DOI:10.14075/j.jgg.2015.05.009　　**文章编号**:1671-5942(2015)05-0768-03

基于 TRACK 的 GPS 海浪测量方法

王俊杰[1]　何秀凤[1]　刘焱雄[2]

1　河海大学卫星及空间信息应用研究所,南京市西康路 1 号,210098
2　国家海洋局第一海洋研究所,青岛市仙霞岭路 6 号,266061

摘　要:针对现有 GPS 海浪测量技术的不足,提出基于 TRACK 的 GPS 海浪测量方法,即利用 TRACK 解得海上载体高精度的垂向位移,经浪潮分离提取海浪信号,采用周期图法估计海浪信号的功率谱,计算海浪要素。利用实测数据进行实验,结果表明,平均波高和平均周期与测波仪结果差异分别小于 2 cm 和 0.25 s,验证了本文方法的有效性。

关键词:GPS;海浪测量;TRACK;功率谱;周期图法
中图分类号:P229.2　　**文献标识码**:A

GPS 载波相位差分和 RTK 技术较早用于海浪测量,定位精度在亚 cm 级,但只能在近岸地区使用,有效范围仅 10～20 km[1-3]。为将测量范围拓展到远洋,Datawell 实验室提出利用 GPS 单点测速技术获取浮标的三维速度,并研制出 DWR-G 型测波浮标[4]。董东璟等人利用 GPS 测速信号的速度谱推算位移谱,反演得到海浪要素[5],但在高动态条件下,GPS 单点测速误差与载体的加速度存在很强的相关性,当加速度变大时,测速误差随之增大[6]。Bender 等人评价了 PPP 技术在海浪测量中的应用前景[7],但动态 PPP 技术模糊度采用浮点解[8],且其定位结果中有系统误差残留[9],不能得到高精度高采样率的海面变化结果。有学者提出用 GNSS 反射信号反演海浪波高,但仍处于岸基实验阶段,且反演的参数误差较大[10-12]。

TRACK 是 GAMIT/GLOBK 软件的广域动态差分定位模块,采用消电离层 LC 组合和 M-W 组合,并附加电离层延迟约束,逐历元固定模糊度,其定位结果为测站每个历元的三维坐标差及单位权中误差,从而获得移动测站的运动轨迹[13]。对于 100 km 以上的基线,TRACK 的定位精度在亚 cm 级[14],且 TRACK 的定位精度与站间距没有明显关系[15]。因此,利用 TRACK 进行海浪测量,能在一定程度上解决上述技术手段的缺陷。本文利用 TRACK 对海上载体的 GPS 数据进行处理,获得载体垂向位移时间序列,并对计算结果进行精度评定,提取垂向位移中的海浪信号,采用周期图法估计其功率谱,计算海浪要素,并利用测波仪结果验证本文方法的可靠性。

1　海浪要素的功率谱估计原理

海浪通常被视为各态历经的平稳随机过程,可用一个有限长的定点波面记录来估计该过程的谱[16]。记 $X(t)$ 为一随机过程,其自相关函数为:

$$R(\tau) = E[X(t+\tau) \cdot X(t)] \tag{1}$$

根据 Wiener-Khintchine 定理,随机过程的功率谱 $S(\omega)$ 是其自相关函数的 Fourier 变换[17]:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega\tau} \mathrm{d}\tau \tag{2}$$

其中,$\omega = 2\pi f$,ω 为圆频率,f 为频率。在各态历经的条件下,$X(t)$ 可代之以随机过程的任意一函数 $x(t)$。在海浪问题中,$x(t)$ 可理解为定点连续记录的波面。按周期图法有:

$$S(\omega) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{4T} \left| \int_{-T}^{T} x(t) \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t} \mathrm{d}t \right|^2 \tag{3}$$

然而,实际信号长度是有限的,对于长度为 T 的信号 $x(t)$,以时间间隔 Δt 采样得到 N 个数据 $x_n = x(t_n)$,$n = 0, 1, \cdots, N-1$,则功率谱相应的离散形式为:

$$\hat{S}(\omega_m) = \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega_m t_n} \right|^2 = \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n \mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi nm/N} \right|^2 \tag{4}$$

收稿日期:2014-10-08
项目来源:国家自然科学基金(41274017,40974001)。
第一作者简介:王俊杰,博士生,主要从事卫星导航与定位、GPS 气象学和 GNSS 海洋应用相关研究,E-mail:junjie.wang@hhu.edu.cn。

其中,$t_n=n\Delta t$,$\omega_m=m\Delta\omega$,$\Delta\omega$ 取以信号长度 T 为周期的简谐波的圆频率,即 $\Delta\omega=2\pi/T$。考虑到信号混叠的问题,且 $\hat{S}(\omega_m)$ 是 m 的偶函数,故取 $m=0,1,\cdots,N/2$。

用周期图法估计的谱曲线参差不齐,通常用矩形公式进行平滑,以 ω_m 及其左右各 p 个频率粗谱值的算术平均值作为 ω_m 的平滑谱值 $\tilde{S}(\omega_m)$:

$$\tilde{S}(\omega_m)=\frac{1}{2p+1}\sum_{i=-p}^{p}\hat{S}(\omega_{m+i}) \tag{5}$$

其中,p 近似取 $N/80\sim N/160$,不需要对前述所有 ω_m 进行上式的平滑手续,只需要在其中等间隔地挑出 $N/(2p+1)$ 个进行平滑[16]。由平滑的功率谱推算平均波高与平均周期:

$$\overline{H}=\sqrt{2\pi M_0} \tag{6}$$

$$\overline{T}=2\pi\sqrt{M_0/M_2} \tag{7}$$

其中,$\overline{H}$、$\overline{T}$ 分别为平均波高和平均周期,M_0、M_2 分别为功率谱的零阶矩和二阶矩。

2　实验结果与分析

在青岛近海的小型测量船上安装 GPS 接收机进行海浪测量。实验采用 Leica SR530 型接收机,扼流圈天线,采样率 1 Hz。在距船约 10 m 处放置 Datawell Waverider MKIII 型测波仪,以减小船体对测波仪观测的影响。测波仪的海浪周期测量范围为 1.6～30 s,波高测量误差为 0.5%。

选取与测波仪观测时间相吻合的 GPS 观测数据进行处理。以距青岛约 550 km 的 SHAO 站为参考站,利用 TRACK 解算得测量船上接收机的垂向位移时间序列,并以此表征海面情况。图 1 为 TRACK 解算结果的双差相位 RMS 频率分布直方图。可以看出,双差相位 RMS 近似服从 Γ 分布,值较小的双差相位 RMS 频率较大,且 99%以上历元的双差相位 RMS 小于 1 cm,验证了 TRACK 长距离定位精度在亚 cm 级的结论。

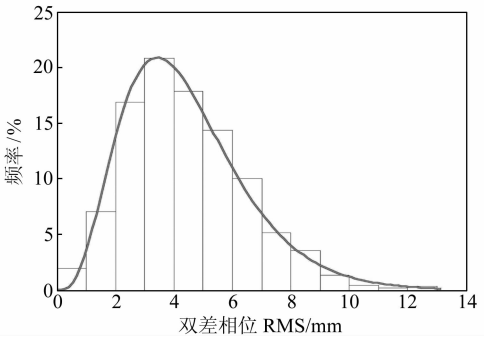


图 1　双差相位 RMS 频率分布直方图
Fig. 1　Frequency distribution histogram of double difference phase RMS

海面垂向位移时间序列主要包括低频的海潮信号、高频的海浪信号和观测噪声等因素。由于滑动平均法计算量小,处理效果明显,能够最大限度地保留潮位变化的物理过程,常用于浪潮信号的分离。采用滑动平均法对海面垂向位移时间序列进行处理,分离出海潮信号,如图 2 所示。进一步用海面垂向位移时间序列减去海潮信号,提取海浪信号,如图 3 所示。

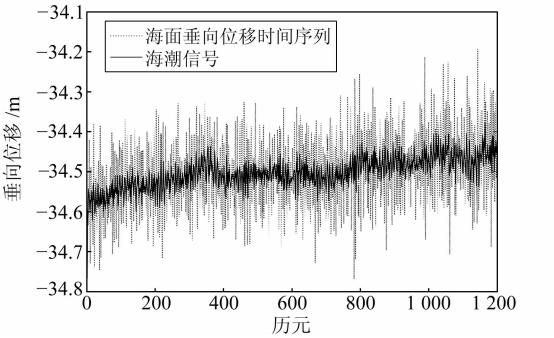


图 2　海面垂向位移时间序列及海潮信号
Fig. 2　Vertical displacement time series of sea surface and tide signal

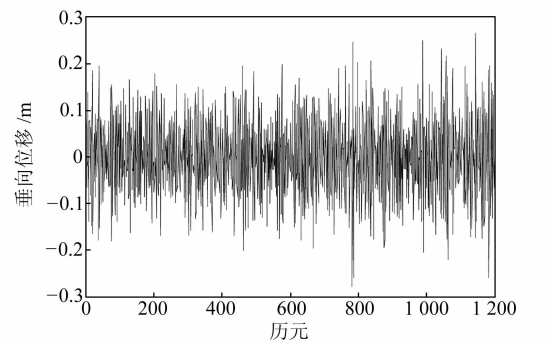


图 3　海浪信号
Fig. 3　Wave signal

海浪变化的最大周期约为 33 s[5,18],取功率谱的截止频率为 0.03 Hz,进一步滤除残余噪声的影响。用周期图法对海浪信号进行功率谱分析,绘制频率大于 0.03 Hz 的谱曲线,如图 4 所示。从图 4 可以看出,其谱曲线参差不齐,取 $p=N/120$ 进行粗谱平滑,平滑后的谱曲线如图 5 所示。

由平滑后的功率谱推算得平均波高和平均周期,如表 1 所示。可以看出,平均波高与测波仪结果相差不到 2 cm,平均周期与测波仪结果差异小于 0.25 s,可见实验结果是准确可靠的,基于 TRACK 的 GPS 海浪测量方法是可行的。实验中 GPS 接收机的采样率为 1 Hz,只能分辨频率小于 0.5 Hz 的海浪,缺乏频率大于 0.5 Hz 的海浪的功率谱曲线可能是导致实验结果偏差的主要原因。因此,为了获得更加准确的结果,测量时应使用采样率更高的接收机。此外,测量船具有一

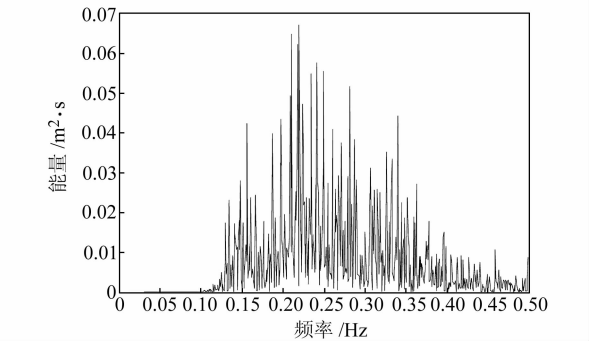


图 4 原始功率谱图
Fig. 4 Raw power spectrum

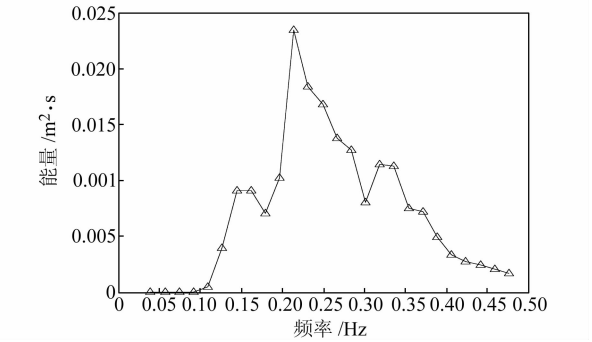


图 5 平滑后的功率谱图
Fig. 5 Smooth power spectrum

定的滤波能力,随波运动特性不如浮标,在一定程度上也导致了实验结果的偏差。

表 1 海浪要素测量结果比较

Tab. 1 Comparison of wave parameter results

海浪要素	测波仪	实验结果	误差
$\overline{H}$ /m	0.34	0.359 3	0.019 3
$\overline{T}$ /s	3.38	3.627 1	0.247 1

3 结 语

本文提出基于 TRACK 的 GPS 海浪测量方法,给出了该方法的技术流程,并通过实测数据反演得到准确可靠的海浪要素,验证了所提方法的有效性,并指出 1 Hz 以上的高频 GPS 数据是提高 GPS 海浪测量精度的关键因素。

参考文献

[1] Vries J J, Waldron J, Cunningham V. Field Tests of the New Datawell DWR-G GPS Wave Buoy [J]. Sea Technology, 2003, 44(12): 50-55

[2] Akiyoshi G, Kouguchi N. Wave Information by Precise Velocity Measurement Using GPS Buoy [C]. OCEANS 2012 MTS/IEEE Yeosu Conference, Yeosu, 2012

[3] Cardellach E, Behrend D, Ruffini G, et al. The Use of GPS Buoys in the Determination of Oceanic Variables [J]. Earth Planets and Space, 2000, 52(11):1 113-1 116

[4] Hayashi Y. Empirical Relationship of Tsunami Height between Offshore and Coastal Stations [J]. Earth Planets and Space, 2010, 62(3):269-275

[5] Doong D, Lee B, Kao C. Wave Measurements Using GPS Velocity Signals [J]. Sensors, 2011, 11(1):1 043-1 058

[6] 王甫红, 张小红, 黄劲松. GPS 单点测速的误差分析及精度评价[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007, 32(6):515-519 (Wang Fuhong, Zhang Xiaohong, Huang Jinsong. Error Analysis and Accuracy Assessment of GPS Absolute Velocity Determination with SA off [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(6):515-519)

[7] Bender L C, Howden S D, Dodd D, et al. Wave Heights during Hurricane Katrina: An Evaluation of PPP and PPK Measurements of the Vertical Displacement of the GPS Antenna [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(10):1 760-1 768

[8] 畅鑫, 左翔, 张伟. 动态 PPP 模糊度固定方法及实验分析 [J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014, 39(3):275-278 (Chang Xin, Zuo Xiang, Zhang Wei. The Experiment and Analysis of Zero-Difference Ambiguity Resolution for Kinematic PPP [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(3):275-278)

[9] 方荣新, 施闯, 辜声峰. 基于 PPP 动态定位技术的同震地表形变分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2009, 34(11):1 340-1 343(Fang Rongxin, Shi Chuang, Gu Shengfeng. Precise Point Positioning with High-Rate GPS Data Applied to Seismic Displacements Analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11):1 340-1 343)

[10] Soulat F, Caparrini M, Germain O, et al. Sea State Monitoring Using Coastal GNSS-R [J]. Geophys Res Lett, 2004, 31(21): 1-4

[11] 尹聪,曹云昌,朱彬,等. GNSS-R 信号测量海面有效波高的应用[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(6):36-40(Yin Cong, Cao Yunchang, Zhu Bin, et al. Application of Significant Wave Height Measurement Using GNSS-R Signals [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(6):36-40)

[12] 邵连军, 张训械, 王鑫, 等. 利用 GNSS-R 信号反演海浪波高[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2008, 33(5):475-478 (Shao Lianjun, Zhang Xunxie, Wang Xin, et al. Sea Surface Wave Height Retrieve Using GNSS-R Signals [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(5):475-478)

[13] MIT. TRACK: GPS Differential Phase Kinematic Positioning Program [EB/OL]. http://geoweb.mit.edu/~simon/gtgk/help/track.hlp.htm, 2011

[14] Avallone A, D'Anastasio E, Serpelloni E, et al. High-Rate (1 Hz to 20 Hz) GPS Coseismic Dynamic Displacements Carried out during the Emilia 2012 Seismic Sequence [J]. Annals of Geophysics, 2012, 55(4): 773-779

[15] 殷海涛, 肖根如, 张磊, 等. TRACK 高频 GPS 定位中震时参考站的选取方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(4):15-19(Yin Haitao, Xiao Genru, Zhang Lei, et al. Study on Method for Selecting Reference Station in High Rate GPS Positoning Using TRACK during Earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(4): 15-19)

(下转第 779 页)