间变化的空间范围的响应的涨落，表示焦平面像元之间的响应不均匀性，其定义为：红外焦平面在均匀辐射条件下，各有效像元输出信号的均方根值^[7]：

$$S_{SP} = \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\bar{S}_{DS}(i,j) - \bar{S}_{DS}]^2} \quad (4)$$

式中： M, N 分别表示焦平面阵列的行数和列数； d 为探测器的死像元数； h 为过热像元； $\bar{S}_{DS}(i,j)$ 某个像元在相同曝光时间下采集的 F 帧图像的数值进行平

均; \bar{S}_{DS} 表示所有像元 $S_{DS}(i, j)$ 的平均值; S_{SP} 为剔除了盲元后在背景温度下的固定图形噪声。

响应不均匀性: 所有像元响应信号的均方根起伏与其平均响应信号的比值:

$$NU = \frac{S_{SP}}{\bar{S}_{DS}} \times 100\% \quad (5)$$

测试方法: 可以采用天文观测中平场测量的方法进行评估, 即在均匀的光场辐射下采集 $F=500$ 帧图像, 调节积分时间, 使得平均像元输出在半阱附近, 并对图像数据进行平均, 除掉读出噪声和图像本底值, 得到图像的平场值。探测器的固定图形噪声是一个非常重要的参数, 由于制造工艺的限制, 不可完全消除。天文探测器要求响应灵敏度非常高, 不均匀性的大小对天体辐射的分辨本领有很大的影响, 所以要根据天文观测的目标要求, 选择适合图形噪声的探测器才能达到预期目标。所以对天文红外焦平面探测器进行固定图像噪声的评估显得异常重要。

2.4 信噪比

探测器的信噪比广义上定义为: 探测器某像元在相应波长下的信号输出与其值的不确定性的比值。而狭义上定义为: 探测器某个像元在相应波长处的测量信号与全部测量噪声之间的比值^[8]。探测器的信噪比与探测器输出的信号大小有关, 所以所对应的噪声信号也应该为与信号大小有关的总噪声信号^[7]:

$$SNR_{AD}(i, j) = \frac{S_{AD}(i, j)}{\sigma_{DN}(i, j)} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\sigma_{DN}(i, j)$ 为测量的总噪声; $S_{AD}(i, j)$ 为测量信号值。

测试方法: 在特定积分时间和特定的波长条件下, 选取焦平面上的某一个像元(保证不是盲元), 采集该像元的信号响应值, 帧数不少于 100 帧, 之后进行平均得到信号 $S_{(\lambda)}(i, j)$, 通过前面方法求的噪声, 即可得到此像元的信噪比。

2.5 量子效率

焦平面探测器量子效率的定义为入射到焦平面上的某一波长上的光子数所能产生读出电子的概率。由于焦平面探测器对波长有选择性, 所以对不同波长的响应有不同的量子效率, 在应用中常用量子效率表示探测器对不同波长辐射响应的灵敏程度^[9]。读出的光生电子数接收到的光量子数:

$$\varrho_e = \frac{\text{读出的光生电子数} n_e}{\text{接收到的光量子数} n_p} \times 100\% \quad (7)$$

根据定义可以得出:

$$\varrho_{eD(\lambda)}(i, j) = \frac{S_{D\lambda}(i, j) \cdot G \cdot h \cdot c}{E \cdot t_{int} \cdot A_d \cdot \lambda} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $S_{AD}(i, j)$ 表示某像元的平均输出信号, ADU; G 为增益值, e^-/ADU ; E 为辐照度, W/cm^2 ; A_d 为单个像元面积, cm^2 。

测试方法: 确定积分时间, 在某单色波长处, 选定某像元(非盲元)采集 $F=100$ 帧图像, 对 F 帧图像数值进行平均, 得到 $S_{D\lambda}(i, j)$, W 的测量最为复杂, 需要用到定标探头和检测探头, 相机曝光前, 定标探头和检测探头分别测的探测器芯片的照度和电流为 E_c 、 I_c , 用检测探头在相机曝光时所测电流值为 I , 因为照度值和电流值成比例关系, 所以可以得到曝光时的照度值为: $E=IE_c/I_c$, 代入公式可以求出成像系统的量子效率。

2.6 暗流

暗流是表示红外焦平面探测器在无光照辐射条件下, 由随机的热电子所引起的暗信号, 表示单位时间内单个像元产生的热电子信号值^[10], 单位 e^-/s :

$$I_{dark}(i, j) = \frac{[\bar{S}(i, j) - \bar{B}(i, j)] \cdot G}{t_{int}} \quad (9)$$

式中: B 表示本底值。

测试方法: 关闭快门进行积分输出, 以确保输出过程中没有光子到达光敏区, 用适宜的积分时间采集一组暗场图(大于 10 帧), 本底(Bias)是为了保证探测器输出不会出现负值现象所加的正偏置电压, 所以要减掉本底值, 在没有辐射最短曝光时间采集一组本底(大于 10 帧), 将两组数据平均, 即可求得暗流的大小(其中包括了读出噪声)。

2.7 线性度

线性度反映了信号输入和输出之间的变化关系^[11], 测试公式表示为:

$$S(i, j)_{out} - B(i, j) = A \times E_{int}(i, j) \quad (10)$$

式中: E_{int} 为输出信号, 通过线型拟合输出和输入值, 求出曲线的系数, 用此系数值 A 表征探测器的线性度。

测试方法: 通过改变不同的曝光时间, 每个曝光时间拍 $F=100$ 帧图像, 求出输入的曝辐量值和平均的信号响应输出, 信号响应输出减去本底值, 以不同曝光时间下的曝辐量为横坐标, 不同曝光时间下的平均信号响应减去本底的值为纵坐标画图, 得到的曲线为线性响应曲线, 对此曲线进行拟合, 用得到的系数值 A 表征像元信号响应度。

3 小结

红外探测器性能测试是红外探测器应用于天文观测必须的前期工作,建立和完善一套实用红外天文观测的红外参数测试方法是搭建红外测试平台关键的一步^[12],不仅能对天文红外探测器发展起促进作用,还给红外探测器的应用提供理论指导。因天文观测对红外焦平面探测器的高要求,使得其主要性能参数、定义、测试评估方法有别与其他领域使用的红外焦平面探测器,本文结合澄江抚仙湖1m红外太阳望远镜的红外观测要求对天文观测中主要的性能参数以及测试方法做了理论分析,由于实验条件的限制,实测工作还待以后完成。

参考文献:

- [1] Rieke G H. Infrared detector arrays for astronomy[C]//Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2006: 90-92.
- [2] 沈宏海, 黄猛, 李嘉全, 等. 国外先进航空点载荷的进展和关键技术分析[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 21-23.
- [3] HOLST G C. Testing and evaluation of infrared imaging systems[M]. SPIE, 1998: 203-207.
- [4] 曾戈虹. p-on-n HgCdTe 红外探测器机理分析与性能计算[J]. 红外技术, 2013, 35(5): 249-250.
- [5] Stanford M R, Hadwen B J. The noise performance of electron multiplying charge coupled devices[J]. IEEE Trans. Electron on Devices, 2003, 50(5): 1227-1232.
- [6] 王书宏, 胡谋法, 陈曾平. 天文 CCD 相机的噪声分析与信噪比模型的研究[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 731-734.
- [7] 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.
- [8] 王术军. 红外焦平面阵列特性参数定义和测试方法的讨论[J]. 红外技术, 2007, 29(4): 211-212.
- [9] 李丹, 尚媛园, 宋谦. 天文用 2 k×2 k 高速 CMOS 相机的研制与测试结果[J]. 天文研究与技术, 2006, 3(4): 380-386.
- [10] 孙宏海, 刘艳澧. 两种高速 CMOS 图像传感器的应用与测试[J]. 中国光学, 2011, 4(5): 453-460.
- [11] 尚媛园, 张伟功, 宋宇, 等. CMOS 成像器件性能测试方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(5): 2-3.
- [12] 宋谦, 季凯帆, 曹文达. 天文红外电荷耦合器件的实验室检测[J]. 天文物理学报, 1999, 19(3): 333-337.