

宽视场遥感相机像移速度模型及补偿策略

李永昌¹ 金龙旭² 李国宁² 武奕楠² 王文华²

1 航天东方红卫星有限公司,北京,100094
2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春,130033

摘 要:宽视场遥感相机在轨成像期间,受地球自转、卫星颤振、姿态机动等因素影响而产生像移,导致成像质量降低。为此,提出了一种适用于宽视场遥感相机的像移速度模型,并考虑了离轴角对计算精度的影响,推导了离轴三反相机像移速度和偏流角解析式。以某卫星为例,仿真分析了 3 种典型成像模式下像移速度和偏流角在焦面的分布情况,仿真结果与定性分析结果一致,验证了像移速度模型的正确性。在此基础上,针对侧摆兼具俯仰成像模式,提出了相应的像移补偿策略。补偿效果表明,卫星侧摆 35°兼具俯仰 35°成像时,采用全局优化偏流角匹配策略能保证整个焦面区域的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)均大于 0.95(16 级);采用局部优化偏流角匹配策略能保证焦面重点观测目标的 MTF 大于 0.95(96 级);采用提出的像移速度匹配策略在分 11 组调节行周期情况下,能保证整个焦面区域的 MTF 均大于 0.95(16 级)。仿真结果表明,提出的像移补偿策略能有效解决侧摆兼具俯仰成像时的像质下降问题,可为宽视场遥感相机像移补偿提供可靠依据。

关键词:宽视场;遥感相机;离轴三反;像移速度;像移补偿

中图分类号:P231.5 **文献标志码:**A

空间遥感技术的飞速发展使遥感相机的幅宽及地面分辨率等指标都得到了大幅度提升,促进了遥感卫星在军事侦察、地理测绘、农业估产等领域中的广泛应用。目前,离轴三反光学系统以其无中心遮拦、结构紧凑、长焦距与宽视场兼具等特点广泛应用于空间对地观测系统中。时间延迟积分电荷耦合器件(time delay and integration charge coupled devices, TDI CCD)因探测灵敏度高、输出信噪比高、曝光时间可控等特点,被广泛用作空间遥感相机的焦面器件^[1-4]。理论上,TDI CCD 相机的行转移速率应严格与地物目标的运动速率同步,然而遥感相机在轨成像过程中,受地球自转、大气传输及折光、卫星姿态机动等因素影响,导致目标像点在焦面上发生相对运动,称之为像移,像移对具有侧摆和俯仰姿态机动能力的宽视场遥感相机影响更大^[5-8]。为保证高质量成像,需精确计算出焦面各像点的像移速度,并通过调整 CCD 行转移周期、焦面偏流机构匹配偏流角等方式对像移进行实时补偿^[9-12]。因此建立高精度的像移速度模型是进行像移补偿的重要前提

与关键技术。

近年来,国内外学者做了大量有关遥感相机像移补偿技术的研究工作^[13-21]。国外对高分辨率相机的像移速度模型及其补偿方法保密甚严。从公开的资料来看,2014 年美国的 WorldView-3 卫星地面分辨率可达 0.31 m,仅需用时 12 s 即可快速侧摆机动 18°;2014 年法国发射的 SPOT7 卫星具有更强的姿态机动能力,侧摆 30°仅需用时 14 s,并且具备多种成像模式。国内方面,王家骥等^[19]率先通过齐次坐标变换法提出了星下点像移速度矢量计算模型,该模型对中国后续开展像移补偿研究具有重要指导意义,但该模型已不适用于具有侧摆和俯仰姿态机动能力的遥感相机;武星星等^[20]采用几何投影法,推导了基于地球椭圆的大视场遥感相机像移速度和偏流角计算解析式,并分析了补偿方式对焦面调制传递函数(modulation transfer function, MTF)的影响,但其对像移速度的计算只简化考虑了某些特征点,未对像移速度在焦面的整体分布情况进行分析;王翀等^[21]基于像方系观测目标视运动法,建立了

大视场遥感相机像速场模型,并对不同成像姿态下焦面像速场的分布规律进行了仿真,但忽略了离轴三反光学系统中的离轴角对像移速度计算精度的影响。

本文针对上述模型的不足,提出了一种适用于具备姿态机动能力的宽视场离轴三反相机像移速度模型。在此基础上,仿真分析了不同成像姿态下像移速度和偏流角在相机焦面的整体分布情况,并针对目前开展研究较少的侧摆兼俯仰成像模式提出了相应的像移补偿策略。

1 遥感相机像移速度模型建立

离轴三反遥感相机像移速度模型建立过程涉及 5 个坐标系(右手系),各坐标系之间的矢量关系如图 1 所示,地球选用 WGS84 椭球模型。建模涉及的物理量包括地球半短轴 b_e ,半长轴 a_e ,卫星速度 $\mathbf{V}$,轨道倾角 i ,卫星地心距 r ,轨道升交点赤经 Ω ,卫星纬度幅角 u (轨道面内与升交点间地心角),相机焦距 f 和相机离轴角 δ 。

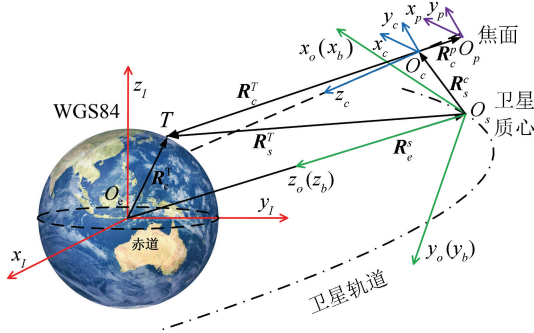


图 1 坐标系矢量关系

Fig.1 Vector Relation of Coordinate Systems

1.1 坐标系定义

I 系,即地心赤道系 $O_e-x_Iy_Iz_I$ 。原点为地心 O_e , $O_e x_I$ 在赤道平面内指向 J2000 春分点, $O_e z_I$ 垂直于赤道面指向北极。

o 系,即卫星轨道系 $O_s-x_o y_o z_o$ 。原点为卫星质心 O_s , $O_s x_o$ 在轨道平面内指向卫星运动方向, $O_s z_o$ 指向地心 O_e 。

b 系,即卫星本体系 $O_s-x_b y_b z_b$ 。原点为卫星质心 O_s ,无姿态运动时, b 系和 o 系重合,存在姿态运动时, b 系相对 o 系的偏航、俯仰、横滚角分别为 ψ, θ, φ ,相应的姿态角速度分别为 $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}$ 。

c 系,即相机系 $O_c-x_c y_c z_c$ 。原点为相机光学系统主点 O_c , $O_c x_c y_c$ 面为遥感相机的物镜面, $O_c z_c$ 沿光轴方向指向地面目标 T 。

p 系,即焦面系 $O_p-x_p y_p z_p$ 。原点为相机焦

面中心 O_p , $O_p x_p y_p$ 面为遥感相机焦面, $O_p x_p$ 沿 TDI CCD 积分方向且与 $O_c x_c$ 平行, $O_p y_p$ 沿 CCD 线阵方向且与 $O_c y_c$ 平行, $O_p z_p$ 为焦面法线且与 $O_c z_c$ 同向。

1.2 像移速度计算解析式

由图 1 中的坐标系关系可知:

$$\mathbf{R}_s^T = \mathbf{A}_I^o \mathbf{R}_e^T - \mathbf{R}_e^s \quad (1)$$

式中, $\mathbf{R}_s^T$ 指由 O_s 指向地物点 T 的矢量在 o 系内的表示; $\mathbf{R}_e^T$ 指由 O_e 指向地物点 T 的矢量在 I 系内的表示; $\mathbf{R}_e^s$ 指由 O_e 指向原点 O_s 的矢量在 o 系内的表示; $\mathbf{A}_I^o$ 指从 I 系到 o 系的旋转矩阵:

$$\mathbf{A}_I^o = \mathbf{C}_y(-u - \frac{\pi}{2}) \mathbf{C}_x(i - \frac{\pi}{2}) \mathbf{C}_z(\Omega) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{C}_x, \mathbf{C}_y, \mathbf{C}_z$ 分别为绕 x, y, z 轴的基元旋转矩阵。由矢量关系可知:

$$\mathbf{R}_c^T = \mathbf{M}_b^c (\mathbf{A}_o^b \mathbf{R}_s^T - \mathbf{R}_s^c) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{R}_c^T$ 指由 O_c 指向地物点 T 的矢量在 c 系内的表示; $\mathbf{R}_s^c$ 指由 O_s 指向 O_c 的矢量在 b 系内的表示; $\mathbf{A}_o^b$ 指从 o 系到 b 系的旋转矩阵; $\mathbf{M}_b^c$ 指从 b 系到 c 系的相机安装矩阵。

由 p 系内的矢量关系可知:

$$\mathbf{R}_p^q = -\frac{f}{H} \mathbf{R}_c^T - \mathbf{R}_c^p \quad (4)$$

式中, $\mathbf{R}_p^q$ 指由 O_p 指向 T 所对应的焦面目标像点 q 的矢量在 p 系内的表示; H 指 $\mathbf{R}_c^T$ 在 z 轴分量的距离; $\mathbf{R}_c^p$ 指由 O_c 指向焦面中心 O_p 的矢量在 c 系内的表示。

焦面目标像点 q 的像移速度矢量可由 $\mathbf{R}_p^q$ 对时间的导数求出,即:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}}_p^q &= [\mathbf{V}_{p1} \mathbf{V}_{p2}] = -\frac{f}{H} \dot{\mathbf{R}}_c^T + \frac{\dot{H}f}{H^2} \mathbf{R}_c^T = -\frac{f}{H} \mathbf{M}_b^c \cdot \\ &(\dot{\mathbf{A}}_o^b \mathbf{R}_s^T + \mathbf{A}_o^b \dot{\mathbf{R}}_s^T) + \frac{\dot{H}f}{H^2} \mathbf{M}_b^c (\mathbf{A}_o^b \mathbf{R}_s^T - \mathbf{R}_s^c) = \\ &-\frac{f}{H} \mathbf{M}_b^c (\dot{\mathbf{A}}_o^b (\mathbf{A}_I^o \mathbf{R}_e^T - \mathbf{R}_e^s) + \mathbf{A}_o^b (\dot{\mathbf{A}}_I^o \mathbf{R}_e^T + \\ &\mathbf{A}_I^o \dot{\mathbf{R}}_e^T - \dot{\mathbf{R}}_e^s)) + \frac{\dot{H}f}{H^2} \mathbf{M}_b^c (\mathbf{A}_o^b \mathbf{R}_s^T - \mathbf{R}_s^c) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,取 $\dot{\mathbf{R}}_p^q$ 在焦面内的两个量(焦面 $z_p \equiv 0$),即可得到焦面目标像点 q 的前向像移速度 $\mathbf{V}_{p1}$ 和横向像移速度 $\mathbf{V}_{p2}$,而像移速度 $\mathbf{V}_p$ 和偏流角 β 的计算如下:

$$\mathbf{V}_p = \sqrt{\mathbf{V}_{p1}^2 + \mathbf{V}_{p2}^2} \quad (6)$$

$$\beta = \arctan(\mathbf{V}_{p2} / \mathbf{V}_{p1}) \quad (7)$$

1.3 模型分量推导

离轴三反光学系统目前已在宽视场遥感相机中广泛使用,图 2 为离轴相机成像示意图,摄影点

视轴与相机光轴之间存在离轴角。对宽视场相机而言,离轴角在像移速度计算模型中不可忽视。

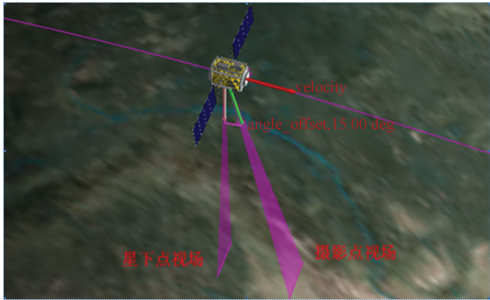


图2 离轴相机成像原理
Fig.2 Imaging Principle of Off-Axis Camera

计算焦面某一像点像移速度的前提是根据焦面像点的位置推算出对应的地物点在 I 系内的位置,即地物点位置矢量。如焦面某一像点 i 对应一个地物点 T , 设 $\mathbf{R}_c^T = [x_c \ y_c \ z_c]^T$, $\mathbf{R}_e^T = [x_i \ y_i \ z_i]^T$, 则根据上述矢量关系可将地物点位置矢量 $\mathbf{R}_e^T$ 表示为:

$$\mathbf{R}_e^T = \mathbf{A}_o^I (\mathbf{A}_b^o (\mathbf{M}_c^b \mathbf{R}_c^T + \mathbf{R}_s^T) + \mathbf{R}_e^T) \tag{8}$$

式中, $\mathbf{A}_o^I$ 、 $\mathbf{A}_b^o$ 和 $\mathbf{M}_c^b$ 分别为 $\mathbf{A}_I^o$ 、 $\mathbf{A}_o^b$ 和 $\mathbf{M}_b^c$ 的逆矩阵。

根据 c 系和 p 系的几何关系可得到约束方程组为:

$$\begin{cases} x_c + x_p z_c / f - z_c \tan \delta = 0 \\ y_c + y_p z_c / f = 0 \\ (x_i^2 + y_i^2) / a_e^2 + z_i^2 / b_e^2 - 1 = 0 \end{cases} \tag{9}$$

式中, (x_p, y_p) 是像点 q 的焦面坐标; δ 为相机离轴角。由式(8)、式(9)结合物理意义选取 z_c 较小的一组解,即可解得地物点位置矢量 $\mathbf{R}_e^T$, 然后可求出 $\mathbf{R}_e^T$ 对时间的导数:

$$\dot{\mathbf{R}}_e^T = \boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{R}_e^T = [0 \ 0 \ \omega_e]^T \times \mathbf{R}_e^T \tag{10}$$

式中, $\boldsymbol{\omega}_e$ 指地球自转角速度。

式(2)中 $\mathbf{A}_I^o$ 的参数 Ω 和 i 均为某一固定值, 因此 $\dot{\mathbf{A}}_I^o$ 可由纬度幅角 u 对时间的导数求出:

$$\dot{u} = \dot{f}_{\text{sat}} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_e}{a(1-e^2)}} (1 + e \cos f_{\text{sat}})}{r} \tag{11}$$

式中, a 为轨道长半轴; e 为轨道偏心率; f_{sat} 为真近点角; μ_e 为地球引力常数。

设 $\boldsymbol{\omega}_b$ 为姿态角速度在 b 系下的分量, 当卫星采用 1-2-3 姿态转序时, $\boldsymbol{\omega}_b$ 为:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_b &= [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T = \\ &\mathbf{C}_z(\psi) \left[\mathbf{C}_y(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{C}_x(\varphi) \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{12}$$

因此,式(5)中从 o 系到 b 系的变换矩阵 $\mathbf{A}_o^b$ 对时间的导数为:

$$\dot{\mathbf{A}}_o^b = -\boldsymbol{\omega}_b^\times \mathbf{A}_o^b = - \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}_o^b \tag{13}$$

$\mathbf{H}$ 对时间的导数为:

$$\dot{\mathbf{H}} = [0 \ 0 \ 1] \mathbf{M}_b^c (\dot{\mathbf{A}}_o^b \mathbf{R}_s^T + \mathbf{A}_o^b \dot{\mathbf{R}}_s^T) \tag{14}$$

将求出的地物点位置矢量 $\mathbf{R}_e^T$ 以及各模型分量 $\dot{\mathbf{R}}_e^T$ 、 $\dot{\mathbf{A}}_I^o$ 、 $\dot{\mathbf{A}}_b^o$ 、 $\dot{\mathbf{H}}$ 等代入式(5),可推导出像移速度计算解析式,其中 $\mathbf{R}_e^T$ 、 $\mathbf{R}_s^T$ 和 $\mathbf{M}_b^c$ 均为不随时间变化的常矢量,对时间的导数为零。

综上所述,采用本文提出的像移速度模型对焦面某一目标像点的像移速度和偏流角进行计算,流程如图3所示。

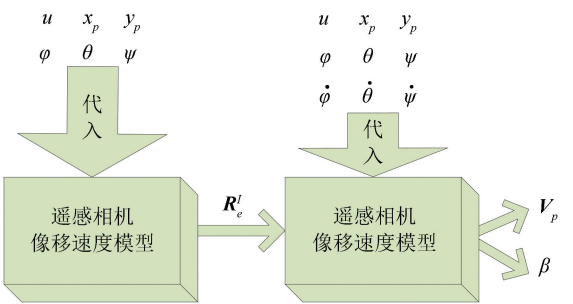


图3 像移速度和偏流角计算流程图
Fig.3 Flowchart of Image Motion Velocity and β Calculation

2 焦面像移速度和偏流角分析

像移速度矢量是像点坐标 (x_p, y_p) 的二维函数。图4为某卫星降轨至赤道处(0°),宽视场遥感相机在侧摆、俯仰、侧摆兼具俯仰3种典型成像姿态下的焦面像移速度 V_p 和偏流角 β 分布仿真结果。轨道倾角 98.192° , 轨道高度 645 km, 焦面由 11 片 TDI CCD 交错拼接组成, CCD 有效像元数 8 192, 像元尺寸 $10 \mu\text{m}$, 焦距 10 m, 离轴角 6.5° 。本文充分考虑了两行拼接 CCD 之间的区域,对像移速度和偏流角在焦面的整体二维分布情况进行分析,从而为后续的像移补偿工作提供依据。

由图4仿真结果可知,遥感相机在不同成像姿态下的焦面像移速度和偏流角均呈非线性异向分布。

2.1 侧摆成像

图4(a)中,侧摆成像时像移速度在沿 CCD

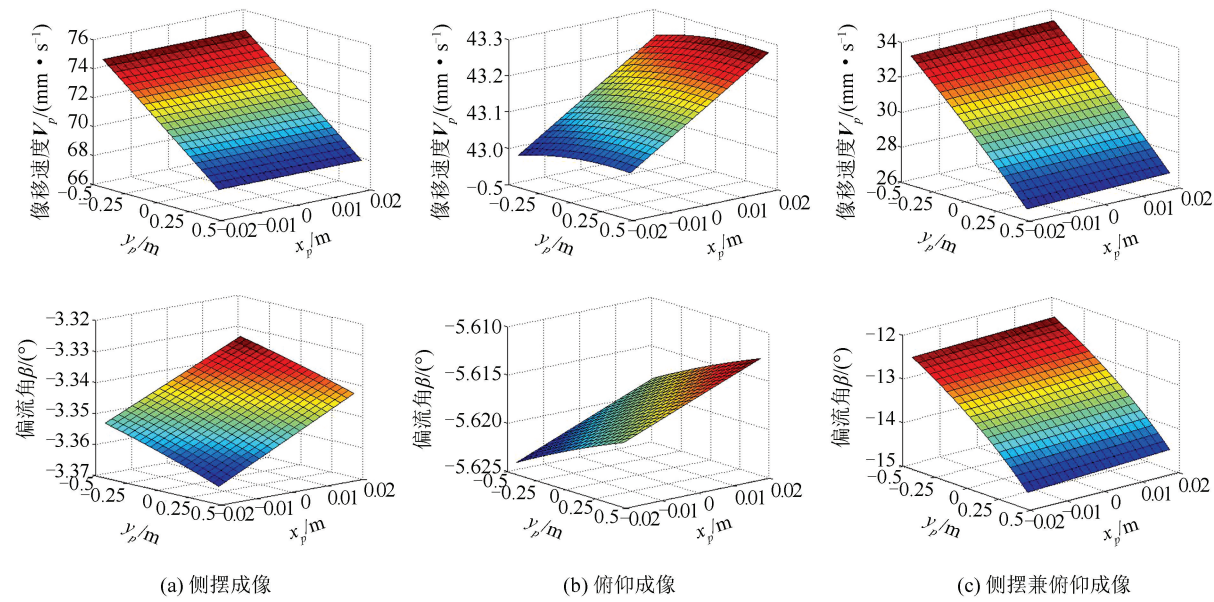


图 4 焦面像移速度和偏流角分布仿真结果

Fig.4 Distribution of Focal Plane Image Motion Velocity and Drift Angle

线阵方向(y 轴)差异明显,偏流角则在焦面分布较为均匀,原因在于侧摆成像导致沿 CCD 线阵方向各像点对地视线长度各异。图 4(a)为左侧摆成像结果,位于焦面右侧的像点视线长度更长,因此右侧像点的像移速度要小于左侧;而偏流角的分布则与地球自转有关,降轨左侧摆成像导致焦面右侧像点所指向的地物点纬度更高(地球自转线速度更小),所以焦面右侧像点的横向像移速度要小于左侧,而偏流角则是由横向像移速度与前向像移速度共同决定的。

卫星降轨经过赤道时,相机侧摆成像焦面中心点偏流角 β 随侧摆角 φ 的变化如图 5 所示。

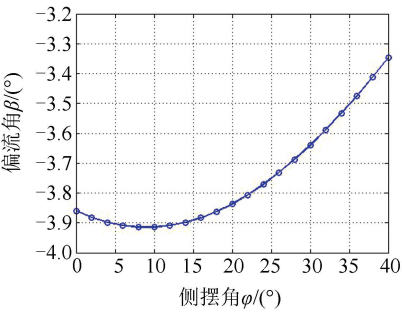


图 5 星下点纬度 0° 偏流角随侧摆角变化

Fig.5 Change of Drift Angle Along with Scrolling Angle when Subastral Point Latitude is 0°

可以看出,偏流角趋势大体上是随侧摆角的增大而减小(正负指方向),但并非在侧摆角 0° 时最大。原因在于本文提出的像移速度模型考虑了离轴角因素,当卫星降轨经过赤道时,相机左侧摆一个角度后,视轴才会指向对应地球自转线速最

大的赤道处,此时偏流角达到最大。

2.2 俯仰成像

图 4(b)中,俯仰成像时像移速度在焦面的分布较为均匀,只在沿 TDI 积分方向(x 轴)存在 0.3 mm/s 的差异,且像移速度要比侧摆成像时小,而偏流角比侧摆成像时大。原因在于相机采用前离轴设计,前仰 35° 比侧摆 35° 对应的视线更长,因此在相同姿态角度下,俯仰的像移速度要比侧摆小。偏流角的大小则是由横向像移速度 V_{p2} 与前向像移速度 V_{p1} 的比值决定的,焦面像点的前向像移速度在俯仰成像时要远小于侧摆成像时,而这两种姿态下的横向像移速度值差异不大,因此俯仰成像时的焦面偏流角整体大于侧摆成像时。

图 6 为卫星绕轨一圈前仰 35° 成像,相机离轴角 δ 分别取 0° 、 2° 、 4° 和 6° 时,焦面中心点像移速度 V_p 随卫星纬度幅角 u 的变化情况。

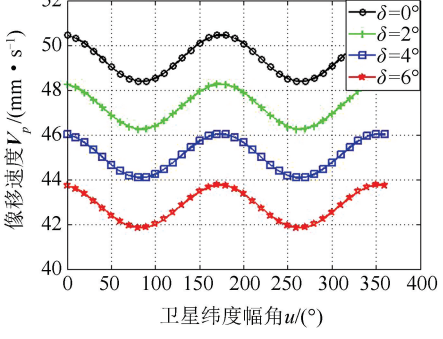


图 6 不同离轴角时像移速度随纬度幅角变化

Fig.6 Change of Image Motion Velocity Along with Argument of Latitude at Different Off Axis Angles

可以看出,卫星绕轨一圈前仰成像过程中,焦面中心点的像移速度在地球两极处达到最小,在赤道处达到最大。卫星在同一纬度幅角处,焦面像移速度随着离轴角的增大而减小,可见离轴光学系统与同轴光学系统的像移速度差值随离轴角增大,该现象在俯仰成像时尤为明显。在像移速度建模过程中若不考虑离轴角因素,会产生较大的像移补偿误差,导致成像质量下降,因此俯仰成像时,不可忽略离轴角对焦面像移速度的影响。

2.3 侧摆兼具俯仰成像

图 4(c)中,侧摆兼具俯仰成像时,像移速度和偏流角均在沿 CCD 线阵方向(y 轴)差异明显,相比仅侧摆或者仅俯仰成像,像移速度值偏小,而偏流角偏大。原因在于,卫星前仰会造成焦面后端比前端像点的视线更长,而左侧摆会造成焦面右侧比左侧像点的视线更长,但由于焦面在沿 TDI 积分方向很短,因此像移速度在沿 TDI 积分方向差异不明显,而在沿 CCD 线阵方向差异明显。偏流角的分布则是由于卫星低轨运动对像移速度的影响远大于地球自转,造成横向像移速度在沿 CCD 线阵方向变化缓慢,因此焦面左侧像点的偏流角小于右侧。卫星降轨至赤道处(0°),焦面中心点像移速度 V_p 随俯仰角 θ 和侧摆角 φ 的变化如图 7 所示。

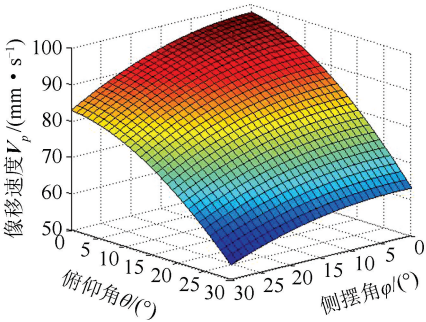


图 7 像移速度随俯仰角和侧摆角的变化
Fig.7 Change of Image Motion Velocity Along with Scrolling and Pitching Attitude Angles

可以看出,像移速度随俯仰角或侧摆角的增大存在不同程度的减小,当俯仰角和侧摆角均为 0° 时, V_p 最大,当俯仰角和侧摆角均为 30° 时, V_p 最小。原因在于,增大侧摆角时,焦面中心点到地物点的视线变长,导致像移速度减小;而增大俯仰角时,不仅焦面中心点到地物点的视线变长,且卫星在轨运动所产生的牵连速度与焦面存在一个夹角,导致牵连速度在焦面的投影变小,像移速度随之减小。因此俯仰角或侧摆角姿态角度的增加均会造成侧摆兼具俯仰成像时像移速度的减小。

3 遥感相机像移补偿策略

TDI CCD 遥感相机的像移补偿分为偏流角匹配和像移速度匹配两步。偏流角匹配是以焦面某一参考像元的偏流角为基准来调整焦面角度,使 TDI CCD 电荷的转移方向与参考像元的像移速度方向一致;而像移速度匹配则是通过改变 TDI CCD 行周期的方式,使 TDI CCD 电荷的转移速度大小与参考像元的像移速度大小一致,从而保证同一列像元的曝光电荷对应的均为同一地物点,进而达到对像移进行补偿的目的。

然而由上述分析可知,不同成像姿态下,焦面各像元的像移速度矢量存在明显差异,而受限于 TDI CCD 器件和电路设计等因素,目前尚不能对每个像元单独设置积分时间,并且偏流角匹配时焦面转向也是统一的,故而产生像移速度匹配残差 Δv 和偏流角匹配残差 $\Delta\beta$ 。

为保证高分辨率遥感相机的成像质量,通常要求 Nyquist 频率下由 Δv 和 $\Delta\beta$ 造成的 MTF 下降不大于 5%:

$$\left\{\begin{aligned} \text{MTF}_{D_x} &= \frac{\sin(\frac{\pi}{2} N \frac{\Delta v}{v})}{\frac{\pi}{2} N \frac{\Delta v}{v}} \\ \text{MTF}_{D_y} &= \frac{\sin(\frac{\pi}{2} N \tan\Delta\beta)}{\frac{\pi}{2} N \tan\Delta\beta} \end{aligned}\right. \tag{15}$$

式中, N 为 TDI CCD 积分级数; MTF_{D_x} 、 MTF_{D_y} 分别为由像移速度误差和偏流角误差引起的调制传递函数。

本文在提出的遥感相机像移速度模型基础上,分析不同成像姿态下的焦面 MTF 分布情况,重点针对目前研究较少的侧摆兼具俯仰成像模式,提出相应的像移补偿策略。

3.1 偏流角匹配

1) 全局优化匹配策略

该策略是对焦面全部区域的 MTF_{D_y} 进行整体优化,使焦面各像点的 MTF_{D_y} 均大于 0.95,适用于普查成像任务。实现方法是:先根据成像姿态的变化适当选取 TDI CCD 积分级数,然后以焦面中心点为参考像元对整个焦面进行统一匹配。

2) 局部优化匹配策略

该策略是对相机视场中重点观测目标所对应区域的焦面 MTF_{D_y} 进行局部优化,在保证大姿态角与高积分级数的情况下,使焦面局部区域的

MTF_{D_y} 大于 0.95,适用于详查成像任务。实现方法是:先根据重点观测目标确定与其对应的焦面像点,然后以该像点为参考像元对整个焦面进行统一匹配。

卫星侧摆 35° 兼具俯仰 35° 成像时,采用上述两种偏角匹配策略,所对应的焦面 MTF_{D_y} 分布情况如图 8、图 9 所示。全局优化匹配策略时,当 TDI CCD 的积分级数选取为 16 级时,能保证整个焦面区域的 MTF_{D_y} 均大于 0.95,可显著提升相机的整体成像质量;局部优化匹配策略时,当 TDI CCD 的积分级数提升至 96 级时,能保证焦面边缘重点观测目标的 MTF_{D_y} 大于 0.95,可显著提升相机的局部成像质量。

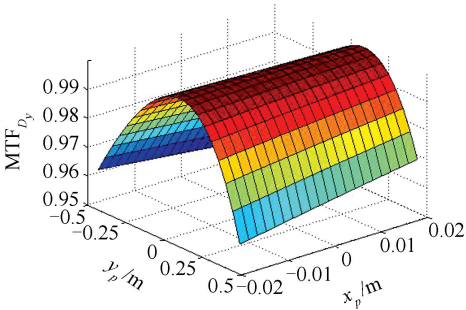


图 8 全局优化匹配策略(16 级)

Fig.8 Global Optimization Matching Strategy (Stage 16)

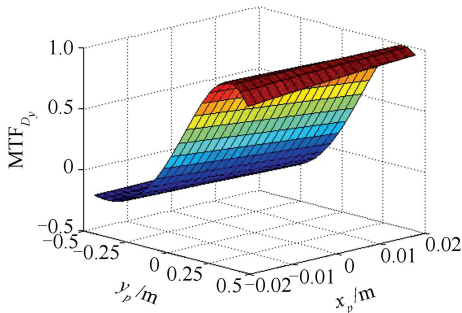


图 9 局部优化匹配策略(96 级)

Fig.9 Local Optimization Matching Strategy (Stage 96)

3.2 像移速度匹配

本文提出一种积分级数选取和分组行周期调节相结合的像移速度匹配策略。实现方法是:先根据地物反射率、太阳高度角以及相机辐射响应度等因素,调节相机 TDI 积分级数至允许范围内的最低级,若此时仍不能保证整个焦面区域的 MTF_{D_x} 均大于 0.95,则需对多片 CCD 进行分组行周期调节,如图 10 所示。

采用上述像移速度匹配策略,不同成像姿态、不同积分分数所对应的焦面 MTF_{D_x} 分布情况如图 11、12 所示。

图 11 中,当成像姿态角为侧摆 10° 兼具俯仰

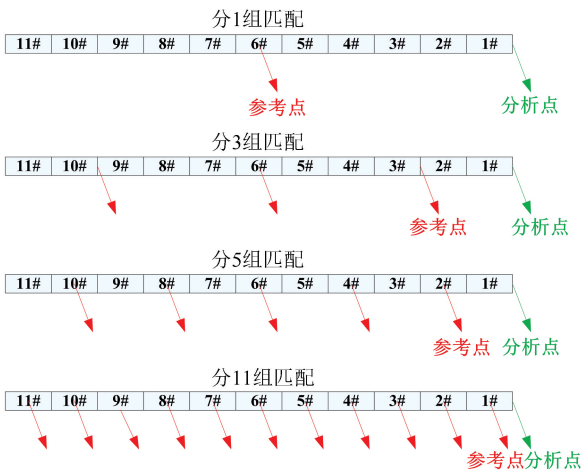


图 10 分组行周期匹配方法

Fig.10 Grouping Matching Method

10° 时,将焦面分 3 组行周期调节,可保证 96 级时整个焦面的 MTF_{D_x} 均大于 0.95;而图 12 中,当成像姿态角增大至侧摆 35° 兼具俯仰 35° 时,即使采用最大分组调节方式(11 组),仍不能保证整个焦面的 MTF_{D_x} 均大于 0.95,此时需降低 TDI 积分级数到 16 级,以保证整个焦面的 MTF_{D_x} 均大于 0.95。

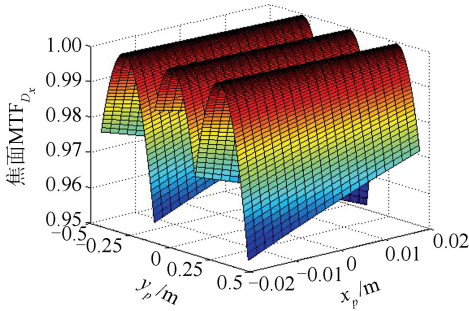


图 11 侧摆 10° 兼具俯仰 10° 时 3 组匹配(96 级)

Fig.11 Scrolling and Pitching Attitude of 10° and Dividing into 3 Groups (Stage 96)

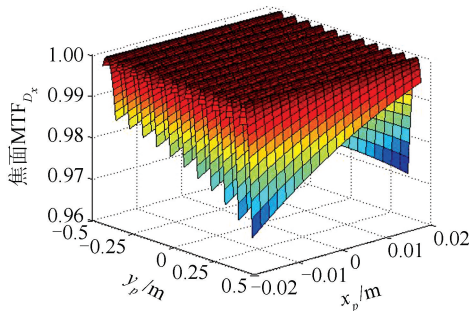


图 12 侧摆 35° 兼具俯仰 35° 时 11 组匹配(16 级)

Fig.12 Scrolling and Pitching Attitude of 35° and Dividing into 11 Groups (Stage 16)

可见,本文提出的像移速度匹配策略既能兼顾相机在小姿态角下的高积分级数,又能兼顾相机在大姿态角下的高传递函数,能有效解决侧摆

兼具俯仰成像时的像质下降问题。

4 结 语

本文提出一种适用于具备姿态机动能力的宽视场遥感相机像移速度模型,推导了离轴三反相机像移速度和偏流角解析式。以某卫星为例,利用 Matlab 仿真分析了 3 种典型成像模式下像移速度和偏流角在焦面的整体分布情况,仿真结果与定性分析得出的经验结果相符,从而进一步验证了像移速度模型的正确性。并对不同成像姿态下的焦面 MTF 分布情况进行了分析,重点针对目前开展研究较少的侧摆兼具俯仰成像模式提出相应的像移补偿策略。补偿效果表明,偏流角的全局优化匹配策略能够保证全部焦面区域的 MTF_{D_y} 均大于 0.95,可显著提升相机的整体成像质量,适用于卫星的普查成像任务;局部优化匹配策略能保证焦面边缘重点观测目标的 MTF_{D_y} 大于 0.95,可显著提升相机的局部成像质量,适用于卫星的详查成像任务;积分级数选取和分组行周期调节相结合的像移速度匹配策略既能兼顾相机在小姿态角下的高积分级数,又能兼顾相机在大姿态角下的高传递函数,能有效解决侧摆兼具俯仰成像时的像质下降问题。本文的研究内容可为宽视场遥感相机的像移补偿提供可靠依据。下一步将重点针对敏捷卫星动机中成像的像移补偿工作开展研究。

参 考 文 献

- [1] Yue Qingxing, Tang Xinming, Gao Xiaoming. Imaging Simulation of Sub-meter Satellite TDI CCD Camera for Surveying and Mapping[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3): 327-332(岳庆兴,唐新明,高小明. 亚米级卫星 TDI CCD 立体测绘相机成像仿真[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(3): 327-332)
- [2] Ning Yonghui, Guo Yongfei. Real-Time Image Processing in TDI CCD Space Mosaic Camera[J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(2): 508-516(宁永慧,郭永飞. 星上时间延迟积分 CCD 拼接相机图像的实时处理[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 508-516)
- [3] Zhang Jian, Zhang Linghua, Liu Liguang, et al. Necessity and Implement Method of Precise Assembling of TDI CCD in Sweep Aerial Remote Sensor[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 996-1 001(张健,张玲花,刘立国,等. 全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调必要性分析及实现方法[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 996-1 001)
- [4] Yan Li, Jiang Yun, Wang Jun. Building of Rigorous Geometric Processing Model Based on Line-of-sight Vector of ZY-3 Imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12): 1 451-1 455(闫利,姜芸,王军. 利用视线向量的资源三号卫星影像严格几何处理模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(12): 1 451 - 1 455)
- [5] He Xiaojun, Qu Hongsong, Zhang Guixiang, et al. Impact of Scan Mirror Stability on TDI CCD System Measure Accuracy[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 665-671(贺小军,曲宏松,张贵祥,等. 扫描镜稳定度对 TDI CCD 测量精度的影响[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 665-671)
- [6] Le Guoqing, Guo Yongfei, Liu Chunxiang, et al. Micro-vibration Detection of Remote Sensing Camera Under Low Exposure Condition[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 917-924(乐国庆,郭永飞,刘春香,等. 低曝光条件下遥感相机微振动量检测[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 917-924)
- [7] Tang Xinming, Zhou Ping, Zhang Guo, et al. Research on a Production Method of Sensor Corrected Products for ZY-3 Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3): 287-299(唐新明,周平,张过,等. 资源三号测绘卫星传感器校正产品生产方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(3): 287-299)
- [8] Liu Lei, Ma Jun, Zheng Yuquan. Defocus Range of Off-Axis Three-Mirror Anastigmat (TMA) Camera Under Space Microgravity[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 320-325(刘磊,马军,郑玉权. 空间微重力下离轴三反相机离焦范围[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 320-325)
- [9] Le V N, Chen S, Fan Z. Optimized Asymmetrical Tangent Phase Mask to Obtain Defocus Invariant Modulation Transferfunction in Incoherent Imaging Systems[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(7): 271-274
- [10] Li Jin, Xing Fei, Wang Chong. High-Precision On-Orbit Assessment of MTF for Space CCD Camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211003(李进,邢飞,王翀. 空间 CCD 相机高精度在轨调制传递函数估算[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211003)
- [11] Hao C L, Chen S Q, Zhang W. Comprehensive Analysis of Imaging Quality Degradation of an Airborne Optical System for Aerodynamic Flow Field Around the Optical Window[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(33): 7 889-7 898
- [12] Lv Hengyi, Xue Xucheng, Zhao Yunlong, et al. Measurement and Experiment of Modulation Transfer Function at Nyquist Frequency for Space Optical Cameras[J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(5):

1 484-1 489(吕恒毅,薛旭成,赵运龙,等. 空间光学相机在乃奎斯特频率处的调制传递函数测试与实验[J].光学精密工程,2015, 23(5): 1 484 -1 489)

[13] Ghosh S K. Image Motion Compensation Through Augmented Collinearity Equations [J].*Optical Engineering*, 1985, 24(6): 241014

[14] Li Gang, Yang Mingyu. Image Motion Measurement for Airborne Camera Based on Joint Transform Correlation[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 401-406 (李刚,杨名字. 基于联合变换相关的机载航空相机像移测量[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 401-406)

[15] Wang Guoliang, Liu Jinguo, Long Kehui, et al. Influence of Image Motion on Image Quality of Off-Axis TMA Aerospace Mapping Camera [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(3):806-813(王国良,刘金国,龙科慧,等.离轴三反航天测绘相机像移对成像质量的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3):806-813)

[16] Zhao Jiaxin, Zhang Tao, Yang Yongming, et al. Image Motion Velocity Field of TDI-CCD Aerial Panoramic Camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7):0728003(赵嘉鑫,张涛,杨永明,等. TDI-CCD 全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7):0728003)

[17] Hu Yan, Jin Guang, Chang Lin, et al. Image Motion Matching Calculation and Imaging Validation of TDI CCD Camera on Elliptical Orbit [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(8): 2 274-2 284(胡燕,金光,常琳,等. 椭圆轨道 TDI CCD 相机像移匹配计算与成像验证[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2 274-2 284)

[18] Liu Haiqiu, Yan Dejie, Wang Dong, et al. Space Camera Image Motion Model Analysis Caused by Spacecraft Vibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6):0612001(刘海秋,闫得杰,王栋,等. 飞船振动引起的空间相机像移模型分析[J].光学学报, 2014, 34(6):0612001)

[19] Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, et al. Space Optical Remote Sensor Image Motion Velocity Vector Computational Modeling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12):1 585-1 589(王家骐,于平,颜昌翔,等. 航天光学传感器像移速度矢计算数学模型[J].光学学报, 2004, 24(12):1 585-1 589)

[20] Wu Xingxing, Liu Jinguo. Image Motion Compensation of Scroll Imaging for Space Camera Based on Earth Ellipsoid [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(2):351-359(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)

[21] Wang Chong, You Zheng, Xing Fei, et al. Image Motion Velocity for Wide View Remote Sensing Camera and Detectors Exposure Integration Control [J]. *Acta Optic Sinica*, 2013, 33(5):0511002(王翀,尤政,邢飞,等.大视场空间遥感相机的像速场及图像传感器曝光积分控制[J].光学学报, 2013, 33(5):0511002)

Image Motion Velocity Model and Compensation Strategy of Wide-Field Remote Sensing Camera

LI Yongchang¹ JIN Longxu² LI Guoning² WU Yinan² WANG Wenhua²

1 DFH Satellite Co. Ltd., Beijing 100094, China

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

Abstract: During the orbit imaging of the wide-field remote sensing camera, it is affected by the earth’s rotation, satellite jittering, attitude maneuverings and other factors, resulting in a decrease in image quality. Therefore a image motion velocity modeling is put forward, which is suitable for the wide-field of the remote sensing camera and considers the effect of off-axis angle on the calculation accuracy, to deduce the off-axis three-mirror camera image motion velocity and drift angle. Taking a satellite as an example, the distribution of the image motion velocity and the drift angle in the focal plane of the three typical imaging modes is simulated. The simulation results, which are consistent with the qualitative analysis results, verify the validity of the image motion velocity model. On this basis, a corresponding image motion compensation strategy is proposed against the scroll and pitch imaging mode. The compensation effect shows that, when the satellite is imaging as scrolling and pitching angles are both 35°, the global optimization drift angle matching strategy can guarantee that the MTF of

the whole focal area is greater than 0.95 (16 integration stages) . The MTF of the focus observation target is greater than 0.95 (96 integration stages) with the local optimization drift angle matching strategy. Using the proposed method of image motion velocity matching strategy, the MTF of the whole focal area is greater than 0.95 (16 integration stages) when dividing the row cycles into 11 groups. The simulation results show that the proposed strategy can effectively solve the image quality degradation problem when scroll and pitch imaging and can provide a reliable basis for the image motion compensation of the wide-field remote sensing camera.

Key words: wide-field;remote sensing camera;off-axis three-mirror;image motion velocity;image motion compensation

First author: LI Yongchang, PhD, mainly engaged in photoelectric imaging technology and image motion compensation technology of space camera. E-mail: liyongchang1231@163.com

Foundation support: The National High Technology Research and Development Program, No.863-2-5-1-13B; Sci-tech Development Program of Jilin Province, No.20130522107JH; the Youth Fund of GF, No.GFZX04061502.

.....
(上接第 1233 页)

ther application of sonar images (for example, seabed target recognition and sediment classification). Current existing methods are mostly based on mathematical interpolation method or acoustic models, but there are still many deficiencies when dealing with complex situations. To solve these problems, this paper proposes a method of weakening angular response effect of the multibeam sonar image based on the angular backscatter characteristics of different seabed sediment type. Firstly, the suitable angular response parameters are reasonably chosen, and the k -mean unsupervised classification method is used to classify the angular response parameters to different sediment types. Secondly, the ave-rage of angular backscatter strength curves corresponding to different seabed sediment type is calcula-ted to obtain the echo characteristic curve of each sediment types. Finally, the angular re-sponse effect is weakened by subtracting the echo characteristic curve of each sediment type from the original echo strength curve and adding the average backscatter strength value of each sediment type. Following the steps, the consistency of the echo intensity is achieved and the quality of the sonar image is improved. During the processes, as to the problem of k selection when using the k -mean method, this paper gives out an iterative selection method. In the experiment, the multibeam sonar data measured in the waters of Jiaozhou Bay was used to verify the method, and it was proved that the method can effectively weaken the angular response effect.

Key words: multibeam sonar; backscatter image; unsupervised seabed classification; angular response; seabed echo characteristics

First author: ZHAO Jianhu, PhD, professor, specializes in the theories and methods of marine surveying and mapping. E-mail: jhzhao@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: YAN Jun, PhD. E-mail: juny.yan@foxmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos.41576107,41376109,41176068.