



# 脉冲星导航发展概要

## 摘要

随着空间探测任务的纵向深度发展,基于地基设备和操作的现有导航模式无法胜任未来的任务需求,利用遥远宇宙中脉冲星辐射信号信息的脉冲星导航为深空飞行器的精密定轨开辟了新的发展方向.文章介绍了脉冲星成因及辐射机制,在分析现有通用导航模式特点及其在深空任务中的局限性的基础上,阐述 X 射线脉冲星自主导航原理,对脉冲星导航方法以及 X 射线探测器等关键技术的发展进行了介绍,最后,对射电脉冲星导航进行了初步探讨.

## 关键词

导航系统;脉冲星;导航原理;X 射线探测器;射电脉冲星导航

中图分类号 U249;P145

文献标志码 A

## 0 引言

脉冲星<sup>[1]</sup>是一种快速自转的强磁化中子星,它能够使探测器接收到周期性脉冲信号.脉冲星表面具有极强的磁场,并且其整体磁场结构呈现磁偶极型,两磁极附近的带电粒子在磁场的作用下获得很高的加速度,随后沿磁轴方向发射各个频段的电磁辐射.由于脉冲星的磁轴与自转轴一般存在一定的夹角,电磁辐射波束随着自转轴旋转,因而在波束扫过的方向会接收到周期性脉冲信号,沿特定方向发射的脉冲周期就是脉冲星的自转周期,这便是脉冲星的灯塔模型.

脉冲星是中等质量恒星经逐级热核燃烧后发生引力坍缩留下的残骸.恒星演化末期燃料消耗殆尽,热核反应停留在某一级上,强度减弱,星核内部各处辐射压随之降低,不足以与引力作用相抗衡,使得星体在引力的作用下逐渐坍缩.小质量恒星的引力较弱,坍缩后电子简并压可与引力作用保持平衡,形成白矮星;中等质量恒星引力十分强大,电子被压入原子核与质子结合成电中性的中子,中子致密排列依靠更大的中子简并压与引力作用抗衡,形成中子星;更大质量的恒星坍缩后的宿命是黑洞.恒星在坍缩的过程中,密度急剧增高,半径大幅减小多个量级,转动惯量随之减小更多量级.由于整体质量和角动量保持恒定,因而造成中子星的自转角速度急剧变大.与太阳相当的质量集中在数千米的半径空间内高速自转,使得其自转周期极其稳定.

脉冲星的辐射谱包含脉冲能量在频率和时间上的分布信息.脉冲星的电磁辐射涵盖了从射电、红外、可见光到紫外、X 射线<sup>[2]</sup>和  $\gamma$  射线<sup>[3]</sup>的所有波段.由于脉冲星的辐射机制不完全相同,并非所有脉冲星的电磁辐射都覆盖全波段.截至 2014 年 5 月,已发现并编目的脉冲星有 2 300 多颗,其中射电脉冲星和 X 射线脉冲星可达 150 余颗, Fermi 卫星探测到的  $\gamma$  脉冲星有 147 颗.在时间分布上,脉冲星信号具有十分稳定的周期脉冲轮廓.通过长时间脉冲信号积累并进行历元折叠可以测得精准的脉冲轮廓<sup>[4]</sup>.

脉冲星辐射信号具有极其稳定的周期性和极其微小的周期变化率.按照脉冲周期大小可将脉冲星分为普通脉冲星和毫秒脉冲星<sup>[5]</sup>两类.普通脉冲星的周期从数十毫秒到数秒不等,占脉冲星比例的 90%,其电磁辐射能量消耗源自自转能量,因而自转速度逐渐减慢,周期变化率约在  $10 \times 10^{-15}$  s/s 量级;毫秒脉冲星周期多在毫秒量级,约占脉

收稿日期 2014-05-28

## 作者简介

周城宏,男,硕士生.somezbx@163.com

钱卫平(通信作者),男,研究员,主要从事飞行器测控总体工作.qianweiping@bittt.cn

1 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

冲星总数的 10%,一般属于双星系统,依靠吸积伴星物质提供辐射能量,且自转速度逐渐加快,周期变化率约在  $10 \times 10^{-20}$  s/s 量级.毫秒脉冲星的时间稳定性可用于性能堪比原子钟的精准定时,此外,毫秒脉冲信号信噪比远好于普通脉冲星的特点使其更适用于空间导航.

## 1 现有导航方法

人类航天活动发展至今,航天器的活动范围已逐渐从近地转向深空乃至星际空间,航天器的精确导航已经成为所有空间任务的关键.近年来,越来越多的太阳系内深空探测任务对于导航能力提出了越来越高的标准,如何提升航天器位置、速度、时间和姿态的导航精度对于空间探测深度的延伸具有极其重要的意义.截至目前,通用的导航方式有地面导航和自主导航.其中基于地面设备和操作的传统地面导航一直扮演着主导作用,而导航的自主性提高是亟待解决的问题,自主导航技术对于地面测控站数量、遥控指令上行频繁程度以及系统整体耗费的降低意义重大,因此新的自主导航手段一直是未来发展方向.

对于现阶段的深空任务而言,深度依赖于地面操作的无线电导航和光学导航仍然扮演着主要角色.广泛分布于地球表面测控站的雷达设备能够在径向方向提供精确的航天器位置和速度信息,通过大量有针对性的地面操作和精细的数据分析克服无线电传播空间的电磁干扰后,径向的距离和速度随机误差可分别最优化到 1 m 和 0.1 mm/s 量级<sup>[6]</sup>.然而,对于与径向垂直的切向而言,导航的距离分辨率则依赖于雷达设备的角分辨率和距离的乘积,即  $\Delta L_{\perp} = \Delta \theta \cdot R$ ,因此,如果以目前相干测量的角分辨率 25 nrad 估计,深空飞行器与地球距离每增加 1 天文单位 ( $1.5 \times 10^8$  km),其切向距离误差便增加 4 km,由此算来,距离地球 50 个天文单位的冥王星处航天器的切向距离不确定度可达 200 km.

合作式跟踪、深空网(Deep Space Network, DSN)和甚长基线相干测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)<sup>[7-8]</sup>等测控方法极大地提升了无线电导航的适用距离.合作式跟踪通过在航天器搭载信号发射器来辅助地面导航进行定轨,利用航天器下行遥测信息的多普勒频移可精确地计算其径向速度.深空网由 3 个配有多个大口径抛物面天线的综合深空站构成,分别位于精度相差 120° 的美国戈德斯通

(Goldstone)、澳大利亚堪培拉(Canberra)和西班牙马德里(Madrid),支持 S、X、Ka 频段并且满足从近地到深空的导航需求.VLBI 是一种利用多个测控站准同时接收目标航天器信号,经互相关处理获其角位置的新测量体制,受启发于射电天文学中的天文干涉测量,其等效无线电天线尺寸相当于测站间的最大距离.利用深空网的甚长基线相干测量可达到很高的距离精度<sup>[9]</sup>.以上手段使得导航距离得到了极大的突破,但是即便忽略复杂的地面操作和数据处理弊端,角分辨率极限导致横向距离误差随导航距离增加的状况以及信号强度的长距离衰减、电磁波传播的时间延迟(Voyager 号飞行器到地球的时延可达 17 h)仍是不争的事实.

基于地面操作的第二类导航方法是光学跟踪导航,依赖于反射到航天器上的可见光成像来进行导航定位.与无线电导航相似,严重依赖地面控制与维护,横向误差随距离增加而增大,成为地面导航的主要弊端.克服如上劣势的出路便是发展自主导航.

自 20 世纪 60 年代起,美国宇航局 NASA 与欧洲太空局 ESA 等先后发展了多种自主导航方法<sup>[10]</sup>,如惯性导航<sup>[11]</sup>、卫星导航<sup>[12]</sup>、天文导航和地磁导航<sup>[13]</sup>等.惯性导航完全依赖航天器自身载荷,误差随时间积累的特点不利于航天器独立地长时间在轨运行;卫星导航系统<sup>[12,14]</sup>,目前有多国已经投入使用或正在开发,如美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 GALILEO、中国的“北斗”、印度的 IRNSS 和日本的“准天顶”等,其中 GPS 系统率先实现了自主导航,即在 180 d 无地面注入信息的情况下,卫星通过星间双向测距与通信链路,保证用户测距误差小于 6 m.此外,通过即时测量信息与自然界固有信息的比较也可实现自主导航,例如利用天体高度角和方位角定位的天文导航,利用地磁场进行位置匹配的地磁导航等.然而,上述各类自主导航技术均有特定的适用范围或特有的缺陷,对于深空任务的航天器导航并不适用.长距离长时间的深空运行使得惯性导航的时间累积误差无法得到及时有效修正;卫星自主导航系统的使用空间范围仅局限于近地区域;天文导航的实现难度极大,短时间内无法达到特定技术指标;地磁导航的精度低,且仍局限在近地空间;其他类似地表信息匹配的导航手段同样受到空间范围的制约.因而,对于现阶段蓬勃发展的深空任务而言,发展一套不依赖于地面操作、适用空间范围广泛、精度高、自主性强、系统简单、可靠性优良的新

型导航方法显得尤为重要,而脉冲星导航便具有相当可观的应用前景.

## 2 脉冲星导航

### 2.1 脉冲星导航的发展历程

脉冲星的研究分辐射机制、计时和导航三部分,辐射机制为计时与导航提供理论基础,计时研究可为确保导航精度创造便利条件.

纵观脉冲星导航发展史,脉冲星信号用于航天器导航的开创性思想出自喷气推进实验室,1974年 Downs 将 27 颗脉冲星的射电信号积累 24 h 用于航天器的绝对导航,需采用口径 25 m 以上射电天线方可达理论精度 150 km<sup>[15]</sup>.限于当时的技术条件,微弱的射电信号无法从宇宙背景噪声中有效检测并提取.1976年,搭载 X 射线探测器的 Ariel-5 天文观测卫星发现首颗 X 射线脉冲星.随之,美国通信系统研究所的 Chester 和 Butman 于 1981 年提出将 X 射线脉冲星信号用于地球卫星导航的构想<sup>[16]</sup>.1993年,美国海军实验室 Wood 利用 X 射线脉冲星设计了一个用于航天器定时、定轨和定姿的完备方案 USA (Unconditional Stellar Aspect)<sup>[17]</sup>.此后,斯坦福大学的 Hanson 深化了 Wood 的工作,提出姿态测量算法并应用于 HEAO-A1 航天器,设计锁相环方案以实现自主时间同步<sup>[18]</sup>.1999年,搭载 X 射线探测器的 ARGOS 卫星发射升空用于 USA 导航方案的实验验证.2004年,西班牙人对射电脉冲星和 X 射线脉冲星的绝对导航的可行性进行了论证<sup>[19]</sup>.同年,美国国防部预先研究计划局开展 X 射线自主导航定位验证计划(XNAV)<sup>[20]</sup>,致力于创建脉冲星网络,拟将脉冲星导航应用于整个太阳系.在 X 射线脉冲星导航领域,文献[21]将扩展卡尔曼滤波应用于新导航系统中的位置估计.利用 X 射线脉冲辅助 GPS 定轨定时,Emadzadeh<sup>[22]</sup>提出相对导航算法.欧洲、日本、澳大利亚以及中国等也陆续规划或开展 X 射线脉冲星导航<sup>[23]</sup>的理论研究和实验研究.

### 2.2 脉冲星导航的实现

脉冲星导航的实现需要分 4 个环节,即设备、定时、定位与导航.设备攻关主要包含适用于深空导航的脉冲星信号接收器的研发,X 射线探测器的体积、质量是制约导航实现的瓶颈;定时是基于脉冲星数据库对接收到信号进行辨识,并计算该指定脉冲信号到达航天器与参考点的时间差;时间估计信息可以导出位置估计信息;对时间估计与位置估计进行滤波处理可以实现飞行器的导航.脉冲星导航流程如图 1 所示.

以相对地球的定位为例,如图 2 所示,其中  $\hat{n}$  表示太阳系质心 SSB 到脉冲星的方向, $r$  表示 SSB 到空间飞行器(Spacecraft)的矢量, $r_E$  表示 SSB 到地球质心的矢量, $r_{SC/E}$  表示地球质心到空间飞行器的矢量,即飞行器相对地球质心的位置  $\Delta x$ .测量飞行器与地球质心脉冲到达时间差  $\Delta t$ ,则有

$$\Delta t \cdot c = \hat{n} \cdot \Delta x, \quad (1)$$

其中脉冲星方向向量  $\hat{n} = (n_1, n_2, n_3)$ .若无模糊测得 3 颗脉冲星信号,则可得

$$\begin{pmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \Delta t_3 \end{pmatrix} \cdot c = \begin{pmatrix} \hat{n}_1 \\ \hat{n}_2 \\ \hat{n}_3 \end{pmatrix} \cdot \Delta x = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{pmatrix} \cdot \Delta x, \quad (2)$$

$$\Delta x = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \Delta t_3 \end{pmatrix} \cdot c, \quad (3)$$

即为飞行器的定位原理.然而时间延迟与位置相互耦合,可采用滤波方法进行时间与位置迭代解耦,如图 3 所示.

导航滤波迭代过程首先假设飞行器初始位置,随后利用特定的脉冲星信号模型、空间位置、信号参数信息将到达时间进行修正得到太阳系质心的到达时间,其次利用信号接收器测量脉冲到达时间,如果与假设位置预测的时间相符,则飞行器位置确定,反之,对飞行器预测位置进行修正再次迭代,直到满足

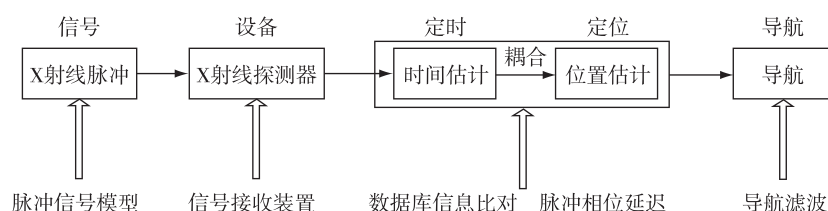


图 1 脉冲星导航流程

Fig. 1 Pulsar navigation process

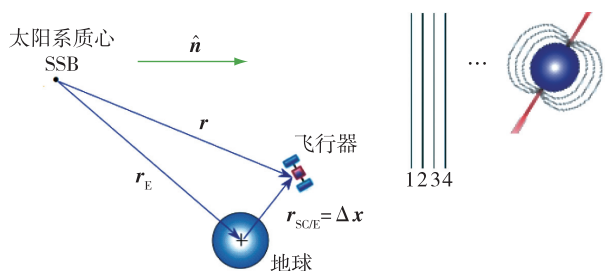


图2 脉冲星导航原理

Fig. 2 Principle of pulsar navigation

一定的误差阈值。

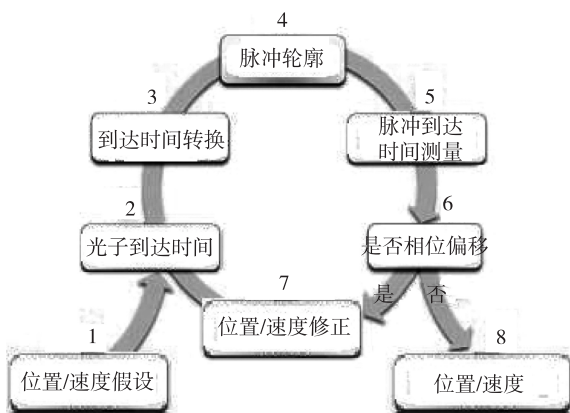


图3 导航滤波原理

Fig. 3 Navigation filtering principle

由于脉冲星信号呈现周期性,因而导航定位可能出现模糊.模糊位置可将定位区域约束在飞行器初始位置的附近(飞行器的已知信息)来甄别,也可通过观测多颗脉冲星的信号来进行约束(图4).

实现脉冲星导航的关键技术包含脉冲星数据库的构建,脉冲信号的检测与辨识,脉冲延迟估计以及导航滤波等,而制约脉冲星导航发展的核心技术在于星载脉冲接收器的研制,如X射线探测器.X射线探测系统的尺寸和质量是限制脉冲星导航的首要难题.

### 3 X射线探测器

X射线脉冲星导航选用毫秒脉冲星<sup>[24]</sup>.X射线脉冲信号无法穿透大气,需要星载X射线探测器接收.X射线探测器是导航的技术核心,通过测量光子的到达时间实现X射线光子数的测量,其设计需兼顾时间精度、粒子分辨、能量分辨和空间分辨以及探测区域、系统质量等,也是全世界脉冲星导航计划亟须突破的首要方向.

目前最先进的X射线探测器是Chandra和

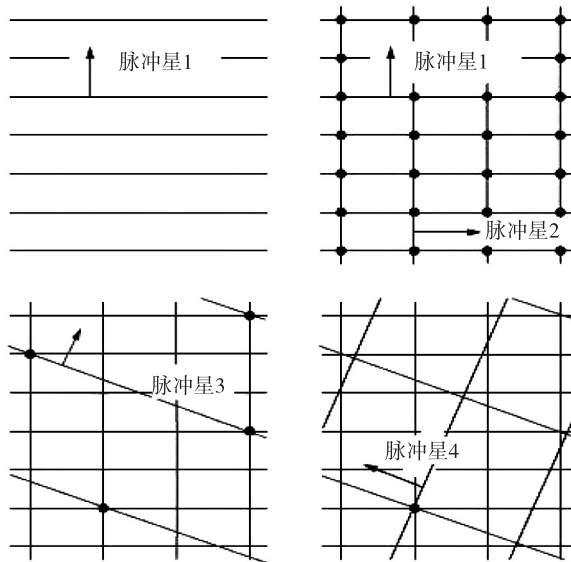


图4 4颗脉冲星解模糊原理

Fig. 4 Principle of solving the ambiguity by 4 pulsars

XMM-Newton,其有效探测面积分别可达0.43和0.08 m<sup>2</sup>,角分辨率分别达到了0.5"和14",然而限于系统质量而不具备执行空间任务的可能.固定在探测介质外部的光学系统类似凸透镜可以对X射线起到汇聚作用,增加了探测器的有效探测面积.在此方面,近年来NASA和ESA对X射线探测器研发投入了庞大的精力,SPO(Silicon Pore Optics)<sup>[25]</sup>和GMO(Glass Micropore Optics)<sup>[26]</sup>实现了较大的技术突破,是下一代轻型X射线探测系统的典范,在保证空间角分辨率的情况下,系统质量分别降至200和25 kg/m<sup>2</sup>(表1).

表1 目前X探测器系统性能

Table 1 Performance of X-ray detectors

X射线探测系统	角分辨率/(")	系统质量/(kg/m <sup>2</sup> )
Chandra	0.5	18 500
XMM-Newton	14	2 300
Silicon Pore Optics	5	200
Glass Micropore Optics	30	25

依据探测介质类型,相比于气体探测器,半导体探测器最有可能应用于空间任务.SDD(Silicon Drift Detectors)和APS(Active Pixel Sensors)是目前两类极具应用前景的探测技术.SDD的计数率可达2 Mcts/s(计数/秒),具有极好的时间分辨率.APS是一种由大量微小探测器件像素拼接而成的探测器,主要对0.1~25 keV频段的X射线响应,具有很强



的灵活性.这两种技术在能耗和质(重)量方面具有很好的发展空间.

#### 4 射电脉冲星导航

脉冲星导航在国际上均指 X 射线脉冲星导航.在 X 射线脉冲星导航发展的同时,人们也同样对射电脉冲星导航进行了探索.人类利用脉冲星信号进行空间导航的最早尝试便是使用脉冲星射电信号,限于 1974 年的技术手段,当时的导航精度以及导航条件无法满足导航实际需求.30 a 后的 2004 年,西班牙人证实了射电脉冲星导航的可行性<sup>[19]</sup>.此后,Becker 等<sup>[27]</sup>也对射电脉冲星导航进行了深入研究.

射频脉冲在大气中衰减不明显,地面上的大口径射电天线以及长基线相干测量技术均可实现信号的接收与检测.脉冲星的辐射谱研究显示,绝大多数的脉冲星频段包含射电频段,因而可用于导航的射电脉冲星众多,然而射电频段的辐射具有能量密度低的特点,射电脉冲强度较弱、信噪比较低,故导航所需的信号累积时间较长.航天器上的脉冲星导航系统需要兼顾到导航器体积、能源消耗、质量以及经济等诸多因素,考虑信号散射、闪烁和脉冲流量密度与电磁波频率  $\nu^{-1.5}$  相关,射电脉冲的最佳观测频率为 21 cm.假设脉冲探测所需的信噪比  $S/N=10$ ,合理的脉冲累计时间  $t_{\text{int}}$ ,射频带宽  $\Delta\nu=100$  MHz,接收机的噪声温度  $T_{\text{rec}}=100$  K,宇宙背景温度  $T_{\text{sky}}=5$  K,毫秒脉冲星信号脉冲周期  $P=10$  ms,脉冲宽度  $W=2$  ms,在所选波段平均能流密度  $\Delta S=10$  mJy ( $1 \text{ Jy}=10 \times 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$ ),脉冲接收效率  $\varepsilon=0.5$ ,天线接收面积  $A_{\text{ant}}$  (天线有效接收面积  $A_{\text{eff}}=\varepsilon A_{\text{ant}}$ ),极化方向  $n_p=2$ ,根据 Lorimer 和 Kramer 所给出的天线接收信号灵敏度公式

$$\Delta S_{\text{min}} = \frac{2k}{\varepsilon A_{\text{ant}}} \frac{(T_{\text{rec}} + T_{\text{sky}})}{\sqrt{n_p t_{\text{int}} \Delta\nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}}, \quad (4)$$

可以得到

$$A_{\text{ant}} = \frac{S}{N} \frac{2k}{\varepsilon \Delta S} \frac{(T_{\text{rec}} + T_{\text{sky}})}{\sqrt{2 t_{\text{int}} \Delta\nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}}, \quad (5)$$

代入估算数据,可得  $A_{\text{ant}}=342 \text{ m}^2$ ,  $R=10.5 \text{ m}$ .

此外,用于导航的脉冲星分布于天球各个方向,天线的单一朝向不利于获取所有方向的脉冲信号,通过航天器转动姿态来采集其他方向脉冲的措施既不能保证足够的信号积累时间,又无法满足取向相对固定的通信天线与太阳能电池板的正常工作.然而,Datashvili 等<sup>[28]</sup>提出采用双极相阵列天线可以解

决上述困境.满足导航需求的天线尺寸对于当前深空任务显得过于庞大,然而对于未来超大规模的宇宙飞船而言却有十足的可行性.

#### 5 结束语

地面设备及操作的传统导航方式的局限对于深空探测任务的需求已逐渐力不从心,脉冲星自主导航经理论证实具有高精、简单、可行性强的特点,从脉冲星物理本质的探索到导航模型算法的开发,从信号接收器的硬件研制到探测装置的在轨试验,脉冲星导航技术正以其独特的魅力吸引世界航天大国的积极关注与大力投入,发展势头如火如荼,技术细节日臻完善,必将在可以预见的未来于深空乃至星际探测任务中扮演不可或缺的角色.

#### 参考文献

##### References

- [ 1 ] Hewish A, Bell S J, Pilkington J, et al. Observation of a rapidly pulsating radio source [ J ]. Nature, 1968, 217 ( 5130 ): 709-713
- [ 2 ] Giacconi R, Gursky H, Kellogg E, et al. Discovery of periodic X-ray pulsations in Centaurus X-3 from Uhuru [ J ]. The Astrophysical Journal, 1971, 167: L67
- [ 3 ] Thompson D J. Gamma ray pulsars [ M ] // Cosmic gamma-ray sources. Springer Netherlands, 2004: 149-168
- [ 4 ] Emadzadeh A A, Speyer J L. X-ray pulsar-based relative navigation using epoch folding [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 ( 4 ): 2317-2328
- [ 5 ] Backer D, Kulkarni S R, Heiles C, et al. A millisecond pulsar [ J ]. Nature, 1982, 300( 5893 ): 615-618
- [ 6 ] Maddè R, Morleyó T, Abell R, et al. Delta-DOR-a new technique for ESA's deep space navigation [ J ]. ESA Bulletin, 2006, 128: 68-74
- [ 7 ] Felli M, Spencer R E. Very long baseline interferometry [ M ]. Springer, 1989
- [ 8 ] Takahashi F. Very long baseline interferometer [ M ]. IOS Press, 2000
- [ 9 ] 李海涛,周欢,郝万宏,等.深空导航无线电干涉测量技术的发展历程和展望 [ J ].飞行器测控学报, 2013, 32(6): 470-478  
LI Haitao, ZHOU Huan, HAO Wanhong, et al. Development of radio interferometry and its prospect in deep space navigation [ J ]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2013, 32(6): 470-478
- [ 10 ] Grewal M S, Weill L R, Andrews A P. Global positioning systems, inertial navigation, and integration [ M ]. John Wiley & Sons, 2007
- [ 11 ] Britting K R. Inertial navigation systems analysis [ M ]. Artech House Publishers, 2010
- [ 12 ] Ananda M, Bernstein H, Cunningham K E, et al. Global Positioning System (GPS) autonomous navigation [ C ] //

- Proceedings of the Position Location and Navigation Symposium, 1990. Record. The 1990's-A Decade of Excellence in the Navigation Sciences, IEEE PLANS'90, 1990: 497-508
- [13] Psiaki M, Martel F. Autonomous magnetic navigation for earth orbiting spacecraft [ C ] // Proceedings of the 3rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 1989
- [14] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more [ M ]. Springer, 2007
- [15] Downs G S. Interplanetary navigation using pulsating radio sources [ R ]. NASA Technical Reports, N74-34150, 1974: 1-12
- [16] Chester T, Butman S A. Navigation using X-ray pulsars [ R ]. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, NASA Tech Rep 81N27129, 1981
- [17] Wood K S. Navigation studies utilizing the NRL-801 experiment and the ARGOS satellite [ C ] // Horais B J. Small Satellite Technology and Applications III, SPIE Proceedings, 1993, 1940: 105-116
- [18] Hanson J E. Principles of X-ray Navigation [ D ]. Stanford: Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 1996
- [19] Sala J, Urruela A, Villares X, et al. Feasibility study for a spacecraft navigation system relying on pulsar timing information [ R ]. European Space Agency Advanced Concepts Team ARIADNA Study, 2004, 3(4202): 23
- [20] Graven P, Collins J, Sheikh S, et al. XNAV for deep space navigation [ C ] // 31st Annual AAS Guidance and Control Conference, 2008: 8-54
- [21] Adelberger E G, García A, Robertson R G H, et al. Solar fusion cross sections. II: The p-p chain and CNO cycles [ J ]. Reviews of Modern Physics, 2011, 83(1): 195-246
- [22] Emadzadeh A A, Speyer J L. A new relative navigation system based on X-ray pulsar measurements [ C ] // 2010 IEEE Aerospace Conference, 2010: 1-8
- [23] 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 Ping, CHEN Shaolong, WU Yifan, et al. Navigation principles using X-ray pulsars [ J ]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1538-1543
- [24] Becker W, Trümper J. Detection of pulsed X-rays from the binary millisecond pulsar J0437 4715 [ J ]. Nature, 1993, 365(6446): 528-530
- [25] Wallace K, Bavdaz M, Gondoin P, et al. Silicon pore optics development [ C ] // Proceedings of the SPIE, Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy IV, 74370T, 2009, 7437, doi: 10.1117/12.825824
- [26] Wallace K, Collon M, Bavdaz M, et al. Development of micro-pore optics for x-ray applications [ C ] // Optics & Photonics 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005
- [27] Becker W, Bernhardt M G, Jessner A. Autonomous spacecraft navigation with Pulsars [ J ]. arXiv Preprint arXiv: 13054842, 2013, doi: 10.2420/AF07.2013.11
- [28] Datashvili L, Baier H, Kuhn T, et al. A large deployable space array antenna: Technology and functionality demonstrator [ C ] // Proceedings of the ESA Antenna Workshop, 2011

## Overview of pulsar-based navigation

ZHOU Chenghong<sup>1</sup> QIAN Weiping<sup>1</sup> GUO Junhai<sup>1</sup> ZHAO Hua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094

**Abstract** With the rapid and deep development of space exploration, the existing Earth-based navigation solutions will not be able to meet the increasing precision demand of future spacecraft navigation. Pulsar are rapidly rotating neutron stars that generate pulsed electromagnetic radiation, which provides feasibility of precisely determining spacecraft time and position using X-ray pulsar. A detailed analysis in formation and radiation mechanism of X-ray pulsars is presented. The characteristics of the exiting Earth-based navigation systems, as well as its limitations in deep space exploration, are analyzed, and then the principle of the autonomous celestial-based systems using X-ray pulsar is introduced. This paper gives an overview on the development of pulsar-based navigation and its key technologies including X-ray detector, and gives a preliminary discussion on the radio pulsar navigation.

**Key words** navigation system; pulsar; navigation principle; X-ray detector; radio pulsar navigation