

# 基于 X 波段海洋雷达的南海西北部内波参数特征研究

温静涵<sup>1</sup>, 何宜军<sup>1,2</sup>, 陈忠彪<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 国家卫星海洋应用中心 空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 中国南海是内波频发海域, 卫星遥感在内波参数特征的统计分析中得到了广泛应用, 但是卫星轨道的重复访问时间长, 不能连续观测内波参数的变化特征。X 波段海洋雷达具有高时间和空间分辨率, 可以长期连续观测内波的变化, 本文提出了利用 X 波段海洋雷达图像提取内波参数的方法, 并利用连续观测的数据研究了各参数的分布特征。首先, 对雷达图像进行预处理, 包括平均处理及斜坡校正两步; 利用二维快速傅里叶变换确定内波的传播方向, 进而根据该方向上的径向廓线确定内波的相速度大小、波长及周期。最后, 利用在南海石油平台上观测的 X 波段雷达图像对内波各参数进行提取和统计分析, 结果表明, 研究区域内波的传播方向多为西北向及西向传播, 相速度多为 0.6~0.8 m/s, 波长一般为 400~600 m, 周期大部分不超过 1000 s。

**关键词:** 海洋内波; 南海西北部; X 波段海洋雷达; 参数统计

中图分类号: P733 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)09-0055-09

DOI: 10.11759/hyqx2021109002

中国南海是海洋内波的多发地, 内波在海洋内部能量的传递、海洋生物的生长、海上的生产活动和海洋工程等方面都有重要影响。随着遥感图像分辨率的提高, 卫星遥感技术可以用于获取大范围的海洋内波图像。目前用于海洋内波观测的传感器主要有合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)、可见光光谱仪和 X 波段海洋雷达等。SAR 具有全天时、全天候观测成像等优点, 可以获得高分辨率的海面图像<sup>[1]</sup>。利用 SAR 进行内波观测最早始于 SAR 图像中内波调制条纹的发现<sup>[2]</sup>, Alpers 于 1985 年针对 SAR 图像提出了内波的雷达成像理论为后人利用 SAR 观测内波打下理论基础<sup>[3]</sup>。Li 等<sup>[4]</sup>通过测量内波波包之间的距离确定内波的群速度, 并结合两层有限深度模型导出混合层深度。Zheng 等<sup>[5]</sup>于 2001 年提出了曲线拟合法和 peak-peak 法来确定内孤立波的半振幅宽度, 进而利用 SAR 图像计算内孤立波的振幅。Shen 等<sup>[6]</sup>通过收集分析 SAR 图像, 统计了南海西北部海洋内波的分布并提出混合层深度的反演方法。Ning 等<sup>[7]</sup>通过收集 44 幅哨兵一号及高分 3 号的 SAR 图像, 统计了马六甲海峡处内波的振幅及内波波包传播的群速度的分布范围。Jackson<sup>[8]</sup>于 2007 年将中分辨率成像光谱仪(MODIS)图像中的太阳耀斑用于分析全球范围内的高频非线性内孤立波, 同时

分析了全球各个海域的内波发生频率。Wang 等<sup>[9]</sup>于 2012 年分析了 2500 多幅光学卫星和 SAR 图像后, 对整个南海的内波传播进行了系统的研究, 针对南海的不同区域分析内波的传播机制。Sun 等<sup>[10]</sup>利用 MODIS 图像对安达曼海中内波的时空分布进行统计并推测该地内波发生源。但是, 由于卫星轨道的限制, 星载 SAR 和 MODIS 的重复访问周期长、时间分辨率不足, 不便研究内波连续的发展变化过程, 导致内波参数统计不完全; 光学传感器容易受云、雾、观测角度等影响。

X 波段雷达具有高时间(几秒至几分钟)和空间分辨率(几米)的优点, 可以实时获得海面连续观测

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目(41620104003); 国家自然科学基金重大仪器设备研制项目(42027805); 江苏省海洋科技创新专项项目(HY2018-12); 国家自然科学基金青年基金(41506199); 江苏省自然科学基金青年基金(BK20150905)

[Foundation: The International Cooperation Project of the National Natural Science Foundation of China, No. 41620104003; The National Natural Science Foundation of China Major Instrument and Equipment Development Project, No. 42027805; Jiangsu marine science and technology innovation project, No. HY2018-12; The National Natural Science Youth Foundation of China, No. 41506199; The National Natural Science Youth Foundation of Jiangsu Province, No. BK20150905]

作者简介: 温静涵(1997—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事海洋内波研究, E-mail: jinghanwen@nuist.edu.cn; 陈忠彪(1987—), 通信作者, 副研究员, 研究方向: 海洋微波遥感, E-mail: chenzhongbiao@nuist.edu.cn

的图像,近年来被广泛应用于海浪和海流等参数的观测。随着 X 波段雷达技术的发展,研究人员也开始探索利用 X 波段雷达反演海洋内波的方法。尽管与 SAR 相比, X 波段雷达的探测范围较小,但它可以对海面进行实时、连续的观测,在海洋内孤立波的动态信息研究中有其独到的优势。1990 年, Watson 和 Robinson 使用 X 波段海洋雷达数据研究直布罗陀海峡内波的演化过程<sup>[11]</sup>。2009 年, Ramos 等<sup>[12]</sup>利用 X 波段雷达的图像,提出了一种基于 Radon 变换的方法,计算内波的传播方向、非线性速度、孤立波之间的距离和每个波包中孤立波的数量等参数。在此基础上, Lu 等<sup>[13]</sup>基于 X 波段雷达、利用 Radon 变换的方法计算出南海东北部内孤立波的传播方向和传播速度等参数,并应用海洋的两层有限深度理论计算混合层深度。Plant 等<sup>[14]</sup>通过对 2005 年和 2007 年部署在中国南海的舰载双极化相干 X 波段雷达的图像进行分析,发现南海至少存在两种不同类型的内波,并指出两类内波各自的特征。Lund 等<sup>[15]</sup>提出了一种从雷达图像中全自动检索内波的方法,并且针对振幅超过 20 m 的大振幅内波进行了单独讨论。2016 年, Badiey 等<sup>[16]</sup>通过分析由锚定温度传感器组成的阵列和 X 波段雷达所得到的数据,统计了一系列内波参数,包括内波的传播速度、传播方向和振幅等。

已有的研究主要是利用 SAR 及 MODIS 图像进行内波时间及空间分布的统计,由于卫星的重复访问周期较长,使得统计时间不连续,不能体现内波一段时间内连续的变化特征。为解决传统方法的不足,本文提出一种基于 X 波段雷达图像提取海洋内波参数方法,实验时间内 X 波段雷达固定在石油平台上,基于 X 波段雷达高时间和空间分辨率、实时连续观测的特点,对海洋内波参数进行定量提取,并对一段时间内南海西北部的内波参数进行统计分析。本文结构如下。第二节介绍所用的实验数据,第三节介绍本文提出的利用 X 波段雷达图像提取内波参数及参数统计的方法,第四节利用实验数据对方法进行验证,第五节对研究结果进行讨论与总结。

## 1 数据介绍

本实验开展于 2017 年 4—12 月,地点位于中国南海西北部的石油平台上(图 1)。观测海区位于海南岛西南部约 100 km 处,该地水深约为 90 m。观测海区的地形变化为由东南向西北水深逐渐减小,潮汐以不规则

全日潮为主,前人已证实该地常有内波出现<sup>[17]</sup>。实验所用的 X 波段海洋雷达基于一套标准的船载导航雷达开发,工作频率为 9.4 GHz,工作在掠入射角,极化方式为 HH 极化,加装了 40 MHz 的数据采集卡和数据采集软件,用于将雷达接收的海面向后散射回波转换为 8 bit 的灰度图像。雷达的主要参数如表 1 所示,其中,雷达天线的旋转速度为 42 r/min,故雷达的时间分辨率为 1.43 s,实验中一组雷达序列采集 32 至 128 幅雷达图像,采集相邻两个图像序列的时间间隔为 3~10 min。雷达的径向距离分辨率为 3.75 m,方位分辨率为 1°,最大探测范围约为 6 km。图 2 为本实验中内波通过观测海区时 X 波段雷达采集的一幅图像,其中明暗变化的粗条纹是内波造成的海面粗糙度变化引起的雷达回波,从图中目视可以清楚地判断出该组内波是向西北方向传播。

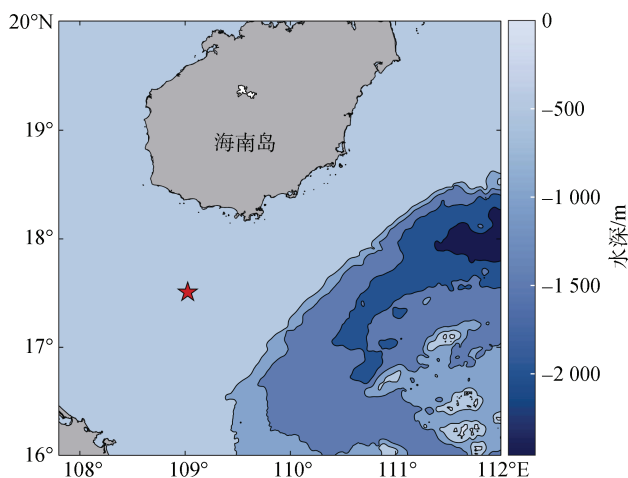


图 1 南海西北部地形图及雷达站所处位置(以红色五角星表示)

Fig. 1 Topographic map of the northwestern South China Sea and the location of the radar station (the red pentagon marks the location of the radar station)

表 1 X 波段海洋雷达系统的参数

Tab. 1 Configuration of the X-band marine radar system

属性	属性值
极化方式	HH
频率	9410 MHz±30 MHz
脉冲宽度	70 ns
脉冲重复频率	3 000 Hz
发射功率	25 kW
天线束宽度(3 dB)	~1°垂直向, ~20°水平向
天线类型	2.4 m 波导缝隙天线
天线旋转速度	42 r/min

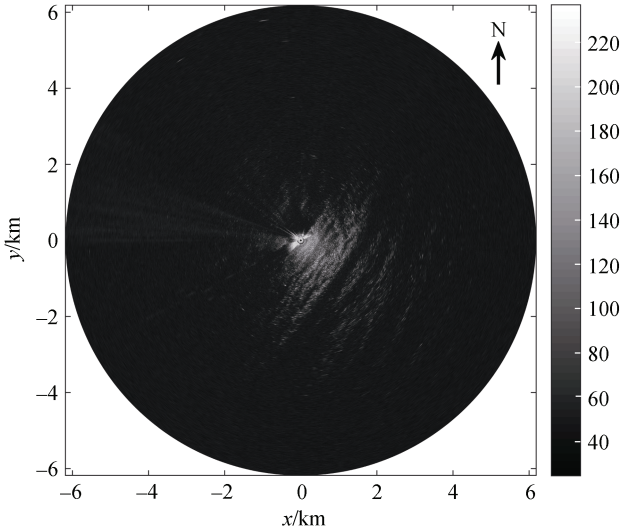


图2 2017/07/04 07: 48 UTC 观测到的一幅 X 波段雷达图像  
Fig. 2 X-band marine radar images obtained during the experiment. The images were recorded on July 4, 2017, at 07: 48 UTC

由于实验条件的限制，本实验中没有内波的现场实测数据。目前，卫星遥感图像已经被广泛用于海洋内波的观测，本文选取与 X 波段海洋雷达同步观测的 MODIS 图像来估计内波到达观测海区的时间。MODIS 搭载于 NASA 的极轨卫星 Terra 和 Aqua 上，其中 Terra 卫星每天 10: 30 前后(当地时间)过境、Aqua 卫星每天 13: 30 前后(当地时间)过境。MODIS 图像的刈幅为 2 330 km，空间分辨率为 250 m，可以大范围观测海洋内波。由于光学卫星图像容易受云层遮挡、实验中雷达调试等原因，MODIS 与 X 波段海洋雷达同步观测的数据较少，为了验证利用 X 波段海洋雷达观测内波方法的可靠性，选取雷达观测区域内出现内波的邻近时间内较清晰的 MODIS 图像。例如，图 3 即为本文获取到的与 X 波段海洋雷达图像(图 2)匹配的 MODIS 卫星图像，图中红色五角星所在位置即为实验中所用的 X 波段海洋雷达所处位置，黑色虚线框中有清晰的内波条纹，根据内波的传播方向和速度可以估计该内波达到雷达观测海区的时间(图 2)，表明利用 X 波段海洋雷达可以有效观测海洋内波。

## 2 方法

本节介绍利用 X 波段海洋雷达图像提取内波参数的方法，包括内波的传播方向、内波的相速度、内波的波长和周期等参数。

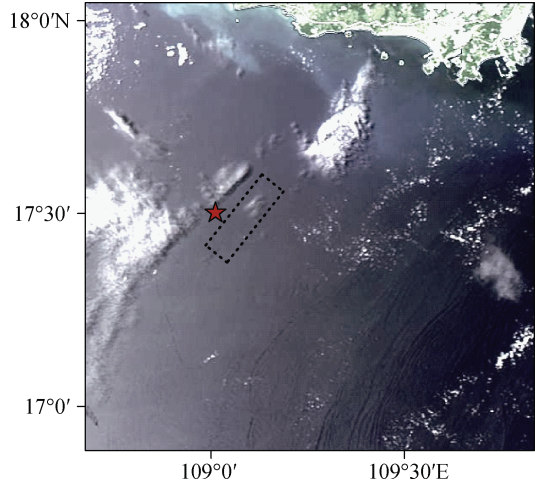


图3 2017/07/04 06: 11 UTC 获取到的一幅与 X 波段海洋雷达图像匹配的 MODIS 图像

Fig. 3 MODIS image matches with the X-band marine radar image obtained on July 4, 2017, at 06: 11 UTC

## 2.1 数据预处理

### 2.1.1 平均处理

为了减少 X 波段海洋雷达图像中的风浪对提取内波条纹的影响，首先对雷达图像序列进行平均处理。设连续观测的一组 X 波段海洋雷达图像序列为  $I(r, \phi, t)$ ，其中， $I$  为雷达图像的灰度值， $r$  和  $\phi$  分别表示距雷达的径向距离和方位角， $t$  表示观测时间，需对每组雷达图像分别关于时间作平均处理，得到平均后的雷达图像  $\bar{I}(r, \phi, t)$ 。

为了获得内波的运动速度和传播方向，每次首先对相邻的两组 X 波段雷达图像序列做平均，得到两幅平均后的雷达图像  $\bar{I}_{c1}(r, \phi_p, t_1)$  和  $\bar{I}_{c2}(r, \phi_p, t_2)$ 。为了有效提取内波参数，这两组图像序列需要满足以下条件：(1) 两个序列的观测时间间隔小于 5 min(即  $|t_1 - t_2| < 5 \text{ min}$ )；(2) 每组雷达图像序列包含大于 32 幅图像。

### 2.1.2 斜坡校正

由于雷达收到的电磁能量随距离增大而衰减，X 波段雷达的后向散射强度随距离的增加急剧减小。为了有效提取内波的变化特征，需要去除雷达图像的灰度值随距离的变化趋势，即对雷达图像进行斜坡校正<sup>[15]</sup>。

为了获得雷达后向散射图像对距离向的依赖性，针对每一个方位角  $\phi_0$ ，分别用幂函数拟合平均后的雷达图像的灰度值，即：

$$\bar{I}_{fi}(r, \phi_0, t) = a \cdot r^b \quad (i=1,2), \quad (1)$$

其中,  $a$  与  $b$  为待定系数, 可以采用最小二乘法进行拟合确定。

然后, 用平均的灰度值减去拟合值:

$$\bar{I}_{ci}(r, \phi_0, t) = \bar{I}_i(r, \phi_0, t) - \bar{I}_{fi}(r, \phi_0, t) \quad (i=1,2), \quad (2)$$

完成斜坡校正过程后, 再将雷达图像的灰度值调整至 0~255

$$\bar{I}_{ci}(r, \phi, t) = \frac{\bar{I}_{ci}(r, \phi, t) - \min(\bar{I}_{ci}(r, \phi, t))}{\max(\bar{I}_{ci}(r, \phi, t)) - \min(\bar{I}_{ci}(r, \phi, t))} \times 255. \quad (3)$$

## 2.2 内波参数的提取

为了提取内波参数, 首先确定内波的传播方向。对研究区域的一幅雷达图像进行二维快速傅里叶变换(FFT), 得到内波能量分布的二维波数谱, 寻找波数谱峰值所对应的波数  $k_{x\max}$  和  $k_{y\max}$ , 根据下式可求得内波波包的平均传播方向  $\phi_p$ :

$$\phi_p = \arctan\left(\frac{k_{y\max}}{k_{x\max}}\right), \quad (4)$$

根据式(4)得到的内波传播方向存在  $180^\circ$  方位模糊, 为了消除模糊确定实际的内波传播方向, 可以对相邻的两幅雷达图像做交叉谱分析, 以确定内波的平均传播方向  $\phi_p$ <sup>[18]</sup>。确定交叉谱  $S_{12}(\vec{k})$  后, 交叉谱的相位如下式所示:

$$\Phi(\vec{k}) = \arg\left(S_{12}(\vec{k})\right), \quad (5)$$

其中,  $\arg(\cdot)$  表示的是复数的幅角, 内波实际的传播方向  $\phi_p$  取为式(5)中的正相位。

前导波是一组内波波包中沿传播方向最靠前的孤立波, 本文中讨论的内波相速度即为前导波的相速度值。选取沿内波传播方向  $\phi_p$  的雷达径向廓线

$\bar{I}_{c1}(r, \phi_p, t)$  和  $\bar{I}_{c2}(r, \phi_p, t)$ , 根据两个径向廓线中前导波的位置差可以计算出波包中前导波的相速度大小, 即:

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t}, \quad (6)$$

其中,  $\Delta r$  为前导波波峰在两个径向廓线中的距离差,  $\Delta t$  为相邻两组雷达图像观测的时间差。根据上述其中一个径向廓线中相邻波峰的位置差值, 可以获得内波波包中相邻内孤立波之间的距离, 本文将该距离定义为内波波长  $\lambda$ , 但是并不是所有内波都以波包的形式存在, 研究区域中也存在许多内孤立波<sup>[19]</sup>, 对于内孤立波则不能以上述方法计算内波波长  $\lambda$ , 故本文利用以下公式计算内波波长  $\lambda$ :

$$\lambda = 2D, \quad (7)$$

其中,  $D$  为传播方向径向廓线上前导波点(最亮点)与相邻最暗点之间的距离。已知内波相速度  $v$  及内波波长  $\lambda$  后可以利用下式求得内波周期  $T$ :

$$T = \frac{\lambda}{v}. \quad (8)$$

## 2.3 内波参数的统计

对一段时间内的研究区域中的 X 波段海洋雷达图像进行筛选, 标记每一组有内波出现的雷达图像, 利用上述方法提取内波相速度、内波传播方向、内波波长及周期等参数, 统计观测时间内各参数的分布规律。

由于 X 波段雷达连续观测海面的变化, 而内波通过观测海区需要一定的时间, 为了避免同一个内波被重复统计, 本文根据以下原则统计内波参数:

- (1) 相邻 3 h 内只统计一次内波, 即将 3 h 内雷达图像中出现且传播方向相近的内波作为同一个内波;
- (2) 当一个内波在相邻的多组雷达图像内连续出现时, 将雷达回波最强的图像用于统计内波的参数。

图 4 为本文方法的流程图。

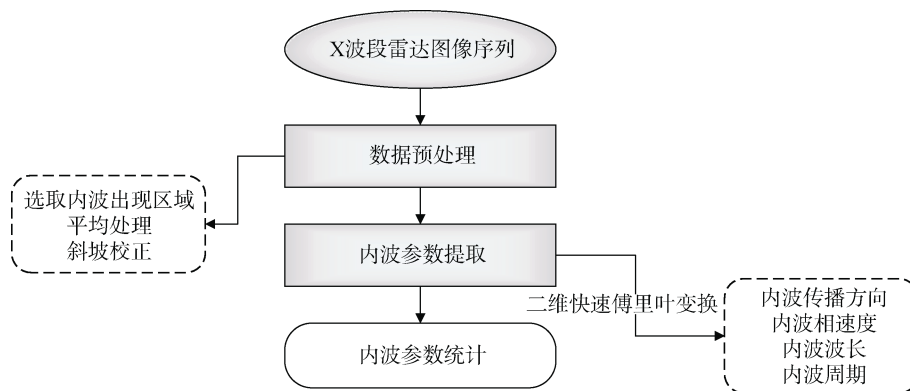


图 4 方法流程图

Fig. 4 Flowchart of the proposed method

### 3 结果

本节首先结合卫星图像验证提出的方法的有效性, 然后根据 X 波段雷达长期的观测数据统计观测海区中内波的变化特征。

#### 3.1 内波参数提取

为了进一步说明提出的利用 X 波段雷达图像提取内波参数的方法, 并检验方法的有效性, 选取图 2 中 X 波段雷达观测的内波为例, 提取内波参数并与 MODIS 观测的内波做比较。

首先对 X 波段雷达图像进行平均处理, 如图 5 所示, 可看出平均处理可以一定程度上平滑掉图像中海表面的风浪和涌浪, 使得内波条纹更容易被识别, 雷达图像中内波波包的传播方向与 MODIS 图像 (图 3) 中内波的传播方向一致。

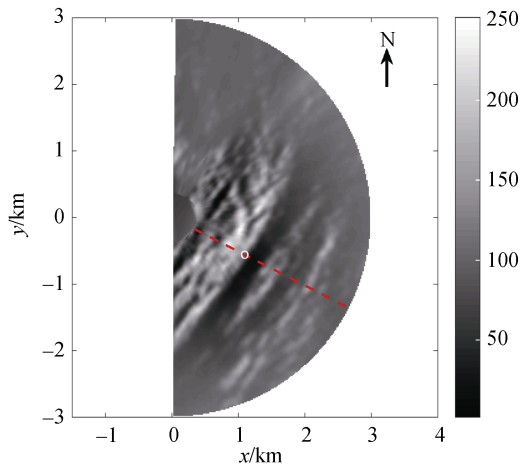


图 5 平均处理后的雷达图像

Fig. 5 Averaged image of a set of X-band radar image sequences

接下来对雷达图像进行斜坡校正, 即去除雷达图像的灰度值随距离的变化趋势, 图 6 展示的为该组图像灰度值随距离拟合结果的示意图 (式(1)), 该拟合结果所得 R-square 值 (确定系数) 为 0.95, 接近于 1, 说明所选的幂函数模型适用。

完成预处理过程的雷达图像为“均衡化”的图像, 下一步即可利用该图像进行内波参数的提取。首先, 利用二维快速傅里叶变换的方法确定该组内波波包的传播方向, 二维傅里叶变换后得到的波数谱如图 7 所示, 根据波数谱能量峰值所对应的波数  $k_{x\max}$  和  $k_{y\max}$  可求出该组内波的传播方向 (式(4)) 为  $117^\circ$  或  $297^\circ$ , 利用交叉谱分析中的相位谱可确定内波的传播方向为  $\phi_p = 117^\circ$ , 如图 5 中的红色虚线所示。

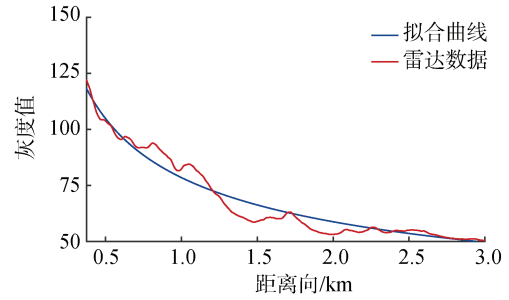


图 6 雷达图像灰度值随距离变化趋势的拟合结果图  
Fig. 6 Variations in gray value as a function of range

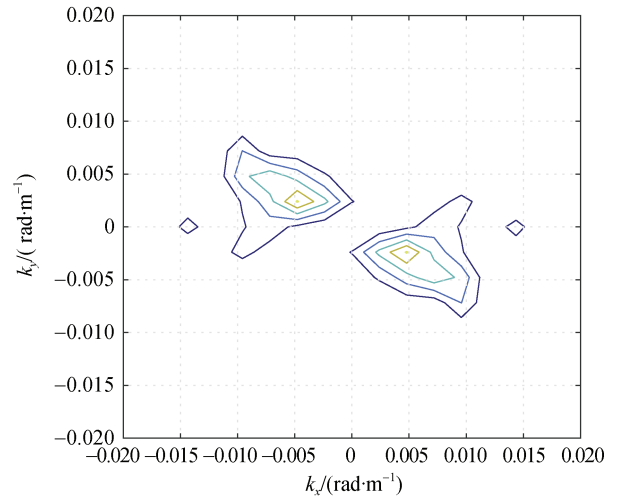


图 7 二维傅里叶变换后所得波数谱

Fig. 7 Wavenumber spectrum obtained after two-dimensional fast Fourier transform

确定内波的传播方向  $\phi_p$  后, 选取相邻两组雷达图像序列在传播方向上的径向廓线  $\bar{I}_{c1}(r, \phi_p, t)$  与  $\bar{I}_{c2}(r, \phi_p, t)$ , 如图 8 所示, 该内波波包中的前导波为径向廓线中距离雷达约 1 km 处、图像灰度值最大的点, 根据式(6)可以计算出内波的相速度为 0.44 m/s (图 5 中白色空心圆处), 内波波长为 817.50 m, 根据式(8)计算出该组内波的周期为 1 857.95 s。

#### 3.2 内波参数统计

X 波段雷达具有可以连续、长期观测的优点, 可以有效获取内波参数的分布特征。下面利用第 2 节的 X 波段雷达数据统计观测海区中内波的变化特征。实验期间各月份中内波的出现次数如图 9 所示, 可以看出 2017 年 7 月至 9 月内波出现次数较多, 4—6 月出现内波的次数呈递增趋势, 10—12 月出现内波的次数递减, 均少于 7—9 月出现内波的次数, 即这 3 个月为研究区域内 (南海西北部) 内波频发的月份, 因此本文主要统计 7—9 月中内波各参数的分布规律。

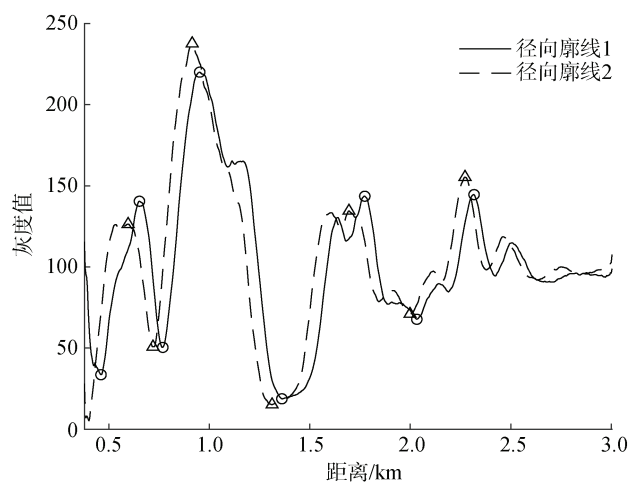
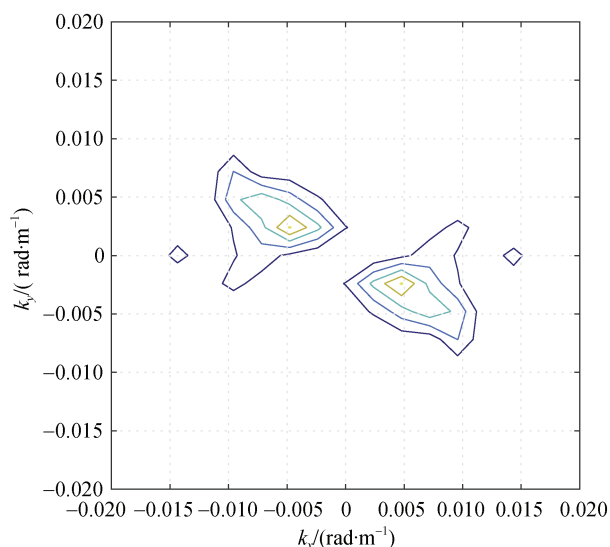


图 8 内波传播方向上的径向廓线

Fig. 8 Radial profiles of radar image sequences in the propagation direction of internal waves (IWs)

1) 内波的传播方向

首先对内波的传播方向进行统计。图 10 展示

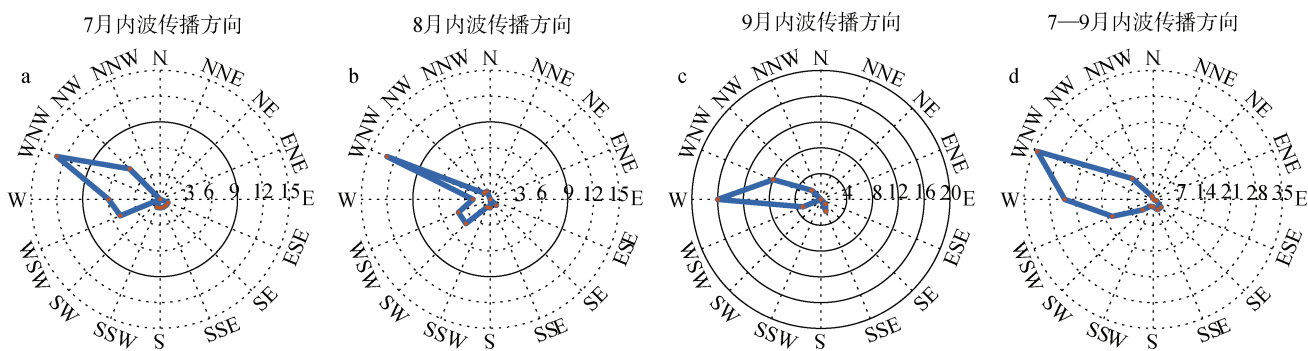


图 10 内波传播方向统计图(a)7月, (b)8月, (c)9月, (d)7—9月

Fig. 10 Propagation direction of IWs in (a) July, (b) August, (c) September, and (d) between July and September

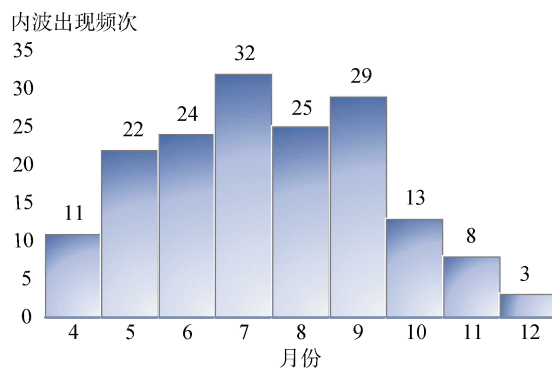


图 9 观测海域各月份中内波出现次数统计图

Fig. 9 Number of IWs that occurred in the study area in each month

了7月、8月、9月及7—9月内波传播方向的统计图, 在7月和8月, 内波传播方向最多的是西北偏西向, 在9月内波多为西向传播; 图 10(d)展示的是7—9月方向统计集合, 可以看出研究时间内, 内波多为西北偏西向、西向传播, 也存在少数内波向南向、东南向及西南向传播, 这与前人利用遥感图像统计结果一致<sup>[20]</sup>。

2) 内波的相速度

利用式(6)计算每组内波相速度, 统计 7—9 月各月内波相速度大小的分布情况, 如图 11 所示。图 11(a)可以看出, 7月研究区域中内波相速度集中分布于 0.2~0.8 m/s, 也有少部分分布在 0~0.2 m/s 及 0.8~1.8 m/s; 8月内波速度分布较为均匀, 集中分布在 0.2~0.8 m/s, 少部分分布在 0.8~1.6 m/s 中, 极少部分内波相速度小于 0.2 m/s 或超过 1.8 m/s; 9月内波速度大部分处于 0.6~1 m/s, 观察 7—9月内波相速度大小分布图, 内波相速度最多落在 0.6~0.8 m/s 的区间内, 这个结论与前人利用 SAR 图像总结出的经验公式结果相吻合<sup>[21]</sup>。

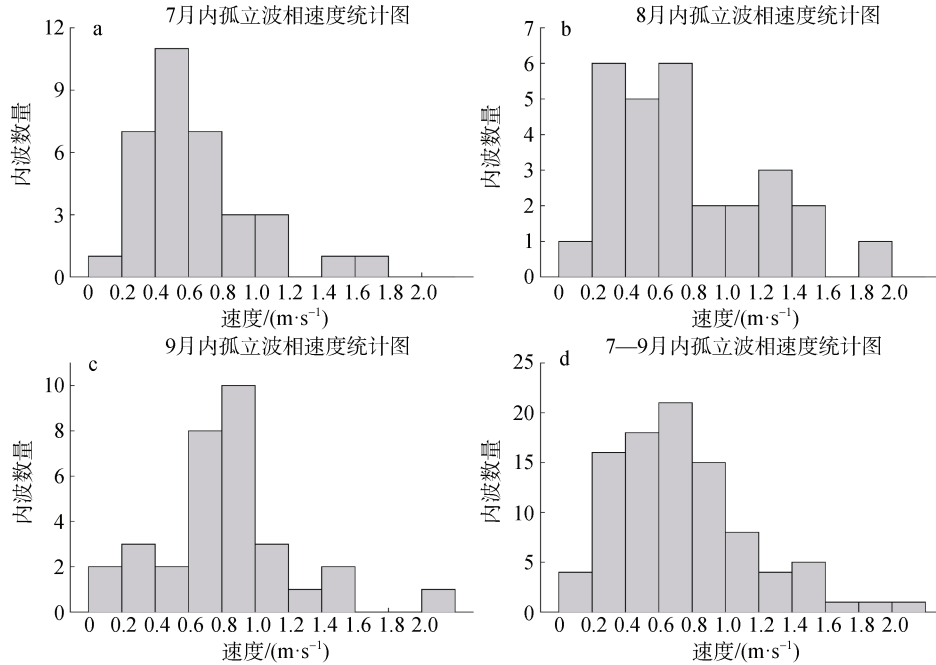


图 11 内波相速度统计图  
Fig. 11 Statistical chart of the IW phase velocity

3) 内波的波长

内波波长的统计结果如表 2 所示, 大部分内波波长为 200~800 m(出现次数为 74 次), 尤其在 400~

600 m 内居多(出现 31 次), 部分为 800~1000 m(出现 14 次), 但也有小部分处于 1 000 m 以上及 200 m 以下(共出现 6 次), 不同月份的波长分布略有差别。

表 2 内波波长的分布

Tab. 2 Distribution of the internal wave (IW) wavelengths

时间	波长/m					
	<200	200~400	400~600	600~800	800~1 000	>1 000
7 月	1	6	11	12	4	0
8 月	0	8	7	5	6	2
9 月	0	7	13	5	4	3
7—9 月	1	21	31	22	14	5

注: 表中的数值为内波的出现次数。

4) 内波的周期

利用式(8)计算内波每组内波的周期, 统计于表 3。周期集中分布在 0~2 000 s(出现次数为 82 次), 其中大

部分内波周期小于 1 000 s(出现 62 次), 2 000~3 000 s 内也有分布(出现 8 次), 极少数周期大于 3 000 s(共出现 4 次), 该结果在研究的 3 个月内基本一致。

表 3 内波周期的分布

Tab. 3 Distribution of the IW period

时间	时间/s			
	<1 000	1 000~2 000	2 000~3 000	>3 000
7 月	19	10	4	1
8 月	18	7	2	1
9 月	25	3	2	2
7—9 月	62	20	8	4

注: 表中的数值为内波的出现次数。

此外,前人的研究表明内孤立波的周期(持续时间)一般在 10~30 min(600~1 800 s)<sup>[22]</sup>,而超出这个范围的值可能是涌浪或潮波。由于本文在提取内波参数时对雷达图像做了平均处理(第 3.1 节),每次平均时所用的雷达图像一般大于 32 幅,而涌浪的周期一般小于 20 s,所以平均后的图像中一般不包括涌浪;潮波造成的海面粗糙度变化较小,在雷达图像不易观察。本文分析了周期大于 1 800 s 的 X 波段雷达图像,结果表明图像中的条纹的特征与内波相同,所以本文将 3 000 s 左右的条纹仍然认为是内波造成的。

## 4 讨论与总结

南海是内波频发海域,前人的研究大多集中于南海东北部,且大多利用遥感影像对内波参数进行统计分析。由于卫星轨道的重复访问时间不能连续观测,统计时间跨度较大,不能获得连续时间内波参数的分布特征。本文采用的 X 波段雷达具有高时间分辨率(几秒至几分钟)和空间分辨率(几米),可以对实验地点进行全天时的实时连续观测,从而可以获得观测海区中内波的大范围、连续变化,有利于全面分析内波的变化特征。基于 X 波段海洋雷达图像,本文提出了内波参数的提取方法,并利用长期的观测数据统计了内波参数的分布。观测时间中内波的主要分布特征如下:

- (1) 南海西北部 7—9 月内波出现次数最多,5、6 月次之,11、12 月最少;
- (2) 南海西北部内波多为西北向及西向传播,也有少部分内波为西南及东南向传播;
- (3) 内波相速度大小最多集中于 0.6~0.8 m/s 之间,0.4~0.6 m/s 也存在多数,该海域内波相速度最大值超过 2 m/s;
- (4) 内波波长多数为 400~600 m,其次为 600~800 m、200~400 m,也有极少数内波波长超过 1 000 m;
- (5) 内波的周期绝大部分小于 1 000 s,少部分为 1 000~2 000 s,很少部分内波的周期大于 2 000 s,最大的周期大于 3 000 s。

由于实验中没有内波的实测数据,下一步将结合现场实测及数值模拟结果,对观测海区内波的源地及成因进行研究。

### 参考文献:

[1] PAN J, JAY D A, ORTON P M. Analyses of internal solitary waves generated at the Columbia River plume

- front using SAR imagery[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C7): C07014.
- [2] ELACHI C, APEL J R. Internal wave observations made with an airborne synthetic aperture imaging radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 1976, 3(11): 647-650.
- [3] ALPERS W. Theory of radar imaging of internal waves[J]. *Nature*, 1985, 314(6008): 245-247.
- [4] LI X, CLEMENTE-COLON P, FRIEDMAN K S. Estimating oceanic mixed-layer depth from internal wave evolution observed from Radarsat-1 SAR[J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 2000, 21(1): 130-135.
- [5] ZHENG Q, YUAN Y, KLEMAS V, et al. Theoretical expression for an ocean internal soliton synthetic aperture radar image and determination of the soliton characteristic half width[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2001, 106(C12): 31415-31423.
- [6] SHEN H, HE Y. SAR imaging simulation of horizontal fully two-dimensional internal waves[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, 18(3): 294-302.
- [7] NING J, SUN L, CUI H, et al. Study on characteristics of internal solitary waves in the Malacca Strait based on Sentinel-1 and GF-3 satellite SAR data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(5): 151-156.
- [8] JACKSON C. Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C11): C11012.
- [9] WANG J, HUANG W, YANG J, et al. Study of the propagation direction of the internal waves in the South China Sea using satellite images[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(5): 42-50.
- [10] SUN L, ZHANG J, MENG J. A study of the spatial-temporal distribution and propagation characteristics of internal waves in the Andaman Sea using MODIS[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(7): 121-128.
- [11] WATSON G, ROBINSON I S. A Study of internal wave propagation in the Strait of Gibraltar using shore-based marine radar images[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, 20(3): 374-395.
- [12] RAMOS R J, LUND B, GRABER H C. Determination of internal wave properties from X-Band radar observations[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(14): 1039-1047.
- [13] LV H, HE Y, SHEN H, et al. A new method for the estimation of oceanic mixed-layer depth using shipboard X-band radar images[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(5): 962-967.
- [14] PLANT W J, KELLER W C, HAYES K, et al. Characteristics of Internal Waves in the South China Sea Observed by a Shipboard Coherent Radar[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(3): 441-446.
- [15] LUND B, GRABER H C, XUE J, et al. Analysis of internal wave signatures in Marine Radar Data[J]. *IEEE*



- Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(9): 4840-4852.
- [16] BADIEY M, WAN L, LYNCH J F. Statistics of Nonlinear Internal Waves during the Shallow Water 2006 Experiment[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2016, 33(4): 839-846.
- [17] 孙丽娜, 张杰, 孟俊敏. 基于遥感与现场观测数据的南海北部内波传播速度[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(3): 471-480. SUN Lina, ZHANG Jie, MENG Junmin. On propagation velocity of internal solitary waves in the northern South China Sea with remote sensing and in-situ observation data[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(3): 471-480.
- [18] CHEN Z, ZHANG B, KUDRYAVTSEV V, et al. Estimation of sea surface current from X-Band marine radar images by cross-spectrum analysis[J]. Remote Sensing, 2019, 11(9): 1031-1045.
- [19] 方欣华, 杜涛. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005. FANG Xinhua, DU Tao. Fundamentals of oceanic internal waves and internal waves in the China Seas[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.
- [20] 王隽. 基于卫星遥感观测的南海内波发生源与传播路径分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012. WANG Juan. The sources and propagation analysis of internal waves in the South China Sea based on satellite remote sensing[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [21] 汤琦璇. 基于 SAR 图像的海洋内波识别与参数提取技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019. Tang Qixuan. Research on oceanic internal wave detection and parameter extraction technology based on SAR image[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [22] RAMP S R, YANG Y, BAHR F L. Characterizing the nonlinear internal wave climate in the northeastern South China Sea[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2010, 17(5): 481-498.

## Study of the characteristics of internal wave parameters in the northwestern South China Sea based on X-band marine radar

WEN Jing-han<sup>1</sup>, HE Yi-jun<sup>1, 2</sup>, CHEN Zhong-biao<sup>1</sup>

(1. College of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

**Received:** Oct. 9, 2021

**Key words:** internal wave; the northwestern South China Sea; X-band marine radar; parametric statistics

**Abstract:** Internal waves (IWs) frequently occur in the South China Sea (SCS), and satellite remote sensing images have been widely used to analyze the characteristics of IW parameters. However, the repeated access time of the satellite orbit is long; thus, the characteristics of IW parameters cannot be continuously observed. X-band marine radar has high temporal and spatial resolutions, which can be used to observe the change of IWs continuously. In this study, a method for determining IW parameters from X-band marine radar images is proposed, and the characteristics of each parameter are investigated using continuous observation data. Firstly, X-band marine radar images are preprocessed by averaging and ramp correction. Secondly, the propagation directions of IWs are determined by the two-dimensional fast Fourier transform, and the parameters of IWs are determined by the radial profile in this direction, such as the phase velocity, wavelength, and period. Finally, the X-band radar images observed on the SCS oil platform are used to extract and statistically analyze the parameters of IWs. The results show that the propagation directions of IWs in the study area are mostly northwest and west, the phase velocities are mostly 0.6–0.8 m/s, the wavelengths are generally 400–600 m, and the periods are mostly less than 1, 000 s.

(本文编辑: 康亦兼)