

面向天基光学监视的空间目标 TLE 拟合与跟踪方法

李 骏, 吴 京, 安 玮, 周一宇

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 针对天基光学监视特点和需求对 TLE 拟合方法进行改进, 使其适于仅测角被动跟踪定轨应用. 在采样拟合方法基础上, 提出基于测角资料的 TLE 非线性最小二乘拟合方法; 将 TLE 单点拟合方法与 SGP4 模型嵌入跟踪滤波过程, 在混合坐标系中采用 Sigma 点卡尔曼滤波方法提高滤波稳定性. 仿真结果表明, 本文方法在获取非合作空间目标 TLE 的同时可实现摄动条件下天基光学被动跟踪.

关键词: 双行根数 (TLE); 空间目标; 天基光学监视; 跟踪

中图分类号: V4121.4, TN9711.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 11-2462-07

Two Line Elements Conversion and Passive Tracking of the Space Object in Space2Based Optical Surveillance

LI Jun, WU Jing, AN Wei, ZHOU Yi2yu

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

Abstract: Aiming at the characteristics and requirements of the space2based optical surveillance, the methods of the Two2Line Elements (TLE) conversion were modified for the bearing2only passive tracking. Based on the trajectory sampling fitting method of the TLE, the nonlinear least square estimation method using bearing2only measurements was brought forward. The single point fitting of the TLE and the SGP4 propagator was embedded in the procedure of the tracking filter, and sigma points kalman filters was adopted in hybrid coordinates to enhance the stability of the tracking filter. Simulation results indicate that the space object passive tracking with perturbations can be realized using space2based optical measurements, and at the same time the TLE of the non2cooperative space object can be obtained.

Key words: two2line elements; space object; space2based optical surveillance; tracking

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, 其中天基光学传感器由于其能耗低及易于小型化实现等方面的优势而更具有发展潜力^[1]. 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, 一般单站观测即可满足可观测条件^[2].

空间目标在轨受摄运动比较复杂, 一般情况下简化为二体运动, 或仅考虑地球非球形引力摄动 J_2 项影响^[2]. 利用双行根数 (TLE, Two2Line Elements) 的 SGP4 (Simplified General Perturbation Version4) 分析预报模型在轨道计算精度和效率上具有较好的折衷^[3], 且可考虑多种主要摄动因素影响. 其中 SGP4 模型算法已公开, 但

TLE 生成方法仍被保留. Montenbruck 和 Byoung2Sun Lee 以目标星载 GPS 数据作为观测输入, 拟合生成 TLE 主要参数^[4,5], 用于目标轨道确定和预测. 然而在空间目标监视应用中, 多数情况下均为非合作目标, 其运动状态并非精确已知, 尤其是对于无目标距离信息的光学观测资料.

本文根据空间目标 TLE 拟合方法特点, 针对天基光学监视需求对其进行改进, 使其适于仅测角被动跟踪定轨应用. 在 TLE 采样拟合方法基础上, 提出基于测角资料的 TLE 非线性最小二乘估计方法, 可用于长期轨道预报. 根据 TLE 单点拟合方法特点, 通过引入 UT 变换将 TLE 拟合过程与 SGP4 模型一起嵌入跟踪滤波过程, 并利用混合坐标系增强跟踪滤波稳定性, 提出基于 TLE 单点拟合的混合坐标 Sigma 点卡尔曼滤波方法, 实现摄动条件下的空间目标天基光学被动跟踪.

2 空间目标 TLE 及其拟合方法

2.1 TLE 及其拟合方法

双行根数(TLE)是北美防空联合司令部(NORAD)开发的空目标轨道根数表示形式,其主要根数项包括轨道倾角*i*、升交点赤经*8*、偏心率*e*、近地点幅角*X*、平近点角*M*、平均角速度*n*以及归一化大气阻尼系数*B**.TLE是考虑了主要摄动项影响的平均轨道根数,采用特定方法去除掉周期扰动项,预测模型必须用同样的方法重构周期扰动项,为保证预测精度必须采用NOA RAD提供的SGP4系列轨道预测模型^[3].

TLE生成方法未能完全公开,影响到SGP4模型的广泛应用.Montenbruck和ByoungSun Lee等人以目标星载GPS数据作为观测输入,利用SGP4预测模型迭代拟合生成TLE主要参数^[4,5].拟合方法可分为单点拟合和轨道采样拟合,单点拟合以某历元时刻目标运动状态为参考对TLE进行迭代估计,该方法无法估计阻尼系数*B**(一般将其设为0);轨道采样拟合则根据采样弧段内目标状态为参考进行最小二乘拟合,使得以此得到的轨道与标称轨道偏差最小.轨道采样拟合预报精度高,在采样区间内误差分布比较均匀,但计算开销较大,一般用于TLE的发布;单点拟合方法虽然无法估计阻尼系数*B**,从而不适宜用于长时间轨道预报,但计算速度相对较快.

需要注意的是,TLE所使用的坐标系为真赤道、平春分点坐标系(TEME, True Equator Mean Equinox),而通常的轨道计算或数值积分一般采用地心平赤道、平春分点坐标系(MEME, Mean Equator Mean Equinox,如J2000.0地心赤道惯性系),需要进行坐标转换^[3].

2.1.2 拟合方法改进

TLE拟合过程中偏微分矩阵的求解十分关键,若直接采用TLE=(*i, 8, e, X, M, n*)^T作为目标参数,则在微分矩阵计算过程将存在奇点问题,将导致该矩阵非正定,从而影响到迭代顺利收敛,而采用与其对应的惯性系位置和速度矢量作为状态变量则可避开奇点问题影响^[6].选取对应于该TLE根数的J2000.0惯性系目标状态*X_{tle}*=(*x, y, z, x-dot, y-dot, z-dot*)_{tle}^T作为目标变量,定义函数TLE=*g*(*X_{tle}*)为目标状态至TLE的转换函数,构造新的迭代格式如下

$$X_{tle}^{(k+1)} = X_{tle}^{(k)} + (M_x)^{-1} (y - y^{(k)}) \tag{1}$$

其中 $M_x = \frac{5f \left(\frac{g(X_{tle})}{5X_{tle}} \right)}$, 计算过程如图1所示.

另外,可采用Richard外推公式提高偏微分矩阵计算精度.

上述TLE拟合方法均以目标状态为参考,然而在空间目标监视应用中多为非合作目标,其状态一般不是精确已知的,尤其是在无目标距离信息的光学监视应用中.为拓展TLE和SGP4预测模型应用范围,针对天基光学监视应用需求并根据两种拟合方式特点,分别给出相应方法,将TLE拟合过程和SGP4模型嵌入跟踪定轨过程,在拟合得到目标TLE的同时提高被动跟踪过程中状态预测精度.

3 基于天基光学观测的TLE2NLS拟合方法

3.1 天基光学测量模型

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,背景中的恒星相对静止,而经过该天区内空间目标则表现为条痕.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,可对其按观测时间进行多项式拟合,取拟合常数项*A*_D和线性项系数*A-dot*_D定义为目标帧集测量信息^[1],可由J2000.0坐标系下目标位置矢量*r*(*x, y, z*)和测站位置矢量*R*(*X, Y, Z*)确定.

$$\begin{cases} A = \tan^{-1} \left(\frac{y - Y}{x - X} \right) \\ D = \sin^{-1} \left(\frac{z - Z}{Q} \right) \end{cases}, \begin{cases} \hat{A} = \frac{(\hat{y} - \hat{Y}) \cos A - (\hat{x} - \hat{X}) \sin A}{Q \cos D} \\ \hat{D} = \frac{(\hat{z} - \hat{Z}) - Q \sin D}{Q \cos D} \end{cases} \tag{2}$$

其中 $Q = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2}$.

测量为状态变量*X*的非线性函数

$$z(k) = h(X(k)) + n(k) \tag{3}$$

其中*h*(#)表示由状态至测量的非线性变换,*n*(*k*)为测量噪声.设帧集内共有*M*帧测量,帧间测量间隔*ΔT*,则相应帧集测量协方差矩阵为

$$R = \text{diag} \left(\frac{R^2}{M \cos^2 D}, \frac{R^2}{M}, \frac{12R^2}{M(M^2 - 1)}, \frac{12R^2}{M(M^2 - 1)}, \Delta T^2 \cos^2 D, \Delta T^2 \right) \tag{4}$$

其中*R*为传感器视线测量误差.

3.1.2 利用测角资料的TLE2NLS方法

假设可获得目标测角资料 $Z_M = \{z_K, K = 1, 2, \dots\}$

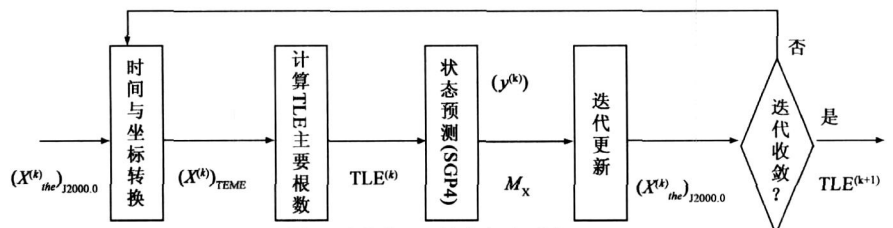


图1 改进的TLE迭代拟合过程

$M\}$, 为避免奇点问题目标参数选择为

$$\mathbf{N} = (\mathbf{X}_{\text{tle}}, \mathbf{B}^*) \Big|_{t=T_r} = (x, y, z, \hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \mathbf{B}^*) \Big|_{t=T_r} \quad (5)$$

对参考时刻 T_r 目标状态 \mathbf{N} 的估计可以采用最大似然估计方法, 定义代价函数

$$J_M(\mathbf{N}) = \sum_{k=1}^M [\mathbf{Z}_k - \mathbf{h}(\mathbf{X}_k)]^T \mathbf{R}_k^{-1} [\mathbf{Z}_k - \mathbf{h}(\mathbf{X}_k)] \quad (6)$$

其中 \mathbf{x}_k 为 T_k 时刻目标惯性系内运动状态, 利用 SGP4 模型计算获得, 而 SGP4 采用的是对应于 \mathbf{N} 的 TLE, 注意对 \mathbf{N} 中的目标状态需进行时间和坐标转换。

则参考时刻 T_r 状态 \mathbf{x}_r 的最大似然估计转换为非线性最小二乘 (NLS, Nonlinear Least Square) 问题, 假定目标状态矢量 $\mathbf{N} = (\mathbf{N}_1, \dots, \mathbf{N}_M)^T$, 令

$$\#(\mathbf{N}) = \begin{bmatrix} -\mathbf{R}_1^{-\frac{1}{2}} [\dots \mathbf{N}_1^T(\mathbf{x}_1)]^T \\ \mathbf{s} \\ -\mathbf{R}_M^{-\frac{1}{2}} [\dots \mathbf{N}_M^T(\mathbf{x}_M)]^T \end{bmatrix}_{2M \times 1} \quad (7)$$

只需给定初始估计 $\mathbf{N}_{(0)}^{\text{ME}}$, 就可通过迭代求解 \mathbf{N}^{ME}

$$\mathbf{N}_{(n+1)}^{\text{ME}} = \mathbf{N}_{(n)}^{\text{ME}} - \left(\#^T \# \right)^{-1} \#^T \mathbf{v} \left(\mathbf{N}_{(n)}^{\text{ME}} \right) \quad (8)$$

同样可利用 Richard 外推式以提高 Jacobian 矩阵 $\#(\mathbf{N})$ 的计算精度。迭代收敛后, 将 \mathbf{N} 中 \mathbf{X}_{tle} 转换为 TEME 坐标系内经典根数即可获得相应的 TLE 拟合结果。

4 基于 TLE 单点拟合的天基光学 HC2SPKF 方法

单点拟合方法虽不适于长时间轨道预报, 但其计算速度相对采样拟合方法较快, 更适于目标跟踪应用。考虑 TLE 单点拟合需要以目标运动状态为参考, 将其与 SGP4 模型嵌入跟踪滤波的状态预测过程中。

虽然 EKF 是常用的无源定位跟踪方法^[7], 但需进行线性化展开; 另一方面, EKF 仅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^[8]。与 EKF 线性化截断相比, UT 变换在获取非线性系统状态二阶矩方面具有一定优势^[9,10], 且无需计算状态 Jacobian 矩阵, 可进行非线性的状态外推。虽然利用双行根数进行轨道计算的 SGP4 模型方法已公布, 但是由于其模型中牵涉到相关摄动的周期项重构, 表示形式比较复杂, 难以计算其状态 Jacobian 矩阵。所以在此引入 UT 变换完成非线性状态预测以及预测协方差计算, 对 Sigma 样点进行 TLE 单点拟合, 并利用 SGP4 模型完成状态预测。

另外, 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^[11]; 但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^[11,12], 在直角坐标空间实现目标运动状态预测和预测协方差计算, 然后转至修正球坐标空间完成状态的滤波更新, 定义为 HC2SPKF (Hybrid Coordinates Sigma Points Kalman Filter) 方法。

4.1 基于 UT 和 SGP4 的非线性状态预测

对于给定的惯性系初始状态 $\hat{\mathbf{X}}_{k-1} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\dot{x}}, \hat{\dot{y}}, \hat{\dot{z}})^T_{k-1}$ 和初始协方差 \mathbf{P}_{k-1} , 在初始状态附近进行确定性采样获取 Sigma 样点集^[10]

$$\mathbf{V}_{k-1} = \left[\hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \sqrt{(L+K) \mathbf{P}_{k-1}} \right] \quad (9)$$

其中 L 表示状态变量的维数, K 为尺度因子。对上述样点集进行时间更新

$$\mathbf{V}_{k/k-1} = \mathbf{F}(\mathbf{V}_{k-1}) \quad (10)$$

上式中 $\mathbf{F}(\#)$ 可以为非线性状态预测函数, 可选择数值积分或分析预报等方法, 并可考虑相关摄动影响。在此 $\mathbf{F}(\#)$ 定义为利用拟合 TLE 的 SGP4 模型进行样点状态预测, 有

$$\mathbf{F}(\#) = \text{sgp4}(\text{tle}(\#)) \quad (11)$$

其中函数 $\text{sgp4}(\#)$ 表示 SGP4 轨道预测模型, 函数 $\text{tle}(\#)$ 则表示 TLE 单点拟合迭代过程, 函数中已包含相应时间坐标变换。对各样点的 SGP4 模型预测输出进行统计加权, 获取预测均值 $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}^c$ 和预测协方差 $\mathbf{P}_{k/k-1}^c$ ^[10]。

4.2 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, 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^[12]。修正球坐标系为站心赤道坐标系, 其状态变量取为 $\mathbf{X}_{\text{MP}} = (\mathbf{A} \ \mathbf{D} \ \hat{\mathbf{A}} \ \hat{\mathbf{D}} \ 1/Q \ \hat{Q})^T$, 其中 $(\mathbf{A} \ \mathbf{D} \ \hat{\mathbf{A}} \ \hat{\mathbf{D}})$ 为空间目标站心赤道坐标系下赤经赤纬测量及其变化率, Q 和 \hat{Q} 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^[11]

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{\text{MP}}(k/k-1) = \mathbf{f}_{\text{C}}^{\text{MP}}(\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}^c) \\ \mathbf{P}_{\text{MP}}(k/k-1) = \mathbf{J}_{\text{C}}^{\text{MP}} \mathbf{P}_{k/k-1}^c (\mathbf{J}_{\text{C}}^{\text{MP}})^T \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\mathbf{f}_{\text{C}}^{\text{MP}}(\#)$ 为直角坐标至修正球坐标转换函数, $\mathbf{J}_{\text{C}}^{\text{MP}}$ 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^[11]。

修正球坐标系下卡尔曼滤波增益为

$$\mathbf{K}_{\text{MP}}(k) = \mathbf{P}_{\text{MP}}(k/k-1) \# \mathbf{H}^T \left(\# \left[\mathbf{H} \# \mathbf{P}_{\text{MP}}(k/k-1) \# \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k \right]^{-1} \right) \quad (13)$$

其中对于帧集测量信息 $\mathbf{H} = [I_4 \quad \mathbf{0}_{4 \times 2}]$ 。修正球坐标空间内目标状态滤波及相应协方差为

$$\hat{\mathbf{X}}_{\text{MP}}(k/k) = \hat{\mathbf{X}}_{\text{MP}}(k/k-1) + \mathbf{K}_{\text{MP}}(k)$$

$$\# \left(Z_k - H \# \hat{X}_{MP}(k/k-1) \right) \quad (14)$$

$$P_{MP}(k/k) = (I - K_{MP}(k) \# H) \# P_{MP}(k/k-1) \quad (15)$$

转换至直角坐标系状态

$$\begin{cases} \hat{X}_{k/k} = f_{MP}^C \left(\hat{X}_{MP}(k/k) \right) \\ P_{k/k} = J_{MP}^C \# P_{MP}(k/k) \# (J_{MP}^C)^T \end{cases} \quad (16)$$

其中 $f_{MP}^C(\#)$ 为修正球坐标至直角坐标转换函数, J_{MP}^C 为直角坐标变量对修正球坐标变量的 Jacobian 矩阵. 上述式(9)~(16)即为基于 TLE 单点拟合的混合坐标 Sigma 点卡尔曼滤波(HC2SPKF)跟踪滤波方程.

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.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,需先对其进行跟踪初始化或初轨确定^[12].

5 仿真实验与结果分析

仿真实验模拟 SBV 对中低轨目标的监视跟踪,观测平台轨道采用 MSX 的近太阳同步轨道,轨道高度 900km,倾角 9815b,在其升交点附近开始对目标进行观测.观测对象选择 MEO 和 LEO 两类目标,目标轨道参

数设置如下表所示.利用 STK 工具软件仿真生成测站和目标轨道数据,观测历元起始时刻为 2007 年 9 月 1 日 0 时,天基光学测量则以 16 帧为一帧集,帧积分时间设为 2s,视线测量随机误差设为 20Lrad.

表 1 目标轨道参数设置

	n(rev/day)	i(b)	8(b)	e	X(b)	M(b)	B*
MEO	8.2	10	40	0.05	10	0	0.0001
LEO	14.2	20	30	0.05	10	0	0.0001

采用两种拟合方法对目标 TLE 进行拟合,根据获得的 TLE 拟合结果,利用 SGP4 模型进行轨道计算,并与标称轨道比较获得预报误差.单点拟合方法中以观测首点目标状态为参考,采样拟合方法则选择观测首日为采样时段,采样间隔为 1000s,两种方法均向后预测 4 天,预报误差在目标的 RTC(Radial, Transverse, Cross-track)坐标系下给出.MEO 目标轨道预报误差如图 2 所示,目标位置预报误差在迹向较为显著,速度误差则在径向较为明显.相比之下,基于采样拟合方法的轨道预报效果较好,采样段内位置拟合误差 45m,速度拟合误差 0.0125m/s,最终预报误差为位置 300m 和速度 0.12m/s.

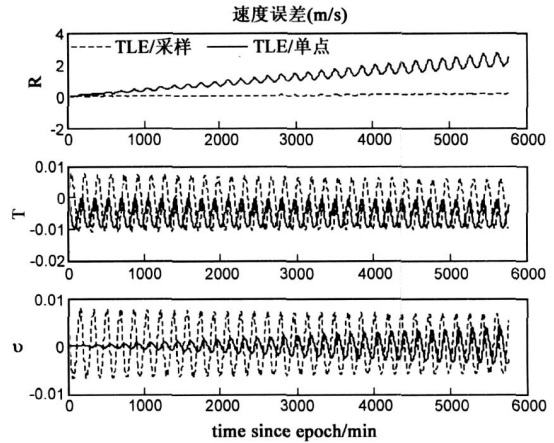
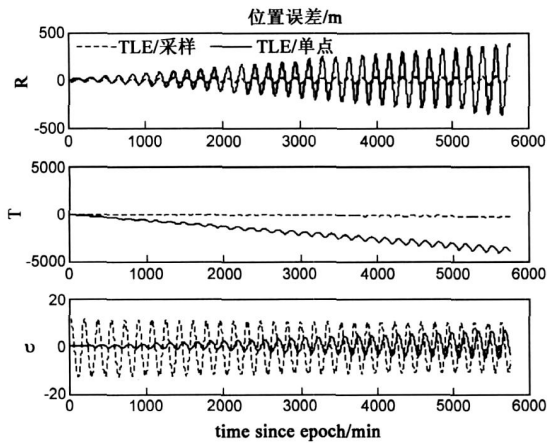


图2 利用拟合TLE的SGP4轨道预测误差(MEO目标)

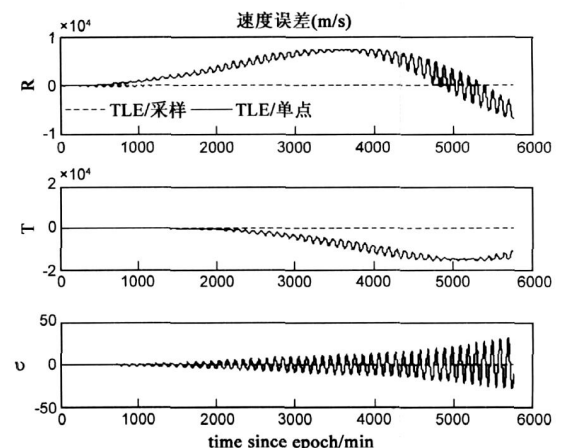
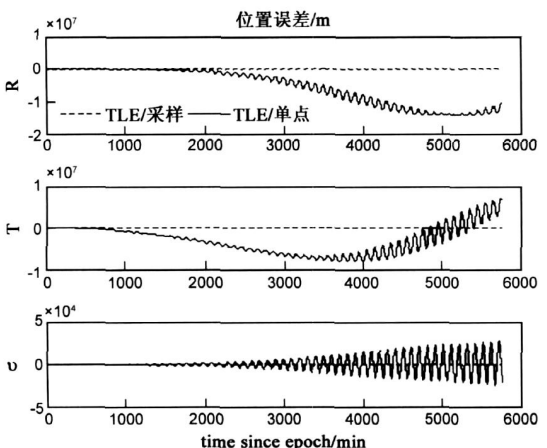


图3 利用拟合TLE的SGP4轨道预测误差(LEO目标)

LEO 目标预报误差如图 3 所示. 低轨目标受大气阻力摄动影响比较明显, 由于单点拟合方法无法估计 B^* , 其预报误差迅速发散. 而基于采样拟合方法仍可获得较好的轨道预报结果, 其采样段内位置和速度拟合误差为 40m 和 0105m/s, 最终预报误差则为位置 2km 和速度 213m/s.

TLE 单点拟合方法虽然在长期轨道预报方面不具有优势, 但却适于嵌入跟踪滤波过程, 提高状态预测精度. 暂不考虑地球遮挡及太阳照射角等观测限制, 在目标观测弧段内选择 30 个测量帧集, 帧集间隔设为 50s 以考虑传感器视线调整等耗时. 位置初始误差设为 100km, 速度误差设为 50m/s, 进行 100 次 Monte Carlo 仿真. 为与本文 HC2SPKF(TLE) 方法在跟踪性能上进行比较, 同时采用基于二体和 J_2 摄动模型的 EKF 和 HC-SPKF 方法对目标进行跟踪滤波. 首先给出 MEO 目标的跟踪滤波仿真结果, 如图 4 所示.

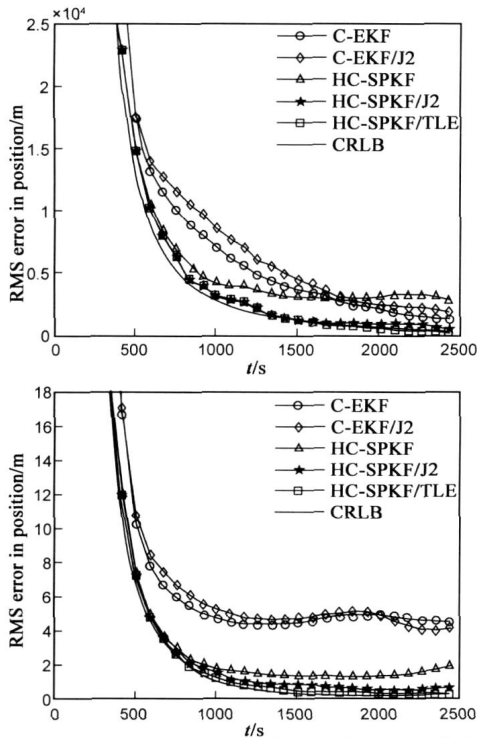


图4 帧集间隔50s时MEO目标跟踪滤波误差曲线

EKF 方法在收敛速度和精度上弱于 HC2SPKF 方法, 考虑 J_2 摄动和采用 TLE 的两种 HC2SPKF 方法性能相近, 均能获得接近克拉美罗下限 (CRLB) 的精度. 仿真条件不变, 将帧集间隔增至 1000s, 上述各方法跟踪滤波结果如图 5 所示.

受线性化截断误差和目标运动模型误差的影响, EKF 方法已发散, 不能实现对目标的有效跟踪. 状态预测步长增加后, 模型误差带来的影响也明显增强, 其中以二体模型尤为明显, J_2 摄动模型的滤波曲线也出现

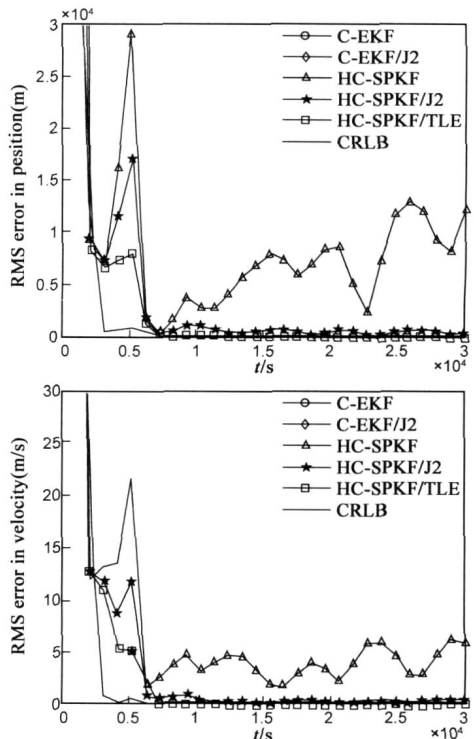


图5 帧集间隔1000s时MEO目标跟踪滤波误差曲线

起伏. 相比之下 HC2SPKF(TLE) 方法依然能够保持接近 CRLB 的收敛趋势和精度. 但是对于低轨目标, 由于大气阻力摄动影响, 其跟踪收敛效果明显不同, 图 6 即给出帧集间隔为 500s 时的 LEO 目标跟踪滤波仿真结果.

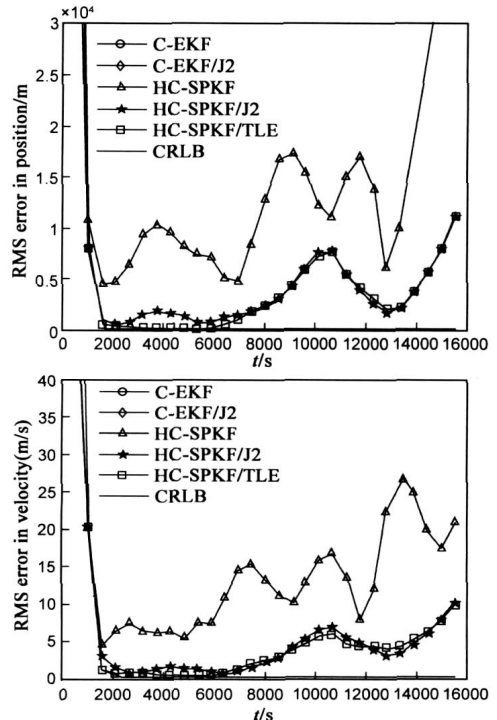


图6 帧集间隔500s时LEO目标跟踪滤波误差曲线

低轨目标相对运行较快,且受大气阻力摄动影响更为显著,由于单点拟合无法考虑大气阻力摄动,受模型误差积累影响 HC2SPKF(TLE)方法在一段时间后也不再能够保证收敛.为进一步验证大气阻力摄动影响,在小帧集间隔(30s)和长观测时段(200 帧集)条件下给出 MEO 和 LEO 目标的 HC2SPKF(TLE)跟踪误差曲线,同时给出同一 LEO 目标在不考虑大气阻力影响(B^* 设为 0)时的跟踪滤波结果,如图 7 所示.

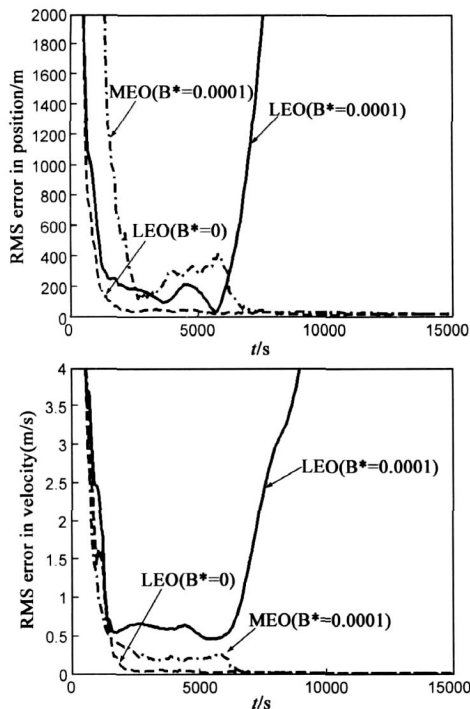


图7 长时段密集观测跟踪滤波结果

MEO 目标轨道较高,几乎不受大气阻力影响,单点拟合 TLE 与 SGP4 模型可较好地描述 MEO 目标在轨运动,可以获得与 CRLB 一致的收敛趋势. LEO 目标则在跟踪收敛一圈后逐渐发散,而 B^* 设为 0 的 LEO 目标则可顺利收敛,表明对于轨道高度较低的目标大气阻力摄动影响较为明显.基于 TLE 单点拟合的 HC2SPKF 方法对于 LEO 目标仅适合短时段跟踪,可考虑在观测积累一定时段后对其进行基于 TLE 采样拟合的最小二乘估计,为后续跟踪提供新的滤波起始条件,降低模型误差积累的影响.

6 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.本文从原理和方法上对空间目标 TLE 和 SGP4 模型在天基光学监视跟踪中的应用进行研究,提出空间目标仅测角 TLE 拟合和跟踪的新方法.对于被监视空间目标尤其是非合作目标, TLE 的获取有助于对其进一步识别和编目.

文中仿真场景设置并未考虑系统误差和观测条件等因素限制,但理论上不会影响方法可行性.实际应用中,对中低轨目标的跟踪也并非仅依靠单监视平台所能完成,需要利用星座组网或与地基观测站联合对目标进行交接跟踪,虽然关于目标交接策略以及数据融合方法等还有待进一步研究,但本文方法在目标跟踪和后续数据处理中仍可适用,具有一定应用价值.

参考文献:

- [1] Jayant Sharma, Grant H. Stokes, Curt von Braun, et al. Toward operational space-based space surveillance[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13(2): 309- 334.
- [2] 李强, 郭福成, 周一宇. 单个卫星观测器对卫星仅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 Fucheng, Zhou Yiyu. Observability of satellite passive tracking from angles measurements using single satellite observer[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1323 - 1330. (in Chinese)
- [3] 韩蕾, 陈磊, 周伯昭. SDP4/SGP4 模型用于空间碎片轨道预测的精度分析[J]. 中国空间科学技术, 2004, (8): 65- 71.
Han Lei, Chen Lei, Zhou Bozhao. Precision analysis of SGP4/SDP4 implemented in space debris orbit prediction[J]. Chinese Space Science and Technology, 2004, (8): 65- 71. (in Chinese)
- [4] Oliver Montenbruck, Eberhard Gill. Realtime estimation of SGP4 orbital elements from GPS navigation data[A]. International Symposium Space Flight Dynamics [C], Biarritz, France, 2000- 6- 6- 30.
- [5] ByoungSun Lee. NORAD TLE conversion from osculating orbital element[J]. J Astron Space Sci, 2002, 19(4): 395- 402
- [6] 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, Wang Yanrong. An analytical method for satellite orbit forecasting[J]. ACTA ASTRONOMICA SINICA, 2005, 46(3): 307- 313. (in Chinese)
- [7] 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 Peizhang. Developments of the research on kalman filter in orbit determination[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2001, 20(3): 45- 50. (in Chinese)
- [8] 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 Weisheng, Xu Demin, Zhang Fubin. Unscented kalman filter for passive underwater target tracking[J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(12): 26- 29. (in Chinese)

nese)

- [9] Julier S, Uhlmann J K. A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems [A]. Proceedings of 11th International Symposium Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls [C]. Orlando, 1997. 182- 193.
- [10] 傅建国, 王孝通, 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 Jianguo, WANG Xiaotong, et al. Sigma point kalman filter and its application [J]. System Engineering and Electronics, 2005, 27(1): 141- 144. (in Chinese)
- [11] Grossman W. Bearing Only Tracking: A Hybrid Coordinates System Approach [A]. Proceeding of the 30th Conference on Decision and Control [C]. England, December 1991: 2032- 2037.
- [12] 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 Jiaojie, Chen Honglin, Zhang Yaoyong. An bearing-only tracking algorithm in the hybrid coordinates [J]. Electronic Optics & Control, 2005, 12(2): 34- 36. (in Chinese)

作者简介:



李 骏 男, 1978 年生于河南商丘, 国防科技大学电子科学与工程学院博士, 研究方向为空间信息处理.

E-Mail: nudt_ljun@yahoo.com.cn

吴 京 女, 1964 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电子信息系统技术与仿真、空间信息处理等.

安 玮 女, 1969 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子信息系统与技术、空间信息处理等.

周一宇 男, 1948 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 重点研究方向为电子信息系统理论与仿真、无源定位理论与技术、雷达数据处理等.