

# 航空推扫高光谱成像仪 CCD 探测器选型研究

马 骏<sup>1,2</sup> 肖喜中<sup>1,2</sup> 郎均慰<sup>1,2</sup> 王跃明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 在可见近红外(VNIR)波段,信噪比及焦面稳定性是高光谱成像系统的重要性能指标,其中电荷耦合器件(CCD)探测器的合理选型是提高高光谱系统的信噪比及焦面稳定性的重要环节。提出了一种基于 CCD 像元规模、帧频和像元尺寸三个参数的快速选取符合要求 CCD 的方法,根据 VNIR 波段信噪比公式,建立了信噪比与焦深两个模型,根据工程应用系统分析,阐述了选型过程,着重阐述了像元尺寸选型(信噪比选型)的计算,对选型结果进行信噪比和焦深分析,验证了模型建立与选型方法的合理性。结果表明,提出的 CCD 选型方法可以高效准确地选取符合高光谱成像仪要求的 CCD 探测器。

**关键词** 成像系统;高光谱成像;可见近红外;面阵电荷耦合器件;信噪比;像元尺寸

**中图分类号** TP732 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1011001

## Study on Selection of CCD Detector of Space-Borne Hyper-Spectral Imager

Ma Jun<sup>1,2</sup> Xiao Xizhong<sup>1,2</sup> Lang Junwei<sup>1,2</sup> Wang Yueming<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Signal-to-noise ratio (SNR) and stability of focal plane are important performance index for airborne hyperspectral imaging systems in visible near infrared (VNIR) band. To fulfill the requirement, the rational selection of charge coupled device (CCD) detectors turns to be a key issue. A rapid method is proposed for choosing compatible CCD based on the scale, pixel size and frame rates of CCD. According to SNR formula of hyperspectral imager in VNIR band, a SNR model and a focal depth model are built. With analysis of a real project application, the selection process is proposed and the calculation when choosing the pixel size (or SNR) of the CCD is particularly elaborated. SNR and focal depth analysis of the selected one is also presented, proving that the models and the method of choosing CCD are rational. Results show that an efficient and accurate means of selecting CCD detectors is proposed for airborne hyperspectral imager.

**Key words** imaging systems; hyperspectral imaging; visible near infrared; area array charge coupled device; signal-to-noise ratio; pixel size

**OCIS codes** 110.4234; 040.3060; 040.1520

## 1 引 言

从 20 世纪 90 年代开始,高光谱成像技术便成为了遥感技术研究的热门课题和不可或缺的技术手段,发展潜力巨大<sup>[1-2]</sup>。随着高光谱技术发展的日

趋成熟,其应用也愈加广泛<sup>[3-4]</sup>。尤其在是对地观测领域,如环境监测、地质填图、矿物勘测、水资源遥感等方面更是备受关注<sup>[5-7]</sup>。在可见近红外(VNIR)波段,更高分辨率、更高稳定性以及更高信噪比的高

**收稿日期:** 2014-03-12; **收到修改稿日期:** 2014-04-08

**基金项目:** 高分专项民用航空项目(30H33D01900613/15)

**作者简介:** 马 骏(1989—),男,硕士研究生,主要从事光电信息获取技术方面的研究。E-mail: majunball@163.com

**导师简介:** 王跃明(1977—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光谱成像技术方面的研究。

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

光谱成像系统能在应用领域发挥更显著的作用。而面阵电荷耦合器件(CCD)是高光谱成像系统的重要组件,同时又是提高高光谱系统的信噪比及焦深的重要环节<sup>[8]</sup>,因此快速准确的 CCD 选型成为高光谱系统设计的一大需求。

由于 CCD 具有体积小、重量轻、灵敏度高、寿命长、功耗低和动态范围大等诸多优良的性能<sup>[9]</sup>,从它诞生之日起,就受到人们普遍重视。随着新型半导体材料的不断涌现和器件细化技术的日趋完备,CCD 技术得到了较快的发展<sup>[10]</sup>。但作为机载高光谱成像系统设计的重要环节,关于准确高效的面阵 CCD 选型方法的研究却较为鲜见。

针对机载高光谱成像系统 CCD 的选型,目前国内外的研究仅提出了对类型的选取,认为帧转移型 CCD 能满足机载高光谱的高帧频要求,且填充因子高,更适合机载高光谱成像系统<sup>[11-12]</sup>。本文在此基础上提出了基于 CCD 像元规模、像元尺寸和帧频三项参数的选型方法,令机载高光谱系统信噪比等其他主要技术指标也可直接对应 CCD 参数,从而实现快速准确的 CCD 选型。通过信噪比和焦深两个模型的建立及实际工程应用的分析,验证选型的合理性。

## 2 CCD 选型方法

高光谱成像仪具有光谱分辨率高,光谱覆盖范围广等显著特点,并且实现了“图谱合一”<sup>[13]</sup>。因此高光谱成像仪对面阵 CCD 具有高帧频、高信噪比、高稳定性、合适的像元规模等要求。面阵 CCD 中帧转移型 CCD(尤其背照帧转移 CCD),具有高帧频、高分辨率、高填充因子及高动态范围等特点<sup>[14]</sup>,比其他类型 CCD 更适用于高光谱成像系统。因此在机载高光谱系统选择 CCD 探测器时,帧转移 CCD 应首先考虑<sup>[8,15]</sup>。

根据高光谱成像仪对 CCD 的要求,提出了一种选型方法。可将选型分为三个步骤,分别为像元规模标准选型、帧频标准选型和信噪比标准选型。高光谱成像仪对像元规模与帧频的要求可以与 CCD 参数直接对应,但信噪比要求无法直接与 CCD 某参数对应而快速准确的选择出来,因此需要通过计算建立信噪比与 CCD 像元尺寸的对应函数关系。此种选型方法将高光谱系统的主要指标要求转换为直观可查的 CCD 像元规模、帧频和像元尺寸三个参数,可以实现快速准确选择符合高光谱项目要求的 CCD。

## 3 信噪比(SNR)公式与模型建立

### 3.1 SNR 公式计算

机载高光谱成像仪对 CCD 的要求中,高光谱 CCD SNR(用  $R_{SN}$  表示)可以用等效电子法来计算,即用 CCD 输出端信号等效电荷和噪声等效电荷的比值来表示<sup>[16]</sup>为

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

式中  $N_{\text{signal}}$  为信号电子数,  $N_{\text{total}}$  为噪声电子数。

输出端等效电子数  $N_{\text{signal}}$  可表示为<sup>[17-18]</sup>

$$N_{\text{signal}} = \frac{\rho \cdot F_f \cdot d^2 \cdot T_1 \sin \theta}{4hc \cdot F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_o(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \lambda d\lambda, \quad (2)$$

式中  $\rho$  是地面反射率,  $F_f$  为填充因子,无特殊说明时,本文中此参数取 100%,  $d$  为像元尺寸,  $T_1$  为积分时间,  $\theta$  为太阳高度角,  $hc/\lambda$  为一定波长的单光子能量,  $\lambda$  为波长,  $F$  为系统  $F$  数,其值为  $F = f/d_o$ ,其中  $f$  为镜头焦距,  $d_o$  为光学孔径,  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  为响应波段,  $\tau_o(\lambda)$  为光学系统的效率,  $\tau_a(\lambda)$  为大气透射率,  $E(\lambda)$  为太阳光谱辐射照度,  $\eta(\lambda)$  为探测器量子效率。

由于机载高光谱成像仪光谱分辨率一般在 10 nm 以下,可近似认为  $\tau_o(\lambda)$ ,  $\tau_a(\lambda)$ ,  $E(\lambda)$ ,  $\eta(\lambda)$  在一个窄波段内不变,  $\lambda$  取窄波段中间值, (2) 可写为

$$N_{\text{signal}} = \frac{E(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \lambda \rho \cdot T_1 \sin \theta}{4hc \cdot F^2} \cdot d^2. \quad (3)$$

噪声主要由散粒噪声,探测器输出噪声和电路噪声组成。其中散粒噪声电子数可近似等于  $\sqrt{N_{\text{signal}}}$ , 探测器输出噪声电子数表示为  $n_{ro}$ , 电路噪声电子数表示为  $n_{cl}$ 。

噪声等效电子数  $n_{\text{total}}$  可近似用下式表示为

$$N_{\text{total}} = \sqrt{N_{\text{signal}} + n_{ro}^2 + n_{cl}^2}. \quad (4)$$

在确定窄波段内,可计算信噪比得:

$$R_{SN} = \frac{N_{\text{signal}}}{N_{\text{total}}} = \frac{N_{\text{signal}}}{\sqrt{N_{\text{signal}} + n_{ro}^2 + n_{cl}^2}}. \quad (5)$$

根据(3)~(5)式可知,在确定窄谱段内,光学效率、量子效率等参数已知,若  $F$  数不变,信噪比  $R_{SN}$  与 CCD 像元尺寸  $d$  成函数关系;若信噪比达到同样水平,系统  $F$  数与像元尺寸  $d$  成函数关系。这为 CCD 选型指导及模型建立提供了理论基础。

### 3.2 模型建立

#### 3.2.1 SNR 模型建立

根据(3)式,当焦深条件不变时(即  $F$  不变时),可将信号电子数  $N_{\text{signal}}$  表示为  $N_{\text{signal}} = \xi \cdot d^2$ , 式中  $\xi = \frac{E(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \rho \cdot T_1 \sin \theta}{4hc \cdot F^2}$  为  $\lambda$  的函数, $\lambda$  确定时  $\xi$  不变。而(5)式中,探测器输出噪声与电路噪声合噪声电子数  $n_{\text{com}}$  的平方  $n_{\text{com}}^2 = n_{\text{ro}}^2 + n_{\text{cl}}^2$  为常数。因此信噪比公式可表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\xi \cdot d^2}{\sqrt{\xi \cdot d^2 + n_{\text{com}}^2}}, \quad (6)$$

根据(6)式,比较两个采用不同像元尺寸 CCD,但采用相同光学型式、光学效率等参数相同的高光谱成像系统,若两系统的 CCD 量子效率相同,选定相同窄波段  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ,当两个高光谱成像系统  $F$  数相同时,两者的焦深也相同,此时,两系统信噪比之比  $\beta_{\text{SNR}}$  为

$$\beta_{\text{SNR}} = \frac{R_{\text{SN1}}}{R_{\text{SN2}}} = \frac{\xi d_1^2}{\sqrt{\xi d_1^2 + n_{\text{com}}^2}} \cdot \frac{\sqrt{\xi d_2^2 + n_{\text{com}}^2}}{\xi d_2^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \frac{\sqrt{\xi d_2^2 + n_{\text{com}}^2}}{\sqrt{\xi d_1^2 + n_{\text{com}}^2}}. \quad (7)$$

当  $\xi d_1^2 \gg n_{\text{com}}^2$  且  $\xi d_2^2 \gg n_{\text{com}}^2$  时,信噪比之比可表示为

$$\beta_{\text{SNR}} \approx \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \frac{\sqrt{\xi d_2^2}}{\sqrt{\xi d_1^2}} = \frac{d_1}{d_2}. \quad (8)$$

由(6)式可知,在同一窄波段且两 CCD 量子效率相同时,在焦深条件不变的情况下,像元尺寸  $d$  越大,信噪比  $R_{\text{SN}}$  越高。

进一步考察(6)~(8)式,当系统满足光子噪声限条件,即  $N_{\text{signal}} = \xi \cdot d^2 \gg N_{\text{com}}^2$  时, $R_{\text{SN}}$  与像元尺寸  $d$  近似成正比。实际应用中,若  $N_{\text{signal}} = \xi \cdot d^2 \geq 10 \times N_{\text{com}}^2$ ,即认为信噪比与像元尺寸成正比。

#### 3.2.2 焦深模型建立

同样根据(3)式,当各 CCD 达到相同信噪比条件时,可将信号电子数  $N_{\text{signal}}$  表示为  $N_{\text{signal}} = \frac{\psi \cdot d^2}{\delta}$ , 其中

$$\psi = \frac{E(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \lambda^2 \cdot \Delta\lambda \cdot \rho \cdot T_1 \sin \theta}{2hc}$$

为  $\lambda$  的函数,焦深  $\delta = 2\lambda F^2$ 。因此 SNR 公式可表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\frac{\psi \cdot d^2}{\delta}}{\sqrt{\frac{\psi \cdot d^2}{\delta} + n_{\text{com}}^2}}. \quad (9)$$

根据(9)式,同样比较两个采用不同像元尺寸

CCD,但采用相同光学型式、光学效率等参数相同的高光谱成像系统,若两系统的 CCD 量子效率相同,选定相同窄波段  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ,当两个高光谱成像系统信噪比达到同样水平,此时满足:

$$\frac{\frac{\psi d_1^2}{\delta_1}}{\sqrt{\frac{\psi d_1^2}{\delta_1} + n_{\text{com}}^2}} = \frac{\frac{\psi d_2^2}{\delta_2}}{\sqrt{\frac{\psi d_2^2}{\delta_2} + n_{\text{com}}^2}}, \quad (10)$$

整理得焦深比值为

$$\beta_{\delta} = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \frac{\sqrt{\frac{\psi d_1^2}{\delta_1} + n_{\text{com}}^2}}{\sqrt{\frac{\psi d_2^2}{\delta_2} + n_{\text{com}}^2}}, \quad (11)$$

当  $\frac{\psi d_1^2}{\delta_1} \gg n_{\text{com}}^2$  且  $\frac{\psi d_2^2}{\delta_2} \gg n_{\text{com}}^2$ , (11)式可表示为

$$\beta_{\delta} = \frac{\delta_1}{\delta_2} \approx \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \sqrt{\frac{d_1^2}{\delta_1} \cdot \frac{\delta_2}{d_2^2}}, \quad (12)$$

整理化简得:

$$\beta_{\delta} = \frac{\delta_1}{\delta_2} \approx \frac{d_1^2}{d_2^2}. \quad (13)$$

由(11)式可知,在同一窄波段且两 CCD 量子效率相同时,在 SNR 条件相同情况下,像元尺寸  $d$  越大,焦深  $\delta$  越大。

进一步考察(9)~(13)式,当系统满足光子噪声限条件,即  $N_{\text{signal}} = \frac{\psi \cdot d^2}{\delta} \gg n_{\text{com}}^2$ ,可认为焦深  $\delta$  与像元尺寸  $d$  近似成平方关系。实际应用中,同样若  $N_{\text{signal}} = \frac{\psi \cdot d^2}{\delta} \geq 10 \times n_{\text{com}}^2$ ,即认为焦深  $\delta$  与像元尺寸  $d$  成平方关系。

## 4 工程应用系统分析

### 4.1 项目指标及备选 CCD 信息

某航空推扫高光谱成像仪提出主要技术指标要求如表 1 所示。

表 1 主要技术指标要求

Table 1 Demand of primary technical indicators

Indicators	Demand
Wavelength / $\mu\text{m}$	0.4~1.0
Angle of view / ( $^{\circ}$ )	40 $^{\circ}$
Number of spectral bands	256
Number of pixel crossing the track	2800
Frame rate / Hz	$\geq 160$
SNR	$\geq 250$
Focal depth( $\pm 2\lambda F^2$ ) / $\mu\text{m}$	$\geq \pm 15$

一些典型 CCD 产品及其主要参数如表 2 所示。

表 2 典型 CCD 产品及其主要参数

Table 2 Typical CCD products and its primary parameters

No.	Type	Scale /pixel	Pixel size / $\mu\text{m}^2$	Frequency /Hz	Manufacturer
1	Full frame transfer	4096 $\times$ 4096	11 $\times$ 11	1	CETC44
2	High frame rate frame transfer	128 $\times$ 128	17 $\times$ 17	300	CETC44
3	High frame rate frame transfer	400 $\times$ 300	26 $\times$ 26	500	CETC44
4	Interline transfer	512 $\times$ 512	8.3 $\times$ 8.3	160	CETC44
5	1/2 Inch interline transfer	782 $\times$ 582	8.3 $\times$ 8.3	25	CETC44
6	Interline transfer	1920 $\times$ 1080	9 $\times$ 9	160	CETC44
7	Headlight EMCCD	512 $\times$ 512	16 $\times$ 16	1000	CETC44
8	High frame rate frame transfer	2048 $\times$ 256	16 $\times$ 16	700	DALSA
9	High frame rate frame transfer	1024 $\times$ 1024	13 $\times$ 13	180	E2V
10	Full frame transfer	1242 $\times$ 1152	24 $\times$ 24	8.5	E2V

## 4.2 选型过程

### 4.2.1 像元规模标准选型

像元规模标准选型主要考虑拼接问题与视场角问题。根据表 1 光谱维像元数和穿轨像元数,可知探测器要求总像元规模为 2800 pixel $\times$ 256 pixel。由于 CCD 拼接只能一字型拼接,而且数量一般不超过 3 片,另外视场角要求 40°,单镜头难以实现,并且不利于系统像质、光谱弯曲和畸变校正,因此至少需要两片 CCD 拼接。综合考虑,应选择穿轨像元数在 1000~2800 pixel、光谱维像元数在 256 pixel 及以上规模的 CCD。备选 CCD 中只有 6, 8, 9, 10 号 CCD 满足像元规模要求。

### 4.2.2 帧频标准选型

根据调研,只有行间转移 CCD 和帧转移 CCD 这两种面阵 CCD 具备较高的工作帧频,而全帧转移 CCD 一般帧频较低,不能达到 160 Hz 的项目系统帧频要求。经调查 10 号 CCD 帧频仅为 8.5 Hz 左右,而 6, 8, 9 号 CCD 满足系统帧频要求。

### 4.2.3 像元尺寸标准选型

在可见近红外(VNIR)波段,波长覆盖范围为 0.4~1.0  $\mu\text{m}$ 。根据表 1,光谱维像元数至少为 256 pixel,则光谱分辨率最大为  $\Delta\lambda=0.6/256=2.34\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$ ,为了方便计算取  $\Delta\lambda=2.3\times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$ 。焦深要求  $\delta=\pm 2\lambda F^2\geq\pm 15$   $\mu\text{m}$ , $\lambda$  取均值 0.7,可得  $F\geq 3.27$ ,按照常用  $F$  数,可取  $F$  数为 3.4。当帧频为 160 Hz 时,可得积分时间  $T_1=6.25\times 10^{-3}$  s。反射率  $\rho=0.3$ ,太阳高度角  $\theta$  取 60°,大气透射率  $\tau_a(\lambda)$  取 0.7,高光谱成像仪平均光学效率  $\tau_o(\lambda)$  约为 0.227,并可以通过曲线拟合得到不同窄波段的太阳光谱辐射照度  $E(\lambda)^{[10]}$ 。

经过多个 CCD 样本具体调查,探测器输出噪声电子数可取  $n_{ro}=70 e^-$ ,电路噪声电子数取  $n_{el} =$

50  $e^-$ 。各 CCD 平滑量子效率如下表 3 所示。

表 3 各波段范围内 CCD 量子效率

Table 3 Quantum efficiency of CCD in different bands

Wavelength / $\mu\text{m}$	Quantum efficiency /%
0.4~0.45	45
0.45~0.5	55
0.5~0.55	60
0.55~0.6	65
0.6~0.65	70
0.65~0.7	70
0.7~0.75	60
0.75~0.8	50
0.8~0.85	35
0.85~0.9	30
0.9~0.95	25
0.95~1.0	20

利用 Excel 表格公式功能,将已知参数带入信噪比计算公式,便可通过调整  $d$  值来获得各窄波段  $R_{SN}$  值。只要所选 CCD 满足: $R_{SN}$  值在整个波段内均值为 250 左右,并且在 55% 及以上数量的窄波段内  $R_{SN}$  值大于 250,便认定符合项目需求。经过计算可得,满足条件的像元尺寸为 15.58  $\mu\text{m}$ 。在经过像元规模和帧频要求筛选后的 6, 8, 9 号 CCD 中,只有 8 号 CCD 满足像元尺寸要求。

因此,经过上述基于 CCD 三个参数的选型方法的筛选,得到 8 号 CCD 为此高光谱项目最优选。

## 4.3 最优选 CCD 结果分析

### 4.3.1 SNR 模型分析

在如 4.2.3 所述的相同的焦深条件下( $\delta=2\lambda F^2$ ,其中  $F$  取 3.4),对帧频与像元规模符合要求 6 号和 9 号 CCD 的进行 SNR 计算(其中 6 号行间转移 CCD 需额外乘 50% 的填充因子),与最优选 8 号 CCD SNR 进行比较。得到 6, 8, 9 号 CCD 在 VNIR 波段 SNR 曲线如下图 1 所示。

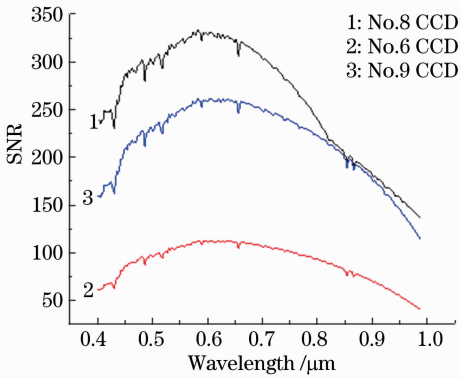


图 1 各 CCD 信噪比

 Fig. 1  $R_{SN}$  of different CCDs

其中 8 号 CCD 平均信噪比为 260, 最高  $R_{SN}$  为 330,  $R_{SN}$  超过 250 的窄波段数为 155 个, 达总窄波段数 60% 以上, 符合项目  $R_{SN}$  要求。而 6 号 CCD 平均信噪比仅为 90, 最高  $R_{SN}$  仅为 113。9 号 CCD 平均  $R_{SN}$  为 216, 最高  $R_{SN}$  为 261.5,  $R_{SN}$  超过 250 的波段数为 64 个, 仅占总窄波段数的 25%, 不符合项目信噪比要求。由以上数据统计, 在焦深及其他条件相同的情况下, 6 号 CCD 为行间转移类型 CCD, 其填充因子最高仅能达 50%, 且在三个像元尺寸最小, 因此  $R_{SN}$  最低; 而 8 号帧转移 CCD 填充因子达 100%, 且像元尺寸最大, 因此  $R_{SN}$  最高。

参照 4.1 建立的  $R_{SN}$  模型, 选取 8 号 CCD 与 9 号 CCD 量子效率较高且最接近的波段 0.6438 ~ 0.6460  $\mu\text{m}$  (两者量子效率分别为 0.64982 和 0.64990), 计算可得两者信号电子数  $N_{\text{signal}} = \xi \cdot d^2$  分别为 112347 和 74176, 均为  $n_{\text{com}}^2 = 70^2 \times 50^2 = 7400$  的 10 倍以上, 符合所建立模型的光子噪声限条件。在此窄波段, 8 号和 9 号 CCD 信噪比分别为  $R_{SN8} = 324.66$  和  $R_{SN9} = 259.71$ , 其比值  $\beta_{SNR} = \frac{R_{SN8}}{R_{SN9}} = 1.25$ 。而 8 号和 9 号 CCD 的像元尺寸  $d$  之比为  $\beta_d = \frac{d_8}{d_9} = \frac{16}{13} = 1.23$ 。 $\beta_{SNR}$  与  $\beta_d$  在误差范围内近似相等。计算结果与所建模型相符。

因此在采用相同光学型式、光学效率等参数相同的高光谱成像系统中, CCD 量子效率相同, 在同一窄波段且系统焦深相同时, 当系统满足光子噪声限条件, 即  $N_{\text{signal}} = \xi \cdot d^2 \gg n_{\text{com}}^2$  时,  $R_{SN}$  与像元尺寸  $d$  近似成正比。

#### 4.3.2 焦深模型分析

参照 4.2 建立的焦深模型, 当  $n_{\text{com}}^2 = 70^2 \times 50^2 = 7400$  时, 最低光子噪声限条件为  $N_{\text{signal}} = 74000$ , 此时信噪比为 259.38。令 8 号 CCD 和 9 号 CCD  $R_{SN}$

均达到 260 (大于 259.38, 两者一定都满足光子噪声限条件), 同样选取 0.6438 ~ 0.6460  $\mu\text{m}$  波段对两者进行焦深的计算比较。经计算, 8 号 CCD 的  $F$  数为 4.18, 焦深  $\delta_8 = 2\lambda F_8^2 = 22.536 \mu\text{m}$ , 而 9 号 CCD 的  $F$  数为 3.396, 焦深  $\delta_9 = 2\lambda F_9^2 = 14.875 \mu\text{m}$ , 其比值  $\beta_\delta = \frac{\delta_8}{\delta_9} = 1.5150$ 。而 8 号和 9 号 CCD 的像元尺寸平方之比  $\beta_{d^2} = \frac{d_8^2}{d_9^2} = 1.5148$ , 与焦深之比  $\beta_\delta$  在误差范围内近似相等。计算结果与所建模型相符。

由以上数据统计, 在采用相同光学型式、光学效率等参数相同的高光谱成像系统中, CCD 量子效率相同, 在同一窄波段且达到相同  $R_{SN}$  水平时, 8 号 CCD 由于像元尺寸较大而  $\delta$  明显高于 9 号 CCD; 当系统满足光子噪声限条件, 即  $N_{\text{signal}} = \frac{\psi \cdot d^2}{\delta} \gg n_{\text{com}}^2$  时,  $\delta$  与像元尺寸  $d$  近似成平方关系。

根据上述对两个模型的分析验证, 8 号 CCD 较其他备选 CCD 有更高的  $R_{SN}$  和更深的  $\delta$ , 从而拥有更高的灵敏度和和更高的稳定性, 验证了 8 号 CCD 为此项目最优选择, 与理论选择相符合。并且根据工程应用系统计算得到结论: 在采用相同光学型式、光学效率等参数相同的高光谱成像系统中, CCD 量子效率相同, 在同一窄波段, 系统满足光子噪声限条件下,  $\delta$  条件相同时,  $R_{SN}$  与像元尺寸  $d$  近似成正比; 而  $R_{SN}$  相同时, 焦深  $\delta$  与像元尺寸  $d$  近似成平方关系。

## 5 结 论

根据高光谱成像系统对 CCD 的要求, 提出了基于像元规模、像元尺寸和帧频三个参数的 CCD 选型方法。利用  $R_{SN}$  计算公式, 推导变换得到  $R_{SN}$  与  $d$  的对应函数关系。以实际系统为例, 先进行直观的像元规模标准选型和帧频标准选型; 再通过推导的函数关系与合适的参数取值, 计算符合项目系统  $R_{SN}$  要求的 CCD 像元尺寸, 从而得到 8 号 CCD 为最优选的 CCD。将最优选与其他 CCD 进行  $R_{SN}$  与  $\delta$  的比较分析, 结果表明最优选 CCD 灵敏度和稳定性明显高于其他 CCD。同时得到  $R_{SN}$  和  $\delta$  与  $d$  的关系: 在同一窄波段, 各 CCD 量子效率接近时, 系统满足光子噪声限条件,  $\delta$  相同时,  $R_{SN}$  与  $d$  近似成正比; 而  $R_{SN}$  相同时,  $\delta$  与  $d$  近似成平方关系。提出的 CCD 选型方法能够快速准确的选取符合项目要求的 CCD, 并且通过  $R_{SN}$  模型和焦深模型的建立和计算

分析验证了选型的合理性,可为高光谱成像仪 CCD 选型提供一定的指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Lixia, Wang Hui, Gao Jun. Analysis and applications of spaceborne hyperspectral imaging technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2000, 21(1): 40–46.  
王丽霞, 王 慧, 高 军. 星载超光谱成像技术应用及现状分析[J]. *航天返回与遥感*, 2000, 21(1): 40–46.
- 2 Mei Anxin, Peng Wang, Qin Qiming, *et al.*. Introduction to Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.  
梅安新, 彭 望, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- 3 Li Tianhong, Yang Haihong, Zhao Yongping. Imaging spectrometer remote sensing: current status and future [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1997, 12(2): 54–58.  
李天宏, 杨海宏, 赵永平. 成像光谱仪遥感现状与展望[J]. *遥感技术与应用*, 1997, 12(2): 54–58.
- 4 Pu Ruiliang, Gong Peng. Hyperspectral Remote Sensing and its Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.  
浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 5 R O Green, M L Eastwood, C M Sarture, *et al.*. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imager spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 65(3): 227–248.
- 6 Zhang Da, Zheng Yuquan. The application and development of hyperspectral remote sensing [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(3): 67–72.  
张 达, 郑玉权. 高光谱遥感的发展与应用[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(3): 67–72.
- 7 Yu Bingxi. Study on high resolution imaging spectrometer (C-HRIS) [J]. *OME Information*, 2000, 17(4): 1–5.  
禹秉熙. 高分辨率成像光谱仪(C-HRIS)研究[J]. *光机电信息*, 2000, 17(4): 1–5.
- 8 Wang Yueming, Liu yinnian. Application of high frame rate CCD detectors technology [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 25(1): 50–55.  
王跃明, 刘银年. 高帧频面阵 CCD 探测器应用技术研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(1): 50–55.
- 9 Liu Xiande. CCD and its Application Principle [M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1990.  
刘贤德. CCD 及其应用原理[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- 10 Wang Jianyu, Shu Rong, Liu Yinnian, *et al.*. Introduction to Imaging Spectral Technique [M]. Beijing: Science Press, 2011.  
王建宇, 舒 嵘, 刘银年, 等. 成像光谱技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 11 M Robberto, M Stiavelli, S Baggett, *et al.*. Selection of the infrared detectors for wide field camera 3 on the hubble space telescope [C]. *SPIE*, 2004, 5167: 167–174.
- 12 A Barducci, F Castagnoli, G Castellini, *et al.*. Developing a new hyperspectral imaging interferometer for earth observation [C]. *SPIE*, 2012, 51(11): 111706.
- 13 A F H Goetz, G Vane, J E Solomon, *et al.*. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 228(4704): 1147–1153.
- 14 Zhou Shichun. Introduction to Advanced Infrared Optoelectronic Engineering [M]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2010.  
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2010.
- 15 Zhang Yongsheng, Zhang Yunbin. Aerospace Remote Sensing Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.  
张永生, 张云彬. 航天遥感工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- 16 Wang jianyu, Wang Yueming, Li Chunlai. Noise model of hyperspectral imaging system and influence on radiation sensitivity [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4): 607–620.  
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): 607–620.
- 17 A Eckardt, S Hofer, C Neumann, *et al.*. SNR Estimation for advanced hyperspectral space instrument [C]. *SPIE*, 2005, 5883: 588303.
- 18 Y M Wang, J W Lang, J Y Wang, *et al.*. An advanced scanning method for space-borne hyper-spectral imaging system [C]. *SPIE*, 2011, 8196: 819626.

栏目编辑: 张浩佳