

文章编号: 1672-8785(2008)08-0021-05

影响 TDICCD 相机成像质量的因素分析

樊 超¹ 李英才² 王 锋¹ 梁义涛¹

(1. 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘 要: 在高分辨率 TDICCD 相机的成像过程中, 偏流角和速高比的变化都会影响相机的成像质量。根据卫星的运动状态, 分别推导了偏流角和速高比的表达式, 并分析了由其引起的附加像移。结合实际卫星轨道参数, 详细计算了偏流角和速高比随纬度的变换规律以及它们在不同积分级数下引起的像移对相机像质的影响程度, 给出了像移调制传递函数大于 0.95 时允许的最大偏流角和相机侧摆角度。结果表明, 随着积分级数的增加, 由偏流角和侧摆引起的像移对相机像质的影响越来越大, 当积分级数 $N = 32$ 、 $MTF_{\text{像移}} > 0.95$ 时, 允许的最大偏流角和侧摆角度分别为 0.62° 和 29.5° 。

关键词: TDICCD 相机; 偏流角; 速高比; 像移; 像质

中图分类号: V448.21 **文献标识码:** A

Analysis of Factors Having Influence on Image Quality of TDICCD Camera

FAN Chao¹, LI Ying-cai², WANG Feng¹, LIANG Yi-tao¹

(1. College of Information Science and Engineering of Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract: In the imaging process of a high resolution TDICCD camera, the imaging quality will be affected by variation of the drift angle and velocity-height ratio (V/H) of a satellite. The expressions for the drift angle and V/H of a satellite are deduced respectively according to the motion state of the satellite and the additional image motion caused by both of them is analyzed. The variation laws of the drift angle and V/H of a satellite with latitude and the influence of the image motion caused by them on the image quality of a camera for different integral numbers are calculated. The maximum drift angle and camera scroll angle allowed for $MTF_{\text{imagemotion}} > 0.95$ are given. The result shows that the influence of the image motion caused by the drift angle and camera scroll angle on the image quality of a camera will become greater and greater with the increase of the integral number. For the integral number $N = 32$ and $MTF_{\text{imagemotion}} > 0.95$, the allowed maximum drift angle and camera scroll angle are 0.62° and 29.5° respectively.

Key words: TDICCD camera; drift angle; velocity-height ratio (V/H); image motion; image quality

收稿日期: 2008-04-17

作者简介: 樊超 (1976 —), 男, 博士, 讲师, 研究领域包括空间光学与遥感、信息光学、图像处理。

1 引言

目前, 为了实现卫星相机的轻小型化, 高分辨率空间相机大多采用推扫成像的线阵 (TDI) CCD 作为像接收器件。TDICCD 相机的工作原理基于推扫成像, 其正常工作的基本前提是光生电荷包的转移与焦面上图像的运动保持同步, 任何的误匹配都将导致图像模糊^[1-3]。然而, 卫星平台飞行姿态的变化 (俯仰、翻滚、偏航)、轨道速高比的变化、地球的自转、星上活动部件的颤振等因素都会导致相机在积分成像过程中产生像移, 破坏其与光生电荷包运动的同步性。虽然这种附加像移量很小, 但是随着相机焦距和积分级数的增加, 它在像面上所引起的附加像移将明显增大, 从而降低相机的传递函数和分辨率, 使图像质量恶化: 高频扰动 (振动或抖动) 将引起相机 MTF 的下降 (引起图像模糊), 而低频扰动将导致所成图像出现几何变形^[4,5]。因此, 对影响 TDICCD 相机成像质量的因素进行定量分析, 这对于改善相机的像质是十分必要的。

2 偏流角及其引起的像移分析

2.1 偏流角的计算

如图 1 所示, 在某一时刻 t , 卫星在轨道上的位置为 S_1 , 对应的星下点为 S'_1 。经过一段时间 Δt 后, 卫星的位置为 S_2 , 对应的星下点为 S'_2 。假设相机的视线垂直向下, 而且不考虑地球的自转, 在 $t + \Delta t$ 时刻, 相机扫过的地面点为 S'_2 。但是由于地球的旋转, 原希望在 $t + \Delta t$ 时刻扫过的地面点 S'_2 漂移到了 S''_2 。这样就造成在实际推扫成像过程中存在一个偏流角, 即 $S'_1S'_2$ 与 $S'_1S''_2$ 之间的夹角 A 。

椭圆卫星轨道的开普勒方程为^[6]

$$E - e \sin E = \left(\frac{\mu}{a^3} \right)^{\frac{1}{2}} (t - \tau) \quad (1)$$

这里, $\mu = 398613.5 \text{ km}^3/\text{s}^2$, 为开普勒常数; a 为卫星轨道的长半轴; e 为轨道的偏心率; τ 为卫星近地点时刻; E 为偏近地角。根据上式可以计算出偏流角 A :

$$A = \arctan \left(\frac{r \omega_e \cos \delta \cos A_v}{V_H \cos \theta} \right) \quad (2)$$

式中, r 为地心距 (对于圆轨道, $r = a$), ω_e 为地球自转角速度, δ 为纬度, θ 和 A_v 分别为卫星的速度倾角和方位角, V_H 为卫星作圆周运动相对于惯性系的速度。

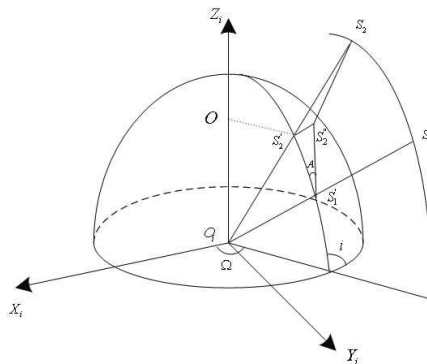


图 1 星下点与偏流角

2.2 偏流角引起的像移

如果在卫星相机的成像过程中忽略偏流角的影响, 则会引起附加像移。图 2 中不考虑偏流角的影响时, TDICCD 的图像积分方向沿 $S'_1S'_2$ 方向 (即卫星运行方向)。相机在一个积分时间内在像面上扫过的距离为 b , 即一个像元 (假设像元的填充系数为 100%)。然而, 由于偏流角的存在, 图像在像面上的实际运动方向沿 $S'_1S''_2$ 方向, 并在积分时间内沿该方向移动距离 b 。因此, 在一个积分时间内偏流角在沿航方向引起的像移 Δb_y 为

$$\Delta b_y = b - b \cos A = b(1 - \cos A) \quad (3)$$

在穿航方向引起的像移 Δb_x 为

$$\Delta b_x = b \sin A \quad (4)$$

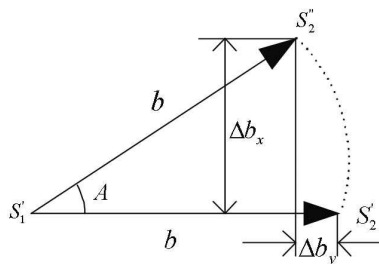


图 2 由偏流角引起的像移的示意图

3 速高比及其引起的像移分析

速高比是指在成像过程中相机相对于被摄景物的移动线速度与成像高度之比, 它等于所拍摄物体的像在相机焦面上移动的角速度。在相机的瞬时视场角和 TDICCD 行积分时间一定的情况下, 为了保持景物图像的运动速度与电荷包的运动速度同步, 相机的速高比应该是固定不变的。然而相机的成像高度会随卫星的侧摆发生变化, 成像高度的变化不仅会带来图像比例尺的改变, 而且会造成相机像面图像运动角速度的变化, 进而引起相机在积分时间内的像移, 恶化成像质量。

3.1 速高比的计算

从光学系统的成像原理来讲, 速高比是被摄目标的移动角速度(相对卫星而言), 因此速高比的高度应该是光学系统成像的物距, 即物空间的物面到光学系统主点的距离, 可以近似为视轴所对的成像点至卫星的距离。在图 3 中, 设 α 为卫星侧摆角, β 表示卫星侧摆后地表成像点对卫星的高度角; R_e 表示地球半径(这里假设地球为圆球); H 表示在侧摆情况下卫星沿视轴方向至地表成像点的斜距; h 表示卫星到其星下点的垂直高度。通过三角运算关系, 可以得到:

$$\frac{R_e}{\sin \alpha} = \frac{R_e + h}{\sin(\beta + 90^\circ)} = \frac{H}{\sin(180^\circ - \alpha - \beta - 90^\circ)}$$

$$H = (R_e + h) \cos \alpha - \sqrt{R_e^2 - (R_e + h)^2 \sin^2 \alpha} \quad (5)$$

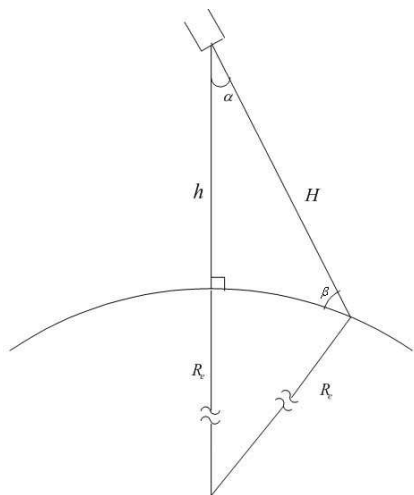


图 3 卫星侧摆时的成像示意图

由于卫星在轨道上作圆周运动, 同时地球本身有自转, 因此相机和被摄景物之间存在着相对运动, 速高比中的速度应是卫星地速与地球自转速度的合速度, 即相机相对于被摄景物的线速度。设卫星轨道倾角为 i , 卫星作圆周运动相对于惯性系的速度为 V_H , 卫星星下点相对于惯性系的速度为 V_S , 地球自转速度为 V_E , 相机星下点相对地物的速度为 V_G 。则有^[2]:

$$V_G = \sqrt{V_S^2 + V_E^2 - 2V_E V_S \cos \delta \cos i} \quad (6)$$

式中, $V_S = V_H R_e / (R_e + h)$, $V_H = (\mu / (R_e + h))^{1/2}$, $V_E = R_e \omega_e$, μ 为开普勒常数, δ 为纬度。

由式 (5) 和式 (6) 可以得到卫星的速高比 (V/H):

$$\frac{V}{H} = \frac{V_G}{H}$$

$$= \frac{\sqrt{V_S^2 + V_E^2 - 2V_E V_S \cos \delta \cos i}}{(R_e + h) \cos \alpha - \sqrt{R_e^2 - (R_e + h)^2 \sin^2 \alpha}} \quad (7)$$

3.2 速高比变化引起的像移分析

在卫星相机的成像过程中, 图像以 V/H 为角速度在像面移动。为了保证同步, 需要使图像移动一行的时间正好等于 CCD 推扫一行的时间。设卫星相机的焦距为 f' , 行积分时间为 t_{INT} , 像元尺寸为 b , CCD 像元的填充率为 100%, 则有:

$$b = \left(\frac{V_G}{H} \right) f' t_{INT}$$

如果在一个行周期内速高比发生变化, 而积分时间不变, 则由于速高比变化引起的附加像移为 Δb , 有:

$$\Delta b = f' t_{INT} \Delta \left(\frac{V_G}{H} \right) \quad (8)$$

卫星相机对地观测时, 为了扩大观测范围, 通常采用侧摆倾斜照相的手段。在这种工作模式下, 相机的速高比因侧摆而发生变化, 使像速度与 TDICCD 电荷转移速度不匹配, 导致像质下降。用式 (7) 对摆角 α 求微分并代入式 (8) 得

到:

$$\Delta b = b \frac{\left[(R_e + h) \sin \alpha - \frac{(R_e + h)^2 \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{R_e^2 - (R_e + h)^2 \sin^2 \alpha}} \right]}{(R_e + h) \cos \alpha - \sqrt{R_e^2 - (R_e + h)^2 \sin^2 \alpha}} \times \Delta \alpha \quad (9)$$

并且, 该像移主要产生于沿航方向 [7]。

4 实例计算

为了讨论问题方便, 这里假设地球为圆球, 且 $R_e = 6378\text{km}$; 卫星运行轨道为极地圆轨道, 轨道参数为: 轨道高度 $h=500\text{km}$; 偏心率 $e=0$; 升交点赤经 $\Omega = 283^\circ$; 近地点时刻 $\tau = 0\text{s}$; 轨道倾角 $i = 97.4^\circ$; 近地点幅角 $\omega = 0^\circ$ 。根据这些参数, 可以计算得到如图 4 所示的偏流角的变化曲线 (这里定义向左偏时偏流角为正, 向右偏时偏流角为负), 以及如图 5 所示的卫星在不同侧摆角 (分别为 0° 、 10° 、 20° 和 30°) 下的速高比变化曲线。从图 4 中可以看出, ①随着纬度绝对值的增加, 偏流角会减小, 在赤道附近偏流角可达到最大值。因为在赤道附近地球的自转线速度最大, 因此引起的偏流角也最大, 对于文中给定的轨道, 最大偏流角约为 3.7° ; ②赤道附近偏流角的变化较为缓慢, 越往两极, 偏流角的变化越快。

根据图 5 可以看出, ①随着侧摆角的增大, 侧摆点的速高比成非线性快速下降, 侧摆成像时影响速高比的主要因素是侧摆后成像距离的增加; ②侧摆角一定时, 随着纬度的增加, 地球自转线速度降低, 导致星下点相对地物的线速度下降, 速高比减小; ③速高比在赤道附近变化较慢, 越往两极变化越快。对于上面假定的轨道参数, 在 $\phi \in (-80^\circ, 80^\circ)$ 范围内, 速高比的最大值出现在 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ$ 的情况下, 其值为 0.0177 ; 最小值出现在 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\phi = \pm 80^\circ$ 的情况下, 其值为 0.0142 。

对于 TDICCD 相机, 由附加像移所导致的相机调制传递函数的退化与所用 TDI 级数密切相关, 文献 [8] 给出了 TDICCD 对运动图像的 MTF

分析。由该文献可知, 由像移导致的相机像质退化的调制传递函数 MTF 为

$$MTF = \frac{\sin(N\pi f \Delta b)}{N \sin(\pi f \Delta b)}$$

式中, N 为所用的 TDICCD 级数, f 为相机焦面上所对应的空间频率, Δb 为附加像移。

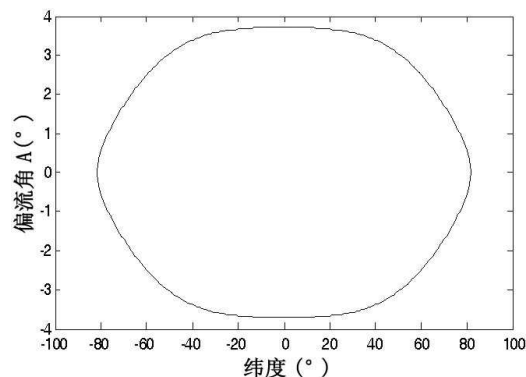


图 4 偏流角与纬度的关系

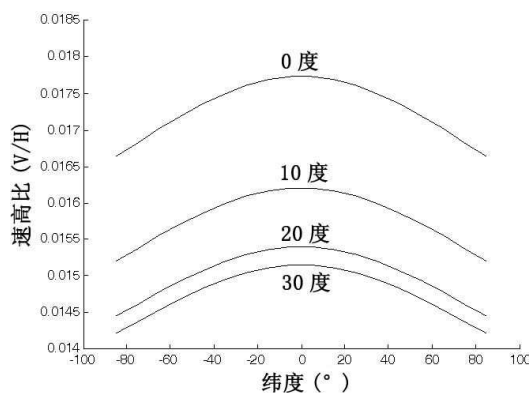


图 5 速高比随纬度的变化关系

这里, 为了使问题分析起来更为简便, 只考虑由卫星侧摆而引起的速高比变化在沿航方向导致的像移, 对于不同的积分级数, 在奈奎斯特采样频率下, 卫星相机在沿航和穿航方向的像移调制传递函数曲线可根据式 (3)、式 (4) 和式 (9) 计算得到, 它们分别如图 6、图 7 和图 8 所示。从这些图中可以看出, 随着偏流角 (或侧摆角) 和积分级数的增加, 由其引起的像移对像质的影响变大。并且, 偏流角在穿航方向对相机成像质量的影响要大于沿航方向。将图 6 与图 8 比较后不难发现, 在沿航方向影响相机像质的主要因素是由侧摆而引起的速高比变化。

若要求像移调制传递函数不小于 0.95, 则对于不同的积分级数 N , 相机所允许的最大偏流角 A_{max} 和侧摆角 α_{max} 如表 1 所示。值得注意的是, 表中所给的最大允许角度是按 $MTF \geq 0.95$ 计算的, 如果要求像移所导致的 MTF 更高, 那么所允许的偏流角 (或侧摆角) 将会更小。另外, 这里计算的最大角度为不包含相机其它误差因素时的理论值。如果考虑相机的光学误差、机械误差、计算误差等相关误差, 相机实际所允许的最大角度将低于理论值。

表 1 相机允许的最大偏流角 A_{max} 和侧摆角 α_{max}

积分级数 N	$N=32$	$N=48$	$N=64$	$N=96$
$A_{max} (^{\circ})$	0.62	0.42	0.32	0.21
$\alpha_{max} (^{\circ})$	29.5	21	16	11

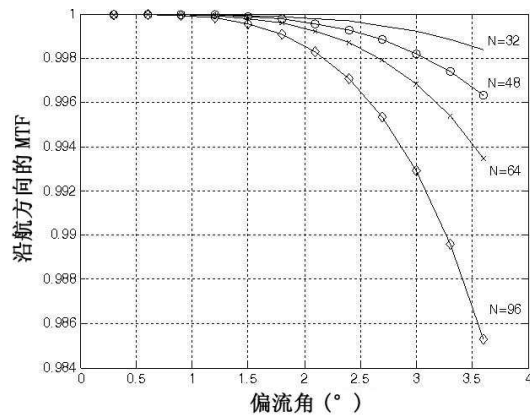


图 6 偏流角对沿航方向像质的影响

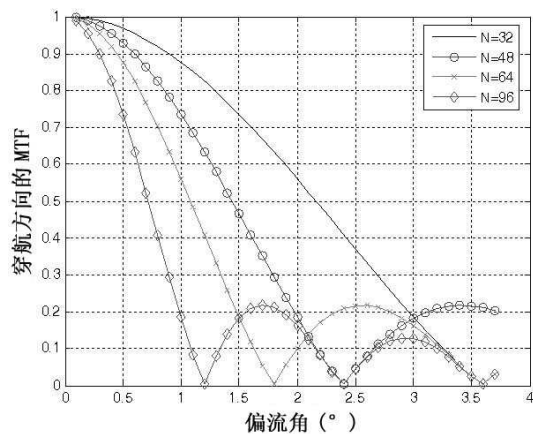


图 7 偏流角对穿航方向像质的影响

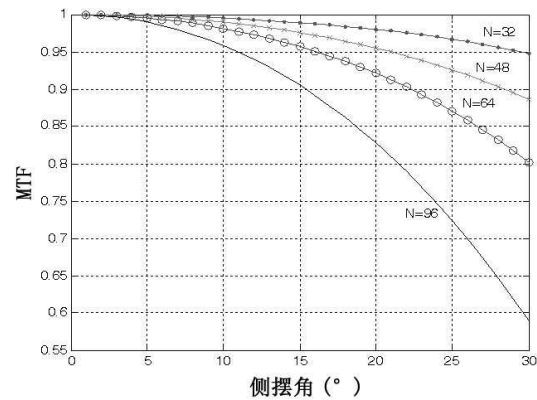


图 8 侧摆角在沿航方向对象质的影响

5 结论

高分辨率卫星相机在成像过程中, 由于偏流角的影响和相机侧摆角的变化, 相机像面上的图像运动与电子潜像的运动不同步, 引起像移, 从而严重影响相机成像质量。通过分析, 在假设地球为圆球、轨道为圆形、无摄动的情况下, 分别计算了由偏流角和相机侧摆角变化引起的像移对象质的影响, 这为了解卫星相机成像过程中像质变化的规律提供了参考。然而, 在实际成像过程中, 像移还会受到被摄景物地面起伏、卫星轨道形状、摄动等因素的影响, 全面分析各种因素对相机像质的影响是很困难的, 也是不现实的。因此, 为了提高相机的成像质量, 寻求在轨实时测量和补偿像移的方法将是下一步需要探索 and 解决的一个关键问题。

参考文献

- [1] 佟首峰, 李德志, 郝志航. 高分辨率 TDI-CCD 遥感相机的特性分析 [J]. 光电工程, 2001, 28(4): 64-67.
- [2] Huang Qiaolin. Application of TDICCD on real-time earth reconnaissance satellite [C]. SPIE 1998, 3558: 93-104.
- [3] Savvas G Chamberlain, William D Washkurak. HIGH SPEED, LOW NOISE, FINE RESOLUTION TDI CCD IMAGERS [C]. SPIE 1990, 1242: 252-262.
- [4] Steven L Smith, James Mooney, Theodore A Tantalos, et al. Understanding image quality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging systems [J]. Opt. Eng., 1999, 38(5): 824-826.

(下转第 48 页)