

基于最小能量准则的参数估计圆周 SAR 三维成像方法

王保平^{1,2}, 马健钧², 张 研², 方 阳²

- (1. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 针对圆周合成孔径雷达成像模式下应用参数化估计的三维成像算法效率低、精度差的问题, 提出一种基于最小能量准则的参数估计圆周 SAR 三维成像算法。该算法首先对成像场景进行粗略网格划分, 利用参数估计的方法得到目标的粗略位置, 其次利用最小能量准则和精细化网格的方法得到目标精确三维位置和散射强度系数, 最后通过 CLEAN 技术消除已估计点带来的影响, 实现场景的三维成像。仿真实验结果表明: 所提成像方法能有效对圆周观测下目标进行三维成像, 同时与传统算法相比, 解决了传统算法效率低、对目标估计不准确的问题, 验证了所提算法的有效性。

关键词: 圆周 SAR; 参数估计; 最小能量准则; 三维成像

中图分类号: TN957 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0726001

Parameter estimation of circular SAR 3-D imaging method based on the minimum energy criterion

Wang Baoping^{1,2}, Ma Jianjun², Zhang Yan², Fang Yang²

- (1. National Key Laboratory of Science and Technique on UAV, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China;
2. School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to solve the problem of low efficiency and poor accuracy of the 3-D imaging algorithm using parameter estimation in the imaging mode of circular synthetic aperture radar, a 3-D imaging algorithm of parameter estimation circular SAR based on the minimum energy criterion was proposed. Firstly, the imaging scene was divided into a rough mesh with the algorithm, the method of parameter estimation was used to get the rough position of the target. Secondly, the minimum energy criterion and the fine grid method were used to get the accurate 3-D position and scattering intensity coefficient of the target. Finally, the CLEAN technology was used to eliminate the impact of estimated points and realize 3-D imaging of the scene. The simulation results show that the proposed imaging method can effectively carry out 3-D imaging of the objects under circular observation. Meanwhile, compared with the traditional algorithm, it solves the problems of low efficiency and inaccurate target estimation of the traditional algorithm, and verifies the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: circular SAR; parameter estimation; minimum energy criterion; 3-D imaging

收稿日期: 2019-02-06; 修订日期: 2019-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61472324)

作者简介: 王保平(1964-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事图像处理、雷达成像等方面的研究。Email: wbp1964@sina.com

0 引言

随着合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 应用技术的发展, 在民用和军事领域的新要求不断地被提出, 传统 SAR 系统得到的二维成像信息已经不能满足需求。与常规 SAR 成像模式相比, 圆周 SAR 具有以下优势: (1) 具有全方位观测能力, 可获取目标在各个方向的散射特性; (2) 具有较高的方位分辨率, 成像精度高; (3) 具有目标三维成像能力, 解决了传统 SAR 系统只能获得二维像的限制。因此圆周 SAR 一经提出便得到了广泛关注^[1-3]。由于圆周 SAR 系统特殊的运动方式, 传统 SAR 成像算法如 RD、CS、RMA 等不适用于圆周 SAR 成像。目前国内圆周 SAR 成像算法中比较经典的算法有时域相关法、后向投影算法、波束域算法等。时域相关法和后向投影算法是经典传统 SAR 成像算法, 算法原理简单, 亦可满足圆周 SAR 特殊轨迹成像, 但这两种算法需要对场景中每一个点做卷积运算, 计算量巨大, 不适用工程中实时成像。波束域算法及其改进算法是针对圆周 SAR 模式提出的成像算法, 该方法未采用平面波近似的方式, 因而是一种高精度的成像方法, 但该方法推导过程复杂繁琐, 算法中对于 Hankel 函数的计算大大增加了算法的复杂度, 一般作为其他算法的验证算法^[4-8]。

参考文献[9]利用参数估计的思想提出了一种适用于圆周 SAR 的三维成像方法, 该方法利用参数估计和 CLEAN 技术相结合的方法提取出散射点的位置及散射强度信息, 从而完成三维成像。由于该算法在参数估计时并未对估计的三维位置作判别, 该算法在散射点间隔较近, 散射点间散射强度相差较大时, 提取出的散射点位置误差较大, 造成散射系数求解不准确, 最终导致目标的三维成像结果出现明显错误, 因此文中提出基于最小能量准则的参数估计三维成像算法。

基于最小能量准则的参数估计三维成像算法首先对成像场景进行粗略划分, 利用参数估计的方法找到散射点大致位置, 并在该点附近进行精细化三维网格划分, 利用最小能量准则找到散射点最精确位置, 估计出散射点的准确散射系数, 从而解决了原算法的在散射点相距较近时, 成像结果不准确的缺

陷, 同时由于采用了先“粗略后精细”的策略大幅提高了成像效率, 最后通过仿真实验验证了该算法的有效性。

1 圆周 SAR 回波数据模型

圆周 SAR 系统几何示意图如图 1 所示。雷达在

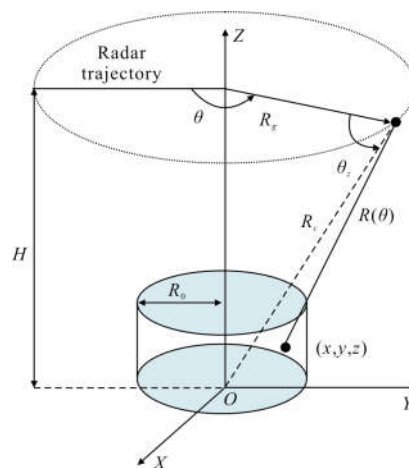


图 1 圆周 SAR 系统几何示意图

Fig.1 Geometric diagram of circular SAR system

高度为 H 、半径为 R_g 的圆周轨道上进行匀速运动, θ 为雷达方位积累角, 其范围为 $\theta \in (0, 2\pi]$ 。雷达围绕目标进行圆周运动, 天线始终指向以场景 O 为中心, 半径为 R_0 的区域, 雷达与场景中心距离为 R_c , 雷达入射角 $\theta_s = \arctan(H/R_g)$ 。雷达向目标发射线性调频信号 $p(t)$, 其表达式为:

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\{j(2\pi f_c t + \pi k t^2)\} \quad (1)$$

式中: T 为脉冲宽度; f_c 为发射信号载频; k , 为发射信号调频率; 矩形窗函数 $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ 满足:

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases} \quad (2)$$

设场景中某一散射点坐标为 (x, y, z) , 其反射函数为 $f(x, y, z)$, 当雷达转动到方位角 θ 时目标回波信号为 $s(t, \theta)$, $s(t, \theta)$ 可表示为:

$$s(t, \theta) = \iiint f(x, y, z) p\left(t - \frac{2R(\theta)}{c}\right) dx dy dz \quad (3)$$

式中: c 代表光速; $R(\theta)$ 表示为随雷达转动 θ 角度下雷达与目标间的瞬时距离^[10-12]:

$$R(\theta) = \sqrt{(x - R_g \cos \theta)^2 + (y - R_g \sin \theta)^2 + (z - H)^2} \quad (4)$$

在远场假设下, 将雷达发射电磁波到场景中心的时间补偿掉, 即相当于对公式(3)中回波信号 $s(t, \theta)$ 在快时间 t 上进行了平移, 此时 $s(t, \theta)$ 可表达为:

$$s(t, \theta) = \iiint f(x, y, z) p\left(t - \frac{2\Delta R}{c}\right) dx dy dz \quad (5)$$

其中

$$\Delta R = \|R(\theta) - R_c\|_2 \quad (6)$$

将公式(4)、(6)代入公式(5)中得到:

$$s(t, \theta) = \iiint f(x, y, z) \exp\{j \cdot (2\pi f_c t + \pi k_r \left(t - \frac{2\Delta R}{c}\right)^2 - j \frac{4\pi f_c \Delta R}{c})\} dx dy dz \quad (7)$$

通过去载频技术将公式(7)中的载频消除掉得到:

$$s(t, \theta) = \iiint f(x, y, z) \exp\left\{j \left(\pi k_r \left(t - \frac{2\Delta R}{c}\right)^2 - j \frac{4\pi f_c \Delta R}{c}\right)\right\} dx dy dz \quad (8)$$

对公式(8)中快时间 t 做一维傅里叶变换, 得到快时间频域信号:

$$s(f_r, \theta) = \exp\left\{j \frac{4\pi f_c \Delta R}{c}\right\} \cdot \iiint f(x, y, z) \exp\left\{j \pi \frac{f_r^2}{k_r} - j \frac{4\pi f_c \Delta R}{c}\right\} dx dy dz \quad (9)$$

采用匹配滤波技术对公式(9)进行距离压缩得到:

$$s(f_r, \theta) = \iiint f(x, y, z) \exp\left[-j \frac{4\pi(f_c + f_r) \Delta R}{c}\right] dx dy dz \quad (10)$$

令 $f = f_c + f_r, k = 2\pi f/c$, 此时 f 表示为瞬时频率, k 表示为波数大小。公式(10)可进一步写为:

$$s(f, \theta) = \iiint f(x, y, z) \exp[-j2k\Delta R] dx dy dz \quad (11)$$

在远场条件下由于目标与雷达之间的距离远远大于目标的尺寸, 即满足 $x \ll R_c, y \ll R_c, z \ll R_c$, 散射点与雷达的距离可进一步近似为:

$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{(x - R_c \cos \theta)^2 + (y - R_c \sin \theta)^2 + (z - H)^2} - R_c = \\ R_c \sqrt{1 - 2 \frac{R_c \cos \theta}{R_c} x - 2 \frac{R_c \sin \theta}{R_c} y - 2 \frac{H}{R_c} z + \frac{x^2 + y^2 + z^2}{R_c^2}} - R_c &\approx \\ -\frac{R_c}{R_c} x \cos \theta - \frac{R_c}{R_c} y \sin \theta - \frac{H}{R_c} z = \\ -x \cos \theta_c - y \sin \theta_c - z \sin \theta_c \end{aligned} \quad (12)$$

令 $x' = x \cos \theta_c, y' = y \sin \theta_c, z' = z \sin \theta_c$, 那么 ΔR 可以

重新写为:

$$\Delta R = -x' \cos \theta - y' \sin \theta - z' \quad (13)$$

将公式(13)代入公式(11)中得到圆周 SAR 单散射点回波模型:

$$s(\omega, \theta) = \iiint f(x, y, z) \cdot \exp\{-j2k(-x' \cos \theta - y' \sin \theta - z')\} \cdot dx dy dz \quad (14)$$

对公式(14)进行积分运算, 可得散射点预处理后的回波为:

$$s(\omega, \theta) = \sigma \cdot W(\omega, \theta) \cdot \exp[-j2k\Delta R] \quad (15)$$

式中: $W(\omega, \theta) = \text{rect}\left(\frac{\omega - \omega_0}{2\pi B}\right) \text{rect}\left(\frac{\theta - (\theta_{\max} + \theta_{\min})/2}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}\right)$ 表示两个窗函数, $\theta_{\max}, \theta_{\min}$ 分别为最大观测角和最小观测角, $\omega = 2\pi f, \omega_0 = 2\pi f_c$ 分别表示瞬时频率和载频对应的角频率。将公式(13)代入公式(15)中, 得到单个点目标预处理后的回波信号为:

$$s(\omega, \theta) = \sigma \cdot W(\omega, \theta) \cdot \exp[j2k(x' \cos \theta + y' \sin \theta + z')] \quad (16)$$

对于整个成像场景可以看成由 N 个散射点组成, 其相应的位置坐标和散射系数分别为 (x_n, y_n, z_n) 和 σ_n , 则场景回波可表示为:

$$s(\omega, \theta) = \sum_{n=1}^N \sigma_n W(\omega, \theta) \cdot \exp[j2k(x_n' \cos \theta + y_n' \sin \theta + z_n')] \quad (17)$$

2 基于最小能量准则的参数估计成像算法

2.1 三维位置粗估计

对 $s(\omega, \theta)$ 中 ω 域作傅里叶逆变换, 得到距离-方位角域信号 $s(r, \theta)$, 其表达式为:

$$s(r, \theta) = \sum_{n=1}^N \sigma_n \cdot B \cdot \text{rect}\left(\frac{\theta - (\theta_{\max} + \theta_{\min})/2}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}\right) \cdot \text{sinc}\left[\frac{2\pi B}{c}(r + x_n' \cos \theta + y_n' \sin \theta + z_n')\right] \cdot \exp[j2k_0(r + x_n' \cos \theta + y_n' \sin \theta + z_n')] \quad (18)$$

式中: k_0 表示载波频率, $k_0 = 2\pi f_c/c$; B 表示发射信号带宽。由公式(17)分析可得, 每个散射点在距离向上的点目标响应为 sinc 函数的形状, 且该 sinc 函数最大值的位置随着方位角的变化, 其轨迹可近似为正弦曲线的形式, 且满足:

$$r = -x_n' \cos \theta - y_n' \sin \theta - z_n' \quad (19)$$

对 $s(r, \theta)$ 取模, 记为 $s_1(r, \theta)$, 对成像场景进行粗略的三维网格划分, 对 $s_1(r, \theta)$ 中每条正弦曲线沿着角度进行叠加运算, 其表达式为:

$$s_2(x', y', z') = \sum_{\theta} s_1(r, \theta) = \sum_{\theta} s_1(-x' \cos \theta - y' \sin \theta - z', \theta) \quad (20)$$

经过叠加运算后, 每个网格点都得到了一定的积累值, 但在散射点位置对应的网格处积累值较大, 故通过检测网格中幅值最大点就可得到散射点位置信息, 由于场景是粗略划分, 此时得到的散射点位置为大致位置^[10-12]。

2.2 精细化估计

上述估计过程得到了散射点粗略位置, 此时以该点位置为起点位置, 构造更加精细化的三维网格, 通过设置网格大小, 可以得到网格各点的三维位置, 根据各点位置 (x', y', z') 构造出三维网格上每个位置的点散布函数:

$$H_p(r, \theta) = B \cdot \text{rect} \left(\frac{\theta - (\theta_{\max} + \theta_{\min})/2}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \right) \cdot \text{sinc} \left[\frac{2\pi B}{c} (r + x' \cos \theta + y' \sin \theta + z') \right] \cdot \exp[j2k_0(r + x' \cos \theta + y' \sin \theta + z')] \quad (21)$$

假设精细化网格上某一点的散射系数为 σ_i , 那么可使用最小范数准则对网格各个点散射系数进行估计, 估计的表达式为:

$$\sigma_i = \underset{\sigma_i}{\text{argmin}} \|s(r, \theta) - \sigma_i H_p(r, \theta)\| = \underset{\sigma_i}{\text{argmin}} \sum_{r, \theta} |s(r, \theta) - \sigma_i H_p(r, \theta)|^2 \quad (22)$$

式中: $\text{argmin} \|\cdot\|$ 表示当 $\|s(r, \theta) - \sigma_i H_p(r, \theta)\|$ 取最小值时, 变量 σ_i 的取值。为了求解公式(22), 对 σ 求一阶导数并计算导数为零的点, 则得到网格各个点散射系数的估计值为:

$$\sigma_i = \frac{\sum_{r, \theta} s(r, \theta) H_p^*(r, \theta)}{\sum_{r, \theta} |H_p(r, \theta)|^2} \quad (23)$$

式中: $H^*(r, \theta)$ 为点散布函数 $H(r, \theta)$ 的复共轭。此时三维网格中各点位置信息和散射强度信息都已得到, 计算距离-方位角域信号与每个位置上散射强度与点散布函数乘积的差值, 寻找三维网格中差值最小位置, 此时信号中的能量最小, 当满足如下表达式时:

$$\min_{\sigma_i, r} I(\sigma_i) = \min_{\sigma_i, r} \|s(r, \theta) - \sigma_i H(r, \theta)\| \quad (24)$$

记录此时的三维位置 (x, y, z) 和散射强度系数 σ 。

经过最小能量准则的精细化估计过程可以得到散射点的准确的三维位置信息和散射系数信息, 此

时就完成了对单一点散射点的信息估计。而实际场景中目标是由若干散射点组成, 此时需要利用 CLEAN 技术从脉冲压缩后的回波数据中消除估计出的散射点对回波数据的影响, 从而进行下个散射点的估计, 令:

$$s(r, \theta) = s(r, \theta) - \sigma H(x, y, z) \quad (25)$$

使用消除后的信号作为新的回波数据, 重复上述粗估计和精细化估计过程, 直至完成所有散射点的估计^[13-15], 此时利用得到的目标信息完成目标的三维成像。

2.3 算法流程

针对上述分析, 为了解决参数化估计方法运算效率低、精度差的问题, 文中提出一种基于最小能量准则的参数估计三维成像算法, 其主要步骤如下:

(1) 对成像场景进行粗网格化划分, 经过参数化估计提取出网格中幅值最大值点, 记录该点位置, 如图 2 所示, 红色点为粗略划分网格后找到的大致位置。

(2) 以步骤(1)中找出的大致位置为起始点, 在其三维空间精细化划分三维网格。根据最小能量准则和精细化估计得到准确估计的散射点的三维位置和散射强度系数, 如图 2 所示, 黑点位置即找到的散射点精确位置。

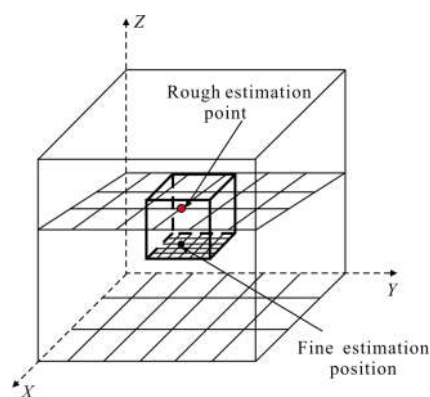


图 2 “先粗略后精细”策略示意图

Fig.2 A schematic diagram of "rough first, fine second" strategy

(3) 使用 CLEAN 技术消除已准确估计出的散射点带来的影响。

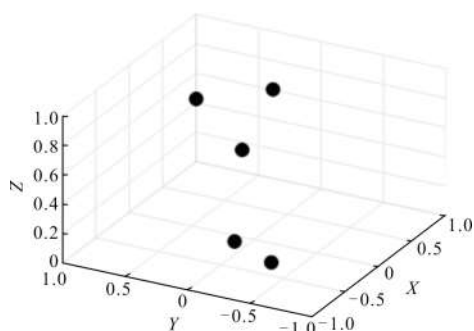
(4) 将更新后的 $s(r, \theta)$ 作为输入值重复步骤(1)。此时每进行一次迭代过程, 信号剩余能量是最小的, 即随着迭代次数的增加, 信号剩余能量是单递递减

的,当找到所有散射点时终止迭代,也可设置相应的能量门限值,当信号能量小于该值终止迭代。

3 实验仿真及性能分析

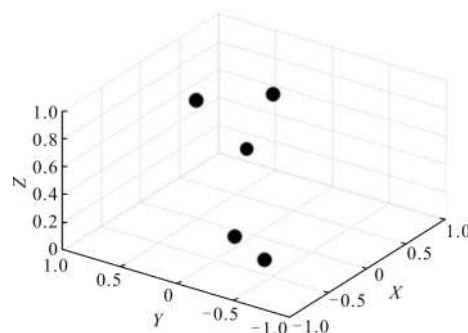
实验一:远距点实验仿真

雷达发射信号载频为 9.6 GHz, 带宽为 1.2 GHz, 频率采样间隔为 6 M, 采样点数为 201, 角度采样间隔为 1°, 采样点数为 360, 假设雷达探测场景中分布有距离相距较远的五个单位散射强度的散射点, 采用原有参数化估计方法将成像场景划分为 101×101×101 的网格, 网格间隔为 0.01 m, 为保证两次实验成像精度相同, 文中方法设置粗估计网格为 11×11×11, 网格间隔为 0.1 m, 精细化网格为 11×11×11, 网格间隔为 0.01 m。图 3(a)为仿真目标点实际位置。图 3(b)为参数化估计三维成像结果。图 3(c)为文中所



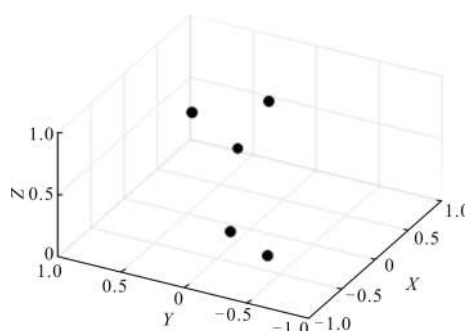
(a) 目标散射点实际位置

(a) Actual position of the scattering points



(b) 参数化估计三维成像结果

(b) 3-D imaging results of parametric estimation



(c) 文中方法三维成像结果

(c) Proposed approach 3-D imaging results

图 3 散射点仿真成像结果

Fig.3 Scattering points simulation imaging results

提算法三维成像结果。表 1 是各个散射点实际位置及散射强度系数数据与两种算法提取的散射点位

表 1 远距条件下两种不同算法提取出的散射点信息

Tab.1 Scattering points information extracted by two different algorithms under far range condition

| No. | Actual position of the scattering points | Parametric estimation method | Proposed method in the paper |
|-----|--|------------------------------|------------------------------|
| 1 | (0.2, 0.2, 0.5, 1) | (0.2, 0.2, 0.5, 0.934 7) | (0.2, 0.2, 0.5, 0.934 7) |
| 2 | (-0.3, 0.3, 1, 1) | (0.2, 0.2, 0.2, 1.017 3) | (0.2, 0.2, 0.2, 1.017 3) |
| 3 | (-0.3, -0.3, 0, 1) | (-0.3, -0.3, 0, 0.999 7) | (-0.3, -0.3, 0, 0.999 7) |
| 4 | (-0.1, 0.1, 0, 1) | (-0.1, 0.1, 0, 0.997 1) | (-0.1, 0.1, 0, 0.997 1) |
| 5 | (0.1, -0.1, 1, 1) | (0.1, -0.1, 1, 0.998 0) | (0.1, -0.1, 1, 0.998 0) |

置及散射强度系数数据,其中数据前三项表示散射点的三维位置信息,第四项表示散射点散射强度系数。从实验结果可以看出当散射点距离相距较远时参数化估计方法和文中所提算法都可以准确地估计散射点的位置及散射系数。

实验二:近距点实验仿真

当散射点距离较近且散射系数相差较大时,重新设置五个散射点,散射点位置和散射强度系数如

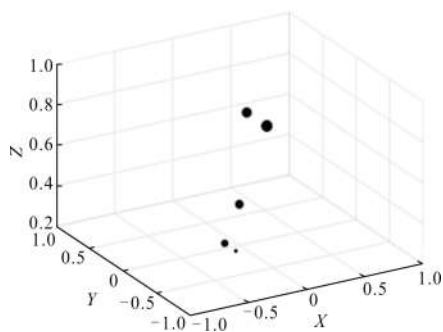
表 2 所示,其余参数设置与实验一中的仿真参数设置相同。图 4(a)为仿真目标点实际位置,图 4(b)为参数化估计三维成像结果,图 4(c)为文中所提算法三维成像结果。两种算法估计出的散射点的位置信息及散射系数信息如表 2 所示。从表 2 和图 4 可以看出:当散射点距离较近,散射系数差别较大时,参数化估计算法提取出的散射点信息有较大的误差,严重影响了成像效果,而文中所提算法仍能够准确重

表 2 近距条件下两种不同算法提取出的散射点信息

Tab.2 Scattering points information extracted by two different algorithms under near range condition

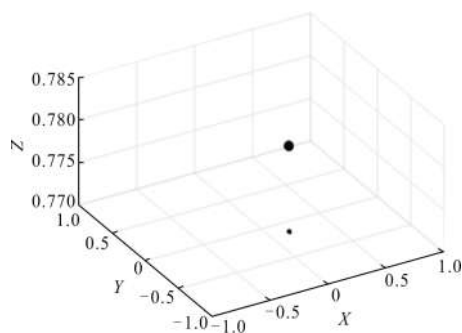
| No. | Actual position of the scattering points | Parametric estimation method | Proposed method in the paper |
|-----|--|------------------------------|------------------------------|
| 1 | (0.15, -0.15, 0.8, 0.8) | (0.16, -0.16, 0.77, 0.192) | (0.15, -0.15, 0.8, 0.812) |
| 2 | (0.15, 0.15, 0.8, 0.7) | (0.16, -0.16, 0.78, 0.386) | (0.15, -0.15, 0.8, 0.719) |
| 3 | (0, 0, 0.4, 0.6) | (0.16, -0.14, 0.77, 0.182) | (0, 0, 0.4, 0.602) |
| 4 | (-0.08, 0.08, 0.2, 0.5) | (0.16, -0.14, 0.77, 0.350) | (-0.08, 0.08, 0.2, 0.507) |
| 5 | (-0.08, -0.08, 0.2, 0.3) | (0.16, -0.14, 0.78, 0.696) | (-0.08, -0.08, 0.2, 0.300) |

构出场景的三维图像。



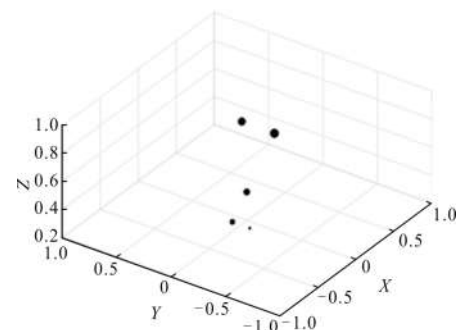
(a) 目标散射点实际位置

(a) Actual position of the scattering points



(b) 参数化估计三维成像结果

(b) 3-D imaging results of parametric estimation



(c) 文中方法三维成像结果

(c) Proposed approach 3-D imaging results

图 4 散射点仿真成像结果

Fig.4 Scattering points simulation imaging results

采用成像结果的几何均方误差和运算时间来衡量算法的成像质量和运算效率。几何均方误差可以反映成像结果的位置重构精度，几何均方误差大于一个成像网格点间隔时，表明图像存在位置重构误差，其计算公式为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_n - \hat{H}_n|^2} \quad (28)$$

式中： H_n 表示第 n 个目标的真实位置； \hat{H}_n 表示第 n 个目标的成像位置。

运算时间上文中算法与参数化估计算法主要不同点体现在步骤(1)和步骤(2)。假设成像场景为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，成像网格间隔为 0.01 m ，场景中有 N 个散射点，那么参数化估计算法在步骤(1)中，需进行 $N \times 101 \times 101 \times 101$ 次乘法运算。使用文中提出的算法假设粗估计成像网格间隔为 0.1 m ，那么步骤(1)中需要计算 $N \times 11 \times 11 \times 11$ 次乘法运算，为保证两次算法对比成像精度一致，在步骤(2)中精细化估计中网格间隔为 0.01 m ，此时步骤(2)进行 $N \times 11 \times 11 \times 11$ 次运算，故文中采用方法共需 $2 \times N \times 11 \times 11 \times 11$ 次运算，与原算法相比，计算量大大降低，提高了算法效率。由公式(28)计算得到的几何均方误差和运算时间结果如表 3 所示。

表 3 成像结果均方误差和成像时间

Tab.3 Mean square error and operation time of imaging results

| Parameters | Standard parametric estimation method | Proposed method in the paper |
|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Geometric mean square error/m | 0.449 3 | 0.001 |
| Operation time/s | 886.47 | 103.83 |

从表 3 可以看出，当场景中散射点相距较近，散射强度相差较大时，参数化估计算法均方误差已远

远大于一个像素间隔,导致成像结果出现较大误差,而且运算时间较长。文中所提算法实际运算时间远远小于原有算法,且能实现对目标的准确重构。

4 结 论

文中针对圆周 SAR 模式提出了一种基于最小能量准则的参数估计三维成像方法,该方法首先粗略划分成像场景,使用参数估计的方法估计出散射点粗略位置,其次在粗略点的基础上精细化成像网格并结合最小能量准则方法得到散射点精确位置,最后通过 CLEAN 技术提取出所有散射点信息。该三维成像方法有效解决了原有参数化成像算法在散射点位置相距较近时,成像结果不准确的问题,并且大大提高了运算速度。实验仿真结果证明了文中算法的有效性和准确性。

参考文献:

- [1] Hong Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 124-135. (in Chinese)
洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 124-135.
- [2] Zhang Lamei, Chen Zexi, Zou Bin. Fine classification of polarimetric SAR images based on 3D convolutional neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0703001. (in Chinese)
- [3] Dong Lei, Lu Zhenwu, Liu Xinyue, et al. Research of the effect of echo outside field of view on fringes scanning imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(3): 689-697. (in Chinese)
- [4] Wang Qi, Xing Mengdao, Lu Guangyue, et al. SRMF - CLEAN imaging algorithm for space debris [J]. *IEEE Transaction on Antennas & Propagation*, 2007, 55(12): 3524-3533.
- [5] Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms[M]. New York: Wiley, 1999.
- [6] Zhao Y, Lin Y, Hong W, et al. Adaptive imaging of anisotropic target based on circular-SAR [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(16): 1406-1408.
- [7] Bu Yuming, Du Xiaoping, Zeng Zhaoyang, et al. Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11 (5): 711-727. (in Chinese)
- [8] Zhang B, Pi Y, Min R. A CGRT -CLEAN Method for Circular SAR Three Dimensional Imaging [M]//Signal Processing, and Systems. New York: Springer, 2012: 41-52.
- [9] Wang Baoping, Guo Junjie, Sun Chao, et al. ISAR imaging algorithm based on SRMF and sequence CLEAN[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (12): 3410-3416. (in Chinese)
王保平, 郭俊杰, 孙超, 等. 基于 SRMF 和序列 CLEAN 的空间碎片 ISAR 成像算法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3410-3416.
- [10] Wang Hao, Zhang Ye, Shen Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448. (in Chinese)
- [11] Zhao Ning, Lu Jianguo, Ge Jialong, et al. Research of P band circular polarization SAR [C]//2016 CIE International Conference on Radar (RADAR). IEEE, 2017.
- [12] Dupuis X, Martineau P. Very high resolution circular SAR imaging at X band [C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2014: 930-933.
- [13] Jia G, Buchroithner M F, Chang W, et al. Fourier-based 2-D imaging algorithm for circular synthetic aperture radar: analysis and application[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(1): 475-489.
- [14] Fan Zhiguo, Song Qiang, Qai Qingqing, et al. Underwater target polarization recovery method based on global parameter estimation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1621-1632.
- [15] Chen L, An D, Huang X. A back projection-based imaging for circular synthetic aperture radar [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, 10(8): 3547-3555.