

高轨红外扫描相机视轴指向实时校正算法

薛永宏¹ 安 玮¹ 张 涛² 张寅生²

(¹ 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
² 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 视轴指向校正是红外监视系统目标高精度跟踪定位的重要前提,而扫描相机视轴指向校正又是其中的难点。在分析扫描相机成像模型及其特点的基础上,提出基于失配角估计的视轴指向校正原理模型。通过建立失配角状态转移模型和视轴指向观测模型,并采用无迹卡尔曼滤波器(UKF),实现了对失配角参数的实时估计和视轴指向的实时校正。仿真结果表明,所提算法对相机视轴指向的校正精度高、性能稳定,可有效提高红外监视系统目标跟踪处理的实时性能和精度。

关键词 遥感;视轴指向校正;失配角估计;红外监视系统;跟踪定位

中图分类号 TP732.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0628003

Real-Time Line of Sight Calibration Algorithm for High Earth Orbit Infrared Scanning Sensor

Xue Yonghong¹ An Wei¹ Zhang Tao² Zhang Yinsheng²

(¹ College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
² Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

Abstract Line of sight (LOS) calibration is the key precondition of accurate location and tracking of targets in infrared surveillance systems and the LOS calibration of scanning sensor is one of the difficulties. Based on the analysis of the imaging model and characteristics of scanning sensor, a theoretical calibration model based on the estimation of mismatching angles is proposed. By establishing the process model of the mismatching angles and the observation model of sensor LOS, and using an unscented Kalman filter (UKF), the real time estimation of mismatching angles and calibration of sensor LOS are finally achieved. Simulation results show that the proposed algorithm has a high precision and smooth performance for sensor LOS calibration, and can effectively improve the timeliness and precision of target tracking process in infrared surveillance system.

Key words remote sensing; line of sight calibration; mismatching angle estimation; infrared surveillance system; tracking and location

OCIS codes 110.3080; 120.5800; 280.4991

1 引 言

高地球轨道红外成像监视系统[简称高轨红外监视系统,如 Space Based Infrared System (SBIRS)等]装载有可对地进行宽视场覆盖的长线

阵扫描相机,其主要任务是及时准确地发现弹道导弹目标,并对其进行快速、高精度的跟踪定位^[1]。高轨红外监视系统属于被动探测系统,其对目标的跟踪定位精度主要取决于相机对目标的视轴(LOS)指

收稿日期: 2012-12-02; 收到修改稿日期: 2013-03-08

作者简介: 薛永宏(1985—),男,博士研究生,主要从事空间信息处理、目标检测及图像处理等方面的研究。

E-mail: sanger_xue@126.com

导师简介: 安 玮(1969—),女,博士,教授,主要从事综合电子战系统与应用、空间信息对抗技术等方面的研究。

E-mail: nudtanwei@tom.com

向精度^[2,3]。但是受高地球轨道热环境、平台姿态测量误差和相机安装偏差等因素的影响,扫描相机的高精度 LOS 指向信息通常难以精确获得。为提高对目标的跟踪定位精度,必须利用已知控制点(如地标和恒星等)对相机 LOS 指向进行校正^[4]。同时,为满足对目标跟踪定位的时效性要求,要求必须对相机 LOS 指向进行实时校正。

常用的校正算法包括多项式法^[5]、有理函数法^[6,7](RFM)和共线方程法^[8]等,技术较为成熟,但是需等待一个成像周期完成并获取均匀分布在整幅探测图像中大量的控制点后才能进行处理,时效性较差。Wu^[9]以美国的 SBIRS-HEO 扫描载荷为背景,提出了采用三个扩展卡尔曼滤波器(EKF)并利用恒星对载荷 LOS 指向进行确定的方法;由于 SBIRS-HEO 卫星采用在载荷万向节安装陀螺仪的特殊设计方案,所提方法不适用于对常规扫描相机 LOS 指向的校正。Clemons 等^[10-12]以美国空间跟踪与监视(STSS)系统为背景,提出基于恒星的红外跟踪相机指向偏差实时修正方法;与跟踪相机面阵探测不同,扫描相机由于采用线阵探测,在对每一扫描行的成像过程中,平台位置、速度和姿态角等参数都在动态变化,所提方法不适用于对扫描相机 LOS 指向的校正。

通过对扫描相机成像模型及特点的分析,本文研究提出采用失配角参数对相机 LOS 指向偏差建模的原理模型,通过利用控制点对失配角的估计,提出基于失配角实时估计的扫描相机 LOS 指向校正算法,有效解决了高轨红外监视系统扫描相机 LOS 指向的实时、高精度校正问题。

2 扫描相机成像模型及特点

高轨红外监视系统常采用红外长线阵探测器与机械扫描机构相结合的方式对地进行大视场、宽区域覆盖成像。长线阵探测器通常装载在相机焦平面;机械扫描机构,如扫描镜等,通常装载在相机入瞳处,沿扫描方向作往复运动。扫描相机成像示意图如图 1 所示。

扫描相机对地成像探测的过程本质上可看作是三维空间中点到相机焦平面的投影过程,可通过一系列的坐标系旋转变换进行描述^[3,13]:地惯坐标系 \Rightarrow 轨道坐标系 \Rightarrow 星体坐标系 \Rightarrow 相机坐标系 \Rightarrow 焦平面坐标系等,如图 2 所示。

图 2 所示的扫描相机成像模型可表示为

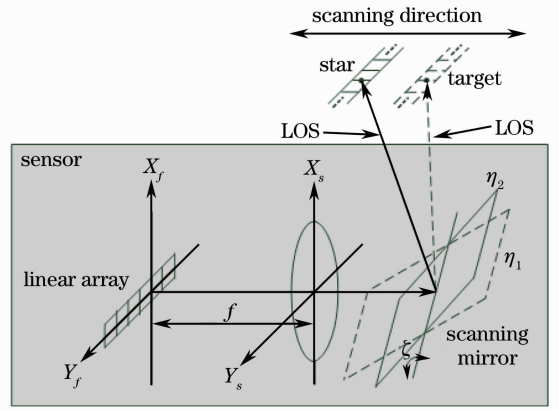


图 1 扫描相机成像示意图

Fig. 1 Imaging sketch map of the scanning sensor

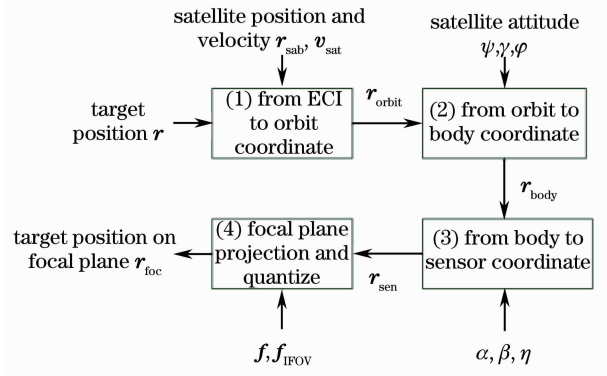


图 2 扫描相机成像模型

Fig. 2 Imaging model of the scanning sensor

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{\text{sen}} = \mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{sensor}} \mathbf{r}_{\text{ECI}} = \mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{sensor}} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{sat}}) \\ \mathbf{r}_{\text{foc}} = q(\mathbf{r}_{\text{sen}}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{r}_{foc} 和 \mathbf{r}_{sen} 分别为投影点在焦平面坐标系和相机坐标系中的位置矢量; \mathbf{r}_{ECI} 表示卫星-空间点连线在地惯坐标系中的指向矢量; \mathbf{r} 和 \mathbf{r}_{sat} 分别表示空间点和卫星在地惯坐标系中的位置坐标; $\mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{sensor}}$ 和 $q(\mathbf{r}_{\text{sen}})$ 分别表示空间点从地惯坐标系到相机坐标系的成像变换矩阵和投影点在焦平面的位置量化函数,二者的定义如下:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{sensor}} = \mathbf{R}_1(\alpha, \beta, \eta) \mathbf{R}_2(\psi, \gamma, \varphi) \mathbf{R}_3(\mathbf{r}_{\text{sat}}, \mathbf{v}_{\text{sat}}) \\ q(\mathbf{r}_{\text{sen}}) = \left\{ \left[\frac{\arctan(x_{\text{sen}}/z_{\text{sen}})}{f_{\text{IFOV}}} \right], \left[\frac{\arctan(y_{\text{sen}}/z_{\text{sen}})}{f_{\text{IFOV}}} \right] \right\}^T, \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{r}_{\text{sen}} = (x_{\text{sen}}, y_{\text{sen}}, z_{\text{sen}})^T$; f_{IFOV} 表示相机像元的角分辨率; \mathbf{v}_{sat} 表示卫星在地惯坐标系中的速度矢量; (ψ, γ, φ) 表示卫星平台的滚动、俯仰和偏航姿态角; (α, β) 表示相机在卫星平台上的俯仰和方位安装角; η 表示扫描镜的旋转角度; \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 分别表示从

星体坐标系到相机坐标系和轨道坐标系到星体坐标系、地惯坐标系到轨道坐标系的旋转变换矩阵^[3]。

由于在轨道空间中,卫星平台的位置、速度、姿态角以及相机扫描镜的旋转角等参数在动态变化,结合(1)式和(2)式可得出扫描相机的主要成像特点:

1) 卫星平台位置、速度、姿态角及扫描镜旋转角等参数的动态变化,要求相机 LOS 指向校正必须采用均匀分布在整幅探测图像中的控制点;

2) 卫星平台位置、速度、姿态角以及扫描镜旋转角等参数的随机测量误差,决定了相机 LOS 指向确定的随机误差;

3) 相机热变形、发射过程中振动环境引起的相机安装角变化等,决定了相机 LOS 指向确定的系统偏差。

扫描相机的上述成像特点决定了其 LOS 指向实时校正的复杂性和难度。为有效解决扫描相机 LOS 指向的实时校正问题,提出采用失配角参数等效描述相机热变形、卫星平台位置、速度和姿态角等参数对相机 LOS 指向影响的模型,下面介绍其基本原理和实时估计方法。

3 扫描相机视轴指向实时校正算法

3.1 基于失配角的视轴指向校正原理

控制扫描相机 LOS 指向空间中某一方向,通常有两种实现途径:1)调整卫星平台的姿态角;2)调整相机视轴的转动角。可见,卫星平台的姿态调整角,即失配角与相机 LOS 转动角间存在着对应关系。基于此原理,由平台的姿态角等参数测量误差和相机热变形误差、安装角固定偏差等引起的相机 LOS 指向偏差也可通过等效的失配角参数进行描述。假设卫星在滚动、俯仰和偏航三个方向的失配角为 $(\bar{\psi}, \gamma, \bar{\varphi})$,则相机成像变换矩阵 $\mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{Sensor}}$ 可改写为

$$\mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{Sensor}} = \mathbf{R}_1(\eta)\mathbf{R}_2(\psi + \bar{\psi}, \gamma + \gamma, \varphi + \bar{\varphi})\mathbf{R}_3(\mathbf{r}_{\text{sat}}, \mathbf{v}_{\text{sat}}), \quad (3)$$

其中在特定的坐标系定义下,可假定相机安装角 $\alpha = \beta = 0$ 。卫星平台的位置 \mathbf{r}_{sat} 、速度 \mathbf{v}_{sat} 、姿态角 (ψ, γ, φ) 以及相机扫描镜转角 η 一般可通过地面或星上设备测量获得,可认为是已知参数。因此,(3)式描述的成像变换矩阵仅与失配角 $(\bar{\psi}, \gamma, \bar{\varphi})$ 相关,下文将用矩阵 $\mathbf{R}(\bar{\psi}, \gamma, \bar{\varphi})$ 代替成像变换矩阵 $\mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{Sensor}}$ 进行表述,即相机 LOS 指向的校正问题转换为失配角参数的估计问题。根据最小二乘(LS)原理,利用三个

以上的控制点,即可对三个未知的失配角参数进行求解,即

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{\text{sen}}^k = \mathbf{q}^{-1}(\mathbf{r}_{\text{loc}}^k) \\ \mathbf{R}(\bar{\psi}, \gamma, \bar{\varphi}) = \mathbf{R}_{\text{sen}}\mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{T}}(\mathbf{R}_{\text{ECI}}\mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{T}})^{-1}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{r}_{\text{loc}}^k$ 表示第 k 个控制点在焦平面投影点的位置坐标; $\mathbf{R}_{\text{sen}} = [\mathbf{r}_{\text{sen}}^1, \mathbf{r}_{\text{sen}}^2, \mathbf{r}_{\text{sen}}^3, \dots]$, $\mathbf{R}_{\text{ECI}} = [\mathbf{r}_{\text{ECI}}^1, \mathbf{r}_{\text{ECI}}^2, \mathbf{r}_{\text{ECI}}^3, \dots]$,其中 $\mathbf{r}_{\text{sen}}^k$ 和 $\mathbf{r}_{\text{ECI}}^k$ 分别表示在相机坐标系和地惯坐标系中,从卫星到第 k 个控制点的指向矢量坐标。

由扫描相机的第一个成像特点可知,依据(4)式进行失配角参数求解需获得多个均匀分布在探测图像中的控制点。这就意味着必须等待扫描相机完成一次全区域扫描成像,获得整幅探测图像之后,才能进行控制点的提取和失配角参数的估计。由于扫描相机完成一次全区域扫描的周期较长,因而校正处理难以满足对目标跟踪的时效性要求。

3.2 基于无迹卡尔曼滤波器的失配角实时估计算法

在高地球轨道空间中,卫星的热环境是周期变化的,卫星平台位置、速度、姿态角等参数及其测量误差也是缓变的。在短时间内,相机 LOS 指向偏差随时间的变化具有一定的规律,相应的等效失配角参数也具有一定的变化规律。

同时,高轨红外监视系统在探测过程中,相机通常依照一定的时序对各控制点进行扫描成像。因而可利用失配角参数的变化规律,建立其状态转移模型,将相机对控制点的 LOS 指向矢量作为量测,采用实时滤波的方法,对失配角参数进行估计,进而实现对相机 LOS 指向的校正,算法的原理框图如图 3 所示。

首先,给出失配角的状态转移模型。研究表明^[12],轨道空间热环境的周期变化以及相机扫描镜的周期转动等,将使相机 LOS 指向偏差呈现周期性变化规律;等效的失配角参数也将周期性变化,并可采用余弦函数进行描述:

$$\begin{cases} \bar{\psi}(t) = \varepsilon_{\psi} + \theta_{\psi} \cos(\omega_{\psi}t + \zeta_{\psi}) \\ \gamma(t) = \varepsilon_{\gamma} + \theta_{\gamma} \cos(\omega_{\gamma}t + \zeta_{\gamma}) \\ \bar{\varphi}(t) = \varepsilon_{\varphi} + \theta_{\varphi} \cos(\omega_{\varphi}t + \zeta_{\varphi}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 ε 表示与相机 LOS 指向系统偏差相关的失配角常值分量; θ 表示失配角周期性变化的振幅,且在短时间内, θ 可认为是常值;变化频率 ω 和相位 ζ 均为未知量。

进一步推导^[12,14]可得到失配角参数的状态转移模型为

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{Q}\hat{\mathbf{x}}_{t-1} + \mathbf{v}_{t-1}, \quad (6)$$

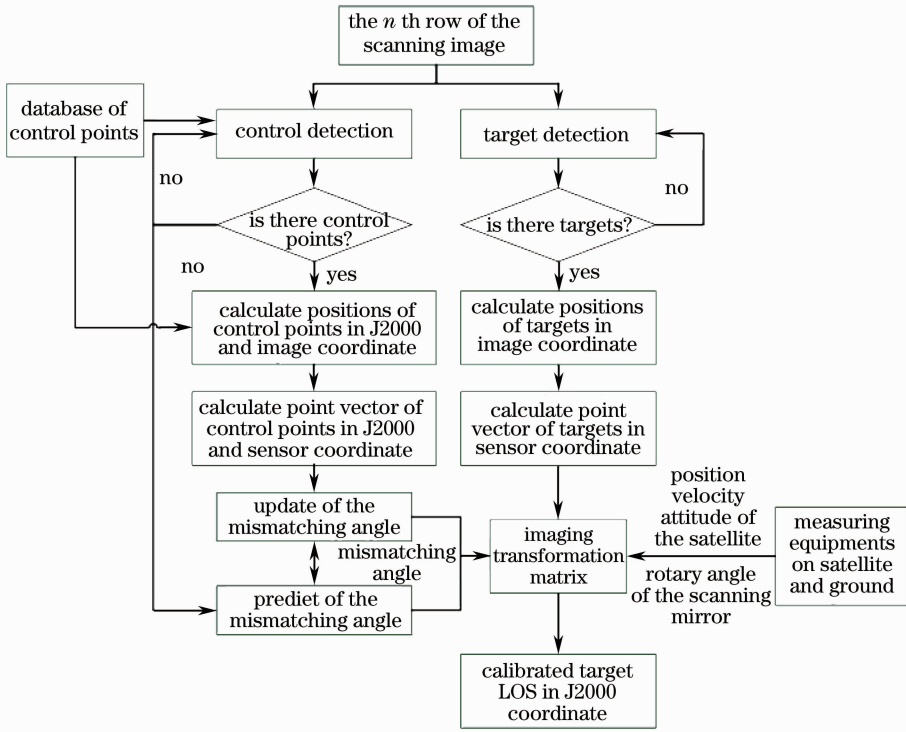


图 3 失配角实时估计算法原理框图

Fig. 3 Diagram of real-time estimating algorithm for mismatching angles

式中 $\hat{\mathbf{x}}_t = [\hat{\mathbf{x}}_\psi; \hat{\mathbf{x}}_\gamma; \hat{\mathbf{x}}_\varphi]_t$ 为状态矢量; $\Phi = \text{diag}[\Phi_\psi, \Phi_\gamma, \Phi_\varphi]$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_\psi; \mathbf{v}_\gamma; \mathbf{v}_\varphi]$ 为零均值过程噪声, 其协方差矩阵为 $\mathbf{Q} = \text{diag}[\mathbf{Q}_\psi, \mathbf{Q}_\gamma, \mathbf{Q}_\varphi]$ 。其中 $\mathbf{x}_\psi = [\bar{\psi}, \dot{\bar{\psi}}, \omega_\psi]^T$, $\mathbf{x}_\gamma = [\bar{\gamma}, \dot{\bar{\gamma}}, \omega_\gamma]^T$, $\mathbf{x}_\varphi = [\bar{\varphi}, \dot{\bar{\varphi}}, \omega_\varphi]^T$; $\dot{\bar{\psi}}, \dot{\bar{\gamma}}$ 和 $\dot{\bar{\varphi}}$ 分别表示失配角 $\bar{\psi}, \bar{\gamma}$ 和 $\bar{\varphi}$ 的一阶导数; $\mathbf{v}_\psi = [0, 0, \mu_\psi]^T$, $\mathbf{v}_\gamma = [0, 0, \mu_\gamma]^T$, $\mathbf{v}_\varphi = [0, 0, \mu_\varphi]^T$; $\mathbf{Q}_\psi, \mathbf{Q}_\gamma, \mathbf{Q}_\varphi$ 和 $\Phi_\psi, \Phi_\gamma, \Phi_\varphi$ 分别具有相同的矩阵结构, 以 \mathbf{Q}_ψ 和 Φ_ψ 为例, 给出其矩阵结构为

$$\Phi_\psi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 \\ -\omega_\psi^2 \Delta T & 1 & -2\omega_\psi \dot{\bar{\psi}} \Delta T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{t-1},$$

$$\mathbf{Q}_\psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4}{3}\omega_\psi^2 \dot{\bar{\psi}}^2 \Delta T^3 \Theta_\psi & -\omega_\psi \dot{\bar{\psi}} \Delta T^2 \Theta_\psi \\ 0 & -\omega_\psi \dot{\bar{\psi}} \Delta T^2 \Theta_\psi & \Delta T \Theta_\psi \end{bmatrix}_{t-1},$$

(7)

式中 $\dot{\bar{\psi}}$ 表示 $\bar{\psi}$ 在 $t-1$ 时刻的估计值; ΔT 表示两个控制点之间的成像时间间隔; Θ_ψ 表示 μ_ψ 的功率谱密度。

其次, 给出地惯坐标系中, 相机 LOS 指向的观测模型:

$$\mathbf{r}_{\text{ECI}} = \mathbf{R}^{-1}(\psi', \gamma', \varphi') \mathbf{r}_{\text{sen}} + \mathbf{u}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{r}_{ECI} 可利用控制点和卫星在地惯坐标系中的位

置信息计算得出; \mathbf{u} 为零均值观测噪声, 其协方差矩阵为 \mathbf{U} 。

由(6)式和(8)式可知, 失配角状态转移模型为线性模型, 相机 LOS 指向观测模型为非线性模型。为提高滤波精度、减小滤波器模型误差, 将采用无迹卡尔曼滤波器(UKF)对失配角状态进行估计。

3.3 算法实现

下面给出算法的实现步骤:

1) 构建 Sigma 样点及其权重矢量。假设初始状态矢量 \mathbf{x}_0 , 其协方差矩阵为 \mathbf{P}_{x0} ; 则在 t 时刻, Sigma 样点集 $\boldsymbol{\chi}_t = [\boldsymbol{\chi}_{t,1}, \boldsymbol{\chi}_{t,2}, \dots]$ 及其权重矢量 \mathbf{W}_t 为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\chi}_{t,0} = \hat{\mathbf{x}}_t \\ \boldsymbol{\chi}_{t,i} = \hat{\mathbf{x}}_t + [\sqrt{(n+\kappa)\mathbf{P}_{x_t}}]_i, & i = 1, \dots, n \\ \boldsymbol{\chi}_{t,i} = \hat{\mathbf{x}}_t - [\sqrt{(n+\kappa)\mathbf{P}_{x_t}}]_i, & i = n+1, \dots, 2n \\ \mathbf{W}_0^{(m)} = \kappa/(n+\kappa) \\ \mathbf{W}_0^{(c)} = \kappa/(n+\kappa) + (3-\rho^2) \\ \mathbf{W}_i^{(m)} = \mathbf{W}_i^{(c)} = 1/(2n+2\kappa), & i = 1, \dots, 2n \end{cases}, \quad (9)$$

式中 n 为状态矢量 \mathbf{x} 的维数, $\kappa = n(\rho^2 - 1)$ 为尺度因子, ρ 决定了 Sigma 点集的离散程度, $[\sqrt{(n+\kappa)\mathbf{P}_{x_t}}]_i$ 表示矩阵 $(n+\kappa)\mathbf{P}_{x_t}$ 第 i 行或列的均方根。

2) 预测。利用状态转移模型和观测模型对 Sigma 样点进行预测

$$\begin{cases} \boldsymbol{\chi}_{t+1,i} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\chi}_{t,i} \\ \boldsymbol{r}'_{t+1,i} = \mathbf{R}^{-1}(\boldsymbol{\chi}_{t,i}) \boldsymbol{r}_{\text{sen}} \end{cases}, \quad (10)$$

则预测的状态矢量、观测矢量及其协方差矩阵分别为

和

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \boldsymbol{\chi}_{t+1,i} \\ \boldsymbol{r}_{t+1|t} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \boldsymbol{r}'_{t+1,i} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{\hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (\boldsymbol{\chi}_{t+1,i} - \hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t}) (\boldsymbol{\chi}_{t+1,i} - \hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t})^T + \mathbf{Q} \\ \mathbf{P}_{\boldsymbol{r}_{t+1|t}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (\boldsymbol{\chi}_{t+1,i} - \hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t}) (\boldsymbol{r}'_{t+1,i} - \boldsymbol{r}_{t+1|t})^T \\ \mathbf{P}_{\boldsymbol{r}_{t+1|t}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (\boldsymbol{r}'_{t+1,i} - \boldsymbol{r}_{t+1|t}) (\boldsymbol{r}'_{t+1,i} - \boldsymbol{r}_{t+1|t})^T + \mathbf{U} \end{cases}. \quad (12)$$

3) 更新。若在 $t+1$ 时刻的扫描图像中检测有控制点,则利用获得的量测 $\boldsymbol{r}_{\text{ECL},t+1}$ 对预测的状态矢量及其协方差矩阵进行更新

$$\begin{cases} \mathbf{K} = \mathbf{P}_{\hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t}} (\mathbf{P}_{\boldsymbol{r}_{t+1|t}})^{-1} \\ \hat{\boldsymbol{x}}_{t+1} = \hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t} + \mathbf{K}(\boldsymbol{r}_{\text{ECL},t+1} - \boldsymbol{r}_{t+1|t}). \\ \mathbf{P}_{\hat{\boldsymbol{x}}_{t+1}} = \mathbf{P}_{\hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t}} - \mathbf{K} \mathbf{P}_{\boldsymbol{r}_{t+1|t}} \mathbf{K}^T \end{cases} \quad (13)$$

若在 $t+1$ 时刻的扫描图像中未检测出控制点,则将当前时刻状态矢量和协方差矩阵的预测值作为更新值:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_{t+1} = \hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t} \\ \mathbf{P}_{\hat{\boldsymbol{x}}_{t+1}} = \mathbf{P}_{\hat{\boldsymbol{x}}_{t+1|t}} \end{cases}. \quad (14)$$

利用滤波获得的当前时刻失配角参数,以及通过地面测控系统、卫星姿控系统测量获得的卫星平台位置、速度、姿态角等参数,即可计算得到成像变换矩阵 $\mathbf{R}(\psi', \gamma', \varphi')$;待处理系统检测到目标后,即可利用成像变换矩阵对目标 LOS 指向进行校正。

4 仿真试验与分析

4.1 仿真场景与参数

以一颗运行于 Molniya 轨道的高椭圆轨道 (HEO) 卫星为例,对其扫描相机 LOS 指向进行校正试验。卫星轨道参数如表 1 所示,卫星轨道历元时间为 2012-11-7T14:00:00;仿真开始时间为 2012-11-8T04:00:00,结束时间为 2012-11-8T04:00:30。

仿真中假设卫星轨道位置误差为 600 m/s,速度误差为 100 m/s,姿态确定精度为 $10''$;扫描相机成像周期为 5 s,像元角分辨率为 $60 \mu\text{rad}$,安装角偏差为 $\alpha = \beta = 200 \mu\text{rad}$ 。

表 1 HEO 卫星轨道参数

Table 1 Orbit parameters of HEO satellite

Semimajor axis /km	Eccentricity	Inclination /($^\circ$)
26554.3	0.72	63.4
Argument of perigee /($^\circ$)	Right ascension of the ascending node /($^\circ$)	True anomaly /($^\circ$)
270	7.75	0

表 2 控制点和检查点经纬度参数表

Table 2 Longitude and latitude parameters of control points and check points

Number	Control point longitude/latitude /($^\circ$)	Check points longitude/latitude /($^\circ$)
1	-71.2/23.2	-60.4/32.7
2	-50.9/39.1	-33.1/42.3
3	-17.1/51.8	-43.8/57.5
4	-157.1/73.4	-143.1/62.6
5	-131.6/51.8	-118.3/37.2
6	-165.3/89.3	-91.5/59.4
7	-92.8/37.8	-65.5/67.7
8	-96.6/49.2	3.8/67.1
9	-32.4/67.1	-68.8/49.1
10	-78.2/31.4	-94.2/24.5
11	-112.5/59.6	
12	-135.0/37.3	
13	-45.8/77.0	
14	-109.5/18.6	
15	16.9/78.4	
16	-33.3/25.7	
17	23.3/66.4	
18	-76.4/80.9	
19	-128.4/19.8	
20	-2.4/87.5	

利用设定的 20 个控制点对失配角参数进行估计,分别采用基于二阶有理函数法(RFM)、LS 的校正方法和本文所提实时校正算法对设定的 10 个检查点的 LOS 指向进行校正,比较其校正性能。控制点和检查点经纬度参数如表 2 所示。

4.2 仿真结果

利用校正算法输出的卫星-检查点 LOS 指向矢量 r_{ECI} 和真实的卫星-检查点 LOS 指向矢量 r_{ECI}^c 之间的夹角对算法性能进行评价:

$$\phi = \arccos \left[\frac{(r_{\text{ECI}})^T r_{\text{ECI}}^c}{\|r_{\text{ECI}}\| \cdot \|r_{\text{ECI}}^c\|} \right]. \quad (15)$$

仿真试验结果如图 4 所示。

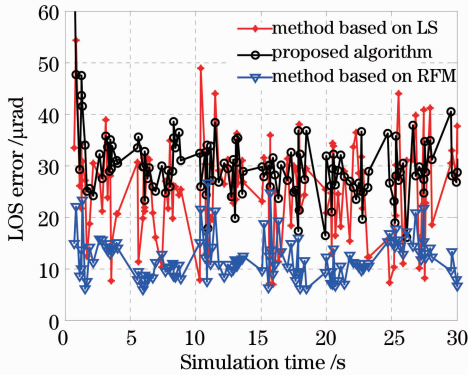


图 4 检查点 LOS 指向校正结果

Fig. 4 Calibration results of check points

4.3 结果分析

根据图 4 的仿真结果可以得出以下结论:1) 本文所提算法滤波性能收敛速度较快,且可有效地对消除相机 LOS 指向的固定和随机偏差;2) 收敛后,本文所提算法与基于 LS 的校正方法对相机 LOS 指向的校正性能相当;校正后各检查点 LOS 指向的平均残差为 $30 \mu\text{rad}$,即为像元角分辨率的一半,这是由于检查点在像平面投影点的位置存在量化误差的缘故;3) 与基于 RFM 模型的校正方法相比,本文所提算法对各检查点的 LOS 指向校正后的平均残差略大约 $15 \mu\text{rad}$,但是基于 RFM 的校正方法对控制点个数及分布要求严格,难以适应高轨红外监视系统实时指向校正的要求。

进一步分析校正结果的方差可知,采用基于 LS 的方法,校正结果的方差为 9.17;采用基于 RFM 模型的方法,校正结果的方差为 4.15;采用本文所提算法,待收敛后,校正结果的方差为 5.31。比较可知,本文所提算法校正结果的平稳性与基于 RFM 模型的方法相当,比基于 LS 方法的校正结果更加平稳,这是由于滤波器具有较好平滑性能。

5 结 论

分析了高轨红外监视系统扫描相机的成像模型及特点,提出采用失配角参数描述相机 LOS 指向偏差的原理模型;通过建立失配角参数的状态转移模型和相机 LOS 指向的观测模型,采用 UKF 对失配角参数进行估计的扫描相机 LOS 指向实时校正算法。算法的实现有效避免了高轨红外监视系统动平台下的图像配准难题,为序列图像目标检测和高精度目标跟踪定位问题的研究奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 N. S. Andreas. Space based infrared system (SBIRS) system of systems [C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1997, **4**: 429~438
- 2 S. Blackman, R. Popoli. Design and Analysis of Modern Tracking Systems [M]. Boston: Artech House, 1999. 267~290
- 3 Sheng Weidong, Long Yunli, Zhou Yiyu. Analysis of target location accuracy in space based optical sensor network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0228001
盛卫东, 龙云利, 周一宇. 天基光学传感器网络目标定位精度分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0228001
- 4 Z. Afik, A. Shammas, R. Schwartz *et al.*. A generic model for line of sight analysis and calibration [C]. *SPIE*, 1990, **1442**: 392~398
- 5 He Pengju, Liang Bin, Zhang Tao *et al.*. Calibration method for wide field of view star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1023001
贺鹏举, 梁斌, 张涛等. 大视场星敏传感器标定技术研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1023001
- 6 Yasser El-Manadili, Kurt Novak. Precision rectification of spot imagery using the direct linear transformation model [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, **62**(1): 67~72
- 7 Florin Savopol, Costas Armenakis. Modeling of the IRS-1C satellite PAN stereo-imagery using the DLT approach [J]. *Internet Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1998, **32**(4): 511~514
- 8 Zhang Zhengyu, Huang Shijie, Luo Chuan *et al.*. Nonlinear distortion correction of camera based on coplanar condition equations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0115002
张征宇, 黄诗捷, 罗川等. 基于共面条件的摄像机非线性畸变自校正[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0115002
- 9 Andy Wu. SBIRS high payload LOS attitude determination and calibration [C]. IEEE Aerospace Conference, 1998, **5**: 243~253
- 10 T. M. Clemons, K. C. Chang. Effect of sensor bias on space-based bearing-only tracker [C]. *SPIE*, 2008, **6968**: 696809
- 11 T. M. Clemons, K. C. Chang. Space-based IR tracking bias removal using background star observations [C]. *SPIE*, 2009, **7330**: 73300D
- 12 T. M. Clemons, K. C. Chang. Sensor calibration using *in-situ* celestial observations to estimate bias in space-based missile tracking [J]. *IEEE Trans. AES*, 2012, **48**(2): 1403~1427
- 13 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
- 14 P. Zarchan, H. Musoff. Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach [M]. AIAA, Reston, VA, 2000. 417~420