

# 机载 C 波段全极化 SAR 海面风矢量反演理论研究 及实验验证\*

赵现斌 严卫<sup>†</sup> 孔毅 韩丁 刘文俊

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2013 年 1 月 27 日收到; 2013 年 3 月 12 日收到修改稿)

机载全极化 SAR 海面风矢量反演研究对于近海岸复杂气象条件下风矢量探测具有重要意义. 本文从极化散射理论出发, 通过分析全极化 SAR 探测数据与海面风矢量的关系, 设计了全极化 SAR 海面风矢量反演方案. 依据机载 SAR 高机动性和全极化两个探测特点, 针对 VV 极化探测数据, 提出了基于最大似然估计的海面风矢量反演方法, 并设计了飞行实验方案; 针对 VH 极化探测数据, 提出了通过带约束最优拟合的 VH 极化海面散射模型反演风速, 再利用 CMOD5 地球物理模型函数计算风向的海面风矢量反演方法. 利用机载全极化 SAR 探测的台风“海葵”边缘数据, 开展了海面风矢量反演实验研究. 研究表明, 两种风矢量反演方法均可不借助辅助信息, 反演复杂气象条件下的海面风矢量. 前者反演风向、风速的均方根误差分别为  $18.0^\circ$ ,  $1.8 \text{ m/s}$ , 后者反演风向、风速的均方根误差分别为  $9.3^\circ$ ,  $1.2 \text{ m/s}$ , 后者的反演精度优于前者. 这是因为 VH 极化归一化雷达截面与风向和雷达入射角无关, 仅与风速密切相关, 更适合复杂气象条件下的海面风矢量反演.

**关键词:** 机载全极化 SAR, 海面风矢量, 理论研究, 实验验证

**PACS:** 84.40.Xb, 92.60.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.62.138402

## 1 引言

通过雷达探测的归一化雷达截面 (normalized radar cross section, NRCS) 反演海面风矢量, 是目前遥感获取海面风矢量的主要方式. 星载微波散射计是业务化的海面风矢量遥测设备, 但在海岸附近、半封闭的海湾和海冰边缘地带 (离岸 30 km 以内), 其探测值易受到陆地和海冰的影响, 反演风矢量的精度较低<sup>[1]</sup>. 然而, 近海岸海面风场对于海洋工程、海洋渔业、海洋环境污染以及近海岸风能开发等人类活动都有重要影响. 合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种主动式微波成像雷达, 它可通过测量海面反射信号, 经过相干综合处理得到归一化雷达截面, 再通过地球物理处理获取海面风矢量<sup>[2,3]</sup>. SAR 具有高空间分辨率的优势, 可以提供广阔海洋及沿岸地区风矢量的细节信息. 特别

是高机动性的机载 SAR, 弥补了星载 SAR 受轨道限制, 实时探测能力弱的不足, 成为近海岸海面风矢量精细化探测的有效手段.

传统单极化 SAR 反演海面风矢量, 需要先获取风向, 再将风向、雷达入射角和归一化雷达截面输入 CMOD 地球物理模型函数 (geophysical model functions, GMF) 计算风速<sup>[4-6]</sup>. 目前, 星载 SAR 获取风向手段主要有两种, 一是基于风条纹反演法 (SAR wind direction algorithm, SWDA), 包括快速傅里叶变换法<sup>[7,8]</sup>、局部梯度法<sup>[9,10]</sup>和小波分析法<sup>[11-14]</sup>, 二是利用辅助资料直接获取, 包括数值预报模式资料 (numerical weather prediction, NWP) 和散射计数据<sup>[15,16]</sup>. 对于机载 SAR 而言, 图像中存在风条纹的概率小于 44%<sup>[17]</sup>, SWDA 方法难以在机载 SAR 上业务化应用. 另外, 机载 SAR 探测时间和区域的不确定性, 使其探测数据在空间和时间上均难与 NWP 或散射计探测数据匹配. 综上所述, 如

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41076118) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: weiyang2002net@yahoo.com

何不借助辅助信息, 直接从 SAR 图像反演海面风矢量信息, 是机载 SAR 海面风矢量反演研究中需解决的一个核心问题.

全极化 SAR 对海探测时, 通过近同时发射和接收水平 (H)、垂直极化 (V) 相干脉冲, 可同时测量不同极化状态组合回波的幅度和相位信息, 获得完整极化散射矩阵. 因此, 全极化 SAR 比单极化或多极化 SAR 包含更多的海洋环境信息, 提高了海洋遥感应用问题的解决能力. RADARSAT-2 SAR 是全球唯一在轨运行的 C 波段全极化 SAR, 针对其全极化探测数据 (HH, HV, VH, VV), Vachon<sup>[18]</sup>, Zhang<sup>[19]</sup> 等开展了基于 VH 极化归一化雷达截面的高风速反演研究, Zhang 等<sup>[20]</sup> 进一步利用地球物理模型函数, 计算了海面风向; Huang 等<sup>[21]</sup> 通过研究极化率模型 (Polarization Ratio, PR), 将 HH 极化归一化雷达截面转化为 VV 极化, 进而利用 CMOD 地球物理模型函数反演了海面风矢量. 然而, 上述算法均为星载 RADARSAT-2 SAR 设计, 没有专门针对机载平台的算法研究, 对机载平台的适用性存在疑问.

本文以极化散射理论为基础, 通过分析全极化 SAR 探测数据与海面风矢量关系, 设计全极化 SAR 海面风矢量反演方案. 针对 VV 极化探测数据, 依据机载 SAR 高机动性的特点, 提出基于最大似然估计的风矢量反演方法, 并设计飞行实验方案. 针对 VH 极化探测数据, 通过带约束最优拟合, 拟合出适合机载 SAR 的 VH 极化海面散射模型, 进而提出全极化风矢量反演方法.

## 2 全极化 SAR 海面风矢量反演理论研究

### 2.1 极化散射理论

全极化 SAR 照射散射体时, 照射在散射体的入射波被散射体散射回去, 在远场情况下散射波可视为面波, 整个散射过程可看作一个线性转换过程<sup>[22]</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{re}} &= [S] \mathbf{E}^{\text{tr}} = \begin{bmatrix} E_{\text{H}}^{\text{re}} \\ E_{\text{V}}^{\text{re}} \end{bmatrix} \\ &= \frac{e^{ikr}}{r} \begin{bmatrix} S_{\text{HH}} & S_{\text{HV}} \\ S_{\text{VH}} & S_{\text{VV}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{H}}^{\text{tr}} \\ E_{\text{V}}^{\text{tr}} \end{bmatrix}, \quad (1) \end{aligned}$$

式中,  $E$  表示电场矢量, 上标 tr 表示发射天线发射到散射体上的入射波, 上标 re 表示接收天线接收到

来自散射体的散射波,  $r$  为散射目标与接收天线之间的距离,  $k$  为电磁波波数. 极化散射矩阵  $S$  是一个  $2 \times 2$  的复矩阵, 包含幅度和相位信息,  $S_{\text{HH}}$  和  $S_{\text{VV}}$  为同极化分量,  $S_{\text{HV}}$  和  $S_{\text{VH}}$  为交叉极化分量. 实际研究中, 通常依据单基系统和天线互易定理, 认为交叉极化分量相等, 即  $S_{\text{HV}} = S_{\text{VH}}$ . 极化散射矩阵描述了雷达照射波和目标散射波各极化分量之间存在的变换关系. 若已知矩阵内所有元素的相位和幅度, 可清楚描述目标的电磁散射特性.

全极化 SAR 探测数据中, 极化散射矩阵元素和归一化雷达截面的关系, 可以利用散射场均匀充满全空间立体角时对于入射场的能量之比来表示, 具体为<sup>[23]</sup>

$$\sigma_{pq} = 4\pi |S_{pq}|^2, \quad (2)$$

式中, 极化散射矩阵元素分别为  $S_{\text{HH}}$ ,  $S_{\text{HV}}$ ,  $S_{\text{VV}}$  和  $S_{\text{VH}}$ , 同时包含了强度和相位信息, 而对应的归一化雷达截面分别为  $\sigma_{\text{HH}}^0$ ,  $\sigma_{\text{HV}}^0$ ,  $\sigma_{\text{VV}}^0$  和  $\sigma_{\text{VH}}^0$ , 仅包含强度信息. 全极化 SAR 散射与遥感, 强度和相位信息均是重要的研究内容.

探测目标的形状、运动状态等物理因素, 探测目标和测量系统之间的相对姿态取向、空间几何位置关系等探测条件均是影响全极化 SAR 探测的重要因素. 不同海况条件下, 四种极化探测数据对于海面风矢量的响应不同, 这是开展全极化 SAR 海面风矢量反演研究的物理基础.

### 2.2 全极化 SAR 探测数据与海面风矢量关系研究

海面风场使得海面产生了坡陡和破碎波, 这时海面散射通常由二尺度散射模型描述, 风速与雷达回波在海浪平缓时呈现线性关系, 而在海浪破碎时, 表现为三次方关系. 同极化雷达回波主要依赖前者, 受海表面的 Bragg 散射影响, 而交叉极化雷达回波符合典型的双尺度散射结构, 受表面倾斜或体散射的影响<sup>[19,21]</sup>. 因而, 同极化数据与交叉极化数据的相关性很小, 不同极化归一化雷达截面与海面风矢量关系需分别研究.

#### 2.2.1 VV 极化探测数据与海面风矢量

依据 Bragg 散射定理, 风致海面的微尺度波是产生雷达回波的主要散射体, 这是 VV 极化探测数据联系海面风矢量的理论基础. 据此, 假定 VV 极化归一化雷达截面与风速成正比, 通过长期统计雷

达探测数据与相应位置的浮标或数值预报资料, 构建了 CMOD 地球物理模型函数, 表达式为<sup>[24]</sup>

$$\sigma_{VV}^0 = A(\theta)u_{10}^{\gamma(\theta)}(1 + B(u_{10}, \theta)\cos(\phi) + C(u_{10}, \theta)\cos 2\phi), \quad (3)$$

其中,  $\sigma_{VV}^0$  为 VV 极化归一化雷达截面,  $u_{10}$  为海面 10 m 高风速,  $\phi$  为风向相对于雷达方位角,  $\theta$  为雷达相对于海面的入射角,  $A, B, C$  和  $\gamma$  均为由雷达频率和极化决定的系数. 本文采用业务化的 CMOD5 地球物理模型函数作为海面风矢量反演的研究模型<sup>[6]</sup>.

为了考察 CMOD5 地球物理模型函数中 VV 极化归一化雷达截面与风向、风速和雷达入射角三个参数的函数关系, 我们确定其中两个参数, 逐一仿真研究归一化雷达截面与另一个参数的函数关系. 仿真研究中, 风向取值范围为  $0^\circ\text{--}360^\circ$ , 风速取值范围为  $3\text{--}25\text{ m/s}$ , 雷达入射角取值范围为  $20^\circ\text{--}50^\circ$ . 参数固定时, 风向取值为  $45^\circ$ , 风速取值为  $10\text{ m/s}$ , 雷达入射角取值为  $40^\circ$ . 通过仿真计算, VV 极化归一化雷达截面与风向、风速和雷达入射角的函数关系如图 1 所示.

图 1(a) 表明 VV 极化归一化雷达截面与风向近似为余弦函数关系, 图 1(b) 表明 VV 极化归一化雷达截面随着风速的增加而增加, 图 1(c) 表明 VV 极化归一化雷达截面随着入射角的增加而降低. 可以确定, VV 极化归一化雷达截面与风向、风速和雷达入射角均有关.

### 2.2.2 HH 极化探测数据与海面风矢量

由波浪破碎引起的布拉格散射对回波信号的贡献, 是 HH 极化探测数据区别于 VV 极化的主要因素. 入射角  $40^\circ\text{--}60^\circ$  的回波信号中, HH 极化探测数据中非布拉格散射部分的贡献高达 50%, 而 VV 极化中低于 20%, 这使得 HH 极化探测数据的回波强度弱于 VV 极化<sup>[25]</sup>.

HH 极化归一化雷达截面  $\sigma_{HH}^0$  可以通过极化率模型校正为 VV 极化归一化雷达截面  $\sigma_{VV}^0$ , 最终与海面风矢量相联系. 极化率模型可表示为<sup>[26]</sup>

$$PR = \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{HH}^0}. \quad (4)$$

为了考察极化率与雷达入射角、风速和雷达方位角的函数关系, 本文仿真研究了描述雷达入射角与极化率关系的 Kirchoff<sup>[26]</sup>, Vachon<sup>[18]</sup>, Thompson<sup>[26]</sup> 和 Elfouhaily<sup>[27]</sup> 极化率模型, 描述雷达入射角、风速和极化率关系的 Hwang<sup>[21]</sup> 极化率

模型, 以及描述雷达入射角、方位角和极化率关系的 Mouche<sup>[26]</sup> 极化率模型. 仿真研究中, 入射角取值范围为  $20^\circ\text{--}50^\circ$ , 风速取值为  $5\text{ m/s}, 10\text{ m/s}$  和  $15\text{ m/s}$ , 雷达方位角取值为  $0^\circ$  (顺风),  $90^\circ$  (侧风) 和  $180^\circ$  (逆风). 极化率与雷达入射角、风速和雷达方位角的函数关系如图 2 所示.

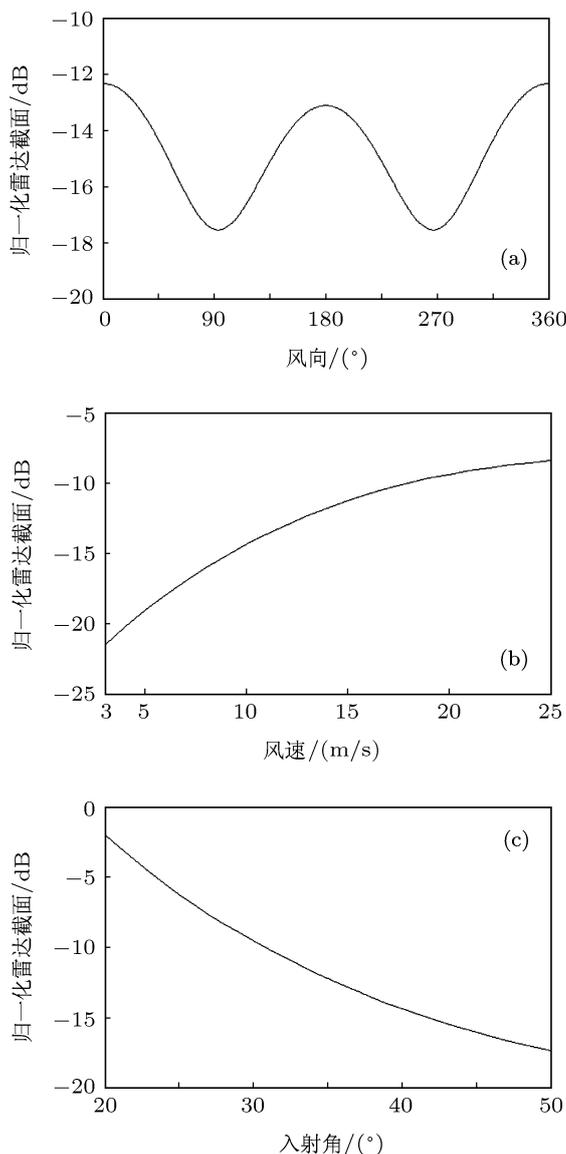


图 1 CMOD5 地球物理模型函数描述的函数关系 (a) VV 极化归一化雷达截面与风向; (b) VV 极化归一化雷达截面与风速; (c) VV 极化归一化雷达截面与雷达入射角

从图 2(a), (b), (c) 可知, 极化率均随着入射角的增加而增加. 另外, 图 2(b) 中, 极化率随着风速的增加而减少, 图 2(c) 中, 极化率受到雷达方位角的影响, 逆风时极化率最大, 顺风次之, 侧风时最小. 可以断定, HH 极化归一化雷达截面与风向、风速和雷达入射角均有关.

### 2.2.3 VH 极化探测数据与海面风速

VH 极化雷达回波符合典型的双尺度散射结构, 这是 VH 极化归一化雷达截面联系海面风速的物理基础. 在统计分析 RADARSAT-2 SAR VH 极化归一化雷达截面与浮标匹配观测结果的基础上, Zhang 等<sup>[19]</sup> 确立了 VH 极化海面散射模型, 具体为

$$\sigma_{VH}^0 = a * u_{10} + b, \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{VH}^0$  为 VH 极化归一化雷达截面, 单位为 dB,  $u_{10}$  为海面 10 m 高风速, 单位为 m/s, 模型参数  $a$  为 0.580,  $b$  为 35.652.

不难看出, VH 极化归一化雷达截面不依赖于雷达入射角和风向的变化, 与风速呈现出明显的线性关系.

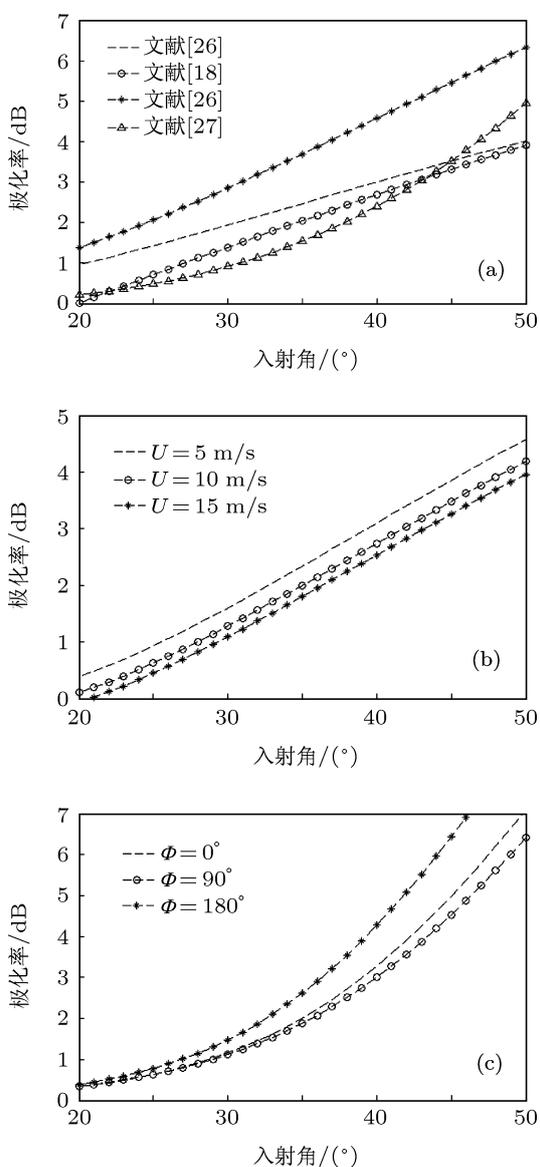


图2 极化率模型描述的函数关系 (a) 极化率和雷达入射角; (b) 极化率和雷达入射角、风速; (c) 极化率和雷达入射角、方位角

### 2.2.4 极化相关系数与海面风向

极化散射矩阵元素包含了幅度与相位特征, 不同散射矩阵元素之间的相关性不同, 这是全极化 SAR 去除模糊风向的理论依据. 其中, 极化相关系数  $\rho_{VVVH}$  描述了极化散射矩阵元素  $S_{VV}$  和  $S_{VH}$  之间的相关性, 可表示为

$$\rho_{VVVH} = \frac{\langle S_{VV} \cdot S_{VH}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{VV}|^2 \rangle \langle |S_{VH}|^2 \rangle}}. \quad (6)$$

Zhang 等<sup>[20]</sup> 在考察 RADARSAT-2 SAR 极化散射矩阵元素之间的相关性时, 发现  $\rho_{VVVH}$  随着风向变化呈现出奇对称性规律, 同时给出了  $\rho_{VVVH}$  与风向的对应关系: 当  $\rho_{VVVH}$  的实部小于 0, 虚部小于 0 时,  $0^\circ < \phi < 90^\circ$ ; 当  $\rho_{VVVH}$  的实部大于 0, 虚部大于 0 时,  $-90^\circ < \phi < 0^\circ$ ; 当  $\rho_{VVVH}$  的实部小于 0, 虚部大于 0 时,  $-180^\circ < \phi < -90^\circ$ ; 当  $\rho_{VVVH}$  的实部大于 0, 虚部小于 0 时,  $90^\circ < \phi < 180^\circ$ . 其中,  $\phi$  为风向相对于雷达方位角的夹角.

这样, 依据极化散射系数与风向的奇对称性, 可以去除模糊风向, 确定唯一风向.

### 2.3 全极化 SAR 海面风矢量反演方案设计

从 2.2 节可知, 全极化 SAR 探测数据中, VV, HH 极化归一化雷达截面与风向、风速和雷达入射角均有关, 而 VH 极化归一化雷达截面仅与风速有关, 极化散射矩阵元素  $S_{VV}$  和  $S_{VH}$  的相关系数  $\rho_{VVVH}$  随着风向变化呈现出奇对称性.

依据上述结论, 我们设计了全极化 SAR 海面风矢量反演方案, 如图 3 所示. 从图中可知, 对于 VV 极化归一化雷达截面, 可直接采用 CMOD 地球物理模型函数反演海面风矢量; 对于 HH 极化归一化雷达截面, 可利用极化率模型将其校正为 VV 极化归一化雷达截面, 再利用 CMOD 地球物理模型函数反演海面风矢量; 对于 VH 极化归一化雷达截面, 可通过 VH 极化海面散射模型反演风速, 再通过技术手段计算风向; 对于反演过程中产生的模糊风向, 可利用极化相关系数与风向的奇对称性去除.

与传统单极化 SAR 相比, 全极化 SAR 既可以采用传统的 VV, HH 极化归一化雷达截面反演风矢量, 又可以采用 VH 极化归一化雷达截面反演风矢量, 提供了更为丰富的海面风矢量反演手段. 另外, VH 极化海面散射模型使得全极化 SAR 可直接反演风矢量, 无需借助辅助信息, 而极化相关系数与

风向的奇对称性解决了传统单极化 SAR 海面风矢量反演中固有的风向模糊问题。

值得注意的是,全极化 SAR 探测数据中, VH 极化归一化雷达截面与风速的关系不依赖于风向

和雷达入射角,仅与风速密切相关.这一特点对于复杂气象条件下,机载 SAR 对海探测时摆脱飞机姿态、海况变化等因素对风矢量反演精度的影响具有重要作用。

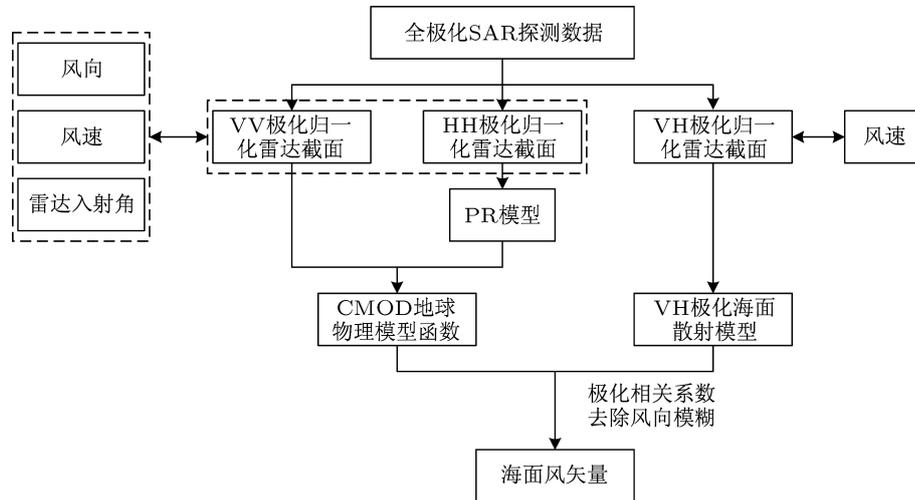


图3 全极化 SAR 海面风矢量反演方案

### 3 实验数据

机载 C 波段全极化 SAR 三次飞行探测实验的时间分别为北京时间 2012 年 7 月 26 日 14 时到 21 时, 7 月 30 日 06 时到 13 时, 8 月 5 日 10 时到 14 时. 探测数据包括归一化雷达截面  $\sigma_{HH}^0$ ,  $\sigma_{HV}^0$ ,  $\sigma_{VV}^0$  和  $\sigma_{VH}^0$ , 极化散射矩阵元素  $S_{HH}$ ,  $S_{HV}$ ,  $S_{VV}$  和  $S_{VH}$ , 内容如表 1 所示.

表 1 机载 C 波段全极化 SAR 探测数据

内容	7月26日	7月30日	8月5日
探测波段	C 波段	C 波段	C 波段
极化方式	HH, HV, VH, VV	HH, HV, VH, VV	HH, HV, VH, VV
飞行高度/m	3000	4000	4000
探测分辨率/m	1.5, 3	1.5, 3	1.5, 3
入射角/(°)	30, 40	30, 40	30, 40
浮标位置/(°)	29.75N, 122.75E	29.75N, 122.75E	29.75N, 122.75E
探测区域/km	50×50	50×50	50×50
数据量	87 组	63 组	32 组

比对验证数据来源于位于探测区域的中国气象局“58573 号”浮标. 该浮标提供的海洋环境要素包括海面 10 m 高的风向、风速, 海浪的波向、有效波高和有效波周期等海洋环境信息. 浮标数据每 10 min 一次, 为保证比对验证数据的有效性, 每一

幅 SAR 探测图像与浮标的距离不超过 20 km.

2012 年 11 号台风“海葵”在 8 月 5 日影响了飞行探测实验. 8 月 5 日飞行探测实验时, 08 时, 台风“海葵”中心位于 129.30°E, 26.70°N 附近, 台风中心与探测中心距离为 726.4 km; 17 时, 台风中心位于 27.40°N, 128.00°E 附近, 台风中心与探测中心距离为 576.0 km. 从飞行探测实验时探测中心与台风中心的距离来看, 本次实验探测区域处于台风边缘. 因此, 基于 8 月 5 日探测数据, 开展机载全极化 SAR 台风边缘风矢量的反演研究及比对验证, 对于研究、验证其在复杂天气情况下的海面风矢量探测能力, 丰富复杂天气情况下近海岸海面风场的探测手段具有特殊意义.

鉴于此, 本文将 2012 年 7 月 26 日和 7 月 30 日探测的 150 组 VH 极化归一化雷达截面和对应浮标观测结果作为初始数据, 用于拟合机载全极化 SAR 的 VH 极化海面散射模型; 将 8 月 5 日探测数据中的 VV, VH 极化归一化雷达截面, 极化散射矩阵元素以及对应浮标观测结果作为实验数据, 验证反演方法.

需说明的是, HH 极化归一化雷达截面通过极化率模型校正为 VV 极化归一化雷达截面, 也可反演海面风矢量, 方法与 VV 极化相同, 这里不针对 HH 极化探测数据作专门研究.

## 4 机载全极化 SAR 海面风矢量反演方法研究

根据机载 SAR 高机动性和全极化两个探测特点, 本文提出两种风矢量反演方法, 来实现机载全极化 SAR 探测数据的海面风矢量反演. 一种是基于最大似然估计, 利用 VV 极化探测数据反演海面风矢量, 另一种是基于带约束最优拟合, 利用全极化探测数据反演海面风矢量. 需要指出的是, 两种反演方法中均用到极化散射矩阵元素  $S_{VV}$  和  $S_{VH}$  去除模糊风向.

### 4.1 基于最大似然估计的 VV 极化风矢量反演方法

从 2.2.1 节可知, CMOD5 地球物理模型函数中包含风速、风向和雷达入射角三个未知的地球物理参数调制归一化雷达截面. 在缺乏辅助信息的情况下, 无法通过一幅 SAR 图像中的一组归一化雷达截面和雷达入射角反演出海面风矢量. 针对这一问题, 本文利用机载 SAR 高机动性的特点, 提出一种风矢量反演方法.

依据贝叶斯定理, 已知 B 发生后 A 的条件概率, 与已知 A 发生后 B 的条件概率乘以 A 的边缘概率的比例关系为 [28]

$$P(A|B) \propto P(B|A) \cdot P(A). \quad (7)$$

若将 A 记为真实状态  $x_t$ , B 记为测量值  $y_0$ , 则 (7) 式可表示为

$$P(x_t|y_0) \propto P(y_0|x_t) \cdot P(x_t), \quad (8)$$

式中, 概率  $P(y_0|x_t)$  包含未确定的测量值和传递函数, 可表示为

$$\begin{aligned} P(y_0|x_t) &= P_{of}(y_0 - k_n(x)) \\ &= \int P_0(y_t - y_0) \cdot P_f(y_t - k_n(x)) \cdot dy_t, \end{aligned} \quad (9)$$

这里,  $y_t$  为测量值真值,  $k_n(x)$  为传递函数,  $P_0$  为随机观测误差,  $P_f$  为传递函数误差.

记  $P(x_t|y_0)$  为条件概率  $P_a(x)$ , 其概率函数可写为

$$P_a(x) \propto P_{of}(y_0 - k_n(x)) \cdot P(x_t). \quad (10)$$

若  $P_{of}$  和  $P(x_t)$  的概率分布相互独立,  $P_f$  和  $P_0$  的误差服从高斯分布, 且  $P(x_t)$  未包含除机载 SAR

数据之外的任何信息, 则 (10) 式可改写为

$$\begin{aligned} P_a(x) &\propto \exp \left[ -\frac{1}{2} \{y_0 - k_n(x)\}^T \right. \\ &\quad \left. \times (O + F)^{-1} \{y_0 - k_n(x)\} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $O$  和  $F$  分别为  $P_0$  和  $P_f$  的误差协方差矩阵. 由于  $P_a$  最优解等价于  $-\ln(P_a)$  的最小值, 最大似然估计的代价函数可写为

$$J = \{y_0 - k_n(x)\}^T (O + F)^{-1} \{y_0 - k_n(x)\}, \quad (12)$$

式中,  $y_0$  是包含 VV 极化归一化雷达截面  $\sigma_{VV}^0$  和雷达入射角  $\theta$  的测量值,  $k_n$  为 CMOD5 地球物理模型函数,  $x$  为海面 10 m 高风矢量. 假设 CMOD5 为理想模型, 测量值  $\sigma_{VV}^0$  和  $\theta$  无关, 则利用最大似然估计反演海面风矢量的代价函数可描述为

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma^s - \sigma^{si})^2, \quad (13)$$

这里,  $N$  为观测值数量,  $\sigma^s$  为机载 SAR 探测的 VV 极化归一化雷达截面,  $\sigma^{si}$  为仿真所得 VV 极化归一化雷达截面.

我们知道, 星载散射计通过扇形波束、笔形波束的天线设计, 可同时获得同一观测海域的三个或多个归一化雷达截面和雷达方位角 [28]. 通过增加 CMOD 地球物理模型函数的输入信息, 实现了不借助辅助信息, 直接利用散射计探测数据反演海面风矢量. 根据散射计的设计启示, 结合机载 SAR 高机动性的特点, 我们设计载机作近似等腰直角的三角航线飞行, 形成短时间 (海面风矢量特征基本不变) 探测同一海域的三个方位向天线, 同时获得利用代价函数计算风矢量的三组观测值, 飞行方案如图 4 所示. 图中, 长箭头所指方向表示载机飞行方向, 长箭头和虚直线之间的距离表示载机飞行高度, 沿飞行方向 (1) 探测时, 指向 A, B 箭头分别表示雷达方位向第一个脉冲和最后一个脉冲的探测视向, A, B 之间的距离表示机载 SAR 探测的刈幅宽度, 其余两个飞行方向的探测视向及刈幅宽度与其类似, 红色虚直线区域为按照飞行方案形成的同一探测海域. 此时, 式 (13) 的代价函数可改写为

$$\begin{aligned} J &= \left( \sigma_1^s - \sigma_1^{si} \left( u_{10}, \phi^{wd} - \phi_1^{az}, \theta \right) \right)^2 \\ &\quad + \left( \sigma_2^s - \sigma_2^{si} \left( u_{10}, \phi^{wd} - \phi_2^{az}, \theta \right) \right)^2 \\ &\quad + \left( \sigma_3^s - \sigma_3^{si} \left( u_{10}, \phi^{wd} - \phi_3^{az}, \theta \right) \right)^2, \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $\phi^{wd} - \phi^{az}$  为风向与雷达方位向的夹角  $\phi$ . 一个三角飞行探测区域内, 海面 10 m 高风速  $u_{10}$ 、风

向  $\phi^{wd}$  和雷达入射角  $\theta$  均可认为是固定值。

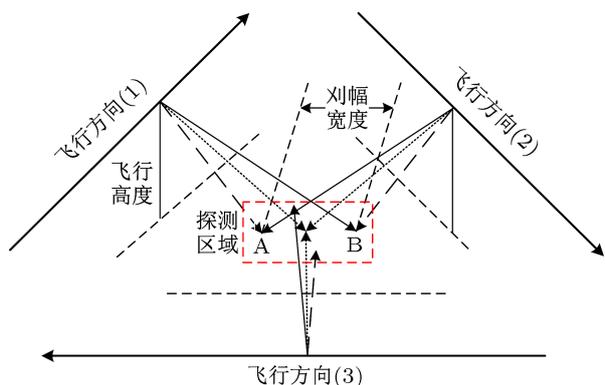


图4 机载 SAR 飞行方案

在完成代价函数构建的基础上, 本文提出基于最大似然估计的 VV 极化风矢量反演方案. 首先, 将雷达入射角、方位角和三个方位向探测的 VV 极化归一化雷达截面输入代价函数; 然后, 采用数值方法在风速 0—30 m/s、风向 0°—360° 范围内 (间隔均为 0.1), 求解每一组风向、风速的代价函数, 选择代价函数最小的 2—4 组风矢量作为反演风矢量; 接着, 计算极化散射矩阵元素  $S_{VV}$  和  $S_{VH}$ , 利用极化相关系数  $\rho_{VVVH}$  与风向的奇对称性去除模糊风向, 得到唯一风矢量; 最后, 将反演结果与浮标观测结果比对分析, 验证反演方法的有效性. 具体流程如图 5 所示.

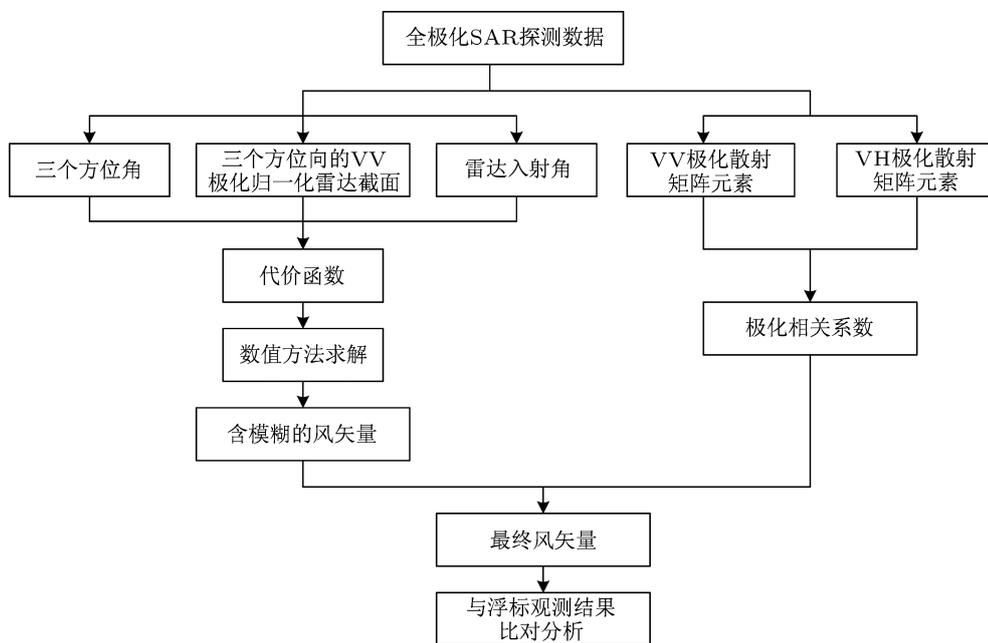


图5 基于最大似然估计的 VV 极化风矢量反演流程

## 4.2 基于带约束最优拟合的全极化风矢量反演方法

依据 2.2.3 节可知, VH 极化归一化雷达截面与风速的关系不依赖于风向和入射角, 仅与风速密切相关. 根据这一规律, Zhang 等设计了 VH 极化海面散射模型. 然而, 对于我国自行设计的机载 SAR, 由于飞行平台, 载荷性能等方面与 RADARSAT-2 SAR 存在显著差异, 使得该模型难以直接应用, 如图 6 所示. 图中虚直线表示 Zhang 等<sup>[19]</sup>拟合模型, 可以看出该模型与机载 SAR 探测数据符合情况较差.

针对这一问题, 本文以 Vachon<sup>[18]</sup>, Zhang<sup>[19]</sup> 等

提出的 VH 极化海面散射模型函数关系为建模基础, 以 RADARSAT-2 SAR VH 极化归一化雷达截面和对应浮标观测结果拟合的模型参数为约束条件, 构建出求解 VH 极化海面散射模型的代价函数, 具体为

$$J = (y - y^{obs})^2 + \lambda_1 (a - a_1)^2 + \lambda_2 (b - b_1)^2, \quad (15)$$

其中,  $y = ax + b$  为本文要拟合的目标模型,  $a, b$  为模型参数,  $y^{obs}$  为机载 SAR 探测的 VH 极化归一化雷达截面, 单位为 dB,  $x^{obs}$  为浮标观测海面 10 m 高风速, 单位为 m/s,  $a_1, b_1$  为约束参数, 分别为 0.580,

35.652,  $\lambda_1, \lambda_2$  为约束条件的权重系数, 这里均取 1.

利用 2012 年 7 月 26 日和 7 月 30 日机载 SAR 探测的 150 组 VH 极化归一化雷达截面和对应浮标观测结果作为初始数据, 采用带约束最优拟合方法, 确定了 VH 极化海面散射模型系数  $a, b$  的值. 为与前文一致, 这里  $y$  记为  $\sigma_{VH}^0$ ,  $x$  记为  $u_{10}$ , 则机载全极化 SAR 的 VH 极化海面散射模型为

$$\sigma_{VH}^0 = 0.3659u_{10} - 34.9948. \quad (16)$$

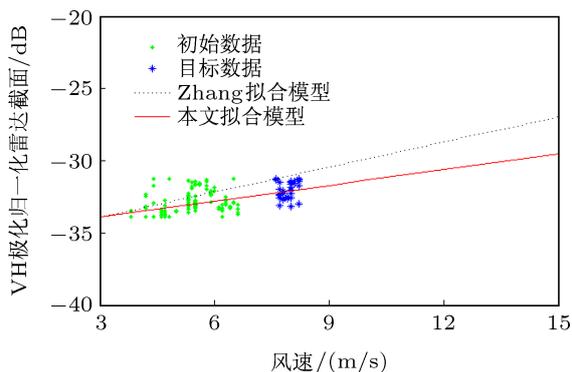


图 6 VH 极化海面散射模型拟合

图 6 中, 绿色点代表 2012 年 7 月 26 日和 7 月 30 日探测数据, 蓝色的代表 8 月 5 日探测数据, 虚线为 Zhang 等拟合模型, 红直线为本文拟合模型. 从图中可以看出, 代表本文拟合模型的红直线与机载 SAR 探测数据符合较好. 这是因为该模型既通过 Zhang 等模型参数的约束, 利用了 RADARSAT-2 SAR VH 极化归一化雷达截面和浮标观测结果的对应关系作为背景信息, 又通过采用机载 SAR 探测的初始数据参与拟合, 使其更为符合机载 SAR 的平台特点.

采用 VH 极化海面散射模型确定风速后, 将风速、雷达入射角和方位角输入 CMOD5 地球物理模型函数<sup>[20]</sup>, 即可计算出四个模糊风向, 如图 7 所示. 图中表明入射角为  $40^\circ$ , 风速为 10 m/s, 确定 VV 极化归一化雷达截面时, 求解出风向在  $0^\circ-360^\circ$  的四个取值, 分别为  $\phi, 180^\circ - \phi, 180^\circ + \phi$  和  $360^\circ - \phi$ .

基于上述研究结果, 本文提出基于带约束最优拟合的全极化风矢量反演方法. 首先, 利用 VH 极化海面散射模型直接反演风速; 然后, 将风速、雷达入射角、方位角和 VV 极化归一化雷达截面输入 CMOD5 地球物理模型函数计算风向; 接着, 计算极化散射矩阵元素  $S_{VV}$  和  $S_{VH}$  的相关系数  $\rho_{VVVH}$ , 利用其与风向的奇对称性去除模糊风向, 得到唯一风

矢量; 最后, 将反演结果与浮标观测结果比对分析, 验证反演方法的有效性. 具体流程如图 8 所示.

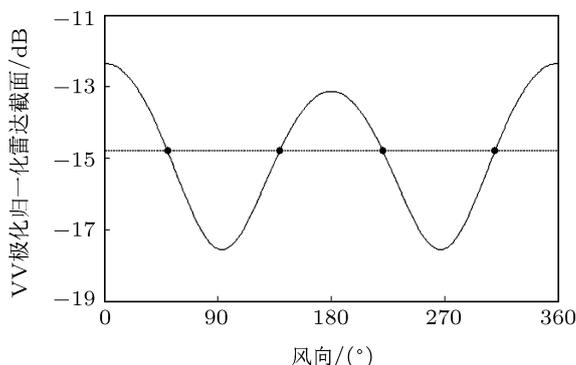


图 7 已知风速情况下, 风向计算结果

## 5 实验结果及分析

### 5.1 台风边缘的机载 SAR 探测特点分析

台风边缘区域的海面风场、空中风场等均与通常情况有所不同. 在这一区域, 机载 SAR 探测海面风矢量时受到的影响主要体现在数据探测、数据定标和反演模型三个方面. 一是数据探测. 空中风场变化增大使得平台稳定性受到影响, 俯仰角、横滚角和偏航角等平台稳定性误差均可影响探测数据质量. 虽然安装了高精度惯导的机载 SAR 可对探测数据进行补偿, 但造成的探测误差不容忽视. 二是数据定标<sup>[29]</sup>. 俯仰角、横滚角和偏航角等平台稳定性误差使得机载 SAR 进行外定标飞行时的姿态难以稳定, 造成传递函数产生误差, 最终导致定标误差增大, 影响了探测数据精度. 三是反演模型, 在复杂气象条件下, VV 极化归一化雷达截面与风向、风速和雷达入射角的关系更为复杂, CMOD5 地球物理模型函数对参数间关系的描述本身存在误差.

综上所述, 在台风边缘区域的复杂气象条件下, 机载全极化 SAR 探测数据反演海面风矢量可采用的方法及其呈现的特点均需通过实验开展研究.

### 5.2 海面风矢量反演结果及分析

本文利用机载 C 波段全极化 SAR 8 月 5 日探测的 32 组数据, 开展海面风矢量反演研究. 采用基于最大似然估计的 VV 极化风矢量反演方法反演时, 将探测所得的 VV 极化归一化雷达截面, 雷达

方位角和入射角输入代价函数,采用数值方法计算海面风矢量,并利用极化相关系数与风向的奇对称性去除模糊风向.风矢量反演结果与浮标观测结果的比对如图9所示.

从反演结果可知,风向反演结果与浮标观测结果的偏差为 $-2.1^\circ$ ,均方根误差为 $18.0^\circ$ ,风速反演结果与浮标观测结果的偏差为 $-0.5\text{ m/s}$ ,均方根误差为 $1.8\text{ m/s}$ .

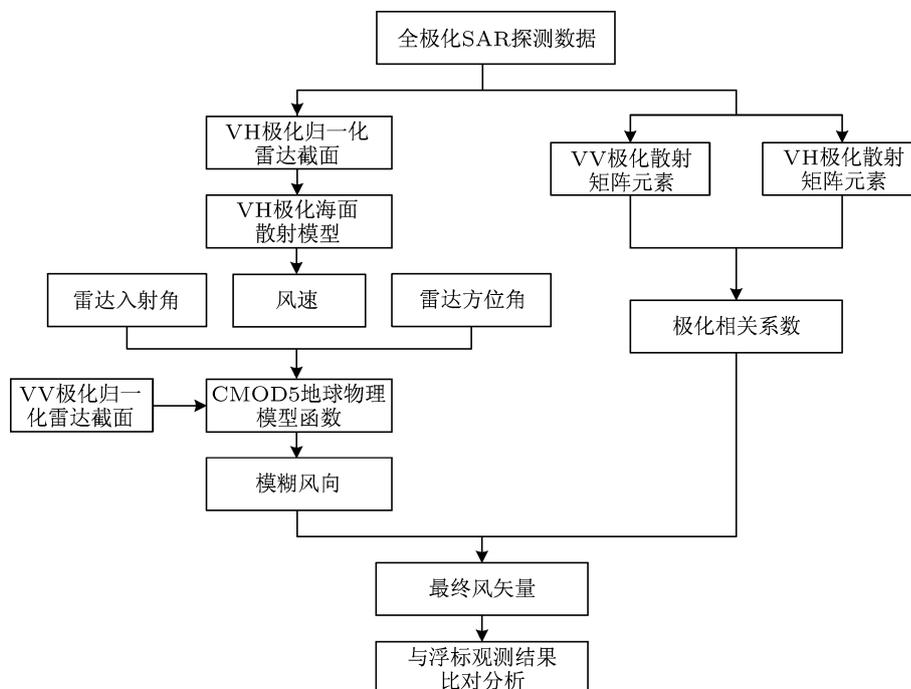


图8 基于带约束最优拟合的全极化风矢量反演流程

采用带约束最优拟合的全极化风矢量反演方法反演时,通过VH极化归一化雷达截面直接计算风速,再将风速、雷达入射角、方位角和VV极化归一化雷达截面输入CMOD5地球物理模型函数计算出四个模糊风向,最后利用极化相关系数与风向的奇对称性去除模糊风向.风矢量反演结果与浮标观测结果的比对如图10所示.

从反演结果可知,风向反演结果与浮标观测结果的偏差为 $2.8^\circ$ ,均方根误差为 $9.3^\circ$ ,风速反演结果与浮标观测结果的偏差为 $-0.1\text{ m/s}$ ,均方根误差为 $1.2\text{ m/s}$ .

可以看出,两种风矢量反演方法的反演结果与浮标观测结果均存在一定误差.分析实验环节,我们认为载机平台运动误差、成像误差、定标误差和反演模型误差是四个主要误差源<sup>[30]</sup>.其中,载机平台运动误差包含平移运动误差和滚动运动误差,影响机载SAR定标精度和仪器稳定性;成像误差包括传递函数参数估计误差、成像处理系统非线性误差和A/D转换误差,降低SAR图像质量,影响探测数据精度;定标误差包含传感器误差和传递函

数误差,影响归一化雷达截面精度;反演模型误差包括地球物理模型函数自身误差和方案选择产生误差,直接影响反演精度.我们知道,实验误差很难完全去除,但在未来研究工作中,若能对平台、传感器和处理设备等探测仪器,以及运动补偿、参数估计、定标和反演方案等数据处理方法进行优化选择和设计,可以减小试验误差,提高海面风矢量反演精度.

进一步分析反演结果可知,两种风矢量反演方法均可实现复杂气象条件下的海面风矢量反演,而以VH极化海面散射模型为核心的全极化风矢量反演方法的反演结果优于以CMOD5地球物理模型为核心的VV极化风矢量反演结果.虽然高空风场的影响使得机载全极化SAR的探测精度和定标精度均受影响,但VH极化海面散射模型仍在复杂的气象条件下体现出较强的适用性.这是因为CMOD5地球物理模型函数中, VV极化归一化雷达截面与风向、风速和雷达入射角均有关,而VH极化海面散射模型中, VH极化归一化雷达截面与风向和雷达入射角无关,仅与风速密切相关,受复

杂气象条件的影响较小.

## 6 结论

极化散射理论表明, 不同极化探测数据对于海面风矢量的响应不同. 本文通过分析全极化 SAR 探测数据与海面风矢量的关系, 设计了全极化 SAR 海面风矢量反演方案. 其中, VV, HH 极化归一化雷达截面可以直接或借助极化率模型, 采用 CMOD 地球物理模型函数反演海面风矢量; VH 极化归一化雷达截面可以利用 VH 极化海面散射模型反演风速, 再采用 CMOD 地球物理模型函数计算风向; 极化相关系数与风向的奇对称性可以去除模糊风向.

依据机载 SAR 高机动性和全极化两个探测特点, 本文提出了基于最大似然估计的 VV 极化风矢量反演方法和基于带约束最优拟合的全极化风矢量反演方法, 实现了不借助辅助信息, 直接利用机载全极化 SAR 探测数据反演海面风矢量.

利用机载全极化 SAR 2012 年 8 月 5 日探测的台风“海葵”边缘风场数据, 开展了复杂气象条件下的海面风矢量反演研究. 研究结果表明, 基于最大似然估计的 VV 极化风矢量反演方法反演风向、风速的均方根误差分别为  $18.0^\circ$ ,  $1.8 \text{ m/s}$ , 基于带约束最优拟合的全极化风矢量反演方法反演风向、风速的均方根误差分别为  $9.3^\circ$ ,  $1.2 \text{ m/s}$ . 两种反演方法均可用于复杂气象条件下的海面风矢量反演, 而后者的反演精度优于前者. 这是因为 VH 极化海面散射模型中, VH 极化归一化雷达截面与风向和雷达入射角无关, 仅与风速密切相关, 散射模型受复杂气象条件的影响较小.

本文研究结果对于开展机载全极化 SAR 海面风矢量的业务化探测, 丰富近海岸复杂气象条件下海洋环境保护方法具有重要作用. 由于实验条件限制, 目前开展的飞行实验航次较少, 未来我们将进一步开展多种气象条件下, 多航次的机载 SAR 海面风矢量探测实验, 进一步验证、完善反演方法. 值得一提的是, 机载全极化 SAR 海洋环境探测实验完成的技术积累, 对于我国自主研发星载全极化 SAR 同样具有意义.

感谢中国电子科技集团公司第三十八研究所提供机载 SAR 探测数据和舟山气象局提供浮标观测结果, 以及两个单位在数据处理过程中的热情帮助.

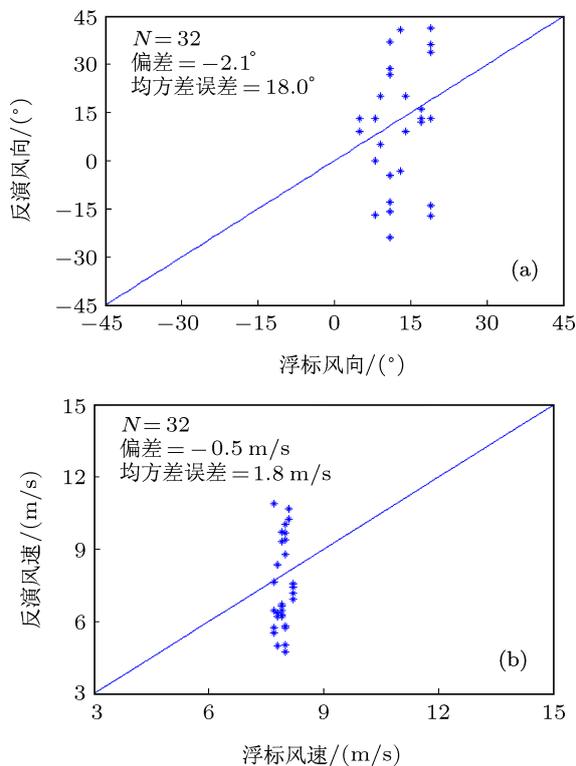


图 9 基于最大似然估计的 VV 极化风矢量反演方法反演结果与浮标观测结果对比 (a) 风向反演结果对比; (b) 风速反演结果对比

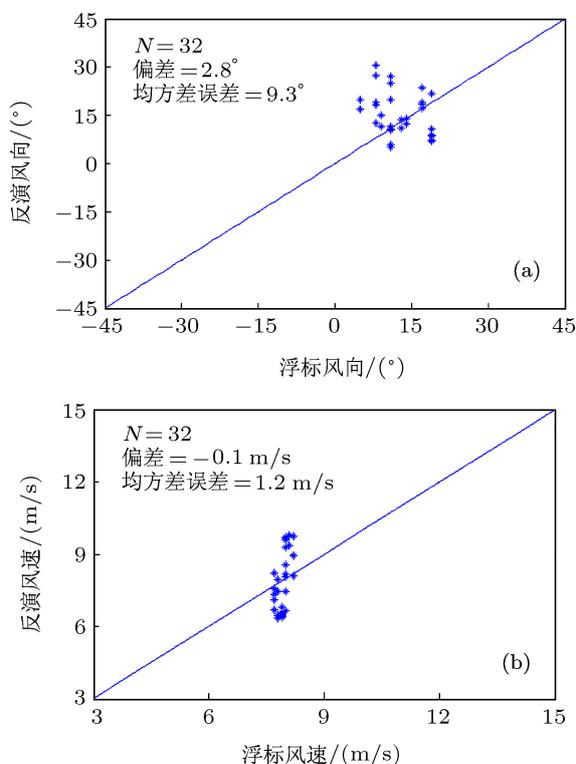


图 10 基于带约束最优拟合的全极化风矢量反演方法反演结果与浮标观测结果对比 (a) 风向反演结果对比; (b) 风速反演结果对比

- [1] He Y J, Perrie W, Zou Q P, Vachon P W 2005 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **43** 1453
- [2] Portabella M, Stoffelen A, Johannessen J A 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 3086
- [3] Martine S 2004 *An introduction to ocean remote sensing* (1st Ed.) (Cambridge: Cambridge University Press) 201–207
- [4] Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T M, Katsaros K, Tournadre J 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 7767
- [5] Stoffelen A, Anderson D 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 5767
- [6] Hersbach H, Stoffelen A, Haan S D 2007 *J. Geophys. Res.* **112** C03006
- [7] Vachon P W, Dobson F W 1996 *The Global Atmosphere and Ocean System* **5** 177
- [8] Yang J S, Huang W G, Zhou C B 2001 *J. Remote Sens.* **5** 13 (in Chinese) [杨劲松, 黄韦良, 周长宝 2001 遥感学报 **5** 13]
- [9] Wolfgang K 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 702
- [10] Zhu H B, Wen B Y, Huang J 2005 *J. Wuhan Univ.* (Nat. Sci. Ed.) **51** 375 (in Chinese) [朱华波, 文必洋, 黄坚 2005 武汉大学学报(理学版) **51** 375]
- [11] Zhang R W, Yan W, Ai W H, Ma S 2011 *J. Microwave* **27** 79 (in Chinese) [张日伟, 严卫, 艾未华, 马烁 2011 微波学报 **27** 79]
- [12] Gladeston C L, Daniela M U, Fátima N S 2010 *Sensors* **10** 5994
- [13] Kong Y, Zhao X B, Ai W H, Han D, Xue J 2011 *Journal of PLA University of Science and Technology* (Natural Science Edition) **12** 301 (in Chinese) [孔毅, 赵现斌, 艾未华, 韩丁, 薛剑 2011 解放军理工大学学报(自然科学版) **12** 301]
- [14] Ai W H, Kong Y, Zhao X B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148403 (in Chinese) [艾未华, 孔毅, 赵现斌 2012 物理学报 **61** 148403]
- [15] Li X, Zheng W, Yang X, Li Z, Pichel W G 2011 *J. Geophys. Res.* **116** C02014
- [16] Yang X, Li X, Pichel W G, Li Z 2011 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **49** 4743
- [17] Levy G, Brown R A 1998 *Detecting planetary boundary layer rolls from SAR. Remote Sensing of the Pacific Ocean from Satellites*, Brown R A, Ed., 128–134
- [18] Vachon P W, Wolfe J 2011 *IEEE Geosci. Remote Sens. Letters* **8** 456
- [19] Zhang B, Perrie W 2012 *American Meteorological Society* **93** 531
- [20] Zhang B, Perrie W, Vachon P W, Li X F, Pichel W G, Guo J, He Y J 2012 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **50** 4252
- [21] Hwang P A, Zhang B A, Toporkov J V, Perrie W 2010 *J. Geophys. Res.* **115** C08019
- [22] Chen X 2008 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [陈曦 2008 博士学位论文(北京: 中国科学院遥感应用研究所)]
- [23] Jin Y Q, Xu F 2008 *Theory and Approach for Polarimetric Scattering and Information Retrieval of SAR Remote Sensing* (1st Ed.) (Beijing: Science Press) p3 (in Chinese) [金亚秋, 徐丰 2008 极化散射与 SAR 遥感信息理论与方法(第1版)(北京: 科学出版社) 第3页]
- [24] Jochen H, Wolfgang K 2005 *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** 508
- [25] Bergeron T, Bernier M, Chokmani K, Lessard-Fontaine A, Lafrance G, Beaucage P 2011 *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **4** 896
- [26] Mouche A A, Hauser D, Daloz J F, Guérin C 2005 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **43** 753
- [27] Zhang B, Perrie W, He Y J 2011 *J. Geophys. Res.* **116**, C08008
- [28] Stoffelen A, Redaño A 2002 *Wind Field Retrieval from Satellite Radar Systems* (1st Ed.) (Amsterdam: Ponsen & Looijen BV) 29–58
- [29] Zhao X B, Kong Y, Yan W, Ai W H, Liu W J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148404 (in Chinese) [赵现斌, 孔毅, 严卫, 艾未华, 刘文俊 2012 物理学报 **61** 148404]
- [30] Ge Y, Wang J F 2000 *Geo-Information Science* **2** 28 (in Chinese) [葛咏, 王劲峰 2000 地球信息科学 **2** 28]

# Theoretical research and experimental verification for ocean surface wind vector retrieval from airborne C-band fully polarimetric SAR\*

Zhao Xian-Bin Yan Wei<sup>†</sup> Kong Yi Han Ding Liu Wen-Jun

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 27 January 2013; revised manuscript received 12 March 2013)

## Abstract

Ocean surface wind vector retrieval research on airborne fully polarimetric SAR (synthetic aperture radar) is of great significance for wind vector sounding under complex weather conditions near the coast. Starting from polarization scattering theory, we designed an ocean surface wind vector retrieval scheme for fully polarimetric SAR, by analyzing the relationship between fully polarimetric SAR sounding data and ocean surface wind vector. According to the high mobility and fully polarimetric two sounding characteristics of airborne SAR, firstly, we presented an ocean surface wind vector retrieval method based on maximum likelihood estimates for VV-polarized sounding data, and designed the flight experiment scheme. Secondly, we proposed an ocean surface wind vector retrieval method for VH-polarized sounding data, retrieved wind speed by VH-polarized ocean surface scattering model from optimum fitting with constraints, and calculated wind direction by CMOD5 geophysical model function. Using typhoon “Haikui” edge sounding data from airborne fully polarimetric SAR, we carried out the ocean surface wind vector retrieval experimental research. Results show that two wind vector retrieval methods can retrieve ocean surface wind vector under complex weather conditions without auxiliary information. Wind direction and wind speed retrieval root mean square errors of the former are  $18.0^\circ$ , 1.8 m/s, wind direction and wind speed retrieval root mean square errors of the latter are  $9.3^\circ$ , 1.2 m/s, and the accuracy of the latter is better than that of the former. The VH-polarized normalized radar cross section is more suitable for ocean surface wind vector retrieval under complex weather conditions, because it is independent of wind direction and radar incidence angle but has a linear relationship with respect to wind speed.

**Keywords:** airborne fully polarimetric SAR, ocean surface wind vector, theoretical research, experimental verification

**PACS:** 84.40.Xb, 92.60.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.62.138402

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41076118).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: weiyang2002net@yahoo.com