

空间非合作目标在轨主/被动融合跟踪方法

黄京梅, 胡士强

(上海交通大学航空航天学院, 上海 200240)

摘 要: 针对空间远距离非合作目标的点目标跟踪问题, 研究基于非地面测控数据支持的远距离空间目标的在轨主/被动融合跟踪方法。包括运用基于被动传感器以及雷达间歇辅助测距跟踪的 Unscented 卡尔曼滤波(UKF)方法, 得到非合作目标的运动状态信息, 即利用光学跟踪摄像机的二维角度量测值及雷达间歇提供的距离量测值, 估计目标的惯性位置与速度方法, 为后续自主空间操作建立初始轨道状态数据。仿真结果表明, 当状态误差和量测噪声改变时, UKF 均能持续跟踪远距离非合作目标, 使得雷达间歇提供的距离信息可以得到更好的跟踪精度。

关键词: 非合作目标; 光学跟踪; 雷达跟踪; 机动检测; 融合跟踪; Unscented 卡尔曼滤波

Tracking Method of Space Non-cooperative Target with Active/Passive Fusion In-orbit

HUANG Jing-mei, HU Shi-qiang

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

【Abstract】 For the problem of tracking long distance in-orbit non-cooperative point target, a synergy tracking algorithm of active/passive fusion system is given. Using Unscented Kalman Filter(UKF) algorithm based on passive sensor and intermittent-working mode of radar, the state information of non-cooperative target is established, using angle's measurements provided by the optical camera and intermittent range's measurements provided by the radar to estimate position and velocity of the target. The non-cooperative target's state information can use as the initial orbit data for autonomy space operations. Simulation results indicate that the point target can be tracking consciously based on UKF algorithm when the state error and measurement noise are changing, and intermittent range information provided by radar can get better tracking accuracy.

【Key words】 non-cooperative target; optical tracking; radar tracking; maneuver detection; fusion tracking; Unscented Kalman Filtering(UKF)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.04.048

1 概述

卫星轨道确定一般均采用地基或天基观测站获取的带有误差的测量数据结合非精确的卫星运动方程实现对卫星运动状态进行估计。估计卫星轨道分为合作工作方式和非合作方式 2 种情况。

目前针对非合作目标相对测量, 主要以雷达、空间相机(包括红外和可见光)和激光测距仪作为测量设备。文献[1]通过激光测距仪得到非合作目标的量测信息(距离和角度)实现对非合作目标的相对导航。而激光测距仪主要用于中距离阶段(几十千米内)目标的测量, 因此, 不适用远距离目标测量。文献[2]通过星载雷达得到非合作目标的量测信息(距离和角度)实现对目标的相对导航。雷达作为主动传感器, 虽能提供目标完整的量测信息, 但工作时向外界发射电磁波, 易被侦察及 ESM 锁定。文献[3]通过空间相机得到非合作目标的角度量测, 实现对非合作目标的相对导航, 由于空间相机不能提供目标距离信息, 在跟踪过程中存在强非线性、弱可观测性等问题, 致使滤波稳定性差, 容易导致滤波发散, 但它在工作过程中不辐射能量, 不容易被侦察和定位, 有很好的隐蔽性。

在典型的纯角度无源定位中^[3], 其角度计算公式中的相对位置矢量都定义为目标与观测器位置矢量之差。空间非合作目标在轨跟踪中测量的角度是在追踪星轨道坐标系, 状态变量是在地心惯性坐标系, 两者的坐标转换必须在原有相对位置矢量的基础上乘以时变坐标旋转矩阵实现^[4], 否则失去

了物理意义。被动跟踪由于缺乏距离信息可能由于噪声影响从而使系统跟踪精度下降, 并有可能造成滤波发散。单纯主动跟踪工作时雷达消耗能量, 且发射电磁波, 容易被电磁波干扰。雷达和空间相机均可用于空间远距离目标的测量, 因此, 将光学相机和雷达配合使用, 成为相互独立又彼此互补的目标探测及跟踪手段。

本文研究了用非线性逼近更强的 Unscented 卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filtering, UKF)算法实现空间远距离非合作目标的纯角度跟踪以及雷达辅助光学跟踪空间远距离非合作目标的方法, 给出了雷达辅助开机判定准则, 并对测量方程中的变量及其坐标转换进行明确定义。同时对状态预测方程进行详细推导, 最后通过仿真产生的数据对算法在不同初始状态误差和测量精度下的性能进行对比分析和仿真验证。

2 跟踪模型和方法

根据已有的知识^[4]可以得到卫星的运动状态方程和观测方程如下:

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^T & \dot{\mathbf{r}}^T \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_k = H(\mathbf{x}_k, \mathbf{e}_k) \quad (2)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074106); 国家“863”计划基金资助项目(2009AA7043001)

作者简介: 黄京梅(1986—), 女, 硕士研究生, 主研方向: 模式识别, 导航与控制; 胡士强, 教授

收稿日期: 2011-08-09 **E-mail:** huangjingmei@sjtu.edu.cn

其中, r 、 $\dot{r}$ 分别表示地心惯性坐标系下目标卫星的位置和速度矢量。

2.1 状态方程

由于状态运动方程是非线性连续方程, 考虑到跟踪结果的精确性, 采用 UKF 滤波方法估计低轨卫星的状态矢量。

离散化卫星运动微分方程:

$$\dot{X}(t) = F(X(t)) = [\dot{r}^T \dot{r}^T]^T \quad (3)$$

得到状态方程:

$$X(k+1) = X(k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} F(X(t))dt$$

$$F(X(t)) \approx F(X(k)) + A(X(k)) \cdot F(X(k)) \cdot (t - t_k) \quad (4)$$

其中, $A(X(k)) = \frac{\partial F(X(t))}{\partial X} \Big|_{t=t_k}$, 由微分矢量法则得到:

$$A(X(k)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{r}}{\partial r_{3 \times 3}} & \frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{r}_{3 \times 3}} \\ \frac{\partial \ddot{r}}{\partial r_{3 \times 3}} & \frac{\partial \ddot{r}}{\partial \dot{r}_{3 \times 3}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ A_{21} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \frac{\mu}{r^3} \begin{bmatrix} \frac{3x^2}{r^2} - 1 & \frac{3xy}{r^2} & \frac{3xz}{r^2} \\ \frac{3yx}{r^2} & \frac{3y^2}{r^2} - 1 & \frac{3yz}{r^2} \\ \frac{3zx}{r^2} & \frac{3zy}{r^2} & \frac{3z^2}{r^2} - 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将预测值分别带入式(4)、式(5)可得预测方程:

$$\hat{X}(k+1/k) = X(k/k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} F(X(t))dt \quad (6)$$

2.2 跟踪方法

系统工作过程: 首先光学模式进行目标跟踪, 检测目标机动, 根据检测结果切换 2 种跟踪模式, 然后由所选用的跟踪模块继续进行滤波, 这样不断循环, 如图 1 所示。

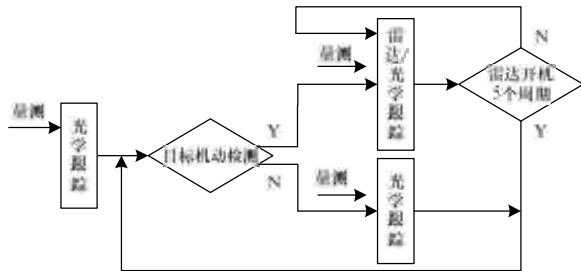


图 1 雷达辅助光学跟踪流程

2.2.1 机动检测

根据测量角度的定义:

$$r = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2 + \rho_z^2} \quad (7)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\rho_y}{\rho_x}\right) + n_\beta \quad (8)$$

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{\rho_z}{\sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2}}\right) + n_\varepsilon \quad (9)$$

其中, r 表示目标星与追踪星质心的距离; n_β, n_ε 分别表示方位角和高低角测量误差, 且服从零均值方差分别为 $\sigma_\beta^2, \sigma_\varepsilon^2$ 的高斯分布; $\rho = (\rho_x, \rho_y, \rho_z)$ 表示目标卫星在追踪星轨道坐标系中的位置矢量。为了明确其物理意义, 下面定义轨道坐标系。

高轨卫星轨道坐标系^[4]: 在该坐标系中, 坐标原点 O 为高轨卫星质心, 基础平面为高轨卫星的轨道面。X 轴从坐标

原点 O 指向高轨卫星, Y 轴在基础平面内与 X 轴垂直并指向卫星运动方向, Z 轴垂直于基础平面并与 X 轴、Y 轴构成右手系。从地心惯性坐标系到高轨卫星轨道坐标系的坐标转换公式如下:

$$\rho = \begin{bmatrix} r \\ c \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, G 为坐标转换矩阵, 根据其定义可得:

$$G(i,3) = \frac{r_c}{r_c}, G(j,2) = -\frac{r_c \times v_c}{|r_c \times v_c|} \quad (11)$$

$$G(k,1) = G(j,2) \times G(j,3) \quad (12)$$

其中, r_c 、 v_c 分别表示追踪星在地心惯性坐标系下的位置和速度矢量。

假设雷达在关断期间没有发生机动, 目标状态估计值为 $(\hat{x}(k), \hat{y}(k), \hat{z}(k))$, 对应球坐标系下估计值为 $(\hat{r}(k), \hat{\beta}(k), \hat{\alpha}(k))$ 。

$$\begin{cases} \exp\left[-\frac{(\hat{\alpha}(k) - \alpha_r(r))^2}{(2\sigma_r)^2}\right] \geq \varepsilon \\ \exp\left[-\frac{(\hat{\beta}(k) - \beta_r(k))^2}{(2\sigma_r)^2}\right] \geq \varepsilon \end{cases} \quad (13)$$

当式(12)成立, 则目标发生机动。其中, $(\alpha_r(r), \beta_r(k))$ 为 k 时刻光学设备观测值; σ_r 为光学测量设备标准方差^[5]。

2.2.2 UKF 方法

UKF 滤波方法是卡尔曼滤波(Kalman Filtering, KF)方法的一种推广, 具有 KF 滤波方法基本递推结构是 Unscented 变换(Unscented Transformation, UT)和 KF 的结合。

UT 变换采用近似非线性函数概率密度的方法, 在确保采样均值和协方差的前提下, 选择一种 Sigma 采样策略得到一组 Sigma 点集, 将非线性变换应用于采样的每个 Sigma 点, 得到非线性变换后的点集。常用的采样策略有: 对称采样, 单形采样, 比例修正及其他采样策略, 本文用的是比例对策采样。UT 变换的具体步骤见参考文献[6]。基于前文所述的跟踪模型, UKF^[7]实现的算法描述如下:

$$(1) \text{初始化权值: } W^{(m)}, W^{(c)}: W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{\lambda + L}$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{\lambda}{2(\lambda + L)}, i = 1, 2, \dots, 2L$$

(2)滤波器初始化:

$$\hat{X}_0 = E[X_0], P_0 = E[(X_0 - X_0)(X_0 - X_0)^T]$$

(3)For $k=1:N$

1)计算 Sigma 点:

$$X_{k-1} = [\hat{x}_{k-1} \quad x_{k-1} \pm \sqrt{(L + \lambda) P_{k-1}}]$$

2)时间更新:

$$X_{k/k-1} = F(X_{k-1})$$

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} X_{i,k/k-1}$$

$$P_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [X_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-][X_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-]^T$$

$$Y_{k/k-1} = H(X_{k-1}), Y_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} Y_{i,k/k-1}$$

3)量测更新:

$$P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [Y_{i,k/k-1} - \hat{y}_k^-][Y_{i,k/k-1} - \hat{y}_k^-]^T$$

$$P_{x_k, y_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [X_{i,k/k-1} - \hat{x}_k^-][Y_{i,k/k-1} - \hat{y}_k^-]^T$$

$$K = P_{x_k, y_k} P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k}^{-1}, P_k = P_k^- - K P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k} K^T$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(y_k - \hat{y}_k^-)$$

End

其中, $\lambda = \alpha^2(L + \kappa) - L$; α 决定 $\bar{x}$ 周围 Sigma 点的分布, 通常为 $1 > \alpha \geq 1e-4$; β 用来表示分布的先验知识, 对于高斯分布 $\beta = 2$ 是最优的; κ 是一个比例参数, 通常设为 0 或 $3-n$ 。

3 轨道跟踪仿真

需要根据初始条件(相对 50 km~150 km), 从远距离开始进行仿真研究, 便于接续研究。采用表 1 中初始数据并使用 Matlab R2010 仿真。

表 1 2 颗卫星的轨道根数

轨道根数描述	追踪星	目标星
半长轴 a/km	6 678	6 778
偏心率 e	0	0
轨道倾角 $i/(\text{^\circ})$	28.5	28.5
升交点赤经 $\Omega/(\text{^\circ})$	30	30
近地点幅角 $\omega/(\text{^\circ})$	0	0
过近地点时刻/s	0	100

3.1 光学跟踪仿真

追踪星由光学摄像机每隔 $T=1\text{ s}$ 测量目标星得到一个方位角 β 和高低角 ε , 总共观测 1 000 次。

假定初始误差为 $[1\ 1\ 1\ 0.0001\ 0.0001\ 0.0001]^\text{T}$, 量测精度为 0.1 mrad 与 1 mrad 的组合, 跟踪误差曲线如图 2 所示, $t=995\text{ s}$ 的均方根误差如表 2 所示。由图 2 可以看到, 当量测精度降低时滤波收敛时间及跟踪误差都相应增加, 且滤波结果最终是趋于稳定的。同样可以通过仿真得到: 当量测精度不变, 初始误差增大时, 滤波收敛时间及跟踪误差都相应增加, 滤波结果稳定。

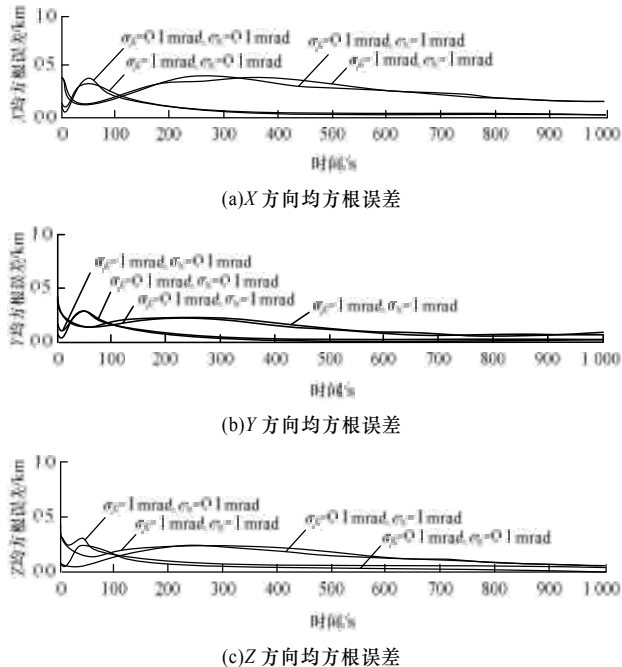


图 2 量测精度 σ_x 、 σ_y 改变时的跟踪误差

表 2 状态误差 σ_x 、 σ_y 不变时的跟踪误差

类型	$\sigma_x=0.1\text{ mrad}, \sigma_y=0.1\text{ mrad}$	$\sigma_x=1\text{ mrad}, \sigma_y=0.1\text{ mrad}$	$\sigma_x=0.1\text{ mrad}, \sigma_y=1\text{ mrad}$	$\sigma_x=1\text{ mrad}, \sigma_y=1\text{ mrad}$
X 跟踪误差	0.018 7	0.143 8	0.020 8	0.149 3
Y 跟踪误差	0.014 6	0.069 4	0.020 4	0.079 6
Z 跟踪误差	0.008 1	0.045 2	0.027 2	0.051 4

3.2 雷达辅助光学跟踪仿真结果

追踪星由光学摄像机每隔 $T=1\text{ s}$ 测量目标星得到一个方位角 β 和高低角 ε 以及检测到机动时雷达开机后每隔 1 s 测量目标得到距离信息 r , 总共观测 1 000 次。假定初始误差 $[10\ 10\ 10\ 0.001\ 0.001\ 0.001]$, $\varepsilon=0.75$ 时的跟踪误差曲线如图 3 所示, Ra-OP 曲线为雷达辅助光学跟踪的误差曲线, OP 为光学跟踪的误差曲线, $t=995$ 时的均方根误差如表 3 所示。由图 3 可知, 雷达间歇开机辅助光学跟踪性能比光学跟踪的均方根误差以及收敛时间都大幅减小, 跟踪性能显著提高, 同时降低了雷达被 ESM 锁定的可能, 保留了被动跟踪的隐蔽性优点。

表 3 雷达辅助跟踪误差

方式	X 跟踪误差/km	Y 跟踪误差/km	Z 跟踪误差/km	雷达开机间隔/s
光学跟踪	0.065 6	0.037 8	0.012 9	—
雷达辅助跟踪	0.004 9	0.009 9	0.011 5	52.63

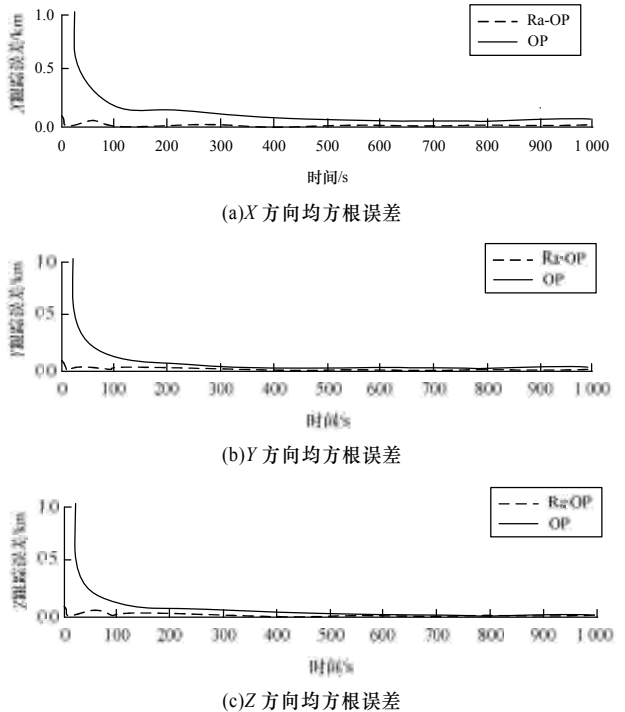


图 3 雷达辅助光学跟踪误差

4 结束语

本文给出了基于 UKF 的空间非合作轨道目标雷达/光学融合跟踪算法, 得到了包含目标位置和速度的运动状态信息。采用地心惯性坐标系下位置、速度矢量作为状态变量, 避免了圆轨道目标跟踪时的奇点问题, 同时明确定义了测量方程中的变量及其坐标转换, 给出了状态矢量的离散化公式、量测公式及 UKF 滤波公式以及雷达间歇开机准则。

由仿真结果可以得到如下结论: 本文算法实现了空间远距离阶段单颗追踪星对圆轨道低轨目标的轨道跟踪。采用雷达辅助跟踪的 UKF 滤波收敛所需时间及估计误差都相对减小, 对初始误差及量测精度有较好的适应性, 较好地解决了 EKF 易发散及对初始误差和量测精度适应性较差等问题, 表明基于 UKF 的雷达/光学融合跟踪算法可实现轨道目标的远距离精确跟踪。

(下转第 154 页)