

文章编号: 1005-5630(2020)06-0009-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.06.002

基于近程柱面 SAR 成像的改进距离徙动算法

夏克文, 李 萍

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了提高近程柱面合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像的距离徙动算法(range migration algorithm, RMA)成像效率, 增加 RMA 在实际工程中的应用价值, 提出了一种 SAR 成像的改进 RMA。该算法采用驻点相位法近似求解获得了波数域下的相位补偿项, 避免了传统近程柱面 SAR 成像的 RMA 中需对补偿项进行角度维傅里叶变换的步骤, 降低了计算量, 提高了成像效率。通过峰值旁瓣比(peak side-lobe ratio, PSLR)、峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)和结构相似性(structural similarity, SSIM)对改进 RMA 的成像质量进行了客观评价。仿真和实验结果表明, 该算法提高了近程柱面 SAR 成像的 RMA 成像效率。

关键词: 柱面成像; 距离徙动算法(RMA); 合成孔径雷达成像; 近程成像; 三维成像
中图分类号: TN 957.52 **文献标志码:** A

Improved range migration algorithm based on short-range cylindrical SAR imaging

XIA Kewen, LI Ping

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the range migration algorithm (RMA) imaging efficiency of short-range cylindrical synthetic aperture radar (SAR) imaging and increase the application value of RMA in practical engineering, an improved RMA for SAR imaging is proposed. In this algorithm, the stationary phase method is used to obtain the phase compensation term in the wavenumber domain, which avoids the steps of angle dimension Fourier transform in the RMA of traditional short-range cylindrical SAR imaging, reduces the calculation amount and improves the imaging efficiency. The image quality of RMA was evaluated by peak-side lobe ratio (PSLR), peak signal to noise ratio (PSNR) and structural similarity (SSIM). Simulation and experimental results show that the algorithm improves the RMA imaging efficiency of short-range cylindrical SAR imaging.

收稿日期: 2020-05-08

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1200805)

作者简介: 夏克文(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹/毫米波成像系统成像算法。

E-mail: 937384383@qq.com

通信作者: 李 萍(1979—), 女, 助理研究员, 研究方向为太赫兹成像、天线及雷达系统。

E-mail: liping@usst.edu.cn

Keywords: cylindrical imaging; range migration algorithm(RMA); synthetic aperture radar imaging; short range imaging; 3D imaging

引 言

距离徙动算法 (range migration algorithm, RMA) 是毫米波成像应用中常用的算法之一, 相比于反向投影算法, RMA 的运算量少, 相比于距离压缩、线性调频算法, RMA 的近似更少, 因而能获得更加精确的成像数据以用于后续的算法处理。RMA 不受场景大小的限制, 理论上是最适合合成孔径成像的算法^[1], 因而得到了广泛的应用^[2-5]。在近程成像系统中常用的成像方式有平面合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 成像和柱面 SAR 成像。相比于平面 SAR 成像, 柱面 SAR 成像具有更大的观测角度, 能够获得更多的观测目标的细节信息^[6-7]。因此, 近程柱面 SAR 成像的 RMA 适用于很多的应用场景, 例如机场安检、地铁履带检测等。

在近程柱面 SAR 成像研制中, 美国西北太平洋国家实验室的 Soumekh 首次提出了近距离圆柱扫描的成像算法^[8-9]。在过去的 20 多年中, 近程柱面 SAR 成像逐步发展成熟, 并实现了商业化。目前, 在大多数的近程柱面成像及系统研究中都沿用了 Sheen 提出的成像算法^[10-12]。任百玲等研究人员复现了传统近程柱面 SAR 成像的 RMA^[11]。王友舒提出了一种基于柱面合成孔径的高精度垂直曲面成像方式, 其补偿方式比传统方法更加精准, 最终得到了更为精确的柱面成像结果^[12]。然而, 近程柱面 SAR 成像的 RMA 因需要傅里叶变换、相位补偿、插值而产生大量的计算, 导致其成像的时间成本很高。

针对传统近程柱面 SAR 成像的 RMA^[11] 运算量大、消耗时间长的问题, 本文提出了一种近程柱面 SAR 成像的改进 RMA (improve range migration algorithm, iRMA)。通过在驻点相位法求解过程中对相位补偿项做近似求解, 省去了相位补偿项所需的方位维傅里叶变换过程, 降低了相位补偿的计算量, 使成像效率有所提高, 且具备与传统近程柱面 SAR 成像的 RMA 相同的成像质量。

1 近程柱面 SAR 成像的改进 RMA 理论推导

近程柱面 SAR 的成像模型如图 1 所示, 柱面成像系统为一维线性阵列形成的等效合成孔径。合成孔径由一维线阵自左至右扫描形成, 由它可以获得目标三维散射信息的回波信号。设天线阵列 (见图 1) 上任意一点 A 的坐标为 $(R_0 \cos \varphi, R_0 \sin \varphi, z_0)$, 目标上任意一点 P 的坐标为 $(r \cos \theta, r \sin \theta, z)$, 其中, R_0 、 r 分别表示天线阵列和目标的坐标半径, φ 、 θ 分别表示天线阵列和目标的方向角, z_0 、 z 分别表示天线阵列和目标的高度维位置, 则回波^[13] 可表示为

$$s(\varphi, z_0, f) = \iiint \sigma(x, y, z) e^{-j2kR} dx dy dz \quad (1)$$

式中: f 为频率; $\sigma(x, y, z)$ 为目标的散射系数; k 为波数; R 为目标到天线阵列的距离。 R 又可表示为

$$R = \sqrt{(R_0 \cos \varphi - r \cos \theta)^2 + (R_0 \sin \varphi - r \sin \theta)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (2)$$

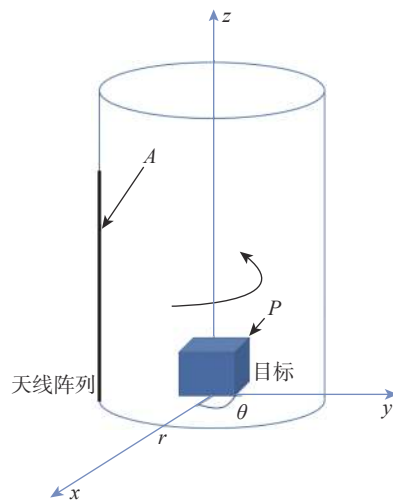


图 1 近程柱面 SAR 的成像模型

Fig. 1 Imaging model of short-range cylindrical SAR

为了减少运算量、简化推导过程, 对式(2)进行泰勒展开并近似到二次项 ($\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots$)。近似之后, R 的表达式为

$$R = \sqrt{(R_0 - r)^2 + rR_0(\theta - \varphi)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (3)$$

为了得到目标模型的散射系数 $\sigma(x, y, z)$, 首先, 对回波信号 $s(\varphi, z_0, f)$ 进行角度维和高度维的傅里叶变换, 将回波变换到波数域进行处理, 此时回波信号为

$$s(k_\varphi, k_{z_0}, k) = \iiint \left\{ \iint \sigma(x, y, z) e^{-j(2kR + k_\varphi \varphi + k_{z_0} z_0)} d\varphi dz_0 \right\} dx dy dz \quad (4)$$

式中: k_φ 、 k_{z_0} 分别是角度维和高度维的波数域变换。然后, 再用驻点相位法对相位进行二次求解, 并对回波进行角度维的逆傅里叶变换。最终, 再将回波由柱面坐标系变换到直角笛卡尔坐标系, 得到

$$s(k_x, k_y, k_z) = \iiint \sigma(x, y, z) e^{-j(\beta + k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy dz \quad (5)$$

式中: k_r 、 k_x 、 k_y 分别表示为 $\sqrt{4k^2 - k_z^2}$ 、 $k_r \cos \theta$ 、 $k_r \sin \theta$ 。式(4)的 k_{z_0} 和式(5)的 k_z 都是表示高度维的波数域变换, 二者是等价的关系, 即 $k_{z_0} = k_z$ [11]。

本文对相位项进行两次驻点相位法, 求解出相位补偿项, 其表达式为

$$\beta = R_0 \sqrt{4k^2 - k_z^2 - k_\varphi^2 / (R_0 r)} \quad (6)$$

式中 r 近似选取目标区域为场景半径均值, 即 $r = R_0 / 2$, 则相位补偿项近似为

$$\beta = R_0 \sqrt{4k^2 - k_z^2 - 2k_\varphi^2 / R_0^2} \quad (7)$$

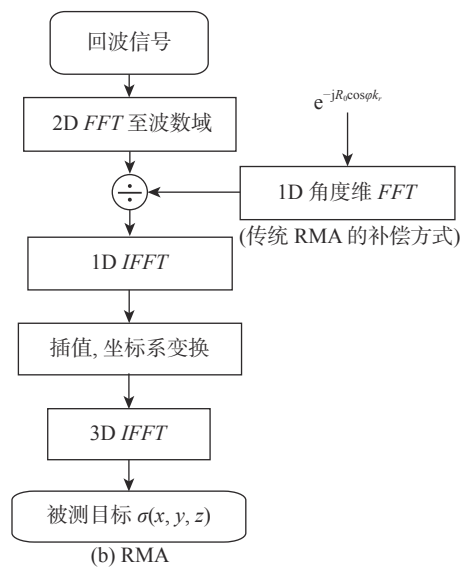
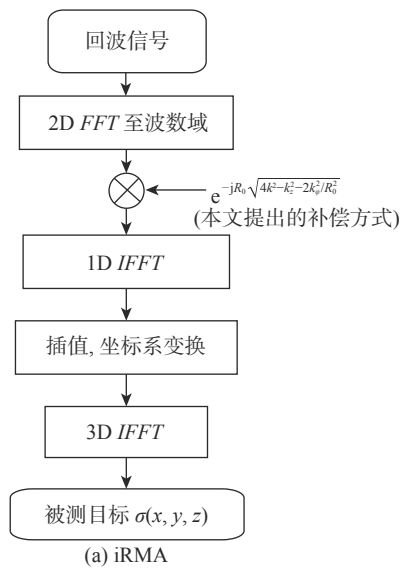


图 2 iRMA 与传统 RMA 流程对比图

Fig. 2 Comparison of iRMA and traditional RMA processes

传统近程柱面 SAR 成像的 RMA 相位补偿项是在对相位补偿项进行驻点相位法后再卷积和循环对称求得, 其相位补偿项 [11] 为

$$\beta' = -R_0 \cos \varphi k_r \quad (8)$$

求得的相位补偿项无法直接在波数域和回波数据中进行处理, 因此需采用角度维傅里叶变换, 即将相位补偿项变换至波数域后再对回波信号进行相位补偿。

对比两种方法求出的补偿项可以发现: 传统近程柱面 SAR 成像 RMA 相位补偿项的计算量为 $5N_\varphi N_z N_k \log_2 N_\varphi$ [14], 其中 N_φ 、 N_z 、 N_k 分别表示在角度、高度、距离维的采样点数; 而本文提出的 iRMA 的相位补偿项仅需进行一次矩阵点乘运算即可, 且随着数据量的增加, 这种计算量的差距更加明显。

由于距离维采样是非均匀分布的, 因此, 在进行距离维逆傅里叶变换之前需要对其进行插值。本文选取了准确性最优的 stolt 插值, 通过对回波信号进行 x 、 y 、 z 三维的逆傅里叶变换, 即可得到目标模型的散射系数

$$\sigma(x, y, z) = FD_{3D}^{-1} \left\{ FD_{1D}^{-1} \left\{ FT_{2D} \{ s(\varphi, z_0, f) \} e^{-j\beta} \right\} \right\} \quad (9)$$

式中: FD_{1D}^{-1} 、 FT_{2D} 、 FD_{3D}^{-1} 分别表示为一维傅里叶逆变换、二维傅里叶变换、三维傅里叶逆变换。

基于上述分析, 给出本文提出的算法与传统近程柱面 SAR 成像的 RMA 流程对比图, 如图 2

所示。与传统近程柱面 SAR 成像的 RMA 不同，本文提出了一种改进的推导相位补偿项方法，求得出近似相位补偿项。对比文献 [11] 的近场柱面 SAR 成像 RMA，本文方法计算量被大幅缩减，提高了算法的成像效率。

2 近程柱面 SAR 成像的改进 RMA 成像性能验证

2.1 仿真验证

本文从仿真和实验两个方面来验证 iRMA 算法的有效性，并通过与传统近程柱面 SAR 成像的 RMA 对比，对所提出算法的成像性能进行评估。

首先，为了更全面地反映 iRMA 的成像质量，本文在仿真部分分别采用点目标和连续目标模拟计算 iRMA 的成像结果，且成像实验直接使用了体目标。两种算法都是通过 MATLAB

实现，硬件设备使用 CPU 为 4 GHz 和 16 GB RAM 的计算机。处理过程中不使用并行计算，不考虑数据采集时间，数据采集部分是通过矢量网络分析仪完成。通过 LabVIEW 上位机控制程序控制电机分别移动收发天线及被测目标，每次移动后通过矢量网络分析仪采集数据。

仿真原理如图 1 所示，天线阵列由间隔为 10 mm 的 128 个均匀间隔的收发单元组成，圆弧圆心角为 180°，半径为 0.5 m。角度维扫描的采样点数为 360，高度维扫描的采样点数为 128，频率范围为 75~110 GHz。3 个维度采样点数为：360(角度维)×128(高度维)×256(距离维)。其中，点目标采用的是空间 5 个具有相同间隔的点目标，其坐标分别为(0, 0, 0)、(-1, -1, 0)、(1, 1, 0)、(1, 0, 1)、(-1, 0, -1)，单位为 cm。连续目标采用的是距离 z 轴位置相同的字母 F。成像结果如图 3 所示。图 3 表明，近程柱面 SAR 的 iRMA 对点目标和连续目标都可以准确地重建。

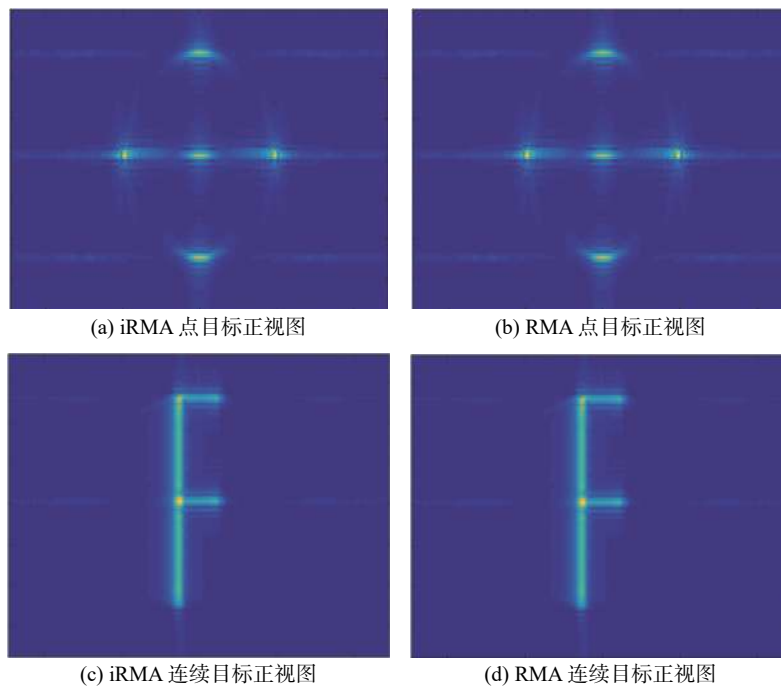


图 3 iRMA 与 RMA 仿真结果对比图

Fig. 3 Comparison of iRMA and RMA simulation results

为了客观评价两种算法的成像质量，本文利用峰值旁瓣比(peak side-lobe ratio, PSLR)数值对两种算法的点目标进行成像性能对比。两种算法对点目标成像结果的 PSLR 数值见表 1，表 1

中的 PSLR 数值都低于-13 dB，说明两种方法都能正常反演目标。由于两种方法的 PSLR 数值接近，说明两种方法的成像性能基本相同。表 1 两种方法的实际仿真成像时间表明，本文提出的成

像算法比传统柱面 SAR 成像的 RMA 消耗时间更少, 却能得到相同的成像效果。由此说明, 在理想环境下, iRMA 可以达到与 RMA 相同的成像性能, 同时提高了成像效率。

表 1 iRMA 与 RMA 仿真性能对比
Tab. 1 Comparison of iRMA and RMA simulation results

算法	PSLR/dB	成像时间/s	成像点数
iRMA	-14.2	517.2	720×128×256
RMA	-14.5	612.4	

2.2 实验验证

在实验过程中, 通过竖直维电机带动单个天线运动模拟成一维天线阵列, 并通过转动电机转动被测目标实现角度维的扫描, 由此形成一个近场柱面成像系统。其中电机控制由 LabVIEW 上位机程序提供, 矢量网络分析仪通过天线发射信号, 该信号经过被测目标后产生回波信号并被采集, 回波信号被转换为数字格式后保存至计算机中。图 4 为实验场景。

天线阵列和场景参数与仿真部分相同。回波数据经 MATLAB 处理后得到成像结果, 图 5 为

iRMA 与 RMA 的实验成像结果。成像结果说明, 在具有环境噪声、系统噪声的干扰下, iRMA 仍然能达到与 RMA 相同的成像效果, 两种方法都能反演被测目标。在两种成像结果中, 被测目标(字母 F)四周都存在高亮反射, 这是由塑料瓶的背景反射而导致。为了客观地评价两种算法所得图像的视觉质量, 我们使用了 PSNR 和 SSIM 两种图像评价参数对结果进行了评价, 结果如表 2 所示。



图 4 实验场景

Fig. 4 The tested object and the experimental scene

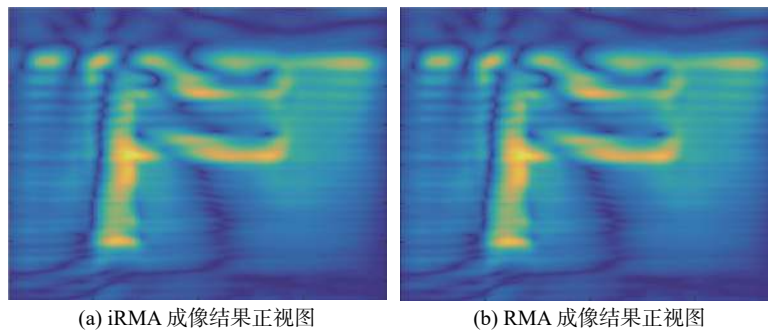


图 5 iRMA 与 RMA 实测成像结果

Fig. 5 Comparison of iRMA and RMA measured imaging results

表 2 iRMA 与 RMA 实验性能对比
Tab. 2 Comparison of experimental performance between iRMA and RMA

算法	PSNR	SSIM	成像时间/s	成像点数
iRMA	21.76	0.87	547.2	720×128×256
RMA	21.96	0.91	672.4	

表 2 说明: 以峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 和结构相似性 (structural similarity, SSIM) 评价两种算法, iRMA 拥有和 RMA 相同的成像质量; 以实验的成像时间评价两种算法, iRMA 的成像成本更低。因此 iRMA 的成像效率更高。

3 结 论

本文分析了近程柱面 SAR 成像的 RMA 目标模型, 并对相位补偿项进行了改进, 提出了一种基于近程柱面 SAR 成像的 iRMA。仿真和实验的成像结果验证了 iRMA 的有效性, 同时通过仿真和实验的实际成像时间对比验证了 iRMA 具有更高的成像效率。因此, 近程柱面 SAR 成像的改进 RMA 可应用于对成像效率要求更高的近程柱面成像系统。

参考文献:

- [1] ROCCA F, CAFFORIO C, PRATI C. Synthetic aperture radar: a new application for wave equation techniques[J]. *Geophysical Prospecting*, 1989, 37(7): 809 – 830.
- [2] YU Q, CHEN X Z, HOU Q W. Verification of near field SAR image formation based on RMA in blast furnace stock lines[C]//*Proceedings of the 37th Chinese control conference*. Wuhan: Control theory Committee of China Automation Society, 2018: 1389 – 1393.
- [3] NASH G T, CHEEMA U I, ANSARI R, et al. Power-efficient RMA SAR imaging using pipelined Non-uniform Fast Fourier Transform[C]//*Proceedings of 2015 IEEE radar conference*. Arlington, VA: IEEE, 2015: 1600 – 1604.
- [4] ZHU R Q, ZHOU J X, CHENG B B, et al. Sequential frequency-domain imaging algorithm for near-field MIMO-SAR with arbitrary scanning paths[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(8): 2967 – 2975.
- [5] ZHUGE X D, YAROVY A G. Three-dimensional near-field MIMO array imaging using range migration techniques[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(6): 3026 – 3033.
- [6] TAN W X, HONG W, WANG Y P, et al. A novel spherical-wave three-dimensional imaging algorithm for microwave cylindrical scanning geometries[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 111: 43 – 70.
- [7] SHEEN D M, MCKIN D L, HALL T E, et al. Real-time wideband cylindrical holographic surveillance system: USA, 5859609[P]. 1999-01-12.
- [8] SOUMEKH M. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8): 1252 – 1265.
- [9] SOUMEKH M. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithm[M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [10] 温鑫, 方维海, 张冰, 等. 基于步进频连续波的近距离主动毫米波圆柱扫描成像系统 [J]. *宇航计测技术*, 2014, 34(5): 5 – 9.
- [11] 任百玲. 主动毫米波安检成像算法及系统研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [12] 王友舒. 太赫兹雷达柱面三维成像算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [13] 叶阳阳. 太赫兹近场二维成像的相位失配问题研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2018.
- [14] GAO H, LI C, WU S Y, et al. Study of the extended phase shift migration for three-dimensional MIMO-SAR imaging in terahertz band[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 24773 – 24783.

(编辑: 刘铁英)