

文章编号 1004-924X(2009)12-2924-07

TDI-CCD 总剂量辐射效应及测试

张立国¹, 李豫东^{1,2}, 刘则洵¹, 李宪圣¹, 万志¹, 任建岳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 研究生院, 北京 100039)

摘要:为评估空间辐射效应对应用于某空间相机的 TDI-CCD 的成像性能的影响,从器件的电路结构入手,分析了总剂量辐射效应对器件主要性能指标的影响。针对此器件的总剂量辐照测试方法研制了测试装置。用⁶⁰Co 对器件进行了 γ 射线总剂量辐照实验,定量测试了受辐照前后器件的光电响应性能及对对比度传递函数的变化情况。实验结果表明,总辐照剂量达到 20 krad(Si)时,定制 TDI-CCD 的相对响应度、暗电流、动态范围、最大信噪比相对于该器件没受辐照的初始值变化量均小于 5%,对比度传递函数(CTF)没有明显变化,说明定制 TDI-CCD 器件能够满足某空间相机的使用要求。

关键词:TDI-CCD;总剂量辐射效应;光电响应;对比度传递函数(CTF)

中图分类号:TN386.5 **文献标识码:**A

Influence of total dose effects on TDI-CCD and corresponding test methods

ZHANG Li-guo¹, LI Yu-dong^{1,2}, LIU Ze-xun¹, LI Xian-sheng¹, WAN Zhi¹, REN Jian-yue¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: In order to evaluate the effect of space radiation on the imaging function of a TDI-CCD, the influence of the Total Dose Effects (TDEs) on the main specifications of the TDI-CCD was analyzed based on the circuit structure of the device. The test equipment and the test methods for the TDI-CCD were developed based on the TDEs. A total dose ⁶⁰Co γ irradiation experiment on the device was studied to measure quantitatively the change of the photoelectric response capacity and the CTF of the device before and after irradiation. Experimental results demonstrate that when the total dose irradiation reach 20 krad(Si), the changing ranges of the relative responsibility, dark signals, dynamic ranges and the SNR of the specified TDI-CCD are less than 5%, and the contrast transfer function (CTF) has almost no change as compared to the initial values. The conclusion is that the specified TDI-CCD can meet the requirement of the space cameras.

收稿日期:2009-06-24;修订日期:2009-07-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 86325113B)

Key words: TDI-CCD; Total Dose Effects (TDEs); photoelectric response; Contrast Transfer Function (CTF)

1 引言

TDI-CCD 是当前技术较先进,性能较优越的传输型光学遥感相机采用的新一代光电成像器件^[1-3]。空间相机在轨运行过程中,要经受宇宙空间环境中带电粒子的辐射作用而产生辐射效应。这些效应对空间光学遥感相机影响较为严重的是总剂量辐射效应,它使其核心器件-TDI-CCD 的性能发生不同程度的劣化,如光辐射响应度下降,暗电流增大、动态范围减小、信噪比下降,甚至传递函数降低等。TDI-CCD 性能的劣化,将导致空间相机在轨成像质量下降、使用寿命缩短和可靠性降低,因此,必须对 TDI-CCD 受辐射后由总剂量效应所引起的光电性能参数变化进行测量并对测试方法进行研究,进而对选型 TDI-CCD 的抗辐射性能进行评估,为空间相机在设计中对辐射作用引起的性能劣化引入校正措施提供依据。这已成为研制高质量、长寿命和高可靠性空间相机的关键技术之一。

随着空间光学遥感技术的发展和应用,国外的器件制造厂商和有关应用部门均已广泛开展了 CCD 器件的辐射效应研究,并在器件制造中引入抗辐射加固设计与工艺,提高了 CCD 器件抗空间电离辐射的能力;国内虽然也开展了相关方面的研究,但目前对 CCD 器件受总剂量辐射后其光电性能参数的变化,特别是对其成像性能变化做出定量评价方面的研究较少。而在工程应用中,定量考察 CCD 器件受辐射后的成像性能是否下降,是否满足应用要求更为引人关注。所以,怎样结合理论研究,并从工程应用的角度评估总剂量辐射效应对 CCD 器件成像性能的影响成为亟待解决的问题。

本文分析了某空间相机中定制 TDI-CCD 的总剂量辐射效应及其主要性能指标的影响;研究了总剂量辐照实验测试方法并研制了实验现场测试装置;对器件进行了⁶⁰Co γ 源总剂量模拟辐照实验。对实验结果的分析表明,该种定制 TDI-CCD 可满足某空间相机的使用要求。

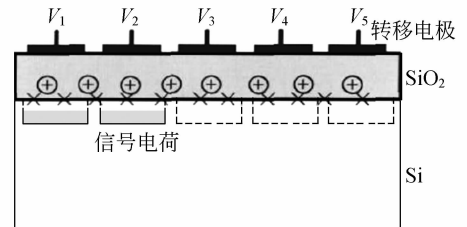
2 TDI-CCD 的总剂量辐射效应

CCD 器件是一种由 MOS 电容、MOS 逻辑元件和 MOS 线性元件混合集成的固体成像器件,内部主要结构可分为输入部分、电荷转移部分和信号检测放大输出部分。其中输入部分包括输入二极管、输入栅和第一时钟栅。输入部分向 CCD 势阱注入电荷的数量为:

$$Q_s = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 t, \quad (1)$$

式中, V_{GS} 为栅源电压; V_T 为输入栅阈值电压; β 为依赖于器件几何参数的常数; t 为势阱填充的有效时间。

总剂量电离辐射在 MOS 电容器的栅氧化层中产生固定正电荷,如图 1^[4]所示。



⊗ 电离总剂量效应在 SiO₂ 中产生的氧化层陷阱电荷
 × 电离总剂量效应在 SiO₂/Si 界面产生的界面态

图 1 CCD 中辐射诱生的氧化层陷阱电荷和界面态
 Fig. 1 Oxide trapped charge and interface state induced by radiation in CCD

氧化层内固定正电荷主要对 CCD 的输入部分产生影响。由式(1)可知,输入部分对栅源偏置的微小变化极其灵敏,辐射效应将使平带电压漂移,从而改变向 CCD 势阱注入电荷的数量,典型的辐射剂量容限为 10^5 rad(Si)。CCD 的电荷转移部分和信号检测放大输出部分是辐射损伤影响最小的部分,通常在这些部分失效前,输入部分已经失效。

总剂量辐射效应还将引起 Si—SiO₂ 界面处的界面态密度增加,降低 CCD 的电荷转移效率,使 CCD 的暗电流密度增加^[5]。

由于表沟 CCD 的界面态俘获作用,使得表沟器件不适合总辐射剂量大于 10^5 rad(Si) 的应用环境。而埋沟器件电荷包是在硅体内转移的,所以界面态俘获效应不会发生于埋沟器件,即埋沟 CCD 器件的抗总剂量辐射能力强于表沟 CCD 器件。

某空间相机选用了定制的埋沟 TDI-CCD 作为光电成像器件。根据以上分析得知,辐射效应将使器件产生平带电压漂移并增加界面态密度,影响器件的响应度、暗电流和动态范围等性能参数。要对 TDI-CCD 器件进行辐射效应评估,必须对器件受辐射后主要光电响应性能指标进行测试,而 TDI-CCD 器件不能脱离时序驱动和后续信号处理电路而独立工作,这就给器件光电响应性能指标的测试带来了困难。本文采用的方法是:将受试 TDI-CCD 器件通过适配器插接在实验电路板上,器件的各种偏置电压、时序驱动及视频信号通过板上连接器导入和导出;辐照实验时将实验电路板放置在开有窗口的厚重金属屏蔽盒内,仅使 CCD 器件接受辐射源辐照,而后续电子线路不受辐照。当辐照达到一定剂量时,关闭辐射源后从金属屏蔽盒内取出实验电路板,安装在专用检测设备上测试 TDI-CCD 的主要光电性能指标。

3 TDI-CCD 的总剂量辐照实验及测试方法

3.1 TDI-CCD 的主要光电响应性能指标

3.1.1 光电响应度

CCD 每个像元输出的电信号与其所接收的光辐照度之间存在定量关系,如器件后续成像及信号处理电路的输出经过量化,则输出数字量(DN 值)方程为^[6]:

$$DN = DN_B + E \cdot A_D \cdot R_{CCD} \cdot t_{int} \cdot \beta, \quad (2)$$

式中, DN_B 为 CCD 暗信号数码输出; E 为 CCD 光敏面上的光辐照度; A_D 为像元有效面积; R_{CCD} 为 CCD 的光电响应度; t_{int} 为积分时间; β 为 CCD 及其后续电路的增益、变换等与最终输出幅度相关的电子学因子。

在上式中,可以用成像电路的响应度 R 替换 $A_D \cdot R_{CCD} \cdot t_{int} \cdot \beta$,则响应度方程简化表示为:

$$DN = DN_B + E \cdot R, \quad (3)$$

当成像电路中放大器的增益及 CCD 的积分级数确定后, $A_D \cdot t_{int} \cdot \beta$ 为常数,此时成像电路响应度 R 的变化情况就反映了 CCD 响应度 R_{CCD} 的变化情况。

3.1.2 暗信号

CCD 的暗电流对 CCD 成像的影响是降低了动态范围和增加了 CCD 噪声,可通过测试成像电路的暗信号来考察 CCD 器件的暗电流。测试暗信号时,选择在暗场条件下测试,获取若干行(m)图像数据 $g(i, j)$, $i = 1 \sim N$ (N 为 CCD 像元总数), $j = 1 \sim m$ 。首先计算第 i 列暗信号平均值:

$$V_{Di} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m g(i, j), \quad (4)$$

则 CCD 的暗信号 V_{dark} :

$$V_{dark} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{Di}, \quad (5)$$

暗噪声的测试方法与暗信号的测试方法相同,其计算方法为:

$$V_{noise} = \sqrt{\frac{1}{m \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m [g(i, j) - V_{Di}]^2}, \quad (6)$$

3.1.3 噪声与信噪比

按照时空域对 CCD 的噪声进行划分,可分为随机噪声与图形噪声,其中,图形噪声可以通过图像校正措施进行补偿,这里主要讨论随机噪声。随机噪声包括:霰粒噪声 σ_{shot} ($\sigma_{shot}^2 = S$, S 为信号表征量)、暗电流噪声 σ_{dark} 、复位噪声 σ_{reset} 和输出放大器噪声 σ_a ,其定义及计算公式可参考文献[7]。

总的随机噪声的平方为 σ_{shot} 、 σ_{dark} 、 σ_{reset} 与 σ_a 的平方和;一般将复位噪声和输出放大器噪声称为读出噪声 σ_{read} ,则总随机噪声可表示为:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{dark}^2 + \sigma_{reset}^2 + \sigma_a^2} = \sqrt{S + \sigma_{dark}^2 + \sigma_{read}^2}, \quad (7)$$

则信噪比 SNR_r 为:

$$SNR_r = S / \sigma_r, \quad (8)$$

信噪比测量在亮场条件下进行,可通过统计叠加在信号上的平均随机噪声计算该照明下的信噪比。

3.1.4 动态范围

CCD 的动态范围(DR)通常用饱和曝光量和噪声等效曝光量之比来描述,也可以用满阱电荷和读出噪声电子数来计算(将复位噪声和输出放大器噪声称为读出噪声 σ_{read}):

$$DR = (n_{\text{well}} - n_{\text{dark}}) / \sigma_{\text{read}}, \quad (9)$$

在计算 CCD 的动态范围前,需要得出 CCD 的临界饱和电压(V_{sat})、暗信号电压(V_{dark})及暗噪声电压(V_{noise}),当以数字 DN 值表示这些电压值时,动态范围为:

$$DR = (V_{\text{sat}} - V_{\text{dark}}) / V_{\text{noise}} = (DN_{\text{sat}} - DN_{\text{B}}) / DN_{\text{noise}}, \quad (10)$$

式中, DN_{sat} 为 CCD 的临界饱和 DN 值; DN_{B} 为暗信号的 DN 值; DN_{noise} 为暗噪声的 DN 值。

(e)对比度传递函数(CTF)^[8]

测试 CCD 调制传递函数(MTF)的系统由光学镜头组件、CCD 和后续电路构成,其系统调制传递函数 MTF_{system} 可用下式描述:

$$MTF_{\text{system}} = MTF_{\text{optics}} \times MTF_{\text{CCD}} \times MTF_{\text{electronics}}, \quad (11)$$

式(11)中, MTF_{optics} 、 $MTF_{\text{electronics}}$ 和 MTF_{CCD} 分别为测试系统中光学镜头组件、CCD 和后续电路的调制传递函数。

如果光学镜头组件的传递函数 MTF_{optics} 和电路的传递函数 $MTF_{\text{electronics}}$ 已知,则测试成像系统传递函数的变化情况就可得到 CCD 器件传递函数 MTF_{CCD} 的变化情况。

MTF 的测试有点源法、线源法、刃边法、正弦输入法和矩形输入法等^[9]。在实验室评价 CCD 成像性能时主要采用的方法是矩形输入法,此时输入的是方波信号,测试的是对比度传递函数(CTF)。通常最为关心的是 CCD 在 Nyquist 频率处的正弦调制传递函数(MTF),此时可用测得的 CTF 通过下式计算 MTF:

$$MTF(f) = \frac{\pi}{4} CTF(f), \quad (12)$$

3.2 辐照实验

随机抽取一片定制的 TDI-CCD,在中科院新疆理化所进行了⁶⁰Co γ 源总剂量辐照实验。辐照剂量率为 10 rad(Si)/s。选取 5、10、15、20、30、50 和 80 krad(Si)7 个剂量测试点。为了使驱动偏置电路不受辐照影响,以铅砖屏蔽盒对实验电路板进行了屏蔽,只有 TDI-CCD 器件受辐照。在辐照剂量达到某个剂量测试点时,降源取出插接有 TDI-CCD 的实验电路板作移地测试。辐照实验现场示意图如图 2 所示。

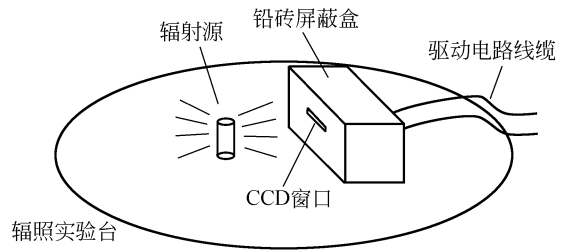


图 2 TDI-CCD 的辐照实验现场示意图

Fig. 2 Irradiation locale of TDI-CCD experiment

3.3 测试方法及测试装置

目前通用的测量 CCD 器件光电响应性能的扩展光源辐射定标系统通常由多个部件组成,结构庞大且调试过程复杂,适用于位置相对固定的测试情况,当被测部件需要频繁移动时,很难保证测试的重复性。而辐照实验中为减小时效效应采用的移位测试法要求被测部件可灵活移动,测试时间短,测试重复性好,所以,本文研制了一套辐照实验现场 CCD 专用光电响应性能测试装置,其示意图如图 3 所示。

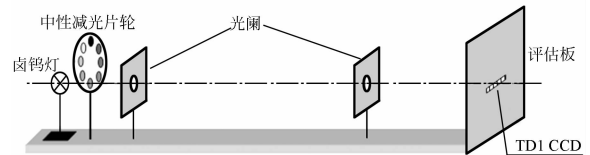


图 3 TDI-CCD 光电响应性能测试装置示意图

Fig. 3 Test equipment used to test response capability of TDI-CCD

该装置主要由点光源(卤钨灯光源室)、光阑、若干档不同透过率的中性减光片、TDI-CCD 评估板(后续信号处理电路)、配备图像采集卡的计算机主机、图像数据事后处理程序几部分构成。TDI-CCD 评估板上有 CCD 适配插槽,使得器件可插拔。测试装置的基本原理如下:采用 1 支至少经过 24 h 电老炼的稳定发光卤钨灯作为测试光源(保证光源的稳定性),由于卤钨灯灯丝的尺寸远小于测试距离,因此可当作点光源看待,其发光可在 TDI-CCD 光敏面上产生均匀的照明;通过若干档不同透过率的中性减光片可以改变 TDI-CCD 光敏面处的光辐照度;用计算机通过评估板采集对应各种照明条件下的 TDI-CCD 图像数据并处理,就能确定 TDI-CCD 的光电响应性能指标。

CCD 器件的极限分辨率是由像元尺寸对应的线量即 Nyquist 频率 (lp/mm) 决定的, 所以 Nyquist 频率处的 CTF 是判断 CCD 分辨率的一个非常重要的指标。为了测试 TDI-CCD 在 Nyquist 频率处的 CTF, 并保证测试条件的一致性和测试的重复性, 研制了一套 CCD 辐照实验现场 CTF 测试装置, 其示意图如图 4。

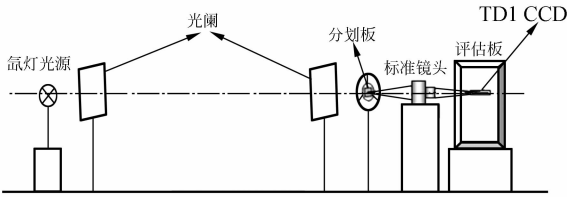


图 4 TDI-CCD 的 CTF 测试装置示意图

Fig. 4 Test equipment used to test the CTF of TDI-CCD

在测试装置中, 光源发出的光照射到空间频率为 f 的黑白间隔的分划板上, 分划板经过标准光学镜头组件 (传递函数已知) 成像在 CCD 光敏面上, 调整分划板与镜头之间的距离, 使物距与像距满足一定比例的共轭关系, 从而使每对相邻黑白条纹成像在 CCD 的两个相邻像元上, 满足空间频率为 Myquist 频率的测试要求。用 CTF 测试装置对 CCD 测试后, 可得到黑白条纹相间的图像, 对图像数据进行分析处理, 即可得出 CTF 值。可以用下式计算 CTF 的近似值:

$$CTF = \frac{DN_{\max} - DN_{\min}}{DN_{\max} + DN_{\min} - 2DN_B}, \quad (13)$$

式中 DN_{\max} 为亮条纹灰度值; DN_{\min} 为相邻暗条纹灰度值; DN_B 为本底 (暗信号) 灰度值。

用上式计算的结果除以测试镜头和信号处理电路的传递函数即可得出 CCD 的传递函数值。

4 实验结果

实验中选择 TDI-CCD 的级数为 96 级, 行频 5.5 MHz。

图 5 所示是器件的相对响应度与暗信号随辐照总剂量的变化关系曲线。

由图可见, 随着辐照总剂量的增加相对响应度明显下降, 总的相对变化量为 8.9%; 暗信号随辐照总剂量的增加而不断增大, 在辐照剂量达到 80 krad(Si) 时, 暗信号相对于初始值的变化量为 29.7%。

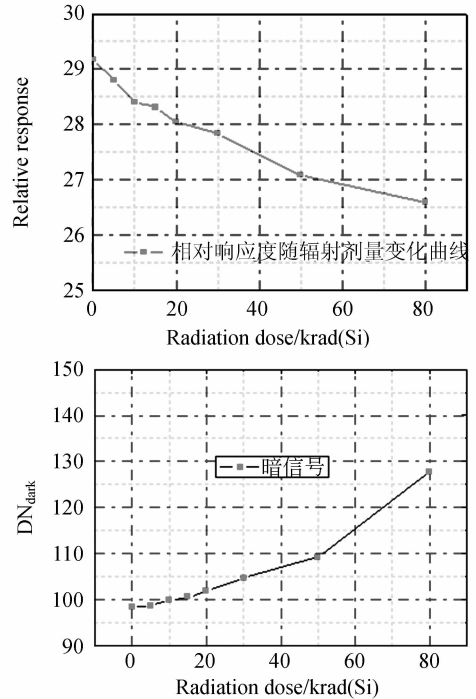


图 5 相对响应度与暗信号随辐照总剂量的变化

Fig. 5 Relative responsibility and dark current versus total radiation dose

信噪比与动态范围的测试结果如图 6。

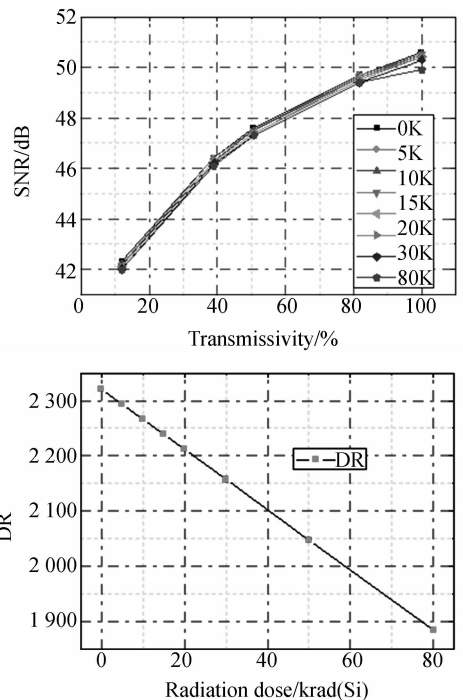


图 6 信噪比与动态范围随辐照总剂量的变化

Fig. 6 SNR and dynamic range versus total radiation dose

辐照总剂量 < 50 krad(Si) 时,采用各种透过率的中性减光片的条件下,测试的信噪比变化均不大,当辐照总剂量达到 80 krad(Si) 后,信噪比有所下降。动态范围随辐照总剂量的增加不断减小,辐照总剂量从 0 krad(Si) 增加到 80 krad(Si) 时,动态范围从 2 321.1 降至 1883.3,相对变化量为 18.9%。

器件的 CTF 测试结果如图 7 所示。

随着辐照总剂量的增加,CTF 没有明显变化,其原因是在同一辐照水平下 CCD 像元之间的响应变化很小。图中测试结果的波动是由测试中的随机误差引起的。

将 TDI-CCD 的相对响应度、暗信号、动态范

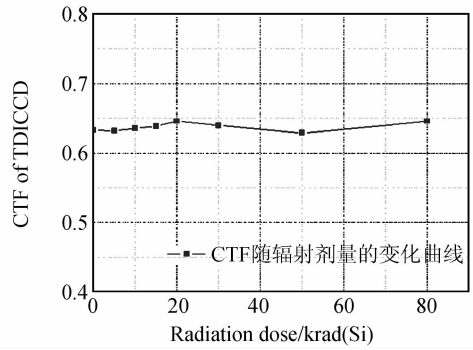


图 7 CCD 的 CTF 随辐照总剂量的变化
Fig. 7 CTF of CCD versus total radiation dose

围、最大信噪比在不同辐照剂量下的变化情况列于表 1 中。

表 1 相对响应度、暗信号、动态范围、最大信噪比的变化情况

Tab. 1 Changes of relative responsibility, dark signal, dynamic range and SNR_{max} in different total radiation doses

参数名称	总剂量 / krad(Si)						
	5	10	15	20	30	50	80
相对响应度变化量 (%)	1.27	2.64	2.95	3.84	4.56	7.16	8.84
暗信号变化量 (%)	0.20	1.41	2.13	3.46	6.40	11.18	29.67
动态范围变化量 (%)	1.18	2.36	3.54	4.72	7.07	11.79	18.86
最大信噪比 (%)	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.59	1.38

5 结 论

通过分析 TDI-CCD 总剂量辐照实验的结果,可以得出如下结论:

(1)TDI-CCD 的相对响应度、暗电流、动态范围受总剂量辐照的影响较大,随着辐照总剂量的增加相对响应度明显下降,动态范围明显减小,说明 TDI-CCD 的光电转换效率随着辐照剂量的增加呈下降趋势。在辐照剂量较大时,信噪比也有所下降。由于暗电流与读出噪声决定了器件的探测极限,而 TDI-CCD 的暗信号不断增大,所以器件探测弱小信号的能力受到了损失。

(2)响应线性度随辐照总剂量的增加无明显变化,表明定制 TDI-CCD 受辐照后保持了良好的线性响应特性。对比度传递函数随辐射总剂量增加无明显变化,表明器件对各频率下输入信号的复现能力没有明显下降。

经估算某空间相机在轨辐射总剂量 < 20 krad(Si)。由表 1 可判断辐射总剂量达到 20 krad(Si) 时,TDI-CCD 的相对响应度、暗电流、动态范围、最大信噪比相对于初始值的变化量 < 5%,对比度传递函数(CTF)没有明显变化,可见,定制 TDI-CCD 的成像性能没有受到较大的影响,表明该定制 TDI-CCD 器件能够满足某空间相机的使用要求。

参考文献:

[1] CHAMBERLAIN S G, WASHKURAK W D. High speed, low noise, fine resolution TDI-CCD imagers [J]. SPIE, 1990, 1242: 252-263.

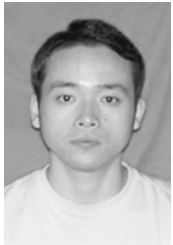
[2] 杨秉新. TDI-CCD 在航天遥感器中的应用[J]. 航天返回与遥感, 1997, 18(3): 15-18.
YANG B X. Application of TDI-CCD in space remote sensor [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1997, 18(3): 15-18. (in Chinese)

- [3] 刘亚侠. TDI-CCD 遥感相机标定技术的研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所,2005.
LIU Y X. *Research on the calibration technique of the TDI-CCD remote sensing Camera*[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2005. (in Chinese)
- [4] 于庆奎,唐民,朱恒静. 用 10MeV 质子和钴 60 γ 射线进行 CCD 空间辐射效应评估[J]. 航天器环境工程,2008,25(4):391-396.
YU Q K, TANG M, ZHU H J. Experimental investigation on radiation damage on CCD by 10MeV proton and Cobalt 60 gamma[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(4): 391-396. (in Chinese)
- [5] ROY T, WATTS S J, WRIGHT D. Radiation damage effects on imaging charge coupled devices [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1989, 275:545-557.
- [6] 任建伟,万志,李宪圣,等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. 光学 精密工程,2007,15(8):1186-1190.
REN J W, WAN ZH, LI X SH, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1186-1190. (in Chinese)
- [7] 王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京:电子工业出版社,2003,9.
WANG Q Y. *Application Technology of Imaging Sensor*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
- [8] HONG W, EION J, DAVID B T. Experimental approach for measuring resolution of complementary metal oxide semiconductor imaging systems [J]. *IEEE: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1998, 37(9):2565-2573.
- [9] 苏大图. 光学测量与象质鉴定[M]. 北京:北京工业学院出版社,1988.
SU D T. *Optical Measurement and Image Appraisal*[M]. Beijing: Publishing House of Beijing Academe of Technology, 1988. (in Chinese)

作者简介:



张立国(1961—),男,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,主要从事光电仪器和光辐射计量的研究。E-mail: zlgxx9@163.com



李豫东(1982—),男,新疆伊犁人,专业博士研究生,主要从事嵌入式系统与图像处理的研究。E-mail: lydong555@126.com



刘则洵(1980—),男,吉林市人,硕士,助理研究员,主要从事空间光学遥感器辐射定标方面的研究。E-mail: bjxlzx@163.com



李宪圣(1979—),男,山东德州人,硕士,助理研究员,主要从事光电仪器辐射定标的研究。E-mail: lixs688@163.com



万志(1973—),男,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事光学遥感器辐射定标的研究。E-mail: wz7181@163.com



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为空间光学及光机电系统。E-mail: Renjy@ciomp.ac.cn