星载多普勒散射计单频与线性调频信号径向测速性能对比仿真研究

景立伟[1], 林文明*[1,2], 刘保昌[1,2]

1（南京信息工程大学海洋科学学院 江苏南京 210044）

2（自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室 北京 100081）

摘要 海表流场观测对海洋动力过程研究具有重要意义，多普勒散射计为海表径向速度测量提供了有效途径。为对比星载多普勒散射计不同波形的脉冲对测速性能，本文构建了包含海面散射回波、热噪声、斑点噪声及理想平台运动相位补偿的统一面目标信号级仿真模型。在相同系统参数与 7.5 km 公共距离窗下，量化分析了单频（Single-Frequency, SF）与线性调频（Linear Frequency Modulation, LFM）信号反演径向速度的均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）。结果表明：在斑点噪声与热噪声并存的仿真场景中，两类波形的径向速度 RMSE 总体随输入信噪比增加而降低；当输入信噪比高于约−9 dB 后，LFM 信号利用距离压缩与多视复相关平均降低了斑点相位起伏对相位估计的影响，RMSE 低于 SF 信号。研究结论可为星载多普勒散射计波形体制分析提供参考。

关键词 多普勒散射计，信号级仿真，脉冲对法，信噪比

中图分类号 P715.6

最新录用

A Simulation-Based Comparative Study on Radial-Velocity Measurement Performance of Single-Frequency and LFM Signals for a Spaceborne Doppler Scatterometer

JING Liwei[1], LIN Wenming*[1,2], LIU Baochang[1,2]

1 (School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

2 (Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081)

Abstract Sea surface currents are important for understanding multiscale ocean dynamics and the transport of heat, momentum, and material. Spaceborne Doppler

基金项目：国家自然科学基金（42576180），中国气象科学研究院基本科研业务费专项基金项目资助（2023Y008）

2026-06-03 收到原稿, 2026-06-29 收到修定稿

scatterometers offer the potential for wide-swath, direct observation of submesoscale ocean surface motions. To compare the pulse-pair velocity-measurement performance of single-frequency (SF) and linear frequency-modulated (LFM) signals, a unified signal-level simulation model for distributed sea-surface targets was developed. The model includes radar-equation-based scattering echoes, additive thermal noise, multiplicative speckle noise, and ideal platform-motion phase compensation. Under identical observation geometry, platform states, radar parameters, and noise realizations, both waveforms were evaluated within a 7.5-km common range window. After matched filtering, the SF signal was processed by a single whole-window complex correlation, whereas the LFM signal was range-compressed into approximately 50 nominal 150-m range-resolution cells, followed by local complex correlation and multi-look averaging. Simulations covered input signal-to-noise ratios (SNRs) from −15 to 15 dB. At each SNR, 150 independent spatial speckle fields were generated, with 500 thermal-noise trials for each field. Performance was assessed using interferometric phase-error standard deviation, pulse-pair correlation coefficient, and radial-velocity root-mean-square error (RMSE). The RMSEs of both waveforms generally decreased as SNR increased. When the input SNR exceeded approximately −9 dB, LFM produced lower phase errors and radial-velocity RMSEs than SF. At 10 dB, the phase-error standard deviations of SF and LFM were 3.01° and 1.99°, while their radial-velocity RMSEs were 0.57 m/s and 0.37 m/s, respectively. Although SF had a higher correlation coefficient at 10 dB, its velocity error was larger, showing that correlation magnitude alone cannot fully reflect measurement accuracy under speckle noise. Sensitivity analyses of azimuth angle and simulation-grid size further showed near-zero phase-error biases for both waveforms, while LFM remained more stable. These results indicate that LFM range compression and multi-look complex correlation can suppress localized speckle-induced fluctuations and improve radial-velocity accuracy, providing a reference for waveform and processing design in future spaceborne Doppler scatterometers.

最新录用

Key words Doppler scatterometer, Signal-level simulation, Pulse-pair method, Signal-to-noise ratio

0 引言

海洋表层流是海气热量、动量与物质输运的重要载体，也是多尺度海洋动力学研究的关键参数之一。现有海表流遥感观测手段在覆盖宽度、观测方向或空间尺度等方面仍存在一定局限，面向亚中尺度海表流场宽刈幅、直接观测的需求正持续推动新体制遥感载荷的发展[1, 2]。与利用后向散射系数反演海面风场的传统微波散射计不同，多普勒散射计通过提取海面散射回波的多普勒信息估计海表径向速度，具备在全球尺度直接观测亚中尺度海表流场的潜力[3-6]。基于这一概念，近年来国内外围绕多普勒散射计及相关体制相继提出了多种任务方案，并开展了机载验证实验及相关理论研究[6-10]。在星载旋转扫描笔形波束体制下，脉冲对法因其算法实现形式简洁、易于与相干接收处理链衔接，常被用于相邻回波间的干涉相位提取与径向流速估计[5]。

从海流遥感观测手段看，当前海表流场反演方法主要包括卫星高度计、光学遥感以及多普勒类主动微波雷达等。其中，卫星高度计可通过海面高度异常反演大尺度地转流[11]；光学遥感传感器可利用悬浮泥沙、叶绿素等示踪物的时空变化估计表层流场[12, 13]，但其反演精度通常受示踪物分布、云雨遮挡及光照条件等因素制约。相比之下，主动微波雷达具有较强的全天时、全天候观测能力。进一步从多普勒类主动微波雷达信号处理机制看，典型海流观测体制主要包括三类。第一类为基于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)多普勒质心异常(Doppler Centroid Anomaly, DCA)的海流测量[14]，其核心在于从 SAR 回波的多普勒频谱偏移中提取沿视线方向的运动信息；第二类为基于沿轨干涉（Along-Track Interferometry, ATI）SAR 的测流体制[15]，通过顺轨配置的双天线或多天线，获取两次近同时观测回波间的干涉相位差以反演径向速度；第三类为多普勒散射计体制[16]，其通过对海面散射回波的多普勒频移或脉冲间相位信息进行处理来实现流场观测。

近年来，围绕星载多普勒散射计的研究主要集中于测量原理、体制设计、多普勒谱特性分析、风浪调制机理以及海流反演算法等方向[5, 17-19]。已有研究表明，

最新录用

平台运动多普勒频率、天线波束展宽、后向散射系数调制以及风浪耦合等因素均会影响多普勒质心及测速误差统计特性[5, 18-21]。在波形体制方面，单频（Single-Frequency, SF）信号具有体制简单、相位关系直接、发射与接收处理链路相对简洁等特点，常作为基础信号形式应用于星载多普勒散射计的建模与误差分析研究中[19]；线性调频（Linear Frequency Modulation, LFM）信号能够通过距离压缩获得更高的距离分辨能力，并可在公共距离窗内形成多个距离分辨单元，为多视复相关平均提供条件。然而，针对脉冲对测速及其波形依赖性，尤其是SF 与 LFM 信号在统一观测几何和统一参数框架下的建模与定量对比，现有公开研究仍缺少讨论。

基于上述问题，本文针对星载旋转扫描笔形波束体制多普勒散射计，建立统一的面目标信号级仿真模型，在观测几何、平台运动、场景运动和雷达参数一致，并采用理想平台运动相位补偿的条件下，对 SF 与 LFM 脉冲对测速性能进行对比。本文首先建立统一的海面散射回波模型；其次，构建距离处理后的等效脉冲对复样本表达，统一两类波形的复相关与速度反演公式；最后，在斑点噪声与热噪声共同作用的仿真场景中，分析不同输入信噪比条件下的径向速度 RMSE、脉冲对相位稳定性和相关系数，并补充讨论方位角和网格尺寸的影响。本文聚焦统一处理链下的波形差异机理，暂不涉及复杂海况耦合、真实在轨定标误差和二维矢量流场反演。

最新录用

1 信号模型与处理方法

1.1 面元回波模型

为便于在同一框架下比较 SF 与 LFM 的测速性能，本文在相干解调后的基带域建立回波模型[20]。设发射信号的载频为 f_c，基带复包络为 $s_q(t)$，则其对应的射频信号可写为 $x_q(t)=s_q(t)\exp(j2\pi f_c t)$，考虑到后续的回波生成、匹配滤波和脉冲对处理均在基带域完成，下文的模型推导将统一围绕 $s_q(t)$ 展开。设脉冲宽度为 T_p，LFM 带宽为 B，调频率为 $\mu=B/T_p$，矩形窗函数记为 $\mathrm{rect}(\cdot)$，则这两类发射信号的基带复包络可统一表示为：

$$s_q(t)=\begin{cases}\mathrm{rect}(t/T_p) & q=\mathrm{SF}\\ \mathrm{rect}(t/T_p)\exp(j\pi\mu t^2) & q=\mathrm{LFM}\end{cases} \tag{1}$$

其中，q表示波形类型，t表示快时间，j 表示虚数单位。设第 m 个脉冲照射区域内第i个散射单元的瞬时斜距为 $R_{m,i}$，则双程时延为：

$$\tau_{m,i}=\frac{2R_{m,i}}{c} \tag{2}$$

其中 c 为光速。图 1 给出了笔形波束条件下面元回波观测几何与回波时延示意图。图中虚线椭圆表示第 m 个脉冲对应的有效照射足印，网格表示对粗糙海面照射区域的离散面元划分，(x_i,y_i)表示第i个散射单元的位置。平台至该散射单元的瞬时斜距为 $R_{m,i}$，其对应的双程传播时延为 $\tau_{m,i}$。

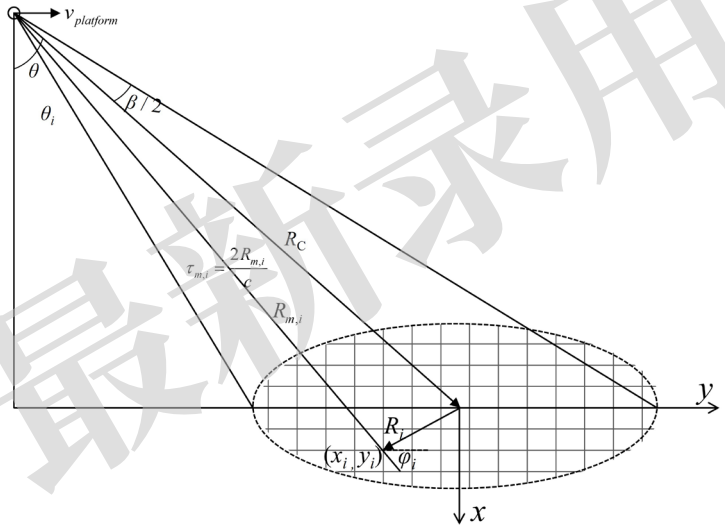


图 1 笔形波束足迹内海面散射面元划分与回波时延示意图

Figure 1 Schematic diagram of sea-surface facet division and echo delay within the pencil-beam footprint

若该散射单元的归一化后向散射系数为 σ_i^0，面元面积为 ΔS，则其等效雷达散射截面为 $\sigma_i=\sigma_i^0\Delta S$，在单站体制下，第 m 个脉冲、第 i 个散射单元的基带回波可表示为：

$$s_{r,i}^{(q)}(t)=A_{m,i}\eta_i s_q(t-\tau_{m,i})\exp(-j2\pi f_c\tau_{m,i}) \tag{3}$$

其中，η_i 为第 i 个散射单元对应的乘性复散射系数，用于表征粗糙海面散射单元

最新录用

随机幅相起伏所引入的斑点噪声，$A_{m,i}$ 为由雷达方程决定的幅度项：

$$A_{m,i}=\left[\frac{P_t\lambda^2 G_{m,i}^2\sigma_i}{(4\pi)^3 R_{m,i}^4}\right]^{1/2} \tag{4}$$

式中，P_t 为发射功率，$\lambda=c/f_c$ 为雷达波长，$G_{m,i}$ 为第 m 个脉冲时刻该散射单元的单程天线增益。对面目标而言，第 m 个脉冲的总回波为有效照射区域内所有散射单元回波的相干叠加，即

$$s_r^{(q)}(t)=\sum_{i\in F_m} s_{r,i}^{(q)}(t)+n(t) \tag{5}$$

其中，F_m 为第 m 个脉冲的有效照射区域，$n(t)$ 为加性复高斯白噪声。需要指出的是，η_i 并非表示接收机端热噪声项，而是描述粗糙海面散射单元随机幅相起伏的乘性随机项。在含斑点噪声场景下，η_i 在空间上服从独立复高斯分布，定义为：

$$\eta_i=\frac{u_i+jv_i}{\sqrt{2}} \tag{6}$$

其中，$u_i\sim \mathrm{N}(0,1)$，$v_i\sim \mathrm{N}(0,1)$，从而有 $\eta_i\sim \mathrm{CN}(0,1)$，其功率 $|\eta_i|^2$ 服从均值为 1 的指数分布。在一次斑点噪声场实现中，η_i 对所有脉冲保持固定，用于表征同一粗糙海面随机实现下的空间斑点噪声场。为避免单一斑点噪声场实现对 SF 与 LFM 性能对比结果产生偶然影响，本文生成 150 个相互独立的斑点噪声场，并对各实现下的测速误差统计量进行集合平均。不同统计样本之间重新生成 η_i；而在每一个斑点噪声场实现内部，SF 与 LFM 共享完全相同的斑点噪声场。因此，本文采用的是空间固定的乘性斑点噪声模型，主要描述粗糙海面散射单元随机幅度和初相在相干叠加过程中对回波相位的影响；通过对多组独立斑点噪声场实现进行集合平均，降低单次随机场实现带来的偶然性。模型本身未考虑海面散射结构随慢时间演化所产生的时间去相关效应。观测信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)定义为式(5)右边两项的比值[22, 23]，即

最新录用

$$\mathrm{SNR}=\frac{\int_{t_1}^{t_2}\sum_{i\in F_m}\left|s_{r,i}(t)\right|^2\mathrm{d}t}{\int_{t_1}^{t_2}\left|n(t)\right|^2\mathrm{d}t} \tag{7}$$

其中，t_1和t_2分别是接收窗口起止时间。本文定义的输入 SNR 是指匹配滤波前原始接收窗口内的时域平均功率信噪比，以区别于匹配滤波后的脉冲压缩输出信噪比。具体仿真中，首先由无噪声原始基带回波在完整接收窗口内的平均功率确定信号功率，再根据预设输入 SNR 生成加性复高斯白噪声，并将噪声叠加至匹配滤波前的原始基带回波中。同时，SF 与 LFM 的匹配滤波参考信号均采用单位能量归一化，以避免匹配滤波器能量差异引入额外偏差。因此，本文控制的是两类波形在相同输入 SNR 定义下的测速性能。为了与实际雷达系统的热噪声基准建立对应关系，接收机的热噪声功率可表示为：

$$P_n=kT_0BF_n \tag{8}$$

其中，k为玻尔兹曼常数，T_0为标准参考温度，B为接收机等效噪声带宽，F_n为线性噪声因子，其对应的噪声系数 NF 满足 $NF=10\log_{10}F_n$。真实系统的等效 SNR 由雷达方程确定的回波功率与式(8)给出的热噪声功率共同决定。本文控制的输入 SNR 并非用于替代雷达方程，而是在由雷达方程生成的无噪声回波功率基础上，按照预设 SNR 调整加性热噪声功率，用于分析不同观测信噪比条件下两类波形的相对测速性能。结合本文设定的系统参数与雷达方程计算得到的无噪声回波功率，若取典型接收机噪声系数 NF=5 dB，则对应的系统等效 SNR 约为 5 dB。在本文仿真中，式(8)主要用于提供工程参考基准，从而将仿真输入 SNR 与实际雷达系统参数联系起来。

1.2 脉冲对相关与径向速度估计

虽然 SF 与 LFM 在快时间结构上存在差异，但在完成与各自波形相匹配的距离处理之后，二者可以在统一的等效复基带样本层面建立脉冲对模型。具体而言，设第k个发射脉冲的原始回波经过匹配滤波并在截取目标距离窗后，得到离散复样本序列$\{s_k^{(q)}(n)\}_{n\in\Omega}$，其中$n$为距离向采样序号，$\Omega$表示目标所在距离窗的索引集合。为了提取由目标运动引起的相位变化，针对时间相隔M个脉冲重复

最新录用

周期的两组距离门内复样本，构造归一化复相关系数：

$$\Gamma^{(q)}=\frac{\sum_{n\in\Omega}s_{k+M}^{(q)}(n)\left[s_{k}^{(q)}(n)\right]^{*}}{\sqrt{\sum_{n\in\Omega}\left|s_{k+M}^{(q)}(n)\right|^{2}\sum_{n\in\Omega}\left|s_{k}^{(q)}(n)\right|^{2}}} \tag{9}$$

其辐角 $\phi^{(q)}=\arg\left(\Gamma^{(q)}\right)$ 为未扣除平台运动相位贡献时的原始脉冲对相位。本文主要采用 $M=1$ 的相邻脉冲对，并未进行多脉冲序列联合平均。为了隔离平台运动相位补偿误差的干扰，聚焦波形体制对残余运动相位的影响，本文在仿真中构造了静止海面条件（即海表运动速度置零）下的无噪声平台参考回波。该参考回波保持轨道状态、姿态、扫描几何以及距离窗构造与运动场景完全一致，仅去除了海面目标的运动贡献。因此，本文的平台相位补偿是一种理想平台相位参考，用于从总脉冲对相位中剥离由平台运动引起的主导相位项[5, 18, 21]，最终得到平台参考相关系数为:

$$\Gamma_{0}^{(q)}=\frac{\sum_{n\in\Omega}s_{k+M,0}^{(q)}(n)\left[s_{k,0}^{(q)}(n)\right]^{*}}{\sqrt{\sum_{n\in\Omega}\left|s_{k+M,0}^{(q)}(n)\right|^{2}\sum_{n\in\Omega}\left|s_{k,0}^{(q)}(n)\right|^{2}}} \tag{10}$$

其中，下角标0表示零运动参考场景。由此可得平台运动相位补偿后的残余相位：

$$\phi_{\mathrm{r}}^{(q)}=\arg\left[\Gamma^{(q)}\left(\Gamma_{0}^{(q)}\right)^{*}\right] \tag{11}$$

相应的径向速度估计值为：

$$v_{\mathrm{r}}^{(q)}=-\frac{\lambda}{4\pi\Delta T}\phi_{\mathrm{r}}^{(q)} \tag{12}$$

其中 $\Delta T=M/\mathrm{PRF}$。式(9)至式(12)表明，在完成各自的距离处理和平台相位补偿之后，SF 与 LFM 的脉冲对测速公式保持一致。两类波形的差异，主要体现在进入复相关公式之前的距离响应、目标距离窗构造以及门内样本加权的特性上。需要特别指出的是，在实际在轨运行中，通常难以直接获取纯粹的静止海面参考回波，平台相位往往需要结合轨道姿态数据、几何模型、陆地定标等方法进行估计。本文暂不讨论此类定标算法引入的残差及平台相位参考误差，后续分析均限定在理想平台相位补偿前提下。

为确保两类波形用于速度估计的物理观测范围一致，本文在脉冲对处理阶段首先结合波束中心轨迹与目标区域位置选取一组相邻脉冲，使该脉冲对的 3 dB

最新录用

波束足迹均落在场景范围内且靠近场景中心；此处采用 3 dB 波束足迹描述主瓣有效照射尺度，是因为 3 dB（半功率）波束宽度对应天线主瓣的典型高增益范围，是雷达波束主瓣照射范围的常用工程度量；采用该准则可保证所选脉冲对的主瓣高增益照射区域位于目标场景内，从而使 SF 与 LFM 波形在一致的观测几何约束下进行比较。随后，基于平台至参考点的预测双程时延确定距离窗中心。通过该处理方式，可保证 SF 与 LFM 采用相同相邻脉冲，并截取相同的 7.5 km 公共距离窗。以本文仿真的系统参数 $T_p = 50\mu\text{s}$、LFM 带宽 $B = 1\text{MHz}$、采样率 $f_s = 2\text{MHz}$ 为例，SF 与 LFM 的理论距离分辨率分别约为 7.5 km 和 150 m。离散样点对应的物理距离间隔为：

$$\Delta R_s = \frac{c}{2f_s} \approx 75\text{m} \tag{13}$$

对于 SF 信号，由于脉内无调制，其脉宽决定的距离响应尺度约为 7.5 km，本文在公共距离窗内计算一次整体复相关。对于 LFM 信号，距离压缩后的理论距离分辨率约为 150 m，同一 7.5 km 公共窗内包含约 50 个名义距离分辨单元。本文对 LFM 先在各距离分辨单元内构造局部复相关，再按分辨单元进行多视平均。该处理并非将 LFM 的有效距离分辨率降低为 7.5 km，而是在相同物理积分范围内保留 LFM 的距离分辨与多视平均能力。场景中 0.1 km×0.1 km 面元划分仅用于海面后向散射系数赋值、几何参数更新和面目标回波相干叠加，并不等同于快时间采样间隔；系统最终的距离向响应仍由回波时延、采样率和匹配滤波过程共同决定。

1.3 SF 与 LFM 信号的模糊函数特性

为进一步说明 SF 与 LFM 信号在时延-多普勒域中的特性，本节对两类发射信号进行模糊函数分析。对基带发射信号 $s_q(t)$，其模糊函数定义为：

$$\chi_q(\tau, f_D) = \int_{-\infty}^{\infty} s_q(t) s_q^*(t-\tau) \exp(-j2\pi f_D t) dt \tag{14}$$

其中，q 表示波形类型，τ 为时延差，f_D 为多普勒频率。采用 $\chi_q(0,0)$ 对模糊函数进行归一化后，归一化模糊函数记为 $\bar{\chi}_q(\tau, f_D)$。对于本文采用的 SF 信号，其

最新录用

基带包络可写为：

$$s_{\mathrm{SF}}(t)=\frac{1}{\sqrt{T_p}}\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \tag{15}$$

对应的归一化模糊函数幅度为：

$$|\bar{\chi}_{\mathrm{SF}}(\tau,f_D)|=\begin{cases}\left(1-\dfrac{|\tau|}{T_p}\right)\left|\mathrm{sinc}\left[f_D(T_p-|\tau|)\right]\right| & |\tau|\le T_p\\ 0 & |\tau|>T_p\end{cases} \tag{16}$$

其中 $\mathrm{sinc}(x)=\sin(\pi x)/(\pi x)$。由上式可见，SF 信号的频率响应形式较为直接，多普勒主瓣宽度主要由脉冲时宽 T_p 决定；然而，由于脉内无调制，其时延响应尺度受脉冲时宽限制，对应的距离尺度约为 $\Delta R_{\mathrm{SF}}\approx\dfrac{cT_p}{2}$。

对于矩形包络 LFM 信号，其基带包络可写为：

$$s_{\mathrm{LFM}}(t)=\frac{1}{\sqrt{T_p}}\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)\exp(j\pi\mu t^2) \tag{17}$$

对应的归一化模糊函数幅度为：

$$|\bar{\chi}_{\mathrm{LFM}}(\tau,f_D)|=\begin{cases}\left(1-\dfrac{|\tau|}{T_p}\right)\left|\mathrm{sinc}\left[(f_D-\mu\tau)(T_p-|\tau|)\right]\right| & |\tau|\le T_p\\ 0 & |\tau|>T_p\end{cases} \tag{18}$$

与 SF 信号相比，LFM 信号的模糊函数主响应沿 $f_D=\mu\tau$ 方向倾斜分布。当 $f_D=0$ 时，距离向压缩响应的主瓣尺度约为 $1/B$，因此理论距离分辨率为 $\Delta R_{\mathrm{LFM}}\approx\dfrac{c}{2B}$。

在本文参数 $T_p=50\mu$s、$B=1$MHz 下，SF 信号对应的脉宽距离尺度约为 7.5km，LFM 信号的理论距离分辨率约为150m。图 2 给出了两类信号在本文参数下的归一化时延-多普勒模糊函数图，图中颜色表示归一化模糊函数功率，单位为 dB，黑色曲线为相应等值线。由图可知，SF 信号在多普勒维具有相对直接的响应形式，但时延响应范围较宽；LFM 信号通过线性调频和匹配滤波显著压缩距离响应，但同时存在时延-多普勒耦合。

最新录用

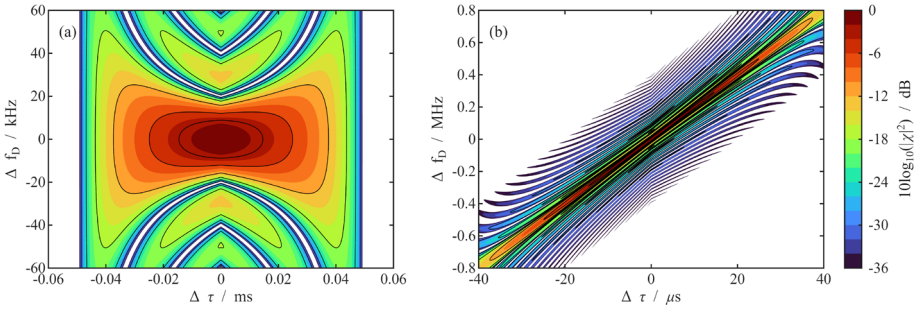


图 2 SF 与 LFM 信号的归一化时延-多普勒模糊函数对比图。（a）SF 信号；（b）LFM 信号

Figure 2 Comparison of normalized delay-Doppler ambiguity functions of SF and LFM signals. (a) SF signal; (b) LFM signal

需要说明的是，图 2 仅用于展示两类发射波形理想的归一化时延-多普勒模糊函数特性。由于本文采用相邻脉冲对处理进行测速，径向速度由目标距离窗内的复相关相位提取，而非基于长时间相干积累的多普勒谱估计，因此实际测速性能并非模糊函数的直接映射。本文后续的比较，均在相同的观测几何、相邻脉冲对、7.5 km 公共距离窗及理想平台运动相位补偿条件下进行。在该统一处理框架下，两类波形测速性能的差异主要体现为：SF 信号脉内无调制，表现为宽距离响应下的整体复相关；而 LFM 信号经匹配滤波后，可在同一公共距离窗内进行多个距离分辨单元的多视复相关平均。

2 仿真设置

2.1 仿真流程

本文采用信号级仿真方法开展 SF 与 LFM 脉冲对测速性能对比。图 3 给出了海面运动径向速度估计的流程图。

最新录用

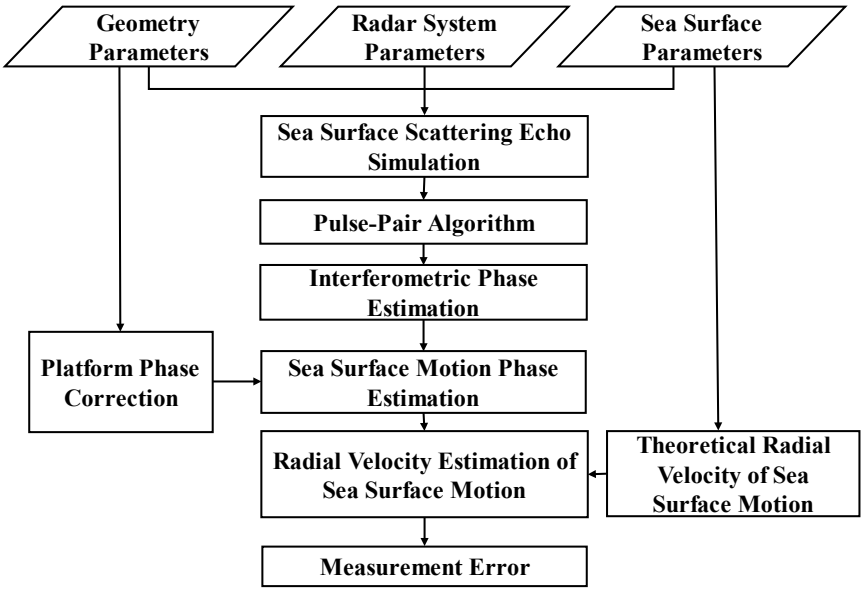


图 3 海面运动径向速度估计流程图

Figure 3 Process of radial velocity estimation of ocean surface motion

该流程以观测几何、雷达系统与海面运动参数为初始输入，生成海面散射回波序列；随后利用脉冲对算法提取包含平台与海面复合运动的干涉相位。为消除星载平台高速运动带来的主导相位项，本文使用静止海面参考回波进行理想平台相位补偿；补偿后的残余相位用于估计海面沿雷达视线方向的径向速度。最后，将估计结果与相同距离窗内的相干加权等效真值进行比对，从而量化测速误差。

2.2 观测场景与系统参数

本文采用局部切平面（tangent plane, TP）面目标场景开展信号级仿真。目标区域尺寸为 40km×40km，场景离散面元尺寸默认为 0.1 km×0.1 km。平台位置、速度和姿态由中法海洋卫星（CFOSAT）的 L1B 轨道文件提供，并在慢时间上通过插值得到各脉冲时刻的平台状态。本文仅借用 CFOSAT 的真实星载轨道与姿态时序作为平台运动输入，以确保仿真中的平台运动具有现实代表性，这并不意味着本文所设定的多普勒散射计载荷体制、扫描方式及系统参数与 CFOSAT 实际载荷一致。

天线采用旋转扫描笔形波束体制，机械扫描使波束中心在切平面内形成连续轨迹。SF 与 LFM 共用同一轨道状态、同一扫描方式、同一海表运动速度矢量、同一噪声注入策略以及同一平台参考补偿流程。场景后向散射系数采用 Ku 波段 NSCAT-4DS 地球物理模式函数（Geophysical Model Function，GMF）进行赋值[24]。

最新录用

为突出波形与距离处理链的影响，本文主要针对具有均匀运动速度的海面场景进行仿真分析，场景默认的海表运动速度矢量设定为：

$$\mathbf{v} = [1.5, 1.2, 0]^T \,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1} \tag{19}$$

默认风速取$8\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$，风向取$0^\circ$，本文风向采用气象学来向定义，角度在局地水平面中给出，其中 0° 表示从局地正北方向吹来，角度按顺时针方向增加；在调用 GMF 时，将该来向风向转换为雷达观测方位与风向之间的相对风向角。单次回波示意图采用固定输入 SNR，即取 10 dB 为例；统计分析部分再对输入 SNR 在−15 dB 至 15 dB 范围内进行扫描。本文评估的速度均指扣除平台运动相位贡献后的雷达视线径向速度，而非由多方位观测合成的二维海流矢量速度。仿真采用的观测几何与雷达系统参数列于表 1。

表 1 仿真采用的观测几何与雷达系统参数

Table 1 Observation geometry and radar system parameters used in the simulation

参数类型	参数	设定值
系统参数	工作频率	13.256 GHz
	峰值天线增益	50 dB
	发射功率	200 W
	LFM 脉冲带宽	1 MHz
	脉冲时宽	50 μs
	脉冲重复频率	6 kHz
	采样频率	2 MHz
	天线扫描速度	18 RPM
几何参数	轨道高度	543 km
	俯仰/方位向-3dB 波束宽度	0.3° / 0.3°
	天线俯仰角	48°
	波束中心斜距	859 km
	波束中心离星下点距离	640 km
	单程−3 dB 足迹大小（距离向×方位向）	7.6 km×4.5 km
	波束多普勒带宽（侧视）	3.5 kHz

最新录用

2.3 噪声设置

为定量评估系统热噪声与海面散射随机起伏对测速精度的影响，本文建立加性热噪声与斑点噪声并存场景。该场景在接收基带回波中叠加热噪声的同时，通过乘性复散射系数对每个场景面元引入斑点噪声。斑点噪声作为面元散射系数的乘性随机项引入，其作用是改变不同面元回波参与相干叠加时的幅度和初相，从而导致距离窗内出现随机亮斑、深衰落和相位扰动。

在测速处理时，本文基于几何关系固定相邻脉冲和距离窗中心。具体而言，选取的两个相邻脉冲均处于目标区域有效照射范围内，并位于场景中心附近；距离窗中心由平台至参考地面点的预测时延确定；两类波形均使用 7.5 km 公共距离窗。采用这一处理方式后，SF 与 LFM 的差异主要体现在距离响应、有效距离分辨单元数、门内散射权重和斑点噪声平均方式上，而不是来自不同脉冲或不同距离窗位置。

2.4 性能评价指标

本文以反演径向速度的均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）作为核心评价指标。为降低随机噪声与单一斑点噪声实现对统计结果的偶然影响，本文在−15 dB 至 15 dB 的输入 SNR 范围内开展多次独立重复仿真。对于含斑点噪声场景，每一个 SNR 采样点首先生成 150 个相互独立的空间斑点噪声场；随后，对每个斑点噪声场分别进行 500 次独立加性热噪声重复试验。最终对不同斑点噪声场实现的统计结果进行集合平均，以同时表征热噪声和空间斑点噪声随机性的综合影响。海表运动径向速度估计的均方根误差定义为：

$$\mathrm{RMSE}=\left[\frac{1}{N}\sum_{a=1}^{N}\left(\hat{v}_{r,a}-v_{r,a}^{\mathrm{eff}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{20}$$

其中，$\hat{v}_{r,a}$ 为第 a 个统计样本的径向速度估计值；$v_{r,a}^{\mathrm{eff}}$ 为与该统计样本对应的等效真实径向速度，而非简单取场景几何中心值，对于含斑点噪声场景，由于不同斑点噪声场实现对应的门内散射权重不同，$v_{r,a}^{\mathrm{eff}}$ 可发生变化，因此，式(20)是相对于当前斑点噪声实现下相干加权等效真值的条件误差。该定义与实际脉冲对相位

最新录用

估计过程中的门内加权方式保持一致，可用于比较 SF 与 LFM 在相同斑点噪声场和相同热噪声条件下的相位估计稳定性。设第 k 个脉冲与第 $k+M$ 个脉冲构成一组脉冲对，二者时间间隔为 $\Delta T = M / \mathrm{PRF}$。对第 i 个海面散射单元，其相对于第 k 个脉冲时刻雷达视线方向的径向速度定义为：

$$v_{r,i} = \mathbf{v}_i^{\mathrm{T}} \hat{\mathbf{u}}_{k,i} \tag{21}$$

其中，$\mathbf{v}_i$ 为第 i 个散射单元的三维速度矢量，$\hat{\mathbf{u}}_{k,i}$ 为由卫星指向该散射单元的单位视线向量：

$$\hat{\mathbf{u}}_{k,i} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{s,k}}{\left\| \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{s,k} \right\|} \tag{22}$$

式中，$\mathbf{r}_i$ 为散射单元位置，$\mathbf{r}_{s,k}$ 为第 k 个脉冲时刻的卫星位置。在脉冲对间隔 ΔT 内，则该面元径向运动引起的双程残余相位可近似写为：

$$\phi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} v_{r,i} \Delta T \tag{23}$$

对于面目标，脉冲对相关相位是各散射单元回波在处理窗口内相干叠加后的等效相位。因此，本文将等效真实相位定义为：

$$\phi_{\mathrm{true}}^{(q)} = \arg\left[\sum_{i \in \Omega_q} W_i^{(q)} \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_{r,i} \Delta T \right) \right] \tag{24}$$

其中，q 表示波形类型，Ω_q 表示在该波形处理链下进入公共距离窗的有效散射单元集合。$W_i^{(q)}$ 为第 i 个散射单元在脉冲对相关中的等效权重，可表示为：

$$W_i^{(q)} = |\eta_i|^2 \, A_{k,i} A_{k+M,i} \chi_i^{(q)} \tag{25}$$

式中，$|\eta_i|^2$ 表示斑点噪声功率项；$A_{k,i}$ 和 $A_{k+M,i}$ 分别为第 k 个和第 $k+M$ 个脉冲下的幅度项；$\chi_i^{(q)}$ 表示该散射单元经过对应波形距离处理和公共距离窗截取后进入当前处理窗口的等效选窗权重。对于本文采用的公共距离窗处理，该权重主要由面元时延位置与距离窗边界共同决定。由式(24)得到的相位真值进一步换算为等效真实径向速度：

$$v_{r,a}^{\mathrm{eff}} = -\frac{\lambda}{4\pi \Delta T} \phi_{\mathrm{true}}^{(q)} \tag{26}$$

最新录用

该定义与式(12)的速度反演公式保持一致。为进一步分析径向速度 RMSE 的来源，本文还统计平台运动相位补偿后干涉相位误差的标准差 $\sigma_{\phi}^{(q)}$，其定义为：

$$\sigma_{\phi}^{(q)}=\left[\frac{1}{N-1}\sum_{a=1}^{N}\left(\Delta\phi_{a}^{(q)}-\overline{\Delta\phi}^{(q)}\right)^{2}\right]^{1/2} \tag{27}$$

$$\Delta\phi_{a}^{(q)}=\mathrm{W}\left\{\hat{\phi}_{\mathrm{r},a}^{(q)}-\phi_{\mathrm{true}}^{(q)}\right\} \tag{28}$$

$$\overline{\Delta\phi}^{(q)}=\frac{1}{N}\sum_{a=1}^{N}\Delta\phi_{a}^{(q)} \tag{29}$$

其中，$\hat{\phi}_{\mathrm{r},a}^{(q)}$ 为第 a 个统计样本经理想平台运动相位补偿后的残余干涉相位估计值；$\phi_{\mathrm{true}}^{(q)}$ 为由式(24)确定的等效真实相位；$\mathrm{W}\{\cdot\}$ 为相位主值提取算子，用于将相位差等效折叠至 $[-\pi,\pi)$ 主值区间内。本文中 N 表示参与统计的有效样本数。

本文仿真模型的核心目的是比较统一处理链下，SF 与 LFM 波形体制对脉冲对测速性能的影响。仿真模型对观测环境进行了理想化假设：将海表运动速度简化为空间均匀场，斑点噪声设为固定空间随机场，暂未引入海面散射体的慢时间去相关、风浪流耦合等复杂的海洋动力学调制效应。同时，平台运动相位补偿基于前述的理想静止海面参考，未包含实际陆地定标等。因此，本文结果旨在阐明理想平台运动相位补偿、同等观测几何与公共输入 SNR 条件下两类波形体制本身的相对测速性能差异。

3 结果与分析

为了评估 SF 与 LFM 在星载多普勒散射计脉冲对测速中的性能差异，本节结合前文构建的信号级仿真模型，从观测几何、距离处理响应、公共距离窗特征、干涉相位稳定性、相关系数和速度 RMSE 等方面展开分析。

3.1 观测几何与脉冲对选取

星载多普勒散射计通常采用笔形波束圆锥扫描体制。扫描过程中，天线足迹在海面形成连续且相互交叠的轨迹。图 4 给出了本文处理时目标区域、波束中心轨迹、3 dB 足迹和选中相邻脉冲对的几何关系。图 4(a)中，阴影部分表示目标区域，黑色实线表示波束中心轨迹，灰色虚线椭圆表示不同时刻的 3 dB 波束

最新录用

足迹，虚线矩形为局部放大区域。图 4(b)进一步放大了相邻足迹。由于脉冲重复间隔较短，相邻两次观测之间由平台平动和天线旋转引起的足迹偏移远小于 3 dB 足迹尺度，有效照射区域高度重合，这为脉冲对复相关保持较高相干性提供了几何前提。实际仿真的网格面元分辨率为 100 m；为避免图幅显示过密，图中仅以 1 km 间距网格进行示意。

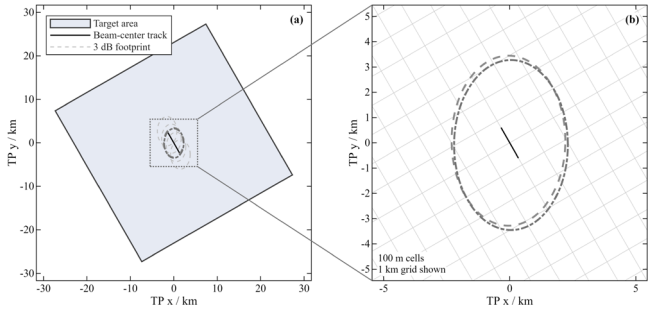


图 4 仿真观测几何与脉冲对选取示意图

Figure 4 Simulated observation geometry and pulse-pair selection

3.2 原始回波与距离处理二维特征

波形体制差异首先体现在基带回波的慢时间-快时间二维幅度分布上。图 5 给出了同一仿真场景下 SF 与 LFM 回波在距离处理前后的归一化幅度分布示意图。

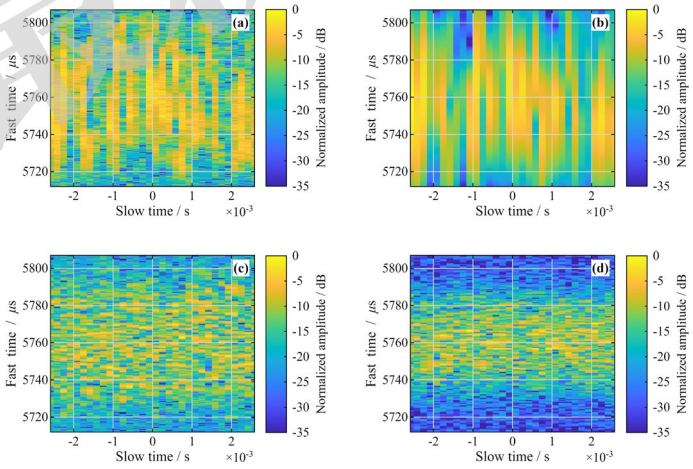


图 5 SF 与 LFM 回波在慢时间–快时间域的二维幅度分布示意图。（a）SF 原始回波；（b）SF 匹配滤波输出；（c）LFM 原始回波；（d）LFM 匹配滤波输出

Figure 5 Two-dimensional amplitude distributions of SF and LFM echoes in the slow-time–fast-time domain. (a) Raw SF echo; (b) matched-filtered SF echo; (c) raw LFM echo; (d) matched-filtered LFM echo

最新录用

从图 5 可见，距离处理前 SF 与 LFM 均受发射脉冲物理时宽控制，回波能量在快时间向呈宽展布。经过匹配滤波后，两类波形的距离响应出现明显差异。SF 由于脉内无调制，其匹配滤波输出的主瓣宽度仍主要受时宽控制，能量在数公里尺度上缓慢变化。LFM 经过匹配滤波后，能量集中于约 150 m 的距离分辨单元内，主瓣更窄、局部峰值更尖锐，能够在距离向上提供更精细的散射结构。

这一差异会直接影响脉冲对相位估计。SF 的宽距离响应相当于对较长距离范围内的散射单元进行相干积分，有利于在宽距离门内形成整体平均；但在含斑点噪声场景中，宽响应也会混合更多具有随机幅度和初相的散射单元，使门内相位更容易受随机亮斑影响。LFM 的窄距离响应可将公共窗口分解为多个距离分辨单元，再通过多视复相关实现统计平均，因此在含斑点噪声场景中具有更强的距离向随机起伏抑制能力。

3.3 公共距离窗内的距离像特征

为进一步分析公共距离窗对相位估计的影响，图 6 对比了含斑点噪声条件下相邻脉冲的距离像剖面。图中灰色阴影表示 7.5 km 公共距离窗；图 6 (b)展示了 LFM 在公共距离窗内的整体距离像；图 6 (c)则为 LFM 距离像在局部距离尺度上的示例，用于更清楚地表征 150 m 名义距离分辨单元及其附近的幅度起伏。

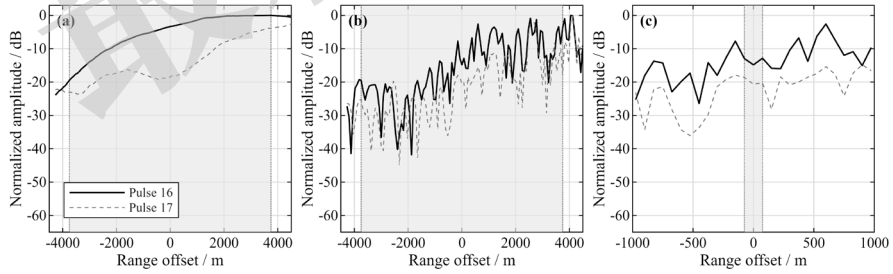


图 6 脉冲对公共距离窗内距离像对比。（a）SF 距离像；（b）LFM 距离像；（c）LFM 的 150 m 距离分辨单元示例

Figure 6 Comparison of range profiles within the common range window of the pulse pair. (a) SF range profile; (b) LFM range profile; (c) Example of a 150 m LFM range-resolution cell

图 6 表明，在含斑点噪声场景下，SF 与 LFM 均出现明显的距离向随机起伏。SF 的宽距离响应会将较大范围内具有随机幅度和初相的面元回波相干混合在同一宽主瓣内，导致相邻脉冲间包络差异和相位扰动增大。LFM 虽然在单个

最新录用

150 m 分辨单元内也会受到斑点噪声引起的衰落影响，但其距离分辨能力使不同距离单元的斑点噪声扰动可通过多视平均部分抵消。因此，在斑点噪声与热噪声共同作用的条件下，LFM 更容易获得稳定的脉冲对相位。

图 7 进一步展示了选定相邻脉冲在完整斜距范围内的距离像。与图 6 的局部距离偏移视角相比，图 7 更直观地体现了公共距离窗在完整距离像中的位置，以及斑点噪声对不同波形距离响应形态的影响。

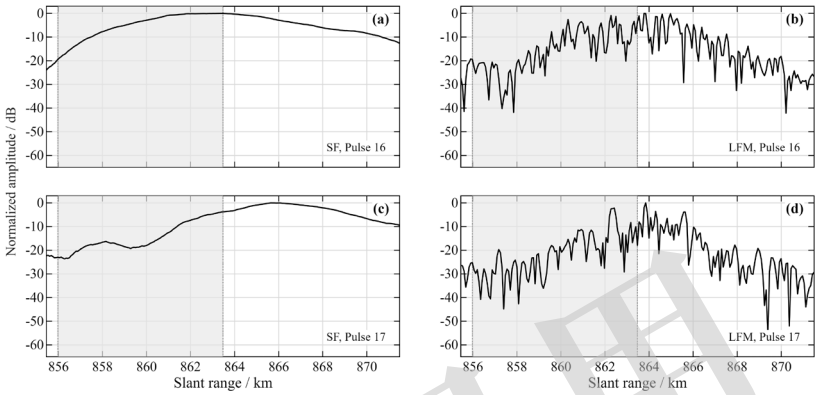


图 7 相邻脉冲的完整距离像剖面。（a）第 16 个脉冲的 SF 距离像；（b）第 16 个脉冲的 LFM 距离像；（c）第 17 个脉冲的 SF 距离像；（d）第 17 个脉冲的 LFM 距离像

Figure 7 Full range profiles of adjacent pulses. (a) SF range profile of pulse 16; (b) LFM range profile of pulse 16; (c) SF range profile of pulse 17; (d) LFM range profile of pulse 17

图 7 表明，在完整斜距范围内，SF 的能量分布更连续、更宽，而 LFM 距离压缩结果呈现更强的细尺度起伏。若直接在全窗口内进行单次整体相关，这种局部起伏可能降低相位估计稳定性；而采用 LFM 距离分辨单元多视平均方法，能够将局部随机亮斑分散到多个子视中，从而提升整体相位估计的稳健性。

3.4 干涉相位稳定性与相关系数分析

图 8 给出了统一选窗处理下 SF 与 LFM 的干涉相位误差标准差随 SNR 的变化。由于径向速度估计由平台运动相位补偿后的残余相位直接换算得到，因此相位误差标准差是径向速度误差的直接来源。

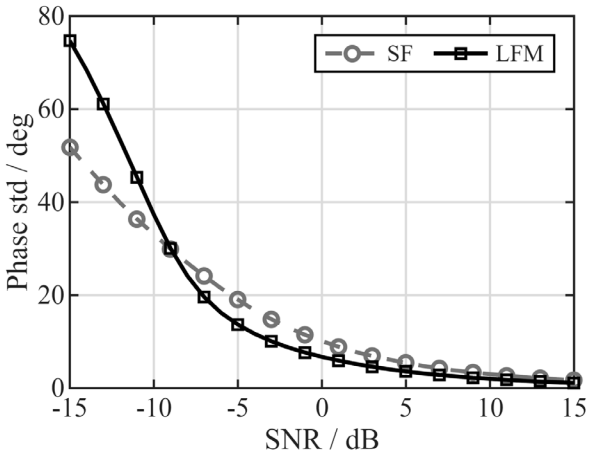


图 8 干涉相位误差标准差随 SNR 的变化

Figure 8 Variation of interferometric phase-error standard deviation with SNR

图 8 表明，在含斑点噪声场景中，两类波形的相位误差标准差总体随输入 SNR 增加而降低；当 SNR 高于约−9 dB 后，LFM 的相位误差标准差低于 SF。以 SNR 为 10 dB 为例，LFM 和 SF 的相位误差标准差分别为 1.99°和 3.01°。这表明在斑点噪声与热噪声并存条件下，相位误差由加性热噪声、乘性斑点噪声以及距离处理方式共同决定；随着输入 SNR 提高，距离窗内随机幅相起伏及其平均方式对两类波形相位估计差异的影响更加明显。对于 SF，宽距离响应会将较大范围内的随机亮斑以相干方式混合进入同一次整体相关，使等效相位容易受少数强散射影响；对于 LFM，公共 7.5 km 窗被分解为约 50 个名义距离分辨单元，不同距离单元中的斑点噪声扰动可通过多视复相关平均，从而降低单个随机结构对整体相位的影响。

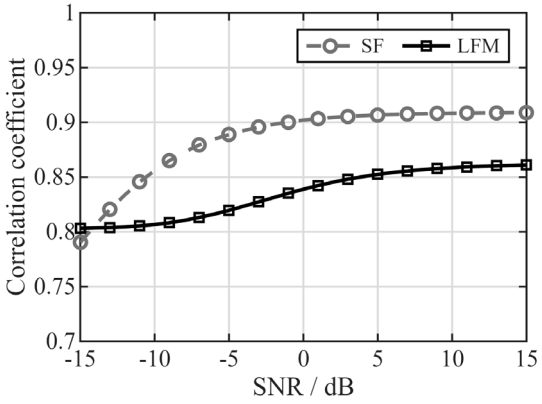


图 9 脉冲对相关系数随 SNR 的变化

Figure 9 Variation of pulse-pair correlation coefficient with SNR

最新录用

图 9 表明，在含斑点噪声场景中，相关系数幅值与最终测速误差并不完全一致。以 SNR 为 10 dB 为例，SF 与 LFM 的相关系数分别约为 0.91 和 0.86。结合图 8 可知，此时 LFM 具有更低的相位误差，这说明相关系数幅值只能反映复样本整体相干程度的一部分，不能单独解释测速误差差异；距离压缩后的多视复相关处理改变了门内斑点噪声扰动对相位估计的贡献方式，是 LFM 在含斑点噪声场景中获得更稳定等效干涉相位的重要原因。

3.5 径向速度 RMSE 随 SNR 的变化

图 10 给出了 SF 与 LFM 径向速度 RMSE 随输入 SNR 的变化趋势。结果表明，在含斑点噪声场景中，两类波形的径向速度 RMSE 总体随输入 SNR 增加而降低；当输入 SNR 高于约−9 dB 后，LFM 的径向速度 RMSE 低于 SF。这表明，在当前输入 SNR 和处理链下，SF 与 LFM 的测速性能差异并不能仅由相关系数幅值或热噪声水平解释，而与两类波形的距离响应、公共距离窗内散射权重以及斑点噪声平均方式有关。以 SNR 为 10 dB 为例，SF 与 LFM 的径向速度 RMSE 分别为 0.57 m/s 和 0.37 m/s；在 15 dB 时，二者分别为 0.32 m/s 和 0.21 m/s。

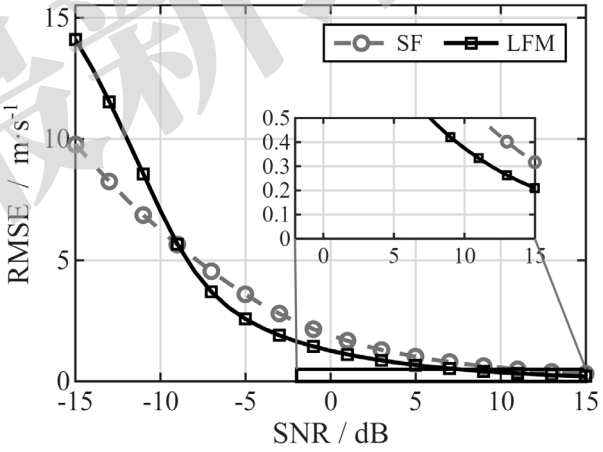


图 10 径向速度 RMSE 随 SNR 的变化

Figure 10 Variation of radial-velocity RMSE with SNR

结合第 1.3 节的分析可知，SF 信号与 LFM 信号的时延-多普勒响应特性存在差异。在本文的相邻脉冲对干涉测速处理框架下，两类波形的测速性能差异主要源于距离响应及样本处理方式的不同：SF 信号的距离响应尺度受限于脉冲时宽，在 7.5 km 公共距离窗内表现为宽距离响应下的整体复相关；而 LFM 信号得益于匹配滤波后的高距离分辨率，在同一窗口内距离分辨单元数增多，进而可通过多

最新录用

视复相关平均，有效抑制局部随机散射结构对整体相位估计的影响。

综上，SF 与 LFM 的测速性能差异主要体现为宽距离门整体相关与 LFM 距离分辨单元多视平均之间的权衡。对于星载多普勒散射计波形体制选择而言，SF 信号具有体制简单和宽距离门整体平均的特点；而在更接近实际海面回波的斑点噪声条件下，LFM 更有利于获得稳定的脉冲对相位和较低径向测速误差。

3.6 方位角与网格尺寸影响

为补充不同观测方位和场景离散方式可能引入的误差差异，本文在含斑点噪声、输入 SNR 为 10 dB 条件下，进一步开展方位角和网格尺寸敏感性仿真。需要说明的是，本文采用静止海面参考回波进行理想平台相位补偿，因此方位角变化所对应的平台多普勒项已在补偿过程中被扣除。补充仿真主要用于检验在理想平台相位扣除后，两类波形对斑点噪声引起的相位扰动和网格离散差异的敏感性。

图 11 给出了方位角从 0°至 180°变化时的相位误差均值和标准差。如图 11(a)所示，SF 与 LFM 的相位误差均值均接近 0，其最大绝对值分别为 0.036°和 0.023°，未表现出随方位角变化的明显系统性偏差。如图 11(b)所示，LFM 在各方位角下保持较稳定，相位误差标准差为 1.63°-1.99°；SF 的相位误差标准差为 3.01°-6.58°。这说明在理想平台运动相位补偿条件下，方位角变化并未改变 LFM 优于 SF 的相位稳定性结论；相比之下，SF 的宽距离响应更容易受到不同方位角下随机幅相权重变化的影响。

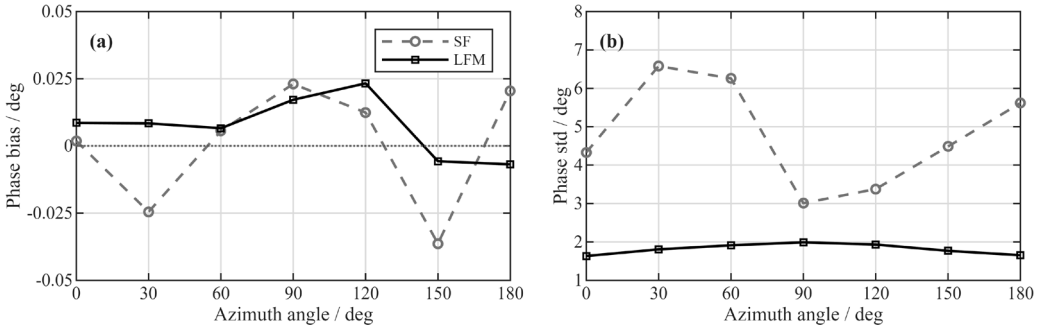


图 11 不同方位角下相位误差均值与标准差变化。（a）相位误差均值；（b）相位误差标准差

Figure 11 Variation of phase-error bias and standard deviation with azimuth angle. (a) Phase-error bias; (b) phase-error standard deviation

图 12 给出了场景仿真网格尺寸分别取 100 m、200 m、500 m 和 1000 m 时的相位误差均值和标准差。如图 12(a)所示，SF 与 LFM 的相位误差均值同样接

近 0，其最大绝对值分别为 0.023°和 0.017°，未表现出随网格尺寸变化的明显系统性偏差。如图 12(b)所示，LFM 在不同网格尺寸下基本保持不变，相位误差标准差集中在 1.84°-1.99°；SF 则表现出更明显波动，相位误差标准差为 3.01°-7.12°。这表明，在 7.5 km 公共距离窗远大于单个网格尺度的条件下，网格尺寸变化对 LFM 多视平均结果影响较小；SF 由于在宽距离响应内进行整体相干叠加，对斑点噪声场的空间离散化和随机强散射位置更敏感。

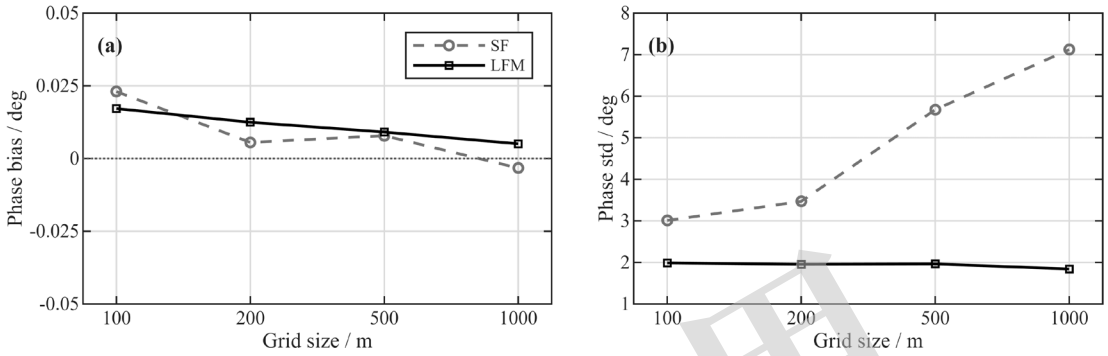


图 12 不同网格尺寸下相位误差均值与标准差变化。（a）相位误差均值；（b）相位误差标准差

Figure 12 Variation of phase-error bias and standard deviation with simulation grid size. (a) Phase-error bias; (b) phase-error standard deviation

上述仿真表明，在本文理想平台相位补偿和统一公共距离窗设定下，方位角与网格尺寸不会改变两类波形的相对性能关系。由于平台运动相位贡献已通过静止海面参考回波进行理想补偿，方位角变化主要体现为斑点噪声场对应的散射权重分布和局部相干叠加方式的变化。从相位误差均值来看，SF 与 LFM 均未表现出明显系统性偏差；从相位误差标准差来看，LFM 对方位角和网格尺寸均表现出更强稳定性；SF 信号则更容易受到斑点噪声场的随机调制以及网格离散方式的影响。

4 结论

本文针对星载旋转扫描笔形波束多普勒散射计海表径向速度测量中的波形选择问题，构建了包含海面散射回波、加性热噪声、乘性斑点噪声和理想平台运动相位补偿的统一面目标信号级仿真模型，在相同观测几何、系统参数和 7.5 km 公共距离窗下，对 SF 与 LFM 信号的脉冲对径向测速性能进行了对比。结果表明，两类波形在完成各自距离处理后可采用统一的复相关测速公式，其性能差异

最新录用

主要来自距离响应、距离窗内散射权重和斑点噪声平均方式。

在斑点噪声与热噪声并存的仿真场景中，当 SNR 高于约−9 dB 后，LFM 信号的径向速度 RMSE 和相位误差标准差均低于 SF 信号。以 SNR 为 10 dB 为例，SF 与 LFM 的径向速度 RMSE 分别为 0.57 m/s 和 0.37 m/s，相位误差标准差分别为 3.01°和 1.99°。其主要原因在于，SF 宽距离响应会将较大范围内具有随机幅度和初相的面元回波相干混合到同一次整体相关中，使等效相位更容易受到斑点噪声扰动的影响；LFM 则可利用距离压缩能力将公共 7.5 km 距离窗分解为多个距离分辨单元，并通过多视复相关降低单个局部随机散射结构对整体相位的影响。因此，在更接近实际海面回波的斑点噪声条件下，LFM 信号对相位稳定性和径向测速精度更有利。

方位角和网格尺寸敏感性仿真进一步表明，在理想平台运动相位补偿条件下，SF 与 LFM 的相位误差均值均接近 0，未表现出随方位角或网格尺寸变化的明显系统性偏差；在相位误差标准差方面，LFM 在不同方位角和不同网格尺寸下的相位误差标准差均保持在约 2°以内，而 SF 的波动更明显。这说明 LFM 的多距离分辨单元平均对方位角变化和网格离散更稳健。需要说明的是，本文结论建立在理想平台运动相位补偿、统一公共距离窗、给定系统参数和空间固定斑点噪声模型等假设前提下，暂未考虑平台相位参考误差、海面散射体慢时间去相关、复杂风浪流耦合及真实在轨定标误差等因素。因此，本文结果不构成对 SF 与 LFM 波形体制优劣的绝对判定，其核心目的在于揭示统一信号级处理链下两类波形的距离响应和门内平均方式对脉冲对测速性能的影响机制。本文结果可为后续星载多普勒散射计波形体制分析提供参考。

参考文献

[1] DOHAN K. Ocean surface currents from satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, **122**(4): 2647-2651

[2] HAUSER D, ABDALLA S, ARDHUIN F, *et al*. Satellite remote sensing of surface winds, waves, and currents: Where are we now?[J]. *Surveys in Geophysics*, 2023, **44**(5): 1357-1446

[3] FABRY P, RECCHIA A, DE KLOE J, *et al*. Feasibility study of sea surface currents measurements with doppler scatterometers[C]//ESA Living Planet Symposium. Edinburgh: ESA, 2013: 233

[4] BAO Q L, DONG X L, ZHU D, *et al*. The feasibility of ocean surface current

measurement using pencil-beam rotating scatterometer[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, **8**(7): 3441-3451

[5] RODRÍGUEZ E, WINETEER A, PERKOVIC-MARTIN D, *et al*. Estimating ocean vector winds and currents using a ka-band pencil-beam doppler scatterometer[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(4): 576

[6] RODRÍGuez E, BOURASSA M, CHELTON D, *et al*. The Winds and currents mission concept[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, **6**: 438

[7] ARDHUIN F, AKSENOV Y, BENETAZZO A, *et al*. Measuring currents, ice drift, and waves from space: the Sea surface KInematics Multiscale monitoring (SKIM) concept[J]. *Ocean Science*, 2018, **14**(3): 337-354

[8] MIAO Y J, DONG X L, BAO Q L, *et al*. Perspective of a ku-ka dual-frequency scatterometer for simultaneous wide-swath ocean surface wind and current measurement[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(7): 1042

[9] GOMMENGINGER C, CHAPRON B, HOGG A, *et a*l. SEASTAR: a mission to study ocean submesoscale dynamics and small-scale atmosphere-ocean processes in coastal, shelf and polar seas[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, **6**: 457

[10] 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)

[11] MORROW R, FU L L, RIO M H, *et al*. Ocean circulation from space[J]. S*urveys in Geophysics*, 2023, **44**(5): 1243-1286

[12] CHEN J, CHEN J Y, CAO Z Y, *et al*. Improving surface current estimation from geostationary ocean color imager using tidal ellipse and angular limitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Ocean*s, 2019, **124**(6): 4322-4333

[13] YANG H P, ARNONE R, JOLLIFF J. Estimating advective near-surface currents from ocean color satellite images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **158**: 1-14

[14] CHAPRON B, COLLARD F, ARDHUIN F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, **110**(C7): C07008

[15] ROMEISER R, SUCHANDT S, RUNGE H, *et al*. First analysis of TerraSAR-X along-track InSAR-derived current fields[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(2): 820-829

[16] DU Y, DONG X L, JIANG X W, *et al*. Ocean surface current multiscale observation mission (OSCOM): Simultaneous measurement of ocean surface current, vector wind, and temperature[J]. *Progress in Oceanography*, 2021, **193**: 102531

[17] RODRIGUEZ E. On the optimal design of doppler scatterometers[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**: 1765

[18] ZHANG J Y, DONG X L, ZHU D. Satellite velocity correction method of ocean current retrieval for a spaceborne doppler scatterometer[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(23): 5541

[19] YU M M, ZHU D, DONG X L. Wind wave effects on the doppler spectrum of the ka-band spaceborne doppler measurement[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(12): 2083

[20] 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

[21] CHEN Shaohan, DONG Xiaolong, ZHU Di, *et al*. Doppler spectrum analysis of ground echoes from spaceborne doppler scatterometer[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(1): 97-109 (陈少涵, 董晓龙, 朱迪, 等. 星载多普勒散射计地面回波的多普勒谱分析[J]. 空间科学学报, 2026, **46**(1): 97-109)

[22] RICHARDS M A. Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. New York: Mcgraw-Hill, 2005.

[23] WANG Heqing, LIN Wenming, JING Liwei. High-spatial-resolution signal processing for the airborne rotating-antenna microwave scatterometers[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2026, doi: 10.11728/cjss2026-0039 (王何庆, 林文明, 景立伟. 机载旋转扫描微波散射计的高空间分辨率信号处理研究[J]. 空间科学学报, 2026, doi: 10.11728/cjss2026-0039)

[24] WANG Z X, STOFFELEN A, ZHANG B, *et al*. Inconsistencies in scatterometer wind products based on ASCAT and OSCAT-2 collocations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **225**: 207-216

最新录用

作者简介

第一作者：景立伟 男，2001 年 11 月出生于江苏省海安市，现为南京信息工程大学海洋科学学院在读硕士研究生，主要研究方向为雷达信号处理。

E-mail：jingliwei@nuist.edu.cn



通信作者：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。

E-mail：wenminglin@nuist.edu.cn



最新录用