

# 机载合成孔径雷达海面风场探测辐射定标精度要求研究\*

赵现斌<sup>†</sup> 孔毅 严卫 艾未华 刘文俊

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2011年11月11日收到; 2011年12月16日收到修改稿)

复杂的机载合成孔径雷达系统使得探测精度要求研究难以系统有效. 依据辐射定标精度在机载合成孔径雷达海面风场探测信息流程中的作用, 提出通过辐射定标精度要求整体考察系统探测精度要求的研究方法, 仿真研究了CMOD4地球物理模型函数的参数关系, 系统地确定出不同入射角和风向条件下机载合成孔径雷达海面风场探测的辐射定标精度要求. 研究表明, 辐射定标精度要求随着入射角的增加而降低, 且随着风向变化呈周期性变化, 这一规律与CMOD4地球物理模型函数中由风速变化引起的后向散射截面变化值的变化规律一致. 依据这一规律, 研究发现通过采用有源定标器定标、设计载机做侧风飞行以及选择大入射角的探测图像作为反演图像区这三种手段, 能够提高风速反演精度.

**关键词:** 机载合成孔径雷达, 海面风场, 辐射定标精度要求, 仿真模式

**PACS:** 84.40.Xb, 92.60.Gn, 93.85.Pq

## 1 引言

发展机载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, 简记为 SAR) 海面风场探测技术, 获取高精度的海面风场信息, 是实现区域海洋环境精细化探测的重要环节. 针对这一需求, 孔毅等<sup>[1]</sup>开展了基于墨西哥帽小波变换的机载 SAR 海面风场反演研究, 从机载 SAR 探测数据中反演出了高空间分辨率的海面风场信息, 验证了采用机载 SAR 探测海面风场的可行性.

若要进一步开展机载 SAR 海面风场探测业务, 机载 SAR 系统的探测精度必须得到有效保证. 明确探测精度达到何种指标可以满足海面风场反演要求, 对于机载 SAR 海面风场探测技术研究具有重要意义. 然而, 机载 SAR 探测系统的载机平台、地面站以及 SAR 载荷等均包含着复杂的子系统<sup>[2,3]</sup>. 直接针对系统探测精度要求的研究, 如葛咏和王劲

峰<sup>[4]</sup>提出的利用机理辅以数据分析确定 SAR 的不确定性, 进而建立误差传递模型来研究探测精度的方法. 由于误差传递模型在系统误差源较复杂的情况下难以准确建立, 目前仅处于定性研究阶段.

作为探测数据用户, 我们更关注整个机载 SAR 系统的探测精度, 可以通过考察系统端到端的性能来整体考察探测精度要求, 从而避免复杂的子系统性能分析. 我们注意到, 辐射定标过程是指标定 SAR 系统端到端性能的过程, 辐射定标精度反映了探测值偏离真实值的程度, 因此可以考虑利用辐射定标精度来考察机载 SAR 系统的探测精度能否满足海面风场反演要求<sup>[2,3,5]</sup>. Freeman<sup>[6]</sup>初步给出了 SAR 探测海面风速、波高等海洋环境要素时的辐射定标精度, 认为 SAR 探测风速的误差小于风速大小的 20% 时, 它的绝对定标精度、相对定标精度 (长期和短期) 均为 1.0 dB. 国内席育孝<sup>[7]</sup>在其硕士论文中引用了该要求. 但 Freeman 的研究未能给出辐射定标精度计算的具体方法, 且风速反演精

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41076118) 和中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验基金 (批准号: KDW1105) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhaoxb2010@gmail.com

度要求与国际上公认的海面风场反演精度要求(风速测量范围 3—20 m/s: 风速反演精度为 2 m/s; 风速测量范围 20—30 m/s: 反演精度为风速值的 10%; 风速测量范围 3—30 m/s: 风向反演精度为  $20^\circ$ ) 不一致, 同时缺乏在机载 SAR 特有的多风向和宽入射角范围条件下, 对辐射定标精度要求的系统研究, 不能作为机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求.

本文系统分析了辐射定标精度在机载 SAR 海面风场探测信息流程中的作用, 提出了通过辐射定标精度要求整体考察机载 SAR 系统探测精度要求的研究方法. 按照海面风场反演精度要求划分了研究范围, 利用 CMOD4 地球物理模型函数详细考察了机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求, 分析了其随风向和入射角变化的规律, 并进一步研究了机载 SAR 海面风场探测的三个关键技术.

## 2 辐射定标精度要求研究方法分析

### 2.1 辐射定标理论

辐射定标是指标定 SAR 系统端到端性能, 建立 SAR 图像与目标后向散射截面精确关系的过程, 以便通过地球物理处理方法来分析目标区域的性质(如风矢量、海浪高度和土壤湿度等). 辐射定标包括内定标和外定标. 内定标是指通过固定设备注入定标信号到雷达数据流中, 以标定雷达系统性能的过程. 外定标是指通过地面目标产生或反射的定标信号, 以标定 SAR 系统性能的过程. 通过测量 SAR 系统的定标常数和系统传递函数, 确定出目标的雷达截面积, 用该雷达截面积除以分辨单元面积得到后向散射截面, 从而得到 SAR 图像上的灰度值与绝对雷达散射截面的一一对应关系. 高精度的 SAR 数据处理既需要外定标来估计系统端

到端的性能, 标定系统的绝对增益, 又需要内定标监视系统在两次外定标间隔内的相对漂移<sup>[2,3,5]</sup>.

目前, 国际上星载 SAR 系统的内定标精度较高, 可达 0.2 dB<sup>[5]</sup>. 相对于星载 SAR, 机载 SAR 的温度环境比较稳定, 增益变化曲线平稳, 对内定标的要求较低, 因此本文的辐射定标精度要求研究不考虑内定标.

机载 SAR 外定标的目标可分为无源目标和有源目标. 其中, 无源定标器指角反射器、球和正方形平板等, 其理论设计精度约为 1.0 dB, 国内实际精度约为 1.5 dB, 它的优点是简单、高效、成本低, 缺点是响应比较窄, 对雷达定向非常敏感, 噪声和背景杂波对定标的干扰大<sup>[5,8]</sup>. 有源定标器是一种转发器, 它接收来自雷达发射来的信号, 经放大器放大后再发射回雷达, 其理论设计精度约为 0.5 dB, 国内实际精度约为 0.7 dB, 它的优点是能提供很高的信号杂波比, 在方位向和距离向都有很好的波束宽度、高的稳定度以及好的参考标准, 缺点是参数可能随时间、温度发生漂移, 造价和维护成本高<sup>[5,9]</sup>. 外定标精度直接决定了机载 SAR 系统的探测精度, 是影响海面风场反演精度的关键因素. 本文的辐射定标精度主要指外定标精度.

### 2.2 研究方法分析

机载 SAR 探测海面风场时, 首先在特定信号参数的条件下, 按照一定的重复频率向海面发、收脉冲, 获得具有多普勒相位和距离徙动的表示海面风场特性的回波信号, 然后对接收到的回波信号进行辐射定标处理、成像处理、几何校正处理以及相干斑抑制等处理, 获得表示后向散射截面的 SAR 图像, 最后采用地球物理模型函数反演获取海面风场信息<sup>[2,3]</sup>.

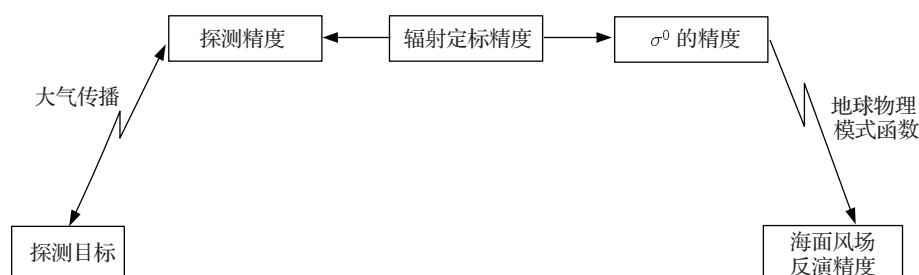


图1 辐射定标精度在机载 SAR 海面风场探测信息流程中的作用

在机载 SAR 海面风场探测的信息流程中, 依据辐射定标的定义, 辐射定标精度从端到端的角度确定了机载 SAR 系统的探测精度, 同时直接决定了后向散射截面 ( $\sigma^0$ ) 的精度, 而海面风场反演精度又通过地球物理模型函数与后向散射截面精度相联系. 辐射定标精度在机载 SAR 海面风场探测信息流程中的作用如图 1 所示.

依据上述分析, 辐射定标精度要求既整体考察了机载 SAR 系统的探测精度要求, 又反映了探测用户对海面风场反演的精度要求, 通过研究辐射定标精度要求能够考察机载 SAR 海面风场探测系统的探测精度要求. 另外, 辐射定标精度要求又与辐射定标方案选择、飞行方案设计等具体技术方案密切相关, 在机载 SAR 海面风场探测研究中具有特殊意义.

### 3 仿真模式

利用 SAR 图像反演海面风场时, 可以利用快速 Fourier 变换法、局部梯度法和小波法等方法直接通过风条纹确定风向<sup>[10-14]</sup>, 再将所得风向输入地球物理模型函数计算风速<sup>[15-19]</sup>. 然而, 由于机载 SAR 图像中不一定存在风条纹, 在实际研究中, 通常直接采用数值预报结果作为输入风向, 再利用地球物理模型函数计算风速<sup>[12,13]</sup>. 鉴于此, 本文在机载 SAR 海面风场探测辐射定标精度要求研究中, 暂不考虑风向反演的精度要求, 仅考虑风速反演的精度要求.

CMOD 系列地球物理模型函数是目前 C 波段 SAR 数据反演风速的主要模式. 它在假定后向散射截面与风速成正比的基础上, 通过长期统计后向散射截面与相应位置的浮标或数值预报结果资料得出相关系数, 最终确立了后向散射截面与风向、风速和入射角的函数关系. 其一般表达式为<sup>[20]</sup>

$$\sigma_0 = A(\theta) u^{\gamma(\theta)} (1 + B(u, \theta) \cos(\phi) + C(u, \theta) \cos 2\phi), \quad (1)$$

其中,  $u$  为海面 10 m 高风速,  $\phi$  为风向相对于雷达视向的夹角,  $\theta$  为雷达相对于海面的入射角,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  和  $\gamma$  为由雷达频率和极化决定的系数.

其中, 由欧洲中长期预报中心提供的 CMOD4 地球物理模型函数已经在星载 SAR 上业务化应用. 在风向和入射角确定时, 我们认为该模型函数准确

无误地提供了风速与后向散射截面的一一对应关系, 利用它能够通过风速反演精度要求获得后向散射截面的精度要求, 进而选择出辐射定标精度要求.

## 4 辐射定标精度要求仿真研究

### 4.1 方案设计

基于前文研究方法分析所得结论, 利用仿真模式, 开展机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求研究, 研究方案流程如图 2 所示. 从仿真研究 CMOD4 地球物理模型函数的参数关系出发, 利用风速反演的精度要求获取后向散射截面的精度要求, 进而确定机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求, 并在系统分析辐射定标精度要求变化规律的基础上, 开展机载 SAR 海面风场探测的三个关键技术研究, 主要步骤如下.

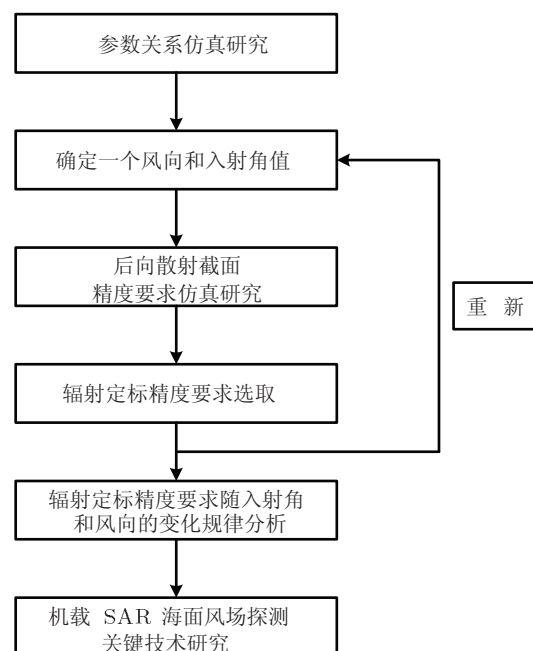


图 2 研究方案流程

1) 仿真研究入射角、风向和风速三个参数与后向散射截面之间的函数关系, 了解每一个参数变化时后向散射截面的变化规律.

2) 在某一特定的风向和入射角条件下, 仿真研究风速 3—20 m/s 范围内, 每一个整数风速的反演误差为  $\pm 2$  m/s 时, 后向散射截面的精度要求, 以及风速 21—30 m/s 范围内, 每一个整数风速的反演误差为  $\pm 10\%$  时, 后向散射截面的精度要求, 再从获取的后向散射截面精度要求中, 选取最小值 (精度

要求最高) 作为辐射定标精度要求.

3) 重新给定一个风向和入射角值 (风向取  $0^\circ$ — $359^\circ$  范围内的整数, 入射角取  $20^\circ$ — $60^\circ$  范围内的整数), 重复 2) 过程, 确定不同风向和入射角条件下机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求, 并进一步分析.

4) 依据辐射定标精度要求随入射角和风向的变化规律, 开展机载 SAR 海面风场探测的三个关键技术研究.

### 4.2 参数关系研究

本文分别考察入射角、风向和风速三个参数与后向散射截面的函数关系, 了解其变化规律. 我们取风向范围为  $0^\circ$ — $359^\circ$  (风向与雷达视向的夹角), 入射角范围为  $20^\circ$ — $60^\circ$  (机载 SAR 入射角的设计指标), 风速范围为  $3$ — $30$  m/s.

首先考察入射角变化对后向散射截面的影响. 我们从  $0^\circ$ — $359^\circ$  范围内取风向为  $90^\circ$ , 从  $3$ — $30$  m/s 范围内取风速为  $3$  m/s,  $10$  m/s,  $20$  m/s 和  $30$  m/s, 仿真研究入射角与后向散射截面的函数关系.

从图 3 中可以看出, 当风向和风速固定时, 后向散射截面随着入射角的增加而减小. 值得注意的是, 当风向固定时, 由风速变化引起的后向散射截面变化值随着入射角的增加而增加.

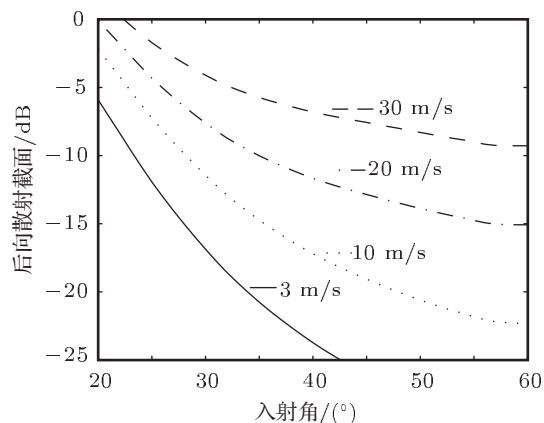


图 3 入射角与后向散射截面的函数关系

其次考察风向变化对后向散射截面的影响. 本文从  $20^\circ$ — $60^\circ$  范围内取入射角为  $40^\circ$ , 从  $3$ — $30$  m/s 范围内均匀取风速为  $10$  m/s,  $20$  m/s 和  $30$  m/s (风速为  $3$  m/s 时不能考察整个入射角范围, 在这里不考虑), 仿真研究风向与后向散射截面的函数关系.

从图 4 中可以看出, 当风速和入射角固定时, 后向散射截面随着风向呈周期性变化, 近似为余弦

函数关系. 值得注意的是, 当入射角固定时, 风向范围为  $0^\circ$ — $90^\circ$ ,  $180^\circ$ — $270^\circ$  时, 由风速变化引起的后向散射截面变化值随着风向的增加而增加; 风向范围为  $90^\circ$ — $180^\circ$ ,  $270^\circ$ — $359^\circ$  时, 由风速变化引起的后向散射截面变化值随着风向的增加而减小.

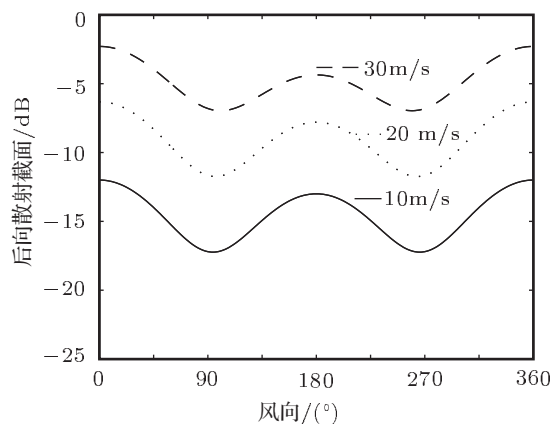


图 4 风向与后向散射截面的函数关系

最后考察风速变化对后向散射截面的影响. 根据前两个参数的单调性和周期性变化规律, 本文从  $20^\circ$ — $60^\circ$  入射角范围内取中间值为  $40^\circ$ , 从  $0^\circ$ — $359^\circ$  范围内取风向为  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  和  $180^\circ$ , 仿真研究风速与后向散射截面的函数关系.

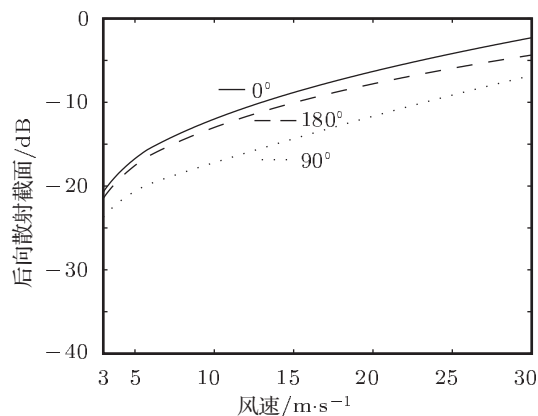


图 5 风速与后向散射截面的函数关系

从图 5 中可以看出, 当风向和入射角固定时, 风速与后向散射截面近似为线性关系. 因此, 在辐射定标精度要求的仿真研究中, 可以对风速均匀取值.

### 4.3 仿真研究

按照海面风场反演的精度要求, 将研究范围分为  $3$ — $20$  m/s 和  $21$ — $30$  m/s 两部分.

在给定风向和入射角的条件下, 仿真研究 3—20 m/s 风速范围内, 每个整数风速 (3, 4, 5, …, 20) 的误差范围为  $\pm 2$  m/s 时, 后向散射截面的精度要求, 并从中选取最小值作为此条件下机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求.

重复上述过程, 风向逐一取  $0^\circ$ — $359^\circ$  范围内的整数值, 入射角逐一取  $20^\circ$ — $60^\circ$  范围内的整数值, 仿真获取 3—20 m/s 风速范围内机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求, 如图 6 所示.

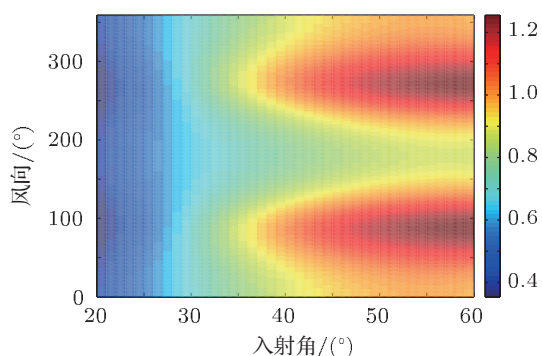


图 6 3—20 m/s 风速范围内机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求

由图 6 可知, 3—20 m/s 风速范围内机载 SAR 海面风场探测辐射定标精度要求的数值范围为 0.35—1.25 dB, 且其变化规律与入射角和风向密切相关. 从入射角的变化看, 辐射定标精度要求随着入射角的增加而降低. 当入射角范围为  $20^\circ$ — $25^\circ$  时, 辐射定标精度要求在 0.35—0.5 dB 之间; 当入射角范围为  $25^\circ$ — $30^\circ$  时, 辐射定标精度要求在 0.5—0.7 dB 之间; 当入射角范围为  $30^\circ$ — $40^\circ$  时, 辐射定标精度要求在 0.7—1.0 dB 之间; 当入射角范围为  $40^\circ$ — $60^\circ$  时, 辐射定标精度要求在 0.8—1.25 dB 之间. 从风向的变化看, 辐射定标精度要求随着风向的变化呈周期性变化. 当风向范围为  $0^\circ$ — $90^\circ$ ,  $180^\circ$ — $270^\circ$  时, 辐射定标精度要求随着风向的增加而降低; 当风向范围为  $90^\circ$ — $180^\circ$ ,  $270^\circ$ — $359^\circ$  时, 辐射定标精度要求随着风向的增加而升高.

值得注意的是, 在入射角范围为  $30^\circ$ — $60^\circ$  条件下, 风向范围为  $140^\circ$ — $220^\circ$  时, 辐射定标精度要求与其他风向段的相比最高, 数值在 0.7—0.9 dB 之间; 风向范围为  $320^\circ$ — $40^\circ$  时, 辐射定标精度要求与其他风向段的相比较低, 数值在 0.7—1.0 dB 之间; 风向范围为  $40^\circ$ — $140^\circ$  和  $220^\circ$ — $320^\circ$  时, 辐射定标精度要求与其他风向段的相比最低, 数值在 0.7—1.25 dB 之间.

21—30 m/s 风速范围内机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求研究过程与上文相似, 区别在于这里在给定风向和入射角条件下, 仿真研究 21—30 m/s 风速范围内, 每个整数风速 (21, 22, 23, …, 30) 的误差范围为风速的  $\pm 10\%$  时, 后向散射截面的精度要求, 研究结果如图 7 所示.

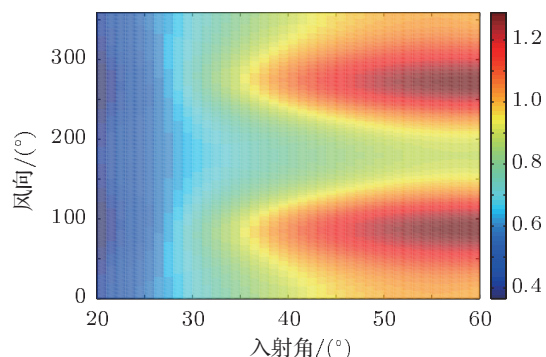


图 7 21—30 m/s 风速范围内机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求

由图 7 可知, 21—30 m/s 风速范围内机载 SAR 海面风场探测辐射定标精度要求的数值范围为 0.35—1.25 dB, 其变化规律同样与入射角和风向密切相关, 且与前文的变化规律相同. 不同的是, 当入射角范围为  $20^\circ$ — $26^\circ$  时, 辐射定标精度要求在 0.35—0.5 dB 之间; 当入射角范围为  $26^\circ$ — $30^\circ$  时, 辐射定标精度要求在 0.5—0.7 dB 之间.

由上文仿真研究结果可知, 两个风速段的辐射定标精度要求基本相同, 且均随着入射角的增加而降低, 随着风向的变化呈周期性变化. 从图 3 和图 4 可知, 这一规律与 CMOD4 地球物理模型函数中风速变化引起的后向散射截面变化值的变化规律一致.

利用辐射定标精度要求随入射角和风向的变化规律, 可以开展机载 SAR 海面风场探测关键技术研究.

## 5 机载 SAR 海面风场探测关键技术研究

### 5.1 辐射定标方案选择

辐射定标精度直接决定了机载 SAR 系统的探测精度, 选择合适的定标方案, 对于开展机载 SAR 海面风场探测具有重要意义.

按照有源定标器、无源定标器的理论设计和国内实际精度将辐射定标精度分为 0.5 dB, 0.7 dB,

1.0 dB 和 1.5 dB 四个考察点. 从 4.3 节仿真研究可知, 机载 SAR 探测海面风场时, 有源定标器的理论设计精度可满足入射角  $26^{\circ}$ — $60^{\circ}$  范围内的辐射定标精度要求, 国内实际精度可满足入射角  $30^{\circ}$ — $60^{\circ}$  范围内的辐射定标精度要求; 无源定标器的理论设计精度可满足入射角  $35^{\circ}$ — $60^{\circ}$ , 风向  $40^{\circ}$ — $140^{\circ}$ ,  $220^{\circ}$ — $320^{\circ}$  范围内的辐射定标精度要求, 国内实际精度不能满足辐射定标精度要求.

依据上述分析, 结合 2.1 节两类定标器的特点, 我们认为无源定标器虽然成本低, 实现方案简单, 但其精度无法满足机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求. 机载 SAR 海面风场探测必须采用有源定标器定标.

## 5.2 飞行方案设计

载机飞行方向影响着辐射定标精度要求, 设计恰当的飞行方案, 对于提高风速反演精度具有重要作用.

按照风向与雷达视向的夹角, 载机飞行方向可分为顺风飞行 (风向与雷达视角为  $180^{\circ}$  左右)、侧风飞行 (风向与雷达视角为  $90^{\circ}$ ,  $270^{\circ}$  左右) 和逆风飞行 (风向与雷达视角为  $0^{\circ}$  左右). 入射角范围为  $30^{\circ}$ — $60^{\circ}$  时, 在飞行准备和定标方案等探测条件相同的情况下, 选择辐射定标精度要求最低的侧风飞行, 反演风速的精度最高; 选择辐射定标精度要求较高的逆风飞行, 反演风速的精度较高; 选择辐射定标精度要求最高的顺风飞行, 反演风速的精度最低.

依据上述分析, 开展机载 SAR 海面风场探测时, 设计载机做侧风飞行, 有利于提高风速反演精度.

## 5.3 反演图像区选择

入射角影响着探测图像的辐射定标精度要求, 选择入射角范围合理的探测图像, 对于确保风速反演精度具有重要作用.

在飞行方向和定标方案等探测条件相同的条件下, 入射角  $20^{\circ}$ — $30^{\circ}$  范围内探测图像的辐射定标精度要求最高, 反演风速的精度最低, 不宜将其作为反演图像区; 入射角  $30^{\circ}$ — $50^{\circ}$  范围内探测图像的辐射定标精度要求较高, 反演风速的精度较高, 适合作为反演图像区; 入射角  $50^{\circ}$ — $60^{\circ}$  范围内探测图像的辐射定标精度要求最低, 反演风速的精度

最高, 但在该区域机载 SAR 接收到的反射信号弱, 探测图像质量较差, 应该选择图像质量较好的区域作为反演图像区.

依据上述分析, 反演海面风场时, 选择大入射角的探测图像可以确保风速反演的精度.

## 6 结论

本文依据辐射定标精度在机载 SAR 海面风场探测信息流程中的作用, 提出了通过辐射定标精度整体考察机载 SAR 系统探测精度能否满足海面风场反演要求的研究方法, 从用户需求出发解决了机载 SAR 探测精度要求的获取问题. 利用 CMOD4 地球物理模型函数开展了仿真研究, 系统确定出不同入射角和风向条件下机载 SAR 海面风场探测的辐射定标精度要求, 并在此基础上开展了机载 SAR 海面风场探测的三个关键技术研究.

CMOD4 地球物理模型函数的参数关系仿真研究表明, 后向散射截面随着入射角的增加而减小, 随着风向变化呈周期性变化, 与风速近似为线性关系. 后向散射截面与风速的近似线性关系是辐射定标精度要求仿真研究中风速均匀取值的理论依据.

辐射定标精度要求仿真研究结果表明, 辐射定标精度要求随着入射角的增加而降低, 且随着风向变化呈周期性变化. 这一变化规律与 CMOD4 地球物理模型函数中由风速变化引起的后向散射截面变化值的变化规律一致.

关键技术研究结果表明, 采用有源定标器定标, 设计载机做侧风飞行以及选择大入射角的探测图像有利于提高风速反演精度. 上述结论由辐射定标精度要求随入射角和风向的变化规律分析得到.

本文的研究对于发展机载 SAR 海面风场探测技术, 提高探测精度具有重要作用. 由于目前条件限制, 文中仅开展了机载 SAR 海面风场探测辐射定标精度要求的仿真研究. 在下一步的机载 SAR 海面风场探测试验中, 将按照本文的研究结论设计试验方案, 开展辐射定标精度要求研究结论的试验验证以及更为细致的关键技术研究, 为发展机载 SAR 海面风场探测业务提供理论支持. 本研究对机载 SAR 探测海浪、海洋内波的研究具有借鉴意义.

感谢中国电子科技集团公司第三十八研究所王立刚高级工程师提供国内辐射定标精度实际指标和机载 SAR 入射角设计

指标,以及在辐射定标理论方面的热情帮助.

附录 CMOD4 地球物理模型函数具体形式为 [19]

$$\sigma^0 = 10^{a+bf_1(V+c)} b_r (1 + b_1 \cos \phi + b_3 \tanh b_2 \cos 2\phi)^{1.6}, \quad (2)$$

式中,  $\sigma^0$  表示 VV 极化后向散射截面,  $\phi$  表示风向相对于雷达视向的夹角, 函数  $f_1(y)$  为分段函数:

$$f_1(y) = \begin{cases} 0 & y \leq 0, \\ \log_{10} y & 0 < y \leq 5, \\ \sqrt{y}/3.2 & y > 5. \end{cases} \quad (3)$$

$a, b, c, b_1, b_2$  和  $b_3$  可展开为 18 个系数的 Legendre 多项式, 具体为

$$a = c_1 + c_2 P_1 + c_3 P_2, \quad (4)$$

$$b = c_4 + c_5 P_1 + c_6 P_2, \quad (5)$$

$$c = c_7 + c_8 P_1 + c_9 P_2, \quad (6)$$

$$b_1 = c_{10} + c_{11} V + (c_{12} + c_{13} V) f_2(x), \quad (7)$$

$$f_2(x) = \tanh [2.5(x + 0.35)] - 0.61(x + 0.35), \quad (8)$$

$$b_2 = c_{14} + c_{15} (1 + P_1) V, \quad (9)$$

$$b_3 = 0.42 [1 + c_{16} (c_{17} + P_1) (c_{18} + V)], \quad (10)$$

以上各式中, Legendre 多项式为

$$P_1 = x, \quad (11)$$

$$P_2 = (3x^2 - 1)/2, \quad (12)$$

参数  $x$  为  $\theta$  的函数:

$$x = (\theta - 40)/25. \quad (13)$$

其中,  $V$  表示海面 10 m 高风速,  $\theta$  表示雷达相对于海面的入射角, 系数  $c_1$ — $c_{18}$  的值见表 1, 不同入射角  $\theta$  对应的修正因子  $b_r$  值见表 2.

表 1 地球物理模型函数中的  $c_1$ — $c_{18}$  系数值

系数	数值	系数	数值	系数	数值
$c_1$	-2.301523	$c_7$	-1.015244	$c_{13}$	0.004023
$c_2$	-1.632686	$c_8$	0.342175	$c_{14}$	0.148810
$c_3$	0.761210	$c_9$	-0.500786	$c_{15}$	0.089286
$c_4$	1.156619	$c_{10}$	0.014430	$c_{16}$	-0.006667
$c_5$	0.595955	$c_{11}$	0.002484	$c_{17}$	3.000000
$c_6$	-0.293819	$c_{12}$	0.074450	$c_{18}$	-10.00000

表 2 不同入射角  $\theta$  对应的  $b_r$  值

$\theta/(^\circ)$	$b_r$	$\theta/(^\circ)$	$b_r$	$\theta/(^\circ)$	$b_r$	$\theta/(^\circ)$	$b_r$	$\theta/(^\circ)$	$b_r$
16	1.075	25	0.979	34	0.937	43	1.033	52	1.016
17	1.075	26	0.967	35	0.944	44	1.042	53	1.002
18	1.075	27	0.958	36	0.955	45	1.050	54	0.989
19	1.072	28	0.949	37	0.967	46	1.054	55	0.965
20	1.069	29	0.941	38	0.978	47	1.053	56	0.941
21	1.066	30	0.934	39	0.988	48	1.052	57	0.929
22	1.056	31	0.927	40	0.998	49	1.047	58	0.929
23	1.030	32	0.923	41	1.009	50	1.038	59	0.929
24	1.004	33	0.930	42	1.021	51	1.028	60	0.929

- [1] Kong Y, Zhao X B, Ai W H, Han D, Xue J 2011 *J. PLA Univ. Sci. Technol. (Nat. Sci. 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]
- [2] Curlander J C, McDonough R N (Translated by Han C Z, Wen J P) 2006 *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing* (1st Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp215–228 (in Chinese) [Curlander J C, McDonough R N 著, 韩传钊等译, 文江平 审校 2006 合成孔径雷达——系统与信号处理 (第1版)(北京: 电子工业出版社) 第215—228页]
- [3] Curlander J C, McDonough R N 1991 *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing* (1st Ed.) (New York: Wiley-Interscience Publication) pp223–240
- [4] Ge Y, Wang J F 2000 *Geo. Inf. Sci.* **2** 28 (in Chinese) [葛咏, 王劲峰 2000 地球信息科学 **2** 28]
- [5] Yuan L H, Ge J L, Jiang K, Zhang C Y 2009 *Radar Sci. Technol.* **7** 35 (in Chinese) [袁礼海, 葛家龙, 江凯, 张长耀 2009 雷达科学与技术 **7** 35]
- [6] Freeman A 1992 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **30** 1107
- [7] Xi Y X 2005 *M S dissertation* (Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [席育孝 2005 硕士学位论文 (北京: 中国科学院电子学研究所)]
- [8] Chen L 2005 *MarCoPola Polarimetric SAR Trial: Signatures of Multiple Vessels with Aligned Operating Conditions* (1st Ed.) (Ottawa: Defence R&D Canada Ottawa) pp10–13
- [9] Gray A L, Vachon P W, Livingstone C E, Lukowski T I 1990 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **28** 374
- [10] Walker N, Woodhouse H, Gameron D 2007 *Proceeding International Geoscience Remote Sensing Symposium Barcelona*, July 23–27, 2007 p3273
- [11] Alpers W, Brummer B 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 12613
- [12] Wolfgang K 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 702
- [13] Gladeston C L, Daniela M U, Fátima N S M, Gilson G D L 2010 *Sensors* **10** 5994
- [14] Zhang R W, Yan W, Ai W H, Ma S 2011 *J. Microw.* **27** 79 (in Chinese) [张日伟, 严卫, 艾未华, 马烁 2011 微波学报 **27** 79]
- [15] Stoffelen A, Anderson D 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 5767
- [16] Hersbach H, Stoffelen A, Haan S D 2007 *J. Geophys. Res.* **112** C03006
- [17] Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T M, Katsaros K, Tournadre J 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 7767
- [18] Jiang Z H, Huang S X, He R, Zhou C T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068401 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 何然, 周晨腾 2011 物理学报 **60** 068401]
- [19] Yang J S 2005 *SAR Remote Sensing Techniques of Sea Surface Wind, Surface Wave and Internal Wave* (1st Ed.) (Beijing: Ocean Press) pp24–32 (in Chinese) [杨劲松 2005 合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术 (第1版)(北京: 海洋出版社) 第24—32页]
- [20] Jochen H, Wolfgang K 2005 *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** 508



# Radiometric calibration accuracy of airborne synthetic aperture radar in ocean surface wind field sounding\*

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

(*Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*)

(Received 11 November 2011; revised manuscript received 16 December 2011)

## Abstract

Sounding accuracy is difficult to study systematically and effectively because of complex airborne synthetic aperture radar system. In this paper, according to the role of radiometric calibration accuracy in ocean surface wind field sounding process of airborne synthetic aperture radar, a method is proposed to investigate the system sounding accuracy by radiometric calibration accuracy. The parameter relationship of CMOD4 geophysical model function is simulated. The radiometric calibration accuracy of airborne synthetic aperture radar ocean surface wind field sounding at different incidence angles and in wind directions is ascertained. The results show that the radiometric calibration accuracy decreases with incidence angle increasing and changes periodically with wind direction changing. The law is accordance with the change of backscattering cross-section, caused by wind speed in CMOD4 geophysical model function. According to this law, we find that the accuracy of ocean surface wind field retrieval can be improved by using active calibration scale, designing carrier aircraft crosswind flight and selecting the large incidence angle sounding imagery as retrieval area.

**Keywords:** airborne synthetic aperture radar, ocean surface wind field, radiometric calibration accuracy, simulation model

**PACS:** 84.40.Xb, 92.60.Gn, 93.85.Pq

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41076118) and the Foundation of CMA Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, China (Grant No. KDW1105).

<sup>†</sup> E-mail: zhaorb2010@gmail.com