

关于脉冲星参数的我国 VLBI 网测量

李金岭¹ 郭 丽¹ 孙中苗²

(1 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030)

(2 西安测绘研究所,西安市雁塔路中段 1 号,710054)

摘要:根据毫秒脉冲星计时测量和深空导航应用的基本原理,分析了对脉冲星位置、自行和视差等天体测量参数的 VLBI 测量精度需求,讨论了我国 VLBI 网的现有观测能力和不足及可能的改进途径,包括天线后端配置、时钟同步和数据互相关处理等。

关键词:毫秒脉冲星;TOA 测量;深空导航;VLBI

中图分类号:P228.6

弱磁场毫秒脉冲星的寿命可达十亿年,自转周期极其稳定,射电脉冲非常规则,不需要也无法进行人为干预或校准,因而是实现高精度天文时钟——脉冲星钟的理想天体,也可用于搭建人造导航星座以外的空间飞行器导航系统。这两项工作均基于脉冲到达时间(TOA)实测与理论预测的比较,理论关系式是相同的。关联的物理参数包括脉冲星的位置(方向)、自行和视差(距离),VLBI 技术是目前测定这些参数最有力的工具。本文根据毫秒脉冲星 TOA 测量的理论关系式,分析了对 VLBI 测量的基本需求,并讨论了我国 VLBI 网的现有观测能力与不足及可能的改进途径。

1 TOA 测量的基本理论关系

基于脉冲星构建天文钟和实现空间飞行器导航的基本公式为^[1]:

$$t_b - t = \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{R}}{c} - \frac{1}{2cd} [R^2 - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{R})^2] + \Delta C - \frac{D}{\nu^2} D_m - \frac{2GM_\odot}{c^3} \ln(R + \mathbf{uR}) + \frac{1}{c^2} \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\rho} \quad (1)$$

其中, t_b 为脉冲到达太阳系质心(SSB)的时刻,为

太阳系质心坐标时(TCB),即假设不存在太阳与行星引力场时的原时,由理论模型预测。

t 为脉冲到达观测者的时刻,为观测量。测站钟一般与协调世界时(UTC)同步,需转换为地球时(TT)、地球质心坐标时(TCG)、TCB。

$\frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{R}}{c}$ 为脉冲到达 SSB 和观测者时刻之差的项,即 Roemer 延迟。 c 为光速; \mathbf{u} 为脉冲星在 SSB 参考架中的方向矢量,可由 VLBI 观测确定; \mathbf{R} 为观测者(或飞行器)在 SSB 中的位置矢量,对于构建脉冲星钟为已知参数,对于脉冲星导航为待解参数。

$\frac{1}{2cd} [R^2 - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{R})^2]$ 为视差改正, R 为 \mathbf{R} 的模, d 为脉冲星距离(视差)。

ΔC 为观测者参考钟相对于 UTC 的改正,需转换为 TCB。

$\frac{D}{\nu^2} D_m$ 为星际介质色散所致频率为 ν (MHz) 的射电辐射的附加延迟。 D 为色散常数,约 $(4.148\ 808 \pm 0.000\ 003) \times 10^3 \text{ MHz}^2 \text{ pc}^{-1} \cdot \text{cm}^3 \text{ s}$; D_m 为色散量度。因为 X 射线频率极高,脉冲星导航观测中可忽略此项改正。

$\frac{2GM_\odot}{c^3} \ln(R + \mathbf{uR})$ 为 Shapiro 引力延迟,即光

收稿日期:2013-03-16。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(10973030,11178024);探月工程(嫦娥二号、三号)资助项目;上海市科学技术委员会资助项目(06DZ22101)。

线在引力场中沿弯曲时空传输的附件延迟, GM_{\odot} 为太阳引力常数。光路特别接近时需考虑行星尤其是木星引力场的影响。导航和计时观测中均可视 u 、 R 为已知。

$\frac{1}{c^2} \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\rho}$ 为 Einstein 延迟(相对论坐标变换效应), 包括时间延缓和引力红移。 $\boldsymbol{\rho}$ 为脉冲星信号传播方向矢量, 近似与 u 反向; V 为观测者速度, 脉冲星钟观测可视为已知, 导航观测为待求参数。更精确的改正需考虑脉冲星的运动与时空转换。

地球上建立脉冲星钟的观测中还需考虑电离层延迟、中性大气与水汽延迟等改正。行星际色散也是重要的误差源, 黄道带数度内可达微秒量级。

2 VLBI 测量精度需求分析

假设式(1)等号右侧除 Roemer 延迟之外其他均准确已知, 即 $d(t_b - t) = d\left(\frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{R}}{c}\right)$, 记作

$$d(c\Delta t) = d(\mathbf{R} \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{R}}) \quad (2)$$

$\hat{\mathbf{R}}$ 为 R 的方向矢量。于是,

$$d(c\Delta t) = (\mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{R}}) dR + R d(\mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{R}}) \quad (3)$$

由误差传播定律,

$$\sigma(\mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{R}}) = \frac{1}{R} \sqrt{\sigma^2(c\Delta t) - |(\mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{R}})|^2 \sigma^2 R} \quad (4)$$

设 θ 为 u 、 $\hat{\mathbf{R}}$ 的夹角, 于是 $\sigma(\mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{R}}) = |\sin\theta| \sigma\theta$ 。简化假设 $|\sin\theta|$ 、 $|(\mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{R}})|^2$ 均为 1(不可能同时成立, 但量级一致), 式(4)近似为:

$$\sigma\theta = \frac{1}{R} \sqrt{\sigma^2(c\Delta t) - \sigma^2 R} \quad (5)$$

假设 TOA 测量误差为 $1 \mu\text{s}$, 即 $\sigma(c\Delta t)$ 约为 300 m, 要求导航定位精度 $\sigma R = 100 \text{ m}$ 时, 取地球、火星、土星、天王星的平均轨道半径分别为 1、1.524、9.576、30.13 AU, 则对应的 $\sigma\theta$ 分别为 0.390、0.256、0.041、0.013 mas。可见, 在给定的 TOA 测量精度和目标定位精度下, 目标的质心距越大, 对脉冲星位置(方向或赤经赤纬)精度的要求越高。

由式(5)可知, 若 TOA 的测量偏差完全由脉冲星位置误差引起, 即 $\sigma\theta = \frac{1}{R} \sigma(c\Delta t)$ 。仍假设 $\sigma(c\Delta t) = 300 \text{ m}$, 对应于上述距离处的导航目标, $\sigma\theta$ 分别为 0.413、0.271、0.043、0.014 mas, 此为不同质心距处的导航对脉冲星位置观测精度的最低要求, 大约正比于 TOA 测量精度。亦即, 随着 TOA 测量精度的提高, 必须相应提高脉冲星位置

参数的精度, 以保障所需的导航精度。

一般要求自行精度比位置精度高一个量级, 可通过增加观测次数和拓展观测资料时间跨度以提高自行精度。

(周年)视差 $P(\text{mas})$ 与距离 $d(\text{pc})$ 的关系为 $d = \text{AU}/P$ 。假设式(1)中除视差改正之外的所有

项误差均为零, 即 $\sigma(c\Delta t) = \sigma\left(\frac{R^2}{2cd} \sin^2\theta\right)$, 于是

$$\sigma(c\Delta t) = \frac{R^2 \pi \sin^2\theta}{2\text{au} \times 1000 \times 3600 \times 180} \sigma P \quad (6)$$

取 $\sigma(c\Delta t) = 300 \text{ m}$, 假设 $\sin^2\theta$ 为 1, 于是对于地球、火星、土星、天王星距离处的导航, 所需 P 的最大测量误差分别为 1.850、0.797、0.020、0.002 mas。与脉冲星位置测量精度需求类似, TOA 的测量精度越高, 则要求视差的测量精度也越高。

3 我国 VLBI 测量网现状与讨论

脉冲星射电辐射一般呈幂率谱特征($S_{\nu} \propto \nu^{\alpha}$, α 约为 $-2 \sim -1$), 观测频率过高时会因为射电辐射流量低而使信噪比下降。星际闪烁使脉冲轮廓明显致宽, 特别是对于毫秒脉冲星, 当观测频率过低时也不能保证高的测量精度。国际上常用的脉冲星观测频率为 L 波段(1.4 GHz)。观测频率略高时会降低星际介质色散的影响, 因而 S 波段(2.3 GHz)也可用于脉冲星观测。另外, 脉冲星辐射为强偏振, 采用单一圆偏振接收机的观测精度相对略差, 主要取决于具体的偏振度。

现阶段我国适合于脉冲星观测的射电望远镜主要包括 1987 年建成的上海 25 m、1994 年建成的乌鲁木齐 25 m、2006 年建成的北京 50 m 和昆明 40 m 等天线系统, 关联参数如表 1 所示。

上海 25 m 天线配备双偏振 L 波段接收机和标配 S/X 接收机。L 波段接收机噪声温度 38 K, 双极化, 带宽 128 MHz。S 波段系统噪声温度 65 K, 右旋, 带宽为 256 MHz。乌鲁木齐 25 m 天线 18 cm(L 波段)接收机噪声温度 24 K, 双极化, 带宽 320 MHz; 除 S/X 波段标配接收机外, 还配备了常温双极化 S 波段接收机, 温度 75 K, 带宽 512 MHz。北京 50 m 天线、昆明 40 m 天线均已配备 S/X 波段接收机, S 波段接收机噪声温度为常温 220 K 和制冷 70 K。北京天线接收机有两路偏振, 左旋只能用于标配 70 MHz 窄带观测, 右旋可选标配 70 MHz 和 200 MHz 两种带宽。昆明天线接收机只有右旋偏振, 可选标配 70 MHz 和 200 MHz 两种频带。

由此可见,利用我国 VLBI 网在 L 波段目前只能进行上海-乌鲁木齐单基线脉冲星观测,在 S 波段虽可进行全网观测,但单一圆偏振天线后端配置不利于提高脉冲星强偏振辐射的观测精度。全网观测时的分辨率约为 $8 \text{ mas} \times 8 \text{ mas}$,借助于高精度参考源的相位参考,脉冲星定位精度可好于 1 mas 。例如,对 B0329+54 选用 2.6° 以内参考源相位参考观测时,获得约 0.4 mas 的定位精度^[2]。一年内安排同一目标多次观测可获得视差参数,多年同一目标安排多次观测可获得自行参数。国际上

脉冲星的定位精度一般为 mas 水平,最好的达 0.4 mas ;自行精度约 $0.5 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$,最好的达 $0.02 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$;视差精度约 0.1 mas ,最好的达 0.02 mas 。

在观测数据互相关处理方面,我国研制的相关处理机已经成功应用于绕月探测工程并取得了良好效果,但是至 2012 年尚未向该工程以外的射电天文观测提供常规互相关处理服务,而且对于脉冲星观测数据处理尚未配置脉冲门技术,即仅对有脉冲时段进行积分、无脉冲时段置零,以提高相关幅度和信噪比。

表 1 我国 VLBI 网关联参数

Tab. 1 Some Related Parameters of Chinese VLBI Network

	上海	乌鲁木齐	北京	昆明
纬度/ $^\circ$	31	43	40	25
天线直径/m	25	25	50	40
效率/%	42	54	60	60.2
覆盖波段	L 双极化+S 右旋	L 双极化+S1 右旋 常温 S 双极化	S 右旋	S 右旋
系统温度/K	L: 38+S: 65	L: 24+S1:75/200 S2: 75	70/220	80/220
SEFD/Jy	L: 670+S: 870	S1: 680+S2: 60	220	350
带宽/MHz	L: 128, S: 200	L: 320, S1: 200 S2: 512	70 / 200	180 / 200
VLBI 后端	DBBC+Mark5B	DBBC+Mark5B	DBBC+Mark5B	DBBC+Mark5B
脉冲星接收机	无	PDFB 和 FB	无	PDFB
灵敏度 $3\sigma/60 \text{ min}$	L: 0.5 mJy S: 0.6 mJy	L: 0.3 mJy S2: 0.8 mJy	不可用	S: 1 mJy

另外,测站钟与 UTC 的同步精度直接关系到 VLBI 测量的时刻标定精度。我国测站钟同步一般采用单站 GPS 接收机输出秒信号的简化处理方式。以往参加 VLBI 国际联测时,通过相对于国外较可靠钟的偏差与变率参数化解算,我国测站钟同步问题的影响并不显著。但是若独立开展国内网脉冲星观测,至少要求一台氢钟具备与 UTC 的良好同步,否则将影响测量精度。单站 GPS 接收机时钟比对一般只能保证 $0.05 \sim 0.1 \mu\text{s}$ 的精度水平, GPS 共视技术能够达到数个 ns ^[3],借助于通信卫星的双向时间频率比对(TWSTFT)技术可达 0.1 ns ^[4],但设备成本较高且采样率偏低(2 h)。依据性价比,本文建议配备 GPS 共视时间频率比对技术。

总之,利用我国目前 VLBI 网开展毫秒脉冲星的位置、自行与视差等高精度天体测量工作尚存在一些实际困难,与国际先进水平存在显著差距。比如,在国际上常用的脉冲星观测频率 L 波段尚无法开展全网 4 站观测,在 S 波段虽可进行全网观测,但单一圆极化天线后端配置不利于提

高脉冲星强偏振辐射的观测精度。需研制天文观测应用的相关处理机,尤其是配备适用于毫秒脉冲星观测的脉冲门技术,在测站时钟比对的精度方面急需提高。上海与乌鲁木齐 25 m 天线早已超过设计寿命^[5-6],存在严重的设备老化问题。北京 50 m 和昆明 40 m 天线主要设计用于我国探月工程科学应用数据接收,不仅表现为用于开展高精度天体测量工作的使用时间受限,在天线机械架构、后端设备配置等方面也值得特别关注。例如,自 2006~2012 年已经组织参加了多次河外射电源观测实验,但两站坐标精度仍局限于 cm 级。因此,扩建我国现有 VLBI 网、更新或增配必要的后端设备、提高资料互相关处理能力以及提高时钟比对精度等显得十分迫切。

参 考 文 献

- [1] Edwards R T, Hobbs G B, Manchester R N. TEMPO2, a New Pulsar Timing Package-II. The Timing Model and Precision Estimates[J]. MNRAS, 2006, 372: 1 549-1 574
- [2] Guo Li, Zheng Xingwu, Zhang Bo, et al. New De-

- termination of the Position of the Pulsar B0329+54 with Chinese VLBI Network [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2010, 53(8): 1 559-1 564
- [3] Lombardi M A, Nelson L M, Novick A N, et al. *Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System*[C]. *Cal. Lab. Int. J. Metrology*, New York, 2001
- [4] Hanson D W. *Fundamentals of Two-Way Time Transfer by Satellite*[C]. *The 43rd Annual Frequency Control Symposium*, New York, 1989
- [5] 李金岭, 乔书波, 刘鹏, 等. 2008 年余山 25-m 射电天线归心测量[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(12): 1 387-1 391
- [6] 李金岭, 魏二虎, 孙中苗, 等. 关于我国天测与测地 VLBI 网络未来建设的讨论[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(6): 670-673

第一作者简介:李金岭,研究员,主要从事射电天体测量与空间大地测量研究工作。

E-mail:jll@shao. ac. cn

Determination of Astrometric Parameters of Millisecond Pulsars via VLBI

LI Jinling¹ GUO Li¹ SUN Zhongmiao²

(1 Shanghai Astronomical Observatory, CAS, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China)

(2 Xi'an Institute of Mapping and Surveying, 1 Middle Section, Yanta Road, Xi'an 710054, China)

Abstract: The requirement of observation precision of pulsar astrometric parameters including the position, proper motion and parallax by VLBI technique is analyzed based on the fundamental principle of pulse timing observations and the application in deep space navigation of millisecond pulsars. It is also discussed concerning the current technical specifications, the deficiencies as well as the possible ways of improvement in the equipment of electronic backend of antennas, the data cross-correlation processing and the time synchronization of the Chinese VLBI network on the observation of millisecond pulsars for criticism and reference.

Key words: millisecond pulsars; time of arrival (TOA) observation; deep space navigation; VLBI

About the first author: LI Jinling, research professor, majors in radio astrometry and space geodesy.

E-mail: jll@shao. ac. cn