doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.02.009

基于 GPS PPK 技术确定测深点瞬时潮位及分析

王正杰1,王 峰2,吴自银1,曹振轶3,罗孝文1,李守军1*

(1.自然资源部第二海洋研究所自然资源部海底科学重点实验室,浙江 杭州 310012;2.浙江省工程物探勘察 设计院有限公司,浙江 杭州 310005;3.自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘 要:潮位是影响水下地形测量精度的主要误差之一,获取准确的潮位信息直接关系着潮位改正的正确与否。文中基于 GPS PPK 技术得到的 GPS 天线大地高,首先经过垂直基准转换,其次利用推算的姿态改正公式以及利用压力式潮位计获取的动态吃水进行姿态与吃水改正,最后采用小波变换进行波浪滤除,得到测深点精密的瞬时潮位。以琼州海峡为试验海区,采用上述方法获得测深点瞬时潮位,并与传统潮汐模型推算潮位对比,对比发现两者并不一致,且前一种方法得到的潮位趋势与测船的航向有很强的相关性。对测区的潮汐潮流特征进行了分析,分析结果与实测结果相符,表明 GPS PPK 能够获得该区域的潮位,并可以反映该区域的潮汐特征。

关键词:GPS PPK 潮位;潮位改正;潮汐模型;瞬时潮位

中图分类号: P229.1 文献标志码:A 文章编号:1003-2029(2020)02-0058-06

水下地形测量中,测量的水深是瞬时海面至海 底的距离,潮位随时间发生变化。要想得到稳态的 水深值,必须从获得的瞬时水深值中去除潮汐变化 的影响。传统的水位改正模式基于岸边验潮站控 制,利用一个或多个验潮站水位观测序列,采用模 拟法、分带法、时差法及最小二乘拟合法,通过单 站、两站、三站等潮汐模型获得测点瞬时潮位[1-2]。然 而,在一些水域使用传统方法会导致较大的潮汐模 型误差,会给水下地形测量带来较大的影响^[3]。PPK (Post Processed Kinematic) 是利用载波相位观测值 进行事后处理的动态相对定位技术。在动态情况下, 80 km 范围内, PPK 的平面位置精度可以达到 5 cm 以内,高程精度也可以达到 10 cm 以内^[4]。由于测船 在测量过程中不可避免地要受到动态吃水、波浪的 影响,要获得高精度的 PPK 潮位,必须进行姿态改 正、动态吃水改正以及波浪滤除。目前,GPS潮位测量 在波浪滤除方面的研究较为深入[5-9],一般通过 FFT/ Butterworth 等低通滤波器或小波变换来滤除。在姿态改正方面,将姿态角直接当作旋转矩阵的旋转角。而实际上,坐标变换中的旋转角并非姿态角^[7]。在动态吃水方面,传统的观测方式利用实测统计或经验公式法来计算测船的动态下沉量^[8]。然而,采用传统方式实时测定不同航速下测量船的动态吃水几乎是不可能的^[9]。为解决上述问题,本文进行了精确的姿态改正,并利用压力式潮位计实时测量船的动态吃水,将计算得到的潮位与传统方法相比,并就结果进行了分析论证。

1 GPS PPK 确定测深点瞬时潮位原理

GPS PPK 确定瞬时潮位的原理是:利用 PPK 测量获得 GPS 天线处的瞬时三维坐标,并结合其在船体坐标系下的坐标,以及潮位计测量得到的动态吃水,经过一系列基准面转换获得测深点瞬时潮位。

收稿日期:2019-11-27

基金项目:国家重点研发计划专项资助项目(2016YFC1401210);国家自然科学基金资助项目(41576099);全球变化与海气相互作用专项资助项目(16011G)

作者简介:王正杰(1995-),男,硕士,主要从事 GNSS 数据处理技术与应用研究。E-mail:1274049712@qq.com 通讯作者:李守军(1977-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事海底地形地貌研究。E-mail:0911guang@163.com

其基准面关系如图1所示。



图 1 PPK 确定测深点瞬时潮位的基准面关系

图 1 中, H_c 为 GPS 天线的大地高; L 为 GPS 天 线到换能器与压力式潮位计所在平面的直线距离; T 为基于 85 高程基准面的潮位; ξ 为 85 高程基准 面到参考椭球面的距离; D 为换能器的动态吃水; h 为 GPS 天线的 85 高程。测深点瞬时潮位为:

$$T=h-L'+D \tag{1}$$

式中:L'为L在竖直方向的长度;D为换能器的动态吃水,可以利用与换能器固连在同一平面上的压力式潮位计测量压力,然后将压力转换为深度 实时获得;h为GPS天线的85高程,可以利用测区 周围已知控制点在两套坐标系下的坐标求得七参 数后进行坐标转换后获得。

2 GPS PPK 瞬时潮位的改正

2.1 姿态改正

若以船作为测量载体,在海面上受风浪的影响 会引起载体空间姿态的改变,导致式(1)中的L'值 不为定值。Alkan R M¹⁰通过测量横摇r、纵摇p的姿 态测定实验,表明它们引起的误差达到了5 cm,且 试验时海面较为平静,如果海况恶劣,误差还会增 大。因此,L需要经过姿态改正求得L'。姿态改正在 船体坐标系 VFS(Vessel Framework System)下进行, 姿态角由 MRU (Motion Reference Unit)输出。设 GPS 天线与换能器间的初始杆臂为(x_0, y_0, L),在不 考虑姿态角与旋转角的差异时,受姿态的影响为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ L' \end{pmatrix} = R(r)R(p) \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ L \end{pmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos p & 0 & -\sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ L \end{bmatrix}$$

$$(2)$$

横摇纵摇通常在 10°以内,虽然将姿态角直接 当作旋转角的误差较小,但是严格意义上在构成旋 转矩阵时,旋转角应为横摇和纵摇的函数。应该根 据对应的几何位置,由两个姿态角计算相应的旋转 角,才能使姿态改正的计算结果更加准确⁽⁷⁾。当先进 行纵摇改正后,再进行横摇改正时旋转角不再是横 摇角 r,应为 r,p 的函数 r':

$$r'=\arcsin(\sin r/\cos p)$$
 (3)

将式(3)代入式(2)进行严格意义上的姿态改 正,得到更为准确的L′。

2.2 波浪滤除

在海面上,波浪不但会引起载体姿态的变化, 还会使其位置发生改变,使求得的潮位包含了波浪 的影响。波浪的频率和潮汐的频率相差很大,一般 波浪的周期是 0.1~30 s,而潮汐的周期至少为 1 h 以上^[11]。根据它们各自在频率上的特性,通过小波变 换将信号分解为不同的频率空间,然后根据潮汐信 号所占有的低频空间将该低频空间的系数进行重 组,就可以实现波浪的滤除^[5]。

使用小波变换,首先要确定原始采样序列对应 的最高频率ω。设原始采样的时间长度为*T*,采样个 数为*N*,采样频率为*f*_s,则ω为:

$$\omega = N/2T = f_s/2 \tag{4}$$

假设波浪的频率为*f*_w,潮汐的频率为*f*_i,则使用 小波剖分的层数由式(5)决定:

$$f_{\iota} < \omega/2^{n} < f_{w} \tag{5}$$

通过上述步骤,使小波变换的低频系数的最高频 率小于波浪的最低频率,从而实现潮汐信号的提取。

3 实验对比及分析

为了验证本文所述方法的正确性,在琼州海峡 中部结合某工程进行实验验证。琼州海峡地处广东 省雷州半岛与海南省之间,南北平均宽 30 km,东西 长约 80 km。本文试验区域为不规则日潮区域,潮流 流向总体上为东西向。测区周围有海安和秀英 2 个 长期验潮站,以及 1 个南港临时验潮站。3 个站的潮 位数据均基于 85 高程基准面,测区示意图见图 2。数据采集的时间为 2010 年 5 月 30 日北京时间 9:15 AM-14:38 PM,采集频率为 5 Hz,测线布设总 体上为东西向。



图 2 测区及测线示意图

3.1 实验步骤

利用航测船 GPS 采集的数据,获得测深点瞬时 潮位,详细步骤如下:

(1) 将测船流动站的数据与基站数据一起进行 PPK 解算,获得流动站天线大地高 H_c (图 3)。

(2)利用测区周围多个已知控制点在 WGS84 坐标和西安 80 坐标系下的两套坐标,使用 85 高程 代替西安 80 坐标的大地高来求解空间转换七参 数,检验七参数转换的精度,合格后将流动站的 GPS 坐标直接转换为西安 80 平面坐标和 85 高程 h。

(3) 经过姿态改正后,将压力式验潮仪记录的数据进行压力和深度转换,获得与测点位置对应的动态吃水 *D*(图 4)。利用式(1)获得含有波浪误差的潮位 *T*。

(4)由于数据采样频率为5Hz,因此采用
 symlets小波进行6次分解,将波浪误差滤除得到最终的潮位T(图5)。





3.2 实验结果对比

为了分析实验结果的准确性,利用岸边验潮站 数据进行潮汐模型推算,求得测深点处的潮位。考 虑到琼州海峡的潮汐变化复杂,在潮汐模型选择上 使用基于3站的最小二乘拟合法。不同分潮的潮 高比重会随着时间变化,并且存在不同变化规律 的比较参数,使得潮汐参数具有时变特征^[1],所以 采用1d的时段长度推算验潮站相互之间的潮时 差、潮差比、基准面偏差3个潮汐参数,该过程可 以描述为:

$$T_B(t) = \gamma_{AB} \cdot T_A(t + \tau_{AB}) + \varepsilon_{AB}$$
(6)

式中: $T_A(t)$, $T_B(t)$ 分别为A 验潮站和B 验潮站的 潮位序列。 γ_{AB} , τ_{AB} , ε_{AB} 分别为A、B 两站的潮差比、 潮时差、基准面偏差。

理论上,往返潮汐参数应该有:

 $\gamma_{AB} = 1/\gamma_{BA}, \tau_{AB} = -\tau_{BA}, \varepsilon_{AB} = -\varepsilon_{BA} \cdot \gamma_{AB}$ (7)

实际上潮波是由诸多频率构成的,且观测到的 潮位除潮汐成分外,还有非潮汐因素的影响。这些 影响难以保证在验潮站之间具有同步性和一致性, 于是式(7)并不严格成立,这会造成与理论上的不 符值,只要不符值满足一定的限差,两站水位就可 以互相表达。计算结果见表 1,计算结果与理论上的 不符值见表 2。

表1 ;	海安、南港、	秀英 3	站之间的	潮汐参数对比
------	--------	------	------	--------

验潮站		潮差比	潮时差/s	基准面偏差/cm
法中	南港	1.142 1	-761.689 2	3.456 0
何女	秀英	0.968 7	-882.349 4	14.885 1
南港	海安	0.866 0	758.987 5	-2.495 1
	秀英	0.842 6	-287.296 5	12.325 4
秀英	海安	1.024 8	896.513 9	-14.960 0
	南港	1.175 6	290.386 2	-13.963 7

表 2 海安、南港、秀英 3 站之间的潮汐参数与理论不符值

心油站	潮差比	潮时差	基准面偏差
迎佣垍	不符值	不符值/s	不符值/cm
海安-南港	0.012 6	2.270 2	0.960 9
南港-秀英	0.011 2	14.164 5	0.074 9
秀英-海安	0.007 5	3.089 7	1.638 3

由表2的计算结果可知,往返潮汐参数不符值 均较小,且由3站验潮站组合成的潮时闭合差小于 6 min,满足规范要求。

假设潮汐参数在 3 个验潮站之间是平面分布 状态,则可以求出以海安站 H 为基准测点 P 处相对 海安的 3 个潮汐参数: λ_{HP} , τ_{HP} , ε_{HP} 。求出测点 P 处潮 汐参数之后,就可以代入式(8)得到以海安站 H 为 基准测点 P 的潮位值:

$$T_{HP}(t) = \gamma_{HP} \cdot T_H(t + \tau_{HP}) + \varepsilon_{HP} \tag{8}$$

$$T_{NP}(t) = \gamma_{NP} \cdot T_N(t + \tau_{NP}) + \varepsilon_{NP}$$
(9)

$$T_{XP}(t) = \gamma_{XP} \cdot T_X(t + \tau_{XP}) + \varepsilon_{XP}$$
(10)

式中: $\lambda_{NP}, \tau_{NP}, \varepsilon_{NP}, \lambda_{XP}, \tau_{XP}, \varepsilon_{XP}$ 分别是以南港站 N为基准和秀英站 X 为基准求得测点 P的潮汐参数。则根据距离加权得到测点 P最终的潮位为:

$$h_{p}(t) = [T_{HP}(t)/D_{HP} + T_{NP}(t)/D_{NP} + T_{XP}(t)/D_{XP}]/$$

$$[1/D_{HP} + 1/D_{NP} + 1/D_{XP}]$$
(11)

式中:D_{HP},D_{NP},D_{XP}分别为测点P到海安、南港、 秀英3个验潮站的距离,计算结果见图6。

由图 6 可见,采用潮汐模型推算的潮位与 PPK 解算并不一致,由潮汐模型推算的潮位总体上一直 保持上升的趋势,反映为涨潮过程;而由 PPK 解算 的潮位在上升过程中有一个阶段为下降的过程,且 两曲线之间有交点。与图 2 测线示意图对比,发现 用 PPK 解算的潮位与测线的方向有很强的相关性。 实验中发现,在测线 A-B 段(从 A 到 B), PPK 解算 的潮位保持上升的趋势;而在测线 C-D 段(从 C 到 D),PPK 解算的潮位却呈现出下降的趋势;在测线 E-F 段(从 E 到 F), PPK 解算潮位特征又和 A-B 段 的特征一致,呈现出上升的趋势。将 PPK 解算潮位 与岸边固定验潮站站对比(图7),发现在 A-B 段 PPK 潮位先慢慢靠近海安、南港验潮站,并且在 A-B 段中间时刻 10:30 左右与海安、南港站潮位曲线相 交,然后再慢慢靠近秀英站,在11:30 与秀英站最近; 在 C-D 段恰恰相反, PPK 潮位先慢慢远离秀英站, 在 C-D 段中间时刻 11:58 与海安、南港站潮位曲线相 交,然后继续下降;E-F段特征与A-B段特征一致。



3.3 分析

太平洋潮波经吕宋海峡传入南海[12-13],在南海 向西南向传播。在传播过程中,分出一支经东口进 入琼州海峡,继续向西南向传播的潮波,经海峡西 口进入北部湾。海峡东口主要受半日潮波的影响, 西口则受全日潮波的影响,故海峡自东向西存在不 同的潮汐类型,由不规则半日潮逐渐变为规则全日 潮。由于东西口不同位相和潮时的分潮从相反方向 传入,这些分潮相互叠加,再加上地形的影响,海峡 潮流表现出一定的复杂性。海峡东西两端水流入口 处均呈喇叭状,水流的窄管效应明显,致使潮流流 速为南海之最[14-15]。海峡的潮流呈显著的往复式运 动,其涨潮流为偏西向,落潮流为偏东向;涨潮历时 一般为 13~14 h, 落潮历时为 10~11 h, 是以日潮流 为主的强潮流区16。夏季在测区三塘附近潮流运动 方向为: 涨潮指向 240°~250°, 落潮方向指向 70°~ 80°,和地形基本保持一致[17]。

整个测量过程为涨潮阶段,涨潮流沿粤西沿岸 以西南方向流入测区。根据涨潮流传播方向,以及3

个验潮站所处的地理位置,理论上可认为海安站要 比南港站、秀英站潮汐相位要提前,而南港站和秀 英站都在海峡南岸且相距不远,故潮汐相位应该相 近。实测结果由表1可知,海安站比南港站潮位提 前 12.6 min,比秀英站潮位提前 14.7 min,与实测结 果相符。在 A-B 段,测船航行方向与涨潮流方向相 反,为顶潮流测量状态,涨潮流从 B 流至 A。由于潮 波传播时延,致使不同位置在同一时刻的潮位不 同,在同一时刻潮位沿 A-B 方向,潮位应该逐渐升 高。测线起始点 A 位于海安站的西南方向,理论上 A 点潮位应该低于海安站潮位,随着船的沿测线往 东偏北方向航行,由于位置和时间的不同,潮位会 逐渐上升,且在最靠近海安站的位置处与海安站潮 位最接近,随后继续升高。实测结果为A点潮位低 于海安站潮位,且在最接近海安站时(A-B段的中 间时刻)与海安站潮位重合,然后潮位继续上升至 与秀英站潮位接近,与理论分析结果相符。在 C-D 段,测船航行方向与涨潮流方向相同,为顺潮流测 量状态,涨潮流从C点流至D点。由于潮波传播时 延,在同一时刻沿 C-D 方向不同位置处的潮位应该 逐渐降低,但此时在每一点处的潮位实际还是在上 升的,只是测船处于运动状态,船速虽然比潮波的 传播速度慢,但是潮波引起的潮位的增长比因位置 的不同引起的潮位下降的幅度要小,因此两种因素 的综合效应在整个过程中出现下降的趋势,且在最 靠近海安站的位置(C-D)中间时刻处与海安站潮位 最接近,然后往西南方向测量潮位继续下降。实测 结果在 C-D 段与上述描述相符, 日在最接近海安位 置处(C-D段的中间时刻)与海安站潮位重合。E-F 和 A-B 段相同,只是由于潮位增长速度变缓,致使 PPK 解算潮位增长也出现变缓的趋势。

在 A-D 段, A 与 D 点距离很小, 仅 100 m, 故可 以将 A 点与 D 点的潮位差视近似为同一点在不同 时刻的潮位差,经计算得到潮位差为93 cm。同样,可 以得到海岸站、南港站、秀英站3站验潮站在该过程 中的潮位差分别为91.63 cm,91.47 cm,93.72 cm,与 PPK 得到的潮位差相符。

利用压力传感器测量多波束换能器动态吃水 变化时,要考虑流体的伯努利效应。实际操作中,在 水下容器的进水端加盖一个分流罩,使得处于分流 罩内的水下传感器容腔内流体运动速度近于零,消 除伯努利效应的影响。在 A-D 段、B-C 段及 E-F 段 船速分别为 1.393 m/s,4.150 m/s 和 1.435 m/s,中间 一段与前后两端的船速差异较大,且测船在测线之 间转向的过程中船速的变化也较大,但因动态吃 水,由图 4 可见船速造成的压力变化对测量的动态 吃水的影响较小,可以认为测船航行造成潮位计测 量的动态吃水误差较小。

根据以上分析可认为,PPK 计算潮位是可靠的。虽然解算的 PPK 潮位还是存在较小的抖动,可以认为是由于利用压力式潮位计测量动态吃水和 其他的环境噪声造成的。

4 结论

(1) GPS PPK 在航潮位测量能够真实地反映潮 位变化的时空特征,能够给出不同位置、不同时刻 的潮位,有效地避免了在潮汐性质复杂、强潮流区 利用潮汐模型推算潮位带来的模型误差,利用该技 术可以在潮汐性质复杂区域进行海底地形测量中 得到应用。

(2)利用压力式潮位计获得的测船动态吃水能 够准确地测量不同船型在不同船速下真实的动态 吃水值,在后续数据处理过程中减少了工作量。

(3)利用 MRU 输出的姿态参数,进行更为严密的姿态改正,能够进一步提高姿态改正的精度。

参考文献:

[1] 暴景阳,刘雁春.海道测量水位控制方法研究[J].测绘科学,2006,31(6):49-51.

[2] 徐永斌,黄辰虎,申家双,等.潮汐对多波束测深的影响及改正[J].海洋测绘,2008,28(2):29-32.

[3] 赵建虎,张红梅, Hughes Clarke J E.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):1067-1070.

[4] 赵建虎,王胜平,张红梅,等.基于 GPS/PPP 的长距离潮位测量[J].武汉大学学报:信息科学版,2008,33(9):910-913.

[5] 阳凡林,赵建虎.GPS 验潮中波浪的误差分析和消除[J].海洋测绘,2003,23(3):1-4.

[6] 赵建虎,董江,柯灏,等.远距离高精度 GPS 潮汐观测及垂直基准转换研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2015,40(6):761-766.

[7] 彭琳,刘焱雄,吴永亭,等.海洋测绘中船体姿态改正误差分析[J].海洋通报,2007,26(1):28-34.

- [8] 李家彪.多波束勘测原理技术与方法[M].北京:海洋出版社,1999.
- [9] 欧阳永忠,陆秀平,孙纪章,等.GPS 测高技术在无验潮水深测量中的应用[J].海洋测绘,2005,25(1):6-9.
- [10] Alkan R M. The role of pitch and roll effects on the short period instantaneous sea level height determination with GPS[S/OL].http: //www.thsoa.org/pdf/h01/.
- [11] 刘雁春.海洋测深空间结构及其数据处理[D].武汉:武汉测绘科技大学,1998.
- [12] Fang G H, Kwok Y K, Yu K J, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand[J]. Continental Shelf Research,1999,19(7):845–869.
- [13] Zu T T, G an J P, Erofeeva S Y. Numerical study of the tide and tidal dynamics in the South China Sea [J]. Deep-Sea Research Part I (Oceanography Research Papers),2008,55(2):137-154.
- [14] Shi M C, Chen C S, Xu Q C, et al. The role of Qiongzhou Strait in the seasonal variation of the South China Sea circulation [J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 32(1):103–121.
- [15] 陈达森,陈波,严金辉,等.琼州海峡余流场季节性变化特征[J].海洋湖沼通报,2006(2):12-17.
- [16] 赵焕庭,王丽荣,袁家义.琼州海峡成因与时代[J].海洋地质与第四纪地质,2007,27(2):33-40.
- [17] 侍茂崇,严金辉,陈波,等.琼州海峡夏季三塘潮流谱分析和余流特征研究[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2011,41(11):1-4.

Determination and Analysis of the Instantaneous Tide Level of Sounding Point Based on GPS PPK

WANG Zheng-jie¹, WANG Feng², WU Zi-yin¹, CAO Zhen-yi³, LUO Xiao-wen¹, LI Shou-jun¹

- 1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institude of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, Zhejiang Province, China;
- 2. Zhe Jiang Engineering Geophysical Prospecting and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310005, Zhejiang Province, China;
- 3. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institude of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, Zhejiang Province, China

Abstract: Tide level is one of the main errors that affect the accuracy of underwater topographic survey. Accurate tide level information is directly related to the correctness of tide level correction. The ellipsoidal height of GPS antenna obtained based on the GPS PPK technology firstly undergoes vertical reference conversion. Then it uses the estimated attitude correction formula and the dynamic draught obtained by the pressure tide gauge to correct the attitude and draught. Finally, it adopts wavelet transform to perform wave filtering to obtain the precise instantaneous tide level at the sounding point. Taking the Qiongzhou Strait as the experimental sea area, and using the above method to obtain the instantaneous tide level of the sounding point and comparing with the tide level calculated by the traditional tide model, it is found that the two methods are not consistent, and the tide level trend obtained by the former method has a strong correlation with the course of the ship. Through the analysis of tidal current characteristics in the survey area, the analysis results are proved to be consistent with the measured results, which show that GPS PPK can obtain the tide level of the area and reflect the tidal characteristics of the area.

Key words: GPS PPK tidal level; tidal level correction; tidal model; instantaneous tide level