

# 上海海域风浪谱分析与研究

冯卫兵<sup>1</sup>, 任华堂<sup>2</sup>, 洪广文<sup>1</sup>

(1. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

**摘要** 根据上海海域四个测点的 11300 多组实测波面记录, 经初谱估计和分析, 筛选出拟合样本 280 多个, 并求得各测站的标准化平均样本谱及 4 个测站的综合平均样本谱。结果表明上海海域的风浪谱都呈现双峰谱型, 且其低频部分的能量比重约为 15% ~ 20%。因此, 经过多种拟合计算分析后认为: 该海域拟采用 JONSWAP 谱与三参数谱联合或者五参数谱与三参数谱联合进行拟合较为合适, 同时提出了适用于上海海域的双峰谱型及其相应参数, 可作为上海海域沿海建筑物的不规则波设计的备选谱型, 对我国其他类似海域也有一定的参考价值。

**关键词** 波浪; 风浪谱; 双峰型风浪谱

中图分类号: TV139.2<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2002)03-0028-05

海浪是港口航道及海岸工程规划中一个重要的海洋因素。天然海浪实质上是一种随机波(或者称为不规则波), 海浪谱是描述随机海浪的重要手段。由于海浪的生成、发展机制极为复杂, 其传播水域条件不尽相同, 目前提出的多种海浪谱模式形式尚未统一, 参数大多有待确定。上海市海塘总长 542.8 km, 海塘工程是沿海地区抵御风暴潮、保障人民生命财产安全的重要水利设施, 因此如何合理规划、设计上海海塘, 确定既经济又安全可靠的海塘形式, 是上海堤防工程的重要课题, 海浪谱模式研究就是其中的重要组成部分。

## 1 基本情况

上海市有关单位于 1986 ~ 1994 年期间, 分别在团结沙、横沙岛、大治河以及中港等测站进行波浪实时观测, 得到的波面记录共计 11300 多组。观测时间大致为: 中港和横沙岛是台风期(1990 年 8 ~ 9 月), 团结沙和大治河是寒潮期(1988 年 12 月 ~ 1989 年 2 月)。经过与同步风速资料对比分析, 选择了风速较大的 3500 多组数据, 作为进行初谱分析的样本资料。各测点位置如图 1 所示, 从图 1 可以看出: 4 个测站基本上覆盖了上海海域, 而且各观测站的观测时间也反应了对工程影响最大的大风浪天气。因此, 利用上述资料作为拟合上海海域风浪谱的样本谱是具有代表性的。

## 2 初谱估计与样本筛选

目前常用的二维波能谱分析方法有两种: 一是相关函数(协方差函数)法; 二是快速傅立叶方法, 即直接利用波面离散值进行快速傅立叶变换求解波能谱。从谱型和各种特征参数的比较, 发现这两种方法的结果差

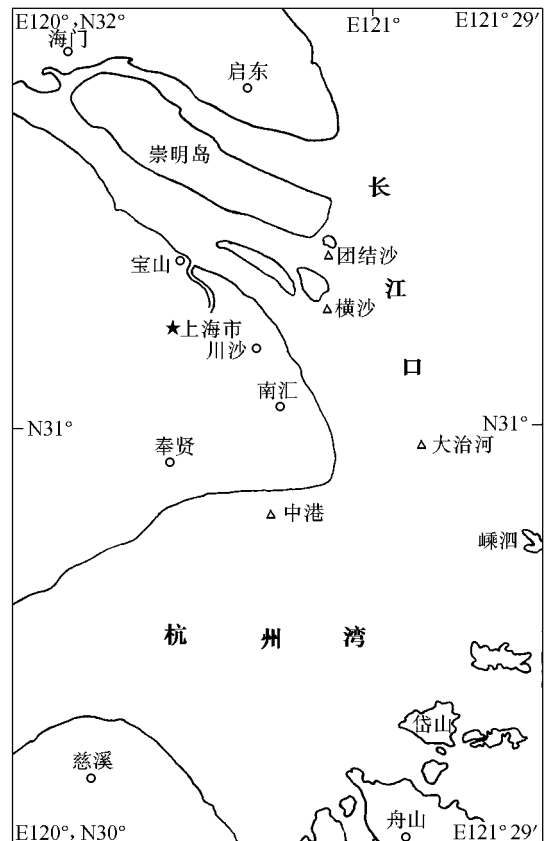


图 1 上海海域风浪测站位置

Fig.1 Sketch of wave observation stations in Shanghai seas

别不大,所以研究中应用快速傅立叶变换求解波能谱.同时计算了各阶谱矩  $M_n'$  及相应谱特征参数如谱峰频率  $f_0$ ,谱峰值  $S_{\max}$  等.根据谱型和特征参数对样本谱作进一步筛选,保留 280 多组波能谱进行统计分析,得到波面统计特征波要素及谱特征值如表 1 所示.

由表 1 可以看出 (a) 团结沙、横沙岛及大治河测站的波高相对较小,中港测站的波高较大 (b) 团结沙和大治河测站的波周期较小,无论实测统计平均波周期还是波谱特征波周期 ( $T_{01}$  或者  $T_{02}$ ) 均小于 4.0 s,且三者之间差别不大,而横沙岛和中港测站的波周期相对较大 (c) 4 个测站的样本谱多为双峰谱,部分样本谱的次峰能量占总能量的 20% 以上,说明上海海域的波能谱中包含涌浪能量和风浪能量两部分,详见图 2.3 (d) 所有各测站的波谱特征波高与对应的波面统计特征波高较为接近,说明研究中采用的初谱分析方法是正确的,同时按波谱计算的特征波高比波面统计的特征波高为大,说明当地的波浪受浅水影响,波高的增大受到限制.

表 1 波谱特征参数与波面统计特征参数

Table 1 Characteristic values of sea wave spectra and wave surface

| 测站  | 波面统计特征      |             |            |           |             | 波谱特征        |             |              |                |                |             |  |
|-----|-------------|-------------|------------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|----------------|-------------|--|
|     | $H_{s\max}$ | $\bar{H}_s$ | $T_{\max}$ | $\bar{T}$ | $\bar{T}_s$ | $H_{s\max}$ | $\bar{H}_s$ | $T_{01\max}$ | $\bar{T}_{01}$ | $\bar{T}_{02}$ | $\bar{f}_0$ |  |
| 团结沙 | 0.45        | 0.22        | 6.22       | 3.17      | 3.54        | 0.49        | 0.25        | 5.32         | 3.36           | 3.12           | 0.2904      |  |
| 横沙岛 | 0.66        | 0.59        | 4.44       | 4.01      | 4.85        | 0.73        | 0.66        | 4.58         | 4.34           | 3.81           | 0.2441      |  |
| 大治河 | 0.53        | 0.33        | 4.83       | 3.44      | 4.05        | 0.58        | 0.37        | 4.94         | 3.66           | 3.33           | 0.2681      |  |
| 中港  | 1.90        | 1.02        | 5.53       | 4.58      | 5.47        | 2.30        | 1.22        | 6.01         | 5.21           | 4.59           | 0.1896      |  |

3 样本谱标准化及常用谱型剖析

3.1 样本谱标准化

由于影响因素多种多样且处于变化之中,每个样本谱形状、大小也各不相同,为了探讨其固有共性,研究中对个别样本谱(称为个例谱)  $S'(f)$ ,由其谱峰频率  $f_0$  与谱零阶矩  $M_0'$  进行无量纲化(标准化).同时计算了团结沙、横沙、大治河和中港等 4 个测站的无量谱估计、相应的无量谱矩  $M_n$ 、无量谱峰值  $S_0$ 、特征频率 ( $\mu_{10}$ ,  $\mu_{20}$ ) 和谱宽度 ( $\varepsilon$ ,  $q$ ) 等.尽管有的无量谱曲线离散大一些,但皆呈现一定的形状共性(如图 2),将得到的无量谱进行平均,求得各测站及所有测站合并的平均无量谱估计(如图 3),并依此作为拟合的样本代表谱型.由图 3 可以看出低频部分的次峰谱频率  $\mu_0'$  在 0.2 左右,约为主峰频率  $\mu_0 = 1.0$  的 1/5.

3.2 常用拟合谱型

3.2.1 JONSWAP 谱

1970 年前后基于北海深水有限风区风浪观测资料分析(约 2 500 个样本谱)拟合的波浪谱称为 JONSWAP 谱,模式<sup>[1]</sup>中包含了称为峰值升高因子的参数  $\gamma$ ,其平均值  $\bar{\gamma} = 3.3$ ,但是该模式只有在  $\gamma \geq 1.0$  条件下才适用.

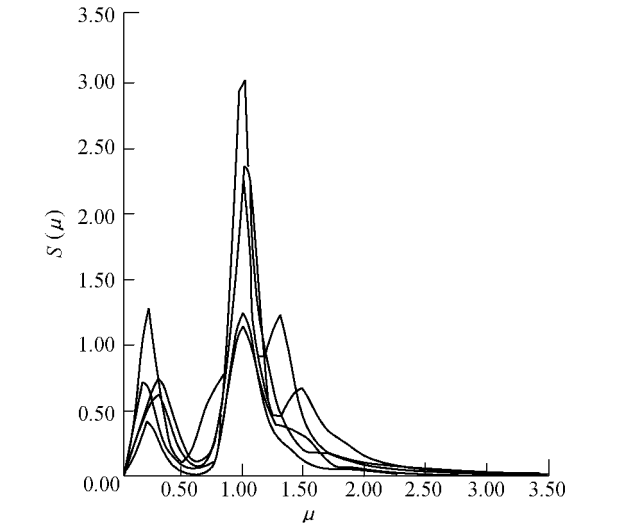


图 2 部分无量谱曲线  
Fig.2 Wave spectral curves

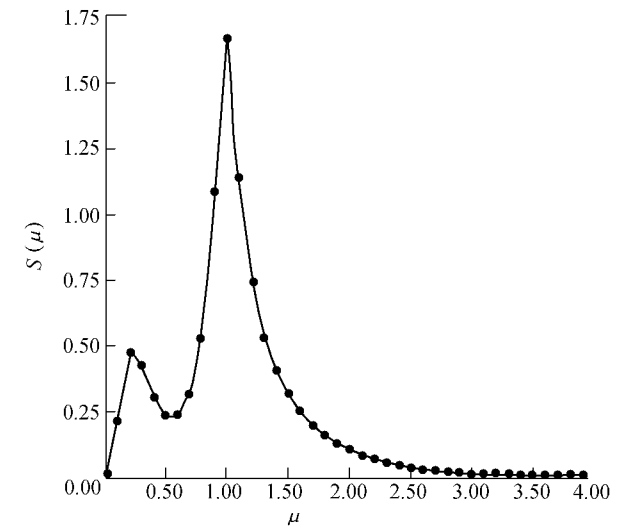


图 3 四站合并平均无量谱曲线  
Fig.3 Wave mean spectral curve for four observation stations

### 3.2.2 5 参数海浪谱模式

洪广文教授等<sup>[2,3]</sup>提出一个含有 5 参数的风浪谱理论模式,并首先应用于莆田海堤观测站浅水风浪谱拟合<sup>[4,5]</sup>,之后国内其他研究者也利用该模式拟合我国东海、黄海水域实测谱估计,符合良好.模式中包含了无因次频率  $\mu$ , 高频段的衰减因子  $\delta$  以及由实测资料给定的无因次参数  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, k$  和  $b$  等.该模式可灵活地利用  $\delta, k$  和  $b$  等 3 个主要参数来拟合无量纲实测谱估计,比 JONSWAP 谱有更广泛的适应性.实际进行拟合时可根据谱估计的高频段衰减情况和无量纲谱峰值等,经试算逐步选定  $\delta, k$  和  $b$ ,也可以参考文献<sup>[6]</sup>提供的有关计算表.

### 3.2.3 交通部《海港水文》规范谱

由文圣常院士等<sup>[7]</sup>提出并收录于交通部《海港水文》规范的风浪谱模式分为深水风浪谱和有限水深水域风浪谱两种,模式中都包含了称为尖度因子的参数  $S_0$ .《海港水文》规范中给出了相关的计算公式,计算后发现,实测值与按公式计算的计算值差别很大.同时经过我国其他海域的实测资料验证表明,此理论谱模式一般适用于完全风浪谱,对于风涌混合谱不是太适用.

### 3.2.4 3 参数风浪谱模式

国家海洋局第一海洋研究所黄培基、胡泽建<sup>[8]</sup>参照 КРЫЛОВ (1966) 和 Liu (1984) 的研究成果于 1987 年提出的 3 参数风浪谱拟合模式:

$$S(\omega) = C_1 \frac{M_0'}{\omega_0} \mu^{-c_2} \exp(-C_2/C_3 \mu^{-c_3})$$

此模式中  $C_i (i=1, 2, 3)$  为由给定的实测谱确定的无因次参数;1989 年黄培基、胡泽建<sup>[9]</sup>又将其拓展为模拟双峰谱的 3 参数:  $S(\omega) = S_1(\omega) + S_2(\omega)$  (主、次峰谱各用 3 个参数),此模式的优点在于避免了 JONSWAP 谱及《海港水文》规范谱对尖度因子大于 1.0 的要求,并且通过  $C_2, C_3$  的调试可拟合谱增长或衰减较慢的次峰,其缺点在于要用  $\Gamma$  函数来确定  $C_2, C_3$  时出现多峰值解,而且求解较为困难.

## 4 样本谱拟合

每个理论谱型都有其优、缺点,如何利用各自的优点克服缺点来拟合实测的样本谱正是研究者们所要解决的课题.从上海海域实测波浪谱多为双峰谱且其主次峰的增长和衰减速度不一致的特点,本文选择了 JONSWAP 谱或者 5 参数谱与 3 参数谱分别来拟合实测样本谱的主峰段与次峰段.问题的关键是如何保证理论谱的主次峰峰值与相应实测样本谱的主次峰峰值相一致,同时又要保证理论谱主、次峰交界处的谱密度与相应实测样本谱主、次峰交界处的谱密度相一致,采用设定最小目标函数逐步搜索的方法,计算表明该方法是行之有效的.通过各测站及 4 站综合的样本谱拟合计算,求得上海海域期望(平均)风涌混合双峰型频谱模式.

#### a. JONSWAP 谱与 3 参数谱组合(方法 1)

$$S(\mu) = \begin{cases} \frac{m_0}{K\gamma} \mu^{-5} \exp(-\frac{5}{4}\mu^{-4}) \gamma^{\exp[\frac{(\mu-1)^2}{2\sigma^2}]} + C_1(5m_0' \gamma 5\mu)^{-c_2} \exp[-(\frac{C_2}{C_3} \gamma 5\mu)^{-c_3}] & \mu < 1 \\ \frac{m_0}{K\gamma} \mu^{-5} \exp(-\frac{5}{4}\mu^{-4}) \gamma^{\exp[\frac{(\mu-1)^2}{2\sigma^2}]} & \mu \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu = f/f_0 \quad \sigma = \begin{cases} \sigma_a & \mu < 1 \\ \sigma_b = 0.09 & \mu \geq 1 \end{cases} \quad m_0 + m_0' = 1$$

式中:  $m_0$ ——主峰所占的谱能量;  $m_0'$ ——次峰所占的谱能量.

#### b. 5 参数谱与 3 参数谱组合(方法 2)

$$S(\mu) = \begin{cases} m_0 \alpha_1 \mu^{-\delta} \exp(-\alpha_2 \mu^{-b} \gamma (1 - k + \alpha_4 \mu^{-b})) + \\ C_1(5m_0' \gamma 5\mu)^{-c_2} \exp[-(\frac{C_2}{C_3} \gamma 5\mu)^{-c_3}] & \mu < 1 \\ m_0 \alpha_1 \mu^{-\delta} \exp(-\alpha_2 \mu^{-b} \gamma (1 - k + \alpha_4 \mu^{-b})) & \mu \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

由表 2 和图 4.5 可以看出,本文拟合的理论谱谱型以及各种谱参数都与相应实测样本谱谱型和谱参数相吻合,说明本文所用的拟合方法是正确的.

同时,在研究中也曾尝试将次峰能量均匀分配到主峰谱上,只拟合成单峰谱形式,事实证明无论是 JONSWAP 谱模式还是 5 参数谱模式拟合的理论谱曲线及各种谱参数都与实测样本谱相应的点据及谱参数不符,特别是  $\mu_{10}$ 、 $\mu_{20}$  相差较大,这说明上海海域忽略涌浪作用是不合适的,那样有效波周期会偏小,对工程安全不利。

表 2 各测站拟合理论谱参数与实测平均值之比较

Table 2 Comparisons of simulation results with averaged observed characteristic values

| 测站    | 主峰 $S_0$ |       |       | 次峰 $S_0'$ |       |       | $\mu_{10}$ |       |       | $\mu_{20}$ |       |       |
|-------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
|       | 理论值 1    | 理论值 2 | 实测值   | 理论值 1     | 理论值 2 | 实测值   | 理论值 1      | 理论值 2 | 实测值   | 理论值 1      | 理论值 2 | 实测值   |
| 团结沙   | 2.090    | 2.131 | 2.089 | 0.265     | 0.265 | 0.265 | 1.120      | 1.132 | 1.100 | 1.218      | 1.223 | 1.192 |
| 横沙岛   | 1.258    | 1.255 | 1.257 | 0.700     | 0.700 | 0.638 | 1.015      | 1.018 | 1.007 | 1.152      | 1.153 | 1.184 |
| 大治河   | 1.708    | 1.716 | 1.708 | 0.304     | 0.304 | 0.304 | 1.133      | 1.136 | 1.081 | 1.238      | 1.238 | 1.197 |
| 中港    | 1.614    | 1.631 | 1.614 | 0.800     | 0.800 | 0.700 | 1.044      | 1.051 | 1.007 | 1.173      | 1.174 | 1.144 |
| 团一大   | 1.967    | 1.992 | 1.968 | 0.277     | 0.277 | 0.277 | 1.125      | 1.133 | 1.094 | 1.225      | 1.227 | 1.193 |
| 中一横   | 1.569    | 1.578 | 1.569 | 0.800     | 0.800 | 0.690 | 1.046      | 1.051 | 1.000 | 1.175      | 1.176 | 1.149 |
| 4 站合并 | 1.667    | 1.685 | 1.667 | 0.476     | 0.476 | 0.476 | 1.082      | 1.087 | 1.049 | 1.199      | 1.198 | 1.179 |

注:理论值 1 为 JONSWAP 谱与 3 参数组合拟合结果,理论值 2 为 5 参数谱与 3 参数组合拟合结果。

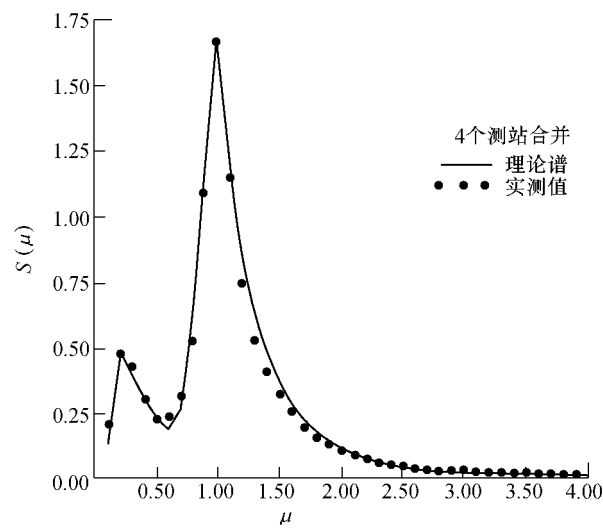


图 4 方法 1 拟合的理论谱与实测谱的比较  
Fig.4 Comparison between simulation value of model 1 and observed values

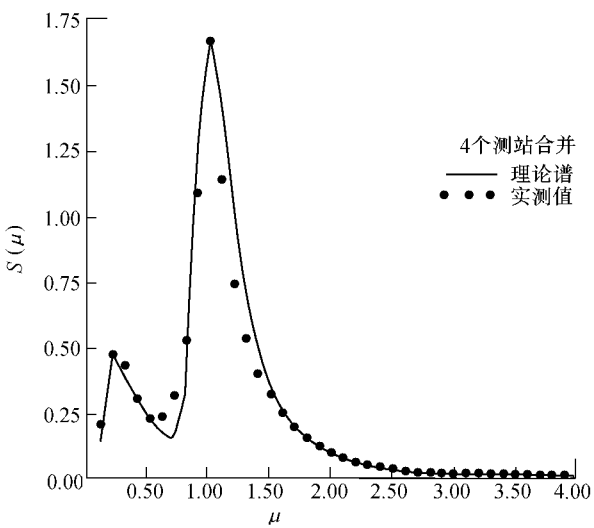


图 5 方法 2 拟合的理论谱与实测谱的比较  
Fig.5 Comparison between simulation value of model 2 and observed values

5 结 语

- a.研究通过 11 300 多组实测波面资料的筛选和初谱分析,利用各种统计方法求得各测点的相关特征值及无量谱曲线,显示出上海海域的波浪谱呈风涌混合型双峰谱且低频部分的能量不可忽视。
- b.在研究剖析各种理论谱模式的基础上,针对上海海域的风涌混合型双峰谱的特点,确定采用 JONSWAP 谱与 3 参数谱组合或者采用 5 参数谱与 3 参数谱组合来拟合上海海域的实测样本谱,并且运用事先设定最小目标函数逐步搜索的方法求解相关参数,求得理论谱无论从谱曲线还是各种谱参数都与实测样本谱相吻合,证明本文的计算方法及所选模式是正确的。
- c.经过转移次峰低频能量至主峰,采用单峰谱拟合试验,结果表明:无论谱型曲线还是谱参数都与实测样本谱不符,说明上海海域忽略涌浪作用是不合适的。

## 参考文献：

- [1] Hasselmann K, et al. Measurements of wind wave growth and swell decay during the joint north sea wave projec[ J]. Dt Hydng Z, 1973 ( 12 ) 9 ~ 95.
- [2] 洪广文. 关于浅水风浪统计性质和若干问题的探讨[ J]. 华东水利学院学报, 1978( 1 ): 15 ~ 45.
- [3] 洪广文. 关于浅水风浪统计性质和若干问题的探讨[ J]. 华东水利学院学报, 1978( 2 ) 50 ~ 71.
- [4] 洪广文, 杨正己. 关于浅水风浪谱及其统计特性分析[ J]. 水利水运科学研究, 1980( 2 ): 68 ~ 86.
- [5] 杨正己. 风浪的统计性质和谱分析[ J]. 水利水运科学研究, 1985( 3 ): 70 ~ 81.
- [6] 洪广文, 夏期颐. 关于 JONSWAP 风浪谱[ A]. 第 7 届全国海岸工程学术讨论会论文集( 下 ) [ C]. 北京: 海洋出版社, 1993. 979 ~ 989.
- [7] 文圣常. 改进的风浪频谱[ J]. 海洋学报, 1990( 3 ): 13 ~ 21.
- [8] 黄培基, 胡泽建. 胶州湾风浪谱的拟合模式[ J]. 黄渤海海洋, 1987( 3 ): 12 ~ 18.
- [9] Huang Peiji, Hu Zejian. Representation of double-peaked sea wave spectra in Jiaozhou Bay[ J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 18( 1 ): 41 ~ 50.

## Representation of Sea Wave Spectra for Shanghai Seas

FENG Wei-bing<sup>1</sup> REN Hua-tang<sup>2</sup>, HONG Guang-wen<sup>1</sup>

( 1. College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;

2. National Marine Environmental Forecast Center, Beijing 100081, China )

**Abstract :** According to 11300 groups of measured data of wave surfaces from four observation stations in Shanghai seas, more than 280 simulated samples are acquired by analysis and estimation, and standardized average sample spectra for each station and synthetic average spectra for the four stations are obtained. The results indicate that the sea wave spectra are all of double-peak shapes, and energy of low frequency waves amounts to 15% ~ 20%. Based on comparison and analysis of multiple fitting calculation methods, it is considered that the JONSWAP spectrum combined with the three-parameter spectrum or the five-parameter spectrum combined with three-parameter spectrum is reasonable for fitting of sea wave spectrum in Shanghai seas, and a double-peak wave spectrum and corresponding parameters are given, which can be used for fitting of irregular waves around coastal structures at Shanghai seas, and which are of a certain reference value for other similar seas in China.

**Key words :** wave ; wave spectrum ; double-peak wave spectrum