

文章编号:1001-1595(2011)02-0226-06

一种基于 IGS 超快星历的区域性实时精密单点定位方法

易重海^{1,3}, 陈永奇², 朱建军^{1,3}, 戴吾蛟^{1,3}

1. 中南大学 测绘与国土信息工程系, 湖南 长沙 410083; 2. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港; 3. 湖南省精密工程测量与形变灾害监测重点实验室, 湖南 长沙 410083

An Approach to Regional Real Time Precise Point Positioning Based on IGS Ultra-rapid Orbit

YI Zhonghai^{1,3}, CHEN Yongqi², ZHU Jianjun^{1,3}, DAI Wujiao^{1,3}

1. Department of Survey Engineering and Geomatics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Department of Land Surveying and Geoinformatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. Key Laboratory of Precise Engineering Surveying and Deformation Hazard Monitoring of Hunan Province, Changsha 410083, China

Abstract: Real time precise point positioning (PPP) needs real time GPS orbit and clock product. An approach to real time PPP using regional GPS continuously operating reference stations (CORS) data and IGS ultra-rapid (IGU) product is proposed. First, real time GPS satellite clock is estimated using regional CORS data and IGU real time predicted orbit product. Then real time PPP positioning for user GPS receiver is conducted using the estimated real time satellite clock and IGU real time predicted orbit. Experiments show that the approach can be used to get centimeter level PPP result, and can extend PPP service area several hundreds kilometer away from CORS.

Key words: GPS; precise point positioning; IGU product; real time

摘要:实时 GPS 精密单点定位需要实时的卫星轨道和钟差产品,为此提出一种利用区域 GPS 连续运行参考站和 IGS 发布的 IGU 超快轨道进行实时精密单点定位的方法。该方法首先利用连续运行参考站观测数据与 IGU 超快轨道预报部分进行实时 GPS 卫星钟差的估计,然后利用估计得到的实时 GPS 卫星钟差产品和 IGU 超快轨道预报部分,进行用户 GPS 接收机的实时精密单点定位。试验表明该方法可达到厘米级实时精密单点定位的要求,并且该方法可用于相距 CORS 区域数百公里范围内的精密单点定位。

关键词:GPS; 精密单点定位; IGU 产品; 实时

中图分类号:P228

文献标识码:A

基金项目:国家自然科学基金(40704002); 香港研究资助委员会基金(PolyU5132/05E)

1 引言

GPS 精密单点定位技术 (precise point positioning, PPP) 是指在外部高精度 GPS 卫星轨道和钟差产品的支持下,对单个测站的非差 GPS 伪距和相位观测值数据进行处理,获得分米级、厘米级甚至毫米级定位结果的一种 GPS 数据处理技术^[1]。当前静态 PPP 的定位精度为毫米级至厘米级,动态 PPP 的定位精度为厘米级至分米级,定位收敛时间约为半小时^[2-5]。在实时精密卫星轨道和钟差产品的支持下,PPP 技术可以实现实时数据处理而得到实时的定位结果,称为实时 PPP 技术。近年来,该技术得到了长足的发展,如美国 JPL 已经开发了实时全球 PPP 系统^[6];加拿大 NRCAN 也开发了区域实时 PPP 系统^[7],其服务范围仅限于加拿大及其周边区域;NavCom

公司已经成功推出商用实时 PPP 系统^[8];加拿大 Calgary 大学开发了具有事后和实时 PPP 功能的 P3 软件,该软件在实时 PPP 处理时采用 JPL 提供的实时精密卫星轨道和钟差产品^[9]。实时 PPP 技术的关键是实时精密卫星轨道和钟差产生算法,上述各实时 PPP 系统需要建立一个覆盖全球(或某一较大局部区域)的 GPS 观测网络,将各站 GPS 观测数据实时地传送至系统控制中心,进行 GPS 卫星轨道的精密确定,然后利用预报的实时轨道(该轨道每隔一段时间,如数小时进行更新)进行 GPS 卫星钟差的实时估计,最后基于系统产生的精密轨道和钟差产品为用户提供实时精密单点定位服务。该类系统估计的未知参数众多,除系统所必需的卫星轨道和钟差参数外,还需估计诸如相位模糊度、接收机钟差和测站天顶对流层延迟等参数。因此此类系统对数据通讯和计算机

硬件要求均比较高,并且小范围区域 GPS 网不能进行 GPS 卫星的精密定轨,故不能应用此方案建立基于小范围区域网的实时 PPP 系统。当前可以免费获取的实时 GPS 卫星轨道和钟差产品有:① 广播星历;② 国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)提供的实时超快精密 GPS 卫星轨道和钟差产品^[10]。对于广播星历,由于轨道和卫星钟差精度太差,不能满足厘米级至分米级精密单点定位的要求。而 IGS 提供的实时超快精密 GPS 卫星轨道和钟差产品,虽然轨道精度达到 10 cm,但卫星钟差精度较差,约为 5 ns,且钟差数据的采样间隔为 15 min,也不能用于厘米级实时精密单点定位^[11]。因此,要使用 IGS 提供的免费产品进行厘米级实时精密单点定位,就必须自主估计实时卫星钟差。估计卫星钟差的方案主要有两种:① 单参考站方案,即采用一个参考站的观测数据估计卫星钟差;② 多参考站方案,即采用多于一个参考站的观测数据进行卫星钟差估计。显然,多参考站方案较之单参考站方案有诸多优点:观测数据成倍增加,提高卫星钟差的估计精度和可靠性;观测到的卫星数更多,跟踪的卫星弧段更长。单参考站方案虽然成本较低,但由于仅采用一个参考站进行钟差估计,估计的钟差容易受到相位周跳、接收机故障等影响,且无法进行有效的质量控制,因此本文选择多参考站方案。另外,基于 CORS 的网络 RTK 技术虽然在该 CORS 网覆盖区域内或附近,无论在定位的精度还是收敛速度方面,均优于 PPP 技术,但按本文思想建立的区域性实时 PPP 系统可以满足本区域和区域外数百公里范围实时精密单点定位,这是网络 RTK 技术无法比拟的。基于以上考虑,本文尝试利用区域 CORS 网观测数据和 IGS 发布的实时产品 IGU 超快轨道预测部分,进行 GPS 卫星钟差的实时估计,然后利用估计得到的实时卫星钟差产品与 IGU 超快轨道预测部分,进行该区域及其周边区域的实时 PPP 测试,以验证该方法的效果。

2 基于区域 CORS 网的 GPS 实时 PPP 方法

2.1 基于区域 CORS 网的 GPS 实时 PPP

基本思想与算法流程

该方法的基本思想是将 IGS 发布的 IGU 超快轨道的预测部分作为实时 GPS 卫星轨道,则只

需要由 CORS 系统中各站的观测值计算实时的 GPS 卫星钟差,就可以得到实时 PPP 所需的实时轨道和钟差产品;然后根据 IGU 轨道预报部分和系统估计的实时 GPS 卫星钟差,进行用户 GPS 接收机的实时精密单点定位,图 1 为算法具体流程,其中最关键的是实时卫星钟差的估计。

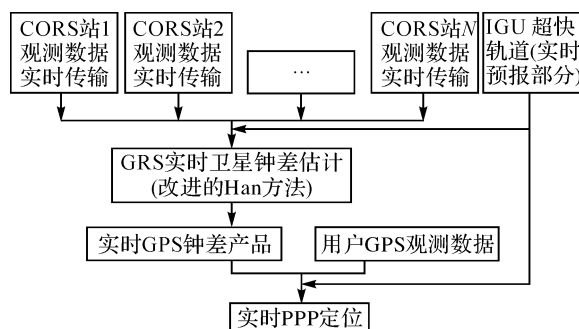


图 1 基于区域 CORS 网的 GPS 实时 PPP 流程

Fig. 1 Flowchart for real-time PPP based on regional CORS network

2.2 GPS 精密单点定位模型

GPS 精密单点定位一般以非差载波相位和伪距为观测值,观测值中的电离层延迟误差通过双频信号组成消电离层组合消除、对流层延迟误差和接收机钟差则通过引入未知参数进行估计,观测方程如下

$$\left. \begin{aligned} P &= \rho + c(dt - dT^i) + M \cdot zpd + \varepsilon_P \\ \phi &= \rho + c(dt - dT^i) + M \cdot zpd + N^i + \varepsilon_\phi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, P 为消电离层伪距组合观测值; ϕ 为消电离层相位组合观测值; ρ 为测站 (x, y, z) 与 GPS 卫星 (X^i, Y^i, Z^i) 之间的几何距离; c 为光速; dt 为 GPS 接收机钟差; dT^i 为 GPS 卫星 i 的钟差; N^i 为消电离层相位组合观测值的模糊度(不具有整周特性); M 为对流层映射函数; zpd 为接收机天顶对流层延迟; ε_P 和 ε_ϕ 分别为消电离层伪距和相位观测值的观测噪声与多路径误差。因此,PPP 数据处理的未知数向量包括 3 个接收机坐标参数、1 个接收机钟差参数、1 个天顶对流层延迟参数和 n 个消电离层浮点模糊度参数(n 为观测到的 GPS 卫星数)。组成观测方程以后,可以采用卡尔曼滤波或者序贯滤波进行 PPP 数据处理,详细的算法请参照文献[2]。

2.3 GPS 卫星钟差的实时估计

为满足 PPP 处理所需的高采样率卫星钟差,文献[12]提出一种利用 IGS 最终精密卫星轨道和多个 IGS 跟踪站的非差相位观测值估计 GPS

卫星之间相对钟差的方法^[12]。该方法的基本思想和计算步骤如下:

(1) 固定 GPS 卫星轨道和 IGS 站坐标为 IGS 发布的精密轨道和测站坐标,采用一个经验对流层模型对观测值中的对流层延迟进行建模,这样观测值误差方程中未知参数只剩下卫星钟差、接收机钟差和消电离层组合模糊度。

(2) 在相邻历元间进行对相位观测值进行历元间差分,以消去模糊度参数,再对每站的历元间差分相位观测值进行星际差分,消去接收机钟差参数,此时观测值误差方程中只剩下卫星钟差参数。

(3) 对每一测站获得的星间相对钟差历元间的变化值进行平均,得到星间相对钟差历元间变化值的最或然值 $dt^{k,l}(t_{i,i-1})$ (k 和 l 分别代表两个卫星, $t_{i,i-1}$ 代表 t_i 与 t_{i-1} 历元之间)。

(4) 根据初始历元 t_1 时刻 k 和 l 卫星的星间相对值 $dt^{k,l}(t_1)$,以及 t_1 时刻至任意时刻 t_n 之间 $n-1$ 个星间相对钟差历元间变化值 $dt^{k,l}(t_{i,i-1})$, ($i=2, \dots, n$)。对这些项进行累加,即可得到任意时刻 t_n 的星间相对钟差 $dt^{k,l}(t_n)$ 。以此方法对每一卫星对进行处理,完成所有星间相对钟差的估计。

在进行卫星钟差的实时估计时,本文对 Han 方法进行如下改进:使用 IGU 轨道的预报部分取代 IGS 最终轨道,作为 GPS 卫星的轨道;考虑到用户采用的定位软件可能是基于非差观测值的情况,因此将相对卫星钟差转换成常用的绝对卫星钟差产品。本文采用的方法是:利用超快轨道中的卫星钟差采用拉格朗日多项式插值方法计算每一历元基准卫星的钟差 $dt^k(t_i)$,则任意历元 t_i 的其他非基准卫星钟差为

$$dt^l(t_i) = dt^k(t_i) + dt^{k,l}(t_i) \quad (2)$$

由以上描述可知,当各 GPS 站实时地将观测数据发送至系统控制中心后,采用 IGU 超快轨道的预报部分作为实时轨道,即可逐个历元计算出当前历元跟踪到的卫星钟差值,以满足实时 PPP 系统的需求。基于该方法,笔者从底层开发一个进行实时卫星钟差估计的软件,试验中用到的实时卫星钟差均由该软件计算得到。

3 试验及分析

3.1 试验数据

本文选择的试验区域为香港,该地区 CORS

网总共有 12 个 GPS 永久跟踪站,站间的平均距离为 15 km~20 km,数据采样率为 5 s。其站点分布如图 2 所示。

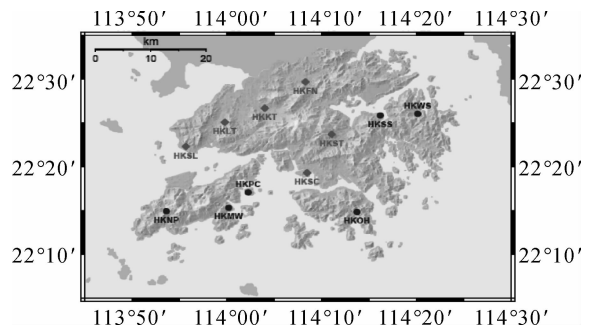


图 2 香港地区 CORS 站分布图

Fig. 2 Distribution of Hong Kong CORS stations

试验选取除 HKFN 站以外的 11 个香港参考站的观测数据 (HKFN 站被选取进行香港地区的实时 PPP 测试);观测时间为 2008-10-07 日 03 时至 2008-10-08 日 03 时 (GPS 时,下同);观测值采样率为 5 s;卫星钟差估计间隔为 30 s。计算时首先采用 GAMIT/GLOBK (V 10.3) 软件^[13-14]将香港基准站与其周边的 IGS 跟踪站进行网络解,获得香港各 GPS 站在 ITRF2005 框架下的精确坐标;然后在钟差估计中以此作为 GPS 站的位置予以固定。

为研究该方法能否用于区域 CORS 网周边地区实时 PPP 定位,还选择台湾 IGS 站 TWTF 进行试验。TWTF 站离香港的直线距离约为 765 km,其数据采样率为 30 s,观测数据的时间为 2008-10-07 日 03 时至 2008-10-08 日 03 时,共计 24 h。

3.2 实时卫星钟差产品与定位软件

考虑到 IGS 每隔 6 h 发布一次 IGU 产品,而且发布时刻存在 3 h 的时间延迟^[8],本次试验所采用到的 IGU 产品及其对应的有效时段如表 2 所示,对应的实时 PPP 测试分为 4 个,即 Test 1~Test 4。为与 IGS 发布的 IGU 文件命名一致,将对相应的利用香港区域 CORS 网结合 IGU 轨道估计的实时钟差文件分别命名为:igu15002_00.clk, igu15002_06.clk, igu15002_12.clk 和 igu15002_18.clk。为便于后面试验的描述,表 1 给出了 HKFN 和 TWTF 两个测站进行实时 PPP 测试中所用到的 IGU 产品名及其各测试的命名。

表 1 实时 PPP 测试中 IGU 产品使用

Tab. 1 IGU products used in real time PPP positioning

IGU 产品名	实时 PPP 定位时的产品有效时段	测试名 (HKFN)	测试名 (TWTF)
igu15002_00.sp3/clock	3:00—9:00	Test1	Test5
igu15002_06.sp3/clock	9:00—15:00	Test2	Test6
igu15002_12.sp3/clock	15:00—21:00	Test3	Test7
igu15002_18.sp3/clock	21:00—3:00(次日)	Test4	Test8

实时 PPP 软件为作者从底层开发的能够进行事后和实时 PPP 数据处理软件,该软件的详细算法参见文献 [2], PPP 软件定位结果与 GAMIT/GLOBK 软件^[13-14]得到的相对定位结果进行比较,表明该 PPP 软件算法正确,能够得到厘米级精密单点定位结果^[11]。笔者对 PPP 软件解算参数的具体设置如下:非差消电离层组合相位和伪距观测值天顶方向的中误差分别为 1 cm 和 1 m;天顶对流层延迟随机游走过程噪声为 5 mm/ \sqrt{h} ;测站坐标分量随机游走过程噪声为 30 m/ \sqrt{s} ;接收机钟差随机游走过程噪声为 3 000 m/ \sqrt{s} ;对流层映射函数为 GMF^[15];卫星截止高度角为 10°。

3.3 HKFN 站实时动态 PPP 测试

HKFN 站的 4 个实时 PPP 测试结果如图 3 所示,定位时间间隔为 5 s,收敛后 PPP 结果的中误差如表 2 所示(图 3 中横坐标为相应测试从第一历元起算的小时数,图 4 同)。

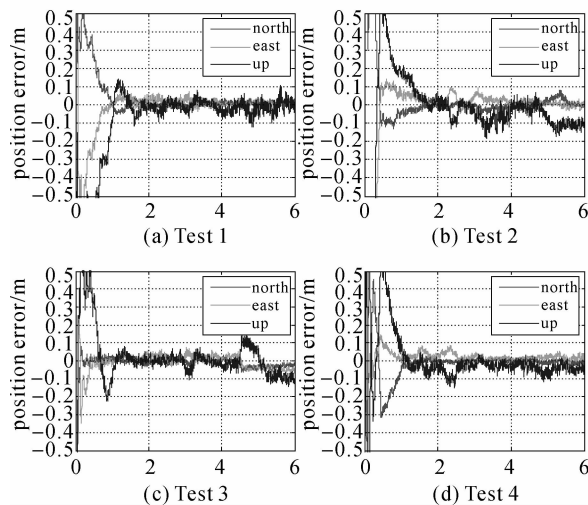


图 3 Test 1~Test 4 实时 PPP 结果误差(HKFN 站)
Fig. 3 Real-time PPP position error for Test 1 to Test 4 (HKFN station)

由图 3 和表 2 可知,采用 IGU 超快轨道预报部分结合香港 CORS 观测数据,进行 GPS 卫星钟

差的实时确定,可以使实时精密单点定位达到厘米级精度,收敛时间约为 1 h。

表 2 Test 1~Test 4 实时 PPP 结果中误差 (HKFN 站)

Tab. 2 RMS of real time PPP results for Test 1 to Test 4 (HKFN) /m

测试	北分量	东分量	高程分量
Test 1	0.013 1	0.019 9	0.031 4
Test 2	0.020 4	0.028 8	0.073 8
Test 3	0.023 3	0.034 1	0.056 4
Test 4	0.009 8	0.025 0	0.047 7

3.4 TWTF 站实时动态 PPP 测试

与 HKFN 站测试一样,TWTF 站也根据实时香港区域 GPS 卫星轨道和钟差产品,进行了 4 次测试,分别称为 Test 5~Test 8,具体的情况如表 1 所示。4 个测试结果如图 4 所示,定位计算的时间间隔为 30 s,收敛后 PPP 结果的中误差如表 3 所示。

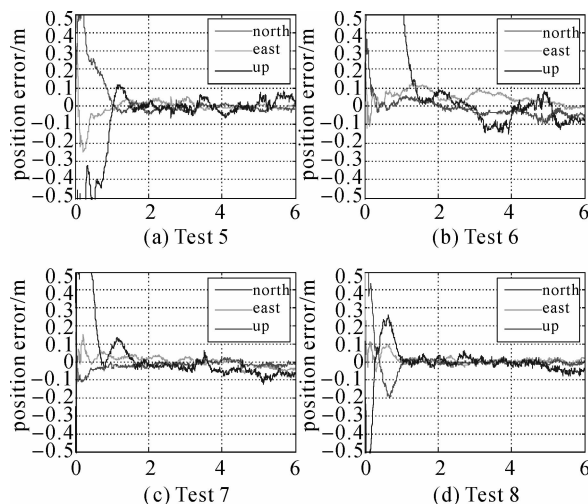


图 4 Test 5~Test 8 实时 PPP 结果误差(TWTF 站)
Fig. 4 Real-time PPP position error for Test 5 to Test 8 (TWTF station)

表 3 Test 5~Test 8 实时 PPP 结果中误差 (TWTF 站)

Tab. 3 RMS of real time PPP results for Test 5 to Test 8 (TWTF) /m

测试	北分量	东分量	高程分量
Test 5	0.016 1	0.017 4	0.031 9
Test 6	0.040 4	0.045 0	0.070 6
Test 7	0.014 5	0.027 9	0.050 6
Test 8	0.008 3	0.012 6	0.029 4

由图 4 和表 3 可知,基于香港 CORS 的区域实时 GPS 钟差产品,在距离香港 765 km 的台湾 TWTF 站进行实时动态 PPP 结果与香港 HKFN

站的实时动态 PPP 结果精度基本上一致。这说明基于区域 CORS 网的 GPS 实时 PPP 方法,不仅可以用于该区域本身,还可以用于周边更大范围的地区。在一定的卫星截止高度角条件下,只要 PPP 作业区域与建立实时 PPP 系统的 CORS 区域共视卫星大致相同,则此作业区域属入实时 PPP 系统有效工作区域。根据作者的试验,在 CORS 网计算实时卫星钟差取观测值截止高度角为 5° 、PPP 计算取截止高度角为 10° 的情况下,实时 PPP 系统有效工作区域为距离 CORS 区域约 1 000 km 以内的广大区域。

3.5 实时卫星钟差产品的精度评价

本文估计的钟差是实质上为各历元各卫星钟差相对于基准卫星钟差的差值,因此在评价实时钟差产品的精度时,只需比较各历元卫星间的相对钟差。由于目前精度最高的卫星钟差产品为 IGS 发布的 30 s 卫星钟差产品,以下几个典型卫星对的相对钟差精度评定,都是与 IGS 最终 30 s 间隔卫星钟差产品进行比较的。图 5 为 Prn13、19、23 和 25 号卫星与基准卫星 Prn03 钟差之差与 IGS 最终 30 s 间隔精密卫星钟差相比的残差图(注:IGS 超快星历每隔 6 h 更新一次及 6 小时内基准卫星发生更替两个因素导致以 Prn03 为基准卫星的相对钟差数据较少,仅 380 个历元)。4 个卫星对相对钟差的比较结果如表 4 所示。

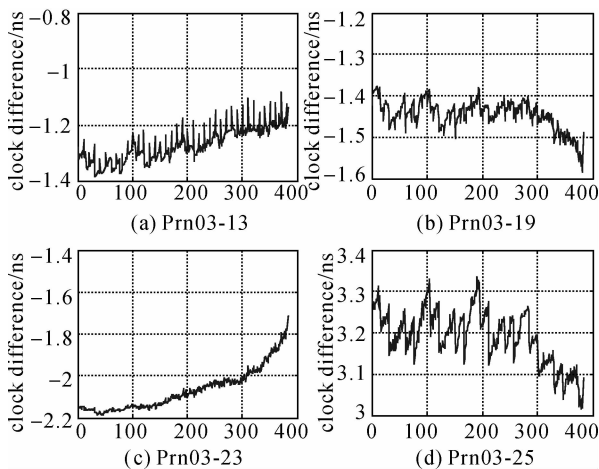


图 5 4 个典型卫星对的钟差之差残差图

Fig. 5 Residual for 4 typical satellites pair clock

由图 5 可以看出,随着时间的延长,估计的实时卫星钟差精度有所下降,存在一定的发散趋势,但在 6 小时之内精度下降幅度很小,从图 3 和图 4 定位结果可知其对实时精密单点定位的影响

基本上可以忽略。由表 4 可知,实时 GPS 卫星钟差相对于基准卫星的钟差之差一般存在几个纳秒的整体偏差,这是由于在实时卫星钟差估计中所用的起始历元的钟差是对 IGU 超快星历中的钟差产品进行插值计算得到的,而 IGU 超快星历中的卫星钟差精度大约为 5 ns。精密单点定位计算时,该相对钟差的整体偏差可以被卫星的模糊度参数所吸收,因而不会对定位的结果产生影响。此外,基准卫星的钟差也是由 IGU 产品中的卫星钟差数据进行插值计算得到的,所以每一历元基准卫星的钟差均与该时刻卫星钟差真值存在偏差,但该偏差可以被接收机钟差参数吸收,因此也不会对 PPP 定位中的坐标分量求解产生影响。由此,实际上对精密单点定位影响最重要的是卫星间相对钟差的稳定性,即各卫星间相对钟差相对于其真值的变化,其评价指标可用相对卫星钟差的标准差。从表 4 可以看出,各卫星对的相对钟差标准差均低于 0.1 ns,这表明本文的钟差估计方法及自主开发的实时 GPS 卫星钟差估计软件能够获得高精度的卫星钟差产品,满足实时 PPP 要求。

表 4 4 个卫星对钟差的残差统计结果

卫星对	偏差	标准差
03-13	-1.27	0.060
03-19	-1.44	0.036
03-23	-2.07	0.098
03-25	3.19	0.064

至于图 5 中呈现的钟差精度下降现象,由于本文方法中影响卫星钟差估计精度的主要误差项为卫星轨道误差和对流层延迟误差,同时考虑到 IGU 超快轨道精度较好,而在估计实时卫星钟差时采用实测的香港各站气象元素与对流层延迟模型进行对流层延迟改正,因此初步认为是对流层延迟误差改正不完善造成的。据此,笔者采用 GAMIT/GLOBK(V 10.3)^[12-13] 软件估计香港参考站及周边 IGS 站的天顶对流层延迟值(事后估计值),然后在模拟实时卫星钟差估计中采用天顶对流层延迟估计值进行对流层延迟改正,卫星轨道仍采用 IGU 超快轨道预报部分,最后得到“实时”卫星钟差。将此卫星钟差与 IGS 最终 30 s 间隔卫星钟差产品进行比较。具体的,将与图 5 中观测时段相同的 6 h 内所有卫星对钟差的残差序列除去整体偏差后绘图,比较结果如图 6 所示。

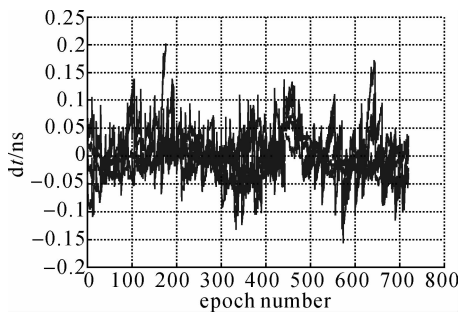


图 6 所有卫星对的残差序列(除去整体偏差)

Fig. 6 Residual for all satellites pair clock (bias removed)

由图 6 可知,在整个 6 h 内卫星钟差精度比较均匀,不存在明显的发散现象。因此可以确认图 5 中钟差精度随时间略微下降是钟差估计过程中对流层延迟残余误差引起的。如何提高实时卫星钟差产品估计中对流层延迟改正精度将是下一步需要研究的问题。

4 结 论

利用 IGS 超快轨道与区域 CORS 观测数据进行实时 PPP 定位的方法可以达到厘米级定位要求,而且该方法不仅可以用于 CORS 网本区域,还可以用于距离 CORS 区域达数百公里以外的地区进行实时 PPP 定位(在 CORS 网区域内,不推荐采用本文提出的 PPP 定位方法)。由于本文采用区域 CORS 网覆盖范围较小,不能对所有 GPS 卫星进行全弧段跟踪,如果利用省级区域 CORS 网,其应用范围可进一步扩大。此外本文算例的实时 PPP 定位大约需要 30~60 min 三维坐标分量才能收敛到厘米级,如何进行加快 PPP 定位收敛时间将是下一步需要重点研究的问题。

参考文献:

[1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B3): 5005-5017.

[2] KOUBA J, HEROUX P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28.

[3] GAO Y, SHEN X. A New Method for Carrier Phase Based Precise Point Positioning[J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 2002, 49(2): 109-116.

[4] ZHANG Xiaohong, LIU Jingnan, FORSBERG R. Application of Precise Point Positioning in Airborne Survey[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,

2006, 31(1): 19-22. (张小红, 刘经南, FORSBERG R. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2006, 31(1): 19-22.)

- [5] NIE Jianliang, YANG Yuanxi, WU Fumei. An Algorithm of Dynamic Precise Point Positioning Based on Modified Particle Filtering [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(4): 338-343. (聂建亮, 杨元喜, 吴富梅. 一种基于改进粒子滤波的动态精密单点定位算法[J]. *测绘学报*, 2010, 39(4): 338-343.)
- [6] MUELLERSCHOEN R J, BERTIGER W I, LOUGH M F. Results of an Internet-Based Dual-frequency Global Differential GPS System [C] // *Proceedings of IAIN World Congress*. California: [s. n.], 2000: 796-802.
- [7] COLLINS P, LAHAYE F, KOUBA J, et al. Real-time WADGPS Corrections from Undifferenced Carrier Phase [C] // *Proceedings of ION-NTM-2001*. California: ION, 2001.
- [8] DIXON K. StarFire: A Global SBAS for Sub-decimeter Precise Point Positioning [C] // *Proceedings of ION GNSS 2006*. California: ION, 2006: 2286-2296.
- [9] GAO Y, CHEN K. Performance Analysis of Precise Point Positioning Using Real-time Orbit and Clock Products [J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2005, 3(1-2): 95-100.
- [10] IGS Products [EB/OL]. [2009-12-10]. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.
- [11] CHEN Y Q, YI Z H. Development of a Precise Point Positioning Software and Test Results [C] // *Proceedings of the 2008 International Symposium on GPS/GNSS*. Tokyo: [s. n.], 2008.
- [12] HAN S C, KWON J H, JEKELI C. Accurate Absolute GPS Positioning through Satellite Clock Error Estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 2001, 75(1): 33-43.
- [13] HERRING T A, KING R W, MCCLUSKY S C. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT Version 10. 3 [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [14] HERRING T A, KING R W, MCCLUSKY S C. GLOBK Reference Manual: Global Kalman filter VLBI and GPS Analysis Program Version 10. 3 [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [15] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 1-4.

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2010-02-08

修回日期: 2010-09-24

第一作者简介: 易重海(1977—),男,博士生,主要从事 GPS 数据处理工作。

First author: Yi Zhonghai (1977—), male, PhD candidate, majors in GPS data processing.

E-mail: yizhonghai@gmail.com