

CHEN Shaohan, DONG Xiaolong, ZHU Di, ZHANG Jingyu. Doppler Spectrum Analysis of Ground Echoes from Spaceborne Doppler Scatterometer (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, 46(1): 97–109. CSTR:32142.14.cjss.2024-0182. DOI:10.11728/cjss2026.01.2024-0182

星载多普勒散射计地面回波的多普勒谱分析*

陈少涵 董晓龙 朱迪 张敬钰

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 流场多普勒的定标和量化测量是实现流场观测的基础和前提,是需要解决的关键核心问题. 建立地面散射回波仿真模型,对潜在可用于多普勒散射计外定标的自然地面扩展目标的多普勒谱特性进行仿真分析,比较其不同平台的运动速度、入射角、方位角下的变化特征. 结果表明,平台运动速度是影响多普勒谱特性的主要因素,入射角和方位角的变化也对多普勒谱特性有明显影响. 对不同高度起伏的地面扩展目标的多普勒谱特性仿真结果表明,高度起伏越大的目标其多普勒谱偏移越大,同时中心高度的变化对于多普勒谱特性的影响则不明显. 因此在定标目标的选择中,应选择较为平坦的扩展目标. 最后对地面回波多普勒频偏进行了分析,并使用 DEM 模型进行验证. 研究结论将为多普勒散射计定标的后续研究提供支持.

关键词 多普勒散射计, 自然扩展目标, 地面回波, 多普勒谱特性

中图分类号 P714

Doppler Spectrum Analysis of Ground Echoes from Spaceborne Doppler Scatterometer

CHEN Shaohan DONG Xiaolong ZHU Di ZHANG Jingyu

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Sea surface current fields are important oceanic and climatic variables. Due to its capability for global coverage and direct observation of sub-mesoscale sea surface current fields, the Doppler scatterometer has become a frontier in ocean remote sensing technology research. The calibration and quantitative measurement of the Doppler scatterometer are the foundations and prerequisites for current field observations, as well as a critical core issue that needs to be addressed. This paper develops a ground-scatter-echo simulation model and uses it to simulate and analyze the Doppler spectra of natural

* 中国科学院前瞻战略科技先导专项项目资助 (XDA0370101)

2024-12-13 收到原稿, 2025-05-15 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

extended targets that could potentially serve for Doppler scatterometer calibration. First, the variation characteristics of the Doppler spectrum were compared with different platform velocities, incidence angles, and azimuth angles. The results indicate that platform motion speed is the primary factor affecting Doppler spectrum characteristics, while variations in incident and azimuth angles also have significant impacts. Then, the Doppler spectral characteristics of ground extended targets were analyzed with different terrain-undulation conditions, namely varying height variation and central height. Simulation results indicate that targets with larger height variation exhibit greater Doppler spectral frequency shifts, whereas changes in central height have little effect on the Doppler spectral characteristics. Therefore, in the selection of calibration targets, relatively flat extended targets should be chosen, while the absolute elevation of the target is not a critical factor. Finally, an analysis of the ground echo Doppler frequency shift was conducted and validated using the DEM model. The findings of this study will provide support for further research on Doppler scatterometer calibration.

Key words Doppler scatterometer, Natural extended targets, Ground echoes, Doppler spectrum characteristics

0 引言

海洋表层流是重要的海洋和气候变量,也是海气热量、能量和碳以及其他许多常量交换的主要驱动力之一^[1]. 实现全球海洋表层流场测量对于了解多尺度海洋动力学、海气相互作用、海洋在气候变化中的作用以及海洋运动预测具有重要的科学意义和应用价值^[2,3]. 近年来,多普勒散射计因为其全球覆盖测量以及直接观测亚中尺度海表全流场的能力而受到越来越多的关注,目前已成为国际海洋遥感观测技术研究发展的热点和前沿^[2]. 基于这一概念,多个国家已经开始研制星载多普勒散射计并展开机载验证实验及相关理论研究^[4].

多普勒散射计对流场矢量的精确测量依赖于对目标多普勒频移的高精度估计,而多普勒散射计对于流场矢量的观测是建立在目标多普勒频率的精确测量上^[5]. 多普勒频率的定标和量化测量是实现观测和任务目标的基础和前提. 因为海洋流场是时刻运动的,且运动特征未知,所以要实现多普勒频率的精确测量,需要通过已知扩展目标对散射计的多普勒测量精度及其关键影响因素进行验证^[6]. 而地面扩展目标时刻静止,理论多普勒频率为零,是理想的定标目标. 因此,对于地面扩展目标散射回波进行多普勒频率及其谱分析,以了解其特性十分重要.

多普勒散射计作为卫星海洋学需要重点突破的方向之一^[7],多普勒频率定标是需要解决的关键核心问题. 本文针对星载旋转笔形波束体制多普勒散射计

(以下简称多普勒散射计)对潜在可用于多普勒频率定标的自然扩展目标的多普勒谱特性进行了仿真分析,比较了其在不同条件下的变化特征,并给出了初步的定标方法. 首先,明确了地面散射回波多普勒谱的仿真流程,建立了多普勒散射计的观测几何和地面散射回波信号模型,用以对地面扩展目标的回波信号进行仿真,并对仿真使用的后向散射幅度及多普勒频率计算方法进行了详细说明,给出了地面散射回波信号多普勒的表达式. 然后,通过计算得到地面散射回波信号的多普勒频率及多普勒谱,刻画系统的观测过程和多普勒响应特性,比较了其在不同入射角、方位角以及不同高度起伏条件下的变化特征,分析了影响地面扩展目标多普勒频率的因素;最后仿真得出地面散射回波的多普勒偏移校正量及其不确定度,为利用地面扩展目标进行多普勒频率在轨外定标提供了理论基础.

1 地面散射回波多普勒谱仿真

计算地面自然扩展目标的散射回波多普勒谱的仿真流程如图1所示.

将自然扩展目标进行网格划分,结合观测几何参数及多普勒散射计参数,可以计算出多普勒散射计足印内各面元的多普勒频率偏移;基于随机粗糙面解析近似模型,结合观测几何参数及多普勒散射计参数,可以得到足印内各面元的回波功率;通过各面元的多普勒频率偏移和回波功率,可以得到各面元的散射回

波, 将其叠加即可得到最终的地面散射回波; 对地面散射回波使用脉冲对算法计算得到多普勒频率; 在去除平台运动引起的多普勒频率后, 可以得到地面散射回波的多普勒频率, 从而得到其多普勒谱。

1.1 地面散射回波信号仿真模型

多普勒散射计的观测几何如图 2 所示, 设地球半径为 R_e , 多普勒散射计飞行高度为 H , 飞行速度为 v_p , 入射角为 θ , 天线波束宽度为 β , 方位角为 φ [8]。

根据观测几何及正弦定理可以得到笔形波束近端视向向量的法向夹角为

$$\theta_L = \arcsin \left[\frac{R_e + H}{R_e} \sin \left(\theta - \frac{\beta}{2} \right) \right]. \quad (1)$$

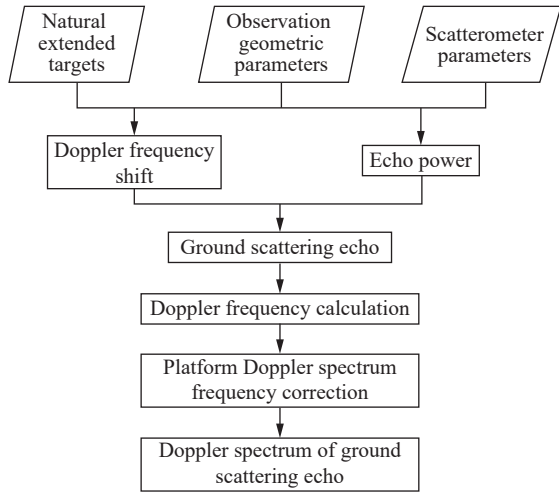


图 1 地面散射回波多普勒谱仿真流程

Fig. 1 Simulation flowchart of ground scattering echo Doppler spectrum

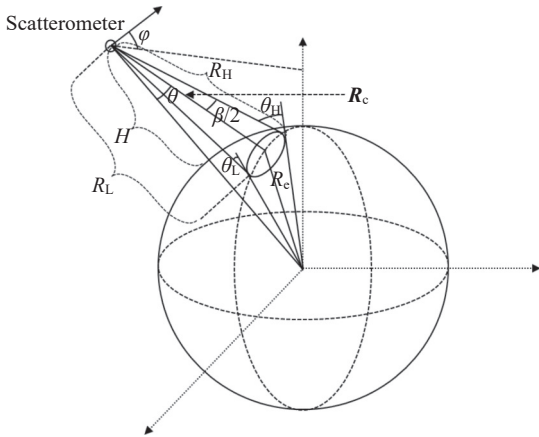


图 2 多普勒散射计观测几何

Fig. 2 Observation geometry of Doppler scatterometer

同理, 可以得到笔形波束远端视向向量的法向夹角

$$\theta_H = \arcsin \left[\frac{R_e + H}{R_e} \sin \left(\theta + \frac{\beta}{2} \right) \right]. \quad (2)$$

对笔形波束的足印进行网格化处理, 划分为多个微小面元, 网格化处理如图 3 所示. 波束足印中每个小面元到多普勒散射计的径向距离和多普勒频率均不同, 其回波强度也不同. 多普勒散射计收到的回波信号则是各面元回波信号强度加权后叠加的结果。

坐标为 (x_i, y_j) 的面元到多普勒散射计的径向距离 $R_L(i, j)$ 可以表示为

$$R_L(i, j) = |\mathbf{R}_c + \mathbf{R}_{i,j}|. \quad (3)$$

其中, $\mathbf{R}_c$ 为多普勒散射计到波束中心的距离矢量, $\mathbf{R}_{i,j}$ 为波束中心到坐标为 (x_i, y_j) 面元的距离矢量。

坐标 (x_i, y_j) 面元的入射角可以表示为

$$\theta_{i,j} = \arccos \left[\frac{(R_e + H)^2 + R_e^2 - R_L(i, j)^2}{2R_e(R_e + H)} \right]. \quad (4)$$

方位角

$$\varphi_{i,j} = \arccos \left\{ \frac{H \tan \varphi \cos \theta - x_i}{[(-H \tan \varphi \cos \theta + x_i)^2 + (H \tan \varphi \sin \theta + y_j)^2]^{0.5}} \right\}. \quad (5)$$

多普勒频率

$$f_D(i, j) = \frac{2v_{i,j} \cos \varphi_{i,j} \sin \theta_{i,j}}{\lambda}. \quad (6)$$

其中, $v_{i,j}$ 为多普勒散射计到面元的径向速度。

面元回波信号的幅度由雷达方程决定, 即

$$A(i, j) = \left[\frac{P_t \lambda^2}{(4\pi)^3} G(i, j) \frac{R_L(i, j)}{\sin \theta_i} \sigma_0(i, j) \right]^{0.5}. \quad (7)$$

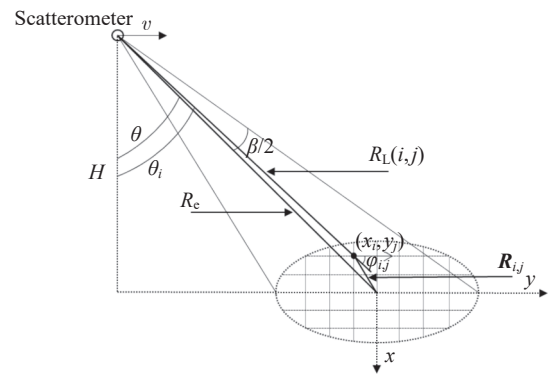


图 3 笔形波束足印的面元划分

Fig. 3 Grid division of the footprint for the pencil-beam

其中, P_t 为传输功率, $G(i)$ 为基于 Sinc 函数的天线方向图, $\sigma_0(i)$ 为回波信号的后向散射系数.

面元的时延为

$$t_{i,j} = t - \frac{2R_L(i,j)}{c}. \quad (8)$$

多普勒散射计的回波信号为各面元回波信号强度加权后的叠加, 为更准确测量多普勒频率, 发射信号使用单频正弦信号, 最后得到的回波信号可表示为

$$S = \sum S_{i,j} = \sum A_{i,j} \exp\{j2\pi[f_c + f_D(i,j) + f]t_{i,j}\}. \quad (9)$$

其中, f_c 为载频.

1.2 回波信号后向散射幅度计算

地面散射回波中, 回波信号的信号幅度由雷达方程决定, 而雷达方程的计算需要地面的后向散射系数信息, 因此需要计算地面中各面元的后向散射系数. 后向散射幅度由多普勒散射计发射功率、地面高度及斜率、后向散射系数计算得到. 计算流程如图 4 所示.

通过地面高度和观测几何参数计算得到地面斜率. 地面斜率结合地面的介电常数, 通过随机粗糙面近似解模型, 计算得到地面的后向散射系数. 将多普勒散射计发射功率与后向散射系数相乘, 得到地面散射回波的后向散射幅度.

如图 5 所示, 设地面上一点为 (x, y) , 沿多普勒散射计视向矢量方向可以得到另一点 (x_1, y_1) , 两点的地面高度分别为 $A(x, y)$, $A(x_1, y_1)$.

由 (x, y) 和 (x_1, y_1) 两点间距离及地面高度, 可以计算得到点 (x, y) 在对应方位角 φ 下的地面斜率为

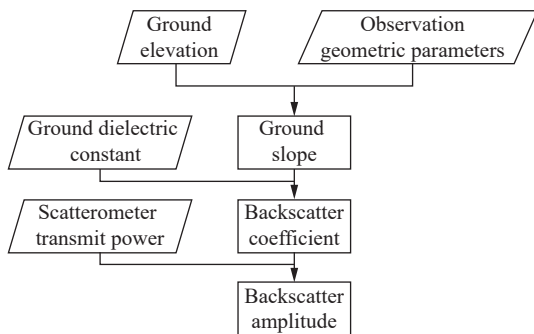


图 4 后向散射幅度计算流程

Fig. 4 Flowchart for backscatter amplitude calculation

$$k(x, y) = \frac{A(x, y) - A(x_1, y_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}}. \quad (10)$$

其中, 后向散射系数由积分方程法 (IEM) 计算. 基于 IEM 的后向散射系数为

$$\sigma_{pp} = \frac{k_1^2}{4\pi} \exp(-2k_1^2 \delta^2 \cos^2 \theta) \sum_{n=1}^{\infty} |I_{pp}^n|^2 \frac{W^{(n)}(2k_1 \sin \theta, 0)}{n!}. \quad (11)$$

其中, 下角 pp 为入射和散射波的极化状态, k_1 为自由空间波数, δ 为均方根高度, $W^{(n)}$ 为粗糙面的二维 n 阶功率谱密度函数.

研究选用撒哈拉沙漠和格陵兰冰盖两个典型自然扩展目标进行地面散射回波信号的仿真. 撒哈拉沙漠地势开阔, 沙质均一, 且水分含量极低, 为近似平坦、延伸广阔的干旱区提供了较为理想的散射环境; 格陵兰冰盖则以大面积连续冰层为主要特征, 其表面含水量和介电特征同沙漠区域截然不同, 同时冰盖区在局部地形起伏和冰层动态方面更具变化性.

在计算 I_{pp}^n 时, 需要使用等效介电常数 ϵ_r , 不同环境下的地表后向散射系数不同. 沙地的组成主要为砂砾、空气和水. 由于其含水量较少, 所以一般不考虑含水量对等效介电常数的影响. Matzler 等^[9] 在 1994 年通过实地数据测量建立了等效复介电常数模型, 在入射波频率为 f 的条件下, 其等效介电常数可表示为

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' = 2.53 + \frac{0.26}{1 - i \frac{f}{f_0}} + ia''. \quad (12)$$

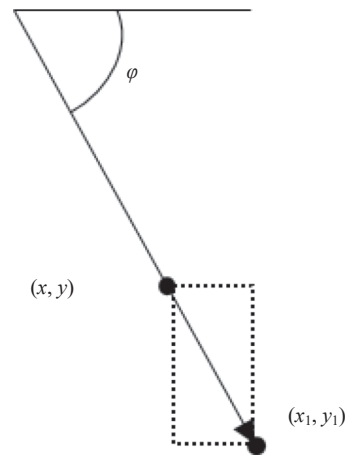


图 5 多普勒散射计视向地面斜率

Fig. 5 Doppler scatterometer line-of-sight ground slope

其中, a'' 为虚部的估计值, 作为主要砂砾部分损失的补充, 通常取 0.002; f_0 为介电常数虚部过度的频率值, 通常取 0.25 GHz.

冰盖的等效介电常数的实部由 Mätzler 的经验公式^[10] 计算, 虚部由 Tiuri 的经验公式^[11] 得到

$$\varepsilon_{r,\text{ice}} = \varepsilon'_{r,\text{eff}} + i\varepsilon''_{r,\text{eff}},$$

$$\varepsilon'_{r,\text{eff}} = 1 + 1.4667f_v + 1.435f_v^3, \quad 0 < \rho \leq 0.4,$$

$$\varepsilon''_{r,\text{eff}} = \varepsilon''_{r,\text{ice}}(0.52\rho + 0.62\rho^2). \quad (13)$$

其中, ρ 为雪/冰体积密度, 单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; $f_v = \rho/0.917$. 由 Alley 的计算^[12] 可以得到

$$\rho(z) = 0.922 - 0.564 \times e^{0.0165z}. \quad (14)$$

其中, z 为冰层深度, 单位为 m, 在该回波仿真模型中取 0.

1.3 剖分面元的多普勒频率计算

在得到地面散射回波信号后, 通过计算获得多普勒频率. 在多普勒散射计系统中, 常用脉冲对算法进行计算. 该算法是基于脉冲相关模型的时域算法, 利用两个连续的回波脉冲之间的相位差获得目标速度.

算法原理如图 6 所示.

在径向速度不变的情况下, 相对运动会引起两次回波脉冲的探测距离变化, 从而造成两个回波脉冲的相位差.

两个相邻回波 S_1, S_2 分别表示为

$$S_1 = A_1 \exp[j(2\pi ft + \varphi_0 + (4\pi r_1)/\lambda)],$$

$$S_2 = A_2 \exp[j(2\pi ft + \varphi_0 + (4\pi r_2)/\lambda)]. \quad (15)$$

相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi r_1}{\lambda} - \frac{4\pi r_2}{\lambda} = \frac{4\pi(r_1 - r_2)}{\lambda}. \quad (16)$$

其中, A_1, A_2 为回波信号幅度; r_1, r_2 分别为两次回波脉冲的探测距离.

两回波信号的复相关系数可以表示为

$$\Gamma = S_1 \cdot S_2^* = A_1 A_2 \exp(j\Delta\varphi). \quad (17)$$

复相关系数的辐角干涉相位

$$\varphi_{pp} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\Gamma)}{\text{Re}(\Gamma)} \right]. \quad (18)$$

其中, $\text{Im}(\Gamma)$ 为复相关系数的虚部, $\text{Re}(\Gamma)$ 为复相关系数的实部.

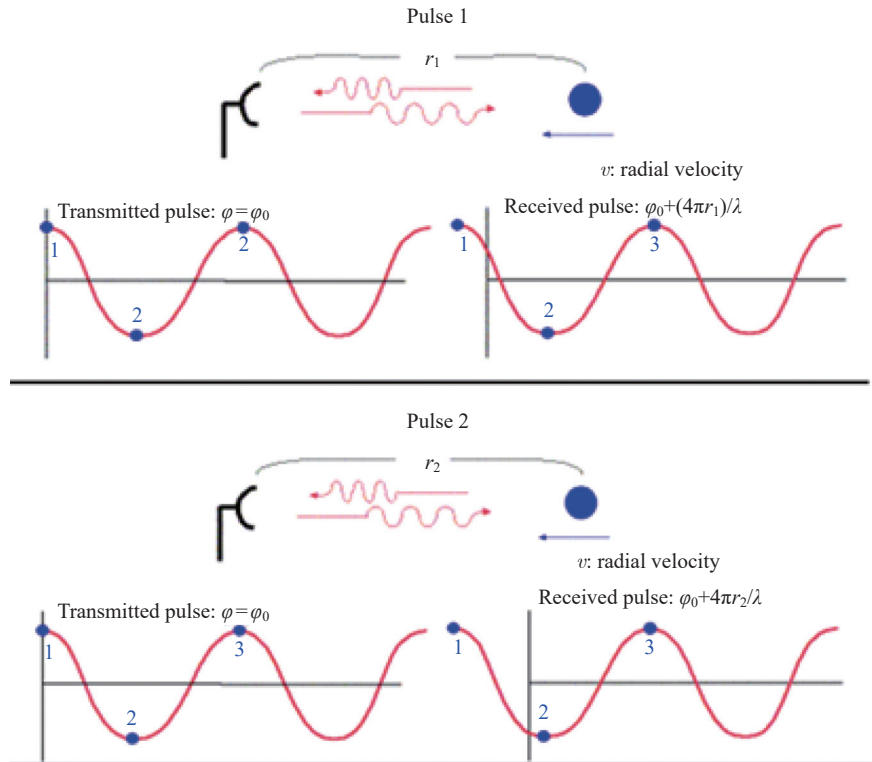


图 6 脉冲对算法原理

Fig. 6 Pulse pair algorithm schematic

故使用脉冲对算法计算得到的多普勒频率 f_{pp} 可表示为

$$f_{pp} = \frac{1}{2\pi\Delta\tau} \arctan \left[\frac{\text{Im}(I)}{\text{Re}(I)} \right]. \quad (19)$$

通过后向散射系数计算以及各面元多普勒频率计算得到回波信号后,即可对回波信号进行多普勒谱特性分析.

1.4 地面回波信号多普勒谱

多普勒谱通过对回波信号进行傅里叶变换得到.在进行傅里叶变换之前,先通过下式去除载频,有

$$S_D = S \cdot e^{-j2\pi f_c t} = \sum A_i \exp \{j2\pi [f_D(i) + f] t_i\}. \quad (20)$$

多普勒谱 F'_D 由 S_D 通过傅里叶变换获得,即

$$F'_D(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_D e^{-j2\pi f t} dt. \quad (21)$$

此时的多普勒谱 $F'_D(f)$ 中多普勒散射计运动是多普勒谱的主要贡献,需要将其去除,有

$$F_D(f) = F'_D(f) - \frac{2v_p \sin\theta \cos\varphi}{\lambda}. \quad (22)$$

由此得到地面散射回波的多普勒谱.

2 多普勒谱仿真结果分析

2.1 仿真目标

在轨外定标过程中,自然扩展面目标的选取对多普勒散射计高精度流场测量具有举足轻重的影响.同固定的定标站不同,自然扩展面目标通常具备大面积、连续性与均质性的特征,使多普勒散射计可以覆盖更大范围,同时获得更加稳定的回波信号.但是如

果目标区域的地形起伏、表面粗糙度和介电特性分布差异过于明显,可能使多普勒频率偏移和谱展宽出现不可忽视的随机波动,从而增加后续定标过程中的不确定性,使流场测量的精度降低.

为获得可靠的地面数据,采用成熟的地形数据库.数字高程模型(DEM)是最常用的一种数据库,由一组离散数据表示地形的高度信息.ASTER GDEM(先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型)覆盖了全球从83°N到83°S之间的所有陆地区域,覆盖率达99%,分辨率30 m.ASTER GDEM的数据格式采用的是地理经纬度坐标系,因此需要对其进行系统坐标系转换,将其转换为直角坐标系.平面直角坐标系采用UTM(Universal Transverse Mercator Grid System,通用横墨卡托网格系统).同时,由于原始地形数据的分辨率为30 m,与仿真的地形精度10 m要求不一致,因此需要对其进行线性插值处理.

选用撒哈拉沙漠、格陵兰冰盖两个典型扩展目标,所选区域分别为(N26, E001), (N79, W041).在进行坐标系转换以及插值处理后,各区域地形分别如图7所示.

2.2 仿真参数

仿真使用的多普勒散射计平台参数采用OSCOM计划中提出的星载多普勒散射计(DOPS)参数^[4],具体参数如表1所示.

基于多普勒散射计地面散射回波仿真模型以及自然扩展目标,对不同扩展目标的多普勒谱进行分析.多普勒谱的展宽主要来自足印内各面元到多普勒散射计的径向速度差异,其中多普勒散射计的运行速度

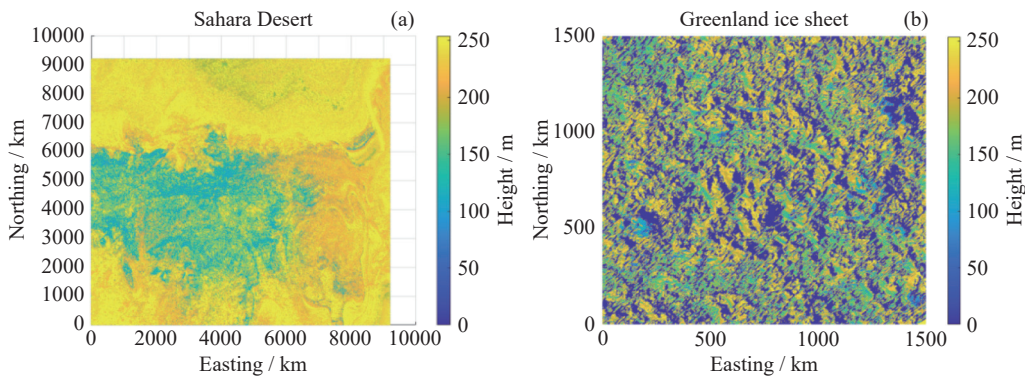


图7 处理后的自然扩展目标

Fig. 7 Interpolated natural extension targets

表 1 旋转笔形波束多普勒散射计参数
Table 1 Parameters of rotating pencil-beam Doppler scatterometer

平台高度/km	520
平台速度/(m·s ⁻¹)	7000
波束宽度/(°)	0.3
脉冲宽度/μs	50
脉冲重复时间/μs	100
入射角/(°)	46
采样率/MHz	20
信号频率(Ka波段)/GHz	35.6
极化方式	VV
刈幅范围/km	>1000

是主要影响因素. 多普勒谱的偏移则主要源于后向散射系数对于多普勒谱的调制, 各面元不同的后向散射系数决定了面元散射回波信号的多普勒频率在多普勒谱中的权重. 不同影响条件下的多普勒谱如图 8 所示.

图 8(a) 中多普勒谱的展宽约为 ± 3 Hz, 在这种理想情况下, 多普勒展宽主要源自足印内微小的几何差异导致的径向速度分量变化, 频谱分布近似对称, 且峰值位于 0 Hz 附近. 图 8(b) 中的多普勒谱展宽约为 ± 3300 Hz, 相比理想情况有非常明显的展宽, 但是多普勒质心依然保持在 0 Hz 左右, 因此本阶段的观测条件虽然大幅增加了多普勒散射计相对于自然扩展目标的整体径向速度分量, 却并未引起系统性偏移. 这表明多普勒谱的展宽来源主要来自平台速度, 且对于谱展宽的影响十分显著. 在考虑了后向散射系数调制后, 图 8(c) 中多普勒谱整体展宽与图 8(b) 近似, 而实际多普勒质心相比理论多普勒质心发生了显著偏移, 偏移量为 -485.84 Hz, 负值表示多普勒散射计与自然扩展目标之间存在相对趋近运动. 此外, 后向散射系数对回波分布的调制使多普勒谱形在峰值两侧不再保持对称.

2.3 不同观测几何的多普勒谱

2.3.1 不同方位角下的多普勒谱

设顺轨向方位角为 0° , 逆时针方向旋转方位角增大, 不同自然扩展目标、不同方位角下的多普勒谱及各阶矩如图 9 和图 10 所示. 当多普勒散射计平台以一定速度朝向目标时, 目标回波观测到的电磁波频率将不同于静止情况下的参考频率. 为了表征这种偏高

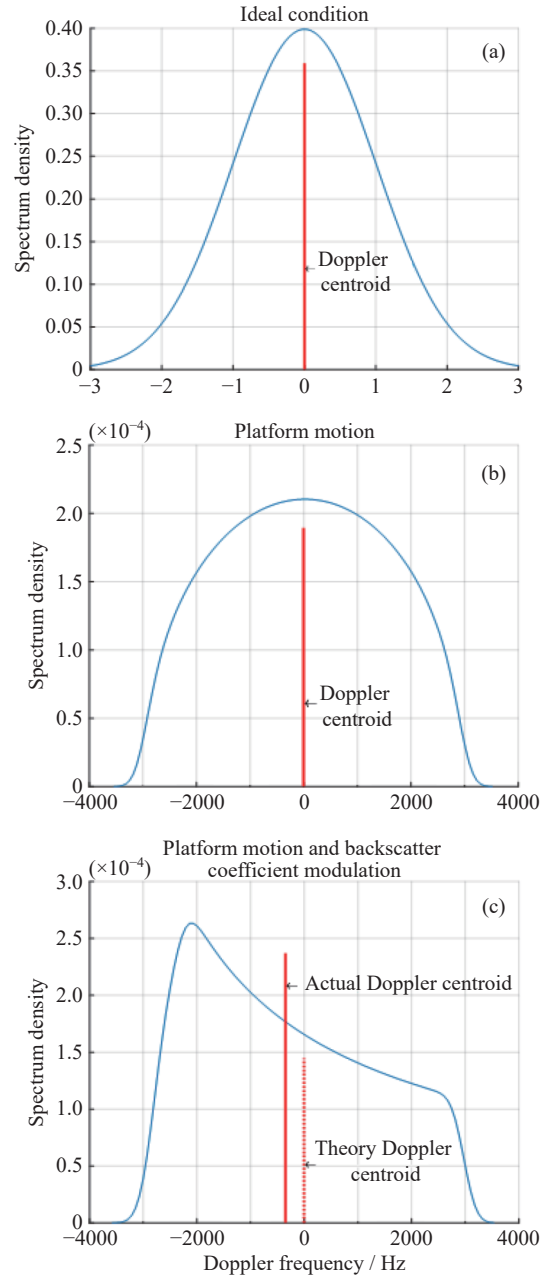


图 8 不同影响的多普勒谱

Fig. 8 Doppler spectrum under different influences

或偏低的现象, 相对运动方向往往用正负号加以区分, 在本文的仿真中, 设多普勒散射计靠近自然扩展目标时, 多普勒频率为负值.

在顺轨方向, 平台速度分量最大, 谱展宽最小, 多普勒中心的偏移最大. 随着方位角的增大, 多普勒谱明显展宽. 交轨方向的平台速度分量最小, 近似为零, 多普勒谱展宽最大, 出现两个峰值, 且峰值呈对称分布.

对比两个自然扩展目标的仿真结果, 首先, 撒哈拉沙漠的多普勒频偏最大值为 724.22 Hz, 谱展宽范围为 1558.82~2257.88 Hz; 而格陵兰冰盖的多普勒频偏最大值为 744.79 Hz, 谱展宽范围为 1608.25~2359.49 Hz. 尽管二者的多普勒频偏最大值差异不大, 且展宽范围接近, 但撒哈拉沙漠的多普勒频偏与谱展宽较格陵兰冰盖更小. 同时, 在方位角变化过程中, 撒哈拉沙漠的多普勒频率偏移与谱展宽的变化量较小, 且撒哈拉沙漠的多普勒谱展宽与频偏变化均较为平缓, 未出现显著的急剧变化或异常波动.

2.3.2 不同入射角下的多普勒谱

不同中等入射角 ($40^\circ \sim 60^\circ$) 下的顺轨多普勒谱

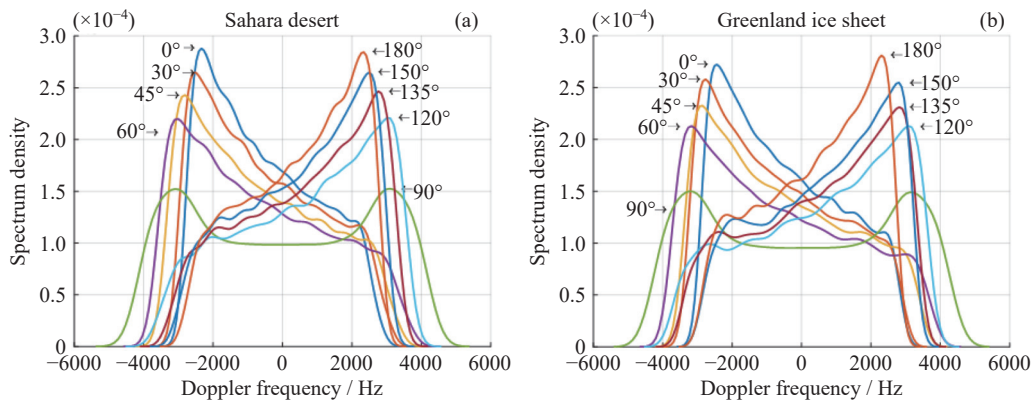


图 9 不同方位角多普勒谱

Fig. 9 Doppler spectrum at different azimuth angles

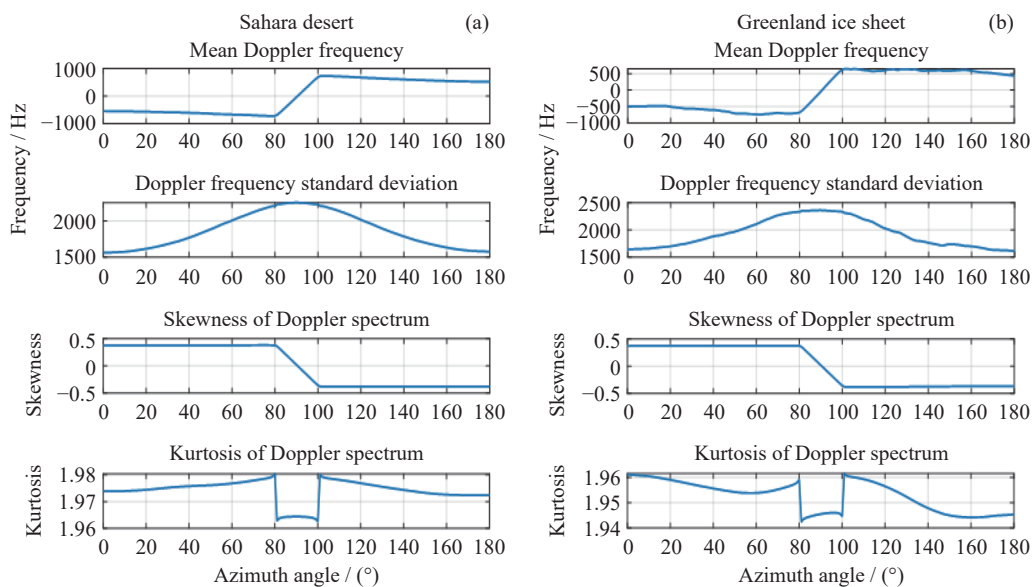


图 10 不同方位角多普勒谱的各阶矩

Fig. 10 Doppler moments at different azimuth angles

如图 11 所示. 不同入射角多普勒谱的各阶矩如图 12 所示.

随着入射角的增大, 多普勒散射计相较于自然扩展目标的径向速度增大. 在多普勒谱中的表现为谱展宽减小, 后向散射系数调制的影响逐渐增大, 在大角度时, 多普勒谱线形状发生显著变化, 甚至出现两个峰值. 同时多普勒中心的偏移呈减小趋势, 如图 12 所示, 其中负值表示多普勒散射计接近自然扩展目标.

对比两个地面扩展目标, 撒哈拉沙漠的多普勒频偏范围为 483~559 Hz, 多普勒谱展宽范围为 1287~1624 Hz; 格陵兰冰盖的多普勒频偏范围为 530~634 Hz, 多普勒谱展宽范围为 1307~1630 Hz. 格陵

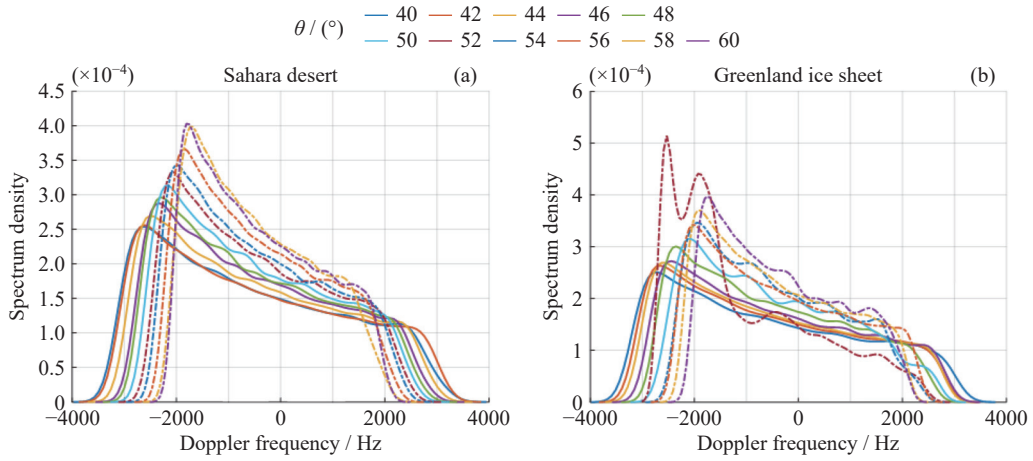


图 11 不同入射角多普勒谱

Fig. 11 Doppler spectrum at different incidence angles

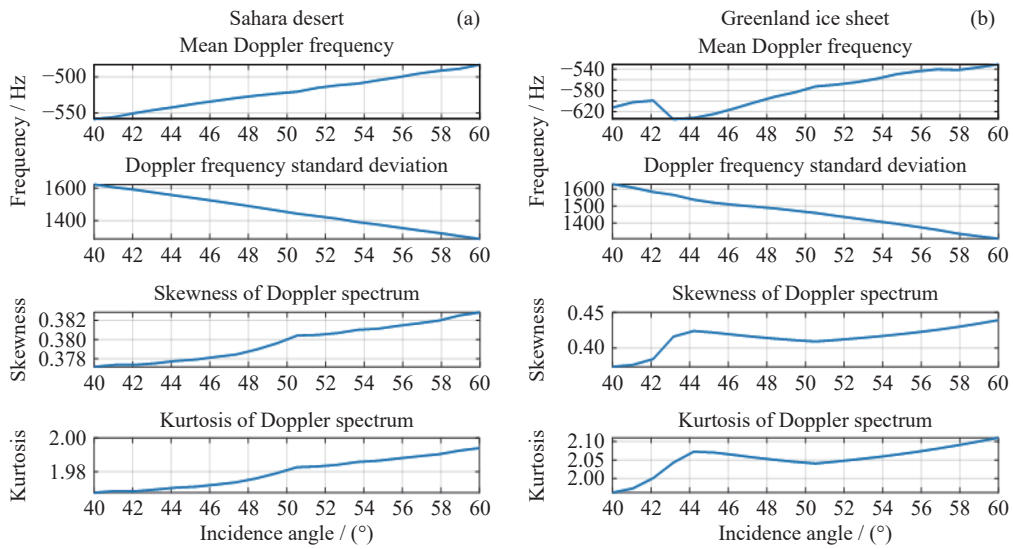


图 12 不同入射角多普勒谱的各阶矩

Fig. 12 Doppler moments at different incidence angles

兰冰盖的多普勒谱受入射角变化的影响更大, 相比格陵兰冰盖, 撒哈拉沙漠的多普勒频偏及变化量更小, 多普勒谱展宽更小, 但变化量更大。

2.4 不同地形起伏下的多普勒谱

基于表 1 的多普勒散射计参数, 对不同地形起伏的扩展目标进行回波仿真。

不同地形起伏的自然扩展目标通过高斯随机粗糙面生成。高斯随机粗糙面是模拟自然界中粗糙表面的常用数学模型, 该模型具有随机性, 且高度分布符合高斯分布。

首先设其中心高度为 500 m, 高度起伏由 200~

1000 m 变化, 其地形图如图 13 所示。其高度谱及顺轨多普勒谱如图 14 和图 15 所示, 多普勒各阶矩如图 16 所示。

随着高度起伏由 200~1000 m 变化, 多普勒频谱的均值逐渐增大 (负值代表多普勒散射计靠近扩展目标), 均值范围为 499~827 Hz。方差随起伏变化先减小, 展宽范围约为 1450~1680 Hz; 在中心高度在 200~460 m, 750~1000 m 两个区间内谱展宽变化较小; 在 460~750 m 区间谱展宽迅速减小。偏度和峰度均呈增大趋势, 在 500 m 前变化较小, 在 500 m 后迅速增大。在多普勒谱中表现为高度起伏越大, 多普

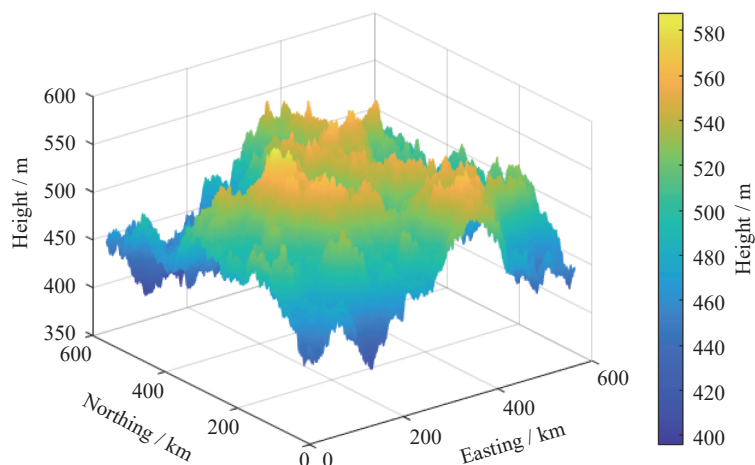


图 13 随机高斯粗糙面

Fig. 13 Random Gaussian rough surface

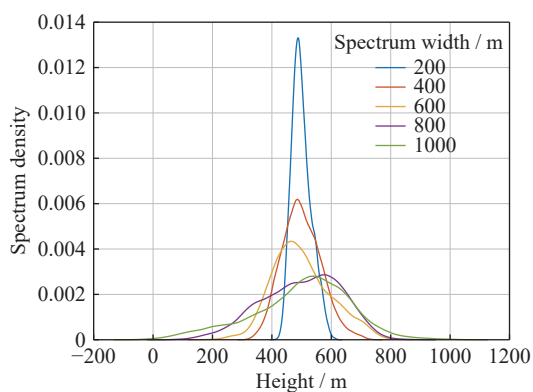


图 14 不同高度范围的高度谱

Fig. 14 Height spectrum at different altitude ranges

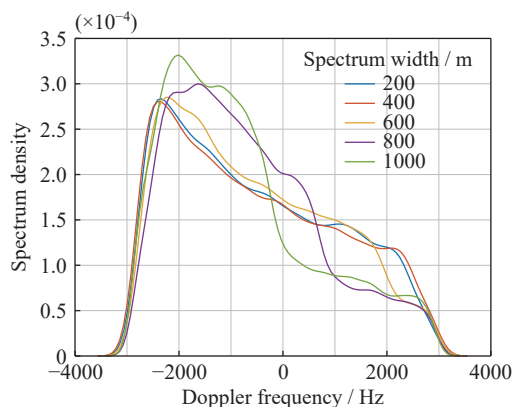


图 15 不同高度范围的多普勒谱

Fig. 15 Doppler spectrum at different altitude ranges

勒谱的偏移越大, 且分布更多地集中在均值左侧, 同时谱展宽越小. 故在自然扩展目标选取的过程中, 应

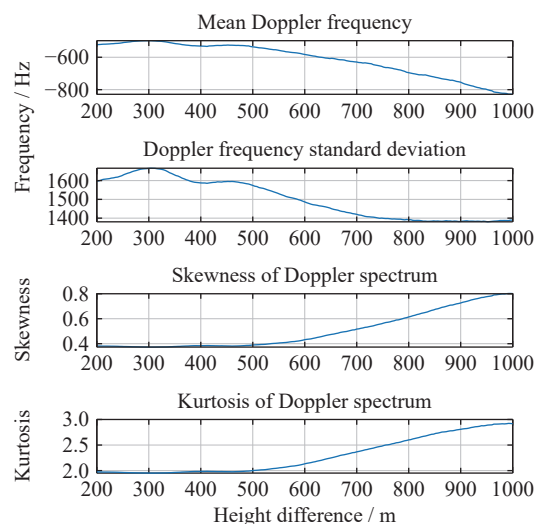


图 16 不同高度起伏的多普勒谱各阶矩

Fig. 16 Doppler moments at different height variations

尽可能选取高度起伏小的地区.

设置高斯随机粗糙面的高度为 500 m, 其中心高度由 250~1250 m 逐渐增大, 其高度谱、多普勒频谱及多普勒谱各阶矩分别如图 17~19 所示.

随着中心高度的逐渐增大, 多普勒谱线的变化很小, 反映在图 18 中五条谱线基本重合, 说明地表中心高度的变化对多普勒频率分布形态的影响极其有限. 多普勒谱的均值在 -535~-529 Hz 范围内, 浮动范围约 6 Hz, 偏移极小; 方差的浮动范围也极小, 约 12 Hz, 范围为 1572~1584 Hz; 此外, 偏度与峰度的变化也极小. 通过以上结果可以得出结论: 自然扩展

目标中心高度的变化对散射计回波的多普勒频率分布影响极小, 故在选取自然扩展目标作为定标参考时, 无需将中心高度作为主要考量因素。

3 地面散射回波的多普勒频率偏移分析

地面扩展目标的理论多普勒频率为零. 因此, 多普勒散射计通过脉冲对算法得到多普勒频率, 并去除平台运动速度影响后, 得到的多普勒频率即为地面散射回波的多普勒频率偏移量. 对于多普勒散射计, 其入射角、波束宽度、平台速度等参数在观测过程中不会变化, 影响其多普勒频率偏移的主要因素为方位角 φ .

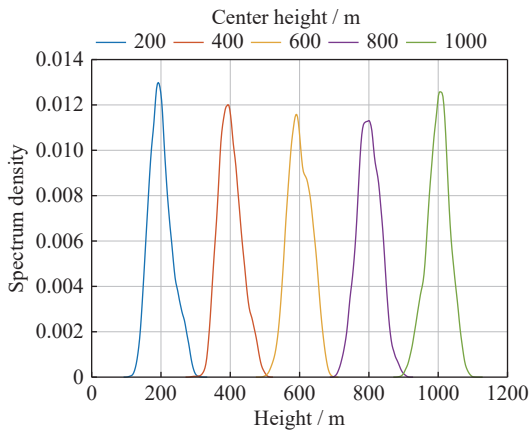


图 17 不同中心高度的高度谱

Fig. 17 Height spectrum at different central heights

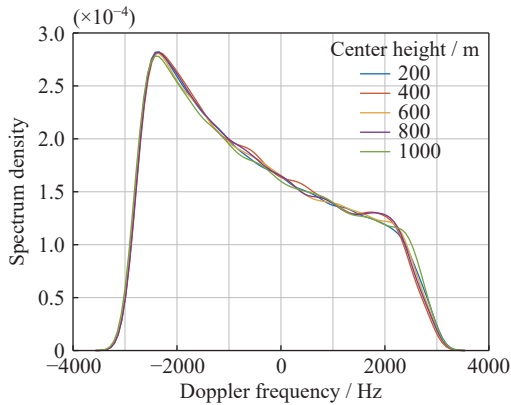


图 18 不同中心高度的多普勒谱

Fig. 18 Doppler spectrum at different central heights

为分析多普勒频率的偏移量及其不确定度, 使用随机高斯粗糙面进行地面回波仿真, 其高度谱如图 20 所示, 多普勒频率校正量及其不确定度如图 21 所示。

从图 21 可以看到, 顺轨向的径向速度最大, 故偏移量最大, 约为 30 Hz, 因为多普勒散射计在接近扩展目标, 所以用负号表示, 同时不确定度也最大, 约为 8 Hz. 随着方位角的增大, 多普勒散射计径向速度减小, 偏移量与不确定度也减小. 位于交轨向时, 多普勒散射计的径向速度减小至零, 故偏移量为零, 不确定度也最小, 约为 5 Hz. 随后, 随方位角的增大, 多普勒散射计远离扩展目标, 偏移量增大, 在逆轨时约为

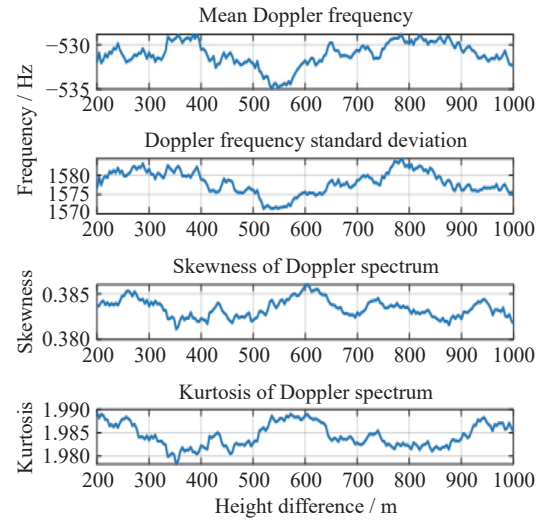


图 19 不同中心高度的多普勒各阶矩

Fig. 19 Doppler moments at different central heights

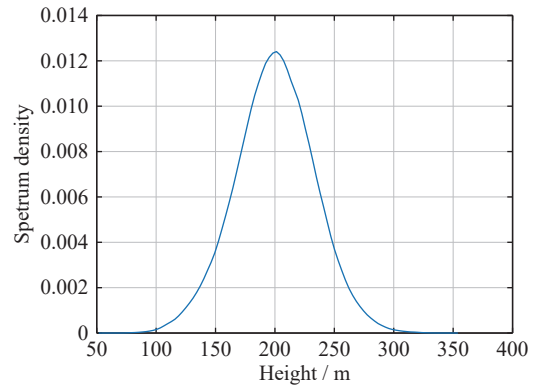


图 20 随机高斯粗糙面高度谱

Fig. 20 Random Gaussian rough surface height spectrum

30 Hz, 不确定度约为 8 Hz.

将该方法应用于真实 DEM 扩展目标进行检验, 仿真结果如图 22 所示.

通过仿真结果可以看到, 沙漠地形的多普勒偏移量与理想情况近似, 而冰盖地形的差距较大. 原因是沙漠的地形起伏更为平坦, 且高度谱与高斯随机粗糙面近似, 而冰盖的海拔起伏较大, 且分布不均. 该仿真结果与 2.3 节中的结论相互印证, 使用海拔起伏小的扩展目标进行定标有更好的校正效果.

4 结论

建立地面散射回波仿真模型, 对潜在可用于多普勒散射计在轨外定标的地面扩展目标的多普勒谱特性进行分析, 并对多普勒频率进行定标校正. 结果表明, 地面扩展目标的多普勒频移主要由多普勒散射计

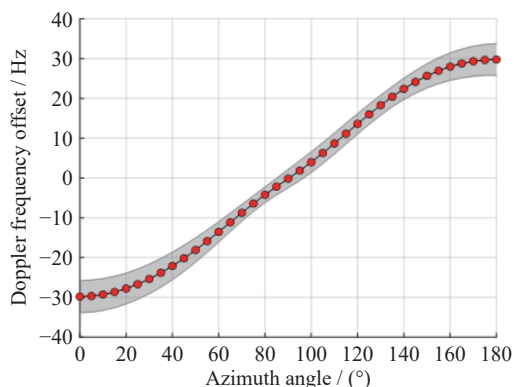


图 21 不同方位角的多普勒频率偏移量及其不确定度
Fig. 21 Doppler frequency shift and its uncertainty with different azimuth angles

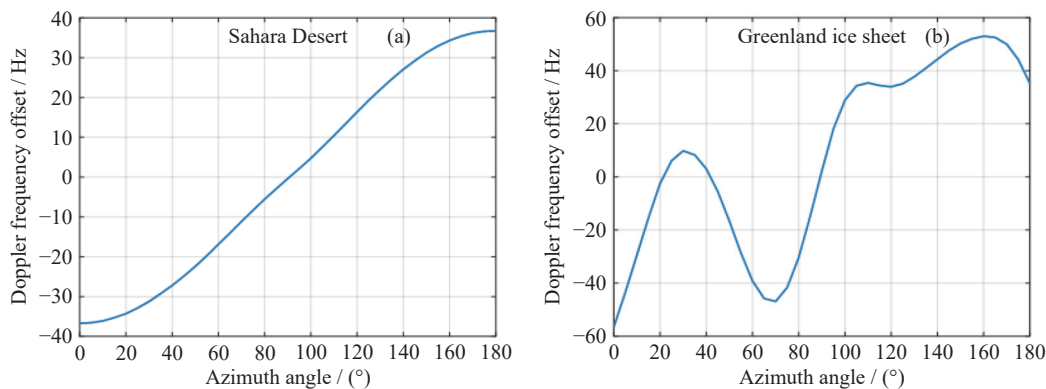


图 22 DEM 扩展目标的多普勒频率偏移量
Fig. 22 Doppler frequency shift for DEM extended targets

与地面的相对运动决定; 在刈幅内各点细微的入射角与方位角差异, 仅能使多普勒谱在 ± 3 Hz 内出现轻微展宽, 而平台本身运动速度则会引起约 ± 3300 Hz 的显著展宽. 后向散射系数的调制还会进一步改变多普勒谱分布特征. 通过改变观测几何对撒哈拉沙漠与格陵兰冰盖开展仿真后发现, 两者的多普勒偏移范围分别为 520~731 Hz 和 436~645 Hz, 谱展宽范围为 1558~2258 Hz 和 1608~2360 Hz, 相比之下沙漠地形更平坦、其多普勒各阶矩变化更平滑, 冰盖因地势崎岖而产生更大波动; 在入射角变化时亦可观察到类似规律. 进一步针对不同高度起伏与中心高度的扩展目标进行仿真, 结果显示, 高度起伏从 200 m 增至 1000 m 时, 多普勒频谱的均值与展宽显著增大, 表明, 当地势落差更大时, 频率偏移更强, 且能量更集中于均值左侧; 而中心高度的改变对谱特征影响有限. 因此, 在为多普勒散射计定标选取自然扩展目标时, 应优先考虑地势平坦、起伏幅度小的区域, 而中心高度的变化则不是影响自然扩展目标选取的主要因素. 最后, 本文对地面回波的多普勒频偏进行了分析, 并使用高斯随机粗糙面进行了仿真, 得到不同方位角时的多普勒偏移量及其不确定度. 顺轨向偏移量最大, 约 30 Hz, 不确定度最大, 约为 8 Hz. 同时使用 DEM 地面数据进行验证, 也进一步确定海拔变化小的区域更适宜作为定标目标.

通过对不同地面扩展目标的多普勒谱特性分析, 比较了其在不同入射角、方位角以及不同高度起伏条件下的变化特征, 并进行了地面回波多普勒频偏分析, 为多普勒散射计在轨外定标的自然扩展面目标选择及流场测量的多普勒定标提供了理论基础.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] MIAO Y J, DONG X L, BOURASSA M A, *et al.* Effects of ocean wave directional spectra on doppler retrievals of ocean surface current[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 4204812
- [2] BHARGAVA A, ECHENIQUE J A. An econometric analysis of sea surface temperatures, sea ice concentrations and ocean surface current velocities[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, **10**(12): 1854
- [3] DONG Xiaolong, LIU Yang, HE Jieying, *et al.* Venus Volcano Imaging and Climate Explorer Mission. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(6): 1047-1059 (in Chinese) (董晓龙, 刘洋, 何杰颖, 等. 金星火山与气候探测任务 [J]. *空间科学学报*, 2022, **42**(6): 1047-1059)
- [4] SHI Jiancheng, GUO Huadong, DONG Xiaolong, *et al.* Developments and future strategies of Earth science from space in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 95-117 (施建成, 郭华东, 董晓龙, 等. 中国空间地球科学发展现状及未来策略 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 95-117)
- [5] ZHANG Zijin, DONG Xiaolong. Sea level pressure retrieval in mid-to-low latitude regions using FY-3C/MWHTS data[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(3): 364-375 (张子瑾, 董晓龙. 基于 FY-3C/MWHTS 观测资料反演中低纬度海面气压 [J]. *空间科学学报*, 2020, **40**(3): 364-375)
- [6] DONG Xiaolong, ZHU Di, LIN Wenming, *et al.* Orbit Performances Validation for CFOSAT Scatterometer[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(3): 425-431 (董晓龙, 朱迪, 林文明, 等. 中法海洋卫星微波散射计在轨性能验证 [J]. *空间科学学报*, 2020, **40**(3): 425-431)
- [7] DU Yan, DONG Xiaolong, JIANG Xingwei, *et al.* Ocean surface current multiscale observation mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(5): 849-861 (杜岩, 董晓龙, 蒋兴伟, 等. 全球海表流场多尺度结构观测卫星计划 [J]. *空间科学学报*, 2022, **42**(5): 849-861)
- [8] ZHANG J Y, DONG X L, ZHU D. Analysis of Doppler spectrum of a spaceborne Doppler scatterometer using an echoed signal simulation model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2023, **44**(16): 4883-4910
- [9] MATZLER C. Microwave permittivity of dry sand[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(1): 317-319
- [10] MÄTZLER C. Microwave permittivity of dry snow[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(2): 573-581
- [11] TIURI M E, SIHVOLA A H, NYFORS E G, *et al.* The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2003, **9**(5): 377-382
- [12] ALLEY R B, BOLZAN J F, WHILLANS I M. Polar firn densification and grain growth[J]. *Annals of Glaciology*, 1982, **3**: 7-11

作者简介



陈少涵 男, 1999 年出生于山东省青岛市, 现为中国科学院大学国家空间科学中心硕士研究生. 主要从事微波遥感探测技术等方面的研究.

E-mail: chenshaohan21@mails.ucas.ac.cn



董晓龙 (通信作者) 男, 1969 年出生于陕西省渭南市, 现为中国科学院大学国家空间科学中心研究员, 博士生导师. 主要从事新型微波遥感探测与成像及微波遥感信息获取的方法与技术研究.

E-mail: dongxiaolong@mirslab.cn