

# 毫秒脉冲星在天体测量中的应用

高洁 萧耐园  
(南京大学天文系)

## 提 要

本文介绍了毫秒脉冲星的脉冲到达时间的五种分析模型, 以及毫秒脉冲星在作为高度稳定的时间和频率标准、确定射电参考系原点、确定太阳系质心位置误差等方面的应用。最后给出了迄今发现的毫秒脉冲星一览表。

## 引 言

1982年9月, Backer等人发现了第一颗毫秒脉冲星 PSR 1937+21, 脉冲周期约 1.558 ms, 从此为天文学开辟了新的研究领域。目前, 脉冲星计时观测已达到很高精度。对于 PSR 1937+21, 计时精度可达  $1\mu\text{s}$  以上, 但受现有原子频率标准测量精度的限制。计时观测位置精度可达  $0.0003^{[1]}$ 。毫秒脉冲星计时观测精度如此高, 使其在天体测量中有重要作用。

## 一、计时原理

到目前为止, 人们已提出多种分析脉冲到达时间的模型。Fairhead (1991)<sup>[2]</sup>指出, 由所

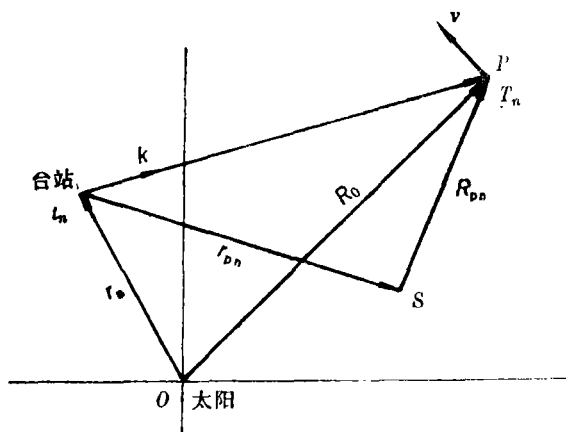


图 1

采用的计时模型引入的系统误差比拟合过程中的计算误差大 5—10 倍。因此, 研究各种模型, 有助于提高处理计时观测资料的精度。下面介绍几种常见的计时模型。

### 1. Hellings (1986) 的讨论<sup>[3]</sup>

Hellings 讨论了把地球架中的脉冲星计时观测结果转换到被测脉冲星的固有架所必须的相对论变换, 并考虑视差、自行等影响。

假设在初始时刻  $T_0$ , 脉冲星  $P$  位于  $R_0$ , 并以常速  $v$  运动,  $t_n$  为第  $n$  个脉冲到达台站的时刻。设  $r_n$  为  $t_n$  时的站矢量,

$r_{pn}$  为台站相对于第  $p$  个天体  $S$  的位置,  $R_{pn}$  是脉冲星在固有时  $T_n$  时相对于第  $p$  个天体  $S$  的位置。见图 1。

$k$  为台站至  $P$  的单位矢量。则处理脉冲星计时观测资料的条件方程为:

$$\begin{aligned} c(t_n - t_0) = & c(T_n - T_0) + [(k \cdot v) \Delta t_n - (k \cdot r_n)] \\ & + \frac{1}{2R_0} [r_n^2 - (k \cdot r_n)^2] - \frac{1}{R_0} [v \cdot r_n - (k \cdot v)(k \cdot r_n)] \Delta t_n \\ & + \frac{1}{2R_0} [v^2 - (k \cdot v)^2] \Delta t_n^2 - (1 + \gamma) \sum_p \frac{GM_p}{c^2} \ln |k \cdot r_{pn} + r_{pn}| \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $t_0 = T_0 + \frac{1}{c} R_0 + (1 + \gamma) \sum_p \frac{GM_p}{c^3} \ln(2R_0)$

(1) 式中的第一项包含脉冲星本身的固有动力学模型, 第二项为多普勒延迟的一阶项, 第三项为地球运动的影响(视差), 第四项正比于  $\Delta t_n$ , 是脉冲星自行产生的, 第五项正比于  $\Delta t_n^2$ , 是因脉冲星有横向运动, 到脉冲星的距离随着时间增加而产生的, 最后一项给出太阳引力场弯曲时空所产生的附加延迟。(1)式中  $(T_n - T_0)$  通常由下式计算:

$$n(T_n) = \Omega(T_n - T_0) + \frac{1}{2} \dot{\Omega}(T_n - T_0)^2 + \frac{1}{6} \ddot{\Omega}(T_n - T_0)^3 \quad (2)$$

其中  $\Omega$  为自转速率。另外, (1)式中  $t$  为坐标时, 它与台站原子钟读数  $\bar{t}$  之间的关系为:

$$\bar{t} = t - \left( \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} + U_e \right) t - \frac{v_e \cdot \xi}{c^2} - \int_0^t \left( \frac{1}{2} \frac{v_s^2}{c^2} + U_s \right) dt' \quad (3)$$

其中  $\omega$  为地球自转速度,  $\xi_e$  为地球公转速度,  $U_e$  为地球在台站处的引力势,  $U_s$  为太阳系天体在地心处的引力势,  $\xi$  为台站对于地心的位矢。利用 (1)–(3) 式, 可对大量计时观测资料作最小二乘拟合计算, 解算出脉冲星的周期及其变率, 位置和自行等参数。

Fairhead 把 Hellings 的模型简化如下<sup>[2]</sup>:

$$T_N = t_N^{\text{obs}} - \frac{R_0}{c} + k \cdot r/c + \Delta_{\text{rel}} + \Delta_{\text{TB}} + k \cdot DM/v^2 \quad (4)$$

其中  $t_N^{\text{obs}}$  是台站脉冲到达时间,  $T_N$  是脉冲星处的发射时间,  $k$  是  $t_N^{\text{obs}}$  时, 脉冲星的质心矢量,  $\Delta_{\text{rel}}$  是信号的相对论延迟,  $\Delta_{\text{TB}}$  是从地球时 TT 到坐标时 TB 的转换,  $k \cdot DM/v^2$  是星际介质色散引起的延迟。经过 (4) 式变换后,

$$T_N - T_0 = (N + \delta)P \quad (5)$$

$-0.5 < \delta < 0.5$ ,  $N$  为  $T_0$  至  $T_N$  之间的脉冲数。周期为

$$P = P_0 + \frac{1}{2} \dot{P}_0 (T_N - T_0) \quad (6)$$

其中  $P_0$ ,  $\dot{P}_0$  分别是  $T_0$  时的脉冲星周期及其变率。此外, Fairhead(1991) 证明了从毫秒脉冲星计时资料分析所确定的参数, 同选择哪种历表及原子时尺度关系密切。因而当把毫秒脉冲星计时资料应用到精密天体测量中时, 必须强调指明所使用的历表和时间尺度<sup>[2]</sup>。

## 2. Rawley 等人的模型<sup>[1,4]</sup>

第  $i$  次观测的时间坐标  $t$  通过下面的变换公式与站心到达时间  $T_i$  联系起来:

$$t(T_i) = T_i - |d - r|/c - D/f^2 - \delta T_e - \delta T_R \quad (7)$$

其中  $d$  是脉冲星的质心矢量,  $r$  是台站的质心矢量,  $D$  是脉冲星的色散常数,  $\delta T_e$  为台站时钟

到原子时的改正,  $\delta T_R$  为地球运动产生的相对论效应与台站处引力势的总影响。若设  $t$  时刻的脉冲星自转位相为

$$\phi(t) = \phi_0 + \frac{t}{P} - \frac{1}{2} \dot{P} \left( \frac{t}{P} \right)^2 \quad (8)$$

通过调整参数使残差平方和  $\sum_i \{ \phi[t \times (T_i)] - n_i \}^2$  最小, 而从一组观测的脉冲到达时间  $T_i$ , 确定出  $\phi_0$ ,  $P$ ,  $\dot{P}$  及其他参数。

### 3. Davis (1985) 的模型<sup>[5]</sup>

$$t_b = t_{\text{obs}} + (\mathbf{r} \cdot \hat{\mathbf{h}}) / c + \Delta t_r - \Delta t_g - D/f^2 \quad (9)$$

此处  $t_b$  是太阳系质心处, 脉冲到达时间的坐标时。  $t_{\text{obs}}$  是台站测的 TAI 时,  $\mathbf{r}$  是台站的质心矢量,  $\hat{\mathbf{h}}$  是脉冲星的单位质心矢量。  $\Delta t_r$  是原时 TAI 到坐标时 TDB 的相对论改正。  $\Delta t_g$  是引力传播延迟。时间单位取距太阳 1AU 的圆轨道上运动的假想钟读出的 1 原子时秒。

通过测算得到一系列质心的脉冲到达时间  $t_{bi}$ , 略去下标  $b$ , 相应于第  $i$  个脉冲到达时间的脉冲位相为:

$$\phi(t_i) = \phi_0 + \nu_0(t_i - t_0) + \frac{1}{2} \dot{\nu}(t_i - t_0)^2 \quad (10)$$

其中  $\phi_0$ ,  $\nu_0$ ,  $\dot{\nu}$  分别是  $t_0$  时刻的脉冲星位相、频率和频率导数。则脉冲到达时间的残差表示为

$$R(t_i) = [\phi(t_i) - n(t_i)] / \nu_0 \quad (11)$$

用最小二乘法拟合, 即可解出  $\phi_0, \nu_0, \dot{\nu}$  的改正及方程(9)中  $\hat{\mathbf{h}}$  包括的两个位置和两个自行项。

### 4. Backer (1987) 的残差模型<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned} \Omega R(t) = & \Delta\phi_0 + \Delta\Omega_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \Delta\dot{\Omega}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \Delta\ddot{\Omega}_0(t - t_0)^3 \\ & + [\Delta\alpha + \Delta\mu_\alpha(t - t_0)] \left[ \frac{r\Omega}{c} \cos\delta_\oplus \cos\delta \cdot \sin(\alpha - \alpha_\oplus) \right] \\ & + [\Delta\delta + \Delta\mu_\delta(t - t_0)] \left[ \frac{r\Omega}{c} (\cos\delta_\oplus \sin\delta \cos(\alpha - \alpha_\oplus) - \sin\delta_\oplus \cos\delta) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

上式中含 8 个参数: 脉冲初相  $\phi_0$ , 自转速率  $\Omega_0$ , 两个导数  $\dot{\Omega}_0$  与  $\ddot{\Omega}_0$ , 赤经  $\alpha$ , 赤纬  $\delta$  及自行  $\mu_\alpha$ ,  $\mu_\delta$ ,  $t$  是由下式改正得到的 TDB 时:

$$\frac{d(\text{TAI})}{d(\text{TDB})} = 1 - \sum \frac{GM_i}{r_i c^2} - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \left\langle \sum \frac{GM_i}{r_i c^2} - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right\rangle \quad (13)$$

在(12)式中,  $t_0$  为任意参考时间,  $r$  及  $\alpha_\oplus, \delta_\oplus$  是地球位置的质心坐标。

### 5. Foster 与 Backer (1990) 的计时阵模型<sup>[7]</sup>

设初始历元为  $t_0$ , 第  $N$  个脉冲的到达时间

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_N = & t_0 + P_0 N + P_0 \dot{P}_0 N^2 / 2 + P_0 \ddot{P}_0 N^3 / 6 + \frac{1}{c} \mathbf{r}(t_N) \cdot \mathbf{n}(T) \\ & + \frac{1}{2cD} \{ r^2(t_N) - [\mathbf{r}(t_N) \cdot \mathbf{n}(T)]^2 \} + \Delta t_R + \Delta t_0 \\ & + A \cdot DM(T) / v^2 + \Delta t_{\text{geo}} \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $P_0, \dot{P}_0, \ddot{P}_0$  分别为初始周期及其一、二阶导数,  $\mathbf{r}(t_N), \mathbf{n}(T)$  分别为第  $N$  个脉冲时

刻的台站和脉冲星的质心位矢。\$D\$为脉冲星距离, \$\Delta t\_R\$是包括所有相对论效应的时 间变换的 周期项, \$\Delta t\_c\$是台站 UTC 到标准原子时的改正, \$DM(T)\$为色散量。几何路径增长引起的折 射时间延迟为:

$$\Delta t_{geo} \approx 0.012 \mu s \left( \frac{DM}{pc \cdot cm^{-3}} \right)^{0.5} \cdot \left( \frac{v}{GHz} \right)^{-3.3} \frac{\tau}{months} \quad (15)$$

Foster 和 Backer 的计时阵模型可独立确定毫秒脉冲星自转参数。

模型(1)(2)(3)没有本质区别, 均反映台站脉冲到达时间与脉冲发射的坐标时 之间的关 系。各项所代表的内容也可分别对应起来。模型(4)给出含有 8 个参数的脉冲位相的 残差模 型, 用该模型计算出的残差表现出随机不稳定性, 不连续性(自转突变), 缓慢变化和噪声<sup>[6]</sup>。 模型(5)实质上也与前三种模型相同, 只是把自转位相(含周期及其变率)与脉冲到达时间归 并到同一式中, 但 Foster 与 Backer 引入了“计时阵”的思想, 用几颗脉冲星 的资料可算 出造成脉冲星之间数据相关性的各种影响, 提供了独立确定毫秒脉冲星自转参数的方法。

## 二、毫秒脉冲星时钟<sup>[1,8]</sup>

毫秒脉冲星 PSR 1937 + 21 是目前为止 发现的自转最快的脉冲星, 具有稳定的自转 和锐利的脉冲。周期仅为 1.558ms, 其长期 频率稳定性接近或超过最好的原子钟。4 个 月以上, 其频率稳定度达 \$6 \times 10^{-14}\$, 在更长的 时间上, 稳定度的测量受到所参考的原子 钟的稳定性的限制。

下面是比较各种时间标准的相对频率稳定 度的图示<sup>[8]</sup>。从图可见, PSR 1937 + 21 的 计时噪声随时间增加而持续降低。在比原 子钟更好的比对标准发现之前, PSR1937 + 21 的稳定度能否继续提高尚未可知。

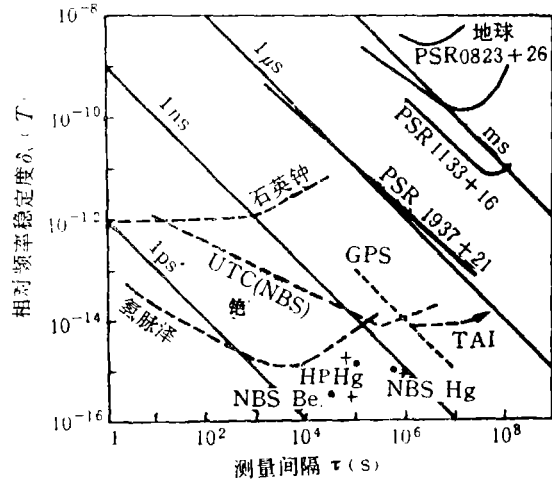


图 2

## 三、确定太阳系质心的位置误差<sup>[10]</sup>

太阳系质心的位置误差将影响脉冲星周期及其变率的解算<sup>[9]</sup>。为把脉冲到达时间与太阳 系质心联结起来, 需在站心到达时间上, 加光行时改正、相对论时钟改正和色散延迟改正 (用于射电观测)<sup>[10]</sup>。光行时改正为 \$(r\_1 + r\_2) \cdot n/c\$, 其中 \$r\_1\$ 是太阳系质心指向地心的矢量, \$r\_2\$ 为台站地心矢量, \$n\$ 为脉冲星方向的单位矢量。\$r\_1\$ 可查行星历表, 是主要的误差源。太阳 系质心假想位置中一个微小误差, 也会影响光行时改正, 但对其余两项影响不显著。

太阳系质心位置误差主要来自于外行星质量的误差。若某行星质量有误差 \$\Delta m\$, 脉冲到 达时间将会呈现正弦变化趋势, 周期等于该行星的轨道周期, 振幅为 \$\frac{\Delta m}{M} \frac{a}{c} \sin i\$, 其中 \$a\$ 为

行星轨道半长轴， $i$  是脉冲星方向与该行星轨道面法向之间的夹角。另外，几颗质量最大的小行星也值得注意，会产生  $1\mu\text{s}$  量级的正弦偏差。目前，PSR1937+21 的计时观测资料已用于确定太阳系质心位置误差。为检测计时资料的周期项，观测时间的跨度至少要等于行星的轨道周期。

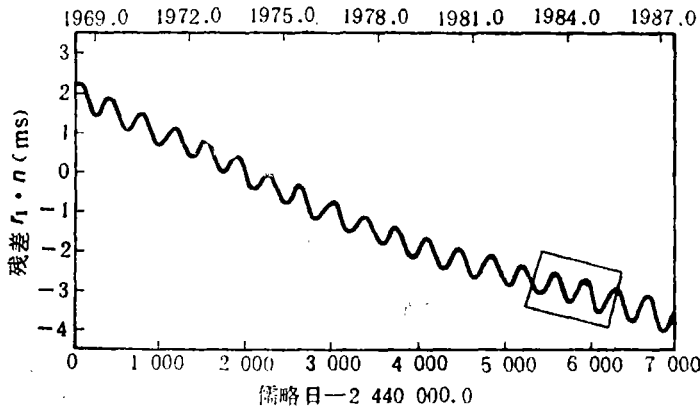


图 3

历表和 JPL DE200/LE200 历表算出的 PSR 1937+21 的  $r_1 \cdot n/c$  值之间的差异。

图中的波状线可分解为一长期项与周年正弦项。长期项即由两历表所采用的外行星质量差异引起的，由周期为 11.9 年、22.5 年等正弦项组成；周年项是因两个历表坐标轴取向不同引起的。类地行星的质量差异引起的正弦项比该周年项小几个量级。

显然，分别从 MIT 和 JPL 的两个历表得到的 PSR1937+21 的位置不同。图 4 给出的最佳拟合模型的残差曲线是从图 3 截取的一段跨度两年的曲线。它只包括二阶项和位置项。但也表现出长期项中的三阶以上的高阶项。

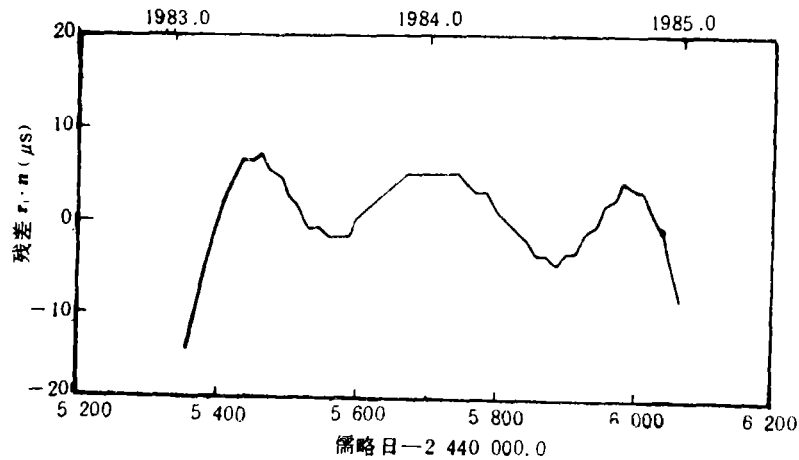


图 4

#### 四、射电参考系原点

使用不同技术观测毫秒脉冲星，有助于联结不同参考架。例如，用射电干涉仪观测脉冲星，得到以绝对赤纬和相对赤经表示的脉冲星赤道坐标，而计时观测可给出脉冲星相对于黄

比较不同的行星历表，可得到太阳系质心位置误差的估计。遗憾的是，现代历表大都以同一套测量为依据，彼此并不完全独立。因而这一比较不能揭示出历表之间的系统误差。真实误差可能大于历表之间的差异。比较新旧历表可得到对误差的非常粗略且保守的估计。图 3 是依据 MIT PEP311

道三元基的方向。因此, 只要有干涉测量位置和计时观测位置, 就可能联接射电参考架中的赤道坐标系和动力参考架中的黄道坐标系<sup>[11]</sup>。

### 1. 确定射电参考架零点的原理

若射电观测得到脉冲星位置  $k_0$ , 且位置改正  $\Delta k_0$  只是由分点改正  $e_0$  引起:

$$\Delta k_0 = e_0 n \times k_0 \quad (16)$$

其中  $n$  为指向平天极的单位矢量。以地球日心矢量代替质心矢量  $r_n$ , 则  $r_n$  的改正量为:

$$\Delta r_n = \Delta k \cdot r_n + \Delta \varepsilon \cdot l \times r_n = \delta r_n + \delta \omega \cdot k \times r_n + \Delta \varepsilon \cdot l \times r_n \quad (17)$$

其中  $\Delta k \cdot r_n$  是地球轨道根数  $(a, e, M, \omega)$  的改正引起,  $\delta r_n$  为力学因素  $(a, e, M)$  的改正引起,  $\Delta \varepsilon$  是黄道旋转引起的交角改正,  $l$  是指向平春分点的单位矢量。

考虑脉冲星计时观测的条件方程(1)<sup>[3]</sup>, 略去多普勒漂移项、视差项、相对论改正项及自行项和视向速度项, 则(1)式简化为

$$c(t_n - t_0) = c(T_n - T_0) - k_0 \cdot r_n \quad (18)$$

其中  $t_n$  为台站测的第  $n$  个脉冲到达时间,  $T_n$  为脉冲星处第  $n$  个脉冲发射时间。若设  $T_n = T_0 + f(n)$ , 其中  $f(n)$  为脉冲数  $n$  的某经验函数。微分(17)式,

$$c \cdot \Delta t = c \cdot \Delta f - \Delta k_0 \cdot r_n - r_0 \cdot \Delta r_n \quad (19)$$

将(16)、(17)式代入(19)式中, 并展开, 得到

$$c \cdot \Delta t = c \cdot \Delta f - \left( \frac{\delta a}{a} + e \sin M \delta M - \cos M \delta e \right) k_0 \cdot r_n + \{ [(1 + 2e \cos M) \delta M + 2 \sin M \delta e + \delta \omega] \cdot k + \Delta \varepsilon \cdot l - e_0 n \} \cdot k_0 \times r_n \quad (20)$$

只要对(20)式作最小二乘拟合, 就可同时解算分点改正  $e_0$ , 交角改正  $\Delta \varepsilon$  及地球轨道根数改正等, 从而确定射电参考系零点。

### 2. Fomalont 等人(1984)的讨论<sup>[12]</sup>

Fomalont 等人讨论了脉冲星计时观测与射电观测(VLA)的精度。58 颗脉冲星的 VLA 观测的位置精度( $0''.2$ )接近于计时观测位置精度, 两种位置间存在系统差( $0''.2-0''.5$ ), 这种差异来自许多方面, 如: 干涉测量中的校准误差、计时测量中脉冲星周期的内禀无规则性、地球历表误差等。简单的坐标旋转不能消除这一系统差, 只能减小 20%, 因此两种技术之间的差异并不能准确反映射电参考系与历表参考系之间的关系。

分析 VLA 与两种历表间的位置差异, 发现系统差  $\Delta \alpha \cos \delta$  对  $\alpha$  呈现某种函数关系, 且 VLA-MIT 与 VLA-JPL 有相同的位置差异:

$$[\text{VLA-MIT}] \quad \Delta \alpha \cos \delta = 0''.03 \pm 0''.03 \quad \Delta \delta = -0''.13 \pm 0''.04$$

$$[\text{VLA-JPL}] \quad \Delta \alpha \cos \delta = -0''.17 \pm 0''.04 \quad \Delta \delta = 0''.05 \pm 0''.05$$

但 VLA 观测中不可能存在这种系统差。振幅  $0''.5$ , 位相零点在赤经  $12^h$  左右的余弦波可近似表现这种  $\Delta \alpha \cos \delta$  变化, 它可解释为地面钟速在 6 月份快 1ms, 而在 1 月份慢 1ms 的正弦变化。在计时资料处理中, 忽略未知的地面钟速的正弦变化(ms 量级), 可能是产生上述系统差的原因。这种猜测有待于证实。

### 3. Dickey(1988)的讨论<sup>[13]</sup>

Dickey 讨论了利用 PSR1937+21 的射电干涉测量和计时观测资料联接射电参考系与

表 1 PSR1937+21 的 FK4 J2000.0 位置

VLA 观测历元 1983.67	$\alpha = 19^{\text{h}}39^{\text{m}}38^{\text{s}}.5613 \pm 0^{\text{s}}.0030$	$\delta = +21^{\circ}34'59''.155 \pm 0''.050$
计时观测 JPL DE200	$\alpha = 19^{\text{h}}39^{\text{m}}38^{\text{s}}.56025 \pm 0^{\text{s}}.00003$	$\delta = +21^{\circ}34'59''.1447 \pm 0''.0010$

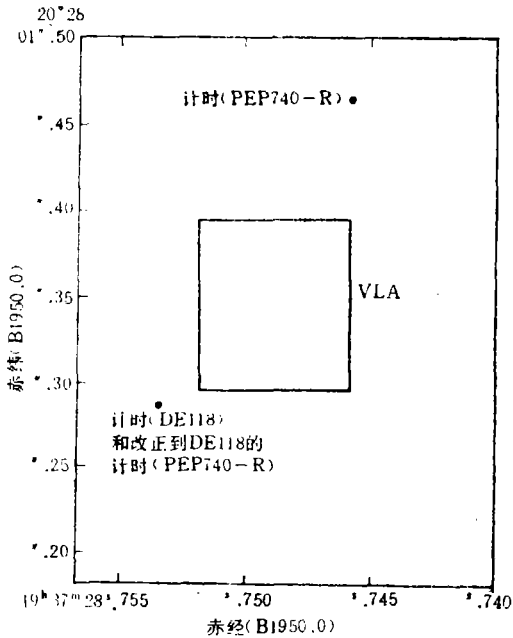


图 5

历表参考系。

分析脉冲到达时间, 可得到脉冲星在历表参考系中的精确坐标。PSR 1937+21 计时噪声低, 脉冲宽度窄 ( $60\mu\text{s}$ ), 周期只有  $1.558\text{ms}$ , 自转稳定度高, 在 Arecibo 射电望远镜的计时精度为  $\mu\text{s}$  量级, 则在历表系中的位置精度好于  $1\text{mas}$ 。

分别用历表 DE118 和 PEP 740-R 分析 JPL 和 CfA 的资料, 两历表定义的参考系相差  $0^{\text{s}}.4$  的刚体旋转。以 DE 118 参考系 (在  $0^{\text{s}}.05$  内与 FK4 相符) 为基础, 将 PEP 740-R 中的结果旋转到这个系统来比较, 得到 FK4 B1950.0 和 J2000.0 系统的计时观测结果。计时观测和 VLA 观测的结果见表 1 和图 5。

图 5 给出 PSR 1937+21 的相对位置。方框为 VLA 位置误差。实心点为 JPL 历表 DE118 和 CfA 历表 PEP740-R 的计时位置。

经坐标系旋转, PEP740-R 结果 (VLA 以北  $0^{\text{s}}.12 \pm 0^{\text{s}}.05$ ) 将与 DE118 结果 (VLA 东南  $0^{\text{s}}.09 \pm 0^{\text{s}}.05$  处) 重合。由此可见, 射电—历表参考系的联结受干涉测量的精度的限制。所以改进射电干涉测量, 可更好地联接两坐标系。

#### 4. VLBI 技术用于毫秒脉冲星<sup>[14]</sup>

这种应用是指使用 VLBI 的位相参考跟踪 PRT, 观测一个距毫秒脉冲星很近的参考源, 并在观测期间估计位相, 且要使脉冲星观测的总信噪比 SNR 大到足以确定其位置的精度。利用 PRT 可获得毫秒脉冲星的 mas 级精度的 VLBI 位置。由于接收频率须在  $2\text{GHz}$  左右 (除非能发现非常接近脉冲星的参考源), 必须很好地校准电离层。在夜间或太阳活动极小期 (例 1996 年) 进行实验效果最好。在整个观测期间使用灵敏干涉仪, 并用消色散和选通相关处理, 能获得较高的信噪比。对几颗毫秒脉冲星的 VLBI 观测, 将在  $1\text{mas}$  精度上把河外射电参考架与太阳系动力学参考架联系起来。

总之, 人们已利用 PSR1937+21 的观测资料取得较好结果。我们尚须弄清射电观测与计时观测之间系统差的真正起因, 使利用毫秒脉冲星的射电观测和计时观测来联结射电参考系与历表参考系的结果更具有说服力。

总之, 毫秒脉冲星在天体测量中有许多重要应用, 我们有必要搜寻更多的毫秒脉冲星, 以便进一步研究其在天文学与天体测量学中的应用。

五、已发现的毫秒脉冲星一览表

脉冲星名	参量			赤经 (B1950.0)			赤纬 (B1950.0)			脉冲周期 (ms)		周期变率		色散量		流量密度	
	h	m	s	d	m	as	d	m	as	ms	$10^{-20} \text{ss}^{-1}$	pc/cm <sup>3</sup>	mJy	(MHz)			
(1) 1937+21	19	37	28.74573	+21	28	01.4587	1.557806464077	10.5092(7)	71.045	1.1(3)	(430)						
(2) 1921-24	18	21	27.3888	-24	53	50.6	3.05431449218	161.87(3)	120(1)	10	(430)						
(3) 1855+09	18	55	13.6834	+09	39	13.319	5.362100452367	1.71(5)	13.31	1.0(5)	(1385)						
(4) 1859+29	19	53	26.7311	+29	00	43.734	6.133166488729	2.95(3)	104.50(3)	25(10)	(430)						
(5) 1957+20	19	57	24.9826	+20	39	59.817	1.6074016836502	1.61(9)	29.13(1)	0.5	(430)						
(6) 1516+02A	15	16		+02			5.5	7.9	29.5±1.0	0.5	(430)						
(7) 1516+02B	15	16		+02			7.9	6.218	29.5±1.0	0.5	(430)						
(8) 1257+12	12	57	31	+12	56	10	3.6	10.1(2)	200(10)	2	(610)						
(9) 1908+00	19	08		+00			5.44	3.6	86(1)	2	(610)						
(10) ?							10.3775094520		30.36(4)	15	(408)						
(11) 1639+36	16	39	53.626	+36	32	54.94	11.0757508061	-5(9)	242.153(16)	5	(600)						
(12) 1620-26	16	20	34.14	-26	24	58.0	11.5631483696	<10 <sup>-15</sup> ss <sup>-1</sup>	67(2)	4(2)	(430)						
(13) 1744-24A	17	44	57.72	-24	45	38.1	4.4789545		67(2)	3	(600)						
(14) 0021-72A	00	21	54	-72	21	00	6.127		24.5(5)								
(15) 0021-72B	00	21	54	-72	21	00	5.756780090										
(16) 0021-72C	00	21	53	-72	21	00											

续上表

历元(JD)	自行(mas/yr)	视差(mas)	发现脉冲星的时间、人物	是双星成员	位于何星团	备注	参考文献
(1) 2446977.57	$\mu_{\alpha} = -0.3 \pm 0.4$ $\mu_{\delta} = -1.4 \pm 1.0$	$\pi < 0.4$	1982年9月, Don Backer等	否	M28	色散量在减小, $\bar{P} < 1.4 \times 10^{-29} \text{g/s}^2$	4, 5, 7, 15
(2) 2446977.67			1987年6月 A. G. Lyne 等	✓		$\dot{P}$ 很大 $\dot{P} < 6.6 \times 10^{-29} \text{s/s}^2$	7, 31.
(3) 2446421.2363	$\mu < 150$	$\pi < 8$	1985年12月 V. Borjakkoff	✓		$\dot{P}$ 很小	20
(4) 2446113.1435	$\mu < 20$	$\pi < 25$	1983年5月 A. S. Fruchter等	✓		负食环很大	4, 21
(5) 2447402.0700			1989年5月 A. Wolsczcan等	✓	M5(NGC5904)	是食变双星	16, 19
(6)			1989年10月 A. Wolsczcan等	✓	M5(NGC5904)		23
(7)			1990年 A. Wolsczcan等	✓	M5(NGC5904)		23
(8)			1987年12月 S. Anderson等	有可能	NGC6780		24
(9)			1987年6月 J. D. Biggs等	有可能	NGC6624		25
(10)			1989年5月 S. Anderson等	有可能	NGC6624		26
(11)			1987年6月 A. Brinkow等	✓	M13(NGC6205)		18, 22
(12)			1989年11月 A. G. Lyne等	✓	M4		32, 33
(13) 2447837.0000			1987年11月 J. G. Ables等	✓	47Tuc	是食变双星	27, 30
(14)			1988年2月 J. G. Ables等	✓	47Tuc		28
(15)			1988年2月 R. N. Manchester等	✓	47Tuc		28
(16) 2447857.521				✓	47Tuc		17, 34



续表<sup>[34]</sup>

脉冲星	参 量	脉 冲 周 期 (ms)	色 散 量 cm <sup>-3</sup> · pc	是否双星成员
	0021-72C	5.756780	24.4	
	D	5.357573	24.7	
	E	3.536318	24.2	✓
	F	2.623579	24.4	
	G	4.040379	24.2	
	H	3.2105	24.3	✓
	I	3.48495*	23.7	✓
	J	2.1006331	24.6	✓
	K	1.7858	24.9	✓
	L	4.34617	24.5	可能
	M	3.67666	24.4	✓

\* 注: 脉冲星周期为其2倍, 以上是Manchester, R. N.等人在47Tuc中发现的11颗毫秒脉冲星。一般处于同一星团中的各个源的色散量应基本一致, 而C-M星与A, B星的色散量明显不同, Manchester等人坚持认为Ables等人观测到的A, B星不在47Tuc中。

## 参 考 文 献

- [1] Rawley, L. A., Taylor, J. H., Davis, M. M. and Allan, D. W., *Science*, 238 (1987), 761.  
 [2] Fairhead, L., *Astron. Astrophys.*, 241 (1991), 289.  
 [3] Hellings, R. W., *A. J.*, 91 (1986), 650.  
 [4] Rawley, L. A., Taylor, J. H. and Davis, M. M., *Ap. J.*, 326 (1988), 947.  
 [5] Davis, M. M., Taylor, J. H., Weisberg, J. M. and Backer, D. C., *Nature*, 315 (1985), 547.  
 [6] Backer, D. C., *Ap. J.*, 209 (1976), 895.  
 [7] Foster, R. S. and Backer, D. C., *Ap. J.*, 361 (1990), 300.  
 [8] Backer, D. C. and Hellings, R. W., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 24 (1986), 537.  
 [9] Mulholland, J. D., *Ap. J.*, 165 (1971), 105.  
 [10] Proszynski, M., in *Millisecond Pulsar*, p. 287, (1984).  
 [11] Cole, T. W., *The Observatory*, 96 (1976), 244.  
 [12] Fomalont, E. B., Goss, W. M., Lyne, A. G. and Manchester, R. N., *M. N. R. A. S.*, 210 (1984), 113.  
 [13] Dickey, J. O., in *Reference Frames*, p. 305, (1988).  
 [14] Petit, G., *Journées 1990: Systèmes de Référence Spatio-temporels*, 293 (1990).  
 [15] Backer, D. C., Kulkarni, S. R., Heiles, C., Davis M. M. and Goss, W. M., *Nature*, 300 (1982), 615.  
 [16] Fruchter, A. S. et al., *Ap. J.*, 351 (1990), 642.  
 [17] Manchester, R. N., Lyne, A. G., D'Amico, N., Johnston, S., Lim, J. and Kniffen, D. A., *Nature*, 345 (1990), 598.  
 [18] Kulkarni, S. R., Anderson, S. B., Prince, T. A., and Wolszczan, A., *Nature*, 349 (1991), 47.  
 [19] Fruchter, A. S., Stineberg, D. R., and Taylor, J. H., in *NATO Advanced Study Institute on Timing Neutron Stars*, p. 161, (1989).  
 [20] Segelstein, D. J., Taylor, J. H., Rawley, L. A., Stinebring, D. R. and Wolszczan, A., *IAU Circ. No. 4262*, (1986).  
 [21] Boriakoff, v., Buccheri, R. and Fauci, F., *Nature*, 304 (1983), 417.  
 [22] Anderson, S., Kulkarni, S., Prince, T. and Wolszczan, A., *IAU Circ. No. 4819*, (1989).  
 [23] Wolszczan, A., Anderson, S., Kulkarni, S. and Prince, T., *IAU Circ. No. 4880*, (1989).  
 [24] Wolszczan, A., *IAU Circ. No. 5073*, (1990).  
 [25] Anderson, S., Kulkarni, S., Prince, T. and Wolszczan, A., *IAU Circ. No. 5013*, (1990).  
 [26] Biggs, J. D., Lyne, A. G., Manchester, R. N. and Ashworth, M., *IAU Circ. No. 4988*, (1990).  
 [27] Lyne, A. G. et al., *Nature*, 347 (1990), 650.  
 [28] Ables, J. G. et al., *IAU Circ. No. 4802*, (1988).  
 [29] Ables, J. G., McConnell, D., Jacka, C. E., McCulloch, P. M., Hall, P. J. and Hamilton, P. A., *Nature*, 342 (1989), 158.

- [30] Nice, D. J., Thorsett, S. E., Taylor, J. H. and Fruchter, A. S., *Ap. J.*, 361 (1990), L61.
- [31] Lyne, A. G., Brinklow, A., Middleditch, J., Kulkarni, S. R., Backer, D. C. and Clifton, T. R., *Nature*, 328 (1987), 399.
- [32] Lyne, A. G., Biggs, J. D., Brinkow, A., Ashworth, M. and McKenna, J., *Nature*, 332 (1988), 45.
- [33] McKenna, J. and Lyne, A. G., *Nature*, 336 (1988), 226.
- [34] Manchester, R. N., Lyne, A. G., Robinson, C., D'Amico, N., Bailes, M. and Lim, J., *Nature*, 352 (1991), 219.
- [35] 魏 学, 天文学进展, 8 (1990), 303.

(责任编辑 刘金铭)

## Application of Millisecond Pulsars in Astrometry

Gao Jie    Xiao Naiyuan

(Astronomy Department, Nanjing University)

### Abstract

In this paper we have reviewed five models of analysis of pulse arrival time of millisecond pulsars, and the application of millisecond pulsars as a highly-stationary time and frequency standard as well as its application to the determination of the origin of radio reference systems and the errors of position of the solar barycentric system. Finally, all of the hitherto discovered millisecond pulsars are listed.