中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0762-08 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 762-769.

基于非迭代PGA运动补偿的SAR成像效能提升算法

李伟伟[1]，周嘉琦[2,3]，张亚崇[4]

(1. 陕西飞机工业有限责任公司，陕西 汉中 723213；2. 西北工业大学 自动化学院，陕西 西安 710129；
3. 中国商飞上海飞机设计研究院，上海 201210；4. 西安飞行自动控制研究所，陕西 西安 710065)

摘 要： 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像中，传统相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocus, PGA)算法依赖多次迭代以估计并补偿运动引入的相位误差，但较大的计算开销制约了成像的实时性。为解决此问题，本文提出一种基于多维度选点与自适应窗宽的单次迭代PGA算法。该方法首先通过计算距离单元能量并进行排序，初步筛选高能量单元；进而，采用结合信噪比与局部对比度的双重约束，从杂波中精准筛选孤立的强散射点；在窗宽估计阶段，摒弃固定阈值法，采用基于局部能量分布的自适应策略，即通过计算全局平均能量并确定主瓣区域，进而扩展形成基准窗宽；最后，引入相位一致性验证机制，计算各候选点相位误差梯度与全局平均模式的方差，剔除异常散射点。通过对筛选后强点的相位梯度进行聚类，实现单次全局相位误差估计。利用某型K波段飞行器SAR实测数据进行验证的结果表明：本算法单次迭代后，点目标成像指标的峰值旁瓣比和积分旁瓣比优于传统PGA及以往改进型PGA算法多次迭代的结果，残余相位误差显著降低，图像聚焦效果接近理想状态。本文所提算法通过构建能量-信噪比-对比度-相位一致性四维联合评价指标及自适应窗宽调整，在单次迭代内实现了高精度的相位误差补偿，显著提升了SAR成像的效率和实时性，为高分辨率实时成像应用提供了有效方案。

关键词： 合成孔径雷达； 相位梯度自聚焦； 相位误差补偿

中图分类号： TN951 **文献标识码：** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.11.0029

引用格式： 李伟伟，周嘉琦，张亚崇. 基于非迭代PGA运动补偿的SAR成像效能提升算法[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：762-769.

Li Weiwei, Zhou Jiaqi, Zhang Yachong. Algorithm for improving SAR imaging performance based on non-iterative PGA motion compensation[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 762-769.

Algorithm for Improving SAR Imaging Performance Based on Non-Iterative PGA Motion Compensation

Li Weiwei[1], Zhou Jiaqi[2,3], Zhang Yachong[4]

(1. Shaanxi Aircraft Industry(Group) Co., Ltd., Hanzhong 723213, China;
2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
3. COMAC Shanghai Aircraft Design & Research Institute, Shanghai 201210, China;
4. Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In synthetic aperture radar (SAR) imaging, the traditional phase gradient autofocus (PGA) algorithm relies on multiple iterations to estimate and compensate for motion-induced phase errors, but its heavy computational burden limits the real-time imaging performance. To address this issue, this paper proposed

收稿日期： 2025-11-26

作者简介： 李伟伟(1985—)，女，高级工程师，硕士，主要从事综合导航技术的研究。E-mail:1743226485@qq.com。

a single-iteration PGA algorithm based on multi-dimensional target selection and adaptive window width. The method began by calculating and ranking the energy of range bins to preliminarily select high-energy units. Subsequently, it used dual constraints of signal-to-noise ratio (SNR) and local contrast to accurately isolate strong scatterers from clutter. During the window width estimation stage, the fixed threshold approach was abandoned in favor of an adaptive strategy based on local energy distribution. This involved calculating the global average energy, identifying the mainlobe region, and then extending it by a certain percentage to form a baseline window width. Finally, a phase consistency verification mechanism was introduced, where the variance between the phase error gradient of each candidate point and the global average pattern was computed to eliminate anomalous scatterers. By clustering the phase gradients of the filtered strong points, a single global phase error estimation was achieved. Validation using measured data from a K-band aircraft SAR system shows that after a single iteration, the proposed algorithm achieves better peak side lobe ratio (PSLR) and Integrated side lobe ratio (ISLR) for point targets compared to traditional PGA and other improved PGA algorithms even after multiple iterations. The residual phase error is significantly reduced, and the image focus quality approaches the ideal state. The proposed algorithm, through the construction of a four-dimensional joint evaluation metric (energy-SNR-contrast-phase consistency) and adaptive window width adjustment, achieves high-precision phase error compensation within a single iteration. This significantly enhances the efficiency and real-time capability of SAR imaging, providing an effective solution for high-resolution real-time imaging applications.

Key words: synthetic aperture radar; phase gradient autofocus; phase error compensation

0 引 言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)凭借其全天候及高分辨成像能力，已成为对地观测与军事侦察领域的核心设备[1]。SAR依靠理想的直线运动来实现高质量成像，然而在实际应用中，载体平台的运动误差及大气扰动等因素不可避免地会引入相位误差，导致了成像过程中图像的散焦和分辨率的下降，严重限制了成像质量[2]。

常见的SAR运动补偿方法主要可以分为两大类：基于运动传感器的补偿方法和自聚焦补偿方法。基于运动传感器的补偿方法依赖于在平台上安装高精度的惯性测量单元、全球定位系统等传感器，实时采集平台的运动信息，估算出平台的实际运动轨迹，然后将其用于校正回波信号中的相位误差。在实际应用中，该方法补偿速度快、实时性强，但其精度受传感器性能和校准的影响，无法完全补偿运动误差[3]。因此，SAR系统往往需要采用混合补偿策略，利用外部传感器提供首次估算，再通过自聚焦算法细化补偿效果，以实现更高分辨率的成像。

常见的自聚焦算法有子孔径相关法(Map Drift, MD)[4]、最小熵准则自聚焦(Minimum Entropy Criterion Autofocus, MECA)[5]、相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocus, PGA)[6]等。相较于MD对场景结构敏感、仅能补偿低阶相位误差的局限性，以及MECA依赖全局统计特性、计算复杂度高且易陷入局部极值的缺陷，PGA算法通过局部强散射点的相位梯度提取与迭代校正，实现了无需场景先验知识的高精度相位误差估计，可处理复杂运动引起的高阶误差，被广泛应用于SAR成像中。

PGA算法的处理流程中，特显点的选择和加窗是关键步骤，这两步对算法的性能和计算效率有着重要影响[7]。现有许多研究致力于优化选点策略和加窗方法，通过合适的方法选择孤立的强散射点能够显著降低迭代次数，提升算法的收敛速度，从而提高整体处理效率和精度。Lim等[8]设计了一种新的PGA方法，通过适当的目标过滤以及选择区分度更高的高质量散射体来实现高质量成像。赵侠等[9]基于最优对比度准则，提出了一种新的相位梯度自聚焦算法，并改进了PGA算法的加窗方法和迭代终止条件。Deng等[10]提出了一种基于自适应范围区间选择的改进的迭代PGA方法，用于距离区间由多个相邻散射点。Chen等[11]对相位梯度算法中特显点的选取方法进行了修改，提出了一种基于自适应孤立特显点选择的相位梯度方法。Li等[12]提出了一种方法来应对缺乏孤立强散射点的问题，该方法包含许多处理步

骤，耗时是普通PGA的数倍。陈琦等[13]通过对加窗方法的改进，提高了算法的聚焦速度。卿吉明等[14]通过分析散射点的杂波概率分布判断信号的孤立性，并通过提取脉冲包络来估算窗宽。倪崇等[15]提出了一种新的确定相位误差点扩展函数支撑域的方法，以此来确定加窗的宽度。张文虎等[16]对低信噪比场景，采用固定窗长滑窗来提高数据信噪比。刘建彬等[17]基于能量-信噪比最大准则进行强点选择，并提出一种自适应窗宽方法。

现有研究虽然在PGA算法的精度优化与计算加速方面取得一定的进展，但均未能实现算法的单次迭代。本文提出一种基于多维度散射特征联合约束的单步PGA算法，通过构建能量-信噪比-对比度-相位一致性四元评价体系，实现强散射点的精准筛选，并引入窗宽的自适应调整策略，在无需多轮迭代条件下即可实现高分辨率SAR成像。

1 飞行器SAR运动误差模型及PGA算法原理

1.1 飞行器SAR运动误差模型

在飞行器SAR系统中，回波模型和误差模型的构建通常基于理想运动假设，即载机沿预设直线匀速飞行，且平台姿态保持稳定。然而，实际飞行中载机受设备性能限制、气流扰动及机械振动等随机因素影响，不可避免地偏离理想状态，导致回波信号中引入复杂相位误差[18]，运动误差模型如图1所示。图1中，OX轴为载机方位向，OY轴为载机距离向，OZ轴为载机高度向，β为下视角。

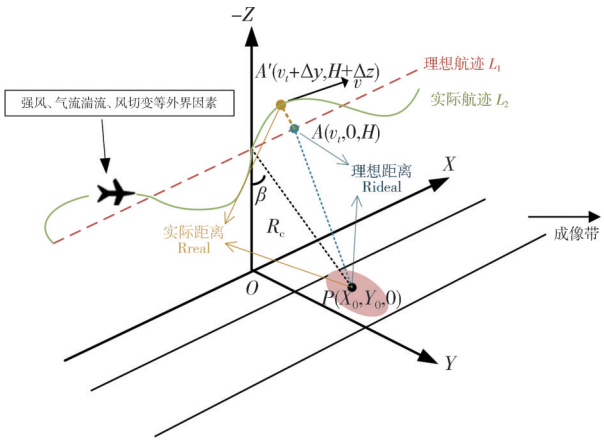


图1 飞行器SAR的运动误差模型

Fig. 1 Motion error model of aircraft SAR

设$R_{\text{ideal}}(t)$、$R_{\text{real}}(t)$分别为方位向时间t载机平台与目标点$P(0,Y_n,0)$之间的理想斜距、实际斜距。斜距误差如式(1)所示。

$$\Delta R(t)=R_{\text{real}}(t)-R_{\text{ideal}}(t), \tag{1}$$

其对应的相位误差为

$$\Delta\varphi(t)=\frac{4\pi\Delta R(t)}{\lambda}。 \tag{2}$$

设SAR系统发射的线性调频脉冲信号为

$$s(\tau)=rect\left(\frac{\tau}{T_{\text{p}}}\right)\exp(\text{j}2\pi f_0\tau+\text{j}\pi K_{\text{r}}\tau^2), \tag{3}$$

式中：τ为距离向时间；$rect(\cdot)$为矩形窗函数；T_{p}为合成孔径时间；f_0为载波频率；K_{r}为调频率。在完成距离压缩、距离徙动校正以及逆傅里叶变换后，获得了包含相位误差的单个点目标回波信号

$$S_n(\tau,t)=p_{\text{r}}\left(\tau-\frac{2R_0}{c}\right)p_{\text{a}}(t)\cdot$$
$$\exp\{-\text{j}[\varphi_0(t)+\Delta\varphi(t)+\sigma(t)+2\pi f_\tau t]\}, \tag{4}$$

式中：p_{r}和p_{a}分别为距离冲激响应幅度和方位冲激响应幅度，均为sinc函数；$\varphi_0(t)$为载机理想运动情况下的回波相位；$\sigma(t)$为杂波引入的误差相位；f_τ为点目标多普勒中心频率。

由式(4)可以看出，运动误差破坏了信号相干性，引发了图像散聚和细节模糊，导致成像分辨率的显著下降。自聚焦算法的主要任务就是估计出相位误差并对其进行补偿，从而恢复回波信号的相干性。

1.2 传统PGA算法

PGA算法[19]的理论框架建立在空域一致性相位误差假设基础上，其核心是通过筛选具有高信噪比特性的孤立强散射点来驱动误差估计过程。由于此类目标点具有散射特性稳定且回噪比高的优势，回波信号中相位误差对信号变化的贡献度显著高于噪声干扰，即回波主要由相位误差决定。通过提取该点的回波数据，得到该点的相位误差，进而对目标所在距离单元进行全局补偿。主要流程包括：选取回波特显点，进行循环位移操作使其能量中心化；采用窗函数截取高置信度数据段；通过相位差分构建误差估计模型；最后通过迭代更新完成全场景相位校正。

首先选取孤立强散点，进行循环位移操作，使目标点多普勒中心频率为0，此时回波相位为

$$\varphi_{\text{r}}(t)=\varphi_0(t)+\Delta\varphi(t)+\sigma(t)。 \tag{5}$$

在完成强散射点筛选后，需对目标区域执行加窗操作以抑制高频噪声成分及邻近散射体产生

的旁瓣干扰。窗函数的宽度参数是算法设计的核心要素，过宽或过窄的窗宽设置均会导致相位梯度信息失真，排除干扰相位后回波相位为

$$\varphi_r(t)\approx\varphi_0(t)+\Delta\varphi(t)。\tag{6}$$

此时回波信号为

$$S_n(\tau,t)=p_r\left(\frac{\tau-2R_0}{c}\right)p_a(t)\cdot\exp\{-\mathrm{j}[\varphi_0(t)+\Delta\varphi(t)]\}。\tag{7}$$

回波相位误差只与方位时间t有关，将t时刻接收到的脉冲信号写为

$$S_n(t)=A(t)\exp\{-\mathrm{j}[\varphi_0(t)+\Delta\varphi(t)]\}\tag{8}$$

式中：$A(t)$为信号幅度。

对脉冲信号求一阶差分，可得

$$d_n(t)=s_n(t+1)-s_n(t)=A_n\exp\left[\mathrm{j}(\varphi_0+\varphi(t))\right]\cdot(\exp\mathrm{j}(\varphi(t+1)-\varphi(t))-1)\approx s_n(t)\cdot\mathrm{j}\varphi'(t),\tag{9}$$

式中：$\varphi'(t)$为$\varphi(t)$的一阶差分，即$\varphi'_t=\varphi(t+1)-\varphi(t)$。

设$s_n^*(t)$为$s_n(t)$的复共轭，在式(9)两边同乘$s_n^*(t)$可得相位一阶差分的估计值

$$\widehat{\varphi'}(t)=\frac{\mathrm{Im}[d_n(t)\cdot s_n^*(t)]}{s_n(t)\cdot s_n^*(t)}=\frac{\mathrm{Im}[d_n(t)\cdot s_n^*(t)]}{|s_n(t)|^2}。\tag{10}$$

令$\widehat{\varphi'}(1)=0$，对式(10)进行积分求和就可以得到相位误差的估计值

$$\varphi(t)=\sum_1^{t-1}\widehat{\varphi'}(t),\tag{11}$$

然后用估计的相位误差进行回波信号补偿，并进行多次PGA算法迭代以实现更高的分辨率。

2　改进选点和加窗的非迭代PGA

现有的改进方案通过优化算法提升了收敛速度和估计精度，但仍需要多次迭代以实现高精度误差估计，这种多次迭代的过程增加了计算负担，还可能在实时应用中导致延迟。为了克服这一问题，本文提出了一种改进方案，重点在于优化选点策略和采用自适应加窗方法，以显著减少计算量，同时保证结果的高可靠性。通过精确选择散射点和动态调整加窗参数，保证新的方案能够在不依赖多次迭代的情况下，实现有效的相位误差补偿。

2.1　主要目标选择

首先类似传统PGA方案，计算每个距离单元的能量。获取各距离单元能量大小后，按大小排序，从中挑选出能量最大的一部分单元。这些初步筛选出的距离单元，在能量标准上满足一定要求，可视为潜在的包含孤立强点的目标。对每个距离单元沿方位向积分能量，可得

$$E_k=\sum_{m=1}^{N_a}|s_k(m)|^2,\tag{12}$$

式中：$s_k(m)$为第k个距离单元的第m个方位采样点。

针对初步筛选出的含强点距离单元，先进行圆移操作，对每个候选距离单元，定义信号区域主瓣与杂波区域旁瓣。信号区L_{sig}以强点为中心，取3～5个方位采样点，杂波区L_{clu}对称分布于信号区两侧各10～20个采样点。

在选择目标时，信噪比是最关键的元素。信号强度越高，对现有相位误差模式的检测就越准确[20]。信噪比(Signal-to-Noise Ratio，SNR)为

$$SNR_k=10\log_{10}\left(\frac{\sum\limits_{m\in L_{\mathrm{sig}}}|s_k(m)|^2}{\sum\limits_{m\in L_{\mathrm{clu}}}|s_k(m)|^2}\right)。\tag{13}$$

本文阈值保留SNR＞3 dB的单元，该阈值通过蒙特卡洛仿真验证，可排除90％以上杂波虚警。值得注意的是，在强杂波场景(如海洋成像)中，可提升SNR阈值至5 dB；在洁净场景(如沙漠成像)中可放宽至2 dB。

2.2　高对比度目标选择

根据文献[8]可知，仅依据信噪比不足以挑选出优质目标，还需要排除均匀背景中如农田纹理、海浪斑点的伪强点，筛选具有显著孤立特性的真实目标。以候选点为中心，定义局部邻域窗口，计算归一化对比度

$$C=\frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I_i-\mu)^2}}{\mu},\tag{14}$$

式中：I_i为邻域内像素幅度；μ为邻域幅度均值；N为邻域像素总数。与以往方法不同，本文并非在所有数据中搜索突出目标，而是计算所有对比度的平均值，保留对比度$C>\bar{C}_{\mathrm{global}}$的点，$\bar{C}_{\mathrm{global}}$为距离块对比度均值，以此保证目标孤立性，提高算法速度。要实现单次迭代就完成误差估计，仅

依靠信噪比和对比度是不够的，这可以通过第3节的实验进行验证。

2.3 动态加窗策略

传统的自动窗宽选择方法通过寻找能量基线确定点扩展函数支撑域范围，但仅以峰值能量下降10 dB后扩展50%的固定模式存在显著局限性，这种固定阈值会导致强散射点主瓣未被完整覆盖，造成相位梯度估计偏差和聚焦性能退化。

本文方法中，需要对每个目标分别确定窗口长度。窗口长度是通过将孤立强点局部平均能量与区域的平均总能量进行滤波比较来确定的，对目标进行滤波的原因是为了减少因高频噪声而选择错误窗口的可能性。首先基于方位向能量分布计算全局均值能量E_m，筛选出高于该阈值的区域并计算其局部平均能量E_n，以E_n作为主瓣能量表征；随后从方位向能量峰值点出发，向两侧搜索至能量首次降至E_n的位置，获得初始窗宽W并扩展20%形成基准窗宽W_{current}，以避免窗宽振荡发散。该方法通过动态能量阈值替代固定10 dB衰减规则，使窗宽估计能自适应不同目标点的主瓣能量分布。

2.4 相位误差一致性验证

目前筛选出的目标在幅度和对比度上均表现出高质量，适用于低迭代次数的相位梯度自聚焦处理，但仍存在部分目标尚未达到理想相位误差的标准。相位数据与目标到天线的距离以及合成孔径时间间隔紧密相关，在同一孔径下，静止目标的相位误差轨迹通常呈现相似性，只是略有噪声干扰，因此对所有目标的相位误差取平均可有效提取场景的整体相位误差。但此方法仅适用于完全静止的目标，对于那些在移动的目标，比如行驶中的车辆，或者因为环境影响而摇摆的目标，比如风中的旗杆，其相位轨迹与静止目标存在显著差异，若将其相位与其他目标平均，可能引入额外误差。

相位一致性验证通过三阶段流程实现选点的优化：首先基于式(11)计算初步筛选目标的相位误差；随后对所有目标的相位误差取平均，获得场景整体相位误差的初步估计；最后通过方差分析筛选更优目标，计算各目标相位误差与均值的方差，保留方差最小的前85%目标进行后续处理。高质量点筛选是提升相位误差估计精度的核心环节：通过筛选高幅度、高对比度目标，再结合相位方差验证，可有效抑制噪声与杂波干扰，优化相位误差估计。

本文提出的算法流程如图2所示。对于带误差成像，首先，基于能量、信噪比双阈值与对比度优化从杂波中提取孤立强散射点；其次，结合动态能量平均值为每个目标定制窗宽，抑制噪声干扰并保障主瓣完整性；然后，用相位误差方差验证剔除异常目标，拟合全局相位误差；最后，只需单次迭代，利用估计的相位误差完成运动补偿，得到聚焦后图像，从而避免了传统PGA算法的多轮收敛的不足。

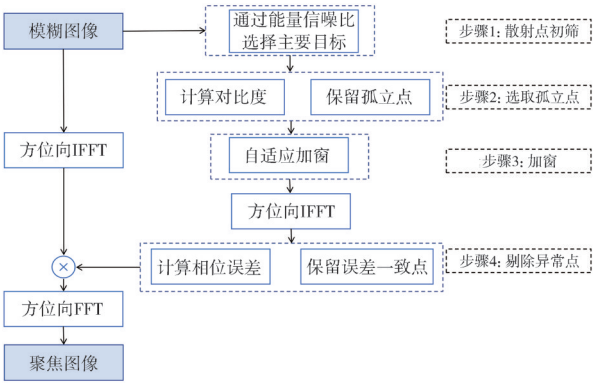


图2 单次迭代PGA算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the single-iteration PGA algorithm

3 实验验证

3.1 参数设置

为验证本文所提单次迭代PGA算法的有效性，利用某型Ku波段飞行器SAR系统的实测数据进行实验验证。实验数据主要参数如表1所示，场景包含山脉、河流、平地等多类型地物目标。

表1 实测数据参数

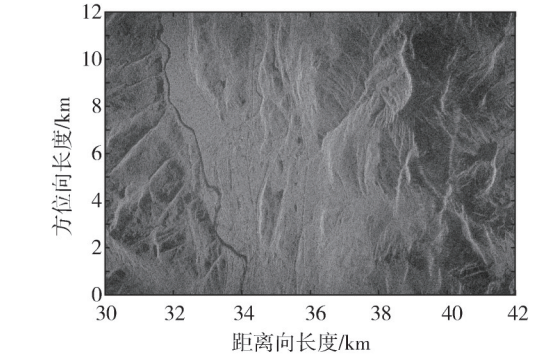
Tab. 1 Measured data parameters

载波频率/GHz	脉宽/μs	带宽/MHz
15	25	400
载机速度/(m·s^{-1})	作用距离/m	成像时间/s
200	35 000	50

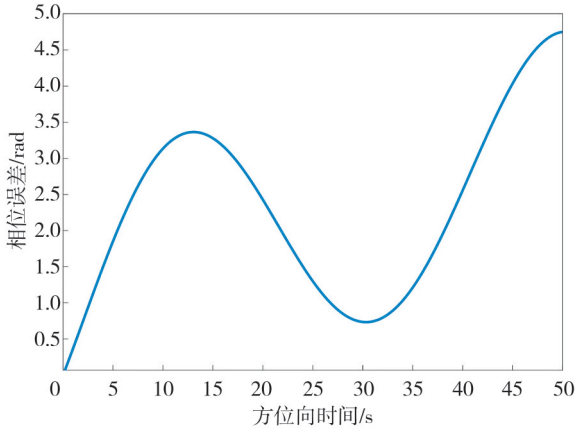
3.2 实验分析

在理想情况下，飞行器SAR成像结果如图3(a)所示，图像中的地形特征、山脉和河流清晰可辨，细节分辨率高。然而，在实际飞行过程中，受气流扰动、大气湍流以及平台运动不稳定性等外部因素的影响，回波信号不可避免地引入相位误差。相位误差的典型表现如图3(b)所示，其呈现出高次非线性特征。由于这些相位误差的干扰，成像过程中信号的相干性受到破坏，如图3(c)所示，图像出现散聚现象，空间分辨率显

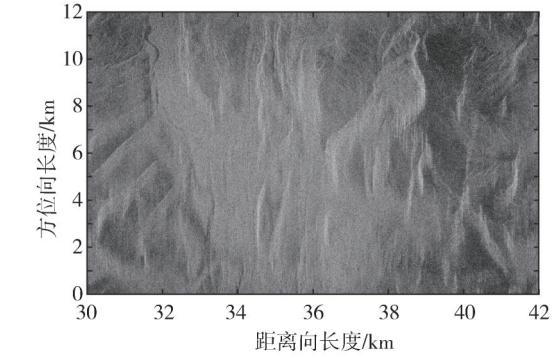
著下降，地物特征模糊，严重影响了成像质量。



（a）无误差原始图像



（b）相位误差函数



（c）带误差成像

图 3　相位误差对成像的影响

Fig. 3　Effect of phase error on imaging

利用本文所提算法对相位误差进行估计并进行运动补偿，成像结果如图 4 所示，处理后的图像清晰度显著提升，地形特征细节恢复良好，空间分辨率接近理想水平。图 4 中的区域 A 为弱散射特征区域，其主要特征是缺乏孤立强散射点，导致该区域的回波信号强度较低，相位误差估计的偏差较大。在本文提出的算法中，通过散射点筛选机制，类似区域 A 内的弱散射点被排除在外，以避免其对整体估计精度的干扰。算法采用全局相位误差估计值进行运动补偿后，区域 A 的成像聚焦效果仍能得到一定程度的改善。在类似图 4 中区域 B 的场景中，该区域包含显著的强散射点，表现出较高的回波信号强度。筛选出孤立强散射点后，可以准确提取区域内的局部相位误差，进行运动补偿，这些强散射区域聚焦效果显著改善，地物特征清晰可见。

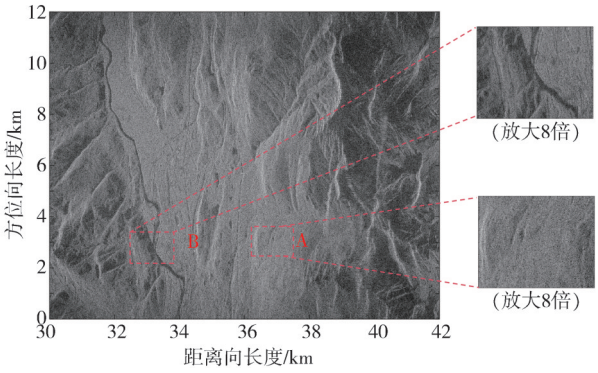


图 4　本文所提方法补偿后成像结果

Fig. 4　The imaging results compensated by this paper method

如前文所述，仅依赖信噪比和图像对比度，无法在单次迭代中实现高精度的相位误差估计。图 5 展示了不同算法在单次迭代后估计相位误差残差的对比结果。其中，仅以信噪比和对比度筛选目标的PGA算法估计精度受限，导致残余相位误差较为显著，相比之下，本文提出的算法综合考虑了信噪比、对比度、相位一致性筛选机制以及动态加窗，在单次迭代后显著减小了未补偿相位误差。

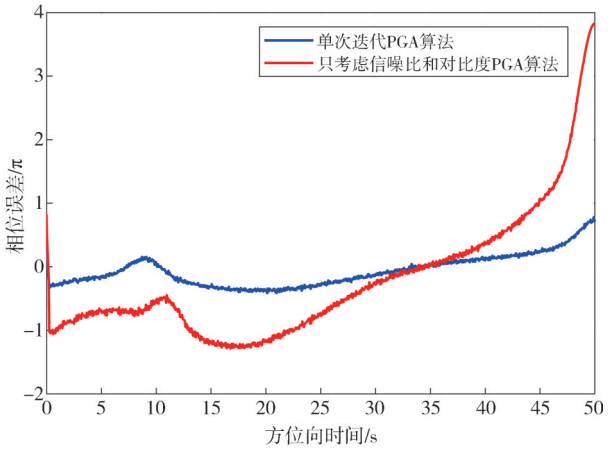


图 5　不同PGA方法得到的未补偿相位误差

Fig. 5　Uncompensated phase error obtained by different PGA methods of MAV

为进一步验证本文算法的有效性，选择图 4 中区域 B 内的点目标，采用峰值旁瓣比（Peak Side Lobe Ratio，PSLR）和积分旁瓣比（Integrated

Side Lobe Ratio，ISLR)这两个典型成像质量指标，对不同方法进行比较。其中，传统方法仅基于能量进行强散射点筛选，并固定窗宽；在众多改进PGA算法的研究中，文献[17]中提出了一种基于能量-信噪比最大准则选点并结合自适应窗宽的PGA算法。该算法代表了当前通过优化选点和窗宽来提升PGA效率与精度的一类主流改进思路，因此本文选择该方法作为主要对比对象之一，从而验证所提方案在单次迭代内所能达到的精度能否够超越需多次迭代的现有改进算法。表2和表3分别列出了各方法在不同迭代次数下，区域B点目标的峰值旁瓣比和积分旁瓣比的结果。

表2 不同方法峰值旁瓣比的对比

Tab. 2 Comparison of PSLR of different methods dB

方法	第一次迭代	第二次迭代	第三次迭代
无补偿	−5.306 4		
传统PGA	−7.236 3	−8.926 7	−9.835 8
文献[17]PGA	−9.637 4	−11.374 6	−13.463 9
本文所提PGA	−13.686 7		

表3 不同方法积分旁瓣比的对比

Tab. 3 Comparison of ISLR of different methods dB

方法	第一次迭代	第二次迭代	第三次迭代
无补偿	−4.578 2		
传统PGA	−6.956 3	−8.125 4	−8.928 6
文献[17]PGA	−8.748 4	−9.312 7	−10.283 7
本文PGA	−10.676 7		

传统方法单次迭代时的PSLR和ISLR较高，表明旁瓣抑制能力较弱，即使增加迭代次数，指标的改善幅度也较为有限，依然受到相位误差估计精度的制约。以往方法基于传统方法进行了改进，但单次迭代后仍存在一定残余误差，单次迭代后的PSLR和ISLR值无法满足高精度成像要求，需要进行多次迭代才能满足补偿需求。可以看出，本文方法仅需单次迭代即可显著降低成像指标，表现出更高的相位误差估计精度，且提升了算法的收敛速度。在算法稳定性方面，本文引入的相位一致性验证机制，能有效剔除与全局相位误差模式差异过大的异常散射点，使最终的全局相位误差估计结果受异常点的影响较小，从而提升了算法在不同场景下估计性能的稳定性。

4 结 论

本文针对飞行器SAR成像中运动误差补偿对高精度与高效率的双重需求，提出了一种基于多维度选点与自适应窗宽的单次迭代PGA算法。该方法通过构建能量-信噪比-对比度-相位一致性四维联合评价指标，实现了强散射点的精准筛选，并引入基于局部能量分布的自适应窗宽调整机制，有效平衡了主瓣覆盖与旁瓣抑制的需求。实验结果表明，本算法在单次迭代条件下即可实现优于传统多次迭代方法的运动补偿精度与稳定性，显著提升了SAR成像的实时性。

本文算法的性能在一定程度上依赖于场景中是否存在足够多且质量高的孤立强散射点，在缺乏此类特征的均匀场景中，其误差估计精度可能受限。此外，本文算法主要针对静态场景进行优化，对存在大量运动目标的动态场景的适应性有待进一步验证。该算法框架在低成本的轻量化无人机SAR平台，以及对实时性要求极高的机载实时处理系统中具有广阔的应用潜力，并可考虑与惯性导航系统进行融合来构建更具鲁棒性的混合补偿策略。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] 邢孟道，孙光才，王彤，等. 雷达成像技术[M]. 北京：电子工业出版社，2024.

[2] 景国彬，李宁，孙光才，等. 联合误差估计的机载超高分辨率SAR成像[J]. 西安电子科技大学学报，2019，46(3)：1-7.
Jing Guobin，Li Ning，Sun Guangcai，et al. Very high resolution SAR imaging method combined with motion estimation[J]. Journal of Xidian University，2019，46(3)：1-7.（in Chinese）

[3] 孟智超，张磊，卢景月，等. 随机样本选择的合成孔径雷达距离空变相位梯度自聚焦算法[J]. 系统工程与电子技术，2023，45(12)：3828-3835.
Meng Zhichao，Zhang Lei，Lu Jingyue，et al. A range-dependent phase gradient autofocus algorithm integrated stochastic sample selection for SAR imaging[J]. Systems Engineering and Electronics，2023，45(12)：3828-3835.（in Chinese）

[4] Ran L，Liu Z，Li T，et al. Extension of map-drift algorithm for highly squinted SAR autofocus [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing，2017，10(9)：4032-4044.

[5] Ran L, Liu Z, Zhang T, et al. Autofocus for correcting three dimensional trajectory deviations in synthetic aperture radar [C]//2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), 2016: 1-4.

[6] Huang X, Ji K, Leng X, et al. Refocusing moving ship targets in SAR images based on fast minimum entropy phase compensation [J]. Sensors, 2019, 19 (5): 1154.

[7] Fu T, Gao M G, He Y. An improved scatter selection method for phase gradient autofocus algorithm in SAR/ISAR autofocus [C]//International Conference on Neural Networks and Signal Processing, 2003: 1054-1057.

[8] Lim C H, Soon Y T. Non-iterative spotlight SAR autofocusing using a modified phase-gradient approach [C]//Proceedings of the 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'97, 1997: 484-486.

[9] 赵侠, 汪雄良, 王正明. 基于最优对比度准则的SAR图像相位梯度自聚焦算法[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(6): 606-610.
Zhao Xia, Wang Xiongliang, Wang Zhengming. Phase gradient autofocus algorithm for SAR imagery based on contrast criteria [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(6): 606-610. (in Chinese)

[10] Deng Y, Zhang Y H. Improved PGA algorithm based on adaptive range bins selection [C]//2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing, 2010: 232-235.

[11] Chen H, Wang X K, Shen L C, et al. Formation flight of fixed-wing UAV swarms: a group-based hierarchical approach [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 504-515.

[12] Li Y K, Liu C, Wang Y F, et al. A robust motion error estimation method based on raw data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(7): 2780-2790.

[13] 陈琦, 李景文. 相位梯度自聚焦算法的性能分析及改进[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(2): 131-134.
Chen Qi, Li Jingwen. Performance analysis and improvement of phase gradient autofocus algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(2): 131-134. (in Chinese)

[14] 卿吉明, 徐浩煜, 梁兴东, 等. 一种可用于实时成像的改进PGA算法[J]. 雷达学报, 2015, 4(5): 600-607.
Qing Jiming, Xu Haoyu, Liang Xingdong, et al. An improved phase gradient autofocus algorithm used in real-time processing [J]. Journal of Radars, 2015, 4 (5): 600-607. (in Chinese)

[15] 倪崇, 王岩飞, 徐向辉, 等. 一种改进的SAR图像聚焦算法[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 449-453.
Ni Chong, Wang Yanfei, Xu Xianghui, et al. An improved autofocus algorithm for SAR images [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41 (3): 449-453. (in Chinese)

[16] 张文虎, 向聪, 李涛, 等. 一种用于低信噪比场景的改进PGA算法[J]. 火控雷达技术, 2025, 54(1): 73-78.
Zhang Wenhu, Xiang Cong, Li Tao, et al. An improved phase gradient autofocus algorithm for low signal-to-noise ratio scenes [J]. Fire Control Radar Technology, 2025, 54(1): 73-78. (in Chinese)

[17] 刘建彬, 周鹏, 王影, 等. 一种改进选点及加窗处理的相位梯度自聚焦算法[J]. 遥测遥控, 2024, 45 (5): 91-99.
Liu Jianbin, Zhou Peng, Wang Ying, et al. Optimized phase gradient autofocus algorithm based on improved point Se-lection and windowing processing [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(5): 91-99. (in Chinese)

[18] Shaghaghian A, Karimaghaee P. Accuracy improvement in motion-measurement using frequency-weighted Kalman filter [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(1): 89-96.

[19] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, et al. Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 827-835.

[20] Al-Dujaili M J, Dhaam H Z, Mezeel M T. Automatic and non-iteration algorithm for compensating the phase error for SAR based on the PGA algorithm [J]. Sensing and Imaging, 2023, 24(1): 13.