

文章编号 1004-924X(2016)09-2173-10

大视场空间相机的像移速度场模型 及卫星三轴姿态稳定度分析

路朋罗^{1,2*}, 李永昌³, 金龙旭¹, 李国宁¹, 武奕楠¹, 王文华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;

3. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要:针对大视场空间相机的像移补偿,建立了基于坐标变换和姿态动力学的离轴三反大视场空间相机通用像移速度场模型。建模过程中考虑了离轴三反光学系统的离轴角对像移模型的影响,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 3 种典型成像姿态下焦面像移速度和偏流角的分布特点,研究了卫星姿态稳定度对相机成像质量的影响。分析表明,卫星三轴姿态稳定度的降低会导致相机焦面动态传递函数(MTF)下降,其中俯仰姿态稳定度对焦面动态 MTF 的影响最大;并且随着积分级数增加,下降会愈发明显。相机侧摆姿态成像时,对卫星姿态稳定度的要求更高。以传递函数下降 5%为限,积分级数为 96 级的大视场空间相机,要求卫星姿态稳定度控制在 $0.001(^{\circ})/s$ 以内。实验结果验证了文中对卫星姿态稳定度的分析,证明了像移速度场模型的准确性,为大视场空间相机像移补偿提供了可靠依据。

关键词:空间相机;离轴三反光学系统;像移补偿;像移速度场;卫星姿态稳定度;调制传递函数

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162409.2173

Image motion velocity field model of space camera with large field and analysis on three-axis attitude stability of satellite

LU Peng-luo^{1,2*}, LI Yong-chang³, JIN Long-xu¹, LI Guo-ning¹, WU Yi-nan¹, WANG Wen-hua¹

(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;

3. DFH Satellite Co., LTD, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: lupengluo@163.com

Abstract: To compensate the image motion of a space camera with large field, a general image motion velocity field model was established by combination of coordinate transformation and attitude dynamics for an off-axis three mirror anastigmat camera. In modelling, the effect of off-axis angles of three-mirror system on the image motion was taken into account, and the formulas of image motion velocity field in the off-axis three-mirror system were derived. By taking a space camera with large field for an example, the distribution characteristics of imaging motion velocity field under three typical imaging

收稿日期:2016-01-13;修订日期:2016-02-02.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20126016)

attitudes were analyzed. The influence of three axis attitude stability on imaging quality of the satellite was studied. The results indicate that the decline of satellite attitude stability, especially the pitching attitude stability, will lead to the decrease of dynamic Modulation Transfer Function (MTF) of focal plane. And the decrease is more obvious when the integration stages are increased. Moreover, the satellite attitude should be more stable when the camera is imaged in a side rolling with a large angle. For the space camera with 96 integration stages and the reduction of MTF no more than 5%, the satellite three-axis attitude stability should be controlled under $0.001(^{\circ})/s$. The experiment results confirm the above analysis of satellite stability, verify the accuracy of the proposed image motion velocity field model and provide a reliable basis for the image motion compensation of space cameras with large fields.

Key words: space camera; off-axis three mirror anastigmat system; image motion compensation; image motion velocity field; satellite attitude stability; Modulation Transfer Function(MTF)

1 引言

随着空间遥感技术的不断发展,对空间相机的分辨率以及视场范围的要求也越来越高,因此当今大视场空间相机多采用具有结构紧凑、无中心遮拦、像质接近衍射极限等特点的离轴三反光学系统,并结合卫星大角度姿态机动实现对地面目标的大视场成像,提高成像任务的敏捷性。同时采用时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)作为相机的焦面器件,通过多级光敏元件对同一目标进行多次逐级积分,将每级积分所获得的较弱信号叠加为较强信号输出,从而获得更高的信噪比和灵敏度,使图像质量得到改善^[1-4]。鉴于其特殊的成像方式,理论上要求焦面上像点的像移速度必须与 TDICCD 电荷包的转移速度相匹配。然而实际空间相机在轨成像时,由于卫星轨道运动、卫星姿态机动、地球自转等因素导致目标像点在焦面上产生像移,像移是制约 TDICCD 相机实现高质量成像的主要原因,它对具有大角度姿态机动的空间相机的影响更加严重^[5-8]。随着积分级数的增加,像速失配会使焦面动态传递函数(MTF)急剧下降,导致成像模糊,分辨率和对比度降低。为获得高质量遥感图像,需要根据像移速度场模型的计算结果进行像移补偿^[9-10]。建立准确的像移速度场模型对提高大视场空间相机的在轨成像质量具有重要意义。

针对空间相机的像移补偿技术,近年来国内外学者做了大量研究工作^[11-14]。国外方面,美国 2009 年发射的 WorldView-2 卫星分辨率为

0.46 m,侧摆范围为 $\pm 45^{\circ}$,沿轨推扫成像宽度达到 250 km;法国 2011 年发射的 Pleiades 卫星侧摆角范围为 $\pm 25^{\circ}$,俯仰角范围达到 $\pm 30^{\circ}$ 。然而国外对像移模型和补偿技术的保密甚严,近年来侦查卫星分辨率已经达到 0.5 m 以下,从中可见国外一些军事强国的像移补偿技术已经达到了先进水平。国内方面,王家骥等人^[12]较早提出了地面目标到焦面的坐标变换思想,建立了星下点成像像移速度矢的计算模型。但此模型是基于球体地球模型而建立的,忽略了地球是椭球体的实际情况,并且只考虑了平飞姿态时星下点成像这一种情况;武星星等人^[13]根据几何投影的思想,推导了地球为椭球的大视场空间相机不同视场位置的像移速度和偏流角计算解析式,并分析了像移补偿方式对焦面 MTF 的影响,但其忽略了指向精度及姿态稳定度对像移速度的影响;王翀等人^[14]提出了在像方系中观测目标点视运动的成像方法,建立了大视场空间相机像移速度场模型,分析了不同成像姿态下的像移速度场在焦面的分布规律,但并未考虑离轴三反光学系统的离轴角对模型的影响。

本文针对以上模型的不足,提出了基于坐标变换结合姿态动力学的建模方法,建立了离轴三反大视场空间相机通用性像移速度场模型。在此基础上,研究了卫星三轴姿态稳定度对相机成像质量的影响,并给出了相应的姿态稳定度控制要求。

2 大视场空间相机像移速度场模型

本文所建立的像移速度场模型共涉及 5 个坐

标系,图 1 描述了这 5 个坐标系之间的位置矢量关系,各坐标系均为右手坐标系,卫星轨道为太阳同步回归近圆轨道,地球采用 WGS84 椭球模型。

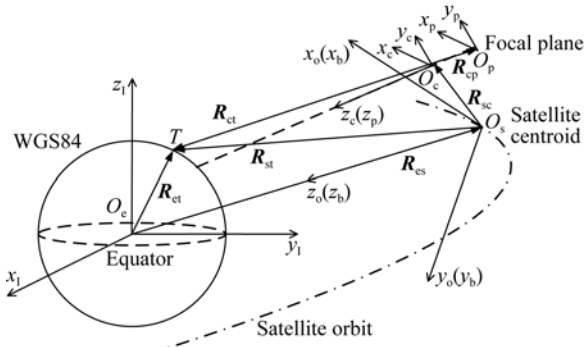


图 1 空间相机成像原理

Fig. 1 Imaging principle of space camera

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

2.1 坐标系定义

地心赤道坐标系 $O_e-x_1y_1z_1$:简称 I 系,原点在地心 O_e ; O_e-x_1 轴在赤道平面内,并指向 J2000.0 春分点; O_e-z_1 轴垂直于赤道面并指向北极; O_e-y_1 轴与 O_e-x_1 和 O_e-z_1 轴构成右手系坐标。

卫星轨道坐标系 $O_s-x_oy_oz_o$:简称 o 系,原点在卫星质心 O_s ; O_s-x_o 轴在卫星轨道平面内,并指向卫星飞行方向; 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。

卫星本体坐标系 $O_s-x_by_bz_b$:简称 b 系,原点在卫星质心 O_s ;当没有姿态运动时 b 系与 o 系重合;当存在姿态运动时, b 系相对于 o 系的横滚、俯仰、偏航角分别为 φ, θ, ψ ,相应的三轴姿态稳定度分别为 $\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ 。

相机坐标系 $O_c-x_cy_cz_c$:简称 c 系,原点在相机摄像中心,即光学系统主点 O_c ; $O_c-x_cy_c$ 平面为相机的物镜平面; O_c-z_c 沿着光轴方向指向地面目标,并垂直于相机的物镜平面,构成右手系坐标。

焦面坐标系 $O_p-x_py_pz_p$:简称 p 系,原点在相机的焦面中心 O_p ; $O_p-x_py_p$ 构成焦面, O_p-x_p 轴沿 TDI 积分方向,并与 O_c-x_c 轴平行; O_p-y_p 轴垂直 TDI 积分方向,并与 O_c-y_c 轴平行; O_p-z_p 轴为焦面

法线,并与 O_c-z_c 轴方向相同。

2.2 坐标系转换

坐标系之间最基本的转换有基元旋转和坐标平移两种方式^[15]:

基元旋转即坐标系绕某一轴的旋转,其中绕 x, y, z 轴旋转 α 角的旋转矩阵如式(1)所示:

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

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

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

坐标平移即坐标系沿某一个矢量平移,假设平移之后的坐标原点 O' 在原有坐标系中的坐标为 $[k, m, n]^T$,则转换后的坐标系为:

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

$O_e-x_1y_1z_1$ 系到 $O_s-x_oy_oz_o$ 系的坐标转换,首先要进行三次基元旋转,然后再进行一次坐标平移,式(3)中 A_{oI} 为从 I 系到 o 系的旋转矩阵:

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

$O_s-x_oy_oz_o$ 系到 $O_s-x_by_bz_b$ 系的坐标转换,可根据三轴姿态角的基元旋转得到,考虑工程实现方便,将姿态转序定为 1-2-3,即最后调整偏航角,这样在偏流角匹配的过程中,可减少姿态角解算的次数,式(4)中 A_{bo} 为从 o 系到 b 系的变换矩阵:

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

$O_s-x_by_bz_b$ 系到 $O_c-x_cy_cz_c$ 系的坐标转换,设相机摄像中心 O_c 在 b 系中的相对坐标位置为 $[x_{bc}, y_{bc}, z_{bc}]^T$, M_{cb} 为相机安装矩阵,则 b 系到 c 系的转换关系为:

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

$O_c-x_cy_cz_c$ 系到 $O_p-x_py_pz_p$ 系的坐标转换,设 p 系的坐标原点 O_p 在 c 系中的相对坐标位置为 $[x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}]^T$, H 为轨道高度,即相机摄像中心 O_c 与地面目标点 T 投影到光轴上的距离,则 c 系到 p 系转换关系为:

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

2.3 矢量推导

由图 1 中的矢量关系可知:

$$\mathbf{R}_{st} = \mathbf{R}_{ct} - \mathbf{R}_{cs}, \quad (7)$$

其中: \mathbf{R}_{st} 表示由卫星质心 O_s 指向目标点 T 的矢量, \mathbf{R}_{ct} 表示由地心 O_c 指向目标点 T 的目标点位置矢量, \mathbf{R}_{cs} 表示由 O_c 指向 O_s 的矢量, \mathbf{R}_{st} 在 o 系中的表示如式(8)所示, 式中 \mathbf{R}_{ct}^I 为矢量 \mathbf{R}_{ct} 在 I 系中的表示, \mathbf{R}_{cs}^o 为由 I 系到 o 系转换的平移矢量。

$$\mathbf{R}_{st}^o = \mathbf{A}_{oI} \mathbf{R}_{ct}^I - \mathbf{R}_{cs}^o, \quad (8)$$

由图 1 中的矢量关系还可知:

$$\mathbf{R}_{ct} = \mathbf{R}_{st} - \mathbf{R}_{sc}, \quad (9)$$

其中: \mathbf{R}_{ct} 表示由相机摄像中心 O_c 指向目标点 T 的矢量, \mathbf{R}_{st} 表示由卫星质心 O_s 指向目标点 T 的矢量, \mathbf{R}_{sc} 表示由 O_s 指向 O_c 的矢量, \mathbf{R}_{ct} 在 c 系中的表示如式(10)所示, 式中 \mathbf{R}_{st}^b 与 \mathbf{R}_{sc}^b 分别为矢量 \mathbf{R}_{st} 与 \mathbf{R}_{sc} 在 b 系中的表示。

$$\mathbf{R}_{ct}^c = \mathbf{M}_{cb} (\mathbf{R}_{st}^b - \mathbf{R}_{sc}^b), \quad (10)$$

由焦面坐标系内的矢量关系可知:

$$\mathbf{R}_{pi}^p = -\frac{f}{H} \mathbf{R}_{ct}^c - \mathbf{R}_{cp}^c, \quad (11)$$

其中: \mathbf{R}_{pi}^p 表示在 p 系内由焦面中心 O_p 指向目标像点 i 的矢量, \mathbf{R}_{cp}^c 表示在 c 系内相机摄像中心 O_c 指向焦面中心点 O_p 的矢量, H 为 \mathbf{R}_{ct}^c 在 z 轴的分量距离, 即离轴三反相机的光轴长度。

焦面目标像点 i 的像移速度可由 \mathbf{R}_{pi}^p 对时间 t 的导数求出, 如式(12)所示:

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

取 $\dot{\mathbf{R}}_{pi}^p$ 在焦面内的两个量(焦面 $z_p \equiv 0$), 即可得到目标像点 i 的前向像移速度 v_{p1} 和横向像移速度 v_{p2} , 如式(13)所示:

$$\dot{\mathbf{R}}_{pi}^p = \begin{bmatrix} v_{p1} \\ v_{p2} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

2.4 目标点位置矢量与姿态动力学分量

相比于透射式和折反射式光学系统, 离轴三反光学系统不会产生色差、可做到大孔径且无中心遮拦, 具有光学系统可折叠、光谱范围宽、易于轻量化等特点, 随着轴对称型自由曲面光学加工与装调技术的不断发展, 离轴三反光学系统在大

视场空间相机中被广泛使用^[16]。

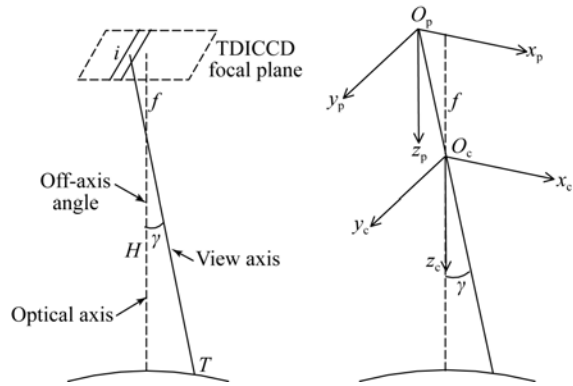


图 2 离轴三反空间相机简化模型

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

离轴三反空间相机的等效模型如图 2 所示, 光轴垂直于相机焦面, 地面目标点 T 发出的光线沿着视轴到达焦面形成像点 i , 光轴与视轴之间存在夹角, 即离轴角 γ 。

要计算焦面像点的像移速度, 首先要根据焦面像点的位置推算出对应的地面目标点在地心赤道坐标系内的位置, 即已知像点的坐标位置计算出地面目标点的位置坐标。

焦面上某一像点 i 对应一个地面目标 T , 假设 $\mathbf{R}_{ct}^c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$, $\mathbf{R}_{ct}^I = [X_1, Y_1, Z_1]^T$, 则根据上述矢量关系推导可将目标点位置矢量 \mathbf{R}_{ct}^I 表示为式(14), 其中平移矢量 $\mathbf{R}_{cs}^o = [0, 0, -r]^T$, r 为卫星轨道地心距, 由于 \mathbf{R}_{sc}^b 是一个固定不变的常量, 因此可用 X_c, Y_c, Z_c 来表示 X_1, Y_1, Z_1 。

$$\mathbf{R}_{ct}^I = \mathbf{A}_{oI}^{-1} (\mathbf{A}_{bo}^{-1} (\mathbf{M}_{cb}^{-1} \mathbf{R}_{ct}^c + \mathbf{R}_{sc}^b) + \mathbf{R}_{cs}^o). \quad (14)$$

根据图 2 中 c 系和 p 系的几何关系可得如下约束方程组:

$$\begin{cases} X_c + \frac{X_p}{f} Z_c - Z_c \tan \gamma = 0 \\ Y_c + \frac{Y_p}{f} Z_c = 0 \\ \frac{X_1^2}{a_c^2} + \frac{Y_1^2}{a_c^2} + \frac{Z_1^2}{b_c^2} - 1 = 0 \end{cases}, \quad (15)$$

其中: a_c 和 b_c 分别为 WGS84 地球椭球模型长短半轴, X_p 和 Y_p 为像点 i 的焦面坐标, 由于有离轴

角的存在, p 系的原点 O_p 并不在光轴与焦面的交点上。由上式(14)和(15)可得两组解,根据物理意义应选 Z_c 取值较小的一组解。

根据姿态运动学原理可求出目标点位置矢量对时间 t 的导数,其中 ω_e 为地球自转角速度^[15]。

$$\dot{\mathbf{R}}_{ct}^l = \boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{R}_{ct}^l = [0, 0, \omega_e]^T \times \mathbf{R}_{ct}^l. \quad (16)$$

由式(3)可知转换矩阵 \mathbf{A}_{o1} 中的轨道升交点赤经 Ω 和轨道倾角 i 均为固定参数,另一个参数卫星的纬度幅角 u 对时间 t 的导数为:

$$\dot{u} = \dot{f}_{sat} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e \cos f_{sat}) / r, \quad (17)$$

其中: μ 为地球引力常数, f_{sat} 为真近点角, e 为轨道偏心率, p 为轨道半通径^[15], 由于卫星轨道为太阳同步回归近圆轨道,则上式可化简为 $\dot{u} = \sqrt{\mu/r^3}$, 据此可求出矩阵 $\dot{\mathbf{A}}_{o1}$ 。

由式(4)和姿态动力学原理可将 \mathbf{A}_{bo} 对时间 t 的导数求出:

$$\dot{\mathbf{A}}_{bo} = -\boldsymbol{\omega}_{bo} \mathbf{A}_{bo}, \quad (18)$$

其中: $\boldsymbol{\omega}_{bo}$ 是姿态角速度在 b 系下的分量,其按照之前所述的 1-2-3 姿态转序可得式(19):

$$\boldsymbol{\omega}_{bo} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_z(\psi) \left[\mathbf{C}_y(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{C}_x(\varphi) \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

H 为 \mathbf{R}_{ct}^c 在 z 轴的分量距离,是一个随时间变化的标量,因此其对时间 t 的导数如式(20):

$$\dot{H} = [0, 0, 1] \mathbf{M}_{cb} \dot{\mathbf{R}}_{st}^b. \quad (20)$$

将式(12)展开并代入上述求出的目标点位置矢量 \mathbf{R}_{ct}^l 以及各模型分量 $\dot{\mathbf{R}}_{ct}^l$ 、 $\dot{\mathbf{A}}_{o1}$ 、 $\dot{\mathbf{A}}_{bo}$ 、 \dot{H} 等,可推导出大视场空间相机像移速度场解析式(21)。需要说明的是,由于卫星轨道地心距 r 为一固定参数,并且相机在卫星内的安装位置与安装矩阵固定不变,因此 $\dot{\mathbf{R}}_{cs}^o$ 、 $\dot{\mathbf{R}}_{sc}^b$ 和 \mathbf{M}_{cb} 均为不随时间变化的常矢量,它们对时间 t 的导数均等于零。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}}_{pt}^p = \begin{bmatrix} v_{p1} \\ v_{p2} \end{bmatrix} &= -\frac{f}{H} \mathbf{M}_{cb} \dot{\mathbf{R}}_{st}^b + \frac{\dot{H}f}{H^2} \mathbf{M}_{cb} (\mathbf{R}_{st}^b - \mathbf{R}_{sc}^b) = \\ &= -\frac{f}{H} \mathbf{M}_{cb} (\dot{\mathbf{A}}_{bo} \mathbf{R}_{st}^o + \mathbf{A}_{bo} \dot{\mathbf{R}}_{st}^o) + \frac{\dot{H}f}{H^2} \mathbf{M}_{cb} (\mathbf{R}_{st}^b - \mathbf{R}_{sc}^b) = \\ &= -\frac{f}{H} \mathbf{M}_{cb} (\dot{\mathbf{A}}_{bo} (\mathbf{A}_{o1} \mathbf{R}_{ct}^l - \mathbf{R}_{cs}^o) + \\ &= \mathbf{A}_{bo} (\dot{\mathbf{A}}_{o1} \mathbf{R}_{ct}^l + \mathbf{A}_{o1} \dot{\mathbf{R}}_{ct}^l - \dot{\mathbf{R}}_{cs}^o)) + \\ &= \frac{\dot{H}f}{H^2} \mathbf{M}_{cb} (\mathbf{R}_{st}^b - \mathbf{R}_{sc}^b). \end{aligned} \quad (21)$$

综上得到像移速度 v_p 和偏流角 β 的计算公式如下:

$$v_p = \sqrt{v_{p1}^2 + v_{p2}^2}, \quad (22)$$

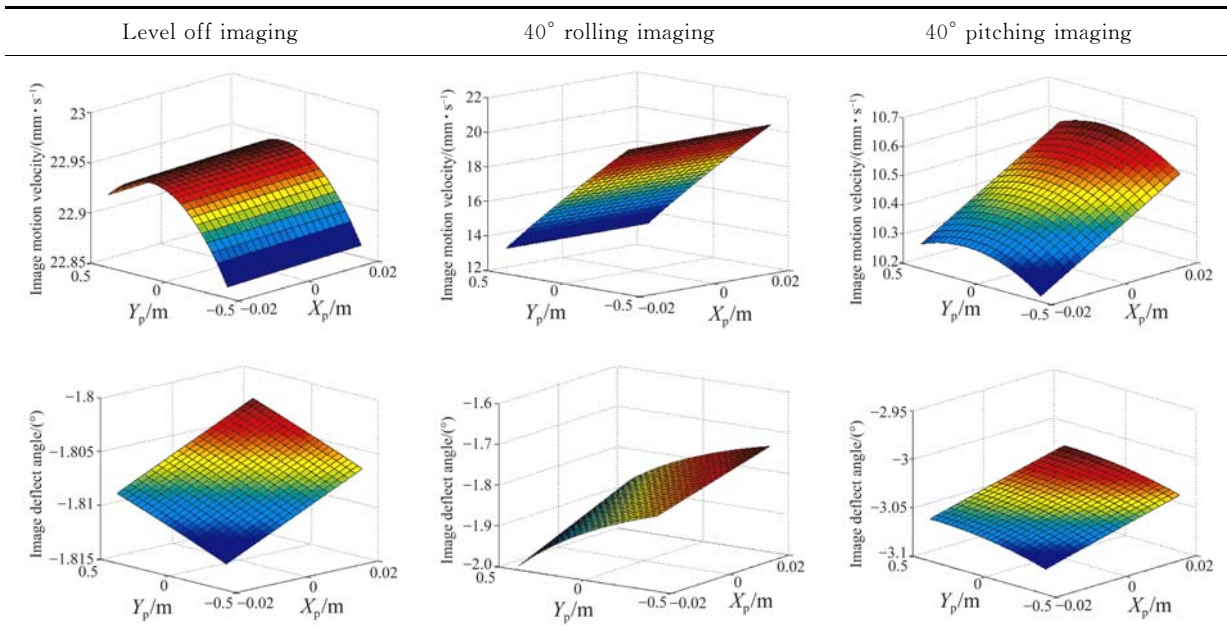
$$\beta = \arctan(v_{p2} / v_{p1}). \quad (23)$$

表 1(彩图见期刊电子版)为某卫星下行段大视场空间相机在平飞、侧摆、俯仰 3 种典型成像姿态下的焦面像移速度场分布仿真结果,该空间相机采用太阳同步近圆轨道,轨道倾角为 100.5° ,轨道高度为 600 km,焦面由 11 片 TDICCD 交错拼接组成,单片 CCD 全光谱段有效像元数为 8 192,相机焦距为 2 m,离轴角为 6.5° ,像元尺寸为 $8.75 \mu\text{m}$,侧摆机动范围为 $-40^\circ \sim 40^\circ$,俯仰机动范围为 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 。仿真时设卫星三轴姿态稳定度均为 $0.001^\circ/\text{s}$,焦面仿真区域为沿轨方向 $-0.019 \sim 0.019 \text{ m}$,垂轨方向 $-0.4025 \sim 0.4025 \text{ m}$ 。

根据表 1 中结果可以看出,相机不同成像姿态下的焦面像速场呈非线性各向异性分布,平飞时像移速度较侧摆和俯仰时大,有姿态角时,像移速度会有不同程度的下降,侧摆时像移速度模值在垂轨方向(y 轴)差异显著,俯仰时像移速度模值在沿轨方向(x 轴)存在一定差异。这是因为侧摆成像时,焦面在垂轨方向上各像点对地面目标的视线长度不同,由速高比关系可知,像点到地面目标点的视线长度越长,则像移速度越小;俯仰成像时(前摆),焦面前端像点的视线长度更短,因此前端像点的像移速度要大于后端像点的像移速度,但由于焦面仿真区域在沿轨方向的长度较小,因此像移速度在沿轨方向的差异不够明显,同时卫星运动引起的地面牵连速度与像平面存在一个夹角,牵连速度投影到像面上使得像移速度比侧摆成像时更小。仿真结果与实际分析得到的经验结果相符。

表 1 焦面像移速度场分布

Tab. 1 Distribution of focal plane image motion velocity field



3 卫星姿态稳定度对成像质量的影响分析

大视场空间相机的像移速度场分布复杂, 这对像移补偿技术提出了更高的要求。为获得高质量遥感图像, 需根据像移速度场模型实时计算焦面像点的像移速度, 据此调整各片 TDICCD 的行频, 并通过焦面偏流机构匹配偏流角。然而由表 1 可知焦面像速矢量存在差异, 但单片 CCD 的匹配行频是一致的, 偏流角匹配时焦面转向也是一致的, 这势必会在焦面上产生像速匹配残差 Δv 与偏流角匹配残差 $\Delta\beta$ 。

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, 为了保证成像质量, 通常要求动态调制传递函数 MTF_D 的下降不超过 5%。

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

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

式中: N 为 TDICCD 积分级数, 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^[17]。

本文利用提出的像移速度场模型, 对不同成像姿态下卫星姿态稳定度对相机成像质量的影响进行分析^[18]。

(1) 平飞姿态。采用以焦面中心点的像移速度计算结果来统一调整行频与偏流角的同速像移补偿策略。图 3 (彩图见期刊电子版) 为 96 级积分、无姿态偏差时 ($\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ 均为 0) 焦面各点的 MTF_D , 可以看出焦面传函在垂轨方向 (y 轴) 有所下降, 但均能保证高于 0.95。横滚角速率的增加会导致焦面 MTF_{D_y} 均匀下降; 俯仰角速率的增加会导致 MTF_{D_x} 在垂轨方向下降; 偏航角速率对焦面传函也有一定的影响, 但影响小于横滚及俯仰角速率。

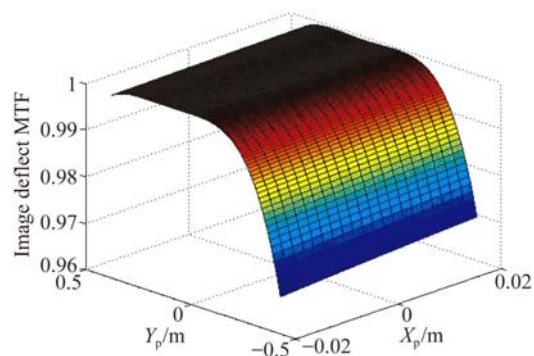


图 3 96 级大视场空间相机平飞无姿态偏差焦面 MTF
Fig. 3 Focal plane MTF of space camera with 96 integration stages under no attitude deviation and level-off imaging

(2)俯仰 40°姿态。采用分片调整行频,统一调整偏流角的异速像移补偿策略。图 4(彩图见期刊电子版)为交错拼接的 11 片 TDICCD,96 级无姿态偏差时焦面各点的 MTF_D ,可以看出焦面上每片 CCD 的传函在沿轨方向(x 轴)均有所下降,但均能保证高于 0.95。横滚角速率的增加会导致焦面 MTF_{D_y} 均匀下降,以及 MTF_{D_x} 沿焦面对角线方向下降;俯仰角速率的增加会导致 MTF_{D_x} 在沿轨方向下降;偏航角速率的增加也会导致焦面 MTF_{D_x} 在沿对角线方向下降。

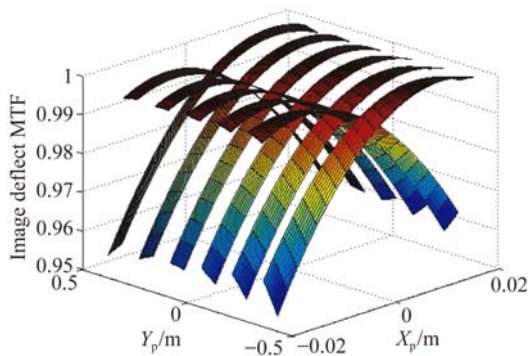


图 4 96 级大视场空间相机俯仰 40°无姿态偏差焦面 MTF
Fig. 4 Focal plane MTF of space camera with 96 integration stages under no attitude deviation and pitching imaging of 40°

(3)侧摆 40°姿态。采用分片调整行频,统一调整偏流角的异速像移补偿策略。图 5(彩图见期刊电子版)为 96 级无姿态偏差时 11 片 TDICCD 焦面各点的 MTF_D ,由分布趋势可以看出,每片 CCD 在垂轨方向(y 轴)由 CCD 像元中心向两端下降,均高于 0.95。横滚角速率的增加会导致焦面 MTF_{D_y} 均匀下降;俯仰角速率的增加会导致 MTF_{D_x} 在垂轨方向下降,使 CCD 边缘传函低于 0.95;偏航角速率对焦面 MTF_{D_x} 在垂轨方向也有一定的影响,但影响小于俯仰角速率。

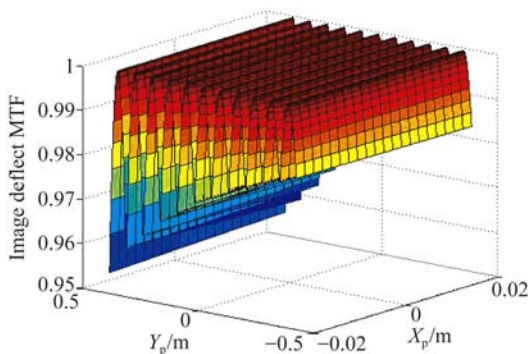


图 5 96 级大视场空间相机侧摆 40°无姿态偏差焦面 MTF
Fig. 5 Focal plane MTF of space camera with 96 integration stages under no attitude deviation and rolling imaging of 40°

综上所述,在 3 种不同成像姿态下,卫星三轴姿态稳定度的降低会导致焦面动态传函下降,而且随着积分级数增加,下降会愈发明显。俯仰姿态稳定度对焦面动态传函 MTF_D 的影响最大;横滚姿态稳定度对焦面 MTF_{D_y} 的影响要大于俯仰、偏航姿态稳定度的影响;偏航姿态稳定度对焦面传函下降的影响较小。焦面传函的下降规律需根据姿态情况综合分析,实际工程中,往往要求卫星三轴姿态稳定度是一致的^[19],图 6 为 96 级积分、三轴姿态稳定度一致时,焦面边缘点动态传函与姿态稳定度的关系。

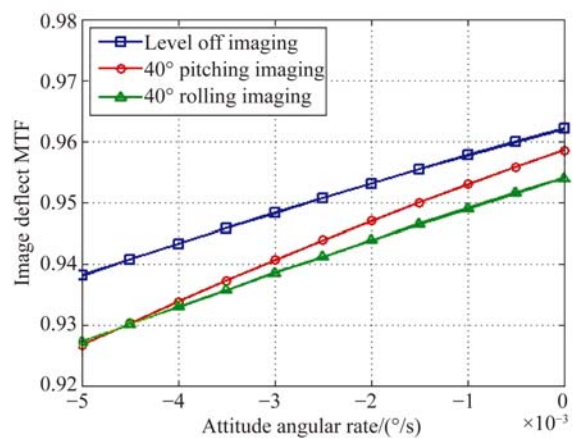


图 6 焦面边缘点三轴角速率与 MTF 的关系
Fig. 6 Relationship between three-axis angular rate of focal plane edge points and MTF

由图 6 可知,以传函下降 5% 为限,平飞姿态时姿态稳定度要求为 0.002 7(°)/s,40°俯仰姿态时姿态稳定度要求为 0.001 5(°)/s,40°侧摆姿态时姿态稳定度要求为 0.001(°)/s,可知相机大角度侧摆时对姿态稳定度的要求更高,为保证不同姿态下的成像质量,该空间相机的三轴姿态稳定度要控制在 0.001(°)/s 以内。

4 实验验证

为了验证上述分析,以某在研大视场空间相机的原理样机进行实验。实验系统如图 7 所示,包括 TDICCD 原理样机、三轴气浮转台、平行光管和动态目标发生器。原理样机搭载在三轴气浮转台上,用以模拟卫星在轨微扰动环境,该三轴气浮转台的姿态稳定度优于 0.001(°)/s。动态目标发生器上安装着分辨率靶标,结合平行光管按表

1 中的相机参数等比缩放,模拟地面目标相对于相机的推扫运动。

成像过程中,相机通过平行光管对分辨率靶标进行成像,控制器根据卫星姿态轨道参数计算像速场模型,对 CCD 行频进行调整,同时通过焦面偏流机构匹配偏流角。选择焦面边缘 CCD 作为成像区域,调整三轴气浮转台使其在不同姿态稳定度下进行实验。其中相机侧摆 40° 成像时,4 组实验在不同积分级数下分别满足和不满足第 3 节提出的姿态稳定度小于 $0.001^\circ/\text{s}$ 的要求,根据像移速度场模型计算得到的理论值如表 2 所示^[20]。



图 7 动态成像实验平台

Fig. 7 Dynamic imaging experiment setup

表 2 像移速度场与焦面传函计算数值

Tab. 2 Theoretical value of image motion velocity field and focal plane MTF

Test group	Integration stages	Attitude stability/ $(^\circ/\text{s})$	Image motion velocity/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Image deflect angle/ $(^\circ)$	Focal plane MTF
1	8	0.001	8.83	-2.03	0.98
2	8	0.003	8.77	-1.54	0.97
3	96	0.001	8.83	-2.03	0.95
4	96	0.003	8.77	-1.54	0.91

图 8(a)和(b)分别为 96 级积分级数下姿态稳定度为 $0.001^\circ/\text{s}$ 和 $0.003^\circ/\text{s}$ 时的分辨率

靶标图像,对比可知图 8(a)中 Nyquist 频率处所成的线对图像清晰可分辨,图 8(b)存在明显像移,图像质量下降,Nyquist 频率处所成的线对图像已无法分辨,符合表 2 中的理论结果,证明了像移速度场模型及姿态稳定度分析的准确性。

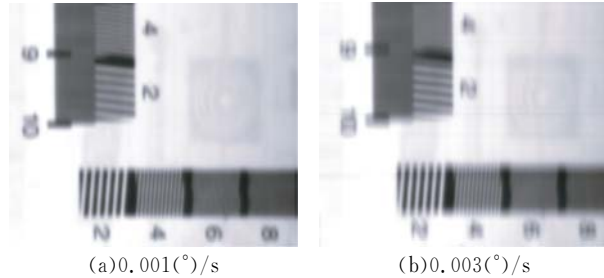


图 8 不同姿态稳定度下的靶标图像。

Fig. 8 Target images under different attitude stabilities

5 结 论

本文针对大视场空间相机像移补偿技术,提出了一种坐标变换结合姿态动力学的像移速度场建模方法,并在建模过程中考虑了离轴三反光学系统的离轴角对像移模型的影响。该建模方法具有矢量关系清晰、可移植性强、易于星上算法实现等优点。此外,对 3 种典型成像姿态下的焦面像速场分布进行了仿真,分析了各种成像姿态下焦面像速场的分布特点,在此基础上研究了卫星姿态稳定度对相机成像质量的影响。分析表明,卫星三轴姿态稳定度的降低会导致焦面动态 MTF 下降,其中俯仰姿态稳定度对焦面动态 MTF 的影响最大,而且随着积分级数的增加,下降会愈发明显。相机大角度侧摆成像时,对姿态稳定度的要求更高,以传函下降 5% 为限制条件,积分级数为 96 级的大视场空间相机,卫星姿态稳定度应控制在 $0.001^\circ/\text{s}$ 以内。成像实验结果验证了对卫星姿态稳定度的分析,证明了像移速度场模型的准确性,本文的研究可为大视场空间相机在不同成像姿态下的像移补偿提供可靠依据。

参考文献:

[1] 张敏,金龙旭,李国宁,等. 基于 TDICCD 空间相机图像模拟源系统设计[J]. 液晶与显示, 2016, 31(2): 208-214.

ZHANG M, JIN L X, LI G N, *et al.*. Design of image simulation system of TDICCD space camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 208-214. (in Chinese)

[2] 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.
- WANG G L, LIU J G, LONG K H, *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)
- [3] 李永昌,路朋罗,金龙旭,等.大视场 TDICCD 空间相机全通道高可靠快视系统[J]. *光子·激光*, 2015,26(2):224-232.
- LI Y CH, LU P L, JIN L X, *et al.*. A full channel and high-reliability quick-look system for TDICCD space camera with large field of view [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26 (2): 224-232. (in Chinese)
- [4] JIN L X, LI J, HAO X P. Design of image transmission system for multi channel panchromatic TDICCD camera with large field of view [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 380: 3758-3761.
- [5] 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.
- SUN J M, GUO J, SHAO M D, *et al.*. Precise focusing for TDICCD camera with wide field of view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (3): 602-607. (in Chinese)
- [6] 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.
- NING Y H, GUO Y F. Real-time image processing in TDICCD space mosaic camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 508-516. (in Chinese)
- [7] 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.
- GUO H ZH, LV H Y, QU L X. 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)
- [8] 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.
- YAN D J, LI W X, WU W P, *et al.*. Aircraft's large attitude angles' usage in image motion compensation calculation of space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1200-1205. (in Chinese)
- [9] WANG Z, XIONG X, CHOI T, *et al.*. On-orbit characterization of MODIS modulation transfer function using the moon [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4112-4121.
- [10] LE V N, CHEN S Q, FAN Z G. Optimized asymmetrical tangent phase mask to obtain defocus invariant modulation transfer function in incoherent imaging systems [J]. *Opt Lett*, 2014, 39 (7): 2171-2174.
- [11] GOSHS K. Image motion compensation through augmented collinearity equations [J]. *Optical Engineering*, 1985,24(6): 241014.
- [12] 王家骥,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.
- WANG J Q, YU P, YAN CH X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12):1585-1589. (in Chinese)
- [13] 武星星,刘全国.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.
- WU X X, LIU J G. Image motion compensation of scroll imaging for space camera based on earth ellipsoid [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (2): 351-359. (in Chinese)
- [14] 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.
- WANG CH, YOU ZH, XING F, *et al.*. Image motion velocity for wide view remote sensing camera and detectors exposure integration control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013,33(5):0511002. (in Chinese)
- [15] 彭成荣.航天器总体设计[M].北京:中国科学技术出版社,2011,227-231.
- PENG CH R. *System Design for Spacecraft* [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2011, 227-231. (in Chinese)
- [16] YAN F, ZHENG L G, ZHANG X J. Design of an off-axis three-mirror anastigmatic optical system with wavefront coding technology [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(6): 587-601.
- [17] 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.
- LI J, XING F, WANG CH. High-precision on-orbit assessment of MTF for space CCD camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (2): 0211003. (in Chinese)
- [18] 张媛.星载 TDICCD 相机侧摆成像像移速度建模

- 与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013, 2-4.
- ZHANG Y. *Modeling and analysis of image motion velocity for satellite borne TDICCD camera in roll attitude* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013, 2-4. (in Chinese)
- [19] 石俊霞, 李佩玥, 李洪法, 等. 遥感 TDICCD 相机侧摆成像及定位精度优化[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 777-784.
- SHI J X, LI P Y, LI H F, *et al.*. Scroll imaging of space TDICCD remote sensing camera and optimization of image location accuracy [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 777-784. (in Chinese)
- [20] 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.
- ZHAO J X, ZHANG T, YANG Y M, *et al.*. Image motion velocity field of TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728003. (in Chinese)

作者简介:



路朋罗(1988—), 女, 河北任丘人, 博士研究生, 2011 年于吉林大学获得学士学位, 主要从事光电成像和像移补偿技术方面的研究。E-mail: lupengluo@163.com

导师简介:



金龙旭(1965—), 男, 吉林延吉人, 研究员, 博士生导师, 2001 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位, 主要从事空间相机智能控制系统方面的研究。E-mail: Jinlx@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)