

基于 GAMP 软件的 GNSS 精密单点定位研究

邵 贺

(沈阳市勘察测绘研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 研究利用开源的 GNSS 数据处理软件 GAMP 进行精密单点定位解算, 阐述了 GAMP 软件在精密单点定位中使用的数据预处理方法以及电离层、对流层、频间偏差等误差项的改正方法, 设计了精密单点定位的解算策略并配置了相关的软件关键参数, 对 IGS 跟踪站 jfng 站的实测数据进行了解算。结果表明, 利用 GAMP 软件, 利用适当的解算策略处理静态数据, 约 10 min 可收敛至亚米级, 3 h 左右可收敛至厘米级, 经过全天的解算其最终精度可达近毫米级。

关键词: GAMP; 精密单点定位; GNSS

中图分类号: P228.49

文献标识码: A

文章编号: 1672-5867(2020)02-0124-04

Research on GNSS Precise Point Positioning Based on GAMP Software

TAI He

(Shenyang Surveying and Mapping Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110004, China)

Abstract: This paper studies the solution of precise single point positioning by using open source GNSS data processing software GAMP, expounds the data preprocessing method used by GAMP software in precise single point positioning and the correction method of errors such as ionosphere, troposphere and frequency deviation, designs the solution strategy of precise single point positioning and configures the key parameters of the software. The measured data of jfng station of IGS tracking station are also given. The solution is carried out. The results show that the static data can converge to the sub-meter level in about 10 minutes and to the centimeter level in about 3 hours by using GAMP software, and the final accuracy can reach the millimeter level after all-day calculation.

Key words: GAMP; precise single point positioning; GNSS

0 引 言

精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术是 20 世纪 70 年代美国在 Doppler 定位时提出的概念^[1]。PPP 技术不需要参考站或参考网络的参与, 利用国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)获取 GNSS 卫星钟差和卫星精密星历改正数据之后, 利用单台高精度单频或多频 GNSS 接收机的载波相位以及非差伪距观测值即可实现高精度定位^[1]。这种方式既降低了野外实测的费用, 也极大地提高了 GNSS 精密定位操作上的灵活性。

目前, 精密单点定位的数据处理软件已经被国内外多家公司和研究机构推出, 比如 NRcan-PPP、SOPAC、MagicGNSS、RTX 等, 都是商业软件或服务, 价格较为昂贵^[2]。国内方面, 武汉大学张小红教授开发了 Trip 软件, 是国内首款该领域的商业软件^[3]。目前, 开源软件方面,

主要有 RTKlib 以及 GAMP 软件。其中, GAMP(GNSS Analysis software for Multi-constellation and multi-frequency Precise positioning) 软件是由山东科技大学周峰教授在 RTKlib 的基础上开发, 但相比于 RTKlib 在周跳检测、接收机钟跳修复、频间偏差等方面进行了优化, 具备 GPS、GLONASS、GALILEO、BDS 这 4 个系统联合定位的 PPP 软件, 其目前代码公开, 便于学习研究和算法测试, 界面友好, 配置丰富。

探讨 GAMP 软件使用的模型改正、参数配置、解算策略, 分析 GAMP 软件的 PPP 解算结果和精度水平, 对于使用 GAMP 开展 PPP 解算具有重要意义, 同时对于生产单位探索 PPP 技术及工程应用具有较好的参考价值。

1 精密单点定位的数学模型

GNSS 伪距观测值方程如式(1)所示, GNSS 载波相位观测值如式(2)所示:

收稿日期: 2019-03-18

作者简介: 邵 贺(1985-), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 硕士, 2007 年毕业于武汉大学大地测量学与测量工程专业, 主要从事连续运行参考站的技术管理工作。

$$P_i = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion/i} + \varepsilon(P_i)$$
$$\varphi_i = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion/i} + \lambda_i N_i + \varepsilon(\varphi_i)$$

式中, P_i 、 φ_i 分别为伪距观测值和载波相位观测值; ρ 为 GNSS 接收机和卫星间的几何距离; c 为真空中的光速; dt 为接收机钟差; dT 为 GNSS 卫星钟差; d_{orb} 为 GNSS 卫星轨道误差; d_{trop} 为对流层延迟; $d_{ion/i}$ 为 L_i 频率 ($i = 1, 2$) 上的电离层延迟; λ_i 为 L_i 载波波长; N_i 为整周模糊度; $\varepsilon(P_i)$ 为多路径和伪距观测噪声误差; $\varepsilon(\varphi_i)$ 为多路径和载波相位观测噪声误差。

GAMP 软件中采用的无电离层组合形成观测方程,其观测模型的简化形式式(3)、式(4)^[4]:

$$P_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 = \rho + cdt + d_{trop} + \varepsilon(P_{IF})$$
$$\varphi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \varphi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \varphi_2 = \rho + cdt + d_{trop} + B_{IF} + \varepsilon(\varphi_{IF})$$

式中, P_{IF} 为 P_1 、 P_2 伪距无电离层组合观测值; φ_{IF} 为 φ_1 、 φ_2 载波相位无电离层组合观测值; f_i ($i = 1, 2$) 为载波频率; $B_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 N_2$ 为无电离层组合相位观测值(距离)的模糊度; $\varepsilon(P_{IF})$ 、 $\varepsilon(\varphi_{IF})$ 分别为两种组合观测值未被模型化的和观测噪声的误差。

2 GAMP 软件基本介绍

2.1 基本架构

GAMP 是基于 RTKLIB 并进行深度优化后形成的软件,其主要是在周跳检测、接收机钟跳修复、频间偏差等方面进行了优化。

GAMP 软件由山东科技大学周峰教授编写,可在 Windows、UNIX/Linux 以及 Macintosh 等平台下运行,具备标准和电离层限制的单频和双频非差及非组合形式的 GNSS PPP 处理、支持 GPS、GLONASS、BDS、Galileo 和 QZSS 等多星座、能够处理 GLONASS 伪距频间偏差(IFBS)、高效的批处理 C shell 脚本、强大的结果输出、分析和绘图功能等。该软件是目前 PPP 领域通用、可靠的科研分析软件。

2.2 操作方式

按照项目,将算例目录进行复制,形成如图 1 所示的结构。

在实际操作时,首先通过第三方软件如 RTKLIB 中的 RTKGet 程序,对包括精密星历文件、精密钟差文件、广播星历文件、IGS 天线相位改正文件、海洋潮汐加载系数文件、差分码偏差、电离层改正文件、snx 解算文件等下载至目录中。

brdm2440.17p	2017/11/29 18:33	17P 文件	5,579 KB
CASOMGDRAP_20172440000_010_01...	2017/11/29 18:34	85X 文件	277 KB
CODG2440.17i	2017/11/29 18:34	17I 文件	1,631 KB
cu02440.17o	2017/11/29 18:34	17O 文件	26,756 KB
gamp.cfg	2017/11/29 18:43	CFG 文件	4 KB
ign14.txt	2017/11/29 18:34	ATX 文件	9,588 KB
ign1964.txt	2017/11/29 18:34	SNX 文件	35,383 KB
ign19647.erp	2017/11/29 18:34	ERP 文件	2 KB
jmg2440.17o	2017/11/29 18:34	17O 文件	23,592 KB
onload.biq	2017/11/29 18:34	BIQ 文件	301 KB
P1C11709.DCB	2017/11/29 18:34	DCB 文件	2 KB
P1R21709.DCB	2017/11/29 18:34	DCB 文件	3 KB
P2C21709.DCB	2017/11/29 18:34	DCB 文件	16 KB
sbw.crd	2017/11/29 18:33	CRD 文件	8 KB
wum19644.clk	2017/11/29 18:34	CLK 文件	14,189 KB
wum19644.sp3	2017/11/29 18:33	SP3 文件	486 KB
wum19645.clk	2017/11/29 18:34	CLK 文件	14,016 KB
wum19645.sp3	2017/11/29 18:33	SP3 文件	480 KB
wum19646.clk	2017/11/29 18:34	CLK 文件	14,184 KB
wum19646.sp3	2017/11/29 18:34	SP3 文件	486 KB

图 1 GAMP 软件处理文件目录结构图
Fig.1 GAMP software processing file directory structure diagram

下载完毕之后,将观测值文件放入该目录中,编辑测站先验坐标(CRD)文件,将全部测站的先验坐标输入,精度越高越好。然后,编辑 gamp.cfg 文件,设置处理选项,包括处理星座、起止时间、解算类型等,具体设置(部分)如图 2 所示。

start_time	= 0
end_time	= 0
posmode	= 7
solttype	= 0
navsys	= 33
gnsisb	= 1
gloicb	= 0
minelev	= 7.0
maxout	= 3
sampleprc	= 0
inpfreq	= 2
ionoapt	= 4
ionopnoise	= 1
ionconstraint	= 0
tropopt	= 3
tropmf	= 1
tidecorr	= 7

图 2 GAMP 软件处理配置文件图
Fig.2 GAMP software processing profile diagram

编辑完成后,通过 cmd 命令行,在目录下执行命令 gamp gamp.cfg 即可开始运行。当多文件处理时,仅需要将文件放入同一目录即可,软件自动判别文件数量,并按顺序进行处理。

处理完毕之后,生成包括点位坐标、编译信息等在内的多个输出结果,如图 3 所示。

3 GAMP 解算策略

3.1 模糊度解算

GAMP 软件中,精密单点定位模糊度采用浮点解策略。

3.2 周跳探测

GAMP 软件中,周跳探测采用的是 $L1-L2$ geometry free 法。

```

cut02440.17o.debug
cut02440.17o.dtrp
cut02440.17o.elev
cut02440.17o.gf
cut02440.17o.ippp
cut02440.17o.isb
cut02440.17o.pdop
cut02440.17o.pos
cut02440.17o.resc1
cut02440.17o.resc2
cut02440.17o.resp1
cut02440.17o.resp2
cut02440.17o.stec
cut02440.17o.wlamb_no
cut02440.17o.wlamb_yes

```

图3 GAMP 软件处理结果文件图

Fig.3 GAMP software processing results diagram

3.3 电离层时延改正

在精密单点定位中,一般采用式(3)、式(4)的无电离层组合。在无电离层组合中,一阶电离层影响被消除,残余的高阶项误差大约为厘米级。

在 GAMP 软件中,对于电离层的选项,缺省采用 uc12 模式,即 f_1 、 f_2 频率的非组合模式。对于残余的电离层高阶项误差,采用模型进行估计,一般为 random walk 随机游走。

3.4 对流层时延改正

在 GAMP 软件中,缺省对流层延迟采用 ztd-est 的估计方式,投影函数选择 gmf。

3.5 硬件延迟偏差改正

不同频率的载波以及不同类型的测距码的硬件延迟不同,假设 C_1 、 P_1 、 P_2 对应的硬件延迟分别为 H_{C_1} 、 H_{P_1} 、 H_{P_2} , 硬件延迟偏差 $H_{P_1-P_2}$ 、 $H_{P_1-C_1}$ 可达到米级。

在 GAMP 中,DCB 采用 IGS 相关的 P_1C_1 、 P_1P_2 、 P_2C_2 解算值产品。

4 算例分析

本次研究,采用了 IGS 跟踪站的 jfng 站,采用的数据为 2017 年 9 月 1 日的观测数据,精确坐标来自 SNX 文件。将 PPP 的解算结果与已知值进行比较,得到 X、Y、Z 这 3 个地心分量上的定位误差。

4.1 解算策略

在本次研究中,重点分析不同卫星星座组合对于 PPP 结果的影响,故在 gamp.cfg 设置文件中,对于 navsys 分别采用单独卫星星座(GPS 或 GLONASS 或 GALILEO 或 BDS)处理,同时考虑组合方式,分析了 GPS+BDS、GPS+GLONASS 两种配置的 PPP 解算情况。

其余配置,采用软件的缺省配置。缺省条件下,采用全部观测数据、采用 PPP_static 模式,采用 forwards 的滤波模式等,详细配置情况如图 4 所示。

```

start_time      = 0
end_time        = 0
posmode         = 7
soltype         = 0
navsys          = 1
gnsisb         = 1
gloicb         = 0

minelev        = 7.0
maxout         = 3
sampleprc      = 0
inpfrq         = 2
ioncopt        = 4
ionopnoise     = 1
ionconstraint   = 0
tropopt        = 3
tropmf         = 1
tidecorr       = 7
cycleslip_GF   = 1 0.00
cycleslip_MW   = 1 0.00
errratio(P/L GPS) = 100.0
errratio(P/L GLO) = 100.0
errratio(P/L BDS) = 500.0
errratio(P/L GAL) = 100.0
errratio(P/L QZS) = 100.0
errmeas(L)     = 0.003
prcNoise(AMB)  = 1.0e-07
prcNoise(ZTD)  = 1.0e-04
prcNoise(ION)  = 4.0e-02
prcNoise(ION_GF) = 1.0e-03

```

图4 本次研究采用的 GAMP 软件配置

Fig.4 GAMP software configuration used in this study

4.2 解算结果分析

经过计算,各种卫星组合下单天解的各分量差异分布如图 5 至图 11 所示。

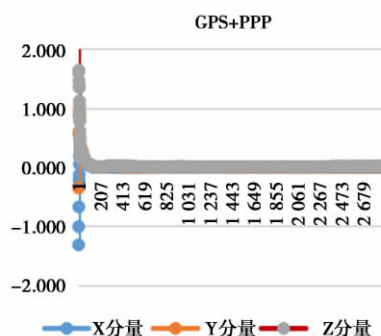


图5 GPS_PPP 定位结果

Fig.5 GPS_PPP positioning results

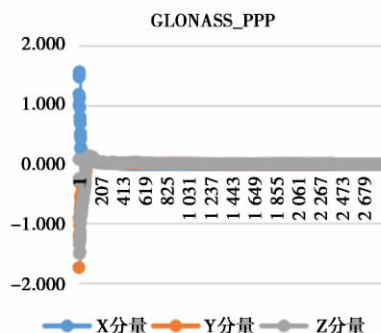


图6 GLONASS_PPP 定位结果

Fig.6 GLONASS_PPP positioning results

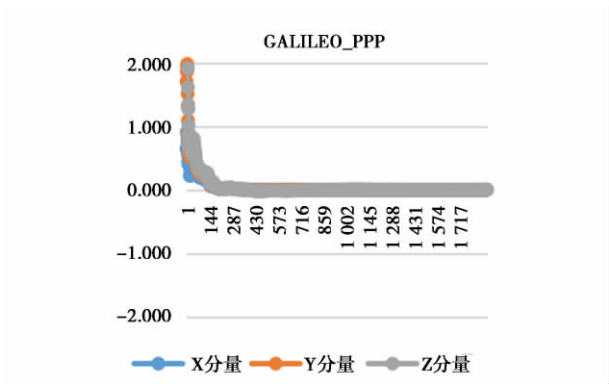


图 7 GALILEO_PPP 定位结果
Fig.7 GALILEO_PPP positioning results

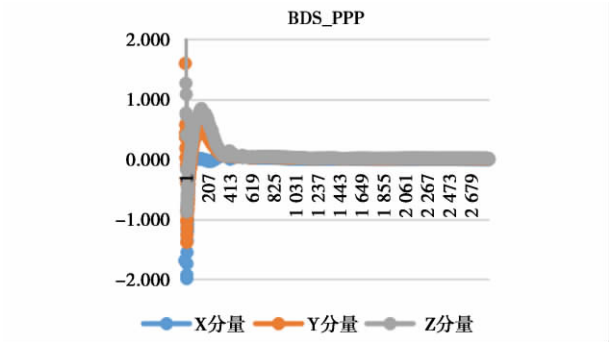


图 8 BDS_PPP 定位结果
Fig.8 BDS_PPP positioning results

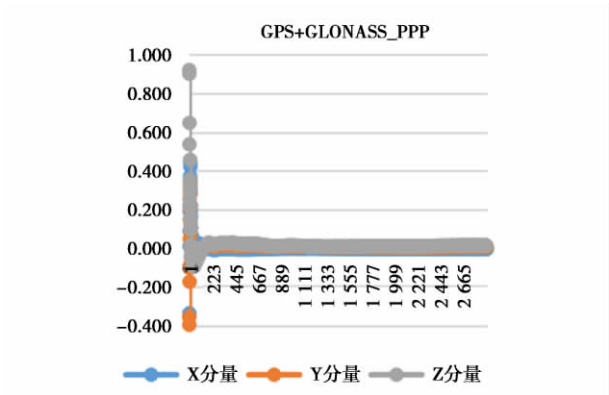


图 9 GPS+GLONASS_PPP 定位结果
Fig.9 GPS+GLONASS_PPP positioning results

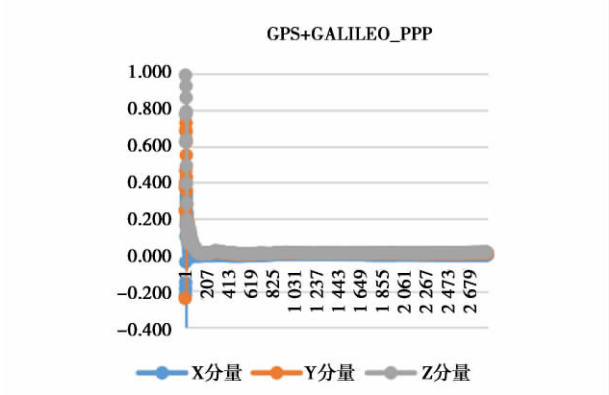


图 10 GPS+GALILEO_PPP 定位结果
Fig.10 GPS+GALILEO_PPP positioning results

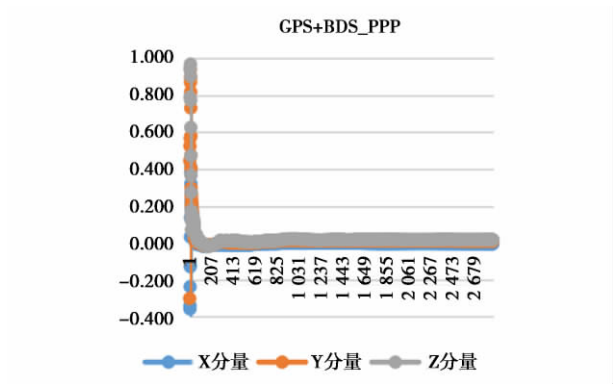


图 11 GPS+BDS_PPP 定位结果
Fig.11 GPS+BDS_PPP positioning results

从结果上看,利用 GAMP 软件采用 4.1 中的计算策略处理 jfng 基准站的静态数据,其解算的收敛时间(X、Y、Z 分量内符合精度分别为 0.05 m、0.1 m、0.5 m) 见表 1。

表 1 收敛时间汇总表(历元数,30 s 采样间隔)

阈值 (m)	GPS	GLO	GAL	BDS	GPS+GLO	GPS+BDS	GPS+GAL
0.5	10	42	10	35	5	11	9
0.1	45	78	38	95	27	32	26
0.05	70	151	56	212	45	41	32

从表 1 可以看出,在单卫星星座且单历元观测卫星足够解算的前提下,收敛时间在 0.5 m 的阈值下 GPS = GAL> BDS>GLO; 在 0.1 m 的阈值下 GAL>GPS>BDS>GLO; 在 0.05 m 的阈值下 GAL>GPS>BDS>GLO。

在卫星组合的条件下,卫星数量已不再是影响单历元计算的核心因素,收敛时间在 0.5 m 的阈值下 GPS+ GAL>GPS+BDS>GPS+GLO; 在 0.1 m 的阈值下 GPS+GAL ≈ GPS+BDS>GPS+GLO; 0.05 m 的阈值下 GPS+GAL>GPS +BDS>GPS+GLO。

经过分析,影响 PPP 定位结果的主要因素在于卫星钟的稳定性以及码观测数据的稳定性,由于 GALILEO 系统的卫星钟稳定度以及码观测值的精度相对较高,而 GLONASS 的卫星钟稳定度以及码观测值的精度相对较低,故造成了单卫星星座以及组合卫星星座的定位性能的表现差异,组合星座的收敛速度要高于单卫星星座。

对于超过 24 h 的观测数据,其 PPP_Static 的最终坐标成果的差异见表 2。

表 2 坐标成果差异汇总表(单位: m)

	GPS	GLO	GAL	BDS	GPS+GLO	GPS+BDS	GPS+GAL
DX	-0.005	-0.002	0.004	-0.009	-0.004	-0.004	-0.001
DY	0.011	0.009	0.006	0.012	0.012	0.014	0.011
DZ	0.008	0.005	0.005	0.006	0.008	0.008	0.007

(下转第 131 页)



图 6 实验二 BDS, GPS, BDS/GPS 动态测量轨迹图

Fig.6 Experiment 2 BDS, GPS, BDS / GPS dynamic measurement trajectory map

根据图 5 跟踪卫星图可知,实验二观测到的北斗卫星有 9 颗,观测到的 GPS 卫星有 8 颗,由于实验一和实验二是同时观测,经纬度相差不大,接收卫星信号的情况几乎相同。根据图 6 的动态轨迹图可知,实验二的测量效果要优于实验一。BDS 动态轨迹图中,BDS 未被采集到的点占整个轨迹 1/6,但是在高层建筑和树林周围仍有大量未采集到的点;GPS 动态轨迹图中,树林区域出现大量浮点解,可见树林中对 GPS 信号的遮挡较为严重。BDS/GPS 组合动态轨迹图中,仅有少数浮点,动态轨迹图趋于完整,测量效果也是最好的。因此,对于 BDS/GPS 组合动态测量的实验结果分析,实验二可以验证实验一得出的结论: BDS/GPS 组合系统的动态测量效果优于 BDS 和 GPS 任一单系统动态测量的效果。

4 结束语

随着北斗卫星导航定位系统的日益发展以及其在民间的应用深入化,越来越多的领域需要将 BDS 与原有 GPS、GLONASS 等系统进行融合,实现组合定位,旨在更好地享受科学技术给人们带来的便利,故以本文所论述的基于 BDS、GPS、GLONASS 等多星座组合定位效果分析研究的重要性便日趋突出。现将本文所得结论总结如下:

①BDS/GPS 单系统和 BDS/GPS 组合系统相比,BDS/

GPS 组合系统的动态测量效果优于 BDS/GPS 任一单系统动态测量的效果。

②目前,BDS 系统不如 GPS 系统完善,单系统的动态测量效果相比,GPS 动态测量效果优于 BDS 动态测量效果^[10]。

③高层建筑和树林会影响 BDS/GPS 动态测量的效果,即便受到其影响,BDS/GPS 的组合系统进行动态测量可以优化其单系统动态测量效果不佳的部分^[3,11],提高动态测量的可靠性。

参考文献:

- [1] 周蓉,向民志,薛志宏.一种 BDS/GPS 组合动态变形测量系统的模糊度实时算法分析[J].现代测绘,2014,37(5):29-31.
- [2] 倪卫明,王志伟,王永平. GPS RTK 技术和 PPK 技术联合作业探讨[J]. 物探装备,2006(4):303-304.
- [3] 汪亮,李子申,袁洪,等. BDS/GPS/GLONASS 组合的双频单历元相对定位性能对比分析[J].科学通报,2015,60(9):857-868.
- [4] 何俊,袁小玲,曾琪,等. GPS/BDS/GLONASS 组合单点定位研究[J].测绘科学,2014,39(8):124-128,170.
- [5] 白立舜,张宏伟,聂敏莉. GPS PPK 技术和 GPS RTK 技术在包头市第二次土地调查中的应用与对比分析[J].测绘通报,2013(7):49-53.
- [6] 王世进,秘金钟,谷守周,等. BDS/GPS 组合相对定位方法及精度分析[J].测绘通报,2014(5):1-4.
- [7] 汪连贺.基于 GPS PPK 技术的远距离高精度验潮方法研究[J].海洋测绘,2014,34(4):24-27.
- [8] 张广汉,严超. BDS/GPS 组合单点定位与伪距双差算法分析[J].北京测绘,2017(2):13-16.
- [9] 吴春节,胡玉坤,彭攀. BDS/GPS 观测值质量评估与分析[J].北京测绘,2017(S1):32-36.
- [10] 何峰,郑勇,骆亚波,等. GPS 动态测量精度检测及分析[J].工程勘察,2009(3):77-82.
- [11] 张辉,周田,李博,等. BDS/GPS 组合系统定位性能分析[J].测绘科学,2014,39(6):18-21,58.

[编辑:刘莉鑫]

(上接第 127 页)

从表 2 可知,在观测时长达到单天时,最终的坐标成果在卫星星座上的差异很小,仅为毫米级,而卫星组合与单卫星的差异不大,这表明在跨度足够长的时间内,卫星数量已经不作为最终精度的主要影响因素。

5 结束语

在实际工程应用中,当测区范围内无高精度已知点且对精度要求不高时,可利用精密单点定位的方式布设基准点,并观测至少 3 h 以上,可得到分量精度优于 5 cm 的三维地心坐标成果,用于本地的 RTK 作业,具有较好的现实意义和应用价值。

对于采用的卫星星座方面,在观测时间足够的情况下,推荐采用全星座的接收机和天线,并采用组合方式,可以提高定位精度的收敛速度和稳定性。

参考文献:

- [1] 李征航,张小红.卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M].武汉:武汉大学出版社,2009.
- [2] 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),2002,27(3):223-240.
- [3] 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.
- [4] KOUBA J HEROUX P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J].GPS Solutions,2001,5(2):12-28.
- [5] ZUMBERGE J F. Automated GPS Data Analysis Service[J].GPS Solutions,1999,2(3):76.

[编辑:任亚茹]