

稀疏微波成像技术在轨验证及应用探讨

田菁¹, 康利鸿¹, 孙希龙¹, 李洲¹, 张冰尘²

(1. 北京市遥感信息研究所, 北京 100192; 2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

摘 要: 介绍了稀疏微波成像技术在轨试验验证情况, 试验中通过更改卫星系统成像参数, 完成了系统均匀降采样数据的获取, 利用稀疏微波成像方法进行了成像处理, 提出了面向稀疏微波成像处理的成像质量评估方法, 并对成像结果进行了量化评估。最后根据试验结论, 对稀疏微波成像技术在未来遥感卫星的应用方向进行了展望。

关键词: 稀疏微波成像技术; 在轨验证; 应用

中图分类号: TN955

文献标识码: A

Experiment based on orbit satellite and application for sparse microwave imaging

TIAN Jing¹, KANG Li-hong¹, SUN Xi-long¹, LI Zhou¹, ZHANG Bing-chen²

(1. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China;
2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: The experiment aiming to verify the sparse microwave image methodology based on orbit SAR satellite was presented. During the experiment, the imaging parameters were changed in order to achieve the uniform de-sampling echo data. The image quality evaluation method for sparse microwave imaging was proposed and quantified evaluation results for the experiment were also presented. Finally, the remote applications of sparse microwave imaging were prospected.

Key words: sparse microwave imaging, experiment based on orbit satellite, application

1 引言

合成孔径雷达 (SAR, synthetic aperture radar) 卫星具有全天时全天候成像的优点, 已成为现代遥感中不可或缺的重要手段, 在地形测绘、灾害监测、资源调查等诸多领域获得了广泛应用。但受奈奎斯特采样定理的约束, 传统雷达在提高分辨率和满足实时性要求时, 面临采样率过高、数据量过大、快速处理困难等问题的挑战。

稀疏微波成像方法将稀疏信号处理理论应用于微波成像, 针对观测对象的稀疏特征, 通过在空间、时间、频谱或极化域稀疏采样, 获取被观测对象的空间位置、散射特征等几何与物理特征^[1,2]。该方法是雷达成像领域的一种创新体制, 可有效提高

星载 SAR 图像质量, 降低系统研制难度和成本, 因此成为国内外合成孔径雷达技术领域研究热点^[3~5]。

目前, 从公开发表的文献中看, 国外研究机构在相关领域尚未开展系统性研究。国内, 中国科学院电子学研究所、北京航空航天大学、西安电子科技大学、清华大学、国防科技大学、电子科技大学等单位开展了相关的研究工作。2010 年, 国家重点基础研究计划支持了“稀疏微波成像的理论、体制和方法研究”项目研究, 围绕微波成像稀疏表征与变换域映射、微波成像稀疏观测约束、稀疏微波成像非模糊重建等难点问题, 研究稀疏微波成像的基础理论、数据获取、信号处理、数据压缩与特征理解等内容, 在稀疏微波成像系统的概念和理论框架、体制、算法、原理性验证方面取得原创性成果。在此

收稿日期: 2017-09-18

基金项目: 国家安全重大基础研究基金资助项目 (No.61323801)

Foundation Item: The National Defiance Program on Key Basic Research Project of China (No.61323801)

基础上, 构建基于航空和地面平台的稀疏微波成像实验验证系统, 获取稀疏微波成像体制雷达的实验数据, 完成稀疏微波成像的原理性验证。国内外众多研究^[6]表明, 基于稀疏微波成像的信号处理方法可应用于现有雷达数据并提高其图像质量; 利用稀疏微波成像工作原理可设计性能更优的成像雷达系统; 利用分布式压缩感知技术可进一步降低多通道雷达系统的数据量及其设计复杂度。

为了进一步推动稀疏微波成像方法成果的应用转化, 为后续合成孔径雷达卫星发展奠定技术基础, 利用在轨卫星开展了稀疏微波成像技术在轨试验验证, 试验过程中, 通过更改卫星系统的成像参数, 完成了均匀降采样数据的获取, 利用稀疏微波成像方法完成了试验数据的成像处理, 并进行了成像质量评估。本文对此次试验的主要情况进行了介绍, 包括试验内容、面向稀疏微波成像的图像质量评估方法以及试验结果, 最后, 对稀疏微波成像技术的应用方向进行了展望, 面向稀疏微波成像的图像质量评估方法以及试验结果, 最后, 对稀疏微波成像技术的应用方向进行了展望。

2 稀疏微波成像技术在轨验证方法

2.1 试验设计

试验中, 选择距离向波束宽度和采样点数余量相对较大的波位, 在满足数据率约束的前提下, 提高距离向采样点数, 同时降低方位向 PRF, 从而使试验波位较原系统设计波位提高了成像带宽, 但是模糊度指标下降非常严重, 可以预计利用传统的匹配滤波方法得到的图像质量将会严重下降, 而利用稀疏成像处理的效果如何, 恰恰是此次试验关注的重点。

试验首先基于在轨卫星的硬件条件, 按照稀疏微波成像方法要求设计选取较低的脉冲重复频率; 根据卫星实时轨道参数, 选取海洋、岛礁以及陆地等不同稀疏特性的观测场景, 完成回波数据获取。

然后, 针对获取的原始回波数据, 利用基于回波模拟算子的稀疏微波成像处理方法和基于匹配滤波的传统 SAR 成像方法并行开展成像、辐射校正及几何校正处理, 获得 2 种不同方法得到的图像。

最后, 针对稀疏微波成像重建信号非带限的特点, 从稀疏成像的分辨能力、成像带宽、模糊比、相对旁瓣、信杂噪比等方面构建客观评价指标, 面

向试验选取的不同稀疏度场景, 通过比较稀疏成像结果与匹配滤波结果以及历史成像结果, 评估稀疏微波成像方法的图像质量。

2.2 面向稀疏微波成像的成像质量评估方法

稀疏微波成像方法采用了 LQ 正则化算法实现了目标后向散射系数的重建, 与传统匹配滤波算法相比, 其点扩展函数为非带限信号, 可以取得更好的图像质量。因此, 稀疏成像方法在理论上可以重建场景内的后向散射系数。但由于重建滤波器的构造过程中会受到噪声、成像误差等问题的影响, 在处理结果中可能会出现信息丢失、重建失败等现象。为了评估稀疏微波成像方法的成像效果, 试验重点对分辨能力、成像带宽、模糊比、相对旁瓣性能以及信杂噪比等几项指标进行评估, 其中, 模糊比、相对旁瓣性能以及信杂噪比重点在于与历史图像的对比评估。

1) 分辨能力

相比传统匹配滤波器的点目标冲击响应输出结果, 稀疏微波成像方法的点目标冲击响应为非带限信号, 因此, 传统的分辨率计算方法不适用于评估稀疏微波成像的分辨能力。为此, 在此次试验中, 采用点目标对区分概率指标评估分辨能力。设场景内存在 M 对定标器, 每对定标器以系统名义分辨率两两放置, 对成像结果进行差值后, 根据相邻 2 个角反射器峰值的可区分能力进行判断, 若可分辨的角反射器对数量为 N 。则点目标对区分概率为

$$R = \frac{N}{M} \quad (1)$$

2) 成像带宽

距离向成像带宽是指 SAR 天线距离向波束所覆盖的、满足图像质量要求的成像区域宽度, 即一次成像获取的地面有效观测宽度。

针对试验获取的图像, 确定卫星星下点轨迹方向, 定为场景方位向, 与方位向垂直方向为距离向。选取距离向边缘最近点与最远点, 求取两点间距离, 投影至距离向, 即为距离向成像带宽。

3) 平均能量模糊比

传统星载 SAR 系统模糊度指标主要反映了系统能力, 而稀疏成像技术是一种利用地面处理技术实现方位模糊抑制的方法。为考察稀疏成像技术的模糊抑制能力, 定义了一种基于图像数据的模糊比计算方法, 即平均能量模糊比指标。选取弱散射背景下具有明显模糊现象的目标, 如图 1 所示。



图 1 典型面目标与强散射目标模糊示意

寻找主区位置与第一模糊区位置。设主区目标的轮廓区域范围为 $area_M$ ，沿方位向上下分布的第一模糊区域范围为 $area_{A^+}$ 与 $area_{A^-}$ ，则主区能量 P_M 与第一模糊区能量 P_A 分别为

$$P_M = \sum_{x \in area_M} P_x - P_N \quad (2)$$

$$P_A = \sum_{x \in area_{A^+}} (P_x - P_N) + \sum_{y \in area_{A^-}} (P_y - P_N)$$

其中， P_N 为噪声与背景杂波的平均功率，利用成像区域中无任何目标的数据估计得到，则平均能量模糊比为

$$MAR = 10 \lg \left(\frac{P_A}{P_M} \right) \quad (3)$$

根据试验获取数据情况，选择出现明显模糊的图像，计算平均能量模糊比；然后选择相同波位相同目标历史图像，计算平均能量模糊比，对比并统计试验波位参数成像结果与正常波位参数成像结果的平均能量模糊比，得到稀疏成像方法的模糊抑制性能评估。

4) 相对积分旁瓣比

稀疏成像方法利用范数最优理论直接对图像的后向散射系数进行重建。如果重建滤波器与目标信息完全匹配，点目标不会出现旁瓣。但由于目标信息的随机性，使重建过程会产生一定的能量残余，形成旁瓣。这种旁瓣的信息仍然是非带限的，与传统 sinc 函数旁瓣不同，不能通过频域补零插值进行估计。因此，稀疏成像算法的旁瓣也只能从像素级图像进行评估。试验中定义了相对积分旁瓣比指标进行评价旁瓣性能。

以点目标峰值左右两侧的第一过零点为分界，采用类似积分旁瓣比的计算方式进行评估，所得到的旁瓣性能主要为针对第三旁瓣外的性能。

选取图像中出现明显旁瓣的强点目标，求取点目标冲击响应的最大功率 P_1 ，设其坐标为 x_1 。求取最大值周围最近的极小值点 x_2 和 x_3 ，使其满足

$$x_2 = \max \{x, x < x_1 \text{ 且 } P_x < P_{x+1} \text{ 且 } P_x < P_{x-1}\}$$

$$x_3 = \min \{x, x > x_1 \text{ 且 } P_x < P_{x+1} \text{ 且 } P_x < P_{x-1}\}$$

其中，坐标 x_2 的采样点对应功率为 P_2 ，坐标 x_3 的采样点对应功率为 P_3 。则定义基于像素级图像的主瓣能量为

$$M = \int_{x_2}^{x_3} P(x) dx \quad (4)$$

旁瓣能量为

$$S = \int_{-\infty}^{x_2} P(x) dx + \int_{x_3}^{+\infty} P(x) dx \quad (5)$$

其中， $P(x)$ 表示坐标 x 对应的功率。

则定义相对积分旁瓣比指标如下所示。

$$I = \frac{M}{S} \quad (6)$$

可以看出，由于主瓣包括了第三旁瓣以内的能量，这种相对积分旁瓣比指标要明显优于系统设计的积分旁瓣比指标，但是与积分旁瓣比指标仍保持一一映射关系，因此，相对积分旁瓣比指标在一定程度上表征了点目标冲击响应的积分旁瓣比，可以应用于传统 SAR 成像处理技术与稀疏成像处理技术的对比，实现对稀疏成像处理技术的相对性能评估。具体评价方法为，在试验获取的典型场景中，选择出现明显旁瓣的场景，对比并统计稀疏微波成像结果与匹配滤波成像结果的旁瓣性能，得到稀疏成像方法的旁瓣性能评估结果。

5) 信杂噪比

稀疏微波成像技术具有一定的抑制噪声能力，但可能造成弱目标辐射失真现象。因此，既需要考察稀疏成像技术的噪声抑制能力，也要考察其对弱目标的重建恢复能力。试验中定义信杂噪比以分别考察稀疏微波成像方法对强散射目标和弱散射目标的重建能力。

在后向散射系数平均的背景上（如海洋、草原等），选取具有典型几何形状的目标，确定目标的轮廓区域 $area$ ，该区域内共计散射点个数为 M ，

选取目标周围无任何其他强散射目标的区域，求取背景的平均功率 P_N 。目标信号能量提取方式如图 2 所示。

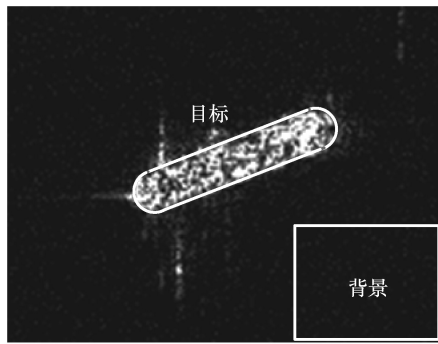


图 2 目标与背景能量提取示意

则平均信杂噪比为

$$MSCNR = \frac{\sum_{x \in area} P_x - MP_N}{MP_N} \quad (7)$$

其中, x 为目标轮廓区域内的任意采样点。

具体计算方法为: 选择试验获取的海面及陆地场景, 在单视复图像上进行信杂噪比评估。

3 试验结果

此次试验共获取了 7 次降采样情况下的回波数据, 并完成了稀疏微波成像处理, 下面对图像质量评估结果进行介绍。

3.1 图像质量评估结果

1) 分辨能力

对稀疏微波成像处理方法和匹配滤波处理方法对点目标对(三面角反射器)的成像处理结果分别进行二维 48 倍差值后, 结果如图 3 和图 4 所示。稀疏微波成像方法的点目标对区分概率为 70%, 匹配滤波方法的点目标对区分概率分辨能力为 60%, 二者均优于 50%。

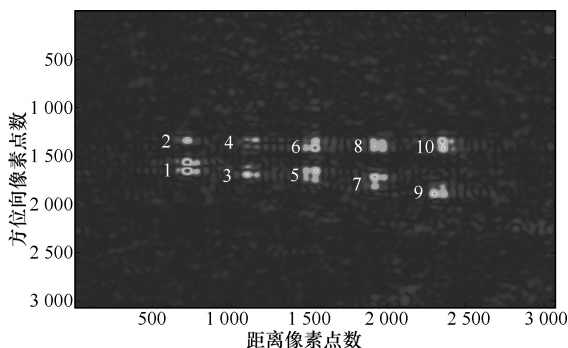


图 3 稀疏微波成像点目标二维差值结果

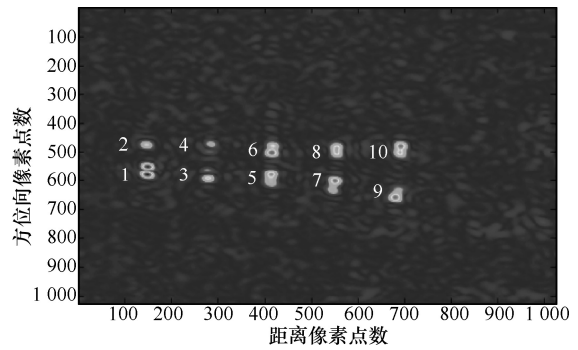


图 4 匹配滤波成像点目标二维差值结果

2) 成像带宽

根据 7 次不同更改波位成像参数获取的数据, 选择其中典型目标图像进行了成像带宽的评估, 测试结果如表 1 所示。可见, 此次试验获取的图像幅宽均有提升, 提升幅度在 9%~45%。

表 1 成像带宽测试结果

编号	提升幅度
1	45.36%
2	17.37%
3	9.30%
4	11.59%
5	44.88%
6	44.64%

3) 相对积分旁瓣比

相对积分旁瓣比指标评测结果如表 2 所示。从相对旁瓣测试结果看, 稀疏成像结果的整体旁瓣抑制效果较好, 可以在不降低分辨能力的情况下, 抑制旁瓣 4~9 dB。此外, 针对海陆交界处的强散射目标, 进行了稀疏微波成像方法与历史图像的相对积分旁瓣比的计算, 结果如表 3 所示, 此次试验的匹配滤波成像结果与历史图像的旁瓣性能接近, 稀疏成像结果的旁瓣性能优于历史图像。

表 2 相对积分旁瓣比指标评测结果

图像序号	目标	稀疏成像测试结果/dB	匹配滤波测试结果/dB
图像 1	方位向	-20.75	-16.80
	距离向	-19.21	-16.50
图像 2	方位向	-25.99	-17.01
	距离向	-23.86	-17.72
图像 3	方位向	-29.45	-18.48
	距离向	-24.24	-17.23

表 3 相对积分旁瓣比指标历史对比评测结果

目标	稀疏成像 测试结果/dB	匹配滤波 测试结果/dB	历史图像 测试结果/dB
方位向	-29.446 6	-18.48	-18.12
距离向	-24.239 5	-17.23	-18.42

4) 模糊比

模糊比测试结果如表 4 所示。从模糊比测试结果看, 由于降低了 PRF, 方位模糊度指标下降严重, 因此利用匹配滤波方法成像处理结果模糊现象极为明显, 而通过稀疏试验处理可以有效地抑制模糊现象。

表 4 实验波位模糊比测试结果

目标序号	稀疏成像/dB	匹配滤波/dB
目标 1	-19.80	-15.25
目标 2	-22.77	-18.41
目标 3	-39.69	-10.54
目标 4	-21.57	-15.32
目标 5	-17.19	-16.33

除以上目标外, 本次试验针对 7 次试验均进行了稀疏成像结果和匹配滤波结果的比对, 根据场景不同, 稀疏试验的提升效果也不同。对于海陆交界地区, 稀疏试验的模糊比无法达到历史波位水平, 相比匹配滤波结果提升约 4 dB。对于海洋地区, 根据目标的强度不同, 稀疏成像的模糊比相比匹配滤波提升范围约为 4~40 dB, 部分目标可到历史相当水平。

5) 信杂噪比

表 5 给出了试验的信杂噪比测试结果。由测试结果可以看出, 对于杂波能量较弱的目标 (如海杂波), 经过稀疏成像结果处理后, 信杂噪比可提升 40~60 dB。对于杂波能量较强的目标 (如陆地类杂波), 经过稀疏成像结果处理后, 信杂噪比提升约 3~8 dB。这说明稀疏成像方法具有对弱能量目标和噪声的抑制作用。

表 6

成像质量评估结果

指标	对比结果
分辨能力	点目标对区分概率 70%, 略好于匹配滤波方法
成像带宽	提高 9%~45%, 优于历史图像
相对积分旁瓣比	优于历史图像
模糊比	多数差于历史图像, 个别目标优于历史水平
信杂噪比	提高了目标信杂噪比。但是对于弱目标, 引入了较大的相对辐射失真

表 5 信杂噪比评测结果

目标序号	稀疏成像结果/dB	匹配滤波结果/dB
目标 6	72.934 2	21.693 7
目标 7	58.825 9	17.706 0
目标 8	69.951 3	61.747 0
目标 9	8.726 3	5.065 7
目标 10	82.945 4	33.194 8
目标 11	7.697 7	1.684 3

需要注意的是, 对礁盘等弱目标的测试结果表明, 弱目标的信杂噪比也较匹配滤波高, 但是, 由于稀疏成像方法对弱能量目标和噪声的均具有抑制作用, 导致弱目标存在较大的相对辐射失真, 对某礁盘相对岛礁主区目标的能量进行对比分析, 稀疏成像结果中弱目标能量相对被压低了 39.02 dB, 相对辐射失真较大。

3.2 试验小结

综合以上指标评价结果, 如表 6 所示。

1) 对于部分稀疏度较好的场景, 稀疏微波成像方法的幅宽提升超过 40%, 分辨能力、旁瓣抑制能力以及模糊比等主要图像质量指标达到历史相当水平。

2) 对于大部分试验场景, 稀疏微波成像的幅宽均有所提升, 提升幅度在 9%~45%, 同时保持了与历史图像相当的分辨能力, 旁瓣抑制能力优于历史图像, 模糊抑制效果因目标而异, 多数略低于历史图像水平。此外, 稀疏微波成像方法提高了强散射目标的信杂噪比, 但是存在因过度抑制杂波能量引起的弱目标相对辐射失真问题。

3) 稀疏微波成像方法在目标轮廓表现能力及噪声抑制能力方面性能较好, 但是在图像层次感、目标细节表现能力以及弱目标表现能力方面与历史图像质量还有差距。

4 结束语

稀疏微波成像在轨试验表明, 稀疏微波成像技

术可用于海洋遥感卫星系统。我国是一个海洋大国,维护海洋权益、合理开发海洋资源、科学保护海洋环境、防止与减少海洋灾害都迫切需要发展多种探测手段相结合的卫星探测系统。星载 SAR 系统具有全天时、全天候主动成像的优点,是执行海洋观测的理想选择之一。传统 SAR 成像体制难以实现高分辨率大幅宽,稀疏微波成像方法在扩大成像幅宽的条件下,较传统成像方法可保持较好的分辨能力、旁瓣和模糊抑制能力,后续该技术可应用于执行大范围观测任务的星载 SAR 系统。

但是,从试验结果看,目前稀疏微波成像方法在目标细节和弱目标表现能力方面相对较弱,在满足目标精细分析方面还需进一步提升。此外,从稀疏微波成像方法工程化应用的角度,后续还需在降低算法复杂性和自动化设定成像参数方面进行改进。

目前,稀疏微波成像技术仍在不断发展中,相信随着更多技术难题的解决,稀疏微波成像将逐渐工程化和实用化,在我国空间信息系统中发挥重大作用。

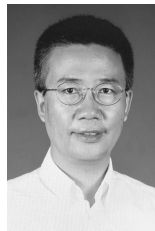
参考文献:

- [1] 吴一戎,洪文,张冰尘,等. 稀疏微波成像研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 55(8): 1722-1754.
WU Y R, HONG W, ZHAGN B C, et al. Current developments of sparse microwave imaging[J]. Journal of Radars, 2012, 55(8): 1722-1754.
- [2] BARANIUK R, STEGHS P. Compressive radar imaging[C]//2007 IEEE Radar Conference. 2007: 128-133.
- [3] POTTER L C, ERTIN E, PARKER J T, et al. Sparsity and compressed sensing in radar imaging[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6): 1006-1020.
- [4] JOACHIM H G E. On compressive sensing applied to radar[J]. Signal Processing, 2010, 90(5): 1402-1414.
- [5] 吴一戎,洪文,张冰尘,等. 稀疏微波成像原理及其应用[J]. 空间对地观测工程与技术, 2015, 2: 1-7.
WU Y R, HONG W, ZHAGN B C, et al. Sparse microwave imaging[J]. Space Earth Observation Engineering and Technology, 2015, 2: 1-7.

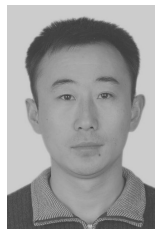
作者简介:



田菁 (1980-), 女, 山东沂水人, 博士, 北京市遥感信息研究所副研究员, 主要研究方向为微波遥感卫星系统应用总体技术。



康利鸿 (1974-), 男, 河北新乐人, 博士, 北京市遥感信息研究所研究员, 主要研究方向为遥感卫星系统应用总体技术。



孙希龙 (1982-), 男, 山东高密人, 博士, 北京市遥感信息研究所助理研究员, 主要研究方向为微波遥感卫星应用技术。



李洲 (1985-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 北京市遥感信息研究所助理研究员, 主要研究方向为微波图像分析技术。



张冰尘 (1973-), 男, 浙江温州人, 中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向为微波遥感与雷达技术、稀疏信号处理。