

TDI CCD 相机大姿态角推扫成像行频精确匹配*

李国宁¹ 韩双丽¹ 张宇¹ 刘妍妍^{2,4} 高印寒³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院 长春 130022;

3. 吉林大学 测试科学实验中心 长春 130022; 4. 长春理工大学 电子信息工程学院 长春 130022)

摘要: 针对大视场 TDI CCD 相机大姿态角推扫成像过程中像面上像点像速差异较大, 行频匹配精度不高引起的相机传函下降等问题, 提出一种可支持粗调和精调的高精度行频匹配方法。首先, 阐述了大视场遥感相机像速场的主要特点及像速匹配的关键问题; 其次, 深入分析了大视场 TDI CCD 相机大角度侧摆和前后摆推扫成像的像速场特性; 然后, 根据像速场特性制定同速匹配模式和异速匹配模式, 分析传函特性, 确定各自模式的使用条件; 最后, 提出了一种可支持粗调和精调的高精度行频匹配方法, 并分析已实现行频匹配方法的精度, 最终满足给定行频匹配精度要求。实验结果表明: 在积分级数为 96 级, 粗调方法使行频精度达到 0.999 425, 精调方法使行频精度达到 0.999 928, 2 种方法均能使相机传函 MTF 优于 0.998, 从而实现大视场 TDI CCD 相机在各种大姿态角推扫成像条件下高质量成像。

关键词: 成像系统; 时间延迟积分电荷耦合器件; 调制传递函数; 行频匹配

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10

Exact matching for row frequency of TDICCD camera under the big attitude angle scanning imaging

Li Guoning¹ Han Shuangli¹ Zhang Yu¹ Liu Yanyan^{2,4} Gao Yinhan³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

3. Centre of Test Science, Jilin University, Changchun 130022, China;

4. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: With wide field of TDI CCD camera at the push of the attitude Angle of image point in the process of scanning imaging like speed difference is bigger, the row frequency matching precision is not caused by higher camera function to drop, a kind of coarse and fine adjustment precision horizontal frequency matching method was put forward. First of all, the large field of TDI CCD camera as the main characteristic of the velocity field and as the key problems of speed matching was expounded; Secondly, in the big field of TDI CCD camera Angle side swing and swing pushed sweeping imaging before and after in-depth analysis of the characteristics as velocity field; Then, according to the characteristics of the velocity field choose image speed matching mode of the same speed and the different speed, analysis the functional features, the using condition of each mode; Finally, this paper proposes a support of coarse and fine adjustment precision horizontal frequency matching method, and analysis of the accuracy of the implemented row frequency matching method, ultimately meet the requirements of a given row frequency matching accuracy. The experimental results show that the integral series for level 96, coarse adjustment method can make the precision of the row frequency 0.999 425, fine adjustment method can make the precision of the row frequency 0.999 928, two methods can make the camera pass letter MTF is better than 0.998, thus realize the wide field of TDICCD camera under the condition of all kinds of big push attitude Angle scanning imaging with high quality imaging.

Keywords: Imaging systems; TDICCD; modulation transfer function; row frequency matching

1 引言

目前TDICCD成像技术在遥感领域已经获得了广泛的应用,随着视场和空间分辨率不断提高,采用的TDICCD拼接片数和单片像元数也不断增多和提高,但同时也带来了很多问题。大视场遥感相机大姿态角成像的特点:大视场相机大角度侧摆、前后摆引起的像面上像点像速差异较大;卫星轨道高度较大使得像速大小及方向均对卫星姿态运动速率敏感;光学系统的场曲引起的成像的光学畸变、非正视成像、地球的不均匀椭球几何特性引起的几何畸变引起像速大小和方向发生各向异性的畸变^[1-4]。这些因素将引起像面上地球景物的像点呈复杂运动,因此,为了获取清晰的遥感图像需要进行动态成像的电子学像速匹配。

近两年很多文献对卫星姿态精度、侧摆和前后摆成像条件对TDICCD相机像质的影响进行了较为详细的分析,其中包括对像速场的分布和像移速度匹配等问题,但是很少针对大视场TDICCD相机在大姿态角成像情况下的行频匹配方法和使用条件及行频精度对相机调制传递函数MTF(modulation transfer function)的影响问题进行深入研究,后面将调制传递函数简称传函。电子学像速匹配方法包括同速匹配和异速匹配,同速匹配运算量和实现复杂度较小,而异速匹配相对较大,两者的有效选取主要由像面上像速场的分布特点决定的。在实际应用过程中像速匹配需要通过控制TDICCD行频来实现,因此行频匹配的实现和精度直接决定相机图像质量。该文在参考国内外相关技术的基础上,深入分析大视场TDICCD相机大姿态角成像的像速场分布及传函特性,提出一种高精度行频匹配方法及其使用条件,使行频匹配精度满足相机传函要求,从而实现大视场TDICCD相机在各种大角度条件下高质量成像。

2 大角度推扫成像的像速匹配原理

遥感相机获得清晰优质图像的一个关键技术是动态像

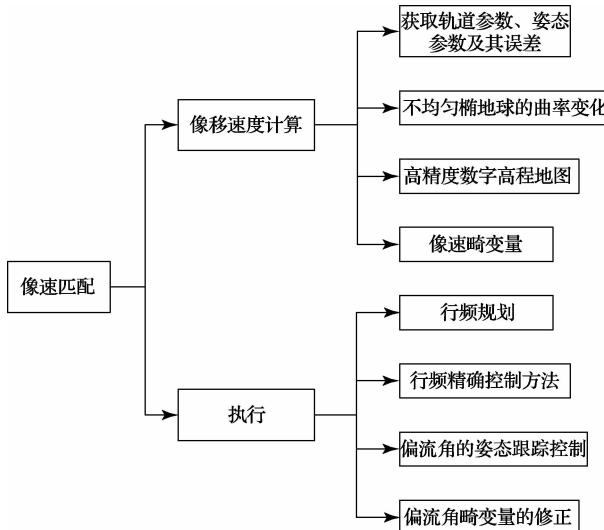


图1 像速匹配涉及的关键问题

速匹配,像速匹配的实现中所涉及的关键问题如图1所示。像移速度计算过程中要考虑轨道参数和姿态参数及其误差、不均匀椭球的曲率变化、高精度数字高程地图、像速畸变量等因素;像速匹配的执行过程包括焦平面所有TDICCD的行频规划、行频精确控制方法、偏流角的姿态跟踪控制、偏流角的姿态跟踪控制、偏流角畸变量的修正^[5-6]。

根据遥感任务要求,TDICCD相机存在平飞、侧摆和前后摆3种推扫方式成像。TDICCD相机视场角越大、侧摆或前后摆成像的角度愈大、焦平面成像像元位置距离像面中心区域越远像速差就越大,同时几何畸变越明显,如图2所示。

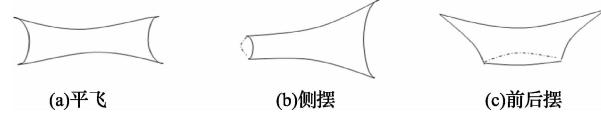


图2 几何畸变

相机传函的分析可以分为两个方面:由于实际物像在像面上的速度和CCD电荷移动速度存在客观误差,像移速度失配引起的传函MTF退化会作用于TDICCD积分方向,记为 MTF_{\parallel} ;由于像面上各点偏流角存在差异,偏流角匹配误差引起的MTF退化垂直于TDICCD积分方向,记为 MTF_{\perp} ^[7-8]。

计算由于像移速度残差引起的TDICCD积分方向 MTF_{\parallel} :

$$MTF_{\parallel} = \frac{\sin\left(\pi \frac{Mf_c}{2f_N} \frac{\Delta V}{V}\right)}{\pi \frac{Mf_c}{2f_N} \frac{\Delta V}{V}} \quad (1)$$

式中: M 为TDICCD的积分级数, f_c 为空间频率, f_N 为奈奎斯特频率, $\frac{\Delta V}{V}$ 为像速差。

通过分析空间相机在各机动模式下由偏流角畸变量和原理残差引起的 MTF_{\perp} 变化,估算空间相机摆角范围和TDICCD积分级数。

MTF_{\perp} 计算公式如下:

$$MTF_{\perp} = \frac{\sin\left(\pi \frac{Mf_c}{2f_N} \tan(\Delta\beta)\right)}{\pi \frac{Mf_c}{2f_N} \tan(\Delta\beta)} \quad (2)$$

式中: $\Delta\beta$ 为偏流角匹配误差,即为选定的CCD特征点相对于像面中点的偏流角原理残差和畸变角之和。

重点内容放在行频匹配方面,计算大视场TDICCD相机大姿态角成像的像速场分布,分析由于像移速度残差引起的TDICCD积分方向 MTF_{\parallel} ,在上述基础上提出一种高精度行频匹配方法及其使用条件,使行频匹配精度满足相机传函要求。

3 大姿态角推扫成像像移速度计算

为了计算像速场的分布,需要建立并计算大视场 TDI CCD 相机像面上特征像点像速的数学模型,这些特征像点包括焦平面上每片 TDI CCD 的中心点和边缘点。下面分别将在相机侧摆和前后摆大角度推扫成像 2 种情况下进行像移速度分析和计算。分析中设定条件为轨道高度 H 为 500 km, 相机焦距 f 为 3.5 m, 焦平面由 7 片 TDI CCD 拼接完成, 单片 TDI CCD 有效像元数为 6 144, 像元尺寸 a 为 $8.75 \mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$ 。

3.1 侧摆推扫成像像移速度计算

侧摆推扫成像几何关系图如图 3 所示, 侧摆角为 ψ (角度的单位是 $^\circ$), 焦平面有效成像区第一个像元为 X_1 , 最后一个像元为 X_{last} , 地面景物目标 X_1' 和 X_{last}' 点经过光学系统分别成像在焦平面上的 X_1 和 X_{last} 像元点。光学系统中心点据地面距离(即轨道高度)为 H , 相机焦距为 f 。

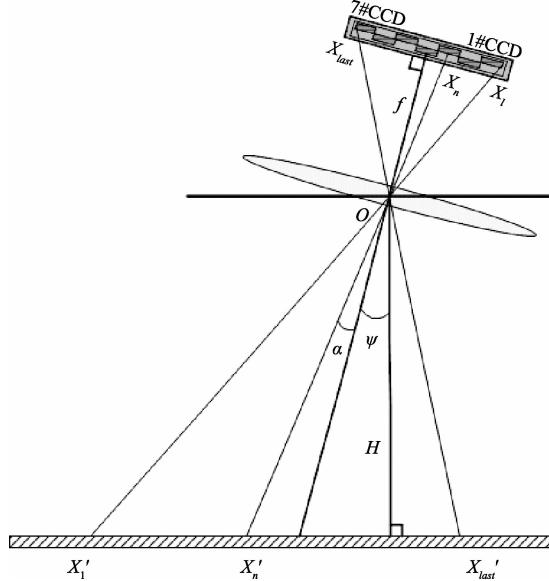


图 3 侧摆推扫成像几何关系

在侧摆角为 ψ 下计算相机焦平面上任意一个像元点的像移速度, 设相机焦平面上任意一点 X_n , X_n 与地面景物 X_n' 相对应, X_n 与焦平面中心点之间的夹角为 α , 则 X_n 点的像移速度为:

$$V_{X_n} = \frac{OX_n}{OX_n'} V_{X_n'} = \frac{f/\cos\alpha}{H/\cos(\alpha + \psi)} V_{X_n'} \quad (3)$$

式中: $V_{X_n'}$ 为星下点速度。

由第一宇宙速度公式计算得卫星对地心速度为:

$$V_{X_n'} = \frac{R_{\text{地球}}}{H + R_{\text{地球}}} V_{\text{卫星}} \quad (4)$$

$$V_{\text{卫星}} = \sqrt{G \frac{M_{\text{地球}}}{H + R_{\text{地球}}}} \quad (5)$$

式中: $R_{\text{地球}}$ 为地球平均半径, G 为万有引力常数, $M_{\text{地球}}$ 为地

球质量。

选取焦平面每片 TDI CCD 的中心点作为特征点, 由式(3)可以计算出不同侧摆角下焦平面各片 TDI CCD 中心点的像移速度, 理想情况下正侧摆角度和负侧摆角度的像移速度对称, 所以只考虑正侧摆角度情况。取相机侧摆角为 $0^\circ \sim +40^\circ$, 每隔 10° 计算一次各片 TDI CCD 中心点的像移速度。为了更为直观的说明, 将不同侧摆角下焦平面各片 TDI CCD 中心点的像移速度进行直线拟合, 如图 4 所示。从图中可以看出, 当侧摆角为 0° 时各片 TDI CCD 中心点像移速度相同, 随着侧摆角度逐渐增大, 各片 TDI CCD 中心点相对于焦面中心点的像速差异逐渐增大。

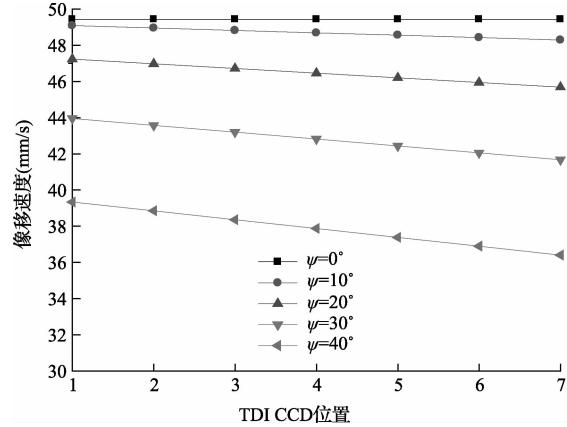


图 4 侧摆成像焦平面像移速度

3.2 前后摆推扫成像像移速度计算

前后摆推扫成像几何关系图如图 5 所示, 前后摆角为 θ (角度的单位是 $^\circ$), 地面景物目标和焦平面上像元的定义和侧摆推扫成像完全相同, 前后摆推扫成像时, 焦平面上的 X_n' 点对应的星下点速度为 $V_{X_n'}$ 。需要提到的是在前后摆角 $\theta = 0^\circ$ 的情况下, 相机也就是平飞推扫成像状态。

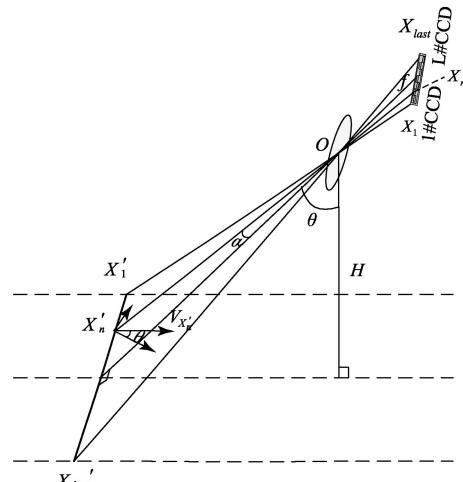


图 5 前后摆推扫成像几何关系

在前后摆角为 θ 下计算相机焦平面上任意一个像元点的像移速度, 设相机焦平面上任意一点 X_n, X_n' 与地面景物 X_n' 相对应, X_n 与焦平面中心点之间的夹角为 α , 则 X_n 点的像移速度为:

$$V_{X_n} = \frac{OX_n}{OX_n'} V_{X_n'} = \frac{f/\cos\alpha}{H/\cos(\alpha)\cos(\theta)} V_{X_n'} = \frac{f}{H} V_{X_n'} \cos(\theta) \quad (6)$$

选取焦平面每片 TDI CCD 的中心点作为特征点, 由式(6)可以计算出不同前后摆角下焦平面各片 TDI CCD 中心点的像移速度, 考虑相机前摆和后摆在理想情况下计算得到的像移速度是对称的, 这里只取相机前摆角为 $0^\circ \sim +40^\circ$, 每隔 10° 计算一次各片 TDI CCD 中心点的像移速度。将不同前摆角下焦平面各片 TDI CCD 中心点的像移速度进行直线拟合, 如图 6 所示, 从图中可以看出, 在所有前摆角条件下各片 TDI CCD 中心点像移速度均相同, 随着前摆角度逐渐增大, 各片 TDI CCD 中心点的像速差异逐渐增大。

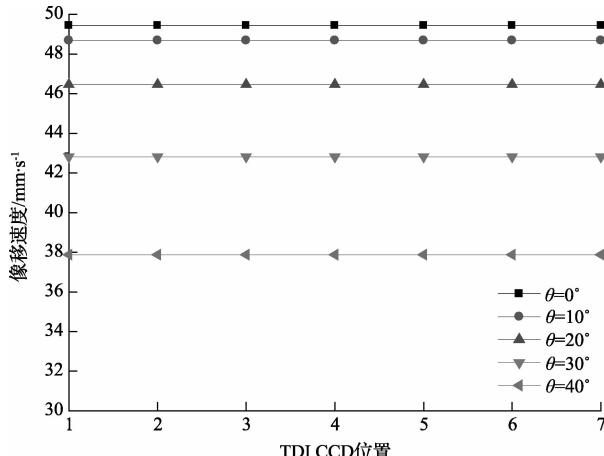


图 6 前后摆成像焦平面像移速度

4 像速匹配模式及传函分析

4.1 像速匹配模式

像速匹配方法非常重要, 匹配精度的高低直接决定了相机获取图像的质量。像速匹配模式包括同速匹配和异速匹配 2 种, 同速匹配是以相机 CCD 焦平面中心点为基准统一设置各片 CCD 的行频; 异速匹配以各片 CCD 中心点为基准分别设置各片 CCD 行频。同速匹配更便于相机电子学计算和实现, 但离像面中心点越远, 像速差异越大, 传函就越低; 而异速匹配增加了像速计算量和控制复杂度, 但匹配精度更高, 图像传函更高^[9-11]。

同速匹配像速差设定如图 7(a)所示, 焦平面中心片(第 4 片)中心点的像速 V_4 设为参考点, 每片 CCD 像点的像速差是该片 CCD 中心点与 V_4 之间的速度差。焦平

面边缘 CCD 的像速差最大, 图像传函最差。异速匹配像速差设定如图 7(b)所示, 焦平面每片 CCD 中心点的像速($V_1 \sim V_7$)设为各自参考点, 每片 CCD 其他像点的像速差是该像点与该片 CCD 中心点($V_i, i=1 \sim 7$)之间的速度差。每片 CCD 的边缘点与 CCD 中心点的像速差最大, 即图像传函最差。

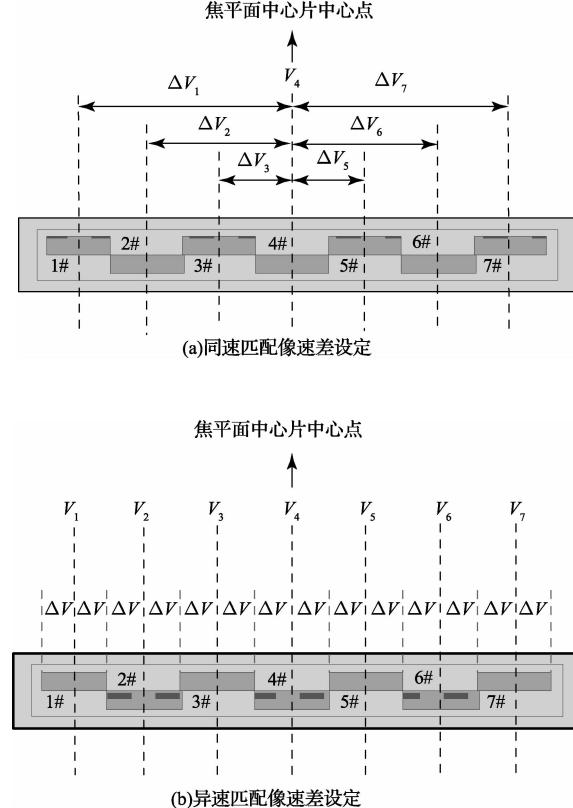


图 7 像速匹配模式

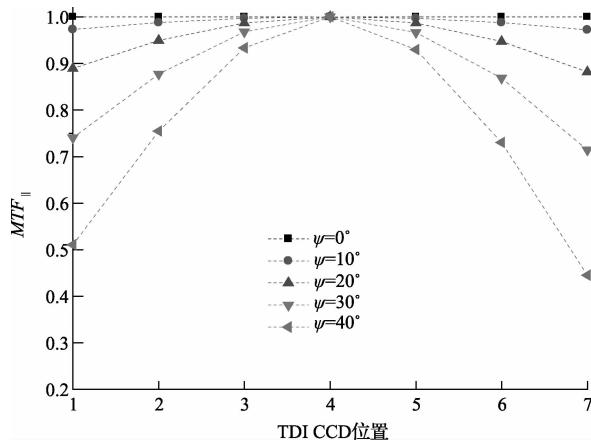
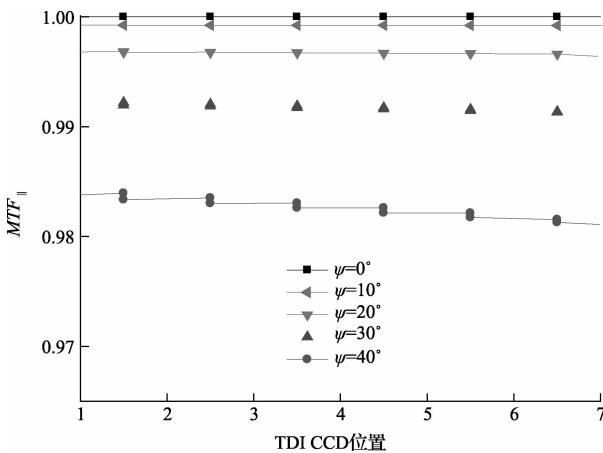
4.2 侧摆推扫成像传函计算

当特征频率 f_c 等同于奈奎斯特频率 f_N , 像移速度残差引起的 MTF_{\parallel} :

$$MTF_{\parallel} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2fN} \frac{\Delta V}{V_m}\right)}{\pi \frac{Mfc}{2fN} \frac{\Delta V}{V_m}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} M \frac{\Delta V}{V_m}\right)}{\frac{\pi}{2} M \frac{\Delta V}{V_m}} \quad (7)$$

式中: $\Delta V = V_m - V_i$ ($i = 1 \sim 7$), $\Delta V/V_m$ 为像速匹配相对误差, 同速匹配模式下(见图 8), V_m 为第 4 片中心点像移速度, ΔV 为每一片 CCD 中心点的像移速度 V_i 与 V_m 的差; 异速匹配模式下(见图 9), V_i 为每片 CCD 中心点的像移速度, V_m 为每片 CCD 边缘点的像移速度, ΔV 为每一片 CCD 中心点像移速度 V_i 与 V_m 的差。

根据式(7)计算同速匹配和异速匹配两种模式下的 MTF_{\parallel} , 在侧摆 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内, 每间隔 10° 计算一次, 其中, 积分级数 M 取 32 级, 结果如图 8 和 9 所示。

图 8 侧摆成像同速匹配 MTF_{\parallel} 图 9 侧摆成像异速匹配 MTF_{\parallel}

在同速匹配模式,随着侧摆角度的增大,各片 CCD 相对中心片的像移速度残差越大,导致 MTF 越低,同时离中心片 CCD 越远,MTF 下降越明显,只能在正负侧摆 10° 范围内保证各片 CCD 的 MTF 都大于 0.95;而在侧摆 40° 成像时仅能保证中间 3 片 CCD 的 MTF 大于 0.9。显然同速匹配模式下 MTF 下降太多,无法满足空间相机大角度正负侧摆成像要求。

在异速匹配模式下,以每片 CCD 中心点像速作为参考来匹配该片 CCD 的边缘像元点,减小了像速残差。由于焦面上各片像速差异非对称分布,MTF 呈非对称分布,在 40° 侧摆时所有片 CCD 的右端点 MTF 均能大于 0.98,可以满足相机侧摆成像的要求。

通过比较上述 2 种匹配模式下的 MTF 结果,假设 MTF_{\parallel} 指标下限为 0.95,确定相机在平飞、俯仰成像以及侧摆 $\pm 10^{\circ}$ (积分级数 $M=32$) 以内时可采用同速匹配,其余工况必须采用异速匹配。在每个积分级数下都要分析 MTF_{\parallel} ,确定两种匹配模式的边界使用条件,降低行频匹配控制复杂度,实现 MTF 最大化。

5 行频匹配实现及精度分析

5.1 行频匹配精度要求

在上一节已经说明了 CCD 同速匹配和异速匹配 2 种工作模式,像移速度匹配精度越高,图像质量越好,但像移速度的匹配需要通过更改 CCD 行频实现,同样,行频控制的精确程度直接影响到图像质量,精度越高,图像质量越好^[12-14]。本节将重点分析行频匹配精度对传函的影响,以及两者之间的数值对应关系,并找出一种快速、高效的行频匹配方法,从而满足一定传函指标下对行频匹配精度的要求。

计算 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 各侧摆角度成像时焦平面各片 CCD 中心点行频,如表 1 所示(正为左侧摆,负为右侧摆)。

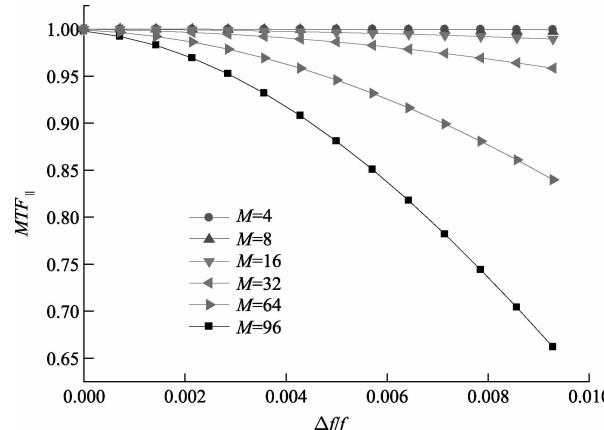
表 1 侧摆成像 CCD 行频规划

CCD 片数	不同侧摆角度下各 TDI CCD 中心点行频/kHz				
	0°	10°	20°	30°	40°
1	5.650 29	5.609 77	5.398 68	5.023 56	4.495 8
2	5.650 29	5.594 69	5.368 99	4.980 15	4.440 0
3	5.650 29	5.579 63	5.339 32	4.936 78	4.384 24
4	5.650 29	5.564 56	5.309 64	4.893 39	4.328 46
5	5.650 29	5.549 49	5.279 96	4.850 00	4.272 68
6	5.650 29	5.534 43	5.250 29	4.806 63	4.216 92
7	5.650 29	5.519 35	5.220 60	4.763 22	4.161 12

首先,找出像速匹配误差 $\frac{\Delta V}{V}$ 与行频匹配误差 $\frac{\Delta f}{f}$ 之间的关系即可分析行频精度 $\frac{\Delta f}{f}$ 对传函 MTF_{\parallel} 的影响。由关系式像移量 $a = V_{\text{电荷转移}} \times t, f = 1/t, \Delta f = 1/\Delta t$, 得出:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_{\text{电荷转移}} - V_{\text{像移}}}{V_{\text{像移}}} = \frac{\frac{a}{t + \Delta t} - V_{\text{像移}}}{V_{\text{像移}}} = \frac{\frac{a/t}{1 + \Delta t/t} - V_{\text{像移}}}{V_{\text{像移}}} = \frac{\frac{V_{\text{电荷转移}}}{1 + \Delta f/f} - V_{\text{像移}}}{V_{\text{像移}}} \quad (8)$$

结合式(7)和式(8)得出行频匹配误差与传函 MTF_{\parallel} 的关系,如图 10 所示。

图 10 行频匹配误差与传函 MTF_{\parallel} 的关系

从图 10 中看出, 行频匹配误差越小, 控制精度越高, 相机传函越高, 图像质量就越好。如果需要满足 $MTF_{\text{行频失配}} \geq 0.95$ 的条件, 每个积分级数下的行频精度要求如表 2 所示, 积分级数越高, 需要的行频精度就越高, 其中积分级数为 96 级时行频精度要求最高, 行频精度至少要保证优于 0.996 34。

表 2 不同积分级数下的行频精度要求

积分级数	行频匹配误差	行频精度要求
96	0.003 66	0.996 34
64	0.005 49	0.994 51
32	0.010 98	0.989 02
16	0.021 96	0.978 04
8	0.043 92	0.956 08
4	0.087 84	0.912 16

5.2 行频规划与数据处理

由前所述, CCD 行频是决定相机成像质量的一个重要因素, 因此, 需要对 CCD 成像行频有一个高效、合理的规划。行频规划如图 11 所示。首先, 考虑相机任务需求中的轨道要求和限制, 相机成像系统需要预留出足够的资源实现 CCD 行频的相应调整, 行频设有最大阈值 f_{\max} 和最小阈值 f_{\min} 分别能够满足 CCD 相机最低轨道和最高轨道成像

要求; 其次, 考虑每一轨成像前的轨道参数和姿态参数, 为了在具体实现中提高行频调整效率, 设置中心行频 f_c 和行频滑动窗口 f_w , 行频滑动窗口的最大值为 f_H , 最小值为 f_L , 中心行频 f_c 和行频滑动窗口 f_w 将占用较少的资源和响应速度。

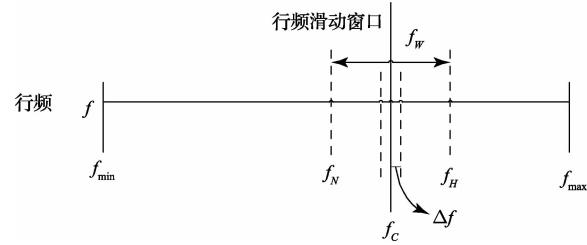


图 11 行频定义与规划

相机上电后, CCD 成像系统按照默认轨道行频参数初始化相关计数器, 时序发生器根据行频调整计数器和行频产生计数器的内容更改 CCD 行频。在每一轨成像前, 相机控制器根据卫星注入的轨道参数和姿态参数计算行频, 确认此轨成像的中心行频和行频调整范围, 中心行频和滑动行频范围窗口的中心点频率相同, 然后, 确定行频调整计数器和行频产生计数器, 触发时序发生器更改 CCD 行频。

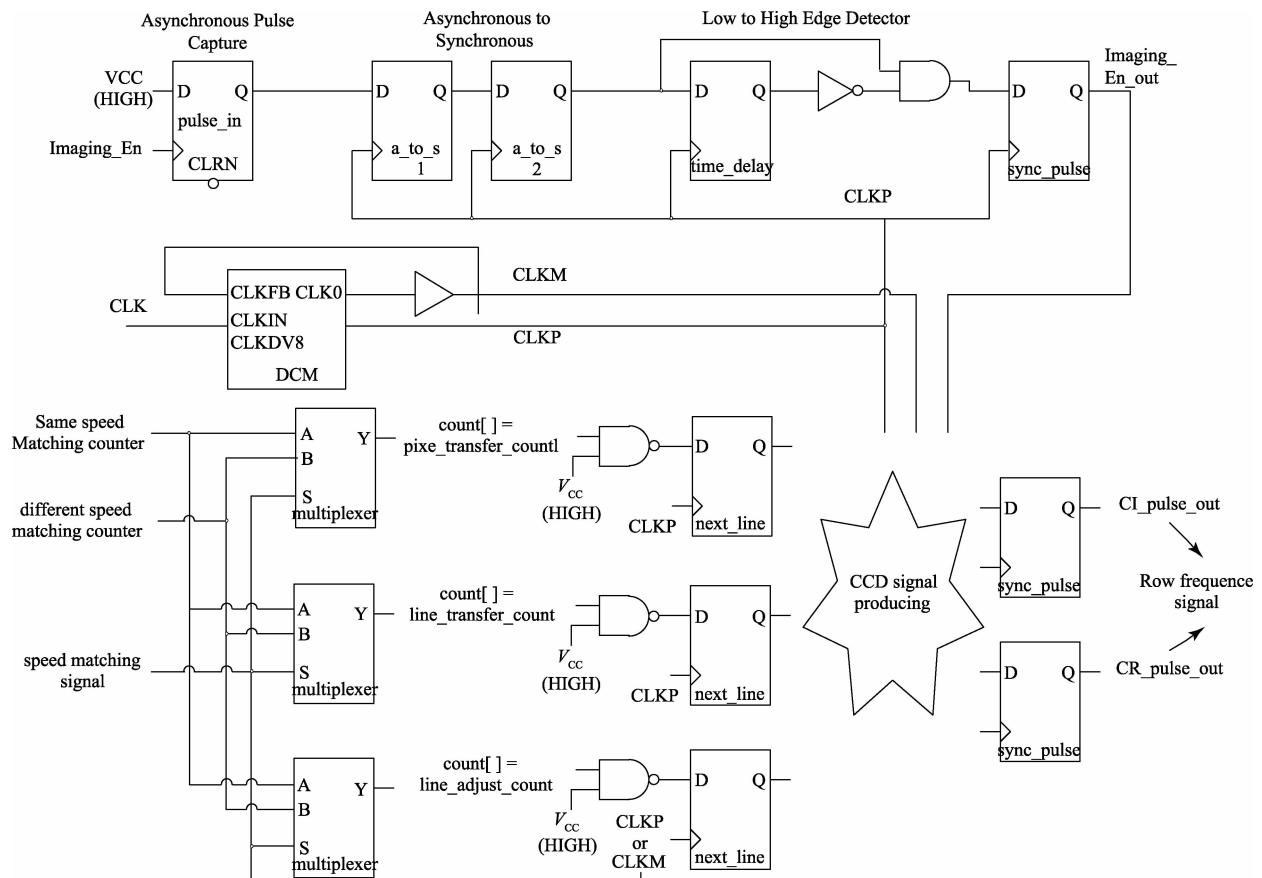


图 12 行频匹配具体实现结构

5.3 行频匹配实现与精度分析

行频匹配具体实现结构如图 12 所示,系统接收到成像使能信号 Image_En 后经过同步锁存、边沿检测出发 CCD 时序驱动信号产生,像速匹配信号表示同速匹配和异速匹配模式切换,针对不同模式进行计数器初始化操作。时钟输入信号 CLK 经过时钟管理模块 DCM 输出基本时钟 CLK_m 和像元时钟 CLK_p 。

行频的更改最终由 CCD 时序发生器来实现,CCD 时序发生器将产生 CCD 积分和电荷转移所需的时序信

号,时序信号包括电荷垂直转移信号 $CI(1\sim4)$,水平转移信号 $CR1\sim CR4$,垂直转移信号 CI 的一个信号周期即为积分时间,垂直转移信号 CI 和水平转移信号 CR 要保持一定的相位关系。 CI 一个信号周期内包括像元转移时间 $t_{pixel_transfer}$ 、行转移时间 $t_{line_transfer}$ 和行调整时间 t_{line_adjust} ,其中,行调整时间 t_{line_adjust} 为行频调整部分。定义如图 13 所示,CCD 时序均由像元时钟信号 CLK_p 产生,而像元时钟信号 CLK_p 由基本主时钟 CLK_m 产生, CLK_m 是 CLK_p 的 8 倍频始终。

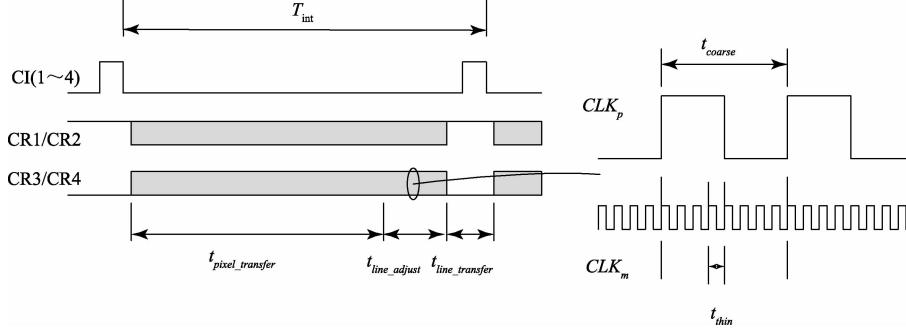


图 13 行频匹配主要时序关系

图 13 中 $t_{pixel_transfer}$ 、 $t_{line_transfer}$ 和 t_{line_adjust} 均由像元时钟信号 CLK_p 计数产生,三者对应的计数器分别是 $n_{pixel_transfer}$ 、 $n_{line_transfer}$ 和 n_{line_adjust} ,计数器的值由像移速度匹配参数决定,设定具体行频计算如式(9):

$$f_{line} = \frac{f_{pixel} \times 1000}{n_{pixel_transfer} + n_{line_transfer} + n_{line_adjust}} \text{ (kHz)} \quad (9)$$

式中: $n_{pixel_transfer}$ 为 CCD 像元数 $6144/4=1536$ (CCD 采用 4 个通道同时输出像元信号)、 $n_{line_transfer}$ 等价于 200 个 CLK_p 周期, n_{line_adjust} 是可调量,其精度直接决定了行频 f_{line} 的精度。这里设定像元时钟信号 CLK_p 为 10 MHz,粗调时 n_{line_adjust} 采用像元时钟 CLK_p 计数,最小可调时间间隔为 100 ns;精调时 n_{line_adjust} 采用基本时钟 CLK_m 计数,最小可调时间间隔为 12.5 ns。

精调和细调 2 种调整方式的误差精度如表 3 所示,粗调时,行频匹配精度可以达到 0.999 425,可满足传函值 0.998 07;精调时,行频匹配精度可以达到 0.999 928,可满足传函值 0.999 25,2 种方法均可使传函值优于 0.998。

表 3 行频实现精度及相应传函

调整方式	匹配误差	匹配精度	可满足传函值
粗调	0.000 574 6	0.999 425	0.998 07
精调	0.000 071 88	0.999 928	0.999 25

6 结 论

TDI CCD 相机像面上像点像速差异较大,深入分析了大视场 TDICCD 相机大角度机动成像的像速场特性,重点对同速匹配和异速匹配方法对传函的影响及其使用条件进行了详细的阐述,在给定行频匹配精度要求的前提下,提出了一种可支持粗调和精调的高精度行频匹配方法,并分析已实现行频匹配方法的精度,最终满足给定行频匹配精度要求,粗调方法使行频精度达到 0.999 425,精调方法使行频精度达到 0.999 928,使相机传函 MTF 满足要求优于 0.998 的要求,从而实现大视场 TDICCD 相机在各种大角度条件下高质量成像。

参考文献

- [1] 荣少巍. 基于 FPGA 的高精度多通道采集存储系统研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(4): 108-112.
- [2] 武星星, 刘金国. 基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 351-359.
- [3] 王运, 颜昌翔. 基于差分法的空间相机像移速度矢量计算[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1054-1060.
- [4] 金光, 任秉文, 钟兴. 瞬变对 TDI-CCD 空间相机的影响分析及抑制方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 221-227.
- [5] 王家骐, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢量计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.

(下转第 91 页)

针对大视场遥感相机大姿态角成像过程中,由于