

引用格式: 付桂涛, 尉保国. 一种天地一体时间基准建立模式的思考[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 116-126.

一种天地一体时间基准建立模式的思考

付桂涛^{1,2}, 尉保国²

1. 北京卫星导航中心, 北京 100094;
2. 中国电子科技集团 第 54 研究所, 石家庄 050081

摘要: 随着低轨卫星导航系统、卫星物联网、远程时间比对等技术的发展, 分布广泛的原子钟资源为构建天地一体时间基准提供了基础条件。根据原子钟位置不同, 可将时间基准建立模式分为地面时间基准和天地一体时间基准。介绍各种模式的框架结构、设备构成、运行机制, 分析了各种模式的异同。从数据融合、数据预处理、守时算法、实时信号控制等 4 个方面梳理了关键技术, 为时间基准建立提供研究切入点。

关键词: 时间基准; 守时; 时间比对; 天地一体

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0116-11

Thinking about the established model of time reference of integrative space-ground

FU Gui-tao^{1,2}, YU Bao-guo²

1. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;
2. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: With the technological development of the low Earth orbit (LEO) navigation satellite system, the internet of things by satellite, remote time transfer, etc. The basic conditions for building time reference of integrative space-ground were provided by the atomic clock resources which widely distributed. According to the difference in the position between atomic clocks, the established model of time reference can be divided into time reference of ground and time reference of integrative space-ground. The frame structure, equipment composition and operation mechanism of various modes of the time reference were introduced, and the similarities and differences of various modes were analyzed. By considering the technology of data fusion, the technology of data preprocessing, the time-keeping algorithm and the technology of real-time signal adjusting control, the key technologies were sorted out to provide a research entry point for the establishment of time reference.

Key words: time reference; time keeping; remote time transfer; integrative space-ground

随着技术的发展和应用需求的多样化,传统的“烟囱式”发展的卫星网络存在的功能单一,相互孤立,运行依赖于地面等问题逐渐凸显,不能满足我国军事、经济和人民生活水平发展的迫切需求^[1]。天地一体化网络通过卫星、飞机以及地面站间链路链接地面、海上、空中和深空中的用户、飞行器以及各种平台,采用智能高速处理、交换和路由技术准确获取、快速处理和高效传输信息的通信技术,形成融合天基、空基和陆基一体化的综合信息网络,可以实现支撑国家重大战略行动,促进多元信息传输共享。天地一体化网络主要由天基网络、空基网络、海基网络、地面移动网络等组成,在天基网络建设方面以建设发展低轨卫星导航系统、卫星物联网为主要方向。当前,全球现有 4 800 多颗在轨卫星,分布在空间各个层次,实现区域或全球全覆盖,未来世界各国将发射更多的卫星建设天地一体化网络。

统一时间基准和节点间高精度时间同步是实现天体一体化网络高效互联和任务协同的重要技

术基础。时间基准是指能够为记录事件发生时刻和持续时间提供一个参考点的时间,包含时间间隔和时刻两个基本要素,即时间单位和时刻起点,一般是一个或多个实验室保持的多台原子钟求得的综合时间尺度^[2]。在卫星导航系统中,时间基准是系统定位、导航和时间比对的基础,与 UTC (Coordinated Universal Time) 同步在 100 ns 之内,主要技术指标包括频率准确度和频率稳定度,具有稳定、连续、可靠的特点^[3]。天体一体化网络的时间基准系统一般由地面高精度原子钟、星载原子钟组成原子钟组,通过本地相位比对、频率测量设备和远程时频比对完成钟组相位、频率测量,各类测量数据经过数据融合处理单元后发送至时间综合软件,采用综合原子时算法计算出时间尺度。系统通过一定的方法将原子钟内性能最好的原子钟优选出作为主钟,主钟输出的时间频率信号经过相位微调、分配放大等一系列操作后产生时间信号和频率信号,建立流程如图 1 所示。

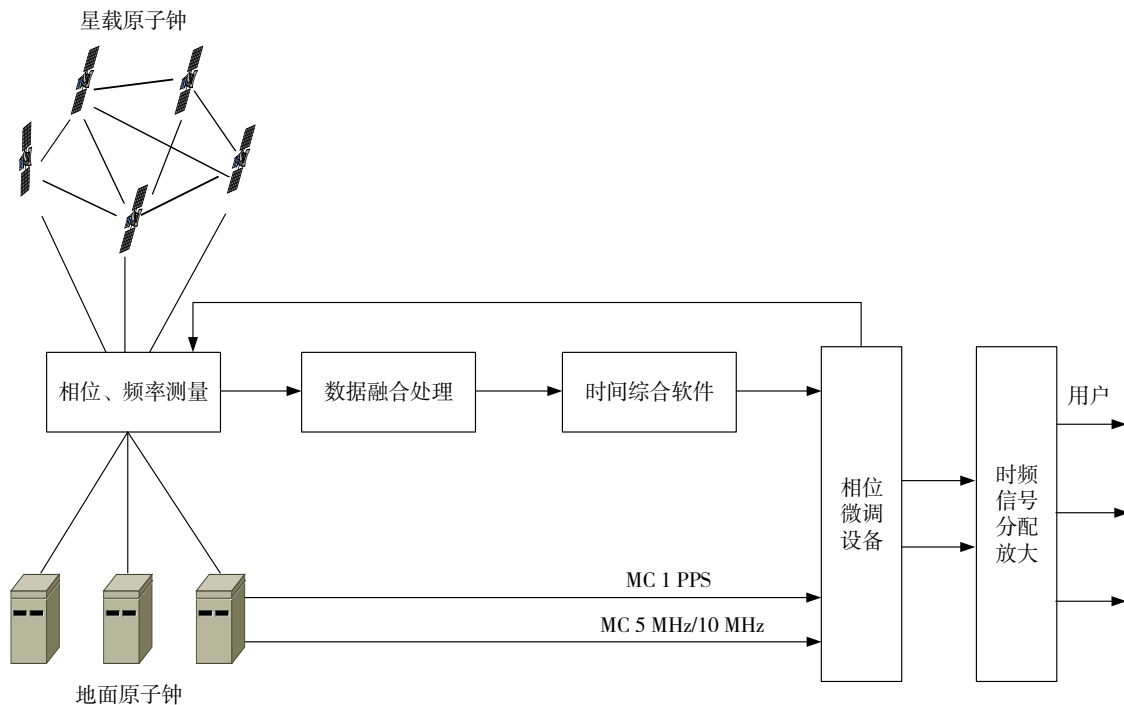


图 1 天地一体时间基准系统原理图

天体一体化网络的时间基准需充分利用天基、空基和地基的原子钟资源和高精度的时间比对网络,形成天地一体时间基准建立模式,满足

多节点间高精度时间同步的需求,因此探讨天地一体时间基准建立模式、开展关键技术研究是十分必要的。

1 时间基准建立模式

根据参与守时的原子钟的空间位置,可将时间基准建立模式分为地面时间基准和天地一体时间基准。

1.1 地面时间基准

地面上的原子钟放置在同一地点开展守时,称这种地面时间基准建立模式为本地守时;将原子钟组分布在不同地域,则称为异地守时;利用多个守时实验室的原子钟组建立时间基准,称为联合守时。

1.1.1 本地守时

本地守时是指原子钟组放置在同一地点或相距较近区域的时间基准建立模式。国际上,大多数守时实验室采用本地守时模式,以便于监测各原子钟的状态。本地守时一般只产生一个时标。

根据主钟信号调整的方法,又可将本地守时模式划分为主钟模式和组合钟模式。在主钟模式下,利用主钟输出信号建立时间尺度,不产生纸面时。利用外部基准(如 UTC、UTC(k)或其他基准装置)或原子钟互比的方式,评估钟组内原子钟的性

能,性能最优的钟被选为主钟,通过对主钟输出时间信号的驾驭调整完成对上级基准或外部其他基准的溯源,实现时间尺度建立,该时间尺度的频率稳定度、频率准确度等指标主要受主钟自身性能影响。目前采用主钟模式建立的时间尺度主要有俄罗斯格洛纳斯导航卫星系统时间基准、中国北斗二号导航卫星系统时间基准等^[4-5]。

组合钟模式下,利用组合钟内所有原子钟的钟差表现和综合原子时算法计算建立的纸面时作为时间尺度。时间尺度的驾驭量由主钟时间信号与纸面时、上级基准或外部基准的相位差或频差决定,时间尺度的频率稳定度、频率准确度等指标主要受钟组内各原子钟噪声水平、综合原子时算法影响。目前采用组合钟模式建立的时间尺度主要有美国全球卫星导航系统时间基准、欧洲伽利略卫星导航系统时间基准等。

一般来讲,主钟模式适用于钟组规模较小、距离上级或外部溯源基准较近的守时系统,组合钟模式适用于钟组规模适中、没有其他溯源基准或距离溯源基准较远的守时系统。

表 1 主钟模式和组合钟模式的异同

项目	主钟模式	组合钟模式
钟组规模	3~5 台, 较小	6 台以上, 较大
纸面时	无	有
驾驭方式	驾驭主钟信号	驾驭主钟信号或纸面时
性能影响因素	主钟	整个钟组
适用范围	导航系统时间基准; 小型守时系统	专业守时实验室; 导航系统时间基准
用例	中国北斗二号导航 卫星系统时间基准	美国 GPS 时间基准

1.1.2 异地守时

异地守时是原子钟组结构松散,部署于两地或多地的时间基准建立模式。异地守时一般产生多个时标,每个时标之间时间偏差保持在一定范围内。异地守时将原子钟组分散在不同地点,是提高时间

基准系统可靠性的主要手段,可以避免人为因素或其他不可抗力因素引起的灾难性故障,同时还可以克服本地原子钟相关性对原子时的影响。研究发现,由于本地原子钟的机房温湿度、磁场的变化规律十分类似,原子钟之间的频率变化存在强相关

性，测量结果的频率稳定度一般优于真实的频率稳定度^[6]。异地原子钟的运行环境由分属于不同地点的单位独立维护，环境变化差异明显，时差比对结果相关性较低，测量结果更加真实可信。

美国海军天文台守时系统（USNO）是典型的异地守时系统。目前，美国海军天文台守时系统由 60 余台铯原子钟、30 余台氢原子钟和 6 台频率基准装置组成的守时钟组及庞大的比对设备和数据处理系统构成（见图 2）。原子钟组分布在华

盛顿本部和科罗拉多州的斯里弗空军基地，两地之间建有完善的时间比对网络，从而利用异地原子钟建立了时间尺度，标准时间的频率准确度达到 1×10^{-15} 量级，与 UTC 的偏差控制在 $\pm 10\text{ns}$ 以内。美国海军天文台在华盛顿本部和斯里弗空军基地产生了两个时标，分别是 USNO MC 和 USNO AMC，二者之间通过高精度时间比对链路实时比对，时差小于 2ns ^[7]。

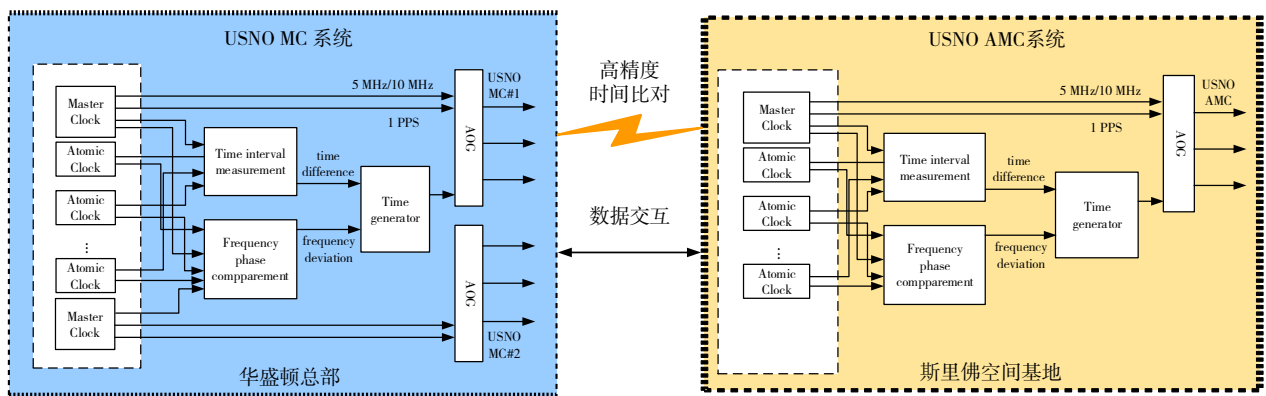


图 2 USNO 守时结构示意图

异地守时的前提是建立和维持高精度的比对链路，同地原子钟可通过测量设备进行循环测量得到原子钟相互的时差或频差，而不同地点的原子钟需要通过比对链路建立关系，将分布于各地的时差数据通过一定的数据传输链路送到数据中心，利用比对关系将这些时差/频差数据进行融合处理后用于守时计算。异地守时涉及的关键技术包括高精度时间比对技术、数据融合与处理、异地原子钟权重的确定、末端时间频率处理技术等。

1.1.3 联合守时

联合守时是采用集中式结构将多个守时实验室资源统一联合的时间基准建立模式，它利用本地原子钟测量比对设备，获取各实验室内部原子钟组的比对数据；采用远程比对手段实现不同实验室间溯源比对，最终获得多个实验室的原子钟比对数据。在联合守时模式下，无论选择哪个实验室作为主站，采用相同的时间尺度算法和频率驾驭算法，

最终产生的标准时间性能差异主要由主钟性能、参数设置的异同引起。

UTC 是典型的联合守时模式，以德国联邦物理技术研究院（PTB）作为主站，国际上其他守时实验室通过 GNSS（global navigation satellite system）卫星共视比对、GNSS 精密单点定位时间比对或卫星双向时间频率比对等手段与 PTB 建立时间比对链路^[8]，由 PTB 测量各守时机构时间与 PTB 主钟的时差，将比对数据发送给 BIPM（Bureau International des Poids et Mesures）。于此同时，各个守时实验室将本地测量的原子钟组内部测量钟差上传至 BIPM 指定的服务器，BIPM 统一归算出国际原子时（International Atomic Time, TAI），过程如图 3 所示。经过 50 多年的发展，全球 80 多个守时实验室约 450 台高精度原子钟参与国际原子时的计算。目前，TAI 频率准确度优于 1×10^{-15} ，频率月稳定度达到 3×10^{-16} 。

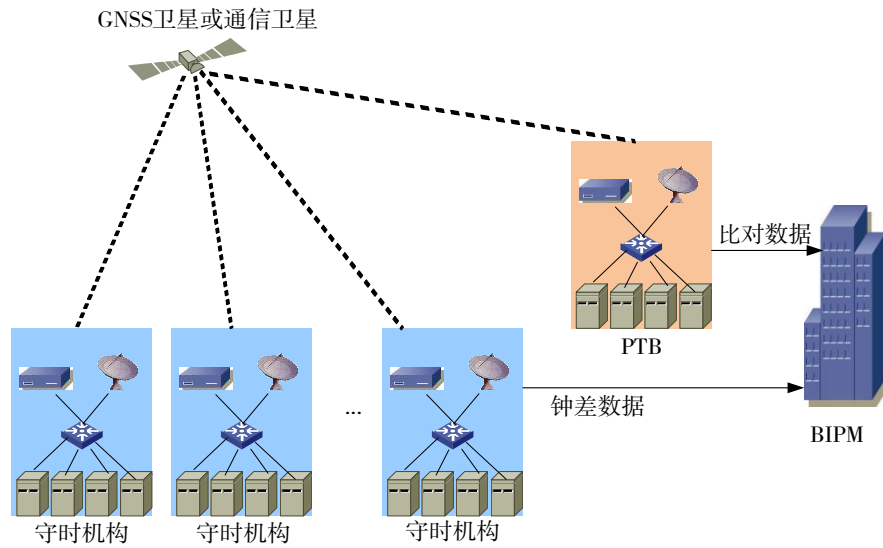


图 3 UTC 产生过程图

联合守时系统中,每个实验室都可以产生一个时标,利用本地原子钟组中性能最好的原子钟作为主钟输出时间频率信号,但原子钟频率普遍存在偏差和漂移,因此需要对输出信号进行频率调整。为维持原子钟的稳定性和独立性,一般不直接对原子钟进行相位或频率的干预,而是通过外部频率调整设备(一般为相位微调器)实现对原子钟输出信号的修正,调整时不仅需要考虑驾驭后输出信

号与时间基准的偏差,还应兼顾输出信号的频率稳定性。

联合守时涉及钟差数据预处理、综合原子时计算和实时物理信号控制等关键技术^[9]。

联合守时在远程比对链路中断时,可看作本地守时;参与守时的实验室同属一个机构或实验室数量较少时,可看作异地守时,3种模式之间的关系见表2。

表 2 本地守时、异地守时和联合守时的异同

项目	本地守时	异地守时	联合守时
管理机构	1	1	多个
时标数量	1	1个或多个	多个
比对网络	本地内部测量	本地内部测量、 外部比对网络	本地内部测量、 外部比对网络
可靠性设计	本地冗余设计	本地冗余设计、 异地部署	本地冗余设计、 异地部署
复杂度	简单	复杂	复杂

1.2 天地一体时间基准

星载原子钟是导航卫星的关键载荷,能够确保卫星导航系统提供精确的授时服务。目前, GPS 空间段的每颗 BlockII/IIA 卫星均放置了 2 台铷钟和 2 台铯钟,每颗 BlockIIR 卫星上放置了 3 台铷钟。Block IIR-M 采用与 Block IIR 卫星相同的原子钟配置方案,Block IIF 采用 2 台铷钟和 1 台铯钟的配置

方案,铯钟的引入能够改善频率短期稳定度^[10]。北斗三号系统中每颗卫星配置 3 至 4 台原子钟,星载钟类型包括星载铷钟、星载氢钟,组合模式为 3 台铷钟组合或者 2 台铷钟和 2 台氢钟组合^[11],星载钟的万秒稳定度指标接近地面的商品型铯原子钟。除导航卫星外,我国积极发展的天宫空间站、低轨卫星等空间飞行器也搭载有星载原子钟,甚至高性能

冷原子钟。随着星载原子钟性能的不不断提升，基于星载原子钟开展自主导航、自主守时甚至天地一体守时已成为可能。美国 GPS 时间基准就是利用地面主控站、监测站的高精度原子钟及 20 多个 GPS 卫星的星载原子钟共同建立和维持的。GPS 的地面控制中心收集来自于 5 个分布在全球的 GPS 监控站所接收的各个卫星钟的时间信号，通过滤波处理，得到组合钟时间。

天地一体时间基准是指利用地面原子钟和星载原子钟建立时间基准的模式，使用多个卫星的卫星钟和地面守时实验室的守时原子钟组成守时钟组，然后通过星间链路完成各卫星钟之间的测量比对，通过星地双向时间比对链路实现卫星钟与地面钟的测量比对，采用合适的时间尺度算法，可实现

天地之间原子钟的联合守时。

天地一体时间基准建立模式可以分为 3 种：地面守时模式、半自主守时模式和自主守时模式，如图 4 所示。

地面守时模式是指利用地面原子钟和星上原子钟开展联合守时，通过地面丰富的比对链路和基准钟开展实时物理信号的驾驭工作，此模式与 GPS 时间基准建立模式^[12]相同，充分发挥了地面原子钟的性能优势，星载原子钟在纸面时计算时取得的权重较低，其参与守时计算，一方面可以评估当前星载原子钟的性能和运行状态，另一方面扩充了时间基准的钟组规模，增加了钟组的冗余性和时间基准的鲁棒性，适用于地面原子钟数量充足、星地比对链路完好、追求最优守时性能的场景。

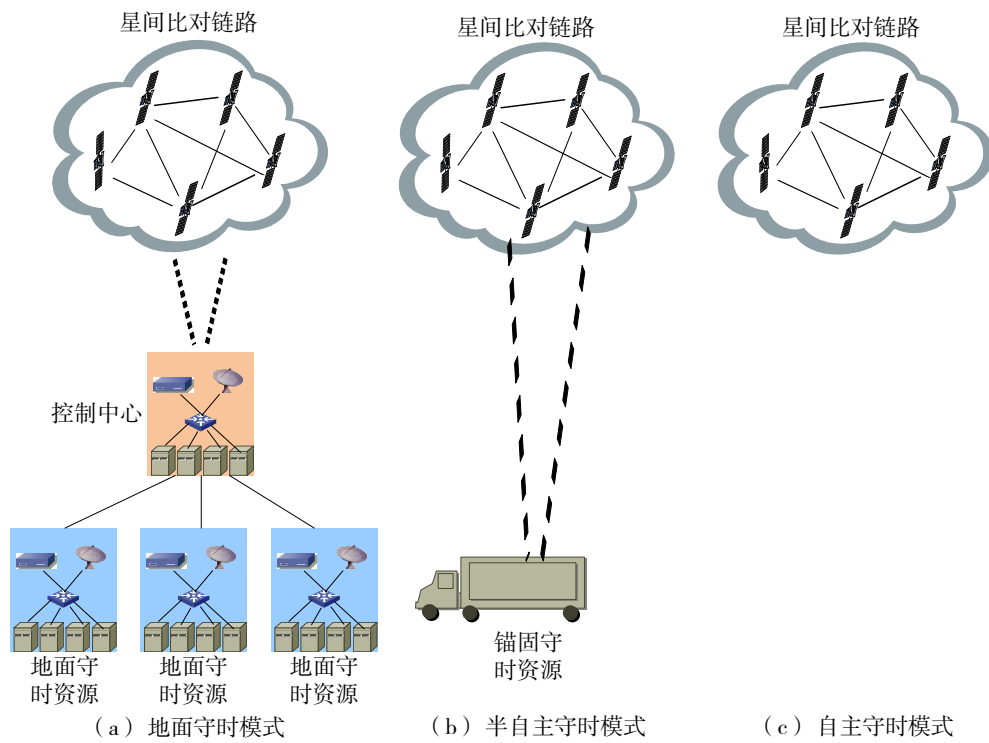


图 4 天地一体时间基准建立模式

半自主守时模式是指利用移动式或固定式锚固守时钟联合星上原子钟开展守时，地面锚固守时钟定时开展时间偏差计算和实时信号驾驭工作。为提升 GPS 星座自主运行能力，提出了锚固站（anchor station）定义^[13]，在地面上建立一个简单的站点，具有高精度的时间和坐标信息，与卫星间建立卫星双向测距和时间比对链路，将地面坐标信

息和时间基准传输到卫星上，协助导航系统完成定规和管理的工作。半自主守时模式基于此方案设计基准建立模式，可降低星载原子钟频率漂移的影响。由于锚固站具有一定的机动能力，因此，半自主守时模式的时间基准也具备了机动能力，但该模式需要一个或多个地面锚固站，且锚固站需配置原子钟或原子钟组。

自主守时模式是指在得不到地面守时系统支持的情况下,通过星间双向测距、数据交换及星载处理器滤波处理,利用星上原子钟资源建立时间基准,并不断自主修正,为卫星导航系统提供高精度的时间信息,满足用户对高精度导航定位的应用需求。星间原子钟时差测量通过同步算法实现,常见的同步方式有两种^[4]:一种是多颗卫星观测同一颗卫星,计算这一颗卫星的钟差;另一种是两颗卫星同时进行钟差计算。自主守时模式需要建立卫星钟之间的时差信息,因此选用计算量平均的第二种时间同步方式,通过双向测距方法,获得卫星钟面时差的测量信息。自主守时模式主要应用于卫星系统的自主运行。

天地一体时间基准建立需解决数据预处理和联合守时算法两个难题。首先,星上原子钟的比对数据一般采用星地无线电双向时间比对法获取,易受到电离层、对流层等影响,存在一定的噪声;同时受卫星不可见弧段的影响,部分卫星钟数据存在不连续现象,需采用数据预处理技术,针对各类噪声可采用卡尔曼滤波方法进行降噪处理,对数据异常点进行剔除;由于不可见弧段而缺失的数据一般不做插值处理。其次,位于地面的守时原子钟一般为氢钟与铯钟,而星载原子钟一般为铷钟,它们各自特性鲜明,时间基准建立时需要探索地面氢、铯钟与星载铷钟联合守时的能力,设计优化的氢、铯钟和星载铷钟的联合守时算法。

2 时间基准建立关键技术

2.1 数据融合

天体一体时间基准系统中,本地测量噪声和异地远程时间频率比对引入的噪声特性不同,原子钟的短期噪声特性往往“淹没”在远程时间比对的噪声中,本地原子钟组测量周期一般为 1 s,测量设备不确定度约为几十皮秒,甚至更低,而卫星导航系统采用星地无线电双向方法的测量不确定度约为 1 ns。因此,远程时间频率比对的数据采样间隔要大于本地测量的采样间隔,才能消除或降低噪声影响。本地测量数据和异地比对数据一起用于守时计算时,首先应融合处理,考虑以下两种情况:一

是通过插值拟合或挑选的方式将本地测量数据的采样间隔与异地比对数据的采样间隔对齐;二是将本地测量数据和异地比对数据按照特定的采样间隔进行转换处理,达到采样间隔一致。比如 IGS (International GNSS Service) 提供的钟差数据采样间隔为 300 s 和 30 s,在数据融合时要么对 IGS 钟差插值拟合,使得数据变密;要么对本地钟差按 300 s 或 30 s 间隔抽样,使二者采样间隔一致,便于开展守时计算。

同时,考虑到原子钟资源分散在天空、深空、地表等区域,钟差测量将受到相对论效应影响。星载钟上天所受的相对论效应影响约在纳秒量级,周期与卫星轨道周期相当,对卫星钟的稳定度计算带来的影响约在 1×10^{-14} 量级(与具体的轨道设计有关),导致评估星载钟稳定度时出现异常。因此,在数据融合时需考虑相对论周期项的影响并预先扣除。

在轨的卫星钟的数学模型可表示为

$$X(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \varepsilon_c(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_m(t)。(1)$$

式(1)中: t 为时刻, a_0 , a_1 和 a_2 分别为钟差、频偏和频漂, $\varepsilon_c(t)$ 为原子钟本身固有噪声, $\varepsilon_r(t)$ 为相对论效应引起的钟差项, $\varepsilon_m(t)$ 代表测量噪声。

在相对论框架中,时间与空间的概念与牛顿力学有本质的差别。时间不再是绝对的、唯一的,而是相对的,与空间相关的。根据广义相对论,在引力场的作用下,时空不是平直的欧几里得空间,而是一个弯曲的四维黎曼空间,由于时空的同一性和弯曲性,时空的整体度量变成了十分复杂的问题。在局域内,时间和空间不但可以分离而且可以看成是平直的,因此在观测者附近的局域时空范围内可以建立笛卡尔坐标系。这个笛卡尔坐标系就是与观测者相对静止的、并且相互垂直的三轴刚架,局域笛卡尔坐标系加上观测者所携带的“钟”,就构成了一个局域参考系。然而要描述大尺度时空中的物体运动所建立的全局坐标系将不满足笛卡尔坐标系的条件。

为了给出一般意义上的全局性时间坐标和空间坐标,相对论有两种不同定义的时间:一种是局域坐标系中的观测者利用自身携带的钟所实现的

时间，称为“原时”，这一时间是具有明确的物理意义的；另一种则是定义在全局坐标系中，由全局坐标系的时空度规所确定的类时变量，称为“坐标时”。原时是具有明确物理意义的，它可以根据“秒长”的定义由一个物理“时钟”或某种测量手段直接实现。坐标时却不具有这种属性，它只能根据由时空度规给出的数学关系，通过计算由原时间接得到。

根据国际天文联合会第24届大会决议，太阳系质心参考系和地心天球参考系使用如下的时空度规^[15]：

$$\begin{cases} g_{00} = -1 + \frac{2\omega}{c^2} - \frac{2\omega^2}{c^4} \\ g_{0i} = -\frac{4}{c^3}\omega^i \\ g_{ij} = \delta_{ij}\left(1 + \frac{2\omega}{c^2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中： g_{00} 、 g_{0i} 和 g_{ij} 是时空度规的3个张量， g_{00} 表示时间的演化， g_{0i} 表示时间和空间之间的混合， g_{ij} 表示三维空间度规， ω 和 ω^i 分别为引力场的牛顿势和矢量势， δ_{ij} 为 δ 函数， c 为光速。

对使用原子秒长定义的原时 τ 和坐标时 t ，在后牛顿精度下二者满足如下关系：

$$(d\tau)^2 = \left(1 - 2\frac{\mu}{r} - \frac{v^2}{c^2}\right)(dt)^2 \quad (3)$$

式(3)中： μ 表示卫星的引力位， r 为卫星位置矢量， v 为卫星在地心参考系中的运行速度。式(3)按泰勒级数展开，并取一次项可得：

$$\frac{d\tau}{dt} \approx \frac{1}{2}\left(1 - 2\frac{\mu}{rc^2} - \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (4)$$

根据卫星二体运动的微分方程解：

$$r = a(1 - e\cos E), \quad (5)$$

$$v^2 = \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)\mu \quad (6)$$

式(5)和(6)中： a 为卫星椭圆轨道长半径， e 为积分常数， E 为偏近点角，代入式(3)变为：

$$\frac{d\tau}{dt} = 1 - \frac{3}{2}\frac{\mu}{ac^2} - 2\frac{\mu e\cos E}{ac^2} \quad (7)$$

所以可得：

$$\tau = \left(1 - \frac{3}{2}\frac{\mu}{ac^2}\right)(t - t_0) - 2\int \frac{\mu e\cos E}{ac^2} dt \quad (8)$$

对偏近点角，有下面的关系式成立：

$$E - e\sin E = n(t - t_0) \quad (9)$$

两边取微分，可得：

$$dt = \frac{1}{n}(1 - e\cos E)dE = \frac{a^2}{\mu^{\frac{3}{2}}}(1 - e\cos E)dE \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)可得到原时与坐标时的函数关系式：

$$\tau = \left(1 - \frac{3}{2}\frac{\mu}{ac^2}\right)(t - t_0) - 2\frac{\sqrt{\mu a}}{c^2}e\sin E \quad (11)$$

式(11)中的第二项体现了由相对论效应所引起的原时与坐标时之间函数关系，对卫星钟的在轨运行而言，受到的相对论效应影响包括两部分：一是固定的频率偏差影响，该影响为常数项；二是周期性偏差影响，该变化量与卫星轨道偏心率、偏近点角相关，其变化周期与卫星运行周期一致。

2.2 数据预处理

守时数据难以避免地存在粗差、跳相和变频等情况，特别是星载钟数据在比对过程中受外界因素影响，更容易出现异常，如图5所示。在计算原子时之前，需要对这些异常数据或异常情况进行处理，这个过程就是数据预处理。

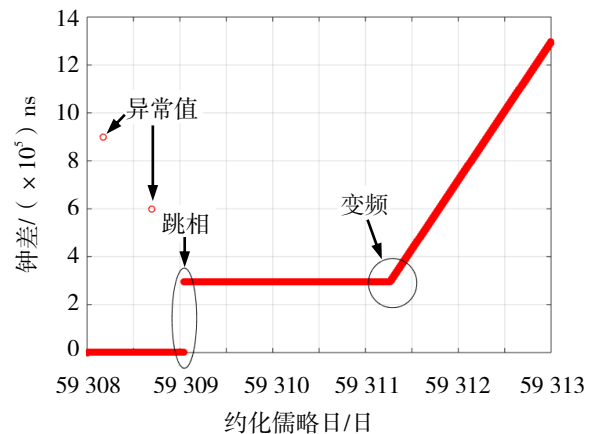


图5 时差测量数据常见异常情形

观测数据中存在大量粗差点,这些粗差点的产生由许多原因造成,可能是时间尺度的跳变,也可能是观测仪器的瞬时变化,这些孤立的粗差数据点不能反映时间尺度的性能特征,如果不进行处理则可能会影响计算结果,因此必须对粗差数据进行剔除。常用的方法主要有中位数(MAD)方法^[16],具有原理简单、计算效率高等优点,是钟差数据预处理中普遍采用的一种方法,此外还有抗差估计方法^[17]、基于AR模型的AO类异常值探测贝叶斯方法^[18]以及Baarda检测方法^[19]等。

原子钟数据跳相会使原子钟表现出调频白噪声的特性,进而对频率稳定性产生影响。跳相有两类原因:一是钟自身跳相,二是人为操作了调相指令。对跳相数据可考虑数据平移拼接的方式处理,主要基于两方面的考虑:一是平移拼接的可行性,原子钟的物理特性决定了钟差是连续的,这是实施拼接的基础;二是通过拼接,增加了数据长度,发挥所有观测数据的作用。

频率跳变是原子钟输出频率信号不稳定的表现,变频量较小时仅影响该钟的稳定度和权重,变频量较大时将被剔除守时钟组。对与变频数据的处理,关键是要确定变频发生的时刻,目前,多数算法通过在频率数据上移动窗口的方法识别频率跳变,查找移动窗口前后两部分数据均值的变化点,以此定位频率跳变点。由此,将跳变点前后的数据分为两部分,分析并计算变频的量级,其变频后的

数据进行修正,修正的效果取决于变频时刻的判断的准确性和变频量级的评估精度,常用算法包括分块平均(block average)算法^[20]、顺序平均(sequential average)算法^[20]、经典累积求和(cumulative sum)方法^[20]、基于卡尔曼滤波的检测法^[21]等。

2.3 守时算法

时间尺度算法在时间基准建立中居于核心地位。对原子时而言,时间尺度算法的本质是调整原子钟之间的相互关系,每一种相互关系,都代表着不同物理过程的不同实现,最终目的就是选择或构造一种物理过程,使算法的不确定度最小、产生的自由原子时TA(k)的稳定度最高。

常见的守时算法为BIPM的经典加权算法ALGOS算法^[22]和NIST提出的AT1算法^[23]。此外,还有AT2算法^[24]、卡尔曼滤波算法^[24]、小波分解算法^[25]等。ALOGS算法和AT1算法的核心思想是加权平均法,给每台原子钟分配一个权重,时间尺度的稳定性较好,但是缺少消除或抑制原子钟噪声的过程,不能进一步提高时间尺度的精度;卡尔曼滤波算法经过一系列滤波可部分抑制原子钟噪声,可以获得较好的长期稳定性,但需提防估值误差发散性问题。AT1算法和卡尔曼滤波算法具有实时性,而ALOGS是一种滞后算法^[26],各守时算法特点见表3。各守时算法均有优劣,需根据实际情况选择一种合适的守时算法计算时间尺度。

表3 常见守时算法比较

类别	ALOGS	AT1	卡尔曼滤波
工作原理	经典加权平均	指数滤波加权平均	利用滤波器预测钟的相位和频率
取权算法	取决于钟长期稳定性	利用指数滤波取权	没有权重的概念
噪声抑制	仅对调频白噪声、调频随机游走偶闪变噪声中的一种有抑制	仅对调频白噪声、调频随机游走偶闪变噪声中的一种有抑制	对多种噪声均有抑制
优点	原理简单,长期稳定性好	实时性,原理简单,短期稳定性好	实时性,长期稳定性好
缺点	滞后算法,实时性差	长期稳定性差	实现复杂,存在发散性问题

2.4 实时信号控制

利用守时算法计算得到自由原子时,它具有一定的滞后性,不能用作物理信号输出。卫星系统为完成卫星轨道精密测定、高精度时间同步、信号监测等操作需要高精度的时间和频率信号,确保各设备的工作时序。

实时物理信号由主钟产生并经过一系列频率和相位调整控制后输出。影响实时信号调整的因素包括:原子钟自身的频率稳定性、测量数据的可靠性和调整控制的周期等。一般的调整过程如下:利用本地纸面时 UTC (k) 或外部参考基准评估主钟频率信号的频率偏差,将其负值作为补偿量植入实时信号调整设备,使实时信号相对于本地纸面时或外部参考基准的频率偏差趋近于零,同时还需调整实时信号的相位,在不影响短期稳定度的情况下实施相位调整,确保实时信号代表纸面时的物理复现,如图6所示。

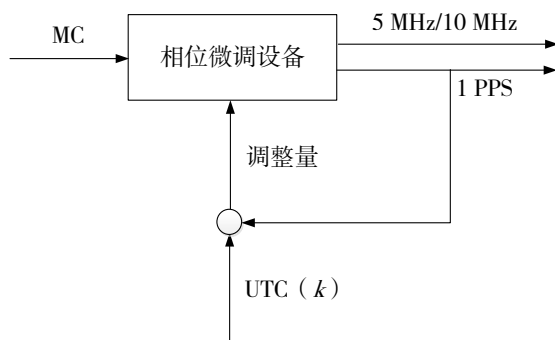


图6 实时信号调整原理图

上述过程仅完成本地钟的驾驭调整。异地远程原子钟可通过一定的方式调整,使其与时间基准保持一致,常用方法分为物理调钟^[27]和数字调钟。物理调钟是指利用高精度比对技术获得远程原子钟与时间基准的时差测量,利用该观测量物理调校本地原子钟,使得原子钟与时间基准的时差物理同步精度达到纳秒级,从源头上抑制和消除钟差对远程时差测量数据的污染,北斗二号卫星导航系统采用此方式将多个时间注入站的时间与主控站保持一致,保证了对星指令操作的准确性。数字调钟是指仅通过数据处理的方式修复测量数据中的系统差,不进行物理调整原子钟。在联合守时系统中,各个守时机构的时间基准之间因链路校准、设备时

延,将存在一定的时间偏差,当彼此不存在溯源关系时,这个时间偏差一般作为系统差保留,不需消除,仅在数据预处理时修正,实现彼此间的时间“软同步”。

3 结语

本文针对天地一体化网络的时间基准建立模式开展讨论,分析了时间基准的建立模式和关键技术,主要包括如下内容。

① 时间基准建立模式划分,学术界对时间基准建立模式尚未有一致意见,作者依据自身工作经验提出划分的方法,根据参与守时的原子钟的空间位置,可分为地面时间基准和天地一体时间基准。而地面时间基准又可区分为本地守时、异地守时和联合守时。

② 天地一体时间基准的定义和组成,指利用地面原子钟和星载原子钟建立的时间基准模式,包括卫星钟、地面守时原子钟、星间链路、星地链路等。区分了3种运行模式:地面守时模式、半自主守时模式和自主守时模式。

③ 时间基准建立关键技术,从数据融合、预处理、守时算法、实时信号控制等角度入手,逐一分析各个关键环节。

当前,我国建有多多个守时实验室,在地面分布有上百台高性能守时原子钟;天基守时资源方面,主要以北斗卫星、天宫空间站的星载钟为主,大多数星载钟性能低于地面原子钟,现阶段天体一体时间基准以地面守时运行模式为主。总之,天地一体时间基准建立是个新生事物,在天体一体化网络走向全面建设的历史性关头,认真探索其时间基准建立思路并攻克相应关键技术,具有重要意义。

参考文献:

- [1] 徐益平. 天地一体化网络发展趋势与挑战[J]. 现代雷达, 2017, 39(7): 12-16.
- [2] 董绍武. 守时中的若干重要技术问题研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心), 2007.
- [3] 张首刚. 新型原子钟发展现状[J]. 时间频率学报, 2009, 32(2): 81-91.

- [4] 钦伟瑾, 韦沛, 杨旭海, 等. 导航卫星自主时间维持算法影响因素分析[J]. 天文学报, 2018, 59(1): 13-25.
- [5] 刘丽丽, 王跃科, 陈建云, 等. 导航星座自主时间基准的相对论效应[J]. 宇航学报, 2015, 36(4): 470-476.
- [6] GUO Y C, WANG B, SI H W, et al. Correlation measurement of co-located hydrogen masers[J]. Metrologia, 2018, 55(5): 631-636.
- [7] 杨玉婷, 刘晨帆, 蔺玉亭, 等. 我国守时系统发展现状与性能分析[J]. 自动化仪表, 2021, 42(7): 93-97+102.
- [8] 王威雄. 守时系统国际时间比对数据融合方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2021.
- [9] 赵书红, 董绍武, 袁海波, 等. 异地多站联合守时方法研究[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 288-299.
- [10] 赵学军. GNSS 系统时间及星载钟研究[J]. 现代导航, 2018, 9(6): 399-404.
- [11] 卢鋈, 武建峰, 袁海波, 等. 北斗三号系统时频体系设计与实现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1-8.
- [12] 肖寅. 导航卫星自主导航关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2015.
- [13] RAJAN J, BRODIE P, RAWICZ H. Modernizing GPS autonomous navigation with anchor capability[C] // Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003), Portland, 2003: 1534-1542.
- [14] 王冬霞, 辛洁, 薛峰, 等. GNSS 星间链路自主导航技术研究进展及展望[J]. 宇航学报, 2016, 37(11): 1279-1288.
- [15] 韩春好. 时空测量原理[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [16] 王宇谱. 导航卫星原子钟钟差预报理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- [17] 黄观文. GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [18] 张倩倩, 韩松辉, 杜兰, 等. 星地时间同步钟差异常处理的 Bayesian 方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(6): 772-777.
- [19] 胡锦涛. 原子时水平与原子钟性能的相关特性分析[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1997(18): 220-226.
- [20] RILEY W Y. Algorithms for frequency jump detection[J]. Metrologia, 2008, 45(6): S154-S161.
- [21] GÖDEL M, SCHMIDT T D, FURTHNER J. Kalman filter approaches for a mixed clock ensemble[C] // Proceedings of 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium, Piscataway: IEEE Press, 2017: 666-672.
- [22] WEISS M A, ALLAN D W, PEPLER T K. A study of the NBS time scale algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(2): 631-635.
- [23] TAVELLA P, THOMAS C. Comparative study of time scale algorithms[J]. Metrologia, 1991, 28(2): 57-63.
- [24] JONES R H, TRYON P V. Continuous time series models for unequally spaced data applied to modeling atomic clocks[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1987, 8(1): 71-81.
- [25] PERCIVAL D B. Stochastic models and statistical analysis for clock noise[J]. Metrologia, 2003, 40(3): S289-S304.
- [26] 王锐, 袁静, 班亚, 等. 原子时算法分析与对比[J]. 计量学报, 2020, 41(3): 363-368.
- [27] 王雪晖, 王盾, 李周, 等. 双向比对高精度物理世界同步方法[J]. 航空学报, 2019, 40(5): 217-231.