

文章编号 1004-924X(2022)02-0143-10

天问一号高分相机CMOS曝光参数设计与 卷帘校正

李云辉*, 王晓东, 刘文光, 周鹏骥, 黄敬涛, 董吉洪
(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:为获取高信噪比、明暗度适宜的火表图像,对天问一号火星高分相机CMOS探测器曝光参数开展了详细设计,并对卷帘效应畸变进行了量化分析与校正。首先建立了CMOS探测器光电响应模型,对比了曝光参数中曝光时间与PGA增益对成像信噪比的影响,确定曝光时间为优先调节参量。在分析曝光时间约束条件、明确靶面辐照度计算方法后,给出了不同火表反射率、太阳天顶角及轨道高度参数下的曝光时间设计结果与成像信噪比。最后针对CMOS探测器卷帘畸变机理进行分析,给出了校正方法及理论校正精度。仿真实验结果表明:成像信噪比在非轨道像移受限区域保持在48.28 dB左右,在受限区域则逐步降低,反射率取0.1时最低值为32.45 dB,典型辐照环境下成像信噪比为45.56 dB。根据实际轨道像移分析,CMOS探测器卷帘效应会造成数十像素倾斜畸变,在轨道像移测量误差不超过3.46‰前提下,所述方法校正后图像特征点位移量优于1个像素。

关键词:火星高分相机;CMOS探测器;曝光参数;卷帘畸变校正

中图分类号:TP722.4;TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223002.0143

CMOS exposure parameter design and rolling shutter distortion correction for Tianwen-1 high-resolution camera

LI Yunhui*, WANG Xiaodong, LIU Wenguang, ZHOU Pengji, HUANG Jingtao, DONG Jihong

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

* Corresponding author, E-mail: liyunhui@ciomp.ac.cn

Abstract: To obtain an image of the Martian surface with a high signal-to-noise ratio (SNR) and suitable brightness, the exposure parameters of the CMOS detector in the Mars high-resolution camera were designed, and the rolling shutter distortion was analyzed and corrected quantitatively. First, the photoelectric response model of the CMOS detector was established. By comparing the influence of exposure time and PGA gain on SNR, the exposure time was determined as the priority adjustment parameter. After analyzing the constraints of exposure time and clarifying the calculation method of target irradiance, the exposure time design results and SNR under different reflectivities, solar zenith angle, and orbit height parameters were given. Finally, the distortion mechanism of the rolling shutter was analyzed, and the correction method and theoretical correction accuracy were presented. The simulation results indicate that the SNR remains at approximately 48.28 dB in the non-orbital image-motion restricted area, and gradually decreases

收稿日期:2020-09-14;修订日期:2020-11-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 62005266)

es in the restricted area, with a minimum value of 32.45 dB when the reflectivity is 0.1. The SNR is 45.56 dB in a typical irradiation environment. Under the orbital parameters, the rolling shutter of the CMOS detector causes tens of pixels of tilt distortion. Under the premise that the image motion measurement error does not exceed 3.46‰, the image displacement after correction using the proposed method is better than 1 pixel.

Key words: Mars high-resolution camera; complementary metal oxide semiconductor detector; exposure parameters; correction of rolling shutter distortion

1 引言

传统航天光学遥感载荷中普遍采用 TDI CCD 探测器实现沿轨推扫或垂轨摆扫成像,在 CCD 探测器本身所具备的高量子效率、低噪声、高动态范围等优势基础上,增加时间延时积分模式,使其在高速像移下仍可获得高信噪比图像。但 CCD 探测器所需外围电路复杂,对驱动信号时序及模拟信号采集要求高,导致焦平面电路系统庞杂,硬件体积、质量及功耗代价均较高;且逐像素读出方式也无法实现高数据吞吐率^[1-3]。相比之下,CMOS 探测器将调理电路及模数转换电路集成于内部,外围电路简单,极大降低了焦平面电路复杂度,利于系统小型化,同时具有成本低、功耗低的优势^[4]。随着近年来技术飞速发展,CMOS 探测器在量子效率、噪声水平及动态范围等关键性能参数上已能够与 CCD 相媲美,有逐步取代 CCD 探测器的趋势^[5]。在消费电子、工业领域及遥感领域得到广泛应用。

CMOS 探测器按曝光机理可分为全局快门与卷帘快门两种。相比于卷帘快门的片内相关双采样(CDS)电路,全局快门一般采用外部数字 CDS 方式来抑制复位噪声,因此读出噪声相对偏高;同时由于在像素内增加电荷存储器降低了电荷势阱深度,动态范围有所下降。但基于像素同步曝光特性,适于高速像移场合应用。而卷帘快门作为目前应用更广泛的 CMOS 探测器曝光模式,在噪声水平、满阱电荷量、动态范围等方面均有优势,且成本较低;但缺点是卷帘效应在高速像移下会导致图像产生“果冻”畸变现象^[6-7]。

卷帘效应的独特性使其在光电领域得到了充分运用。刘智等人探讨了一种利用卷帘 CMOS 计算运动目标位姿和速度的方法^[8]。刘海龙等人基于卷帘 CMOS 自相关成像实现空间

相机振动参数检测^[9]。但对于航天光学遥感载荷来说,除少数静止轨道外,绝大多数轨道具有像移特征,且轨道高度越低,像移速度越大。此时卷帘效应则成为一种负面影响,需要通过调整工作参数规避其影响或采取有效措施进行校正。

我国首次火星探测任务“天问一号”探测器已于 2020 年 7 月 23 日在海南文昌中心成功发射,将进一步实现“绕-落-巡”三个目标。作为火星环绕器有效载荷之一的高分辨率相机,承担获取火星表面高分辨率全色及彩色影像功能,将对局部重点区域进行高精度成像与详细勘测,以开展地形地貌及地质构造研究^[10-11]。环绕器工作于近地点 265 km、远地点超过 10 000 km 的环火大椭圆轨道,高分相机将在轨道高度 800 km 以下择机成像。其焦平面采用 TDI CCD 探测器加 CMOS 探测器组合形式,兼备推扫成像与画幅成像功能。

在深空探测任务中,地空数据链带宽资源十分宝贵,因此设置合理参数,保证每一次成像质量尤为重要。对于 TDI CCD 探测器来说,一方面高分相机增加了自动调光功能,在轨可根据实时灰度值自动完成级数调节;另一方面制定了预设曝光级数表,供地面控制人员上注成像参数指令时参考。这些在遥感载荷中均有相对成熟的应用。而对于承担画幅成像功能的 CMOS 探测器,曝光参数设计方法并未成熟,尤其大椭圆轨道像移特性将对其曝光参数的合理设置提出严峻挑战。一方面在曝光参数设计时需要避免欠曝而导致图像信噪比过低,同时又需要避免曝光过曝而导致图像模糊;另一方面需要对轨道像移造成的卷帘畸变进行定量分析与有效校正。

本文从 CMOS 探测器的光电响应模型出发,分析了曝光时间及 PGA 增益对信噪比的影响,并依据 CMOS 探测器性能参数及轨道像移特性参数,计算得到了不同辐照环境及轨道参数下的

曝光时间设计结果与对应信噪比,可供地面控制人员上注CMOS探测器成像指令时参考。同时,基于CMOS探测器卷帘畸变工作机理,分析了不同轨道高度下畸变情况,并给出了校正方法,仿真实验结果表明在目前系统参数下校正精度优于1个像素。

2 CMOS探测器光电响应模型

CMOS探测器虽然与CCD探测器在制造工艺及工作机理上不尽相同,但从光电响应过程角度二者遵循同样的物理规律,参照EMVA1288相机测试标准,CMOS探测器的光电响应数学模型如图1所示^[12]。

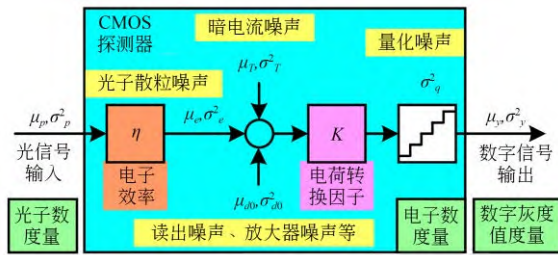


图1 CMOS探测器光电响应模型

Fig. 1 Photoelectric response model of CMOS detector

CMOS探测器的成像过程可以描述为:在曝光时间内入射到靶面上的光子转换为电子,然后经电荷存储电容将电子转换为电压信号,进而再经放大及量化转换为数字灰度值输出。其产生的电子数 μ_e 与入射光子数 μ_p 之比为量子效率 η 。

入射到靶面的光子转换成的电子,其波动性符合统计规律,表现为泊松分布,称之为光子散粒噪声,其特征是均值与方差相同,即有 $\mu_e = \sigma_e^2$ 。将探测器读出噪声以及放大电路等噪声统一归化为噪声 σ_{d0}^2 ,其统计规律表现为高斯分布,均值为零。暗底信号 μ_{d0} 表现为一固定值。暗电流噪声为热生电子噪声,同样满足泊松分布,即有 $\mu_T = \sigma_T^2$,且暗电流噪声与温度及曝光时间有关,正比于曝光时间 t 。 K 为电荷转换因子,单位为DN/e⁻。在模数转换量化过程还会引入一个量化噪声 σ_q^2 (以数字灰度值度量),其计算方法为:

$$\sigma_q^2 = K^2 \cdot \sigma_{qe}^2 = K^2 \cdot \frac{1}{q_e} \int_{-\frac{q_e}{2}}^{+\frac{q_e}{2}} x^2 dx = \frac{1}{12} \text{DN}^2. \quad (1)$$

依据上述成像过程描述及噪声因素分析,若以电子数度量,成像信噪比 SNR_e 可按照下式计算:

$$\text{SNR}_e = \frac{\mu_e}{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_{d0}^2 + \sigma_T^2 + \sigma_{qe}^2}} = \frac{\mu_e}{\sqrt{\mu_e + \sigma_{d0}^2 + \mu_T + \sigma_q^2/K^2}}. \quad (2)$$

若以数字灰度值度量,成像信噪比 SNR_{DN} 可按照下式计算:

$$\text{SNR}_{DN} = \frac{K\mu_e}{\sqrt{K^2\sigma_e^2 + K^2\sigma_{d0}^2 + K^2\sigma_T^2 + \sigma_q^2}} = \frac{K\mu_e}{\sqrt{K^2\mu_e + K^2\sigma_{d0}^2 + K^2\mu_T + \sigma_q^2}}. \quad (3)$$

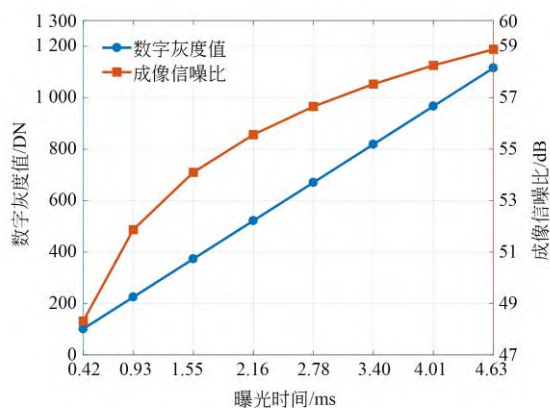
3 CMOS探测器曝光设计约束

3.1 曝光调节参量分析

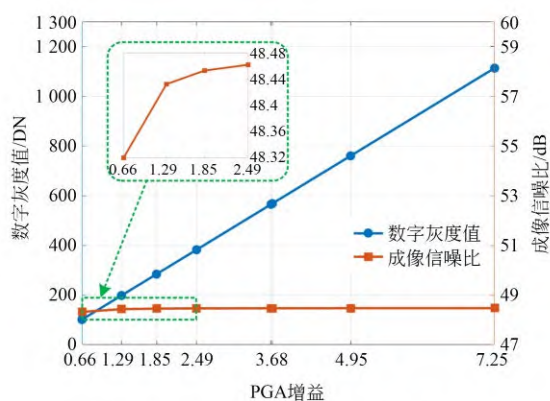
在入射到探测器靶面的辐照度一定时,可以通过两种有效方式获取适宜灰度值的图像,一种为曝光时间调节,另一种是PGA增益调节。

由于光生电子数 μ_e 与暗电流噪声 μ_T 均正比于曝光时间,因此由式(2)可知:当增加曝光时间 t 至原来 N 倍时,若忽略影响较小的噪声 σ_{d0}^2 与量化噪声 σ_q^2 ,信噪比会提升至原来的 $\sqrt{N}$ 倍。而作为电荷转换因子 K 的一个环节,调节PGA增益将直接反映到 K 上,由式(3)可知:当提升PGA增益时,若忽略量化噪声 σ_q^2 ,信噪比将保持不变。

以火星高分相机所采用的HR400型CMOS探测器为例,在火表典型辐照环境下探测器靶面获得辐照度约为 $0.075 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,如图2所示为采用增加曝光时间与提升PGA增益对灰度值及信噪比的影响。由于采用数字 4×4 Binning模式,等效于信噪比提升为原始图像的4倍。两种情况的初始参数均为曝光时间 0.42 ms ,PGA增益 $0.66 \times$,灰度值为101,此时将曝光时间增加至 4.63 ms 或将PGA增益提升至 $7.25 \times$ 能够获得同样的灰度值,但显然增加曝光时间会显著提升信噪比,而提升PGA增益对信噪比提升十分有限。图示结果变化趋势与理论分析相符。



(a) 信噪比和数字灰度值随曝光时间变化曲线
(a) SNR and digital gray value versus exposure time



(b) 信噪比和数字灰度值随PGA增益变化曲线
(b) SNR and digital gray value versus PGA gain

图2 曝光调节参量对信噪比和数字灰度值的影响

Fig.2 Influence of exposure adjustment parameters on SNR and digital gray value

由上述分析结果可以得出:相比于调节PGA增益,调节曝光时间是一种优选方式,在常规成像环境下一般不进行PGA增益的调节。但在极端成像环境下,如当采用探测器工作频率约束下的最短曝光时间,图像灰度值仍然饱和时,可以尝试降低PGA增益;当采用像移约束下的最长曝光时间,图像灰度值仍然较低时,可以尝试提升PGA增益。尤其在灰度值很低时会凸显出量化噪声,提升PGA增益会带来信噪比的有限提升,如图2所示,在PGA增益由 $0.66\times$ 提升至 $1.29\times$,信噪比提升 0.11 dB 。

3.2 曝光时间调节约束

3.2.1 最短曝光时间

火星高分相机采用HR400在HDR模式下高

增益HG通道图像数据,其行时间与曝光时间表示为:

$$T_{\text{line}} = 513 \times T_{\text{pix_clk}}, \quad (4)$$

$$T_{\text{exp,HDR}} = N \times T_{\text{line}} + 244 \times T_{\text{pix_clk}}, \quad (5)$$

其中,像素时钟设计为 25 MHz ,即 $T_{\text{pix_clk}}=0.04\text{ }\mu\text{s}$,对应行时间 $T_{\text{line}}=20.52\text{ }\mu\text{s}$ 。式(5)中曝光行数 N 原则上可取0至任意正整数,当 N 取0时为最短曝光时间 $9.76\text{ }\mu\text{s}$ 。需要注意曝光时间并非可连续设置,而是以行时间为间隔的一系列离散值。最短曝光时间设置不受像移等外界环境因素影响,只受限与探测器自身工作频率。

3.2.2 最长曝光时间

依据CMOS探测器曝光机理,原则上曝光时间可设置为无限长。但长曝光一方面会带来暗电流噪声的线性增长,降低动态范围;更重要的是由于轨道像移特性,长曝光将导致图像模糊。轨道像移特性对单行像素来说,可能会导致曝光时间内的图像模糊;对单帧图像来说,可能会导致几何畸变。需要明确的是,最长曝光时间设置只受图像模糊因素限制,图像几何畸变与曝光时间设置无关。

设在火星环绕器轨道参数下,折算到探测器靶面的像移速度为 v ,则在曝光时间 t 内目标场景像移量 S (单位:像素)为:

$$S = \frac{v \times t}{d}, \quad (6)$$

其中, d 为探测器像元尺寸。为保证图像清晰度,通常像移量不超过 $1/3$ 像素。因采用数字 4×4 Binning模式,像移量 S 的限值可以放宽至 $4/3$ 像素。此时最长曝光时间 t 应满足:

$$t \leq \frac{4d}{3v}. \quad (7)$$

3.3 Binning数字像元合并处理

在数字 4×4 Binning模式下,由于采用16个临近灰度值数字叠加,无论是否均值化处理,等效信噪比均提升至原始图像的4倍。若不采取均值化处理,直接以16个灰度值叠加作为输出,在获取相同灰度值时,曝光时间缩短至原来 $1/16$,则原始图像信噪比下降至原来 $1/4$,Binning后信噪比不变。若采取均值化处理,在获取相同灰度值时,曝光时间保持不变,则原始图像信噪比不

变,Binning后信噪比提升至4倍。

虽然曝光参数设计表面上是为了获取适宜灰度值的图像,但因此而牺牲图像信噪比却是得不偿失的。在保证信噪比优先前提下,完全可借助数字后处理获得适宜灰度值的图像。基于上述分析,为充分利用像移约束下的曝光时间以提升信噪比,系统设计采用数字 4×4 Binning模式下16个临近像素灰度值均值化处理后的数值作为数字图像输出。

4 CMOS探测器曝光参数设计

4.1 探测器性能参数

火星高分相机采用长光辰芯的HR400型面阵CMOS探测器,其关键性能参数如表1所示。

表1 HR400关键性能参数
Tab. 1 Key performance of HR400

序号	参数名称	参数值
1	像元尺寸	$11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$
2	有效像素数	$2048(\text{H}) \times 2048(\text{V})$
3	快门方式	电子卷帘式快门
4	像素时钟	20~30 MHz
5	帧频	24 fps@HDR模式
6	量子效率($\times$ 填充因子)	平均45%@400~900 nm
7	满阱电荷量	91 ke ⁻
8	读出噪声	1.45 e ⁻
9	暗电流	$31.3 \text{ e}^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} @ 20^\circ\text{C}$
10	动态范围	>96 dB@ HDR模式
11	量化位数	12 bit

依据CMOS探测器光电响应模型,其输入靶面辐照度与输出响应灰度值之间的关系可表示为:

$$G_{DN} = K \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\eta(\lambda) \cdot k_{\text{fill}} \cdot d^2}{hc/\lambda} \cdot t \cdot E(\lambda) d\lambda, \quad (8)$$

其中: G_{DN} 为响应灰度值, $E(\lambda)$ 为靶面光谱辐照度, $\eta(\lambda)$ 为量子效率, k_{fill} 为填充因子, d 为像元尺寸, t 为曝光时间, h 为普朗克常量, c 为真空中光速。响应谱段范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$,电荷转换因子为 K 。

4.2 靶面辐照度计算

由文献[13]可查得地球大气层外的太阳光谱辐照度,根据式(9)可以等效得到火星表面的

太阳光谱辐照度。由于火星大气稀薄,大气密度约为地球的1%,忽略大气吸收、散射等因素影响。

$$E_{\text{mars}}(\lambda) = \left(\frac{l_{\text{earth}}}{l_{\text{mars}}} \right)^2 \cdot E_{\text{earth}}(\lambda), \quad (9)$$

其中: $E_{\text{earth}}(\lambda)$ 表示地球大气层外光谱辐照度, $E_{\text{mars}}(\lambda)$ 表示火表光谱辐照度, l_{earth} 为日地平均距离, l_{mars} 为日火平均距离。

再基于高分相机观测火表特定目标的区域特征,根据式(10)确定入瞳光谱辐亮度:

$$L(\lambda) = \frac{\rho \cdot \cos \theta_z}{\pi} \cdot E_{\text{mars}}(\lambda), \quad (10)$$

其中: ρ 为目标区域反射率, θ_z 为太阳天顶角, $L(\lambda)$ 为入瞳光谱辐亮度。

进而再根据式(11)计算得到高分相机探测器靶面的光谱辐照度:

$$E(\lambda) = \frac{\pi}{4} \cdot L(\lambda) \cdot \frac{1}{F^2} \cdot \tau, \quad (11)$$

其中: τ 表示光学系统透过率, F 表示光学系统 F 数。

在获取靶面光谱辐照度后,将其代入式(8)即可计算得到输出图像灰度值。

4.3 曝光时间表计算

首先,根据火星环绕器轨道参数,可以计算得到不同轨道高度 h 下,折算到CMOS探测器靶面的像移速度 v ,二者关系如图3所示。

其次,在暂不考虑轨道像移对曝光时间约束的前提下,以经验值1/4饱和灰度值为设计目标,

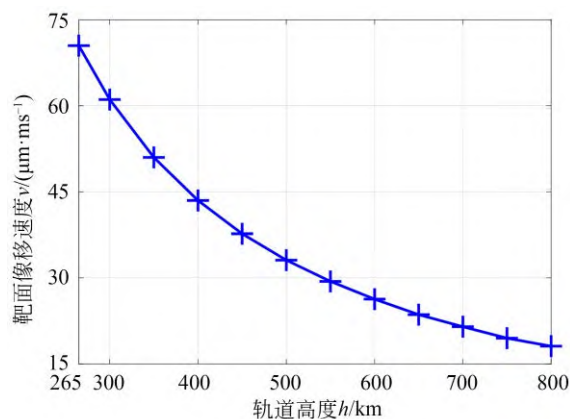


图3 像移速度随轨道高度变化关系

Fig. 3 Relationship between image motion velocity and orbital height

计算不同火表反射率、太阳天顶角参数下的曝光时间值。具体计算过程为:在一组反射率 ρ 、天顶角 θ_z 参数下,依次根据式(10)计算入瞳辐亮度 $L(\lambda)$,根据式(11)计算靶面辐照度 $E(\lambda)$;进而再将其代入式(8),并以1 024灰度值为目标,逆向求解理想曝光时间 t 。最后依据探测器实际可设置值,将曝光时间离散化。图4所示为反射率 ρ 在0.1~0.3范围内取不同值时,曝光时间设计结果随太阳天顶角的变化关系曲线。整体趋势表现为曝光时间随火表反射率降低、太阳天顶角增大而增加。

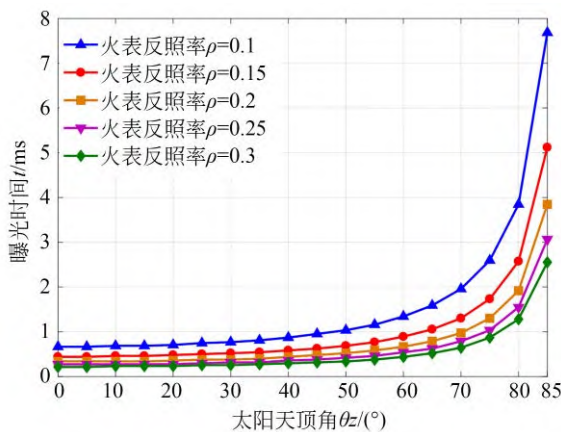
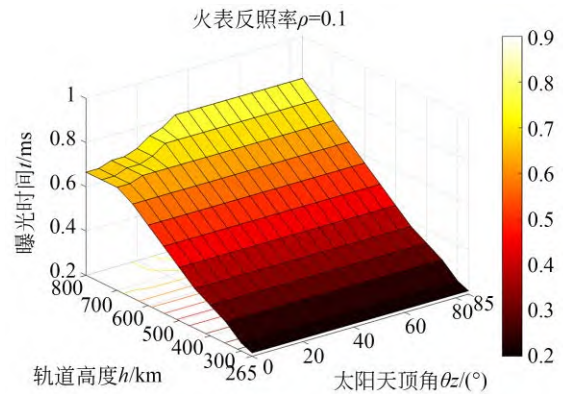


图4 曝光时间设计结果随太阳天顶角的变化关系

Fig. 4 Relationship between exposure time design results and solar zenith angle

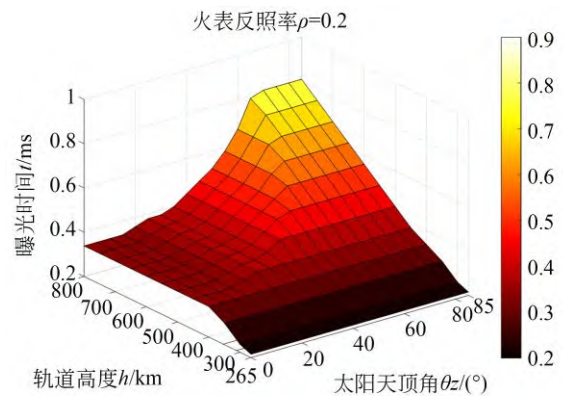
最后,在上述设计结果基础上,增加轨道像移的曝光时间约束。将不同轨道高度 h 下的像移速度 v 代入式(7)中计算得到最长曝光时间,并进行离散化,将此曝光时间与上述结果取较小值,作为最终的曝光时间设计值。如图5所示分别为在反射率 ρ 取0.1~0.3时,不同轨道高度、不同太阳天顶角参数下的曝光时间设计结果。

图5中所示的曲面部分为非轨道像移因素受限区域,此时曝光时间未受到像移约束最长曝光时间限制,可以获取到较为理想的目标设计灰度值;所示的倾斜平面部分为轨道像移因素受限区域,此时受限于轨道像移,曝光时间无法满足目标设计灰度值,实际成像灰度值将小于1/4饱和值。



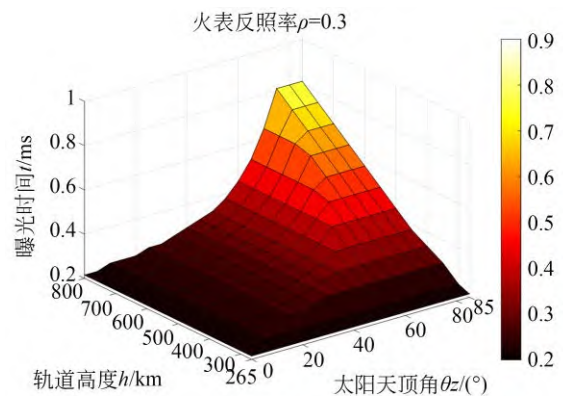
(a) 反照率 $\rho=0.1$ 的情况

(a) Case of albedo $\rho=0.1$



(b) 反照率 $\rho=0.2$ 的情况

(b) Case of albedo $\rho=0.2$



(c) 反照率 $\rho=0.3$ 的情况

(c) Case of albedo $\rho=0.3$

图5 曝光时间设计结果

Fig. 5 Results of exposure time design

图6所示分别为在反射率 ρ 取0.1~0.3时,不同轨道高度、不同太阳天顶角参数下,依据曝光设计结果得到的图像信噪比。与图5中对应区域对比可以看出:非轨道像移因素受限区域信噪

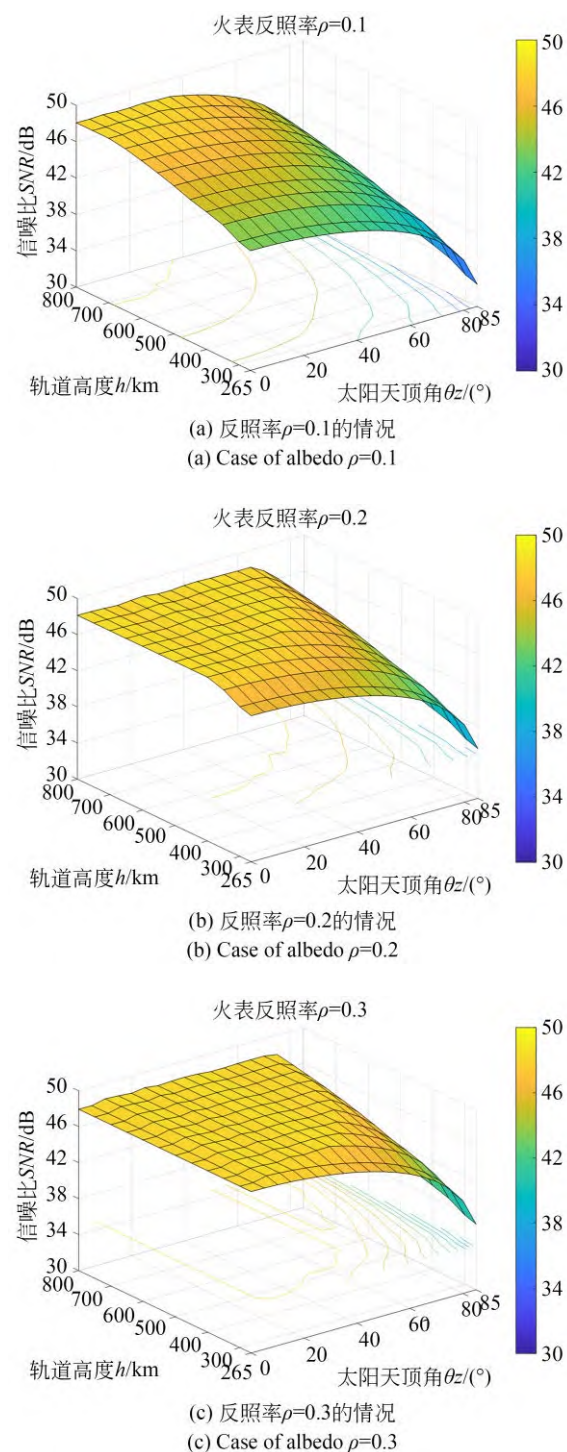


图6 基于曝光时间设计结果的信噪比

Fig. 6 SNR based on the results of exposure time design

比始终保持在48.28 dB附近;在轨道像移因素受限区域逐渐降低,反射率 ρ 取0.1时最低值为32.45 dB。在反射率 $\rho=0.2$ 、太阳天顶角 $\theta_z=30^\circ$ 的火表典型辐照环境下,265 km轨道高度上成像

信噪比能够达到45.56 dB。

5 CMOS卷帘效应畸变几何校正

5.1 卷帘效应产生机理

轨道像移除导致图像模糊外,还会因CMOS探测器卷帘式快门工作机理造成几何畸变。卷帘式快门曝光过程如图7所示,每个行时间被划分为两部分:读取操作与复位操作,复位操作等效于开始曝光时刻,读取操作等效于停止曝光时刻。对任意一行像素来说,其复位与读取操作之间的时间间隔即为曝光时间 t ,在连续成像模式下,每一行像素的曝光时间都是等同的。对整个探测器来说,某一行像素较其上一行曝光起始时刻滞后一个行时间 T_{line} ,依此类推,第2 047行较第0行像素曝光起始时刻滞后了 $2\,047T_{\text{line}}$,这种曝光非同步性是产生卷帘畸变的根本原因。

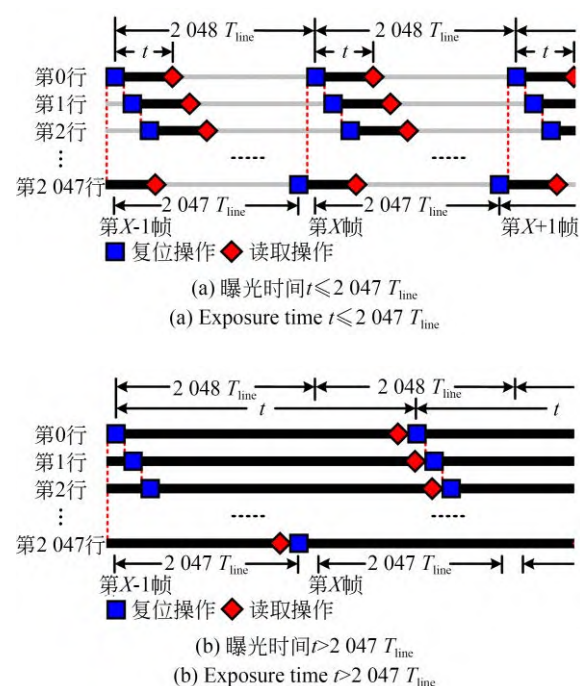


图7 卷帘式快门曝光过程

Fig. 7 Exposure process of rolling shutter

探测器中第0行与第2 047行像素产生最大相对畸变,在相距 $2\,047 T_{\text{line}}$ 时间内的畸变位移量 S_d 为:

$$S_d = \frac{2047T_{line} \times v}{d}. \quad (12)$$

图 7 所示卷帘快门工作过程分为两种情况:曝光时间小于帧时间与曝光时间大于帧时间。对于后者来说,由于曝光设计结果能够满足曝光时间内图像不模糊,则在小于曝光时间的帧时间内,畸变位移量很小,此种情况下卷帘效应畸变可忽略。

而对于火星高分相机来说,其曝光时间设计结果均小于帧时间 42 ms,为上述第一种情况。如图 3 所示,在 265~800 km 轨道高度范围,靶面像移速度为 18.10~70.50 $\mu\text{m}/\text{ms}$,代入式(12)计算得到畸变位移量为 86.89~338.44 像元,在 4×4 Binning 模式基础上,等效畸变 21.72~84.61 像素,有必要采取措施进行校正。

5.2 倾斜畸变校正

CMOS 探测器卷帘方向与轨道像移方向存在两种相对关系:垂直与平行。当二者垂直时,卷帘效应表现为倾斜畸变,校正过程只涉及逆映射及重新采样;当二者平行时,按照方向相同或相反,卷帘效应表现为拉伸或压缩,由于存在过采样或欠采样问题,校正过程稍显复杂,且对校正后图像质量有一定影响。因此火星高分相机采用卷帘方向与轨道像移垂直的安装型式。

相比于光学系统内畸变校正及未知运动矢量的几何畸变校正过程,CMOS 探测器卷帘效应畸变较为单一,引起该畸变的像移过程表现为所有像素统一的全局运动矢量,且该矢量值可依据轨道像移参数计算得到。卷帘畸变校正的思路为:首先确定目标景物到畸变图像的正向映射矩阵,然后通过取其逆过程即得到校正矩阵。

设原始目标景物的某一特征点坐标为 (x, y) ,对应畸变图像的坐标为 (x', y') ,则二者的正向映射关系为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -T_{line} \cdot v/d & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (13)$$

取其逆过程,畸变校正矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ T_{line} \cdot v/d & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}. \quad (14)$$

火星高分相机成像焦平面共有两片 CMOS 探测器,考虑硬件结构及电路布局一致性,

CMOS#A 与 CMOS#B 采用中心对称安装形式,如图 8 所示。二者卷帘方向均与像移方向垂直,但彼此相反。因此在卷帘畸变校正时,CMOS#A 像移速度 v 应取正值,而 CMOS#B 像移速度 v 应取负值。

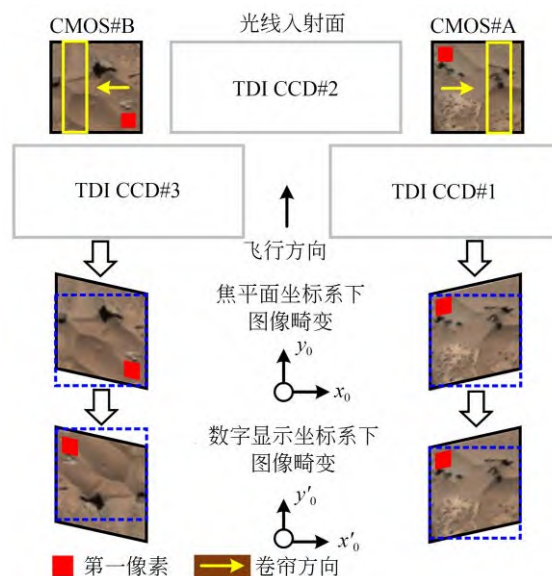


图 8 两 CMOS 探测器卷帘畸变对应关系

Fig. 8 Correspondence of rolling shutter distortion of the two CMOS detectors

5.3 畸变校正精度

在 CMOS 探测器像素时钟一定的前提下,作为畸变校正过程的唯一输入参量,像移速度精度将直接决定卷帘畸变校正精度。根据环绕器姿态测量及控制精度指标,当环绕器无侧摆、俯仰时,在 265~800 km 轨道高度下像移速度相对误差 $\Delta v/v$ 约为 2.38~3.46%,则根据式(15)计算得到对应畸变校正误差最大不超过 1.17 像元,在 4×4 Binning 模式下等效畸变 0.29 像素,此校正误差量值可忽略。

$$\Delta S_d = \frac{\Delta v}{v} \times S_d. \quad (15)$$

5.4 仿真实验验证

以火星表面沙丘景物图为对象,通过仿真分别计算了在 265 km 轨道、500 km 轨道及 800 km 轨道高度下的成像畸变效果及对应校正后图像,如图 9 所示。轨道高度愈底,卷帘畸变愈严重,在 500 km 轨道高度以下成像时,已经肉眼可见图形

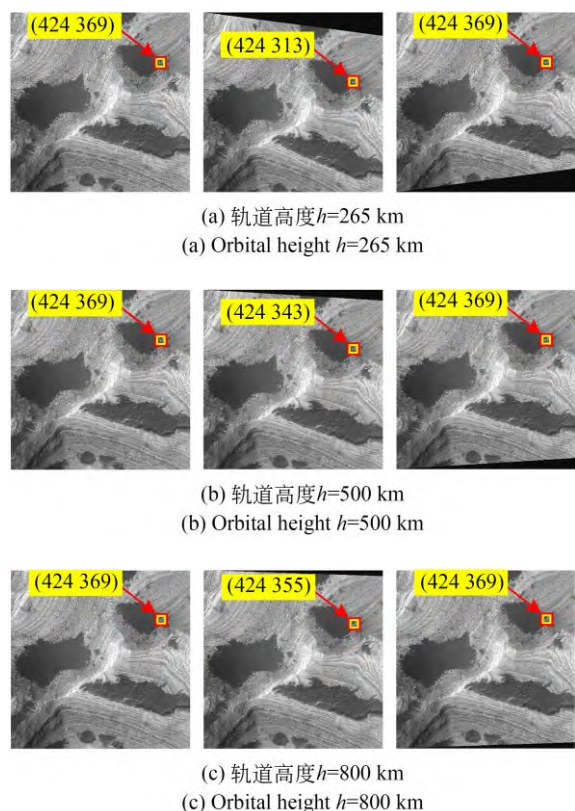


图9 卷帘畸变校正前后图像对比(从左至右依次为原始图像、畸变图像及校正后图像)

Fig. 9 Comparison of images before and after correction of rolling shutter distortion (from left to right are the original image, distorted image and corrected image)

参考文献:

- [1] 宁永慧, 刘辉, 赵庆磊, 等. 大面阵高帧频 CMOS 成像电子学系统设计[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1167-1177.
NING Y H, LIU H, ZHAO Q L, et al. High-frame frequency imaging system of large area CMOS image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1167-1177. (in Chinese)
- [2] 孙宏海, 何舒文, 吴培, 等. 高动态科学级 CMOS 相机设计与成像分析[J]. 液晶与显示, 2017, 32(3): 240-248.
SUN H H, HE S W, WU P, et al. Design and imaging analysis of high dynamics scientific CMOS camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 240-248. (in Chinese)
- [3] 曲宏松, 张叶, 金光. 基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能[J]. 光学精密工程,

畸变。经所述方法校正后,畸变消失,且特征点坐标与原始图像景物一致,校正精度优于1个像素。

6 结 论

为获取高信噪比、明暗度适宜的火表图像,对火星高分相机 CMOS 探测器曝光参数开展了详细设计,并对卷帘畸变效应进行了量化分析与校正。设计给出了不同火表反射率、太阳天顶角及轨道高度参数下的曝光时间值,以及对应的成像信噪比。针对 CMOS 探测器卷帘畸变机理进行分析,给出了校正方法及校正精度。

仿真实验结果表明:依据曝光时间设计结果,在非轨道像移因素受限区域的信噪比能够始终保持在 48.28 dB 附近,而在轨道像移因素受限区域逐渐降低,在反射率取 0.1 时最低值降为 32.45 dB。在典型火表辐照环境(反射率 0.2、太阳天顶角 30°)下,近地点 265 km 轨道高度上成像信噪比能够达到 45.56 dB。经分析,CMOS 探测器在工作轨道高度范围内存在数十像素几何畸变,在环绕器轨道像移测量误差不超过 3.46% 前提下,所述方法校正后特征点位移量优于1个像素。所述内容对深空探测光学成像载荷的曝光参数设计及卷帘畸变校正具有指导意义。

2010, 18(8): 1896-1903.

QU H S, ZHANG Y, JIN G. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1896-1903. (in Chinese)

- [4] MEHTA S, PATEL A, MEHTA J. CCD or CMOS Image sensor for photography [C]. 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSPP). April 2-4, 2015, Melmaruvathur, India. *IEEE*, 2015: 291-294.

- [5] 张晓祥, 赵金宇, 贾建禄, 等. 卷帘快门 sCMOS 相机对空间碎片观测的影响研究[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1441-1449.

ZHANG X X, ZHAO J Y, JIA J L, et al. Study on the effect of rolling shutter sCMOS camera on space debris observation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1441-1449. (in Chinese)

- [6] KOZACEK B, GRAUZEL J, FRIVALDSKY M. The main capabilities and solutions for different types of the image sensors[C]. 2018 *ELEKTRO*. May 21-23, 2018, Mikulov, Czech Republic. IEEE, 2018: 1-5.
- [7] ALBL C, KUKLOVA Z, LARSSON V, *et al.* From two rolling shutters to one global shutter[C]. 2020 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. June 13-19, 2020, Seattle, WA, USA. IEEE, 2020: 2502-2510.
- [8] 刘智, 柴华, 李娜娜. CMOS图像传感器中卷帘式快门特性及其应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 2017-2023.
- LIU Z, CHAI H, LI N N. Shutter mode of CMOS image sensor and its application[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 2017-2023. (in Chinese)
- [9] 刘海龙, 李祥之, 薛旭成, 等. 利用卷帘快门面阵 CMOS 自相关成像的空间相机振动参数检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1474-1481.
- LIU H L, LI X Z, XUE X C, *et al.* Vibration parameter detection of space camera by taking advantage of CMOS self-correlation Imaging of plane array of roller shutter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1474-1481. (in Chinese)
- [10] 李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. *深空探测学报*, 2018, 5(5): 406-413.
- LI C L, LIU J J, GENG Y, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 406-413. (in Chinese)
- [11] 朱岩, 白云飞, 王连国, 等. 中国首次火星探测工程有效载荷总体设计[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(6): 510-514, 534.
- ZHU Y, BAI Y F, WANG L G, *et al.* Integral technical scheme of payloads system for Chinese Mars-1 exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 510-514, 534. (in Chinese)
- [12] European Machine Vision Association. EMVA Standard 1288 Release 3.1 [S]. 2016.
- [13] 都亨, 叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- DU H, YE Z H. *Space environment manual for LEO Spacecraft* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. (in Chinese)

作者简介:



李云辉(1989—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,助理研究员,2012年与2014年于哈尔滨工业大学分别获得学士及硕士学位,2019年于中国科学院大学获得博士学位,现为中科院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,主要从事空间光学遥感成像系统及空间目标稳像与跟踪控制方面的研究。E-mail: liyunhui@ciomp.ac.cn