

基于电子倍增的高光谱成像链模型 的系统信噪比分析

余达^{1*}, 刘金国¹, 何昕¹, 何家维¹, 陈佳豫¹, 张晓阳^{1,2}, 彭畅^{1,2}

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 高光谱成像的应用效果非常依赖于所获取的图像信噪比(SNR)。在高空间分辨率下, 帧速率高、信噪比低, 由于光谱成像包含了两维空间-光谱信息, 不能使用时间延迟积分(TDI)模式解决光能量弱的问题; 目前多采用摆镜降低应用要求, 但增加了体积和质量, 获取的图像不连续, 且运动部件降低了航天的可靠性。基于此, 将超高速电子倍增与成像光谱有机结合, 构建了基于电子倍增的高分辨率高光谱成像链模型, 综合考虑辐射源、地物光谱反射、大气辐射传输、光学系统成像、分光元件特性、探测器光谱响应和相机噪声等各个环节, 可用于成像链路信噪比的完整分析。采用 LOWTRAN 7 软件进行大气辐射传输计算, 对不同太阳高度角和地物反射率计算像面的照度, 根据电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)探测器的噪声模型, 计算出不同工作条件下的 SNR。对 SNR 的分析和实验, 选择适当的电子倍增增益, 可使微弱光谱信号 SNR 提高 6 倍。

关键词 探测器; 高光谱成像; 信噪比; 电子倍增; 太阳高度角; 地物反射率

中图分类号 TN386.5; P231

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1104002

System Signal-to-Noise Ratio Analysis of Hyperspectral Imaging Chain Model Based on Electron Multiplication

Yu Da^{1*}, Liu Jinguo¹, He Xin¹, He Jiawei¹, Chen Jiayu¹, Zhang Xiaoyang^{1,2}, Peng Chang^{1,2}

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

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

Abstract The application effect of hyperspectral imaging relies heavily on the acquired signal-to-noise ratio (SNR) of images. The hyperspectral imaging requires a high frame rate and a low SNR for a high spatial resolution. The time-delay-integration (TDI) mode cannot be used to solve the problem of weak light energy, because the spectral imaging contains the two-dimensional spatial-spectral information. A swing mirror is usually used to reduce the application requirement. However, not only the volume and weight increase, but also the acquired image is discontinuous and the space reliability of the moving parts is reduced. Thus the ultra-high speed electron multiplication and the imaging spectroscopy are combined organically, and a high-resolution hyperspectral imaging chain model based on electron multiplication is built. This model can be used for a complete analysis of the SNR in an imaging chain, if all elements such as radiation source, object reflectance, atmospheric radiation transmission, optical system imaging, spectroscopic characteristics, detection spectral response and camera noise are comprehensively considered. The LOWTRAN 7 software is used to investigate the atmospheric radiation transmission. The illuminance at the image plane is calculated for different solar altitudes and object reflectance, and the SNR under different working conditions is calculated according to the noise model of an electron multiplying charge coupled device (EMCCD) detector. Through the analysis and experiment of SNR, a suitable choice of multiplication gain can make the SNR of weak spectral signals enhanced by 6 times.

Key words detector; hyperspectral imaging; signal-to-noise ratio; electron multiplication; solar altitude; ground reflectance

OCIS codes 040.1520; 120.0280; 110.2970

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-06-11; 录用日期: 2018-07-12

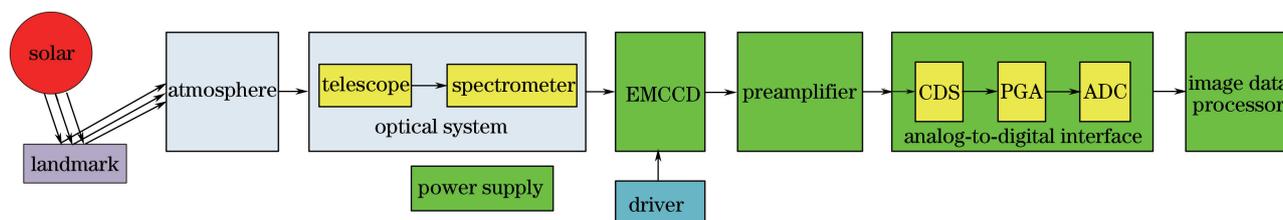
基金项目: 国家自然科学基金项目(61405191)、吉林省科技发展计划项目(20160101273JC, 20150520102JH)

* E-mail: ciompyuda@163.com

1 引 言

光谱成像技术结合光谱处理技术和成像技术的多维信息获取处理技术^[1],是光学成像技术的重要分支^[2]。成像光谱仪是遥感探测的关键设备之一^[3],能够对地物成像的同时,得到同一地物的光谱特征信息^[4],在遥感探测领域正发挥着越来越重要的作用。成像光谱技术,在军事领域,可识别伪装,可进行近海探测和反潜、地雷探测、导弹导引、武器生产和使用情况调查;在民用领域,成像光谱设备既能用于农、林、水、土、矿等地球资源勘查、环境污染与灾害监测等方面^[5-6],也可实现微量气体成分以及大气层垂直温度的探测等,为气象、地球物理等领域提供了大量的数据信息^[7-8]。

光谱成像系统的应用效果非常依赖获取图像的信噪比(SNR)。但在低照度如仅有陆地能量的1/6~1/4海洋遥感条件下,特别是高空间分辨率下高光谱成像领域,受入射光能量、积分时间、光谱分辨率以及分光元件透过率的影响,仪器的信噪比受到较大的制约^[9]。由于光谱成像包含了空间和光谱二维信息,不能使用时间延迟积分(TDI)模式来解决光能量弱问题。色散式存在狭缝,分光的效率较低,仍然无法完全有效利用全部入射光能量。早期的干涉式成像光谱仪在入瞳处也需要狭缝,无法实现通光量最大化,不太适用于高速成像探测应用场合。其他新型光谱分光方式,通常采集周期长,存在对运动目标敏感的问题,如无法实现微弱信号下高光谱分辨率的成像探测^[10]。基于电子倍增(EM)技术的低照度电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)具有灵敏度高、信号增益高、噪声低、体积小、分辨力高、性能稳定的特点,可在全日光到星光的大范围照度条件下连续工作^[11]。



CDS: correlated double sample; PGA: programmable gain amplifier; ADC: analog-to-digital converter

图1 高光谱遥感的成像链路模型

Fig. 1 Imaging chain model for hyperspectral sensing

在可见光和近红外谱段,地表物体自身几乎无辐射,发出的波谱主要以反射太阳辐射为主。因此入射到空间的高光谱成像系统的入瞳处辐亮度主要

信噪比表征成像光谱仪的辐射响应,是与其图像质量密切相关的重要参数。基于电子倍增的高光谱遥感包括电磁波谱能量的辐射传输、空间光学望远成像、光谱分光、探测器光电转换、电子倍增、包含模数(A/D)转换的视频处理、数字图像处理等环节。准确评估系统的信噪比应综合考虑辐射度学、光学和探测器特性等主要环节,找到成像链中的薄弱环节,尽可能准确地描述系统在轨工作时的性能^[12]。

本文以色散型高光谱成像为例,首先建立高光谱遥感的成像链模型,采用LOWTRAN软件模拟计算大气辐射传输,分析高光谱光学成像中的能量传递,建立EMCCD的光电转换关系及其噪声特性,从而获得最终输出的数字化的信号和噪声;计算了不同太阳高角、地物反射率 R 、光学系统焦比 ξ 、前照和背照探测器对应的量子效率和探测器不同工作模式下的信噪比指标。

2 成像链路模型

高光谱遥感的成像链模型如图1所示,来自太阳的电磁波辐射经大气传输到地球表面,部分电磁波经地物反射后再通过大气辐射传输,进入高光谱成像的光学系统。高光谱成像光学系统中的望远成像部分将一定波段范围内的电磁波能量聚焦狭缝位置,色散光学系统按照光谱间隔将不同光谱的电磁波成像于探测器靶面的不同位置。探测器为EMCCD,在驱动电路的作用下,对入射的电磁波能量进行光电转换,将到达靶面的光子转换为电子,同时在电荷转移的过程中进行电子倍增,最后输出的模拟电压信号经外部的预防电路后再送入视频处理器中进行相关双采样、前置放大和模数转换,输出数字图像数据再经数据处理转换为满足用户需求的格式后输出。

是由太阳高角、不同地物的光谱反射率决定。太阳作为辐射源,当到达地球附近的大气时被反射、吸收,其中能够达到地球表面的辐射为散射和直射的

太阳辐射^[13]。对于一年中任一天任一时刻到达成像光谱仪入瞳处的目标光谱辐亮度^[14],具体参考文献[14]中的建模方法。

高光谱成像望远系统中使用的望远物镜的类型分为满孔径和局部遮挡卡塞格林式系统两种。对于满孔径式望远物镜,若望远物镜的口径为 D , 焦距为 f , $L(\lambda)$ 为物镜入瞳的光谱辐射亮度, $\tau_{\text{telescope}}(\lambda)$

为经望远系统后的光谱透过率, $\Delta\lambda$ 为对应谱段的光谱宽度, 则入射狭缝处的照度为 $E_i(\lambda)$ 为

$$E_i(\lambda) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \frac{\pi \times \tau_{\text{telescope}}(\lambda) L(\lambda) \times D^2}{4f^2} d\lambda. \quad (1)$$

对于卡塞格林望远物镜, 主镜口径 D_1 , 次镜口径为 D_2 , 入射狭缝的辐射照度可表示为

$$E_i(\lambda) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \frac{\pi \times \tau_{\text{telescope}}(\lambda) \times L(\lambda) \times (D_1^2 - D_2^2)}{4f^2} d\lambda, \quad (2)$$

则对于满孔径式望远物镜, 光栅成像光谱仪在 $\Delta\lambda$ 光谱范围内像面上的照度 $E_o(\lambda)$ 为

$$E_o(\lambda) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \tau_{\text{split}}(\lambda) \times \frac{\pi \times \tau_{\text{telescope}}(\lambda) L(\lambda) \times D^2}{4f^2} \times \frac{f_1^2}{f_2^2 \cdot \gamma_g} d\lambda, \quad (3)$$

式中: $\tau_{\text{split}}(\lambda)$ 为经光谱分光系统的透过系数; f_1 为准直物镜的焦距; f_2 为成像物镜的焦距; γ_g 为光栅的横向放大率。

光谱信号经过探测器获得的电子数 $u_p(\lambda)$ 可表示为

$$u_p(\lambda) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \frac{\tau_{\text{split}}(\lambda) \times \frac{f_1^2}{f_2^2 \cdot \gamma_g} \times A \times \pi \times \tau_{\text{telescope}}(\lambda) L(\lambda) \times D^2 \times t_{\text{exp}} \times \eta(\lambda)}{4f^2 hc / \lambda_0} d\lambda, \quad (4)$$

式中: A 为探测器的像元面积; t_{exp} 为探测器的曝光时间; η_λ 为在探测器中心波长为 λ 的谱段内的积分量子效率。经获得的电子数再乘以探测器的电荷转换因子 η_{CVF} , 即可转换为对应的电压 $V_s(\lambda)$:

$$V_s(\lambda) = u_p(\lambda) \times \eta_{\text{CVF}}. \quad (5)$$

3 信噪比分析

EMCCD 噪声主要包括暗电流噪声、散粒噪声、复位噪声、时钟诱导噪声和倍增噪声, 其中复位噪声可通过相关双采样技术消除, 暗电流噪声成为高光谱成像暗场噪声的主要来源。暗电流噪声是由 EMCCD

内部热生电荷载流子产生, 强烈依赖于 EMCCD 的表面温度, 冷却可使热生电荷生成速率显著降低。将制冷系统应用于高光谱成像应用中, 设置制冷温度, 遮盖光谱仪入光镜头, 测试不同温度下的暗背景噪声, 可得到 EMCCD 暗噪声与温度的变化关系^[15]。

如图 2 所示, 可使用电子倍增方式对高光谱成像的光谱信号进行放大, 提高信噪比。当电子倍增增益为 1 时, 基于电子倍增的高光谱成像系统的信噪比模型与普通 CCD 相同。

图 2 中, V_s 表示由光子电荷经电荷电压转换后的等效输出电压; n_s 、 n_d 、 n_{CIC} 、 n_{smear} 、 n_{re} 和 n_{transfer} 分

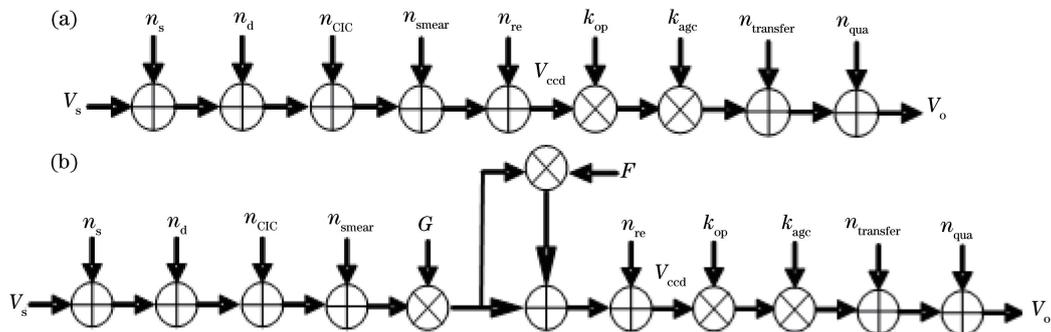


图 2 基于电子倍增的高光谱成像系统的信噪比模型。(a) 电子倍增增益为 1; (b) 电子倍增增益大于 1

Fig. 2 SNR model of hyperspectral imaging system based on electron multiplication.

(a) Electron multiplication gain is 1; (b) electron multiplication gain is larger than 1

别表示霰粒噪声、暗电流噪声、时钟诱导噪声、smear 引起的噪声、读出噪声和光生电荷在整个转移过程中受电源及驱动信号等影响产生的噪声; V_{ccd} 表示 CCD 成像器件的输出电压; k_{op} 表示预放器的放大倍数; k_{agc} 表示视频处理器的成像增益; G 为电子倍增过程产生的增益; F 为电子倍增过程产生的额外噪声因子; n_{qua} 表示量化噪声; V_o 表示量化值对应等效输出电压, 表达式为

$$V_o = Gk_{\text{agc}}k_{\text{op}}V_s, \quad (6)$$

$$R_{\text{SN}} = \frac{V_o}{\sigma} = \frac{k_{\text{agc}}k_{\text{op}}GV_s}{\sqrt{F^2G^2k_{\text{agc}}^2k_{\text{op}}^2(\sigma_s^2 + \sigma_d^2 + \sigma_{\text{CIC}}^2 + \sigma_{\text{smear}}^2) + k_{\text{agc}}^2k_{\text{op}}^2\sigma_{\text{re}}^2 + \sigma_{\text{qua}}^2 + \sigma_{\text{transfer}}^2}}. \quad (8)$$

成像电路成像增益采用 g 表示, 表达式为

$$g = k_{\text{agc}}k_{\text{op}}, \quad (9)$$

则(8)式变换为

$$R_{\text{SN}} = \frac{V_s}{\sqrt{F^2(\sigma_s^2 + \sigma_d^2 + \sigma_{\text{CIC}}^2 + \sigma_{\text{smear}}^2) + \frac{\sigma_{\text{re}}^2}{G^2} + \frac{\sigma_{\text{qua}}^2 + \sigma_{\text{transfer}}^2}{g^2G^2}}}. \quad (10)$$

基于电子倍增的高光谱成像系统的成像增益 g 和模数量化位数 N 的设置原则为: 对于模数转换器, 应该保证输入信号的满量程使用, 保证 CCD 输入的最大信号能接近模数转化器的最大量程, 则

$$g = V_{\text{ad}}/V_o. \quad (11)$$

高光谱成像电路中视频处理器内部的模数转换器完成对视频信号的模数转换。在模数转换过程中不可避免地引入量化噪声。在空间遥感高光谱成像电路中使用的视频处理器内部的模数转换器属于 1/2 偏置型量化模数转换, 采用了均匀量化方式, 所以视频信号量化噪声服从均匀分布, 均方差为

$$\sigma_{\text{qua}} = V_{\text{ad}}/(2^N \sqrt{12}). \quad (12)$$

量化位数越高则量化噪声越小, 更能真实地反映成像电路输出信号的信噪比, 有利于提高成像信噪比。

$$\sigma_{\text{qua}} = g\sigma_{\text{re}}, \quad (13)$$

$$N = \text{lb} \frac{V_{\text{ad}}}{\sqrt{12}g\sigma_{\text{re}}}. \quad (14)$$

经分析, 可得到如下结论:

1) 当输入的光谱信号能量足够强时, σ_s 远大于其他信号, 则使用电子倍增增益的信噪比可近似为

$$R_{\text{SN}} \approx \sqrt{V_s}/F, \quad (15)$$

而不使用电子倍增增益的信噪比可近似为

$$R_{\text{SN}} \approx \sqrt{V_s}. \quad (16)$$

式中: 当电子倍增增益为 1 时则 G 为 1; (6) 式成立需满足 GV_s 不超过 EMCCD 的等效的满阱电子容量, 且 $Gk_{\text{agc}}k_{\text{op}}V_s$ 为超过模数转换器的量程 V_{ad} 。

各种噪声的迭加遵循独立误差合成原理, 其方差可表示为

$$\sigma^2 = F^2G^2k_{\text{agc}}^2k_{\text{op}}^2(\sigma_s^2 + \sigma_d^2 + \sigma_{\text{CIC}}^2 + \sigma_{\text{smear}}^2) + k_{\text{agc}}^2k_{\text{op}}^2\sigma_{\text{re}}^2 + \sigma_{\text{qua}}^2 + \sigma_{\text{transfer}}^2, \quad (7)$$

当电子倍增增益为 1 时则 G 和 F 为 1。则成像信噪比计算表达式为

受电子倍增增益的额外噪声因子 F 的影响, 当输入的光谱信号能量足够强时, 使用电子倍增增益功能会使信噪比下降到接近 $1/F$ 倍。

2) 当输入的光谱信号能量足够弱时, σ_s 远小于读出噪声 σ_{re} , 读出噪声为噪声主要因素, 则使用电子倍增增益的信噪比可近似为

$$R_{\text{SN}} \approx GV_s/(\sigma_{\text{re}}), \quad (17)$$

而不使用电子倍增增益的信噪比可近似为

$$R_{\text{SN}} \approx V_s/(\sigma_{\text{re}}). \quad (18)$$

当输入的光谱信号能量足够低时, 使用电子倍增增益功能会使信噪比提高到接近 G 倍。

3) 根据上述两种状态下的分析, 可以根据输入的光谱能量大小, 选择合适的电子倍增增益, 以达到输入光谱信号的最佳信噪比。对于每谱段的光谱信号(对应 EMCCD 的每行), 根据实验目的选择是否进行电子倍增增益放大。

4 仿真与实验

4.1 曝光时间的计算

星下点的平均速度可表示为

$$v = \frac{R}{R+H} \cdot \sqrt{\frac{G_0M}{R+H}}, \quad (19)$$

式中: G_0 为万有引力常数, M 为地球质量, R 为平均地球半径, H 为飞行器平均离地高度。表 1 为不同像元分辨率下的最大积分时间。

表 1 不同像元分辨率下的最大积分时间

Table 1 Maximum integration time at different pixel resolutions

| Pixel resolution | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| (Dataset) / m | | | | | | | | | | |
| Integration time | 1.38 | 1.24 | 1.11 | 0.96 | 0.83 | 0.69 | 0.55 | 0.41 | 0.28 | 0.14 |
| (Salinas) / ms | | | | | | | | | | |

4.2 入射光能量的仿真计算

采用 LOWTRAN 7 软件进行大气辐射传输计算,轨道高度设为 400 km,望远光学系统的透过率以单片反射率 96% 计算,分光衍射系统的透过率按

0.3 计算;高入瞳辐亮度设置为 60° 太阳高角,地面反射率 $R=0.6$;高入瞳辐亮度设置为 10° 太阳高角,地面反射率 $R=0.2$;空间分辨率设置为 10 m,探测器的量子效率采用 E2V 公司 EMCCD CCD201 的前照和背照量子效率曲线;探测器读出噪声为 $43e^-$ (噪声以电子数计数, $43e^-$ 即 43 个电子数),在深度制冷的条件下忽略暗电流和暗噪声。图 3 中的曲线分别为谱段间隔 5 nm 和 10 nm,焦比 ξ 分别为 4.5, 10, 20, 分别对应高和低入瞳辐亮度下获得的焦面辐照度;说明入瞳辐亮度越高,谱段间隔越宽,焦比越小,焦面辐照度越强。图 4 对应焦比为 4.5, EMCCD

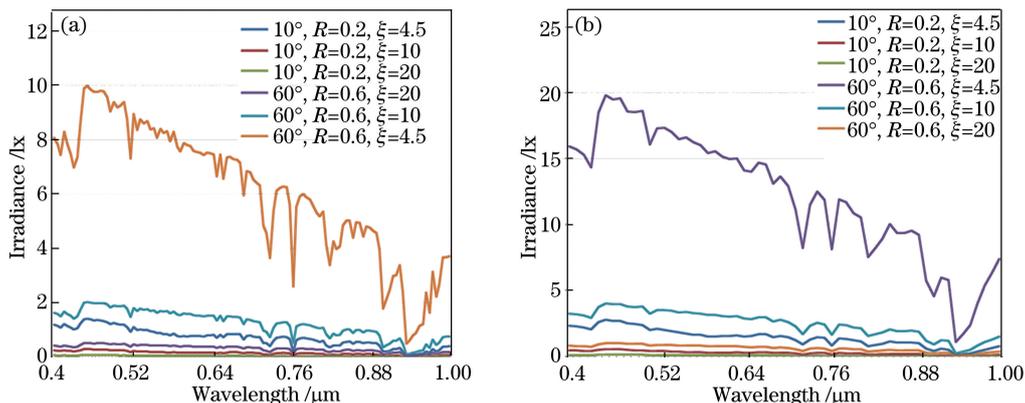


图 3 焦面辐照度。(a) 5 nm 谱段间隔; (b) 10 nm 谱段间隔

Fig. 3 Focal surface irradiance. (a) 5 nm spectral interval; (b) 10 nm spectral interval

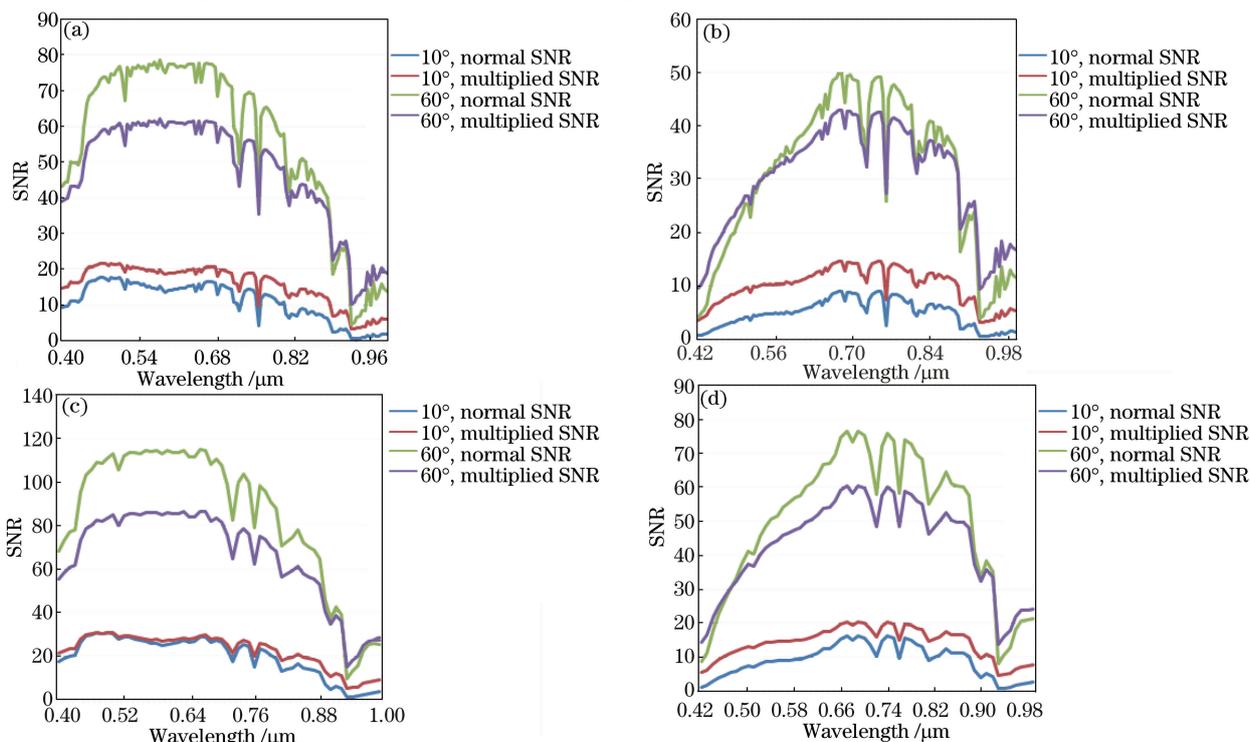


图 4 $\xi=4.5$ 的信噪比。(a) 背照谱段间隔 5 nm; (b) 前照谱段间隔 5 nm; (c) 背照谱段间隔 10 nm; (d) 前照谱段间隔 10 nm

Fig. 4 SNR when $\xi=4.5$. (a) 5 nm spectral interval for back illumination; (b) 5 nm spectral interval for front illumination; (c) 10 nm spectral interval for back illumination; (d) 10 nm spectral interval for front illumination

探测器量子效率分别为前照和背照,谱段间隔分别为 5 nm 和 10 nm,探测器分别在常规和电子倍增工作模式下获得信噪比;图 5 对应焦比为 10,EMCCD 探测器量子效率分别为前照和背照,谱段间隔分别为 5 nm 和 10 nm,探测器分别在常规和电子倍增工作模式下获得信噪比。图 4 和图 5 说明焦面辐照度越强,探测器量子效率越高,信噪比越高,在弱光谱

能量下使用电子倍增功能信噪比会提高,当光谱能量足够强时使用电子倍增功能信噪比反而下降。光谱的谱段间隔、焦比及量子效率都影响感生电子数的数量,图 6 为不同感生电子数分别在常规和电子倍增工作模式下对应的信噪比,当感生电子数达到 1850 附近使用电子倍增功能信噪比反而会下降。

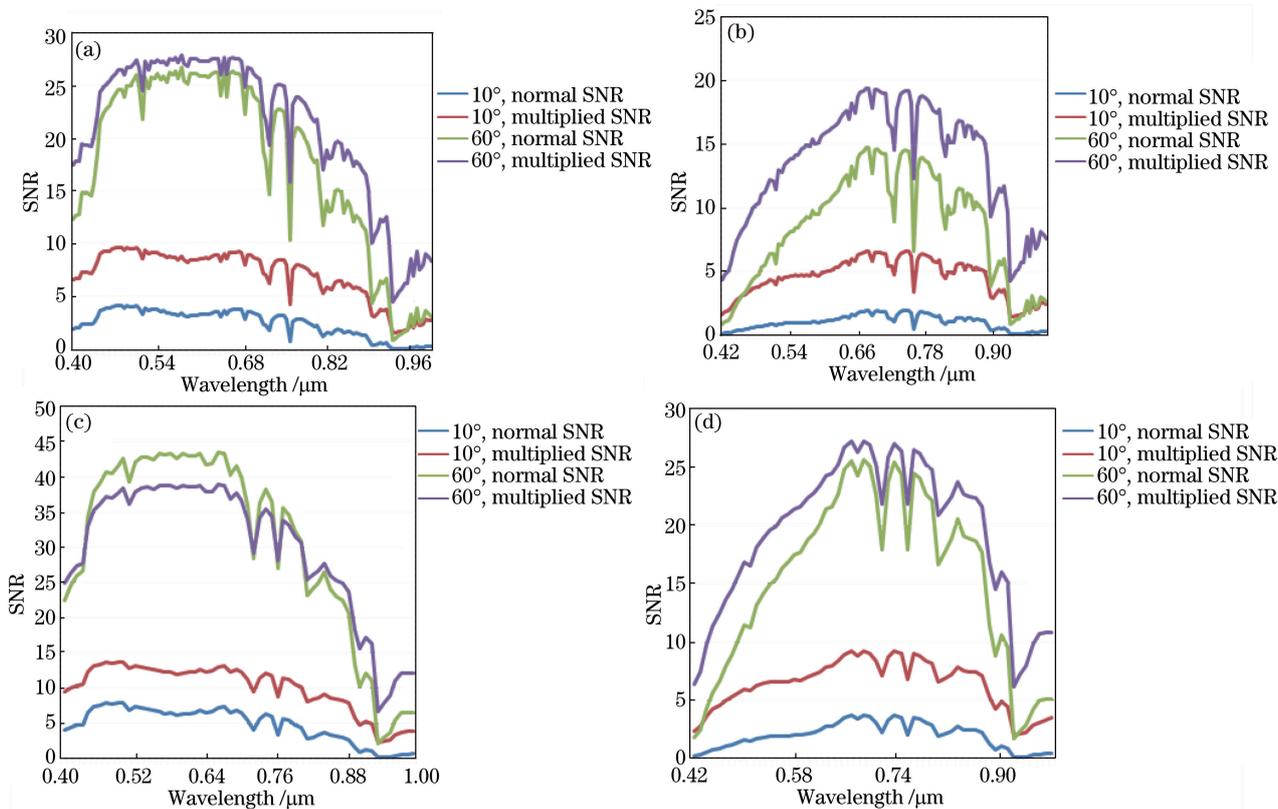


图 5 $\xi=10$ 的信噪比。(a) 背照谱段间隔 5 nm;(b) 前照谱段间隔 5 nm;(c) 背照谱段间隔 10 nm;(d) 前照谱段间隔 10 nm
Fig. 5 SNR when $\xi=10$. (a) 5 nm spectral interval for back illumination; (b) 5 nm spectral interval for front illumination; (c) 10 nm spectral interval for back illumination; (d) 10 nm spectral interval for front illumination

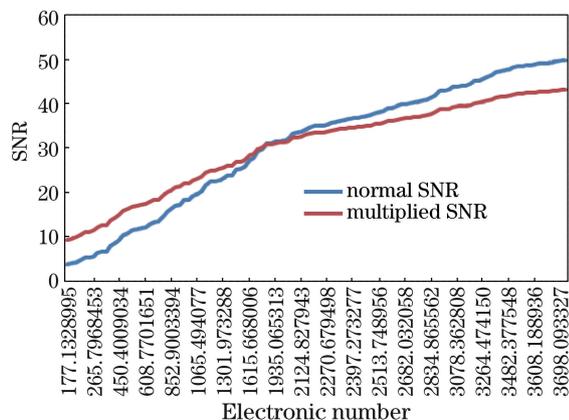


图 6 感生电子数对应信噪比

Fig. 6 SNR versus number of induced electrons

4.3 成像实验

采用积分球、微光照度计(型号为 HOTO-2000 μ)

按照 EMVA 1288(EMVA, 欧洲机器视觉协会)标准进行成像参数测试,测试在不同入射焦面光照度下的信噪比。对各种颜色的打印字在弱光下成像,模拟同时对不同光谱信号的成像,并进行了信噪比测试及优化。由于积分球的光源为卤素灯,峰值波长为 0.9 μm ,故存在大量的红外谱线;积分球的出口采用通带频率为 0.65~0.75 μm 的窄带滤波片滤除红外光谱的影响。经测试,如图 7 所示,在微弱光能量下,光生电子数较少时,使用电子倍增功能信噪比可提高 6 倍以上;如图 8 所示,在较强光能量下,光生电子数较多时,使用电子倍增功能反而会使信噪比下降。图 9 为不同颜色打印字“不同颜色的辐射测试”在电子倍增增益分别为 2,16,64 的成像效果对比,随着电子倍增增益的增加,不同颜色打印字的信噪比逐步提高。

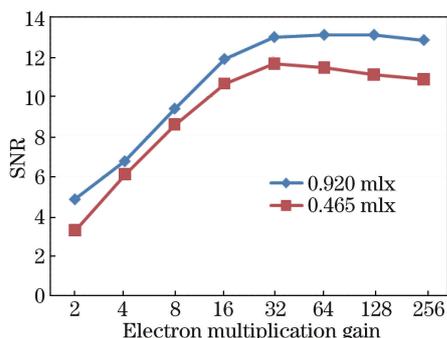


图 7 弱光下不同电子倍增增益的信噪比
Fig. 7 SNR versus electron multiplication gain under weak light

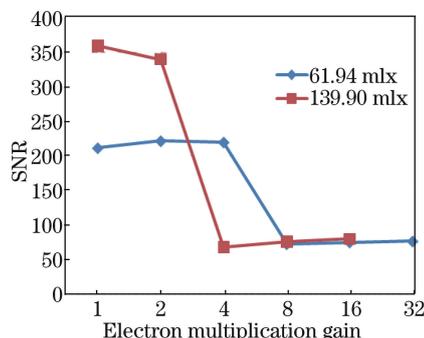


图 8 较强光下不同电子倍增增益下的信噪比
Fig. 8 SNR versus electron multiplication gain under strong light

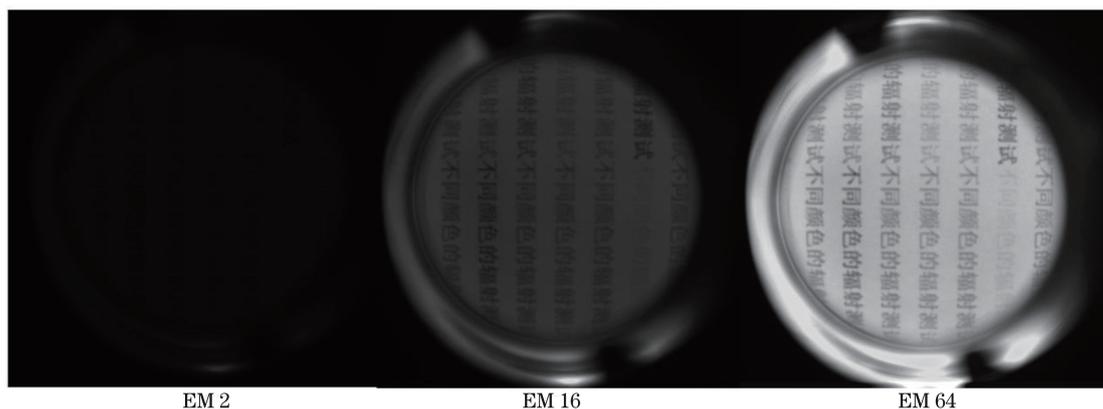


图 9 彩色目标在不同电子倍增增益下的成像效果
Fig. 9 Imaging effects of the color target at different electron multiplication gains

5 结 论

经仿真计算和实验可知,高空间和高光谱分辨率的高光谱成像的焦面辐照度,在不同季节主要受地物反射率变化的影响,一天中不同时间内主要受太阳高角变化的影响,谱段宽度决定了光谱辐射亮度的积分宽度。对于不同谱段的光谱信号的信噪比,主要受入射光谱信号辐照度、轨道高度和像元尺寸及像元分辨率决定的无像移补偿的最大积分时间、像元尺寸、量子效率、电荷转换因子、读出噪声等影响,表现出不同的信噪比。根据光生电子数的大小,选择适当的电子倍增增益,可提高微弱光谱信号的信噪比。

参 考 文 献

[1] Liu C M, Li J X, Zhu R H, *et al.* Signal-to-noise ratio analysis of dual-channel shearing interferometry hyperspectral imaging method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0511001.
刘成森, 李建欣, 朱日宏, 等. 双通道剪切干涉高光光谱成像方法的信噪比分析[J]. *光学学报*, 2018, 38

(5): 0511001.
[2] Wang S, Xiangli B, Li L B, *et al.* Research of spectrum signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 851-856.
王爽, 相里斌, 李立波, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪光谱信噪比研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(3): 851-856.
[3] Wu Y H, Hu B L, Gao X H, *et al.* Adaptive hyperspectral image classification using region-growing techniques[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 426-434.
吴银花, 胡炳樑, 高晓慧, 等. 利用区域增长技术的自适应高光光谱图像分类[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 426-434.
[4] Wang Q C, Fu G Y, Wang H Q, *et al.* Fusion of multi-scale feature using multiple kernel learning for hyperspectral image land cover classification[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 980-988.
王庆超, 付光远, 汪洪桥, 等. 多核融合多尺度特征的高光谱影像地物分类[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(4): 980-988.

- [5] Hou B H, Yao M L, Jia W M, *et al.* Spatial-spectral discriminant analysis for hyperspectral image classification[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 450-460.
候榜焕, 耀敏立, 贾维敏, 等. 面向高光谱图像分类的空谱判别分析[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 450-460.
- [6] Ma F Y. Research of hyperspectral imaging acquisition technology based on CMOS sensor[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 1-3.
马芳苑. 基于 CMOS 探测器的高光谱成像采集技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2016: 1-3.
- [7] Wang Y Q. The research on imaging spectrometer motion compensation implementation technology[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 1-20.
汪逸群. 成像光谱仪运动补偿实现技术的研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2013: 1-20.
- [8] Yu D, Liu J G, Guo Y F, *et al.* Recent progress in low light level superspeed EMCCD imaging[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(36): 3777-3784.
余达, 刘金国, 郭永飞, 等. 微光 EMCCD 超高速成像研究进展[J]. *科学通报*, 2013, 58(36): 3777-3784.
- [9] Wang J, Ma Y, Fu Z H. Study on signal-to-noiseratio of the ocean imaging spectrometer[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(3): 410-413.
王杰, 马越, 付智红. 海洋成像光谱仪信噪比研究[J]. *半导体光电*, 2017, 38(3): 410-413.
- [10] Yue J. Study on high SNR narrow-band spectral data acquisition and unsupervised classification[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014: 5-15.
岳江. 高信噪比窄带光谱数据获取与非监督分类技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 5-15.
- [11] Bai Y, Chen Y J, Zhang M J, *et al.* Method and demonstration of true-color imaging by EMCCD[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(4): 329-340.
白玉, 陈远金, 张猛蛟, 等. EMCCD 真彩色成像方法与验证[J]. *红外技术*, 2017, 39(4): 329-340.
- [12] Chen Y H, Ji Y Q, Zhou J K, *et al.* Signal-to-noise ratio evaluation of airborne visible-infrared hyperspectral imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2300-2303.
陈宇恒, 季轶群, 周建康, 等. 机载可见-红外超光谱成像仪信噪比的估算[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2300-2303.
- [13] Shang Y. Research of noise reduction technique in imaging spectrometer with grating dispersion[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012: 1-20.
尚杨. 光栅型成像光谱仪噪声抑制技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012: 1-20.
- [14] Ruan N J, Su Y, Zhang K K, *et al.* Research on calculation method of dynamic SNR of TDICCD camera[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2009, 29(6): 15-20.
阮宁娟, 苏云, 张科科, 等. 空间 TDICCD 相机动态信噪比计算方法研究[J]. *中国空间科学技术*, 2009, 29(6): 15-20.
- [15] Zhang Q, Huang S H, Zhao X, *et al.* The design and implementation of CCD refrigeration system of imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3): 0311004.
张泉, 黄书华, 赵欣, 等. 机载成像光谱仪 CCD 制冷系统设计与实现 [J]. *光子学报*, 2017, 46(3): 0311004.