



测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Algorithms of Precise Clock Offset and Quality Evaluation of
GNSS Satellite Clock

黄观文 著

GNSS星载原子钟 质量评估及 精密钟差算法



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

GNSS 星载原子钟质量评估 及精密钟差算法

Algorithms of Precise Clock Offset and Quality
Evaluation of GNSS Satellite Clock

黄观文 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 黄观文 2017

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

星载原子钟作为导航系统测距的星上时间基准,其性能直接决定着导航定位和时频传递的精度。本书利用 GNSS 钟差产品对星载原子钟的特性、模型及预报方法等进行了系统的研究,主要包括星载原子钟状态监测和质量评价、卫星钟参数估计和预报模型、GNSS 精密授时和时间同步、多模 GNSS 融合定位及时差监测等。

本书适合测绘工程、大地测量学、天文学及电子学科的本科生和研究生学习,也可作为大地测量理论及工程应用、卫星导航、天文学等领域的工作人员和用户的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS 星载原子钟质量评估及精密钟差算法/黄观文著. —北

京:测绘出版社,2017.10

ISBN 978-7-5030-3810-5

I. ①G… II. ①黄… III. ①卫星导航—全球定位系
统一原子钟—质量—评估—高等学校—教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 243570 号

责任编辑	雷秀丽	封面设计	李伟	责任校对	孙立新	责任印制	陈超
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68581263(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.sinomaps.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm			彩 插	7		
印 张	9.375			字 数	184 千字		
版 次	2017 年 10 月第 1 版			印 次	2017 年 10 月第 1 次印刷		
印 数	001—600			定 价	48.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3810-5

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

时间系统是卫星导航定位的核心要素之一,导航定位实际是测时间。而卫星导航系统的时频由卫星所装载的原子钟提供。星载原子钟作为导航系统测距的星上时间基准,又是卫星导航系统有效核心荷载之一,其性能直接决定着导航定位和时频传递的精度。目前全球导航卫星系统(GNSS),特别是我国的北斗卫星导航系统(BDS),在星载原子钟特性及其性能维护方面还有许多理论问题和实际问题值得研究。GNSS 星载原子钟的时频特性及精密钟差研究的理论意义在于探索卫星钟系统的时变规律,进而为卫星钟动态特性预测、性能维护等提供理论依据;精密卫星钟差特性研究的实践意义在于为用户导航定位提供精确的时差,为提高卫星定轨精度、用户导航定位精度提供支持。于是,星载原子钟特性及其性能维护研究是国内外卫星导航理论探索与实践研究的热点问题之一。

本书针对 GNSS 星载原子钟特性和钟差模型,系统地研究了星载原子钟的物理模型和参数估计理论及相关的应用技术,提出了多项新的或改进的算法和模型,并进行了大量实际验证。主要研究内容分为四部分:①星载原子钟状态监测和质量评价;②卫星钟参数估计和预报模型;③GNSS 精密授时和时间同步;④多模 GNSS 融合定位及时差监测。本书关于 GPS 和 GLONASS 的卫星钟研究成果可以被尝试应用至我国正在发展和推进的北斗卫星导航系统中,进而可能会对促进国民经济发展起到一定的正向推进作用。

全书共分 7 章:第 1 章介绍 GNSS 星载原子钟的发展,总结了目前 GNSS 钟差理论与方法的研究现状,列出了本书的主要研究内容和组织架构;第 2 章首先描述了原子钟性能的一些重要指标定义,然后简要介绍了目前 GNSS 星载原子钟的时频特性及性能指标;第 3 章介绍了常用的钟差参数估计方法和预报模型,研究了卫星钟差的实时参数估计和短期预报算法及卫星钟差长期预报算法;第 4 章首先介绍了 IGU-P 实时钟差产品的发展和现状,然后针对 GPS 和 GLONASS 的 IGU-P 实时钟差产品精度过低问题,介绍了各自的改进自适应实时钟差预报模型;第 5 章总结了 GNSS 精密授时理论和发展,介绍了基于精密单点定位技术的精密授时数学模型;第 6 章介绍了在用户端利用融合精密单点定位模型,并结合不同类型 IGS 产品进行 GNSS 时差监测的技术方法;第 7 章简要总结了本书的主要工作和结论,以及今后值得进一步研究的问题及其展望。

本书的主要读者对象为测绘工程和天文学学科的本科生,大地测量学、天文学、电子学科的研究生。大地测量理论及工程应用、卫星导航、天文学等领域的科

研人员及用户可能会对此书产生一定的需求和兴趣。

考虑 GNSS 卫星钟差研究是由多学科相关渗透而形成的一个研究方向,涉及数学、天文学、无线电技术、现代数据处理技术和测绘科学等诸多学科的相关知识,加之作者水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请读者不吝斧正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 GNSS 星载原子钟的发展与现状	2
1.3 GNSS 钟差研究的理论与方法	5
1.4 主要研究内容	9
第 2 章 GNSS 星载原子钟的状态监测和质量评价	11
2.1 重要指标	11
2.2 GNSS 星载原子钟的时频特性及性能指标概述	14
2.3 GNSS 星载原子钟的状态监测和质量评价方法设计	16
2.4 基于 IGS 产品进行 GPS 卫星钟长期特性变化分析和质量评价	18
第 3 章 GNSS 卫星钟参数估计与钟差预报算法	29
3.1 常用的钟差模型和参数估计方法	29
3.2 顾及钟差随机噪声类型的卡尔曼滤波实时钟差算法	32
3.3 开窗分类因子抗差自适应序贯平差实时卫星钟差算法	40
3.4 开窗分类因子抗差自适应卡尔曼滤波实时钟差算法	48
3.5 基于钟差物理特性和 ARIMA 模型的 GPS 卫星钟差长期预报算法	53
第 4 章 基于改进模型的 IGU-P 钟差实时预报算法	60
4.1 IGU-P 实时钟差产品概况	60
4.2 GPS 的 IGU-P 改进钟差预报模型及实例分析	61
4.3 GLONASS 的 IGU-P 钟差预报模型及实例分析	68
4.4 改进的 IGU-P 钟差产品在实时 PPP 中的应用	81
第 5 章 GNSS 单站精密授时与时频传递技术	85
5.1 基于 GNSS 精密授时和时频传递技术的理论与发展	85
5.2 基于 PPP 的精密授时算法及误差源影响函数分析	86
5.3 基于参数先验贝叶斯估计的连续精密单点定位时频传递算法	89

5.4	基于单差模式的连续载波相位时间同步(GPS DCP)算法	94
5.5	基于基准站改正的精密单点定位研究拓展	101
第 6 章	GNSS 融合 PPP 模型及其时差监测算法	107
6.1	GNSS 时差监测理论与发展	107
6.2	改进的 GNSS 融合 PPP 模型	108
6.3	基于融合 PPP 模型的 GNSS 时差监测分析	120
第 7 章	结论与展望	131
7.1	结 论	131
7.2	展 望	132
参考文献		134

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Background	1
1.2	Development of the GNSS satellite atomic clocks	2
1.3	Theory and method of the GNSS clock model	5
1.4	The main research content	9
Chapter 2	Quality variation and monitoring of the GNSS satellite atomic clocks	11
2.1	Main indexes	11
2.2	The time-frequency characteristic and indexes of the GNSS satellite atomic clocks	14
2.3	Method of quality monitoring of the GNSS satellite atomic clocks	16
2.4	Quality variation of GPS satellite clocks on-orbit using IGS clock products	18
Chapter 3	GNSS satellite clock parameter estimation and the clock offset prediction	29
3.1	Common clock offset model and parameter estimation method	29
3.2	Real-time clock offset algorithm using random noise Kalman filter	32
3.3	Real-time estimation of satellite clock offset using adaptively robust sequential adjustment with classified adaptive factors	40
3.4	Real-time estimation of satellite clock offset using adaptively robust Kalman filter with classified adaptive factors	48
3.5	GPS satellite clock offset long-term forecast algorithm based on the clock characteristic and ARIMA model	53

Chapter 4	IGU-P real-time clock offset prediction with an improved model	
		60
4.1	IGU-P real-time clock offset products	60
4.2	GPS IGU-P improved clock offset prediction model and example analysis	61
4.3	GLONASS IGU-P improved clock offset prediction model and example analysis	68
4.4	The IGU-P improved clock offset product and application in real-time PPP	81
Chapter 5	GNSS precise timing and time-frequency transfer technology	85
5.1	Theory and development of GNSS precise timing and time-frequency transfer	85
5.2	PPP precise timing algorithm and influence function analysis of error sources	86
5.3	Continuous time and frequency transfer using parameters constrained PPP	89
5.4	Continuous time and frequency transfer algorithm based on GPS single different carrier phase observations	94
5.5	PPP algorithm based on reference station corrections	101
Chapter 6	GNSS combined PPP model and time offset monitoring algorithm	
		107
6.1	Theory and development of GNSS time offset monitoring	107
6.2	The improved GNSS combined PPP model	108
6.3	GNSS time offset monitoring based on the combined PPP model	120
Chapter 7	Conclusion and future work	131
7.1	Conclusion	131
7.2	Future work	132
References		134

第1章 绪论

1.1 研究背景

时间作为自然界中最基础的物理量,在国民经济建设和国防军队及其他各项领域中都起着十分重要的作用。对于卫星导航定位而言,时间的作用更是至关重要,精确位置测量实际上就是精确时间测量,没有高精度的时频,卫星导航定位系统就不可能实现高精度的导航与定位,因此实现高精度的时间测量,获得精确的时频一直是人们探索研究的重要领域(吴海涛等,2011)。

随着全球经济、军事竞争一体化趋势越来越激烈,全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)也步入了快速发展阶段,定位时间短、精度高已成为每个导航系统的奋斗目标,而导航系统的时频由卫星装载的原子钟提供。目前的GNSS主要包括美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、俄罗斯的格洛纳斯导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)、欧盟的伽利略导航卫星系统(Galileo satellite navigation system)、中国的北斗导航卫星系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)、日本的准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)及印度的区域导航卫星系统(Indian regional navigational satellite system, IRNSS)等(杨元喜等,2011)。其中, GPS和GLONASS系统均是从20世纪70年代左右开始建设,已发展了40余年,各项技术设备等相对较为成熟。中国的BDS从2007年发射首颗导航卫星后,截至2012年3月1日,已成功发射了11颗导航卫星,形成了覆盖亚太平洋地区的全天候区域导航系统,目前在轨卫星中包含5颗地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星、1颗中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星以及4颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星。值得一提的是,由于西方国家的原子钟技术封锁及我国硬件设备水平相对落后的现状, BDS卫星上配备的国产铷钟的频率稳定性和精度水平相对稍差。因此,对BDS在轨卫星钟的性能特性进行监测和评估以及相应的钟差研究成为了当前国内导航定位工作者关注的焦点。目前,不同的导航系统卫星轨道分布情况如图1.1所示。

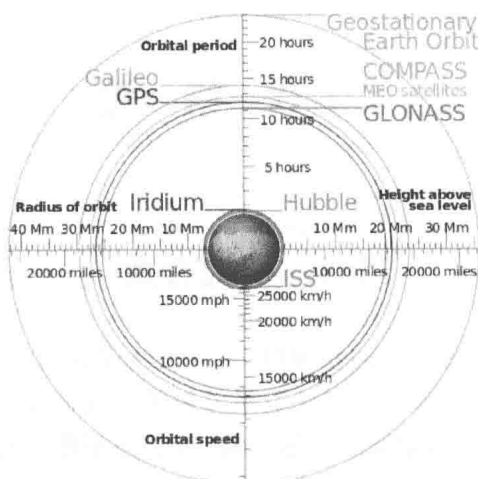


图 1.1 不同导航系统的卫星轨道分布

注:图片来源(http://en.wikipedia.org/wiki/File:Comparison_satellite_navigation_orbits.svg)

GNSS 星载原子钟作为导航系统测距的星上时间基准,又是卫星导航系统有效荷载的核心,其性能直接决定着导航定位和时频传递的精度。因此,要想实现精密定位和授时服务,必须研究星载原子钟的时频特性,分析卫星钟频率稳定度,建立精密卫星钟差模型,进行高精度的卫星钟差获取和预报等。同时为了实现不同导航系统之间的兼容互操作,GNSS 时差监测和预报也是一个非常重要的研究内容。目前,GNSS 特别是我国的 BDS 的星载原子钟还存在很多问题,因而,进行 GNSS 星载原子钟的时频特性及精密钟差研究是一项非常具有理论意义和实用价值的研究课题,已成为当前导航卫星发展的最重要任务之一。

1.2 GNSS 星载原子钟的发展与现状

1.2.1 GPS

自 1978 年美国发射了第 1 颗 Block I 实验卫星后,标志着 GPS 卫星系统工程的正式开始,1979—1984 年,美国又陆续发射了 7 颗 Block I 试验卫星,GPS 进入全面研制和试验阶段。Block I 试验卫星采用铷(Rb)钟,相对频率稳定度为 $10^{-12}/\text{d}$,定位误差为 8 m。Block II 型采用了马斯频率和时间系统公司研制的铯(Cs)钟后相对稳定频率达到 $10^{-13}/\text{d}$,误差则降为 2.9 m。1981 年,休斯公司研制的相对稳定频率为 $10^{-14}/\text{d}$ 的铷钟使 Block II R 型卫星的定位误差仅为 1 m (<http://zh.wikipedia.org/wiki/>)。GPS 系统的每颗 Block II/II A 卫星上都放

置4台原子钟:2台铷钟和2台铯钟。每颗 Block II R 卫星上都装载3台铷钟,其中一台作为工作钟,其余备用。Block II / II A 卫星原子频标的输出信号要通过频标分配单元调制后再发播给用户,而 Block II R 卫星是以时间保持系统(time keeping system, TKS)产生系统所需的频率信号,支持生成导航信号后再发播给用户。因此,Block II R 卫星的时间保持主要通过时间保持系统来实现。GPS 时间(GPS time, GPST)由地面主控站钟、监测站钟和卫星钟所组成的组合钟给出,它是通过主控站运用卡尔曼滤波算法对 GPS 系统内部钟组进行不等权平均,其中星载原子钟的权值最小,监测站原子钟的权值较大,主控站原子钟的权值最大,然后根据权值导出 GPST。GPST 以美国海军天文台的协调世界时(universal time coordinated, UTC)为基准,并与其保持同步。

截至2017年8月,美国的GPS系统拥有31颗在轨卫星,包括12颗 Block II R 卫星、7颗 Block II R-M 卫星和12颗 Block II F 卫星(发射于2010—2016年,设计寿命为12年),最后一颗 Block II A 卫星于2016年退役。在上述卫星中,Block II R 卫星系列具有星间测距功能,当地面站出现严重故障或因为不可抗原因等导致通信故障时,对卫星导航系统星座的自主运行能力很重要。Block II R 和 Block II F 型卫星使用了新型的铷钟,其频率稳定度比 Block II A 的星载原子钟高一个量级。目前美国推出的GPS现代化计划中的更高性能卫星将会在2018年后开始发射,命名为GPS III, GPS III的星载原子钟指标参数相比前期卫星还会有一定幅度的提升。不同时期的GPS卫星携带的星载原子钟质量也存在差异,为了便于对比分析,本书按照GPS卫星类型对不同期的星载原子钟进行了分类,分别为Block I、Block II、Block II A、Block II R、Block II R-M、Block II F 和 Block III 型星载原子钟。

1.2.2 GLONASS

俄罗斯的GLONASS设计卫星数为24颗,此前因为政治和经济因素,GLONASS工作卫星数目较少,覆盖面积较小,国际上开展相关星载原子钟研究甚少。近年来,随着经济的发展和政治局面的稳定,俄罗斯积极增加在轨卫星数目,截至2017年8月,GLONASS卫星数目维持在24颗,且均是现代化的“GLONASS-M”系统卫星,可提供全球范围内的导航定位服务。

GLONASS的时间系统由若干台高精度氢(H)钟和铯钟经纸面钟技术综合后得到。卫星的时间由高精度铯钟保持,综合控制中心每天比对系统时间和卫星时间2次,并将星钟修正值上传至卫星。在GLONASS卫星的发展中,相继提出了“GLONASS”“GLONASS-M”“GLONASS-K1”“GLONASS-K2”和“GLONASS-KM”等信号和功能不断优化的导航卫星系列。早期的“GLONASS”系列卫星寿命较短,基本上只有3年,卫星钟的稳定性较差,只有 $5 \times 10^{-13}/\text{d}$,目前已全部退役。

俄罗斯 1996 年计划发射新一代 GLONASS 卫星,称为 GLONASS-M 计划,中间由于经济 and 政策原因而推迟,约于 2003 年开始陆续发射了 GLONASS-M 卫星系列,延长卫星寿命到 5 年以上,提高卫星钟稳定性到 $1 \times 10^{-13}/\text{d}$,定位精度可达 $10 \sim 15 \text{ m}$ 。

GLONASS 与 GPS 一样,也在其地面控制系统和 GLONASS 卫星上的原子钟配置中采用了冗余技术。这些冗余配置的原子钟组为卫星轨道估算以及星载钟的准确校准提供了可靠的支撑。卫星轨道估算以及星载钟的准确校准均由 GLONASS 地面控制系统通过精确计算后传送给 GLONASS 卫星,再通过空间的 GLONASS 卫星将含有精密星历和钟校正项的相应数据发播给用户。GLONASS 时间系统溯源到俄罗斯国家标准时间 UTC(SU),与 GPST 不同的是,GLONASS 系统时间引入了跳秒(闰秒),并以莫斯科时间为基准。因此,它与俄罗斯时间空间计量研究所产生和保持的俄罗斯协调时 UTC(SU)之间存在 3 h 的系统差。

1.2.3 BDS

BDS 是中国自主研制开发的卫星导航定位系统,是继 GPS、GLONASS 以及在建的 Galileo 之后,又一个全球卫星导航定位平台。它设计满足覆盖全球和区域内实时连续性三维定位、测速、高精度授时和部分地区的用户位置报告及双向短报文通信服务等需求。

BDS 由 5 颗地球静止轨道卫星和 30 颗地球非静止轨道卫星组成,截至 2017 年年初,在轨卫星总数为 23 颗,可以提供亚太平洋区域范围内的导航定位服务。BDS 提供两种服务方式,即开放服务和授权服务。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务,定位精度为 10 m ,授时精度为 50 ns ,测速精度为 0.2 m/s 。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务信息,授时精度优于 10 ns (Dong et al, 2008)。BDS 星载原子钟为国产铷钟,稳定性为 $(5 \sim 7) \times 10^{-14}/\text{d}$,实时卫星钟差精度为几百纳秒,这相当于产生几十米的测距误差,星载原子钟的准确度和可靠性不如 GPS 卫星钟和 Galileo 卫星钟。下一代北斗卫星将提高精度。BDS 时间系统(BDT)基于原子时,是一个连续的时间系统,不引入跳秒改正。BDT 通过地面主控站以优于 100 ns 的精度同步至国际 UTC 时上,BDT 的稳定性优于 $10^{-14}/\text{d}$ (Dong et al, 2008)。目前,BDS 星载钟的相关研究已成为我国导航定位研究工作者的研究热点。

1.2.4 Galileo

欧盟也在开发自己的全球导航卫星系统——伽利略导航卫星系统(Galileo),该系统设计卫星总数为 30 颗,其中 27 颗工作卫星,3 颗在轨备用卫星。Galileo 星载原子钟为高精度铷钟和被动型氢钟,其日稳定性分别为 10^{-13} 和 10^{-14} ,设计定

位精度为 1 m, 优于 GPS。但因为种种政治和经济原因, 目前该计划正延期进行。按欧洲空间局(European Space Agency, ESA)的原子钟设计要求, Galileo 的铷钟每 9 h 更新一次星历, 上传时间间隔不小于 4 h 时, 卫星钟预报误差不大于 1.5 ns。国外学者 Bursa 等基于长期测地型时间传递试验分析了 Galileo 星载钟的时间预报误差, 结果表明, 如果不考虑测量噪声, 用 8 h 数据预报 6 h 钟差时, 铷钟的最大预报误差约为 0.57 ns, 被动型氢钟的最大预报误差约为 0.44 ns; 用 24 h 数据预报 12 h 钟差时, 铷钟的最大预报误差约为 4.1 ns, 被动型氢钟的最大预报误差约为 0.65 ns。总体而言, Galileo 星载原子钟的性能要优于 GPS 星载原子钟。目前, 针对 Galileo 的卫星钟研究大部分在实验室进行。

从理论和应用层面来归纳, GNSS 星载原子钟的研究主要分为: 卫星钟物理模型研究、卫星钟参数估计方法、精密钟差获取、卫星钟状态监测和质量评价、实时短期预报和中长期预报、精密授时和时间同步应用、时间偏差监测预报等, 如图 1.2 所示。

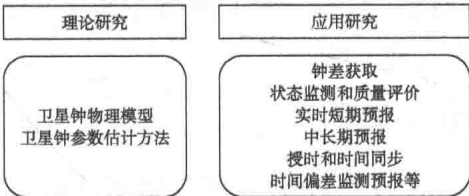


图 1.2 GNSS 卫星钟的主要研究内容

卫星钟差的获取主要通过计算 GNSS 卫星轨道后, 固定轨道值反算得到, 计算过程中并不考虑原子钟物理模型, 得到的仅为离散的钟差序列, 因此可认为钟差产品是 GNSS 轨道产品的副产品之一。目前的卫星钟差研究绝大多数都是基于已知的钟差产品进行开展, 本书也是如此。本书利用 GNSS 钟差产品对星载原子钟进行系统的分析研究, 内容主要包括四大部分: ①星载原子钟特性分析和质量评价; ②卫星钟参数估计和预报; ③GNSS 精密授时和时间同步; ④GNSS 时差监测和预报。

1.3 GNSS 钟差研究的理论与方法

1.3.1 卫星钟特性分析及质量评价

在 GNSS 星载原子钟特性方面, 美国海军研究所的 Reid 和 Petzinger 在 2000 年提出用载波相位平滑伪距观测分析卫星钟的特性, 结果表明, 对于 Block II A 铯钟和 Block II A 铷钟, 具有码测量相位噪声淹没钟的特性, 而对于 Block II R 铷钟, 时间保持系统噪声淹没了钟的特性, 不同卫星钟体现出不同特性和现象, 这种

不同卫星钟的差异性应在性能分析中予以重视。在频率稳定性方面,频率跳变一直是影响钟特性的重要因素,一方面可以从钟的设计方面减小频率跳变,另一方面可从数学算法上对其进行探测、减少频率跳变影响。国内外很多学者在这方面做了很多工作,取得了一些效果,但改善程度有限。在原子钟的特性方面,McCaskill 和 Oaks 通过合作研究,在 2001 年的精密时间和时间间隔(Precise Time and Time Interval, PTTI)会议上报告了他们的研究成果:通过长期数据分析,Block II R 铷钟的特性要好于 Block II/II A 铷钟,而 Block II/II A 铷钟的特性要好于 Block II/II A 铯钟,研究结果对开展精密导航定位、高精度授时工作提供了重要参考。另外,对于星载钟特性分析,其周期特性(振荡特性)是很重要的一个研究方面,卫星钟的周期特性研究可以为卫星钟差拟合模型、预测预报工作打下基础。2000 年,Reid 通过频谱分析的方法,发现卫星钟会受到与季节有关的 30~45 d 的周期变化,此外还会受到天、半天以及年和半年等周期变化影响。对于卫星钟明显的振荡现象,主控站虽通过调整参数来补偿广播星历中的这些系统性影响,但还不能完全消除。我国的郭海荣(2006)也对 GPS 星载原子钟的特性进行了较为详细的研究,得出了一些有意义的结论。

1.3.2 卫星钟差估计与预报

在 GNSS 卫星钟差获取方面,国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)分析中心通过对全球 IGS 站数据进行卫星轨道计算,同时估计出测站坐标、整周模糊度、对流层延迟和接收机钟差等参数,在估算卫星钟差时,轨道参数、测站坐标、整周模糊度参数和对流层延迟参数均当作已知值处理,仅估计接收机钟差和卫星钟差。利用这种方法估计的事后卫星钟差的精度可达 0.1 ns。但此方法是在计算轨道基础上估计卫星钟差,算法极为复杂,计算量大,且全球 IGS 跟踪站数据传输存在较长时延,实现实时估计卫星钟差存在较大困难。针对这些问题,国内外很多学者进行了深入研究,刘经南等在分布式广域差分研究中提出利用若干个分布均匀的跟踪站伪距相位观测值与预报精密星历一起实时估计相对卫星钟差的方法,采用此法估计的钟差绝对精度优于 10^{-7} s,相对精度为 3~5 ns。而美国的 Han 和 Kwon 提出了利用 IGS 精密轨道数据和 IGS 跟踪站的观测数据,估计事后高采样率的精密钟差方法,其估计的 30 s 采样率的精密钟差精度为 0.1 ns。澳大利亚的 Broderbauer 教授也提出了基于连续跟踪站的卫星钟差实时计算模型,并首次引入二次多项式加周期项的钟差拟合模型,其计算的实时卫星钟差精度为 1~2 ns,但拟合模型的周期项只有一项,不符合星载原子钟特性。其他学者,如上海天文台的季善标等(2001)、武汉大学的叶世榕(2002)等,都开展了相关的研究工作,并取得了一定的成果。纵观上述研究工作,GPS 卫星钟差获取研究大多限于用地面基准站数据估计卫星钟差,而研究卫星钟差模型的内容甚少。

在 GPS 卫星钟差预测预报方面,IGS 最早采用二次多项式模型进行快速星历卫星钟差短期预报,其预报精度较低。鉴于实时卫星钟差的重要性,很多学者进行了相关研究。国外学者 Epstein 等(2003)对在轨 GPS 铷钟研究表明,用卡尔曼(Kalman)滤波对 GPS 星座卫星进行状态参数预报,预报时间为 6 h 以内,预报精度为 8~9 ns。当预报时间较长时,卡尔曼滤波预报精度较低。澳大利亚的 Broederbauer 和 Weber 提出的附加周期项的二次多项式拟合模型,考虑了其预报钟差模型和钟差具有周期性的特点,预报 6 h 钟差的精度达到了 2 ns。国内的学者(郭海荣,2006;郑作亚等,2008)提出基于卫星双向时间频率传递技术(two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT)的钟差预报方法,其改进的自回归(auto-regressive, AR)模型,预报 6 h 钟差的精度为 1 ns。路晓峰等(2008)提出利用卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)及伪距数据进行卫星钟差预测预报,预报 24 h 钟差的精度为 2 ns。目前, GPS 卫星钟差存在的问题是卫星钟差模型多元化,短期预报精度较高,但长期、实时预报精度较低。

1.3.3 GNSS 精密授时和时间同步

Allan 和 Weiss 于 1980 年在美国电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)频率控制年会上首次提出了利用 GPS 共视(common view, CV)技术进行时间传递的方法,开创了 GNSS 用于远程时间同步和传递的先河,具有里程碑的意义(王继刚,2010)。此后经过 20 多年的发展, GPS CV 技术迅速取代罗兰 C 技术成为国际上的最主要的时间比对手段之一(聂桂根, 2005)。然而 CV 技术需要两测站同时观测同一颗卫星,随着测站间距离增加, CV 技术比对精度会迅速降低。因此, Jiang 等(2004)提出了 GPS 全视(all in view, AV)技术, Gotoh 在 2005 年精密时间和时间间隔大会上也验证了这个方法(Gotoh, 2005)。GPS AV 技术,是指位于任意位置的观测站进行 GPS 单站观测,利用码单点定位技术将测站钟差统一归算到国际 GNSS 服务时间基准(International GNSS service time, IGST)时间尺度上,最后在 IGST 这一尺度上比较两站的钟差,完成时间传递的任务。GPS AV 技术提出后得到了国际上的认可,国际时间频率咨询委员会(Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF)于 2006 年 9 月正式决定采用 AV 技术代替 CV 技术进行国际原子时(international atomic time, TAI)计算。

然而无论是 CV 法还是 AV 法,采用的观测量都是测距码伪距观测值,而 GNSS 的载波相位观测值比伪距观测值精度高出近两个数量级,因此为了进一步提高 GNSS 精密授时和时间比对的精度,利用载波相位观测值的单站载波相位技术(carrier phase, CP)(Zumberge, 1999)被引入。CP 技术的原理就是在 AV 技术的观测基础上,增加载波相位观测量,进而提高时间传递的精度。

目前国内外众多学者对上述 GNSS 时频传递技术进行了广泛的研究,取得了诸多研究成果(Costa et al, 2004; Ray et al, 2005; Jiang et al, 2009; 陈宪冬, 2008; 张小红 等, 2009, 2010a)。我国的聂桂根指出利用 CP 技术进行 GPS 单站授时的理论精度可达 0.1 ns , 对于短时间的时比对是有可能的。张小红等(2009, 2010)利用单站 GPS 载波平滑伪距的精密单点定位(precise point positioning, PPP)方法对单站授时进行测试,获得了纳秒级的单站授时精度;还利用载波相位和伪距观测值组合的 PPP 方法获得了 $0.1\sim 0.2\text{ ns}$ 的单站授时精度。陈宪冬(2008)利用 CP 技术对大地型时频传递接收机的精密时间传递进行研究,并针对多天连续时频传递时出现的天跳变(day boundary)现象提出了参数继承的连续 CP 技术,取得了较好的效果。王继刚(2010)对 PPP 技术用于不同距离的时间比对进行了详细研究,取得了一些成果。陈军等(2010)利用白噪声卡尔曼滤波模型的方法提高 GPS 原始单站授时结果的精度。国际上 Petit 等(2007)利用 PPP 技术对 USNO-PTB 进行了国际原子时比对计算。为了进一步提高单站授时精度,Delporte 等(2007)、Orgiazzi 等(2005)还利用固定模糊度的 CP 技术进行 GPS 载波相位时间传递,并与卫星双向时频传递技术(two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT)技术结果相比较,取得了较好的结果。另外,Delporte 等(2007)还对传统的码和相位组合 PPP 方法与仅用载波相位的 PPP 时频传递方法进行了对比,指出仅使用载波相位观测值的 PPP 时频传递方法精度和稳定性更高。对于连续 PPP 授时中存在的天跳变,Defraigne 等(2007)指出了天跳变现象与测距码噪声之间存在相关性。Guyennon 等(2009)、Dach 等(2005, 2006)则利用多天数据的连续 PPP 授时算法来平滑天跳变现象,进而提高授时解的稳定性和精度。

总体而言,目前国内针对 PPP 技术用于时频传递的研究并不多见,该技术在我国时频领域的应用也并不十分成熟。同时,目前的 PPP 时频传递技术在实际应用中也还存在一些问题需要完善,如并没有有效解决连续授时解中的天跳变,同时 PPP 技术在中短距离内的时频传递精度和稳定性并没有较大的优越性。

1.3.4 GNSS 时差监测方法

随着 GNSS 的逐渐增多和日益完善,除了实现单系统的导航定位授时应用外,不同系统间的兼容互操作已成为 GNSS 发展的趋势。而系统间的兼容性和互操作性需要一个统一的时间尺度。因此,GNSS 时间偏差(time offset, 以下简称时差)的测量工作显得尤为重要。虽然 GNSS 在时间频率领域内的研究已有 30 多年历史,但是利用 GNSS 技术方法进行系统间时差监测研究目前尚处于初步研究阶段,而随着我国 BDS 的逐渐完善,实现该系统与其他 GNSS 间的兼容互操作工作显得越来越紧迫。