

GPS精密卫星钟差的计算模型研究^{*}冯义楷¹⁾ 刘焱雄¹⁾ 单瑞^{1, 2)} 高兴国¹⁾ 李杰¹⁾

¹⁾国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061
²⁾山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266510

摘要 为解决卫星相对钟差估计问题, 设计3种观测网布设方案, 比较采用不同网型数据计算的卫星钟差结果, 并将计算所得的卫星钟差应用于精密单点定位计算, 分析其对定位精度的影响。结果显示, 卫星钟差的计算模式与跟踪站位置无关, 小区域计算的卫星钟差也具有较高的应用价值。

关键词 GPS精密单点定位; 星历; 卫星钟差; 非差相位

中图分类号: P227

文献标识码: A

STUDY ON CALCULATION MODEL OF PRECISE
GPS SATELLITE CLOCK ERRORFeng Yikai¹⁾, Liu Yanxiong¹⁾, Shan Rui^{1, 2)}, Gao Xingguo¹⁾ and Li Jie¹⁾

¹⁾The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061
²⁾College of Geomatics, SDUST, Qingdao 266510

Abstract The estimation of relative satellite clock is discussed and three observation network layout schemes are designed. By using data from different networks, different satellite clock error results can be obtained and used for PPP calculation, and then their impacts on the positioning accuracy are analyzed. The results show that the satellite clock estimation does not depend on the location of GPS stations, and the estimation of the satellite clock from a small region is still valuable.

Key words GPS; Precise Point Positioning (PPP); satellite ephemeris; satellite clock error; un-differenced phase

1 前言

GPS精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 是最新的定位技术, 主要利用 GPS 卫星精密星历及精密卫星钟差, 以单台双频 GPS 接收机采集的非差码观测值和载波相位观测值作为主要数据进行单点定位计算, 其精度可达分米级甚至厘米级^[1-3]。

PPP 技术借助国际或区域 GPS 数据分析处理中心的 GPS 产品和互联网、移动通讯服务, 完全能够实现全球、单机、实时、厘米级的定位。但是由于受制于卫星轨道和卫星钟差的实时性和精度, PPP 技术的实时应用未能广泛开展。国际 GNSS 服务组织 (IGS) 公布的资料显示卫星预报轨道的精度已经很高, 而预报卫星钟差的精度远远低于最终钟差的精

^{*} 收稿日期: 2009-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (40745025); 国家 863 计划项目 (2009AA12Z127); 海洋公益性行业科研专项 (200705003); 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项 (2007G18); 山东科技大学研究生科技创新基金 (YCA090203)

作者简介: 冯义楷, 男, 1979年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 GNSS 精密定位技术、海洋测绘等。E-mail: ykfeng@fj.org.cn

度,约为 5 ns 左右^[4]。 5 ns 的卫星钟差等效于 1.5 m 的距离观测误差,对位置估值的影响达到米级。由此可见,卫星钟差的精度已经成为 PPP技术实时应用的瓶颈。

近年来,国内学者也在钟差研究方面投入了大量精力,他们利用 IGS站数据估计的卫星钟差和 GPS的精密预报星历解算动态数据,在 PANDA软件平台下实现了亚米级动态定位精度^[5-7]。但是 IGS站数据和产品具有滞后性,上述研究工作在理论上证实了技术可行,但并不能由此真正实现分米级实时精密单点定位。

国内机构尚不具备实时管理和处理大型 IGS站网的能力,因此目前不可能通过 IGS站数据获取实时精密卫星钟差。另外,跟踪站之间的距离太远,也影响数据的实时处理和系统应用。随着连续运行参考站(Continuous Operational Reference System, CORS)和通讯技术的发展,在国家层面及省市地区陆续出现了区域 CORS网络,部分 CORS网络实现了数据的实时传输。本文结合现有区域 CORS网及 IGS网,设计 3种用于钟差计算的控制网布设方案,以验证卫星钟差计算与测站位置之间的关系,并利用已有的可用于计算卫星钟差的数据处理平台,分别计算各网型的卫星钟差。分析、比较不同网型数据计算的卫星钟差结果,并将计算所得卫星钟差用于 PPP动态数据解算,结果证明可以利用几个区域 CORS网计算钟差替代 IGS钟差,将计算产品用于实时 PPP计算,可以实现实时分米级的定位精度。

2 精密卫星钟差计算

目前可用于卫星钟差计算的有武汉大学的 PANDA软件、瑞士伯尔尼大学的 Bemese GPS数据处理软件等大型 GPS数据处理平台。各数据处理平台在钟差计算流程上相似。在精密卫星钟差估计中,一般采用无电离层影响的非差相位和伪距观测值,观测值误差方程为:

$$\varphi = \rho + \Delta T - \Delta t + \Phi_{\text{trop}} + \lambda N + \epsilon_{\varphi} \quad (1)$$

$$P = \rho + \Delta T - \Delta t + \Phi_{\text{trop}} + \epsilon_P \quad (2)$$

式中: φ 和 P 分别为相位与伪距的无电离层影响的组合观测值, λ 为无电离层影响组合观测值的波长;

c 为光速, ρ 为信号发射时刻的卫星位置到信号接收时刻接收机位置的几何距离, ΔT 为接收机钟差, Δt 为卫星钟差, Φ_{trop} 为对流层延迟, ϵ_{φ} 和 ϵ_P 为多路径、观测噪声等未模型化的误差影响。GPS观测值是测站与卫星之间的相对时间延迟。因此,不能同时确定所有的卫星和接收机钟差,必须先固定某一基准钟(卫星钟或接收机钟)的钟差,然后确定其他

接收机和卫星的相对钟差。只要保证基准钟的钟差精度优于 10^{-6} s ,相对钟差和绝对钟差对用户定位结果而言是等价的,即相对钟差的系统性偏差在用户定位模型中可完全被用户接收机钟差吸收,而不影响用户的定位精度^[8]。

目前引入基准钟的方法有两种:1)利用所用跟踪网络的所有钟定义一个虚拟基准钟,基准钟由所有钟共同维持;2)利用跟踪网络中的一个接收机作为基准钟。相比两种方法,第一种方法比较可靠,但是实现起来相对困难;第二种方法实现起来比较简单。在保证基准接收机钟稳定可靠的前提下,采用第二种方法也是可行的。

在具体实现上,各 IGS分析中心通常利用 GPS站的外接原子钟,在计算卫星钟差时选择其中的某个原子频标并将其固定。然而,一般的 GPS站没有外接原子频标,其内置的石英钟的精度在 100 ns 量级,如果固定其中某个接收机内的钟差,其计算出的卫星钟差与实际钟差相差很大,并且每个历元之间也出现 100 ns 量级的抖动,无法进行精度分析和实际应用。

由公式(1)和(2)可知,如果进行星间单差,能够有效地消除接收机钟差,计算出准确的卫星相对钟差。为此进行如下处理:

1)计算时先固定某个接收机的钟差;

2)计算出的钟差序列每个历元上进行星间单差,得到星间单差钟差序列;

3)以 IGS提供的某个卫星的绝对钟差为参考钟差值;

4)根据 2)给出的星间单差卫星钟差序列和 3)提供的卫星参考钟,恢复卫星绝对钟差序列。

3 控制网布设及钟差计算

单站 GPS观测不可能确定卫星的钟差,必须依靠多个测站联合求解,这就涉及到 GPS站址的布设方案。为此,本文设计长、中、短程基线 3种布站方案,分析讨论各观测方案的可行性、可靠性和准确性,比较 3种方案计算卫星钟差的精度。根据分析结果判断能否采用短基线计算的钟差代替中长基线得出的结果。

3种 GPS站址布设方案为:选择中国境内的 BJFS KUNM和韩国的 DAE等 3个 IGS站组成大网,3条基线长度均在 $1\ 000\text{ km}$ 以上,最长为 DAE-J KUNM 超过 $2\ 000\text{ km}$ (图 1);中网和小网均选择广西泛北部湾 CORS观测站构成,中网为 JZ02、JZ05、JZ07 3个点,其中该控制网最短基线为 78 km ,最长基线为 124 km ;小网由 JZ01、JZ03、QIIG 3个控制点

组成, 3条基线长度均在 30~40 km之间 (图 2)。

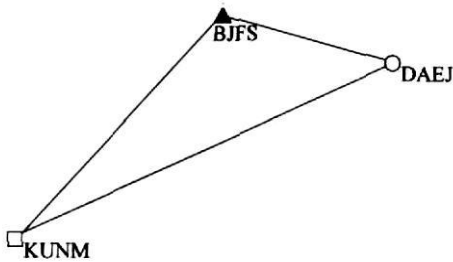


图 1 大网网型图
Fig 1 Diagram of big network type

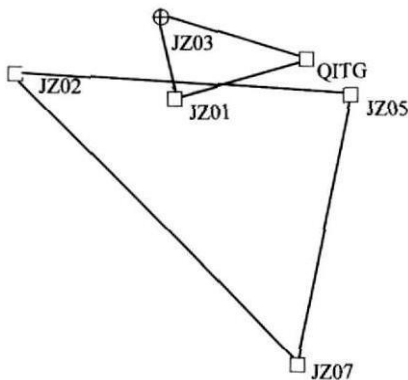


图 2 中网与小网网型图
Fig 2 Diagram of middle and small network types

收集上述 9 个点同期观测资料, 同时收集相同时间段内 GPS精密卫星星历、GPS预报卫星星历和钟差产品 (选取 2008 年 10 月 11 日的数据进行计算研究)。将收集到的原始观测数据分别按大网、中网、小网组成 3 个 GPS观测方案, 分别计算 3 个网的 GPS精密卫星钟差。软件在计算卫星钟差的时候会 自动选择其中一测站时钟作为基准钟, 其他站和卫星的钟差是相对此基准钟的相对钟差。

4 结果分析

由于 3 种观测方案控制点点位不相同, 基准钟也存在差异, 计算出的相同历元同一卫星的钟差相互之间没有可比性。为比较不同网型的 GPS卫星钟差, 须在相同历元中选择同一卫星作为参考卫星, 历元中其他卫星钟差与参考卫星钟差求一次差, 消除由于基准钟选择不同而对钟差产生的影响。将一次差的计算结果与 GPS结果之间作二次差, 可以有效地反映出计算结果与 GPS事后精密钟差之间的符合程度。

为便于和 GPS事后精密卫星钟差结果比较, 计算卫星钟差时采用 5 分钟的时间间隔。共比较了 6 组相对钟差的二次差数据, 分别为大、中和小网相互比较及与 GPS事后精密的比较, 比较结果见表 1 和表 2。

表 1 3 个网型计算钟差相互比较 (单位: s)

Tab 1 Comparison among the clock errors calculated with three network types

二次差	大—中	大—小	中—小
平均值	$-9.505\,09\times10^{-11}$	$1.273\,63\times10^{-10}$	$2.224\,14\times10^{-10}$
标准偏差	$1.950\,23\times10^{-9}$	$2.216\,76\times10^{-9}$	$1.968\,57\times10^{-9}$

表 2 3 个网型与 GPS精密相对钟差比较 (单位: s)

Tab 2 GPS relative clock error compared among the three network types (unit: s)

二次差	GPS相对值—大	GPS相对值—中	GPS相对值—小
平均值	$-7.641\,53\times10^{-12}$	$1.090\,66\times10^{-10}$	$1.097\,69\times10^{-10}$
标准偏差	$2.363\,82\times10^{-9}$	$2.331\,68\times10^{-9}$	$2.740\,10\times10^{-9}$

从表 1 可以看出, 大网与中网计算钟差的相似度略好, 与小网钟差的相似度稍差; 3 种方案计算的标准偏差结果都相差无几, 说明 3 种方案计算卫星钟差精度相当。

由表 2 可知, 由 GPS计算的相对钟差与大网保持了很好的一致性, 与其他两种网型结果稍差; 计算钟差与 GPS钟差之差的标准偏差为 2 ns左右。

将 GPS精密钟差作为真值, 3 种计算方案中的参考卫星钟差以对应的 GPS精密卫星钟差替换, 重新反算其他卫星的钟差。将计算的卫星钟差与 GPS精密卫星钟差作比较, 选取其中的 3 颗卫星的比较结果列于表 3。各卫星钟差比较见图 3~5。

表 3 卫星钟差比较 (单位: ns)

Tab 3 Comparison among different satellite clock error (unit: ns)

卫星号	4号	10号	26号
GPS钟差—大网	平均值	-3 228 353-3 758 025-1 429 765	
	标准偏差	0 033 7	0 037 9 1 261 4
GPS钟差—中网	平均值	-1 815 216-2 753 947-1 941 713	
	标准偏差	1 922 5	0 785 0 1 974 2
GPS钟差—小网	平均值	-3 020 843-2 521 216-1 754 850	
	标准偏差	1 460 48	0 447 02 2 134 105

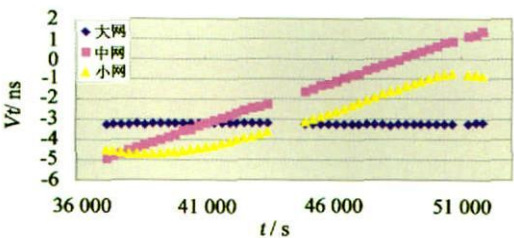


图 3 4 号卫星钟差比较图
Fig 3 Comparison among the clock errors of No. 4 satellite of the three network types

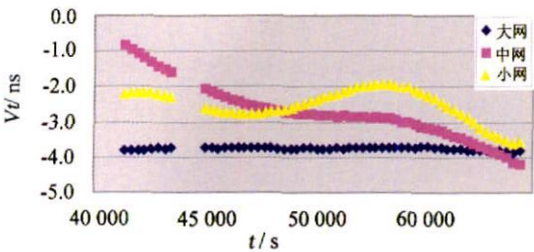


图 4 10号卫星钟差比较图

Fig 4 Comparison among the clock errors of No. 10 satellite of the three network types

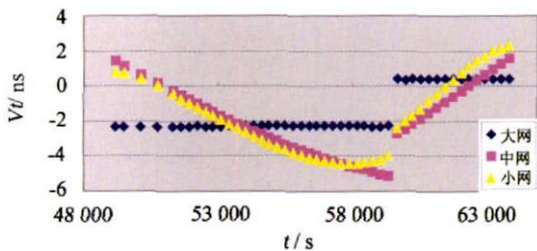


图 5 26号卫星钟差比较图

Fig 5 Comparison among the clock errors of No. 26 satellite of the three network types

分析可以得出: 1)计算钟差与 IGS钟差之间仍然存在系统性误差; 2)中网与小网计算钟差与 IGS计算钟差的差值存在规律性变化, 究其原因是由于接收机钟精度不高, 由接收机钟漂引起计算的卫星钟差存在规律性漂移。

将计算的钟差编辑成标准钟差格式, 利用该钟差和 IGS预报卫星星历对广西 CORS站进行动态 PPP解算。计算的结果与 PPP单天解的比较结果见表 4。

表 4 计算坐标结果比较 (单位: m)

Tab 4 Comparison among the calculated coordinates (unit: m)

网型	ΔX			ΔY			ΔZ		
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值
大网	-0.007 5	0.050 3	0.034 1	0.273 2	-0.561 9	0.347 6	-0.351 8	0.910 0	0.826 8
中网	-0.351 8	0.910 0	0.826 8	0.384 2	-0.296 2	0.299 7	-0.783 0	1.074 0	0.644 3
小网	-0.783 0	1.074 0	0.644 3	0.389 6	-0.697 0	0.358 3			

比较结果表明, 利用计算的卫星钟差和 IGS预报星历可以实现亚米级动态定位; 3种网型计算的结果相当。其中, 大网由于采用 IGS站数据, 钟差对定位影响变化相对平稳, 故解算结果稍好于其他两种网型的结果。

5 结论

- 1)利用计算的卫星钟差可以实现亚米级动态定位;
- 2)3种网型计算钟差精度相当;
- 3)计算钟差与 IGS钟差存在系统性误差, 具体原因需进一步研究。

参 考 文 献

1 陈俊勇, 党亚明, 程鹏飞. 全球导航卫星系统的进展 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007 (5): 1—4 (Chen Junyong, Dang Yaming and Cheng Pengfei. Development and progress in GNSS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007 (5): 1—4)

2 刘焱雄, 等. 网解和 PPP解的等价性 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版) 2005 30(8): 736—738 (Liu Yanxiong et al. Equivalence of Network Solution and PPP Solution [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005 30(8): 736—738)

3 吴江飞, 黄城. GPS精密单点定位模型及其应用分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008 (1): 96—100 (Wu Jiangfei and Huang Cheng. GPS precise positioning models and their utility analysis [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008 (1): 96—100)

4 Kouba J and Heroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products [J]. GPS Solutions, 2001, 15(2): 12—28

5 叶世榕. GPS非差相位精密单点定位理论与实现 [D]. 武汉大学, 2002 (Ye Shirong. Theory and implementation of GPS precise point positioning using undifferenced phase data [D]. Wuhan University, 2002)

6 耿涛, 等. 基于 PANDA软件的实时精密单点定位研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版) 2007 32(4): 312—315 (Geng Tao et al. Real-time precise point positioning based on PANDA software [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007 32(4): 312—315)

7 楼益栋, 等. GPS精密卫星钟差估计与分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版) 2009 34(1): 88—91 (Lou Yidong et al. Realization and analysis of GPS precise clock products [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009 34(1): 88—91)

8 刘经南, 等. GPS广域差分定位原理与方法 [M]. 北京: 测绘出版社, 1999 (Liu Jingnan et al. GPS positioning principles and methods [M]. Beijing: Survey and Mapping Press, 1999)