

基于混合编程的实时精密单点定位方法

李梦昊¹, 王胜利², 高兴国³, 陈冠旭⁴, 刘焱雄¹

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;

3. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250014; 4. 武汉大学, 湖北 武汉 430079)

摘 要:在已有后处理精密单点定位 Fortran 程序的基础上, 基于 C/C++ 和 Fortran 的混合编程技术, 实现了实时静态精密单点定位, 其中高精度卫星轨道及钟差参数由卫星广播星历和 SSR 改正信息数据流实时估算, 卫星观测数据流由 GNSS 接收机实时提供。通过实时精密单点定位程序验证了混合编程技术的可行性, 对于相关的研究工作和精密单点定位的实时性应用具有参考价值。GPS 单系统实时静态精密单点定位试验结果表明: 在 6 h 观测时段, 1 s 采样间隔的情况下, 实时静态精密单点定位的收敛时间约为 30~100 min; 利用实时定位解算结果与测站精确坐标求差计算的 RMS, 收敛后可实现水平方向优于 5 cm, 垂直方向优于 10 cm。

关键词:SSR 改正信息; 混合编程; 实时精密单点定位; GPS

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)01-0066-08

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.01.007

精密单点定位技术(Precise Point Positioning, PPP)是基于精密 GNSS 卫星轨道和钟差产品实现的, 其利用单台接收机即可在全球范围内进行作业, 并直接获得厘米级精度的 ITRF 框架坐标^[1-3]。因而在海岛礁测绘^[4]、海平面监测^[5]、高精度潮汐测量^[3,6-7]、航空测量^[8]等海工程方面具有广阔应用前景。但精密单点定位技术大多使用事后精密卫星轨道和卫星钟差产品, 不能进行实时定位解算, 因而无法满足海洋工程的实时性需求^[9-11]。为推进 PPP 技术实时应用, 从 2007 年起, IGS(International GNSS Service)开始运行 IGS-RTTP 项目(IGS Real-Time Pilot Project), 由各分析中心实时估计出广播星历的卫星轨道和钟差精密改正信息, 并采用 SSR(State Space Representation)信息格式实时播发^[12]。目前, BKG, DLR, ESOC, NRCAN, GFZ 等 IGS 分析中心均可实时播发 SSR 改正信息。基于 NTRIP(Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)协议, 用户能够实时获取卫星轨道及钟差改正数据产品。已有研究对比了由广播星历和 SSR 改正信息估算的实时产品和 IGS 最终产品, 结果表明: 卫星位置互差的均方根值(RMS)优于厘米级, 钟差互差的 RMS 优于亚纳秒级, 实时估算的卫星轨道和钟差产品可满足静态实时 PPP 厘米级的定位需求^[12-17]。

目前, PPP 软件的编写主要采用 Fortran 语言和 C/C++ 语言。Fortran 语言非常适合科学计算领域底层程序开发, 广泛应用于 GNSS 定位程序开发^[18]; C/C++ 语言具有强大的系统编程和图形界面开发功能, 已成为 Linux 平台最基本的编程工具^[19]。实时 PPP 软件的开发涉及硬件控制, 多在 Linux 环境下运行。若结合不同编程语言的风格特点、充分发挥各自的优势, 即进行混合编程, 将对开发过程十分有利。另外, 许多已有的 PPP 后处理软件采用了 Fortran 语言编程, 采用混合编程可以最大限度地利用已有的程序, 节省人力和时间, 快速地将已有的后处理 PPP 软件转换为实时 PPP 应用程序, 推进实时 PPP 应用。因此, 本文聚焦 Linux 环境下 C/C++ 与 Fortran 的混合编程技术, 基于混合编程, 利用广播星历和改正信息数据流实时估算 GPS 卫星轨道及钟差, 开发了实时精密单点定位软件, 并分析了实时定位结果。

收稿日期:2017-10-26

资助项目:国家自然科学基金项目——中国沿海海洋潮汐特征的 GPS 响应研究(41374044)

作者简介:李梦昊(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事 GNSS 精密单点定位方面研究. E-mail: li2z3e@163.com

(王佳实 编辑)

1 C/C++和 Fortran 混合编程的二个问题

所谓混合编程,即使用 2 种或 2 种以上的语言组合编程,彼此间互相调用,进行参数传递,共享数据结构或数据信息,从而形成一个统一的程序实体的过程^[20]。

根据调用方式,C/C++和 Fortran 混合编程可分为 C/C++调用 Fortran 方式和 Fortran 调用 C/C++方式。这两种混合编程的方式不尽相同,第一种方式采用 C/C++编写主函数,调用 Fortran 子函数;第二种方式则相反,主函数为 Fortran 语言编写,调用 C/C++编写的子函数。函数调用过程可以使用直接调用和链接库调用两种方法。前者是函数调用最常用的方法,即主函数直接调用子函数,在各种语言编程中均有体现;而后者在实现时,需要把 Fortran 子函数编译成链接库,在 Linux 操作环境中,常将其编译成动态链接库(**.so)文件或静态链接库(**.a)文件,然后由主函数调用。

不同编程语言存在不同的约定,必须对基本约定进行统一。本文在 Linux 平台中,采用 C/C++直接调用 Fortran 的方式编写了实时精密单点定位软件,故这里仅对 C/C++调用 Fortran 函数需要注意的 2 个问题进行详细说明:

1)名称重整。在 C/C++中,函数重载使得编译后函数名与参数个数及参数类型相关,即名称重整(Name Mangling)。Fortran 不具备名称重整的功能,因此在 C/C++调用 Fortran 时,应在 C/C++的头文件中使用 extern"C"声明关闭名称重整^[21]。在 Fortran 中,函数经过编译后会自动添加下划线,如函数 test 会变成函数 test_,故在 C/C++声明和调用 Fortran 子函数时,应主动为函数添加下划线,以免出现主函数找不到子函数的情况。C/C++调用 Fortran 可用下述声明方法

```
#ifdef __cplusplus
extern"C" {
#endif
void test_(int *,int *); //test_为 Fortran 子函数
#ifdef __cplusplus
}
#endif
```

2)数据类型对应。不同的编程语言具有不同的数据类型,故需要使 C/C++与 Fortran 的数据类型一一对应,否则无法完成参数在不同语言间的传递和过渡。表 1 是 C/C++与 Fortran 主要数据类型的对应表。除此之外,字符串数据的传递方法较为复杂。C/C++中,字符串的存储以空字符 NULL 为结尾;Fortran 中,字符串没有结束符,但有长度的概念。因此,需在 C/C++函数中添加一个额外的长度参数,以控制字符串的长度^[19]。本文混合编程过程中未涉及字符串的传递,故没有给出具体实例。针对数组数据,C/C++中数组元素以行为主序(row major order),且数组下标从 0 开始;而 Fortran 语言则是以列为主序(column major order),下标从 1 开始。

表 1 C/C++与 Fortran 主要数据类型对应表

Table 1 A correspondence table of data types

C/C++类型	Fortran 类型	描 述
signed char	integer * 1	8 位有符号整数
short	integer * 2	16 位有符号整数
int	integer * 4	32 位有符号整数
float	real * 8	32 位浮点数
double	Double precision	64 位浮点数

2 实时精密单点定位方法

2.1 实时数据流的获取

从实时性的角度考虑,实现实时精密单点定位的前提是能够提供稳定的实时数据流。本文利用 GNSS 接收机实时接收测站的观测数据及卫星广播星历,通过网络从 IGS 分析中心依据 NTRIP 协议实时下载 GPS 卫星的 SSR 改正信息,以改正广播星历获取高精度的实时卫星轨道和钟差参数。由于 GNSS 接收机采集的数据和网络下载的改正信息均为 RTCM(Radio Technical Commission for Maritime Services)格式的二进制数据,故需进行数据解码,以获得可用于 PPP 解算的实时数据流。

从定位精度的角度考虑,实现精密单点定位的关键之处在于获得高精度卫星轨道和钟差数据。本文使用 1060 格式的 SSR 改正信息,它可以同时提供导航卫星的位置、速度及钟差的改正信息。利用 SSR 改正信息改正广播星历计算的卫星轨道和钟差,生成 GPS 卫星系统实时精密星历轨道和钟差产品的具体方法可参见文献^[8-11]。一般,SSR 改正信息提供的卫星位置改正数据分为两类:一种是改正到卫星天线相位中心;另一种是改正到卫星质心。而 GPS 广播星历可以计算基于相位中心的卫星位置坐标,若要获取卫星质心的位置坐标,还需要进行卫星天线相位偏差改正。

本文使用 C/C++ 语言实现不同类型数据的获取、解码以及卫星轨道和钟差的计算等功能,并以结构体(struct)形式将实时数据流传递给 Fortran 子函数进行实时定位解算。其中,Fortran 子函数需要定义与 C/C++ 同类型的结构体,两种结构体的定义方式分别为

```
//C/C++ 结构体
typedef struct
{
    int a;
    double b;
} struct_test;
!! Fortran 结构体
type struct_test
integer * 4 a
real * 8 b
end type
```

2.2 实时精密单点定位观测模型

Fortran 子函数获取实时数据流后,通过数据预处理可剔除异常观测值,获得“干净”的观测数据。采用双频非差消电离层组合观测值,将测站坐标、接收机钟差、对流层延迟以及模糊度作为未知参数,并使用误差改正模型尽量消除各项误差的影响。逐历元组成观测方程,解算并输出实时精密单点定位的结果^[22],其中观测方程为

$$P_{\text{IF}} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(dT - dt) + Trop + \epsilon_P, \quad (1)$$

$$L_{\text{IF}} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(dT - dt) + Trop + \frac{\lambda_1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 N_1 - f_1 f_2 N_2) + \epsilon_L, \quad (2)$$

式中, P_{IF} 为消电离层伪距组合观测值; L_{IF} 为消电离层载波相位组合观测值; ρ 为接收机和卫星之间的距离; c 为光速; dT, dt 分别为接收机与卫星的钟差; $Trop$ 为对流层延迟误差; N_1, N_2 为双频载波模糊度; ϵ_P, ϵ_L

为观测噪声。由图 1 可见实现实时精密单点定位的流程,表 2 到出了实时精密单点定位具体采用的数据处理策略。

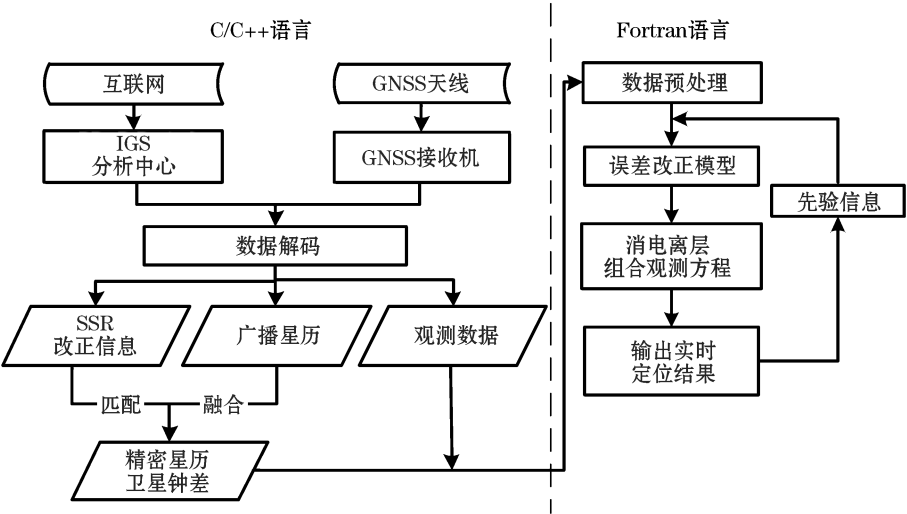


图 1 实时精密单点定位流程图

Fig.1 Flow chart of real-time precise point positioning

表 2 数据处理策略

Table 2 Data processing strategy

参 数	处理策略
测站坐标	伪距估算+参数估计
相位模糊度	参数估计
对流层延迟	Saastamoinen 模型+GMF 映射函数+随机游走过程+参数估计
接收机钟差	参数估计
卫星轨道及钟差	广播星历+实时轨道钟差改正数据
电离层延迟	双频消电离层组合
相位中心偏差	绝对天线相位中心(IGS08)模型改正
相对论效应	(IS-GPS-200D2004)模型改正
固体潮、极潮	(IERS Conventions 2010)模型改正
截止高度角	10°

3 试验分析

本文基于实时精密单点定位软件,选取 CLKL2(格式 1060)挂载点,实时获取基于相位中心的 SSR 改正信息,其同时提供 GPS 的卫星轨道和钟差改正数据,使用 GPS 单系统模式,进行了静态实时精密单点定位试验。试验的时间跨度 3 d,每次试验连续观测时长 6 h,采样间隔均为 1 s。为分析实时精密单点定位结果,将实时定位结果与测站精确坐标进行比较,并把坐标差异的时间序列输出成图。

由图 2 可见,试验期间可用卫星个数(satnum)及其对应的 PDOP 值,GPS 单系统模式下共有 5~9 颗可用卫星,试验期间可用卫星数量十分充足;绝大多数历元的 PDOP 值约 1~3,部分历元的 PDOP 值略大于 3,故可认为试验期间 GPS 卫星几何图形强度良好。

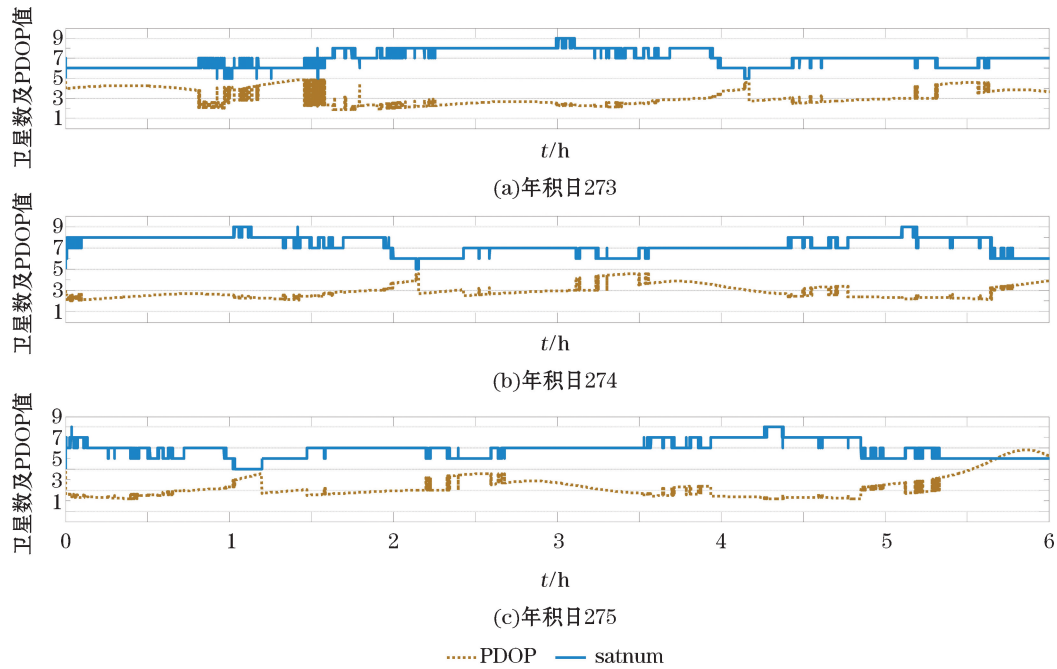


图 2 可用卫星数目和 PDOP 值

Fig.2 The number of available satellites and the PDOP value

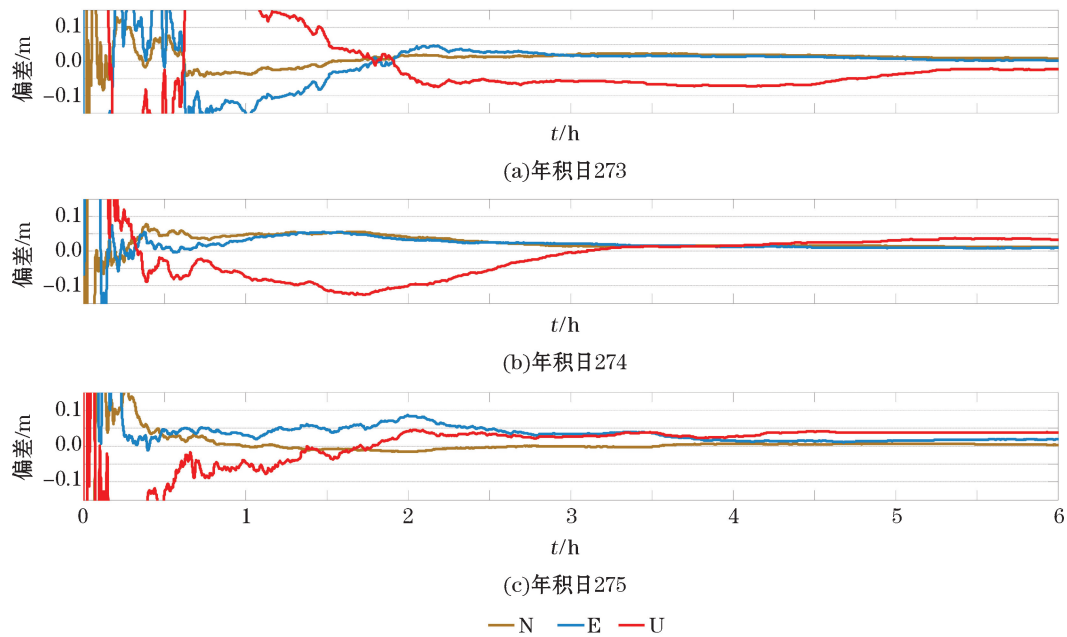


图 3 实时精密单点定位结果

Fig.3 Results of real-time precise point positioning

图 3 分别给出了年积日 273、年积日 274 及年积日 275 实时精密单点定位结果差值的时间序列子图。从定位结果可看出,单 GPS 模式下实时精密单点定位在 30~100 min 左右可以完成收敛。本文使用的收敛标准为定位结果偏差达到 ± 0.1 m,且之后 20 个历元的偏差均维持在 ± 0.1 m 以内。收敛后,水平方向定位结果精度较高,定位精度逐步稳定在 5 cm 以内;垂直方向随着收敛时间的增加,定位精度也可以稳定至 10 cm 以内。在收敛过程中,部分历元定位结果存在较小幅度的波动,如年积日 273 的 1~2 h 区间,在 U 方向,实时定位结果上下波动约 5 cm,对比年积日 273 可用卫星统计图发现,在 1~2 h 区间,可用卫星数目变化频繁,PDOP 值大于 4,卫星几何图形强度较差,小幅度的波动与卫星几何图形强度和卫星变化有关。

表 3 统计了实时精密单点定位收敛后定位结果偏差的平均值、标准差。从表 3 可看出,GPS 单系统实时单点定位精度在 N、E 方向均可以达到 5 cm 以内,U 方向在 10 cm 以内。统计结果也说明本文的实时精密单点定位软件能够达到厘米级的定位精度。

表 3 实时精密定位结果偏差统计
Table 3 Biased statistics of the real-time precise point positioning result

年积日	N		E		U	
	平均值/m	标准差/m	平均值/m	标准差/m	平均值/m	标准差/m
273	0.009	0.017	0.006	0.051	0.015	0.085
274	0.026	0.015	0.021	0.014	0.021	0.053
275	0.001	0.008	0.033	0.018	0.015	0.037
均值	0.012	0.014	0.020	0.028	0.017	0.058

4 结论与展望

本文研究了在 Linux 环境下 C/C++ 与 Fortran 的混合编程技术,基于混合编程,采用广播星历和 SSR 改正信息产品,完成高精度的卫星轨道和钟差参数的实时估算,实现了实时精密单点定位。试验结果表明:GPS 单系统实时精密单点定位可在 30 min 左右完成收敛。收敛后,在水平方向上,定位精度相对较高,且 N 和 E 方向具有相似的精度,可以稳定在 5 cm 以内;在垂直方向上,定位精度逐渐提高且稳定至 10 cm 以内。这也表明本文通过混合编程技术编制的实时定位软件已具备了实时精密单点定位的能力。

本文的研究是在已有 FORTRAN 语言编制的后处理 PPP 软件基础上完成的。目前,国际上主要的 GNSS 综合数据处理软件是用 FORTRAN 语言编制的;受此影响,国内外的很多 PPP 软件也是采用 FORTRAN 语言开发的。本文的工作也表明,可充分利用已有的 FORTRAN 软件包和子程序,通过混合编程可实现后处理 PPP 软件的实时应用,这对于相关的研究工作和 PPP 的实时性应用具有参考价值。

本文的研究也发现,GPS 单系统的卫星数量不够多时,出现收敛时间长和精度不稳定的情况,针对这一现象,实时精密单点定位软件需下一步工作中加入其他卫星系统,以减少单系统频繁换星对定位结果的影响。

参考文献(References):

[1] LIU J N, YE S R. GPS precise point positioning using undifferenced phase observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University(Geomatics and Information Science), 2002(3): 234-240. 刘经南,叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002(3): 234-240.

[2] KOUBA J, HEROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28.

[3] YAN X C. Research on the application of precise point positioning technology in marine survey[D]. Zhengzhou:PLA Information Engi-

- neering University, 2013. 宴新村. 精密单点定位技术在海洋测量中的应用研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2013.
- [4] ZHANG H, TANG J, SONG G D, et al. Research on calculating scheme optimization of precise point positioning in seacoast control surveys[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(4): 13-16. 张华, 唐俊, 宋国大, 等. 海岛礁测量中精密单点定位优化解算方案研究[J]. 海洋测绘, 2014, 34(4): 13-16.
- [5] CHEN W, HU C, LI Z, et al. Kinematic GPS precise point positioning for sea level monitoring with GPS buoy[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2004, 3(1-2): 302-307.
- [6] ZHAO J H, DONG J, KE J, et al. High precision GPS tide measurement method in far-distance and transformation model vertical datum[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University(Geomatics and Information Science), 2015, 40(6): 761-766. 赵建虎, 董江, 柯灏, 等. 远距离高精度 GPS 潮汐观测及垂直基准转换研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 761-766.
- [7] FAN S J, QIN X B, WU S Y, et al. Tidal level measurement test and result analysis based on PPP with different ephemeris and clock offsets[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(4): 43-46. 范士杰, 秦学彬, 吴绍玉, 等. 不同星历和钟差产品的 PPP 验潮试验及结果分析[J]. 海洋测绘, 2014, 34(4): 43-46.
- [8] ZHANG X H, LIU J N, RENE F. Application of precise point positioning in airborne survey[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University(Geomatics and Information Science), 2006(1): 19-22, 46. 张小红, 刘经南, RENE F. 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(1): 19-22, 46.
- [9] XU Y. The research of GPS real-time PPP technology[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012. 徐园. GPS 实时精密单点定位相关技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
- [10] YI Z H. Research on theory and application of real time precise point positioning[D]. Changsha: Central South University, 2011. 易重海. 实时精密单点定位理论与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [11] GENG T, ZHAO Q L, LIU J N, et al. Real-time precise point positioning based on PANDA software[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University(Geomatics and Information Science), 2007, 32(4): 312-315. 耿涛, 赵齐乐, 刘经南, 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.
- [12] LIU Z Q, WANG J X. Realization and analysis of real-time precise point positioning based on SSR broadcast ephemeris corrections[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(1): 15-19, 109. 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, 109.
- [13] WANG S L, WANG Q, GAO W, et al. Quality analysis of IGS real-time products and its application in real-time precise point positioning[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(S2): 365-369. 王胜利, 王庆, 高旺, 等. IGS 实时产品质量分析及其在实时精密单点定位中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(S2): 365-369.
- [14] ABDI N, ARDALAN A A, KARIMI R, et al. Performance assessment of multi-GNSS real-time PPP over Iran[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(12): 2870-2879.
- [15] PAN Z P, CHAI H Z, DONG B Q, et al. Real-time GPS precise satellite clock error estimation and precise point position[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2015, 35(5): 12-15, 19. 潘宗鹏, 柴洪洲, 董冰泉, 等. 实时 GPS 精密卫星钟差估计及实时精密单点定位[J]. 海洋测绘, 2015, 35(5): 12-15, 19.
- [16] 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. 尹倩倩, 楼益栋, 易文婷. IGS 实时产品比较与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(6): 123-128.
- [17] LAI Y B, ZHAO C M, LI Z S. Accuracy analysis of real time precise point positioning based on different ephemeris[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(8): 9-12. 赖允斌, 赵春梅, 李子申. 不同星历下实时精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报, 2015(8): 9-12.
- [18] PENG X Y, WANG Z Q, ZHANG Z L. Software development of precise point positioning based on mixed-language programming of C# and FORTRAN[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2013, 22(5): 9-12. 彭秀英, 王宗强, 张尊良. 基于 C# 与 FORTRAN 混合编程的精密单点定位软件研制[J]. 测绘工程, 2013, 22(5): 9-12.
- [19] QI X D, TONG Z Q, HE C G. Study on mixed Fortran and C programming in Linux[J]. Computer Engineering and Design, 2008(9): 2378-2380. 亓雪冬, 仝兆岐, 何潮观. Linux 环境中 Fortran 与 C 混合编程方法研究[J]. 计算机工程与设计, 2008(9): 2378-2380.
- [20] YAN Z Q, LIU Y, HAN S H. Coordinate transformation realization of ECEF and ECI based on hybrid programming[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(11): 119-122. 闫志闯, 刘永, 韩少红. 一种混合编程的地固系与空固系坐标变换方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(11): 119-122.
- [21] LI X, QI X D. Mixed programming of Fortran and C/C++ in Linux[J]. Modern Computer, 2012(5): 57-60. 李霞, 亓雪冬. 基于 Linux 的 Fortran 与 C/C++ 混合编程[J]. 现代计算机, 2012(5): 57-60.
- [22] CHEN G X. Research on Multi-GNSS precise point positioning technology[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015. 陈冠旭. 多模 GNSS 精密单点定位技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.

Real-time Precise Point Positioning Based on Mixed Programming

LI Meng-hao¹, WANG Sheng-li², GAO Xing-guo³, CHEN Guan-xu⁴, LIU Yan-xiong¹

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd, Jinan 250014, China;

4. Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: On the basis of the FORTRAN program that has the existing post processing for the precise point positioning data, the real-time static precise point positioning is realized by means of a C/C++-Fortran mixed programming, in which the parameters of high-precision satellite orbit and clock difference are real-time estimated through the satellite broadcast ephemeris and the SSR correction information data stream, and the satellite observation data flows are provided by GNSS receiver in real time. The feasibility of the mixed programming technology can be validated by the real-time precise point positioning program, which is of good reference value for the relevant researches and the real-time application of the real-time static precise point positioning. The results from the real-time static precise point positioning test of GPS single system indicate that the convergence time of the real-time static precise point positioning is about 30 ~ 100 min under the cases of 6-hour observation session and 1 second sampling interval. The RMS calculated according to the real time positioning results and the exact coordinate difference of the stations are better than 5cm horizontally and 10cm vertically after the convergence.

Key words: SSR correction information; mixed programming; real-time precise point positioning; GPS

Received: October 26, 2017