

星载紫外遥感仪器测量系统噪声研究

宋克非¹, 汪龙祺^{1,2}, 王淑荣¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对星载紫外遥感仪器的高测量灵敏度和大动态范围的要求, 采用了数字同步累加解调法提取所测的光谱信号, 实时扣除噪声和零点漂移的影响。为保证仪器弱信号下 $\pm 1\%$ 的光度测量精度, 电控测量系统噪声应低于 8×10^{-12} A。分析了噪声的来源及其对测量信号的影响, 并对所设计的系统进行了噪声及噪声等效光谱辐亮度测试, 将该方法的测量结果与采用常规方法测量所得的结果进行了比较。结果表明: 该方法扣除背景噪声近 80%, 且对小信号测量的效果较佳, 信噪比达到了国际同类仪器的水平。

关键词: 紫外遥感仪器; 噪声; 数字累加解调; 等效光谱辐亮度

中图分类号: TP368 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)增(探测与制导)-0544-05

Measurement methods and noise analysis for satellite borne UV remote sensing instrument

SONG Ke-fei¹, WANG Long-qi^{1,2}, WANG Shu-rong¹

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

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: To meet the requirements of high measurement sensitivity and high dynamic range of a satellite borne UV remote sensing instrument, a method of numeric accumulation and synchronous demodulation was introduced to treat with the measured spectral signals and to deduct the influence of the noise and the zero-drift real time. In order to keep $\pm 1\%$ radiation measurement precision for weak signals, the noise of electronic system should be lower than 8×10^{-12} A. The noise sources and its effect on the measurement were analyzed. The noise and the noise equivalent spectral radiance for the designed electronic system were measured. The measurement results were compared with the results obtained by the general method. The results show that background noise has been decreased approximately 80% and this method is especially effective for the weak signal processing. The SNR has reached the level of the same kind of instrument abroad.

Key words: UV remote sensing instrument; Noise; Numeric accumulation synchronous and demodulation; Equivalent spectral radiance

0 引言

近二、三十年随空间技术的发展, 国外利用大气

后向散射紫外光谱进行空间臭氧探测研究十分活跃。20 世纪 70 年代国外研制成太阳后向散射紫外光谱辐射计(SBUV), 搭载风云七号卫星进行太阳/大气紫外

收稿日期: 2007-08-16

作者简介: 宋克非(1967-), 女, 吉林人, 研究员, 硕士, 从事微弱信号检测及航天遥感测量仪器的研究工作。Email:songkf@sklao.ac.cn

光谱观测, 取得臭氧总量及垂直分布信息^[1], 发现了南极臭氧洞。90 年代中后期欧空局(ESA)也发展了与 TOMS/SBUV 相类似的载于欧洲遥感卫星(ERS-2)的全球臭氧监测试验仪器, 大气制图扫描成像吸收分光计(SCIAMACHY), 并进行了相关的探测和研究。为跟踪国际先进技术的发展, 我所于 20 世纪 90 年代初开始了太阳/大气紫外光谱探测研究, 1997 年采用所研制的太阳紫外光谱辐照监视器进行高空气球试验, 取得了 32 km 处太阳/大气紫外光谱。2002 年所研制的太阳紫外光谱监视器搭载神舟三号飞船, 取得飞行试验成功, 为太阳物理、大气物理、环境科学研究提供了重要数据。

风云三号气象卫星上紫外遥感仪器是通过测量地外太阳光谱辐照度及大气的太阳后向散射光谱辐亮度, 经反演得出臭氧总量的垂直分布, 为气候预测和全球变化研究提供重要参数。太阳紫外辐射测量信号变化很大, 其最小量化信号与满量程最大信号之间往往要跨越 10^5 量级, 这就要求测量系统应具有较大动态范围, 而系统噪声和零点漂移限制系统动态范围的下限, 且大量的空间辐射测量常常需要几年的时间。因此, 要保证 $\pm 1\%$ 的光度测量精度并能长期稳定工作就要求仪器电子学系统具有足够低的噪声即足够高的灵敏度 (8×10^{-12} A), 为此, 对电子学测量系统的噪声进行了分析, 采用了数字累加调制解调法提取所测的光谱信号, 实时扣除噪声和零点漂移的影响, 取得了满意的结果。

1 电控系统的测量原理

为实时扣除背景辐射、噪声和零点漂移的影响, 采用了数字同步累加解调法^[5-6]提取所测的光谱信号。利用斩波器将被测光斩切产生交替的“信号 S +背景 B ”和“背景 B ”并对其进行数字化, 其斩切波形如图 1 所示。

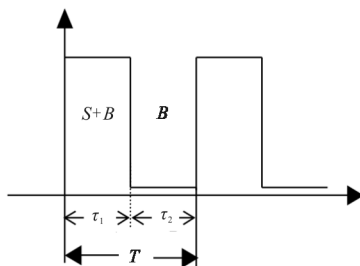


图 1 斩波波形图

Fig.1 Chopping waveform

在一定的时间周期内用 n 位可逆计数器对已经过数字化的光信号进行累加计数, 当被测光通过时进行加计数, 当被测光阻断时进行减计数, 对一个周期 T 内的总计数进行采样, 便实现了斩波信号的调解。由于加减计数是在与斩切光信号同相位的参考信号控制下进行的, 因此, 此方法为数字同步累加解调法。

由于信号和背景噪声遵守泊松分布, 则信号测量的标准偏差为:

$$\Delta S = \sqrt{\frac{S+B}{\tau_1} + \frac{B}{\tau_2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\frac{S}{\eta} + \frac{B}{\eta(1-\eta)} \right]} \quad (1)$$

式中: $T = \tau_1 + \tau_2$, 为斩波周期, 且 $\tau_1 = \tau_2$, $\eta = \frac{\tau_1}{T}$ 为斩波占空比。则:

$$\frac{\Delta S}{S} = \sqrt{\frac{1}{ST} \left[\frac{1}{\eta} + \frac{B}{S \eta(1-\eta)} \right]} \quad (2)$$

显而易见, 当占空比 $\eta = 0.5$ 时, 信号测量误差 $\frac{\Delta S}{S}$ 最小, 代入公式 (2) 有:

$$\frac{\Delta S}{S} = 1.4 \sqrt{\frac{1}{ST} \left[1 + \frac{2B}{S} \right]} \quad (3)$$

故可以计算当背景 B 等于信号 S 的 20 倍, 即 $B=20S$ 时:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{8.8}{\sqrt{ST}} \quad (4)$$

它仅比背景与辐射信号相等, 即 $B=S$ 时的:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2.4}{\sqrt{ST}} \quad (5)$$

增加 3.7 倍。由此可见, 经斩切解调后, 虽然背景增大了许多, 但总的信号测量误差却增加得很少。通过上述分析说明利用数字同步累加解调法可实时扣除系统噪声、零点漂移和背景辐射对倍增管暗电流调制等的影响, 保证了测量精度。

2 电控系统的噪声分析

要保证仪器弱信号下 $\pm 1\%$ 的光度测量精度, 就要求电控测量系统噪声低于 8×10^{-12} A。众所周知, 测量系统的噪声主要来源于探测器噪声及电子学系统本身, 电子学系统噪声包括放大器噪声、低压供电电源 DC-DC 变换器及高压电源纹波馈入引起的噪声、数字电路开关引起的电流突变通过地线串入的噪

声等,其主要作用的是放大器噪声。为此对探测器及前置放大器噪声进行分析并采取有效措施进行抑制。

因为系统的带宽直决定系统的噪声,因此在分析探测器及前置放大器噪声之前,首先对带宽加以讨论。为了减少噪声应尽量减少带宽,但减少带宽会使如图 1 所示的信号波形 $f(x)$ 产生畸变,丢失有用信息,影响数字同步累加解调的效果。为此应当选择系统带宽 Δf 。信号波形的 $f(x)$ 傅里叶展开式为:

$$f(x) = \frac{E_m}{2} + \frac{2E_m}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots) \quad (6)$$

当信号频率 $f=50$ Hz, 带宽 Δf 取 1.6 kHz 时相当于信号的 31 次谐波被充分放大了,能量信息损失不到 3%,其影响可忽略不计。

2.1 探测器噪声

作为空间光谱仪器应用的探测器选择原则首先要考虑它的光特性。根据斯托列多夫定律,在光束的光谱成分不变时,光电流与入射光束强度应成线性关系,但由于许多探测器存在着二次光电效应,使线性关系受到破坏,不同种类的探测器其光特性各异,在选择上必须予以重视。其次要考虑到探测器的光谱特性。一般规定一个探测器的波长限是指输出光电流具有 $S/N \geq 2$ 的波长点,而当测量精度要求优于 $\pm 1\%$ 时, S/N 必须大于 100,因此在选择探测器的灵敏光谱区时,应使得它大于仪器的工作波段,以保证在仪器的工作波段内的信噪比。光电倍增管是满足上述要求的最佳选择。它具有放大倍数和信噪比高、灵敏度好的特点,由于它是一种严格遵守斯托列多夫定律的外光电效应探测器,因而具有较宽的动态范围。

根据光照灵敏度、量子效率、电流放大倍数、暗电流、等效输入噪声以及它的空间应用环境和力学条件,选择了具有双碱阴极的端窗光电倍增管 R1689-02。

光倍增管噪声很多,但主要作用的是散粒噪声 i_n , 可表示为:

$$i_n^2_{\text{倍增管}} = 2eI_a M \Delta f \quad (7)$$

式中: e 为电子电荷,其值为 1.6×10^{-19} C; I_a 为倍增管暗电流; M 为放大系数; Δf 为噪声带宽,可以近似认为信号带宽。由上式可以看出倍增管的噪声主要取决于暗电流的大小和系统的带宽。当系统的带宽 $\Delta f=1.6$ kHz, 倍增管型号为 R1689-02 (工作电压

1 500 V 时, $I_a=10^{-11}$, $M=3 \times 10^5$), 则倍增管散粒噪声 i_n 为:

$$i_n = \sqrt{2eI_a M \Delta f} = 5.3 \times 10^{-11} \text{ A} \quad (8)$$

2.2 电流放大器噪声

电流放大器采用分压式反馈电路如图 2 所示。

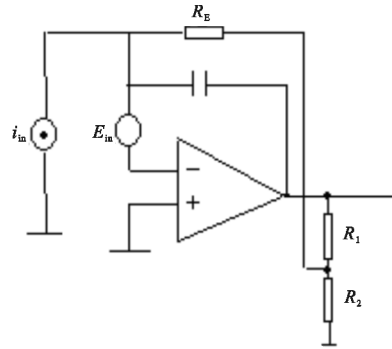


图 2 分压式反馈测量电路

Fig.2 Voltage divided feedback circuit

则电流放大器的输出噪声 E_o 可表示为:

$$E_o = \beta \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2} \quad (9)$$

式中: $\beta = (R_1 + R_2) / R_1$; E_1 为放大器的输入噪声电压; E_2 为电阻 R_f 产生的约翰逊噪声; E_3 为放大器输入噪声电流流过 R_f 和 C_f 产生的噪声。分别表示为:

$$E_1^2 = e_{in}^2 \quad (10)$$

$$E_2^2 = 4KTR_f \Delta f \quad (11)$$

$$E_3^2 = \frac{i_{in}^2 R_f^2}{2\pi C_f R_f \Delta f} \text{tg}^{-1}(2\pi C_f R_f \Delta f) \quad (12)$$

式中: Δf 为噪声带宽; k 为玻耳兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K); T 为绝对温度; e_{in} 为放大器输入噪声电压; i_{in} 放大器输入噪声电流。

取 $\Delta f_{\text{noise}}=1.6$ kHz, $T=300$ K, $C_f=2$ pF, $R_f=10^7 \Omega$, $R_1=1$ K, $R_2=10 \Omega$, 对所选的超低偏运放 AD549 而言 $e_{in}=4 \mu\text{V}$, $i_{in}=0.5 \text{ fA}$, 代入公式(10)~(12)可算出: $E_1^2=2.65 \times 10^{-10}$, $E_2^2=4.87 \times 10^{-10}$, $E_3^2=4.97 \times 10^{-17}$ (可忽略)。则 $E_o = \beta \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2} = 27.3 \beta \mu\text{V}$ 。将 E_o 等效到放大器的输入端噪声为 2.73×10^{-12} A。

由上述分析可知,放大器的等效输入噪声为 2.73×10^{-12} A 小于信号源即探测器噪声的 1/3,即小于 1.7×10^{-11} 。则放大器的噪声不会对系统的灵敏度产生影

响。而探测器即倍增管的噪声 i_n 大于系统探测灵敏度 $8 \times 10^{-12} \text{ A}$, 为此在采用数字累加调制解调法的同时, 对较弱信号增加测量积分时间, 提高系统的灵敏度。测量时间与信噪比改善的关系为:

$$SNIR = \sqrt{\frac{t_G}{T}}$$

(13)

式中: t_G 为积分时间; T 为调制周期。当 $T=20 \text{ ms}$, $t_G=1.24 \text{ s}$, 则 $SNIR=7.9$ 。通过采取以上措施可以使系统灵敏度达到系统要求。

3 噪声等效光谱辐亮度及其测量结果

对所设计的系统进行了噪声扣除测试及噪声等效光谱辐亮度测试, 这里探测器选用了日本滨松光电子公司生产的 R1689-02 光电倍增管, 斩波器的斩波频率为 50 Hz , 所用的计数器为 16 位可逆计数器。噪声等效光谱辐亮度测试装置原理如图 3 所示。

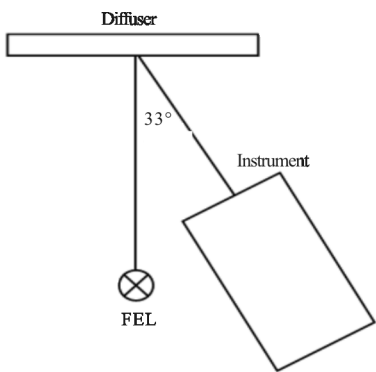


图3 噪声等效光谱辐亮度测试装置

Fig.3 Noise equivalent spectral radiance measurement setup

以中国计量院 $1\,000 \text{ W}$ 光谱辐照度标准石英卤钨灯, 在 500 mm 的距离处沿法线方向照明 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的 Spectrolon 标准漫反射板, 构成大面积光谱辐亮度标准光源。仪器光轴与漫反射板法线成 33° 角, 观测漫反射板的中心区域, 仪器的入射狭缝距漫反射板 510 mm , 在漫反射板上的投影为梯形。Spectrolon 漫反射板经光谱辐照度标准灯照明后, 在仪器观测方向的平均光谱辐亮度可由下式沿仪器视场积分给出:

$$L_\lambda = E_\lambda \cdot \cos \theta \cdot \overline{BRDF} \cdot w(x,y) \cdot f(x,y)$$

(14)

式中: E_λ 为标准灯的光谱辐照度; θ 为照明漫反板的方向相对法线的夹角; $w(x,y)$ 为离轴照明的校正因

子; $f(x,y)$ 为仪器视场投影面积上标准灯光谱辐照度随角度的变化; \overline{BRDF} 为漫反射板双向漫反射率在仪器视场内的平均值。光谱辐亮度响应度定义为:

$$R_L(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{V(\lambda)}$$

(15)

式中: $V(\lambda)$ 是仪器在特定波长 λ 处的输出; $L(\lambda)$ 是标准光源经漫反射板形成的光谱辐亮度。根据标准光源经漫反射板形成的光谱辐亮度 $L(\lambda)$ 及仪器输出 $V(\lambda)$, 可以得到仪器光谱辐亮度响应度。根据预计的仪器在轨运行时最小大气后向散射光谱辐射亮度及仪器光谱辐亮度响应度, 可以得到仪器在轨运行时的最小输出信号。根据最小信号强度和噪声得到仪器信噪比, 当信噪比为 1 时得到噪声等效光谱辐亮度, 其结果如表 1 所示。

表1 仪器噪声及信噪比
Tab.1 Instrument noise and SNR

Item (1 500 V,10 ¹⁰)	Unit	Own	SBUV/2
		Instrument	
The radiation least value atmospheric scattering (252 nm)	W cm ⁻² nm ⁻¹ sr ⁻¹	1.20E-04	1.20E-04
Least value of atmospheric	V	1.18	
RMS	V	0.22	
SNR		5.4	10
Equivalent spectral radiance	W cm ⁻² nm ⁻¹ sr ⁻¹	2.2E-05	

4 结 论

从测试数据可知, 数字同步累加解调法及相关的噪声抑制措施已将背景噪声扣除了近 80%, 背景噪声的影响降到十分理想的程度, 满足了任务需求。在小信号情况下用该方法可使系统测量灵敏度增加一个量级。同时还可以看出, 信号愈弱, 背景噪声扣除的效果愈好, 其原因是大信号带宽有限所致。噪声等效光谱辐亮度测试结果表明: 仪器的信噪比达到了美国 SBUV/2 的水平。另外对空间紫外光谱测量方面还刚刚起步, 空间环境对测量的影响有待进一步研究。

参考文献:

[1] JOANNA J, BHARTIA P K, ERNEST H S. Remote sensing application

- of continuous spectral backscatter ultraviolet spectral measuring[C]// SPIE, 1996, 2831: 94-101.
- [2] GLEN J, KRUEGER A J, HARING R. Improved ozone trend measuring capabilities of toms instruments[C]// SPIE, 1996, 2831: 48-56
- [3] KRUEGER A J, ROEDER H A, HENDERSON B D. The Solar-Backscatter Ultraviolet and Total ozone Mapping Spectrometer (SBUV/TOMS) for NIMBUSG[J]. Optical Eng, 1975, 14(4): 323-331.
- [4] ROBERT E. Recent Progress in UV Remote Sensing[C]// SPIE, 1996, 2831: 170-175.
- [5] 宋克非. 一种用于空间辐射测量的信号检测方法[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(3): 113-117.
- [6] 赵继印, 戴逸松. 微弱信号检测技术及仪器[M]. 吉林: 吉林工业大学出版社, 1998.
- [7] 陈成杰, 徐正卜. 光电倍增管[M]. 北京: 原子能出版社, 1988.
- [8] FEGLEY A A, FOWLER W K. Radiometric calibration of SBUV/2 instruments: retrospective improvements[J]. Metrologia, 1991, 28: 297-300.