

基于 EMCCD 的 AOTF 成像光谱仪噪声分析与信噪比研究

赵慧洁, 程 宣*, 张 颖, 李冲冲

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191

摘 要 声光可调谐滤波器(AOTF)成像光谱仪是一种新型高光谱成像系统。针对系统存在的波段间辐射灵敏度差异较大, 低照度条件下部分波段信噪比较低的问题, 引入了电子倍增 CCD(EMCCD)作为感光器件。对该原理仪器在普通和电子倍增两种工作模式下的噪声进行了分析, 推导了信噪比模型, 并利用研制的原理样机进行了实验验证。在此基础上, 提出了电子倍增模式下系统动态范围的评价方法, 给出了以入瞳光谱辐亮度为判据的工作模式选择方法。结果表明, 信噪比模型与实测结果吻合, 电子倍增模式的合理选择有效提高了低照度条件下的信噪比, 改善波段间辐射灵敏度的非一致性。

关键词 AOTF 成像光谱仪; EMCCD; 噪声; 信噪比; 电子倍增模式

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)12-3422-07

引 言

成像光谱仪能够对地物成像的同时, 得到同一地物的光谱特征信息, 在遥感探测领域正发挥越来越重要的作用。按照分光原理的不同, 成像光谱仪可分为色散型、干涉型和滤光片型。声光可调谐滤波器(AOTF)成像光谱仪是近年来新兴的一类成像光谱仪器, 属于滤光片型, 相对于色散型和干涉型系统, 具有快速电控波长可编程调谐的特点^[1]。目前, 美国^[1]、欧洲^[2]以及日本等^[3]发达国家在 AOTF 光谱成像系统方面的研究已取得了一定的研究成果。在我国, 中国科学院上海技术物理研究所^[4]、中国科学院西安光学精密机械研究所^[5]以及北京航空航天大学等^[6]研究单位也开展了 AOTF 成像光谱仪原理样机的研制。

光谱成像系统的应用效果非常依赖获取的图像信噪比^[7]。但在低照度条件下, 特别是高光谱成像领域, 受入射光能量、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。对于 AOTF 成像光谱仪而言, 其分光原理导致不同波长的带宽差别较大, 加上衍射效率、光学系统透过率及探测器光谱响应等非均匀性因素的影响, 不同波段间的辐射灵敏度存在较大差异, 部分波段的信号很弱。为提高系统的探测灵敏度, 将用于微光成像的电子倍增 CCD 探测器(EMCCD)引入高光谱成像系统是一种有益的尝试。近年来, 国外开始将 EMCCD 用于高光谱成研究。2011 年

Bosoon Park 等采用带 EMCCD 的 AOTF 显微成像系统进行食品致病菌的检测^[8]; 挪威科技大学的 Hernandez-Palacios 等^[9]利用 EMCCD 进行了低照度高光谱成像实验, 对 EMCCD 的增益和积分时间对数据质量的影响进行了定性分析。但目前尚未见量化研究 EMCCD 对光谱成像系统信噪比影响的相关报道。如何最大化的发挥 EMCCD 技术的优势, 对低照度成像光谱探测有着十分重要的现实意义。

本文分析了基于 EMCCD 的 AOTF 成像光谱仪的系统噪声, 推导了普通模式和电子倍增模式下的信噪比模型, 并利用已研制的原理样机进行了信噪比计算和验证。在此基础上, 提出了电子倍增模式下系统动态范围的计算方法和最佳工作模式的定量化选择方法。

1 基于 EMCCD 的 AOTF 成像光谱仪噪声分析

信噪比(SNR)是成像光谱仪的一个重要参数, 信噪比的计算一般采用两种方式: 比探测率法和等效电子数法。由于后者更适合面阵 CCD 系统, 本文采用等效电子数法分析系统噪声, 建立 AOTF 成像光谱仪的信噪比计算模型。

1.1 系统噪声的相关性

一般认为成像光谱信号中的噪声是不相关的, 但 Roger 发现 AVIRIS 中的噪声在像素间存在相关性^[10]。由于系统噪声跟成像原理和器件类型息息相关, 不同类型系统的噪声相

收稿日期: 2012-05-04, 修订日期: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61177008, 61107013)资助

作者简介: 赵慧洁, 女, 1966 年生, 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院教授 e-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: chengxuan2002@163.com

相关性需要单独分析。本文采用“去相关法”^[11]对已研制的 AOTF 光谱成像仪的数据进行噪声提取,并采用相关系数法对噪声分布的相关性进行评价。图 1 为其中 100×100 像元区域数据噪声的相关系数图。图中显示,除了同一像元的自

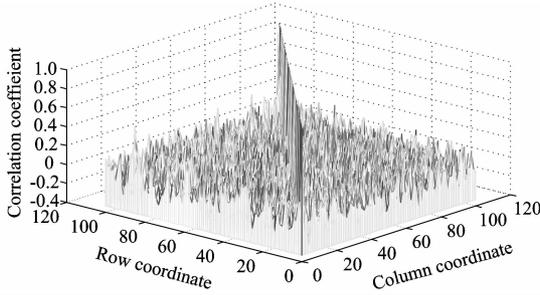


Fig. 1 Correlation coefficient diagram of the noise

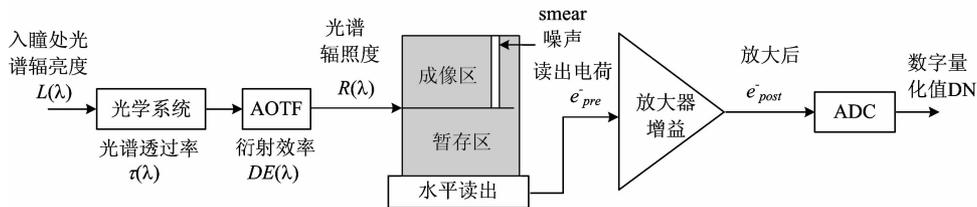


Fig. 2 Principle of photoelectric conversion in AOTF imaging spectrometer

光谱数据噪声属于系统噪声,在辐射传输过程中伴随着光谱信号的产生而出现。理想情况下,成像光谱仪的目标辐射可用入瞳处的光谱辐亮度值和仪器参数计算得到。AOTF 成像光谱仪属于凝视型,每个像元能够独立的获取成像光谱的强度,其像面光谱辐照度的分析和色散型一致。中心波长为 λ , 光谱带宽为 $\Delta\lambda$ 的波段中入射到探测器焦面上的目标辐射的光电子数 $S_p(\lambda)$ 可由下式计算得到

$$S_p(\lambda) = \frac{\pi t_{int} A_d \lambda}{4hc (f\#)^2} \int_{\lambda-\frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda+\frac{\Delta\lambda}{2}} L(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) DE(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中, A_d 为 CCD 像元面积, $f\#$ 为光学系统 f 数, t_{int} 为积分时间, $L(\lambda)$ 为入瞳处光谱辐亮度, $\tau(\lambda)$ 为系统透过率, $\eta(\lambda)$ 为 CCD 量子效率, $DE(\lambda)$ 为 AOTF 衍射效率, h 为普朗克常数, c 为光速。 $\Delta\lambda$ 较小时,式(1)中的积分形式可用乘积代替。

由于入射光子产生的光电流具有不确定性,会在光谱数据中加入光子噪声。该噪声属于散粒噪声,服从泊松分布。光子噪声和 CCD 暗电流噪声均属于散粒噪声,且二者间相互独立,可以将二者合并,设由光电流 I 引入的光子散粒噪声为 i_s^2 ,并转换为等效电子数 N_s ,如下

$$i_s^2 = 2e[I + I_{dark}] \Delta f \quad (2)$$

式中, i_{shot} 表示引入的光子噪声有效值, e 为电子电荷数, Δf 为系统的噪声等效带宽。 Δf 与 t_{int} 满足如下关系^[7]

$$\Delta f = \frac{1}{2t_{int}} \quad (3)$$

令 S_I 为探测器产生的总信号电子数, N_s 可表示为

$$N_s = \sqrt{\frac{t_{int}}{e} (I + I_{dark})} = \sqrt{S_p + S_d} = \sqrt{S_I} \quad (4)$$

光子噪声是目标辐射通过光学系统时引起的,当目标光

相关系数为 1 外,其余点的互相关系数均在零值附近,均值为 0.017 1,说明像元间的噪声不存在相关性,可以独立分析。

EMCCD 同时具备普通读出寄存器和倍增寄存器,具有普通和电子倍增两种读出模式,在噪声分析中将分别讨论。由于像元间的噪声不存在相关性,噪声分析只考虑时域噪声,仪器的空域噪声可通过非均匀校正消除^[12]。

1.2 普通模式下的噪声分析

图 2 为 AOTF 成像光谱仪光电转换原理图,可以将系统噪声分为常规 CCD 噪声和辐射传输中引入的光谱数据噪声两类。CCD 噪声主要指器件工作中产生的噪声,包括:暗电流噪声 N_d 、复位噪声 N_{KTC} 、读出噪声 N_R 以及 ADC 过程中的量化噪声 N_Q 等。CCD 噪声分析已有较多的研究^[13],此处不再赘述。

谱信号在 CCD 上形成光谱图像时,受 smear 效应影响,将产生拖尾噪声叠加在光谱图像上。虽然帧转移型 CCD 的 smear 效应很弱,但在 t_{int} 较小时,该现象仍然不可忽略,并且有

$$N_{smear}(i) = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ \sum_{k=1}^{i-1} \frac{t_{tr}}{t_{int}} N k I_k & 2 \leq i \leq N \end{cases} \quad (5)$$

其中, $N_{smear}(i)$ 表示 CCD 第 i 行像元的拖尾噪声, N 为行数, I_k 为第 k 行像元的光谱信号强度, t_{tr} 为垂直帧转移时间, t_{int} 为积分时间。

1.3 普通模式下的信噪比模型

根据上述分析可以得到系统噪声总的等效电子数。由于系统输出为 AD 变换后的量化值,用 A 表示系统增益,将噪声的等效电子数进行转换,量纲为 $e^- \cdot ADU^{-1}$,此时总噪声 N_{AOTF} 表示为

$$N_{AOTF} = \sqrt{A^{-2} [N_s^2 (S_I) + N_R^2 + N_{KTC}^2 + N_{smear}^2(i)] + N_Q^2} \quad (6)$$

对于波段 λ ,系统的信噪比可以表示为

$$SNR(\lambda) = \frac{A^{-2} S_p(\lambda)}{N_{AOTF}} = \frac{A^{-2} S_p(\lambda)}{\sqrt{A^{-2} [N_s^2 (S_I) + N_R^2 + N_{KTC}^2 + N_{smear}^2(i)] + N_Q^2}} \quad (7)$$

1.4 电子倍增模式下的噪声源分析

电子倍增 CCD 的噪声分析已有一些研究成果^[14],但主要面向噪声机理分析。针对 AOTF 成像光谱仪的噪声特点,讨论电子倍增机制引入的新噪声源及对原有噪声源的影响,获得了电子倍增模式下系统噪声的解析表达式。

(1) 额外噪声因子

电子倍增过程中碰撞电离出的新电荷数具有随机性,这

种增益的不确定性引入新的噪声源,采用额外噪声因子 F 表征。Robbins 等^[15]推导了 F 与倍增增益 g 以及倍增寄存器 N 之间的数值计算关系,如下

$$F = \sqrt{2(g-1)g^{-((N+1)/N)} + \frac{1}{g}} \quad (8)$$

但该方法基于一个近似:倍增电荷服从二项式分布,单次倍增发生概率 p 在所有倍增级数中保持不变。而实际的碰撞电离过程存在“反馈效应”^[16],当光生电荷达到一定程度时, p 值会有所降低。同时,不同 CCD 芯片的反馈效应也有所不同。因此,令 $F=\sqrt{2}$ 的简化并不准确,需要结合倍增噪

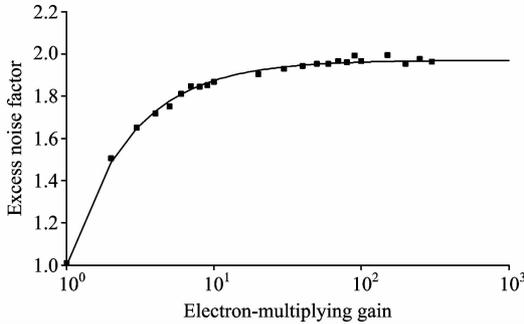


Fig. 3 Measurement and estimation of the F^2

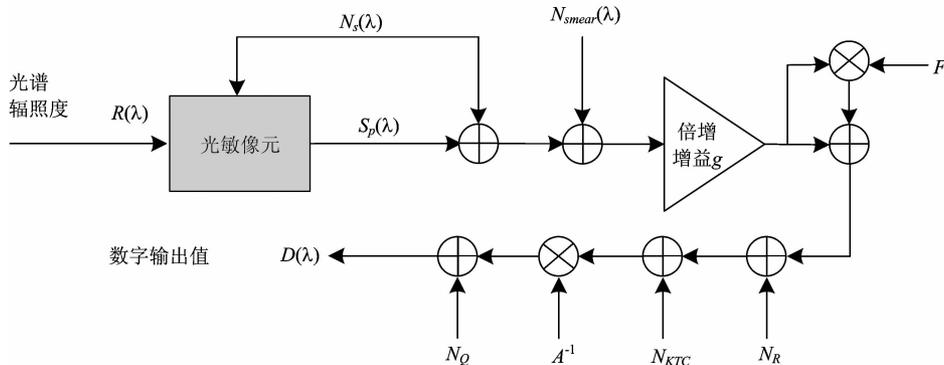


Fig. 4 Mathematical model of the system in EM mode

由于 EMCCD 中普通移位寄存器和倍增寄存器间的势阱容量差别较大,考虑到系统的动态范围,模型中还应加入对入射光电子数的限制,设普通移位寄存器的势阱容量为 FW ,倍增寄存器的势阱容量为 FW_{EM} ,实际系统的信噪比写为

$$SNR_{EM}(\lambda) = \frac{S_p(\lambda)}{\sqrt{F^2(N_s^2(S_1) + N_{smear}^2(S_1)) + \frac{N_R^2 + N_{KTC}^2}{g^2} + \frac{A^2 N_Q^2}{g^2}}} \quad (11)$$

$$S_p(\lambda) \leq \min\left\{\frac{FW_{EM}}{g}, FW\right\}$$

2 信噪比理论计算

以研制的原理样机为例计算信噪比。样机的谱段为 460~780 nm,光谱带宽为 2~6 nm,探测器为 e2v 公司的 CCD97 帧转移 EMCCD。为了减少暗电流,采用四级半导体

声的测量加以修正。

通过测量得到 g 对应的 F 值,以式(8)为拟合函数,采用 Levenberg-Marquardt 算法进行曲线拟合,得到 N 与 g 的对应关系,图 3 为拟合结果。此时 p 可用 1.1% 简化代替,如下

$$g = (1 + 0.011)^N \quad (9)$$

(2) 时钟感生电荷噪声

时钟感生电荷是电荷转移特别是垂直转移过程中产生的伪电荷。该噪声不受工作温度和积分时间的影响,相比于倍增噪声影响很小,实际计算中可以忽略。

(3) 对原有噪声的影响

倍增噪声的存在使得经过倍增区域后的光谱图光子噪声、smear 噪声以及暗电流噪声被放大,跟额外噪声因子满足乘性关系。读出噪声、复位噪声以及量化噪声的等效输出变为原有噪声与倍增增益的比值。

1.4.1 电子倍增模式下信噪比模型

结合电子倍增过程对系统噪声的影响,得到电子倍增模式下的信噪比模型。设第 j 行像元光谱信号的数字输出值为 $D(j, \lambda)$, λ 为波段,可得

$$D(j, \lambda) = \{[S_p(\lambda) + N_s(\lambda) + N_{smear}(\lambda)]g\}(1 + F) + N_R + N_{KTC}A^{-1} + N_Q \quad (10)$$

式(10)所描述的系统模型如图 4 所示。

制冷器, CCD 焦面温度降至 -70°C ,暗电流电子数 $N_d = 0.0024 \text{ e}^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 。普通模式下,读出噪声 N_R 为 $10.38 \text{ e}^- \text{ rms} \cdot \text{pixel}^{-1}$,满阱容量 20 ke^- ,系统增益 A 为 $4.08 \text{ e}^- \cdot (\text{ADU})^{-1}$,垂直帧转移时间 $t_{tr} = 153.6 \mu\text{s}$,读出时间 $t_{rd} = 57.8 \text{ ms}$ 。电子倍增模式下, N_R 增大为 $27.82 \text{ e}^- \text{ rms} \cdot \text{pixel}^{-1}$,满阱容量 900 ke^- ,系统增益 A 为 $12.35 \text{ e}^- \cdot (\text{ADU})^{-1}$ 。倍增增益选择了 $g=4$ 和 $g=10$,比较其对信噪比的影响。

信噪比计算时,利用积分球产生稳定均匀的面光源,将仪器入瞳处光谱辐亮度数据、光学系统以及探测器相关参数作为输入,选取了分布在工作光谱范围内的 17 个波段进行信噪比计算。图 5 和图 6 分别为普通模式和电子倍增模式下的信噪比曲线。实验对积分时间 t_{int} 分别为 300 和 3 ms,像元行数分别为 10, 250 和 512 行的结果进行了比对,垂直行转移时间 t_{tr}/N 跟 t_{int} 的比值越小,不同行间信噪比差异越小。受倍增噪声及倍增增益的影响,当 $t_{int} = 300 \text{ ms}$ 时, $g=10$ 的

信噪比在整个波段范围内均高于 $g=4$ 时, 而当 $t_{int}=3$ ms 时则出现了相反的结果。可见, 入射目标的光谱强度及倍增增

益的大小对系统信噪比有着明显的影响。

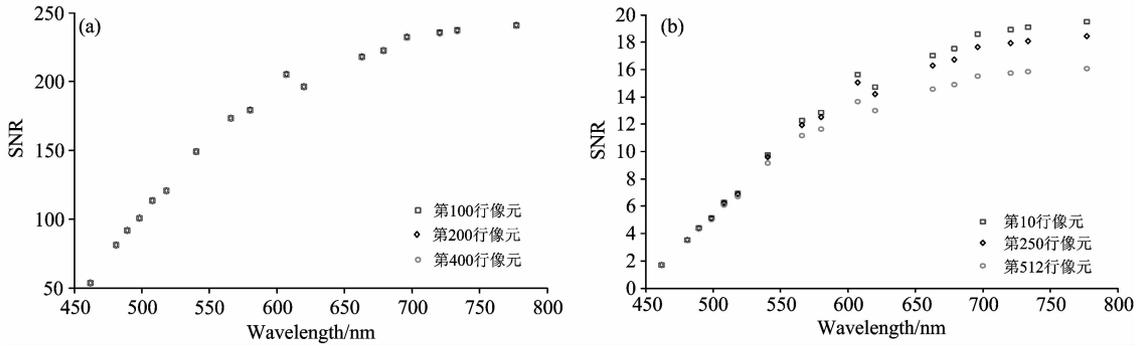


Fig. 5 Theoretic SNR curve in normal mode

(a): SNR curve with $t_{int}=300$ ms; (b): SNR curve with $t_{int}=3$ ms

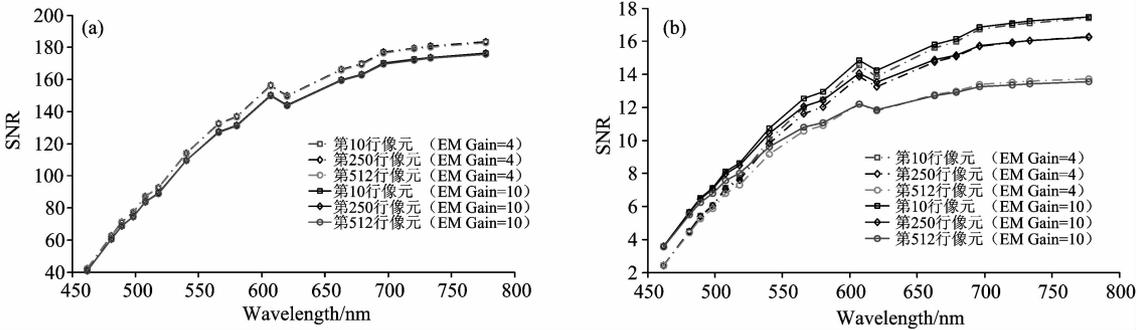


Fig. 6 Theoretic SNR curve in EM mode

(a): SNR curve with $t_{int}=300$ ms; (b): SNR curve with $t_{int}=3$ ms

3 信噪比的实测验证

为了验证理论模型的正确性, 利用相同光源进行了仪器信噪比测量。合理放置成像光谱仪, 使得积分球出口光充满仪器视场, 调节积分球亮度, 达到跟理论计算一致的光谱辐亮度。各波段重复采集 100 幅图像, 以像元的平均灰度值作为仪器的光谱响应值 $\bar{S}(j, \lambda)$, 各像元灰度值的均方根 $N(j, \lambda)$ 作为总噪声, 按照式 (12) 得到实际测量值。式中, j 为 CCD 像元行数, λ 为波长。

$$SNR(j, \lambda) = \frac{\bar{S}(j, \lambda)}{N(j, \lambda)} = \frac{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{i=100} S_i(j, \lambda)}{\sqrt{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{i=100} [S_i(j, \lambda) - \bar{S}(j, \lambda)]^2}} \quad (12)$$

图 7 为 SNR 理论值和实测值的对比图, 两种模式下二者信噪比曲线均基本吻合。图 8 为理论值与实测值之间的误差散点图, 17 个波长中, 普通模式下的相对误差为 0.4%~8.7%, 平均误差为 4.32%, 电子倍增模式下的相对误差为 0.9%~11.2%, 平均误差为 4.93%。该误差主要由系统各参数的实测误差累计引入, 包括倍增增益、额外噪声因子等

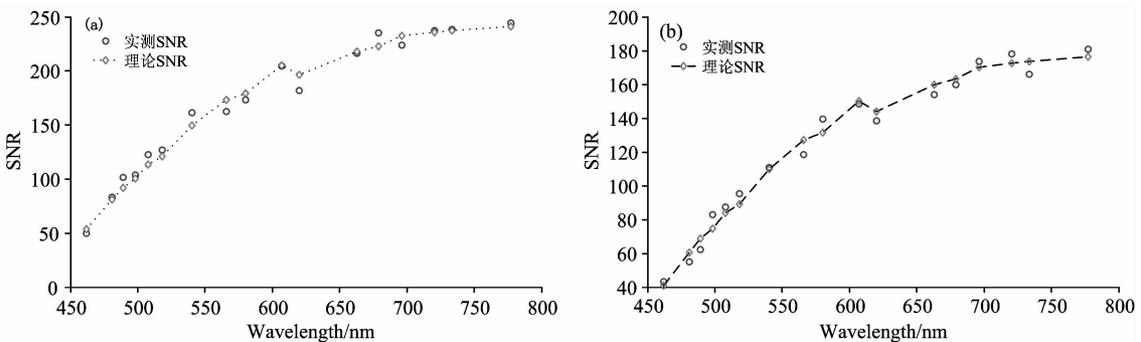


Fig. 7 SNR comparison of theoretic calculation versus experimental result

(a): Normal mode; (b): EM mode

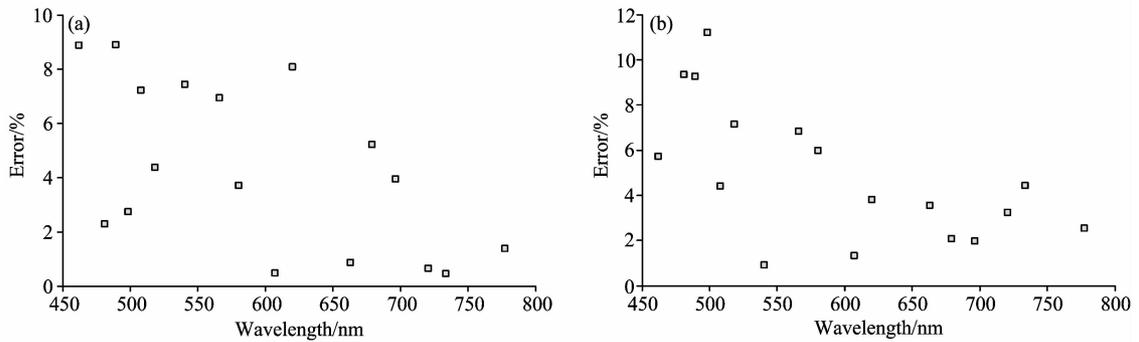


Fig. 8 Differences of theoretic calculation versus experimental results

(a): Normal mode; (b): EM mode

的测量误差及 AOTF 衍射效率和光谱辐亮度数据进行插值运算引入的数值计算误差等。由于平均误差小于 5%，最大误差小于 12%，该误差可以接受，能够验证系统噪声模型和理论信噪比模型的正确性。

4 电子倍增 CCD 探测器工作模式的合理选择

4.1 电子倍增模式下的系统动态范围计算

动态范围是成像光谱仪的重要的参数，探测器的可探测动态范围是制约系统动态范围的主要因素。普通模式下，探测器的可探测动态范围定义为最大的可探测信号跟探测器本底噪声之比。然而在电子倍增模式下，受入射光强度和倍增增益的影响，本底噪声中的读出噪声并非一直占主导，并且两种读出寄存器的势阱容量差别较大，该定义不太适用。本文引入 Hoslt 等^[17]提出的“实际动态范围”的概念，将电子倍增模式下 $SNR=1$ 时的光电子数作为本底噪声的等效值，令 $\alpha = FW_{EM}/FW$ 表示倍增寄存器和普通转移寄存器势阱容量之比，以 α 为阈值计算电子倍增模式下系统动态范围 DR_{EM} ，计算方法如下

$$DR_{EM} = \begin{cases} \frac{FW}{S_{SNR=1}} & 1 \leq g \leq \alpha \\ \frac{1}{g} \frac{FW_{EM}}{S_{SNR=1}} & g > \alpha \end{cases} \quad (13)$$

式中， $S_{SNR=1}$ 为信噪比 $SNR = 1$ 时的光电子数，利用式 (11)，并忽略系统中影响很小的噪声源 S_{dark} 和 S_{smear} 可以得到 $S_{SNR=1}$ 的计算式

$$S_{SNR=1} \approx \frac{F^2}{2} + \sqrt{\frac{F^4}{4} + \frac{1}{g^2}(N_k^2 + N_{kTC}^2 + A^2 N_Q^2)} \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (13) 中得到电子倍增模式下系统动态范围的表达式

$$DR_{EM} = \begin{cases} \frac{FW}{\frac{F^2}{2} + \sqrt{\frac{F^4}{4} + \frac{1}{g^2}(N_k^2 + N_{kTC}^2 + A^2 N_Q^2)}} & 1 \leq g \leq \alpha \\ \frac{FW_{EM}}{\frac{gF^2}{2} + \sqrt{\frac{g^2 F^4}{4} + N_k^2 + N_{kTC}^2 + A^2 N_Q^2}} & g > \alpha \end{cases} \quad (15)$$

根据式 (15) 的表述，当 $1 \leq g \leq \alpha$ 时，倍增增益 g 的增加会提高系统的动态范围，而在 $g > \alpha$ 时动态范围反而会大大降低。图 9 为电子倍增模式下系统的可探测动态范围曲线，可以看出，在 $g \leq 4$ 时，可测动态范围随着 g 的增大而升高，当 $g > 4$ 时则相反。在实际应用中，应根据动态范围的设计指标合理的选择倍增增益，在条件允许的情况下尽可能的选择较低的倍增增益。

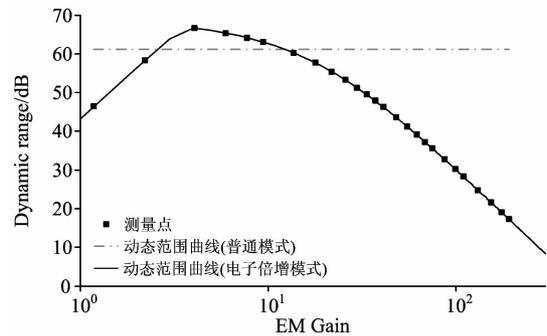


Fig. 9 Dynamic range curve of the system

4.2 工作模式的选择

在信噪比分析的基础上，利用信噪比模型计算出原理样机信噪比随入瞳处光谱辐亮度值的变化，图 10 为 467.1 nm 处和 508 nm 处的变化曲线。可以看出，随着目标光谱辐亮度值的增大，相比于普通模式，电子倍增模式下的信噪比呈现先大后小的趋势，这与电子倍增的机理吻合。因此，可以利用两种模式信噪比相等时的入瞳处光谱辐亮度值 $L_0(\lambda)$ 作为判据，当 $L(\lambda) < L_0(\lambda)$ 时选择电子倍增模式，当 $L(\lambda) > L_0(\lambda)$ 时则选择普通模式。AOTF 成像光谱仪不同波段间的辐射灵敏度存在较大差异，不同波段 λ 下的 $L_0(\lambda)$ 差别较大，图 11 显示了原理样机在不同波段所选 $L_0(\lambda)$ 的差别。该差别表明，在低照度条件下工作模式的选择十分重要，能够在一定程度上改善波段间辐射灵敏度的失配，提高仪器的信噪比。

系统选用电子倍增工作模式时还需确定倍增增益 g 。从图 10 中不同增益下的信噪比曲线可以发现，在电子倍增模式区间中，当增益 $g > 10$ 时，信噪比变化很小，而从前文的分析可知，当 $g > \alpha$ 时，系统的可探测动态范围会逐渐降低，

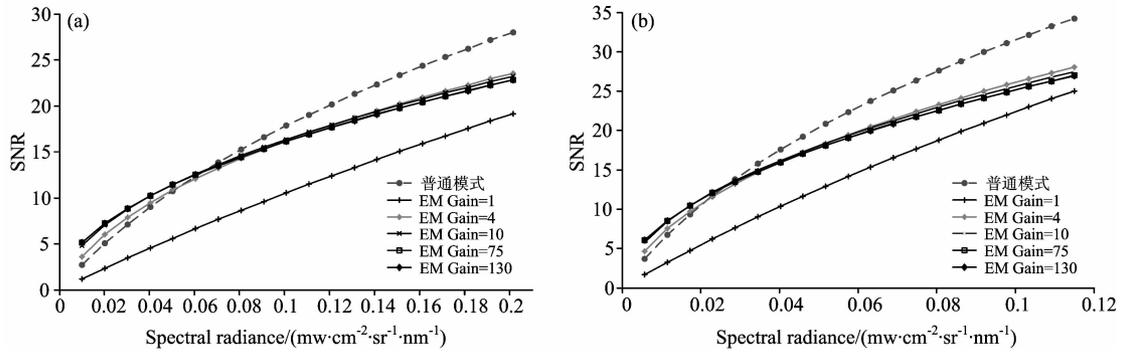


Fig. 10 SNR curves with spectral radiance of object

(a): 467.1 nm band; (b): 508 nm band

为防止数据局部过饱和, 可以根据仪器动态范围的需求设计 g 的上限。

利用本文提出的工作模式选择方法, 采用原理样机进行了实验验证。选用低照度的钨灯作为环境光, 并假设电子倍增模式下系统的动态范围不低于 30 dB, 根据图 9 的结果选取倍增增益 $g=100$ 。图 12 为两种工作模式下不同波段的光谱图像, 图 13 为图中绿叶的信噪比计算结果。可以看出, 518 nm 之前的波段选择电子倍增模式, 之后的波段选择普通模式可使系统性能达到最佳。电子倍增模式的使用使得前端的数据质量有了明显的提高, 信噪比提高了约 1 倍, 有效补偿了波段间的辐射响应差异。

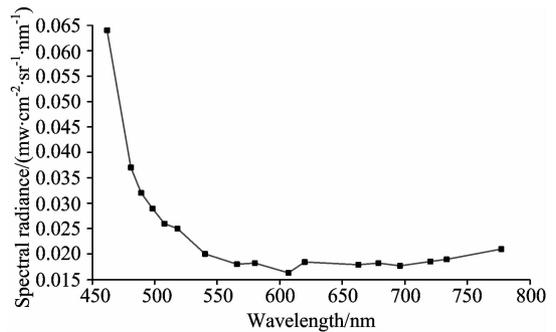


Fig. 11 Optimum operation mode of the prototype

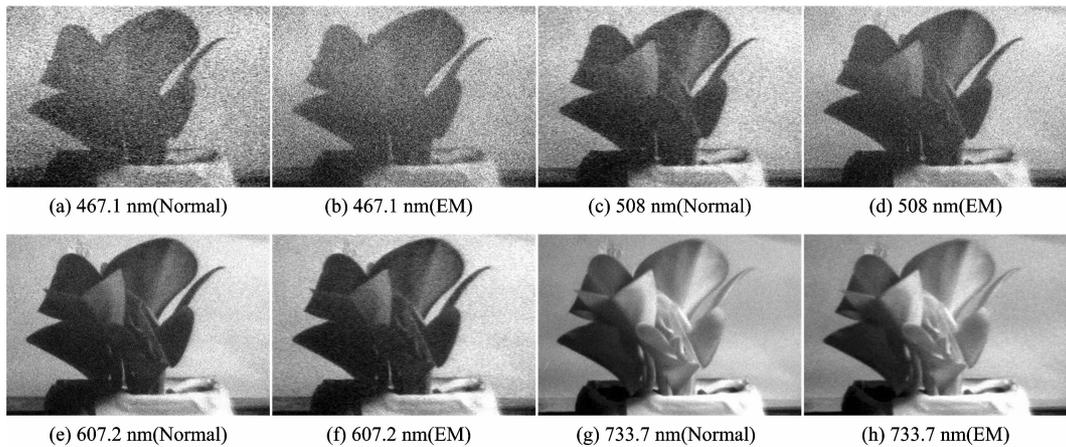


Fig. 12 Spectral images of several bands in experiment

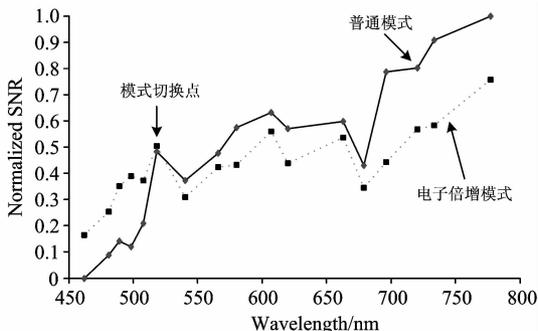


Fig. 13 Contribution of optimum operation mode to improvement of SNR

5 结论

深入分析了基于 EMCCD 的 AOTF 成像光谱仪在普通和电子倍增模式下的仪器噪声, 推导出两种模式下的信噪比模型, 实验验证结果与理论计算基本吻合, 最大误差约为 11.2%, 证明了信噪比模型的正确性。通过建立电子倍增模式下系统动态范围的评价方法, 设计了以入瞳光谱辐亮度为阈值的探测器工作模式选择方法, 确定了模式的最佳切换点和倍增增益的选择依据, 有效提高了低照度条件下的信噪比, 为 EMCCD 技术在 AOTF 成像光谱仪中的应用提供了理论依据, 对其他分光原理系统也有借鉴意义。

References

- [1] David A Glenar, Diana L Blaney, John J Hillman. *Acta Astronautica*, 2003, 52: 389.
- [2] Joan Vila, Javier Calpe, Filiberto Pla, et al. *Real-Time Imaging*, 2005, 11: 85.
- [3] Inoue Y, Penuelas J. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3883.
- [4] Tong Qingxi, Xue Yongqi, Wang Jinnian, et al. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14: 409.
- [5] CHANG Ling-ying, ZHAO Bao-chang, QIU Yue-hong(常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2010, 30(10): 3021.
- [6] ZHAO Hui-jie, ZHOU Peng-wei, ZHANG Ying(赵慧洁, 周鹏威, 张颖). *Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程)*, 2009, 38(2): 189.
- [7] WANG Jian-yu, WANG Yue-ming, LI Chun-lai, et al(王建宇, 王跃明, 李春来, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2010, 14(4): 614.
- [8] Bosoon Park, Sangdae Lee, Seung-Chul Yoon, et al. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8027: 07.
- [9] Hernandez-Palacios J, Randeberg L L. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8215: 82150Q.
- [10] Roger R E, Amold J F. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17: 1951.
- [11] Eklum L R. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 15: 2955.
- [12] Joan Vila-Francés, Javier Calpe-Maravilla, Luis Gómez-Chova, et al. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(4): 85.
- [13] Kenji Irie, Alan E McKinnon, Keith Unsworth, et al. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, 18(2): 280.
- [14] ZHANG Wen-wen, CHEN Qian(张闻文, 陈钱). *Optics and Precision Engineering(光学精密工程)*, 2008, 16: 1977.
- [15] Robbins M S, Hadwen B J. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2003, 50(5): 1227.
- [16] Jaroslav Hynccek, Takahiro Nishiwaki. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, 50(1): 239.
- [17] Gerald C. JCD Publishing, Winter Park, FL 2003. 105.

Analysis of the Noise and Signal-to-Noise of AOTF Imaging Spectrometer Based on EMCCD

ZHAO Hui-jie, CHENG Xuan* , ZHANG Ying, LI Chong-chong

Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract Imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter (AOTF) is a novel hyperspectral imaging system. In order to rectify the non-uniformity of radiation sensitivity on different waveband, especially the low signal-to-noise (SNR) in low-light conditions, the electron-multiplying CCD (EMCCD) sensor was proposed. The noise of AOTF imaging spectrometer was analyzed in both normal and EM modes of the CCD sensor with derived SNR calculating model which has been experimentally validated. On that basis, a new evaluation method of the dynamic range in EM mode and a novel method of calculating spectral radiance at the entrance aperture were adopted. The experimental result shows that the theoretic SNR models are fit, and better selection of EM mode is effective to improve the SNR and non-uniformity of radiation sensitivity in low light level conditions.

Keywords AOTF imaging spectrometer; EMCCD; Noise; Signal-to-noise (SNR); EM mode

(Received May 4, 2012; accepted Aug. 20, 2012)

* Corresponding author