

光纤时频同步技术的研究进展

梁益丰**, 许江宁*, 吴苗, 何泓洋, 江鹏飞

中国人民解放军海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 基于光纤传输的时频同步技术具有高精度、高稳定性和低损耗的优点。近年来光纤时频同步技术发展迅速,新方法、新技术和新应用不断涌现,具有很强的军事应用需求和民用推广前景,系统梳理其发展现状、客观审视其未来发展趋势很有必要。在明确光纤时频同步技术原理与技术特点的基础上,分别介绍了光纤时间同步、频率同步、网络化同步等主要技术的现状,指出地基时频网络建设的重难点。对制约光纤时频同步技术实用化的问题进行了分析,认为商用网络中的远距离高精度传递是限制光纤时频同步技术的难点,也是后续研究需要重点解决的问题。

关键词 光纤时频同步; 时间传递; 授时; 地基时频网络

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050004

Research Progress on Optical Fiber Time-Frequency Synchronization Technology

Liang Yifeng**, Xu Jiangning*, Wu Miao, He Hongyang, Jiang Pengfei

College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, The Chinese People's Liberation Army, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract Time-frequency synchronization technology based on optical fiber transmission has advantages of high accuracy, high stability and low loss. In recent years, optical fiber time-frequency synchronization technology developed rapidly, with the emergence of new methods, new technologies and new applications, and it has strong military application needs and civil promotion prospects too. It is extremely necessary to review its development status and objectively examine its future development trend. On the basis of defining the principle and technical characteristics of optical fiber time-frequency synchronization technology, the current status of optical fiber time synchronization, frequency synchronization and networked synchronization technologies are introduced, the key points in the construction of ground-based time-frequency network are proposed. The problem of restricting the practicality of optical fiber time-frequency synchronization technology is analyzed. It is considered that ultra-long-distance and high precision transmission on commercial networks is the difficulty of restricting optical fiber time-frequency synchronization technology and the key problem to be solved in the future research.

Key words optical fiber time-frequency synchronization; time transfer; time service; ground-based time-frequency network

OCIS codes 060.3510; 060.4510

1 引言

时间一直是重要的基本物理量,最早人们依靠天体运动来计时,将春去秋来、月圆月缺、日出而落

表征为“年、月、天”,在现实需求的推动下又先后发明了日晷、摆钟、航海钟等计时工具。1960年,时间成为7个国际基本单位中测量精度最高的物理量^[1-2],此后其计量精度迅速提高,20世纪60年代

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-07-30; 录用日期: 2019-08-27

基金项目: 国家第二代卫星导航重大专项(GFZX0301040303)、国家重点研发计划(2016YFB0501700, 2016YFB0501701)、国家自然科学基金(41804076)

* E-mail: 1431425578@qq.com; ** E-mail: 310714938@qq.com

时间间隔周期为 10^{-12} s^{-1} 的铯原子钟已被频率不确定度约为 10^{-18} s^{-1} 的光频原子钟所取代。高精度原子钟保证了时间源的精确性,但在实际应用中需要多台钟构成钟组进行远程比对,成本高昂。国家电力、通信、交通等重点学科对时间精确性的要求越来越高,军事方面也对时间可用性有严格需求,如何将上级时间和高稳定度频率可靠、精准地传输给用时部门,成为该领域研究的重要课题。

时频同步技术指将处于异地的时钟产生的时频信号进行比对,形成统一时频基准的过程^[3],是当下应用高准确度和高稳定度时间频率信号的瓶颈^[4]。近年来卫星授时以范围广、精度高等优点成为时频同步的主要方式,缺点是难以克服信号弱、短期稳定度差等缺陷,存在明显的安全隐患。出于国防安全考虑,2010年美国交通部和国防部开始谋划国家综合定位、导航与授时(PNT)架构^[5],旨在整合各种可用的PNT资源,使其能力更加强大^[6]。2017年,美国空军意识到授时的重要地位从而提出了“授时战”的概念,认为应该将“T”从体系建设中独立出来,建立地基时频体系^[7]。2015年我国的PNT体系建设也进入了加速阶段,对于独立时频体系建设的基础理论、框架构建等方面的研究都取得了一定进展^[8]。光纤时频同步技术凭借可靠性、高精度、低损耗特征,以及依托光网络形成的时频体系的潜在优势,成为时频同步技术的主要方向之一。

利用光纤传输时频信息的想法始于20世纪70年代光纤通信的兴起,目前国内外已经有多个研究机构验证了精度优异的光纤时频传递与同步方案,有望改善现有技术的不足,实现广泛应用。本文简

要回顾了光纤时频同步技术的发展历史,对关键技术进行了较为全面的介绍,最后分析其发展趋势,为进一步研究该技术提供了参考。

2 光纤时频同步技术的特点及发展历史

2.1 时频同步技术的原理

时频同步是形成统一时频基准的必要过程,包含时间同步、频率同步、时频传输等多项技术。虽然时间和频率互为倒数的关系体现了两者之间的紧密联系,但以上概念之间并不完全等同。将文献[8-12]中相关概念的界定与描述整合为

- 1) 时间同步:两台时钟在某一瞬间给出的时标值的差处于容许范围内,称为时间同步;
- 2) 频率同步:频率信号传输前后随时间无明显起伏、稳定度无恶化,称为频率同步;
- 3) 时间传递:将上级时间基准通过信号转换、时延补偿等方法向下逐级传递的过程;
- 4) 频率传输:高稳原子钟主站产生标准的频率信息经传输后,在终端恢复使用的过程;
- 5) 时间溯源:通过时间比对方法获得本地与上级时间之间的偏差,并通过补偿等手段使本地信号与上级信号高度一致(与时间传递相对应的过程)。

目前对于时间或者频率同步尚未有统一、确切的指标要求,但随着技术手段的进步,同步对于主从时钟的误差要求越来越高。过去对于频率传输技术的研究比较广泛,相反关于时间同步以及时频同时传输的研究较少。国内具有代表性的时间频率同时传输与同步实验方案是清华大学设计的,其原理如图1所示^[3]。

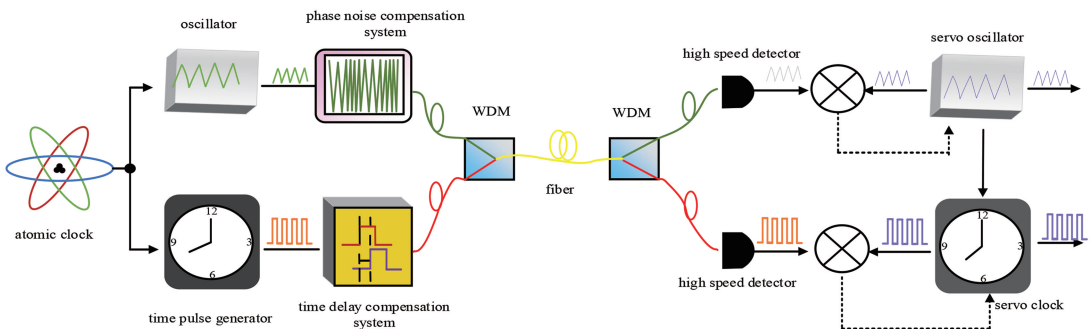


图1 清华大学时间频率同时传输与同步实验原理图^[3]

Fig. 1 Principle diagram of time-frequency simultaneous transmission and synchronization experiment^[3]

实验中高精度时钟源输出的频率信号分别为频率传输系统和时间同步系统的基准频率,在光纤信道内经时间传输延迟和频率相位噪声补偿后完成传输,同步过程:

- 1) 发射端原子钟的脉冲发生器产生一系列时间脉冲,经过时延补偿系统和波分复用(WDM)装置后进入光纤信道,接收端再通过探测器解调得到具有固定传输时延的脉冲信号,并利用该时间脉冲

信号同步本地振荡器的时间,使两端时钟时间达到同步;

2) 高频信号由接收端的频率振荡器产生,经过相位噪声补偿系统和波分复用装置进入光纤信道;接收端借助高速光电探测器进行探测和解调,得到的相位锁定在发射端原子钟的频率信号上作为伺服时钟振荡器的参考信号,从而实现两端时钟本振频率的同步。

2.2 光纤时频同步技术的特点及优势

光纤时频同步过程在封闭环境下进行,由于传递介质损耗低、抗电磁干扰强,可以传递高精度时频信息。在图 1 所示清华大学使用 83 km 光纤的实验中,采取幅度调制为 9.1 GHz 的微波频率信号进行传输,稳定度达到 $7 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ 、 $4.5 \times 10^{-19} \text{ d}^{-1}$,通过波分复用技术传递时间的同步不确定度也达到了 50 ps,充分证明了该技术的优越性。

我国广泛应用且精度较高的授时方法主要有长波和卫星授时。长波授时是较早发展的授时技术之一,在罗兰 C 系统建立后被广泛应用。其优点是传输距离远、时延稳定,目前主要应用于国民生活和军用方面。卫星双向时间传递(TWSTFT)技术通过

两条对应的传递路径抵消部分误差项,将时频传输的精度和范围提升到较高水平,得到了广泛的应用。缺点是难以实现高精度频率的同步及比对,且信号易受干扰。而具备大范围应用条件的电缆传输、短波授时等技术精度较低,自由空间微波链路、激光时间传递等方法的效果受到环境和距离限制,存在明显的不足。

对比分析得到,光纤时频同步技术有 3 个特点^[13]:1)极高的时间传递精度、频率传输稳定度。通过光纤信道传递的频率,适当处理后能达到 10^{-18} d^{-1} 的稳定度;2)分布式测量与控制。基于光纤网络的频率传输系统具备非常好的抗干扰性能,能够较好地隐蔽时频中心处理站和远端天线,应对更复杂的测控任务^[14];3)应用潜力巨大。大量实验表明在几公里到上千公里的光纤链路上,其都能达到较高精度的时间和频率同步,且能传输高质量的探测、控制信号,具有良好的推广前景。将各类型中具有代表性的三种方法所能达到的指标进行对比,如表 1 所示,可以明显看出光纤时频同步技术的优越性能,其中 DWDM 表示密集波分复用。

表 1 典型方法的技术特征

Table 1 Technical characteristics of typical methods

Technical types	Timing methods	Time accuracy	Frequency stability	Scope of action	Advantages and disadvantages
Radio time service	long wave time service	$\sim 1 \mu\text{s}$	$1 \times 10^{-12} \text{ d}^{-1}$	3000 km(territory, territorial sea)	wide application scope high reliability general accuracy
Satellite timing	TWSTFT	$\sim 1 \text{ ns}$	$1 \times 10^{-14} \text{ d}^{-1}$	communication satellite coverage	high accuracy good instantaneity easy to interfere
Optical fiber time-frequency synchronization	DWDM	up to 10 ps	$5 \times 10^{-18} \text{ d}^{-1}$	optical fiber range of action	high accuracy accuracy usually decreases with distance

2.3 光纤时频同步技术的发展历史

光纤时频同步技术随光纤通信的发展而发展。自 20 世纪 70 年代光纤损耗和半导体激光器性能取得重大突破以来,光纤通信进入了实用化时代。美国喷气实验室 JPL 最早根据美国宇航局 NASA 深空探测网 DSN 地面站的需求进行了光纤时频传递方法研究。90 年代光纤通信开始被视为现代通信的一种主要手段,美国国家标准技术局 NIST 和实验天体物理学联合研究所 JILA 迅速在稳定频率传输方面占据了技术领先地位^[15-16]。为了实现能满足光钟稳定度要求的高精度频率比对系统,双方于

2003 年搭建光纤通路,授时精度达到 0.1 ns 水平,超越了卫星 TWSTFT 法的技术指标。

除美国外,德国联邦物理技术研究院 PTB、英国国家物理实验室 NPL、法国巴黎天文台时间频率标准实验室 LNE-SYRTE、波兰 AGH 大学、日本国家信息与通信研究院 NICT 等科研机构也在光纤时频同步的理论和应用方面取得了丰硕成果^[17-19]。21 世纪初以 1015 Hz 左右光频段辐射为基础的光钟^[19]频率稳定度大幅上升,如何无损传输高稳定性的光频和射频信号成为一个主要问题。为此,各研究小组提出了微波频率传输、光学频率传输^[18]和光

梳信号频率传输等方案^[19],能达到 10^{-15} s^{-1} 的频率稳定度。在时间传递与同步方面,国外大都采用双向比对法和环回法,短距离内能达到 100 ps 的精度。

国内方面,2003 年前后,国家授时中心通过光纤传递时间信息^[20],分析了利用光纤信道或者扩频技术实现 ns 级时间同步精度的可能性,论证了单纤闭环时间频率信号同时传输方案,并于 2010 年在 100 km 光纤上完成了实验验证。2011 年,上海交通大学通过光电延迟锁定环实现了 50 km 光纤链路上 10 GHz 微波频率的相位补偿传输,达到了时延抖动亚 ps 级的精度^[21]。北京大学对基于锁模激光器的稳定光频率传输展开了深入研究,通过直接调节锁模激光器光脉冲相位的方式补偿光纤链路的相位抖动,于 2012 年在 22 km 传输链路上达到了 $3.7 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ 的稳定度^[22]。清华大学在国际联合的平方公里阵列射电望远镜 SKA 项目中发挥了重要作用,所提出的光纤星型补偿系统后置传输方法被列为参考频率同步的首选方案^[3]。此外还有部分地方单位在该技术的工程化应用方面取得了进展,其中四川泰富地面北斗有限公司在 2013 年利用光纤时延伺服锁定和精确控制技术进行实用化测试,达到了 2000 km 光纤两端主从站时差 4.26 ns,频偏 $1.16 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ 的指标^[23]。

目前已有的光纤时频同步方案虽然能在局部范围内取得优异效果,但少有大范围组网的范例^[8]。通信网络中广泛使用的定时协议只能达到 μs 级的同步精度,很难在短时间内满足高精度授时的要求。所以尽管光纤时频同步技术在理论研究及系统方案方面都取得了令人满意的成绩,但离真正实用化还有一定距离,需要进一步创新和突破。

3 光纤时频同步的关键技术及研究现状

分别对光纤时间同步、频率同步、时频同时传输与同步的关键技术特点与发展现状进行了总结与分析。

3.1 光纤时间同步技术

时间同步是定位与导航的基础,目前大多数导航参数是通过时间差推导获得的,因为定位精度与时间同步精度成正比,所以时间的精确程度将影响 PNT 的整体性能^[4]。近年来光纤时间同步技术的研究主要集中于三种方法:1)基于同步数字体系(SDH)的时间同步;2)基于仿 TWSTFT 的双向时间同步;3)基于 DWDM 技术的时间同步^[24]。

3.1.1 基于 SDH 的时间同步

SDH 在频率同步和时分复用的基础上完成信

息传递,主要包括业务传输和开销字节传输,利用光缆网络实现网元设备互联。基于 SDH 的时间同步技术主要原理是利用时钟恢复技术复现上级或者同级时钟的频率信号,然后弥补时钟相位差以达到时间同步。最早由日本 Kihara 等^[25]在 2001 年提出,在 175 km 的 2.488 Gbit/s 的 SDH 网络上实现了两台铯钟的双向时间传递,最终与 GPS 共视的测量结果吻合程度好于 32 ns,频率稳定度为 10^{-12} s^{-1} 。目前主要有两种实现形式:1)通过网络自上而下直接传递时标信号,各时钟直接或间接与主站时钟保持一致;2)将包含时间信息的报文在各网元之间传递,根据报文中的时间戳调整本地晶振。

由于该技术可在现有商用网络上完成,无需另外铺设专用光纤链路,所以相关研究主要集中于现实应用。2010 年,瑞典 Ebenhag 等^[26]完成了 560 km 长光纤 SDH 网同步实验,其时间信息与 GPS 载波相位时间传递信息在几个月内吻合程度好于 1 ns。国内研究以信息产业部电信研究院和中国科学院国家授时中心为代表^[27],在 2005 年利用 SDH 的 2 Mbit 支路进行了时间传输实验,时间同步不确定度在 $\pm 5 \mu\text{s}$ 左右,可满足大多民用需求,网络组成如图 2 所示^[28]。其中 PPS 表示秒脉冲(pulse per second),E1 表示传递路径。

SDH 网络传递时间的主要干扰是双向信号路由不确定,导致双向时延可能不对等^[15]。目前对 SDH 时间同步方法研究较为深入的日本 NTT 公司的光网络实验室,在 SDH 网络传递时间实验中充分利用了 VC-3 虚容器的透明性^[27],但该技术现有条件下所能够达到的较高精度,也只得将相邻两个节点间的时差控制在亚 μs 量级。

3.1.2 基于伪随机噪声码的双向时间同步

参考卫星 TWSTFT 法原理,德国 PTB 在 2009 年提出了基于伪随机噪声码的双向时间同步技术^[29],通过光幅度调制的方式实现双向码分多址(CDMA)时差测量。2012 年 PTB 借助卫星双向时间比对调制解调器 SATRE 设备^[30],在 73 km 的单根光纤内采用扩频编码与解码技术,实现了单波长传递;随后巴黎天文台在 540 km 链路上进行类似的实验,达到了时间偏差 20 ps(平滑时间为 100~105 s)的精度^[31]。研究表明,由于光纤链路点对点封闭的特点,复杂的解调器并不是完成传递的必备条件。上海交通大学通过改造后的 IRIG-B 协议编码传输时间信号,低成本地实现了 100 km 光纤链路标准差小于 27 ps 的指标,工作过程如图 3 所

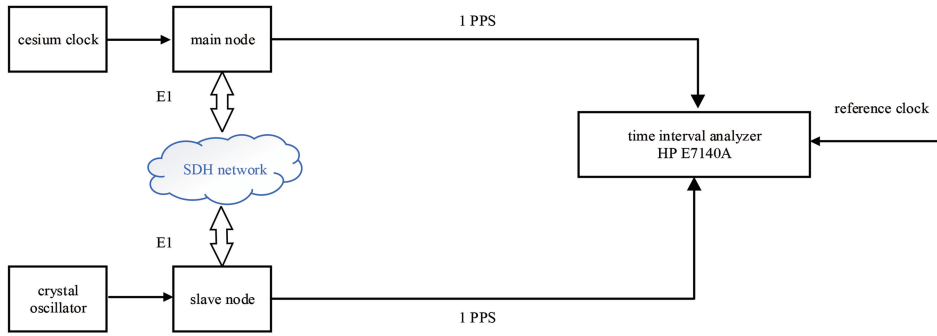


图 2 SDH 网络时间传递环境实验示意图^[28]

Fig. 2 Time transfer environment experiment schematic of SDH network^[28]

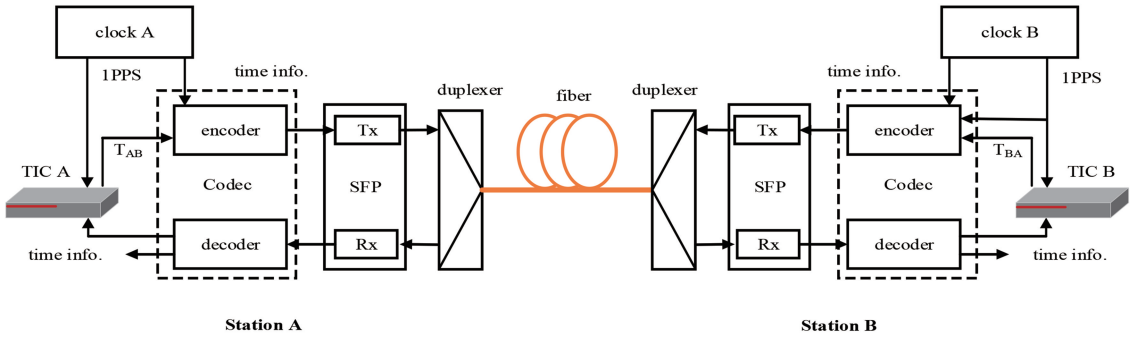


图 3 基于伪随机噪声码的双向时间传递与同步^[32]

Fig. 3 Bidirectional time transfer principle based on pseudo-random noise code^[32]

示^[32]。其中 TIC 表示时间间隔计数器, Tx 表示发送端, Rx 表示接收端。

该方法不需要考虑卫星多径效应、电离层扰动等因素影响,同时保留了伪随机噪声码的弱互相关和强自相关特性,避免了色散引起的双向信号延迟的不一致^[33]。但同时也存在几个问题,例如由于在两个站中间使用的激光器的波长不同和偏振导致的不对称传输路径,增加的光学设备对环境变化的敏感性^[8]。目前主要采用伪随机噪声码相位测量结果,很少利用伪随机噪声码调制的载波相位测量值,在精度方面还有待提升^[34]。

3.1.3 基于 DWDM 的时间同步

基于 DWDM 的时间同步方案通过链路对称等方式计算传输时延并补偿,使两端达到时间信息的高度同步。适用于远距离、高精度场景,是实现光纤时间同步常见的选择,目前主要通过环回法和双向对比法两种方式完成。

3.1.3.1 环回法

环回法是完成主从站间时间传递的主要方法,通过环回的方式把从站时刻与主站时刻的误差维持在尽量小的范围,因此对于主站时钟的精度有很高要求,从站则不需要配备高精度时钟。其原理框图

如图 4 所示^[35]。

图 4 中 T_{AEO} 为中心站光电延时,相应的光电延时为 T_{AOE} , T_{ASO} 为中心站发送光处理延时, T_{BSO} 为终端站发送光处理延时, T_{BEO} 为终端站光电延时,相应的光电延时为 T_{BOE} , T_{BRO} 为终端站光路接收延时, T_{ARO} 为中心站接收光路延时, T_{AB} 为中心站到终端站光纤传输时延,相应的终端站到中心站光纤传输时延为 T_{BA} 。则主站时间间隔计数器所测时间为

$$T = T_{AEO} + T_{ASO} + T_{ARO} + T_{AOE} + T_{AB} + T_{BA} + T_{BSO} + T_{BEO} + T_{BOE} + T_{BRO} \quad (1)$$

因为往返信号在同一根光纤传输,(1)式中 $T_{AB} = T_{BA}$,当 A、B 两端所使用光电转换设备相同时,可以认为 $T_{AEO} = T_{BEO}$,其余几项同理。因此环路时延 τ 等于时间间隔计数器的一半为

$$\tau = T/2 \quad (2)$$

(2)式仅在理论上成立,实验与假设不同的地方至少包括:光电转换器等解调设备存在误差,不同波长传输的时间不同,时延不能完全精确补偿等,尤其是当往返波长间隔较大时,相对误差会随光纤的长度而积累,所以环回法在长距离应用时性能受限,也不具备守时功能^[23]。

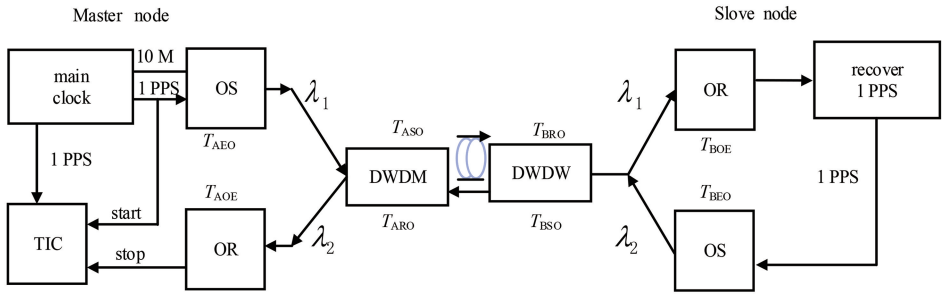


图4 基于DWDM技术的环回法原理框图^[35]

Fig. 4 Principle block diagram of round-trip based on DWDM technology^[35]

3.1.3.2 双向比对法

双向比对法在环回法的基础上为从站配备了与主站一致的时钟,通过两站同时向对方发出时间信号的方式,可以解决环回法中往返时延不对等的问题。即将两个授时站A和B同时向对端发送时间

的一刻作为各自时间间隔计数器的“开始”信号,接收到对面时间信息的一刻作为本地时间间隔计数器的“停止”信号,通过起始信号之差计算出两地钟差,从而以一端钟源为基准调整另一地钟源,使两地钟源同步。其原理如图5所示^[24]。

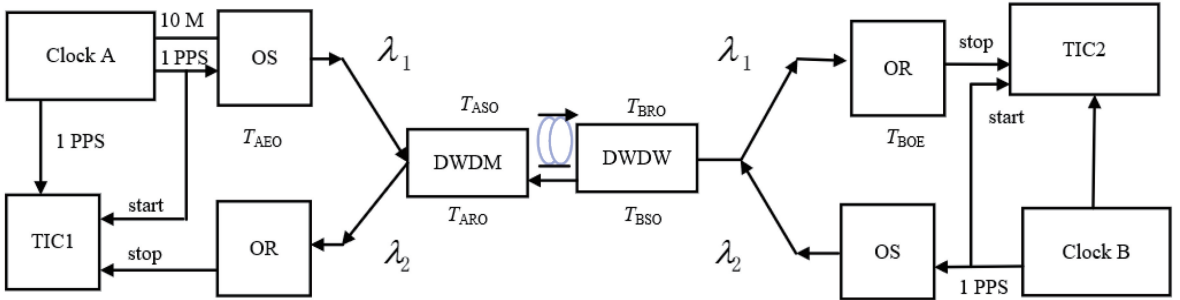


图5 基于DWDM技术的双向时间比对法原理框图^[24]

Fig. 5 Principle block diagram of bidirectional time comparison method based on DWDM technology^[24]

其中,A地时差 T_1 和B地时差 T_2 分别为

$$T_1 = T_{BEO} + T_{BSO} + T_{BA} + T_{ARO} + T_{AOE} + (T_A - T_B), \quad (3)$$

$$T_2 = T_{AEO} + T_{ASO} + T_{AB} + T_{BRO} + T_{BOE} - (T_A - T_B). \quad (4)$$

两地时钟差为

$$\Delta T = T_A - T_B = \frac{1}{2}(T_1 - T_2). \quad (5)$$

根据(5)式,两地时钟差是两个计数器测量值差值的一半,利用这种单向延迟补偿终端站可以使1 PPS的终端站和1 PPS的中心站同步。在向下级用户端传递时间信息时,由于缺少对应精度的时钟,难以形成双向时间比对法的条件,所以该方法目前主要应用于高稳定钟源间的时间比对与传递。环回法中存在的环路带宽和信噪比累积限制的问题在双向比对中会得到有效抑制,两端时间误差通常能达到亚 ns 级,在部分情况下可完成守时任务。但对该方法引入的终端站时频信号的高精度重生问题,还有待进行更加深入的研究^[36]。

3.2 光纤频率同步技术

频率同步能够达到极高的稳定度,被广泛应用于守时实验室间频率比对,精密测量领域各物理量的量值传递、溯源与比对。根据传输频率的不同可以分为微波频率传输、光频补偿传输、光梳信号传输三种同步技术^[8]。

3.2.1 微波频率传输同步

微波频率传输同步利用连续波激光作为载波,将微波频率信号以幅度调制的方式加载到激光载波上进行传输,对相位噪声进行补偿,从而达到两端频率之间的高度同步。法国 LNE-SYRTE 实验室在两段 43 km 光纤链路上进行的微波频率同步实验是较为成功的通过光程控制进行噪声补偿的方法^[37-41]。在发射端利用温度控制一段预置光纤长度来补偿传输链路引入的慢速噪声,借助压电陶瓷对另一段预置光纤进行拉伸来补偿传输链路引入的快速噪声,实验的频率传输稳定度达到 $1.3 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$,超过 $1 \times 10^{-18} \text{ d}^{-1}$,实验过程如图6所示。其中PLL为锁相环,SAW为声表面波滤波器,

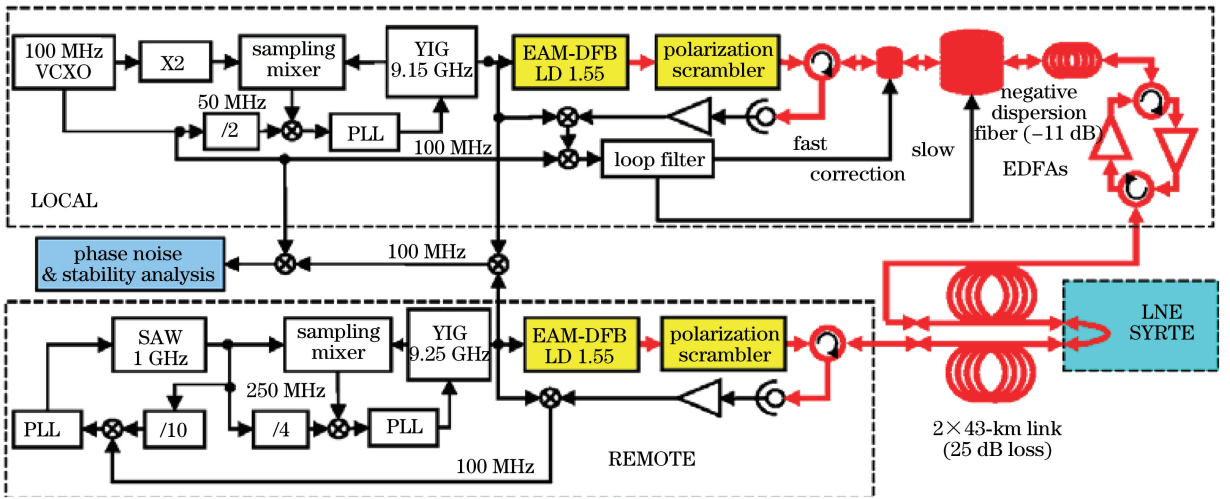


图 6 法国 LNE-SYRTE 光纤频率同步实验过程示意图^[41]

Fig. 6 Frequency synchronization experimental process diagram of LNE-SYRTE fiber in France^[41]

EDFAs 为多个掺铒光纤放大器。

基于相位控制的微波频率传输技术相位补偿范围大,可以对带宽(受光纤传输时延限制)以内的扰动进行有效补偿,频率传输稳定度较高。清华大学的实验方案是这一技术的典型应用。此外还在日本 NICT 的实验中经历了实地测试,实验采用了发射端主动补偿相位噪声的方法,在超过百 km 的城市光纤通信网络上达到了 $8 \times 10^{-15}/s$, $6 \times 10^{-18}/(105 s)$ 的频率传输稳定度^[42-43],充分表明了该技术的实际应用潜力。

光路控制微波频率传输不会干扰时频信号,补偿效果与传输信号的频率无关,但预设光纤的长度限制了传输距离,导致在严重外部干扰的情况下补偿效果不佳,主要应用于天文观测中多载频信号稳相回传。相位控制微波频率传输只对单一频率信号相位噪声进行补偿,频率稳定度高,可实现长时间连续同步,实用性较强。不过普遍需要精确、实时提取链路时延抖动引入的相位噪声,补偿的动态范围不足,存在一定局限。所以近年来被动相位噪声补偿

方案得到了广泛的关注和研究,使用探测信号引入链路时延抖动产生的相位,将其与被传递信号直接混频实现对链路相位噪声的补偿,可以实现快速、无限动态范围的相位噪声补偿^[44]。

3.2.2 光学频率传输同步

微波信号频率很高,但尚不能达到光学频率信号的频段,因此在鉴相精度相同时,直接使用连续波激光在光纤中传输光学频率信号可获得更高的稳定度,被称为光学频率传输同步的补偿,原理与微波频率传输类似。信号经过往传输后,在本地发射端检测由光纤引入的相位噪声,然后通过激光相位补偿装置补偿^[2]。区别在于光学频率对环境温度和外部振动敏感,受到干扰时光路会以共模相位噪声的形式改变,并叠加在光纤传输路径上。针对此问题,华东师范大学的马龙生教授^[45]在 1994 年提出主动相位补偿方法来降低噪声的影响,其核心是利用多普勒噪声抑制技术压制相位噪声,原理如图 7 所示^[46]。其中 PD 为光电探测器,AOM 为声光调制器,VCO 为压控振荡器。

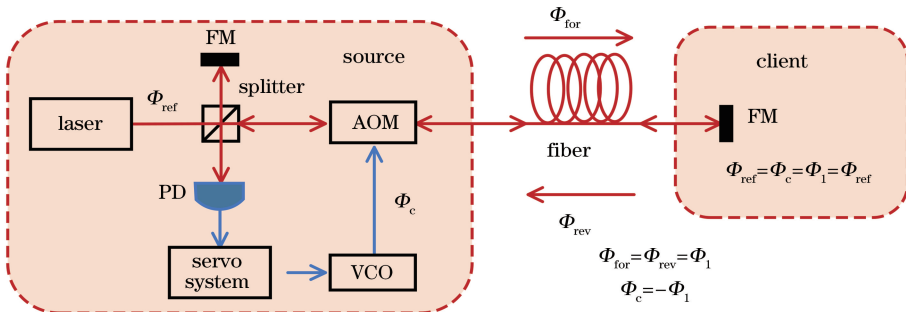


图 7 多普勒噪声抑制技术原理^[46]

Fig. 7 Principle of Doppler noise suppression technology^[46]

由于外界干扰产生的相位噪声不受传输方向的影响,所以图7中正向传输和反向传输的相位变化一致,即 $\Phi_{\text{for}} = \Phi_{\text{rev}} = \Phi_1$,总相位变化为 $2\Phi_1$,通过激光拍频探测出激光往返两次通过光纤的相位变化即可得出单次通过光纤引入的相位噪声 Φ_1 ,然后通过伺服控制产生一个相位 $\Phi_c = \Phi_1$,用相位补偿器对激光相位进行动态补偿。实际的计算中存在激光源相位的变化,这部分误差可通过闭环锁定等方式补偿^[1]。

自主相位补偿方法取得成效之后,光纤光学频率传输大都以该方法为参考^[47-49]。比较成功的是德国PTB研究所在920 km光纤链路上进行的远距离光频原子钟比对实验^[47],在与马普研究所MPQ之间的两条比对链路上,通过相位调制光频信号以实现预先补偿的方式,光频原子钟信号比对不确定度达到了 10^{-19} 量级^[5],这种高质量的频率传输对于光频原子钟信号比对意义重大^[48]。国内主要有中科院国家授时中心针对长距离和多用户网络化光频传输开展初步研究,在2015年用线绕光纤进行的光频传输是国内在该领域首次实现的100 km级传输实验^[49]。

PTB研究所通过920 km的传输实验充分证明了光频的高稳定性,这意味着其在超远距离传输中有独有的优势。但其相位补偿需要配备窄线宽激光

系统、飞秒光梳系统等设备,成本高且操作复杂,主要应用于对同步精度要求较高的基础科学研究。

3.2.3 光梳信号传输同步

光学频率梳(光梳)对实现微波频率与光学频率的高精度连接起着关键作用,具有将微波与光频优势相结合潜力^[50]。在时间域上,飞秒光梳信号表现为等间隔的飞秒激光脉冲,在频率域上则表现为等频率间隔的激光频率梳,能够被锁定在微波频率标准或者光学频率标准上。所以光梳通过噪声补偿后可以转换为微波或光学频率信号^[2],为频率传输提供了新的可能。

由于能够获得两种信号,光纤光梳信号传输方案比较灵活,包括美国NIST和JILA、英国NPL在内的小组均提出过不同的方案。国内北京大学针对常规光电探测器和混频器引入额外噪声问题,使用了一种新型光纤Sagnac环状光电相位探测器进行光电转换,具有较强的代表性。该方案如图8所示,在单模和色散光纤组成的10 km链路上,部分参考图6方案对噪声进行补偿,图中OC为光载波,AMP为放大器,PZT为压电换能器,OM-PD表示光电探测器,PID代表比例-积分-微分过程。该方案最终实现了 $2 \times 10^{-15}/\text{s}$ 和 $8.8 \times 10^{-19}/(4000 \text{ s})$ 的传输稳定度^[9]。

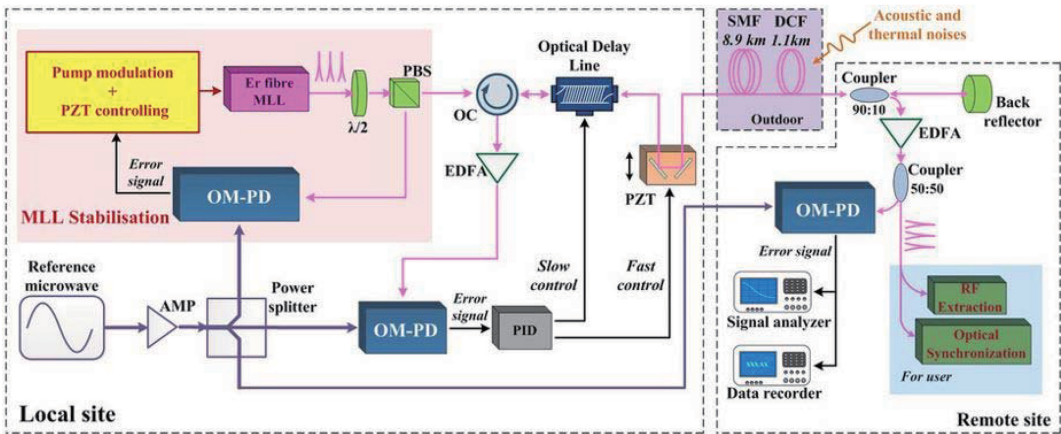


图8 北京大学光梳光脉冲信号传输同步方案示意图^[9]

Fig. 8 Schematic of optical comb pulse signal transmission synchronization scheme in Peking University^[9]

光梳信号的最大优势是拥有同时传输多个微波与频率信号的能力,且具备将两种信号互相转换的可能。但所需的设备较为复杂,需要额外补偿光纤色散效应以避免激光脉冲的展宽,传输稳定度通常略低于光频^[8],还有待于在远距离传输中进行比较全面的测试。作为一个新兴研究领域,光梳技术存在广阔的发展空间和研究价值^[51-54]。

3.3 时间频率同时传输与同步

单一的时间或者频率同步一般在短期内可以达到预期效果,比如卫星调时采取时间同步、频率同步被应用于异地原子钟比对。但是工程应用中往往将1 PPS、时间信号TOD与10 MHz的频率信息同时传递,其中TOD提供时刻值,1 PPS信号为时间间隔,10 MHz决定以固定的频率持续向下级发播。

由于长期使用单一技术会导致时间偏差线性积累等问题,所以不得不频繁进行校准,因此甚长基线干涉测量、精密时间同步协议 PTP 和卫星导航等都对时频同步提出了日益严格的要求^[27]。时间和频率的传输与同步互相促进、互为参考,时频同传是该技术领域的发展趋势。

时频同传系统中,两种信号的传输通常有两种选择:1)将时间与频率信号调制到同一个信道中传输;2)通过波分复用技术将时间、频率信号分开至两个不同信道中传递^[55]。基于这两种方式展开的方案都比较广泛。2013年,Sliwczynski等^[56]将时间信号嵌入到频率信号中,再借助双向波分复用传输实现了420 km时间和频率的同时传递,但这种方法的双向链路不完全对等,需要对相应的噪声进行标定。为了解决这一问题,文献^[57]将时间和频率信号加载到不同波长中进行同时传输,文献^[58]将携带时间信号的射频信号和频率信号加载到同一波长上进行传输,然后均在远端将信号返回。两种不同类型的方案中,往返光信号的波长都是相同的,但后向散射噪声的干扰比较严重。

国内近年来关于时频同传技术的研究呈上升趋势,包括国家授时中心、上海交通大学、清华大学在内的多家单位都取得了一定进展。上海交通大学将时分复用技术应用于时频同传,并在2015年创新性地提出了一种基于双向时分复用技术的单纤单波时间传递的方法,不仅建立了光纤时分复用传递的温度模型,还提出了高对称、低噪声的单向放大方案,实现了超远距离的传输^[59]。

4 光纤时频同步技术发展方向

光纤时间频率同步在实验室条件下达到的指标已经能够满足各类应用需求,如何在现有精度基础上提升可用性是关键所在。主要思路是通过高稳频率源、网络化传递等技术保证时频信号的远距离与分布式传输,为地基时频网络的建设提供强有力的技术支持。

4.1 高稳频率源

高稳定频率信号产生技术是时频产生、传递、测量等所有过程的必要前提,只有具备高频、高稳定度的频率信号,才可能在千公里距离上实现时频信息的高质量传输。目前该技术的主要研究方向有原子频标和频率合成等方面^[2,13,45,49]。

民用的主要方式是通过石英晶振频标与微波振荡器产生的低相位噪声本振信号频率,仅有几十

MHz,若要通过倍频提高频率则会干扰相位噪声,不能满足高质量时频传输的需求。因此需要原子频标减小跃迁谱线线宽或提高信噪比,或者提高跃迁谱线中心频率,即将微波频段提升至光频。尽管原子频标指标优越,但一般也只能输出10 MHz的频率信号。而新型光电振荡器(OEO)的光学谐振腔相比于电介质腔体拥有更高的频段,是产生高频、低相位噪声信号的极佳选择,保证了时频远距离传输。

用户端往往对连续或离散频率有多样化的需求,将高稳定度参考频率源转换成对应频率信号通常采用的是频率合成技术,输出的信号与基准频率具有同样的稳定度和准确度^[60]。微波频率合成技术是常用方式,但随着光梳的出现与发展,光学频率合成技术也已成型。目前的光学频率合成能够实现超高精度的光学频率测量、合成与转换,将超稳频激光器提供的高精度光学频率标准传递到微波波段,从而提供比微波原子钟精度更高的时间频率标准,这是决定时频同步质量的重要因素^[61]。

4.2 网络化同步技术

光纤链路的封闭性和点对点传输减少了外界干扰,但随着一个区域中的多个用户有着时频分配需求的情况越来越普遍,点对点传输可能导致终端站数量不可控、系统复杂度大幅度提高^[62]。光纤时频网络化同步,既可以实现点对多点传输,又可以结合不同的结构完成组网以建立稳定可靠的时频传递网络,因此成为光纤时频同步技术取得大范围推广的关键。但难点在于需要针对不同拓扑结构的差异进行组网。常见的网络化拓扑结构包括线形结构、多点下载结构和环形结构等,可单独应用或组合形成专用网络,图9展示了线形与星形网络先形成树形网,再综合为复杂网状拓扑的过程。

清华大学是国内较早开展光纤网络授时的单位,重点针对传统点对点传输、主动补偿的局限性,实现了任意位置多点下载的高精度时频网络化同步^[3]。陆军工程大学以最常见的环形网拓扑结构为研究对象,对链路上色散带来的不对称性偏差进行校消,在100 km光网络内终端站能够在任意位置接入,获取了峰峰值低于400 ps的授时精度^[57]。其余的拓扑结构通常用来应对具体需求,例如文献^[63]主要利用星形网完成了多点频率传递,文献^[64]在树形网中进行时间传递的同时对两端时差进行了测量。但大多是基于单一的物理层编码协议,对商用光纤网络的传输效果尚未得到充分测试。

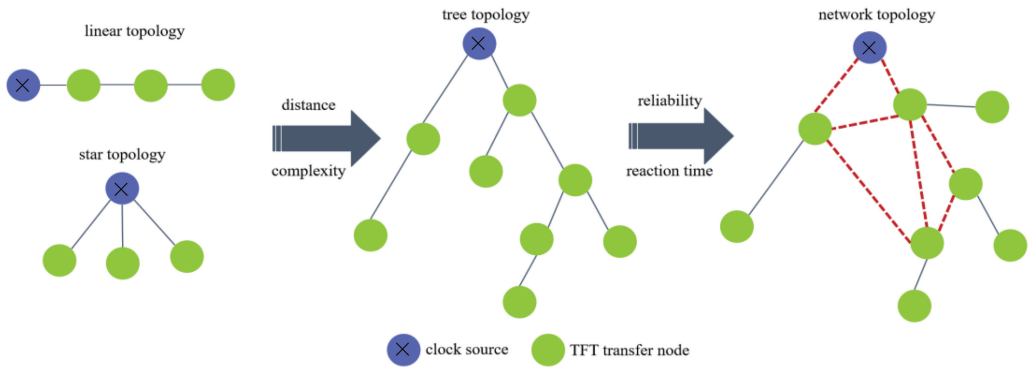


图9 光纤网络传输的多种拓扑结构

Fig. 9 Multiple topologies for optical fiber network transmission

Whiterabbit(WR)时钟同步技术可应用标准以太网协议,是一种综合了同步以太网、精密定时协议IEEE 1588 和数字相位测量技术的分布式同步授时技术。能够在 10 km 内使千余个节点达到亚 ns 精度的时钟同步,并且不需要占用额外网络带宽,在对多节点有需求的局部范围内极为重要^[65]。但是现在的 WR 技术基本都在 10 km 以内应用,如何扩大应用范围是需要重点研究的。

4.3 地基时频网络建设

目前我国的授时服务需要尽快摆脱对 GPS 的高度依赖。2010 年 1 月 13 日下午,美国在未告知的情况下对 GPS 的授时系统进行维护,导致中国电信大部分省份的 CDMA 系统发生告警^[24]。类似的不安定因素在一定程度上促使我国加快了北斗卫星导航系统的建设,提前两年实现了“北斗三号”组网,但其信号脆弱的根本性问题无法回避,因此我国自 2013 年起加快了对独立授时体系的研究。

围绕地基授时系统建设需求而进行的研究以长波为主,光纤授时研究也在这一领域呈现出了明显的上升趋势。由于良好的稳定性和安全性,同时拥有与其他方法对接的潜力,光纤授时被认为是地基时频网络建设的一种重要手段,主要在两个方面发挥关键作用:1)与长波授时形成有线-无线组合模式,通过优势互补形成独立自主、强健壮性、高精度的时频体系;2)作为长波台链拉远的主要方式,拓展台站的灵活性,既是主站的备份手段之一,又能达到隐蔽、抗摧毁的目的。高精度地基授时系统有望与卫星导航系统授时形成优势互补,构建多层次、立体交叉、安全可靠的国家级授时体系。

我国长波授时台和北斗卫星导航系统的建设均经历了范围性方案、方案验证、完整建设的“多步走”过程^[11],对于地基时频网络的研究预计也将自范围

性系统方案展开,逐渐从卫星授时的补充方法发展为军事力量的主要手段,再推广到国民应用。其中关于无线-有线授时方法对接、局域时间基准网建设等方面的研究有望取得一定进展,这也对光纤时频同步技术的发展与应用提出了更高要求。

5 光纤授时技术实用化问题分析

虽然光纤信道内部的稳定性优异,但通常由专用光纤传输,其远距离与网络化传递在现有商用网络中可行性急需提高,这是目前光纤授时技术需要迫切解决的问题^[66]。光纤的传递距离延长时,因外界因素导致的长度变化问题会逐渐叠加,频率也会随距离的增加而降质。因此光纤时频同步取得实用化的问题是在商用光纤中的传递能达到怎样的效果?能否在现有光纤网络中便捷地实现超远距离传输?

限制光纤时频超远距离传递的核心问题是时延测量。在相同的实验设备下,光纤受到的干扰越多,时延测量越难,传递精度就越低。远距离传递的噪声主要包括温度、色散、异地 Sagnac 效应等因素引起的光纤长度变化、时延不对称等问题。当距离达到几百乃至数千公里时,路径损耗及光纤噪声等问题凸显,信噪比严重下降。导致实验室方案并不一定能在远距离的实地传输中发挥优势,反而可能在实用性和精度方面落后于现有的大范围授时方法。

通过增加双向光纤放大器及中继站的方式应对远距离传输问题是一种普遍思路^[10],即使用光学放大器对传输信号进行中继以补偿信号衰减。但是在光纤传输中补偿带宽与链路长度呈负相关,导致远距离条件下噪声预补偿效果受限,这决定了仅通过级联多个掺铒光纤放大器(EDFA)来延长距离的方式不适合光纤时频传输,至少还需要与级联对应的

噪声补偿方式相配合。2015年德国 Chiodo 等^[67]进行的光频传递测试中通过双向布利渊放大器补偿光功率衰减。2013年法国 Droste 等^[68]开展的实验中采取四级级联,基本实现了超过 1000 km 距离的高精度时频信息传递。但是相关方案在脱离专用网络后的性能急需进一步测试,这也是光纤时频同步技术取得广泛应用的关键所在。

6 结 论

独立自主的完备授时体系是国家的战略资源^[69],目前国际形势和综合 PNT 体系建设等多方面的需求在呼唤新的时频同步技术。光纤时间频率同步技术经过约 40 年的积累,相关的研究工作依然十分活跃,技术创新持续不断,同时需要克服的技术难度依然很大,现有技术水平和应用范围距其可开发程度还有一定的距离,但已经展现了应用于时频体系的潜力与可行性。除用于尖端行业的高精度授时以外,光纤时频同步技术还可以在国民生活、国防建设等方面发挥重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Uzan J P. The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75(2): 403-455.
- [2] Liu J. Experimental study on optical frequency transfer via optical fibers[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 5.
刘杰. 光纤光学频率传递研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 5.
- [3] Bai Y. Fiber-based time and frequency synchronization network and aerospace measurement application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015: 16.
白钰. 光纤时频网络化精密同步及航天测量应用[D]. 北京: 清华大学, 2015: 16.
- [4] Miao J. Time and frequency synchronization in free space[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015: 4.
苗菁. 自由空间时间频率同步[D]. 北京: 清华大学, 2015: 4.
- [5] Yang Y X. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 505-510.
杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术 [J]. *测绘学报*, 2016, 45(5): 505-510.
- [6] Liu C B. PNT service under GPS constraints [J]. *Satellite Application*, 2013(4): 44-49.

- 刘春保. GPS 受限条件下的 PNT 服务 [J]. *卫星应用*, 2013(4): 44-49.
- [7] Ge Y T, Xue L L, Li J M. Conceptual analysis of time warfare in the US Air Force [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2018(5): 11-14.
葛悦涛, 薛连莉, 李婕敏. 美国空军授时战概念分析 [J]. *飞航导弹*, 2018(5): 11-14.
- [8] Zhu X. Fiber-based time and frequency synchronization network and application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016: 2.
朱玺. 光纤时间频率同步网络技术及应用[D]. 北京: 清华大学, 2016: 2.
- [9] Yuan Y B. The research on fiber-based time and frequency dissemination and synchronization technique[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017: 34.
袁一博. 光纤网络时间频率传输与同步技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017: 34.
- [10] He T, Chen G J, Ma J L. Overview of precise time and frequency transfer technology [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(5): 1-5.
何婷, 陈国军, 马嘉琳. 精密时频传递技术综述 [J]. *测绘通报*, 2018(5): 1-5.
- [11] Li X H, Dou Z, Zhao X H. Beijing time: BPL and BPM national time service systems [M]. Zhejiang: Zhejiang Education Publishing House, 2016: 98.
李孝辉, 窦忠, 赵晓辉. 北京时间: 长短波授时系统 [M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2016: 98.
- [12] Zhang D N, Yu Y H. Time synchronization technology of power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017: 56.
张道农, 于跃海. 电力系统时间同步技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 56.
- [13] Wu Z L. Research on stable frequency source and time & frequency transfer technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015: 11.
吴钟乐. 稳定频率源与时频传输技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015: 11.
- [14] Ge H W, Zhang Y X, Ma T. Performance evaluation of two-way pulse time transmission over optical fiber networks [J]. *Telecommunications for Electric Power System*, 2011, 32(10): 30-33.
葛红舞, 张宇新, 马涛. 利用光纤传递高精度时间的研究 [J]. *电力系统通信*, 2011, 32(10): 30-33.
- [15] Ye J, Peng J L, Jones R J, et al. Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network [J]. *Journal of the*

- Optical Society of America B, 2003, 20(7): 1459-1467.
- [16] Holman K W, Jones D J, Hudson D D, et al. Precise frequency transfer through a fiber network by use of 15- μm mode-locked sources [J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1554-1556.
- [17] Peik E, Sterr U. The development of accurate optical clocks [J]. PTB-Mitteilungen/Special Issue, 2009, 119(2): 25-32.
- [18] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place [J]. Science, 2012, 336(6080): 441-444.
- [19] Foreman S M, Holman K W, Hudson D D, et al. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks [J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(2): 021101.
- [20] Liang S Y, Ren Y. High precision time can be transmitted via optical fiber [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2004, 24(3): 24-26.
梁双有, 任燕. 利用光纤进行高精度时间传递[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(3): 24-26.
- [21] Zhang L M, Chang L, Dong Y, et al. Phase drift cancellation of remote radio frequency transfer using an optoelectronic delay-locked loop [J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 873-875.
- [22] Ning B, Du P, Hou D, et al. Phase fluctuation compensation for long-term transfer of stable radio frequency over fiber link [J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28447-28454.
- [23] Li Z W, Li Q, Meng Z C. "Loose Coupling" phase lock technique for master-slave synchronization [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(11): 2302-2306.
李忠文, 李琦, 孟志才. 主从同步"松耦合"锁相技术[J]. 电子学报, 2013, 41(11): 2302-2306.
- [24] Wu Y. Time transmission system of using be-contrast methods in optical fiber [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014: 11-13.
吴燕. 采用双向对比法的光纤时间传递系统[D]. 西安: 西安理工大学, 2014: 11-13.
- [25] Kihara M, Imaoka A, Imae M, et al. Two-way time transfer through 2.4 Gb/s optical SDH system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(3): 709-715.
- [26] Ebenhag S C, Hedekvist P O, Jarlemarck P, et al. Measurements and error sources in time transfer using asynchronous fiber network [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(7): 1918-1924.
- [27] Ding W. Time information transmission over optical fiber communication network [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010: 17.
丁玮. 光纤网络中时间信息的传递技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2010: 17.
- [28] Zhang D Y, Xie Y, Meng A L, et al. Transferring high accuracy standard time signal by SDH 2.048 Mbit/s branch [J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2006, 36(12): 17-20, 25.
张大元, 谢毅, 孟艾立, 等. 利用光纤数字同步传送网 2.048 Mbit/s 支路传送高精度标准时间信号[J]. 现代电信科技, 2006, 36(12): 17-20, 25.
- [29] Piester D, Fujieda M, Rost M, et al. Time transfer through optical fibers (TTTOF): first results of calibrated clock comparisons [EB/OL]. (2010-01-29). <https://arxiv.org/abs/1001.5406>.
- [30] Rost M, Piester D, Yang W, et al. Time transfer through optical fibres over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps [J]. Metrologia, 2012, 49(6): 772-778.
- [31] Lopez O, Kanj A, Pottier P E, et al. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network [J]. Applied Physics B, 2013, 110(1): 3-6.
- [32] Wu G L, Hu L, Zhang H, et al. High-precision two-way optic-fiber time transfer using an improved time code [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 114701.
- [33] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2006.
- [34] Yang W K. Research on key technologies of high precision inter-station two-way time and frequency transfer [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 18.
杨文可. 高精度站间双向时间频率传递关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 18.
- [35] Ding X Y, Zhang B F, Lu L, et al. High precision time transfer with optical fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(11): 110601.
丁小玉, 张宝富, 卢麟, 等. 高精度时间信号的光纤传递[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(11): 110601.
- [36] Li X Y, Zhu Y, Lu L, et al. Study on high precision disciplined time-frequency transferring experiments

- through optical fiber link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0506004.
- 李晓亚, 朱勇, 卢麟, 等. 高精度光纤时频伺服传递实验研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0506004.
- [37] Lopez O, Amy-Klein A, Lours M, et al. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link [J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(4): 723-727.
- [38] Lopez O, Daussy C, Chardonnet C, et al. Frequency dissemination with a 86-km optical fibre for fundamental tests of physics [J]. *Annales de Physique*, 2007, 32(2/3): 187-189.
- [39] Lopez O, Amy-Klein A, Daussy C, et al. 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer [J]. *The European Physical Journal D*, 2008, 48(1): 35-41.
- [40] Lopez O, Chanteau B, Roncin V, et al. Multiplexed optical link for ultra-stable frequency dissemination [C] // 2010 IEEE International Frequency Control Symposium, June 1-4, 2010, Newport Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2010: 639-641.
- [41] Lopez O, Kanj A, Pottie P E, et al. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network [J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(1): 3-6.
- [42] Jung K, Shin J, Kang J, et al. Frequency comb-based microwave transfer over fiber with 7×10^{-19} instability using fiber-loop optical-microwave phase detectors[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1577-1580.
- [43] Zhao J Y, Li D W, Ning B, et al. Highly-stable frequency transfer via fiber link with improved electrical error signal extraction and compensation scheme [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8829-8836.
- [44] Huang R. Study on fiber-optic frequency transfer based on passive phase noise compensation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016: 3-5.
- 黄睿. 基于被动相位噪声补偿的光纤频率传递技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016: 3-5.
- [45] Ma L S, Jungner P, Ye J, et al. Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(21): 1777-1779.
- [46] Cao Q. The study on optical frequency comparison and transfer via optical fibers [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 46.
- 曹群. 基于光纤的光学频率比对与传递研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 46.
- [47] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place [J]. *Science*, 2012, 336(6080): 441-444.
- [48] Schediwiy S W, Gozzard D, Baldwin K G H, et al. High-precision optical-frequency dissemination on branching optical-fiber networks [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2893-2896.
- [49] Liu J, Gao J, Xu G J, et al. Study of optical frequency transfer via fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 120602.
- 刘杰, 高静, 许冠军, 等. 基于光纤的光学频率传递研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 120602.
- [50] Lin G B. Research on optical frequency comb generation and application in WDM system [D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 18.
- 林贵斌. 光学频率梳生成及其在 WDM 系统中应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 18.
- [51] Liang Z H, Gao S C, Feng Y H, et al. Fast BOTDA sensing system based on coherent detecting digital optical frequency comb [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110602.
- 梁梓豪, 高社成, 冯元华, 等. 基于相干检测数字光频梳的快速 BOTDA 传感系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110602.
- [52] Lu Q, Shi L, Mao Q H. Research advances in dual-comb spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0400001.
- 路桥, 时雷, 毛庆和. 双光梳光谱技术研究进展 [J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0400001.
- [53] Yang L, Shen X L, Yang K W, et al. Analysis and realization of adaptive dual-comb spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0514002.
- 杨力, 沈旭玲, 杨康文, 等. 自适应双光梳光谱原理分析与实现 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0514002.
- [54] He M F, Chen K X, Hu Z F. Kerr optical frequency comb based on micro-ring resonator with thermal effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091901.
- 何明芳, 陈开鑫, 胡哲峰. 热效应作用下的微环克尔光频梳 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091901.
- [55] Cheng N, Chen W, Liu Q, et al. Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber [J]. *Chinese Journal of*

- Lasers, 2015, 42(7): 0705002.
- 程楠, 陈伟, 刘琴, 等. 光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0705002.
- [56] Śliwczyński L, Krehlik P, Czubla A, et al. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km [J]. Metrologia, 2013, 50(2): 133-145.
- [57] Wang B, Gao C, Chen W L, et al. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 556-560.
- [58] Yin F F, Wu Z L, Dai Y T, et al. Stable fiber-optic time transfer by active radio frequency phase locking [J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 3054-3057.
- [59] Wang L D, Wu G L, Shen J G, et al. Simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber link [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0705002.
王灵东, 吴龟灵, 沈建国, 等. 基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0705002.
- [60] Bai J X. Low noise frequency synthesis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995: 5.
白居易. 低噪声频率合成[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995: 5.
- [61] Zhao W Y. Key technique of the high-accuracy synthesizer and frequency transmit [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 15.
赵文宇. 高精度频率综合与传递关键技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 15.
- [62] Zhao X Y, Lu L, Wu C X, et al. Ring fiber network based multipoint time-frequency dissemination method with high precision[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0606002.
赵晓宇, 卢麟, 吴传信, 等. 基于光纤环形网的多点高精度时频传递方法[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0606002.
- [63] Zhu X, Wang B, Guo Y C, et al. Robust fiber-based frequency synchronization system immune to strong temperature fluctuation[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(1): 010605.
- [64] Zhu X, Wang B, Gao C, et al. Fiber-based multiple-access frequency synchronization via 1f-2f dissemination[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 090601.
- [65] Gong G H, Li H M. High-precision time distribution based on optical ethernet[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(6): 68-74.
龚光华, 李鸿明. 基于光纤以太网的高精度分布式授时技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 68-74.
- [66] Xiong X F, Yang F, Gui Y Z, et al. Time-frequency transfer performance of wavelength selection switch in optical fiber communication network[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0106003.
熊晓锋, 杨飞, 桂有珍, 等. 光纤通信网中波长选择开关的时频传递性能[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0106003.
- [67] Chiodo N, Quintin N, Stefani F, et al. Cascaded optical fiber link using the internet network for remote clocks comparison[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33927-33937.
- [68] Droste S, Ozimek F, Udem T, et al. Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(11): 110801.
- [69] Hua Y, Guo W, Yan B R, et al. Developing status of national time service architecture [J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(3): 193-201.
华宇, 郭伟, 燕保荣, 等. 我国授时服务体系发展现状分析[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 193-201.