

机载旋转扫描微波散射计高空间分辨率信号处理仿真研究

王何庆¹, 林文明^{*2,3}, 景立伟²

1. 安徽建筑大学电子信息学院 安徽合肥 230601

2. 南京信息工程大学海洋科学院 江苏南京 210044

3. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室 北京 100081

摘要: 旋转扫描微波散射计凭借观测刈幅宽、结构简单、经济性好等优点, 广泛应用于海面风场遥感。但传统散射计多采用真实孔径雷达体制, 难以获取高空间分辨率的地表后向散射观测数据。本文将多普勒波束锐化 (Doppler Beam Sharpening, DBS) 技术应用于旋转扫描微波散射计, 实现宽刈幅与高空间分辨率探测的有机融合。以机载平台为例, 构建包含信号收发、脉冲压缩、DBS 处理等环节的信号级仿真流程, 探究了新型散射计空间分辨率随扫描方位角的变化特性。结果表明, 引入 DBS 技术后, 散射计超 74% 观测刈幅的空间分辨率较传统体制提升 10 倍以上。此外, 利用数值模拟探究了信噪比对 DBS 成像质量和后向散射系数测量精度的影响, 为该新型散射计的定量化遥感应用提供重要的技术支撑。

关键词: 微波散射计, 多普勒波束锐化, 空间分辨率, 信噪比

A Simulation Study on the High-Spatial-Resolution Signal Processing for the Airborne Rotating-Antenna Microwave Scatterometers

Abstract: The rotating scanning microwave scatterometer is characterized by its wide observation swath, simple system architecture, cost-effectiveness etc., such that it has been widely used in the remote sensing of sea surface wind fields. It serves as the primary payload of ocean remote sensing satellites for ocean surface wind field monitoring, and plays a key role in the research and operational applications of marine meteorology and global ocean dynamics. However, conventional microwave

基金项目: 国家自然科学基金 (42576180)

投稿日期: 20260213

E-mail: wenminglin@nuist.edu.cn

scatterometers are generally real-aperture radars, which are incapable of acquiring Earth surface backscattering measurement data with high spatial resolution. This limitation hinders their capability in capturing fine-scale ocean features and restricts the development of high-precision quantitative remote sensing. Therefore, this paper focuses on high spatial resolution signal processing, and proposes to adopt the Doppler Beam Sharpening (DBS) technique in the development of a novel rotating scanning microwave scatterometer, with the aim of achieving both wide observation swath and high spatial resolution simultaneously. Taking the airborne platform as an example, a simulation experiment is carried out. Specifically, a signal-level simulation workflow, which consists of key steps such as signal transmission and reception, pulse compression, and DBS processing, is established. Then, the variation characteristics of the spatial resolution of the novel scatterometer with scanning azimuth angle are firstly explored. The simulation results demonstrate that the DBS processing generally results in 10-times finer spatial resolution than that of conventional scatterometers within ~74% of the observation swath. Furthermore, numerical simulations are carried out to quantify the impact of signal-to-noise ratio (SNR) on the quality of DBS “images” and the measurement accuracy of backscattering coefficients. The study provides important technical support for the quantitative applications of this new-type rotating scanning microwave scatterometer. On the other hand, the research findings lay a solid foundation for the system parameter design of next-generation spaceborne microwave scatterometers.

Key words: Microwave scatterometer; Doppler beam sharpening; Spatial resolution; Signal-to-noise ratio

1. 引言

在遥感系统设计中，观测幅宽与空间分辨率之间存在此消彼长的固有矛盾，这构成了传感器设计的核心挑战。以全球海面风场遥感为例，目前最常用的星载旋转扫描微波散射计的观测幅宽可达 1800 km，仅需一天便能完成对全球逾 90%

海域的风场观测^[1]。但这种类型散射计的空间分辨率通常只有 25 km，因此其遥感风场主要用于中等尺度海洋气象领域的科学研究与业务应用^{[2][3][4]}，难以在亚中尺度过程的研究中发挥重要作用。星载合成孔径雷达（SAR）则可用于获取高空间分辨率（1 km）的海面风场信息^{[5][6]}，对于亚中尺度海洋气象的研究具有重要的意义，但其观测幅宽通常不超过 500 km，限制了单次观测的覆盖范围。

为了兼顾 SAR 空间分辨率高和旋转扫描微波散射计观测刈幅宽的优点，国外学者提出了一种基于多普勒波束锐化（DBS）技术的星载笔形波束旋转扫描微波散射计^[7]，旨在同时实现宽刈幅与高空间分辨率的海面风场观测，从而克服传统旋转扫描微波散射计的系统性局限。理论分析表明，这种星载微波散射计不仅具备 1800 km 的宽刈幅，且刈幅内大部分区域观测的空间分辨率可达 1-5 km，远优于传统微波散射计的空间分辨率^[7]。2015 年 1 月，世界上首个使用 DBS 技术的旋转扫描微波散射计随着“土壤湿度主被动观测卫星（SMAP）”成功发射运行^[8]。然而，由于空间高能粒子的影响，该散射计仅工作了两个月便失效了，因此目前尚无在轨运行的高分辨率旋转扫描微波散射计，也缺少实际观测数据用于分析、验证这种新型微波散射计的系统性能。

DBS 技术与旋转扫描微波散射计相结合，有效调和了观测幅宽与空间分辨率之间的固有矛盾，有望拓展全球亚中尺度海面风场遥感研究与应用的前景。但这种新型微波散射计的信号处理也面临一系列亟待解决的技术挑战，主要包括以下几个方面。首先，波束足迹的多普勒频移呈现复杂的时变特性，需要设计自适应的地理坐标转换（重采样）算法，将 DBS 处理得到的“距离-多普勒图像”（Range Doppler Map, RDM）转换至地理坐标系下，以便将不同观测方位角下的“图像”拼接成连续的高分辨率观测图像。其次，以往基于真实孔径雷达方程估计地表后向散射系数（ σ^0 ）不能直接用于这种新型微波散射计的 σ^0 反演，复杂的信号处理过程及其伴随的旁瓣效应增加了从 RDM 图像估计 σ^0 的难度。

为此，本文以机载平台为例，聚焦上述 DBS 信号处理、地理定位等关键问题开展研究。通过构建涵盖信号收发、脉冲压缩、多普勒锐化等步骤的信号级仿真流程，分析 DBS 旋转扫描微波散射计的空间分辨率随扫描方位角变化的特性，进而将不同观测方位角下的距离-多普勒图像重采样至统一的地理网格下。然后，

分析观测信噪比对 DBS “成像”质量和 σ^0 测量精度的影响，为 DBS 散射计海面风场反演精度评估提供技术支撑。

2. 系统参数

本文依托 Ku 波段笔形波束旋转扫描微波散射计开展研究，其核心系统参数设计需考虑机载平台的实际条件，如飞行高度、速度、以及容纳天线的空间尺寸等。本研究将飞行平台的高度 (H) 和速度 (V_p) 设置为航空校飞试验常用的典型值，即 3000 m 和 60 m/s。考虑机载散射计的天线口径不宜太大（例如小于 0.2 m），天线的-3 dB 波束宽度设置为 5° ，且波束中心入射角为 45° 。在这些基线参数的基础上，进一步根据扫描覆盖需求设计天线转速，并依照空间分辨率需求和雷达模糊理论，依次设计脉冲时宽、带宽以及重复频率。

为了保证机载旋转扫描散射计能够对观测刈幅内实现无缝覆盖，天线旋转一周飞行平台的移动距离不能超过波束足迹在俯仰方向的长度（记作 l_{-3dB} ）。基线参数对应的波束足迹距离向长度约 525 m，因此天线转动的周期应小于 $l_{-3dB}/V_p = 8.7$ s，对应的转速 > 6.9 rpm（每分钟转动周数）。天线转速越快，波束足迹在地面的驻留时间越短，DBS 获取的方位分辨率也就越低^[9]。综上，这里将天线转速设置为 7 rpm。

脉冲重复频率（PRF）设计应考虑距离模糊和方位模糊的约束。一方面，避免距离模糊的 PRF 上限由最大探测距离（ R ）决定，即 $PRF \leq \frac{c}{2R}$ （ c 表示电磁波在真空中的传播速度）。另一方面，根据奈奎斯特采样定理， $PRF \geq B_d$ （ B_d 表示波束足迹的多普勒带宽）才能避免多普勒频谱混叠，实现方位向无模糊处理^[10]。基线参数条件下，该旋转扫描微波散射计波束足迹方位向的宽度约 370 m、多普勒带宽不超过 480 Hz。为兼顾成像质量和处理效率，本文将 PRF 设置为 1000 Hz。

为了方便数据处理与应用，散射计距离向和方位向的空间分辨率应基本一致。本文利用线性调频信号和脉冲压缩技术获取距离向的高空间分辨率，然后利用 DBS 技术获取方位向的高空间分辨率（ Δx_{az} ）。 Δx_{az} 与观测方位角（ ϕ ）、载波波长（ λ ）、飞行平台速度（ V_p ）、观测距离（ R ）、频率分辨率（ ΔB ）等参数相关^[11]，

记作：

$$\Delta x_{az} = \frac{\Delta B \cdot \lambda \cdot R}{2V_p \cdot |\sin(\phi)|}$$

(1)

其中， ΔB 由 PRF 和波束足迹驻留时间（约 0.12 s）确定。结合上述基线参数， $\phi=90^\circ$ 时，方位向空间分辨率最高（约 6.7 m）； $\phi=15^\circ$ 时， Δx_{az} 数值增至最优分辨率的 4 倍（约 26 m）。当波束视线与飞行轨迹的夹角小于 15° 时， Δx_{az} 数值将显著增大，这种情况下仅使用常规的脉冲压缩获取距离分辨能力。本研究将线性调频脉冲的带宽设置为 20 MHz（地面距离分辨率约 10.6 m），从而使距离向和方位向空间分辨率（ $\phi>15^\circ$ ）基本相当。表 1 汇总了上述机载旋转扫描微波散射计的主要系统参数。

表 1 系统参数

Table 1 System Parameters

参数名称	符号	数值
飞行高度	H	3000 m
飞行速度	V_p	60 m/s
天线峰值增益	G_t	30 dB
天线旋转速率	ω	7 rpm
波束中心入射角	θ	45°
波束宽度	θ_{el} 、 θ_{az}	5°
载波中心频率	f_c	13.256 GHz
脉冲重复频率	PRF	1000 Hz
脉冲宽度	T_p	10 μs
带宽	B	20 MHz
采样率	f_s	40 MHz
发射功率	P_t	50 W

3. 信号处理模型

3.1 脉冲发射与接收处理

发射信号一般采用矩形包络的线性调频 (LFM) 脉冲, 其时域表达式如下^[12]:

$$S_t(t) = \sqrt{P_t} \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) e^{j\pi\mu t^2} \cdot e^{2\pi f_c t} \quad (2)$$

其中, $\mu = B/T_p$ 为调频斜率; rect 表示矩形窗函数, 在脉冲发射时间内其值为 1、其它时间为 0。信号仿真时通常忽略上式右边的载波项, 故在后续的公式模型中将其省略。波束足迹近似为平面, 后向散射信号视为一系列独立散射面元回波的累加, 每个面元斜距、多普勒频移与后向散射系数视为常量, 但各个独立面元之间的回波延迟和 Doppler 频移均不同^[13]。第 i 个散射面元的回波信号表示为:

$$S_{r,i}(t) = c_i \sqrt{\sigma_i^0 A_i} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_i - V_r t)} \cdot e^{j\pi\mu\left(1 + \frac{2V_r}{c}\right)t^2} \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R_i}{c}}{T_p}\right) \quad (3)$$

等式右边各项符号的意义如下说明,

- σ_i^0 : 面元后向散射系数;
- A_i : 面元面积 (m^2);
- λ : 载波波长 (m);
- R_i : 散射计与面元之间的斜距 (m);
- V_r : 面元相对于散射计的径向速度;

本研究中的径向速度 V_r 仅考虑飞行平台运动所导致的贡献。参数 c_i 包括了雷达方程中的其它系统参数^[14], 如发射功率 P_t 、双程天线增益 G^2 、载波波长 λ 、系统损耗 L_i 和斜距 R_i , 记作:

$$c_i = \sqrt{\frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R_i^4 L_i}} \quad (4)$$

单个脉冲的回波信号看成波束足迹 (记作 F) 内所有面元散射信号的累加^[15]:

$$s_r(t) = \sum_{i \in F} s_{r,i}(t) + n(t) \quad (5)$$

其中， $n(t)$ 为加性高斯白噪声。观测信噪比（SNR）是上式右边两项的比值^[16]，即：

$$\text{SNR} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sum_{i \in F} |s_{r,i}(t)|^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} |n(t)|^2 dt} \quad (6)$$

这里 t_1 、 t_2 分别是接收窗口起止时间。

接收机单元在完成回波信号的低噪声放大、中频处理和数字采样后，即可对每个脉冲回波进行距离向脉冲压缩，从而获得距离向的分辨能力。该处理可在频域利用匹配滤波来实现^[17]，即

$$s_{rc}(t) = \text{iFFT} \left\{ \text{FFT} [s_r(t)] \cdot \text{FFT} [s_t^*(t)] \right\} \quad (7)$$

其中，FFT 和 iFFT 分别表示快速傅里叶变换及其逆变换，上标“*”表示取复共轭。为了表述简洁，这里数字采样后的信号沿用前文公式所定义的符号表示。

如第 2 节所述，旋转扫描散射计波束足迹的驻留时间较短（约 0.12 s），在此时间内由平台运动引起的距离徙动量（7.2 m）小于一个分辨率单元的尺寸，因此在使用 DBS 实现方位分辨时，可忽略合成孔径雷达通常所需的运动补偿步骤。在实际处理中，我们将波束足迹驻留时间内的一组脉冲压缩后的回波信号（共 120 个脉冲）排列成一个二维矩阵，其中行对应快时间（距离向），列对应慢时间（方位向）。随后，依次在各距离门对慢时间轴进行快速傅里叶变换，即可实现方位向分辨。需要注意的是，该变换对应的频率范围为 $[0, \text{PRF}]$ ，通常需通过循环移位将其调整至 $[-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2]$ 区间，以便在频谱中心显示零频分量。

3.2 DBS 图像处理

DBS 处理得到二维复图像信号可以称为“延迟-多普勒图像 (Delay Doppler Map, DDM)”或“距离-多普勒图像 (Range Doppler Map, RDM)”，记作

$s_{\text{DBS}}(t_r, f_d)$ 。鉴于 DDM 在全球导航卫星系统反射测量学 (GNSS-R) 中亦广泛使用^[18]，为避免混淆，本文后续统一将该复图像记为 RDM。RDM 的每个像素唯一地地表征波束足迹内一个特定的地面单元，然而将其转换为地理坐标系或地距-方位平面坐标系下的图像须考虑两个关键细节。

首先，尽管波束足迹的多普勒带宽在任何观测方位角下均小于方位向采样频率 (PRF)，但多普勒中心频移的绝对值却可能远大于后者，从而导致信号出现混叠效应。尤其在观测方位角接近飞行方向时，这种情况更为突出。在信号处理链路中，通常须要预估并补偿多普勒中心频移将有效信号频谱的中心移至基带附近，从而在现有 PRF 约束下避免频谱折叠。实际上，也可以在地理坐标转换时利用下列公式处理混叠效应^{[19][20]}，即：

$$f_d = f_r - k_n \cdot \text{PRF} \quad (8)$$

其中， $f_d \in [-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2]$ ， f_r 表示面元实际的径向多普勒频移；整数 k_n 表示波束中心多普勒频率 (f_c) 的模糊数，记作 $k_n = \left\lfloor \frac{f_c}{\text{PRF}} + 0.5 \right\rfloor$ (符号 “ $\lfloor \cdot \rfloor$ ” 表示向下取整)。

其次，公式 (1) 表明，散射面元离地面飞行轨迹越近 (即 ϕ 约接近 0° 或 180°) 则空间分辨率越低，反之亦然。这种非均匀的变化特性，会给数据的标准化存储与解译带来困难。而微波散射计的海面风场反演、风向去模糊及数据应用，均需在规则、等间隔的风矢量单元上进行，这与分辨率的非均匀性存在内在矛盾。为此，本文通过以下步骤将不同方位向下的观测数据重采样至等间隔的网格单元中。

- 1) 设置地面网格：分别沿着平行于和垂直于地面飞行轨迹方向，将观测刈幅划分成等间隔的网格。依据表 1 的系统参数，本文将网格大小设置为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 。
- 2) 构建“网格-延迟/多普勒”对应关系：基于 DBS 中间脉冲对应的飞行平台位置、速度和姿态信息，结合该时刻散射计的观测几何 (入射角和方位角)，计算波束足迹内每个地面网格相对于散射计的斜距 (即延迟 $t_{r,g}$) 和多普勒频移 $f_{r,g}$ ，下标 $\mathbf{g}$ 表示地面网格的行列号矢量。

- 3) 地理坐标转换：根据公式 (8) 和步骤 2) 的结果，利用二维空间插值法依次计算 RDM 图像各个像素在地面网格中的位置 $\mathbf{g}_x$ ，该数值一般为非整数。
- 4) 重采样处理：步骤 3) 可能存在一幅 RDM 有多个像素映射到同一个地面网格单元（其位置记作 $\mathbf{g}$ ）的情况（即 $\|\mathbf{g}_x - \mathbf{g}\| < 1$ ），须利用反距离加权法对这些像素进行平均处理^[21]，即：

$$\bar{v}_g = \frac{\sum_i w_i \cdot (v_i^2 - \langle |n(t)|^2 \rangle)}{\sum_i w_i} \quad (9)$$

其中， v_i 表示第 i 个像素的幅值 $|s_{\text{DBS}}(t_{i,r}, f_{i,d})|$ ， $\langle |n(t)|^2 \rangle$ 是平均噪声功率，

$w_i = 1 - \|\mathbf{g}_x - \mathbf{g}\|$ 表示其权重系数。

- 5) 后向散射系数估计：与传统散射计不同，这里无法利用雷达方程由 $\bar{v}_g$ 直接导出地面网格单元的 σ^0 。我们首先将观测区域假设为 $\sigma^0=1$ 的均匀场景，结合飞行平台和散射计系统参数，通过上述流程（公式 2-9）仿真得到无噪声、均匀场景下的网格参考幅值，记作 $\bar{u}_g$ 。最后，利用下式估计地面的后向散射系数：

$$\sigma^0 = \frac{\bar{v}_g}{\bar{u}_g} \quad (10)$$

为了提高信号处理的时效性，实际处理时可以把不同观测方位角下的 $\bar{u}_g$ 写入预先设置好的三维查找表中，该表的三个维度分别表示方位角、延迟以及多普勒频移。后向散射系数估计时只要读入相应方位角下的 $\bar{u}_g$ 并代入公式 (10) 即可实现高效的处理。

4. 结果分析

4.1 理想点目标仿真

本节首先仿真分析 $\phi=90^\circ$ 时点目标的观测结果，旨在验证第 2 节系统参数和

第3节信号处理流程的有效性。仿真输入假设如下：1) 点目标 ($\sigma^0 \equiv 1$, $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$) 且位于波束足迹中心 (如图 1a 所示), 波束其它照射区域不存在散射目标 (即 $\sigma^0 \equiv 0$); 2) 系统的信噪比足够高, 因此公式 (5) 右侧第二项忽略不计。图 1(b) 展示了 DBS 处理得到的点目标 RDM 图像。利用公式 (9) 将其转换至地理坐标下, 再除以均匀场景下的网格参考幅值 $\bar{u}_g$ (图 1c), 即可得到点目标的后向散射系数估计值 (图 1d)。

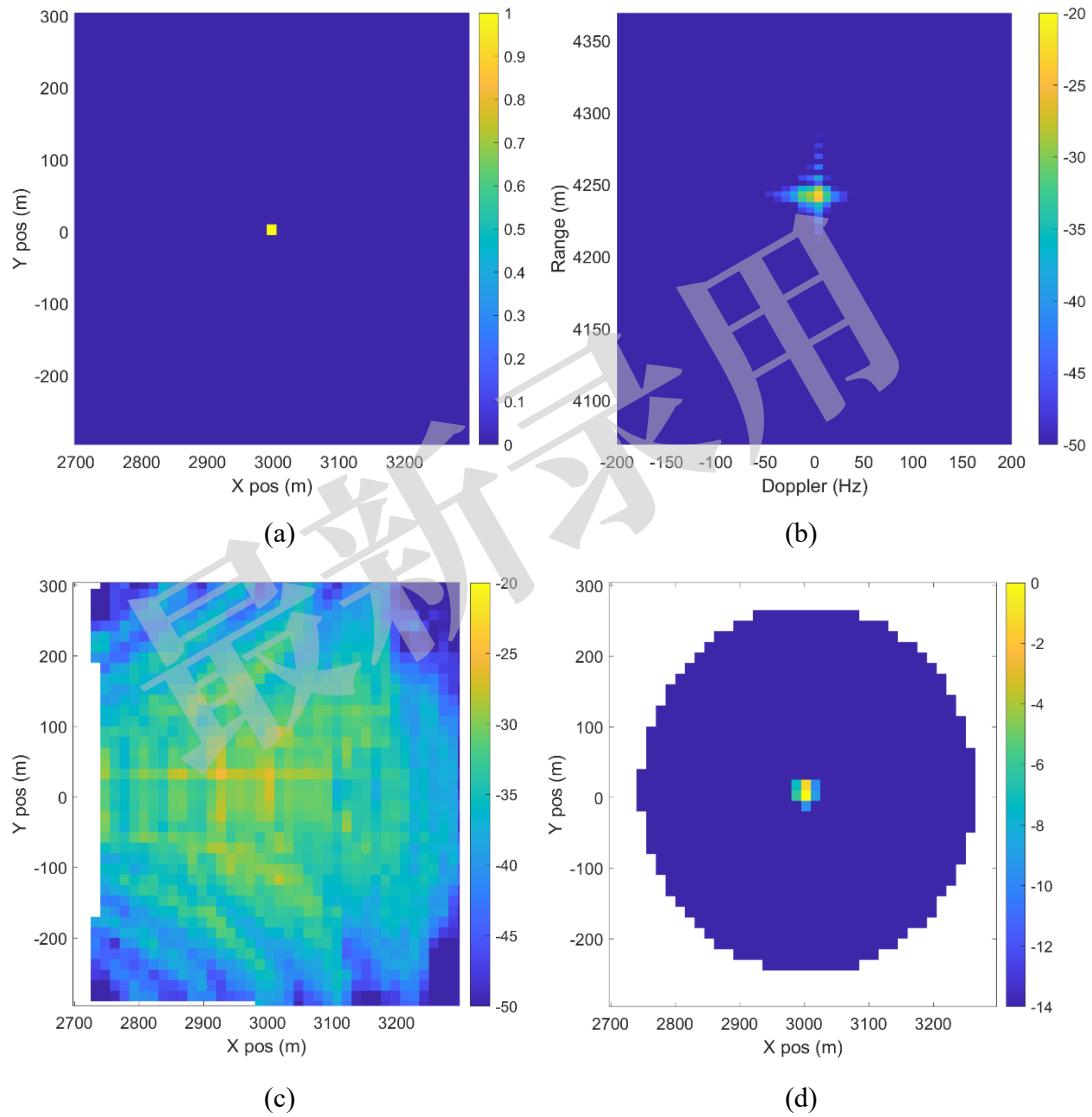


图 1 点目标设置及其仿真结果：(a) 仿真场景后向散射系数的空间分布；(b) DBS 处理得到的 RDM 图像；(c) 均匀场景下的网格参考幅值 $\bar{u}_g$ ；(d) 后向散射系数估计结果。其中(a)色标为自然值，(b)、(c)图色标的单位均为 dBW，(d)图色标单位是 dB。

Fig. 1 Point target settings and the corresponding simulation results: (a) spatial distribution of the

backscattering coefficient in the simulation scenario; (b) RDM image obtained by the DBS processing; (c) reference amplitude $\bar{u}_g$ obtained from a uniform scenario; (d) the estimated backscattering coefficient. The color bar of (a) represents natural values, the color bars of (b) and (c) are both in dBW, and the color bar of (d) is in dB.

为了提高处理的效率，利用公式（9）进行地理坐标转换时，仅对距离波束中心不超过 250 m 的网格单元进行处理。图 1(d)空白部分表示实际处理中被忽略的区域。对比图 1(a)和(d)，可以看出 DBS 旋转扫描微波散射计具备良好的空间分辨性能。尽管天线旋转扫描导致其波束足迹的驻留时间远小于常规正侧视 SAR，仍可以利用 DBS 处理准确获取点目标的空间位置和后向散射系数信息。需要注意的是，点目标的 RDM 图像在距离向和方位向均存在旁瓣，导致图像局部模糊并降低目标轮廓的清晰度。以图 1(d)为例，点目标周围 5 个像元的后向散射系数仅比该点目标的 σ^0 小 6-10 dB，意味着目标能量出现了一定的扩散，进而可能降低参数定量反演的精度。信号处理时可以利用加权窗抑制旁瓣功率，但也会损失一定的空间分辨率，本文不对此展开讨论。

图 2 对比了正侧视（ $\phi=90^\circ$ ）、斜视（ $\phi=60^\circ$ ）以及近正前视（ $\phi=15^\circ$ ）三种观测方位角下点目标的 RDM 图像在方位向（即多普勒轴）的归一化响应函数。可见，观测波束方位角从正侧视转向正前视时，多普勒轴归一化响应函数的-3 dB 宽度逐渐增大，分别为 3.6 Hz、4.4 Hz 以及 7.2 Hz；且旁瓣功率也随之增大，近正前视时第一旁瓣的归一化幅度高达约为-20 dB。

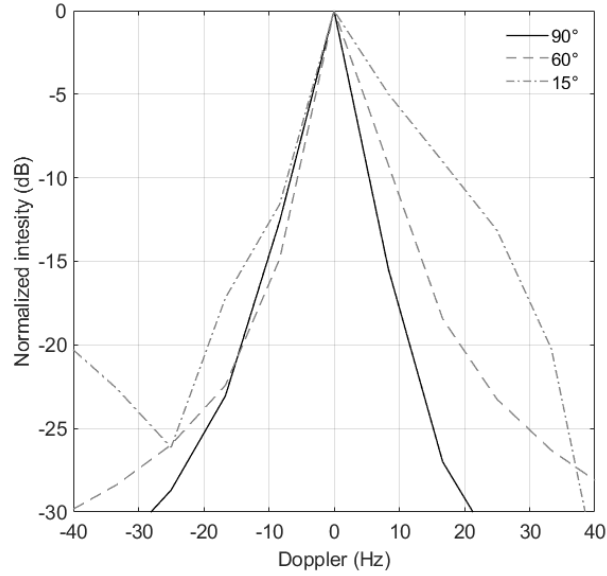


图 2 不同观测方位角下点目标在方位向的归一化响应函数

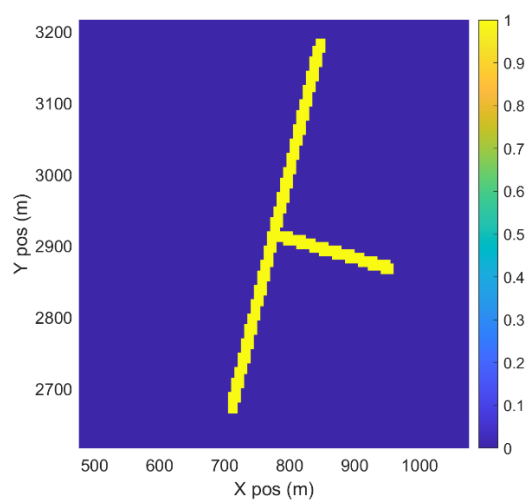
Fig. 2 Normalized azimuth response function of point target under different observation azimuth angles

4.2 观测方位角对 RDM 图像的影响

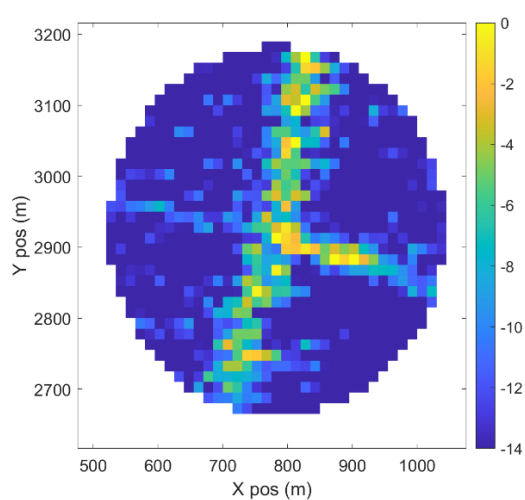
公式 (1) 和图 2 从理论和实际信号处理方面均表明, DBS 获取的空间分辨率与观测方位角有关。为了直观演示这种变化特性, 本节仿真了不同观测方位角下 ($\phi=15^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90°) DBS 处理得到的地面图像。仿真输入假设如下: 1) 各方位角下波束中心存在一“T”字型面目标, 宽度为 15 m; 2) 用于 DBS 处理的脉冲数为 120 (即: 驻留时间 $\times$ PRF), 中间脉冲的波束足迹中心与“T”字型面目标重合; 3) 观测信噪比 $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$ 。图 3 展示了上述四个不同方位角下输入面目标的空间分布及相应的 DBS 成像结果。

可以看出, 在不同观测方位角下, DBS 处理均能较好地获取面目标的轮廓与幅度信息。随着观测方位趋近飞行方向, 成像目标的轮廓清晰度逐渐降低, 表明其实际空间分辨率随之下降。尤其是 $\phi=15^\circ$ 时, 目标区域仅呈现模糊的轮廓, 且在非目标区域存在明显的斑点噪声。这说明当观测方位接近地面飞行时, DBS 处理所获得的空间分辨率较低, 且后向散射系数的测量精度容易受噪声的影响。总体而言, DBS 处理有效的观测方位区间为 $15^\circ \leq \phi \leq 165^\circ$ 及 $195^\circ \leq \phi \leq 345^\circ$, 对应了

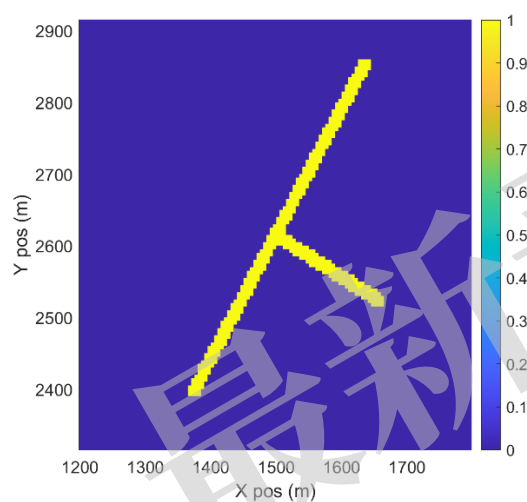
大约 74%的观测刈幅范围。



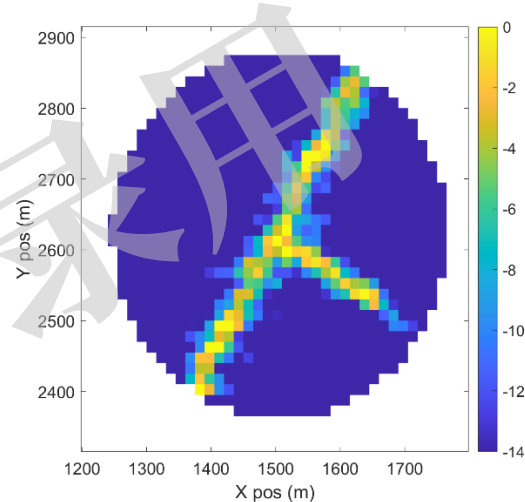
(a)



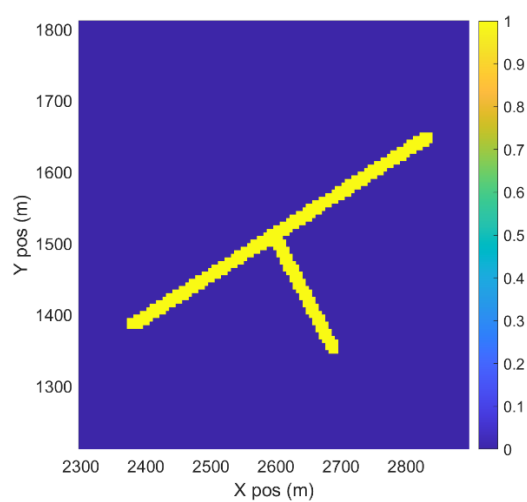
(b)



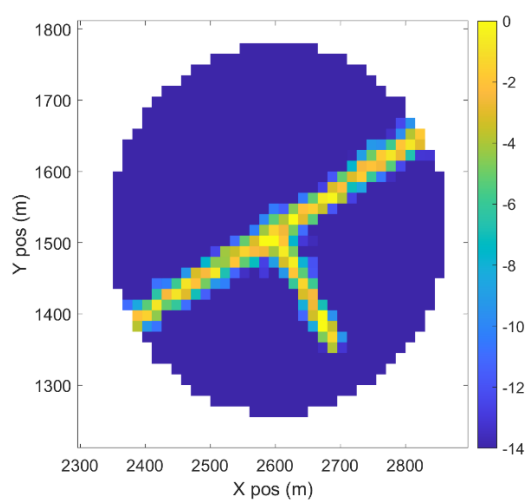
(c)



(d)



(e)



(f)

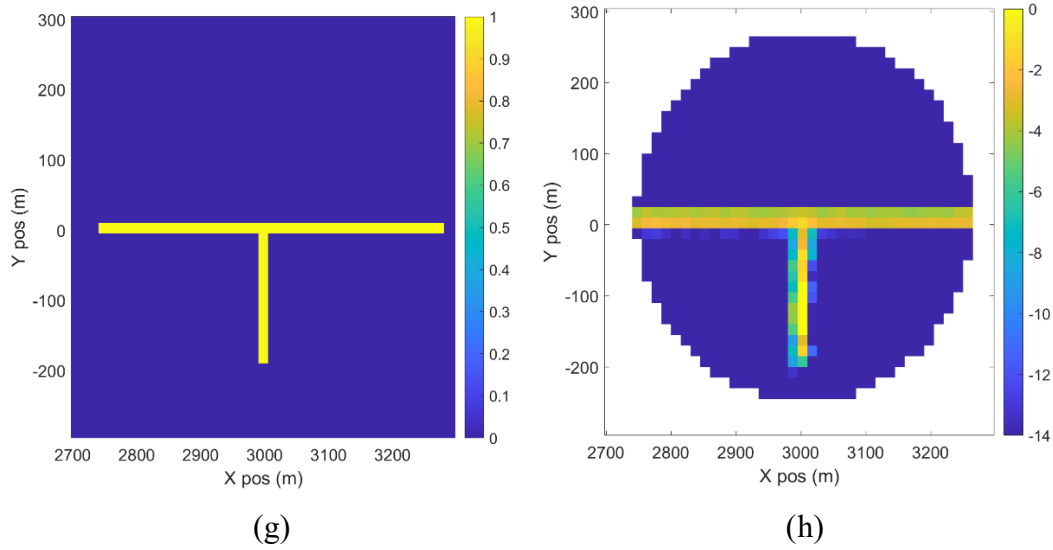


图 3 不同观测方位角下仿真面目标的空间分布（左列）与 DBS 成像效果（右列）。(a)、(c)、(e)、(g)分别对应观测方位角 $\phi=15^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° 。

Fig. 3 Spatial distribution of the simulated area targets (left column) and DBS imaging results (right column) at different observation azimuth angles. (a), (c), (e), and (g) correspond to observation azimuth angles $\phi = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, and 90° , respectively.

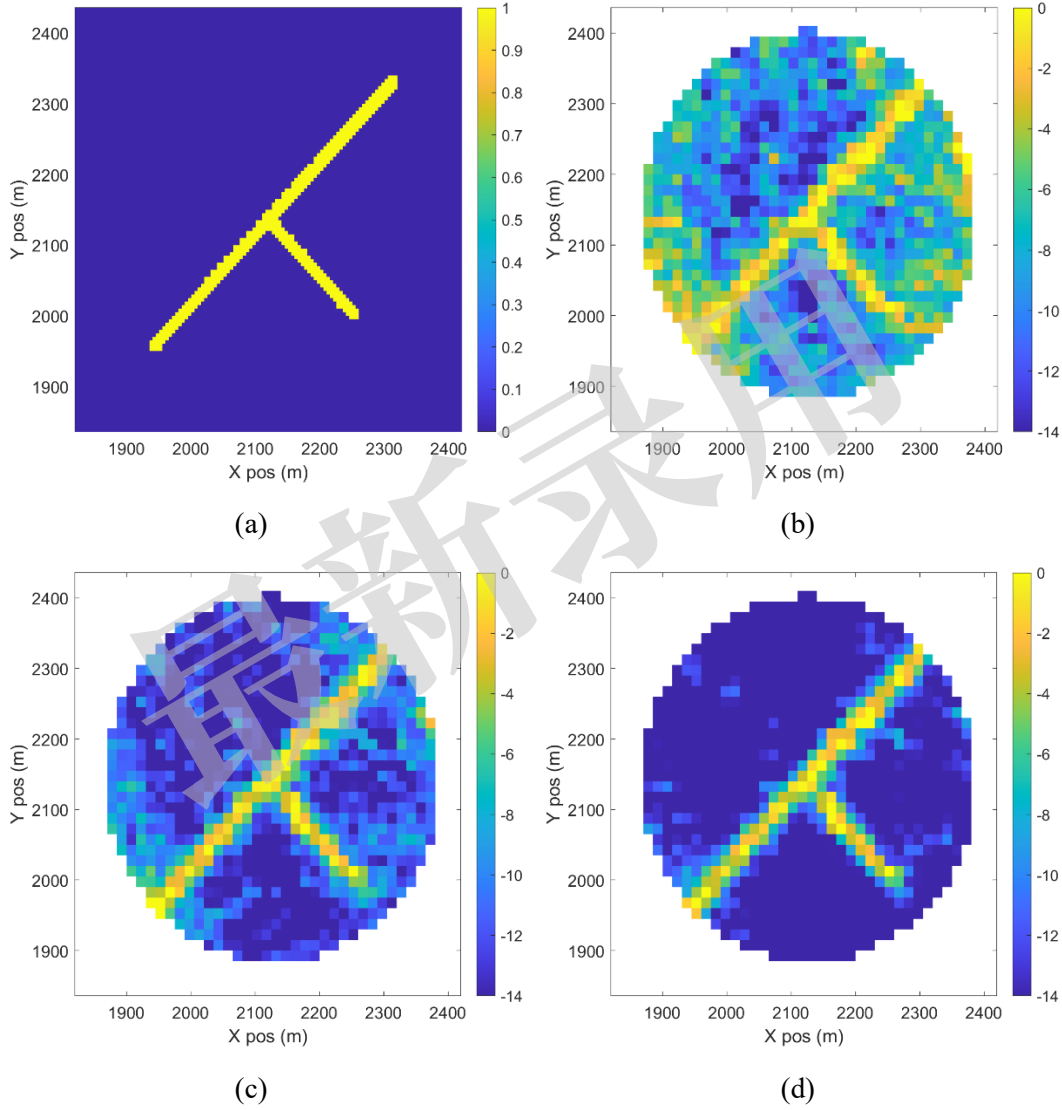
4.3 信噪比对 RDM 图像质量的影响

信噪比是决定 DBS 图像质量的另一核心要素。本节以 45° 观测方位角为例，通过仿真对比分析了不同信噪比条件下 DBS 成像效果，如图 4 所示。总体上，该 DBS 旋转扫微波扫描散射计在 $\text{SNR} \geq -10 \text{ dB}$ 时均能清晰地获取面目标的轮廓信息，且随着 SNR 增大，目标轮廓越清晰、“目标-背景”的对比度越高。 $\text{SNR} < 0 \text{ dB}$ 时，DBS 图像的目标四周开始出现明显的噪声干扰，其强度仅比目标的散射强度弱若干 dB、甚至相当（图 1b 左下角区域）。例如，图 4(b)、(c)中许多非目标区域的散射系数估计值约为 -5 dB ，意味着这些区域若存在与目标相当的散射体时，噪声干扰将导致 30%以上的相对测量误差，这会影响后向散射系数测量的准确性，进而产生较大的反演误差。

定量分析噪声对 DBS 图像质量的影响是合理设计旋转扫描微波散射计系统的关键。本节利用图像的“信号-噪声”比值（记作 SNR_{img} ）来刻画 DBS 图像的质量，其定义如下：

$$\text{SNR}_{\text{img}} = 10 \times \log_{10} \frac{\frac{1}{N} \sum_{i \in \text{目标区}} \sigma_i^0}{\frac{1}{M} \sum_{j \in \text{非目标区}} \sigma_j^0} \quad (11)$$

其中，分子和分母分别表示目标区、非目标区（图 4a 中 $\sigma^0 \equiv 1$ 、 $\sigma^0 \equiv 0$ 区域）的平均后向散射系数。实际上， SNR_{img} 也可以看作是“目标-背景”对比度的衡量指标，其值大于 10 dB 时（图 4f）图像对比度清晰、图像质量高。



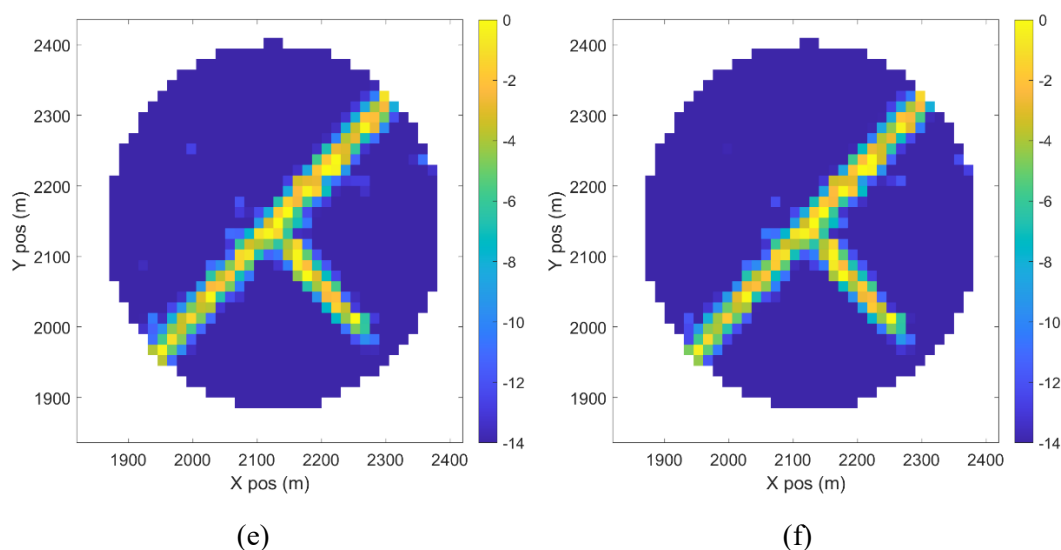


图 4 (a)观测方位角为 45° 时仿真面目标后向散射系数的空间分布; (b)-(f) 分别为 $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$ 、 -5 dB 、 0 dB 、 5 dB 以及 10 dB 时的成像效果。

Fig. 4 (a) Backscattering coefficient distribution of the simulated area target at an observation azimuth angle of 45° ; (b)-(f) show the imaging results under SNR of -10 dB , -5 dB , 0 dB , 5 dB , and 10 dB , respectively.

图 5 展示了图像质量 (SNR_{img}) 随观测方位角和信噪比综合变化的情况。可见，信噪比越高、观测方位越靠近正侧视，则 DBS 处理获取的图像质量越好。 $\phi=15^\circ$ 时，尽管 DBS 处理也能较好实现高空间分辨能力，但图像的质量普遍较差。 $30^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 、且 $\text{SNR} > 0 \text{ dB}$ 时，DBS 图像的质量良好，“目标-背景”对比度通常优于 10 dB 。 $\text{SNR} > 10 \text{ dB}$ 时，进一步提高观测信噪比并不会显著改善 DBS 图像的质量。因此，实际系统设计时可以考虑将观测区域的目标信噪比设置为 $0 \sim 10 \text{ dB}$ ，以在观测性能与系统成本之间取得较好平衡。

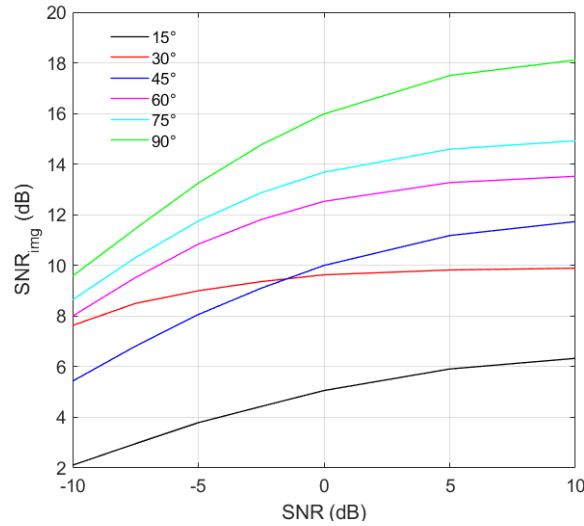


图 5 DBS 图像质量（目标-背景对比度）随观测方位角和信噪比变化的曲线

Fig. 5 Curves of DBS image quality (target-to-background contrast) varying with observation azimuth angle and signal-to-noise ratio

4.4 σ^0 测量精度分析

微波散射计的 σ^0 测量精度主要受观测信噪比、网格单元的独立样本数以及观测区域散射面元的非均匀性等因素影响^[22]。海面上散射面元的非均匀性主要是由波浪运动、长波倾斜调制和海面风场的空间变异性引起的，全面仿真分析这些因素对 σ^0 测量精度的影响超出了本文研究的范畴。本节聚焦系统自身的参数，利用数值仿真模拟讨论信噪比和反演的 σ^0 网格单元的大小对 σ^0 测量精度的影响。仿真输入以一幅陆地影像为例（图 6a），其 σ^0 范围为-22 dB ~ -1 dB、中位数为-7 dB，空间分辨率为 15 m×15 m，同时假设面元是各向同性的。仿真的平均信噪比范围设置为-10 dB ~ 10 dB。此外，仿真输出的 σ^0 网格单元分别考虑 15 m×15 m、30 m×30 m 以及 45 m×45 m 三种不同的尺寸。

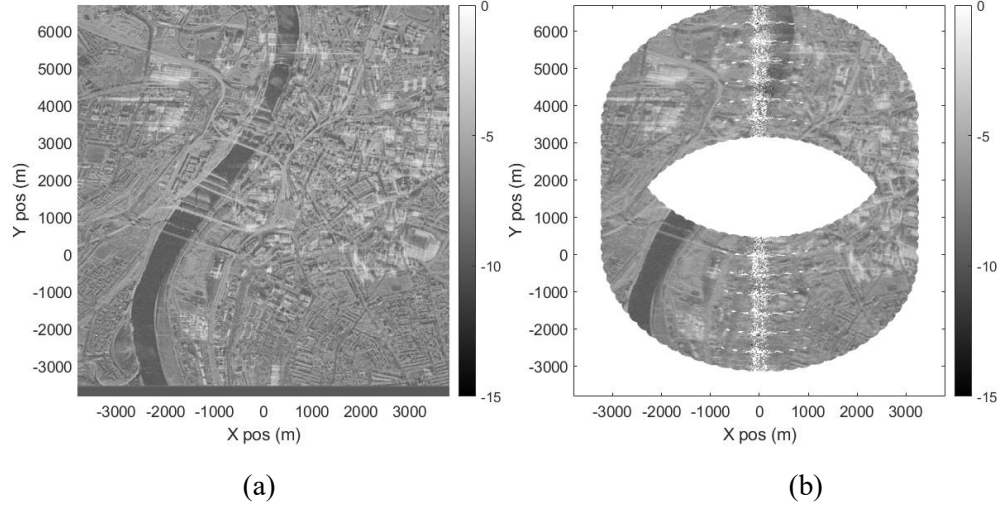


图 6 (a)仿真输入的 σ^0 影像，分辨率为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$; (b) $\text{SNR}=10\text{ dB}$ 、 σ^0 网格单元为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ 时，天线连续旋转 6 周反演得到的 σ^0 图像。色标表示后向散射系数强度 (dB)

Fig. 6 (a) Simulation input σ^0 image with a resolution of $15\text{ m} \times 15\text{ m}$; (b) Inverted σ^0 image obtained by six consecutive antenna rotations under $\text{SNR} = 10\text{ dB}$ and a σ^0 grid cell of $15\text{ m} \times 15\text{ m}$. The color bar denotes the intensity of backscatter coefficient in dB.

图 6(b)展示了 $\text{SNR}=10\text{ dB}$ 、 σ^0 网格单元为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ 时，天线连续旋转 6 周反演得到的 σ^0 图像。可以看出，观测刈幅内大部分区域的反演结果与输入图像具有良好的一致性。观测方位角接近飞行方向时 ($\phi < 15^\circ$ 、 $|\phi - 180^\circ| < 15^\circ$ 、以及 $\phi > 345^\circ$)，上文地理坐标转换算法失效，从而出现部分空白的结果，该区域不纳入 σ^0 测量精度的统计分析之中。对于其它 DBS 有效处理区域，利用归一化标准差 K_p 定量评价反演 σ^0 的总体精度，即

$$K_p (\text{dB}) = 10 \times \log_{10} \left[1 + \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i \in \text{有效}} (\sigma_{i,\text{inv}}^0 - \sigma_{i,\text{input}}^0)^2}}{\langle \sigma_{\text{input}}^0 \rangle} \right] \quad (12)$$

等式右边 N 表示有效区域总的样本数，下标 “inv” 和 “input” 分别表示反演和输入的值，分母表示有效区域的平均后向散射系数。图 7 给出了 K_p 随信噪比和网格单元大小变化的曲线。与预期的趋势一致， σ^0 测量误差随着信噪比的提高或网格单元的增大而减小。海面风场反演通常要求 σ^0 的总体精度优于 0.5 dB (即 $K_p < 0.5\text{ dB}$) [22]，这就要求该散射计的 $\text{SNR} \geq 0\text{ dB}$ 、且 σ^0 网格单元尺寸不小于 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。

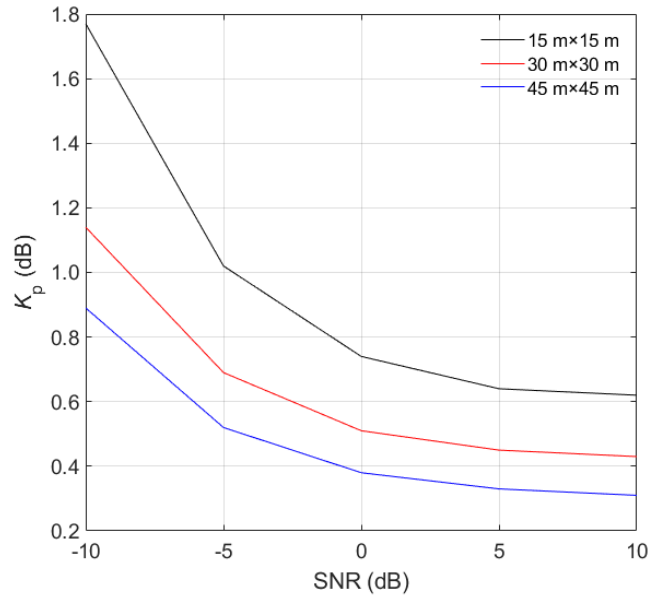


图 7 归一化测量标准差 K_p 随信噪比和网格单元大小变化的情况

Fig. 7 Variation of the normalized measurement standard deviation K_p with signal-to-noise ratio and grid size

5 结论和展望

本文面向“宽刈幅、高分辨率”对地遥感观测需求，将多普勒波束锐化技术与旋转扫描微波散射计相结合，旨在构建一种新型的、可用于亚中尺度海面风场遥感微波散射计系统。以机载平台为例，首先分析设计了旋转扫描微波散射计的主要系统参数，包括天线旋转速率、脉冲时序等。然后，概述了信号发射、接收和 DBS 信号处理模型，重点阐述了如何将“距离-多普勒图像”转换至地理坐标系下，以及如何估计地面的后向散射系数。最后，通过信号级的系统仿真探究了不同观测方位角和信噪比条件下的 DBS 图像质量，并分析了信噪比和网格单元的大小对 σ^0 测量精度的影响。结果表明，DBS 旋转扫描微波散射计能够有效获取高空间分辨能力，远优于该散射计真实孔径波束的方位分辨率 (~ 370 m)。信噪比越高、观测方位越靠近正侧视，DBS 图像的质量越好，当 $30^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 且 $\text{SNR} > 0$ dB 时，DBS 图像的“目标-背景”对比度优于 10 dB。此外，信噪比大于 0 dB 时高分辨 ($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$) σ^0 的总体测量精度与传统微波散射计的 σ^0 精度相当 (~ 0.5 dB)。

本研究也存在一些不足之处：首先，研究手段完全依赖于信号级仿真，忽略了实际系统中各个模块增益/损耗的波动、滤波器通频带的非一致性等因素的影

响。实际系统定标处理后,上述因素对 σ^0 测量精度的影响约为 0.2 dB^[23]。其次,尽管 DBS 旋转扫描散射计波束足迹的地面驻留时间远小于传统 SAR,仿真中未考虑的海面波浪、风场变异性等动态因素仍可能导致 σ^0 分辨率及测量精度降低^[24]。换言之,本文进行了静止的、均匀的点/面目标或静态场景仿真,其结果反映的是 DBS 散射计在理想条件下的分辨率提升潜力和测量精度上限。尽管如此,文中信号处理、地理坐标转换等关键流程均可以为未来星载 DBS 旋转扫描散射计的系统设计提供借鉴。

需要注意的是,未来星载 DBS 散射计的目标是实现公里级观测,其亚中尺度海面风场反演将面临新的挑战。一方面,现有地球物理模式函数通常基于中低分辨率观测数据构建,以半经验拟合方式量化 σ^0 与风场的关系,而公里级尺度下海面粗糙度的异质性(如长波的倾斜调制、水动力调制)和局地风场的变异性可能导致 σ^0 与风场的关系偏离传统模型假设,进而增大风速、风向反演误差^[25]。另一方面,公里级海面风场的空间变异性显著高于风向解模糊方法(圆中数滤波或二维变分)常用的数值天气预报背景风场,因此须要改进传统解模糊算法中的误差协方差矩阵,才有望实现较为理想的解模糊效果^[26]。下一步我们将结合实际海面的散射和运动特征,更加真实地仿真分析不同空间分辨率和海面风场变异性下 DBS 散射计的测量性能,全面分析其后向散射系数的测量精度及影响因素。同时,探索公里级海面风场反演中的解模糊方法,进一步夯实高分辨率海面风场遥感的理论和工程基础。

参考文献

- [1] SPENCER M W, WU C, LONG D G. Tradeoffs in the design of a spaceborne scanning pencil beam scatterometer: application to SeaWinds[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**(1): 115-126
- [2] VOGELZANG J, STOFFELEN A, VERHOEF A, *et al.* Validation of two-dimensional variational ambiguity removal on SeaWinds scatterometer data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, **26**(7): 1229-1245
- [3] WANG Z X, ZHAO C F, ZOU J H, *et al.* An improved wind retrieval algorithm for the HY-2A scatterometer[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, **33**(5): 1201-1209
- [4] MANDAL S, SIL S, SHEE A, *et al.* Comparative analysis of SCATSat-1 gridded winds with buoys, ASCAT, and ECMWF winds in the Bay of Bengal[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, **11**(3): 845-851

- [5] MOUCHE A, CHAPRON B, KNAFF J, *et al.* Copolarized and cross-polarized SAR measurements for high-resolution description of major hurricane wind structures: application to Irma category 5 hurricane[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, **124**(6): 3905-3922
- [6] KHAN S, YOUNG I, RIBAL A, *et al.* High-resolution calibrated and validated synthetic aperture radar ocean surface wind data around Australia[J]. *Scientific Data*, 2023, **10**(1): 163
- [7] SPENCER M W, WU C, LONG D G. Improved resolution backscatter measurements with the SeaWinds pencil-beam scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(1): 89-104
- [8] WEST R. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) SMAP Level 1 Radar Data Products[R]. Pasadena: California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory, 2012: 70
- [9] WANG Gang, DONG Xiaolong, ZHU Di. High resolution implementation based on scanning spaceborne radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, **32**(6): 1071-1077 (王刚, 董晓龙, 朱迪. 基于星载旋转扫描雷达的高分辨率实现[J]. *遥感技术与应用*, 2017, **32**(6): 1071-1077)
- [10] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, *et al.* A tutorial on synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, **1**(1): 6-43
- [11] SUN H , LIU G , GU H, *et al.* The development of DBS imaging based on airborne pulse Doppler radar in China[J]. *Microwave Journal*, 2001, **44**(2): 78-94
- [12] ZHAO Yong. Research and Hardware Implementation of Forward-Looking Angle Super-Resolution Imaging Method for Airborne Radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024 (赵勇. 机载雷达前视角超分辨成像方法研究与硬件实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2024)
- [13] XU F, JIN Y Q. Imaging simulation of bistatic synthetic aperture radar and its polarimetric analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(8): 2233-2248
- [14] LIN Wenming. Study on Spaceborne Rotating, Range-Gated, Fanbeam Scatterometer System[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, 2011 (林文明. 星载扇形波束扫描微波散射计系统研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2011)
- [15] ZHANG S S, LONG T, ZENG T, *et al.* Space-borne synthetic aperture radar received data simulation based on airborne SAR image data[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(11): 1818-1821
- [16] PALMER R D .FUNDAMENTALS OF RADAR SIGNAL PROCESSING[J].*bulletin of the american meteorological society*, 2008.
- [17] XING Mengdao, SUN Guangcai, WANG Tong. Radar Imaging Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2024: 407 (邢孟道, 孙光才, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2024: 407)
- [18] RUF C S, CHEW C, LANG T, *et al.* A new paradigm in earth environmental monitoring with the CYGNSS small satellite constellation[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 8782
- [19] EINEDER M. Efficient simulation of SAR interferograms of large areas and of rugged

- terrain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(6): 1415-1427
- [20] CUMMING I G, WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston: Artech House, 2005
- [21] CURLANDER J C. Location of spaceborne SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, **GE-20**(3): 359-364
- [22] LIN W M, DONG X L, PORTABELLA M, *et al.* A perspective on the performance of the CFOSAT rotating fan-beam scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(2): 627-639
- [23] STOFFELEN A. A simple method for calibration of a scatterometer over the ocean[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, **16**(2): 275-282
- [24] RIZAEV I G, KARAKUŞ O, HOGAN S J, *et al.* Modeling and SAR imaging of the sea surface: a review of the state-of-the-art with simulations[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, **187**: 120-140
- [25] RANA F M, ADAMO M. Uncertainty analysis in SAR sea surface wind speed retrieval through C-band geophysical model functions inversion[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(7) 1685
- [26] NI W C, STOFFELEN A, REN K J, *et al.* Enhanced tropical cyclone ASCAT winds guided by SAR-learned spatial structure functions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, **63**: 4100719

第一作者：王何庆 男，1999 年 9 月出生于安徽省池州市，现为安徽建筑大学电子与信息工程学院硕士研究生（南京信息工程大学联合培养），主要研究方向为雷达信号处理。



通讯作者：林文明 男，1984 年 4 月出生于福建省仙游县，现任南京信息工程大学海洋科学学院教授、副院长，主要研究方向为海洋微波遥感、数据处理、雷达定标等。

