

脉冲星钟模型精度分析*

赵成仕^{1,2†} 童明雷^{1,2} 高玉平^{1,2} 杨廷高^{1,2}

(1 中国科学院国家授时中心 西安 710600)

(2 中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600)

摘要 毫秒脉冲星具有很高的自转稳定性, 利用脉冲星自转极其稳定的特性可以开展许多应用研究, 如: 脉冲星时间标准的建立、宇宙背景引力波的探测、X射线脉冲星导航应用等等. 利用国际脉冲星计时阵(International Pulsar Timing Array, IPTA)中J0437-4715和J1713+0743 2颗源的实测数据开展脉冲星钟模型参数精度分析和脉冲到达时间(Time Of Arrival, TOA)预报精度研究. 通过研究得知, 目前脉冲星自转频率测量精度为 10^{-15} Hz, 频率1阶导数测量精度为 10^{-23} s $^{-2}$, 且自转参数测量精度随观测时间跨度每4-5 yr提高1个量级. 另外, 利用J0437-4715 10 yr观测数据建立的钟模型, 其脉冲到达时间预报偏差4.8 yr之内可保持在1 μ s之内. 因此, 利用该脉冲星建立时间标准用于校准原子时, 可以使原子时相对于地球时(Terrestrial Time, TT)的偏差在4.8 yr之内小于1 μ s.

关键词 脉冲星; 普通, 时间, 方法: 解析

中图分类号: P127; 文献标识码: A

1 引言

脉冲星具有体积小(半径 ~ 10 km)、密度大($\sim 10^{14}$ g/cm 3)、磁场强($\sim 10^{12}$ Gs)等特点^[1]. 强磁场产生高速带电粒子, 使其从磁极两端发出电磁辐射, 由于磁轴与自转轴不重合, 当电磁波扫过地球时, 地球上的观测者就可以探测到周期性的脉冲信号. 1982年Backer等人发现了第1颗毫秒脉冲星PSR B1937+21^[2], 观测表明毫秒脉冲星的自转周期非常稳定, 周期1阶导数为 $10^{-18} - 10^{-20}$ s $\cdot$ s $^{-1}$. 1991年Taylor提出毫秒脉冲星是自然界最稳定的钟, 并认为毫秒脉冲星的长期稳定性可以与原子钟相媲美^[3]. 随着更多毫秒脉冲星的发现, 以及射电望远镜观测能力不断提高, 毫秒脉冲星计时观测得到迅速发展, 有力推动了脉冲星应用领域研究, 如: 脉冲星时间标准的建立^[4], 检测太阳系行星历表误差^[5]、探测残余宇宙背景引力波^[6]、脉冲星导航应用等^[7]. 脉冲星计时应用研究都是基于脉冲星自转的稳定性, 其自转参数可以被精确测量, 如J0437-4715, 周期为5.757451831072007(8) ms, 可精确测量到小数点后15位. 脉冲星自转极其稳定的特性

2016-11-08收到原稿, 2016-12-21收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11373028、U1531112、11403030)、中国科学院西部之光青年学者A项目、地理信息工程国家重点实验室开放研究基金项目(SKLGIE2014-M-1-4)资助

[†]zhaocs@ntsc.ac.cn

使得辐射的脉冲信号到达太阳系质心(Solar System Barycenter, SSB)的时间可以被精确预报. 因此, 脉冲星自转参数测量精度直接决定脉冲星的应用价值, 例如脉冲星时的稳定性、脉冲星导航精度、引力波探测精度等.

本文利用国际上公开的国际脉冲星计时阵(International Pulsar Timing Array, IPTA)观测数据开展脉冲星钟模型精度分析, 主要涉及的研究内容包括目前脉冲星参数的测量精度分析, 钟模型参数测量精度与观测数据时间跨度关系, 脉冲到达时间预报精度分析等等, 其中, 第2节介绍钟模型建立方法; 第3节通过对实测数据分析, 给出钟模型参数精度及其预报的脉冲到达时间精度; 第4节为结论与讨论.

2 钟模型建立方法

脉冲星具有极其稳定的自转特性, 被誉为自然界最稳定的天文时钟. 以高稳定的脉冲星自转周期为基准建立的时间系统称为脉冲星时系统. 对一个具体的脉冲星而言, 脉冲星时可用脉冲信号相位的泰勒级数展开形式表示, 称为脉冲星相位模型, 表达式如下:

$$\phi = \phi_0 + \nu(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{\nu}(t - t_0)^2 + \cdots, \quad (1)$$

式中, ϕ 为 t 时刻的脉冲相位, t 为脉冲星时, t_0 为参考历元, ϕ_0 为参考历元时刻的脉冲相位, ν 、 $\dot{\nu}$ 分别为参考历元时刻的频率和频率1阶导数. 根据相位模型得知, 脉冲星钟预报的脉冲到达时刻 t_p 为^[8]

$$t_p = \left[\phi_0 + \nu(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{\nu}(t - t_0)^2 \right] P(t). \quad (2)$$

式中, $P(t)$ 为 t 时刻脉冲星自转周期, 脉冲星钟相位模型参数 ϕ_0 、 ν 、 $\dot{\nu}$, 又称为脉冲星钟模型参数.

脉冲星钟模型描述了脉冲星本征的自转特性, 根据上面脉冲到达时刻预报公式, 可以预报脉冲到达SSB处的时刻, 其预报精度直接与脉冲星自转参数测量精度有关. 目前脉冲星自转参数主要利用地面射电望远镜通过计时手段进行测量, 具体的钟模型参数测量方法如下: (1)首先利用射电望远镜接收(通常为L波段)并记录脉冲星的辐射信号, 然后经过消色散和周期折叠等处理, 得到稳定的积分脉冲轮廓, 其中, 观测参考时间由原子钟提供; (2)经过多次观测得到一系列积分脉冲轮廓, 将观测得到的一系列脉冲星轮廓与标准模板轮廓(高信噪比)互相关, 得到脉冲到达天线的时间(Time Of Arrive, TOA)和观测误差, 其中, 标准模板轮廓是通过长时间观测数据周期折叠获得; (3)将到达天线的TOA转换为脉冲达到SSB处的TOA, 其中, 时延修正项包括: 参考时间误差、几何时延、引力时延、爱因斯坦时延、色散时延等; (4)将脉冲到达SSB处的TOA与初始脉冲星钟模型预报的到达时间作差, 得到计时残差, 即地球时(Terrestrial Time, TT)与脉冲星时(Pulsar Time, PT)之差. 如果是双星系统, 钟模型预报到达SSB的时间需要修正双星轨道引起的时延; (5)将得到的计时残差利用最小二乘法拟合, 并不断迭代拟合得到高精度的脉冲星自转参数和天体测量参数, 即更新了脉冲星钟模型参数.

3 利用观测数据分析钟模型精度

3.1 脉冲星历表参数精度分析

高精度钟模型的建立依赖于长期计时观测资料, 国际上脉冲星计时观测研究主要以计时阵的模式开展, 即选择一组具有高稳定自转特性的毫秒脉冲星, 按照事先设定的观测计划进行观测. 目前全世界已有3个脉冲星计时观测阵, 分别是澳大利亚Parkes脉冲星计时阵(Parkes Pulsar Timing Array, PPTA)、北美脉冲星计时观测阵(North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves, NANOGrav)、欧洲脉冲星计时阵(European Pulsar Timing Array, EPTA). 3个计时阵通过国际合作组成IPTA. 目前IPTA计时阵中共包括46颗毫秒脉冲星, 其中, 有2颗源(J0437-4715、J1938+2134)的TOA测量精度为30 ns^[9]. 2016年初IPTA观测数据对外公开发布¹.

本文利用IPTA公开数据分析脉冲星钟模型精度, 主要使用J0437-4715和J1713+0743 2颗源的数据, 数据时间跨度分别为14.8 yr和19.4 yr, 其中, J0437-4715观测数据来源于PPTA, J1713+0743观测数据来源于PPTA、EPTA和NANOGrav 3个计时阵. 观测数据的详细介绍请参考Verbiest等人2016年发表的文献^[10]. J0437-4715为目前计时精度最高的源, 计时残差均方根(Root Mean Square, RMS)为108 ns, 且具有X射线辐射, 可以应用于X射线脉冲星导航. J0437-4715的历表参数测量精度为目前测量精度最高的源, 自转参数测量精度为: 频率误差 $\sim 6 \times 10^{-15}$ Hz, 频率1阶导数误差 $\sim 7 \times 10^{-23}$ s⁻²; 天体测量参数计时测量精度为: 赤经误差 $\sim 15 \mu\text{as}$, 赤纬误差 $\sim 100 \mu\text{as}$, 赤经自行误差 $\sim 0.5 \mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$, 赤纬自行误差 $\sim 0.5 \mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$, 视差误差 $\sim 30 \mu\text{as}$. J1713+0743为数据跨度最大的源(19.4 yr)且没有红噪声, 计时残差均方根(RMS)为343 ns, 适用于研究脉冲星钟模型参数的精度.

为了进一步研究钟模型参数精度, 将J0437-4715和J1713+0743观测数据按照不同时间跨度进行计时分析, 来评估钟模型参数精度与数据时间跨度的关系. 具体分析时, 将数据以步长为1 yr逐渐增加数据跨度进行计时分析, 由于在这里只讨论钟模型参数精度, 在具体计时分析时只拟合自转参数, 其他参数(天体测量参数、双星轨道参数)统一采用IPTA发布的最佳参数值, 其中, 参考时间都采用TT(BIPM2013), 太阳系行星历表采用DE421. 利用国际上通用的脉冲星计时分析软件Tempo2对脉冲星钟模型参数进行拟合^[11-12]. 图1为2颗源的自转参数拟合精度与数据时间跨度的关系, 其中左图为频率的不确定性与数据时间跨度的关系, 右图为频率1阶导数的不确定性与数据跨度的关系. 从图1得知脉冲星自转参数的测量精度与观测时间跨度成指数相关, 其数据跨度越长, 自转参数的测量精度越高, 每4-5 yr自转参数测量精度提高1个量级. 另外, 在同样数据时间跨度内J0437-4715自转参数的测量精度比J1713+0743高1个量级, 意味着脉冲星自转参数的测量精度与源本征的自转稳定性有关.

下面分析目前脉冲星天体测量参数精度对计时残差的影响, 利用前面对J0437-4715计时分析时获得的天体测量参数值误差进行分析, 图2给出了各天体测量参数误差对计时残差的影响, 其中, 上图为视差(parallax, PX)误差对计时残差的影响, 中图为自行(proper motion, PM)误差对计时残差的影响, 下图为赤经(right ascension, RA)和赤

¹ IPTA数据下载网址: <http://www.ipta4gw.org>

纬(declination, Dec)误差对计时残差的影响. 从图2中各误差对计时残差的影响得知, 目前测量精度最高的源J0437-4715其天体测量参数误差对计时残差的影响均小于20 ns, 自行误差对计时残差的影响随时间跨度具有累积效应, 10 yr内对计时残差的影响也小于20 ns.

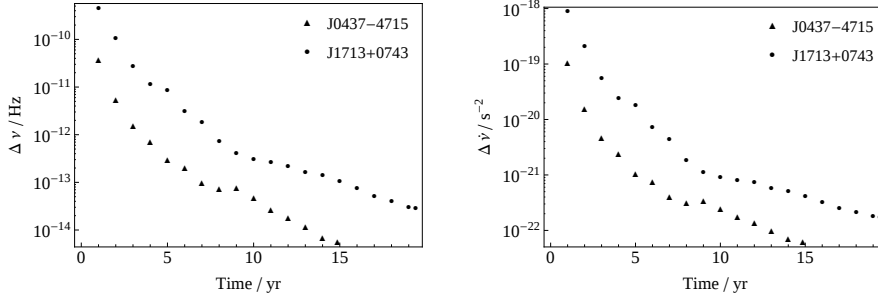


图 1 J0437-4715和J1713+0743自转参数拟合的不确定度与数据时间跨度的关系, 其中, 左图为频率的不确定度, 右图为频率1阶导数的不确定度.

Fig. 1 The relationship between the uncertainty of rotational parameters and the observational data span, left: the uncertainty of spin frequency, right: the uncertainty of the first derivative of spin frequency

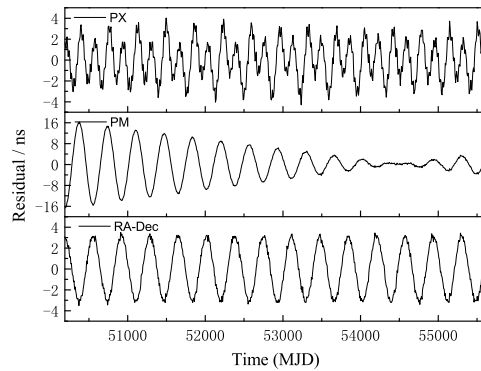


图 2 J0437-4715天体测量参数误差对计时残差的影响, 其中, 上图为视差误差对计时残差的影响; 中图为自行误差对计时残差的影响; 下图为赤经和赤纬对计时残差的影响.

Fig. 2 The effects of parallax (top), proper motion (middle), right ascension, and declination (bottom) errors on pulsar timing residuals

3.2 脉冲星钟模型预报精度分析

脉冲星在应用到导航及时频领域时, 需要利用钟模型参数对脉冲到达时间进行预报, 因此, 有必要研究脉冲星钟模型的预报精度. 这里同样利用前面2颗源的数据研究不同时间跨度数据建立的钟模型对到达时间预报精度的影响, 其中, J0437-4715数据跨度为14.8 yr, 在分析时, 分别以5 yr、10 yr为时间跨度建立钟模型预报4.8 yr内的脉冲到达SSB的时间, 通过与望远镜观测的TOA转换到SSB处的TOA进行比较来研究钟模型的预报精度. 对J1713+0734采用19.4 yr的观测数据, 分别以5 yr、10 yr、15 yr为时间跨度建立钟模型分析4.4 yr时间跨度内的脉冲到达时间预报精度.

图3为J0437-4715建立钟模型数据时间跨度分布说明, 图中10 yr之后的数据时间跨

度为将要预报的部分(红色表示), 10 yr 内的数据分为2种情况建立钟模型: (1)利用整个10 yr数据建立钟模型; (2)利用5–10 yr共5 yr的数据建立钟模型. 建立钟模型时拟合的参数包括: 自转参数(频率、频率1阶导数), 天体测量参数(位置、自行、视差), 双星轨道参数. 图4为J0437-4715不同时间跨度数据建立的钟模型预报TOA与实测TOA的偏差, 左图中, 圆点(红色)为10 yr数据建立的钟模型预报精度; 蓝色三角形为5 yr数据建立的钟模型预报精度; 黑色方块为利用全部数据(14.8 yr)建立的钟模型预报精度, 其表示数据跨度内(4.8 yr)的最佳钟模型的预报精度. 右图表示5 yr、10 yr数据建立的钟模型与最佳钟模型(14.8 yr)的预报精度偏差. 从图4得知, 10 yr数据建立的钟模型预报精度明显优于5 yr跨度数据建立的钟模型, 10 yr数据跨度建立的钟模型4.8 yr内的预报偏差小于 $1 \mu\text{s}$, 5 yr数据建立钟模型预报精度优于 $2 \mu\text{s}$. 通过比较得知, 在建立钟模型时使用数据时间跨度短时, 脉冲星的位置测量不精确, 导致预报偏差存在明显的周年项, 这是因为在将观测TOA转换到SSB处与钟模型预报TOA比较时, 计算几何时延用到脉冲星的方向矢量. 图4右图通过比较5 yr、10 yr数据建立的钟模型与最佳钟模型(14.8 yr)的预报精度偏差, 得知5 yr数据预报4.8 yr相对于最佳钟模型预报偏差小于 $2 \mu\text{s}$, 而且存在明显的周年项, 说明位置不准确(相对于最佳参数). 10 yr数据预报4.8 yr相对于最佳模型预报偏差小于 $0.6 \mu\text{s}$, 也存在周年项, 但是幅度小于5 yr数据建立的钟模型, 说明其高于5 yr数据跨度给出的脉冲星位置精度.

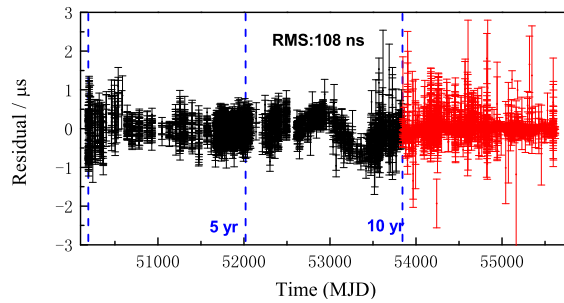


图3 J0437-4715钟模型的建立及TOA预报时间跨度数据说明

Fig. 3 The establishment of the clock model of J0437-4715 for different data spans and the corresponding TOA predictions

利用上面同样的方法分析了J1713+0743的钟模型预报精度, J1713+0743数据跨度为19.4 yr, 在数据分析时以5 yr、10 yr和15 yr为时间跨度建立钟模型, 分析最后4.4 yr的脉冲到达时间预报精度. J1713+0743钟模型的建立及预报时间跨度数据说明见图5. 15 yr内的数据分为3种情况建立钟模型: (1)利用整个15 yr数据建立钟模型; (2)利用5–15 yr共10 yr的数据建立钟模型; (3)利用10–15 yr共5 yr的数据建立钟模型. 图6为J1713+0743不同时间跨度数据建立的钟模型预报TOA与实测TOA的偏差, 以及5 yr、10 yr、15 yr数据跨度建立的钟模型与最佳钟模型(19.4 yr)预报精度的偏差. 根据图6得知5 yr、10 yr、15 yr数据跨度建立的钟模型预报精度相差不大, 4.4 yr内的预报精度都在 $5 \mu\text{s}$ 之内, 另外, 从图6中右图得知, 不同时间跨度建立的钟模型与最佳钟模型预报偏差均很小, 小于图4中右图J0437-4715的5 yr数据建立钟模型与最佳模型的预报偏差. 这主要与脉冲星内部本征噪声有关, 该源长期的计时残差主要为白噪声, 意味着脉

冲星历表参数的拟合没有红噪声的影响, 尤其对天体测量参数的拟合影响很小, 图6没有明显的周年项. J0437-4715有红噪声的影响, 当观测数据时间跨度短时, 红噪声对钟模型建立的精度影响较大, 不适合用于TOA的长期预报.

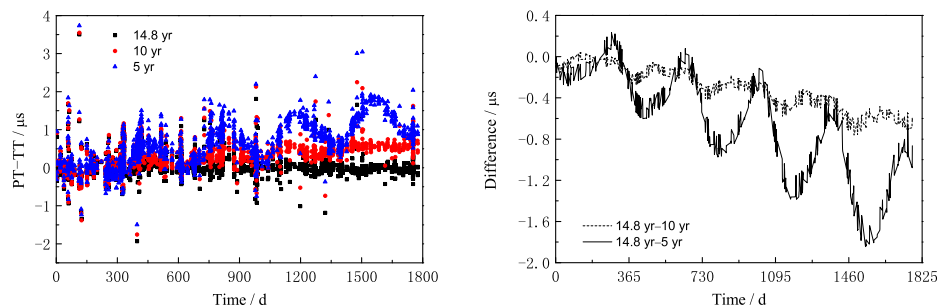


图 4 左图: J0437-4715数据跨度为5 yr、10 yr和14.8 yr建立的模型预报4.8 yr的预报精度; 右图: 5 yr、10 yr建立的钟模型与14.8 yr数据建立的钟模型预报TOA之差

Fig. 4 Left: the predicted TOA precision for 4.8 yr using the clock model of J0437-4715 with a data span of 5 yr, 10 yr, and 14.8 yr, respectively; Right: the predicted time offsets between different clock models

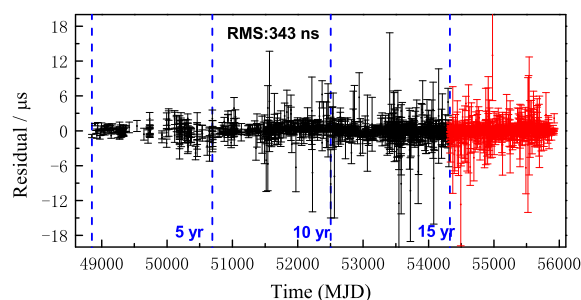


图 5 J1713+0743钟模型的建立及TOA预报时间跨度数据说明

Fig. 5 The establishment of the clock model of J1713+0743 for different data spans and the corresponding TOA predictions

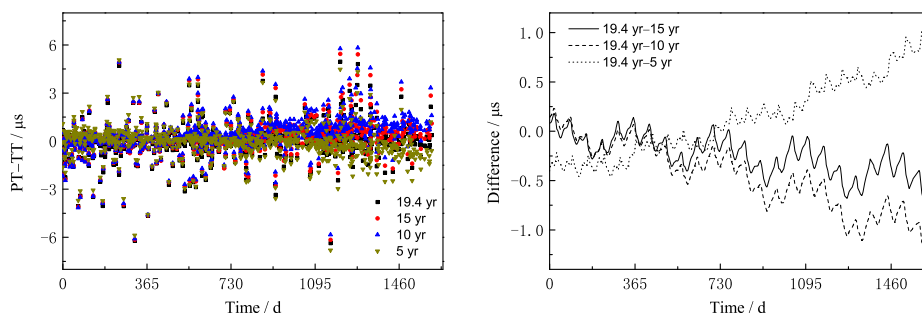


图 6 左图: J1713+0743数据跨度为5 yr、10 yr、15 yr和19.4 yr建立的模型预报4.4 yr的预报精度; 右图: 5 yr、10 yr和15 yr建立的钟模型与19.4 yr数据建立的钟模型预报TOA之差

Fig. 6 Left: the predicted TOA precision for 4.4 yr using the clock model of J1713+0743 with a data span of 5 yr, 10 yr, 15 yr, and 19.4 yr, respectively; Right: the predicted time offsets between different clock models

4 结论与讨论

国际上主要利用原子钟进行时间的产生和保持, 原子时的特点是短期稳定性好, 其长期稳定性不如脉冲星时, 存在频率漂移. 目前各个时间保持实验室主要利用铯/氢原子钟来保持时间, 铯/氢原子钟的频率准确度为 $10^{-12} - 10^{-13}$ Hz, 意味着由1台铯原子钟或氢原子钟保持时间, 1 yr内由频率不准确引起的偏差约为几十微秒量级. 世界上主要的时间保持实验室都保持有自己独立的地方原子时系统TA(k), 其中, k 代表实验室的名称. 国际权度局(International Bureau of Weights and Measures, BIPM)网站定期发布各实验室保持的地方原子时TA(k)与国际原子时TAI(International Atomic Time)的偏差², 每年3月份发布最新的地球时TT与TAI的偏差³. 根据TAI与TA(k)、TT(BIPM)与TAI的偏差, 可以计算得知TT与地方原子时TA(k)的偏差. 图7给出了TT(BIPM2013)-TA(k)相对于数据起始点(MJD53844)的偏差, 数据跨度(MJD: 53844—55619)与前面图4中J0437-4715钟模型预报数据跨度一致, TA(k)表示时间保持实验室保持的地方原子时, 其中, NTSC代表中国科学院国家授时中心(虚线), SU代表俄罗斯国家时间实验室(点线), NIST代表美国国家时间实验室(点虚线), 它们与TT(BIPM2013)在5 yr之内的相对偏差分别为9 μ s、28 μ s和68 μ s. 图中实线表示J0437-4715 10 yr数据建立的钟模型预报PT与TT(BIPM2013)的偏差, 即TT-PT, 其5 yr内的预报偏差小于1 μ s. 从图7得知, 脉冲星时PT的长期(1 yr以上)自主保持精度目前优于地方原子时TA(k), 可被用于长期自主保持TA(k)或其他时间标准(如军用时间)的准确度, 不再需要通过其他手段与TAI或TT比对来保持. 下面简单介绍利用脉冲星时校准TA(k)的原理方法.

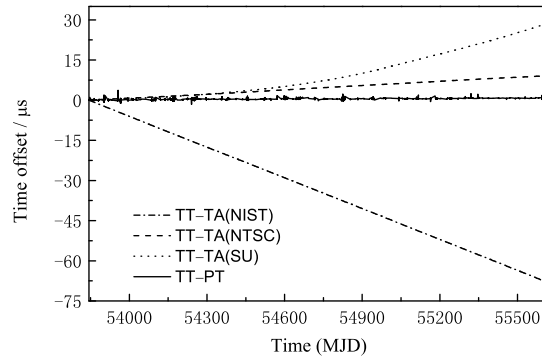


图7 TT与地方原子时TA(k)、脉冲星时PT的偏差

Fig. 7 Time offsets between TT and TA(k), PT

根据前面介绍的脉冲星钟模型建立方法得知, 高精度的脉冲星钟模型的建立依赖于高精度的参考时间TT, 脉冲星计时残差为地球时TT与脉冲星时PT之差, 即

$$\Delta_{\text{res}} = \text{TT} - \text{PT}. \quad (3)$$

若在测量脉冲星钟模型参数时采用高精度TT为参考时间, 比如采用TT(BIPM2013), 且

²TA(k)数据下载地址: <ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/publication/tailab/>

³TT(BIPM)数据下载地址: <ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/ttbipm/>

分析获得的脉冲星计时残差很小, 如J0437-4715 14.8 yr的计时残差均方根为108 ns, 则在百纳秒精度范围内可认为

$$PT \approx TT. \quad (4)$$

这意味着建立的脉冲星时PT精度可以近似代表地球时TT的精度(Δ_{res} 代表近似精度). 在脉冲星时应用时, 若地方原子时TA(k)直接作为观测站的参考时间(不校准到TT), 利用之前的高精度钟模型进行脉冲星PT预报, 获得计时残差且不对残差进行拟合, 则残差可表示为

$$\Delta t = TA(k) - PT, \quad (5)$$

其中, PT的精度近似代表建立脉冲星钟模型时所用TT的精度. 将(4)式代入(5)式, 得

$$\Delta t = TA(k) - TT. \quad (6)$$

即计时残差 Δt 代表地方原子时TA(k)相对于TT的偏差, 利用此偏差可以校准TA(k), 根据图7中PT相对于TT的精度得知, 目前利用IPTA中J0437-4715 10 yr观测数据建立的PT来自主校准TA(k), 校准后TA(k)相对于TT的偏差4.8 yr之内保持在1 μs 之内. 另外, 利用BIPM网站发布的TT与TAI的偏差, 也可以间接得到TA(k)相对于TAI的偏差.

脉冲星钟模型精度直接决定脉冲到达时间的预报精度, 本文利用IPTA公布的J0437-4715和J1713+0743 2颗源的数据分析给出了钟模型参数值与误差, 目前部分脉冲星位置通过计时手段测量精度优于0.1 mas, 其误差在计时残差中的影响小于10 ns. IPTA中计时精度最高的源J0437-4715的自转频率测量精度达到 10^{-15} Hz量级, 另外, 通过实测数据分析不同时间跨度(5 yr, 10 yr)数据建立的钟模型预报精度, 得知: 数据跨度越长建立的钟模型精度越高, J0437-4715 10 yr数据跨度建立的钟模型4.8 yr内的预报偏差小于1 μs , 其可用于检测原子时的长期漂移. 目前国际上主要用于保持时间的铯/氢原子钟, 其存在很大的频率漂移, 以中国科学院国家授时中心保持的地方原子时TA(NTSC)为例, 原子钟的频率不准确性在1 yr内引起的时间偏差约为2 μs . 也就是说, 利用J0437-4715建立的脉冲星时可以在1 yr之后检测出原子时的偏差, 并实现对其校准, 可以使原子时在4.8 yr之内精度保持在1 μs 之内. 脉冲星时的长期稳定性可以用于星载钟时间的长期自主保持. 根据前面的分析得知, 脉冲星钟模型参数的精度随数据跨度的增大在不断地提高, IPTA测量的钟模型约每4–5 yr提高1个量级. 这意味着随着未来观测数据的增多, 脉冲星参数的测量精度也将越来越高. 随着我国FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope)射电望远镜的建成, 以及未来平方公里阵射电望远镜(Square Kilometre Array, SKA)的建成将大大提升脉冲星的观测能力, 将会使得脉冲星的测量精度优于10 ns, 提升脉冲星时的短期精度.

参 考 文 献

- [1] Lyne A G, Smith F G. Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 1-2
- [2] Backer D C, Kulkarni S R, Helles C, et al. Nature, 1982, 300: 615
- [3] Taylor J H Jr. IEEEEP, 1991, 79: 1054
- [4] Hobbs G, Coles W, Manchester R, et al. MNRAS, 2012, 427: 2780
- [5] Champion D, Hobbs G, Manchester R, et al. ApJL, 2010, 720: 201

- [6] Demorest P B, Pennucci T, Ransom S M, et al. *Nature*, 2010, 467: 1081
- [7] Downs G S. N74-34150. NASA Technical Reports, 1974: 1
- [8] 杨廷高, 高玉平, 童明雷, 等. *天文学报*, 2015, 56: 370
- [9] Hobbs G, Archibald A, Arzoumanian Z, et al. *CQGra*, 2010, 27: 084013
- [10] Verbiest J P W, Lentati L, Hobbs G, et al. *MNRAS*, 2016, 458: 1267
- [11] Hobbs G, Edwards R, Manchester R. *MNRAS*, 2006, 369: 655
- [12] Edwards R, Hobbs G, Manchester R. *MNRAS*, 2006, 372: 1549

Analysis of the Precision of Pulsar Time Clock Model

ZHAO Cheng-shi^{1,2} TONG Ming-lei^{1,2} GAO Yu-ping^{1,2} YANG Ting-gao^{1,2}

(1 National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

(2 Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

ABSTRACT Millisecond pulsars have high rotation stability, which can be applied to many research fields, such as the establishment of the pulsar time standard, detection of gravitational wave, spacecraft navigation by using X-ray pulsars and so on. In this paper, we employ two millisecond pulsars PSR J0437-4715 and J1713+0743 which are observed by International Pulsar Timing Array (IPTA), to analyze the precision of pulsar clock parameter and the prediction accuracy of pulse time of arrival (TOA). It is found that the uncertainty of spin frequency is 10^{-15} Hz, the uncertainty of the first derivative of spin frequency is 10^{-23} s⁻², and the precision of measured rotational parameters increases by one order of magnitude with the accumulated observational data every 4–5 years. In addition, the errors of 4.8 yr TOAs which are predicted by the clock model established by the 10 yr data of J0437-4715 are less than 1 μ s. Therefore, one can use the pulsar time standard to calibrate the atomic clock, which can make atomic time deviate from TT (Terrestrial Time) less than 1 μ s within 4.8 yr.

Key words pulsars: general, time, methods: analytical