

文章编号: 1672-8785(2018)07-0001-07

基于 CMOS 图像传感器的微光 成像系统信噪比研究

张元涛^{1,2,3} 孙德新^{1,2,3,4} 刘银年^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院上海技术物理研究所启东光电遥感中心, 江苏 启东 226200)

摘 要: 信噪比是微光成像系统的关键参数, 决定了成像系统的性能与成像质量。给出了互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)图像传感器微光成像系统的信噪比模型, 仿真计算了系统的信噪比与信号、噪声的关系。搭建了信噪比测试环境, 完成了系统信噪比测试实验。实验结果表明, 理论值与实测值一致。最后, 根据信噪比分析结果对给定系统进行了参数优化。计算结果显示, 优化后的系统在 1 mLux 照度下, 信噪比能达到 4.5。信噪比的研究为基于 CMOS 微光成像系统的总体设计与优化提供了理论依据。

关键词: 微光成像; 信噪比; CMOS 图像传感器; 夜天光照度

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.07.001

Study of SNR of Low Light Level Imaging System Based on CMOS Image Sensor

ZHANG Yuan-tao^{1,2,3}, SUN De-xin^{1,2,3,4}, LIU Yin-nian^{1,2,3,4}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Qidong Optoelectronic Remote Sensing Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Qidong 226200, China)

Abstract: Signal-to-Noise Ratio (SNR) is a key parameter for low light level imaging systems. It determines the performance and image quality of an imaging system. A SNR calculation model of low light level imaging

收稿日期: 2018-04-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602103); 国家高分辨率对地观测系统重大专项(A0106/1112)

作者简介: 张元涛(1989-), 男, 博士, 河南信阳人, 主要从事微光成像技术研究。

导师简介: 刘银年(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高光谱遥感成像技术研究。

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

systems based on CMOS imaging sensors is given. The relationship between the SNR and the signal and noise of a system is simulated. A SNR test environment is set up and SNR test experiment is completed. The experimental results show that the theoretical value is consistent with the measured value. Finally, the parameters of a given system are optimized according to the SNR analysis results. The calculation results show that the optimized system improves its SNR up to 4.5 under 1 mlux. This study of SNR provides the theoretical basis for the overall design and optimization of low light level imaging system based on CMOS image sensors.

Key words: low light level imaging; SNR; CMOS image sensor; nighttime light

0 引言

微光成像系统主要是基于微光图像传感器将微弱的可见近红外光转换为可见光图像。微光图像传感器主要有真空像增强器、真空固态结合图像传感器及全固态图像传感器,其中高灵敏低噪声 CMOS 图像传感器的成像性能已经接近二代像增强器,在微光成像领域有很好的应用前景。

微光成像系统的性能以及成像质量主要由系统的信噪比决定。因此,对微光成像系统信噪比的研究,是微光成像系统总体设计与性能优化的基础。在以往的研究工作中,国内外研究者对低照度 CMOS 图像传感器技术进行了深入研究^[1-3]。文献[4]提出了一种基于低照度 CMOS 图像传感器的夜视系统,分析并测试了成像系统在几种典型光照度条件下的系统信噪比。文献[5]提出采用光子转移曲线(Photon Transfer Curve, PTC)方法评估微光成像系统,进行了理论推导与实验测试,并且用 PTC 方法对两种具有代表性的微光成像系统性能进行了评估。文献[6]对 CMOS 与电子倍增电荷耦合器件(Electron Multiplying Charge Coupled Device, EMCCD)两种成像系统进行了理论分析,并且对比了它们在特定条件下的信噪比。以上研究没有从系统角度对信噪比进行分析,而在微光成像系统总体设计之前,有必要对影响成像系统信噪比的各种系统参数进行全面分析。

本文分析了基于 CMOS 微光成像系统信噪比模型以及系统信噪比的影响因素,搭建了系统信噪比的测试环境,完成了系统信噪比的

测试,并对测试结果进行分析。然后依据本文的研究结果对系统参数进行优化,优化后的系统在典型微光成像条件下获得了良好的信噪比性能。最后给予一定的总结和展望。

1 高灵敏低噪声 CMOS 微光成像系统的信噪比分析

1.1 CMOS 成像系统的信噪比计算模型

基于 CMOS 成像系统的信噪比 R_{SN} 定义为

$$R_{SN} = \frac{N_s}{n_n} \quad (1)$$

式中, N_s 是系统探测器收集的信号电子数, n_n 为系统所有噪声等效为探测器的噪声电子数。

根据光电成像理论,成像仪探测器每个像元上的光生电子数为

$$N_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi L(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \eta(\lambda) \rho(\lambda) \lambda A_{pix} T_{int}}{F^2 h c} d\lambda \quad (2)$$

式中, T_{int} 为成像系统的积分时间, $L(\lambda)$ 为夜天光照射到目标上的光谱辐亮度, F 为光学系统的 F 数, A_{pix} 为探测器的像元面积, $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统的透过率, $\tau_a(\lambda)$ 为大气透过率, $\eta(\lambda)$ 为探测器的量子效率, $\rho(\lambda)$ 为目标的反射率, h 和 c 分别是普朗克常数和真空光速, λ_1 和 λ_2 为系统响应的截止波长。

系统输出的总噪声包含时间噪声与空间噪声,其中空间噪声可以通过算法进行校正,因此本文分析的噪声仅包含时间噪声。CMOS 图像传感器微光成像系统的时间噪声是由光子噪声、暗电流噪声以及读出电路噪声组成。以上噪声分量独立且不相干,因此系统的总噪声功率为上述噪声分量的功率叠加值,即总噪声电子数为

$$n_{total} = \sqrt{N_s + N_d + n_{cir}^2} \quad (3)$$

式中, N_s 为目标信号的光生电子数, N_d 为探测器的暗电流电子数, n_{cir} 为探测器读出电路的噪声电子数。

将信号与噪声电子数代入信噪比模型, 可得到成像系统信噪比的计算公式:

$$R_{SN} = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_d + n_{cir}^2}} \quad (4)$$

1.2 信号电子数对系统信噪比的影响

根据成像系统的信噪比公式, 可得到系统信噪比随信号大小的变化率, 即系统信噪比对信号值求偏导:

$$\frac{\partial R_{SN}}{\partial N_s} = \frac{N_s + 2(N_d + n_{cir}^2)}{2(N_s + N_d + n_{cir}^2)^{3/2}} \quad (5)$$

对信噪比变化率与信号大小的关系进行仿真, 结果如图 1 所示。

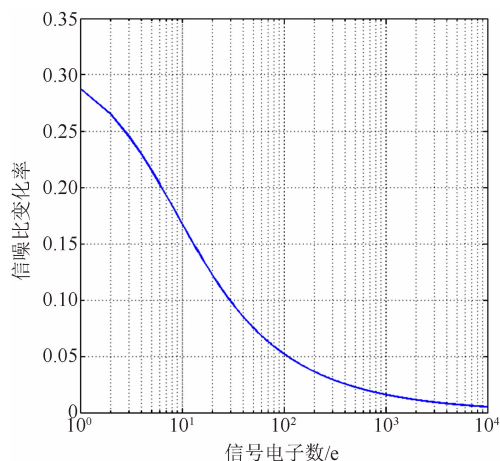


图 1 系统的信噪比变化率与信号电子数仿真曲线

可以看出, 在信号较小时, 信噪比的变化率要远大于信号较大时的变化率, 即在低照度条件下, 增加系统信号电子数将会快速提升信噪比。因此, 对于微光成像系统, 需尽可能地采取措施, 以增大其信号电子数。

根据 CMOS 成像系统的信号电子数公式可知, 信号电子数与光学系统参数、探测器参数有关, 其中, 大气透过率 τ_a 及目标反射率 ρ 不受系统参数影响, 因此改变信号强度只能通过调整入瞳处的辐亮度 L 、光学系统的透过率 τ_o 、探测器的量子效率 η 、像元尺寸 A_{pix} 、积

分时间 T_{int} 以及光学系统 F 数来实现。

1.3 系统噪声对系统信噪比的影响

根据成像系统的信噪比公式, 任何一个噪声分量的增加都会相同程度地减弱系统的信噪比。因此, 将除光子噪声外的所有系统噪声分量作为一个整体, 以便研究总系统噪声对信噪比的影响。假设总系统噪声 n_{sys_noise} 为

$$n_{sys_noise} = \sqrt{N_d + n_{cir}^2} \quad (6)$$

将其代入系统的信噪比公式, 可将系统的信噪比计算公式简化为

$$R_{SN} = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + n_{sys_noise}^2}} \quad (7)$$

求出系统信噪比对系统噪声的变化率为

$$\frac{\partial R_{SN}}{\partial n_{sys_noise}} = \frac{N_s \cdot n_{sys_noise}^2}{(N_s + n_{sys_noise}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

对系统信噪比变化率公式求系统噪声的偏导数, 即信噪比的系统噪声二阶偏导数, 并计算出其零点, 可以得出:

$$n_{sys_noise}^2 = \sqrt{\frac{N_s}{2}} \quad (9)$$

也就是说, 此时系统的信噪比对系统噪声电子数或者信号电子数最敏感。当系统噪声电子数为固定值时, 信号电子数一旦落入此区间内, 系统信噪比会随着信号电子数的变化而快速变化, 导致图像质量进一步恶化。通过仿真计算研究系统信噪比随系统噪声的变化, 仿真结果如图 2 所示。

图 2 的仿真结果表明, 随着系统噪声的增加, 系统信噪比先快速减小, 然后缓慢减小。从系统信噪比变化率曲线也可以看出, 在系统信噪比的敏感区域内, 系统信噪比的变化率要明显大于其他区域。

系统噪声是影响微光成像系统信噪比的关键因素, 因此要尽可能对系统噪声进行抑制。以上仿真过程是将系统噪声作为一个整体进行分析的, 而系统噪声本身也包含了探测器噪声与后端处理电路的噪声, 各个部分的噪声分量都是独立不相关的, 只减小其中一个噪声分量可能无法达到抑制总噪声的目的, 因此需要同

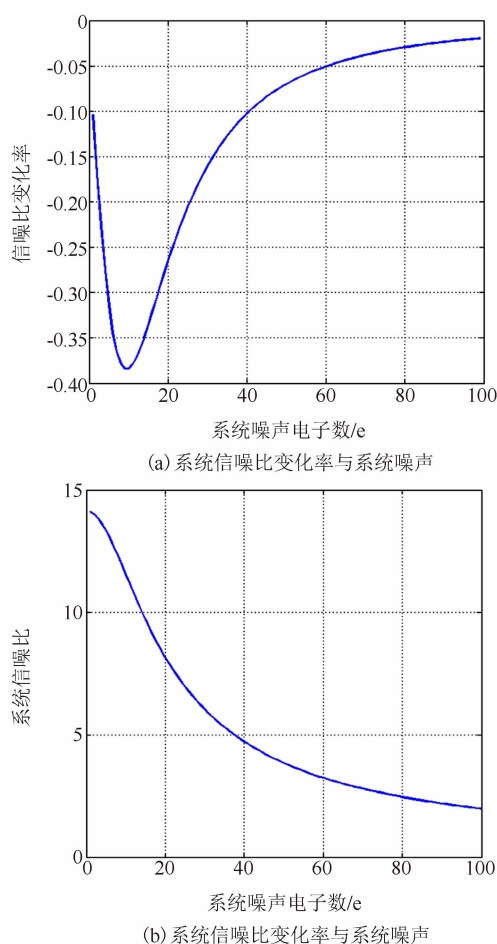


图 2 系统信噪比的变化率及系统信噪比随系统噪声电子数变化的曲线

时考虑各种噪声分量抑制, 达到最大限度减小噪声的目的。

2 系统信噪比的测试与分析

2.1 系统信噪比的测试方法

在微光测试实验室中, 用具备可调光阑的微光积分球光源作为均匀光源, 将微光成像仪光学镜头对准积分球光源输出端面中心, 信噪比测试系统的示意图如图 3 所示。搭建好测试环境之后, 在不同的测试条件下, 用微光成像仪分别获取不同测试条件下的暗电平图像数据数字量化值 (Digital Number, DN) DN_d 与微光积分球光照图像数据 DN_{sph} 。

根据获取的暗电平图像数据 DN_d 计算暗电流偏置 DN_{d_offset} , 计算方法为

$$DN_{d_offset} = \frac{1}{N} \sum_{frm=1}^N DN_d(frm) \quad (10)$$

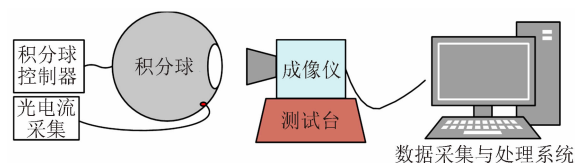


图 3 信噪比测试系统的示意图

式中, $DN_d(frm)$ 为第 frm 帧暗电平图像数据 DN 值, N 是计算暗电流偏置所用的图像数据总帧数, 用本方法计算时 N 取 200。

根据获取的积分球图像数据 DN_{sph} 计算积分球图像信号 DN_{s_sph} 以及积分球图像噪声 DN_{n_sph} , 计算公式为

$$DN_{s_sph} = \frac{1}{N} \sum_{frm=1}^N DN_{sph}(frm) \quad (11)$$

$$DN_{n_sph} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{frm=1}^N (DN_{sph}(frm) - DN_{s_sph})^2} \quad (12)$$

式中, $DN_{sph}(frm)$ 为第 frm 帧积分球图像数据, N 是计算信号与噪声值所用的图像数据总帧数, 在本方法中计算时 N 取 200。需要注意的是, 采用积分球图像数据计算的积分球图像噪声 DN_{n_sph} 包含了光子噪声、暗信号噪声与读出电路噪声, 为相应条件下的系统输出总噪声 DN 值; 但是积分球图像信号值 DN_{s_sph} 包含了信号值、暗信号值及固定偏置, 而用于计算信噪比的信号 DN 值需要扣除系统的固定偏置以及暗信号 DN 值。在实验室测试时, 暗信号 DN 值的获取条件可保持与积分球数据获取条件一致, 暗信号偏置 DN_{d_offset} 既包含相同条件下的暗电流 DN 值, 也包含了固定偏置 DN 值, 可与积分球图像信号值 DN_{s_sph} 相减, 可直接获得用于计算信噪比的信号 DN 值。因此, 根据同一成像条件下的暗电流与积分球图像数据, 可以计算相应成像条件下各个像元信噪比值, 计算方法为

$$R_{SN}(i, j) = \frac{DN_{s_sph}(i, j) - DN_{d_offset}(i, j)}{DN_{n_sph}(i, j)} \quad (13)$$

式中, $R_{SN}(i, j)$ 是成像系统第 (i, j) 个像素的信噪比。为了更加准确地估计系统真实的信噪

比, 将各个像素的信噪比平均值作为系统信噪比值, 即

$$R_{SN} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J R_{SN}(i, j) \quad (14)$$

式中, I 和 J 为计算系统信噪比所用的图像面阵大小, 本方法中, 取 $I=100$, $J=100$, 即用 10000 个像素的信噪比平均值估计系统信噪比值, 可以准确地获取系统信噪比值。

2.2 系统信噪比的测试结果

根据第 1 节对系统信噪比影响因素的分析, 在实际系统信噪比测试过程中, 选择入瞳处的辐亮度、积分时间、探测器像元尺寸和光学系统 F 数作为系统变量, 获取了不同系统参数值的图像数据, 利用信噪比计算方法求出相应条件下的系统信噪比值, 并将实测值与理论计算值进行比较, 测试结果如图 4~图 7 所示。以上所有测试中, 仿真结果与实测结果均为归一化值。

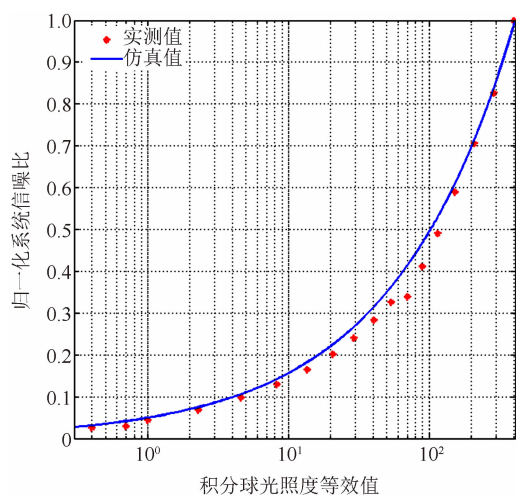


图 4 系统信噪比随辐亮度变化的仿真值及实测值

在噪声方面, 由于系统噪声的各个分量对系统信噪比的影响是等效的, 因此本文在测试系统噪声对系统信噪比的影响时, 仅测试量化噪声变化时系统信噪比的变化情况。系统量化噪声值可以根据量化噪声公式得出:

$$n_q = \frac{N_{FW}}{2^{b+1}\sqrt{3}} \quad (15)$$

式中, n_q 为量化噪声电子数, N_{FW} 为 CMOS 探测器的满井容量电子数, b 为系统采用的量化位数。本文采用的探测器最大量化位数为

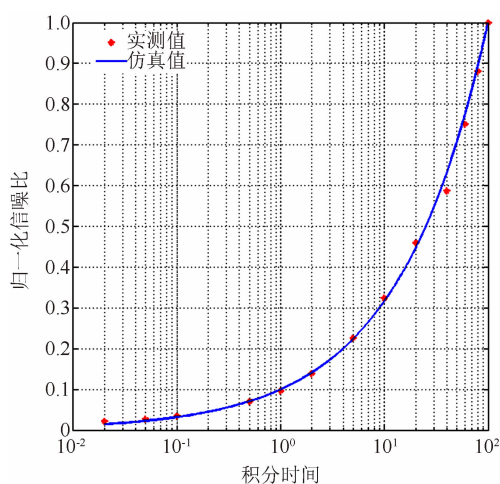


图 5 系统信噪比随积分时间变化的仿真值及实测值

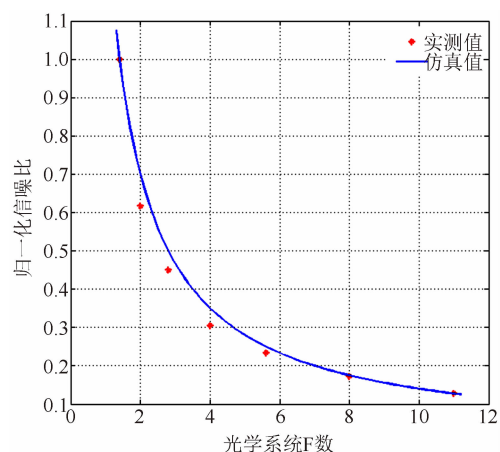


图 6 系统信噪比随光学系统 F 数变化的仿真值及实测值

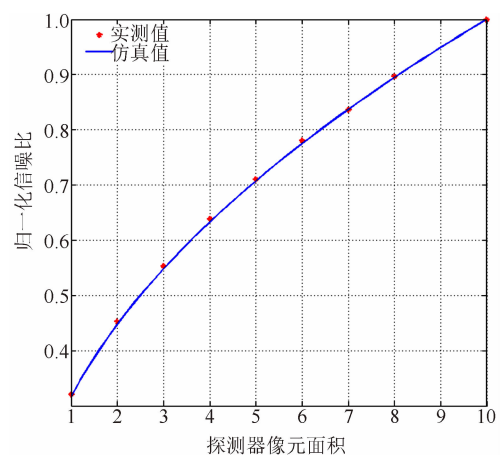


图 7 系统信噪比随探测器像元面积变化的仿真值及实测值

16 bit, 探测器的满井容量为 30000 e^- 。根据量

化噪声公式可以对量化噪声进行仿真与测试，图 8 为量化噪声变化量的仿真值与实测值。

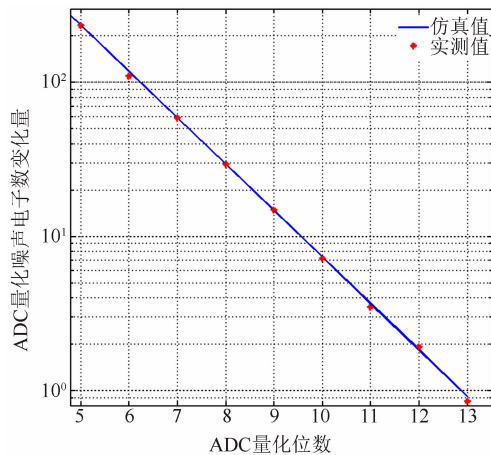


图 8 量化噪声电子数变化的仿真值与实测值

从图 8 中可以看出，仿真值与实测值一致，因此，通过改变量化噪声分析系统噪声对系统信噪比的影响是可行的。图 9 为系统噪声与系统信噪比的测试与仿真结果。

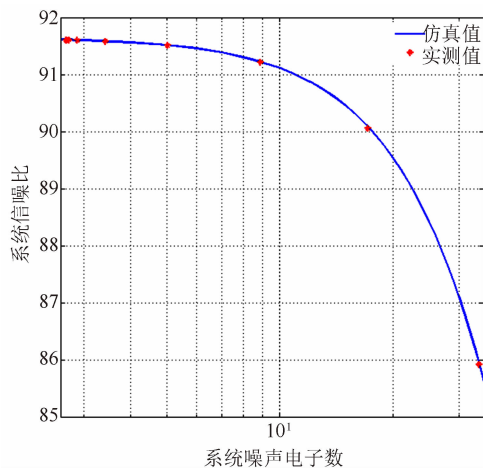


图 9 系统信噪比随系统噪声电子数变化的仿真值及实测值

2.3 系统信噪比的测试结果分析

根据仿真与实测结果可以看出，实测结果与仿真结果较一致。要提高微光成像系统的信噪比，必须要优化光学入瞳处的辐亮度 L 、光学系统透过率 τ_o 、探测器量子效率 η 、像元尺寸 A_{pix} 、积分时间 T_{int} 以及光学系统 F 数，同时尽可能地抑制系统噪声。一般来说，

(1)对于被动微光成像系统，光学入瞳处

的辐亮度受外界光照与目标本身特性的影响，无法通过系统设计进行控制。虽然采用主动照明的方式可以增大入瞳辐亮度，但是增加主动光源势必会增加设备的体积、重量、功耗与设计成本，而且在一些应用场景中，无法通过发射主动光提升系统信噪比。

(2)光学系统的透过率与使用的光学材料、设计方法有关，在系统设计过程中要尽量使用透过率高的材料，并且在满足要求的情况下，应使用最少的镜片数量。

(3)选取微光成像系统图像传感器时，要采用更高量子效率的探测器，同时要考虑探测器的响应波段与目标反射光谱相匹配，才能更好地发挥探测器的性能。

(4)探测器的像元尺寸与系统空间分辨率相关。相同光学焦距条件下，使用大像元尺寸会降低系统的空间分辨率，而增大焦距可以保证空间分辨率不变，但会使整个光学系统更加庞大，光学加工与装调难度更大。

(5)在系统设计时会根据任务需求确定探测器的帧周期。为了获得更大的信噪比，一般会选择最大积分时间成像；然而，积分时间越长，成像系统对相对运动就越敏感，产生的运动就模糊得严重。

(6)光学系统的 F 数越小，光学镜头的口径就越大，重量越重，导致成本增加，像质变差，同样也会导致光学加工与装调难度加大。

(7)对于系统噪声，要将各个噪声分量综合考虑，从而采用最有效的方法抑制系统噪声。以上几种提升系统信噪比的方法是最有效且可行性最高的，但同时也需根据实际情况考虑，选择最佳的系统参数进行设计。

2.4 CMOS 微光成像系统信噪比的实例计算

假设系统为基于 CMOS 图像传感器的微光成像系统，系统各个参数优化前后的对比见表 1。

假定系统工作在晴朗无月、晴朗 0.25 月、晴朗 0.5 月、晴朗满月等四种典型夜晚光照条件下，依据设定参数以及 CMOS 成像系统信噪比计算公式，可以计算出四种光照度条

件下系统的信噪比值, 计算结果见表 2。

表 1 CMOS 图像传感器成像系统参数优化前后的对比

项目	优化前参数	优化后参数
光学系统 F 数 $F\#$	2.8	1.4
光学镜头有效焦距 f/mm	25	12.7
探测器峰值量子效率 η	0.35	0.6
光学镜头平均透过率 τ_o	0.9	0.9
探测器像元尺寸 $A_{pix}/\mu\text{m}^2$	14×14	26×26
积分时间 T_{int}/ms	33	33
探测器电路噪声 n_{cir}/e^-	37	2
探测器暗信号 $N_d/e^-/\text{s}@20^\circ\text{C}$	5000	35
探测器满井容量 N_{FW}/e^-	30000	30000
系统量化位数 b/bit	10	16

表 2 典型夜天光照度下 CMOS 成像系统信噪比的计算

光照条件	晴朗 无月	晴朗 0.25 月	晴朗 0.5 月	晴朗 满月
计算结果				
环境照度/ mLux	0.77	3.98	13.22	31.13
参数优化前系统 信噪比	0.026	0.099	0.273	0.639
参数优化后系统 信噪比	4.58	9.69	17.14	26.41

从表 2 中可以看出, 在满月 31.13 mLux 的光照条件下, 普通的 CMOS 成像系统的信噪比为 0.639, 难以满足微光成像的要求。通过优化光学系统 F 数、探测器量子效率、像元面积、探测器读出噪声、暗电流及系统量化位数等系统参数, 在同样的光照条件下, 系统的信噪比大幅提高。在 1 mLux 量级, 系统的信噪比达到 4.58。此外, 如果采用量子效率更高的背照式 CMOS 图像传感器, 继续减小光学系统的 F 数, 则信噪比可以进一步提升。

3 结论

基于 CMOS 图像传感器微光成像系统的

信噪比计算模型, 讨论了影响成像系统信噪比的因素, 仿真计算了系统信噪比与信号、噪声的关系。根据仿真分析结果选取测试条件, 搭建了信噪比测试环境, 完成了系统信噪比测试, 并将实测结果与理论计算结果进行了对比。结果表明, 仿真结果与实测结果在各种条件下均具有较好的一致性。最后, 依据本文对系统信噪比的研究, 对基于 CMOS 图像传感器的成像系统参数进行优化, 并计算了在典型微光成像光照条件下参数优化前后的系统信噪比值。结果显示, 在 1 mLux 照度条件下, 系统信噪比由参数优化前的 0.026 提升到参数优化后的 4.58。本文的研究内容为后续基于 CMOS 微光成像系统的总体设计提供了理论依据, 也为微光成像系统参数的优化提供了有力的保证。

参考文献

- [1] Faramarzpour N, Deen M J, Shirani S, et al. CMOS-based Active Pixel for Low-light-level Detection: Analysis and Measurements [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, **54**(12): 3229–3237.
- [2] Campos F D S, Ulson J A C, Swart J W, et al. Temporal Noise Analysis and Measurements of CMOS Active Pixel Sensor Operating in Time Domain [C]. *Integrated Circuits and Systems Design*, 2013:1–5.
- [3] Vogelsong T, Tower J, Senko T, et al. Low-light NV-CMOS Image Sensors for Day/night Imaging [C]. *SPIE*, 2013: 8713.
- [4] Gross E, Neshor O. Low Light Level CMOS Sensor for Night Vision Systems [C]. *SPIE*, 2015: 945107.
- [5] Li L, Li M, Zhang Z, et al. Assessing Low-light Cameras with Photon Transfer Curve Method [J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2016, **09**(03): 1630008.
- [6] Wu X X, Liu J G, Zhou H D, et al. Spaceborne Low Light Imaging Based on EMCCD and CMOS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(5):0514002.