

TDI CCD 成像电路系统响应模型的研究

郑亮亮 张贵祥 贺小军 曲宏松 金 光

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要 为建立准确的时间延迟积分电荷耦合元件(TDI CCD)成像电路系统的响应模型,根据成像系统的信号处理流程,详细分析了 CCD 传感器、预放电路与视频处理电路等主要环节对系统响应的影响,并结合理论响应模型,针对实际的处理流程,建立了实际系统的理论响应模型。利用某航天相机 TDI CCD 成像系统进行了暗电流噪声、视频处理电路噪声等专项测试实验,并在不同的拍照参数与光辐射条件下进行了辐射定标实验,分析了具体的实验图像数据,采用最小二乘法的线性拟合与二次多项式拟合分别得到了系统响应的近似数学模型和高精度数学模型,拟合决定系数 R^2 分别达到了 0.992 和 0.9998。利用该响应模型可以准确计算卫星在轨拍照时地物的辐射特性,并为合理选择相机在轨拍照参数提供依据。成像实验表明,系统响应模型准确,参数设置合理,满足相机在轨拍照的任务要求,提高了相机在轨工作的效率。

关键词 成像系统;时间延迟积分;电荷耦合元件;成像电路;响应模型;辐射定标

中图分类号 TN386 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1104001

Research on Response Model of TDI CCD Image System

Zheng Liangliang Zhang Guixiang He Xiaojun Qu Hongsong Jin Guang

(National and Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract To establish accurate response model of time delay integration charge coupled device (TDI CCD) image system, the main parts are analyzed in detail, such as CCD sensor, amplifier circuits and video processing circuit, according to the flow of signal processing. The response model for the actual system is established in theory based on the flow processing. The noises of dark current, video processing circuit are tested on a spatial TDI CCD image system. And so is the radiometric calibration under conditions of different parameters and illuminations. The image data of experiments is analyzed. An approximate formula and a precise formula are achieved by linear polynomial and quadratic polynomial of the least square method. The goodness of fit for linear and quadratic polynomial shows that R^2 reaches 0.992 and 0.9998, respectively. The radiation character of ground targets can be acquired by the response model. And the choice of reasonable working parameter can also be decided according to the model. The experimental results show that the response model of image system is accurate and the working parameters are reasonable, which meets the demand and improves the efficiency of on-orbit spatial camera.

Key words imaging systems; time delay integration; charge coupled device; image circuit; response model; radiometric calibration

OCIS codes 040.1490; 040.1520; 110.2970; 110.2990; 110.4280

1 引 言

电荷耦合元件(CCD)成像电路系统是空间光学相机电子学的重要组成部分,其包括焦平面电路与视频处理电路两部分。该系统能够将 CCD 焦面处的光信号转换为模拟的电信号,并经过射随、放大和

模数转化等处理,进一步将模拟视频信号量化为数字信号,并将数字图像信息按照约定的数据格式进行整合,最终将整合后的图像数据发送至数传系统,从而实现图像数据下传至地面。

为明确 CCD 成像电路系统的光辐射输入与数

收稿日期: 2014-03-28; 收到修改稿日期: 2014-05-07

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)

作者简介: 郑亮亮(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光学遥感成像电子学方面的研究。

E-mail: adqe@163.com

字量输出的相互关系,即实现对输入光辐射与输出数字量进行定量的描述,就需要研究 CCD 成像电路系统的输出响应模型。一旦建立了较准确的响应模型,其意义重大,一方面能够掌握相机在轨工作的状态是否正常,一方面可以反推出地物目标的辐射特性,有助于卫星遥感图像的判读,并且能够辅助选择相机的在轨拍照参数。

目前地面主要依靠应用系统所接收的卫星下传图像来选择航天相机的在轨拍照参数,即根据所拍图像的效果、灰度层次来设置拍照参数,并将参数上注至卫星,如果参数选择不合理,所拍图像仍然不能满足使用要求,则需要再次重新设置参数并上注卫星,增加了卫星的重访时间,因此降低了相机在轨工作的效率。而如果利用成像系统的响应模型,其定量的描述了系统输出与各参数之间的关系,因此可以为地面选择相机的在轨拍照参数提供重要依据,能够快速、准确、高效的确定合理的拍照参数^[1]。

CCD 成像系统响应模型的建立主要通过辐射定标实验来实现,其可以建立相机的辐射输入与最

终信号输出之间的匹配关系,能够对相机辐射输入和信号输出进行定量描述,并能校正像元之间的相对辐射响应差异^[2-4]。

通过对 CCD 成像系统进行辐射定标实验,获得了大量各种拍照参数条件下的图像数据,利用最小二乘法对实验数据进行拟合,建立了较准确的 CCD 成像电路系统的响应模型,确定了系统输出与辐射输入、积分级数和积分时间等参数的数学关系。从而使地面可以了解相机在轨工作的状态,并能为相机选择拍照参数提供重要依据,提高了相机载荷的工作效率,能够使航天相机在有限的寿命周期内,获得更多更有价值的目标信息。

2 CCD 成像系统信号处理流程

为建立准确的 CCD 成像系统的响应模型,需要对 CCD 成像系统的信号处理流程进行详细分析,以明确各环节对系统输出响应的影响程度。本相机系统的 CCD 信号处理流程如图 1 所示。

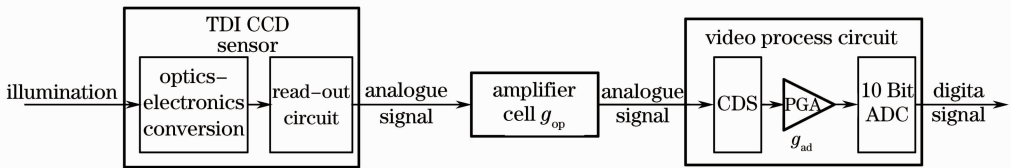


图 1 CCD 成像系统信号处理流程

Fig. 1 Signal processing flow of CCD image system

当光线照射到成像系统的焦平面上,CCD 传感器将光信号转换成电信号,输出模拟电压形式的视频信号,预放单元将该模拟信号进行放大处理,倍数为 g_{op} ,同时该单元还具有对 CCD 传感器保护的功能,放大后的模拟视频信号再被送入到视频处理电路进一步处理,处理环节包括:相关双采样(CDS),增益放大(PGA)以及 A/D 转换(ADC)等,因此视频信号经过 CDS 处理后,便可获得有效的视频电压信号,并再次被放大 g_{ad} 倍,然后通过模数转换器,最终输出数字图像信号。

2.1 TDI CCD 传感器

时间延迟积分(TDI)CCD 传感器是具有时间延迟积分功能的电荷耦合装置,其将光信号转换为电荷信号,然后再通过读出电路将电荷转换为电压信号,可以用光谱响应度来衡量 CCD 传感器整个光电转换的能力,因此 CCD 的响应度直接决定着 CCD 成像系统的输出响应,而响应度是由传感器自身的材料选择、结构与电路设计等因素决定的。

影响 CCD 传感器响应输出的还有暗电流噪声、散粒噪声和读出噪声等,其中暗电流噪声对系统的响应输出影响较大,尤其在低亮度的情况下,系统的输出主要受该因素的影响。而后两者则影响相对较小,可以通过采集多帧图像取平均的分析方式进行有效抑制。

暗电流噪声是由于在传感器处于黑暗条件下电子仍然会产生和被收集造成的,与器件本身设计有关。暗电流噪声与温度和积分时间有关,并且会随着温度的升高而呈指数增加,几乎每增长 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,噪声值增加一倍,而与积分时间基本成线性增长的关系^[5-6]。

2.2 预放处理单元

预放处理单元的电路主要由运算放大器组成,该单元的主要作用是将 CCD 输出的原始视频信号进行放大处理,因此该单元的输入与输出的传递关系为

$$V_{out} = g_{op} \times V_s, \quad (1)$$

式中 V_s 为 CCD 输出的模拟视频信号的幅值, g_{op} 为预放单元的放大倍数。

预放电路在工作带宽内的等效输入噪声计算方法为

$$n_{op} = n_{niv} \sqrt{B_w}, \quad (2)$$

式中 n_{niv} 为归一化带宽条件下的运放等效输入噪声, B_w 为 CCD 输出信号的带宽。参考所使用运放的手册, $n_{niv} = 3.4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 如 CCD 输出信号的带宽为 25 MHz, 则噪声值约为 $17 \mu\text{V}$, 如果利用 10 位 A/D 量化处理, 则对应的码值为 0.01DN(数字量化值), 因此其对成像的影响可忽略不计。

2.3 视频处理电路

视频处理电路包括多种功能模块, 如图 1 所示。CDS 功能模块能够在—个视频信号周期内对模拟视频信号的高低电位分别采样两次, 最终两次采样的电压值之差作为待处理的视频电压信号, 该模块能够对视频信号的噪声进行有效的抑制。PGA 模块为可编程增益放大器, 能够将视频电压信号放大到所要求的大小, A/D 转换模块就是实现对模拟视频信号的量化处理。因此该部分电路的信号输出表达式为

$$V_{out} = g_{ad} \times g_{op} \times V_s, \quad (3)$$

式中 V_s 为 CCD 输出的模拟视频信号的幅值, g_{op} 为预放单元的放大倍数, g_{ad} 为视频处理电路的放大倍数。

视频处理电路是成像系统数字与模拟信号的转换枢纽, 属于集成了模拟电路与数字电路的混合型电路, 其工作时将不可避免的存在噪声, 因此也要针对该电路工作状态的噪声进行详细测试与分析。

视频处理电路通常可以由一片集成芯片就可以实现上述的预定功能, 即视频处理器。视频处理器由于集成了 A/D 模块, 所以其工作噪声中还包括量化噪声。本系统所选用的视频处理器 A/D 模块的量化位数为 10 位, 其输出码值的范围为 $0 \sim 1023\text{DN}$, 其最大量化噪声为 0.2DN , 因此可以忽略其对成像的影响, 所以主要考虑其他电路模块工作时的噪声情况。

3 CCD 成像电路系统输出的理论模型

根据 CCD 的光电转换原理与感光面处的辐射照度, CCD 成像系统的输出电压计算公式为^[7-8]

$$V_s = E(\lambda)MT_{int}R(\lambda), \quad (4)$$

式中 $E(\lambda)$ 为 CCD 成像系统焦平面处的辐射照度, 单位为 W/m^2 , M 表示 TDI CCD 传感器的积分级数, 取值范围由其自身结构决定, 本系统所使用的 CCD 传感器可选积分级数为 $M=8, 16, 32, 48, 72$ 和 96, 若积分级数为 M , 即表示有 M 行像元对目标进行曝光累加, T_{int} 表示 TDI CCD 工作时的积分时间, 即表示每行像元对目标的曝光时间, $R(\lambda)$ 为 CCD 的光谱响应函数, 其表征 CCD 传感器的光电转化能力, 是传感器的关键参数, 单位为 $\text{V}\cdot\text{cm}^2/\mu\text{J}$ 。

根据上述对成像系统信号处理流程的分析, 并且 CCD 输出的模拟视频电压信号最终要通过视频处理器量化为数字信号, 因此将(4)式利用数字量输出的形式可以表示为

$$V_{DN} = g_{ad}g_{op}kE(\lambda)MT_{int}R(\lambda) + N_1 + N_2, \quad (5)$$

式中 k 表示将模拟信号转换为数字信号的比例参数, 由视频处理器决定, $E(\lambda)$ 、 M 、 T_{int} 均为系统响应的变量, N_1 表示成像系统的暗电流噪声, N_2 表示视频处理电路的工作噪声。

但(5)式所描述的数学模型是基于 CCD 焦面处辐射照度响应输出、级数变化以及 A/D 处理等环节的响应均为线性关系的条件下建立的, 但实际系统中这些环节的响应可能都有一定的非线性^[9-10]。因此为精确表达系统的输出响应与辐射照度、积分级数和积分时间之间的数学关系, 可以将相机的数字输出利用泰勒级数分别展开为以辐射照度、积分级数和积分时间为变量的函数, 如(6)~(8)式所示

$$V_{DN} = A_0 + A_1E(\lambda) + A_2E^2(\lambda) + \dots + A_nE^n(\lambda), \quad (6)$$

$$V_{DN} = B_0 + B_1M + B_2M^2 + \dots + B_pM^p, \quad (7)$$

$$V_{DN} = C_0 + C_1T_{int} + C_2T_{int}^2 + \dots + C_qT_{int}^q, \quad (8)$$

式中 $A_0 \sim A_n$ 、 $B_0 \sim B_p$ 、 $C_0 \sim C_q$ 均为待定的系数。以(6)式为例说明确定待定系数的方法: 在一组拍照参数条件下, 改变焦面处的辐射照度, 测试在不同照度下系统的数字输出, 通过多次实验取平均, 可获得较准确的输出值, 然后对数据进行分析, 利用多项式拟合可获得系统在该组拍照参数下响应输出与辐射照度的表达式。同理对于(7)式、(8)式, 均可采用类似的方法, 即可确定在相应拍照参数条件下系统输出与积分级数、积分时间的关系表达式。

通常对成像系统更有指导意义的是研究(6)式的待定系数, 即研究在拍照参数为默认参数时, 系统随辐射照度变化的数字输出, 式中 A_0 表示以暗电流噪声为主的系统输出。

4 CCD 成像系统输出模型的建立

4.1 暗电流噪声的测试与分析

CCD 暗电流噪声的测试需要在无光照的条件下进行^[11-12]。因此将系统处于实验室暗场无光的条件,同时保持室温不变,拍照参数中除积分时间可变之外,其他参数均为保持不变的默认参数。系统在不同的积分时间工作时采集多帧图像,分析各图像的灰度码值,并取平均值,可获得 CCD 成像系统的暗电流噪声随积分时间变化的曲线图,如图 2 所示。

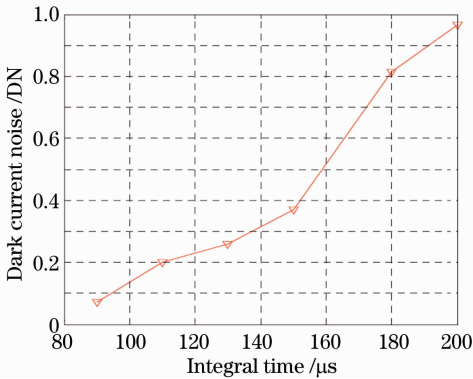


图 2 暗电流噪声随积分时间变化关系

Fig. 2 Relationship between dark current noise and integral time

由图 2 可知,暗电流噪声与积分时间近似呈线性关系,在积分时间较大时(大于 $180 \mu\text{s}$),由于传感器在测试过程中温度不断升高,所以所测的暗电流噪声也出现了向上漂移增大的现象。测试的结果表明成像系统的暗电流噪声较小,一方面由于室温保持在较低的 20°C ;另一方由于系统的视频处理电路中采用了暗电平校正的功能模块,此功能工作的机理是对 CCD 像元阵列中遮光像元输出的暗电流进行采样存储,作为暗电平值,在处理有效感光像元输出信号时减去此暗电平值,从而可以有效抑制暗电流噪声对图像的影响^[13-14]。

4.2 视频处理电路噪声的测试与分析

为分析视频处理电路工作的噪声对系统数字输出的影响,针对该部分电路也进行了相关的测试。在未加 CCD 载荷并且未连接预放单元的情况下,视频处理电路分别在不同的增益条件下工作,其他拍照参数为默认参,测试系统的量化输出值,然后统计量化值数据,可以得到视频处理电路的工作噪声与增益之间的对应关系图,如图 3 所示。

从图 3 中可以看出当增益小于 8 倍时,视频电路的工作噪声基本为零,对系统的输出几乎没有影

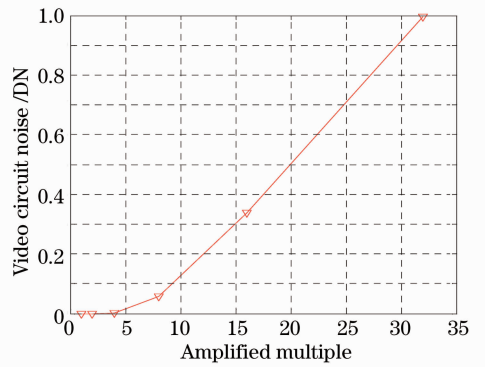


图 3 视频电路噪声随放大倍数变化关系

Fig. 3 Relationship between video circuit noise and amplified multiple

响,但当倍数较大时,电路噪声被放大到 A/D 模块可以识别的大小,即使 A/D 模块工作在线性区内,所以系统输出随增益变化呈线性增加的关系。

因此图 3 说明成像系统的视频处理电路设计较合理,在没有视频信号输入的情况下,利用较低倍数进行拍照,系统输出几乎为零,即(5)式中的 $N_2=0$ 。

4.3 CCD 成像电路系统输出模型

为建立准确的 CCD 成像电路系统输入输出模型,需要进行辐射定标实验进一步确定系统的数字输出与输入辐射、积分级数及积分时间的相互关系。

辐射定标内容包括:相对辐射定标和绝对辐射定标。相对辐射定标是针对 CCD 各像元的响应不一致性进行的调平实验,从而消除或尽量减小 CCD 各像元间存在的差异,绝对辐射定标是在已完成相对定标后,建立系统数字输出与各输入量间的定量关系^[15-16]。图 4 为 CCD 成像电路系统的辐射定标示意图,采用积分球作为光源,其输出的光线能够均匀照射到系统焦平面的 CCD 上,通过改变积分球内标准灯的点亮数目实现对积分球输出的辐射亮度的控制,同时由光谱辐射计进行测量,然后利用图像采集系统接收并显示所拍的图像数据,由通信控制系统负责成像系统参数的设置与 CCD 的上、下电控制。

为避免外界光线的影响,整个测试过程均在暗室中进行,实验所使用的积分球光源不确定度小于 3%,CCD 的光谱响应范围为 $500\sim 800 \text{ nm}$ 。

系统先进行了相对辐射定标,将 CCD 的各像元响应调平,然后展开了绝对定标实验。从(4)式可知系统的输出是与辐射照度、积分级数和积分时间成线性的关系,此处首先研究辐射照度与系统输出的对应关系。利用默认参数(积分时间为 $105 \mu\text{s}$,级数为 48 级,增益为 1 倍)在不同的辐射照度条件下进

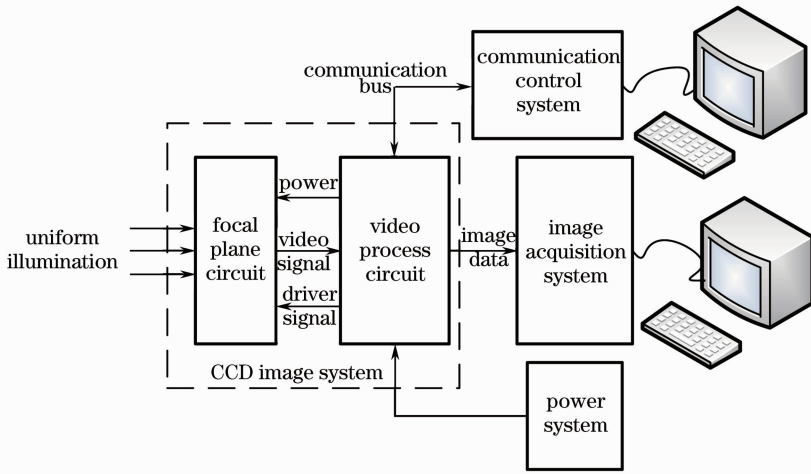


图 4 CCD 成像电路系统辐射定标示意图

Fig. 4 Sketch map of CCD image system radiometric calibration

行多次拍照实验,可以获得具有不同码值的灰度图像。将同一辐射照度条件下所拍的多组图像数据取平均处理,可得到系统输出与辐射照度间的关系曲线图,如图 5 所示。

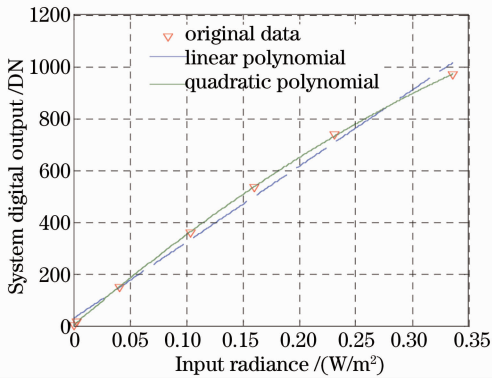


图 5 CCD 成像系统输出与辐射照度关系

Fig. 5 Relationship between CCD image system digital output and radiation

通过图 5 的数据曲线可以看出系统输出响应与输入辐射照度之间为的对应关系为近似线性的关系。分别采用最小二乘法对图 5 中数据进行线性拟合和二次拟合,可以得到系统数字输出与照度之间的两个数学表达式,如(9)式和(10)式,拟合评估结果见表 1。两种表达式的决定系数 R^2 均达到了 0.99 以上,并且二次拟合表达式误差的均方根只有 5.9DN。

$$V_{DN} = 2939E + 28.72, \quad (9)$$

$$V_{DN} = -2582E^2 + 3755E + 2.154. \quad (10)$$

表 1 系统数字输出与辐射照度间的拟合评估
Table 1 Goodness of fit statistics between digital output and radiation

Polynomial fitting	R-square (R^2)	Root-mean-square error
Linear	0.9924	35.5
Quadratic	0.9998	5.901

将 $E=0$ 代入(9)式和(10)式,系统的输出响应却不为零,这是由于 CCD 传感器暗电流噪声的存在造成的。将拍照的默认参数代入线性拟合的(9)式中,并参照(5)式,因此可以获得含有辐射照度、级数与积分时间三个变量的系统输出响应表达式

$$V_{DN} = 0.583EMT_{int} + 28.72, \quad (11)$$

(11)式是在默认拍照参数下,改变不同的辐射照度得到的系统响应拟合结果,而将其推广到含有三个变量后,需要进一步验证系统输出与级数及积分时间的响应关系。而如果要遍历完全,即在不同的亮度和积分时间下测试系统输出随级数的变化,则实验的工作量太大,而且理论上变量间的相互对应关系应为线性关系,因此选择在一个固定的辐射亮度与固定的行时间的条件下,测试系统输出与级数的关系即可。图 6 为系统在 $E=0.136 \text{ W/m}^2$, $T_{int}=105 \mu\text{s}$ 的条件下测得的系统响应输出与级数间的关系图,图中虚线为采用线性最小二乘拟合的结果,实线为利用(11)式描述的系统响应与级数间的关系,两者间最大的相对误差不大于 5.2%,因此利用(11)式可以较准确地表示出系统输出与级数之间的响应关系。

同理对于积分时间,选择一个固定的辐射照度与级数($E=0.1925 \text{ W/m}^2$, $M=48$),可以测试系统输出与积分时间的关系如图 7 所示,图中虚线为采

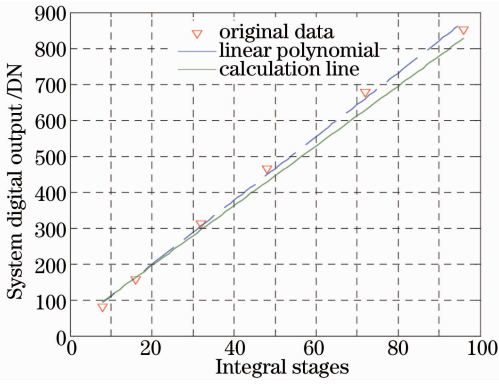


图 6 CCD 成像系统输出与积分级数关系
Fig. 6 Relationship between CCD image system digital output and integral stages

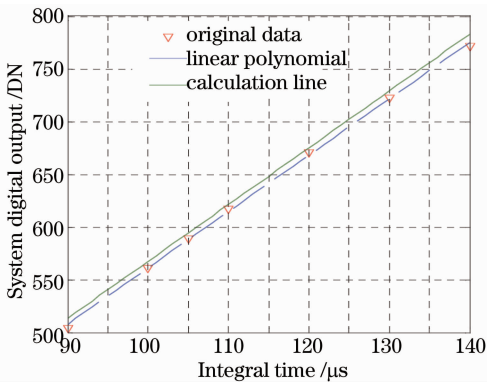


图 7 CCD 成像系统输出与积分时间关系
Fig. 7 Relationship between CCD image system digital output and integral time

用线性最小二乘拟合的结果,实线为利用(11)式描述的系统响应与积分时间的关系,两者间最大的相对误差不大于 1.1%,因此利用(11)式可以较准确地表示出系统输出与积分时间之间的响应关系。

通过对上述数据的分析,CCD 成像系统的数字响应输出可以得到两种表达式,一种为近似响应表达式,可以推广到任意拍照参数条件下使用,见(11)式,一种为高精度的响应表达式,但只能在默认拍照参数下使用,见(10)式。

如果视频处理器的放大倍数为 g_{ad} 倍,通常相机在轨工作时其放大倍数不超过 8 倍,所以可以忽略视频电路的工作噪声,因此根据(11)式,CCD 成像系统的输出响应模型可以表达为

$$V_{DN} = g_{ad} \times (0.583EMT_{int} + 28.72), \quad (12)$$

5 CCD 成像系统输出模型的应用

利用 CCD 成像系统的输出响应模型可以获得地物目标在焦面处的辐射照度情况,并且在需要改变相机的拍照参数时,可以为相机拍照参数的选择

提供重要依据。

CCD 相机在轨工作过程中,其共有 4 个可调整的成像参数,包括:CCD 积分级数、积分时间、视频处理器的放大倍数和灰度偏置。其中积分时间是由相机的轨道高度决定的,由相机控制器负责计算和控制,因此相机在轨拍照时该参数无需进行人为设置。通常地面系统可以根据成像效果调整的参数是积分级数和放大倍数两个参数。

相机在轨执行拍照任务时,主要以默认参数拍照,即积分时间、积分级数和增益均为默认值。但由于地面目标的辐射特性可能会发生变化,此时就需要对相机的拍照参数进行调整。利用 CCD 成像系统响应输出的两个表达式可以快速高效的实现拍照参数的合理选择,图 8 为调整相机在轨拍照参数的流程图。

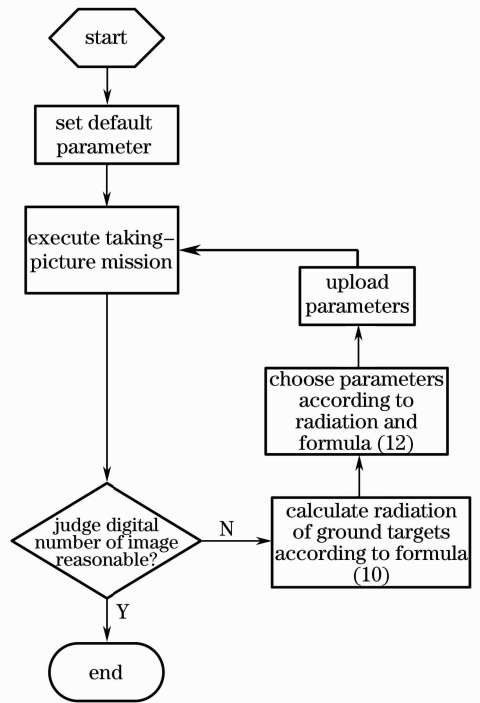


图 8 相机在轨拍照参数选择流程
Fig. 8 Flow chart of choosing parameter for camera on orbit

6 CCD 成像系统输出模型的验证

在实验室利用一定亮度的均匀光照射 CCD 成像系统的焦平面,系统在默认参数下所拍的图像如图 9 中(a)所示,图像的平均灰度码值为 405,利用(10)式可反推出焦面处的辐射照度为 0.1167 W/m^2 ,若要将图像的灰度码值提高到 900,则利用(12)式可以推出拍照条件为: $M=96, g_{ad}=1.26$ 倍(参数 1),其

他参数保持不变,完成参数设置后再次进行拍照,如图 9 中(b)所示,图像的平均灰度码为 959.4,相对误差为 6.6%。

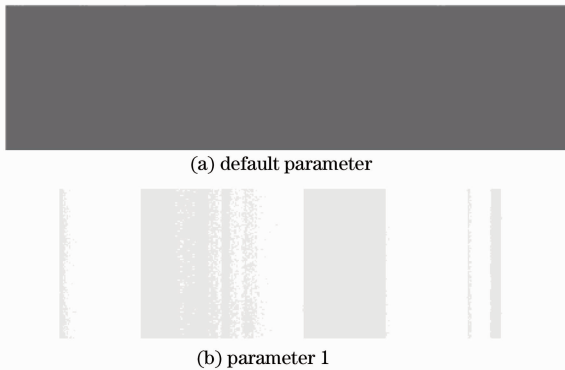


图 9 CCD 成像系统均匀光下所拍图像

Fig. 9 Images under CCD image system uniform illumination

CCD 成像系统对靶标进行动态推扫成像实验,系统在默认参数下所拍图像如图 10 中(a)所示,图像的平均灰度约为 120,灰度值偏低,利用(10)式可反推出焦面处的辐射照度为 0.032 W/m^2 ,为使图像显示效果更加合理,需要进一步增大图像的灰度,若要将图像的平均灰度码提高到 300,则利用(12)式可以推出拍照条件为: $M=72, g_{ad}=1.7$ 倍(参数 2),其他参数保持不变,完成参数设置后再次进行拍照,如图 10 中(b)所示,图像的平均灰度码为 273.6,相对误差为 8.8%。

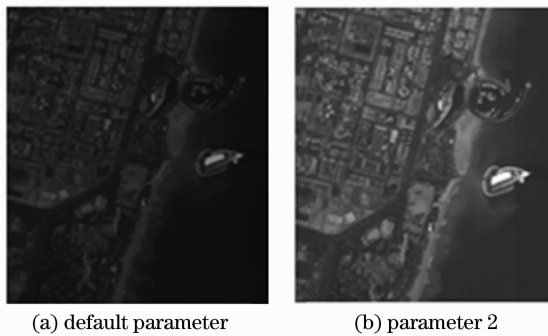


图 10 CCD 成像系统动态推扫靶标所拍图像

Fig. 10 Images of CCD image system dynamic target

7 结 论

为研究 CCD 成像电路系统的输出模型,利用某航天相机 CCD 成像电路系统进行了暗电流噪声、视频电路噪声和辐射定标等专项测试实验,结合理论响应模型,通过对大量实验数据的分析,利用最小二乘拟合方法,建立了系统近似输出模型和高精度输出模型,其拟合决定系数 R^2 分别达到了 0.992 和

0.9998。

通过成像测实验证,利用该响应模型可以准确的用于计算卫星在轨拍照时地物的辐射特性,并为合理选择在轨拍照参数提供重要依据,从而有效提高相机的工作效率,节省星上的存储资源,满足航天相机在轨拍照的任务要求。

参 考 文 献

- 1 Wu Xingxing, Liu Jinguo. Research on on-orbit automatic relative radiometric correction of multi-spectral space camera with large field of view [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 104-111.
武星星, 刘金国. 大视场多光谱空间相机在轨自动相对辐射校正研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 104-111.
- 2 Guo Yue, Liu Xiaopeng, Yang Hua. Analysis of calibration for space CCD camera [J]. Optical technique, 2007, 33(11): 237-238.
郭跃, 刘晓鹏, 杨桦. 空间 CCD 相机的定标方法研究[J]. 光学技术, 2007, 33(11): 237-238.
- 3 Liu Yaxia. Research on the laboratory radiometric calibration of the TDI CCD camera [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(5): 71-74.
刘亚侠. TDI CCD 相机实验室辐射定标的研究[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 71-74.
- 4 Ren Jianwei, Liu Zhexiong, Wan Zhi, et al.. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1491-1497.
任建伟, 刘则洵, 万志, 等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
- 5 R Widenhorn, J C Dunlap, E Bodegom. Exposure time dependence of dark current in CCD imagers [J]. IEEE Transactions on Electron Device, 2010, 57(3): 581-587.
- 6 Cheng Xuan, Zhao Huijie. Dark-current calculation method of area CCD based on bad pixels detection in the scene [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0404002.
程宣, 赵慧洁. 基于场景坏点检测的面阵 CCD 暗电流估计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0404002.
- 7 Wang Zhijian, Liu Dongmei, Fu Yuegang. Foundation of Optics Engineering [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2005.
王志坚, 刘冬梅, 付跃刚. 光学工程基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.
- 8 Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, et al.. Mathematical model of illumination of CCD in the space scanning optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1128006.
孟祥娥, 江俊峰, 刘铁根, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型研究[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128006.
- 9 Ren Jianwei, Wan Zhi, Li Xiansheng, et al.. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1186-1190.
任建伟, 万志, 李宪圣, 等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1186-1190.
- 10 Cheng Shubo, Zhang Huige, Wang Zhebin, et al.. Nonlinearity property testing of the scientific grade optical CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0404001.
程书博, 张惠鸽, 王哲斌, 等. 科学级光学 CCD 非线性特性测试[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0404001.
- 11 Xiu Jihong, Huang Pu, Li Jun, et al.. Radiometric calibration of

- Large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1365–1373.
修吉宏, 黄 浦, 李 军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1365–1373.
- 12 Xiu Jihong, Huang Pu, Li Jun, *et al.*. Non-uniformity correction of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0711003.
修吉宏, 黄 浦, 李 军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0711003.
- 13 Li Guangzhe, Liu Jinguo, Ning Fei, *et al.*. Imaging SNR analysis of stereo mapping camera based on equivalent imaging model [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(5): 1096–1101.
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): 1096–1101.
- 14 X Q Wu, L Zhang, X J Li, *et al.*. Research on CCD video signal processing based on correlated double sampling [C]. *SPIE*, 2007, 6279: 62795J.
- 15 Ren Huanhuan, Ruan Pin, He Jianwei, *et al.*. Study of the radiation calibration of TDI CCD spatial stereo camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3476–3480.
任焕焕, 阮 萍, 何建伟, 等. TDI CCD 空间立体相机辐射定标研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3476–3480.
- 16 Song Zongxi, Zhao Baochang, Gao Wei, *et al.*. Focal plane design of chang e-1 satellite CCD stereo-camera and laboratory radiation calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3508–3514.
宋宗玺, 赵葆常, 高 伟, 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机焦平面设计与辐射定标[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3508–3514.

栏目编辑: 张浩佳