数字域 TDI CMOS 相机调偏流方法

陶淑苹

(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：为了解决现有的机械式调偏流的像移补偿方法存在的，需要复杂的调偏流机构所带来的问题,提出一种适用于数字域 TDI CMOS 遥感相机的图像调偏流方法。该方法基于数字图像,通过配准图像像素在数字域对位累加来调整偏流角的失配量。最后为了验证提出算法的有效性开展了成像实验,结果表明在 26.56°偏流角情况下直接成像的图像对比度传函为 0.132 8,而应用图像法调偏流后提升为 0.444 7,证明图像调偏流方法能明显改善成像效果,可行有效。该方法摆脱调偏流机械结构思路的限制,精度高而又简单易行,无需要任何附加硬件开支,有助于改进目前国内现有的像移补偿体系。

关键词：图像；　时间延迟积分；　数字域；　遥感

中图分类号:TP386.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1007-2276(2014)S-0214-05

Drift angle adjusting method for CMOS cameras based on TDI in digital domain

Tao Shuping

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To resolve the problem that brought by the complex drift angle adjusting structure in the current image motion compensation method, a new drift angle adjusting method based on image was proposed in this paper, which was suitable for the CMOS remote sensing cameras based on TDI in digital domain. The method was based on digital images, and accumulates the matching image pixel in digital domain to adjusts the image motion mismatch caused by the drift angle. Finally, in order to verify the effectiveness of the proposed algorithm, the imaging experiment was conducted. And the results show that when the drift angle is 26.56 degrees, the of the image gotten directly before using the proposed algorithm is 0.132 8, while the contrast transfer function is increased to 0.444 7 after using the proposed method. So it proves that the drift angle adjusting method based on image can improve imaging results significantly and is feasible and effective. The proposed method gets rid of the limit of the idea of adjusting the drift angle by mechanical structure, and it is of high precision but simple, without the need for any additional hardware expenses, which is helpful to improve the current image motion compensation system.

Key words: image;　time delayed and integration;　in digital domain;　remote sensing

收稿日期:2014-10-10;　**修订日期**:2014-11-15

基金项目:吉林省青年科研基金(201201010)

作者简介:陶淑苹(1986-),女,博士,主要从事空间遥感相机成像电子学方面的研究。Email: taoshuping-163@163.com

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0 引 言

TDI(Time Delayed and Integration,时间延迟积分)技术通过对同一目标多次曝光，在与推扫速度严格匹配时可大幅提高成像系统的灵敏度和信噪比。因此被广泛应用于高分辨力航天遥感、机器视觉、微光成像等众领域。目前航天高分辨遥感领域普遍采用 TDI CCD 作为图像传感器[1]。然而,TDI CCD 在应用中不断暴露出诸多缺陷,诸如体量大、功耗大、积分级数不可连续调整、在轨自主调焦困难、依赖复杂的机械调偏流机构等,这些都是由 TDI CCD 器件自身结构特点造成的固有缺陷，因此拥有一系列优势的 CMOS 图像传感器逐渐受到研究人员的重视，并且为了使 CMOS 图像传感器适用于高分辨航天遥感领域,提出了数字域 TDI CMOS 相机,即在 CMOS 相机面阵成像的基础上在数字域完成对应像素的时间延迟累加。显然,数字域 TDI 操作灵活且易实现[2-4]。

然而，不管是 TDI CCD 相机还是数字域 TDI CMOS 相机,只要 TDI 成像模式必然存在像移失配,这是由于卫星在轨的姿态、轨道参数实时变化,星下点的经纬度也不断改变，导致像平面的像移速度矢量不固定;在敏捷成像模式下像移现象更为显著[5]。因此在航天相机推摆扫成像过程中必须有精密的像移补偿机制，尤其在敏捷成像时还要求有甚高的卫星姿态稳定度，否则像移失配现象将引起光学系统传递函数下降,甚至使图像发生畸变和模糊。

目前,航天相机的调整偏流角的方法是:分析产生像移的各个环节,计算出像移速度矢,进而得到偏流角，然后在调偏流机构控制下驱动焦面至合适的位置[6-8]。这种方法实现起来复杂,不仅增加了额外的调偏流机构和控制机构，而且对调偏流控制机构的精度和实时性提出很高的要求[9-11]。针对以上问题，论文提出一种数字域 TDI CMOS 遥感相机的图像调偏流方法,从而实现简单易行地高精度调偏流。

1 图像调偏流算法

数字域 TDI CMOS 相机动态成像如图 1 所示。为便于分析,首先定义图像坐标系。定义推扫方向对应图像坐标轴为 **X**，垂直于推扫方向的图像坐标轴对应 **Y**。则 **X** 方向像素对应于行数,取决于推扫成像时间和积分时间长短。**Y** 向像素对应于列数,一旦传感器选用的成像窗口确定，那么 **Y** 方向的像素个数也就确定。以 $P(x,y)$表示读取地面图像一次成像对应的像素值,并假设 CMOS 相机图像像素数组 $P_k(x,y)$,k 代表 CMOS 传感器扫过的行数,即累加次数。

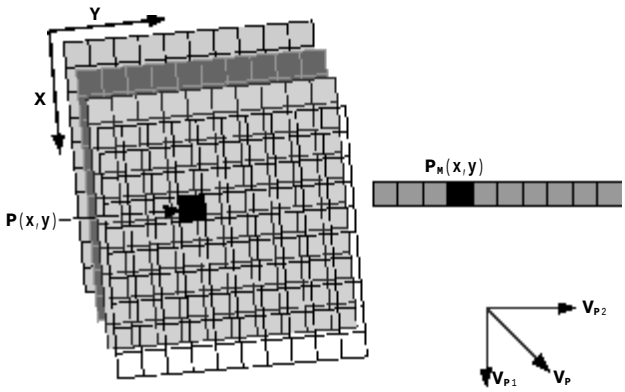


图 1 数字域 TDI CMOS 推扫成像

Fig.1 Push-broom imaging by CMOS cameras based on TDI in digital domain

然而,由于偏流角(横向像移速度)和纵向像移速度匹配残差的存在，使得数字域 TDI CMOS 相机在推扫成像过程中 **X** 向与 **Y** 向的速度不再匹配。其中纵向像移速度 V_{P1} 和横向像移速度 V_{P2} 的合成矢量,即为像移速度矢 V_P。对像面位置方程的垂轨分量关于时间 t 求导，计算像移速度矢的角度偏差对应的像素个数:

$$n_2=\frac{\left.\frac{dP_2}{dt}\right|_{t=0}}{a} \tag{1}$$

像移速度矢的角度偏差在一个行周期内产生的像素偏差个数为:

$$n_2'=\frac{\left.\frac{dP_2}{dt}\right|_{t=0}}{a}\cdot T_{line} \tag{2}$$

式中:a 为像元尺寸;T_{line} 为行周期。

为了使分析简单，假设一个行周期内沿轨方向的像移量始终等于像元尺寸，因此得到应用像移配准的数字域 TDI 计算公式为:

$$\begin{aligned}N_{signal}(k,M,j)=&P_k(1,j+(M-1)n_2')+\cdots\\&+P_{k-1}(2,j+(M-2)n_2')+\cdots\\&+P_{k-(M-2)}(M-1,j+n_2')+\cdots\\&+P_{k-(M-1)}(M,j)\end{aligned} \tag{3}$$

在某些应用场合需要对感兴趣目标区域回扫成

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

像，此时应用 TDI CCD 遥感相机不能满足要求，除非将整个焦平面偏流角调整 180°。众所周知，TDI CCD 遥感相机通常只能单向扫描清晰成像，即要求扫描方向与电荷转移方向一致，否则会引起图像混叠模糊。而数字域 TDI 可以在不调整焦平面位置的情况下仍清晰成像，其 TDI 计算公式为：

$$\mathbf{N}_{signal}(k,M,j)=\mathbf{P}_k(M,j)+\mathbf{P}_{k-1}(M-1,j)+\cdots+\mathbf{P}_{k-(M-2)}(2,j)+\mathbf{P}_{k-(M-1)}(1,j) \tag{4}$$

综合上述，推导出应用自适应像移配准算法的任意像移角度偏差的数字域 TDI 输出信号模型：

$$\mathbf{N}_{signal}(k,M,j)=\begin{cases}\mathbf{P}_k(1,j+(M-1)n_2')+\mathbf{P}_{k-1}(2,j+(M-2)n_2')+\cdots+\\ \mathbf{P}_{k-(M-2)}(M-1,j+n_2')+\mathbf{P}_{k-(M-1)}(M,j) & 0°\leqslant\beta\leqslant 90°\\ \mathbf{P}_k(M,j+(M-1)n_2')+\mathbf{P}_{k-1}(M-1,j+(M-2)n_2')+\cdots+\\ \mathbf{P}_{k-(M-2)}(2,j+n_2')+\mathbf{P}_{k-(M-1)}(1,j) & 90°\leqslant\beta\leqslant 180°\\ \mathbf{P}_k(M,j-(M-1)n_2')+\mathbf{P}_{k-1}(M-1,j-(M-2)n_2')+\cdots+\\ \mathbf{P}_{k-(M-2)}(2,j-n_2')+\mathbf{P}_{k-(M-1)}(1,j) & 180°\leqslant\beta\leqslant 270°\\ \mathbf{P}_k(1,j-(M-1)n_2')+\mathbf{P}_{k-1}(2,j-(M-2)n_2')+\cdots+\\ \mathbf{P}_{k-(M-2)}(M-1,j-n_2')+\mathbf{P}_{k-(M-1)}(M,j) & 270°\leqslant\beta\leqslant 360°\end{cases} \tag{5}$$

其中，将遥感相机正向扫描且没有角度偏差时定义为偏流角的 0°，沿垂轨方向且像素增加的方向为偏流角的 90°。基于上述分析，得到数字域 TDI CMOS 相机的图像调偏流方法流程如图 2 所示。

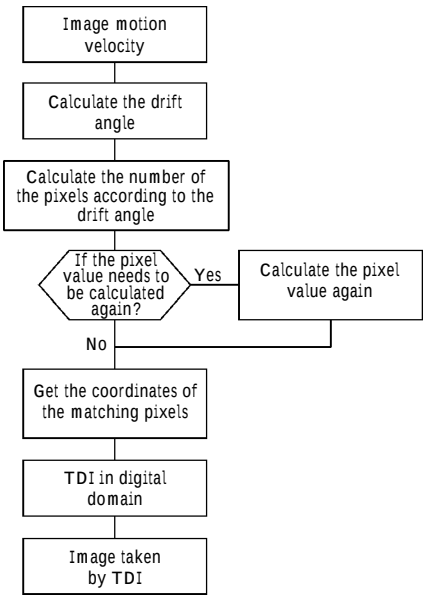


图 2 数字域 TDI CMOS 相机的图像调偏流流程图

Fig.2 Flow chart of image-based drift angle adjusting method for CMOS cameras based on TDI in digital domain

图 2 中，包含以下步骤：

(1)由像面位置方程对时间求导计算得到当前传感器的像移速度矢；

(2)计算得到偏流角及其像移对应的像素个数；

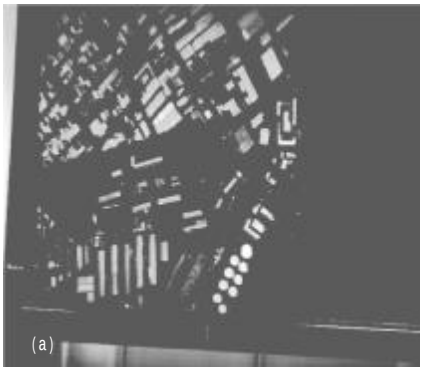
(3)设计图像像素配准模型，定位待累加像素的坐标点位置并二次计算图像像素灰度值；

(4)对配准的像素应用数字域 TDI 算法，得到匹配景物的时间延迟积分清晰图像。当下一帧图像到来，重新进入步骤(1)。

2 实验与分析

为了对数字域 TDI CMOS 相机图像调偏流方法进行进一步实现和验证，基于研制的 CMOS 相机原理样机，改进成像单元软件并开展成像实验。原理样机由 FPGA、CMOS 传感器、时序驱动电路、数据存储电路、数传电路等组成，其中 FPGA 选用 Xilinx 公司的 XC2V3000，CMOS 传感器为 CYPRESS 公司的全色面阵 IBIS5-B-1300。基于 FPGA 分别开发针对所选用 CMOS 传感器的数字域 TDI 算法软件和增加图像调偏流的数字域 TDI 算法软件，并可以通过控制指令灵活切换。

将相机摆放于一维成像转台，并沿方位轴将相机一侧垫高 1 cm，此时由于偏流角的存在，沿扫描方向的叠加像素对应关系发生改变，实验选用 32 级积分，应用图像调偏流算法前后获取图像分别如图 3 所示。其他条件不变，将一侧垫高高度升为 2 cm，此时获取图像如 4 所示。图 3 和图 4(a)为未应用图像调偏流算法的成像结果，图(b)为应用图像调偏流算法后的成像结果，观察图像可得，应用图像调偏流前倾斜角度越大，图像几何畸变越严重，而且图像越模糊，但是应用图像调偏流算法后可明显改善成像质量，极大消除了未配准像素累加产生的像移失配模糊。



PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

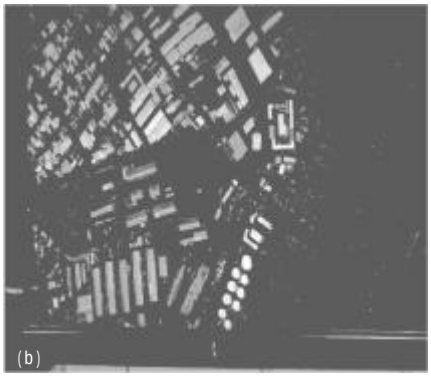


图 3 数字域 TDI CMOS 相机成像图像 1

Fig.3 Images 1 taken by CMOS cameras based on TDI in digital domain

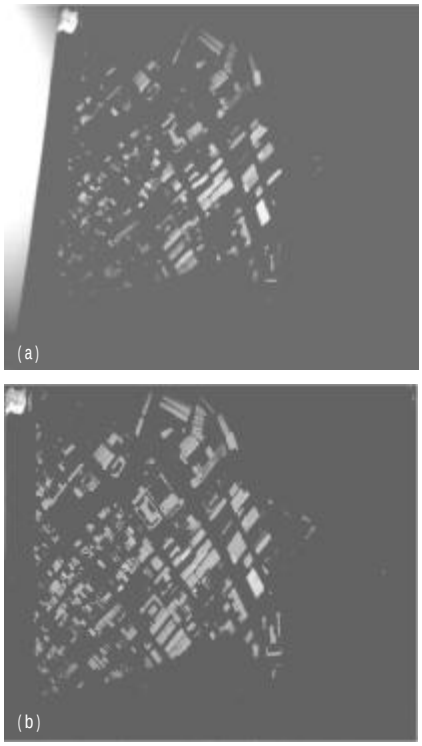


图 4 数字域 TDI CMOS 相机成像图像 2

Fig.4 Images 2 taken by CMOS cameras based on TDI in digital domain

为了定量验证论文提出的数字域 TDI CMOS 相机的图像调偏流方法，设定特定偏流角度的推扫成像实验。图 5 是数字域 TDI CMOS 相机角度偏差 26.56°的图像调偏流示意图。由图 5 可知,相邻两幅图像的绿色阴影区域对应相同的地面景物，此时若按照对应列像素叠加显然不可以，但是将当前帧的第 j+1 列与前帧的第 j 列像素叠加则可物像匹配,根据任意像移角度偏差的数字域 TDI 输出信号模型推导出该情况下 TDI 计算公式:

$$S=P_{k+(M-1)}(i-M+1,j+M-1)+\cdots+P_{k+(M-2)}(i-M+2,j+M-2)+\cdots+P_k(i,j)+P_{k+1}(i-1,j+1) \quad (6)$$

式中:S 为数字域 TDI 后的图像;$P_k(i,j)$表示第 k 帧图像的第 i 行、第 j 列像素。

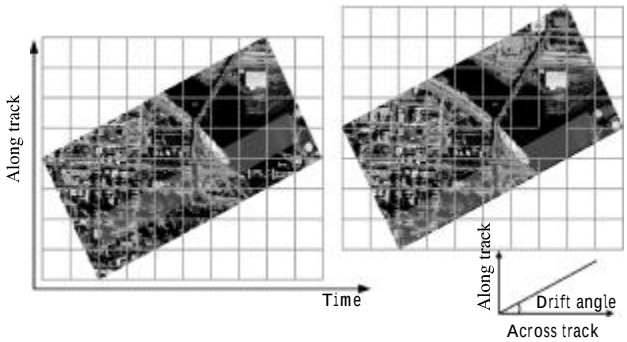


图 5 图像调偏流方法示意图

Fig.5 Schematic diagram of image-based drift angle adjusting method

图 6 是为了定量测试图像调偏流方法而设计的条纹靶标以及成像结果。其中靶标上半部分为等宽的水平黑白条纹，靶标下半部分为倾角 26.56°的等宽黑白条纹。传感器水平安装并与靶标保持相对静止。以静态条纹模拟动态推扫过程,因此等效于倾斜 26.56°安装的传感器对目标景物推扫成像,而对水平条纹成像等效于存在偏流失配且未应用图像调偏流的推扫成像。

实验采用 16 级积分成像。由图 4 下半部分的成像结果可知应用文中提出的图像调偏流方法能明显改善成像效果,可行有效。其中应用图像法调偏流的图像对比度传函为 0.444 7，而未应用的图像对比度传函只有 0.132 8。

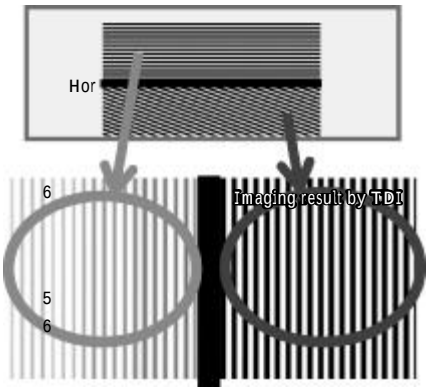


图 6 图像调偏流成像实验结果

Fig.6 Imaging result of the image-based drift angle adjusting method

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

4 结 论

文中利用数字域 TDI 的工作原理及其灵活的操作优势，将偏流失配计算转换为图像像素的位移量(m,n),然后通过图像之间配准像素累加加以补偿偏流失配量。最后基于提出的数字域 TDI CMOS 遥感相机的图像调偏流方法开展了成像验证实验，结果表明该方法能明显改善成像效果，可行有效,在 26.56°偏流角情况下可将图像对比度传函从未应用图像法调偏流的 0.132 8 提升为 0.444 7。图像调偏流方法省去了机械调偏流法所依赖的复杂调偏流机构和调偏流控制机构,直接从图像入手,通过配准图像像素在数字域对位累加来调整偏流角的失配量,实现简单,很适合航天 TDI 相机在轨偏流补偿,尤其满足未来卫星的一体化、集成化发展要求。

参考文献:

[1] 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. (in Chinese)
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.

[2] 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): 0411001-1-9. (in Chinese)
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): 0411001-1-9.

[3] Emst Bodenstorfer, Johannes Furtler, Jorg Brodersen, et al. High-speed line-scan camera with digital time delay integration [C]// Proceeding of SPIE-IS&T Electronic Imaging, 2007,6496: 1-10.E

[4] Gérald Lepage, Jan Bogaerts, Guy Meynants. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors [J]. Ieee Transactions on Electron Devices, 2009, 56(11): 2524-2533.

[5] Li Weixiong. Research on method of image motion compensation of space high resolution camera's collecting sense agilely [D]. Beijing: Chinese Academy of Since, 2011: 6-8. (in Chinese)
李伟雄. 高分辨率空间相机敏捷成像的像移补偿方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011: 6-8.

[6] Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, et al. Space optical remote sensoe image motion velocity vector computational modeling, error budget and synthesis [J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(7): 414-417. (in Chinese)

[7] Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, et al. [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1585-1589.
王家骐, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.

[8] Yang Xiubin, He Xiaojun, Zhang Liu, et al. Effect and simulation of the deviant angle error on TDI CCD cameras image[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(11): 45-56. (in Chinese)
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): 45-56.

[9] Li Youyi. Study of the drift angle control in a space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 10 (4): 402-406. (in Chinese)
李友一. 空间相机中的偏流角控制 [J]. 光学 精密工程, 2008, 10(4): 402-406.

[10] Gu Song, Wang Shaoju. Design and control of drift adjusting mechanism in space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 615-620. (in Chinese)
谷松, 王绍举. 空间相机调偏流机构的设计与控制[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 615-620.

[11] Yu Ping, Wu Weiping. Closed-loop simulation and testing of control cell of drift angle for space optical remote sensor in real time [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17 (11): 2800-2805. (in Chinese)
于平, 吴伟平. 空间光学遥感器偏流机构控制单元的闭环测试实时模拟检测 [J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2800-2805.

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com