

# BDS 与 GPS、GLONASS 多模融合导航定位时空统一<sup>\* 1</sup>

李鹤峰<sup>1,2)</sup> 党亚民<sup>1)</sup> 秘金钟<sup>1)</sup> 阳凡林<sup>2)</sup>

(1) 中国测绘科学研究院大地测量与地球动力学研究所,北京 100830  
(2) 山东科技大学测绘科学与工程学院,青岛 266510

**摘 要** 给出北斗卫星导航系统(BDS)、GPS、GLONASS 三系统间时空统一的转换模型和转换参数,提出 GNSS 多模融合导航定位时空统一转换方法,并基于 Visual C++ 平台编写多模融合定位程序,用实测 BDS/GPS/GLONASS 数据进行定位解算,实验验证了时空统一转换方法的正确性;得出多模融合定位精度高,可靠性好的结论。

**关键词** 北斗系统;GNSS;多模融合;导航定位;时间系统;坐标系统

**中图分类号**:P228.4

**文献标识码**:A

## RESEARCH ON SPATIO TEMPORA UNIFICATION OF BDS/GPS/GLONASS MULTI-MODE FUSION NAVIGATION AND POSITIONING

Li Hefeng<sup>1,2)</sup>, Dang Yamin<sup>1)</sup>, Bei Jinzhong<sup>1)</sup> and Yang Fanlin<sup>2)</sup>

(1) *Institute of Geodesy and Geodynamics, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830*  
(2) *College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510*

**Abstract** Time system and coordinate system are the reference datum for navigation and positioning, any form of navigation and positioning are carried out within a certain amount of time and coordinate frame. This paper detailed study spatio tempora unification among Beidou Satellite Navigation System (BDS), GPS and GLONASS, introduces the time frame and coordinate frame of the three navigation systems. Gives spatio tempora unification conversion model and parameters. On the basis of the theory, puts forward the spatio tempora unification method in practical application of multimode navigation and positioning. Based on the Visual C++ platform write multi-mode combinations positioning program, calculate and analyze BDS/GPS/GLONASS three system receiver data, experimental results show that, multi-mode fusion positioning have better accuracy and reliability. Verify the correctness and feasibility of spatio tempora unification transformation thought and method in practical application.

**Key words**: BDS; GNSS; multi-mode fusion; navigation and positioning; time system; coordinate system

## 1 引言

随着全球 GNSS 系统的不断完善,特别是北斗卫星导航(区域)系统的正式投入运行,继 GPS/GLO-NASS 组合定位后,再一次掀起 GNSS 多星座系统融

合导航定位研究的热潮。多模融合定位能大大提高可见卫星数目,形成更好的空间卫星布局,降低精度稀释因子(DOP),提高导航定位的稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。由于时间系统和坐标系统是导航定位的参考基准,任何形式的导航定位都是在一定的时间和坐标

\* 收稿日期:2013-02-10

基金项目:国家“863”重点项目(2011AA120503);科技部科技支撑计划(2012BAB16B01);国家“863”计划项目(2013AA122501)

作者简介:李鹤峰,男,1987年生,硕士研究生,主要研究方向为GNSS(BDS、GPS、GLONASS)多模融合定位与RAIM算法。E-mail:lehe-ro@163.com。

框架内进行<sup>[2]</sup>,为此,本文将详细研究 BDS、GPS、GLONASS 各系统的时间框架和坐标框架,给出三系统间时空统一的转换模型和转换参数,并基于 Visual C++ 平台,编写 GNSS(BDS/GPS/GLONASS)多模融合定位程序,用实测 BDS/GPS/GLONASS 三系统数据进行融合定位解算,以验证 GNSS 多模融合定位中时空统一转换方法的正确性和可行性。

2 GPS、BDS、GLONASS 时间系统

2.1 GPS 时间框架

GPS 时间系统(GPST)属于原子时系统(AT),其秒长与原子时相同,但与国际原子时(AIT)具有不同的原点,任一瞬间 GPST 与 AIT 间均有一常量偏差(19 s),GPST 与 AIT 的关系式为:

GPST = AIT - 19 s (1)

AIT 与 UTC 的关系式为<sup>[3]</sup>:

AIT = UTC + 1 s × n (2)

式中,n 为 AIT 与 UTC 间不断调整的参数。

从式(1)、(2)可知,GPST 与 UTC(USNO)的关系式为:

GPST = UTC(USNO) + 1 s × n - 19 s (3)

2.2 BDS 时间框架

BDS 时间基准采用北斗时(BDT),BDT 以国际单位制(SI)秒(s)为基本单位,与 GPST 一样同属于原子时(AT),无闰秒,以周和周内秒为单位连续计数,通过 BDS 导航电文播发<sup>[4,5]</sup>。但 BDT 的起算历元为 2006-01-01T00:00:00 秒(星期日)的协调世界时 UTC,BDT 通过中国维持的协调世界时 UTC(NTSC)与国际 UTC 建立联系,由于闰秒的影响,从 1980-01-06—2006-01-01 日间共有正闰秒 + 14 s,所以 BDT 与 GPST 间相差 14 s 的整数差,参考式(3),BDT 与 UTC(NTSC)之间的关系式为:

BDT = UTC(NTSC) + 1 s × n - 19 s - 14 s (4)

2.3 GLONASS 时间框架

GLONASS 时间系统(GLONASST)属于 UTC 时间系统,其产生是基于 GLONASS 同步中心 CS(Central Synchronize)时间。由于 GLONASS 控制部分的特性,使 GLONASST 与俄罗斯维持的协调世界时 UTC(SU)存在 3 个小时的整数差,此外它们还存在有 1 ms 以内的系统差  $\tau_r$ <sup>[6]</sup>。GLONASST 与 UTC(SU)的关系式为:

GLONASST = UTC(SU) + 3 h -  $\tau_r$  (5)

2.4 GPS、BDS、GLONASS 系统间的时间统一

时间的统一无非就是寻求一中间变量,将各自

的时间系统都转化到含有相同中间变量的关系式中,从而实现时间的统一。通过对 GPS、BDS、GLONASS 时间框架的分析,它们的时间基准都能和 UTC 形成一定的联系(表 1)。将 UTC 作为中间变量,即可实现不同时间系统的统一,UTC 作为中间变量的转换关系如图 1 所示。

表 1 GPS、BDS、GLONASS 时间系统对比

Tab. 1 Comparison among GPS, BDS, GLONASS time systems

对比参数	GPS	BDS	GLONASS
时间系统	GPST	BDT	GLONASST
时间基准	AIT	AIT	UTC
时间维持	UTC(USNO)	UTC(NTSC)	UTC(SU)
起算历元	1980. 1. 6 (0;0;0)	2006. 1. 1 (0;0;0)	1996 年起 4 年一周期
闰秒	无	无	有

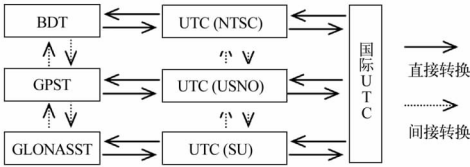


图 1 GPST、BDT、GLONASST 之间通过国际 UTC 相互转换关系

Fig. 1 Conversion relationship to each other through the UTC among GPST, BDT and GLONASST

若令:  $\tau_{U-N} = UTC(USNO) - UTC(NTSC)$  (6)

$\tau_{U-S} = UTC(USNO) - UTC(SU)$  (7)

通过分析可推得:

1)  $GPST = BDT + \tau_{U-N} + 14 s$  (8)

2)  $GPST = GLONASST - 3 h + \tau_r + \tau_{U-S} + 1 s \times n - 19 s$  (9)

3)  $BDT = GLONASST - 3 h + \tau_r + \tau_{U-S} + 1 s \times n - 19 s - \tau_{U-N} - 14 s$  (10)

3 GPS、BDS、GLONASS 坐标系统

3.1 GPS、BDS、GLONASS 坐标系统

GPS 坐标系统采用美国世界大地坐标系统(WGS84)。

BDS 坐标系统采用 2000 中国大地坐标系统(CGCS2000),CGCS2000 的定义和国际地球参考系统(ITRS)相一致<sup>[4,5]</sup>。

GLONASS 坐标系统原采用苏联的 1985 地心坐标系(SGS85),1993 年后改为由俄罗斯进行地面网与空间网联合攻关平差后建立的 PZ90 坐标系<sup>[2,6]</sup>

WGS84、CGCS2000、PZ90 参考椭球定义的基本大地参数见表 2。

表 2 GPS、BDS、GLONASS 坐标系基本大地参数

Tab. 2 Fundamental earth parameters of GPS、BDS and GLONASS coordinate system

坐标系	坐标原点	长半轴(m)	地球引力常数(含大气层)(m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	扁率	自转角速度(rad/s)
WGS-84	地球质心	6 378 137.0	398 600.5 × 10 <sup>9</sup>	1/298.257 223 563	7.2921 15 × 10 <sup>-5</sup>
CGCS2000	地球质心	6 378 137.0	398 600.441 8 × 10 <sup>9</sup>	1/298.257 222 101	7.2921 15 × 10 <sup>-5</sup>
PZ-90	地球质心	6 378 136.0	398 600.44 × 10 <sup>9</sup>	1/298.257 839 303	7.292 115 × 10 <sup>-5</sup>

3.2 GPS、BDS、GLONASS 系统间的坐标统一

3.2.1 基于 ITRF 的 WGS84、CGCS2000、PZ90 的坐标统一

为使 WGS84 坐标系与 ITRF 相一致<sup>[7,8]</sup>, WGS84 先后于 1994、1996、2002、2012 年进行四次精化。最新的 WGS84(G1674)坐标系于 2012 年 2 月 8 日投入使用,和最新的 ITRF08 保持一致<sup>[8]</sup>。

CGCS2000 定义为 ITRF97,采用 2000.0 历元下的坐标和速度场。

2007 年 9 月 20 日改进精化后的 PZ90.02 投入使用,最新的 PZ90.02 与 ITRF2000 只存在原点的平移,三个轴的定向与 ITRF 一致。PZ90 与 ITRF2000 的转换关系为<sup>[2]</sup>:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{ITRF2000}} = \begin{bmatrix} -0.36 \\ +0.08 \\ +0.18 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}_{\text{PZ-90}} \quad (11)$$

通过分析,WGS84、CGCS2000 与 PZ90 都与 ITRF 存在一定的关系,它们之间的转换,本质上是在不同 ITRF 框架间实现统一<sup>[2]</sup>。

3.2.2 基于布尔萨七参数模型的 WGS84、CGCS2000、PZ90 的坐标统一

两个任意的三维空间直角坐标系  $O-XYZ$  与  $O-X'Y'Z'$  之间的转换关系通过布尔萨七参数模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + (1+m) \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,转换参数的确定需要经过长期的观测和高精度的计算,国际上有很多组织和机构都进行了 GPS 与 GLONASS 系统之间的坐标统一转换研究<sup>[2]</sup>。目前,世界公认精度最高的转换参数为俄罗斯 MCC(Russian Mission Control Center)利用全球激光跟踪测轨数据计算而来的坐标转换七参数。MCC 得出的 PZ90 与 WGS84 之间的坐标转换公式为:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} = \begin{bmatrix} -0.47 \\ -0.51 \\ -1.56 \end{bmatrix} + (1+22 \times 10^{-9})$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -1.728 \times 10^{-6} & -0.017 \times 10^{-6} \\ 1.728 \times 10^{-6} & 1 & 0.076 \times 10^{-6} \\ 0.017 \times 10^{-6} & -0.076 \times 10^{-6} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}_{\text{PZ-90}} \quad (13)$$

对于 CGCS2000 与 WGS84、PZ90 间高精度七参数转换公式,目前还没有像 MCC 这样的组织来精确确定系统间的转换参数。前者由于 CGCS2000 与 WGS84 定义基本一致(表 2),后者因为 BDS 尚未覆盖全球,CGCS2000 与 PZ90 之间的联系还不紧密,对于这方面的需求并不明显。

4 实际应用中 GNSS 多模融合导航定位系统间时空统一

4.1 实际应用中时空统一思想和方法

在实际应用多模融合导航定位中,由于各种原因,导航定位的精度本身有限,再进行高精度的时空统一转换无疑是一种费时费力的工作,结果是导航定位的精度并不能得到有效的提高。所以,我们不必按照上述理论研究所述的那样,严格精密地进行 GPS、BDS、GLONASS 系统间的时空统一转换,只进行必要的转换即可。

在应用 GNSS 多模融合导航定位时,由于 GPS 系统较成熟且国际影响力比较大,系统间的时空统一转换研究也相当成熟,可以将接收机观测下的 UTC 统一转换到 GPST,坐标系统则统一转换到 WGS84 坐标系下。这样,就可以实现多模融合系统的时空统一,即将各系统的定位成果统一转换到以 GPST 为融合系统的时间系统,以 WGS84 坐标系为融合系统的坐标系统。

目前 GNSS 多系统接收机将观测文件集合了所有导航星座系统的观测数据,其中的观测时间系统为 GPST。而对于导航文件,值得注意的是,用多模接收机实测的 GNSS 导航文件中,GLONASS 的星历数据是 UTC(SU)时间系统下 PZ90 坐标系中的位置、速度、加速度等星历参数信息,而并非 GLONASS,其他系统的星历参数则是在本导航时间系统下的数据,接收机这样设计的目的是为了简化 GNSS 多模融合导航定位中对 GLONASS 系统时空统一转换的复杂性。

综合分析,在实际应用 GNSS 多模融合导航定位时,系统间的偏差可以通过星历提供的参数进行改正,不同国家维持的 UTC 之间微小偏差一般在几十纳秒,国际上某些部门会定期通过高精度的比对得到它们之间的改正值,导航电文中可以读取。那么,先不考虑这些影响,通过式(5)和式(9),将 UTC 下的 GLONASS 星历数据转换到 GPST 下,其关系式为:

$$GPST = UTC_{GLONASS星历} + 1\text{ s} \times n - 19 \quad (14)$$

其中, $n$  为 UTC 与 AIT 之间的调整参数,截至 2013 年 2 月,该调整参数  $n = 35$ 。然而,由表 1 可知, GLONASS 的起算历元从 UTC 时 1996 年起,4 年一个周期。而最近的起算历元是 2012 年,那么 2012 年的闰秒将不考虑在内,即,2012 年及以后 3 年的观测数据转换为 GPST 时  $n$  取 34。

同样,对于 BDS 系统,先将观测时间 UTC 下数据转化到 GPST,再将 GPST 转换到 BDT,在 CGCS2000 坐标下求解相关导航定位数据。GPST 与 BDT 之间的具体关系式为:

$$GPST = BDT + 14\text{ s} \quad (15)$$

对于坐标系统的统一,同样将其他坐标系归化到 WGS84 坐标下。PZ90 到 WGS84 的转化按照布尔萨七参数改正模型,利用 MCC 得到的七参数改正公式(13)进行转换。而 CGCS2000 与 WGS84 坐标系的定义几乎一致,椭球参数仅有两项微小的差别,它们之间是否需要坐标转换一直比较受关注<sup>[2,7]</sup>,文献[7]的研究认为,CGCS2000 和 WGS84 是相容的,在坐标系的实现精度范围内,CGCS2000 和 WGS84 是一致的。所以在实际 GNSS 多模融合导航定位的应用中,不必考虑 CGCS2000 与 WGS84 之间的转换,可以认为 CGCS2000 定位成果同属于 WGS84 坐标系成果。

4.2 算例验证分析

利用 2013 年 1 月 5 日固定于河北某基准站上的 BDS/GPS/GLONASS 三系统接收机采集 1 小时 30 分钟的数据,该 GNSS 接收机采样率为 1 s,UTC 时 11:00—12:30,共计 5 400 个历元,卫星截止高度

角设为 10°,基于 Visual C++ 平台,编写了 GNSS (BDS/GPS/GLONASS)多模融合单点定位程序,对实测数据分别以:①GPS 单系统;②BDS 单系统;③ GLONASS 单系统;④GNSS 融合三系统四种方案进行定位解算。图 2 直观地给出了四种方案  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  各分量定位结果与已知基准点坐标(可认为是精确值)各分量的残差值。表 3 统计了四种方案定位的残差平均值、残差中误差、以及点位误差等。

从图 2 和表 3 可以清楚地看出,四种方案除 GLONASS 系统坐标定位精度略大于 10 m 外,其余都在 10 m 以内。GPS、BDS、GLONASS 的定位精度依次递减,融合三系统定位精度较 BDS、GLONASS 明显提高,优化率分别达到 72.5% 和 80.7%,而较 GPS 系统定位精度只提高了 12.6%。其原因是 GPS 本身定位精度较高,而且本实验 GPS 可见卫星相对较多(图 3(a)),不能充分发挥融合系统的优势;另一方面是 GPS、BDS、GLONASS 各系统定位精度不同,本文参考其他学者对 GPS/GLONASS 组合系统的定权结论<sup>[9]</sup>,为验证 GNSS 融合系统时空统一思想的正确性和方法的可行性,考虑到不同系统定位精度不同,本文对融合系统的权比简单的赋予固定权值(GPS/BDS/GLONASS 权比按 12:3:2),并未对此权比是否最佳做进一步的研究。但根据定位结果已充分说明了对融合系统进行时空统一的思想是正确的,方法是可行的。

融合三系统定位精度的提高,其主要是由于融合系统增加了空间可见卫星数目,提高了卫星空间布局,降低了影响定位精度的 DOP 值(图 3 和表 4)。从图 3 和表 4 可以看出,融合系统可见星平均达到 21.9 颗,GDOP 平均值降为 1.436,卫星数远远高于各单系统,GDOP 值明显低于各单系统,这一点与空间卫星增加,GDOP 值下降相一致。而 GDOP 越小,定位精度越高,从而验证了上述融合系统定位精度高于各单系的结论,并得出多模融合系统定位精度高、可靠性好的结论。

表 3 GNSS 时空统一融合系统与各单系统定位结果统计(单位:m)

Tab.3 Positioning results of GNSS spatio tempora unification fusion system and single positioning system( unit:m)

星座	X 分量残差		Y 分量残差		Z 分量残差		点位 误差	优化率	定位 级别	时空 统一
	平均值	均方根	平均值	均方根	平均值	均方根				
GPS	0.173	1.209	-2.533	3.157	-0.410	1.484	2.572	12.6%	优	无需
BDS	8.082	8.146	1.266	2.221	-0.060	1.223	8.181	72.5%	良	无需
GLONASS	-11.094	11.184	-3.580	4.578	-0.021	2.864	11.657	80.7%	一般	无需
融合三系统	1.351	1.765	-1.793	2.718	0.115	1.272	2.248	0.0%	最优	必需

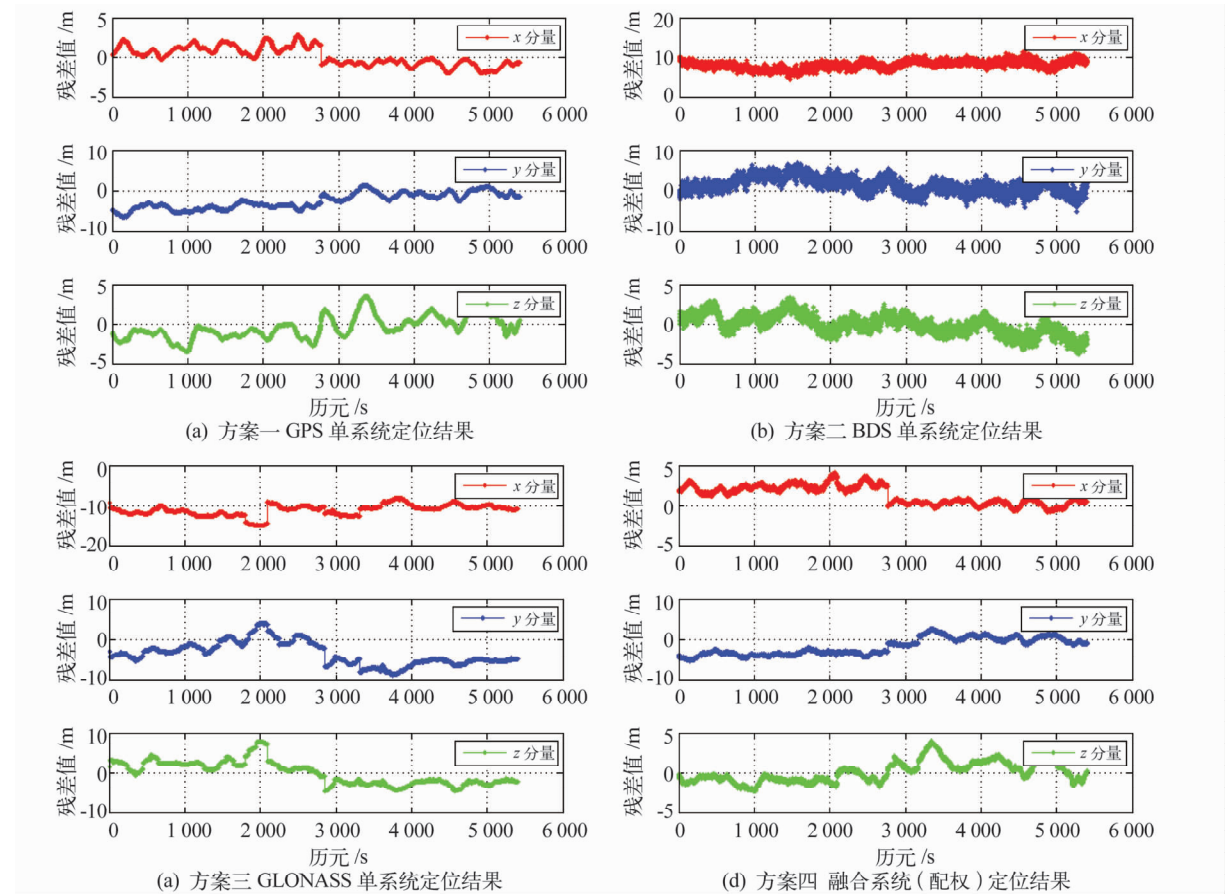


图2 GPS、BDS、GLONASS 各单系统与其时空统一融合系统定位结果

Fig.2 Positioning results of GPS, BDS, GLONASS single system and spatio-tempora unification fusional system

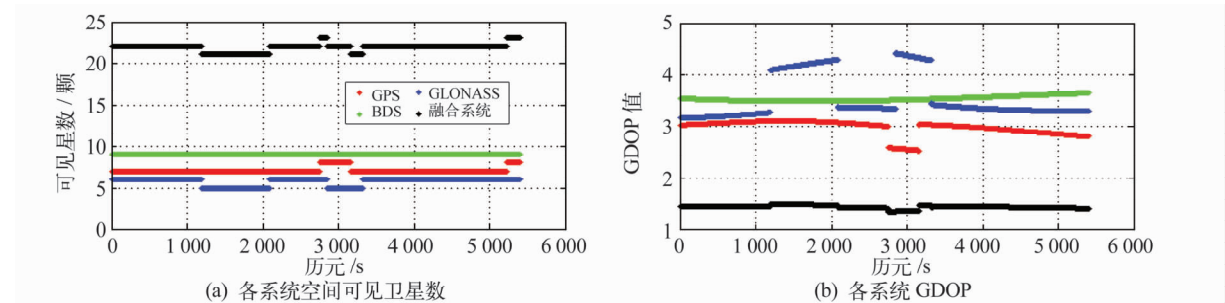


图3 GPS、BDS、GLONASS 各单系统与其时空统一融合系统可见卫星数及对应的 GDOP 值

Fig.3 Number of visible satellites and GDOP of GPS, BDS, GLONASS single system and spatio-tempora unification fusional system

表4 GNSS 融合系统与各单系统可见星数和 GDOP 值统计表

Tab.4 Number of visible satellites and GDOP of GNSS fusion system and single positioning system

定位系统	可见卫星数(颗)			GDOP			定位精度
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
GPS	8	7	7.1	3.097	2.528	2.964	优
BDS	9	9	9	3.640	3.480	3.528	良
GLONASS	6	5	5.7	4.397	2.153	3.534	一般
融合三系统	23	21	21.9	1.488	1.328	1.436	最优

## 5 结论

目前,在全球范围内,BDS、GPS 和 GLONASS 是仅有的能够正常运行并独立实现导航定位功能的三大系统,特别是 BDS 区域系统刚刚正式投入运营,在 BDS 还没有完全覆盖全球之前,加强与其它 GNSS 系统间的国际合作,开展系统间的兼容和互操作是当前研究的重点,也是充分利用 BDS 和发展 BDS 的关键。时间系统和坐标系统作为导航定位的参考基准,是各系统实现兼容和互操作的基础。文中详细介绍的 GNSS 系统间时间框架和坐标框架统一的方法,在时间和坐标系精度实现范围内,忽略系统间的某些误差,对 GNSS 任意双系统、三系统乃至正在建的 Galileo 四系统进行多模融合导航定位都具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

1 吴玲,等. GPS/GLONASS/GALILEO 多星座组合导航系统研究[J]. 中国空间科学技术,2009,(3):23-28. (Wu Ling, et al. Research on GPS/GLONASS/GALILEO multi-constellation integrated navigation system[J]. Chinese Space Science and Technology, 2009,(3):23-28)

2 党亚民,成英燕,薛树强. 大地坐标系统及其应用[M]. 北京:测绘出版社,2010. (Dang Yamin, Cheng Yingyan and Xue Shuqiang. Geodetic coordinate systems and their applications[M]. Beijing:Survey and Mapping Press,2010)

3 党亚民,秘金钟,成英燕. 全球导航卫星系统原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,2007. (Dang Yamin, Cheng

Yingyan and Cheng Yingyan. Principals and applications of global navigation satellite system[M]. Beijing: Survey and Mapping Press,2007)

4 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件(测试版)[R]. 2011. (China Satellite Navigation Office. Beidou navigation satellite system signal in space interface control document(test version)[R]. 2011)

5 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B1 I (1.0 版)[R]. 2012. (China Satellite Navigation Office. Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B1I(version 1.0)[R].2012)

6 Moscow. GLONASS interface control document(ICD) (version 5.0)[R].2002.

7 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学,2008,(5):1-5. (Wei Ziqing. China geodetic coordinate system 2000 and its comparison with WGS84[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008,(5):1-5)

8 Wong R and Rollins C. Recent updates to the WGS84 reference frame[EB/OL]. ION GNSS 2012, 2012. 9. 20, <http://www.ion.org/meetings/abstract.cfm?meetingID=38&pid=465&t=A&s=3>.

9 蔡昌盛,等. 单频 GPS/GLONASS 组合单点定位定位的精度评估[J]. 大地测量与地球动力学,2011,(3):85-89. (Cai Changsheng, et al. Accuracy assessment of combined single-frequency GPS/GLONASS single point positioning [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011,(3):85-89)