

面阵 CCD 光谱响应测试及不确定度评估

李晓杰^{1,2} 任建伟¹ 刘洪兴¹ 万志¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于单色仪对面阵 CCD 进行光谱响应测试, 并对测试结果的不确定度进行全面评估。介绍单色仪法测试 CCD 光谱响应的原理; 选用硅陷阱探测器作为标准探测器, 搭建测试装置, 得出 400~1000 nm 波段内面阵 CCD 光谱特性参量, 其中峰值波长为 602 nm, 中心波长为 580 nm, 光谱带宽为 402 nm; 以 632 nm 处光谱响应测试为例, 建立不确定度评估模型, 分析了包括面阵 CCD 辐照度响应非均匀性、溴钨灯稳定性、单色仪出射波长重复性和准确度以及图像采集处理系统的稳定性对测试的影响。应用模型计算得出测试结果的合成标准不确定度为 4.3%($k=1$), 满足面阵 CCD 光谱响应测试精度要求。

关键词 测量; 面阵 CCD; 光谱响应; 不确定度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.111202

Spectral Response Testing and Uncertainty Evaluation of Plane Array CCD

Li Xiaojie^{1,2} Ren Jianwei¹ Liu Hongxing¹ Wan Zhi¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the method of monochromator, the spectral response of plane array CCD is tested and the uncertainty of the results is evaluated in all respects. The principle of the test method is introduced, a set of spectral testing device which uses the silicon trap as the standard detector is designed. Within the range of 400~1000 nm, the spectral characteristics of the plane array CCD is obtained, including the peak wavelength of 602 nm, the center wavelength of 580 nm and the spectral band wavelength of 402 nm. According to the spectral response at 632 nm, an uncertainty evaluation model is established to analyze all the factors that have impact on the test results, including the irradiance responsivity non-uniformity of plane array CCD, the stability of bromine tungsten lamp, the repeatability and accuracy of emitting wavelength of monochromator, as well as the stability of the image acquisition and processing system. According to the model, the combined standard uncertainty is 4.3% ($k=1$), which can meet the requirement of spectral response testing accuracy of plane array CCD.

Key words measurement; plane array CCD; spectral response; uncertainty

OCIS codes 120.4140; 230.0040; 230.1140; 230.1150

1 引言

电荷耦合器件(CCD)拼接^[1-2]是目前获取大视场高分辨率遥感图像的有效途径,符合拼接条件的一组 CCD 除了满足尺寸等几何一致性条件外,还需要满足辐射响应、光谱响应、辐射分辨率及动态范围等光电参量一致性条件。其中,光谱响应描述了 CCD 响应输出与入射辐射波长之间的关系,它决定了指定波段内测量目标的辐射信息。因此光谱响应测试以及测试结果的准确性都会对后续 CCD 的拼接筛选^[3]和光谱信息定量反演产生重大影响。

收稿日期: 2014-06-03; 收到修改稿日期: 2014-06-17; 网络出版日期: 2014-10-21

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 李晓杰(1987—),女,硕士研究生,主要从事辐射和光谱测量方面的研究。E-mail: xiaojieli2009@126.com

导师简介: 任建伟(1956—),男,高级工程师,硕士生导师,主要从事光学遥感辐射校正方面的研究。

E-mail: renjw@ciomp.ac.cn(通信联系人)

CCD 光谱响应测试也叫 CCD 光谱定标^[4],有单色仪法^[5]、发光二极管(LED)阵列法^[6]和激光脉冲法^[7]。其中单色仪法是通过光栅分光的原理提供单色波长,影响定标精度的因素主要有单色仪出射单色光的波长准确度和重复性;LED 阵列法是应用多种 LED 提供单色波长,但由于市场上 LED 种类有限且 LED 自身有一定的光谱带宽,这就从数据密度上影响定标精度;激光脉冲法是通过可调谐激光器将各波长激光束导入积分球,实现单色均匀光源,但激光照射到 CCD 会产生散斑和干涉现象,对测量精度影响较大,且整个装置成本较高。综合考虑简易程度、测试精度和装置成本等因素,目前单色仪法是实验室最适用的方法。

基于单色仪法搭建光谱响应测试装置后,对测试结果准确度的评估是不可或缺的。查阅相关文献,有关装置搭建和操作方面的内容并非充实^[8],对测试结果准确性的具体分析更为少见,这在一定程度上影响了对测试结果的判读,甚至造成测试结果的无法使用。

针对上述现状,本文在对单色仪法测试原理简单分析后,对星敏用高灵敏度 SONY ICX285AL 面阵 CCD 进行了光谱响应测试,并从相对光谱分布中得到待测 CCD 的峰值波长、中心波长和半峰全宽(FWHM)等光谱特性参量;从装置特点及整个测试流程出发,建立单色仪法测面阵 CCD 光谱响应不确定度分析模型,并以 632 nm 处光谱响应测试不确定度评估为例,确定测试结果的不确定度。

2 光谱响应测试原理

光谱响应描述 CCD 响应输出与入射单色能量之间的关系。对于 CCD 传感器芯片,输入是各个波长下的辐射照度,输出是经过模/数(A/D)转化后的数码值(记为 DN)。某一光源经过单色仪分光后由于各个波长下的辐射照度并不相同,所以如果采用对各个辐射照度逐一测量的方法会引起很大的误差,因此,单色仪法测 CCD 光谱响应中对单色辐射的确定一般应用比较的思想通过另外的标准探测器来实现。

CCD 器件光谱辐射传输的数学物理方程为

$$D_{\text{DNC}}(\lambda) = \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_c(\lambda) E(\lambda) d\lambda + D_{\text{DNC}0}, \quad (1)$$

参考已有资料^[9],当 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 5 \text{ nm}$ 时,(1)式的积分值能转换为求和的表达式

$$D_{\text{DNC}}(\lambda) = \alpha R_c(\lambda) E(\lambda) \Delta\lambda + D_{\text{DNC}0}, \quad (2)$$

式中 $D_{\text{DNC}}(\lambda)$ 为 CCD 单色响应输出信号值, $R_c(\lambda)$ 为光谱响应函数, $E(\lambda)$ 为入射单色辐射照度, $D_{\text{DNC}0}$ 为响应暗信号值, α 为与光谱辐射传输无关的系数。

对于标准探测器同样有

$$D_{\text{DNS}}(\lambda) = \alpha R_s(\lambda) E(\lambda) \Delta\lambda_s + D_{\text{DNS}0}, \quad (3)$$

式中 $D_{\text{DNS}}(\lambda)$ 、 $R_s(\lambda)$ 和 $D_{\text{DNS}0}$ 分别为与待测 CCD 相对应条件下的标准探测器的单色响应输出信号值、光谱响应函数和响应暗信号值。另外标准探测器的光谱响应函数 $R_s(\lambda)$ 由国家计量单位标校后给出。

当 CCD 和标准探测器有相同的入射单色辐射照度和扫描波长间隔时,整理(2)、(3)式即可在理论上得出 CCD 探测器的绝对光谱响应函数(实际绝对光谱响应函数的获得是在相对光谱响应函数的基础上通过进一步的辐射标定得到)

$$R(\lambda) = \frac{D_{\text{DNC}}(\lambda) - D_{\text{DNC}0}}{D_{\text{DNS}}(\lambda) - D_{\text{DNS}0}} R_s(\lambda), \quad (4)$$

归一化即可得出待测 CCD 的相对光谱响应函数 $R_r(\lambda)$

$$R_r(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R(\lambda)_{\text{max}}}, \quad (5)$$

待测 CCD 光谱响应峰值波长为相对光谱响应最大值所对应的入射波长,半峰全宽是相对光谱响应为 0.5 时所对应两入射波长之差,中心波长 λ_c 的表达式为

$$\lambda_c = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \cdot R_r(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_r(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

式中 λ_1 和 λ_2 为扫描的起止波长, $d\lambda$ 为单色仪扫描间隔。

3 实验室光谱响应测试装置

图1为实验室光谱特性测试装置示意图,主要包括溴钨灯和单色仪、硅陷阱标准探测器,图像采集处理系统三部分。其中,溴钨灯和单色仪联合提供单色光,溴钨灯与单色仪入射狭缝进行光路耦合,光源发出的光进入单色仪入射狭缝后被准直,然后经过光栅元件分光,最终单色光经过准直系统从出射狭缝射出;硅陷阱探测器属于单元探测器^[10],由3只反型硅光电二极管组成,性能稳定且能消除光的偏振对测量数据的影响;图像采集处理系统由 CCD 和硅陷阱探测器驱动电路、图像采集卡以及控制软件组成。

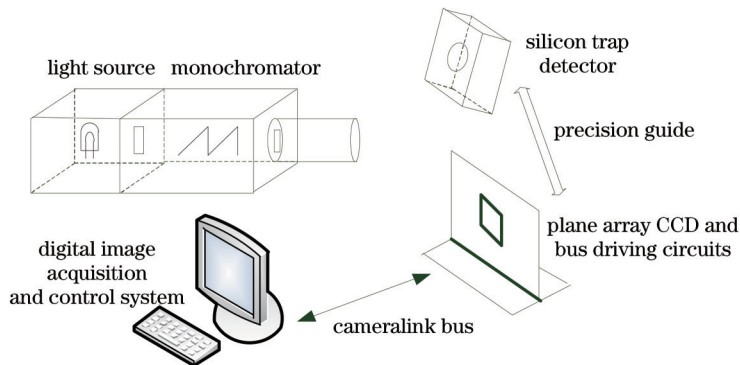


图1 光谱特性测试装置示意图

Fig.1 Sketch of measurement device for CCD spectral conformance

实验流程可以简单地描述为:调整光源强度,设置单色仪的扫描范围和扫描间隔;单色光照射到面阵 CCD 后通过上层采集软件选取均匀的矩形感光区,随着扫描的进行记录各波长下所选区域内 CCD 各像元的平均响应数码值 D_{DNc} 。相同条件下,通过精密导轨移动硅陷阱探测器至恰当位置,同样采集到硅陷阱探测器在各单色波长下的响应数码值 D_{DNs} ;最后,采集面阵 CCD 和硅陷阱探测器在无光照条件下的响应数码值 D_{DNc0} 和 D_{DNs0} ,作为本底信号。

4 光谱测试实验

4.1 面阵 CCD 辐射响应测试

从实验流程上可看出,测试面阵 CCD 相对光谱响应时,实际上是用一部分区域像元的光谱响应来代替整片 CCD 的光谱响应,如果各像元的辐射响应度不一致,那么这种代替必然会引起测量结果的不准确。

实验所用面阵 CCD 有效成像区域像元数目为 1392 pixel×1040 pixel。将面阵 CCD 放置于积分球出口

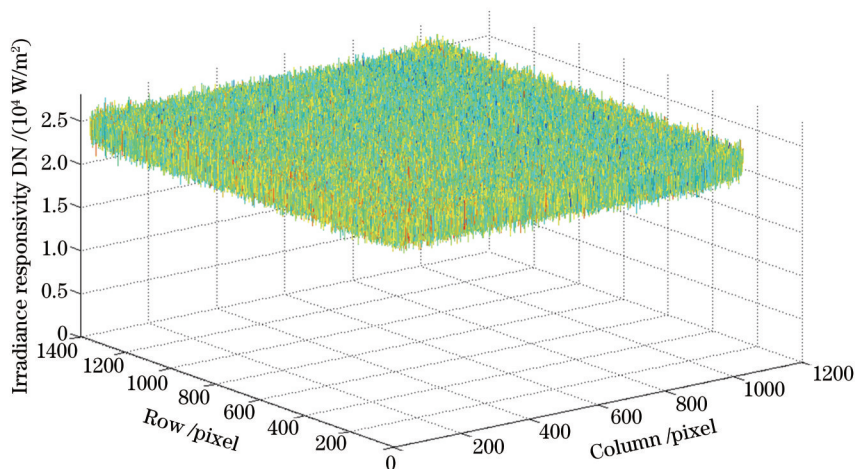


图2 面阵 CCD 辐射照度响应度

Fig.2 Irradiance responsivity of plane array CCD

处,调整积分球出光强度,在出光口辐射照度分别为 0、0.012、0.028、0.036、0.051、0.064、0.078、0.086 W/m² 时,采集 8 帧图像。应用多点定标方法计算出待测面阵 CCD 的辐射照度响应度,如图 2 所示。统计整片 CCD 的辐射照度响应度非均匀性为 1.57%。

4.2 面阵 CCD 光谱测试

在暗室中,设置溴钨灯电流为 9 A(保证各波长下 CCD 和硅陷阱探测器未饱和),单色仪扫描范围为 400~1000 nm,间隔 2 nm。按照第 3 节中描述的实验流程,记录待测面阵 CCD 和硅陷阱探测器在各单色波长下的响应输出值;关闭溴钨灯,采集面阵 CCD 和硅陷阱探测器在无光照条件下的响应输出,结果如图 3 所示。

将所得数据按照第 2 节描述的测试原理进行处理,其中硅陷阱探测器的光谱响应函数 $R_s(\lambda)$ 已知。计算后得到待测 CCD 的相对光谱响应函数 $R_r(\lambda)$ 如图 4 所示,表 1 列出了根据相对光谱响应函数计算出的待测面阵 CCD 的其他光谱特性参量。

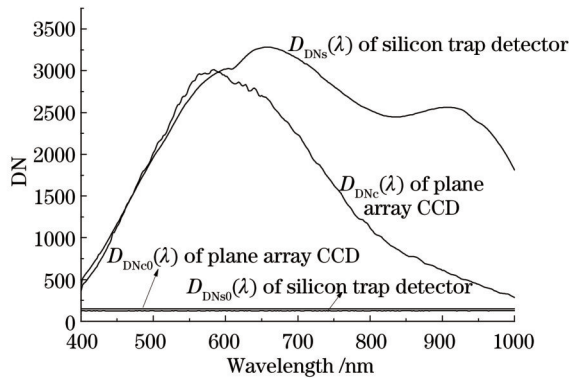


图3 CCD和硅陷阱不同条件下输出

Fig.3 Output DN of CCD and silicon trap under different conditions

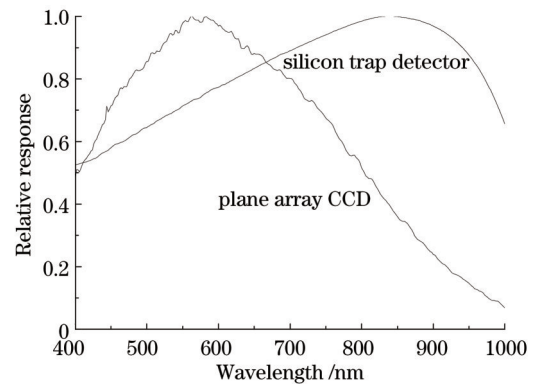


图4 面阵 CCD 光谱相对光谱响应

Fig.4 Relative spectral responsivity of plane array CCD

表 1 面阵 CCD 光谱特性参量

Table 1 Spectral parameters of plane array CCD

Spectral parametric	Result /nm
Center wavelength	680
Peak wavelength	562
Spectral bandwidth	402

5 光谱响应测试不确定度分析

虽然这里面阵 CCD 的光谱响应测试是在 400~1000 nm 波段内,但各个单色波长点响应值的计算实质上是互不相关、单独进行的。因此首先以每个波长点处响应值的求解为分析对象,然后选取所有波长处最大的不确定度作为面阵 CCD 的光谱响应不确定度。

以溴钨灯电流 9 A,单色仪出射波长 632 nm 为例,测试所得数据为: $D_{DNc}(\lambda) = 2759$, $D_{DNc0}(\lambda) = 151$, $D_{DNc}(\lambda) - D_{DNc0}(\lambda) = 2608$, $D_{DNs}(\lambda) = 3201$, $D_{DNs0}(\lambda) = 127$, $D_{DNs}(\lambda) - D_{DNs0}(\lambda) = 3074$ 。通过第 3 节中描述的测试方法只能得到面阵 CCD 器件的相对光谱响应,绝对光谱响应还需进一步的辐射标定。然而不确定度分析应该从理论绝对光谱响应计算(4)式入手,对(4)式进行变换

$$R(\lambda) = \frac{D_{N1}(\lambda)}{D_{N2}(\lambda)} R_s(\lambda), \quad (7)$$

式中 $D_{N1}(\lambda) = D_{DNc}(\lambda) - D_{DNc0}$, $D_{N2}(\lambda) = D_{DNs}(\lambda) - D_{DNs0}$ 。

经变换后,绝对光谱响应计算公式中只含有积和商,依据国际标准化组织(ISO)认可的《测量不确定度评定与表示指南》中关于相对不确定度的评定方法进行评定。面阵 CCD 光谱响应相对标准不确定度为

$$u_{rel}[R(\lambda)] = \frac{u[R(\lambda)]}{R(\lambda)} = \sqrt{u_{rel}^2[D_{N1}(\lambda)] + u_{rel}^2[D_{N2}(\lambda)] + u_{rel}^2[R_s(\lambda)]} = \sqrt{\left\{ \frac{u[D_{N1}(\lambda)]}{D_{N1}(\lambda)} \right\}^2 + \left\{ \frac{u[D_{N2}(\lambda)]}{D_{N2}(\lambda)} \right\}^2 + \left\{ \frac{u[R_s(\lambda)]}{R_s(\lambda)} \right\}^2}. \quad (8)$$

考察(8)式可知,面阵 CCD 光谱响应 $R(\lambda)$ 的不确定度来源有如下 3 项:1)硅陷阱探测器光谱响应 $R_s(\lambda)$ 的不确定度 $u(R_s)$; 2)待测面阵 CCD 数码输出 $D_{N1}(\lambda)$ 的不确定度 $u(D_{N1})$,属于合成不确定度; 3)硅陷阱探测器数码输出 $D_{N2}(\lambda)$ 的不确定度 $u(D_{N2})$,属于合成不确定度。此外,面阵 CCD 自身的响应非均匀性对测试不确定度也存在影响。图 5 用框图的形式说明对相对光谱响应产生影响的各个因素及其相互关系。

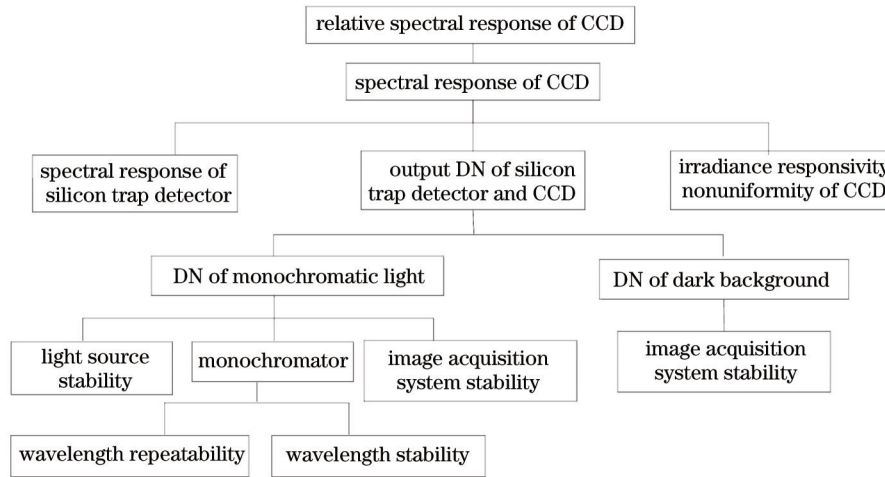


图 5 影响相对光谱响应测试的因素

Fig.5 Influence of elements on relative spectral responsivity

5.1 硅陷阱探测器光谱响应 $R_s(\lambda)$ 的相对标准不确定度 $u_{rel}(R_s)$ 评定

硅陷阱探测器在光谱 400~1000 nm 范围内,由中国计量科学院标校时传递的不确定度为 3%,632 nm 处测量的光谱响应不确定度为 0.07%($k=2$, k 表示置信因子)。故在 632.8 nm 处硅陷阱探测器光谱响应 $R_s(\lambda)$ 的相对标准不确定度为 $u_{rel}(R_s) = \sqrt{0.03^2 + (0.0007/2)^2} = 0.03$ 。

5.2 $D_{N1}(\lambda)$ 和 $D_{N2}(\lambda)$ 的相对标准不确定度 $u_{rel}(D_{N1})$ 和 $u_{rel}(D_{N2})$ 评定

因为 $D_{N1}(\lambda) = D_{DNc}(\lambda) - D_{DNc0}$, $D_{N2}(\lambda) = D_{DNs}(\lambda) - D_{DNs0}$,所以数码输出 $D_{N1}(\lambda)$ 的不确定度包括 $D_{DNc}(\lambda)$ 和 D_{DNc0} 两项不确定度, $D_{N2}(\lambda)$ 的不确定度包括 $D_{DNs}(\lambda)$ 和 D_{DNs0} 两项不确定度。

5.2.1 $D_{DNc}(\lambda)$ 和 $D_{DNs}(\lambda)$ 的标准不确定度 $u(D_{DNc})$ 和 $u(D_{DNs})$ 评定

分析整个测试装置,引起该数值不确定度的因素主要包括溴钨灯光源的稳定性,单色仪输出波长的重复性和准确度^[11],电子学系统和数据采集及显示系统的稳定性。

1) 测试装置中所用仪器的稳定性对整个测试精度的影响起到至关重要的作用。说明书上显示溴钨灯的稳定性小于 0.05 A/h,但这个误差说明在这里的测试中不方便使用;查阅单色仪产品说明书,单色仪波长重复性为 0.2 nm,这个重复性误差在最终不确定度分析中也不能直接使用;另外还有驱动电路及图像采集显示系统的稳定性^[12],二者都由于稳定性的原因影响面阵 CCD 和硅陷阱探测器的输出值。因此评价稳定性最合理的方法就是将 3 种因素结合在一起,统一用 A 类不确定度评价方法^[13]来评定。

设置溴钨灯电流 9 A,对待测面阵 CCD 和硅陷阱探测器在 632 nm 处的输出 DN 值进行独立重复测试 10 次,测试结果如表 2 所示。

表 2 CCD 和硅陷阱响应输出信号(10 次)

Table 2 Output DN of CCD and silicon trap at ten times

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
D_{DNc}	2760	2753	2750	2755	2758	2749	2761	2763	2754	2762	2756.5
D_{DNs}	3190	3194	3194	3200	3196	3212	3202	3206	3213	3208	3201.5

应用贝塞尔公式计算面阵 CCD 响应输出 DN 值的实验标准差,得

$$s(D_{DNc}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{DNci} - \overline{D_{DNc}})^2}{n-1}} = 5.02.$$

由于面阵 CCD 光谱响应计算结果是由 1 次测试得到的,因此 CCD 单色光条件下响应输出 DN 值的标准不确定度为

$$u_A(D_{\text{DNc}}) = \frac{s(D_{\text{DNci}})}{\sqrt{1}} = 5.02$$

同理,硅陷阱在 9 A、632 nm 处响应输出 $D_{\text{DNs}}(\lambda)$ 的标准不确定度为 $u_A(D_{\text{DNs}}) = 8.05$ 。

2) 单色仪输出波长准确性对面阵 CCD 和硅陷阱探测器输出 DN 值的影响

查阅单色仪说明书,其波长准确性为 0.4 nm,也就是说单色仪扫描界面上显示的输出波长和实际输出波长之间的差别不会超过 ± 0.4 nm,而且出现在区间中心的概率比出现在两端的概率要大得多,可以看作服从三角分布。

根据面阵 CCD 和硅陷阱探测器输出值和波长关系曲线可以得出 0.4 nm 的偏差带来 DN 值的偏差分别为 1.496 和 1.8。因此,波长准确性给两器件带来的标准不确定度分别为: $u_B(D_{\text{DNc}}) = \frac{1.496}{\sqrt{6}} = 0.611$,

$$u_B(D_{\text{DNs}}) = \frac{1.8}{\sqrt{6}} = 0.735。$$

3) 综合 1)、2) 的讨论,又由于两类因素对测量结果的影响相互独立,因此可以得出待测面阵 CCD 和硅陷阱探测器在 9 A、632 nm 时输出 DN 值的标准不确定度为

$$u(D_{\text{DNc}}) = \sqrt{u_A^2(D_{\text{DNc}}) + u_B^2(D_{\text{DNc}})} = 5.057, u(D_{\text{DNs}}) = \sqrt{u_A^2(D_{\text{DNs}}) + u_B^2(D_{\text{DNs}})} = 8.079。$$

5.2.2 $D_{\text{DNc0}}(\lambda)$ 和 $D_{\text{DNs0}}(\lambda)$ 的标准不确定度 $u(D_{\text{DNc0}})$ 和 $u(D_{\text{DNs0}})$ 评定

影响暗信号响应输出的因素包括各器件自身的暗电流噪声和电子学系统、数据采集及显示系统的稳定性。因此选用 A 类不确定度评价方法评定,在满足重复性条件下,同样进行 10 次独立重复试验。利用与 5.2.1 节中相同的算法,得出 $D_{\text{DNc0}}(\lambda)$ 和 $D_{\text{DNs0}}(\lambda)$ 的标准不确定度分别为

$$u(D_{\text{DNc0}}) = u_A(D_{\text{DNc0}}) = 0.2054, u(D_{\text{DNs0}}) = u_A(D_{\text{DNs0}}) = 0.9661。$$

5.2.3 $D_{\text{N1}}(\lambda)$ 和 $D_{\text{N2}}(\lambda)$ 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(D_{\text{N1}})$ 和 $u_{\text{rel}}(D_{\text{N2}})$ 评定

根据上述计算结果, $D_{\text{N1}}(\lambda)$ 和 $D_{\text{N2}}(\lambda)$ 的合成标准不确定度分别为

$$u(D_{\text{N1}}) = \sqrt{u^2(D_{\text{DNc}}) + u^2(D_{\text{DNc0}})} = 5.061, u(D_{\text{N2}}) = \sqrt{u^2(D_{\text{DNs}}) + u^2(D_{\text{DNs0}})} = 8.137。$$

本次测量中, $D_{\text{N1}}(\lambda) = D_{\text{DNc}}(\lambda) - D_{\text{DNc0}} = 2608$, $D_{\text{N2}}(\lambda) = D_{\text{DNs}}(\lambda) - D_{\text{DNs0}} = 3074$ 。故 $D_{\text{N1}}(\lambda)$ 和 $D_{\text{N2}}(\lambda)$ 的相对标准不确定度分别为

$$u_{\text{rel}}(D_{\text{N1}}) = \frac{u(D_{\text{N1}})}{D_{\text{N1}}(\lambda)} = 0.0019, u_{\text{rel}}(D_{\text{N2}}) = \frac{u(D_{\text{N2}})}{D_{\text{N2}}(\lambda)} = 0.0026。$$

5.3 绝对响应函数 $R(\lambda)$ 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(R)$ 评定

综合整个分析过程,影响光谱响应的 3 个因素各分量之间互不相关;如果用本次结果表征整个面阵 CCD 的相对光谱响应,还应考虑 CCD 的辐射响应非均匀性,因此最终评定测试结果时要补充此项不确定度。所以,面阵 CCD 波长为 632 nm 处绝对光谱响应 $R(\lambda)$ 的相对标准不确定度为

$$u_{\text{rel}}[R(\lambda)] = \frac{u[R(\lambda)]}{R(\lambda)} = \sqrt{0.03^2 + 0.0019^2 + 0.0026^2 + 0.0157^2} = 0.034。$$

5.4 相对光谱响应函数 $R_{\text{rel}}(\lambda)$ 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(R_{\text{rel}})$ 评定

根据(5)式,相对光谱响应 $R_{\text{rel}}(\lambda)$ 是绝对光谱响应 $R(\lambda)$ 的归一化过程,两者之间只是数值计算关系,没有引入新的不确定度因素(仅仅是舍入误差造成影响)。因此测量中认为两者的不确定度一致,即面阵 CCD 在 632 nm 处光谱响应相对标准不确定度为 3.4%。

5.5 其他波长处相对光谱响应不确定度计算

按照 5.1~5.4 节针对 632 nm 处相对光谱响应测试不确定度的分析方式,对 400~1000 nm 波段内各测试波长处相对光谱响应不确定度进行计算,结果如图 6 所示。由于溴钨灯在 400~500 nm 处单色光的辐射能量较弱,引起了此波段内不确定度的增大。测试波段内最大不确定度为本次测试结果的不确定度,因此面阵 CCD 光谱响应测试的不确定度为 4.3%($k=1$)。

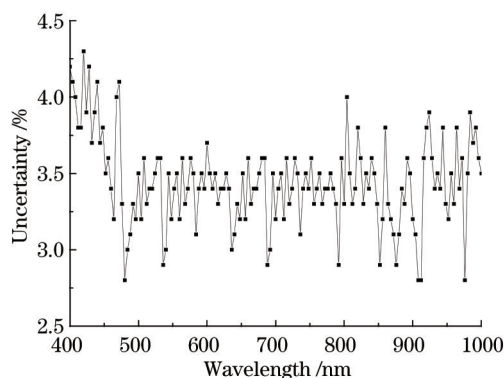


图 6 400~1000 nm 波段内不确定度分析结果

Fig.6 Result of uncertainty in wavelength between 400 nm and 1000 nm

6 结 论

通过单色仪法测量 400~1000 nm 波段内 SONY ICX285 面阵 CCD 相对光谱响应,并建立评估模型,得出测试结果不确定度为 4.3%($k=1$)。为后续多片 CCD 拼接和星敏传感器应用过程中光谱信息量化反演,提供了可靠的数据保障。

另外,如需要测试 CCD 在其他波段的光谱响应,只需将硅陷阱探测器换成响应待测波段的探测器(比如 1.1~2 μm 光谱波段,应用钢镓砷材料制成的探测器),测试结果的不确定度按照本文建立的评估模型重新分析即可。

参 考 文 献

- 1 Li Zhaohui, Wang Zhaoxun, Wu Keyong. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 213-216.
李朝辉,王肇勋,武克用.空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J].光学精密工程,2000,8(3):213-216.
- 2 Shen Honghai, Huang Meng, Li Jiaquan, *et al.*. Recent progress in aerial electro-optic payloads and their key technologies [J]. Chinese Optics, 2012, 5(1): 20-29.
沈宏海,黄猛,李嘉全,等.国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析[J].中国光学,2012,5(1):20-29.
- 3 Ye Zhao, Liu Zexun, Li Xiansheng, *et al.*. Screening device of CCD spectral conformance for wide field of view space camera [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(2): 265-270.
叶钊,刘则洵,李宪圣,等.用于宽视场空间相机的 CCD 光谱特性筛选装置[J].光电子·激光,2013,24(2):265-270.
- 4 Li Yudong, Wang Bo, Guo Qi, *et al.*. Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2778-2784.
李豫东,汪波,郭旗,等.CCD 与 CMOS 图像传感器辐射效应测试系统[J].光学精密工程,2013,21(11):2778-2784.
- 5 Jin Hui, Jiang Huilin, Zheng Yuquan, *et al.*. Spectral calibration of the hyperspectral optical remote sensor [J]. Chinese J Luminescence, 2013, 34(2): 235-239.
金辉,姜会林,郑玉权,等.高光谱遥感器的光谱定标[J].发光学报,2013,34(2):235-239.
- 6 Liu Yanyan, Li Guoning, Yang Xiaohui, *et al.*. High-precision detection of wide-band spectral responsivity of TDI CCD [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(2): 298-300.
刘妍妍,李国宁,杨晓慧,等.TDI CCD 宽波段光谱响应度的高精度检测[J].半导体光电,2013,34(2):298-300.
- 7 Alejandro Ferrero, Joaquin Campos, Alicia Pons. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD [J]. Metrologia, 2006, 43(2): 17-21.
- 8 Yan Feng, Zhou Yue, Zhang Mingchao, *et al.*. Test equipment for relative spectral response of CCD [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2865-2868.
闫丰,周跃,章明朝,等.CCD 器件相对光谱响应测试仪[J].光谱学与光谱分析,2013,33(10):2865-2868.
- 9 Liu Hongxing, Ren Jianwei, Wan Zhi, *et al.*. Measurement of relative spectral responsivity of photodetector by LED-based spectrum-tunable source [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(1): 250-254.
刘洪兴,任建伟,万志,等.基于 LED 光谱可调谐光源的光电探测器相对光谱响应测量研究[J].光谱学与光谱分析,2013,

33(1): 250-254.

- 10 Zou Peng, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *et al.*. Research on calibration of radiance detector based on trap detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0712002.
邹鹏, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于陷阱探测器的辐亮度探测器定标方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0712002.
- 11 Ma Liang, Wei Jun, Huang Xiaoxian, *et al.*. Laboratory spectral calibration method of grating dispersive imaging spectrometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 023001.
马亮, 危峻, 黄小仙, 等. 光栅色散型成像光谱仪的实验室光谱定标方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 023001.
- 12 Liu Dongmei, Xia Rihui, Pan Yonggang, *et al.*. Study of digital spectrometer based on change coupled device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0107003.
刘冬梅, 夏日辉, 潘永刚, 等. 基于电荷耦合器件的数字光谱分析仪的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0107003.
- 13 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Hongzhuang, *et al.*. Study on calibration environment of spectral responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0312001.
张振铎, 王淑荣, 李宏壮, 等. 空间紫外遥感仪器光谱响应度定标环境的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0312001.