

基于光学/脉冲星的木星探测转移段 自主组合导航

李佳宁¹, 李 杨², 林海森¹, 侯博文^{1,3}

(1.北京空间飞行器总体设计部,北京 100094;2.西昌卫星发射中心,四川 西昌 615000;
3.国防科技大学 文理学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:提出一种基于光学/X脉冲星的木星探测器转移段自主组合导航方案。该方案在探测器转移段动力学模型的基础上,以地球、火星、木星、木星卫星以及X射线脉冲星作为观测目标,从待观测目标的几何分布、视星等以及导航精度几个方面,分析光学自主导航待观测目标的可观测条件和可观测度,优化选取最优的光学观测目标;结合X射线脉冲星观测信息,构建光学/X射线脉冲星组合导航方案;结合无迹卡尔曼滤波算法,应用于木星探测转移段,实现探测器位置和速度估计。从数学仿真结果来看,该组合导航方案状态估计精度显著优于单独使用光学导航或者X脉冲星导航系统。

关键词:木星探测器;转移段;光学导航;X射线脉冲星导航;组合导航;可观测条件

中图分类号: V 419

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.04.001

Autonomous Integrated Navigation for Jupiter Probe Transfer Phase Based on Optical / Pulsar

LI Jianing¹, LI Yang², LIN Haimiao¹, HOU Bowen^{1,3}

(1.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2.Xichang Satellite Launch Center (XSLC), Xichang 615000, Sichuan, China;

3.College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: An autonomous integrated navigation scheme based on the optical / X-ray pulsar navigation system for the Jupiter probe transfer phase is proposed. Based on the dynamic model of the probe transfer phase, the system uses the Earth, the Mars, the Jupiter, the Jupiter satellites, and X-ray pulsars as the observation targets. From the analyses of the geometric distribution and the apparent magnitude of the observed targets and the navigation accuracy, the observable conditions and the observability degree of the optical autonomous navigation targets are analyzed, and the optical targets are optimized and selected. Combined with the X-ray pulsar observation information, an integrated optical / X-ray pulsar navigation scheme is constructed. Based on the unscented Kalman filter algorithm, the scheme is applied to the Jupiter probe transfer phase to estimate the position and velocity of the probe. The simulation results show that, the state estimation accuracy of the integrated navigation scheme is significantly better than that of the optical navigation system or the X-ray pulse navigation system alone.

Key words: Jupiter probe; transfer phase; optical navigation; X-ray pulsar navigation; integrated navigation; observability condition

收稿日期:2020-06-02; 修回日期:2020-07-03

基金项目:民用航天预先研究项目(D020213)

作者简介:李佳宁(1988—),男,硕士,主要研究方向为航天器自主导航、动力学与控制。

通信作者:侯博文(1994—),男,博士生,主要研究方向为航天器自主导航、目标跟踪。

0 引言

自 20 世纪 50 年代首颗人造地球卫星发射成功以来,人们对航天器的各种需求越来越高,各种航天器也相继升空。进入 21 世纪以后,深空探测逐渐成为世界航天活动热点。对小行星、彗星、大行星及其卫星等天体的探测,能够推动太阳系起源、行星演化、生命起源等基础科学问题的突破,是当前空间探索的前沿和热点问题^[1]。我国科学家在《2016—2030 空间科学规划研究报告》^[2]中指出,我国在“嫦娥”系列卫星发射成功后,将开展火星、木星及小行星等天体的探测。2020 年,我国正式公布了火星探测任务名称,并将择机发射“天问一号”火星探测器,下一步将开展木星系统探测计划,为进一步了解太阳的演变和起源提供重要途径^[3-4]。

相比于月球和火星探测,木星探测的距离更加遥远,环境更为复杂,使得探测器飞行时间更长,进一步提高了木星探测器制导、导航和控制的难度^[5-6],这对探测器在轨运行的自主性提出了更高的要求。探测器自主运行主要涉及自主导航与控制、自主健康管理、自主感知与态势评估、自主任务规划与调度等多个方面,其中,自主导航是核心关键技术^[7]。木星是典型的深空天体,对木星进行探测一般可分为转移段、绕飞段和附着段等几个典型工作阶段,其中转移段是深空探测任务的长时间飞行段,采用基于地面深空探测网的导航方式会长期占用地面站资源,而且无法满足故障等情况下的实时轨道确定要求^[8]。因此,转移段具备自主导航功能对于木星探测任务的顺利完成具有重要意义。

自主光学导航是实现深空探测自主导航的主要方式之一,主要利用携带的光学传感器观测可见的天体,通过在轨处理拍摄得到的天体图像,实时获得探测器的位置和速度^[9]。目前,美国“深空一号”探测器^[10]采用恒星图像和天体图像信息实现了自主导航,并且取得了巨大成功,证明了自主光学导航具有强自主性和高精度的特点。由于木星具有很多卫星,这些卫星均可作为木星探测转移段的观测目标,为光学自主导航提供足够的测量信息。另外,太阳系中的八大行星由于体积大、星历信息已知,也可作为观测源,在较近的距离观测时(如接近段或环绕段),行星成像为一个圆盘,可选取大行星的视半径作为观测信息;当距离较远时,可选择圆盘中心的视线矢量作为观测信息。

除了光学自主导航方式以外,随着对脉冲星的深入了解和认识,科学家意识到脉冲星在导航系统中的应用价值。2004 年,美国 DARPA 开启了“基于 X 脉冲星的自主导航定位验证”计划^[11],并开始建立能够提供高精度定轨的脉冲星导航网络。由于脉冲星自旋周期稳定,X 脉冲光子属于高能粒子,能够集中脉冲星的绝大部分辐射能量,可以使探测器小型化探测与处理,国内外学者开始研究将其应用于深空探测领域^[12-14],结合无线电和光学传感器实现火星探测器自主导航^[15],并利用可观测性矩阵分析了该方案的可行性^[16]。由于光学导航系统的传感器视场较小,并且受到行星等等限制,无法保证在整个转移段都有足够的测量信息,因此,可以采用行星/脉冲星组合导航方案实现木星探测转移段自主导航。

本文将针对木星探测转移段,给出行星/卫星/脉冲星组合导航的实现过程和具体算法。首先,明确了基于行星/卫星观测和基于脉冲星观测的自主导航过程;其次,给出了转移段探测器动力学模型和观测模型;之后,通过对备选观测行星或者行星卫星进行实时的可观测度评价,进而选取最优观测组合,以利于提高导航滤波精度;最后,以“木星”探测器转移段飞行轨道为背景进行数学仿真,验证了算法的有效性。

1 多源信息融合的组合导航原理及实现过程

基于行星/卫星/脉冲星组合导航原理示意图如图 1 所示。

根据图 1,该组合导航方案主要分为光学导航系统和脉冲星组合导航系统,在探测轨道动力学模型的基础上,利用光学导航系统测量数据和 X 脉冲星导航系统测量数据,结合导航滤波算法,实现探测器轨道状态估计。其中,行星/卫星的光学导航系统和 X 脉冲星导航系统实现过程如下。

1) 光学导航系统

本文主要以木星探测转移段为背景,距离行星距离较远,所以将考虑采用行星成像圆盘中心作为观测量;利用光学传感器拍摄得到太阳系中已知星历的一颗行星或者行星卫星,并通过质心提取技术获得其成像中心的视线方向,因此,探测器的位置一定在探测器与目标的视线上;同时拍摄 2 颗行星,

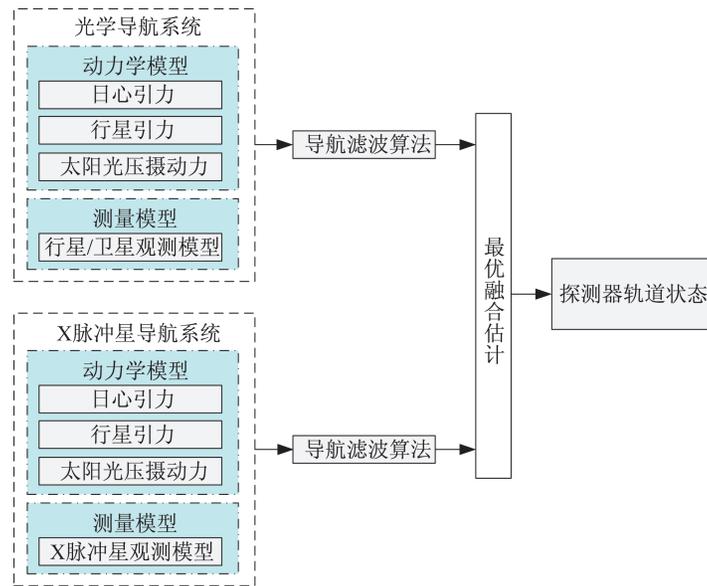


图 1 光学/脉冲星组合导航

Fig.1 Schematic diagram of the integrated optical/pulsar navigation

就可获得 2 条视线,两条视线的交点即为探测器位置,如图 2 所示。

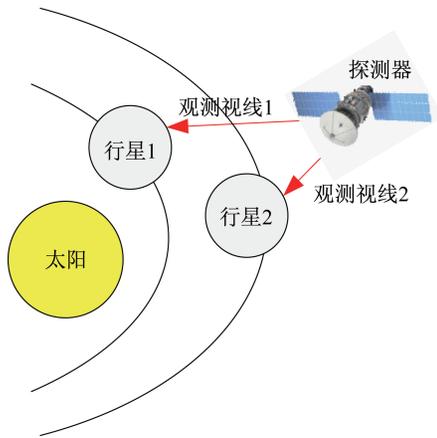


图 2 光学导航系统原理

Fig.2 Schematic diagram of the optical navigation principle

2) X 脉冲星导航系统

探测器利用 X 脉冲星探测器测量得到光子到达航天器的时间,同时利用星钟记录来获得太阳系质心(Solar System Barycenter, SSB)坐标系下光子到达时间序列,并计算 X 脉冲星信号到达探测器和 SSB 的时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)。TDOA 反映了探测器位置在脉冲星视线矢量投影上的大小,即航天器的位置信息,如图 3 所示^[17]。

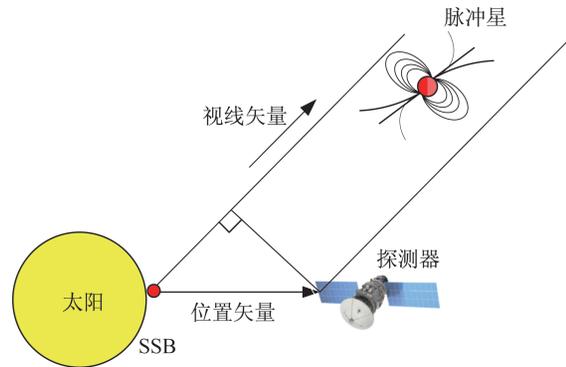


图 3 X 脉冲星导航系统原理

Fig.3 Schematic diagram of the X-ray pulsar navigation principle

2 转移段轨道动力学模型

木星探测转移段的动力学模型是以太阳为中心天体^[4],以八大行星引力和太阳光压为摄动力建模的。在 J2000.0 日心黄道坐标系中建立探测器动力学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = -\frac{\mu_{\text{sun}}}{r^3} \mathbf{r} + \sum_{i=1}^8 \mu_i \left(\frac{\mathbf{r}_{ri}}{r_{ri}^3} - \frac{\mathbf{r}_{pi}}{r_{pi}^3} \right) + \mathbf{a}_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{r} 、 \mathbf{v} 分别为探测器在日心坐标系的位置矢量、速度矢量,且有 $r = \|\mathbf{r}\|$; \mathbf{r}_{pi} 为第 i 个产生摄动力行星的位置矢量,且有 $r_{pi} = \|\mathbf{r}_{pi}\|$; \mathbf{r}_{ri} 为第 i 个产生摄动力的行星相对航天器的位置矢量,即 $\mathbf{r}_{ri} = \mathbf{r}_{pi} - \mathbf{r}$,且有

$r_{vi} = \|\mathbf{r}_{vi}\|$; μ_{sun} 为太阳引力常数; μ_i 为第 i 个行星的引力常数, 这里假设只有太阳系八大行星对探测器具有引力摄动; \mathbf{a}_s 为太阳光压产生的摄动加速度, 其模型可参考文献[18], 这里不做详细描述。

3 导航系统观测模型

3.1 基于行星/卫星的观测模型

3.1.1 基于行星/卫星的导航系统观测方程

首先定义导航传感器测量坐标系, 以成像焦平面焦中心为坐标原点 X_o , 以焦平面为基准平面 $X_o O_o Y_o$, 以光轴方向为 Z_o 。

如图 2 所示, 记被观测目标视线方向在日心坐标系下表示为 \mathbf{n}^s , 则有

$$\bar{\mathbf{n}}^c = C_n^s \mathbf{n}^s + \mathbf{v}_c \quad (2)$$

式中: C_n^c 为日心坐标系到传感器坐标系的旋转矩阵, 假设已知, 由姿态确定系统计算得到; $\bar{\mathbf{n}}^c$ 为在传感器坐标系下被观测目标视线方向; \mathbf{v}_c 为测量噪声, 近似为高斯白噪声并满足

$$\begin{cases} E\{\mathbf{v}\} = 0 \\ E\{\mathbf{v}^T \mathbf{v}\} = \sigma^2 [I - (C_n^s \mathbf{n}^s)(C_n^s \mathbf{n}^s)^T] \end{cases} \quad (3)$$

假设被观测目标在日心坐标系下的坐标为 \mathbf{R}_T^s , 则有

$$\mathbf{n}^s = \frac{\mathbf{R}_T^s - \mathbf{r}}{\|\mathbf{R}_T^s - \mathbf{r}\|} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)中则有

$$\bar{\mathbf{n}}^c = C_n^c \frac{\mathbf{R}_T^s - \mathbf{r}}{\|\mathbf{R}_T^s - \mathbf{r}\|} + \mathbf{v}_c \quad (5)$$

假设第 i 个观测的目标视线矢量为 $\bar{\mathbf{n}}_i^c$, 则基于行星/卫星的观测方程可表示为

$$\mathbf{z}_1 = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{n}}_1^c \\ \bar{\mathbf{n}}_2^c \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{n}}_{n_1}^c \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{z}_1 为光学导航系统观测量; n_1 为可观测的目标个数。

假设木星探测转移段备选观测目标为地球、火星、木星以及木星的 67 颗卫星。需要考虑的是, 在不同阶段可观测得到的目标星等不同, 会影响光学传感器观测目标。为了克服这一问题, 需要分析不同行星之间的遮挡关系, 并且要实时计算待观测目标星等。

3.1.2 行星可观测条件分析

行星间的遮挡关系如图 4 所示, \mathbf{r}_p 代表探测器在太阳坐标系下的位置矢量, \mathbf{r}_E 代表行星在太阳坐标系下的位置矢量, r_s 代表太阳的半径, 因此, 可以得到行星不可见条件为

$$\beta_1 < \alpha_1 \text{ 且 } \beta_2 > \alpha_2 \quad (7)$$

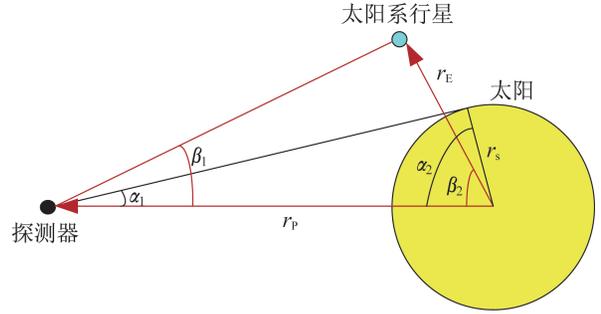


图 4 行星可观测条件几何

Fig.4 Geometric sketch of the observable conditions for planets

3.1.3 行星及行星卫星视星等条件分析

非恒星的绝对星等定义为如果物体与太阳和地球的距离为一个天文单位, 且相位角为 $\xi = 0^\circ$ 时它的视在大小。如图 5 所示, 可观测卫星的相位角 ξ 为与地球的连线和太阳的连线的夹角。

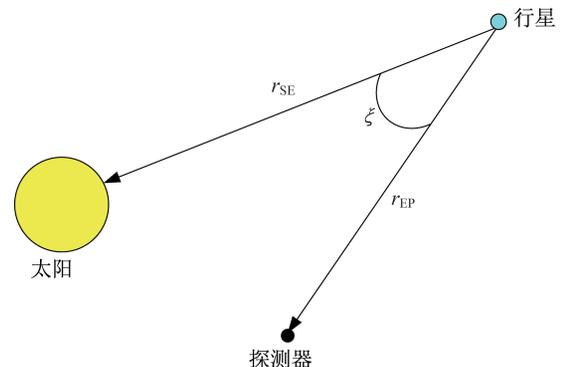


图 5 相位角

Fig.5 Schematic diagram of the phase angle

特别是, 观测到的球形物体(例如行星或卫星)的绝对视星等 M 可通过以下表达式进行近似计算:

$$M = m_{\text{sun}} - 5 \log_{10} \left(\frac{r_d}{d_0} \sqrt{a} \right) \quad (8)$$

式中: $m_{\text{sun}} = -26.73$ 代表太阳视星等; $d_0 = 1 \text{ AU}$, 其中 $1 \text{ AU} = 1.4959787 \times 10^8 \text{ km}$, 代表一个天文单位的距离; r_d 为观测行星的半径; a 为反射率。

通常来讲, r_d 可以用卫星的形状来近似。被观测卫星的视星等 m 可以根据 M 计算得到

$$m = M + 2.5 \log_{10} \left[\frac{r_{SP}^2 |r_{EP}|^2}{d_0^4 p(\xi)} \right] \quad (9)$$

式中: $|r_{SE}|$ 为太阳和被观测行星的距离; $|r_{EP}|$ 为观测卫星和被观测卫星的距离; $p(\xi)$ 为相位积分(反射光积分), 对于球形物体可以近似为

$$p(\xi) = \frac{2}{3\pi} [(\pi - \xi) \cos(\xi) + \sin(\xi)] \quad (10)$$

式(10)的相位积分也是未知形状卫星的一个合理的近似值。据图 5, 观测卫星的相位角可计算为

$$\xi = \cos^{-1} \left[\frac{r_{SP} r_{EP}}{|r_{SP}| |r_{EP}|} \right] \quad (11)$$

视星等越高, 被观测卫星的亮度就越暗。考虑到被观测卫星的视星等 m 和受导航星敏感器探测能力限制的视星等范围 m_0 , 确保被观测卫星具有足够的视星等以供导航星传感器探测的条件为

$$m \leq m_0 \quad (12)$$

3.1.4 待观测目标实时选取方法

为提高导航精度, 用导航目标可观测度度量方法实时选取合适的待观测目标。度量方法如下^[17]:

$$\kappa = \frac{1}{\text{Tr} \left[\left(-\sum_{i=1}^{n_t} \sigma_i^{-2} \frac{1}{r_{a,i}^2} [\bar{n}_i^n \times]^2 \right)^{-1} \right]} \quad (13)$$

式中: n_t 为可观测目标个数; $r_{a,i}$ 为第 i 个目标距离探测器的距离; σ 为敏感器测量精度, 采用实时优化选取的方式选取待观测目标。

选取最优导航行星组方法为: 设一次自主导航需要观测 n_t 个视线信息, 而符合选取标准的备选行星有 $m (n_t \leq m)$ 颗, 则共有 $C(m, n_t)$ 种组合方式, 计算所有组合的可观度, 其中可观度最大的组合就是最优导航路标组合。

3.2 基于 X 脉冲星的观测模型

在日心坐标系下, 由于相对论效应可能会影响 X 脉冲星导航系统 TOA, 所以光子到达时间转换方程可以为如下形式^[19]:

$$\begin{aligned} \text{TDOA} &= t_b - t_{sc} = \\ &= \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_0}{c} + \frac{1}{2cD_0} [(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_0)^2 - r_0^2] + \\ &= \frac{2\mu_{\text{sun}}}{c^3} \ln \left| \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_0 + r_0}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{b} + b} + 1 \right| + \delta t + \mathbf{v}_x \end{aligned} \quad (14)$$

式中: t_b 为脉冲星光子到达 SSB 的时间; t_{sc} 为同一光子到达探测器的时间; c 为光速; D_0 为脉冲星到 SSB 的距离; \mathbf{n} 为 SSB 指向脉冲星的视线矢量; \mathbf{r}_0 为探测器相对于 SSB 的位置。

$r_0 = \|\mathbf{r}_0\|$ 可以表示为

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r} - \mathbf{b} \quad (15)$$

式中: \mathbf{b} 为 SSB 在日心坐标系下的位置; $b = \|\mathbf{b}\|$; δt 为 X 脉冲星星钟偏差, \mathbf{v}_x 为测量噪声, 本文中暂时不考虑星钟偏差 δt 的影响。

当采用多个脉冲星进行导航时, X 脉冲星导航系统观测模型为

$$\mathbf{z}_2 = \begin{pmatrix} \text{TDOA}_1 \\ \text{TDOA}_2 \\ \vdots \\ \text{TDOA}_{n_2} \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中: n_2 为脉冲星个数。

4 导航滤波算法

4.1 无迹卡尔曼滤波算法

针对动力学模型(1)及观测模型(6)和(16), 可构建非线性组合导航系统模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}) + \boldsymbol{\omega}_k \\ \mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (17)$$

式中: $f(\mathbf{x}_{k-1}) = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_{k-1} \\ \mathbf{v}_{k-1} \end{pmatrix}$ 可由式(1)离散化表示;

$h(\mathbf{x}_k) = \begin{pmatrix} h_1(\mathbf{x}_k) \\ h_2(\mathbf{x}_k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_{1,k} \\ \mathbf{z}_{2,k} \end{pmatrix}$, 其中, $h_1(\cdot)$ 、 $h_2(\cdot)$ 分别为

两种导航系统测量方程; $\boldsymbol{\omega}_k$ 为状态噪声, 用于表示由于动力学模型构建不准确而出现的误差影响^[20], 假设为高斯噪声, 满足

$$\begin{cases} E\{\boldsymbol{\omega}\} = 0 \\ E\{\boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega}\} = \mathbf{Q} \end{cases} \quad (18)$$

\mathbf{v}_k 为观测噪声, 由光学导航系统和 X 脉冲星导航系统测量噪声共同组成。

文中采用非线性滤波算法实现最优状态估计。无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)算法由于精度高, 常用于实现航天器状态估计, 其算法步骤如下^[21]:

步骤 1 根据上一步状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 和状态估计协方差 \mathbf{P}_{k-1} , 获取一组采样点 $\chi_k^{(i)}$ 及其对应权值

$$\chi_{k-1}^{(i)} = \left[\hat{x}_{k-1} \quad \hat{x}_{k-1} + \sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}} \hat{x}_{k-1} - \sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}} \right] \quad (19)$$

步骤 2 计算 $2n+1$ 个 Sigma 点集的一步预测,
 $i=1, 2, \dots, 2n+1, n$ 为状态维数

$$\chi_{k|k-1}^{(i)} = f(k, \chi_{k-1}^{(i)}) \quad (20)$$

步骤 3 计算系统状态量的一步预测及协方差矩阵,它由 Sigma 点集的预测值加权求和得到

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^{(i)} \chi_{k|k-1}^{(i)} \quad (21)$$

$$P_{k|k-1} = \left[\hat{x}_{k|k-1} \quad \hat{x}_{k|k-1} + \sqrt{(n+\lambda)P_{k|k-1}} \hat{x}_{k|k-1} - \sqrt{(n+\lambda)P_{k|k-1}} \right] \quad (23)$$

步骤 5 将步骤 4 中预测的 Sigma 点集代入观测方程,得到预测的观测量, $i=1, 2, \dots, 2n+1$

$$z_{k|k-1}^{(i)} = h(x_{k|k-1}^{(i)}) \quad (24)$$

步骤 6 由步骤 5 得到 Sigma 点集的观测预测值,通过加权求和得到系统预测的均值及协方差

$$\hat{z}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^{(i)} z_{k|k-1}^{(i)} \quad (25)$$

$$P_{z_k z_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^{(i)} \left[z_{k|k-1}^{(i)} - \hat{z}_{k|k-1} \right] \left[z_{k|k-1}^{(i)} - \hat{z}_{k|k-1} \right]^T + R \quad (26)$$

$$P_{x_k z_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^{(i)} \left[\chi_{k|k-1}^{(i)} - \hat{x}_{k|k-1} \right] \left[z_{k|k-1}^{(i)} - \hat{z}_{k|k-1} \right]^T \quad (27)$$

步骤 7 计算 Kalman 增益矩阵

$$K_{k+1} = P_{x_k z_k} P_{z_k z_k}^{-1} \quad (28)$$

最后,计算系统的状态更新和协方差更新

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - \hat{z}_{k|k-1}) \quad (29)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k P_{z_k z_k} K_k^T \quad (30)$$

4.2 系统可观测性分析

可观测性是由 KALMAN 先生提出来的,通过对系统的可观测性分析,判断系统是否可以准确地估计状态变量。根据导航系统模型(17),该系统为非线性系统,本文通过线性化对其进行分析,则在 k 时刻线性化的状态转移矩阵 F_k 和测量矩阵 H_k 如下:

$$F_k = \frac{\partial(f(x))}{\partial x} \Big|_{x=x_k} = \begin{pmatrix} O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ \frac{\partial \dot{v}}{\partial r^T} & O_{3 \times 3} \end{pmatrix}_{6 \times 6} \quad (31)$$

$$H_k = \frac{\partial(h(x))}{\partial x} \Big|_{x=x_k} = \begin{pmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial r^T} & O_{(3 \times n_1) \times 3} \\ \frac{\partial z_2}{\partial r^T} & O_{n_2 \times 3} \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^{(i)} \left[\hat{X}_{k|k-1} - X_{k|k-1}^{(i)} \right] \left[\hat{X}_{k|k-1} - X_{k|k-1}^{(i)} \right]^T + Q \quad (22)$$

步骤 4 根据一步预测值,再次使用 UT 变换,产生新的 Sigma 点集

则可观测性矩阵可以表示为

$$O_k = (H_k^T \quad F_k^T H_k^T \quad \dots \quad (F_k^5)^T H_k^T) \quad (33)$$

如果系统可观测性矩阵的秩等于状态变量的维数,则在该时刻系统是完全可观的。可以看出,当光学导航系统存在 2 个及以上可观测目标时,系统是完全可观的,结合 X 脉冲星测量信息后,虽然测量矩阵维数增加了,但可观测性矩阵的秩始终为 6。为更好地证明系统满足可观测性,在仿真中将通过数值分析给出每一时刻系统可观测性矩阵的秩。

5 仿真验证及结果分析

以木星探测器转移段轨道为例进行自主导航的蒙特卡洛仿真。在 J2000 日心惯性坐标系中,相应的仿真参数选取见表 1。根据表 1,日心坐标系下木星探测轨道如图 6 所示。

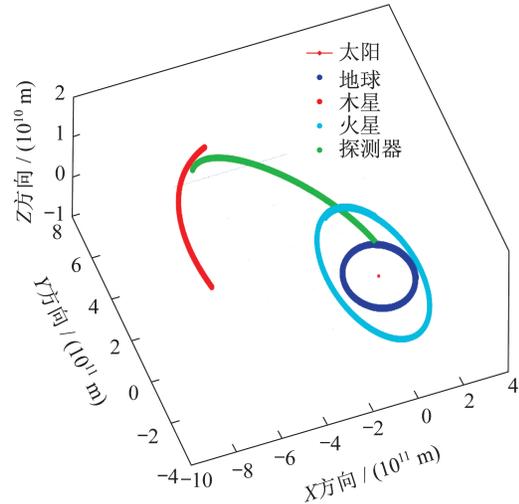


图 6 日心坐标系下探测器轨道

Fig.6 Schematic diagram of the probe orbit in the heliocentric coordinate system

表 1 仿真条件

Tab.1 Simulation conditions

仿真条件	数值
仿真起始时间	2026年9月1日12时0分0秒
探测器初始位置	(53 107 871 005.59, 137 626 318 366.08, -10 143 245.41)
探测器初始速度	(-14 012.19, 35 864.13, 421.28)
仿真时间/a	2.2
初始状态误差	(1 000 m, 1 000 m, 1 000 m, 1 m/s, 1 m/s, 1 m/s)
光学敏感器可敏感星等	小于 6
光学敏感器测量误差/像素	0.1
X 脉冲星测量误差/ μ s	10

由于光学敏感器视场较小,假设最多只能观测 2 个目标。脉冲星观测目标为 B0531+21、B1821-24 和 B1937+21,可观测目标为 3 颗大行星(地球、火星、木星)及木星的 67 颗卫星,其轨道根数及相关光学反射参数见文献[22],则根据可观测条件(7)和(12)计算每一时刻可观测的目标数,如图 7 所示。系统可观测性矩阵的秩计算结果如图 8 所示。

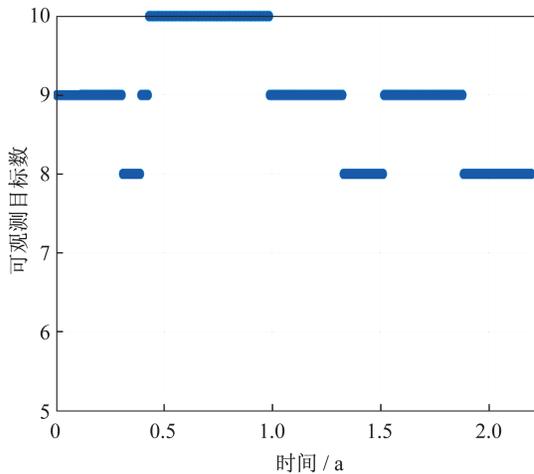


图 7 可观测目标数目

Fig.7 Schematic diagram of the number of the observable targets

根据系统可观测性矩阵的秩计算结果可知,系统在整个仿真过程都是可观的,即系统状态可以估计出来。根据每一时刻可观测的目标数,结合式(13)实时分析每两个目标的可观测度,并优选出可观测度最高的待观测目标,再结合 UKF 算法,分别采用光学自主导航、X 脉冲星自主导航方法以及光学/X 脉冲星自主导航方法实现木星探测转移段自主导航,结果如图 9~图 14 所示,各误差值见表 2。

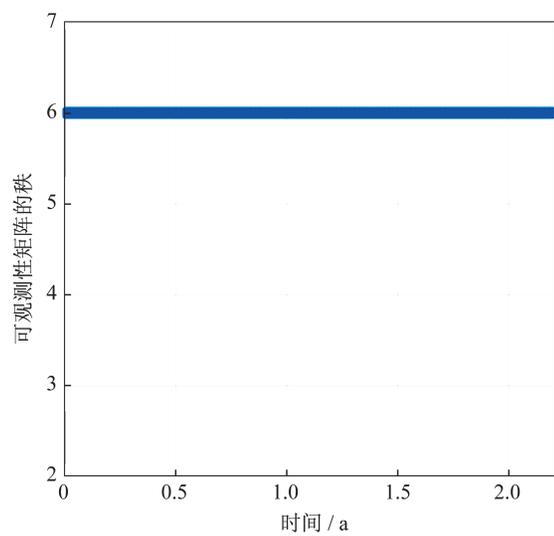


图 8 系统可观测矩阵的秩

Fig.8 Rank of the system observability matrix

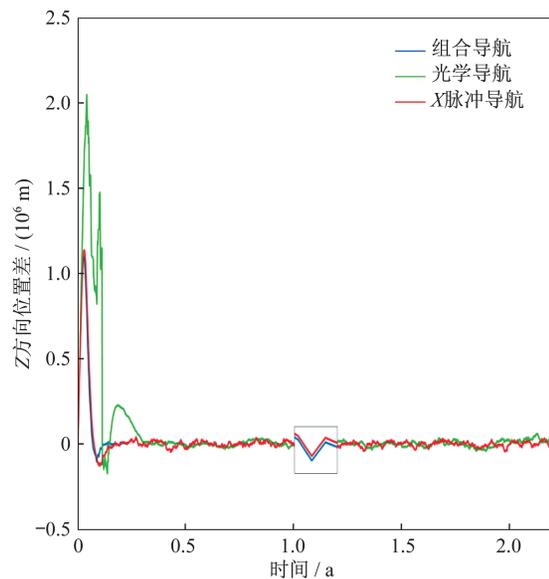


图 9 Z 方向位置误差

Fig.9 Position estimation errors in the Z direction

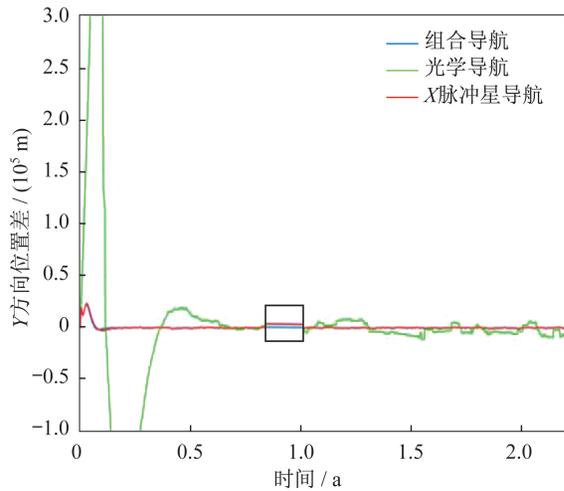


图 10 Y 方向位置误差

Fig.10 Position estimation errors in the Y-direction

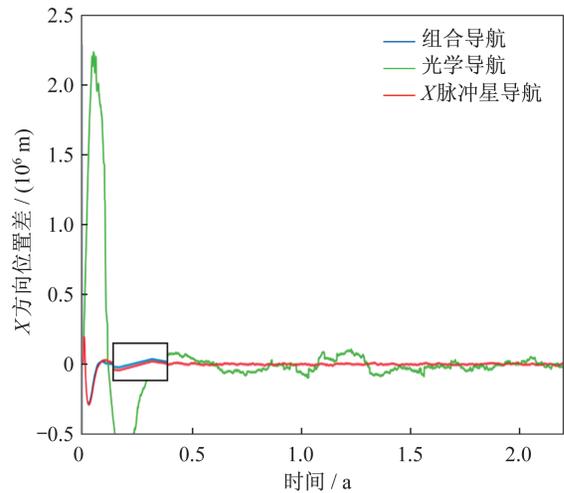


图 11 X 方向位置误差

Fig.11 Position estimation errors in the X-direction

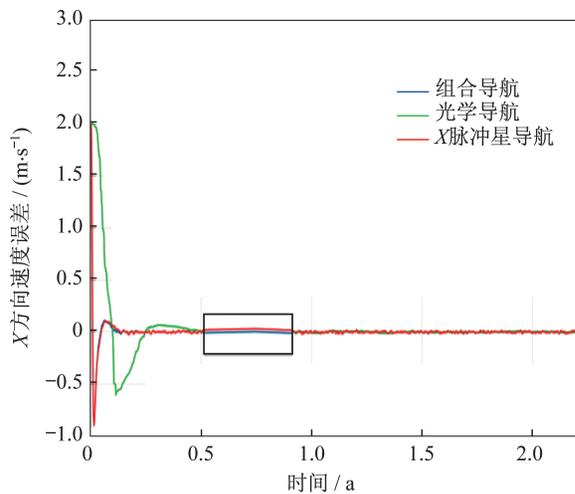


图 12 X 方向速度误差

Fig.12 Velocity estimation errors in the X-direction

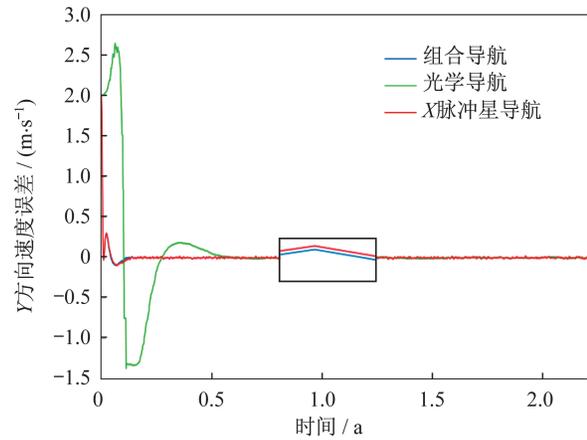


图 13 Y 方向速度误差

Fig.13 Velocity estimation errors in the Y-direction

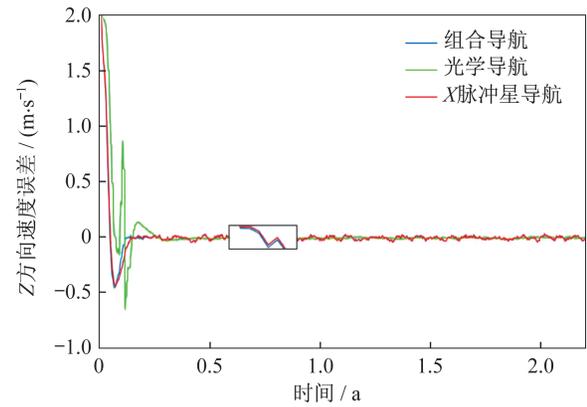


图 14 Z 方向速度误差

Fig.14 Velocity estimation errors in the Z-direction

表 2 探测器状态估计均方根误差统计表

Tab.2 Statistical table of the root mean square errors of the probe state estimation

导航方法	位置/m			速度/(m·s ⁻¹)		
	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向
组合导航	3.10×10^4	2.58×10^4	1.21×10^5	0.11	0.09	0.20
X 脉冲星导航	3.32×10^4	2.76×10^4	1.30×10^5	0.11	0.09	0.21
光学导航	3.96×10^5	9.50×10^5	2.96×10^5	0.31	0.54	0.28

根据上述结果,可以看出X脉冲星导航系统状态估计精度和组合导航系统状态估计精度显著高于光学导航系统,而组合导航系统自主导航精度相对于X脉冲星导航系统位置状态估计精度也有较大提升,每个方向均有1 km左右的精度提升,速度估计精度比较相近,但是也有一定程度的提升。

本文提出的组合导航方案能够有效提升导航精度,是因为综合利用了X脉冲星和光学导航信

息,实现了测量信息冗余,有效地实现了测量数据融合。应当指出,组合导航方案的使用还需要考虑硬件的实时状态,比如脉冲星信号接收机,在不同的环境下,X脉冲星信号的强度会影响脉冲星的信号接收,可用测量信息也会受到影响,进而影响导航系统状态估计。因此,应该根据不同应用场合、不同在轨环境综合评价导航系统状态估计精度。

6 结束语

针对木星探测转移段,给出了基于光学自主导航方案和X脉冲星自主导航方案的组合导航方案和具体实现过程。为了更好地为该方案提供应用指导,通过分析光学观测目标的可观测条件和可观测度,优化选取相应的待观测目标,同时增加X脉冲星观测信息,结合无迹卡尔曼滤波算法实现探测器转移段轨道状态估计。仿真结果表明,该组合导航方案相对于光学导航和X脉冲星导航方案,均有较高提升。

参考文献

- [1] 王大轶,黄翔宇.深空探测自主导航与控制技术综述[J].空间控制技术与应用,2009,35(3):6-12.
- [2] 吴季,孙丽琳,尤亮.2016—2030年中国空间科学发展规划建议[J].中国科学院院刊,2015(6):707-720.
- [3] 杨彬,杨洪伟,李爽.基于不同动力引力辅助模型的木星转移轨道设计[J].上海航天,2019,36(3):54-60.
- [4] 王旭生,施伟璜,王伟.基于脉冲初值的小推力转移轨道优化研究[J].上海航天,2019,36(1):53-58.
- [5] 夏亚茜,卢波.木星和土星探测的未来发展态势[J].国际太空,2012(8):24-31.
- [6] BALINT T, WHIFFEN G, SPILKER T. Mixing moons and atmospheric entry probes: challenges and limitations of a multi-objective science mission to Jupiter [C]// 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation. Reston, USA: AIAA Press, 2003: 1-8.
- [7] 王大轶,魏春岭,熊凯.航天器自主导航技术[M].北京:国防工业出版社,2017.
- [8] 王大轶,黄翔宇.深空探测转移段光学成像测量自主导航及仿真验证技术[J].控制理论与应用,2014,31(12):1714-1722.
- [9] 张晓文,王大轶,黄翔宇.利用小行星测量信息的深空探测器自主导航算法研究[J].航天控制,2009,27(3):17-22.
- [10] BHASKARAN S, DESAI S, DUMONT P. Orbit determination performance evaluation of the deep space 1 autonomous navigation system [EB/OL]. (1998-01-01) [2020-05-18]. https://www.researchgate.net/publication/237732219_Orbit_Determination_Performance_Evaluation_of_the_Deep_Space_1_Autonomous_Navigation_System.
- [11] HEESE R, KALSI S, LEUNG E. The DARPA compact superconducting X-ray lithography source features [C]// 1991 IEEE Particle Accelerator Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1991: 2652-2654.
- [12] GRAVEN P, COLLINS J, SHEIKH S, et al. XNAV for deep space navigation [C]// Workshop on Emerging Technologies for Autonomous Space Navigation. Washington, D. C., USA: NASA Headquarters, 2008: 131.
- [13] 杨博,张舒.基于X射线脉冲星的深空导航方法[J].计算机科学与技术汇刊(中英文版),2014,3(4):126.
- [14] 史世平,徐青,龚志辉.利用X射线脉冲星进行深空飞行器导航[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第六届学术年会暨863计划"深空探测与空间实验技术"重大项目学术研讨会论文集.2009:1-8.
- [15] GU L, JIANG X, LI S. Optical/radio/pulsars integrated navigation for Mars orbiter [J]. Advances in Space Research, 2019, 63(1): 512-525.
- [16] GU L, LI S, LI W. Comparative study on autonomous navigation for Mars cruise probe based on observability analysis [J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2018, 4(4): 048001.
- [17] 王大轶,李茂登,黄翔宇.航天器多源信息融合自主导航技术[M].北京:北京理工大学出版社,2018.
- [18] 李济生,王家松,刘林.航天器轨道确定[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [19] SHEIKH S I, PINES D J, RAY P S. Spacecraft navigation using X-ray pulsars [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(1): 49-63.
- [20] KAI X, CHUNLING W, LIANGDONG L. Autonomous navigation for a group of satellites with star sensors and inter-satellite links [J]. Acta Astronautica, 2013, 86(3): 10-23.
- [21] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 401-422.
- [22] NASA. List of natural satellites [EB/OL]. (2017-06-08) [2020-05-21]. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_satellites.