

文章编号: 1000-8349(2011)01-0097-8

基于脉冲星计时的航天器自主定位误差估计方法

田 丰^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 目前很多学者希望从“X 射线脉冲星自主导航”的导航算法研究入手, 利用数据分析或仿真进行验证。其中关于航天器自主定位的误差估计方法、误差量级和各种影响因素的讨论, 并没有在给定详细初始条件的基础上系统性地说明问题。为了分析上述问题, 需从天体测量学的角度出发, 对自主定位的各种误差源及其影响因素进行探讨和误差量级的估计。首先, 由脉冲到达时间测量精度的定义出发, 在对比了其特征及其与计时噪声的区别和联系的基础上, 在现有观测精度条件下, 分析了对于不同距离的脉冲星是否可以用平面波代替球面波的表达, 是否可以在时延表达式中忽略脉冲星距离的不确定性以及是否可以忽略脉冲星距离相关项。其次, 在缺少脉冲星视向速度资料的情况下, 分析了脉冲星计时数据处理和建立脉冲星自转模型的影响。最后, 从原理上分析了脉冲星空间分布对自主定位精度的影响。

关键词: 导航; 脉冲星; 自主定位; 计时观测; 时延

中图分类号: P17; P145.3 **文献标识码:** A

1 引 言

脉冲星是高速自转的中子星, 磁极两端的辐射束绕其自转轴做周期转动, 如同茫茫宇宙中的灯塔, 可以利用这些特性进行航天器的自主定位。同一脉冲波前到达真空质心和到达航天器的时延包含了航天器的位置信息, 在航天器上同时记录几个不同方向的脉冲到达时刻 (Time of Arrival, 下文都缩写为 TOA) 即可以解算其瞬时位置。

在实现自主定位前, 需要地面天体测量支持系统为自主定位提供所需的脉冲星自转模型。事先筛选出周期稳定、有射电和 X 射线多波段辐射的脉冲星, 同时考虑脉冲星在天球上的合理分布。

对于毫秒脉冲星, 其自转周期虽然不是常数, 有着缓慢的自转减慢, 但却非常稳定并可

收稿日期: 2010-04-13; 修回日期: 2010-08-16

资助项目: 国家自然科学基金 (10973030, 10903022, 10703010); 天文联合基金 (10878022)

建模给出预测。通过长期监测毫秒脉冲星,可不断提高其周期的精度。其中 PSR B1855+09 自转周期为 5.362 ms,观测 15 a 的稳定性优于 USNO,接近 PTB^[1]; PSR J0437-4715 自转周期为 5.757 ms,观测了 4 a,其 1 a 的稳定性就优于 USNO 和 PTB^[2]。这说明毫秒脉冲星的自转是非常稳定的,通过地面台站在射电波段的长期监测可以逐步精化其自转模型,可以不断地外推,这是实现自主定位的前提。将地面台站的 TOA 观测值经过一系列处理,归纳脉冲信号在假想真空质心处的固有变化规律,建立已观测脉冲星的自转模型,即脉冲星钟模型。在搭载了 X 射线接收机的深空航天器上对已有自转模型的多颗脉冲星进行同时性的计时测量,即可解算出航天器的瞬时位置。

有关脉冲星计时的航天器自主定位,1967 年第一颗射电脉冲星被发现之后,Downs 于 1974 年就提出了一种行星际导航方案^[3,4]。当时还未探测到具有 X 射线辐射的脉冲星,Downs 的方案是基于射电波段的计时观测,需要在深空航天器安装数个 2 m 天线。根据其方案的估计,航天器的位置误差可能达到 150~1 500 km。后来 Wallace 指出脉冲信号在星际空间传播信号被削弱,因此基于射电观测的系统需要很大的天线,而携带大天线对航天器自主导航是不现实的^[5]。

1976 年英国的天文观测卫星第一次探测到 X 射线脉冲星,这让学者们看到了脉冲星自主导航的新契机。1981 年 Chester 和 Butman 提出通过 X 射线脉冲星进行导航^[6]。即航天器装载小尺寸的 X 射线传感器,接收 X 射线光子。他们提议的导航方法是将 X 射线脉冲到达深空航天器和地球卫星的时刻做差分。

在这基础上,1993 年 Wood 由 ARGOS (Advanced Research and Global Observation Satellite) 的 NRL-801 实验提出,在 X 射线脉冲星导航中综合解算近地轨道卫星的姿态、位置和时间^[7]。后来美国海军天文台继续进行这个实验,1996 年 Hanson 设计了详细的 X 射线导航理论方法^[8]。给出了通过 X 射线脉冲星对航天器进行自主守时,即在航天器上使用锁相环路维持高精度时钟的方法。

1999 年和 2000 年,海军天文台在 ARGOS 卫星上的特殊天体实验 (Unconventional Stellar Aspect, USA) 提供了进一步检验脉冲星导航的平台^[9]。其实这个实验最开始是为了验证解算卫星姿态的方案。这期间的数据后来被用来解算卫星位置和守时。

Sheikh 于 2005 年在其博士论文中详细论述了脉冲星自主导航的算法^[10],并分别通过几何定位法(位置改正算法)和卡尔曼滤波递归估计方法解算了卫星的位置和速度。通过位置改正算法得到的卫星位置估计值和美国海军天文台地面台站导航系统外部参照得到的位置估计值存在 5~15 km 的误差。他推断这种误差是由卫星上的 GPS 接收机和钟不准造成,每 4 h 就需要更新卫星导航系统软件的数值。

随着脉冲星观测技术的发展和精度的提高,加上无线电导航在空间范围上的局限性以及易受干扰等缺点,欧美国家加强了脉冲星导航的可行性研究,使得这个领域的工作从纯理论研究扩展到航天领域的应用研究。

到目前为止,大多数的研究都是期望不依赖地面支持而实现航天器完全自主导航。但这样做很难实现其标称的精度。因为不论是在航天器上自主生成脉冲星自转模型还是用卡尔曼滤波方法进行轨道改进和精化,都是建立在航天器的轨道是比较准确的基础上。实际上,已

经远离绕地轨道的深空航天器的轨道很难定得准确。如果在自主定位之前先建立脉冲星自转模型, 就可以提高时延模型的建模精度, 这是因为自转模型的建模精度直接关系到最终自主定位的误差大小。建立的自转模型的精度受很多误差源的影响, 而且这些误差源在之后实现航天器自主定位的过程中仍会再次出现, 所以有必要对这些误差源引起的最终定位误差大小进行量级的估计。

本文将影响自主定位的误差源分为两大类: 观测误差和模型误差。其中观测误差包括设备误差、观测参数配置不恰当引起的误差和外界信号干扰等; 模型误差包括脉冲星自转的固有误差和时延模型误差。下面将对影响定位误差的各种误差源进行分析和量级的估计, 并提出减小误差影响的方法。这有助于进一步分析脉冲时延模型的各个分量, 而且在实现航天器自主定位之前也必须对定位所能达到的精度有预先的估计。

2 观测误差

观测误差直接影响待建立的脉冲星时延模型的精度, 这里主要分析地面台站脉冲星计时观测的设备误差以及观测参数配置不恰当引起的误差。脉冲星的个别脉冲在脉冲形状和强度上会有变化, 但几百个脉冲累加得到的平均脉冲轮廓 (在接收到脉冲期间辐射能量随时间的变化曲线) 是稳定的。其中脉冲辐射持续时间约为周期的百分之一到十分之一。

地面台站的 TOA 测量精度, 即 TOA 测量的不确定性 (uncertainty), 与脉冲宽度 W 和脉冲轮廓的信噪比 S/N 成比例关系^[11]:

$$\sigma_{\text{TOA}} \approx \frac{W}{S/N} \propto \frac{S_{\text{sys}}}{\sqrt{t_{\text{obs}}\Delta f}} \times \frac{P\delta^{3/2}}{S_{\text{mean}}}, \quad (1)$$

W 为脉冲宽度, 常用的有 W_{10} (为脉冲峰值 10% 高度处的脉冲宽度) 和 W_{50} (为脉冲峰值 50% 高度处的脉冲宽度), S/N 为信噪比。根据表达式 (1) 的前一个关系式, 单脉冲的不确定性与脉冲宽度 W 成正比, 但很多个脉冲轮廓叠加后信噪比提高, 得到的 TOA 的精度也会提高。 S_{sys} 为系统等效流量密度, 即系统噪声温度与望远镜增益的比率, Δf 为观测带宽, t_{obs} 为积分时间, P 为脉冲星的自转周期, δ 为脉冲宽度占周期百分比 (频宽比), S_{mean} 是脉冲星的平均流量密度。由式 (1) 的第 2 个关系式可知, 最优的 TOA 测量精度需要一个灵敏的宽带系统, 即很小的 S_{sys} 和较宽的 Δf , 用来观测流量较强的 (较高的 S_{mean}) 且具有较小频宽比的短周期脉冲星^[11]。而且很多个脉冲轮廓叠加后信噪比提高, 得到的 TOA 的精度也会提高。

这里需要说明, 虽然经过统计, 大部分长周期脉冲星的脉冲宽度 W 占周期百分比都较小, 但仍有一部分例外情况。而且长周期的脉冲星很多自转都不稳定, TOA 测量精度也不高。所以为了提高测量精度, 最好是选择具有较小频宽比 δ 的短周期脉冲星。

观测误差还包括人为配置观测参数不恰当引起的误差, 包括观测带宽、积分时间和采样率。仅与脉冲星有关的观测参数为脉冲星的流量密度、自转周期和频宽比。这些观测参数共同决定了 TOA 的精度。下面分析脉冲宽度、采样率和信噪比的关系。

根据式 (1), 如果需要获取较高精度的 TOA, 观测短周期的脉冲星 (脉冲宽度小) 只是其

中一个必要条件, 还有别的重要因素影响其精度, 包括采样率、观测带宽和积分时间等。如果观测参数的配置不能适应不同周期的脉冲星, 则观测短周期脉冲星也不一定能得到高精度的 TOA。例如, 在观测中使用长周期 (1 s 左右) 脉冲星的采样率 (1 ms) 对毫秒脉冲星进行采样, 其后果是得到的单脉冲轮廓无法折叠出积分脉冲轮廓; 使用毫秒脉冲星的采样率 (1 μ s) 对长周期 (1 s 左右) 脉冲星进行采样, 其后果是过密的采集引入了大量噪声, 反而使信噪比降低。上海天文台 2010 年 4 月对脉冲星的实验性计时观测中即反映了这种问题。因此, 观测短周期的脉冲星以得到高精度的 TOA 是建立在一定的观测条件下的, 在观测中必须配置恰当的采样率。

除了以上的观测误差源, 设备延迟误差和外界信号干扰也极大地影响 TOA 的精度。因此, 提高 TOA 测量精度的主要途径是改进计时观测的设备、技术、观测方法和数据处理方法。

3 模型误差

这里的模型误差仅指建立的脉冲星自转模型或时延模型不能完全反映真实情况所引起的误差, 不包括观测误差进入模型后产生的模型误差。

3.1 脉冲星的计时噪声

计时噪声主要与脉冲星的物理机制有关, 是由脉冲星固有的自转不稳定性所产生, 表现为连续的不稳定的变化^[12], 使得脉冲星的自转参数呈现一种类随机的变化。计时噪声不同于观测产生的误差, 所以这里将其归类为模型误差, 可以通过消噪模型去除。在做轮廓叠加的时候, 这种与脉冲星自转有关的计时噪声影响了周期的准确性, 自然也影响了 TOA 的测量精度。

年轻的、不稳定的脉冲星比年老的毫秒脉冲星表现出更大的计时噪声。通过测量自转频率的二阶导数可识别出这种计时噪声^[11]。去除计时噪声的模型包括“多项式白化”和“谐波白化”^[11]。另一种解决办法是在选取导航用脉冲星时, 将自转周期稳定、计时噪声很小的毫秒脉冲星作为待观测的导航星即可。

3.2 时延模型的误差

自主定位能达到什么样的精度是倍受关注的, 可以通过简单的方法对误差进行预估计。本文从以下几个方面分析时延模型的误差: 脉冲星的距离, 脉冲星的球面坐标方向以及导航星空间分布对时延模型的影响。

脉冲信号从脉冲星当前位置传播到航天器当前位置的真空光行时 δt_{nvac} 的表述为^[13]

$$\begin{aligned} \delta t_{\text{nvac}} = & \frac{1}{c}R_0 - \frac{1}{c}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n) + \frac{1}{2cR_0}[\mathbf{r}_n^2 - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n)^2] + \frac{1}{c}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})\Delta t_n \\ & + \frac{1}{2cR_0}[(\mathbf{v}\Delta t_n)^2 - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}\Delta t_n)^2] - \frac{1}{cR_0}[\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}_n - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v})(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n)]\Delta t_n, \quad (2) \end{aligned}$$

其中, R_0 是脉冲星在参考时刻的质心距离, \mathbf{k} 为脉冲星的质心方向, \mathbf{r}_n 为航天器的瞬时质心

坐标矢量, v 是脉冲星相对于质心的三维速度, Δt_n 等于参考脉冲和当前脉冲发射时刻的间隔。上式右端第 1 个分项为脉冲从脉冲星的参考位置到达质心的真空光行时^[13], 前 3 项表示脉冲星相对于航天器的光程位置, 第 4、5 项为脉冲星自行引起的光行时的变化, 第 6 项为航天器位移和脉冲星自行对光行时影响的交叉项。

3.2.1 脉冲星的距离

根据澳大利亚国家天文台 ATNF 编制的脉冲星星表, 目前已观测的脉冲星中, 距离最近为 0.13 kpc, 最远为 30.0 kpc^[14]。由于脉冲星的距离远近相差很大, 作为一种简单的预估计, 在给定的观测精度条件下, 需要分析是否可以省略与距离有关的二阶小量时延分项。这只是为了定性地说明问题, 实际工作中的计算是严密的, 不能省略二阶时延项。

如果脉冲的波前为平面波, 则忽略式 (2) 的第 3 项、第 5 项和第 6 项。当航天器的坐标方向和脉冲星的坐标方向垂直时, 可给出脉冲星在最小距离 0.13 kpc 和最大距离 30.0 kpc 时二阶时延项的估计值。对应距离最近的脉冲星, 式 (2) 的第 3 项可达 9.3 μs 。对应距离最远的脉冲星, 式 (2) 的第 3 项为 0.04 μs 。式 (2) 的第 5 项、第 6 项与脉冲星 Δt_n 时段内 (从参考时刻到当前时刻) 的自行大小有关, Δt_n 很短则这两项都很小, 但随着 Δt_n 的增加, 其值将越来越大, 可达到微秒量级甚至更大。因此, 在进行预估计时, 不能简单地用平面波的表达代替球面波的表达。

接下来分析脉冲星距离误差对时延分项的影响。目前很多脉冲星的距离是通过测定色散量而获取, 还有一部分是通过测定周年视差得到距离。由于脉冲星的距离很难定得准确, 这两种方法得到的距离有时会相差几 kpc。

根据 3.2 节的式 (2) 可知, 与脉冲星距离有关的项为第 3、5 和 6 项, 对 R_0 求偏导即可估计脉冲星距离误差的影响量级。设定最近的脉冲星其距离的不确定性为 10%, 最远的脉冲星其距离的不确定性为 50%。则考虑了脉冲星距离误差的影响后, 对应距离最近的脉冲星, 式 (2) 的第 3 项其偏导数可达 0.8 μs 。对应距离最远的脉冲星, 式 (2) 的第 3 项其偏导数为 0.013 μs 。式 (2) 的第 5 项、第 6 项与脉冲星 Δt_n 时段内的自行大小有关。因此, 在进行预估计过程中, 当脉冲星距离较近时, 需要考虑脉冲星的距离误差, 不能一看到距离相关项是高阶项就忽略不计。

3.2.2 脉冲星的视向速度

脉冲星的视向速度很难准确测得, 而且目前 ATNF 的脉冲星星表也未提供脉冲星的视向速度^[14]。缺少脉冲星视向速度资料会带来哪些影响呢?

地面台站看到的脉冲星自转的视周期与脉冲星视向速度是有关的, 在计时观测中做脉冲轮廓的折叠时, 需要对视周期进行修正。

此外在建立脉冲星时延模型的过程中, 由于缺少视向速度, 计算时只能将其取为 0, 将脉冲星切向运动速度 v_t 做为脉冲星的运动速度。这种情况相当于设定脉冲星仅做切向运动。

式 (2) 中与脉冲星运动速度 v 有关的项也会发生变化。由于脉冲星的质心方向 k 和它的切向运动速度 v_t 是正交的, 则式 (2) 的第 4 项、自行的一阶项变为 0。同时第 5 项和第 6 项

也有变化。式 (2) 变为如下的形式:

$$\delta t_{\text{nvac}} = \frac{1}{c}R_0 - \frac{1}{c}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n) + \frac{1}{2cR_0}[\mathbf{r}_n^2 - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n)^2] + \frac{1}{2cR_0}(v_t \Delta t_n)^2 - \frac{1}{cR_0}v_t \mathbf{r}_n \Delta t_n \quad . \quad (3)$$

下面分析视向速度对建立脉冲星自转模型是否有影响。

目前在没有精确的视向速度资料的情况下, 可将视向速度设为 0, 用切向速度代替脉冲星的坐标运动速度。这种影响将进入自转模型, 实际上存在的视向速度会影响计算的精度, 表现为长期的漂移。此时的自转模型反映的脉冲星的固有特征虽然含有脉冲星视向运动的长期项, 但通过对脉冲星长期的监测, 可以拟合出这个长期项。

将来为了实现自主定位, 需要通过 VLBI 方法测定更为精确的脉冲星自行和视差, 而且脉冲星视向速度也需要通过光谱分析的方法测定。有了完备的观测资料, 就可用完全严格的公式来进行计算, 在建立自转模型之前即可将自行的影响完全扣除。

3.2.3 脉冲星的坐标方向

这里脉冲星方向误差是指事先由 VLBI 方法得到的脉冲星方向的不确定性, 所以这里将方向误差归为模型误差。根据几何时延的一阶模型:

$$\tau = \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{r} = \frac{1}{c} r \cos \theta, \quad |\mathbf{n}| = 1 \quad . \quad (4)$$

关于 θ 求偏导数, 可估计脉冲星方向误差对自主定位精度的影响: 当航天器位于距质心一个 AU 处, 且航天器的质心方向和脉冲星的质心方向垂直时, 经过推算, 0.1 mas 的脉冲星方向误差对时延 τ 的最大影响可达 0.242 μs 。这与 NRAO 的 Rick Fisher 的估算结果一致, 他估计 0.1 as 的方向误差最大可产生 240 ms 的计时误差^[15]。

3.2.4 脉冲星空间分布对定位的影响

根据测量学的后方交会测距原理, 在空间直角坐标系 $O - XYZ$ 中, 如果待求点周围的已知参考点越多、分布越均匀, 则待求点的定位精度也就越高。如果已知参考点分布不均匀, 仅在局部方位, 比如待求点在靠近原点的位置, 所有已知参考点都位于偏离 X 轴正、负方向 30° 范围以内的方向, 则待求点最终的定位结果必然是 X 方向的坐标分量精度高于 Y 、 Z 方向。

脉冲星计时的航天器自主定位需要先求解航天器处和真空真心处的时延, 相当于差分测距, 这与后方交会测距原理类似。在进行航天器的自主定位时, 选定的脉冲星应尽量在天球上均匀分布, 避免选定的脉冲星只是分布在局部方位。

除此之外, 由于选择性效应, 观测到的脉冲星在银道面上比较集中。北银极的赤纬约为 $+27^\circ$, 则在赤道坐标系中, 脉冲星在赤纬方向的分布较多, 待选择的脉冲星数量非常多 (注意需要考虑北天可见和南天可见脉冲星)。但赤经方向的脉冲星分布是不均匀的, 由 ATNF 的脉冲星星表可以很明显地看到这一点。再加上脉冲星的流量大小、自转周期长短、自转是否稳定、是否射电和 X 射线脉冲星等条件限制, 选定脉冲星其分布可能就不那么理想。

4 结 语

从减小观测误差和减小模型误差的角度入手, 提高脉冲星自转模型的建模精度, 在此基础上可提高航天器自主定位的精度。

提高 TOA 测量精度的主要途径是减小设备延迟误差和外界信号干扰, 提高观测系统灵敏度和带宽。观测流量较强且具有较小频宽比的短周期脉冲星可得到更高的精度。同时需要改进观测方法和数据处理方法。

实际上建立的脉冲星自转模型或时延模型不能完全反映真实情况, 总会存在一定的误差。首先需要对脉冲星固有的计时噪声建模消除其影响。接下来建立的时延模型其误差来源主要有脉冲星距离、视向速度、脉冲星坐标方向和脉冲星分布的影响。

对于远距离脉冲星, 其距离不确定性所产生的影响, 在 $0.1 \mu\text{s}$ 计时观测精度条件下可忽略; 对于近距离脉冲星, 应尽可能通过高精度三角视差测定方法提高距离的准确性。

在没有精确的视向速度资料的情况下, 用切向速度代替脉冲星的坐标运动速度, 这种影响将进入自转模型, 表现为长期项。此时的自转模型反映的脉冲星的固有特征虽然含有脉冲星视向运动的长期项, 但通过对脉冲星长期的监测, 其自转模型可以不断得到精化并给出新的预测值。

脉冲星计时的自主定位是采用差分测距原理, 这决定了选取的脉冲星应尽量在天球上均匀分布, 避免选定的脉冲星只是分布在局部方位。

自主定位不仅对测时精度要求很高, 同时还需要高精度的脉冲星坐标方向。

致谢

中国科学院上海天文台的赵铭研究员、唐正宏研究员在天体测量理论方面给予作者许多指导, 同济大学的夏纾雨在文本写作方面提出了很好的修改意见, 作者在此表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] Hotan A W, Bailes M, Ord S M. MNRAS, 2006, 369: 1502
- [2] Verbiest J P W, Bailes M, van Straten W, et al. ApJ, 2008, 679: 675
- [3] Downs G S. NASA Technical Reports N74-34150, 1974: 1
- [4] Downs G S, Reichley P E. NASA Technical Reports NASA-CR-163564, Pasadena, California: JPL, Calif. of Tech., 1980: 33317
- [5] Wallace K. Journal of Navigation, 1988, 41: 358
- [6] Chester T J, Butman S A. NASA Technical Reports N81-27129, 1981: 22
- [7] Wood K S. In: Small Satellite Technology and Applications III, Horais B J Ed. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 1993: 105
- [8] Hanson J E. Doctoral Dissertation. California: Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics, 1996: 97

- [9] Wood K S, Kowalski M, Lovellette M N, et al. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Space Conference and Exposition, AIAA Paper 2001-4664, Albuquerque New Mexico, 2001
- [10] Sheikh S I. Doctor Dissertation. Maryland: University of Maryland, 2005: 279
- [11] Lorimer D R, Kramer M eds. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 202
- [12] Lyne A G, Graham-Smith F eds. Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 85
- [13] 赵铭, 黄天衣. 中国科学G辑: 物理学力学天文学, 2009, 39: 1671
- [14] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>, 2010
- [15] http://www.cv.nrao.edu/~rfisher/Ephemerides/ephem_use.html, 2010

Error Estimation of Pulsar Timing Based Spacecraft Autonomous Positioning

TIAN Feng^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Recently, researchers use data analysis or simulation to validate algorithm of “X-ray pulsar autonomous navigation”. Concerning the error estimation methods, the error magnitude and the various affecting factors of spacecraft autonomous positioning, a conclusion has not given based on the specific initial conditions. In this paper, Astrometry method is used to estimate errors of spacecraft autonomous positioning based on pulsar timing. Obviously, uncertainty of a timing measurement has direct influence on autonomous positioning; this uncertainty has difference and relation between timing noise. Given pulsars with different distance, we discuss whether or not to replace expression of spherical wave with plane wave, whether or not to ignore pulsar distance uncertainty even distance related term under recent arrival-time precision. We make analysis of how to build pulsar clock model when lack of radial velocity. At last, we analyze affecting features of pulsars spatial distribution on positioning coordinate components of a spacecraft.

Key words: navigation; pulsar; autonomous positioning; timing observation; time delay