

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210517

基于双天线 GNSS/SINS 组合的风速 测量运动补偿方案设计*

张文勤 周文清 邵毅
(国家海洋技术中心 天津 300110)

摘要: 以基于浮标平台的动态风速测量为背景,根据运动姿态补偿的原理和实际需要,设计了一套双天线 GNSS/SINS 组合姿态测量系统,采用卡尔曼滤波实现信息融合,通过在卡尔曼滤波的观测量中引入双天线 GNSS 输出的航向角信息,解决了惯性系统航向角可观测性较弱的问题,并通过实验验证了系统的有效性。实验结果表明,该运动补偿设计方案能够提高平台姿态测量的精度和稳定性,准确测量平台的姿态信息,并有效降低平台运动对风速测量的影响,风速测量误差低于 4%,满足了海洋浮标观测的需求。

关键词: 风速测量;运动补偿;卡尔曼滤波;双天线

中图分类号: P412.16 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 570.5

Design of wind speed measurement motion compensation scheme based on dual-antenna GNSS/SINS integrated system

Zhang Wenqin Zhou Wenqing Shao Yi
(National Ocean Technology Center, Tianjin 300110, China)

Abstract: Taking the dynamic wind speed measurement based on the buoy platform as the background, according to the principle of motion attitude compensation and actual needs, a dual-antenna GNSS/SINS integrated attitude measurement system is designed. Kalman filtering is used to achieve information fusion. The heading angle information output by dual-antenna GNSS is introduced into the measurement, which solves the problem of weak observability of heading angle of the inertial system, and the effectiveness of the system is verified by experiments. The experiments results show that the motion compensation scheme can improve the accuracy and stability of the attitude measurement, accurately measure the attitude information of the platform, and effectively reduce the influence of the platform motion on the wind speed measurement, and the wind speed measurement error is less than 4%. It meets the needs of marine buoy observation.

Keywords: wind speed measurement; motion compensation; Kalman filter; dual-antenna

0 引言

风速风向是重要的海洋气象参数,浮标测风一个主要的误差来源是浮标在海上的运动^[1-2]。由于波浪、海流和风场等影响,浮标只能通过不断摇摆晃动来维持一个动态平衡,浮标上固定的风速计也要随着浮标的摇摆一起运动,因此风速计的测量值中包含了浮标的运动信息。为了获得准确的风矢量,必须对测得的风矢量进行浮标运动补偿。

运动补偿是指通过测量浮标运动信息从风速计测量数据中去除浮标运动的影响。相关研究最早在船载姿态测量

系统开展^[3],使用光纤陀螺或者激光陀螺,可以达到很高的精度,但由于功耗、体积以及浮标长期生存在复杂环境等原因,难以在浮标上广泛使用^[4]。随着微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术的发展,浮标搭载姿态测量系统成为可能^[5]。以 MEMS 传感器组成的姿态测量系统具有低成本、低功耗、体积小的优点,非常适合在浮标上应用。不过由于 MEMS 传感器存在测量噪声导致越来越大的漂移误差,因此需要通过多传感器信息融合技术来达到长期稳定的目的^[6],目前使用较多的是卫星(global navigation satellite system, GNSS)/捷联惯导

收稿日期:2022-06-29

* 基金项目:广东省重点研发计划项目(2020B1111020001)资助

(strapdown inertial navigation system, SINS) 组合或者 GNSS/磁力计/SINS 组合^[7-10],但在低成本的 MEMS 应用中,航向角存在可观测性弱的问题,磁力计又易受环境干扰^[11-12]。

基于上述考虑,本文以浮标高精度测风为目的,提出一种基于双天线 GNSS/SINS 组合的运动补偿方案,采用 MEMS 传感器,通过卡尔曼滤波实现信息融合,在卡尔曼滤波的观测方程中加入双天线 GNSS 测得的航向角信息,提高航向角的可观测性,在准确测量浮标运动信息的基础上补偿浮标运动造成的风速计数据偏差,提高风矢量测量的准确度。

1 风速测量运动补偿方案

1.1 运动补偿原理

浮标在海洋中所受到的影响主要包括风浪流的作用和锚链的作用。针对浮标的运动可概括为:在有风流的作用下,浮标发生移动和倾斜,获得新的平衡位置,由于波浪的作用,浮标在此平衡位置上做摇摆和升沉运动^[13]。同时,由于锚链的共同作用,浮标存在绕中心轴的旋转运动。当风速计与浮标固定连接时,风速计的测量值中包含有浮标的运动信息。分析浮标的运动响应与风速计测量值之间的关系,浮标运动对风速测量值的影响主要包括:1)由于浮标的倾斜造成的风速计测量瞬时值的倾斜;2)由于浮标摇摆旋转造成风速计位置的线速度变化;3)浮标运动带来相对于大地坐标系的速度影响。

针对浮标的运动所造成的以上三方面影响,参考 Miller^[14]的公式,浮标风速测量的运动补偿公式为:

$$\mathbf{V}_{true} = \mathbf{C}_n^b \cdot \mathbf{C}_b^w \cdot \mathbf{V}_w + \mathbf{C}_n^b \cdot (\boldsymbol{\omega}_g \times \mathbf{B}) + \mathbf{V}_b \quad (1)$$

其中, \mathbf{V}_{true} 为大地坐标系下的真实三维风速矢量, \mathbf{V}_w 为风速计三维风速矢量测量值, \mathbf{V}_b 为浮标在大地坐标系下的速度, \mathbf{C}_n^b 为浮标坐标系到大地坐标系的旋转矩阵, \mathbf{C}_b^w 为风速计坐标系到浮标坐标系下的旋转矩阵, $\boldsymbol{\omega}_g$ 为浮标坐标系下的旋转角速度, \mathbf{B} 为风速计相对于浮标原点坐标系的位置向量。通过计算其中的每一项之后矢量合成得到相对于大地坐标系的经过运动补偿后的真实风矢量。

1.2 风速运动补偿方案

根据运动补偿原理着手设计风速运动补偿方案。系统框图如图 1 所示,通过风速计获得风速的测量值,即包含有浮标运动的风速风向值,然后通过双天线 GNSS/SINS 组合测姿系统得到同一时刻的浮标姿态角和速度,由陀螺仪获得旋转角速度,由姿态角得到坐标变换矩阵,最后通过求得的风速计瞬时倾斜分量、当前时刻的浮标旋转分量以及速度分量将测量风校正为真实风。

风速测量的精度很大程度上由组合测姿系统运动信息获取的精度决定,因此对组合测姿系统着重分析。

1.3 双天线 GNSS/SINS 组合测姿系统

测姿系统首先获得初始值。在静态条件下通过

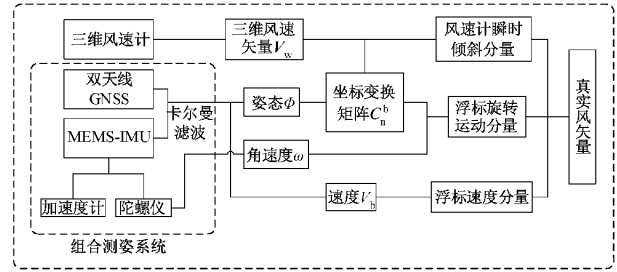


图 1 风速运动补偿方案框图

MEMS 加速度计和重力加速度的转换关系可以得到仰角 θ 和横滚角 γ :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}\right) \quad (2)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-a_x}{a_z}\right) \quad (3)$$

其中,为 $[a_x \ a_y \ a_z]$ 三轴加速度计输出。

对于航向角的求取,由于磁力计的存在漂移误差较大且易受干扰,因此选用双天线 GNSS 得到航向角。双天线 GNSS 定向指 GNSS 接收机的主天线和从天线之间构成一个基线向量,得到此向量在水平面的投影,确定此基线向量逆时针方向与真北的夹角,方向为主天线到从天线。由于两个天线同步接收观测相同的卫星,具有相关性,因此可以抵消公共误差的部分,提高测量的精度^[15]。设主天线投影坐标为 (x_1, y_1) , 从天线投影坐标为 (x_2, y_2) , 则航向角 ψ 为:

$$\psi = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4)$$

在动态条件下浮标自身有加速运动和振动,加速度计受到非重力加速度的影响,后续计算再按照上式解算姿态角的话,会与真实值有较大偏差。为了得到更为准确的浮标姿态角,设计了双天线 GNSS/SINS 组合测姿系统。GNSS 系统长期数据稳定但受卫星信号的影响,SINS 系统短时稳定但存在随时间累积误差。两种系统之间有很好的互补性,通过卡尔曼滤波融合两种系统的优势,可以得到更为准确的信息^[16]。组合测姿框图如图 2 所示,SINS 系统与 GNSS 系统解算的运动信息的差值作为误差量参与卡尔曼滤波融合,将滤波融合后得到的误差量最优估计返回 SINS 系统中,再次通过 SINS 解算得到组合测姿系统的输出。

根据系统设计建立状态方程:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} \quad (5)$$

其中, \mathbf{F} 为状态转移矩阵, \mathbf{G} 为噪声驱动矩阵, \mathbf{W} 为系统噪声向量。

$\mathbf{X} = [\phi^T \ (dv^n)^T \ (dp^n)^T \ (e^b)^T \ (\mathbf{V}_b)^T]^T$ 为 15 维状态量,其中:

$\phi = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U]^T$ 为大地坐标系东北天姿态失准角; $dv^n = [\delta v_E \ \delta v_N \ \delta v_U]^T$ 为大地坐标系东北天速度误差

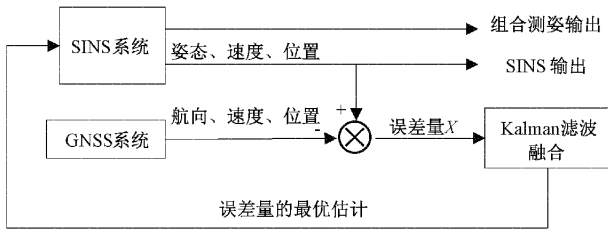


图 2 组合测姿系统框图

差; $d\mathbf{p} = [\delta L \ \delta\lambda \ \delta h]^T$ 为浮标位置误差(纬度、经度、高度); $\mathbf{e}_r^b = [e_{rx}^b \ e_{ry}^b \ e_{rz}^b]^T$ 为浮标坐标轴三个陀螺漂移; $\mathbf{V} = [\nabla_{rx}^b \ \nabla_{ry}^b \ \nabla_{rz}^b]^T$ 为浮标坐标系三轴加速度计漂移;

针对航向角可观性弱的问题,在量测方程中引入双天线 GNSS 测得的航向角,以 SINS 和 GNSS 的航向角差、速度差、位置差作为观测量,建立量测方程:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \Delta yaw \\ \Delta \mathbf{v}^n \\ \Delta \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} yaw_{SINS} - yaw_{GNSS} \\ \mathbf{v}_{SINS}^n - \mathbf{v}_{GNSS}^n \\ \mathbf{p}_{SINS} - \mathbf{p}_{GNSS} \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (6)$$

其中, \mathbf{H} 为量测矩阵, \mathbf{V} 为 GNSS 噪声向量, Δyaw 、 $\Delta \mathbf{v}^n$ 、 $\Delta \mathbf{p}$ 分别为 SINS 解算与 GNSS 解算输出航向角、速度、位置的差值。

系统的状态模型建立之后,卡尔曼滤波器通过以下公式递推更新:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \mathbf{F}_{k,k-1} \cdot \mathbf{X}_{k-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{F}_{k,k-1} \cdot \mathbf{P}_{k-1} \cdot \mathbf{F}_{k,k-1}^T + \mathbf{G}_{k-1} \cdot \mathbf{Q}_{k-1} \cdot \mathbf{G}_{k-1}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \cdot \mathbf{H}_k^T \cdot (\mathbf{H}_k \cdot \mathbf{P}_{k,k-1} \cdot \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k \cdot (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \cdot \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}) \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{H}_k) \cdot \mathbf{P}_{k,k-1} \quad (11)$$

其中, \mathbf{P} 为状态量的协方差阵, \mathbf{Q} 为系统噪声向量的协方差阵。递推更新之后获得当前时刻平台的姿态角和平动速度,角速度由 MEMS 陀螺仪获得。

2 实验结果与分析

2.1 姿态对比实验

为了验证双天线 GNSS/SINS 组合测姿系统的测姿性能,将设计的组合测姿系统与 MTi-3 输出的数据进行对比。MTi-3(后文简称 MTi)是荷兰 XSENS 公司生产的一款航姿参考系统,依靠内置的捷联惯导积分算法和卡尔曼滤波算法,最终输出仰俯、横滚、航向三维姿态信息,同时可输出加速度计和陀螺仪的原始数据。它的静态仰俯角/横滚角精度为 0.5° ,动态精度为 0.8° ,航向角精度为 2° 。在姿态对比实验中,采集 MTi 的原始加速度计和陀螺仪数据,通过双天线 GNSS/SINS 组合测姿系统输出三维姿态角与其自身输出姿态信息进行对比。实验平台如图 3 所示。两个垂直的长臂长为 1.41 m,长臂两端平板上固定 GNSS 天线,中间隔板之间放置组合测姿系统和 MTi。

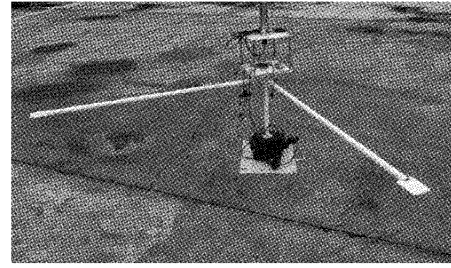


图 3 姿态对比实验平台

分别进行静态和动态实验,静态实验将 MTi 静止 2 000 s,10 Hz 频率采集陀螺仪、加速度计、GNSS 原始数据并通过设计的组合测姿系统进行姿态解算,将解算结果与其内部解算三维姿态角进行对比。动态实验在高精度倾斜台上进行,通过控制倾斜平台,实现实验平台运动。经历一段时间静止的初始对准阶段,控制倾斜台以 $5^\circ/\text{s}$ 的速度摇摆,摇摆幅度为 $-15^\circ \sim 15^\circ$,总计摇摆 10 次,对比 MTi 解算结果和组合测姿系统结果。实验结果如图 4、5 所示。

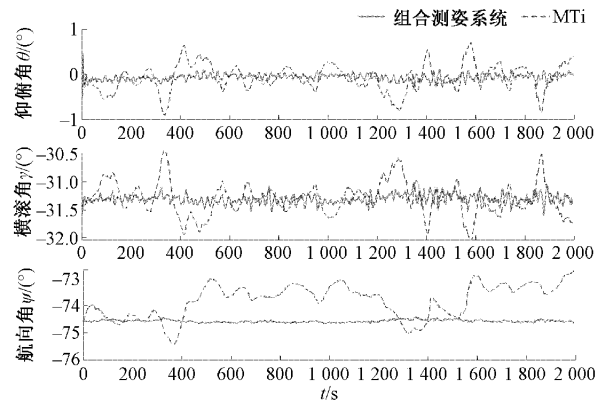


图 4 MTi 输出姿态信息和组合测姿系统静态对比

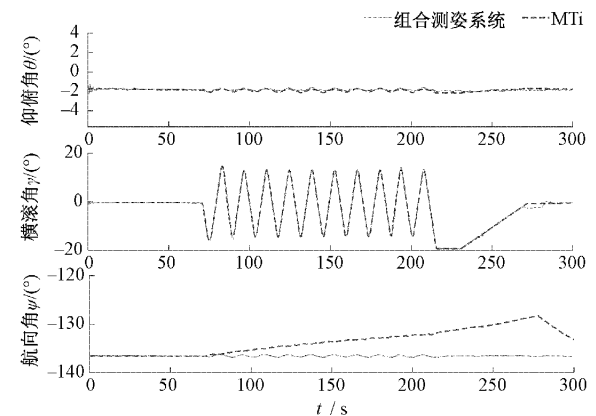


图 5 MTi 输出姿态信息和组合测姿系统动态对比

通过表 1 可以看到,静态实验中 MTi 的静态三维姿态最大误差分别为 $0.83^\circ, 0.91^\circ, 1.72^\circ$ 。而组合测姿系统的最大误差分别为 $0.23^\circ, 0.28^\circ, 0.21^\circ$ 。相比较 MTi 系统的结果,角度精度分别提高了 $0.60^\circ, 0.63^\circ, 1.51^\circ$ 。由图 5 可

表 1 姿态对比实验结果

实验类型	角/ (°)	MTi 输出误差	组合测姿系统输出误差
静态实验	仰俯角	(-0.83, 0.76)	(-0.23, +0.20)
	横滚角	(-0.72, 0.91)	(-0.28, +0.27)
	航向角	(-0.80, 1.72)	(-0.07, +0.21)
动态实验	仰俯角	(-0.22, 0.21)	(-0.20, +0.21)
	横滚角	(-0.42, 0.50)	(-0.21, +0.30)
	航向角	(-0.07, 8.30)	(-0.10, +0.09)

注: 括号中左边为负最大值, 右边为正最大值

可以看出, 在摇摆状态下, 组合测姿系统可以稳定的输出横滚角的摇摆信息。以 MTi 输出信息作为基准, 组合测姿系统具有较好的跟随性, 在横滚角和仰俯角信息中, 实线和虚线基本重合。图中虚线 MTi 输出航向角存在漂移, 这是因为 MTi 的航向角输出来源是磁力计融合捷联惯导系统, 所以在不稳定磁场存在漂移问题, 使用 GNSS 的航向角输出则不存在漂移。动态摇摆实验的航向角相比较 MTi 的数据, 在 300 s 时间内不存在漂移误差。实验验证了所设计的组合测姿系统在静态和动态都具有更好的测姿效果。

2.2 风洞实验

为了验证设计的风速运动补偿方案的可行性, 进行风洞试验。风洞实验在国家海洋标准计量中心的海洋测风仪器校准实验室进行。该风洞风速范围为 0~60 m/s, 由于实验平台的尺寸问题, 实验在空间较大的低速段进行, 瞬时风速误差为 2%。风洞实验示意图和安装位置如图 6 和 7 所示。采样频率 10 Hz。

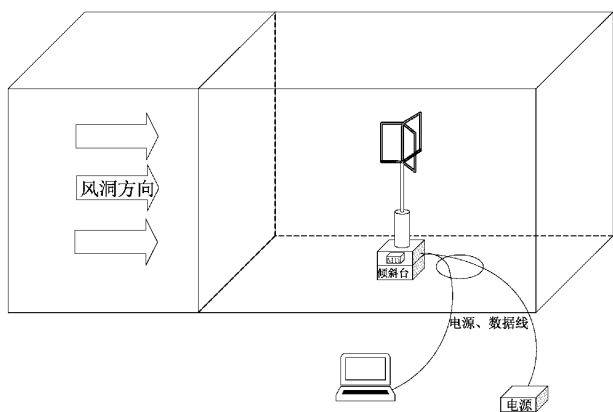


图 6 风洞实验示意图

1) 风洞摇摆旋转实验

为了模拟真实的浮标运动, 在风洞中做摇摆旋转实验, 实验平台叠加上摇摆和旋转 2 种运动状态。旋转角度 0°~180°, 摇摆角度 -15°~+15°, 旋转速度 10°/s, 摇摆速度 6°/s, 摇摆周期 13 s, 时间 10 min。选取风速点为 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s。实验结果如图 8~10 所示。

运动补偿后的结果大幅降低了摇摆旋转造成的偏差,

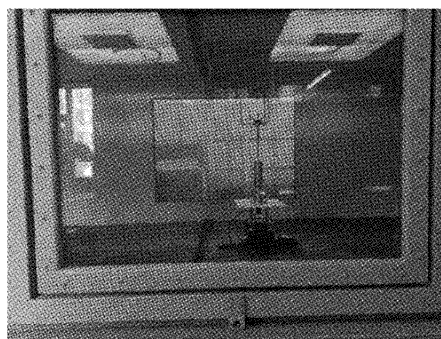


图 7 风洞实验平台放置图

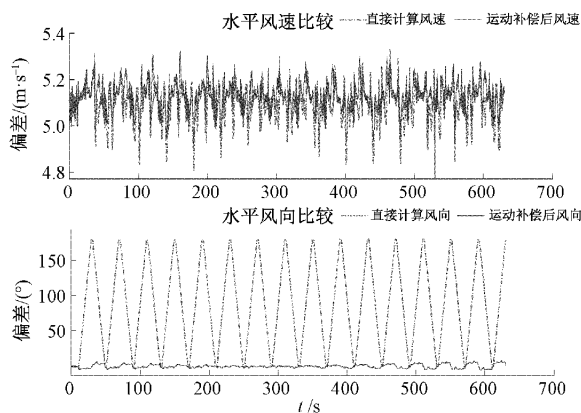


图 8 5 m/s 风摇摆旋转测量风与补偿真风比较

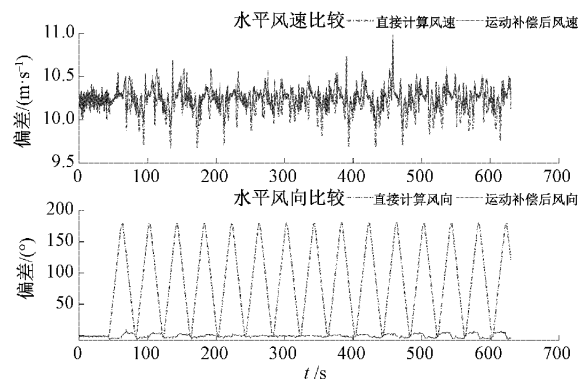


图 9 10 m/s 风摇摆旋转测量风与补偿真风比较

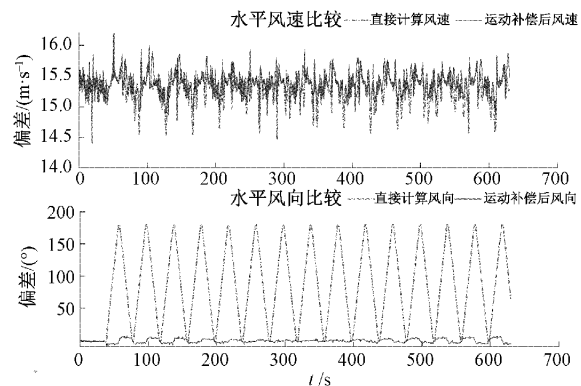


图 10 15 m/s 风摇摆旋转测量风与补偿真风比较

通过表 2 对比,经过运动补偿后风速风向值基本与静止 0° 时相同,风速误差均小于 0.2 m/s,风向偏差在 5 m/s、10 m/s、15 m/s 分别为 0.04°、0.56°、0.75°,均小于 1°,同时运动补偿后的水平风速值稳定性更好。

表 2 运动补偿与静止 0° 结果比较

风洞 风速点	静止 0° 平均值		运动补偿后平均值	
	风速/ (m·s ⁻¹)	风向/ (°)	风速/ (m·s ⁻¹)	风向/ (°)
5 m/s	5.065 2	0.330 7	5.126 2	0.377 1
10 m/s	10.243 2	1.070 5	10.260 7	0.511 4
15 m/s	15.317 2	1.281 0	15.385 6	0.515 2

2) 风洞垂向风实验

垂向风速是海上研究中重要的观测量,需考虑运动补偿后垂向风的效果。风洞产生的风由于方向水平,在垂向方向没有分量,在倾斜台保持不动和竖直时风速计垂向风几乎没有,对于垂向风的校正效果不明显,因此设计垂向风实验,在风洞迎风的方向倾斜摇摆,以产生垂向风分量。垂向实验选取的风速点为 5 m/s 和 15 m/s,将实验台调整至迎风向,以 -15°~+15° 的摇摆角沿着迎风向摇摆。实验结果如图 11 和 12 所示。

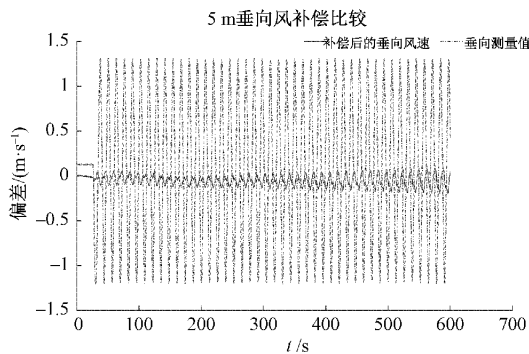


图 11 5 m/s 风垂向实验测量风与补偿真风比较

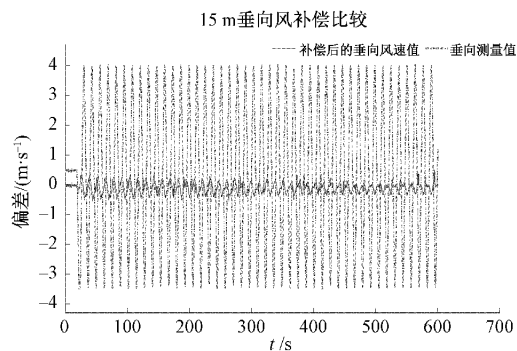


图 12 15 m/s 风垂向实验测量风与补偿真风比较

比较结果如表 3 所示,补偿后 10 min 的垂向风平均值分别为 -0.051 m/s 和 -0.092 m/s,补偿之后的垂向风测

量值较补偿之前有了大幅降低,误差减少到原来的 11%,补偿后 5 m/s 风况下的误差低于 0.2 m/s,15 m/s 风况下误差低于 0.5 m/s,风速测量的误差低于 4%。

表 3 补偿前后垂向风速比较

风洞风速点	补偿前/(m·s ⁻¹)	补偿后/(m·s ⁻¹)
5 m/s	-1.207~1.315	-0.197~0.090
15 m/s	-3.507~4.033	0.490~0.406

论文通过两个实验来验证设计的可行性。通过姿态对比实验验证了设计的双天线 GNSS/SINS 组合测姿系统的测姿性能。由于平台的运动会引起固连在平台上的风速计做同样的运动,会给风速计测量值中引入平台运动信息,造成偏差,因此实验中根据运动补偿原理,对运动影响进行定量分析并进行了补偿。最后为了验证运动补偿设计方案的可行性,进行了旋转摇摆和垂向风的风洞实验。综合上面的实验结果,在不同条件下,经过补偿后的风速测量的误差值远小于补偿前,有效降低了浮标摇摆对风速测量的影响。不同风况和运动状态下经过运动补偿后的风速测量值与未补偿前相比,误差降低到原来的 11%,与固定平台相比误差低于 4%,角度误差低于 1°,满足了海洋观测的要求。

3 结 论

本文根据浮标测风的需要,分析了风速测量误差来源,根据运动补偿原理提出了一种风速补偿方案,并根据补偿方案建立了基于 MEMS 惯性传感器和双天线 GNSS 的组合测姿系统,实现了浮标平台风速测量的运动补偿。实验结果表明,设计的组合测姿系统测姿的稳定性和精度均高于荷兰 XSENX 公司的 MTi 系统;设计的风速测量运动补偿方案可以有效降低浮标运动对风速测量的影响,运动状态下风速测量与固定测量值相比误差低于 4%,满足了浮标风速测量的要求。该方案具有一定的工程应用价值,可应用于各种运动平台的风速测量。

参考文献

- [1] 周亦武,王国锋,赵永生. 船舶摇摆状态下风速测量误差分析与补偿研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1239-1245.
- [2] 段自强,高会旺. 利用不同方法校正船体运动对海气通量观测结果的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(7): 18-24.
- [3] 门雅彬. 船基系统海气通量测量方法研究[J]. 海洋技术, 2004(3): 51-54.
- [4] 王军成. 海洋资料浮标原理与工程[M]. 北京: 海军出版社, 2013.
- [5] 卢艳军,陈雨荻,张晓东,等. 基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 281-288.

- [6] 严恭敏,翁浚.捷联惯导算法与组合导航原理[M].西安:西安工业大学出版社,2019.
- [7] ZHANG C, GUO C, GUO M Z. Information fusion based on artificial intelligence method for SINS/GPS integrated navigation of marine vessel[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020.
- [8] 王翔,白茹,崔晓阳,等.姿态检测系统中的数据融合算法综述[J].电子科技,2018,31(10):39-43.
- [9] SABATELLI S, GALGANI M, FANUCCI L, et al. A double-stage Kalman filter for orientation tracking with an integrated processor in 9-D IMU[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(3): 590-598.
- [10] 余博嵩,何姣,曹晓钟.基于 MEMS 的海洋漂流浮标运动姿态测量系统设计[J].电子测量技术,2019,42(10):99-104.
- [11] 郑京森.双天线 GPS/SINS 组合导航系统研究与设计[D].杭州:浙江大学,2017.
- [12] 李杰,杨雁宇,冯凯强,等.一种融合互补滤波和卡尔曼滤波高精度姿态测量算法[J].中国惯性技术学报,2018,26(1):51-55,86.
- [13] 王丽元,唐友刚,何堃,等.球形波浪浮标运动性能分析[J].海洋技术,2012,31(4):9-13.
- [14] MILLER S D, HRISTOV T S, EDSON J B, et al. Platform motion effects on measurements of turbulence and air-sea exchange over the open ocean[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(9): 1683-1694.
- [15] ZHE Y, LIAN B, TANG C. GPS/INS integrated navigation algorithm based on the double-difference of time/inter-satellite with carrier phase[C]. 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), IEEE, 2017.
- [16] 张仟雨,杨文博,吴亚丽.惯性导航系统中信息处理的特点研究[J].电子测量技术,2020,43(24):34-42.

作者简介

张文勤,硕士研究生,主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail:changzhi_xq@163.com

周文清,工程师,主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail:sohotapple@163.com

邵毅(通信作者),高级工程师,主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail:shaoyi8090@163.com