

空间遥感仪器探测器工作温度对信噪比的影响分析

李占峰^{1,2}, 王淑荣^{1*}, 黄煜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. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 临边观测是一种新的空间大气遥感探测方式,但大气散射光谱辐射随临边高度的增加而迅速减弱。所以信噪比是临边遥感仪器的关键性能指标。在深入分析典型仪器信号光谱辐射传输特性和噪声来源的基础上建立了随探测器制冷温度变化的信噪比模型,并在一台临边遥感光谱仪原理样机上模拟试验验证了空间环境下临边高度 70 km 处的信噪比,理论分析和实验结果一致表明:探测器制冷到一定温度时,仪器的信噪比达到了一个极限值。在综合考虑功耗、散热等问题的基础上获得了探测器的最优工作温度。

关键词 大气遥感; 信噪比; 探测器制冷; 临边观测; 辐射传输

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)03-0786-04

引言

临边观测是对地球临边高度为 0~100 km 处的大气散射光谱辐射进行探测从而反演大气成分垂直分布信息的一种新型观测方式。临边观测具有高空间覆盖范围和高垂直分辨率等优点,因此受到人们极大的关注^[1-3]。但由于随着临边高度的增加,大气散射光谱辐射迅速减弱,如何估算和提高在弱信号下探测仪器的信噪比对临边大气探测至关重要^[4,5]。

本工作以研制的临边遥感光谱仪原理样机为例,从理论上分析和推导了光谱仪的信号和噪声,并建立了以探测器制冷温度为变量的信噪比模型,然后利用该模型从理论上估算了典型观测条件下,临边遥感光谱仪原理样机在探测器不同制冷温度下的信噪比。最后在实验室中用积分球模拟空间目标信号,通过调节探测器的制冷温度来测得仪器的信噪比,并与理论值进行比较与分析,进而实验验证了相关模型。

1 信噪比模型

信噪比是光谱仪的关键性能指标之一,它限制了成像光谱仪对弱信号的探测能力。信噪比的分析和估算对指导仪器的设计和应用有重大意义。信噪比定义为信号与噪声的比值,对于光谱仪,我们一般采用信号电子数的平均值(\bar{e}_s)和

噪声电子数的标准差(σ_N)的比值来表示信噪比。当观测的目标信号较弱时,噪声主要来源是探测器的暗电流噪声,此时降低探测器的工作温度能有效提高仪器的信噪比^[6]。下面推导光谱仪的信号和噪声,并建立了信噪比与探测器制冷温度的关系模型。

1.1 光谱仪信号分析

当观测目标的光谱辐亮度各方向均匀时,像面上某点的光谱辐照度 $E(\lambda)$ 可表示为^[7]

$$E(\lambda) = \frac{\pi}{4} \tau(\lambda) L(\lambda) \left(\frac{D}{f}\right)^2 K_D \cos^4 \omega' \quad (1)$$

其中, $\tau(\lambda)$ 为光学系统的光谱辐射传输效率, $L(\lambda)$ 为观测目标的光谱辐亮度, D/f 为光学系统的相对孔径, K_D 为轴外点的面渐晕系数, ω' 为轴外点的像方视角。

像面接收的光谱辐射能量等于光谱辐照度、接收面积与积分时间三者的乘积。由光电能量转换关系可得,探测器每个像元对应的目标辐射的信号电子数为

$$e_s(\lambda) = \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \frac{E(\lambda) A_d t_{int} \eta(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda \quad (2)$$

其中, A_d 为探测器像元的面积, t_{int} 为积分时间, $\eta(\lambda)$ 为探测器的量子效率, h 为普朗克常数, 等于 6.63×10^{-34} J·s, c 为光速, λ 为波长。

将式(1)代入式(2),得光谱仪信号电子数公式为

$$e_s(\lambda) = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \frac{K_D \cos^4 \omega' A_d t_{int}}{hc} \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} L(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda \quad (3)$$

收稿日期: 2011-07-12, 修订日期: 2011-10-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2009AA12Z151), 国家自然科学基金项目(41074126)和吉林省青年科研基金项目(20090118)资助

作者简介: 李占峰, 1986年生, 中国科学院长春光学精密机械物理研究所博士研究生 e-mail: lizhanfeng115@163.com

* 通讯联系人 e-mail: srwang@ciomp.ac.cn

1.2 光谱仪噪声分析

光谱仪的噪声主要由观测目标的背景噪声和探测器噪声组成。探测器噪声主要分为散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声等^[8]。由于各种噪声在其统计意义上相互独立，可以认为总噪声服从正态分布，所以系统总噪声为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_b^2 + \sigma_{\text{read}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2} \quad (4)$$

(1)散粒噪声 σ_{shot} ，又称光子噪声，是指由于入射光子的随机波动引起的噪声。统计服从 Poisson 分布。所以有

$$\sigma_{\text{shot}} = \sqrt{e_s} \quad (5)$$

散粒噪声是探测器进行信号探测的固有属性，代表成像系统能够达到的极限噪声水平。

(2)背景噪声 σ_b ：观测目标的背景光信号入射到探测器上引起电子数的统计起伏，形成了背景噪声。原理和计算都类似于散粒噪声。

(3)读出噪声 σ_{read} ：一般是指探测器内部的电子学噪声，主要贡献来源于电路的输出放大器噪声和复位噪声。对高性能探测器，可通过特殊设计(例如双相关采样)把读出噪声限制到低水平。

(4)暗电流噪声 σ_{dark} ：由于探测器材料内部的热运动产生电子数量的统计波动形成的噪声。与散粒噪声相似，暗电流噪声也服从泊松 Poisson 分布，所以有

$$\sigma_{\text{dark}} = \sqrt{e_{\text{dark}}} \quad (6)$$

决定暗电流电子数的因素主要是探测器的制冷温度。目前，光谱仪中的探测器大部分是 CCD 探测器，根据 CCD 探测器的暗电流方程可得单位时间内的暗电流电子数为^[8]

$$e_{\text{dark}} = 2.5 \times 10^{15} A_s J_{\text{dc}} T^{1.5} e^{-E_g/(2KT)} \quad (7)$$

$$E_g = 1.11557 - \frac{7.021 \times 10^{-4} \times T^2}{1108 + T} \quad (8)$$

其中， J_{dc} 为绝对温度 300 K 下测量所得的暗电流， A_s 为像元面积， T 是绝对温度， E_g 是硅的带隙能量。

将式(5)~式(8)代入式(4)，得系统总噪声为

$$\sigma_{\text{总}} = \sqrt{e_s + \sigma_b^2 + \sigma_{\text{read}}^2 + 2.5 \times 10^{15} A_s J_{\text{dc}} T^{1.5} e^{-E_g/(2KT)}} \quad (9)$$

科学研究中常对探测器进行制冷降低暗电流电子数，进而降低暗电流噪声。

1.3 光谱仪的信噪比模型

根据以上光谱仪信号电子数和总噪声，可以得出光谱仪在波长 λ_0 的信噪比与 CCD 探测器制冷温度 T 关系为

$$\text{SNR}(T) =$$

$$\frac{e_s(\lambda_0)}{\sqrt{e_s(\lambda_0) + \sigma_b^2(\lambda_0) + \sigma_{\text{read}}^2 + 2.5 \times 10^{15} A_s J_{\text{dc}} T^{1.5} e^{-E_g/(2KT)}}} \quad (10)$$

根据式(10)以及式(3)和式(8)，就可以理论上计算出固定波长处，仪器在不同 CCD 制冷温度下的信噪比。

2 不同制冷温度下临边遥感光谱仪原理样机信噪比的理论计算

临边遥感光谱仪原理样机是一台以临边观测方式对地球临边高度为 0~70 km，波长 400~570 nm 范围内的大气散

射光谱辐亮度进行探测的成像光谱仪。它由反射式前置光学系统和改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统组成，光学系统结构如图 1 所示^[9]。随着临边高度的增加，大气散射光谱辐亮度逐渐减弱，仪器的信噪比也随之逐渐减小。所以本工作只考察仪器观测临边高度为 70 km 处的弱信号的信噪比。

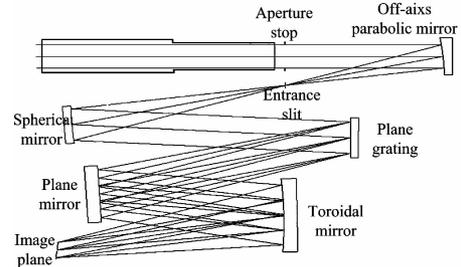


Fig. 1 Layout of optical system of limb sensing spectrometer

2.1 计算仪器的信号电子数

首先对式(3)进行简化，由于临边遥感光谱仪的垂直最大视角角只有 1.5°， $\cos^4 \omega' = 0.9986$ ，可近似为 1。此光谱仪的光谱带宽很窄仅有 0.6 nm，所以式(3)中积分可近似用下式代替

$$e_s(\lambda) = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \frac{A_d t_{\text{int}} K_D}{hc} L(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) \lambda \Delta \lambda \quad (11)$$

临边遥感光谱仪的相对孔径为 1/6.3，根据各镜面的反射率以及光栅效率可估算出系统的光谱辐射传输效率，探测器选取的是英国 E2V 公司的 CCD47-10 高性能 CCD 探测器，像元尺寸 13 μm × 13 μm，量子效率已给出。利用 MODTRAN 软件，可以模拟出仪器工作条件下(轨道高度约 400 km，观测距离 2 294 km)，临边高度 70 km 处 400~570 nm 的光谱辐射量传输到仪器入瞳处的光谱辐亮度的典型值(天顶角 60°)。根据式(11)可估算出 1000 ms 积分时间内前行临边成像光谱仪的信号电子数 $e_s(\lambda)$ ，结果如图 2。

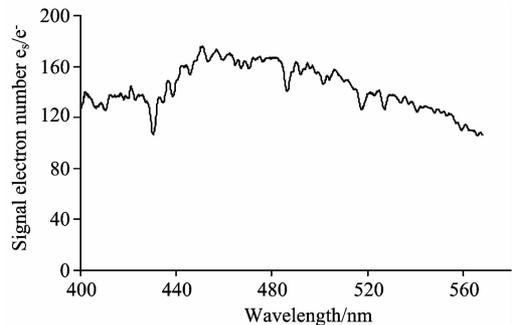


Fig. 2 Theoretical signal electron number in 1000ms

2.2 计算仪器的噪声电子数

对于临边观测成像光谱仪来说，它有效减弱了来自地表、云层等的干扰，所以背景噪声可以忽略， $\sigma_b = 0$ 。

E2V CCD47-10 高性能 CCD 在读出频率为 2 MHz 时的读出噪声约为 $\sigma_{\text{read}} = 10e^-$ (rms)。在温度 T 为 293 K (20 °C) 时的暗电流电子数约为 500 e^- /pixel/s。

由式(9)和(8)可估算出仪器在不同温度下的总噪声。

2.3 计算仪器的信噪比

根据信号电子数公式和系统总噪声公式, 得出临边遥感光谱仪的信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{\bar{e}_s}{\sigma_N} = \frac{e_s(\lambda)}{\sqrt{e_s(\lambda) + 10^2 + 2.5 \times 10^{15} A_s J_{dc} T^{1.5} e^{-E_g/(2kT)}}} \quad (12)$$

由上式估算了 CCD 温度在 20~−30 °C, 临边遥感光谱仪观测临边 70 km 处弱信号时的信噪比, 示于图 3。

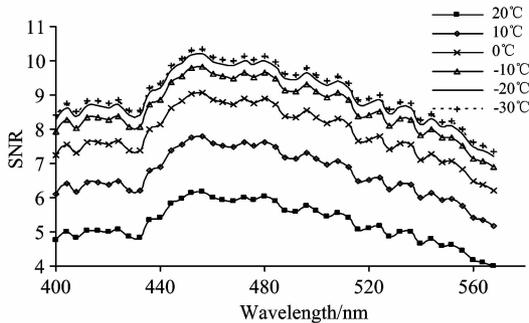


Fig. 3 SNR curve of theoretical calculation with different detector's temperatures

3 实验验证

为了验证信噪比分析的正确性, 实验室中通过用积分球模拟目标信号, 来测量临边遥感光谱仪的信噪比, 通过调节 CCD 的制冷温度, 来监测温度对信噪比的影响。

实验选取 400 和 500 nm 两个典型波长, 调节积分球使其输出辐亮度依次在这两个波长上与目标辐亮度相等。对应上述每个波长, 调节 CCD 制冷温度由 20 °C 逐渐降低到 −30 °C, 仪器在每个温度下采集 200 帧图像。取对应像元在 200 帧图像灰度值的平均值和均方差值分别作为信号值 \bar{e}_s 和噪声 σ_N , 用信号值除以噪声得到信噪比, 表达式如下

$$\text{SNR} = \frac{\bar{e}_s}{\sigma_N} = \frac{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} s_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{200} \left(s_i - \frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} s_i \right)^2} / 200} \quad (13)$$

其中, s_i ($i=1, 2, \dots, 200$) 是对应像元在第 i 帧图像的灰度值。

在 2 个波长处, 不同 CCD 制冷温度下信噪比的实验值与理论值分布如图 4。

由图 4 可以看出 CCD 温度在 −10~10 °C 范围内, 仪器信噪比的实验值与理论值较一致, 误差小于 4%; 温度在 10~20 °C 和 −20~−10 °C 范围内, 两者误差较大。分析原因如下:

(1) 暗电流噪声中的暗电流电子数是由经验式(7)估算得出的, 存在一定的误差, 由式(7)可知暗电流电子数与温度近似成指数关系, 所以温度越高, 估算得到的暗电流电子数的误差越大; 又根据式(10)可知, 温度越高, 暗电流电子数对信噪比的影响越大。由上述两个因素造成了信噪比实验值

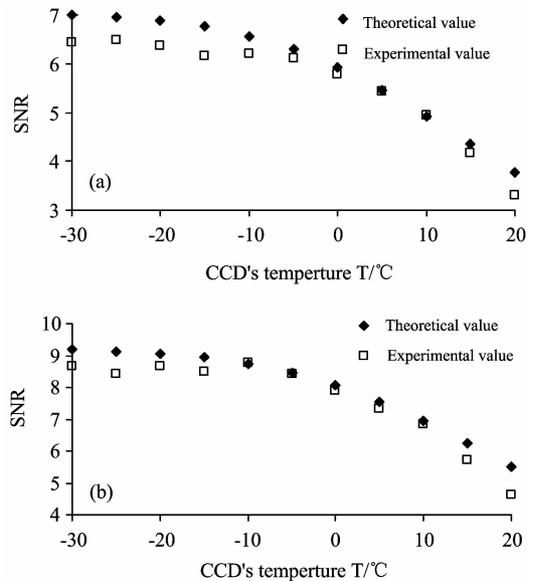


Fig. 4 Distribution of the theoretical values and experimental value
(a): 400 nm; (b): 500 nm

和理论值在 CCD 温度为 10~20 °C 时有较大误差, 在 20 °C 的实验值和理论值的误差达到 10%。

(2) 由信噪比理论估算式(10)可知, 仪器信噪比的理论值随 CCD 温度的降低而增大, 但由于实际中的 CCD 制冷电路及后续电子学信号放大和量化等过程引入的噪声的限制, 信噪比不会无限增大下去, 而是当 CCD 制冷到一定温度时, 仪器的信噪比会达到一个极限值, CCD 温度再降低, 信噪比几乎不再增加。这就导致了信噪比的实验值与理论值产生较大误差。

对于临边遥感光谱仪来说, 当 CCD 制冷温度约为 −10 °C 时, 仪器的信噪比几乎达到最大值。考虑到制冷功耗随 CCD 的制冷温度降低成指数增大, 以及仪器内部导热问题。综合以上因素及实验结果, 临边遥感光谱仪原理样机的 CCD 工作温度选定为 −10 °C。

4 结论

利用对典型仪器的光谱辐射传输特性、光电转换关系、仪器噪声来源的分析建立了前向临边遥感光谱仪的信噪比与探测器制冷温度的关系模型, 理论估算及实验测量了 CCD 探测器温度由 20 °C 逐渐制冷到 −30 °C 时, 临边遥感光谱仪原理样机工作在空间环境下临边高度 70 km 处的信噪比。实验结果与理论计算基本符合。表明探测器制冷到一定温度, 仪器信噪比已经达到极限值。为了提高信噪比以及对功耗、导热等问题的考虑, 可根据以上分析及实验结果综合确定探测器的最优工作温度。对于临边遥感光谱仪原理样机, 探测器最优工作温度为 −10 °C。

References

- [1] Chen S B. SPIE, 2006, 6031: 6031R-1.
- [2] Dittman M G, Leitch J, Chrisp M, et al. SPIE, 2002, 4817: 120.
- [3] Rault D, Loughman R. SPIE, 2007, 6745: 674509-1.
- [4] BAI L F, GU G H, CHEN Q, et al. SPIE, 2000, 4223: 178.
- [5] Fiete R D, Tantaló T. Optical Engineering, 2001, 40(4): 574.
- [6] CHEN Fang, SUN Li-qun, ZHANG En-yao(陈芳, 孙利群, 章恩耀). Journal of Applied Optics(应用光学), 2008, 29(6): 854.
- [7] AN Lian-sheng, LI Lin, LI Quan-chen(安连生, 李林, 李全臣). Applied Optics(应用光学). Beijing: Beijing Institute of Technology Press(北京: 北京理工大学出版社), 2002. 116.
- [8] Howell S B. Handbook of CCD Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 26.
- [9] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, et al(薛庆生, 王淑荣, 李福田, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(4): 823.

Analysis of the Effect of Detector's Operating Temperature on SNR in Space-Based Remote Sensor

LI Zhan-feng^{1,2}, WANG Shu-rong^{1*}, HUANG Yu¹

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

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

Abstract Limb viewing is a new viewing geometry for space-based atmospheric remote sensing, but the spectral radiance of atmosphere scattering reduces rapidly with limb height. So the signal-noise-ratio (SNR) is a key performance parameter of limb remote sensor. A SNR model varying with detector's temperature is proposed, based on analysis of spectral radiative transfer and noise' source in representative instruments. The SNR at limb height 70km under space conditions was validated by simulation experiment on limb remote sensing spectrometer prototype. Theoretic analysis and experiment's results indicate congruously that when detector's temperature reduces to some extent, a maximum SNR will be reached. After considering the power consumption, thermal conductivity and other issues, optimal operating temperature of detector can be decided.

Keywords Atmospheric remote sensing; Signal-noise-ratio (SNR); Detector's refrigeration; Limb viewing; Radiative transfer

(Received Jul. 12, 2011; accepted Oct. 8, 2011)

* Corresponding author