

海浪方向谱的数据测量和估计方法

周 波,石爱国,蔡 烽,张永胜
(海军大连舰艇学院,辽宁 大连 116018)

摘 要: 海浪方向谱的研究在基础物理、海洋预报以及军事方面都有重要意义。现在已经有多种测量方法,其中现场测量方法包括设置浮筒、观测阵列或传感器以及水下自治运载设备等;遥感方法包括使用雷达或卫星等。本文对其进行系统比较,并介绍不同测量方法的分析流程。另外,还对最大似然法(MLM)、扩展最大熵方法(EMEP)、贝叶斯(BDM)方法等进行了比较。

关键词: 海浪方向谱;测量方法;谱估计

中图分类号: U675.74 **文献标识码:** A

Measurement and estimation methods of wave directional spectrum

ZHOU Bo, SHI Ai-guo, CAI Feng, ZHANG Yong-sheng
(Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: Measurements of directional wave spectra have interests that range from fundamental physics, to accurate forecasting, to determination of tactical information for military operations. There are many techniques for collecting spectral information, each of which has advantages and Disadvantages. These include deployable or in-situ instruments such as directional wave buoys, arrays of current meters and pressure sensors, as well as autonomous underwater vehicle, remote sensing techniques involving microwave radar systems or satellites are also commonly used. In this paper, different methods are discussed and the flows charts are provided. At same time, different estimating methods such as maximum likelihood method (MLM), extended maximum entropy principle(EMEP) and Bayesian directional method(BDM) are studied and compared respectively.

Key words: directional wave spectrum; measurement method; estimating method

0 引 言

海浪通常指风作用下形成的风浪以及风浪传播所导致的涌浪。海上的风成波并非沿着某个固定的方向传播,因此波能也分布在不同的方向上。当波浪的频率接近均值频率时,波能主要沿着风的方向传播;而当波浪频率高于或低于均值频率时,波能则分布在不同的方向上。为了准确描述随机波浪,必须获取波能沿各个方向耗散的信息。海浪方向谱比海浪频谱更细致地刻画了海浪的内部结构,但世界上对其研究远较频谱为少,我国在这方面的研究也很少。系

统地研究海浪方向谱,不仅可以了解海浪的生成、生长机制,搞清海浪的内部结构和外在特征,而且对国防、航运、造船、港口和海上石油平台的建设具有重要意义^[1,2]。

1 数据获取方式

海浪是一种随机信号,要深入分析海浪信息,不能单纯依靠理论计算和实验室中的试验结果,而需要进行测试。为了获得波浪谱在各个方向上的信息(方向谱),有很多收集波浪谱信息的方法,如,通过分析采用仪器的一维阵列(直线阵列)、二维阵列和

多维阵列所测得的资料进行估计的方法;根据浮标升降、倾斜和曲率的记录,获得波浪方向性的方法^[1];通过遥感获得较大范围内海面起伏的方法。本文将前两种方法统称为现场测试方法。

1.1 现场测试

常见的现场定点测量方法有阵列方法、PUV 传感器方法和方向波浮筒方法等。测试仪器包括垂荡/纵摇/横摇浮筒、位移浮筒、速度跟踪浮筒、流速压力传感器矩阵(Allender 1989)等。

早期的 PUV 传感器包括电磁速度传感器和压力传感器,在使用中要特别注意平均水深变化,要精确设定压力传感器和速度传感器的高度。高度不同会对波浪谱的谱型带来一定的影响,如图 1 所示^[4]。近年来,由于声学传感器可以进行远程测量,远离传感器本身的噪声,而且它的测速精度更高,因此正逐渐取代电磁传感器。如 SZS2-1 坐底式声学波流测量仪,该仪器自水底向上垂直测量水体的流速度剖面和波浪高度、反演波浪方向谱及波浪特征值。系统集成流速剖面与波浪方向谱、能谱以及波浪特征参数测量于一体,可长期连续测量,实时地以图形方式显示流速剖面、各层流速、流向,二维、三维波向谱图和各种辅助传感器的数据。数据以文件形式存储并可通过 RS-232 口实时送出,使用起来非常方便。

阵列测波仪可以较好地测量波浪信息,但安装困难,分析复杂。国家海洋局的林明森完成了海浪方向谱的阵列式波浪仪系统的波浪特征值、方向谱的计算软件及数据无线传输的软件研制。吴秀杰等^[2]采用仪器阵列观测方案进行了海浪方向谱观测工作;赵栋梁等在实验室风浪槽内用仪器阵列观测了海浪方向谱。

相对而言,波浪浮筒价格相对较低,安装容易且分析简单,因此更常用一些,但是容易受损。

水下自治运载工具(AUV)是一种比较合适的移

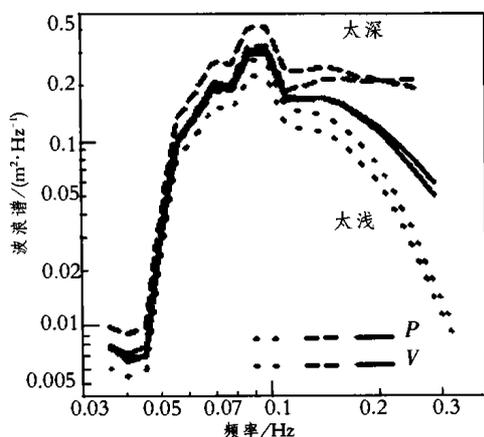


图 1 传感器位置对波浪谱的影响

动测量器材,它可以作为海洋环境现场测试的移动平台。小型的 AUV 可以以 3 ~ 4kn 的时速测量 3 ~ 5 mile² 的区域,在此区域内分析海浪特性,机动灵活,使用方便。AUV 携带的传感器和浮筒可以在任何理想位置机动灵活地收集数据,而不必每次更换测量区域都要重新安装和卸载。美海军研究生学院正在开展用 PHOENIX—AUV 测量方向谱方面的研究工作。

总的来说,现场测试方法收集到的各种数据都要通过一定的处理,才能得出方向谱。基本流程如图 2 所示。

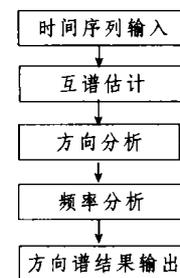


图 2 现场测试数据处理流程

1.2 远程遥感

常规方法测量海浪方向谱相当困难,大面积的测量几乎不可能,遥感技术是解决这一问题的有效方法。远程遥感技术有微波雷达系统(Tyler 1974)、飞行器(McLeish, 1980)以及卫星(Monaldo 1984)系统等。

1.2.1 SAR 图像获取海浪方向谱

高分辨率的合成孔径雷达(SAR)图像能够测量海浪方向谱,从 SAR 图像获取海浪方向谱相当复杂,国际上许多学者在这方面做过研究^[2,6]。

利用 SAR 图像获取海浪方向谱的方法主要有三种:第一种是直接利用线性传递函数变换方法求得海浪方向谱;第二种是利用 SAR 图像谱到海浪方向谱非线性前向变换进行迭代求逆求得海浪方向谱;第三种是参数化方法^[2],直接利用图像谱获取海浪方向谱。SAR 参数法方法提取海浪方向谱的步骤是:(1)读取 SAR 波模式图像数据,将每一块图像分成 4 块子图像;(2)将上述每一子图像进行傅立叶变换,获得它们的图像谱,将每一块图像中的 4 图像谱进行平均,获取每一块图像的图像谱;(3)优化求逆,利用网格法优化方法获取使价值函数取最小值时的参数,并提取海浪方向谱,如图 3 所示^[2]。

1.2.2 船用雷达图像分析

近 20 年来,普通的航海雷达已经用于海浪方向

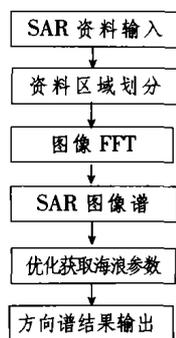


图3 SAR图像获取海浪方向谱流程

谱方面的分析,雷达接收到附近海域的回波,这些海洋信号通常被称为海洋杂波,被当成噪声处理。要用航海雷达分析海面图像,至少要有3m/s以上的海风,风速、波浪倾斜以及波高等都会对雷达图像产生影响。对这些信息进行分析,可以得出海况分析所需要的波浪谱、波浪周期、传播方向和有义波高等参数信息。

德国 GKSS 研究中心 (Ziemer, 1991; Dittmer, 1995) 开发了一种可处理海洋杂波的系统 (WaA4oS II), 该系统由 1 个常规的航海雷达、1 个对模拟雷达图像信号进行数字化的 A/D 转换器, 1 台用于实时数据处理的计算机。分析流程如图 4 所示。

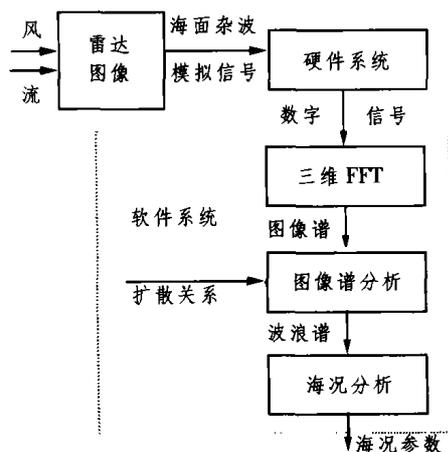


图4 航海雷达计算海浪谱流程图

2 谱分析方法^[7]

由有限数据估计海浪方向谱的基本思想最先由 Barber 提出, 测量数据经傅立叶变换成交叉谱, 交叉谱与方向谱之间的关系可写成

$$\Phi_{mn}(w) = \int_k H_m(\vec{k}, w) H_n^*(\vec{k}, w) \cdot \exp[-i\vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)] S(\vec{k}, w) d\vec{k}, \quad (1)$$

式中: Φ_{mn} 为复合阵列中第 m 和第 n 个海浪特性间的交叉谱; $S(\vec{k}, w)$ 为海浪的波数频率谱; $H_m(\vec{k}, w)$ 和 $H_n^*(\vec{k}, w)$ 分别为第 m 和第 n 个海浪与波面间的传递函数; \vec{x}_m 和 \vec{x}_n 分别为第 m 和第 n 个测头位置矢量; \vec{k} 和 w 分别为组成波数矢量和圆频率; M 为复合阵列的维数。

对方向谱的估计有许多方法, 比较经典的谱估计法如间接法 (BT 法)、直接法 (周期图法、修正周期图等)、现代谱估计方法 (参数模型法常用 AR 模型、最大熵法 MEP、扩展最大熵法 EMEP 和线性预测法, 极大似然法 MLM, 以及自适应法和 Robust 法以及高阶谱估计等) 和贝叶斯方法 BDM 等。其中分辨率较强的有 MLM, EMEP 和 BDM。由于观测资料的限制, 一个估计方法的可靠性一般是通过数值模拟的方式来检验的, 并以某种特定的频率和噪声水平进行。各种估计方法无法直接比较其优劣性。

2.1 最大熵方法 (Maximum Entropy Principle)

1967 年 Burg 提出的最大熵法, 把过程的自相关函数进行了无限的外推, 大大提高了谱分辨率。扩展最大熵法将方向分布 $G(\theta, f)$ 视为区间 $[-\pi, \pi]$ 上的概率函数。

$$G(\theta, f) = \exp\left[\sum_{n=1}^N (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)\right]. \quad (2)$$

在 Shannon 熵最大前提下, 求解非线性积分方程来确定系数 a_n 和 b_n , 从而得到方向谱分布函数。

2.2 极大似然方法 (Maximum Likelihood Method)

极大似然方法 (MLM) 的基本思想: 由观测所得到的交叉谱含有噪声, 获得方向谱是自噪声中检测出信号的问题。采用的最佳滤波器类似于从高斯随机噪声估计已知频率正弦波幅度的最大似然估计形式^[7]。

Isobe 等将 MLM 推广, 建立了扩展最大似然方法 EMLM, 可用于各种复合阵列。

$$\hat{S}(\vec{k}, w) = \frac{K}{\sum_{mn} \Phi_{mn}^{-1}(w) H_m(\vec{k}, w) H_n^*(\vec{k}, w) \exp[-i\vec{k} \cdot (\vec{x}_n - \vec{x}_m)]}, \quad (3)$$

式中: $\Phi_{mn}^{-1}(w)$ 为交叉谱矩阵 $\Phi(w)$ 的逆矩阵 $\Phi^{-1}(w)$ 的第 (m, n) 个元素; $\hat{S}(\vec{k}, w)$ 为方向谱的估计值; K 为比例系数, 其他参数的含义与式 (1) 中基本相同。

2.3 贝叶斯方法 (Bayesian Directional Method)

贝叶斯方法 (BDM) 是基于信号和噪声参数联合

后验概率密度函数的对信号的谱估计,它把被估计量视为需估计出现实的随机变量,这样就可以在估计时引入被估计量的先验知识,从而改善估计性能。Hashimoto 等将 Bayesian 模型引入海浪方向谱估计,首先将方向分布函数 $G(\theta, f)$ 均匀离散化:

$$G(\theta, f) = \sum \exp[x_k(f)] I_k(\theta), \quad (4)$$

$$I_k(\theta) = \begin{cases} 1 & (k-1)\Delta\theta \leq \theta \leq k\Delta\theta, \\ 0 & \text{其他} \theta. \end{cases}$$

式中: $\Delta\theta = 2\pi/K$, K 为均匀等分的份数,同时考虑到方向函数应该是光滑连续。

在分析方向谱时,考虑资料中存在的随机误差,利用超参数将平滑函数引入计算过程中,使估算结果在波浪方向分布的分布特性与平滑连续性两者都适当考虑的情况下,推导出一个最优估计的方向分布。

表 1 谱估计方法比较

方法	优点	缺点
DFT	方法简单	通常给出较宽的分布,尤其对于分布较窄的波浪,难于分析出与实际较一致的主波向。
MEP	可用来识别重要的频率成分;适用于短记录数据或慢变(低频)信号的谱估计,频谱分辨率高;抗噪能力强;对信噪比非常敏感。	模型阶数选择困难,谱估计的方差不能估计;离散谱的谱线峰值可靠性差;在信噪比大等情况下有谱线分裂现象;不能由谱估计值尖峰幅度直观得出对应频率信号的功率,而须由曲线下的面积来判断;计算复杂。
EMEP	由低次向高次逐步迭代,分辨率高。	不宜对实测资料进行分析。
MLM	计算时间短,有一定的精度。	由于资料的随机误差而产生影响,造成方向分别出现扭曲变形,导致不能正确辨别主波向,可能出现波向偏离或双峰现象。
EMLM	有较高的分辨率。运算速度快。	计算时间与迭代精度有关。容差性差,有时会导致负能量分布。
BDM	分辨率较高,较真实反映海浪方向分布。	计算量与方向谱的分辨率有关,计算相当复杂,不适于现场观测。

这种方法用分段近似的方式估算波浪的方向分布,而不以一固定函数表示方向分布,在描述海洋波向分布时不因函数本身的特性而受到限制。

3 不同方法比较

表 1 给出了 6 种谱估计方法的比较。这些方法的方向分辨率受阵列中仪器个数、仪器间距和方向分别宽度以及互谱误差等影响。对比分析得出,在平滑函数的影响、方向分布的宽度、双峰方向分布、仪器数目多少、仪器平均间距与波长比等因素综合考虑下,贝叶斯方法都可以用于解析不同形态的波浪方向分布。BDM 法的方向分辨率最高, EMLM 的分辨率次之。MLM 计算时间短,有一定的精度,可以满足工程和应用的要求。

参考文献:

- [1] 奥奇 M K. 不规则海浪随机分析及概率预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1985.
- [2] 何宜军. 合成孔径雷达提取海浪方向谱的参数化方法[J]. 科学通报, 1999, (4): 428 - 433.
- [3] 吴秀杰, 等. 海浪方向谱阵列资料实例分析[J]. 黄渤海海洋, 1999, (1): 7 - 15.
- [4] 管长龙. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, (10): 549 - 556.
- [5] LEE GORDON ATLE LOHRMANN, Near-shore Doppler Current Meter Wave Spectra[C], ASCE Waves 2001 proceedings. 2001.
- [6] JOSCE C. N, BORGE RICARDO, et. al. Estimation of Sea State Directional Spectra by Using Marine imaging of Sea Surface [C], Proceedings of ETCE/OMAE2000, 2000, (2), New Orleans, LA.
- [7] 赵栋梁, 管长龙, 吴克俭, 文圣长. 海浪方向谱估计方法比较[J]. 海洋学报, 1999, (5): 119 - 125.

作者简介: 周波(1974-), 女, 讲师, 在读博士, 从事信号处理、系统仿真方面的研究。