

引用格式:刘会,马鑫程,辛明真,等.GNSS浮标导出多普勒速度测波应用研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(2):36-43.

LIU Hui, MA Xincheng, XIN Mingzhen, et al. Wave measurement using GNSS buoy based on out Doppler velocity[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(2): 36-43.

GNSS 浮标导出多普勒速度测波应用研究

刘 会¹, 马鑫程², 辛明真¹, 张尧禹², 王晓明¹, 阳凡林^{1,3}

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088;

3. 自然资源部海岛(礁)测绘技术重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:高精度的 GNSS 位置或速度是利用 GNSS 浮标研究海浪运动规律的关键。基于不同测速模型, GNSS 浮标单站原始多普勒、单站导出多普勒速度和 PPK 载波位置差分速度精度展开对比分析; 在此基础上对速度进行积分, 提取波面位移, 进行功率谱分析得到表面波浪的波高和周期。通过海上数据实测发现, 单站导出多普勒相比于单站原始多普勒测速精度更高, 以位置差分实测波面位移为参考, 单站导出多普勒更能满足波浪观测的精度要求。该方法仅需一台 GNSS 接收机, 不需要架设岸边基站, 为 GNSS 浮标深远海观测应用提供一定的参考。

关键词:GNSS 浮标; 多普勒; 导出多普勒; 单点测速; 功率谱分析; 测波

中图分类号:P229

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2020)02-0036-08

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.02.004

Wave measurement using GNSS buoy based on out Doppler velocity

LIU Hui¹, MA Xincheng², XIN Mingzhen¹, ZHANG Yaoyu², WANG Xiaoming¹, YANG Fanlin^{1,3}

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. CCCC Highway Consultant Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: High precision GNSS position or velocity is the key to the study of wave motion with GNSS buoys. Based on different velocity measurement models, a comparative analysis was achieved between the raw Doppler velocity and out Doppler velocity of GNSS single station and the differential velocity of PPK. Then, by integrating the velocity, the wave displacement was extracted and by using power spectrum analysis, the height and period of the surface wave were obtained. The measured data of the sea experiment shows that the out Doppler of a single station has a higher accuracy than the raw Doppler measured from a single buoy. Taking the wave surface displacement measured by the PPK as a reference, the out Doppler of a single station has a higher velocity measurement compared with that of the raw Doppler. With reference to the measured surface displacement of position differentials, the out Doppler can better meet the requirements for precision. Requiring only a GNSS receiver without the need to set up a base station on the shore, the proposed method provides certain reference for the application of GNSS buoy in the high-seas.

Key words: GNSS buoy; Doppler; out Doppler; single point velocity; power spectrum analysis; wave measurement

收稿日期:2019-04-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0501705, 2018YFF0212203, 2017YFC1405006, 2016YFC1401210); 山东省重点研发计划项目(2018GHY115002)

作者简介:刘 会(1994—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事海洋测绘研究. E-mail:m15726247361@163.com

阳凡林(1974—),男,湖北荆州人,教授,博士生导师,主要从事海底地形测量和海洋定位导航方面的研究,本文通信作者. E-mail:flyang@126.com

波浪运动规律的研究在海洋工程、海洋预报和防灾减灾等领域具有非常重要的应用价值。目前近海波浪测量的常用技术方法包括压力式测波、声学测波和重力式测波等^[1]。因为波动压力随水深衰减严重,压力式测波仪常用于浅水区进行波高和周期观测,且单个压力式测波仪无法测量波向;坐地式声学测波仪在气候和海况恶劣时,测量破碎波准确度易受浪花和气泡干扰;重力式测波仪可分为重力加速度测波浮标和 GPS 测波浮标,重力式加速度测波浮标测量的准确度高,操作简单易于维护,但是内部罗盘等传感器易受金属影响。随着 GNSS 卫星导航定位技术的发展,GNSS 浮标作为一种低成本的新型海洋测量仪器随之出现,可经济、快速、可靠、高精度地测量浮标的实时三维位置及速度,进而提取潮汐、海浪高度、波浪周期、功率谱等水文要素。

高精度的 GNSS 位置或速度信息是 GNSS 测波的关键,近年来,国内外学者基于精密单点定位(precise point positioning, PPP)^[2-4]、实时动态载波相位差分定位(real-time kinematic, RTK)^[5]以及载波后处理位置差分(post processed kinematic, PPK)^[6-7]尝试了不同方式的 GNSS 波浪观测试验。但是以上三种方法在海上实验时各有利弊:PPP 观测易受海况影响;当 GNSS 观测信息间断频繁或失锁时间过长都会导致模糊度难以收敛,影响定位精度;RTK\PPK 观测精度高但是需要在岸边架设基站,无法适用于远海观测且 RTK 要求通信链路稳定高效^[8-9]。因此,一些学者基于 GNSS 单站多普勒速度测波进行了相关研究,如 Doong 等^[10]直接利用 GPS 输出多普勒速度进行功率谱分析,提取了有效波高、波浪周期、波浪方向和波浪谱等波浪参数,证明利用 GPS 速度研究海浪是一种合理手段,但是该方法速度模型中,采用的卫星速度来源于精度较高的快速或者事后精密星历,不适合实时分析。单瑞等^[11]分析比较了船载 GPS 的单站原始多普勒测速与单站导出多普勒测速精度,并利用精度更高的单站导出多普勒速度提取波浪信息,鉴于测量船自身波动性稍差于浮标,且观测易受船员干扰,观测数据受噪声影响比较大。

近年来一些研究^[12-14]表明,在 GNSS 接收机低动态(≤ 50 km/h)情况下,单站导出多普勒速度精度相对于单站原始多普勒速度精度更好,因此本文基于国产化 GNSS 浮标开展海上测波实验,重点对不同多普勒测速精度及测波精度进行对比分析,由于单站多普勒测速不需要岸边架设基站,且不需要进行模糊度求解,模型简单、精度高、适用范围广,对 GNSS 浮标研制及海浪观测、飓风监测、海啸预警等具有一定参考意义。

1 原理与方法

1.1 GNSS 测速模型与方法

利用 GNSS 测速的方法主要有位置差分、单站原始多普勒频移和单站相位导出多普勒频移等,下面主要从原理上来分析比较这三种测速模型。

1) 位置差分测速

由 GNSS 得到载体位置之后,计算载体速度常用的方法是通过位置进行微分,假设载体 i 在历元 t_1 和 t_2 时刻测定的实时位置分别为 $\mathbf{X}_i(t_1)$ 和 $\mathbf{X}_i(t_2)$,则其三维速度可以按式(1)进行计算:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \frac{1}{dt}(\mathbf{X}_i(t_2) - \mathbf{X}_i(t_1)) = \frac{1}{dt} \begin{bmatrix} x_i(t_2) \\ y_i(t_2) \\ z_i(t_2) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_i(t_1) \\ y_i(t_1) \\ z_i(t_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $(\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z})$ 为在协议地球坐标系中,载体的三维速度分量; dt 为采样间隔。

2) 单站原始多普勒测速

在 t_i 时刻,对测站 r 与卫星 s 间载波相位观测方程进行微分^[12]:

$$\lambda D(t_i) = dR_r^s(t_i) + c(d\delta t^s(t_i) - d\delta t_r(t_i)) - d\delta_{\text{ion}}(t_i) + d\delta_{\text{trop}}(t_i) + d\delta_{\text{rel}}(t_i) + d\epsilon_p(t_i) \quad (2)$$

其中: λ 是载波波长; $D(t_i)$ 为原始多普勒观测值; $dR_r^s(t_i)$ 为 t_i 时刻卫星 s 与接收机 r 的几何距离的时间变率; $d\delta t^s$ 、 $d\delta t_r$ 分别为 t_i 时刻卫星钟差及接收机钟差变率; $d\delta_{\text{trop}}(t_i)$ 、 $d\delta_{\text{ion}}(t_i)$ 分别为 t_i 时刻对流层和电离层对载波相位观测值的影响变化率; $d\delta_{\text{rel}}(t_i)$ 为 t_i 时刻的相对论效应影响的时间变率, $d\epsilon_p(t_i)$ 为其他观测噪声的时间变率。利用最小二乘原理可以求得载体速度。

3) 单站导出多普勒测速

本文采用相邻历元差分构造单站导出多普勒观测值,可有效消除模糊度参数,同时进行各项改正,包括对流层延迟改正、相对论效应改正、固体潮改正、地球自转改正和相位缠绕改正等。用相位前后历元间差分的基本原理单站导出多普勒可表示为^[12]:

$$d\phi = \frac{\phi(t_{i+1}) - \phi(t_i)}{\Delta t} = \tilde{D}(t_{i+1})。 \quad (3)$$

其中: $\phi(t_i)$ 、 $\phi(t_{i+1})$ 分别表示前一历元 t 时刻和后一历元 $t + dt$ 时刻的相位观测值; dt 为采样间隔; $d\phi$ 为 t 时刻的导出多普勒观测值。

1.2 GNSS 海浪参数提取

将 GNSS 测得垂直方向上的速度分量求积分,便可得到浮标处的波面位移,得到的波面位移是波浪、潮汐以及噪声综合作用的结果。本文采用滑动平均法^[14]进行滤波,此方法得到的海面相对变化过程跟真实值较接近。通过滤波将数据分解成海浪波面位移和潮位信号,采用周期图法进行频谱分析得到波高、周期等参数(图 1)。

1) 海浪功率谱估计:

假设以时间间隔 dt 对时间长度为 T 的信号 $x(t)$ 取样得到 N 个数据: $x(t_n)$, $n=0,1,2,\dots, N-1$ 。则海浪频谱的离散形式为^[10]

$$\hat{S}(\omega_m) = \frac{dt}{2\pi N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-i\omega_m t_n} \right|^2 = \frac{dt}{2\pi N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-i2\pi m n / N} \right|^2, \quad (4)$$

$$\text{式中, } m_n = \frac{2m\pi}{Ndt}, t_n = n\Delta t。 \quad (5)$$

其中: $\hat{S}(\omega_m)$ 为海浪频谱; m_n 为波浪的 n 阶谱矩; N 为采样个数。

2) 平均波高 \bar{H} 和平均周期 \bar{T} 以及有效波高 H_s 和波浪的谱矩 m_n 有如下关系^[2]:

$$\begin{cases} \bar{H} = \sqrt{2\pi m_0}, \\ \bar{T} = 2\pi \sqrt{m_0/m_2}, \\ H_s = 4\sqrt{m_0}。 \end{cases} \quad (6)$$

3) 高通滤波:海浪功率谱一般最低截止频率对应于 1% 的波浪能量^[15]:

$$f_L = \frac{0.910}{U_{10}}。 \quad (7)$$

其中: f_L 是截止频率; U_{10} 是海面 10 m 处风速,一般风速最大不超过 30 m/s。根据公式(7),计算所得截止频率为 0.03 Hz,周期为 33 s,潮汐的频率远小于最大风浪所能导致的最低截止频率,实验时取功率谱截止频率为 0.03 Hz。

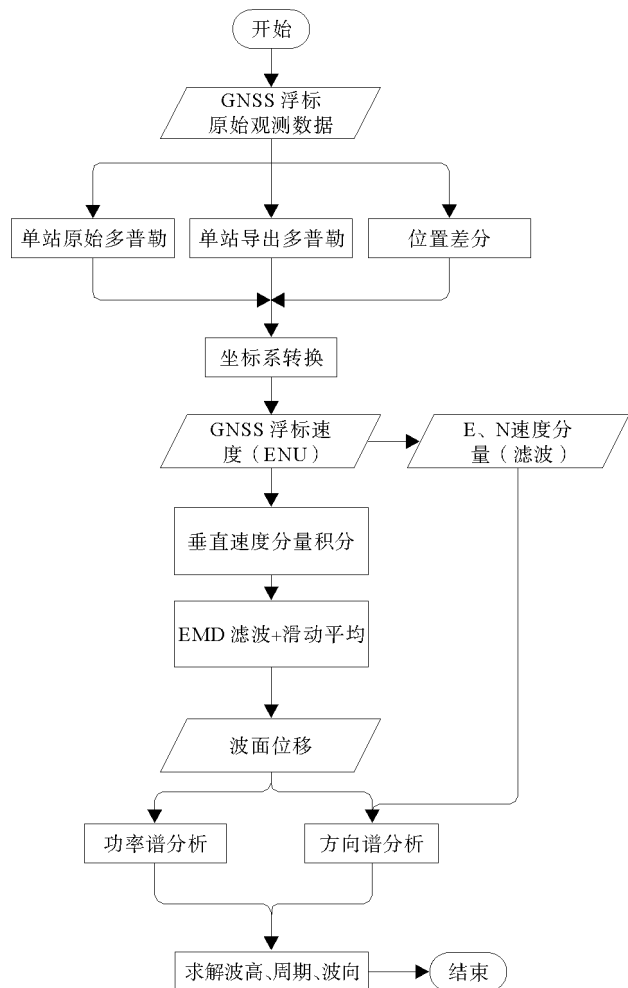


图 1 程序流程图

Fig. 1 Program flowchart

2 实例分析

2.1 船载 GNSS 测速实验

实验采用 2017 年 5 月 31 日下午采集的船载 GNSS-INS 组合导航数据,实验场地为长江三峡某段水域,

实验时 GPS 采样频率 5 Hz,INS 采样频率 200 Hz,采样时间约 1.5 h,船速约 4 m/s。分别以单站原始多普勒、单站导出多普勒、PPK 位置差分计算的 ENU 三方向的速度与 GNSS-INS 紧组合速度(采用 NovAtel Internal Explorer(IE)商用数据处理软件可以得到精度 mm/s 级别的组合导航速度信息)作差进行比较。

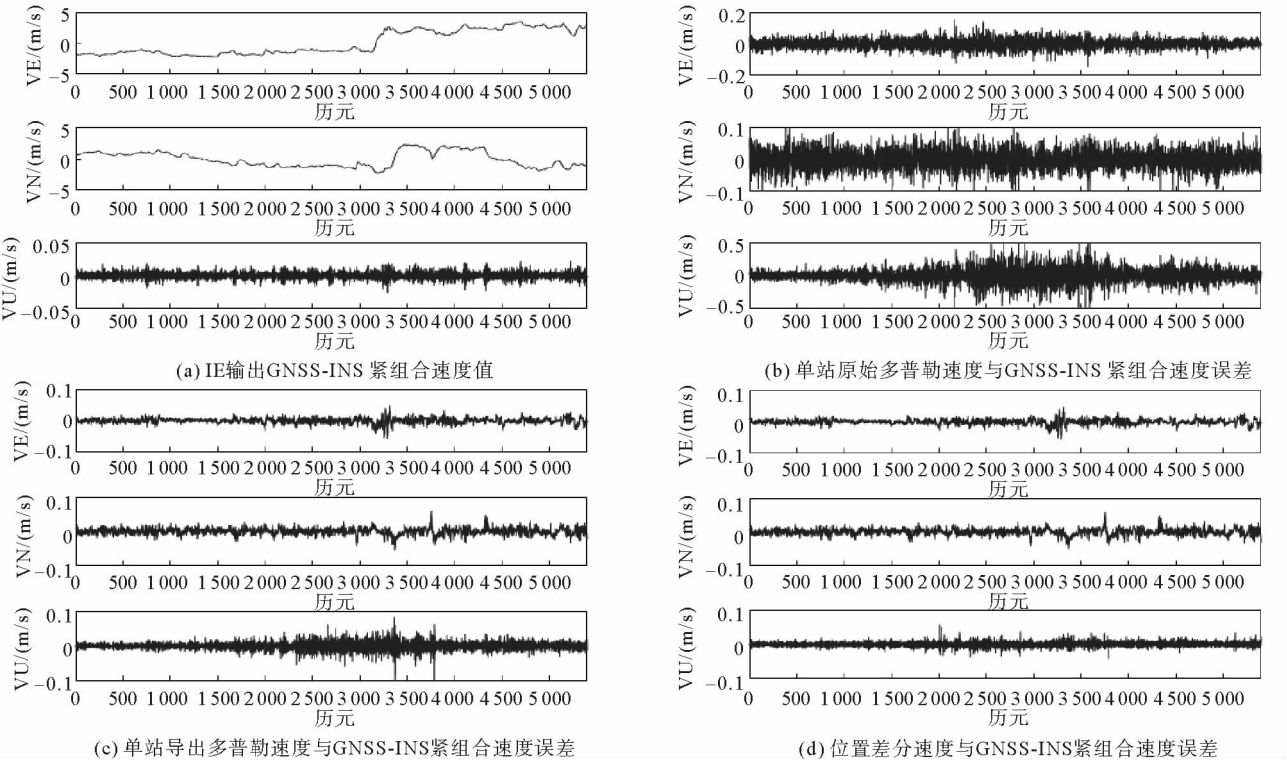


图 2 三种速度模型与 GNSS-INS 紧组合速度误差分析

Fig. 2 Error analysis between the velocity of three models and the velocity of GNSS-INS strong combination

1) 图 2 为单站原始多普勒速度、单站导出多普勒速度、位置差分速度与紧组合速度的误差对比图,图 2(a)为船载 GNSS-INS 紧组合速度,实验时船速 4 m/s 可简单划分为低动态(≤ 50 km/h),由图 2(b)、2(c)、2(d)可以明显看出,基于单站原始多普勒精度最差,单站导出多普勒次之,PPK 的位置差分速度精度最好。位置差分法计算速度受位置精度影响比较大,因此本实验选用精度较高的 IE 解 PPK 位置进行差分得到速度。一定程度内,单站导出多普勒与单站原始多普勒不易受载体位置精度的影响。

2) 表 1 为三种速度模型与 IE 解紧组合速度相比较的误差统计,以 GNSS-INS 紧组合速度作为参考值进行对比分析,单站原始多普勒计算的 E、N 方向 RMS 分别为 3.18、3.24 cm/s, U 方向精度最差 RMS 约为 9.93 cm/s;单站导出多普勒速度与位置差分速度精度近似,具有很好的一致性,单站导出多普勒速度的 E、N、U 方向 RMS 分别为 0.57、0.69、1.02 cm/s,精度明显优于单站原始多普勒速度;基于 PPK 的位置差分速度精度最好,三方向 RMS 皆为 mm 级。分析速度差异原因为:利用单站原始多普勒计算的是瞬时速度且受接收机类型影响,而单站导出多普勒是数据后处理过程中导出的观测值,是观测历元间多普勒频移的积分,也是载波相位采样时间间隔内的平均速度,噪声被平滑。由于 GNSS 浮标海上运动可简单归为低动态

表 1 测速误差统计

Tab. 1 Statistics of velocity differences comparison error

cm/s				
	统计量	VE	VN	VU
单站原始多普勒	RMS	3.18	3.24	9.93
单站导出多普勒	RMS	0.57	0.69	1.02
位置差分速度	RMS	0.55	0.66	0.76

(≤ 50 km/h)^[14], 因此对于单 GNSS 浮标深远海观测, 可优先采用单站导出多普勒测速。

2.2 GNSS 浮标测波实验

为验证 GNSS 浮标单点测速的可行性及精确度, 于 2017 年 10 月中旬, 在青岛近海(图 3, GHFB 为浮标投放点, MTJZ 为岸边基站点)使用本单位定制的 GNSS 浮标进行两天的观测实验。GNSS 浮标顶部白色半球状部件为 GNSS 接收天线, 主体内安装一台 TRIMBLE NETR9 接收机(图 4), 主体以及三个浮筒皆呈圆柱状, 浮筒彼此等间隔 120° , 浮标底下连接一个锚沉入海底, 使浮标可以随海面自由波动, 浮标水上部分约 0.50 m, 水下约 0.40 m, 实验时采样频率为 1 Hz, 同时在岸上安置一架 TPSCR. G3 型接收机, 采样频率为 1 Hz, 进行同步采样。实验区水深约 20 m, 试验期间风速为 3~4 级, 深水判断依据为^[15]:

$$d > U_{10}^2/5. \quad (8)$$

实验水域显然满足观测条件, 实验具体步骤首先对不同的测速方法进行对比分析, 在此基础上进行海浪要素提取, 具体实验结果及分析如下。

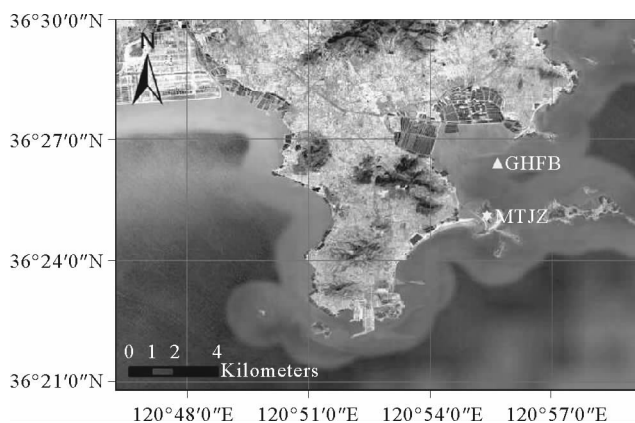


图 3 浮标测量实验区

Fig. 3 Experimental area of GNSS buoy measurement



图 4 GNSS 浮标图

Fig. 4 Image of the GPS buoy

2.2.1 速度对比分析

通过上节船载 GNSS-INS 速度对比试验可知, 当只有 GNSS 数据时, 位置差分速度最好, 因此可利用载波位置差分速度作为参考, 分析 GNSS 浮标单站多普勒速度精度。因此, 以一段 20 min 采集数据为例(测波周期), 分别采用单站原始多普勒、单站导出多普勒模型计算的速度与 PPK 位置差分速度进行对比, 如图 5。表 2 为三种方法对比求差统计结果。

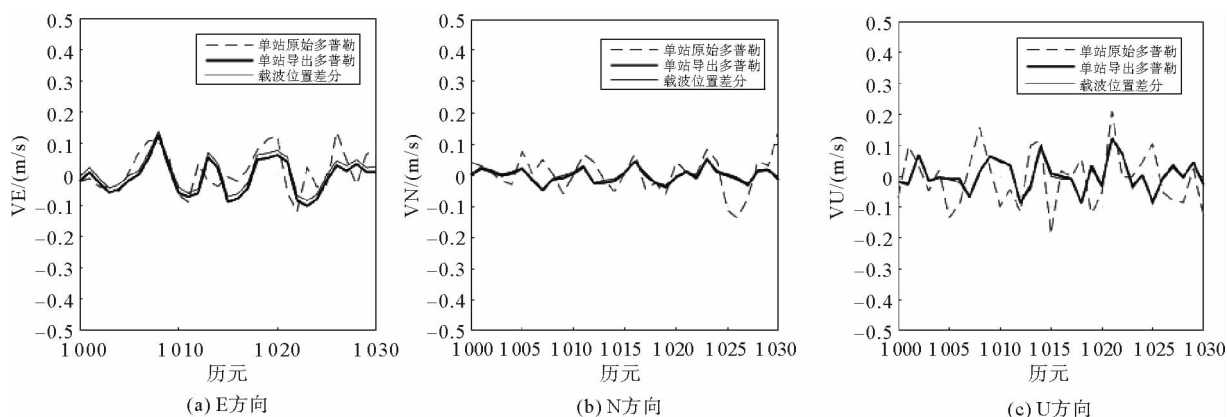


图 5 原始多普勒、导出多普勒与位置差分 E、N、U 方向速度比较

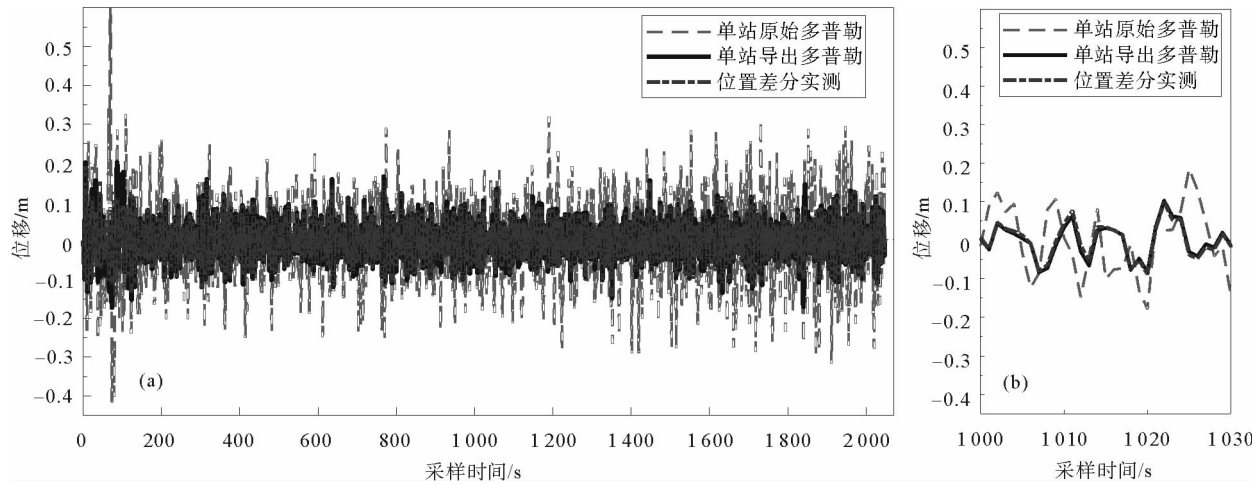
Fig. 5 Statistics of velocity in E, N, U direction between Doppler and out Doppler with real time kinematics

由图 5 可看出,利用单站导出多普勒和载波双差位置差分法计算得到的三方向速度变化趋势大体相同,单站导出多普勒比单站原始多普勒测速精度更高。

分析表 2 结果可知:从误差均值上看,利用单站导出多普勒解算三方向速度误差比单站原始多普勒更好,从残差方面的比较可以看出,单站导出多普勒解算的速度内符合精度要远优于单站原始多普勒。证明本实验利用单站导出多普勒速度计算速度时,系统误差较低,基本没有影响。

2.2.2 波浪参数提取

对动态数据进行系统误差改正后,将垂直方向速度进行积分,采用半参数模型进行漂移改正,然后对其每 31 点进行滑动平均滤波(波浪信号周期一般在 30 s 内),滤波后得到的低频趋势即潮位变化,与原始信号相减即可求得实验时间内的高频信号,主要为时间内对应的波面位移以及噪声信息。图 6 是两种多普勒速度模型积分得到的波面位移与 GNSS 差分实测波面位移对比,采用周期图法对提取的波面位移进行功率谱分析。图 7 是三种波面位移经过平滑后的功率谱对比。



(a)两种多普勒测速模型与载波位置差分实测波面位移 35 min 内对比;(b)两种多普勒测速模型与载波位置差分实测波面位移 30 s 内对比

图 6 原始多普勒、导出多普勒以及载波位置差分实测波面位移

Fig. 6 Wave surface displacement of Doppler, out Doppler and real wave displacement

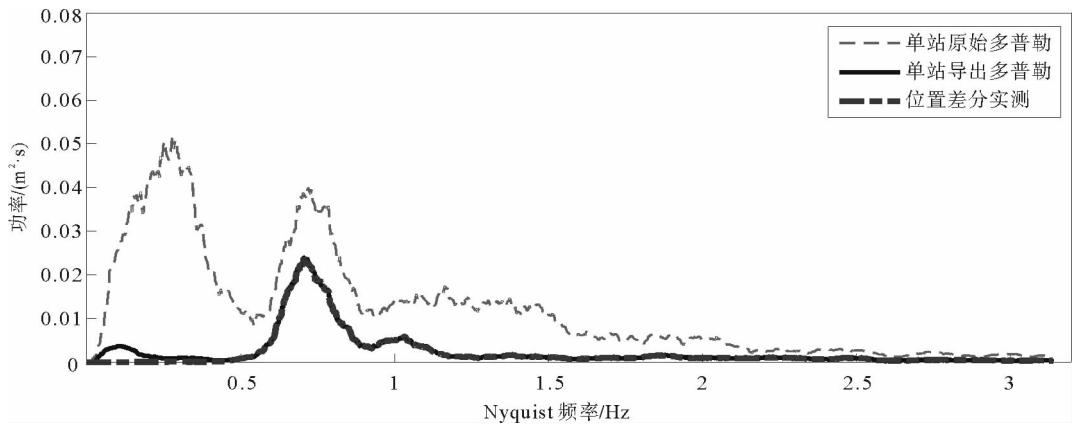


图 7 原始多普勒、导出多普勒及实测功率谱

Fig. 7 Power spectrum of Doppler, out Doppler and real power spectrum

表 2 测速结果求差统计					
Tab. 2 Statistics of velocity differences					cm/s
		MIN	MAX	AVE	RMS
单站原始多普勒	N	-30.13	24.98	-0.53	6.25
	E	-26.68	28.98	-1.45	7.66
	U	-41.49	49.89	0.48	10.79
单站导出多普勒	N	-5.25	1.69	-0.18	0.68
	E	-5.50	1.21	0.30	1.49
	U	-4.78	16.93	0.23	1.02

1) 由图6波面位移对比分析可以看出,利用单站原始多普勒得到的波面位移大部分位于0.30 m以内;单站导出多普勒速度及载波位置差分速度积分得到的波面位移大部分位于0.20 m以内;单站导出多普勒速度积分得到的波面位移与GNSS实测波面位移一致,这与速度表现相符。由图7可以看出,功率谱粗谱采用 $P=15$ 滑动平均后明显平滑,谱估计的质量大大改善。但是单站原始多普勒的功率谱噪声部分能量较大,出现了明显的双峰,单站导出多普勒和载波位置差分实测的功率谱表现基本一致,在功率谱Nyquist频率为0~0.5 Hz区间,单站导出多普勒略有一小部分噪声,而位置差分实测数据对应功率谱值全部为0。

2) 由表3波浪参数统计结果看出,单站原始多普勒相对载波位置差分实测得到的平均周期、平均波高误差比较大,这也与单站原始多普勒的功率谱表现相符,单站原始多普勒是某一瞬间多普勒频移的积分,且受接收机类型影响,噪声通常比较大,采用速度积分法计算波面位移误差累积,因此波面位移得到的功率谱噪声较大。而采用未发生周跳的相邻历元相位导出多普勒以及GNSS实测波面位移提取的平均波高误差在0.01 m内,平均周期相差0.17 s左右,且符合上跨零点法统计的结果。因此,对于单GNSS浮标,可优先采用单站导出多普勒速度进行海浪分析。

表3 波浪参数结果统计

Tab. 3 Statistics of wave measurement elements

海浪要素	上跨零点法(统计)	单站原始多普勒	单站导出多普勒	PPK 实测波面位移
平均周期/s	5.670	6.250	5.740	5.460
平均波高/m	0.112	0.272	0.125	0.119
有效波高/m	—	0.408	0.192	0.190

3) 根据我国《港口工程荷载规范》中经验公式^[15]:

$$SWH = 0.021 \ 8U_{10}^2 \quad (9)$$

其中 SWH 、 U_{10} 分别为有效波高、海面10 m处的风速。由于实验时风速约3 m/s,单站原始多普勒测得的相对误差较大,而单站导出多普勒速度计算有效波高与经验公式所得0.196 m的相对误差较小,为2.04%。证明利用单站导出多普勒相比单站原始多普勒进行功率谱分析海浪精度更高,数据可靠。

以上数据证明对海上GNSS浮标波浪观测时,利用单站导出多普勒测速相比单站原始多普勒速度进行海浪观测精度更高,数据更加稳定,且相比位置差分法,该方法不需要岸边架设基站,成本低、精度高,更适合深远海波浪观测。

3 结论

基于GNSS速度开展研究,结果表明,在近岸以GNSS-INS紧组合速度为参考,单站原始多普勒测速可达cm级精度,GNSS单站导出多普勒与位置差分速度具有高度一致性,都可达mm级,其中近岸PPK位置差分速度精度最好。通过GNSS浮标测波实验,由单站导出多普勒速度功率谱提取的海浪平均波高以及平均周期与GNSS实测波高以及上跨零点统计所得结果十分接近,有效波高与《港口工程荷载规范》的经验模型计算所得相对误差2.04%。对于深远海波浪观测,PPK位置差分法受岸边基站距离限制,必然会影响位置差分测速精度,而利用单站导出多普勒方法计算的单GNSS浮标导出多普勒速度精度高且该方法不需要架设岸边基站,使用更加灵活便捷,对深远海波浪观测、飓风监测和海啸预警等具有较大的应用价值。

参考文献:

- [1]周庆伟,封哲,汪小勇,等.基于三种测波方法的实测数据对比分析[J].海洋技术学报,2017,36(3):45-49.
ZHOU Qingwei, FENG Zhe, WANG Xiaoyong, et al. Comparison and analysis of the measured data based on three wave measurement methods[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(3): 45-49.
- [2]JODAKI G, NAHAVANDCHI H, CHENG K. Ocean wave measurement using GPS buoys[J]. Journal of Geodetic Science, 2013, 3(3): 163-172.

- [3] KOMATSU K, TANAKA K. Swell-dominant surface waves observed by a moored buoy with a GPS wave sensor in Otsuchi Bay, a ria in Sanriku, Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73(1): 87-101.
- [4] 程世来, 张小红. 基于 PPP 技术的 GPS 浮标海啸预警模拟研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(9): 764-766.
CHENG Shilai, ZHANG Xiaohong. Simulation of tsunami forecasting with GPS buoy using PPP technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(9): 764-766.
- [5] 党超群, 齐占辉, 李明兵, 等. 基于近岸 GPS RTK 技术的潮位和波浪提取算法研究[J]. *海洋测绘*, 2016, 36(1): 63-64.
DANG Chaoqun, QI Zhanhui, LI Mingbing, et al. Research on algorithms of tide and wave extraction based on off-shore GPS RTK technology[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2016, 36(1): 63-64.
- [6] 王俊杰. 基于 GPS 高频数据的海浪测量方法[J]. *海洋测绘*, 2015, 35(6): 37-40.
WANG Junjie. A wave measurement method based on GPS high-frequency data[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(6): 37-40.
- [7] WANG J J, He X F, FERREIRA V G. Ocean wave separation using CEEMD-Wavelet in GPS wave measurement[J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 19416-19428.
- [8] 张中喜, 赵相伟, 艾波. RTK 技术在城市导线测量中的应用[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(1): 32-34.
ZHANG Zhongxi, ZHAO Xiangwei, AI Bo. Application of RTK technology in city traverse survey[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2008, 27(1): 32-34.
- [9] 胡艳, 胡剑. GPS 单历元精密单点定位精度分析[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(1): 74-78.
HU Yan, HU Jian. Analysis of accuracy of GPS single-epoch precise point positioning[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2013, 32(1): 74-78.
- [10] DOONG D J, LEE B C, KAO C C. Wave measurements using GPS velocity signals[J]. *Sensors*, 2011, 11(1): 1043-1058.
- [11] 单瑞, 刘焱雄, 赵铁虎, 等. 基于 GPS 单点测速的海浪测量方法初探[J]. *海洋通报*, 2011, 30(5): 529-534.
SHAN Rui, LIU Yanxiong, ZHAO Tiehu, et al. Feasibility study of using GPS absolute velocity estimation to measure wave [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(5): 529-534.
- [12] HE K F. GNSS kinematic position and velocity determination for airborne gravimetry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(10): 1179.
- [13] 丛佃伟. 北斗卫星导航系统高动态定位性能检定理论及关键技术研究[J]. *测绘学报*, 2015, 44(12): 1402.
CONG Dianwei. Research on theory and key technologies of BDS in high kinematic positioning accuracy calibration[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(12): 1402.
- [14] AUSTIN J, ATKINSON S. The design and testing of small, low-cost GPS-tracked surface drifters[J]. *Estuaries*, 2004, 27(6): 1026-1029.
- [15] 徐曦煜, 王振占, 叶沛, 等. GPS 浮标数据反演海浪谱的理论仿真与试验验证[J]. *海洋学报*, 2014, 36(7): 34-44.
XU Xiyu, WANG Zhenzhan, YE Pei, et al. Theoretic simulation and campaign validation of ocean wave spectrum retrieval from GPS buoy measurements[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(7): 34-44.

(责任编辑:高丽华)