

X 射线脉冲星导航技术研究进展^{*}

帅 平 陈绍龙 吴一帆 张春青 李 明

(中国空间技术研究院 北京 100094)

摘 要 X 射线脉冲星能够为近地轨道、深空和星际空间飞行航天器提供位置、速度、时间和姿态等丰富的导航信息,实现航天器高精度自主导航和运行管理,有着巨大的发展潜力.本文论述了 X 射线脉冲星导航技术研究历程;重点研究了 X 射线脉冲星导航的基本原理、信息处理流程和自主导航算法,进而提出了脉冲星导航的关键技术;分析了国内脉冲星观测研究的基础条件,以及开展 X 射线脉冲星导航技术研究的必要性和可行性.

关键词 自主导航;脉冲星; X 射线; 脉冲到达时间; 脉冲轮廓; 鲁棒滤波

中图法分类号 V 448, P 145

Advance in X-Ray Pulsar Navigation Technology

SHUAI Ping CHEN Shaolong WU Yifan ZHANG Chunqing LI Ming

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

Abstract The pulsars are the result of a massive star that has exhausted its nuclear fuel and undergone a core-collapse resulting in a supernova explosion. Its radius is roughly 10 km and mass near 1.4 solar. There are the very strong gravitational, electronic and magnetic fields for the pulsar. The pulsar might emit in the radio, infrared, visible, ultraviolet, X-ray and gamma-ray of the spectrum. Meanwhile, the navigation parameters for the spacecraft on the low earth orbit, deep space and interplanetary flight can, including the position, velocity, attitude and time, be determined highly-accurately by detecting the X-ray radiation of pulsars. And then the spacecrafts are able to flight and operate autonomously. Therefore, the potential of using the X-ray Pulsar Navigation (XPNAV) is very high. Firstly, the history of XPNAV is described briefly in this paper. Secondly, the basic principles, information flow charts and autonomous navigation algorithms are studied in detail as an main part. Moreover the key techniques of XPNAV, including the all-sky surveying and data processing for the X-ray pulsars, pulse-arrival-time measuring and error correcting, X-ray detector and weak signal processing, establishment and maintenance of the space-time reference, and robust filtering of the autonomous information processing, are also presented. Finally, the essentiality and feasibility to study XPNAV are also shown in some detail.

Key words Autonomous navigation, Pulsar, X-ray, Arrival time of pulse, Pulse profile, Robust filtering

^{*} 中国空间技术研究院自主研发基金资助 (CAST-WK0611)

2006-08-21 收到原稿, 2006-12-28 收到修定稿

1 引言

脉冲星是大质量恒星演化、坍缩、超新星爆发的遗迹,是一种具有极端物理条件的天体.脉冲星属于高速自转的中子星,具有极其稳定的周期性,毫秒级脉冲星的自转周期变化率达到 $10^{-19} \sim 10^{-21}$,被誉为自然界最稳定的天文时钟^[1].脉冲星在射电、红外、可见光、紫外、X射线或 γ 射线等频段具有信号辐射.X射线属于高能光子,集中了脉冲星的绝大部分辐射能量,易于小型化设备探测与处理,可以在大气层外飞行的航天器上探测到.

2004年,美国国防部国防预先研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出“基于X射线源的自主导航定位验证(X-ray Navigation and Autonomous Positioning Verification, XNAV)”计划^[2].该计划分为可行性论证、原理样机研制和飞行演示验证等三个阶段,将于2009年在国际空间站上安装X射线探测器系统,对硬件接口、导航算法、关键技术和性能指标等进行飞行试验.DARPA的最终目标是建立一个能够提供定轨精度10m、定时精度1ns和测姿精度3arcsec的脉冲星导航网络,以满足未来航天任务从近地轨道、深空至星际空间的全程高精度自主导航应用需求.

X射线脉冲星导航技术研究属于基础性、前瞻性和战略性研究课题,具有重要的学术理论研究意义和实际工程应用价值.本文将概述脉冲星导航技术研究历程,重点研究基于X射线脉冲星的卫星自主导航原理和算法,提出X射线脉冲星导航的关键技术.同时分析国内研究的基础条件,以及开展此项研究的必要性和可行性.

2 X射线脉冲星导航技术研究历程

1967年,英国剑桥大学的Hewish等发现了第一颗射电脉冲星^[3].1974年,Downs首次提出基于射电脉冲星的航天器自主轨道确定方法,并概算定轨精度达到150km^[4].该方法要求探测设备天线口径为25m,信号积分时间长达24h.而绝大部分天体辐射及银河系散射信号分布于整个射电频段,掩盖了微弱的脉冲星射电信号,不利于有用信号的检测、提取和噪声剔除.对于红外、可见光和紫外辐射的脉冲星,数量稀少,光度较低,需要大口径的

望远镜以及较高的指向精度和信号处理技术^[5].显然,脉冲星的射电和光学频段辐射信号都不宜用于航天器导航.

1976年,美国的天文观测卫星Ariel-5首次观测到脉冲星的X射线辐射信号^[6].1981年,Chester和Butman提出利用脉冲星X射线源为航天器导航的构想^[7].X射线集中了脉冲星的绝大部分辐射能量,易于设备探测和信号处理,缩短信号积分时间,提高脉冲到达时间测量的分辨率;尤其是它有利于设计小型化探测设备,探测器面积小于1m²,使装备航天器应用成为可能.

1993年,Wood设计了非常规恒星特征试验(Unconventional Stellar Aspect experiment, USA),继承了传统天文导航掩星方法,对利用X射线源的航天器轨道和姿态确定以及时间保持进行了综合研究^[8].此后,Hanson针对USA试验做了深入细致的研究工作,提出了基于X射线源的航天器姿态测量算法和时间保持锁相环路设计方案,仿真姿态测量精度达到0.01°,利用单颗脉冲星信号的时间保持误差小于1.5ms.1999年2月23日,搭载USA试验设备的高技术研究与全球观测卫星(Advanced Research and Global Observation Satellite, ARGOS)被发射进入轨道高度840km,倾角98°的太阳同步轨道^{[9],[10]}.在此后的18个月时间里,USA的X射线探测器采集了大量观测数据,分别用于包括X射线源导航在内的4大主题项目研究^[11].USA试验采用2台双轴平台式准直型气体正比计数探测器,探测X射线能量范围为1~15keV,探测器的有效面积为0.1m²,视场为1.2°×1.2°.2003年,Sheikh^[12]在深入分析研究脉冲星的基本物理特征和现代卫星导航系统体制的基础上,初步论证了基于X射线脉冲星的航天器自主高精度轨道确定的可行性,从而掀起了X射线脉冲星导航研究的热潮,美国、日本、欧盟等国家和组织纷纷拟定相关研究计划,开展理论方法研究、关键技术攻关、原理样机研制和飞行试验验证等方面的工作.

3 基于X射线脉冲星的卫星自主导航原理和算法

3.1 基本原理

X射线脉冲星导航系统由X射线成像仪和光子

计数器(探测器)、星载原子时钟、星载计算设备、导航模型算法库和脉冲星模型数据库组成. 图 1 为 X 射线脉冲星导航原理和信息处理流程. 从图 1 中可以看到, 脉冲星导航定位和姿态测量分别在两个环路中实现. 前者的输入信息为光子计数器提取的脉冲信号和相位, 输出为卫星位置、速度和时间信息; 后者的输入信息为 X 射线成像仪提取的脉冲星角位置, 输出为卫星姿态角分量. 脉冲星导航定位的基本原理和步骤如下.

(1) 脉冲到达时间测量

星载探测器接收 X 射线光子, 光子计数器输出脉冲信号和相位信息; 脉冲信号进入原子时钟的锁相环路, 修正本地时钟漂移, 标定和输出脉冲到达时间 (Time-Of-Arrival, TOA), 记为 T_{sat} .

(2) 脉冲到达时间转换改正

调用基本参数数据库和脉冲星模型数据库, 对

T_{sat} 进行 Roemer 延迟、Shapiro 延迟和其他误差项改正, 转换得到在太阳系质心坐标系中的脉冲到达时间测量值 $T_{\text{SSB}/M}$.

(3) 脉冲到达时间与预报时间对比

调用脉冲星模型数据库, 提取标准脉冲轮廓和脉冲计时模型, 由脉冲计时模型预报脉冲到达时间 $T_{\text{SSB}/\text{pre}}$; 整合测量脉冲轮廓, 并与标准轮廓进行相关处理, 得到脉冲到达时间差 ΔT_{SSB} (基本观测量).

(4) Kalman 滤波处理

利用多颗脉冲星的 ΔT_{SSB} 组成基本观测矢量, 构造脉冲星导航定位测量方程, 调用卫星摄动轨道力学方程、卫星时钟系统状态方程和 Kalman 滤波器, 得到卫星位置、速度和时间偏差估计.

(5) 导航参数预报

利用导航定位偏差估计值, 可以修正卫星近似位置、速度和时间等参数; 采用数值积分和时间递

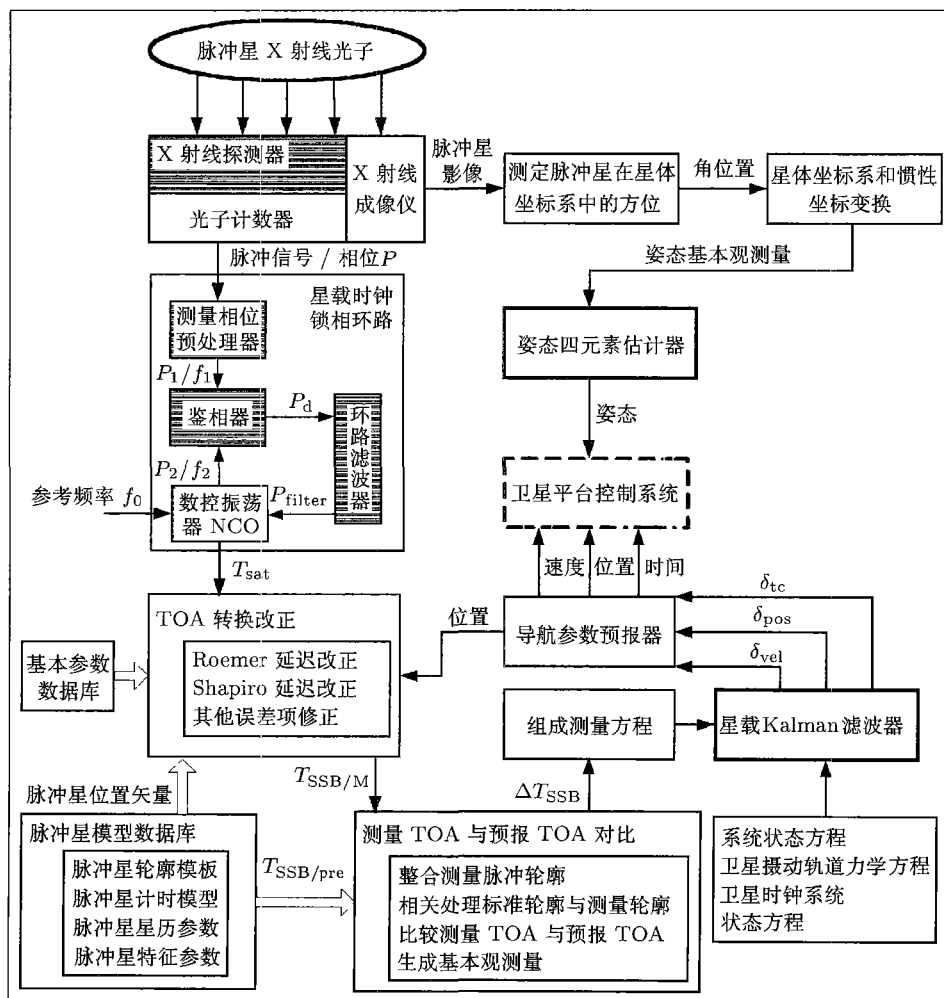


图 1 基于 X 射线脉冲星的卫星自主导航原理

Fig.1 Block diagram for the autonomous navigation of satellite based on X-ray pulsars

推方法短时预报导航参数, 输出到卫星平台控制系统, 自主进行轨道控制和钟差修正.

利用 X 射线脉冲星信号测定卫星姿态的方法与星敏感器类似, 区别在于用 X 射线代替可见光观测. 一旦 X 射线成像仪提取脉冲星影像, 脉冲星在探测器平面和星体坐标系的角位置也就随之确定. 由于脉冲星相对于太阳系质心坐标系的位置单位矢量已精确测定, 因此可以进行星体坐标系与太阳系质心坐标系之间的旋转变换. 于是, 可以直接提取坐标变换的欧拉角信息, 或利用姿态四元素方法进行滤波估计, 最终获得卫星俯仰、滚动和偏航等姿态信息, 并输出到卫星平台控制系统, 自主进行飞行姿态控制.

3.2 自主导航定位算法

X 射线脉冲星导航以太阳系质心坐标系为位置基准, 相应的时间基准为太阳系质心力学时 (Temps Dynamique Barycentrique, TDB). 太阳系质心坐标系原点位于整个太阳系质量中心, X_{SSB} 轴指向 J2000.0 定义的春分点, 在天球赤道面内构成的右手坐标系.

在太阳系质心坐标系中, 卫星 sat、脉冲星 PSR、地球质心 O_e 和太阳质心 O_s 之间的几何关系如图 2

所示. 其中, P 为脉冲星位置单位矢量; α, λ 分别为脉冲星在太阳系质心坐标系中的赤经和赤纬; R_{sat} , R_e 和 $R_{sat/e}$ 分别为在太阳系质心坐标系中的卫星位置矢量、地球位置矢量以及卫星相对于地球的位置矢量; b 为太阳系质心在太阳质心坐标系中的位置矢量. 由于脉冲星距离太阳系达几光年, 因此对于整个太阳系来说, P 可以被视为常矢量.

(1) 系统测量方程

在太阳系质心坐标系中, X 射线脉冲星导航的基本观测量是脉冲星计时模型的预报时间与卫星测量时间之差. 因此, 对于观测历元 t_k , 基于脉冲星 PSR 的导航定位测量方程可以表示为

$$\delta\rho = (\cos\lambda\cos\alpha)\delta x + (\cos\lambda\sin\alpha)\delta y + (\sin\lambda)\delta z + c\delta\tau_p + v. \quad (1)$$

式中,

$$\begin{aligned} \delta\rho = & c\tau_{SSB} - c\tau_{sat} - P(R_e + R'_{sat/e}) - \\ & \frac{1}{2D_0} \{ [P(R_e + R'_{sat/e})]^2 - \|R_e + R'_{sat/e}\|^2 + \\ & 2(P \cdot b)[P(R_e + R'_{sat/e})] - 2[b(R_e + R'_{sat/e})] \} - \\ & \frac{2\mu_s}{c^2} \ln \left[\frac{P(R_e + R'_{sat/e}) + \|R_e + R'_{sat/e}\|}{P \cdot b + \|b\|} + 1 \right] \end{aligned}$$

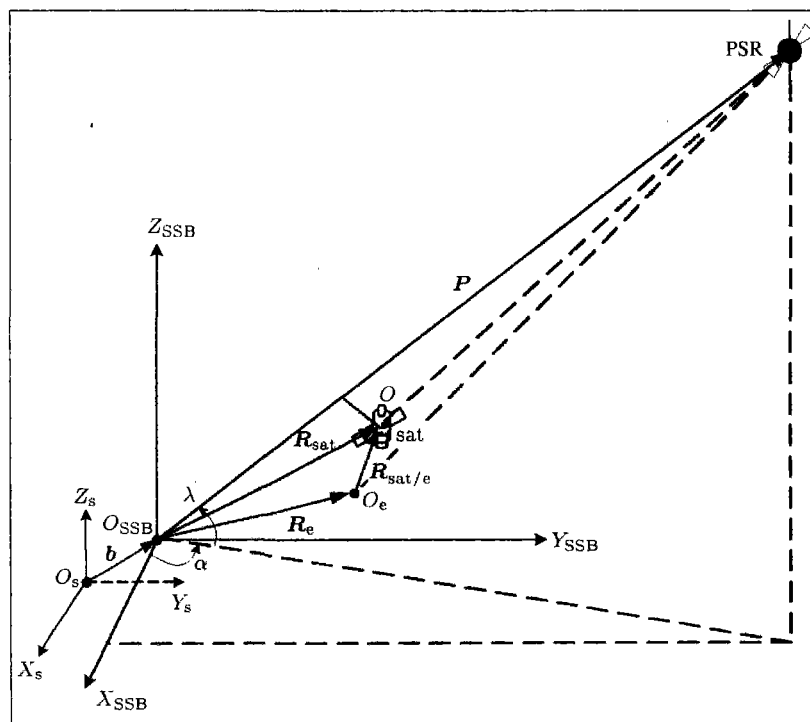


图 2 在太阳系质心坐标系中卫星、脉冲星、地球和太阳质心的几何关系

Fig.2 Geometric relationship among the pulsar, sun, earth and satellite in solar system barycenter

$$-d_{\text{other}}. \quad (2)$$

$$\mathbf{P} = [\cos \lambda \cos \alpha \quad \cos \lambda \sin \alpha \quad \sin \lambda]^T.$$

δx , δy 和 δz 为相对于地球的卫星位置坐标分量偏差; $\delta \tau_\varphi$ 为星载时钟偏差; c 为光速; v 为测量噪声; μ_s 为太阳引力常数; D_0 为太阳质心至脉冲星的距离; $\mathbf{R}'_{\text{sat/e}}$ 为在太阳系质心坐标系中卫星相对于地球的近似位置矢量; d_{other} 为其他误差项修正量; $\|\cdot\|$ 为矢量的模. 式 (2) 右边的第 3 和 4 项称为 Roemer 延迟, 第 5 项称为 Shapiro 延迟.

(2) 系统状态方程

X 射线脉冲星导航系统状态方程包括卫星摄动轨道力学方程和星载时钟状态方程. 前者为非线性连续时变系统, 若考虑高阶项摄动, 则方程的线性化和离散化过程极其复杂; 后者由具体的星载原子时钟系统确定, 通常表示为多项式展开的线性离散系统.

如果卫星轨道力学方程仅考虑地球中心引力和 J_2 摄动项, 其他高阶摄动加速度被视为系统状态控制向量, 这样可以简化方程的线性化过程. 于是, 在惯性坐标系统中线性化的卫星摄动轨道力学方程可以表示为^[13]

$$\delta \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t) \cdot \delta \mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t) \cdot \mathbf{A}(t) + \mathbf{W}(t). \quad (3)$$

式中, $\delta \mathbf{X}(t) = [\delta x \quad \delta y \quad \delta z \quad \delta \dot{x} \quad \delta \dot{y} \quad \delta \dot{z}]^T$, $\mathbf{F}(t)$ 为系统状态矩阵, $\mathbf{G}(t)$ 为高阶摄动加速度输入控制系数矩阵, $\mathbf{A}(t)$ 为高阶摄动加速度矢量, $\mathbf{W}(t)$ 为系统过程噪声矢量.

星载原子钟具有良好的稳定性能, 频率漂移变化缓慢, 确定性的频率漂移可以利用数据库进行周期性补偿, 因此时钟系统状态方程可以表示为^[14]

$$\begin{bmatrix} \delta \tau_\varphi \\ \delta \tau_f \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \tau_\varphi \\ \delta \tau_f \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} w_\varphi \\ w_f \end{bmatrix}_{k-1}. \quad (4)$$

式中, $\delta \tau_\varphi$ 和 $\delta \tau_f$ 分别为卫星时钟偏差 (相位误差) 及频率误差; Δt 为滤波周期; w_φ 和 w_f 分别为时钟相位噪声及频率噪声, 由具体时钟的 Allan 方差确定.

(3) 系统测量噪声和过程噪声的统计特征

测量噪声方差矩阵为对角阵, 可以用脉冲到达时间测量精度来表示. 基于 X 射线源信噪比分析的脉冲到达时间测量精度可以表示为

$$\sigma_{\text{TOA}} = \frac{W_h}{F_x A_e p_f T_{\text{obs}}} \cdot \{[B_x + F_x(1 - p_f)]\}.$$

$$(A_e T_{\text{obs}} d_r) + F_x A_e p_f T_{\text{obs}} \}^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

式中, B_x 为 X 射线背景辐射流量; F_x 为 X 射线脉冲星辐射光子流量; p_f 为在一个脉冲周期内的脉冲辐射流量与平均辐射流量之比; A_e 为探测器的有效面积; T_{obs} 为观测时间; W_h 为脉冲半宽度; d_r 为脉冲宽度与脉冲周期之比.

对于系统过程噪声方差阵, 通常难以直接确定, 或表现为典型的有色噪声过程. 需要采用自适应 Kalman 滤波算法同步估计噪声方差, 或依据时钟 Allan 方差与 Kalman 滤波统计特征参数之间的相互关系, 可以将有色系统噪声转化为零均值的高斯白噪声^{[13],[14]}.

3.3 数值试验结果分析

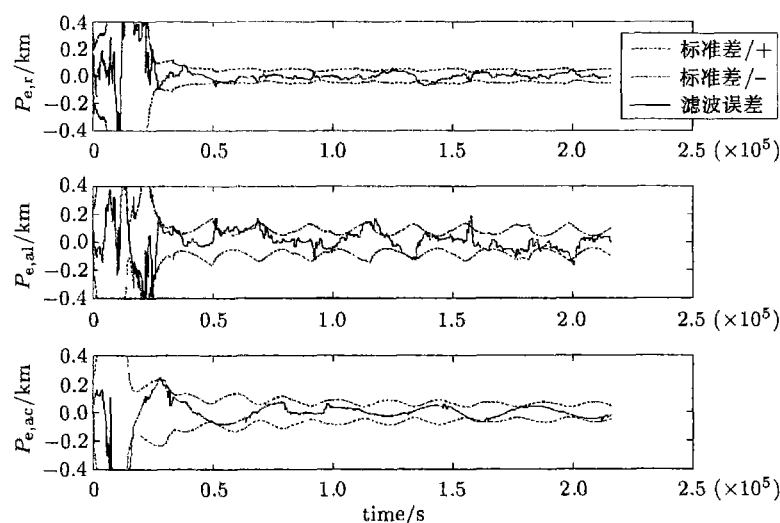
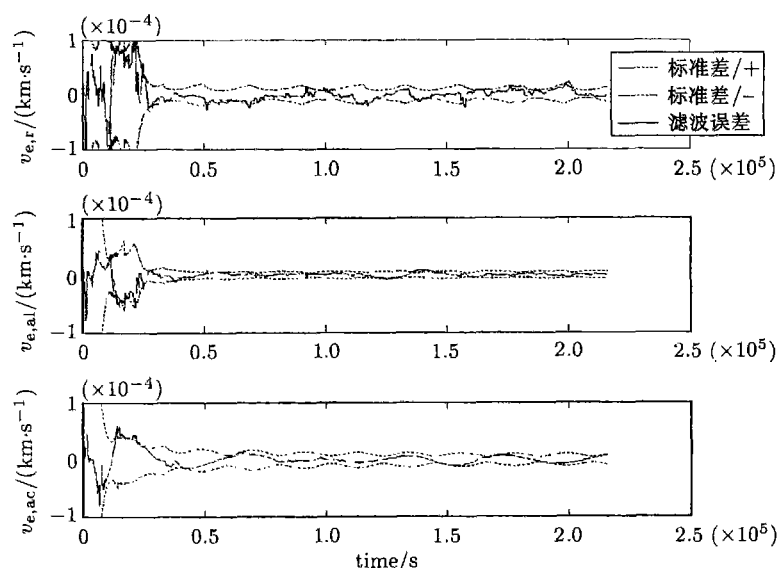
选取 3 颗脉冲星 PSR B05321+21, PSR B1821-24 和 PSR B1737+21, 概算测距精度分别为 109 m, 325 m 和 344 m. 对 GPS 卫星进行导航仿真, 经 Kalman 处理得到 GPS 卫星在 5 个轨道周期 (216 000 s) 内的位置和速度径向、切向和法向误差时间序列及其滤波标准差包络, 分别如图 3 和图 4 所示. 可见, Kalman 滤波动态数据处理过程稳定, 能够不断地修正卫星轨道摄动误差. 统计两个轨道周期后的卫星定轨和测速精度分别达到 75 m, 1.0 cm/s. 若增加探测器有效面积和观测时间, 提高脉冲到达时间测量精度, 就可以达到当前 GPS 卫星广播星历轨道精度水平 (15 m).

4 X 射线脉冲星导航关键技术分析

综上所述, X 射线脉冲星导航的关键技术可以概括为脉冲星的巡天观测与数据处理技术, 脉冲到达时间测量与误差修正技术, X 射线探测器技术, 导航定位时空基准的建立与维持技术, 以及自主导航信息处理的鲁棒滤波技术.

4.1 脉冲星的巡天观测与数据处理技术

对脉冲星基本物理特征的认识、高信噪比脉冲轮廓提取、精密位置确定和导航脉冲星优选等都依赖于长期累积的巡天观测数据的分析和处理. 脉冲轮廓是识别脉冲星的惟一标识符, 标准脉冲轮廓模板是通过长期观测数据处理, 大量脉冲周期整合和同步平均而得到的, 具有极高的信噪比. 脉冲星的基本物理特征参数可以从脉冲轮廓模板直接提取.

图3 GPS 卫星的径向 ($P_{e,r}$)、切向 ($P_{e,al}$) 和法向 ($P_{e,ac}$) 位置误差Fig.3 Position errors of GPS satellite on the radial ($P_{e,r}$), along track ($P_{e,al}$) and across track ($P_{e,ac}$)图4 GPS 卫星的径向 ($v_{e,r}$)、切向 ($v_{e,al}$) 和法向 ($v_{e,ac}$) 速度误差Fig.4 Velocity errors of GPS satellite on the radial ($v_{e,r}$), along track ($v_{e,al}$) and across track ($v_{e,ac}$)

如果脉冲星的角位置测量精度达 0.0001 arcsec , 且脉冲到达时间测量精度为 $0.1 \mu\text{s}$, 那么导航定位精度就能够达到 10 m . 目前, 利用甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometer, VLBI) 技术的测角精度一般为 0.001 arcsec , 有的声称已达到 0.0003 arcsec ^[15]. 导航脉冲星的优选准则分为定性和定量两个方面. 品质因子是定量评价和标定脉冲星 X 射线信号源质量的重要指标. 综合考虑脉冲星的物理特性、空间环境和探测器对脉冲到达时间测

量精度的影响, 可以得到以脉冲周期和信噪比表示的品质因子.

4.2 脉冲到达时间测量与误差修正技术

卫星脉冲到达时间测量是指测定接近脉冲积分时间中间点的脉冲基准点到达时间. 在足够长的信号积分时间内, 以原子时作为参考时标, 整合测量脉冲轮廓, 提取脉冲到达时间观测量. 式 (2) 为简化的脉冲到达时间转换模型, 通常只能达到 $10 \mu\text{s}$ 的时间转换精度水平. 精细的脉冲到达时间转换改正

模型精度可达 0.1 ns , 但误差修正过程极其复杂. 脉冲星计时模型通常表达为脉冲测量相位的泰勒级数展开式, 模型精度与脉冲星内部物理机制、外部空间环境和数据处理方法相关. 目前, 毫秒脉冲星的长期稳定度已达到或优于原子时钟水平, 而短期稳定度相对较差, 在几分钟的时间内仅能达到 200 ns 的精度.

4.3 X 射线探测器技术

X 射线探测器是通过测量入射光子与探测器碰撞释放的能量, 而达到探测 X 射线光子数量的目的, 二维阵列探测器可以精确测定光子在网格平面上的位置, 进而提取脉冲星影像和角位置信息. 常用的探测器类型包括充气正比计数器、闪烁探测器、CCD 半导体探测器、微通道板探测器、热敏探测器和固体半导体探测器等^[16]. 不同探测器具有不同的探测优势和适应辐射能量的范围. 探测器面积一般小于 1 m^2 , 脉冲到达时间测量精度可以达到微秒, 甚至纳秒量级. X 射线定位与成像技术可以分为准直型定位技术、软 X 射线成像技术和调制型成像技术. 其中, 调制型成像技术又分为板条型和旋转调制、编码孔径成像和扫描观测直接成像. 编码孔径成像技术适用于硬 X 射线, 成像分辨率高, 发展潜力大.

4.4 导航定位时空基准的建立与维持技术

在太阳系质心坐标系中所受到的惯性力与来自银河系中除太阳以外的其他恒星引力互相抵消, 因此太阳系质心坐标系是典型的惯性坐标系, 能够精确表达三维位置坐标和四维时间坐标, 可以作为 X 射线脉冲星导航定位的时空基准. 在实际工程应用中还会涉及太阳质心坐标系、地心惯性坐标系和地心固联坐标系 (Earth-Center Earth-Fixed, ECEF) 与太阳系质心坐标系之间的相互转换问题.

时空基准维持与太阳系行星周期运动直接相关. 坐标转换维持参数包括坐标平移、坐标旋转、尺度因子和时间偏差, 以及岁差、章动、地球极移和非均匀自转参数等. 对于利用 X 射线脉冲星的航天器相对导航来说, 还可以选择存在于地球与月球和太阳之间的拉格朗日点作为脉冲信号监测、数据更新和信息转发的基站, 同样涉及时空基准的维持问题.

4.5 自主导航信息处理的鲁棒滤波技术

在卫星自主导航信息处理过程中, 可能出现测量数据错误、滤波器发散和设备故障等问题, 要

求 Kalman 滤波算法具有良好的鲁棒性能. 利用 Kalman 滤波的测量新息矢量 (残差), 构造故障检测函数, 并依据二元假设检验原理, 判决测量数据故障和可能的滤波器发散. 为了进行系统故障隔离与重构, 需要设计主滤波器和副滤波器. 两个滤波器相互备份, 切换使用, 从而提高导航信息处理的可靠性和完好性.

Kalman 滤波算法是基于 H_2 范数准则导出的, 要求对代表实际物理系统的数学模型噪声统计特性具有足够的先验知识. 基于 H_∞ 范数理论推导的滤波算法—— H_∞ 滤波, 不需要系统过程噪声和测量噪声的先验统计知识, 对系统状态初值的选取也没有任何特殊要求, 对实际工程应用环境具有较好的适应性和鲁棒性能. 因此, H_∞ 滤波可以作为 Kalman 滤波的有效备份算法, 以增强卫星自主导航信息处理的鲁棒性能.

5 我国开展 X 射线脉冲星导航技术研究的基础条件

国内有关脉冲星观测和理论研究已开展了十余年, 主要集中在天文学、天体物理学和时间计量方法等方面的研究. 1992 年, 北京天文台成功研制了脉冲星单通道观测系统, 在国内首次观测到了射电脉冲星. 1996 年, 乌鲁木齐天文站开始启用 25 m 的射电望远镜观测脉冲星, 并积极拓展国际合作观测研究, 目前已观测到数百颗脉冲星. 对射电脉冲星的周期参数、周期跃变、自旋速率、脉冲轮廓、星际闪烁和频谱特征等方面进行了研究^[17]. 同时, 陕西天文台国家授时中心的专家, 开展了毫秒脉冲星时间计量的理论分析研究工作^[18]. 当前, 我国正在研制 500 m 口径射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST), 计划建造在贵州山区的一个“碗状”山谷中^[19]. FAST 具有大口径、频带宽和灵敏度高优点, 天区覆盖可达到 70% , 其性能指标优于美国的阿雷西博射电望远镜 (口径 305 m). FAST 建成必将增强我国巡天观测脉冲星的能力.

我国已初步具备射电脉冲星观测和理论研究的基本条件. 射电脉冲星的巡天观测技术、信号与数据处理技术、以及时间计量的理论方法研究, 为我国开展 X 射线脉冲星导航技术研究奠定了初步基础.

6 结束语

研究表明, X 射线脉冲星导航定位原理与现代卫星导航系统类似, 能够为航天器提供位置、速度、时间和姿态等丰富导航信息, 概算卫星轨道确定精度优于 100 m. 其实现难点在于, 精确测量脉冲到达时间和脉冲星位置矢量, 建立高精度脉冲星计时模型、时间转换误差修正模型和脉冲轮廓, 研制高灵敏度、小型化的探测器系统, 完善信号与数据处理算法.

X 射线脉冲星导航属于基础性和前沿性研究, 发展潜力巨大. 目前国外研究尚处于起步阶段, 需要密切跟踪技术研究动向, 开展 X 射线脉冲星导航的基本概念和原理、理论模型和算法及关键技术和途径等方面的研究工作, 逐步提升 X 射线脉冲星导航技术研究水平.

参考文献

- [1] Taylor J H. Millisecond Pulsars: Nature's most stable clocks. In: Proceedings of the IEEE, Las Vegas, Nevada, 1991. 1054~1062
- [2] Pines D J. ARPA/DARPA Space Programs. XNAV Industry Day, 2004. 1~15
- [3] Hewish A, Bell J *et al.* Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, 1968, **217**:709~713
- [4] Downs G S. Interplanetary Navigation Using Pulsating Radio Sources. NASA Technical Reports, N74-34510, 1974. 1~12
- [5] Wallace K. Radio Stars, What they are and the prospects for their use in navigation system. *J. Ins. Nav.*, 1988, **41**(3):358~374
- [6] Brat V D *et al.* X-ray astronomy missions. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1992, **30**:391~427
- [7] Chester T J, Butman A S. Navigation Using X-ray Pulsar. TDA Progress Report, N81-27129, 1981. 22~25
- [8] Wood K S. Navigation studies utilizing the NRL-801 experiment and the ARGOS satellite. In: Proceedings of International Society of Optical Engineering (SPIE), Nashville, Tennessee, 1993, **1940**:105~116
- [9] Wood K S, Kowalski M *et al.* The unconventional stellar aspect (USA) experiment on ARGOS. In: Proceedings of AIAA Space Conference and Exposition, Albuquerque, NM, 2001. 1~9
- [10] Wood K S, Determan J R *et al.* Using the Unconventional Stellar Aspect (USA) experiment on ARGOS to determine atmospheric parameters by X-ray occultation. In: Proceedings of International Society of Optical Engineering (SPIE), Nashville, Tennessee, 2002, **4485**:258~265
- [11] Wood K S. The Silicon X-ray Imager (SIXI) on ISS express pallet. In: The 42nd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, AIAA 2004-443, 2004. 1~8
- [12] Sheikh S I, Pines D J *et al.* The use of X-ray pulsar for spacecraft navigation. In: Proceedings of the 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference, AAS 04-109, Maui, HI, 2004, 105~119
- [13] Shuai Ping, Qu Guangji. An autonomously updated ephemeris technique for navigation constellation. *J. Astron.*, 2006, **27**(2):187~191. in Chinese (帅平, 曲广吉. 导航星座自主星历更新技术. 宇航学报, 2006, **27**(2):187~191)
- [14] Shuai Ping, Qu Guangji. Time synchronization techniques of autonomous navigation for navigation constellation. *J. Astron.*, 2005, **26**(6):768~772. in Chinese (帅平, 曲广吉. 导航星座自主导航的时间同步技术. 宇航学报, 2005, **26**(6):768~772)
- [15] Yang Tinggao. Characteristics of pulsar time scale and timing of multi-pulsar. *J. Time Freq.*, 2003, **26**(1):25~30. in Chinese (杨廷高. 脉冲星时间特征和多星观测. 时间频率学报, 2003, **26**(1):25~30)
- [16] Wang Shouguan, Zhou Youyuan. X-ray Astrophysics. Beijing: Science Press, 1999, 76~112. in Chinese (王绶琯, 周又元. X 射线天体物理学. 北京: 科学出版社, 1999, 76~112)
- [17] Wu Xinji, Zhang Jin. The progress of pulsar observation. *Prog. Astron.*, 2001, **19**(2):216~226. in Chinese (吴鑫基, 张晋. 乌鲁木齐 25 m 脉冲星望远镜脉冲星观测研究. 天文学进展, 2001, **19**(2):216~226)
- [18] Ni Guangren, Yang Tinggao. Timing of millisecond pulsars and atomic time. *Acta Metrol. Sinica*, 2001, **22**(4):308~313. in Chinese (倪广仁, 杨廷高. 毫秒脉冲星计时和原子时. 计量学报, 2001, **22**(4):308~313)
- [19] Gan Hengqian, Jin Chengjin *et al.* A way to improving the field of view of the large aperture radio telescope. *Acta Astron. Sinica*, 2005, **46**(1):108~116. in Chinese (甘恒谦, 金秉进等. 一种扩大 FAST 视场的方法. 天文学报, 2005, **46**(1):108~116)