

doi: 10.3788/gzxb20154411.1123004

大孔径静态干涉成像光谱仪曝光时间控制技术

杨阳^{1,2}, 刘学斌¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要: 为了克服不带电子快门的 CCD 成像探测器曝光时间无法控制的问题, 提出了改变驱动时序的设计方法. 在帧频确定的情况下, 通过在水平读出之后增加电荷释放状态, 将一帧之内多余时间段的电荷迅速排放掉, 可以有效地控制 CCD 曝光时间, 并克服 CCD 最小曝光时间为水平读出时间的问题. 实验结果表明, 大孔径静态成像光谱仪系统的抗饱和性能得到了很好的改善且此方法的非线性度为 4.61%.

关键词: 光谱仪; 曝光时间; 驱动时序; CCD; 电荷释放; 电子快门; 控制

中图分类号: TN386.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)11-1123004-6

Exposure Time Control of Large Aperture Static Imaging Spectrometer

YANG Yang^{1,2}, LIU Xue-bin¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The method of CCD exposure time control based on driver timing was proposed for the situation of the high performance CCD imaging detector without electronic shutter. The charge will be drained quickly in the excess period by increasing the charge excretion state after the horizontal readout under the certain frame frequency. It can control the CCD exposure time effectively, and overcome the problem the CCD minimum exposure time is equal to the readout time. Results show that the booming resistance of the large aperture static imaging spectrometer is well improved and the non-linearity of the method is 4.61%.

Key words: Spectrometer; Exposure time; Driver timing; CCD; Charge excretion; Electronic shutter; Control

OCIS Codes: 040.1520; 170.010; 230.0040; 320.0050; 060.6718

0 引言

近年来,随着光谱成像遥感技术的发展,光谱成像技术发挥着越来越重要的作用^[1]. 它集中了多个领域的先进技术,将传统的二维成像技术和光谱技术有机地结合在一起^[2]. 大孔径静态干涉成像光谱技术是一种新型光谱成像技术^[3],通过时空联合调制方式获得光谱干涉图,有效解决了现有成像光谱仪存在的高辐射通量与高稳定性的矛盾,具有高灵敏度、高稳定性的特点.

大孔径静态干涉成像光谱仪普遍采用 CCD 探测

器,且要求 CCD 探测器具有大面阵、高帧频、高灵敏度等优越的特性^[4]. 背照式帧转移型面阵 CCD 由于其高灵敏度、低噪声和大动态范围等特性^[5],使其比其他类型的 CCD 更适用于光谱成像系统. 但同时由于其光利用率较高,在强光下也更容易饱和. 尤其是在大孔径静态干涉成像光谱仪(Large Aperture Static Interference Imaging Spectrometer, LASIS)成像过程中光照强度的变化范围较大时,系统成像质量受到了一定的影响. 当光照充足的情况下,电荷溢出到相邻势阱,探测器像元获得的电子数增多,图像容易过度饱和^[6];相反,光照较弱,电子数减少,图像较暗,目标与背景不容易区分,

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11327303, 61405239)资助

第一作者:杨阳(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为 CCD 驱动电路设计与信号处理. Email:liu_hui1990@126.com

导师(通讯作者):刘学斌(1965—),男,研究员,博导,主要研究方向为光谱成像技术与信号处理. Email:lxh@opt.ac.cn

收稿日期:2015-03-13;录用日期:2015-07-02

<http://www.photon.ac.cn>

从而影响了整个系统的成像质量。

本文是基于某大型工程项目遇到的实际问题而提出的解决方法。工程中使用的 CCD 为背照式 CCD 成像器件,这类器件与前照式 CCD 器件相比,显著特点是量子效率较高。但是如果给这类 CCD 器件增加电子快门功能,其内部构造的变化必然会导致量子效率的下降,这样便丧失了这种 CCD 器件的优势,所以工程中选用的是不带电子快门的 CCD 器件。而对于不带电子快门功能的 CCD 成像探测器来说,曝光时间的控制问题显得至关重要。所以,针对大孔径静态干涉成像光谱仪 CCD 探测器不带电子快门的问题,提出了一种通过驱动时序控制 CCD 曝光时间的方法,可以快速方便地调节图像亮度。

1 问题的提出与解决

1.1 曝光时间对光谱数据质量的影响

大孔径静态干涉成像光谱仪可以在同一时刻获得全部目标点的干涉信息^[7]。它主要由前置光学系统、横向剪切干涉仪、傅氏镜系统和探测器^[8]组成,基本结构如图1。其中,探测器可接收光学系统采集的光信号,并

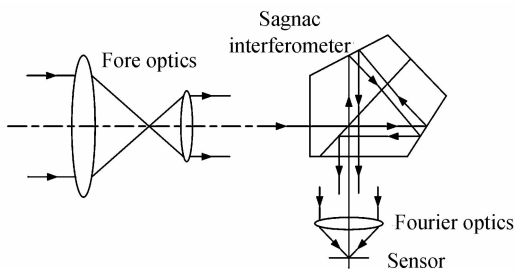


图 1 LASIS 结构

Fig. 1 Schematic diagram of the LASIS

将其转换为电荷进行存储和成像。成像光谱仪信息量主要通过 CCD 来读取,则在曝光时间为 T 时,CCD 输出信号电压值^[9]为

$$V_x = \frac{\pi D^2 \tau_0 S_d T K_f \cos^4 \theta}{4 f^2 h c} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_e(\lambda) \lambda \eta(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中, D 表示相对孔径; τ_0 表示光学系统总透射率; S_d 表示 CCD 像元面积; θ 表示视场角; f 表示焦距; $L_e(\lambda)$ 表示光谱辐亮度; K_f 表示探测器的转换因子; h 表示普朗克常量; c 表示光速; $\eta(\lambda)$ 表示探测器在波长 λ 处的量子效率。由式(1)可知,曝光时间的长短与 CCD 输出信号幅值成线性关系,合适的曝光时间直接影响光谱仪获得的图像质量。所以光谱仪成像过程中,曝光时间的控制显得至关重要。

1.2 设计思路

针对不带电子快门功能的面阵 CCD 探测器,调节曝光时间的方法主要有两种,一是通过改变驱动主时钟频率的方法来进行,这种方法在改变曝光时间的时候系统帧频会发生变化;第二个方法是陈学飞等人提

出的采用增加行转移数量的方法来增大曝光时间^[10],这种方法的局限性在于只能增大系统曝光时间,无法解决图像饱和的问题,且帧频同样会改变。所以,对于不带电子快门的 CCD 探测器,在帧频确定的情况下,曝光时间不能方便控制已成为目前使用这类 CCD 器件所遇到的技术瓶颈。

不带电子快门的帧转移型面阵 CCD 在正常工作时,一帧的工作周期按照感光区的工作状态可以分为感光积分和帧转移两个阶段。如图 2 所示,当系统帧频确定之后,帧转移和水平读出时间也被确定,此时,若采用常规方法,则曝光时间也被唯一确定,且最小曝光时间为水平读出时间。这样,在没有电子快门的 CCD 器件中,便不能控制曝光时间。

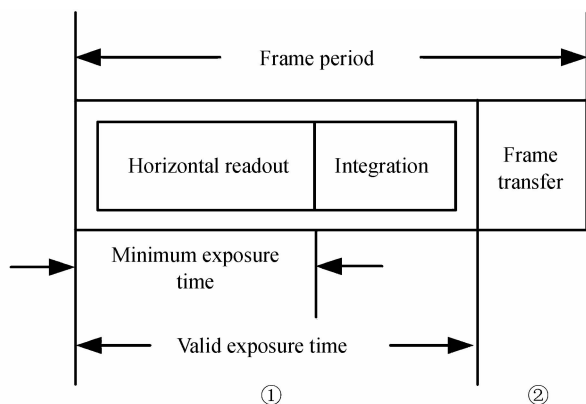


图 2 常规工作状态下帧周期

Fig. 2 Frame period schematic diagram of common station

针对此问题,本文提出了一种电荷释放的方法,可以有效地控制 CCD 的曝光时间。其判据是在不影响 CCD 正常工作的情况下,CCD 驱动时序信号在合理的情况下可以根据需要修改。即在 CCD 常规工作状态的基础上,引入电荷释放段。“电荷释放段”加入的主要机理与正常工作下将电荷读出的原理一样,只是它不同于正常读出时那样需要转移固定的行数且每行转移固定的像素数,而是在一段时间内(电荷释放阶段)让感光区与存储区配合以一定频率将电荷转入到存储区。此时,水平读出驱动信号进行连续的读出,从而迅速地将前面感光积累的电荷排出。本质上说,“电荷释放段”等效于帧转移与水平读出同时进行。这样,在帧频确定的情况下,电荷释放时间与有效曝光时间的和为定值,所以可以通过改变电荷释放时间的长短通过软件方便、有效地控制曝光时间。整个工作周期划分见图 3,可分为感光积分(水平读出)、电荷释放、感光积分和帧转移四个阶段。本文提出方法的具体步骤为:

1)感光积分(水平读出):此时感光区仍然处于电荷积累阶段,存储区与水平读出寄存器区配合将存储区电荷逐行读出;

2)电荷释放:将一帧之内除感光积分、帧转移与水平读出时间之外的多余时间段通过一定规律的驱动时

序来消耗掉,此段时间的引入为曝光时间的控制起到了关键作用;

3)感光积分:感光区进行正常的电荷积累,此段时间为整帧之内的有效曝光时间;

4)帧转移:将感光阶段所积累的电荷由感光区转到存储区.

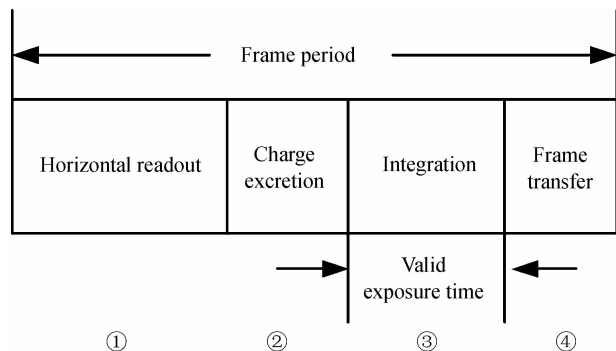


图3 本文提出的方法帧周期

Fig. 3 Frame period schematic diagram of this paper proposed

由图2分析可知,CCD在常规工作状态下,最小的曝光时间为水平读出时间.而本文提出的电荷释放法是将“电荷释放段”加入到水平读出段之后,实际这段时间感光区也在感光.正是由于“电荷释放段”加入的位置是处于水平读出段之后,所以在水平读出这段时间内感光区积累的电荷正好在电荷释放段被完全排放掉,也就是说前面这段时间感光积分产生的电荷没有被作为有效信号在帧转移之后读出,等效于这段时间为无效曝光阶段.而在电荷释放段之后,才会进入到真正的感光时间,所以说,曝光时间完全不受水平读出时间的限制,可以根据需要来确定.

2 方案设计

2.1 CCD探测器

大孔径静态干涉成像光谱仪在特定使用环境下,对探测器的要求较高,其决定整个成像系统的质量.实际选择中,像元尺寸、分辨率、帧频、填充因子和动态范围等需符合光谱仪实际工作要求^[11].本文选用的可见光CCD探测器是一款高性能背照式帧转移型面阵CCD,根据芯片手册内容介绍,此CCD分辨率为 2048×256 ,像元大小 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$,帧频最高可达到1050 fps,符合整个系统要求,无电子快门功能.

2.2 曝光时间控制的具体设计方法

CCD探测器作为大孔径静态干涉成像光谱仪的主要成像器件,必须满足其工作的基本需求^[12].试验过程中,设一帧时间为10.0008 ms,按照芯片手册推荐参量,帧转移阶段感光区与存储区驱动脉冲周期均为300 ns,快速完成电荷从感光区到存储区的转移,水平读出信号周期为50 ns,电荷释放阶段感光区与存储

区驱动信号周期均为 $1.2 \mu\text{s}$.由于整个CCD阵列分为上下两个子阵列,为了保证数据信号的完整性,每个子阵列共有136行.帧转移的时间计算为

$$T_{\text{trans}_v} = 300\text{ns} \times 136 = 40.8\mu\text{s} \quad (2)$$

若无释放阶段,则一帧时间内除帧转移时间段之外,其余时间均为曝光时间.此时,CCD工作在最简单的状态下,曝光时间达到最大,即

$$T_{\text{exp}} = 10.0008\text{ms} - 40.8\mu\text{s} = 9.96\text{ms} \quad (3)$$

水平转移周期为50 ns,每行共转移155个像元,水平读出的时间为

$$T_{\text{trans}_h} = (400 + 155 \times 50)\text{ns} \times 136 = 1.1084\text{ms} \quad (4)$$

图4为100 fps时曝光时间的具体调节示意图.由于电荷释放时间设置在水平读出之后,水平读出时间积累的电荷将被当作无效电荷释放掉,有效曝光时间为图中所示的感光积分时间.当帧频确定之后,水平读出时间与帧转移时间也被唯一确定,此时,一帧之内剩余的时间即为电荷转移与感光积分时间,这样,通过调节电荷释放时间的长短即可达到控制曝光时间的目的.

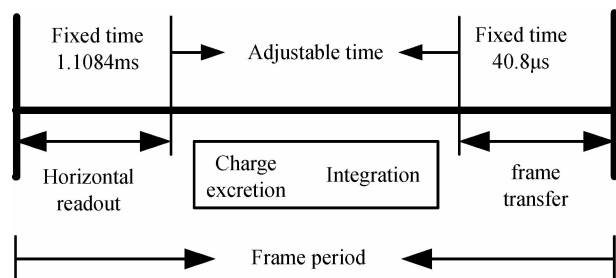


图4 曝光时间控制原理

Fig. 4 Diagram of exposure time control

根据本文提出的方法,在CCD时序的设计中,加入电荷释放段之后,共有感光积分、帧转移、水平读出和电荷释放四个阶段.具体实现时,首先通过软件设定好每个状态下所有驱动时序的周期、占空比以及驱动信号之间的相位关系,这些均通过由时序产生模块时钟倍频、分频计数而产生.四个阶段对应四个状态,状态之间的转换是通过状态机来实现的.当帧频确定时,电荷释放时间根据曝光时间的长短确定,为了方便起见,曝光时间在软件中可以通过修改参量来实现.所以,“电荷释放时间”的调节模块具体是由状态机之间的状态转换及参量修改来实现的.

3 结果与分析

对大孔径静态干涉光谱仪的整个CCD探测器部分进行试验测试,首先,将帧频确定为100fps,在实验室条件下,采用均匀光源照射,保证入射光均匀性,通过调节释放时间的长短,测得CCD输出信号幅值随曝光时间变化情况如图5.

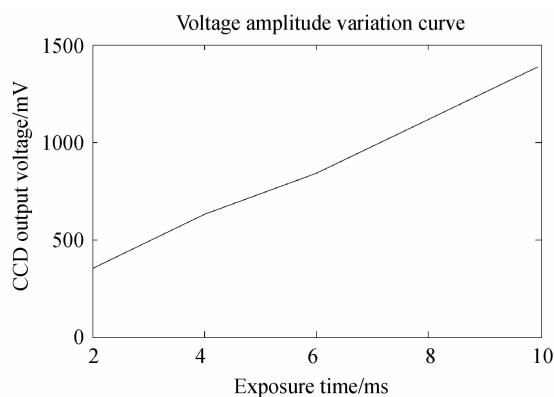


图 5 CCD 输出信号曲线
Fig. 5 CCD output amplitude curve

考虑测量误差, CCD 输出信号幅值随曝光时间基本呈线性增大, 符合式(1)提出的理论依据. 因此, 本文提出的方法达到了控制曝光时间的目的. 通过 Camera link 接口进行图像采集得到的输出图像如图 6 所示, 本文选取 2 个通道的输出图像. 由图 6 可以看出, 同样均匀光源照射下, 随着曝光时间的变化, 图像亮度有明显变化, 符合实际情况.

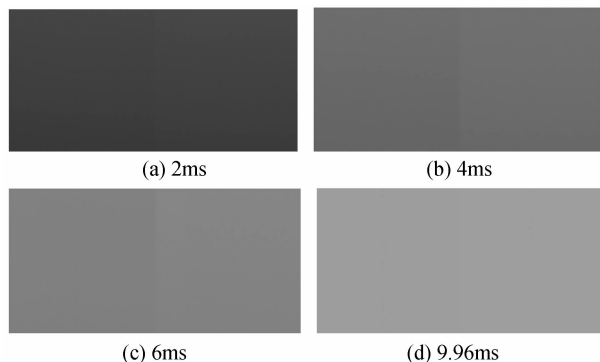


图 6 不同曝光时间下采集的图像

Fig. 6 Image captured in different exposure time

对所测结果做进一步的定量分析, 采集连续 100 帧图像灰度值的裸数据, 采用经典最小二乘法对其平均灰度值进行线性拟合, 如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 平均灰度值随曝光时间也呈线性变化, 通过计算, 其非线性误差为 4.61%.

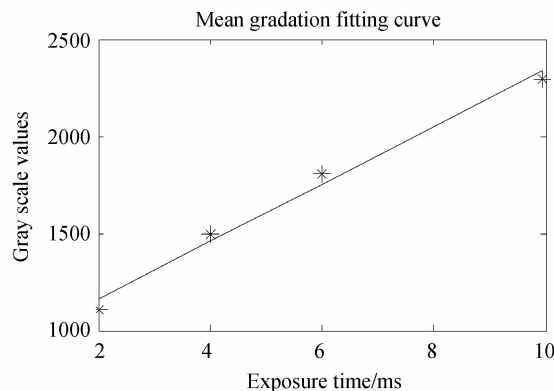


图 7 平均灰度值拟合曲线
Fig. 7 Mean gradation fitting curve

大孔径静态干涉成像光谱仪获得的是带有干涉条纹的二维空间图像^[13], 需要对干涉图进行反演复原, 利用原始干涉图像重构出与目标景物相对应的数据立方体^[14]. 对于理想干涉图, 光谱信息的获取就是一个对干涉图进行逆傅里叶变换的过程, 每个谱段信号强度^[15]为

$$B'(v_i) = \int_{v_i-\Delta v}^{v_i+\Delta v} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [TS_d I_0 - I(x_n)] \cdot \cos\left(-2\pi v \frac{sx_n k}{f}\right) dv \quad (5)$$

式中, v_i 表示第 i 个谱段的中心波数值; Δv 表示波数分辨率; N 表示单边采样点数; T 表示曝光时间; S_d 表示 CCD 像元尺寸; s 表示干涉仪剪切量; $I_0 = \int_0^{+\infty} B(v) P(v) \eta(v) dv$; x_n 表示每个探测器像元感光面中心位置的波数; k 表示探测器像元采样间隔; f 表示焦距; v 表示波数. 由式中可以看出来, 光谱反演过程与曝光时间有着密切的关系, 如果曝光时间设置不合理, 将直接影响光谱反演的结果.

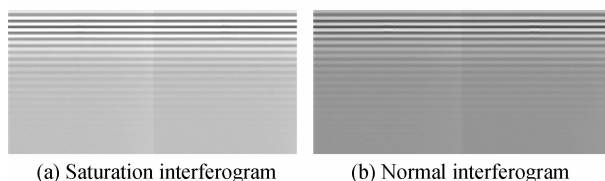


图 8 干涉图

Fig. 8 Interferogram

图 8(a) 为试验中光谱仪获取的干涉图. 由图中可以看出, 由于曝光量过大, 图像出现饱和状态, 此时, 便不能恢复出有效的场景信息. 图 8(b) 为采用本文提出的控制 CCD 曝光时间的方法, 将曝光时间调节至合适亮度得到的干涉图. 可以看出, 干涉条纹饱和现象消失, 说明本文提出方法的有效性与工程实用性.

图 9 为曝光时间饱和时的干涉曲线. 图 10 为通过调节曝光时间后的正常干涉曲线. 从图中可明显看出通过曝光时间的调节, 干涉图不再饱和, 进一步验证了本文提出方法的可行性.

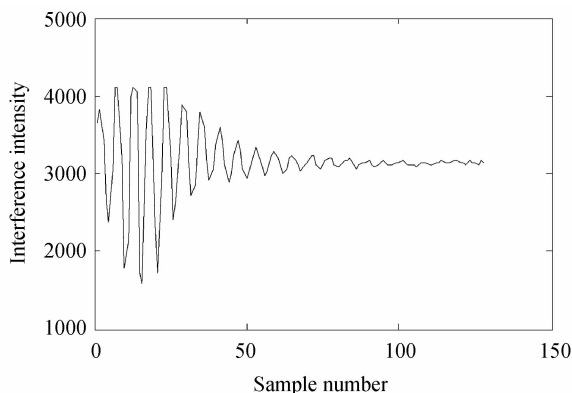


图 9 饱和干涉图曲线

Fig. 9 Saturation interferogram curve

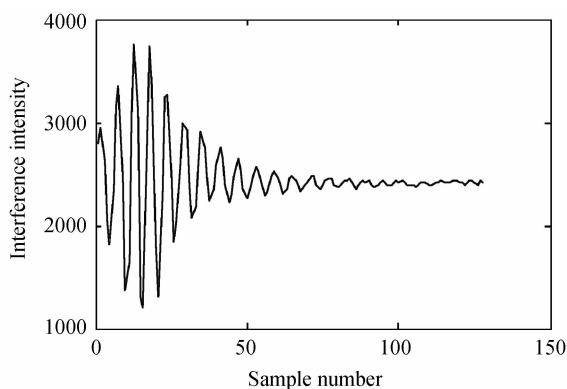


图 10 正常干涉图曲线

Fig. 10 Normal interferogram curve

由于干涉图像饱和程度(亮度)与正常图像亮度一样受多方面影响,包括:入射光强度、光圈大小、信号增益和曝光时间.其中,任何一个影响因素变化都会引起图像饱和度的变化.由本文分析可知,要给出释放时间的合理取值,等效于给出曝光时间的取值.而曝光时间的取值,只有在其他几个因素确定的情况下给出才有意义的,也就是说,只给出电荷释放时间的具体取值在实际应用中意义不大.

另一方面,在实际使用过程中,除入射光强度不可控之外,其它三个影响因素的值都是手动可调的.在某些极端的入射光强度条件(过亮或过暗)下,如果光圈大小跟信号增益取值设置不合理,那么只调节曝光是得不到合适的图像亮度的.所以必须根据实际需要配合调节三个值,才能得到亮度(饱和度)合适的图像.此处给出了两幅干涉图像的对比图来说明本文提出方法在实际使用过程中的有效性.

4 结论

对于大孔径静态干涉成像光谱仪在实际使用过程中极易饱和,且其使用的 CCD 探测器又不带电子快门的情况,首次提出了一种通过电荷释放来控制 CCD 曝光时间的方法.此方法是针对不带电子快门的 CCD 探测器提出的,其作用等同于加装了电子快门的 CCD 探测器,可以达到控制曝光时间的目的.由前面的分析可知,与加装电子快门的 CCD 探测器相比,本文使用的背照式不加装电子快门的 CCD 探测器可以达到很高的量子效率.所以使用这类 CCD 器件既能拥有高量子效率,又可以使用本文提出的方法起到电子快门的功能.

综上所述,电荷释放法的提出很好地解决了在帧频一定的情况下,不带电子快门的 CCD 探测器曝光时间无法控制的问题.同时,克服了最小曝光时间为水平读出时间的不足.对于大孔径静态成像光谱仪不带电子快门的帧转移型面阵 CCD 探测器,该方法能够使系统的抗饱和性能大大提升.

参考文献

- [1] BAI Yu, XING Ting-wen, JIANG Ya-dong. Advances in infrared spectrum zoom imaging system research [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(12): 3419-3423.
白瑜, 邢廷文, 蒋亚东. 国外红外光谱连续变焦成像系统的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(12): 3419-3423.
- [2] YIN Shi-min, JI Zhong-ying, CUI Yan, et al. Research on pixel response nonuniformity correction of CCD in interferential imaging spectromete[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 880-884.
殷世民, 计忠瑛, 崔燕, 等. 干涉成像光谱仪 CCD 象元响应非均匀性校正研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 880-884.
- [3] ZHAO Bao-chang, YANG Jian-feng, XUE Bin, et al. Calibration of Chang' E-1satellite interference imaging spectromete[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 769-775.
赵葆常, 杨建峰, 薛彬, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱仪的定标[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 769-775.
- [4] DONG Ying, XIANG Li-bin, ZHAO Bao-chang. Analysis of interferometer system in a large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(03): 330-334.
董瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(03): 330-334.
- [5] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2010.
- [6] DU Yun-fei, LIU Bo, HU Bing-liang, et al. Precision control technology of exposure time for full-frame CCD digital camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 1025-1028.
杜云飞, 刘波, 胡炳樑, 等. 全帧型 CCD 数码相机曝光时间的精确控制[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 1025-1028.
- [7] XIAO Jiang, ZHOU You-xi, WU Cheng-ke, et al. The image compression technology of the large aperture static imaging interference spectrometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1494-1498.
肖江, 周有喜, 吴成柯, 等. 大孔径静态干涉光谱仪图像压缩技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1494-1498.
- [8] FU Qiang, Xiang Li-bin, LÜ Qun-bo, et al. Design of a dual-channel mach-zehnder lateral shearing interometer for the large aperture static imaging spectromete [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(03): 553-557.
付强, 相里斌, 吕群波, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪中双通道 Mach-Zehnder 横向剪切干涉仪的设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(03): 553-557.
- [9] CHEN Qi, YANG Jian-feng, QIAO Wei-dong, et al. Analysis for signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1889-1892.
陈琦, 杨建峰, 乔卫东, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪的信噪比分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1889-1892.
- [10] CHEN Xue-fei, WEN De-sheng, ZHENG Pei-yun. Designing on driving schedule generator for array CCD and hardware based on CPLD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**: 282-285.
陈学飞, 汶德胜, 郑培云. 基于 CPLD 的面阵 CCD 驱动时序发生器设计及其硬件实现[J]. *光子学报*, 2007, **36**: 282-285.
- [11] MA Jun, XIAO Xi-zhong, LANG Jun-wei, et al. Study on selection of CCD detector of space-borne hyper-spectral imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(10): 1011001.
马骏, 肖喜中, 郎均慰, 等. 航空推扫高光谱成像仪 CCD 探

- 测器选型研究[J]. 光学学报, 2014, **34**(10):1011001.
- [12] QIU Yue-hong. Timing design of the interference imaging spectrometer of Chang' E-1satellite [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 495-498.
邱跃洪. 嫦娥一号卫星干涉成像光谱仪时序设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 495-498.
- [13] ZHAO Hui-jie, JIA Guo-duan. Effect of oblique attitude on image quality of spatio-temporally modulated imaging fourier transform spectrometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 583-586.
赵慧洁, 贾国瑞. 姿态倾斜对时-空联合调制型干涉成像光谱成像质量的影响[J]. 光学学报, 2008, **28**(3):583-586.
- [14] DU Shu-song, WANG Yong-mei, WANG Ying-jian. The research of the space applied interference imaging spectrometer[J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(3): 77-82.
杜述松, 王咏梅, 王英鉴. 空间应用干涉成像光谱仪的研究[J]. 光学仪器, 2008, **30**(3): 77-82.
- [15] WANG Shuang, XIANG Li-bin, Li Li-bo, *et al.* Research of spectrum signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(3): 851-856.
王爽, 相里斌, 李立波, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪光谱信噪比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(3):851-856.