

圆迹 SAR 极坐标格式算法研究

林 贇^{①②③} 谭维贤^{①②} 洪 文^{①②} 王彦平^{①②} 吴一戎^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要: 该文提出一种新的用于圆迹合成孔径雷达(Circular Synthetic Aperture Radar, CSAR)成像的极坐标格式算法。在 CSAR 模式下, 点目标的波数域 3 维频谱为 3 维曲面。根据这一特点, 算法采用逐高度平面成像的方法最终获得 3 维图像, 即通过参考函数相乘, 将频谱投影到 2 维平面, 既避免了高度向的插值, 又保证了算法的精确性。并且该算法通过两步相位补偿操作校正了越距离单元徙动的高次项, 扩大了有效成像范围, 避免了场景边缘目标的散焦。最后, 点目标仿真验证了该算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 圆迹合成孔径雷达; 极坐标格式算法; 成像算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2802-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00003

Polar Format Algorithm for Circular Synthetic Aperture Radar

Lin Yun^{①②③} Tan Wei-xian^{①②} Hong Wen^{①②} Wang Yan-ping^{①②} Wu Yi-rong^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, a novel Polar Format Algorithm (PFA) is presented for Circular Synthetic Aperture Radar (CSAR) imaging. Based on the signal model analysis, it is found that the shape of the spectrum in the wavenumber domain of a point target in CSAR is a three-dimensional curved surface. To avoid the interpolation along the third dimension and also ensure accuracy, this algorithm obtains two-dimensional images at equally spaced heights to form the final three-dimensional image, and this is done by multiplying reference function of height to project the spectrum to two-dimensional planes. By two steps of phase compensation, this algorithm also corrects the high terms of the Range Cell Migration (RCM) to enable full image quality over much larger scenes without image defocus. Finally, simulation results validate the feasibility of the proposed approach.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Circular SAR; Polar Format Algorithm (PFA); Imaging algorithm

1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天时全天候, 高分辨大区域成像的能力, 已经成为军用和民用的重要工具。传统 SAR 平台多采用直线轨迹^[1], 方位向分辨率受观测视角限制, 为了进一步提高 SAR 的分辨率, 90 年代初, 美国学者 Knaell 等最早提出了圆迹合成孔径雷达(Circular SAR, CSAR)概念^[2], 此后 CSAR 因其特有的优势得到了广泛的研究^[3-5], 其优势包括: (1)3 维成像能力; (2)高平面分辨率; (3)

全方位观测; (4)高信噪比^[6]等。近年来, CSAR 的可行性和独特优势在多次机载实验中得到了验证, 如法国空间局(ONERA)于 2004 年和 2006 年分别开展的 L, X 波段机载实验^[7,8], 德宇航(DLR)于 2009 年开展的 L 波段机载实验等^[9]。

CSAR 由于圆形轨迹的特点, 其成像算法不同于常规的直线轨迹 SAR。同已经发展比较成熟的直线轨迹 SAR 相比, CSAR 成像算法尚处于发展阶段。尽管共焦投影算法在原理上可以用于任何几何配置^[4], 但很低的计算效率使其无法实际应用。后向投影(BP)算法是目前应用最多的算法^[5,8], 虽然 BP 算法也可实现任意几何配置下的聚焦处理, 但仍存在计算效率较低的缺点。Soumekh 在文献[3]中提出了基于格林函数傅里叶分析的 CSAR 成像算法, 该算

2010-01-04 收到, 2010-06-01 改回

国家自然科学基金(60890070), 国家杰出青年基金(60725103)资助课题

通信作者: 林贇 yunlin2010@gmail.com

法利用快速傅里叶变换提高了运算效率, 但算法中的系统核矩阵求逆操作增加了算法的复杂度, Burki 等人在文献[10]中专门就系统核的求逆问题展开了研究。

本文在对 CSAR 信号模型进行分析的基础上, 引入极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)^[11], 提出了可实现有效聚焦的 CSAR 极坐标格式算法。根据 CSAR 点目标波数域 3 维频谱为 3 维曲面的特点, 算法采用逐高度平面成像的方法, 即通过参考函数相乘, 将频谱投影到 2 维平面, 既避免了高度向的插值, 又保证了算法的精确性。并且该算法通过两步相位补偿操作校正了越距离单元徙动(Range Cell Migration, RCM)的高次项, 扩大了有效成像范围, 避免了场景边缘处目标的散焦。

2 信号模型

CSAR 的成像几何如图 1 所示, 雷达平台 A 沿着半径为 R , 离地面高度 H 的圆形轨迹运动, 雷达平台旋转角 θ 定义为慢时间, $\theta \in [0, 2\pi)$, 慢时间方向即为方位向。雷达平台运动时, 雷达视线方向始终指向场景区域中心 O , 波束俯仰角为 α 。场景区域半径为 R_s , 高度为 $2h$, P 为场景区域中任意点目标, 散射系数设为 σ_p 。在直角坐标系下, 雷达平台 A 的坐标为 $(x, y, z) = (R \cos \theta, R \sin \theta, H)$, 点目标 P 坐标设为 (x_p, y_p, z_p) ; 在球坐标系下, 雷达平台 A 的坐标为 (R_0, α, θ) , 其中 $R_0 = \sqrt{R^2 + H^2}$ 为雷达平台与场景中心的距离, 点目标 P 坐标设为 (ρ, η, φ) 。设雷达平台与目标 P 之间的瞬时距离为 $R_p(\theta)$, 位置向量瞬时夹角设为 $\beta(\theta)$ 。

假设发射雷达信号为 Chirp 信号, 脉冲宽度为 T_p , 调频率为 γ 。则雷达所接收点目标 P 的回波为

$$s_r(\theta, t) = \sigma_p \text{rect} \left[\frac{t - 2R_p(\theta)/c}{T_p} \right] \cdot \exp \left\{ j2\pi f_c \left[t - 2R_p(\theta)/c \right] + j\pi\gamma \left[t - 2R_p(\theta)/c \right]^2 \right\} \quad (1)$$

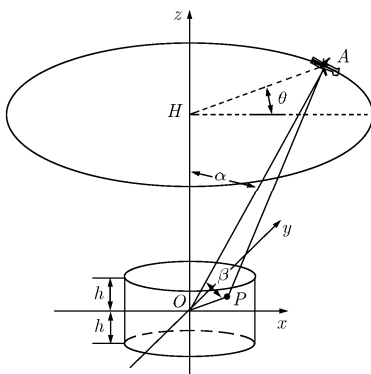


图 1 CSAR 成像几何

其中 c 为光速, t 为快时间, f_c 为中心频率。以区域中心 O 处的回波作为 Dechirp 的解调参考信号, 则回波经 Dechirp 并距离去扭后的回波信号为

$$s_{\text{IF}}(\theta, t) = \sigma_p \text{rect} \left[\frac{t - 2R_0/c}{T_p} \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} [\gamma(t - 2R_0/c) + f_c] [R_p(\theta) - R_0] \right\} \quad (2)$$

定义 $K = 2\pi[\gamma(t - 2R_0/c) + f_c]/c$ 为波数, $K_c = 2\pi f_c/c$ 为中心波数, $B_r = 2\pi\gamma T_p/c$ 为发射信号带宽, 则式(2)重写为

$$s_{\text{IF}}(\theta, K) = \sigma_p \text{rect} \left[\frac{K - K_c}{B_r} \right] \exp \{ j\Phi(\theta, K) \} \quad (3)$$

其中

$$\Phi(\theta, K) = -2K[R_p(\theta) - R_0] \quad (4)$$

越距离单元徙动 $R_p(\theta) - R_0$ 对 ρ 作幂级数展开, 得

$$\begin{aligned} \text{RCM} = R_p(\theta) - R_0 &= \sqrt{R_0^2 + \rho^2 - 2\rho R_0 \cos \beta} - R_0 \\ &= -\rho \cos \beta + \frac{\sin^2 \beta}{2R_0} \rho^2 + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

根据几何关系可得

$$\cos \beta = \sin \alpha \sin \eta \cos(\theta - \varphi) + \cos \alpha \cos \eta \quad (6)$$

将式(5), 式(6)代入式(4), 得

$$\begin{aligned} \Phi &= 2K\rho[\sin \alpha \sin \eta \cos(\theta - \varphi) + \cos \alpha \cos \eta] \\ &\quad - 2K \frac{(\rho \sin \beta)^2}{2R_0} + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

通常在极坐标格式算法处理中, 采用平面波假设, RCM 近似至 1 次项, 即式(7)右侧只保留第 1 项, 通过球坐标格式 (K, θ, α) 到直角坐标格式 (K_x, K_y, K_z) 的转换可校正 RCM 的 1 次项, 获得目标的 3 维频谱信号, 坐标映射关系为

$$\begin{aligned} K_x &= -2K \sin \alpha \cos \theta, \quad K_y = -2K \sin \alpha \sin \theta, \\ K_z &= -2K \cos \alpha \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)代入式(7)可得点目标的 3 维频谱的相位表达式为

$$\Phi(K_x, K_y, K_z) \approx -K_x x_p - K_y y_p - K_z z_p \quad (9)$$

CSAR 点目标 3 维频谱的支持域可由式(8)得到, 其分布如图 2 所示。

式(9)中, 3 维频谱的线性相位将确定重建目标的位置 (x_p, y_p, z_p) 。然而, 平面波近似的成立前提是 $R_0 \gg \rho$ ^[12], 当假设条件不成立时, RCM 高次项引起的相位增量项将造成图像的几何形变和散焦, 离场景中心越远的目标越严重。在实际应用中, 为了避免严重的散焦, 常对可用的场景范围加以限制。

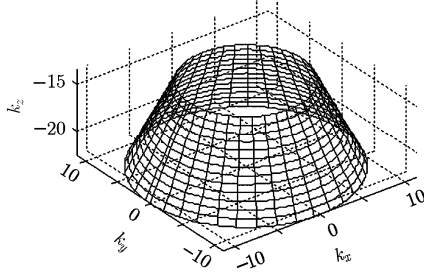


图 2 CSAR 3 维频谱示意图

本文提出的 CSAR 极坐标格式算法通过补偿 RCM 的 2 次项引起的相位增量项, 即式(7)右侧第 2 项, 扩大有效成像范围, 避免图像边缘目标的散焦。

3 CSAR 极坐标格式算法

如图 2 所示, CSAR 点目标的 3 维频谱为一个 3 维曲面, 通过 3 维插值实现球坐标格式到直坐标格式的转换, 不仅精度有限, 而且操作繁琐, 难以实现。因此本文采用逐高度平面成像的方法, 即首先通过参考相位补偿将 3 维频谱投影到等间隔高度的 $K_x K_y$ 平面, 然后经 2 维插值完成极坐标格式到直坐标格式的转换, 实现各高度平面上的 2 维成像, 从而完成整个场景区的 3 维成像。该方法不仅避免了繁琐的 3 维插值过程, 而且能依次快速获得特定高度平面的图像, 更适用于实际数据处理。

下面先讨论位于 $z = 0$ 平面的点目标的 2 维成像方法, 随后再给出整个场景区的成像算法处理流程。在下面的公式推导中, 将略去幅度函数, 该处理对成像算法推导不产生影响。

设点目标 P 位于 $z = 0$ 平面, 将 $\eta = \pi/2$ 代入式(7), 并近似至 2 次项, 可得

$$\begin{aligned} \Phi \approx & 2K\rho \sin \alpha \cos(\theta - \varphi) \\ & - 2K \frac{\rho^2 [1 - \sin^2 \alpha \cos^2(\theta - \varphi)]}{2R_0} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中的第 1 项将确定重建目标位置, 第 2 项是 RCM 的 2 次项带来的相位增量, 将在本算法中得到补偿。将式中的 $1 - \sin^2 \alpha \cos^2(\theta - \varphi)$ 拆分为 $\sin^2 \alpha \cdot \sin^2(\theta - \varphi) + \cos^2 \alpha$, 则式(10)重写为

$$\begin{aligned} \Phi \approx & 2K\rho \sin \alpha \cos(\theta - \varphi) \\ & - 2K \frac{\rho^2 \sin^2 \alpha \sin^2(\theta - \varphi)}{2R_0} - 2K \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0} \end{aligned} \quad (11)$$

分两次对相位增量项进行补偿。式(11)右侧第 2 项是关于慢时间 θ 的函数, 可通过方位频域的 2 次相位全通系统补偿; 第 3 项与慢时间 θ 无关, 却随目标与场景中心的距离 ρ 变化, 可考虑在完成极坐标格式到直坐标格式的转换后, 分区域进行相位补偿。

基于上述考虑, 首先讨论第 1 次的相位增量补偿方法。对回波信号式(3)沿方位向作傅里叶变换,

注意此处相位 Φ 的表达式为式(11), 则

$$\begin{aligned} S_{af}(K_\theta, K) &= FT_\theta \{s_{IF}(\theta, K)\} \\ &\approx \exp \left[-j2K \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0} - jK_\theta \varphi \right] \\ &\quad \cdot \int_0^{2\pi} \exp\{j[p(\theta) + q(\theta)]\} d\theta \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$p(\theta) = 2K\rho \sin \alpha \cos(\theta) - K_\theta \theta \quad (13)$$

$$q(\theta) = -2K \frac{\rho^2 \sin^2 \alpha \sin^2(\theta)}{2R_0} \quad (14)$$

由于式(12)的被积函数 $\exp\{j[p(\theta) + q(\theta)]\}$ 没有奇异点, 且是一个快速震荡函数, 可使用驻定相位原理计算该积分^[13]。驻留点处的时频关系为

$$K_\theta \approx -2K\rho \sin \alpha \sin \theta - 2K(\rho \sin \alpha)^2 \sin(2\theta) / 2 / R_0 \quad (15)$$

通常情况下可忽略式(15)右侧第 2 项, 只保留第 1 项, 则方位频谱 $S_{af}(K_\theta, K)$ 的解析表达式为

$$\begin{aligned} S_{af}(K_\theta, K) &\approx \exp \left[-j2K \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0} - jK_\theta \varphi \right] \\ &\quad \cdot \exp\{jp[\theta(K_\theta)] + jq[\theta(K_\theta)]\} \end{aligned} \quad (16)$$

观察式(14), 可发现 $q(\theta)$ 是方位频率 K_θ 的 2 次函数。

$$q[\theta(K_\theta)] \approx -K_\theta^2 / (4R_0 K) \quad (17)$$

因此, 可通过 2 次相位全通系统对 $q(\theta)$ 进行补偿, 系统传递函数和系统冲激响应分别为

$$H_{az}(K_\theta, K) = \exp[jK_\theta^2 / (4R_0 K)] \quad (18)$$

$$h_{az}(\theta, K) = \text{IFT}[\exp(-jR_0 K \theta^2)] \quad (19)$$

则回波 $s_{IF}(\theta, K)$ 通过滤波后, 输出信号 $S_{po}(K_\theta, K)$ 的解析表达式为

$$\begin{aligned} S_{po}(\theta, K) &= s_{IF}(\theta, K) \otimes h_{az}(\theta, k) \\ &= \text{IFT}_{(K_\theta)} [S_{af} \cdot H_{az}(K_\theta, K)] \\ &\approx \exp \left[j2K\rho \sin \alpha \cos(\theta - \varphi) - j2K \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

至此完成了第 1 次相位补偿, 下面讨论极坐标格式到直坐标格式的转换方法。

如图 3 所示, 实际录取的采样点是按极坐标格式排列的, 由于直角坐标的 2 维傅里叶变换的采样点必须在均匀的矩形网格上, 所以需通过 2 维插值得到均匀矩形网格采样点上的频谱。极坐标 (θ, K) 到直角坐标 (K_x, K_y) 的映射关系见式(8)的前两个表达式, 通过该映射关系对式(20)进行 2 维插值, 得到直角坐标系下的 2 维频谱解析式为

$$\begin{aligned} S(K_x, K_y) &\approx \\ &\exp \left[-jK_x x_p - jK_y y_p - j\sqrt{K_x^2 + K_y^2} \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0 \sin \alpha} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

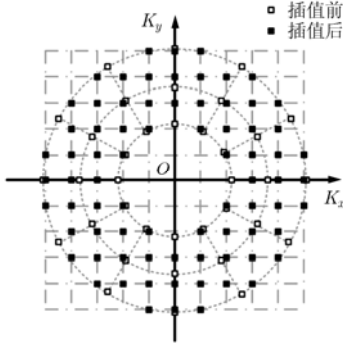


图 3 极坐标到直角坐标插值示意图

下面讨论第 2 次相位补偿的方法, 即式(21)右边指数相位第 3 项的补偿方法。

重写式(21)右边相位第 3 项如下:

$$\begin{aligned} \phi_1(K_x, K_y) &= -\sqrt{K_x^2 + K_y^2} \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0 \sin \alpha} \\ &= -2K \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0} = -2K_c \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0} \\ &\quad - 2(K - K_c) \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0} \end{aligned} \quad (22)$$

对每个点目标来说, 式(22)右边第 1 项是常量, 不需补偿, 第 2 项将引起关于 (K_x, K_y) 的非线性相位变化, 需予以补偿, 该项随目标位置半径 ρ 变化, 因此本算法采用分区成像的方法, 即将需要成像的场景区域按半径分成不同的分区, 然后采用不同的相位补偿函数对各分区分别进行相位补偿并成像, 最后拼接成一个完整的 2 维图像。

下面讨论分区策略。式(22)右边第 2 项引起的相位变化量为

$$\Delta\phi_1(\rho) = 2(K_{\max} - K_{\min}) \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{2R_0} = B_r \frac{\rho^2 \cos^2 \alpha}{R_0} \quad (23)$$

为保证图像质量, 相位补偿后场景区内所有目标的非线性相位都需控制在 $\pi/4$ 内^[12], 因此, 每个分区的内圈目标和外圈目标的相位变化量 $\Delta\phi_1(\rho)$ 的差值应不超过 $\pi/2$, 若将 $\Delta\phi_1(\rho)$ 设为 $\pi/2$, 并设第 k 个分区的内圈半径为 r_{k-1} , 外圈半径为 r_k , 则 r_k 的表达式为

$$r_k = \sqrt{k\pi R_0 / (2B_r \cos^2 \alpha)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (24)$$

对于第 k 个分区, 相位补偿量为内外圈目标相位增量的中值, 即

$$\begin{aligned} H_k(K_x, K_y) &= \exp \left[2(K - K_c) \frac{\cos^2 \alpha}{2R_0} \frac{(r_k^2 + r_{k-1}^2)}{2} \right] \\ &= \exp \left[\left(\frac{\sqrt{K_x^2 + K_y^2}}{\sin \alpha} - 2K_c \right) \frac{\cos^2 \alpha}{4R_0} (r_k^2 + r_{k-1}^2) \right] \end{aligned} \quad (25)$$

将式(21)与相位补偿函数相乘, 可保证每个目标的相

位误差都不超过 $\pi/4$, 相位补偿后得

$$S_k(K_x, K_y) = S \cdot H_k \approx \exp(-jK_x x_p - jK_y y_p) \quad (26)$$

对式(26)作 2 维逆傅里叶变换, 并加窗即可得到各分区的聚焦图像, 表达式为

$$\begin{aligned} s_k(x, y) &= \text{IFT2}[S_k] \cdot W_k \\ &\approx \text{PSF}_{2d}(x - x_p, y - y_p) \cdot W_k \end{aligned} \quad (27)$$

$$W_k = \begin{cases} 1, & r_{k-1} \leq \sqrt{x^2 + y^2} < r_k \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (28)$$

其中 $\text{PSF}_{2d}(x, y)$ 代表 CSAR 的 2 维点扩展函数。完成各分区的成像处理后, 将图像拼接, 可得到 $z = 0$ 平面的 2 维图像。

以上针对位于 $z = 0$ 平面点目标的 2 维成像方法进行了详细的分析, 当目标位于其他高度平面时, 首先需要将 dechirp 后的回波数据 s_{IF} 乘以一个以成像平面高度 z 为变量的参考相位函数, 该操作的目的是完全去除位于 $(0, 0, z)$ 的点目标的历史相位, 即将 3 维频谱投影到高度 z 的 $K_x K_y$ 平面上, 参考相位函数的表达式为

$$H_z(z) = \exp \left\{ j2K \left[\sqrt{R^2 + (H - z)^2} - \sqrt{R^2 + H^2} \right] \right\} \quad (29)$$

然后更新参数 α 和 R_0 :

$$\alpha = \arctan \left(\frac{R}{H - z} \right), \quad R_0 = \sqrt{R^2 + (H - z)^2} \quad (30)$$

随后操作过程如同式(10)–式(28)。若对等间隔高度 $z = i\Delta z, (i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots)$ 成像, 其中 Δz 为成像高度间隔, 可最终获得 CSAR 的 3 维图像。

综上, CSAR 极坐标格式算法的流程如图 4 所示。

4 仿真实验

为验证本文算法的有效性, 利用表 1 所示的系统参数进行仿真, 成像几何如图 1 所示。

仿真实验 1 的目的是为了检验本算法的 2 维成像质量及其有效成像面积, 因此设置用于仿真的点目标都位于 $z = 0$ 平面, 且散射系数均设为 1。在 xy

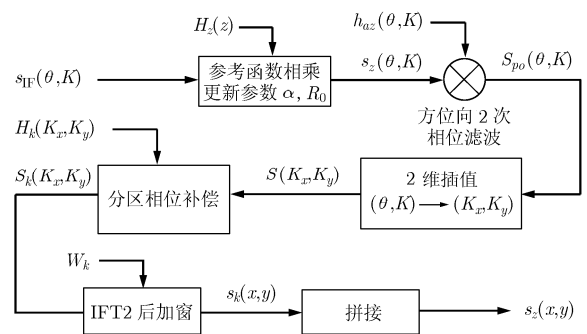


图 4 CSAR 极坐标格式算法流程图

表1 仿真系统参数

发射脉冲时宽 T_p	5.0 μs	平台高度 H	2 km
脉冲带宽	0.25 GHz	平台运动轨迹半径 R	0.8 km
雷达工作频率 f_c	0.5 GHz	平台速度	100 m/s
脉冲重复频率 PRF	50 Hz	场景区尺寸 $R_s^2\pi$	$200^2\pi$

平面上,点目标均匀分布于间隔为 10 m 的矩形网格上,场景区半径为 200 m。

图5为2维成像结果,图像动态显示范围为[-300] dB。为验证两步相位补偿方法对成像分别产生的影

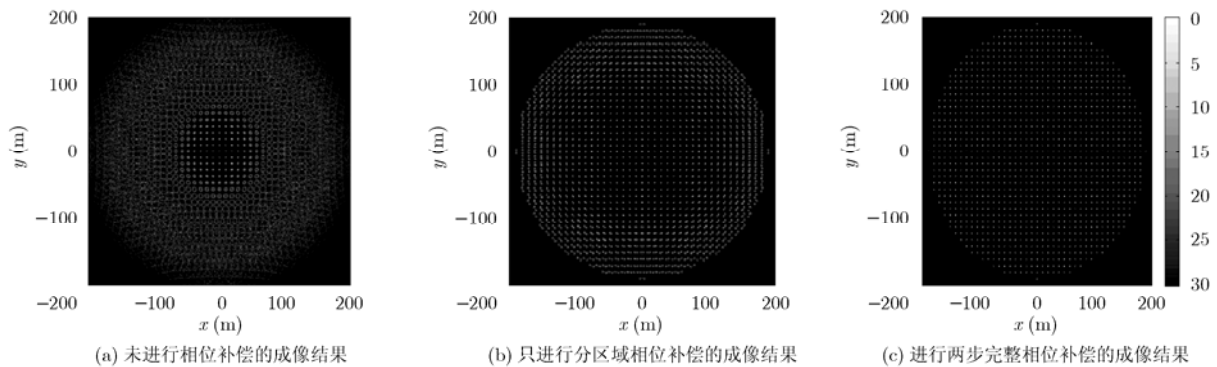


图5 2维成像结果比较

为检验本文方法的2维成像质量,对位于图像边缘的目标(200,0,0)进行指标测试,并与BP算法的成像结果进行比较。通过图6和表2,可以看到本文方法的2维成像质量与BP非常接近,其中在表2中,PSLR代表峰值旁瓣比,ISLR代表积分旁瓣比,IRW代表3 dB分辨率。

仿真实验2的目的是为了检验本文方法的3维成像质量,考虑到数据量,设置场景区半径为40 m,高度为40 m,其他系统参数同表1。本仿真中,共设置了67个点目标,散射系数均设为1,其位置分

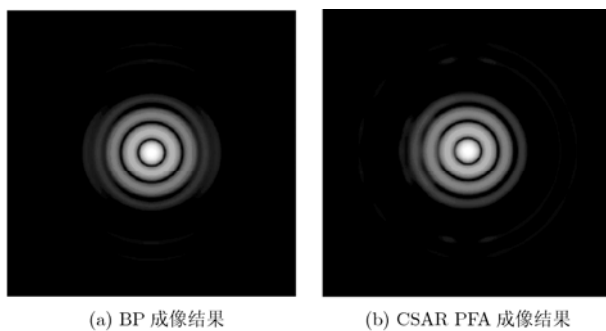


图6 边缘点目标(200,0,0)成像放大图

响,仿真对成像过程中不进行任何相位补偿操作(图5(a))、只进行第2步即分区相位补偿操作(图5(b)),以及进行两步完整的相位补偿操作(图5(c))的成像结果进行比较。如图5(a)所示,离场景中心越远的目标,聚焦性能越差,有效成像区域半径仅为约16 m。如图5(b)所示,图像聚焦性能较图5(a)明显改善,有效成像区域半径约扩大至50 m,但由于未进行第1步相位补偿,场景外圈目标散焦较为严重。如图5(c)所示,经两步完整的相位补偿后,即使是场景边缘处的目标也具有较好的聚焦性能,证明了相位补偿的必要性,为获得较大的有效成像面积,两步相位补偿缺一不可。

表2 边缘目标成像性能指标测试结果

	x方向			y方向		
	PSLR (dB)	ISLR (dB)	IRW (m)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	IRW (m)
BP	-9.2878	-6.6177	0.2878	-9.2209	-6.7004	0.2857
CSAR PFA	-9.1816	-6.4317	0.2848	-8.9768	-6.3816	0.2810

布如图7所示。图8为3维成像的3 dB轮廓图,可以看到所有目标都得到了很好的重建。

对边缘点目标(40,0,0)进行高度向的成像性能指标测试,并与BP算法进行比较,通过图9和表3,可以看到本文方法在高度方向的成像质量与BP结果也非常接近。

仿真实验1和仿真实验2验证了本文算法的有效性。

5 结束语

本文提出了CSAR极坐标格式算法。根据CSAR点目标波数域3维频谱为3维曲面的特点,算法采用逐高度平面成像的方法,既避免了高度向

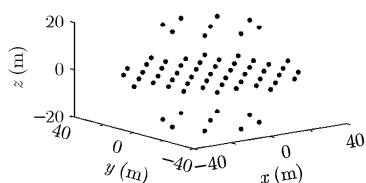


图 7 仿真实验 2 的点目标分布图

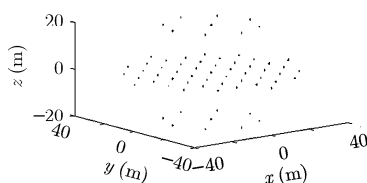


图 8 3 维成像结果

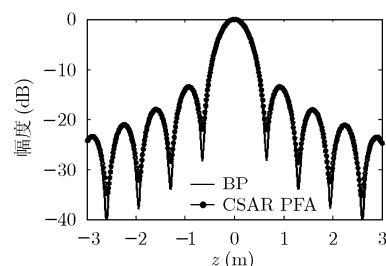


图 9 高度向点扩展函数比较

表 3 高度向成像性能指标测试结果

	PSLR (dB)	ISLR (dB)	IRW (m)
BP	-13.2772	-10.2163	0.5867
CSAR PFA	-13.2920	-10.1146	0.5867

的插值又保证了精确性。算法通过两步相位补偿操作校正了越距离单元徙动的 2 次项, 为获得较大的有效成像面积, 两步相位补偿操作缺一不可。仿真结果证明在一定成像范围内, 本文方法的成像质量与 BP 算法非常接近, 本文方法的有效性得到了验证。在后续工作中, 将通过实测数据对本文方法进行验证。

参 考 文 献

- [1] Cumming I G, and Wong F H 著. 洪文, 胡东辉译. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 第 4 章.
- [2] Knaell K. Three-dimensional SAR from practical apertures[C]. SPIE, 1995, 2562: 31-41.
- [3] Soumekh M. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8): 1252-1265.
- [4] Ishimaru A, Chan T, and Kuga Y. An imaging technique using confocal synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1524-1530.
- [5] Ferrara M, Jackson J A, and Austin C. Enhancement of multi-pass 3D circular SAR images using sparse reconstruction techniques[C]. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI, Proceedings of SPIE, 2009: 7337-02.
- [6] Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing[M]. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1999: 486-539.
- [7] Hurbert M J and Cantalloube E C. Airborne SAR imaging along a circular trajectory[C]. EUSAR, Dresden, Germany, May 16-18, 2006.
- [8] Hubert M J, Cantalloube E C, and Koeniguer H O. High resolution SAR imaging along circular trajectories[C]. IGRASS, Barcelona, Spain, July 23-27, 2007: 2259-2262.
- [9] Pinheiro M, Prats P, and Scheiber R, *et al.* Tomographic 3D reconstruction from airborne circular SAR[C]. IGARSS, Cape Town, South Africa, July 12-17, 2009: III 21-24.
- [10] Burki J and Barnes C F. Slant Plane CSAR processing using householder transform[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(10): 1900-1907.
- [11] 孙进平, 白霞, 毛士艺. 聚束模式双基地 SAR 极坐标格式成像算法研究[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2324-2327. Sun Jin-ping, Bai Xia, and Mao Shi-yi. The PFA imaging algorithm for spotlight mode bistatic SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 2324-2327.
- [12] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 177-180.
- [13] Fortuny J. Efficient algorithms for three-dimensional near-field synthetic aperture radar imaging[D]. [Ph.D. dissertation], University of Karlsruhe, 2001.

林 赞: 女, 1983 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达 3 维成像技术.

谭维贤: 男, 1981 年生, 助理研究员, 研究方向为合成孔径雷达成像算法.

洪 文: 女, 1968 年生, 研究员, 研究领域为雷达信号处理理论、合成孔径雷达成像算法、微波遥感图像理解及其应用等.