

对海面弱流场最佳观测的雷达遥感体制研究

余颖 王小青 朱敏慧

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 对海面弱流场进行监测是海洋微波遥感的重要应用之一,在海洋内波、浅海地形、水下运动目标监测等民用和军事领域都具有十分重要的意义。该文定义了海面弱流场和风生海杂波之间的信杂比;以信杂比作为衡量标准,在风速统计平均意义上,研究了我国南海海域内实孔径雷达(RAR)/SAR/平飞斜视机载双站 SAR 对海面弱流场的最佳观测参数。3 种雷达体制的信杂比对比分析表明, RAR 信杂比最强,最有利于探测海面弱流场。

关键词: 雷达体制;海面弱流场;调制机理;最佳观测参数

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1879-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00745

Study on Optimal Radar System for Observation of Weak Current on Ocean Surface

Yu Ying Wang Xiao-qing Zhu Min-hui

(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Monitoring the weak ocean surface current is one of the most important applications for microwave remote sensing. It is significant for both civil and martial maritime activities. Signal Clutter Ratio (SCR) between ocean surface weak current and wind-generated waves is defined, in the frame of which the optimal configurations of RAR/SAR/biSAR with parallel flight squint mode are studied, under wind speed statistical distributions in South China Sea. The comparison results among the SCRs of the three sensor systems show that RAR, with the highest SCR, is the best system for weak ocean surface current observation.

key words: Radar system; Weak current on ocean surface; Modulation mechanism; Optimal observation parameter

1 引言

在过去的几十年里,微波遥感技术除了用于各种陆地表面的应用观测外,还进行了大量海洋应用研究。经过大量的实验和理论研究表明,不管是浅海地形,内波或者水下运动物体等都是间接通过其产生的海洋表面弱流场与海表面波浪的流体动力调制被微波传感器系统观测到^[1]。因此,观测浅海地形,内波或者水下运动物体可以统一为观测它们产生的海面弱流场。这对于民用和军事领域来说具有十分重要的意义。

雷达对海面弱流场的观测能力与工作波段、极化方式和雷达入射角等雷达观测参数有密切关系。而微波传感器主要包括 RAR(实孔径雷达), SAR(合成孔径雷达)到近年来兴起的双站 SAR^[2-4],不同雷达遥感体制对海面弱流场也会有不同的探测能力。

国外学者的研究主要围绕具体海洋特征(浅海地形、内波等)的雷达成像机制,通过建立成像理论仿真模型来解释观测到的海洋现象^[5-7]。目前见到的国内关于海面弱流场的最佳雷达观测参数的报道主要有:杨劲松、张杰等结合 KdV 方程的内孤立波解,在一维情况下探讨星载 SAR 内波成像能力与雷达波长、极化和入射角等参数的关系^[8,9]。黄韦良、傅斌等重点研究了 SAR 探测浅海地形的最佳海况条件和雷达系统参数^[10,11]。在以上最佳雷达观测参数研究中都是采用布拉格散射模型,该散射模型会低估高频波段和高海况时的海面散射系数;除此之外,海面长波通过其与短波之间的各种调制作用间接改变散射能量的分布,但上述研究中均未考虑大尺度海浪的存在对探测海面弱流场的干扰。但实际上海面除了海面流场会对海面散射产生调制效应,海面的波浪也会对雷达散射产生调制作用,从而对雷达信号中的流场信息产生干扰作用,海浪的干扰强弱往往是从雷达信号中提取水下运动目标和浅海地形等弱流场信号的决定性因素。

2009-05-15 收到, 2010-04-26 改回

国家自然科学基金(40706063)和微波成像技术国家重点实验室基金(MITL-2008-01)资助课题

通信作者: 余颖 yxk720@sina.com

本文定义了海面流场与背景风生海杂波之间的信杂比, 分别根据海面弱流场和海浪的 RAR, SAR, 双站 SAR 成像机理, 通过全球海洋风速统计模型, 研究了风速统计平均情况下信杂比与雷达观测参数的关系, 并在此基础上探讨海面弱流场的最佳观测雷达体制。

2 信杂比定义

为了对表面弱流场进行最佳观测, 类似于信噪比, 这里把信杂比定义成: 海面弱流场引起的散射系数相对改变量与大尺度海杂波引起的散射系数相对改变量的能量比值。信杂比出现极大值的雷达观测参数即是最佳雷达观测参数:

$$\left. \begin{aligned} \text{SNR} &= \langle |S|^2 \rangle / \langle |N|^2 \rangle \\ S &= \Delta\sigma_s / \sigma_0 = \int T_s(\mathbf{K}^{\text{trg}}) \cdot u(\mathbf{K}^{\text{trg}}) e^{i(\vec{k}^{\text{trg}} \cdot \vec{x})} d\mathbf{K}^{\text{trg}} + \text{c.c.} \\ N &= \Delta\sigma_n / \sigma_0 = \int T_n(\mathbf{k}) \cdot h(\mathbf{k}) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \vec{\omega} t)} d\mathbf{k} + \text{c.c.} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 σ_0 为海面平均散射系数; $\Delta\sigma_s$, $\Delta\sigma_n$ 分别为海面流场、波浪引起的散射系数改变量; $u(\mathbf{K}^{\text{trg}})$ 为海面流场; $h(\mathbf{k})$ 分别为海浪波高和海浪谱; $\langle \cdot \rangle$ 表示空间、时间平均, c.c. 表示前一项的复共轭; $T_s(\mathbf{K}^{\text{trg}})$, $T_n(\mathbf{k})$ 分别为海面流场、波浪的调制传递函数。

为了使得所讨论的信杂比指标与流场强弱无关, 定义归一化信杂比, 其含义是 SNR 与流场信号强度之比。

$$\text{SNR}_{\text{normal}} = \text{SNR} / \int u^2(\mathbf{K}^{\text{trg}}) d\mathbf{K}^{\text{trg}} \quad (2)$$

海面流场雷达信号的信杂比跟两类观测因素有关:

(1) 随机性观测参数 (a) 雷达视向与风向夹角: 随机变化量; (b) 风速: 根据多年来海洋风速的统计分布研究表明, 海面风速的概率密度分布可以很好地用两参数韦布尔分布 (weibull distribution) 来近似^[12]:

$$p(x) = (b/a)(x/a)^{b-1} \exp\left(-(x/a)^b\right) \quad (3)$$

其中 a , b 分别表示尺度和形状参数。文献[12]中的研究表明, 根据 NASA 的 QuikSCAT 卫星上装载的 SeaWinds 散射计数据进行全球范围内参数估计, a , b 取值的全球分布如图 1 所示:

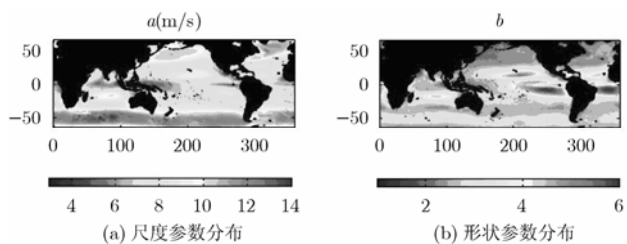


图 1 全球范围的韦布尔分布参数估计结果

本文以南海海域某处为例(经纬度 22.52° N , 128.22° E), 此处的参数为 $a = 9.2 \text{ m/s}$, $b = 2.7$ 。图 2 给出了此处风速出现概率情况。图中可以看出, 该处主要出现的风速范围大约在 $7 \sim 10 \text{ m/s}$ 。

(2) 确定性观测参数 (a) 入射角: 在雷达系统设计时, 此参数可控制。(b) 入射载波频率: 同样, 在雷达系统设计时, 该参数可控制。

根据 RAR, SAR, 双站 SAR 的成像调制机理, 可通过数值计算的方法求得它们的归一化信杂比。

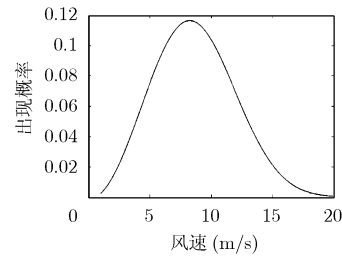


图 2 风速概率分布 ($a = 9.2 \text{ m/s}$, $b = 2.7$)

3 散射调制机理

本文采用文献[13]给出的基于 2 阶调制的 3 尺度海面散射模型来计算海面散射, 该模型中每个局部区域的散射采用 IEM 模型, IEM 模型中的入射角、波浪谱等参数会随着海面波浪坡度改变, 因此海面局部散射系数是海面坡度的函数。海面散射按 2 维坡度泰勒展开, 其中关于坡度的奇次项在进行平均后为 0, 而偶次项平均后会对散射产生贡献。忽略 4 次以上高次项, 则海面散射可以表示为

$$\langle \sigma_{\text{sp}} \rangle \approx \sigma_{\text{sp}}^0 + \sigma_{\text{sp}}^2 \quad (4)$$

σ_{sp}^0 , σ_{sp}^2 分别为海面散射的 0 阶和 2 阶分量, 通常情况下 0 阶分量基本上取决于 Bragg 散射, 只有在风浪很小的时候才会有显著的大尺度基尔霍夫散射效应。

$$\sigma_{\text{sp}}^0 \approx T_0 \psi(\mathbf{k}_b), \quad \sigma_{\text{sp}}^2 = T_2 \int_{|\mathbf{k}| < k_b}^{\psi(\mathbf{k})} d\mathbf{k} \quad (5)$$

其中 T_0 是一个与雷达入射角、波长有关的一个参数, $\psi(\mathbf{k})$ 为波浪谱, \mathbf{k}_b 为 Bragg 波数。 $T_2(\mathbf{k})$ 是一个与波浪谱、松弛率等有关的复杂表达式, 具体可以参考文献[13]。 σ_{sp}^2 中的积分项表示对 Bragg 波长到分辨单元尺度内的波浪谱进行积分。该式表明散射系数不仅与 Bragg 波有关, 还与分辨单元内的其他波浪谱分量有关。

波浪对散射系数的调制主要表现在通过表面倾斜效应改变局部入射角以及通过流体动力调制效应改变波浪谱。而海面流场对散射系数的调制只有流体动力的调制效应。二者对散射系数改变量的表达式如下:

$$\Delta\sigma_{gp}^w \approx \sigma_{gp}^0 \left(1 + \int [T_t(\mathbf{K}) + T_{hw}(\mathbf{k}_b, \mathbf{K})] \varphi(\mathbf{K}) d\mathbf{K} \right) + \sigma_{gp}^2 \left(1 + \int \left[T_t(\mathbf{K}) + \int_{|\mathbf{k}|>k_r} \varphi(\mathbf{k}) T_{hw}(\mathbf{k}, \mathbf{K}) d\mathbf{k} \right] \varphi(\mathbf{K}) d\mathbf{K} \right) \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{gp}^c \approx \sigma_{gp}^0 \left(1 + \int T_{hc}(\mathbf{k}_b, \mathbf{K}) u(\mathbf{K}) d\mathbf{K} \right) + \sigma_{gp}^2 \left(1 + \int \int_{|\mathbf{k}|>k_r} \varphi(\mathbf{k}) T_{hc}(\mathbf{k}, \mathbf{K}) u(\mathbf{K}) d\mathbf{k} d\mathbf{K} \right) \quad (7)$$

其中 $T_t(\mathbf{K})$, $T_{hw}(\mathbf{k}_b, \mathbf{K})$ 分别为波浪的倾斜和流体动力调制系数, $T_{hc}(\mathbf{k}_b, \mathbf{K})$ 为流场流体动力调制系数。

4 3 种雷达体制的调制机理与最佳参数

4.1 RAR 调制机理与最佳参数

对于 RAR 来说, 雷达信号是一个分辨单元内的散射之和。

$$I(x_0, r_0) \propto \int_{x_0 - \frac{\rho_a}{2}}^{x_0 + \frac{\rho_a}{2}} \int_{r_0 - \frac{\rho_r}{2}}^{r_0 + \frac{\rho_r}{2}} \sigma(x, r - h \cos \theta) dx dr \quad (8)$$

其中 ρ_a , ρ_r 分别为方位向和斜距向分辨率。 x 为目标的方位向位置, r 为目标的斜距, $\sigma(x, r)$ 为海面 NRCS, h 为海面波高。令 $r' = r - h \cos \theta$, 则

$$I(x_0, r_0) \propto (1 + Z_y \text{ctg} \theta) \int_{x_0 - \rho_a/2}^{x_0 + \rho_a/2} \int_{r_0 - \rho_r/2}^{r_0 + \rho_r/2} \sigma(x, r') dx dr' \quad (9)$$

其中 y 为电波入射方向在水平面的投影。 Z_y 为海面 y 方向的坡度。因此 RAR 图像强度除了和散射系数有关, 还与 y 方向坡度有关, 与 y 方向坡度有关的项又被称为距离聚束调制。表示为波数域的形式为

$$T^{rb}(\mathbf{K}) = iK_y \text{ctg} \theta。$$

而海面流场不产生表面坡度, 因此对 RAR 信号的调制系数就等于对散射的调制系数。

4.2 RAR 实验条件及结果分析

图 3-图 5 给出了风速统计平均情况下, RAR 的 $\text{SNR}_{\text{normal}}$ 随入射角、波段的分布状态。从图中可以得出如下结论:

(1)最佳波段 风向与雷达视向夹角 0、40 度情况下, 最佳波段是 X 波段, C 和 Ku 波段的信杂比相当, 仅次于 X 波段, L、S 波段最弱; 风向与雷达视向夹角 90° 情况下, 不同波段的信杂比差异不明显, L 波段信杂比最弱。综合而言, 最佳波段为 X 波段。

(2)最佳极化方式 VV 极化的 $\text{SNR}_{\text{normal}}$ 大于 HH 极化, 并且 VV 极化的平均后向散射系数大于 HH 极化, 因此利用 RAR 系统观测海面弱流场采用 VV 极化方式为佳。

(3)最佳入射角 为了对海面弱流场进行最优观测, 也即获取尽量大的信杂比值, RAR 入射角在 40°~60° 范围为最佳。但随着入射角增加, 海面后向散射系数减小, 如果后向散射系数低于噪声等效散射系数, 接收机无法正常接收和检测海面目标反射信号。因此, 设计 RAR 系统入射角在 40°~60° 度范围内时, 还需根据实际系统折中考虑噪声等效散射系数的问题。

4.3 SAR 信号调制机理与最佳参数

运动目标的径向速度分量会导致目标在 SAR 图像上的位移。海面波浪和流场由于径向速度的一致性会导致在 SAR 图像上出现有的地方海面散射信号汇聚叠加, 而有的地方散射信号分离, 从而形成 SAR 海洋成像中特有的速度聚束调制效应。

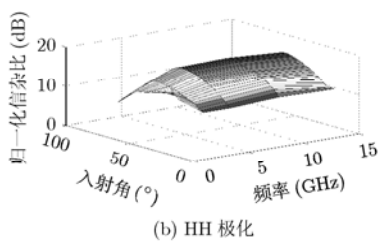
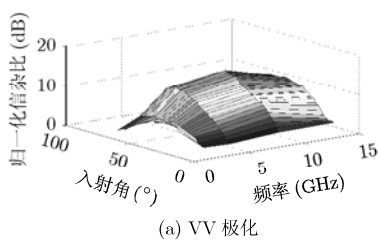


图 3 RAR 的方位夹角 0° 时风速统计平均 $\text{SNR}_{\text{normal}}$ 分布情况

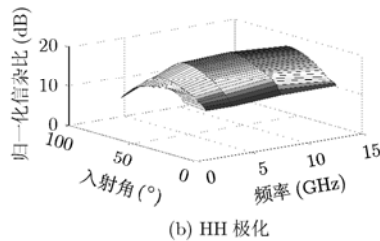
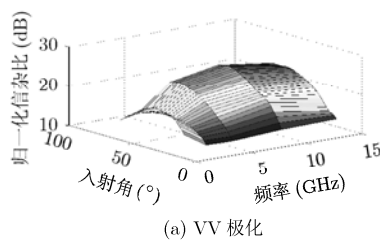


图 4 RAR 的方位夹角 40° 时风速统计平均 $\text{SNR}_{\text{normal}}$ 分布情况

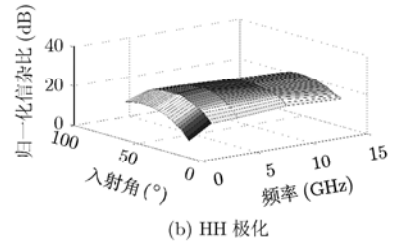
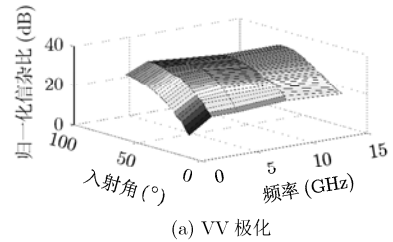


图 5 RAR 的方位夹角 90° 时风速统计平均 $\text{SNR}_{\text{normal}}$ 分布情况

海面流场只有水平速度，而波浪在水平和垂直位置都有速度，二者的速度聚束调制系数分别为

$$\left. \begin{aligned} T_{vb}^c(\mathbf{K}) &= j \frac{R}{V} |\mathbf{K}| \sin \theta \cdot \cos \varphi_c \cdot \sin \varphi_c \\ T_{vb}^n(\mathbf{K}) &= -R/V |\mathbf{K}| \omega \cos \varphi \cdot (\cos \theta - j \sin \theta \sin \varphi) \end{aligned} \right\} (10)$$

其中 φ_c , φ 分别为流场和波浪传播方向与雷达视向的夹角, θ 为雷达入射角。从中可以看出波浪由于存在水平和垂直速度分量, 而且海面主要波浪分量的波长往往要较流场更小, 所以在相同情况下它比流场的聚束调制效应要更大。

同样, 采用表 1 中的各项参数进行仿真实验, 并且设平台高度为 6000 m, 平台速度为 150 m/s:

表 1 RAR 仿真实验参数列表

目标区域经纬度	(22.52° N, 128.22° E)
风向与雷达视向夹角	0°, 40°, 90°
风速范围	2~20 m/s
仿真入射角范围	20°~70°
仿真波段范围	1.2 GHz(L 波段), 3.2 GHz(S 波段), 5.6 GHz(C 波段), 10 GHz(X 波段), 15 GHz(Ku 波段)
流场分量与风向夹角	-180°~180°
流场分量波数大小	0~0.3142 rad/s
流场速度分量幅度	0.001 m/s

图 6-图 9 给出了风速统计平均情况下, 不同的风向与雷达视向夹角的 SAR 的 SNR_{normal} 随入射角、波段的分布状态。从图中可以得出如下结论。

- (1)最佳波段 综合而言, 最佳波段为 L, X 波段。
- (2)最佳极化方式 利用 SAR 系统观测海面弱

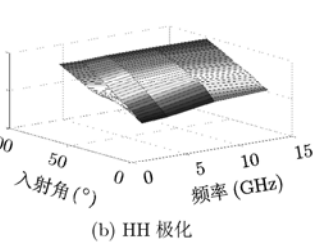
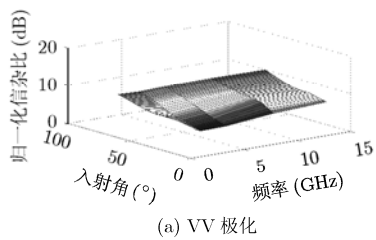


图 6 SAR 的方位夹角 0° 时
风速统计平均 SNR_{normal} 分布情况

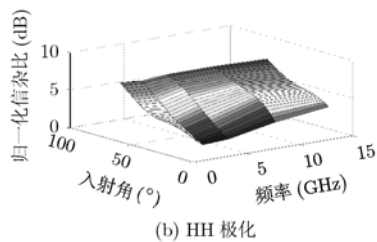
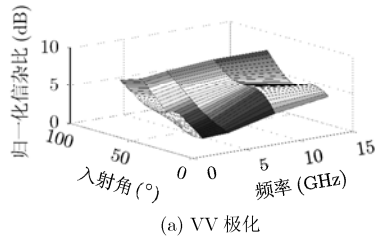


图 7 SAR 的方位夹角 40° 时
风速统计平均 SNR_{normal} 分布情况

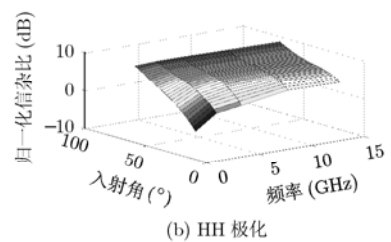
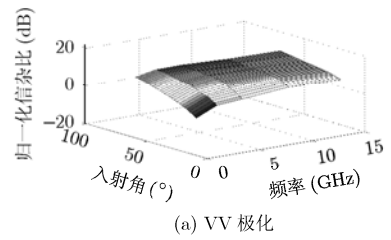


图 8 SAR 的方位夹角 90° 时
风速统计平均 SNR_{normal} 分布情况

流场采用 VV 极化方式为佳。

(3)最佳入射角 入射角越大, 信杂比越大, 目标与背景反差越明显, 但选择最佳观测入射角需要折中考虑信杂比和后向散射系数两者之间的关系。在目前的一般工程设计中, 机载 SAR 的噪声等效散射系数设计为 -30 dB 左右^[14,15]。假设 SAR 接收机输出信噪比要高于 5 dB, 如图 9 所示, 为了最优观测海面弱流场, 入射角的设计如表 2 所示。

4.4 双站SAR信号的调制机理与最佳参数

本节讨论平飞斜视机载双站SAR这种几何构型, 由于对地观测时, 大斜视角情况下的SAR2维分辨能力变差, 不能进行2维成像, 所实用的构型中斜视角一般小于40°, 并且基于文献[16]的结论, 为了探测全方向的流场分量, 发射机和接收机斜视角大小应尽量接近且方向相反, 因此, 本节讨论的平飞斜视机载双站SAR的入散射方位夹角在0°到80°范围。与单站SAR一样, 双站SAR同样存在聚束调制效应, 流场和波浪的速度聚束调制系数分别为^[16]

$$T_{vb_c}^{bi}(\mathbf{K}^{trg}) = j \frac{R_{tc} R_{rc}}{V(R_{rc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} \cdot |\mathbf{K}^{trg}| \cdot \cos \varphi_c (m_1 \cos \varphi_c + n \sin \varphi_c) \quad (11)$$

$$T_{vb_w}^{bi}(\mathbf{k}) = \frac{-R_{tc} R_{rc}}{V(R_{rc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} |\mathbf{k}| \cdot \omega \cos \varphi [m_2 - j(m_1 \cos \varphi + n \sin \varphi)] \quad (12)$$

其中 R_{tc} , R_{rc} 分别为发射和接收平台斜距, α_t , α_r 分别为发射和接收视角,

$$m_1 = (\sin \alpha_t + \sin \alpha_r), \quad m_2 = \cos \theta_i + \cos \theta_s$$

$$n = \left(\sqrt{\sin^2 \theta_i - \sin^2 \alpha_t} + \sqrt{\sin^2 \theta_s - \sin^2 \alpha_r} \right)$$

为了与 RAR, SAR 对比, 双站 SAR 实验参数如表 3 所示。

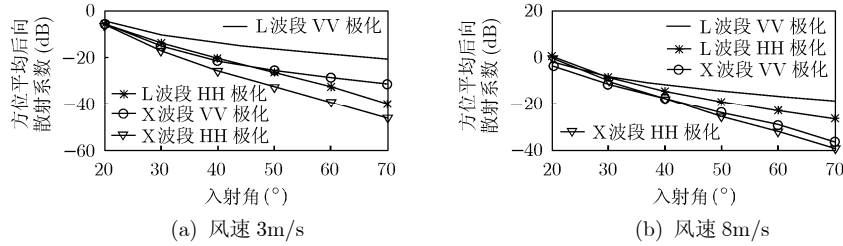


图 9 方位平均后向散射系数随入射角的变化关系

表 2 L、X 波段的机载 SAR 入射角的设计关系

	L 波段 VV 极化	X 波段 VV 极化
风速 3 m/s	入射角小于 70° 均满足要求	入射角小于 50°
风速 8 m/s	入射角小于 70° 均满足要求	入射角小于 65°

表 3 双站 SAR 观测仿真参数

入射雷达视向与风向夹角	0°, 45°
入射角	30°
散射角	30°~70°
入散射方位夹角	20°, 40°

根据表 3 中参数，仿真实验结果如图 10-图 13 所示。图中给出了风速统计平均情况下，入射角 30° 时，不同的入散射方位夹角、不同的风向与入射视向夹角的双站 SAR 的 SNR_{normal} 随散射角、波段的分布状态。从图中可以得出如下结论：

- (1)最佳波段 结论与单站 SAR 类似，综合而言，最佳波段为 X，L 波段。
- (2)最佳极化方式 同单站 SAR 一样，利用双

站 SAR 系统观测海面弱流场采用 VV 极化方式为佳。

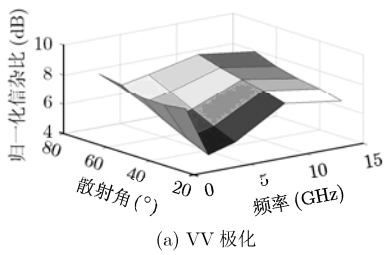
(3)最佳入散射方位夹角 双站 SAR 系统的 SNR_{normal} 随着入散射方位夹角的增加无明显变化。而双站 SAR 几何构型比单站 SAR 更加灵活，利用双站 SAR 观测海面弱流场将更加便利。

(4)最佳入、散射角 与单站 SAR 类似，双站 SAR 的 SNR_{normal} 随着入、散射角的增大而增大。双站海面散射系数随着入(散)射角的增加而减小，选择最佳观测入射角需要折中考虑信杂比和双站海面散射系数两者之间的关系。

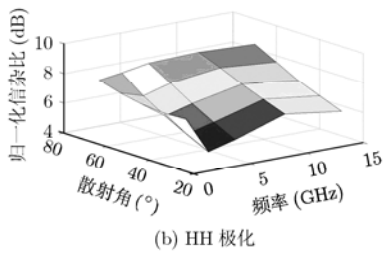
5 结论

从本文的分析和仿真计算可知：从信杂比这个标准来衡量，RAR 能获取的信杂比值比其他两种雷达体制更大，主要原因在于 RAR 成像机理中没有速度聚束调制作用，SAR 和双站 SAR 的海浪引起的速度聚束调制作用通常情况下比流场大得多，因此会使得信杂比下降，因而影响流场的探测。

但是考虑到 RAR 的方位分辨率的提高是依靠

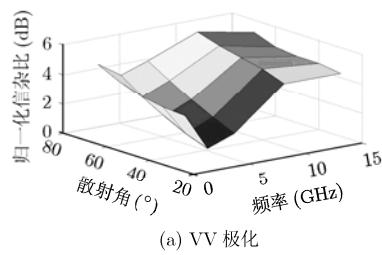


(a) VV 极化

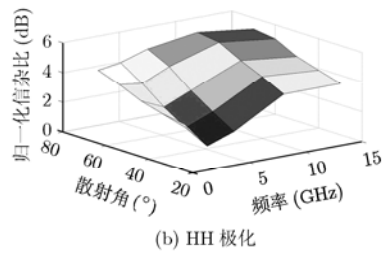


(b) HH 极化

图 10 双站 SAR 的入散射方位夹角 20°，风向与入射视向夹角 0° 时风速统计平均的 SNR_{normal} 分布情况

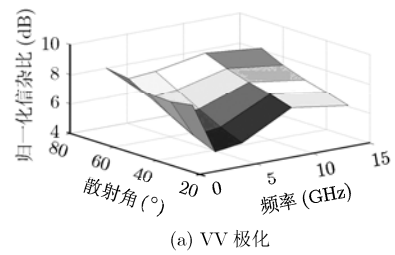


(a) VV 极化

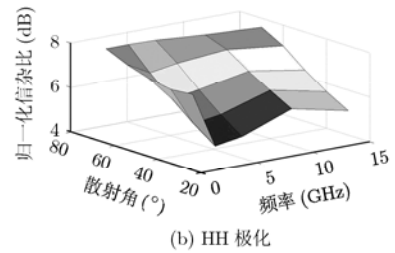


(b) HH 极化

图 11 双站 SAR 的入散射方位夹角 20°，风向与入射视向夹角 45° 时风速统计平均的 SNR_{normal} 分布情况



(a) VV 极化



(b) HH 极化

图 12 双站 SAR 的入散射方位夹角 40°，风向与入射视向夹角 0° 时风速统计平均的 SNR_{normal} 分布情况

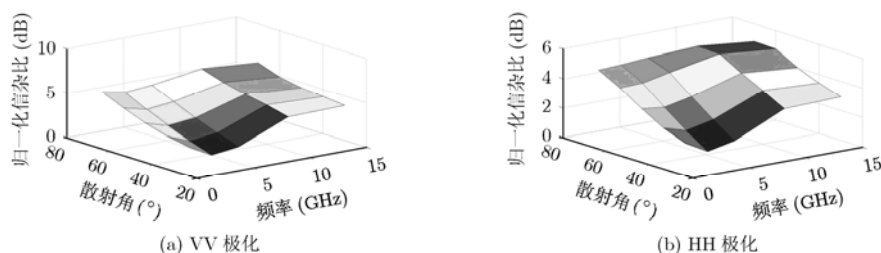


图13 双站SAR的入散射方位夹角 40° ，风向与入射视向夹角 45° 时风速统计平均的 SNR_{normal} 分布情况

增加真实天线孔径长度，要实现较高的分辨率只能机载近距离观测，因此也限制了RAR的成像幅宽，应用范围受到了较大的限制。但它主要可以用于中小尺度海洋特性及现象的观测，并且它的高重复访问率也使得它成为有效的海洋科研工具。

在SAR和双站SAR两种雷达体制中，海面弱流场的流体动力调制，以及流场和大尺度波浪的速度聚束调制在所有调制中占主要作用。它们随着入散射方位夹角从 0° 到 80° 范围内变化时无明显变化，因此，双站SAR与单站SAR在信杂比方面有相当的性能。而双站几何构型比单站SAR更加灵活，利用双站SAR观测海面弱流场将更加便利。

参考文献

- [1] 何宜军. 成像雷达海浪成像机制[J]. 中国科学, 2000, 30(5): 554-560.
He Yi-jun. Imaging radar imaging mechanism of ocean waves[J]. *Science in China*, 2000, 30(5): 554-560.
- [2] Cherniakov M. Bistatic Radar: Emerging Technology[M]. New York: Wiley&Sons, Ltd, 2008, Ch.1-2.
- [3] Ferdinando N, Attilio G, and Maurizio M. A simulator for SAR sea surface waves imaging[C]. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain: 2007: 786-789.
- [4] Arnold-Bos A and Khenchaf A. Bistatic radar imaging of the marine environment-Part I: Theoretical background[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3372-3383.
- [5] Alpers W and Hennings I. A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(C6): 10529-10546.
- [6] Vogelzang J and Valk C D. Application of Spaceborne SAR for Bathymetric Monitoring[R]. 1997, RWS-AGI, Delft, The Netherlands.
- [7] Chubb S R and Valenzuela G R. Radar surface signatures based on the two-dimensional tidal circulation of phelps bank[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(1): 129-134.
- [8] 杨劲松. 合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2005, 第5章.
- [9] 张杰. 合成孔径雷达海洋信息处理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 第4章.
- [10] 黄伟良, 傅斌, 周长宝, 杨劲松等. 星载SAR遥感浅海水下地形的最佳海况模拟仿真[J]. 自然科学进展. 2000, 10(7): 642-649.
Huang Wei-gen, Fu Bin, and Zhou Chang-bao *et al.* Spaceborne SAR remote sensing underwater bottom topography simulation of the best sea conditions[J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(7): 642-649.
- [11] 黄伟良, 傅斌, 周长宝, 杨劲松等. 星载SAR水下地形和水深遥感的最佳雷达系统参数模拟[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 172-177.
Huang Wei-gen, Fu Bin, Zhou Chang-bao *et al.* Spaceborne SAR remote sensing of underwater topography and water depth the best simulation of the radar system parameters[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(3): 172-177.
- [12] Monahan A H. The probability distribution of sea surface wind speeds Part II: Dataset intercomparison and seasonal variability[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(4): 521-534.
- [13] 余颖, 王小青, 朱敏慧, 肖疆. 基于二阶散射的海面三尺度雷达后向散射模型[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1771-1775.
Yu Ying, Wang Xiao-qing, and Zhu Min-hui, *et al.* Three-scale radar backscattering model of the ocean surface based on second-order scattering[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(9): 1771-1775.
- [14] 张卫华, 王立刚. 高分辨率星载SAR系统关键参数的设计[J]. 雷达科学与技术, 2004, 8(4): 230-234.
Zhang Wei-hua and Wang Li-gang. Design of the key parameters of high resolution satellite SAR system[J]. *Radar Science and Technology*, 2004, 8(4): 230-234.
- [15] Suess M, Riegger S, Pitz W, and Werninghaus R. Terra SAR-X: Design and Performance[C]. The 4th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Cologne, Germany, 2002: 49-52.
- [16] 余颖, 王小青, 朱敏慧, 肖疆. 双站SAR的海面速度聚束调制机理研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2840-2843.
Yu Ying, Wang Xiao-qing, and Zhu Min-hui, *et al.* A study on bistatic SAR velocity bunching modulation of ocean surface[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(12): 2840-2843.

余颖: 女, 1981年生, 工程师, 从事海洋微波遥感方面的研究。
王小青: 男, 1978年生, 副研究员, 从事雷达信号与信息处理等方面的研究。
朱敏慧: 女, 1943年生. 研究员, 博士生导师, IEEE高级会员, 研究方向为计算机图像和图形学、微波遥感与雷达技术、雷达信号与信息处理等。