

文章编号: 1007-4619 (2002) 01-0035-05

# 极轨星载 TDI CCD 相机的像移及恢复算法研究

陈 梁, 刘春霞, 龚惠兴

(中国科学院 上海技术物理研究所 上海 200083)

**摘 要:** 根据 TDI CCD 特殊的工作方式, 预测了由于地球自转而引起的极轨星载 TDI CCD 相机的特殊像移及其对图像的影响, 根据 TDI 像移产生的机理建立了数学模型, 并求出了像移恢复滤波器的数字表达式, 经过计算机仿真证明图像恢复算法有效。

**关键词:** TDI CCD; 像移; 图像处理

**中图分类号:** TP751.1      **文献标识码:** A

TDI CCD 器件是近几年发展起来的一种新型光电传感器, 因其具有特殊的结构和工作方式, 故与一般线阵 CCD 相比具有很高的响应度, 作为图像传感器在航天航空遥感中得到了越来越广泛的应用。在星载相机中采用 TDI CCD 器件作为焦平面探测器可以大大减小光学系统孔径, 从而减小相机重量和体积, 同时还具有很高的探测灵敏度, 因此采用 TDI CCD 器件的星载推帚式相机具有很大的优越性。

但由于 TDI CCD 的特殊工作方式, 将其应用于极轨卫星遥感中会产生由于地球自转而引起的像

移, 像移使图像混叠, 分辨率下降、目标边缘模糊、物体灰度失真及对比淡化, 因此像移图像恢复是极轨星载 TDI CCD 相机应用中必须解决的重要问题。

## 1 TDI CCD 的工作原理

TDI CCD 的结构像一个长方形的面阵 CCD 器件, 如图 1, 但从功能上说它是一个线阵 CCD 器件, 它的列数是一行的像元数, 它的行数为延迟积分级数  $N$ 。TDI CCD 采用了特殊的扫描方式, 它的工作

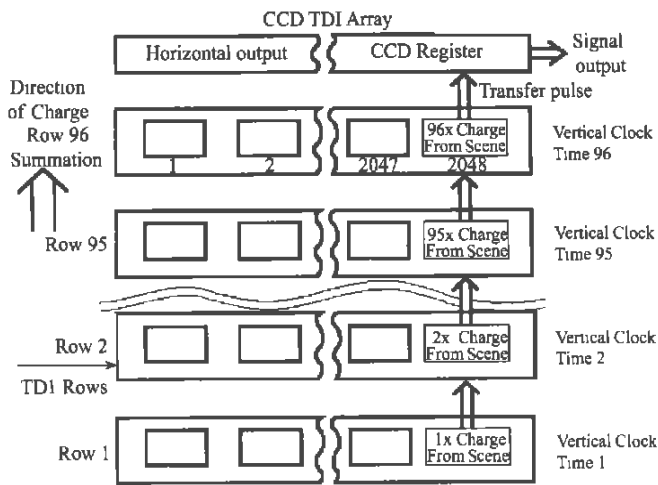


图 1 TDI CCD 的结构  
Fig. 1 Architecture of TDI CCD

收稿日期: 2000-10-24; 修订日期: 2001-02-12

作者简介: 陈梁(1974—), 男, 1999年毕业于西安电子科技大学技术物理系, 获物理电子学工学硕士学位, 现为中国科学院上海技术物理研究所博士研究生, 从事航天遥感器仪器的研制, 已发表论文 5 篇。

原理如下:某一行上的第一个像元在第一个曝光积分周期内收集到的信号电荷并不直接输出,而是与同列第二个像元在第二个积分周期内收集到的电荷相加,相加后的电荷移向第三行……,CCD 最后一行(第  $N$  行)的像元收集到的信号电荷与前面  $N-1$  次收集到的信号电荷累加后移到输出寄存器中,按普通线阵 CCD 器件的输出方式进行读出。可见 CCD 输出信号的幅度是  $N$  个像元积分电荷的累加,即相当于一个像元  $N$  倍积分周期所收集到的信号电荷,输出幅度扩大了  $N$  倍,而信噪比增加  $\sqrt{N}$  倍。在 TDI CCD 中积分级数  $M$  可分为 16, 32, ……最大可达 256, 行周期相同时,TDI CCD 比普通 CCD 的响应度大为提高。

由于 TDI CCD 的特殊工作方式,要求同一列上的每一个像元都对同一目标曝光积分,才能保证成像质量。这就给 CCD 的时钟驱动系统带来了新的要求,即要求 CCD 的行扫速率与相机星下点景物的移动速率要严格同步,也就是要求经过 CCD 的一个行周期(曝光积分周期)时间,相机星下点景物的像恰好移动一行。TDI CCD 的制造商 DALSA 公司有研究报告表明:对于 96 阶的 TDI CCD,要提取出清晰的图像,同步误差要控制在 2% 之内。

## 2 TDI 像移及影响

由于 TDI CCD 的特殊工作方式,将其应用于极轨卫星遥感中会出现许多新的问题。要提取出清晰的遥感图像,除了要保证 TDI CCD 的时钟驱动同步,更重要的是要恢复由于地球自转引起的像移。这种像移不同于一般线阵 CCD 星载相机的像移,一般星载 CCD 相机的像移是由于在曝光时间内物像的移动造成的,其像移方向与卫星行进方向平行,与卫星行进方向垂直的像移因曝光时间短影响不大可以忽略;而 TDI CCD 的像移则是由于地球自转,各积分阶的同一图像信号部分交错叠加造成的,其像移方向与卫星行进方向垂直。为与一般星载 CCD 相机的像移相区别,称这种像移为 TDI 像移。TDI 像移使图像混叠,分辨率下降、目标边缘模糊、物体灰度失真及对比淡化,因此这种特殊的 TDI 像移恢复是极轨星载 TDI CCD 相机应用中心必须解决的重要问题。

下面计算 TDI 像移对图像信号的影响程度。设相机地面分辨率  $R$ , 星下点速度  $V$ , TDI CCD 积分时间  $t_{in}$ , 地球自转线速度  $V_E$ 。根据 TDI CCD 成像特性

的要求,要保证 TDI 积分同步,积分时间  $t_{in}$  必须满足

$$t_{in} = \frac{R}{V} \Rightarrow \frac{t_{in}}{R} = \frac{1}{V} \quad (1)$$

星下点速度  $V$  由卫星轨道高度  $H$  决定,为一常数。在 TDI CCD 积分时间内地球自转引起了焦平面上图像的横向移动,在  $N$  阶积分时间中图像移动的距离  $x$  为

$$x = \frac{N \cdot t_{in} \cdot V_E \cdot f}{H} \quad (2)$$

相当于像元数为

$$p = \frac{N \cdot t_{in} \cdot V_E \cdot f}{H \cdot a} \quad (3)$$

其中,  $f$  为光学系统集距,  $a$  为像元尺寸。又根据光学系统成像关系有

$$\frac{a}{f} = \frac{R}{H} \quad (4)$$

将式(1)和式(4)代入式(3)可得  $N$  阶积分时间中图像移动的像元数为

$$p = \frac{N \cdot t_{in} \cdot V_E}{R} = N \cdot \frac{V_E}{V} \quad (5)$$

$V_E$  为地球纬度  $\Phi$  的函数

$$V_E = V_{E0} \cdot \cos \Phi \quad (6)$$

其中,  $V_{E0}$  为地球自转赤道表面的线速度。

故 TDI 像移也为地球纬度  $\Phi$  的函数

$$p = N \cdot \frac{V_{E0}}{V} \cdot \cos \Phi \quad (7)$$

当卫星在赤道上空时,  $\Phi=0$ ,  $V_{E0}=0.4638 \text{ km}$ 。在本系统中星下点速度  $V=6.69 \text{ km}$ , 当积分阶数  $N=96$  阶, TDI 像移最多可为 6.65 个像元。TDI 像移与纬度的关系曲线如图 2。

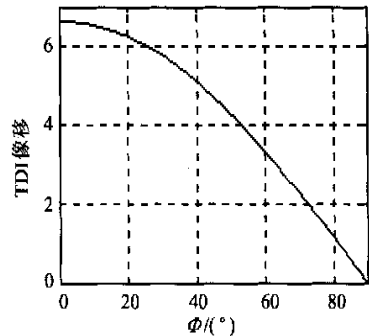


图 2 TDI 像移与纬度的关系

Fig. 2 TDI shift vs. latitude  $\Phi$

此外从式(5)中可看出,对于不同指标的极轨卫星 TDI 相机系统,如果 TDI CCD 的积分阶数  $N$  相同,并且卫星高度相同因而星下  $V$  相同,则像移规

律或重叠的像元数也相同，与系统的其它成像指标无关。这是一个具有普遍性的问题，解决 TDI 像移的恢复具有现实应用意义。

### 3 TDI 像移图像恢复方案

设想的解决方案有光机和电子学两种。光机方案是在卫星行进过程中根据地球纬度的不同不断调整 TDI CCD 与轨迹行进方向的夹角，使 TDI CCD 列与星下点轨迹行进方向的切线方向的保持为直角，这一方案可以补偿部分像移但不能完全消除像移，而且对调整机构要求很高，像移补偿结构复杂。

电子学方案是根据 TDI 像移的产生规律建立其数学模型，推导出数字信号处理算法，并采用高速数字信号处理器来完成 TDI 像移的恢复，计算机仿真证明像移图像可以完成恢复，整个方案无机械结构，而且算法可以灵活调整，因而电子学方案具有很大的优越性。故拟采用电子学方案进行 TDI 像移图像的恢复。

首先建立 TDI 像移的数学模型。考虑两阶像移图像信号的形成机理，设某一时刻，代表地表景物在 TDI CCD 第一阶光敏单元上所成的图像信号的电荷  $x_1(t) = x(t)$  原样传送到第二阶光敏单元， $t$  为像元序数，同时该地表景物也在第二阶光敏单元上成像并产生电荷  $x_2(t)$ 。如果地球静止，则有  $x_2(t) = x(t)$ 。 $x = x_1(t) + x_2(t) = 2 * x(t)$  代表了原景物亮度两倍的信号电荷；但因地球自转， $x_2(t)$  与  $x_1(t)$  实际产生了像元移位  $T$ ， $x_2(t) = x(t - T)$ ，则  $x = x_1(t) + x_2(t) = x(t) + x(t - T)$  就不能代表原景物亮度的两倍响应了。以次类推， $N$  阶光敏单元最终得到的信号电荷  $x$  为：

$$\begin{aligned} x &= x_1(t) + x_2(t) + \dots + x_{N-1}(t) \\ &= x(t) + x(t - T) + \dots + x[t - (N - 1)T] \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} x(t - kT) \end{aligned} \tag{8}$$

而希望得到的输出信号应为  $N \cdot x(t)$ 。这样，TDI 像移恢复就归结为如何从  $\sum_{k=0}^{N-1} x(t - kT)$  得到  $N \cdot x(t)$  的问题。

考虑将  $\sum_{k=0}^{N-1} x(t - kT)$  通过一个数字滤波器<sup>[1]</sup>后得到  $N \cdot x(t)$ 。这样的数字滤波器应该具有怎样的形式呢？用  $Z$  变换分析如下。

将每一阶的信号分别进行  $Z$  变换：

$$\begin{aligned} x(t) &\leftrightarrow X(z) \\ x(t - T) &\leftrightarrow X(z) Z^{-T} \\ &\dots \quad \dots \\ x[t - (N - 1)T] &\leftrightarrow X(z) Z^{-(N-1)T} \end{aligned}$$

变换号两边求和得

$$\sum_{k=0}^{N-1} x(t - kT) \leftrightarrow \sum_{k=0}^{N-1} X(z) Z^{-kT} = X(z) \sum_{k=0}^{N-1} Z^{-kT} \tag{9}$$

期望的输出信号的  $Z$  变换：

$$N \cdot x(t) \leftrightarrow N \cdot X(z) \tag{10}$$

下面为分析问题方便，令  $T=1$ ，则(9)式简化为

$$\sum_{k=0}^{N-1} x(t - k) \leftrightarrow X(z) \sum_{k=0}^{N-1} Z^{-k} \tag{11}$$

显然，从  $X(z) \sum_{k=0}^{N-1} Z^{-k}$  变换到  $N \cdot X(z)$ ，希望的滤波器形式应为

$$F(z) = \frac{N}{\sum_{k=0}^{N-1} Z^{-k}} \tag{12}$$

在  $Z$  域中的乘积相应于在时域中的卷积，找到  $F(z)$  在时域中的形式  $f(t)$ ，混迭图像信号  $\sum_{k=0}^{N-1} x(t - kT)$  与  $f(t)$  卷积后就可以恢复出期望的图像信号  $N \cdot x(t)$ 。

由等比数列的求和公式化简  $F(z)$  为

$$F(z) = \frac{N}{\sum_{k=0}^{N-1} Z^{-k}} = N \cdot \frac{1 - Z^{-1}}{1 - Z^{-N}} \tag{13}$$

式(13)就是滤波器  $f(t)$  的  $Z$  域形式，将其进行反  $Z$  变换可得  $f(t)$  的表达式，并得到像移恢复计算时所用的时域离散序列。要注意的是，式(13)中  $N$  为 TDI CCD 的积分阶数，在前面的简化推导式(11)中， $N$  与重叠的像元数相等。

当  $N=2$  时， $F(z) = 2 \cdot \frac{1 - Z^{-1}}{1 - Z^{-2}} = 2 \cdot \frac{1}{1 + Z^{-1}}$

则由反  $Z$  变换公式得

$$f(t) = 2 \cdot (-1)^t u(t)$$

滤波器序列为  $2 \cdot [1, -1, 1, -1, \dots]$ ；

当  $N=3$  时， $F(z) = 3 \cdot \frac{1 - Z^{-1}}{1 - Z^{-3}}$ ，采用计算留数

法<sup>[2]</sup>得

$$F(z) = 3 \cdot \left[ \frac{0.5 + 0.2887i}{1 - e^{-i\frac{2}{3}\pi} Z^{-1}} + \frac{0.5 - 0.2887i}{1 - e^{i\frac{2}{3}\pi} Z^{-1}} \right]$$

则可得

$$f(t) = 3 \cdot \left[ \cos\left(\frac{2}{3}\pi t\right) - 0.5774 \sin\left(\frac{2}{3}\pi t\right) \right]$$

滤波器序列为  $3 * [1, -1, 0, 1, -1, 0, 1, -1, 0, \dots]$ ;

同理依次计算可得:

当  $N=4$  时,  $f(t)$  序列为  $4 * [1, -1, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 1, -1, 0, 0, \dots]$ ;

当  $N=5$  时,  $f(t)$  序列为  $5 * [1, -1, 0, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 0, \dots]$ ;

当  $N=6$  时,  $f(t)$  序列为  $6 * [1, -1, 0, 0, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 0, 0, \dots]$ ;

由此可看出滤波器序列  $f(t)$  具有这样的规律:

(1)  $f(t)$  序列中以  $[1, -1, 0, 0, \dots, 0]$  为周期进

$N-2$  个 0

行重复;

(2)  $f(t)$  序列总长度与输入的一行图像序列长度相等。

像移图像恢复序列是否有效还需进行 TDI 像移图像恢复的验证。因为目前尚未得到实际 TDI 像移的图像, 所以仅验证是否能恢复人为产生的 TDI 像移信号来说明问题。

图 3 示出 TDI 图像信号像移及恢复的过程。(a) 为原始图像; 每行移位一个像元并相加, 6 次后得到像移图像即 TDI CCD 相机的实际输出 (b), 将此每行图像序列与上面分析得到的滤波器序列式 (\*) 卷积计算后得到恢复后的输出 (c)。从图中可看出, TDI 像移图像可以成功恢复, 证明利用图像恢复滤波器序列恢复 TDI 像移图像是有效的。但仿真也证明, 由于实际系统量化位数的限制因而存在截断误差, 若采用 8bit 量化像移图像, 则恢复后的图像 (d) 与原始图像相比有一些差异, 因此为减小量化噪声需提高系统量化位数。

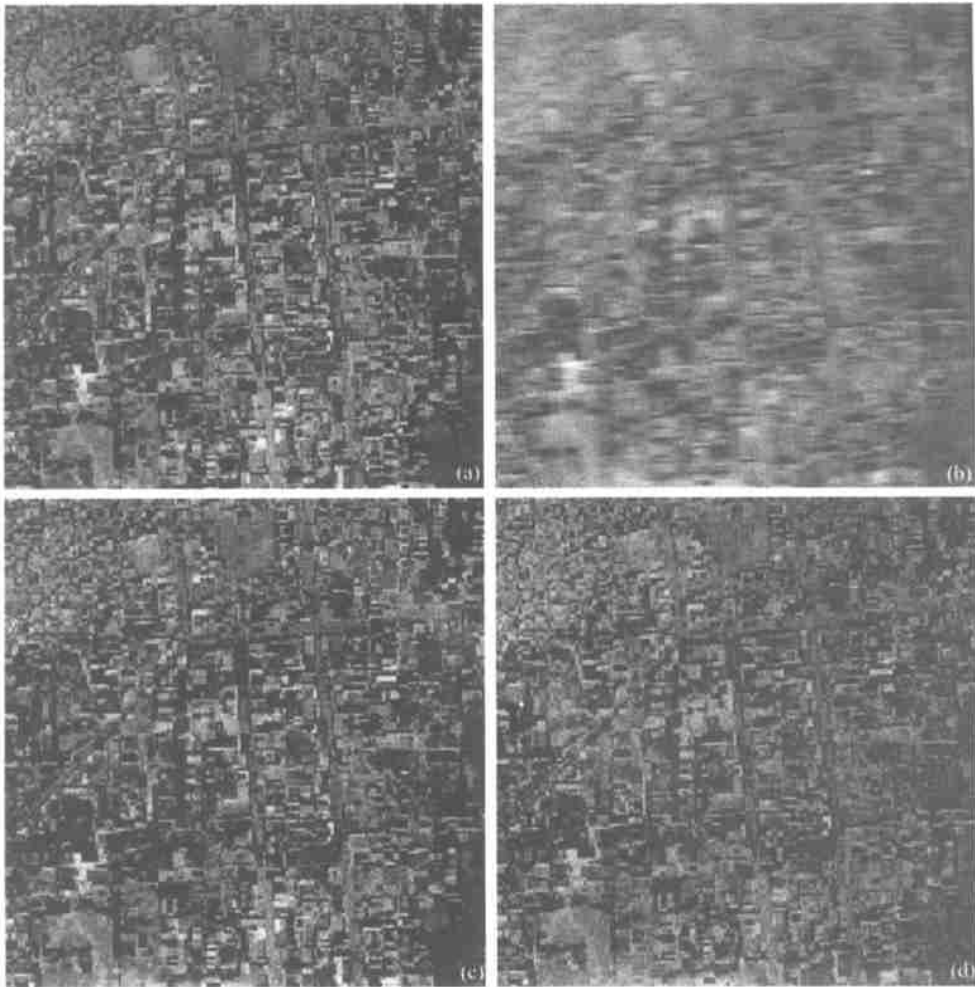


图 3 TDI 图像信号像移及恢复

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(a) 原始图像, (b) 6 阶像移图像, (c) 理论计算恢复图像, (d) 8bit 系统恢复图像

Fig. 3 TDI image shift and compensation

## 4 讨 论

在上面的推导中为了简化令像元移位  $T=1$ , 即 TDI 每阶移位一个像元。但在实际的 TDI 像移中,  $T$  小于 1 且随地球纬度的变化而变化。因此为了能够利用推导得出的像移恢复滤波器序列完全消除像移, 必须在行图像恢复前将行图像信号进行细分, 每个像元细分的倍数等于  $1/T$ 。由式(7)可得像元移位  $T$  为

$$T = \frac{V_{E0}}{V} \cdot \cos \Phi \quad (14)$$

则每个像元细分倍数  $M$  为

$$M = \frac{V}{V_{E0} \cdot \cos \Phi} \quad (15)$$

但这样做有一个缺点, 在纬度较高时,  $M$  较大, 例如, 当纬度  $\Phi=80^\circ$  时,  $M=83$  倍, 这会导致卷积计算量过大而对 DSP 器件要求提高。因此在容许的条件下可采取存在一定像移的算法, 以减少卷积计算量。输出图像容许像移的限度可取为 0.5, 此时每个像元细分的倍数  $M$  为

$$M = 2N \cdot \frac{V_{E0}}{V} \cdot \cos \Phi \quad (16)$$

这样, 当纬度  $\Phi=0^\circ$  时, 最大细分倍数  $M$  为 13, 采用一般商业 DPS 器件就可以实时完成图像恢复。

## 5 总 结

由于 TDI CCD 特殊的工作方式, 极轨星载 TDI CCD 相机因地球自转会引起的特殊像移, 影响获取的图像的质量, 所以必须恢复像移图像。根据 TDI 像移产生的机理可以建立像移数学模型, 并求出像移恢复滤波器的数学表达式, 经过计算机仿真证明, 像移图像恢复算法有效, 采用 DSP 器件进行像移图像恢复是可行的。

**致谢:**感谢中国科学院上海技术物理研究所张铔博士对论文的指导。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Oppenheim A V, Schaffer R W. Discrete-Time Signal Processing [M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- [2] Vinay K, Ingle, John G, Proakis. Digital Signal Processing Using MATLAB. [M] International Thomson Publishing Inc., 1996.

# Image Shift and Compensation of TDI CCD Camera for Polar Orbit Satellite

CHEN Liang, LIU Chun-xia, GONG Hui-xing

(Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Due to the special operation mode of TDI CCD, image shift is resulted from earth self-rotation in polar orbit sensing. This kind of image shift makes image degradation, resolution decrease, and target margin mistiness. Compensating the shifted image is an important problem that must be resolved in the application of polar orbit satellite TDI CCD camera. In this paper, the image shift of TDI CCD camera for polar orbit satellite is forecasted, then the effect of image degradation is calculated. A mathematical model is set up according to the principle of TDI image shift, and an image compensation filter is worked out, which is proved to be valid by computer simulation.

**Key words:** TDI CCD; image shift; image processing