

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2026.02.03

高精度原子钟及卫星导航系统时间尺度建立与维持方法进展

陈广耀^{1,2}, 李晓杰³, 周善石¹, 曲伟菁¹

(1. 中国科学院 上海天文台 上海 200030; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100094; 3. 北京
卫星导航中心, 北京 100094)

摘要: 围绕天地一体时间基准建立、维持与传递需求, 该文梳理广义相对论框架下的时间定义与实现方法, 分析地面时间基准、远距离时间频率比对及 GNSS 系统时间建立与维持现状。当前 UTC 频率准确度和稳定度达 10^{-16} 量级, GNSS 时间基准稳定度约为 10^{-15} 量级。该文进一步讨论空间钟守时、高阶相对论修正、外接高精度频率源和星地联合守时等技术路径, 为构建高精度、弹性化天地一体时间服务体系提供参考。

关键词: 高精度原子钟; 时间频率传递; 守时实验室; 卫星导航系统; 广义相对论

中图分类号: P127 **文献标识码:** A

1 引言

信息化、智能化的快速发展, 对时空信息服务性能提出了越来越高的要求。时间是时空信息服务的重要内容。世界各国正处在高精度、高可靠、高弹性的定位导航授时 (PNT) 服务体系建设过程中, 原子钟性能、时间频率比对方法以及时间系统维持精度均不断提升。

时间基准维持与传递服务系统主要由高精度原子钟间时间频率比对链路、时间尺度建立与维持方法及时间传递方法构成。地面守时与时间传递系统和卫星时间传递系统是目前常用的两种典型时间服务系统。地面守时系统主要以分布于全球的多个守时实验室进行联合守时, 每个守时实验室配备多台高稳定度原子钟钟组, 不同原子钟通过比相的方式, 进行时间频率比对, 并形成本地的综合原子时; 守时实验室之间通过比对链路进行时间频率比对, 并联合生成协调世界时。卫星导航系统作为时间频率传递的重要手段, 将地面高精度时间频率基准通过用户定位授时处理方法传递至用户; 在卫星导航系统时间频率传递过程中, 导航系统地面站及卫星也配备了高精度原子钟, 在一定时间尺度和精度范围内提供守时能力。随着导航

收稿日期: 2025-05-19; 修回日期: 2025-09-05

资助项目: 中国科学院重点部署项目 (KGFZD-145-25-07); 基础加强计划 (2024-JCJQ-JJ-0336)

通讯作者: 陈广耀, chenguangyao@shao.ac.cn

系统的广泛应用, 以卫星导航系统为核心的综合 PNT 体系正在建设中。联合地面守时实验室、卫星导航系统、空间高精度原子钟、脉冲星等多类型时间基准的综合时间服务体系正逐步建成并完善。

本文将介绍 PNT 建设中高精度原子钟配备、时间频率比对方法等热点问题, 从时间基准理论出发, 全面综述时间定义和物理实现, 梳理各时间服务系统建设需求与实现方法, 最后展望未来发展趋势。各章具体安排如下: 第 2 章介绍近代时间尺度理论基础演进过程和目前国际秒定义; 第 3 章梳理不同应用需求下的原子钟指标; 第 4 章和第 5 章介绍协调世界时和四大卫星导航系统时的建立与维持方法; 第 6 章展望未来低轨导航星座时间基准和天基时间基准; 第 7 章总结和讨论。

2 近代时间定义

时间计量基于周期性运动。现代时间测量体系从基于天文观测的天文时, 转变为广义相对论框架下基于原子跃迁的原子时。国际原子时 (TAI) 和协调世界时 (UTC) 的建立标志着人类对时间测量和定义的新里程碑。尽管天文时不再作为时间尺度实现和维持的具体方法, 但由于其与地球自转、公转运动紧密相关, 在空间大地测量及卫星导航数据处理中仍具有重要作用。

2.1 原时和坐标时

高精度测量要求建立与之相适应的高精度理论模型。20 世纪初, 随着爱因斯坦广义相对论理论的建立, 在相对论框架下进行精确时间计量成为时间尺度研究重点^[1]。

经典牛顿理论认为时间和空间彼此独立, 而相对论则将时间与空间联系在一起, 视为四维时空的数学表达^[2]。局域内, 以观测者为中心建立局域参考系, 观测者携带理想时钟观测自己的时间, 该时间定义为“原时”。在描述大尺度时空中的物质运动时, 如建立人造地球卫星运动方程, 需要建立全局参考系。全局参考系中时间坐标由度规方程计算得到, 称为“坐标时”。原时具有明确物理意义, 坐标时只能由时空度规给出的数学关系, 由原时通过计算间接得到^[3-6]。

利用特定时空度规, 可将观测结果归算至对应的时空参考系, 因此不同度规定义了不同时空参考系。国际天文联合会 (IAU) 分别定义了太阳系质心力学时 (TDB) 和以大地水准面为参考的地球时 (TT), 以及太阳系质心天球参考系 (BCRS) 和地心天球参考系 (GCRS) 对应的太阳系质心坐标时 (TCB) 和地心坐标时 (TCG)。TDB、TT、TCB 和 TCG 均为原子时时间尺度, 都是基于 SI 秒所确定的原时而得到, 是符合相对论理论体系、较好适应近地空间的各类物质运动、从理论上具有明确定义的时间尺度。在地球附近 (如同步轨道处) 原时与地球时的转换关系为:

$$\frac{d\tau_A}{dT} = 1 + L_G - \frac{1}{c^2} \left[\frac{v_A^2}{2} + U_E(x_A) + V(X_A) - V(X_E) - x_A^i \partial_i V(X_E) \right], \quad (1)$$

其中, x_A 为时钟 A 在 GCRS 的坐标, U_E 表示地球在地心系中时钟位置 x_A 处的牛顿位势,

$v_A = dx_A/dt$ 为坐标速度, V 表示其他天体 (主要是太阳和月亮) 在太阳质心系中地球质心 X_E 或时钟位置 X_A 计算的牛顿位势之和。

根据 IERS2010 规范, 对于时间不确定度需求在 10^{-18} 以内时, 可采用式 (1) 进行时间系统转换。对于 GNSS 卫星轨道高度, 速度项和地心引力势项在式中起主导作用。此外, 考虑到 GNSS 卫星为圆轨道, 且 MEO 卫星轨道高度约 20 Mm, 因此通过调整频率常数偏差以及仅考虑地球中心引力的周期项作为 GNSS 卫星相对论修正方法, 被称为协议相对论修正。

近年来, 随着原子钟性能和卫星导航空间信号精度提升, 以及空间高精度原子钟应用和低轨导航增强服务的建设, 高阶相对论对卫星钟频率的影响逐步受到重视。式 (1) 中后三项分别是地球非球形引力及日月引潮势, 对原子钟产生半轨道周期、半月周期及半年周期影响, 对频率产生约 10^{-15} 影响, 一天内对钟差影响约亚纳秒量级。该误差会破坏钟差解算的线性特征, 进而影响时钟特性的准确分析及预测精度。通过修正该误差, 预报精度可提升约 10%, 对未来光钟等高精度原子钟测量及时间同步具有重要意义。

2.2 国际秒定义

2.1 节给出了相对论框架下时间系统的理论基础, 本节从物理实现层面给出国际秒定义。1967 年第 13 届国际计量大会 (CGPM) 确定了以铯原子辐射为基础的秒长定义。2006 年国际计量局 (BIPM) 重新定义原子时秒为铯 133 基态的两个超精细能级跃迁辐射振荡 9 192 631 770 周所持续的时间, 该定义不再限定实现地点及当地引力场, 使 SI 秒可以在任意地点以相同方法实现, 被认为是原时的实现方案^[7]。

自 2005 年以来, 光钟技术不断发展, 在稳定度方面, 光钟比铯原子喷泉钟提升 2 个数量级, 这种系统性优势推动了基于光学原子跃迁原理重新定义“秒”的国际学术探讨。国际计量大会 (CGPM) 于 2022 年第 5 号决议明确提出 2030 年实现光钟定义的技术路线图, 该决议不仅明确了光学频率标准的性能要求, 还对全球时频比对网络建设提出了具体指标。决议强调新定义必须保持与现行铯基准的溯源性, 确保计量体系的平稳过渡。新的秒定义将极大促进测量精度的提升, 为检验标准模型之外物理理论开启新窗口, 如探测暗物质与引力波的量子效应, 同时亚纳秒级时间同步能力将重塑 5G 通信、量子网络和深空导航体系的性能跃升, 为多种新兴领域创造新的可能性。

2.3 国际原子时 (TAI) 和协调世界时 (UTC)

为实现高精度、高稳定度的原子时, 1971 年第 14 届 CGPM 引入国际原子时 (TAI), 形成了一个具有物理实现的时间系统。以原子时作为近地空间的时间尺度 (TCG 和 TT) 的理论实现, 满足实际应用。TAI 原点为 1958 年 1 月 1 日, 此时 UT1 与 TAI 的差值近似为 0。TAI 是大地水准面的坐标时, TT 与 TAI 仅存在常数偏差, 其关系如下^[8]:

$$TT(TAI) = TAI + 32.184 \text{ s}. \quad (2)$$

原子时是广义相对论框架下的大地水准面坐标时, 与地球自转及天体运动无关。地球自转存在长期变慢趋势, 导致原子时秒长与世界时秒长存在差异。为协调两者需求, 协调世界时 (UTC) 成为通用的国际时间基准。UTC 是阶梯状的原子时间尺度, 通过闰秒调整实现与 UT1 近似同步。当前 TAI 与 UTC 相差 37 s。UTC 是事后处理的时间尺度, 每月公布, 不适用于实时和

准实时应用, 因此, BIPM 在 2013 年 7 月引入快速 UTC (TCr), 每周公布, 其稳定性相比于 UTC 稍差, 低 20% 左右^[9]。

2.4 导航系统时

卫星导航系统的核心作用就是将地面维持的高精度时间、空间基准通过卫星传递给用户; 同时, GNSS 依靠精密时间实现测距和定位服务。GNSS 系统时间 (GNSST) 由各导航系统地面主控站的原子钟组和时间尺度算法来建立和维持, 并定期驾驭至 UTC(k), 实现高精度服务和 GNSS 系统间的互操作性。GPS、Galileo 和 BDS 无闰秒调整, 是连续的原子时, GLONASS 跟随 UTC 闰秒, 不是连续的时间尺度^[10, 11]。

3 高精度原子钟性能及类型

现代时钟利用稳定的振荡源和计数器实现组合计时。为了提高时间测量精度, 须不断提高振荡频率的稳定度。某些原子的特定跃迁频率具有优异的稳定度和复现性, 适合作为时间频率基准, 原子钟应运而生。1955 年, 英国国家物理实验室 (NPL) 成功研制热铯束原子钟^[12], 促成秒定义由天文秒转为原子秒。此后, 铯钟 (Cs)、氢钟 (H) 和铷钟 (Rb) 被广泛应用在地面和空间守时^[13]。本章将介绍高精度原子钟发展现状, 给出不同类型原子钟应用场景和性能指标。

3.1 原子钟性能评估指标

原子钟性能的指标包括频率漂移率、频率准确度和频率稳定度^[14, 15]。频率漂移率表征原子钟输出频率随时间的变化, 简称频漂。频率准确度表征时钟实际输出频率与标称频率 (“秒” 定义) 的一致程度, 标称频率准确度应比待测原子钟高一个量级以上。对于守时原子钟和星载原子钟, 其频率准确度以基准钟作为标准; 而对于基准钟和光钟, 只能通过自我评定或相互比对来获得其准确度指标。频率稳定度为时变统计量, 表征时钟输出频率受噪声影响而产生的随机起伏情况, 对频率稳定度的表征需要给出相应的平滑时间。常用的评估方法有 Allan 方差、Hadamard 方差等, 方差量级越小, 频率稳定度越高。

评估原子钟基本性能的不确定度一般分为 A 类和 B 类^[16]。A 类不确定度即频率稳定度; B 类不确定度为扣除系统效应后残余系统误差引起的系统频移, 包括二阶塞曼效应、黑体辐射、引力红移等十几项因素。通过对不同因素分别评估并合成, 得到原子频标的最终不确定度。

3.2 地面原子钟

原子钟分为基准钟和守时钟, 基准钟复现时间单位 “秒”, 通常在实验室运行, 守时钟输出时间信号^[17]。国际原子时 (TAI) 和协调世界时 (UTC) 综合全球 80 多个守时实验室运行的约 450 台原子钟, 实现高稳定性时间尺度, 并通过少数维持的主频标 (PFS) 和次级频标 (SFS) 实现其准确性, 以最小的不确定性实现 SI 秒。鉴于氢钟优越的稳定性, 在计算 TAI 时, 氢钟取得了更大权重^[18]。

表 1 列出基准钟的 A 类和 B 类不确定度。可以看出光钟性能好于喷泉钟, 喷泉钟好于热铯束钟。相比国际一流喷泉钟, 中国喷泉钟仍有差距。

表 1 主要国家实验室基准钟性能指标评估结果

实验室	基准钟	类型	A 类不确定度/($10^{-13} \times \tau^{-1/2}$)	B 类不确定度/ 10^{-15}
INRIM	IT-CsF2 ^[19]	Fountain	2	0.19
METAS	METAS-FOC2 ^[20]	Fountain	0.8	1.99
NIM	NIM5 ^[21]	Fountain	3	1.4
NPL	NPL-CsF2 ^[22]	Fountain	1.7	0.23
NRC	NRC-FCs2 ^[23]	Fountain	1.1	0.23
PTB	PTB-Cs1 ^[24]	Beam	0.69 ~ 0.82($\tau = 5\,000\text{ s}$)	8
PTB	PTB-Cs2 ^[24]	Beam	0.52 ~ 0.66($\tau = 5\,000\text{ s}$)	12
PTB	PTB-CsF1 ^[25]	Fountain	0.72	0.28
PTB	PTB-CsF2 ^[25]	Fountain	0.25	0.17
VNIIFTRI	SU-CsFO2 ^[26]	Fountain	2.5	0.50
LNE-SYRTE	SYRTE-FO1 ^[27]	Fountain	0.3 ~ 0.4	0.37
LNE-SYRTE	SYRTE-FO2 ^[27]	Fountain	0.3 ~ 0.4	0.23
LNE-SYRTE	SYRTE-FOM ^[27]	Fountain	0.6 ~ 0.7	0.7
NICT	NICT-Sr1 ^[28]	Lattice	0.07	0.06
NMIJ	NMIJ-Yb1 ^[29]	Lattice	0.1	0.36
LNE-SYRTE	SYRTE-FORb ^[30]	Fountain	0.3 ~ 0.4	0.34
SIOM	SIOM-RbF ^[31]	Fountain	2.7	2
NTSC	NTSC-F1 ^[32]	Fountain	0.56	2.9
NIST	NIST-F2 ^[33]	Fountain	1.7	0.11

注：INRIM 表示意大利国家气象计量研究所；METAS 表示瑞士联邦计量局；NIM 表示中国计量科学研究院；NPL 表示英国国家物理实验室；NRC 表示加拿大国家研究委员会；PTB 表示德国联邦物理技术研究院；VNIIFTRI 表示俄罗斯国家技术物理和无线电工程研究院；LNE-SYRTE 表示法国巴黎天文台时频标准实验室；NICT 表示日本情报通信研究机构；NMIJ 表示日本国家计量研究院；SIOM 表示中国上海光机所；NTSC 表示中国科学院国家授时中心；NIST 表示美国国家标准与技术研究院；Fountain 表示喷泉钟，Beam 表示热铯束，Lattice 表示光晶格钟。

除微波钟，性能更好的光钟也得到了快速发展，包括单离子光钟和基于大量中性原子的光晶格钟^[34]。国内外代表性单离子光钟和光晶格钟的 A 类和 B 类不确定度见表 2。

除基准钟和光钟，各大实验室配备了多台普通守时钟。美国 Microsemi 公司研发的 5071A 型商品铯原子钟准确度为 5×10^{-13} ，5 天稳定度（简称天稳）可达 10^{-14} 量级；该公司研发的 MHM2010 型氢钟的天稳为 2×10^{-15} 量级。俄罗斯 Vremya-Ch 公司研制的 VCH-1003M 型氢钟天稳为 7×10^{-16} 量级。中国成都天奥公司 TA1000 激光抽运小型铯钟天稳为 1.91×10^{-14} 量级^[48]。中国科学院上海天文台生产的 SOHM-4 型主动型氢钟天稳为 2×10^{-15} 量级^[49]。

USNO 是拥有原子钟最多的时间实验室，曾在 TAI 守时中占有最大权重，近几年逐渐降低，当前约 16.22%；VNIIFTRI (SU) 原子钟数量虽然不多，但权重占比很大，并逐年增加，当前约 21.65%，为最大权重；NTSC 拥有世界第三规模的守时原子钟组，权重占比逐年增大，约占 18.35%^[50]。

尽管地面原子钟在工程化应用领域已高度成熟，但其基础性能仍在持续突破。与此同时，将上述高性能原子钟引入空间应用成为了进一步努力的方向。

表 2 国内外主要光钟性能指标评估结果

实验室	类型	A 类不确定度/($10^{-15} \times \tau^{-1/2}$)	B 类不确定度/ 10^{-18}
NIST ^[35]	²⁷ Al ⁺	1.2	0.94
PTB ^[36]	¹⁷¹ Yb ⁺	1.4	2.7
APM ^[37]	⁴⁰ Ca ⁺	3	3
NRC ^[38]	⁸⁸ Sr ⁺	3	12
NPL ^[39]	⁸⁸ Sr ⁺	22	40
JILA ^[40, 41]	⁸⁸ Sr	0.048	2.1
NIST ^[42, 43]	¹⁷¹ Yb	0.06	1.4
PTB ^[44]	⁸⁸ Sr	0.16	20
LNE-SYRTE ^[45]	¹⁹⁹ Hg	3.4	170
NIM ^[46]	⁸⁷ Sr	1.18	7.2
NTSC ^[47]	⁸⁷ Sr	0.66	51

注：APM 表示中国科学院精密测量科学与技术创新研究院；JILA 表示美国实验物理研究所。

3.3 星载原子钟

本节星载原子钟主要指导航卫星钟。与地面钟不同，除性能指标外，星载卫星钟还考虑尺寸、重量、功率、可靠性以及在轨运行寿命等因素。目前星载原子钟主要为铯钟、氢钟和铷钟。铷钟体积小、成本低、功耗低，适合小型化，仪器工作寿命更长，但长期稳定性较差，需要与铯钟配合使用^[51]。铯钟长期漂移小，具有优异的长期稳定性，但短期稳定性相对较差。主动型氢钟具有优异的稳定性，但体积大、重量大、功耗高，最初只能在地面和基础太空应用，后来发展出适合小型化的被动型氢钟，被广泛应用于导航系统^[52, 53]。星载原子钟性能和工作状态直接影响 GNSS 的运行和服务能力，因此综合评价卫星钟性能指标是一个重要的研究课题^[54]。四大导航系统星载原子钟性能指标见表 3，其中氢钟和铯钟频率稳定度由 Allan 方差表示，铷钟由 Hadamard 方差表示。从表中可以看出，北斗三号星载钟性能较北斗二号提升显著，万秒稳定度比 Galileo 略优。GPS III 铷钟具有较优的万秒稳和天稳性能，原因为 GPS 监测站较多，钟差数据质量较高，且其卫星钟周期项较少。

目前典型 GNSS 卫星钟的频率稳定性在 $10^{-12}(\tau/s)^{-1/2}$ 和 $10^{-11}(\tau/s)^{-1/2}$ 之间^[55]，后续研究重点是进一步提高时钟性能，减小其体积、重量与功耗。

3.4 空间原子钟

在空间微重力环境下，原子损耗率更低，冷原子制备的效率会显著提升，延长原子相互作用时间，提升控制系统误差能力，且更容易实现较低的原子温度，从而提升光钟的俘获原子数和探测信噪比，进而实现性能的提升。但是，空间原子钟也面临高精度复杂光学系统热学与力学稳定性，以及小型化、超高真空系统的维持、空间磁场环境对原子钟的影响等难点。原子跃迁频率对磁场非常敏感，需要原子所处环境磁场波动在 nT 量级，因此真空腔必须使用无磁材料，并进行磁场补偿以保持稳定的磁场环境。正是由于空间环境赋予的独特优势与亟待突破的技术难点，自 20 世纪末以来，各国均开展了有关空间原子钟的研究。

1997 年，以国际空间站 (ISS) 作为载荷平台，欧空局 (ESA) 和法国航天局 (CNES) 提出

表 3 GNSS 星载钟性能指标

导航系统		日漂移率 / 10^{-14}	频率准确度 / 10^{-12}	万秒稳 / 10^{-14}	天稳 / 10^{-15}
GPS ^[58-63]	GPS IIF(2Rb+2Cs)	5.5(Rb) 0.34(Cs)	7.12(Rb) 1.4(Cs)	3(Rb) 17.5(Cs)	6(Rb) 55(Cs)
	GPS III(3Rb)	3.41	3.43	2.48	4.73
	GLONASS-M(3Cs)	0.59(Cs)	1.3(Cs)	12.3(Cs)	46.4(Cs)
GLONASS ^[64,65]	GLONASS-K1(2Cs+2Rb)	0.59(Cs)	1.3(Cs)	12.3(Cs)	46.4(Cs)
	Galileo (2Rb+3H) ^[66-68]	1.46(H) 7.45(Rb)	17.9(H) 63.3(Rb)	3.12(H) 3.76(Rb)	5.56(H) 28.6(Rb)
BDS-2(4Rb) ^[69]	GEO	5.42	48.7	6.06	49.6
	IGSO	5.91	33	9.87	44.7
	MEO	8.81	21.8	16.7	57.1
BDS-3 ^[67,70-74]	GEO(4H)	0.1	5.84	6	20
	IGSO(4H)	0.046	2.8	3	8.23
	MEO(2Rb+2H)	4.15(Rb) 0.053(H)	8.87(Rb) 8.2(H)	2(Rb) 1.7(H)	8.23(Rb) 8(H)

空间原子钟计划 (ACES), 目标为在太空中运行激光冷却铯原子钟, 并进行基础物理实验^[56, 57]。ACES 铯钟 PHARAO 样机原计划于 2025 年发射, 已实现 $3.4 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 秒稳和 2.3×10^{-15} 长期稳定度, 以及 1.5×10^{-15} B 类不确定度, 并通过环境试验考核^[58]。

美国国家航空航天局 (NASA) 提出深空原子钟 (DSAC) 技术演示任务, 计划将小型汞离子钟 ($^{199}\text{Hg}^+$) 送入轨道, 实现深空导航等应用^[59]。其原型机在地面表现出 $1.5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 秒稳和 2.3×10^{-15} 天稳, 于 2019 年发射升空, 在 23 d 表现出 3×10^{-15} 长期稳定度和 3×10^{-16} 的日漂移率。DSAC 目前仍在运行, NASA 探索将其应用于未来航天任务, 包括单向导航和行星科学^[60]。

中国在《2011 年中国的航天》白皮书提出空间高精时频计划, 开展系列空-地时频传递和基础物理实验。在中国载人航天计划 (CMSP) 的支持下, 中国科学院上海光学精密机械研究所于 2011 年开始“空间冷原子钟实验” (CACES) 任务, 目标是在太空中运行铷冷原子钟^[61]。该原子钟于 2018 年随航天器发射升空, 是世界首台太空冷原子钟, 其短期稳定性约 $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 长期稳定性可达 7×10^{-16} 。随后载人航天工程计划开展新的基于空间站的空间原子钟组及高精度时频传递实验, 钟组包括主动型氢钟、冷原子微波钟和冷原子锲光钟, 可产生秒稳定度优于 2×10^{-15} , 天稳和不确定度为 8×10^{-18} 的高精度时频信号, 预计在空间微重力环境下实现精度优于地面时频基准 1~2 个量级^[62, 63]。

4 地面时间维持

时间计量体系定义了时间基准, 并通过各种原子钟实现。为保持时间尺度的稳定和连续, 需联合多台原子钟组成钟组, 利用时间尺度算法产生综合时间尺度。合适的时间尺度算法能使综合时间尺度在稳定性、准确性和可靠性上优于单台原子钟。同时, 还需通过时间频率比对技术将全球分布的钟和时间尺度同步到国际频率标准, 实现全球时间同步。

4.1 协调世界时

UTC 要求极高的可靠性和长期频率稳定性, 需要依赖大量不同类型的原子钟和高精度时间比对网络。UTC 的计算分三步进行, 如图 1 所示:

- (1) 对全球约 450 台原子钟进行加权平均得到自由原子时间尺度 (EAL);
- (2) 引导 EAL 频率与 SI 秒定义保持一致, 利用 PFS/SFS 驾驭 EAL, 通过计算修正量得到 TAI;
- (3) 插入闰秒与 UT1 保持一致, 由此得到 UTC, 闰秒由 IERS 组织公布。

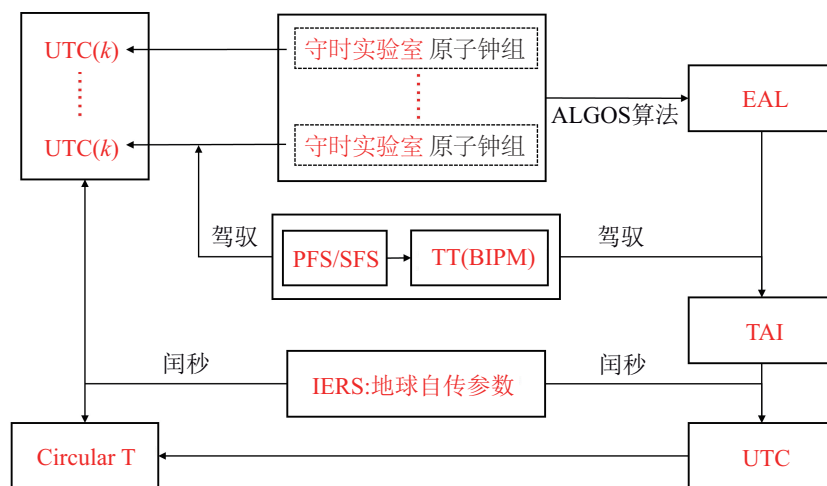
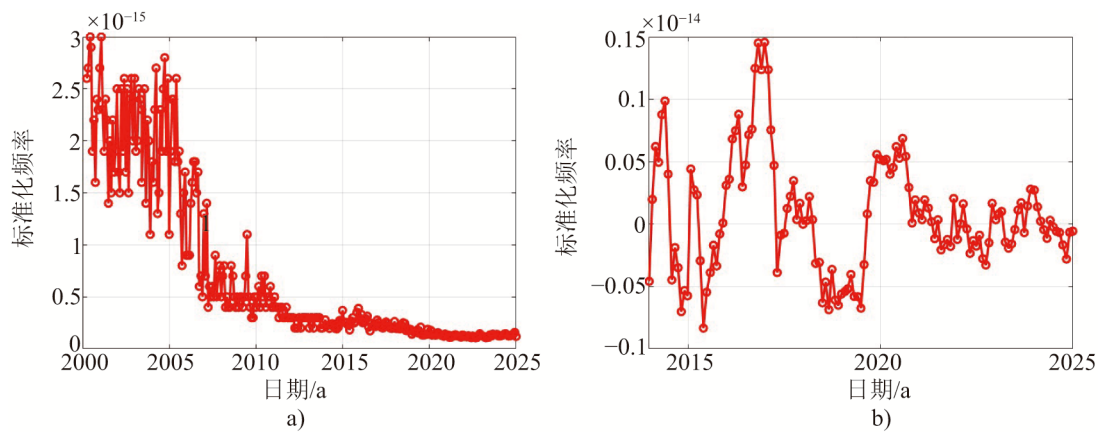


图 1 UTC 产生过程

时间尺度 TT(BIPM) 由所有 PFS/SFS 组成的钟组通过加权平均得到, 用来评估 TAI 和 EAL 稳定性^[64]。TAI 当前守时性能如图 2 所示, 可以看出 EAL 相对于 TT(BIPM20) 的不确定度逐渐降低, 目前约为 1×10^{-16} 量级, 这得益于基准钟的质量和数量的提升。EAL 经过驾驭得到 TAI 后, 与 TT(BIPM20) 频率偏差保持在 1×10^{-15} 内。

4.2 站间时间比对技术

综合全世界各地守时实验室原子钟计算 UTC, 需要远距离时频传递系统。目前时间比对的不确定度主要受传播介质、测量随机误差等因素影响, 精度在纳秒级到百皮秒量级, 足以达到当前基准钟时间频率传递需求。此外, 时频比对还须考虑时频传递设备校准带来的不确定度。当前校准产生的不确定度可达到纳秒级, 需要对设备信号时延进行重复校准以确保 UTC



a) EAL 相对于 TT(BIPM20) 不确定度; b) TAI 相对于 TT(BIPM20) 频率偏差。

图 2 国际原子时性能

的长期稳定性和准确性。

站间时间比对分为有线和无线两种。有线方面, 光纤时频传递是目前最稳定的技术, 但仅限于数百千米内应用^[65]。对于大多数实验室直接的长距离比对, 多采用无线手段, 目前主要依赖于 GNSS 卫星进行远距离时频传递, 常用方法有共视 (CV)^[66]、全视 (AV)^[67]、精密单点定位 (PPP)^[68]、卫星双向时间比对 (TWSTFT)^[69]等。CV 和 AV 时频传递不确定度为 1 ns, PPP 为 0.3 ns, TWSTFT 在 1 ns 内^[70, 71]。随着 GPS/GLONASS 组合和 TWSTFT/GPSPPP 时间链路的引入, 将 TWSTFT 与 GPS PPP 数据结合, 使用联合平滑方法对两个数据集进行处理, 可得到亚纳秒级稳定性的链路^[72]。BIPM 利用组合观测值估计 UTC 中所有时间链路不确定度, 发布在 BIPM 公告。目前主要守时实验室与 PTB 时频传递链路的不确定度见表 4。

表 4 守时实验室时频传递链路不确定度

实验室	链路类型	u_{Sub}/ns	u_{Cal}/ns
USNO/PTB	TWGPPP	0.3	2.1
NIST/PTB	TWGPPP	0.3	2.6
OP/PTB	TWSDRR	0.3	1.6
NICT/PTB	GPSPPP	0.3	2.2
NPL/PTB	TWGPPP	0.3	1.7
NTSC/PTB	GPSPPP	0.3	3.3
NIM/PTB	GPSPPP	0.3	2.2
JATC	GPS P3	0.7	3.4
VNIIFTRI	GPSPPP	0.3	2.0

注: TWGPPP 表示 TWSTFT 和 GPS PPP 联合平滑; GPS P3 表示 GPS 全视多通道双频 P 码数据; GPS PPP 表示 GPS 精密单点定位; TWSDRR 表示 TWSTFT SDR(Software Defined Radio) 和 GPS PPP 联合平滑; u_{Sub} 表示标准不确定度; u_{Cal} 表示总不确定度。

除上述技术, 基于整周模糊度的精密单点定位 (IPPP) 技术也已研究多年, 可提高时频传输的长期性能。目前 IPPP 在一个月的平均时间内频率不确定度可达 1×10^{-16} ^[73]。IPPP 技术有望应用于 UTC 时间比对, 以改进目前 GNSS 时间链路。

4.3 守时实验室

自 1988 年起, BIPM 负责 TAI 和 UTC 的计算。由 BIPM 时间部门开发算法处理来自世界各地的守时实验室的原子钟读数, 以提供对 UTC 本地实现的 SI 秒的可追溯性, 命名为 UTC(k), k 指实验室。BIPM 每月报告 UTC 与 UTC(k) 的差异 (<https://www.bipm.org/en/time-ftp/circular-t>), 结果见图 3。本节介绍了主要守时实验室所生成和维持时间尺度的方法及其异同、优劣, 以及时间尺度的性能指标。

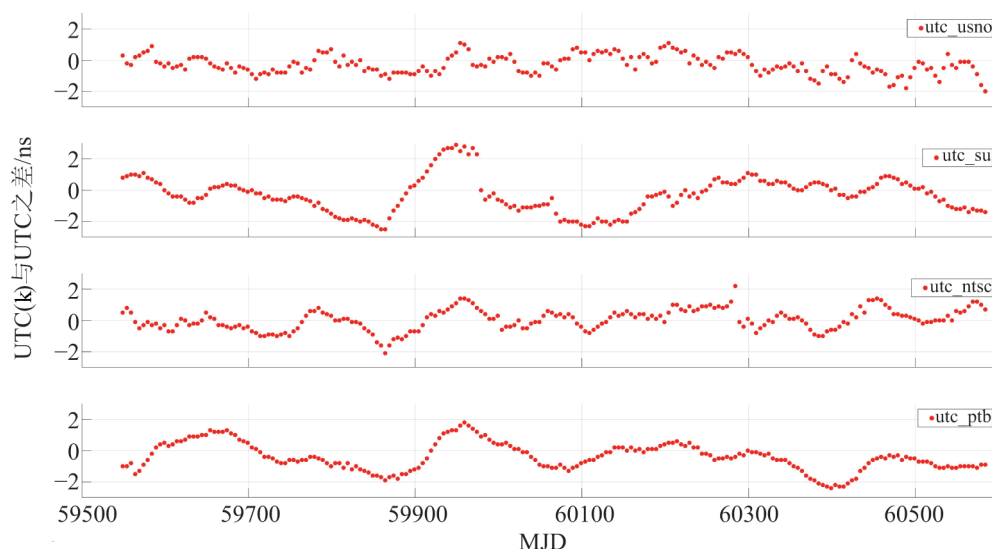


图3 UTC(k) 与 UTC 之差

美国海军天文台 (USNO) 自 1830 年以来为美国海军提供授时服务, 是 GPS 的时间溯源对象。USNO 时间尺度基于铯钟、氢钟和铷喷泉钟组成的钟组, 由事后加权平均得到纸面时 A.1。权重选择随时间变化, 氢钟主导短期稳定性, 铯钟主导长期稳定性, 在全采样范围内得到高精度时间尺度。UTC(USNO) 通过“温和驾驭”将 A.1 驾驭至 UTC 来实现, 利用多项式算法计算铯钟读数, 主钟每天利用控制器驾驭一次, 消除频率误差和小部分相位误差, 单次频率驾驭幅度不超过 1.75×10^{-15} ; 利用 Kalman 滤波器估计氢钟的相位、频率和频漂频率, 扣除二次模型参数后计算氢钟读数, 单次频率驾驭幅度不超过 2.7×10^{-16} ; 最后利用简单平均的方法计算铷喷泉钟读数, 以铷钟为主要参考, 铯钟为辅助参考, 氢钟提供短期稳定性, 最大限度减少驾驭幅度, 生成的时间尺度每天变化速率不超过 100 ps, 同时保证了尽可能与 UTC 接近^[74]。当前 UTC(USNO) 稳定度为 $8.81 \times 10^{-16}/5 \text{ d}$, $3.23 \times 10^{-16}/30 \text{ d}$, UTC(USNO) 与国际标准时间 UTC 的偏差如图 3 所示, $|\text{UTC}(\text{USNO}) - \text{UTC}| < 2 \text{ ns}$, UTC(USNO)–UTC 的控制精度 RMS 为 0.56 ns。

俄罗斯国家技术物理及无线电工程研究院 (VNIIFTRI) 的时间频率及地球定向参数服务中心自 1996 年开始采用加权平均算法产生 UTC(SU), 所有参与计算的氢钟等权。首先用前一个月数据估计氢钟频率和频漂, 然后用简单平均计算当前月份的时间尺度; 根据上月估计的频率和频漂修正量及喷泉钟驾驭主钟产生 UTC(SU)。驾驭方法为, 首先估计钟差, 然后引入适当的全月导向频率偏差, 以消除将在下一月引入的驾驭校正, 时间尺度差异采用线性拟合预测模型, 驾驭上限为 3×10^{-15} ^[75, 76]。当前 UTC(SU) 稳定度为 $6.02 \times 10^{-16}/5 \text{ d}$, $3.37 \times 10^{-16}/30 \text{ d}$, UTC(SU) 与国际标准时间 UTC 的偏差如图 3 所示, $|\text{UTC}(\text{SU}) - \text{UTC}| < 3 \text{ ns}$, UTC(SU)–UTC 的控制精度 RMS 为 1.23 ns。

中国科学院国家授时中心 (NTSC) 利用 ALGOS 算法生成 UTC(NTSC), 守时钟组由铯钟和氢钟组成, 氢钟为主钟, 分别对铯钟和去除频漂的氢钟进行加权平均, 实现全采样范围内高精度频率稳定性。从三个方面考虑主钟的驾驭修正: 逐时驾驭以 NTSC 守时实验室现有原子钟组生成的时间尺度作为参考基准; 每周驾驭利用 UTC(k) 与 UTCr 之间的相位差来评估驾驭修正, 使 UTC(k) 与 UTCr 尽可能接近; 每月驾驭基于 UTC(k) 和 UTC 之间的相位差来计算驾驭修正, 使主钟尽可能与 TAI 接近^[77]。当前 UTC(NTSC) 稳定度为 $7.44 \times 10^{-16}/5 \text{ d}$, $3.22 \times 10^{-16}/30 \text{ d}$, UTC(NTSC) 与国际标准时间 UTC 的偏差如图 3 所示, $|\text{UTC}(\text{NTSC}) - \text{UTC}| < 2 \text{ ns}$, UTC(NTSC)–UTC 的控制精度 RMS 为 0.64 ns。

德国联邦物理技术研究院 (PTB) 利用相位微调仪 (PMS) 驾驭氢钟作为主钟产生 UTC(PTB), 钟组包括氢钟、商用铯钟, 铯喷泉钟 CsF1、CsF2 以及热铯束钟 Cs1、Cs2, 通过计算氢钟与基准钟、主钟与 TAI、UTC 与 UTC(PTB) 的频率偏差数据得到驾驭量以维持 UTC(PTB) 与 UTC 接近。通过基准钟优异的长期稳定度和准确度以及氢钟良好的短期稳定度保证 UTC(PTB) 的准确度和稳定度, 当前 UTC(PTB) 稳定度为 $4 \times 10^{-16}/5 \text{ d}$, $2.26 \times 10^{-16}/30 \text{ d}$, UTC(PTB) 与国际标准时间 UTC 的偏差如图 3 所示, $|\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{UTC}| < 2 \text{ ns}$, UTC(PTB)–UTC 的控制精度 RMS 为 0.87 ns。

5 卫星导航系统时间维持

GNSS 依靠精确时间进行定位, 需要内部系统精确同步。为此, 卫星导航系统使用时钟集合和特定算法来生成和维持内部系统时间 (GNSST)。这类似于 TAI, 但计量要求不同。此外, 考虑到 GNSS 兼容互操作需求, 不同 GNSST 需保持一致性。目前, GNSS 系统时间通常被溯源到 UTC(k), 从而与 UTC 建立联系, 并保持时差的高精度和互操作性能。图 4 给出了四大导航系统时与 UTC 的时差。

5.1 GPS

GPS 时间 (GPST) 由地面运控模块 Ensemble Timescale Filter (ETF) 建立, 溯源至 UTC(USNO), 其零时点定义为 UTC 时间 1980 年 1 月 6 日 00:00, 无闰秒调整。GPST 采用组合钟模式, 利用 Kalman 滤波算法, 综合地面站和卫星原子钟生成纸面时间, 用 UTC(USNO) 驾驭纸面时间, 得到 GPST, 与 UTC(USNO) 同步。目前 GPST 与 UTC (USNO) 实现纳秒级同步。ETF

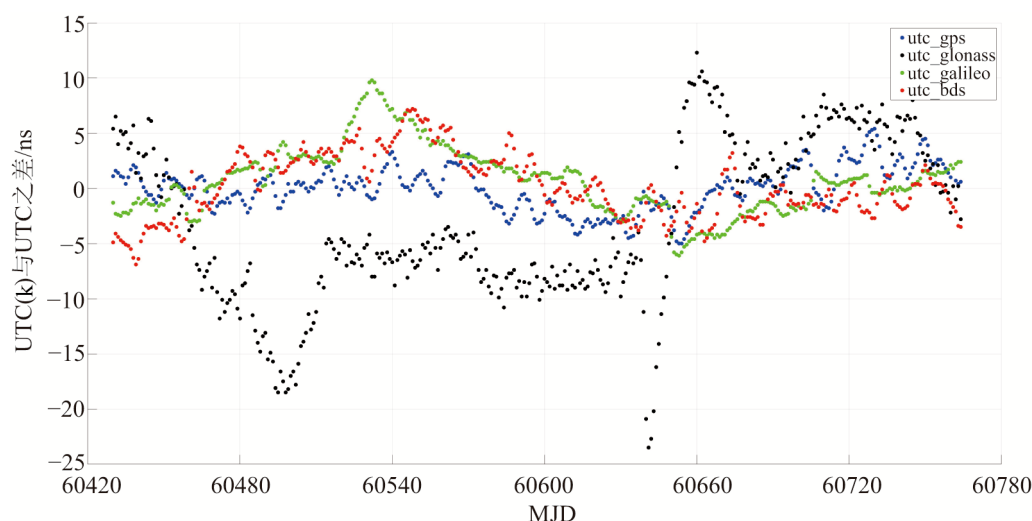


图4 UTC-GNSS

核心是 Kalman 滤波器, 根据算法接收的钟差数据来预测和校正模型状态。

UTC(USNO) 稳定度为 $8.81 \times 10^{-16}/5 \text{ d}$, $3.23 \times 10^{-16}/30 \text{ d}$, $|\text{UTC(USNO)} - \text{UTC}| < 2 \text{ ns}$, UTC(USNO)–UTC 的控制精度 RMS 为 0.56 ns。GPS 铷钟日漂移率 3.41×10^{-14} , 天稳为 4.73×10^{-15} , 铯钟日漂移率 0.34×10^{-14} , 天稳为 5.5×10^{-14} 。由此得到当前 UTC-GPST 状态, 如图 4 所示, 扣除闰秒差后, GPST 与 UTC 偏差可保持在 10 ns 以内, RMS 为 1.13 ns, 天稳为 4.35×10^{-15} 。

5.2 Galileo

Galileo 系统时间 (GST) 由精密时频设施 (PTF) 生成。GST 初始历元为 UTC 时间 1999 年 8 月 22 日星期日 00:00, 但与 GPST 保持零整数秒, 以满足 GPS-Galileo 互操作性需求。为保证可靠性, Galileo 系统有两个 PTF, 位于德国和意大利的两个 Galileo 控制中心 (GCC)。为增强 GST 可用性, PTF 至少配备两台主动型氢钟 (AHM) 和四台铯钟, 一台 AHM 作为主钟, 另一台备用, 备用 AHM 将其相位与主 AHM 保持同步。当主 AHM 信号丢失或失锁时, 系统会自动切换到备用 AHM, 以确保 GST 的连续性。Galileo 通过溯源至多个 UTC(k) 的加权平均, 将 GST 与 UTC 联系起来, 从而广播 UTC。GST 与欧洲主要时频实验室、备用 PTF 系统、USNO 之间通过 CV 和 TWSTFT 保持比对, 并提供 GPS-GALILEO 的时差参数 (GGTO)。

UTC(PTB) 稳定度为 $4 \times 10^{-16}/5 \text{ d}$, $2.26 \times 10^{-16}/30 \text{ d}$, $|\text{UTC(PTB)} - \text{UTC}| < 2 \text{ ns}$, UTC(PTB)–UTC 的控制精度 RMS 为 0.87 ns。Galileo 铷钟日漂移率 7.45×10^{-14} , 天稳为 2.86×10^{-14} , 氢钟日漂移率 1.46×10^{-14} , 天稳为 5.56×10^{-15} 。由此得到当前 UTC-GST 状态, 如图 4 所示, 扣除闰秒差后, GST 与 UTC 偏差可保持在 10 ns 以内, RMS 为 4.06 ns, 天稳为 4.34×10^{-15} ^[78]。

5.3 GLONASS

GLONASS 系统时间 (GLNT) 由 GLONASS 中央同步器 (CS) 维持的自由纸面时生成, 与 UTC(SU) 同步。CS 的核心是频率/时间保持设施 (FTKF), 包括四个氢钟, 相对频率偏差 $\Delta f/f$

小于 3×10^{-14} , 天稳优于 2×10^{-15} , 用于内部比较的系统以及用于控制氢钟信号频率和相位的系统。备用 CS 时间尺度与主 CS 时间尺度通过全视 (AV) 比对方法得出。根据内部比较结果提供最佳精度特性的氢钟成为主钟, 其他的作为次要频标运行。GLNT 与 UTC 同步闰秒。由于 GLONASS 控制段特定功能, GLNT 与 UTC(SU) 存在 3 h 差异, 即: $GLNT = UTC(SU) + 10\,800\text{ s}^{[79]}$ 。

当前 UTC(SU) 稳定度为 $6.02 \times 10^{-16}/5\text{ d}$, $3.37 \times 10^{-16}/30\text{ d}$, $|UTC(SU) - UTC| < 3\text{ ns}$, UTC(SU) - UTC 的控制精度 RMS 为 1.23 ns 。GLONASS 铯钟日漂移率 0.59×10^{-14} , 天稳为 4.64×10^{-14} 。由此得到当前 UTC-GLNT 状态, 如图 4 所示, GLNT 与 UTC 偏差可保持在 20 ns 以内, RMS 为 9.06 ns , 天稳为 2×10^{-14} 。

5.4 BDS

北斗系统时间 (BDT) 由主控站的原子钟组以组合钟形式实现, 由时频系统 (PFS) 维护, 起始历元为 UTC 时间 2006 年 1 月 1 日 00:00, 与 UTC(NTSC) 溯源。BDT 与 UTC 之间的闰秒信息在导航电文中播报^[80]。BDT 由氢钟和铯钟组成的钟组维持, 利用类 ALGOS 算法计算得到 BDT。时钟权重由去除频漂的 Allan 方差确定, 并设置权重上限。BDT 时间同步不确定度达到 1 ns , 时空测量和观测模型的精度达到皮秒量级, 频率准确度为 1.3×10^{-14} , 天稳定度达到 4.6×10^{-15} ^[81, 82]。同时, 为了满足 GNSS 互操作需求, BDS 会播发 BGTO 信息, 给出与其他导航系统的时间尺度偏差。

BDT 以 UTC(NTSC) 为溯源, 并与 UTC 建立联系, UTC(k)/UTC 之间的时差由 CV 和 TW-STFT 链路持续监测^[82]。当前 UTC(NTSC) 稳定度为 $7.44 \times 10^{-16}/5\text{ d}$, $3.22 \times 10^{-16}/30\text{ d}$, $|UTC(NTSC) - UTC| < 2\text{ ns}$, UTC(NTSC) - UTC 的控制精度 RMS 为 0.64 ns 。BDS-3 铷钟日漂移率 4.15×10^{-14} , 天稳为 8.23×10^{-14} , 氢钟日漂移率 0.053×10^{-14} , 天稳为 8×10^{-15} 。由此得到当前 UTC-BDT 状态, 如图 4 所示, BDT 与 UTC 偏差可保持在 10 ns 以内, RMS 为 3.62 ns , 天稳为 5.79×10^{-15} ^[83]。

文献 [84] 计算了 UTC 与 GNSS 广播的 UTC 预测值的差, 并给出了计算值的不确定度, 其中 GLONASS 与 UTC 的偏差在 -25 至 15 ns , BDS 为 -5 至 10 ns , GPS 和 Galileo 为 -5 至 5 ns 。不确定度结果见表 5。可以看出 Galileo 广播 UTC 预测值的不确定度好于 BDS 和 GPS, BDS 和 GPS 好于 GLONASS。

表 5 四大导航系统广播 UTC 预测值不确定度

GNSS	不确定度/ns
BDS	4.1
Galileo	3.7
GLONASS	6.6
GPS	4.1

6 低轨卫星时间维持

当前四大导航系统卫星星座主要由中地球轨道卫星 (MEO)、地球静止轨道 (GEO) 和倾斜地球同步轨道 (IGSO) 组成, 单星对地覆盖区域广, 能满足持续导航增强服务。但高轨卫星落地信号弱, 空间几何构型变化不显著, 导致 PPP 收敛慢, 影响实时定位效率。为解决上述问题, 国内外学者提出利用低轨卫星播发导航信号来增强 GNSS。与中高轨卫星相比, 低轨卫星轨道低, 落地功率高; 运动速度快, 几何变化快, 有利于 PPP 快速收敛; 搭载 GNSS 接收机可作为“星基监测站”, 参与高中低轨卫星联合定轨, 弥补地面站不足, 增强 GNSS 卫星跟踪网图形强度, 实现区域监测站条件下导航卫星精密定轨, 对导航定位的精度、完好性等有较大提升^[85, 86]。

6.1 Kepler

德国航空航天中心 (DLR) 将低轨星座与导航星座相结合, 提出了 Kepler 星座构想^[87]。Kepler 星座由 MEO 和 LEO 卫星组成, MEO 段卫星配备腔稳定激光器, 用于向地球传输传统导航信号, 并通过双向 ISL 连接同一轨道平面的两颗相邻卫星及与 LEO 卫星的非连续链接, 实现卫星之间的时间传输和同步; LEO 段由 6 颗配备光钟和光学终端卫星组成。Kepler 系统只需一个地面站与地面空间框架和时间尺度保持一致, 地面站通过部署一个或多个氢钟来参与维持系统时间, 为系统时间尺度提供长期频率稳定性。整个星座通过光钟和地面微波钟组成的钟组来实现时间同步, 测量信息通过 ISL 传输, 在每颗 MEO 上生成集成信号, 利用钟组计算生成时间尺度驱动本地振荡器。钟组由 30 个腔稳定激光器 (MEO 24 个, LEO 6 个)、6 个碘光钟 (LEO) 和 1 个地面站氢钟组成。利用 Kalman 滤波算法生成时间尺度, 在所有采样间隔内频率稳定性好于 10^{-15} 量级。

6.2 天基时间维持

随着越来越多原子钟发射升空及星间链路的铺设, 利用原子钟建立和维持天基时间基准已逐渐从构想变为现实。上节所述 Kepler 星座就是一种天基时间基准。借助天基时间基准, GNSS 可以将导航信号同步到优于当前水平, 可以显著减少甚至完全消除卫星钟差误差, 可以更好地分离空间和时间的不确定性, 提高定轨精度; 还可以实现相对论导航, 通过传播每颗卫星的原时来确定轨道, 使用户无需应用相对论校正即可估计位置。同步信号对地球重力场监测、地面参考系提供、大气传感应用和 GNSS 反射测量具有潜在影响。在天基时间基准中, LEO 可以用作移动监测站, 实现 MEO 的全球跟踪覆盖, 空间站和深空原子钟也可参与其中。因此, 星载高稳定性原子钟和时钟之间的高精度时间比较至关重要。通过适合的时间尺度算法, 估计所有钟组时钟读数的加权平均值作为新系统时间, 并与 UTC 或 GNSST 等保持同步^[88]。

当前, 高精度深空原子钟处于刚发射或计划发射阶段, 最多的空间原子钟仍是导航系统星载原子钟。以北斗系统为例, 利用 ALGOS 算法, 通过评估 12 颗北斗星载氢钟 Hadamard 方差天稳性能设置权重, 生成天基时间尺度, 星载氢钟天稳定度在 $(2\sim 8) \times 10^{-15}$ 量级, 最终生成的时间尺度天稳定度可达 1×10^{-15} 量级。随着更多高性能星载原子钟的加入, 天基时间

尺度有望达到 10^{-16} 量级, 未来星地联合守时生成的 BDT 在系统稳定性、异常恢复能力等方面能达到优于当前 BDT 性能。随着时间同步方法和星载原子钟的不断发展与更新, BDS-3 具备厘米级钟差参数的生成能力, 在这一背景下, 高阶相对论的影响不可被忽视, 如在一天内的尺度上, 当前星载原子钟拟合残差为亚纳秒量级, 高阶相对论半轨道周期误差主导了星间钟差拟合残差的波动, 因此, 未来充分发掘和发挥高性能星载原子钟的潜力, 以及进一步提升时间同步精度, 需要在高阶相对论修正模型下研究。

7 总 结

本文面向综合 PNT 体系建设需求, 从时间基准理论出发, 全面综述时间定义、物理实现, 梳理各时间服务系统建设需求与实现方法, 并结合多项前沿技术, 展望了时间服务体系向更高精度、更强可靠性、更广覆盖范围和更深层融合方向的发展趋势, 进一步提出了构建天地一体化时空基准体系的技术路径, 为中国综合 PNT 系统的发展提供了理论参考与技术支撑。

理论方面, 本文阐述了相对论理论框架下的时间计量体系定义与实现方法, 其中 IERS 协议给出了广义相对论框架下 10^{-18} 精度量级转换方法。当前 GNSS 应用协议相对论修正只考虑了速度项和地心引力势项, 精度为 10^{-15} 量级。随着原子钟性能和时间频率传递精度提升, 后续有必要考虑更高阶的相对论修正, 开展广义相对论框架下的时间频率建立、维持与传递应用研究。

对于地面守时系统, 介绍了基准钟和守时钟的类型和性能指标, 给出了目前地面守时系统时间维持方法和服务情况。目前频率基准主要采用喷泉钟和光晶格钟建立, 守时主要采用氢钟和铯钟等原子钟每月维持, 通过 GNSS 卫星实现共视、全视以及双向时间比对等方法进行站间时间频率传递。目前 UTC 频率准确度约为 1×10^{-16} 、稳定度约为 1×10^{-16} , 时间传递不确定度约纳秒量级。

对于卫星导航系统, 介绍了当前四大导航系统采用的原子钟类型与性能指标, 给出了目前导航系统时间维持方法和服务情况。导航系统采用地面长期守时与卫星短期守时相结合的方式提供时间服务, 地面钟采用喷泉基准钟与守时原子钟组合, 卫星钟采用氢钟、铷钟和铯钟, 采用卫星钟向地面溯源、地面向 UTC 溯源的方式实现 GNSST。目前 GNSST 稳定度约为 10^{-15} 量级, GNSS 时差不确定度约为纳秒量级。随着新一代高性能星载原子钟的部署应用, 结合高精度外接频率源和星地联合守时策略, 未来导航系统时频体系将实现质的飞跃: 在精度方面, GNSST 稳定度有望达到甚至突破 10^{-16} 量级; 在稳定性上, 通过星地联合守时机制可显著降低系统漂移; 在可靠性层面, 多重备份的时频资源配置将大幅提升系统鲁棒性。这一技术演进不仅将提升现有卫星导航服务性能, 更为未来综合 PNT 体系建设奠定坚实的时频基础。

在现有地面守时系统、导航卫星星载原子钟性能及时间比对技术的基础上, 面向下一代导航卫星系统对高精度、高弹性建设需求, 本文展望了未来天体一体化时间基准建立与维持的技术方向。利用导航系统星载/地面高精度自由原子频标、星地星间时间频率比对方法以及

天地协同综合原子时算法, 有望构建全新一代时间基准的生成、维持和传递技术体系。该体系能够支撑高中低轨导航增强服务及长期自主运行等多种应用场景, 为下一代导航系统的建设提供重要技术路线。

致谢 本文作者衷心感谢 BIPM 组织提供的各类数据。

参考文献:

- [1] 韩春好. 天文学进展, 2002, 20(2): 107
- [2] 王若璞, 邓向瑞, 佟帅, 等. 计量学报, 2022, 43(10): 1348
- [3] 韩雨桐. 计量学报, 2022, 43(1): 1
- [4] 马高峰, 郑勇, 杜兰, 等. 天文学进展, 2010, 28(4): 383
- [5] 张捍卫, 王志军, 杜兰, 等. 测绘学院学报, 2004, 21(2): 79
- [6] 刘佳成, 朱紫, 刘佳成, 等. 天文学进展, 2012, 30(4): 411
- [7] 雷伟伟, 张捍卫, 李凯, 等. 飞行器测控学报, 2016, 35(3): 212
- [8] Guinot B. A&A, 1988, 192(1-2): 370
- [9] Petit G, Arias F, Harmegnies A, et al. Metrologia, 2014, 51(1): 33
- [10] 马佳慧. 博士论文. 北京: 中国科学院大学, 2022
- [11] Lewandowski W, Arias E F. Metrologia, 2011, 48(4): S219
- [12] Essen L, Parry J V L. Nature, 1955, 176(4476): 280
- [13] 翟造成. 世界科技研究与发展, 2006, 28(3): 63
- [14] 郭海荣. 博士论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006
- [15] 黄观文, 曹钰, 谭粤, 等. 测绘地理信息, 2024, 49(1): 20
- [16] 王义遒. 量子频标原理. 北京: 科学出版社, 1986
- [17] 阮军. 博士论文. 西安: 中国科学院研究生院 (国家授时中心), 2012
- [18] Milton J, Panfilo G. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2023, 70(4): 336
- [19] Levi F, Calonico D, Calosso C E, et al. Metrologia, 2014, 51(3): 270
- [20] Jallageas A, Devenoges L, Petersen M, et al. Metrologia, 2018, 55(3): 366
- [21] Fang F, Li M S, Lin P W, et al. Metrologia, 2015, 52(4): 454
- [22] Li R X, Gibble K, Szymaniec K. Metrologia, 2011, 48(5): 283
- [23] Beattie S, Jian B, Alcock J, et al. Metrologia, 2020, 57(3): 035010
- [24] Weyers S, Hübner U, Schröder R, et al. Metrologia, 2001, 38(4): 343
- [25] Weyers S, Gerginov V, Kazda M, et al. Metrologia, 2018, 55(6): 789
- [26] Blinov I Y, Boiko A I, Domnin Y S, et al. Measurement Techniques, 2017, 60(1): 30
- [27] Gibble K, Lea S N, Szymaniec K. Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium. New York: IEEE, 2012: 700
- [28] Nemitz N, Hachisu H, Gotoh T, et al. Proceedings of the Institute of Navigation. Manassas: Institute of Navigation, 2021: 220
- [29] Akamatsu D, Inaba H, Hosaka K, et al. Appl. Phys. Express, 2014, 7(1): 012401
- [30] Guéna J, Abgrall M, Clairon A, et al. Metrologia, 2014, 51(1): 108
- [31] Du Y B, Wei R, Dong R C, et al. Chin. Phys. B, 2015, 24(7): 070601
- [32] Liu D D, Ruan J, Fan S C, et al. Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium. New York: IEEE, 2020: 1
- [33] Heavner T P, Donley E A, Levi F, et al. Metrologia, 2014, 51(3): 174
- [34] 赵国栋, 卢晓同, 常宏, 等. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 44
- [35] Huntemann N, Sanner C, Lipphardt B, et al. Phys. Rev. Lett., 2016, 116(6): 063001
- [36] Sanner C, Huntemann N, Lange R, et al. Nature, 2019, 567(7747): 204
- [37] Huang Y, Zhang B L, Zeng M Y, et al. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.034041>, 2021
- [38] Dubé P, Madej A A, Shiner A, et al. Phys. Rev. A, 2015, 92(4): 042119
- [39] Barwood G P, Huang G, Klein H A, et al. Phys. Rev. A, 2014, 89(5): 050501
- [40] Nicholson T L, Campbell S L, Hutson R B, et al. Nat. Commun., 2015, 6(1): 6896

- [41] Oelker E, Hutson R B, Kennedy C J, et al. *Nat. Photonics*, 2019, 13(10): 714
- [42] Beloy K, Bodine M I, Bothwell T, et al. *Nature*, 2021, 591(7851): 564
- [43] Schioppo M, Brown R C, McGrew W F, et al. *Nat. Photonics*, 2017, 11(1): 48
- [44] Origlia S, Pramod M S, Schiller S, et al. *Phys. Rev. A*, 2018, 98(5): 053443
- [45] Tyumenev R, Favier M, Bilicki S, et al. *New J. Phys.*, 2016, 18(11): 113002
- [46] Lu B K, Sun Z, Yang T, et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2022, 39(8): 080601
- [47] Lu X T, Guo F, Wang Y B, et al. *Metrologia*, 2023, 60(1): 015008
- [48] 赵杏文, 韦强, 李东旭, 等. *时间频率学报*, 2022, 45(1): 1
- [49] 刘峰宇, 王宇谱, 李锡瑞, 等. *导航定位学报*, 2020, 8(5): 10
- [50] 杨玉婷, 刘晨帆, 蒯玉亭, 等. *自动化仪表*, 2021, 42(7): 93
- [51] Vanier J, Tamescu C. *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards: Recent Developments*. Montréal: Université de Montréal, 2025
- [52] Belyaev A A, Demidov N A, Medvedev S Y, et al. *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*. New York: IEEE, 2019: 1
- [53] Waller P, Gonzalez F, Binda S, et al. *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*. New York: IEEE, 2009: 388
- [54] Li F N, Liang Y F, Xu J N, et al. *Meas. Sci. Technol.*, 2024, 35(1): 015027
- [55] Beard R, Senior K. *Clocks*. Cham: Springer International Publishing, 2017: 121
- [56] Laurent P, Massonnet D, Cacciapuoti L, et al. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 540
- [57] Simon E, Laurent P, Santarelli G, et al. *Acta Astronaut.*, 1997, 40(12): 837
- [58] Laurent P, Esnault F X, Gibble K, et al. *Metrologia*, 2020, 57(5): 055005
- [59] Ely T. *Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Reston: AIAA, 2014
- [60] Burt E A, Prestage J D, Tjoelker R L, et al. *Nature*, 2021, 595(7865): 43
- [61] Liu L, Lü D S, Chen W B, et al. *Nat. Commun.*, 2018, 9(1): 2760
- [62] 陈俊平, 王彬, 孟文东, 等. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2023, 48(7): 1082
- [63] Guo F, Tan W, Zhou C H, et al. *AIP Adv.*, 2021, 11(12): 125116
- [64] Petit G. *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*. New York: IEEE, 2007: 391
- [65] Predohl K, Grosche G, Raupach S M F, et al. *Science*, 2012, 336(6080): 441
- [66] Allan D W, Weiss M A. *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*. New York: IEEE, 1980
- [67] Petit G, Jiang Z. *Metrologia*, 2008, 45(1): 35
- [68] Larson K M, Levine J, Nelson L M, et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2000, 47(2): 484
- [69] Kirchner D. *Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT): Principle, Implementation, and Current Performance*. New York: IEEE, 2009
- [70] Petit G, Jiang Z. *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*. New York: IEEE, 2007
- [71] Kouba J, Héroux P. *GPS Solut.*, 2001, 5(2): 12
- [72] Jiang Z, Petit G. *Metrologia*, 2009, 46(3): 305
- [73] Petit G, Meynadier F, Harmegnies A, et al. *Metrologia*, 2007, 51(4): 045007
- [74] Skinner J, Koppang P, Johns D. *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*. New York: IEEE, 2012: 639
- [75] Gornaeva L, Koshelyaevsky N, et al. *Proceedings of the Frequency and Time Forum*, 2012
- [76] Blinov I Y, Boyko A I, Kosheliaevskii N B, et al. *Proceedings of the Institute of Navigation*. Manassas: Institute of Navigation, 2019: 62
- [77] Zhao S H, Dong S W, Qu L L, et al. *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*. New York: IEEE, 2016
- [78] Morante Q, Cretoni D, Putorti G, et al. *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*. New York: IEEE, 2016: 484
- [79] Kuranov V. *GLONASS Interface Control Document*, ICAO GNSSP/2 WP/66, 1995
- [80] 全国北斗卫星导航标准化技术委员会. 北斗卫星导航系统空间信号接口规范第 3 部分: 公开服务信号 B1I: 20190770-T-801. 北京: 全国北斗卫星导航标准化技术委员会, 2019
- [81] Han C H, Liu L, Cai Z W, et al. *Satell. Navig.*, 2021, 2(1): 18
- [82] 卢璠, 武建峰, 袁海波, 等. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2023, 48(8): 1340

- [83] 朱琳. 博士论文. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院国家授时中心), 2022
- [84] Defraigne P, Pinat E, Petit G, et al. *Metrologia*, 2023, 60(6): 065010
- [85] 徐哲宇. 博士论文. 郑州: 信息工程大学, 2021
- [86] Reid T G, Neish A M, Walter T F, et al. *Proceedings of the Institute of Navigation*. Manassas: Institute of Navigation, 2016
- [87] Giorgi G, Schmidt T, Guenther C, et al. *Adv. Space Res.*, 2019, 64(6): 1256
- [88] Chen G Y, Xing N, Tang C P, et al. *Remote Sens.*, 2023, 15(5): 1227

Advances in High-precision Atomic Clocks and Timescale Establishment and Maintenance for Satellite Navigation Systems

CHEN Guangyao^{1,2}, LI Xiaojie³, ZHOU Shanshi¹, QU Weijing¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Time is the cornerstone of modern space geodetic techniques and space-time information services. Its determination, maintenance, and dissemination are of paramount importance in the construction of a space-time information service system. Currently, the time and space information service and application systems for navigation constellations and giant Low Earth Orbit (LEO) communication and navigation integrated constellations are undergoing large-scale construction. Concurrently, the national comprehensive positioning, navigation, and timing (PNT) system, centered around satellite navigation constellations, is also being continuously developed. The establishment of a high-precision, resilient, integrated terrestrial and space time system is based on fundamental geophysical principles and serves the practical needs of Earth and near-Earth users. This paper provides a review of the definition of the second and maintenance and propagation methods within the framework of general relativity from both in theoretical and practical perspectives. The types of atomic clocks and time-frequency comparison methods are introduced to meet different time scale maintenance requirements. Under different timekeeping needs, a comparative analysis is conducted on the similarities and differences in the requirements for atomic clocks and timekeeping methods. Finally, in conjunction with the future needs for the construction of a resilient time service system, the paper gives a prospect of the technological development trends for atomic clocks and comparison methods. This work provides important theoretical and technical supports for the construction of China's comprehensive PNT system.

Key words: high-precision atomic clocks; time and frequency transfer; timekeeping laboratory; satellite navigation system; general relativity