

文章编号 1004-924X(2022)02-0217-10

天问一号高分相机成像噪声分析与抑制

周鹏骥^{1,2}, 王晓东^{1*}, 董吉洪¹, 郝贤鹏¹, 黄敬涛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: 在深空探测中, 为了充分利用有限的空间和视场, 提出了一台相机同时含有三片线阵 TDI CCD 思路。为了获得高分辨率、高信噪比的遥感图像数据, 针对相机成像链路, 分析了影响高分相机信噪比的关键因素, 提出了成像系统的串扰模型, 并针对各种影响要素提出了改进措施。首先, 完全独立设计各个通道, 减少通道间的电路耦合。其次, 调整垂直转移驱动信号的时间常数, 以减小 TDI CCD 芯片内部的串扰噪声。最后, 通过三片探测器物理隔离, 减小噪声的近场耦合。对天问一号高分相机进行辐射定标试验, 试验结果表明: 模拟火星轨道条件, 在典型工况条件, 太阳高角 30 度、地面反照率 0.2 时, TDI CCD 全色谱段在积分级数为 32 级的情况下信噪比即可达到最高 115.1 倍, 满足火星探测的指标要求。

关键词: TDI CCD; 串扰; 信噪比; 天问一号; 辐射定标

中图分类号: TN253; TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223002.0217

Imaging noise analyzing and suppressing for Tianwen-1 high-resolution camera

ZHOU Pengji^{1,2}, WANG Xiaodong^{1*}, DONG Jihong¹, HAO Xianpeng¹, HUANG Jingtao¹

(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)*

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

Abstract: In order to fully utilize the limited space and field of view in deep space exploration, a camera with three linear TDI CCD detectors is proposed. To acquire remote sensing images with high SNR and high-resolution, according to the chain of the imaging system, methods for analyzing the key factors that affect the SNR of high-resolution cameras as well as improvement measures are put forward. First, each channel is designed independently to reduce circuit coupling between channels. Then, the time-constant of the vertical transfer frequency is adjusted to reduce the crosstalk of the inner TDI CCD. Finally, the three detectors are physically isolated to reduce the near field coupling noise. The results of the radiation calibration experiment with the high-resolution camera in Tianwen-1 indicate that by simulating the orbital conditions of Mars, the SNR of the panchromatic spectrum is 115.1 when the integral number is 32, as the elevation angle of the sun is 30° and the surface albedo is 0.2. The results show that the design satisfies the criteria for Mars exploration.

Key words: TDI CCD; crosstalk; SNR; Tianwen-1; radiation calibration

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2021-10-11.

基金项目: 北京市科技计划课题资助项目 (No. Z191100004319001)

1 引言

深空探测指脱离地球引力场,进入太阳系空间和宇宙空间的探测。执行深空探测的装置处在复杂多变的空间环境中,这在功能层面和技术层面都对执行深空探测的装置的各个组成部分提出了较高的要求^[1-4]。

高分辨率数字遥感相机多采用时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)推扫成像模式,而在向大视场、宽覆盖的方向发展过程中,单片 TDI CCD 像元数已无法满足系统覆盖宽度的要求,需要对多片 TDI CCD 进行机械拼接组成焦面,使其总像元数满足系统要求^[5]。目前,国内外关于多片拼接 CCD 成像电路设计的研究已有不少介绍,然而,有时根据成像要求,多片 TDI CCD 需要以不同行转移频率进行工作^[6-9],导致不同通道的 CCD 工作时存在相互干扰现象,不同行频差会在图像上产生不同斜率、不同宽度的干扰斜条纹^[10-12]。针对该问题,文献[10]采取优化关键信号布线方式、系统地、电源布置、去耦电容接地方式等多方面对电路系统进行了改进,优化多 TDI CCD 成像系统电路抗异速干扰设计。文献[11]详细分析了多 CCD 成像通道间相互串扰产生的原因,并建立了串扰的数学模型,在工程研制中,提出 CCD 通道之间的工作电源隔离以及共用统一的系统时钟等防止串扰发生的措施;但该措施仅考虑到了电路信号的耦合,并未考虑到高频信号的空间辐射方面的影响。文献[12]通过建立 CCD 成像电路串扰模

型,提出了通过采用带状线绘制视频信号同时采用防护布线的方式对敏感信号进行隔离,该方式仅从 PCB 的信号完整性的角度采取措施。不同于前述方法,本文通过建立异速成像串扰噪声影响模型,提出了多 CCD 拼接异速下抑制串扰噪声的设计方法,并将该方法应用于天问一号环绕器高分辨率相机中,有效抑制串扰的影响,得到高信噪比图像。

2 成像电路设计

成像电路中的驱动电路对噪声最为敏感,较易产生串扰,其次是预放电路。除此以外,多片 TDI CCD 之间的近场空间辐射也易产生串扰噪声。为提高天问一号高分辨率相机成像信噪比,针对以上三个方面进行设计。

由于光学系统的指标要求,天问一号高分辨率相机成像电路中需包含 3 片 TDI CCD,为最大限度降低通道之间的电路传导耦合,每片 CCD 均具有独立通道。

2.1 TDI CCD 芯片介绍

天问一号高分辨率相机采用三片多谱段 TDI CCD,每片探测器具有 6 144 个全色像元(像元大小为 8.75 μm)以及 3 072 个彩色像元(像元大小为 17.5 μm)。该 TDI CCD 含有 5 个谱段,分别为全色谱段(450~900 nm)、B1 谱段(450~520 nm)、B2 谱段(520~600 nm)、B3 谱段(630~690 nm)和 B4 谱段(760~900 nm)。各个谱段均可设置不同的积分级数,该型 TDI CCD 的主要指标见表 1。

表 1 某型 TDI CCD 的主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of a TDI CCD

Working spectrum	Pixel size/ μm	Number of pixels	Maximum number of output channels	Maximum pixel readout rate/MHz	Maximum row transfer rate/kHz	Spectral band/nm	Maximum integral stage
PAN	8.75	6 144	8	≥ 25	≥ 26	450~900	96
B1	17.5	3 072	2	≥ 25	≥ 14	450~520	64
B2	17.5	3 072	2	≥ 25	≥ 14	520~600	48
B3	17.5	3 072	2	≥ 25	≥ 14	630~690	32
B4	17.5	3 072	2	≥ 25	≥ 14	760~900	32

2.2 TDI CCD 外围电路设计

TDI CCD 外围电路包括驱动电路、预放电路和视频处理电路。其中驱动电路可提供 CCD 工作所需的所有时序信号,而预放电路可对 CCD 输出的模拟信号进行预处理,以满足后续视频处理器的输入要求,实现最大的动态范围。视频处理电路实现将 CCD 输出的模拟信号转变为数字信号以备 FPGA 进行数据整合处理。

2.2.1 TDI CCD 驱动电路设计

某型 TDI CCD 驱动电路将单一逻辑电平结合 FPGA 数字脉冲信号转换为 CCD 所需的各种驱动脉冲包括像元读出时钟、行转移时钟和输出复位时钟等,控制 CCD 的工作模式、积分时间和成像,对 CCD 的输出信号质量影响很大。FPGA 根据接收的命令参数控制使能信号,控制驱动器开始或结束工作。CCD 驱动电路原理框图如图 1。

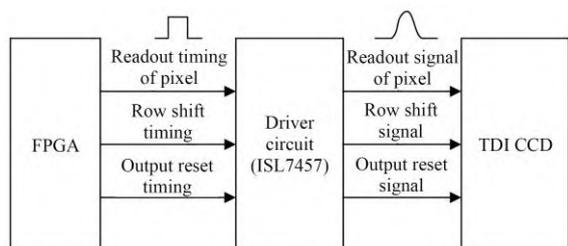


图 1 CCD 驱动电路原理框图

Fig.1 Principle block diagram of driving circuit of the CCD

驱动电流与电压摆幅、容性负载、上升或下降时间的关系是:

$$I = C \cdot \frac{du}{dt} = C \cdot \frac{(V_H - V_L)}{t}, \quad (1)$$

其中: V_H 和 V_L 分别为驱动信号的高、低电平, t 为驱动信号的上升或下降时间, C 为驱动信号管脚的等效电容。

根据某型 TDI CCD 工作时各驱动电平的等效负载电容和摆幅,以及对驱动信号上升或下降时间的要求,依据式(1)计算各驱动信号所需的驱动电流,驱动器设计选用 Intersil 公司的 ISL7457 驱动器,其单路输出最高可实现 2 A 的输出电流能力,完全能够满足各个驱动信号的要求。

2.2.2 TDI CCD 预放电路设计

CCD 输出的信号最高频率为 25 MHz,其直流偏置为 12.5 V,该 CCD 的电荷转换因子 CCE 为 $11 \mu\text{V}/e^-$,饱和信号电荷为 $110 ke^-$,计算可得其理论输出最大交流幅值为 1.21 V。

通过交流耦合的方式,将视频信号中的直流偏置隔离掉,利用运算放大器将 CCD 输出的信号调整至视频处理器的输入范围,使动态范围最大。

预放电路主要由一个运算放大器构造的同相放大器组成。采用 NS 公司的视频宽带运算放大器 LMH6722。该器件 3 dB 带宽可达 300 MHz,而 CCD 视频输出信号最高频率为 16 MHz,满足系统的设计要求。

2.2.3 TDI CCD 视频处理电路设计

CCD 视频信号处理器直接决定了 CCD 图像信号的性能。系统选用器件采用 TI 公司视频处理器 LM98640,主要性能参数如下:

- (a) 采样保持 (CTH), 可编程增益放大 (PGA), 14-bit ADC;
- (b) 最高采样频率: 40 MHz;
- (c) PGA 增益: $-3 \text{ dB} \sim 18 \text{ dB}$;
- (d) 3.3 V 和 1.8 V 工作, 2.5 V \sim 5.25 V 数字输出;
- (e) TTL 兼容输入, TTL 和 CMOS 兼容输出。

该芯片集成的 CTH 模块具有相关双采样功能 (Correlated Double Sample, CDS), 其工作原理是: 首先视频模拟信号通过隔直电容传输到 LM98640 输入端, 由 SHP 时序实现对视频信号的控制, 然后在采样时序 SHP 和 SHD 的边沿处完成 CCD 视频信号的采样, 从而保证获得正确的模拟视频信号, 由于两次采样信号是相关的, 均含有复位等噪声, 所以噪声得到了一定程度的抑制。

3 多 TDI CCD 串扰噪声分析与抑制

多 TDI CCD 成像系统中的串扰主要由电路传导方式和近场空间辐射方式两种途径产生耦合。

由于多 TDI CCD 拼接成像系统具有多通道

处理电路,每条通道均包含有 CCD 时序驱动电路、视频信号预处理电路和模数转换电路等,是一个复杂的模数信号混合电路系统。CCD 驱动信号以及数字信号均会对视频模拟信号产生干扰,特别地,当多 TDI CCD 成像系统中,各个

CCD 分别以不同的行频进行工作的时候,相应的成像通道对临近的成像通道会产生串扰。同时,由于相邻的 TDI CCD 分别以不同的行频进行工作,使得噪声通过空间辐射传播,耦合到被干扰通道,具体串扰示意图如图 2 所示。

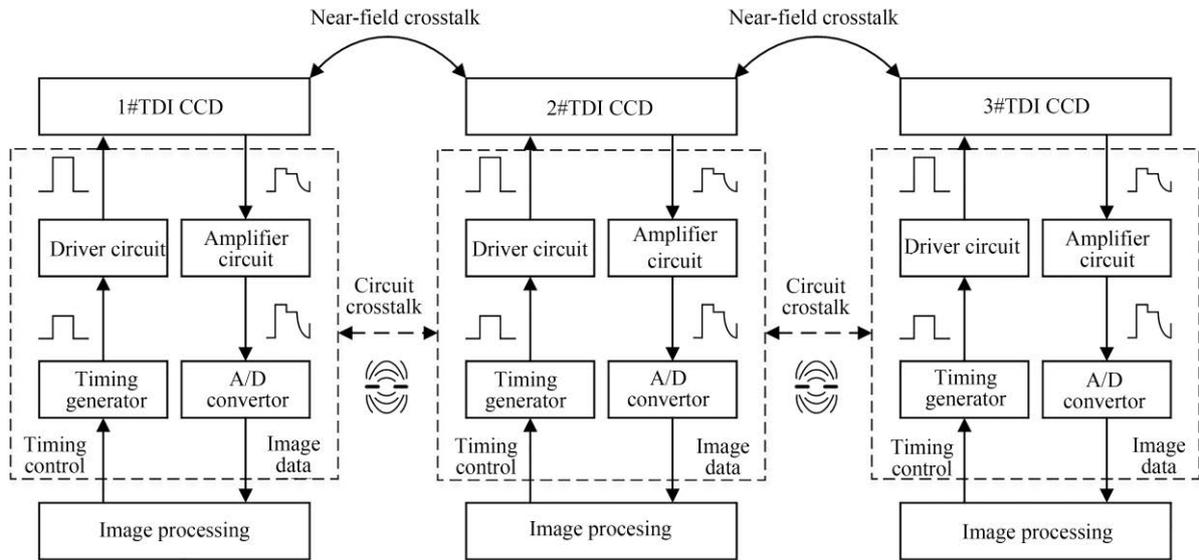


图 2 成像系统串扰示意

Fig. 2 Schematic diagram of crosstalk in imaging system

3.1 串扰噪声分析

3.1.1 电路传导耦合

电路传导耦合是指 CCD 成像电路中,由于 PCB 走线并非理想的导线,会存在电容和电感寄生现象,因此在信号变化区域,线路之间会通过互容和互感方式进行干扰,产生的串扰噪声耦合到相邻的线路。同时,CCD 的内部构造原因,使 CCD 内各个转移驱动电极之间的间隔很小,当 CCD 的垂直转移驱动信号和水平转移驱动信号同时存在时,垂直转移驱动信号就会对水平转移驱动信号产生干扰,从而造成光生电荷在水平转移时叠加干扰噪声,最终导致图像信噪比降低。电路串扰的电路模型如图 3 所示。

电路串扰模型中,通过互容产生的干扰电流为:

$$I_c = C_m \frac{dV}{dt} = C_{ml} \cdot \Delta x \cdot \frac{dV}{dt} = C_{ml} \cdot v \cdot t_r \cdot \frac{V}{t_r} = C_{ml} \cdot v \cdot V \quad (2)$$

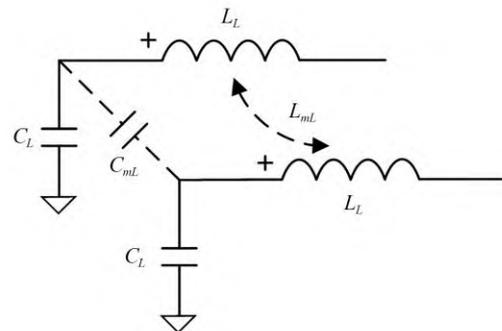


图 3 电路串扰模型

Fig. 3 Model of crosstalk in circuit

其中: C_m 表示干扰信号上升沿在 PCB 走线中延伸长度对应的总电容, V 表示干扰信号电压, Δx 表示干扰信号上升沿在 PCB 走线中延伸长度, t_r 表示干扰信号上升沿时间, v 表示干扰信号在 PCB 走线中的传播速度, C_{ml} 表示单位长度互容。

电路串扰模型中,通过互感产生的干扰电压为:

$$V_L = L_m \frac{dI}{dt} = L_{ml} \cdot \Delta x \cdot \frac{dI}{dt} = L_{ml} \cdot v \cdot t_r \cdot \frac{I}{t_r} = L_{ml} \cdot v \cdot I \quad (3)$$

其中: L_m 表示干扰信号上升沿在PCB走线中延伸长度对应的总电感, I 表示干扰信号电流, L_{ml} 表示单位长度互感。

由信号完整性理论可知,近端串扰系数为:

$$NEXT = \frac{1}{4} \left(\frac{C_{ml}}{C_L} + \frac{L_{ml}}{L_L} \right) \quad (4)$$

其中: $NEXT$ 表示近端串扰系数。

远端串扰系数为:

$$FEXT = \frac{Len}{t_r} \cdot \frac{1}{2v} \cdot \left(\frac{C_{ml}}{C_L} - \frac{L_{ml}}{L_L} \right) \quad (5)$$

其中: $FEXT$ 表示远端串扰系数, Len 表示两条线之间耦合区域的长度。

当两条传输线靠近时,互容和互感将增加。从而,根据模型得到的串扰系数可知,其 $NEXT$ 和 $FEXT$ 均将增加。此外,减小耦合长度 Len ,同样可以减小 $FEXT$ 。

3.1.2 近场空间辐射

近场空间辐射是指电磁噪声的能量,以电磁场能量的形式,通过空间辐射传播,耦合到被干扰电路。

由于TDI CCD的驱动信号电压摆幅大、压摆率高、容性负载大等特点,在驱动信号的上升时间或下降时间内的瞬态驱动电流大。

高频信号线、CCD集成电路引脚都可能成为具有天线特性的辐射干扰源,能发射电磁波并影响其他通道,互为干扰源,通过空间把其信号耦合(干扰)到另一TDI CCD的电网络中。

3.2 串扰噪声抑制

现有的对多通道TDI CCD串扰噪声抑制方法的分析主要是基于电路传导耦合所引起的串扰噪声,其抑制方法如参考文献[10-12]采用电源隔离、统一工作时钟、优化PCB电路走线等方式,均是从硬件电路的设计上进行分析和优化。

本文在此基础上,首先对多通道异速成像TDI CCD的驱动方式进行分析,考虑了多片探测器异速工作时在近场空间会形成辐射干扰,探测器之间互为干扰源,并针对这两个方面进行了串扰抑制设计。

3.2.1 电路传导耦合噪声抑制

由前述可知,电路传导耦合多是由于干扰线和被干扰线距离近、并且有一定的耦合长度,导致串扰系数增加。因此,在电路板设计的时候采用避免高频信号距离过近,并对敏感信号进行防护布线等串扰抑制措施。

然而,TDI CCD在成像过程中,按照不同的工作方式,其驱动时序可分为突发转移模式和连续转移模式。突发转移模式和连续转移模式驱动时序分别如图4和图5所示,图中的 CIx 为电荷转移过程中的垂直转移信号,全色为 $CIxP$,彩色为 $CIxB$,统一用 CIx 来表示该类信号;图中的 CR 为电荷转移过程中的水平转移信号,全色为 $CRxP$,彩色为 $CRxB$,统一用 CR 来表示该类信号。驱动时序中的 T_{tran} 是转移时间,表示像元从一个像元转移到下一个像元的时间; T 是行周期时间。

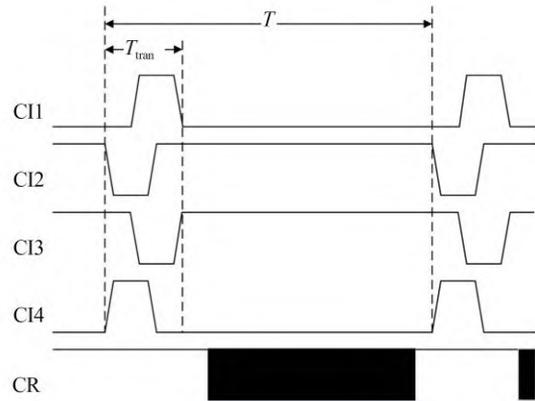


图4 突发转移模式下的驱动时序

Fig. 4 Timing of drive signal in abrupt transfer

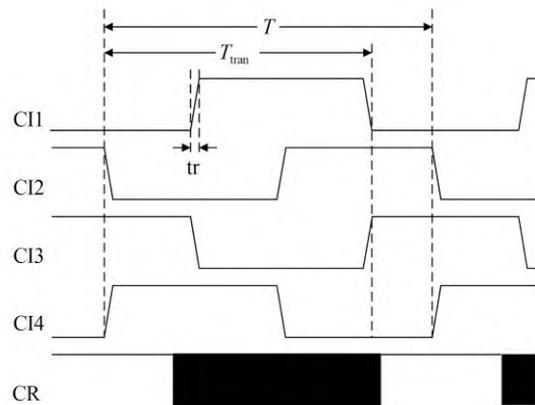


图5 连续转移模式下的驱动时序

Fig. 5 Timing of drive signal in sequential transfer

在突发转移模式下, T_{trans} 时间短、占整个行周期比例很小, 这种模式的优点是垂直转移信号(CIx)和水平转移信号(CR)分时工作, 因此信号的串扰小、噪声低, 但在工程应用中 MTF 会降低。

在连续转移模式下, T_{trans} 基本与行周期相等, 各个 CIx 平均分配在整个行周期内, 这种模式的优点是可以在一定程度上提高 MTF, 但是由于 CIx 与 CR 同时存在, CIx 的上升沿/下降沿的突变会使 CR 上叠加串扰噪声, 因此 CIx 为噪声源, 需要对它进行分析。

为了便于分析, 将垂直转移信号看作是周期性时域函数, 并作适当平移, 如图 6 所示。将其 x 轴定于其高低电平的中间, 即零时刻为高低电平的中间值位置, 从零时刻到高电平时间为上升时间的一半即 $tr/2$ 。这样做的好处是在展开为傅里叶级数时, 由于函数在整个周期 T 内的积分为 0, 因此傅里叶级数的常数项为 0, 便于进行函数的分析。

图 6 中, A 为垂直转移信号幅值, tr 为上升/下降时间。则其模型在区间 $[0, T/2]$ 的数学表达式为:

$$f(t) = \frac{4AT}{\pi tr} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{(2n-1)\pi tr}{T}\right)}{(2n-1)^2} \sin\left(\frac{2(2n-1)\pi}{T}t\right). \quad (7)$$

从上式可以看出在不改变幅值的情况下, 上升时间与垂直转移信号高频分量强度成反比。当上升/下降沿越陡峭, 即 tr 减小时, 信号的高频分量强度越强; 而当上升/下降沿越缓慢, 即 tr 增加时, 信号的高频分量强度越弱。根据信号完整性理论可知, 高频分量决定了串扰噪声的大小, 因此, 适当增加 tr 可减小串扰噪声。由于 TDI CCD 工艺影响, 若 tr 过长, 会导致转移效率的下降。

针对上述分析, 调整垂直转移驱动信号上升/下降沿的时间常数。其调整电路如图 7 所示。图中, R_s 为调节电阻, C_0 为 CCD 驱动引脚等效电容, TDI CCD 芯片给定了 C_0 , 全色谱段的垂直转移信号等效电容为 4 nF, 彩色谱段的垂直转移信号等效电容为 16 nF。

时间常数调整公式为:

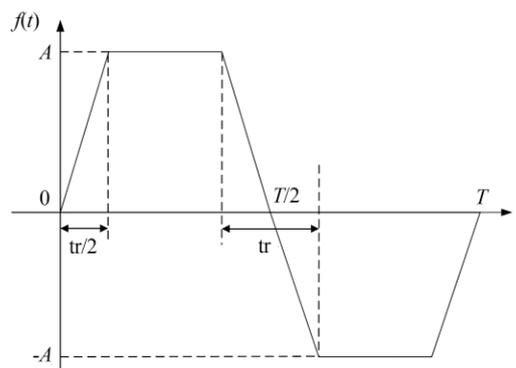


图 6 垂直转移信号波形图

Fig. 6 Oscillogram of vertical transfer

$$f(t) = \begin{cases} \frac{2A}{tr}t & 0 < t \leq \frac{tr}{2} \\ A & \frac{tr}{2} < t \leq \frac{T-tr}{2} \\ \frac{2A}{tr}\left(\frac{T}{2}-t\right) & \frac{T-tr}{2} < t \leq \frac{T+tr}{2} \\ -A & \frac{T+tr}{2} < t \leq T-\frac{tr}{2} \\ \frac{2A}{tr}(t-T) & T-\frac{tr}{2} < t \leq T \end{cases}. \quad (6)$$

对该时域周期函数进行傅里叶级数展开得到:

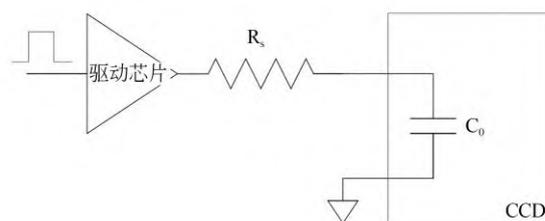


图 7 驱动信号时间常数调整电路

Fig. 7 Regulator circuit of time-constant of driver signal

$$t = -\ln\left(\frac{V_H - V_r}{V_H - V_L}\right) \cdot R_s \cdot C_0, \quad (8)$$

其中: V_H 为信号高电平电压值, V_L 为信号低电平电压值, V_r 为上升时间 tr 时刻负载电压, 其中上升时间取 0.9 倍峰峰值所对应的时刻, 故

$$V_r = 0.9 \cdot (V_H - V_L) + V_L. \quad (9)$$

因此,只需调节 R_s 大小即可调整上升/下降时间常数。根据该型 TDI CCD 数据手册提供的数据,通过电路仿真和实际调试,全色谱段的调节电阻 R_s 设置为 4Ω ,得到其垂直转移信号上升/下降时间为 74 ns ;彩色谱段的调节电阻设置为 10Ω ,得到其垂直转移信号上升/下降时间为 92 ns 。三路 TDI CCD 的垂直转移信号上升/下降时间相同。

3.2.2 近场空间辐射抑制

TDI CCD 为了更灵活的进行成像,拼接而成的三片 TDI CCD 可分别设置为不同的行转移频率(实验中分别设置为 1 kHz 、 0.9996 kHz 和 0.9993 kHz),此时的成像称为异速成像。由于行转移频率较高,且幅值较大,因此要求信号的上升沿时间非常短,信号的高频分量能量很强。这就导致相邻两片 CCD 在进行异速成像时,高频影响下噪声会近场耦合到相邻的探测器上,最终噪声反应在拍摄的图像上,严重影响信噪比。如图 8 所示(图像为黑白条低 8 位图像),左侧为同速时图像,右侧为异速时图像,图像存在横条纹噪声。

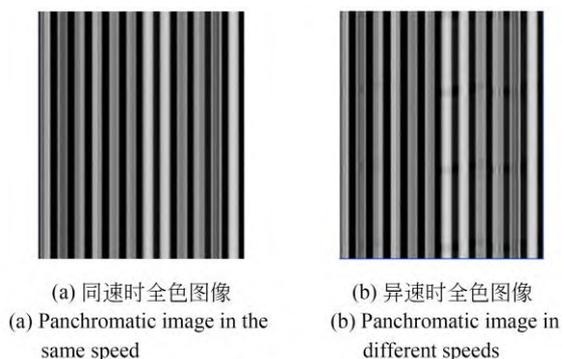


图 8 同速和异速情况时的全色图像

Fig. 8 Panchromatic images in the same and different speeds condition

为解决上述问题,抑制近场空间辐射,提高异速成像信噪比,在三片 TDI CCD 拼接完成后,用铜片将三片探测器进行物理空间隔离,减小噪声的近场耦合。将三个 CCD 器件用铜片相互隔离开,如图 9 所示。

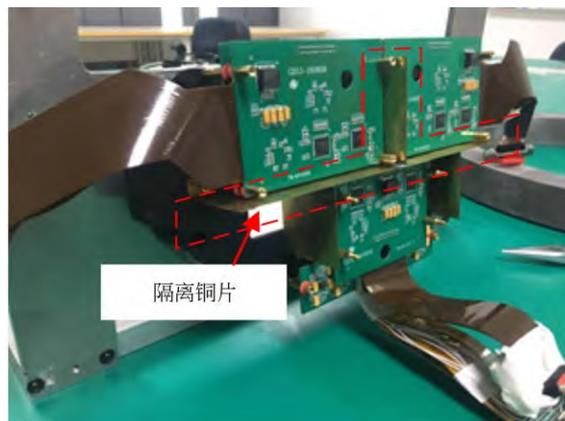


图 9 隔离铜片安装图

Fig. 9 Installation diagram of isolating copper

4 试验结果

4.1 异速成像测试

为了较为准确的对比,屏蔽后的实验条件与屏蔽前的基本保持一致,并分别设置各 CCD 的行转移频率,得到的图像如图 10(b)所示,与屏蔽前的图 10(a)相比,图像清晰没有横条纹噪声。

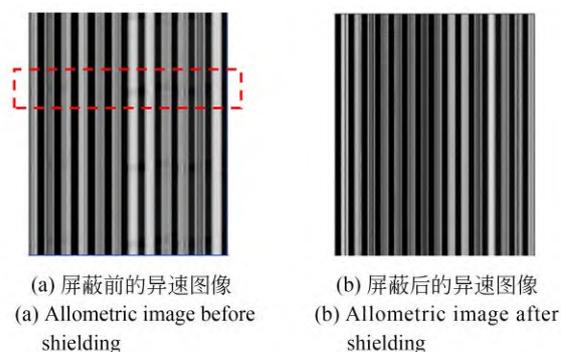


图 10 实施屏蔽前后的异速图像

Fig. 10 Allometric image before and after shielding

在常温下对屏蔽前后的图像进行测试,在图像半饱和条件下,计算其均方根误差(RMS),测试结果如表 2 所示。

表 2 噪声抑制前后图像半饱和条件下的 RMS 测试结果
Tab. 2 RMS results of the image in half-saturation before and after noise restraining

Item	RMS/DN
Before noise restraining	13.591
After noise restraining	9.758

通过结构设计采用低成本、便捷的方式进行隔离,串扰抑制效果明显。

4.2 信噪比测试

根据系统指标要求,在太阳高角 30°、地面反照率 0.2 的典型照明情况下,相机系统信噪比应不低于 100 倍。在辐射定标中通过积分球定标光源模拟这种照明条件下对应的相机入瞳处辐亮度对相机进行信噪比测试,各工况下各光谱通道相机入瞳辐亮度估算如表 3 所示。动态范围调整的手段主要靠改变相机的积分级数和增益来实现。

根据表 3 给出的输入辐亮度进行测试,在该亮度下采集各谱段图像 500 行进行统计,测试条件为模拟 265 km 火星轨道高度,积分时间为 124.11 μs ,得到对应的 CCD 全色和 B1~B4 各谱段在不同积分级数和成像模式下的信噪比,实际

表 3 各光谱通道相机入瞳辐亮度估算

Tab. 3 Radiance estimation of camera entrance pupil for each spectral channel

Working spectrum	SNR test input radiance/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)		
	30°, 0.2	10°, 0.2	5°, 0.2
PAN(450~900 nm)	9.01	3.13	1.57
B1(450~520 nm)	1.86	0.65	0.32
B2(520~600 nm)	1.99	0.69	0.35
B3(630~690 nm)	1.25	0.43	0.22
B4(760~900 nm)	1.98	0.69	0.35

测试中采用的信噪比单位为“倍数”,见表 4。测试中为保证各谱段信噪比 SNR 可达到 100(倍)调节积分级数。

表 4 TDI CCD 信噪比测试结果

Tab. 4 Test result of SNR of TDI CCD

Environment condition (altitude angle, ground albedo)	Spectrum segment	Integral stage	SNR		
			CCD1(times)	CCD2(times)	CCD3(times)
30°, 0.2	PAN	32	109	115.1	105.8
	B1	16	109.2	117.9	146.4
	B2	12	138	118.1	134.6
	B3	16	149.8	142.1	161
	B4	16	106.5	122.9	118.7
10°, 0.2	PAN	96	114	120.2	111.8
	B1	48	124.3	129.6	154.5
	B2	32	138.1	116.1	135
	B3	32	116.4	110.8	127.8
	B4	32	74.9	84	85.2
5°, 0.2	PAN	96	68.5	75.9	65.5
	B1	64	90.4	102.9	121.3
	B2	48	119.9	102.6	116
	B3	32	72.4	64.4	82.7
	B4	32	46	53.1	54

5 外景成像试验

室温条件下,利用单轴转台对3.5 km外的目标(长春中国南方航空公司以及中邑大厦)进行推扫拍摄,得到的图像清晰度高,层次明显,图11为全色谱段拍摄效果图片。

图12为彩色谱段拍摄图像经多光谱图像数据融合后所形成的图像,色彩真实、绚丽,达到了预期的设计目的。

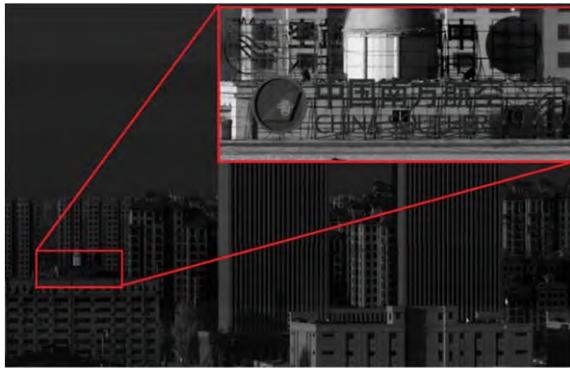


图11 TDI CCD外景推扫成像试验图像

Fig. 11 Test image of TDI CCD in outdoor scene

参考文献:

- [1] 邱家稳,王强,马继楠. 深空探测技术(特约)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 3788/IR-LA20201001.
QIU J W, WANG Q, MA J N. Deep space exploration technology (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 3788/IRLA20201001. (in Chinese)
- [2] 王赤,张贤国,徐欣锋,等. 中国月球及深空空间环境探测[J]. 深空探测学报, 2019, 6(2): 105-118.
WANG C, ZHANG X G, XU X F, et al. The lunar and deep space environment exploration in China [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(2): 105-118. (in Chinese)
- [3] 孙雪晨,吕恒毅,薛旭成,等. 高分辨力遥感相机CCD采样位置自适应补偿技术[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 973-978.
SUN X C, LÜ H Y, XUE X C, et al. Adaptive compensation technique for CCD signal sampling po-



图12 RGB拼接融合效果图

Fig. 12 Image of RGB fusion

6 结论

在天问一号高分相机的成像系统设计中,结合成像需求,在器件选型、电路研制、噪声抑制等环节展开细致的研究。针对多个线阵TDI CCD探测器拼接后异速成像时带来的问题,提出改进措施并验证,利用积分球等辐射试验设备测试验证TDI CCD的成像性能,三片TDI CCD的信噪比满足任务要求,从而验证了设计的实用性、灵活性和有效性。针对TDI CCD探测器的成像电路系统设计方法对其他相机电路系统设计具有借鉴意义。

- sitions in high-resolution remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 973-978. (in Chinese)
- [4] 孙武,韩诚山,晋学飞,等. 推扫式遥感相机超满阱大动态范围成像[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 944-950.
SUN W, HAN C S, JIN X F, et al. HDR imaging method of overcoming full well limitation for push-broom remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 944-950. (in Chinese)
- [5] 于向阳. 双视场多通道成像仪的光机结构[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2870-2876.
YU X Y. Opto-mechanical structure of imager with two field of views and multiple channels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2870-2876. (in Chinese)
- [6] 李进,金龙旭,韩双丽,等. 大视场遥感相机的时间延迟积分电荷耦合器件测试系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2415-2423.
LI J, JIN L X, HAN S L, et al. Test system for

- time-delayed integration charge coupled device of remote camera with wide field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2415-2423. (in Chinese)
- [7] 李伟雄, 徐抒岩, 闫得杰. 影响空间相机偏流角估值误差的参数 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1530-1536.
LI W X, XU S Y, YAN D J. Influencing parameters of estimate errors of space camera's drift angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1530-1536. (in Chinese)
- [8] 常振, 王煜, 司福祺, 等. CCD 数字像元的合并方法及其应用 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2204-2211.
CHANG Z, WANG Y, SI F Q, *et al.* Digital binning method for CCD pixels and its applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2204-2211. (in Chinese)
- [9] 马天波, 郭永飞, 李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [10] 曲洪丰, 王晓东, 徐抒岩, 等. 多 TDI CCD 拼接遥感相机异速成像抗干扰设计 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 1026-1032.
QU H F, WANG X D, XU S Y, *et al.* Anti-jamming design for multi-velocity imaging mode of multiple TDI CCDs mosaic remote camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1026-1032. (in Chinese)
- [11] 张贵祥, 郑亮亮, 贺小军, 等. 多 TDICCD 拼接遥感相机成像串扰分析与抑制 [J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0711003.
ZHANG G X, ZHENG L L, HE X J, *et al.* Imaging crosstalk analyzing and suppressing for multi-TDICCD mosaic remote sensing camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0711003. (in Chinese)
- [12] 薛旭成, 李洪法, 郭永飞. 高速 CCD 成像电路抗串扰技术 [J]. *中国光学*, 2011, 4(6): 611-616.
XUE X C, LI H F, GUO Y F. Anti-crosstalk techniques for high-speed CCD imaging circuit [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(6): 611-616. (in Chinese)

作者简介:



周鹏骥(1985—),男,黑龙江伊春人,博士研究生,助理研究员,2013年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事空间遥感成像技术方面的研究。E-mail:zpj1029@163.com

通讯作者:



王晓东(1970—),男,吉林白山人,研究员,博士生导师,2003年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事空间光学遥感仪器成像技术与信息处理方面的研究。Email:wangxd@ciomp.ac.cn