



X波段测波雷达海流信息反演的影响因素分析

王立¹ 洪丽娟¹ 刘辛宇¹ 成云飞¹ 华寅¹ 吴雄斌²

1 公安部第三研究所, 上海, 200031

2 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉, 430072

摘要: X波段测波雷达海流信息的提取决定着有效浪高结果的准确度。因此, 对可能影响X波段测波雷达海流信息提取的各种环境因素以及雷达工作模式等进行了海浪回波成像仿真, 然后采用目前测波雷达通用的算法对仿真回波图像进行了海流信息反演。主要研究了海表面风速、雷达天线架设距离海平面高度、天线转速、海流流速、海流流向与海浪方向夹角、所选取的图像帧数以及每帧图像大小对海流信息反演的影响。对比分析设定值与反演结果, 可知海表面风速在6~14 m/s之间, 天线高度大于20 m并且转速为50~70 r/min, 流速小于200 cm/s并且主波浪向与流向夹角不接近90°, 图像帧数为128帧并且每帧图像数据点数为128×128时, X波段测波雷达能获得最佳海流信息反演结果。

关键词: X波段雷达; 海洋观测; 海流信息反演; 影响因素; 海面成像仿真

中图法分类号:P229; P231

文献标志码:A

利用雷达观测海洋信息具有全天候、高分辨率等优势, 已成主流观测手段^[1-2]。作为雷达探测海洋手段的补充, X波段导航雷达测波系统的发展使得雷达探测手段更为精确多样。当X波段导航雷达电磁波入射到海面时, 会与和雷达波长相当的、由风引起的毛细波产生 Bragg 散射, 后向散射回波被雷达接收器接收, 形成“海杂波”。而波长较长的重力波通过对毛细波的调制作用表现在海杂波图像上^[3], 使X波段导航雷达回波图像包含了丰富的海洋动力学参数信息。德国基斯塔赫特(GKSS)研究中心和挪威 Miros 公司开发的利用X波段雷达的海流观测系统占据目前国际测波雷达市场80%的份额^[4]。除此之外, 美国, 日本, 荷兰, 意大利等国也在从事利用X波段雷达进行海流监测的研究。国内的科研院校也都加大了对利用X波段雷达进行海流监测技术的自主研发速度^[5-7]。

随着科技的发展, X波段测波雷达海流参数反演方法也日益多样化^[8,9]。但包括WaMoS II与WAVEX在内的测波雷达的通用方法是首先对雷达接收的矩形回波图像序列进行三维傅里叶(FFT)变换, 以获得图像谱; 然后通过最小二乘法从图像谱中得到观测海域海流大小和方向。文献

[10,11]在测波雷达海流观测方面做了仿真研究, 并且对仿真雷达回波进行了海流信息的提取。目前, 利用X波段测波雷达来探测海流只局限在应用阶段, 对影响其反演结果精度的各种因素的定量分析却很少。本文对可能影响X波段测波雷达海流信息反演的各种环境因素以及雷达工作模式等进行了海浪回波成像仿真, 采用目前测波雷达通用的算法对不同条件下的仿真图像进行了海流信息反演, 了解各种条件对雷达海流信息反演的影响程度, 可为雷达站的架设以及环境因素评估提供较好的指导。

1 影响因素仿真分析

1.1 影响因素

雷达天线架设高度会导致阴影遮挡。由于波峰较长的波阻挡了部分雷达波束的照射路线, 导致海面某些地方不能产生回波信号, 在图像的相应位置出现暗区, 由此造成遮挡(图1(a))。阴影遮挡程度与雷达天线距离海平面高度有直接关系, 海流计算中应该根据天线高度不同, 考虑遮挡造成的阴影部分^[12]。测波雷达需要对N幅回波图进行处理, 天线旋转一周即可对海面成像一次,

收集一定帧数的回波图后再进行三维 FFT 分析(图 1(b))。因此,天线转速决定两帧图像之间的时间间隔 Δt ,进而决定图像谱的时间分辨率,对海流反演影响显著。由于雷达成像与海面粗糙度有关,海表面风速大小是影响海面回波形态最直观的因素,直接关系到雷达工作效率。与风速相似,海表流速以及流向也是雷达海流信息提取的影响因素。用于分析的图像帧数以及每帧图像大小都会影响雷达海态参数提取的准确度,并且会影响雷达数据运算时间以及对雷达硬件的要求。同时背景噪声也是雷达工作过程中不可避免的因素。

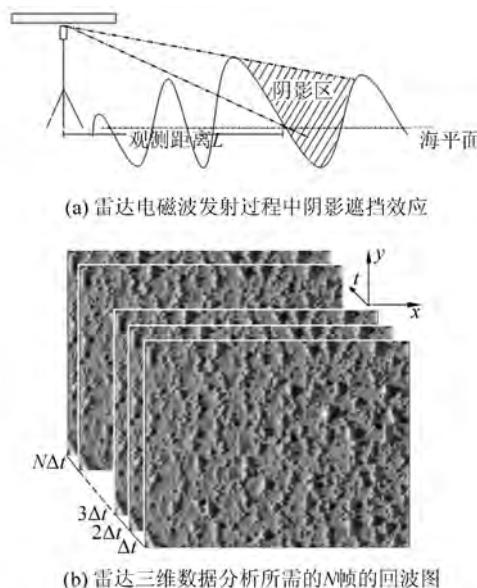


图 1 雷达发射电磁波示意图以及接收的海面回波图像序列

Fig.1 Diagram of Transmitting Electromagnetic Wave and Sea Echo Image Sequence

1.2 雷达回波仿真

为了分析雷达天线距离海平面高度、海表面风速、天线转速、海流流速、海流流向与海浪方向夹角、所选取的图像帧数以及每帧图像大小等因素对 X 波段测波雷达海流信息反演的影响,本文考虑上述因素对回波图像进行仿真。

海浪属于窄带谱的正态随机过程,其幅值服从雷利分布。仿真雷达回波使用 Longuet-Higgins 海浪模型,该模型是一种描述长峰波海浪的模型,认为海面是由多数据幅为 a_n 、频率为 ω_n 、初相为 ϵ_n ,并且在水平面上沿与图 1(b)中 X 轴成 θ_n 角方向传播的余弦波叠加而成^[13],图 1(b)中的三维海面 $\eta(x, y, t)$ 可表示如下:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos[\omega_n t - k_n (x \cos \theta_n +$$

$$y \sin \theta_n) + \epsilon_n]$$
 (1)

式中, k_n 为第 n 个波浪的波数, $-\pi \leq \theta_n \leq \pi$ 。定义方向谱密度函数 $S(\omega, \theta) = S(\omega)G(\omega, \theta)$, $S(\omega)$ 表示频率间隔 $\Delta\omega$ 内的平均能量,也称为频谱, ω 为海浪频率; $G(\omega, \theta)$ 为方向分布函数,简称方向函数, θ 为海浪传播方向。本文模拟海浪采用 P-M 谱作为频谱^[14]:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\beta \left(\frac{g}{U_F \omega}\right)^4\right] \quad (2)$$

式中, $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$ 为无因次常数; g 为重力加速度; U_F 为海面上 19.5 m 高处的风速。方向函数采用根据波浪立体观测计划(stereo wave observation project, SWOP) 得到的公式^[14]:

$$G(\omega, \theta) = \frac{1}{\pi} (1 + a \cos 2\theta + b \cos 4\theta) \quad (3)$$

式中,

$$\begin{cases} a = 0.5 + 0.82 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^4\right] \\ b = 0.32 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^4\right] \end{cases} \quad (4)$$

理论上, $-\pi \leq \theta \leq \pi$; 实际上, 海浪能量多分布在主波方向两侧各 $\pm 90^\circ$ 的范围内^[14], 因此 $|\theta| \leq \pi/2$ 。由于 $S(\omega, \theta)$ 表示频率间隔 $\Delta\omega$ 与方向间隔 $\Delta\theta$ 内的平均能量,因此有:

$$\sum_{\Delta\omega} \sum_{\Delta\theta} \frac{1}{2} a_n^2 = S(\omega, \theta) \Delta\omega \Delta\theta \quad (5)$$

振幅可表示为:

$$a_n = \sqrt{2S(\omega_n, \theta_n) \Delta\omega \Delta\theta} \quad (6)$$

将式(3)代入式(5),即可仿真由不同阶次波组成的海浪图;由于前两阶次波成分占海浪大部分,因此本文仅将 0 阶次波与 1 阶次波进行仿真考虑^[14]。

2 测流算法

2.1 重力波色散关系

各项同性、无粘性、不可压缩的液体(如海水),其表面波近似符合重力波色散关系方程。重力波的色散关系方程可近似表示为^[14]:

$$\omega(\mathbf{k}) = \sqrt{g |\mathbf{k}| \tanh(|\mathbf{k}| h)} \quad (7)$$

式中, ω 为海浪的角频率; g 为重力加速度; \mathbf{k} 为空间波数矢量; h 为观测海域平均水深。色散关系可以从运动的欧拉方程、连续性方程及其海表面的动力学边界条件和海底的运动边界条件推导。由于海流的存在,使得朝向雷达天线方向的

回波图像功率谱因多普勒效应而移到高频部分,反之则移至低频部分。这使得海浪场与雷达之间有一个相对运动。引入多普勒频移,则此时基本色散关系方程可表示为:

$$\omega_\mu(\mathbf{k}) = \sqrt{g|\mathbf{k}|} \tanh(|\mathbf{k}|h) + \mathbf{k}\mathbf{U} \quad (8)$$

式中, $\omega_\mu(\mathbf{k})$ 为受海流影响的海浪角频率; \mathbf{U} 为海流矢量。受雷达成像非线性和海浪本身弱非线性影响, 海浪能量不仅仅符合基本色散关系方程, 而且还存在于高阶次色散方程中:

$$\omega_n(\mathbf{k}) = (n+1) \sqrt{\frac{g|\mathbf{k}|}{n+1}} \tanh\left(\frac{|\mathbf{k}|h}{n+1}\right) + \mathbf{k}\mathbf{U} \quad (9)$$

式中, n 为海浪能量的阶次, n 为 0 时式(9)即为基本色散关系方程(7); ω_n 为受海流影响的 n 阶海浪角频率。图 2 给出了基本色散关系曲面图, 其中图 2(a)表示流速为 0 cm/s, 流向为 0° 时色散关系曲面; 图 2(b)为流速为 100 cm/s, 流向为 0° 时的色散关系曲面。从图 2 中可以看出, 由于海流的存在, 此时的色散关系曲面与原始流速为零时的色散关系曲面有相应的偏移, 随着流速大小和方向的变化, 色散关系曲面也将不再对称。

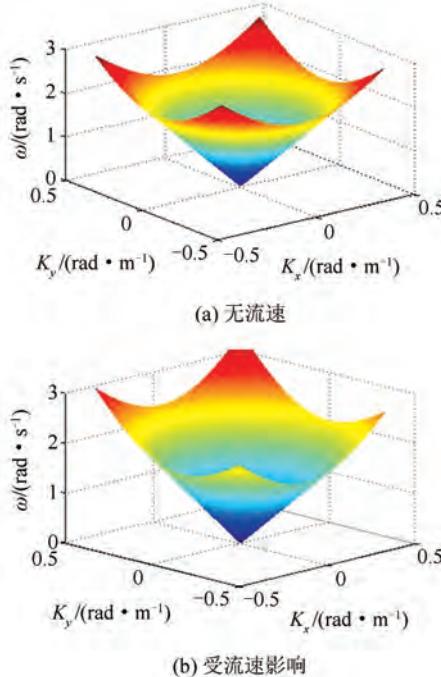


图 2 无流速以及受流速影响的色散关系曲面图

Fig.2 Diagram of Dispersion Relation Surface

2.2 海流信息提取

目前通用的海流信息提取算法也是传统测流算法, 用图像谱加权最小二乘法拟合出表面流。算法思路是使谱能量大的点尽可能多地落在色散关系曲线上, 并且使理论谱与雷达实测图像谱的

频率方差最小^[15], 步骤如下。

1) 设定噪声阈值, 通常为最大能量的 20%。该阈值应高于非线性能量及背景噪声能量, 谱点能量低于阈值的将其能量置零。

2) 将步骤 1) 得到的谱点运用能量加权最小二乘法, 得到较低精度海流值。根据极小值原理, 取加权最合适方差为:

$$Q^2 = \sum_{i=1}^{n_0} (\omega_i - \omega(k_i))^2 E(k_{x_i}, k_{y_i}, \omega(k_i)) \quad (10)$$

式中, ω_i 为对应第 i 个实测谱分量频率; $\omega(k_i)$ 为理论基本色散关系与波数 k_i 对应的谱分量频率; $E(k_{x_i}, k_{y_i}, \omega(k_i))$ 代表与 ω_i 对应的点的谱能量; n_0 为最小二乘分析的谱分量数目。使 Q^2 取极小值时对应的流速与流向即是需要得到的海流值。

3) 迭代算法估算精确海流。将步骤 2) 得到的粗略海流值代入式(3)判断实测谱分量属于 0 阶次还是 1 阶次波, 并且利用色散方程计算出对应角频率, 判断出是否有混叠现象发生。若有混叠产生, 则利用傅里叶变换有关性质进行去混叠处理。将处理后的数据应用于步骤 2) 得到更为准确的海流。继续将新的海流值代入式(3)进行判断, 然后重复步骤 2) 直至迭代 10 次左右, 最终即可输出更为精准的海流结果。

3 海流反演结果与分析

采用 § 2 的算法对以下不同条件下的仿真回波进行海流信息反演, 将设定值与反演海流结果进行对比分析。

3.1 流速、流向与浪向夹角

图 3 为不同流速设定值条件下, 反演出流速、流向与设定流速、流向之间的误差棒图。仿真过程中, 天线距离海表面高度设定为 50 m, 转速为 60 r/min, 海浪主波方向与流向均设定为 0°, 消除了浪向与流向夹角的影响。图像帧数为 128 帧, 图像大小(数据点数)为 128×128, 风速设定值为 10 m/s。流速设定为 0~400 cm/s 之间变化。本文中所有对比图黑色与红色线分别对应反演的海流流速和流向。图 4 为不同流向设定值条件下反演出的流速、流向与设定流速、流向之间的误差棒图。仿真过程中, 天线距离海表面高度设定为 50 m, 转速 60 r/min, 流速值设定为 100 cm/s, 海浪主波方向为 0°, 图像帧数为 128 帧, 图像大小为 128×128, 风速设定值为 10 m/s。流向设定为 -90°~90° 之间变化, 即流向与浪向夹角在 -90°~

90°之间变化。

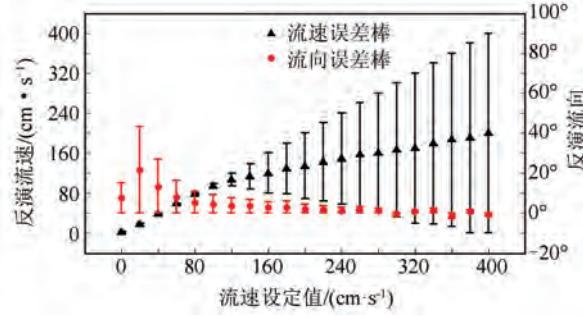


图 3 流速大小对海流反演的影响

Fig.3 Effect of Current Speed on Current Inversion

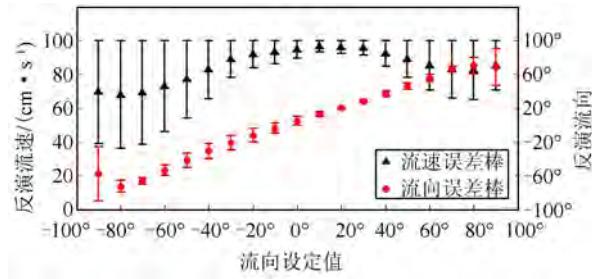


图 4 流向与浪向夹角对海流反演的影响

Fig.4 Effect of Current Direction on Current Inversion

由图 3 可知, 观测区域流速过小, 会导致反演海流结果不太理想, 这是由于最小二乘算法本身的缺陷导致的。当流速过小时, 实测图像谱与理论谱偏离很小, 此时不能发挥最小二乘法的优势, 计算出的流速与流向与设定值会有略微偏差; 当观测区域流速过大时, 会因为多普勒效应而使观测频率大大提高, 出现混叠现象, 且由图 4 中对比结果可知, 传统去混叠方法对此类混叠的处理效果不明显。分析图 4, 发现当海流流向与主波浪向夹角为 90° 时, 海流反演会出现很大误差。根据理论分析结合仿真对比结果, 由式(7)可知, 此时波数矢量与海流矢量乘积为零, 不存在多普勒频移项; 海流对色散关系曲面没有贡献, 根据重力波色散关系, 反演海流已经失去效用。并且随着二者夹角逐步接近 90°, 流速与流向反演结果误差也会逐步增大。

3.2 天线高度以及天线旋转速度

图 5 为不同天线距离海面高度设定值条件下, 反演出流速、流向与设定流速、流向之间的误差棒图。仿真过程中, 观测区域与雷达天线距离为 1 000 m, 天线转速为 60 r/min, 流速值设定为 100 cm/s, 海浪主波方向与流向均设定为 0°, 消除了浪向与流向夹角的影响。图像帧数为 128 帧, 图像大小为 128×128, 风速设定值为 10 m/s。天线高度设定为 10~200 m 之间变化。图 6 为不

同雷达天线转速设定值条件下, 反演出流速、流向与设定流速、流向之间的误差棒图。仿真过程中, 天线距离海表面高度设定为 50 m, 流速值设定为 100 cm/s。海浪主波方向与流向均设定为 0°, 消除了浪向与流向夹角的影响, 图像帧数为 128 帧, 图像大小为 128×128, 风速设定值为 10 m/s。天线转速设定为 24~120 r/min 之间变化。

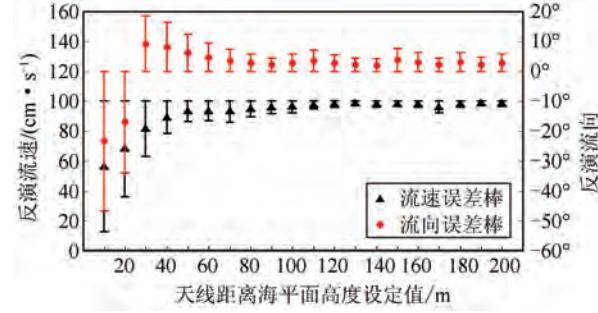


图 5 天线高度对海流反演的影响

Fig.5 Effect of Antenna Height on Current Inversion

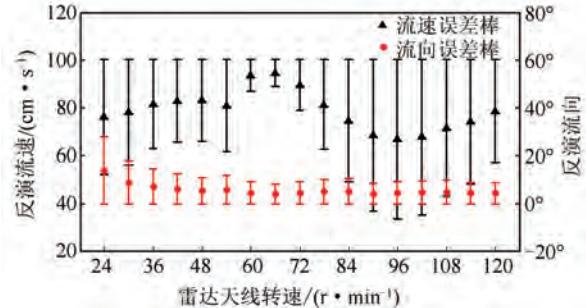


图 6 天线转速对海流反演的影响

Fig.6 Effect of Rotating Speed on Current Inversion

图 5 中, 观测距离为 1 000 m, 天线高度变化范围为 10~200 m, 因此电磁波掠射角度范围为 0°~10°。天线距离海平面高度是影响雷达海流反演的重要因素, 天线架设高度过低会增多被遮挡波浪数, 直接影响观测结果。研究表明, 对于水平极化雷达, 其最优工作下的人射角限定在 20°~40° 之间^[16]。在大入射角条件下, 天线高度越高, 入射角越接近理论最优入射角值, 海流反演结果越精确。对于 X 波段测波雷达, 由于环境限制, 天线架设高度一般不会太高, 特别是船载 X 波段雷达, 高度更低。而且天线高度越高, 架设难度、天线维护以及风险也会随之增加。分析图 6, 天线转速过慢, 将会导致时域亚采样, 部分海浪频率会大于奈奎斯特频率, 形成混叠效应, 影响海流反演结果。天线转速并不是越快越好。转速太快, 观测海浪时间积累不够, 海浪状态监测不足, 海流反演结果不理想。且天线转速越快, 对天线以及转台磨损越大, 有效工作时间会大大缩减。

3.3 海表面风速以及图像帧数与大小

图7为不同风速设定值条件下,反演出流速、流向与设定流速、流向之间的误差棒图。仿真过程中,天线距离海表面高度设定为50 m,天线转速为60 r/min,流速值设定为100 cm/s。海浪主波方向与流向均设定为0°,消除了浪向与流向夹角的影响,图像帧数为128帧,图像大小为128×128。风速设定为0~20 m/s之间变化。图8为不同图像帧数与大小条件下,反演出的流速大小与设定流速大小之间的误差色彩图。横坐标为图像帧数 N_1 ,纵坐标为每帧图像数据点数 $N_2 \times N_3$ (用来海流反演的数据量为 $N_1 \times N_2 \times N_3$)。仿真过程中,天线距离海面高度设定为50 m,天线转速为60 r/min,流速值设定为100 cm/s。海浪主波方向与流向均设定为0°,消除了浪向与流向夹角的影响,风速设定值为10 m/s。图像帧数设定值分别为32、64、128、256,每帧图像大小分别设定为32×32、64×64、128×128、256×256。图9为不同图像帧数与大小条件下反演出流向与设定流向之间的误差色彩图。仿真过程中,天线距离海表面高度设定为50 m,天线转速为60 r/min,流速值设定为100 cm/s。海浪主波方向与流向均设定为0°,消除了浪向与流向夹角的影响,风速设定值为10 m/s。图像帧数设定值分别为32、64、128、256,每帧图像大小分别设定为32×32、64×64、128×128、256×256。

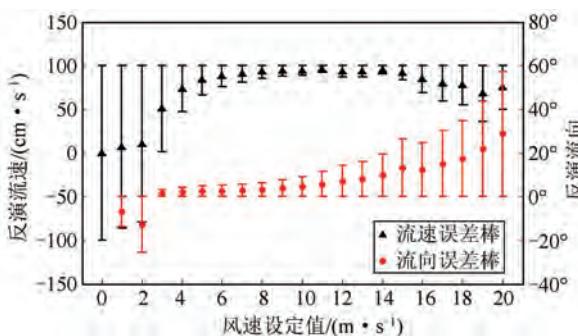


图7 风速对海流反演的影响

Fig.7 Effect of Wind Speed on Current Inversion

由图7可知,海表面风速小于3 m/s或者大于14 m/s时,海流反演误差很大。这是由于当风速过小时,会导致海浪信号淹没在背景噪声中而无法分离,X波段测波雷达不能发挥海浪观测能力;而风速过大,海面波浪振幅也会越大,根据之前遮挡效应形成的阴影区域会突然增多。而且在实际情况下,风速过大,部分海浪会出现波浪破碎情况或者产生白沫,在电磁波掠入射条件下,某些破碎海浪归一化雷达散射截面增加明显,雷达回

波图像会受到“虚假”信号影响,进而影响海流信息提取^[17]。分析图8、图9,在某一范围内用来计算的图像帧数越多、每帧图像数据点数越大,反演海流结果越准确。测波雷达海流信息是从所选取的矩形图像中提取出来的,所得到的海流值是整个矩形区内的平均值。在某一范围内每帧图像数据点数越多,观测区域越大,包含海浪信息更多,则谱在空间域上分辨率越高,可以降低测量误差;同理,用来分析的图像帧数越多,时间累积越久,包含海浪信息越多,谱在时间域上分辨率越高,也可降低测量误差。但图像帧数选取越多,观测区域海浪非平稳性越明显,利用传统平稳假设下的傅里叶分析来反演海流会导致更多误差;而且图像越大,整个区域流场变化越大,均匀性变低,不能满足傅里叶变换的均匀性假设。实践表明,用来分析的图像越多,数据量越大,计算时间越长,而且需要的存储空间越大,对雷达硬件要求更高;当数据量达到一定程度后,再增加数据量,对结果精度提升已经不明显。

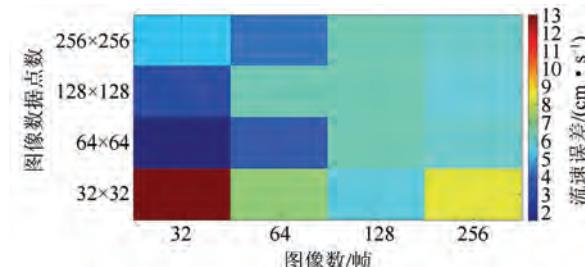


图8 图像帧数与大小对流速反演的影响

Fig.8 Effect of the Quantity and Size of Images on Current Speed Inversion

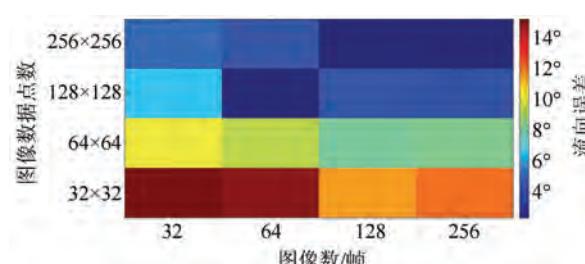


图9 图像帧数与大小对流向反演的影响

Fig.9 Effect of the Quantity and Size of Images on Current Direction Inversion

通过对上述各种影响因素的图像仿真以及海流结果反演,可以发现海表面风速、雷达天线架设距离海平面高度、天线转速、海流流速、海流流向与海浪方向夹角、所选取的图像帧数以及每帧图像大小对海流信息反演均有影响,而真实海表流速以及风速大小对海流反演结果影响最大。当海

表流速大于 2 m/s 时,利用 X 波段雷达观测海流会有很大误差。通常情况下,真实海表流速一般不超过 1.5 m/s,因此当出现极端海况条件使得海表流速过大时,需要对 X 波段雷达测得流速值进行校正处理;而在风速小于 3 m/s 时,低海况下雷达基本接收不到海浪后向散射回波,此时海流估算基本失效。针对低海况下的情况,相应的海流计算结果应该被舍弃。相比较而言,其他影响因素对海流反演结果影响较小,但为了使雷达工作在最优状态,理想工作环境以及参数确认如下:海表面风速在 6~14 m/s 之间,天线高度大于 20 m 并且转速为 50~70 r/min,流速小于 200 cm/s 并且主波浪向与流向夹角不接近 90°,图像帧数为 128 帧并且每帧图像数据点数选择为 128×128 个。

4 结 语

海流计算结果直接影响 X 波段测波雷达所有海态参数提取的准确度。本文对可能影响 X 波段测波雷达海流信息反演因素进行了研究,将海表面风速、雷达天线架设距离海平面高度、天线转速、海流流速、海流流向与海浪方向夹角、所选取的图像帧数以及每帧图像大小等因素对雷达海流信息反演的影响进行了评估,获得了各种条件对雷达海流信息反演的影响程度并且为雷达站的架设提供了很好的指导意义;得到了雷达工作的最佳模式,为测波雷达探测海流提供了可靠依据。

参 考 文 献

- [1] Young I R, Rosenthal W, Zimmer F. A Three Dimensional Analysis of Marine Radar Images for Determination of Ocean Wave Directionality and Surface Currents [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C1):1 049-1 059
- [2] Tian Jiansheng, Wu Shicai, Yang Zijie. Noise Researched in HFGW Radar Sea Echo Processing[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(4): 396-400(田建生, 吴世才, 杨子杰. 高频地波雷达海洋回波处理中的噪声研究[J]. 电波科学学报, 2002, 17(4): 396-400)
- [3] Senet C M, Seemann J, Flampouris S. Determination of Bathymetric and Current MAPS by the Method DISC Based on the Analysis of Nautical X-Band Radar Image Sequences of the Sea Surface[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(8):2 267-2 279
- [4] Gangeskar R. An Algorithm for Estimation of Wave Height from Shadowing in X-Band Radar Sea Surface Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(6):3 373-3 381
- [5] Chen Z, He Y, Zhang B, et al. A New Algorithm to Retrieve Wave Parameters from Marine X-Band Radar Image Sequences[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(7):4 083-4 091
- [6] Wang Li, Wu Xiongbin, Ma Ketao, et al. A Method to Detect Ocean Surface Current Based on X-Band Marine Radar[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 90-95(王立, 吴雄斌, 马克涛, 等. 利用 X 波段导航雷达探测海洋表面流速的方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(1):90-95)
- [7] Xu M, Chu X L, Wang J, et al. Ocean Wind Speed Retrieved from X-Band Radar Image[C]. International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering, Atlantis Press, Paris, France, 2015
- [8] Shen C, Huang W, Gill E W, et al. An Algorithm for Surface Current Retrieval from X-Band Marine Radar Images[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(6): 7 753-7 767
- [9] Serafino F, Lugni C, Soldovieri F. A Novel Strategy for the Surface Current Determination From Marine X-Band Radar Data[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2):231-235
- [10] Cui Limin. Study on Remote Sensing Mechanism and Retrial Method of Ocean Wave and Current with X-Band Radar[D]. Qingdao: Marine Research Institute of Chinese Academy of Sciences, 2008(崔利民. X 波段雷达海浪与海流遥感机理及信息提取方法研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008)
- [11] Wang Guanghai. Inversion of Ocean Current and Analysis of Influencing Factors of Sea States Parameters with X-Band Radar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013(王广海. 基于 X 波段雷达的海流信息反演及海态参数的影响因素分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013)
- [12] Ramos R J, Lund B, Gruber H C. Determination of Internal Wave Properties from X-Band Radar Observations[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(14): 1 039-1 047
- [13] Longuet-Higgins M S. The Statistical Analysis of a Random Moving Surface[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1957, 249:321-387
- [14] Wen Shengchang, Yu Zhouwen. Wave Theory and

- Principle of Calculations [M]. Beijing: Science Press, 1984(文圣常, 宇宙文. 海浪理论及计算原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1984)
- [15] Senet C M, Seemann J, Ziemer F. The Near-Surface Current Velocity Determined from Image Sequences of the Sea Surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2001, 39(3): 492-505
- [16] Plant W J, Keller W C, Hayes K, et al. Normalized Radar Cross Section of the Sea for Backscatter: 2. Modulation by Internal Waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(1): 783-1-794
- [17] Catalán P A, Haller M C, Plant W J. Microwave Backscattering from Surf Zone Waves[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2014, 119(5): 3 098-3 120

Influencing Factors of Ocean Current Inversion with X-Band Wave Monitoring Radar

WANG Li¹ HONG Lijuan¹ LIU Xinyu¹ Cheng Yunfei¹ HUA Yin¹ WU Xiongbin²

1 Third Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai 200031, China

2 School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Sea surface dynamic parameters such as significant wave height and current velocities are obviously important for climate studies as well as the safe and efficient operation and routing of marine traffic. The key point determining the accuracy of the significant wave height extracted by the X-band wave monitoring radar is the accurate estimation of SNR which depends on whether the dispersion shell is correctly obtained. To obtain the dispersion shell, the accurate current velocity should be estimated first. This is done by fitting the theoretical dispersion relation to the signal coordinates in the complex wave number frequency spectrum. Without accurate measurement result of current, there will be serious bias in SWH inversion due to the erroneous calculation of SNR. This paper carried out simulation of ocean surface with different working state of radar and various environment factors which may influence the performance of X-band wave monitoring radar in extracting ocean current, and then inverted the ocean current from the simulated echo images with a general algorithm for wave monitoring radar. The study mainly focused on the factors which may influence ocean current inversion like wind speed, the height and the rotation speed of antenna, the velocity and the angles between current and main wave direction, images quantity and its size. Comparing preset values and inversion results, it shows that when the wind speed ranges from 6 to 14 meters per second, the antenna is 20 meters higher than sea level and its rotation speed is limited from 50 to 70 r/min, the velocity of ocean current is less than 200 centimeters per second and the angles between current and main wave directions are not close to 90 degrees. When the quantity of images is 128 and an image size of 128×128, X-band wave monitoring radar could achieve the best ocean current inversion results.

Key words: X-band radar; ocean observation; ocean current inversion; influencing factors; simulation of ocean surface

First author: WANG Li, PhD, specializes in the microwave remote sensing. E-mail: sanven@whu.edu.cn

Corresponding author: LIU Xinyu, assistant researcher. E-mail: gasslx@163.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC0800405; the Shanghai Municipal Science and Technology Project, No. 15DZ0500600.