

## 凹障碍超宽带 SAR 图像特征分析\*

蒋志彪, 王 建, 宋 千, 周智敏

(国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**野外环境下的凹障碍感知一直是地面无人作战平台环境感知面临的难题,长期以来常规传感器,例如立体视觉、红外相机和激光雷达,都没有取得好的效果。超宽带合成孔径雷达作为一种全天时、全天候的高分辨率雷达,在目标感知方面得到了广泛的运用。基于超宽带合成孔径雷达感知凹障碍是一种有效的感知手段,阐述了凹障碍的雷达成像几何,利用 MATLAB 模拟仿真合成孔径雷达数据获得了凹障碍图像,分析得出了凹障碍在雷达图像表现出由阴影区和光亮区紧密相连的特征,并通过实测数据成像获得的凹障碍图像结果,对凹障碍雷达图像特征进行了进一步的验证。

**关键词:**合成孔径雷达;凹障碍;后向投影

**中图分类号:**TP957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)06-160-05

## Study on ultra-wideband SAR image feature of negative obstacle

JIANG Zhibiao, WANG Jian, SONG Qian, ZHOU Zhimin

(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Negative obstacle sensing is one of the most difficult problems for unmanned ground vehicle in unstructured environments. The regular obstacle sensors, such as stereo vision, infrared detector and lidar, have their limited performances in unconstructed environments. Ultra-wideband SAR (synthetic aperture radar) sensors have the ability to operate in all weather, all lighting and foliage covered conditions, which have been received widely. Sensing negative obstacle by ultra-wideband SAR for unmanned ground vehicle was an effective way. Image geometry of negative obstacle was expounded. The simulation image of negative obstacle was obtained by simulation based on MATLAB, and the conclusion that the image feature of negative obstacle is the shadow area next to shine area is obtained. Moreover, a real data experiment is presented and the experimental result proves the same conclusion again.

**Key words:** negative obstacle; synthetic aperture radar; back projection

由于军事上的特殊运用,地面无人作战平台得到了各个国家的普遍重视,美国、西欧等国家早在 20 世纪 70 年代就进行了许多探索性的研究。其中美国在国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 的支持下,Stanford 和 Carnegie Mellon 等大学开始了地面无人平台在野外自动驾驶的研究。从 2004 年起,美国 DARPA 更是发起了每年一届的机器人挑战。目前地面无人作战平台在自动控制、人工智能、环境感知方面均取得了很大的进展<sup>[1-2]</sup>。

然而,在地面无人作战平台环境感知中,凹障碍感知一直是一个非常有挑战性的研究课题。目前,用于地面无人作战平台上常用的传感器有红外相机、立体视觉和激光雷达等,这些传感器在结构化和有利的气候条件下,已经取得了较好的障

碍感知效果,但是这些传感器也都存在一定的问题<sup>[3-9]</sup>。例如,立体相机存在感知距离过近、计算复杂度和立体匹配等问题;红外相机容易受到大气、地面热辐射以及探测器噪声等因素影响;而激光雷达在平台运动情况下只能获取稀疏的点云数据,不利于对凹障碍的感知。特别是在野外环境下,上述传感器的障碍探测会受到很大的影响,无法有效探测植被覆盖目标、坑洞、树桩等障碍物。

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种全天时、全天候高分辨成像雷达,具有传统光学、红外成像无法企及的决定优势。而超宽带 SAR 将超宽带和合成孔径两种先进技术相结合,不仅具备距离向和方位向的二维高分辨成像能力,而且还具备一定的植被穿透能力,在探测叶簇覆盖目标和地面浅埋目标方面得到了重要

\* 收稿日期:2016-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372163)

作者简介:蒋志彪(1988—),男,湖南益阳人,博士研究生,E-mail:13596458441@163.com;

周智敏(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:kdzhouzm@sina.cn

应用,其实超宽带 SAR 也可以作为地面无人作战平台上的障碍感知传感器<sup>[10-13]</sup>。文献[10]是美国陆军实验室的 BoomSAR 系统,最早是应用在探测地雷等浅埋目标,后来用于地面被植被覆盖目标的探测。文献[11-12]是陆军实验室设计的一种基于阵列天线的低频超宽带 SAR 系统,采用同步脉冲重建和前视成像,用于支持地面无人平台的障碍感知。文献[13]是韩国国防发展研究院用于植被覆盖目标感知的地面无人车载前视雷达。

本文将利用超宽带 SAR 对凹障碍进行成像,分析和研究凹障碍在超宽带 SAR 图像中的图像特征,为凹障碍在超宽带 SAR 障碍感知中提供理论支撑,进一步为凹障碍雷达图像特征提取和分割奠定理论基础。

### 1 凹障碍成像几何

实际环境中,凹障碍的形状多种多样,简单来说,可以将它们分为三类:悬崖型凹障碍、负台阶型凹障碍以及沟型凹障碍,如图 1 所示,其中虚线表示雷达视线方向。

下文以沟型凹障碍为例进行分析,其成像几何示意图如图 2 所示。一般来说,对于理想平地地面,其后向散射系数是与雷达擦地角和地面粗糙程度等因素紧密相关的,在补偿自由空间距离的影响后,理想平地地面的雷达信号强度在距离向上是相似的。但是当地面场景中有高程起伏时,特别是地面倾角与雷达天线的侧偏角可以比拟时,会产生透视收缩、叠掩和阴影等现象,形成独特的雷达图像特征。

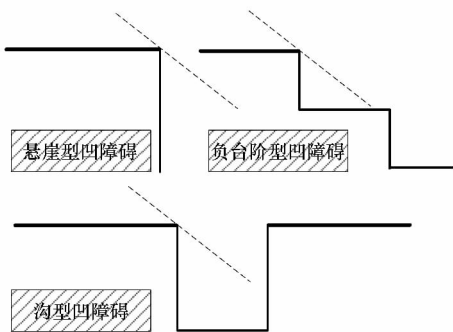


图 1 凹障碍分类

Fig. 1 Types of negative obstacle

对于凹障碍,由于其沟壑低于地面,沟壑前壁的遮挡会造成雷达波无法照射到 I 区域,所以 I 区域将不存在雷达回波,即反映为高斯噪声,相应地, I 区域的后向散射能量比较小;而沟壑后壁 II 区域正对着雷达,在 II 区域雷达的回波强度将会

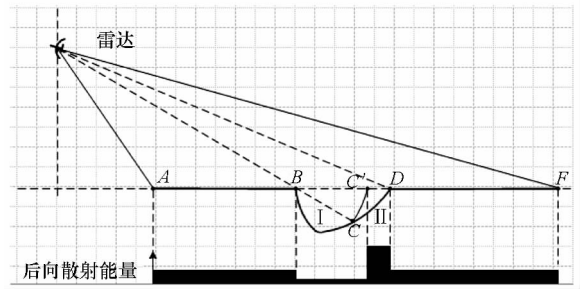


图 2 凹障碍成像几何

Fig. 2 Geometry of negative obstacle

强于地面普通区域,如果 II 区域坡度角度比较大时,还可能形成叠掩,造成叠掩区域的信号是多个散射面的回波叠加,反映在 II 区域内的雷达回波强度要较其他同质区域明显偏高,这样将会造成障碍迎坡面 II 区域后向散射能量比较大。

### 2 实验结果

#### 2.1 仿真实验结果分析

在上一节对凹障碍成像几何分析的基础上,为了研究凹障碍在超宽带 SAR 二维图像中的特征,首先利用 MATLAB 语言对地形场景的雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)和回波进行了仿真编程,实现了超宽带 SAR 系统对凹障碍场景的二维成像,获取了凹障碍的超宽带 SAR 仿真数据和二维图像,系统的仿真流程图如图 3 所示。

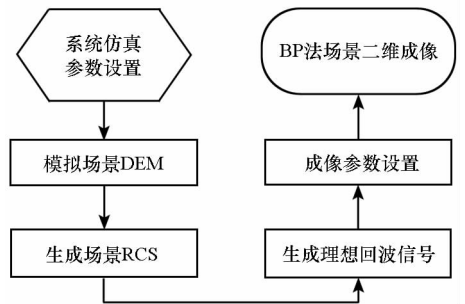


图 3 系统仿真流程图

Fig. 3 Diagram of system simulation

文中采用后向投影(Back Projection, BP)算法进行二维成像,BP 算法无须做任何近似,在运动补偿、几何校正等方面具有优势。超宽带 SAR 系统仿真参数如下,采用步进频率信号体制,系统工作频率范围为 13 GHz ~ 15 GHz,合成孔径长度为 1 m,孔径间距为 0.01 m。仿真模拟的凹障碍地形场景由 1 个低于地面的凹陷组成,其中凹陷的最大深度为 -0.8 m,分布范围在雷达前方(距离向)10 ~ 16 m,左右(方位向)宽 5 m,凹障碍的模拟地形场景的数字高程图(Digital Elevation

Map, DEM) 如图 4 所示。

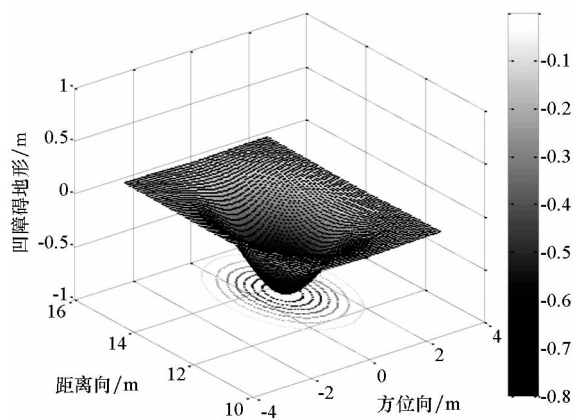


图 4 模拟场景 DEM

Fig. 4 Simulation scene of DEM

准确模拟凹障碍地形场景的 RCS 是面目标回波仿真的关键,面目标回波仿真的常用方法有时域脉冲相干法、频域脉冲相干法和二维频域快速傅里叶变换法三种。在这里选用了时域脉冲相干法,首先将凹障碍地形分成平面小单元,要求平面小单元小于雷达分辨率单元,并大于信号波长。另外,由于凹障碍地形网格均匀,目标相位已知,所以会造成较严重的干涉条纹,本文通过采用增加随机相位的方法进行了抑制。利用 BP 成像算法对距离向 10 ~ 15 m、方位向以合成孔径长度中心处左右各 2.5 m 的区域进行二维成像,其成像结果如图 5 所示。

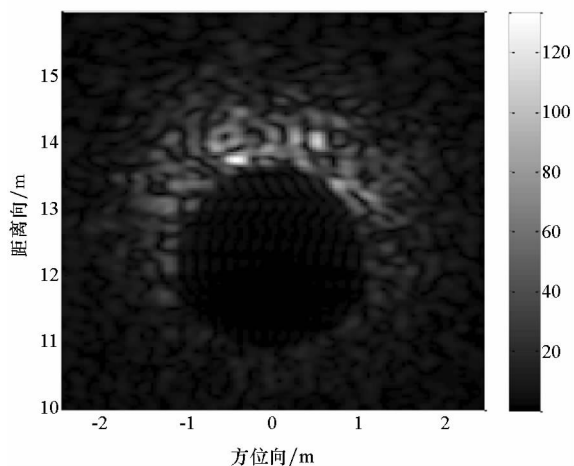


图 5 仿真凹障碍图像

Fig. 5 Simulated negative obstacle image

从凹障碍的超宽带 SAR 仿真图像可以看出,图像中凹障碍表现出阴影区域和光亮区的特点,而且阴影区在前面,光亮区紧邻其后。凹障碍的阴影区域是由于凹障碍沟壑前壁的遮挡造成的,通过凹障碍成像几何关系可知,凹障碍阴影区域的大小是与凹障碍的位置、宽度以及深度紧密相

关的。同理,光亮区域是由于沟壑后壁区域正对着雷达造成的,所以凹障碍光亮区域的形状、大小与凹障碍的后壁区域形状、位置和倾斜角度等信息是紧密相关的。

对于阴影区,有可能是因为遮挡造成的,也有可能是因为地面的镜面反射造成的(见图 5 的外围部分),因为镜面反射和地形遮挡,都会造成雷达无法接收目标的回波,单独从阴影区特征是无法区分的,还需要结合其他更多的特征组合才能有效地分开,比如光亮区域。对于凹障碍,其阴影区域在前面而光亮区域在后。当图像中存在较多的大面积阴影区时,此时很难判断凹障碍目标的准确区域或者容易导致误判。

由于图像中存在比较强的噪声和相干斑,使得凹障碍表现出阴影区域和光亮区域断断续续,为了去除图像中存在的噪声和相干斑,在这里选用了 Gamma MAP 滤波器<sup>[14-15]</sup>对凹障碍图像进行了滤波,滤波窗口为 7 × 7,其滤波图像结果如图 6 所示,图像中凹障碍表现出阴影区域和光亮区得到较好的平滑,呈现出明显的阴影区域和光亮区域紧密相连。

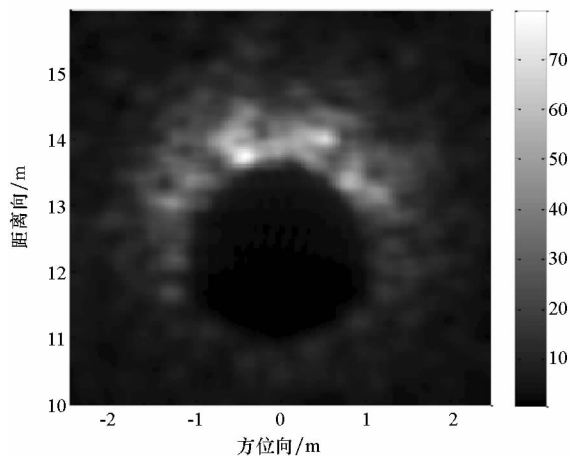


图 6 仿真凹障碍滤波图像

Fig. 6 Simulated negative obstacle filtered image

### 2.2 实测数据结果分析

为了进一步验证凹障碍雷达的图像特征,本课题组搭建了一个线性轨道的超宽带 SAR 系统,用其录取凹障碍的实测数据。

图 7 是超宽带 SAR 系统在外场条件下进行凹障碍探测的示意图,雷达系统架在 0.8 m 高的轨道上,凹障碍位于雷达前方,距离 10 m,场景左侧是光滑的道路,场景右侧有落叶、草和大树等植被。超宽带 SAR 系统参数如下:系统采用步进频率信号,频率步进间隔为 2 MHz,步进频率范围为 13.5 GHz ~ 14.5 GHz,合成孔径长度为 1.2 m,孔

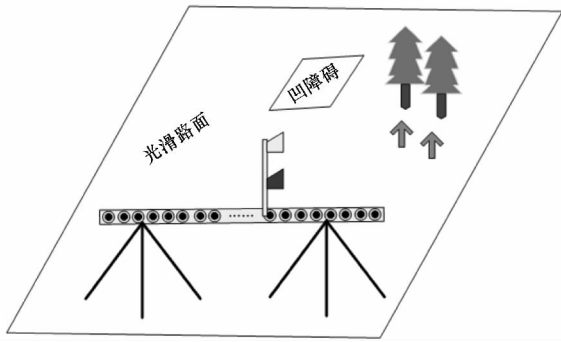


图7 超宽带 SAR 系统

Fig. 7 Ultra-wideband SAR system

径间距为 0.01 m。将雷达获取的实测凹障碍数据,利用 BP 成像算法进行二维成像,成像范围为距离向 4 ~ 15 m、方位向以合成孔径长度中心处左右各 3 m 的区域,其成像结果如图 8 所示。从图 8 得知,凹障碍在图像中表现出阴影区域和光亮区域,如矩形所示区域内,其特点是颜色最深的阴影区域位于前面,而紧邻其后的是跟障碍边缘吻合的光亮区域,成像结果跟其仿真的凹障碍成像结果特征相同。凹障碍的阴影区域是由凹障碍前壁遮挡造成的,而凹障碍的后壁倾角接近于直角,所以光亮区域很小,跟线形相似。

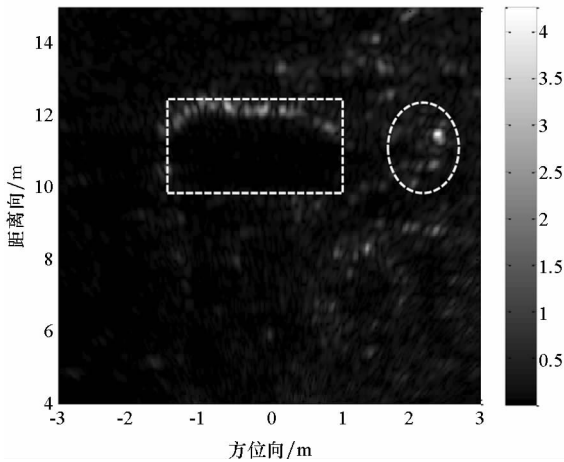


图8 实测凹障碍图像

Fig. 8 Real negative obstacle image

通过图 7 实测场景的示意图可知,示意图左侧是光滑的路面,后向散射比较弱,对应应在雷达图 8 中,光滑的路面表现为黑色;而示意图的右侧比较粗糙,同时还有落叶、草和大树等植被,相比于光滑的路面,其后向散射较强,对应应在雷达图 8 中,表现为零星的亮点,尤其是树干的后向散射相对较强,如雷达图 8 右侧椭圆区域中存在的明显亮点是由周边树干的强后向散射所造成的。

图 8 中左下侧部分地面光滑,雷达波入射时,大部分入射波发生镜面反射,造成雷达能够接收

到的目标回波很少,因而在雷达图像中表现为暗区域,(如图 8 的左下侧部分所示),虽然幅度比较小,但还是有部分能量,可以将其看成背景区域。而凹障碍前壁遮挡造成的凹障碍阴影区,由于信号被遮挡,是没有雷达回波的,这部分阴影区的能量为零。另外,由于超宽带 SAR 成像是固定孔径成像,只有成像场景中心的目标方位分辨率最高,处于场景中心两侧的方位分辨率随着离场景中心距离的增大而变差。此时容易造成凹障碍目标图像的边缘尺寸变形,为凹障碍雷达图像边缘尺寸的特征提取和分割增加了难度。图 9 是 Gamma MAP 滤波后的凹障碍图像结果,其滤波窗口为  $7 \times 7$ ,噪声和相干斑被滤除,其阴影区域和光亮区得到较好的平滑,阴影区域和光亮区的对比也更加明显;从图中也能看出目标的细节和边缘被模糊。

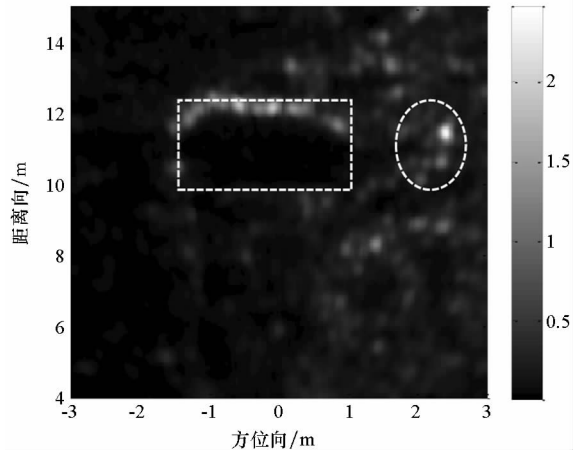


图9 实测凹障碍滤波图像

Fig. 9 Real negative obstacle filtered image

### 3 结论

本文分析了凹障碍 SAR 图像,得出凹障碍在图像中表现出由阴影区域和光亮区域紧密相连的特征,并且凹障碍阴影区域和光亮区域的形状、大小跟凹障碍的形状、深度和位置等信息是紧密相关的。在凹障碍仿真和实测实验中,验证了上述结论,这为下一步的凹障碍雷达图像特征提取和分割奠定了理论基础。当然,以上研究只是超宽带 SAR 进行凹障碍探测的起步,还有许多问题有待进行深入研究,如凹障碍图像中的阴影和光亮特征的提取和检测识别等问题。

### 参考文献 (References)

- [1] Talukder A, Manduchi R, Castano R, et al. Autonomous terrain characterisation and modelling for dynamic control of unmanned vehicles [J]. IEEE Transaction on Intelligent

- Transportation Systems, 2002, 13(2): 708 - 713.
- [2] 戴斌, 聂一鸣, 孙振平, 等. 地面无人驾驶技术现状及应用[J]. 汽车与安全, 2012(3): 46 - 49.  
DAI Bin, NIE Yiming, SUN Zhenping, et al. Development and application of unmanned ground vehicle [J]. Auto & Safety, 2012(3): 46 - 49. (in Chinese)
- [3] Matthies L, Rankin A. Negative obstacle detection by thermal signature [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003: 906 - 913.
- [4] Barbe S, Krapez J C. Performance modeling and assessment of infrared-sensors applicable for TALOS project UGV as a function of target/background and environmental conditions[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8355: 41.
- [5] Yang C, Peng J J, Sun J, et al. V-disparity based UGV obstacle detection in rough outdoor terrain [J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(5): 667 - 673.
- [6] Hu T B, Nie Y M, Wu T, et al. Negative obstacle detection from image sequences[J]. Proceedings of the SPIE, 2011, 8009: 80090Y.
- [7] Choi J, Lee J, Kim D, et al. Environment-detection-and-mapping algorithm for autonomous driving in rural or off-road environment [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(2): 974 - 982.
- [8] Heckman N, Lalonde J F, Vandapel N, et al. Potential negative obstacle detection by occlusion labeling [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: 2168 - 2173.
- [9] Han J, Kim D, Lee M, et al. Enhanced road boundary and obstacle detection using a downward-looking LIDAR sensor[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(3): 971 - 985.
- [10] Nguyen L H, Wong D C, Stanton B, et al. Forward imaging for obstacle avoidance using ultrawideband synthetic aperture radar[J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 5083: 519 - 528.
- [11] Ressler M, Nguyen L, Wong D, et al. The army research laboratory (ARL) synchronous impulse reconstruction (SIRE) forward-looking radar[J]. Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering, 2007, 6561: 656105.
- [12] Nguyen L, Wong D, Ressler M, et al. Obstacle avoidance and concealed target detection using the Army Research Lab ultrawideband synchronous impulse reconstruction (UWB SIRE) forward imaging radar [J]. Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering, 2007, 6553: 65530H.
- [13] Song J P, Ross J A, Shires D R, et al. Hybrid core acceleration of UWB SIRE radar signal processing[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2010, 22(1): 46 - 57.
- [14] Lopes A, Nezry E, Touzi R, et al. Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in Sar images[C]//Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1990: 2409 - 2412.
- [15] Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1990, 28(6): 992 - 1000.