

利用 Seasat SAR 遥感图象分析海浪的 一种新方法

孙京生 刘政凯
(中国科学技术大学无线电系,合肥)

摘要 本文提出一种从 Seasat 合成孔径雷达 SAR 遥感图象中分析海浪波长和方向的新方法。该方法首先对遥感图象进行定向取样;然后进行一维傅氏变换,求出海浪相关函数;最后求出海浪波长和方向。这种新方法的精度和运算速度明显优于通常采用的二维傅氏变换分析法。

关键词 海浪;合成孔径雷达;遥感图象;傅氏变换; Seasat

一、海浪模型

海洋占地球表面积 70% 以上,它蕴藏着丰富的资源。因此,对海洋的研究具有重要的科学价值和经济意义。1978 年美国发射了海洋卫星 (Seasat) 专门用于探测海洋。Seasat 上的合成孔径雷达 (SAR) 获得的遥感图象具有较高的分辨率,对海洋分析极为有用。今年初日本也发射了 MOS-1 海洋卫星用于海洋遥感研究。利用海洋卫星获得的遥感图象进行海洋研究,今后将会有很大的发展。本文主要研究利用 Seasat SAR 遥感图象对海浪进行分析。

海浪可分为三种:风浪、涌浪和碎浪^[1]。直接受到风影响的海区内的浪叫风浪,它是不规则的,没有分类学上的形态。这些不规则的海浪离开它们的生成区后,波长较长速度较快的波将超越波长较短速度较慢的波,并逐步形成速度相近尺寸相似并一起传播的比较均匀的波型。这种比较规则的波型叫涌浪。海浪遇到浅滩形成的浪叫碎浪。在本文中我们主要研究涌浪并简称海浪或海波。图 1 为一幅 Seasat SAR 遥感图象。图象尺寸为 1024 × 1024,对应地面距离为 25.6km × 25.6km。

海浪最简单的动态模型是正弦波模型^[2]。这种模型可用公式(1)表示。

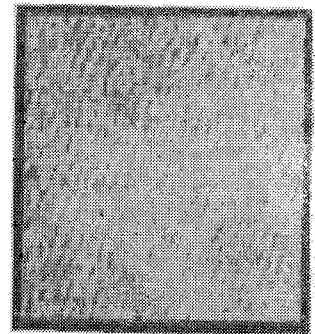


图 1 一幅 Seasat SAR 图象

$$H(x, t) = \sum_m A_m e^{i(k_m x - \omega_m t)} \quad (1)$$

其中 ω_m 代表海浪频谱中第 m 个分量的频率, A_m 为其振幅, k_m 为常数。

与公式(1)相对应的静态模型可用公式(2)表示.

$$h(x, y) = \sum_m |A_m| \cos(k_{xm}x + k_{ym}y + \varphi_m) \quad (2)$$

这种正弦波模型对于海洋物理学的研究具有较大意义. 这种模型假定海浪是长峰和相位相干的. 而实际的浪是极其复杂的, 不能象公式(1)和公式(2)那样简单地表示成几个不同频率不同相位不同幅度的正弦波的叠加. 尽管如此, 海浪还是具有一定的统计特性的. 1952年 Neumann 根据对有效波的定义和目测资料, 把视在周期与其相应的最大波高观测值用风速联系起来, 推导出公式(3). 1964年 Pierson 等人又提出另一估值公式, 如公式(4)所示. 它们都与实际观测结果十分接近^[3,4].

$$F_n(\omega) = \frac{\alpha_n}{\omega^6} \exp\left[-\frac{\beta_n^2}{\omega^2}\right] \quad (3)$$

$$F_p(\omega) = \frac{\alpha_p}{\omega^5} \exp\left[-\frac{\beta_p^4}{\omega^4}\right] \quad (4)$$

其中 $F_n(\omega)$ 和 $F_p(\omega)$ 表示在某一固定点记录水面高度随时间变化曲线的相关谱, α_n , β_n , α_p , β_p 是常数. β_n , β_p 反比于风速.

二、2D-FFT 法

海浪分析通常采用二维频谱分析法. 即对海浪图象进行二维傅氏变换, 寻找代表海浪主频率的极大点的位置从而求出海浪传播方向和波长. 该法简称 2D-FFT 法^[5,6]. 其基本公式如下:

$$L = N \cdot \Delta x / (u_0^2 + v_0^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$\theta = \arctan(v_0/u_0) \quad (6)$$

其中 L, θ 分别代表海浪的波长和方向. u_0, v_0 是频率域中代表海浪主频率的极大点的坐标. N 代表海浪图象的采样数, Δx 代表采样间隔. 采用 2D-FFT 法求出一幅 256×256 SAR 图象的频谱如图 2 所示.

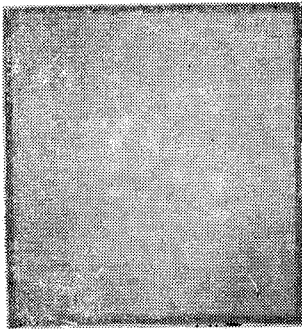


图 2 海浪图象的频谱

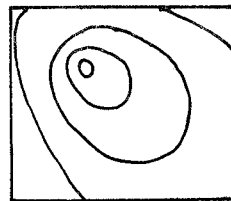


图 3 等高线放大图

2D-FFT 方法比较简单直观,但存在着严重的缺点:

(1) 2D-FFT 法需要进行二维傅氏变换,也就是说需要求出 256×256 个频率分量. 但在计算海浪波长和方向过程中只用到频率极大点附近的分量, 绝大部分求出来的频率

分量都没有用。

(2) 从图 2 可以看出频率极大点不易找出, 因为在频率极大点附近频谱分布比较平坦。实验表明, 频谱分布在极大点附近是不对称的, 其等高线的放大图如图 3 所示。对于这种不对称分布, 当我们采用平滑滤波以去除随机噪声时, 就会引起极大点位置的移动。表 1 显示出随着平滑模板的增大, 这种由于极大点位置移动所造成的波长估值偏差是不能容忍的。因此, 实际上只好不用平滑或采用小尺寸模板进行平滑。因此, 2D-FFT 法会造成较大误差。

三、1D-FFT 法

针对 2D-FFT 法存在的问题, 我们提出一种新方法, 简称 1D-FFT 法。其基本思想是利用海浪相关函数求海浪波长。我们知道, 频谱的平方即功率谱的傅氏反变换就是相关函数。求出相关函数原点与第一个极大点之间的距离, 即可求出海浪的波长。为了提高运算速度, 可以在海浪原图上取四个特定方向上的采样值进行傅氏变换。新方法的具体实现步骤如下:

- (1) 取与水平轴夹角 $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 四个轴向, 如图 4 所示。
- (2) 对每个轴向, 各找出平行于该轴等间距的 25 条样本线, 如图 5 所示。

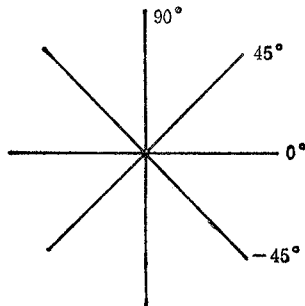


图 4 四个轴向

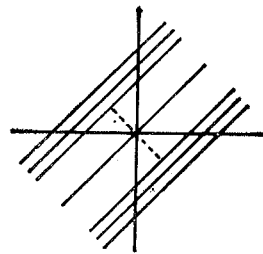


图 5 样本线

- (3) 对每个样本线作 FFT, 求出频谱。
- (4) 对每个轴向的 25 个频谱求平均, 便可得到四个轴向的平均频谱。
- (5) 把 4 个轴向的平均频谱平方并作反 FFT, 便可求得 4 个轴向上的海浪相关函数。

(6) 分别在 4 个相关函数上寻找距离原点最近的极大点, 极大点与原点之间的距离记作 $\lambda_{-45}, \lambda_0, \lambda_{45}$ 和 λ_{90} 。

(7) 在极坐标上标出 $(\lambda_{-45}, -45^\circ), (\lambda_0, 0^\circ), (\lambda_{45}, 45^\circ)$ 和 $(\lambda_{90}, \pm 90^\circ/)$ 四点。 $\lambda_{45} > \lambda_{-45}$ 时取 $(\lambda_{90}, 90^\circ)$; $(\lambda_{-45} > \lambda_{45})$ 时取 $(\lambda_{90}, -90^\circ)$ 。

(8) 对以上四点进行最小二乘法拟合。拟合时这四点的加权系数可取为 $1/\lambda_{-45}^2, 1/\lambda_0^2, 1/\lambda_{45}^2$ 和 $1/\lambda_{90}^2$, 如图 6。采用加权拟合的目的在于提高波长短的那些点的权重, 降低波长长的那些点的权重, 以提高求波长和方向的精度。

表 1 2D-FFT 和 1D-FFT 两种方法的处理结果

	平滑模板尺寸	波长 (m)		方向(°)	
		均值	方差	均值	方均
2D-FFT	3×3	284.8	16.9	-17.4	4.5
	5×5	272.1	13.1	-18.5	4.0
	7×7	257.5	5.7	-17.4	3.4
1D-FFT		240.4	6.9	-17.4	2.8

(9) 求出拟合直线的法线距离,这就是海浪波长; 求出拟合直线的法线方向, 这就是海浪方向。

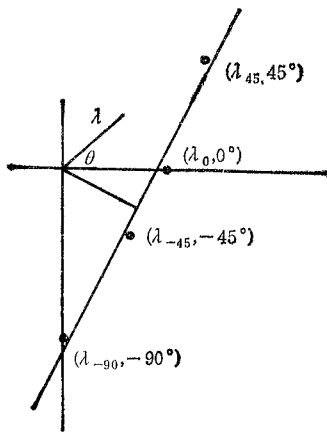


图 6 直线拟合

从表 1 可以看出, 利用 2D-FFT 法和 1D-FFT 法求的波长有较大的差别。这是由于两种方法对波长的定义有所不同而造成的。如图 7 所示。图 7(a) 是 2D-FFT 法中首先求出海浪相关谱中频率极大点 ω_M , 然后求出波长, 即 $\lambda_{\text{频率}} = 2\pi/\omega_M$ 。图 7(b) 是 1D-FFT 法中海浪波长的定义, 即求出海浪相关函数原点与第一个极大点之间的距离, 此距离就是 1D-FFT 方法中海浪的波长。

四、两种方法波长差别的解释

从表 1 可以看出, 利用 2D-FFT 法和 1D-FFT 法求的波长有较大的差别。这是由于两种方法对波长的定义有所不同而造成的。如图 7 所示。图 7(a) 是 2D-FFT 法中首先求出海浪相关谱中频率极大点 ω_M , 然后求出波长, 即 $\lambda_{\text{频率}} = 2\pi/\omega_M$ 。图 7(b) 是 1D-FFT 法中海浪波长的定义, 即求出海浪相关函数原点与第一个极大点之间的距离, 此距离就是 1D-FFT 方法中海浪的波长。

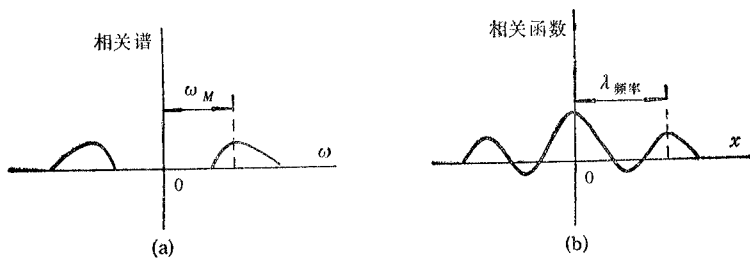


图 7 海浪波长的两种定义

对于正弦波模型这两种定义所求出的波长的数值是相同的。但是, 对于 Neumann 模型两种定义所得波长数值不同, 但两者之比为常数, 下面我们证明上述论点。

1. 正弦模型 对于正弦模型, 在固定点所观测到海面随时间变化的函数为一正弦波 $A \cos(\omega_0 t)$, 它的频谱为冲激函数 $(A/2)\pi\delta(\omega - \omega_0) + (A/2)\pi\delta(\omega + \omega_0)$ 。1D-FFT 法所求波长为 $\lambda_{\text{频率}} = 2\pi/\omega_0$ 。对于冲激函数, 其傅氏反变换即相关函数, 也是周期函数。因此, 由 2D-FFT 法求出的波长 $\lambda_{\text{时间}} = 2\pi/\omega_0$ 。也就是说, 对于正弦模型两种定义所求出的

波长数值是相同的。

2. Neumann 模型 对于 Neumann 模型, 我们首先采用 1D-FFT 法计算波长, 即对公式(3)取极值。

$$\frac{dF_n(\omega)}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left[\frac{\alpha_n}{\omega^6} \exp\left(-\frac{\beta_n^2}{\omega^2}\right) \right] = 0 \quad (7)$$

解得

$$\omega_M = \frac{\beta_n}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

因而

$$\lambda_{\text{频率}} = \frac{2\pi\sqrt{3}}{\beta_n} \quad (9)$$

采用 2D-FFT 法时, 海浪相关函数为

$$f_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_n(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (10)$$

求 $f_n(t)$ 距离原点最近的极大值, 即令

$$\frac{d}{dt} f_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (-j\omega) F_n(\omega) e^{-i\omega t} d\omega = 0 \quad (11)$$

为了计算上的方便, 令 $\omega = \zeta\beta_n$, 则公式(11)变为

$$\frac{d}{dt} f_n(t) = \frac{-j\alpha_n}{2\pi\beta_n^4} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\zeta^6} \exp\left(-\frac{1}{\zeta^2}\right) e^{-i\zeta\beta_n t} d\zeta = 0 \quad (12)$$

即求

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\zeta^6} \exp\left(-\frac{1}{\zeta^2}\right) e^{-i\zeta\beta_n t} d\zeta = 0 \quad (13)$$

我们对公式(9)和公式(13)进行数值计算, 便可求出 $\lambda_{\text{频率}}/\lambda_{\text{时间}}$ 的数值, 如表 2 所示。

表 2 $\lambda_{\text{频率}}/\lambda_{\text{时间}}$ 的理论值

β_n	1.0	1.2	1.5	1.8	2.0
$\lambda_{\text{频率}}/\lambda_{\text{时间}}$	1.186	1.184	1.184	1.179	1.179

从上述推导可见, 1D-FFT 法和 2D-FFT 法所求波长之比近似为常数, 即

$$\lambda_{\text{频率}}/\lambda_{\text{时间}} = 1.182 \quad (14)$$

由表 1, 两种方法实际求出的波长比为 $284.8/240.4 = 1.185$, 与理论值吻合的相当好。因此, 把 1D-FFT 法所求出的海浪波长乘以 1.182, 即得出通常定义的海浪波长。

五、结 论

本文提出的 1D-FFT 法是根据海浪相关函数求海浪波长, 从理论上证明这种方法所求波长与通常 2D-FFT 法所求波长是一致的。这种方法的特点是相关函数的极大值点较易求出, 因而精度较高。这一点也可由表 1 看出。用 2D-FFT 法求出的波长方差为 16.9m, 方向方差 4.8° ; 而用 1D-FFT 法求出的波长方差为 6.9m, 方向方差为 2.8° 。从

方差的角度上看, 1D-FFT 法的误差较小, 精度较高。

另外, 1D-FFT 法仅在四个方向上取样并进行一维傅氏变换, 从而提高了运算速度。在 VAX-11/750 机上对一幅 1024×1024 图象进行处理时, 2D-FFT 法所用的时间是 1D-FFT 的 6 倍。

作者对吴健康同志的大力帮助表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] D. A. Ross 著, 李允武译, 海洋学导论, 科学出版社, 1977 年, 第 133 页。
- [2] E. B. Kraus 著, 山东海洋学院译, 大气与海洋的相互作用, 科学出版社, 1972 年, 第 122 页。
- [3] 永田豊、彦拆繁雄、宫崎正衛著, 海洋物理 (III), 科学出版社, 1970 年, 第 86—91 页。
- [4] 李经虎, 声纳信号处理, 海洋出版社, 1984 年。
- [5] Wu Jian-Kan, J. O. Thomas, The Measurement of Ocean Wave from Seasat Synthetic Aperture Radar Imagery, 中国科学技术大学学报, 1981 年增刊, 第 1—6 页。
- [6] T. D. Allan, T. H. Guymet, *International Journal of Remote Sensing*, 5 (1984) 2, 379—408.
- [7] F. S. Grauford 著, 卢鹤绂译, 波动学(下), 科学出版社, 1968 年, 第 407—417 页。

A NEW METHOD FOR MEASURING OCEAN WAVE FROM SEASAT SAR REMOTE SENSING IMAGE

Sun Jingsheng Liu Zhengkai

(China University of Science and Technology, Hefei)

ABSTRACT A new method for measuring ocean wave length and direction from Seasat synthetic aperture radar (SAR) remote sensing image is presented in the paper. In the method, a ocean wave image is sampled in certain directions, the samples are then analyzed by using one dimensional Fourier transformation to calculate the ocean wave correlation function. At last the ocean wave length and direction are determined from the ocean wave correlation function. The method is better than the traditional two dimensional Fourier transformation method in both consuming time and precision.

KEY WORDS Ocean wave; Synthetic aperture radar; Remote sensing image; Fourier transformation; Seasat