

基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析

付 强^{1,2} 相里斌³ 景娟娟^{1,2}

¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术实验室, 陕西 西安 710119
² 中国科学院研究生院, 北京 100049
³ 中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 信噪比(SNR)是评价多光谱遥感成像性能的重要指标,在设计多光谱遥感成像仪的最初阶段应进行分析,从而确定各分系统相关参数。多光谱遥感系统的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,可用于进行成像过程端对端的完整分析。以基于滤光片阵列的多光谱遥感系统为例,采用 MODTRAN 软件进行大气辐射传输计算,对不同太阳天顶角下,不同目标地物计算像面的照度,根据电荷耦合器件探测器的噪声模型,计算出不同工作条件下多光谱遥感系统的 SNR。通过对 SNR 的分析,可给出该类型多光谱遥感系统获得最佳性能的工作条件,并能够结合使用要求进行光学系统参数的优化选择。

关键词 遥感;多光谱成像;信噪比;成像链;大气辐射传输

中图分类号 TP702 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0211001

System Signal-to-Noise Ratio Analysis Based on Imaging Chain Model in Multispectral Remote Sensing

Fu Qiang^{1,2} Xiangli Bin³ Jing Juanjuan^{1,2}

¹ *Spectral Imaging Technique Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*
² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
³ *Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*

Abstract Signal-to-noise-ratio (SNR) is an important index for evaluating multispectral imaging performance. In the early stage of designing a multispectral imager, SNR analysis should be performed for the determination of subsystem parameters. The imaging chain model of multispectral remote sensing is introduced. Characteristics of radiation source, object spectral reflectance, atmospheric radiation transfer, optical imaging, dispersive element, detector spectral responsivity and camera noise are synthesized to come into an end-to-end analysis. A filter array based multispectral imaging system is modeled. Computation of atmospheric radiation transfer is from MODTRAN under conditions of different solar zenith angles and different surface features. The models of charge coupled device are adopted for characterizing the noise features. SNR for different working conditions are shown for the designed multispectral remote sensing system. The SNR analysis is helpful for demonstrating the best operation condition for multispectral remote sensing system of this kind, as well as optimizing related optical system parameters for best performance with lowest cost.

Key words remote sensing; multispectral imaging; signal-to-noise ratio; imaging chain; atmospheric radiation transfer

OCIS codes 110.4234; 110.2970; 010.0280; 250.0040; 040.1880

收稿日期: 2011-07-27; **收到修改稿日期**: 2011-08-14

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724005)资助课题。

作者简介: 付 强(1985—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: vorQ.Fu@hotmail.com

导师简介: 相里斌(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱成像技术研究和航空航天光学遥感等方面的研究。

E-mail: xiangli@aoe.ac.cn

1 引 言

人们对于地球的多光谱遥感探测始于 1972 年发射的陆地多光谱扫描系统^[1,2] (MSS), 随后, 伴随着电荷耦合器件 (CCD)、互补金属氧化物半导体 (CMOS) 等固体探测器技术的不断进步, 计算机技术和数字图像处理技术日新月异的发展, 数字遥感领域日渐庞大。时至今日, 大量机载和星载的多光谱、高光谱遥感器^[3~8] 已经出现, 其性能分析和评价也是多光谱遥感系统设计过程中的重要环节。随着经验的积累, 在新的仪器设计之初对其性能进行分析预测, 从而指导参数的优化选择, 已经成为多光谱遥感系统设计和工程化实施前的重要内容。

信噪比 (SNR) 是表征多光谱成像的一项重要指标, 对于图像质量、数据处理等都有重要影响, 是决定多光谱遥感系统成败的一个限制因素。事实上, 多光谱遥感是一系列物理事件形成的连续过程, 包括电磁波能量的辐射传输、光学成像、探测器光电转换、电子电路处理、数字图像处理以及最终图像的显示等环节, 称为成像链^[1,2,9,10]。准确评估系统的 SNR 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, 尽可能准确的描述系统在轨工作时的性能。

本文首先建立多光谱遥感的成像链模型, 采用 MODTRAN 软件模拟计算大气辐射传输, 分析光学成像中的能量传递, 建立 CCD 探测器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。以基于滤光片阵列的多光谱成像仪为例, 计算了不同太阳天顶角条件下, 对不同地面反照率的目标探测时的 SNR 指标。

2 成像链模型

多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过大气传输到达地球表面, 地表景物反射的电磁波再通过大气辐射传输, 进入多光谱遥感器的光学系统。光学系统对一定波段范围内的电磁波能量聚焦成像于探测器靶面。探测器一般为 CCD 或 CMOS 等固体探测器, 利用光电转换作用, 将到达靶面的光子转换为电子, 经过放大电路处理和模数转换后储存。获得的原始图像数据经过计算机图像处理, 便可用于图像显示、分析和解释等用途。这些物理环节构成一个完成的成像链模型。

多光谱遥感的成像链包括电磁波的辐射传播、光学成像 (包括分光元件)、光电转换、电子线路处

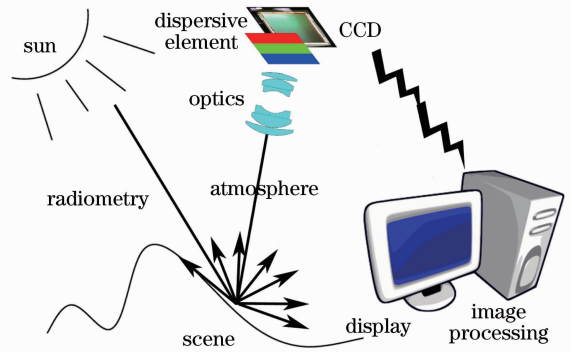


图 1 多光谱遥感的成像链模型

Fig. 1 Image chain model of multispectral remote sensing

理、数字图像处理及图像显示等主要环节。各环节独立作用, 但又存在紧密的内在联系。在设计和分析多光谱遥感器时, 为了定量分析到达遥感器的能量, 从而确定与能量有关的系统参数, 需要分析能量的传输路径; 为了分析系统的 SNR, 需要了解探测器及其处理电路的噪声特性。因此, 进行系统设计和分析时, 涉及的主要成像链环节有电磁波的辐射传播、光学成像、光电转换和电子线路处理等。

2.1 电磁波辐射传输

对于地球表面物质进行探测时, 进入多光谱遥感系统的能量是被地表物质反射的太阳电磁辐射, 因此最终的能量源为太阳。太阳可近似看做一个温度约为 5800 K 的黑体^[1,10,11], 其光谱辐射出射度可表示为

$$M_{\text{BB}}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

式中 h 是普朗克常数, k 是玻尔兹曼常数, T 是黑体的绝对温度。到达大气上界的辐照度可表示为

$$E_{\text{top}} = M_{\text{BB}}(\lambda, T) \frac{4\pi R_{\text{sun}}^2}{4\pi d_{\text{sun-earth}}^2}, \quad (2)$$

式中是 R_{sun} 太阳的平均半径, $d_{\text{sun-earth}}$ 是地日间的距离。

到达大气上界的电磁波能量经过大气传输, 被地表物质反射回大气, 进入遥感探测器, 图 2 表示了该过程中几种主要的能量传输路径^[1,10]。遥感探测器观测到的最直接的能量来自太阳电磁波辐射经过大气传输, 被地表物质反射后在经过大气到达探测器, 如图中 A 路径; 另一部分则来自被大气散射的能量照射到目标区域后, 再反射进入探测器, 如图中 B 路径; 还有一部分能量来自被大气散射进入遥感器视场内的光线, 未经地面目标反射而直接进入遥

感器,如图中 C 路径;还有一些能量来自被周围背景物反射到目标区域,再通过大气传输进入遥感器,如图中 D 路径;另外,被邻近区域的背景反射到大气中经过大气散射而进入遥感器的光也是能量的组成部分,如图中 E 路径。一般情况下, A, B, C 是最主要的能量传输路径。

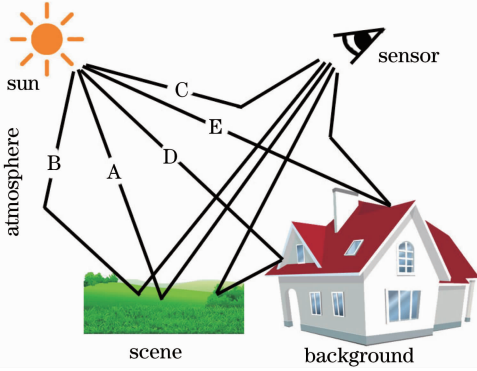


图 2 大气中的能量传输路径

Fig. 2 Energy transmission paths in the atmosphere

考虑三条路径对辐射能量的贡献,到达遥感器入瞳处的辐亮度可表示为

$$L_{\text{pupil}} = \left(\frac{E_{\text{top}} \tau_1 \rho \cos \sigma}{\pi} + \frac{E_d \rho_d}{\pi} \right) \tau_2 + L_u, \quad (3)$$

式中 τ_1 是下行辐射路径的大气透过率, ρ 是目标对 A 路径的光谱反射率, σ 是太阳天顶角, τ_2 是上行辐射路径的大气透过率, E_d 是总的下行辐照度, ρ_d 是目标对 B 路径的光谱反射率, L_u 是总的上行辐亮度。这里总的下行辐照度 E_d 和上行辐亮度 L_u 与大气状况有关,不同大气情况下的散射系数分布不同。

E_d 可表示为

$$E_d = E_{\text{top}} \int_{L\text{-path}} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\sigma=0}^{\pi/2} \tau_{L1} \tau_{L2} \beta_{\text{scn1}} \cos \sigma \sin \sigma d\sigma d\phi dr, \quad (4)$$

式中 τ_{L1} 和 τ_{L2} 为 L 型路径的大气透过率, β_{scn1} 为大气散射系数。

L_u 可表示为

$$L_u = E_{\text{top}} \int_{L\text{-path}} \tau_{L3} \tau_{L4} \beta_{\text{scn2}} dr, \quad (5)$$

式中 τ_{L3} 和 τ_{L4} 为 L 型路径的大气透过率, β_{scn2} 为大气散射系数。

实际上,大气辐射传输过程还包括多重散射效应,精确模拟电磁辐射在大气中的传播需要利用复杂的大气模型来进行,如 MODTRAN 等软件可用于此类分析^[12~18]。

2.2 光学成像

光学系统主要由各种材料的透镜或反射镜组成,材料本身对电磁辐射的透射、反射和吸收等作用也影响最终到达探测器靶面的能量。像面上 (x, y) 处的辐通量^[10,19]可表示为

$$\Phi_{\text{image}}(x, y) = \frac{A_{\text{image}} A_{\text{aperture}} \cos^n \theta}{f^2 (M+1)^2} \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \tau_{\text{optics}}(\lambda) L_{\text{image}}(x, y, \lambda) d\lambda, \quad (6)$$

式中 A_{image} 为像面面积, A_{aperture} 为光学系统孔径面积, f 为焦距, M 为垂轴放大率, $\tau_{\text{optics}}(\lambda)$ 为光谱透过率,与成像光谱仪采用的分光结构有关, L_{image} 为像面光亮度,是入瞳处光亮度与系统点扩展函数 PSF 的卷积,即

$$L_{\text{image}}(x, y, \lambda) = h(x, y, \lambda) * L_{\text{pupil}}(x, y, \lambda), \quad (7)$$

θ 为探测器对应的视场,可表示为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f}\right), \quad (8)$$

n 是像面照度随视场增大的衰减因子,一般取 3~4,应根据实验测得。

转换到探测器靶面的辐通量为

$$\Phi_{\text{detector}}(x, y) = \frac{A_{\text{detector}} A_{\text{aperture}} \cos^n \theta}{f^2 (M+1)^2} \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \tau_{\text{optics}}(\lambda) L_{\text{image}}(x, y, \lambda) d\lambda. \quad (9)$$

对于直径为 D 的圆形孔径的光学系统,探测器像元大小为 $p \times p$,则达到探测器靶面的辐通量为

$$\Phi_{\text{detector}}(x, y) = \frac{\pi p^2 \cos^n \theta}{4F^2 (M+1)^2} \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \tau_{\text{optics}}(\lambda) [h(x, y, \lambda) * L_{\text{pupil}}(x, y, \lambda)] d\lambda, \quad (10)$$

其中 $F = f/D$ 为光学系统的 F 数。

值得指出的是,不同类型的成像光谱仪,其光学系统的光谱透过率的表现形式不尽相同,尤其对于干涉型成像光谱仪,光谱图像不是直接获得,而是通过数据处理反演获得,因此 SNR 的分析还牵扯到成像链中的图像处理环节,具有更复杂的表现形式。

2.3 光电转换

在积分时间 t 内,被探测器接收的光子数^[1,10]可表示为

$$N_p = \frac{\pi p^2 t \cos^n \theta}{4F^2 (M+1)^2} \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{\lambda}{hc} \tau_{\text{optics}}(\lambda) [h(x, y, \lambda) * L_{\text{pupil}}(x, y, \lambda)] d\lambda, \quad (11)$$

式中 hc/λ 为单光子能量。探测器量子效率为 $\eta(\lambda)$ ，则经过光电转换后的电子数为

$$N_e = \frac{\pi p^2 t \cos^n \theta}{4F^2(M+1)^2} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{\lambda}{hc} \eta(\lambda) \tau_{\text{optics}}(\lambda) \times [h(x, y, \lambda) * L_{\text{pupil}}(x, y, \lambda)] d\lambda. \quad (12)$$

3 SNR 分析

多光谱遥感系统将目标反射的电磁波能量收集并转换为电子，经过电子线路处理后形成图像存储。

表 1 噪声计算公式

Table 1 Formulas for noise calculation

Noise type	Equation	Parameter
Shot noise	$\langle N_{\text{shot}} \rangle = \sqrt{N_e + N_{\text{dark}}}$	N_e — number of photoelectrons N_{dark} — number of dark electrons
Pattern noise	$\langle N_{\text{PRNU}} \rangle = UN_e$	U — photo response non-uniform k — Boltzmann constant
Reset noise	$\langle N_{\text{reset}} \rangle = \frac{\sqrt{kTC}}{q}$	T — absolute temperature C — sense node capacitance q — electron charge
On-chip noise	$\langle N_{\text{on-chip}} \rangle = \frac{C}{Gq} V_{\text{on-chip-amp-noise}} \sqrt{\Delta f_{\text{elec}}}$	G — on-chip amplifier gain $V_{\text{on-chip-amp-noise}}$ — noise voltage Δf_{elec} — noise bandwidth
Off-chip noise	$\langle N_{\text{off-chip}} \rangle = \frac{C}{GG_1q} V_{\text{off-chip-amp-noise}} \sqrt{\Delta f_{\text{elec}}}$	G_1 — off-chip amplifier gain
ADC noise	$\langle N_{\text{ADC}} \rangle = \frac{N_{\text{well}}}{2^N \sqrt{12}}$	N_{well} — charge well capacity N — number of bits

系统总噪声是各项噪声的均方和，即

$$\langle N_{\text{sys}} \rangle = \sqrt{\langle N_{\text{shot}} \rangle^2 + \langle N_{\text{PRNU}} \rangle^2 + \langle N_{\text{reset}} \rangle^2 + \langle N_{\text{on-chip}} \rangle^2 + \langle N_{\text{off-chip}} \rangle^2 + \langle N_{\text{ADC}} \rangle^2}. \quad (13)$$

通常，复位噪声采用相关双采样的方法可以降低到可忽略的程度，选择合适的模数转换器可以降低量化噪声的影响，芯片外部噪声远小于内部噪声，芯片制造商往往以读出噪声或噪声电平来表示该项噪声值，因此系统总噪声可简化为

$$\langle N_{\text{sys}} \rangle = \sqrt{\langle N_{\text{shot}} \rangle^2 + \langle N_{\text{floor}} \rangle^2 + \langle N_{\text{PRNU}} \rangle^2}. \quad (14)$$

3.2 SNR

按照 SNR 的定义，多光谱遥感系统探测到的每波段内的 SNR 应定义为

$$R_{\text{SN}}^i = \frac{N_e}{\sqrt{\langle N_{\text{shot}} \rangle^2 + \langle N_{\text{floor}} \rangle^2 + \langle N_{\text{PRNU}} \rangle^2}}. \quad (15)$$

从成像链模型可知，探测器记录的能量既有来自被探测目标反射的部分，是实际探测的有用信号；又有大气散射进入遥感器的部分，为杂散信号。在遥感图像处理之初，应进行大气校正，去除大气对遥感成

在此过程中，由于信号自身的随机特性和探测器的不完美，不可避免的会带来噪声，从而降低对感兴趣的目标的辨识能力。

3.1 噪声特性

从成像链中引入噪声的来源看，噪声主要分为^[20,21]散粒噪声、模式噪声、复位噪声、芯片内部噪声和外部噪声、模数转化(ADC)噪声等。表 1 给出了各中噪声的计算公式。

像的影响。进行 SNR 分析时，利用 MODTRAN 可仿真大气效应，因此多光谱遥感探测的 SNR 应表示为

$$R_{\text{SN}}^i = \frac{N_{\text{object}}}{\sqrt{\langle N_e \rangle^2 + \langle N_{\text{floor}} \rangle^2 + \langle UN_e \rangle^2}}, \quad (16)$$

式中 N_{object} 为来自被探测目标反射部分产生的电子数，表示为

$$N_{\text{object}} = N_e - N_{\text{atmosphere}}. \quad (17)$$

4 实 例

4.1 系统参数

以基于滤光片阵列的多光谱遥感系统为例，系统参数如表 2 所示。探测器选择 Fairchild imaging 公司^[22]前照式 PeregrineTM-486 CCD，相关参数如表 3 所示，图 3 是其量子效率曲线。

表 2 多光谱遥感系统参数

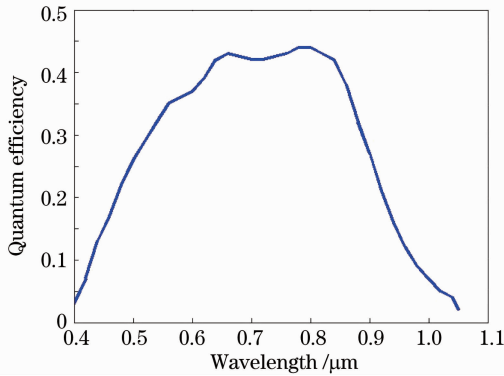
Table 2 Parameters for a multispectral remote sensing system

Parameter	Specification
Spectral range / μm	0.4~1.0
Number of bands	8
Focal length /mm	105
F	4
Sensor height /m	7000
Instantaneous field of view /mrad	0.1
Integration time /ms	2

表 3 PeregrineTM-486 CCD 参数

Table 3 Parameters of PeregrineTM-486 CCD

Parameter	Specification
Resolution	4096 \times 4096
Pixel pitch	15 μm \times 15 μm
Typical read noise	10 e^- @ 1 MHz
Typical full well capacity	100 k e^-
Typical dark current (-50°C)	0.05 e^- / (pixel \cdot s)
ADC dynamic range	16 bit

图 3 PeregrineTM-486 CCD 量子效率曲线Fig. 3 Quantum efficiency of PeregrineTM-486 CCD

该多光谱成像仪将滤光片阵列置于探测器靶面附近,光谱透过率函数 $\tau_{\text{optics}}(\lambda)$ 可表示为以不同中心波长为均值的高斯函数

$$\tau_{\text{optics}}(\lambda) = T \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (18)$$

滤光片阵列的波长分布见表 4 所示。

4.2 大气条件

在 MODTRAN 中模拟大气辐射传输,计算条件如表 5 所示。大气模型采用美国 1976 标准模型,选择无云无雨的气象条件,气溶胶模型采用乡村型 5 km 能见度模型,而地表反照率从 0~0.9 范围内一定间隔条件下对太阳天顶角分别为 30° , 45° 和 60° 时计算,其中反照率为 0 时的结果表示完全来自大

气散射进入探测器的辐射能量,不同反照率可以在一定程度上反应不同地物的反射特性。

表 4 滤光片阵列参数

Table 4 Parameters of filter array

Band index	Central	Full width at half maximum /nm
	wavelength / μm	
1	0.42	20
2	0.46	
3	0.55	
4	0.65	
5	0.71	
6	0.85	
7	0.90	
8	0.94	

表 5 MODTRAN 中设定的大气条件

Table 5 Atmospheric condition set in MODTRAN

Parameter	Specification
Sensor height	7000 m
Atmosphere model	1976 US standard
Zenith angle range	30° , 45° , 60°
Weather condition	No cloud or rain
Aerosol model	Rural VIS 5 km
Albedo range	0~0.9

4.3 SNR 计算

按照前文的成像链模型,计算出探测器记录的电子数,考虑探测器噪声特性按照表 3 中的暗电流、读出噪声等,定标后的模式噪声系数按照 $U=0.2\%$ 预估。对不同地面反照率下,各谱段 SNR 计算结果如图 4(a)~(c) 所示。

经过大气、探测器光谱响应等调制作用,相同条件下各谱段 SNR 不尽相同。在该系统参数配置和工作条件下,多光谱遥感系统能够比较充分利用探测器的动态范围,对很亮的目标(如雪等,反照率约 0.9),SNR 可接近极值($R_{\text{SNR}}^{\text{max}} \approx 316$),对暗目标(如水体等,反照率约为 0.05),除短波 0.42 μm 处 SNR 略低外,其余均可达到 30 以上。系统性能和工作时段、气象条件有关,根据 SNR 分析结果,可以给出飞行任务执行的时间和条件,为任务决策提供参考依据。

同时,从 SNR 分析结果可以看出,在一定的条件下,可以对系统参数做适当调整而保证系统性能仍达到使用要求。如本系统中,保证在轨工作 MTF 影响不大的情况下,适当增加曝光时间,可以将 F 数增大,使得光学系统设计难度减小,同时减轻体积重量等指标。

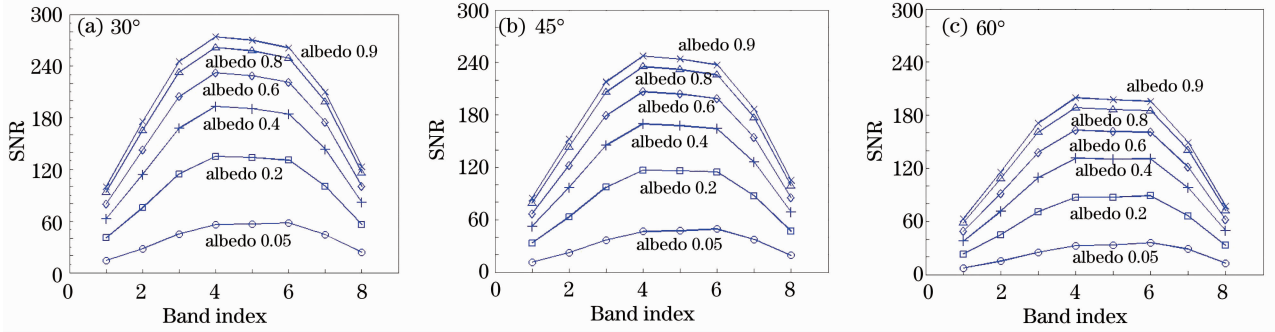


图 4 不同太阳天顶角时的 SNR

Fig. 4 SNR for different solar zenith angles

4.4 成像仿真

成像链模型对构成多光谱成像的各个物理环节建模,因此利用上述计算结果也可对系统成像进行仿真。采用 JPL 实验室 AVIRIS 机载多光谱相机公布的 Moffett Field 地区光谱图像数据^[23]作为仿真目标图像,如图 5 所示。合成彩色图采用 462.8, 550.3 和 655.3nm 波段数据。用上述滤光片阵列型多光谱遥感系统探测,获得的 8 谱段多光谱图像数据立方体分别如图 6(a)~(c)所示,合成彩色图采用 460,550 和 650 nm 波段数据。可见该多光谱成像系统在规定的工作条件下,能够满足成像要求,得到较高 SNR 的多光谱图像。

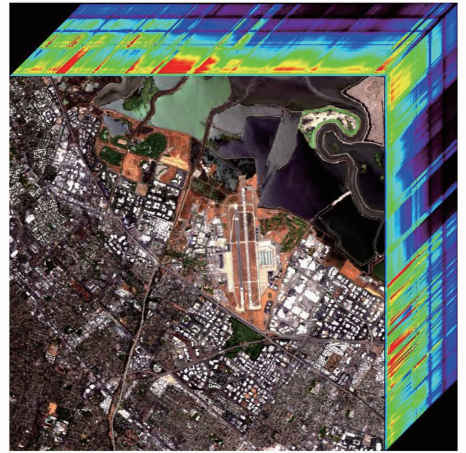


图 5 仿真目标源数据立方体

Fig. 5 Data cube for simulated scene

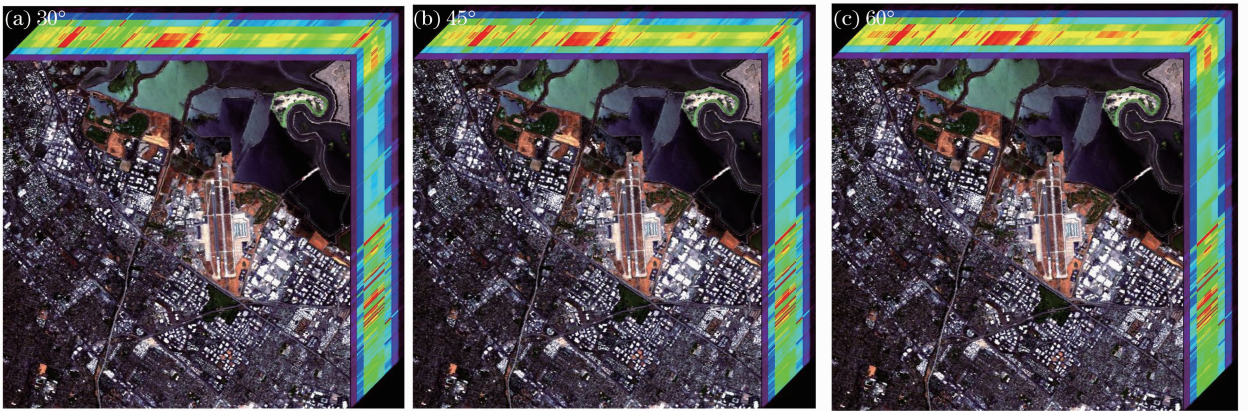


图 6 不同太阳天顶角时获得的数据立方体

Fig. 6 Captured data cubes for different solar zenith angles

5 结 论

对于多光谱遥感器的设计,分析系统 SNR 是必不可少的环节。从遥感的成像链模型出发,考虑到能量传输的各种可能路径,以及引入噪声的环节,能够有效地分析影响系统 SNR 的可能环节。系统设计时,控制成像链中对 SNR 影响最大的可控参数,

能够有效优化系统参数,减少不必要的投入。在大气辐射传输软件的辅助下,可以模拟各种气象条件和工作时间段内仪器的工作性能,基于成像链模型的 SNR 分析还可以给出系统最佳工作条件,对于机载多光谱遥感任务的实施决策也有参考意义。

参 考 文 献

- 1 John R. Schott. Remote Sensing The Image Chain Approach [M]. New York: Oxford University Press, 2007. 23~191
- 2 Robert A. Schowengerdt. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing, Third Edition [M]. San Diego: Elsevier Inc., 2007, 1~44
- 3 Yuan Yan. Theoretical and Technical Study of the Imaging Spectrometry [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 2005. 41~54
袁 艳. 成像光谱理论与技术研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005. 41~54
- 4 Lü Qunbo. Data Processing of Fourier Transform Imaging Spectroscopy [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 2007. 2~9
吕群波. 干涉光谱成像数据处理技术 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2007. 2~9
- 5 Xiangli Bin, Yuan Yan, Lü Qunbo. Spectral transfer function of the Fourier transform spectral imager [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5399~5405
相里斌, 袁 艳, 吕群波. 傅里叶变换光谱成像仪光谱传递函数研究 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(8): 5399~5405
- 6 Xiangli Bin, Wang Zhonghou, Liu Xuebin *et al.*. Hyperspectral imager of the environment and disaster monitoring small satellite [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, **24**(3): 257~262
相里斌, 王忠厚, 刘学斌 等. “环境与灾害监测预报小卫星”高光光谱成像仪 [J]. *遥感技术与应用*, 2009, **24**(3): 257~262
- 7 Li Hongsheng. The Study on the Modulation Transfer Function of Hyperspectral Imager Imaging-Link [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 6~9
李宏升. 超光谱成像仪成像链的调制传递函数研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005. 6~9
- 8 Jayati Datta, S. C. Charkravarty. Chandrayaan-1 India's First Mission to Moon [M]. Bangalore: Space Science Office, ISRO Headquarters, 2008. 21~41
- 9 William L. Wolfe. Introduction to Imaging Spectrometers [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1997. 3~6
- 10 Robert D. Fiete. Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2010. 5~37
- 11 Sun [OL]. [2011-10-31]. en.wikipedia.org/wiki/Sun
- 12 Ontar Corporation. PcModWin Manual [M]. North Andover: Ontar Corporation, 2001. 27~375
- 13 Mao Kebiao, Qin Zhihao. The transmission model of atmospheric radiation and the computation of transmittance of MODTRAN [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2004, **27**(4): 1~3
毛克彪, 覃志豪. 大气辐射传输模型及 MODTRAN 中透过率计算 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2004, **27**(4): 1~3
- 14 Qi Xueyong, Tian Qingjun. The advances in the study of atmospheric correction for optical remote sensing [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2005, **66**(4): 1~6
齐雪勇, 田庆久. 光学遥感大气校正研究进展 [J]. *国土资源遥感*, 2005, **66**(4): 1~6
- 15 Jiang Yuesong, Li Xiaolu, Zhao Yiming *et al.*. Effects of atmospheric scattering on thermal infrared remote sensing of the earth [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **26**(12): 1766~1771
江月松, 李小路, 赵一鸣 等. 热红外对地遥感中的大气散射效应 [J]. *光学学报*, 2007, **26**(12): 1766~1771
- 16 A. Berk, G. P. Anderson, L. S. Bernstein *et al.*. MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction [C]. *SPIE*, 3866, 1999, **3756**: 348~353
- 17 A. Berk, G. P. Anderson, P. K. Acharya *et al.*. MODTRAN4 User's Manual [M]. Burlington: Spectral Sciences, Inc., 1999. 6~72
- 18 F. X. Kneizys, D. C. Robertson, L. W. Abreu *et al.*. MODTRAN Report [M]. North Andover: Ontar Corporation, 1996. 24~193
- 19 Qu Enshi, Zhang Hengjin, Cao Jianzhong *et al.*. Discussion of illumination formula in optical design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1364~1368
屈恩世, 张恒金, 曹剑中 等. 对光学设计中照度计算公式的讨论 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1364~1368
- 20 Shang Yuanyuan, Guan Yong, Zhang Weizhong *et al.*. Research on evaluation method of CCD image sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 317~322
尚媛园, 关 永, 赵伟功 等. CCD 固体成像器件性能测试方法的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 317~322
- 21 Gerald C. Holst. CCD Arrays, Cameras, and Displays [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998. 102~144
- 22 Peregrine 486 [OL]. [2011-10-31]. www.fairchildimaging.com/main/documents/Peregrine486_RevE.pdf
- 23 Airborne visible/Infrared Imaging Spectrometer [OL]. [2011-10-13]. http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html

栏目编辑: 李文喆