

引用格式:刘亚,何文涛. 组合 SSR 改正数实时精密单点定位性能研究[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(2): 14-18. [LIU Y, HE W T. Researches on real-time precise point positioning performance based on combined SSR corrections[J]. Microelectron-ics & Computer, 2021, 38(2): 14-18.]

组合 SSR 改正数实时精密单点定位性能研究

刘 亚^{1,2}, 何文涛^{1,3}

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 杭州中科微电子有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘 要: 实时精密单点定位精度很大程度上取决于轨道及钟差精度, 本文通过组合 SSR 改正数结合广播星历的方式为实时精密单点定位提供了高精度、稳定的卫星轨道及钟差. 相较于单 SSR 改正源来说, 卫星轨道及钟差改正数据缺失率分别下降 0.39 % 和 2.14 %. 最后通过对 3 测站 7 天观测数据进行精密单点定位分析, 在静态定位模式下最快收敛时间在 20 min 以内, 定位精度优于 2 cm 甚至是毫米级, 动态模式下定位精度为分米级.

关键词: 精密单点定位; 实时; SSR 改正数; 轨道; 钟差; 缺失率

中图分类号: TN967; P228 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000—7180(2021)02—0014—05

Researches on real-time precise point positioning performance based on combined SSR corrections

LIU Ya^{1,2}, HE Wen-tao^{1,3}

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Hangzhou Zhongke Microelectronics Co., Ltd, Hangzhou 310053, Zhejiang, China)

Abstract: The real-time precision point positioning depends largely on the accuracy of the satellite orbit and clock bias. This paper provide a high-precision, stable satellite orbit and clock bias for real-time precise point positioning by combined SSR corrections with broadcast ephemeris. Compared with the single SSR correction source, the missing rate of satellite orbit and clock corrections decreased by 0.39% and 2.14% respectively. Through the precise point positioning analysis of 7 days observation data with 3 IGS stations, the fastest convergence time is within 20 min and the positioning accuracy is better than 2 cm or even millimeter level in static positioning mode, the positioning accuracy in dynamic mode is decimeter level.

Key words: precise point positioning; real-time; SSR corrections; orbit; clock bias; missing rate

1 引言

实时精密单点定位 (Real-Time Precise Point Positioning, RTPPP) 相较于事后精密单点定位, 其较小的时延可以满足实时应用, 但是定位精度受到星历精度的限制无法与事后精密单点定位相比较.

事后精密单点定位应用于全球多个 GNSS 跟踪站, 观测数据解算获得精密轨道和钟差信息其收敛后的定位精度可达到厘米级甚至是毫米级^[1]. 为了让实时精密单点定位获得较高的定位精度, 2007 年 IGS 启动了 IGS-RTPP (IGS Real-Time Pilot Project) 项目, 2013 年 4 月 1 日起利用全球实时跟踪网采集的

GNSS 数据,实时估计轨道及钟差改正数以 SSR (State Space Representation) 形式,基于 NTRIP (Network Transport of RTCM over the Internet Protocol)协议向全球用户播发^[2]. 用户在接收 SSR 改正数后结合广播星历可恢复出高精度的卫星轨道及钟差来用于实时精密单点定位.

与一些商业 RTS(Real Time Service)产品不同的是,IGS 改正数是通过网络播发,且每颗可观测卫星的 SSR 改正数不一定完整,同时在实际测试中会发现转播中心网络正常,但是所选择的挂载点出现中断的情况. 本文采用组合 SSR 改正数的方式,通过增加挂载点获得两个或多个不同的 SSR 改正数进行组合,可以减少因单一挂载点中断而带来的定位解算精度下降问题,且通过组合不同的 SSR 改正数可以提高定位精度.

2 组合 SSR 实时改正数

2.1 组合 SSR 实时 PPP 原理

为了降低 SSR 实时改正数的缺失率,我们通过组合不同分析中心的 SSR 改正数来进行实时精密单点定位. 实时精密单点定位原理^[3-4]不再详细阐述. 为了简化分析及验证流程,我们采用两个不同分析中心的 SSR 改正数进行组合,如图 1 所示.

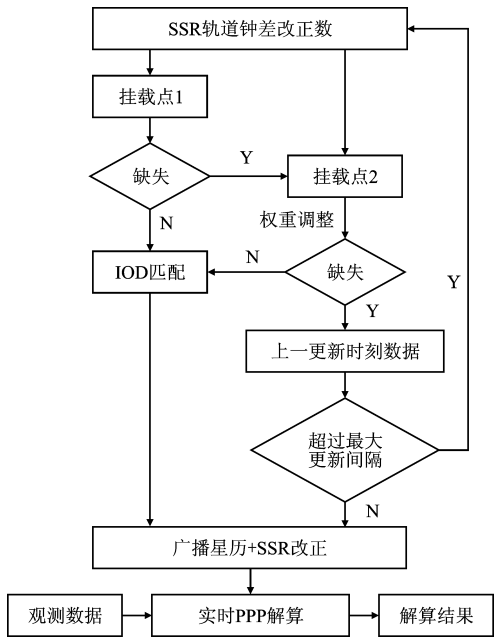


图 1 组合 SSR 实时 PPP 简要流程图

具体步骤是通过对比所选择的不同分析中心 SSR 改正数的精度,确定用来定位的主 SSR 数据源以及在主数据源信号中断时采用的辅助 SSR 数据源. 在主数据源信号良好时,辅助数据源还可提供主

数据源缺失的部分卫星改正数,定位解算时将把这些卫星的权值进行调整来提高定位精度,对于精度相近的 SSR 改正数无需进行权重调整. 需要注意的是,在选择改正数以及广播星历时需要根据给定的数据版本号(Issue of data, IOD)进行匹配,否则则会进行无效的改正(若无法匹配则使用先前 SSR 数据继续进行匹配). 对于 GPS 和 GALILEO 卫星系统, SSR 改正数与广播星历 IOD 表达一致不需要变换,对于 GLONASS 以及北斗系统需要变换^[5]才能进行选择. 如果进行多系统组合定位,不同分析中心的改正数精度相对于不同导航卫星系统会有所不同,可根据精度分析来确定各个系统所选用的主数据源以及辅助数据源,亦可采用完整率高的为主数据源.

2.2 SSR 轨道及钟差精度分析

本文利用开源软件 BNC^[6]来接收和保存实时数据流. 通过收集 2020-05-11 至 2020-05-20 共 10 天的 IGS03 和 CLK93 实时改正数,结合广播星历来计算出实时精密星历^[7]与 GFZ 事后精密星历进行卫星轨道和钟差对比. 表 1 列举了部分 SSR 实时改正数挂载点.

表 1 部分 SSR 实时改正数挂载点

挂载点	基准	GNSS 系统
IGS01	APC	GPS
IGS03	APC	GPS+Glonass
CLK92	CoM	GPS+Glonass+Galileo+BDS
CLK93	APC	GPS+Glonass+Galileo+BDS

注:CoM 表示该改正源以卫星质心为基准,APC 表示以卫星天线相位中心为基准.

轨道精度对比通过计算各个卫星在径向、切向和法向上互差的 RMS(Root Mean Square)值,统计时剔除了大于 1 m 的异常值. 钟差精度对比时通过选定基准卫星作一次差消除基准时钟不同所带来的影响后与事后精密星历作二次差来计算 RMS 值^[8]:

$$RMS_{orbit} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{orb,i}^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMS_{clock} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{clk,i} - \overline{\Delta_{clk}})^2}{n}} \quad (2)$$

式中, $\Delta_{orb,i}$ 、 $\Delta_{clk,i}$ 分别为第 i 个历元轨道互差以及钟差二次差; $\overline{\Delta_{clk}}$ 为钟差二次差均值; n 为历元个数. 图 2 和 3 分别给出了 IGS03 和 CLK93 挂载点 10 天内 GPS 各个卫星轨道径向、切向、法向以及钟差精度

对比图。

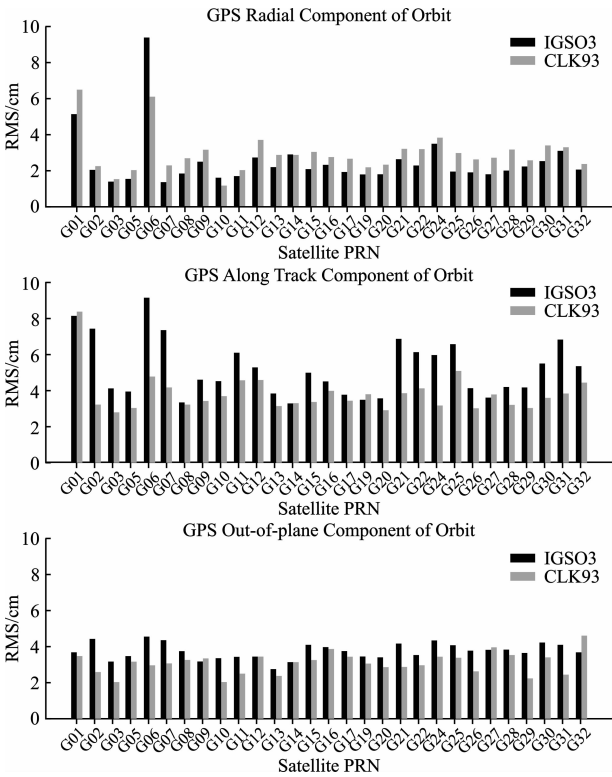


图 2 GPS 卫星轨道精度对比图

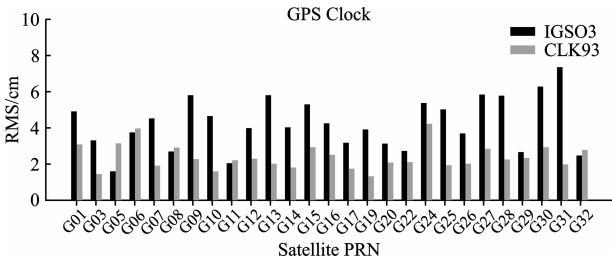


图 3 GPS 卫星钟差精度对比图

其中钟差对比中 G02 卫星为基准卫星,统计时剔除了互差大于 5 ns 的异常值.需要注意的是,不同分析中心事后精密星历会有细微差别,对比结果会有不同,所以这里的结果只做参考结果并非最终卫星轨道及钟差的精度.总体来说,CLK93 挂载点在轨道切向、法向及钟差方面分别优于 IGS03 约 1.37 cm、0.66 cm 和 2.79 cm,只是在径向上差 0.46 cm.

2.3 SSR 改正数缺失率对比

通过精度对比,选择 CLK93 挂载点为主数据源,IGS03 挂载点为辅助数据源.分别统计 10 天内单 CLK93 挂载点和 CLK93 结合 IGS03 挂载点 GPS 各个卫星的数据缺失率(含信号中断影响)如图 4 所示.

CLK93 轨道及时钟改正数每 5 s 更新一次,而

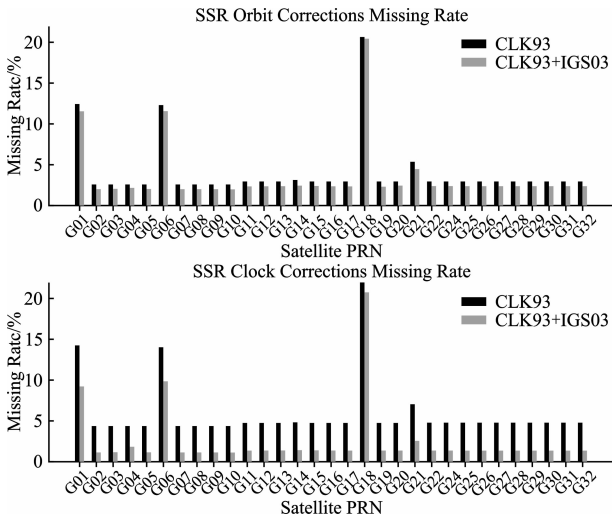


图 4 GPS 卫星轨道及时钟数据缺失率对比图

IGS03 轨道及时钟分别每 1 min 和 10 s 更新一次.使用 IGS03 辅助后,CLK93 轨道及钟差改正数缺失率分别下降 0.39 %和 2.14 %.如果使用和 CLK93 更新频率一样的挂载点如 CLK91,缺失率下降幅度会更高.

3 组合 SSR 定位性能分析

为了验证组合 SSR 精密单点定位性能,本文使用单 GPS 双频无电离层组合模型进行静态定位解算和 GPS/GLONASS/GALILEO/BDS 四系统进行动态定位解算.具体参数估计及解算策略如表 2 所示,需要注意的是这里为仿实时解算,即采用收集的 SSR 改正数与广播星历生成精密星历来进行定位解算.

表 2 实时 PPP 参数估计及解算策略

参数		解算策略
观测值	观测值	无电离层组合伪距/载波相位
	观测数据采样间隔	30s
	卫星截至高度角	7°
	天线相位缠绕	模型改正
	固体潮汐	模型改正
误差处理	相对论效应	模型改正
	地球自转	模型改正
	卫星轨道及钟差	组合 SSR+广播星历
	相位中心偏差	igs14.atx 文件改正
	卫星硬件延迟	DCB 文件改正
参数估计	坐标	静态/动态
	接收机钟差	白噪声
	对流层延迟	干延迟:Saastamoinen 模型 湿延迟:参数估计
	模糊度	浮点解

3.1 静态定位性能分析

从 2020-05-12 日开始分别对 FFMJ、JFNG 和 GMSD 三个测站进行实时静态 PPP 解算,图 5 分别表示该三个测站 7 天的静态定位结果.

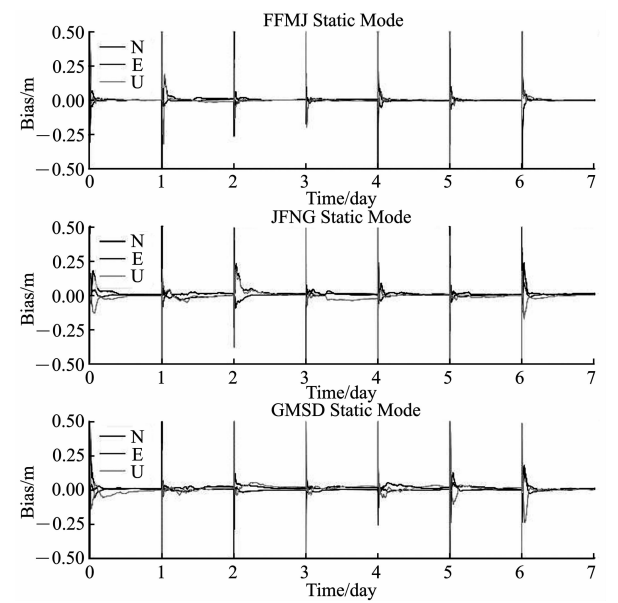


图 5 FFMJ、JFNG 及 GMSD 测站 7 天静态定位结果图

7 天内静态实时 PPP 模式下平均收敛时间及定位精度见表 3.

表 3 三测站静态 7 天平均收敛时间及定位精度				
测站	收敛时间 (min)	N (mm)	E (mm)	U (mm)
FFMJ	31.00	1.96	4.26	4.04
JFNG	13.00	4.53	7.50	15.09
GMSD	20.29	4.37	11.46	14.49

注:静态模式下收敛表示在三方向上的误差首次均低于 0.1 m 且持续时间至少保持 10 min 即 20 个历元,定位精度选取每天后 2000 历元 RMS 值做平均.

结合图 5 和表 3 可以看出,静态模式下三测站收敛后的定位精度均优于 2 cm,但是收敛时间有所差别,这可能由于各个测站所处位置以及可观测卫星数不同所导致的. 不过总体来看,使用挂载点 IGS03 辅助的 CLK93 SSR 实时改正数在静态模式下的定位精度高,性能好,收敛后无中断或其他不稳定现象发生.

3.2 动态定位性能分析

与静态分析一样从 2020-05-12 日开始分别对 FFMJ、JFNG 和 GMSD 三个测站进行四系统实时动态 PPP 解算,图 6 分别表示该三个测站 7 天的动态定位结果. 7 天内动态实时 PPP 模式下定位精度由表 4 给出.

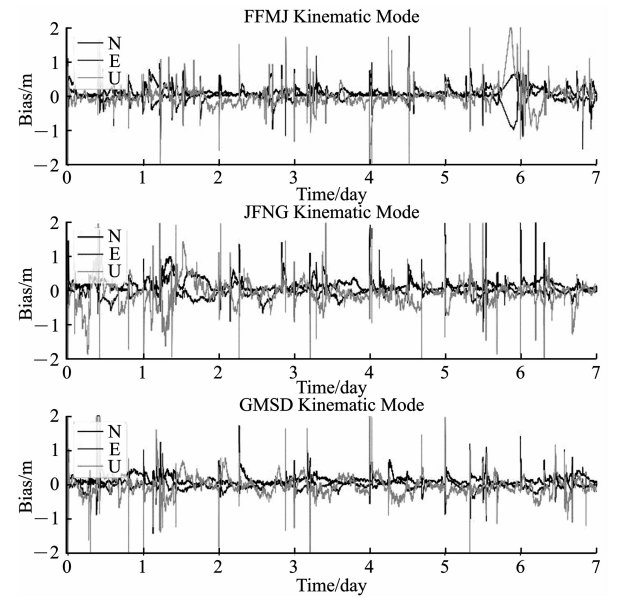


图 6 FFMJ、JFNG 及 GMSD 测站 7 天动态定位结果图

表 4 三测站动态 7 天平均定位精度

测站	N (cm)	E (cm)	U (cm)
FFMJ	16.16	17.69	25.21
JFNG	20.45	22.38	36.59
GMSD	11.52	16.90	25.22

注:定位精度选取每天后 2000 历元 RMS 值做平均.

动态定位模式下的性能较静态模式有很大差别,静态定位时,测站的位置可视为固定点,可通过大量的重复观测来提高定位精度. 动态定位中,测站的位置视为动点,所以无法重复观测提高定位精度且对卫星观测数据质量要求较高. 从图 6 中可以看出部分测站在定位过程中出现的位置偏离的情况,原因在于其所观测卫星的星历受到实时改正数精度的影响精度过低,所以解算时位置偏离严重,这里是四系统动态 PPP 解算,如果采用单 GPS 系统那么所受实时 SSR 改正数稳定性的影响会更大,因为观测卫星的减少,卫星构型差,性能也会更不稳定. 但是总体而言,动态模式下三测站在大部分时间内定位精度稳定在分米级.

4 结束语

本文通过采用组合 SSR 改正数方式,改善单 SSR 挂载点信号不稳定情况,降低卫星轨道及钟差改正数据缺失率分别约为 0.39 %和 2.14 %,另一方面使用较高精度 SSR 改正源为主,其余 SSR 改正源为辅的方式提供了与事后精密星历精度相当的轨道及钟差数据. 使其在静态模式下最快收敛时间

能在 20 min 之内,且 N、E、U 三方向误差低于 2 cm,甚至为毫米级.动态模式下测站的定位误差在分米级,满足了实时 PPP 定位需求且性能较为稳定.

参考文献:

[1] ZHOU F. Theory and methodology of multi-GNSS undifferenced and uncombined precise point positioning [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.

[2] YIN Q Q, LOU Y D, YI W T. Comparison and analysis of IGS real-time products[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(6): 123-128. DOI: 10.14075/j. jgg. 2012. 06. 019.

[3] SONG W W. Research on real-time clock offset determination and real-time precise point positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.

[4] WANG L, LI Z S, GE M R, et al. Validation and assessment of multi-GNSS real-time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS real-time service[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 337. DOI:10.3390/rs10020337.

[5] KAZMIERSKI K, SO SNICA K, HADAS T. Quality

assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning [J]. GPS Solutions, 2018, 22(1): 11. DOI:10.1007/s10291-017-0678-6.

[6] STÜRZE A, MERVART L, WEBER G, et al. The new version 2.12 of BKG Ntrip Client (BNC)[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, EGU, 2016.

[7] ZHANG L P, DANG Y M, GU S Z, et al. BDS satellite real-time orbit determination and SSR correction generation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(12): 1-5. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2017.0368.

[8] ZHANGX H, LI X X, GUO F. Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications [J]. GPS Solutions, 2011, 15(4): 315-324. DOI: 10.1007/s10291-010-0191-7.

作者简介:

刘亚男, (1995-), 硕士研究生. 研究方向为卫星导航算法. E-mail: liuya@ime.ac.cn

何文涛男, (1982-), 博士, 研究员. 研究方向为卫星导航接收机信号处理算法, 超大规模集成电路设计.

(上接第 13 页)

[7] GIARD P, BALATSOUKAS-STIMMING A, SARKIS G, et al. Fast Low-complexity decoders for low-rate polar codes [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2018, 90(5): 675-685. DOI:10.1007/s11265-016-1173-y.

[8] LEROUX C, TAL I, VARDY A, et al. Hardware architectures for successive cancellation decoding of polar codes [C]//Proceedings of 2011IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Prague: IEEE, 2011: 1665-1668. DOI:10.1109/ICASSP.2011.5946819.

[9] DIZDAR O, ARIKAN E. A high-throughput energy-efficient implementation of successive cancellation decoder for polar codes using combinational logic[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2016, 63(3): 436-447. DOI: 10.1109/TCSI.2016.2525020.

[10] ERCAN F, CONDO C, GROSS W J. Reduced-memory high-throughput fast-SSC polar code decoder architecture [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS). Lori-

ent: IEEE, 2017: 1-6. DOI: 10.1109/SiPS.2017.8110014.

[11] ZENG J, ZHOU Y C, LIN J, et al. Hardware implementation of improved fast-SSC-flip decoder for polar codes [C]//Proceedings of 2019 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI). Miami, FL, USA: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ISVLSI.2019.00109.

作者简介:

林青男, (1992), 硕士研究生. 研究方向为 5G 移动通信信道编码和集成电路设计.

杜高明(通讯作者)男, (1977), 博士, 副教授. 研究方向为多核体系结构、片上网络体系结构、多核/NoC 性能分析. E-mail: 12345@163.com

戴吴骏男, (1994), 硕士研究生, 研究方向为 5G 移动通信信道编码和集成电路设计.

王晓蕾女, (1978), 博士, 副教授. 研究方向为集成电路设计.