

文章编号:1007-2780(2020)08-0845-07

太阳 $H\alpha$ 空间望远镜信噪比分析

蔡志鹏^{1,2}, 张星祥^{1*}, 陈 哲¹, 毕国玲¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 太阳 $H\alpha$ 空间望远镜是国际上首次实现全日面 $H\alpha$ 单色像(包括 $H\alpha$ 线心和线翼 3 个波段)的空间观测望远镜, 对太阳物理研究有着重要的意义。信噪比是定量评价空间望远镜成像质量和工作稳定性的重要指标, 因此信噪比的计算和估计对太阳 $H\alpha$ 空间望远镜的研制和使用至关重要。本文从太阳 $H\alpha$ 空间望远镜工作原理和能量传递的角度出发, 建立了信噪比计算模型, 推导了信噪比计算公式。在此基础上计算了信噪比以及曝光时间区间, 给出了最佳工作状态下单像元和像元合并情况下曝光时间分别为 5 ms 和 10 ms。实验结果表明, 计算值和测量值误差在 1% 以内, 由此可以验证该信噪比计算模型的准确性和实用性。

关键词: 空间望远镜; 太阳 $H\alpha$ 成像; 信噪比

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A doi: 10.37188/YJYXS20203508.0845

Signal to noise ratio analysis of solar $H\alpha$ space telescope

CAI Zhi-peng^{1,2}, ZHANG Xing-xiang^{1*}, CHEN Zhe¹, BI Guo-ling¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The solar $H\alpha$ space telescope is the first space observation telescope to realize the full-surface $H\alpha$ monochromatic image in the world (including the three bands of $H\alpha$ core and wire wing), which is of great significance for solar physics research. The signal-to-noise ratio (SNR) is an important index for quantitative evaluation of imaging quality and working stability of space telescope, so it is very important to calculate and estimate SNR for the development and use of solar $H\alpha$ space telescope. The calculation model of the signal-to-noise ratio is established and the formula is derived according to the principle of the solar $H\alpha$ space telescope and the way of energy transfer. On this basis, the interval of the signal-to-noise ratio and the exposure time is calculated, and the exposure time of the single pixel in the best working condition is 5 ms, and the exposure time of the pixel combination is 10 ms. It has been experimentally verified that the calculated and measured

收稿日期: 2019-12-03; 修订日期: 2020-03-16.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2016YFB0500100); 国家自然科学基金 (No.61801455); 民用航天预研项目 (No.D040101)

Supported by National Key Research and Development Program Project (No.2016YFB0500100); National Natural Science Foundation of China (No.61801455); Civil Space Pre-research Program Project (No.D040101)

* 通信联系人, E-mail: jan_zxx@163.com

values are within one percent of the error. This can verify the accuracy and practicability of the signal-to-noise ratio calculation model.

Key words: space telescope; solar H_{α} imaging; signal to noise ratio

1 引言

为了实现建立太阳爆发从光球至日冕的能量积累、释放与传输的完整物理过程这一科学目标,研究设计了太阳 H_{α} 空间望远镜,可以为空间天气预报提供高质量的观测资料。太阳光谱中 H_{α} 谱线对于太阳全日面观测和物理研究具有重要意义。 H_{α} (波长为 656.28 nm)是主要用于观测耀斑及暗条纹等众多太阳活动现象的重要谱线。在以往的太阳 H_{α} 全日面观测中,都是使用地表的观测平台,在图像信息传递的过程中容易受到天气和大气的污染,导致观测到图像含有云层覆盖的污染,遮盖到太阳表面上的活动现象导致图像降质,影响人们对太阳表面活动研究。常规做法是在获取图像后后续处理前对图像主观检查区分,工作量一般较大且处理过程复杂^[1-3]。太阳 H_{α} 空间望远镜是国际上首次实现全日面 H_{α} 单色像(包括 H_{α} 线心和线翼 3 个波段)的空间观测望远镜。对比传统的地面观测平台,太阳 H_{α} 空间望远镜具有更强大的功能和优势。

信噪比(Signal to Noise, SNR),又称讯噪比,是一个在信号处理、目标探测、图像分析等众多领域都有重要作用的技术参量。信噪比即信号和噪声之比,单位一般是 dB。而信噪比作为评价望远镜成像质量的重要指标,是本文主要分析的问题。就 CMOS 器件探测信噪比计算而言,有数十种定义和计算方式^[4-5]。

本文主要根据太阳 H_{α} 空间望远镜的整体结构和工作原理,区别于传统的地面测量相机以及宽光谱测量,从能量传递角度进行分析,提出符合太阳 H_{α} 空间望远镜系统信噪比计算方法,对太阳 H_{α} 空间望远镜信噪比进行了计算和分析。

2 信噪比分析

2.1 太阳 H_{α} 空间望远镜结构

对于太阳 H_{α} 空间望远镜来说,信号传递到探测器阵列 CMOS 上时的大小与系统的结构有密切

关系。太阳 H_{α} 空间望远镜的结构主要有 3 个部分,一是望远镜的探测器部分,二是探测器扫描部分,三是光学系统部分,如图 1 所示。

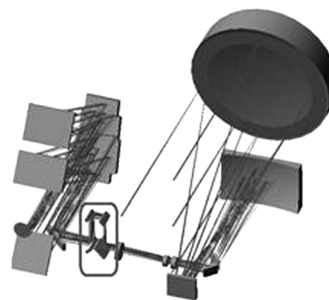


图 1 太阳 H_{α} 空间望远镜结构

Fig.1 Structure of solar H_{α} space telescope

观测太阳时,太阳光直接照射到望远镜入瞳面 S_1 上,即望远镜的孔径面积,直径为 180 mm 的圆。在这之后,太阳光经过望远镜的光学系统在像面上形成一个圆形的太阳的像。与此同时,系统的狭缝也在像面上。此时,太阳的像只有部分光可以经过狭缝进入到探测系统。经过狭缝进入到探测系统后,光经过系统内部的折叠镜、准直反射镜和成像反射镜再经过衍射光栅不同波长之间彼此分开,最后到达 CMOS 阵列面上,完成传递,探测器结构如图 2 所示。

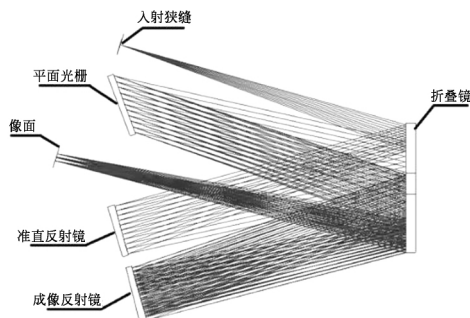


图 2 探测器结构

Fig.2 Structure of detector

2.2 信号分析及计算

在此我们从能量传递的角度进行信号估算,系统的工作原理如图 3 所示。太阳的照度为 $E_1(\lambda)$,照射到望远镜 $S_1(\lambda)$ 上,则在 $S_1(\lambda)$ 上的光

通量 $\varphi_1(\lambda)$ 等于:

$$\varphi_1(\lambda) = E_1(\lambda) \times S_1(\lambda). \quad (1)$$

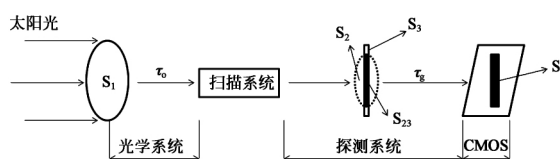


图3 相机工作原理图

Fig.3 Working principle of camera

光学系统总透过率为 τ_0 , 像的大小为 S_2 , 狭缝的面积为 S_3 , 经过分析, 只有 S_2 和 S_3 重叠部分 S_{23} 的光可以透过, 到达探测器。狭缝长度大于太阳的圆形像斑直径, 因此 S_{23} 为狭缝宽度和太阳像斑直径的乘积, 此时可以通过的光通量为 $\varphi_2(\lambda)$, 根据系统能量的传递关系, 则有:

$$\varphi_2(\lambda) = \varphi_1(\lambda) \times \tau_0(\lambda) \times \frac{S_{23}}{S_2}. \quad (2)$$

光经过狭缝进入到探测后, 依次经过折叠镜、准直镜、平面光栅和成像反射镜到达像面, 即 CMOS 平面, 此时总的通量为 $\varphi(\lambda)$ 。已知探测器内滤光片和光栅透过率 τ_g , 则有:

$$\varphi(\lambda) = \varphi_2(\lambda) \times \tau_g, \quad (3)$$

由于光通过狭缝进入到探测器后又经过光栅的作用, 不同的波长会在 CMOS 表面上分别形成狭缝的光斑彼此散开。设波长在 CMOS 面上对应狭缝光斑的面积为 $S(\lambda)$, 虽然 CMOS 是 1:1 成像, 但是狭缝的像会有一定的弥散情况, 可以在软件中利用点扩散函数近似地求出弥散斑的面积, 则可求 CMOS 面上的光照度 $E(\lambda)$:

$$E(\lambda) = \frac{\varphi(\lambda)}{S(\lambda)}, \quad (4)$$

由式(1)~(4)可知,

$$E(\lambda) = \frac{S_1(\lambda) S_1 \tau_0 \tau_g S_{23}}{S S_2} E_1. \quad (5)$$

太阳 H α 空间望远镜 CMOS 探测器上一个像元接收到的能量为像面照度、像元面积和积分时间的乘积, 太阳照度经过系统传递照射到 CMOS 上产生的信号电子数 S_e 可表示为:

$$S_e = \frac{\lambda}{hc} \left[\int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} E(\lambda) A_d t_{\text{int}} \eta(\lambda) d\lambda \right], \quad (6)$$

式中: $E(\lambda)$ 为像面光谱辐照度, A_d 为 CMOS 像元的面积, t_{int} 为相机的曝光时间, $\eta(\lambda)$ 为探测器的量子效率, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常

数, $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为真空中的光速。由于 CMOS 探测器一个像元所占的光谱宽度很窄, 可以省去积分, 因此式(6)可以改写为:

$$S_e = \frac{E(\lambda) A_d t_{\text{int}} \eta(\lambda) \Delta\lambda}{hc}. \quad (7)$$

2.3 噪声分析及计算

在太阳 H α 空间望远镜中考虑的噪声主要分为探测器接收到的入射光子的散粒噪声和探测器本身的噪声, 下面将主要按照这两个方面进行噪声分析。

目标物(太阳)辐射的光子噪声是指辐射光子产生的散粒噪声, 它起源于光子流随机特性, 属于随机噪声, 光子数则遵循泊松分布^[1]。我们用 $\sigma_s(\lambda)$ 表示目标物(太阳)辐射散粒噪声, 则有:

$$\sigma_s(\lambda) = \sqrt{N_s(\lambda)}, \quad (8)$$

式中, $N_s(\lambda)$ 是目标物辐射产生的光子数, 通常计算信噪比时, 只会考虑时域上的随机噪声, 因此 $N_s(\lambda)$ 也可以表示探测器 CMOS 的信号, 即探测器光敏单元接收的电子数 S_e 。

探测器噪声是太阳 H α 空间望远镜中不可避免的噪声。探测器输出噪声主要分为时间噪声和空间噪声, 但是空间噪声可以在设计的同时通过算法进行校正, 消除其对系统信噪比的影响。因此, 在这里我们只需要分析探测器 CMOS 的时间噪声。CMOS 时间噪声包括光子噪声(即散粒噪声)、读出电路噪声和暗电流噪声^[2]。

在此, 我们假设噪声是相互之间彼此独立的, 并且探测器是噪声容限的, 则可以得到系统总的噪声 σ 是各噪声源方差的和, 其表达式如下:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_d^2 + \sigma_r^2}, \quad (9)$$

式中, 暗电流噪声和电路读出噪声分别用 σ_d 和 σ_r 表示。信号及噪声组成如图4所示。

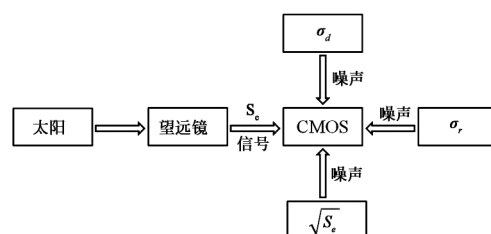


图4 信号及噪声组成

Fig.4 Composition of signal and noise

2.4 信噪比计算

结合以上对系统噪声的分析, 以及只考虑时域上的随机噪声, 并且假设目标信号所有的光子

都汇聚到探测器 CMOS 的一个像元上^[6],则系统的信噪比 SNR 可以用光电子数表达:

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= S_e / \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_d^2 + \sigma_r^2} \\ &= S_e / \sqrt{S_e + N_d + \sigma_r^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中, N_d 是暗电流噪声所对应的电子数。

3 太阳 H_α 空间望远镜的信噪比计算

太阳 H_α 空间望远镜的系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

望远镜参数	数值
望远镜孔径	180 mm
焦距	1 820 mm
光学系统透过率	0.5
滤光片和光栅透过率	0.375
单像元光谱宽度	0.264 nm
探测器量子效率	0.45
探测器像元的面积	$4.6 \mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$
太阳在焦距处的光斑半径	8.47 mm
狭缝宽度	$8 \mu\text{m}$

太阳照度 $E_1(\lambda)$ 为 $3.5 \times 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (线心), $1.4 \times 10^{-5} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (线翼, 线心 $\pm 0.05 \text{ nm}$), 线心爆发期的能量是线翼的 2 倍。

太阳 H_α 空间望远镜 COMS 器件参数如表 2 所示。

表 2 CMOS 参数

Tab.2 CMOS parameters

参数	数值
满阱电子	$14\ 500 \text{ e}^-$ (Normal)
	$58\ 000 \text{ e}^-$ (Binning)
暗电流噪声	$0.24 \text{ e} \cdot \text{s}^{-1}$ (20°C)
	$66 \text{ e} \cdot \text{s}^{-1}$ (60°C)
电路读出噪声	$25 \text{ e} \cdot \text{s}^{-1}$
像元尺寸	$4.6 \mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$

由于太阳 H_α 空间望远镜工作环境温度在 20°C 左右,因此选择 0.24 e/s 作为系统的暗电流噪声,信噪比计算结果如表 3 所示。

表 3 信噪比计算

Tab.3 Signal to noise ratio calculation dB

	曝光时间/ms			
	1 ms	2 ms	5 ms	10 ms
线翼	17	24.042	38.013	53.768
线心	34	48.083	76.046	107.544
线心爆发	48.094	68.015	107.545	——

由于 CMOS 的满阱电子数为 $14\ 500 \text{ e}^-$,在测量的曝光时间内不允许转化电子数达到满阱状态,因此可以得出线心、线翼和线心爆发所对应的最大曝光时间。且要满足探测器 CMOS 的工作要求,信噪比大于 15 dB,因此可以得到 3 种情况下满足要求的曝光时间区间,如表 4 所示。

表 4 曝光时间

Tab.4 Exposure time

谱线	最少曝光时间/ms	最大曝光时间/ms
线翼	0.778	50
线心	0.195	12.5
线心爆发	0.097	6.25

在探测器工作期间,不同的测量要求对应不同的曝光时间。只测量单一谱线时,只考虑单一谱线的曝光时间即可。同时测量 3 组谱线时,为同时达到更大的信噪比且不达到电子数满阱的状态,我们选取 5 ms 为曝光时间。在实验和实际的使用时都得到很好的效果。单像元信噪比与曝光时间曲线如图 5 所示。

在满足望远镜要求的空间分辨率和探测器分辨率的前提下,采用像元合并技术,可以提高系统的信噪比^[7-13]。像元合并技术就是将探测器 CMOS 阵列相邻像素上的电荷在读出时作为一个值读出,此时的信噪比计算模型为:

$$\text{SNR}_{\text{binning}} = \frac{MS_e}{\sqrt{MS_e + MN_d + \sigma_r^2}}, \quad (11)$$

式中, M 为合并像元数,在此我们选择 $M=2$,此时满阱电子数为 $58\ 000 \text{ e}^-$,线心、线翼和线心爆

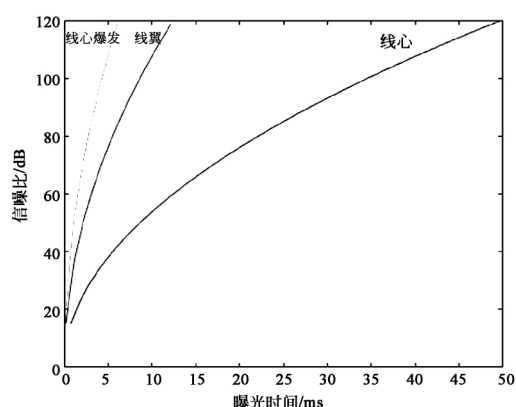


图 5 单像元情况下信噪比与曝光时间的关系

Fig.5 Relationship between the signal-to-noise ratio and exposure time in the case of single pixel

发得到最小积分时间分别是 0.389, 0.097, 0.049 ms, 最大积分时间为 100.034, 25.076, 12.537 ms。像元合并时信噪比与曝光时间曲线如图 6 所示。

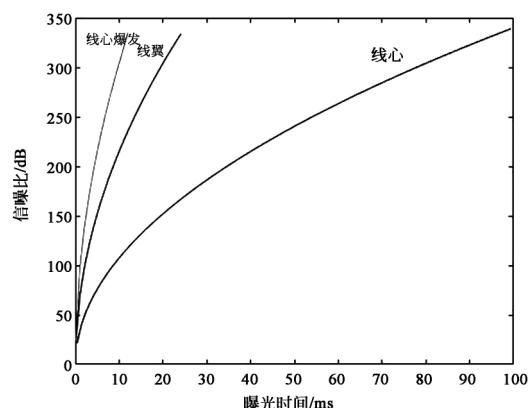


图 6 像元合并情况下信噪比与曝光时间的关系

Fig.6 Relationship between the signal-to-noise ratio and exposure time in the case of pixel combination

像元合并后,信噪比显著提高,正常工作的曝光时间由原来的 5 ms 提高到 10 ms。

4 实验验证

4.1 实验内容

为了验证信噪比计算公式准确性,在实验室用日照灯模拟太阳对该相机进行了信噪比实验测量。实验装置将太阳 $H\alpha$ 空间望远镜置于实验轨道一侧,在距离较远的同一轨道另一侧放置模拟太阳的日照灯即可。实验积分时间为 10 ms,CMOS 与驱

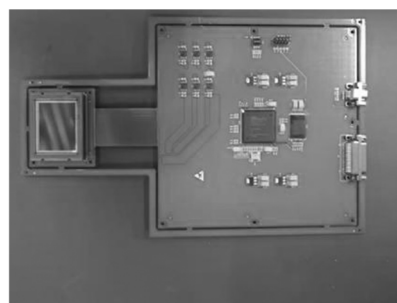


图 7 CMOS 与驱动板装置

Fig.7 CMOS and driver board devices



图 8 实验实物图

Fig.8 Experimental physical map

动板装置如图 7 所示,实验装置如图 8 所示。

调整日照灯功率,模拟 3 种照度太阳辐射,分别进行多次重复实验,测量系统信噪比,同时和建立的信噪比计算模型计算得到的信噪比进行对比,分析误差。实验结果如表 5 所示。

表 5 实验结果与计算值

Tab.5 Experimental results and calculated values

实验辐射照度/ ($J \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot s^{-1}$)	信噪比 (实验平均)	信噪比 (计算)	误差/ %
1.43×10^{-4}	109.6	108.66	0.858
7.4×10^{-5}	78.7	78.16	0.686
3.5×10^{-5}	54.1	53.786	0.580

计算结果与测量结果基本相同,误差在 1% 以内。由此可以验证信噪比计算模型的准确性。

5 结 论

针对太阳 $H\alpha$ 谱线,结合国际上首次实现全日面观测 $H\alpha$ 单色像(包括 $H\alpha$ 线心和线翼 3 个

波段)的空间观测望远镜系统和探测器 CMOS 参数,从能量传递的角度分析并建立了太阳 $H\alpha$ 空间望远镜信噪比计算模型。给出了单像元模式和像元合并模式下 3 种谱线测量的曝光时间区间,并确定了正常稳定工作的曝光时间:单像元情况

下曝光时间 5 ms,像元合并情况下曝光时间为 10 ms。通过实验验证了信噪比计算模型的准确性,信噪比实验结果和计算结果误差均在 1% 以下。太阳 $H\alpha$ 空间望远镜仍处于研制阶段,预计将于 2021 年发射使用。

参 考 文 献:

- [1] 朱海波,杨云飞,邓辉,等. $H\alpha$ 全日面太阳图像云污染的去除[J].天文研究与技术,2014,11(2):134-139.
ZHU H B, YANG Y F, DENG H, *et al.* Removal of cloud extinction for $H\alpha$ full-disk solar images [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2014, 11(2): 134-139. (in Chinese)
- [2] ZHARKOVA V V, IPSON S S, ZHARKOV S I, *et al.* A full-disk image standardisation of the synoptic solar observations at the Meudon Observatory [J]. *Solar Physics*, 2003, 214(1): 89-105.
- [3] 罗鹭鹭,杨云飞,季凯帆,等.基于临边昏暗轮廓的 $H\alpha$ 全日面太阳图像质量评价[J].天文学报,2013,54(4): 392-400.
LUO L S, YANG Y F, JI K F *et al.* The quality assessment of $H\alpha$ full disk solar image based on limb darkening profile [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2013, 54(4): 392-400. (in Chinese)
- [4] 罗一涵,刘妍妍,陈科.探测信噪比计算方法及原理综述[J].电声技术,2016,40(6):37-43,57.
LUO Y H, LIU Y Y, CHEN K. Computing methods and principles of detective SNR [J]. *Audio Engineering*, 2016, 40(6): 37-43, 57. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 金锡哲,向阳,禹秉熙.成像干涉光谱仪信噪比分析[J].遥感学报,2000,4(3):194-196.
JIN X Z, XIANG Y, YU C X. Analysis for signal-to-noise ratio of imaging fourier transform spectrometer [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(3): 194-196.
- [7] 薛庆生,王淑荣,李福田,等.临边成像光谱仪信噪比分析及实验研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(6): 1697-1701.
XUE Q S, WANG S R, LI F T, *et al.* Analysis and experimental validation of signal-to-noise for limb imaging spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1697-1701. (in Chinese)
- [8] 龚学艺,黄思婕,曲荣升,等.CMOS 图像传感器时间域噪声分析及其应用研究[J].光学与光电技术,2013,11(1): 86-90.
GONG X Y, HUANG S J, QU R S, *et al.* Time domain noise analysis of CMOS image sensor and its application [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(1): 86-90. (in Chinese)
- [9] EI GAMAL A, ELTOUKHY H. CMOS image sensors [J]. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 2005, 21(3): 6-20.
- [10] PHILIPP R M, ORR D, GRUEV V, *et al.* Linear current-mode active pixel sensor [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, 42(11): 2482-2491.
- [11] 张元涛,孙德新,刘银年.基于 CMOS 图像传感器的微光成像系统信噪比研究[J].红外,2018,39(7):1-7.
ZHANG Y T, SUN D X, LIU Y N. Study of SNR of low light level imaging system based on CMOS image sensor [J]. *Infrared*, 2018, 39(7): 1-7. (in Chinese)
- [12] 王军,李国宏.CMOS 图像传感器在航天遥感中的应用[J].航天返回与遥感,2008,29(2):42-47.
WANG J, LI G H. The application of CMOS image sensor in space remote sensing [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(2): 42-47. (in Chinese).
- [13] 吴晓波,安问斗,杨钢.图像测量系统中的误差分析及提高测量精度的途径[J].光学精密工程,1997,5(1): 133-141.

WU X B, AN W D, YANG G. Error analysing and approaches of improving measureing precision in image measuring system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(1): 133-141. (in Chinese)

作者简介:



蔡志鹏(1993—),女,吉林公主岭人,硕士研究生,2017 年于东北师范大学获得学士学位,主要从事 SAR 数据实时成像光学处理器等光学成像方面的研究。E-mail:1021285050@qq.com



张星祥(1977—),男,云南大理人,博士,研究员,2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间宽幅成像技术、精密装调与拼接技术、在轨测试与处理技术方面的研究。E-mail:jan_zxx@163.com