

近岸海域 GPS 在航潮位解算中 潮位的提取方法研究

马飞虎^{1,2} 赵建虎¹ 王胜平¹ 鄂栋臣^{1,2}

(1 武汉大学中国南极测绘研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 极地测绘科学国家测绘局重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:基于潮位提取理论,给出了三种潮位提取方法,通过与实际观测潮位的比较和分析,认为基于快速傅立叶变换(fast Fourier transform,FFT)的潮位提取方法最佳,实验也证实了该结论的正确性。

关键词:GPS 潮位;有限冲激响应(finite-impulse response, FIR)数字滤波器;低通滤波器;快速傅立叶变换(FFT)

中图法分类号:P228.41; P229.2

海上作业时,为了获得测船处的潮位,传统的方法是利用近岸附近的验潮站观测潮位,然后通过潮位模型内插获得。随着 GPS RTK/PPK^[1]技术的普及,目前,一种新型的潮位测量方法即 GPS 在航潮位测量,已成为研究热点^[2]。

本文结合 GPS 潮位的测量思想和潮位理论,对三种 GPS 在航潮位提取方法进行了研究,并期望得到一个具有普适性的方法,以用于实际。

1 GPS 在航潮位测量及数据处理流程

GPS 在航潮位测量的主要思想是基于 GPS 载波相位差分处理技术得到 GPS 天线的平面位置及高程,然后通过测定 GPS 天线到水面的高差,进而计算测船处瞬时水面的高程,并从该瞬时高程中提取出潮位。其数据处理流程如下。

1) GPS 天线处的高程滤波。GPS RTK/PPK 测量中,由于无线电传输、卫星失锁等因素易引起 GPS 高程信号异常和中断,进而影响潮位的准确提取,为此,必须对 GPS 垂直解进行滤波处理。

2) 瞬时海面高程的获取。由于 GPS 所测的高程为天线相位中心的高程,而潮位反映的是海面的变化,为此,需要将 GPS 天线处的高程通过

姿态改正转换到海面,进而获得瞬时海面高程。瞬时海面高程是潮位提取的基础。

3) 高程转换。由于 GPS 提供的是大地高,而潮位一般采用基于海面深度基准面的潮位高,因此,必须进行高程转换。

经过以上三步处理,就获得了测船处的瞬时海面高程序列。该高程序列的变化是瞬时的,是波浪、船体上下起伏变化和潮位等因素综合作用的结果,为了获得实际潮位,就必须对该瞬时高程时序进行处理,以提取出正确的潮位。

2 GPS 在航潮位数据的提取方法

瞬时海面变化包含了周期性的长周期潮位变化、中长周期的潮波和海浪的变化以及短周期的船体操纵引起的船体上下起伏的变化^[2]。潮位项为长周期项,周期最小也大于 1 h;涌浪影响为短波项,周期为 10~60 s^[3]。为此,在获得瞬时海面高程后,需要通过信号处理,从中提取出需要的长周期潮位。

下面研究三种滤波器^[4]对综合信号中的中、长周期项提取的方法,最终获得潮位。

2.1 窗函数法 FIR 滤波器

FIR 数字滤波器是一类重要的数字滤波器,

使用数字方法实现滤波对工程实际具有重要的实用价值。FIR 滤波器的设计问题就是使设计的滤波器的单位采样响应 $h(n)$ 逼近理想滤波器的单位采样响应 $h_d(n)$ 。由于理想的选频滤波器的频率响应是逐段恒定的,且在边界有不连续点,因此, $h_d(n)$ 一定是无限长的序列,且是非因果的。而实际中要设计的 FIR 滤波器,其 $h(n)$ 必然是有限长的,且是因果可实现的,所以要用有限长的 $h(n)$ 来逼近无限长的 $h_d(n)$,最有效的方法就是截断 $h_d(n)$,或者说用一个有限长度的窗口函数序列 $w(n)$ 来截取 $h_d(n)$,即

$$h(n) = w(n)h_d(n)$$

(1)

因此,窗函数序列的形状及长度的选择就非常关键。

本实验采用加海明窗的 FIR 低通滤波器。海明窗又称为改进的升余弦窗,对升余弦窗加以改进,可以得到旁瓣更小的效果。其窗函数为:

$$w(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \left(\cos \frac{2\pi n}{N-1} \right), & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(2)

式中, N 为窗口序列长度; n 为序列。

2.2 Butterworth 低通滤波器

Butterworth 低通滤波器是一类重要的归一化模拟低通滤波器,具有通带最平幅度逼近的特性,是一全极点型滤波器,且极点均匀分布在 Ω_c 的圆上,并且与虚轴对称。其最主要的特点是在通带内,幅频最平坦,且随着频率的升高而单调下降。其幅方函数为:

$$A^2(\Omega) = 1/[1 + (\Omega/\Omega_c)^{2N}]$$

(3)

式中, N 为整数,表示滤波器的阶次; Ω_c 定义为截止频率。

2.3 基于快速傅立叶变换(FFT)的低通滤波器

离散傅立叶变换(DFT)是利用数字计算机对信号进行分析提取的理论依据,但直接使用 DFT 定义计算信号频谱时,计算量太大,尤其在工程实际中,往往要求数字信号处理系统具有相应的实时性,大的运算量将无法保证系统的实时性。而 FFT 是以较少的计算量实现 DFT 的快速算法,它使理论变成了实践,是数字信号处理领域中的一项重大突破。其滤波的数学表达式是:

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v)$$

(4)

式中, $F(u,v)$ 是原始信号的傅立叶频谱; $G(u,v)$ 是平滑后信号的傅立叶频谱; $H(u,v)$ 是滤波器的转移函数。因此,使用低通滤波器对高频成分进

行抑制,可以达到消除噪声的作用。

2.4 三种方法的比较

FIR 数字滤波器虽然稳定,但存在两个主要的缺点:① 必须用很长的冲激响应滤波器才能很好地逼近锐截止的滤波器,这意味着需要很大的运算量,因而要取得很好的衰减特性,FIR 滤波器的阶数就要高;② 频带范围需要预先设定,在事先未知信号特点时,难以准确地设定滤波器的参数。

Butterworth 低通滤波器通带最大衰减是固定的 3 dB,这意味着应用这种滤波器时,在通带中不可能得到比 3 dB 更小的最大衰减,会出现不可能达到逼近预定指标的情况。

FFT 滤波法先对处理信号进行 FFT 变换,得到频谱分布,然后根据设定的频谱门限频率,把所有大于门限频率的值置零,再反变换到时域,这样就明显抑制了干扰,很好地反映出实际信号。

为验证上述理论分析的正确性,从实验数据中截取了 3 h 的瞬时海面高程序列,利用以上三种滤波器进行信号滤波处理,并提取潮位。各种方法所得的潮位及与潮位站潮位的比较结果分别如图 1、图 2 及表 1 所示。由于篇幅有限,表 1 列出的仅为 0.5 h 间隔的潮位差。

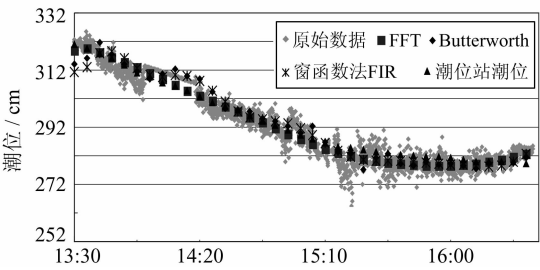


图 1 三种方法得到的 GPS 潮位与潮位站潮位的比较

Fig. 1 Comparison of Tidal Reading and GPS Tides Calculated by Three Methods

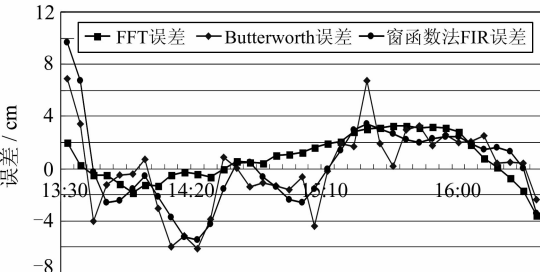


图 2 三种方法得到的潮位误差曲线图

Fig. 2 Error Curve of GPS Tides Calculated by Three Methods

表 1 三种方法提取的 GPS 潮位相对潮位站潮位的偏差分布

Tab.1 Distribution of GPS Tides Acquired by Three Methods/cm

| | FFT 提取的 潮位偏差/cm | FIR 提取的 潮位偏差/cm | Butterworth 提取 的潮位偏差/cm |
|-------|--------------------|--------------------|----------------------------|
| 13:30 | 1.96 | 9.69 | 6.90 |
| 14:00 | -1.27 | -0.57 | 0.72 |
| 14:30 | -0.02 | -1.57 | 0.86 |
| 15:00 | 1.23 | -2.55 | -0.66 |
| 15:30 | 3.12 | 3.09 | 1.91 |
| 16:00 | 2.80 | 2.44 | 2.02 |
| 16:30 | -3.55 | -3.44 | -2.35 |
| 最大偏差 | 3.55 | 9.69 | 6.90 |
| 最小偏差 | 0.02 | 0.01 | 0.03 |
| RMS | ±1.91 | ±3.10 | ±3.01 |

从比较结果中可以看出,滤波数据从较小值逐渐升至正常的值,也就造成了 GPS 验潮值与实际观测值的初始差值较大,这主要是因为信号没有输入之前,滤波器的输入为 0,在信号输入后,滤波器有一个达到稳定的过程,这个过程有可能短,也有可能长,这取决于滤波器的特性。除了这个较大的差值外,其余的点都符合得较好,而三种滤波器中又以基于 FFT 的低通滤波器的效果最好。

3 实验分析

为了检验基于 FFT 的低通滤波器提取潮位的可行性和正确性,本文进行了海上实测,其中,基准站到流动站的最大航行距离为 18 km。具体实测过程如下:采用三台 Trimble 4700 GPS 接收机,其中一台接收机用作基准站,基准站上的 GPS 接收机采用 RTK 测量模式;另两台 GPS 接收机架设在船上,用于 RTK 测量及 PPK 测量,中间位置的无线电鞭状天线用于接收来自基准站的无线电差分信号。在潮位测量中,三台 GPS 接收机的数据存储间隔均设置为 5 s,RTK 定位间隔设置为 1 s。TSS 姿态传感器安置在近于船舱的中央位置,该位置即近似为测量船的重心位置。TSS 的采样频率设置为 5 Hz。在 GPS 在航潮位测量的同时,还进行了传统的潮位站潮位观测。

野外数据采集完成后,从原始观测数据中提取 GPS RTK/PPK 三维定位数据(平面和高程)、姿态数据(纵摇 Pitch、横摇 Roll 和涌浪参数 Heave)以及不同传感器采样时刻的时间,而 PPK 定位数据则通过后处理解算获得。

利用上述数据处理方法首先对原始观测数据进行处理,然后利用基于 FFT 的滤波器对瞬时海面高程进行滤波,提取潮位,最终得到 GPS 在航潮位。

为与连续的 GPS 潮位结果对应,对潮位站潮位进行了内插处理,并将结果与 GPS 潮位进行比较。潮位站潮位和 RTK 潮位的结果比较如图 3 所示。

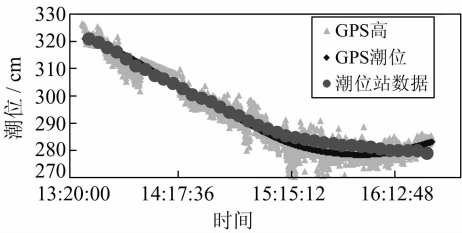


图 3 潮位站潮位和 RTK 潮位的比较
Fig. 3 Comparison Between RTK Tidal Level and Tidal Reading

若以潮位站内插潮位为参考,则 GPS RTK 潮位的误差分布如图 4 所示。从 13:30 至 16:30,每隔 0.5 h 的 GPS RTK 潮位与潮位站内插潮位之差分别为 2.0 cm、-1.3 cm、1.2 cm、3.1 cm 和 -3.6 cm。

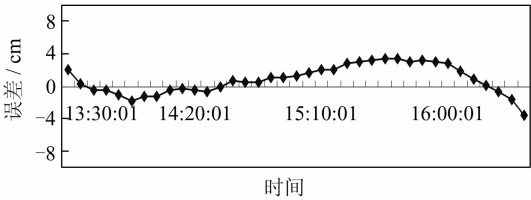


图 4 GPS RTK 潮位与潮位站内插潮位之差的分布曲线
Fig. 4 Error Distribution Curve of GPS RTK Tide and Tidal Reading

统计图 4 中的数据可以发现,基于 FFT 的滤波器提取的 GPS RTK 潮位的最大偏差为 3.6 cm,最小为 0.0 cm,均方根为 1.91 cm。这些参数表明,在 18 km 范围内,GPS RTK 潮位和潮位站内插潮位具有很好的一致性。

类似地,利用 GPS PPK 解算得到的瞬时水面高程、基于 FFT 的滤波器提取的 GPS PPK 潮位以及根据潮位站内插得到的测量船位置的潮位如图 5 所示。

比较 GPS PPK 潮位和潮位站内插潮位,可得 GPS PPK 潮位的误差分布曲线如图 6 所示。从 11:45 至 13:35,每隔 0.5 h 的 GPS PPK 潮位与潮位站内插潮位之差分别为 3.8 cm、0.2 cm、

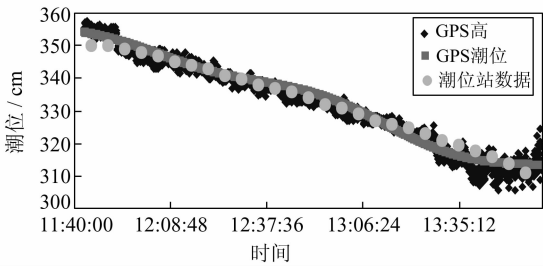


图 5 潮位站潮位和 PPK 潮位的比较
Fig. 5 Comparison Between PPK Tidal Level and Tidal Reading

1.4 cm、1.1 cm、-3.4 cm。

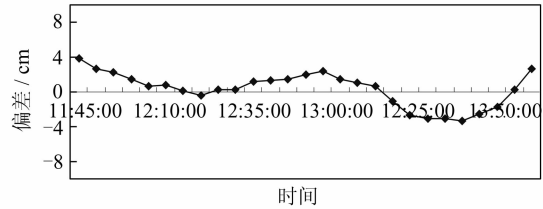


图 6 GPS PPK 潮位与潮位站内插潮位之差的分布曲线

Fig. 6 Error Distribution of Curve GPS PPK Tide and Tidal Reading

从图 5 和图 6 可以看出,GPS PPK 潮位的最大偏差为 3.8 cm,最小为 0.2 cm,均方根为 1.97 cm。这些参数进一步表明了基于 FFT 滤波器提取的 GPS PPK 潮位和潮位站内插潮位具有很好的一致性。

4 结 语

1) GPS 在航潮位是由船载 GPS 天线的高程解算得到的,其呈现的是一个复杂的综合性信号,为了获得测船处的实际潮位,必须采用恰当的方法对该信号进行处理,信号处理技术是在航潮位提取的一种有效方法。

2) 通过对窗函数法 FIR 滤波器、Butterworth 低通滤波器以及基于 FFT 的低通滤波器的研究和实践,认为基于 FFT 的低通滤波器提取的潮位精度相对较好,故在实际工程应用中建议采用该滤波器。

参 考 文 献

[1] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社,2003

[2] 赵建虎,张红梅, Hughes Clarke J E. 测船处瞬时潮位的 GPS 精确定义[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(12):1 067-1 070

[3] 刘雁春. 海洋测深空间结构及其数据处理[M]. 北京: 测绘出版社,2003

[4] 吴镇扬. 数字信号处理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004

第一作者简介:马飞虎,博士生。主要从事 GPS 和海洋测量以及相关极地科学方面的研究。
E-mail:mfh@whu.edu.cn

Research on Methods of Extracting On-the-Fly Tidal Level from GPS Observation in Near-shore Area

MA Feihu^{1,2} ZHAO Jianhu¹ WANG Shengping¹ E Dongchen^{1,2}

(1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, School of Geodesy Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

(2 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, SBSM, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

Abstract: Based on the extraction of tide level theory, three methods of extraction of tide level are given. Through comparison and analysis with the actual observations, it can be concluded that the method based on FFT is best; and the experimental results show the correctness of the conclusions.

Key words: GPS tidal level; finite-impulse response digital filter; lowpass filter; fast Fourier transform(FFT)