

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.009

基于 SSR 改正的实时精密单点定位精度分析

夏风雨,叶世榕,赵乐文,胡广保

(武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉 430079)

摘要:通过 IGS 分析中心实时播发的 SSR(State Space Representation)信息修正广播星历轨道和钟差,使用扩展 Kalman 滤波数据处理方法仿真实时精密单点定位。结果表明:经过实时 SSR 修正后的广播星历钟差与 IGS 最终钟差产品相比,精度优于 0.15ns。广播星历 SSR 修正的实时精密单点定位单天解 ENU 方向 RMS 优于 20cm,其优于超快速预报星历的实时精密单点定位结果,低于基于 IGS 最终精密星历的动态精密单点定位精度。

关键词:扩展 Kalman 滤波;精密单点定位;实时 SSR

中图分类号:U666.12

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)03-0052-06

Analysis of Real-time Precision Point Positioning Based on SSR Corrections

XIA Feng-yu, YE Shi-rong, ZHAO Le-wen, HU Guang-bao

(Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, Forecasting ephemeris and clock is corrected by real-time SSR (State Space Representation) information IGS Analysis Center broadcast and simulation of real-time precise point positioning is realised by using the extended Kalman filter algorithm. The results shows that, compared to IGS final clock products, the accuracy of SSR modified broadcast ephemeris clock is better than 0.15ns. The ENU direction RMS of SSR broadcast ephemeris corrected real-time precise point positioning is better than 20cm in single day solution, better than the results of rapid ephemeris of real-time precise point positioning and lower than dynamic precise point positioning results of the IGS final precise ephemeris.

Key words: Extended Kalman filter; Precise point positioning; Real-time SSR

0 引言

传统的精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)是根据全球若干个 GNSS 跟踪站观测数据解算的最终精密轨道和精密钟差,利用单台接收机所采集的伪距和载波相位数据,收敛后实现单历元厘米级或者毫米级的定位精度^[1]。自 2007 年以来,为了满足实时定位需要,IGS 启动了 IGS-RTPPP 项

目,各个分析中心根据全球实时跟踪网络采集的 GNSS 数据,实时估计轨道和钟差改正数并以 SSR (State Space Representation)形式基于 NTRIP 协议通过 Internet 向全球播发^[2]。本文利用各个分析中心的精密轨道产品进行精密单点定位解算,获得目前不同分析中心事后轨道产品的动态精密单点定位精度,并验证 IGS 超快速星历由于卫星钟差精度较低无法满足实时 PPP 需求。再通过对多个

收稿日期:2016-12-09;修订日期:2017-01-03

基金项目:福建省科技计划项目(2016Y00002)

作者简介:夏风雨(1994-),男,在读研究生,主要研究方向为高精度 GNSS 数据处理。E-mail:1550427769@qq.com

分析中心的实时 SSR 数据流仿真实时 PPP, 评估目前基于实时 SSR 修正信息的精密单点定位精度。

1 精密单点定位基本原理

1.1 函数模型

本文采用传统的双频 LC 观测模型, 首先对数据进行预处理, 考虑对流层延迟误差、硬件延迟、地球自转改正、固体潮、海洋潮、相位缠绕等误差项影响, 基本观测方程为:

$$\frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} P_1 - \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} P_2 = \rho + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{\text{trop}} + M_p + \epsilon_p(P_{\text{IF}}) \quad (1)$$

$$\frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} L_1 - \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} L_2 = \rho + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{\text{trop}} + M_\phi + \epsilon_\phi(\Phi_{\text{IF}}) - \lambda_j \cdot N_j \quad (2)$$

式中, L_i 表示表示不同频率上的载波观测值, P_i 表示表示不同频率上的伪距观测值, ρ 表示卫星与测站之间的几何距离, dt_r 、 dt^s 分别表示接收机和卫星的钟差, d_{trop} 表示信号路径方向的对流层延迟, M_p 、 M_ϕ 表示其他未列出的误差, 例如硬件延迟、固体潮、海洋潮等引起的误差。 N_j 表示第 j 颗卫星的整周模糊度。 $\epsilon_p(P_{\text{IF}})$ 、 $\epsilon_\phi(\Phi_{\text{IF}})$ 表示双频无电离层伪距和载波组合的测量噪声误差^[3]。

采用扩展 Kalman 滤波数据处理方法, 通过引入状态向量及其协方差矩阵的动力学模型, 将递推最小二乘推广到更一般的形式。与递归最小二乘有相似的优点, 不需要储存以前所有的观测数据, 根据前一时刻的状态估值以及精度信息和当前时刻观测值以及精度信息递推新的状态估值。

状态方程为

$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi_{k,k+1} \mathbf{X}_k + \mathbf{W}_{k+1}, \mathbf{W}_{k+1} \sim N(0, \mathbf{Q}_{k+1}) \quad (3)$$

观测方程为

$$\mathbf{L}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{X}_{k+1} + \mathbf{V}_{k+1}, \mathbf{V}_{k+1} \sim N(0, \mathbf{R}_{k+1}) \quad (4)$$

式(3)、式(4)中: k 、 $k+1$ 表示前一历元和当前观测时刻, \mathbf{X} 表示 n 维状态向量空间, $\Phi_{k,k+1}$ 表示状态转移矩阵, \mathbf{W}_{k+1} 表示动态噪声, \mathbf{Q}_{k+1} 为相应的协方差阵, \mathbf{L}_{k+1} 表示观测向量, \mathbf{H}_{k+1} 表示系数矩阵, \mathbf{V}_{k+1} 表示观测误差, \mathbf{R}_{k+1} 表示相应的协方差阵, 其中动态噪声和观测噪声为无关的高斯白噪声。

1.2 Kalman 滤波随机模型

1.2.1 观测方程方差阵

在 GNSS 导航中, 观测模型已经逐渐完善, 研究对象逐渐转向随机模型的确立。随机模型的确

定是十分重要的, 对于观测值的方差阵, 可以根据伪距和载波的测量噪声以及结合卫星高度角确定、卫星钟差内插精度、SNR 等方法确定。当 PPP 采用单系统观测值组合模型时, 应根据误差传播定律得到对应组合值的精度。当采用多系统融合的 PPP 时, 应根据验后方差定权方法更为合理。

1.2.2 状态方程方差阵

在无电离层组合 PPP 中, 估计参数有模糊度、测站坐标、对流层延迟以及接收机钟差。一般对于模糊度而言, 无周跳时认为是常数, 在探测该历元有周跳时, 采用模糊度初始化的方法。而测站坐标、对流层延迟、接收机钟差估计一般采用一阶高斯马尔科夫模型或者随机游走^[4]。通常, 静态 PPP 时测站坐标和模糊度(无周跳时)采用纯随机游走, 对流层和接收机钟差可以采用随机游走和白噪声来模拟。本文使用无电离层组合的实时精密单点定位函数模型, 测站坐标采用白噪声, 接收机钟差采用白噪声过程模拟, 对流层采用纯随机游走, 起始 σ_0 为 0.3m, 噪声变化率设为 0.0001m/s。模糊度随机游走时, 起始 σ_0 为 30m, 噪声变化率为 0.0001m/s。

2 卫星轨道和钟差的计算

2.1 IGS 轨道产品及精度

IGS 提供的轨道产品及精度如表 1 所示, 精密星历和钟差与观测文件的历元间隔是不同的, 为了获得对应观测时刻的轨道信息, 对 IGS 提供的精密轨道产品采用内插方法获取历元时刻的卫星位置, 在很大程度上削弱了卫星轨道误差和卫星钟差对定位的影响^[5]。

表 1 IGS 轨道钟差产品

Tab. 1 IGS orbit and clock products

卫星星历	轨道精度/cm	钟差精度	时延	更新率
广播星历	100	0~5ns	实时	
超快速预测星历	5	0~3ns	实时	4次/天
超快速观测星历	3	0~150ps	3~9h	4次/天
快速星历	2.5	0~75ps	17~41h	每天
最终星历	2.5	0~75ps	12~18天	每周

2.2 基于 SSR 实时轨道和钟差的计算

本文通过 BNC 软件保存 IGS 分析中心播发的 SSR 实时数据流, SSR 是相对于广播星历的轨道改正项和钟差改正信息。所处坐标系如图 1 所示, 其中 SSR 中的轨道改正项对应着卫星轨道的法向、切向以

及径向,即卫星轨道的切向对应着卫星的速度方向,径向对应着卫星的位置矢量,那么法向就是垂直于卫星速度矢量和位置矢量的平面构成右手坐标系^[6]。由于导航定位中,需要地固坐标系下的卫星坐标,因此,在对广播星历计算的卫星坐标进行改正时,需要将在星固坐标系中的轨道改正数转换到地固坐标系下,进而对信号发射时刻的卫星坐标进行改正。

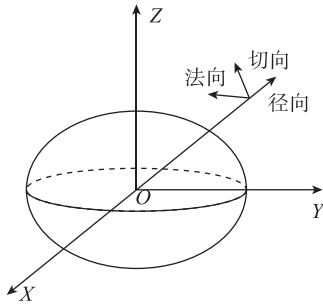


图1 SSR所属坐标系示意图

Fig. 1 The diagram of SSR coordinate

假设在 t_1 时刻由广播星历计算的卫星坐标为 $\mathbf{X} = (x^s, y^s, z^s)$, 卫星速度矢量为 \mathbf{v} , 钟差改正数为 d_{clk} 。与广播星历 IODE 相符最近的 SSR 信息时刻为 t_0 且满足 $(t_1 - t_0) \leq 90\text{s}$ 时, 依据 t_0 时刻的 SSR 改正量改正由广播星历计算的轨道和钟差。不妨假设 t_0 时刻, SSR 轨道改正数为 (x_0, y_0, z_0) , 钟差改正数 c_0 以及对应在该时刻的轨道改正数变化率为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, 钟速和钟速率分别为 c_1, c_2 , 则计算过程如下:

1) 计算卫星星固坐标系坐标轴在地固坐标系的指向 (e_a, e_c, e_r)

$$\begin{cases} e_a = \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} \\ e_c = \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{X}}{|\mathbf{v} \times \mathbf{X}|} \\ e_r = \frac{e_a \times e_c}{|e_a \times e_c|} \end{cases} \quad (5)$$

2) 计算 t_1 时刻地固坐标系下 SSR 改正量

首先计算 t_1 时刻的 SSR 在星固坐标系的改正

$$\text{量: } \begin{cases} x_t = x_0 + \Delta x \cdot (t_1 - t_0) \\ y_t = y_0 + \Delta y \cdot (t_1 - t_0) \\ z_t = z_0 + \Delta z \cdot (t_1 - t_0) \end{cases} \quad (6)$$

在根据 1) 中计算的星固坐标轴指向, 则地固坐标系中的改正量 (x_{te}, y_{te}, z_{te})

$$\begin{bmatrix} x_{te} \\ y_{te} \\ z_{te} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a & e_c & e_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 计算 t_2 时刻地固坐标系下卫星精确坐标和钟差 d_{clk}

$$\begin{bmatrix} x^s \\ y^s \\ z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^s \\ y^s \\ z^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{te} \\ y_{te} \\ z_{te} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对应的钟差计算为:

$$d_{\text{clk}} = d_{\text{clk}} + (c_0 + c_1 \cdot (t_1 - t_0) + c_2 \cdot (t_1 - t_0)^2) / c_{\text{light}} \quad (9)$$

式中 c_{light} 表示光速, 需要注意的是 SSR 给出钟差改正数是以距离的形式给出。如果顾及在高速运动环境对 SSR 的影响值 h_{clk} , 计算方式为

$$d_{\text{clk}} = d_{\text{clk}} + (c_0 + c_1 \cdot (t_1 - t_0) + c_2 \cdot (t_1 - t_0)^2 + h_{\text{clk}}) / c_{\text{light}} \quad (10)$$

2.3 实时 SSR 钟差修正精度分析

通过 2.2 节的计算方法计算修正广播星历的钟差结果生成 30s 采样间隔的钟差产品, 与 IGS 事后精密钟差产品进行比较。由于不同分析中心的钟差估计策略不一致而存在系统性偏差, 本文采用与 IGS 精密钟差作二次差的方法评估实时 SSR 钟差修正精度, 即选择某一颗卫星作为基准星, 基于 SSR 改正信息计算的钟差结果与计算结果中的基准星求一次差, 同理, IGS 事后钟差采用相同一次差策略, 然后对两次一次差结果求差, 即获得二次差^[7]。这种方法消除了不同卫星钟差计算策略的系统性偏差, 可以很好地反映计算结果与 IGS 事后钟差的符合程度^[8-9]。通过统计二次差的时间序列的 RMS_j:

$$\text{RMS}_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i^j - \bar{\Delta}^j)^2}{n}} \quad (11)$$

式中, Δ_i^j 表示 j 号卫星时间节点 i 的二次差, $\bar{\Delta}^j$ 为 j 号卫星二次差时间序列均值, 以 1 号卫星为基准星, 统计 4 个分析中心的 5 个挂载点 SSR 改正信息的单天钟差 RMS 以及使用 Neville 多项式内插 IGU 获得采样间隔为 30s 的钟差结果的单天 RMS(4、31 号卫星在该天处于非健康状态), 结果发现各个挂载点的钟差精度要优于 0.15ns。IGU 钟差除了 28 号卫星较差外, 其余卫星钟差精度都在 0.2~3ns 左右。目前 IGS 中心提供的实时超快速精密星历轨道精度优于 5cm, 但是由于超快速精密星历钟差精度较低, 无法满足实时 PPP 需求^[9-10]。

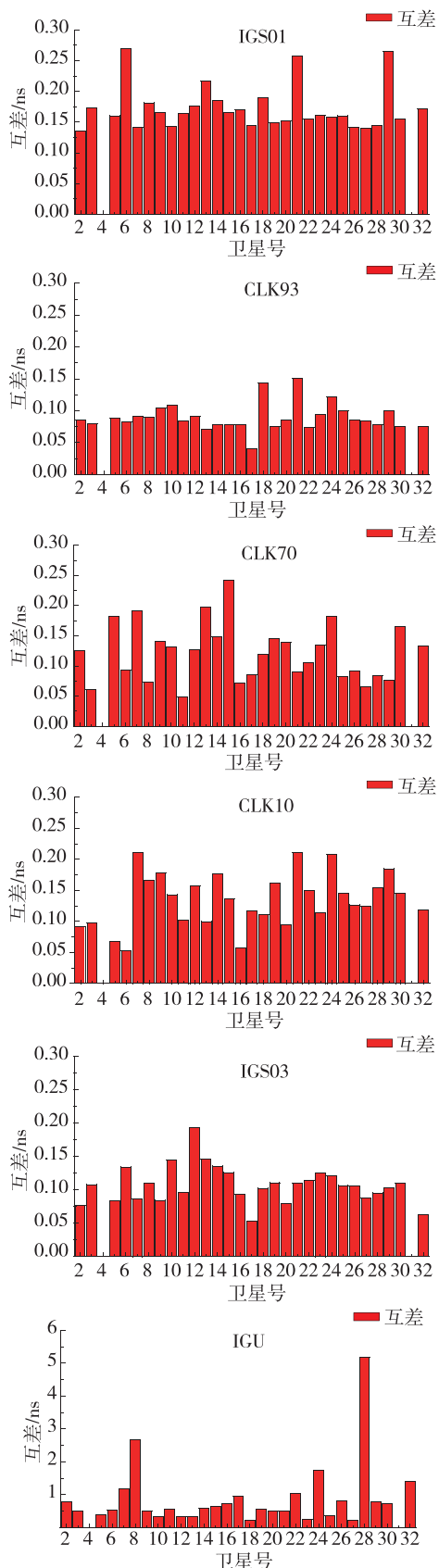


图 2 经过 SSR 修正的广播星历钟差以及 IGU 钟差与 IGS 钟差对比结果

Fig. 2 Broadcast ephemeris clock corrected by SSR and IGU clock compared with IGS clock

表 2 不同挂载点实时钟差 RMS

Tab. 2 The RMS of difference mountpoints real-time clock

实时数据流	卫星钟差 RMS		
	最大值/ns	平均值/ns	最小值/ns
IGS01	0.27	0.17	0.13
IGS03	0.19	0.11	0.05
CLK10	0.21	0.13	0.05
CLK70	0.24	0.12	0.04
CLK93	0.15	0.09	0.04

3 不同星历的 PPP 定位结果精度分析

为了比较在不同星历下的精密单点定位精度,本文选择 algo 测站年纪日 232 的采样间隔 30s 观测数据,分别利用不同分析中心的最终轨道产品、IGS 超快速星历以及 SSR 实时修正广播星历作三种动态 PPP 实验,对比不同星历下的动态 PPP 定位精度。

3.1 精密星历动态 PPP 精度对比

采用 CODE、GFZ、ESA、JPL 的最终精密轨道产品进行动态 PPP 解算,并与 IGS 公布坐标比较,统计动态解算水平方向收敛至厘米级所需大概时间以及各方向偏差的 RMS,如表 3 所示。

表 3 不同 IGS 分析中心 PPP 定位精度

Tab. 3 The PPP positioning accuracy of different IGS analysis centers

AC	RMS			收敛时间/min
	E	N	U	
CODE	4.4	2.7	4.8	25
GFZ	4.6	3.2	6.1	20
JPL	6.6	4.9	8.5	40
ESA	4.8	3.2	6.5	30

由于篇幅限制,仅结合分析中心 CODE 最终精密产品的动态精密单点结果如图 3 所示, CODE 分析中心的最终轨道产品的动态 PPP 水平方向大约在 30min 可以收敛至厘米级,水平方向和高程方向收敛后分别可达 6cm、8cm。根据表 3 可知,各分析

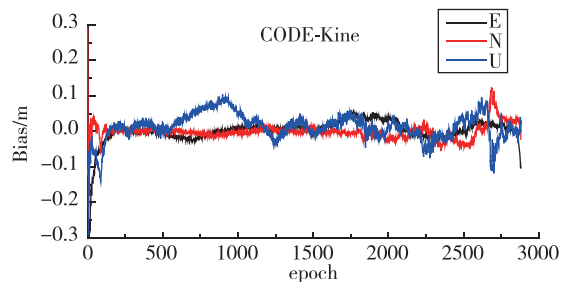


图 3 CODE 精密星历动态 PPP 定位结果

Fig. 3 Dynamic PPP positioning results based on CODE precise ephemeris

中心的动态 PPP 平面收敛精度厘米级所需平均时间为 25min, 通过统计收敛之后 E、N、U 分别可以达到 6cm、5cm、8cm 的定位精度。

3.2 SSR 钟差修正+IGU 定位精度分析

上文统计 IGU 钟差精度在 0.2~3ns, 为了验证目前 IGU 的钟差精度无法满足实时 PPP 高精度的需求, 本文作 IGU、IGU+IGS01 挂载点修正广播星历所计算采样间隔为 30s 的钟差产品、IGU+IGS 最终 30s 的钟差产品的三种组合 PPP 动态实验, 通过图 4 可以发现, 随着钟差精度的提高, 单天解定位精度逐次提高, 表明钟差的精度是影响精密单点定位结果的重要因素^[11-12]。

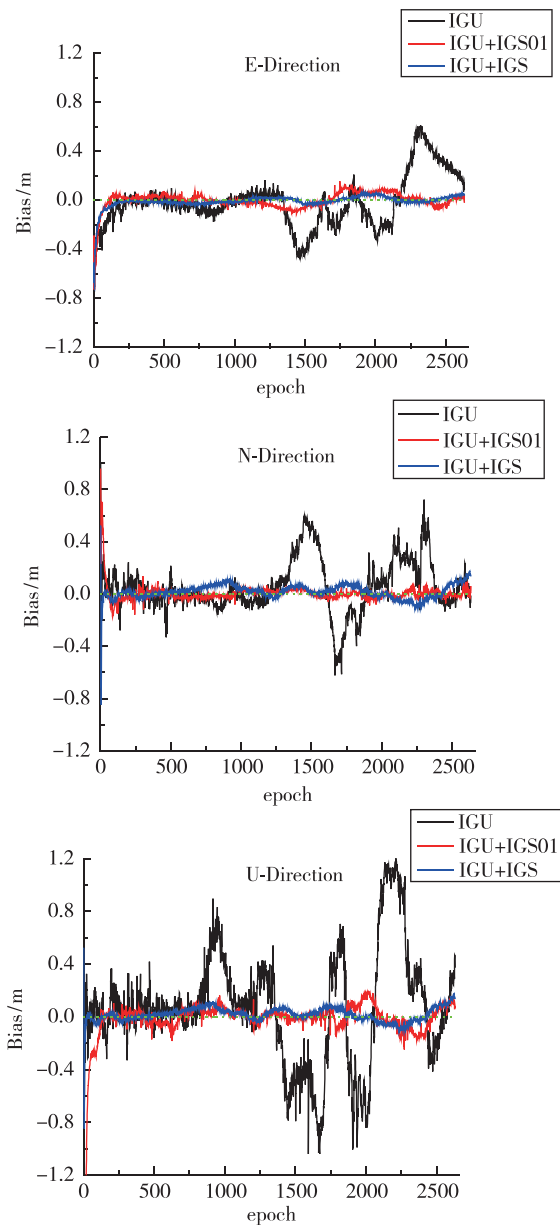


图 4 不同策略的动态 PPP 定位结果示意图

Fig. 4 Dynamic PPP positioning results of different strategies

表 4 不同策略下 PPP 定位精度

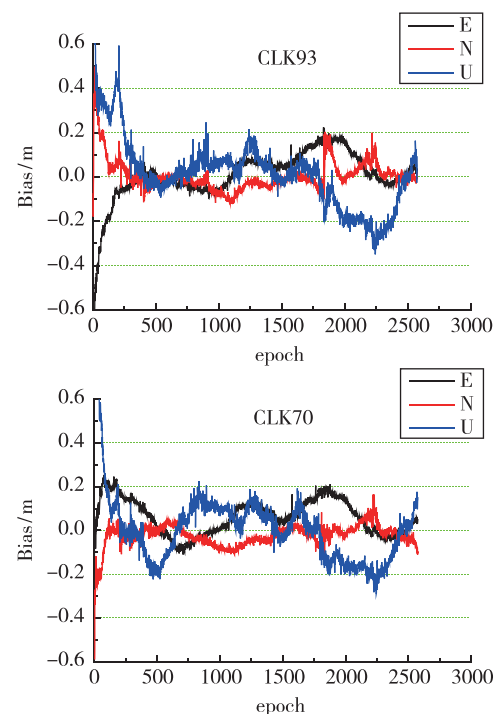
Tab. 4 PPP positioning accuracy under different strategies

数据源	RMS/cm		
	E	N	U
IGU	20.6	20.5	42.7
IGU+IGS01 修正钟差	7.1	5.9	22.5
IGU+IGS 最终钟差	5.2	3.5	13.1

3.3 基于 SSR 模拟实时动态 PPP 精度分析

本文选择 IGS、GFZ、GNFS 维护的实时 SSR 数据流挂载点 IGS01、CLK70、CLK93, 通过 BNC 软件保存年纪日为 232 的单天 SSR 数据, 仿真基于广播星历 SSR 改正的实时 PPP 解算, 观测数据和广播星历均事后在 IGS 网站下载, 最终的定位结果偏差转化为 E、N、U 方向。由于观测数据和广播星历均采用事后下载, 可以充分反应基于各个挂载点实时 SSR 改正信息的定位精度, 并且选择该天在 UTC 时间 9 点更新超快速预测星历 IGU 定位结果作为对比。

通过图 5 和表 5 可知, 基于挂载点 IGS01、CLK93、CLK70 的 SSR 改正信息动态 PPP 的单天解 ENU 统计结果表明: RMS 均在 20cm 以内, E、N 方向要优于 20cm, U 方向大部分时间在 20cm 内波动, 优于基于超快速精密星历的动态 PPP 定位精度, 低于基于最终精密轨道的动态 PPP 定位结果。并且发现 IGU 定位结果在前 6h 的定位结果明显优于后 18h 的定位结果, 这是由于 IGU 的前 24h 为实测部分且有 3h 滞后的原因导致。



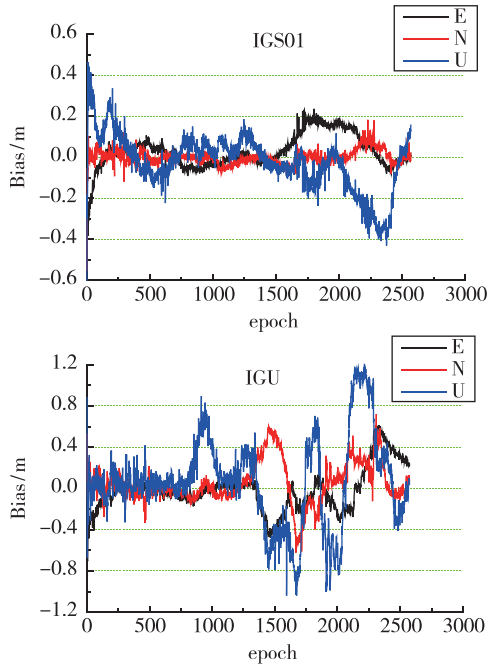


图5 基于 SSR 以及 IGU 的动态 PPP 定位结果示意图

Fig. 5 The diagram of dynamic PPP positioning based on SSR and IGU

表5 不同分析中心基于 SSR 的 PPP 定位结果精度

Tab. 5 The accuracy of PPP positioning results based on SSR in different analysis centers

挂载点	RMS/cm		
	E	N	U
IGS01	8.7	3.7	13.8
CLK93	11.1	6.8	15.7
CLK70	10.0	6.2	14.7
IGU	20.6	20.5	42.7

4 结论

1) 利用各个分析中心的最终精密轨道产品进行精密单点定位处理, 通过比较定位结果可知, 基于不同分析中心最终星历的动态 PPP 结果平均在 30min 左右, 平面定位精度可以达到厘米级, 收敛之后 E、N、U 方向分别可以达到 6cm、5cm、8cm 的定位精度, ENU 方向单天解 RMS 达到厘米级。

2) 通过 BNC 软件保存 IGS 分析中心基于 Internet 播发的实时 SSR 改正数据, 基于广播星历修正获取的采样间隔为 30s 钟差产品, 并与 IGS 最终钟差产品作二次差, 统计结果表明经过 SSR 修正后的钟差精度优于 0.15ns, 这与内插精度和 SSR 钟差改正信息本身精度有关。

3) 根据 IGU、IGU+IGS01 挂载点修正的广播星历钟差获取 30s 采样间隔的钟差产品、IGU+IGS

最终采样间隔为 30s 钟差产品进行动态精密单点定位, 结果表明目前限制超快速星历无法满足实时精密单点定位的主要原因是其钟差精度较低。

4) 基于 SSR 改正信息仿真实时精密单点定位, 结果表明单天解 ENU 方向波动均在 20cm 以内, ENU 方向单天解 RMS 可以达到厘米级或者分米级, 通过 Internet 网络播发的实时 SSR 修正广播星历可以实现实时分米级甚至更高的定位精度。但由于受 SSR 本身钟差精度以及实时数据流的稳定性问题的影响, 目前实时精密单点定位的精度难以达到基于 IGS 最终精密星历的动态 PPP 的定位精度。

参考文献

- [1] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [2] 王俊杰, 许杭, 高俊强. 基于广播星历改正的实时精密星历与钟差获取研究 [J]. 全球定位系统, 2015, 40 (2): 21-25.
- [3] 赵兴旺, 王胜利, 邓健, 等. 精密单点定位中 4 种函数模型解算性能分析 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2014, 37(6): 751-756.
- [4] 辜声峰. 多频 GNSS 非差非组合精密数据处理理论及其应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [5] 李明峰, 江国焰, 张凯. IGS 精密星历内插与拟合法精度的比较 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(2): 77-80.
- [6] Weber G, Mervart L, Lukes Z, et al. Real-time clock and orbit corrections for improved point positioning via NTRIP [C]//ION GNSS 2007. Fort Worth, TX, 2007.
- [7] Zhang X, Li X, Guo F. Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications [J]. GPS Solutions, 2011, 15(4): 315-324.
- [8] 楼益栋, 施闯, 周小青, 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.
- [9] 李夫鹏, 张超, 李崇辉, 等. 一种提高精密单点定位实时性的方法 [J]. 测绘工程, 2016, 25(9): 63-67.
- [10] 陈良, 耿长江, 周泉. 北斗/GPS 实时精密卫星钟差融合解算模型及精度分析 [J]. 测绘学报, 2016, 45 (9): 1028-1034.
- [11] 刘志强, 王解先. 广播星历 SSR 改正的实时精密单点定位及精度分析 [J]. 测绘科学, 2014, 39(1): 15-19.
- [12] 高鹏飞, 楼益栋, 王仲想, 等. 基于广播星历轨道区域钟差估计的非差实时精密定位分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(3): 116-120.