

深空探测器自主天文导航研究进展

宁晓琳¹, 杨雨青¹, 房建成¹, 吴伟仁^{2,3}

(1. 北京航空航天大学 仪器与光电工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学 未来空天技术学院, 北京 100191;
3. 探月与航天工程中心, 北京 100037)

摘要: 针对深空探测器自主天文导航的迫切需求, 简要介绍了研究现状, 总结了其面临的技术问题。针对自主天文导航系统误差来源多且时变的问题, 详细阐述了基于扩维滤波和基于差分的误差抑制技术; 针对现有自主天文导航方法各有局限性且单独使用难以满足导航定位要求问题, 详细介绍了自主天文组合导航方法。最后对深空探测器自主天文导航方法未来发展趋势进行了展望。

关键词: 深空探测; 自主导航; 天文导航; 误差抑制; 组合导航

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)02-0099-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230023

引用格式: 宁晓琳, 杨雨青, 房建成, 等. 深空探测器自主天文导航研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(2): 99-108.

Reference format: NING X L, YANG Y Q, FANG J C, et al. The progress of autonomous celestial navigation for deep space spacecraft[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(2): 99-108.

引言

20世纪以来, 人类利用深空探测器遍访了太阳系中的8大行星及其一些卫星^[1-4], 并对太阳活动进行了一系列探测^[5]。高精度导航是确保这些探测任务成功实施的前提和保障。当前深空探测器主要依靠地面测控来导航。但受到地理及其它条件的限制, 可测控的卫星轨道弧段很短, 且由于被天体遮挡等, 无线电测控导航不能覆盖全程, 难以满足深空探测器自主导航需求。为保持系统正常运行, 探测器需装备复杂的测控和通信设备, 增加了成本。随着探测距离越来越远, 任务越来越复杂, 深空探测器数量也在不断增加, 导致地面站运行负荷不断增大。对于距离遥远的深空探测器, 无线电测控还存在时延大、信号弱等问题^[6]。为降低地面站负荷, 增强探测器在轨运行的可靠性和生存力, 迫切需要发展深空探测器自主导航技术。

天文导航是一种重要的自主导航方法, 它具有误差不会随时间积累、抗干扰能力强及可同时提供位置和姿态信息的特点, 已成为一种有效的深空探测器自主导航方法, 并在深空探测任务中得到了应用, 未来在行星际航行和太阳系边际探测也必将发挥重要作用^[7]。深入开展自主天文导航方法研究, 对进一步提升深空探测器自主导航精度和可靠性具有重要意义。

本文针对深空探测器对自主天文导航的迫切需求, 介绍了现有自主天文导航方法研究现状, 总结了当前自主天文导航方法面临的问题, 分析了关键技术, 最后对自主天文导航方法的未来发展进行了展望。

1 深空探测器自主天文导航方法研究现状

深空探测器自主天文导航方法按照量测量类型的不同, 可分为天文测角、测距和测速导航。天文测角导航方法是利用星敏感器测量探测器与天体之间的夹角来确定探测器位置, 原理如图1所示。天文测角导航是目前最为成熟的自主天文导航方法, 已在多个探测任务得到了应用。“水手九号”(Mariner 9)^[8]、“海盗号”(Viking)^[9]、“卡西尼-惠更斯号”(Cassini-Huygens)^[10]、“深空一号”(Deep Space-1)^[11]、“欧西里斯号”(OSIRIS-REx)^[12-13]、“露西号”(Lucy)^[14-15]和双小行星重定向测试(Double Asteroid Redirection Test, DART)^[16-18]及其“智慧一号”(Smart-1)等^[19-20]任务的成功实施都验证了天文测角导航的有效性。中国在2007年发射的“嫦娥一号”^[21-23]和2020年发射的“嫦娥五号”等^[24]都搭载了光学敏感器, 成功在轨应用了天文测角导航技术^[25]。随着天文测角导航的不断发展, 应

用范围不断扩大,从最初的月球/火星等大天体探测发展到目前在小行星探测任务发挥重要作用。

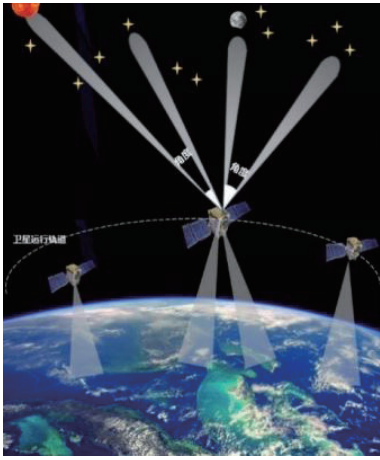


图1 天文测角导航
Fig. 1 Celestial navigation using angle measurement

天文测距导航(图2)是通过测量X射线脉冲星信号到达探测器与到达太阳系质心的时间之差来确定探测器位置^[26-33]。1974年,美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL) Downs博士^[29]首次提出了X射线脉冲星应用于深空自主确定轨道的想法,其后经过Butman^[28]和Sheikh等^[31-30]多位学者的理论分析,初步论证了天文测距导航的可行性。2011年,美国发射了中子星内部组成探测器(Neutron star Interior Composition Explorer, NICER),搭载导航技术试验(Station Explorer for X-ray Timing And Navigation Technology, SEXTANT)进行脉冲星导航在轨验证,是世界上第1个脉冲星导航的实时在轨验证试验,实现了10 km以下的定位精度^[34]。在中国,帅平等^[35-36]研究了脉冲星导航的基本原理和系统方程,并对脉冲星导航的工程意义^[37]进行了论证分析。刘劲等^[38-40]对天文测距/测角、天文测距/测速组合导航的系统^[41]和多普勒效应抑制^[42]等进行了研究,熊凯^[43-44]和宁晓琳等^[45-46]先后就脉冲星导航系统中的误差抑制进行了研究。2016年中国发射了脉冲星导航试验(X-ray Pulsar NAVigation-1, XPNV-1)卫星,实现了38.4 km的粗定轨^[47]。2017年发射了硬X射线调制望远镜(Hard X-ray Modulation Telescope, HXMT)探测器,利用搭载的3台望远镜获得观测数据,实现了10 km的导航定位精度、10 m/s的定速精度^[48-49]。未来美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)还计划发射CubeX探测器,进一步探索脉冲星自主天文导航技术^[50]。脉冲星导航未来在深空探测将会发挥越来越重要的作用。

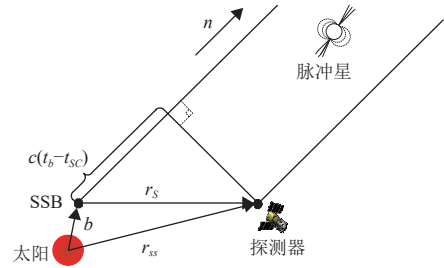


图2 天文测距导航
Fig. 2 Celestial navigation using distance measurement

天文测速导航(见图3)通过测量探测器与导航天体之间的多普勒频移,解算出探测器相对导航天体的径向速度,进而采用积分的方法确定探测器位置^[51-53]。天文测速导航是一种新型的天文导航方法,目前仍处于探索阶段。1960年富兰克林研究所首先提出通过观测天体电磁辐射进行导航的方法,并对多普勒量测量进行了重点研究^[54]。其后多位学者对天文测速导航进行了理论分析和仿真验证。1999年美国约翰霍普金斯大学提出了通过测量太阳光多普勒频移获得探测器相对太阳的径向速度,与太阳矢量方向相结合进行自主天文定位^[55-56]。2000年德克萨斯A&M大学Yim^[57-58]提出探测器相对太阳径向速度与太阳、地球矢量方向相结合的自主导航方法,仿真结果表明在仅考虑光谱仪及星敏感器测量误差的情况下,导航定位精度可达3 km,速度精度0.01 cm/s。2013年张伟等^[59-60]提出了天文光谱测速导航的想法,并就径向速度测量与定速误差之间的映射关系^[61]和测角/测速组合导航系统时间配准问题^[62]等进行了研究。刘劲等^[63]和宁晓琳等^[64]就天文测速导航的误差传递与抑制进行了深入研究。2022年,“羲和号”探测器首次在轨验证了天文多普勒测速导航的可行性,实现了定速精度1.93 m/s^[65]。

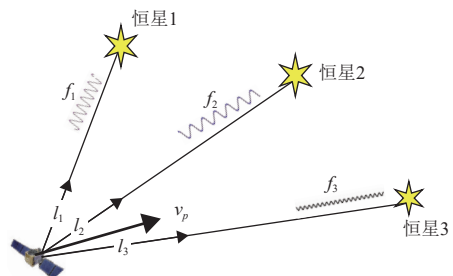


图3 天文测速导航基本原理
Fig. 3 Basic principle of Celestial navigation using velocity measurement

2 深空探测器自主天文导航技术难点

2.1 系统误差来源多且时变

深空探测器在轨运行过程中,状态模型精度、量测量和量测模型精度是影响自主天文导航定位的主要

因素。现有的自主天文导航系统通常都是以轨道动力学方程为系统状态模型, 而轨道动力学模型精度受未建模、模型中参数及计算误差的影响^[66]。对以太阳为中心天体的状态模型而言^[67], 未建模目标天体卫星的其它行星摄动引起的模型误差呈现时变特性, 由目标天体星历误差引起的状态模型误差随探测器与目标天体间距离而变化。

此外, 受测量技术和水平的限制, 量测获取过程中不可避免地含有误差。以天文测角导航为例, 星敏传感器作为天文测角导航的核心敏感器, 其本身测量精度可达角秒级, 而星敏传感器的安装误差可达角分级, 严重影响星敏传感器获得的量测精度^[68]。当探测器逐渐接近目标天体时, 其成像发生变化, 提取的质心精度也会随之变化, 进而影响天文量测精度^[69-70]。

天文测距导航中, 脉冲星作为唯一的导航信息源, 其方向和距离误差会直接影响量测获取的精度。0.001"脉冲星方向误差将导致约800 m的导航位置误差^[71], 30%的脉冲星距离不确定度将导致约300 m的导航位置误差。此外除导航信息源误差外, 测量仪器误差如测量噪声和星载原子钟钟差, 也是影响天文测距导航量测获取精度的重要因素, 其中1 μs 原子钟钟差将导致约200 m的位置误差^[71]。

天文测速导航中, 太阳多普勒速度是一种重要的速度量测量, 对基于太阳多普勒速度的天文测速导航而言, 太阳自身光谱频率的变化是影响测量准确性的主要误差源。现已观测到太阳光谱存在5 min、160 min及11年的周期性变化^[72-73], 此外还存在尚未确定规律的太阳光谱频率变化^[57], 这些变化将直接影响天文光谱测速导航量测量的获取精度。

综上, 影响自主天文导航方法定位精度的误差来源多, 且呈现时变特性。如何抑制自主天文导航方法中的系统误差成为提升自主天文导航定位精度的一大难题。

2.2 现有天文量测局限性

随着航天技术的发展, 对深空探测器自主天文导航方法的要求将越来越高。不论是天文测角导航, 还是天文测距和测速导航, 其原理都存在一定的局限性, 如天文测角导航, 虽然可利用高精度敏感器观测探测器与自然天体间的夹角来确定探测器位置, 但由于角度量测量仅包含方向信息, 缺少直接的距离和速度信息, 随着探测器与目标天体间距离的增大, 系统可观测性下降, 进而导致定位精度低^[74]。天文测速导航中, 虽然可以直接获得高精度的速度信息, 利用对

速度积分获得探测器位置, 但天文测速导航方法的位置误差会随初始误差和时间累积^[60], 此外由于天文速度量测中不含姿态信息, 天文测速导航无法直接修正探测器的姿态误差。天文测距导航中, 虽然可直接提供位置信息, 但目前可用于导航的脉冲星数量少、脉冲信号微弱, 需要较长的时间进行量测量获取^[75]。

综上, 从导航原理层面分析, 现有自主天文导航方法都有各自的局限性, 随着深空探测技术的不断发展, 对深空探测器自主导航系统的性能要求越来越高, 单独使用任何一种自主天文导航方法都难以满足深空探测器的定位精度需求, 因此如何综合利用各导航方法的优势, 成为自主天文导航方法一个重要的研究内容。

3 深空探测器自主天文导航方法关键技术

3.1 系统误差抑制技术

深空探测器在轨运行过程中, 由于状态模型量测获取和量测模型精度受到各种因素的影响, 因此研究自主天文导航系统误差的抑制技术是提升自主天文导航定位精度的重要手段。

3.1.1 扩维滤波技术

扩维滤波是一种系统可建模误差抑制方法, 将系统可建模误差项扩维至状态量进行估计。Liu等^[76-77]在分析脉冲星方向和时钟引起的系统误差特性后, 将脉冲星方向误差及星载原子钟钟差引起的系统误差项作为一个状态扩维到状态量中, 采用无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)对其进行估计、修正。Wang等^[78]分析了行星星历误差对脉冲星导航精度的影响, 建立了行星星历引起的系统误差模型, 并将系统误差扩维至状态量, 通过卡尔曼滤波对探测器位置, 速度和系统误差进行估计。与传统UKF相比, 扩维后的滤波方法由于对系统误差进行了估计, 在一定程度上抑制了噪声的影响, 但基于扩维滤波的方法, 并没有在真正意义上消除误差。此外, 扩维滤波需要增加状态量的维数, 导致计算量增大, 极大地加重了滤波器的负担。

3.1.2 基于差分的误差抑制技术

差分方法是一种系统常值和缓变误差的抑制技术, 可分为空间和时间差分方法。空间差分方法是利用不同空间位置的多个载体观测同一目标, 将同一时刻得到的量测量进行差分。空间差分方法在GPS定位技术中具有广泛的应用。差分GPS技术通过基准站和

运动载体同时观测相同的GPS卫星来抑制卫星星历误差、钟差、对流层误差等对定位精度的影响,来获得更高的导航精度^[79]。在深空探测器天文导航中,通常利用编队飞行中2个不同的探测器观测同一目标源,将获得的量测量进行差分,来消除系统共有误差对导航精度的影响^[43,80]。然而,空间差分方法需要多颗探测器,对深空探测任务而言难以实现。

时间差分技术是指利用同一载体在前后2个时刻观测的量测量进行差分。基于时间差分的导航方法在天文测距和测速系统误差抑制方面表现优异,针对脉冲星导航中,脉冲星角位置、距离误差、地球星历误差和星载原子钟差对定位精度的影响,提出了一种时间差分脉冲星导航方法,利用探测器观测同一颗脉冲星,对得到的不同时刻的TOA量测量进行差分,来抑制系统误差,仿真结果表明,基于时间差分的脉冲星导航方法定位精度比传统天文导航方法提升约90%^[71]。

虽然时间差分后的量测量可有效抑制缓慢时变误差对导航系统的影响,但也造成了量测信息的丢失,降低了系统的估计能力,时间差分与非时间差分相结合的系统误差抑制技术可用来解决该问题。针对月球探测器天文测角/无线电测距/测速组合导航方法受无线电接收机频率漂移误差及星载原子钟时间测量误差等的影响,天文测角/时间差分无线电组合导航方法^[81]仿真结果表明,该方法可有效抑制上述误差对导航定位精度的影响。针对火星探测器天文测速导航,太阳光谱频率变化对导航精度的影响,天文测角/时间差分测速组合导航方法^[64]仿真结果表明,所提方法的定位精度与天文测角/测速组合导航相比提升24%。同时考虑脉冲信号的信噪比低、量测获取时间长,而天文测角导航的观测周期短,利用天文测角和天文测距导航的互补特性的天文测角/时间差分TOA天文导航方法^[82],仿真结果表明天文测角/时间差分TOA的导航方法的定位误差比天文测角/测距组合导航减小了54%,有效提升了火星探测器的导航性能。

此外,经过时间差分的量测量不仅与当前时刻状态量有关,而且还与上一时刻的状态量相关,这是时间差分给滤波估计带来的新问题。针对该问题,利用上一时刻估计值代替上一时刻状态量的方法虽然解决了量测量与上一时刻状态量相关的问题,但也使得时间差分后系统量测误差不仅含有前后2个时刻的量测误差的差值,还包括上一时刻的估计误差引起的量测模型误差。因此对应的量测误差方差阵并非简单的叠加,Ning等经过详细的推导,给出了时间差分后量测噪声协方差阵的计算公式^[46]。

3.2 自主天文组合导航

根据上述分析,综合利用各导航方法的量测信息进行融合,实现各导航方法的优势互补是提升自主天文导航定位精度的重要手段。按照导航信息融合的类型,深空探测器自主天文组合导航方法可分为2类:天文自组合导航系统和天文导航与其它导航方法相结合构成的组合导航系统。

天文自组合导航系统是指天文测角、测速和测距组合导航。针对天文测角和天文测距导航虽然可以提供高精度的位置信息,但速度估计精度不高的问题,综合天文测角/测速组合导航方法^[83]和天文测距/测速组合导航方法^[84],解决了天文测角和测距导航无法直接求解速度的问题。综合利用3种导航方法的优势^[85]天文测角/测速/测距组合导航方法,利用角度和速度量测来补偿脉冲星信号中的多普勒效应,大大提升了定位精度。

天文导航与其它导航方法相结合的组合导航系统中,典型的是将惯性、视觉和天文导航相结合来提高巡视器的位置、速度和姿态精度。火星车惯性/天文组合方法^[86],利用星敏感器来校正失准角和陀螺漂移。月球车的捷联惯性/视觉/天文组合导航方法^[87],利用星敏感器来获得高精度姿态信息。惯性/天文/里程仪组合导航方法^[88],利用天文观测量来提高运动状态下月球车的姿态对准精度。此外天文/无线电组合导航方法也是一种可有效提升导航精度的方法,利用轨道器与着陆器之间的相对距离和速度与天文信息相结合,可提高深空探测器在交会对接时导航的精度^[89]。

4 深空探测器自主天文导航方法展望

虽然现有的系统误差抑制技术和组合导航方法可在一定程度上提升自主天文导航定位精度,但二者都会带来新的问题,如扩维滤波方法会引起计算量大、空间差分方法需要多个载体同时进行观测、时间差分技术会引入新的滤波估计问题、组合导航方法会引入信息融合的难题。因此探索基于新型导航原理的天文量测量,作为现有自主天文导航方法的补充,成为深空探测器自主天文导航方法的重要研究内容。

4.1 基于太阳圆面速度差的天文导航方法

在天文测速导航的研究过程中发现,传统太阳多普勒测速导航方法中通常都是将太阳看作一个点,而实际上当探测器距离太阳较近时观测到的太阳是一个圆盘,并且探测器从不同的角度观测到的太阳圆面上不同位置处的多普勒速度是不同的(图4给出太阳圆面上不同点的速度分布),其速度信息与探测器位置存

在确定的函数关系。针对这一现象, 基于太阳圆面速度差新型天文导航方法利用光谱仪测量太阳圆面上不同点的多普勒速度, 以它们之间的速度差作为量测量来估计探测器的位置信息 (图5)。仿真结果表明考虑太阳光谱扰动引起的系统误差时, 基于太阳圆面速度差的导航方法的定位误差仅为基于太阳多普勒速度天文导航方法的6%, 表明该方法可有效抑制由于太阳光谱扰动引起的系统误差。此外, 虽然该方法可以得到速度信息, 但无法直接提供位置信息, 而太阳视方向可提供探测器的位置信息。考虑2种方法之间的互补特性, 基于太阳圆面速度差/太阳视方向的组合导航方法^[90]仿真结果表明, 基于太阳圆面速度差/太阳视方向组合导航方法的精度比仅基于太阳视方向的导航方法提升了16.0%, 比仅基于太阳圆面速度差的导航方法提高了10.2%, 有效提升了太阳探测器的导航性能。

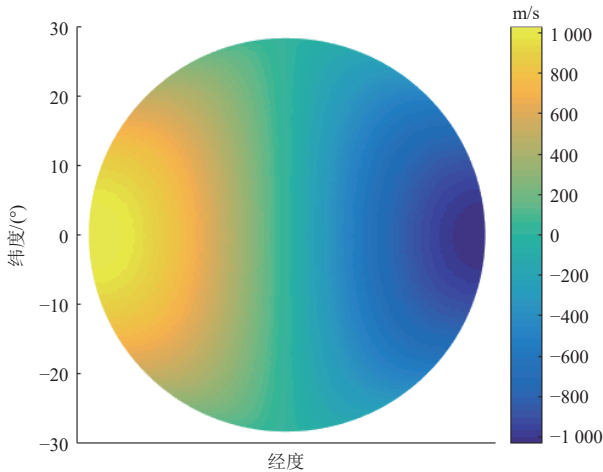


图 4 太阳圆盘上不同点径向速度的分布

Fig. 4 Doppler velocity of different points on the solar disk

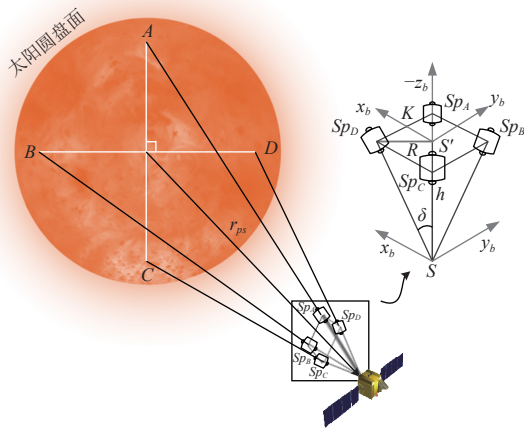


图 5 光谱仪测量太阳圆盘面径向速度^[91]

Fig. 5 Schematic diagram of measuring radial velocity on the solar disk surface with a spectrometer^[91]

4.2 基于太阳震荡时间延迟的天文导航方法

近年来, 太阳震荡得到了人们的广泛重视, 是当今天体物理学最活跃的研究领域之一, 美国和中国都先后开展了针对太阳探测的任务。研究了包括太阳震荡和太阳光谱等在内的一系列太阳活动现象^[92-96]。基于太阳震荡的导航方法也引起了一些学者的注意^[97-98]。

太阳震荡时间延迟导航基本原理如图6所示^[99]。该方法利用2个原子鉴频仪分别测量探测器直接接收到太阳震荡的时刻和接收到被反射的太阳震荡的时刻之差来确定探测器相对太阳的位置。由于在此期间发生太阳震荡的时间、探测器接收到直射太阳震荡的时间、经过反射天体反射的时间和接收到反射太阳震荡的时间都不同, 对应的太阳、探测器和反射天体的位置也不同。笔者根据探测器和反射天体在发生太阳震荡时刻, 接收到直射太阳震荡的时刻和接收到被反射的太阳震荡时刻的几何关系建立了系统量测模型, 仿真结果表明, 针对火星探测器转移轨道, 基于太阳震荡时间延迟的导航方法的定位误差可以达到3.55 km, 对火星环绕轨道定位误差可达1.76 km, 大大提升了火星探测器的导航性能。

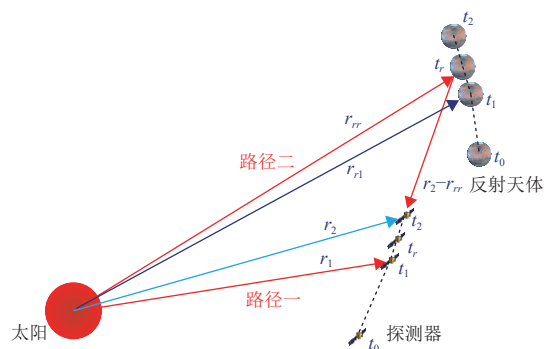


图 6 太阳震荡时间延迟量测模型

Fig. 6 Basic principle of time delay measurement model

在太阳震荡时间延迟导航方法的系统误差抑制方面, 提出了一种天文测角/时间延迟组合导航方法^[100], 仿真结果表明所提方法的平均位置误差1.46 km, 是仅利用天文测角导航方法定位误差的8%, 可有效抑制由于测量误差, 探测器与反射天体间距离等因素对导航定位精度的影响。针对反射天体星历误差对定位精度的影响, 在线估计反射天体位置和速度的天文测角/时间延迟组合导航方法^[101], 同时为了减少系统计算量和运行时间, 还提出了一种基于事件触发的IUKF方法, 仿真结果表明, 与传统天文测角/时间延迟组合导航相比, 所提方法的位置和速度精度分别提升61%和67%。针对由仪器测量、轨道递推引起的量测误差和

反射天体星历误差引起的系统量测模型误差时变的问题,提出了一种变分贝叶斯隐式卡尔曼滤波方法^[102],通过在线估计量测误差方差阵来进一步抑制由量测误差时变引起的系统误差。仿真结果表明,该方法的定位精度优于传统的IUKF算法,且新方法的定位精度几乎不受初始量测误差方差阵影响。

根据上述分析可知,虽然目前已经有学者针对新型天文量测进行了一些探索,但对这些基于新型天文量测自主导航方法的系统误差分析、应用范围和相应系统的研制等方面仍需要进行深入研究。此外,当前深空探测器自主天文导航方法主要是以恒星和行星作为观测目标,以可见光作为观测谱段。未来,新型自主天文导航方法可采用紫外、红外、多光谱、X射线等敏感器,观测目标源可以扩展至宇宙微波背景辐射等,因此针对新型天文量测的可行性研究也是自主天文导航方法值得探索的前沿课题。

5 结束语

作为无线电测控导航的重要补充,自主天文导航方法受到了国内外学者的高度关注,本文重点介绍了当前深空探测器自主天文导航方法的研究现状。分析了现有自主天文导航方法面临的问题,总结了自主天文导航方法的关键技术,并对未来自主天文导航的发展进行了展望。分析结果可为未来深空探测器自主天文导航系统设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] STANTON R, OHTAKAY H, MILLER J, et al. Demonstration of optical navigation measurements on Mariner 10[C]//Proceedings of the 13th Aerospace Sciences Meeting. Pasadena: AIAA, 1975.
- [2] RIEDEL J, OWEN J, STUVE J, et al. Optical navigation during the Voyager neptune encounter[C]//Proceedings of Astrodynamics Conference. Portland: AIAA, 1990.
- [3] ANTREASIAN P, ARDALAN S, CRIDDLE K, et al. Orbit determination processes for the navigation of the Cassini-Huygens mission[C]//Proceedings of Space Ops 2008 Conference. Heidelberg: JPL, 2008.
- [4] MACKENZIE R, SALVADOR D L, MILLIGAN D, et al. Orbit determination of the Smart-1 mission[C]//Proceedings of the 18th International Symposium on Space Flight Dynamics. Munich, Germany: JPL, 2004.
- [5] 杨孟飞, 代树武, 王颖, 等. 太阳空间探测进展与展望[J]. *中国空间科学技术*, 2022, 42(5): 1-10.
YANG M F, DAI S W, WANG Y, et al. Progress and prospect of solar exploration in space[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(5): 1-10.
- [6] FARAHANIFAR M, ASSADIAN N. Integrated magnetometer-horizon sensor low-Earth orbit determination using UKF[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 106: 13-23.
- [7] 房建成, 宁晓琳, 刘劲. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 第二版, 北京: 国防工业出版社, 2017.
FANG J C, NING X L, LIU J. Principles and method of spacecraft celestial navigation[J]. 2nd Edition, Beijing: National Industrial Press, 2017.
- [8] DUXBURY T C, BORN G, JERATH N. Viewing phobos and deimos for navigating mariner 9[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1974, 11(4): 215-222.
- [9] ROURKE K, ACTON C, BRECKENRIDGE W, et al. The determination of the interplanetary orbits of Vikings 1 and 2[C]//Proceedings of the 15th Aerospace Sciences Meeting. Los Angeles: AIAA, 1977.
- [10] ANTREASIAN P, ARDALAN S, BORDI J, et al. Cassini orbit determination results january 2006-end of prime mission[C]//Proceedings of AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. Honolulu: AIAA, 2008.
- [11] BHASKARAN S, DESAI S, DUMONT P, et al. Orbit determination performance evaluation of the deep space 1 autonomous navigation system[C]//Proceedings of the 8th Annual Space Flight Mechanics Meeting. California: AIAA, 1998.
- [12] STANBRIDGE D, WILLIAMS K, WILLIAMS B, et al. Lucy: Navigating a Jupiter trojan tour[C]//Proceeding of AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference. Stevenson: AIAA, 2017.
- [13] LESSAC-CHENEN E J, ADAM C D, NELSON D, et al. Optical navigation operations and preparations for the lucy trojan-asteroid mission[C]//Proceedings of AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego: AIAA, 2022.
- [14] WILLIAMS B, ANTREASIAN P, CARRANZA E, et al. OSIRIS-REx flight dynamics and navigation design[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(4): 69.
- [15] LORENZ D A, OLDS R, MAY A, et al. Lessons learned from OSIRIS-REx autonomous navigation using natural feature tracking[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2017.
- [16] ATCHISON J A, ABRAHAMSON M, OZIMEK M T, et al. Double asteroid redirection test (DART) mission design and navigation for low energy escape[C]//Proceeding of the 69th International Astronautical Congress. Bremen: IAC, 2018.
- [17] ADAMS E, O'SHAUGHNESSY D, REINHART M, et al. Double asteroid redirection test: the Earth strikes back[C]//Proceedings of 2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2019.
- [18] MCQUAIDE M, ATCHISON J, BELLEROSE J, et al. Double Asteroid Redirection Test(DART) phase D mission design & navigation analysis[C]//Proceedings of the 7th IAC Planetary Defense Conference. Vienna: IAC, 2021.
- [19] FOING B H, RACCA G D, MARINI A, et al. SMART-1 Mission to the Moon: Status, First Results and Goals[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 6-13.
- [20] MARINI A E, RACCA G D, FOING B H. SMART-1 technology preparation for future planetary missions[J]. *Advances in Space Research*, 2002, 30(8): 1895-1900.
- [21] 黄欣, 王立, 卢欣. 嫦娥一号卫星紫外月球敏感器[J]. *空间控制技术与应用*, 2021, 34(1): 51-55.
HUANG X, WANG L, LU X. An ultraviolet lunar sensor for CE-1 spacecraft[J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 34(1): 51-55.

- [22] 叶培建. 嫦娥一号卫星的技术进步点[J]. 中国航天, 2008(4): 9-12.
YE P J. Chang'e 1 technical progress points[J]. Aerospace China, 2008(4): 9-12.
- [23] 王立, 吴奋陟, 梁潇. 我国深空探测光学传感器技术发展与应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 33-38.
WANG L, WU F S, LIANG X. Technical development and application of China deep space exploration optical sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(5): 33-38.
- [24] 于萍, 张洪华, 李骥, 等. 嫦娥五号着陆上升组合体 GNC 系统设计与实现[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(7): 763-777.
YU P, ZHANG H H, LI J, et al. Design and implementation of GNC system of lander and ascender module of Chang'e-5 spacecraft[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2021, 51(7): 763-777.
- [25] 强祺昌, 林宝军, 刘迎春, 等. 深空探测自主导航技术综述[J]. 导航与控制, 2023, 22(1): 19-32.
QIANG Q C, LIN B J, LIU Y C, et al. Review of autonomous navigation technology for deep space exploration[J]. Navigation and Control, 2023, 22(1): 19-32.
- [26] MITCHELL J W, HASSOUNEH M, WINTERNITZ L, et al. SEXTANT-station explorer for X-ray timing and navigation technology[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Kissimmee, Florida: AIAA, 2015.
- [27] HANSON J E. Principles of X-ray navigation[M]. Stanford: Stanford University, 1996.
- [28] CHESTER T J, BUTMAN S A. Navigation using X-ray pulsars: 81N27129[R]. Pasadena, CA: JPL, 1981.
- [29] DOWNS G S. Interplanetary Navigation using pulsating radio sources: 74N34150[R]. Pasadena, CA: JPL, 1974.
- [30] SHEIKH S I, PINES D J, RAY P S, et al. Spacecraft navigation using X-ray pulsars[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(1): 49-63.
- [31] SHEIKH S I, PINES D J, RAY P S, et al. The use of X-ray pulsars for spacecraft navigation[J]. Advances in the Astronautical Science, 2005, 119(1): 105-119.
- [32] SHEIKH S I. The use of variable celestial X-ray sources for spacecraft navigation[M]. Baltimore: University of Maryland, 2005.
- [33] GENDREAU K C, ARZOUMANIAN Z, OKAJIMA T. The Neutron star Interior Composition Explorer(NICER): an Explorer mission of opportunity for soft x-ray timing spectroscopy[C]//Proceedings of Be X-Ray Binary Systems (BeXRB) 2014 Workshop. Valencia: NASA, 2012.
- [34] WANG Y D, ZHENG W, ZHANG S, et al. Review of X-ray pulsar spacecraft autonomous navigation[EB/OL]. (2023-3-14)[2023-4-1]https://pdf.sciencedirectassets.com/274151/AIP/1-s2.0-S1000936123000584/main.pdf?.
- [35] 帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 等. X射线脉冲星导航原理[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1538-1543.
SHUAI P, CHEN S L, WU Y F, et al. Navigation principle using X-ray pulsars[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1538-1543.
- [36] 帅平, 李明, 陈绍龙. X射线脉冲星导航系统原理与方法[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [37] 帅平, 陈绍龙, 吴一帆. X射线脉冲星导航技术研究进展[J]. 空间科学学报, 2007, 27(2): 169-176.
SHUAI P, CHEN S L, WU Y F. Research progress of X-ray pulsar navigation technology[J]. Chinese Journal of Space Science, 2007, 27(2): 169-176.
- [38] LIU J, MA J, TIAN J. Pulsar/CNS integrated navigation based on federated UKF[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(4): 675-681.
- [39] JIN L, JIE M, JINWEN T. CNS/pulsar integrated navigation using two-level filter[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(2): 265-269.
- [40] LIU J, KANG Z W, WHITE P, et al. Doppler/XNAV-integrated navigation system using small-area X-ray sensor[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, 5(9): 1010-1017.
- [41] LIU J, FANG J CHENG, LIU G, et al. Fractional differentiation-based observability analysis method for nonlinear X-ray pulsar navigation system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2018, 232(8): 1467-1478.
- [42] LIU J, FANG J C, KANG Z W, et al. Novel algorithm for X-ray pulsar navigation against doppler effects[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(1): 228-241.
- [43] KAI X, CHUNLING W, LIANGDONG L. The use of X-ray pulsars for aiding navigation of satellites in constellations[J]. Acta Astronautica, 2009, 64(4): 427-436.
- [44] XIONG K, WEI C, LIU L. Robust multiple model adaptive estimation for spacecraft autonomous navigation[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 42: 249-258.
- [45] NING X, YANG Y, LI Z, et al. Ephemeris corrections in celestial/pulsar navigation using time differential and ephemeris estimation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2018, 41(1): 268-275.
- [46] NING X, YANG Y, GUI M, et al. Pulsar navigation using time of arrival(TOA) and time differential TOA (TDTOA)[J]. Acta Astronautica, 2018, 142: 57-63.
- [47] HUANG L, SHUAI P, ZHANG X, et al. Pulsar-based navigation results: data processing of the x-ray pulsar navigation-I telescope[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2019, 5(1): 018003.
- [48] 贾淑梅, 黄跃, 马想, 等. 硬 X 射线调制望远镜卫星科学观测应用初步评价[J]. 航天器工程, 2018, 27(5): 167-174.
JIA S M, HUANG Y, MA X, et al. Preliminary evaluation for scientific observations application of HXMT satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(5): 167-174.
- [49] ZHANG S, ZHANG S, LU F, et al. The insight-HXMT mission and its recent progresses[C]//Proceedings of Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray. Texas: SPIE, 2018.
- [50] HONG J, ROMAINE S, NITTLER L, et al. CubeSat X-ray telescope (CubeX) for lunar elemental abundance mapping and millisecond X-ray pulsar navigation[C]//Proceedings of the 49th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: USRA, 2018.
- [51] 张伟, 许俊, 黄庆龙, 等. 深空天文自主导航技术发展综述[J]. 飞控与探测, 2020, 3(4): 8-16.
ZHANG W, XU J, HUANG Q L, et al. Survey of autonomous celestial navigation technology for deep space[J]. Flight Control & Detection, 2020, 3(4): 8-16.
- [52] 房建成, 宁晓琳, 马辛, 等. 深空探测器自主天文导航技术综述[J]. 飞控与探测, 2018, 1(1): 1-15.
FANG J C, NING X L, MA X, et al. A survey of autonomous

- astronomical navigation technology for deep space detectors[J]. *Flight Control & Detection*, 2018, 1(1): 1-15.
- [53] 尤伟. 深空探测天文测速导航多矢量融合机理与估计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
YOU W. Multi-vector integration and estimation of celestial velocity measurement navigation in deep space exploration[D]. Harbin: Harbin institute of Technology, 2020.
- [54] FRANKLIN R, BIRX D. A study of natural electromagnetic phenomena for space navigation[J]. *Proceedings of the IRE*, 1960, 48(4): 532-541.
- [55] GUO Y. Self-contained autonomous navigation system for deep space missions[J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 1999, 102(2): 1099-1113.
- [56] GUO Y. Method and apparatus for autonomous solar navigation: AU20010029273[P]. USA: [s. n.], 2003.
- [57] YIM J R. Autonomous spacecraft orbit navigation[D]. Texas: Texas A&M University, 2002.
- [58] YIM J R, CRASSIDIS J L, JUNKINS J L. Autonomous orbit navigation of interplanetary spacecraft[J]. *Proceedings of Astrodynamics Specialist Conference*. Denver: AIAA, 2000.
- [59] 张伟, 陈晓, 尤伟, 等. 光谱红移自主导航新方法[J]. *上海航天*, 2013, 30(2): 32-33.
ZHANG W, CHEN X, YOU W, et al. New autonomous navigation method based on redshift[J]. *Aerospace Shanghai*, 2013, 30(2): 32-33.
- [60] 张伟, 张恒. 天文导航在航天工程应用中的若干问题及进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(3): 204-213.
ZHANG W, ZHANG H. Research on problems of celestial navigation in space engineering[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(3): 204-213.
- [61] 尤伟, 张伟, 马广富. 深空天文测速自主导航速度矢量合成误差传递分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2017, 25(3): 338-342.
YOU W, ZHANG W, MA G F. Analysis on error propagation in velocity vector synthesis of deep-space celestial autonomous navigation based on radial velocity measurement[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(3): 338-342.
- [62] 张恒, 张伟, 陈晓. 深空测角测速组合导航系统时间配准方法研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(4): 373-378.
ZHANG H, ZHANG W, CHEN X. Study on deep space time registration method of integrated navigation system based on celestial angle and velocity measurements[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(4): 373-378.
- [63] LIU J, WANG T, NING X L, et al. Modelling and analysis of celestial Doppler difference velocimetry navigation considering solar characteristics[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(12): 1897-1904.
- [64] NING X L, GUI M Z, FANG J C, et al. A novel differential Doppler measurement-aided autonomous celestial navigation method for spacecraft during approach phase[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(2): 587-597.
- [65] ZHANG W, YANG Y, YOU W, et al. Autonomous navigation method and technology implementation of high-precision solar spectral velocity measurement[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65(8): 289606.
- [66] MA X, NING X L, FANG J C. Analysis of orbital dynamic equation in navigation for a Mars gravity-assist mission[J]. *The Journal of Navigation*, 2012, 65(3): 531-548.
- [67] 李卓. 深空探测器接近/捕获段自主天文导航误差分析与处理[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2016.
LI Z. Error analysis and treatment for deep space celestial navigation during approach/capture phase[D]. Beijing: Beihang University, 2016.
- [68] 王融, 熊智, 刘建业, 等. 一种星敏传感器安装误差标定模型仿真研究[J]. *系统仿真技术*, 2013, 9(4): 287-291, 298.
WANG R, XIONG Z, LIU J Y, et al. Study on installation error calibration model simulation of star sensor[J]. *System Simulation Technology*, 2013, 9(4): 287-291, 298.
- [69] BHASKARAN S, RIEDEL J, SYNNOTT S, et al. The Deep Space 1 autonomous navigation system-A post-flight analysis[C]//*Proceedings of Astrodynamics Specialist Conference*. Denver, CO: AIAA, 2000.
- [70] WANG Y, ZHENG W, SUN S, et al. X-ray pulsar-based navigation using time-differenced measurement[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, 36: 27-35.
- [71] LEAN J. Variations in the Sun's radiative output[J]. *Reviews of Geophysics*, 1991, 29(4): 505-535.
- [72] GREC G, FOSSAT E, POMERANTZ M. Solar oscillations: full disk observations from the geographic south pole[J]. *Nature*, 1980, 288(5791): 541-544.
- [73] 刘宇飞. 深空自主导航方法研究及在接近小天体中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LIU Y F. Study on the deep space autonomous navigation method and its application in approaching the small celestial bodies[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [74] 郑伟, 王禹淞, 姜坤, 等. X射线脉冲星导航方法研究综述[J]. *航空学报*, 2023, 44(3): 527451.
ZHENG W, WANG Y S, JIANG K, et al. overview of X-ray pulsar-based navigation methods[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(3): 527451.
- [75] LIU J, MA J, TIAN J, et al. Pulsar navigation for interplanetary missions using CV model and ASUKF[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 22(1): 19-23.
- [76] LIU J, MA J, TIAN J WEN, et al. X-ray pulsar navigation method for spacecraft with pulsar direction error[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(11): 1409-1417.
- [77] WANG Y, ZHENG W, SUN S, et al. X-ray pulsar-based navigation system with the errors in the planetary ephemerides for Earth-orbiting satellite[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(12): 2394-2404.
- [78] 徐周. GPS 差分定位技术及实现方法的研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
XU Z. A study of GPS differential positioning technology and realization method[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006.
- [79] LIU J, FANG J C, LIU G. Solar frequency shift-based radial velocity difference measurement for formation flight and its integrated navigation[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 30(5): 04017049.
- [80] 宁晓梁, 梁晓钰, 吴伟仁, 等. 月球探测器天文测角/单程无线电时间差分测距/差分测速导航方法[J]. *航空学报*, 2021, 42(11): 129-138.
NING X L, LIANG X Y, WU W R, et al. Lunar probe navigation based on celestial angle measurement, one-way radio time-differenced distance and time-differenced velocity measurement[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(11): 129-138.

- [81] NING X, GUI M, FANG J, et al. Differential X-ray pulsar aided celestial navigation for Mars exploration[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 62: 36-45.
- [82] CUI P, WANG S, GAO A, et al. X-ray pulsars/Doppler integrated navigation for Mars final approach[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(9): 1889-1900.
- [83] CHEN X, SUN Z, ZHANG W, et al. A novel autonomous celestial integrated navigation for deep space exploration based on angle and stellar spectra shift velocity measurement[J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2555.
- [84] LIU J, NING X, LIN MA X, et al. Direction/distance/velocity measurements deeply integrated navigation for venus capture period[J]. *Journal of Navigation*, 2018, 71(4): 861-877.
- [85] HE Z, WANG X, FANG J. An innovative high-precision SINS/CNS deep integrated navigation scheme for the Mars rover[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, 39: 559-566.
- [86] ZHAO Y, WANG X, LI Q, et al. A high-accuracy autonomous navigation scheme for the Mars rover[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 154: 18-32.
- [87] LU J, LEI C, YANG Y, et al. In-motion initial alignment and positioning with INS/CNS/ODO integrated navigation system for lunar rovers[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(12): 3070-3079.
- [88] 王卫华, 谭天乐, 贺亮. 基于组合导航的月面起飞自主对准技术[J]. *载人航天*, 2014, 20(4): 296-300.
WANG W H, TAN T L, HE L. Initial alignment calibration off the lunar surface based on combination navigation[J]. *Manned Spaceflight*, 2014, 20(4): 296-300.
- [89] NING X, CHAO W, HUANG Y, et al. Spacecraft autonomous navigation using the Doppler velocity differences of different points on the solar disk[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(6): 4615-4625.
- [90] 宁晓琳, 黄玉琳, 晁雯. 航天器太阳圆面速度差/太阳视方向组合导航[J]. *航空学报*, 2020, 41(9): 271-280.
NING X L, HUANG Y L, CHAO W. Integrated navigation of solar disk velocity difference and sun direction for spacecraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(9): 271-280.
- [91] 晁雯. 基于太阳圆面速度差的新型天文导航方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2019.
CHAO W. Spacecrafts celestial navigation method using the doppler velocity differences of different points on the solar disk[D]. Beijing: Beihang University, 2019
- [92] EYLES C J, HARRISON R A, DAVIS C J, et al. The heliospheric imagers onboard the STEREO mission[J]. *Solar Physics*, 2009, 254(2): 387-445.
- [93] PESNELL W D, THOMPSON B J, CHAMBERLIN P C. The solar dynamics observatory(SDO)[J]. *Solar Physics*, 2012, 275(1-2): 3-15.
- [94] FOX N J, VELLI M C, BALE S D, et al. The solar probe plus mission: humanity's first visit to our star[J]. *Space Science Reviews*, 2016, 204(1-4): 7-48.
- [95] BALOGH A, BEEK T J, FORSYTH R J, et al. The magnetic field investigation on the Ulysses mission-instrumentation and preliminary scientific results[J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1992, 92: 221-236.
- [96] DOMINGO V, FLECK B, POLAND A I. The SOHO mission: an overview[J]. *Solar Physics*, 1995, 162(1): 1-37.
- [97] LIU J, FANG J C, LIU G, et al. Solar flare TDOA navigation method using direct and reflected light for Mars exploration[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(5): 2469-2484.
- [98] ZHANG W. A study of the navigation technology and application based on astronomical spectral velocity measurement[J]. *Navigation and Control*, 2020, 19(5/4): 64-73.
- [99] NING X L, GUI M Z, FANG J C, et al. A novel autonomous celestial navigation method using solar oscillation time delay measurement[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1392-1403.
- [100] NING X, GUI M, ZHANG J, et al. Solar oscillation time delay measurement assisted celestial navigation method[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 134: 152-158.
- [101] GUI M Z, ZHAO D, NING X L, et al. A time delay/star angle integrated navigation method based on the event-triggered implicit unscented kalman filter[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-10.
- [102] GUI M Z, YANG H, NING X L, et al. Variational Bayesian implicit unscented Kalman filter for celestial navigation using time delay measurement[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(1): 756-767.

作者简介:

宁晓琳(1979-), 女, 教授, 主要研究方向: 航天器自主导航方法; 极弱磁功能成像、信号处理及医学应用。

通信地址: 北京市海淀区学院路39号北京航空航天大学(100019)

E-mail: ningxiaolin@buaa.edu.cn

杨雨青(1991-), 女, 博士生, 主要研究方向: 深空探测器自主天文导航方法、自适应滤波技术。**本文通信作者。**

通信地址: 北京市海淀区学院路39号北京航空航天大学(100019)

E-mail: yuqingyang@buaa.edu.cn

The Progress of Autonomous Celestial Navigation for Deep Space Spacecraft

NING Xiaolin¹, YANG Yuqing¹, FANG Jiancheng¹, WU Weiren^{2,3}

(1. School of Instrumentation Science & Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Future Aerospace Technology, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Lunar Exploration and Space Program Center, China National Space Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: In response to the urgent needs of deep space explorer for autonomous celestial navigation, this paper briefly introduces the research status of autonomous celestial navigation methods and summarizes the problems faced by current autonomous celestial navigation methods. As the error sources of the celestial navigation system is multiple and time-varying, two error suppression technologies based on augmented filtering and differential are expound in detail. In view of the limitations of the existing autonomous celestial navigation methods, the autonomous celestial integrated navigation methods are introduced in detail. Finally, the future development trend of the celestial navigation method for the deep space spacecraft is prospected.

Keywords: deep space exploration; autonomous navigation; celestial navigation; time difference; time delay

Highlights:

- The research status of autonomous celestial navigation methods is introduced and two problems faced by the celestial navigation method are summarized in this paper.
- Two error suppression technologies are expounded in detail, including the augmented filtering method and method using differential measurements.
- A new celestial navigation method based on the Doppler velocity differences of different points on the solar disk and a novel celestial navigation method based on solar oscillation time delay are introduced, which can be seen as a supplement to the existing celestial navigation.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]