

文章编号: 1000-8349(2004)02-0104-11

守时工作进展

王正明

(中国科学院 国家授时中心, 西安 710600)

摘要: 随着近 5 年时间传递技术 (多通道 GPS/GLONASS CV、TWSTFT、GPS P3 CV) 和原子时算法的发展, 国际原子时 TAI 和各国的守时工作有了较大的进展, 中国科学院国家授时中心 (NTSC) 和国内其他时间实验室的工作也不例外。介绍国际权度局 (BIPM) 时间部有关 2000~2003 年 TAI 的研究进展, 以及 NTSC 和国际、国内某些时间实验室守时工作简况。另外, 自 2000 年以来国际上对 UTC 之未来的争论很激烈, 因此就 2003 年 5 月 28~30 日在意大利都灵市举行的“UTC 的未来”研讨会的情况也作一些介绍, 以便国内天体测量相关学术领域的同行们对这些发展有一个基本的了解。

关键词: 天体测量学; 守时; 综述; 国际原子时; 协调世界时

中图分类号: P127.1⁺2 **文献标识码:** A

1 引 言

精密时间是现代高科技发展的必要条件, 精密时间的应用涉及基础研究领域 (天文学、地球动力学、物理学等) 到工程技术领域 (信息传递、电力输配、深空跟踪、空间旅行、导航定位、武器实验、交通运输、地震监测、计量测试等) 的各个方面, 每个系统内部运作或者不同系统之间的协调都需要有统一的时间系统。要使大到全世界、小到一个实验室内部不同时钟所报告的时间都一致, 则必须通过一套硬、软件系统来实现, 这个系统就是守时系统。从完整的概念来说, “守时” 涵盖了 3 个重要方面^[1]: (1) 用什么样的钟? 如何通过一组钟的有机结合来产生稳定的时间尺度? (2) 以什么时间作为国际标准参考时间? (3) 如何使全球不同的钟、不同的时间尺度同步到国际公认的标准时间上来? “守时” 是整个时间工作中最关键的一环, 它的任务是产生和保持高精度的准确时间, 以满足人类科学、实验、生产和生活方方面面的需求。

日晷的诞生 (3500BC) 是人类发明时计的第一个里程碑, 石英晶体振荡器的研制成功 (1918 年) 则是時計进展到电子时代的一个标志。最近 50 多年中, 频标的发展历史显示频标的性能

收稿日期: 2003-10-25; **修回日期:** 2003-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60272067); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KJ CX2-SW-T07)

大约提高了近 7 个数量级^[2], 全球时间实验室的现代守时所用的钟以 HP 5071A 铯原子钟和美国或俄罗斯生产的氢钟为主; 国际原子时 TAI 计算方法 (ALGOS 算法) 的多次修改以及时间传递技术的发展提高了 TAI 的稳定性; 在采用光抽运和铯喷泉作为 TAI 秒长的基准参考后, TAI 的准确度也有了显著的改进。

由于原子时的出现, 时间尺度分成了两种类型^[3]。一种是 integrated time scale, 另一种是 dynamic time scale。半个多世纪中, 人们定义了几种新的时间尺度, 从单一的 UT 发展到 ET、TT、TAI 和 UTC, SI 秒的定义也随之改变, 每一次的改变都意味着科学技术的发展对时间准确度改进的需求, 从 UT 秒到 TAI 秒, 准确度提高了 5 个数量级。1972 年以前, 世界时 UT1 作为一种参考时间而为国际公认, 它是法定时间的基础。UTC 定义于 1972 年, 它代表了 TAI 和 UT1 的结合, 并成为全世界的官方 (Official) 时间, 即国际公认的标准时间。但是 GPS 出现之后, GPS time 不采用闰秒, 而且 UTC 的频繁闰秒给实际工作带来了麻烦, 多种同时存在的参考时间尺度也给导航电信等工作造成混乱, 2000 年起国际上就“UTC 的未来”, 即究竟以什么作为国际标准时间展开了新一轮的争论。

在 20 世纪 50~80 年代, 远程时间频率比对和同步主要依靠短波无线电时号、Loran-C 长波信号、广播电视信号以及搬运钟等手段。原子频标性能的快速提高对远程时间比对技术的要求也愈来愈高, GPS 共视 (CV) 时间传递、卫星双向时间频率传递 (TWSTFT)、GPS 载波相位 (CP) 时间频率传递、激光时间传递系统等技术先后发展起来。从 Loran-C 到 GPS (CP), 时间频率传递技术的日稳定度有望提高约 6~7 个数量级^[4]。

守时工作的上述 3 个方面在过去 50 年中的发展情况, 我们已经在有关文章中作过介绍^[5,6], 这里不再重复。本文将主要介绍以下几个方面近 3 年来的情况: (1) 国际权度局 (BIPM) 时间部负责的 TAI 的产生与保持水平; (2) 关于 UTC 未来的讨论; (3) 参加 TAI 合作的全球共 50 个左右的时间实验室所产生和保持的协调世界时 UTC(k) (k 是实验室代码) 和地方原子时 TA(k) 的水平; (4) 中国科学院国家授时中心的守时工作进展和水平。

2 TAI 系统

TAI 是全世界约 50 个时间实验室共 250 个左右自由运转的原子钟的合作产物。国际权度局 (BIPM) 根据分布在世界各地的这些实验室的数据, 采用 ALGOS 算法计算得到自由原子时 EAL。TAI 则是参照基准频标, 对自由原子时 EAL 经过频率修正后导出的。每月初各实验室发送给 BIPM 的数据包括 3 个部分: (1) 该实验室的各个钟分别与自己 UTC(k) 的比对结果; (2) 时间传递数据——该实验室的 UTC(k) 与 GPS 卫星钟的比对结果 (或者用 TWSTFT 得到的两个实验室的 UTC(k1) 和 UTC(k2) 之间的比对结果); (3) UTC(k) 与实验室的地方原子时 TA(k) 的比对结果。BIPM 通过各实验室的这些数据进行归算出全球所有的钟与 UTC (PTB, 德国技术物理实验室) 的比对结果, 然后计算出自由原子时 EAL, 其理论公式为

$$UTC(PTB) - EAL = \frac{\sum \{W_i \times [UTC(PTB) - Clock(k, i)]\}}{\sum W_i},$$

式中 W_i 是计算时分配给每一个钟的权重, 因此 EAL 就是所有钟的加权平均值。要得到高稳定性、高准确度的 TAI, 必须从如下 3 个方面入手。

2.1 ALGOS 算法的改进

过去的 10 年中 BIPM 时间部在 EAL 的算法方面做过几次大的改动。第一次是在 1996 年计算周期由每两月改为每月计算一次, 数据点的间隔由 10 d 改为 5 d。第二次是在 1998 年, ALGOS 算法中的权系统做了较大调整, 从过去的最大绝对权重改为最大相对权重, 所有钟的总权重为 1, 最大相对权 $W_{\max} = 0.7\%$ 。任意一个钟, 以其过去连续 12 个月相对于 TAI 速率的波动 (标准偏离) σ 为准取权, 当 $\sigma < 15.5 \times 10^{-15}$ 即获得最大权。

但是到 2000 年大多数实验室的守时钟都更新为 HP 5071A 高性能铯钟或新一代性能更好的氢钟。BIPM 对 1998 年 1 月至 2000 年 6 月的数据进行统计分析, 结果表明 HP 5071A 中有 65% 的钟获满权, 也就是说, 这种计权方法并不能在 HP 5071A 当中择优以提高 EAL 的稳定性。为了让真正的好钟在计算 EAL 中起主要作用, BIPM 决定从 2001 年起改变取权规则^[7], 采用 $W_{\max} = A/N$, 其中 N 是每月参加 EAL 计算的钟的数量, A 是经验值, 通过选择合适的 A 值来确定 W_{\max} , 同时提高达到最大权的条件。BIPM 在 2000 年下半年分析了 1998~2000 年 6 月钟的数据, 按 $A = 2.0, 2.5, 3.0$ 对 EAL 作试验归算。结果表明, 取 $A = 2.5$, 采样间隔为 100 d 以下的频率稳定度最好, A 再增大, 能达到最大权的钟数量则大大减少, 反而不利于 EAL 的稳定度。 A 取不同值对采样间隔为 100 d 以上的频率稳定度没有明显影响。为保证 EAL 频率的连续性, 作为过渡, 2001 年 1 月起, BIPM 先采用 $A = 2$, 2002 年 7 月开始又改为 $A = 2.5$ 。由于 $W_{\max} = A/N$, 而每月参加 EAL 计算的钟的数量不尽相同, 每月的最大权也各不相同。一个钟能获得最大权的速率波动 σ 亦随 N 而变, 2001 年 1 月~2002 年 6 月和 2002 年 7 月~2003 年 7 月两段时间实际的 σ 平均值分别为 $\sigma < 5.5 \times 10^{-15}$ 和 $\sigma < 4.1 \times 10^{-15}$ 。表 1 给出 2000 年和 2002 年 7~12 月获得最大权重的钟数占所有参加 EAL 计算的钟总数的百分比情况。

表 1 获得最大权重的钟数占总钟数的比重

2000 年		2002 年 7~12 月	
获最大权的钟占总钟数的比例	50%	获最大权的钟占总钟数的比例	11%
—— 其中氢脉泽的比例	14%	—— 其中氢脉泽的比例	14%
—— 其中 HP 5071A 的比例	74%	—— 其中 HP 5071A 的比例	76%
获最大权的氢脉泽占氢脉泽总数的比例	42%	获最大权的氢脉泽占氢脉泽总数的比例	10%
获最大权的 HP 5071A 占 HP 5071A 总数的比例	65%	获最大权的 HP 5071A 占 HP 5071A 总数的比例	12%

注: 表中数据取自 BIPM 时间部首席科学家 Arias E 在第 25 届 IAU 大会 31 专业委员会会议上的报告。

由表 1 可知, 与 2000 年相比, 2002 年 7~12 月虽然获得最大权的氢脉泽和 HP 5071A 的数量占全部最大权的钟的比例变化不大, 但获最大权的钟的数量大大低于总钟数。

2.2 时间传递技术的发展

BIPM 组织的国际时间比对网, 当前主要还是依赖于以 C/A 码测量、单通道接收机为基础的经典 GPS 共视技术^[8], 这种技术现在已经扩展为多通道、双系统 (GPS 和 GLONASS) 观测; TWSTFT 时间比对链从 1999 年 7 月开始逐步引入 TAI 计算; 另外 BIPM 已经进行了一个用测地型 GPS 接收机的双频、P- 码测量 (作电离层时延改正) 实验, 用于 TAI 时间传递。

2.2.1 GPS 和 GLONASS C/A 码共视 (CV) 观测

至 2003 年 6 月止, BIPM 仍然每半年一次为单通道接收机编制 GPS 和 GLONASS 国

际共视表(多通道接收机无须共视表)。在每月初 BIPM 收到各实验室的数据后对单通道或多通道 GPS 和 GLONASS 接收机的观测结果作共视数据处理, 包括用 IGS (国际 GPS 服务) 的 TEC Map (电子总含量全球分布图) 来改正电离层时延和用 IGS 的精密星历表来事后改正卫星位置、作 TWSTFT 数据处理。BIPM 不定期为各个与之合作的时间实验室的 GPS 接收机作时延检测等。2002 年 8~11 月, BIPM 的一个多通道 GPS 流动接收机 TTS-2 为亚太地区已开通 TWSTFT 的 NTSC、CRL (日本通信综合研究所)、NMIJ (日本国家计量研究所)、TL (台湾电信实验室)、NML (澳大利亚国家计量实验室) 等的 GPS 接收机做了时延校正测量。

除了上述常规工作外, TAI 计算中还将引进更多的多通道 GPS 共视基线, 多通道 GLONASS P 码测量结果的共视比对引入 TAI 计算的研究还正在进行, 另外 BIPM 正在研究电离层参数和双频接收机硬件延迟中的时延变化之间的关系。

2.2.2 卫星双向时间传递 (TWSTFT)

TWSTFT 的精度比传统的单通道 GPS C/A 码共视高 1 个数量级, 比长波高 3 个数量级。它的优点是由于发射和接收路径相同、方向相反, 最大限度地消除了卫星位置、测站位置误差造成的几何时延误差, 以及电离层、对流层干扰等引起的传播路径时延误差, 同时通信卫星较宽的带宽有利于信号设计, 受温度影响小。目前欧洲的 6 个时间实验室和美国的 3 个时间实验室租用国际商用卫星 INTELSAT 706 进行 TWSTFT 时间比对, 正式引入 TAI 计算。它们是: PTB-ROA (西班牙天文研究所)、PTB-VSL (荷兰 Van Swinden 实验室)、PTB-OCA (意大利 Cagliari 天文台)、PTB-IEN (意大利国家伽利略电子研究所)、PTB-NPL (英国国家物理实验室)、PTB-NIST (美国国家标准与技术研究所)、NPL-USNO (美国海军天文台) 和 USNO-AMC (美国主钟备用站), 欧美的 TWSTFT 基线以 PTB、NPL、USAO 为主节点。在亚太地区, 以日本 CRL 为主节点, 形成 CRL-NTSC、CRL-NMIJ、CRL-TL 和 CRL-NML, 用 JSAT1 卫星和 INTELSAT 177 卫星进行 TWSTFT 工作, 这些基线自 2001 年开始逐步加入 BIPM 的 TAI 计算。如果一条基线(两个实验室之间的时间比对) 同时有 TWSTFT 和 GPS CV 两种手段的数据, 在计算 TAI 时, 采用 TWSTFT 的结果, GPS CV 的结果作为备份。TWSTFT 设备时延校正的一种方法是用流动 TWSTFT 设备作差分测量, 测量不确定度小于 1 ns, 已经由 USNO 对 USNO-PTB、USNO-NPL 和 USNO-AMC 做了这种测量。但由于缺少流动设备而使这种方法难于操作, 因此 TWSTFT 设备时延校正主要通过相同基线上的 GPS 共视比对结果作比较来进行, 其测量不确定度约为 5 ns。

下一步要进行的亚太地区 TWSTFT 链和美国海军天文台 TWSTFT 的链接正在准备之中, 多通道的 TWSTFT 设备已经在亚太地区的 CRL、NTSC、NML、NMIJ、TL 等实验室安装, 实验比对即将开始。

2.2.3 用测地型 GPS 接收机作 P3 码共视时间比对

单频 GPS 接收机在作电离层时延改正时采用 Klobuchar 改正模型和 GPS 导航电文中的全球电离层系数 (α_i 、 β_i , $i = 0, 3$) 来计算, 至多只能修正实际电离层影响的 50%。采用 IGS 的 TEC Map 来计算电离层时延可明显提高电离层时延改正的精度, 但 TEC Map 的发布滞后 6 d 左右, 而且 IGS 电离层观测站在全球的分布密度不同使得各个地区 TEC Map 的精度也相差甚远, 因而在不同地区用 TEC Map 作电离层时延改正的精度不同。根据电离层的折射率是工作频率的函数这一特性, 用双频 GPS 接收机直接测量电离层时延, 就可以较大地提高 GPS

CV 时间传递的精度。比利时皇家天文台的 Defraigne 和 Bruyninx^[9] 提出把经过差分时间延校正的测地型双频 GPS 接收机 Z12-T 或与此相类似的接收机用于时间传递, 把时间实验室的频标准频率信号和 UTC(k) 的 1 pps 信号送入接收机, 由专用软件将 Z12-T 的观测数据转换成 RINEX 文件, 再对 RINEX 文件作计算处理, 得到按 CCTF 规范格式的数据文件^[10], 用于 TAI 计算。这项工作的方法和软件编制都已完成。因为采用了双频 P1 和 P2 码的信号, 结合起来就能得到不受电离层影响的 UTC(k) 与 GPS 卫星钟的比对结果, 这种方法称为 P3 码技术。在做了实验观测得到很好的结果之后, BIPM 于 2002 年 6 月开始将 7 条 P3 码基线引入 TAI 试算, 与其他时间传递技术作比较。从 2003 年 7 月开始有几条 P3 基线正式引入 TAI 计算, 它们是 DLR (德国宇航中心)-PTB (P3 为主要技术), IEN-PTB 和 USNO-PTB (P3 作为备份)。

2.3 用于 EAL 频率校正的基准频标

2000 年 7 月以前有 6 个基准频标用于 TAI 频率检测, 它们是 NIST-7 (光抽运)、NRLM-4 (光抽运)、PTB 的 3 个实验室铯钟和 LPTF-JPO (光抽运) (LPTF 是巴黎天文台时频实验室)。2000 年 8 月起增加了 2 个铯喷泉 NIST-F1 和 PTB CSF1。2002 年淘汰了 NRLM-4 和 PTB 的 CS3; 2002 年 10 月之后又逐步增加了 3 个铯喷泉用于 TAI 频率检测, 它们是 LPTF 的 FO2、FOM 和 IEN (意大利) 的 CSF1, 由此大大缩小了 TAI 频率检测的不确定度。图 1 给出了自由原子时 EAL 的频率 f (EAL) 和目前所用的各个基准频标 PFS 的频率 f (PFS) 比对情况。从图中可以看出, 实验室铯钟频率之间的差异较大, 准确度也差一些; 光抽运与铯喷泉的频率符合得较好; 不同铯喷泉的频率比较一致。预计随着今后投入使用的铯喷泉数量的增加, TAI 的频率准确度还会有明显提高。我国 NIM (中国计量科学研究院) 研制的铯喷泉最近通过了国内成果鉴定, 希望于近期在 BIPM 时间部公布的类似于图 1 的统计中看到这个铯喷泉与 EAL 的频率比对结果。

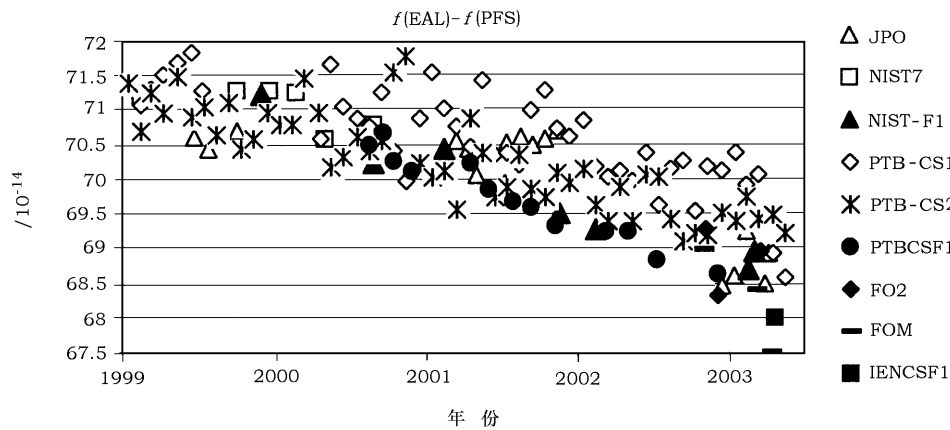


图 1 EAL 与目前所用的各个基准频标 PFS 的频率比对结果 (取自 BIPM 时间部首席科学家 Arias E 在第 25 届 IAU 大会 31 专业委员会会议上的报告)

由于时间尺度的算法和时间传递技术两方面的改进, 到 2002 年 6 月为止 TAI 的中期稳定度 (Allan deviation) 达到 0.6×10^{-15} (20~40 d)。TAI 尺度单位的持续时间相对于大地水准

面上的 SI 秒的偏离为 $(+0.6 \sim 1.0) \times 10^{-14} \pm (0.2 \times 10^{-14})$ 。由于目前调整 TAI 频率的方法似乎难以再降低该偏离值, BIPM 时间部正在研究一种新的方法来提供更准确的 TAI 而不影响其稳定度。在时间传递技术方面除了上述研究外, BIPM 和国际上一些主要的时间实验室正在积极开展 GPS 载波相位时间传递的研究, 这项技术可望 2005~2006 年在有条件的实验室取代 GPS C/A 码的测量。

3 协调世界时 (UTC) 的未来

从 1972 年至今共闰秒 22 次, 1999 年 1 月 1 日 0 时作了最近的一次闰秒之后, UTC 比 TAI 落后 32 s。值得注意的是, 由于地球自转的不均匀性, 特别是它的长期减慢, 使 UT1 与 TAI 的差值越来越大, 估计 4000 yr 之后 UT1 将比 TAI 落后 0.5 d。如果一直沿用 UTC 的闰秒, 到那时可能会达到每个月闰秒两次。GPS 为了避免这种麻烦, 采取不闰秒的办法, 因此 GPS 时间 (GPS time) 从 1980 年开始启用与当时的 UTC 在整秒上一致之后, 至今与 UTC 的差异为: $[UTC - GPS \text{ time}] = -13 \text{ s} + C_0$, C_0 是 GPS 时间与 UTC 在秒小数上的差异。由于出现了多个时间尺度, 而且不断地闰秒带来诸多的麻烦, 2000 年国际电信联合会 ITU 无线电通讯 (ITU-R) 组成员和 BIPM 主席向 ITU 提出了未来 UTC 怎么办的问题。但 UTC 的任何大的变化, 如改变 UTC 的定义, 或者放弃 UTC, 都会对电信网络、导航系统及时间的发布带来很大冲击。因此 ITU-R-Group7 建立了一个特别报告组, 专门讨论闰秒和相关问题。经过多次协调会议, 为了尽可能缩小或消除闰秒带来的冲击, 该特别报告组于 2003 年 5 月 28~30 日在意大利都灵市举行了题为“UTC 定义的未来”的学术讨论会, 试图能在会议上得出一个结论, 为 ITU 起草一份推荐性意见。会议特邀来自全球包括守时、导航、地球自转、电信和网络定时等各个方面的专家。

在这次会议上不少人提议取消闰秒, 把 UTC 拉回到与 TAI 同步, 认为现在已经无人用恒星导航, 加闰秒会增加额外的工作。由于世界时与 TAI 的差异越来越大, GPS 时间却不采用闰秒, 在导航方面已经引起了严重的混乱。如果飞机用 GPS 时间导航, 地面航空指挥台用 UTC, 十几秒钟或将来更大的差异很可能引起飞机相撞的空难。避免这一问题的唯一办法是把国际标准时间与地球自转分离, 使它成为所有导航系统的共同标准时间。

天文学家则希望继续加闰秒来使国际标准时间与地球自转同步, 原因是保持国际标准时间与地球自转同步意味着能使他们的望远镜在天空中正确地找到恒星或星系, 否则望远镜不能正常工作。尽管大部分采用反射镜系统的望远镜不会马上受到影响, 但是跟踪卫星或其他移动天体的测量仪器会在几年内受到严重影响。当然也可以采用改装仪器和编制软件来解决望远镜的跟踪问题, 但是这种做法耗资巨大而且必须考虑得非常仔细。天文学家还认为, 时间的概念历来源于天文学, 源自于地球的自转与公转, 如果抛弃闰秒, 用 TAI 作为标准时间, 未来的人对于过去时间概念的含义将变得模糊不清。另外, 如果放弃闰秒, 以后将会出现这种情况: 黑暗的子夜时分, 时钟却敲击正午 12 点。

会议没有得出任何折中的能使争论双方都可接受的办法。我国的天文学家在 2001 年发表了一篇文章指出, 这么频繁的闰秒之原因在于当时确定原子时秒长时, 是根据过去 300 yr 地球自转的秒长计算得到的, 但是当时的考虑不够全面, 以至于所确定的原子时秒长太短了^[11]。

有相当一部分国际同行认同这个观点。根据这个观点,有人提出用修改 SI 秒长的办法来解决频繁闰秒的问题,但是这样做会影响到所有以秒长来定义的物理单位全部要修改,涉及面太广,因此这个建议被否定了。还有人建议把闰秒改成几个世纪闰 1 h,但这一想法也没有被接受。

因此,ITU 特别报告组将继续收集各方面的意见,特别是世界时用户的意见,该报告组的组长 Ronald Beard 希望为 ITU 下一次(可能在 2006 年)全世界无线电通信大会(World Radiocommunication Conference)提交一个关于 UTC 具体做法的计划,但是他估计,ITU 作出最后决定还需要许多年。

4 UTC(k) 相对于 UTC 的同步准确度和 TA(k) 的稳定度

ITU-R-Group7 的 1997 文件又一次强调(1993 年首次提出)要求每个国家时间中心的地方参考时间(实时 UTC(k))与 UTC 的差异不超过 100 ns。由于 UTC 是纸面时间,其发布比实时滞后 20~50 d,实时 UTC(k)的控制不可能以实时 UTC 为参考,因此要控制 $|UTC - UTC(k)|$ 具有一定的难度。近年来参加 BIPM 合作的约 50 个时间实验室大都在努力逐步改善 UTC(k)对 UTC 的同步准确度。1999~2002 年 4 年中达到 $|UTC - UTC(k)| < 100$ ns 的实验室个数分别为 7、7、11、17。2002 年 $|UTC - UTC(k)| < 100$ ns 的实验室情况列于表 2。表中的 *rms* 是指全年 $UTC - UTC(k)$ 的标准偏离,设备符号 Cs、Hm、F、LCs、OP 分别表示 HP 5071A、氢钟、铯喷泉、实验室铯钟、光抽运。从表 2 可以看出,设备条件特别好的实验室其 UTC(k)相对于 UTC 同步的准确度明显优于设备条件差的实验室,但设备条件处于中等的实验室如果能精心控制 UTC(k),也能达到较高的同步准确度。

表 2 2002 年 $|UTC - UTC(k)| < 100$ ns 的实验室情况

实验室	$ UTC - UTC(k) _{\max}$ /ns	<i>rms</i> /ns	设备情况
USNO	5	2.8	70 Cs、15 Hm
NIST	25	9.5	4 Cs、5 Hm、1 F、1 OP
NPL	29	11.9	3 Cs、2 Hm
NRC	37	15.2	2 Cs、2 Hm、3 LCs
OP	38	25.2	20 Cs、2 Hm
PTB	38	13.8	4 Cs、3 Hm、1 F、3 LCs
NTSC	44	15.0	6 Cs
SU	55	23.9	10 Hm
CH	59	25.4	6 Cs
SG	66	37.9	3 Cs
IGMA	71	29.1	3 Cs
ROA	73	33.7	5 Cs
VSL	77	20.1	4 Cs
TL	82	15.5	5 Cs、2 Hm
TP	82	34.6	4 Cs
CRL	83	41.4	18 Cs、2 Hm、1 OP
IEN	88	34.9	5 Cs

注:表中数据取自 BIPM 时间部 2002 年报。

TA(k)是由实验室 k 综合本实验室多台守时钟的数据,用其自己的原子时计算方法得到的地方原子时,因此 TA(k)的稳定度应该优于单一台钟,它可以为用户提供一种稳定的参考时间

尺度。参加 TAI 合作的 50 个左右的时间实验室中, 约 15 个实验室每月计算并发送 $UTC(k) - TA(k)$ 数据给 BIPM。我们用 BIPM Circular T (<ftp://62.161.69.5>) 公布的 1998~2002 年 $TAI - TA(k)$ 值计算了 Allan 方差 (稳定度), 所得结果列于表 3 (此处给出 13 个序列, 2002 年没有数据的序列未列出, “—” 表示该实验室当年数据不连续), 表中 2001 年的数据是 4~12 月的 (见第 5 节说明)。

表 3 2001~2002 年各主要实验室 $TAI - TA(k)$ 稳定度统计结果

10^{-15}

	USNO	AUS	CH	CRL	NTSC	F	IEN	KRIS	NIST	NRC	PL	PTB	SU
1998	5.40	—	17.36	11.75	47.99	6.13	15.07	24.45	4.00	12.03	—	7.09	—
	2.91	—	13.91	7.41	23.48	4.17	15.21	15.43	2.74	7.77	—	5.10	—
	1.65	—	9.45	3.00	11.10	2.70	17.00	15.29	1.33	4.57	—	3.51	—
	1.67	—	13.71	2.28	5.08	2.01	18.80	21.94	1.84	3.84	—	2.45	—
	2.07	—	15.16	2.36	3.68	2.50	17.97	28.76	3.08	3.35	—	1.48	—
1999	4.91	48.70	13.23	13.48	22.83	6.93	9.41	18.01	4.63	—	—	8.80	—
	3.51	27.66	9.54	7.73	14.85	4.24	7.19	11.77	2.60	—	—	5.43	—
	1.95	12.14	10.78	5.32	6.84	3.14	5.07	9.63	1.57	—	—	3.18	—
	1.19	10.41	9.42	6.68	4.70	3.63	6.95	6.45	1.34	—	—	2.11	—
	1.61	5.84	9.62	9.32	5.45	5.84	10.50	5.26	2.21	—	—	2.23	—
2000	6.40	39.79	9.37	69.93	36.34	5.16	40.07	22.97	6.53	10.74	—	8.29	—
	3.10	27.68	7.02	55.41	14.05	3.75	57.59	16.95	3.25	6.60	—	5.38	—
	1.71	7.71	8.59	36.22	4.61	2.66	79.57	19.26	1.86	5.13	—	3.56	—
	1.19	6.15	12.87	29.47	4.78	3.82	42.55	11.16	1.85	4.23	—	2.91	—
	1.18	5.43	16.47	21.44	4.10	5.46	46.33	6.06	2.88	4.60	—	2.84	—
2001	4.36	29.77	11.71	10.05	12.73	5.09	22.27	17.29	6.16	12.94	—	4.75	—
	2.46	24.38	9.17	6.84	5.82	3.38	21.59	13.83	4.01	11.15	—	4.34	—
	1.00	10.86	6.48	3.92	3.67	3.08	12.92	15.74	1.58	6.62	—	3.43	—
	1.52	7.76	4.25	1.43	1.77	5.14	22.11	6.51	1.14	2.94	—	1.78	—
	2.03	7.38	10.66	1.35	2.05	7.19	14.87	2.73	0.61	2.24	—	0.44	—
2002	4.07	29.33	9.67	8.15	14.69	5.64	15.13	—	4.65	12.72	11.05	6.23	7.10
	2.38	19.90	8.51	4.79	8.03	3.43	12.22	—	2.27	11.90	7.38	5.06	4.25
	1.02	8.68	5.64	2.42	4.18	3.10	13.89	—	1.44	5.84	4.25	2.80	2.09
	0.82	4.61	4.61	1.33	2.53	5.52	19.45	—	1.14	5.82	6.26	2.75	1.66
	0.91	2.64	5.25	0.87	2.71	8.64	22.43	—	1.34	4.78	7.79	2.65	2.63

5 NTSC 守时工作进展

近几年来, NTSC 在守时领域开展了大量研究工作, 收集计算机网络上一切可以为我所用的数据和信息, 研究新的计算方法, 编制了大量分析数据的软件, 对各种数据进行透彻的分析。通过这些创新性的研究, NTSC 所产生的我国标准时间 UTC(NTSC) 的保持水平一再创造新的历史最好记录。2000 年以前实时 UTC(NTSC) 相对于 UTC 的差异为 600~800 ns。

2000年我们注意了人工监测和控制,使这差异缩小到接近但仍略大于100 ns。与此同时我们研究了UTC(NTSC)的实时监测与控制方法,开发了自动监测UTC(NTSC)的软件。该软件于2001年年底完成^[12],2002年启用该软件后,UTC-UTC(NTSC)的准确度大幅度提高,实现了全年达到 $|UTC - UTC(NTSC)| < 50$ ns的水平。NTSC的频标设备条件大概处于BIPM的约50个实验室中第10位,但与某些条件更好的实验室相比,UTC(NTSC)的控制水平是比较高的,具体情况见表2。由于缺乏实验用的相位微调仪,目前UTC(NTSC)只做到自动检测、人工控制。待实现了自动控制后,UTC(NTSC)相对与UTC的同步准确度有望更大的提高。

TA(k)是实验室k把本实验室一组钟的数据采用一套自己的地方原子时算法进行加权平均后得到的时间尺度,许多实验室用实时计算的TA(k)作为实时UTC(k)控制的参考,NTSC从2002年开始也这样做。另外TA(k)的稳定度常常被用作为衡量一个守时实验室守时水平的主要参数之一。NTSC在1999年研究了TA(NTSC)新算法并完成了一套新的计算软件,2000年正式启用。图2表示1998~2000年每年TAI-TA(NTSC)不同采样间隔(5、10、30、50、100 d)的稳定度(Allan方差)。由图可见2001年4~12月曲线上各点的Allan方差值比其他年份都小,稳定度最高。2002全年的稳定度比2001年4~12月略差一些,原因是NTSC的6个HP 5071A均是1997年4月进口的,这种频标的优质期为3 yr,使用寿命为5~7 yr。2002年底这些钟都已接近寿命极限,钟的质量已逐步变坏,基于这些钟的TA(NTSC)的稳定度下降是正常的。图中2000年及2001全年的5、10 d短稳较差的原因是,1999年8月~2001年3月,NTSC的GPS接收机更换芯片给接收机带来了不应有的似7 d的周期性数据波动^[13],以致造成远程时间比对中不应有的短期(5~10 d)波动,这严重影响了TAI-TA(NTSC)的短期稳定度。

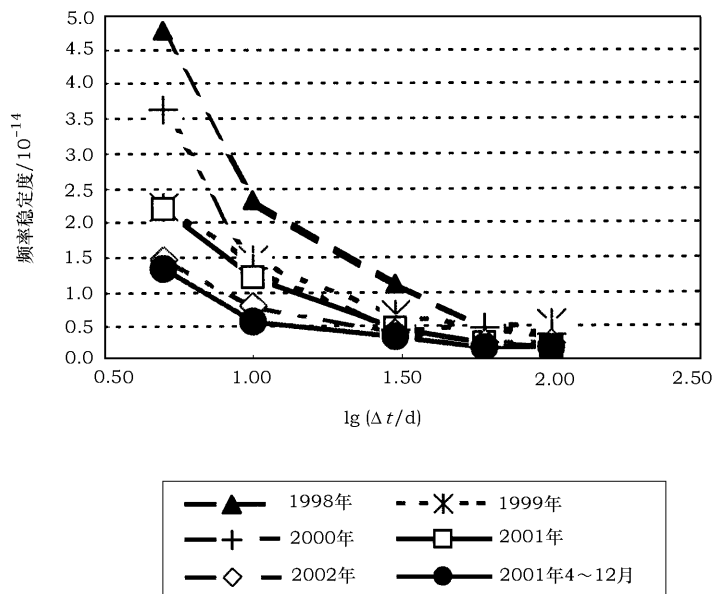


图2 1998~2002年TAI-TA(NTSC)的频率稳定度

根据表 3, 表 4 列出 NTSC 每年在这些实验室中的排名情况。可以明显看出, TA(NTSC) 的短期稳定度比较差, 有待进一步改进原子时算法, 并引进短稳好的氢钟来解决该问题。

表 4 $TAI - TA(NTSC)$ 的 Allan 方差在国际上的排名

采样间隔 /d	1998	1999	2000	2001	2002
				4~12 月	
5	10	9	8	7	10
10	10	9	7	5	8
30	8	7	5	5	7
60	7	5	6	4	5
100	7	5	4	5	7

NTSC 的时间传递手段近 3 年来也有了较大的改善, 除了装备有多通道 GPS/GLONASS 双卫星系统的时间型接收机外, 目前正在调试测地型接收机 Z12-T, 它即将作为 TAI 的 P3 码共视比对技术, 与 CRL 构成 P3 码基线。另外我们开展的 TWSTFT 中日合作项目受到中国科学院和国家科技部支持并已列入中日政府间的科技合作项目。从 1998 年 10 月 CRL 的 TWSTFT 设备在 NTSC 安装并开通 CRL-NTSC 基线进行时间传递以来, 我们的工作情况良好。鉴于 NTSC 在 TWSTFT 方面卓有成效的研究工作, BIPM TWSTFT 工作组曾在 NTSC 举办了 2001 年度 TWSTFT 第 8 次国际会议。2003 年 NTSC 又安装了多通道调制解调器, 有望很快替代单通道调制解调器。

除 NTSC 和 TL 外, 我国还有 NIM、BIRM (航天科工集团 203 所) 和 SCL (香港标准与校正实验室) 3 个时间实验室每月送数据给 BIPM。其中 NIM 和 SCL 的钟参加 TAI 的计算, 但它们不计算自己的地方原子时 $TA(k)$, BIRM 只发送 $UTC(BIRM) - GPS$ 数据, 以便得到 BIRM 保持的 $UTC(BIRM)$ 与 UTC 的差值。这 3 个时间实验室目前的 $UTC(k)$ 与 UTC 同步情况分别为 $UTC - UTC(NIM) \approx 2.5 \mu s$ 、 $UTC - UTC(BIRM) \approx 1.0 \mu s$, $|UTC - UTC(SCL)|$ 从 2003 年以来已经控制在 50 ns 以内^[14]。

从表 2 可知, UTC(USNO) 对 UTC 的同步准确度非常高, 这与 USNO 拥有大量的原子钟是分不开的。为了使我国的标准时间与国际标准时间有更高的同步准确度, 应该充分利用国内尽可能多的钟资源来计算更加稳定的实时 $TA(k)$, 以它作为控制实时 $UTC(k)$ 的参考, 为此必须建立我国综合原子时 (JATC)。NTSC 与国内有关单位合作, 在上世纪 80 年代末建立了 JATC, 但是由于除 NTSC 外, 其他单位的钟在过去 10 多年中逐步被淘汰, JATC 已名存实亡。NTSC 在中国科学院基础局和 NTSC 自己的经费支持下, 已经开始了重建 JATC 的工作。NTSC 已经自行研制了第一代多通道单频 GPS CV 时间传递用的接收机, 随后将研制双频 (用于准确改正电离层时延) 多通道接收机, 用于建立 JATC 的时间传递网。同时我们将开展原子时算法、时间传递数据处理方法和其他有关方面的大量研究工作, 用 2~3 年的时间建立起一个初步的 JATC 系统, 并逐步将其扩展。

参考文献:

- [1] Lewandowski W, Azoubib J, Klepczynski W. Proc. IEEE, 1999, 87(1): 163

-
- [2] Allan D W, Ashby N, Hodge C C. The Science of Timekeeping, Application Note 1289, <http://www.hp.com.go.tmdir>, HEWLETT PACKARD, 1997
 - [3] Thomas C. In: Sydnor R, Allan D W eds. Handbook Selection and Use of Precise Frequency and Time Systems, Geneva: ITU, 1997: 121~159
 - [4] Lewandowski W, Azoubib J. GPS World, November 1998: 30
 - [5] 王正明, 高俊法. 天文学进展, 2000, 18(3): 182
 - [6] 王正明. 陕西天文台台刊, 2002, 25(1): 9
 - [7] Azoubib J. In: Breakiron L A ed. Proc. 32nd PTTI meeting, Washington DC: USNO, 2002: 195
 - [8] Annual Report of the BIPM Time Section, Vol.15, Paris: BIPM, 2002: 93
 - [9] Defraigne P, Bruyninx C. GPS Solutions, 2001, 5(2): 43
 - [10] Allan D, Thomas C. Metrologia, 1994, 31: 69
 - [11] Liu Ciyuan. A&A, 2001, 369: L26
 - [12] 王正明, 袁海波. 陕西天文台台刊, 2002, 25(2): 109
 - [13] 王正明, 王改霞. 陕西天文台台刊, 2001, 24(1): 15
 - [14] Circular T 181~189, BIPM, <ftp://62.161.69.5>, 2003

The Progress on Time Keeping

WANG Zheng-ming

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

Abstract: Along with the development on time transfer techniques and the improvement of the algorithm, ALGOS, for the TAI computation and local atomic time scale, the accuracy and stability of the TAI and the accuracy of UTC(k) synchronizing to UTC have been made big progress. The development on the ALGOS, the means for the TAI time links and the primary frequency standards used for estimating the relative departure and, its uncertainty, of the TAI scale from the SI second, are described here. The Future Definition of UTC Timescale has been discussed since the year 2000 and the viewpoints presented by experts in different fields are introduced in this paper. The work on time keeping at NTSC and a few time labs in the world during the past 3 years are displayed.

Key words: astrometry; time keeping; review; TAI; UTC