

基于地基合成孔径雷达的弱目标检测性能分析

周勇胜,周梅,唐伶俐,李传荣

(中国科学院光电研究院,北京 100094)

摘要:合成孔径雷达(SAR)是一种主动微波成像遥感技术,弱目标检测与分类是其重要应用之一。鉴于弱目标的有效检测与 SAR 系统参数密切相关,为系统地研究弱目标的散射特性及其检测性能与 SAR 系统参数的关系,本文提出了一种基于地基 SAR 进行弱目标检测的实验研究方法。首先通过构建室内实验场景,获取了多频多极化原始 SAR 回波数据并进行成像处理;接着分析了不同工作频率、不同带宽条件下塑料材质目标以及干沙覆盖目标的后向散射特性;最后讨论了极化方式对检测性能的影响。本文的实验方法和结果有助于进一步利用极化干涉 SAR 信息进行弱目标检测研究。

关键词:合成孔径雷达;极化 SAR;地基 SAR;弱目标检测

doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2011.06.010

中图分类号:TP79 文献标识码:A 文章编号:1000-3177(2011)118-0047-04

Performance Analysis of Weak Target Detection via Ground-based Synthetic Aperture Radar

ZHOU Yong-sheng, ZHOU Mei, TANG Ling-li, LI Chuan-rong

(Academy of Opto-Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract: Synthetic Aperture Radar(SAR) is an active microwave imaging remote sensing technique. Weak target detection and classification is one of its important applications. The effective detection of weak target depends on the SAR system parameters. In order to systematically investigate the effect of SAR parameters on the scattering property and detection performance of weak target, the paper presets an experiment analysis methods based on ground-based SAR. Firstly, indoor experiment scene is constructed and multi-frequency, multi polarization raw data are acquired and processed into images. Then the effects of different operation frequency and different bandwidth on the scattering property of plastic and/or dry sand covered targets are analyzed. Finally the effects of polarization on the detection performance are discussed. The experiment method and results in this paper are helpful for the investigation of weak target detection based on polarimetric interferometric SAR information.

Key words: synthetic aperture radar; polarimetric SAR; ground-based SAR; weak target detection

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率微波成像技术,通过多普勒波束锐化和脉冲压缩,获得观测对象沿传感器运动方向和视线方向上的二维高分辨率斜距图像^[1]。在此基础之上,利用干涉技术,可以获取地形高程、形变等信息^[2];利用极化技术,可以获

得目标形状、介电特性、指向等信息^[3];将两者结合,则可以进一步获取目标的三维信息^[4]。目前 SAR、干涉 SAR、极化 SAR、极化干涉 SAR 等技术已经在森林参数估计、农作物生长监测、土地利用覆盖分类、DEM 生成与形变监测等遥感领域发挥重要作用^[5~6]。

在 SAR 目标检测与分类应用中,目标的后向散

收稿日期:2010-10-20

基金项目:中国科学院科技创新基金项目。

作者简介:周勇胜(1982~),男,博士,助理研究员,主要研究方向为:SAR 遥感数据处理及其地表信息提取应用等。

E-mail: zhyosh@gmail.com

射特性不仅与其材质、尺寸、形状等参数有关,还与 SAR 系统参数密切相关。塑料材质目标(例如救灾时的活动板房)或沙土覆盖的目标,其后向散射特性往往较弱,回波信号往往淹没于背景信号中。为对这些弱目标进行检测与分类,一方面需要优化设置合适的雷达系统参数;另一方面,极化与干涉等信息的引入可以进一步增强弱目标的检测性能^[7]。

SAR 根据其搭载平台的不同,可以分为星载、机载和地基等。星载 SAR 的主要优点是照射面积较大和平台姿态稳定,然而造价较为昂贵且分辨率相对较低;机载 SAR 的主要优点是机动灵活、分辨率相对较高然而运动补偿增加了处理难度;而地基 SAR 主要优点是建造费用较为低廉、灵活使用,平台稳定,分辨率高,十分适用于星载和机载 SAR 实验前的系统参数与性能分析。为深入研究弱目标散射特性与雷达参数的关系,本文利用地基 SAR 平台进行实验研究,分析工作频率、带宽、极化方式等对检测塑料材质目标以及沙层覆盖目标的性能影响。

2 基本原理

真实孔径雷达的方位向分辨率 ρ_a 等于波束方位角 γ 与雷达作用距离 R 的乘积,而 γ 与天线直径 D 有关:

$$\rho_a = R\gamma = R \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

式中 λ 为雷达波长。提高方位分辨率最直接的方法是加大天线尺寸,但要使分辨率在数十千米处达到米级,必须要有数百米的天线,这显然在工程上难以实现。

合成孔径雷达通过对发射的宽带信号进行脉压使目标在雷达视线方向(斜距向)获得较高的分辨率:

$$\rho_r = \frac{c}{2B_{rg}} \quad (2)$$

式中 c 为光速, B_{rg} 为系统带宽。进一步再利用雷达的运动在不同的位置处发射多次脉冲合成出一个长孔径阵列,而后对接收到的目标回波进行相干处理得到目标在与雷达视线垂直方向(方位向)的高分辨率二维图像。方位向分辨率可以表示为

$$\rho_a = D/2 \quad (3)$$

式中 D 为天线孔径。图 1 是 SAR 成像几何示意图。

干涉 SAR(InSAR)是在 SAR 基础上,通过略微分离的两部天线获取的同一目标复信号相位差,

提取目标高程或变化信息。

极化 SAR(PolSAR)利用互相垂直的两个天线发射和接收雷达信号在互相垂直的两个方向上的分量,获得目标散射的全部极化信息,可以进行地物分类、目标识别、地物参数估计等。

极化干涉 SAR 是极化 SAR 与干涉 SAR 的结合。由于弱目标与环境杂物的相干性随极化变化特性表现不同,因此可以充分利用这一差异进行弱目标的检测。

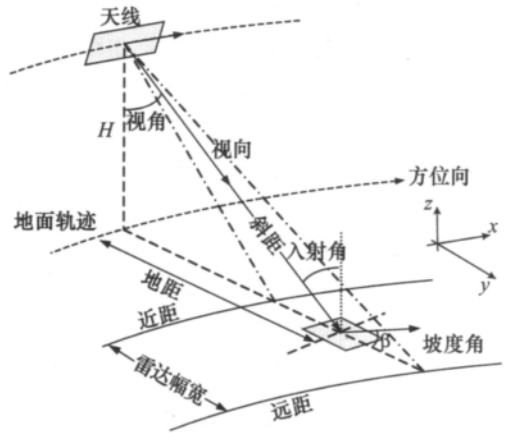


图 1 合成孔径雷达成像几何(条带模式)

3 实验系统与场景设计

3.1 实验系统

为研究弱目标散射特性与雷达参数的关系,本文基于中科院电子所微波成像技术国家级重点实验室(IECAS-MITL)的地基 SAR 系统进行仿真实验,该系统主要包括矢量网络分析仪、二维扫描轨道平台、全极化天线、控制单元等部分,如图 2 所示。

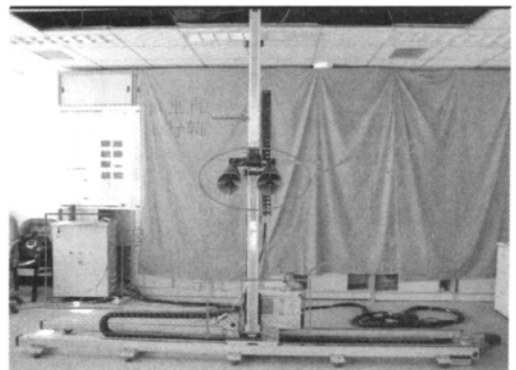


图 2 中科院电子所 MITL 地基 SAR 系统

其中,水平和垂直导轨由计算机通过以太网将控制指令发到控制器上,控制器再驱动电机运动,使得天线可以分别在水面轨道和垂直轨道上移动,主要用于模拟 SAR 的运动。矢量网络分析仪主要用

于发射信号的生成与回波信号的记录,可以输出 1GHz—12GHz调频连续波。双极化天线用于信号的发射与接收。控制单元主要包括 3 部分功能:轨道平台运动控制、矢网触发控制、极化通道选通控制。

通过垂直导轨的升降,可以形成 SAR 干涉测量;通过双极化天线,可以实现 SAR 极化测量。两者同时进行,则可以获取极化干涉 SAR 数据。

3.2 实验场景

设计的室内实验场景如图 3 所示,其中包括两个金属圆柱体(A 和 G)、两个塑料目标体(B 和 D)、3 个角反射器(C、E 和 F)。金属圆柱体用于确定塑料目标体参考位置,塑料目标体 B 和二面角 C 用于干沙覆盖,覆盖厚度约 2cm。目标 ABD 方位向成直线,目标 CE 方位向成直线,目标 BC 距离向成直线,目标 DEF 距离向成直线。

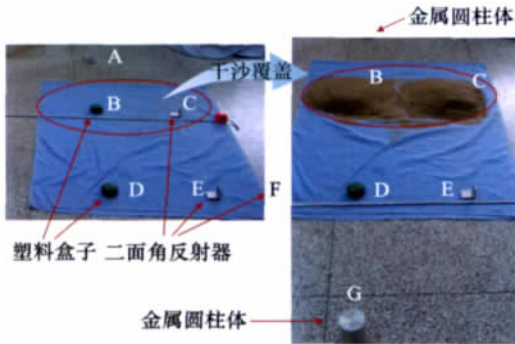


图 3 实验场景

4 实验结果分析

利用图 2 所示的地基 SAR 系统和如图 3 所示布设的实验场景,获取不同工作频率、不同带宽的多极化 SAR 原始数据。下面分析工作频率、带宽、极化方式等参数对成像后弱目标检测性能的影响。

4.1 工作频率(波长)对检测性能影响

SAR 系统工作频率主要是根据其应用需求确定,是雷达的尺寸、重量、发射功率、角分辨率、天线波束宽度、大气衰减、多普勒频移、目标高度、衰减系数、时间去相干等的综合考虑。雷达波长与穿透性能密切相关,波长越长,穿透性能越好。对于伪装或掩藏的目标,需要较长的雷达波长才能获取掩藏目标的信息。

图 4 给出了不同工作频率时的成像结果图,可以看出:在 X 波段时,干沙覆盖的塑料目标 B 在 SAR 图像中几乎不可见,而干沙覆盖的目标 C 在 SAR 图像中可见但强度较弱。随着波长的增加,图像整体散射强度增加,干沙目标 B 和 C 在图像中可

见。然而在 S 波段时,地表杂波强度也相应增加,弱目标淹没在杂波中。后续工作中将通过引入极化和干涉信息进一步进行弱目标检测。

需要注意的是,布设场景时,目标 C 和 E 的距离向成直线,然而由于干沙与空气介电特性的差异,使得成像后目标 C 相对于目标 E 朝远距方向偏移,并且这一偏移量随着波长的增加而增大。

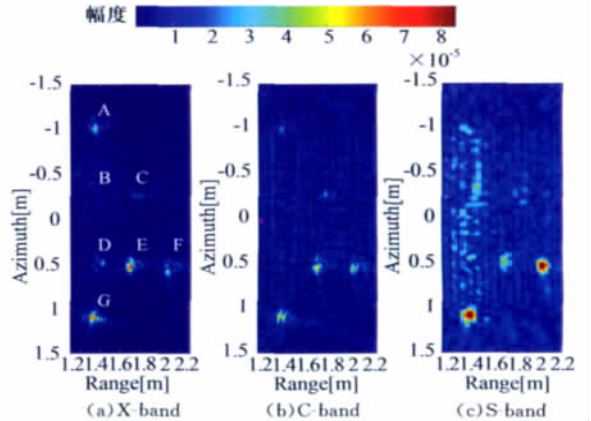


图 4 不同工作频率时的成像结果

4.2 带宽对检测性能影响

根据第 2 节的分析,带宽与系统的分辨率密切相关,带宽越大,分辨率越高,图像质量越好,有利于弱目标的检测。此外,带宽也决定了加性热噪声的功率大小。假设热噪声功率谱密度一定,则系统带宽和热噪声功率是线性关系,因此系统带宽增加一倍则噪声功率增加一倍。低的信噪比将降低弱目标的检测性能。

图 5 给出了 X 波段下不同带宽时的成像结果图,可以看出随着带宽的降低,旁瓣展宽,图像变得模糊。对于目标 C,随着带宽的降低,回波强度减弱,检测性能下降。

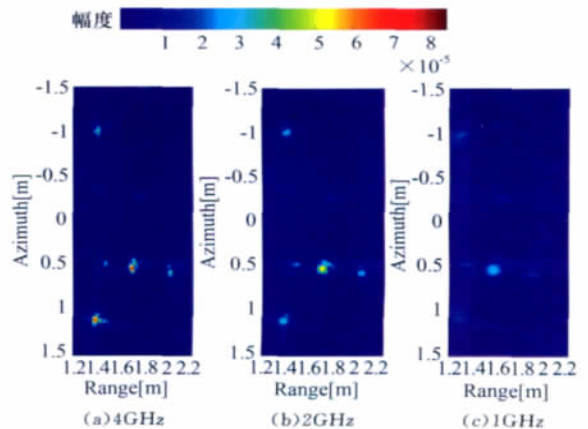


图 5 不同带宽时的成像结果(X 波段)

4.3 极化方式对检测性能影响

目标的后向散射特性往往随着入射和接收电磁波极化方式的变化而变化,并且存在一个特定的最优入射电磁波极化,使得目标散射能量达到最大;给定入射极化后,还存在着一个最优接收极化,使得对散射信号的接收功率达到最大。热噪声、杂波和干扰背景可以看作是随机影响,其回波强度不随极化的变化而变化。而对于确定性形状、介电特性的弱目标,其回波强度将随着不同极化方式改变,利用这一特性可以检测出弱目标。

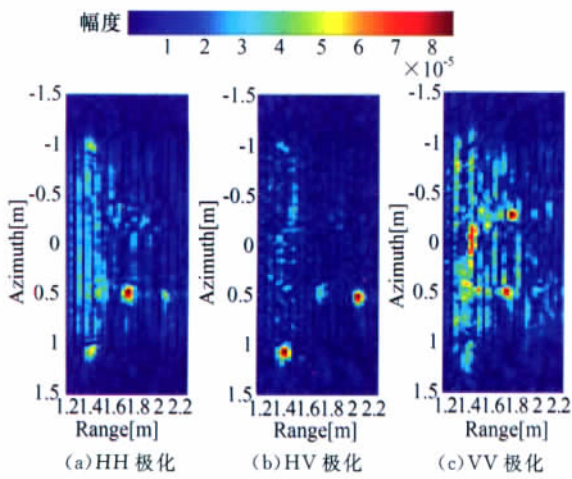


图6 不同极化时的成像结果(S波段)

图6分别给出了S波段下HH、HV和VV极化时的成像结果图,对于目标C,在HH极化时,强

度较弱;而VV极化时,强度较强,HH和VV回波强度存在显著差异,由此可以检测弱目标的存在。

以上从工作频率、带宽和极化方式等方面分析了地基SAR用于塑料目标和干沙覆盖目标的检测性能。实验结果表明,塑料目标D和干沙覆盖的二面角目标C可以通过适当地选取系统参数从而实现检测识别。然而对于干沙覆盖的塑料目标B,不能被检测得到,其主要原因是回波较弱而环境杂波强度大,仅利用SAR强度和常规极化SAR信息难以实现有效检测。

5 结束语

为了分析研究极化干涉SAR检测掩藏微弱目标的应用潜力,本文基于地基SAR实验并分析了系统参数与弱目标检测性能的关系。实验结果分析表明,塑料目标和干沙覆盖下的二面角目标可以被有效检测。然而对于干沙覆盖的塑料目标,难以通过常规SAR回波强度进行检测。根据极化SAR和干涉SAR信息获取特性,有望可以通过极化SAR信息与干涉SAR信息的组合,实现对干沙覆盖塑料目标的检测。在后续实验研究中,将获取极化干涉SAR数据进行此类目标检测的研究。

致谢:感谢中科院电子所微波成像技术国家级重点实验室(IECAS-MITL)提供地基SAR系统实验支持。

参考文献

- [1] Oliver C, Quegan S 著. 丁赤飏, 陈杰, 何国金, 等译. 合成孔径雷达图像理解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] Zhou X B, Chang N B, Li S S. Applications of SAR interferometry in earth and environmental science research[J]. Sensors, 2009(9): 1876-1912.
- [3] Lee J S, Pottier E. Polarimetric radar imaging: From basic to applications[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- [4] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551-1565.
- [5] Cloude S R, Papathanassiou K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry[J]. IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation, 2003, 150(3): 125-134.
- [6] Lopez-Sanchez J M, Ballester-Berman J D. Potentials of polarimetric SAR interferometry for agriculture monitoring[J]. Radio Science, 2009, 44(RS2010).
- [7] Sagues L, Lopez-Sanchez J M, Fortuny J, et al. Polarimetric radar interferometry for improved mine detection and surface clutter rejection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(6): 1271-1278.