

离轴三反大视场空间相机像移速度场模型

李永昌^{1,2},金龙旭¹,武奕楠¹,王文华¹,吕增明¹,韩双丽¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大视场空间相机在轨成像期间, 由于地球自转、卫星姿态机动和颤振等因素导致焦面像速场呈非线性各向异性分布。为此提出了一种新的基于刚体运动学的像移速度场建模方法, 考虑离轴角参数, 推导了离轴三反大视场空间相机的像速场解析式。以某大视场空间相机为例, 分析了侧摆成像时同速与异速像移速度匹配模式对相机成像质量的影响。分析结果表明: 以传函下降 5% 为约束, 侧摆 15° 成像时, 当积分级数大于 10 级时应采用异速匹配模式, 积分级数为 32 级时, 异速匹配相比于同速匹配使焦面动态 MTF 从 0.340 8 提高到 0.970 2。当积分级数确定为 16 级时, 侧摆角在 12.3° 以内时可采用同速匹配模式。在轨成像结果证明了像移速度场模型的准确性, 可为大视场空间相机像移补偿提供可靠依据。

关键词: 空间相机; 离轴三反; 像移补偿; 像移速度场; 侧摆成像

中图分类号: V446 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0513001

Image motion velocity field of off-axis TMA space camera with large field of view

Li Yongchang^{1,2}, Jin Longxu¹, Wu Yinan¹, Wang Wenhua¹, Lv Zengming¹, Han Shuangli¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: During the onboard imaging process of space camera with large field of view, due to the effects of earth rotation, satellite attitude maneuverings, jittering and other factors, image motion velocity field of the focal plane has a non-linear anisotropic distribution. To overcome this problem, a novel image motion velocity field modeling method which is based on kinematics of rigid body was proposed. In this model, off-axis angle parameter was introduced and formulas of image motion velocity field in the large view off-axis three-mirror system were derived. Taking a certain large field space camera as an example, influences of synchronous and asynchronous velocity matching models on the camera image qualities were analyzed. Results show that, under a constraint of 5% drop and with scroll angle of 15°, if integral stages are larger than 10, asynchronous velocity matching models should be adopted. Especially when integral stages are fixed to 32, its dynamic MTF on focal plane can be improved to 0.970 2 while

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B); 吉林省科技发展计划(20126016)

作者简介: 李永昌(1988-), 男, 博士生, 主要从事光电成像技术方面的研究。Email: liyongchang1231@163.com

导师简介: 金龙旭(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间相机智能控制技术方面的研究。Email: jinlx@ciomp.ac.cn

it is 0.340 8 in the synchronous model case. However, synchronous velocity matching model outperforms in the condition of 16 integral stages and 12.3° scroll angle. Onboard imaging experiments proved the accuracy of the models which will provide a reliable basis for large field space camera image motion compensation.

Key words: space camera; off-axis three-mirror; image motion compensation; image motion velocity field; scroll imaging

0 引言

随着空间光学技术的发展,当今大视场空间相机多采用具有无中心遮拦、结构紧凑、像质接近衍射极限等优点的离轴三反光学系统,配合卫星大角度侧摆与俯仰机动来实现对地面目标的大视场扫描成像,提高成像任务的灵活性和敏捷性^[1-2]。2009 年美国发射的 WorldView-2 卫星分辨率达到 0.46 m,大角度侧摆范围 $\pm 45^\circ$,空间相机可将沿轨推扫成像宽度扩大到 250 km;法国的 Pleiades 卫星侧摆角范围 $\pm 25^\circ$,最大俯仰角达到 $\pm 30^\circ$ 。空间相机在轨成像期间,由于地球自转、卫星姿态机动、轨道运动和颤振等因素导致焦面上像点的像移速度与 TDICCD 电荷包转移速度不匹配,即产生像移,这在具有大角度侧摆与俯仰机动的空间相机中尤为明显^[3-5]。为获得高质量图像,需要进行精确的像移补偿,实时计算各像点像移速度,据此匹配 CCD 行频,通过焦面偏流机构匹配偏流角^[6-7]。因此建立精确的像移速度场模型对于提高大视场空间相机的成像质量具有重要意义^[8-10]。

针对空间相机像移补偿技术,参考文献[8]较早推导了空间相机平飞成像时的像移速度解析式,但其是基于球体地球模型建立的,并未考虑地球是椭球体的实际情况,而且只考虑了平飞星下点成像一种姿态;参考文献[9]推导了基于地球椭球的离轴式双线阵相机的像移速度和偏流角计算公式,并分析了行频与偏流角调整方式对成像质量的影响,但其只考虑了焦面上几个特征点的像移速度分布规律,没有得出整个焦面的像移速度分布情况;参考文献[10]提出了在像方系中观测目标视运动的成像方法,建立了大视场空间相机像速场模型,分析了以不同姿态成像时像速场在焦面的分布规律,但其并未考虑离轴角对像速场模型的影响。

文中提出了基于刚体运动学的建模方法,推导

了离轴三反大视场空间相机的像移速度场解析式。在此基础上,研究了相机侧摆成像时焦面像速场的分布特点,分析了同速与异速像移速度匹配模式对相机成像质量的影响,并根据成像参数制定了在轨像速匹配最优化方案,为在轨像移补偿提供依据。

1 大视场空间相机像移速度场模型

图 1 为大视场空间相机成像原理。卫星轨道为太阳同步的回归近圆轨道,忽略不计成像瞬间极小的轨道摄动,地球采用 WGS84 椭球模型。

相关物理量为:地球半长轴 a_e ,半短轴 b_e ,卫星速度 V ,卫星轨道地心距 r ,轨道倾角 i ,轨道升交点赤经 Ω ,卫星纬度幅角 u (轨道平面内,卫星与升交点间的地心角),相机焦距 f ,离轴角 γ 。

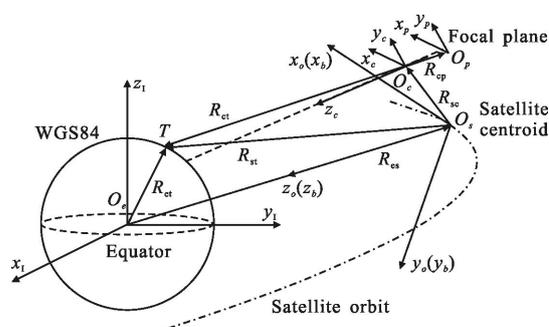


图 1 空间相机成像原理

Fig.1 Imaging principle of space camera

1.1 坐标系定义

地心赤道坐标系 $O_e-x_e y_e z_e$:原点为地心 O_e ; $O_e x_e$ 轴在赤道平面内,指向春分点; $O_e z_e$ 轴垂直于赤道面,指向北极; $O_e y_e$ 轴与 $O_e x_e$ 和 $O_e z_e$ 轴构成右手系坐标,简称 I 系。

卫星轨道坐标系 $O_s-x_o y_o z_o$:原点为卫星质心 O_s ; $O_s x_o$ 轴在卫星轨道平面内,指向卫星运动方向; $O_s z_o$ 轴指向地心 O_e ; $O_s y_o$ 轴与 $O_s x_o$ 和 $O_s z_o$ 轴构成右手系坐

标,简称 o 系。

卫星本体坐标系 $O_s-x_b y_b z_b$: 原点为卫星质心 O_s ; 没有姿态运动时, $O_s x_b$ 、 $O_s y_b$ 、 $O_s z_b$ 轴分别与 $O_s x_o$ 、 $O_s y_o$ 、 $O_s z_o$ 轴重合, 简称 b 系。 b 系相对于 o 系的横滚、俯仰和偏航姿态角分别为 φ 、 θ 、 ψ , 姿态角速度分别为 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\psi}$ 。

相机坐标系 $O_c-x_c y_c z_c$: 原点为光学系统主点 O_c ; $O_c x_c y_c$ 平面为相机物镜平面; $O_c z_c$ 沿光轴方向指向地面目标, 垂直于相机物镜平面, 构成右手系坐标, 简称 c 系。

焦面坐标系 $O_p-x_p y_p z_p$: 原点为焦面中心 O_p ; $O_p x_p$ 轴沿 TDI 积分方向与 $O_c x_c$ 轴平行; $O_p y_p$ 轴垂直 TDI 积分方向与 $O_c y_c$ 轴平行; $O_p z_p$ 轴为焦面法线与 $O_c z_c$ 轴方向相同, 简称 p 系。

1.2 坐标系转换

基元旋转: 坐标系绕其一个轴旋转, 绕 x 、 y 、 z 轴转过 α 角的基元旋转矩阵如公式(1)所示, 适用于转换前后的坐标系原点重合的情况。

$$C_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad C_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$C_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

坐标平移: 坐标系沿一个矢量平移, 若平移之后的坐标系原点 O' 在原坐标系中的坐标为 $[k, m, n]^T$, 则转换之后的坐标系如公式(2)所示, 适用于转换前后的坐标系原点不重合的情况。

$$[x', y', z']^T = [x, y, z]^T - [k, m, n]^T \quad (2)$$

$I \sim o$ 系的坐标转换如公式(3), 可通过三次基元旋转得到:

$$A_{oi} = C_y\left(-u - \frac{\pi}{2}\right) C_x\left(i - \frac{\pi}{2}\right) C_z(\Omega) \quad (3)$$

式中: A_{oi} 表示从 $I \sim o$ 系的变换矩阵。

$o \sim b$ 系的坐标转换如公式(4), 可依据三轴姿态角的基元旋转得到, 为了工程实现方便, 姿态转序定为 1-2-3, 最后调整偏航角, 这样可以减少偏流角调整过程中姿态角解算次数。

$$A_{bo} = C_z(\psi) C_y(\theta) C_x(\varphi) \quad (4)$$

式中: A_{bo} 表示从 $o \sim b$ 系的变换矩阵。

$b \sim c$ 系的坐标转换如公式(5), 设光学系统主点

O_c 在 b 系中的相对位置为 $[x_{bc}, y_{bc}, z_{bc}]^T$, 相机安装矩阵为 M_{cb} 。

$$[x_c, y_c, z_c]^T = M_{cb}([x_b, y_b, z_b]^T - [x_{bc}, y_{bc}, z_{bc}]^T) \quad (5)$$

$c \sim p$ 系的坐标转换见公式(6), 设 p 系焦面中心 O_p 在 c 系中的相对位置为 $[x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}]^T$, H 为光学系统主点 O_c 到地面目标 T 的 z 轴分量距离。

$$[x_p, y_p, z_p]^T = -\frac{f}{H}[x_c, y_c, z_c]^T - [x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}]^T \quad (6)$$

1.3 矢量推导

由图 1 中的矢量关系有:

$$R_{st} = R_{ct} - R_{cs} \quad (7)$$

式中: R_{st} 为从卫星质心 O_s 指向目标 T 的矢量; R_{ct} 为从地心 O_c 指向目标 T 的目标位置矢量; R_{cs} 为从地心 O_c 指向卫星质心 O_s 的矢量, R_{st} 在轨道坐标系(o 系)中表示为:

$$R_{st}^o = A_{oi} R_{ct}^i - R_{cs}^o \quad (8)$$

式中: R_{ct}^i 为矢量 R_{ct} 在 I 系中的表示; R_{cs}^o 为矢量 R_{cs} 在 o 系中的表示。

由矢量关系有:

$$R_{ct} = R_{st} - R_{sc} \quad (9)$$

式中: R_{ct} 表示从光学系统主点 O_c 指向目标 T 的矢量; R_{sc} 表示从卫星质心 O_s 指向目标 T 的矢量; R_{sc} 表示从 O_s 指向 O_c 的矢量, R_{ct} 在 c 系中表示为:

$$R_{ct}^c = M_{cb}(R_{st}^b - R_{sc}^b) \quad (10)$$

式中: R_{st}^b 和 R_{sc}^b 分别为矢量 R_{st} 和 R_{sc} 在 b 系中的表示。

由焦面坐标系(p 系)内的矢量关系有:

$$R_{pq}^p = -\frac{f}{H} R_{ct}^c - R_{cp}^c \quad (11)$$

式中: R_{pq}^p 为在焦面坐标系内焦面中心 O_p 指向目标像点 q 的矢量; R_{cp}^c 为在 c 系内光学系统主点 O_c 指向焦面中心 O_p 的矢量, 即光学系统与焦面的相对位置, H 为 R_{ct}^c 的 z 轴分量距离, 即离轴三反相机的光轴长度。 p 系中目标的位置矢量对时间的导数如公式(12)所示:

$$\dot{R}_{pq}^p = -\frac{f}{H} \dot{R}_{ct}^c + \frac{H\dot{f}}{H^2} R_{ct}^c \quad (12)$$

1.4 刚体运动学分量

离轴三反空间相机的等效简化模型如图 2 所示, 光轴垂直于 CCD 焦面, 地面目标 T 发出的光线沿视轴到达焦面形成像点 q , 光轴与视轴间存在夹角, 即离轴角 γ 。

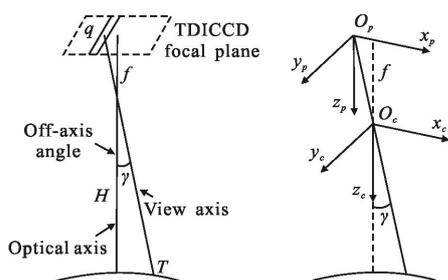


图 2 离轴三反空间相机简化模型

Fig.2 Equivalent model of off-axis three-mirror space camera

焦面上一像点 q 对应一个地面目标 T , 设 $R_{ct}^c = [x_c, y_c, z_c]^T, R_{ct}^1 = [x_l, y_l, z_l]^T$, 根据矢量关系推到可得:

$$R_{ct}^1 = A_{ol}^{-1} (A_{bo}^{-1} (M_{cb}^{-1} R_{ct}^c + R_{sc}^b) + R_{es}^o) \quad (13)$$

式中: $R_{es}^o = [0, 0, -r]^T$; r 为卫星轨道地心距。

根据图 2 中 c 系和 p 系的几何关系可得如下约束方程组:

$$\begin{cases} x_c + x_p z_c / f - z_c \tan \gamma = 0 \\ y_c + y_p z_c / f = 0 \\ x_1^2 / a_e^2 + y_1^2 / a_e^2 + z_1^2 / b_e^2 - 1 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: x_p 和 y_p 为 p 系中像点 q 的焦面坐标; γ 为离轴角, 由于离轴角的存在, p 系中焦面原点并不在光轴与焦面的交点上。由公式(13)和(14)可得出两组解, 需根据物理意义选取 z_c 较小的解。根据刚体运动学可求出:

$$\dot{R}_{ct}^1 = \omega_e \times R_{ct}^1 = [0, 0, \omega_e]^T \times R_{ct}^1 \quad (15)$$

式中: ω_e 为地球自转角速度。

由公式(3)可知从 $l-o$ 系的变换矩阵为 A_{ol} , 式中的三个参数轨道倾角 i 和轨道升交点赤经 Ω 均为固定参数, 卫星纬度幅角 u 对时间的导数为:

$$\dot{u} = \dot{f}_{sat} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e \cos f_{sat}) / r \quad (16)$$

式中: f_{sat} 为真近点角; μ 为地球引力常数; p 为轨道半通径; e 为轨道偏心率, 由于卫星轨道为太阳同步的回归近圆轨道, 上式可化简为 $\dot{u} = \sqrt{\mu / r^3}$, 由此可求出矩阵 \dot{A}_{ol} 。

由公式(4)可知从 $o-b$ 系的变换矩阵为 A_{bo} , 由刚体运动学知识可得:

$$\dot{A}_{bo} = -\omega_{bo}^{\times} A_{bo} \quad (17)$$

式中: ω_{bo} 是姿态角速度在 b 系下的分量, 其按照之

前所述的 1-2-3 姿态转序。

可得:

$$\omega_{bo} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = C_z(\psi) \left[C_y(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_x(\varphi) \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (18)$$

H 为 R_{ct}^c 的 z 轴分量, 是一个随时间变化的标量, 因此得到其对时间导数:

$$\dot{H} = [0, 0, 1] M_{cb} \dot{R}_{st}^b \quad (19)$$

将公式(12)展开代入以上各分量, 由于相机位置及安装矩阵都是固定的, 所以 R_{st}^b 和 M_{cb} 均为常量, \dot{R}_{pq}^p 取焦面内两个量, 因此大视场空间相机的像移速度场解析式为:

$$\begin{aligned} \dot{R}_{pq}^p &= \begin{bmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \end{bmatrix} = -\frac{f}{H} (M_{cb} (\dot{R}_{st}^b - \dot{R}_{sc}^b) + \dot{M}_{cb} (R_{st}^b - R_{sc}^b)) + \\ &\frac{\dot{H}f}{H^2} M_{cb} (R_{st}^b - R_{sc}^b) = -\frac{f}{H} M_{cb} (\dot{A}_{bo} R_{st}^o + A_{bo} \dot{R}_{st}^o) + \\ &\frac{\dot{H}f}{H^2} M_{cb} (R_{st}^b - R_{sc}^b) = -\frac{f}{H} M_{cb} (\dot{A}_{bo} (A_{ol} R_{ct}^1 - R_{es}^o) + \\ &A_{bo} (\dot{A}_{ol} R_{ct}^1 + A_{ol} \dot{R}_{ct}^1 - \dot{R}_{es}^o)) + \frac{\dot{H}f}{H^2} M_{cb} (R_{st}^b - R_{sc}^b) \end{aligned} \quad (20)$$

综上得到像移速度主向量值和偏流角如下:

$$V_p = \sqrt{V_{p1}^2 + V_{p2}^2} \quad (21)$$

$$\beta = \arctan(V_{p2} / V_{p1}) \quad (22)$$

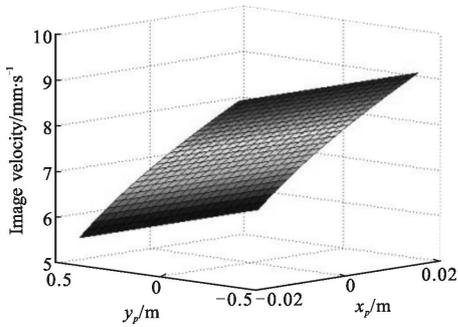
2 侧摆成像同速与异速像移速度匹配模式对成像质量的影响

随着对空间相机的空间和时间分辨率要求不断提高, 为了进一步提高成像任务的灵活性和敏捷性, 焦面多采用多片 TDICCD 拼接而成, 同时配合大角度侧摆来实现对地面目标的大视场扫描成像。为获得高质量图像, 在轨成像期间需根据像速场模型实时计算焦面各像点的像移速度, 据此调整 CCD 的行频, 并通过焦面偏流机构匹配偏流角。以某空间相机为例, 采用本文提出的像移速度场模型计算方法, 对相机侧摆成像时同速与异速像移速度匹配模式对成像质量的影响进行分析, 理论分析结果如图 3~8 所示。

该空间相机采用太阳同步近圆轨道, 轨道倾角 100° , 轨道高度 500 km, 焦面由 11 片 TDICCD 交错

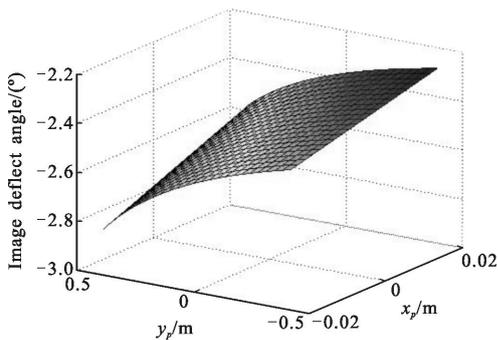
拼接组成,单片 CCD 全色谱段有效像元数 8 192,相机焦距 2 m,离轴角 6.5°,像元尺寸 8.75 μm ,最高积分级数设为 32 级,侧摆范围 $-38^\circ\sim 38^\circ$ 。仿真时设卫星三轴姿态稳定度均为 0.001($^\circ$)/s,焦面范围沿 TDI 方向 $-0.019\sim 0.019\text{m}$,垂直 TDI 方向 $-0.4025\sim 0.4025\text{m}$ 。

图 3 为卫星下行段纬度幅角 60° 时,大视场空间相机侧摆 38° 成像时焦面像速场的分布仿真结果。可以看出,相机侧摆成像姿态下的焦面像速场呈非线性各向异性分布,像移速度模值在垂直 TDI 积分方向(y 轴)差异显著,而偏流角的分布则与星下点纬度有关。分析造成这种分布趋势的原因主要包括相机在侧摆成像姿态下焦面各像点的视线长度不同,以及星下点纬度的差异导致地球自转线速度不同等因素,仿真结果与实际分析得到的经验结果相符。



(a) 侧摆 38° 焦面像移速度分布

(a) Focal plane image motion velocity with scroll imaging of 38°



(b) 侧摆 38° 焦面偏流角分布

(b) Focal plane image deflect angle with scroll imaging of 38°

图 3 侧摆 38° 焦面像移速度场分布

Fig.3 Focal plane image motion velocity field with scrolling of 38°

图 4 为相机侧摆 38° 时,焦面上左边缘视场点、中心视场点及右边缘视场点像移速度随纬度幅角的变化曲线。可以看出,不同视场位置的像移速度大小不同,由于是左侧摆,所以左边缘视场点的视线长度最短,因而该点像移速度最大。当 u 为 0° 和 180°

时,即在赤道附近像移速度最大,在地球两极像移速度最小。

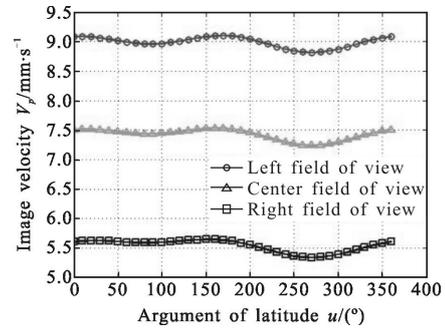


图 4 侧摆 38° 像移速度随纬度幅角 u 变化曲线

Fig.4 Image motion velocity curves along with u as scrolling of 38°

图 5 为相机侧摆 38° 时,焦面上左边缘视场点、中心视场点及右边缘视场点偏流角随纬度幅角 u 的变化曲线。可以看出:偏流角的绝对值在赤道附近最大,地球两极最小。

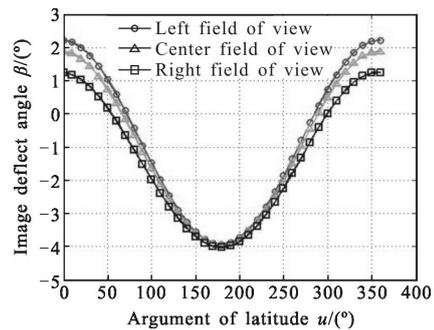


图 5 侧摆 38° 偏流角随纬度幅角 u 变化曲线

Fig.5 Image deflect angle curves along with u as scrolling of 38°

图 6 为卫星纬度幅角 $u=0^\circ$ 时左、右边缘视场点与中心视场点像移速度之差随侧摆角(横滚角 φ)的变化曲线。图 7 为卫星纬度幅角 $u=0^\circ$ 时左、右边缘

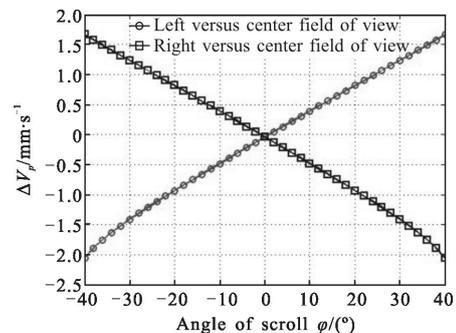


图 6 像移速度之差随侧摆角 φ 变化曲线

Fig.6 Image motion velocity difference along with scroll angle φ

视场点与中心视场点偏流角之差随侧摆角的变化曲线。可以看出,像移速度之差和偏流角之差随着侧摆角的增大而增大。侧摆角为 0°时(平飞姿态),焦面上各像点间的像移速度之差和偏流角之差最小。

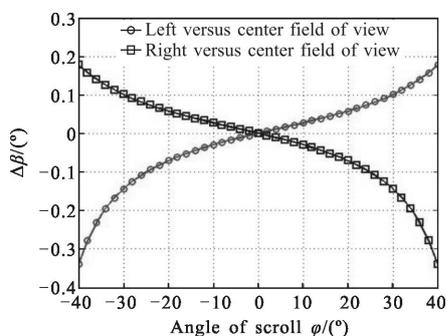


图 7 偏流角之差随侧摆角 φ 变化曲线

Fig.7 Image deflect angle difference along with scroll angle φ

大视场空间相机侧摆成像时像速场分布复杂,这对像移补偿技术提出了更高的要求。目前偏流角的匹配方式主要是根据像移速度场模型计算出中心视场点的偏流角,然后由焦面偏流机构统一调整。而像移速度的匹配有两种模式:同速匹配和异速匹配。同速匹配是以焦面中心视场点的像移速度为基准统一匹配各片 CCD 行频。异速匹配是以各片 CCD 中心像点的像移速度为基准分别独立匹配各片 CCD 行频。空间相机在轨成像期间,像移速度匹配模式的选取会影响相机的成像质量。

空间相机的成像质量一般用传递函数 (MTF)来评价,对于高分辨率空间相机而言,为了保证图像质量,通常要求动态调制传递函数 MTF_D 的下降不超过 5%。

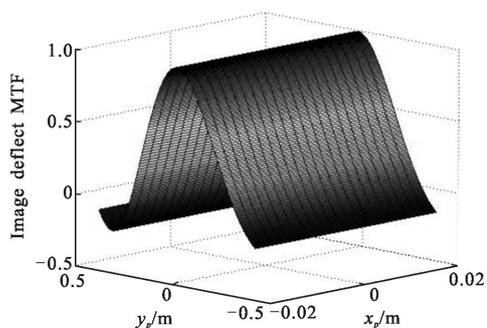
$$MTF_D = MTF_{D_x} MTF_{D_y} \quad (23)$$

$$MTF_{D_x} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} N \frac{\Delta v}{v}\right)}{\frac{\pi}{2} N \frac{\Delta v}{v}} \quad MTF_{D_y} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} N \tan \Delta \beta\right)}{\frac{\pi}{2} N \tan \Delta \beta} \quad (24)$$

式中: N 为 TDICCD 积分级数; Δv 为像速匹配残差; $\Delta \beta$ 为偏流角匹配残差。 MTF_{D_x} 和 MTF_{D_y} 分别为奈奎斯特(Nyquist)空间频率下由像速匹配残差和偏流角匹配残差引起的调制传递函数。

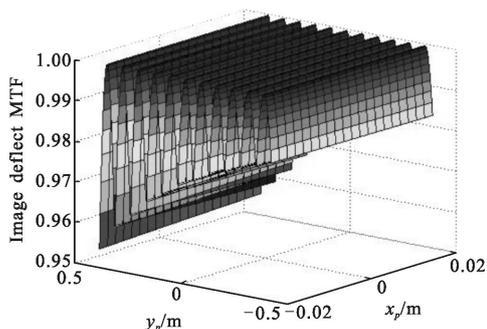
图 8(a)和(b)为侧摆 38°,纬度幅角 60°,积分级数为 32 级时,分别采用同速匹配和异速匹配的焦面 MTF_D 分布情况。可以看出,同速匹配焦面 MTF_D 沿垂直 TDI 积分方向(y 轴)由中心视场点向视场边缘

迅速下降,边缘像点动态传函已下降到 0;与同速匹配相比,异速匹配时焦面各像点得到明显提升,沿垂直 TDI 积分方向由各片 CCD 中心像点向 CCD 边缘下降,均高于 0.95。



(a) 同速匹配焦面 MTF

(a) Focal plane MTF with synchronous matching



(b) 异速匹配焦面 MTF

(b) Focal plane MTF with asynchronous matching

图 8 不同匹配模式的焦面 MTF

Fig.8 Focal plane MTF of the different matching model

尽管异速匹配能使传函得到明显提升,也不应在任何场合都使用,因为其增加了 CCD 驱动控制复杂度,而且异步输出的各片 CCD 数据给前端数据处理带来了困难。因此应在不影响成像质量的前提下,根据成像参数制定在轨像速匹配最优化方案。表 1 为侧摆角取 15°(为避免大角度侧摆导致远端分辨率降低,该相机多数情况下侧摆角控制在 15°以内)时不同积分级数下同速与异速像速匹配的焦面边缘处 MTF 对比结果。

由表 1 可知,侧摆 15°成像,当积分级数小于 10 级时可采用同速匹配模式,超过 10 级时需要调整到异速匹配模式。当积分级数到达 32 级时,异速匹配相比于同速匹配使焦面动态 MTF 从 0.3408 提高到 0.9702。

表 1 不同积分级数下同速与异速匹配 MTF 对比

Tab.1 Comparison of synchronous and asynchronous matching MTF at different integral stage

N	Synchronous matching	Asynchronous matching
4	0.977 1	0.995 8
8	0.961 7	0.990 8
10	0.950 4	0.989 6
16	0.732 5	0.983 7
32	0.340 8	0.970 2

表 2 积分级数为 16, 以不同侧摆角成像时同速与异速像速匹配的焦面边缘处 MTF 对比结果。可知积分级数由于成像条件确定为 16 级时, 侧摆角在 12.3°以内时可采用同速匹配模式。

表 2 不同侧摆角下同速与异速匹配 MTF 对比

Tab.2 Comparison of synchronous and asynchronous matching MTF at different scroll angle

$\varphi/(\circ)$	Synchronous matching	Asynchronous matching
5.0	0.972 4	0.992 0
10.0	0.957 3	0.987 2
12.3	0.950 1	0.985 3
20.0	0.672 5	0.980 4
38.0	0.544 6	0.976 8

文中提出的像移速度场模型计算方法已经在某离轴三反大视场空间相机在轨成像期间得到了应用。图 9 为侧摆 14.5°对美国洛杉矶地区成像结果,



图 9 在轨侧摆成像结果

Fig.9 Scroll imaging results of on-orbit testing experiments

相机侧摆成像时根据像速场解析式和上述提出的像速匹配最优化方案进行像移补偿。从图 9 可以看出相机侧摆成像质量良好, 通过地面靶标计算得出在轨传函满足成像要求, 图像信息熵较大。该成像结果

与前述理论分析相符, 证明了所提出的像移速度场模型和侧摆成像时像速匹配最优化方案准确可靠。

3 结论

针对空间相机像移补偿技术提出一种新的基于刚体运动学的像移速度场建模方法, 并推导了离轴三反大视场空间相机的像移速度和偏流角解析式。该建模方法矢量关系清晰、可移植性强、易于星上 DSP 进行像速解析式的算法实现。此外, 以某离轴三反大视场空间相机为例, 研究了相机侧摆成像时焦面像速场的分布特点, 分析了同速与异速像移速度匹配模式对相机成像质量的影响。

分析结果表明, 以传函下降 5% 为约束, 侧摆 15°成像时, 当积分级数小于 10 级时可采用同速匹配模式, 当积分级数达到 32 级时, 异速匹配相比于同速匹配使焦面动态 MTF 从 0.340 8 提升到 0.970 2。当积分级数确定为 16 级成像时, 采用同速匹配模式时侧摆角应控制在 12.3°以内。在轨成像结果证明了像移速度场模型及侧摆成像时像速匹配最优化方案的准确性, 文中的研究可为大视场空间相机的像移补偿提供可靠依据。

参考文献:

[1] Yan Dejie, Li Weixiong, Wu Weiping, et al. Aircraft's large attitude angles' s usage in image motion compensation calculation of space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1200-1205. (in Chinese)
 闫得杰, 李伟雄, 吴伟平, 等. 空间相机像移补偿计算中飞行器大姿态角使用方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1200-1205.

[2] 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. (in Chinese)
 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.

[3] Zhang Shuqing, Zhang Yuan, Zhou Chenghao, et al. Image motion model of azimuthally photography for satellite borne TDICCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1823-1829. (in Chinese)
 张树青, 张媛, 周程灏, 等. 星载 TDICCD 相机方位扫描像移模型研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1823-1829.

- [4] Sun Jiming, Guo Jiang, Shao Mingdong, et al. Precise focusing for TDICCD camera with wide field of view [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(3): 602–607. (in Chinese)
孙继明, 郭疆, 邵明东, 等. 大视场时间延迟积分 CCD 遥感相机的精密定焦[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(3): 602–607.
- [5] Ning Yonghui, Guo Yongfei. Real-time image processing in TDICCD space mosaic camera[J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(2): 508–516. (in Chinese)
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.
- [6] Guo Hanzhou, Lv Hengyi, Qu Lixin. Relation of line transfer period error and dynamic MTF of TDICCD in remote sensing camera[J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(8): 2195–2200. (in Chinese)
郭汉洲, 吕恒毅, 曲利新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分 CCD 行周期误差的关系 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(8): 2195–2200.
- [7] Ghosh S K. Image motion compensation through augmented collinearity equations [J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(6): 241014.
- [8] 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): 1585–1589. (in Chinese)
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.
- [9] Wu Xingxing, Liu Jinguo, Kong Dezhu, et al. Image motion compensation of off-axis two-line camera based on earth ellipsoid [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 838–844. (in Chinese)
武星星, 刘金国, 孔德柱, 等. 基于地球椭球的离轴式双线阵相机像移补偿[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 838–844.
- [10] 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. (in Chinese)
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.