

# 合成孔径雷达影像反演台风浪的研究

刘永孝<sup>1</sup>, 张景辉<sup>1</sup>, 栾曙光<sup>1</sup>, 王茜<sup>2</sup>

(1.大连海洋大学, 辽宁 大连 116023; 2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

**摘 要:**台风浪的研究对于船舶航行、避风以及港口、海洋和近岸建筑物的安全有着重要的现实意义。本文选用台风“莫拉克”(MORAKOT)发生时的ERS-2卫星的合成孔径雷达(SAR)海面影像为例进行了相关研究,采用遥感软件和Matlab编程相结合,得到了台风浪的主波波长、波向和周期。与同实测资料吻合较好的Mike21软件的数值模拟结果相比较,效果良好。

**关键词:**合成孔径雷达(SAR);反演;台风浪;海浪信息

**中图分类号:**TN958 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0239(2013)03-0058-08

## 1 引言

台风登陆过程中,台风浪造成的损失尤其严重<sup>[1]</sup>。比如,2009年发生的台风“莫拉克”造成台湾及大陆,共计500多人死亡、近200人失踪、46人受伤。我国沿海东接西北太平洋,海岸线总长度32万公里,领海海域广阔。由于特殊的地理条件,我国已成为世界上热带气旋登陆最多、受灾最严重的国家之一<sup>[2]</sup>。

台风浪的研究对于船舶航行、避风以及港口、海洋和近岸建筑物的安全有着重要的现实意义<sup>[3]</sup>。但台风浪因其风大浪急强度高,传统的波浪观测因地域和气象条件的影响,仅能获得有限点的资料,资料的时间不够长,精度不够,乃至根本就没有任何气象资料。不能满足海洋资源开发、海洋环境保护、海洋防灾减灾和海浪预报等对海浪观测资料的需要<sup>[4]</sup>。随着空间技术的发展,星载SAR可全天候、全天时、高分辨率对海浪成像,能提供大范围、高精度的实时动态海面波浪场信息;可以提供有效的灾害浪的观测,为及时获得第一手的灾害浪的资料从而进行及时的预防措施提供了重要途径<sup>[5]</sup>。

## 2 海浪反演

### 2.1 海浪成像机理

星载SAR是一个主动式微波成像传感器,它的光束入射角范围在20°—70°。在这种情况下,后向散射微波主要是来自表面张力波和短的重力波的Bragg散射。这些光束的波长与入射光束的情形一样<sup>[6]</sup>。海浪主要通过以下调节过程来成像<sup>[6-7]</sup>:

(1)通过海洋波浪的短的Bragg散射波的上升和倾斜(倾斜调制);

(2)短波(微尺度波)和长的重力波之间的相互作用引起的短波(微尺度波)的能量变化(流体动力调制);

(3)由于沿着长波剖面的坡度变化引起的有效后向散射面积的变化(距离向聚束调制);

(4)与长的重力波的轨道速度相关的多普勒(Doppler)频移(速度聚束调制)。

静止海面上海浪的成像主要包括倾斜调制、流体动力调制、距离向聚束调制等三种调制机制<sup>[8]</sup>。它们都是线性调制。而实际上,海面总是处在一刻不停的运动之中,速度影响是最明显的,表现为强

收稿日期:2012-03-28

基金项目:农业部2012年渔政管理项目“东南沿海避风型渔港和避风锚地合理布局研究”

作者简介:刘永孝(1984-),男,硕士研究生,海洋工程防灾减灾研究方向。E-mail: lyxxaut@126.com

烈的非线性,则速度聚束调制通常是占主导地位的海浪成像机理。

## 2.2 海浪反演过程

利用SAR影像进行海浪反演和相关波浪要素计算,需要先对SAR影像进行预处理,包括辐射定标、图像截取、图像镜像、斑点噪声去除等;然后对图像数值矩阵做快速傅立叶变换(FFT)生成SAR图像粗谱;最后,对生成的SAR图像粗谱进行平滑处理得到SAR图像谱,进而计算得到海浪信息。

首先对影像做预处理,主要包含以下几部分:

### (1) 辐射定标

SAR影像给出的仅是各点的灰度值(像素值),要将灰度值转化为后向散射截面 $\sigma^0$ ,这个过程叫辐射定标。对SAR影像进行精确校准获得归一化雷达后向散射截面 $\sigma^0$ ,这是从SAR强度图中反演高精度波浪场一个非常重要的步骤。以ERS-2 SAR为例,辐射定标的结果取决于卫星的参数, $\sigma^0$ 可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$\sigma^0 = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^{i,j=N} P_{i,j} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{ref}} \cdot C \cdot \frac{PRP}{RRP} \cdot PI$$

式中, $P_{i,j}$ 为回波强度,即像元 $(i,j)$ 振幅A的平方; $\alpha$ 为入射角; $\alpha_{ref}$ 为参考入射角,ERS卫星一般取 $23^\circ$ ;K为辐射定标常数,对于ERS-2来说, $K=93325.3$ ;PRP为Product Replica Power,RRP为Reference Replica Power,均在头文件中给出。PI即为ADC功率补偿<sup>[9]</sup>。

### (2) 图像截取

图像的截取应该在辐射定标后的整幅图像中进行,截取的大小应该适宜,图像过大对处理数据不利,图像过小所包含的海浪信息太少,因此应根据情况截取适宜大小的图像。一般情况下图像大小为2的N次幂的情形,N为整数。本文为了图像处理和计算的方便,采用ENVI软件截取大小为 $512 \times 512$ 像元的感兴趣区域的图像。

### (3) 图像镜像

若卫星为降轨运行,需要对影像进行左右镜像。

### (4) 斑点噪声去除

在雷达成像阶段,雷达波在反射过程中会产生许多不同亮度的斑点,我们称之为“斑点噪声”,这

将影响图像的解译。雷达成像原理和回波信号处理的特殊性决定了斑点噪声是雷达数据所固有的<sup>[10]</sup>。所以,在利用雷达图像之前,必须消除或者减少噪声,这是雷达数据分析和处理不可或缺的步骤。

预处理完成后,对输入的 $\sigma^0$ 值矩阵进行二维Fourier变换,可得到SAR图像粗谱。Matlab强大的图像处理功能可以实现。

因对SAR影像作二维Fourier变换所得到是SAR图像粗谱。为更好的表现信号在波数空间内的能量分布情况,需要对粗谱进行平滑。一般的做法是使用窗函数,对粗谱的每个点进行加权平均,滤掉粗谱的高频部分。

## 2.3 波长、波向和周期的获得

根据文献[11],可用波数k来表征波长 $\lambda$ ,即 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。在反演得到SAR的图像谱中,假设谱峰所在的坐标(即波数分量)为 $k_x$ 、 $k_y$ ,则这个谱峰所对应的主波波长为 $\frac{2\pi}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}$ ,波向与方位方向的夹角为 $\arctan \frac{k_y}{k_x}$ <sup>[5]</sup>,周期为 $\sqrt{4\pi^2 / (g \sqrt{k_x^2 + k_y^2})}$ 。

## 2.4 波向不确定性的消除

SAR影像存在海浪传播方向的 $180^\circ$ 不确定性,杨劲松等(2002)<sup>[4]</sup>根据海浪传播理论和海浪的弥散关系,提出了波长不断增大的方向就是海浪传播的方向来确定波向,消除 $180^\circ$ 不确定性。孙建(2005)<sup>[5]</sup>认为由于涌浪的波长并非必然在传播方向上变大,所以这种方法也只适合于风浪情况。而台风登陆期间,风浪占主要波浪成分,故可通过比较同一方向上的子图像反演得到的海浪波长不断增大的方向就是海浪传播的方向来确定波向。另外,还可借助海岸线来断定海浪的传播方向,但要注意台风路径左右的浪向变化情况。

# 3 实例研究

## 3.1 SAR影像

以ERS-2 SAR影像为例。选取的SAR影像见图1,地理区域位于我国福建以东、台湾西北部海域。影像的中心经纬度为 $24^\circ 54' N$ 、 $119^\circ 19' E$ ,成像

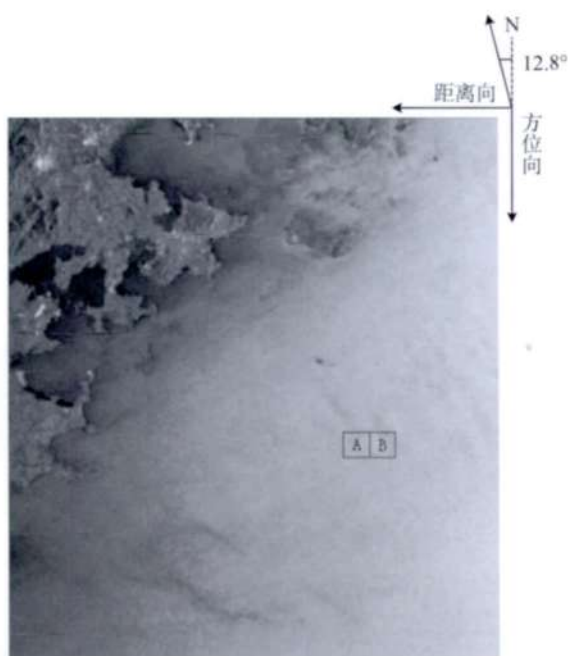


图1 SAR影像灰度图像

时间为2009年8月9日2时38'(UTC),此时ERS-2卫星作降轨飞行,椭圆形太阳同步轨道,轨道高度约为780 km,极化方式为VV极化,雷达波波长为0.057 m,入射角 $\theta=23^\circ$ ,像元大小为12.5 m $\times$ 12.5 m,刈幅为100 km,影像像素点为7898 $\times$ 8671,覆盖大

约(100 $\times$ 100)km<sup>2</sup>的区域。相关具体参数见表1。

此时,正对应于0908号台风“莫拉克”(MORAKOT)自菲律宾东北部的西北太平洋洋面(21.1°N, 135.6°E)沿西北行路径,横跨整个台湾岛后一路北上到达福建省福州市以东海面(大约26.1°N, 120.4°E),此时最大风力为12级台风(TY),中心最大风速为33 m/s,中心气压达到970 hPa,十级风圈半径达到80 km,七级风圈半径达到350 km,此刻台风中心距SAR影像中心距离约为170 km,SAR影像区域被完全包围在七级风圈以内(见图2)。

### 3.2 处理及计算

#### 3.2.1 SAR影像反演

在定标后的 $\sigma^0$ 图像中截取两幅512 $\times$ 512像元(大约6.4 km $\times$ 6.4 km)的感兴趣区域的子图像,记为A,B(见图1)。截取的A,B子图像见图3—4:

其地理坐标为:1(24.808°N,119.522°E)、2(24.808°N,119.473°E)、3(24.740°N,119.522°E)、4(24.740°N,119.473°E);5(24.796°N,119.584°E)、6(24.796°N,119.535°E)、7(24.728°N,119.584°E)、8(24.728°N,119.535°E)。

此时ERS-2卫星作降轨飞行,所以需要对于子图像进行左右镜像;然后再去除斑点噪声。本文应用增强型Lee(Enhanced Lee)滤波器来去除斑点噪声,

表1 SAR影像数据参数一览表

卫星	产品类型	数据格式	分辨率/m (方位向 $\times$ 距离向)	覆盖/km <sup>2</sup> (方位向 $\times$ 距离向)	波段-极化	中心经纬度/(°)
ERS-2	Level 1B Precision	ENVISAT	30 $\times$ 30	100 $\times$ 100	C-VV	24°54'N、 119°19'E

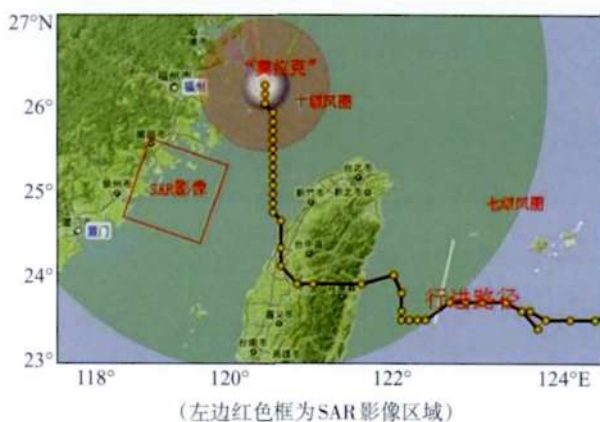


图2 台风“莫拉克”对应于SAR影像2009年8月9日2时(UTC)的行进位置图



它是 Lee 滤波器的改进,但同 Lee 滤波器一样,也是根据单独滤波窗口中计算出的统计(方差系数)对数据进行滤波,其可以在保持雷达图像纹理信息的同时减少斑点噪声。左右镜像并去噪后的 A、B 子图像见图 5—6。

反演得到的 SAR 图像谱见图 7—8:

由上图可以看出,信号或者图像的能量大部分集中在低频或者中频段,而在较高频段,感兴趣的信息常被噪声所淹没。由文献[5]可知,SAR 图像谱的高频对应风浪信息,低频对应涌浪信息。对于本

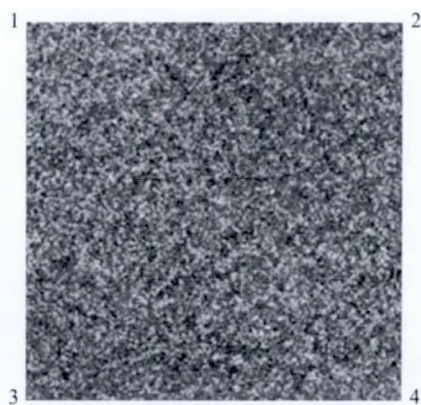


图3 截取的  $\sigma^0$  子图像 A

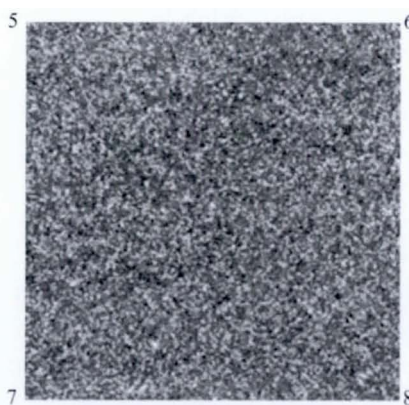


图4 截取的  $\sigma^0$  子图像 B



图5 镜像去噪后的  $\sigma^0$  子图像 A

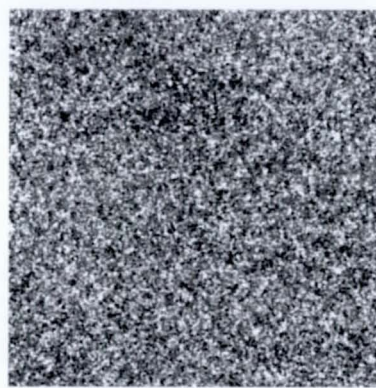


图6 镜像去噪后的  $\sigma^0$  子图像 B

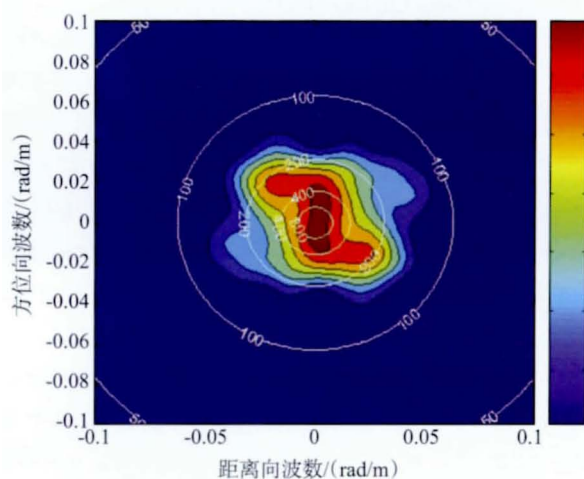


图7 子图像 A 的 SAR 图像谱

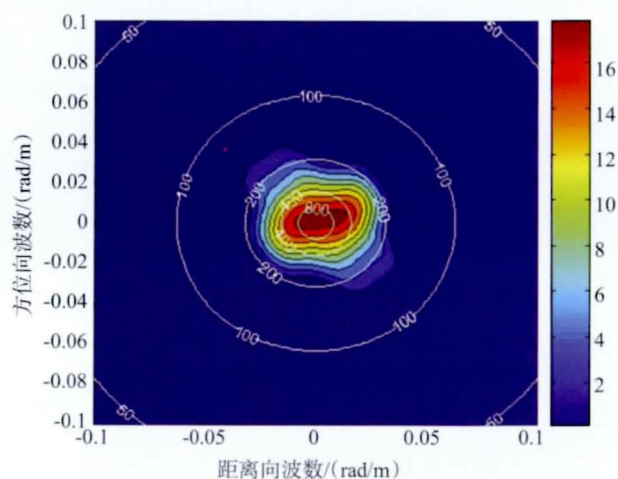


图8 子图像 B 的 SAR 图像谱

文选取的 SAR 图像的感兴趣区域位于台风“莫拉克”的七级风圈内,风浪占主要的波浪成分,故需对谱进行高通滤波以便提取高频信息。设计截断波数  $k_{sep}=0.0157$  的高通滤波器,滤波后进行计算。并根据海浪波长增加的方向即波向来消除  $180^\circ$  不确定性,最后得到海浪信息见表 2:

表 2 海浪主波长、波向和周期

	计算结果	
	子图像 A	子图像 B
波长 /m	61.031	106.92
波向 /°	359.805	259.601
周期 /s	6.25	8.28

由上表可以看出,子图像的海浪波长由 A 向 B 递增。由中国海洋信息网<sup>[12]</sup>查询到地理坐标  $(24.7667^\circ\text{N}, 119.5000^\circ\text{E})$  和  $(24.7667^\circ\text{N}, 119.5667^\circ\text{E})$  处水深都为  $-53\text{ m}$ , 分别对应子图像 A 和 B 的中心坐标,此区域满足《海港水文规范》<sup>[13]</sup>水深  $d \geq \lambda/2$  ( $\lambda$  为波长)的深水波浪条件,因此可确定该海区海浪由 A 向 B 方向传播,即由西(西南)向东(东北)方向传播。

### 3.2.2 Mike21 数值模拟

#### (一)数学模型简介

##### (1)模型控制方程

波浪要素采用丹麦水力研究所(DHI Water & Environment)研制的计算软件 MIKE21 中的 SW (Spectral Waves FM)模块进行推算。SW 是波谱模型,可以考虑波浪的折射、底部损耗、波浪破碎、波流联合作用及风等因素对波浪传播的影响,可以用来进行大范围的波浪场的推算,也可以满足大尺度波浪推算的要求。

SW 模型基于波作用守恒方程,采用波作用密度谱  $N(\sigma, \theta)$  来描述波浪。模型的自变量为相对波频率  $\sigma$  和波向  $\theta$ 。波作用密度谱与波能谱密度  $E(\sigma, \theta)$  的关系为:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

在笛卡尔坐标系下,MIKE21 SW 的控制方程,可以表示为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中  $\vec{V}$  指波群速度,  $\vec{V} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ ,  $c_x, c_y$ , 分别表示波作用在地理空间(x, y)中传播时的变化,  $c_\sigma$  表示由于水深和水流变化造成的相对频率的变

化,  $c_\theta$  表示由水深和水流引起的折射。

S 指能量平衡方程中以谱密度表示数:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3)$$

式中,  $S_{in}$  指风输入的能量,  $S_{nl}$  指波与波之间的非线性作用引起的能量耗散,  $S_{ds}$  指有白帽引起的能量耗散,  $S_{bot}$  指由底摩擦引起的能量耗散,  $S_{surf}$  指由于水深变化引起的波浪破碎产生的能量耗散。

#### (2)风场数据及最大风速半径

应用 MIKE21 SW 模型进行台风浪场数值模拟计算需要输入的风场数据有台风的中心经纬度、最大风速、中心气压和标准气压,均来自温州台风网。最大风速半径 R 采用 Graham 和 Nunn 提出的台风经验式<sup>4[14]</sup>计算。式 4 除了考虑台风中心气压以外,还考虑了地理纬度和台风中心移动速度的影响。

$$R = 28.52 \operatorname{th}[0.0873(\varphi - 28)] + 12.22 \cdot \exp [(P_0 - 1013.2)/33.86] + 0.2V_f + 37.22 \quad (4)$$

式中:  $V_f$  为台风中心移动的速度(km/h),  $\varphi$  为地理纬度,  $P_0$  为台风中心气压(hPa)。

#### (3)数值模拟的边界条件及网格设置

地理空间陆地边界采用对称边界。因此,在开边界处需要指定能量谱参数;在频率空间,边界为对称边界。方向空间则不需边界条件。本区域模拟分别在北向、东向、南向、西向划分 4 个开边界,即 N、E、S、W 边界。计算模型所选区域包含了福建省、部分浙江省、广东省以及台湾岛的沿海区域(见图 9)。

#### (二)Mike21 数值模拟计算

##### (1)台风浪场数值模拟结果和实测结果的对比

为了验证 Mike21 SW 模型对台风浪的模拟效果,将 0908 号台风“莫拉克”的 Mike21 SW 模型数值模拟计算结果与东海预报中心提供的 2009 年 8 月 9 日 10 时和 11 时的台湾岛东北部约 80 km 处的东海浮标 QF203 ( $25.77^\circ\text{N}$ ,  $120.77^\circ\text{E}$ ) 和台湾岛北部约 260 km 处的东海浮标 QF205 ( $27.51^\circ\text{N}$ ,  $122.48^\circ\text{E}$ ) 实测资料进行了对比分析,结果如下:

2009 年 8 月 9 日 10 时,浮标 QF203 实测有效波高  $H_s$  为 4.1 m,有效波周期  $T_s$  为 9.1 s,相同时刻 Mike21 数值模拟的  $H_s$  为 3.86 m,  $T_s$  为 7.9 s; 8 月 9 日 11 时, QF203 实测  $H_s$  为 3.7 m,  $T_s$  为 8.9 s,相同时刻 Mike21 数值模拟的  $H_s$  为 3.8 m,  $T_s$  为 7.95 s。



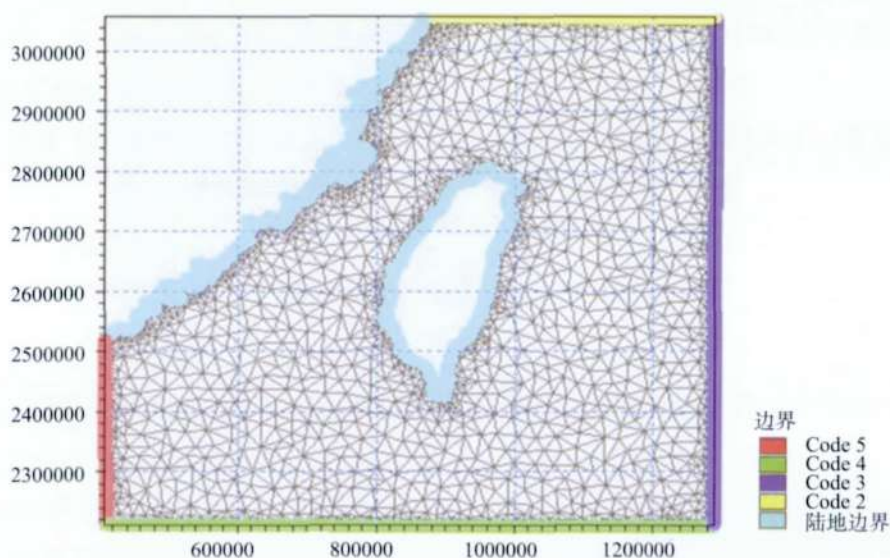
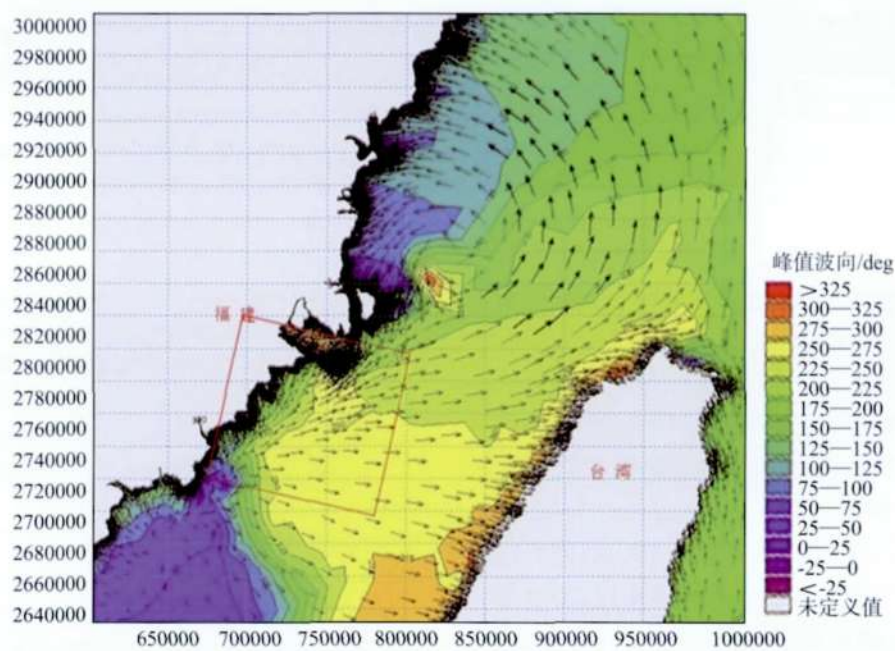


图9 计算海域的边界及网格设置示意图



(图中左边红框处为SAR图像区域)

图10 对应于SAR影像2009年8月9日2时(UTC)的主波波向矢量图

2009年8月9日10时,浮标QF205实测有效波高  $H_s$  为6.3 m,有效波周期  $T_s$  为9.7 s,相同时刻Mike21数值模拟的  $H_s$  为4.13 m,  $T_s$  为9.59 s;8月9日11时,QF205实测  $H_s$  为5.7 m,  $T_s$  为9.7 s,相同时刻Mike21数值模拟的  $H_s$  为4.22 m,  $T_s$  为9.71 s。

(注:据《海港水文规范》(JTJ 213-98)<sup>[13]</sup>可知,  $T_s = 1.15 \bar{T}$ ;由文献[15]可知,谱峰周期

$T_p = (1.17-1.32) \bar{T}$ 。本文取  $T_p = 1.24 \bar{T}$ ,Mike21 SW数值模拟计算得到  $T_p$  后经上述换算得到  $T_s$ 。)

由上述分析可以看出,台风“莫拉克”期间Mike21 SW模型数值模拟结果和浮标实测资料对比,结果吻合较好。

(2)对应于SAR影像的Mike21数值模拟计算Mike21 SW模型数值模拟计算得到的对应于

SAR影像2009年8月9日2时(UTC)的主波波向矢量图见图10。

### 3.2.3 SAR反演计算结果与Mike21数值模拟计算

结果的比较

将子图像A和B的反演结果与Mike21 SW的数值模拟结果进行比较分析,列于表3:

表3 SAR反演计算结果与Mike21数值模拟结果比较

	SAR反演计算结果		Mike21数值模拟结果
	子图像A	子图像B	
波长 /m	61.031	106.92	94.9
波向 /°	359.805	259.601	271
周期 /s	6.25	8.28	7.8

注:Mike21软件进行数值模拟计算,得到波向和周期,波长根据深水波长公式  $\lambda = gT^2/(2\pi)$  计算得到

由上表可以看出,子图像B的SAR反演计算与Mike21数值模拟得到的海浪信息结果吻合较好;而子图像A两者的结果对比有一定的差距,这很可能是因为台风期间风急浪大,且风速和风向在不断变化中,而选取的图像位于台湾海峡,海峡内水深较浅,平均深度不足50 m,地形及海峡两岸的波浪反射和折射等易造成风浪和涌浪的相互作用,波浪生成及传播过程变得更为复杂,易造成海峡内某些海域波浪混乱。

## 4 结论

本文从SAR影像反演得到了SAR图像谱,进而计算得到了海浪的主波波长、波向和周期。采用波长不断增大的方向就是海浪传播的方向来确定波向,消除了180°不确定性。选取台风“莫拉克”经过时的台湾西北部海域的ERS-2 SAR影像进行了实例研究,得到结论如下:

(1)部分海区的反演计算结果与同实测资料吻合较好的Mike21软件的数值模拟结果相比较,效果良好,这对于台风期间灾害浪的预报、港口海岸设施的防灾减灾和船舶避害有一定的指导和借鉴作用;

(2)但同时可以看出,台湾海峡内某些海域在台风这种特殊气象条件下,波浪生成及传播过程变得更加复杂,易造成海峡内某些海域波浪混乱,这将给台风发生时我国沿海特别是东南沿海的防灾减灾造成更大的困难;

(3)对于某些缺少水文气象观测站点,而根据附近测站资料又难以推算波浪要素的海域,本文的研究对当地的港口、海岸建设有一定的指导和借鉴

作用;对于已有的观测站点,因台风期间常造成测站的损毁等,使观测资料不连续,SAR反演计算可起到一定的补充作用;

(4)SAR反演台风浪在精度和实际应用中有待进一步的研究提高,任重而道远。

### 参考文献:

- [1] 贾晓,路川,卢坚,等.中国沿海台风的统计特征及台风浪的数值模拟[J].水道港口,2010,31(5):433-436.
- [2] 刘天娇.台风特征因子特性分析及其对海浪的影响[D].中国海洋大学硕士学位论文,2011.
- [3] 赵凯,栾曙光,张瑞瑾.强台风“珍珠”引起的近岸波浪场数值分析[J].海洋预报,2011,28(4):35-41.
- [4] 杨劲松,黄韦良,周长宝.星载SAR海浪遥感中波向确定的一种新方法[J].遥感学报,2002,6(2):113-116.
- [5] 孙建. SAR影像的海浪信息反演[D].中国海洋大学博士学位论文,2005:76-102.
- [6] Yang J S, Huang W G, Zhou C H, et al. Wave Height Estimation from SAR Imagery[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2004,22(2):157-161.
- [7] Bruning C. On the relative importance of the ocean wave radar modulation transfer function for Inverting ERS-1 SAR image spectra into ocean wave spectra[C]. Proceedings of Second ERS-1 Symposium-Space at the Service of Our Environment, Hamburg, Germany, 11-14, October, 1993, ESA SP2361, 1994:233-238.
- [8] 杨劲松.合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术[M].北京:海洋出版社,2005:45.
- [9] 陈艳玲,黄斌,丁晓利,等.ERS-2 SAR反演海洋风矢量的研究[J].地球物理学报,2007,50(6):1688-1694.
- [10] 王树文,尹杰,黄明祥.ERS-2 PRI去噪评价及其在土地利用/覆盖分类中的应用[J].地理与地理信息科学,2008,24(1):43-45, 84.
- [11] 侍茂崇.物理海洋学[M].济南:山东教育出版社,2004:255.
- [12] 西太平洋水深网格图[DB/OL].2012-03-13.http://221.239.0.160/terrain.htm
- [13] JTJ213-98.海港水文规范[S].中华人民共和国交通部发布.

- 北京:人民交通出版社,1999:11.
- [14] 邱大洪主编.工程水文学(第三版)[M].北京:人民交通出版社,1999:89.
- [15] 俞聿修.随机波浪及其工程应用[M].第三版,大连:大连理工大学出版社,2003:176.

## Study of typhoon wave from SAR images

LIU Yong-xiao<sup>1</sup>, ZHANG Jing-hui<sup>1</sup>, LUAN Shu-guang<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>2</sup>

(1.Dalian Ocean University, Dalian 116023 China;2.Hydrochina Xibei Engineering Corporation,Xi'an 710065 China)

**Abstract:** Study on the typhoon wave has important practical significance for ship navigation and shelter as well as the safety of ports, marine and coastal buildings. In the paper, based on the combination of remote sensing software and Matlab program, we have studied the ERS-2 SAR ocean surface image of typhoon “MORAKOT” occurring and obtained the main wavelength, wave direction and period of the typhoon wave. The measured data agrees well with the numerical results of Mike21 software.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar(SAR); retrieve; typhoon wave; ocean wave information