

基于海面散射模型的全极化合成孔径雷达海洋环境探测关键技术参数设计仿真研究*

赵现斌 严卫[†] 王迎强 陆文 马烁

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2014年5月13日收到; 2014年6月23日收到修改稿)

技术参数设计研究是提升全极化 SAR 海洋环境探测能力的有效途径. 本文通过分析噪声等效后向散射系数和辐射分辨率与海洋环境探测的地球物理联系, 提出一种全极化 SAR 关键技术参数设计方法. 采用全极化海面散射模型计算不同海洋环境条件下的雷达后向散射系数, 据此确定全极化 SAR 对海探测的噪声等效后向散射系数, 再将其作为合成孔径雷达方程输入参数, 以辐射分辨率和信噪比的函数关系为约束条件, 开展信噪比、辐射分辨率和系统功率孔径积等技术参数设计研究. 论文通过全极化海面散射模型的仿真计算, 发现对海探测的噪声等效后向散射系数设计为 -35.0 dB, 可满足全极化 SAR 不同海洋环境条件的探测需求. 通过研究辐射分辨率与信噪比的函数关系, 发现对海探测的最优信噪比为 8.0 dB. C 波段机载全极化 SAR 设计结果表明, 由于兼顾了海洋环境探测需求, 本文设计方法使得全极化 SAR 技术参数同时满足了海洋环境应用需求和系统设计要求.

关键词: 海面散射模型, 全极化合成孔径雷达, 海洋环境探测, 技术参数设计

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

DOI: 10.7498/aps.63.218401

1 引言

全极化合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种全天时、全天候的主动式微波侧视成像雷达, 它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, 获得完整的极化散射矩阵^[1]. 全极化 SAR (HH, HV, VH 和 VV 极化) 比单极化或多极化 SAR 提供了更为丰富的地物信息, 已经广泛应用于全球变化、资源勘查、环境监测、灾害评估和情报侦察等领域, 是当前国际最前沿的遥感观测技术之一^[2].

在海洋环境探测领域, 全极化 SAR 可同时观测海浪、海洋内波、中尺度涡和海洋锋等海洋本体活动信息, 海面风场、海岸带和浅海水深及水下地形等与海洋交邻物及其活动信息, 以及船舶及其航

迹、漂浮海冰和海洋污染物等海洋上目标物及其活动信息, 具有广阔应用前景^[3]. 然而, 与环境监测、灾害评估等定性观测不同, 海洋环境探测主要为定量反演研究^[4-6]. 因此, 全极化 SAR 对海探测的技术参数设计, 必须根据海洋环境探测需求开展针对性研究.

全极化 SAR 海洋环境探测时, 辐射定标精度决定探测图像与目标后向散射系数精确关系, 噪声等效后向散射系数决定雷达对弱信号的成像能力, 而辐射分辨率决定探测图像特征的可辨程度, 三者是衡量全极化 SAR 海洋环境探测能力的重要技术参数. 辐射定标精度设计研究方面, Freeman 给出了 SAR 探测风速、波高等海洋环境要素的辐射定标精度^[7]. Zhao 等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, 解决了辐射定标精度设计问题^[8]. 然而, 噪声等效后向散射系数

* 国家自然科学基金 (批准号: 41076118, 41375029, 41306187) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: 18913979082@163.com

设计仍然依据 Ulaby 等^[9], Xue 等^[10] 给出的风速 2.5, 15 m/s, 顺风, 侧风和逆风条件下, 水平、交叉和垂直极化雷达后向散射系数观测值. 由于样本较少, 无法直接将统计个例作为全极化 SAR 对海探测噪声等效后向散射系数的设计依据, 还常常借助经验因素. 另外, 辐射分辨率通常依据图像处理经验设计为 1—2 dB, 缺乏针对海洋环境应用需求的设计研究.

海面风场是海洋表层运动的主要动力来源, 它既是海上波浪形成的直接动力, 又是区域和全球海洋环流形成的关键性动力, 还影响着大气与海洋环流以及海气之间的相互作用. 因此, 描述雷达后向散射系数与海面风场之间函数关系的地球物理模型构建最为完善, 也最具代表性^[11–17]. 利用 VV, VH 和 HH 极化地球物理模型函数组成全极化海面散射模型, 可以计算不同雷达入射角、海况 (风向、风速) 和极化条件下的雷达后向散射系数, 提供了确定全极化 SAR 对海探测噪声等效后向散射系数的理论依据.

本文采用全极化海面散射模型计算不同海洋环境条件下的雷达后向散射系数, 据此确定全极化 SAR 对海探测的噪声等效后向散射系数. 针对海洋环境探测需求, 将噪声等效后向散射系数作为输入参数, 辐射分辨率与信噪比的函数关系作为约束条件, 依据合成孔径雷达方程提出一种全极化 SAR 关键技术参数设计方法.

2 关键技术参数设计方法研究

2.1 技术参数与海洋环境探测的地球物理联系

2.1.1 合成孔径雷达方程

合成孔径雷达方程是从发射机、天线、传播路径和目标参数等信息计算回波信号强度的基本方程, 一般表达式为^[18]

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{av} G^2 \lambda^3 \sigma^0 \rho_{gr}}{2 (4\pi)^3 r^3 V_s k_b T_s} \cdot \frac{1}{k_s}, \quad (1)$$

其中, S/N 为信噪比; P_{av} 为雷达平均发射功率; $G^2 = G_t G_r$ 为天线发射、接收增益; λ 为雷达工作波长; σ^0 为雷达后向散射系数; ρ_{gr} 为地距分辨率; r 为雷达作用距离; V_s 为搭载平台飞行速度; k_b 为玻尔兹曼常数; T_s 为系统噪声温度; k_s 为系统损耗因子.

合成孔径雷达方程既可在全极化 SAR 系统使用阶段描述其探测性能 (如最大作用距离和辐射分辨率等), 又可在系统设计阶段计算满足特定应用需求的技术参数指标. 另外, 借助合成孔径雷达方程, 还有助于理解雷达工作时各分系统参数的相互关系, 对于正确选择、设计系统指标具有重要作用.

2.1.2 噪声等效后向散射系数与海洋环境探测

噪声等效后向散射系数 (Noise-Equated backscattering coefficient, $NE\sigma^0$) 是决定全极化 SAR 系统探测性能的一个重要指标, 它定义为信噪比 $S/N = 1$ 时的雷达后向散射系数, 反映了全极化 SAR 能够成像的雷达后向散射系数下限值. 依据这一定义, 噪声等效后向散射系数表示为^[18]

$$(NE\sigma^0) = \frac{\sigma^0}{S/N}. \quad (2)$$

将 (2) 式代入 (1) 式, 可得

$$(NE\sigma^0) = \frac{2 (4\pi)^3 r^3 V_s k_b T_s}{\lambda^3 G^2 P_{av} \rho_{gr}} \cdot k_s. \quad (3)$$

全极化 SAR 海洋环境探测时, 同极化 (HH, VV) 和交叉极化 (HV, VH) 探测数据发挥着不同作用. 其中, 同极化探测数据主要应用于中等海况条件下海面风场、海浪反演^[19–22], 而交叉极化信息对于高海况特别是台风条件下的风速反演具有重要作用^[15]. 另外, 全极化信息应用研究中, Zhang 等利用 VV 和 VH 极化信息解决了传统方法反演风向时存在的 180° 模糊问题^[23]. He 提出了全极化海浪反演方法, 避免了复杂的水动力调制分析, 提高了海浪反演精度^[24]. 然而, 波动海面的探测回波信号远弱于地面固定目标回波, 全极化 SAR 对弱信号的探测能力, 决定着其反演海洋环境参数的能力.

噪声等效后向散射系数是全极化 SAR 弱信号探测能力的决定因素. 因此, 依据海洋环境探测需求, 确定全极化 SAR 对海探测的噪声等效后向散射系数, 对于海洋环境应用研究具有重要意义. 特别在系统设计阶段, 噪声等效后向散射系数是信噪比、辐射分辨率和系统功率孔径积等技术参数设计的重要依据.

2.1.3 辐射分辨率与海洋环境探测

SAR 是一种全天时、全天候的高分辨率微波成像雷达, 而高分辨率通常被理解为高空间分辨率

(距离向和方位向二维分辨率, SAR 图像所能区分的两个目标间最小距离). 然而, SAR 图像特征研究时, 可懂度不仅取决于空间分辨率, 还受到雷达回波信号衰落的影响 [25].

辐射特性是对 SAR 回波信号衰落现象的统计描述. 如果认为 SAR 图像像元强度遵循 χ^2 分布, 辐射分辨率是量度像元强度概率密度函数宽度的应用参数, 表示 SAR 图像所能区分的两个目标微波反射率间最小差值. 辐射分辨率通常定义为 [25]

$$\delta = 1 + \frac{1}{\sqrt{M}} \left(1 + \frac{1}{S/N} \right), \quad (4)$$

式中, M 表示探测图像的多视数, S/N 表示信噪比.

海洋环境探测研究中, 探测图像中风条纹信息的清晰程度直接决定风向的反演精度 [26-28], 进而影响风速计算精度. 统计结果表明, 30% 的风向误差将导致 40% 左右的风速误差 [29]. 海浪波向、波长反演需要借助图像中海浪纹理信息获取海浪谱分布规律, 其反演精度取决于海浪纹理的清晰程度 [20-22]. 另外, 海洋内波、中尺度涡和海洋锋等海洋现象探测, 以及船舶航迹、油污等海洋目标监测, 同样需要借助探测对象的图像特征 [3].

由图像可懂度定义可知, 探测图像中目标特征的可辨程度由空间分辨率和辐射分辨率共同决定 [25]. 因此, 将辐射分辨率与信噪比、多视数的函数关系作为约束条件, 依据合成孔径雷达方程开展辐射分辨率、空间分辨率和信噪比设计研究, 对于全极化 SAR 探测图像的海洋环境应用研究具有重要价值.

2.2 设计方法研究

全极化 SAR 探测时, 海面探测回波数据通过全极化成像、极化定标、几何校正以及相干斑抑制等处理, 获得 HH, HV, VH 和 VV 极化雷达后向散射系数, 再通过地球物理模型函数反演海面风场、海浪等海洋环境要素. 因此, 雷达后向散射系数是

全极化 SAR 海洋环境探测的核心参数, 而描述雷达对弱信号成像能力的噪声等效后向散射系数则是决定雷达系统性能的重要因素.

全极化海面散射模型描述了不同极化雷达后向散射系数与海面风场的函数关系. 据此, 我们采用全极化海面散射模型计算不同雷达入射角、海况 (风向、风速) 和极化条件下的雷达后向散射系数, 求解海洋环境探测需成像的最小雷达后向散射系数, 从而确定全极化 SAR 对海探测的噪声等效后向散射系数.

合成孔径雷达方程是全极化 SAR 技术参数设计的理论依据, 它提供了噪声等效后向散射系数、信噪比和系统功率孔径积等技术参数的函数关系. 据此, 我们将技术参数设计问题转化为噪声等效后向散射系数、信噪比和系统功率孔径积的函数关系研究问题. 另外, 辐射分辨率通过信噪比建立了与合成孔径雷达方程的函数联系, 可作为技术参数设计的约束条件.

基于上述分析, 本文提出一种全极化 SAR 海洋环境探测的关键技术参数设计方法, 如图 1 所示. 采用全极化海面散射模型计算不同雷达入射角、海况 (风向、风速) 和极化条件下的雷达后向散射系数, 据此确定全极化 SAR 对海探测的噪声等效后向散射系数. 将噪声等效后向散射系数作为输入参数, 辐射分辨率与信噪比的函数关系作为约束条件, 依据合成孔径雷达方程开展信噪比、辐射分辨率和系统功率孔径积等技术参数的设计研究. 图中, 噪声等效后向散射系数决定雷达对弱信号的成像能力, 辐射分辨率决定探测图像特征的可辨程度.

我们知道, 噪声等效后向散射系数和辐射分辨率是影响全极化 SAR 海洋环境探测能力重要因素, 而系统功率孔径积是系统参数设计的重要依据. 因此, 本文设计方法既满足了全极化 SAR 海洋环境应用需求, 又考虑到系统设计要求, 可作为技术参数设计的理论依据.

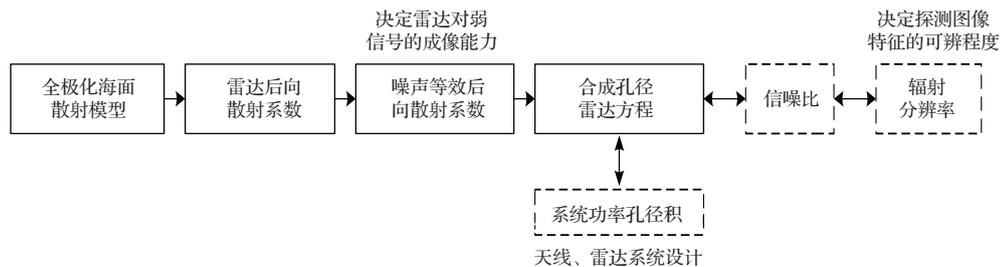


图1 技术参数设计方法

3 全极化海面散射模型

3.1 极化散射理论

全极化 SAR 照射散射体时, 散射过程可表示为^[30]

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{re}} &= [S] \mathbf{E}^{\text{tr}} = \begin{bmatrix} E_{\text{H}}^{\text{re}} \\ E_{\text{V}}^{\text{re}} \end{bmatrix} \\ &= \frac{e^{\text{ikr}}}{r} \begin{bmatrix} S_{\text{HH}} & S_{\text{HV}} \\ S_{\text{VH}} & S_{\text{VV}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{H}}^{\text{tr}} \\ E_{\text{V}}^{\text{tr}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, E 表示电场矢量, 上标 tr 表示发射天线发射到散射体的入射波, re 表示接收天线接收到来自散射体的散射波, r 为散射体与接收天线之间的距离, k 为电磁波波数. 极化散射矩阵 S 描述雷达照射波和目标散射波各极化分量之间的变换关系, 包含幅度和相位信息. S_{HH} 和 S_{VV} 为同极化分量, S_{HV} 和 S_{VH} 为交叉极化分量.

全极化 SAR 海洋环境探测时, 通常利用表征回波强度信息的雷达后向散射系数反演海洋环境要素. 雷达后向散射系数和极化散射矩阵元素的对应关系可表示为^[31]

$$\sigma_{pq} = 4\pi |S_{pq}|^2, \quad (6)$$

式中, 极化散射矩阵元素分别为 S_{HH} , S_{HV} , S_{VH} 和 S_{VV} , 包含强度和相位信息, 而雷达后向散射系数分别为 σ_{HH}^0 , σ_{HV}^0 , σ_{VH}^0 和 σ_{VV}^0 , 仅包含强度信息.

3.2 地球物理模型函数

研究雷达后向散射系数与海面风场之间的函数关系时, 通常认为在海面产生坡陡和破碎波条件下, 海面散射遵循二尺度散射模型. 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. 其中, 同极化雷达回波主要依赖前者, 受海洋表面 Bragg 散射影响, 描述海面平缓时的海洋环境特征; 交叉极化雷达回波受表面倾斜或体散射的影响, 描述高海况条件下海浪破碎现象^[15,32]. 同极化雷达回波中, HH 与 VV 极化雷达后向散射系数的区别在于由波浪破碎引起的 Bragg 散射对回波信号的贡献^[14].

3.2.1 VV 极化地球物理模型函数

Bragg 散射定理是构建 VV 极化地球物理模型函数的理论基础. 风致海面的微尺度波是产生雷

达回波的主要散射体, 据此可假定 VV 极化雷达后向散射系数与风速成正比. 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, 一般表达式为^[19]

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{VV}}^0 &= A(\theta) u_{10}^{\gamma(\theta)} (1 + B(u_{10}, \theta) \cos(\phi) \\ &\quad + C(u_{10}, \theta) \cos 2\phi), \end{aligned} \quad (7)$$

其中, σ_{VV}^0 为 VV 极化雷达后向散射系数, u_{10} 为海面 10 m 高风速, ϕ 为风向相对于雷达方位角, θ 为雷达入射角, A , B , C 和 γ 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理论研究模型^[13].

Zhao 等利用 CMOD5 地球物理模型函数仿真研究了 VV 极化雷达后向散射系数与风向、风速和雷达入射角的函数关系^[33]. 结果表明, 雷达后向散射系数随着风向变化呈周期性变化, 近似为余弦函数关系, 随着风速增加而增加, 随着雷达入射角增加而减少.

3.2.2 HH 极化地球物理模型函数

HH 极化雷达后向散射系数的计算同样依赖 VV 极化地球物理模型函数. 通常将风向、风速和雷达入射角输入 CMOD 地球物理模型函数计算 VV 极化雷达后向散射系数, 再利用极化率模型将 VV 转化为 HH 极化. 极化率模型一般表达式为^[34]

$$PR = \frac{\sigma_{\text{VV}}^0}{\sigma_{\text{HH}}^0}, \quad (8)$$

式中, σ_{HH}^0 为 HH 极化雷达后向散射系数.

极化率模型描述了极化率与雷达入射角和风速的函数关系, 包括描述极化率与雷达入射角函数关系的 Kirchoff^[34], Vachon^[35] 和 Elfouhaily^[36] 等极化率模型, 描述极化率与雷达入射角、风速函数关系的 Hwang^[32], Zhang^[36] 等极化率模型. Bergeron, Zhang 等分别利用多种极化率模型, 仿真研究了极化率与雷达入射角、风速的函数关系, 研究发现极化率均随着雷达入射角增加而增加, 随着风速增加而减少^[14,36].

RADARSAT-2SAR 是全球惟一在轨运行的 C 波段全极化 SAR, 基于其探测数据的 Zhang 极化率模型描述了极化率与风速 (1—26 m/s)、雷达入射角的函数关系. 本文将其作为研究模型, 表达式为^[36]

$$PR = P(\theta) u_{10}^{Q(\theta)}, \quad (9)$$

$$P(\theta) = P_1 \times \theta^2 + P_2 \times \theta + P_3, \quad (10)$$

$$Q(\theta) = Q_1 \times \theta + Q_2, \quad (11)$$

式中, 模型参数分别为 $P_1 = 0.0014$, $P_2 = -0.0319$, $P_3 = 1.3794$, $Q_1 = 0.0026$, $Q_2 = -0.1711$. u_{10} 为海面 10 m 高风速, θ 为雷达入射角.

3.2.3 VH 极化地球物理模型函数

全极化 SAR 探测数据处理时, 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

$$S_{HV} = S_{VH}, \quad \sigma_{HV}^0 = \sigma_{VH}^0.$$

因此, 交叉极化 (VH, HV) 地球物理模型函数无需分别研究.

Zhang 等在统计分析 RADARSAT-2 SAR VH 极化雷达后向散射系数与浮标匹配观测结果的基础上, 构建了 VH 极化地球物理模型函数, 表达式为 [15]

$$\sigma_{VH}^0 = a \times u_{10} + b, \quad (12)$$

式中, σ_{VH}^0 为 VH 极化雷达后向散射系数, u_{10} 为海面 10 m 高风速, 模型参数 a 为 0.580, b 为 -35.652.

不难看出, VH 极化雷达后向散射系数不依赖于雷达入射角和风向, 随着风速增加而增加, 表现为线性关系.

VV, HH 和 VH 极化地球物理模型函数描述了雷达后向散射系数与雷达入射角、风向和风速的函数关系, 本文利用其组成全极化海面散射模型, 作为全极化 SAR 技术参数设计研究的理论模型.

4 关键技术参数设计仿真研究

4.1 研究方案

全极化 SAR 海洋环境探测的关键技术参数设计方案如图 2 所示, 具体步骤如下:

首先, 采用全极化海面散射模型计算不同雷达入射角、海况 (风向、风速) 和极化条件下的雷达后向散射系数, 求解海洋环境探测需成像的最小雷达后向散射系数, 从而确定全极化 SAR 对海探测的噪声等效后向散射系数. 其中, VV 极化雷达后向散射系数通过 CMOD5 地球物理模型函数计算, HH 极化雷达后向散射系数借助极化率模型转化计算, 而 VH 极化雷达后向散射系数通过 VH 极化地球物理模型函数计算.

其次, 仿真研究辐射分辨率与信噪比、多视数的函数关系, 讨论辐射分辨率与信噪比、多视数以及距离向分辨率的相互制约关系, 作为技术参数设计研究的约束条件.

接着, 将噪声等效后向散射系数、信噪比及基本参数输入合成孔径雷达方程, 计算全极化 SAR 的系统功率孔径积. 再次, 分析讨论信噪比、辐射分辨率和空间分辨率等是否满足全极化 SAR 海洋环境应用需求, 发射峰值功率、占空比和天线尺寸等能否满足系统设计要求.

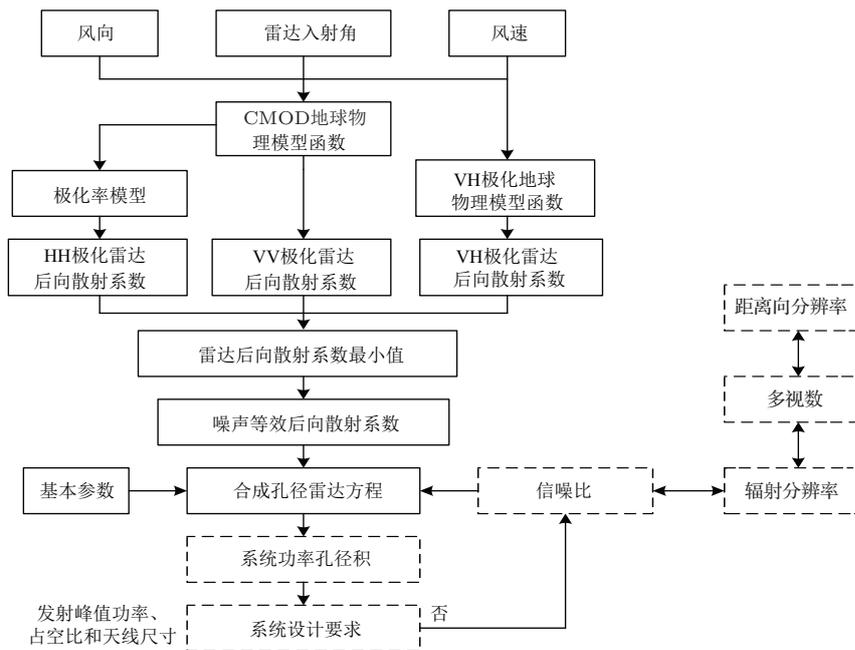


图2 技术参数设计方案

最后, 通过合理设计辐射分辨率、信噪比和系统功率孔径积, 使得全极化SAR的技术参数同时满足海洋环境应用需求和系统设计要

4.2 噪声等效后向散射系数计算

全极化SAR海洋环境探测时, 噪声等效后向散射系数表示不同雷达入射角、海况(风向、风速)和极化条件下, 描述海面回波特性的雷达后向散射系数最小值。

当海面风速小于5 m/s时, 海面波动平缓使得雷达探测信号较弱, 此时雷达后向散射系数与风向、风速的函数关系无法采用地球物理模型函数准确描述。当雷达入射角大于55°时, 海面散射信号较弱, 雷达回波信号与背景噪声信号难以区分。因此, 全极化SAR适用于中、高等海况条件下(风速大于5 m/s)的海洋环境探测, 且雷达入射角不宜超过55°。

基于上述分析, 本文设定风向取值为0°—359°, 风速取值为5—30 m/s, 雷达入射角取值为20°—55°。另外从3.2节可知, 雷达后向散射

系数随着风速增加而增加, 随着雷达入射角增加而减少。因此, 我们固定一个参数仿真计算时, 风速取值为5 m/s, 雷达入射角取值为55°。

在风速5 m/s条件下, 仿真计算风向0°—359°, 雷达入射角20°—55°范围内, VV, VH和HH极化雷达后向散射系数。在雷达入射角55°条件下, 仿真计算风向0°—359°, 风速5—30 m/s范围内, VV, VH和HH极化雷达后向散射系数。为了便于分析计算, 我们将VV和VH极化、HH和VH极化雷达后向散射系数计算结果组合显示, 如图3和图4所示。

图3和图4中, 曲平面分别表示VV, HH极化雷达后向散射系数, 直平面表示VH极化雷达后向散射系数。从计算结果可知, 相同雷达入射角和海况条件下, VV极化雷达后向散射系数值最大, HH极化次之, VH极化最小。另外, VV, HH极化雷达后向散射系数与风向、风速和雷达入射角均有关, 而VH极化雷达后向散射系数与风向和雷达入射角无关, 仅与风速相关。

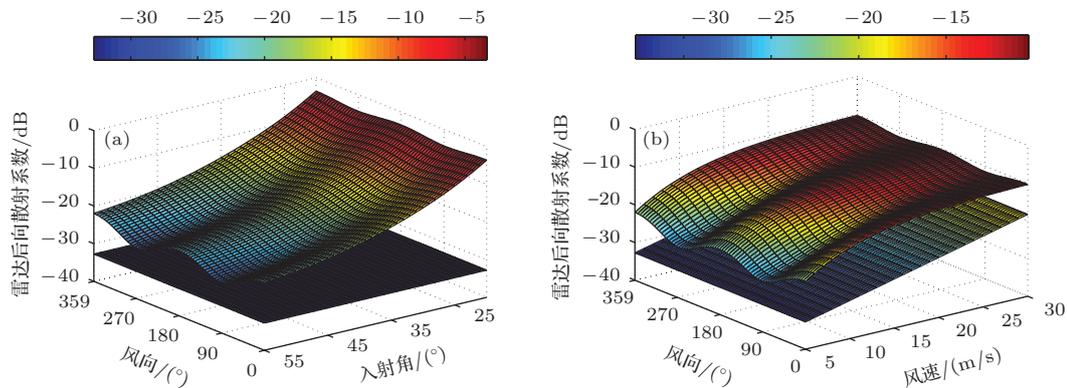


图3 (网刊彩色) VV和VH极化雷达后向散射系数计算结果 (a) 风速5 m/s, 风向和入射角作为变量; (b) 雷达入射角55°, 风向和风速作为变量

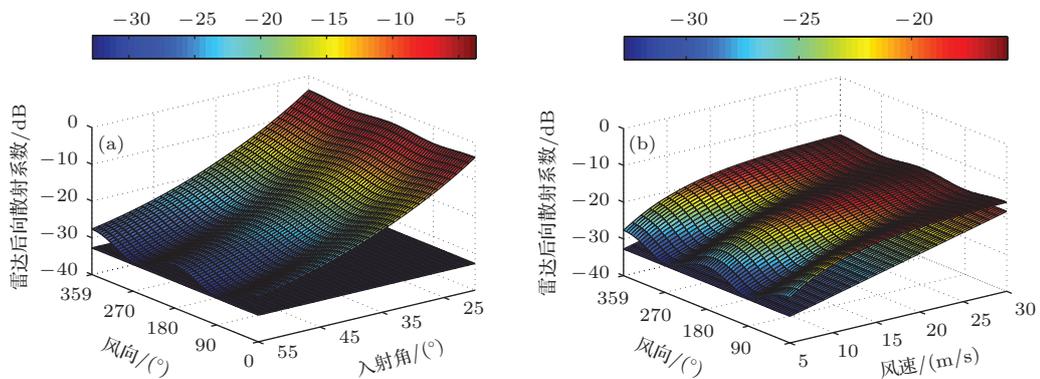


图4 (网刊彩色) HH和VH极化雷达后向散射系数计算结果 (a) 风速5 m/s, 风向和入射角作为变量; (b) 雷达入射角55°, 风向和风速作为变量

图3中, VV极化雷达后向散射系数最小值出现在侧风(90°, 270°)、风速5 m/s和雷达入射角55°条件下, 数值为-26.7 dB, VH极化雷达后向散射系数最小值出现在风速5 m/s条件下, 数值为-32.8 dB. 图4中, HH极化雷达后向散射系数最小值出现在侧风、风速5 m/s和雷达入射角55°条件下, 数值为-32.2 dB, VH极化雷达后向散射系数最小值出现在风速5 m/s条件下, 数值为-32.8 dB.

从计算结果可知, 当全极化SAR可成像的雷达后向散射系数优于-32.8 dB, 即可满足中、高等海况条件下的海洋环境探测需求. 为了保留设计余量, 本文确定噪声等效后向散射系数为-35.0 dB, 并据此开展全极化SAR技术参数设计研究.

4.3 辐射分辨率影响因素分析

仿真研究辐射分辨率与信噪比和多视数的函数关系, 我们发现辐射分辨率随着信噪比和多视数增加而提高, 如图5所示. 值得注意的是, 随着信噪比提高, 其对辐射分辨率的影响逐渐减弱, 超过8.0 dB时趋于平缓. 因此, 信噪比为8.0 dB时, 可以充分利用雷达探测性能, 提供较高的辐射分辨率. 若要通过信噪比进一步提高辐射分辨率, 则需提高雷达系统整体性能, 受到研制技术水平和生产成本的制约, 难度大且收益低.

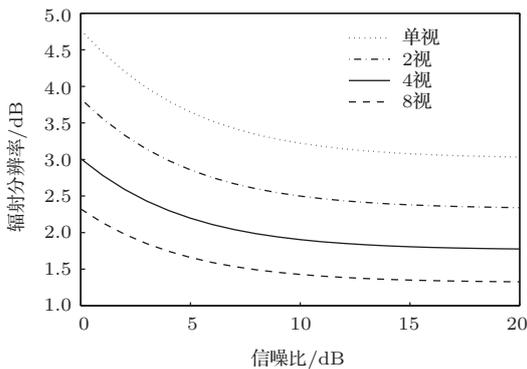


图5 辐射分辨率与信噪比和多视数的函数关系

辐射分辨率同样与多视数有关, 当信噪比固定为8.0 dB时, 辐射分辨率与多视数的函数关系如图6所示. 图中, 当探测图像的多视数由1视提高到19视时, 辐射分辨率由3.4 dB提高到1.0 dB, 表明增加多视数可以提高辐射分辨率. 需注意的是,

探测图像的多视数与距离向分辨率有关, 当多视数为 M 时, 距离向分辨率降低为原来的 $1/M$. 因此, 通过多视处理提高探测图像的辐射分辨率, 需兼顾距离向分辨率损失, 合理设计辐射分辨率和空间分辨率.

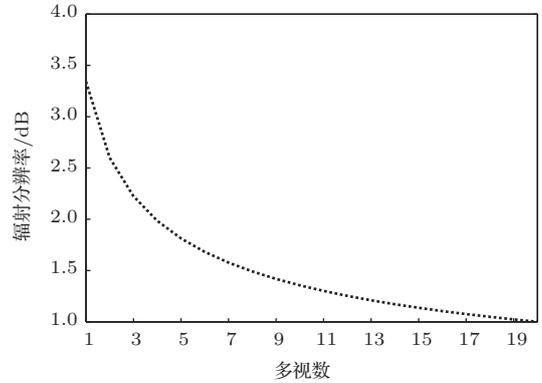


图6 信噪比8.0 dB, 辐射分辨率与多视数的函数关系

综合上述分析, 全极化SAR对海探测的最优信噪比为8.0 dB, 进一步通过信噪比来提高辐射分辨率则受到研制技术水平和生产成本的制约. 增加探测图像的多视数同样可以提高辐射分辨率, 但会损失距离向分辨率. 据此, 本文将辐射分辨率与信噪比、多视数和距离向分辨率的函数关系, 作为技术参数设计研究的约束条件.

4.4 关键技术参数设计研究实例

4.4.1 基本参数设定

本文以C波段机载全极化SAR为例, 开展技术参数设计研究. 设定载机最大飞行高度为8000 m, 飞行速度为60 m/s, 则雷达入射角55°时, 最大作用距离为14000 m. 雷达工作波长设定为0.0556 m, 地距分辨率按照高空间分辨率要求设定为3 m. 系统噪声温度, 损耗因子等参数依据系统设计经验确定为固定值. 合成孔径雷达方程中已确定的基本参数如表1所示.

合成孔径雷达方程的基本参数确定后, 方程的可变参数包括雷达后向散射系数 σ^0 , 信噪比 S/N , 雷达平均发射功率 P_{av} , 天线发射、接收增益 $G_t G_r$. 技术参数设计研究时, 雷达后向散射系数指全极化SAR需成像的雷达后向散射系数最小值, 即噪声等效后向散射系数, 而雷达平均发射功率和天线发射、接收增益合称为系统功率孔径积 $P_{av} G_t G_r$.

表1 合成孔径雷达方程的基本参数

参数	数值	分贝/dB
方程常数	$2 \cdot (4\pi)^3$	35.98
波长 λ^3/m	0.0556 ³	-37.65
最大作用距离 r^3/m	14000 ³	124.38
平台最大飞行速度 $V_s/(\text{m/s})$	60	17.78
玻尔兹曼常数 $k_b/10^{-23}$	1.380658	-228.60
系统噪声温度 T_s/K	290	24.62
系统损耗因子 k_s/dB	8.48	8.48
地距分辨率 ρ_{gr}/m	3	4.77

4.4.2 设计研究

由4.2, 4.3节计算结果可知, 全极化SAR对海探测的噪声等效后向散射系数为-35.0 dB, 最优信噪比为8.0 dB. 我们将噪声等效后向散射系数、信噪比及基本参数输入合成孔径雷达方程, 可计算系统功率孔径积为58.5 dB. 由于3.0 dB波束边缘, 天线发射、接收增益积降低6.0 dB, 则全极化SAR海洋环境探测实际所需系统功率孔径积应为64.5 dB·W.

我们知道, 雷达平均发射功率由发射峰值功率和系统占空比决定, 天线发射、接收增益由天线尺寸决定^[37].

如果系统采用H, V双极化天线阵面, 双极化交替发射, 当H, V极化T/R组件各36个, 组件峰值功率为20 W时, 发射峰值功率为720 W. 组件工作占空比设计为1%, 则雷达平均发射功率 P_{av} 为7.2 W, 即8.5 dB·W.

天线增益计算公式为

$$G = \eta \times 4\pi A / \lambda^2, \quad (13)$$

式中, η 表示天线效率, 本文取值0.7, A 为天线面积, λ 为雷达工作波长.

天线面积的影响因素包含天线方位向和距离向尺寸. 假设平台安装条件限制天线方位向尺寸必须小于1.5 m, 则其设计须满足

$$d \leq \frac{\lambda_{\min} \cdot (1 - \Delta)}{1 + |\sin(\alpha_{\max})|}, \quad (14)$$

$$d/\Delta \leq 1.5, \quad (15)$$

其中, d 为天线方位向尺寸, λ_{\min} 为最小工作波长, α_{\max} 为天线偏离阵面法向的最大扫描角, Δ 为辐射单元数目的倒数.

若方位向波束扫描范围为 $\pm 15^\circ$, 辐射单元数

目为36, 则天线方位向尺寸为1.4 m. 天线距离向尺寸的影响因素包括观测带宽度、天线阵面结构和工艺设计等, 本文设计为0.2 m. 将天线面积、天线效率和雷达工作波长输入(13)式, 计算天线增益为29.2 dB, 则天线发射、接收增益积 $G_t G_r$ 为58.4 dB·W.

利用雷达平均发射功率和天线发射、接收增益可计算系统功率孔径积为66.9 dB·W, 满足64.5 dB·W的设计要求. 因此, 发射峰值功率、占空比和天线尺寸等系统参数满足全极化SAR系统设计要求.

我们知道, 全极化SAR海洋环境探测的辐射分辨率通常设计为1—2 dB, 当信噪比为8.0 dB时, 对探测图像作8视处理, 辐射分辨率为1.5 dB. 此时, 设计为3 m的距离向分辨率降低为24 m, 优于RADARSAT-2 SAR四极化模式25 m的标准分辨率. 因此, 噪声等效后向散射系数、信噪比、辐射分辨率和空间分辨率等技术参数满足全极化SAR海洋环境应用需求.

综合上述讨论, 本文设计方法使得C波段机载全极化SAR的技术参数同时满足海洋环境应用需求和系统设计要求. 需注意的是, 全极化SAR技术参数设计研究时, 噪声等效后向散射系数作为全极化SAR对弱信号成像能力的最低要求, 必须得到满足, 而信噪比、辐射分辨率等则需考虑研制技术水平和生产成本等约束条件. 若发射峰值功率、占空比和天线尺寸等满足系统设计要求, 表明此时技术参数设计合理. 反之, 则需调整信噪比, 结合辐射分辨率、空间分辨率等约束条件, 重新设计研究.

5 结 论

本文通过分析噪声等效后向散射系数和辐射分辨率与海洋环境探测的地球物理联系, 提出了一种全极化SAR关键技术参数设计方法, 克服现有噪声等效后向散射系数设计依靠统计个例和经验因素的不足, 使得全极化SAR的技术参数同时满足海洋环境应用需求和系统设计要求.

利用全极化海面散射模型, 论文计算了不同雷达入射角、海况(风向、风速)和极化条件下的雷达后向散射系数, 求解出海洋环境探测需成像的最小雷达后向散射系数为-32.8 dB. 按照保留余量设计原则, 确定全极化SAR对海探测的噪声等效后向

散射系数为 -35.0 dB. 本文计算结果可满足全极化 SAR 不同海洋环境条件的探测需求, 优于依靠统计个例和经验因素的现有方法.

通过仿真研究辐射分辨率与信噪比和多视数的函数关系, 我们发现全极化 SAR 对海探测的最优信噪比为 8.0 dB, 进一步通过信噪比提高辐射分辨率受到研制技术水平和生产成本制约. 另外, 增加探测图像的多视数也可以提高辐射分辨率, 但会损失距离向分辨率.

文章将噪声等效后向散射系数作为输入参数, 辐射分辨率与信噪比、多视数和距离向分辨率的函数关系作为约束条件, 结合雷达工作波长等基本参数, 依据合成孔径雷达方程开展了 C 波段机载全极化 SAR 的技术参数设计研究. 结果表明, 本文设计方法使得全极化 SAR 的技术参数同时满足了海洋环境应用需求和系统设计的要求.

目前, 论文研究主要采用描述雷达后向散射系数与海面风场函数关系的地球物理模型函数, 未来我们将引入海浪、海流等海洋环境要素, 进一步完善全极化海面散射模型, 提高噪声等效后向散射系数的计算精度. 另外, 由于条件限制, 本文主要开展了全极化海洋 SAR 技术参数设计的仿真研究. 下一步工作中, 我们将结合全极化海洋 SAR 论证和设计研究项目, 开展机载、星载全极化海洋 SAR 设计的真实数据比对实验, 全面衡量海洋环境应用需求、系统设计的要求以及比对实验效果, 进一步验证和改进设计方法.

感谢中国电子科技集团公司第 38 研究所王立刚、陈曦和高超工人在 C 波段机载全极化 SAR 技术参数设计中提供的技术帮助和理论支持.

参考文献

- [1] Wang C, Zhang H, Chen X, Liu Z, Yan D M 2008 *Polarimetric synthetic aperture radar image processing* (Beijing: Science Press) p15–30 (in Chinese) [王超, 张红, 陈曦, 刘智, 闫冬梅 2008 全极化合成孔径雷达图像处理 (北京: 科学出版社) 第 15—30 页]
- [2] Guo H D, Li X W 2011 *Chinese Sci. Bull. (Chinese Ver)* **56** 1155 (in Chinese) [郭华东, 李新武 2011 科学通报 **56** 1155]
- [3] Jackson C R, Apel J R 2005 *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual* (Washington, D. C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, Center for Satellite Application and Research) p81

- [4] Martine S 2004 *An introduction to ocean remote sensing* (Cambridge: Cambridge University Press) p201–207
- [5] Dong Q, Guo H D 2005 *SAR ocean remote sensing* (Beijing: Science Press) p10–17 (in Chinese) [董庆, 郭华东 2005 合成孔径雷达海洋遥感 (北京: 科学出版社) 第 10—17 页]
- [6] Yang J S 2005 *SAR Remote Sensing techniques of sea surface wind, surface wave and internal wave* (Beijing: Ocean Press) p24–32 (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 (北京: 海洋出版社) 第 24—32 页]
- [7] Freeman A 1992 *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **30** 1107
- [8] 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]
- [9] Ulaby F T, Dobson M C 1989 *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain* (Artech House) p21
- [10] Long M W (translated by Xue D Y, Wang F S) 1981 *Radar scattering properties of land and sea* (theory and practice of radar remote sensing) (Beijing: Science Press) p23–35 (in Chinese) [朗 M W 著 (薛德镛, 王福山译) 1981 陆地和海面的雷达波散射特性 (雷达遥感的理论与实践) (北京: 科学出版社) 第 23—35 页]
- [11] Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T M, Katsaros K, Tournadre J 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 7767
- [12] Stoffelen A, Anderson D 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 5767
- [13] Hersbach H, Stoffelen A, Haan S D 2007 *J. Geophys. Res.* **112** C03006
- [14] 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
- [15] Zhang B, Perrie W 2012 *American Meteorological Society* **93** 531
- [16] Ji W J, Tong C M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 020301
- [17] Zhong J, Huang S X, Du H D, Zhang L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 034301
- [18] Yuan X K 2002 *Aerospace Shanghai* **3** 1 (in Chinese) [袁孝康 2002 上海航天 **3** 1]
- [19] Jochen H, Wolfgang K 2005 *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** 508
- [20] Hasselmann K, Hasselmann S 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 10713
- [21] Hasselmann S, Brüning C, Hasselmann K, Heimbach P 1996 *J. Geophys. Res.* **101** 16615
- [22] Engen G, Johnsen H 1995 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **33** 1047
- [23] 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
- [24] He Y J, Perrie W, Xie T, Zou Q P 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 2623
- [25] Yuan X K 1998 *Aerospace Shanghai* **3** 9 (in Chinese) [袁孝康 1998 上海航天 **3** 9]
- [26] Vachon P W, Dobson F W 1996 *The Global Atmosphere and Ocean System* **5** 177

- [27] 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]
- [28] 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]
- [29] Choignard J, Laroche S 2008 *J. Geophys. Res.* **113** C05006
- [30] 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)]
- [31] 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]
- [32] Hwang P A, Zhang B A, Toporkov J V, Perrie W 2010 *J. Geophys. Res.* **115** C08019
- [33] Zhao X B, Yan W, Kong Y, Han D, Liu W J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 138402 (in Chinese) [赵现斌, 严卫, 孔毅, 韩丁, 刘文俊 2013 物理学报 **62** 138402]
- [34] Mouche A A, Hauser D, Daloz J F, Guérin C 2005 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **43** 753
- [35] Vachon P W, Wolfe J 2011 *IEEE Geosci. Remote Sens. Letters* **8** 456
- [36] Zhang B, Perrie W, He Y J 2011 *J. Geophys. Res.* **116** C08008
- [37] Bao Z, Xing M D, Wang T 2005 *Radar Imaging Technology* (Beijing: Publishing House Of Electronics Industry) p30–70 (in Chinese) [保铮, 邢孟道, 王彤 2005 雷达成像技术 (北京: 电子工业出版社) 第 30—70 页]

Simulation study on the design of key technical parameters in marine environment sounding with fully polarimetric synthetic aperture radar based on ocean surface scattering model*

Zhao Xian-Bin Yan Wei[†] Wang Ying-Qiang Lu Wen Ma Shuo

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

(Received 13 May 2014; revised manuscript received 23 June 2014)

Abstract

Technical parameter design is an effective approach to improve marine environment sounding capability for fully polarimetric synthetic aperture radar (SAR). By analyzing geophysical contact between noise-equated backscattering coefficient and marine environment sounding, and that between radiometric resolution and marine environment sounding, we present the key technical parameters design method for fully polarimetric SAR. We first calculate radar backscattering coefficient in different marine environments by using the fully polarimetric ocean surface scattering model, and accordingly determine the noise-equated backscattering coefficient of fully polarimetric SAR ocean sounding. Then the noise-equated backscattering coefficient is used as an input parameter in SAR equation, and the function relationship between radiometric resolution and signal to noise ratio is used as a constraint condition, we thus can carry out technical parameter design, such as for signal to noise ratio, radiometric resolution and system power aperture product. By simulation calculation of fully polarimetric ocean surface scattering, we find that the noise-equated backscattering coefficient of ocean sounding is designed to -35.0 dB, which can meet the needs of fully polarimetric SAR sounding in different marine environments. Studying the function relationship between radiometric resolution and signal to noise ratio, we find that the optimal signal to noise ratio of ocean sounding is 8.0 dB. Results of C-band airborne fully polarimetric SAR design show that the above method can make technical parameter of fully polarimetric SAR meet both the need for marine environment application and system design, because of taking into account the needs of marine environment sounding.

Keywords: ocean surface scattering model, fully polarimetric synthetic aperture radar, marine environment sounding, technical parameter design

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

DOI: [10.7498/aps.63.218401](https://doi.org/10.7498/aps.63.218401)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41076118, 41375029, 41306187).

[†] Corresponding author. E-mail: 18913979082@163.com