



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
03
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

非真实感图像处理 P437





第20卷第3期（总第227期）

2015年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of

Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

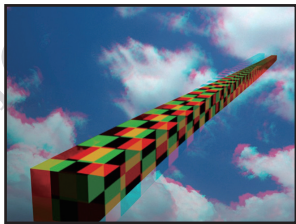
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

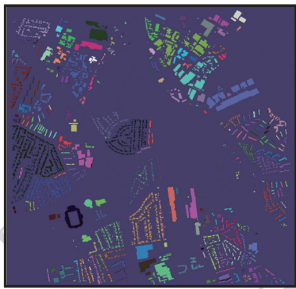
国内定价 50.00元



实时立体视觉系统中的深度映射(第0366页)



基于辐照度的运动模糊图像去模糊(第0395页)



面向智慧城市的3维城市在线可视化(第0445页)

综述

面向血管疾病诊断及预测分析的血流动力学模拟综述

徐梦佳, 杨金柱, 赵宏, 赵大哲 0297

图像处理和编码

多特征融合的车辆阴影消除

邱一川, 张亚英, 刘春梅 0311

图像分析和识别

基于局部时空特征方向加权的人体行为识别

李俊峰, 张飞燕 0320

对表情鲁棒的面部轮廓线3维人脸识别

常朋朋, 达飞鹏, 梅俊 0332

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰 0340

面向动摄像机的高速运动目标检测

穆春迪, 谢剑斌, 闫玮, 刘通, 李沛秦 0349

匹配滤波在SAR目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧 0357

图像理解和计算机视觉

实时立体视觉系统中的深度映射

李大锦, 白成杰 0366

遥感图像处理

GPU支持的SAR影像几何校正大规模并行处理

杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满 0374

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森 0386

第十届中国计算机图形学大会专栏

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文 0395

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇 0408

结合因子图的多目的地地图布局优化

罗振珊, 张俊松, 范接鹏 0418

高阶连续的形状可调三角多项式曲线曲面

严兰兰, 韩旭里 0427

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东 0437

面向智慧城市的3维城市在线可视化

潘斌, 郭小明, 陈明明, 陈为, 彭群生 0445

CONTENTS

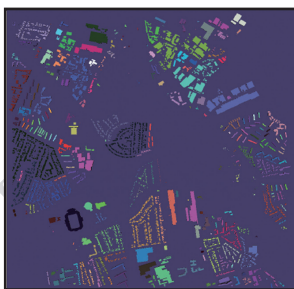
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Depth mapping in real-time stereoscopic systems (P0366)



Deblurring of motion blurred images based on the irradiance(P0395)



Online 3D city visualization for smarter cities(P0445)

Review

Survey of hemodynamics simulation for diagnosis and prediction in vascular disease

Xu Mengjia, Yang Jinzhu, Zhao Hong, Zhao Dazhe 0297

Image Processing and Coding

Vehicle shadow removal with multi-feature fusion

Qiu Yichuan, Zhang Yaying, Liu Chunmei 0311

Image Analysis and Recognition

Human behavior recognition based on directional weighting local space-time features

Li Junfeng, Zhang Feiyan 0320

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng, Da Feipeng, Mei Jun 0332

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia, Li Zongmin, Kuang Zhenzhong, Liu Yujie 0340

Detecting high-speed moving targets in moving camera environments

Mu Chundi, Xie Jianbin, Yan Wei, Liu Tong, Li Peiqin 0349

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui 0357

Image Understanding and Computer Vision

Depth mapping in real-time stereoscopic systems

Li Dajin, Bai Chengjie 0366

Remote Sensing Image Processing

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman 0374

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen 0386

Column of Chinagraph'2014

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianyang, Kan Weiran, Zhou Jian, Li Li, Guo Yanwen 0395

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu 0408

Synthesizing multi-destinations map with factor graph

Luo Zhenshan, Zhang Junsong, Fan Jiepeng 0418

Higher-order continuous shape adjustable trigonometric polynomial curve and surface

Yan Lanlan, Han Xuli 0427

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong 0437

Online 3D city visualization for smarter cities

Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, Chen Wei, Peng Qunsheng 0445

中图法分类号: TP753 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)03-0357-09

论文引用格式: Ding B Y, Wen G J, Zhong J R, Ma C H. The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0357-0365. [丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧. 匹配滤波在 SAR 目标单个散射部件检测中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0357-0365.] [DOI:10.11834/jig.20150307]

匹配滤波在 SAR 目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧

国防科技大学自动目标识别重点实验室, 长沙 410073

摘要: 目的 目标部分缺失是 SAR(synthetic aperture radar) ATR(automatic target recognition)中的难点问题, 实现 SAR 目标散射部件级别的检测可以有效解决这一问题。方法 基于目标的部件级别 3 维电磁散射模型提出了一种基于匹配滤波的单个散射部件检测方法。该方法通过模型预测单个散射部件的图像构造匹配滤波器, 并通过在模型 3 维参数域的调整实现了匹配滤波器在 3 维空间的滑动, 得到最佳的部件检测位置和最大相关系数。为克服方位角估计不准的限制, 采用了领域搜索寻找最佳检测结果。按照散射部件的强度由强至弱顺序检测各个散射部件。采用 CLEAN 算法去除部件之间的相互干扰。结果 在简易坦克部件级 3 维电磁散射模型基础上, 利用电磁仿真数据、暗室数据以及 MSTAR(moving and stationary target acquisition and recognition)干扰数据进行了单个散射部件检测实验, 实验结果表明, 本文方法可以很好地检测出实测图像中存在的目标散射部件, 并且可以检测出缺失的散射部件。结论 本文提出了基于匹配滤波器的散射部件检测方法, 实验证明了该方法的有效性。

关键词: 散射部件; 部件级电磁散射模型; 检测; 匹配滤波; 3 维滑动; CLEAN

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui

Science and Technology on Automatic Target Recognition Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: **Objective** Part absence is a difficult problem in Synthetic Aperture Radar (SAR) Automatic Target Recognition. However, such problem can be resolved to some extent by detecting the single scattering part of the target in the measured SAR data. **Method** This study proposes a matched filter-based approach to detect single scattering part on the basis of the part-level 3-D scattering model of the target; this approach can well predict the scattering properties of the whole target and the single scattering part comprising the target. The following steps are used in applying the matched filter approach in detecting single scattering part: First, a matched filter is built according to the image of the single scattering part predicted by the scattering model. Second, the matched filter slides in the 3-D parameter domain detects the best position of the scattering part that is appropriate for the measured SAR image and determines the maximum correlation coefficient to enhance detection precision. Moreover, in terms of the imprecision of azimuth estimation, the pre-misposition is explored in the neighborhood to obtain the best result. According to the intensity of all visible scattering

收稿日期: 2014-06-30; 修回日期: 2014-10-26

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0866)

第一作者简介: 丁柏圆(1990—), 男, 国防科技大学信息与通信工程专业在读硕士研究生, 研究方向为空间信息获取与处理技术。

E-mail: 18609472565@163.com

Supported by: Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-11-0866)

parts under the present position, the strongest to the weakest parts are detected sequentially. The interference from the neighboring scattering part disturbs the detection of the present scattering part. The CLEAN algorithm is employed to overcome this problem and to eliminate the interference of the other scattering parts. **Result** A part-level 3-D scattering model of a simple tank is used in this study. Experiments are conducted on the basis of electromagnetically simulated data, dark-room measured data of the simple tank, and MSTAR (moving and stationary target acquisition and recognition) data, which are used as interference. Results demonstrate that the proposed method can detect existing scattering parts in the measured image, as well as find the absent parts. In addition, interfering data can be excluded from the experiments. **Conclusion** This study proposes a single scattering part detection method for SAR target. Experiment results confirm the efficiency of the method.

Key words: scattering part; part-based scattering model; detection; matched filter; 3-D sliding; CLEAN

0 引言

目标部分缺失是 SAR (synthetic aperture radar) ATR (automatic target recognition) 目标中的难点问题^[1]。传统的 SAR 目标识别方法包括基于模板的方法和基于模型的方法。基于模板的方法通过构建目标模板库或者特征库,通过总体特征匹配的方法实现 SAR 目标识别,林肯实验室的 SAIP (semi-automated image intelligence processing system) 系统是其中的典型代表^[2]。基于模型的方法通过构建目标模型在线预测目标特征进而匹配识别。早期的 MSTAR (moving and stationary target acquisition and recognition) 计划中采用了 CAD 模型在线预测目标特征 (峰值、边缘等),通过特征匹配完成目标识别^[3]。Ohio 州立大学研究人员将属性散射中心模型引入 SAR ATR 中,通过属性参数的匹配达到目标识别^[4]。周剑雄等人通过建立目标的 3 维电磁散射模型并将其应用于 SAR ATR 中^[5-6]。这些方法多采用目标整体特征匹配的方法,很难克服目标发生部分变化导致的识别错误。通过目标散射部件级别的检测可以有效克服这一问题。近年来,在光学图像的自动目标检测领域,不少学者提出了一种“部分组成整体”的思想,即将复杂目标视为由若干区域或部件通过一定的规律组合而成^[7-9]。通过对目标各个部件建模,在实测图像中检测各个部件最终达到目标检测的目的。这种方法以目标的几何部件作为处理单元,充分利用了光学图像中目标各个部件的形状特征。然而,与光学图像不同的时,SAR 图像中很难体现出目标的几何形状信息,因此很难通过形状

描述的方法实现对目标的建模。考虑到 SAR 图像反应的是目标的电磁散射特性,因此可以通过对目标各个实体部件 (几何部件) 建立电磁散射模型实现对于目标在电磁散射空间的“拆分”。本文正是在目标部件级 3 维电磁散射模型的指导下完成各个散射部件的检测。

正确检测出目标的单个散射部件可以有效克服目标出现部分缺失对于识别结果的影响。针对单个散射部件的检测问题提匹配滤波器^[10-11]运用于 SAR 目标单个散射部件检测。该方法利用模型预测的单个散射部件构造匹配滤波器并通过在模型参数域的参数调整实现匹配滤波器在 3 维空间的滑动进而计算该散射部件存在的可能性。相比传统的图像域匹配滤波,这种方法既可以实现匹配滤波的连续滑动并且实现了由 2 维到 3 维的滤波器实现,因此可以得到更为精确的滤波结果。特别地,本文对于检测器的使用思想上有所改进,传统检测器的响应是确定值,即值为 1,表示存在感兴趣的目标,反之亦然;而本文方法在概率框架下处理问题,将检测结果视为概率值,即值越大,表明感兴趣目标存在的可能性越大。这种方法可以为后续的目标识别提供了更为精确的数值依据。由于目标存在多个强弱不同的散射部件,强散射部件不可避免地会对弱散射部件造成掩盖和“干扰”,因此弱散射部件的检测较为困难。为克服弱散射部件检测困难的问题,将 CLEAN 算法^[12]引入单个散射部件检测中,即由强至弱逐个检测单个散射部件,在检测到前一个散射部件时将该散射部件的电磁散射从实测 SAR 数据中 CLEAN 掉,从而避免其对于较弱散射部件检测的影响。

实测数据的中目标姿态角未知,目前多采用姿

态角估计的方法估计得到, 这些方法都存在一定的估计误差。本文主要针对方位角的估计^[13]误差进行研究, 根据估计得到的方位角, 并设定一定的方位角搜索区间进行最有搜索, 得到最佳的检测结果。

采用简易坦克模型的电磁仿真数据、暗室数据以及 MSTAR 干扰数据进行了单个散射部件的检测实验, 实验结果表明了方法的有效性。

1 目标部件级 3 维电磁散射模型

根据复杂目标的部件级电磁散射模型, 目标的电磁散射特性可由组成目标的各个散射部件的电磁散射叠加得到, 即

$$E(f, \theta, \phi; \Theta) = \sum_{i=1}^p E_i(f, \theta, \phi; \Theta_i) + n \quad (1)$$

式中, p 为散射部件的个数, $E(f, \theta, \phi; \Theta)$ 为实测数据, $\Theta_i = [A_i, \alpha_i, x_i, y_i, z_i, L_i, \phi_i, \gamma_i]$ 为第 i 个散射部件的参数集, x_i, y_i, z_i 分别表示散射部件的 3 维位置, A_i 表示幅度, α_i 是频率依赖因子, L_i 是散射中心长度, ϕ_i 是散射中心方向角, γ_i 表示散射部件对方向角方向依赖性。 $E_i(f, \theta, \phi; \Theta_i)$ ($i = 1, 2, \dots, p$) 为单个散射部件的参数化模型项, 表达了单个散射部件散射特性对方位角 θ , 俯仰角 ϕ 以及频率 f 的变化特性。 n 为背景噪声以及模型失配带来的误差, 一般将其建模为高斯白噪声并认为与模型项无关^[4]。相比传统的散射中心模型, 散射部件模型实现了目标实体部件和散射特性的结合, 通过在实测 SAR 数据中检测相应的散射特性可以推断散射部件存在的可能性进而判断实测数据中目标某一实体部件的存在性。

目标部件级的电磁散射模型提供了目标在特定频段、特定姿态下各个散射部件的电磁散射特性以及目标整体的电磁散射特性。利用目标部件级电磁散射模型可以预测单个散射部件的散射特性并据此实现在实测 SAR 数据中单个散射部件的检测, 计算该散射部件存在的可能性以及可能发生的变化。

2 单个散射部件检测方法

2.1 匹配滤波器构造

匹配滤波器的实质是设计一个和目标对象相

关的滤波器, 经过匹配滤波器提高测量信息的信噪比, 进而改善目标检测的性能^[10]。单个散射部件的匹配滤波器可以在频域进行构造也可以在其某个变换域进行。实际过程中, 单个散射部件在频域是无法有效分开的。根据高频区散射部件在图像域表现为聚集的亮点的特性, 在图像域构造单个散射部件的匹配滤波器可以达到更好的效果。

定义成像过程的线性算子为 B , 根据式(1), 则实测图像为

$$\begin{aligned} D &= B \left(\sum_{i=1}^p E_i(f, \theta, \phi; \Theta_i) + n \right) = \\ &= \sum_{i=1}^p B \left(\sum_{i=1}^p E_i(f, \theta, \phi; \Theta_i) \right) + B(n) = \\ &= \sum_{i=1}^p d_i + n_{\text{img}} \end{aligned} \quad (2)$$

部件 k ($1, 2, \dots, p$) 在图像域表示为

$$d = d_k + d' + n_{\text{img}} \quad (3)$$

式中, d_k 为模型项的图像域表现, d' 为其他散射部件的图像域干扰, n_{img} 为背景噪声以及模型失配带来的误差的图像域表现。从式(3)可以看出, 在实测图像中检测单个散射部件可以视为经典的信号检测问题, 即从 d 中检测 d_k 。由于模型可以较为准确地预测第 k 个散射部件的图像域投影 d_k , 在其他部件的干扰以及背景噪声、模型失配带来的干扰与第 k 个散射部件的图像域投影相关性较弱时, 考虑采用匹配滤波的方法进行单个散射部件的检测。

将匹配滤波器应用于单个散射部件的检测中, 即在检测某一散射部件时, 该散射部件即为感兴趣目标, 根据模型得到的该散射部件的图像域投影设计匹配滤波器为

$$d = d_k + d' + n_{\text{img}} \quad (4)$$

式中, d_k 为模型项, 即待检测的目标对象, $d' + n_{\text{img}}$ 为干扰项。则匹配滤波器的输出为

$$\begin{aligned} S_{\text{out}} &= d \otimes d_k = \\ &= (d_k + d' + n_{\text{img}}) \otimes d_k = \\ &= d_k \otimes d_k + (d' + n_{\text{img}}) \otimes d_k \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\otimes$ 表示相关, 可以看出匹配滤波器的输出不仅包括目标对象的自相关 (即单个散射部件的自相关), 还包括目标对象与背景干扰的互相关。在干扰项与目标对象的互相关较高时, 匹配滤波器将很

难达到提高信噪比的目的。

一般认为噪声(n_{img} 项)与目标对象无关,因此在其他散射部件干扰(d')较小时,采用匹配滤波器进行单个散射部件检测可以达到较好效果;反之,当 d' 的影响较大时,则需要最大可能剔除其对于当前散射部件(d_k)检测的影响。

2.2 基于 CLEAN 算法的干扰剔除

实际过程中,强散射部件成像过程中形成的旁瓣不可避免地对弱散射部件产生较大的“污染”甚至覆盖,即式(4)中的 d' 影响较大。为有效克服这一影响,将 CLEAN 算法引入到单个散射部件的检测中。根据 CLEAN 算法^[12],可首先检测最强散射部件,在判断该散射部件存在后从实测图像中提出最强散射部件的分量,进而检测次强的散射部件,以此类推直到检测到最弱的散射部件。对当前姿态下模型中各个散射部件按照散射强度排序,按照由强至弱的顺序逐个检测,在检测到某一散射部件后,从实测图像中将该散射部件的电磁散射剔除,再检测下一个散射部件。

对于 $D = \sum_{i=1}^p d_i + n_{\text{img}}$, 式中 $d_i (i=1, \dots, p)$ 为强弱不同的散射部件图像,为将各个散射部件检测出来,具体的 CLEAN 方法实施为:

- 1) 对 $d_i (i=1, \dots, p)$ 按强度大小排序,确定 CLEAN 的顺序;
- 2) 模型投影最强散射部件图像(d_k)并以此构造匹配滤波器检测该散射部件,得到最大相关系数;
- 3) 根据最大相关系数判断散射部件的存在性,若判为存在则从实测图像中将 d_k 分量 CLEAN 掉;
- 4) 重复步骤 1)~3), 得到各个散射部件的检测结果。

2.3 3 维参数域的匹配滤波器滑动

传统的图像域匹配滤波采用的逐个像素的匹配滤波器滑动,这种方法对于亚像素级的散射部件偏移无法得到最佳的匹配滤波结果。由于有单个散射部件的参数化电磁散射模型,采用参数域的调整实现滤波器的滑动,这种方法可以实现部件位置的连续滑动。同时,与传统图像域的 2 维滑动不同,本文采用的是 3 维位置的滑动,将 2 维匹配滤波推向 3 维有利于提高匹配滤波器的效果。

设定 x, y, z 方向的滑动精度分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, 滑动区间的大小为 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ (滑动区间的大小可

以根据目标中该散射部件的实际尺寸确定), 则匹配滤波器的滑动过程实施如下:

- 1) 计算滑动区间长度

$$L_x = \frac{\Delta X}{\Delta x}, L_y = \frac{\Delta Y}{\Delta y}, L_z = \frac{\Delta Z}{\Delta z}$$

- 2) 计算当前部件参数

$$x' = x_0 + i \times \Delta x$$

$$y' = y_0 + j \times \Delta y$$

$$z' = z_0 + k \times \Delta z$$

式中, $(i \in [-\frac{L_x}{2}, \frac{L_x}{2}], j \in [-\frac{L_y}{2}, \frac{L_y}{2}], k \in [-\frac{L_z}{2}, \frac{L_z}{2}])$, $\{x_0, y_0, z_0\}$ 为该部件的初始位置参数, 根据模型得到当前散射部件的图像, 并进行匹配滤波;

- 3) 根据滑动滤波的结果, 得到该散射部件检测的最佳位置以及最大相关系数。

设计单个散射部件检测流程如图 1 所示。具体

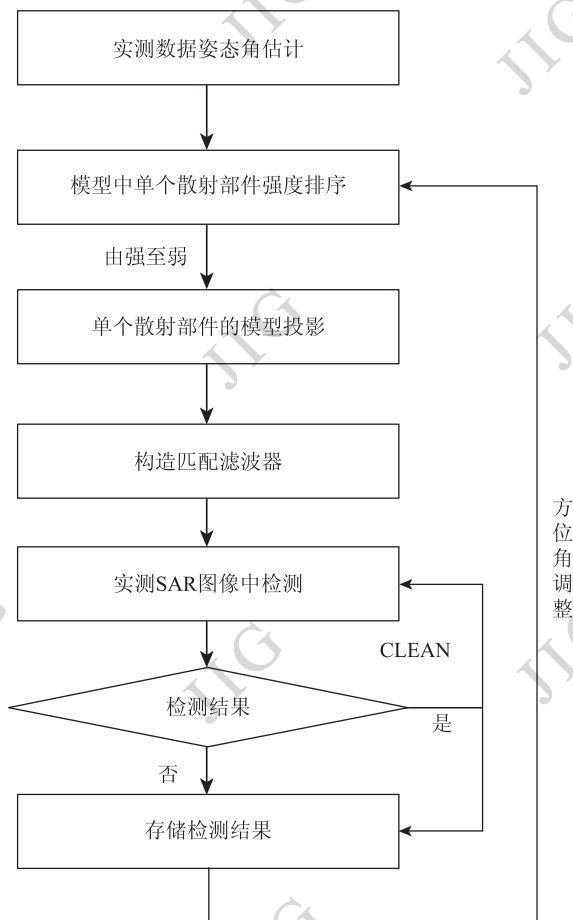


图 1 基于匹配滤波的单个散射部件检测流程
Fig. 1 The flowgraph of matched filter-based scattering part detection

步骤为:

1) 估计输入实测数据的姿态角, 设定方位角角的搜索区间和搜索精度;

2) 目标模型根据实测图像的姿态角生成各个当前姿态下各个可见散射部件的图像, 根据各个散射部件的强度排序;

3) 由强至弱选取待检测的散射部件, 根据该散射部件的图像构造匹配滤波器, 设定参数滑动精度以及滑动区间大小实现滑动窗口, 得到最大相关系数 $S_{\max}$;

4) 若检测结果满足 $S_{\max} \geq 0.5$, 则根据最佳匹配滤波位置在实测数据中将该散射部件的模型项 CLEAN 掉;

5) 重复步骤 3) 4), 当前姿态下完成各个散射部件的检测并记录结果;

6) 调整实测数据的姿态角, 重复流程。

目标姿态角选用了方位角是因为方位角对于 SAR 散射特性的影响较大。根据现有方法中方位角估计^[13]的误差, 设定方位角搜索区间为 10° (左右各 5°), 搜索精度为 0.5° 。

3 实验结果与分析

采用简易坦克模型 (图 2) 进行了单个散射部件检测的验证实验。分别利用了电磁仿真数据、暗室数据以及干扰数据进行了实验。产生仿真 SAR 图像的数据条件如下: 中心频率 $f_c = 9.0\text{E}9$ Hz, 带宽 $1.0\text{E}9$ Hz, 采样点数 $M = N = 101$, 成像点数 $M_z = N_z = 104$ 。图像方位向和距离向分辨率均为 0.15 m。根据简易坦克的实际尺寸设定匹配滤波器滑动区间大小为 1.0 m, 滑动精度 0.05 m。对俯仰角 30° , 方位角 90° 下电磁仿真数据以及暗室测量数据进行单个散射部件检测的实验。

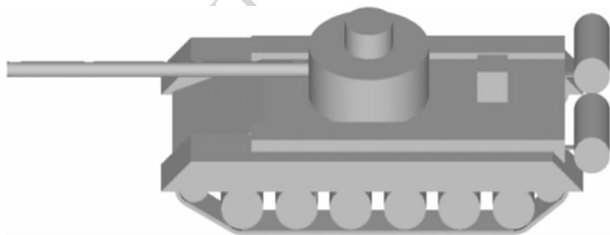


图2 简易坦克 CAD 模型

Fig. 2 The CAD of simple tank

根据简易坦克的 3 维部件级电磁散射模型, 得到当前姿态下各个可见散射部件的图像如图 3 所示。

3.1 电磁仿真数据实验

对俯仰角 30° 、方位角 90° 时的电磁仿真数据进行散射部件检测实验。结果如图 4。

输入数据的方位角估计结果为 88.5° 。搜索得到最佳检测结果的方位角为 89.5° , 结果如表 1。

从散射部件的匹配滤波输出可以看出, 对于电磁仿真数据, 提出的散射部件检测方法可以以较大的相关系数检测出简易坦克在当前姿态下各个可见散射部件, 检测结果表明实测图像中存在简易坦克的各个散射部件。

3.2 含噪声的电磁仿真数据实验

对俯仰角 30° 、方位角 90° 的含噪声电磁仿真数据 ($\text{SNR} = 40$ dB) 进行散射部件检测实验。结果如图 5。

输入数据的方位角估计结果为 89.5° 。搜索得到最佳检测结果的方位角为 92.5° , 结果如表 2。

从散射部件的匹配滤波输出可以看出, 对于加入噪声电磁仿真数据, 各个散射部件的检测最大相关系数均存在不同程度的下降, 弱散射部件受到更大的影响。但检测方法仍可以以较大的相关系数检测出当前姿态下简易坦克中的可见散射部件。

3.3 暗室数据实验

对俯仰角 30° 、方位角 90° 时的暗室数据进行散射部件检测实验。结果如图 6。

输入数据的方位角估计结果为 90.5° 。搜索得到最佳检测结果的方位角为 89.0° , 结果如表 3。

从散射部件的匹配滤波输出可以看出, 对于暗室数据, 提出的散射部件检测方法能以较大的相关系数检测出当前姿态下简易坦克中的可见散射部件。相比电磁仿真数据, 暗室测量数据存在更多的干扰, 因此在检测最大相关系数上有所降低。

3.4 部件缺失的暗室数据实验

对俯仰角 30° 、方位角 90° 的暗室数据 (缺失某一部件) 进行散射部件检测实验。结果如图 7。

输入数据的方位角估计结果为 90° 。得到最佳检测结果的方位角为 90.5° , 结果如表 4。

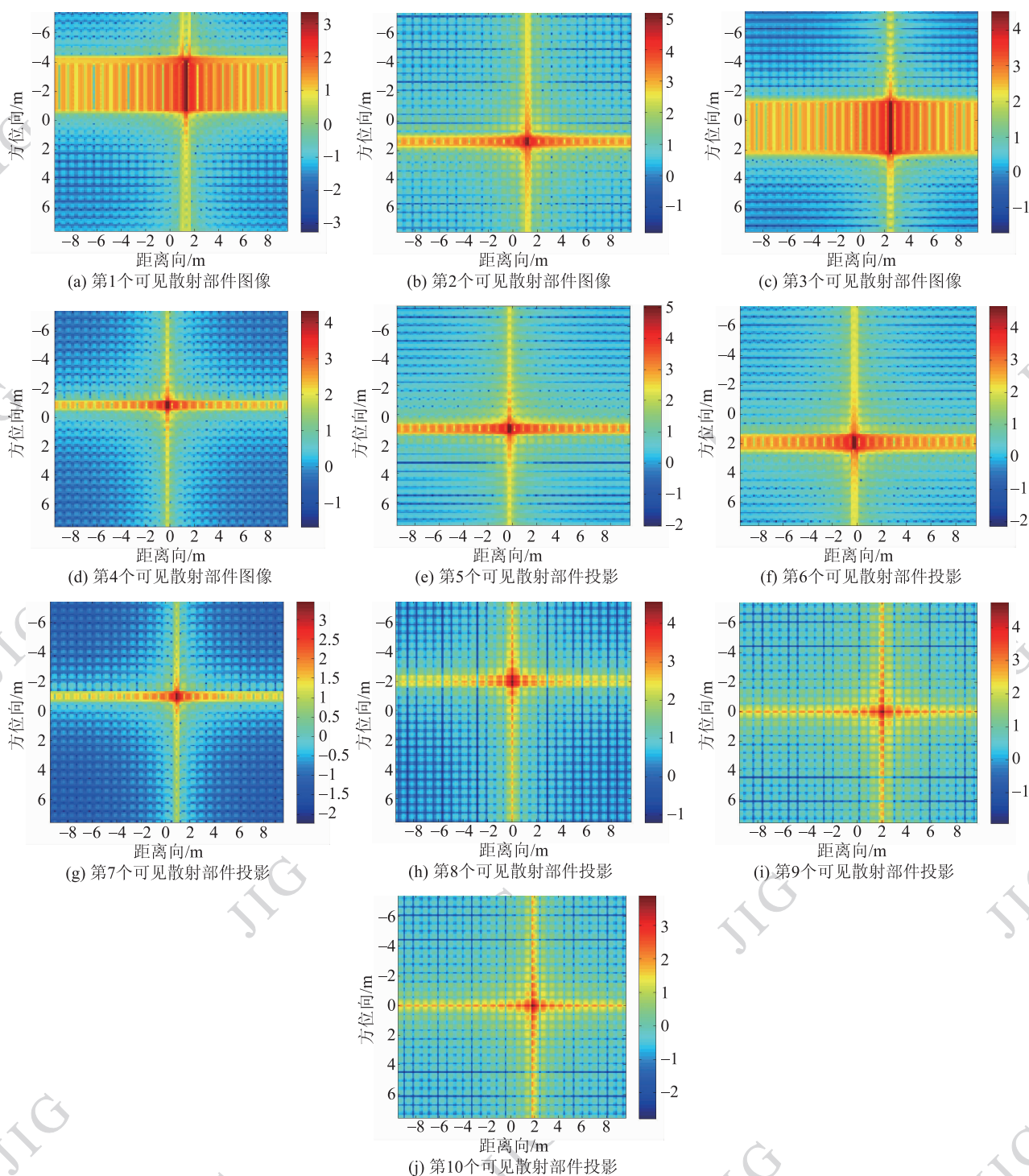


图3 当前姿态下模型中各个散射部件的图像

Fig. 3 The images of visible scattering parts under present posture

从散射部件的匹配滤波输出可以看出,对于部件缺失电磁计算数据,提出的散射部件检测方法可以以较大的相关系数检测出当前姿态下简易坦克中的大部分可见散射部件并且发现第2个散射部件的检测相关系数较低,通过门限判决可以推断该部件缺失。

3.5 MSTAR 数据干扰实验

利用 MSTAR 图像数据 (HB03355.001) 作为干扰数据进行散射部件检测实验。结果如图 8。

输入数据的方位角估计结果为 74.5° 。得到最佳检测结果的方位角为 76.5° , 结果如表 5。

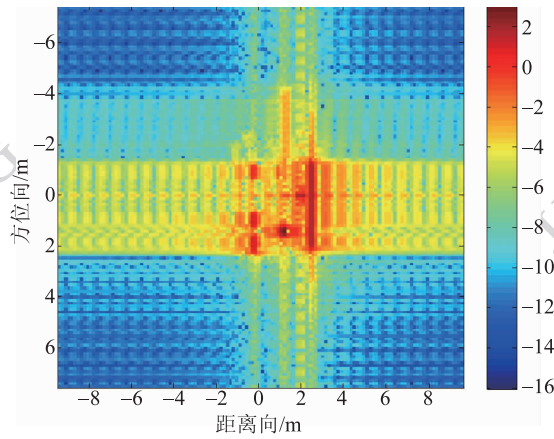


图 4 电磁仿真数据成像

Fig. 4 The image by simulated electromagnetic data

表 1 电磁仿真数据检测结果

Table 1 The detection result of simulated electromagnetic data

部件编号	对应实体结构	最大相关系数
1	炮筒	0.79
2	立方体与车身	0.99
3	左履带与左矩形条	0.89
4	车身与右矩形条(第 1 段)	1.00
5	车身与右矩形条(第 2 段)	1.00
6	车身与右矩形条(第 3 段)	0.97
7	炮筒与车身	0.98
8	右履带前斜平板与车身	0.72
9	大圆柱与前矩形条	0.80
10	小圆柱与大圆柱	0.78

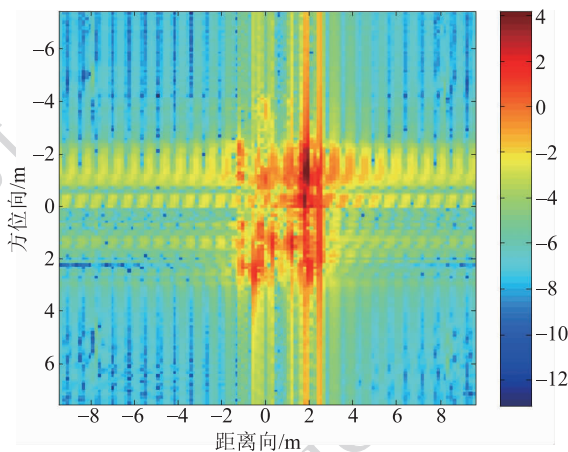


图 5 加入噪声的电磁仿真数据成像

Fig. 5 The image by simulated electromagnetic data added with noise

表 2 电磁仿真数据检测结果

Table 2 The detection result of simulated electromagnetic data

部件编号	对应实体结构	最大相关系数
1	炮筒	0.58
2	立方体与车身	0.84
3	左履带与左矩形条	0.82
4	车身与右矩形条(第 1 段)	0.78
5	车身与右矩形条(第 2 段)	0.92
6	车身与右矩形条(第 3 段)	0.89
7	炮筒与车身	0.87
8	右履带前斜平板与车身	0.61
9	大圆柱与前矩形条	0.63
10	小圆柱与大圆柱	0.60

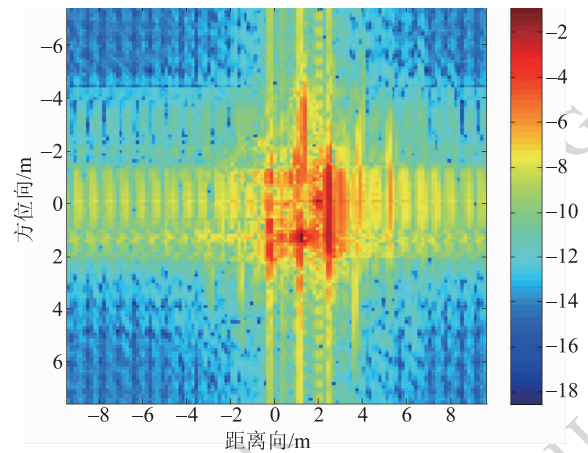


图 6 暗室数据成像

Fig. 6 The image by dark-room data

表 3 暗室数据检测结果

Table 3 The detection result of dark-room data

部件编号	对应实体结构	最大相关系数
1	炮筒	0.61
2	立方体与车身	0.53
3	左履带与左矩形条	0.73
4	车身与右矩形条(第 1 段)	0.81
5	车身与右矩形条(第 3 段)	0.76
6	左矩形条鱼油箱	0.62
7	炮筒与车身	0.75
8	右履带前斜平板与车身	0.59
9	大圆柱与前矩形条	0.99
10	小圆柱与大圆柱	0.99

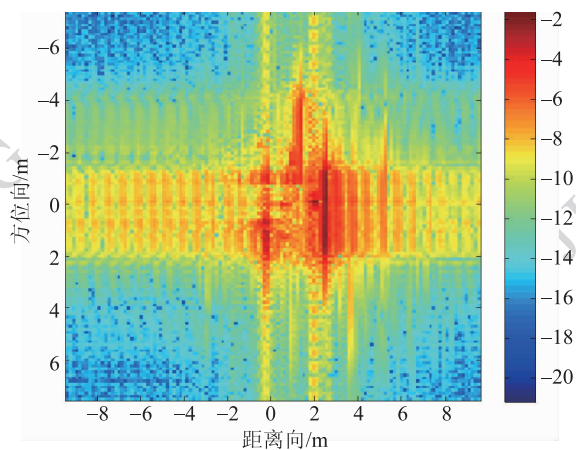


图7 缺失部件的暗室数据成像
Fig. 7 The image by dark-room data with a scattering part missing

表4 部分缺失暗室数据检测结果

Table 4 The detection result of dark-room data with part-absence

部件编号	对应实体结构	最大相关系数
1	炮筒	0.64
2	立方体与车身	0.21
3	左履带与左矩形条	0.82
4	车身与右矩形条(第1段)	0.68
5	车身与右矩形条(第3段)	0.93
6	左矩形条鱼油箱	0.63
7	炮筒与车身	0.75
8	右履带前斜平版与车身	0.72
9	大圆柱与前矩形条	0.95
10	小圆柱与大圆柱	0.93

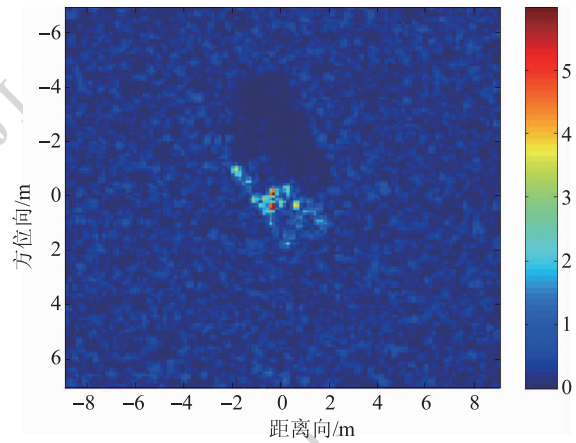


图8 MSTAR 干扰图像
Fig. 8 The MSTAR interfering image

表5 MSTAR 干扰检测结果

Table 5 The detection result of MSTAR interfering image

部件编号	对应实体结构	最大相关系数
1	炮筒	0.25
2	立方体与车身	0.35
3	左履带与左矩形条	0.36
4	车身与右矩形条(第1段)	0.28
5	车身与右矩形条(第3段)	0.36
6	左矩形条鱼油箱	0.27
7	炮筒与车身	0.32
8	右履带前斜平版与车身	0.34
9	大圆柱与前矩形条	0.38
10	小圆柱与大圆柱	0.40

从散射部件的匹配滤波输出可以看出,对于干扰数据,当前姿态下简易坦克的各个可见散射部件的最大相关系数均较低,可以推断当前实测数据并不是目标。

4 结 论

实现目标部件级别的检测对于 SAR 图像解译具有重要意义。基于目标部件级别的 3 维电磁散射模型采用匹配滤波的方法实现了目标中单个散射部件的检测,并得到各个散射部件的检测最大相关系数。采用了 3 维参数域的滤波器滑动,相比传统的图像域匹配滤波可以提高散射部件滑动的精度。基于简易坦克模型的单个散射部件检测实验证明了本文方法的有效性:1)可以有效检测出标准操作条件下目标中存在的散射部件;2)可以有效检测出目标中缺失的散射部件;3)可以有效避免虚假目标的干扰。

提出了散射部件检测的概念并针对部分扩展操作条件下的单个散射部件检测进行了实验验证,但没有验证在更多、更为复杂的扩展操作条件下的检测性能。因此,不断提高检测算法的稳健性以适应于更多的操作条件是下一步要着重研究的内容。

单个散射部件的检测结果是后续的目标识别服务的。相比整体匹配识别的传统 SAR ATR 方法,这一结果可以为 SAR ATR 提供可靠的依据,即通过散射部件检测的最大相关系数判断目标类别。这一

方法有利于提高 SAR ATR 在扩展操作条件下的工作性能。

参考文献 (References)

- [1] Ross T D, Bradley J J, Hudson L J, et al. SAR ATR: So what's the problem? -An MSTAR perspective [C]// Proceedings of SPIE Conference in Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery. Orlando: SPIE 1999, 37(21): 662-672.
- [2] Novak L M, Owirka G J, Brower W S. The automatic target-recognition system in SAIP [J]. Lincoln Lab. J., 1997, 10(2): 187-202.
- [3] Diemunsch J, Wissinger J. Moving and stationary target acquisition and recognition model-based automatic target recognition; search technology for a robust ATR [C]// Proceedings of SPIE Conference in Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery. Orlando: SPIE, 1998: 481-492.
- [4] Potter L C, Moses R L. Attributed scattering centers for SAR ATR [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 5(1): 79-91.
- [5] Zhou J X, Shi Z G. Automatic target recognition of SAR images based on global scattering center model [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2011, 5(1): 79-91.
- [6] Fu Q, Zhou J X, Qin J X, et al. Global scattering center model extraction and its application in radar target recognition [J]. System Engineering and Electronics, 2011, 33(1): 48-52. [付强, 周剑雄, 秦敬喜, 等. 雷达目标散射中心模型反演以及其在目标识别中的作用 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 48-52.]
- [7] Weber M, Welling M, Perona P. Toward automatic discovery of object categories [C]// Proceeding of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2000: 2101-2108.
- [8] Zhang Z, Wang H Q, Sun X, et al. An automatic method for targets detection using a component-based model [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1017-1022. [张正, 王宏琦, 孙显, 等. 基于部件的自动目标检测方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1017-1022.]
- [9] Opelt A, Pinz A. Fusing shape and appearance information for object category detection [C]// Proceeding of British Machine Vision Conference. Nottingham, UK: British Machine Vision Association, 2006: 117-126.
- [10] Richards M A. Fundamentals of Radar Signal Processing [M]. New York: McGraw-Hill Companies, 2005: 112-117.
- [11] Bhuiyan S M A, Alam M S, Sim S. Target detection classification and tracking using MACH and PDCCF filter combination [J]. Optical Engineering, 2006, 45(7): 116-110.
- [12] Steer. Enhancements to the deconvolution algorithm CLEAN' [J]. Astron. Astrophys., 1984, 21(8): 159-165.
- [13] Ji K F, Kuang G Y, Su Y, et al. Methods of target's peak extraction and azimuth estimation from SAR imagery [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(1): 102-108. [计科峰, 匡刚要, 粟毅, 等. SAR 图像目标峰值特征提取与方位角估计方法研究 [J]. 宇航学报, 2004, 25(1): 102-108.]