

斜视干涉逆合成孔径雷达成像算法

李丽亚, 刘宏伟, 纠博, 吴顺君

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对雷达在斜视工作下的干涉相位模糊问题, 提出了一种新的特显点干涉逆合成孔径雷达(ISAR)成像算法. 该算法利用特显点信噪比较高、干涉相位估计值较为准确的特性, 根据特显点的多普勒频率和横距信息拟合得到目标的多普勒频率与横距的关系, 从而对整幅 ISAR 像进行横向定标, 得到目标的干涉 ISAR 像. 该算法能消除干涉相位缠绕, 而且对噪声具有较强的鲁棒性, 同经典的干涉 ISAR 成像算法相比, 在正确成像时, 该算法所需的信噪比可降低 10~15 dB.

关键词: 逆合成孔径雷达; 干涉; 相位缠绕; 特显点

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)10-1290-05

An Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithm for Squint Model

LI Liya, LIU Hongwei, JIU Bo, WU Shunjun

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Aiming at the interferometric phase wrapping in squint model, a novel interferometric inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging algorithm based on dominant scatterers is proposed. By using the higher level of signal-to-noise ratio (SNR) and the more accurate interferometric phase estimations of dominant scatterers, the relationship between the target's Doppler frequency and the cross range is obtained based on the information about Doppler frequency and the cross range at dominant scatterers. The whole ISAR image can be scaled, and then, the interferometric ISAR image is obtained. The proposed algorithm can not only eliminate the phase wrapping, but also be robust to noise. Compared with the traditional interferometric ISAR imaging algorithms, the SNR that is required in the proposed algorithm is decreased by 10-15 dB when the vivid image is generated.

Keywords: inverse synthetic aperture radar; interferometric; phase wrapping; dominant scatterer

逆合成孔径雷达(ISAR)像是目标在距离-多普勒平面上的二维投影像, 当距离-多普勒平面和目标实际的坐标平面不一致时, ISAR 像不容易反映目标的形状信息^[1], 需要确定目标横向距离, 才可以得到反映目标真实形状的距离-方位像^[2]. 将多天线的干涉技术应用到逆合成孔径雷达, 可以获取目标的横向距离信息, 从而得到反映目标真实尺寸的图像^[3-4]. 在文献[3-4]中, 目标通常位于天线的电轴

上, 但在实际应用中, 目标会偏离天线电轴, 称为斜视. 当斜视达到一定程度时, 会使干涉相位发生模糊, 传统的干涉成像方法不能很好地解决这个问题, 并且在低信噪比情况下传统的干涉 ISAR 成像算法会失效, 无法正确成像. 本文提出了一种新的基于特显点的干涉 ISAR 成像算法, 解决了斜视下的相位模糊问题, 同时算法对噪声具有较强的稳健性.

1 干涉 ISAR 成像原理

干涉 ISAR 是利用多个天线接收到的回波数据进行干涉处理,对目标进行横向定标,从而得到反映目标真实尺寸的图像.下面以距离-方位像为例作具体说明.

天线和目标的距离-方位平面如图 1 所示.天线 A、B 水平放置,天线 B 位于原点 O 处,天线间距(称为基线长度)为 D_{BA} ,M 为 BA 的中点,虚线为 BA 的垂直平分线,称为天线电轴,目标与电轴的夹角(斜视角)为 α ,天线 B 收发共用, A 只接收信号.目标中心 o 在 XOY 中的坐标为 (X_o, Y_o) ,以 o 为中心建立坐标系 xoy .目标上任意一点 P 在 xoy 中的坐标为 (x, y) ,使用干涉技术对 ISAR 像进行定标就是要确定 P 的横向坐标 x ,P 到 A、M、B 的距离分别为 R_{PA} 、 R_P 、 R_{PB} .

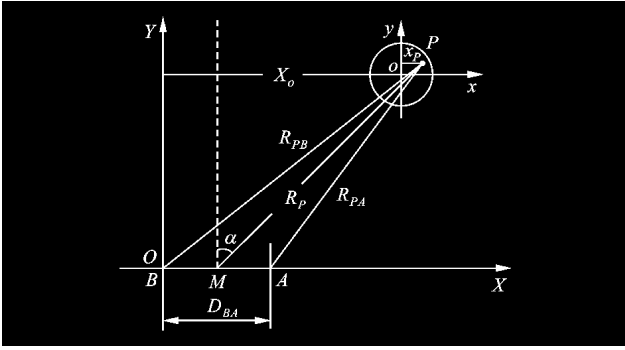


图1 天线和目标的距离-方位平面图

由目标和天线的几何关系可得

$$R_{PB}^2 = (X_o + x)^2 + (Y_o + y)^2 \quad (1)$$

$$R_{PA}^2 = (X_o + x - D_{BA})^2 + (Y_o + y)^2 \quad (2)$$

在一般情况下,总有 $R_{PA} + R_{PB} \gg D_{BA}$ 成立,所以有 $R_{PA} + R_{PB} \approx 2R_P$.由式(1)和式(2)得

$$\Delta R = R_{PB} - R_{PA} \approx \frac{x D_{BA}}{R_P} + \frac{2X_o D_{BA} - D_{BA}^2}{2R_P} \quad (3)$$

如果能求得波程差 ΔR ,就可从式(3)中解得 P 点的横向坐标 x ,从而对 P 点定标.通常求解 ΔR 的方法是比较 2 个通道输出复信号的相位,由相位差求得波程差,这就是干涉技术.

天线 B 和 A 接收的回波信号的相位差为

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{2\pi\Delta R}{\lambda} = \frac{2\pi x D_{BA}}{\lambda R_P} + \\ &\frac{2\pi(2X_o D_{BA} - D_{BA}^2)}{2\lambda R_P} = \varphi_1(x) + \varphi_0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: λ 为发射信号的波长; φ_0 为斜视引起的相位项.当目标中心在天线电轴上时,即雷达正侧视工

作,有 $\alpha=0$, $\varphi_0=0$.由式(4)可得

$$x = \frac{\varphi R_P}{2\pi D_{BA}} \quad (5)$$

由于相位差以 2π 为周期,为使横向定标无模糊,应保证

$$|\varphi(x)| = |\varphi_1(x)| = \left| \frac{2\pi x D_{BA}}{\lambda R_P} \right| \leq \pi \quad (6)$$

雷达斜视工作时, $\alpha \neq 0$, $\varphi_0 \neq 0$.当 φ_0 足够大时,相位差 φ 就会发生模糊,此时只能将 φ_0 补偿掉,才可使用式(5)进行定标.以往文献中只是考虑了正侧视的情况,本文讨论雷达斜视工作的情况.

2 斜视干涉 ISAR 成像

2.1 运动补偿

在 ISAR 成像中,一般将目标的运动分解为平动和转动.目标依赖转动分量在横向成像,所以要将平动分量补偿掉,使得目标可以看成转台目标来进行距离-多普勒 ISAR 成像.本文采用文献[1]中的平动补偿方法.干涉 ISAR 成像要求用于干涉的 2 幅 ISAR 像在各个像素上精准对齐,由于 2 个天线位置的不同,在成像积累时间内存在波程差,使得 2 幅 ISAR 像在多普勒域失配准,所以需要角运动 $\theta(t)$ 带来的波程差进行补偿后才能使 2 幅 ISAR 对准,如图 2 所示.文献[5]给出了角运动的补偿方法,这里不再赘述.经过平动补偿和角运动补偿后,再进行方位成像,即可得到对齐的 ISAR 像.

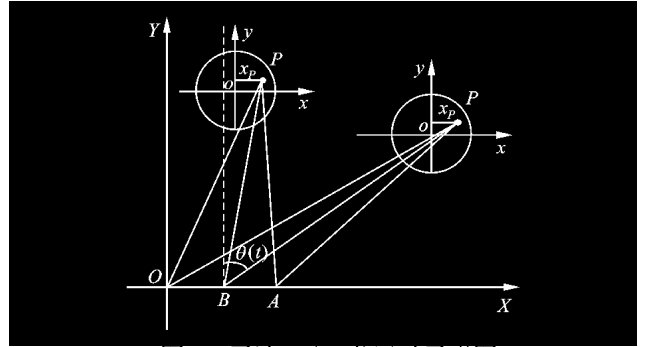


图2 干涉 ISAR 角运动示意图

2.2 斜视对干涉 ISAR 成像的影响

假设对齐后的 2 幅 ISAR 像分别是 S_A 和 S_B ,传统的干涉 ISAR 成像算法是将 2 幅 ISAR 像的对应像素干涉求相位差,即 $S = S_A S_B^*$,其中上标 * 表示共轭.正侧视时,成像期间内斜视角 α 和 φ_0 近似为 0,在式(6)成立的情况下,取 S 的相位,用式(5)进行定标成像.斜视时,在成像期间斜视角 α 和 φ_0 不能近似为 0.当 φ_0 达到一定值时,需要对 φ_0 进行补偿才能正确成像.下面分 2 种情况进行讨论.

(1) $|\varphi_1(x)| \leq \pi$, 且 $\varphi_1(x) \in [F_1, F_2]$, 其中 F_1, F_2 为上限和下限. 当 $\varphi_0 \in [-\pi, F_1] \cup [F_2, \pi]$ 时, 有 $|\varphi| > \pi$, 干涉相位发生模糊, 一般称为相位缠绕^[6], 如图 3a 所示. 记 $\varphi = 2k\pi + \phi$, 其中 $\phi \in (-\pi, \pi]$, k 为整数, ϕ 称为干涉相位主值或者缠绕值, 此时原本连续的真实干涉相位 φ 被分成不连续的 2 段, 在成像时会出现像分裂.

(2) 当 $|\varphi_1(x)| > \pi$ 时, 干涉相位差总会发生模糊, 如图 3b 所示. 此时, 干涉相位的真实值被分成了几段, 导致不同的横向坐标对应着相同的干涉相位缠绕值, 缠绕的次数越多重叠的也越多. 如果不做解缠绕处理, 目标像的不同部分会叠加在一起, 无法正确成像.

由上述可知, 真实的干涉相位 φ 是正确成像的基础, 必须从模糊的相位中恢复出真实的干涉相位 φ , 才能进行定标和成像.

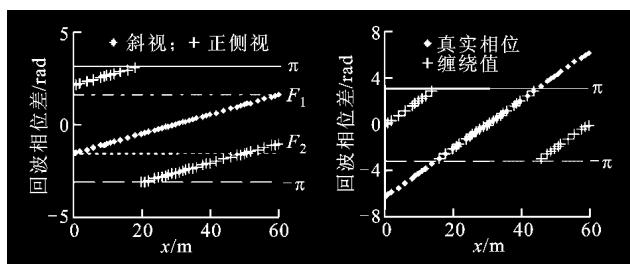
(a) $|\varphi_1(x)| \leq \pi$ (b) $|\varphi_1(x)| > \pi$

图 3 斜视成像时的干涉相位差

2.3 相位解缠绕

斜视干涉 ISAR 成像的核心问题是求解能够正确反映真实目标横距的干涉相位 φ . 相位解缠绕是求解真实相位 φ 的必要过程.

设 $\phi(n)$ 和 $\varphi(n)$ 分别为缠绕和解缠绕相位, $n = 1, 2, \dots, N$. 路径积分解缠绕算法^[6]为

$$\varphi(1) = \phi(1); \quad \varphi(n+1) = \varphi(n) + \Delta(n) \quad (7)$$

其中

$$\Delta(n) = \begin{cases} \phi(n+1) - \phi(n) & |\phi(n+1) - \phi(n)| < \pi \\ \phi(n+1) - \phi(n) - 2\pi & \phi(n+1) - \phi(n) > \pi \\ \phi(n+1) - \phi(n) + 2\pi & \phi(n+1) - \phi(n) < -\pi \end{cases}$$

对于 2.2 节讨论的 2 种情况, 路径积分解缠绕算法均可得到正确的干涉相位, 但由于解缠绕运算是递推进行的, 当受到噪声的污染时, 会使某一点的解缠绕相位发生错误, 这不仅改变了该点的解缠绕相位值, 也会使后续解缠绕相位发生错误最终导致无法成像. 针对第 1 种情况, 还有另外 2 类解决相位缠绕的方法: 一类是在成像后运用图像处理的方法,

将分裂的像进行拼接; 另一类是在干涉成像之前求得 φ_0 , 将其补偿掉. 得到 φ_0 的方法有: ①利用先验信息算出 φ_0 ; ②因为 $\varphi(x=0) = \varphi_0$, 所以估计 S 的中心相位作为 φ_0 , 但是由于中心相位易受噪声的影响, 因此估计的准确性直接影响成像的结果.

2.4 基于特显点的干涉 ISAR 成像算法

在实际应用中, 上述相位解缠绕方法存在一个问题, 由于目标 ISAR 像中各散射点强度分布的不均匀, 因此在低信噪比情况下, 较弱散射点对应的干涉相位估计值会有较大误差, 导致最终相位解缠绕结果出错. 此外, 对 ISAR 像解缠绕还可以利用目标通常被认为是刚体、所有散射点的干涉相位和横距之间均满足式(4)的线性关系这一条件. 因此, 本文提出基于特显点的干涉 ISAR 的成像算法, 具体步骤如下.

(1) 选取幅值 $|S_A|$ 或者 $|S_A| + |S_B|$ 最大的 Q 个像素点, 并记下其在整幅图像中的位置, 按此位置在 S_A 和 S_B 中分别取出 Q 个像素点. 如果目标散射点在 ISAR 像中能被充分分离, 则 Q 个强像素点可以看作 Q 个强散射点, 称为特显点.

(2) 对 Q 个特显点进行干涉测角, 得到干涉相位主值 $\phi_q, q = 1, 2, \dots, Q$.

(3) 将 Q 个特显点按照多普勒频率大小进行排列, 使用式(7)求出真实干涉相位 $\varphi_q, q = 1, 2, \dots, Q$.

(4) 利用式(5)求出 Q 个特显点对应的横向距离 $x_q, q = 1, 2, \dots, Q$.

(5) 当目标匀速转动时, 目标散射点的多普勒频率 f_d 和横距 x 成线性关系

$$x = kf_d + b \quad (8)$$

式中: k, b 为线性参数. 对 Q 个特显点, 有

$$FH = X \quad (9)$$

式中: $F = \begin{bmatrix} f_{d1} & f_{d2} & \cdots & f_{dQ} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T$; $H = \begin{bmatrix} k \\ b \end{bmatrix}$; $X = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_Q]^T$. 由式(9)可以解得参数 H . 因为目标可看作是刚体, 那么目标上所有散射点的多普勒频率与横距的关系都可由 H 表述.

(6) 利用参数 H 和 ISAR 像中的多普勒频率信息, 根据式(8)可以求出所有散射点的横向距离, 进而对整幅 ISAR 像定标成像.

本文算法主要是在目标可以看作是刚体且匀速转动的情况下, 利用强散射点的定标误差较小和多普勒频率与横向距离的关系更为准确的特性, 对目标进行定标, 进而成像. 需要指出的是: 本文算法适用于匀速转动的目标. 一般在 ISAR 成像中, 平稳飞

行的目标通过平动补偿后一般都可以成为匀速转动的转台目标,故本算法对平稳飞行的目标都是适用的。

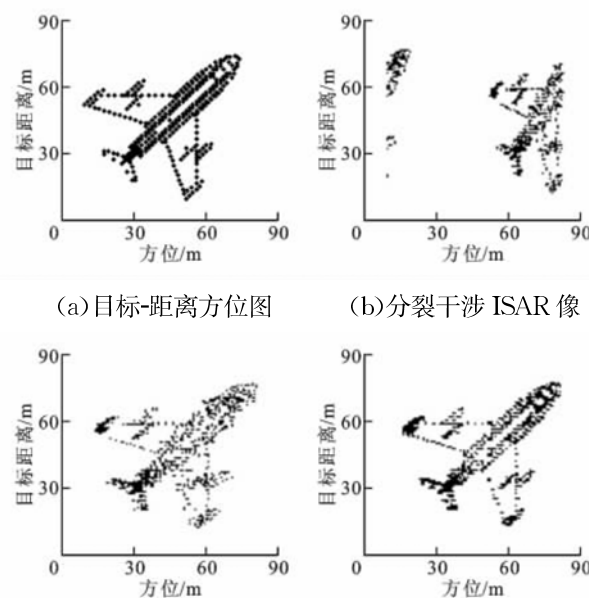
3 仿真实验

仿真实验中,以一个 330 个散射点的飞机模型为例,模型的俯视图如图 4a 所示,其长、宽和高分别为 70 m、60 m 和 9 m。

实验 1 参数选择如下: $\lambda=6$ cm, $D=10$ m, $R=20$ km, $\alpha=0.15^\circ$ 。在这组参数下, $|\varphi_1(x)| \leq \pi$, 因为斜视角的存在,传统干涉 ISAR 成像中出现像分裂,如图 4b 所示。补偿 φ_0 后,可以正确地成像,如图 4c 所示。使用本文算法得到干涉 ISAR 像,如图 4d 所示。从这个实验可以看出,很小的斜视角都会导致像分裂。对比图 4c 和图 4d 可以看出,基于特显点的干涉 ISAR 像要比传统干涉 ISAR 像更为清晰,更接近目标像。

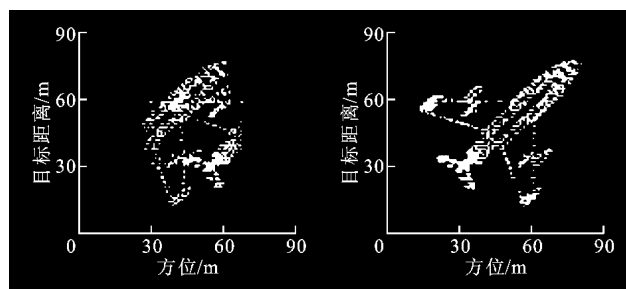
实验 2 参数选择如下:波长 $\lambda=6$ cm, $D=30$ m, $R=20$ km, $\alpha=1^\circ$ 。在这个实验中, $|\varphi_1(x)| > \pi$, 干涉相位出现多次缠绕,在传统干涉 ISAR 成像算法中,由于没有解缠绕的处理,目标的不同部分因为相同的干涉相位主值而叠加在一起,因而无法正确成像,而本文提出的算法很好地解决了相位缠绕,能够正确地成像,如图 5 所示。

实验 3 噪声对干涉 ISAR 成像的影响。取 $\lambda=6$ cm, $D=1$ m, $R=20$ km, $\alpha=5^\circ$ 。在这组参数下,针对传统算法,补偿 φ_0 ,在信噪比为 15 dB 和 30 dB 时得到的像如图 6a 和 6b 所示。可以看出,当信噪比为 15 dB 时,得到的只是目标的大概轮廓像,当信噪比增加到 30 dB 时,才能正确成像,而基于特显点的干涉 ISAR 成像算法在信噪比为 5 dB 时,就能够清晰地成像,如图 6c 所示。与传统方法相比,基于特显点的方法能正确成像的信噪比降低了很多。



(c) 补偿后的干涉 ISAR 像 (d) 基于特显点的干涉 ISAR 像

图 4 $|\varphi_1(x)| \leq \pi$ 时的斜视干涉 ISAR 成像

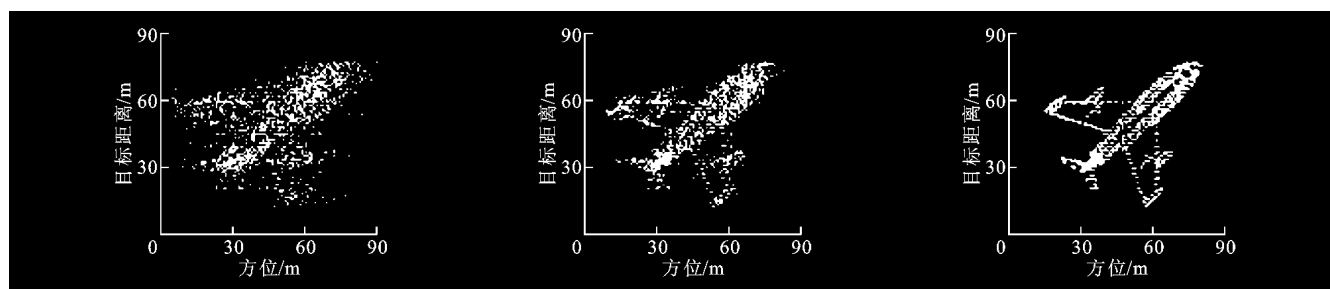


(a) 传统干涉 (b) 基于特显点的干涉

图 5 $|\varphi_1(x)| > \pi$ 时斜视干涉 ISAR 成像

4 结束语

针对斜视干涉 ISAR 中低信噪比和相位缠绕问题,本文提出了基于特显点的干涉 ISAR 成像算法,利用强散射点信噪比较高、定标误差较小这一特性,得到目标散射点多普勒频率与横距之间的关系,从而对 ISAR 像进行定标,得到反映真实尺寸的像。本



(a) 传统干涉(15 dB)

(b) 传统干涉(30 dB)

(c) 基于特显点干涉(5 dB)

图 6 噪声对干涉 ISAR 成像的影响

文算法不仅有效地解决了斜视下相位缠绕问题,而且对噪声具有较强的稳健性.需要指出的是,本文方法适用于平稳飞行的目标,而对于机动的目标,则需要进一步研究.

参考文献:

- [1] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 姜正林,保铮. 低分辨雷达成像定标算法性能分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(6): 677-681.
JIANG Zhenglin, BAO Zheng. Performance analysis of the method of cross-range scaling of low resolution radar [J]. Journal of Xidian University, 2000, 27(6): 677-681.
- [3] WANG Genyuan, XIA Xianggen, Chen V C. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(3):436-447.
- [4] 张群,马长征,张涛,等. 干涉式逆合成孔径雷达三维成像技术研究[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(9): 890-898.
ZHANG Qun, MA Changzheng, ZHANG Tao, et al. Research on 3-D imaging technique for interferometric inverse synthetic aperture radar [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2001, 23(9): 890-898.
- [5] ZHANG Qun, YEO T S, DU Gan, et al. Estimation of three-dimensional motion parameters in interferometric ISAR imaging [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(2): 292-300.
- [6] FORNARO G, FRANCESCHETTI G, LANARI R. Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(3): 720-727.

(编辑 刘杨)