

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*

王德江^{1)2)†} 匡海鹏¹⁾

1)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

2)(中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010年7月31日收到; 2010年11月5日收到修改稿)

电荷耦合器件(CCD)是遥感成像系统的核心部件,为了在低照度、低量化位数的情况下获得高信噪比与大动态范围的遥感图像,首先根据 CCD 的结构与噪声物理性质给出了模拟增益、量化位数与 CCD 信噪比的关系,接着搭建了 CCD 的积分球标定系统,依据实验数据建立了散粒噪声、光子响应非均匀性噪声以及基底噪声的数学模型,然后着重分析了低照度情况下模拟增益与信噪比之间的关系,最后搭建了实际成像系统,获取了低照度情况下不同模拟增益系数的遥感图像.结果表明理论分析、实验室积分球标定数据与实际成像图像符合良好,即模拟增益提高 1 至 2 倍,可显著提高 CCD 信噪比,同时获得较大的动态范围.

关键词: 电荷耦合器件, 模拟增益, 信噪比, 遥感成像系统

PACS: 72.70.+m

1. 引言

1969 年 Boyle 与 Smith 发明了电荷耦合器件(charge coupled device, CCD), CCD 以其高灵敏度、低噪声、高量子效率、宽光谱响应以及高几何稳定性等优点,广泛应用于空间遥感、天文观测、微光夜视等领域^[1,2].

随着器件设计、生产工艺的改进以及后续处理电路对噪声的成功抑制, CCD 的动态范围得到了进一步提高,一些科学级的 CCD 动态范围甚至高于 4000,为了将器件的动态范围充分发挥出来,模数转换器(analog digital converter, ADC)的分辨率由传统的 8 位提高到 12 至 14 位.然而当前空间遥感相机的存储介质多为固态电子盘,从可靠性、存储速率以及存储容量等多方面因素考虑实际遥感图像存储分辨率为单字节,另一方面在空间遥感领域由于成像距离远、相机相对孔径以及曝光时间受限等因素导致目标在焦平面上所成的像亮度较低,获得的数字遥感图像动态范围远小于 CCD 的动态范

围^[3].如将高量化位数的遥感图像截断存储,引起的量化噪声会显著降低成像系统的信噪比, CCD 的性能亦受到严重抑制.

Holst 对 CCD 的结构与噪声的来源、性质进行了系统分析与深入讨论^[4,5], Healey 等提出了一种通用的 CCD 的信噪比估算方法^[6], Irie 等实验标定了一款彩色商用 CCD 的信噪比等参数^[7,8], 杨秉新从遥感相机研制总体角度分析了 CCD 噪声对相机相对孔径、整机调制传递函数以及照相分辨率的影响^[9].本文结合文献的研究成果^[4-11],根据 CCD 的噪声物理模型从理论上分析了模拟增益、量化位数与信噪比、动态之间的关系,然后从积分球标定与实际成像两方面实验进行了验证.本文旨在通过对 CCD 内部结构以及后处理电路的分析使其物理性能在遥感成像系统得到充分发挥.

2. CCD 的关键参数分析

2.1. CCD 的信噪比

CCD 的主要噪声有散粒噪声,暗电流噪声,固

* 国家高技术研究发展计划(863)(批准号:2006AA06A208)资助的课题.

† E-mail: wangdj04@live.cn

定模式噪声,光子响应非均匀性噪声,复位噪声,电路读出噪声以及量化噪声等,如图 1 所示.

随着曝光量的增加,CCD 的散粒噪声、光子响应非均匀性噪声在总噪声中占据主导地位,此时信噪比 SNR 为

$$SNR = n_{pe} (\langle n_{floor}^2 \rangle + \langle n_{ADC}^2 \rangle + \langle n_{shot}^2 \rangle + \langle n_{PRNU}^2 \rangle)^{-1/2}, \quad (1)$$

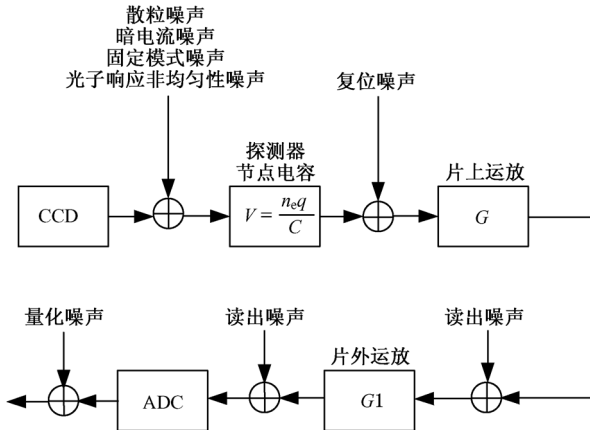


图 1 CCD 噪声源

其中 n_{pe} 光电转换产生的电子数, n_{floor} 为基底噪声, 主要由暗电流噪声、固定模式噪声以及电路读出噪声组成, n_{ADC} 为 ADC 量化噪声, n_{shot} 为散粒噪声, n_{PRNU} 为光子响应非均匀性噪声, 二者与 n_{pe} 的关系为

$$\langle n_{shot}^2 \rangle = An_{pe}, \quad (2)$$

$$\langle n_{PRNU}^2 \rangle = (Un_{pe})^2, \quad (3)$$

其中 A 为散粒噪声系数, U 为光子响应非均匀系数. 将(2), (3)式代入(1)式得

$$SNR = \frac{n_{pe}}{\sqrt{\langle n_{floor}^2 \rangle + \langle n_{ADC}^2 \rangle + An_{pe} + (Un_{pe})^2}}. \quad (4)$$

2.2. CCD 的动态范围

CCD 的动态范围定义分两种,电子学定义为

$$DR = \frac{SAT}{n_{floor}}, \quad (5)$$

其中 SAT 为 CCD 探测器饱和输出幅值, n_{floor} 为基底噪声.

动态范围的光学定义为

$$DR = \frac{SEE}{NEE}, \quad (6)$$

其中 SEE 表示饱和输出幅值所需要的曝光量, NEE 为产生暗场随机噪声幅值所需的曝光量. 动态范围

越大,一方面说明 CCD 探测弱小目标的能力越强,另一方面说明其探测光照度范围越大.

2.3. 模拟增益与信噪比关系

为了适应高速率的数据存储,图像分辨率截断为 M 位(ADC 的原始分辨率为 $N, N > M$),此时信噪比为

$$SNR = \frac{n_{pe}}{\sqrt{\langle n_{floor}^2 \rangle + 2^{2(N-M)} \cdot \langle n_{ADC}^2 \rangle + An_{pe} + (Un_{pe})^2}}. \quad (7)$$

由(7)式可知量化噪声均方值增大 $(N - M)^2$ 倍,在低照度的情况下对信噪比的影响更为明显.

设 $N - M$ 位量化器前端低噪运放放大倍数为 G ,则信噪比为

$$\begin{aligned} SNR &= Gn_{pe} (G^2 \langle n_{floor}^2 \rangle + 2^{2(N-M)} \cdot \langle n_{ADC}^2 \rangle + G^2 n_{pe} + G^2 (Un_{pe})^2)^{-1/2} \\ &= n_{pe} (\langle n_{floor}^2 \rangle + \left(\frac{2^{(N-M)}}{G}\right)^2 \cdot \langle n_{ADC}^2 \rangle + n_{pe} + (Un_{pe})^2)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (8)$$

当 $G \geq 2^{(N-M)}$ 时, M 位分辨率量化器与 $G = 1$, N 位分辨率量化器对应的信噪比近似相等. 但增加运放的放大倍数等比例减小了 CCD 的动态范围,当模拟运放增益增至 G 时,CCD 饱和输出所需的曝光量变为原来的 $1/G$. 虽然遥感相机的输入光照度动态范围较小,但为了适应不同太阳高度角,整机的动态范围仍不宜过小,实际中应根据具体的探测器噪声水平,在动态范围与信噪比中进行折衷,选择较为恰当的运放放大参数.

3. CCD 积分球标定实验

太阳高度角、气候以及侦查时间等对遥感相机的曝光量有重要影响,CCD 探测器在不同曝光量下产生的噪声是不同的,依据(2), (3)式给出的 CCD 噪声模型,首先对基底噪声、散粒噪声系数、光子响应非均匀性系数进行标定,建立起 CCD 等效噪声与曝光量之间的关系;为验证调整模拟增益的可行性,实验验证了模拟增益与 CCD 噪声、CCD 图像平均曝光量的关系,即模拟增益提高 N 倍,CCD 噪声与 CCD 图像信号同时提高 N 倍,在完成以上两项实验标定后建立起不同曝光量情况下模拟增益对信噪比、动态范围的影响.

3.1. 积分球实验系统

实验原理如图 2 所示. 将 CCD 探测器放在积分球的光出瞳处, 探测器的感光面与积分球的出瞳抛面平行, 积分球的出光口亮度通过计算机选择, 单位为 cd/m^2 . 垂直于出光口圆盘上的某点光照度为

$$E = \pi B \sin^2 \theta, \quad (9)$$

其中 B 为圆盘亮度, θ 为像方孔径角, 因实验中 CCD 放置在积分球出光口, 对应 $\theta = \pi/2$, 探测器接收的光照度为

$$E = \pi B, \quad (10)$$

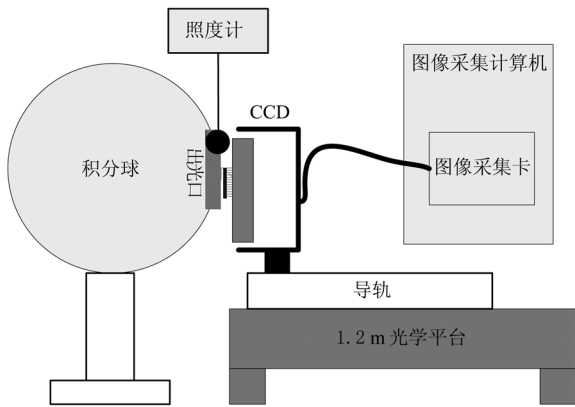


图 2 积分球标定实验原理框图

其中选用的 CCD 参数如表 1 所示^[12].

表 1 HS-40-04K40 参数

CCD 分辨率	4096 × 1
满阱电荷/ e	90000
动态范围	> 2500
TDI 级数	200
ADC 量化位数/bit	12
行转移频率/kHz	20
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	+ 40
灵敏度/ $(\text{DN}/(\text{nJ}\cdot\text{cm}^2))$	50

3.2. CCD 噪声测试方法与数据拟合

如前所述基底噪声包括暗电流噪声、固定模式噪声、复位噪声、电路读出噪声与 ADC 量化噪声. 基底噪声不依赖于外界曝光, 在一定环境下基底噪声保持不变^[13-15]. CCD 在暗场曝光时输出的信号均方根差 (root mean square, RMS) 即为基底噪声, 选择一帧图像的大小为 4096×10000 , 暗场噪声如式

$$\sqrt{\langle n_{\text{floor}}^2 \rangle} = \sigma(\text{img}(i, j)),$$

$$i \in 1, \dots, 4096, j \in 1 \dots 10000. \quad (11)$$

对采集到的 8 帧图像计算基底噪声, 实验结果如表 2 所示.

表 2 基底噪声测试结果

测试帧	基底噪声 (DN)
1	1.36
2	1.36
3	1.34
4	1.32
5	1.36
6	1.39
7	1.44
8	1.40

光子响应非均匀性噪声是一种空域噪声, 同一像素在不同时间所成的信号累加, 对时域随机噪声具有平滑效果, 而对 PRNU 噪声则有加强效果^[16,17]. 亮场情况下, 对一帧图像在列方向上进行累加, 获得的数组为

$$\text{img}(i) = \left(\sum_{j=1}^{10000} \text{img}(i, j) \right) / 10000, \quad i \in 1, \dots, 4096. \quad (12)$$

经时域累加后, $\text{img}(i)$ 之间的波动是由 PRNU 噪声引起的, 在曝光条件 I 下, PRNU 噪声为

$$\sqrt{\langle n_{\text{PRNU}}^2(I) \rangle} = \sigma(\text{img}(i)), \quad i \in 1, \dots, 4096. \quad (13)$$

在不同曝光条件下测得 PRNU 噪声, 经线性拟合后, 即可得到光子响应非均匀性系数 U . 噪声拟合结果为

$$\sqrt{\langle n_{\text{PRNU}}^2 \rangle} = 0.0012155I - 0.068527. \quad (14)$$

由于积分球输出亮度均匀, 入射光照度近似为

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{4096} \sum_{j=1}^{10000} \text{img}(i, j)}{4096 \times 10000}. \quad (15)$$

将采集到的一帧图像, 对每个像元进行光子响应非均匀性校正, 去除非均匀性噪声

$$\text{img}_1(i, j) = \text{img}(i, j) - \text{img}(i), \quad i \in 1, \dots, 4096; j \in 1, \dots, 10000, \quad (16)$$

$\text{img}_1(i, j)$ 主要由不相关的三部分组成, 视频信号、散粒噪声、基底噪声, 对 (16) 式求均方差然后减去基底噪声为某一曝光条件下的散粒噪声

$$\sqrt{\langle n_{\text{shot}}^2 \rangle} = \sqrt{\sigma^2(\text{img}_1) - \langle n_{\text{floor}}^2 \rangle}. \quad (17)$$

测试不同曝光下的散粒噪声拟合结果为

$$\sqrt{\langle n_{\text{shot}}^2 \rangle} = \sqrt{0.069I - 6.2}. \quad (18)$$

图3为散粒噪声、光子响应非均匀性噪声的测试数据及其数学拟合结果.

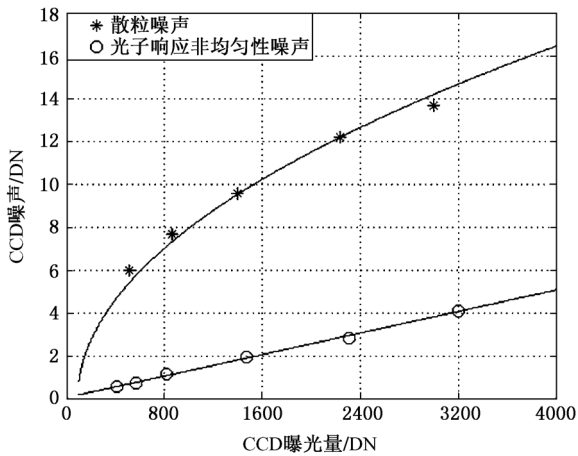


图3 CCD 噪声实验结果与拟合曲线

综上分析与试验结果, CCD 在不同曝光条件下总的噪声为

$$N_{\text{Total, noise}} = \left(1.375^2 + (0.00121552I - 0.068527)^2 + 0.0692I - 6.2 + 0.29 \cdot \left(\frac{2^{N-M}}{G} \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (19)$$

3.3. 低照度情况下模拟增益与信噪比关系分析

如前所述, 模拟增益理论上与视频信号成线性关系, 在量化噪声非常小的情况下, 模拟增益与噪声也成线性关系. 在出光口亮度为 2.8 cd/m^2 , 探测器像面照度 8.8 lx 的情况下, 改变模拟增益图像平均灰度值、噪声均方差的实验如图4所示, 从中可以得出随着模拟增益的增加, CCD 的等效曝光量等比例增加, 同时由于量化噪声占总噪声的比例很小, CCD 总噪声也成等比例增加, 因此信噪比不随模拟增益改变, 但动态范围与模拟增益成反比^[18], 如图4所示.

当对 CCD 光电转换、模数转换后的数据截断后4位, 而存储高8位时, 量化噪声所占的比例增加, 低照度下图像信噪比下降明显. 提高模拟增益可以抵消截断效应对信噪比的影响, 如(8)式所示. 图5给出了饱和光照度为2.5%, 5%, 10%, 20%时随着模拟增益的增加信噪比的变化情况.

从中可以发现无论光照度情况如何, 信噪比随着模拟增益的提高而增加, 但信噪比增加的总幅度与每级模拟增益贡献的幅度不尽相同. 设模拟增益

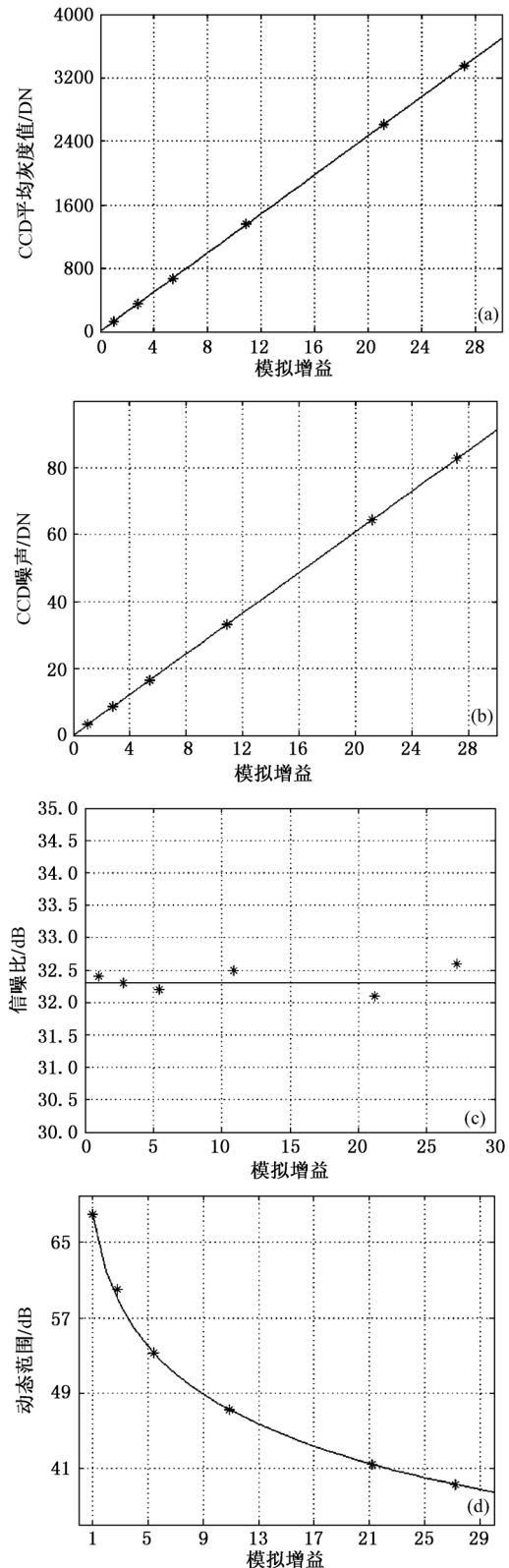


图4 模拟增益与(a)CCD 平均灰度值、(b) CCD 噪声、(c)信噪比、(d) 动态范围之间的关系

提高16倍对应的信噪比幅度为所能获得的最大信噪比提高量^[19]. 图6给出了模拟增益提高1倍、1—

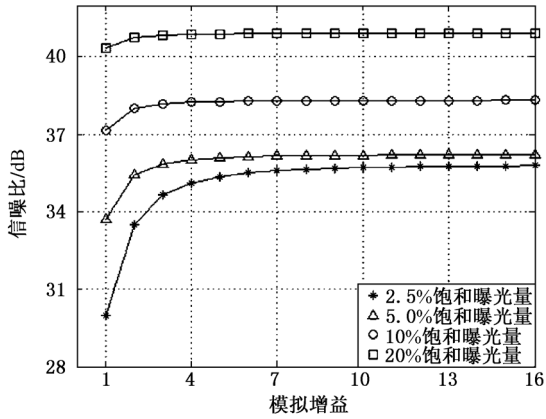


图5 不同曝光程度下模拟增益与信噪比的关系

2 倍以及 2—16 倍对应的信噪比增幅占总增幅的百分比,从中可以发现,模拟增益提高 1 倍,信噪比增幅占总增幅的 60% 以上,而再提高模拟增益对信噪比的增幅贡献不大.

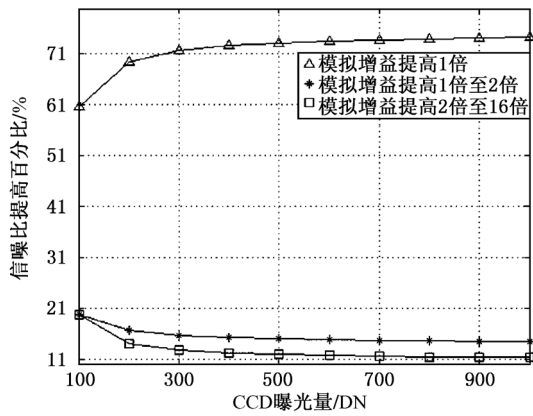


图6 模拟增益与信噪比提高百分比之间的关系

从图 6 中发现随着曝光量的增加,信噪比的增幅随之下降,因此模拟增益的提高对于低照度的遥感成像系统尤为关键.

4. 成像实验

如前所述低照度情况下模拟增益能够提高遥感图像的信噪比,虽然信噪比能够在一定程度上反映遥感图像的质量,但实际应用中更重要的是通过实际图像进行判断. 成像系统的参数与试验环境如表 3 所示.

表 3 成像系统参数

相机焦距/mm	1000
相对孔径	1:5.6
曝光时间/ms	2.5
目标距离/km	18
地面照度/lx	6000
模拟增益	1,2,4,8

图 7 从左至右分别是模拟增益为 1,2,4,8 时拍摄到的某建筑物窗户截图.

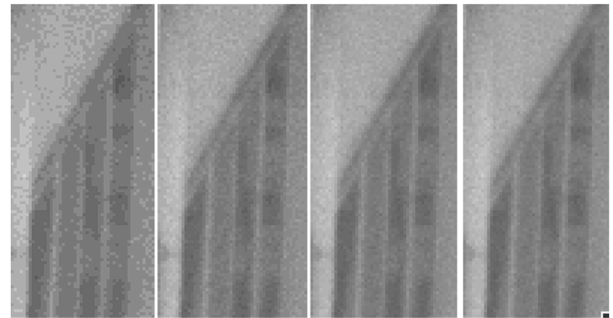


图7 模拟增益 1,2,4,8 实际成像图像

从图 7 可以看出模拟增益为 1 时,由于在曝光不充分,量化噪声占总噪声比重大,图像的马赛克效应明显,而当模拟增益提高至 2,4,8 时,图像的马赛克效应显著减小,利于后续的图像辨别. 且模拟增益提高 2,4,8 后,三幅图像之间差别不大,这证明了模拟增益提高 1 倍图像信噪比提高占总信噪比提高 60% 以上这一论断.

5. 结 论

遥感成像系统所成的像亮度往往较低,且由于存储的遥感图像量化分辨率受限,导致 CCD 的低噪声、高灵敏度优势未充分发挥出来,更制约了成像系统的总体性能. 本文根据 CCD 噪声物理性质建立了光子响应非均匀性噪声、散粒噪声以及基底噪声模型,并从积分球标定实验与实际成像实验两方面深入分析了模拟增益与 CCD 信噪比以及动态范围的关系. 理论分析与实验均表明当模拟增益放大 1 至 2 倍时,CCD 信噪比增幅占总增幅的 60% 以上,且获得了较大的动态范围.

- [1] Wang Z J, Tang B Q, Xiao Z G, Liu M B, Huang S Y, Zhang Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4136 (in Chinese) [王祖君,唐本奇,肖志刚,刘敏波,黄绍艳,张勇 2010 物理学报 **59** 4136]
- [2] Du H D, Huang S X, Shi H Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7685 (in Chinese) [杜华栋,黄思训,石汉青 2008 物理学报 **57** 4136]
- [3] Zhang C M, Huang W J, Zhang B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5479 (in Chinese) [张淳民,黄伟健,赵葆常 2010 物理学报 **59** 5479]
- [4] Holst G C 2008 *Electro-Optical Imaging System Performance* (Bellingham; SPIE Optical Engineering Press) p57
- [5] Holst G C 2007 *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems* (Bellingham; SPIE Optical Engineering Press) p178
- [6] Healey G E, Kondepudy R 1994 *IEEE trans. Pattern Anal. Mach. Intel.* **16** 267
- [7] Irie K, McKinnon A E, Unsworth K, Woodhead I M 2008 *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology.* **18** 280
- [8] Chen L, Zhang X, Lin J, Sha D 2009 *Opt. Laser Technol.* **41** 574
- [9] Yang B X 2005 *Spacecraft Recovery & Remote Sensing* **26** 22 (in Chinese) [杨秉新 2005 航天返回与遥感 **26** 22]
- [10] Hu J, Wang D 2009 *Opt. Precision Eng.* **8** 1819 (in Chinese) [胡君,王栋 2009 光学精密工程 **8** 1819]
- [11] Ma T B, Guo Y F, Li Y F 2010 *Opt. Precision Eng.* **18** 2028 (in Chinese) [马天波,郭永飞,李云飞 2010 光学精密工程 **18** 2028]
- [12] Steven L S 1999 *Opt. Eng.* **38** 821
- [13] Robert D F, Theodore T 2001 *Opt. Eng.* **40** 574
- [14] Robert D F 1999 *Opt. Eng.* **38** 1229
- [15] Robert D F, Theodore T, Jason R C, James A M 2002 *Opt. Eng.* **41** 1957
- [16] Robert D F, Theodore T 1999 *Opt. Eng.* **38** 815
- [17] Zarco-Tejada P J, Berni J A, Suarez L 2009 *Remote Sens. Environ.* **113** 1262
- [18] Tominaga. Shoji, Tanaka Norihiro 2008 *J. Electron Imaging.* **17** 43022
- [19] Olivier Romain, Thomas Ea, Patrick Garda 2007 *Opt. Eng.* **26** 103202

Experimental study of the effects on signal noise ratio and dynamic range caused by analog gain for CCD*

Wang De-Jiang^{1)2)†} Kuang Hai-Peng¹⁾

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

2) (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 31 July 2010; revised manuscript received 5 November 2010)

Abstract

Charge coupled device (CCD) is a key component in a remote sensing system. In order to obtain high signal-to-noise ratio (SNR) and dynamic range in low illumination and quantization circumstance, first, according to CCD architecture and noise physical characteristics, relationship between analog gain quantization step and CCD SNR is proposed; next, integrating sphere calibration system is established, shot noise, photo response nonuniformity and noise floor model are also built, and the next relationship between analog gain and SNR in low illumination condition is analyzed thoroughly; finally, the practical photographing system is built, and remote images in different gain parameters are acquired. Theoretical analysis, experimental calibration, and practical images all indicate that when analog gain is increased by one to two times, the SNR is improved greatly and dynamic range is acceptable.

Keywords: charge coupled device, analog gain, signal noise ratio, remote sensing system

PACS: 72.70.+m

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA06A208).

† E-mail: wangdj04@live.cn