

# 基于 SAR 图像样本的本征维数检测人造目标

张之光 雷宏

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

**摘要:** 人造目标检测是合成孔径雷达(SAR)自动目标识别(ATR)系统的重要功能,当前适用于复杂背景中人造目标检测的手段较为有限,为此提出了一种基于多方位角 SAR 图像样本本征维数的检测方法。该方法不依赖于图像强度,而是估计出各感兴趣区域(ROI)大量不同方位角图像样本在高维度空间中的本征维数,根据本征维数定量衡量 ROI 内目标更趋近人造或是自然,由此检测出人造目标。采用 Gotcha 项目实测数据将本文方法与当前以分形维数检测人造目标的方法进行了对比,实验结果显示本征维数方法具有不依赖于图像强度的特点,并且在目标形态刻画上比分形维数方法取得更好效果。

**关键词:** 合成孔径雷达;人造目标检测;本征维数;分形维数

**中图分类号:** TN959.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Man-made targets detection based on intrinsic dimension of SAR image samples

Zhang Zhiguang Lei Hong

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Man-made targets detection is a crucial function of synthetic aperture radar (SAR) automatic targets recognition (ATR) systems. At present, there exist sort of limited methods which are applicable to complex background. To treat this case, a method based on the intrinsic dimension of multi-aspect angle image samples is proposed. This method doesn't count on intensity of the image, whereas it estimates the intrinsic dimension of images samples of the region of interest (ROI) in high dimensional space, which are obtained from different aspect angles. The measurement of artificiality and naturalness is performed with the intrinsic dimension of ROI. In this way man-made targets are detected. The real data from Gotcha project are adopted to compare our method with that of fractal dimension to detect man-made targets. The experiment result shows that intrinsic dimension has a merit that it doesn't count on image intensity and it performs better than the fractal dimension method in depicting the shape of targets.

**Keywords:** synthetic aperture radar; man-made targets detection; intrinsic dimension; fractal dimension

## 1 引言

合成孔径雷达(SAR)自动目标识别(ATR)是指在尽可能没有人工干预的前提下,以较短时间从场景中自动地检测并识别感兴趣的目标。ATR 的流程可以拆分为 3 个步骤:检测、鉴别、分类。检测是 ATR 流程中的第 1 个步骤,其性能优劣直接影响整个自动目标识别流程。针对特定环境背景和特定目标的检测方法相继被提出和实现,比如 Hough 变换适于检测道路、建筑、桥梁等直线结构较明显的目标;灰度阈值分割适于检测河道<sup>[1]</sup>;直方图信息熵门限分割(KSW)方法<sup>[2]</sup>、Shearlet<sup>[3]</sup>变换适于检测海面舰船。

对于一般的环境背景和目标,基于强度差别的恒虚警率(CFAR)方法获得了广泛应用。人造目标是场景监视应用中的关注对象,而 CFAR 检测只给出目标有无的判决,并不能提供目标在多大程度上趋于人造目标的度量;同时,CFAR 需要依靠背景杂波的统计模型,在复杂城市环境与目标比较密集的情况下难以获得准确的背景杂波统计模型,CFAR 效果并不理想。因此,有必要研究适用于复杂环境并且能够度量目标人造性强弱的通用方法。当前能够满足该需求的方法主要有极化与分形两类。

### 1) 极化

由于几何结构的不同,人造目标与自然目标的极化散

射机理存在差别。自然杂波主要来自表面的单次散射,很多植被没有明显的奇次散射或偶次散射特性。而人造目标可以拆解为二面角、三面角等结构,分别会造成二次散射、三次散射。不同极化分量的能量比值取决于回波经历了奇次还是偶次散射,因此可以采用极化方法检测鉴别人造目标<sup>[4]</sup>。

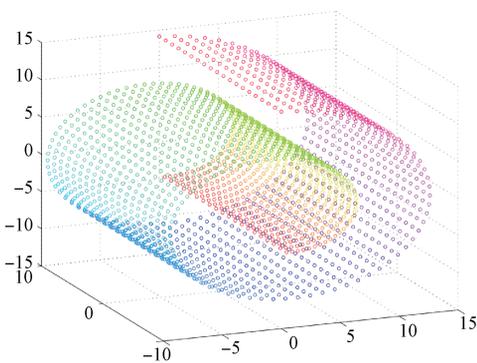
## 2) 分形维数

分形维数用于度量图案的空间填充能力,描述图案的细节随观测尺度如何变化。SAR 图像中人造目标和自然背景在分形维数上存在固有差异,可以依此检测人造目标。Lincoln 实验室<sup>[5]</sup>对比了 SAR 图像中点、线、面的分形维数,并以实验验证了对于 SAR 图像而言人造目标的分形维数大于自然目标。

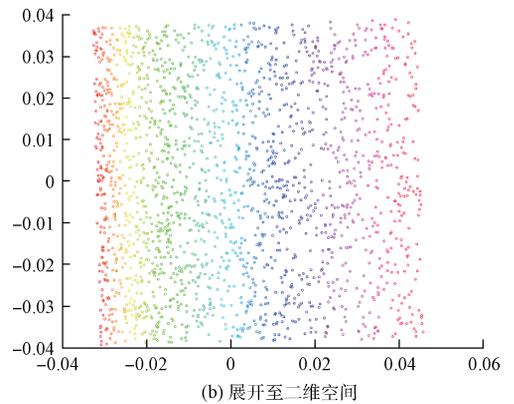
考虑到圆迹 SAR 从多个方位角观测,具备获取大量不同方位角图像样本的能力,于是本文探索了人造目标与自然目标图像样本各自的本征维数,发现本征维数能够有效地定量衡量目标人造性强弱,从场景中检测出人造目标。以 Gotcha 项目实测数据对比了本征维数方法与现有的分形维数方法,这两种方法都对目标的人造性进行定量度量,获得维数图后可以根据具体的应用需求,灵活地以单一阈值门限、多个阈值门限或聚类等方法给出人造目标的定性判别。实验结果证实了以图像样本集合的本征维数检测人造目标的可行性,展示了其在目标形态保持上的优势。本文提出的本征维数方法为人造目标检测提供了新的手段。因极化方法需要雷达在硬件上具备多个极化通道,设备复杂<sup>[6]</sup>,故本文仅对比了与本征维数方法同为单通道设置的分形维数方法。

## 2 本征维数

数据的本征维数是描述数据特定属性所需的最少参量个数,同时也是理想情况下数据降维能达到的最小维数值。实际中很多内嵌在高维空间中的数据(比如图像)可以在低维空间(比如非线性流形)内有效描述,同时并不损失多少信息。一个直观的例子是,分布在三维空间中瑞士卷(Swiss roll)结构上的数据可以在二维空间平滑地展开,同时几乎不破坏各个局部的样本结构(图 1),即本征维数是 2。



(a) 内嵌于三维空间



(b) 展开至二维空间

图 1 瑞士卷结构数据本征维数示意图

本文探索感兴趣区域(ROI)大量不同方位角图像样本的本征维数,期待本征维数能够反映目标的人造特性与自然特性。当前的本征维数估计方法主要有三类:基于投影、基于几何结构、基于概率<sup>[7]</sup>。本文采用基于概率的最大似然估计(MLE)方法估计本征维数,该方法在多种应用场合均取得了较好的效果。

## 3 利用本征维数检测人造目标

利用多方位角 SAR 图像样本的本征维数检测人造目标需要机载 SAR 圆迹飞行,以获得大量不同方位角的图像。处理流程如下:

- 1) 对于 ROI,截取出各方位角图像中该位置图像;
- 2) 将 ROI 的各方位角图像分别拉直为高维向量;
- 3) 估计全部高维向量样本所构成集合的本征维数;
- 4) 根据本征维数判断 ROI 内目标的人造性强弱。

直接以 Gotcha 项目实测数据进行阐述。Gotcha 项目由美国空军研究实验室(AFRL)主导,进行了多次机载 X 波段 SAR 1 英尺分辨率的飞行实验。本文采用 Gotcha 停车场场景数据<sup>[8]</sup>验证以本征维数检测人造目标的方法。

### 3.1 局部 ROI 的本征维数

停车场的坐标为 N 39°46'42.8", W 84°04'52.2", 在谷歌地图上可以查询到光学图像详情。手工从场景中提取出 20 个 ROI,如图 2 所示(该 SAR 图像系不同方位角获取的大量图像样本非相干累加形成,每个方位角获取的图像质量要远劣于此),其中方框 ROI 为车辆目标,蓝色框 ROI 包含草地、沥青路面以及两种地物的混合。

本实验仅使用一圈航迹的 HH 极化数据,以每 4°方位角的 SAR 回波数据相干成像,每相邻两块回波数据相差 1°方位角,采用 BP(back projection)成像算法生成总共 360 幅不同方位角获取的图像。每个 ROI 的尺寸为 30×40 像素,经拉直操作变为 1200 维的高维向量。以 MLE 方法对每个 ROI 的 360 个高维向量样本进行本征维数估计,获得图 3 所示结果,这里详细地给出了 MLE 设置不同邻域大小小时估计出的本征维数。通过逐渐增大邻域直至本征维数

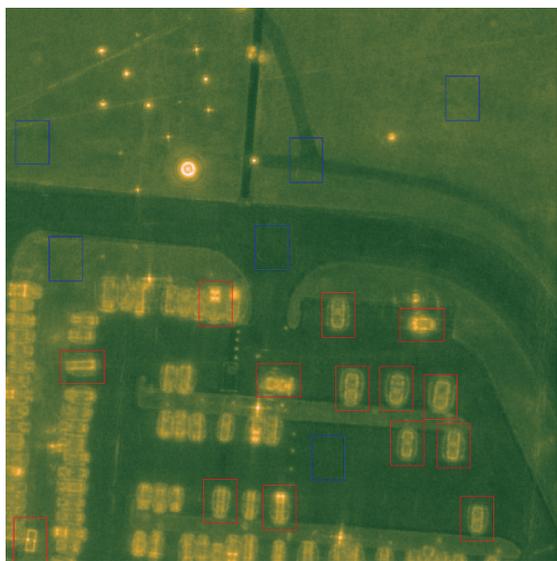


图 2 Gotcha 项目停车场场景 SAR 图像中手工提取 20 个 ROI

稳定时的估计值最接近真值,图中各颜色柱形条达到的最高位置即为估计出的本征维数值。由图可见,以本征维数作为评价指标来判断目标的人造性具有很好的区分度,20 个 ROI 中人造目标(铲车、其他车辆)的本征维数明显小于自然目标(草地、沥青路面)。至此,本文以局部 ROI 验证了多方位角 SAR 图像样本本征维数检测人造目标的能力。

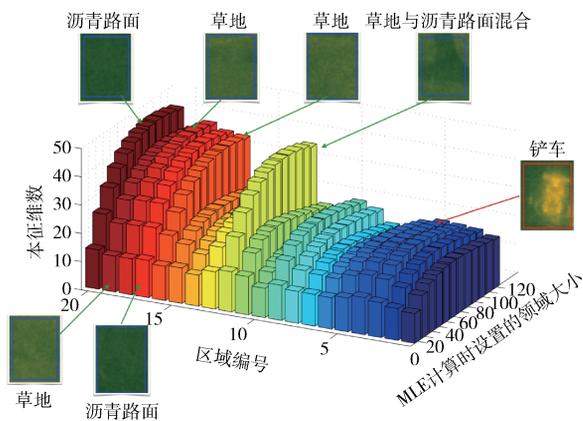


图 3 采用 MLE 方法估计 20 个 ROI 的本征维数

为了解释人造目标与自然目标本征维数存在差别的原因,这里给出一个简化的例子作类比:三维空间中的大量一般样本点集的本征维数是 3,每个点可以用另外 3 个一般点的组合来表达;三维空间中过原点的一个面上点集的本征维数是 2,每个点可以只用另外 2 个点的组合来表达。面上的点集之所以具有较低的本征维数,是因为各样本点之间有共性的特征,比如  $x-y$  面上点的  $z$  坐标都为 0。样本点间共性的特征越多,每个样本点就可以用越少其他样本

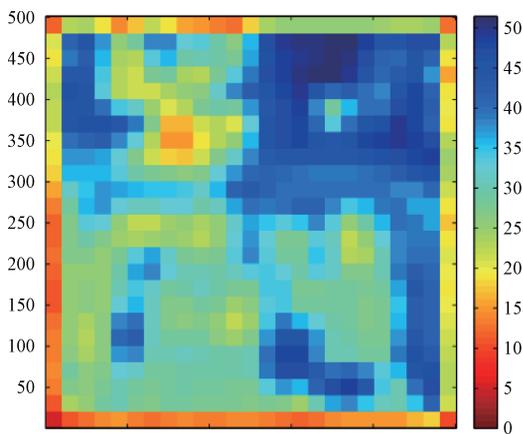
点的组合来表达。比如  $x$  轴上的点集,其  $y$  轴坐标都为 0, $z$  轴坐标也都为 0,共性特征较  $x-y$  面上点集更多,可以仅用  $x$  轴坐标这一个维度来表达,本征维数是 1。

与此类似,不同方位角获取的大量人造目标图像间共性特征较明显,可以用较少的图像样本通过线性或非线性组合来表达某一幅图像,因此本征维数更低;而自然目标图像样本之间共性特征较弱,某个方位角获取的草地图像,很难用其他方位角图像的组合来近似表达,因此本征维数较高。

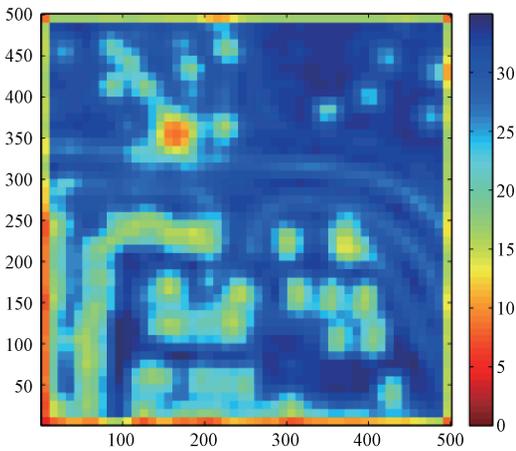
另外需要注意,尽管草地与沥青路面散射特性的差别使得 SAR 图像上的明暗有显著差别,然而各图像样本点集内的样本点之间关系类似(类比:  $R^3$  中尽管  $z = 0$  平面上点集与  $z = 1$  平面上点集的  $z$  轴坐标截然不同,然而本征维数都是 2),因此图 3 中草地、沥青路面以及混合体的本征维数几乎看不出差别。

### 3.2 完整场景的本征维数

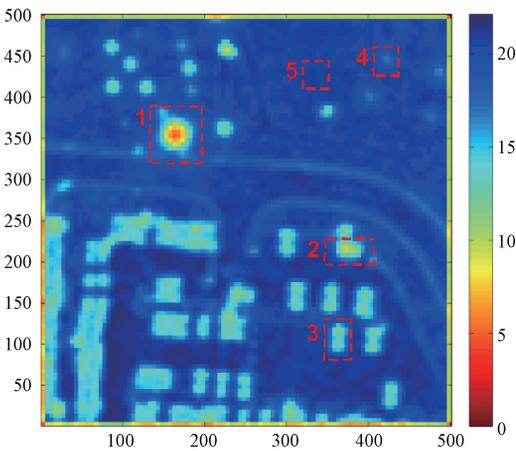
3.1 节以局部 ROI 验证了人造目标与自然目标可以通过本征维数区分,本节考察整个场景的本征维数以检测人造目标。操作方法为将整个场景栅格化,每个栅格作为一个方形 ROI,以 360 个不同方位角获取的图像样本集估计出一个本征维数值赋给该栅格。方形栅格可以紧邻或重叠,重叠设置栅格获得的最终本征维数图更加平滑。前文已指出人造目标的本征维数低,为了突出场景中的人造目标,热度图颠倒设置,即用蓝色表示高数值,用红色表示低数值。图 4(a)~(c)展示了 3 种逐渐精细划分栅格所获得的场景本征维数图,均采用相邻栅格重叠 50% 的设置。从图 4(c)中手工提取出 5 个有代表性的 ROI,对应的光学图像如图 4(d)所示。按照估计出的本征维数由小到大的顺序排列,5 个 ROI 中的目标分别是金属圆柱台座、铲车、轿车、树木、草地,形状特征从明显到不明显,正是由人造到自然的过渡顺序。至此可见多方位角 SAR 图像样本的本征维数能够有效地对整个场景全部区域进行评估,给出人造特性强弱的定量热度图。



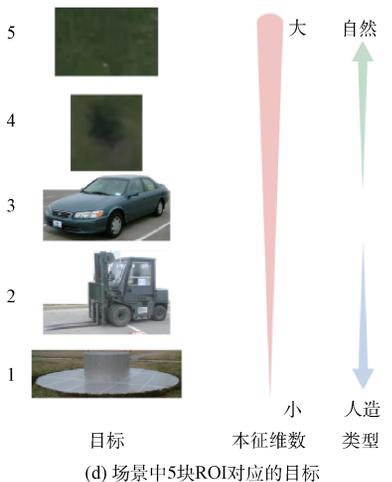
(a) 栅格边长 40 像素,重叠 20 像素



(b) 栅格边长20像素,重叠10像素



(c) 栅格边长10像素,重叠5像素



(d) 场景中5块ROI对应的目标

图 4 Gotcha 停车场场景的本征维数图  
(以像素为坐标)

将本征维数图与 SAR 图像作比较。场景右上角有近似围成正方形的四颗树木,每个  $4^\circ$  方位角子孔径 SAR 图像相干斑严重,图像质量较差,只能勉强看出树木<sup>[9]</sup>;如果将 360 幅  $4^\circ$  方位角子孔径图像非相干累加(图 2),尽管图

像质量显著改善,右上角的树木却在非相干累加过程中被抹平(树冠受雷达照射的一面较亮,另一面较暗,照射源旋转一周获得的多幅图像累加后亮暗恰被抹平),完全无法辨识。而由本文获得的本征维数图(图 4)则清楚地指示出树木的位置,同时给出了其人造特性的定量度量,这是 SAR 图像无法提供的信息。

另外,可以看到图 2 的 SAR 图像中草地与沥青路面散射强度上差别较明显,同时没有表现出路牙石;本征维数图中草地与沥青路面难以分辨,同时人造的路牙石表现得较为明显,可见两种图像的性质明显不同。本征维数方法依赖于图像样本集合的共性特征而不依赖图像强度的特点已在 3.1 节举例说明。

#### 4 与分形维数方法的对比

利用分形(fractal)同样可以定量地给出目标人造性强弱的评价,从 SAR 图像中检测出人造目标。因此有必要将本文方法与分形方法做一个比较。

在 SAR ATR 流程中,既可以先对大场景进行初步 CFAR 检测,而后采用分形的方法鉴别人造目标,比如文献[5];也可以在原始 SAR 图像上直接采用分形的方法检测人造目标,比如文献[10]。Gotcha 项目停车场场景较小且环境复杂,故本文不经 CFAR 检测而直接在原始 SAR 图像上采用分形方法检测。

分形维数描述图案的细节随观测尺度如何变化。这里以简单有效的计盒维数(box-counting dimension)<sup>[11]</sup>进行说明。用边长  $\epsilon$  的正方形盒子覆盖经过二值化的图案,需要盒子的数目为  $N(\epsilon)$ 。

对于有分形结构的图案,  $N(\epsilon)$  与  $\epsilon$  符合式(1)所示指数关系,其中  $D$  为分形维数。

$$N(\epsilon) \propto \epsilon^{-D} \quad (1)$$

通过式(2)可求得通过计盒获得的分形维数  $D$ ,方法为绘制出  $1/\epsilon$  与  $N(\epsilon)$  的 log-log 曲线,再求导获得斜率曲线,找到斜率曲线中平坦的部分。平坦部分所占据的横坐标尺度范围称为尺度不变区间,图案在尺度不变区间上具有稳定的分形维数  $D$ 。

$$D = \frac{d \log N(\epsilon)}{d \log (1/\epsilon)} \quad (2)$$

对于 Gotcha 项目圆迹 SAR 监视的停车场场景,利用分形维数检测人造目标的处理流程为:

- 1) 将场景图像栅格化,可设置栅格重叠或不重叠;
- 2) 对每个栅格的局部图像进行二值化处理(将幅度超过阈值的像素置为 1,幅度低于阈值的像素置为 0,阈值可以采用栅格内像素的均值、中值,或根据直方图确定);
- 3) 采用计盒维数法计算每个栅格局部图像的分形维数,将结果赋给该栅格,以此获得完整场景的分形维数图;
- 4) 将 360 幅不同方位角获取的场景图像的分形维数图进行平均处理;

5)在平均处理后的分形维数图上根据具体应用确定衡量人造性的阈值,检测出感兴趣人造目标。

只有找到了尺度不变区间,才能够用式(2)确定稳定的分形维数  $D$ 。对于分形特性强的图案,较容易找到尺度不变区间;然而对于一般的 SAR 图像而言,找到尺度不变区间并获取稳定的分形维数较困难,人造性强的区域甚至无法找到尺度不变区间。为此文献[5]提出了简化方法:只使用边长为 1 像素、2 像素的盒子覆盖,用分别需要的盒子数代入式(2)计算出分形维数,而不再寻找尺度不变区间来确定稳定的分形维数。本文采用与此类似的方法,然而改为以边长为 4 像素左右的盒子覆盖,这是因为对于本文所处理的数据而言,这样的盒子尺寸设置能够更好地区分人造目标与自然目标。需要注意的是,这样的设置会造成“人造目标分形维数低于自然目标”的假象,这里对造成这种假象的原因作解释:自然目标根据式(2)求得的  $D$  在尺度不变区间上有稳定值,曲线平稳,只有这样的稳定  $D$  值才是真实的分形维数;而人造目标根据式(2)绘制的曲线总体上的斜率为负,在盒子尺寸很小时  $D$  的值高于自然目标,在盒子尺寸较大时  $D$  的值低于自然目标。为了更好的区分度,本文将盒子尺寸设置为较大,因此使得人造目标的非标准分形维数表面上低于自然目标。人造目标真实分形维数高于自然目标的解释详见 Lincoln 实验室文献[5]。

以无交叠的 5 像素栅格精细划分 Gotcha 场景,对比分形维数图(图 5)与本征维数图(图 6)。两幅图的热度图均设置为红色表示人造目标,蓝色表示自然目标。可以看到两种方法都能够有效地对场景各个区域的人造性强弱进行标注。相较于分形维数图,本文提出的本征维数方法在 Gotcha 场景的至少以下几处表现出更好的效果:

1)本征维数图中人造特性最强的圆柱形台座形状保持得更好(坐标约 200,350);

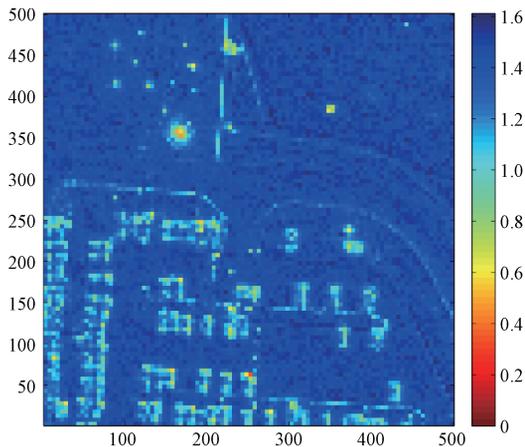


图 5 Gotcha 停车场场景分形维数图  
(栅格大小 5 像素,相邻栅格无交叠,经 360 幅分形维数图平均处理)

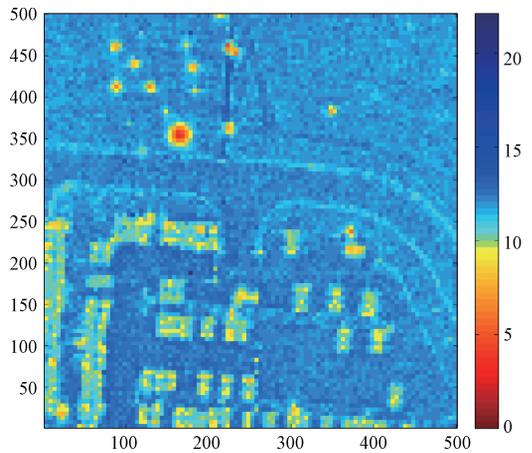


图 6 Gotcha 停车场场景本征维数图  
(栅格大小 5 像素,相邻栅格无交叠)

2)本征维数图中能够清楚看到上方的一排路牙石,而分形维数图中缺失(纵坐标约 350);

3)本征维数图中上方纵向的小路形态完好,而分形维数图中呈现为不连续的多段(横坐标约 250)。

对于图中上方纵向倾斜的小路,两种方法的结果不只目标形态上不同,颜色也相反,这里对照图 7 一并作解释。图 7 中灰色的条形表示小路,周围是草地。小路是新铺的水泥路面,表面平坦,反射回到雷达传感器的能量很小,在 SAR 图像(图 2)上强度较弱。分形维数方法根据栅格中图像的对比度进行二值化操作,按照文献[5]中的图 10 所作的解释:二值化图案如果是直线,那么不论有几条、每条的长短如何,图案的分形维数都是 1;二值化图案只要是方形、L 形的面,图案的分形维数都是 2。因此对于分形维数图 7(a)中黄绿色标注的明亮栅格,不论灰色占比如何,二值化后的图案在几何构成上极为相似,都是由几条直边围成,因此分形维数几乎相同。同理,图 7(a)中间位置灰色栅格处的小路同周围的草地一样没有被标注为亮块,也是因为两种地物二值化后的几何形态相似。黄绿色块构成的图形就是图 5 中小路的分形维数图,正是中间暗块使得分形维数图中的小路断开。

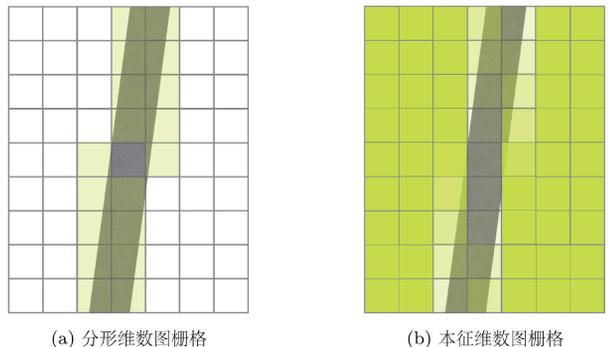


图 7 Gotcha 场景中水泥小路形态与明暗的解释

如 3.1 节所述,栅格的本征维数与样本点的共性特征有关。与草地相比,不同方位角获取的平坦水泥路面区域图像集合的样本点间共性更少,各样本点近似于独立的噪声,很难用其它样本点的组合来表达某一个样本点。因此水泥路面具有更高的本征维数,在图 6(与图 7(b)中标注为更暗。对于含多种地物的栅格,栅格的本征维数与不同地物的比例有关,样本点间共性特征微弱(水泥路面)的地物所占比例越高,栅格的本征维数越高,图中标注为更暗。若相邻栅格的地物比例渐进改变,则明亮也渐进改变,因此图 7(b)中水泥小路较周围更暗,同时不会有分形维数中明显分段的现象,本征维数方法在目标形态刻画上比分形维数方法效果更好。

## 5 总 结

本文提出了基于多方位角 SAR 图像样本本征维数检测人造目标的方法。以 Gotcha 项目停车场的局部 ROI、完整场景分别展示了利用本征维数方法检测人造目标的可行性。将该方法与同样能够定量分析目标人造性强弱的分形维数方法进行了对比,实验结果展现了本征维数方法不依赖图像强度的特点,并且在目标形态刻画上取得了比分形维数方法更好的效果。

## 参考文献

- [1] 朱贺,李臣明,张丽丽,等. 联合灰度阈值分割及轮廓形态识别的河道提取[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1288-1296.
- [2] AI J, QI X, YU W, et al. A new CFAR ship detection algorithm based on 2-D joint log-normal distribution in SAR images [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2010, 7(4): 806-810.
- [3] 鲁小丽,王岩飞,潘卓,等. 基于剪切波变换的 SAR 图像舰船检测[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 54-58.
- [4] 张锐,洪峻,明峰. 基于极化相似度的全极化 SAR 自动目标识别算法[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(5): 24-27.
- [5] NOVAK L M, OWIRKA G J, NETISHEN C M. Performance of a high-resolution polarimetric SAR automatic target recognition system [J]. Lincoln Laboratory Journal, 1993, 6(1): 11-24.
- [6] 刘荣军,汪普宏. 基于 CP-SAR 雷达四极化重建数据的目标检测[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(9): 34-37.
- [7] CAMASTRA F, STAIANO A. Intrinsic dimension estimation: Advances and open problems [J]. Information Sciences, 2016(328): 26-41.
- [8] DUNGAN K E, POTTER L C. 3-D imaging of vehicles using wide aperture radar[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2011, 47(1): 187-200.
- [9] GORHAM L R A, MOORE L J. SAR image formation toolbox for MATLAB[C]. SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2010: 769906-13.
- [10] CHEROUAT S, SOLTANI F, SCHMITT F, et al. Using fractal dimension to target detection in bistatic SAR data[J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(2): 365-371.
- [11] 李钊,高明亮,李业德. 分形维数计算的流水线优化方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2690-2696.

## 作者简介

张之光,1988 年出生,工学博士,主要研究方向为合成孔径雷达自动目标识别。

E-mail: diegozhangbit@163.com

雷宏,1963 年出生,研究员,博士生导师,主要研究方向为微波遥感系统技术、天线理论与工程。