

时间和频率技术新进展

张昱 翟造成

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘要

概述了最近几年时间和频率技术的最新进展。给出了各种实用的原子频率标准的最新发展以及它们的性能指标的最新结果。介绍了国际原子时的归算方法和所达到的新水平,并对各种原子钟在归算中的应用概况和所起的作用进行了比较,强调了氢原子钟的特殊作用和地位。同时也综述了高精度的时间同步和时频计量新技术的进展,特别是对为提高GPS这一国际时间同步新技术的应用水平进行的各种实验研究工作的最新进展进行了描述。对目前国际上正在进行和计划中的一些重要的时频活动也进行了介绍。

关键词 仪器设备: 原子频标 — 时间: 原子时尺度 — 时间: 传递技术

众所周知,时间与国防、国民经济和现代科学实验乃至人们的日常生活密切相关。几乎每一项社会活动都离不开时间。1985年以来,时、频工作无论在基准的准确度和稳定性性能,还是在传递技术方面都取得了重大进展。同时,也出现了某些新问题,提出了一些新概念新方法。

1 时、频标准的新进展

1.1 传统的时、频标准现状

当今国际上广泛使用的传统时、频标准主要有铯、氢、铷等原子频标。80年代以来,美国、加拿大、西德、日本、法国、意大利和中国等国家在传统的时、频基准的研究和改进方面取得了许多新进展。新设计的秒定义基准——铯束标准,以PTB、NRC和NIST达到的准确度最高,达 $(2-8) \times 10^{-14}$,它们的稳定度也都在 1×10^{-14} 以上;其他国家如日本(CRL)、俄罗斯(SU)等国的铯基准的准确度也在 1×10^{-13} 量级。我国国家计量科学研究所1981年建立的铯标准,准确度为 4×10^{-13} 。目前,世界上有NRC、PTB和NIST等实验室型铯基准向BIPM定时发送数据,它们的主要功能是提供准确的秒长。

小型商品铯束频标是目前国际上广泛使用的原子频标。老型号的小铯钟,其准确度为 $(0.7-1) \times 10^{-11}$ 。世界上只有美国、瑞士和俄罗斯等国有商品。美国HP公司最近推出一种新产品——HP-5071A型小铯钟,其准确度可达 $(1-2) \times 10^{-12}$,稳定度为 $4 \times 10^{-14}/d^{[1]}$ 。

目前, 氢钟是传统原子频标中稳定度最高的标准, 稳定度可达 $10^{-16}/\text{d}$ 的量级, 而准确度为 $(3-5)\times 10^{-13}$ 。几年前, 腔频自动调谐技术引入氢频标后, 使氢标准的频率漂移大大改善, $10^{-17}/\text{d}$ 量级的小的频率漂移率使氢钟可参加 TAI 守时工作。还有一种以被动工作机理为基础的被动型氢钟其长期频率稳定度也可达 $10^{-16}/\text{月}$ 的量级, 其准确度与主动型氢钟相当。在我国, 中国科学院上海天文台实用型氢钟已小批量生产, 是国内唯一的氢钟产品^[2]。

铷原子频标也是传统实用型原子频标, 尽管在性能指标上比不上铯和氢原子频标, 但是应用最广泛, 价格最低廉的一种原子频标。其准确度为 1×10^{-11} , 稳定度为 10^{-12} 量级。我国大华无线电厂以及北京大学等单位早有批量生产, 并且是我国最早的商品原子频标。北京大学无老化漂移铷原子频标也取得了可喜的进展^[3]。国际上, 铷原子频标的小型化十分惊人, 体积 10cm 见方的铷振荡器产品已不稀奇。中国科学院湖北物理所、北京大学及航天部 203 所等单位也正在积极开展铷标准小型化研究。

表 1 列出了商品传统原子频标技术指标。

表 1 实用标准频率源技术指标

种类		商品铯钟		商品氢钟		商品铷钟	
		标准型	新(优质)型	主动型	被动型	普通型	极小型
频率 稳定 度	1s	$(2-3)\times 10^{-11}$	$(3-5)\times 10^{-12}$	3×10^{-13}	1×10^{-12}	5×10^{-12}	1×10^{-11}
	1h	$(4-5)\times 10^{-13}$	$(0.8-1)\times 10^{-13}$	1×10^{-14}	3×10^{-14}	2×10^{-13}	2×10^{-12}
	1d	$(7-20)\times 10^{-14}$	$(3-4)\times 10^{-14}$	5×10^{-15}	1×10^{-14}	3×10^{-12}	1×10^{-12}
	10d	$(6-10)\times 10^{-14}$	$(2-4)\times 10^{-14}$	2×10^{-15}	10^{-15}	3×10^{-12}	3×10^{-12}
频率准确度		$(2-3)\times 10^{-12}$	$(1-2)\times 10^{-12}$	3×10^{-13}	5×10^{-13}	10^{-11}	10^{-11}
频率再现性		5×10^{-13}	5×10^{-13}	3×10^{-14}	1×10^{-12}	5×10^{-11}	5×10^{-11}
频率漂移率		$1\times 10^{-15}/\text{d}$	$1\times 10^{-15}/\text{d}$	$1\times 10^{-15}/\text{d}$	$1\times 10^{-15}/\text{d}$	$3\times 10^{-11}/\text{月}$	$3\times 10^{-11}/\text{月}$
寿命(yr)		5	3	5-9	5-9	3-6	3-6
价格(\$)		(4-5)万	7.0万	(30-10)万	6.5万	(0.7-1)万	(0.6-1)万

1.2 新型原子频标

有希望成为下一代新基准的, 一是光抽运铯原子频标。美国 NIST 在实用中实现的准确度已达 1×10^{-14} ^[4]。除美国 NIST 外, 日本的 CRL、加拿大的 NRC、英国的 NPL 和我国北京大学等都在积极开展这方面的研究。另一种较有希望的是激光冷却的离子储存装置, 它基于激光冷却囚禁在磁阱中的微波和光跃迁技术。由于相互作用时间长而获得跃迁谱线的高 Q 值, 准确度预期为 10^{-15} 量级。美国 NIST、日本 CRL、英国 NPL 以及法国 LHA 都在积极开展这方面的研究, 并取得实用性进展。几年前有两台这种标准已在美国的 USNO 正式投入原子时试用。但到目前为止, 还尚未在 TAI 中看到该标准的守时数据。在我国, 湖北物理所、北京大学等单位也正积极开展这方面的研究。

目前, 最热门、最有希望代替传统铯基准成为下一代新时、频基准的是喷泉铯原子。它采用磁光阱, 激光原子粘团新技术, 将铯原子往上抛, 再靠自身重量自然下落两次通过微波

谐振腔, 从而消除腔相差而使该标准的准确度能好于 3×10^{-15} [5]。法国 LPTF 已经制成这种标准, 并且准确度达到 3×10^{-15} 。目前, 加拿大、美国也正积极开展这方面的研究。在我国, 北京大学和中国科学院陕西天文台从 1993 年开始就进行了铯原子喷泉频标的合作研究。中国计量科学研究院也在积极准备开展铯原子喷泉频标的研究。

2 原子时归算及相对论改正

2.1 国际原子时 TAI 的新水平

国际原子时 (TAI) 是世界参考时间基准。原子时秒定义为“铯原子两个特定能级的跃迁辐射的 9192631770 个周期所持续的时间”。而地球上各种科学和技术应用以及民用的时间标准是协调世界时 (UTC)。其秒长是原子时秒, 而时刻与世界时 UT1 接近 (不差 0.9s)。

国际原子时从 1973 年开始便直接由原子钟数据计算得到。利用公布在世界各时间实验室的各种原子钟的数据, 通过 GPS 时间传递技术送到国际计量局 BIPM 的时间部, 用 Algos 原子时算法得到自由原子时尺度 EAL, 然后 EAL 的频率再与 NIST、VNIIFTRI、USNO、PTB 和 LPTF 所维持的最好的独立原子时尺度比较, 进行长期准确度控制而得到国际原子时 TAI。

到 1996 年底止, 全世界约有 40 余个守时中心和实验室参加国际原子时系统, 其中约 15 个实验室保持独立的地方原子时。全世界参加 TAI 归算的原子钟约 210 多台, 其中老型号小铯钟 (如 HP5061A、B 或相当者) 有 82 台, 新型小铯钟 (HP5071A) 96 台, 而氢钟 (带自动调谐) 约 37 台。

与以往比较, 最近几年发生了许多变化: 首先, 老型号的商品铯钟已广泛被 HP5071A 新型铯钟代替, 这种新型铯钟在 20—40d 取样时间中的稳定度达 6×10^{-15} ; 其次, 主动型自动调谐氢钟大量参加 TAI 守时, 它们的频率漂移为 $10^{-17}/\text{d}$ 量级; 另外, GPS 时间传递技术的广泛采用, 使所有参加 TAI 的实验室的钟可以以几个 ns 的准确度进行比对; 还有, 新型基准如 NTST 的光抽运铯基准和 LPTF 的喷泉铯基准的评定和投入使用。这些变化的直接结果是 TAI 的准确度性能的自然改善。所以, 从 1992 年以后, 国际原子时水平有了较大的提高, 准确度从 5×10^{-14} 达到了 2×10^{-14} , 长期频率稳定度从 $(1-2) \times 10^{-14}$ 达到 $(3-5) \times 10^{-15}$, 均提高了 2—3 倍。原子时水平主要取决于守时钟性能的优劣。新型高性能小铯钟 (HP5071A) 和氢钟的大量加入, 是国际原子时水平提高的重要因素。这两种钟在 TAI 中占了主导地位, 而导致老型号铯钟 (如 HP5061A 等) 将最终被取代。

另一个重要变化是守时钟最高权重的选择。参加国际原子时的原子钟性能是由国际原子时给出各国时间实验室的单台原子钟的双月速率方差确定的权重来衡量的。为了保证 TAI 有高的准确度和好的长期稳定度, 原子钟取权规则的要求是很严格的。钟权重 $P_i = A/\sigma_i^2$, 这里, 独立方差 σ_i 是钟 H_i 相对于 TAI 的 6 个连续 60d (双月) 平均速率计算得到的; 因子 A 是任意选择的。1994 年底以前为 1000, 参数 σ_i 用 ns/d 来表示。1994 年底以前最高权为 100, 这要求达到最高权的原子钟速率均方差必须小于 $3.16\text{ns}/\text{d}$ (3.66×10^{-14}), 即一年内原子钟频率变化的峰-峰值小于 1×10^{-13} [6]。从 1995 年 2 月开始因子 A 改为 10000, 最高权定为 1000。1995 年 5 月, 因子 A 仍为 10000, 但最高权定为 2500, 其目的是将原子钟性能的权重差异拉大距离, 突出优良钟的贡献。获得最高权的原子钟性能要求比以前提高了 5 倍, 即

σ_i 为 $0.632\text{ns/d}(7.31 \times 10^{-15})$ ，而原子钟频率的年变化最大值不能大于 2.2×10^{-14} 。统计表明，只有新型高性能商品铯钟 (HP5071A) 和自动调谐的氢原子钟才有可能获得满分。表 2 表示截止到 1996 年 12 月底参加 TAI 的原子钟类型和它们的权重。由表 2 可见，200 多台守时原子钟对 TAI 的贡献最大的当属 HP5071A 新型小铯钟和自动调谐的氢原子钟 [5]。

表 2 参加 TAI 的商品原子钟类型和权重
(截止到 1996 年 12 月)

钟类型	12	14	16	17	50	21	23	30	31	34	35	36	4X
钟数	7	15	8	2	1	3	1	1	6	4	89	13	31
合计权重	2353	12275	946	1828	142	137	161	5	5038	6385	219669	28013	62165
平均权重	336	818	118	914	142	46	161	5	840	1596	2468	2155	2005
占 TAI 权重比例	0.007	0.035	0.003	0.005	~0	~0	~0	~0	0.014	0.018	0.629	0.080	0.178

注：钟类型：4X 为氢钟，35 为 5071A 小铯钟，36 为 5071A 低性能小铯钟或 5071A 铯束管，其他为标准型小铯钟。

在我国，目前有国家计量科学研究院 (NIM)、中国科学院陕西天文台 (CSAO) 和上海天文台 (SO) 三个时间实验室参加国际原子时。NIM 和 CSAO 是以商品小铯钟 HP5061 型和 HP5071A 为守时钟。SO 是以自己几年前研制的自动调谐氢钟为守时钟，并从 TAI 获得 1000 权的权重。

2.2 国际原子时 TAI 的频率控制修正 [4]

CCDS 正在考虑一种对 TAI 的新的控制修正问题，其目的是保持 TAI 单位秒长与旋转大地水准面上的国际单位制 (SI) 秒尽可能接近。多年来，TAI 的准确度都是依赖 PTB Cs1 和 PTB Cs2 铯基准的结果。但是现在的情况发生了变化：1994 年 7 月以来，国际计量局一直收到美国国家标准局研制的 NIST-7 光抽运铯基准的数据，这些数据显示这种标准具有相对不确定度 1×10^{-14} 的准确度水平。这种结果对黑体辐射偏移的修正大约为 -1.7×10^{-14} 。在以前，所有实验室铯钟基准的数据特别是 PTB Cs1 和 PTB Cs2 所提供的结果，从未进行过这种修正，其相对不确定度为 1.5×10^{-14} ；1995 年 10 月以后，PTB Cs3 也以其相对不确定度 1.4×10^{-14} 并对黑体辐射进行修正了的数据送到了 BIPM。因此，从 1995 年 10 月开始，BIPM 把黑体辐射修正应用到 PTB Cs2 和 Cs3，并且由 PTB Cs2、PTB Cs3 和 NIST-7 三个铯基准对 TAI 单位秒长进行了评定。这导致了一个新的结果，即 TAI 单位秒长与 SI 单位秒长之间的偏差为 1.9×10^{-14} 。这种不符合可用积累的频率控制修正的形式予以补偿。每 60d 进行一次，每次的相对幅度为 1×10^{-15} ，以免破坏时间尺度的稳定度。

2.3 相对论修正对时间计量的应用

随着原子时、频比对精度从微秒到亚毫微秒级的发展，相对论改正不仅具有理论意义，而且在实际比对中必须加以修正。动力学理论认为，TAI 就是原时，可以在不同坐标系之间任意变换。在天体力学、天体测量、历书历表和大地测量等各种应用中也必须注意到，TAI 是一个地心参考系中定义的具有国际单位制秒长的坐标实际基准。其秒长是在旋转大地水准面上作为基准单位实现的。根据目前的技术水平，它能以足够的准确度扩展到邻近大地水准面的任何一个固定或移动点上，只要应用一阶广义相对论修正就行了。对于搬运钟在搬运期

间累计的坐标时间相对论修正的不确定性不超过 1×10^{-14} , 对在无线电时间信号传输过程中收发两地之间所经历的坐标时作相对论改正, 可获得小于 1ns 的不确定性^[7]。

但是, 在亚毫秒 (ps) 准确度水平上, 把相对论修正应用于地球附近的时间传输以及应用于钟同步的研究也已经完成^[8]。已经得到相对于地心坐标时 (TCG) 钟的同步分析表达式, 其相对不确定性对地球表面上的钟大约为 2×10^{-17} , 对地球卫星钟大约为 1×10^{-18} 。

3 时、频传递与比对技术新进展

70 年代时间比对的主要手段是 Loran-C 和电视, 精度为 10^{-12} 。80—90 年代主要依靠各种卫星同步, 包括利用通信卫星、广播卫星、气象卫星和导航卫星作单向和双向的时间比对。其中 GPS 系统和 GLONASS 系统的应用尤为引人注目。采用共视法, 地球上相距上万千米的两点之间的时间比对可获 10ns 的精度。频率比对精度可达 $1 \times 10^{-13}/d$ 以上。这种精度不仅超过 Loran-C 一个数量级, 而且达到了目前工业铯钟的水平。因而, GPS 和 GLONASS 这两个系统, 尤其是 GPS 系统在世界各守时中心获得了广泛的应用。

3.1 GPS 系统

国际计量局 BIPM 不仅采用 GPS 共视技术作为 TAI 计算的主要时间传递方法, 而且也是最有责任来担当此重任的权威机构。BIPM 进行着这方面的一系列研究。它利用一个大陆内的本地星连同 NIST-OP 和 CRL-OP 两个长距离链对所得数据进行电离层测量和精细处理的精密卫星星历表修正。只有应用严格的共视才有可能克服卫星信号中的 SA 效应。周日时差 (UTC-GPS 时间) 估算结果的标准偏差为 12ns 左右, 在这个过程中 SA 效应不能完全消除。BIPM 还通过 OP-NIST, NIST-CRL 和 CRL-OP 三个链的联合, 利用 GPS 卫星星历和三个站测得的电离层延迟, 正在进行 GPS 潜在能力的测试。结果仍然表明日平均剩余误差为几个 ns。剩余误差可能来自坐标的误差和电离层测量误差。这些误差的估计工作在 BIPM 仍在继续进行^[4]。

BIPM 现在也对 GPS 定时接收机硬件标准化进行研究, 以期减少某些接收机工作中外部温度的影响。

BIPM 也正在试验建立在天气测量基础上的半经验模型, 在短基线范围内 GPS 共视时间传递试验表明, 相类同的天气范围内, 时间比对结果应用这个半经验模型, 不会超出几百 ps 的偏差。相反, 在长距离比对中, 差值可达几个 ns^[9]。

3.2 GLONASS 系统

GLONASS 系统是俄罗斯近期才投入应用的全球导航卫星系统。像 GPS 一样, 也是由 24 颗卫星组成。但它们分布在 19100km 高空的三个轨道上, 运行周期为 11h 15min。可以确保在任何时间, 全球的任一地点都可看到 5—10 颗卫星。系统无 SA 效应。其共视时间传递精度与 GPS 系统相当^[10]。

从 1996 年初开始, BIPM 利用一种新型 GLONASS 双频接收机, 根据 BIPM 官方制定的 GLONASS 国际共视纲要, 对 GLONASS 系统的能力进行实验测试。其他一些特别是在欧洲和亚洲的实验室, 目前也正在购买类似的 GLONASS 定时接收机。这种情况有可能导致形成一个 GLONASS 时间传递网在世界范围内进行该系统潜在能力的试验研究。

需要强调指出的是, 与 GPS 相比, 尽管 GLONASS 没有 SA 效应, 但是它存在其他两个

问题^[4]: 即 GLONASS 时间与 UTC 差 $35\mu\text{s}$ (已于 1997 年 7 月 1 日调整消除了这一系统差), 而 GPS 时间与 UTC 保持在 100ns 以内; 另外, GLONASS 所采用的参考系不是 ITRF^[4]。

3.3 双向时间传递

BIPM 也正在积极开展双向卫星时间传递的研究。对双向技术和 GPS 共视技术所得到的时间传递结果进行了比较^[11]。某些研究是在地面试验框架中进行的。地面试验是通过 INTELAST V-A(F13) 卫星的国际双向时间传递实验, 由欧洲和北美的一些实验室进行。这个实验是为将来 8 个站的国际网投入永久工作所做的重要努力。单次双向点的精度是大约 200ps^[12]。

3.4 卫星轨道激光同步 (LASSO)

BIPM 也正在 Texas 和 France 之间进行时间传递的实验以比较卫星轨道激光同步 (LASSO) 时间传递技术与 GPS 共视时间传递技术。正如所预期的, 单次 LASSO 点的精度好于 100ps^[13], 但用这个实验尚不能估计 LASSO 技术的准确度。

3.5 空间氢脉泽

主动型和自动调谐的氢脉泽极高的短期稳定度能够用于解决时间、导航、地球动力学、测地以及地球大气物理等各个领域的一系列科学和应用问题。多年前, BIPM 就已对利用卫星载氢脉泽实验用于时间计量感兴趣, 并已经研究了“定时测距和大气探空”(ExTRAS) 实验的潜在应用。在这个实验中, 空间钟与地面之间的通讯采用 PRARE(precise range and range-rate equipment) 技术的微波链方法和 T2L2(time transfer by laser link) 技术的光学链方法。PRARE 和 T2L2 技术是通常双向和 LASSO 方法的升级换代技术。他们还用预先估算不确定性误差的方法对 ExTRAS 在时间领域的潜力进行了研究^[14], 这个实验的潜在准确度用于时间发播和地面钟同步时为 500ps 左右。另一个空间计划是 1997 年发射的 NASA/RSA 氢脉泽钟 HMC 计划, 它将一个氢脉泽放在俄罗斯空间站 MIR 上, 用 T2L2 激光链与地面钟进行比对。

3.6 甚长基线干涉仪 (VLBI)

甚长基线射电干涉测量对大地测量和高精度天文参考系的实现是一种精密的技术。它也是需要最高稳定度原子钟的一种技术系统。VLBI 也被用来提供极高准确度的时间比对, 其

表 3 现有的和计划中的高精度国际时、频比对技术比较

方 法	时刻比对精度	频率比对精度	使用范围
GPS	10—30ns	$(1-2)\times 10^{-13}/\text{d}$ $(1-3)\times 10^{-14}/10\text{d}$	全 球
GLONASS	10—30ns	$(1-2)\times 10^{-13}/\text{d}$ $(1-3)\times 10^{-14}/10\text{d}$	全 球
Loran-C	80—150ns	$(0.7-2)\times 10^{-12}/\text{d}$ $(1-5)\times 10^{-13}/10\text{d}$	北半球
双向	0.2—1ns	$10^{-14}/\text{d}$	近两极处除外
LASSO	0.1—1ns	$1 \times 10^{-14}/\text{d}$	近两极处除外
VLBI	0.1—1ns	$(0.1-1)\times 10^{-14}/\text{d}$	洲 际
ExTRAS	0.5—1ns	$(0.1-1)\times 10^{-14}/\text{d}$	洲际、空间

潜在能力为 10—100ps。通过 VLBI 技术也可进行毫秒脉冲星的观测。BIPM 的科学家

正在与巴黎天文台和 CNES 保持接触, 用这种技术进行脉冲星观测研究。

表 3 列出了各种时频传递比对技术的特征比较。

4 其他研究活动

4.1 脉冲星时间尺度

毫秒脉冲星可以用来作为一个很稳定的钟, 采用一种稳定度算法来建立时间尺度。为了了解脉冲星时间尺度究竟如何, 以及这个尺度建立对原子时尺度意味着什么, 已经开展了一些研究工作^[15]。这项工作的重要特点是, 脉冲星时间尺度能使原子秒从一个起点到另一个起点的准确度进行传递, 因此克服了原子时标准故障带来的问题。

为了得到实际的脉冲星数据, 一些观测脉冲星的射电天文组正在进行合作研究。BIPM 的时间部从 1993 年起把地球时 (TT) 实现的详细文本 (年报) 逐年提供给这些天文研究组参考。

为了得到更多脉冲星数据, 供射电观测者使用的新技术的研究正在法国 CNES 和巴黎天文台 (OP) 之间协作进行, 以期发现更多脉冲星。

4.2 GNSS 系统^[16]

全球导航卫星系统 (GNSS) 将组合 GPS 和 GLONASS 系统来更好地满足那些要求定位精度高、完整性强的用户以及满足授时领域等方面广大用户的要求。

GLONASS 的 3 个平面及 GPS 的 6 个平面卫星星座以及它们各自不同的倾斜角, 使得它们在不同纬度地区的作用结果有所不同。GLONASS 适用于高纬度而 GPS 适用于中纬度地区, 这种影响随截止高度角的增加而表现得更明显。能兼容 GPS 和 GLONASS 的接收机, 将会在全球任何地方都获得极好的精度。

此外, GLONASS P 码目前未加密, 且 P 码可以从两个频率上获得, 并让民用用户获得与 GPS P 码相当的精度。

这种 GNSS 集成式接收机已由美国 3S 导航公司研制成功并推向市场。

参 考 文 献

- [1] H-P Company. HP5071A primary frequency standard manual, 1991
- [2] 中国科学院上海天文台. “实用型氢原子频率标准”产品说明书, 1992
- [3] 北京大学无线电系. “无老化漂移铷原子频率标准”成果鉴定会成果报告, 1996
- [4] CCDS. Annual Report of the BIPM Time Section, 1993—1995, 1996
- [5] BIPM. BIPM Annual Report 1995
- [6] 胡锦涛. 沪台原子时资料汇编 (内部资料). 1996
- [7] 翟造成. 自然科学年鉴. 上海: 上海科技出版社, 1988, 3: 82
- [8] Wolf P, Petit G. Astron. Astrophys., 1995, 304: 653
- [9] Lewandowski W, Grudler P, Baumont F. Proc, 8th EFTF, Munich, Germany, 1994, [s.l.]: [s.n.], 1994: 981
- [10] Daly P, Koshelyaevsky N B et al. Metrologia, 1993, 30: 89
- [11] Kirchner D, Ressler H et al. Metrologia, 1993, 30: 183
- [12] Klepczynski W J, Davis J A et al. Proc. 26th PTTI, Hawaii, 1994, [s.l.]: NASA, 1995: 89
- [13] Lewandowski W, Petit G et al. Proc. 25th PTTI, California, 1993, [s.l.]: [s.n.], 1994: 357
- [14] Thomas C, Wolf P et al. Proc. 26th PTTI, Hawaii, 1994, [s.l.]: NASA, 1995: 127

- [15] Petit G, Tavella P. *Astron. Astrophys.*, 1996, 308: 290
 [16] 北京天测测绘工程技术服务公司. “GNSS=GPS+GLONASS”产品介绍(内部资料), 1996

(责任编辑 刘金铭 郭盛炽)

Recent Progress in Time and Frequency

Zhang Yu Zhai Zaocheng

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

This paper describes the recent progress of time and frequency techniques, the recent development of various applied atomic frequency standards as well as their new performance results. The algorithm of International Atomic Time (TAI) and its reached new level, along with the applications and roles of various atomic clocks in the TAI computation are presented, in which the outstanding position and role of hydrogen masers have been emphasized. Meanwhile, it also reviews the recent progress in high precision time synchronization techniques and time & frequency measurement techniques, especially that in experimental research for improving application of GPS and GLONASS time synchronization techniques. In addition, some important time & frequency activities under way and projected in the world are also introduced.

Key words Instrumentation: atomic frequency standard—time: atomic time scale—time: transfer techniques