

超高精度时间频率同步及其应用*

王力军^{1,2,3,4,†}

(1 清华大学精密仪器系 清华大学精密测量联合实验室 北京 100084)

(2 清华大学物理系 北京 100084)

(3 清华大学精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

(4 中国计量科学研究院 北京 100013)

2014-04-27收到

† email: lwan@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20140601

High precision synchronization of time and frequency and its applications

WANG Li-Jun^{1,2,3,4,†}

(1 Joint Institute for Measurement Science, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3 State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(4 National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

摘要 文章介绍了时间频率同步的主要概念及方法。重点介绍了在清华大学与中国计量科学研究院之间往返 80 km 的商用光纤链路上进行时间频率传输与同步的方案, 实验得到 $7 \times 10^{-15}/s$, $5 \times 10^{-19}/\text{天}$ 的频率传输稳定性和 50 fs 的时间同步稳定度。针对不同网络结构, 文章作者提出了多种光纤同步方案, 并着重介绍了时间频率同步在科学研究领域中的一些重要应用。

关键词 时间频率, 同步, 卫星定位, 光纤及网络结构

Abstract We discuss the concept and methods for remote synchronization of time and frequency. We discuss a recent experiment that demonstrated time and frequency synchronization via a commercial fiber network, reaching accuracy of $7 \times 10^{-15}/s$, $5 \times 10^{-19}/\text{day}$, and a maximum time uncertainty of less than 50 femtoseconds. We discuss synchronization methods applicable to different topologies and their important scientific applications.

Keywords time and frequency, synchronization, global navigation satellite system(GNSS), fiber network

1 引言

时间, 这是最早被人类意识到的同时也是最神秘的一个基本物理量。从古时代人们的日出而

作, 日落而息, 到地心说和日心说, 再到相对论和宇宙大爆炸理论, 人类从未停止过对时间本质与起源的探求。另一方面, 如何不断地提高“时间”这一基本物理量的测量精度, 也一直是人类不懈追求的重要目标之一。早在 18 世纪, 为争夺海上霸权, 解决远距离航海定位(经度)的难题,

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB922900)资助项目

欧洲各国都在积极寻找海上精确守时的办法。最终，一位英国钟表匠约翰·哈里森(John Harrison)发明了航海钟，首次使钟摆的摆动频率摆脱了重力影响，大大提高了航海过程中的时间测量精度，从而使安全的长距离海上航行成为可能^[1]。在一定程度上，这也是日后英国成为“日不落帝国”的根本原因所在。

在此之后，随着现代高精度原子钟的快速发展，时间测量的精度已经遥遥领先于其他物理量的测量精度，时间因而成为测量精度最高的基本单位。1967年，国际度量衡大会通过了新的国际单位制原子秒的定义——位于海平面上的铯(¹³³Cs)原子基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁振荡9192631770周期所持续的时间为1秒(定义中的铯原子在温度为0 K时必须是静止的)^[2]，这标志着时频计量由天文基准过度到量子基准。极高的测量精度和可直接传递的特性也使时频计量成为其他计量向量子基准转化的先导；1983年，国际计量大会(CGPM)会议重新定义长度计量单位“米”为光在真空中1/299792458秒所传播的距离^[3]。长度和时间的这种密切关系已被广泛应用于卫星定位系统，例如全球定位系统(GPS)以及我国的北斗系统。在卫星定位系统中，星载钟之间的时间同步精度决定了定位精度。为了提高定位精度，一方面要提高星载守时钟的稳定度和准确度，更重要的则是提高整个系统的时间同步精度。

超高精度时间频率同步的重要性不仅仅体现在导航领域，而且在基础科学、天文观测、国防安全、通信以及金融等领域，精密授时与同步均有着广泛而重要的应用。本文将介绍几种主要的时间同步方法及其在科学领域的一些重要应用。

在此，有必要指出，约翰·哈里森在250年前提出的使用高精度守时钟保持时间同步的基本概念影响至今。就基本概念而言，假如有两台独立守时钟，计时分别为 t_1 与 t_2 ，那么，二者相对误差为 $\sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2C_{12}$ ，其中， σ_1 和 σ_2 分别为两台钟的独立稳定度， σ_{12} 为二者相互不确定度。当两台钟完全独立时，其互相关系数 $C_{12} = 0$ ，那么它们都必须有很高的稳定度(即 σ_1 ， σ_2 均较

小)才可以保证其相对误差 σ_{12}^2 很小。今天，我们需要重新审视这个基本假设。事实上，当两台钟频繁地进行比对时，则两台钟可以不再独立，其相对误差 σ_{12}^2 可以非常小，而对其“绝对”稳定度，例如 σ_1^2 的要求可以大大放宽。在大家熟知的重要应用方面，超高精度的异地时间频率同步才是根本；“绝对”时间并没有太多意义。所以，近年来国际、国内大量发展的“光钟”假如不能做到长期运行(守时)和异地可搬运，其实际应用意义并不是很大。相比之下，“授时”(同步)将有可能带来相关方面科学上的革命性进展。

2 时频同步方法

在原子钟技术发展初始，人们最早采用搬运钟的方法进行时间同步，然而这种方法限制了同步距离，同时对原子钟稳定性有很高要求。随着卫星导航系统的发展，目前异地时钟的时间频率传输与同步主要是通过卫星链路来实现的。利用卫星双向时间频率传递(TWSTFT)^[4]，卫星共视(CV)^[5]等方法可以实现 10^{-15} /天量级的频率传输稳定度以及纳秒量级的时间同步精度。

随着现代高精度原子钟的快速发展，频率稳定度在 10^{-16} /s的频率振荡器^[6]以及频率不确定度在 10^{-18} 的光钟^[7]相继出现。现有的时频传输和同步技术已无法满足高精度原子钟时间频率比对的需求，需要发展具有更高精度的时频传输与同步方法。基于光纤链路的时频同步技术以其具有的低损耗、高稳定度优势而逐渐发展成为一种新型同步技术，世界各国均已开展对此项技术的研究。2012年6月1日，由欧盟9国(德国、法国、英国、奥地利、意大利、荷兰、瑞典、芬兰、捷克)共同出资合作进行的联合研究项目NEAT-FT正式启动，旨在未来建设一个频率传输稳定度优于 10^{-17} /天，时间同步精度优于100 ps的欧洲时频光纤同步网络^[8]。此外，在光纤链路中，在进行微波、光频、脉冲以及飞秒光梳信号的传输与同步技术方面，也逐渐有越来越多的研究成果出现^[9-12]。

清华大学精密测量联合实验室长期从事超高

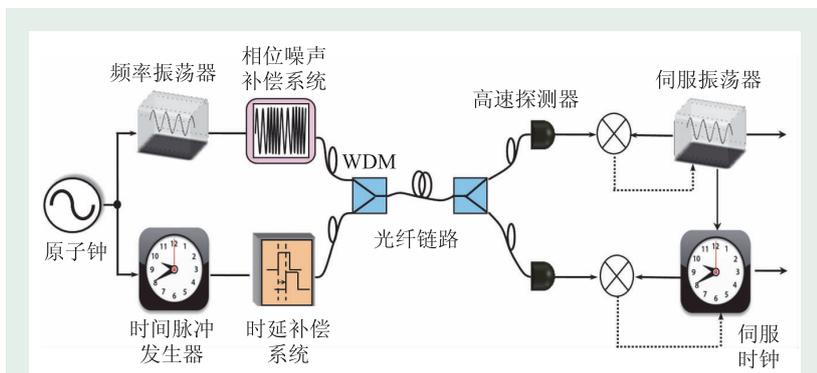


图1 时间频率光纤传输与同步系统原理图

精度时频同步领域的研究，且其成果在世界上处于领先水平。2011年，我们在清华大学与中国计量科学研究院(昌平)之间往返 80 km 的商用光纤链路上，首次演示了时标脉冲、微波频率的同时传输与同步实验^[13]。图1为该实验的原理图，通过在发射端(图中左侧)主动探测并补偿光纤传输引入的相位噪声，实现了 $7 \times 10^{-15}/s$ 、 $5 \times 10^{-19}/\text{天}$ 的频率传输稳定度以及优于 50 ps 的时标同步精度。使用此时标，并进一步使用频率信号过零点作为时间同步基准，可以将时间同步精度提高至 50 fs。相比于卫星传输中常见的 ns 级稳定度指标，这一结果在传输天稳定度上提高了 4 个数量级。

与卫星同步相比，基于光纤的时频同步方法一个显著的不足之处就在于其覆盖范围的局限性——传统方案具有“点对点”结构，即一个发射端对应一个接收端，这在很大程度上限制了光纤时频同步技术的应用范围。基于此，我们提出并演示了一种可在光纤链路任意位置处下载高稳定度频率信号的方案，如图2所示，这一技术大大拓展了传统方案的应用范围，使光纤时频同步的网络化建设成为可能^[14]。

我们还进一步研究了不同拓扑结构的光纤同步网络，针对一个发射站对应于多个接收站的多分支网络化结构，提出了在接收端对光纤传输引入相位噪声进行被动式补偿的同步方案，采用此方案进行高精度时频同步，各接收站相互之间独立，具有树状拓扑结构并且易于扩展，增加新的分支。在国际合作建设的平方公里阵列天文望远

镜(SKA)等实际系统中具有广阔的应用前景。

3 重要科学应用

超高精度的异地时间频率同步与精密授时在众多科学领域均扮演着举足轻重的角色，研究结果往往取决于时间同步的精度。

在卫星导航领域，星载钟之间的时间同步精度很大程度上决定了最终的定位精度。卫星定位、导航的基本原理十分简单：假设位于地表或地表附近的用户看到四颗或更多导航卫星，并接收到了导航卫星所广播的信号。此信号包括了精确的发射时刻及该时刻卫星的精确位置，据此，用户可以列出至少4个方程：

$$|\mathbf{R} - \mathbf{R}_j| = c(t - t_j), \quad j = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (1)$$

其中 \mathbf{R}_j 是第 j 颗卫星在 t_j 时刻所处的位置， \mathbf{R} 是用户在接收时刻 t 的位置。这里的未知量一般是位置 $\mathbf{R}(x, y, z)$ 及时刻 t ，共 4 个变量。通过上述 4 个方程可以求出这 4 个未知数，用户也就得到了自己的时间和位置信息。从以上方程我们很容易看出，定位精度取决于星载钟之间的时间同步精度。以 GPS 系统为例，其星载钟与分布在全球范围的地面监测站地面站之间每天进行两次时间同步校准，校正后便自由运行，运行一段时间 $\tau \approx 40000 \text{ s}$ 之后，这些钟的时间将不再一致，偏离值的不确定量为 $\Delta \tau = \sigma \tau$ 。其中 σ 为描述原子

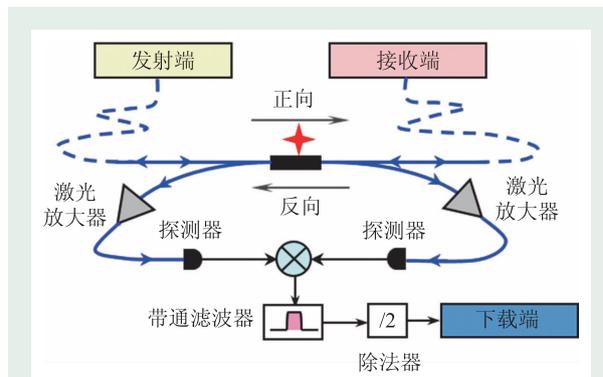


图2 可多点下载光纤时频同步系统原理图

钟频率稳定度的阿伦标准方差, 典型原子钟的频率稳定度满足关系式 $\sigma \propto 1/\sqrt{\tau}$ 。因此, 星载钟间的偏离值将随着运行时间发生正比于 $\sqrt{\tau}$ 的积累。针对于此, 我们提出了对北斗系统星载钟利用星间微波链路进行相位锁定时间同步的设想, 有望使其定位精度得到大幅度提高^[15]。例如, 相比于GPS每40000 s校准钟差, 假如北斗系统每5分钟校准钟差, 则其精度可以提高10倍。

另一方面, 将卫星导航的原理反过来应用, 即所谓倒GPS系统(reversed GPS), 通过设立在地面的观测站, 实现对卫星以及其他天体进行观测定位, 由于地面守时钟精度远高于星载钟, 且利用光纤进行时间同步可以大大提高同步精度, 因此可对卫星运行轨道以及天体星历进行精确测定。

在天文观测领域, 采用甚长基线干涉测量技术(VLBI)时, 可以通过距离达数千公里的观测站对同一射电源发出的信号进行接收, 并根据时延差做相关处理, 最终得到超高分辨率的干涉信号^[16]。观测精度最终取决于延时的测量精度, 即时间同步精度。传统的方案是, 通过在各观测站放置独立运行的高精度原子钟(如氢钟)进行守时, 时延误差随时间 $\sqrt{\tau}$ 积累。若采用光纤链路进行时间同步, 各观测站无需分别放置守时钟即可获得高精度同步的时频信号, 并对时延实时进行补偿, 保

证误差不随时间积累, 天稳定度可比采用独立氢钟守时提高3个数量级。

此外, 清华大学精密测量实验室已加入“平方公里射电望远镜阵列(SKA)”这一国际大型合作项目的研究工作, 此项目由澳大利亚、加拿大、意大利、新西兰、荷兰、南非、英国、中国等20个国家共同合作, 旨在通过建设一个由3000—4000个大型天线组成的阵列, 形成1 km²的信息采集区, 构成世界上最大的射电天文望远镜^[17]。实施SKA将有助于科学家真正了解宇宙和人类起源的奥秘, 并有望推动一些直接影响人们日常生活的新技术的诞生。超高精度时间同步是其中一项十分关键的新技术, 为保证组成阵列的数千面天线之间的相位相干, 短期时间同步精度需要达到1 ps量级, 同时长期稳定度要达到10年内时间误差不超过10 ns, 并且天线阵列具有在中心处呈网状分布, 在3个旋臂处呈链状分布的不同的拓扑结构。针对以上要求, 我们提出了适用于不同网络结构的光纤时间同步方案, 有望最终应用于SKA项目。

综上所述, 在众多科学研究领域, 新兴的基于光纤链路的超高精度时间同步技术以及空间微波链路时间同步技术与传统的授时与同步技术相比, 有着巨大的精度优势; 随着相关技术的逐步发展与完善, 这两项新技术也会逐步展现其在其他领域的巨大应用潜力。

参考文献

- [1] Sobel D. Longitude: The True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time. New York: Penguin, 1995. ISBN 0-14-025879-5
- [2] Unit of time (second). SI Brochure. BIPM. Retrieved 2013-12-22
- [3] 17th General Conference on Weights and Measures (1983), Resolution 1. Retrieved 2012-09-19
- [4] Michito I, Mizuhiko H, Kuniyasu I *et al.* IEEE, 2001, 5:2
- [5] David W A, Marc A W. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. In: Proc.34th Ann. Freq. Control Symposium, USAERADCOM, Ft. Monmouth, NJ 07703, May 1980
- [6] Fortier T M, Kirchner M S, Quinlan F *et al.* Nature Photon., 2011, 5:425
- [7] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D *et al.* Nature Photon., 2011, 5:158
- [8] Droste S *et al.* Physical Review Letters, 2013, 111:110801
- [9] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K *et al.* Science, 2008, 319:1805
- [10] Hong F L, Musha M, Takamoto M *et al.* Opt. Lett., 2009, 34:692
- [11] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F *et al.* Science, 2012, 336:441
- [12] Foreman S M, Ludlow A D, Miranda M H G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 99:153601
- [13] Wang B, Gao C, Chen W L *et al.* Sci. Rep., 2012, 2:556
- [14] Gao C, Wang B, Chen W L *et al.* Opt. Lett., 2012, 37:4690
- [15] Wang Z B, Zhao L, Wang S G *et al.* Sci. China. Phys. Mech. Astron., 2014, 57(8):(页码待定)(DOI: 10.1007/s11433-014-5508-z)
- [16] Robertson D S. Rev. Mod. Phys., 1991, 63:899
- [17] <https://www.skatelescope.org/>