

基于 BP 和 PGA 算法的斜视 SAR 成像方法

闫梦圆, 高安琪, 薛晨, 孙兵, 李景文

(北京航空航天大学 电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 在斜视合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 成像的情况中, 由于目标的运动或者平台运动误差, 导致成像结果方位向散焦, 需要通过自聚焦处理改善图像质量。但由于斜视成像时点目标扩展函数二维不正交, 采用传统自聚焦算法难以提取出强点目标较完整的方位向能量进行自聚焦处理, 聚焦效果不佳。本文提出了一种基于 BP (Back Projection) 算法成像点目标扩展函数 (Point Spread Function, PSF) 二维不正交的自聚焦方法, 利用后向投影算法对晃动的舰船目标进行成像, 通过坐标旋转解决方位向倾斜导致 PGA 性能不佳的问题, 得到聚焦良好的图像。仿真结果验证了本文方法的有效性。

关键词: 斜视 SAR; 后向投影算法; 相位梯度自聚焦; 点目标扩展函数

中国分类号: TN 958 文献标识码: A

Imaging Algorithm for Squint SAR Based on Back Projection and Phase Gradient Autofocus Method

Yan Mengyuan, GAO Anqi, XUE Chen, SUN Bing, LI Jingwen

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing, 100083, China)

Abstract: In the case of squint SAR imaging, the movement of target and the error of platform movement can generate the echo phase error, resulting in azimuth defocusing. Phase Gradient Autofocus (PGA) processing is need to improve image quality. However, the Point Spread Function is not orthogonal in two dimensions during the squint imaging. Using the traditional autofocus algorithm is hard to extract the complete azimuth energy of the strong point target for autofocus processing, leading to poor focusing. This paper proposes a 2D Non-Orthogonal Point Spread Function (PSF) autofocus algorithms for squint SAR based on BP imaging algorithm. Using BP algorithm to image the shaking ship target. Using coordinate rotation to solve the problem of poor PGA performance caused by azimuth tilt, finally we get a well-focused image. The simulation results verify the effectiveness of this method.

Key words: squint SAR; back projection algorithm; phase gradient autofocus; point spread function

1 引言

在合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar,

SAR) 成像中, BP 成像算法作为一种时域算法, 不需要频域的近似, 能够精确成像, 并且能够适用于雷达的各种运动轨迹, 普适性强。在大斜视情况下, SAR 的距离方位耦合较为严重, 目标回波信号频谱的数学表达复杂, 其他频域成像算法如距离多普勒 (Range-Doppler, RD) 算法^[1]等, 其成像结果的精确程度与回波信号的二维频谱的

基金项目: 国家自然科学基金项目 62071022

作者简介: 闫梦圆 (1997-), 女 (汉族), 山东淄博人, 北京航空航天大学硕士研究生, yan_mengyuan@buaa.edu.cn; 孙兵 (1981-), 男 (汉族),

湖北广水人, 北京航空航天大学电子信息工程学院副教授, 硕士生导师, bingsun@buaa.edu.cn.

精确程度密切相关,在斜视情况下成像效果欠佳。而 BP 算法作为时域成像算法,根据雷达到像素点之间的距离计算时延,将回波数据反向映射到成像区域的每个像素,并把所有像素点的回波进行相干叠加来成像。避免了距离方位耦合的问题^[2]。因此对于斜视 SAR 成像情况,本文使用 BP 算法进行处理。

但是由于目标的运动和平台运动误差,会产生回波多普勒信号相位误差,导致 BP 成像聚焦困难,需要进行相位补偿。随着 SAR 成像分辨率的提高,合成孔径长度增加,对回波相位误差的补偿提出了更高的要求^[3]。虽然依靠惯性导航运动补偿系统直接测量雷达平台加速度,获得载机平台的位置,能够补偿一定的相位误差,但是这种方式会产生积累相位误差,不能够完全补偿相位误差^[4]。能够精确估计出 SAR 天线相位中心的运动误差,在成像过程中进行运动补偿,是实现高分辨率 SAR 成像的难点^[5]。

成像的散焦大部分来自于回波信号中的二次相位误差,能够估计并补偿二次相位误差能够有效的解决方位向散焦问题,自聚焦处理是常用的方式。传统的自聚焦方法如子孔径相关法 (Map Drift, MD)^[6],相位差算法 (Phase Difference, PD)^[7]、反射率偏移法 (Reflectivity Displacement Method, RDM)^[8]等,都只能估计低阶相位误差,而相位梯度自聚焦算法 (Phase Gradient Autofocus, PGA) 作为非参数模型算法,不需要确定相位误差的阶数,因此能够同时补偿低阶、高阶以及随机误差^[9],并能够较好的用于有强散射点雷达回波的运动误差估计^[10]。

在已有的 PGA 算法中,相位梯度估计都需要沿二维数据域的某一维度进行估计^[11],但是在斜视情况下的 BP 算法成像中,目标的扩展函数方向与斜视角在地面的投影角度有关,方位向不再是严格的正交方向。因此斜视情况下 SAR 系统目标自聚焦后成像质量得不到明显的提升。为了解决这一问题,本文提出了一种基于 BP 算法点目标扩展函数二维不正交情况下的自聚焦方法。使斜视情况下机载 SAR 的成像质量得到显著提升。

2 BP 成像算法原理

大斜视机载 SAR 成像模型如图 1 所示。假设雷达平台平飞,平台飞行高度始终不变,平台飞

行速度大小恒为 V_0 。以场景中心点为原点建立北天东直角坐标系,为了方便起见,用 X 方向表示北,用 Y 方向表示天,用 Z 方向表示东。雷达速度方向与 X 方向一致,依此建立北天东雷达坐标系,表示为 $OXYZ$ 。同理,建立北天东目标坐标系 $O'X'Y'Z'$,目标坐标系随目标转动, $P(x_t, y_t, z_t)$ 表示目标在 t 时刻的空间位置坐标, $R(\eta)$ 表示每个方位时刻雷达平台到目标点的斜距, $R_{\min}$ 为雷达与目标点之间的最小斜距, $\theta(\eta)$ 表示每个方位时刻雷达与参考点间的斜视角, $\varphi(\eta)$ 表示每个方位时刻雷达与参考点间的俯仰角,雷达与目标之间的方位角为 θ_s 。

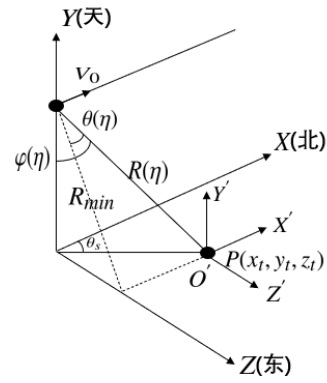


图 1 大斜视机载 SAR 成像几何模型

根据图 1 几何关系,可以计算出在 t 时刻,雷达平台到目标点的斜距为 $R(\eta)$ 。

$$R(\eta) = \sqrt{[x(\eta) - x_t]^2 + [y(\eta) - y_t]^2 + [z(\eta) - z_t]^2} \quad (1)$$

式中, $(x(\eta), y(\eta), z(\eta))$ 为雷达平台的运动轨迹, (x_t, y_t, z_t) 表示目标在 t 时刻的空间位置坐标。

假设雷达发射线性调频信号,经过调制、延迟后得到回波信号。在解调后,可以将目标点的回波信号 $s_0(\tau, \eta)$ 表示出来。

$$s_0(\tau, \eta) = W_r[\tau - 2R(\eta)/c] W_a(\eta - \eta_c) \times \exp[-j4\pi f_0 R(\eta)/c] \times \exp\{j\pi K_r[\tau - 2R(\eta)/c]^2\} \quad (2)$$

式中, f_0 为发射脉冲的载波频率, τ 表示距离向时间, η 表示方位向时间, K_r 为距离向调频率, η_c 表示波束中心偏移时间。

将回波数据变换到距离频域,表示为 $S(f_r, \eta)$ 。

$$S(f_r, \eta) = W_r(f_r) W_a(\eta - \eta_c) \times \exp\left(-j\frac{4\pi(f_0 + f_r)R(\eta)}{c}\right) \exp\left(-j\frac{\pi f_r^2}{K_r}\right) \quad (3)$$

之后进行频域匹配滤波。

$$H(f_\tau) = \exp\left(j\pi \frac{f_\tau^2}{K_r}\right) \quad (4)$$

式中, $H(f_\tau)$ 表示频域匹配滤波器函数。

变换到时域进行距离向脉冲压缩处理, 得到距离脉压后的回波数据 $s_{rc}(\tau, \eta)$ 。

$$s_{rc}(\tau, \eta) = \text{IFFT}\{S(f_\tau, \eta)H(f_\tau)\} \quad (5)$$

式中, τ 表示距离向时间, η 表示方位向时间。

BP 算法实际上是先确定图像的网格大小和区域, 然后按照时延找到它在原始回波数据中的对应位置, 并采用插值的方法来获取回波值, 最后实现针对所有像素点的叠加从而得到所需要的 SAR 图像。

具体来说, 首先根据目标成像区域场景大小建立地面成像网格。根据雷达轨迹, 在地面沿 $Z-X$ 方向建立成像网格, 网格像素间隔根据实际分辨率指标设定。

通过图 1 几何模型可以计算出, 每个方位向采样时刻雷达平台到经过网格划分后各像素点 (z_i, x_j) 的时延 $t_{ij}(\eta)$ 可以表示为:

$$t_{ij}(\eta) = 2R_{ij}(\eta)/c \quad (6)$$

式中, $R_{ij}(\eta)$ 是发射平台到像素点 (z_i, x_j) 的斜距。

通过双程时延 $t_{ij}(\eta)$ 构造相位补偿因子。

$$\phi_c = \exp[j\pi f_0 t_{ij}(\eta)] \quad (7)$$

实际处理过程中, 距离压缩后的信号都是离散信号, 所以对 $t_{ij}(\eta)$ 离散化后难以恰好匹配于采样点, 所以对距离压缩后的回波数据在距离向进行插值重采样, 得到插值后的脉压图像 $s_{rd}(\tau, \eta)$, 对其进行后续处理, 能够实现精确的相位补偿。

对方位向点数进行遍历, 找到每个方位向与各像素点 (z_i, x_j) 的时延 $t_{ij}(\eta)$ 在插值后的脉压图像 $s_{rd}(\tau, \eta)$ 中对应的位置, 利用相位补偿因子 ϕ_c 对相位误差进行补偿。得到方位向相位补偿后的信号为 $s_m(\tau, \eta)$ 。

$$s_m(\tau, \eta) = s_{rd}(\tau, \eta) \cdot \exp[j4\pi R(\eta)/\lambda] \quad (8)$$

对每个收发平台的 $s_m(\tau, \eta)$ 进行叠加处理, 得到成像结果 $f(z_i, x_j)$ 。

$$f(z_i, x_j) = \int_{\eta} s_m[t_{ij}(\eta), \eta] d\eta \quad (9)$$

3 改进的 PGA 自聚焦方法

实际情况中, 由于目标的运动, 会导致回波多普勒信号存在相位误差, 造成图像的散焦, 因此在 BP 成像后进行 PGA 处理以补偿相位误差。

但是在斜视 SAR 成像情况下, 最终目标的

扩展函数方向受到斜视角的影响, 传统的 PGA 算法难以得到效果良好的自聚焦结果。究其原因, 主要是因为成像网格的方向沿东-北 ($Z-X$) 方向划分, 在斜视情况下, 会造成点目标扩展函数二维不正交, 而传统 PGA 沿着二维数据域中的某一维度进行估计, 方位向水平或是垂直时, 才能得到较为准确的估计结果。因此无法准确估计相位误差, 导致自聚焦失效。

本文提出的自聚焦方法过程流程图如图 2 所示。

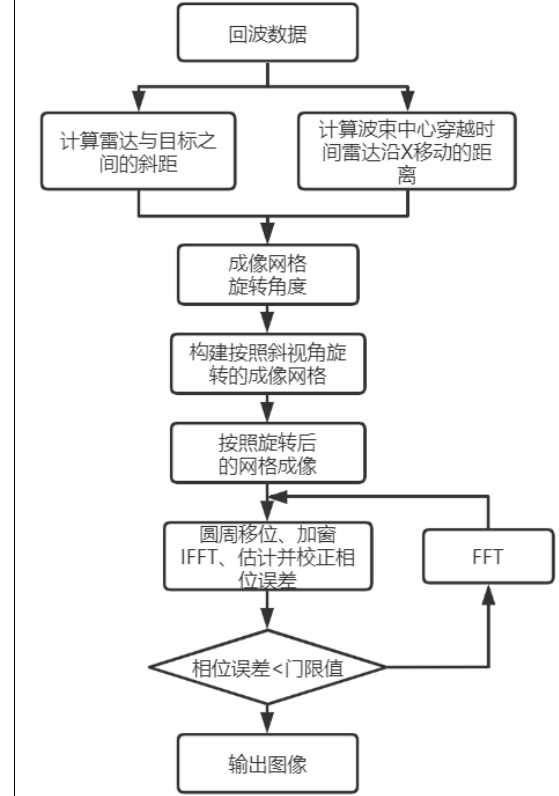


图 2 改进的自聚焦算法流程

本方法针对斜视情况下相位梯度自聚焦失效的问题, 提出了一种新的确定成像网格方向以及划分的方法, 解决斜视情况下相位梯度自聚焦失效的问题。

首先根据大斜视机载 SAR 成像几何模型, 绘制出斜视情况下, 合成孔径中心时刻 SAR 观测目标的地面投影图, 如图 3 所示。

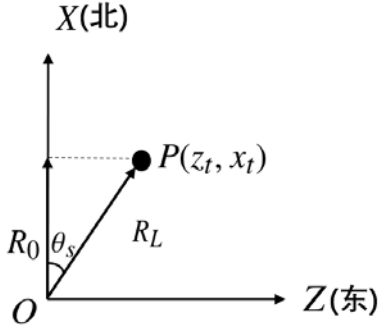


图3 地面投影图

在图3中, $P(z_t, x_t)$ 表示目标在 t 时刻的空间位置坐标。 t 为合成孔径中心时刻。

R_L 为孔径中心时刻雷达与目标点之间斜距在地面上投影的长度。

$$R_L = R(\eta) \sin[\varphi(\eta)] \quad (10)$$

式中, $R(\eta)$ 表示每个方位时刻雷达平台到目标点的斜距, $\varphi(\eta)$ 表示每个方位时刻雷达与参考点间的俯仰角。

由图1几何关系可知, 目标点波束中心偏移时间 η_c 为

$$\eta_c = \frac{R_{\min} \tan[\theta(\eta)]}{V_0} \quad (11)$$

R_0 为雷达与目标距离在 X 方向的投影长度。

$$R_0 = V_0 \eta_c = R(\eta) \sin[\varphi(\eta)] \cos(\theta_s) \quad (12)$$

式中, $\varphi(\eta)$ 为每个方位时刻雷达与目标点间的俯仰角, θ_s 为雷达与目标之间的方位角。

根据图3所示几何关系, 可以计算出网格需要旋转的角度 θ_s 。

$$\theta_s = \arccos\left(\frac{R_0}{R_L}\right) \quad (13)$$

使用旋转角度 θ_s 确B算法中成像网格的方向 $Z' - X'$ 。

$$\begin{bmatrix} Z' \\ X' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ X \end{bmatrix} \quad (14)$$

绘制出 $X - Y$ 方向划分网格和 $X' - Y'$ 方向划分网格示意图, 如图4所示。

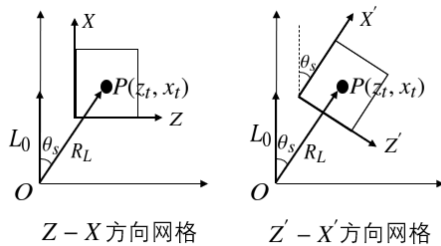


图4 网格方向选取对比

按照改进方向划分网格进行成像, 能够将大斜视情况下BP成像中方位向的倾斜校正为严格

正交方向。再进行相位梯度自聚焦处理。

对成像结果逐距离门找到强散射点, 沿方位向进行圆周移动操作, 将各距离门内的强点目标移动到各自方位向场景中心, 可以将目标位置引起的多普勒频率偏移去除。

对圆移后的数据加窗, 保留用于估计相位误差的目标主要信息, 滤除对相位误差没有贡献的部分, 能够保证相位误差估计过程中输入数据具有较高的信噪比。

记图像的方位向点为 m , 距离向点为 n 。把中心移位和加窗后的图像数据 $g_n(m)$ 。经逆傅里叶变换回到距离压缩相位历史域, 进行相位误差的估计。在距离压缩相位历史域, 数据表示为:

$$G_n(m) = |G_n(m)| \exp \{j[\phi_\alpha(m) + \theta_n(m)]\} \quad (15)$$

其中, $|G_n(m)|$ 为幅度, $\theta_n(m)$ 为依赖于散射点的相位函数, $\phi_\alpha(m)$ 为待估计相位误差。文献[12]给出了相位梯度的线性无偏最小方差 (Linear Unbiased Minimum Variance, LUMV) 估计计算方式为:

$$\hat{\phi}_{LUMV}(m) = \frac{\sum_n \text{Im}(G_n^*(m) G_n(m))}{\sum_n |G_n(m)|^2} \quad (16)$$

$$\hat{\phi}_{LUMV}(m) = \phi_\alpha(m) + \frac{\sum_n \text{Im}(G_n(m) \dot{\theta}_n(m))}{\sum_n |G_n(m)|^2} \quad (17)$$

其中, Im 表示取复数的虚部, $*$ 表示共轭, $\dot{\theta}_n(m)$ 表示真实相位误差梯度, $\frac{\sum_n \text{Im}(G_n(m) \dot{\theta}_n(m))}{\sum_n |G_n(m)|^2}$

为残余误差项, 经过圆移和加窗操作后, 残余相位项值很小, 可忽略。

在实际的操作中, 利用下式进行相位差的估计:

$$\Delta \hat{\phi}_{ML} = \angle \left[\sum_n G_n^*(m) G_n(m+1) \right] \quad (18)$$

根据式(18)得到所有相邻方位向上的相位误差, 通过积分计算出整个孔径上的相位误差。

$$\hat{\phi}(m) = \sum_{l=2}^M \Delta \phi_{ML}(l) \quad (19)$$

$$\hat{\phi}(1) = 0 \quad (20)$$

随后, 补偿相位误差, 并进行迭代, 以逐渐提高图像质量, 当相位误差小于 $\pi/4$, 可以认为相位误差基本被消除, 得到聚焦后的SAR图像。

4 仿真验证

下面对本文提出的机载SAR点目标扩展函

数二维不正交的自聚焦方法进行仿真验证。

建立舰船目标模型如图 5 所示。舰船模型长 60m，宽 30m，高 20m，散射点抽样间隔为 5m，共 37 个散射点组成，舰船目标的转动运动为分别绕三个轴转动的俯仰、偏航、滚动。仿真中不考虑船的直线运动，主要利用船自身的旋转运动形成的转角成像。本次仿真中仅考虑舰船的晃动对成像的影响。

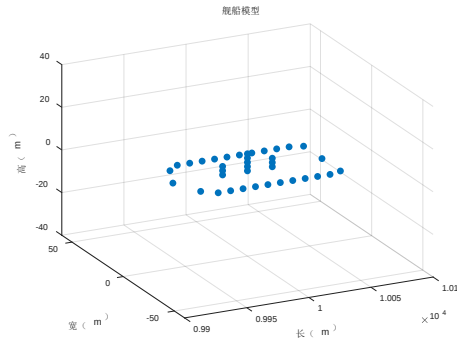


图 5 仿真舰船模型

首先对舰船目标中的单点目标进行仿真和评估，在机载大斜视情况下，设置雷达平台斜视角为 35 度，主要仿真参数如表 1 所示。

表1 主要仿真参数

参数名称	参数数值
载频(GHz)	5.3
脉冲宽度(μs)	3
波长(m)	0.0566
脉冲重复频率(Hz)	300
信号带宽(MHz)	90
采样率(MHz)	108
斜视角($^{\circ}$)	35
雷达速度(m/s)	150

分别采用两种方法进行仿真。

方法一：回波数据在经过 BP 处理后，使用传统 PGA 进行运动补偿，不进行坐标转换。

方法二：使用本文提出的算法，根据斜视角确定成像网格方向，使点目标方位旁瓣与成像网格中的横向方向正交，再逐距离门估计二次误差相位进行误差补偿。两种方法的仿真结果如图 6、图 7、图 8 和图 9 所示。

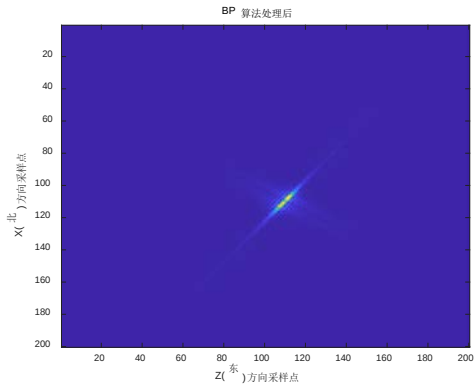


图 6 方法一 BP 成像结果

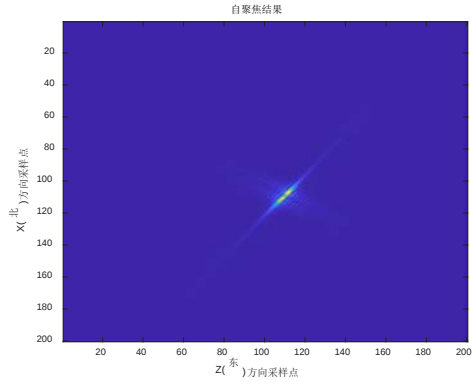


图 7 方法一 PGA 结果

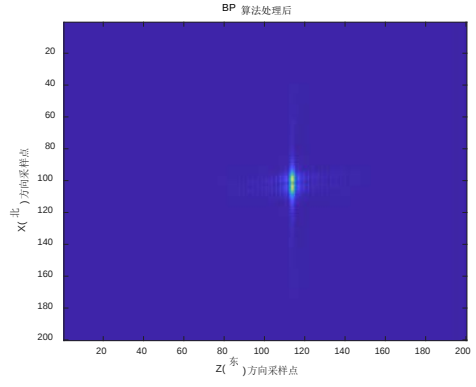


图 8 方法二 BP 结果

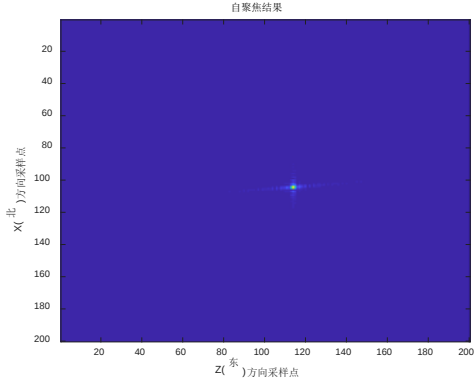


图 9 方法二 PGA 结果

方法一仿真结果可以看出，BP 成像后，如图 6 所示，目标的方位旁瓣严重倾斜，方位向存在

严重散焦，经过 PGA 处理后，如图 7 所示，可以看出成像结果没有得到明显改善。

方法二处理结果可以看出，在 BP 成像后，经过坐标转换，成像结果如图 8 所示，目标的方位旁瓣与图像的纵向维度平行，存在严重散焦；经过 PGA 处理后，成像结果如图 9 所示，方位向散焦得到明显改善，得到聚焦良好的点目标图像。

对两种方法得到的点目标图像进行评估，对比单点目标在两种方法处理后的变化，分析点目标的性能参数，得到评估结果，方法一得到的点目标评估剖面图如图 10a 所示，点目标评估结果如图 11 所示；方法二处理得到的点目标评估剖面图如图 10b 所示，方法二得到的点目标评估结果如图 12 所示；二者的点目标评价指标如表 2 所示。

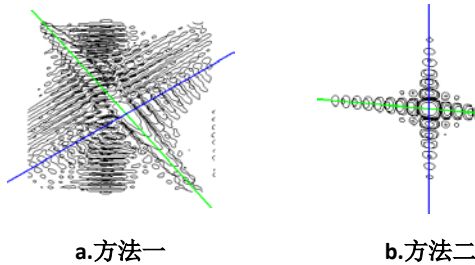


图 10 两种方法点目标评估剖面图

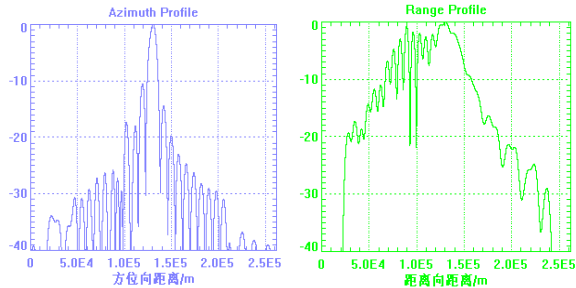


图 11 方法一 PGA 后点目标评估结果

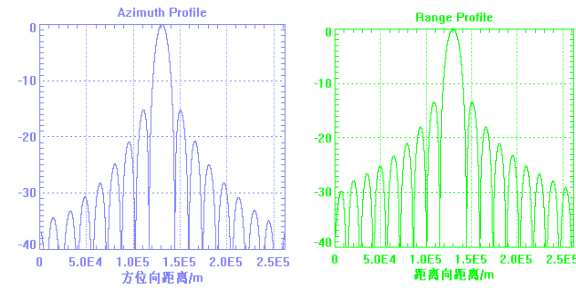


图 12 方法二 PGA 后点目标评估结果

表2 点目标评价指标

方法	距离向	方位向	距离向	方位向
	PSLR(dB)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	ISLR(dB)
方法一	-0.803	-0.616	-2.422	-9.650

方法二 -13.357 -15.197 -10.366 -12.516

由两种方法的点目标评估剖面图可以看出，方法一最终的点目标成像中，方位向仍然存在明显的倾斜，方法二的点目标成像中，方位旁瓣与图像的纵向维度平行。

由两种方法得到的点目标的峰值旁瓣比 (Peak Side Lobe Ratio, PSLR) 和积分旁瓣比 (Integral Side Lobe Ratio, ISLR) 可知，方法一得到的方位向和距离向的峰值旁瓣比和积分旁瓣比的幅值都远远小于方法二，说明经过方法一的自聚焦之后，旁瓣能量仍然较大，没有达到聚焦效果，而经过方法二本文提出的自聚焦方法处理后，峰值旁瓣比和积分旁瓣比维持在较低水平，说明聚焦效果良好。

对整个舰船目标进行仿真，使用本文提出的改进后的PGA算法进行自聚焦。在舰船模型中，取三个点设为强点，便于观察。BP成像后得到结果如图13所示，经过自聚焦后得到的成像结果如图14所示。

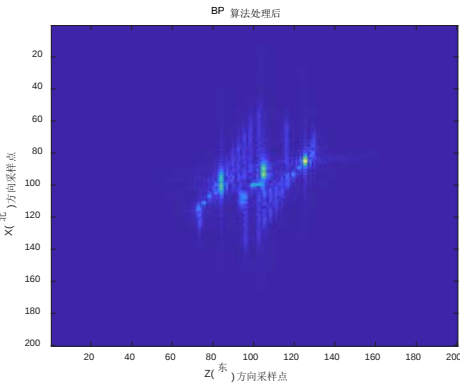


图 13 舰船 BP 成像结果

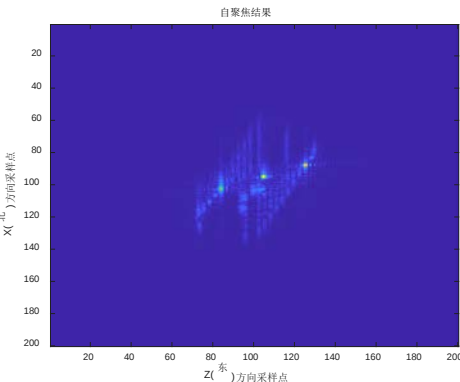


图 14 舰船 PGA 后结果

可以看出，经过改进的PGA处理之后，舰船模型中三个强点目标的方位向散焦得以改善，聚焦效果良好。

5 结 论

本文介绍了一种适用于斜视情况下由于 BP 算法成像导致点目标扩展函数二维不正交时 PGA 算法失效时的成像方法。通过斜视角确定成像网格方向,使点目标方位向旁瓣与成像网格中的一维正交,进行 BP 成像。再逐距离门估计二次误差相位进行误差补偿,从而实现方位向聚焦,解决了斜视情况下 BP 成像后,相位梯度自聚焦由于点目标扩展函数二维不正交导致的失效问题,是一种有效的斜视 SAR 成像方法。

参考文献

- [1] Lan G. Cumming Frank H.Wong. 合成孔径雷达成像: 算法与实现[M]. 电子工业出版社, 2012.
- [2] Vu V T, Sjogren T K, Pettersson M I. Fast Time-Domain Algorithms for UWB Bistatic SAR Processing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(3):1982-1994.
- [3] 李刚,许稼. 一种稳健的机载雷达杂波多普勒参数估计方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12): 2867-2870.
- [4] 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(02): 131-134.
- [5] 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(3).
- [6] P. Samczynski and K. S. Kulpa. Coherent MapDrift Technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3):1505-1517.
- [7] Wei Ye, Tat Soon Yeo and Zheng Bao. Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5):2487-2494.
- [8] 李刚, 彭应宁, 夏香根. 基于改进 RDM 的 SAR 自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(002):349-352.
- [9] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia and C. V. Jakowatz. 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.
- [10] 邢孟道, 林浩, 陈溅来,等. 多平台合成孔径雷达成像算法综述[J]. 雷达学报, 2019, 8(6).
- [11] 蒋锐. 基于多脉冲联合估计的 SAR 相位误差自聚焦算法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(05):1039-1045.
- [12] P. H. Eichel and C. V. Jakowatz Jr. Phase-Gradient Algorithm as An Optimal Estimator of the Phase Derivative[J]. Optics Letters, 1989, 14(20):1101-1103.