

基于多传感器融合的波浪谱数据获取与传输方法研究*

张维星¹ 党超群^{1,2} 张锁平¹ 王斌^{1,2} 孙东波¹ 周莹¹ 邢霄波^{1,2}

(1. 国家海洋技术中心 天津 300112; 2. 自然资源部海洋观测技术重点实验室 天津 300112)

摘要 波浪谱分析是研究随机波浪、构建波浪模型、计算海浪要素的主要方法,也是海洋工程设计、波浪能应用研究等的重要依据。目前对于现场波浪数据的获取仅局限于波浪特征参数和部分频段数据,为了获取准确有效的波浪谱信息,提出微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)和全球定位系统(Global Positioning System, GPS)测波传感器相结合的波浪谱数据获取方法以及利用北斗短报文数据传输的通信方式。综合考虑波浪谱数据特点和北斗短报文通信能力,波浪谱数据选用半精度数据类型编码并设计了相应的数据传输格式。现场海试结果表明该方法对于全波谱数据计算和传输较为准确,有效波高、峰值周期、平均波向和方向扩展的准确率相比于单独 GPS 传感器计算结果分别提升了 12.5% (0.1m)、5% (0.2s)、8% (13°)和 13% (8°),为海浪观测资料获取提供了新方法和新思路,可以进一步满足海洋多要素研究和对完整频谱分析的实际应用需求。

关键词 测波传感器;波浪谱;波浪浮标;北斗短报文通信;数据传输

中图分类号 P714 doi: 10.11693/hyhz20220900236

波浪谱是研究海浪的重要数据。理论上可由谱计算各种特征波高和周期(Houghton *et al*, 2021),利用这些特征量可推算海浪的构成以及描述海浪的内外结构(王倩等, 2018)。此外,波浪谱还可用于海浪预报,波浪的绕射和折射,水工建筑物的作用力(Rode *et al*, 2016),船体、浮标和其他浮体对海浪的响应,以及泥沙运动等许多工程应用问题的研究(王艺之等, 2022)。因此对于完整波浪谱数据的计算与实时获取具有重要的研究价值。

波浪浮标作为海浪观测的重要装备,其测波传感器主要分为两种,即全球定位系统(Global Positioning System, GPS)传感器和加速度传感器(王波等, 2014)。GPS 接收机通过载波频率的多普勒频移测量速度,可实现精确的海浪测量(党超群等, 2016)。由于卫星信号需要视线,因此只能在 180°半球视角下看到,这种基本几何结构在水平面上比在垂直面上提供了更

高的精度。Herbers 等(2012)⁹⁵²研究表明,使用低价的 GPS 接收机无法准确解算垂直运动,尤其是在非常陡峭的波浪中变得不太可靠。微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)传感器的开发使加速度计更小、更灵敏和更可靠(张泽凯等, 2022)。但在低频涌浪部分,加速度计的波浪测量是有噪声的,信噪比受到小加速度和非线性浮标运动的污染,谱估计会产生一定的误差(Yurovsky *et al*, 2022)。此外,为实时快速获取波浪谱信息,目前海洋浮标的通信方式主要采用移动网络通信、无线电通信和卫星通信。前两种方式受传输距离限制,不适合用于远海通信。因此大多数浮标选择卫星通信的方式,尤以铱星和海事卫星为主,但综合考虑数据安全和数据传输质量以及费用等方面,两者均存在一定的不足(杨军平等, 2019)。鉴于我国自主研发的北斗卫星导航系统不仅可以实现定位、导航等服务,其具备的短报文通

*自然资源部海洋观测技术重点实验室定向研究基金项目, 2022klootB01 号; 国家海洋技术中心科技创新基金, K5200Z004 号。张维星, 硕士研究生, E-mail: 1622921338@qq.com

通信作者: 党超群, 工程师, Email: dangchaoqun06@163.com

收稿日期: 2022-09-15, 收修改稿日期: 2022-10-17

信服务也越来越多的应用于海洋通信领域(Liu *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2020), 其缺点是单次通信数据量小, 因此需要对波浪谱数据传输格式开展针对性设计。

本研究的目标包括两个方面。一方面是进一步完善一种低价的 GPS 波浪跟踪浮标, 并进行试验验证。具体而言, 在 GPS 浮标上添加了一个价格相对较低的加速度计, 该加速度计提供更稳健和准确的垂直方向位移测量, 从而提高波浪谱数据获取的准确性。另一方面是根据波浪谱数据特点, 设计适合北斗短报文的谱数据传输格式, 依托我国自主通信卫星实现全波谱数据远距离实时传输。该研究能够有效提升波浪谱观测数据获取和传输的完整性和准确性, 对后续的数据应用研究具有推进作用。

1 测波传感器设计

为了量化仪器倾斜运动在垂直加速度测量中引入误差的数量级, 本文考虑了在测量适当的加速度时, 加速度计跟随浮标的理想化运动情况。由于浮标响应海面波动会产生纵摇和横摇, 在测量垂直加速度 a_z 时, 两个水平加速度分量 a_x 和 a_y 以及垂直于海面的静态重力分量的变化会对结果产生影响, 造成误差(杨梦雨等, 2017), 这些变化与波浪引起的表面高度波动具有相同的时间尺度。对于较小的表面坡度 η_x 和 η_y , 实测垂直加速度中的误差 ε 可表示为

$$\varepsilon = -a_x \eta_x - a_y \eta_y - \frac{1}{2}(\eta_x^2 + \eta_y^2)(a_z + g), \quad (1)$$

$$a_x = -g\eta_x, a_y = -g\eta_y, \quad (2)$$

$$\varepsilon \approx \frac{g}{2}(\eta_x^2 + \eta_y^2), \quad (3)$$

其中, g 表示重力加速度, 通常取值为 9.8 m/s^2 。

这一结果表明, 垂直加速度测量中的倾斜误差

与二阶非线性效应相当, 因此在线性波浪理论近似下可以适当地忽略(文圣常等, 1984)。式(3)中的二次平方项, 对实测加速度的影响不是在表面波主频处, 而是在两组波分量的和频和差频处(Pearman *et al.*, 2014)。在复杂多变的混合浪场中, 相对陡峭的风浪坡度可能会使低频涌浪处的加速度测量值偏低。这一猜想在现场测试中得到了证实, 从加速度计数据中显示出大约 10% 的涌浪频谱水平的正偏差, 与在涌浪频率处预期的低信噪比相反, 通常主导表面坡度谱的陡峭风浪成分的实测加速度对这一误差源不敏感(McIntyre, 2013)。因此, 加速度计特别适合测量较高频率的风浪运动, 从而补充 GPS 传感器, 更适合测量较低频率的涌浪运动。

本文在图 1a 所示 GPS 浮标平台的基础上进行了改进, 改进波浪浮标(wave sea drifting, WSD)携带的测波传感器由 GPS 接收机(BDM610)和九轴加速度计(WT905)组成。HWT905 是一款国产九轴加速度计, 是基于 MEMS 技术的高性能三维运动姿态测量系统。该加速度计体积小、质量轻、功耗小, 可用于全天候部署。加速度计能够测量高达 $6g$ 的加速度, 分辨率为 0.00075 g , 静止零漂为 $\pm 20 \text{ mg}$ 。BDM610 是一款具备北斗 RDSS 通信、北斗 RNSS&GPS 定位功能的小型化模块, 内部集成了高性能 RDSS 射频收发芯片、RNSS 双模定位芯片、北斗专用 RDSS 基带电路, 可以实现载体的实时定位、授时、测速、短报文通信等功能。如图 1b 所示, GPS 固定在浮标体中心位置, 加速度计固定在一个水密性良好的外壳内, 系在浮标和配重链之间, 浮标与加速度计外壳之间采用柔性连接的方式, 以保持加速度计的近似垂直方向, 从而抑制浮标垂直加速度测量对横摇和纵摇运动的敏感性, 北斗短报文通信模块安装在浮标顶部, 用于实时数据传输。

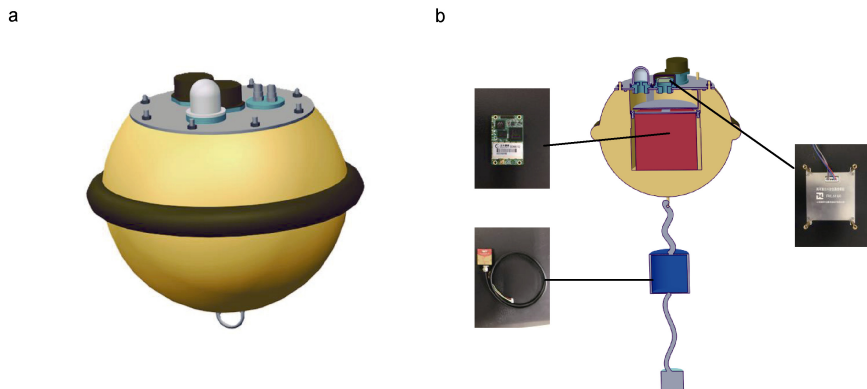


图 1 全球定位系统(GPS)浮标平台(a)和传感器安装示意图(b)

Fig.1 The Global Positioning System (GPS) buoy platform (a) and the schematic diagram of the sensor structure and installation (b)

2 波浪谱数据处理方法

为验证数据获取的准确性, 本文选用 Datawell 生产的波浪骑士(Directional Waverider MK III, DWR-MKIII)作为试验结果比对。从 DWR-MKIII 浮标和 WSD 浮标中提取原始数据, 并创建一个用于分析和比较的统一数据结构。DWR-MKIII 浮标以二进制格式记录原始水平和垂直位移。从 DWR-MKIII 中提取的原始数据包含四个数据串: GPS 时间、东向位移、北向位移和垂直位移, 这些数据串均以 1.28 Hz 采样。从三个位移数据串中移除 30 s 滑动平均值, 移除低频趋势(Herbers *et al*, 2012)⁹⁴⁹。

BDM610 GPS 接收机在内部 SD 卡上记录 GPS 时间、纬度、经度、位移和水平多普勒速度。从 BDM610 中提取的数据包含六个数据串: GPS 时间、东向位移、北向位移、垂直位移、东向多普勒速度和北向多普勒速度, 所有这些数据串均以 2 Hz 采样。从位移数据串中移除 30 s 移动平均值, 以移除任何低频趋势或信号。为了匹配加速度计的采样频率, 所有 DWR-MKIII 和 BDM610 数据串均被线性插值到 10 Hz。

从 HWT905 加速度计提取的数据提供了三个数据串: x 轴方向、 y 轴方向和 z 轴方向的加速度, 加速度计采样频率为 5 Hz。垂直加速度数据被积分一次, 以计算垂直速度, 并且类似于 GPS 时间序列, 去除 30 s 移动平均值, 然后将这些速度数据线性插值到 10 Hz。接下来, 利用和 BDM610 位移之间的互相关分析, 将 HWT905 垂直速度做相应的时序调整, 然后再次积分垂直速度数据(再次去除 30 s 移动平均值), 以计算垂直位移。

整合的第一步是在同步的时基上对齐所有原始数据。将来自不同传感器的同步数据合并到一个数据结构中, 该数据结构包含: GPS 时间、GPS 纬度、GPS 经度、DWR-MKIII 东向位移、DWR-MKIII 北向位移、DWR-MKIII 垂直位移、BDM610 东向位移、BDM610

北向位移、BDM610 垂直位移、BDM610 东移速度、BDM610 北移速度、HWT905 垂直加速度、HWT905 垂直速度和 HWT905 垂直位移。所有数据串现在以 10 Hz 采样, 并在 BDM610 GPS 时间上对齐, 该过程可以直接比较来自各种传感器的时间序列。

将上述位移时间序列转换到频域并结合涌浪峰值频率范围(0~0.1 Hz) 和风浪峰值频率范围(0.08~0.16 Hz), 将涌浪和风浪两个频段同时覆盖, 发挥两个传感器的优势。将整个频段分成若干个部分, 具体来说, 最终波浪谱使用的是 0~0.12 Hz 的 GPS 观测值和 0.2~1 Hz 的加速度计观测值, 0.12~0.2 Hz 的值由两者的加权平均值确定, 其中 GPS (加速度计)的加权线性变化范围为 0.12 Hz 的 1 (0)~0.2 Hz 的 0 (1)。

通过以上波浪谱的计算结果, 波浪特征值有效波高 H_s 和波周期 T_m 可以从波能谱中根据式(4)和式(5)估计,

$$H_s = 4 \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} E(f) df}, \quad (4)$$

$$T_m = \frac{\int_{f_1}^{f_2} E(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} f E(f) df}, \quad (5)$$

其中, f 为频率, f_1 和 f_2 为频谱范围的上下限, $E(f)$ 为波能谱密度函数。

平均波向和方向扩展由一阶和二阶傅里叶矩估计, 表达式如下:

$$\theta_n = \frac{1}{n} \arctan \left(\frac{b_n}{a_n} \right), n = 1, 2, \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{2 \left(1 - \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \right)}, \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \right)}, \quad (8)$$

其中, 傅里叶系数 a_1, a_2, b_1, b_2 可以根据选用不同数据之间的组合依照表 1 进行估计。

表 1 不同测量组合的方向傅里叶系数估计
Tab.1 Direction Fourier coefficient estimation in different measurement combinations

傅里叶系数	x, y, z	x, y, a	u, v, a
a_1	$C_{xz} / \sqrt{(E_{xx} + E_{yy}) E_{zz}}$	$-C_{xa} / \sqrt{(E_{xx} + E_{yy}) E_{aa}}$	$Q_{ua} / \sqrt{(E_{uu} + E_{vv}) E_{aa}}$
b_1	$C_{yz} / \sqrt{(E_{xx} + E_{yy}) E_{zz}}$	$-C_{ya} / \sqrt{(E_{xx} + E_{yy}) E_{aa}}$	$Q_{va} / \sqrt{(E_{uu} + E_{vv}) E_{aa}}$
a_2	$(E_{xx} - E_{yy}) / (E_{xx} + E_{yy})$	$(E_{xx} - E_{yy}) / (E_{xx} + E_{yy})$	$(E_{uu} - E_{vv}) / (E_{uu} + E_{vv})$
b_2	$2C_{xy} / (E_{xx} + E_{yy})$	$2C_{xy} / (E_{xx} + E_{yy})$	$2C_{uv} / (E_{uu} + E_{vv})$

注: x, y, z 分别为地理坐标系下的三轴位移, a 为微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)垂直加速度, $E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, E_{uu}, E_{vv}, E_{aa}$ 为自谱, $C_{xy}, C_{xz}, C_{xa}, C_{ya}, C_{uv}$ 为交叉谱, Q_{ua}, Q_{va} 为同向谱。具体而言, 第一种计算方法利用了 GPS 水平和垂直位移(x, y, z), 第二种方法利用了 GPS 水平位移(x, y)和 MEMS 垂直加速度(a), 第三种处理方法利用了 GPS 水平多普勒速度(u, v)和 MEMS 垂直加速度(a)

3 北斗短报文谱数据传输格式设计

通过使用 128 点快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)计算功率谱密度,利用抽取滤波器将谱数据频率降至 2 Hz,单边谱频率范围为 0~1 Hz,频率带宽为 0.015 6 Hz,每个频率点采集一个海浪谱数据,共获取 64 个频点的海浪谱数据。目前,诸如“波浪骑士”和 NDBC 浮标等均选取有限频段谱数据进行传输(de Vries *et al.*, 2014; National Data Buoy Center, 2009),两者选取的频率范围分别是 0.025~0.58 Hz、0.025~0.485 Hz,该方法将波谱有效信息进行了传输。本文在此基础上,在传输条件允许的情况下尽可能获得更多的信息,将实现频率范围 0~1 Hz 的全波谱传输,一方面可以满足对于不同频段的研究需求,另一方面对于较低频和较高频的现场观测数据研究可以改进数据处理方法和评估、优化传感器性能(Vincent *et al.*, 2019)。

不同波浪尺度对应的能量频谱范围主要集中在中间频段,对于较高(频率大于 0.5 Hz)和较低(频率小于 0.08 Hz)频段的能量数据级偏小,需要保留更多的有效位数(按照波浪骑士数据格式,通常保留至小数点后 4 位),针对这一波浪谱数据特点,需采用合适的的数据格式。IEEE754-2008 包含一种“半精度”格式,这种半精度浮点数是一种计算机使用的二进制浮点数数据类型(Gruber *et al.*, 2022)。半精度浮点数使用 2 字节存储,只有 16 位宽,被称之为 binary16。与 8 位或 16 位整数的相比,它的优点是可以提升动态范围,从而使更多细节得以保留。与单精度浮点数相比,它的优点是只需要一半的存储空间和带宽。其 c/c++ code 如下:

```
u16 halftoFloat16(float f) {
    u32 *i=(u32*) & f;
    u32 sign=( *i >> 31) & 0x1;
    u32 exponent=(( *i >> 23) & 0xff)-0x7f;
    u32 mantissa=( *i) & 0x7ffff;
    exponent+=0x7;
    u16 ret=((sign & 0x1) << 15);
    ret|=(exponent & 0xf) << 11;
    ret|=(mantissa >> 13) & 0x7ff;
    return ret;}
```

根据上述方法设计其输出格式如下所示:

- 第一部分: 时间,“yymmddhhmm”共 6 字节;
- 第二部分: 经纬度,“ddd.mmmm”共 6 字节;
- 第三部分: 波浪谱数据,“binary16”共 128 字节;
- 第四部分: 特征值数据,“Hs、T、dir”共 6 字节。

通过提高传感器采样频率,减小频带宽度,获得更多的波浪谱细节,产生的大量数据可以依据此数据格式采用北斗短报文分包的传输方法。该传输格式总共占用 146 个字节,考虑北斗短报文实际单包最多能传输 78 个字节,因此 2 个包能够容纳,整个传输过程需要 1 min 左右即可完成。但是,现实场景中北斗终端在进行通信时会受各种原因影响,大大降低通讯成功率。本研究结合李伟坚等(2019)所述方法在北斗短报文传输时接入北斗无线电定位(radio determination, RD)控制中心作为中转站,通过北斗 RD 控制中心对短报文数据进行逻辑判断和二次处理后再进行传输,来实现北斗短报文的可靠传输。该方法不仅可提高北斗短报文通讯的成功率,而且增加了有效的回馈机制、重传机制、获取短报文机制。另外,为确保浮标测量数据的有效性和实时性,本研究在数据采集传输过程中还增加了指令交互、握手协议以及全流程数据在线传输等功能。

4 试验验证及分析

为了验证基于 GPS 和 MEMS 加速度传感器融合计算波浪谱的准确性、有效性和北斗传输方法的可行性,本研究开展了相关的海试实验。2022 年 6 月,在青岛小麦岛海域开展了北斗传输波浪谱的海上综合试验。如图 2 所示,试验布放了“波浪骑士”(DWR-MKIII)和本文所述自主研发波浪浮标 WSD 以及漂流式海气界面浮标(drifting air-sea buoy, DrIB2-BW)共 3 个浮标,其中 Datawell 生产的“波浪骑士”作为国际上公认的标准波浪比测仪器,能够提供准确的波浪数据和相应参数信息用于实验比对。此外我国自主创新研发的 DrIB2-BW 型浮标也已被广泛的应用于海洋监测、海浪观测领域(Centurioni *et al.*, 2019),本实验将传感器融合算法同样移植到该平台,从而验证波浪谱算法在不同平台的适用性。

波浪统计量(有效波高 H_s 、谱峰周期 T_p 、平均方向 θ 和方向扩展 σ_θ)以 30 min 为间隔进行计算。如图 3 所示,将实验期间计算结果进行数据对比。结果显示,WSD 得到的有效波高比 DWR-MKIII 测量结果高 8% 左右,而峰值周期低 5%,平均方向和方向扩展分别比 DWR-MKIII 偏差 8% 和 10% 左右。整体而言,两个浮标对于特征参数的计算结果有较强的一致性,误差相对较小。

为展示不同传感器及测波平台计算特征参数的准确性,表 2 给出了部分计算结果。整体而言,各项

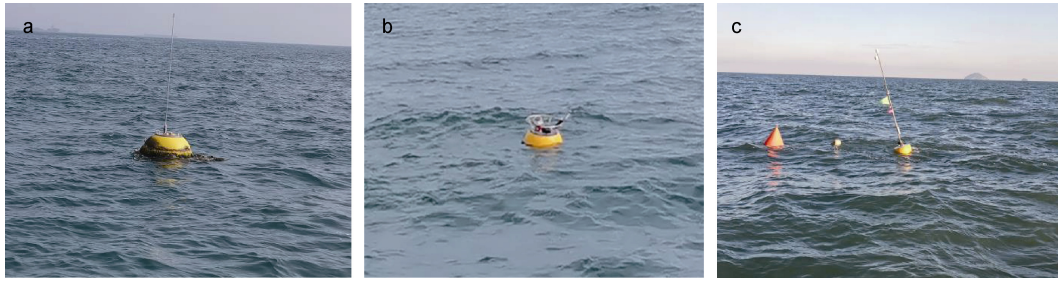


图 2 波浪浮标海试实验现场图

Fig.2 The trial site of the wave buoy at the sea

注: a: “波浪骑士”(Directional Waverider MK III, DWR-MKIII)浮标; b: WSD (wave sea drifting)波浪浮标; c: 漂流式海气界面浮标(drifting air-sea buoy, DrIB2-BW)

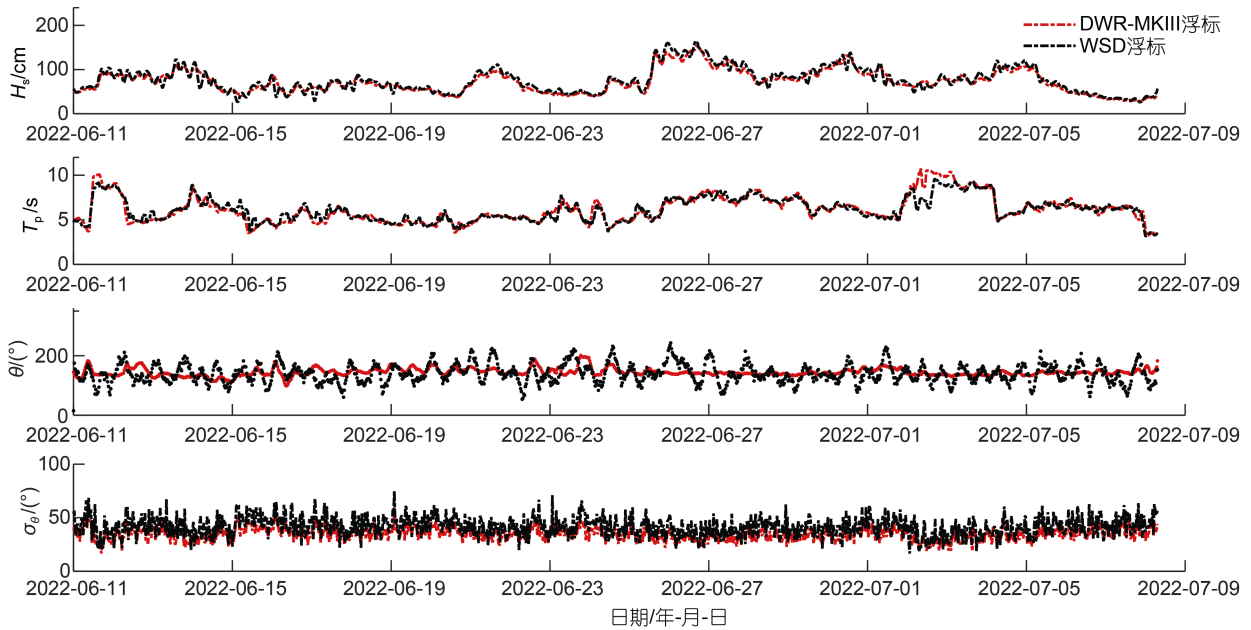


图 3 浮标波浪统计参数比较

Fig.3 Comparison of statistical parameters of buoy waves

注: H_s 为有效波高、 T_p 为谱峰周期、 θ 为平均方向、 σ_θ 为方向扩展

表 2 系统特征参数平均结果对比

Tab.2 Comparison of average results of system characteristic parameters

测波设备	数据接收率	H_s/m	T_p/s	$\theta(^{\circ})$	$\sigma_\theta(^{\circ})$	平均准确率
DWR-MKIII	>95%	0.64	4.0	163	35	-
DrIB2-BW	>95%	0.73	3.6	194	39	90.0%
HWT905	>95%	0.56	3.4	183	42	87.5%
BDM610	>95%	0.78	4.4	189	43	84.0%
WSD	>95%	0.70	3.8	176	37	94.0%

注: H_s 为有效波高、 T_p 为谱峰周期、 θ 为平均方向、 σ_θ 为方向扩展

参数和准确率均在 DWR-MKIII 控制值的 20% 以内, WSD 计算结果准确率相对较高, DrIB2-BW 的测量精度与 WSD 相差不大, 但考虑 DrIB2-BW 尺寸相对较大且搭载了风速计桅杆, 导致其随波性变差, 其整体结构对结果产生了一定的影响, 但仍旧比单个传感

器计算结果要好。

为进一步比较不同传感器对于波浪谱结果的影响, 图 4 给出了由波浪谱计算而得的垂直方向能量谱、平均波向以及方向扩展对应不同频段的相关细节。由图 4 可知, 频率在小于 0.1 Hz 范围内, DWR-MKIII 所

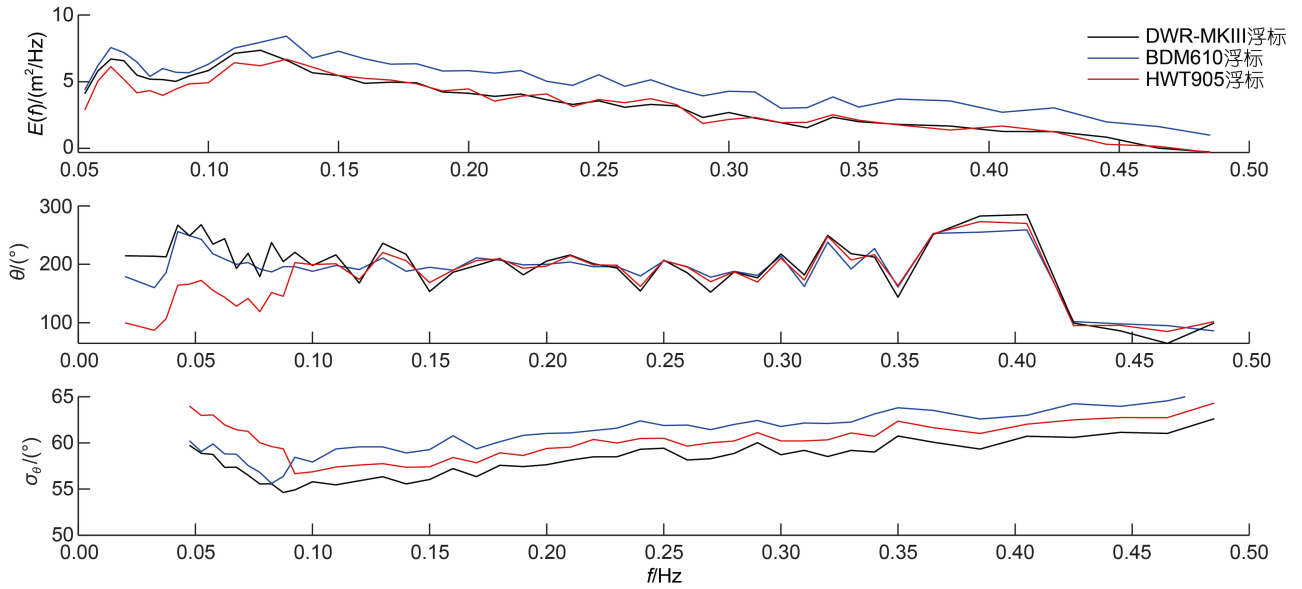


图 4 不同传感器波浪谱数据对比

Fig.4 Comparison of wave spectrum data of different sensors
注: f 为频率; $E(f)$ 为波能谱密度函数; θ 为平均方向; σ_{θ} 为方向扩展

得标准值更接近于 GPS 测量值, 而对应 0.1 Hz 之后的部分, 由加速度计计算结果更倾向于实际值, 这与前文讨论相一致。实验表明, 使用前一段的 GPS 观测值和后一段的加速度计观测值的组合对于波浪谱计算结果有着更好的细节描述, 对于后续的谱分析能提供更加准确的现场观测数据。

本文设计了如图 5 所示的北斗数据接收系统上位机软件, 可以通过指令交互实现远程通信, 软件终端将天线接收到的北斗信号根据帧格式协议解析, 得到所需数据。根据需要在人机界面进行可视化处理, 同时将波浪谱数据生成指定格式文件便于存储。同时, 为防止单个传感器由于损坏和宕机等



图 5 北斗数据接收软件

Fig.5 Beidou data-receiving software

突发状况导致的数据丢失, 本文还设置了 GPS、MEMS、GPS/MEMS 三种数据格式的选择性获取模式, 从而保证数据获取的完整性。

图 6 给出了波浪谱数据传输前后的对比图。图中蓝色“★”表示 64 个波浪谱数据特征点, 红色“○”表示上位机解析北斗回传数据在不同频点的对应值。由于每组波浪谱数据需要两个包传输, 因此需要将分包数据进行合并处理。结果表明, 波浪谱数据传输前后保持了完整的一致性, 数据并未发生丢失与错误, 北斗分包传输数据的接续能力得到很好的验证。

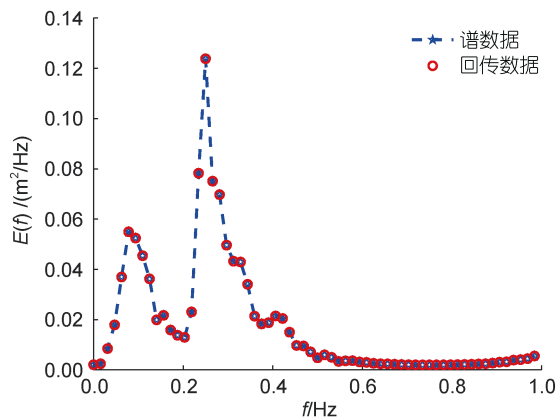


图 6 波浪谱传输前后数据点对比

Fig.6 Comparison of data points before and after wave spectral transmission

综上所述, 本试验全面验证了嵌入式波浪谱算法、基于北斗短报文通信的波浪谱实时传输等功能, 取得了良好的海试效果, 表征了波浪演化时间序列上的精细过程, 进一步完善了国产波浪浮标获取波浪谱的算法设计, 为海上作业、海浪预报等提供了精细化的数据支撑。

5 结论

本文根据科学研究与工程应用对波浪谱数据的需求, 通过分析波浪谱数据采集、信号处理以及数据传输中存在的问题, 提出了一种基于 GPS 和 MEMS 加速度计融合处理的波浪谱数据采集系统和基于北斗短报文通信的谱数据传输方法。根据试验结果可以得到以下结论:

(1) 配备 GPS 和加速度计的波浪浮标可以提供可靠的波浪统计数据 and 较为准确的波浪谱信息。一方面, 将垂直加速度计添加到 GPS 浮标设计中, 显著提高了垂直观测的精度, 与 DWR-MKIII 相比, WSD 浮标的有效波高存在 8% (0.06 m) 的正偏差, 较 GPS 结

果提升了 12.5% (0.08 m), 峰值波周期、波向和方向扩展分别在 5% (0.2 s)、13°和 6°范围内, 各项参数较 GPS 传感器结果分别提升了 5% (0.2 s)、8% (13°) 和 13% (8°)。另一方面, 对于波浪谱数据的分段求解和数据融合处理使波能谱在风浪和涌浪频段处的特征更为明显。

(2) 根据风涌浪混合波谱的数据特点, 结合北斗短报文通信的数据传输长度限制, 设计了相应的传输方案。通过开展北斗传输波浪谱的海上综合试验, 结果表明波浪谱数据传输前后具有良好的一致性, 北斗短报文通信方式可以很好的应用于海浪浮标监测平台中。

参 考 文 献

- 王艺之, 韩新宇, 董胜, 2022. 规则波与直立堤相互作用的数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 44(3): 1-6.
- 王波, 李民, 刘世萱, 等, 2014. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 35(11): 2401-2414.
- 王倩, 宋金宝, 曹海锦, 等, 2018. 波致应力的近似求解及其太平洋特征分析[J]. 海洋与湖沼, 49(3): 524-534.
- 文圣常, 余宙文, 1984. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社: 17-19.
- 李伟坚, 焦明辉, 冯毅华, 等, 2019. 一种实现北斗短报文可靠传输的方法: CN105611511B[P]. 2019-03-08.
- 杨军平, 于晓丰, 武斌, 等, 2019. 基于北斗卫星导航系统的海洋环境监测系统[J]. 海洋开发与管理, 36(8): 77-80.
- 杨梦雨, 管雪元, 李文胜, 2017. 基于 MEMS/GPS/地磁组合的弹体姿态解算[J]. 电子测量技术, 40(4): 60-63.
- 张泽凯, 梁旗, 唐健, 等, 2022. 基于 MEMS 惯性传感器的波浪测量系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 45(10): 170-176.
- 党超群, 张锁平, 齐占辉, 等, 2016. 基于北斗卫星系统的深远海 GPS 波浪浮标数据传输研究[J]. 传感器与微系统, 35(1): 46-48.
- CENTURIONI L R, TURTON J, LUMPKIN R, *et al*, 2019. Global *in situ* observations of essential climate and ocean variables at the air-sea interface [J]. *Frontiers in Marine Science*, 6: 419.
- de Vries, J, 2014. Datawell waverider reference manual, DWR-MkIII, DWR-G[P]. Datawell BV Oceanographic Instruments, Heerhugowaard, Netherlands.
- GRUBER R, KOZHEVNIKOV A, MARINKOVIĆ M K, *et al*, 2022. Performance optimizations for porting the openQ* D package to GPUs [C] // Proceedings of the 38th International Symposium on Lattice Field Theory. Proceedings of Science, 396: 491.
- HERBERS T H C, JESSEN P F, JANSSEN T T, *et al*, 2012. Observing ocean surface waves with GPS-tracked buoys [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(7): 944-959.
- HOUGHTON I A, SMIT P B, CLARK D, *et al*, 2021. Performance statistics of a real-time Pacific Ocean weather

- sensor network [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38(5): 1047-1058.
- LIU Y, XU Y Z, ZHANG K K, *et al*, 2019. Hardware design of marine buoy data communication terminal based on the 1st generation Beidou navigation positioning system [J]. *Journal of Coastal Research*, 93(sp1): 639-645.
- MCINTYRE S A, 2013. Wave and current observations in a tidal inlet using GPS drifter buoys [R]. Monterey: Naval Postgraduate School: 56-61.
- National Data Buoy Center, 2009. Handbook of automated data quality control checks and procedures [R]. Mississippi: Stennis Space Center: 39529-6000.
- PEARMAN D W, HERBERS T H C, JANSSEN T T, *et al*, 2014. Drifter observations of the effects of shoals and tidal-currents on wave evolution in San Francisco Bight [J]. *Continental Shelf Research*, 91: 109-119.
- RODE M, WADE A J, COHEN M J, *et al*, 2016. Sensors in the stream: the high-frequency wave of the present [J]. *Environmental Science & Technology*, 50(19): 10297-10307, doi: 10.1021/acs.est.6b02155.
- VINCENT C L, THOMSON J, GRABER H C, *et al*, 2019. Impact of swell on the wind-sea and resulting modulation of stress [J]. *Progress in Oceanography*, 178: 102164.
- YU F, SUN J, 2020. Integrated marine environment observation system based on iridium satellite communication [C] // JIA Y M, ZHANG W C, FU Y L. *Proceedings of 2020 Chinese Intelligent Systems Conference*. Singapore: Springer: 126-134.
- YUROVSKY Y Y, DULOV V A, 2020. MEMS-based wave buoy: towards short wind-wave sensing [J]. *Ocean Engineering*, 217: 108043.

WAVE SPECTRUM DATA ACQUISITION AND TRANSMISSION BASED ON MULTI-SENSOR FUSION

ZHANG Wei-Xing¹, DANG Chao-Qun^{1,2}, ZHANG Suo-Ping¹, WANG Bin^{1,2},
SUN Dong-Bo¹, ZHOU Ying¹, XING Xiao-Bo^{1,2}

(1. *National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China*; 2. *Key Laboratory of Ocean Observation Technology, MNR, Tianjin 300112, China*)

Abstract Wave spectrum analysis is the main method for studying random waves, constructing wave models, and calculating wave elements, and it is also an important basis for marine engineering design and wave energy application research. The acquisition of wave data in the field is limited to wave characteristic parameters and some frequency band data, a wave spectrum data acquisition method combining MEMS and GPS wave measurement sensors, and a communication method using Beidou short message data transmission were proposed to obtain accurate and effective wave spectrum information. Considering the characteristics of wave spectrum data and the communication capability of Beidou short message, the wave spectrum data were encoded in semi-precision data type, and the corresponding data transmission format was designed. The results of the field trial show that the method is more accurate for the calculation and transmission of full wave spectrum data, and the accuracy of significant wave height, peak period, mean wave direction, and directional spread is 12.5% (0.1m), 5% (0.2s), 8% (13°), and 13% (8°) higher than those calculated by GPS sensor alone. This study provided a new method and new ideas for wave observation data acquisition and can further meet the needs of marine multi-element research and applications for complete spectrum analysis.

Key words wave sensor; wave spectrum; wave buoy; Beidou short message communication; data transmission