

测船处瞬时潮位的 GPS 精密确定

赵建虎¹ 张红梅² John E. Hughes Clarke³

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学动力与机械学院, 武汉市东湖南路 8 号, 430072)

(3 海洋图形研究组, 新布伦兹维克大学, 加拿大)

摘要: 利用 GPS 载波相位差分测量技术, 借助时间偏差改正、姿态改正、高程转换、信号处理和吃水改正, 获得了测船处精密在航潮位。该方法已在几个 GPS 在航潮位测量实验中得到了验证, 并取得了理想的结果。

关键词: GPS 潮位; 时间偏差改正; 姿态改正; 高程转换; 信号处理

中图分类号: P228.42; P229.3

测船处潮位通常是利用验潮站观测潮位, 通过潮位模型内插获得。在一些水域该方法可能会导致较大的潮位模型误差, 并给水下水地形测量带来较大的影响。GPS 潮位测量在近几年已经陆续地投入到实际应用中, 验潮站处的 GPS 潮位测量虽然增强了潮位观测的连续性和可靠性, 但仍未摆脱潮位模型误差的影响; 有文献阐述了在航 GPS 潮位测量的思想, 但其数据处理不甚严密。

1 GPS 潮位观测

三台 Trimble GPS 5700 接收机被用于船载 GPS 潮位测量, 其中两台 GPS 接收机被用作流动台分别安置在船艏和船尾, 它们在船体坐标系 VFS (vessel frame system) 下的杠杆臂已知; 另一台被用作参考站, 架设在已知点上。为了确保 GPS 潮位测量的准确性和连续性, 两台流动站 GPS 接收机分别采用不同的作业模式。其中船艏 GPS 采用 PPK (post processing kinematic), 船尾 GPS 采用 RTK (real time kinematic)。在潮位测量中, 三台 GPS 接收机的采样率均设置为 1 Hz。

为了精确计算潮位, 船体姿态参数需要被测定。在 GPS 潮位测量时, 动态传感器 MRU (motion reference unit) 中的姿态参数被多波束系统

实时提取, 并标定为多波束系统时间。为了获得精确的初始整周模糊度, 以确保 PPK 的测量精度, 在潮位测量前后, 锚定测船, 实施 10~15 min 的 GPS 静态观测。为评定 GPS 潮位测量的精度, 在测量期间, 还提取了实验水域各个验潮站的潮位数据。

2 时间偏差改正和姿态改正

船姿的瞬时变化改变了 GPS 天线在船体坐标系中的位置, 为精确地确定潮位, 必须进行姿态改正。MRU 输出的姿态参数被多波束系统提取并标定, 因而, 它们具有多波束系统时间。因为多波束系统时钟的初始设定误差和时钟的漂移, 多波束系统时间和 GPS UTC 时间必然存在着一定的偏差 (图 1), 并严重地影响着与 GPS 高程时序匹配的姿态参数的提取, 因而必须进行时间偏差改正。

多波束测量中, GPS NMEA-0183 导航电文被连续地提取到多波束系统中, 并以两种不同的形式存储: 为原始的 NMEA-0183 电文, 且被单独存储成一个后缀为 NMEA 的文件; 仅提取了电文中的平面位置信息, 并形成一個后缀为 NAV 的文件。这就意味着, 相同的位置信息被存储在两个不同的时序中, 且分别被标定为 UTC

收稿日期: 2006-08-20。

项目来源: 加拿大自然科学基金资助项目 (2003); 山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室开放研究基金资助项目 (SD060808)。

时间(NMEA 时序)和多波束系统时间(NAV 时序)。利用这种数据存储方式,通过比较 NMEA 时序和 NAV 时序便可计算出时钟偏差 Δt 时序。

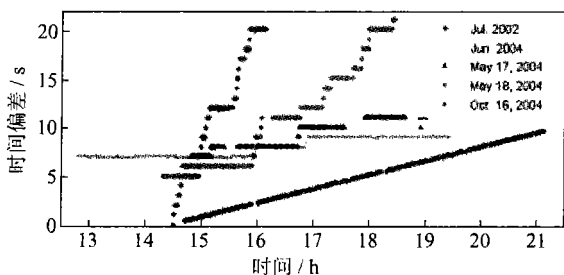


图1 多波束与 GPS 系统间时钟偏差

Fig.1 Time Offset Between Multibeam System Clock and GPS Clock

获得时钟偏差时序以后,便可将姿态参数所标定的多波束系统时间转化为 UTC 时间,并与 GPS 高程时序实现严格匹配,以用于姿态改正。

姿态改正在船体坐标系 VFS 下进行。理想情况下(横摇 r 、纵摇 p 和航向偏差均为 0),若 GPS 天线与换能器间的初始杠杆臂为 (x_0, y_0, z_0) ,受船姿影响变化为 (x, y, z) ,则实际杠杆臂为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由 GPS 确定的换能器处的瞬时高程 H_p 为:

$$H_p = H_{GPS} + z \quad (2)$$

式中, H_{GPS} 为 GPS 天线处的瞬时高程。

3 潮位的确定

3.1 联合 Heave 信号确定换能器处的瞬时高程

在多波束测量中,MRU 输出的 Heave(涌浪参数)同 GPS 一样监测着船体的上下垂直运动。Heave 观测时序反映的是一种相对变化,具有零均值特征。其信号周期小于 15 s,且在这一观测周期段内,观测数据具有很强的稳健性。基于上述特点,可将 Heave 信号与前面通过 GPS 高程数据获得的换能器处的瞬时高程进行联合处理,呈现换能器处的实际垂直运动。

GPS 的观测周期为 1 s,其观测信号可呈现周期大于 2 s 的垂直运动波。考虑两者具有公共的周期分布(2 s~15 s),信号提取中的截止频率

定义为 10 s。即从 H_p 中提取出周期大于 10 s 的信号 H_{L-rp} 和从 Heave 信号中提取出周期小于 10 s 的 $H_{H-Heave}$ 信号,并合成一个反映换能器实际垂直运动的全周期段信号 H'_p 。信号提取通过 FFT (fast fourier transformation) 高通和低通滤波器来实现:

$$H'_p = H_{L-rp} + H_{H-Heave} \quad (3)$$

上述方法提取出了原始 GPS 高程信号中的中、长波项,并利用了 Heave 信号中的短波项,因而,合成信号恢复和滤除了原始 GPS 高程时序中出现的信号中断和异常,真实呈现了换能器的实际垂直运动。

Heave 和 GPS 监测的是同一垂直运动,因而 Heave 信号可用于发现和修正异常的 GPS 高程信号,以确保 H_p 的质量。

3.2 高程转换

GPS 测量的是大地高,而潮位通常以海图高来描述,为此,须将大地高转换为海图高。海图基准通常建立在低低潮的基础上,并同已知水准点进行了联测,因而海图基准高程通常用正常高来表示。基于上述分析,高程转换需通过两步来实现,即从大地高转换为正常高再转换到海图高。

对于第一步转换,国内外文献已经给予了广泛的研究。考虑所研究河段 GPS 水准点分布比较密集、均匀,加之高程异常的变化相对比较小,根据文献[1, 2],笔者采用纯几何法获得区域的大地水准面模型,并实现 H'_p 向正常高 H^o 的转换:

$$H^o(B, L) = H'_p(B, L) - f(B, L) \quad (4)$$

式中, f 是与位置 (B, L) 相关的曲面或曲线函数。

对于第二步转换,由于海图基准的定义是离散的且具有很强的地域性特征,正常高向海图高的转换需要建立一个连续的海图基准高程模型。该模型可通过下面给出的横断面线性内插模型来确定。如图 2 所示,对于相邻两个海图基准定义点 $T_1(x_1, y_1)$ 和 $T_2(x_2, y_2)$,则位于 T_1 和 T_2 河段间的任意一点 $P(x, y)$ 在 $T_1 T_2$ 连线上的投影点 P' 的坐标 (x', y') 为:

$$x' = \frac{x + k_0 y - k_0 b_0}{k_0^2 + 1}, y' = k_0 x' + b_0 \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, b_0 = y_1 - k_0 x_1$$

如果 T_1 和 T_2 上的海图基准高程分别为 h_1^c 和 h_2^c ,则 P 点的海图基准高程 h_p^c 为:

$$h_p^c = h_1^c + S_{T_1 P} \frac{(h_2^c - h_1^c)}{S_{T_1 T_2}} \quad (6)$$

式中, $S_{T_1 P}$ 为 T_1 到 P 之间的距离; $S_{T_1 T_2}$ 为 T_1 和

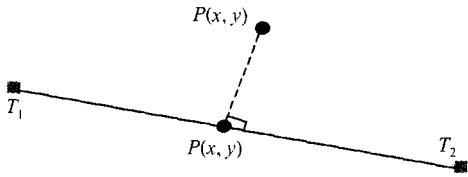


图 2 横断面线性内插

Fig. 2 Cross-section Linear Interpolation

T_2 之间的距离。

在获得了海图基准高程的内插模型后, 便可实现正常高 H^o 向海图高 H^c 的转换:

$$H^c(B, L) = H^o(B, L) - h^c(B, L) \quad (7)$$

3.3 测船处 GPS 潮位的确定

换能器处的高程变化是瞬时的, 它随着船体的上下起伏而变化, 即潮位反映的是一个稳定变化的水位面。事实上, 换能器处的瞬时高程包含了对实际潮位起伏变化的反映, 为了获得实际潮位, 就必须对该瞬时高程时序进行滤波处理。

换能器处瞬时高程时序呈现的是一个复杂的综合性信号, 包含了换能器随潮位变换的中长周期项和随波浪起伏变化的短周期项信号。为了获得实际潮位, 就必须对中长周期项进行提取。潮位提取采用 FFT 低通滤波器来实现。潮位变化周期至少为 $30 \text{ min}^{[1]}$, 则该参数可设置为信号提取中的截止周期。

从 H^c 中提取出的中长周期信号 H^{T-LF} 并不是实际的潮位信号, 但反映了潮位变化的趋势, 而实际潮位 H_T 还需借助静吃水 $\Delta H_{s-Squat}$, 将 H^{T-LF} 归算到理想水位面才能获得:

$$H_T = H^{T-LF} + \Delta H_{s-Squat} \quad (8)$$

4 实践和分析

2004 年 5 月 18 日, Ocean Mapping Group 在 Saint John 河段进行了 GPS 在航潮位测量实验。在这个实验中, RTK 和 PPK 两种数据采集和处理模式分别在船尾和船艏 GPS 接收机中采用。RTK 高程解直接从其输出的 NMEA-0183 GPK 电文中提取; PPK 高程解则需经过基线解算、坐标转换后获得。

比较这两台 GPS 接收机天线相位中心处的大地高(从图 3(a))可以看出, 它们在整体上几乎呈现相同的起伏变化, 但在高程方向上还存在着约 40 cm 的分离。分析认为, 这两台 GPS 接收机天线在船体坐标系下有着不同的杠杆臂, 其中船艏天线的杠杆臂为 $(-0.386 \text{ m}, 0.014 \text{ m}, 4.072$

$\text{m})$, 船尾天线的杠杆臂为 $(-4.769 \text{ m}, -0.414 \text{ m}, 3.832 \text{ m})$ 。将大地高转换为海图高(图 3(b)), 高程转化后的时序与原时序在波形和幅度上都存在着较大的变化, 惟一不变的是 PPK 和 RTK 高程时序在垂直方向上的分离量。该分离量一方面与两 GPS 天线初始杠杆臂在 z 方向的差异有关, 另一方面与姿态的影响有关。

为了消除该分离, 首先确定 GPS UTC 时间与多波束系统时间的偏差时序(图 1), 进行时间偏差改正和姿态改正, 并借助于 Heave 信号, 利用信号合成获得换能器处的海图高程时序(图 3(b))。比较图 3(a) 和 3(b) 可以看出, 信号合成剔除了异常的高程信号, 并填补了因信号中断而造成的记录空白, 真实呈现了换能器的实际垂直运动。

分别对换能器处 PPK 和 RTK 瞬时高程时序进行滤波, 提取出周期大于 30 min 的中长周期信号, 剔除瞬时运动的短周期信号, 使换能器处的高程时序曲线变得光滑(图 3(c)); 对图 3(c) 中的 PPK 和 RTK 高程中低频信号附加吃水改正, 获得最终的 GPS 潮位(图 3(d))。从图 3(d) 可以看出, PPK 潮位、RTK 潮位以及潮位模型所得潮位(参考潮位)都保持了较高的一致性。PPK 潮位(图 3(d))与参考潮位偏差绝对值的最大值为 5.0 cm, 最小为 0.1 cm, 标准偏差为 $\pm 1.9 \text{ cm}$; RTK 潮位与参考潮位偏差绝对值的最大值为 5.1 cm, 最小为 0.3 cm, 标准偏差为 $\pm 2.9 \text{ cm}$ 。由于实验

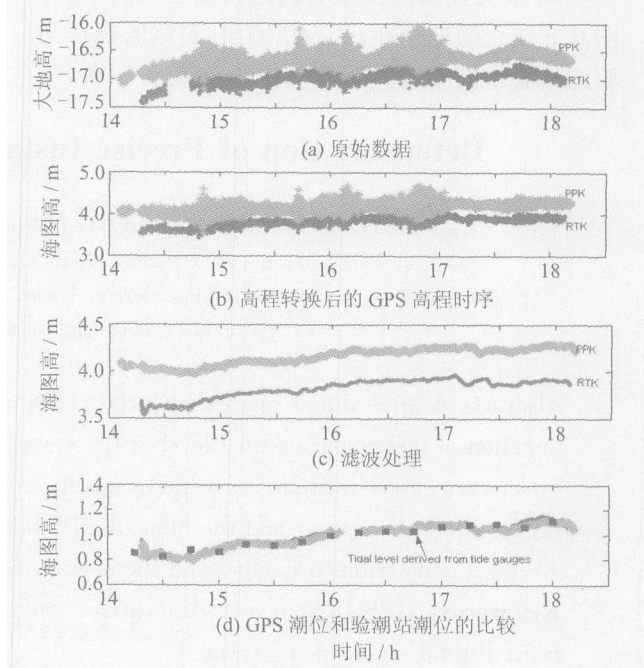


图 3 GPS 潮位解算过程

Fig. 3 Data Processing Procedure in Calculating GPS Tidal Level

河段潮位基本呈线性变化,潮位模型所得船位处潮位可以认为真实地反映了实际的水位变化,因而, GPS 潮位与参考潮位的一致性表明了上述数据处理方法的正确性。

另一个往返程 GPS 在航潮位测量实验在一个大约 30 km 的河段上进行。考虑到无线电信号可能受河流形状和两岸植被的影响,仅采用了 PPK 观测和数据处理模式。数据处理结果表明,在往程测量中, GPS 潮位和参考潮位间偏差绝对值的最大值为 10.2 cm,最小为 0.2 cm,标准偏差为 ± 2.8 ; 在返程测量中,两潮位差绝对值的最大值为 8.5 cm,最小为 0.7 cm,标准偏差为 ± 2.1 。该实验的最终精度评定结果也进一步证明了本文所述 GPS 潮位测量和数据处理方法的正确性。

5 结 语

1) GPS 在航潮位测量能够实时、准确地给出船位处水位的真实变化,有效地克服了传统潮位测量的局限,彻底消除了潮位模型误差对传统水下地形测量的影响。

2) 不同于以往的 GPS 潮位数据处理,基于信号合成技术,真实呈现了换能器的实际垂直运动,进而获得潮位,最大限度地削弱了 GPS 测量误差对潮位精度的影响。该方法对于潮位独立的水下地形测量也具有很强的借鉴意义。

3) 本文提出的横断面线性内插法,保证了海图基准变化的连续性,从而使 GPS 实测的潮位同验潮站获得的潮位在垂直基准上实现了一致,便

于 GPS 潮位的应用。该方法也可推广于类似应用中的高程转换。

4) PPK 潮位测量模式避免了无线电信号传播受地形因素的影响,同时由于采用了精密星历和最优的基线解算参数,因而,高程解算精度和数据的连续性都优于 RTK 潮位解,在不需要实时潮位的情况下,值得推广应用。

参 考 文 献

- [1] 赵建虎,刘经南,张红梅. 顾及非格网数据考虑地形改正的 GPS 高程拟和方法研究[J]. 武汉测绘科技大学学报: 1999, 24(4): 346-350
- [2] 高伟,徐绍铨. GPS 高程分区拟合转换正常高的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(10): 908-911
- [3] 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
- [4] 赵建虎. 多波束深度及图像数据处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002
- [5] Chang C C, Lee H W, Tsui I F. Preliminary Test of Tide-independent Bathymetric Measurement Based on GPS[J]. Geomatics Research Australia, 2002, 76: 23-36
- [6] 于波,刘雁春,肖付民,等. 海洋磁力测量中确定最佳拖曳距离的一种方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(11): 1 003-1 006

第一作者简介: 赵建虎,副教授,博士,主要从事海洋测量的研究和教学工作。

E-mail: jhzhao@sgg.whu.edu.cn

Determination of Precise Instantaneous Tidal Level at Vessel

ZHAO Jianhu¹ ZHANG Hongmei² John E. Hughes Clarke³

(1 School of Geomatics and Geodesy, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430070, China)

(2 School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, 8 South Donghu Road, Wuhan 430072, China)

(3 Ocean Mapping Group, University of New Brunswick, Canada)

Abstract: A kind of new method, which is GPS tidal level measurement, is presented for the determination of instantaneous tidal level at the vessel. The data processing procedure includes the time offset correction, attitude correction, quality control of GPS height; fusion of GPS height and heave, draft correction, and the filter of GPS tidal level. After these processing, precise tidal level at vessel is determined finally, and the new method is also proved by few experiments.

Key words: GPS tidal level; time offset correction; attitude correction; height transformation; digital signal processing