

文章编号 1004-924X(2015)07-1829-09

# 时间延迟积分 CCD 空间相机信噪比的影响因素

刘则洵\*, 万志, 李宪圣, 李葆勇, 邵雅荣

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了定量评估影响时间延迟积分(TDI)CCD空间相机信噪比的因素,研究了 TDICCD空间相机成像机理和噪声来源,建立了相机的信噪比模型。分析了辐射亮度、积分级数、行频和系统增益(模拟增益)对信噪比的影响。搭建了实验室辐射定标系统,模拟了相机在轨工作时的辐射亮度条件。通过辐射定标对不同工作参数与相机信噪比的关系进行了验证。结果表明:对于 TDICCD相机来说,光子散粒噪声、暗电流噪声和固定图形噪声在诸多噪声中起主导作用。相机的输出信号和信噪比均随着辐射亮度、积分级数和系统增益的增加而增大,随着行频的增加而减小。辐射亮度、积分级数、行频和系统增益对信噪比的影响量不同。具体来说,即当辐射亮度、积分级数和行频变化量分别为  $L$  倍、 $M$  倍、 $\tau$  倍时,其导致的信噪比变化量略大于  $L^{1/2}$  倍、 $M^{1/2}$  倍、 $\tau^{-1/2}$  倍。系统增益只能在相对较小的范围内影响信噪比,且信噪比变化幅度随着增益的提高逐渐减小。

**关键词:** CCD空间相机;信噪比;时间延迟积分;辐射亮度;积分级数;行频;系统增益

**中图分类号:** V447.3;V416.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.1829

## Influence factors on SNR of TDICCD space camera

LIU Ze-xun\*, WAN Zhi, LI Xian-sheng, LI Bao-yong, SHAO Ya-rong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: Liu\_zexun@163.com

**Abstract:** To quantitatively assess factors affecting the Signal to Ratio(SNR) of a Time Delay Integration(TDI)CCD camera, the imaging principle and noise sources of the TDICCD space camera were researched and a SNR model was established. The effects of the radiance lightness, integration stages, line transfer frequency and the system gain(analog gain) on the SNR were analyzed. A laboratory radiation calibration system was established to simulate the on-orbit radiance conditions of the camera. The relationship between the SNR and different working parameters were verified by radiation calibration. The calibration results show that the photon shot noise, dark current noise and the fixed pattern noise play a major role in all kinds of noise. The output signal and the SNR of the camera increase with the raises of the radiance, integration stages and the system gain and decrease with the raise of the line transfer frequency. The varieties of these factors have different influences on the SNR. Specifically, when the variations of the radiance, integration stages and the line transfer frequency are respectively  $L$  times,  $M$  times and  $\tau$  times, the variations of the SNR are slightly larger than  $L^{1/2}$  times,

收稿日期:2015-03-20;修订日期:2015-04-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

$M^{1/2}$  times,  $\tau^{-1/2}$  times, respectively. Moreover, the influence of the system gain on the SNR is in a relatively small range and the variation of the SNR decreases gradually with the raise of the system gain.

**Key words:** CCD space camera; signal-to-noise ratio; time delay integration; radiance; integration stage; line transfer frequency; system gain

## 1 引言

空间相机的载体是沿特定轨道运行的卫星。相机与观测目标之间存在相对运动,而且相机的分辨率越高,成像的积分时间就越短,由此必然会导致探测器曝光能量不足。时间延迟积分 CCD (Time Delay Integration, TDICCD) 物理结构类似于面阵。当目标像扫过探测器阵列时,通过对同一目标进行多级次曝光,将各级信号累加,就会增加曝光量,从而实现探测信号的增强。与普通线阵 CCD 相比,采用 TDICCD 能够在不降低空间分辨率的条件下,显著提高相机的响应度和动态范围,还能够减小相机的相对孔径,进而降低相机的体积和重量。因此采用 TDICCD 作为探测器是实现相机轻量化的重要途径。鉴于 TDICCD 对于成像质量提升的巨大优势,国内外已成功研制了 IKONOS、Quick Bird、资源 02B、嫦娥二号等多个 TDICCD 空间相机。

信噪比是一个无量纲值,用倍数或分贝数表示。对于可见-近红外谱段相机,常用信噪比来表示相机的辐射分辨率,即空间相机在接收地面目标反射信号时的分辨能力。信噪比是评价空间相机成像质量和辐射性能的重要技术指标。对信噪比的准确标定,是实验室辐射定标的重要内容。目前对于 TDICCD 相机信噪比的实验室定标,还局限在特定模式下,对典型辐射亮度目标进行标定。由于没有充分考虑相机在轨时的工作状态,这种“单点”式的信噪比标定方式具有片面性。

在轨状态下,除了目标辐射亮度外,还应充分考虑积分级数、行频和系统增益对相机信噪比的影响<sup>[1]</sup>。本文首先从 TDICCD 空间相机成像机理出发,建立 TDICCD 相机信噪比模型,分析了目标辐射亮度、积分级数、行频以及系统增益对信噪比的影响。在此基础上,利用中分辨率大气辐射传输程序 MODTRAN4 对不同太阳高度角和地面反射率的目标进行了辐射亮度估算。利用积分球光源对目标辐射亮度进行模拟,标定对于不

同目标相机的信噪比。此外,通过对不同调光参量(积分级数、行频和系统增益)下相机信噪比的标定,定量地分析三者对于 TDICCD 相机信噪比的影响。

## 2 TDICCD 相机的信噪比模型

### 2.1 噪声来源

相机信噪比为相机输出信号和噪声的比值。噪声是指对图像信号起干扰作用的诸多因素的累加。TDICCD 相机中噪声来源主要包括:光子散粒噪声、暗电流噪声、固定图形噪声、复位噪声、电路读出噪声和量化噪声等。

光子散粒噪声是在光子能量变化的随机过程产生的。散粒噪声作为 TDICCD 相机固有噪声,取决于相机所收集光子的性质,其强度与入射光强度的平方根成正比。与其他噪声来源不同,散粒噪声增大时,相机的信噪比也会增加。

暗电流噪声来源于 TDICCD 中热电子的数量变化。即使在无光照的条件下,由于半导体的热激发效应,TDICCD 仍能产生出暗电流,暗电流使储存在势阱内的电荷数量增加,从而引起噪声。暗电流噪声与温度直接相关,采取制冷措施能够有效地抑制暗电流噪声<sup>[2]</sup>。

固定图形噪声包括两种,一是在无光照时,由于暗电流在像元方向分布不均匀造成的固定模式噪声;二是由于像元间响应度的差异造成的响应非均匀性。由于这种噪声不随空间和时间变化,可通过辐射定标对其进行分离和清除<sup>[3-4]</sup>。

复位噪声是对电荷进行复位操作时产生的一种电阻热噪声。复位噪声与信号电荷无关,与 TDICCD 的输出结构紧密相关。由于热噪声的随机性,不同像素周期的复位噪声也是随机的。在一个像素周期内,采用相关双采样技术(CDS),可有效地抑制输出信号的复位噪声<sup>[5]</sup>。

电路读出噪声主要指读出电路的放大器噪声,其与图像传感器信号的电路结构密切相关。读出噪声为加性噪声,对于每个像元无论输入信

号多少,噪声总是分别累加到信号上。可以通过对电路的优化设计,减小放大器的尺寸等来减小读出噪声。对于 TDICCD 相机,由于芯片外放大器的噪声比芯片内放大器的噪声要小得多,故分析电路读出噪声时,通常只考虑芯片内放大器的噪声。

量化噪声是在模拟信号向数字信号转换过程中产生的噪声<sup>[6]</sup>。量化噪声与信号电荷数无关,与参考电压范围、系统增益和量化位数相关。选取合适的模数转换器、提高量化位数、增加电路增益都能够有效地减小量化噪声,提高相机输出图像的信噪比。

噪声来源的各项因素是独立非相关的,根据独立误差合成原理,相机总噪声可表示为各项噪声平方和的平方根,即:

$$N_{\text{camera}} = \sqrt{N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{PRNU}}^2 + N_{\text{reset}}^2 + N_{\text{read}}^2 + N_{\text{ADC}}^2}, \quad (1)$$

其中:  $N_{\text{camera}}$  为相机总噪声,  $N_{\text{shot}}$  为光子散粒噪声,  $N_{\text{dark}}$  为暗电流噪声,  $N_{\text{PRNU}}$  为固定图形噪声,  $N_{\text{reset}}$  为复位噪声,  $N_{\text{read}}$  为电路读出噪声,  $N_{\text{ADC}}$  为量化噪声。

对于 TDICCD 相机,上述噪声不仅与相机光学参数、TDICCD 器件光电参数和视频处理器电子学参数等相机固有特性相关,而且受辐射亮度、积分级数、行频、系统增益等多种因素的影响,因而是一个动态变化的过程。

尽管噪声分析具有复杂性和不确定性,但各类噪声源对于总噪声贡献的比例不同。由于相关双采样和辐射定标技术在空间相机领域的广泛应用,复位噪声和固定图形噪声得到有效的抑制。此外,目前主流的空间相机的视频处理器均采用 10 bit 以上数字量化,较大的量化噪声得到明显的改善。对于大多数的空间相机,其噪声源存在如下关系:  $N_{\text{shot}}$  或  $N_{\text{read}} > N_{\text{ADC}} > N_{\text{dark}} > N_{\text{PRNU}} > N_{\text{reset}}$ , 光子散粒噪声和电路读出噪声作为相机的主要噪声源,二者占总噪声的比例一般超过 2/3 甚至更多。

## 2.2 相机信噪比

TDICCD 相机一般工作在可见光或近红外波段,其在轨工作时,相机接收到的能量只需考虑目标对于太阳光的反射和上行大气散射,地球表面的热辐射和相机自身的热辐射可忽略<sup>[7]</sup>。故相机

的像面照度可表示为:

$$E_i = \frac{(1 - A^2) K_n(\alpha) \cos^n \alpha}{4 F^2 (1 - B)^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) + \pi L_u(\lambda)] \tau_o(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda_f} d\lambda, \quad (2)$$

其中:  $A$  为镜头遮拦比,对于透射镜头和离轴反射镜头为 0,  $K_n$  为镜头渐晕系数,  $F$  为镜头相对孔径的倒数,  $B$  为镜头放大率,  $E(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处地面目标光谱辐照度,  $\rho(\lambda)$  为地面目标反射率,  $L_u(\lambda)$  为相机在轨接收到的上行大气散射辐射亮度,  $\tau_a(\lambda)$  为大气透光率,  $\tau_o(\lambda)$  为相机光学透光率,  $E_{\lambda_f}$  为相机像面上的杂光照度,  $\alpha$  为镜头半视场角,  $n$  为镜头视场增加引起的渐晕。

在考察相机的信噪比时,可对式(2)进行简化。如已知空间相机的渐晕系数  $K_n(\alpha) = 1$ , 镜头放大率  $B = 0$ 。如果只考虑相机的中心视场,  $\cos(\alpha) = 1$ 。上行大气散射辐射亮度  $L_u(\lambda)$  和相机像面上的杂光照度  $E_{\lambda_f}$  可以忽略不计<sup>[8]</sup>。此时,相机的像面照度为:

$$E_i = \frac{1 - A^2}{4 F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

若 TDICCD 相机的积分时间为  $t_{\text{int}}$  (行频的倒数),相机成像所采用的积分级数为  $M$ ,则有效积分时间为  $t = M t_{\text{int}}$ 。

相机像面处的实际曝光量  $S_e$  可表示为像面照度与有效积分时间的乘积<sup>[9]</sup>,即:

$$S_e = \frac{(1 - A^2) M t_{\text{int}}}{4 F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

若 TDICCD 器件的光谱响应度为  $R(\lambda)$ ,则相机信号可表示为:

$$S_{\text{camera}} = \frac{(1 - A^2) M t_{\text{int}}}{4 F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) R(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

TDICCD 相机的信噪比模型为:

$$\frac{S_{\text{camera}}}{N_{\text{camera}}} = \frac{\frac{(1 - A^2) M t_{\text{int}}}{4 F^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\sqrt{N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{PRNU}}^2 + N_{\text{reset}}^2 + N_{\text{read}}^2 + N_{\text{ADC}}^2}}. \quad (6)$$

### 3 信噪比的影响因素

#### 3.1 辐射亮度

空间相机的成像过程是通过相机光学系统收集目标入射到其入瞳处的辐射亮度,并将其聚焦到探测器上,经过光电转换成图像信号输出的过程。入瞳辐射亮度不仅包含目标直接反射的太阳辐射,还包含太阳辐射在大气之间以及大气与地表之间的散射辐射,这些构成分布不均匀的向下和向上的散射辐射,称为大气辐射。大气辐射可以看作叠加在相机图像上的直流分量。

考虑到大气辐射传输的影响,对于可见近红外相机来说,其入瞳处的辐射亮度可表示为:

$$L_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) + \pi L_u(\lambda)] d\lambda \quad (7)$$

依据信噪比模型,当相机入瞳处的辐射亮度增大  $N$  倍时,相机输出信号也将增大至  $N$  倍。从对相机噪声来源分析可知,暗电流噪声与暗电流有关,电路读出噪声与 TDICCD 芯片的电路结构有关,这两种噪声与辐射亮度无关。量化噪声是在模拟信号向数字信号转换过程中产生的。量化噪声与辐射亮度无关。因此,不同辐射亮度下,引起相机信噪比变化的主要是光子散粒噪声,其强度与入射光强度的平方根成正比。因此,相机信噪比随辐射亮度的增大而增加。当光子散粒噪声为主要噪声源时,相机入瞳处的辐射亮度增大  $N$  倍,信噪比将提高  $N^{1/2}$  倍;当其他种类噪声为主要噪声源时,信噪比将提高  $N$  倍。

#### 3.2 积分级数

TDICCD 是一种具有面阵物理结构,采用线阵输出方式的探测器。在轨成像过程中,经过相机光学系统的目标图像将在不同时刻依次在 TDICCD 的各级像元上成像。每一级像元的图像信号并不直接输出而是转移到下一级像元,而下一级像元是在上一级转入信号的基础上对同一目标进行图像信号采集,即最后一级采集的图像信号是其与前面所有级次信号的累加。由信噪比模型可知,当 TDICCD 的积分级数为  $M$  时,相机输出信号增大至单级次输出的  $M$  倍。

在产生噪声的诸多因素中,由于积分级数对信号的累加作用是在读出电路之前完成的,故复位噪声、电路读出噪声和量化噪声在读出电路之

后的噪声源属于非级数依赖噪声,与积分级数无关<sup>[10]</sup>。光子散粒噪声作为相机输入噪声,与积分级数  $M$  相关,假设单一级次引入的散粒噪声为  $N_{\text{shot}}$ ,则经过  $M$  级累加后,其大小变为  $M^{1/2} N_{\text{shot}}$ 。暗电流噪声和固定图形噪声源于 TDICCD 芯片内部,故与积分级数  $M$  相关,假设单一级次引入的噪声分别为  $N_{\text{dark}}$  和  $N_{\text{PRNU}}$ ,则经过  $M$  级累加后,其大小分别变为  $M^{1/2} N_{\text{dark}}$  和  $M^{1/2} N_{\text{PRNU}}$ 。

通过上述分析可以得到如下结论:首先,采用时间延迟积分的方式可大幅度提高信号强度。其次,无论相机主要噪声来自哪个因素,随着级数的增加,噪声增加的速率都小于信号增加的速率,即相机信噪比提高。最后,积分级数对信噪比的影响量与主要噪声的来源有关。当光子散粒噪声、暗电流噪声和固定图形噪声是相机的主要噪声源时,信噪比与  $M^{1/2}$  成正比;当复位噪声、电路读出噪声和量化噪声是相机的主要噪声源时,信噪比与  $M$  成正比。

#### 3.3 行频

对于采用 TDI 成像模式的空间相机,为保证成像质量,要求 TDICCD 积分级数方向的电荷转移速率与像的运动速率一致。空间相机搭载在卫星平台上,按照预定轨道绕地球运动,其像移速度为:

$$V_p = \frac{V_G}{H} f, \quad (8)$$

其中:  $f$  为相机光学系统的焦距,  $H$  为卫星的轨道高度,  $v_G$  为星下点速度,即卫星在地面投影速度。

星下点速度与卫星轨道速度的关系为:

$$v_G = v_H \frac{R}{R+H}, \quad (9)$$

其中:  $v_H$  为卫星轨道速度(卫星对地心速度),  $R=6\,371\text{ km}$ ,为地球半径。

卫星轨道速度由轨道高度决定<sup>[11]</sup>,可近似表达为:

$$v_H = \sqrt{\frac{GM}{R+H}}, \quad (10)$$

其中:  $G=6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$  为万有引力常数,  $M=5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$  为地球质量。

如果相机 TDICCD 的像元尺寸为  $a$ ,通过式(8)~(10)可以推导出相机的行频  $\tau$  为:

$$\tau = \frac{1}{t_{\text{int}}} = \frac{v_p}{a} = \frac{f \cdot R}{a \cdot H \cdot (R+H)} \cdot \sqrt{\frac{GM}{R+H}} \quad (11)$$

空间相机在轨运行期间,其行频只与轨道高度有关,由于卫星轨道的确定性,其行频只能在一定范围内变化<sup>[12-13]</sup>。

行频是单个像元积分时间(行周期)的倒数,相机行频的变化,实际上改变的是相机的积分时间,而行周期和积分级数对于信噪比的影响是一致的,因而行频对于信噪比的影响和积分级数相反。首先,增加相机行频,信号强度将会减弱。其次,随着行频的增加,噪声减小的速率都小于信号减小的速率,即相机信噪比降低。最后,行频对信噪比的影响量与主要噪声的来源有关。当光子散粒噪声、暗电流噪声和固定图形噪声是相机的主要噪声源时,信噪比与  $\tau^{1/2}$  成反比;当复位噪声、电路读出噪声和量化噪声是相机的主要噪声源时,信噪比与  $\tau$  成反比。

### 3.4 系统增益

由于空间相机的行频只能在一定范围内变化,而且即使采用 TDICCD 作为成像器件,积分级数的调整受硬件的限制,具有不连续性。因而,通过调整系统增益来改善成像质量成为空间相机在轨应用研究的重要方向。

空间相机的系统增益分为数字增益和模拟增益,其调整的目的是为了使图像层次丰富,增强图像的可辨识性<sup>[14]</sup>。但数字增益的调整只能将信号和噪声进行等比例放大,无法改变相机的信噪比。

与数字增益不同,模拟增益是在 AD 转换之前添加的,因而量化噪声与模拟增益的调整无关。通过信噪比模型可以看出,随着模拟增益的增加,信号以及除量化噪声外的噪声因子都进行了等比例的放大,由于量化噪声保持不变,其占有总噪声的比例减小,从而提高了相机的信噪比。从信噪比模型中还可以看出,模拟增益只能在相对较小的范围内提升信噪比。随着模拟增益的增加,信噪比提高的幅度将逐渐减小,当量化噪声的影响可忽略时,达到最大值。

## 4 定标验证

为了验证各类因素对于信噪比的影响,采用积分球面源近距离法对 TDICCD 相机进行定标验证。积分球光源常用于可见近红外遥感器的实验室辐射定标,其输出能量大,具有良好的面均匀

性和角度特性(朗伯性),可提供一个空间均匀且能充满相机视场的均匀漫射源,在相机动态范围的不同点上实现全孔径、全视场、全波段定标。

首先,根据相机入瞳处的目标积分辐射亮度数据调整积分球出口的积分辐射亮度;其次,设置相机的工作参数(积分级数、行频和增益),采集相机多行输出图像(实验中取 500 行);接着,对相机的每一个像元用多行灰度的平均值得到信号值,用多行灰度的均方根误差得到均方根噪声值,用信号值与均方根噪声值的比值求得该像元的信噪比;最后,用所有像元信噪比的平均值表示相机的信噪比。

在确定积分球出口的积分辐射亮度输出范围时,为了更好地模拟相机在轨工作时的实际情况,利用中分辨率大气辐射传输程序 MODTRAN4 对不同太阳高度角下,不同反射率的地面目标到达大气层顶(TOA)的光谱辐射亮度进行估算<sup>[15]</sup>。估算结果如表 1 所示,积分辐射亮度值(积分 500~900 nm)随太阳高度角和目标反射率的提高而增大。

表 1 大气层顶积分辐射亮度

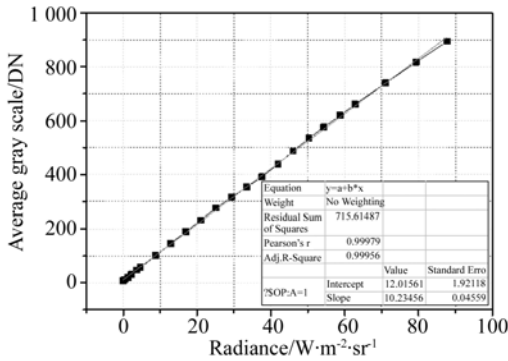
Tab. 1 Integral radiance on the top of atmosphere  
(W/m<sup>2</sup> · sr)

	目标反射率					
	0.05	0.2	0.4	0.6	0.8	1
5°	2.786	3.224	3.825	4.449	5.098	5.778
10°	5.499	6.992	9.085	11.30	13.64	16.13
20°	9.433	13.83	20.01	26.58	33.54	40.90
30°	12.13	19.67	30.22	41.36	53.10	65.45
40°	14.19	24.71	39.37	54.76	70.88	87.75
50°	15.83	28.98	47.23	66.30	86.21	106.9
60°	17.10	32.41	53.59	75.65	98.61	122.5
70°	18.01	34.92	58.26	82.53	107.7	133.9
80°	18.72	36.86	61.88	87.84	114.8	142.6
90°	18.77	36.99	62.11	88.18	115.2	143.2

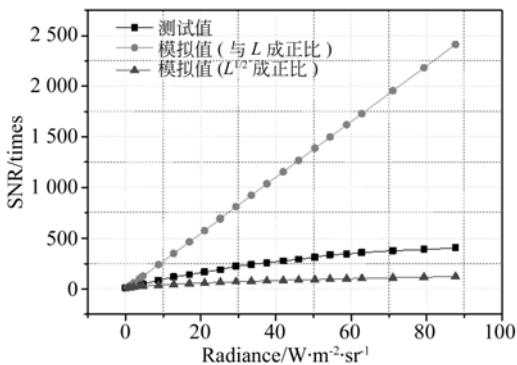
### 4.1 辐射亮度与信噪比

将积分球光源在表 1 所示的辐射亮度范围内设置若干个辐射亮度点,在保证相机工作参数(积分级数、行频、系统增益)不变的前提下,对不同辐射亮度下相机的信噪比进行定标,如图 1 所示。相机的输出信号随着入瞳辐射亮度  $L$  的增加而增大,且二者线性拟合的相关系数为 0.999 56,即输出信号随着入瞳辐射亮度的增加以近似线性的

方式增大。信噪比随着辐射亮度  $L$  的增加而增大,由于各种噪声的共同作用,信噪比增大的倍数介于  $L^{1/2} \sim L$  之间。当辐射亮度较低时,光子散粒噪声较小,信噪比增大速度较快。随着辐射亮度的提高,光子散粒噪声逐步变大,信噪比增幅逐渐减缓。



(a) 辐射亮度对图像信号的影响  
(a) Influence of radiance on image signal



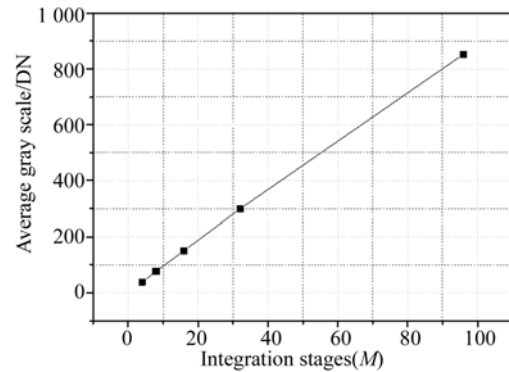
(b) 辐射亮度对信噪比的影响  
(b) Influence of radiance on SNR

图 1 信噪比与辐射亮度的关系

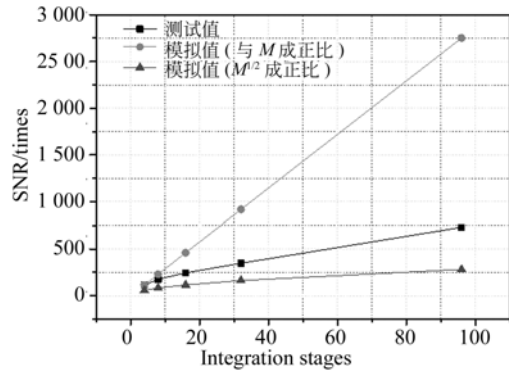
Fig. 1 Relationship between SNR and radiance

#### 4.2 积分级数与信噪比

在保证积分球光源辐射亮度不变的情况下,采用固定行频和系统增益的方式对不同积分级数下相机的信噪比进行定标,如图 2 所示。相机的输出信号与积分级数  $M$  成正比。相机的信噪比随着积分级数  $M$  的增加而增大,由于各种噪声的共同作用,信噪比增大的倍数介于  $M^{1/2} \sim M$  之间。由于相机信噪比增加的趋势与  $M^{1/2}$  正比例模拟曲线更为近似,可以得出,光子散粒噪声、暗电流噪声和固定图形噪声在相机的诸多噪声中起主导作用。



(a) 积分级数对图像信号的影响  
(a) Influence of integration stages on image signal



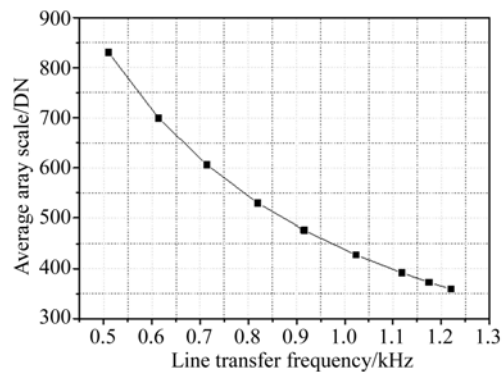
(b) 积分级数对信噪比的影响  
(b) Influence of integration stages on SNR

图 2 信噪比与积分级数的关系

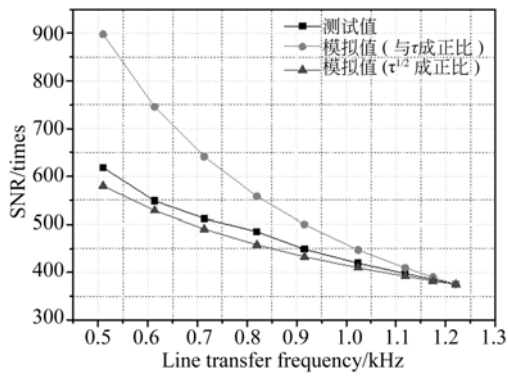
Fig. 2 Relationship between SNR and integration stages

#### 4.3 行频与信噪比

依据相机的轨道高度数据,确定相机在轨工作时行频的变化范围。在保证积分球光源辐射亮度不变的情况下,采用固定积分时间和系统增益的方式对不同行频下相机的信噪比进行定标,如图 3 所示。行频对信噪比的影响与积分级数的影响相反。相机的输出信号与行频  $\tau$  成反比。相机



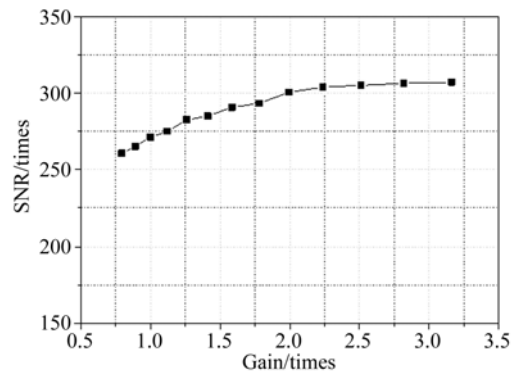
(a) 行频对图像信号的影响  
(a) Influence of line transfer frequency on image signal



(b) 行频对信噪比的影响  
(b) Influence of line transfer frequency on SNR

图 3 信噪比与行频的关系

Fig. 3 Relationship between SNR and line transfer frequency



(b) 系统增益对信噪比的影响  
(b) Influence of system gain on SNR

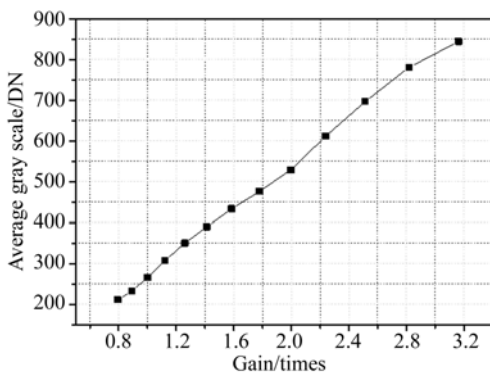
图 4 信噪比与系统增益的关系

Fig. 4 Relationship between SNR and system gain

的信噪比随着  $\tau$  的增加而减小,由于各种噪声的共同作用,信噪比测试曲线介于  $\tau^{1/2}$  反比例模拟曲线和  $\tau$  反比例模拟曲线之间,且与  $\tau^{1/2}$  反比例模拟曲线更为近似,由此再一次验证了光子散粒噪声、暗电流噪声和固定图形噪声的主导作用。

#### 4.4 系统增益与信噪比

由于数字增益对于信噪比的影响已排除,这里的系统增益为模拟增益。和其他调光参量的测试相同,采取固定辐射亮度、积分级数和行频,只改变系统增益的方式对相机信噪比进行定标,如图 4 所示。系统增益以近似线性的方式对相机的输出信号进行放大。相机信噪比随着系统增益的提高而增大,但增大的幅度不大,而且随着增益的提高,信噪比增大幅度有逐渐减缓的趋势。



(a) 系统增益对图像信号的影响  
(a) Influence of system gain on image signal

## 5 结 论

本文研究了 TDICCD 空间相机的成像机理和噪声来源,建立了相机信噪比模型。在此基础上,对辐射亮度、积分级数、行频和系统增益对相机信噪比的影响进行理论分析。利用积分球光源提供特定的辐射亮度,模拟在轨工作的实际情况,对上述各项因素与信噪比的关系进行了实验室定标验证。定标结果表明,相机的输出信号和信噪比均随着辐射亮度、积分级数和系统增益(模拟增益)的增加而增大,随着行频的增加而减小。信号的变化量与辐射亮度、积分级数和系统增益成正比,与行频成反比。对于 TDICCD 相机来说,光子散粒噪声、暗电流噪声和固定图形噪声在相机的诸多噪声中起主导作用。辐射亮度、积分级数、行频和系统增益对信噪比的影响量不同。信噪比与辐射亮度、积分级数、行频的关系介于这三者变化量的均方根关系和线性关系之间,且与均方根关系更为接近。当辐射亮度、积分级数和行频变化量分别为  $L$  倍、 $M$  倍、 $\tau$  倍时,其导致的信噪比变化量略大于  $L^{1/2}$  倍、 $M^{1/2}$  倍、 $\tau^{-1/2}$  倍。系统增益只能在相对较小的范围内影响信噪比,且信噪比变化幅度随着增益的提高逐渐减小。本文的结果可为 TDICCD 空间相机在轨情况下的信噪比评估提供理论和实验依据。

## 参考文献:

- [1] 顾营迎,沈湘衡,马军,等. 空间相机成像参数配置功能检验[J]. 光学精密工程,2014,22(5): 1183-1189.  
GU Y Y, SHEN X H, MA J, *et al.*. Verification of setting function for imaging parameters of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1183-1189. (in Chinese)
- [2] 李广泽,刘金国,宁飞,等. 基于等效成像模型的立体测绘相机成像信噪比分析[J]. 仪器仪表学报,2012,33(5): 1097-1101.  
LI G Z, LIU J G, NING F, *et al.*. Imaging SNR analysis of stereo mapping camera based on equivalent imaging model [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(5): 1097-1101. (in Chinese)
- [3] 宁永慧,郭永飞. 星上时间延迟积分 CCD 拼接相机图像的实时处理[J]. 光学精密工程,2014,22(2): 508-516.  
NING Y H, GUO Y F. Real-time image processing in TDICCD space mosaic camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 508-516. (in Chinese)
- [4] 张宇,张立国,张星祥. 行间转移大面阵 CCD 相机的 Smear 噪声实时去除[J]. 光学精密工程,2013,21(9): 2388-2394.  
ZHANG Y, ZHANG L G, ZHANG X X. Real-time elimination of smear noise for large interline transfer area CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2388-2394. (in Chinese)
- [5] 李云飞,李敏杰,司国良,等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. 光学精密工程,2007,15(8): 1196-1202.  
LI Y F, LI M J, SI G L, *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1196-1202. (in Chinese)
- [6] 王军,黄巧林. 信噪比和量化值的关系研究[J]. 航天返回与遥感,2005,26(2): 25-28.  
WANG J, HUANG Q L. Research on the relationship of the signal-to-noise and the quantized value [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, 26(2): 25-28. (in Chinese)
- [7] ROBERT D F, THEODORE A T. Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(4): 574-585.
- [8] 付强,相里斌,景娟娟. 基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. 光学学报,2012,32(2): 0211001-1-7.  
FU Q, XIANG L B, JING J J. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0211001-1-0211001-7. (in Chinese)
- [9] ROBERT L L, ROBERT A K. Signal-to-noise ratio, contrast-to-noise ratio, and exposure time for imaging systems with photon-limited noise [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(5): 056403-1-06.
- [10] 徐茜,苗丽峰,王跃明,等. 8192 像元 TDI-CCD 相机信噪比的深入分析[J]. 红外技术,2008,30(12): 683-687.  
XU Q, MIAO L F, WANG Y M, *et al.*. In-depth analysis of TDI-CCD image sensor [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(12): 683-687. (in Chinese)
- [11] 马天波,郭永飞,李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. 光学精密工程,2010,18(9): 2028-2035.  
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [12] 胡燕,金光,常琳,等. 椭圆轨道 TDICCD 相机像移匹配计算与成像验证[J]. 光学精密工程,2014,22(8): 2274-2284.  
HU Y, JIN G, CHANG L, *et al.*. Image motion matching calculation and imaging validation of TDICCD camera on elliptical orbit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2274-2284. (in Chinese)
- [13] 石俊霞,李佩玥,李洪法,等. 遥感 TDICCD 相机侧摆成像及定位精度优化[J]. 液晶与显示,2014,29(5): 777-784.  
SHI J X, LI P Y, LI H F, *et al.*. Scroll imaging of space TDICCD remote sensing camera and optimization of image location accuracy [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 777-784. (in Chinese)
- [14] 王德江,匡海鹏. 模拟增益对电荷耦合器件信噪比与动态范围影响的实验研究[J]. 物理学报,2011,60(7): 077208-1-6.  
WANG D J, KUANG H P. Experimental study of the effects on signal noise ratio and dynamic range

caused by analog gain for CCD [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(7): 077208-1-6. (in Chinese)

- [15] 陈宇恒,周建康,陈新华,等. 基于 MODTRAN 模型计算星载 CCD 相机信噪比[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 910-914.

CHEN Y H, ZHOU J K, CHEN X H, *et al.*. Calculation of SNR of a satellite CCD camera based on MODTRAN [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 910-914. (in Chinese)

作者简介:



刘则洵(1980—),男,吉林人,硕士,副研究员,2013年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器辐射定标方面的研究。E-mail: liu\_zexun@163.com



万志(1973—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2000年于中科院长春光机所获得硕士学位,2008年于长春光机所获得博士学位,主要从事光学遥感器实验室光谱辐射定标和性能评价方面的研究。E-mail: wz7181@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)