

高灵敏度 APS CMOS 图像传感器光谱探测技术研究

郎均慰^{1,2} 王跃明¹ 王建宇¹

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术与系统实验室, 上海 200083)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 主动像元型(APS)互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器的成像性能已经接近电荷耦合器件(CCD)的成像性能,在光谱成像领域有很好的应用前景。讨论了 CMOS 器件用于光谱探测的若干问题,建立了光谱成像系统的噪声模型并进行了实际噪声测试,分析了基于 CMOS 探测器的成像光谱仪的灵敏度水平;结合 CMOS 器件的结构和特性给出了图像的校正方法。搭建了包括光学、电子学的完整光谱成像系统,进行了光谱成像试验,验证了灵敏度分析和光谱校正方法。结果表明,CMOS 探测器可以满足高光谱成像的灵敏度要求,可用于高光谱探测。

关键词 遥感;成像光谱仪;主动像元型互补金属氧化物半导体;光谱探测;灵敏度

中图分类号 TP732 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0711003

Applications of High Sensitivity APS CMOS Sensors for Imaging Spectrometers

Lang Junwei^{1,2} Wang Yueming¹ Wang Jianyu¹

(¹ Laboratory of Space Active Electro-Optical Technology and System, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

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

Abstract Active pixel sensor (APS) complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) sensors have performances competitive with charge coupled device (CCD). A number of potential advantages bring it a good prospect of application hyper-spectral imagery area. Several issues about applications of CMOS sensor for imaging spectrometers are discussed. Noise model is built and sensitivity performance of hyper-spectral imagers using CMOS sensors is analyzed. Spectral image calibration method is proposed based on the structure and features of CMOS detectors. Spectral imaging system including electronics and optics is formed, and analyses are proved by imaging experiment. Results show that CMOS sensors can meet the sensitivity requirement of hyper-spectral imagers and are available for hyper-spectral applications.

Key words remote sensing; hyper-spectral imager; active pixel sensor complementary metal-oxide-semiconductor; imaging spectrometer; sensitivity

OCIS codes 110.4234; 280.4788; 280.4991; 040.6040

1 引言

星载高光谱成像技术是一种有效的对地探测手段,目前已日趋成熟。地球科学、环境监测和灾害应急响应等领域对高光谱成像仪的空间分辨率、幅宽和灵敏度提出了越来越高的要求,这也是成像光谱仪的发展趋势。其空间分辨率从 EO-1 卫星载荷

Hyperion 的 30 m,发展到 CHRIS 的 18 m;幅宽也由最初的不到 10 km 发展到现在普遍的几十千米^[1,2]。研制高分辨率成像光谱仪,需要大面阵、高帧频探测器。对于可见近红外(0.4~1.0 μm)波段,电荷耦合器件(CCD)一直以其优良的性能作为设计首选,并且随着设计、工艺的改进,其综合性能也在

收稿日期: 2012-02-04; 收到修改稿日期: 2012-03-07

作者简介: 郎均慰(1986—),男,博士研究生,主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: jwlang@126.com

导师简介: 王建宇(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光电科学方面的研究。

E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

逐步提高。然而随着面阵规模和帧频的日渐增大, CCD探测器的成本激增, 功耗增大, 噪声性能也受到制约。例如 Sarnoff 公司 2009 年研制了一款规模为 $2048 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 、最高帧频为 1000 fram/s 的 CCD 探测器, 其噪声水平约为 $60e^{-[3]}$, 由于该 CCD 器件功耗大, 需要固定在 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的散热片上。

近年来, 互补型金属氧化物半导体 (CMOS) 图像传感器在设计和工艺上都取得了长足的进步, 特别是主动像元型 (APS) CMOS 探测器, 其成像性能已越来越接近 CCD 器件。由于具有功耗低、轻小、可靠性高以及可利用多斜积分增加动态范围等优点, APS CMOS 探测器已逐步应用于星载遥感设备。计划于近年发射的欧空局环境和安全监测卫星 Sentinel-2 的多光谱相机以及海洋气象卫星 COMS 的成像设备就选用了法国 Toulouse 大学研制的 CMOS 图像传感器^[4]。

在高光谱成像应用中, CMOS 探测器的结构不会产生拖尾现象, 且易实现大规模面阵, 其灵活的开窗功能还能进一步提高帧频, 这使得 CMOS 器件在高光谱成像领域替代 CCD 成为可能。

现在国外多家公司研制了性能优异的科学级 CMOS 探测器, 如 Cypress 公司的 LUPA 系列、STAR 系列, 很多性能都接近同类 CCD 探测器。英国 E2V 公司正在研制专门用于光谱成像的 CMOS 探测器, 面阵规模为 $1024 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 最大帧频为 250 frame/s , 读出噪声仅有 $15e^{-}$, 支持光谱维选进行读出^[5]。

分析了成像光谱仪的灵敏度需求, 给出了 CMOS 器件光谱成像试验方法及分析, 提出了应用中一些问题的解决途径, 为发展基于 CMOS 器件的高光谱成像仪提供了一定参考价值。

2 CMOS 光谱成像系统灵敏度分析

高分辨率高光谱观测, 特别是星载高分辨率成像光谱仪, 像元驻留时间短, 且经过精细分光后, 到达探测器表面的能量非常微弱, 这对仪器的灵敏度提出了很高的要求。

2.1 灵敏度计算模型

高光谱成像系统的灵敏度通常用信噪比 (SNR) 来表示, 即信号电子数与等效噪声电子数之比

$$R_{\text{SN}} = \frac{N_e}{N_{\text{total}}}, \quad (1)$$

式中为 N_e 总信号电子数, N_{total} 为噪声总电子数。

信号电子数即一个积分周期内每个像元的光生电子数目。目前高光谱成像主要用于可见-近红外波段和短波红外波段, 这个波段范围内的成像原理为太阳光反射成像, 因此 SNR 的计算可以概括为^[6]

$$R_{\text{SN}} = \frac{d^2 T_{\text{int}} \sin^2 \theta}{4F^2 hc N_{\text{total}}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \rho(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中 d 为像元尺寸, T_{int} 为积分时间, θ 为太阳高度角, $\rho(\lambda)$ 为光谱地表反照率, $E(\lambda)$ 为太阳辐射在地面的光谱辐射照度, h 为普朗克常量, c 为光速, $\tau_a(\lambda)$ 为大气光谱透射率, $\tau_o(\lambda)$ 为总光学效率, $\eta(\lambda)$ 为探测器量子效率 (QE)。

系统的噪声源可分为光子噪声、探测器噪声和电子学噪声等。光子噪声是由入射光信号引入的一种散粒噪声, 太阳辐射光子满足泊松分布, 光子噪声为光生电子数的平方根。探测器中产生的总噪声 (均方根值) 用探测器总噪声等效电子数 N_{detector} 表示, 后端电子学噪声 (均方根值) 等效电子数用 $N_{\text{electronics}}$ 表示。这三种噪声互不相关, 系统总噪声 N_{total} 为

$$N_{\text{total}} = \sqrt{N_e + N_{\text{detector}}^2 + N_{\text{electronics}}^2}. \quad (3)$$

则 SNR 可以表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{N_e}{\sqrt{N_e + N_{\text{detector}}^2 + N_{\text{electronics}}^2}}. \quad (4)$$

光子噪声的产生是无法人为抑制的, 因此根据 (4) 式, SNR 的极限为 $\sqrt{N_e}$ 。要使用 CMOS 探测器满足高光谱成像的灵敏度要求, 探测器本身以及与之相连的电子学系统就需要保证足够低的噪声, 尽量使得光子噪声成为总噪声的主要部分, 从而使 SNR 接近 $\sqrt{N_e}$ 。

2.2 典型条件下灵敏度计算与分析

以某星载高分辨率成像光谱仪为例, 其参数如表 1 所示。

表 1 灵敏度计算条件

Table 1 Conditions of sensitivity calculation

Parameter	Value
QE	0.65
F number	5
Pixel size	$30 \mu\text{m}$
Spectral range	$0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$
Spectral resolution	5 nm, 120 bands
Altitude	500 km
Spatial resolution	16 m

假设太阳天顶角(SZA)为 30° , 地表反照率为 0.3, 大气、镜头和光谱仪总平均效率为 0.5, 则根据仪器参数以及(2)式和(3)式, 可以算出在不同探测器噪声和电子学噪声的情况下, 系统平均 SNR 的情况如表 2 所示。

表 2 典型条件下的 SNR 计算

Table 2 SNR calculations under typical condition

Average shot noise	Noise of detector	Noise of electronic circuit	Average SNR
$197e^-$	$150e^-$	$150e^-$	134
$197e^-$	$70e^-$	$20e^-$	184

在之前假设的情况下, 探测器单个像元平均产生的信号电子数大约在 4×10^4 个。可以看出, 如果探测器和电子学的噪声电子数能够控制在数十个以内, 光子噪声将成为仪器的主要噪声, 从而使 SNR 接近 $\sqrt{N_e}$ 。

如果光谱间隔拓宽一些, 光学和分光效率可得到提高, 有效信号电子数将会更多, 系统平均 SNR 可以达到 200~300。

2.3 CMOS 探测器及电子学噪声水平

中国科学院上海技术物理研究所于 2010 年研制了一款带相关双取样电路(CDS)的 APS CMOS 探测器, 其主要参数如表 3 所示。

表 3 探测器主要参数

Table 3 Main parameters of the detector

Parameter	Value
Pixel type	3T APS
Pixel size	$25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$
Array size	512×512
Spectral range	400~1000 nm
QE multiply by fill factor	Max 40%, Avg more than 25%
Full well capacity	$7 \times 10^5 e^-$
Conversion gain	Low: $1.9 \mu\text{V}/e^-$ High: $7.6 \mu\text{V}/e^-$
Consumption	$< 100 \text{ mW}$

设计了一套与之匹配的电子学系统, 进行探测器驱动及数据采集(14 bit 量化)。经测试, 探测器和电子学的噪声水平如表 4 所示, 表内噪声为均方根值。

在大增益条件下, 信号混入的电子学噪声以及一些探测器读出噪声等效到探测器输入端的噪声电子数要比小增益时减少很多。此时探测器等效噪声电子数为 $67e^-$, 电子学等效噪声电子数为 $22e^-$ 。根据表 2 的计算可以看出, 就噪声水平来说, CMOS 探测器及电子学可以满足高分辨率光谱成像的需求。而 $67e^-$ 的探测器噪声电子数还有很大改进的余地。

表 4 噪声测试

Table 4 Noise test

Parameter	Low gain	High gain
Conversion gain / ($\mu\text{V}/e^-$)	1.9	7.6
Total noise (DN)	2.8	5.9
Electronic circuit noise (DN)	1.8	1.8
Detector noise (DN)	2.4	5.7
Detector noise voltage / mV	0.23	0.53
Electronic circuit noise electrons	$82e^-$	$22e^-$
Detector noise electrons	$110e^-$	$67e^-$

目前 APS CMOS 传感器的平均 QE 大多为 60%~70%, 但由于在每个像素内集成了主动像元读出环节, 因此填充因子(FF)较低, 限制了系统灵敏度性能。本文所用的探测器 FF 只有 50%左右, 使得探测器等效 QE 降低了一半。采用更细致的半导体工艺, 读出电路占用的像元面积可以进一步减小, 对于 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 见方的像元, APS 像素的 FF 可以达到 90%以上。如果能运用层级式或背照式工艺, FF 可以提升到 100%, 这样系统的灵敏度可以进一步提高。

3 图像校正与处理

3.1 非均匀性分析与校正

CMOS 探测器的非均匀性与 CCD 器件有相似之处, 但内部结构的差异也带来了非均匀性的不同。

图 1 为面阵 CMOS 探测器工作框图, CMOS 面阵探测器的读出分为像元读出、相关双采样(CDS)、列放大和移位读出几个部分。

在像元读出环节, 各个光敏二极管的性能差异会带来响应的非均匀性, 表现为图像灰度值的随机

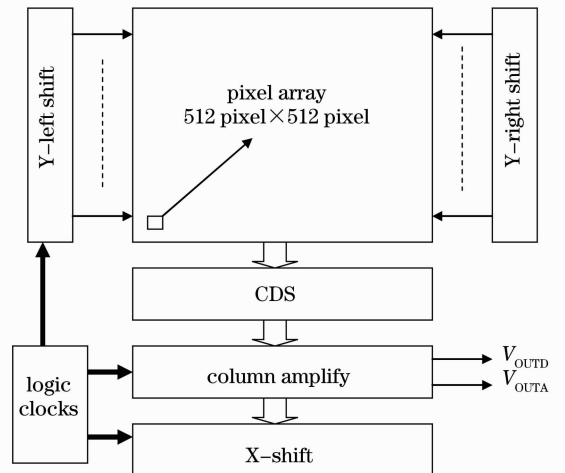


图 1 面阵 CMOS 探测器工作框图

Fig. 1 Working block diagram of plane-array CMOS detectors

起落;像元复位信号和积分信号经过 CDS 电路,可以消除大部分固定图像噪声(FPN),但不能除尽,也带来一部分非均匀性;各个像元的暗电流差异会导致暗信号的非均匀性;此外,各个像元在光电转换后的读出环节增益不同,会造成像元级别的增益的非均匀;各个列放大器的增益不同,也会带来列级别的增益非均匀,表现为纵向条纹,这在 CMOS 器件当中往往起主要作用^[7]。将饱和图像每列的像元数据分别取平均值,灰度垫高后与原来的图像相减,可以去除列级增益非均匀性,剩余响应非均匀性等像元级别的非均匀性。图 2 为 CMOS 探测器非均匀表征。通过图 2 的统计可以看出列级非均匀性是 CMOS 器件非均匀性的主要部分。

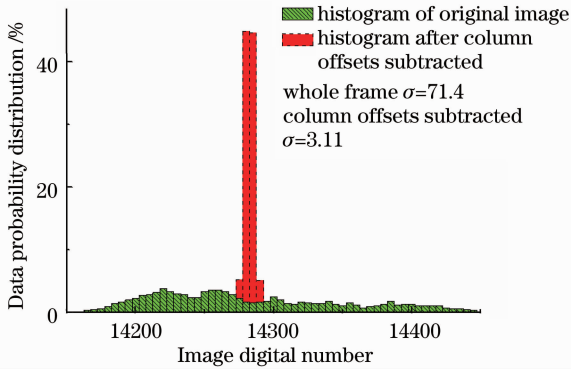


图 2 CMOS 探测器非均匀性表征

Fig. 2 Characterization of CMOS detectors' non-uniformity

针对这个现象,光谱成像的应用中将列向作为光谱维,行向作为空间维,这样获得的地物目标光谱曲线受器件非均匀性影响失真的程度较小。

在非均匀校正计算之前,维持与成像时相同的积分时间和温度,获取暗信号图像。原始图像与暗图像相减后,可以基本消除暗信号非均匀性以及固定图像噪声,但增益和响应的非均匀性没有消除。

背景剔除后,以往的 CCD 探测器中最常用的非均匀校正算法为两点(或多点)法。利用这样的线性校正可以获得每个像元的乘性校正系数 a_i 和加性校正系数 b_i ,则辐照度为 φ 时的校正公式为

$$V'_i(\varphi) = a_i V_i(\varphi) + b_i.$$

而 CMOS 探测器在此基础上进行一轮各列放大,假设第 n 列的放大器增益偏差为 A_n ,列放大器偏置偏差为 B_n ,那么校正公式应调整为

$$V'_i(\varphi) = A_n [a_i V_i(\varphi) + b_i] + B_n. \quad (5)$$

其中列放大器偏置系数 B_n 已经在背景剔除步骤中消去,这样校正公式简化为

$$V'_i(\varphi) = A_n a_i V_i(\varphi) + A_n b_i. \quad (6)$$

可见校正模型依然存在一个乘性系数 $A_n a_i$ 和一个加性系数 $A_n b_i$,因此完全可以沿用两点(或多点)线性校正法。图 3 为经过两点线性校正法校正前后的均匀目标图像数据直方图对比。

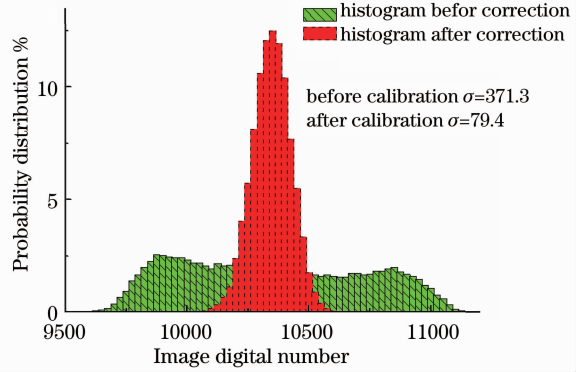


图 3 线性非均匀校正效果

Fig. 3 Result of linear non-uniformity correction

3.2 光谱响应校正

CMOS 探测器的制作工艺带来了光谱响应曲线振荡问题。

光谱响应的不平滑性(图 4)在目标光谱识别上会带来很大障碍,且在振荡谷底处波段的 SNR 会降低,严重影响了光谱图像的质量和和应用。目前世界先进的 CMOS 探测器比如 STAR 系列,LUPA 系列等都存在类似问题。

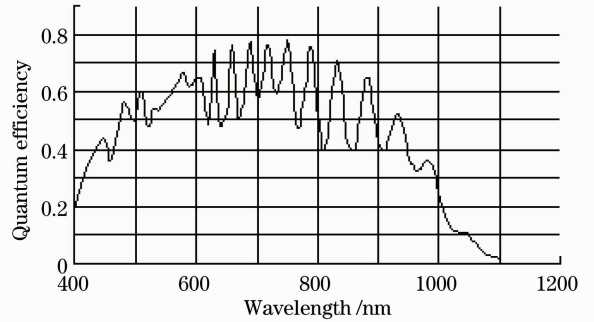


图 4 CMOS 探测器光谱响应

Fig. 4 Spectral response of CMOS detectors

从探测器件的角度来说,理论上可利用背照式 CMOS 技术解决问题,但是尚未成熟;在表面滴膜或采用先进光刻镀膜技术可以平滑光谱曲线,但解决不够彻底。除了从器件方面寻求出路,通过对光谱图像的校正处理也能起到一定效果,校正原理与光谱反演相似。一般光谱成像系统做地物识别时,考虑较多的是对大气的透过率曲线进行定标、反演,从而获得真实地物光谱。如果探测器的 QE 曲线存在振荡,也可以用相同的原理,即根据测得的探测器光谱响应曲线,对获得的各个波段的光谱图像进行

增益补偿,这样补偿后的光谱曲线就会趋于平滑,更接近真实的光谱曲线,便于地物目标的光谱识别。利用这种校正方法可以在一定程度上补偿由于探测器光谱响应曲线振荡带来的光谱失真,但不能解决振荡谷底 SNR 低下的问题。

4 光谱成像试验与分析

图 5 为光谱成像原理示意图,展示了光谱成像实验装置的搭建和扫描方式。镜头后安装芬兰生产的 PGP 光谱仪 ImSpector,分光后由 CMOS 探测器接收各波段信号。仪器置于转台上进行扫描成像,光谱仪狭缝垂直放置,该方向为空间维;转台进行水

平扫描,该方向为光谱维。

成像实验条件如表 5 所示。

表 5 实验条件
Table 5 Test condition

Parameter	Value
QE×FF	25%~40%
Pixel size	25 μm
Spectral range	0.4~1.0 μm, 300 bands
Spectral interval	2 nm
Average optical efficiency	0.3
Integration time	8 ms
F number	1.8

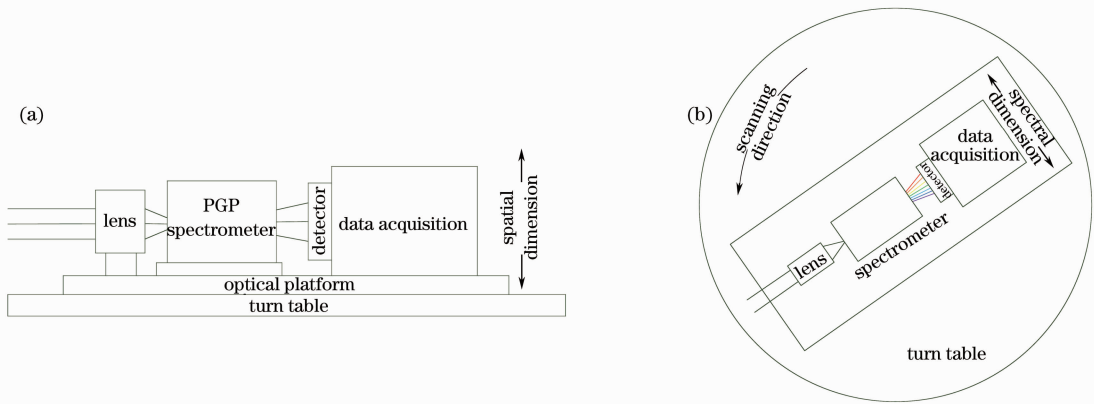


图 5 光谱成像实验示意图。(a)实验装置示意图;(b)扫描示意图(俯视)

Fig. 5 Diagram of spectral imaging test. (a) Testing equipment; (b) scanning diagram (platform)

成像时为上午,太阳高度角约为 45° ,向西平视成像,其信号强度与竖直向下成像基本相等;多云天气平均大气透射率按 80% 计算;光谱仪对光信号进行 300 个波段的分光,谱段间隔为 2 nm;QE 和光学效率低下导致的能量缺失在试验中采用延长积分时间和缩小光学 F 数的方式来弥补。按照一般地物反照率 0.3 计算,试验条件下的平均 SNR 为 260。试验获得了光谱图像数据,其中三个波段的合成图像如图 6 所示。

图 6 展示了几个典型地物光谱的处理结果。该处理过程是先用 CMOS 光谱成像系统对光谱响应平整、无起伏的漫反射目标(定标板)进行光谱探测,将获得的带有探测器光谱振荡的曲线进行滤波平滑处理,得到接近漫反射目标(定标板)本该具有的平坦光谱曲线。根据处理前后的光谱曲线差异计算各波段补偿系数,再将求得的补偿系数应用于各个地物光谱的校正。

本实验只是说明一种光谱振荡的处理办法,而在实际应用中,对定标板的探测光谱不能作为仪器

实际的光谱响应,还需用定标光谱仪测试定标板的光谱特性再进行反演。对获得的光谱曲线作定标处理也不是简单的平滑,而应将大气等因素综合考虑的光谱定标过程。

成像实验进一步验证了 CMOS 探测器的灵敏度性能。图 7 展示了几个波段的小块图像,植被在近红外波段的反照率比可见光波段高很多,因此图中近红外波段的松树比其他波段鲜亮(彩图请详见网络电子版)。对图中方框内的白墙区域进行 SNR 计算。由于该区域内信号值远远大于噪声值,因此可以根据区域内图像平均 DN 值换算出信号电子数 N_e ,再根据(4)式及表 4 算得这块图像区域的 SNR。经测算,674、572、478、820 nm 四个波段在这个区域的 SNR 分别为 618、566、218 和 375。白墙的反照率很高,为 0.8 左右,信号很强。基于 0.8 的反照率及其他实验条件,考虑 QE、光学效率在 500 nm 以下及近红外波段的衰减,按(2)式、(3)式进行计算,得到实验条件下四个波段的理论信噪比分别为 622、537、328 和 394,实测与理论值基本吻合。

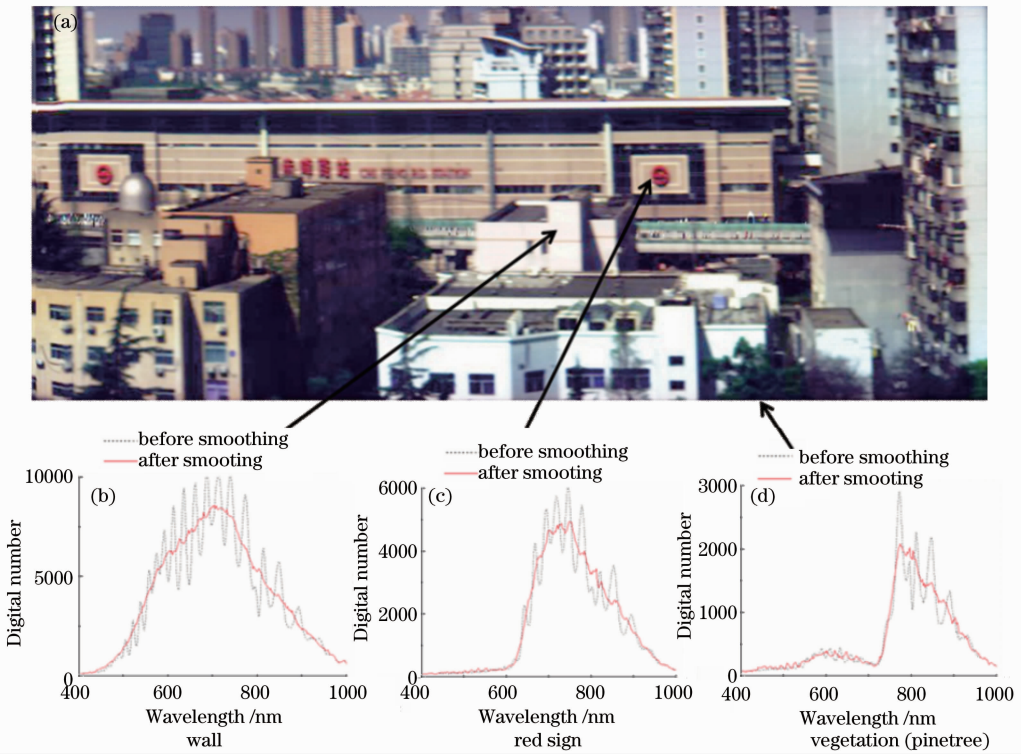


图 6 三个波段的合成图像及部分地物光谱曲线。(a) 图像；(b) 墙；(c) 红色标记；(d) 植物(松树)
 Fig. 6 Merged picture of 3 bands and some targets' spectrum curve. (a) Picture; (b) wall; (c) red sign; (d) vegetation (pine tree)

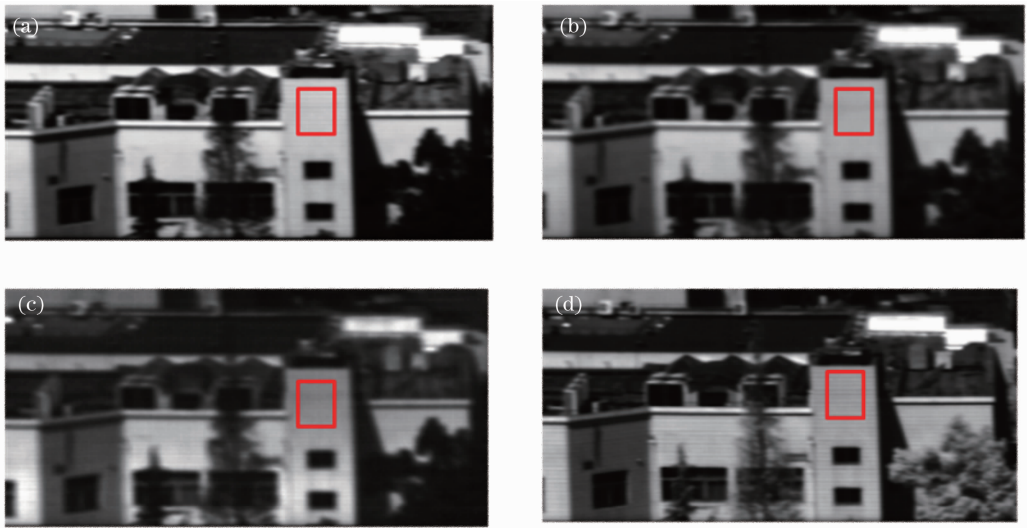


图 7 单波段局部图像。(a) 674 nm(可见光, 红光); (b) 572 nm(可见光, 绿光); (c) 478 nm(可见光, 蓝光); (d) 820 nm(近红外光)

Fig. 7 Single band image (partial). (a) 674 nm(visible, red); (b) 572 nm (visible, green); (c) 478 nm (visible, blue); (d) 820 nm (near infrared)

5 结 论

分析了 CMOS 器件特有的非均匀性、光谱响应振荡等影响光谱成像性能的问题, 提出了对应的解决方法, 并进行了实验验证。论述了高光谱成像系

统的灵敏度要求, 并利用一片国内的自研 CMOS 器件搭建了完整的光谱成像系统, 进行了噪声测试以及光谱成像实验, 证明了基于 CMOS 探测器的光谱成像系统可以满足高灵敏度光谱探测的需求, CMOS 探测器用于高光谱成像是可行的。

致谢 感谢中国科学院上海技术物理研究所硅器件室的陈世军老师及相关技术人员对本研究的支持。感谢薛永祺院士对本研究的关心和帮助。

参 考 文 献

- 1 M. Folkman, J. Pearlman, L. Liao *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration [C]. *SPIE*, 2001, **4151**: 40~51
- 2 A. Barducci, D. Guzzi, P. Marcoionni *et al.*. CHRIS-Proba performance evaluation: signal-to-noise ratio S, instrument efficiency and data quality from acquisitions over San Rossore (Italy) test site [C]. Proc. of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, Frascati; ESRIN, 2005
- 3 Sarnoff Corporation. CCD160-250-SFT datasheet [EB/OL]. http://www.amstechnologies.com/fileadmin/amsmedia/downloads/3569_Sarnoff_NSX.pdf
- 4 P. M. Gonthier, P. Magnan, F. Corbiere *et al.*. CMOS detectors for space applications: from R&D to operational program with large volume foundry [C]. *SPIE*, 2010, **7826**: 78261P
- 5 P. Jerram, D. Burt, D. Morris *et al.*. Design of image sensors for hyperspectral applications [C]. *SPIE*, 2009, **7474**: 74741E
- 6 Wang Jianyu, Wang Yueming, Li Chunlai. Noise model of hyperspectral imaging system and influence on radiation sensitivity [J]. *J. Remote Sensing*, 2010, **14**(4): 608~628
王建宇, 王跃明, 李春来. 高光谱成像系统的噪声模型和对辐射灵敏度的影响[J]. *遥感学报*, 2010, **14**(4): 608~628
- 7 J. Goy, B. Courtois, J. M. Karam *et al.*. Design of an APS CMOS image sensor for space applications using standard CAD tools and CMOS technology [C]. *SPIE*, 2000, **4019**: 145~152

栏目编辑：李文喆