

远距离高精度 GPS 潮汐观测及垂直基准转换研究

赵建虎¹ 董江¹ 柯灏² 张红梅³

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

3 武汉大学动力与机械学院,湖北 武汉,430072

摘要:为实现远岸潮汐精确监测及潮位海图高程转换,基于 GPS 事后动态处理技术(PPK)开展了远距离高精度潮位观测、提取及垂直基准面确定和转换模型构建方法研究。分别探讨了在锚定和走航情况下瞬时水面高程信号改正方法及潮位有效信息提取的最优截止频率,并给出了在不同情况下深度基准面大地高的计算方法模型及区域无缝深度基准面大地高构建模型。在实际试验中,基线距离在 100 km 范围内,获得了基于深度基准的 GPS 潮位,精度优于 10 cm。

关键词:远距离 GPS 潮位观测;GPS 潮位提取;深度基准大地高

中图分类号:P229.3; P228.42 **文献标志码:**A

近年来,国内外一些大地测量学家借助 GPS RTK(real time kinematic)技术在近岸(小于 20 km)开展了船基/浮标 GPS 在航潮位测量,并取得了一定的效果^[1]。但要在外航道、锚地等远岸水域实施潮位测量,仍面临着如下问题:①远距离、高精度 GPS 潮位测量技术及提取技术;②如何将 GPS 潮位转换为基于当地平均海平面或深度基准面潮位。对于第一个问题,在离岸较近或内航道水域,风浪较小,GPS 验潮载体姿态的变化对高程影响较小,然而在离岸较远的海域,风浪引起载体姿态在空间上的变化将给验潮带来较大误差^[2-5]。Alkan 通过试验测定由测船横摇和纵摇引起的误差可达 5 cm^[2]。此外,GPS RTK 模式还受距离限制,当距离超过 15 km 时,基本无法继续采用该模式。对于第二个问题,在近海岸,由于潮位站分布相对较多,借助潮位、水准点正常高和大地高数据,结合验潮站分布,可实现验潮站包围水域垂直基准关系的构建,垂直基准转换问题相对容易解决^[6,7];而在远岸,由于潮位站匮乏,上述垂直基准确定及转换方法很难适用。为此,本文将重点开展基于远距离 GPS 事后动态处理技术(post processing kinetic, PPK)的潮位测量及提取方法、垂直基准确定及转换模型构建两个问题的研究,以期实现远岸 GPS 潮位的精确测量及工程化应用。

1 远距离 GPS 潮位测量及提取

远距离 GPS 潮位测量系统主要由 GPS 和 IMU(initial motion unit)组成^[3-5]。通过基准站和流动站间的 GPS 数据开展 PPK 解算,获得流动站 GPS 天线处的瞬时三维解 $(X, Y, Z)_{\text{PPK}}$ 。若设定测量船/浮球重心在水面的投影点为船体坐标系原点,理想状态下 GPS 天线在船体坐标系下的坐标为 $(0, 0, z)$,瞬时横摇和纵摇分别为 r 和 p ,则 GPS 天线在水面投影点的三维坐标 $(X, Y, Z)_s$ 为:

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}_s^T = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}_{\text{PPK}}^T + \mathbf{R}(A)\mathbf{R}(p)\mathbf{R}(r) \begin{bmatrix} 0 & 0 & z \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中, $\mathbf{R}(A)$ 、 $\mathbf{R}(p)$ 和 $\mathbf{R}(r)$ 分别为方位 A 和姿态 p 、 r 构建的 3×3 旋转变换矩阵。

水面高程序列 Z_s 是潮位 T 、波浪 w 、船体操纵 dh_o 等因素在垂直方向综合作用的结果,即

$$Z_s = T + w + dh_o + \dots = T + \Delta T \quad (2)$$

在诸要素中,潮位变化周期至少大于 1 h,而其他要素的变化周期最大为几秒至十几分钟, T 与 ΔT 存在着明显的周期差异,据此可设计基于 FFT/Butterworth 等低通滤波器实现潮位提取。

收稿日期:2013-07-09

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41376109, 41176068, 40976061);塘沽科技创新及产业化基金资助项目(2012CYH05-04)。

第一作者:赵建虎,教授,博士,博士生导师,研究方向为海洋测绘。E-mail:jhzhaosgg@sgg.whu.edu.cn

潮位提取的一个关键问题是如何给定截止频率 F_c /截止周期 T_c 。恰当的 T_c 应根据当地的潮汐周期特征以及测量状态(走航/锚定)来决定。图 1 给出了一个正规半日潮水域 PPK 锚定和走航状态下,不同截止周期提取的潮位和与潮位站潮位比较所得的误差曲线。从图 1(b)可以看出,锚定状态下,当 $T_c=6$ h 时,潮位提取误差最小;在图 1(d)中,走航状态下,当 $T_c=4$ h、5 h 和 6 h 时,潮位提

取误差都较小,均取得了较好的潮位提取效果,但当 $T_c>6$ h 时,潮位曲线均存在拉平现象,而当 $T_c<4$ h 时,则出现随潮位曲线波动的现象。相对锚定状态,走航 PPK 潮位的获取不但受整体潮汐周期变化的影响,还受局部潮位特征变化的影响,截止周期相对锚定状态要小。因此,锚定状态下, T_c 取当地潮位周期的 1/2 即可实现潮位的正确提取;而在走航状态下,取当地潮位周期的 1/3~1/2。

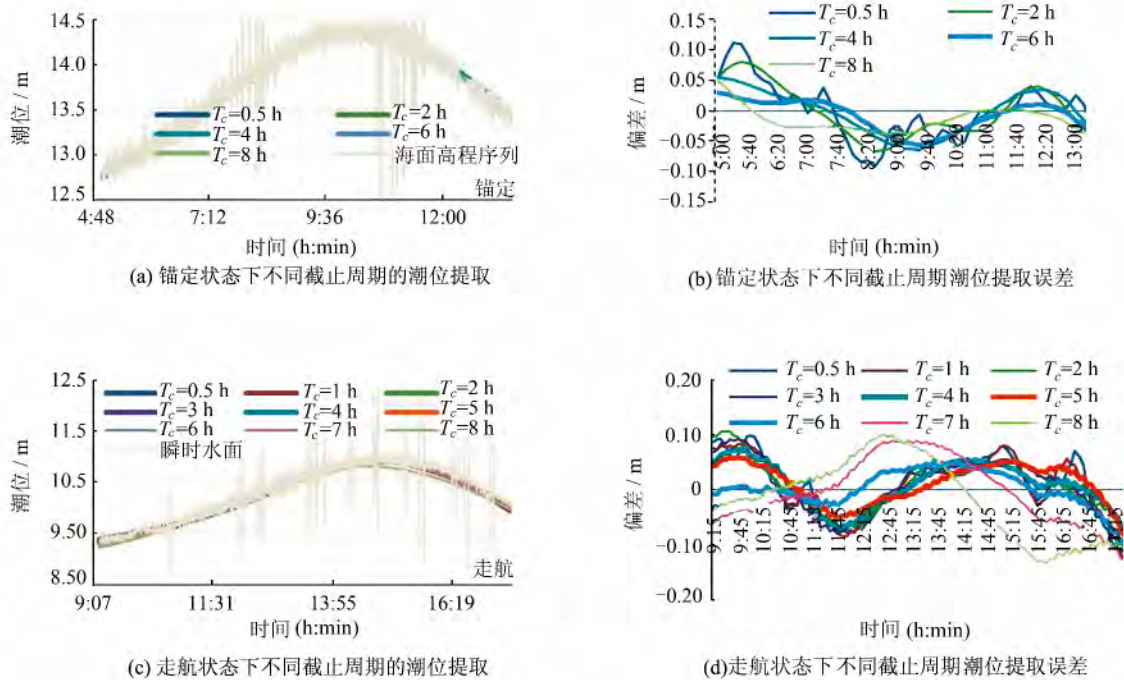


图 1 锚定、走航状态下不同截止周期下提取的潮位曲线及误差曲线

Fig. 1 Tidal Levels and Errors Derived from Different Cut-off Periods at Anchored and On-the-Fly PPK Tidal Measurement

2 垂直基准确定及转换

基于以上方法获得了基于 WGS84 椭球的大地高潮位,而非基于当地平均海平面或深度基准面的实用潮位,下面研究垂直基准的确定及转换问题。

2.1 垂直基准面间及其相互关系的确定

2.1.1 同站潮位比较法

同一潮位站若具备不同基面(零点/平均海平面/深度基准面/WGS84 椭球面)下的潮位观测值 T_{B1} 和 T_{B2} ,则直接比较两两潮位序列即可确定两基面间的关系。

$$\Delta_{B1-B2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{B1}^i - T_{B2}^i) \quad (3)$$

式中, n 代表潮汐观测个数; Δ_{B1-B2} 代表两个不同

基准面间的偏差。

2.1.2 不同潮位站同基面综合传递法^[7,8]

若长期站 A 潮位序列为 $T_A(t)$,短期站 B 潮位序列为 $T_B(t)$,两站为同基面(零点/平均海平面/深度基准面/WGS84 椭球面)下的同步潮位,则二者的关系可描述为:

$$T_B(t) = xT_A(t+y) + z \quad (4)$$

式中, x 、 y 和 z 分别为两站潮差比、潮时差和基面偏差。则 B 站的平均海平面 MSL_B 和深度基准面 L_B 为:

$$MSL_B = xMSL_A + z \text{ 或 } L_B = xL_A \quad (5)$$

2.1.3 不同潮位站不同基面综合传递法

根据式(4)中各参数的物理意义及图 2 所示的 WGS84 椭球面、深度基准面和平均海平面 MSL 间的关系,围绕 GPS 潮位测量,给出如下几种情况下的基面及其大地高确定方法。

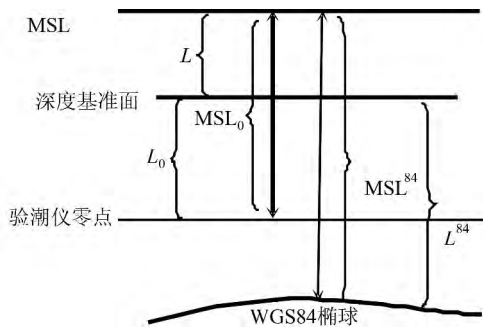


图 2 垂直基准面间的关系

Fig. 2 Relation Among Vertical Datum

1) 根据 A 站大地高的潮位和 B 站验潮站原始观测潮位, 确定 MSL_B^{84} 和 L_B^{84} 。

A、B 站存在同步潮位, 若 MSL_A^{84}/L_A^{84} 已知, 则借助式(6)可将 A 站基于平均海平面/深度基准面的潮位转换为基于大地高的潮位 T_A^{84} 。若 A 站为 GPS 潮位, 则直接获得 T_A^{84} :

$$T_A^{84}(t) = T_A(t) + MSL_A^{84} \text{ 或 } T_A^{84}(t) = T_A(t) + L_A^{84} \quad (6)$$

基于式(4), 可得 z 。 z 反映了 A 站基面(WGS84 面)与 B 站基面(平均海平面/深度基准面)的差异, 也即为 B 站的 MSL_B^{84}/L_B^{84} :

$$MSL_B^{84} = z \text{ 或 } L_B^{84} = z \quad (7)$$

2) 根据 A、B 潮位站潮位, 确定 MSL_B^{84} 和 L_B^{84} 。

A、B 站存在基于各自平均海平面/深度基准面的同步潮位站潮位, 基于综合传递法, 可得两站基面偏差 z 。若已知 A 站的 MSL_A^{84}/L_A^{84} , 并认为 WGS84 椭球面的曲率影响较小, 可近似地认为是一平面, 则有:

$$MSL_B^{84} = z + MSL_A^{84} \text{ 或 } L_B^{84} = z + L_A^{84} \quad (8)$$

2.2 区域无缝垂直基准转换模型构建及 PPK 潮位转换

以上获得了每个验潮站的长期平均海平面 MSL、深度基准面 L 及对应的 MSL^{84} 和 L^{84} , 也即为基于 WGS84 椭球面实测的 PPK 潮位向基于 MSL/L_{MSL} 潮位的转换量。据此结合各潮位站的平面位置 $(x, y)_p$ 以及上述确定的各验潮站的转化量, 构建测量水域无缝垂直基准转换模型 $f(x, y)$ 。考虑 WGS84 椭球面为几何面, 小区域范围内, 两基面间的分离量 MSL^{84}/L^{84} 的变化仍主要取决于 MSL/L 的变化, 为此, $f(x, y)$ 的构建采用距离加权平均方法。

$$\begin{cases} MSL^{84}(x, y) = \sum_{j=1}^m w_j MSL_j^{84} \\ L^{84}(x, y) = \sum_{j=1}^m w_j L_j^{84} \end{cases} \quad (9)$$

式中, w_j 为第 j 个潮位站上 MSL^{84}/L^{84} 的权, 可根据距离给出。

$$w^j = p^j / P, P = \sum_{j=1}^m p^j, p^j = 1/s \quad (10)$$

其中, s 为第 j 个潮位站到内插位置 (x, y) 的距离。自此构建了区域无缝垂直基准间的转换模型, 据此实现测量水域任意位置 (x, y) 的 GPS 潮位向基于当地平均海平面或深度基准面的潮位转换。

$$\begin{cases} T^{MSL}(x, y, t) = T^{84}(x, y, t) - MSL^{84}(x, y) \\ T^L(x, y, t) = T^{84}(x, y, t) - L^{84}(x, y) \end{cases} \quad (11)$$

3 试验及分析

为检验本文所述方法的正确性, 结合某工程开展了试验验证。测量水域有 A、B 和 C 三个验潮站, 其中, A、B 为岸边长期验潮站, C 为海中临时验潮站, A-B、A-C 和 B-C 间的距离分别为 36 km、67 km 和 86 km, 三站潮位均基于深度基准面; 在 B、C 分别开展了 64 h 和 23 h 锚定 PPK 潮位测量, 获得了基于 WGS84 大地高潮位。

3.1 基准关系构建

根据两类潮位站的观测数据, 借助式(3)~式(8)推求了各潮位站深度基准面 L 及其 L^{84} 。在 B 站, 利用 64 h 的同步潮位站潮位和 PPK 锚定潮位, 基于不同基面的综合传递法和潮位曲线比较法, 分别计算出 B 站的 L 和 L^{84} 如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 两种方法所得锚定位置的 L 、 L^{84} 非常接近, 互差小于 1.5 cm。由于锚定位置与 B 潮位站非常接近, 以 B 潮位站已知 L_B 为参考, 计算 L_B 与综合传递法所求 L 以及 L_B 与比较法所求 L 间的差值, 其中最大偏差小于 1.5 cm。最终确定 $L_B = 1.460 \text{ m}$, $L_B^{84} = (12.356 + 12.363) / 2 = 12.357 \text{ m}$ 。

对于 A 站, 首先根据同步的 B 和 A 潮位站潮位, 借助不同基面下的综合传递法, 可得到 B 站深度基准面相对 A 站深度基准面的差 z 以及 A 站 L_A , 由于 B 站 L_B^{84} 已知, 则根据式(8)得到 L_A^{84} 。根据同步的 B 站 PPK 潮位与 A 站已知潮位, 借助不同基面下的综合传递法, 即式(7), 获得 A 站的 L 和两基面差 z , z 也即为 L_A^{84} 。两种方法获得的 A 站 L 和 L_A^{84} 如表 1 所示, 二者所得 L 与实际偏差为 -1.4 cm, L_A^{84} 互差小于 5 cm, 取均值得 $L_A^{84} = 12.406 \text{ m}$ 。

获得了 A、B 站的 L 和 L^{84} 后, 采用三种方法确定 C 站的 L 和 L^{84} 。方法 1: 根据 A、B 站与 C 站 38h 同步潮位站潮位, 借助综合传递法获得 C 站 L 以及两站深度基准面差 z , 借助式(8)实现 C 站 L^{84}

表1 短期站 L 及 L^{84} 的确定Tab. 1 Determination of L and L^{84} at Tidal Stations

潮位序列(类别)	潮位序列(类别)	方法	L^{84}/m	L/m	已知 L/m	dL/cm
B(潮位站潮位)	B(PPK潮位)	不同基面综合传递法	12.356	1.474	1.460	1.4
B(潮位站潮位)	B(PPK潮位)	比较法	12.363	1.460	1.460	0.0
B(大地高潮位)	A(潮位站潮位)	不同基面综合传递法1	12.380	1.267	1.280	-1.3
B(潮位站潮位)	A(潮位站潮位)	不同基面综合传递法2	12.433	1.267	1.280	-1.3

的确定。方法2:比较C站的潮位站潮位和 PPK 站潮位和C站 PPK 潮位,基于式(7)确定 L 和 L^{84} 。潮位,直接确定C站的 L^{84} 。方法3:利用A、B潮位 三种方法确定的C站 L_c 和 L_c^{84} 如表2所示。

表2 C站 L 和 L^{84} 的确定Tab. 2 Determination of L and L^{84} at C Tidal Station

方法	已知站/	确定方法	C站	站间距	PPK基线	(L/L^{84})	最终	$(\Delta L/\Delta L^{84})$
	潮位类型							
1	A潮位	不同基面综合传递法2/38h	潮位	60	无	1.190/12.076		1.4/-1.2
	B潮位		潮位	82	无	1.159/12.097		-1.7/0.9
2	C潮位	比较法/23h	PPK	0	60	1.176/12.115	1.176/12.088	0.0/2.7
			潮位	0	98	1.176/12.044		0.0/-4.4
3	A潮位	不同基面综合传递法1/23h	PPK	60	60	1.190/12.052		1.4/3.6
			潮位	60	98	1.165/12.063		-1.1/-2.5
	B潮位		PPK	82	60	1.148/12.152		-2.8/6.4
			潮位	82	98	1.239/12.028		6.3/-6.0

从表2中可以得出以下结论。

1)各方法的传递精度 ΔL 和 ΔL^{84} 均优于7cm,达到了较好的一致。

2)同步观测时间较长的深度基准面 L 、 L^{84} 的传递精度要高于同步观测时间较短的传递精度。此外,站间距离对传递精度也有一定的影响。距离越近,潮位特征的相关性越强,传递精度越高,PPK基线长度影响着PPK潮位精度,进而影响着 L 和 L^{84} 的传递精度,因此距离越远,PPK定位精度和基准传递精度降低,但在100km范围内,仍取得了优于6.5cm的传递精度。

3) PPK潮位和潮位站潮位直接比较,可以高精度地获取该站两个潮位基面之间的差值,也即实现了高精度 L^{84} 的确定。

3.2 潮位测量及其精度分析

获得各站深度基准面大地高 L^{84} 后,结合各站位置,利用式(9)计算测量水域不同位置深度基准

面的大地高,并根据式(11)实现 PPK 锚定/在航潮位向基于深度基准面潮高的转换。通过 PPK 基线解算和 $T_c=6$ h 潮位提取,得到C处的 PPK 潮位,借助上述基准转换关系,转换潮位站潮位为基于 WGS84 椭球面的大地高潮位,并以其为参考,评估 PPK 潮位测量成果的精度(如图3所示)。统计结果表明,偏差最大值、最小值分别为13.5cm和-14.4cm,均值为0.8cm,标准偏差为 ± 6.5 cm。

基站位于A站,在ABC包围水域内开展走航 PPK 潮位测量,基线长度30~76km,历时约6h。解算并提取 $T_c=4$ h 的 PPK 潮位如图4(a)所示;根据A、B和C坐标及其观测潮位,距离加权内插获得在航不同位置的潮位,并借助上述建立的深度基准面与 WGS84 椭球面垂直基准间的转换模型,将内插潮位转换为大地高潮位,并与 PPK 在航潮位比较,误差曲线如图4(b)所示。可以看出,二者具有很好的一致性,PPK 潮位的最大偏差小于10cm。

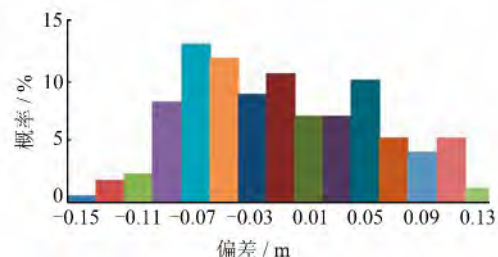
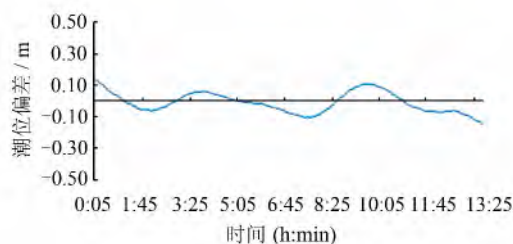


图3 锚定 PPK 潮位和传统潮位站潮位差分布

Fig. 3 Bias Distribution of Anchored PPK Tidal Level and Traditional Tidal Level

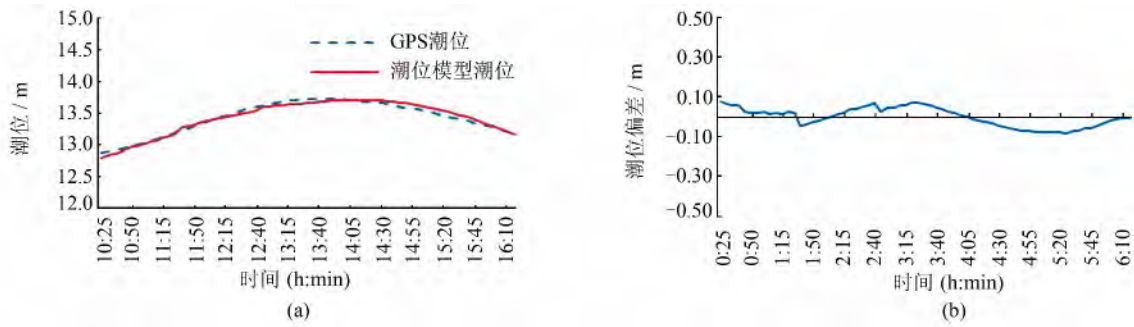


图 4 在航 PPK 潮位提取及与潮位站潮位比较

Fig. 4 On-the-Fly PPK Tidal Extraction and Comparison with the Tide from Tidal Station

将基站分布位于 A 和 B 的不同测次的在航潮位采用上述类似处理,提取出在航 PPK 潮位,并将 PPK 走航潮位与基于传统潮位站潮位内插所得的经垂直基准转换模型转换的在航潮位进行比较,并统计分析各测次偏差的统计参数如表 3 所示。从表 3 中可以看出,整个在航潮位测量,最近距离为 20 km,最远为 90 km,PPK 潮位的最大偏差均小于 12 cm,大部分小于 10 cm;偏差均值均为 0.0,标准差均小于 10 cm,取得了较高的潮位测量精度。同时也可以看出,随着 PPK 作用距离的增加,GPS 基准站和流动站间的误差的相关性减弱,PPK 潮位测量的精度降低。尽管如此,仍取得了偏差标准差优于 8 cm 的精度,从而也表明了本文给出的远距离潮位测量和提取方法、垂直基准确定及无缝转换模型构建方法的正确性。

表 3 在航 PPK 潮位和传统潮位偏差统计参数

Tab. 3 Statistic Parameters of Bias Between PPK Tidal Level and Tidal Level from Tidal Interpolation

基准站	时间长 度/h	PPK 潮位基 线长度/km	偏差/cm			
			最大值	最小值	均值	标准差
B	6	20~65	7.6	-7.5	0.0	±5.0
B	13	20~90	11.3	-11.7	0.0	±7.7
A	9	30~76	7.5	-7.9	-0.0	±4.8

4 结 语

本文给出的 20~100 km 范围内的潮位测量方法以及垂直基准的确定和转换方法,解决了制约 GPS 远距离潮位测量的两大瓶颈问题,实现了远岸 GPS 潮位的准确获取及向基于平均海平面/深度基准面潮位的正确转换,并得到了实际工程的检验。在潮位提取中,截止周期需结合当地潮汐周期和工作状态进行选择,锚定状态下建议为当地潮汐周期的 1/2,走航状态下为 1/3~1/2;在潮位站,借助 15~30 m GPS 潮位测量,通过比较即可获得该站高精度的 L^{84} ;在远岸,开展 2 d 左

右的锚定 GPS 潮位测量,结合岸边潮位站潮位,可实现优于 10 cm 的 L 和 L^{84} 的确定精度。

参 考 文 献

- [1] Zhao Jianhu, Clark J E H, Brucker S, et al. On-the-Fly GPS Tide Measurement Along Saint John River[J]. *International Hydrographic Reviewer*, 2004, 5(3):48-58
- [2] Alkan R M. The Role of Pitch and Roll Effects on the Short Instantaneous Sea Level Height Determination with GPS[S/OL]. <http://www.thsoa.org/pdf/h01/>,2001
- [3] Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, John E. Hughes Clarke. Determination of Precise Instantaneous Tidal Level at Vessel[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(12): 1 067-1 070 (赵建虎,张红梅,John E. Hughes Clarke. 测船处瞬时潮位的 GPS 精密确定[J]. *武汉大学学报·信息科学版*,2006, 31(12): 1 067-1 070)
- [4] Zhao Jianhu, Liu Jingnan, Zhou Fengnian. Method in Determining Vessel Attitude with GPS[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*,2000, 25(4): 353-357(赵建虎,刘经南,周丰年. GPS 测定船体姿态方法研究[J]. *武汉测绘科技大学学报*,2000,25(4): 353-357)
- [5] Zhao Jianhu, Zhang Hongmei. Determination of Precise Instantaneous Height at Multibeam Transducer[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2007, 10(4):250-254
- [6] Ke Hao. Research on the Theory and Implementation Method of Marine Seamless Vertical Reference Surface[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012(柯灏. 海洋无缝垂直基准构建理论和方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2012)
- [7] Bao Jingyang. On the Study of Vertical Datum for Hydrography and Cartography[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*,2009, 29(2): 70-77(暴景阳. 海洋测绘垂直基准综论[J]. *海洋测绘*,2009,29(2):70-77)

High Precision GPS Tide Measurement Method in a Far-Distance and Transformation Model for the Vertical Datum

ZHAO Jianhu¹ DONG Jiang¹ KE Hao² ZHANG Hongmei³

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Based on postprocessor GPS PPK technology, we carried out the research on long-distance tide observation and extraction, the determination of vertical datum and the construction of vertical-datum transformation model. A model for calculating a height series for instantaneous water surface was researched, meanwhile, the best cut-off periods for tidal extraction for anchored and on-the-fly status are proposed. Finally, based on long-term anchor PPK and tide-gauge tidal levels for different situations, a determination of MSL and chart datum as well as the models for calculating their geodetic heights were investigated and proposed. A method to establish a seamless chart datum geodetic height model is presented. An test project showed that the accuracy of GPS tide level reference to chart datum measurement method as presented in paper can be better than 10 cm when the GPS baseline is less than 100 km.

Key words: far-distance GPS tide measurement; GPS tide exaction; chart datum geodetic height

First author: ZHAO Jianhu, PhD, professor, specializes in marine surveying and mapping. E-mail: jhzhao@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41376109, 41176068, 40976061; Tianjin Tanggu Science and Technology Development Fund, No. 2012CYH05-04.

(上接第 715 页)

On Construction of China's Space Information Network

LI Deren^{1,2} SHEN Xin^{1,2,3} GONG Jianya^{1,2} ZHANG Jun^{2,4} LU Jianhua^{2,5}

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

³ School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

⁴ School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

⁵ Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Using space platforms as carriers, spatial information network (SIN) is a new kind of network system that implements real-time data acquisition, fast network transmission and information processing. Through real-time data access/transmission, networks interconnection and cooperative data processing, SIN could realize the integrated application and collaborative service of satellite remote sensing, satellite navigation and satellite communication. Firstly, the concept, function and characteristic of space information network are introduced. Then the significance and necessity of construction of China's SIN are represented after an analysis of development of SIN at home and abroad. Finally, the research objectives and scientific issues for China's SIN construction are discussed.

Key words: space information network; satellite networking; information transmission; collaborative observation; on-board processing

First author: LI Deren, professor, Academician of Chinese Academy of Sciences, Academician of Chinese Academy of Engineering, Academician of Euro-Asia International Academy of Science. He has concentrated on the research and education in geospatial information science and technology represented by RS, GPS and GIS. E-mail: drli@whu.edu.cn

Corresponding author: SHEN Xin, PhD. E-mail: xinshen@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 91438203; China Postdoctoral Science Foundation Funded Project, No. 2014M562006; Independent Research Project of Wuhan University, No. 2042014kf0059.