

基于近场条件下的单天线干涉逆合成孔径雷达成像

王秋艳, 马慧连

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月29日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

与二维逆合成孔径雷达(ISAR)图像相比, 高分辨率三维图像不仅反映了目标的几何结构分布, 而且对目标姿态的变化不敏感, 可以为目标识别提供更全面、更稳定的目标形状和结构信息。然而, 在近场条件下, 平面波假设失效, 会造成传统成像算法的失真和散焦, 导致三维ISAR图像质量较差。为了解决这个问题, 提出了一种在近场和单基线条件下的干涉逆合成孔径雷达(InISAR)成像方法, 首先, 采用极坐标格式算法(PFA)获得初始的二维图像, 然后, 对初始的二维图像进行波前曲率误差校正, 来获得精确的散射体的垂直和水平坐标, 最后通过干涉处理可以获得目标的高度坐标。仿真实验表明, 该方法可以在简易的系统结构下, 实现近场条件下空间目标的高分辨率三维成像。

关键词

干涉逆合成孔径雷达, 近场, 极坐标格式算法, 三维成像

Single-Antenna Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Based on Near-Field Conditions

Qiuyan Wang, Huilian Ma

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 29th, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

Compared with the two-dimensional inverse synthetic aperture radar (ISAR) image, the high-

resolution three-dimensional image not only reflects the geometric structure distribution of the target, but also is insensitive to the change of the target attitude, which can provide more comprehensive and stable information of the target shape and structure for the target recognition. However, in near-field conditions, the invalidation of the plane wave hypothesis will cause distortion and defocusing of traditional imaging algorithms, resulting in poor quality of 3D ISAR images. To solve this problem, an interferometric inverse synthetic aperture radar (In-ISAR) imaging method is proposed under near-field and single baseline conditions. First, the polar coordinate format algorithm (PFA) is used to obtain the initial two-dimensional image, and then the wavefront curvature error is corrected to obtain the accurate vertical and horizontal coordinates of the scatterer. Finally, the altitude coordinates of the target can be obtained by interference processing. Simulation results show that the proposed method can achieve high-resolution 3D imaging of space objects in near-field conditions with simple system structure.

Keywords

Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar, Near Field, PFA, Three-Dimensional Imaging

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷达成像技术[1]是雷达发展史上的一个重要里程碑。目前, 成像雷达通过传输大带宽信号获得距离向分辨率, 并通过合成孔径获得垂直于距离向的方位向分辨率。随着信号带宽的增加, 雷达可以获得反映目标结构信息的二维图像。根据成像目标和平台的不同, 成像雷达可分为合成孔径雷达(SAR) [2] [3]和逆合成孔径雷达(ISAR) [4] [5]。其中, 逆合成孔径雷达(ISAR)可以在所有天气条件下生成远距离非合作目标的二维高分辨率图像, 已被广泛用于军事和民用目的。然而, 传统的二维 ISAR 在成像方面存在一些缺陷。首先, ISAR 图像是目标等效散射中心在二维距离多普勒平面上的投影, 不能提供散射中心的高度信息。其次, ISAR 图像反映了目标散射点的多普勒分布, 而不是目标的实际横向尺寸。第三, 二维 ISAR 图像投影平面(IPP)取决于雷达视线(LOS)和运动方向。机动目标的 ISAR IPP 和水平多普勒分布随时间变化很大[6]。综上所述, 传统的单天线 ISAR 系统无法确定目标散射中心在三维空间中的真实位置, 极大地限制了 ISAR 图像的目标识别能力。

逆合成孔径雷达(ISAR)三维干涉成像技术[7] [8]融合了干涉测量技术和 ISAR 二维成像技术[9]-[11], 它极大地弥补了许多应用场景中二维图像信息的不足。跟二维 ISAR 图像相比, 高分辨率三维 ISAR 图像 [12]-[14]能够真实地反映目标的几何结构分布, 并且对目标姿态的变化不敏感, 因此它可以为目标识别提供更全面、更稳定的目标形状和结构信息。然而, 在近场条件下, 平面波假设失效, 目标的成像结果会出现几何失真和散焦问题, 这会影响图像的质量, 并导致较大的误差。

近年来, 针对近场条件下目标的 ISAR 成像开展了许多研究。Liang H [15]等人研究了一种近场高分辨干涉逆合成孔径雷达(InISAR)成像算法, 该算法采用改进的球面后向投影算法重建近场二维图像, 然后通过复图像的干涉处理, 从两幅不同高度的 ISAR 图像中得到三维 InISAR 图像, 但最终获得的三维图像本质上是 ISAR 图像上散射点相对幅度信息的体现, 而并非真正意义上的目标三维形状图像。ZHANG B [16]提出了利用 Green 函数分解的太赫兹 ISAR 成像算法来实现近场成像, 该算法要求回波数据采用极栅记录, 使用 BP 算法重建近场图像, 但 BP 算法比基于傅立叶的算法有更高的计算负荷。Xu G [17]使用三

个天线来构造两个相互垂直的基线来重建目标的三维形状, 这对硬件设计的复杂性提出了很高的要求。

为了形成近场条件下目标的高分辨率三维图像[18], 本文提出了一种在近场和单基线条件下的 InISAR 成像方法, 结合极坐标格式算法(PFA)和近场波前曲率误差校正, 以及干涉处理技术, 首先, 采用极坐标格式算法(PFA)获得初始的二维图像, 然后, 对初始的二维图像进行波前曲率误差校正, 来获得精确的散射体的垂直和水平坐标, 最后通过干涉处理可以获得目标的高度坐标。此外, 我们的方法减少了天线的数量, 简化了雷达系统。

2. 成像算法

2.1. 系统回波模型

单基线组成的干涉 ISAR 成像系统如图 1 所示。其中, 雷达中心 O 为雷达观测坐标系 O -XYZ 的原点, 天线 A 是发射天线和接收天线, 位于雷达观测坐标系的原点, 坐标为 $(0,0,0)$, 天线 B 是接收天线, 位于 Z 轴, 基线距离恒定为 $L = d_B$, 坐标为 $(0,0,L)$ 。目标位于 O' - $X'Y'Z'$ 坐标系中, 目标中心位置位于 $(R_a, 0, 0)$, 目标随转台一起转动, 雷达与转台在同一个平面, 目标任意散射点 P 的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 散射点 P 到雷达的距离随旋转角度的变化而变化。

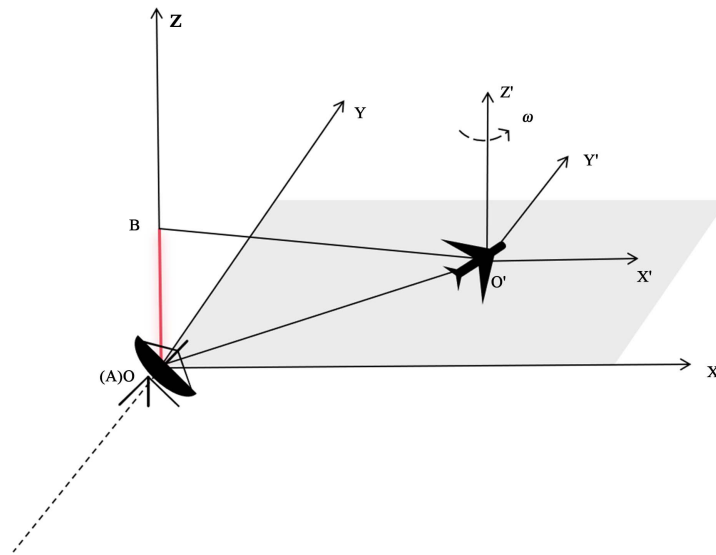


Figure 1. Single antenna interferometric ISAR imaging geometric model
图 1. 单天线干涉 ISAR 成像几何模型

空间目标近似为散射点模型, 假设目标包含 K 个散射点, 天线 A 发射的线性调频信号为:

$$s(t_r, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c * t + \frac{1}{2} * K * t_r^2\right)\right] \quad (1)$$

其中, T_p 为脉冲宽度, f_c 为载频, K 为调频率, t_r 为快时间, t_m 为慢时间, t 为全时间, $\text{rect}(x)$ 为矩形函数, 其定义为:

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 0.5 \\ 0, & |x| > 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

慢时间 t_m 表示的是每个脉冲的起始时刻, 设系统脉冲重复周期为 T , 则慢时间可写为:

$$t_m = mT, (m=0,1,2\cdots) \quad (3)$$

其中, m 表示脉冲序号。快时间 t_r 表示以当前脉冲起始时刻作为起点的时间, 它与慢时间之间的关系可以写作:

$$t_r = t - t_m \quad (4)$$

其中, t 表示以第一个脉冲作为起始点的全时间。

对于任意散射点 P , 接收天线 $i(i=A,B)$ 接收到的信号回波为:

$$s_{ri}(t_r, t_m) = \sigma_P \text{rect} \left(\frac{t_r - \frac{R_{AP}(t_m) + R_{iP}(t_m)}{c}}{T_P} \right) \exp \left[j2\pi \left(f_c * \left(t - \frac{R_{AP}(t_m) + R_{iP}(t_m)}{c} \right) + \frac{1}{2} * K * \left(t_r - \frac{R_{AP}(t_m) + R_{iP}(t_m)}{c} \right)^2 \right) \right] \quad (5)$$

其中, σ_P 为散射点 P 的散射系数, c 为光速。

采用调频率和频率相同的信号与之进行混频处理得到差频信号, 选取 R_{ref} 作为参考距离, 则参考信号可以写为:

$$s_{ref}(t_r, t_m) = \text{rect} \left(\frac{t_r - \frac{2R_{ref}}{c}}{T_{ref}} \right) \exp \left[j2\pi \left(f_c * \left(t - \frac{2R_{ref}}{c} \right) + \frac{1}{2} * K * \left(t_r - \frac{2R_{ref}}{c} \right)^2 \right) \right] \quad (6)$$

其中 T_{ref} 是参考信号的脉宽, 比 T_P 稍大一点来确保差拍信号的完整, 避免距离分辨率损失。

将两个信号进行混频, 得到的差频信号为:

$$\begin{aligned} s_{di}(t_r, t_m) &= s_{ri}(t_r, t_m) \cdot s_{ref}^*(t_r, t_m) \\ &= \sigma_P \text{rect} \left(\frac{t_r - \frac{R_{AP}(t_m) + R_{iP}(t_m)}{c}}{T_P} \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} K \left(t_r - \frac{2R_{ref}}{c} \right) * \Delta R_p \right) \\ &\quad \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} f_c * \Delta R_{ip} \right) \exp \left(j \frac{4\pi K}{c^2} * \Delta R_{ip}^2 \right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\Delta R_{ip} = \frac{R_{AP}(t_m) + R_{iP}(t_m)}{2} - R_{ref}$, 表示目标相对参考距离的差分距离。

去 RVP 项、去斜后的信号为:

$$s_{di}(t_r, t_m) = \sigma_P \text{rect} \left(\frac{t_r - \frac{R_{AP}(t_m) + R_{iP}(t_m)}{c}}{T_P} \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} (f_c + K * t_r) * \Delta R_{ip} \right) \quad (8)$$

2.2. 极坐标格式算法

为方便后续计算, 首先将目标绕雷达转动变换为雷达绕着目标转动, 即将近场 ISAR 转换成圆迹 SAR 成像模型。如图 2 所示, 以天线 A 为例, 任意散射点 P 到天线 A 的斜距可表示为:

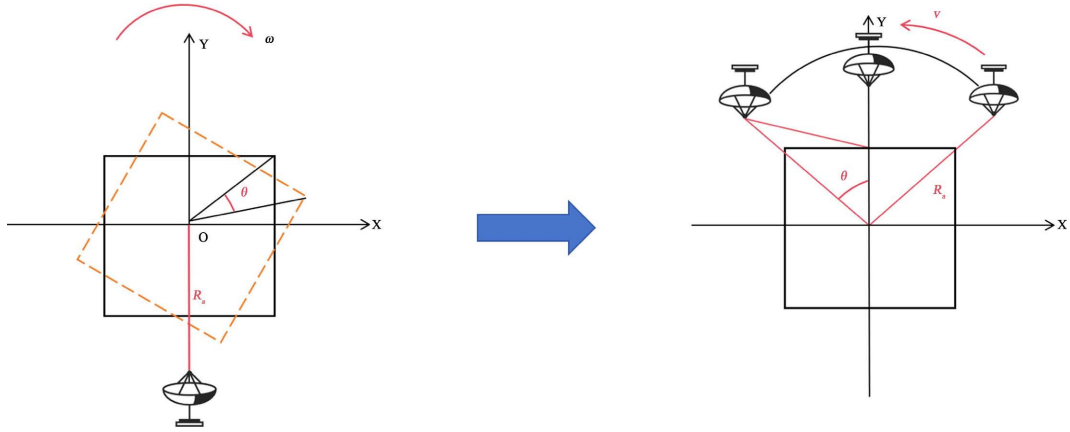


Figure 2. Circular SAR equivalent of near-field ISAR
图 2. 近场 ISAR 的圆迹 SAR 等效

$$\begin{aligned}
 R_{AP}(t_m) &= \sqrt{(R_a - x_p \cos \theta(t_m) - y_p \sin \theta(t_m))^2 + (x_p \sin \theta(t_m) - y_p \cos \theta(t_m))^2 + z_p^2} \\
 &= \sqrt{(R_a \cos \theta(t_m) - x_p)^2 + (R_a \sin \theta(t_m) - y_p)^2 + z_p^2}
 \end{aligned} \quad (9)$$

由于 PFA 算法使用了平面波假设, 那么 R_a 的距离尺寸远大于目标尺寸, 对式(9)进行泰勒展开。以天线 A 为例, 可得天线 A 对应的差分距离 ΔR_{AP} 近似为:

$$\begin{aligned}
 \Delta R_{AP} &= R_{AP}(t_m) - R_a \\
 &\approx R_a \left(1 - \frac{1}{2} \times \left(\frac{2(x \cos \theta(t_m) + y_p \sin \theta(t_m))}{R_a} \right) - R_a \right) \\
 &\approx -x_p \cos \theta(t_m) - y_p \sin \theta(t_m)
 \end{aligned} \quad (10)$$

因此, 式(8)可表示为:

$$s_{dA}(t_r, t_m) = \sigma_p \text{rect} \left(\frac{t_r - \frac{2R_{AP}(t_m)}{c}}{T_p} \right) \exp(-jK_R * \Delta R_{AP}) \quad (11)$$

其中 K_R 表示空间波数,

$$K_R = \frac{4\pi}{c} (f_c + K * t_r) \quad (12)$$

用 x 和 y 方向上的波束分量来对式(12)的相位做简化可得到:

$$s_{dA}(K_R, t_m) = \sigma_p \text{rect} \left(\frac{t_r - \frac{2R_{AP}(t_m)}{c}}{T_p} \right) \exp(K_x x_p + K_y y_p) \quad (13)$$

其中, K_x 和 K_y 分别代表距离向波数和方位向波数

$$K_x = K_R \cos(\theta(t_m) + \pi) \quad (14)$$

$$K_y = K_R \sin(\theta(t_m) + \pi) \quad (15)$$

$s_{dA}(K_R, t_m)$ 在 $K_R - t_m$ 域均匀分布, 而在 $K_x - K_y$ 域不均匀分布, 为了使用有效的二维快速傅里叶变换(2D-FFT), 有必要对波数域信号进行二维重采样, 使其以均匀的矩形格式分布, 这个过程可以通过二维波数域插值来实现, 也可以分解为级联的距离和方位向插值, 插值流程如图 3 所示。在完成信号的二维重采样后, 对以矩形格式分布的波数域信号进行一次 2D-FFT, 即可得到 PFA 图像。

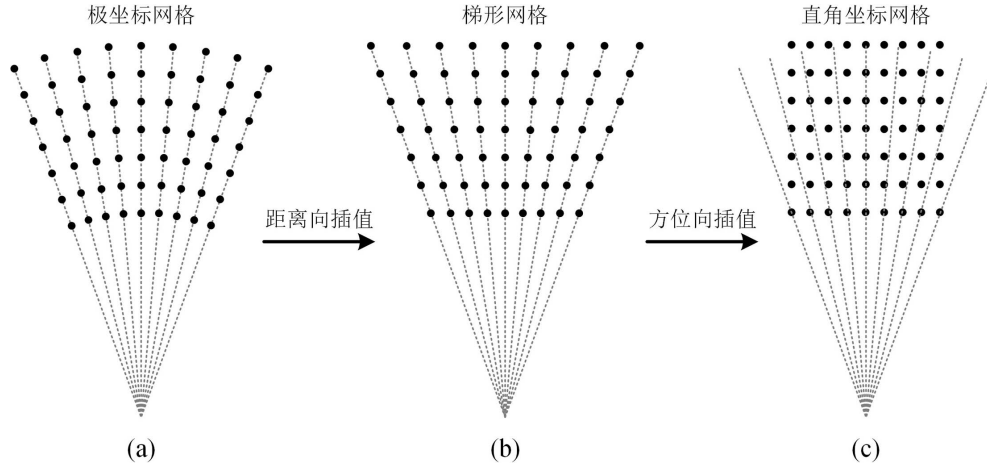


Figure 3. PFA algorithm two-dimensional interpolation process
图 3. PFA 算法二维插值过程

3. 波前曲率误差校正算法和三维成像

3.1. 波前曲率误差分析

当满足以下条件时, 视为近场条件下的 ISAR 成像:

$$V > \sqrt{\frac{R_o * \lambda}{2}} \quad (16)$$

其中, V 表示目标的最大尺寸, R_o 表示雷达天线到目标旋转中心的距离, λ 表示波长。

对于近场条件下的 ISAR 成像, 不再满足平面波近似, 因此当使用 PFA 算法成像时, 二维 PFA 图像将存在波前曲率误差。

由式(11)可得目标的相位为:

$$\Phi(t_m) = -K_R * \Delta R \quad (17)$$

将式(17)分解为单独的分量, 可得:

$$\Phi(t_m) = \Phi_0 + \Phi_1 t_m + \Phi_2 t_m^2 + \Phi_3 t_m^3 \dots \quad (18)$$

其中, 常数和线性相位误差导致目标位置偏移, 二次相位误差导致图像散焦, 而高阶相位误差由于阶数大于等于 3, 因此计算出来的误差值通常很小[19]。此外, 从物理意义上讲, 高阶相位误差引起的相位变化在目标散射点之间差异极小, 对散射点相对位置和整体分布影响微弱, 不会改变成像的主要特征。因此, 只需要考虑常数项、线性项和二次相位误差, 将波前曲率误差校正分解为几何失真校正和图像散焦补偿。

从式(17)可以看出, 与 t_m 相关的唯一项为差分距离 ΔR , 因此在孔径中心($t_m = 0$)对真实差分距离 ΔR_p 以及 PFA 算法中的近似差分距离 ΔR 进行二阶泰勒展开:

$$\begin{aligned}\Delta R_p &\approx \Delta R_p \Big|_{t=0} + \frac{\partial \Delta R_p}{\partial t} \Big|_{t=0} t + \frac{\partial^2 \Delta R_p}{\partial^2 t} \Big|_{t=0} \frac{t^2}{2} \\ &= \Delta R_p(0) + \Delta \dot{R}_p(0)t + \Delta \ddot{R}_p(0)\frac{t^2}{2}\end{aligned}\quad (19)$$

$$\begin{aligned}\Delta R &\approx \Delta R \Big|_{t=0} + \frac{\partial \Delta R}{\partial t} \Big|_{t=0} t + \frac{\partial^2 \Delta R}{\partial^2 t} \Big|_{t=0} \frac{t^2}{2} \\ &= \Delta R(0) + \Delta \dot{R}(0)t + \Delta \ddot{R}(0)\frac{t^2}{2}\end{aligned}\quad (20)$$

对于 $\Delta R_p(0)$:

$$\Delta R_p(0) = \Delta R_p \Big|_{t=0} = R_{tk} - R_a \quad (21)$$

其中:

$$R_{tk} = \sqrt{(X_c - x_p)^2 + (Y_c - y_p)^2 + Z_c^2} \quad (22)$$

式(22)中, (X_c, Y_c, Z_c) 表示等效为圆迹 SAR 天线相位中心在孔径中心时刻的位置, R_{tk} 为在孔径中心时刻雷达到目标的瞬时斜距。

对于 $\Delta R(0)$:

$$\Delta R(0) = \Delta R \Big|_{t=0} = \frac{x^* X_c + y^* Y_c}{-R_a} \quad (23)$$

其中, (x^*, y^*) 为 PFA 图像点目标 (x, y) 的失真位置, (X_c, Y_c) 为等效后中心时刻雷达的瞬时位置。

真实差分斜距 ΔR_p 关于慢时间 $t_m = 0$ 的一阶导数为:

$$\Delta \dot{R}_p(0) = \frac{\partial \Delta R_p}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{(x Y_c - y X_c) \theta_s}{2 R_{tk}} \quad (24)$$

同样的, 近似差分斜距 ΔR 关于慢时间 $t_m = 0$ 的一阶导数为:

$$\Delta \dot{R}(0) = \frac{\partial \Delta R}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{(x^* Y_c - y^* X_c) \theta_s}{2 R_a} \quad (25)$$

式(24)、(25)中, θ_s 为旋转角度。

因为残余相位误差中的常数项和一次项误差导致 PFA 图像几何失真, 因此, 令式(19)和式(20)中的常数项和一次项分别相等, 即建立以下等式:

$$\begin{cases} \Delta R(0) = \Delta R_p(0) \\ \Delta \dot{R}(0) = \Delta \dot{R}_p(0) \end{cases} \quad (26)$$

然后, 解得:

$$\begin{cases} x^* = \frac{(R_a - R_{tk})}{\cos \varphi} \\ y^* = \frac{(y X_c - x Y_c) \cos \theta_k}{R_{tk} \cos \varphi} \end{cases} \quad (27)$$

对于二次相位误差, 表现为真实差分距离和近似差分距离关于慢时间 t_m^2 的二阶导数的差值:

$$\tilde{\Phi}_p = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{2} (\Delta \ddot{R}_p(0) - \Delta \ddot{R}(0)) \right) \quad (28)$$

其中, 真实差分距离的二阶导数 $\Delta \ddot{R}_p(0)$ 表示为:

$$\Delta \ddot{R}_p(0) = \frac{\partial^2 \Delta R_p}{\partial^2 t} \bigg|_{t=0} = \frac{R_a \cos \varphi \theta^2}{4R_{tk}} \left(x - \frac{y^2 R_a \cos \varphi}{R_{tk}^2} \right) \quad (29)$$

近似差分距离的二阶导数 $\Delta \ddot{R}(0)$ 表示为:

$$\Delta \ddot{R}(0) = \frac{\partial^2 \Delta R}{\partial^2 t} \bigg|_{t=0} = \frac{x^* \cos \varphi \theta^2}{4} \quad (30)$$

将式(29)和(30)代入式(28), 可得到 PFA 的残余二次相位误差:

$$\tilde{\Phi}_p = -\frac{\pi R_a \cos \varphi \theta^2}{2\lambda R_{tk}} \left(x - \frac{y^2 R_a \cos \varphi}{R_{tk}^2} - \frac{x^* R_{tk}}{R_a} \right) \quad (31)$$

从式(31)可以看出, 残余二次相位误差不仅与孔径位置相关, 还随着目标的地面位置不同而改变, 具有位置二维空变性, 因此要精确补偿残余二次相位误差, 需要同时具有雷达的孔径位置信息和目标的图像位置信息。但是, 在频域成像算法 PFA 中, 雷达的孔径位置信息与目标的图像位置信息分别表现在不同的域中, 前者表现在回波域而后者表现在 PFA 图像域。在回波域中不同点的相位历史信息相互重叠, 因此无法直接构造一个滤波器来补偿全部点的相位误差, 这使得对 PFA 的残余二次相位误差补偿变得困难。

3.2. 波前曲率误差补偿

由于近场条件下的波前曲率误差, 几何失真使图像偏离实际位置, 导致原本应该是矩形的目标区域被“扭曲”为扇形区域, 对 PFA 图像的几何失真校正可以通过图像域重采样的方法来完成, 图像重采样过程可由双线性插值方法完成, 其目的是将“扭曲”的扇形区域恢复到实际矩形位置。选择双线性插值方法是基于多方面考虑。一方面, 双线性插值在处理二维图像插值时, 计算相对简单且能有效利用周围像素信息, 在保证一定精度的同时提高计算效率。另一方面, 它在重建图像时能够较好地保持图像的连续性和平滑性, 避免出现明显的锯齿或马赛克现象, 对于恢复近场条件下因波前曲率误差导致“扭曲”的目标图像效果较好[20]。

图像插值的关键在于找到重采样点的图像坐标位置, 式(29)给出了真实目标位置和畸变坐标位置之间的映射关系, 称为 GDM 映射。将目标在 PFA 图像上的畸变位置插值回其真实位置处, 就完成了目标的几何失真校正。几何失真校正的示意图如图 4 所示。其具体实施步骤为:

- 1): 在地面二维坐标系中建立并划分校正网格, 相邻校正点的横向和纵向间隔分别为 d_x 、 d_y ;
- 2): 针对每个校正点 (x, y) , 根据(29)计算其在 PFA 图像中的坐标 (x', y') , 完成几何失真映射(GDM);
- 3): 由该偏移坐标在 PFA 图像中通过插值找到其“像”, 并将其返回校正点。
- 4): 这样就完成了单个校正点的校正。重复以上步骤, 直至完成校正区域中所有点的校正。

由式(31)可以看出在 $y=0$ 时, 残余二次相位误差主要是距离向失真坐标 x^* 的函数, 所以在失真坐标系下对图像每个距离门进行一次相位误差校正, 可以补偿图像中绝大部分残余二次相位误差。对于经过 PFA 处理后的失真和散焦图像 $I_d(x^*, y^*)$, 对其执行方位向 FFT 使其变换到距离压缩-方位频域 $s_d(x^*, f_y)$, 并在该域对其进行残余误差校正。校正函数由式(31)定义, 表现为:

$$\tilde{\Phi}_{pdc}(x^*) = -\tilde{\Phi}_p(x^*, y=0) = -\frac{\pi R_a \cos \varphi \theta^2}{2\lambda R_{tk}} \left(x - \frac{x^* R_{tk}}{R_a} \right) \quad (32)$$

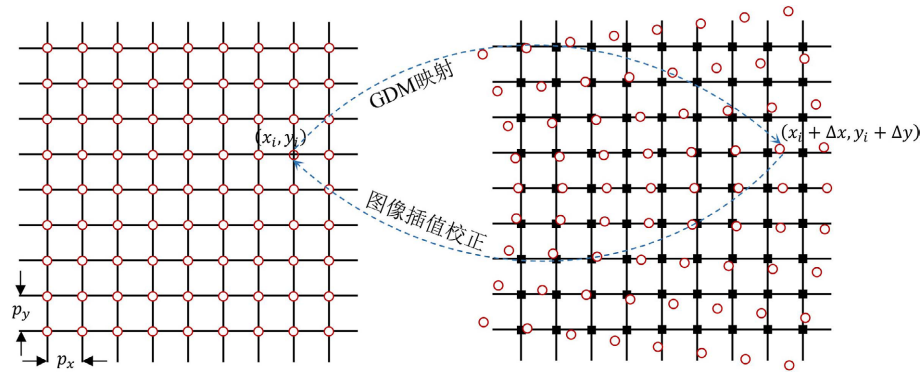


Figure 4. Principle of geometric distortion correction
图 4. 几何失真校正原理

对图像的散焦校正过程由下式表示:

$$s(x^*, f_y) = s_d(x^*, f_y) \cdot \exp\{j\Phi_{dc}(x^*)t^2\} \quad (33)$$

实际上,并非所有场景下都需要补偿该残余二次相位误差。在文献[21]中,作者给出了近似的判断公式,即如果相位误差小于一定阈值时它是可以被忽略的,该阈值为 $\pi/2$ 或 $\pi/4$ 。基于此,在阈值分别为 $\pi/2$ 或 $\pi/4$ 时的有效场景范围为:

$$\begin{cases} r_{e1} = \rho_a \sqrt{\frac{4R_a}{\lambda}} \\ r_{e2} = \rho_a \sqrt{\frac{2R_a}{\lambda}} \end{cases} \quad (34)$$

其中, ρ_a 为方位向分辨率。

3.3. 干涉三维成像

对初始二维 PFA 图像完成波前曲率误差校正后,得到校正后的天线 A (Image_A)和 B (Image_B)的 PFA 图像,可得散射点目标的垂直和水平坐标。对天线 A (Image_A)和 B (Image_B)的 PFA 图像进行干涉处理,计算可得干涉相位差为:

$$\Delta\theta_{AB} = \text{Angle}(\text{Image}_A^* \text{Image}_B) \quad (35)$$

其中, * 表示共轭运算, Angle 表示取相位操作

然而,由于目标散射点较多,提取峰值时需要结合 CLEAN 技术来消除散射点峰值之间的干扰。该方法具体实施过程可以总结为以下几步:

步骤一: 将近场校正的 ISAR 图像记为 $S(n, m)$, $n=1, 2, \dots, N'$, $m=1, 2, \dots, M'$, 其中 N' 和 M' 分别为距离单元数和方位单元数;

步骤二: 二维搜索 $S(n, m)$ 的峰值, 搜索峰值及谱峰位置:

$$[L_{ri}, L_{ai}] = \text{argmax}\{S(n, m)\} \quad (36)$$

$$P_v(i) = S(L_{ri}, L_{ai}) \quad (37)$$

其中, $P_v(i)$ 为第 i 个峰值, $[L_{ri}, L_{ai}]$ 为峰值位置。

步骤三: 构建新矩阵 $S'(n, m)$ 存储峰值

$$S'(L_{ri}, L_{ai}) = P_v(i) \quad (38)$$

步骤四：利用 CLEAN 技术剔除该谱峰

$$S(n, m) = S(n, m) \cdot \text{Win}_i(n, m) \quad (39)$$

其中

$$\text{Win}_i(n, m) = \begin{cases} 0, & |m - L_{ai}| < \varepsilon_a, |n - L_{ri}| < \varepsilon_r \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (40)$$

为第 i 个散射点对应的二维窗函数, ε_r 和 ε_a 分别为距离向和方位向的剔除半径, 且 ε_r 和 ε_a 的取值取决于 ISAR 图像的散射点密集程度。实际上, 式(40)的作用就是剔除 ISAR 图像中以像素 (L_{ri}, L_{ai}) 为中心, 大小为 $(\varepsilon_r, \varepsilon_a)$ 的一小片区域。

重复步骤二至步骤四直到 K 个散射点对应的峰值全部提取出来, 或者剩余信号的能量低于某个事先设定的阈值, 则 $S'(L_{ri}, L_{ai})$ 即为待求的高分辨 ISAR 图像。

通过 CLEAN 技术提取峰值, 再进行干涉相位处理, 然后, 高度向坐标为:

$$z = \frac{\Delta\theta_{AB} * \lambda * R_{NP}}{2\pi L} + \frac{L}{2} \quad (41)$$

其中, R_{NP} 为等效为圆迹 SAR 雷达与目标散射点 P 的距离。

为使得干涉相位不模糊, 需满足:

$$\Delta\theta_{AB} < \pi \quad (42)$$

4. 仿真实验与分析

4.1. 仿真参数

利用啁啾系统的毫米波雷达对目标进行近场成像, 仿真参数如表 1 所示, 仿真目标如图 5(a)所示, 图 5(b)~(d)为目标在不同平面上的位置由分布在三维空间中的 11 个散射点组成, 仿真时假设每个散射点目标的散射系数相同。

Table 1. Simulation parameter
表 1. 仿真参数

参数	参数值
中心频率 f_c	77 GHz
带宽 B	2 GHz
脉冲重复频率 PRF	360 HZ
脉冲宽度 T_p	50 us
参考距离 R_a	200 m
基线长度 L	0.15 m
转速 ω	0.5°/S
相干积累角度 θ	5°

4.2. 仿真实验

根据仿真参数设置, 由式(16)计算可得目标处于近场条件下, 所设置目标尺寸远大于临界目标尺寸。初始天线 A 和 B 的 PFA 图像如图 6 所示, 可以看出近场条件下, 由于存在波前曲率误差, 目标发生了

位置偏移, 散焦误差可以忽略。校正后的图像如图 7 所示, 可以看出位置校正正确, 从而能够实现后续三维成像。

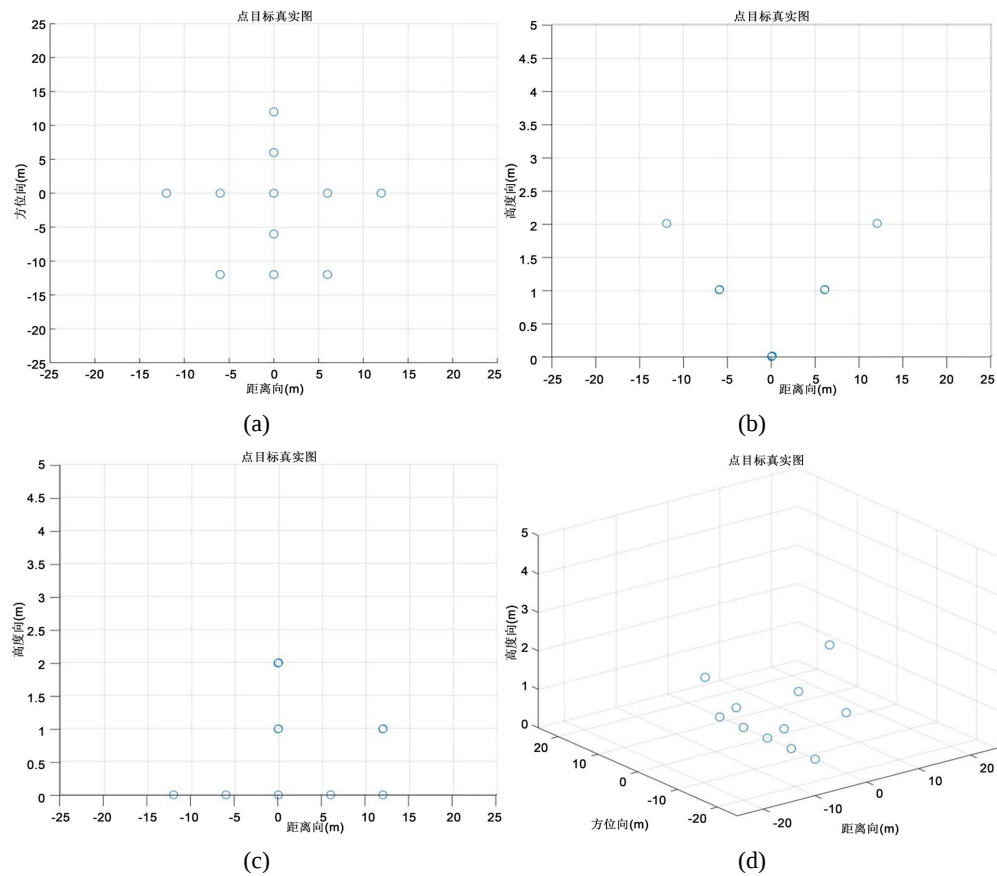


Figure 5. Simulation point target distribution
图 5. 仿真点目标分布

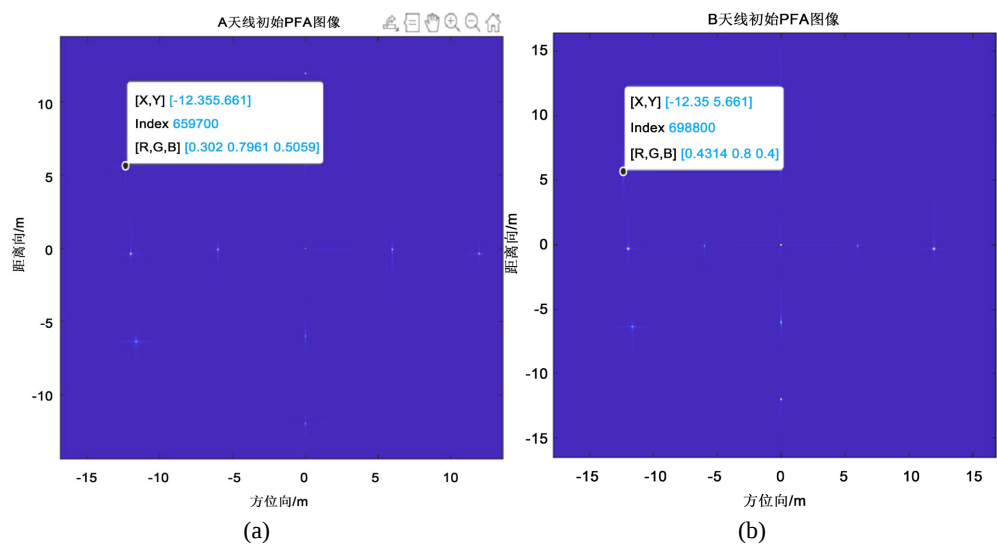


Figure 6. Near-field ISAR image
图 6. 近场 ISAR 图像

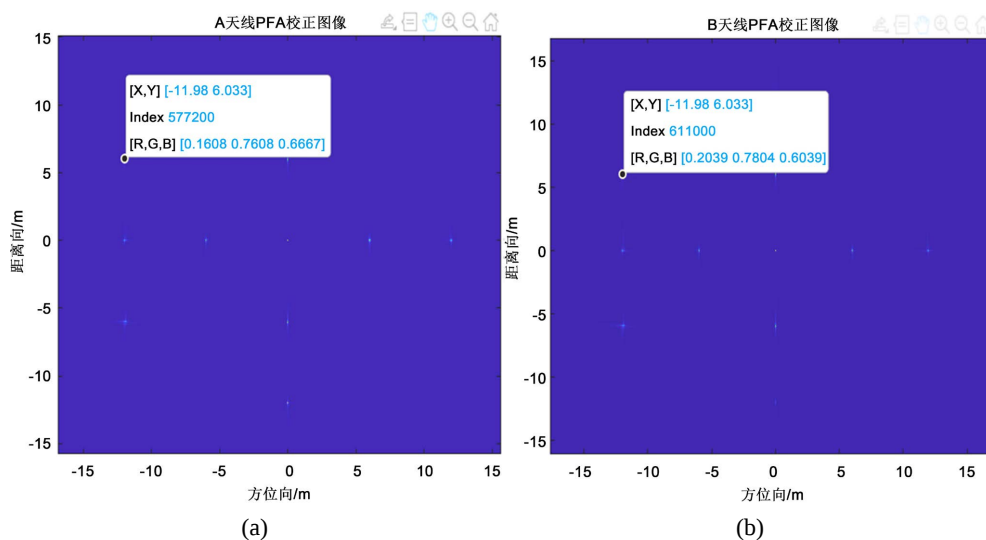


Figure 7. Corrected image

图 7. 校正后图像

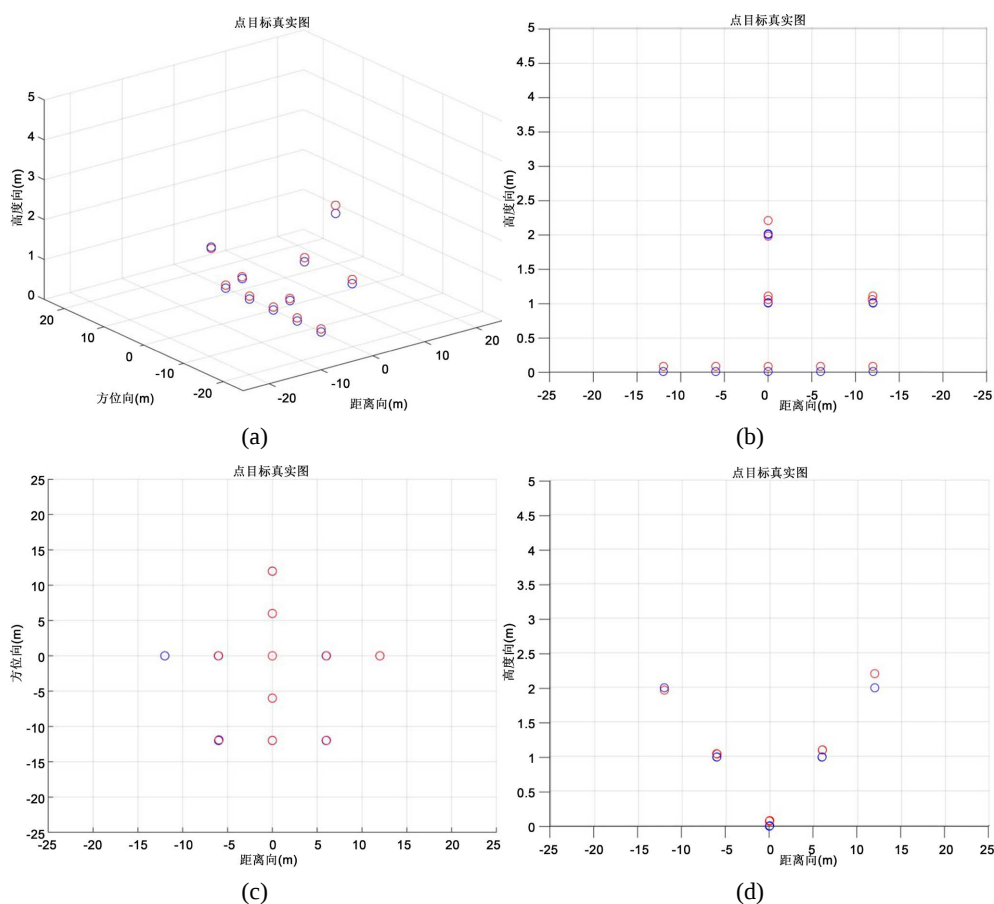


Figure 8. Target 3D map, real coordinates in blue, reconstructed coordinates in red

图 8. 目标三维图, 蓝色为真实坐标, 红色为重建坐标

对校正后的天线 A 的 ISAR 图像采用 CLEAN 技术提取峰值, 从而来消除散射点峰值之间的干扰,

对于 CLEAN 技术中的 ε_r 和 ε_a , 考虑到散射点像素间的距离大小, 均设置为 3。提取出峰值坐标后, 再对天线 A 和 B 二维 PFA 图像进行干涉处理, 反演出目标高度向图像, 重建后的目标三维图像如图 8(a)所示, 图 8(b)~(d)为目标在不同平面上的位置, 可以看出, 重建后的散射体几乎与理想散射体重合。

5. 结论

为了解决近场条件下平面波假设失效造成传统成像算法的失真和散焦, 导致三维 ISAR 成像质量较差的问题, 本文提出了一种在近场和单基线条件下的 InISAR 成像方法, 在获取高分辨率三维图像的同时, 降低了雷达系统的复杂性。首先, 采用极坐标格式算法(PFA)获得初始的二维图像, 然后, 对初始的二维图像进行波前曲率误差校正, 来获得精确的散射体的垂直和水平坐标, 最后通过干涉处理可以获得目标的高度坐标。仿真实验表明该算法的有效性。

参考文献

- [1] Ausherman, D.A., Kozma, A., Walker, J.L., Jones, H.M. and Poggio, E.C. (1984) Developments in Radar Imaging. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **20**, 363-400. <https://doi.org/10.1109/taes.1984.4502060>
- [2] 杨鹏举, 张蓉, 吴瑞, 等. 基于时域弹跳射线与 BP 算法的聚束 SAR 目标电磁成像快速仿真方法[J]. 电波科学学报, 2025, 40(1): 80-88.
- [3] 邢孟道, 马鹏辉, 楼屹杉, 等. 合成孔径雷达快速后向投影算法综述[J]. 雷达学报, 2024, 13(1): 1-22.
- [4] 金胜, 朱天林. ISAR 高分辨率成像方法综述[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(3): 251-260, 266.
- [5] Hu, P., Xu, S., Wu, W., Tian, B. and Chen, Z. (2017) IAA-Based High-Resolution ISAR Imaging with Small Rotational Angle. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **14**, 1978-1982. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2017.2744989>
- [6] Tian, B., Lu, Z., Liu, Y. and Li, X. (2018) Review on Interferometric ISAR 3D Imaging: Concept, Technology and Experiment. *Signal Processing*, **153**, 164-187. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.07.015>
- [7] 毕严先, 魏少明, 王俊, 等. 基于最小二乘估计的 InISAR 空间目标三维成像方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5): 1079-1084.
- [8] 宫蕊, 汪玲, 徐楚, 等. 一种联合 InISAR 成像和微多普勒特征提取的空间目标转动矢量估计方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 640-649.
- [9] Bi, Y., Wei, S., Wang, J. and Mao, S. (2016) Interferometric ISAR Imaging for 3-D Geometry of Uniformly Rotating Targets Based on Least Squares Estimation Method. *Journal of Electronics & Information Technology*, **38**, 1079-1084.
- [10] Martorella, M., Stagliano, D., Salvetti, F. and Battisti, N. (2014) 3D Interferometric ISAR Imaging of Noncooperative Targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **50**, 3102-3114. <https://doi.org/10.1109/taes.2014.130210>
- [11] Ng, B., Tran, H. and Phan, A. (2016) Total Rotational Velocity Estimation Using 3D Interferometric ISAR with Squint Geometry. 2016 *IEEE Radar Conference (RadarConf)*, Philadelphia, 2-6 May 2016, 1-6. <https://doi.org/10.1109/radar.2016.7485206>
- [12] Ma, C., Yeo, T.S., Zhang, Q., Tan, H.S. and Wang, J. (2008) Three-Dimensional ISAR Imaging Based on Antenna Array. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46**, 504-515. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.909946>
- [13] Wang, Y., Rong, J. and Han, T. (2019) Novel Approach for High Resolution ISAR/InISAR Sensors Imaging of Maneuvering Target Based on Peak Extraction Technique. *IEEE Sensors Journal*, **19**, 5541-5558. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2905246>
- [14] Wang, G., Xia, X. and Chen, V.C. (2001) Three-dimensional ISAR Imaging of Maneuvering Targets Using Three Receivers. *IEEE Transactions on Image Processing*, **10**, 436-447. <https://doi.org/10.1109/83.908519>
- [15] Liang, H.-Q., He, M.-Y., Li, N.-J., and Zhang, L.-X. (2008) The Research of Near-Field INISAR Imaging Diagnosis. 2008 *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Nanjing, 21-24 April 2008, 1773-1775. <https://doi.org/10.1109/icmmt.2008.4540820>
- [16] Zhang, B., Pi, Y.M. and Li, J. (2014) Terahertz Inverse Synthetic Aperture Radar Nearfield Imaging Algorithm Using Green's Function Decomposition. *Journal of Signal Processing*, **30**, 993-999.
- [17] Xu, G., Xing, M., Xia, X., Zhang, L., Chen, Q. and Bao, Z. (2016) 3D Geometry and Motion Estimations of Maneuvering Targets for Interferometric ISAR with Sparse Aperture. *IEEE Transactions on Image Processing*, **25**, 2005-2020.

-
- <https://doi.org/10.1109/tip.2016.2535362>
- [18] Zuo, F., Li, J., Hu, R. and Pi, Y. (2018) Unified Coordinate System Algorithm for Terahertz Video-Sar Image Formation. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, **8**, 725-735. <https://doi.org/10.1109/tthz.2018.2872412>
 - [19] Miao, Y., Wu, J., Li, Z. and Yang, J. (2020) A Generalized Wavefront-Curvature-Corrected Polar Format Algorithm to Focus Bistatic SAR under Complicated Flight Paths. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **13**, 3757-3771. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.2999966>
 - [20] Ullah, W., Ilyas, S., Naveed, H., *et al.* (2025) An Integrated Approach to Image Quality: Comparative Analysis of Bilinear and Nearest Neighbor Interpolation. *Big Data and Computing Visions*, **5**, 24-36.
 - [21] Gorham, L.A. and Rigling, B.D. (2016) Scene Size Limits for Polar Format Algorithm. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **52**, 73-84. <https://doi.org/10.1109/taes.2015.140853>