

数字域时间延迟积分时间 CMOS 相机高分“凝视” 成像设计分析

杨秀彬¹ 姜 丽² 金 光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 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 为实现凝视卫星高分跟踪成像,设计了数字域时间延迟积分(TDI)互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器在凝视姿态下的成像匹配模型,推导了卫星凝视跟踪成像时相对轨道坐标系的姿态变化,采用坐标变换方法实时计算其在凝视过程中随姿态变化的行转移时间,利用蒙特卡罗方法统计计算了凝视模式下姿态指向精度和稳定度对成像的影响。利用数字域 TDI CMOS 原理样机和小卫星姿态控制系统全物理仿真平台对成像进行了仿真分析。结果表明,卫星的姿态控制精度在成像过程中会引起纵向的像移速度失配和横向匹配的残余像移,成像积分级数越高,图像信噪比越大。积分级数的增加对卫星姿态提出较高要求,仿真平台姿态角和姿态角速度控制精度分别优于 0.05° , $0.005^\circ/\text{s}$ 时,采用积分级数为 48 级能较好地满足成像质量要求。

关键词 成像系统;时间延迟积分;互补金属氧化物半导体;凝视成像;调制传递函数;信噪比

中图分类号 TP386.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0911004

Design and Analysis of CMOS Camera Based on TDI in Digital Domain to Realize High-Resolution Staring Imaging

Yang Xiubin¹ Jiang Li² Jin Guang¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

² School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130023, China

Abstract The imaging matching model of the digital domain time-delay integral (TDI) complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) sensor under the staring gesture is designed in order to realize high-resolution staring imaging, attitude which satellite changes relative to orbital coordinate system staring on satellite staring tracing imaging is derived. The coordinate transformation method is used to real-time compute the time of the line transfer process in the staring, the method of Monte Carlo is used to statistically calculate the influence of imaging under the satellite's attitude point precision and stability in the mode of staring imaging. The TDI CMOS prototype and the minitype three-axis air bearing table constructed for attitude control are used to simulate the digital domain TDI CMOS staring imaging. Experimental results show that the satellite's attitude control accuracy will cause the vertical image velocity mismatch and the residual image of transverse matching in the process of imaging. The higher imaging integral series is, the greater the signal-to-noise ratio (SNR) of the image will be. Integral series increase has a higher requirements to the satellite attitude. The control accuracy of the attitude angles and attitude angular velocity of the staring imaging simulation platform is better than 0.05° and $0.005^\circ/\text{s}$, the integral series 48 can meet the image-quality requirement.

Key words imaging systems; time-delay integral; complementary metal-oxide-semiconductor; staring imaging; modulation transfer function; signal-to-noise ratio

OCIS codes 110.2960; 110.3000; 110.3055

收稿日期: 2012-03-23; 收到修改稿日期: 2012-04-27

基金项目: 国家 863 计划(O93J32F090)和国家自然科学基金青年基金(60902067)资助课题。

作者简介: 杨秀彬(1982—),男,助理研究员,主要从事空间光学相机成像模式设计像移补偿分析方面的研究。

E-mail: yangxiubin@mail.nankai.edu.cn

1 引 言

随着航天事业发展,对地观测卫星的时间分辨率和空间分辨率要求越来越高,“凝视”卫星是具备可以连续观察光学载荷视场内景物的变化,获得比传统的对地高分推扫成像小卫星更多的关于目标地区的动态信息等独特特点的一种新型对地观测卫星。“凝视”卫星的“凝视”模式是指在卫星沿轨道运动过程中,虽然卫星与目标区域的相对位置不断变化,但通过姿态控制系统调整卫星姿态,可使卫星中的光学载荷光轴始终指向地球上的指定目标区域,从而光学载荷可以对目标区域进行连续成像,因此“凝视”成像具备很高的时间分辨率。

现阶段,高分成像需要使用多级时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)传感器动态推扫成像提高信噪比,在“凝视”成像过程中,卫星和地球之间没有相对运动,探测器的积分时间不受卫星运动速高比的限制,根据 TDI CCD 传感器的设计,多级 TDI CCD 在凝视成像过程不能进行纵向像移速度匹配,多级 TDI CCD 电荷无法累积。因此,凝视卫星主要采用面阵 CCD 进行凝视成像或“太空视频录像”的方式获得信息,由于高分辨力相机焦距很长,曝光时间较短,这种方式成像无法满足高信噪比要求。

随着互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器数字域 TDI 成像系统的设计研究,利用现场可编程门阵列(FPGA)强大的处理能力使 CMOS 在数字域实现 TDI 的工作方式可以轻松满足静态实时成像和动态扫描成像两方面的需求。本文利用数字域 TDI CMOS 相机其 FPGA 数字域操作优势,可以解决 TDI CCD 无法应用于空间凝视卫星高分辨成像的难题,结合凝视卫星在轨凝视成像的姿态变化,提出了数字域 TDI CMOS 相机凝视成像数学模型,分析了姿态变化对 CMOS 传感器数字域 TDI 功能产生的影响,理论推导和实验验证了方案的可行性。

2 数字域 TDI CMOS 凝视成像数学模型

2.1 “凝视”卫星成像姿态变化

为实现在卫星进动和地球自转情况下对运动目标的凝视跟踪,凝视成像只需要使得光学探测器的光轴始终指向目标 A,如图 1 所示。

为了实现对目标点的凝视观测,应使得探测器的光轴始终与观测矢量 C 重合,即矢量 S_3 。对于大多数对地观测卫星来说,光学探测器的光轴沿着星

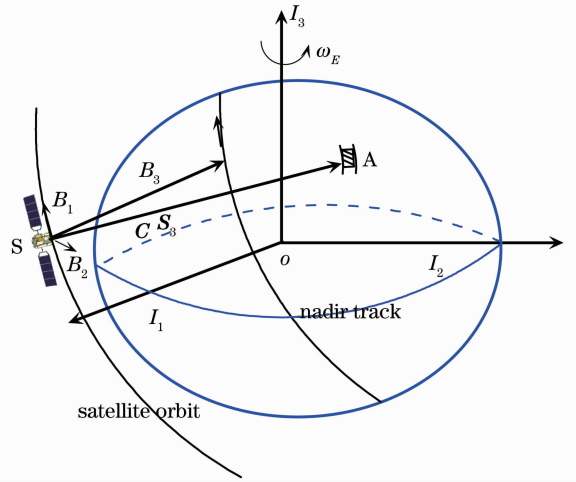


图 1 在轨凝视观测示意图

Fig. 1 Diagram of staring observation on orbit
体的偏航轴。欧拉轴垂直于星体的偏航轴,沿 Z 轴星体机动角速度为 0,也就是说对地凝视时偏航角 ψ 的取值不唯一。按照 1-2-3 转序旋转,可以得到凝视时卫星本体坐标系相对于轨道坐标系的期望横滚角 φ_c 和期望俯仰角 θ_c 的取值以及星体在轨道坐标系表示的角速度 ω_c [1~3]:

$$\varphi_c = \arcsin[2(q_{c0}q_{c2} + q_{c1}q_{c3})], \quad (1)$$

$$\theta_c = \arctan \frac{2(q_{c2}q_{c3} - q_{c0}q_{c1})}{q_{c0}^2 - q_{c1}^2 - q_{c2}^2 + q_{c3}^2}, \quad (2)$$

$$\omega_c = 2E^T(Q_c)\dot{Q}_c, \quad (3)$$

式中 $Q_c(q_{c0}, q_{c1}, q_{c2}, q_{c3})$ 为星体相对轨道坐标的姿态四元数。

2.2 卷帘数字域 TDI 算法

CMOS 卷帘数字域 TDI 原理如图 2 所示,算法包括两部分:计算满足后端数字域叠加要求的传感器时序参数,利用 FPGA 控制 CMOS 传感器按图 2 时序工作;利用 FPGA 控制数字域各帧像素阵列列

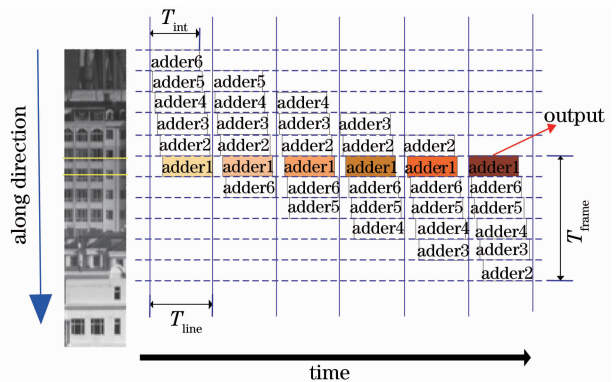


图 2 卷帘数字域 TDI 原理图

Fig. 2 TDI principle of roll shutter in digital domain

向对应像素逐行叠加,得到 TDI 图像^[4~12]。

凝视成像过程卫星和地球之间没有相对运动,偏流角大小等于零,TDI 工作方式清晰成像的前提是像移速度与推扫速度严格匹配,因此要获得清晰图像,一个 TDI 行周期内面阵 CMOS 传感器移动的距离须等于一个传感器像素尺寸(设传感器像素尺寸为 $a \times a$):

$$\mathbf{v}_0 T_{\text{line,TDI}} = \mathbf{a}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{v}_0 为 CMOS 传感器的行向速度, $T_{\text{line,TDI}}$ 为 TDI 行周期。

在凝视成像过程中,卫星凝视跟踪的姿态角和姿态角速度时刻变化,范围波动很大,而 CMOS 传感器行周期 T_{TDI} 会随着卫星姿态的大角度机动大范围变化,需要实时计算面阵 CMOS 传感器最佳行周期 T_{TDI} ,行周期计算采用齐次坐标变化方法,该方法可以将卫星的姿态实时引入到行周期内。方法如下:将被摄景点在地理坐标系下的矢量 $[g_1, g_2, g_3]$ 通过建立从地面景物到像面的 5 个坐标系,进行线性变换,构造各参量的像面位置方程、像面速度方程,推导出像面上像移速度矢的计算公式。从地理坐标系变换到像面坐标系过程如图 3 所示。其中 R

为相对于地心的地球半径; H 为被摄景物处,卫星的轨道高度; h 为被摄景物处的地物地形高度; Ω 为飞船轨道运动相对地心的角速率; γ_0 为摄影时刻,在轨道平面,卫星到升交点之间所对应的中心角; i_0 为轨道倾角; f 为相机镜头焦距; $\varphi_0, \theta_0, \psi_0$ 分别为卫星坐标系相对于轨道坐标系在摄影时刻的偏航、俯仰和横滚姿态角; $\dot{\varphi}_0, \dot{\theta}_0, \dot{\psi}_0$ 分别为卫星坐标系相对于轨道坐标系的偏航、俯仰和横滚姿态角速度。

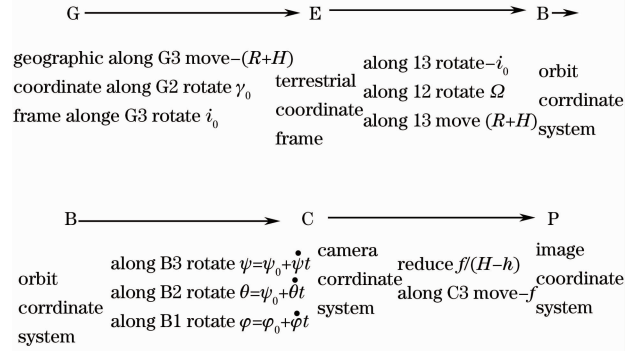


图 3 坐标变换过程图

Fig. 3 Process of coordinate transformations

从变换位置方程可以得到从地理坐标系到像面坐标系的变换方程,即像面位置方程:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{(H-h)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f}{(H-h)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{f}{(H-h)} & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\psi_0 + \dot{\psi}t) & \sin(\psi_0 + \dot{\psi}t) & 0 & 0 \\ -\sin(\psi_0 + \dot{\psi}t) & \cos(\psi_0 + \dot{\psi}t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_0 + \dot{\theta}t) & 0 & -\sin(\theta_0 + \dot{\theta}t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta_0 + \dot{\theta}t) & 0 & \cos(\theta_0 + \dot{\theta}t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_0 + \dot{\varphi}t) & \sin(\varphi_0 + \dot{\varphi}t) & 0 \\ 0 & -\sin(\varphi_0 + \dot{\varphi}t) & \cos(\varphi_0 + \dot{\varphi}t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -H_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & \sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & 0 & -\sin \gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma_0 & 0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

将像面矢量对时间 t 微分后,求出 $t=0$ 的值,即可得到像面上各点的像移速度方程:相机像面的前向像移速度 V_{P_1} 和相机像面的横向像移速度 V_{P_2} 和行周期 T_{TDI} 。

$$V_{P_1} = \frac{dP_1}{dt} \Big|_{t=0}, \quad (6)$$

$$V_{P_2} = \frac{dP_2}{dt} \Big|_{t=0}, \quad (7)$$

$$\beta = \arctan(V_{P_2}/V_{P_1}), \quad (8)$$

$$T_{\text{TDI}} = a/V_{P_1}. \quad (9)$$

当 $V_{P_2} = 0$ 时,无横向像移速度,偏流角度 $\beta = 0$ 。

2.3 成像分析

虽然“凝视”卫星成像过程中卫星和地球之间没有相对运动,但卫星存在俯仰、偏航和横滚方向姿态角与姿态角速度的控制误差,使 TDI CMOS 行转移速率和实际的地面目标在像面上的像的移动速度不同步。

卫星的姿态参数精度是影响像移速度失配的重要因素。成像光学系统中,满足 TDI CCD 成像需求时,要求在 TDI CCD 曝光积分级数第一级和最后一

级内相差不多于 0.3 pixel,TDI CCD 成像积分级数由光学信噪比决定。相差的 0.3 pixel 除以积分级数转化为偏流误差角度,如表 1 所示。因此,姿轨参数对成像的影响要小于偏流角极限误差。由于数字域 TDI CMOS 凝视成像数学模型比较复杂,求解微分方程过程非常繁琐,本文利用蒙特卡洛方法^[13~15],对卫星三轴姿态角与姿态角速度等相关参数及其误差的随机分布进行抽样,分布如表 2 所示,带入像移速度矢量计算(6)~(8)式,统计计算结果,得到卫星姿态对偏流角度和数字域 TDI CMOS 行周期计算误差分布,如图 4、5 所示,其中图 4、5 的纵坐标为相应数据的统计数量,图 4 横坐标为偏流角估值误差,其中偏流角极限误差为 $15'$,图 5 横坐标为像移速度匹配估值误差,像移速度匹配极限误差为 $\pm 0.64\%$ 。

表 1 偏流角与像移速度极限误差允许值表

Table 1 Margin of deviant angle and imaging velocity limited error

Parameters	Value				
TDI CCD Integral series (M)	96	64	48	32	16
Total error value ($\Delta\beta$) / ($'$)	± 11	± 16.5	± 22	± 32	± 66
Total error value ($\Delta v_1/v$) / %	0.3	0.49	0.63	0.93	1.8

表 2 误差的随机分布计算

Table 2 Random-distribution computation of errors

Index i, j	Uniform distribution random matrix $S_{i,j}$	Normal distribution random matrix $T_{i,j}$	Max	Random error
1	$S_{i,1}$		0.1°	$\phi_0 = 2(S_{i,1} - 0.5)\phi_{\max}$
2	$S_{i,2}$		0.1°	$\theta_0 = 2(S_{i,2} - 0.5)\theta_{\max}$
3	$S_{i,3}$		0.1°	$\psi_0 = 2(S_{i,3} - 0.5)\psi_{\max}$
4	$S_{i,4}$		$0.05^\circ/\text{s}$	$\dot{\phi} = 2(S_{i,4} - 0.5)\dot{\phi}_{\max}$
5	$S_{i,5}$		$0.05^\circ/\text{s}$	$\dot{\theta} = 2(S_{i,5} - 0.5)\dot{\theta}_{\max}$
6	$S_{i,6}$		$0.05^\circ/\text{s}$	$\dot{\psi} = 2(S_{i,6} - 0.5)\dot{\psi}_{\max}$
7		$T_{i,12}$	0.05°	$\Delta\phi = \text{Sign}(\cdot) T_{i,12} \cdot \sigma_\phi$
8		$T_{i,13}$	0.05°	$\Delta\theta = \text{Sign}(\cdot) T_{i,13} \cdot \sigma_\theta$
9		$T_{i,14}$	0.05°	$\Delta\psi = \text{Sign}(\cdot) T_{i,14} \cdot \sigma_\psi$
10		$T_{i,15}$	$0.005^\circ/\text{s}$	$\Delta\dot{\phi} = \text{Sign}(\cdot) T_{i,15} \cdot \sigma_{\dot{\phi}}$
11		$T_{i,16}$	$0.005^\circ/\text{s}$	$\Delta\dot{\theta} = \text{Sign}(\cdot) T_{i,16} \cdot \sigma_{\dot{\theta}}$
12		$T_{i,17}$	$0.005^\circ/\text{s}$	$\Delta\dot{\psi} = \text{Sign}(\cdot) T_{i,17} \cdot \sigma_{\dot{\psi}}$

2.4 误差引起的像移及其传递函数

由于数字域 TDI CMOS 成像过程有横向与纵向像移,传递函数分为横向传递函数与纵向传递函数。推扫方向像移由不可补偿的像移和可补偿的像移组成。

不可补偿的像移:像素在采集光信号过程中产生的像移。CMOS 成像相当于狭缝扫描成像,像移

量即为像素宽度。这种像移是不能补偿的,由此产生的调制传递函数(MTF)为

$$f_{\text{MTF-P}} = \frac{\sin(\pi d V_N)}{\pi d V_N}, \quad (10)$$

式中 d 为像素宽度, V_N 为奈奎斯特频率。

可补偿的像移:由于卫星姿态角变化以及姿态角速度变化因素导致的数字域 TDI CMOS 行转移

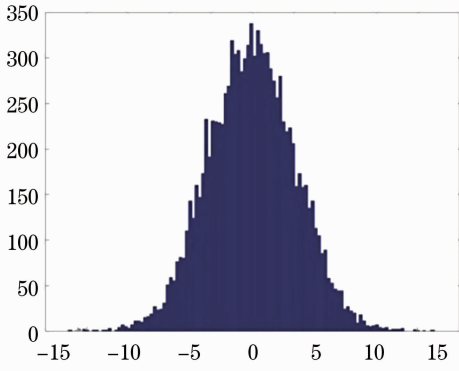


图4 偏流角估值误差分布图

Fig. 4 Estimated error distribution of deviant angle

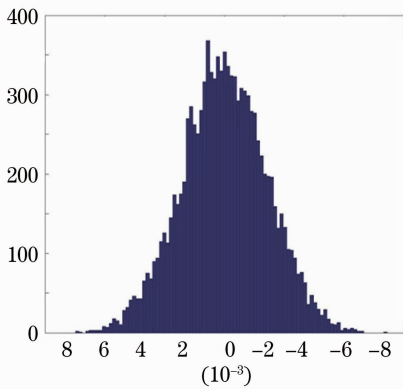


图5 像移速度匹配误差分布图

Fig. 5 Matching error distribution of imaging velocity

速率和实际的地面目标在靶面上的像的移动速度不同步造成的像移,它产生的 MTF 匹配残余误差为

$$f_{\text{MTF-M}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} M \frac{V_c}{V_N} \frac{\Delta V_p}{V_p}\right)}{\frac{\pi}{2} M \frac{V_c}{V_N} \frac{\Delta V_p}{V_p}} \quad (11)$$

为对比图像需要,式中取特征频率 $V_c = V_p$; 数字域 TDI 级次 M ; $\Delta V_p/V_p$ 为像移匹配的速度残余误差, $f_{\text{MTF-P}}$ 为沿推扫方向的 MTF,纵向像移产生的在扫描方向上的 MTF 为

$$f_{\text{MTF-L}} = f_{\text{MTF-P}} \cdot f_{\text{MTF-M}}, \quad (12)$$

横向像移产生在垂直于扫描方向上的,由横向匹配的残余像移产生的 MTF 值为

$$f_{\text{MTF-H}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} M \frac{V_c}{V_N} \frac{\Delta d}{d}\right)}{\frac{\pi}{2} M \frac{V_c}{V_N} \frac{\Delta d}{d}}, \quad (13)$$

式中 $\Delta d/d$ 为横向方向上存在由于偏流角匹配误差产生的横向匹配的残余误差,分析得到误差引起的像移及其传递函数分析值如表 3 所示。

表 3 误差引起的像移及其 MTF 分析值

Table 3 Analysis value of the imaging motion and MTF caused by error

$f_{\text{MTF-M}}$	0.9616
$f_{\text{MTF-L}}$	0.6154
$f_{\text{MTF-H}}$	0.9818

3 实验仿真与分析

利用基于小型三轴气浮台的小卫星姿态控制系统和基于卷帘数字域 TDI 技术的 IBIS5-B-1300 CMOS 成像系统进行仿真实验,如图 6 所示。靶标景物如图 7 所示,小型三轴气浮转台的姿态角确定精度与姿态稳定度分别优于 $0.05^\circ, 0.005^\circ/\text{s}$ 。数字域 TDI CMOS 相机选择像素尺寸为 $6.7 \mu\text{m}$, 焦距为 105 mm , 帧频大于 648 frame/s 的 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的 CMOS 相机,可以满足 $1 \sim 96$ 级积分成像要求。仿真成像如图 8,9 所示,相对应的成像像移调制函数和图像的互相关相似性测度 ρ 如表 4 所示。

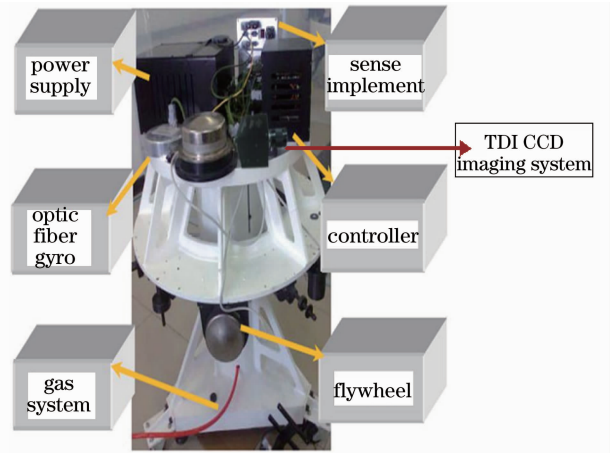


图6 小卫星全物理仿真系统实物图

Fig. 6 Practicality of small satellite physical simulation system



图7 靶标景物图像

Fig. 7 Hypothetical scenery picture of the target

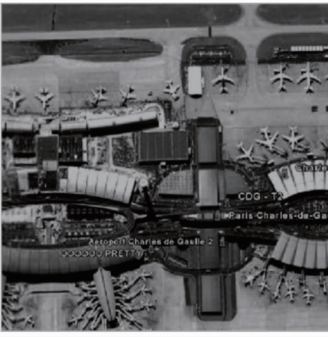


图 8 积分级数 1 级姿态精度为 $0.05^\circ, 0.005^\circ/\text{s}$ 时的仿真成像

Fig. 8 Simulated image at one integral series and the control accuracy of the attitude angles and attitude angular velocity are 0.05° and $0.005^\circ/\text{s}$

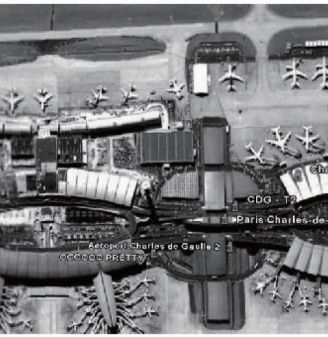


图 9 积分级数 48 级姿态精度为 $0.05^\circ, 0.005^\circ/\text{s}$ 时的仿真成像

Fig. 9 Simulated image at 96 integral series and the control accuracy of the attitude angles and attitude angular velocity are 0.05° and $0.005^\circ/\text{s}$

表 4 仿真图像分析值

Table 4 Analysis value of the simulated image

Integral series	$f_{\text{MTF-L}}$	$f_{\text{MTF-H}}$	ρ
1	0.6366	0.9989	0.85
48	0.6121	0.9806	0.9532

从图 8 和图 9 对比结果可看到,数字域 TDI CMOS 相机成像积分级数越高,图像信噪比越大。根据表 3 可知,高积分级数成像要求严格的横向残余像移和纵向像移速度匹配,需要卫星具备高精度姿态控制指向精度和稳定度。凝视成像仿真平台姿态角和姿态角速度控制精度分别优于 $0.05^\circ, 0.005^\circ/\text{s}$ 时,采用积分级数为 48 级时横向残余像移和纵向像移速度匹配能够达到 $0.9806, 0.6162$ 。

4 结 论

通过对凝视卫星姿轨运动理论的分析,设计的数字域 TDI CMOS 传感器在凝视姿态下的成像匹配模型与姿态指向精度和稳定度对成像的影响分析能较好地匹配 CMOS 传感器数字域 TDI 功能产生的行周期,能较好地实现凝视卫星高分跟踪成像。数字域 TDI CMOS 相机在“凝视”成像上明显改善了成像质量,提高了成像信噪比,为 CMOS 相机数字域 TDI 技术在空间高分辨成像、微小卫星等领域的应用奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 R. H. Triharjanto, A. Widipaminto. Video camera system on LAPAN-TUBSAT micro-satellite [C]. Proceeding of Asian Space Conference, Singapore, 2007. 1~5
- 2 W. H. Steyn. A view finder control system for an earth observation satellite [J]. *Aerospace Sci. & Technol.*, 2006, **10**(3): 248~255
- 3 Sun Zhiyuan, Jin Guang, Zhang Liu *et al.*. Simulation and experiment on attitude tracking control of small TV satellite[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(11): 2715~2723
孙志远, 金光, 张刘等. 视频小卫星凝视姿态跟踪的仿真与实验[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(11): 2715~2723
- 4 Pain, Bedabrata, Cunningham *et al.*. CMOS Image Sensors Capable of Time Delayed Integration[R]. NASA Technology Report, 2001.04
- 5 Gao Jun, Lu Wengao, Liu Jing *et al.*. High performance linear 288×4 CMOS readout integrated circuit with time delay integration [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, **40**(3): 402~406
- 6 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): 3476~3480
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): 3476~3480
- 7 Fu Qiuyu, Lin Qingyu, Zhang Wancheng *et al.*. A high-speed CMOS image sensor for real-time vision chip[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0828001
付秋瑜, 林清宇, 张万成等. 面向实时视觉芯片的高速 CMOS 图像传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0828001
- 8 W. G. Lu, Z. J. Chen, J. Tang *et al.*. A high efficient analog charge delay line for high performance CMOS readout integrated circuits with TDI function[J]. *IEEE ASIC*, 2007. 502~505
- 9 Gérald Lepage, Jan Bogaerts, Guy Meynants. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2009, **56**(11): 2524~2532
- 10 Qu Hongsong, Zhang Ye, Jin Guang. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain [J]. *Optics & 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
- 11 Liu Zhi, Chai Hua, Li Nana. Shutter mode of CMOS image sensor and its application[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 2017~2023
刘智, 柴华, 李娜娜. CMOS 图像传感器中卷帘式快门特性及其应用[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8): 2017~2023

- 12 Zhang Liang, Wang Jianyu, Jia Jianjun *et al.*. Design and performance of fine tracking system based on CMOS for quantum communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205008
张亮, 王建宇, 贾建军等. 基于 CMOS 的量子通信精跟踪系统设计及检验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205008
- 13 Wang Jiaqi, Yu Bing, Yang Changxiang *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling, error budget and synthesis [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **3**(7): 414~417
- 14 Wu Xingxing, Liu Jinguo. Image motion compensation of three line stereo mapping camera using earth ellipsoid[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1794~1800
武星星, 刘金国. 应用地球椭球的三线阵立体测绘相机像移补偿[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(8): 1794~1800
- 15 Yang Xiubin, He Xiaojun, Zhang Liu *et al.*. Effect and simulate of the deviant angle erroron TDI CCD cameras image [J]. *Opo-Electronic Engineering*, 2008, **35**(11): 45~50
杨秀彬, 贺小军, 张刘等. 偏流角误差对 TDI CCD 相机成像的影响与仿真[J]. *光电工程*, 2008, **35**(11): 45~50

栏目编辑：李文喆