



量子信息技术丛书

量子时频

LIANGZI SHIPIN CHUANDI JISHU

传递技术

陈星 编著

非外借



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

 量子信息技术丛书

量子时频传递技术

陈星 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书是一本介绍高精度频率时间同步原理、技术和应用的读物。全书分为6章:第1章是高精度时频传递技术概述;第2章是时频信号测试的基础理论;第3章是基于光纤网络的高精度时频传递相位抖动补偿技术;第4章是高精度时间频率传递的测量方法;第5章是高精度时频传递技术应用实例;第6章是高精度时频传递技术在其他领域中的应用。

本书可作为相关研究的教师和科研人员的参考书,也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

量子时频传递技术 / 陈星编著. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2021. 8

ISBN 978-7-5635-6470-5

I. ①量… II. ①陈… III. ①时间测量②频率计量 IV. ①TB939

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 157099 号

策划编辑:姚 顺 刘纳新 责任编辑:王小莹 封面设计:七星博纳

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码:100876

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:唐山玺诚印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:9.25

字 数:171 千字

版 次:2021 年 8 月第 1 版

印 次:2021 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6470-5

定 价:36.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

量子信息技术丛书

顾问委员会

喻松 王川 徐兵杰 张茹 焦荣珍

编委会

主任 任晓敏

委员 张勇 张一辰 曹聪

陈星 方萍 窦钊

总策划 姚顺

秘书长 刘纳新 马晓仟

前 言

时间频率标准的产生和传递对国民经济、国防建设和日常生活起着至关重要的作用。1955年第一台原子钟被发明，其超过了当时天文观测所能达到的水平。时间频率测量领域也因此发生了划时代的变化，由传统天文学的宏观领域过渡到现代量子物理学的微观领域。1967年10月，第13届国际计量会议通过了新的“秒”定义：“秒是 ^{133}Cs 原子基态的2个超精细能级间跃迁辐射振荡9 192 631 770个周期所持续的时间”。随着技术的不断进步，原子钟的种类迅速扩展到不同应用领域中的铷原子钟、铯原子钟、氢原子钟、CPT原子钟等，原子钟的性能指标被不断地刷新，精度平均每十年提高一个量级。通过提高本振频率可以有效地提高频率标准的稳定度。与已有的原子钟比较，光钟具有实现更高准确度的潜力，被公认为下一代时间频率基准。用光钟替代现行的铯原子喷泉钟来重新定义秒，可以显著提高卫星导航系统的定位精度。发展独立自主的高精度频率传递和时间同步系统，进而实现高精度时频同步网络化，是我国亟待解决的国家基础设施之一。

得益于赶上高精度时频传递的飞速发展，作者在高精度时频传递领域进行了近十年的研究，博士毕业后也一直从事高精度时频传递技术的研究工作，积累了一些经验，在此整理出来与大家分享。本书的撰写以作者发表的论文为主要内容，包括作者博士期间发表的论文和实验结果。在本书的撰写过程中，作者得到研究生张鹏瑶、曹义尧、陈祎楠、刘谦、牛嘉林、汪雨生、慈骋、郑俊鹤等在章节撰写和文字校准方面的支持和帮助，在此表示诚挚的感谢。作者希望本书对相关研究人员、教师、学生的工作和学习有参考作用。

在此感谢北京大学张志刚教授、郭弘教授、施可彬教授、陈景标教授等，在原子钟方面以及精密测量方面给予的帮助，在与他们一次次的交谈中，受益匪浅。

在此感谢北京邮电大学的罗斌副教授、喻松教授等在工作上的大力协助，也感谢北京大学的培养，以及北京邮电大学的同事们在工作上给予的支持，同时，感谢北京大学和北京邮电大学的学生们所做的大量工作。

目 录

第 1 章 高精度时频传递技术概述	1
1.1 高精度时频传递的概念	1
1.2 高精度时频传递技术的历史发展	3
1.3 基于光纤链路的高精度频率传递技术的主要类型	8
1.4 基于光纤链路的高精度时间同步技术的主要类型	14
1.5 高精度时频传递技术的应用	17
1.6 小结	19
本章参考文献	19
第 2 章 时频信号测试的基础理论	28
2.1 统计学基础	28
2.1.1 随机过程的定义	28
2.1.2 随机过程的统计特性	29
2.1.3 平稳随机过程	31
2.1.4 平稳随机过程的遍历性(各态历经性)	32
2.1.5 平稳随机过程的自相关函数	32
2.1.6 平稳随机过程的功率谱密度	33
2.2 频率稳定度的定义	34
2.3 时域频率稳定度的测试	35
2.3.1 阿仑方差	36
2.3.2 交叠阿仑方差	39
2.3.3 修正阿仑方差	39
2.3.4 阿仑方差与修正阿仑方差的关系	40

2.4 频域频率稳定度的测试	41
2.5 实验技术	44
2.5.1 相位噪声测量方法	44
2.5.2 锁相环	51
2.6 时间信号测试的基础理论	54
2.6.1 时间和时间标准	54
2.6.2 时间同步误差的测试	55
2.6.3 时间信号一致性的测试	56
2.6.4 时间信号周期抖动的测试	56
2.7 小结	57
本章参考文献	57
第3章 基于光纤网络的高精度时频传递相位抖动补偿技术	60
3.1 基于光纤的高精度频率传递相位抖动补偿技术	61
3.1.1 可调谐光纤延迟线法	62
3.1.2 电学相位补偿法	64
3.1.3 被动补偿法	67
3.1.4 主动补偿法	70
3.1.5 数字式前馈位相补偿法	75
3.2 基于光纤的高精度时间同步相位抖动补偿技术	76
3.2.1 电延迟线法	76
3.2.2 光延迟线法	78
3.2.3 光学采样法	79
3.3 多节点星状拓扑结构光纤时频传递系统	85
3.4 小结	86
本章参考文献	87
第4章 高精度时间频率传递的测量方法	91
4.1 自外差比对法	91
4.2 双系统法	92
4.3 搬运钟法	93

4.3.1 搬运钟法的基本原理	93
4.3.2 搬运钟法实例	94
4.4 小结	96
本章参考文献	96
第5章 高精度时频传递技术应用实例	98
5.1 基于光学频率梳的高精度频率传递	98
5.1.1 光学频率梳的基本概念及原理	99
5.1.2 光学频率梳与原子钟锁定的基本原理	104
5.1.3 同纤传递技术	107
5.1.4 百公里级高精度时频传递技术实例	110
5.2 基于光学频率梳的高精度时间同步技术	117
5.3 小结	121
本章参考文献	121
第6章 高精度时频传递技术在其他领域中的应用	124
6.1 在国防中的应用	124
6.2 在通信中的应用	127
6.3 基础研究	129
6.4 小结	132
本章参考文献	132
附录 缩略语	134

第 1 章

高精度时频传递技术概述

“时间”是什么？“时间”是怎么测量的？“时间”的长度是一致的吗？是不变的吗？为什么从 2008 年进入 2009 年的时候，全世界所有时钟都多加了 1 s？对于大部分人来说，时间是一种“想当然”的东西。试想，如果每天上下班，大家的“时间”都是不一致的，各走各的毫不相关，那基本的工作秩序就没有了！那么，到底是什么掌控着时间？时间有起点吗？会终结吗？日出而作，日落而息。春夏秋冬，又一春。这就是最原始的时间同步系统。从最初的日晷、滴漏到现代社会的原子钟，时间精度从 100 s 到现在的阿秒量级。随着社会生产力的不断发展，对时间同步精度的要求也越来越高，因此，“时间”在实际生活中是非常重要的。从金融交易到卫星导航，一个唯一而精确的时间系统对每个人来说都很重要。因此，独立自主的高精度频率传递和时间同步系统，进而实现高精度时频同步网络化，是我国亟待解决的国家基础设施之一。

1.1 高精度时频传递的概念

研究时间这个问题和研究宇宙是分不开的。

亚里士多德认为：“时间是关于前和后的运动的数。”他将时间定义为“依先后而定的运动的数目”。其中，“依先后而定”指均匀计数的方式，“运动的数目”指按此方式衡量运动所得到的一个个数目，即“现在”的系列。亚里士多德指出，时间是间断性和连续性的统一，其间断性表现在

“现在”的前后之分,连续性则表现为“现在”的均匀延续。亚里士多德第一次把时间的单元分析为“现在”,把时间解释为由“现在”所构成的连续系列。这种以“现在”为基础的时间观,比较完满地解释了时间的均匀流动性、前后不可逆性、可分割的间断性和不停驻的连续性等特点^[1]。

毫无疑问,时间概念对于任何基础物理理论来说都是重要的,这一观点可以追溯到牛顿时代。在他著名的《自然哲学的数学原理》^[2]一书中,可以看到这样的论述:

我不去定义时间、空间、地点和运动,因为这是众所周知的。只是我观察到,一般人认为这些量之下没有其他概念,但是从它们的关系理解,它们是互相关联的对象。于是就产生了某些偏见。为了消除偏见,把它们区分为绝对的和相对的、真实的和表象的、数学的和通俗的是方便的。

从其自身的性质来看,绝对的、真实的和数学的时间本身是平等流逝的,与外部的任何事物都没有关系,并且也称为“持续时间”;相对的、表象的和通俗的时间通过运动对持续时间进行感性的和外部的(无论是否准确或不平等)测量,通常用来代替真实时间,如一个小时、一天、一个月、一年等^[3]。

爱因斯坦的结论是:过去、现在和未来可同时存在。有一次,他在一封信中写道:对我们这样相信物理的人来说,过去、现在和未来之间的差别只是一种顽固而持久的错觉。

时间的概念是不言自明的。在物理学中,时间通常由其测量来定义:它只是时钟的度数。

时间是人根据物质运动来划分的,不是本来就有的,宇宙中的时本来是没有间的。物质运动需要耗费时,但是如果不把时分割成间,我们的思维就无法识别时,我们之所以能思考,是因为思维能对物质世界命名,物为实,思为虚,思命物以虚名,为思所用。没有进行分割过的时无法被命名,无法进行区分,只有分割成时间后,才能被思维所用,因为分割后时可以被命名了。例如,我们把地球绕太阳一周的运动过程划分为一年,把地球自转一圈的运动过程划分为一日,这样的划分便于思维使用数字符号来计算。如果你不是生活在地球上,绝对不会以地球的运动过程来分割时。所以,时间不过是人为了便于思维思考这个宇宙,而对物质运动进行的一种划分,是人定的规则,而并非自然规则。时间是人为的划分,怎么

分都可以。

授时的概念可以追溯到我国古代,即记录天时告知百姓。古代皇帝身边的星象学专家们根据所观测的日月星辰情况制定历法,谨慎地把时令授予民法,从而指导百姓在合适的时间进行播种、施肥及收获。现在随着工业化、机械化、电子化的发展,各种钟表进入了人们的生活,授时精度在不断提高,推进了社会的进步与发展。

可见,授时从古至今都是非常重要的。

高精度时频传递是指将时间和频率基准通过某种传输介质进行无损地传递。频率传递是为了让两地的钟走得一样快,而时间同步则是为了让两地钟的时刻是一样的。

1.2 高精度时频传递技术的历史发展

时间频率标准的产生和传递对国民经济、国防建设和日常生活起着至关重要的作用。1955年第一台原子钟^[4]被发明,其超过了当时天文观测所能达到的水平。时间频率测量领域也因此发生了划时代的变化,由传统天文学的宏观领域过渡到现代的量子物理学的微观领域。1967年10月,第13届国际计量会议通过了新的“秒”的定义:“秒是¹³³Cs原子基态的2个超精细能级间跃迁辐射振荡9 192 631 770个周期所持续的时间”。现在,时间已进入原子时时代。随着技术不断进步,原子钟的种类迅速扩展到不同应用领域中的铷原子钟、铯原子钟、氢原子钟、相干布居数囚禁(Coherent Population Trapping, CPT)原子钟等,原子钟的性能指标被不断地刷新,精度平均每十年提高一个量级^[5]。原子钟的发展趋势如图1.1所示。基于原子频率的频率标准稳定度不断提高。通过提高本振频率可以有效地提高频率标准的稳定度。从微波原子钟^[6-13]到光频原子钟(光钟)^[14-17],目前世界上主要发达国家都致力于光钟的发展。2017年,光钟的不确定度已经达到 10^{-19} 量级^[18]。2015年,我国计量院的铯原子光钟系统频移自评估不确定度达到 2.3×10^{-16} ^[19]。光钟的频率稳定度如图1.2所示。

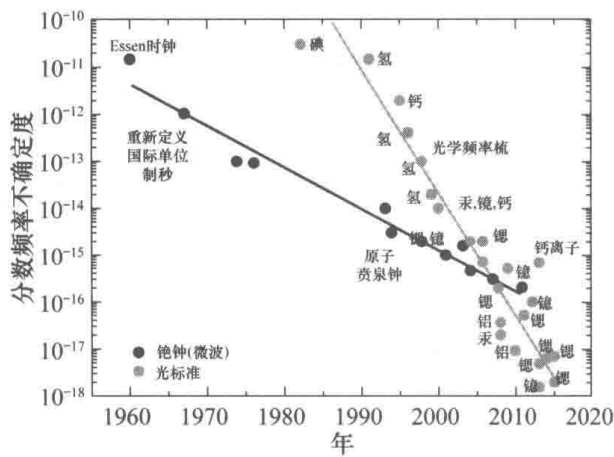


图 1.1 原子钟的发展趋势

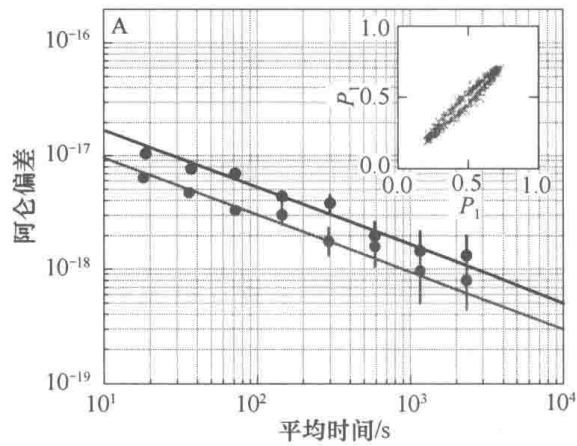


图 1.2 光钟的频率稳定度^[18]

时间同步利用现代技术实现时间基准的远距离异地复制与时间基准的传递,目的是对接收端进行“授时”,使其获得标准的时间信号。根据授时手段的不同,分为长波授时、短波授时、卫星授时、网络授时、光纤授时等。

高精度授时是实现时间同步的关键,世界上主要发达国家都高度重视授时系统建设。1957年,美国在东海岸建成了第一个罗兰-C 导航授时台链,开展利用长波进行无线电导航、授时服务。1973年,美国开始建设全球定位系统(Global Positioning System, GPS);1995年4月,美国宣布GPS达到全运行能力;1996年,美国宣布GPS为军民两用系统,GPS逐渐从军用扩展至民用。目前,GPS授时技术已成为国际上广泛使用的时

同步技术。

20 世纪 70 年代起,我国先后建立了独立的原子时系统以及长波、短波授时系统,北斗卫星导航系统等国家科学工程重要基础设施,形成了以卫星授时为主、地面授时为辅的授时体系。北斗卫星授时具有自主可控、授时精度高、覆盖地域广、使用方便等优点,在军民融合领域得到广泛应用。我国时间同步系统是随着导弹、航天靶场试验等国防科研的需要而发展起来的。2020 年 6 月 23 日,北斗系统第五十五颗导航卫星发射成功,标志着北斗三号全球卫星导航系统星座部署全面完成。北斗系统是我国迄今为止规模最大、覆盖范围最广、性能要求最高、最复杂的巨型航天系统。北斗系统的建设实现了高密度发射组网,创造了世界卫星导航的奇迹,被称之为“中国速度”。北斗系统集导航定位授时、星基增强以及精密定位于一体,再加上地基增强等多种功能,实现了实时的米级、分米级、厘米级导航定位增强服务能力,更提供了“中国精度”^[5]。

20 世纪 80 年代,国内企业采用符合国际规范的 IRIG-B 时间码研制出我国第一代 B 码标准化冗余时统,建立了“主站时统设备+终端”的时间同步系统,提高了国防科研试验时间同步系统的可靠性。另外,近年出现的精确时间协议(Precision Time Protocol,PTP)是一种高精密的网络时间同步技术,已成为网络时间同步的发展方向,美国已将 PTP 技术作为下一代网络的时间传递核心技术。随着我国科学技术和国防科技的发展,越来越多的军事和民用部门需要高精度时间频率的统一,小型化、网络化的板卡、模块、设备等时间同步产品在国防以及通信、电力、交通等国民经济重要领域中得到了广泛的应用。几种时间同步手段的特点及现状如表 1.1 所示。

表 1.1 几种时间同步手段的特点及现状比较^[5]

时间同步手段	特点及现状
卫星授时	卫星授时具有授时精度高、覆盖地域范围广、使用方便等优点。由于 GPS 发展较早,GPS 授时是目前使用最为广泛的授时手段,随着我国北斗卫星导航系统的不断建设和完善,北斗卫星授时将在我国国防及国民经济重要领域中逐步兼容替代 GPS 授时

续表

时间同步手段	特点及现状
网络同步	网络同步主要有网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)和精确时间协议两种方式。PTP 相对于 NTP, 时间同步精度可达亚微秒量级。作为一种新的授时手段, PTP 提供了高精度、低成本的分分布式时钟同步方法, 是时间同步网络化的发展方向
高精度时间同步	采用卫星共视技术、微波双向比对技术等实现纳秒量级的高精度时间同步
多手段时间同步	以星基授时为主, 陆基、网络为辅的多手段进行标准时间频率的接收、保持、传递和使用, 可使得时间同步系统更加安全、可靠。目前主要的授时手段有卫星/微波/光纤双向时间比对、北斗/GPS 卫星授时、长波授时、NTP/PTP 网络授时、同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)通信网时间同步、搬运钟对时等方式

目前一种常用的卫星授时技术有基于 GPS 技术的授时方法和卫星双向时间传递法。在基于 GPS 技术的授时方法中, 最为常用的一种授时技术是 GPS 共视法(Global Positioning System Common View, GPS CV), 即两地的 GPS 接收机在某一时刻同时接收同一颗 GPS 卫星的信号。由于两接收机拥有同样的时间参考, 可以认为他们接收到的 GPS 秒脉冲信号一致, 表示为 T_{GPS} 。将 T_{GPS} 信号分别与两地的时钟秒脉冲信号 T_A 和 T_B 输入到时间间隔计数器中, 测量其秒脉冲时间间隔。然后通过数据传输网络传输两地计数器测得时间间隔 ΔT_{AGPS} 和 ΔT_{BGPS} 。通过做差运算即可获得两地钟差, 授时精度可以达到纳秒量级。具体表达式如式(1.1)~(1.3)所示。

$$\Delta T_{\text{AGPS}} = T_A - T_{\text{GPS}} \quad (1.1)$$

$$\Delta T_{\text{BGPS}} = T_B - T_{\text{GPS}} \quad (1.2)$$

$$\Delta T = T_A - T_B = \Delta T_{\text{AGPS}} - \Delta T_{\text{BGPS}} \quad (1.3)$$

另一种常用的卫星授时技术为卫星双向时间传递法。其基本工作原理是参加对比的两个地面 A 和 B 站同时向卫星发送秒脉冲信号 T_A 和 T_B , 并接收经由卫星转发的、由对面地面站发送的秒脉冲信号。两站的时间间隔计数器分别测量各自发送秒脉冲信号与接收到秒脉冲信号的时间差, 表示为 ΔT_{AB} 和 ΔT_{BA} 。具体传输过程的表达式如式(1.4)~(1.6)

所示。

$$\Delta T_{AB} = T_A - (T_B + T_{BS} + T_{SA}) \quad (1.4)$$

$$\Delta T_{BA} = T_B - (T_A + T_{AS} + T_{SB}) \quad (1.5)$$

$$\Delta T = T_A - T_B = \frac{1}{2}(\Delta T_{AB} - \Delta T_{BA}) + \frac{1}{2}(T_{AS} + T_{SB} - T_{BS} - T_{SA}) \quad (1.6)$$

其中, ΔT_{AB} 表示地面 A 站时间间隔计数器示数, ΔT_{BA} 表示地面 B 站时间间隔计数器示数; ΔT_{BS} 表示 B 站秒脉冲传输到卫星的上行时间, T_{SA} 表示 B 站秒脉冲从卫星传输到 A 站的下行时间; 同样, T_{AS} 表示 A 站秒脉冲传输到卫星的上行时间, T_{SB} 表示 A 站秒脉冲从卫星传输到 A 站的下行时间。考虑到 A 站和 B 站互传信号所经过的传输路径一致, 方向相反, 可以认为其传输时延一致, 如式(1.7)所示。

$$T_{AS} + T_{SB} - T_{BS} - T_{SA} = 0 \quad (1.7)$$

将式(1.7)代入到式(1.6)中可以得到两地钟差, 其等于两地时间间隔计数器显示数值的差值。通过做差运算即可获得两地钟差, 最终授时精度可以达到 1 ns。

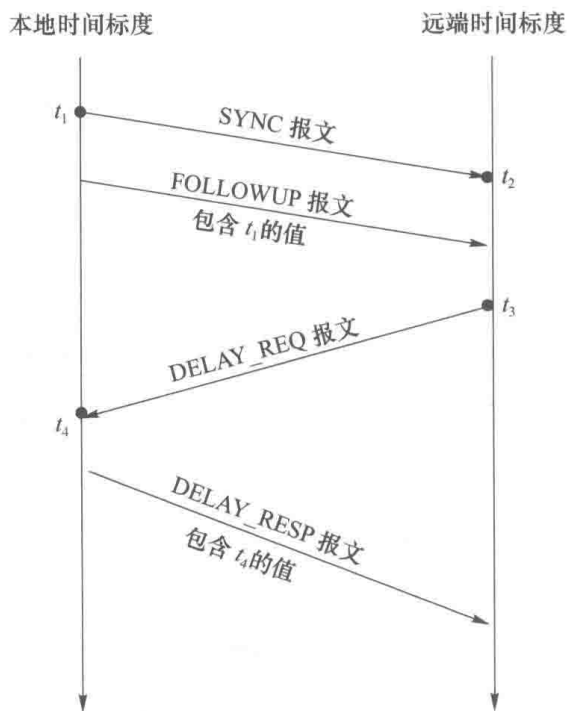
互联网授时就是以计算机网络为传输媒介来传播标准时间。时间同步精度可以达到秒级, 能够满足日常实际需求。互联网中的同步技术有很多, 精确时间协议同步的误差可以达到微秒量级。由 IEEE 1588 标准^[20]标准化的精确时间(PTP)协议于 2002 年首次发布, 它是一个针对分组交换网络(如以太网)的同步协议, 至今仍在不断地发展。PTP 协议通过近远端传递携带精确定时信息的报文来实现。PTP 的同步机制如图 1.3 所示。

(1) 本地端发送同步报文(SYNC)给远端, 并记发送时刻的时间戳 t_1 。
 t_1 由 FOLLOWUP 报文随后发送给远端。

(2) 远端接收本地端传来的 SYNC 报文, 记录接收时间戳 t_2 , 并发送 DELAY_REQ 报文给本地端, 记录发送时间戳 t_3 。

(3) 本地端记录接收到 DELAY_REQ 报文的时间戳 t_4 , 并通过 DELAY_RESP 报文将 t_4 传给远端。

(4) 远端接收 DELAY_RESP 报文, 获得时间戳 t_4 。这样远端就可以通过使用 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 计算得到本地端与远端的时间差, 从而调整时间, 达到时间同步。

图 1.3 PTP 的同步机制^[20]

具体计算如下：

$$\text{delay}_{\text{ms}} = \frac{t_4 - t_3 + t_2 - t_1}{2} \quad (1.8)$$

$$\text{offset}_{\text{ms}} = t_2 - t_1 - \text{delay}_{\text{ms}} = \frac{t_2 - t_1 + t_3 - t_4}{2} \quad (1.9)$$

其中, delay_{ms} 表示本地端与远端之间的链路延时, $\text{offset}_{\text{ms}}$ 表示本地端与远端的时间差。远端调整 $\text{offset}_{\text{ms}}$ 大小的时延, 可实现时间同步。

目前, 在现有的授时手段中, 基于光纤链路的授时方法是精度最高的。光纤具有损耗低、受外界环境影响小等优点, 这使其成为一种更优的传输介质并在近年来得到迅猛的发展。光纤授时能够获得的授时精度高达百皮秒量级, 具体分类和实现方法将在 1.4 节中详细介绍。

1.3 基于光纤链路的高精度频率传递技术的主要类型

高精度频率传递技术是指将本地端频率基准通过某种介质传递到远

端,在远端实现本地端频率基准的“再现”或远端频率基准与本地端频率基准保持“一致”。

随着现代高精度原子钟的快速发展,频率稳定度秒稳在 10^{-6} 的频率振荡器^[21]以及频率不确定度在 10^{-19} 的光钟^[22]相继出现。传统的高精度频率传递方法有微波链路授时(包括长波授时、短波授时)、全球卫星导航定位系统、双向卫星时间频率传递技术等^[23-24],但不能满足如此高精度频率标准的传递。以 GPS 系统为例,其需要长时间(平均时间:天)平均(频率稳定度能达到 10^{-15} ^[25]),以平均掉传输路径中环境条件的变化,不能够提供用于时间同步所必需的高精度短稳时间信号,因此,基于 GPS 的授时系统没有能力传递高稳定的新一代光钟。现有的时频传递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递与同步方法。目前研究表明,利用与环境隔离的光纤网络进行高精度频率传递,并采取主动补偿措施后,频率传递稳定度可以达到天稳 10^{-19} ^[26-27]。因此,目前最有前途的新一代授时方式就是基于光纤网络的授时方式。欧洲在 2020 年底完成光钟比对的计划——Refimeve+,这些单位包括巴黎天文台、英国国家物理研究所(National Physical Laboratory, NPL)、德国物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)和意大利国家计量科学研究院(Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, INRIM)^[28]。

基于光纤链路的高精度频率传递技术已成了重要的频率传递手段^[29-31],在其具体方案实施中,结合电子学方法和光学方法进行系统设计,同时检测光纤传输链路中由于温度、机械振动等引起的相位抖动并利用主动补偿的手段对其进行稳定。目前,利用光载波进行频率传递的技术方案分为三种:射频调制传递、光学频率传递以及光学频率梳传递^[32]。

1. 射频调制传递

射频调制传递是用单频激光对需要传递的频率基准进行强度调制,并将经过调制的光信号通过光纤传递到远端,是通过光纤进行频率传递最直接的方法,原理如图 1.4 所示。

在远端,通过对强度调制频率的检测将射频信号进行恢复,同时本地端将返回的信号与基准信号进行相位比较,并对检测到的相位抖动采取主动补偿。然而,光纤链路由于受到温度、振动等的影响,会引入额外的相位抖动,这会限制整个系统的性能。相位抖动补偿在高精度频率传递