

文章编号 1004-924X(2012)08-1846-08

## X-band 雷达图像中降雨干扰的识别与抑制

沈继红<sup>1\*</sup>, 李英<sup>2</sup>, 戴运桃<sup>1</sup>, 王淑娟<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:**针对雷达进行海浪遥测时降雨对雷达波传播和海浪参数反演的影响,提出一种基于质量控制、三维表面粗糙度评定参数及信噪比的降雨资料识别与处理方法来提高海浪参数反演结果的准确度。首先,分析降雨对雷达遥测海浪及海面回波特性的影响,利用质量控制功能判定存在问题的图像。然后,根据回波图像的三维表面粗糙度的相关评定参数以及信噪比的具体变化趋势确定引起雷达图像产生问题的具体原因,确定受降雨影响的图像。最后对受降雨影响较轻的图像进行频域滤波处理,并将反演结果、未作处理的反演结果与参考值进行对比。实验结果显示:周期的相对误差减小了19.13%;波向测量误差减小了10.54°,表明该方法能有效地区分降雨与非降雨图像,并有效处理降雨图像,提高海浪参数反演的准确度。

**关键词:**雷达图像;图像识别;降雨;质量控制;信噪比;三维参数表征

**中图分类号:** TN957.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1846

## Identification and suppression of rain interference on X-band radar images

SHEN Ji-hong<sup>1\*</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, DAI Yun-tao<sup>1</sup>, WANG Shu-juan<sup>1</sup>

(1. College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;  
2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: shenjiahong@hrbeu.edu.cn

**Abstract:** In consideration of the affects of rainfall on the radar wave propagation and wave parameter inversion in the sea clutter remote sensing by a radar, a new method combined quality control with the three-dimensional evaluation parameters of surface roughness and signal-to-noise ratio(SNR) is proposed to identify and deal with the rain data to improve the parameter accuracy. Firstly, it analyses the influence of the rainfall on the radar remote sensing and the characteristics of sea clutter, and uses the quality control to identify the data available or not. Then, according to the change trend of the three-dimensional evaluation parameters of surface roughness of radar images and SNR, the reasons that radar images are unavailable are determined and those images affected by the rainfall are identified. Finally, those images which are not seriously affected by rain are chosen to be filtered in frequency domain, and the inversion results with and without filtering are compared with the references. Experiment results show that the relative error of wave period has improved by 19.13%, and the

收稿日期:2012-04-17;修订日期:2012-05-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51109041)

measurement error of wave direction has decreased by  $10.54^\circ$ . This method can distinguish the rain and non-rain data, and can deal with rain data effectively to improve the accuracy of inversion results.

**Key words:** radar images; image identification; rain; quality control; Signal to Noise Ratio(SNR); three-dimensional parameter evaluation

## 1 引言

运用雷达进行海浪观测,主要是通过通过分析波浪所产生的回波信号来推算出海浪的相关参数。降雨会影响雷达波的传播,改变海面的粗糙度,从而影响回波数据,最终影响海浪参数反演结果的准确度<sup>[1-5]</sup>。

海浪监测系统的绝对界限取决于 X 波段雷达的连接类型和安装配置(如:天线高度、测量区域和平台之间的距离),强降雨、下雪以及阻尼的海面浮油会干扰雷达的测量。为了便于对提供的海浪信息做有效的判读,质量控制是不可或缺的<sup>[6]</sup>。

在降雨干扰的处理方面,学者们已做过一些研究和应用。软件方法中,唐艳红<sup>[10-11]</sup>等提出利用海面回波强度的均值和差异系数作为判断标准来区分降雨和非降雨数据,并进行中值滤波处理;还有学者利用小波算法以及将中值滤波与小波算法相结合对降雨噪声进行抑制研究,都取得较好的效果<sup>[7-12]</sup>。均值、方差以及差异系数等是评定表面粗糙度的二维参数,是表面的局部性质,不能反映出表面纹理的变化情况及排列规则,故在区分降雨和非降雨图像时,准确性受限;中值滤波或者小波滤波的方法是对雷达图像各个像元之间进行非线性计算,不是具体针对降雨噪声的抑制方法。

也有学者从雷达硬件装置入手,在雷达信号接收端设置相应的门限,通过对接收的信号进行识别,抑制降雨,雪等杂波信号<sup>[13-15]</sup>。

针对以上问题,本文提出了一种将质量控制与三维表面粗糙度评定参数<sup>[16-18]</sup>相结合的降雨资料识别与处理方法。首先分析降雨对海面回波特性的改变;接着利用质量控制功能判读数据的有效与否;然后利用回波影像的三维表面粗糙度的相关评定参数以及信噪比对观测数据是否受降雨影响进行判断;最后进行滤波处理,从而降低降雨噪声对雷达回波的影响。

## 2 降雨对雷达回波的影响

降雨对海浪回波图像的影响有以下几点<sup>[10-11]</sup>:

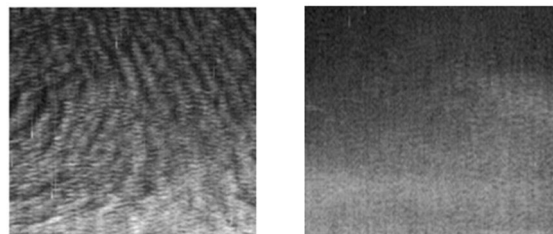
### (1) 削弱雷达遥测的能力

大气中雨滴的存在会影响雷达电磁波的传播,甚至无法传递到海面,使雷达失去其原本在距离上的观测能力,导致观测范围的缩小,或者失去遥测能力。

### (2) 降低海浪的反演精度

降雨会改变海表面粗糙度,扭曲回波的波形。在波谱分析上,降雨会使得谱形变得尖锐,影响分析结果,降低海浪的反演精度。

图 1 为雷达原始图像。未降雨的资料如图 1(a)所示,图像信号在空间中的变化形式主要是近似于海面水面的波动。图 1(b)中降雨直接掩盖了回波信号。雨水在空间是随意分布的,所以导致图像中降雨信号的变动很不规则。



(a) 未降雨图像 (b) 降雨图像  
(a) Image without rain (b) Rain image

图 1 雷达原始图像

Fig. 1 Original radar images

利用卫星图像做近海岸波场的特性分析时发现,图像的回波强度平均值越高、变异数越大时,从波谱上越难分辨出相关的波浪参数。降雨的图像中,包含了平均值高、变异数大的特性。因此,在处理降雨资料时,必须特别注意回波图像的特性和波谱分析的结果。

### 3 降雨数据的识别与处理

均值及差异系数等是评定表面粗糙度的二维参数,在降雨和未降雨图像间它们的变化界限并不明显,所以只利用这二者来区分降雨和非降雨图像,是很难实现的。三维表面评定参数<sup>[16-18]</sup>中有一些是由二维的描述导出的,其余则是为描述表面结构专门设计的区域参数,这使得三维分析法更接近于真实表面,比二维参数能提供更多的信息。

本文提出的降雨资料识别方法是基于三维表面粗糙度评定参数和质量控制的,下面将对其做详细的介绍,并给出降雨识别和处理的具体方法。

#### 3.1 二维评定参数

均值的定义如下所示

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

其中:  $x_i$  表示雷达图像上第  $i$  个像素点的回波强度值,  $n$  表示像素点的个数。

差异系数 CV 的定义如下所示,

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\%, \quad (2)$$

其中:  $\sigma$  是图像回波强度的标准偏差,  $\sigma$  的定义如下所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}. \quad (3)$$

#### 3.2 三维表面粗糙度评定参数

假定  $M$ 、 $N$  为在采样区域内  $x$  向和  $y$  向的采样点数;  $z(x, y)$  为表面的偏离高度。

(1) 表面的均方根偏差  $S_q$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [z(x_i, y_j)]^2}, \quad (4)$$

其中:  $S_q$  是一个常用的参数,相当于统计中的标准偏差  $\sigma$ 。  $S_q$  值越大,表面越粗糙。但是对于表面纹理的变化情况及排列规则,却不能反映出来。

定义标准化的区域自相关函数(AACF)<sup>[17]</sup>:

$$AACF(\tau_x, \tau_y) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z(x_i, y_j) z(x_i - \tau_x, y_j - \tau_y)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z^2(x_i, y_j)},$$

其中:  $1 - M \leq \tau_x \leq M - 1$ ;  $1 - M \leq \tau_y \leq M - 1$ ;  $\tau_x, \tau_y \in \mathbf{Z}$ 。

(2) 最速下降自相关长度  $S_{fd}$ : 是 AACF 最快衰减到 0.2 的距离<sup>[16]</sup>,

$$S_{fd} = \min(\sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}), AACF(\tau_x, \tau_y) \leq 0.2 \quad (5)$$

可以反映轮廓纹理的排列规则,如稀疏、稠密程度。

相应的最慢下降自相关长度  $S_{sl}$ , 是 AACF 最慢衰减到 0.2 的距离,

$$S_{sl} = \max(\sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}), AACF(\tau_x, \tau_y) \leq 0.2. \quad (6)$$

(3) 表面纹理的视在特性比  $S_{tr}$

$$S_{tr} = \frac{S_{fd}}{S_{sl}}. \quad (7)$$

$S_{tr}$  用于描述表面纹理特性的参数。显然,  $0 < S_{tr} < 1$ 。对于表面有很强纹理方向的表面,  $S_{tr} \ll 1$ ; 然而对于纹理方向性不强或者各向异性的表面,  $S_{tr}$  的值较大并且趋于 1。

#### 3.3 质量控制

海面的粗糙度是由局地风产生的。雨雪、同频干扰以及大目标物等都会改变海面粗糙度,干扰雷达的测量。为了便于对提供的海浪信息做有效的判读, WAMOS 和 WAVEX 都设置了质量控制(Data Quality Control)。

一方面在雷达回波中可以通过对图像回波强度的参数作设定,作为质量控制的一方面,如回波强度的最大值、最小值等。

另一方面,回波图像中的降雨、雪,陆地或者目标物等会对海浪波谱分析产生影响。带通滤波会使得不属于海浪的噪声被大量滤除,但不能完全滤除。那么滤波前后的能量比例就是一个判定图像质量好坏的依据<sup>[6]</sup>。

令波数-频率空间中滤波前的谱能量为  $Eng_{total}$ , 带通滤波后的谱能量为  $Eng_{filter}$ , 定义:

$$R_p = \frac{Eng_{filter}}{Eng_{total}}, \quad (8)$$

即为相对信号。  $R_p$  的阈值是一个质量控制的指标,一般认为  $R_p \geq 0.6$  时,图像是可用的; 相对的  $R_p < 0.6$  时,雷达图像是存在问题的(包含各种噪声的影响),不能直接进行海浪参数反演等计算。

### 3.4 降雨数据的识别与处理的具体步骤

因为在描述波浪特性的参数中,波高是表示波浪特性的重要参数之一,在波谱分析上可以利用波高的改变来了解能量变化,在工程设计和海洋相关问题的讨论上,波高更是重要的决策依据。而信噪比 SNR 是波高的直接反应,所以后续的讨论将以信噪比作为讨论依据,并用 WAMOS 的有效波高作为参照值进行对比说明。

具体的降雨数据的识别及处理步骤如下所示:

(1)采集  $N$  幅空间海域杂波连续图像,然后选取分析区域构成图像序列。

(2)对图像序列进行三维傅里叶变换得到三维波数-频率图像谱。

(3)根据色散关系构造带通滤波器,滤除三维波数-频率图像谱中的非海浪信号,计算相对信号  $R_p$ ,并根据相对信号  $R_p$  的值,确定存在问题的图像。

(4)计算上一步确定出的存在问题的各组图像序列的三维表面参数。所述的三维表面参数包括回波强度的均值  $I_{ave}$  和  $S_{tr}$ 。回波强度的均值  $I_{ave}$  的定义由式(1)扩展得到,其中  $f(x_i, y_j)$  为采样区域内各点的回波强度值, $M$ 、 $N$  为在采样区域内  $x$  向和  $y$  向的采样点数。

$$I_{ave} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(x_i, y_j).$$

(5)计算第三步中确定出的存在问题的各组图像序列的 SNR。

带通滤波之后得到三维图像谱,经过积分得到二维图像谱,二维图像谱经过调制传递函数作用之后得到二维海浪谱,信噪比的计算公式定义如下:

$$SNR = \frac{Eng_{wave}}{Eng_{total} - Eng_{image}}, \quad (9)$$

其中: $Eng_{total}$ 代表的是滤波前的三维波数-频率图像谱积分后得到的总能量, $Eng_{wave}$ 代表二维海浪谱能量, $Eng_{image}$ 代表二维图像谱能量。

(6)根据  $I_{ave}$ ,  $S_{tr}$  以及 SNR 变化趋势确定引起图像序列产生问题的具体原因。SNR、 $I_{ave}$  和  $S_{tr}$  的阈值要根据实际计算的结果设定。

(7)针对引起图像序列产生问题的不同原因进行如下处理:如果本身采集的图像序列存在缺失或者海浪回波太小等,直接舍弃该组图像序列。对于降雨影响严重的图像序列,直接舍弃。对于降雨影响较轻的图像序列,进行频域滤波处理。

## 4 实验结果与分析

本次实验数据是 2010 年 10 月份在平潭岸基实验采集得到的。波高有适当的变化,并且含有降雨资料。为了避免随机性,本文从整个月份的数据中,选择带有中间一段不满足质量控制标准的数据进行研究,并取一部分有效数据作对照。

这里只比对  $R_p$ , SNR,  $I_{ave}$  以及  $S_{tr}$ 。为了更直观的对比说明,将整段数据的 SNR、 $I_{ave}$  以及  $S_{tr}$  都进行了计算。

图 2 为各个参数的对比,其中“Hs-wamos”代表的是 WAMOS 提供的有效波高的参照值。由图 2(a)可知,图像可用时, $R_p$  的值一般保持在 0.9 附近,接近 1,也有偶尔出现 0.8 附近的。当  $R_p < 0.6$ ,图像质量有问题,但造成这种情况的原因并不唯一。

降雨、较小的海浪或者无浪时,回波图像都会比较平滑,如图 1(b)所示,此时  $S_{tr}$  的值就会比较大(基本都超过 0.4),如图 2 中(d)所示。如果有一定的海浪,存在降雨的影响,此时回波强度(取值为 0~8 191)会比没有降雨的时候大, $I_{ave}$  基本都大于 2 000,如图 2(c)所示,回波中包含一定海浪的信息,经过滤波之后得到的 SNR 会比浪小或者无浪的时候大(基本都大于 1),如图 2(b)所示;如果海浪小或者无浪时, $I_{ave}$  基本都小于 1 500,相应的信噪比的平方根也很小(基本在 0.5 附近)。

具体的 SNR、 $I_{ave}$  和  $S_{tr}$  的大小的界定值要根据实际计算的结果设定。本文中 SNR、 $I_{ave}$  和  $S_{tr}$  的大小的界定值分别为: $S_{tr}$  大于 0.4 认为是大,否则为小; $I_{ave}$  大于 2 000 认为大,否则为小;SNR 的平方根大于 1 认为大,否则为小。具体分析如表 1 所示。

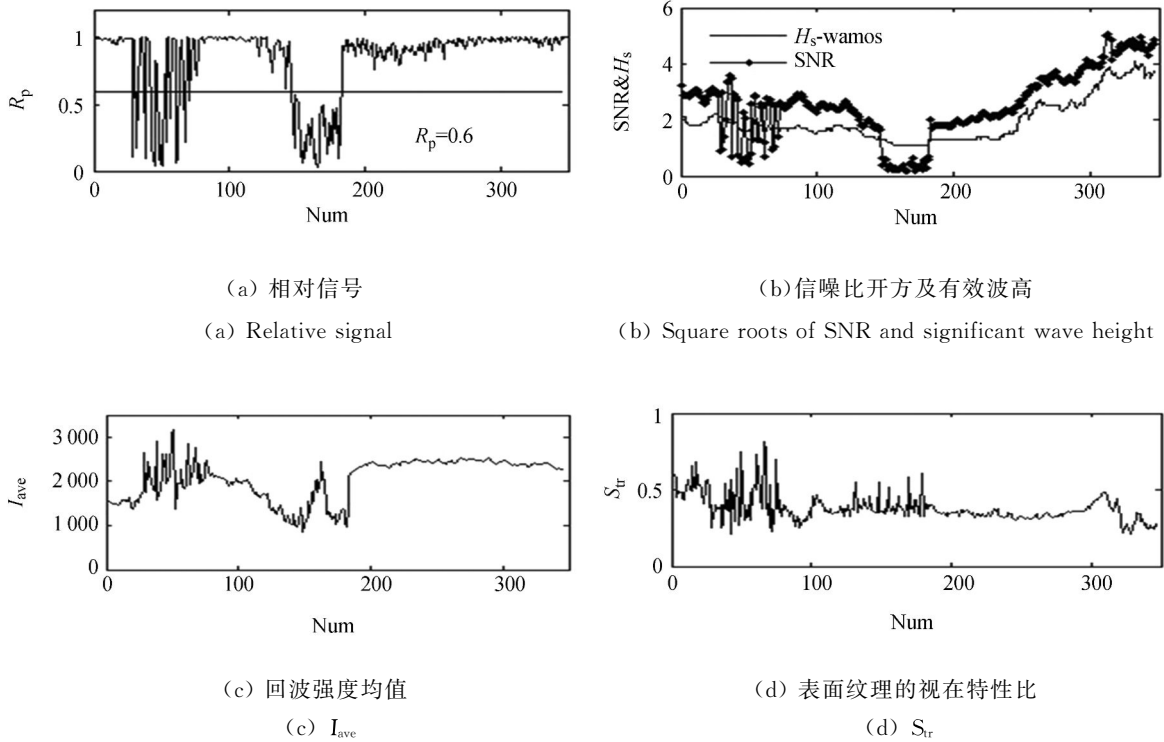


图 2 参数对比图

Fig. 2 Parameters of different images

表 1 参数变化分析

Tab. 1 Analysis of parameter change

$R_p$	信噪比开方	$I_{ave}$	$S_r$	原因
$R_p < 0.6$	大	大	大	降雨
	小	小	大	浪小或者基本没有海浪
$R_p \geq 0.6$	大	小	大	回波强度及纹理小
	大	大	大	回波强度大, 纹理较小, 波高较小
	大	大	小	回波强度大, 纹理大, 也即波高高

对应于图 2(a)  $R_p < 0.6$  的两段数据可知, 第一阶段的部分数据是受降雨影响相对较轻一点的, 同时海浪回波还有一定的纹理; 第二阶段的数据, 同时根据  $I_{ave}$ , SNR 以及的变化可知,  $I_{ave}$  先逐渐增加的部分是降雨影响逐渐严重的部分, 中间  $I_{ave}$  逐渐减小的部分是降雨影响逐渐减弱, 从之前信噪比和  $I_{ave}$  的变化趋势可知两部分的海面基本没有波浪; 最后一部分,  $I_{ave}$  基本很小, 原因是降雨影响小, 但基本没有海浪回波。

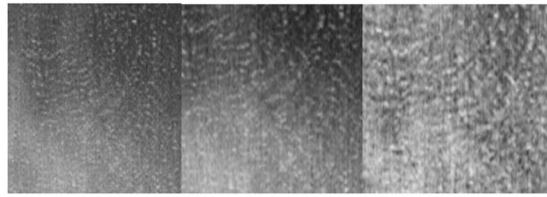
另外, 在  $R_p \geq 0.6$  时,  $S_r$  和  $I_{ave}$  有同增(或者同减)的趋势, 并且  $S_r$  的值超越 0.4, 这种情况判

定为降雨不是影响该时刻的 32 幅图像而是影响其中的一部分时刻的数据。查原始图像也证实, 降雨是渐变的影响雷达图像的。

对于降雨影响较小的资料, 由于降雨与海浪在空间频率上有不同的特性, 降雨影响较轻的图像序列的波谱能量分布中, 低频部分存在过多的能量, 与正常未受降雨影响的图像有明显的差异。由于海浪的实际周期并不会出现在那么大的范围内, 所以频域滤波过程中将频率小于 0.06 (对应周期 15 s) 的能量清零了, 以此来实现降雨干扰的抑制。

图 3 给出了降雨图像经中值滤波和频域滤波得到的结果的对比。其中图 3(a) 是降雨图像, 图像下半部分受降雨影响, 海浪信息被模糊掉很多。图 3(b) 为中值滤波的结果, 可以看出它并没有有效地滤除降雨的影响, 还使得海浪纹理更加模糊。图 3(c) 为利用本文方法进行频域滤波得到的结果, 从图中可以看出, 降雨的影响被有效地抑制, 海浪的纹理很好地保留下来了。

对于降雨影响的数据, 将未利用本文方法滤波得到的反演结果、本算法处理后得到反演结果 (包括有效波高 ( $H_s$ ), 周期 ( $T_p$ ), 波向 ( $P_{dir}$ )) 与参



(a)降雨图像 (b)中值滤波 (c)频域滤波  
(a) Rain image (b) Median filter (c) Filter in frequency domain

图 3 滤波结果对比

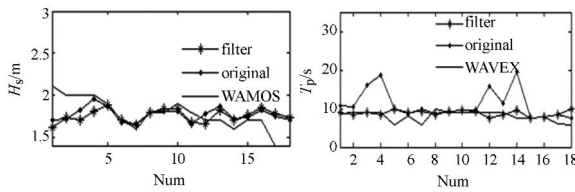
Fig. 3 Comparison of different filters

考值(以 WAMOS 和 WAVEX 提供的数据做参考值)进行了对比,具体结果如图 4 所示,其中“—\*—filter”代表的是本文方法频域滤波后的结果,“—•—original”代表的是未经处理的结果,另一个为相应的 WAMOS 或者 WAVEX 提供的参考值。

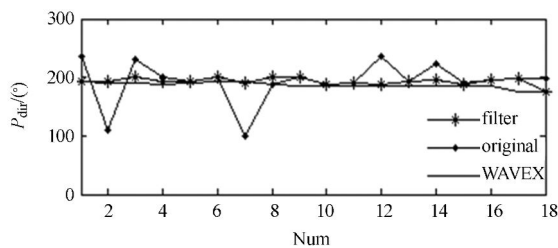
由于信噪比没法直接与参考值进行误差统计,需经过标定得到有效波高再进行误差计算。目前工程上使用的 X 波段雷达来计算有效波高的方法正是基于有效波高与信噪比的开方呈线性关系的原理来实现的,即

$$H_s = A + B\sqrt{SNR} \quad (10)$$

所以图 4(a)中的对比以及表 2 中的误差统计结果都是基于 SNR 标定后的有效波高的。



(a)有效波高 (b)波周期  
(a) Significant wave height (b) Wave period



(c)波向  
(c) Wave direction

图 4 滤波前后参数对比

Fig. 4 Comparison of parameters before and after filtering

各参数(有效波高( $H_s$ ),周期( $T_p$ ),波向( $P_{dir}$ ))相应的误差统计结果如表 2~表 4 所示,对波向和有效波高而言,不需要计算相对误差。

表 2 有效波高的误差统计

Tab. 2 Statistical errors of significant wave height

	Filter	Original
数据量	18	18
测量值均值/m	1.75	1.77
参考值均值/m	1.76	1.76
平均差/m	0.01	-0.01
标准均方根误差/m	0.22	0.19
测量误差/m	0.15	0.13

表 3 波周期的误差统计

Tab. 3 Statistical errors of wave period

	Filter	Original
数据量	18	18
测量值均值/s	8.54	10.08
参考值均值/s	8.00	8.00
平均差/s	-0.54	-2.08
标准均方根误差/s	0.89	3.1
测量误差/s	0.63	2.19
相对误差	7.87%	27%

表 4 波向的误差统计

Tab. 4 Statistical errors of wave direction

	Filter	Original
数据量	18	18
测量值均值/(°)	193.24	203.91
参考真值均值/(°)	186.45	186.45
平均差/(°)	-6.79	-17.46
标准均方根误差/(°)	9.23	24.12
测量误差/(°)	6.52	17.06

通过图 4 及表 2~表 4 的对比结果可以看出,针对降雨影响的数据进行的滤波处理,对于周期和波向的反演结果有很大程度上的改进,与参考值的误差减小很多;有效波高的改进并不明显,也即信噪比的改进较小,这是因为降雨本身就模糊了大部分的海浪信息,滤波并不能将海浪信息与降雨噪声完全分离开来。

## 5 结 论

在雷达测波的过程中,降雨会影响雷达的测

波能力,会改变海面的粗糙度,从而影响回波数据,最终影响海浪参数反演结果的准确度。针对该问题,本文提出了一种基于质量控制、三维表面粗糙度评定参数和信噪比相结合的降雨资料识别与处理方法。首先分析了降雨对雷达测波和海面回波特性的影响,接着利用质量控制功能判读出了存在问题的数据,然后利用回波图像的三维表

面粗糙度的相关评定参数及信噪比的具体变化趋势区分了降雨资料与非降雨资料,并对降雨影响较小的图像进行了频域滤波处理。实验结果证明:周期的相对误差减小了 19.13%;波向测量误差减小了  $10.54^\circ$ ,有效波高的改进较小。该方法能有效地区分降雨与非降雨图像,对降雨图像进行有效地处理,提高海浪参数的反演的准确度。

### 参考文献:

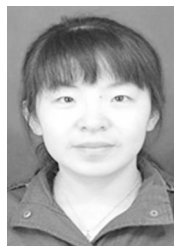
- [1] BRAUN N, GADE M, LANGEA P A. The effect of artificial rain on wave spectra and multi-polarization X B and radar backscatter[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4305-4312.
- [2] PESTORIZA V, NUÑEZ A, MARIÑO P, et al.. Rain-cell identification and modeling for propagation studies from weather radar images[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2010, 52(5): 117-130.
- [3] YASUMA, HIROAKI, FUKUCHI, et al.. Rain effect on polarimetric SAR observation[C]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010:2047-2050.
- [4] PEGRAM, GEOFF, LLORT, et al.. Radar rainfall: Separating signal and noise fields to generate meaningful ensembles[J]. *Atmospheric Research*, 2011,100(2-3):226-236.
- [5] MARZANO F S, MORI S, CHINI M, et al.. Potential of high-resolution detection and retrieval of precipitation fields from X-band spaceborne synthetic aperture radar over land[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011,15(3):859-875.
- [6] WAVEX 4.0 Technical Hand book[CD]. MIROS A/S, 1300/Th/003 rev. 01.
- [7] 李会方, 俞卞章. 基于小波的多重分形图像去噪新算法[J]. *光学 精密工程*, 2004,12(3):305-310.
- LI H F, YU B ZH. New wavelet based algorithm for denoising of multifractal images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(3):305-310. (in Chinese)
- [8] 何超, 管庆. 船载导航雷达信号处理中杂波抑制算法的实现[C]. 中国西部青年通信学术会议, 2006: 488-492.
- HE CH, GUAN Q. The implementation of clutter suppression algorithms on navigation radar signal progressing on shipboard[C]. *Western China Youth Communication Academic Meeting*, 2006:488-492. (in Chinese)
- [9] 郭旭静, 王祖林. 用二维双通道滤波器组的合成孔径雷达相干斑抑制模型[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(9):1456-1461.
- GUO X J, WANG Z L. SAR speckle reduction model based on 2D two-channel filter bank [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1456-1461. (in Chinese)
- [10] 郑亚能. X波段航海雷达图像预处理器的研究与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
- ZHENG Y N. *Research and design of X-band marine radar image preprocessor*[D]. Harbin: University of Harbin Engineering, 2010. (in Chinese)
- [11] 唐艳红. 基于航海雷达的海浪遥测关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
- TANG Y H. *Research on key techniques of wave remote sensing based on marine radar*[D]. Harbin: University of Harbin Engineering, 2010. (in Chinese)
- [12] 陈捷, 还剑平, 谢亚楠. 用合成孔径雷达测量降雨信杂比的方法研究[J]. *科学技术与工程*, 2010,10(4):895-899.
- CHEN J, HUAN J P, XIE Y N. Syudy on method for measuring the precipitation SCR by synthet-

- ic aperture radar[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010,10(4):895-899. (in Chinese)
- [13] FUJIKAW T, KOJIMA T. Radar device and rain/snow srea detecting device: Japan, US2010207809 (A1)[P]. 2010-08-19.
- [14] NAKAHAMA M. Signal processing device, radar apparatus and signal processing program: Japan, JP2011099836(A)[P]. 2011-05-19.
- [15] YANG D N, ZHANG X SH. Operation control panel for marine navigation radar: China, CN201999180(U)[P]. 2011-10-05.
- [16] 王文卓. 基于数字图像技术的铸造表面粗糙度的三维评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2005.  
WANG W ZH. *The three-dimension evaluation of casting surface roughness based on digital imaging technology*[D]. Harbin:University of Harbin Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [17] 刘雪梅. 基于船舶绿色防污的贝壳表面形貌研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2010.  
LIU X M. *Research of shell surface topography based on ship green antifouling*[D]. Wuhan:University of Wuhan Technology, 2010. (in Chinese)
- [18] 李玉玺. 三维表面粗糙度参数表征及其软件系统实现[D]. 洛阳:河南科技大学, 2011.  
LI Y X. *Parameters characterization and system implementation of three-dimensional roughness* [D]. Luoyang:University of Henan Science and Technology, 2011. (in Chinese)

#### 作者简介:



**沈继红**(1966—),男,吉林长春人,教授、博士生导师,2002年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事系统优化与建模方向的研究。E-mail: shenjiahong@hrbeu.edu.cn



**李英**(1983—),女,河北黄骅人,博士研究生,2008年于哈尔滨工程大学获得学士学位,主要从事导航雷达的海洋遥感技术方向的研究。E-mail: 04112117@163.com



**戴运桃**(1980—),女,湖北红安人,博士,讲师,2010年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事智能算法、船舶运动建模方向的研究。E-mail: peach0040@126.com



**王淑娟**(1982—),女,黑龙江佳木斯人,博士,讲师,2009年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事系统解耦、复杂系统分析与建模方向的研究。E-mail: wangshujuan@hrbeu.edu.cn