

基于仿真的合成孔径雷达(SAR)成像算法验证

曾乐天^{1,2} 杨春晖¹ 李强¹ 陈平¹

(工业和信息化部电子第五研究所 广州 510610)¹ (华南理工大学计算机科学与工程学院 广州 510640)²

摘要 成像算法是影响合成孔径雷达(SAR)成像性能的关键因素。现有测试方法须借助实际设备、雷达数据和测试环境,且缺乏对成像效果的合理评估,严重影响了测试工作的效率和有效性。针对上述问题,提出了一种基于仿真的 SAR 成像算法验证方法。首先,采用改进的同心圆法独立生成回波数据,摆脱对实际雷达回波数据的依赖性;然后,结合点目标成像和分布式场景目标成像,采用量化的指标科学评估成像算法的正确性与适用性,提高了算法测试工作的有效性;最后,利用仿真实验验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词 合成孔径雷达(SAR),仿真,成像算法验证

中图分类号 TP311 **文献标识码** A

Validation of Synthetic Aperture Radar(SAR) Imaging Algorithm Based on Simulation

ZENG Le-tian^{1,2} YANG Chun-hui¹ LI Qiang¹ CHEN Ping¹

(The Fifth Electronic Research Institute of MIIT, Software Quality Engineering Research Center, Guangzhou 510610, China)¹

(School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)²

Abstract Imaging algorithm is crucial to the performance of the synthetic aperture radar (SAR). Existing testing method not only needs to use real equipment, radar data and testing environment, but also lacks a reasonable evaluation for the imaging result, which greatly affect the efficiency and effectiveness of the software testing. To solve these problems, this paper presented a novel testing method based on simulation for the validation of SAR imaging algorithms. Firstly, the echo data are generated independently via improved concentric circle method, eliminating the real echo data constraint. Then, the correctness and feasibility of imaging algorithms are evaluated scientifically by quantitative indicators combined with point target imaging as well as distributed scene target imaging. The proposed method greatly improves the effectiveness of the testing work. Finally, the correctness and the effectiveness of the proposed method were verified by simulation experiments.

Keywords Synthetic aperture radar(SAR), Simulation, Validation of imaging algorithm

1 引言

合成孔径雷达(SAR)^[1-3]通过发射宽频带线性调频信号获得距离向高分辨率,通过较长的方位积累时间获得方位向高分辨率,从而得到关于照射场景电磁信息的高分辨二维 SAR 图像。成像算法包括频域成像算法和时域成像算法,是 SAR 信号处理模块的核心和关键。对成像算法进行测试^[4-7]是保障 SAR 算法性能、提高 SAR 系统可靠性、促进 SAR 系统效能正常发挥的重要手段。

目前,针对 SAR 成像算法测试的研究还较少。在实际工作中,测试人员常借助实际设备、雷达数据和测试环境,而软件测试、研制调试往往同步进行,影响了测试工作的效率,造成测试不能按节点完成,且测试、开发混用,无法确保测试工作的独立性^[8-11]。此外,在进行系统测试时,测试人员往往通过直观观察目标成像结果来判断算法的成像性能,且对于最终 SAR 图像的分辨率、聚焦效果、聚焦位置等信息缺乏有效

的测试手段,难以做出科学合理的评价,致使许多情况下只能对 SAR 成像算法进行一定程度的验证,对算法的测试不够深入,降低了测试工作的有效性。

针对上述问题,本文从 SAR 回波数据仿真^[12-13]、点目标仿真、分布式场景目标仿真 3 个方面来验证小斜视 SAR 成像算法的正确性,提高测试工作的独立性和有效性。首先,采用改进的同心圆法^[12-13]快速生成所需的回波数据,摆脱对实际雷达回波数据的依赖性。然后,通过点目标仿真,分析不同算法在实现过程中可能出现的问题;结合分布式场景目标仿真,以进一步发掘点目标仿真未发现的问题。采用科学、量化的评价指标对 SAR 成像结果的性能做出合理评价,而不再仅通过观察的方式来粗略估计成像结果的性能,提高了测试工作的有效性。最后,通过仿真实验验证了所提方法的正确性和有效性。

2 基于仿真的 SAR 成像算法验证

本文提出一种基于仿真的 SAR 成像算法验证方法,从

本文受中国博士后科学基金资助项目(2017M622621)资助。

曾乐天(1988—),男,博士,工程师,主要研究方向为雷达成像、雷达软件测试、质量与可靠性,E-mail:zengletian@ceppei.com(通信作者);杨春晖(1965—),女,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向为质量与可靠性;李强(1990—),男,硕士,工程师,主要研究方向为质量与可靠性;陈平(1985—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为质量与可靠性。

SAR 回波数据生成、点目标仿真、分布式场景目标仿真 3 个方面对小斜视 SAR 成像算法的性能进行验证。其中,小斜视表示斜视角小于 10° ,在斜平面^[1,3]上,波束视线方向与垂直于速度的方向之间的夹角为斜视角。

2.1 SAR 回波数据的生成

点目标回波生成是基于简单场景模型定义的,只需给出场景中对对应点的坐标,而不考虑该点目标的电磁特性以及几何位置关系。分布式场景目标是指场景目标数达到几万甚至几百万的点目标集合,其回波生成需要考虑各点目标的电磁散射特性及相互的几何位置关系,且能够反映场景特性和 SAR 图像之间的内在联系,大大扩展了仿真研究的领域^[13]。雷达软件的测试,需要相应的测试环境和测试数据。在实际测试工作中,常需借助实际的调试环境和雷达回波数据,而软件测试、研制调试往往同步进行,造成测试不能按节点完成,且测试、开发混用,不能保证测试的独立性。为了对 SAR 成像算法进行有效验证,摆脱以往测试工作依赖实际 SAR 回波数据这一限制,可通过仿真生成回波信号。本文拟采用改进的同心圆算法来极大地提高回波仿真的运算效率,以精确、高效地生成点目标回波和分布式场景目标回波^[12-13]。

传统 SAR 点目标回波仿真方法(时域逐点扫描法)^[12]的计算量会随着点目标数量的增加而快速增加,在实时性上存在问题。改进的同心圆算法,是指在同心圆的处理基础上对采样点的幅度值进行多倍插值处理,从而得到点目标的真实主瓣峰值,并将主瓣峰值点对应新的斜距作为计算点目标相位的新斜距历程。虽然插值操作会带来额外的计算量,但整体运算效率还是非常高的。回波仿真是验证成像算法的基础,只有回波仿真正确了,才能利用回波数据对成像算法进行有效验证。

鉴于后向投影(BP)算法的成像结果具有无畸变、大景深等优点,本文采用 BP 算法对目标回波数据进行处理,并根据成像结果判定 SAR 回波仿真数据的正确性。点目标成像结果的性能验证将在 2.2 节详细介绍。分布式场景目标的成像性能可从图像的整体性能和局部场景中某一强散射目标的成像结果两个方面进行分析。图像的熵值和对比度是反映图像整体聚焦性能的指标:熵值越小,图像的聚焦效果越好;对比度越大,图像的聚焦效果越好。局部场景中强散射目标的成像性能将在 2.3 节中详细介绍。

2.2 点目标仿真

在无运动误差的情况下,对于 SAR 成像算法的验证,点目标仿真具有非常重要的作用和意义,能够有效地发现问题,并准确反映算法可能存在的缺陷。此时,可在算法程序中设置节点,待算法进行特定操作和处理后,根据点目标的处理效果进行初步判断。

对时域成像算法的验证,需注意成像网格的间距在数值上必须小于最终 SAR 图像在距离向和方位向的分辨率,且成像网格在距离向和方位向的间隔分别与图像距离向理论分辨率和方位向理论分辨率相差多少并无定论,而是需要进行多次的取值尝试。同时,需要考虑成像网格覆盖的成像场景范围,确保所有点目标均被包含在成像场景中且位置误差较小。

对频域算法的验证,应确保信号的二维频谱不能发生混叠,即信号的多普勒带宽必须小于脉冲重复频率(PRF),尤其是在进行插值操作时,需要注意插值前后的信号不能发生距离向和方位向的信号频谱混叠现象。由于插值后信号相应维

的采样频率发生变化,图像像素的间隔也会发生变化,需重新计算插值后的图像像素间隔和成像场景范围。对有效成像场景范围的确定,除了通过在远离场景中心的位置布置点目标,对成像效果进行评估之外,还可根据一些常用算法对有效成像场景范围的计算公式进行验证,这就需要对算法有一定程度的了解,并结合实际情况对算法的近似程度进行测算。

点目标成像性能的评估主要包括两个方面:1)点目标的聚焦效果;2)点目标的聚焦位置。无论是采用频域算法还是时域算法,场景中心点的聚焦效果都是标准的。在小斜视 SAR 成像模式下,点目标的仿真结果在距离向和方位向均呈现出 sinc 函数的形状,其质量指标包括脉冲响应宽度(IRW)、归一化峰值旁瓣比(PSLR)和归一化积分旁瓣比(ISLR)。其中,IRW 是指冲激响应函数的 3 dB 主瓣宽度,即图像分辨率;PSLR 表示最大旁瓣能量与主瓣能量之比,以分贝(dB)表示,即:

$$PSLR = 10 \lg [P_{\text{sidel}} / P_{\text{main}}] \quad (1)$$

其中, P_{sidel} 表示第一副瓣能量,即最大旁瓣能量; P_{main} 表示主瓣能量。ISLR 表示所有旁瓣能量与主瓣能量之比,即:

$$ISLR = 10 \lg [(P_{\text{total}} - P_{\text{main}}) / P_{\text{main}}] \quad (2)$$

其中, P_{total} 表示总能量。在小斜视 SAR 成像模式下,脉冲响应函数(IRF)是关于主瓣中心线对称的,归一化 PSLR 和归一化 ISLR 的理论值分别为 -13.25 dB 和 -9.98 dB 左右,变化范围为 ± 0.2 dB。对于场景中心点目标,如果其 IRF 非主瓣中心线对称或者归一化 PSLR、归一化 ISLR 严重偏离理论值,则说明成像算法必然存在问题。

2.3 分布式场景目标仿真

在点目标仿真未发现问题的基础上,通常进行分布式场景目标仿真,以进一步发掘点目标仿真未发现的、可能隐藏的深层次问题。分布式场景目标仿真可看作点目标仿真的补充,其验证主要从最终 SAR 图像的整体聚焦效果和场景中强散射点的聚焦效果两个方面来判定。

对于分布式场景目标仿真结果,需计算最终 SAR 图像的熵值与对比度,并分别与原 SAR 图像的熵值和对比度进行比较。一般来说,原 SAR 图像与最终 SAR 图像的熵值之间的差别、对比度之间的差别越小,分布式场景目标仿真效果越好。

对于最终 SAR 图像中含强散射点的场景,通过选取相应散射点所在距离单元的部分区域进行插值操作,得到该散射点的方位向 IRF,计算 IRW、归一化 PSLR 以及归一化 ISLR 的数值,并与原 SAR 图像对应散射点的 IRW、归一化 PSLR、归一化 ISLR 进行比较。相应数值之间的差别越小,说明分布式场景目标仿真中强散射点的聚焦性能越好。

3 实验验证

本节通过仿真实验分别对 SAR 回波数据生成、点目标仿真、分布式场景目标仿真结果进行定量分析和评价,以验证本文所提测试方法的正确性和有效性。

3.1 SAR 回波数据验证

为了验证 SAR 回波数据仿真的正确性,我们设计了分布式场景目标仿真实验。

图 1 表示原始 SAR 图像,根据该图的灰度信息和表 1 所列仿真参数,采用改进同心圆法生成分布式场景目标回波数据,距离向点数和方位向点数分别为 1638 和 2500(垂直方向

表示距离向, 水平方向表示方位向), 成像场景范围为 $369\text{m} \times 565\text{m}$ (距离向 \times 方位向)。为验证该回波数据的正确性, 采用 BP 算法进行处理, 所得分布式场景目标成像结果如图 2 所示。

表 1 仿真参数 1

参数	波长/cm	带宽/MHz	脉冲重复频率/Hz	斜距/km
数值	3.13	360	1000	12



图 1 原始 SAR 图像



图 2 采用改进同心圆法所得分布式场景目标的成像结果

经测算, 图 2 的成像场景范围为 $369\text{m} \times 565\text{m}$ (距离向 \times 方位向)。图 1 的熵值为 14.38, 对比度为 0.77; 图 2 的熵值为 14.39, 对比度为 0.76。显然, 采用改进同心圆法生成回波的成像结果与原始 SAR 图像的成像场景范围相同, 且熵值和对对比度均较为接近。因此, 采用改进同心圆法生成分布式场景目标的效果良好。

3.2 点目标仿真验证

根据表 2 中的仿真参数, 按图 3(a) 所示圆形状在地平面上布置点目标, 圆的半径为 100 m, 6 个点目标均匀分布在圆周上, 位于圆心的点目标为场景中心点 O 。利用线性调频变标算法(CSA)^[14]对点目标回波进行成像处理, 得到图 3(b) 所示的点目标成像结果。点目标距离向分辨率和方位向分辨率的理论值分别为 0.83 m 和 0.74 m。

表 2 仿真参数 2

参数	波长/cm	带宽/MHz	脉冲重复频率/Hz	斜视角/(°)
数值	3.13	180	1667	5

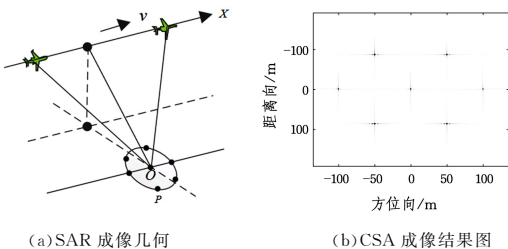


图 3 SAR 成像几何和 CSA 成像结果图

为了验证 CSA 的成像性能, 首先选取场景中心点 O , 对其成像结果进行二维插值操作, 得到两个点目标的等高线(contour)图、距离向 IRF 和方位向 IRF, 分别如图 4(a)、图 4(b) 和图 5(a) 所示。显然, 场景中心点 O 的聚焦效果不佳, 且

距离向 IRF 异常。经计算, 可得 O 点距离向的归一化 PSLR 和归一化 ISLR 分别为 -14.85 dB 和 -9.12 dB 。在频域算法中, 信号的距离脉压一般不存在问题, 信号的二维频谱在频域成像中占有很重要的地位。对成像结果进行进一步分析, 我们画出 O 点二维频谱图, 如图 5(b) 所示, O 点的二维频谱在距离向发生混叠。

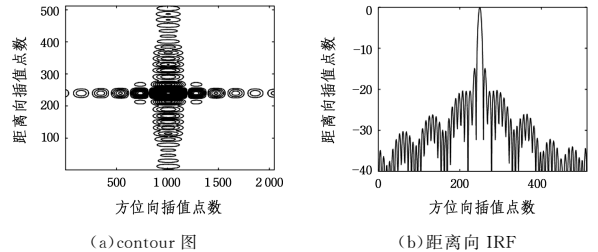


图 4 场景中心点 O 的 contour 图和距离向 IRF

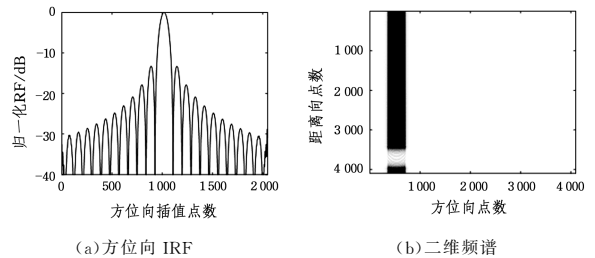


图 5 场景中心点 O 的方位向 IRF 和二维频谱

根据表 2, 信号的距离向采样率 F_s 和信号带宽 B 分别为 200 MHz 和 180 MHz, $F_s/B \approx 1.1$, 参数设置合理。为避免信号的二维频谱在距离向发生混叠, 需要在距离向操作之前对信号进行距离升采样处理, 以信号处理的方法代替实际系统距离向采样频率的提高。图 6(a)、图 7(a) 分别给出了在距离频域进行 1 倍补零操作后, 场景中心点 O 和场景边缘点 P 的信号二维频谱, 相应的点目标 contour 图分别如图 6(b) 和图 7(b) 所示。可见, 经线性调频变标操作, 信号的二维频谱不再在距离向发生混叠。此时, O 点和 P 点的距离向、方位向归一化 PSLR、归一化 ISLR 和 IRW 分别如表 3、表 4 所列, 可见距离向和方位向的归一化 PSLR、归一化 ISLR 均在标准值附近, 点目标聚焦效果良好。

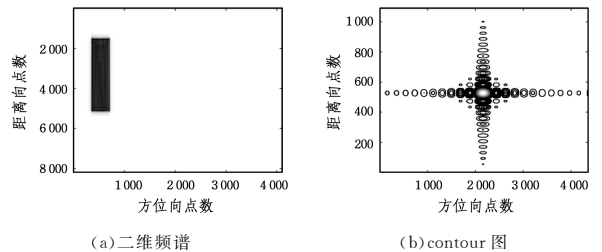


图 6 升采样后场景中心点 O 的二维频谱和 contour 图

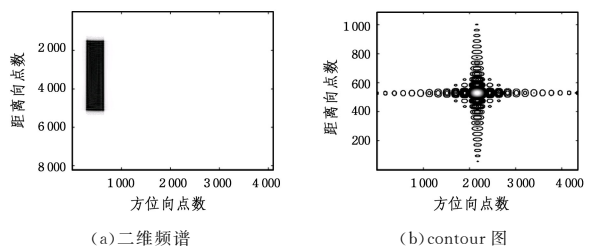


图 7 升采样后场景边缘点 P 的二维频谱和 contour 图

表3 点目标距离向成像质量分析

指标	归一化 PSLR/dB	归一化 ISLR/dB	IRW/m
O 点	-13.27	-10.01	0.70
P 点	-13.24	-10.01	0.70

表4 点目标方位向成像质量分析

指标	归一化 PSLR/dB	归一化 ISLR/dB	IRW/m
O 点	-13.26	-10.11	0.65
P 点	-13.26	-10.11	0.64

结束语 该文提出了针对小斜视 SAR 成像算法的验证方法,从 SAR 回波数据生成、点目标仿真和分布式场景目标仿真 3 个方面验证了小斜视 SAR 成像算法的正确性,提升了算法测试工作的独立性和有效性。需要说明的是,以上 SAR 成像结果的质量验证对于小斜视窄带 SAR 成像算法是适用的,在斜视模式下,信号的距离徙动更大,算法本身的特性更为复杂,需要考虑更多的影响因素。斜视模式下 SAR 成像算法的验证是下一步需要研究的内容。

参考文献

- [1] CUMMING I G, WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithm and Implementation [M]. Boston, MA: Artech House, 2005: 113-168.
- [2] CARRARA W G, GOODMAN R S, MAJEWSKI R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithm [M]. Boston, MA: Artech House, 1995: 13-80.
- [3] 曾乐天. 机载高分辨聚束 SAR 成像及运动补偿算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- [4] GAROUSI V, FELDERER M, HACALOGLU T. What We Know about Software Test Maturity and Test Process Improve-

ment [J]. IEEE Software, 2018, 35(1): 84-92.

- [5] PAUL C J. Software Testing: A Craftsman's Approach (4th Edition) [M]. Boca Raton, CRC Press, 2013: 221-228.
- [6] TARLINDER A. Developer Testing: Building Quality into Software [M]. Boston, MA: Addison-Wesley Professional, 2016: 21-36.
- [7] KASSAB M, DEFRANCO J F, LAPLANTE P A. Software Testing: The State of The Practice [J]. IEEE Software, 2017, 34(5): 46-52.
- [8] JIANG H, TANG K, PETKE J, et al. Search Based Software Engineering [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2017, 12(2): 23-71.
- [9] BIANCHI F, MARGARA A, PEZZE M. A Survey of Recent Trends in Testing Concurrent Software Systems [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2017, PP(99): 1-40.
- [10] ITKONEN J, MANTYLA M V, LASSENIUS C. The Role of The Tester's Knowledge in Exploratory Software Testing [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2013, 39(5): 707-724.
- [11] SPINELLIS D. State-of-The-Art Software Testing [J]. IEEE Software, 2017, 34(5): 4-6.
- [12] 景国彬, 张云曦, 李震宇, 等. 基于 GPU 的 SAR 回波仿真高效实现方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(11): 2493-2498.
- [13] 王伯岭, 孙进平, 吴双力, 等. 扩展场景的 SAR 回波信号快速仿真算法 [J]. 遥测遥控, 2005, 26(6): 33-38.
- [14] RANEY R K, RUNGE H, BAMLER R, et al. Precision SAR Processing Using Chirp Scaling [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 1994, 32(4): 786-799.

(上接第 273 页)

然后,利用反向合成图像对齐算法估计邻帧间的运动参数,并得到直线特征点的跟踪结果;最后,由特征点跟踪结果对序列影像邻帧进行直线匹配。两组序列影像实验表明提出的算法能够准确跟踪匹配直线特征,同时能够计算得到摄像机的运动轨迹;但是,该算法存在累积误差,需要进一步处理。

参考文献

- [1] 张跃强, 苏昂, 朱遵尚, 等. 结合局部描述符合拓扑约束的直线段匹配算法[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 25-30.
- [2] 张聪炫, 陈震, 黎明. 点线光流预测机制的图像序列运动直线跟踪[J]. 中国图象图形学报 2015, 20(9): 1177-1187.
- [3] BAY H, FERRARIS V, VAN GOOL L. Wide-baseline stereo matching with line segments [C] // Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC, USA: IEEE, 2005: 329-336.
- [4] LOPEZ J, FUCINOS M, FDEZVIDAL X R, et al. Detection and matching of lines for close-range photogrammetry [C] // Proceedings of the 6th Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis. Madeira, Portugal: Springer, 2013: 732-739.
- [5] ZHANG L L, KOCH R. An efficient and robust line segment matching approach based on LBD descriptor and pairwise geometric consistency [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(7): 794-805.

- [6] 文贡坚. 一种基于特征编组的直线立体匹配全局算法[J]. 软件学报, 2006, 17(12): 2471-2484.
- [7] 梁艳, 盛业华, 张卡, 等. 利用局部仿射不变及核线约束的近景影像直线特征匹配[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(2): 229-233.
- [8] 胡海霞, 李钢. 几何特性二元关系的直线匹配[J]. 中国图象图形学报 2014, 19(9): 1338-1348.
- [9] FORSTER C, PIZZOLI M, SCARAMUZZA D. SVO: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry [C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA). 2014: 15-22.
- [10] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C] // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Barcelona, Spain, 2011: 2564-2571.
- [11] ROSTEN E, PORTER R, DRUMMOND T. Faster and better: a machine learning approach to corner detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(1): 105-119.
- [12] CALONDER M, LEPETIT V, STRECHA C, et al. BRIEF: Computing a local binary descriptor very fast [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(7): 1281-1298.
- [13] 张振杰, 郝向阳, 刘松林, 等. 基于 Hough 一维变换的直线检测算法[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 1-8.