第 47 卷 第 3 期　　天 文 学 报　　Vol.47 No.3
2006 年 7 月　　ACTA ASTRONOMICA SINICA　　Jul., 2006

50 m 射电望远镜的时间标准问题的讨论*

倪广仁 [1]　许录平 [2]　和康元 [1]

(1 中国科学院国家授时中心　陕西临潼　710600)
(2 西安电子科技大学电子工程学院　西安　710071)

摘要　定量分析了原子钟的时间频率特性产生的守时时差，估算了原子时频标准的守时时差对有关物理量测量所产生的影响．给出了现代实用型原子钟的性能指标比较表，和用现代无线电手段传递、比对时频标准信号达到的指标．论述了高精度时间频率标准在大地、深空间探测、 VLBI 及毫秒脉冲星计时应用测量中的重要地位、作用．阐述了 50 m 射电望远镜的科学目标、“嫦娥”1 号探月卫星任务对时间标准提出的高精度要求和选用原则．为了实现其科学目标和任务，必须建设与其研究目标相适宜的、标准尽可能高的原子时频标准，才能获得高质量的数据信息和高效能的研究成果．并对建设怎样的时间标准等问题进行讨论和提出具体建议．

关键词　**天体测量，射电天文，时间标准，原子钟**
中图分类号：　P 161;　　**文献标识码**：　A

1　引言

高精度的时间频率标准在现代国防、科学实验、空间、大地测量、定时、定位及深空探测等物理测量应用研究活动中的地位至关重要．近年来，氢原子钟的准确度已优于 3E-13, 稳定度接近 1E-16 ($\tau \geq 1$ 年). 实验室型铯原子喷泉钟的准确度和稳定度都进入到 1E-15 水平　(NIST, LPTF, PTB)[1]．这样高精度实验室型原子时基准的尽快工程化，将会对现代空间测量产生很大效益．我国国家天文台正在建设中的 50 m 射电望远镜的科学目标主要是涉及脉冲星天文、物理、天体测量、演化研究、引力波检测、脉冲星巡天、复测以及地外空间环境、太阳活动、 VLBI 技术应用研究等，而 ms 脉冲星脉冲到达时间 (MSPTOA) 的测量研究是脉冲星天文研究的重心，因为高质量的信息获取，必然要求脉冲到达时间 (PTOA) 数据是高精度的．首当其冲的 “嫦娥” 一号探月卫星对 50 m 镜的时频标准也提出了很高的要求．所以，为何建立高精度的时间标准问题，对 50 m 镜来讲，应该引起人们关注和重视．围绕这一主题，先定量分析原子钟时频特性在时间同步系统设备中对守时时差的影响，进而定量计算了原子钟这些影响在测角、测速、测时等物理测量中产生的误差．为了便于讨论、分析，给出了实用型原子钟性能指标比较表，和利用现代时频信号传递比对方法所能达到的同步精度性能表．进而阐述了科学目标和应用需

2005-06-21 收到原稿，　2005-10-20 收到修改稿
* 国家自然科学基金 (60472085) 资助项目

求对时间标准提出的高稳定度、高准确度、高可靠度和高适宜度的科学决策原则，并进行了讨论．也对 50 m 射电望远镜系统中建设怎样的时频标准提出了具体建议．

2　原子钟的时频特性对空间物理量测量的影响

本地时间频率标准 t 在时间同步系统的设备中对守时的影响可用下面的时间误差公式表示 [2]:

$$\Delta t = t - t_s = t_0 + At + 1/2Dt^2 + \Delta_1(t) + \Delta_2(t) + \Delta x(t)\,, \tag{1}$$

式中的 Δt 为 t 时的时差，　t_s 为 t 时的参考标准时间 (如 UTC(USNO), t_0 为 $t = 0$ 时的初始时差 (历元时差), A 为本地频标的准确度，　D 为本地频标的漂移率 (老化率), $\Delta_1(t)$ 为频标的稳定度引起的时差，　$\Delta_2(t)$ 为外部环境特性等对钟的影响，　$\Delta x(t)$ 为相对论中的引力势等引起的时差 [3,4].

为了说明相关问题，列表给出实用型原子钟性能特征 [1], 见表 1:

表 1　常用商品原子钟的性能

Table 1　Performances of commercial atomic clocks

Performances		clocks			
		Commercial cesium clock		Commercial H.maser	
		Standard	New clock	Active clock	Passive clock
Stability	1s	5E−11	5E−12	3E−13	1E−12
	1h	4E−13	1E−13	1E−14	3E−14
	1d	7E−14	4E−14	5E−15	1E−14
	10d	6E−14	4E−14	2E−15	3E−15
Accuracy		3E−12	1.5E−12	3E−13	5E−13
Reproducibility		5E−13	5E−13	3E−14	1E−13
Drift rate		1E−15/d	1E−15/d	1E−15/d	1E−15/d

现代常用来表征频率稳定度的 A llan 方差，也用来定量分析测速、测角和测距系统中频率稳定度对测量结果的影响．如在毫秒脉冲星脉冲到达时间 (MSPTOA) 测量中，近年来测量得最好的结果是 0.1μs (RMS), MSPTOA 的长期稳定度 $\sigma y(\tau)$∼10^{-15} ($\tau \geq$1 年)．而一般 MSPTOA 测量对极弱信号的积分时间为 1200∼ 10^4 S (S/N≥40 dB)．我们可以估算一下本地频标铯钟 ($A = 10^{-12}$, $\sigma y(\tau) = 10^{-13}$, τ = 1200 s); HP5071A 优型铯原子钟对测量过程中引入的时差在 1.332 ns, 实际天文基地站比该结果更差．计算过程是：　At 的时差为 1.2 ns; 频率漂移率，若取 D=$10^{-15}/h$, 那么 $1/2Dt^2$ 产生时差约为 0.2 PS(τ=1200 s); 钟的不稳定度 (10^{-13}) 带来的随机时差为 0.10 PS; 钟的外部环境特性如温度项，每变化 1° C, 时差约有 1 PS∼10 PS 的变化，若在 τ = 1200 S 内，温度变化 ±0.2° C, 随机时差约有 (0.2—2) PS 的波动 [2]; $\Delta x(t)$ 为相对论效应引起的时差，如地球引力势等对钟的影响．依据文 [4] 给出的数据，钟位置海拔每升高 1000 m, 原子钟在一年里会约有 3.4μs 的延时效应，由此推算出在 τ=1200 s 内，原子钟减慢 0.130 ns．对于空载钟，还应考虑多普勒频移等对原子钟造成速率波动效应 [3.4.]．由以上公式计算得到本地原子钟守时时差

$\Delta t = t_0 + 1.2\,\mathrm{ns} + 0.132\,\mathrm{ns} = t_0 + 1.332\,\mathrm{ns}$. 在此，我们取 t_0 为本地频标与 USNO 的 UTC(USNO) 在 $t = 0$ 时的同步时差. 根据文 [5], 2002 年 $|\mathrm{UTC} - \mathrm{UTC(k)}| < 100\,\mathrm{ns}$ 的实验室时频比对情况 (BIPM2002 年年报). $|\mathrm{UTC} - \mathrm{UTC(k)}|\,\max$ 在 5 ns∼88 ns (即 RMS 为 2.8∼34.9 ns). 所以，本地铯原子钟 ($A = 10^{-12}$, $\sigma y = 10^{-13}$) 相对于 UTC(BIPM) 的守时时差约在 6.332 ns∼89.332 ns. 显然，本地铯钟时差主要来源于与基准钟时频传递过程中的同步时差，加上钟的准确度、稳定度和漂移率等影响. 而后面时差三项之和仅占 0.132 ns. 为了说明问题，我们给出了现代时频信号传递比对精度指标比较 [6], 见表 2. 所以，减小本地钟与基准钟之间的守时传递时差一直是在时频标准信号传递中我们不断关注的指标. 在空间探测、定位、跟踪测量中，钟的准确度和稳定度直接会对测量产生影响而且不易实时修正. 就 “嫦娥”1 号探月卫星工程而言，据报道，预期 “嫦娥” 一号升空后，将先用 9 天多时间完成调相轨道、地月转移轨道和环月轨道段的飞行. 卫星在此 9 天关键时段飞行中，我们估算一下准确度为 10^{-13} 的氢钟会给测量带来多大的时差：同样用上面公式仅 At 一项引起的时差就为 77.76 ns, 折合距离误差约为 23.33 m. 取钟的漂移率为 10^{-15}, 9 天带来的时差约为 3.5 ns. 假定执行任务时取 $t_0 = 5\,\mathrm{ns}$ ($\tau = 9\,\mathrm{d}$), 总计时差约为 86.26 ns. 其后 3 项影响较小，可略去估算. 可见，本地时间标准对空间探测的影响应该重视. 又比如测速度：钟的不稳定度对测速的影响，由一阶多普勒表达式 $f' = f_0(1 \pm v'/c)$ 给出. 式中 f_0 是发射频率，而 v' 是速度在沿发射机和接收机连线方向上的分量. 若用 $\sigma y(\tau)$ 代替 $\Delta f/f_0$, 则测速的准确度 (偏差) 为 $\sigma v'(\tau) = c \cdot \sigma y(\tau)$[7]. 若取氢钟的稳定度 $\sigma y(\tau) = 1 \cdot 10^{-13}$, 取样 $\tau = 1000\,\mathrm{s}$, 那么，对于 1000 s 取样时间间隔所进行的二者之间径向目标平均速度的测量，来自氢原子钟不稳定性给测速带来的平均预期误差为 $\sigma v'(1000s) = 3 \cdot 10^{-3}\mathrm{cm/s}$.

表 2 时频传递精度等的比较

Table 2 Comparison of some precise time and frequency transfers

Method	Accuracy	Stability
GPS broadcast (No SA)	10 − 40 ns	2×10^{-14}
GPS-CV	1-10ns	1×10^{-14}
TWSTFT	1-5ns	$(0.1\text{-}1)\times10^{-14}$
GPS-CP	0.1ns	1×10^{-15}

在利用 VLBI 技术进行角度测量时，其精度受到相干信号积分时间以及台站间基线距离的限制. 可以估算钟的准确度、稳定度等对角度测量误差的影响.

测角灵敏度表达式 [7]:

$$\Delta\theta = C \cdot \Delta t/L \cdot \sin\theta\,, \tag{2}$$

其中， Δt 为 τ (如 3600 s) 时间间隔测量时原子钟特性对测量 (准确度) 产生的时差，C 为光速， L 为基线长度 (取空载 VLBI 终端距 18000km), θ 为天线到接收机的连线与两站基线 L 间测量时的夹角 (如 $\theta = 45^\circ$). 那么，测角误差公式近似为 [7], $\sigma\Delta\theta(\tau) \approx C \cdot \tau \cdot \sigma y(\tau)\Delta t/L \cdot \sin\theta \approx 3.1 \cdot 10^{-6}$ 角秒 (取 $\sigma y(3600\,s) = 10^{-14}$). 这个结果与 1996 年以来国际 VLBI 测量的最好结果 $3{\cdot}10^{-4}$ 角秒 (因为当时原子钟的稳定度约为 10^{-12}) 表明了

不同量级钟的稳定度对测量结果的影响是显然的 [8] . 实际上 VLBI 及 MSPTOA 技术成功的关键之一是原子钟的准确度、稳定度和漂移量等, 并提出了优于 10^{-15} 量级的要求.

3　50 m 射电望远镜的目标任务及对原子钟的要求

科学目标任务主要包括脉冲星天文、物理、演化、巡天、引力波检测及 MSPTOA 测量和与原子时交叉比对、互验关系的研究. 首当其冲的工程任务是 “嫦娥” 一号探月卫星工程的实施跟踪观测和研究. 涉及的科学研究目标的内容可能包括以下几个方面： (1) 天体演化学方面的研究 [9]. 脉冲星到达时间 (PTOA) 的高精度测量数据给我们带来许多信息. 它被证认为中子星, 这是 20 世纪天文学一个里程碑式的成就, 它启动了包括中子星、黑洞在内的致密天体的 “强研究”, 它把演化的线索延伸到高能天体物理学领域, 对它本身的探索带来了对天文观测能力和方法的挑战. (2) 在天体物理学与物理学上, 作为一种有着极其致密的内部结构, 极强表面磁场, 非常高而稳定的自转频率, 以及偶而会发生 “星震” 的恒星, 它的动力学原理, 辐射机制, 与周围物质的相互作用等等的研究, 都为恒星物理学带来新的开拓. 这种开拓要求结合到相应基础物理学研究, 如建立脉冲星结构模型、动力学模型、辐射模型. 针对性的天文观测用以验证和开拓. 1982 年毫秒脉冲星的发现, 以及脉冲星双星的发现, 使脉冲星研究更上一层楼和拓展了新的研究目标. 脉冲星双星的研究, 不但联系到 MSP 计时, 而且成功地间接验证了引力辐射效应. (3) 在时间计量学和应用研究上, MSP 以极其稳定的脉冲周期 P 和极其稳定的周期变率 P', 可望用以监测原子时的长期稳定度 (一个时间基准的长期稳定度是它作为时频基准的基本特征之一). 关键技术是如何精确测量脉冲星到达时间. 目前 TOA 测量精度是 0.1μs. 长期稳定度约为 $10^{-14}-10^{-15}$ ($\tau \geq 1$ 年), 与原子钟相当. 进行 MSPTOA 的常规、持续、系统的多星测量相当于产生一种 “脉冲星时”, 而实施这种测量设备系统可以称作为 “脉冲星钟”. 建立和不断完善 “脉冲星钟” 的努力正处在一个 “多学科交叉点” 上：与时间计量学前沿上的交叉, 引进 “脉冲星时”, 以达到与 “原子时” 同时发展, 交叉比对的新格局; 脉冲星物理研究前沿上的交叉; 通过长时间监测脉冲星时间特性的变化, 以深入到内在物理. 宇宙学前沿上的交叉：通过测量脉冲星时长周期 (年、 10 年) 变化, 用以探测极早期宇宙引力波事件. 周期高度稳定的脉冲周期作为一种探测信息. 凡是能够影响电波到达时间 (TOA) 的外因, 都可以反过来看作可以通过 MSPTOA 的测量加以探究的因素, 如脉冲波传播经过星际介质, 介质造成电波的色散量可以从不同频率信号到达接收机时刻的不同延时量来得出, 从而可建立介质的物理模型, 或通过已知的色散模型推算出脉冲星的距离. (4) 地球在太阳系空间的运动, 使 PTOA 有着周年起伏. 反过来, 通过 MSPTOA 的分析, 可以发现地球位置对计算位置的偏差, 从而探索其规律和原因. 银河系引力事件及河外星系引力事件 (如致密天体的双星并合等) 产生的引力波经过地球时同样可以用 MSPTOA 的测量分析发现. 研究不同频率脉冲星辐射脉冲的闪烁效应来探测星际介质尺度和相对于星体的切向速度等等. (5) 除以上目标外, 脉冲星巡天以发现新的脉冲星和复测已知的脉冲星进行相关开拓深入研究, 如是否有黑洞的观测研究以及对来自脉冲星的相对论性星风辐射特性的认识. (6) 中子星超高密度、超强磁

场、超强辐射、超高压、超高温等极端物理现象的应用研究. 在当代物理学研究中占有重要地位, 脉冲星是神奇的天然的宇宙实验室 [10]. 50 m 射电望远镜设计的频段在 (232 、611 、 1665 、 2300 、 5000 、 8400) MHz 等 6 个波段上. 观测 1 小时的灵敏度为 0.1 mjy, 天线接收系统的噪声温约为 30 K. 10 小时的积分, 可使灵敏度达到约 0.018 mjy. 从以上接收频段看, 还可以开展太阳活动及地外空间环境、天文地球动力学、超新星遗迹、射电巡天观测等研究 [11] .

50 m 射电望远镜可以作为 VLBI 技术中一个新的伙伴进行有关项目的相干测量, 也可用 VLBI 方法进行 MSPTOA 的实验观测研究 [12]. 据报道, 50 m 射电望远镜首先进行实验观测的重要项目是 “嫦娥” 一号探月卫星工程的观测研究. 我们从这些科学目标和工程任务的需求上容易理解高准确度、高稳定度、高可靠性的原子标准时间何等重要.

4 50 m 射电望远镜应建立怎样的标准时间

能够满足以上科学目标和工程任务的使用需求, 是建立 50 m 射电望远镜标准时间最根本的原则. 这个标准时频守时设备系统的建设应立足于高准确度、高稳定度、低漂移率、高可靠度和高适宜度. 前 3 个我们容易理解, 高可靠是指标准设备在达到准确度和稳定度等性能指标前提下的保障能力和正常运转的工作效能, 又可称其置信度高、安全正常运转的性能好. 高适宜度是指根据目标任务需求和目前国际上各种原子钟的工程指标性能及自身财力等因素所作的全面综合分析基础上的科学决策. 有些时候, 虽然科学目标要求原子钟性能尽量高, 但目前原子钟指标可能满足不了要求情况下只能降低指标. 比如 VLBI 和 MSPTOA 的长期稳定可以提出优于 1·E−15 的要求, 但就目前工程上实现比较困难. 一般时频标准选用是在能满足使用要求的前提下不应追求指标越高越好, 应该注意性能、价格比. 因为指标越高, 往往价格也越高, 常常会伴随着对环境要求特苛刻, 对维护、安全、可靠性要求也相应加高. 因此, 一方面我们要为时频标准创造一个良好的使用环境, 另一方面, 应根据科学目标和使用环境的情况来挑选合适的时频标准. 一般来讲, 铯原子频率标准准确度高, 价格较高, 应用寿命 ≥5 年, (5071 型), 频率稳定度较氢原子频率标准差. 未实现国产化. 氢原子频率标准的频率稳定度是目前频率标准中最好的, 它的准确度也比较高, 寿命长 (8—10 年). 但体积庞大, 重量较重, 价格也较高. 我国目前已实现氢钟国产化. 上海天文台正在研制小型化 (30 kg) 氢原子频率标准.

5 建议

综合以上评估和分析, 对于 50 m 望远镜系统时间标准的建设提出以下几点建议: 由于 “嫦娥” 一号探月卫星任务及 MSPTOA 计时、 VLBI 测量等对时间标准的实时性、连续性、高精度要求甚高, 为了保证工程任务万无一失地施行, 应建立冗余、双保险氢原子钟或氢、铯钟相结合的时间标准系统.

(1) 在综合科学目标和任务要求及经费宽裕情况下, 可以从全面指标衡量考虑选买美国 (Datum 公司) 生产的主动型氢钟. 性能指标: 频率准确度 $\leq 3\cdot 10^{-13}$, 稳定度 $\leq 3\cdot 10^{-13}$, 漂移率 $\leq 10^{-15}$/d, 寿命在 8—10 年以上的氢钟 2 台. 经费欠充足, 可考虑购上海天文台

产主动型氢钟两台，指标性能属一个量级. (2) 可考虑进口一台优质小铯钟 (HP5071B 型 /HP5071A 优型), 具体指标是准确度 $\pm 5 \times 10^{-13}$, 稳定度约为 $\pm 3 \times 10^{-13}$, 漂移率为 $\pm 10^{-15}$/d, 寿命 5 年以上，和进口或国产氢原子钟一台作为冗余配置. (3) 为了配合时频标准钟的高精度标校和守时运转，可选择配置 NIST 能提供的一种远程频率测量和分析服务 (FMAS) 设备，它可以通过全球定位系统 (GPS) 信号作为它的参考频率，以每天 2×10^{-15} (24 小时平均) 的频率不稳定度跟踪到 USNO, 或者以每天 2×10^{-13} 稳定度跟踪到 NIST[13]. 用此设备可以很容易测量和校准自己实验室的铷、铯、氢频率标准. 时刻准确度 < 20 ns (与 UTC 的偏差). 无论购置哪一类型频率标准都需要给钟创造一个良好合适的正常运行环境. 当然，我们所参考的原子时频基准应该是最好的，如 UTC (BIPM) 、UTC (USNO). 除精良的原子频标外，优良、高效的守时算法是必要的 [4,5]. 这一点，在以往的天文观测站并未引起足够关注和重视.

总之，如前所述，高精度原子频率标准的质量优势在空间定位、深空探索、天体测量等高精度物理量测量中有重大意义，在某种意义上讲，原子钟的性能对天文、空间观测数据的质量和高效起着非常关键作用，这些信息获取的质量好坏关系到我们对于空间物理参量和空间活动规律真实面貌地认识程度，不断深化我们对于宇宙天体运动规律的了解并逼近物理参量的真值. 而这些空间高精度测量的实验活动也必将继续成为不断改善和提高原子频率标准的性能、时频信号更高精度传递方法和激光通信应用技术发展的动力.

参 考 文 献

1　翟造成. 原子时频最新进展. 全国时间频率学术报告会论文集. 成都， 2001
2　童宝润. 时间统一系统. 北京：国防工业出版社， 2003
3　Kartaschoff P Frequency and Time. Academic press, 1978.
4　胡永辉，漆贯荣. 时间测量原理. 香港：香港亚太科学出版社， 2000
5　王正明. 天文学进展， 2004, 22(2): 110
6　周渭，王海. 时间频率学报， 2003, 26(2)
7　翟造成. 天文学进展， 1986, 4(1): 61
8　Petit G, Tavella P. A&A, 1996, 308(1): 290
9　王绶㠯. 脉冲星观测与研究 (序). 见：张晋主编. 脉冲星观测与研究. 乌鲁木齐：新疆人民出版社， 2001
10　康连生. 天文研究与技术 - 国家天文台台刊， 2004, 1(3): 9
11　张喜镇，陈宏升，郑怡嘉等. 关于密云望远镜脉冲星观测发展前景. 见：张晋主编. 脉冲星观测与研究. 乌鲁木齐：新疆人民出版社， 2001
12　张昱，翟造成. 天文学进展， 1997, 15(4)
13　NIST 的时间和频率服务. 美国国家标准与技术研究院特刊 (432 号), 2002

A Discussion on the Time Criterion of the 50 m Radio-Telescope

NI Guang-ren[1] XU Lu-ping[2] HE Kang-yuan[1]
(1 *National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Shanxi Lintong* 710600)
(2 *School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an* 710071)

Abstract It analyzes the influence of the time-frequency properties of atom clock on time-keeping error by quantity, and estimates the error of related physical measure caused by the time-keeping properties of atom time-frequency criterion—time resolution. The comparison table of modern practical atom clock's performance index is given. The index of transferring and comparing standard time-frequency signal by modern radio means is also listed. The high-precision time-frequency criterion's important status in the fields of exploration of earth and astrospace, VLBI and the timing application of millisecond pulsars are also discussed. The high-precision requirement and selection principle, which are applied to time criterion by "Chang'E-I" moon-exploration task, and the 50 m radio telescope's scientific aim are set forth. In order to achieve its scientific aim and task, the time-frequency criterion, which is correspondent to its research goal and high-standard as soon as possible, must be set up, so that the high-quality data and high-efficiency research achievement can be attained. The problem of what time criterion should be set up is discussed, and the primary suggestions are put forward as well.

Key words astrometry, radio astronomy, time criterion, atomic clock