

# 一种基于连通分析的 UWB SAR 目标检测算法

杨志国 黄晓涛 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要** 由于超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)具有较强的穿透性而被广泛用于探测叶簇覆盖目标,但目前针对此种目标的检测尚未有系统完整的检测算法提出,多数研究机构在对基于 UWB SAR 的叶簇覆盖目标进行检测时,均沿用美国 Lincoln 实验室提出的三级结构检测流程,该通用检测算法在对高波段、高分辨率全极化 SAR 数据进行目标检测时,虽表现出良好的检测和识别性能,但用于 UWB SAR 叶簇覆盖目标检测时,则存在诸多不适用性。该文在对通用检测算法用于 UWB SAR 目标检测时存在的问题进行分析的基础上,提出了一种适用的新算法,该新算法通过滑窗平均、低门限恒虚警(CFAR)检测以及连通分析降低了算法对检测环境的要求,从而增强了算法的适用性和稳健性,最后给出了采用通用检测算法和新算法对 UWB SAR 图像中叶簇覆盖目标进行检测的结果,并验证了新算法在 UWB SAR 叶簇覆盖目标检测中的有效性。

**关键词** 超宽带合成孔径雷达 目标检测 检测概率 虚警概率 小滑窗平均 低门限恒虚警 连通分析

**中图分类号**: TP751.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2008)07-1309-07

## A Target Detection Algorithm of UWB SAR Based on Connectivity Analysis

YANG Zhi-guo, HUANG Xiao-tao, ZHOU Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** Ultra-wide band (UWB) synthetic aperture radar (SAR) is widely used to explore the foliage-concealed targets for its better penetrability. But no systemic and integrated detection algorithm is presented for UWB SAR detection. Most of research institutes follow the three-stage detection flow developed by Lincoln laboratory to detect the foliage-concealed targets in UWB SAR images. This current detection algorithm performs excellently when it is used to detect and recognize targets based on high-frequency, high-resolution and fully polarimetric SAR data. But there are many problems when it is used to detect the foliage-concealed targets in UWB SAR images. The question is analyzed when the current algorithm is used to detect the targets of UWB SAR, and a new detection algorithm is presented in the paper. The new algorithm decreases the requirements of detection condition by small slip-window average, low-threshold constant false alarm rate (CFAR) detection and connectivity analysis. It has the good applicability and steadiness. The detection results of the current detection algorithm and the proposed new algorithm for foliage-concealed targets in three UWB SAR images are given in the end of the paper, and they testify the validity of the new detection algorithm in the foliage-concealed target detection of UWB SAR.

**Keywords** ultra-wide band (UWB) SAR, target detection, detection probability, false alarm rate, small slip-window average, low-threshold constant false alarm rate (CFAR), connectivity analysis

## 1 引言

超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)一般工作在

VHF/UHF 频段,其具有较强的穿透性,可以穿透叶簇、地表,用于获取隐蔽目标信息<sup>[1,2]</sup>。UWB SAR 的穿透性有着重要的军事应用价值,例如和平时期其可用于排除遗留的地雷<sup>[3]</sup>,战争时期可用于探测

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(60402034)

**收稿日期**:2006-08-24;**改回日期**:2007-01-23

**第一作者简介**:杨志国(1979~),男,2007年获国防科学技术大学电子科学与工程学院博士学位。现为中国人民解放军94326部队助工。主要研究方向为超宽带合成孔径雷达目标检测技术。E-mail: yzhgdd@163.com

敌方隐蔽的战术目标<sup>[1]</sup>,但这些应用都离不开 UWB SAR 目标检测技术。UWB SAR 目标检测可以基于多种信息,例如幅度信息<sup>[4,5]</sup>、极化信息<sup>[6,7]</sup>、方位向信息<sup>[8,9]</sup>、多分辨率信息<sup>[10]</sup>及变化信息<sup>[11]</sup>等,但针对 UWB SAR 的目标检测,目前尚未有系统完整的检测流程提出,相关研究机构均沿用美国 Lincoln 实验室提出的三级结构模式来进行 UWB SAR 目标检测<sup>[4]</sup>,该通用检测算法在用于高波段、高分辨率全极化 SAR 数据的目标检测时,具有良好的检测和识别性能,但将其应用于 UWB SAR 图像目标检测时,则并不能取得很好的检测效果,其原因主要有以下两点:首先,UWB SAR 的工作波长较长,即使采用了超宽带技术,UWB SAR 图像的分辨率与高波段 SAR 仍存在较大差距,UWB SAR 图像一般呈低分辨率特性;其次,UWB SAR 探测的对象多为隐蔽目标,由于叶簇或土壤介质等遮蔽物对电磁波的双程衰减作用,致使目标呈低散射特性。基于 UWB SAR 目标图像的上述特点,本文提出了一种适于 UWB SAR 目标检测的新算法,该算法通过小滑窗平均、低门限 CFAR(constant false alarm rate)检测以及连通分析不仅降低了算法对检测环境的要求,而且增强了算法的适用性和稳健性,检测结果也验证了新算法应用于 UWB SAR 目标检测的合理性和有效性。

## 2 通用检测算法适用性分析

目前,一些相关研究机构对 UWB SAR 叶簇覆盖目标检测技术都开展了研究,并提出了一些算法,除美国 Lincoln 实验室提出的通用三级结构检测流程外,讨论较多的是利用 UWB SAR 大积累角的特点,通过方位向特征来提高目标检测效果,已提出的检测算法,如方位向匹配滤波检测算法、子孔径变化检测算法、归一化标准偏差滤波检测算法、基于隐马尔可夫模型的多孔径目标检测算法、基于主成分分析的方向性特征融合检测算法等,但由于上述算法均为从单个特征提取的角度出发提出的,不属于系统检测算法的范畴,因此本文将重点对多数研究机构均采用的通用检测算法在 UWB SAR 目标检测中的适用性进行分析。

### 2.1 通用检测算法介绍

由 Lincoln 实验室提出的通用三级结构检测流程整体框图如图 1 所示

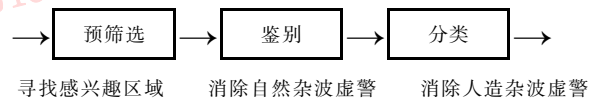


图 1 通用检测算法整体框图

Fig. 1 Diagram of current detection algorithm

如图 1 所示,通用检测算法包括预筛选部分 (prescreener)、鉴别部分 (discriminator) 及分类部分 (classifier),其中预筛选部分是通过一个双参数 CFAR 检测器来快速寻找感兴趣区域 (ROI);鉴别部分是通过提取一系列目标特征来消除自然杂波,而分类部分则通过分类器来消除人造杂波,以实现检测目标的分类。

①预筛选部分。该部分是通过一个双参数 CFAR 检测器来快速寻找 ROI,该双参数 CFAR 检测器的数学表达式如下:

$$\frac{X_t - \hat{\mu}_c}{\hat{\sigma}_c} > K_{CFAR} \quad (1)$$

式中, $X_t$ (下角 t 代表 test)为待检测像素的灰度值, $\hat{\mu}_c$ 为杂波灰度的均值估计, $\hat{\sigma}_c$ 为杂波灰度的均方差估计, $K_{CFAR}$ 是由虚警概率确定的一个常数。CFAR 检测的过程即是根据式(1)来确定检测对象的属性:当待检测像素的灰度值满足式(1)时,则该像素点作为目标点置 1,反之,则作为杂波点置 0。一幅原始的实图像经 CFAR 检测即得到一幅对应 0-1 的二值图像,由于目标通常由多个像素点组成,因此为了方便下一步的目标特征提取,需要对 0-1 二值图像进行聚类,首先得到一系列聚类中心,然后把围绕聚类中心一定范围内的区域(比如 30m × 30m)作为 ROI 送到下一级——鉴别部分。

②鉴别部分。根据预处理得到的 ROI,鉴别部分应首先确定目标的具体位置及相对飞行方向的旋转角。确定方法如下:先用一个跟目标尺寸相当的矩形方框,在 ROI 内部同时进行平移和旋转;然后根据矩形方框内部能量最大的原则确定出目标的具体位置和旋转角;最后在确定的矩形方框内部进行目标特征提取,具体提取的特征如表 1 所示。

表 1 通用检测算法提取的目标特征

Tab. 1 Target feature extracted in current detection algorithm

结构特征	比较特征	尺寸特征	极化特征
标准偏差	峰值 CFAR	集合点数	纯度百分比
空间维数	平均 CFAR	直径	偶数纯度百分比
比例填充	亮度百分比 CFAR	标准化旋转惯量	偶数亮度百分比

表 1 所列特征的具体定义见参考文献[4]。

鉴别部分的最后一步是先把提取的目标特征组成一个特征向量,然后由此特征向量根据式(2)计算出二次距离  $d_t(\mathbf{X})$  (下角  $t$  代表 target)。

$$d_t(\mathbf{X}) = \frac{1}{n}(\mathbf{X} - \hat{\mathbf{M}})^T \hat{\Sigma}^{-1}(\mathbf{X} - \hat{\mathbf{M}}) \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{X}$  为待检测的目标特征向量,  $n$  为提取的特征数,  $\hat{\mathbf{M}}$ 、 $\hat{\Sigma}$  是由训练数据训练得到的目标参考特征向量和特征向量相关矩阵,最后根据计算得到的二次距离  $d_t(\mathbf{X})$  即可判断检测对象的属性。

③分类部分。由于本文讨论的内容主要与三级结构中的前两级有关,因此本文对分类部分不做详细说明。

## 2.1 通用检测算法适用性分析

通过上述分析可以看出,通用检测算法要求待检测图像和目标满足一定条件,即首先对 CFAR 检测所得 0-1 二值图像进行聚类过程中,为消除杂波点对聚类的影响和防止大量虚假聚类中心的出现,以及防止聚类中心的严重偏离,CFAR 检测需设定低的虚警概率。由接收机工作特性曲线可知,低虚警概率对应于低的检测概率,为保证在低虚警概率情况下,算法仍具有优良的性能,待检测目标应具有强的散射特性,而目标具有强的散射特性则是通用检测算法的应用条件之一。

其次,分类部分在对目标位置和旋转角进行确定的过程中,由于算法是通过一个跟目标相当的矩形方框进行平移和旋转的方法来实现的,因此待检测图像和目标需满足如下两个条件:(1) SAR 图像要具有足够高的分辨率,如果待检测图像为低分辨率图像,则与目标对应的 SAR 图像不能准确反映目标的形状结构,而跟目标相当的矩形方框尺寸也很难预先精确确定,致使目标具体位置和旋转角的准确确定将无法进行。(2)与目标对应的 SAR 图像具有或近似具有尺寸旋转不变性,由于在目标检测过程中,目标相对飞行方向的

旋转角是预先未知的,因此只有目标满足上述条件,才能通过一个预置尺寸的固定方框的平移和旋转来确定准确的目标位置和旋转角,否则,上述步骤无法进行。

综上所述,通用检测算法的应用条件主要有以下 3 个方面:①目标具有强散射特性;②SAR 图像具有高的分辨率;③目标具有或近似具有尺寸旋转不变性。当上述 3 个条件不能同时满足时,通用检测算法性能将大大降低,文献[4]给出的低分辨率(1m×1m)情况下通用检测算法的检测结果也说明了上述分析结论。

在 UWB SAR 目标检测中,首先由于 UWB SAR 波长较长,因此,一方面它只能反映目标的轮廓结构,很难提供目标的精细信息,另一方面即使采用了超宽带技术,目前 UWB SAR 分辨率仍然难以达到通用检测算法所要求的分辨率;其次,UWB SAR 检测对象多为叶簇遮蔽目标或埋地目标,由于遮蔽物对电磁波的双程衰减,使得目标散射截面较裸露情况大大减小,如果采用通用检测算法对隐蔽目标进行检测,则低虚警 CFAR 过程将使目标检测概率受到很大损失,从而使通用检测算法性能大大降低;在侧视 UWB SAR 图像中,即使对 UWB SAR 图像进行了几何校正,与目标对应的 SAR 图像旋转不变的条件也难以满足。综合上面的分析可以得出:如果采用通用检测算法对 UWB SAR 图像进行目标检测,则检测性能很难满足实际需要,因此必须寻找适于 UWB SAR 目标检测的新算法,以增强目标检测的有效性。

## 3 一种适于 UWB SAR 目标检测的新算法

本文提出了一种新的检测算法,其流程如图 2 所示,由于本文不讨论分类问题,故整体框图不包括分类部分。



图 2 一种适于 UWB SAR 目标检测新算法整体框图

Fig. 2 Diagram of a new detection algorithm fit for UWB SAR target detection

由图 2 可以看出,本文提出的检测算法分小滑窗平均、低门限 CFAR、图像连通分析及目标特征提取 4 个步骤,下面逐一进行详细说明。

(1)小滑窗平均。对于一幅原始 UWB SAR 图像,应首先采用小滑窗进行平均处理,2 维  $a \times b$  大小的滑窗平均,其数学表达式如式(3)所示。

$$x_{m,n} = \frac{1}{a \times b} \sum_{j=m-\frac{a-1}{2}}^{m+\frac{a-1}{2}} \sum_{k=n-\frac{b-1}{2}}^{n+\frac{b-1}{2}} w_{j-m,k-n} x_{j,k} \quad (3)$$

式中,  $x_{i,j}$  为像素点  $(i,j)$  的灰度值,  $w_{i-m,j-n}$  为  $x_{i,j}$  的权重系数。所谓滑窗平均处理就是将一个预先确定的滑动窗口在待处理图像中逐像素滑动, 并用滑动窗口内像素的灰度值的平均值作为滑窗中心点的灰度值, 由于滑窗平均可以使图像灰度变化趋于平缓, 因此经滑窗平均处理后的 SAR 图像再经过 CFAR 检测, 其准目标区域的连通性较滑窗平均前有很大改善。下面以 SAR 图像中任意相邻的两个像素点  $(m,n)$ 、 $(m+1,n)$  为例来说明上述结论。一般地, 取  $w_{j,k} = 1$ , 由式(3)计算得到的滑窗平均后两点的灰度值差为

$$x_{m+1,n} - x_{m,n} = \frac{1}{a \times b} \sum_{k=n-\frac{b-1}{2}}^{n+\frac{b-1}{2}} (x_{m+1+\frac{a-1}{2},k} - x_{m-\frac{a-1}{2},k}) \quad (4)$$

由式(4)可以得出, 滑窗平均不仅减缓了图像灰度的变化趋势, 而且增强了经 CFAR 检测图像的连通性。

另一方面, 由于滑窗平均改善了自然杂波的杂波分布特性, 从而使自然杂波分布模型更趋于正态分布, 该结论由中心极限定理<sup>[12]</sup>容易得出。图 3 为服从 Weibull 分布模型的实际 UWB SAR 图像的自然杂波数据经  $5 \times 5$  滑窗平均前后的杂波分布模型变化示意图, 其中图 3(a) 为自然杂波直方图及其正态分布拟合曲线, 图 3(b) 为自然杂波经滑窗平均后的直方图及其正态分布拟合曲线, 显然, 服从 Weibull 分布模型的杂波经滑窗平均后, 其分布模型更加接近正态分布。

因滑窗平均本身具有破坏边缘信息的特点, 且破坏程度随滑动窗口的增大而加剧, 故新算法采用小滑窗平均, 其主要目的是为了在增强连通性、改善自然杂波分布的同时, 还能较好地保护目标边缘信息, 使提取出的目标连通区域更接近于目标对应 SAR 图像的真实形状, 以保证新算法的整体检测性能。

(2) 低门限 CFAR 检测。该步骤的主要作用是在保证检测概率不受损失的前提下, 尽量分散自然杂波区域, 对服从某一分布的均匀自然杂波区域进行虚警概率为  $\alpha$  的 CFAR 检测, 由 CFAR 定义及数理统计知识可知, 该区域将会有比例为  $\alpha$  的杂波点剩余, 且

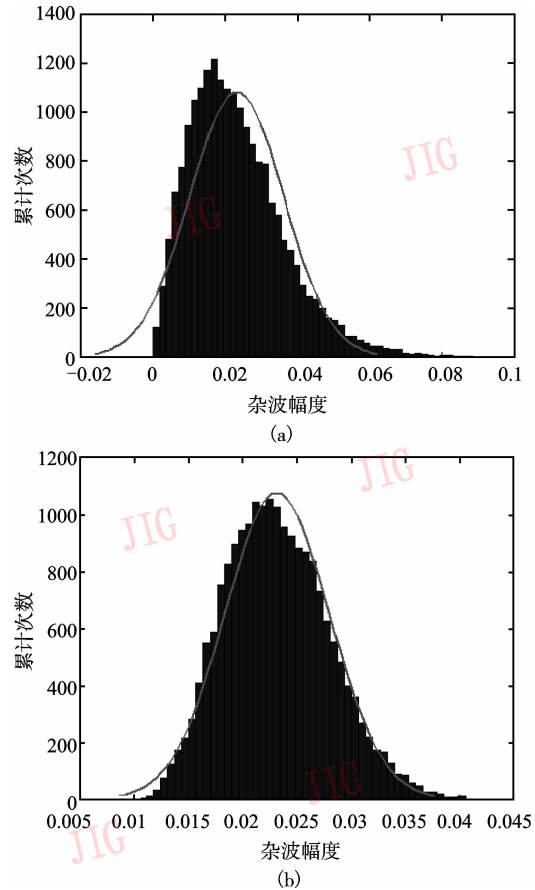


图 3 滑窗平均前后 Weibull 分布杂波分布模型变化示意图  
Fig. 3 Distribution model change diagram of Weibull distribution clutter before and after slip-window average

剩余杂波点呈均匀分布状, 当虚警概率低于一定值时, 则经 CFAR 检测的均匀自然杂波区域的剩余像素点将呈均匀分散状; 而对于目标区域, 则由于通常情况下的目标散射明显高于自然杂波, 而低门限 CFAR 检测则基本不影响目标对应 SAR 图像, 因此一幅 SAR 图像经过低门限 CFAR 检测后, 自然杂波区域呈分散状, 而目标区域仍呈连通状, 以此通过下一级的连通分析即可区分自然杂波区和目标区。

CFAR 检测高虚警概率的确定, 原则上可取为使 CFAR 检测后图像的自然杂波区域得到足够分散的最高虚警概率, 因为足够分散的虚警概率保证了通过连通分析可完全区分目标区域和自然杂波区域, 而最高虚警则是为了使 SAR 图像中目标区域的像素点尽可能不受损失, 以保护目标真实形状信息和保证高的检测概率。为更好地说明高虚警概率的确定过程, 可首先对连通性进行简单说明, 本文对连通的定义是指在图像坐标系中, 若两点横、纵坐标差

的绝对值均不大于一个坐标单位,则两点连通。如图4所示,根据上述连通定义可知,由于图4中与点1连通的点为点2~9,显然,与图像中任一点相连通的点均为8个,因此保证图像不连通的图像抽取率至少为 $1/9$ ,即用于分散均匀自然杂波区域的CFAR检测虚警概率应小于 $1/9$ 。

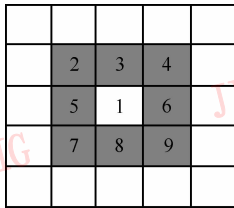


图4 连通示意图

Fig. 4 Connection diagram

另一方面,虚警概率的高低与自然杂波分布的均匀程度有很大关系,如果将自然杂波区域像素点集合看作一随机序列,则其均匀度对应于随机序列的平稳性,即杂波分布越均匀,则与杂波图像像素点集合对应的随机序列越平稳,而用于分散自然杂波的CFAR检测的虚警概率就越高。考虑到实际杂波区域很难满足严格平稳的条件,同时为减轻图像连通分析过程中的数据处理压力,可根据目标散射的情况适当降低虚警概率。

(3)图像连通分析。经低门限CFAR检测得到的SAR图像的自然杂波区域呈分散状,而准目标区域却是连通的,对上述SAR图像进行连通分析的具体过程如下:首先根据连通的定义将经低门限CFAR检测后的图像中的所有连通区域分别记录下来,每个独立的连通区域称为一个连通单元,每个连通单元记录的内容包括像素点灰度值、坐标及该单元的所包含像素点数;然后根据预先设定的像素点粗门限去除掉由部分自然杂波形成的连通单元,并把剩余连通单元作为准目标区送到下一级进行目标特征提取。

上述粗门限将根据杂波分布的均匀程度和CFAR检测的虚警概率来确定,其目的是为了进一步消除因为自然杂波不均匀和虚警概率过高而导致的剩余自然杂波连通单元,以防止自然杂波单元对下一步特征提取的空间信息形成干扰,并减轻因此造成的数据处理压力。由于一般情况下上述自然杂波连通单元所包含的像素点数很少,且明显低于目标连通单元的像素点数,因此该粗门限通常很小,比较容易确定。新算法由于记录保留了大量准目标区,且尽可能

真实地反映了原始SAR图像的空间分布信息,因此可通过空间滤波的方法去除掉一些空间分布有规律的强杂波(例如道路壕沟、电线等形成的杂波)。

(4)目标特征提取。在经过图像连通分析得到的准目标区域内,可基于原始图像提取目标特征,考虑一般情况下UWB SAR图像的分辨率,由于通用检测算法中很多特征已不再具备区分目标和杂波的能力,为此,本文提出了如表2所示的适用特征及其定义。由于通用检测算法中的目标特征是基于旋转矩形方框进行提取的,而新算法则是基于连通区域提取(因为连通区域比矩形方框更接近于目标实际形状,所以由连通区域提取的目标特征将具有更强的区分目标和杂波的能力),从而能有效去除杂波和降低虚警概率。

在连通区域内,计算如表2所示的目标特征,计算时,先将计算得到的目标特征组成特征向量;然后将该特征向量与训练得到的参考特征向量进行类似通用检测算法中的相关运算;最后通过计算得到的二次距离对检测对象的属性进行判决以消除杂波和降低虚警概率。

表2 新算法提取的目标特征

Tab. 2 Target feature extracted in the new algorithm

特征名称	特征定义
集合点数	准目标区域内像素点个数
相对标准偏差	准目标区域内像素灰度值标准偏差与均值之比
极大尺寸	准目标区域全方向投影长度的极大值
极小尺寸	准目标区域全方向投影长度的极小值
比例填充	准目标区域内一定比例最亮像素点能量与总能量之比

## 4 检测结果及分析

为了更好地说明新算法在用于检测UWB SAR图像目标时的合理性和有效性,现选取3幅不同低信杂比的UWB SAR图像进行目标检测试验,所选UWB SAR图像分别如图5(a)、图5(d)、图5(g)所示;其中图5(a)为布置有5辆吉普车的杏树林,矩形方框标注为待检测的目标——吉普车;图5(d)为布置有两辆卡车的桥梁,且卡车被杨树叶簇覆盖,矩形方框标注为待检测的目标——卡车;图5(g)为布置4辆卡车的田间道路,且卡车被槐树叶簇覆盖,矩形方框标注为卡车,三角形标注为角反射器,椭圆标注为房屋。通用检测算法中,CFAR检测虚警概率为 $10^{-6}$ ,新算法中的小滑窗尺寸为 $5 \times 5$ ,低门限

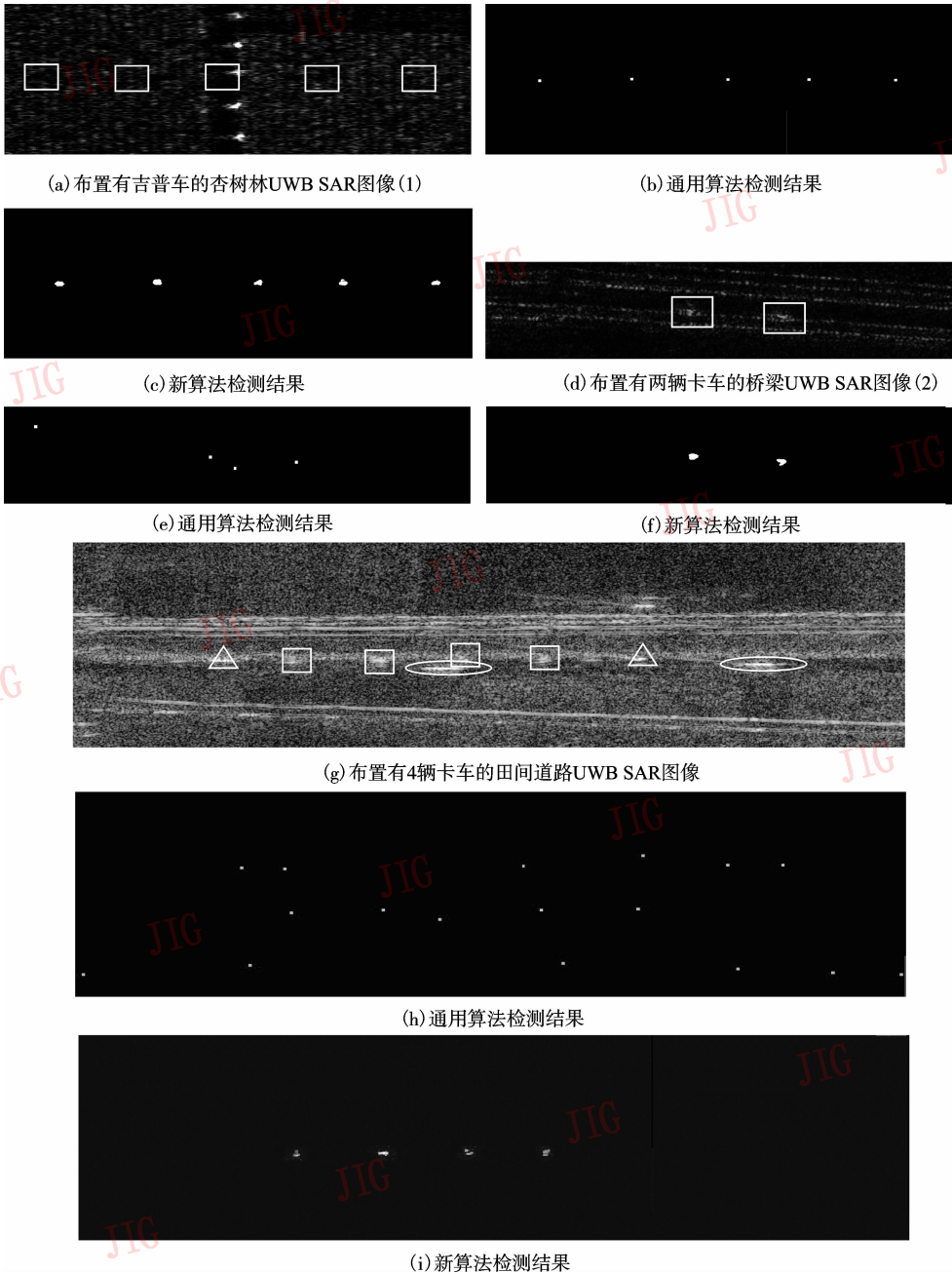


图 5 通用检测算法与新算法检测结果

Fig. 5 Detection results of current and new detection algorithms

CFAR 检测虚警概率为  $10^{-2}$ 。

由图 5(a) ~ 图 5(c) 可以看出, 当待检测图像的信杂比较高时, 通用检测算法与本文提出的新算法均可取得好的检测效果。而由图 5(d) ~ 图 5(f) 可以看出, 当待检测图像的信杂比较低时, 若采用通用检测算法进行检测时, 则强烈的桥梁杂波会导致两个虚假目标的出现, 而新算法则保持了好的检测结果。由 5(g) ~ 图 5(i) 可以看出, 当信杂比进一步

降低时, 作为杂波的角反射器、房屋, 以及道路图像的亮度高于目标, 若采用通用检测算法对 UWB SAR 图像中的卡车进行检测时, 则一方面由于卡车散射能量很小, 从而导致了检测结果有一个目标丢失; 另一方面, 由于用于确定目标具体位置和旋转角的固定矩形方框尺寸无法预先准确确定, 从而无法准确得到目标的具体位置和旋转角, 由此将引起后续提取的目标特征有效性大大降低, 而分辨能力的下降

又将导致由房屋、三角架、道路壕沟等强烈杂波所造成的大量虚警的出现,虚警概率达到了82.4%,这样的检测结果是不能接受的;而新算法由于采用了低门限CFAR检测,其检测概率达到了100%,同时由于目标轮廓信息和目标特征的准确提取,有效去除了角反射器、房屋以及道路壕沟等形成的强杂波,从而取得了令人满意的检测效果,而且为鉴别后分类工作的有效进行提供了更加有力的保证。

表3给出了用通用检测算法和新算法对3幅图像进行检测时所消耗的时间,由表3可以看出,对于3幅图像而言,新算法所消耗的时间均高于通用检测算法,但均低于通用检测算法所耗时间的两倍。

由上述试验结果及分析可见,新算法在增加较少运算时间的情况下,大大提高了UWB SAR叶簇覆盖目标检测性能,这也验证了新算法在UWB SAR叶簇覆盖目标检测中的适用性和稳健性。

表3 两种算法对3幅图像进行检测所需时间

Tab. 3 Consumed time of two algorithms when detecting based on three images

算法	3幅图像检测时间(s)		
	图5(a)	图5(d)	图5(g)
通用检测算法	28.62	13.13	44.93
新算法	43.97	17.27	86.80

## 5 结论

本文在分析了由Lincoln实验室提出的通用检测算法用于UWB SAR叶簇覆盖目标检测时存在的问题的基础上,提出了一种新算法,该新算法通过小滑窗平均、低门限CFAR检测以及连通分析降低了算法对检测环境的要求,增强了检测算法的适应性和稳健性,基于实际图像的检测结果也验证了本文提出的新算法在UWB SAR叶簇覆盖目标检测中的适用性。

### 参考文献(References)

1 Zhou Zhi-min, Huang Xiao-tao. Penetration performance analysis of VHF/UHF ultra-wideband synthetic aperture radar [J]. Systems

Engineering and Electronics, 2003, 25(11): 1136 ~ 1140. [周智敏,黄晓涛. VHF/UHF超宽带合成孔径雷达穿透性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1136 ~ 1140.]

2 Winter E M, Schlagen M J. Comparisons of target detection in clutter using data from the 1993 FOPEN experiments [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery [C], Orlando, FL, USA, 1994:244 ~ 254.

3 Wong D, Carin L. Analysis and processing of ultra wide-band SAR imagery for buried landmine detection [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(11): 1747 ~ 1748.

4 Novak L M, Halversen S D, Owirka G J, et al. Effect of polarization and resolution on SAR ATR [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1):102 ~ 115.

5 Kapoor R, Banerjee A, Nandhakumar N. UWB radar detection of targets in foliage using alpha-stable clutter models [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3):819 ~ 834.

6 Lee J S, Grunes M R, Pottier E. Quantitative comparison of classification capability: fully polarimetric versus dual and single-polarization SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11):2343 ~ 2351.

7 Loiselet M, Grandin J F. Polarization study for better classification [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Radar Processing, Technology and Applications [C], Denver, CO, USA, 1999, 3810: 180 ~ 190.

8 Allen M R, Jauregui J M. FOPEN-SAR detection by direct use of simple scattering physics [A]. In: Proceedings of the IEEE International Radar Conference [C], Alexandria, VA, USA, 1995: 152 ~ 157.

9 Jiang Yong-mei, Liang Dian-nong. A physics-based UWB FOPEN SAR man-made target detector [A]. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Signal Processing Proceedings [C], Beijing, China, 1998, 2: 1465 ~ 1468.

10 Subotic N S, Collins L M, Gorman J D, et al. Multiresolution target detection in SAR imagery [A]. In: Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Detroit, MI, USA, 1995, 4:2157 ~ 2160.

11 Nguyen L, Kapoor R, Sichina J. Detection algorithms for ultrawideband foliage-penetration radar [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference on Radar Sensor Technology [C], Orlando, FL, USA, 1997, 3066:165 ~ 176.

12 Sheng Qian, Xie Shi-qian, Pan Cheng-yi. Probability and Statics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 147 ~ 154. [盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京:高等教育出版社, 2001:147 ~ 154.]