

摄动条件下空间目标天基光学跟踪方法研究

李 骏 安 玮 周一宇

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 该文针对摄动条件下的空间目标天基光学监视跟踪问题, 引入 UT 变换和混合坐标系, 在直角坐标空间内采用 UT 变换完成目标运动状态预测和预测协方差计算并考虑摄动因素影响, 在修正球坐标空间内实现状态滤波更新, 提出混合坐标 SPKF 跟踪方法, 可避免 EKF 线性截断误差影响并增强跟踪滤波稳定性。仿真结果表明, 在密集采样和稀疏测量条件下该方法在收敛性和稳健性上均具有优势。

关键词: 空间目标跟踪; 摄动; 天基光学监视

中图分类号: V556.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2088-05

Space Object Tracking with Perturbation in Space-based Optical Surveillance

Li Jun An Wei Zhou Yi-yu

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To solve the problem of the passive tracking of the space objects with perturbation in space-based optical surveillance, the hybrid coordinates SPKF method is put forward. The Unscented Transformation (UT) and hybrid coordinates are introduced to avoid the influence of the linearization error and enhance the robustness of the tracking filter. The state prediction is performed in Cartesian coordinates utilizing UT and the perturbation influence could be considered at the same time, then the filter updating procedure is performed in modified sphere coordinates. Simulation results indicate that this approach has more advantage on rapidity of convergence and stability under the condition of the dense or sparse measurements.

Key words: Space object tracking; Perturbation; Space-based optical surveillance

1 引言

利用天基平台实现对空间目标的有效监视跟踪具有日益迫切的需求^[1,2], 其中天基光学监视采用 CCD 传感器被动探测空间目标反射的太阳光线, 完成对其探测、捕获和跟踪, 属于仅测角被动定位跟踪范畴。对于地球轨道空间内的目标, 其运动满足地心二体约束, 一般单站观测即可满足可观测条件^[3]。

在无源定位跟踪中扩展卡尔曼滤波(EKF)是常用的非线性处理方法^[4,5], 但 EKF 方法仅为非线性系统一阶近似, 而空间目标在轨运动具有较强非线性, 尤其摄动条件下其运动方程更为复杂, 线性化截断误差带来一定程度不稳定性^[6,7]。相比之下 Julier 等人提出的 UT 变换方法在获取非线性系统状态二阶矩方面具有一定优势^[8,9]。角度测量在直角坐标系下具有较强非线性, 为保证测量方程线性宜采用极坐标系, 易于实现可观测与不可观测状态的

分离, 在算法稳定性上有所提高^[6]。但是极坐标下目标状态方程存在非线性及强耦合, 而直角坐标系下目标运动方程的建立较为容易, 为充分利用两类坐标系优势, 可在混合坐标系下实现对目标的跟踪滤波^[10,11], 并在水下目标跟踪方面得到较多应用^[7,11,12]。

本文根据天基光学监视特点, 针对摄动条件下的空间目标被动跟踪, 提出混合坐标 SPKF(Sigma Points Kalman Filter)方法。引入 UT 变换和混合状态空间, 在直角坐标空间内采用 UT 变换完成目标运动状态预测和预测协方差计算并考虑摄动因素影响, 在修正球坐标空间内实现状态滤波更新, 避免 EKF 线性截断误差影响并增强跟踪滤波稳定性。

2 空间目标运动模型与天基光学测量模型

2.1 空间目标运动模型

选取 J2000.0 惯性系下空间目标地心位置矢量 \boldsymbol{r} 和速度矢量 $\dot{\boldsymbol{r}}$ 作为其状态变量 \boldsymbol{X} , 即

$$\boldsymbol{X} = (x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T \quad (1)$$

则目标运动状态微分方程为

$$\dot{\boldsymbol{X}} = (\dot{\boldsymbol{r}}^T, \ddot{\boldsymbol{r}}^T)^T \quad (2)$$

空间目标运动方程可表示为^[13]

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\mu(\mathbf{r}/r^3) + \mathbf{F}_e \quad (3)$$

其中 μ 为地球引力常数, r 为目标地心矢径长度, \mathbf{F}_e 为其他摄动作用力, 应用中可根据需要进行相应摄动力取舍。对于地球轨道内空间目标, 地球扁率摄动二阶带谐项为主要摄动源, 考虑 J_2 摄动时其运动方程可表示为^[14]

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= -\frac{\mu}{r^3} x \left[1 - J_2 \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 \left(7.5 \frac{z^2}{r^2} - 1.5 \right) \right] \\ \ddot{y} &= -\frac{\mu}{r^3} y \left[1 - J_2 \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 \left(7.5 \frac{z^2}{r^2} - 1.5 \right) \right] \\ \ddot{z} &= -\frac{\mu}{r^3} z \left[1 - J_2 \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 \left(7.5 \frac{z^2}{r^2} - 4.5 \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 R_e 为地球平均赤道半径, J_2 为地球引力场二阶球谐系数。

2.2 天基光学测量模型

SBV 是目前已实际应用的典型天基光学空间目标监视传感器, 其焦平面为林肯实验室专项研发的高灵敏度小型 CCD 传感器。每片 CCD 具有 420×422 像元, 像元分辨为 $12.1''$, 视场大小 $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ 。其信号处理器一般以 $4 \sim 16$ 帧测量为一个帧集, 每帧积分时间可取 $0.4 \sim 1.6$ s^[1]。天基光学监视图像的获取主要采用恒星跟踪模式^[1], 在监视任务时段内传感器指向指定天区, 对该空域进行连续成像。将该时间段内获得的图像序列(帧集)进行叠加, 背景中的恒星目标相对静止, 呈现为点源状目标, 而经过该天区内的卫星等空间目标则表现为条痕。从中提取一定数量恒星, 通过与恒星星表数据库进行匹配, 由恒星天文位置计算传感器精确指向和目标条痕位置, 提取条痕端点赤经和赤纬^[1]。

赤经 α 和赤纬 δ 由 J2000.0 坐标系下目标位置矢量 $\mathbf{r}(x, y, z)$ 和测站位置矢量 $\mathbf{R}(X, Y, Z)$ 确定。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{y - Y}{x - X} \right) \\ \delta &= \sin^{-1} \left(\frac{z - Z}{\rho} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $\rho = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2}$ 。帧集内弧段较短, 帧集条痕内获得的赤经赤纬测量表现为近似线性, 可对其进行多项式拟合, 取拟合常数项 α, δ 和线性项系数 $\dot{\alpha}, \dot{\delta}$ 定义为目标帧集信息^[15], 其中立体角变化率

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha} &= \frac{(\dot{y} - \dot{Y}) \cos \alpha - (\dot{x} - \dot{X}) \sin \alpha}{\rho \cos \delta} \\ \dot{\delta} &= \frac{(\dot{z} - \dot{Z}) - \dot{\rho} \sin \delta}{\rho \cos \delta} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

测量为状态变量 \mathbf{X} 的非线性函数

$$\mathbf{Z}(k) = h(\mathbf{X}(k)) + \mathbf{n}(k) \quad (7)$$

其中 $h(\cdot)$ 表示由式(5), 式(6)所定义的测量对状态变量 \mathbf{X} 的非线性变换, $\mathbf{n}(k)$ 为测量噪声。设帧集内共有 M 帧测量, 帧间测量间隔 ΔT , 则相应帧集信息协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = \text{diag} \left\{ \frac{\sigma^2}{M \cos^2 \delta}, \frac{\sigma^2}{M}, \frac{12\sigma^2}{M(M^2 - 1)\Delta T^2 \cos^2 \delta}, \frac{12\sigma^2}{M(M^2 - 1)\Delta T^2} \right\} \quad (8)$$

其中 σ 为传感器视线测量误差。

3 混合坐标 Sigma 点卡尔曼滤波

在无源定位跟踪中扩展卡尔曼滤波(EKF)是常用的非线性处理方法, 可实现实时或准实时跟踪定轨, 并可减轻数据存储和处理负担^[4]。但 EKF 为非线性系统一阶近似, 其局部线性假设不成立时将带来不稳定性。Julier 等人提出的 UT 变换方法在获取非线性系统状态二阶矩方面具有一定优势^[8,9], 且无需计算状态 Jacobian 矩阵, 可进行非线性的状态外推。同时, 为充分利用两类坐标系优势, 在直角坐标空间内采用 UT 变换完成目标运动状态预测和预测协方差计算, 在修正球坐标空间内实现状态滤波更新。

3.1 基于 UT 的直角坐标状态预测

根据由式(3)所描述的目标运动状态方程, 对于给定的初始状态 $\widehat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 和初始协方差阵 \mathbf{P}_{k-1} , 在初始状态附近进行确定性采样获取 Sigma 样点集^[9]

$$\chi_{k-1} = \left[\widehat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad \widehat{\mathbf{X}}_{k-1} \pm \sqrt{(L + \lambda)\mathbf{P}_{k-1}} \right] \quad (9)$$

其中 L 表示状态变量的维数(考虑 J_2 摄动时未引入新的变量, 目标状态维数仍为 6 维), $\lambda = \alpha^2(L + \mathcal{K}) - L$ 为尺度因子; α 表示选取的样点与样本均值间距离, 通常设置为小常数 ($1e-4 \leq \alpha \leq 1$); \mathcal{K} 为辅助尺度因子, 通常取 $\mathcal{K} = 3 - L$ 。

对上述样点集进行时间更新

$$\chi_{k/k-1} = F(\chi_{k-1}) \quad (10)$$

其中 $F(\cdot)$ 为非线性的目标状态预测函数, 应用中可选择数值积分或分析预报等方法^[13,16], 并根据需要进行相应摄动力取舍。对各样点预测值进行统计加权, 获取预测均值和预测协方差

$$\widehat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \chi_{k/k-1,i} \quad (11)$$

$$\widehat{\mathbf{P}}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \left[\chi_{k/k-1,i} - \widehat{\mathbf{X}}_{k/k-1} \right] \left[\chi_{k/k-1,i} - \widehat{\mathbf{X}}_{k/k-1} \right]^T \quad (12)$$

其中 $W^{(m)}$ 、 $W^{(c)}$ 分别为计算均值和协方差时的样点权值, 选取为^[9]

$$\left. \begin{aligned} W_0^{(m)} &= \lambda / (L + \lambda) \\ W_0^{(c)} &= \lambda / (L + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_i^{(m)} &= W_i^{(c)} = 1 / \{2(L + \lambda)\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中 $i = 1, \dots, 2L$, β 用于体现样点的分布, 对于高斯分布通常取 $\beta = 2$ 。

3.2 修正球坐标状态更新

修正极/球坐标系适于仅测角跟踪应用, 其待估状态中可观测与不可观测分量自动分离, 可降低协方差矩阵病态可能性, 同时也使得滤波更新过程较为简便, 不需进行测量方程线性化。修正球坐标系为站心赤道坐标系, 其状态变量取为

$$\mathbf{X}_{MP} = (\alpha, \delta, \dot{\alpha}, \dot{\delta}, 1/\rho, \dot{\rho}/\rho)^T \quad (14)$$

其中 $(\alpha, \delta, \dot{\alpha}, \dot{\delta})$ 为空间目标站心赤道坐标系下赤经赤纬测量及其变化率, ρ 和 $\dot{\rho}$ 为目标站心斜距和斜距变化率。将 UT 变换采样获取的预测均值和协方差转换至修正球坐标系^[10]

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_{MP}(k/k-1) &= f_C^{MP}(\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}) \\ \mathbf{P}_{MP}(k/k-1) &= \mathbf{J}_C^{MP} \hat{\mathbf{P}}_{k/k-1} (\mathbf{J}_C^{MP})^T \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中 $f_C^{MP}(\cdot)$ 为直角坐标至修正球坐标转换函数, $\mathbf{J}_C^{MP} = \partial \mathbf{X}_{MP} / (\partial \mathbf{X})$ 为修正球坐标变量对直角坐标变量的 Jacobian 矩阵。目标状态在两坐标系间的转换函数虽是非线性的, 但转换公式是精确的, 理论上在转换过程中不存在信息损失^[10]。

修正球坐标系下卡尔曼滤波增益为

$$\mathbf{K}_{MP}(k) = \mathbf{P}_{MP}(k/k-1) \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{MP}(k/k-1) \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (16)$$

其中对于帧集测量信息 $\mathbf{H} = [\mathbf{I}_4 \quad \mathbf{0}_{4 \times 2}]$ 。目标状态滤波更新及相应修正球坐标空间内滤波协方差为^[10]

$$\hat{\mathbf{X}}_{MP}(k/k) = \hat{\mathbf{X}}_{MP}(k/k-1) + \mathbf{K}_{MP}(k) \cdot (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{X}}_{MP}(k/k-1)) \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{MP}(k/k) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{MP}(k) \cdot \mathbf{H}) \cdot \mathbf{P}_{MP}(k/k-1) \quad (18)$$

转换至直角坐标系状态

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_{k/k} &= f_{MP}^C(\hat{\mathbf{X}}_{MP}(k/k)) \\ \mathbf{P}_{k/k} &= \mathbf{J}_{MP}^C \cdot \mathbf{P}_{MP}(k/k) \cdot (\mathbf{J}_{MP}^C)^T \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中 $f_{MP}^C(\cdot)$ 为修正球坐标至直角坐标转换函数, $\mathbf{J}_{MP}^C = \partial \mathbf{X} / (\partial \mathbf{X}_{MP})$ 为直角坐标变量对修正球坐标变量的 Jacobian 矩阵。

上述式(9)~式(19)即为混合坐标 SPKF 跟踪滤波方程, 给定初始条件即可对空间目标运动状态进

行跟踪滤波。对于已知编目目标或合作目标, 可根据其编目根数或已知状态采用分析预报或数值积分等方法外推至跟踪滤波起始时刻, 获得初始状态及相应协方差。如美国 Goddard 空间飞行中心计算公布了绝大多数公开空间目标的 TLE 根数, 可利用其相应的轨道预测模型如 SDP4/SGP4 进行计算。对于新发现目标或重新发现的丢失目标, 由于其轨道根数未知或过于陈旧, 从而无法进行轨道计算以及跟踪起始, 需要先对其进行跟踪初始化或初轨确定^[13]。

4 仿真分析

仿真场景模拟 SBV 对 GEO 目标的观测, 观测平台轨道采用 MSX 的近太阳同步轨道, 轨道高度 900 km, 倾角 99°, 在其升交点附近开始对目标进行观测; 观测目标设定为某 GEO 目标, 其轨道偏心率 0.1, 倾角 10°, 利用 STK 工具软件仿真生成测站和目标的 J_2 摄动轨道数据, 如图 1 所示。测量数据以 16 帧为一帧集, 帧积分时间设为 2 s, 视线测量随机误差取为 20 μrad 。

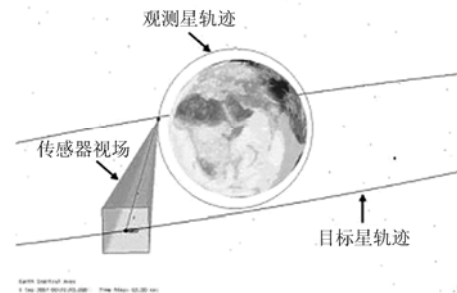


图1 观测仿真场景

在目标观测弧段内选择 30 个测量帧集, 帧集间隔设为 100 s 以考虑传感器视线调整时间。位置初始误差设为 500 km, 速度误差设为 100 m/s, 进行 100 次 Monte-Carlo 仿真。为与本文中 HC-SPKF 方法有所比较, 在相同仿真条件下给出直角坐标 EKF 和 UKF 结果, 并同时给出各方法采用二体模型和 J_2 摄动模型的跟踪滤波均方根误差曲线, 如图 2 所示(为便于显示, 图中已做局部放大)。

混合坐标系内的跟踪滤波结果在收敛速度方面更具有较明显的优势, 目标同时采用两种坐标状态矢量, 获得的目标信息更为充分^[11], 收敛效率更高。此时由于帧集间隔较小, 跟踪弧长也有限, EKF 状态线性化截断误差以及 J_2 摄动带来的影响不够明显。将帧集间隔增至 1000 s, 其余仿真条件不变,

表1 不同条件下目标状态估计误差

估计误差	Two-Body			J_2			CRLB	
	C-EKF	C-UKF	HC-SPKF	C-EKF	C-UKF	HC-SPKF		
帧集间隔								
100 (s)	位置误差(km)	0.991	0.968	0.948	0.998	0.981	0.943	0.926
	速度误差(m/s)	0.986	0.964	0.644	0.970	0.930	0.604	0.600
帧集间隔								
1000 (s)	位置误差(km)	-	0.8931	1.155	-	0.485	0.485	0.481
	速度误差(m/s)	-	0.167	0.137	-	0.055	0.047	0.046

上述各方法的跟踪滤波结果如图3所示。

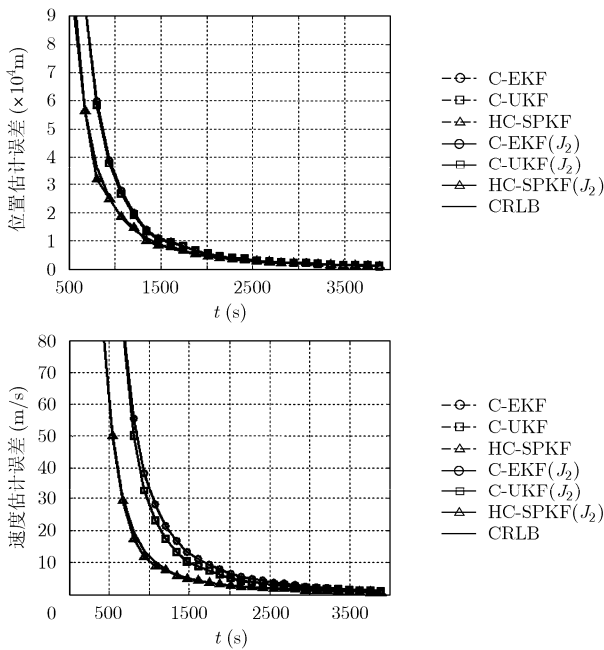


图2 跟踪滤波误差曲线(帧集间隔100s)

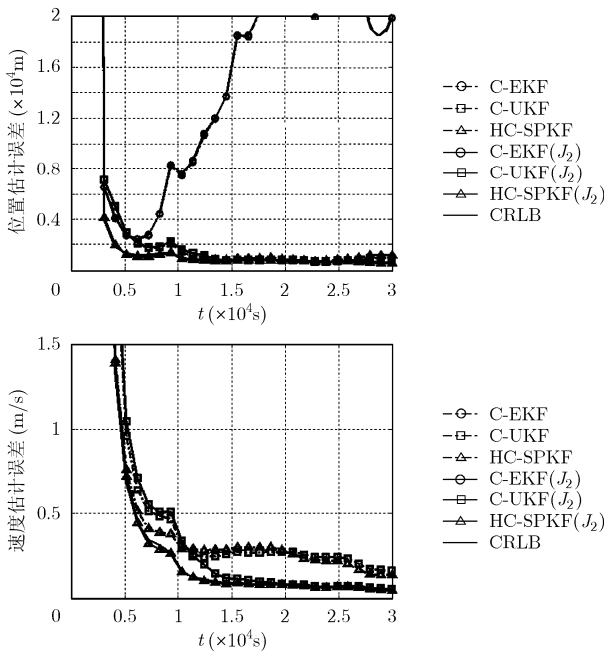


图3 跟踪滤波误差曲线(帧集间隔1000s)

采样步长增加后, J_2 摄动影响更为明显; 受线性化截断误差影响 EKF 方法的局部线性化假设不再成立, 故未能收敛; 混合坐标系内跟踪滤波在收敛速度和精度方面更有优势, 考虑 J_2 摄动的 HC-SPKF 方法能够依然保持接近克拉美罗下限的收敛趋势和精度。上述各仿真条件下的跟踪滤波误差结果如表 1 所示。

5 结束语

利用天基观测平台实现对空间目标的有效监视跟踪是空间监视的发展方向。本文根据天基光学监视特点, 在状态预测中引入 UT 变换来避免状态线性化截断误差影响, 并采用混合坐标系增强跟踪滤波稳定性。仿真结果表明混合坐标 SPKF 方法在收敛性和稳健性上更有优势, 不仅适用于密集观测数据处理, 也能够适用于较稀疏测量条件下的跟踪滤波。文中仿真应用的摄动条件仅考虑 J_2 摄动影响, 其他摄动因素若有解析表达式或相应分析预报函数, 均可在非线状态预测中予以考虑。对于较复杂形式摄动如大气阻力摄动, 还可能增加状态变量维数, 有待进一步研究。

参考文献

- [1] Sharma J, Stokes G H, and Von Braun C, et al. Toward operational space-based space surveillance[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 309-334.
- [2] 王杰娟, 于小红. 国外天基空间目标监视研究现状与特点分析[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2006, 17(4): 33-37.
Wang Jie-juan and Yu Xiao-hong. The current development and characteristics analysis of foreign space-based space surveillance [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2006, 17(4): 33-37.
- [3] 李强, 郭福成, 周一宇. 单个卫星观测器对卫星测角被动跟踪的可观测性研究[J]. *宇航学报*, 2007, 28(5): 1323-1330.
Li Qiang, Guo Fu-cheng, and Zhou Yi-yu. Observability of satellite passive tracking from angles measurements using single satellite observer[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(5): 1323-1330.
- [4] 贾沛璋. 卡尔曼滤波定轨算法的研究进展[J]. *飞行器测控学*

- 报, 2001, 20(3): 45-50.
- Jia Pei-zhang. Developments of the research on kalman filter in orbit determination [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2001, 20(3): 45-50.
- [5] 李强, 郭福成, 周一宇. 单星对卫星的仅测角被动定轨跟踪方法研究[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2): 70-75.
- Li Qiang, Guo Fu-cheng, and Zhou Yi-yu. Research of satellite- to-satellite passive locating and tracking with bearing-only measurements [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(2): 70-75.
- [6] 龚享铤. 一种基于极坐标的无源定位与跟踪稳定算法研究[J]. 信号处理, 2005, 21(4): 402-404.
- Gong Xiang-yi. Analysis of the location and tracking robust algorithm based on polar coordinates [J]. *Signal Processing*, 2005, 21(4): 402-404.
- [7] 高剑, 严卫生, 徐德民, 张福斌. 基于采样卡尔曼滤波的水下被动目标跟踪[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(12): 26-29.
- Gao Jian, Yan Wei-sheng, Xu De-min, and Zhang Fu-bin. Unscented kalman filter for passive underwater target tracking [J]. *Fire Control and Command Control*, 2006, 31(12): 26-29.
- [8] Julier S and Uhlmann J K. A new extension of the kalman filter to nonlinear systems[C]. Proceedings of 11th International Symposium Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls. 1997: 182-193.
- [9] 傅建国, 王孝通, 金良安等. Sigma 点卡尔曼滤波及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 141-144.
- Fu Jian-guo, Wang Xiao-tong, and Jin Lian-gan, *et al.* Sigma-point kalman filter and its application [J]. *System Engineering and Electronics*, 2005, 27(1): 141-144.
- [10] Grossman W. Bearing-only tracking: A hybrid coordinates system approach [C]. Proceeding of the 30th Conference on Decision and Control, England, December 1991: 2032-2037.
- [11] 徐娇杰, 陈红林, 张耀中. 混合坐标系下的一种纯角度跟踪算法[J]. 电光与控制, 2005, 12(2): 34-36.
- Xu Jiao-jie, Chen Hong-lin, and Zhang Yao-zhong. An bearing-only tracking algorithm in the hybrid coordinates [J]. *Electronic Optics & Control*, 2005, 12(2): 34-36.
- [12] 汤琦, 黄建国, 杨旭东等. 极坐标-直角坐标水下目标跟踪算法及试验研究[J]. 声学技术, 2006, 25(6): 623-627.
- Tang Qi, Huang Jian-guo, and Yang Xu-dong, *et al.* A novel underwater-target tracking algorithm with experimental study [J]. *Technical Acoustics*, 2006, 25(6): 623-627.
- [13] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 33-80.
- Liu Lin. Orbit theory of spacecraft [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 33-74.
- [14] 张瑜, 房建成. 基于 Unscented 卡尔曼滤波器的卫星自主天文导航研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(6): 646-650.
- Zhang Yu and Fang Jian-cheng. Study of the autonomous celestial navigation based on the Unscented Kalman filter [J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(6): 646-650.
- [15] Milani A and Gronchi G F, *et al.* Orbit determination with very short arcs I. admissible regions[J]. *Celestial Mechanics and Dynamic Astronautics*, 2004, 90(2): 59-87.
- [16] 刘林, 王彦荣. 卫星轨道预报的一种分析方法[J]. 天文学报, 2005, 46(3): 307-313.
- Liu Lin and Wang Yan-rong. An analytical method for satellite orbit forecasting [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2005, 46(3): 307-313.
- 李 骏: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为空间信息对抗.
- 安 玮: 女, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为综合电子战系统与技术、空间信息处理等.
- 周一宇: 男, 1948 年生, 教授, 博士生导师, 重点研究方向为综合电子战系统理论、无源定位理论与技术、雷达数据处理、电子信息系统仿真等.