

多 TDICCD 拼接遥感相机成像串扰分析与抑制

张贵祥 郑亮亮 贺小军 曲宏松 金光

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要 为了解决多时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)拼接遥感相机不同 CCD 通道间的成像串扰问题,提高相机信噪比(SNR)和成像质量,利用周期信号的傅里叶级数分析法推导成像串扰的数学模型。根据理论分析结果提出多 TDICCD 成像串扰的根本原因是 CCD 工作不同步造成 TDICCD 成像电路电源的地平面高频扰动影响到了相邻通道 CCD 有效视频信号的采集。从工程研制实际出发,采取 CCD 通道之间的工作电源隔离以及共用统一的系统时钟等措施对多 TDICCD 成像电路系统进行改进,抑制成像串扰的发生。对改进后的多 TDICCD 成像电路系统进行成像和信噪比测试。实验结果表明,采取的措施有效地去除了 CCD 通道间成像串扰条纹,相机信噪比得到了显著的提高,在相机入瞳辐亮度为 $42.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$ 的条件下,相机信噪比提高 18.85 dB,达到了 50.42 dB,且外场成像质量高,满足实际工程的需求。

关键词 成像系统;数学模型;傅里叶级数;成像串扰;信噪比

中图分类号 V44.7.3; TN386.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0711003

Imaging Crosstalk Analyzing and Suppressing for Multi-TDICCD Mosaic Remote Sensing Camera

Zhang Guixiang Zheng Liangliang He Xiaojun Qu Hongsong Jin Guang

(National and Local United Engineering Research Center of small satellite technology, Changchun Institute of Optics fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract In order to solve the imaging crosstalk between charge coupled device (CCD) channels and improve the signal-to-noise ratio (SNR) and imaging quality of multi time delay integration (TDI) charge coupled device mosaic remote sensing camera, a mathematical model of imaging crosstalk is established based on Fourier series analysis of the periodic signal. According to the results of mathematical analysis, the root cause of multi-TDICCD imaging crosstalk between different channels is proposed to be the unsynchronized TDICCD imaging circuit working, which causes high-frequency disturbance on the power ground plane and eventually affects the effective video signals acquisition of neighboring TDICCD. Referring to practical project, isolated CCD power supply, shared unified system clock and other methods are adopted to optimize multi-TDICCD imaging circuit system to suppress the occurrence of imaging crosstalk. The imaging quality and SNR are tested after improvement. Experimental results indicate that the adopted methods which can prevent the occurrence on imaging crosstalk between different CCD channels are effective, and the SNR is improved significantly. When the radiance is $42.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$, the camera SNR increases 18.85 dB, reaching to 50.42 dB. The image quality of outside scene imaging is also improved significantly, which can meet the requirements of practical engineering of TDICCD remote sensing camera.

Key words imaging systems; mathematical model; Fourier series; imaging crosstalk; signal-to-noise ratio

OCIS codes 110.4280; 110.4190; 040.1520; 040.1490; 280.4788

1 引 言

时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)起源于 20 世纪 70 年代,是一种具有面阵结构、线阵输出

的新型 CCD 图像传感器,利用多行线阵感光阵列重复对同一目标进行多次曝光,并将曝光感应信号累加,从而在不影响像元输出速率和地面分辨力的情

收稿日期: 2013-12-12; **收到修改稿日期**: 2014-02-16

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)、国家自然科学基金青年基金(61008046)

作者简介: 张贵祥(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光学遥感信号处理与传输技术等方面的研究。

E-mail: zhang_gui_xiang@126.com

况下提高探测灵敏度和成像信噪比^[1-3]。在空间对地遥感成像应用中利用 TDICCD 这一优点,采用相对孔径小的光学系统实现较高的分辨率,从而实现空间遥感相机系统的高分辨率、轻小型化,因此,TDICCD 是空间遥感相机研制的首选探测器,并得到了广泛的应用^[4-6]。

随着空间对地遥感成像技术的发展,大视场宽覆盖已经成为高性能空间遥感相机的重要技术指标要求。但由于受到技术和工艺水平限制,单片 TDICCD 芯片的成像像元数无法满足遥感成像对视场宽度的要求,因此,在现有的技术条件下,为了实现大视场宽覆盖的空间对地遥感成像,大多采用多片 TDICCD 进行机械拼接组成焦面,使其总像元数满足系统需求,以达到扩大相机有效视场的目的^[7-9]。目前,美国的 QuickBird-2、Worldview 系列以及 GeoEyes 系列等新一代商业高分辨率遥感卫星均采用了多片 TDICCD 拼接以达到其成像幅宽。

对于多 TDICCD 拼接遥感相机,由于多路 CCD 同时成像,各 CCD 通道间不可避免地产生相互串扰,这种串扰非常容易耦合到 CCD 模拟视频信号上,经专用 CCD 视频处理器进行模数转换后,在输出图像上出现周期、不规则的串扰条纹,即串扰噪声。这种串扰噪声的大小以及是否明显直接影响到相机的成像质量,在相机设计阶段这种串扰噪声是无法预见和评估的,只能在测试阶段通过积分球辐射定标才能发现。当发现相机输出图像的串扰条纹明显且严重影响成像质量时,相机电子学系统硬件已加工完成,很难通过硬件修改或是软件校正的方法进行抑制,而重新设计又会增加相机的成本,使相机不能按期完成,因此,为了高质量地完成相机研制,获取高信噪比图像,必须在相机设计阶段就要对 CCD 成像电路设计采取抗干扰措施,防止 CCD 成像串扰的产生。参考文献[10]根据传输线理论分析了 CCD 成像电路走线间的串扰,应用电源接地的开关噪声模型分析了 CCD 成像电路工作电压间的串扰。参考文献[11]根据 CCD 工作时序解释了异速模式下干扰现象。这都没有真正解释多 TDICCD 成像系统发生串扰的根本原因,只是提出了相关抗干扰措施。为此,针对工程实践中遇到的多 TDICCD 拼接遥感相机 CCD 通道间成像串扰问题,本文介绍了多 TDICCD 通道间成像串扰现象,分析了成像串扰产生的根源,提出了一种多 TDICCD 成

像通道间成像串扰数学模型,根据数据模型得出的结论提出了相应的措施抑制 CCD 通道间的成像串扰,通过实验验证了串扰数学模型的正确性以及采取措施的有效性。

2 成像串扰分析

2.1 成像串扰现象

多 TDICCD 拼接相机的成像系统是一个多通道并行处理且复杂的模数混合电路系统,如图 1 所示。每片都有自己独立的 CCD 时序发生器、驱动电路、CCD 视频预放电路、CCD 视频处理器以及图像处理模块等外围成像电路^[10]。

当相机对目标景物成像时,每个通道 TDICCD 探测器都在各自的 CCD 功率驱动电路有效驱动下工作在最佳性能状态,将目标景物的光信号转换成电信号输出;预放电路接收 CCD 输出的模拟电信号,并对该信号进行隔直、滤波、电压跟随以及放大等前级预处理,降低噪声对信号的影响,使信号符合后级电路的要求;经预处理后的高速 CCD 模拟视频信号送给后级的专用 CCD 视频处理器进行相关双采样、可编程增益调整(PGA)等处理,去除夹杂在 CCD 视频信号中的复位噪声和暗电平噪声等,提取出反映目标景物亮度的有效 CCD 视频信号,最后通过 A/D 转换将有效 CCD 视频信号转换为数字图像数据输出;图像处理模块对输入的数字图像数据进行非均匀性校正和无缝拼接后,经图像传输接口送给图像采集系统进行存储与显示。由此可见,相机各通道的 CCD 成像电路在进行 CCD 视频信号处理时已经对 TDICCD 的各类噪声进行了抑制和去除。

但是在实际工程研制中发现,在一定光强范围的均匀光条件下,当相机有且只有一路 CCD 上电成像时,采集到的图像十分均匀,未见异常条纹。当相机多路 CCD 同时上电成像时,采集的图像出现周期不规则条纹,这种条纹在相邻的 CCD 通道间明显,CCD 通道间距离越远条纹越弱,而且不同的 CCD 通道间的条纹周期也不尽相同,这说明其他通道 CCD 成像对本通道 CCD 成像形成了串扰。为此,对产生该现象的所有可能性进行了逐一排查,最终发现是由于相机的各 CCD 通道工作不同步所致,因此,就多 TDICCD 通道间成像串扰产生的机理进行数学分析,并为工程优化提供指导性意见。

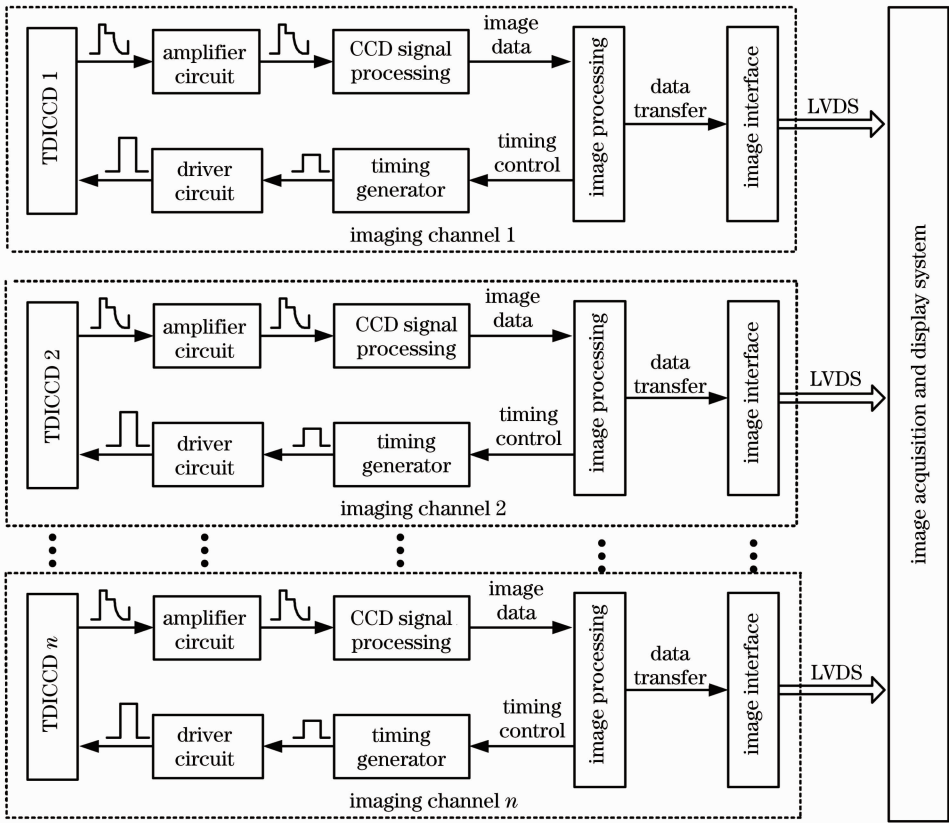


图 1 多 TDICCD 拼接遥感相机成像系统框图

Fig. 1 Block diagram of multi-TDICCD mosaic camera system

2.2 成像串扰数学模型

TDICCD 在轨推扫成像时要完成对地面目标的光电转换输出模拟视频信号,必须要在外围功率驱动电路的驱动下才能实现。TDICCD 在上电成像过程中,当功率驱动电路工作时,成像电路电源地平面存在周期性的高频扰动,经示波器测试,其频率正好是 CCD 工作频率;当 TDICCD 下电不工作时,功率驱动电路也下电,电源地平面的周期性高频扰动随之消失。由此可见,TDICCD 的功率驱动电路会直接引起电源地平面的电压波动。

CCD 正常工作之所以会引起电源地平面高频扰动主要有两个方面的原因:1)由于 TDICCD 高频的驱动器处于同步开关状态,产生的瞬间变化电流 (di/dt) 在回流途径上形成较大交流压降,CCD 工作频率越高,交流压降就越明显;2) CCD 驱动信号的电压摆幅大、变化率高,且 CCD 为大容性负载,因此,在驱动信号快速变化的上升/下降沿时的瞬态驱动电流大。所以,TDICCD 的高频、大压摆驱动信号造成了电源地的高频扰动,电源高频扰动的周期与 TDICCD 的工作频率相同,在多 TDICCD 成像系统中,不同 CCD 通道引起电源扰动在电源地平面上相互叠加,从而引发多 CCD 通道间成像串扰。

TDICCD 的驱动信号主要分为行间转移信号 (TCK) 和像素转移信号 (CR),如图 2 所示,其中行间转移信号为低频信号,其频率与行转移频率相同,一般为千赫兹量级,而像素转移信号为高频信号,一般为兆赫兹量级。由于 CCD 驱动电路的功耗与 CCD 工作频率成正比,且根据 CCD 手册可知,CCD 像素转移信号 CR 频率高、路数多,是 CCD 功率消耗的信号群,集中了 CCD 功耗的 95% 以上,且 CR

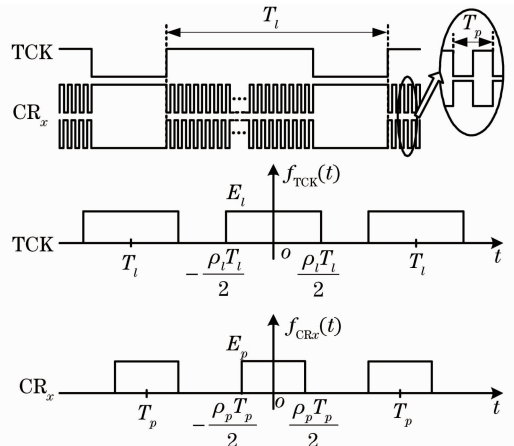


图 2 TDICCD 驱动信号

Fig. 2 Driving signals of TDICCD

信号时钟频率就是 TDICCD 的工作频率,符合电源地平面高频扰动的周期性特征,由此可见,TDICCD 的像素转移信号是造成电源地平面高频扰动的直接干扰源。因此,以 CR 像素转移信号为主要因素,进行数学建模,从理论上分析功率驱动电路对电源地平面的影响,从而查出真正的干扰源和传播媒介,证明产生成像串扰原因的正确性。

从图 2 可以看出,TDICCD 的行间转移信号 $f_{\text{TCK}}(t)$ 的脉冲宽度为 $\rho_l T_l$ (ρ_l 为 TDICCD 行转移时间与行周期之比),脉冲幅度为 E_l ,重复周期为 T_l , $f_{\text{TCK}}(t)$ 在一个周期内 $(-\frac{\rho_l T_l}{2} \leq t \leq \frac{\rho_l T_l}{2})$ 可表示为

$$f_{\text{TCK}}(t) = E_l \left[u\left(t + \frac{\rho_l T_l}{2}\right) - u\left(t - \frac{\rho_l T_l}{2}\right) \right], \quad (1)$$

同样,TDICCD 的像素转移信号 $f_{\text{CR}_x}(t)$ 在一个周期内 $(-\frac{\rho_p T_p}{2} \leq t \leq \frac{\rho_p T_p}{2})$ 可表示为

$$f_{\text{CR}_x}(t) = E_p \left[u\left(t + \frac{\rho_p T_p}{2}\right) - u\left(t - \frac{\rho_p T_p}{2}\right) \right], \quad (2)$$

式中 $u(t)$ 为阶跃函数, E_p 为 CR 的脉冲幅度, T_p 为 CR 的重复周期, ρ_p 为 CR 的占空比。

TDICCD 的像素转移信号 CR 在行转移期间表

现为高低电平,因此,将 CR 时钟信号数字化表示为

$$f_{\text{CR}}(t) = f_{\text{TCK}}(t) * f_{\text{CR}_x}(t). \quad (3)$$

由于周期性矩形脉冲信号可以利用傅里叶级数来研究其频谱,于是将(3)式进行傅里叶级数展开得到^[12]:

$$f_{\text{CR}}(t) = \left[\rho_l E_l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2E_l}{n\pi} \sin(n\pi\rho_l) \cos\left(n\frac{2\pi}{T_l}t\right) \right] \times \left[\rho_p E_p + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2E_p}{n\pi} \sin(n\pi\rho_p) \cos\left(n\frac{2\pi}{T_p}t\right) \right]. \quad (4)$$

由于 CCD 通道间通过电源系统耦合,符合加性叠加原理,因此电源地平面高频扰动由各个通道引起的电源扰动加性叠加得到,为了简化计算,先考虑两个通道引起电源地平面高频扰动的叠加情况,其效果与光学的双缝干涉类似,不同之处在于光学的双缝干涉是单色光形成的空间上分布的干涉条纹,其强度随着空间呈周期性变化,而周期性条纹现象是不同频率的信号源在某一位置上产生的时间分布上的干涉现象,其强度随时间呈周期性变化。由于电源系统为低通系统,高频信号会被电容等元件吸收,所以仅对基频信号进行分析,同时不考虑直流分量和信号幅度的影响,则两个通道引起的电源高频扰动合成可表示为

$$f_s(t) = \sin(\pi\rho_{p1}) \cos\left(\frac{2\pi}{T_{p1}}t\right) \sin(\pi\rho_{l1}) \cos\left(\frac{2\pi}{T_{l1}}t\right) + \tau \sin(\pi\rho_{p2}) \cos\left(\frac{2\pi}{T_{p2}}t\right) \sin(\pi\rho_{l2}) \cos\left(\frac{2\pi}{T_{l2}}t\right), \quad (5)$$

式中 $f_s(t)$ 是电源高频扰动合成的时间分布函数,即 TDICCD 视频信号采样点扰动电压的时间分布函数,单位:伏特(V)。 τ 是 CCD 通道间耦合因子。

将(5)式进行三角变换得到:

$$f_s(t) = \sin(\pi\rho_{p1}) \sin(\pi\rho_{l1}) \times \frac{\cos[2\pi(f_{p1} + f_{l1})t] + \cos[2\pi(f_{p1} - f_{l1})t]}{2} + \tau \sin(\pi\rho_{p2}) \sin(\pi\rho_{l2}) \times \frac{\cos[2\pi(f_{p2} + f_{l2})t] + \cos[2\pi(f_{p2} - f_{l2})t]}{2}, \quad (6)$$

式中 f_{p1} 为 CCD 通道 1 像素转移信号 CR 频率, f_{p2} 为 CCD 通道 2 像素转移信号 CR 频率, f_{l1} 为 CCD 通道 1 CCD 行频, f_{l2} 为 CCD 通道 2 CCD 行频。

通常情况下 CR 的占空比 ρ_{p1} 、 ρ_{p2} 差异很小,约为 $50\% \pm 4\%$,且 CCD 工作行频相同或相差很小(差异不大于 3%),于是 $\sin(\pi\rho_{l1})$ 与 $\sin(\pi\rho_{l2})$ 近似相等, $\sin(\pi\rho_{p1})$ 与 $\sin(\pi\rho_{p2})$ 近似相等,因此, $\frac{\sin(\pi\rho_{p1})\sin(\pi\rho_{l1})}{2}$ 与 $\frac{\sin(\pi\rho_{p2})\sin(\pi\rho_{l2})}{2}$ 也近似相等,可作为常数因子忽略,于是将(6)式简化为

$$f_s(t) = \{ \cos[2\pi(f_{p1} + f_{l1})t] + \cos[2\pi(f_{p1} - f_{l1})t] \} + \tau \{ \cos[2\pi(f_{p2} + f_{l2})t] + \cos[2\pi(f_{p2} - f_{l2})t] \}. \quad (7)$$

当 τ 为 0 时,CCD 通道间完全隔离,则:

$$f_s(t) = \{ \cos[2\pi(f_{p1} + f_{l1})t] + \cos[2\pi(f_{p1} - f_{l1})t] \}. \quad (8)$$

由(8)式可以看出电源高频扰动合成 $f_s(t)$ 的变化仅与本通道有关,而视频处理器的采样信号与 $f_s(t)$ 完

全同步,不会将串扰采集进入图像,所以,电源系统即便有高频扰动,但对图像无影响。这也是串扰为什么仅仅发生在 CCD 通道间,而单片 CCD 成像时串扰不明显。

当 τ 不为 0 时,CCD 通道间存在串扰,但是如果 CCD 工作同步,即 $f_{p1} = f_{p2}, \rho_{p1} = \rho_{p2}, f_{l1} = f_{l2}, \rho_{l1} = \rho_{l2}$, 则根据(7)式有:

$$f_s(t) = (1 + \tau) \{ \cos[2\pi(f_{p1} + f_{l1})t] + \cos[2\pi(f_{p1} - f_{l1})t] \}. \quad (9)$$

对比(8)式和(9)式不难看出电源高频扰动合成 $f_s(t)$ 的变化仍然仅与本通道有关,CCD 通道间不会发生串扰,但是,如果多片 TDICCD 工作不同步,则由(7)式得:

$$f_s(t) = (1 - \tau) \{ \cos[2\pi(f_{p1} + f_{l1})t] + \cos[2\pi(f_{p1} - f_{l1})t] \} + \tau \{ \cos[2\pi(f_{p1} + f_{l1})t] + \cos[2\pi(f_{p1} - f_{l1})t] + \cos[2\pi(f_{p2} + f_{l2})t] + \cos[2\pi(f_{p2} - f_{l2})t] \}. \quad (10)$$

将(10)式后半部分进行三角和差化积变换,同时,根据电源系统的低通特性,将和频高频分量滤除,只剩下差频低频分量,则有:

$$f_s(t) = (1 - \tau) \{ \cos[2\pi(f_{p1} + f_{l1})t] + \cos[2\pi(f_{p1} - f_{l1})t] \} + 2\tau \cos[\pi(\Delta f_p + \Delta f_l)t] + 2\tau \cos[\pi(\Delta f_p - \Delta f_l)t], \quad (11)$$

式中 $\Delta f_p = f_{p1} - f_{p2}, \Delta f_l = f_{l1} - f_{l2}$ 。

(11)式的前半部分高频信号为本通道引入的扰动,且视频处理器的采样信号与其完全同步,不会将扰动采集进入图像,可视为直流分量被去掉,因此,可以将(11)式进一步简化为

$$f_s(t) = 2\tau \cos[\pi(\Delta f_p + \Delta f_l)t] + 2\tau \cos[\pi(\Delta f_p - \Delta f_l)t] = 4\tau \cos(\pi\Delta f_p t) \cos(\pi\Delta f_l t). \quad (12)$$

由此可见,多 TDICCD 同时成像时,在电源地平面存在高频扰动耦合且周期变化的信号。由(12)式可知,该信号周期特性取决于两方面因素:1) TDICCD 成像通道间像素转移信号频率的差异 Δf_p ; 2) TDICCD 成像通道间工作行频的差异 Δf_l , 这正是造成多 TDICCD 成像系统中工作不同步的直接原因。

通常情况下,相机在轨对星下点推扫成像时,各 TDICCD 成像通道工作行频相同或相差很小,此时, $\cos(\pi\Delta f_l t)$ 为一极低频信号分量,对成像的影响基本可以忽略,且从实际成像效果上看,其影响幅度也极为微弱,仅在极高增益条件下,才能进入图像,而正常推扫成像时不会采用极高的增益,以避免噪声过于明显。然而,在相机侧摆成像时,TDICCD 成像通道间的行频差异 Δf_l 较大,侧摆角度越大行频差异就越大,此时引起的成像串扰不容忽略。而对于 Δf_p , 其频率大小取决于 CCD 通道系统时钟晶振之间的频差 Δf , 如果 TDICCD 成像通道不采用同源系统晶振,必然引起成像串扰。

以上数学分析从理论上证明了 TDICCD 成像通道间 CCD 工作的不同步,必然会引起电源系统地平面高频扰动的加性叠加,从而影响到相邻通道 CCD 有效视频信号电平,造成 CCD 成像串扰,由(12)式可知,通过测量 CCD 通道系统时钟晶振的频差 Δf 以及已知的行频差 Δf_l , 能够有效地预测串扰出现频率。

3 成像串扰抑制

根据第 2.2 节中的数学分析可知,造成多 TDICCD 成像系统成像串扰的干扰源是 TDICCD 的功率驱动电路,而真正根源是各 TDICCD 成像通道工作不同步以及电源系统存在耦合,因此,为了抑制成像串扰的发生,就必须切断传播媒介消除根源。

切断传播媒介最根本的方法是通过电源系统拓扑优化,降低 TDICCD 通道间电源系统的耦合度,这里主要是指 CCD 通道之间的工作电源相互隔离。所谓电源隔离就是在 CCD 通道供电输入进行隔离,每个通道有自己独立的供电电源系统,且电源供电线和回线在硬件电路设计上采取物理隔离,在相机供电系统端共地共电源。同时在各自己的 CCD 成像通道内,CCD 驱动的工作电源和 CCD 预放以及视频处理工作电源也不要共电源,模拟电源和数字电源分别供电,但模拟地和数字地采用统一的地平面。尽量使用低压差线性稳压电源,避免引入不必要的纹波噪声。各成像电路的电源入口都采用去耦滤波设计,根据电路供电要求,选用不同容值和不同类型的电容进行去耦和滤波,减小电源和地平面的总阻抗,从而降低高频瞬变的交流信号对电源地平面的影响。

通道间的电源隔离,可以在一定程度上抑制成像串扰现象的出现,但不能从根本上消除串扰。在辐射定标时的均匀光图像上出现串扰条纹的根本原因是各个通道的 CCD 工作不同步,CCD 功率驱动

信号引起的电源地平面的电压波动相互叠加干涉串扰影响到了 CCD 供电系统,所以从根本上的解决办法是使各通道 CCD 同步工作,从而可以从根本上消除成像串扰。要使各 TDICCD 通道同步工作,整个相机各成像通道必须采用一个时钟晶振作为系统统一的时钟源,消除了由于晶振的频差 Δf 引起的工作不同步。如图 3 所示,系统统一的时钟源经时钟驱动器和延时控制器后,采用差分发送器将低压晶体管晶体管逻辑(LVTTL)电平转换为低压差分信号(LVDS)电平后,将时钟分配给各 CCD 通道。之所以采用 LVDS 传输系统时钟是由于 LVTTL 信号抗干扰能力差,传输距离短,很难保证系统时钟的精确传输^[13]。各 CCD 通道分别接收到 LVDS 系统时钟后再使用差分接收器将其转换为 CCD 通道内图像处理模块可以直接使用的 LVTTL 电平时钟信号,以实现各 TDICCD 同源同步工作。当然晶振同源也无法消除因异速行频带来的工作不同步,这只能通过优化 CCD 模拟信号线和功率驱动信号线的走线方式、系统电源物理隔离等方面对成像电路进行改进,从而抑制异速成像串扰的发生。

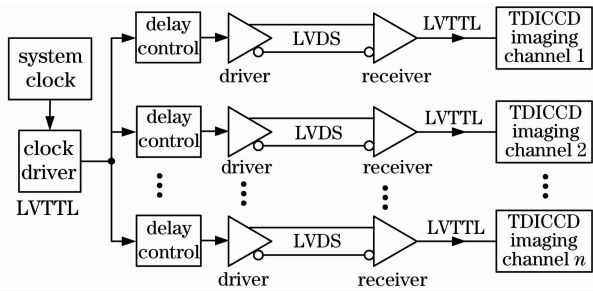


图 3 系统时钟拓扑结构示意图

Fig. 3 Structure of system clock

此外,相机成像电路的 PCB 设计时,模拟电路和数字电路分区布局,防止数字电路对模拟电路造成干扰。同时,注重 CCD 视频信号线、CCD 驱动信号线以及其他数字信号线的信号完整性,采取信号传输线特性阻抗控制以及串联电阻端接技术,减小信号传输反射,降低传输信号线间的电磁干扰,从而进一步减少串扰的发生。

4 实验结果与分析

为了验证成像串扰数学模型的正确性以及所采取措施的有效性,利用积分球均匀光源对某多 TDICCD 拼接遥感相机成像串扰抑制前后分别进行了成像标定实验。图 4 是在某一均匀辐亮度下,对相机成像串扰抑制前后进行成像标定实验所采集到

的均匀光图像。从图 4 可以看出,在相机的 TDICCD 成像通道间工作不同步且电源没有隔离时,CCD 输出图像串扰条纹很明显[如图 4(a)所示],图像灰度值均方差噪声高达 19.29,而成像串扰抑制后图像非常均匀[如图 4(b)所示],图像灰度

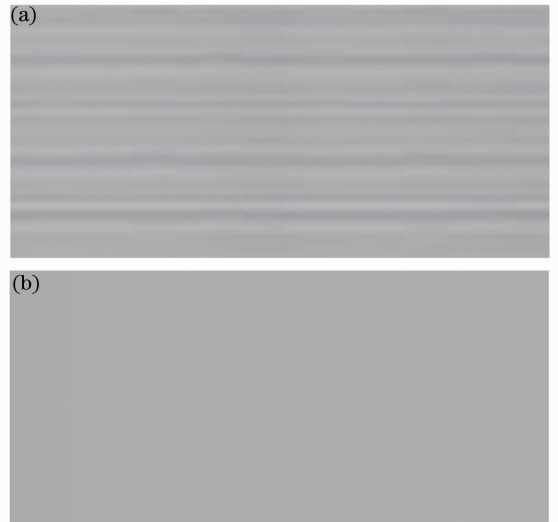


图 4 均匀辐亮度条件下图像。(a)成像串扰抑制前;
(b)成像串扰抑制后

Fig. 4 Images under uniform illumination. (a) Before imaging crosstalk suppressing; (b) after imaging crosstalk suppressing

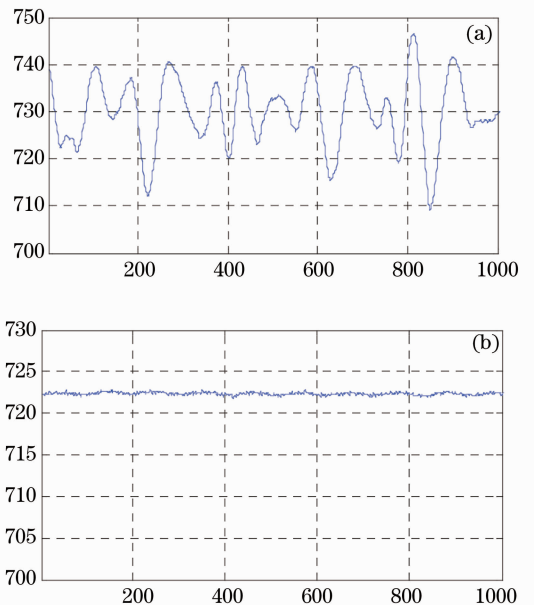


图 5 均匀辐亮度条件下像元灰度值统计曲线。(a)成像串扰抑制前;(b)成像串扰抑制后

Fig. 5 Statistical gray value curves under uniform illumination. (a) Before imaging crosstalk suppressing; (b) after imaging crosstalk suppressing

值均方差噪声仅有 2.18。

采用 Matlab 软件分别对图 4(a)和图 4(b)图像进行灰度统计分析,得到的对比结果如图 5(a)和图 5(b)所示,图 5 中横坐标代表统计行数,纵坐标代表每行像元的灰度均值。统计结果表明成像串扰抑制后图像每行灰度均值稳定,串扰条纹抑制效果明显。

为了进一步验证相机信噪比(SNR)在串扰抑制后有所改善,对相机信噪比进一步测试。整个实验在暗室内进行,用积分球光源充满相机的入瞳和视场,从低到高调整积分球输出的辐亮度,相机在一定

表 1 成像串扰抑制前后信噪比测试结果

Table 1 Experimental results of SNR before and after imaging crosstalk suppressing

Radiance W/(m ² ·Sr)	Before imaging crosstalk suppressing			After imaging crosstalk suppressing		
	Average gray value	Standard deviation of gray value	SNR /dB	Average gray value	Standard deviation of gray value	SNR /dB
42.6	731.13	19.29	31.57	723.64	2.18	50.42
32.7	625.67	18.41	30.62	613.87	2.13	49.19
22.3	442.73	16.85	27.39	434.93	1.95	46.97
12.5	275.29	12.65	26.75	261.35	1.86	42.95
6.1	121.64	8.66	22.95	115.58	1.37	38.52

相机采取成像串扰抑制措施后,有效地抑制了对均匀辐亮度目标成像的串扰条纹。为了进一步验证抑制后对外场复杂景物目标的成像图像不存在串扰条纹,相机进行了外场成像实验,将相机放置在一

行频和级数下分别采集相应辐亮度的图像,然后通过灰度统计计算出相机信噪比。具体计算方法是:利用图像灰度直方图统计求出每个像元灰度的列平均作为信号值,而对应像元灰度随时间随机涨落的均方根值作为噪声,二者相除并对所有像元取平均就得到该测试条件下的平均信噪比^[14-15]。表 1 是串扰抑制前后信噪比测试结果。通过表 1 中数据对比可知,串扰抑制后相机信噪比得到了显著的提高,在相机入瞳辐亮度为 42.6 W/(m²·Sr)时,测得信噪比达到了 50.42 dB,在同等实验条件下,比串扰抑制前的信噪比提高了 18.85 dB。

维转台上,通过计算机控制转台转速模拟卫星在轨对地推扫成像。图 6(a)和图 6(b)分别给出了成像串扰抑制前后的实际外场成像图像,同时对图 6 所

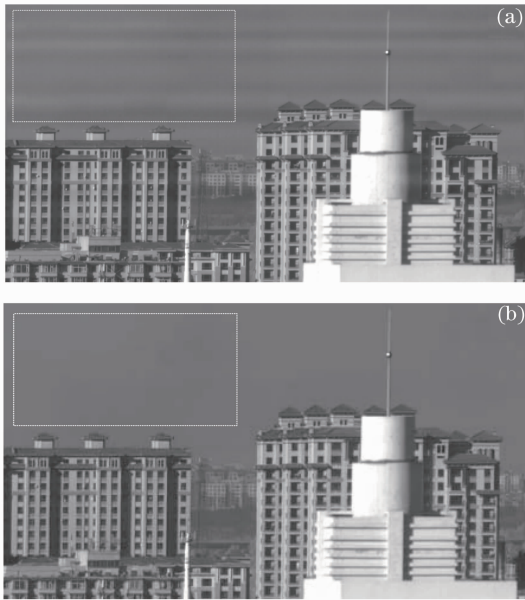


图 6 外场成像图像。(a)成像串扰抑制前;
(b)成像串扰抑制后

Fig. 6 Outside scene images. (a) Before imaging crosstalk suppressing; (b) after imaging crosstalk suppressing

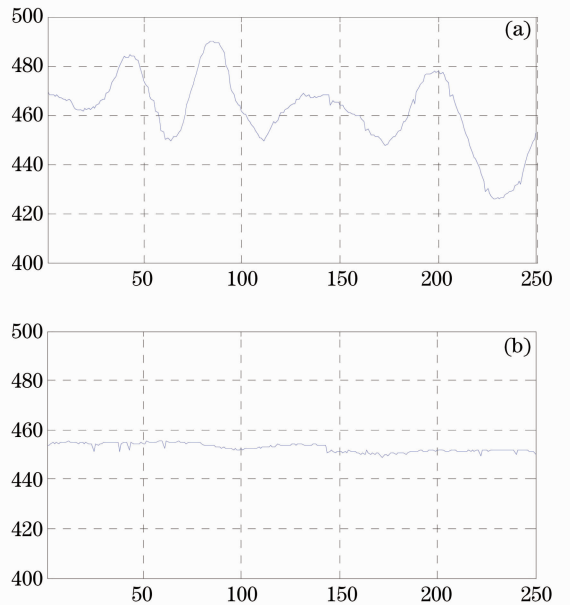


图 7 外场成像图像灰度值统计曲线。(a)成像串扰抑制前;(b)成像串扰抑制后

Fig. 7 Statistical gray value curves of the outside scene images. (a) Before imaging crosstalk suppressing; (b) after imaging crosstalk suppressing

示的虚线框内的均匀天空背景图像进行了灰度统计,统计得到的对比结果如图 7(a)和图 7(b)所示。从图 6 和图 7 可以看出,串扰抑制前天空均匀背景下有明显的串扰条纹,而串扰抑制后均匀天空背景下串扰条纹得到了有效抑制,且外场成像图像动态范围宽,具有较高的成像质量。

5 结 论

针对多 TDICCD 拼接遥感相机 CCD 通道间存在相互串扰的问题,分析了串扰产生的根本原因,发现 CCD 通道间串扰是由于 CCD 工作不同步造成电源系统地平面高频扰动的加性叠加,从而影响到了相邻通道 CCD 有效视频信号电平采集所致。以引起电源地平面高频扰动的主要因素 CR 建立了 CCD 通道间串扰数学模型。从工程研制实际出发,提出了 CCD 通道之间的工作电源隔离以及共用统一的系统时钟等成像串扰抑制措施。通过利用积分球均匀光源对某多 TDICCD 拼接遥感相机串扰抑制前后分别进行了成像实验和信噪比测试。实验结果表明,建立的串扰数学模型正确,提出的措施有效地抑制了 CCD 通道间串扰的发生,相机信噪比得到了显著的提高,在同等实验条件下,成像串扰抑制后相机信噪比提高了 18.85 dB,达到 50.42 dB,且外场成像画面清晰,均匀天空背景下无串扰条纹,图像动态范围宽,具有较高的成像质量。

参 考 文 献

- Xing Hui. Method of adjusting the line array direction of the time delay integration CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912006.
邢 辉. 时间延迟积分 CCD 线阵方向的调整方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912006.
- He Xiaojun, Wang Jinling, Jin Guang. Analysis on effect of camera setting way on pushbroom imaging experiment [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(9): 1354-1360.
贺小军,王金玲,金光. 相机摆放方式对推扫成像试验的影响分析[J]. *宇航学报*, 2012, 33(9): 1354-1360.
- Qu Hongsong, Zhang Ye, Jin Guang. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1896-1903.
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*, 2010, 18(8): 1896-1903.
- Yang Xiubing, Jiang Li, Jin Guang. Design and analysis of CMOS camera based on TDI in digital domain to realize high-resolution staring imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0911004.
杨秀斌,姜 丽,金光. 数字域时间延迟积分时间 CMOS 相机高分“凝视”成像设计分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(9):

- 0911004.
- Ren Huanhuan, Ruan Ping, He Jianwei, *et al.*. Study of the radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3467-3480.
任焕焕,阮 萍,何建伟,等. TDI CCD 空间立体相机辐射定标研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3467-3480.
- Tao Shuping, Jin Guang, Qu hongsong, *et al.*. Design and analysis of CMOS camera based on time delay and integration in digital domain to realize spatial high-resolution imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0411001.
陶淑苹,金 光,曲宏松,等. 实现空间高分辨成像的数字域时间延迟积分 CMOS 相机设计及分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0411001.
- Yue Junhua, Li Yan, Wu Xueying, *et al.*. Correction of imaging non-uniformity for multi-TDICCD mosaic camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(12): 3084-3088.
岳俊华,李 岩,武学颖,等. 多 TDI-CCD 拼接相机成像非均匀性的校正[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 3084-3088.
- Li Guoning, Liu Yanyan, Jin Longxun, *et al.*. Automatic test system for static transfer function of the big visual field time delay integration charge coupled device camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3171-3176.
李国宁,刘妍妍,金龙旭,等. 大视场时间延迟积分电荷耦合器件相机静态传递函数自动测试系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3171-3176.
- Wang Chong, You Zheng, Xing Fei, *et al.*. Image motion velocity field for wide view remote sensing camera and detectors exposure integration control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511002.
王 翀,尤 政,邢 飞,等. 大视场空间遥感相机的像速场及图像传感器曝光积分控制[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0511002.
- Xue Xucheng, Li Hongfa, Guo Yongfei. Anti-crosstalk techniques for high-speed CCD imaging circuit [J]. *Chinese Optics*, 2012, 4(6): 611-616.
薛旭成,李洪法,郭永飞. 高速 CCD 成像电路抗干扰技术[J]. *中国光学*, 2012, 4(6): 611-616.
- Qu Hongfeng, Wang Xiaodong, Xu Shuyan, *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.
曲洪丰,王晓东,徐抒岩,等. 多 TDICCD 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.
- Zheng Junli, Ying Qiheng, Yang Weili. *Signal and System* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
郑君里,应启珩,杨为理. *信号与系统*[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- Zhang Guixiang, Jin Guang, Zheng Lianglin, *et al.*. Design of high-speed and multi-channel CCD image data processing and transmission system [J]. *Chinese J Liquid Crystal and Display*, 2011, 26(3): 397-403.
张贵祥,金 光,郑亮亮,等. 高速多通道 CCD 图像数据处理与传输系统设计[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(3): 397-403.
- R D Fierte, T Tantaló. Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems [J]. *Opt Eng*, 2001, 40(4): 574-585.
- Wan Zhi, Ren Jianwei, Li Xiansheng, *et al.*. Analysis of signal-to-noise ratio for remote sensing TDICCD camera based on radiative transfer model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 497-500.
万 志,任建伟,李宪圣,等. 基于辐射传输模型的 TDICCD 遥感相机信噪比分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 497-500.