

用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置

孙德贝^{1,2} 李志刚^{1*} 李福田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: 依据光叠加原理研制了一台太阳光谱仪光电探测系统线性度测试装置。该测试装置由300 W高稳定度氙灯光源、250 W卤钨灯光源、双层中性滤光片轮、双孔光阑及光学成像系统组成。依靠中性滤光片改变光束强度,依靠独立开闭的双光阑和光学成像系统实现光流叠加。该装置工作波段为200~2400 nm,可模拟紫外-可见-红外波段地外太阳光谱辐照度,动态范围为 10^4 ,已用于太阳光谱仪等光谱仪和硅光电二极管标准探测器等光电探测系统线性测量。

关键词: 线性度; 探测系统; 光谱仪; 辐射度

中图分类号: O432.2 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20191202.0294

Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers

SUN De-bei^{1,2}, LI Zhi-gang^{1*}, LI Fu-tian¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: lizhg@ciomp.ac.cn*

Abstract: According to the optical beam superposition principle, a set of linearity measurement devices of spectrometer photoelectrical detecting system was developed. It consists of a 300 W super-quiet xenon lamp, a 250 W halogen tungsten lamp, a neutral filter group, double apertures and optical imaging system. The radiant power of the optical beams is manipulated with neutral filters and optical beam superposition is achieved using double apertures and optical imaging system. The spectral range of this device is 200–2400 nm and the dynamic range of the linearity measurement is 10^4 . It can simulate the extraterrestrial solar spectral irradiance and can be used for measuring linearity in solar spectrometer photoelectrical systems and silicon photodiode standard detection.

Key words: linearity; detecting system; spectrometer; radiometry

收稿日期: 2018-01-06; 修订日期: 2018-02-26

1 引言

光电探测器广泛用于精密光辐射测量装置中,如分光光度计、傅立叶变换光谱仪、气体分析仪、地基/空基光谱辐射计和天基太阳/大气定量光谱遥感仪器等^[1-7]。由于入射到探测器的光功率变化很大,探测器系统的非线性必须仔细研究,并予以修正。这也是目前高精度大气/太阳定量光谱遥感研究所关注的问题。

本文在讨论光电探测系统线性度高精度测量方法基础上,研制了光谱仪线性度测试装置,文中围绕装置结构设计、工作原理及硅光电二极管探测器和可见波段太阳光谱仪光电探测系统线性度测试结果及测量不确定度分析展开。

2 光电探测系统线性度测量方法

有关光电探测系统线性度及其测量仪器的发展已有较长的历史。除基于传统的距离平方反比定律^[7]等方法外,目前国际上光电探测系统线性度测量一般采用基于非相干光束叠加原理的光束叠加法,实现光束叠加的方法分为双光阑光束叠加法(NRC)、滤光片光束叠加法(NIST)和滤光片-双光阑光束叠加法(NPL)3种。

加拿大国家研究委员会(National Research

Council, NRC)的Sanders设计的线性仪^[8-10],如图1所示,钨带灯光源经消色差透镜成像于探测器。9对光阑的精密光阑片位于成像透镜前方,9对光阑面积递增,相应落到探测器接收面上光流的动态范围达512:1。通过大转盘分别开闭或同时开闭的双孔光阑进行光电探测器线性测量。光电探测器或光电探测系统的线性是用来描述其产生一个正比于输入光信号的电信号的能力。事实上,由于光电探测器本征特性或附属的放大器系统特性,光电探测器或光电探测系统(以下统称光电探测系统)一般都存在光电响应度的非线性偏差。人们常用被称为非线性因子的参量 $L(V_{A+B})$ 来描述光电探测系统的非线性。 $L(V_{A+B})$ 指光电探测系统线性偏差或非线性的,并用其表示光电探测系统输出信号为 $(V_A + V_B)/2$ 时的线性。 $L(V_{A+B})$ 可由公式(1)计算得出:

$$L(V_{A+B}) = \frac{V_{A+B}}{(V_A + V_B)}, \quad (1)$$

其中, V_A 和 V_B 表示两个光信号A和B分别照明光电探测系统时光电探测系统的暗电流修正的输出信号,而 V_{A+B} 表示两个光信号A和B同时照明相同光电探测系统时光电探测系统的暗电流修正的输出信号。如果系统线性,则 $V_A + V_B$ 等于 V_{A+B} ,一般取 V_A 近似等于 V_B ,非线性因子 $L(V_{A+B})$ 实质上描写了 V_{A+B} 电压下2:1动态范围内的光电探测系统的非线性行为。

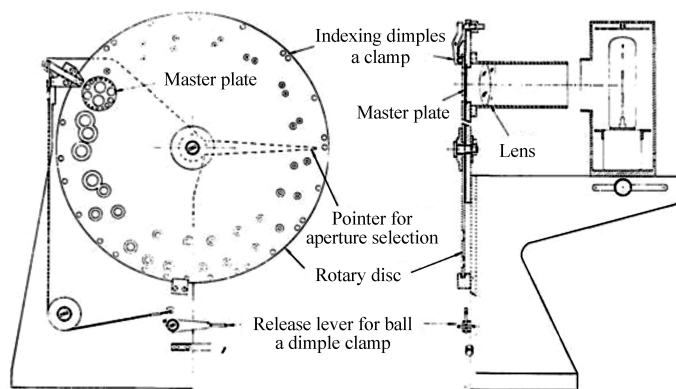


图1 NRC线性仪

Fig.1 NRC linearity testing device

美国国家标准局(National Bureau of Standards, NBS)现美国国家标准技术研究院(National

Institute of standards and technology, NIST) 的 Mielenz 和 Eckerle^[11] 报告了利用双光阑法测量标准分光光度计线性度的测量装置和测量结果。

NIST 的 Saunders^[12] 和 Thompson^[13] 报告了光束组合器 Beamcon 的工作原理、结构及其光电探测器线性度测量结果。Beamcon 用于表征辐射探测器,特别是接近噪声等效功率的低照度下的辐射探测器的线性度,其在消杂光方面采取了多项措施。Beamcon III 的结构如图 2 所示。室 1 中光源产生准直光束;室 2 中准直光束分为两束,又重新合成;室 3 中引入空间滤波器,用于消除杂散光;室 4 中光束聚焦到探测器。Beamcon III 基于光束叠加原理,通过不同的滤光片组合可产生不同的光通量。

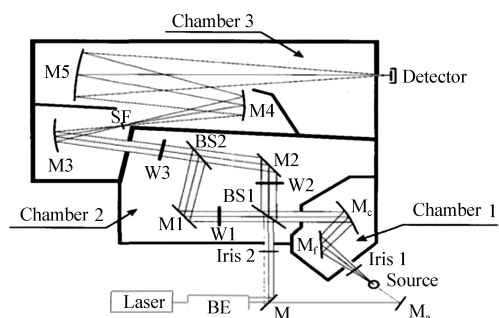


图 2 NIST 光束组合器 Beamcon III 结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of NIST Beamcon III

探测器处的光通量 Φ 是来自两条路径的光通量 Φ_1 与 Φ_2 之和:

$$\Phi(i, j, k) = \Phi_1(i, k) + \Phi_2(j, k), \quad (2)$$

式中的变量表示滤光片组合 $i(i=0, 1, \dots, A)$ 代表轮 W1 上的滤光片。 $j(j=0, 1, \dots, A)$ 代表轮 W2 上的滤光片。 $k(k=0, 1, \dots, 5)$ 代表轮 W3 上的滤光片。0 代表关闭位置。对单条路径而言,有 30 种可能的滤光片组合,其中 10 种组合没有光通过。因此每条路径有 20 种组合探测器能产生响应信号。

设探测器具有 n 次多项式表达的响应函数:

$$\Phi(i, j, k) = r_0 + r_1 S(i, j, k) + r_2 S^2(i, j, k) + \dots + r_n S^n(i, j, k), \quad (3)$$

式中 $S(i, j, k)$ 为探测器测得的响应函数,经过暗

信号修正,且采用滤光片组合表示; $r_0, r_1, r_2, \dots, r_n$ 为探测器响应函数的系数。因为探测器接近线性,也因为信号与光通量取为同一单位,故 r_1 等于 1。由式(2)和式(3)有:

$$\Phi_1(i, k) + \Phi_2(j, k) = r_0 + r_1 S(i, j, k) + r_2 S^2(i, j, k) + \dots + r_n S^n(i, j, k). \quad (4)$$

每一轮测试中,有 120 个响应信号,相应地将生成 120 个如式(4)所示的表达式。其中有 $40 + n$ 个未知变量,来源于每条路径上 20 种滤光片组合以及 n 个响应函数系数。关闭的滤光片组合的光通量规定为 0。通过这 120 个等式,利用线性最小二乘法求出 $40 + n$ 个未知量,即可求得多项式响应函数的系数 r_x ,即探测器的线性度。同时可求得光通量值 $\Phi_1(i, k)$ 和 $\Phi_2(j, k)$,可用于监测滤光片的稳定性。图 3 为硅二极管放大器探测器系统相对响应度随信号的变化,图 3 表明在所有档位光电二极管探测系统线性度优于 0.054%,电流小于 10^{-11} A 时线性度优于 0.209%。说明 Beamcon III 在接近噪声水平下探测线性度的能力^[13]。

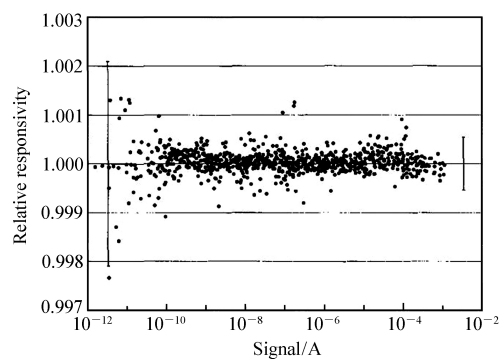


图 3 硅二极管放大器探测器系统相对响应度与信号的函数关系

Fig. 3 Relative responsivity as a function of signal for a silicon diode-amplifier detector system

英国国家物理实验室的 Theocharous^[14-16] 报导了用于表征热释电探测器非线性的测试装置,如图 4 所示。该装置利用双光阑的交替开闭实现光流叠加,用两组中性滤光片改变待测探测器上的照度,从而获得热释电探测器非线性校正因子。此外,还研究了多种 LiTaO_3 热释电探测器的“超线性”特征。

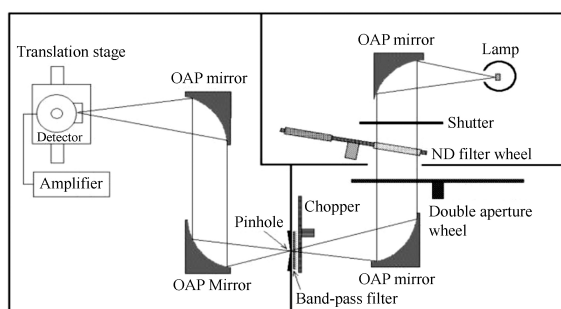


图4 NPL 滤光片-双光阑线性仪

Fig. 4 NPL filter-double aperture linearity testing device

3 实验装置

为满足地外太阳光谱仪光电探测系统的线性度测试需要,本课题组研制了一台光谱仪光电探测系统线性度测试装置,如图5所示。该仪器由光源、中性滤光片轮、双孔光阑和光学成像系统组成。来自光源的光线经平面镜和焦长为200 mm凹面镜准直,利用中性滤光片轮改变其光流强度,之后,由可单独开闭的双孔光阑分为A和B两束,实现光束A或B单通,或A+B双通。然后经另一平面镜和焦长为200 mm凹面镜将光源成像于单色仪入射狭缝或太阳光谱仪前置漫透射板上。采用100 W钨带灯、250 W卤钨灯或300 W氙灯作光源,以模拟地外太阳光谱辐照度,工作波

段为200~2400 nm。金属膜中性减光滤光片轮分为两层,其光密度和透过率如表1所示,光流变化动态范围 10^4 。

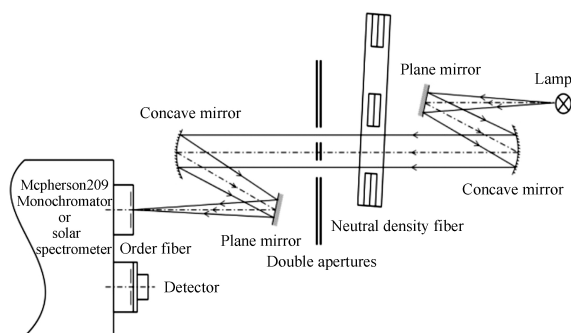


图5 光谱仪光电探测系统线性测试装置

Fig. 5 Linearity measurement devices of spectrometer photoelectric detecting system

表1 滤光片光密度和透过率

Tab.1 Optical density and the transmittance of the neutral filters

Filter wheel Filter labels	No. 1		No. 2	
	Optical density	Transmittance/%	Optical density	Transmittance/%
1	0	100	0	100
2	1	10	0.1	79.43
3	2	1	0.3	50.12
4	3	0.1	0.5	31.62
5	4	0.01	/	/

4 本文光电探测系统线性测量实验

4.1 硅光电二极管探测器线性测量

为验证所设计光谱仪光电探测系统线性度测

试装置的性能,测量了滨松S2281硅光电二极管线性及其相关辐射特性。该光电二极管常用作紫外-可见-近红外传递标准探测器。滨松S2281硅光电二极管的光谱响应范围为190~1100 nm,灵敏面直径为 $\phi 11.3$ mm,采用石英窗口。

4.1.1 光谱响应度稳定性和区域响应度均匀性实验

探测器光谱辐射通量响应度定标装置如图 6 所示。作为标准探测器的是美国国家标准技术研究院 NIST 发布的紫外-可见-近红外硅光电二极管探测器,待定标的探测器是日本滨松公司 S2281 硅光电二极管探测器(编号 31100)。该装置采用 300 W 超静氙灯为光源,直流稳流电源供电。氙灯经平面镜和曲率半径为 400 mm 的凹面镜成像于焦长 1.33 m McPherson 209 单色仪的入射狭缝。单色仪出射狭缝出射的单色光经曲率半径为 400 mm 的凹面镜和平面镜会聚于探测器表面。光点尺寸可调,探测器通量响应度定标时,光点直径约为 3 mm。标准探测器与待测探测器同时安装在一个电控三维平移台上,通过移入移出,进行比对测量。McPherson 209 单色仪的光学结构为双通 Czerny-Turner 型,有中间狭缝。这种结构有利于提高分辨率、减少光谱杂光。平面光栅刻线密度为 1 200 g/mm,工作波段为 200 ~ 1 100 nm,光谱分辨率为 0.01 nm。在 400 ~ 1 100 nm 波段工作时加入滤光片,以消除 400 nm 或 800 nm 以下的二级光谱的影响。单色仪波长重复性和准确度分别为 ± 0.005 nm 和 ± 0.05 nm。计算

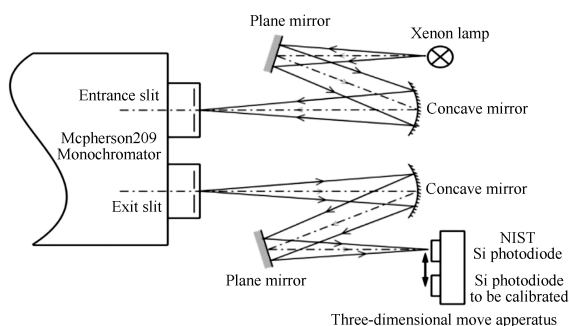


图 6 探测器光谱辐射通量响应度定标装置

Fig. 6 Calibrating instrument of spectral radiant power responsivity for detector

机通过 232 接口控制步进电机驱动器,驱动单色仪正弦机构进行波长扫描。在 McPherson 209 单色仪驱动程序控制下通过 IEEE-488 接口控制 Keithley 6485 数字静电计进行探测器输出数据采集,并通过 232 接口控制波长驱动器进行波长扫描。光谱扫描范围为 200 ~ 1 100 nm,采样间隔为 10 nm。在单色仪波长扫描过程中,也采集挡光时

探测器背景输出信号,最后将波长与探测器输出信号数据进行存储与显示。

图 7 给出待测 S2281-31097(31097 为编号)硅光电二极管探测器光谱辐射通量响应度定标结果,测量结果重复性在 0.3% 以内。5F001 Responsivity 是本实验用作标准探测器的由 NIST 发布的标准硅光电二极管探测器的光谱辐射通量响应度;31097 Responsivity1 和 31097 Responsivity2 是定标得到的滨松 S2281-31097 硅光电二极管探测器的光谱辐射通量响应度,1 和 2 分别表示结果重复性和稳定性。

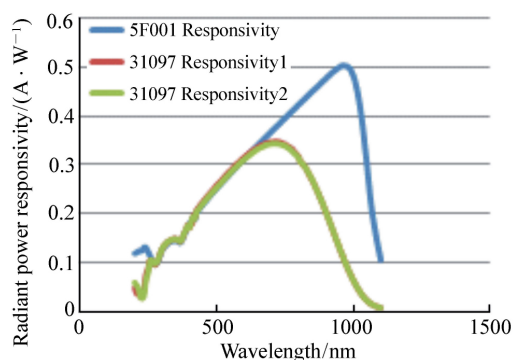


图 7 S2281-31097 硅光电二极管光谱响应度及其稳定性

Fig. 7 Spectral radiant power responsivity and stability of S2281-31097 Si photodiode

为降低待测探测器区域响应度对线性度测量的影响,要求 S2281 探测器要有良好的区域响应度均匀性。为此,在辐射通量模式下,以细窄光束扫描探测器表面,并测量探测器区域响应均匀性。图 6 所示装置中,经 McPherson 209 单色仪出射狭缝出射的单色光经曲率半径为 400 mm 的凹面镜和平面镜会聚于 S2281-31100 硅光电二极管探测器的灵敏面,同时驱动位于电控三维位移台上的探测器,测量其区域响应度均匀性。光点直径为 1 mm, $F/15$, 波长为 500 nm,扫描步长为 0.5 mm/步。图 8(彩图见期刊电子版)给出探测器区域响应度均匀性等高线图,图 8 表明该探测器区域响应度非均匀性小于 0.5%。

4.1.2 S2281-31100 硅光电二极管线性度测量

采用如图 5 所示光谱仪光电探测系统线性度测试装置测量硅光电二极管探测器线性。旋转中

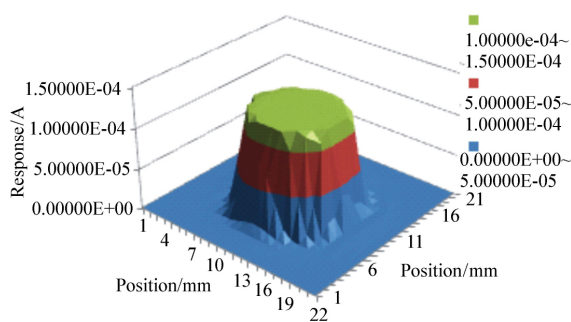


图8 S2281-31100 硅光电二极管区域响应度均匀性

Fig. 8 Spatial uniformity of S2281-31100 Si photodiode response

性滤光片轮改变待测探测器照度,借助双光阑求得不同光照下非线性修正因子,进而求得 S2281-31100 探测器非线性度曲线,如图 9 所示。结果表明 S2281-31100 动态范围为 10^4 ,线性度优于 $\pm 0.1\%$ 。

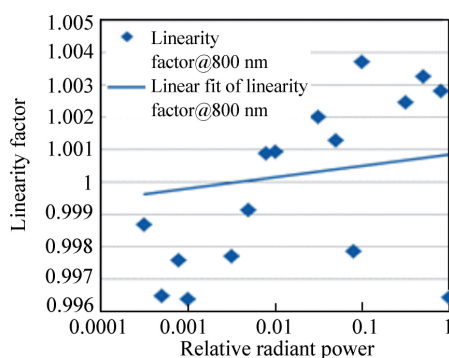


图9 S2281-31100 硅光电二极管探测器线性度

Fig. 9 Linearity factor of S2281-31100 Si photodiode

4.2 可见波段太阳光谱仪光电探测系统线性度测量

用于太阳光谱辐照度测量的可见波段太阳光谱仪由前置漫透射板、800 周/秒音叉调制器、凹面反射光栅双单色仪、后置滤光片轮、R7378A 光电倍增管、前置放大器、800 周/秒锁相放大器、波长驱动器及计算机数控系统组成。

4.2.1 可见波段太阳光谱仪光谱辐照度响应度稳定性及区域光谱辐照度响应度均匀性

以 NIST 发布的 1 000 W 光谱辐照度标准石英卤钨灯 F661 及自行传递的 F1391 石英卤钨灯辐照可见波段太阳光谱仪前置漫透射板,为可见波

段太阳光谱仪定标,获得可见波段太阳光谱仪光谱辐照度响应度及其稳定性,如图 10 所示,其稳定性为 0.1% 。卤钨灯工作电流 $(8 \pm 0.002) \text{ A}$,由高精度直流稳流电源供电,距离可见波段太阳光谱仪漫反射板 $(500 \pm 0.1) \text{ mm}$ 。

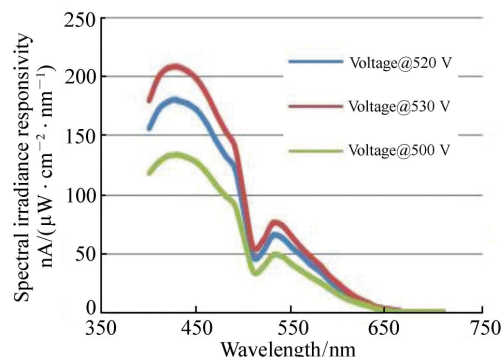


图10 可见波段太阳光谱仪光谱辐照度响应度及其稳定性

Fig. 10 Spectral irradiance responsivity and its stability of VIS solar spectrometer

由可见波段太阳光谱仪的光谱辐照度响应度及地外太阳辐照度,可求得太阳光谱仪在地外太阳辐照下 $400 \sim 750 \text{ nm}$ 预估的光谱输出,如图 11 所示。

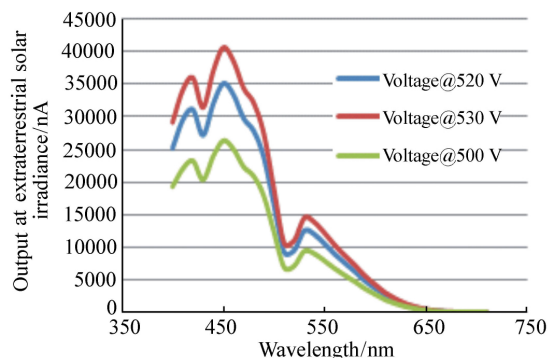


图11 可见波段太阳光谱仪地外太阳辐照下光谱输出

Fig. 11 Output at extraterrestrial solar irradiance of VIS solar spectrometer

上述可见波段太阳光谱仪光谱辐照度响应度定标实验中,在漫透射板前方 5 mm 处放置一片直径为 0.5 mm 光阑,太阳光谱仪波长设置为 500 nm ,进行 $X-Y$ 扫描,取读数,获得可见波段太阳光谱仪区域光谱辐照度响应度均匀性分布图,

如图 12(彩图见期刊电子版)所示。

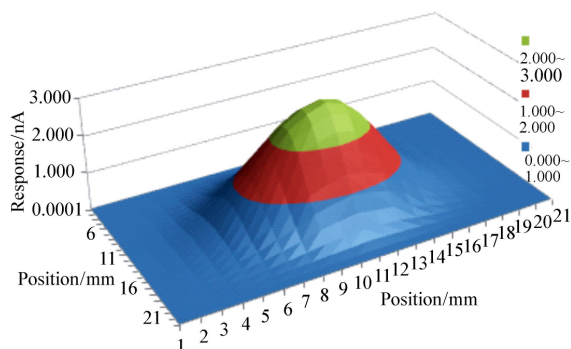


图 12 可见波段太阳光谱仪区域光谱辐照度响应均匀性

Fig. 12 Spatial uniformity of VIS solar spectrometer response

4.2.2 可见波段太阳光谱仪光电探测系统线性度测量

将光谱仪光电探测系统线性度测试装置放于可见波段太阳光谱仪漫透射板前方,旋转中性滤光片轮改变漫透射板上的照度,借助双光阑求得不同光照下非线性修正因子,求得可见波段太阳光谱仪光电探测系统非线性度曲线,如图 13 所示。图 13 显示可见波段太阳光谱仪 500 nm 处光电探测系统地外太阳辐照水平下表现出:一档非线性为 2.8%,二档非线性为 0.6%,三档线性。分析表明:除 1 档强光下 R7378A 光电倍增管具有 0.5% 非线性外,其余归因于电子学放大器。

根据公式 (1) 解出的非线性度综合不确定度如表 2 所示,为 0.14%。

参考文献:

- [1] 李志刚. 基于探测器标准的高精度光谱辐射标准光源[J]. 中国光学 2015 8(6):909-918.
LI ZH G. High accuracy spectroradiometric standard light source based on detector standard[J]. *Chinese Optics* 2015 8(6):909-918. (in Chinese)
- [2] LI ZH G, WANG X X, ZHENG Y Q *et al.*. Absolute detector-based spectrally tunable radiant source using digital micromirror device and supercontinuum fiber laser[J]. *Applied Optics* 2017 56(17):5073-5079.
- [3] 李福田, 李志刚, 王晓旭, 等. 自校准型光谱辐亮度标准光源[J]. 光学精密工程 2017 25(8):2004-2010.
LI F T, LI ZH G, WANG X X *et al.*. Self-calibrated spectral radiance standard source[J]. *Opt. Precision Eng.* 2017 25(8):2004-2010. (in Chinese)
- [4] 王淑荣, 李福田, 宋克非, 等. FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪[J]. 光学学报 2009 29(9):2590-2593.
WANG SH R, LI F T, SONG K F *et al.*. Ultraviolet ozone vertical profile probe for FY-3A meteorological satellite[J]. *Acta Optica Sinica* 2009 29(9):2590-2593. (in Chinese)
- [5] O'DELL C W, DAY J O, POLLOCK R *et al.*. Preflight radiometric calibration of the orbiting carbon observatory[J].

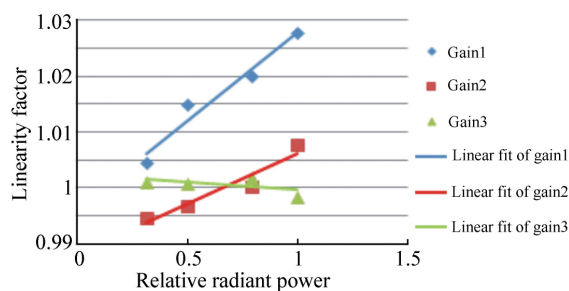


图 13 可见波段太阳光谱仪光电探测系统超线性响应

Fig. 13 Superlinear response of VIS solar spectrometer

表 2 线性测量综合不确定度

Tab. 2 Uncertainty of linearity testing

Uncertainty sources	Uncertainty / %
V_A reading stability and reproducibility	0.1
V_B reading stability and reproducibility	0.1
$V_{(A+B)}$ reading stability and reproducibility	0.1
Combined uncertainty	0.14

5 结论

以高稳定度光源、光密度中性滤光片、双光阑和成像光学系统构成的光谱仪光电探测系统线性度测试装置,在地外太阳光谱辐照度下,测量了可见波段太阳光谱仪的线性度。结果显示,增益为 1 档时非线性度为 2.8%,增益为 2 档时非线性度为 0.6%,需进行非线性修正。非线性度测量不确定度优于 0.14%,测量不确定度满足测量技术指标要求。

- IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2010 49(6): 2438-2447.
- [6] LI ZH G ,LIN CH ,LI CH L *et al.* . Prelaunch spectral calibration of a carbon dioxide spectrometer[J]. *Measurement Science and Technology* 2017 28(6): 065801.
- [7] THUILLIER G ,FOUJOLS T ,BOLSÉE D *et al.* . SOLAR/SOLSPEC: scientific objectives , instrument performance and its absolute calibration using a blackbody as primary standard source[J]. *Solar Physics* 2009 257(1): 185-213.
- [8] SANDERS C L. Aphocell linearity tester[J]. *Applied Optics* ,1962 1(3): 207-211.
- [9] SANDERS C L. Accurate measurements of and corrections for nonlinearities in radiometers[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry* 1972 76(5): 437-453.
- [10] BUDDE W. Multidecade linearity measurements on Si photodiodes[J]. *Applied Optics* ,1979 18(10): 1555-1558.
- [11] MIELENZ K D ,ECKERLE K L. Spectrophotometer linearity testing using the double-aperture method[J]. *Applied Optics* ,1972 11(10): 2294-2303.
- [12] SAUNDERS R D ,SHUMAKER J B. Automated radiometric linearity tester[J]. *Applied Optics* ,1984 23(20): 3504-3506.
- [13] THOMPSON A ,CHEN H M. Beamcon III , a linearity measurement instrument for optical detectors[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* ,1994 99(6): 751-755.
- [14] THEOCHAROUS E. Absolute linearity measurements on LiTaO₃ pyroelectric detectors [J]. *Applied Optics* ,2008 47(18): 3397-3405.
- [15] THEOCHAROUS E. Absolute linearity measurements on a gold-black coated deuterated L-alanine-doped triglycine sulfate pyroelectric detector[J]. *Applied Optics* 2008 47(21): 3731-3736.
- [16] THEOCHAROUS E. Reply to comments on “Absolute linearity measurements on a PbS detector in the infrared” [J]. *Applied Optics* 2007 46(25): 6495-6497.

作者简介:



孙德贝(1992—),男,湖北潜江人,硕士,2014年于中国科学技术大学光信息科学与技术专业获得理学学士学位,2018年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光谱辐射定标方面的研究。E-mail: sundebei14@mails.ucas.edu.cn



李志刚(1972—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,主要从事空间光学遥感技术及辐射定标方面的研究。E-mail: lizhg@ciomp.ac.cn



李福田(1941—),男,天津人,研究员,1964年毕业于南开大学,1980年~1982年于英国国家物理实验室(NPL)做访问学者,主要从事空间光学遥感技术、紫外-真空紫外短波段光学及辐射度学方面的研究。E-mail: li_futian@aliyun.com