

许莽晖, 张彦敏, 王运华. 基于 SAR 图像速度聚束调制的海浪反演研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 111–121, doi:10.12284/hyxb2021103  
Xu Qiaohui, Zhang Yanmin, Wang Yunhua. Ocean wave inversion based on the velocity bunching modulation of SAR image[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(12): 111–121, doi:10.12284/hyxb2021103

# 基于 SAR 图像速度聚束调制的海浪反演研究

许莽晖<sup>1</sup>, 张彦敏<sup>1\*</sup>, 王运华<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 本文首先对合成孔径雷达 (SAR) 海浪成像中的 3 种调制 (倾斜调制、流体力学调制与速度聚束调制) 的影响进行了对比分析, 结果显示: 速度聚束调制对 SAR 图像的影响最为显著。另外, 由于 SAR 图像中固有相干斑噪声的存在, 较低波数范围的噪声难以滤除或抑制, 利用经典 MPI 方法反演海浪谱会造成低波数范围谱值偏大。基于此, 本文借鉴经典 MPI 海浪谱反演算法, 建立了基于速度聚束调制的海浪方位向斜率谱和有效波高的反演算法。通过将经典 MPI 方法、同极化调制法及本文算法等 3 种海浪反演方法所得有效波高与浮标数据进行比较, 结果显示: 本文方法反演得到的海浪有效波高与浮标数据获得的有效波高之间的均方误差为 0.79 m, 为 3 种方法中最小。

**关键词:** 速度聚束调制; 海浪反演; 相干斑噪声; 有效波高

中图分类号: P715.6; P731.22

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)12-0111-11

## 1 引言

海浪是海洋动力学的重要组成部分, 海浪信息对于海洋工程、近海结构设计和航海以及理解和预测恶劣的海洋天气都是至关重要的。由于合成孔径雷达 (SAR) 成像过程不受天气和光照的影响, 基于 SAR 图像的海浪反演技术已成为全天时、全天候、大面积海浪观测的主要途径之一。合成孔径雷达的海浪成像机制主要包括 3 种调制作用: 倾斜调制、流体力学调制以及速度聚束调制<sup>[1-3]</sup>。其中, 倾斜调制是由于大尺度海浪斜率改变了雷达局地入射角度, 从而引起了回波强度的变化; 流体力学调制则是由于大尺度海浪轨道速度所引起了 Bragg 共振波振幅的变化, 进而导致雷达回波强度的变化; 速度聚束调制则是 SAR 所特有的, 是由于海浪的雷达视向速度导致海面散射面元沿 SAR 图像方位向发生位置偏移, 进而引

起回波强度沿着雷达方位向产生辐聚辐散效应<sup>[4-8]</sup>。以上 3 种调制是 SAR 图像海浪谱反演算法的基础, 1991 年, Hasselmann 和 Hasselmann<sup>[9]</sup> 基于倾斜调制、流体力学调制和速度聚束调制, 推导给出了 SAR 图像谱和海浪谱之间的非线性映射关系, 并基于初猜谱与 SAR 图像谱构建价值函数, 通过不断迭代计算使价值函数最小, 从而获取最优海浪方向谱。1994 年, Brüning 等<sup>[10]</sup> 为提高效率, 对迭代求逆过程进行了改进。1996 年, Hasselmann 等<sup>[11]</sup> 进一步改进了成像过程中非线性映射关系。2000 年, Mastenbroek 和 De Valk<sup>[12]</sup> 提出了基于 Hasselmann 所得非线性映射关系的半参数化海浪谱反演方法。2005 年, Schulz-Stellenfleth 等<sup>[13]</sup> 则在 MPI 方法基础上, 应用交叉谱提出了 PARSA (Partition Rescaling and Shift Algorithm) 海浪谱反演算法, 该算法可有效解决海浪谱 180°模糊问题。2010 年, Zhang 等<sup>[14]</sup> 在 He 等<sup>[15-16]</sup> 提出的海浪斜率谱

收稿日期: 2020-10-29; 修订日期: 2021-05-24。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0502700); 国家自然科学基金 (41576170, 41976167); 山东省-国家自然科学基金联合基金 (U1606405)。

作者简介: 许莽晖 (1996—), 女, 山东省济南市人, 主要从事微波海洋遥感研究。E-mail: xuqiaohui0216@qq.com

\* 通信作者: 张彦敏, 女, 副教授, 主要从事海面电磁散射特性和海洋 SAR 遥感探测与信息提取研究。E-mail: yanminzhang@ouc.edu.cn

极化调制算法基础上,利用全极化的 Radarsat-2 数据分别反演了海浪沿 SAR 图像方位向和距离向的海浪斜率谱,进而求取了海浪参数,该方法有效消除了流体力学调制的影响,但是,当入射角较小时,水平极化图像和垂直极化图像之间的差异较小,从而导致新构建图像中的海浪纹理变弱,从而不利于海浪反演。

近年来,基于 SAR 图像回波散射系数及截断波长等参数的海浪有效波高、主波波向等的经验化反演算法也引起了广泛关注。2007 年, Schulz-Stellenfleh 等<sup>[17]</sup>提出了 CWAVE 经验化算法,由于这种方法主要是针对 ERS SAR 数据开发的,所以也称作 CWAVE-ERS 算法,该算法可直接反演得到海浪有效波高和平均波周期。在 CWAVE 基础上,后来不同学者又相继提出了针对其他卫星 SAR 数据的经验算法,例如适用于 ENVISAT ASAR 数据的 CWAVE\_ENV 算法<sup>[18]</sup>,适用于 Sentinel-1 SAR 数据的 CWAVE\_S1A 算法<sup>[19]</sup>和适用于 Terra SAR-X 数据的 XWAVE 算法<sup>[20]</sup>等。2015 年, Romeiser 等<sup>[21]</sup>则针对飓风极端海况条件下,建立了一种海浪有效波高与 NRCS 之间的经验函数来反演有效波高。2016 年, Shao 等<sup>[22]</sup>和 Grieco 等<sup>[23]</sup>则分别提出了关于有效波高和截止波长<sup>[24-25]</sup>、雷达入射角、海浪传播方向之间的半经验化关系。需要说明的是:基于海浪参数与 SAR 参数之间经验关系的反演算法,并不能得到海浪谱。

本文首先对比分析了倾斜调制、流体力学调制和速度聚束调制对 SAR 海浪图像的影响,结果表明,当海浪传播方向在偏离 SAR 距离向的过程中,3 种调制因素中速度聚束调制对海浪 SAR 图像的影响始终最为显著。基于此,文中建立了基于速度聚束调制海浪方位向斜率反演算法,进而基于经验关系提取海浪有效波高。通过将 Radarsat-2 数据海浪反演结果与浮标数据相比较,本文反演算法较 MPI 算法和同极化调制函数算法反演结果的误差更小。

## 2 影响 SAR 图像的调制因素的比较

### 2.1 调制因素影响的理论分析

在线性调制理论的框架下,海面高度  $\zeta(r, t)$  和后向散射截面  $\sigma(r, t)$  随大尺度海浪的变化均可表示为线性叠加的形式<sup>[9]</sup>,即

$$\zeta(r, t) = \sum_k \zeta_k \exp[i(k \cdot r - \omega t)] + \text{c.c.}, \quad (1)$$

$$\sigma(r, t) = \bar{\sigma} \left\{ 1 + \left[ \sum_k m_k \exp i(k \cdot r - \omega t) + \text{c.c.} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中,  $i$  表示纯虚数;  $\text{c.c.}$  表示复共轭;  $\bar{\sigma}$  表示空间平均;

$\omega = \sqrt{gk}$  是海浪角频率,其中  $k$  为波数;  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  是重力加速度常数;波振幅  $\zeta_k$  和散射截面调制因子  $m_k$  与实孔径雷达调制传递函数  $T_k^R$  的关系为

$$m_k = T_k^R \zeta_k, \quad (3)$$

$$T_k^R = T_k^i + T_k^h, \quad (4)$$

式中,  $T_k^i$  是倾斜调制传递函数;  $T_k^h$  是流体力学调制函数。对于水平极化(HH),倾斜调制函数为<sup>[26-27]</sup>

$$T_{\text{HH}}^h = 8ik_t \frac{1}{\sin(2\theta)}, \quad (5)$$

对于垂直极化(VV),倾斜调制函数为

$$T_{\text{VV}}^h = 4ik_t \frac{\cot \theta}{1 + \sin^2 \theta}, \quad (6)$$

式中,  $\theta$  为雷达入射角;  $k_t$  是雷达视向上的大尺度海浪波数分量。流体力学调制传递函数  $T_k^h$  可根据短波与长波相互作用的双尺度模型推导得出<sup>[28]</sup>

$$T_k^h = 4.5k\omega \frac{\omega - i\mu}{\omega^2 + \mu^2} \left( \frac{k_x^2}{k^2} + Y_r + iY_i \right), \quad (7)$$

式中,  $\mu$  为阻尼系数;  $Y_r + iY_i$  为负反馈因子;  $k_x$  是海浪波数距离向分量。

对于实孔径雷达,定义归一化图像强度为

$$I^R(r) = \sigma(r, 0) / \bar{\sigma} - 1, \quad (8)$$

于是结合式(2)和式(8)可得  $I^R(r)$  图像的傅里叶变换系数为

$$I_k^R = T_k^R \zeta_k + (T_{-k}^R \zeta_{-k})^*, \quad (9)$$

进而可得,  $I^R(r)$  图像谱  $P_k^R$  与海浪谱  $F_k$  的关系为<sup>[9]</sup>

$$P_k^R = \frac{1}{2} \left\{ |T_k^R|^2 F_k + |T_{-k}^R|^2 F_{-k} \right\}. \quad (10)$$

然而,对于海浪 SAR 图像而言,海浪运动所引起的速度聚束效应非常显著,在线性条件下,考虑到速度聚束效应的影响后海浪归一化 SAR 图像的傅里叶变换系数为<sup>[9]</sup>

$$I_k^S = T_k^S \zeta_k + (T_{-k}^S \zeta_{-k})^*, \quad (11)$$

式中, SAR 图像调制函数  $T_k^S$  为

$$T_k^S = T_k^R + T_k^{vb}, \quad (12)$$

速度聚束调制传递函数  $T_k^{vb}$  为<sup>[9]</sup>

$$T_k^{vb} = -i\beta k_y T_k^v = -\beta k_y \omega (\cos \theta - i \sin \theta k_t / k), \quad (13)$$

式中,  $\beta = R/V$ , 其中  $R$  为斜距;  $v$  为 SAR 平台飞行速度;  $k_y$  是大尺度海浪波数沿雷达方位向的分量。

由于 SAR 图像同时存在倾斜调制、流体力学调制、速度聚束调制 3 种调制因素,基于式(11),可将海浪归一化 SAR 图像的傅里叶变换系数分解为  $I_k^S = I_k^R + I_k^{vb}$ , 式中,  $I_k^R$  为仅考虑实孔径雷达调制的傅里叶变换系数;  $I_k^{vb}$  为仅考虑速度聚束调制的傅里叶变换系数,二者分别为

$$I_k^R = I_k^S \cdot T_k^R / T_k^S, \quad (14)$$

$$I_k^b = I_k^s \cdot T_k^{vb} / T_k^s. \quad (15)$$

为了更清晰地展示速度聚束调制  $T_k^{vb}$  和实孔径调制  $T_k^s$  对 SAR 图像纹理的影响, 图 1 分别给出了考虑倾斜调制、流体力学调制、速度聚束调制 3 种调制因素仿真的海面 SAR 图像与仅考虑速度聚束调制所得图像 ( $I_k^b$  的逆傅里叶变换) 和仅考虑倾斜调制和流体力学调制所得图像 ( $I_k^s$  的逆傅里叶变换) 的比较。仿真

SAR 海面图像的输入参数分别为: 涌浪传播方向为  $45^\circ$ , 涌浪波长为 120 m, 波高为 1.5 m, 风向为  $90^\circ$ , 风速为 3 m/s。通过图 1 的 3 幅海面图像对比可以看出, 仅含速度聚束效应影响的 SAR 图像与原仿真 SAR 图像的散射系数和海浪纹理非常近似; 而只包含倾斜调制和流体力学调制影响的 SAR 海面图像的散射系数明显较低, 并且纹理特征较弱。

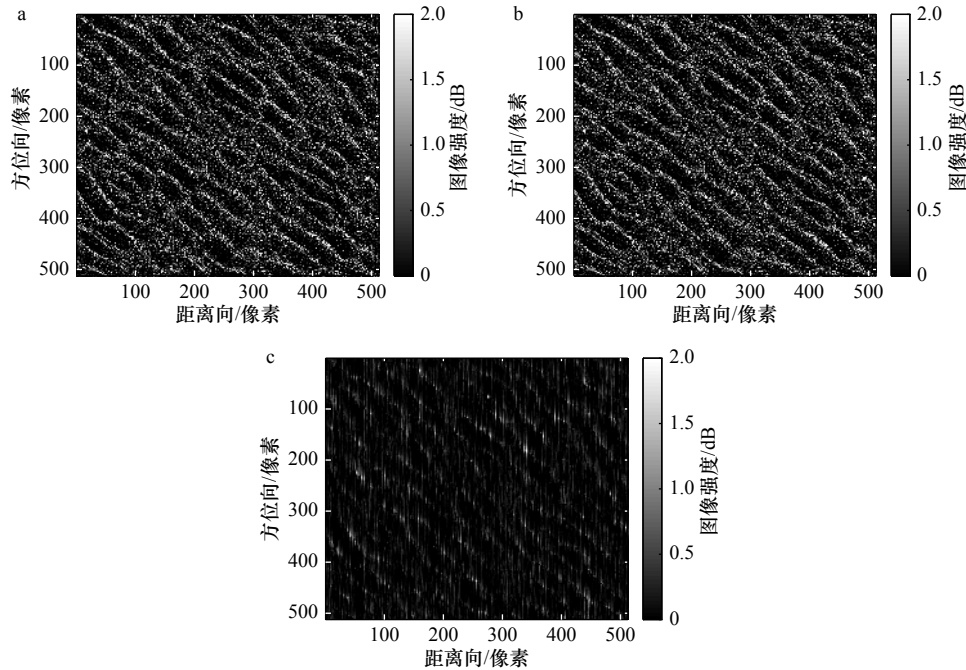


图 1 仿真海面 SAR 图像(a), 仅考虑速度聚束调制的面 SAR 图像(b)和仅考虑倾斜调制和流体力学调制的面 SAR 图像(c)

Fig. 1 Simulated SAR image of sea surface (a), simulated SAR image of sea surface with the velocity bunching modulation (b) and simulated SAR image of sea surface with the tilt modulation and the hydrodynamic modulation (c)

图 2a 至图 2c 则给出了图 1 中 3 幅海面 SAR 图像所对应的图像谱。通过图像谱可以看出, 仅考虑速度聚束效应影响的图像谱(图 2b)与考虑 3 种调制的面海仿真 SAR 图像谱(图 2a)的谱值在同一数量级, 而仅考虑倾斜调制和流体力学调制影响的 SAR 图像谱(图 2c)的谱值则小得多。另外, 从谱的形态上, 仅考虑速度聚束效应影响的图像谱与考虑 3 种调制的面海仿真 SAR 图像谱更为相近。

## 2.2 实测海面 SAR 图像调制因素影响分析

为了进一步验证图 1 和图 2 所示的结果, 我们采用真实的 SAR 卫星数据进行分析。本文后续使用的实验数据为 Radarsat-2 SAR 数据, Radarsat-2 SAR 具有高分辨率多种极化通道的成像能力, 本文中使用的 Radarsat-2 SAR 数据为超精细全极化模式数据, 方位向分辨率为 4.73 m, 距离向分辨率约为 4.9 m, 表 1 为本文所用到的所有数据目录, 图 3 给出了一幅

Radarsat-2 数据 2 SAR 图像的总体位置示例。

图 4 和图 5 中基于 Radarsat-2 真实测量 SAR 数据进行了不同调制因素的影响分析, 这里选用 SAR 图像来自表 1 中的数据 2。图 4a 为截取的  $512 \times 512$  个像素大小的 HH 极化归一化 SAR 图像, 图 4b 为仅考虑速度聚束调制时的归一化 SAR 图像, 图 4c 则是仅考虑倾斜调制和流体力学调制影响的归一化 SAR 图像。由图可见, 对于真实 SAR 海面图像而言, 所得结果与图 1 仿真结果所得结论相一致, 即: 仅考虑速度聚束调制影响的归一化 SAR 图像与考虑 3 种调制的归一化 SAR 图像的强度和海浪纹理非常接近, 而只考虑倾斜调制和流体力学调制影响的 SAR 海面图像的强度值明显偏低且海浪纹理并不明显。图 4 中 3 幅海面 SAR 图像对应的图像谱分别如图 5a 至图 5c 所示, 图 5 中的结果与图 2 仿真 SAR 图像的结果一致, 仅含有速度聚束调制影响的 SAR 图像谱(图 5b)

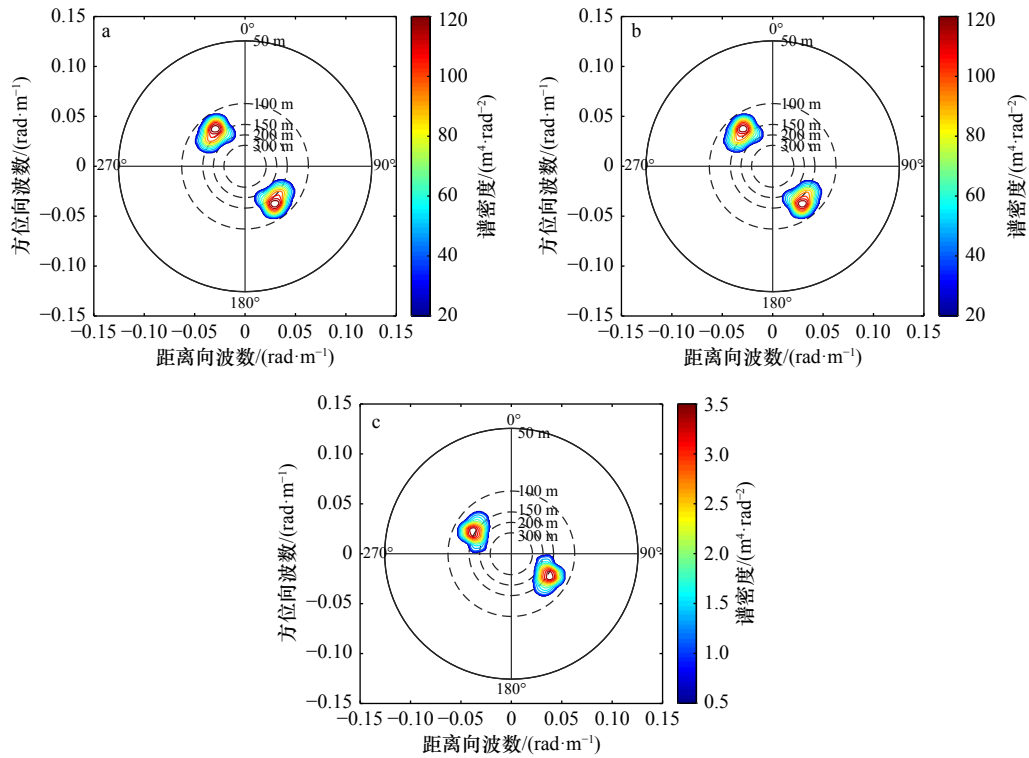


图 2 仿真海面 SAR 图像谱(a), 仅考虑速度聚束调制的仿真海面 SAR 图像谱(b)和仅考虑倾斜调制和流体力学调制的仿真海面 SAR 图像谱(c)

Fig. 2 The spectrum of the simulated SAR image of sea surface (a), the spectrum of the simulated SAR image of sea surface with the velocity bunching modulation (b) and the spectrum of the simulated SAR image of sea surface with the tilt modulation and the hydrodynamic modulation (c)

表 1 Radarsat-2 全极化 SAR 数据信息

Table 1 Radarsat-2 full polarized SAR data information

数据序号	数据名	成像时间	中心坐标
1	RS2_OK105124_PK912453_DK845008_FQ4_20 090 111_022504_HH_VV_HV_VH_SLC	2009年1月11日02:25:04	46°04'06"N, 131°02'22"W
2	RS2_OK105124_PK912454_DK845009_FQ18_20 090 118_143 058_HH_VV_HV_VH_SLC	2009年1月18日14:30:58	45°57'43"N, 125°39'18"W
3	RS2_OK105124_PK912455_DK845010_FQ20_20 090 225_020926_HH_VV_HV_VH_SLC	2009年2月25日02:09:26	35°44'43"N, 121°55'42"W
4	RS2_OK105124_PK912456_DK845011_FQ12_20 090 228_054758_HH_VV_HV_VH_SLC	2009年2月28日05:47:58	51°07'18"N, 178°53'10"W
5	RS2_OK105124_PK912457_DK845012_FQ4_20 090 317_143 915_HH_VV_HV_VH_SLC	2009年3月17日14:39:15	46°07'05"N, 124°33'25"W
6	RS2_OK105124_PK912458_DK845013_FQ13_20 090 822_143 105_HH_VV_HV_VH_SLC	2009年8月22日14:31:05	46°08'05"N, 124°30'15"W
7	RS2_OK29804_PK294773_DK265292_FQ10_20 100 515_115 636_HH_VV_HV_VH_SLC	2010年5月15日11:56:36	28°33'05"N, 88°18'34"W
8	RS2_OK92533_PK818353_DK746868_FQ1_20 091 107_152 316_HH_VV_HV_VH_SLC	2009年11月7日15:23:16	54°21'23"N, 132°23'09"W
9	RS2_OK92533_PK818354_DK746869_FQ12_20 091 208_151 913_HH_VV_HV_VH_SLC	2009年12月8日15:19:13	54°11'19"N, 134°22'30"W
10	RS2_OK100982_PK877033_DK810385_FQ17_20 170 319_042844_HH_VV_HV_VH_SLC	2017年3月19日04:28:44	54°01'02"N, 160°47'01"W

与原 SAR 图像谱(图 5a)的谱形状和谱密度都非常接近, 而仅包含倾斜调制和流体力学调制影响的图像谱

(图 5c)的谱值就小得多, 且峰值位置与原 SAR 图像谱相比有一定的偏离。

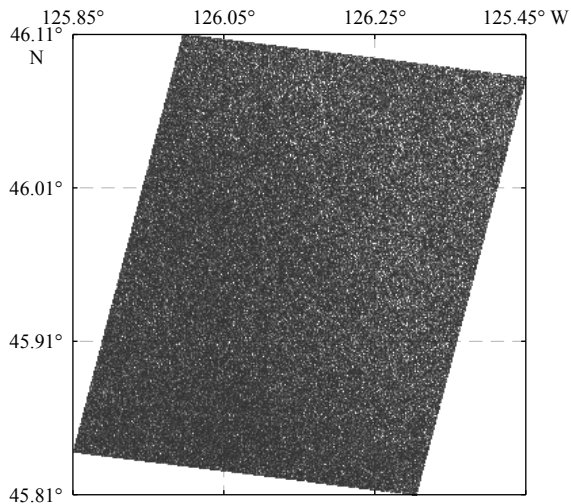


图3 Radarsat-2 数据 2 的 SAR 图像  
Fig. 3 SAR image of Radarsat-2 data 2

### 2.3 海浪不同传播方向时的调制因素比较

为了进一步分析不同海浪传播方向时各调制函数对 SAR 图像的影响, 我们仿真不同涌浪传播方向角(与距离向的夹角分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ ), 其他参数同图 1 情况下的海面 SAR 图像, 进而将考虑 3 种调制效应的归一化 SAR 图像谱、仅考虑速度聚束调制效应的归一化 SAR 图像谱与仅考虑倾斜调制和流体力学调制时的归一化 SAR 图像谱

等 3 种谱的积分能量进行了比较。图 6a 为给出考虑不同调制因素时图像谱积分能量随海浪传播方向的变化, 图 6b 则为仅考虑速度聚束调制时的 SAR 图像谱积分和仅考虑倾斜调制和流体力学调制影响时的 SAR 图像的谱积分能量分别占考虑 3 种调制效应的图像谱能量的比重。由图可见: 在海浪传播方向角远离距离向的变化过程中, 仅考虑速度聚束调制的 SAR 图像谱积分能量和考虑 3 种调制效应的图像谱积分能量呈现上升趋势, 而且通过图 6b 可以看出, 仅考虑速度聚束调制影响的 SAR 图像谱积分能量占考虑 3 种调制效应的 SAR 图像谱积分的比重不断增大, 而且总保持在 70% 以上。实孔径调制(倾斜调制和流体力学调制)对 SAR 图像的影响随着海浪传播方向与距离向的夹角的增加呈现出减小趋势, 而且倾斜调制与流体力学调制影响下的图像谱积分能量较考虑 3 种调制效应的 SAR 图像谱积分能量来说所占比重较小, 基本都在 20% 以下。以上结果进一步表明速度聚束调制对 SAR 图像纹理的影响远大于倾斜调制和流体力学调制的影响。

通过上述结果我们发现在 SAR 成像过程中, 速度聚束效应对 SAR 图像中海浪纹理的影响远大于倾斜调制和流体力学调制的影响。通过式(5)、式(7)、式(12)可知, 海浪沿方位向的波数只要稍微有所增

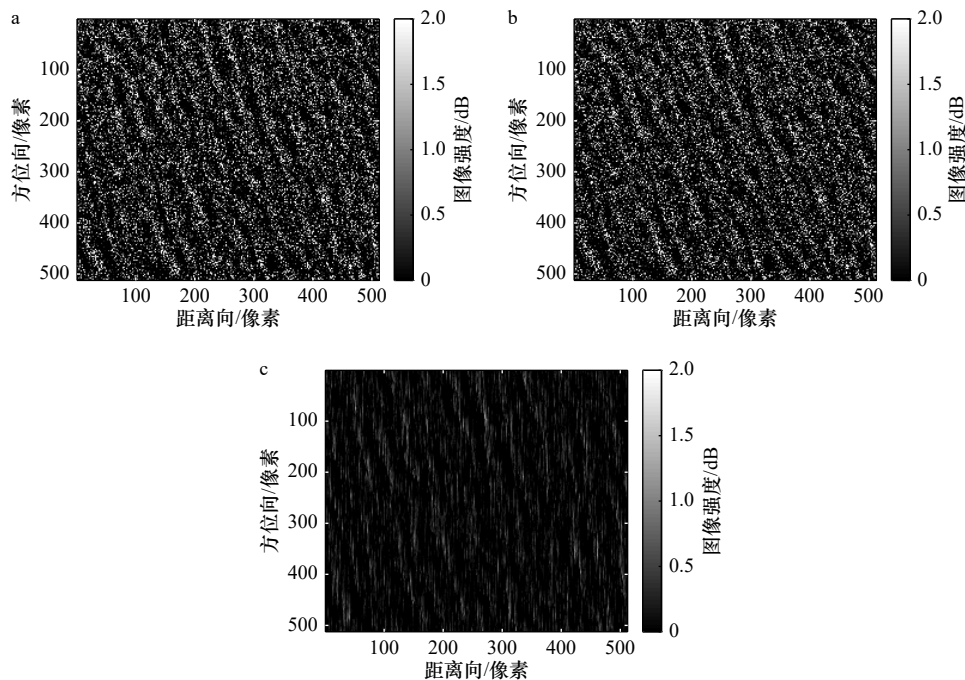


图4 Radarsat-2 数据 2 中选取的  $512 \times 512$  像素 SAR 图像(a), 仅考虑速度聚束调制的 SAR 图像(b)和仅考虑倾斜调制和流体力学调制的 SAR 图像(c)

Fig. 4 SAR image of  $512 \times 512$  size selected in Radarsat-2 data 2 (a), SAR image that only the velocity bunching modulation is considered (b) and SAR image that only the tilt modulation and the hydrodynamic modulation are considered (c)

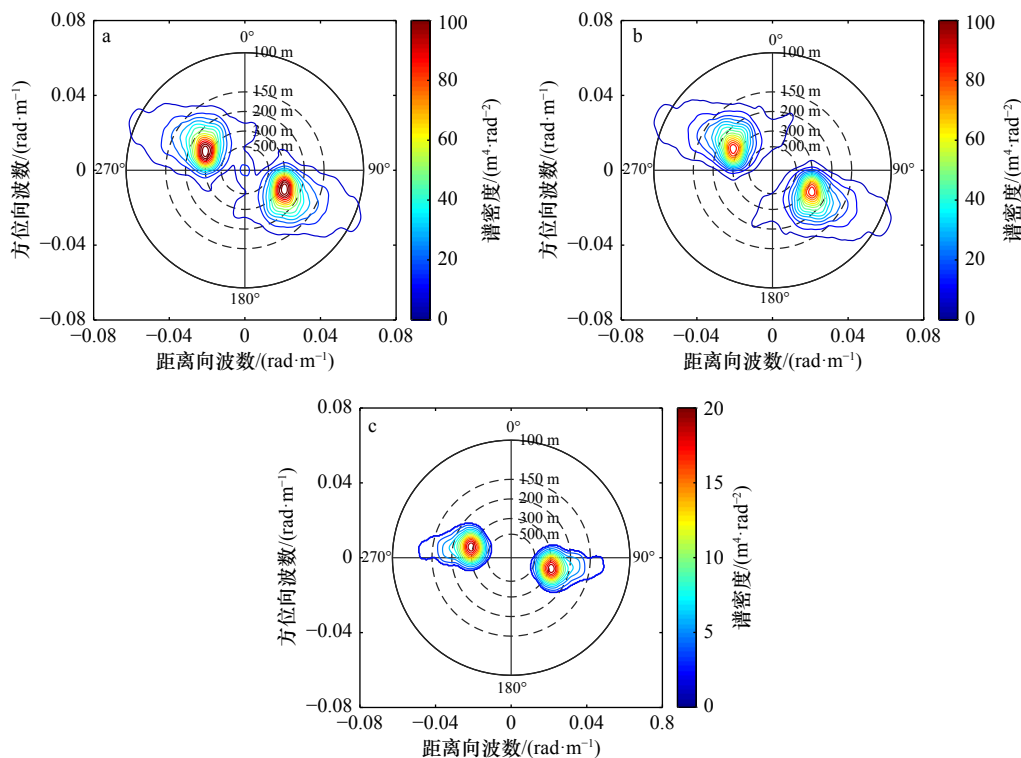


图 5 SAR 图像谱(a), 仅考虑速度聚束调制的 SAR 图像谱(b)和仅考虑倾斜调制和流体力学调制的 SAR 图像谱(c)  
 Fig. 5 The spectrum of the SAR image (a), the spectrum of the SAR image that only the velocity bunching modulation is considered (b) and the spectrum of the SAR image that only the tilt modulation and the hydrodynamic modulation are considered (c)

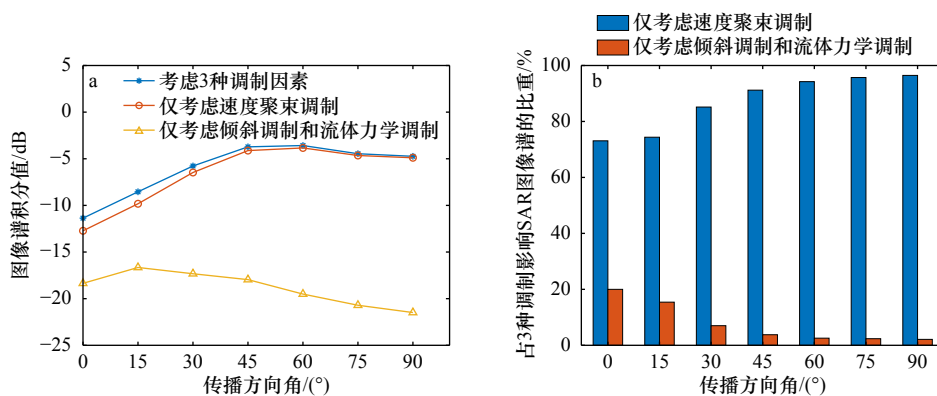


图 6 仿真 SAR 图像谱积分能量随涌浪传播方向角的变化(a), 在不同传播方向角下, 考虑不同调制的谱积分能量占总能量的比重(b)  
 Fig. 6 The spectral integration value variation of the simulated SAR images with different wave propagation direction angle (a), the proportion of the spectral integration variation under the different modulation conditions with different wave propagation direction angles (b)

大, 此时, 由于 $\beta$ 的值较大, 从而导致 $T_k^{vb}$ 影响非常显著, 相比较而言, 倾斜调制和流体力学调制的影响则非常小。

### 3 相干斑噪声影响

在海浪反演过程中相干斑噪声的影响也是不可忽视的。Arsenault 和 April<sup>[29]</sup>证明了相干斑噪声是乘性独立同分布的。因此在空间域时, 一般采用的相干斑噪声模型可表示为<sup>[30-32]</sup>

$$I = x \cdot n, \tag{16}$$

式中,  $I$ 是观测到的 SAR 图像中像素点的强度;  $x$ 是相应的真实反射强度; 乘性噪声 $n$ 满足 Gamma 分布, 其均值为 1, 并且对于均匀区域它的标准差 $\sigma_n$ 为<sup>[28]</sup>

$$\sigma_n = \sqrt{\text{var}(I)/E(I)}, \tag{17}$$

式中,  $\text{var}()$ 表示求随机变量的方差;  $E()$ 表示求随机变量的均值; 对于单视图像来说, 方差 $\sigma_n$ 为 1。据此对模拟的二维海面回波信号(图 7a)添加乘性噪声如图 7b 所示。

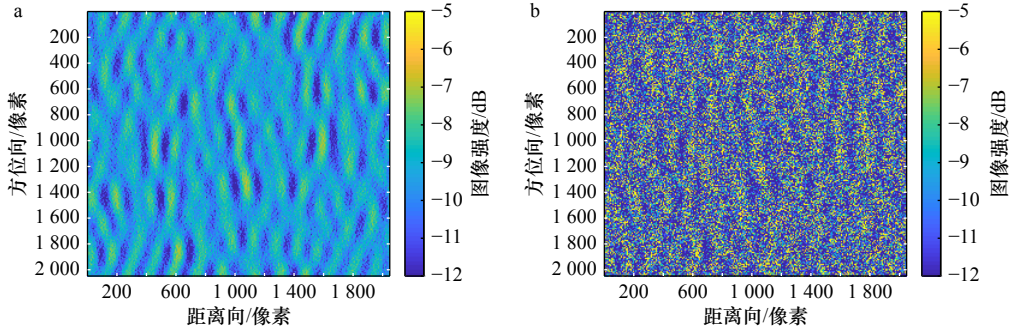


图 7 未添加(a)和添加(b)乘性噪声的二维海面回波信号

Fig. 7 Two-dimensional echo signal of ocean wave without (a) and with multiplicative noise (b)

为分析乘性噪声对图像谱的影响,将未添加乘性噪声和添加乘性噪声的二维信号的图像谱进行比较,图 8 中给出沿着方位向波数平均的平均功率谱密度,可以看出添加乘性噪声后的所得功率谱密度要高于未添加乘性噪声的平均功率谱密度。对于基于 SAR 图像的海浪反演算法而言,尤其值得关注的是:在图像谱的低波数区域,乘性噪声引起了功率谱的增大,此时基于调制函数直接进行海浪反演时,根据 Hasselmann 海浪谱与图像谱的映射关系可知,乘性噪声在低波数区必将引起显著反演误差<sup>[9]</sup>。

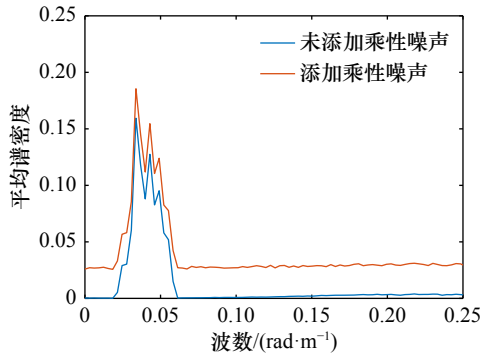


图 8 沿方位向的平均图像谱密度

Fig. 8 Mean density of image spectrum along azimuth direction

#### 4 基于速度聚束调制的 SAR 图像海浪反演

目前,在 Hasselmann 海浪谱反演算法中,由于 Bragg 理论并不能准确反映海面回波随大尺度海浪斜率的变化,因此,基于 Bragg 理论所得海浪倾斜调制函数并不准确;此外,流体力学调制至今也尚不成熟。然而,通过前面的分析可见,相对于倾斜调制和流体力学调制而言,速度聚束调制对 SAR 图像纹理特征的影响起主导作用,这使得单纯基于速度聚束调制的海浪谱反演算法所得海浪参数可能更为准确。

另外,通过上一节讨论可知,相干斑会给 SAR 图像谱带来影响,尤其是低波数范围内的噪声会导致海浪谱的反演产生显著误差,为减小该因素的影响,我们基于速度聚束调制反演海浪方位向斜率谱。

由式(1)可得,海面沿方位向斜率可表示为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} = \sum_k i k_y \zeta_k \exp[i(k \cdot r - \omega t)], \quad (18)$$

式中,  $k_y$  代表方位向波数。根据 SAR 图像海浪调制理论,仅考虑速度聚束调制影响时的归一化 SAR 图像可表示为

$$\begin{aligned} I^{vb} &= \sum_k T_k^{vb} \zeta_k \exp[i(k \cdot r - \omega t)] \\ &= \sum_k T_k^{vb, \sigma} k_y \zeta_k \exp[i(k \cdot r - \omega t)], \end{aligned} \quad (19)$$

式中,

$$T_k^{vb, \sigma} = -\beta \omega (\cos \theta - i \sin \theta k_l / k). \quad (20)$$

对比式(18)和式(19),容易得到  $I^{vb}$  的图像谱  $P_k^{vb}$  与方位向斜率谱  $P_k^{vc}$  之间的映射关系为

$$P_k^{vb} = |T_k^{vb, \sigma}|^2 \frac{P_k^{vc}}{2} + |T_{-k}^{vb, \sigma}|^2 \frac{P_{-k}^{vc}}{2}. \quad (21)$$

由于海浪角频率  $\omega = \sqrt{gk}$ , 式(20)对波数  $k$  大小的敏感性显著降低,另外,涌浪谱一般为窄带谱,因此,式(21)中可以用谱峰处所对应的角频率  $\omega_p$  近似代替  $\omega$ , 这样可有效降低低波数区域相干斑噪声所带来的影响。

根据斜率谱可求主波波长为

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_p}, \quad (22)$$

式中,  $k_p$  为主波波数,主波周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega_p}. \quad (23)$$

当海浪并非严格地沿距离向传播时,海浪斜率均方根

$$\sigma_s \approx \sigma_{as} / \sin \phi, \quad (24)$$

式中,  $\sigma_{as}$  为方位向斜率均方根;  $\phi$  表示海浪传播方向与

距离向的夹角;有效波高 $H_s$ 可以通过主波波长和斜率均方根求出<sup>[14]</sup>

$$H_s = \tan(\sigma_s) \cdot (\lambda/2). \quad (25)$$

图 9 中分别给出了基于数据 2 和数据 3 SAR 图像选取的一块子图像反演所得海浪方位向斜率谱。图 9a 中为数据 2 SAR 图像基于速度聚束调制反演所得斜率谱,计算得到的有效波高为 3.39 m,主波波长为 256.74 m,海浪传播方向与方位向夹角为 63.23°。图 9b 中,反演所得到的有效波高为 2.18 m,主波波长 216.85 m,传播方向角为 126.69°。一般情况下,对于

开阔海域中的海浪而言,在统计意义上相近海域的海浪是一样的,因此,在整幅 SAR 图像中选取一块区域反演所得海浪谱与 SAR 图像中其他区域反演所得海浪谱具有相似性。为了更好地说明这一情况,作为示例,我们基于数据 2 和数据 3 两幅 SAR 图像的整幅图像对海浪谱进行了反演,所得结果为图 10a 和图 10b,将图 10 反演结果与图 9 中选取 SAR 子图像反演结果进行对比可见:整幅图像与局域图像反演所得海浪谱的形状、有效波高、主波波长和传播方向等趋于一致。

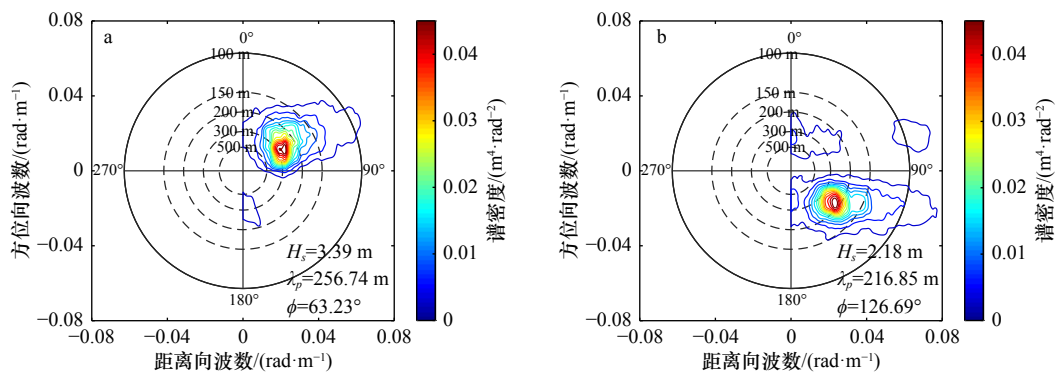


图 9 Radarsat-2 数据 2(a)和数据 3(b)中 SAR 子图像反演所得方位向斜率谱

Fig. 9 The azimuth slope spectrum retrieved from the sub-image of SAR in Radarsat-2 data 2 (a) and data 3 (b)

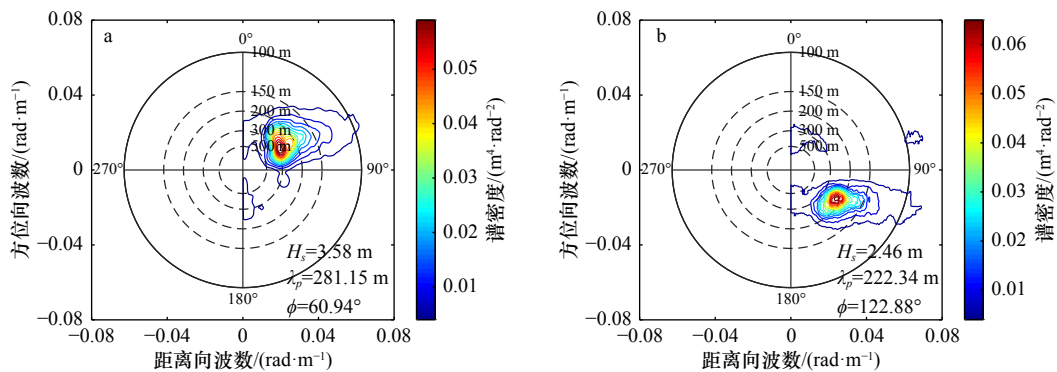


图 10 Radarsat-2 数据 2(a)和数据 3(b)整幅 SAR 图像反演所得方位向斜率谱

Fig. 10 The azimuth slope spectrum retrieved from the SAR in Radarsat-2 data 2 (a) and data 3 (b)

为验证本文方法反演结果的有效性,我们将表 1 中 10 景 Radarsat-2 SAR 数据反演所得结果分别与浮标数据和 ECMWF 再分析数据进行了对比,结果如表 2 所示,作为比较,表 2 中还给出了 MPI 法和同极化调制函数法反演所得结果,为了减少对外部数据的依赖,在 MPI 法中尝试将通过 SAR 图像谱和海浪谱的一阶线性映射关系得到的海浪谱作为初猜谱进行输入。3 种不同反演方法所得有效波高与浮标观测结果对比的散点图如图 11 所示,与 ECMWF 再分析有效波高数据的对比散点图见图 12。在与浮标实测

数据对比的图 11 中,红色散点和红色实线分别代表本文方法反演所得有效波高及其拟合线,反演所得波高的均方根误差为 0.79 m,拟合线斜率为 1.13;绿色散点和绿色实线分别为 MPI 方法反演的有效波高结果及其拟合线,其均方根误差为 1.47 m,拟合线的斜率为 0.44;蓝色散点和蓝色实线代表同极化调制函数法反演的有效波高结果及其拟合线,该方法所得结果的均方根误差为 1.46 m,拟合直线斜率为 0.62。通过与 ECMWF 再分析数据对比的图 10 可以看出,其结果的整体趋势与图 9 中一致,并且本文方法反演所得

表 2 Radarsat-2 数据不同反演方法的有效波高结果

Table 2 The retrieved significant wave height of different inversion methods for Radarsat-2 data

数据序号	本文算法/m	MPI法/m	同极化调制函数法/m	浮标实测/m	ECMWF再分析数据/m
1	1.76	1.71	2.06	3.10	3.22
2	3.39	1.73	2.08	2.51	2.72
3	2.18	1.56	1.73	2.88	2.15
4	3.13	1.88	1.13	4.05	3.27
5	2.60	1.80	2.82	3.44	3.45
6	2.65	1.81	1.93	2.47	2.08
7	1.11	0.46	3.08	1.49	1.42
8	6.32	2.61	6.72	5.20	4.21
9	2.11	2.58	3.87	2.60	2.54
10	2.42	1.01	4.10	2.31	1.94

波高的均方根误差 0.92 m 也为 3 种方法中最小。通过图 11 和图 12 不同方法反演结果的对比分析, 可见: 与 MPI 方法和同极化调制函数法反演的有效波高相比, 利用本文算法反演斜率谱进而计算得到的有效波高的误差更小, 与浮标实测数据对比的拟合直线斜率更接近 1。但是需要说明的是: 当海浪沿距离向传播时, 由式(24)可得, 本文方法不再适用, 而同极化调制函数法则仍适用。

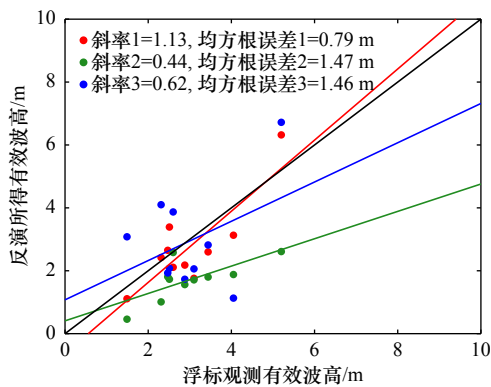


图 11 不同方法反演有效波高与浮标观测结果对比散点图

Fig. 11 The scatter plots of retrieved significant wave height by different methods with buoy data

## 5 结论

本文首先分析了海面 SAR 图像中倾斜调制、流体力学调制和速度聚束调制 3 种调制函数的影响, 将考虑不同调制函数的 SAR 图像分别提取对比, 并在不同海浪传播方向情况下统计分析比较, 结合理论分析, 发现速度聚束调制在 3 种调制中对 SAR 图像的

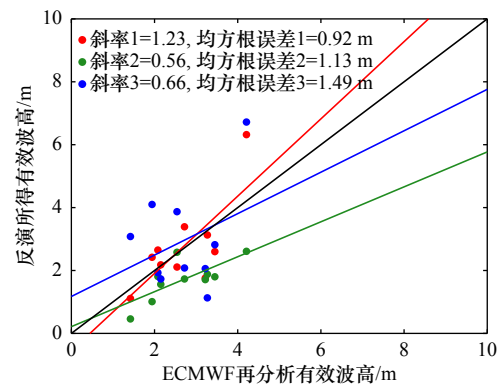


图 12 不同方法反演有效波高与 ECMWF 再分析数据对比散点图

Fig. 12 The scatter plots of retrieved significant wave height by different methods with ECMWF reanalysis data

影响尤为显著, 远大于倾斜调制和流体力学调制的影响。通过对相干斑噪声的影响分析发现相干斑噪声对海浪 SAR 图像反演有一定影响, 特别是在低波数区域相干斑噪声对反演结果的影响显著, 基于此, 我们利用只考虑速度聚束调制的 SAR 图像直接反演方位向斜率谱的方法以降低相干斑噪声的影响。通过比较, 可得: 本文算法反演所得有效波高结果较 MPI 方法和同极化调制函数法所得结果与浮标数据和 ECMWF 再分析数据吻合更好。与 Zhang 等<sup>[14]</sup>提出的全极化斜率谱反演算法不同的是, 本文算法是基于单极化 SAR 数据, 从中提取出仅考虑速度聚束调制影响的 SAR 图像反演海浪方位向斜率谱。然而, 需要说明的是: 当海浪沿距离向传播时, 本文反演海浪有效波高的方法不再适用。

## 参考文献:

- [1] Alpers W R, Ross D B, Rufenach C L. On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C7): 6481–6498.
- [2] Hasselmann K, Raney R K, Plant W J, et al. Theory of synthetic aperture radar ocean imaging: A MARSEN view[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C3): 4659–4686.
- [3] Lyzenga D R, Shuchman R A, Lyden J D, et al. SAR imaging of waves in water and ice: Evidence for velocity bunching[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C1): 1031–1036.
- [4] Alpers W, Rufenach C. The effect of orbital motions on synthetic aperture radar imagery of ocean waves[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1979, 27(5): 685–690.
- [5] Engen G, Johnsen H, Krogstad H E, et al. Directional wave spectra by inversion of ERS-1 synthetic aperture radar ocean imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(2): 340–352.
- [6] Jacobsen S, Høgda K A. Estimation of the real aperture radar modulation transfer function directly from synthetic aperture radar ocean wave image spectra without a priori knowledge of the ocean wave height spectrum[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C7): 14291–14302.
- [7] Brüning C. The impact of the ocean wave-radar modulation transfer function on the inversion of ERS-1 SAR image spectra into ocean wave spectra[C]//Proceedings of IGARSS '94–1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena, CA, USA: IEEE, 1994: 2032–2034.
- [8] Alpers W, Schmidt A, Schmidt R, et al. A comparison of ocean wave-radar modulation transfer functions at different radar frequencies and polarizations determined from tower and aircraft measurements[C]//1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. Firenze, Italy: IEEE, 1995: 1087–1089.
- [9] Hasselmann K, Hasselmann S. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1991, 96(C6): 10713–10729.
- [10] Brüning C, Schmidt R, Alpers W. Estimation of the ocean wave-radar modulation transfer function from synthetic aperture radar imagery[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C5): 9803–9815.
- [11] Hasselmann S, Brüning C, Hasselmann K, et al. An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C7): 16615–16629.
- [12] Mastenbroek C, De Valk C F. A semiparametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C2): 3497–3516.
- [13] Schulz-Stellenfleh J, Lehner S, Hoja D. A parametric scheme for the retrieval of two-dimensional ocean wave spectra from synthetic aperture radar look cross spectra[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C5): C05004.
- [14] Zhang Biao, Perrie W, He Yijun. Validation of RADARSAT-2 fully polarimetric SAR measurements of ocean surface waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C6): C06031.
- [15] He Yijun, Perrie W, Xie Tao, et al. Ocean wave spectra from a linear polarimetric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2623–2631.
- [16] He Yijun, Shen Hui, Perrie W. Remote sensing of ocean waves by polarimetric SAR[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23(12): 1768–1773.
- [17] Schulz-Stellenfleh J, König T, Lehner S. An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C3): C03019.
- [18] Li Xiaoming, Lehner S, Bruns T. Ocean wave integral parameter measurements using Envisat ASAR wave mode data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 155–174.
- [19] Stopa J E, Mouche A. Significant wave heights from Sentinel-1 SAR: Validation and applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(3): 1827–1848.
- [20] Pleskachevsky A L, Rosenthal W, Lehner S. Meteo-marine parameters for highly variable environment in coastal regions from satellite radar images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 119: 464–484.
- [21] Romeiser R, Graber H C, Caruso M J, et al. A new approach to ocean wave parameter estimates from C-band scanSAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1320–1345.
- [22] Shao Weizeng, Zhang Zheng, Li Xiaofeng, et al. Ocean wave parameters retrieval from Sentinel-1 SAR imagery[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 707.
- [23] Grieco G, Lin Wenming, Migliaccio M, et al. Dependency of the Sentinel-1 azimuth wavelength cut-off on significant wave height and wind speed[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(21): 5086–5104.
- [24] Shao Weizeng, Jiang Xingwei, Nunziata F, et al. Analysis of waves observed by synthetic aperture radar across ocean fronts[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70(11): 1397–1407.
- [25] Shao Weizeng, Hu Y Y, Zheng G, et al. Sea state parameters retrieval from cross-polarization Gaofen-3 SAR data[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(3): 1025–1034.

- [26] Wright J. A new model for sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1968, 16(2): 217–223.
- [27] Lyzenga D R. Numerical simulation of synthetic aperture radar image spectra for ocean waves[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, GE-24(6): 863–872.
- [28] Keller W C, Wright J W. Microwave scattering and the straining of wind-generated waves[J]. *Radio Science*, 1975, 10(2): 139–147.
- [29] Arsenault H H, April G. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(11): 1160–1163.
- [30] Lee J S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 17(1): 24–32.
- [31] Lee J S. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images[J]. *Optical Engineering*, 1986, 25(5): 636–646.
- [32] Lee J S, Jurkevich L, Dewaele P, et al. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 8(4): 313–340.

## Ocean wave inversion based on the velocity bunching modulation of SAR image

Xu Qiaohui<sup>1</sup>, Zhang Yanmin<sup>1</sup>, Wang Yunhua<sup>1,2</sup>

(1. *College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*)

**Abstract:** The effects of three kinds of modulation (the tilt modulation, the hydrodynamic modulation and the velocity bunching modulation) on sea wave SAR (synthetic aperture radar) image are compared and analyzed firstly. The results show that the velocity bunching modulation has the most significant effect on SAR images. In addition, due to the inherent speckle noise in the SAR image, it is difficult to filter or suppress the noise in the range of low wavenumber. And the inversion of wave spectrum by classical MPI (max-planck institute) method will result in the larger spectral value in the range of low wavenumber. Referring to the classical MPI inversion algorithm, an azimuth slope spectrum and SWH (significant wave height) inversion algorithm based on the velocity bunching modulation are proposed in this paper. Comparing the SWH obtained by the classical MPI method, the co-polarization modulation method and the algorithm proposed in this paper with the buoy data, one can find that the mean square error between the SWH retrieved by the algorithm proposed in this paper and the SWH obtained from buoy data is 0.79 m, which is the smallest among the three methods.

**Key words:** the velocity bunching modulation; ocean wave inversion; speckle noise; significant wave height