

北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究



施闯^{①*}, 赵齐乐^①, 李敏^①, 唐卫明^①, 胡志刚^①, 楼益栋^①,
章红平^②, 牛小骥^①, 刘经南^①

① 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079;

② 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

* E-mail: shi@whu.edu.cn

收稿日期: 2012-02-06; 接受日期: 2012-05-02

高等学校学科创新引智计划(编号: B07037)和国家高技术研究发展计划(编号: 2012AA12A202)资助

摘要 我国北斗卫星导航系统已建成由 8 颗导航卫星组成的区域导航星座, 初步形成了亚太地区的导航定位服务能力。本文采用“北斗卫星观测实验网”实测数据和我国自主研发的精密数据处理软件 PANDA, 实现了北斗导航卫星系统的高精度定轨, 静态精密单点定位、相对定位, 以及动态伪距差分、相位差分定位。研究成果显示: 北斗卫星精密定轨径向精度优于 10 cm, 静态精密单点定位精度达到厘米级、基线相对定位达到毫米级; 动态伪距差分定位精度达到 2~4 m, RTK 定位精度达到 5~10 cm, 接近目前 GPS 所能实现的精密定位水平。本研究验证了北斗卫星导航系统在地面参考站网的支持下, 具备广域米级至分米级的精密定位, 以及区域厘米级精密定位服务能力。可为北斗系统在我国精密导航定位领域的推广应用和科学研究提供技术积累和重要参考。

关键词

北斗卫星导航系统
PANDA
精密定轨
北斗差分

北斗卫星导航系统(Compass/Beidou Navigation Satellite System)是中国正在实施的自主发展、独立运行的全球卫星导航系统。2012 年左右, 系统将首先具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力; 2020 年左右, 建成覆盖全球的北斗卫星导航系统^[1]。建成后的北斗系统将为北斗用户提供定位、授时与报文通信一体式服务; 北斗系统与其他卫星导航系统的兼容与互操作性使用户能够同时利用多系统观测数据, 极大改善观测冗余度、提高导航定位精度^[2]。2011 年 12 月 2 日第十颗北斗导航卫星的成功发射, 标志着我国自主卫星导航系统建设进入新的发展阶段, 北斗区域卫星导航系统建设又迈出了

重要一步([http://www.beidou.gov.cn/\[EB\]](http://www.beidou.gov.cn/[EB]))。尽管目前北斗卫星导航系统区域星座还未部署完毕, 但已经初步形成了亚太地区的导航定位服务能力。

卫星导航系统的定位服务能力的提高可从以下两方面入手: 一是提高导航卫星数及优化空间构型, 即改善地面终端的卫星几何观测条件; 另一方面提高卫星星历、钟差及相关模型参数的精度, 即提高导航系统的空间信号精度。在卫星数有限的条件下, 获取导航卫星的精密轨道和钟差是提升卫星导航系统精密定位服务能力的关键^[3]。新卫星导航系统的精密轨道和钟差参数的确定, 多模数据的融合处理是一个有效手段, 可充分利用已有导航系统精密时空基

准^[4,5]. 鉴于此, 武汉大学于 2011 年初开始在亚太地区布设北斗系统连续观测基准站网, 初步形成了“北斗卫星观测实验网”(Beidou Experimental Tracking Stations, BETS).

本文的研究基础是 BETS 跟踪站网北斗/GPS 双模观测数据, 数据处理及分析软件采用了武汉大学自主研发的卫星导航数据综合处理软件 PANDA (Position And Navigation Data Analyst)^[6-8]. 文中首先通过北斗/GPS 双系统数据的联合精密定轨处理, 得到了北斗卫星轨道和钟差参数; 然后利用该精密轨道和钟差产品, 分析了北斗卫星导航系统提供精密单点定位的能力; 同时, 给出了利用北斗系统提供短基线精密相对定位, 并分析了融合 GPS 数据对提高其精密相对定位精度的作用; 为了验证北斗系统实时精密定位的服务能力, 文中还讨论了利用北斗的载波及伪距数据的实时差分相对定位能力. 本文精密轨道和钟差及精密单点成果验证了北斗卫星系统潜在的大范围精密定位服务能力, 事后及实时精密相对定位研究成果, 可为利用北斗卫星导航系统建立区域厘米级精度地面增强服务系统提供参考.

1 北斗卫星观测实验网

为全方位开展北斗卫星导航系统科学与应用研

究, 武汉大学于 2011 年初开始在全球范围内布设北斗导航系统连续跟踪站网(BETS), 目前基本形成对北斗导航系统已有在轨卫星连续跟踪的跟踪站网络. 该网络目前包括 6 个境外连续跟踪站和 9 个中国境内跟踪站, 境内跟踪站同时也构成了北斗卫星系统广域差分网络. BETS 跟踪网配备我国自主研发的北斗/GPS 双模接收机 UR240-CORS, 该类接收机支持北斗/GPS 双系统四频高精度接收机, 其载波相位观测精度达到 mm 级. BETS 跟踪网分布图如下图 1.

2 北斗卫星精密定轨及精密单点定位

北斗卫星精密定轨选择 BETS 跟踪网北斗/GPS 双模观测数据, BETS 各跟踪站网可同步观测到两个不同系统北斗/GPS 的观测值, 因此可以充分利用 GPS 数据实施地面站的精密定位和时间同步, 然后进一步实施北斗卫星的精密定轨^[9]. 北斗卫星的精密定轨策略如下: 第一步, 解算地面站的坐标、钟差和天顶对流层延迟 ZTD 参数; 第二步, 固定地面接收机钟差和 ZTD 参数, 同时解算 6 个北斗卫星初始位置, 卫星钟差, 9 个光压参数. 此外, BETS 跟踪网接收机同时接收了 GPS 和北斗卫星信号, 从而也导致

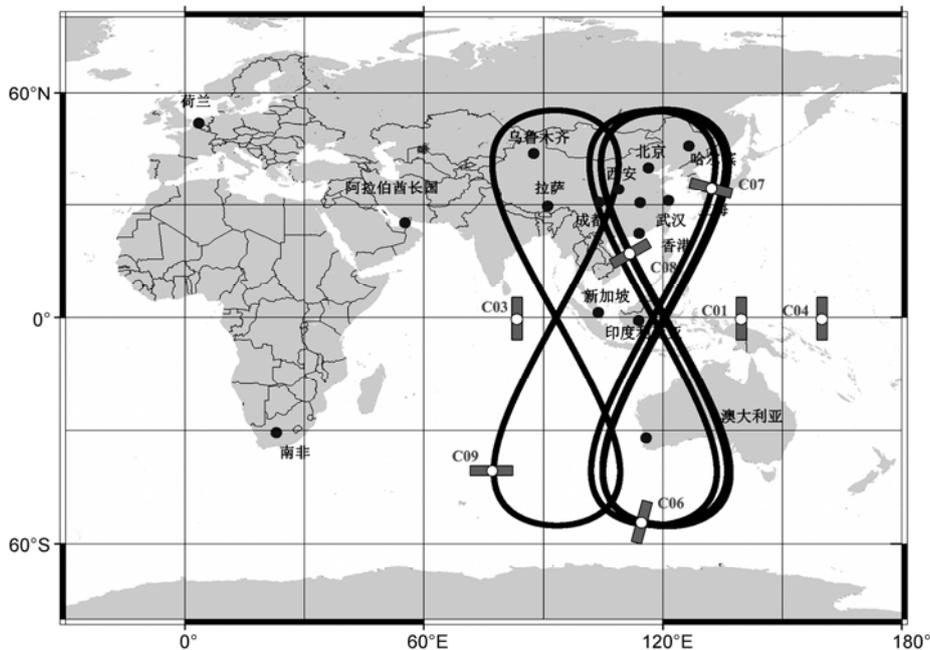


图 1 北斗卫星观测实验网

接收机在接收两种不同系统信号时产生的时间偏差. 而接收机钟差是由 GPS 卫星观测量求出, 因而在固定各站接收机钟差后计算北斗卫星轨道, 还需对各个站估计卫星系统时间偏差. 具体解算过程参见文献[9].

文中处理了 2011 年 09 月 01 日~2011 年 09 月 10 日(年积日 244~253 d)的实测数据, 以三天为计算弧段进行北斗卫星精密定轨, 计算弧段首尾重叠段(24 h)形成连续一周的轨道差值(年积日 245~251 h), 该段时间北斗系统工作卫星(C01, C04, C06, C07, C08)重叠差值统计精度如图 2 和 3 所示.

图 2 为各重叠弧段工作卫星径向重叠精度, 从该图可以看出径向精度可以达到 10 cm 量级, 与目前

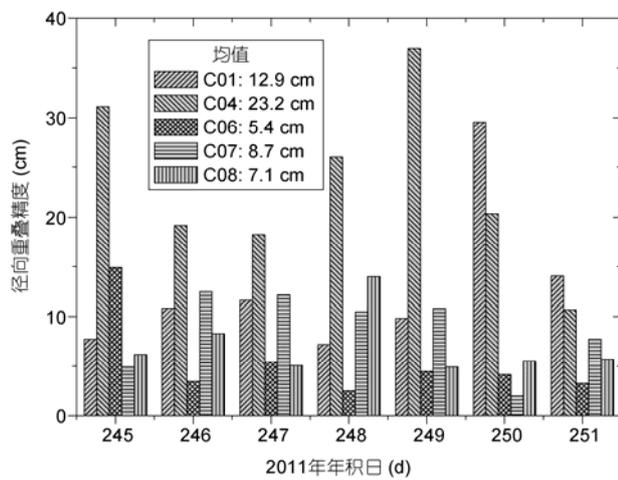


图 2 北斗卫星径向重叠精度

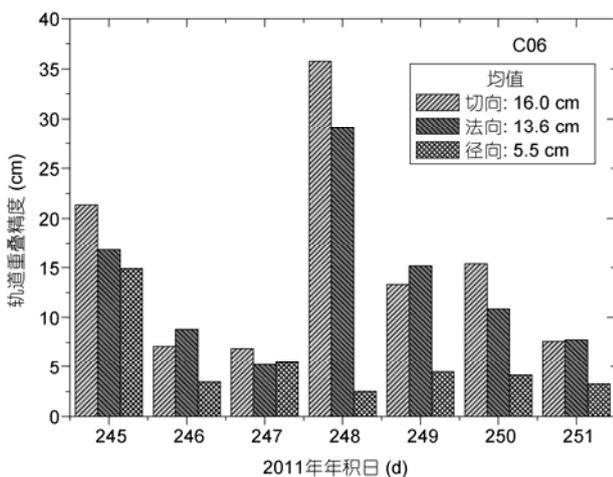


图 3 C06 卫星重叠精度

Galileo 试验卫星重叠弧段精度^[10]基本一致. 而 IGSO 卫星(C06, C07, C08)较 GEO 卫星(C01, C04)高, 这主要由 GEO 卫星静地的几何特性导致.

图 3 为 C06 卫星各方向重叠精度, 从该图可以看出 C06 各方向重叠精度均可以达到 10~20 cm 的精度. 达到目前 Galileo 试验卫星重叠弧段精度^[9].

为分析北斗卫星系统高精度定位功能, 并同时测试基于 PANDA 软件的北斗卫星精密轨道和卫星钟差产品, 开展了基于北斗卫星系统的精密单点定位(Precision Point Positioning, PPP)应用研究.

精密单点定位试验选择 2011 年 9 月 1 日~2011 年 9 月 5 日(年积日 244~248 d)的 BETS 网实测数据. 以单天 24 h 为计算弧段进行 BETS 网跟踪站静态精密单点定位, 估计参数包括跟踪站坐标(以伪距定位坐标为先验值, 约束 20 m)、接收机钟差、对流层参数等. 北斗卫星精密轨道和卫星钟差固定为利用 PANDA 获取的北斗卫星精密轨道和卫星钟差产品.

BETS 网双模跟踪站高精度坐标可通过其 GPS 观测数据获取, 因此北斗精密单点定位精度可通过直接与其高精度 GPS 定位的点位坐标比较进行评价. 下表列出了年积日 245 d 同步观测的 10 个 BETS 网单独利用北斗精密单点定位的精度.

从表 1 可以看出单独利用北斗卫星系统进行静态精密单点定位, 可达到平面 5 cm, 高程 10 cm 的精度, 统计 RMS 达到平面 2 cm, 高程 7 cm 的精度. 从而也验证了北斗卫星系统初步达到高精度定位导航的能力.

为分析不同导航系统(北斗、GPS)间可能存在的系统误差, 在北斗卫星精密定轨时, CHDU 站不参与参数估计并利用其他站计算的北斗卫星的精密轨道和精密钟差对 CHDU 站进行精密单点定位, 连续 5 天定位结果如下图 4 所示.

从上图 4 可以看出, 虽然该站未参与精密轨道计算, 但其定位精度也可以达到平面 2 cm, 高程 5 cm 的精度. 同时该图也显著表明了不同导航系统(北斗、GPS)在导航定位终端可能存在的系统误差, 该系统误差可能由卫星的几何构型、频率差异等多方面引起. 但总体而言, 利用更为密集的地面基准站可以获得北斗卫星导航系统的高精度轨道及钟差参数, 为用户提供广域的精密单点定位服务.

表1 北斗卫星系统精密单点定位精度

站名	东方向(cm)	北方向(cm)	高程方向(cm)
BJF1(北京)	-2.18	-1.08	11.57
CENT(武汉)	-0.73	-0.15	2.12
CHDU(成都)	-1.71	-0.15	2.93
HKTU(香港)	0.06	-0.17	-0.09
HRBN(哈尔滨)	1.12	3.20	-7.52
LASA(拉萨)	0.22	0.47	0.86
PETH(澳大利亚)	-3.24	-2.17	-2.40
SHA1(上海)	0.14	0.05	-0.77
SIGP(新加坡)	0.62	0.08	7.15
URMQ(乌鲁木齐)	-1.54	4.09	-17.31
RMS	1.51	1.82	7.4

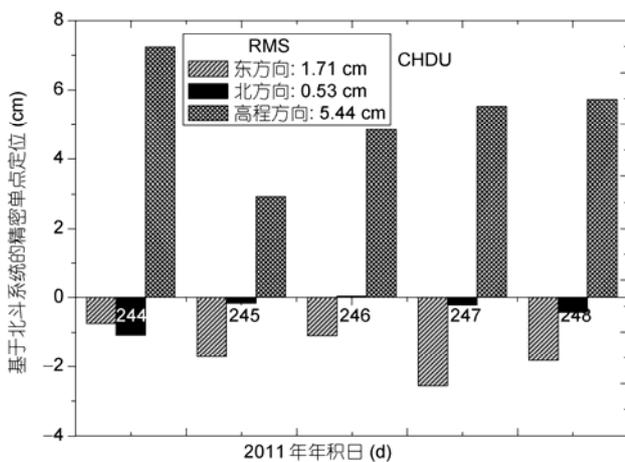


图4 CHDU站精密单点定位精度

3 北斗卫星导航系统高精度相对定位

3.1 短基线精密相对定位

目前, 相对定位仍然是亚毫米/毫米级高精度坐标解算的主要方法. 本文基于“北斗卫星观测实验网”选取长度约 436 m 的短基线进行北斗基线测量实验. 基线的参考坐标由 GPS 数据处理软件 TGO 解算 GPS 数据得到.

严格可靠的北斗/GPS 数据预处理是获得高精度融合北斗/GPS 基线解算的前提, 本文利用文献[11]提出的自动周跳探测与修复方法进行数据预处理, 该方法能够探测出 1 周的小周跳. 在参数解算方面, 利用文献[12]提出的基于 MLAMBDA 模糊度固定方法, 该方法搜索效率较常用的 LAMBDA 方法有明显提高. 最后统计分析 GPS、北斗和北斗/GPS 融合的基线解算结果.

表 2 是静态和动态模式下的 2011 年 6 月 19 日~2011 年 6 月 25 日(年积日 170~176 d)连续一周平均结果, 各模式(GPS、北斗、GPS+北斗融合)基线分量均以商业软件 TGO 处理的基线为参考.

静态模式下利用 PANDA 软件计算的 GPS 基线分量与商业软件 TGO 处理的参考基线分量十分接近(东方向、北方向和高程方向分别为: 0.80, -1.60, 1.20 mm), 而单独采用北斗数据获得的基线精度也达到 mm 级, 但相比于 GPS 解算精度稍低(东方向、北方向和高程方向分别为: 6.20, 0.70, -5.00 mm), 且存在较为明显的系统误差, 如图 5 该计算时段各天基线精度统计所示, 系统误差可能原因是接收机的天线相位中心误差引起.

从表 2 还可以发现, 由 PANDA 软件单独解算 GPS 动态基线平均精度为东方向 9.10 mm、北方向 7.40 mm、高程方向 16.70 mm. 由于目前北斗卫星数量少, 而且星座构型不均匀等原因, 导致其动态解算精度偏低(东方向、北方向和高程方向分别为: 4.50, 13.40, 31.90 mm).

在北斗/GPS 融合方面, 静态基线解算相比于单 GPS 系统影响不明显(表 2), 而动态模式下北斗/GPS 数据融合后得到的基线解精度提高明显, 如图 6 显示的是该计算时段各天基线精度, 相比于单独 GPS 基线解算, 东方向、北方向、高程方向分别提高 33.3%, 28.6%, 29.4%, 大幅度的精度提高主要原因在于观测数据冗余度的提高和几何观测结构的增强.

图 7 为其中 2011 年年积日 171 d 的 GPS 和 GPS+北斗融合动态基线处理结果, 从该图可以看出, GPS 动态基线解在 dE, dN, dU 方向精度分别为 0.6, 0.5 和 1.4 cm, GPS+北斗在 dE, dN, dU 方向精度分别为 0.3,

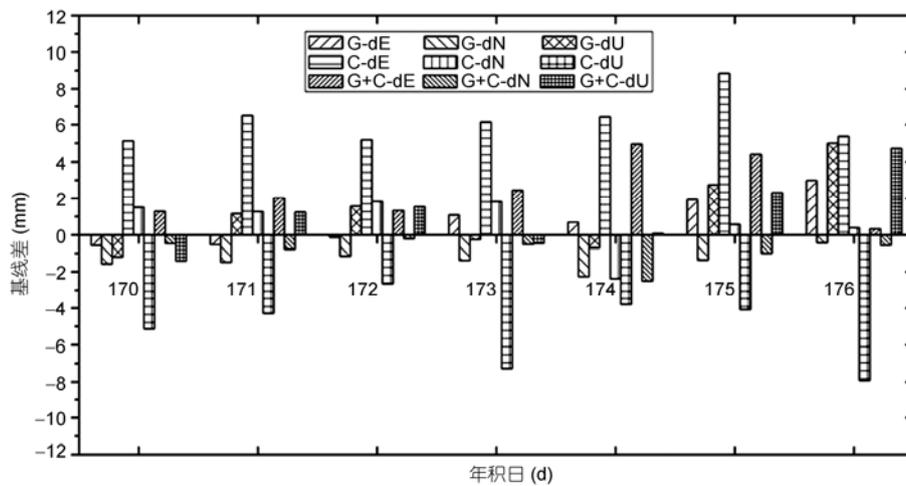


图 5 静态模式基线解算结果

表 2 GPS 和北斗基线解算结果统计表

	静态模式			动态模式		
	东方向(mm)	北方向(mm)	高程方向(mm)	东方向(mm)	北方向(mm)	高程方向(mm)
GPS	0.80	-1.60	1.20	9.10	7.40	16.70
北斗	6.20	0.70	-5.00	4.50	13.40	31.90
GPS +北斗	2.40	-0.90	1.10	5.90	4.70	11.50

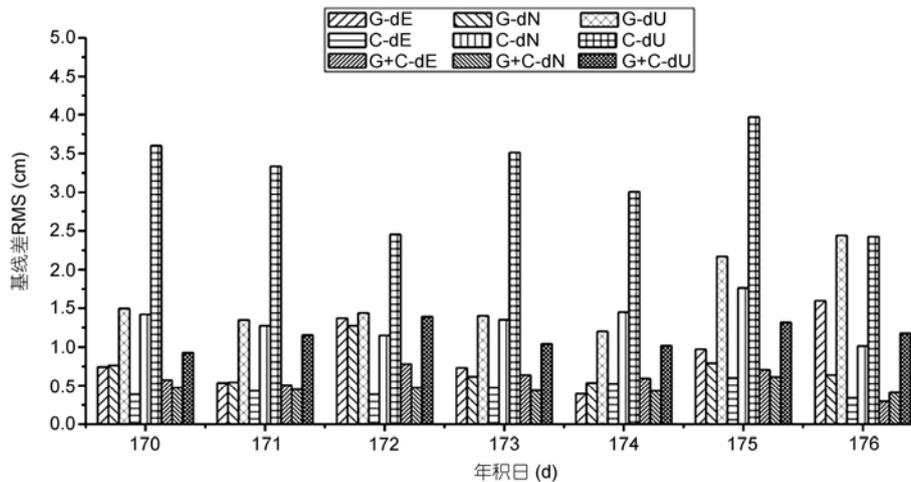


图 6 动态模式基线解算结果

0.4 和 1.0 cm. 北斗数据的融入使得该时段的动态结果得到明显的改善, 特别是高程方向精度从 1.4 cm 提高到 1.0 cm.

3.2 北斗伪距和相位差分定位

差分定位由于消除或者削弱了卫星导航定位中的接收机钟差、卫星钟差等多种误差, 载波双差后模

糊度为整数等多种特性, GPS 差分定位应用非常广泛^[13]. 伪距差分定位精度一般为米级, 用只能于导航或者其他对于精度要求不高的应用领域; 实时载波相位差分精度可以达到厘米级, 一般用于测绘等高精度应用领域. 为了能够测试目前北斗导航系统的精度和可用性, 本文采用了两个测试数据进行分析.

(1) 城市区域(20~30 km)伪距差分和相位差分定

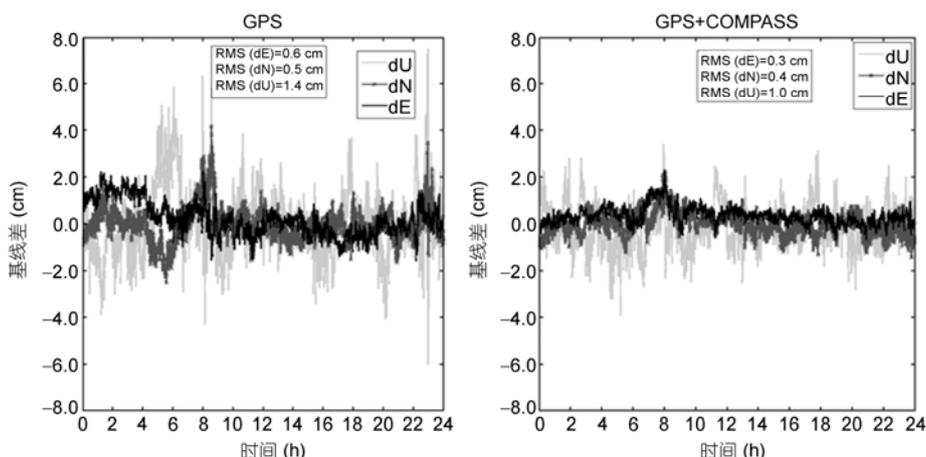


图7 年积日 171 d 的动态基线解算结果

位

本次试验利用武汉区域试验网的参考站数据进行差分定位测试. 测试数据基准站分布和流动站轨迹如图 8 所示.

定位模式分为实时和事后两种解算, 解算坐标以 GPS RTK 结果(精度为平面 3 cm, 高程 5 cm)作为参考进行精度评定, 伪距差分 and 相位差分定位精度如表 3 所示.

(2) 跨省区域(240 km)伪距差分定位实验

本次试验基准站安置于武汉大学, 流动站安置于车上. 测试数据信息如表 4 所示, 测试路线的轨迹如图 9 所示.

车载流动站数据与基准站数据进行伪距差分解

算和单点定位解算, 与 GPS 精密单点定位和 INS 组合结果(精度为 0.2 m)进行比较, 测试结果为平面精度 2.53 m, 高程精度 2.86 m, 误差分布如图 10 所示.

从以上试验和定位结果可以看出, 基于目前北

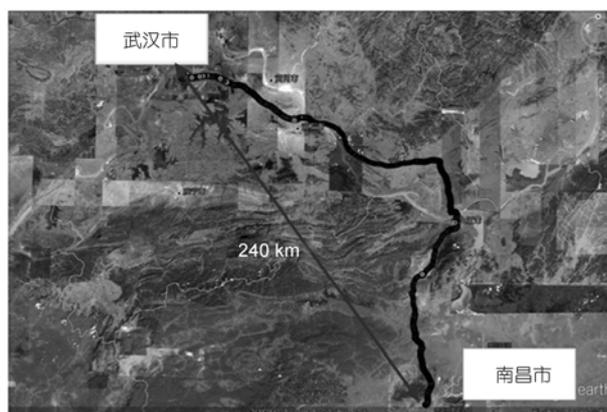


图9 基准站位置和流动站测试轨迹



图8 基准站分布和流动站测试轨迹

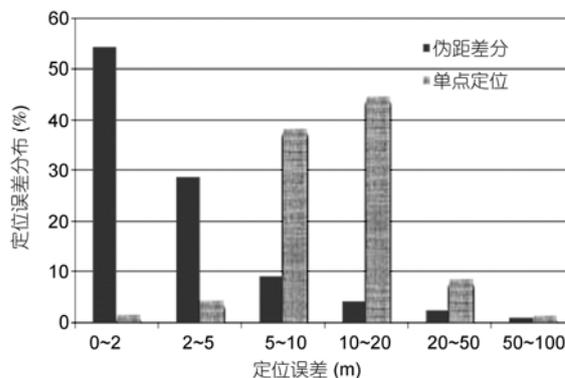


图10 伪距差分 and 单点定位精度分布统计

表 3 定位精度信息(1 倍中误差)

定位类型	有效/总历元	精度信息(m)			
		平面	高程	三维	
北斗伪距差分	实时	956/1255	1.87	3.39	4.10
	事后	2620/2907	0.91	2.31	2.57
北斗载波相位差分	实时	680/1652	0.04	0.07	0.07
	事后	1930/2907	0.02	0.05	0.06
事后 GPS 伪距定位		2906/2907	0.66	1.24	

表 4 测试数据信息^{a)}

类别	说明	
基准站	地点	武汉
	接收机	和芯星通 UB240-CORS
流动站	地点	武汉至南昌高速路
	接收机	和芯星通 UB240-CORS
	运动状态	车载

a) 观测时间: 2011-09-15, 9:00 至 20:00

斗导航系统的伪距差分定位精度相比北斗伪距单点定位有较大提高. 北斗伪距差分平面精度优于 2 m, 高程精度优于 4 m, 优于普通 GPS 系统 4~20 m 的导航精度. 在北斗区域系统建设初期, 各类误差不能很好消除的情况下, 采用伪距和相位差分技术是提高北斗导航用户和精密定位用户的精确导航定位的有效手段.

4 结语

本文采用“北斗卫星观测实验网”实测数据和我国自主研发的精密数据处理软件 PANDA, 实现了基

于北斗导航卫星系统的高精度定轨和导航定位. 计算结果表明: 北斗卫星精密定轨径向精度优于 10 cm; 实时动态伪距差分定位精度达到 2~4 m, 可以满足我国导航用户的近期需求; 静态精密单点定位精度达到厘米级、基线相对定位达到毫米, 动态 RTK 定位精度可以达到 5~10 cm, 可以满足我国测绘、国土资源调查等专业高精度定位用户的需求.

综上所述, 在地面基准站网的增强下, 北斗导航系统可以在我国实现优于普通 GPS 的高精度导航和定位. 因此, 充分利用我国的卫星导航地面基准站资源, 建立北斗卫星导航系统的地基增强服务系统具有重要的战略意义.

参考文献

- 1 杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献. 科学通报, 2011, 56: 1734-1740
- 2 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6
- 3 Catalán C, Hernández C, Mozo A, et al. Improved integrity concept for future GNSS evolutions. In: Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008. 2547-2557
- 4 Kirchner M, Schmidt R, Vilzmann J. Results of GIOVE data processing to allow evaluation of principal system performance drivers. In: Proceedings of the European Navigation Conference-Global Navigation Satellite Systems. http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/D2/7_D2.pdf
- 5 Rooney E, Unwin M, Gatti G, et al. GIOVE-A and GIOVE-A2 Orbit Testing Results. In: Proceedings of the 20th Annual International Technical Meeting (ION GNSS), 25-28 September 2007, Fort Worth, Texas, USA (Institute of Navigation, Alexandria, Virginia). 467-477
- 6 Liu J N, Ge M R. PANDA software and its preliminary result of positioning and orbit determination. Wuhan Univ J Nat Sci, 2003, 8: 603-609
- 7 赵齐乐. GPS 导航星座及低轨卫星的精密定轨理论和软件研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2004
- 8 Shi C, Zhao Q L, Geng J H, et al. Recent development of PANDA software in GNSS data processing. In: Proceedings of the Society of Photographic Instrumentation Engineers, 2008, 7285: 72851S, doi: 10.1117/12.816261

- 9 李敏, 赵齐乐, 葛茂荣. GIOVE-A 卫星精密定轨仿真研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33: 200–205
- 10 Steigenberger P, Hugentobler U, Montenbruck O, et al. Precise orbit determination of GIOVE-B based on the CONGO network. *J Geodesy*, 2011, 85: 357–365
- 11 Liu Z Z. A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency GPS receiver. *J Geodesy*, 2010, 85: 171–183
- 12 Chang X W, Yang X H, Zhou T Y. MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation. *J Geodesy*, 2005, 79: 552–565.
- 13 施闯, 楼益栋, 宋伟伟, 等. 广域实时精密定位原型系统及初步结果. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34: 1271–1274