

长江航道典型航道要素高精度定位技术*

袁兵¹, 叶世榕¹, 周鹏¹, 高振东¹, 刘晖^{1,2}

(1. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北武汉 430072;

2. 武汉导航与位置服务工业技术研究院, 湖北武汉 430075)

摘要: 针对航标、航道地形、碍航物等典型航道要素的高精度定位应用技术, 并结合北斗地基增强系统推广应用, 综合 SPP、RTK、DGNSS、PPP 等高精度定位技术手段, 首次系统研究了长江航道典型航道要素的定位精度指标以及适用于长江航道的导航定位集成技术方案, 并兼顾相关定位技术手段的先进性、可操作性、适应性等在长江航道开展试验研究, 制定应用方案, 解决助航设施、移动信息采集设施、船舶等定位应用技术问题, 提高航道要素信息感知的可靠性, 避免定位精度不够导致的决策失误或不满足应用需求的情况发生, 全面提升航道维护管理和综合服务水平。

关键词: 长江航道; 典型航道要素; GNSS; 高精度定位

中图分类号: P 228.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)01-0036-07

High-precision positioning technology of typical channel elements in the Yangtze River

YUAN Bing¹, YE Shi-rong¹, ZHOU Peng¹, GAO Zhen-dong¹, LIU Hui^{1,2}

(1. Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan Navigation and LBS, Inc., Wuhan 430075, China)

Abstract: In view of the high-precision positioning technology for the navigation mark, channel topography, obstruction and other typical elements of the channel, and combining with popularization and application of Beidou foundation enhancement system, we integrate SPP, RTK, DGNSS, PPP and other high-precision positioning technology to study the positioning accuracy of typical channel elements in the Yangtze River channel and put forward integrated technical scheme for navigation and positioning of the Yangtze River for the first time. Taking the advanced nature, operability, adaptability of related positioning techniques into account, we carry out the experimental research in the Yangtze River channel and develop the application program to solve problems of positioning technology of navigational aids, mobile information collection facilities, ships, etc., to improve the reliability of information perception channel elements, and avoid mistakes or occurrence of not meeting the application requirements due to insufficient positioning accuracy, so to enhance the channel maintenance management and integrated services comprehensively.

Keywords: Yangtze River waterway; typical channel elements; GNSS; high-precision positioning

长江是我国主要的东西交通运输大动脉, 以其优越的地理位置和水运资源被誉为“黄金水道”, 在我国国民经济发展的各个历史时期都发挥了巨大作用^[1-2]。进行航道要素感知中的高精度定

位技术研究能快速推动长江“黄金航道”的智能化建设。长江典型航道要素感知是建设数字航道的关键, 而研究高精度的定位技术在长江航道典型航道要素位置感知中的应用则是建设数字航道

收稿日期: 2015-10-18

*基金项目: 交通运输部信息化技术研究项目 (2013364548200)

作者简介: 袁兵 (1990—), 男, 硕士, 从事卫星导航定位方面的研究。

的迫切需求。以原有长江航道典型要素定位技术为基础,研究如何通过GNSS最新相关定位技术实现典型航道要素的高精度定位需求。

精度高且稳定可靠的航道要素定位技术,能为智能航道信息服务建设与运行提供基础支撑,是现代化、智能化、信息化航道建设中不可或缺的一环^[3-7]。作为航道要素智能感知的重要基础,高精度定位技术能提高航道要素感知的自动化、智能化水平,为航道信息服务品质的提升提供基础支撑。同时,进行航道要素的高精度定位技术研究也是确保水上交通安全高效、充分发挥长江黄金水道社会效益的需要。

本文围绕制约航道要素感知的关键技术之一——高精度定位技术,研究如何提高航道要素感知中空间定位的可靠性与精度。

1 典型航道要素定位精度指标

本文典型航道要素指的是水流条件、航标、水位水深、航道地形、碍航物和能见度。从航道

地形类别	地面倾角/ (°)	比例尺及相应的等高距/m					
		1:200	1:500	1:1 000	1:2 000	1:5 000	1:10 000
平坦地区	<6	0.5	0.5或1	1	1	1或2	1或2或5
丘陵地	6~15	0.5	0.5或1	1	2	5	5
山地	>15	0.5	1	2	2	5	10

注:一个测区应采用同一比例尺和同一基本等高距。

2) 水深测量。

测深应在风浪较小的情况下进行。沿海波高超过0.6 m、内河波高超过0.4 m时,应停止作业。

测深定位点点位中误差应符合表3。

测图比例尺	定位点点位中误差/mm
>1:5 000	图上1.5
≤1:5 000	图上1.0

注:对1:200~1:500测图可放宽至图上2.0 mm。

在不考虑平面位移的情况下,水深测量的深度误差应符合表4。

维护管理和综合服务对水位、水深、航道地形等要素信息移动采集设施、助航设施、航行船舶等的位置精度需求出发,研究制定对这些要素的位置信息采集精度技术指标。

1.1 典型航道要素定位精度分析

参考JTS 131—2012《水运工程测量规范》,根据地图比例尺的不同,采用的相关精度要求也不相同。

1) 地形测量。

地形测量基本精度应符合表1。

点位中误差/mm		等高线高程中误差			
重要地物	次要地物及地形点	地形类别	地面倾角	重点地区	一般地区
图上±0.6	图上±0.8	平坦地区	<6°	$h/3$	$h/2$
		丘陵地	6°~15°	$h/2$	$2h/3$
		山地	>15°	$2h/3$	h

注:1. h 为等高距(m);2. 重点地区是指碍航地区、航道整治区、枢纽工程区和港口工程区;3. 洪水位以上区域及河、海漫滩地区,其点位中误差可适当放宽,但不应大于图上1 mm。

地形图基本等高距的确定应符合表2。

水深范围/m	$H \leq 20$	$H > 20$
深度误差限值	±0.2 m	±0.01H

注:1. H 为水深值(m);2. 对山区河流水深小于5 m的硬底质水域,深度误差不应大于0.15 m。

3) 水下碍航物测量。

浅点或碍航物的平面位置偏差不大于1.5 m,深度误差不大于0.1 m。

4) 航标、能见度观测站、水流条件定位。

航标、能见度观测站以及水流条件定位可以参照地形测量相关精度。

1.2 典型航道要素定位精度需求分析

航标、能见度观测站以及水流条件观测点定

位要达到米级；浅点或碍航物的平面位置偏差不大于 1.5 m，深度误差不大于 0.1 m；水深点位中误差要满足表 3 规定；地形测量点位中误差要满足表 2 的规定。

1.3 典型航道要素定位精度指标

按照 JTS 131—2012 《水运工程测量规范》规定，并以 1:5 000 比例尺精度要求为界，将典型航道要素定位精度分为小于等于 1:5 000 比例尺和大于 1:5 000 比例尺。

航标、能见度观测站、水流条件观测点以及地形测量点点位中误差要小于 3 m(1:5 000)、6 m(1:10 000)和 12 m(1:20 000)，浅点或碍航物的平面位置偏差不大于 1.5 m，水深点点位中误差要小于 7.5 m。

2 典型航道要素感知高精度定位实现方案研究

2.1 GNSS 伪距差分定位精度研究

采用星空之南公司的低成本北斗/GPS 模块 Zsouth 131250 进行北斗伪距差分的定位精度评估。该模块未加入航位推算（DR 技术）等惯导技术。

2.1.1 静态 GNSS 伪距差分定位解算分析

静态北斗伪距差分定位数据采集在晴朗开阔天空下，以 Trimble 接收机的 RTK 固定解平均值为基准，给出 Zsouth 静态北斗伪距差分定位精度的误差统计（表 5）。

表 5 Zsouth 静态北斗伪距差分定位精度的误差统计

误差/m	N		E		U	
	频数	累计百分比/%	频数	累计百分比/%	频数	累计百分比/%
0.5	7	0.47	164	10.99	158	10.59
1	213	14.75	1315	99.13	269	28.62
1.5	338	37.40	0	99.13	198	41.89
2	889	96.98	0	99.13	149	51.88
4	42	99.80	12	99.93	690	98.12
8	3	100.00	1	100.00	27	99.93

从表 5 可以看出，静态北斗伪距差分定位水平方向上绝大多数历元精度优于 1.5 m，高程方向上绝大多数历元精度优于 4 m。

2.1.2 动态 GNSS 伪距差分定位解算分析

动态测试采取路测的形式，将车载导航天线固定在测试车车顶，设置模块采样率为 1 Hz。为评价模块动态北斗伪距差分定位精度，在车载导航天线旁约 50 cm 处设置一台测量型接收机（Trimble R10 一体机），其工作模式为 RTK 模式，以 RTK 接收机的同步浮点解、固定解为真值，评估 Zsouth 的动态北斗伪距差分定位精度。

表 6 为各个误差区间精度的统计，可以看出，N 方向 94.76% 历元解算结果较差小于 1.5 m；E 方向 93.94 % 历元解算结果较差小于 1.5 m；U 方向 98.04% 历元解算结果较差小于 4 m；水平方向较差，小于 2 m 的历元占 92.14%。

表 6 动态定位精度分区间累计概率统计

误差/m	N		E		U		H	
	频数	累计百分比/%	频数	累计百分比/%	频数	累计百分比/%	频数	累计百分比/%
0.5	203	33.22	201	32.90	100	16.37	121	19.80
1	279	78.89	229	70.38	80	29.46	147	43.86
1.5	97	94.76	144	93.94	113	47.95	223	80.36
2	15	97.22	15	96.40	107	65.47	72	92.14
4	14	99.51	15	98.85	199	98.04	36	98.04
6	3	100.00	3	99.35	12	100.00	8	99.35
8			3	99.84			3	99.84
10			1	100.00			1	100.00

2.1.3 小结

以低成本的北斗多模民用模块为例, 使用北斗伪距差分定位算法进行测试表明: 无论是动态还是静态, 水平方向上, 绝大多数历元北斗伪距差分定位精度优于 1.5 m, 高程方向上, 绝大多数历元北斗伪距差分定位精度优于 4 m。考虑到使用的模块为低成本民用模块, 且该模块未对原始观测量作任何优化处理, 算法也未添加任何惯导算法, 因此, 可以认为, 北斗伪距差分定位精度在此基础上仍有很大提升空间。

2.2 GNSS RTK 定位精度研究

进行北斗 RTK 定位精度研究时, 使用开发的算法采用静态数据模拟动态的方式进行定位解算, 并同时北斗三频、北斗双频、GPS 双频进行了解算。

2.2.1 GNSS 静态 RTK 测试

选用的静态基线长 3 km, 采集自 2013 年 10 月 9 日, 采样间隔为 1 s。

表 7 统计了 3 种解算模式的模糊度固定成功率。

表 7 3 种解算模式下的模糊度固定成功率

定位模式	模糊度固定成功率/%
GPS 双频	89.61
BDS 双频	94.95
BDS 三频	99.98

图 1 和图 2 给出了 3 种解算模式下 E、N、U 共 3 个方向的 RMS 统计量与坐标误差序列。

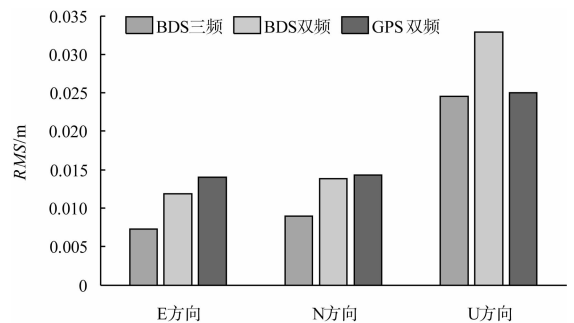


图 1 静态基线 3 种不同解算模式下的模糊度固定坐标精度统计

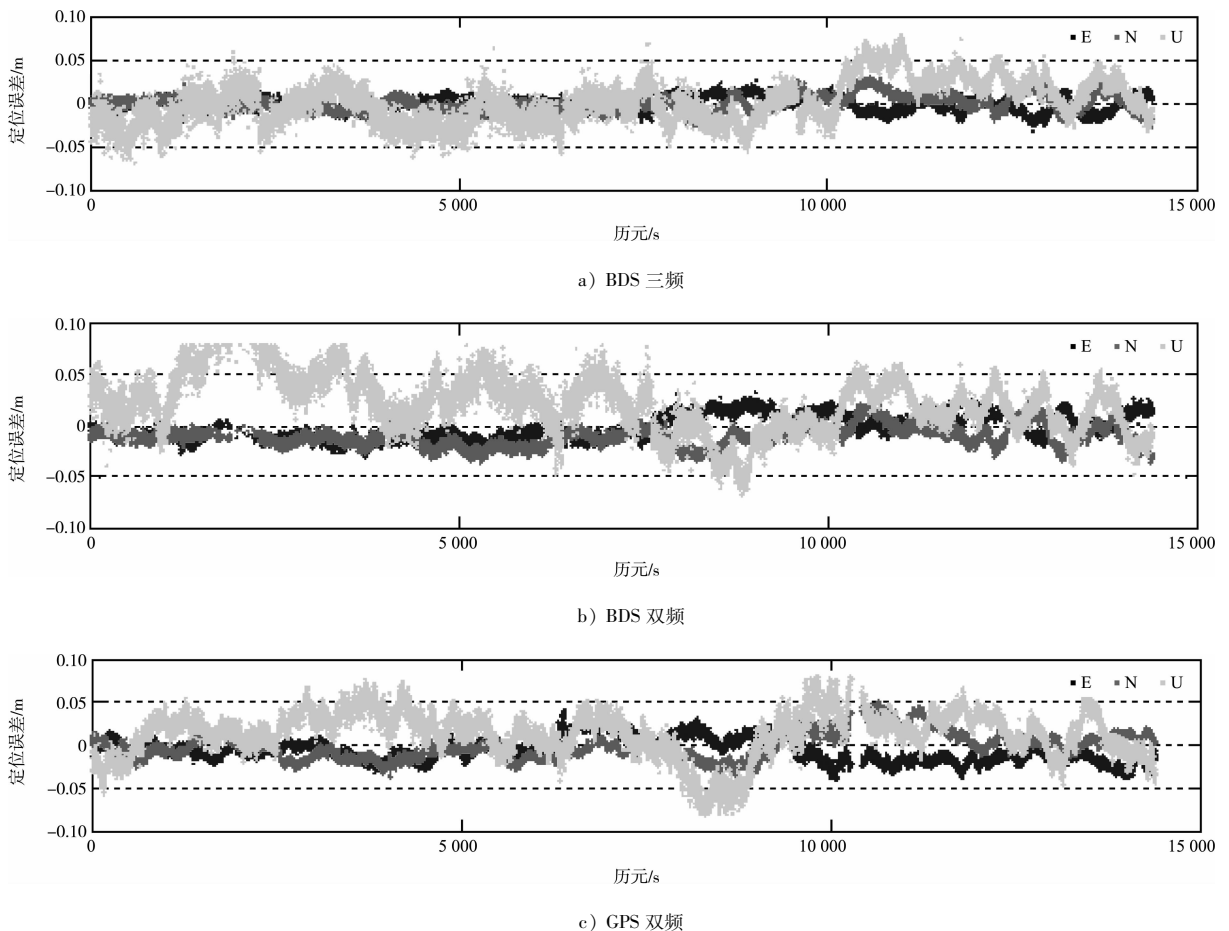


图 2 静态基线坐标误差

2.2.2 GNSS 动态 RTK 解算测试

动态测试采用 2014 年 5 月在武汉市区采集的采样间隔为 1 s 的观测数据，基准站安装在坐标精确的已知楼顶，流动站在车顶。图 3 给出了观测过程中流动站相对于基准站在平面方向上的运动轨迹，最远距离为 2.2 km。

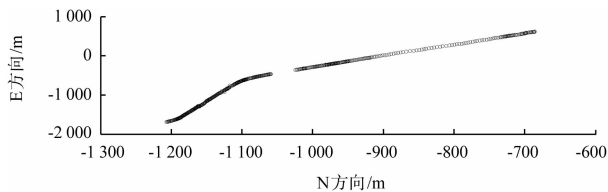


图 3 动态 RTK 测试中流动站相对于基准站的运动轨迹

表 8 统计了 3 种解算模式下的模糊度固定成功率，可以看出，采用 BDS 双频解算的模糊度固定成功率比 GPS 双频稍好，主要是动态环境下 BDS 可视卫星变化比较稳定，卫星空间几何构型较好；与静态试验结果一致，采用 BDS 三频解算的固定成功率优于双频解算模式，GPS 双频和 BDS 双频的固定成功率分别为 82.94% 和 83.86%，而 BDS 三频模糊度固定成功率达到 97.98%，主要是由于采用三频观测值可以使用模糊度固定的超宽巷作为精密伪距，辅助固定宽巷的模糊度，减弱了伪距噪声的影响，提高了宽巷的模糊度固定成功率，进而可以获得较优的动态定位结果。

表 8 动态环境 3 种不同解算模式下模糊度固定成功率

定位模式	模糊度固定成功率/%
GPS 双频	82.94
BDS 双频	83.86
BDS 三频	97.98

表 9 给出了 3 种模式下获得 RTK 固定解所需的收敛时间，可以看到，BDS 三频只需一个历元即可获得 RTK 固定解，GPS 双频和 BDS 双频分别需要 3.5 个历元和 2.2 个历元可以得到固定解。

表 9 3 种 RTK 解算模式下收敛时间

解算模式	时段数	平均收敛时间/s
GPS 双频	520	3.5
BDS 双频	520	2.2
BDS 三频	520	1.0

2.2.3 小结

对静态、动态情况下北斗 RTK 定位精度测试研究，结果表明：静态情况下，基于 BDS 三频的 RTK 模糊度固定成功率较 GPS 双频和 BDS 双频分别提高了 10.4% 和 5.1%，利用三频观测值解算在平面方向可以获得毫米级定位精度，高程方向可以获得和 GPS 相当的定位精度；动态情况下北斗解算优势更为明显，北斗三频可以达到 97.98% 的模糊度固定成功率，较 GPS 双频和 BDS 双频分别提高了 15.0% 和 14.1%。

3 航道要素感知中的高精度定位技术方案试验验证

航道要素测量中，不同要素定位环境和模式各有差异。根据航道要素的具体需求，航道要素定位模式可分为静态定位（航标、碍航物、能见度、航道地形控制网）和动态定位（水流、水位、航道地形测量）；定位环境可分为水上测量（所有航道要素均需进行水上测量）和岸上测量（航道地形图控制网、航标、能见度）。为测试利用北斗 RTK 技术与北斗伪距差分定位技术进行典型航道要素高精度定位的可行性，对前文提出的实现方案进行了测试试验验证。测试共 2 次：陆地设备测试与航道要素高精度定位测试，均分静态、动态情况进行。

3.1 岸上静态测试

上文中已经对陆上 RTK 的测量精度（厘米级）进行实验验证，完全能够满足航道地形图控制网布设的精度要求，本节不再赘述。由于 RTK 定位精度在厘米级甚至毫米级，而 DGNSS 为伪距差分其定位精度在分米级甚至米级，因此本节采用 RTK 作为基准统计 DGNSS 的定位精度。

岸上静态测试于 2014 年 4 月 11 日上午进行，共测量了 2 个坐标已知点，2 个坐标未知点。

为定量分析，下面给出 DGNSS 设备与 RTK 固定解平均值在 N、E、U 方向上的较差统计（表 10）。

表 10 岸上静态测试 RTK 设备定位较差分段统计
(RTK 固定解)

误差/m	N		E		U	
	历元数	累计百分率/%	历元数	累计百分率/%	历元数	累计百分率/%
0.1	30	38.96	41	53.25	42	54.55
0.4	3	68.83	2	72.73	16	90.91
0.8	0	72.73	9	97.40	0	97.40
1.2	8	83.12		100.00	0	97.40
1.4		100.00				100.00

从表 10 可以看出: DGNSS 静态测量中, N 方向定位结果较差小于 1.4 m, 83.12% 的定位结果较差小于 1.2 m; E 方向的定位结果较差小于 1.2 m, 97.40% 的定位结果较差小于 0.8 m; U 方向定位结果较差小于 1.4 m, 97.40% 的定位结果较差小于 0.8 m。DGNSS 静态测量定位 90% 的历元精度能够达到 1.5 m, 100% 历元精度在 2 m 以内, 完全符合岸上航标、能见度观测站的定位需求。

3.2 水上动态测试

水上测量是航道要素测量的重要特征, 所有的航道要素都有相应的水上定位精度需求。在长江航道进行动态测量, 验证 DGNSS 和 RTK 技术在水上动态作业的精度完全能够满足各种航道要素定位需求, 并实现航道要素的高精度定位。采用两台 RTK 设备同时工作的目的是为了保证与 DGNSS 设备相连的那台 RTK 设备不出现太大偏差。

2014 年 4 月 11 日上午在武汉市境内长江、汉江两江交汇口附近 14 km 范围内进行了往返动态定位测试。

测试过程中, 两台 RTK 设备分别连接对中杆, 固定在快艇甲板边缘的栏杆上, 两者水平距离约 2 m, DGNSS 设备天线为导航天线, 天线尺寸小, 直接固定在一台 RTK 天线上。

为定量分析, 表 11 给出两台 RTK 设备同步 RTK 固定定位结果在 N、E、U 方向上的较差统计。

表 11 水上动态测试 RTK 设备定位较差分段统计
(RTK 固定解)

误差/m	E		N		U	
	历元数	累计百分率/%	历元数	累计百分率/%	历元数	累计百分率/%
0.1	367	30.13	302	24.79	299	24.55
0.4	35	52.87	94	33.00	758	86.95
0.5	11	53.78	94	40.72		100.00
1.0	350	89.33	5	69.87		
1.2		100.00	34	72.66		

从表 11 可以看出: RTK 固定解中, E 方向定位结果较差小于 1.2 m, 89.33% 的定位结果较差小于 1.0 m; N 方向的定位结果较差小于 1.4 m; U 方向定位结果较差小于 0.5 m, 86.95% 的定位结果较差小于 0.4 m, 考虑到两台 RTK 设备有近 2 m 的距离, 定位结果较好。

为定量分析, 表 12 给出 RTK 设备的同步 RTK 固定解平均值与 DGNSS 设备定位结果在 N、E、U 方向上的较差统计。

表 12 DGNSS 设备定位较差分段统计

误差/m	N		E		U	
	历元数	累计百分率/%	历元数	累计百分率/%	历元数	累计百分率/%
0.2	0	0.00	106	9.34	347	22.65
0.4	303	19.66	343	43.74	278	73.39
0.6	269	72.87	214	85.85	221	91.69
0.7	185	84.88	138	94.81	128	100.00
0.8	199	97.79	80	100.00	0	100.00
0.9	34	100.00	0	100.00		

从表 12 可以看出: 与 RTK 固定解相比, N 方向定位结果较差小于 0.9 m, 84.88% 的定位结果较差小于 0.7 m; E 方向定位结果较差小于 0.8 m, 94.81% 的定位结果较差小于 0.7 m, U 方向定位结果较差小于 0.7 m, 91.69% 的定位结果较差小于 0.6 m。

3.3 试验小结

结合我国自主研发的北斗地基增强系统进行航道要素测量, 较目前市面上仅利用美国 GPS 模块实现定位具有明显的优越性和先进性。在 DGNSS 设备端采用 DR 等技术, 进行动态定位结果优化。

本方案选用设备包括 2 台 GNSS RTK 设备和 1 台 DGNS 设备在长江江面进行动态测量采集数据。首先,对 GNSS RTK 定位精度进行评估,RTK 在陆地上静态能够达到分米级甚至厘米的精度,在进行岸上静态测量时将其作为真值评估 DGNS 的精度。经测试得, DGNS 静态定位在 N、E、U 方向的定位精度均小于 1.5 m,且多数历元定位精度小于 1 m。对于水上动态测量,采用 RTK 和 DGNS 同步测量互相校核的方式验证其定位精度,以 RTK 固定解为真值, DGNS 动态定位在 N、E、U 方向的定位精度均小于 1 m,且绝大多数历元 (> 90%) DGNS 动态定位精度小于 0.8 m。DGNS 动态定位精度略高于静态定位,可能是因为所采用的 DGNS 设备使用了 DR 等技术:整个动态定位过程中,当观测条件较为恶劣(如通过大桥)时, RTK 设备有明显的偏差,而 DGNS 设备定位结果十分平滑。综上所述,利用 DGNS 进行航道要素测量能够适应岸上和水上动态测量,符合定位精度要求,具有良好的可行性。

总之,使用 GNSS 伪距差分定位技术(DGNS 技术)即可实现航道要素的高精度定位。本文设计的方案经过验证,具有较强的先进性、可行性、经济性、安全性以及稳定可维护性,能够满足航道要素的定位需求并实现航道要素的高精度定位。

(上接第 20 页)

参考文献:

[1] 严新平,马枫,初秀民,等.长江船舶交通流实时采集关键技术研究[J].中国航海,2010,33(2):40-45.

[2] 余华,张杏谷,魏武财. AIS 航标遥测遥控的研究[J].航海技术,2010(5):41-44.

[3] 方晶,吴青,初秀民,等.基于多功能航标的长江水文信息采集系统研究[J].交通信息与安全,2010,28(6):53-56.

[4] 罗毅,江蓓,张红.三峡航道多功能航标系统设计及应用[J].中国水运,2014(6):60-61.

[5] 杨玮,孔文静.基于改进 GM_1_1_的长江干线水位预测方法研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2014,28(4):938-940.

4 结论

本文系统梳理了典型航道要素定位精度技术指标研,并研究了典型航道要素高精度定位集成技术方案,利用试验平台测试定位精度,验证集成方案的可行性。通过本专题的调查研究与试验验证,为实现长江航道元素感知的高精度定位,可借鉴连续运行参考站系统与个别省市建立北斗地基增强系统的经验,结合长江流域及航运的特点进行移植。

参考文献:

[1] 徐硕,彭文,周冠男,等.长江电子航道图航道要素脱密处理方法[J].水运工程,2013(2):133-136.

[2] 杨传堂.加快建设长江黄金水道为长江经济带提供强力支撑[J].全球化,2014(8):5-12.

[3] 车骞,吴国祥. GPS 在航道测量中的应用[J].甘肃水利水电技术,2003(4):321-322.

[4] 张红军. GPS-RTK 定位技术在航道测量中的应用[J].中国水运:下半月,2011(4):78-79.

[5] 素霞,刘厚强. GPS 技术在航道测量中的应用研究[J].科技资讯,2009(4):12.

[6] 陆成成. GPS 实时动态(RTK)系统在航道测量中的应用探讨[J].丹东海工,2012(2):9-11.

[7] 赖寅基,傅博,陈春. CORS 系统在内河航道测量中的应用[J].测绘与空间地理信息,2013(10):133-135.

(本文编辑 武亚庆)

[6] 林强,徐峰.数字航道综合监控系统在航道维护管理中的应用[J].水运工程,2011(3):126-130.

[7] 张国平.加快推进长江电子航道图建设[J].中国水运,2010(4):34-35.

[8] 郭涛,刘怀汉,万大斌,等.长江“智能航道”系统架构与关键技术[J].水运工程,2012(6):140-145.

[9] 刘怀汉,李学祥,杨品福,等.长江智能航道关键技术体系研究[J].水运工程,2014(12):6-9.

[10] 吴文化.中国交通运输效率评价体系研究分析[J].综合运输,2001(3):32-35.

[11] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.

(本文编辑 武亚庆)