

基于小波分析的微尺度波斜率波数谱计算

张福元^{1,2}, 张 杰¹, 王岩峰¹, 行 飞²

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

2. 内蒙古大学数学科学学院, 内蒙古呼和浩特 010021)

摘 要: 海面微结构光学测量装置能够获得以颜色表示的海面毛细波和毛细重力波的斜率信息的图像. 可以从局部图像计算微尺度波的斜率波数谱. 但图像大小有限引起的空间截断导致谱分析时出现频率混叠, 表现为数学上的 Gibbs 现象. 本文利用小波分析方法滤除造成频率混叠的重力波, 得到海面微尺度波的斜率波数谱.

关键词: 斜率波数谱; 微结构光学测量装置; 小波分析

中图分类号: TP274, TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)07-1532-04

The Computation Method of Micro-Scale Slope Wave Number Spectrum Based on Wavelet Analysis

ZHANG Fu yuan^{1,2}, ZHANG Jie¹, WANG Ya r feng¹, XING Fei²

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China;

2. School of Mathematical Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China)

Abstract: A sea surface microstructure optical measuring device can be used to obtain images color coding slope information of capillary and capillary gravity surface waves on the water surface. According to the slope of local region on the water surface, the slope wave number spectrum of the original image is computed. Because the size of the image is limited, the gravity waves are cut off within a period and the phenomenon of frequency aliasing will appear. This is called Gibbs phenomenon mathematically. So, the wavelet analysis is employed to filter the gravity waves, which can lead to the frequency aliasing. Then the slope wave number spectrum of the micro scale wave is computed.

Key words: slope wave number spectrum; microstructure optical measuring device; wavelet analysis

1 引言

海面微尺度波主要是指毛细波和毛细重力波, 通常骑行在长重力波上, 是影响海-气界面动量、热量和物质交换的重要因素. 而谱可以直接给出波的能量相对于频率和方向的分布, 因此谱的计算非常重要. 1997 年“863 海面微结构光学测量装置课题组”研制出以颜色编码原理为基础的海面微结构光学测量装置^[1]. 该装置能够获得以颜色表示的海面微尺度波的斜率信息图像. 利用该装置于 1999 年和 2001 年分别进行了大型动力实验水槽和海洋现场实验, 获取了大量的图像资料. 通过分析图像信息, 可以得到波面上每一点的顺风 and 侧风方向的斜率分量, 进一步导出海面微尺度波斜率波数谱.

2 斜率波数谱的定义

设波面位移方程为 $z = f(x, y)$, 其二维 Fourier 变换为

$$F(k_x, k_y) = \iint f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (1)$$

其中 k_x, k_y 是波数向量 K 的两个正交的分量.

根据 Fourier 变换的微分性质可得两个垂直方向上波面的斜率 $f_x(x, y)$ 和 $f_y(x, y)$ 的二维 Fourier 变换分别为

$$\begin{aligned} F_x(k_x, k_y) &= \iint f_x(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \\ &= ik_x F(k_x, k_y) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_y(k_x, k_y) &= \iint f_y(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \\ &= ik_y F(k_x, k_y) \end{aligned} \quad (3)$$

又式(2)、(3)满足

$$F_x(k_x, k_y) \cdot (-ik_x) + F_y(k_x, k_y) \cdot (-ik_y) = (k_x^2 + k_y^2)F(k_x, k_y) = k^2 F(k_x, k_y) \quad (4)$$

即

$$F(k_x, k_y) = \frac{F_x(k_x, k_y) \cdot (-ik_x)}{k^2} + \frac{F_y(k_x, k_y) \cdot (-ik_y)}{k^2} \quad (k \neq 0) \quad (5)$$

若 $f_x(x, y)$ 和 $f_y(x, y)$ 已知, 由式(2)、(3)可得 $F_x(k_x, k_y)$ 和 $F_y(k_x, k_y)$, 再利用式(5)可得 $F(k_x, k_y)$.

对 $F(k_x, k_y)$ 进行二维 Fourier 逆变换则得到波面位移方程

$$f(x, y) + C = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint F(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (6)$$

其中 C 为常数.

二维斜率波数谱 $S(k_x, k_y)$ 定义为两个正交斜率波数谱的和, 即

$$S(k_x, k_y) = S_x(k_x, k_y) + S_y(k_x, k_y) = k_x^2 \Phi(k_x, k_y) + k_y^2 \Phi(k_x, k_y) = k^2 \Phi(k_x, k_y) \quad (7)$$

定义 $\Phi(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} X(k_x, k_y, \omega) d\omega$, 其中:

$$X(k_x, k_y, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint \xi \eta \tau e^{-i(k_x \xi + k_y \eta + \omega \tau)} d\xi d\eta d\tau$$

且 $R(\xi, \eta, \tau) = f(x, y, t)f(x + \xi, y + \eta, t + \tau)$ 是波面位移 $f(x, y)$ 的自相关函数.

斜率波数谱 $S(k)$ 定义为两个正交斜率波数谱分量的总和, 其中 $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$.

3 斜率波数谱的计算

首先, 给出直接计算原始图像的斜率波数谱, 并给出在中国海洋大学大型动力实验水槽实验中获取的不同风速下的图像, 如图 1(a)、(b)、(c) 所示.

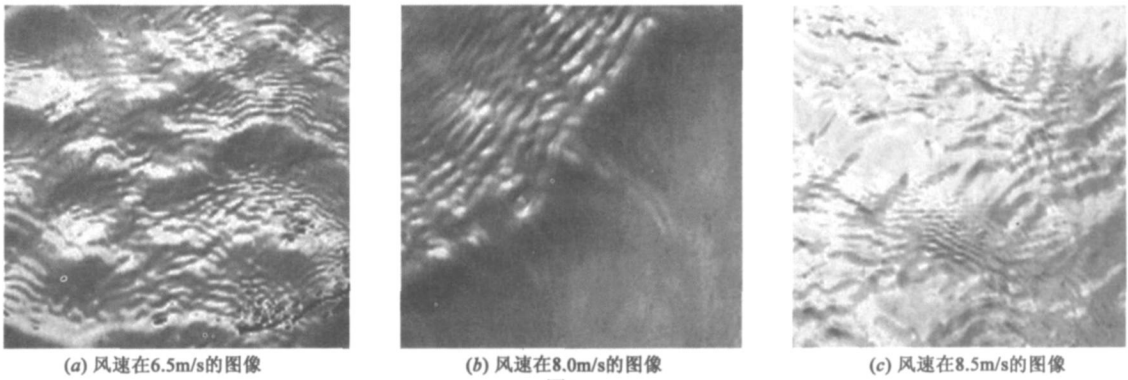


图1

按定义计算不同风速下的二维斜率波数谱, 然后得到斜率波数谱 $S(k)$, 如图 2 所示.

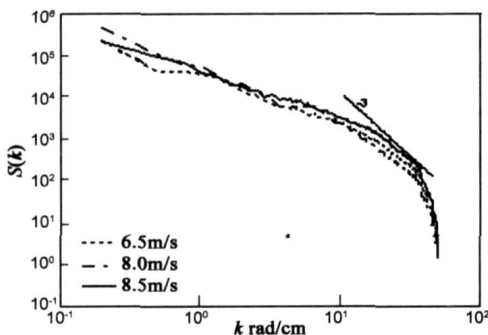


图2 不同风速下的斜率波数谱

计算结果表明, 在波数小于 37 rad/cm 时, 波数谱以波数的 -3 次方下降, 而 Banner (1989) 等人在石油平台上利用立体观测系统所获得数据, 得到了波长范围为 0.2 m 到 1.6 m , 风速从 7 m/s 到 13.3 m/s 的一维波数谱, 以波数 -3 次方的形式下降. Bernd Jahne 和 Klaus S Riemer (1990) 用 Delft 风浪测量装置测到的波表面的斜

率, 得到波长范围为 0.4 cm 到 24 cm , 风速从 2.7 m/s 到 17.2 m/s 的二维波数谱以波数 -3.5 次方的形式下降. Zhang Xin & Cox^[2] (1994) 根据实测数据得到在极端毛细波波数段, 谱以波数 -4 到 -5 次方的形式下降. Paul A Hwang (1996) 等对扫描式坡度测量仪和漂浮在水面上的浮标取得的信息进行分析得到波数范围在 1 rad/cm 到 16 rad/cm , 风速从 0.8 m/s 到 5.7 m/s 的波数谱与波数的 -4 次方有关.

计算结果与已有的研究成果相符, 说明装置的测量结果是可信的, 微尺度波斜率波数谱的计算方法也是可行的. 特别是与工作原理相同的 Zhang Xin & Cox 斜率波数谱在毛细波范围内的整体趋势基本吻合, 但未出现其指出的在波数为 3.6 rad/cm 附近出现的“dip”现象. 这是因为重力波的存在而导致的结果.

在实际海洋现象中, 毛细波、毛细重力波和重力波同时存在, 且毛细波和毛细重力波骑行在重力波上. 因此, 海面微结构光学测量装置得到的图像中不仅有毛细波和毛细重力波的信息, 同时也包含重力波的信息.

由于图像的空间范围有限, 图像中只包含了海面局部区域的波面信息, 区域的边界将重力波有限截断, 不能包含一个完整周期内的重力波信息. 这样在利用 Fourier 变换进行谱分析时, 重力波的频谱信息混叠到其他频率波的波谱中, 数学上表现为 Gibbs 现象. 本文利用小波分析方法滤除重力波.

小波分析^[3]是时间-频率分析的有力工具, 它既保留了 Fourier 分析的优点, 又弥补了 Fourier 分析不能进行时间、频率同时局部化的不足. 因为它的时间窗随频率增高而变窄, 随频率降低而变宽, 因而小波分析能自动地适应信号的不同频域部分. 对低频率、长周期的

部分使用较大的时间窗; 对高频率、短周期的部分使用较小的时间窗.

根据式(6)得到的波面位移, 利用小波分析方法对其进行分解, 得到不同尺度的波面位移分量. 去掉低频分量, 利用剩余的高频分量进行波面位移重构, 最后由重构的波面位移计算微尺度波斜率波数谱.

以风速在 8.5m/s 为例, 分别进行一层、二层、三层小波变换, 将其低频分量系数置为 0, 重构后得到滤掉部分重力波后的波面位移. 计算得到斜率波数谱, 如图 3(a)、(b)、(c) 所示.

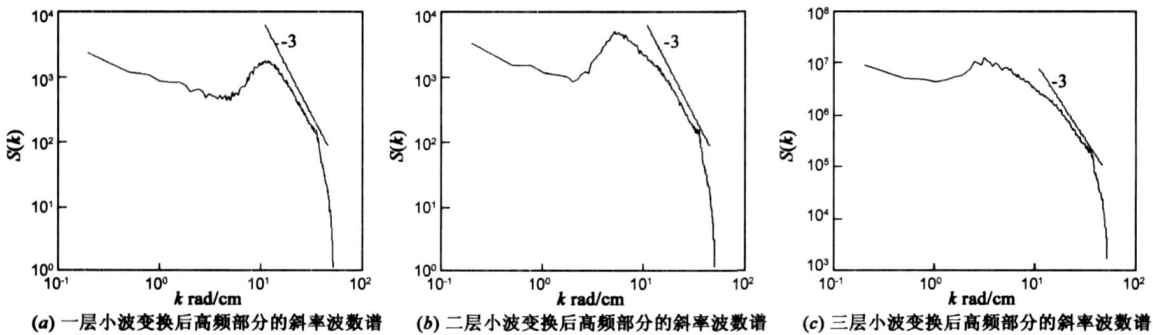


图3

上述三组斜率波数谱表明, 经过一层小波变换后, 波数小于 7rad/cm 的波大部分被滤掉, 即波长大于 9mm 的波大部分被滤掉; 在二层小波变换后, 波数小于 4rad/cm 的波大部分被滤掉, 即波长大于 16mm 的波大部分被滤掉; 在三层小波变换后, 只有很少的波被滤掉, 故三层及三层以上无法滤掉重力波. 由于毛细波和毛细重力波的波长一般在 1 毫米到几个厘米, 因此利用二层小波变换去掉低频后, 得到的信息就是微尺度波谱信息. 图 4 为风速分别为 6.5m/s、8.0m/s、8.5m/s 时, 经过二层小波变换滤波后得到的斜率波数谱.

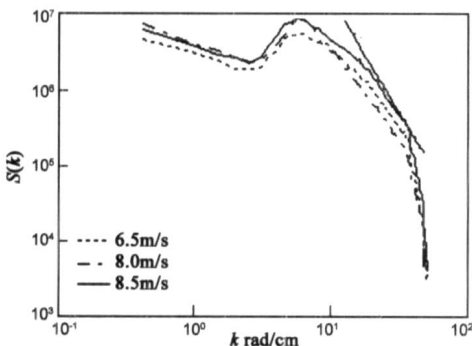


图4 不同风速下二层小波变换滤波后的斜率波数谱

图 4 较图 2 有一个非常明显的特征, 即波数在 1rad/cm 到 10rad/cm 范围内存在“dip”现象, 在约 3rad/cm 处斜率波数谱值存在一个极小值, 即出现“dip”现象. 同时在 37rad/cm 处存在明显的急速下降现象.

4 结论与讨论

通过小波分析方法滤除了重力波对微尺度波斜率波数谱的影响, 得到了不同风速下的斜率波数谱, 并同国际相关结果进行了比较. 结果表明:

- (1) 本研究给出基于图像的斜率波数谱计算方法, 是 863 硬件装置的有机组成;
- (2) 斜率波数谱的主要分布特征与国内外其他研究者的结果是一致的, 说明小波分析方法对滤除重力波很有效.

结果中“dip”现象的存在, 表明了毛细波和毛细重力波形成机理中表面张力和重力的双重作用; 而微尺度波斜率波数谱与风速的关系以及大于 37rad/cm 处的急速下降现象, 是进一步研究的主要内容. 另外, 滤波过程还可以尝试其它有效的方法, 比如: 二维经验模态分解方法等.

参考文献:

- [1] Wang Yar feng, Guan Sheng, Ding Yong yao, et al. The short wave observation using the optical instrument for detecting microstructure of sea surface wave[A]. SPIE Proceedings of Ocean Remote Sensing and Applications[C]. 2003, 4892: 462-472.
- [2] Zhang Xin, Charles S. Cox. Measuring the two dimensional structure of a wavy water surface optically: A surface gradient detector[J]. Experiments in Fluids, 1994, 17(3): 225-237.

- [3] 李建平. 小波分析与信号处理—理论、应用及软件实现 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1997.
- [4] Zhang Xin. Wavenumber spectrum of short wind waves: an application of two dimensional slepian windows to spectral estimation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(4): 489- 505.

- [5] 马毅, 杨大力, 张杰. 基于小波变换的海洋 SAR 图像信息分层技术[J]. 水动力学研究与进展, 1999, 14(4): 168-174.
- Ma Yi, Yang Da li, Zhang Jie. Hierarchical technology of SAR ocean images information based on wavelet analysis[J]. Journal of Hydrodynamics, 1999, 14(4): 168- 174. (in Chinese)

作者简介:



张福元 男, 1971 年 11 月出生于内蒙古凉城. 1997 年和 2003 年分别获得内蒙古大学应用数学学士和硕士. 主要从事计算机图形学和数字图像处理方面的研究工作.

E-mail: zfyzc@sina.com



张 杰 男, 1963 年 3 月生于内蒙古包头, 研究员、博士生导师. 中国海洋学会海洋遥感专业委员会副主任委员、理事. 1984、1987 年和 1990 年分别在内蒙古大学、清华大学获应用数学学士、硕士、博士学位. 1993 年到中国科学院海洋研究所海洋科学博士后流动站做博士后研究, 现为国家海洋局第一海洋研究所遥感室主任. 主要从事微波遥感与海洋动力、光学遥感与海洋生态、

海洋物理应用技术和海洋信息系统方面的工作.