

基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估

付文宪, 李少洪, 洪 文

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 研究了基于特征提取的 SAR 图像理解问题, 提出了一个基于高分辨率 SAR 图像的人造目标打击效果评估系统, 该系统包括目标检测、目标提取、特征提取和分级评估四个模块, 并重点分析了系统中特定人造目标如建筑物特征信息的选择和提取等问题。经过适当扩展和改进, 该系统可用于各种不同人造目标的打击效果评估和自动识别。仿真结果表明, 该系统可有效地对人造目标的打击效果如是否摧毁、摧毁程度以及目标受摧毁部位等进行评估。

关键词: SAR 图像理解; 特征选取; 打击效果评估

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 09-1290-05

Hitting Effect Evaluation Based on High-Resolution SAR Images

FU Wen-xian, LI Shao-hong, HONG Wen

(School of EIE, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper focuses on the SAR image understanding on the basis of feature extracting, and proposes a system which can be used to evaluate some man-made targets' hitting effect. This system includes four modules: target detection; target selection; features extracting; two-level hitting effect evaluation. The selection and extraction of features of special targets, such as buildings, are analyzed. After proper improvement this system can be used to evaluate a variety of man-made targets' hitting effect and work as an ATR system. The simulation results show that this system is feasible and effective.

Key words: SAR image understanding; features selecting and extracting; hitting effect evaluation

1 引言

进入九十年代以来, 随着合成孔径雷达 (SAR Synthetic Aperture Radar) 成像的基础研究逐步完善, 以 ERS-1 和 NASA/JPL Air SAR 为代表的大量星载、机载 SAR 系统研制成功并投入应用, 人们获得了大量高质量的 SAR 图像, 并且由于多频段、多极化、干涉等技术的应用, SAR 研究表现为更加深入和实用化的发展趋势。其中, 对 SAR 图像的理解以及从图像中提取有用信息成为一个重要的研究方向, 它可以揭示 SAR 图像的本质, 为 SAR 系统的设计建立基础, 并推动 SAR 的应用^[1]。

民用 SAR 系统的应用主要表现在对自然目标的辐射特性和精度进行研究, 而军事 SAR 系统则主要围绕如何从含有大量杂波背景的 SAR 图像中检测和识别人造军事目标。SAR 图像理解和目标信息提取技术是一个新的研究领域, 尤其是军事目标信息的提取, 国内还处于起步阶段, 其中, 自动目标检测和分类 (ATR Automated Target Recognition) 是一个主要的研究内容。研究 SAR 图像中军事目标的理解、检测和判决对战场信息的描述、表示、理解和评估是十分重要的, 它能为战场侦察和打击效果评估建立基础^[1]。

由于 SAR 图像是微波成像, 而光学图像为光波成像, 两者所用的波长不同, 故导致 SAR 图像和光学图像之间具有很大的差异, 光学图像中的识别方法通常不适用于 SAR 图像。另外, 实际 SAR 图像中丰富的背景杂波不仅使得图像对比度下降, 严重模糊目标的外形, 而且由于杂波和目标回波之间的相互影响, 它还会严重破坏 IRF (Impulse Response Function) 本来规则的副瓣结构, 使得 SAR 图像更为复杂^[1]。背景杂波和这种影响使得 SAR 图像中目标的检测和识别过程更加困难。目前, 国外有关军事目标的 ATR 系统主要有由美国 DARPA 资助的 SAIP 项目中林肯实验室负责的 ATR 系统^[2]; 由 DARPA 和 AFRL 共同资助的 MSTAR 项目中的 ATR 系统^[3]; 1999 年 Quoc H Pham 等人提出的 ATR 系统^[4], 这些系统都包括三个主要的阶段: 检测、判决和分类, 只是在不同的阶段它们各自所使用方法不同。另外, 基于 SAR 图像的目标信息提取还可用于桥梁和公路的检测^[5], 轮船的检测和识别^[6]等, 这些应用主要处理与上述 ATR 系统类似, 但是在提取目标特征信息方面并不完全相同, 而是针对不同目标选择合理的特征, 以便尽可能的反映目标独有的特性。

本文主要研究如何从高分辨率 SAR 图像中提取目标特征信息, 特别是对特定的军事目标如建筑物、桥梁等进行打击

效果的评估,并提出了一个基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估系统,系统经过适当地扩展可以用于各种不同人造目标的打击效果评估和自动识别。

2 基于高分辨率 SAR 图像打击效果评估系统简介

如前所述,SAR 图像的理解都是基于 SAR 图像中目标特征信息提取的基础上,打击效果评估也要以特征信息的提取为核心,所以合理有效的评估系统要尽量选择能反映目标特性的特征,并对 SAR 图像进行适当处理以利于目标特征的精确提取;然后,分析对比所提取的特征,并在此基础上给出目标的摧毁程度。根据以上分析,本文提出了一种基于高分辨率 SAR 图像的打击效果评估系统,如图 1 所示,主要包括目标检测、目标提取、特征提取、分级评估四个模块。



图 1 打击效果评估系统

该系统主要通过从建筑物、桥梁等人造目标在打击前和打击后的 SAR 图像中提取一些主要特征量,并对这些特征量进行比较,从而给出人造目标被摧毁的程度。由于要比较攻击前后 SAR 图像中的特征量,而特征量与 SAR 成像参数(如成像的视角、俯视角等)密切相关,如成像视角不同,即使完全相同的目标其特征量也存在很大的区别,所以,系统要求打击前后的 SAR 成像参数尽量一致,如同轨道的星载 SAR 系统或者对准处理等使得攻击前后的成像参数一致。

评估系统基于原始 SAR 实图像,因为实图像能准确地反映目标微波散射特性,特别是对人造目标如建筑物、车辆等,它们可以等效为多个散射中心,故目标信息主要包含在 SAR 图像的有限个强散射点中,而实图像能更完整地维护散射点间的关系。输入的 SAR 实图像首先进行 CFAR (Constant False Alarm Ratio) 检测和门限处理以确定要进行效果评估的人造目标,同时滤除大部分背景杂波和其他人造目标。由于在 CFAR 检测的基础上增加了门限处理,检测效果相对单独的 CFAR 检测有所提高。然后,对原始 SAR 图像中检测出的 CFAR 图像进行目标提取,则可以为人造目标进一步准确定位,并确定目标的方向,同时,可以滤除自然杂波和其他人造目标,以便目标特征的精确提取。接着,在所提取的目标区域内计算目标特征,本系统所选取的特征包括两组:几何特征和纹理特征。最后,根据所提取的特征评估人造目标的打击效果,评估分两级进行:先根据几何特征进行评估;再由纹理特征评估。特定人造目标如建筑物在攻击前后的 SAR 图像经过该系统的评估,最终可以确定该人造目标是否毁坏;如果毁坏,进一步确定毁坏的部位以及毁坏的程度。

3 目标检测

基于传统贝叶斯检测理论,一种实用的两参数 CFAR 检测方法如图 2 所示^[7],该方法计算图像的幅度。若目标存在于包括 m 个像素的 ROI (Region Of Interest) 中,则其平均强度可以表示为 $\bar{I}_T = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I_j$, 其中, I_j 为各像素强度值。ROI 外围有

几个像素宽的保护区,以防止目标延伸到杂波区域,最外层的杂波区域则用于计算杂波平均强度 $\bar{I}_B$ 和归一化方差 V_B 。对应于一定虚警检测下的门限 t ,当满足如下条件时

$$\frac{\bar{I}_T / \bar{I}_B - 1}{\sqrt{V_B}} > t \quad (1)$$

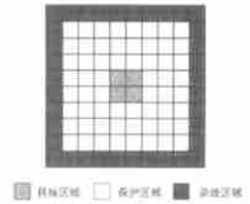


图 2 CFAR 检测器说明图

则认为目标存在。当假设背景杂波的 RCS (Radar Cross Section) 为恒定值时,则单视 SAR 图像的方差有 $\sqrt{V_B} = 1$, 故两参数 CFAR 变成单参数 CFAR

$$\bar{I}_T / \bar{I}_B - 1 > t \quad (2)$$

其中,式(1)和(2)中的左边部分又称为 CFAR 统计值。

经过 CFAR 检测后的图像仍然存在部分的自然背景和其他人造目标,此时,可以设定一个门限值,对 CFAR 图像进行二值处理,其中,门限值可通过统计目标区域和非目标区域的幅度值得到。经过门限处理后的 CFAR 图像进一步滤除了自然背景和其他人造目标杂波,改进了检测效果,同时也获得了目标提取所需的二值图像。

由于建筑物与自然杂波显著的区别,经过 CFAR 检测及门限处理后的 SAR 图像消除了大部分自然杂波,并且基本上确定了 SAR 图像中人造目标的位置。

4 目标选取

目标检测阶段所得到的 CFAR 图像除了人造目标以外,还包括少量自然杂波和其他人造目标杂波,而目标特征的提取是在与目标的位置、方向和形状紧密相关的区域内进行的,所以,为了精确提取目标特征,CFAR 检测后的图像还必须经过目标提取,得到目标准确的位置、方向和形状等。

从特征提取的需要出发,目标提取阶段包括两个处理,一是根据目标的先验知识建立一个与目标大小类似的矩形模板,在图像上模板可以沿距离向和方位向滑动,或者围绕其质心转动,直到模板所含的能量最大,则矩形的位置和方向代表了人造目标的位置和方向。由于目标的能量要比杂波强,所以,在目标方向未知时,上述操作类似于空间二维匹配滤波,所以,又称为空间二维匹配滤波。最终模板所确定的位置和方向主要用于纹理特征的提取。

目标提取的另一个处理是使用形态学图像处理技术,如具有不同内核的侵蚀、扩散处理、边沿检测等,找出与目标形状类似的区域。该区域描述了目标的几何形状、在方位向和距离向的分布范围等,主要用于几何特征的提取。

5 特征选取

根据电磁散射理论,复杂人造目标(如建筑物、飞机等)可以等效为多个散射中心,每个散射中心可视为一个点目标,则人造目标主要为多个点目标,所以,SAR 图像中强散射点的统计特性包含着目标的信息,如 SAR 图像中目标区域内散射点的分布范围、分布规律、散射点强度的变化规律、变化程度等,因此,本文主要选择了两类特征:目标几何特征和纹理特征。

目标几何特征^[2]主要描述了散射点的分布范围和分布规律,反映了目标在外观上的几何大小,它包括质量、直径、长短轴比例、转动惯量,其计算是在目标提取阶段形态处理所得的类似于目标形状的区域内进行。其中,直径为横穿该区域最大的长度;长短轴比例则指区域的最短轴和最长轴之比;转动惯量则描述了该区域上 RCS 的分布情况。因为目标的 SAR 图像主要包含许多强的散射点,所以度量强度超过某一门限的像素比例要比仅仅计算总的像素数合理,故本文对质量的概念加以改进,为给定区域内其强度超过某一门限的像素数占该区域所有像素数的比例。

纹理特征则描述了散射点强度的变化规律和变化程度,反映了目标内在的纹理结构,它包括标准对数偏差、加权饱和度和分形尺寸,其计算是在目标提取阶段的空间二维匹配滤波所得的含有最大能量的矩形区域内进行。其中,标准对数偏差描述了给定区域内的强度波动,即目标 RCS 的变化。如雷达回波的能量用 $P(r, a)$ 表示,则标准对数偏差为^[8]

$$\sigma = \sqrt{\frac{S_2 - S_1^2/N}{N-1}} \quad (3)$$

式中, $N = \sum_{r, a \in \text{给定区域}} 1$; $S_1 = \sum_{r, a \in \text{给定区域}} 10 \log_{10} P(r, a)$;
 $S_2 = \sum_{r, a \in \text{给定区域}} (10 \log_{10} P(r, a))^2$;

加权饱和度为部分具有最大强度散射点的能量占区域总能量的比例,其计算如下^[8]

$$\eta = \frac{\sum_{\text{K \% 个最强点}} P(r, a)}{\sum_{\text{所有点}} P(r, a)} \quad (4)$$

式中,通常可取 5 % 个最强的散射点;分形尺寸则描述了给定区域内最强散射点的空间分布规律。由分形的定义可知孤立的一组点其分形大小为 0;而一条线的分形大小为 1;任何规则平面的分形大小为 2。建筑物的 SAR 图像是一系列点、线、面的组合,经过摧毁后原来的平面可能会分解为更多的孤立点和线、变形,从而导致分形大小发生变化,所以,其变化反映了目标被摧毁的程度。本文采用了文献^[9]中一种计算人造目标分形大小的简易方法。

6 分级评估

根据前面所计算的人造目标在打击前和打击后的特征量,我们可以对目标攻击效果作出较为详细的评估。首先,从整体上考虑目标是否受到摧毁;如果受到摧毁,则要进一步确定目标受毁的具体部位及摧毁的程度。

本系统中评估分两级进行,即先基于目标外围的几何形状作出判断;再基于目标的内在纹理结构进行评估。如果目标无论是几何特征还是纹理特征其变化都不大,则可认为目标基本上不受摧毁;否则,认为目标受到一定的摧毁。如果几何特征变化较大,则可因此判断目标摧毁较严重,引起了目标外形上变化;如果只有纹理特征变化,则可判断为目标受到了轻微的攻击,虽然外形维持原貌,但内部结构受损较严重;如果几何特征和纹理特征变化都很明显,则可判断为目标受到了严重的摧毁。

计算目标受攻击前后特征量的二次距离可以对目标摧毁的程度进行量化,二次距离的计算由式(5)给出^[10]

$$d(x) = \frac{1}{2} (x - m)^T C^{-1} (x - m) \quad (5)$$

其中, x 为目标受攻击后的特征所组成的矢量, m 和 C 分别为目标受攻击前特征的均值和方差, n 则为所有特征的数量。由上式计算的二次距离大小可以说明目标的摧毁情况,显然,该值越大,说明摧毁程度越严重。

另外,如果根据目标的具体形状把目标分为不同部分,并分别计算不同部分的二次距离,则对摧毁严重的目标,还可以根据不同部分的二次距离判断目标受毁的具体部位。

7 仿真结果

根据上述人造目标的打击效果评估系统,本节使用实际建筑物的 SAR 图像进行了仿真,仿真对象为图 3 所示的某建筑物 SAR 图像。

首先,对原始 SAR 图像进行两参数 CFAR 检测,处理的结果如图 4 所示,可见,经过检测后的图像消除了大部分的自然背景杂波和其他部分人造目标杂波。由于建筑物与杂波存在显著的区别,此时,CFAR 图像主要包含各类人造目标,根据建筑物的大小基本上可以确定其位置。



图3 打击前建筑物原始的 SAR 图像

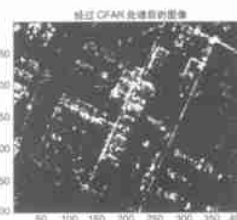


图4 建筑物的 CFAR 图像

检测后的 CFAR 图像为了能精确提取目标的特征信息,还必须提取目标的位置、方向和形状等。空间二维匹配滤波后的图像如图 5 所示,该矩形区域主要用于纹理特征的提取;经过形态学处理中的边沿提取可获得建筑物的边沿,如图 6 所示,根据该边沿可确定类似于 SAR 图像中建筑物形状的区域,用于几何特征的提取。

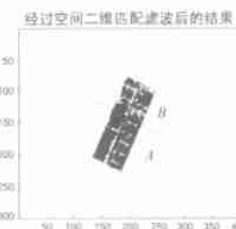


图5 空间二维匹配滤波后的图像

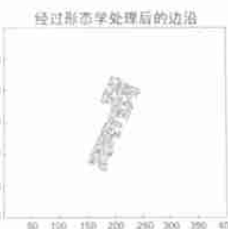


图6 建筑物的边沿

然后,在目标提取所得区域内提取目标的特征信息,通过计算,目标在打击前的几何特征和纹理特征如下:质量 0.3036;直径 152.5;比例 0.6118;归一化的转动惯量 0.3002;对数标准偏差 3.9358;加权饱和度 0.1142;分形大小 0.9161。

由于难以获得建筑物实际打击后的 SAR 图像,故通过对

图像的人工处理来获得打击后的结果,如图 7 所示。

图中圆圈部分为建筑物被摧毁的地方。同理,摧毁后的图像经过目标检测、目标提取和特征提取,也得到一组特征量,具体如下:质量 0.3062;直径 160.0;比例 0.5813;归一化的转动惯量 0.3205;对数标准偏差 7.7116;加权饱和度 0.1196;分形大小 0.9325。为了便于比较,打击前和打击后的特征量列于表 1 中。

从表 1 可看出,无论是目标的几何特征还是纹理特征都发生了一定变化,所以可确认建筑物受到了摧毁。从几何特征的变化可知,建筑物在外形上的尺寸有所改变,故建筑物在整



图 7 打击后目标的 SAR 图像

体上具有一定的变形;同时,由纹理特征的变化可判断建筑物的内部结构也发生了相当的变化,即建筑物的内部也遭受了摧毁。因此,从攻击前后特征量的变化我们可以判断建筑物不仅在几何外形上毁坏,而且在建筑物的内部也有部分毁坏。

表 1 目标在打击前后打击后的特征量

特征 分 组	几 何 特 征				纹 理 特 征		
	质 量	直 径	比 例	转动惯量	对数标准偏差	加权饱和度	分 形 大 小
打击前	0.3036	152.5	0.6118	0.3002	3.9358	0.1142	0.9161
打击后	0.3062	160.0	0.5813	0.3205	7.7116	0.1196	0.9325

为了量化建筑物在攻击后毁坏的程度,可按式(5)计算攻击前后特征量的二次距离,其大小为 0.7327。在没有摧毁的理想情况下,二次距离应该为 0,因此,所计算的二次距离表明建筑物受到了一定程度的摧毁。

在确认目标受摧毁的情况下,可能还要具体确认具体的摧毁部位。此时,可以先按照目标的形状把目标分为不同的块,然后对不同的块分别计算其特征量,则二次距离最大的块所受摧毁最严重。如本仿真中,可按建筑物的特点把它分为两块,如图 5 所示的 A、B,分别计算各自的特征量及二次距离,则可以确认 A 块特征量的变化相对 B 块更大,故判断建筑物的摧毁主要发生在 A 部分。

由于无法获得建筑物原始的高分辨率 SAR 实图像,所以,本仿真的评估是基于 SAR 灰度图像,它只在一定程度上描述目标的 RCS 特性,但是,仿真结果仍然显示了建筑物受到了一定程度的毁坏。由于建筑物的 RCS 特性主要表现在 SAR 复数据的幅度信息上,故在具有实图像的条件下可以得到更准确的结果。另外,由于难以获得建筑物受到攻击后的 SAR 图像,所以本仿真直接对灰度图像进行人工处理来模拟打击后的图像,从建筑物的毁坏造成灰度图像的改变来看这是合理的。

8 总结

本文提出了一种基于高分辨率 SAR 图像的人造目标打击效果评估系统,并对建筑物的打击效果评估进行了仿真试验,结果证明该系统可有效评估目标的摧毁程度。从上述工作可以发现系统的核心是目标特征的选择和提取,若所选择的特征对目标 RCS 的变化十分敏感,能最大限度地表征目标结构,则系统能很精确的反映目标的摧毁程度。特征的选取是与被评估的具体目标有关的,实际应用中很难找到一组通用的与目标无关的特征,所以,对不同类型的目标应该选择不同的

特征。另外,特征提取的精度也直接决定了评估的精度,所以系统要对 SAR 图像进行一定的处理以便目标特征的提取,如本系统中的二维匹配滤波处理,它是基于模板的,故要求模板能准确地反映被评估目标的实际大小,否则,特征的提取不精确。最后,SAR 图像分辨率的提高有助于提高目标特征量的精度,所以评估系统要尽量使用高分辨率的图像^[11]。

本系统主要是针对建筑物的打击效果评估而设计的,但是,通过适当的改进和扩展,也可以用于其他各种人造目标的打击效果评估和识别。例如在给出桥梁模板的基础上,可以提取桥梁的特征并对其攻击效果进行评估,同理,该系统还可用于油库、机场等人造目标打击效果的评估及识别。

后期工作主要集中于选取更多的特征信息,如 CFAR 特征、极化信息、相位信息等,以便更准确地对目标打击效果进行评估。同时,要尽量选择更多的实际人造目标 SAR 复图像进行仿真试验,通过仿真试验给出所提取特征量和具体摧毁程度之间的对应关系,最终实现系统对人造目标打击效果的自动评估。另一方面,可以把 SAR 图像和其他传感器图像如红外图像、航空图像等结合起来,以提高系统的评估和识别精度及效率。

参考文献:

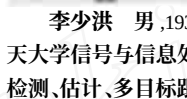
[1] August W Richaczek, Stephen J Hershkowitz. Theory and Practice of Radar Target Identification[M]. Boston, London: Artech House, 2000.
[2] L M Novak, S D Halversen. Effects of polarization and resolution on SAR ATR[J]. IEEE Trans on AES, 1997, 33(1): 102 - 115.
[3] Robert Hummel. Model-based ATR using synthetic aperture radar[A]. IEEE International Radar Conference[C]. USA: Washington, 2000, 856 - 861.
[4] Quoc H Pham, Albert Ezekiel, et al. A new end-to-end SAR ATR system[J]. SPIE, 1999, 3721: 292 - 301.

- [5] Ying Wang, Qinfen Zheng, et al. Recognition of roads and bridges in SAR images [A]. IEEE International Radar Conference [C]. France : BREST, 1999. 399 - 404.
- [6] S Musman, D Kerr, et al. Automatic recognition of ISAR ship images [J]. IEEE Trans on AES, 1996, 32 (4) : 1392 - 1403.
- [7] Jose C Principe, Alex Radisavljevic. Target prescreening based on a quadratic Gamma discriminator [J]. IEEE Trans on AES, 1998, 34 (3) : 706 - 714.
- [8] Michael C Burl, Gregory J Owirka, et al. Texture discrimination in synthetic aperture radar imagery [A]. Proceedings of the IEEE 23rd Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers [C]. Pacific Grove, CA : ACCSC, 1989. 399 - 404.
- [9] J I Butterfield. Fractal interpolation of radar signatures for detecting stationary targets in ground clutter [A]. National Telesystems Conference [C]. Atlanta, Georgia : NTC, March 1991. 83 - 87.
- [10] Daniel E Kreithen, Shawn D Halversen, et al. A discrimination algorithm and the effect of resolution [A]. IEEE National Radar Conference [C]. London : IEEE NRC, 1993. 128 - 133.
- [11] L M Novak, G J Owirka, et al. Automatic target recognition using enhanced resolution SAR data [J]. IEEE Trans on AES, 1999, 35 (1) : 157 - 175.

作者简介 :



付文宪 男, 1973 年生于湖北省监利, 北京航空航天大学信号与信息处理专业博士生, 主要从事机载 SAR 成像、图像处理和遥测遥控等方面的研发工作。



李少洪 男, 1939 年生于天津市, 教授, 博士生导师, 北京航空航天大学信号与信息处理教研室主任, 主要从事雷达、信号与信息处理、检测、估计、多目标跟踪和目标识别等方面的研究工作。



洪文 女, 1968 年生于陕西省西安市, 北京航空航天大学信号与信息处理教研室, 1997 年获北京航空航天大学工学博士学位, 1998 年至 1999 年任德国宇航院客座科学家, 主要研究领域为高分辨率 SAR 成像及其应用等。