

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

王 翀^{1,2} 尤 政^{1,2} 邢 飞^{1,2} 张高飞^{1,2}

(¹ 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084
² 清华大学精密测试与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 大视场空间遥感器由于卫星轨道、姿态机动、颤振、地球星历、几何特性和载荷相机光学设计等因素耦合影响, 成像过程中焦面像场的运动和图像形变表现出非线性时变规律。像速场的分布和变化会影响动态推扫的成像控制精度和成像质量。提出了一种新的遥感器像移速度场数学建模方法, 通过分析具有空间光滑曲面的体目标视运动及其动态成像问题, 推导了对地观测大视场相机像速解析式。算法具准确性好和效率高的优点, 适用于大视场空间遥感器在轨像速匹配的嵌入式计算机处理和仪器设计。同时研究了强非线性像速场的像速匹配和偏流角跟踪的电荷耦合器件(CCD)曝光积分控制及优化问题。

关键词 成像系统; 大视场空间遥感相机; 像速场; 像速匹配; 偏流角

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0511002

Image Motion Velocity Field for Wide View Remote Sensing Camera and Detectors Exposure Integration Control

Wang Chong^{1,2} You Zheng^{1,2} Xing Fei^{1,2} Zhang Gaofei^{1,2}

(¹ Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China
² State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract For space-borne remote sensors with wide field of view, images on focal planes motion deform nonlinearly as well as vary with time due to the affects from satellites orbital motions, attitude maneuverings, jittering, earth ephemeris and geometrical characteristics, optical designs and so on. The distribution of image velocity field determines the exposure integration accurate for the image formation procedure so as to affect the image qualities. A new method is proposed that it focus on to found the image motion velocity field mathematical model which especially appropriate to wide field of view sensors through analyzing the problems of image formation for apparent kinetic spatial object with smooth curved surface. Analytical formulas of image velocities are deduced. The algorithm is proved not only to be precise but also efficient. It can be employed as the dynamic imaging algorithms for embedded computers of orbiting payloads and their instrumentations. Based on this research, it's concerned that an optimized approaches for charge coupled device (CCD) detectors exposure integration control via image velocities matching along with deflect angles compensations as the strong nonlinear image velocity fields.

Key words imaging systems; space camera with wide field of view; image motion velocity field; image velocity matching; deflect angle

OCIS codes 120.0280; 110.6770; 120.6085; 040.1520; 110.4153

收稿日期: 2012-11-26; 收到修改稿日期: 2013-01-20

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121503)资助课题。

作者简介: 王 翀(1979—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事空间光学成像技术方面的研究。

E-mail: chong-wang10@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 尤 政(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事空间光学和微米纳米技术等方面的研究。

E-mail: yz-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

1 引 言

现代空间光学遥感对于相机的空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率的要求日益提高。为了适应这一趋势, 遥感器通常采用以载荷为中心的一体化、轻量化的设计, 使之既具有较大的成像幅宽同时具有较强的机动性能、较高的成像分辨力和图像定位精度。轻型商业遥感卫星 IKONOS 和 Quickbird 的全色成像分辨力分别达到了 1 m 及 0.6 m 级别^[1,2], 可通过摆动实现异轨成像和同轨重访。2008 年美国发射的 Geosy-1 卫星具有 0.41 m 全色分辨力和优于 4 m 的无控制点定位精度^[3]; 法国 Pleiades 卫星的无地面控制点地理定位精度也将能达到 3 m^[4]。这些轻型商业光学遥感相机大多采用星载一体化的设计, 具有很强的机动性。高分辨率动态成像的一个关键技术是像速匹配, 控制焦面像场光流与相机感光探测器曝光积分单元的时序同步, 是动态获取卫星影像的基本原理和核心技术之一。因此, 动态成像的像速匹配和运动模糊图像反卷积技术已成为当今空间光学的研究热点。我国嫦娥二号卫星电荷耦合器件(CCD)立体相机在国际上首次采用两线阵时间延迟积分(TDI) CCD 自推扫技术实现对月面的高分辨率同轨立体成像, 应用卫星轨道外推的方法, 采取地面行频注入与激光高度计辅助行频计算进行像移补偿^[5,6]。在对地观测方面, 文献[7]较早提出并深入研究了中低轨道空间相机平飞成像的像速度矢量数学模型和误差综合方法; 文献[8]研究了航空相机的像速计算的坐标变换方法。文献[9]联合光线追迹和坐标变换方法研究了航空相机的动态成像的像旋。文献[5]研究了已知相机运动状态的像场光流建模。随着空间光学技术的发展和遥感技术的需求, 当代国际先进的遥感器为了同时具有高空间分辨率和高时间分辨率, 相机光学系统采用离轴 3 反射消像散(TMA)等先进的设计与制造技术以扩大视场、增加幅宽、减少中心遮拦, 同时保持静态成像质量接近衍射极限^[3,10]。另一方面, 为了进一步提高成像任务的敏捷性和灵活性, 应用卫星平台或相机自身的大角度侧摆和俯仰机动实现异轨成像和同轨立体重访推扫成像。必须注意到, 轻量化和大角度机动成像必须突破传统空间相机设计时和工作时对平台姿态稳定度的高度依赖。克服卫星姿态机动和颤振带来的不利影响, 亟待建立大视场相机的时变像速场分布的数学和物理模型。基于此, 研制在轨实时像速匹配算法, 优化设计合理的图像传感器曝光成像策略和控制方法具

有现实意义。空间相机在轨成像过程中, 卫星的轨道运动, 姿态机动和颤振等使得相机光学系统相对地球椭球体表面产生十分复杂的相对运动, 地球曲面作为相机的扩展物, 各种成像畸变导致了像移速度场及光流演进在时间和空间上呈各向异性变化^[11~13]。这在大视场空间相机的应用中表现得尤其显著。

对于普遍应用于空间相机的 TDI CCD 图像传感器, 在动态推扫成像中, 为了取得足够的曝光量, 增加积分级数, 提高图像信噪比。各像点的行转移频率与积分方向必须同其曝光时间内的像速大小和方向保持匹配, 才可避免运动模糊, 从而在理论上保持其动态调制传递函数与静态成像时的调制传递函数相一致, 否则成像质量势必退化。实现 CCD 行转移速率与像场运动速度相匹配的方法通常是根据卫星轨道及姿态测量仪器如全球定位系统(GPS)接收机、星敏感器、陀螺所获取的实时测量数据, 通过星载嵌入式计算机中的像速计算程序计算各成像感光坐标位置的像移动速度, 据此控制各 TDI CCD 图像传感器的行转移频率和调光积分级数, 并使用现场可编程门阵列(FPGA)产生相应的驱动时序, 保持 CCD 的曝光积分电荷包运动速度与各像点的运动速度一致, 或控制全局残余像速匹配误差最小化。成像光流偏离 TDI 方向的角度称为偏流角, 偏流角会使得曝光时段同一像点运动不能被约束在该 TDI CCD 的同一列内, 从而导致图像列之间的混淆, 进而像质退化, 因此必须通过卫星姿态或焦面偏流机构实现偏流角跟踪匹配。卫星平台姿态及偏流机构的控制又将产生反馈作用影响焦面像速场变化的复杂现象。本文提出了相机物方目标的视运动成像方法, 建立空间遥感器的通用性像速场模型, 并推导了像速场解析算法。在像速场模型的基础上, 研究了像速匹配控制技术与优化方法。

2 空间相机动态成像时变像速场分析

以遥感卫星通常使用的太阳同步圆轨道作为研究对象。因其轨道摄动在成像时间内极其微小, 可忽略不计。由星载 GPS 接收机、星敏感器、陀螺仪获得相机运动状态的测量数据。

图 1 为大角度机动推扫成像瞬时分析原理图。引入了卫星质心轨道坐标系 $S_0, o, x_0y_0z_0$; S_c 为相机坐标系, $o, x'_iy'_iz'_i$ 的坐标原点位于光学系统主点, 不失一般性地假设它与卫星质点重合, 相机坐标系与卫星本体系固连; S_f 为焦面坐标系, 可由相机坐标系

沿光轴 z'_i 移至像方焦点处得到； I 为地球惯性坐标系； S_c 为 WGS84 地球坐标系。

相关物理量有卫星轨道角速率 ω_s ，卫星轨道地

心距 l_s ，轨道倾角 i_0 ，卫星升交点赤经 α_u ，星下点行地理纬度 λ_g ；WGS84 地球半长轴 $a=6378.137$ km，半短轴 $b=6356.752$ km。

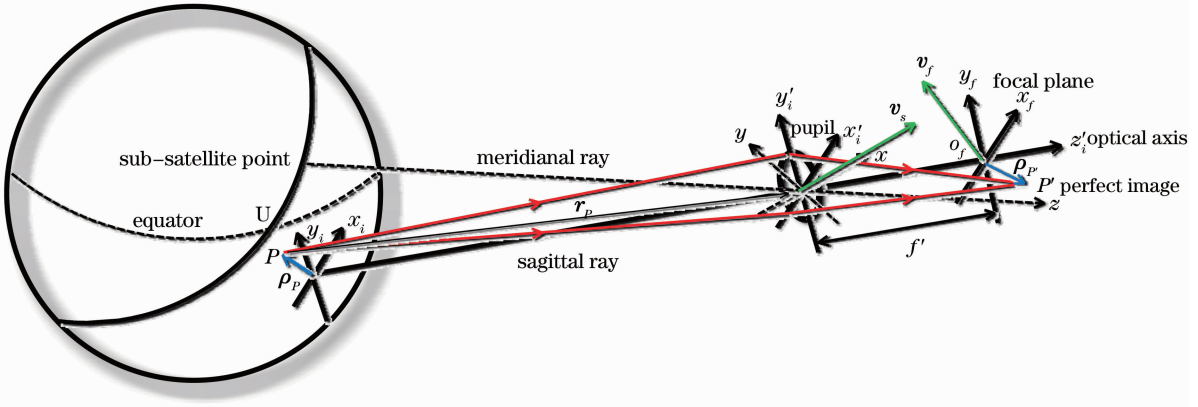


图 1 空间相机姿态机动成像原理

Fig. 1 Principle of space camera attitude maneuver imaging

成像目标的物方视运动是指目标在相机坐标系 S_c 内进行观测的运动形式。这里假设相机姿态相对轨道坐标系 S 保持稳定，即不存在姿态机动及结构颤振；在相机推扫成像时卫星轨道的进动、摄动及地球在惯性系中的章动和岁差均可忽略。相机光学坐标系内，地球椭球体的视运动为绕 S_c 内过地心某旋转轴的匀速自转，地球曲面在相机坐标系中观测的姿态视运动角速度：

$$\omega_a^c = \omega_c^c - \omega_o^c, \quad (1)$$

式中 $\omega_s^c, \omega_c^c, \omega_o^c$ 分别为地球在 S_c 内视运动自转角速度矢量，地球在惯性系 I 中自转角速度矢量在 S_c 系内的表示，卫星轨道角速度矢量在 S_c 系中的表示。实际上，相机光学系统会受成像平台的姿态机动调整及结构颤振的影响，地心在相机观测系中的视运动为地球质心相对相机主点的轨道运动，引入地心视运动速度 \bar{v}_c 。

可见，相机视场中的地球椭球体在相机坐标系 S_c 的物方视运动可由轨道视运动及姿态视运动综合构成，其中轨道视运动由相机光学系统的姿态运动决定，目标的姿态视运动则由地球在惯性空间的自转运动与卫星轨道运动构成。

根据卫星上 GPS 的测量数据，计算出 I 系的卫星平台瞬时速度矢量 V_s^I ，星敏感器测量的卫星本体坐标系中标定的姿态欧拉角 (φ, θ, ψ) ，星载陀螺仪测量的实时姿态角速率 ω_c 。

$$\omega_c = \omega_x e_x^c + \omega_y e_y^c + \omega_z e_z^c, \quad (2)$$

式中 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别为通过陀螺仪测量卫星姿态角速度，通过坐标变换得到其在 S_c 坐标分量。 S_c 中地

心轨道瞬时视运动速度可表示为

$$\bar{v}_{ac} = \omega_c \times r_c^c, \quad (3)$$

式中 r_c^c 为地心在相机坐标系中的位置矢量。

设地球椭球面上一点 P 位于相机视场内，其地理经、纬度分别为 $\alpha_{Pg}, \lambda_{Pg}$ ，通过 NASA SRTM 数字高程数据库，可确定 P 相对相机的位置（在 S_c 内测量为 ρ_P^c ），椭球上 P 点在相机物方的视运动速度可表示为

$$\bar{v}_{aP} = \omega_a^c \times (\rho_P^c - r_c^c) + \bar{v}_{ac}. \quad (4)$$

大视场遥感器的高分辨率光学相机在轨工作时，视场内的目标均位于地球椭球面上，各点在物方的物距、方位角、高程导致不同目标点的视运动差异显著，成像瞬时，它们的高斯像点的运动规律从像场中心至边缘呈非线性变化。设点 P 的视运动轨迹为 Γ_P ，其以时间 t 为参数的矢量参数方程为

$$\rho_P^c(t) = \rho_P^c(0) + \int_0^t \bar{v}_{aP} d\tau, \quad (5)$$

式中 $\rho_P^c(0)$ 是初位矢。时间变分 δt 对应的轨迹变分为 $\delta \rho_P$ 。当相机的 Seidel 像差及各阶高阶像差得到很好的校正，相机静态可获得理想高斯像。在相机坐标系中，视运动轨迹变分 $\delta \rho_P$ 由相机静态所成的像矢量 $\delta \rho_{P'}^c$ 即为 δt 内与 P 点的高斯像点 P' 在焦面上的轨迹变分。由高斯光学的物、像共轭关系得

$$\delta \rho_{P'}^c = A_P \circ (\rho_P + \delta \rho_P) \cdot (\rho_P + \delta \rho_P) - A_P \circ (\rho_P) \rho_P. \quad (6)$$

$$\text{定义 } A_P \circ (\rho_P) = \begin{bmatrix} \beta_P & 0 & 0 \\ 0 & \beta_P & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_P \end{bmatrix}, \text{ 其中 } \beta_P = (-1)^n$$

$\frac{f'}{\rho_P^c \cdot e_z^c}$ 为相机对 P 点成像的横向放大倍率, n 为光学系统中间成像次数, $\alpha_P = \beta_P^0$ 为纵向放大倍率, 对于遥感相机, β_P^0 是高阶小量, 略去。视场内目标物的

高斯像点均严格位于焦平面上。 t 时刻相机坐标系内像点 P' 的像移速度为

$$v_{P'_z} = \frac{\delta f'_{P'}}{\delta t} = \frac{\mathbf{A}_P \circ (\boldsymbol{\rho}_P + \delta \boldsymbol{\rho}_P) \cdot (\boldsymbol{\rho}_P + \delta \boldsymbol{\rho}_P) - \mathbf{A}_P \circ (\boldsymbol{\rho}_P) \boldsymbol{\rho}_P}{\delta t}, \quad (7)$$

$$v_{P'} = \frac{\mathbf{A}_P \circ (\boldsymbol{\rho}_P) \cdot (\boldsymbol{\rho}_P + \delta \boldsymbol{\rho}_P) + \frac{\delta \mathbf{A}_P \circ (\boldsymbol{\rho}_P)}{\delta \boldsymbol{\rho}_P} \cdot \delta \boldsymbol{\rho}_P \cdot (\boldsymbol{\rho}_P + \delta \boldsymbol{\rho}_P) + O(\delta \boldsymbol{\rho}_P^2) - \mathbf{A}_P \circ (\boldsymbol{\rho}_P) \cdot \boldsymbol{\rho}_P}{\delta t},$$

令 $\delta t, \delta \boldsymbol{\rho}_P \rightarrow 0$ 代入 $\frac{\delta \boldsymbol{\rho}'_{P'}}{\delta t} = \bar{\mathbf{v}}_{aP}$, 并略去高阶小量,

$$\mathbf{v}_{P'} \approx \mathbf{A}_P \circ (\boldsymbol{\rho}_P) \cdot \bar{\mathbf{v}}_{aP} + \dot{\mathbf{A}}_P \circ (\boldsymbol{\rho}_P) \boldsymbol{\rho}_P = \bar{\mathbf{v}}_{P'}^{(1)} + \bar{\mathbf{v}}_{P'}^{(2)}. \quad (8)$$

(8)式说明像点 P' 像速矢量不仅与目标物点的视运动[(8)式第一项]有关而且与目标的物方位矢量有关, 且呈各向异性[(8)式第二项]。这种现象是地球椭球体作为目标的几何结构、视运动及光学静态成像关系耦合作用的结果。 $\bar{\mathbf{v}}_{P'}^{(1)}$ 是椭球刚体视运动产生的像速, $\bar{\mathbf{v}}_{P'}^{(2)}$ 是由视运动引起体目标成像在点 P' 的图像畸变速度。

设由 GPS 测量数据计算的星下点地理经度为 α_{gs} , 地理纬度为 λ_{gs} , 据 WGS84 模型得出其地心经度 $\alpha_s = \alpha_{gs}$, 地心纬度为 λ_s , 圆轨道半径为 L_o , 轨道倾角为 i_o 。

定义惯性空间卫星的轨道运动幅角 γ_s (轨道根数中近地点幅角与卫星真近点角之和)。则当传感器所搭载的卫星星下点地心纬度为 λ_s 时, 由球面几何关系得

$$\gamma_s = \frac{\pi}{2} [1 - \text{sgn}(s)] - \text{sgn}(s) \arcsin\left(\frac{\sin \lambda_s}{\sin i_o}\right), \quad (9)$$

式中 $s = -1$ 时为下行轨道, $s = 1$ 时为上行轨道。定义坐标变换矩阵:

$$\mathbf{\Gamma}_{i_o} = \begin{bmatrix} \cos i_o & \sin i_o & 0 \\ -\sin i_o & \cos i_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{\Gamma}_{i_o} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_s & 0 & -\sin \gamma_s \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_s & 0 & \cos \gamma_s \end{bmatrix}. \quad (10)$$

卫星姿态矩阵 $\mathbf{A}_\psi, \mathbf{A}_\theta, \mathbf{A}_\varphi$ 在地球惯性坐标系 I 中, 传感器的轨道角速度矢量为 $\boldsymbol{\omega}_s^I = \frac{V_s}{L_s} \mathbf{\Gamma}_{i_o}^{-1} \mathbf{e}_Y^I$, 其中 \mathbf{e}_Y^I 为地球惯性系 I 的 Y 轴单位矢量。

进而由(1)式得

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_a^I = \omega_c \mathbf{e}_Y^I - \frac{V_s}{L_s} \mathbf{\Gamma}_{i_o}^{-1} \mathbf{e}_Y^I \\ \boldsymbol{\omega}_a^c = \mathbf{A}_\psi \mathbf{A}_\theta \mathbf{A}_\varphi \mathbf{\Gamma}_{\gamma_s} \mathbf{\Gamma}_{i_o} \boldsymbol{\omega}_a^I \end{cases}. \quad (11)$$

像点 P' 点在相机坐标系中位矢为 $S_c, \boldsymbol{\rho}_{P'}^c = (x'_{P'}, y'_{P'}, f')$ 。

由此得到的 P 点所在视线方程, 联立地球惯性坐标系 I 中的地球椭球面方程

$$\frac{(x^I)^2}{a^2} + \frac{(z^I)^2}{a^2} + \frac{(y^I)^2}{b^2} = 1. \quad (12)$$

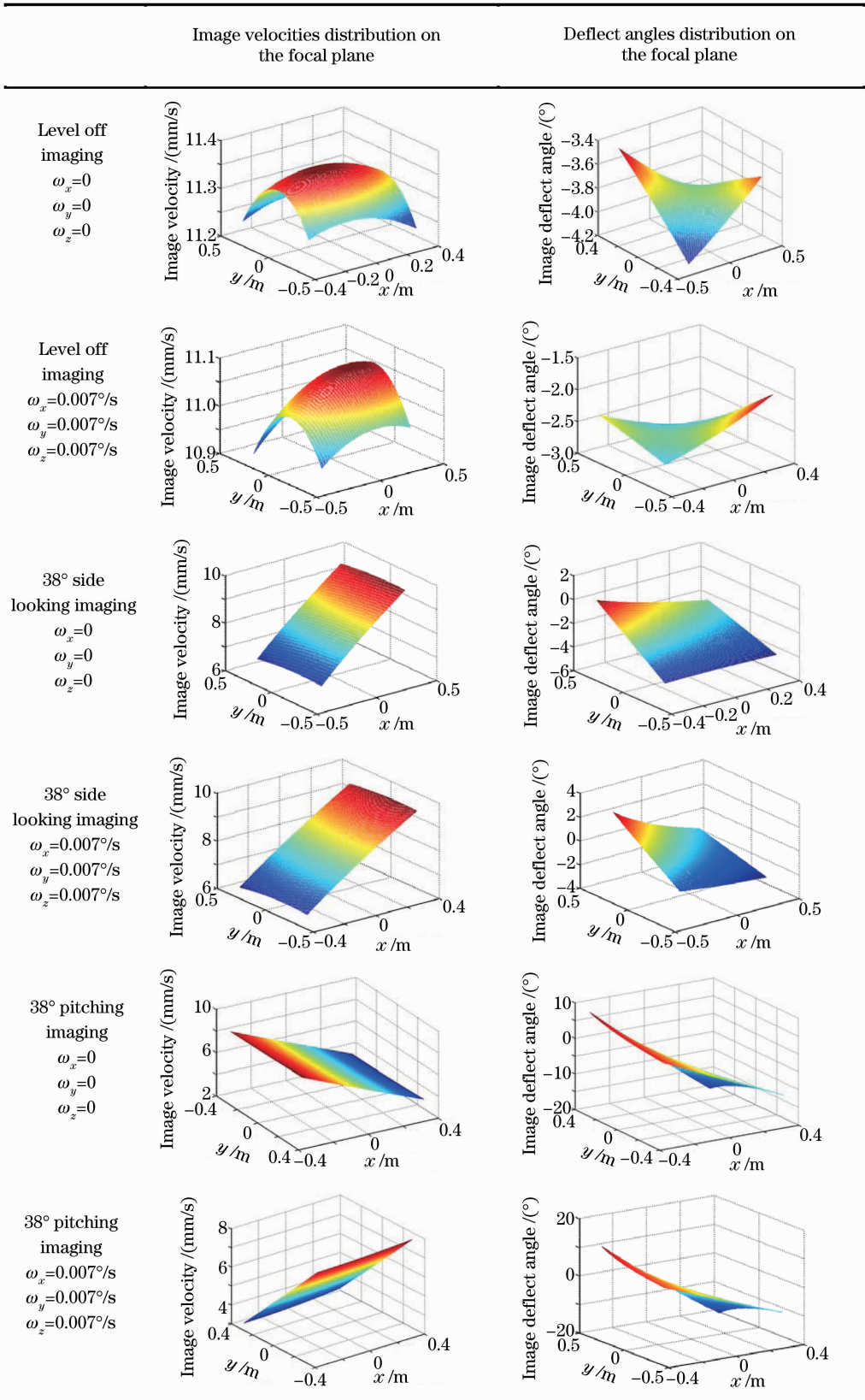
得 P 点在 I 中的位矢 $\boldsymbol{\rho}_P^I, \boldsymbol{\rho}_P^c = \mathbf{A}_\psi \mathbf{A}_\theta \mathbf{A}_\varphi \mathbf{\Gamma}_{\gamma_s} \mathbf{\Gamma}_{i_o} \boldsymbol{\rho}_P^I$ 。将(12)式代入(4)式并联立(2)式和(3)式得 P 点的视运动速度 $\bar{\mathbf{v}}_{aP}$, 将其代入(8)式得到像点 P' 的像速矢量方程可得到其在像空间的标量解析式 $\mathbf{v}_{P'}$ 。图像光流偏离焦面 x_f 轴的偏流角定义为 $\beta_{P'} = \arctan\left(\frac{v_{P'_y}}{v_{P'_x}}\right)$ 。以不同姿态成像的大视场传感器为例, 在某一特定瞬时焦面的像速场在焦面分布的仿真计算结果如表 1 所示。

依计算结果, 成像姿态指向与物方视运动引起焦面瞬时像速场的分布为非线性各向异性, 且在俯仰成像时, 像场的偏流方向在焦面不同位置差异显著; 在侧摆成像时, 像速模值差异显著。图 2 为在 S_c 中观测, 大视场相机姿态机动推扫成像时, 各 TDI CCD 传感器地面多轨推扫条带。各 CCD 不同像元对应的视线指向目标点的地面像元分辨力 (GSD)、物距、CCD 的条带幅宽受摆角和地球表面面型作用差异很大。这种复杂现象是大视场空间相机区别于航空相机及低轨小视场相机的重要特征。

像速场分析方法也同样适用于其他传感器对空间目标体动态成像问题, 具有普适性。经实际的遥感载荷设计测试和实验表明, 像速解析式可作为成像算法应用于在轨嵌入式计算机应用, 全面提高 CCD 成像单元的各项控制参数的实时更新率和精确度。

表 1 焦面像速场分布

Table 1 Image velocity field distribution on focal plane



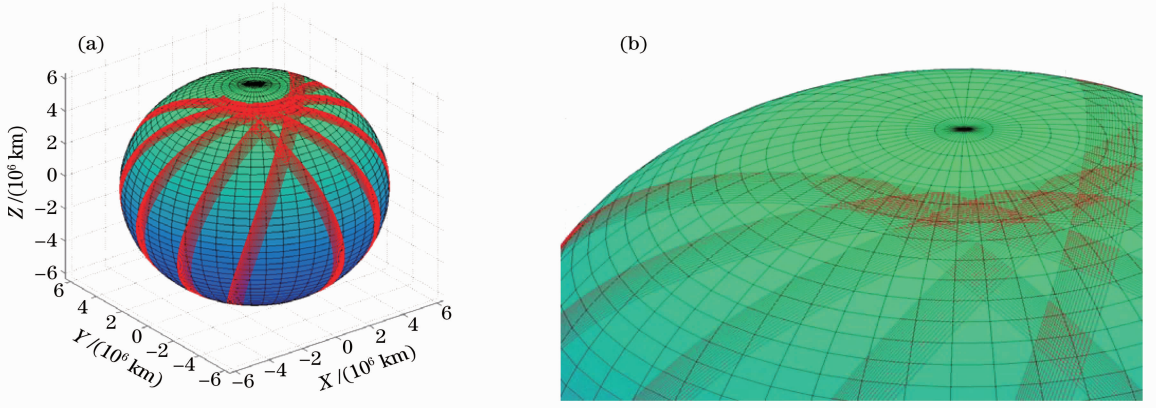


图 2 大视场遥感器大角度机动推扫成像 CCD 地面条带分布

Fig. 2 CCD ground strips for wide field of view camera in large scale attitude maneuver imaging

3 焦面图像传感器动态成像控制与优化

大视场遥感相机的焦面瞬时像速场的复杂性对相机的 CCD 图像传感器的成像控制提出了更高的要求。载荷电子学系统根据测量单元输入的测量数据实时计算焦面各感光像元的瞬时像速矢量,控制 CCD 器件的行转移频率与像速模值保持同步;通过卫星姿态机动或相机焦面偏流机构实现偏流角的跟踪,保持 TDI 推扫方向与像场偏流方向相适应。

像速匹配和偏流角匹配的系统误差主要来自姿、轨测量误差和成像控制误差。在姿、轨测量精度确定的条件下,引入合理的成像控制方法可以从原理上消除系统误差对成像质量的影响。根据第 2 节的仿真计算结果不难看出,由于同一 CCD 器件的行转移频率在同一时刻是唯一的,而该器件不同感光像元位置的像速矢量大小和方向却具有差异,这势必由于感光像元处的像速差异造成像速匹配误差(行转移频率与实际像速的匹配误差计算方法为 $\Delta v_p = v_p - v_{LR} = v_p - f_{LR}l_{CCD}$, 式中 l_{CCD} 为 CCD 像元边长, f_{LR} 为行频)。同理,焦面的偏流角控制方向也不能满足所有感光像元处的积分方向同焦面的转向保持一致,称为偏流角误差 $\Delta\beta = \beta_p - \beta^*$, β^* 为焦面偏流角目标控制量。

综上,若遥感载荷姿、轨测量误差固定,相机的成像控制有两种优化方法:1)局部优化,即高分辨率跟踪成像,这一策略适用于对视场中重点目标的最优像速匹配和偏流跟踪的详查成像模式;2)全局优化,即通过焦面像速场分布,实时制定各 CCD 器件的工作行频和焦面偏流组件(或卫星姿态)的控制律,全焦面感光积分区域调制传递函数(MTF, f_{MTF})整体优化,适用于普查成像模式。

静态点扩散函数(f_{PSF})沿像速失配方向的二维卷积经傅里叶变化可获得动态光学传递函数(f_{OTF})和 f_{MTF} 。

$$f_{MTF_d} = f_{MTF_s} f_{MTF_{dx}} f_{MTF_{dy}}, \quad (13)$$

$$f_{MTF_{dx}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} K \frac{\Delta v}{v}\right)}{\frac{\pi}{2} K \frac{\Delta v}{v}}, \quad f_{MTF_{dy}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} K \tan \Delta\beta\right)}{\frac{\pi}{2} K \tan \Delta\beta}, \quad (14)$$

式中 K 为 TDI 调光积分级数, f_{MTF_s} 为相机的静态成像的调制传递函数, $f_{MTF_{dx}}$, $f_{MTF_{dy}}$ 分别为由于像速失配和偏流角跟踪失配误差决定的调制传递函数。

1) 局部优化方案中控制策略规划。针对景物 P 点的成像优化控制目标函数为 $(f_p, \varphi, \theta, \psi, \phi)$ 使得 $\max\{f_{MTF_d}\}$, 其中 f_p 为 P 点所在 CCD 器件的推扫的行转移频率, φ, θ, ψ 为 3 轴欧拉姿态角, ϕ 为偏流机构的转角。

2) 全局优化方案的控制策略规划。成像控制的目标函数为 $(f_1, \dots, f_N, \varphi, \theta, \psi, \phi)$ 使得 $\max\left\{\sum_{i=1}^N \iint_{\sigma_i} f_{MTF_d} ds\right\}$, 式中 f_1, \dots, f_N 为各片 CCD 器件的行转移频率控制量, σ_i 为焦面第 i 号 CCD 的有效感光面积。

图 3 为 $19^\circ \times 1^\circ$ 视场相机左侧摆 38° 成像(卫星平台三轴颤振角速率均设为 $0.007^\circ/s$)的焦面像速场分布。重点目标像点 P' 恰好位于视场边缘对应的某 CCD 感光区域, $l_{CCD} = 8.75 \mu m$, 该点的曝光时间为毫秒量级。对于交错平行拼接的 CCD 焦面,因各 CCD 可独立进行行转移驱动,而偏流角补偿只能依靠焦面整体的转动实现。通过(13)式不难看出,像速一行频匹配误差较偏流失配误差对图像质量的

影响较小。

计算偏流角匹配的各种优化控制对像质的影响。由图 4 计算仿真结果不难看出焦面偏流角的全局优化控制使中心视场成像动态 f_{MTFdy} 退化很小，

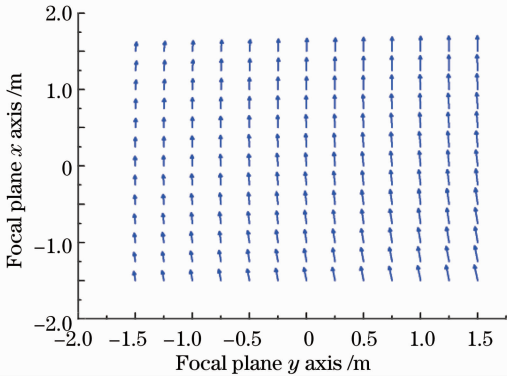


图 3 侧摆 38°异轨颤振成像瞬时焦面像速场

Fig. 3 Image velocity field as 38°side-looking imaging with jitter

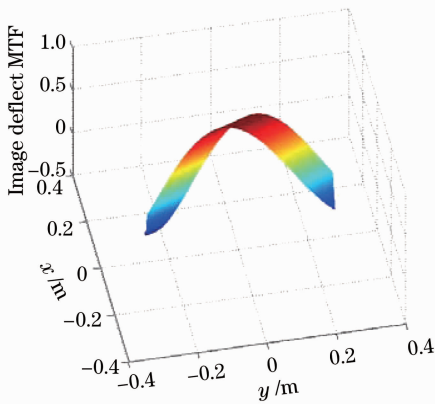


图 4 侧摆 38°异轨颤振成像全局优化感光区 f_{MTF} 分布

Fig. 4 Global optimization of f_{MTF} distribution as 38°side-looking imaging with jitter

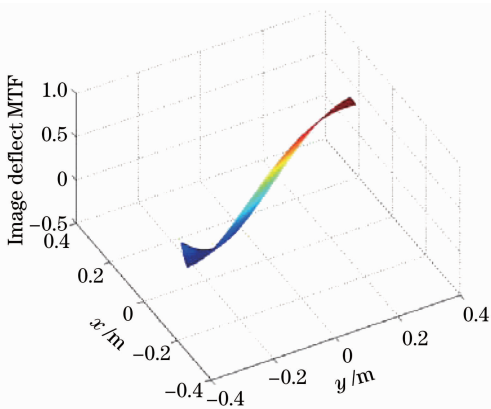


图 5 侧摆 38°异轨颤振成像局部焦面重点区域优化焦面感光 f_{MTF} 分布

Fig. 5 Key objects optimization of f_{MTF} distribution as 38°side-looking imaging with jitter

而视场边缘 f_{MTFdy} 退化较为严重。图 5 所示的计算是对视场边缘成像区域点的 CCD 控制进行局部优化，焦面偏流 f_{MTFdy} 分布，该区域像质因此得到显著提高。

4 结 论

针对大视场遥感相机对地观测动态成像技术提出了空间目标体物方视运动的概念，并研究了引入视运动成像法建立相机的像速场数学模型，解释了其较传统小视场空间相机的像速场的复杂性。基于此，推导了高精度像速解析算法。该方法对于空间相机运动成像具有普适性，且具有算法精确、复杂度低和适合星上嵌入式系统应用的优点。此外，对遥感器各种典型的姿态机动成像模式进行了仿真计算，分别分析了各种工作模式的像速场的特点。在此基础上研究了大视场遥感器焦面 CCD 图像传感器的行频—像速匹配和偏流角跟踪匹配的动态成像控制方法。根据像速场的非线性分布特征，提出了全局 MTF 优化和重点目标高分辨率成像的局部 MTF 优化策略，并进行了仿真实验。结果表明，提高像速计算精度并引入 CCD 曝光控制优化可显著增强大视场遥感器的任务灵活性和成像分辨力，同时必将大大降低相机工作对于卫星平台姿态稳定度的依赖性。

参 考 文 献

- 1 J. W. Figoski. Quickbird telescope: the reality of large, high-quality, commercial space optics[C]. *SPIE*, 1999, **3779**: 22~30
- 2 M. K. Cook, B. A. Peterson, D. Gene *et al.*. IKONOS technical performance assessment [C]. *SPIE*, 2001, **4381**: 94~108
- 3 Han Changyuan. Recent earth imaging commercial satellites with high resolutions [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(3): 202~208
韩昌元. 近代高分辨率地球成像商业卫星[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(3): 202~208
- 4 Feng Zhongkui, Shi Dan, Chen Wenxi *et al.*. The progress of French remote sensing satellite —— from SPOT taward Pleiades [J]. *Remote Sensing Information*, 2007, (4): 87~92
冯钟葵, 石 丹, 陈文熙 等. 法国遥感卫星的发展——从 SPOT 到 Pleiades [J]. *遥感信息*, 2007, (4): 87~92
- 5 Chang Lingying, Zhao Baochang, Yang Jianfeng *et al.*. Optical system design of a two-linear array stereoscopic mapping CCD camera [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0816001
常凌颖, 赵葆常, 杨建峰 等. 两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0816001
- 6 Zhao Baochang, Wen Desheng, Yang Jianfeng *et al.*. Two bore-sight stereo mapping with single lens, TDI CCD pushing model imaging and compensations of the speed-to-height rate—Chang'E-2 CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900115
赵葆常, 汶德胜, 杨建峰 等. 单镜头两视角同轨立体成像、TDI CCD 自推扫和速高比补偿——嫦娥二号 CCD 相机技术[J]. *光学*

- 学报, 2011, **31**(9): 0900115
- 7 Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling, error budget and synthesis [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 414~417
- 8 Yan Changxiang, Wang Jiaqi. Method of coordinate transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(3): 203~207
颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(3): 203~207
- 9 Yu Chunfeng, Ding Yalin, Hui Shouwen *et al.*. Analysis of image rotation for aerial remote sensor with three-mirror reflective optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0823002
于春风, 丁亚林, 惠守文等. 三反射系统航空遥感器像旋转分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0823002
- 10 Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2165~2171
韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2165~2171
- 11 H. Samija, I. Markovic, I. Petrovic. Optical flow field segmentation in an omnidirectional camera image based on known camera motion [C]. Proceedings of the 34th International Convention in MIPRO, May 2011, Opatija, Croatia
- 12 D. Todorovi. Analysis of two- and three-dimensional rigid and nonrigid motions in the stereokinetic effect [J]. *J. Opt. Soc. AM. A*, 1993, **10**(5): 804~826
- 13 S. Roques, L. Jahan, B. Rougé *et al.*. Satellite attitude instability effects on stereo images [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004, **3**: 477

栏目编辑: 李文喆