

卫星导航时差 测量技术

GNSS Time Offset Determination

陈俊平 张益泽 著

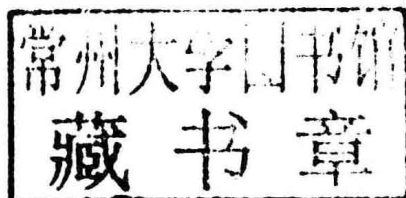


测绘出版社

卫星导航时差测量技术

GNSS Time Offset Determination

陈俊平 张益泽 著



测绘出版社

· 北京 ·

© 陈俊平 2018

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

卫星导航系统(GNSS)以时间作为观测基准,通过测量发送、接收的时间差形成基本伪距、相位观测量。高精度的时间基准对于导航系统性能起着重要作用。

时差测量就是比对两个原子钟的时间,获取两个钟的差值。传统的时差测量方法为双向卫星时间频率传递,其价格高昂。随着卫星导航的飞速发展,也推动了时差测量手段的进步。本书论述了卫星导航在高精度时差测量中的应用,介绍了GNSS时差监测的分类、伪距时差测量、相位时差测量及多系统综合时差测量等技术。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航时差测量技术/陈俊平,张益泽著. —北京:测绘出版社,2018. 1

ISBN 978-7-5030-4018-4

I. ①卫… II. ①陈… ②张… III. ①卫星导航—时差计量 IV. ①TN967. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 306266 号

责任编辑 李 伟 执行编辑 侯杨杨 责任校对 赵 媛 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		010-68531363(编辑部)
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.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	8
印 张	8	字 数	159 千字
版 次	2018 年 1 月第 1 版	印 次	2018 年 1 月第 1 次印刷
印 数	001-800	定 价	58.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-4018-4

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

目 录

第1章 绪 论	1
§ 1.1 卫星导航时间系统概述	1
§ 1.2 卫星导航系统时差测量概述	3
§ 1.3 卫星导航系统时差测量的方法	8
§ 1.4 卫星导航系统时差预报	10
第2章 时差测量基本参数	12
§ 2.1 导航电文概述	12
§ 2.2 时差测量观测值	18
§ 2.3 时差测量误差改正	21
§ 2.4 时差性能指标评定	37
第3章 伪距时差测量	44
§ 3.1 伪距平滑	44
§ 3.2 单系统伪距时差测量算法	49
§ 3.3 多系统伪距时差测量算法	52
§ 3.4 伪距时差测量算例	59
第4章 相位时差测量	65
§ 4.1 PPP 时差测量	65
§ 4.2 多站网解时差测量	75
§ 4.3 相位时差测量参数估计方法	76
§ 4.4 PPP 相位时差测量算例	79
§ 4.5 多站网解相位时差测量算例	82

第 5 章 时差测量预报	86
§ 5.1 多项式模型	86
§ 5.2 灰色模型	87
§ 5.3 ARIMA 模型	88
§ 5.4 卡尔曼滤波模型	90
§ 5.5 周期项拟合预报模型	91
§ 5.6 时差预报改进模型	94
§ 5.7 时差预报算例	94
第 6 章 时差测量数据处理系统	98
§ 6.1 系统组成	98
§ 6.2 导航系统时差测量数据处理	101
§ 6.3 导航系统时差测量结果	103
§ 6.4 导航系统时差预报结果	111
§ 6.5 时差测量稳定度分析	116
§ 6.6 时差测量结果总结	119
参考文献	120

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Time System of Satellite Navigation Systems	1
§ 1.2	Time Offset Measurement of Satellite Navigation Systems	3
§ 1.3	Time Offset Determination Techniques	8
§ 1.4	Prediction of Time Offset	10
Chapter 2	Parameters of Time Offset Measurement	12
§ 2.1	GNSS Navigation Message	12
§ 2.2	GNSS Pseudo-range and Carrier-phase Observables	18
§ 2.3	Time Offset Measurement Error Resources	21
§ 2.4	Time Offsets Evaluation Indicators	37
Chapter3	Carrier-phase Based Time Offset Determination	44
§ 3.1	Pseudo-range Smoothing	44
§ 3.2	Single-system Pseudo-range Based Time Offset Determination	49
§ 3.3	Multi-system Pseudo-range Based Time Offset Determination	52
§ 3.4	Examples of Pseudo-range Based Time Offset Determination	59
Chapter 4	Phase Time Offset Determination	65
§ 4.1	PPP Based Time Offset Determination	65
§ 4.2	Time Offset Determination with Network Solution	75
§ 4.3	Parameter Estimation for Carrier-phase Based Time Offset Determination	76
§ 4.4	Examples of PPP-based Time Offset Determination	79
§ 4.5	Examples of Network Solution Based Time Offset Determination	82

Chapter 5	Prediction of Time Offset	86
§ 5.1	Polynomial Model	86
§ 5.2	Grey Model	87
§ 5.3	ARIMA Model	88
§ 5.4	Kalman Filtering Model	90
§ 5.5	Periodic Model	91
§ 5.6	Modified Periodic Model	94
§ 5.7	Examples of Time Offset Prediction	94
Chapter 6	Processing System	98
§ 6.1	System Structure	98
§ 6.2	Data Processing	101
§ 6.3	Results of Time Offset Determination	103
§ 6.4	Results of Time Offset Prediction	111
§ 6.5	Analysis of Time Offset Measurements	116
§ 6.6	Summary of Time Offset Measurements Analysis	119
References		120

第1章 绪 论

§ 1.1 卫星导航时间系统概述

自从 1967 年美国的海军导航卫星系统 (Navy Navigation Satellite System) 投入民用以来,全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)以其全天候、全球性、实时性及高精度的优势,得到了飞速的发展。卫星导航系统是国家重要的信息基础设施,对国家安全和经济社会发展起着重要的支撑作用。因此,世界大国无不关心卫星导航系统的建设及其技术的发展。尤其是近几年,GNSS 四大供应商:美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 及中国的北斗卫星导航系统(BDS)都在不断推进系统的建设。至 2017 年 3 月, GPS 系统共有 32 颗卫星在轨服务,其中 Block IIR 卫星 12 颗, Block IIR-M 卫星 8 颗, Block IIF 卫星 12 颗。GLONASS 系统目前共有 27 颗卫星在轨,其中 24 颗组网服务,另外 3 颗为备份及试验卫星。Galileo 系统也发射了试验卫星 GIOVE、在轨测试卫星 IOV 及正式组网卫星 FOV。2016 年 12 月 15 日,欧盟宣布 Galileo 系统开始初始服务,至 2017 年 3 月,系统已经有 18 颗卫星在轨服务。我国的北斗卫星导航系统近几年也得到了快速发展,并于 2012 年底向我国及周边的区域提供正式服务,目前系统在轨有 6 颗地球静止轨道(GEO)卫星、6 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星、3 颗中圆地球轨道(MEO)卫星提供组网服务。此外,日本准天顶卫星系统(QZSS)的第一颗卫星也于 2010 年 9 月 11 日发射成功,未来计划扩展成包含 7 颗卫星的区域导航系统。印度区域卫星导航系统(IRNSS)也于 2016 年 5 月完成了 7 颗卫星的组网运行。

卫星导航系统主要分为空间部分、控制部分及用户部分。其中空间部分主要由组网工作卫星星座组成,配备有信号发射机、高精度星载原子钟等设备用于发播观测信号、导航信号及卫星健康信息等各种系统信息。控制部分主要包括主控站、地面监测站等。它们的主要任务是:对卫星进行跟踪,收集观测数据,进行卫星轨道和钟差、电离层模型等参数的确定,将这些参数按照规定协议形成广播电文参数,通过主控站和监测站的星地链路向卫星上注。各个站上装备有高性能接收机和高精度原子钟用于形成系统服务所需的观测信息和进行高精度站间时间同步,并对导航系统的功能、性能、状态进行监视。用户部分主要由用户接收机和其他辅助设备组成,用户接收机利用观测到的卫星信号计算其所在的位置、速度、时间、大气参数,以及进行其他感兴趣的研究。

卫星导航系统以时间作为观测基准,通过测量发送、接收的时间差得到基本伪

距、相位观测量。导航系统的时间基准由空间卫星搭载的高精度原子钟以及地面控制部分各站配备的原子钟共同确定,并通过卫星发播的卫星钟差信息向用户进行传递。高精度的时间基准对于导航系统性能起着重要作用,如果时间的测定哪怕只有百万分之一的误差,也会导致几百米甚至更大的定位误差。目前各大导航系统不断对其进行性能提升,例如 GPS 在最新的 GPS-IIF 卫星上就搭载了新一代的具有铷铯合成频率的原子钟,其万秒以下的频率稳定度已经达到了 10^{-14} 的水平,相比之前的星载原子钟,性能有了大幅提高。新一代北斗卫星也试验搭载了更高精度的氢原子钟,从而有望实现更高精度的时间基准。

高精度的时间基准要求导航系统内部具备高精度的时间同步能力。时间同步需要精确确定时间系统中各组成部分(包括卫星星钟、地面站钟)之间的相对关系及变化趋势。衡量时间基准的参数主要包括频率稳定度、频率准确度和时间偏差。为保障各卫星发射的导航信号实现时间同步,基于时间测量的 GNSS 必须建立一个统一的时间参考,通常称为系统时间。该系统时间必须是独立、稳定可靠、连续运行的、均匀的自由时间尺度。同时,GNSS 系统时间必须与国际法定的标准时间——协调世界时(UTC)进行同步,以实现全球时间的同步和统一。

鉴于时间基准在 GNSS 中的重要作用,现有 GNSS 系统都十分重视时间基准系统的构建,除了空间卫星之外,地面主控站时频系统的维持与性能提升也尤为重要。GPS 系统时间由美国海军天文台(USNO)伺服。USNO 是当前全球最重要的守时实验室,拥有数量庞大的守时钟组及测量比对设备。GLONASS 系统时间由主控站的主钟定义,是以中央同步器时间为基础产生的,其溯源于俄罗斯联邦国家时间空间计量研究所提供的俄罗斯国家标准时间 UTC(SU)。Galileo 系统则结合了欧洲几个最重要的守时实验室的时间基准,共同构建 Galileo 时间参考系统,其中包括德国 PTB、英国 NPL、意大利 INRIM 等。我国的北斗系统的系统时间则是溯源于主控站的高精度钟组。

1. GPS 系统时间

根据卫星导航定位系统的特点,需要一个连续稳定的系统时间。GPS 系统时间(GPST)为连续的时间尺度,不进行闰秒,并溯源到美国海军天文台的协调世界时 UTC(USNO)。TAI 为国际原子时。GPST 从 1980 年开始启用并与当时的 UTC 在整秒上一致后至 2017 年 3 月,GPST 与 UTC、TAI 的差异为

$$\begin{aligned} [UTC - GPST] &= -18s + C_0 \\ [TAI - GPST] &= 19s + C_0 \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中, C_0 是 GPS 时间与 UTC 在秒小数位上的差值。

2. GLONASS 系统时间

俄罗斯的 GLONASS 全球卫星导航系统设计卫星数为 24 颗,其星载原子钟为高精度铯钟,其日稳定性为 10^{-12} 。GLONASS 时间(GLONASST)采用 UTC 作为时

间参考,其溯源到 UTC(SU)。至 2017 年 3 月, GLONASS 与国际原子时(TAI)及 UTC 的关系为

$$\begin{aligned} [UTC - GLONASS] &= 0s + C_1 \\ [TAI - GLONASS] &= 37s + C_1 \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中, C_1 是 GLONASS 时间与 UTC 在秒小数位上的差值。

3. Galileo 系统时间

Galileo 系统星载原子钟为高精度铷原子钟和被动型氢钟,其日稳定性分别为 10^{-13} 和 10^{-14} 。Galileo 时间参考系统(GST)参考 GPS 的做法,即与 TAI 在整数秒上差 19 s。GST 将被驾驭到一种时间预报国际伽利略时(GTI)上,GTI 通过 Galileo 时间供应商从欧洲的几个主要守时实验室 UTC(EU1)、UTC(EU2)、UTC(EU3) 获得。

4. 北斗卫星导航系统时间

北斗时(BDT)是由北斗卫星导航系统主控站高精度原子钟维持的原子时系统,它的秒长取为国际单位制(SI)秒,起始点选为 2006 年 1 月 1 日(星期日)的 UTC 零点。BDT 为连续的时间尺度,不进行闰秒。至 2017 年 3 月, BDT 与 TAI 及 UTC 的关系为

$$\begin{aligned} [UTC - BDT] &= -4s + C_2 \\ [TAI - BDT] &= 33s + C_2 \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中, C_2 是北斗时间与 UTC 在秒小数位上的差值。

§ 1.2 卫星导航系统时差测量概述

1.2.1 卫星导航系统时差测量

时差测量就是比对两个原子钟的时间,获取两个钟的差值。传统的时差测量方法为双向卫星时间频率传递(two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT)。TWSTFT 属于转发式时频传递手段,其原理如图 1.1 所示,地面站 A、B 通过同一卫星,同时向对方发送本地钟源的时间信号并接收对方钟的时间信号,然后用时间间隔计数器测量接收到的信号和本地钟信号之间的时间差。

两个时间间隔计数器的读数 $TIC(A)$ 和 $TIC(B)$ 为

$$\begin{aligned} TIC(A) &= t_A - t_B + \tau_{TB} + t_{BS} + \tau_{SBA} + t_{SA} + \tau_{RA} \\ TIC(B) &= t_B - t_A + \tau_{TA} + t_{AS} + \tau_{SAB} + t_{SB} + \tau_{RB} \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中: t_A 、 t_B 分别为 A、B 本地钟源的时间; t_{BS} 为信号从 B 发出由 S 收到所需要的传播时间,其中下标 S 代表卫星, t_{SA} 、 t_{AS} 、 t_{SB} 、 t_{BS} 类似; τ_{RA} 、 τ_{RB} 、 τ_{TA} 、 τ_{TB} 分别为 A、B 两地

收发设备的设备时延; τ_{SBA} 、 τ_{SAB} 分别为卫星转发不同来源信号时星上的设备时延值。从而两个时频信号的时差值为

$$2(t_A - t_B) = [TIC(A) - TIC(B)] + [(\tau_{TA} - \tau_{TB}) - (\tau_{RA} - \tau_{RB})] + [(t_{AS} - t_{SA}) - (t_{BS} - t_{SB})] + [\tau_{SAB} - \tau_{SBA}] \quad (1.5)$$

式(1.5)第二项表示两地设备时延,可以通过实验室进行精确的校准。第三项是两段空间路径的时延计算。第四项为卫星转播器时延部分。从式(1.5)可以看出,TWSTFT 消除星载钟时延的影响(式中第四项可以完全消掉);同样,由于两地面站发出的信号通过的路径完全相同,传递路径时延变化(几何路径、电离层、大气层)所造成的影响基本相同,在式中基本得到了消除。

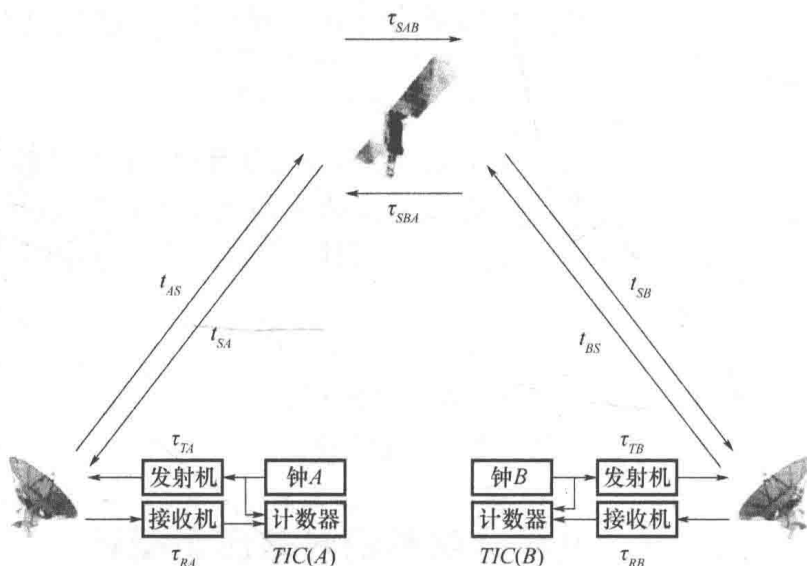


图 1.1 TWSTFT 的原理

但是 TWSTFT 技术需要租用专门的卫星(现在主要是 GEO 卫星)作为信号转发的媒介,参与双方需要专门的发射接收设备,其价格比较高,因此只能应用在一些大的实验室。

随着卫星技术和通信技术的发展,在高精度的时间比对(时差测量)技术上,原来的方法也逐步被卫星时差测量所代替。卫星导航系统时差测量主要是基于卫星导航系统播发的空间信号(包括电磁波信号和电文信息)进行卫星与卫星、卫星与地面、地面站之间时间差异的测量与计算。其原理为:卫星导航系统播发以系统时间信号为基准的信号,用户通过接收卫星广播电文获取自身的时间信息,将不同用户的时间进行比对就能获取相应的时差。

最早发展起来的卫星时差测量技术就是 GPS 单向时间比对,但是 GPS 单向法只能达到约 20 ns 的精度,不能满足现代实验室之间高精度时间比对的需要。在此

基础上,人们又提出了 GPS 共视法(common view, CV)。共视法能够使两站间的共同误差得到消除或削弱,因此大大提高了时间比对的精度。从 1995 年开始,国际计量局(BIPM)时间部在计算国际原子时(TAI)时,就依靠各时间实验室的单通道单频 GPS 接收机每天 48 次跟踪卫星,把全球 70 多个时间实验室几百台高精度原子钟的资料通过共视比对处理,统一归算成 UTC(OP)-UTC(k)。目前,GPS 共视法是国际原子时系统中最广泛应用的比对手段。

近年来,为了与原子频标的发展相适应,TWSTFT、GPS C/A 码多通道时间比对、GLONASS P 码时间比对和 GPS 载波相位时频比对等技术应运而生,它们将在 TAI 的计算中逐步取代单通道的 GPS 共视比对。另外,还包括了 GPS/GLONASS 一体化共视比对方法,进行的比对实验也取得了很好的结果,BIPM 提出利用测地型 GPS 接收机进行时间比对,并在 BIPM 计算 TAI 中得到了应用。

随着技术的发展,时差测量的精度也在不断提高,由以前的 ms 量级、 μ s 量级发展到现在的 ns 量级、0.1 ns 量级甚至更好。图 1.2(Lewandowski, 2000)给出了各种时间比对技术的精度比较。

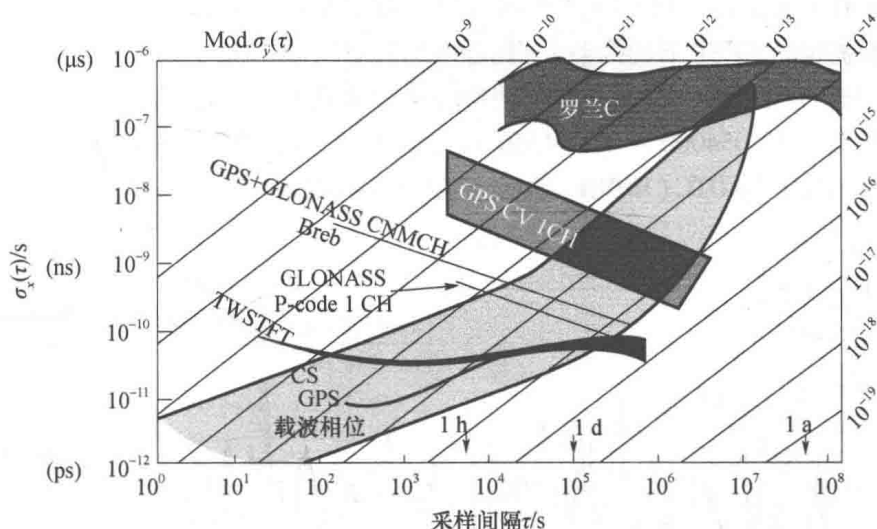


图 1.2 各种时间比对技术的精度比较

从图 1.2 中可以看出,铯频标和氢脉泽的日稳水平基本在 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ 或略高,为了能够反映钟的良好性能,必须采用统计方法对比对数据平滑滤波,把比对中的测量噪声降到最低水平。设 τ_0 为最短的平均采样时间,对于以上两类频标,采用 GNSS 相位观测数据, τ_0 只需要 1 个历元(通常为 1 s);采用 TWSTFT 技术,则 $\tau_0 \approx 5$ min。如果利用罗兰 C,则 $\tau_0 = 50$ d 左右,这显然不能满足该类频标的比对需要。如果利用 GPS 共视法,对于较短基线上取 $\tau_0 \approx 1$ d,对于较长基线,取 $\tau_0 \approx 3 \sim 5$ d 的时间就能反映钟的性能。参与 TAI 计算的铯原子喷泉钟日稳好于 1.5×10^{-15} ,为了反映其性

能,利用传统 GPS 共视法,则 τ_0 需要大大延长。目前 TAI 计算中采用的 $\tau_0 = 5 \text{ d}$,如果继续沿用 5 d 的采样间隔,则单频多通道 GPS 共视法不能满足这类频标的比对需要。

1.2.2 卫星导航系统时差测量分类

按照功能,时差测量主要可分为以下几类:

1. 系统时间监测

系统时间监测的原理就是利用高稳定度、高准确度的地面时间基准,在主控站、监测站对卫星导航系统的时间信号进行连续的性能监测,从而对卫星导航系统时间、卫星钟时间完好性和性能指标进行评估,向用户提供系统的可靠性、完好性信息。

监测站用户接收到导航电文后,可计算出观测时刻对应的系统时间。对于维持系统时间的时间实验室接收机,其同时可以获取实验室的时间信号 $\text{UTC}(k)$ 。比较两组时间信号就可获取导航系统的系统时间与 $\text{UTC}(k)$ 时间的差异。

美国海军天文台利用 GPS 定时接收机接收卫星的空间信号,并在此基础上获取其在系统时间 GPST 下的钟差。将该钟差与 $\text{UTC}(\text{USNO})$ 进行比对,所获取的就是 GPST 与 $\text{UTC}(\text{USNO})$ 之间的系统偏差,从而实现在主控站对 GPST 进行监测。图 1.3 给出了 MJD54000 ~ MJD54350 一年内 GPST 与 $\text{UTC}(\text{USNO})$ 的时差结果。可以看出,GPST 与 $\text{UTC}(\text{USNO})$ 的时差在一年内峰值在 $\pm 5 \text{ ns}$ 以内,均方根为 1.7 ns 。

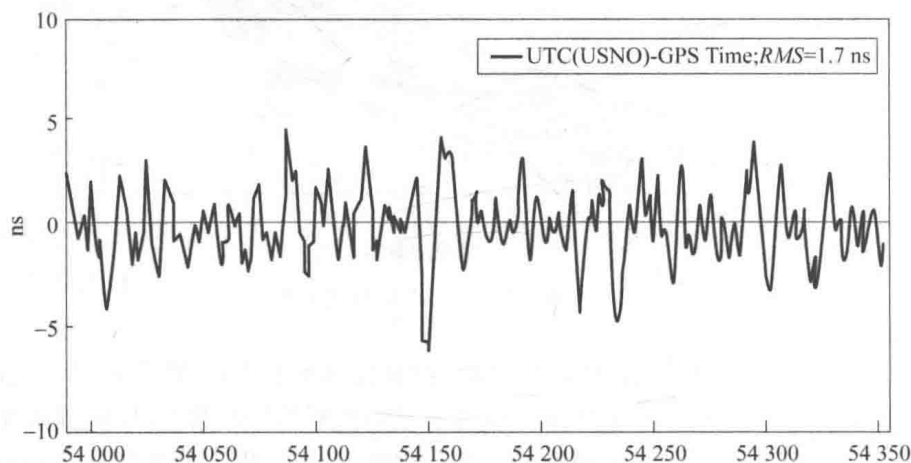


图 1.3 GPST 与 $\text{UTC}(\text{USNO})$ 时差监测值

2. 时间频率传递

时间传递就是比对两个钟的时间,类似的把比对两个钟的频率称为频率传递。

国际计量局负责协调世界时的生成与发布。国际计量局将分布在全世界的 73 个实验室的几百台自由运转的高精度原子钟通过高精度时间比对归算,最终形成 UTC。得益于 GNSS 时差观测技术的迅速发展,目前国际计量局大部分的时间频率比对是基于 GNSS 观测技术进行。

Hackman 等(2010)计算了测站 USN3(外接 GPS 主控站时频信号 USNO)与国际 GNSS 服务组织(IGS)全球观测网中参与数据处理测站的时差测量值。图 1.4 为数据处理中不同测站与测站 USN3 的距离,其中距离在 6 000 ~ 6 999 km 的测站最多。将 IGS 最终测站之间的时差作为参考值,对 2009 年 11 月到 2010 年 10 月一年的各站与 USN3 的时差测量结果进行统计,图 1.5 给出了时差测量值的精度,图中同时给出了测站 USN3 与各卫星以及卫星之间的时差测量精度。从图中可以看到,即使测站(卫星)之间距离超过 10 000 km,利用卫星导航系统进行时差传递的精度仍然优于 0.2 ns。

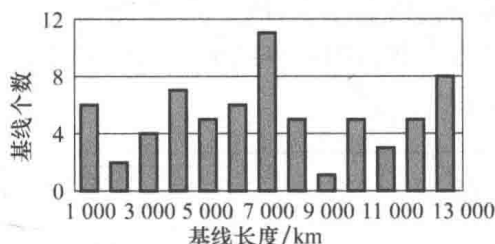


图 1.4 IGS 测站与测站 USN3 的距离

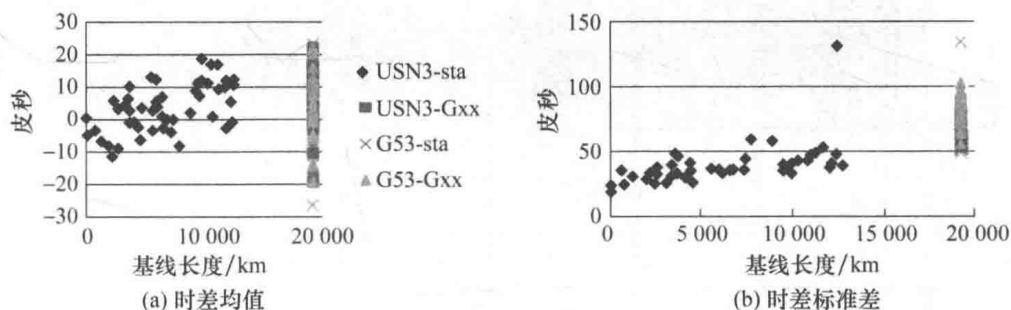


图 1.5 USN3 与各测站时差测量值的精度(G 为 GPS 卫星)

3. GNSS 系统时差监测

目前,正式运行的 GNSS 系统包括 GPS、GLONASS、北斗卫星导航系统,同时 Galileo 系统也正式运行了。多个 GNSS 系统的建设,使系统间兼容与互操作成为各大系统和谐共处、提供更好的服务、提高市场竞争力的必然手段。

任意单一卫星导航定位系统都有易受人为局部干扰、卫星覆盖有局限等缺点。如果实现多个 GNSS 系统组合应用,不但能够拓展系统的可用范围、克服单系统由

于观测条件限制(如城市中建筑物遮挡、森林中树木遮挡)而无法定位的现象,还可以在采集数据时增加可观测卫星数目、提高测量定位的精度、增强测量定位结果的正确性和可靠性。

GNSS 系统时差监测将解决多个系统时间基准差异问题,通过对系统时差的连续监测与综合处理,获取各个导航系统的时差值并进行预报。从而解决 GNSS 多系统共用条件下,系统间的兼容问题,最终实现统一时间基准下的多模兼容服务。

图 1.6 (Lahaye et al,2011)计算了不同数据和处理方法情况下测站 GUSN(美国华盛顿,外接 GPS 主控站时频信号 USNO)、GIEN(意大利都灵,外接 Galileo 试验时频信号 EGST)之间的时差,也即代表了 GPS 与 Galileo 系统时差 EGGTO。其中 GPS TT 是基于每秒原始伪距观测值,并基于广播星历进行时差计算的结果;PPP pseudo 是基于平滑伪距观测值及精密星历利用精密单点定位(precise point positioning, PPP)方法获得的时差结果;PPP phase 是基于相位观测值及精密星历利用精密单点定位 PPP 方法获得的时差结果。三种方法获得的时差精度分别为 4.4 ns、1.1 ns 及 0.1 ns。

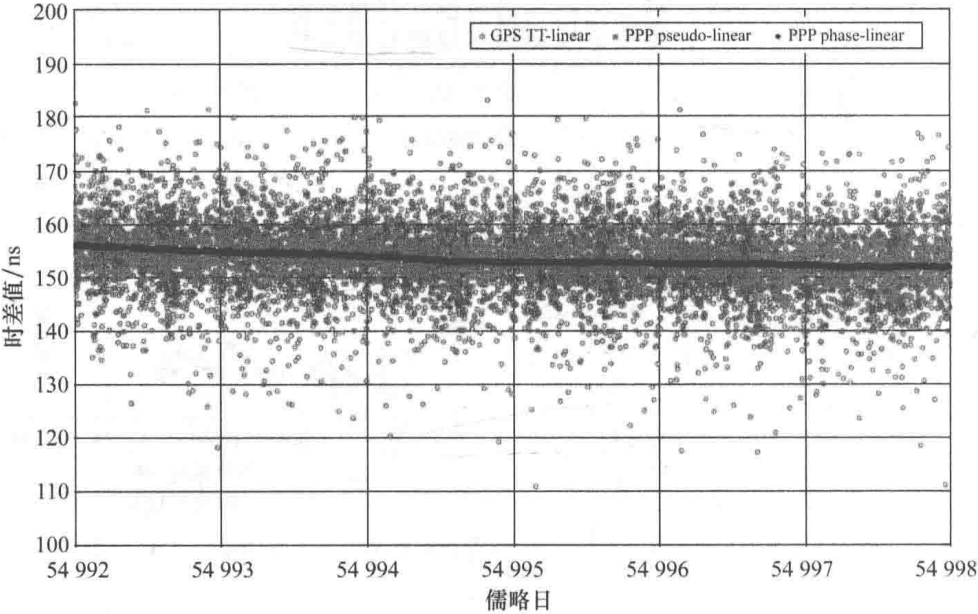


图 1.6 测站 GUSN 与 GIEN 之间的时差测量结果

§ 1.3 卫星导航系统时差测量的方法

GNSS 时差测量可通过多种手段实现,包括单站定时法、卫星共视法、卫星全视

法、精密单点定位法及多站网解等方法。

1. 单站定时法

单站定时是通过外接时频信号的监测站观测导航卫星信号,对导航卫星系统时间与接收机外接时间信号的差异进行监测。其原理如图 1.7 所示,其采用伪距观测值,按照一定的数据处理策略,在指定的时间间隔输出每颗卫星相应的时差测量值,从而达到系统时间性能监测的目的。典型的应用为美国海军天文台(USNO)对 GPST 与 UTC(USNO)差异的监测。

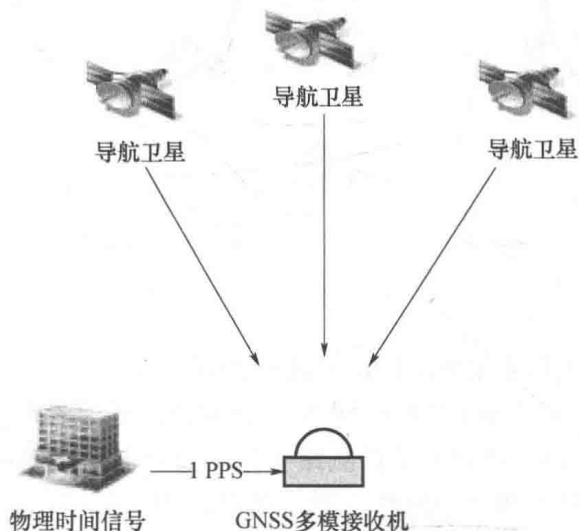


图 1.7 单站定时时差测量

2. 卫星共视法

卫星共视法(common view, CV)是指处于不同位置的测站,在同一时间跟踪观测同一颗卫星,然后在接收机间单差,这样可以消除卫星轨道误差、卫星钟误差、大气折射等共同的误差,从而取得比单站单向定时更高的观测精度。如图 1.8 所示,测站 A 与测站 C 可通过 PRN01 号卫星实现卫星共视;测站 B 与测站 C 可通过 PRN02 卫星实现共视;而测站 A 与测站 B 的时差测量则需要通过测站 C 进行过渡。共视法一般要求两接收机同时对某颗卫星连续跟踪 13 min 以上,且卫星高度角大于 20° 。对于较长基线,电离层(单频)、对流层等共同误差源相关性减小,GPS CV 所起到的主要作用大大削弱。

3. 卫星全视法

卫星共视法适应较短基线,如果基线较长,则由于无法在共同视野中观测到共视星而必须选择中间站作为中继。并且由于需要公共卫星,而减少了参与计算卫星的数量,计算的数据大大减少,因此其精度受到限制。卫星全视法(all in view, AV)时差测量利用每个观测站上观测到的所有卫星数据进行处理,获取每个测站

本地时间与导航卫星系统时间的时差值。在相同时间系统基准基础上,对两个站观测的时差值求差就能获取两站之间的时差测量值,如图 1.9 所示。

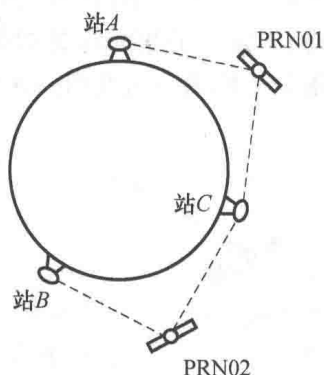


图 1.8 卫星共视法时差测量

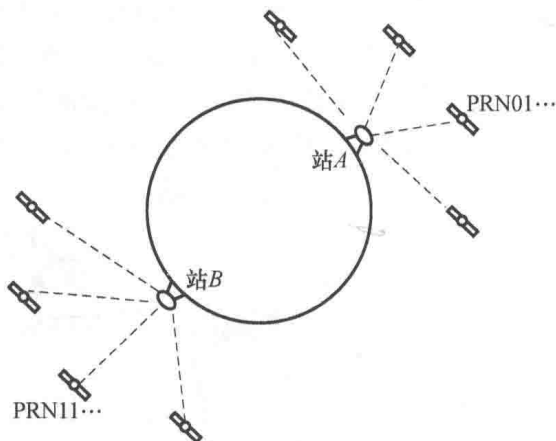


图 1.9 卫星全视法时差测量

4. 精密单点定位法

精密单点定位法是采用外部提供的精密轨道、钟差,利用双频无电离层组合伪距和相位观测值,在估计钟差参数的同时,估计对流层延迟参数。双频无电离层组合能够消除电离层延迟的影响,估计测站坐标以及对流层参数能进一步提高参数求解的精度。由于时差测量中测站一般是固定的,因此在采用精密单点定位方法求得测站精确坐标之后,可对其坐标进行固定,只估计钟差和对流层参数。

相比前几种方法,精密单点定位法采用了更高精度的相位观测值、更高精度的轨道、钟差产品及更为精确的参数估计算法。

5. 多站网解法

精密单点定位法的时差测量受到卫星轨道、钟差的影响较大,目前用于后处理应用中。随着 IGS 组织 RTPP(real-time pilot project)项目的进一步发展,其有望实现实时高精度的处理。以上除了 PPP 方法之外的其他方法都是采用伪距观测数据,因此其精度受到伪距观测值的限制。

为消除时差测量受卫星轨道、钟差的影响,可采用多站网解的方法。多站网解时差测量法是将卫星钟差(或者轨道)与测站钟差一起解算。数据处理时选用一个参考钟 REF,则任意时刻求取的卫星钟差及其他测站钟差为相对于该参考钟的相对钟差,这也是目前 IGS-RTTP 所采用的策略。

§ 1.4 卫星导航系统时差预报

由于卫星在空间轨道飞行,卫星钟与地面时间基准的比对可能不是连续进行