

基于三维电磁散射参数化模型的SAR目标识别方法

文贡坚^① 朱国强^② 殷红成^③ 邢孟道^④ 杨 虎^① 马聪慧^{*①}
闫 华^③ 丁柏圆^① 钟金荣^⑤

^①(国防科学技术大学ATR重点实验室 长沙 410073)

^②(武汉大学 武汉 310071)

^③(电磁散射重点实验室 北京 100854)

^④(西安电子科技大学 西安 710071)

^⑤(中国人民解放军95596部队 西安 710300)

摘 要: 合成孔径雷达目标识别是雷达数据解译中一个长期研究的难点问题。近年来,基于模型的SAR目标识别方法由于在扩展条件下的识别性能表现良好而备受关注。在联合国内多家研究单位进行攻关的基础上,该文简要阐述了对该问题的初步研究成果及思考。首先从3个方面出发梳理了散射部件模型发展的技术脉络并对其进行了补充完善;然后从正向推算和逆向反演两条技术途径提出了复杂目标电磁散射参数化建模方法;最后提出了基于复杂目标电磁散射参数化模型的目标识别新框架。论文最后对基于模型的SAR目标识别下一步研究方向进行了展望。

关键词: 电磁散射; 参数化模型; SAR; 自动目标识别

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2017)02-0115-21

DOI: 10.12000/JR17034

引用格式: 文贡坚, 朱国强, 殷红成, 等. 基于三维电磁散射参数化模型的SAR目标识别方法[J]. 雷达学报, 2017, 6(2): 115–135. DOI: 10.12000/JR17034.

Reference format: Wen Gongjian, Zhu Guoqiang, Yin Hongcheng, *et al.* SAR ATR based on 3D parametric electromagnetic scattering model[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(2): 115–135. DOI: 10.12000/JR17034.

SAR ATR Based on 3D Parametric Electromagnetic Scattering Model

Wen Gongjian^① Zhu Guoqiang^② Yin Hongcheng^③ Xing Mengdao^④ Yang Hu^①
Ma Conghui^① Yan Hua^③ Ding Baiyuan^① Zhong Jinrong^⑤

^①(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(Wuhan University, Wuhan 310071, China)

^③(Key Laboratory on Electromagnetic Scattering, Beijing 100854, China)

^④(Xidian University, Xi'an 710071, China)

^⑤(PLA 95596, Xi'an 710300, China)

Abstract: Automatic Target Recognition (ATR) is one of the most difficult problems in Synthetic Aperture Radar (SAR) data interpretation. In recent years, the model-based SAR target recognition method has attracted much attention because of its good performance in the extended operation condition. Based on the research of a few domestic research institutes, this paper briefly introduces the preliminary research results and gives some thoughts about SAR ATR problem. First of all, the development of parametric scattering model are discussed from three aspects. Next, two ways to model the parametric electromagnetic scattering for complex target are put forward. Finally, we propose a new framework for a Three-Dimensional (3D) parametric scattering model based SAR ATR. In the end, the future research direction of model-based SAR target recognition is prospected.

收稿日期: 2017-03-30; 改回日期: 2017-04-18; 网络出版: 2017-05-04

*通信作者: 马聪慧 ma_conghui@yeah.net

基金项目: 国家部委基金

Foundation Item: The National Ministries Foundation

Key words: Electromagnetic scattering; Parametric model; Synthetic Aperture Radar (SAR); Automatic Target Recognition (ATR)

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动微波相干成像雷达,它分别利用距离向的脉冲压缩技术和方位向的综合孔径技术来实现较高的空间分辨率^[1-3]。与光学、红外等传感器相比,SAR不受外界天气、光照等条件的约束且对地表植被具备一定的穿透性能,可以对感兴趣目标进行全天候、全天时的侦查。因此,SAR自问世以来就成为一种不可或缺的遥感信息获取^[1]手段。经过近半个世纪的飞速发展,已被广泛应用于军事侦察、打击效果评估、武器制导以及导航等国防军事的各个领域,并在资源勘探、灾情预报、海洋研究、地球遥感等国民经济的各个方面发挥着越来越重要的作用。

近年来,随着雷达成像技术和电子器件的飞速发展,SAR系统获取数据的能力不断增强,获取数据的质量得到明显提升,数量也在急剧增加。在这种情况下,如何从海量数据中实时可靠地提取出有用信息,并将其转化为指导实际应用的战斗力,已成为摆在人们面前刻不容缓的紧迫任务。传统的人工解译判读依赖于专业的技术人员、时效慢,急需发展SAR图像智能解译技术。SAR自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)作为SAR图像解译中的重要环节,一直都是国内外学者的研究重点^[4,5]。

美国麻省理工学院(MIT)林肯(Lincoln)实验室于1992年开发的半自动化图像智能处理系统^[6](Semi-Automated IMINT (image intelligence) Processing, SAIP)是一个典型的SAR ATR系统。它采用了基于模板匹配的SAR目标识别技术思路,事先存贮目标在“各种条件”下(主要包含目标不同观测角度、不同配置以及不同背景条件)的模板图像或特征矢量,通过计算待识别的图像与模板图像之间的相似性实现目标类别的识别。为了提高算法的鲁棒性和高效性,一般会增加特征提取环节,提取有利于目标分类识别的鉴别性特征。因此,如何设计出合适的特征是这类识别方法的主要难点之一。林肯实验室在这方面展开了大量研究,提出了包括目标峰值特征、脊特征、阴影特征、纹理特征、极化特征等在内的12类可用于SAR目标识别的特征^[7,8],这些特征是从不同的角度反映目标的性质,在不同分辨率下表现不一,各有其特定的适用范围。此外,椭圆傅里叶描述子^[9]、样本判别分析

特征^[10]、基于投影长度和目标像素的判别特征^[11]、基于几何中心邻域关系的特征和散射中心特征^[12]等等都先后被用于SAR ATR。此外,线性子空间、维数约减和稀疏表示等方法也被引入SAR ATR中^[13-15]。这类方法的基本思想是根据图像在相对低维空间中的投影来描述目标的主要特征,具体包括PCA, LDA, NMF等。设计合适分类器是基于模板匹配方法的另一个难点问题,典型的方法有最近邻方法^[16]、基于Bayes网络的方法^[17]、基于隐Markov模型的识别方法^[18]、基于Adaptive Boosting的方法^[19]、神经网络方法^[20]、支撑向量机^[21]以及基于稀疏表示的分类方法^[22]等等。

为了克服人工设计特征和分类器带来的局限性,近年兴起的深度学习网络被引入解决SAR ATR问题,最典型的网络是卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)^[23]。它一般包括特征提取和分类两个阶段,每个阶段又由多个层次组成,每一层以上一层的输出作为输入,然后所有层联合训练特征提取和分类器。Ding等人^[24]和Du等人^[25]分别对训练数据进行指定域的数据增强操作,然后利用CNN进行SAR目标识别。Li等人^[26]提出了一种快速的训练方法,将整个CNN分解为一个卷积自编码网络(Convolutional Auto-Encoder, CAE)和一个浅层神经网络(Shallow Neural Network, SNN),来提高CNN训练效率问题。Morgan等人^[27]研究了深度CNN在10类目标分类中的应用,取得了较好的效果。Chen等人^[28]利用全卷积网络(an All-Convolutional Networks, A-ConvNets)来减少网络中的自由参数数目,避免由于训练数据有限导致的严重的过拟合问题。这些研究工作表明了深度学习网络可以有效地学习图像中关于目标的有用信息并同时保持目标的2维结构信息,可以作为解决SAR ATR的一种有效途径,有望提高SAR ATR的识别性能。

总体而言,基于模板识别方法的主要工作集中于特征提取和分类器设计两个方面。基于人工设计的方法通常是根据具体数据和特定应用背景定制的,不要求有太多的训练数据,但特征和分类器选择的好坏直接决定整个ATR系统的识别性能。基于学习的方法能够自动从数据中挖掘特征和完成分类器的设计,与基于人工设计的方法相比更有优势,但要获得一个性能优越的深度网络,其训练方法和训练样本都不是一个容易解决的问题。

基于模板的识别方法究其实质是“看图识物”，它是通过比较待识别数据与模板数据的相似性完成目标识别的，这样获得目标在各种条件下的模板数据是保证基于模板方法性能的基本条件。但由于目标的电磁散射特性随着目标内部配置、环境及观测条件(包括姿态、遮挡、损坏、成像参数等)的变化均可发生强烈的变化，通过实际测量和仿真计算建立包含各种条件的完备模板库是非常困难的，也是不现实的^[29]。因此，扩展条件下的SAR目标识别性能下降是基于模板方法的一个不足。

为了克服基于模板方法存在的不足，人们开始研究基于模型的SAR目标识别方法。与基于模板方法不同的是，基于模型的方法将目标电磁散射特性蕴含于目标模型之中。由DARPA和Air Force联合开展的MSTAR计划^[30,31](Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition, MSTAR)是一种典型的基于模型的目标识别方法。它最初存贮的是目标的物理模型(如CAD模型+材质)，通过高频电磁计算软件模拟电磁波照射在目标上的散射过程，可以实时或近实时预测目标在任意姿态、配置或观测几何条件下的图像或特征。由于计算过程中可以对模型进行处理和操作，从而能够灵活地模拟不同扩展操作条件下目标的电磁散射特性，因此基于模型的SAR目标识别方法能够在扩展条件下取得较好的识别效果。但这种基于物理模型的方法还存在一些不足，主要表现在：一是由物理模型仿真计算复杂，难于实时；二是仿真计算产生的数据并不是物理意义清晰的电磁散射特征；三是采用整体计算策略，当目标部分结构或其依托场景发生变化时需要重新整体计算。这些缺点制约了基于物理模型方法在实际中的应用。其实雷达主要获取的是目标的电磁散射特性，而目标物理模型并没有清楚直接地描述目标的电磁散射特性。因此，发展有效的目标电磁散射模型是基于模型SAR目标识别的研究重点。本文在综合前人研究基础的前提下，试图对目标电磁散射模型构建问题以及基于该模型的SAR目标识别问题进行思考。

论文第2节主要研究如何发展目标电磁散射模型的问题，第3节主要阐述基于3维参数化电磁散射模型的SAR识别问题，最后，列出一些在该技术领域未来需要解决的问题。

2 如何发展更加有效的目标电磁散射模型

如何发展更加有效的目标电磁散射模型呢？要解决这一问题，需要从分析物理模型方法的不足之处入手。目前改进物理模型不足之处的技术途径有

两种。一种是研究更加有效的电磁仿真计算方法，这在电磁计算领域有广泛的研究，它不是本文关心的内容，读者可以进一步参考相关文献了解其进展^[32]。另一种是研究更加有效的电磁散射模型表述方式，其中最有名也是研究最多的是参数化表述模型。我们认为，目标电磁散射参数化模型发展的技术脉络正是在不断地改进物理模型的3个不足之处。

2.1 目标电磁散射参数化模型发展的技术脉络

早期雷达分辨率很低，目标整体可视为点目标，可以用RCS和极化散射矩阵等特征描述目标。但随着雷达成像分辨率的提高，目标细节逐渐显现。根据高频射线理论，目标总的电磁散射可以认为是由某些局部位置上电磁散射相干合成的，这些局部性的散射源通常被称为等效散射中心，或简称散射中心^[2]。散射中心这一概念是在理论分析中产生的，虽然没有严格的数学证明，但它与高分辨雷达观测等精确测量结果相吻合，能够切实体现目标的电磁散射特性。后来人们又进一步利用参数化数学公式描述了散射中心的电磁散射，从而利用参数化模型描述目标电磁散射成为可能。从广义上讲，目标电磁散射参数化模型就是用一组参数化的数学公式描述目标电磁散射随频率、雷达入射角度甚至极化方式变化而变化的规律，它一般可写为如下的形式^[2]：

$$S(f, \vec{n}; z) = \sum_{i=1}^N E_i(f, \vec{n}; z_i) \quad (1)$$

其中， S 为目标电磁散射， f 为频率， $\vec{n}$ 为雷达入射角度(含方位角和俯仰角)， z 为数学公式中的参数集； N 是目标包含的散射中心(或部件，以后均称散射部件)的个数； E_i 是描述目标上第 i 个散射部件电磁散射随频率和雷达入射角度变化规律的数学公式， z_i 是该公式中包含的参数集。

从式(1)可以看出，要建立目标电磁散射参数化模型必须要解决两个问题：一是如何建立散射部件的参数化表述公式，即 E_i ；二是如何利用散射部件组合表示复杂目标电磁散射。

2.1.1 如何建立散射部件的参数化表述公式 本文把散射部件的参数化表述公式定义为基础模型。从式(1)可以看出，基础模型是目标电磁散射参数化模型的核心。用参数化数学公式高精度表述散射部件电磁散射变化规律是建立高精度目标电磁散射参数化模型的基本要求，因此精度高是构建基础模型的基本条件。同时为了得到计算简洁、参数物理意义清晰且能拆分计算的目标电磁散射参数化模型，人们一直在不断研究和发展基础模型，总体技术发展特点如下：

(1) 增强基础模型多维空间的描述能力, 保证目标电磁散射参数化模型计算简洁;

(2) 增强基础模型构建的理论性, 保证目标电磁散射参数化模型参数物理意义清晰;

(3) 增强基础模型对应几何结构的现实性, 保证目标电磁散射参数化模型能拆分计算。

2.1.1.1 增强基础模型多维空间的描述能力 目标电磁散射是随着雷达入射频率和入射角度(包括方位角和俯仰角)的变化而变化的。这样, 基础模型多维空间的描述能力主要表现在两个方面: 一是多维表达能力要强; 基础模型能够描述电磁散射在频率、方位角和俯仰角3个维度的变化规律。二是表述的频率和角度范围要宽; 基础模型能够描述电磁散射在更宽频带和更宽角度范围内的变化规律。

(1) 多维表达能力方面

在多维表达能力方面, 基础模型经历了由1维到2维再到3维的发展, 这也是与雷达技术的发展过程相吻合的。

(A) 1维基础模型

早期雷达获取的信号是目标的1维频域测量数据, 此时主要研究1维的基础模型, 也就是描述目标电磁散射随频率变化的规律。典型的模型有1维理想点散射中心模型^[3]、1维衰减指数(Damped Exponentials, DE)模型^[33], 基于几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)的模型^[34]等。

(a) 1维理想点散射中心模型: 1维理想点散射中心模型(ideal point scattering center model)认为目标上所有的散射中心都是各向同性的理性点散射中心, 其散射幅度与频率无关, 是一个常数, 具体表达公式如下:

$$E_i(f; z_i) = A_i \cdot e^{-j4\pi f \cdot r/c}$$

1维理想点散射中心模型具有最为简单的形式, 但当测量带宽和成像积累角度相对较大时, 由于某些散射中心的散射对频率依赖关系不可忽略, 用理想的点散射中心描述将带来较大的模型误差, 因此使得模型与真实数据不匹配, 无法准确反映目标的散射特性。此时, 必须考虑散射幅度对频率的依赖关系。

(b) 1维衰减指数模型: 与理想点散射中心模型相比, 衰减指数模型(damped exponential model)不但能够准确地描述点散射现象, 而且考虑到某些非点散射对频率的依赖关系, 采用指数函数描述了散射中心的散射幅度对频率的依赖关系, 具体表达公式如下:

$$E_i(f; z_i) = A_i \cdot e^{-\alpha_i f/f_c} \cdot e^{-j4\pi f \cdot r/c}$$

(c) GTD模型: 随着人们对目标上主要电磁散射机理(现象)认识的不断深入, 将这些电磁散射机理所形成的散射中心分成不同的类型, 主要包括镜面散射中心、边缘散射中心、尖顶散射中心、凹腔体、行波与蠕动波、天线型散射等, 并一直试图用参数化数学公式来描述这些散射中心的电磁散射。国内电磁散射重点实验室的研究团队在这方面做了深入的研究, 建立了多种散射中心模型, 具体参考文献^[2]。目前学术界使用最多的是美国俄亥俄州立大学的研究团队根据几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)提出的GTD模型, 具体形式如下:

$$E_i(f; z_i) = A_i \cdot \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot e^{-j4\pi f \cdot r/c} \quad (4)$$

GTD模型用幂函数描述散射中心散射强度随频率的变化关系, 不同散射中心的频率依赖因子 α_i 是不同的, 具体如表1所示^[2]。

表 1 几种不同散射中心的 α_i 取值
Tab. 1 The α_i for different scattering centers

α_i 取值	散射中心
-1	角绕射, 尖顶绕射
-1/2	边缘绕射
0	点散射, 双曲面反射, 直边镜面反射
1/2	单曲面反射
1	平板法向发射, 二面角反射, 三面角反射

另外目标上的主要电磁散射机理除了上述提到的几种基本类型外, 还存在二次甚至多次耦合散射, 这些散射对目标电磁散射的贡献是不可忽略的。为此我们课题组(主要是电磁散射重点实验室)根据GTD模型构建了镜面-镜面耦合、边缘-边缘耦合以及镜面-边缘耦合等3类15种二次耦合散射中心模型, 具体各种类型模型的频率依赖因子如表2所示。

(B) 2维基础模型

随着雷达分辨率的提高, 回波信号对雷达入射方位角的敏感性增强, 这就要求基础模型能够同时描述电磁散射随频率和方位角变化而变化的规律, 由此开始了2维基础模型的研究。

(a) 2维理想点散射中心模型: 与1维理想点散射中心模型相比较, 2维理想点散射中心模型将散射中心对相位的响应扩展到了2维。具体公式如下:

$$E_i(f, \phi; z_i) = A_i \cdot e^{\frac{-j4\pi f}{c}(x_i \cos \phi + y_i \sin \phi)} \quad (5)$$

表 2 我们研究的耦合散射中心模型的频率依赖因子
Tab. 2 The α in the proposed model by our team

电磁散射中心类型	电磁散射中心名称	α 取值
镜面-镜面耦合	平面-平面耦合	1
	单弯曲-平面耦合	0.5
	双弯曲-平面耦合	0
	单弯曲-单弯曲耦合	0.5
	双弯曲-单弯曲耦合	0
	双弯曲-双弯曲耦合	0
镜面-边缘耦合	平面-直边耦合	0
	单弯曲-直边耦合	0
	双弯曲-直边耦合	-0.5
	曲边-平面耦合	-0.5
	曲边-单弯曲耦合	-0.5
	曲边-双弯曲耦合	-0.5
边缘-边缘耦合	直边-直边耦合	-0.5
	直边-曲边耦合	-1
	曲边-曲边耦合	-1

(b) 2维衰减指数模型：Sacchini等人^[35]将1维衰减指数模型扩展到了2维。该模型除了考虑雷达频率对散射中心散射响应的影响外，将雷达方位角对散射中心散射幅度的影响依然用指数函数建模，得到2维衰减指数模型的表达式为：

$$E_i(f, \phi; z_i) = A_i \cdot e^{-\alpha_i f/f_c} \cdot e^{-\beta_i \phi} \cdot e^{-j4\pi f \cdot r/c} \quad (6)$$

其中用参数 α_i 描述散射中心散射响应对频率 f 的依赖关系，参数 β_i 描述散射中心散射响应对方位角 ϕ 的依赖关系。

(c) 2维属性散射中心模型：美国俄亥俄州立大学研究团队^[36-38]认为复杂目标中主要存在三面角、顶帽、球、二面角、圆柱和直边等典型散射结构。他们在GTD模型的基础上，推导出描述这些典型散射结构的电磁散射随频率和方位角变化规律的统一模型。对于诸如：三面角反射、角反射器绕射以及边缘绕射等局部散射机理，它们的散射幅度是一个方位角的慢变化函数，可用一个衰减的指数函数近似描述局部散射机理对方位角的依赖关系。对于诸如平板反射、二面角反射、以及圆柱反射等分布散射机理，它们的散射幅度对方位角的依赖可通过 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数因子描述。其具体公式如下：

$$E_i(f, \phi; z_i) = A_i \cdot \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \text{sinc} \left(\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \bar{\phi}_i) \right) \cdot e^{-2\pi f \gamma_i \sin \phi} \cdot e^{-\frac{j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi)} \quad (7)$$

在式(7)中，不同的典型散射结构对应的 L 和 α 的取值是不相同的。三面角、顶帽和球属于局部

式散射中心，它们的 $L=0$ ，三面角的 $\alpha=1$ ，顶帽的 $\alpha=0.5$ ，球的 $\alpha=0$ ；二面角、圆柱和直边属于分布式散射中心，它们的 L 是它们的长度在方位向上的投影值，二面角的 $\alpha=1$ ，圆柱的 $\alpha=0.5$ ，直边的 $\alpha=0$ 。与其它模型相比，该模型的最大优势是其参数包含了散射中心丰富的物理属性和几何属性，所以得名为2维属性散射中心模型。

(d) 非均匀分布散射中心模型：国内艾发智等人^[39]，针对属性散射中心模型只能描述分布式散射中心均匀的情况，建立了非均匀分布式散射中心模型，具体如下：

$$E_i(f, \phi; z_i) = \left((ky_0 + b)L \cdot \text{sinc}(Lp) + j \frac{kL}{2p} (\cos(Lp) - \text{sinc}(Lp)) \right) \cdot \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot e^{-2\pi f \gamma_i \sin \phi} \cdot e^{-\frac{j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi)} \quad (8)$$

该模型增加斜率参数 k 来表示幅度的线性变化，增加常量 b 来表示平均幅度，使得模型能够表示诸如圆锥体等在长度方向分布不均匀的散射结构。

(C) 3维的基础模型

为了全面描述目标电磁散射随频率、方位角和俯仰角变化的规律，有必要建立3维散射中心模型。目前主要的3维散射中心模型有：

(a) 基于GTD扩展的3维散射中心模型：周剑雄等人^[40-42]根据GTD模型建立了3维散射中心模型：该模型保留了散射中心散射响应对频率的依赖关系，同时散射强度和相位考虑了方位角和俯仰角的影响，具体模型表述如下：

$$E_i(f, \theta, \phi; z_i) = A_{i,\theta,\phi} \cdot \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot e^{j4\pi f/c \cdot (x_i \cos \theta \cos \phi + y_i \cos \theta \sin \phi + z_i \sin \theta)} \quad (9)$$

(b) 基于属性散射中心模型扩展的3维散射中心模型：何洋等人^[43]根据属性散射中心模型扩展得到的3维电磁散射模型的参数化形式表述如下：

$$E_i(f, \theta, \phi; z_i) = A_i(\phi, \theta) \cdot \left(\frac{jf}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \text{sinc} \left[2\pi \frac{fL_i}{c} \sin(\phi - \bar{\phi}_i) \right] \cdot \exp \left[-j4\pi \frac{f}{c} (x_i \cos \phi \cos \theta + y_i \sin \phi \cos \theta + z_i \sin \phi) \right] \quad (10)$$

扩展得到的3维电磁散射模型的变化在于：散射特性 E_i 是随频率、方位角和俯仰角 (f, ϕ, θ) 变化的，散射强度 A_i 是随方位角和俯仰角 (ϕ, θ) 的变化而变化的。

(c) 麻省理工学院提出的3维典型体散射模型：美国麻省理工学院的研究团队^[44]用物理光学理论推导了平板、圆盘、二面角、三面角、圆柱和圆形顶帽等6种典型体的3维散射模型，描述了散射强度随视角的变化规律，但没有考虑对频率依赖性。

$$E_i(f, \theta, \phi; z_i) = A_i S_i(f, \theta, \phi; z_i) \cdot e^{j4\pi f/c \cdot (x_i \cos \theta \cos \phi + y_i \cos \theta \sin \phi + z_i \sin \theta)} \quad (11)$$

$S_i(f, \theta, \phi; z_i)$ 是典型散射体形状函数，不同的典型散射体其形状函数是不同的，具体形式参考文献^[44]。

(d) 俄亥俄州立大学提出的3维典型体散射模型：美国俄亥俄州立大学的研究团队^[45-48]根据物理光学理论和均匀散射理论，建立了平板、二面角、三面角、圆柱、圆形顶帽和球等6种典型散射体的散射模型，它们统一的表述公式如下：

$$E_i(f, \theta, \phi; z_i) = P_i(f, \theta, \phi; z_i) M_i(f, \theta, \phi; z_i) e^{j\Delta R_i(\theta, \phi; z_i)} \quad (12)$$

不同典型散射体的 $P_i(f, \theta, \phi; z_i)$ 、 $M_i(f, \theta, \phi; z_i)$ 和 $\Delta R_i(\theta, \phi; z_i)$ 是不同的，具体形式参考文献^[48]。

(e) 我们提出的3维典型体散射模型：我们课题组(主要是电磁散射重点实验室)根据物理光学理论和几何绕射理论，建立了长方体、圆柱体、方形顶帽、圆形顶帽、平面上倒圆柱、二面角、三面角等7种典型体的散射模型，并采用数据拟合的方法建立了圆边浅凹体、矮顶帽和狭长二面角等3种典型体的散射模型。这10种典型体的散射模型具体请参考附录。

(2) 表述的频率和角度范围要宽

研究宽频率和宽角度表述能力的基础模型有如下3个方面的意义：(A)能够降低模型计算量。由于

目标的电磁散射随雷达波的入射角度变化较为剧烈，若基础模型只能描述以入射角为中心小范围内的目标散射特性，描述目标在全姿态下散射则需要使用大量不同的模型。(B)能够获得适用于更大范围的不变识别特征。若基础模型能够有效描述目标在宽的频率和大的角度范围内的电磁散射，则该模型中的参数可作为刻画目标的电磁散射的一种不变特征，这为目标识别，尤其是在目标电磁散射随雷达波的入射角度变化剧烈的情况下，提供了有效的支撑。(C)能够得到更高空间分辨率的SAR成像算法。受信号带宽和观测角度的限制，有些情况下，雷达仅能获得有限带宽和小观测角度下的目标回波数据，该数据所成图像的分辨率也因此受到系统性能的制约。若基础模型能够有效描述目标在宽的频率和大的角度范围内的电磁散射，则可通过拟合小角度观测域内目标的散射数据获知目标的散射特性描述模型，在此基础上，进行频带和孔径外推以扩大有效的频率和成像角范围，进而改善成像的分辨性能。我们课题组(主要是西安电子科技大学)利用宽频率和宽角度基础模型研究新的SAR成像方法^[49-51]，空间分辨率提高30%以上。

以二面角为例，俄亥俄州立大学建立的模型为：

$$S_{VV,HH} = \pm \frac{j2kaL}{\sqrt{\pi}} \text{sinc}(kLl_z) \min\{l_x, l_y\} \quad (13)$$

我们建立的模型将等边尺寸垂直耦合结构推广到非等边尺寸垂直耦合结构，具体如下：

$$S_{VV,HH} = \frac{j2kL}{\sqrt{\pi}} \text{sinc}(kLl_z) \min\{bl_x, al_y\} \quad (14)$$

不同方位角下，这两种模型所产生RCS数据与电磁仿真计算的RCS数据对比如图1所示。图中二面角结构的RCS比较，红实线为仿真计算产生的数

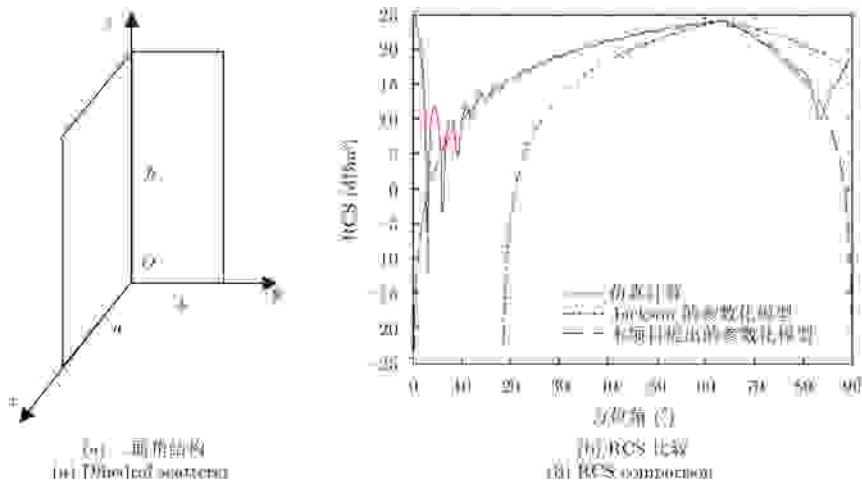


图1 二面角结构及其RCS比较

Fig. 1 Dihedral and the RCS comparison

据, 黑虚线为俄亥俄州立大学建立的模型所产生的数据, 蓝虚线为我们建立的模型所产生的数据, 由图中可见我们改进后的模型精度更高, 适应角度更宽。

2.1.1.2 增强基础模型构建的理论性 目前构建基础模型有理论推导和数据拟合两种方式。

(1) 理论推导

该方式主要是根据高频近似计算方法(几何光学法、几何绕射法、物理光学法、物理绕射法和等效电磁流法等), 首先建立目标上主要散射机理所形成散射中心(1维)的基础模型, 然后再构建典型散射结构(2维)的基础模型, 最后形成典型体(3维)的基础模型。在上述基础模型中, GTD模型及其扩展、属性散射中心模型及其扩展、麻省理工学院及俄亥俄州立大学提出的典型体散射模型和我们提出的前7种典型体散射模型是基于理论推导得到的。基于理论推导的基础模型中的参数具有明确的物理属性和几何属性, 比如GTD模型中的频率依赖因子 α 与典型散射结构的类型相关、属性散射中心模型中的参数 L 反映的是典型散射结构的长度信息、我们提出的长方体散射模型中的参数 a, b, c 是长方体的长宽高。因此, 在目标电磁散射参数化模型的构建中应主要选用理论推导类的基础模型。

(2) 数据拟合

在实际应用中, 有些复杂散射中心的基础模型是难于通过理论推导建立的, 例如目标上存在的凹腔体、行波与蠕动波、天线型散射等复杂电磁散射机理所形成的散射中心。另外由理论推导形成的典型体比较简单, 只利用它们的组合难以构建复杂目标电磁散射模型, 需要结合实际应用建立一些更为复杂的典型体散射模型。为了解决这些基础模型的构建问题, 一般采用数据拟合的方式。该方式首先通过仿真计算或暗室测量等手段获取它们的电磁散射数据, 然后分析这些数据随频率、入射角度等参数的变化规律并选择合适的基函数拟合, 最后得到复杂散射中心和典型体的基础模型。在上述基础模型中, 理想点散射中心模型及其扩展、衰减指数模型及其扩展和我们提出的后3种典型体散射模型是基于数据拟合得到的。虽然数据拟合方式建立的基础模型中的参数没有清晰的物理意义, 但为了建立简洁、高精度的目标电磁散射模型, 采用数据拟合的方式建立基础模型作为补充是十分必要的。

由于理论推导是从电磁散射机理出发构建各种散射中心的基础模型的, 故这些模型中的参数物理意义清晰, 利用它们构建出来的目标电磁散射模型中的参数也会物理意义清晰, 这样使得在雷达目标识别中能够尽量采用反映电磁散射特性的特征, 以

提高目标识别性能。因此, 今后应不断加强理论推导的研究, 丰富基础模型的类型。

2.1.1.3 增强基础模型对应几何结构的现实性 根据电磁理论, 每个散射中心都相当于斯特拉顿-朱(Stratton-Chu)积分中的一个数字不连续处^[2]。从几何观点来分析, 就是一些曲率不连续处与表面不连续处。这也表明散射中心与真实目标的实体结构是有强的关联性的。因此, 建模中应该考虑基础模型与实际目标几何结构的对应性。通常基础模型是对典型散射中心偏于理想化的描述, 然而, 实际感兴趣的目标是真实存在的, 组成目标的结构也都是多种多样的。在实际应用中基础模型还可能与真实目标结构不一致。例如基础模型中建立的二面角模型为直二面角, 而真实目标中的二面角可能有锐角二面角和钝角二面角等等。除了独立的散射结构外, 目标中还可能多种简单散射结构的组合, 它们对应于目标电磁散射响应中的一个散射中心。这种情况下, 增强基础模型与散射结构的现实性就显得尤为重要。

2.1.1.4 基础模型的发展脉络图 上文的3个部分从不同的角度和侧面刻画了电磁散射基础模型描述目标电磁散射特性的能力, 针对文中提到的一些典型的散射中心模型, 其发展脉络如图2所示。

在实际应用时, 可能难以同时满足目标电磁散射参数化模型的3个基本要求, 需要根据实际的需求, 综合考虑它们建立合适的目标电磁散射参数化模型。

2.1.2 如何建立复杂目标电磁散射参数化模型 复杂目标的电磁散射参数化建模, 就是利用上述基础模型的组合构建一个能够描述目标电磁散射随雷达频率和入射角度变化而变化的参数化模型。一个优良的复杂目标电磁散射参数化模型应该具有如下特点。

(1) 精度要高

精度高是指电磁散射参数化模型产生的电磁散射数据与实际目标电磁散射响应具有很高的相似性, 这是模型建立的基本前提。精度高的电磁散射参数化模型是后续目标识别、目标运动参数测量的基础。

(2) 模型组合要简洁

模型组合是指能够通过若干基础模型的组合, 建立复杂目标的电磁散射参数化模型。简洁的模型组合要求建立复杂目标的电磁散射参数化模型过程中使用的基础模型尽量少。这种简洁的组合方式不仅降低了复杂目标电磁散射参数化模型的存储量, 而且能够有效提高由该参数化模型产生电磁散射数据或特征的计算效率。

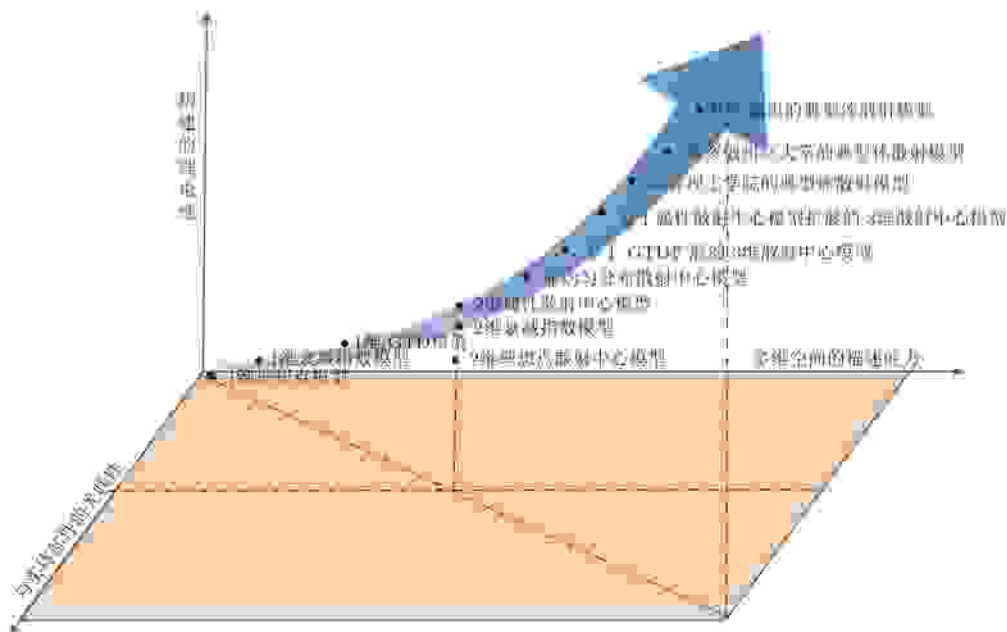


图2 基础模型的发展脉络

Fig. 2 The development of basic model

(3) 参数的物理意义要清晰

参数的物理意义清晰是指模型中的参数具有明确的物理属性和几何属性。在雷达目标识别中采用参数物理意义清晰的电磁散射特征，能够提高目标识别性能。

(4) 散射部件物理来源要明确

散射部件是来源于实际目标中真实存在的物理结构，因此复杂目标电磁散射参数化模型中的各个散射部件与目标中不同部分的物理结构具有明确的对应关系。散射部件物理来源清晰的复杂目标电磁散射参数化模型便于拆分，能够描述复杂目标中某些局部物理结构缺失或变化的情况。

目前建立复杂目标电磁散射参数化模型的技术途径主要有正向推导建模和逆向拟合建模两大类。

2.1.2.1 正向推导建模方法 正向推导建模方法在目标精确几何外形和表面材料特性已知的情况下，通过电磁理论分析，确定目标散射中心的数量、类型及具体参数。

早期，基于物体分解的目标电磁散射建模方法^[52,53]是通过分解目标来建立目标的电磁散射模型。该方法具有实现简易、快速和RCS幅度校模方便等优点，但是分解部分的组合并不能精确反映复杂目标几何形状，因此对目标散射场的相位信息预测具有较大的误差^[54]。

我们课题组(主要是武汉大学电磁工程实验室)从目标的几何结构外形出发，通过几何结构分解，发展了一套复杂目标的3维参数化电磁散射部件模型建模方法^[43]。建模思路如图3所示，首先将

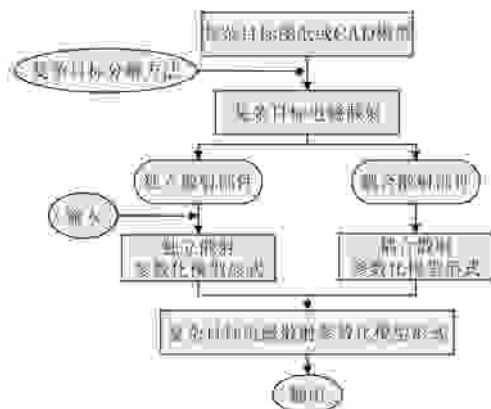


图3 正向建模流程图

Fig. 3 The diagram for forward target modeling

整个目标的电磁散射分解为典型散射部件的共同作用，其中，这些典型散射部件可以直接等效于目标中实体散射结构的作用以及实体散射结构之间相互耦合形成的等效散射体的作用，然后用参数化方法表征各个散射部件的散射特性，最后通过典型散射部件描述目标在3维空间中的电磁散射情况。该模型具备从部件层面上描述目标电磁散射的能力。另外，由于目标中各个散射部件是通过目标的分解而确定的，因此，可以直接从目标中得出所包含的各个部件的属性信息，并且可以直接从该模型中预测相应的2维特征。在该模型中，目标的电磁散射机制和特性是由一些典型的电磁散射部件集而描述的，这些散射部件(例如顶帽，二面角，三面角，平板等)，具备特定的属性信息，并且每个部件的参数与目标的物理结构保持着明确的对应关系。模

型中部件的描述参数相对稳定且具备物理意义，能够用于更高层次的目标推理和理解。此外，这种部件化的描述方式，能够以更简单的方式仿真目标局部配置发生变化的情况，有助于扩展条件下对目标的修正和完善。

我们利用上述方法已建立了包括我军某装甲车、T72、BMP2、BTR70等多种复杂目标的电磁散射参数化模型，但由于保密问题，不适合在公开文献上发表这些数据。图4给出了T72简化后目标几何模型及其参数化建模结果，后面的实验均是以该目标的数据进行测试的。该简易坦克的电磁散射参数化模型是由29个典型部件构成，表3给出了部



图 4 简易坦克目标及其正向建模结果
Fig. 4 Simplified tank target and its modeling result

表 3 简易坦克的部件级3维电磁散射模型
Tab. 3 The 3D parametric electromagnetic part model for the simplified tank target

编号	形成原因	可见范围(°)	参数化模型形式	RCS峰值(dB)
1	车身	俯仰: [19, 39] 方位: [75, 105]	平板	1
2	车身平板与立方体	俯仰: [9, 30] 方位: [75, 105]	方形顶帽	32
...	...	...	...	...
28	右履带与车身前斜平板	俯仰: [2, 30] 方位: [75, 105]	二面角	33
29	车身平板与炮筒	俯仰: [11, 30] 方位: [75, 105]	平板上倒圆柱	10

分部件的结果，公式(15)描述了目标上的炮筒结构的电磁散射参数化模型。

$$\begin{aligned} E(f, \theta, \phi) = & (\text{Re} + \text{Im} \times j_0) \times \sqrt{\frac{2\pi f}{c}} \times r \times L \\ & \times \left(\frac{f}{f_c} \times j_0 \right)^{0.5} \times \cos(\theta - \theta_0) \\ & \cdot \text{sinc} \left[\frac{2\pi f}{c} \times L \times \sin(\theta - \theta_0) \times \cos(\phi) \right] \\ & \cdot \exp \left\{ -j_0 \frac{4\pi f}{c} \times [x_0 \times \cos(\phi) \times \cos(\theta - \theta_0) \right. \\ & \left. + y_0 \times \cos(\phi) \times \sin(\theta - \theta_0) + z_0 \times \sin(\phi)] \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

其中该部件类型为圆柱体，其物理来源为炮筒，可见范围为方位角 $[0^\circ, -180^\circ]$ ，俯仰角 $[6^\circ, -40^\circ]$ ，幅度的实部和虚部分别为 $\text{Re}=0.7016$ ， $\text{Im}=0.744$ ；圆柱的半径为 $r=0.1\text{ m}$ ，长度为 $L=5.2319\text{ m}$ ，其空间姿态角为 $\theta_0 = \pi/2, \phi_0 = 0, \gamma_0 = 0$ ，3维位置坐标为 $(3.5\text{ m}, 0\text{ m}, 1.9\text{ m})$ 。

图5给出了目标电磁散射参数化模型在某特定姿态角和频带内生成图像与仿真图像精度对比结果。我们用700组暗室测试数据和仿真数据进行了精度验证：RCS平均误差为2.57 dB，位置误差小于2个分辨单元的平均准确率为86.2%。

2.1.2.2 逆向拟合建模方法 逆向拟合建模方法是指通过分析目标的电磁散射特性数据，推断得到目标电磁散射参数化模型的基础模型组合形式和参数。逆向拟合建模方法的基本思路如图6所示，首先选定某种描述散射源的基础模型，然后从雷达测量数据中重构散射中心的位置、散射强度和频率依赖因

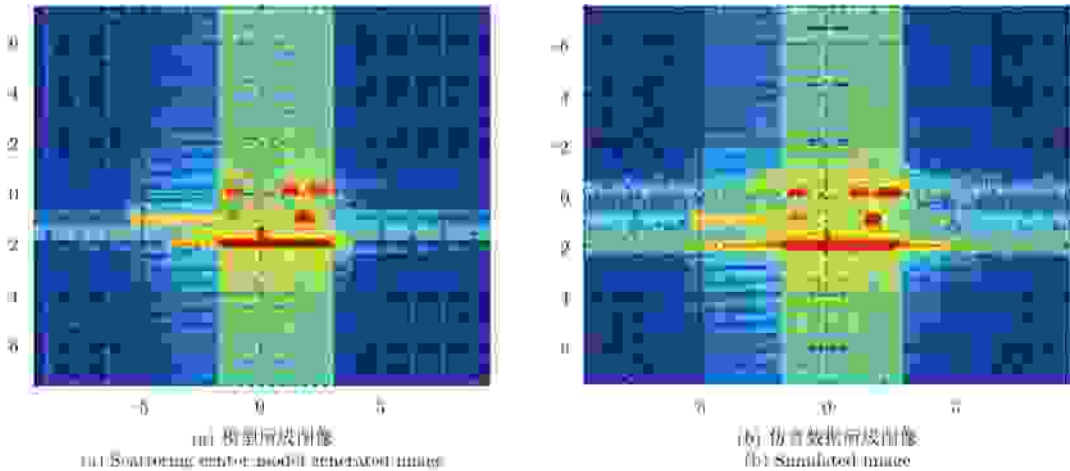


图 5 目标电磁散射参数化模型生成图像与仿真数据对比
Fig. 5 Comparison between the scattering center model generated image and the simulated image

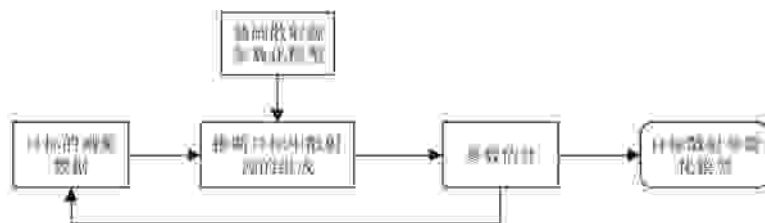


图6 逆向建模基本思路

Fig. 6 The diagram for inverse target modeling

子等模型参数。根据选定的基础模型的不同，可反演构建出不同类型的复杂目标的电磁散射参数化模型。国外的麻省理工学院、俄亥俄州立大学以及国内的北京航空航天大学，武汉大学和国防科技大学等单位对相关方法进行了深入的研究。

国防科技大学周剑雄博士^[40-42]提出的方法采用点散射中心模型描述目标的局部散射源，利用Hough变换、二值形态学运算等方法实现了多角度1维散射中心的匹配，从而构建局部散射源的3维位置，并利用一个2维矩阵表示散射中心在不同方位和俯仰角度下的散射响应幅度大小。

美国麻省理工学院的研究团队^[44]提出了利用多幅SAR图像建立目标3维电磁散射参数化模型的基本框架。该框架采用了二面角、三面角、圆柱和顶帽等4种基础模型，它首先在2维SAR图像上进行特征提取，然后利用描述目标3维散射源与2维投影点对应关系的“粗测量模型”实现了多角度SAR图像中2维散射中心的匹配，最后利用对应关系下散射源参数的“精测量模型”估计3维散射源的各种参数。

我们课题组(主要是国防科技大学)利用多角度合成孔径雷达数据研究了不同基础散射源下的目标重建问题^[55]。整个模型过程划分为模型初始化和参数优化两部分。针对模型初始化问题，重点研究了目标2维/3维散射中心特征提取方法，并提出了由多个2维散射中心重构3维散射中心的方法。针对模型参数优化问题，分别从图像域约束准则和多角度图像分割两个角度提出了优化方法，提高优化稳定性和效率。根据所选择的基础散射模型不同，可以建立的复杂目标3维电磁散射参数化模型也不同。下面具体展示了基于属性散射中心的目标模型反演结果，其中实验条件的具体设置如下，实验数据为简单坦克目标的高频电磁计算数据，雷达发射频率 $f: 8.5 \sim 9.5$ GHz，频率步进 $\Delta f = 10$ MHz，方位角范围是 $[-180^\circ, 180^\circ]$ ，方位角间隔 $\Delta\phi = 0.05^\circ$ 。选择均匀分布在 $\theta \in [10^\circ, 50^\circ]$ 范围内、间隔 $\Delta\theta = 5^\circ$ 的9个俯仰角的CSAR数据。每个俯仰角的CSAR数

据分割为一系列窄的子孔径，形成多角度SAR数据。子孔径的中心方位角 ϕ_k 均匀分布在 -180° 至 180° 之间，间隔为 $\Delta\phi = 5^\circ$ ，子孔径数据的方位角大小为 $\Delta\phi_{AW} = 5^\circ$ 。重构的目标属性散射中心模型结果如图7所示，其中图7(a)是目标CAD模型，图7(b)、图7(c)、图7(d)分别从不同的视角展示了重构的3维属性散射中心。展布式散射中心用一根线段表示，线段的长度是展布式散射中心的等效长度，线段的中点是展布式散射中心的3维位置，用圆圈表示。线段水平法线的方向是展布式散射中心的方向参数。从重构结果可以看到，目标的几何特征已基本浮现，说明通过散射中心重构有可能获得目标的一个几何结构可视化的像。图8展示了仿真电磁软件计算得到目标的SAR图像和基于属性散射中心模型重构的SAR图像。通过两幅图像的对比发现重构SAR图像与原始SAR图像具有较高的相似度，这说明基于属性散射中心模型的反演方法能够较好的反映目标的散射中心结构，并以较高的精度重构目标的散射响应。该方法得到的重构结果对发展自动或人工辅助的可视化的雷达目标识别技术的具有较大的应用价值。

2.1.2.3 基础模型和建模方法的选择 从上面分析可知，对于同一个目标，若采用的基础模型和建模方法的不同，建立的3维电磁散射参数化模型也是不同的，它所具有的特点也会有较大的差别。采用点散射中心为主建立的目标电磁散射参数化模型称为目标3维点散射中心参数化模型，它包含的基础模型数量多、存储量大、计算量大，投影产生的2维散射中心多。采用属性散射中心为主建立的目标电磁散射参数化模型称为目标3维属性散射中心参数化模型，与点散射中心模型相比，目标模型简洁些、参数的物理意义清晰。采用典型体散射为主建立的目标电磁散射参数化模型称为目标3维部件级电磁散射参数化模型，这类模型非常简洁、参数的物理意义清晰、散射部件与实体部件对应性强，处理扩展条件下的能力更强。

总的来说，正向建模的方法是从目标物理结构

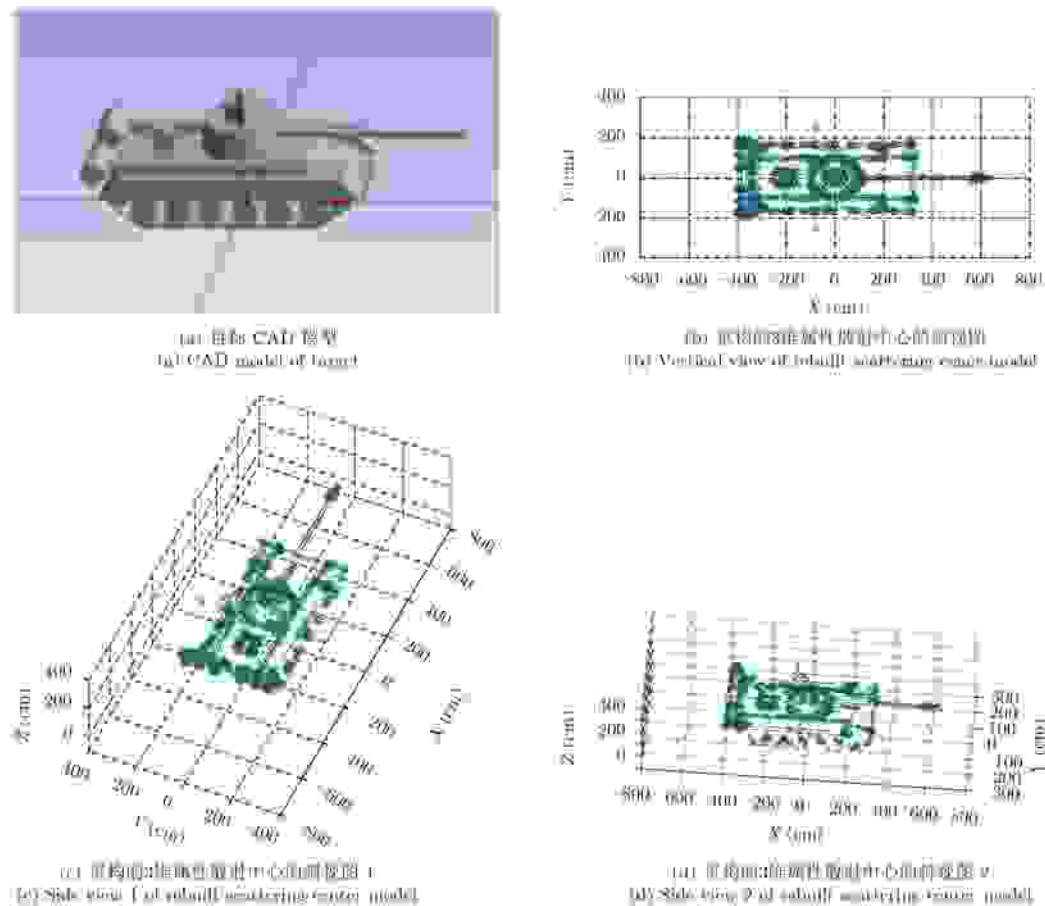


图7 重构的简单坦克宽角度3维属性散射中心模型

Fig. 7 The rebuilt model for simplified tank target based on 3D attributed scattering center model

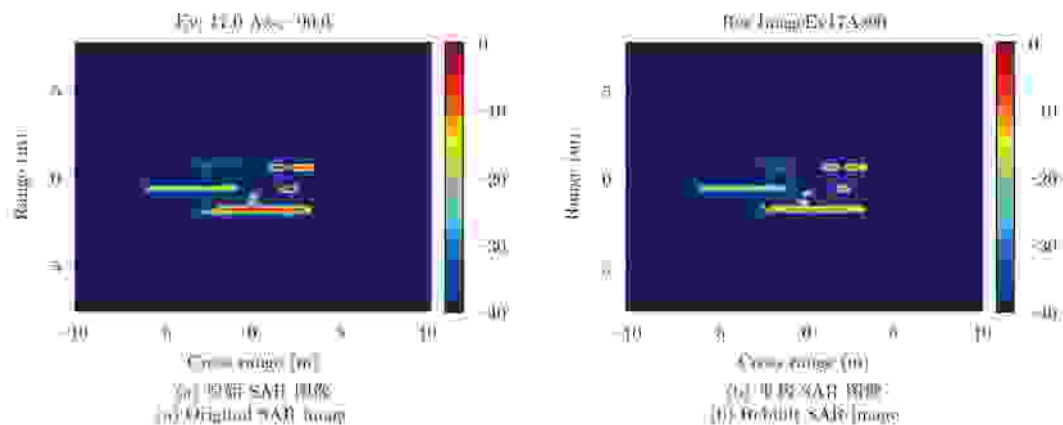


图8 目标的SAR图像以及基于属性散射中心模型重构的SAR图像

Fig. 8 Original SAR image and rebuilt SAR image

出发, 采用电磁理论, 通过组合基础模型构建复杂目标电磁散射参数化模型的。这样建立的模型具有模型组合简洁、参数物理意义清晰以及散射部件物理来源明确且建模精度较高的优点。不过正向建模方法目前还处于探索阶段, 需要有专业的电磁理论知识和丰富经验才能完成复杂目标的建模, 自动化程度较低。而逆向拟合方法是从电磁散射观测数据

出发, 实际上也就是从目标电磁散射的“结果”出发建立目标的电磁散射参数化模型, 因此建模精度较高。同时该类方法自动化程度较高, 对几何结构以及表面材料散射特性较为复杂的目标有很好的适应性。但是该类建模方法难于确定模型中各个散射部件的物理来源, 存在散射部件与目标几何结构的对应性不强、模型中参数的物理意义不清晰的缺点。

目前目标3维部件级电磁散射参数化模型的构建一般采用正向推导的方法,而目标3维点散射中心参数化模型和目标3维属性散射中心参数化模型的构建一般采用数据拟合的方法。

3 如何利用目标3维电磁散射参数化模型发展SAR目标识别方法

基于目标3维电磁散射参数化模型的SAR目标识别方法本质上是建立实测SAR数据与目标3维电磁散射参数化模型之间的匹配关系,通过评估匹配关系的强弱来完成目标的分类或确认。目标3维电磁散射参数化模型可以高效预测目标整体或者局部的电磁散射,这为实现高效、稳健的SAR目标识别提供了支撑。

早期的MSTAR计划中^[30,31],研究人员首先利用目标的CAD模型通过电磁计算软件或者目标3维点散射中心模型预测SAR图像,然后分别从预测图像和实测图像中提取目标特征(如轮廓、峰值等),最后通过特征的匹配完成目标分类。周剑雄等提出的方法^[41]首先提取实测数据的目标区域,然后计算目标3维散射中心模型在实测数据观测条件下的投影散射中心,最后评估这些通用中心与目标区域的重叠度完成目标识别。这些方法均是利用了目标3维电磁散射参数化模型能够高效预测目标在任意姿态角或者配置下的SAR数据或特征的优点,但仍采用整体匹配策略,它们并不能很好地处理目标发生的局部变化,如局部缺失、变形、遮挡等。俄亥俄州立大学的Lee C Potter团队^[56]利用模型预测的属性散射中心集与实测数据中提取的属性散射中心集进行匹配,通过构建属性散射中心的一一匹配关系建立相似性测度,这样可以一定程度上通过设置属性中心匹配虚警和漏警概率辨识目标发生的局部变化,因此处理局部形变的能力更强些。为了更好地发挥目标3维电磁散射参数化模型在预测目标局部特征上的作用,后期的MSTAR计划提出了局部推理的思路^[57]。该思路是以目标3维点散射中心模型为基础,利用射线追踪技术将每一个散射中心与目标的实体部件对应起来,根据目标3维散射中心在实测SAR图像投影中心的存在性判断目标可能发生的局部变化。显然,它更能发挥了目标3维电磁散射参数化模型的优势,但并未在公开文献中报道这种方法的实现情况。

如何稳健可靠地建立实测SAR数据与目标3维电磁散射参数化模型之间的匹配关系?非常有必要在构建过程中考虑如下3个方面的因素:

(1) 必须充分认识实测数据与目标模型之间的

共性和差异性。实测数据和目标模型均包含了目标在特定测量条件下(如频段、姿态角等)的电磁散射,它是构建实测数据和目标模型之间匹配关系的基础。然而,实测数据是目标、背景环境以及SAR数据获取系统等共同作用下的产物,它不仅仅包含目标电磁散射,还有背景环境以及它们之间耦合的电磁散射,而且还有SAR数据获取系统带来的各种测量噪声,但目标模型仅包含目标的电磁散射,这些因素就给构建实测数据和目标模型之间的匹配关系带来了一定的障碍。

(2) 必须选择合适的实测数据与目标模型之间的匹配度计算策略。目前评价实测数据与目标模型之间的匹配度的策略有整体匹配和局部匹配综合两种方式。整体匹配策略首先利用目标3维电磁散射参数化模型预测目标在实测数据测量条件下的SAR数据或者特征,然后计算其与实测SAR数据或特征之间的匹配度。局部匹配综合策略充分利用了目标3维电磁散射参数化模型在预测目标局部散射源上的能力,首先得到目标在实测数据测量条件下的局部散射中心,然后对各个局部散射中心的匹配度进行评价,最后综合这些局部散射中心的匹配度获得整体匹配度。相比于整体匹配策略,局部匹配综合的方法更能方便辨识目标发生的局部变化,能够提高识别方法在扩展操作条件下的稳健性。

(3) 必须要结合参与匹配的目标3维电磁散射参数化模型的特点。对于目标3维点散射中心参数化模型,更多侧重在散射点位置和数据层上研究匹配关系;对于目标3维属性中心参数化模型,对应的参数物理意义更清晰、更稳定,可以考虑在特征层上定义匹配测度;对于目标3维部件级电磁散射参数化模型,由于散射部件和实体部件关联性强、模型的集成性强、参数用于识别的稳定性高,可以更方便地考虑局部匹配策略,甚至可以融入目标知识,提高扩展条件下的匹配性能。

应该指出的是,目标部件级3维电磁散射参数化模型基本上具备一个优良目标3维电磁散射参数化模型应该具备的优势,它为解决复杂条件下的SAR目标识别问题提供一个很好的条件。我们课题组(主要是国防科技大学)基于该模型提出了新的SAR目标识别框架,并针对其中的关键问题进行了较为深入研究。

基于目标3维部件级电磁散射参数化模型的SAR目标识别框架如图9所示。该框架主要包括3个模块:模型投影模块、匹配度计算模块和优化调整模块。

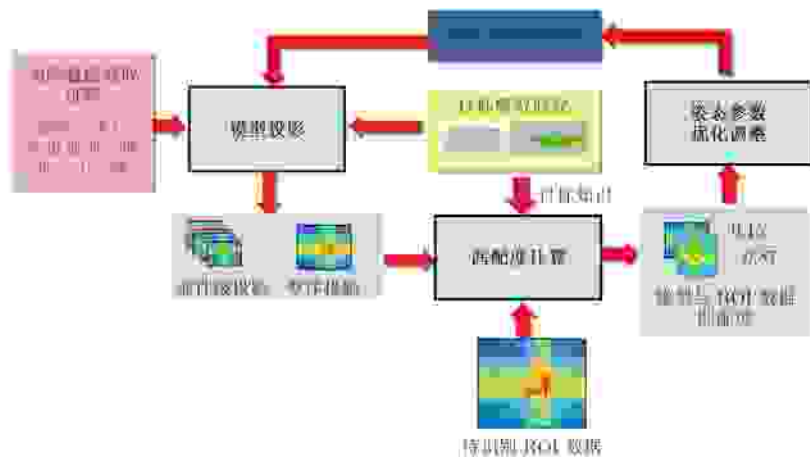


图9 基于3维部件级电磁散射参数化模型的识别框架

Fig. 9 Framework of 3D parametric electromagnetic part model based SAR ATR

(1) 模型投影模块。该模块的作用是根据目标3维部件级电磁散射参数化模型, 结合SAR数据获取系统的各种成像参数(包括带宽、极化方式、入射角度等), 考虑载荷、平台、数据处理、环境各种误差和噪声, 生成与实测数据更加接近的数据或特征。不同SAR数据获取系统的校正模型是不一致, 为了得到精确的校正模型, 有时还需要在地面上布设一些标准散射体。

(2) 匹配度计算模块。匹配度计算是基于3维电磁散射参数化模型的SAR目标识别方法的核心, 它旨在计算实测SAR数据与目标模型投影数据之间的匹配度。我们课题组已提出了多种匹配度计算方法。

(A) 基于目标整体匹配的匹配度

该方法中采用目标部件级3维电磁散射模型预测的目标整体SAR数据与测量数据进行匹配得到相似度。这与MSTAR计划中采用的匹配方法类似。首先得到目标整体的SAR图像(通常将原始SAR数据转换到图像域进行匹配); 然后分别提取模型图像和测量图像的特征, 如散射中心、边缘等; 最后评价这两组特征集的匹配度。这类方法操作较为简单, 但是这种整体匹配的策略对于目标局部的变化(如部分缺失、遮挡等)难以保持稳健。

(B) 基于部件匹配综合的匹配度

目标部件级3维电磁散射模型能够计算目标各个部件的散射特性, 这为实现目标部件级别的匹配提供了可能。在这种方法中, 目标模型首先预测各个部件的SAR数据。然后在模型先验信息的引导下(如某一散射部件在整体图像中的相对位置)对于单个散射部件在测量图像中逐个进行“检测”并得到相应的置信度。最后, 将各个散射部件的置信度综合得到测量数据与目标模型的整体匹配度。相比整体匹配的策略, 这种方法为解决目标局部变化的扩展操作条件提供可能。目标局部的变化在散射部件

“检测”上体现为相应位置的散射部件具有较低的置信度。但在最后的综合过程中, 少量散射部件的变化并不会对最终的整体匹配度造成太大影响, 因此仍然能够保持测量数据与目标模型的高匹配度。此外, 由于各个散射部件对应着目标的实体部件, 因此可以引入知识对目标的局部变化进行推理。例如, 当对应于坦克炮筒的散射部件在测量图像中的置信度较低时, 可以根据炮筒可能的变化规律(可绕炮塔进行360°旋转)在其可能出现的区域进行进一步的检测。

我们课题组(主要是国防科技大学)主要针对这类方法开展了广泛的研究。文献[58]提出了基于匹配滤波的散射部件检测方法, 得到模型各个散射部件在实测数据中的匹配度。文献[59]通过用仿射变换描述模型预测的散射中心集和测试数据提取的散射中心集的关系, 然后综合考虑了散射中心的空间位置信息和属性信息, 通过能量函数的最优化实现散射中心的匹配。文献[60]通过对每个散射部件存在性的判断来确认模型和测试数据中的目标是否是同一类目标。首先确定模型中的散射部件在待识别数据中的存在置信度, 形成散射部件的相似性描述, 然后综合所有部件的相似度得到模型整体和SAR数据的匹配相似度。目标部件存在信息的引入, 在最终的识别结果, 不仅回答了“是不是”某类目标的问题, 更能够深入地分析“为什么是或者不是”的问题。Ding分别在文献[61]和文献[62]中提出了基于结构约束和K-L散度的散射中心集相似度评价方法, 为基于模型的识别方法提供了新的解决思路。

(3) 优化调整模块。SAR数据对于目标的姿态角(包括俯仰角和方位角)具有很强的敏感性, 较小的姿态变化都可能导致SAR数据的显著变化。在模型投影时, 俯仰角的初始值可由飞行参数确定, 方

位角的初始值一般通过方位角估计的方法得到。由于姿态角估计可能存在误差,因此在实际的识别框架中需要加入姿态角优化调整的模块。在初始姿态角的附近按照设定的规律对其调整并重复匹配过程,得到测量数据与目标模型的最佳匹配。

图10给出了俯仰角 30° 方位角 90° 下简易坦克的电磁计算数据、暗室数据以及模型投影数据所成的图像。这些数据既包含了标准操作条件和部分扩展操作条件下。图11给出了几种典型扩展操作条件下的目标图像,包括噪声干扰、部分增添以及局部形变。本实验中采用目标确认的二分类思路,即对每一幅输入SAR图像判断它是或者不是当前的简易坦克目标。对于测试的 N 幅SAR图像如果有 M 幅确认为简易坦克目标(通过相似度的门限判决),则识别率为 M/N 。表4给出了基于模型的方法与基于模板

的方法的性能对比。与传统的模板匹配的方法相比,基于模型的方法在标准操作条件和扩展操作条件下都显示了更好的识别性能。尤其在扩展操作条件下,基于模型的识别方法显现出了巨大的优势。

4 发展趋势

目标3维电磁散射参数化模型用一组特定的数学公式和参数值描述目标的电磁散射,不仅能预测目标任意姿态、分辨率、配置条件、观测几何下的图像或特征,还能通过投影生成任意角度下的低维(1维\2维)电磁散射参数化模型,能够为SAR目标识别提供有力的支撑。虽然基于目标3维电磁散射参数化模型的SAR目标识别方法取得了不少进步,但距离可投入实际应用的SAR ATR系统应用还存在一定的差距,仍需要研究者们孜孜不倦的探索,今后研究的重点有:

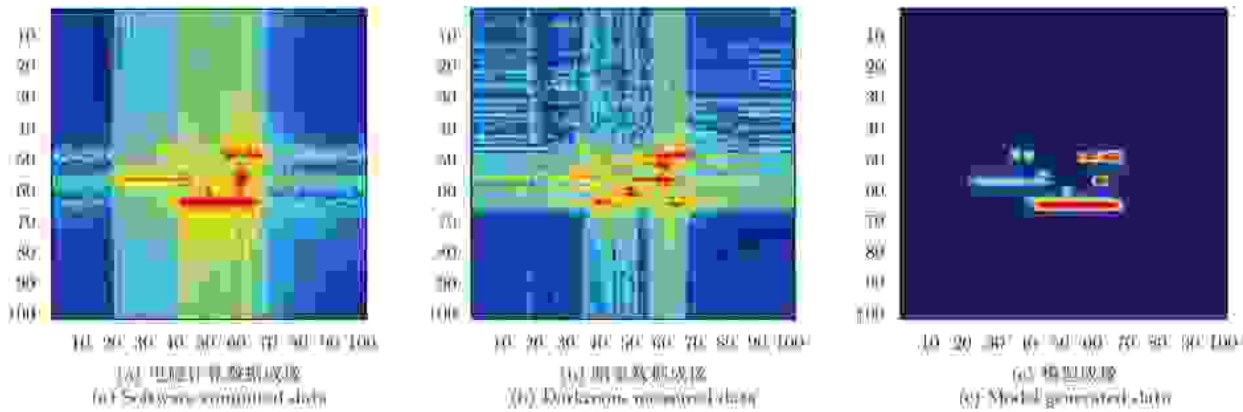


图 10 简易坦克目标成像
Fig. 10 Image of simplified tank target

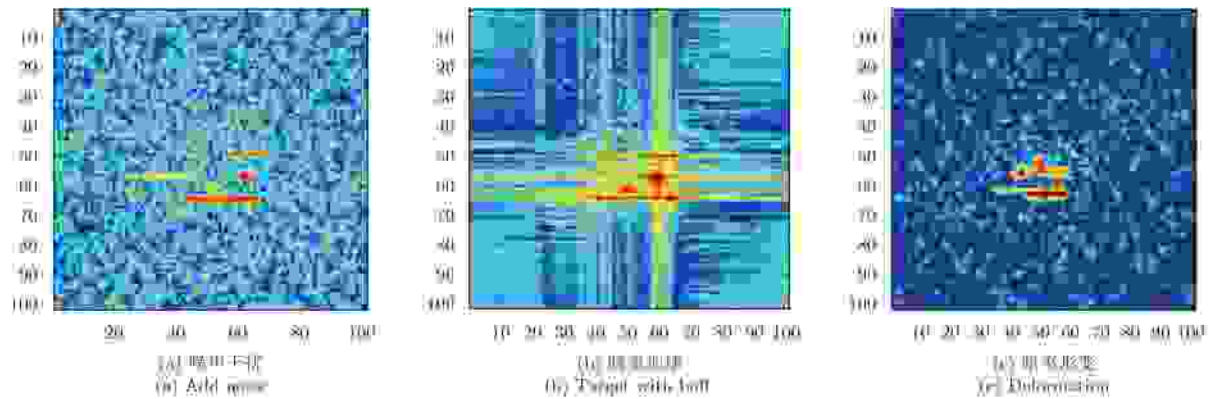


图 11 部分扩展操作条件下暗室测量得到的测试数据
Fig. 11 Test data in EOCs

表 4 基于部件级3维电磁散射模型的识别结果

Tab. 4 The recognition results

操作条件	数据描述	基于目标3维参数化电磁散射模型 方法的识别率(%)	基于模板方法的识别率(%)
标准	500幅电磁计算数据和75幅暗室测量数据	99.13	91.2
扩展	62幅电磁计算数据和106幅暗室测量数据	90.48	58.2

(1) 完善基础模型类型

基础模型作为基于3维电磁散射参数化模型识别方法的基础，其重要性不言而喻。基础模型研究的重点主要包括两方面：一是电磁散射机理的建模；目前虽然对电磁散射机理进行了较深入研究，但对于一些比较复杂的散射机理，如凹腔体、行波与蠕动波、天线型散射等，研究还不到位。另外随着隐身技术的发展，目标上主要散射现象被减弱，弱散射现象凸显，实际应用要求建立弱散射机理模型。二是典型体散射模型的研究；要建立所有复杂目标的3维部件级电磁散射参数化模型，光依靠目前提出的几种典型体散射模型是远远不够的，还需要人们不断地完善。

(2) 丰富复杂目标3维电磁散射参数化建模方法和方式

建立精度较高、模型简洁、参数物理意义清晰、与实体部件关联性强的目标3维电磁散射参数化模型是保证基于模型SAR目标识别优秀性能的基础。从目前报道的结果上看，还需在3个方面做进一步研究：(A)需要建模的目标越来越复杂。这种复杂性不仅仅表现在几何结构上，还有材料属性和目标细节。(B)建模过程的自动化和非专业性。目前建模过程要求人工参与太多，有时还需要非常专业的人员。(C)数据条件的宽松性。现有正向建模的方法需要目标高精度的几何模块和材质模型，而数据拟合的方法需要足够密的测量数据，对于非合

作目标是难于获得这些数据条件的。如何在更宽松的数据条件下，如稀疏观测数据和粗略目标几何模型，实现复杂目标建模也是今后研究的方向。

(3) 深入研究基于目标3维电磁散射参数化模型的识别方法

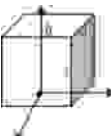
主要体现在以下几个方面：(A)继续深入基于目标3维电磁散射参数化模型的SAR目标识别理论研究。目前提出的基于模型的SAR目标识别方法还没有突破“图像\特征——匹配”的模式，还未充分发挥模型的优势，特别是目标3维部件级电磁散射参数化模型，希望建立一套更适合的SAR目标识别理论和框架。(B)结合应用需求，研究有针对性的基于模型的SAR目标识别方法。

5 结束语

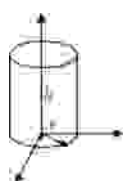
在当今以争夺制信息权为主导的高技术局部战争背景条件下，准确高效地对SAR数据进行自动或半自动的解译对提高我军的战场感知能力具有十分重要的战略意义和现实意义。本文以此为出发点，对SAR目标识别技术做了粗线条的回顾，重点针对如何发展更加有效的目标电磁散射模型，如何利用3维参数化电磁散射模型展开目标识别问题进行扼要的阐述，以期引起更多的研究者对该领域的关注。全文所述仅为作者一己之见，难免有失偏颇，权当抛砖引玉，期冀更多研究者能够深入研究。

附录

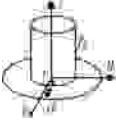
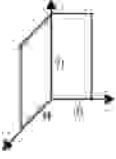
表 1 10种典型体参数化模型表达式列表
Tab. 1 The parametric models for ten scatterers

典型散射 部件名称	图形	参数化模型	模型适用 角度范围	各参数排列 顺序和含义 的解释
长方体		$S_{vv, hh}^{\text{cuboid}} = S_1 + S_2 + S_3 + S_{4vv, hh} + S_{5vv, hh} + S_{6vv, hh}$ $S_1 = -j \frac{kbc}{\sqrt{\pi}} l_x \text{sinc}(kbl_y) \text{sinc}(kcl_z) e^{jk(al_x + cl_z)}$ $S_2 = -j \frac{kca}{\sqrt{\pi}} l_y \text{sinc}(kcl_z) \text{sinc}(kal_x) e^{jk(bl_y + cl_z)}$ $S_3 = -j \frac{kab}{\sqrt{\pi}} l_z \text{sinc}(kal_x) \text{sinc}(kbl_y) e^{j2kcl_z}$ $S_{4vv, hh} = \frac{\sqrt{3}}{9} \frac{c}{\sqrt{\pi}} \left\{ \begin{aligned} & \left[\mp 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sin \frac{1}{3}(\pi/2 - \phi)}{\cos \frac{\phi}{3} \sin \frac{2}{3}(\pi - \phi)} \right] \cdot \text{sinc}(kcl_z) e^{jk(al_x - bl_y + cl_z)} \\ & + \left[\mp 1 + \frac{\sqrt{3}}{4} \frac{1}{\cos \frac{1}{3}(\pi/2 - \phi) \cos \frac{\phi}{3}} \right] \cdot \text{sinc}(kcl_z) e^{jk(al_x + bl_y + cl_z)} \\ & + \left[\mp 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sin \frac{\phi}{3}}{\cos \frac{1}{3}(\pi/2 - \phi) \sin \frac{2}{3}(\pi/2 + \phi)} \right] \cdot \text{sinc}(kcl_z) e^{jk(al_x - bl_y + cl_z)} \end{aligned} \right\}$	$\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 90^\circ]$	a, b, c : 长方体边长

续表1 Continued Tab. 1

典型散射 部件名称	图形	参数化模型	模型适用 角度范围	各参数排列 顺序和含义 的解释
		$S_{5vv, hh} = \frac{\sqrt{3}}{9} \frac{a}{\sqrt{\pi}} \left\{ \begin{aligned} &\left[\pm 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sin \frac{\theta}{3}}{\cos \frac{1}{3}(\pi/2 - \theta) \sin \frac{2}{3}(\pi/2 + \theta)} \right] \\ &\cdot \text{sinc}(ka l_x) e^{j k b l_y} \\ &+ \left[\pm 1 + \frac{\sqrt{3}}{4} \frac{1}{\cos \frac{\theta}{3} \cos \frac{1}{3}(\pi/2 - \theta)} \right] \\ &\cdot \text{sinc}(ka l_x) e^{j k (b l_y + 2 c l_z)} \\ &+ \left[\pm 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sin \frac{1}{3}(\pi/2 - \theta)}{\cos \frac{\theta}{3} \sin \frac{2}{3}(\pi - \theta)} \right] \\ &\cdot \text{sinc}(ka l_x) e^{j k (-b l_y + 2 c l_z)} \end{aligned} \right\}$ $S_{6vv, hh} = \frac{\sqrt{3}}{9} \frac{b}{\sqrt{\pi}} \left\{ \begin{aligned} &\left[\pm 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sin \frac{1}{3}(\pi/2 - \theta)}{\cos \frac{\theta}{3} \sin \frac{2}{3}(\pi - \theta)} \right] \\ &\cdot \text{sinc}(k b l_y) e^{j k (-a l_x + 2 c l_z)} \\ &+ \left[\pm 1 + \frac{\sqrt{3}}{4} \frac{1}{\cos \frac{1}{3}(\pi/2 - \theta) \cos \frac{\theta}{3}} \right] \\ &\cdot \text{sinc}(k b l_y) e^{j k (a l_x + 2 c l_z)} \\ &+ \left[\pm 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sin \frac{\theta}{3}}{\cos \frac{1}{3}(\pi/2 - \theta) \sin \frac{2}{3}(\pi/2 + \theta)} \right] \\ &\cdot \text{sinc}(k b l_y) e^{j k a l_x} \end{aligned} \right\}$	$\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 90^\circ]$	a, b, c : 长方体边长
圆柱体		$S_{vv, hh}^{\text{cylinder}} = S_{1vv, hh} + S_{2vv, hh} + S_{3vv, hh}$ 当 $2kr \sin \theta > 2.44$ 且 $kh \cos \theta > 2.25$ $S_{1vv, hh} = \sqrt{\frac{j r}{3 k \sin \theta}} \left[\mp \frac{2}{3} - \left(\frac{1}{2} + \cos \frac{4\theta}{3} \right)^{-1} \right] e^{j 2 k r \sin \theta}$ $S_{2vv, hh} = \sqrt{\frac{j r}{3 k \sin \theta}} \left[\mp \frac{2}{3} - \left(\frac{1}{2} + \cos \frac{4(\pi - \theta)}{3} \right)^{-1} \right] e^{j 2 k (r \sin \theta + h \cos \theta)}$ $S_{3vv, hh} = j \sqrt{\frac{j r}{3 k \sin \theta}} \left[\mp \frac{2}{3} - \left(\frac{1}{2} + \cos \frac{4(\pi/2 - \theta)}{3} \right)^{-1} \right] e^{j 2 k (-r \sin \theta + h \cos \theta)}$ 当 $kh \cos \theta \leq 2.25$ $(S_1 + S_2 + S_3)_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}} = -\sqrt{j k r h^2 \sin \theta} \text{sinc}(kh \cos \theta) e^{j k (h \cos \theta + 2 r \sin \theta)}$ 当 $2kr \sin \theta \leq 2.44$ $(S_1 + S_2 + S_3)_{\theta \rightarrow 0} = -j 2 \sqrt{\pi} k r^2 \cos \theta \frac{J_1(2kr \sin \theta)}{2kr \sin \theta} e^{j k h (\cos \theta + \cos \theta)}$	$\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 90^\circ]$	r : 圆柱半径 h : 圆柱的长
方形顶帽		$S_{vv, hh}^{\text{cuboid-hat}} = S_1 + S_2 + S_3 + S_{4vv, hh} + S_{5vv, hh}$ $S_1 = -j \frac{k b c}{\sqrt{\pi}} l_x \text{sinc}(k b l_y) \text{sinc}(k c l_z) e^{j k (a l_x + c l_z)}$ $S_2 = -j \frac{k c a}{\sqrt{\pi}} l_y \text{sinc}(k c l_z) \text{sinc}(k a l_x) e^{j k (b l_y + c l_z)}$ $S_3 = -j \frac{k a b}{\sqrt{\pi}} l_z \text{sinc}(k a l_x) \text{sinc}(k b l_y) e^{j 2 k c l_z}$ $S_{4vv, hh} = \mp \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\min\{c l_x, d_1 l_z\}}{l_y} \left\{ \begin{aligned} &e^{j k (b - \delta_1) l_y} \text{sinc}(k \delta_1 l_y) - e^{-j k b l_y}, \delta_1 \leq b \\ &\frac{b}{\delta_1} [\text{sinc}(k b l_y) - e^{-j k b l_y}], \delta_1 > b \end{aligned} \right\} e^{j k a l_x}$ $S_{5vv, hh} = \mp \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\min\{c l_y, d_2 l_z\}}{l_x} \left\{ \begin{aligned} &e^{j k (a - \delta_2) l_x} \text{sinc}(k \delta_2 l_x) - e^{-j k a l_x}, \delta_2 \leq a \\ &\frac{a}{\delta_2} [\text{sinc}(k a l_x) - e^{-j k a l_x}], \delta_2 > a \end{aligned} \right\} e^{j k b l_y}$	$\theta \in [20^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 15^\circ] \cup [75^\circ, 90^\circ]$	a, b, c : 长方体边长 d_1 : x 方向“帽沿”宽度 d_2 : y 方向“帽沿”宽度

续表1 Continued Tab. 1

典型散射 部件名称	图形	参数化模型	模型适用 角度范围	各参数排列 顺序和含义 的解释
圆形 顶帽		$S_{vv, hh}^{\text{top-hat}} = S_1 + S_2 + S_{3vv, hh}$ $S_1 = -\sqrt{jkrh^2} \sin \theta \text{sinc}(kh \cos \theta) e^{jk(h \cos \theta + 2r \sin \theta)}$ $S_2 = -j2\sqrt{\pi kr^2} \cos \theta \frac{J_1(2kr \sin \theta)}{2kr \sin \theta} e^{jk h (\cos \theta + \cos \theta)}$ $S_{3vv, hh} = \mp 2\sqrt{jkr \sin \theta} \min \left\{ h, \frac{d}{\tan \theta} \right\} e^{j2kr \sin \theta}$	$\theta \in [0.1^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 90^\circ]$	r : 圆柱半径 h : 圆柱的长 d : “帽沿”宽度
平板上 倒圆柱		$S_{vv, hh}^{\text{cyl-plane}} = S_1 + S_{2vv, hh} + S_{3vv, hh}$ $S_1 = -\sqrt{jkr} \sqrt{1 - l_y^2} L \text{sinc}(kLl_y) e^{j2k(r+h)l_z}$ $S_{2vv, hh} = \pm \sqrt{-jkrL^2 \sin \theta} \text{sinc}(kLl_y) U \left(\arctan \left(\frac{d}{r+h} \right) - \theta \right) e^{j2kr \sin \theta}$ $S_{3vv, hh} = \frac{2b_0}{\sqrt{3\pi}} \left[\pm \frac{1}{3} + \frac{1}{1 + 2 \cos \frac{4\theta}{3}} \right] \text{sinc}(kb_0l_y) e^{jk a_0 l_z}$ $+ \frac{2b_0}{\sqrt{3\pi}} \left[\pm \frac{1}{3} + \frac{1}{1 + 2 \cos \frac{4(\pi - \theta)}{3}} \right] \text{sinc}(kb_0l_y) e^{jk(a_0 l_z + 2d_0 l_z)}$ $+ \frac{2b_0}{\sqrt{3\pi}} \left[\pm \frac{1}{3} + \frac{1}{1 + 2 \cos \frac{4(\pi/2 - \theta)}{3}} \right] \text{sinc}(kb_0l_y) e^{jk(-a_0 l_z + 2d_0 l_z)}$	$\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 10^\circ]$	r : 圆柱半径 L : 圆柱的长 h : 圆柱面到平面距离 a_0 : 平板边长 b_0 : 平板边长 d_0 : 平板厚度
直二面角		$S_{vv, hh}^{\text{dihedral}} = S_1 + S_2 + S_{3vv, hh}$ $S_1 = -j \frac{ka h}{\sqrt{\pi}} l_y \text{sinc}(kh l_z) \text{sinc}(ka l_x) e^{jk(a l_x + h l_z)}$ $S_2 = -j \frac{kb h}{\sqrt{\pi}} l_x \text{sinc}(kh l_z) \text{sinc}(kb l_y) e^{jk(b l_y + h l_z)}$ $S_{3vv, hh} = \begin{cases} \pm \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\min\{b l_x, a l_y\}}{l_z} \left\{ e^{jk(h-\delta)l_z} \text{sinc}(k\delta l_z) - e^{-jk h l_z} \right\} e^{jk h l_z}, & \delta \leq h \\ \pm \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\min\{b l_x, a l_y\}}{l_z} \left\{ \frac{h}{\delta} \text{sinc}(kh l_z) - e^{-jk h l_z} \right\} e^{jk h l_z}, & \delta > h \end{cases}$ $\delta = \min \{b l_z / l_y, a l_z / l_x\}$	$\theta \in [40^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 90^\circ]$	a, b : 二面角两面宽度 h : 二面角的长度
直三 面角		$S_{vv, hh}^{\text{trihedral}} = S_1 + S_2 + S_3 + S_{12vv, hh} + S_{23vv, hh} + S_{31vv, hh} + S_{123}$ $S_1 = -j \frac{ka^2}{\sqrt{\pi}} l_x \text{sinc}(ka l_y) \text{sinc}(ka l_z) e^{jka(l_y + l_z)}$ $S_2 = -j \frac{ka^2}{\sqrt{\pi}} l_y \text{sinc}(ka l_z) \text{sinc}(ka l_x) e^{jka(l_z + l_x)}$ $S_3 = -j \frac{ka^2}{\sqrt{\pi}} l_z \text{sinc}(ka l_x) \text{sinc}(ka l_y) e^{jka(l_x + l_y)}$ $S_{12vv, hh} = \mp j2 \frac{ka^2}{\sqrt{\pi}} \min\{l_x, l_y\} \text{sinc}(ka l_z) e^{jka l_z}$ $S_{23vv, hh} = \pm j2 \frac{ka^2}{\sqrt{\pi}} \min\{l_y, l_z\} \text{sinc}(ka l_x) e^{jka l_x}$ $S_{31vv, hh} = \pm j2 \frac{ka^2}{\sqrt{\pi}} \min\{l_z, l_x\} \text{sinc}(ka l_y) e^{jka l_y}$ $S_{123} = -j \frac{k\sqrt{3}a^2}{\sqrt{\pi}} \min\{\sin(\theta + \pi/4 - \alpha), \cos(\theta + \pi/4 - \alpha)\} \cdot \min\{\sin \phi, \cos \phi\}$	$\theta \in [10^\circ, 80^\circ]$ $\phi \in [10^\circ, 80^\circ]$	a : 三面角边长
圆边浅 凹体		$S_{vv, hh}^{\text{pan}} = \pm 10^{p_{vv, hh}(\theta)/20} e^{-j2ka \sin \theta}$ $p_{vv}(\theta) = \sum_{i=1}^{N_{vv}} c_i^{vv} (90 - \theta)^i$ $p_{hh}(\theta) = \sum_{i=1}^{N_{hh}} c_i^{hh} (90 - \theta)^i$	$\theta \in [20^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 90^\circ]$	$N_{vv, hh}$: 拟合函数阶数 $c_j^{vv, hh}$: 拟合系数 a : 圆盘半径 k_c : 中心波数

续表1 Continued Tab. 1

典型散射 部件名称	图形	参数化模型	模型适用 角度范围	各参数排列 顺序和含义 的解释
矮顶帽		$S_{vv,hh}^{\text{short-tophat}} = \pm 10^{p_{vv,hh}(\theta)/20} e^{j2ka \sin \theta}$ $p_{vv}(\theta) = \sum_{i=1}^{N_{vv}} c_i^{vv} (90 - \theta)^i$ $p_{hh}(\theta) = \sum_{i=1}^{N_{hh}} c_i^{hh} (90 - \theta)^i$	$\theta \in [20^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 90^\circ]$	$N_{vv,hh}$: 拟合函数阶数 $c_j^{vv,hh}$: 拟合系数 a : 顶部半径 k_c : 中心波数
狭长 二面角		$S_{vv,hh}^{\text{dihedral_smallsurf}} = \pm e^{-\frac{2}{3}(\pi f L \sin \theta / c)^2 (\phi - \pi)^2} 10^{p_{vv,hh}(\theta)/20} e^{j2ka \sin \theta}$ $p_{vv}(\theta) = \sum_{i=1}^{N_{vv}} c_i^{vv} (90 - \theta)^i$ $p_{hh}(\theta) = \sum_{i=1}^{N_{hh}} c_i^{hh} (90 - \theta)^i$	$\theta \in [20^\circ, 90^\circ]$ $\phi \in [0^\circ, 90^\circ]$	$N_{vv,hh}$: 拟合函数阶数 $c_j^{vv,hh}$: 拟合系数 d : 狭长立板偏置距离 L : 狭长立板长度 k_c : 中心波数

说明: $l_x = \sin \theta \cos \phi$, $l_y = \sin \theta \sin \phi$, $l_z = \cos \theta$

$J_1(\cdot)$ 为一阶贝塞尔函数; $\min\{a, b\}$ 指取 a, b 中的较小值; $U(x)$ 为单位阶跃函数, 即 x 大于等于 0 时取 1, 小于 0 时取 0; $k = \frac{2\pi f}{c}$ 为波数。

参 考 文 献

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达—原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
Zhang Cheng-bo. Synthetic Aperture Radar Emdash the Principle, System Analysis and Application[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [2] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Huang Pei-kang, Yin Hong-cheng, and Xu Xiao-jian. Radar Target Characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [3] Wehner D R. High-Resolution Radar[M]. Norwood, MA: Artech House Inc., 1987.
- [4] Oliver C, Quegan S, Ding Chi-biao, *et al.*. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [5] El-Darymli K, Gill E W, McGuire P, *et al.*. Automatic target recognition in synthetic aperture radar imagery: A state-of-the-art review[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 6014–6058.
- [6] Novak L M, Owirka G J, Brower W S, *et al.*. The automatic target-recognition system in SAIP[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1997, 10(2): 187–202.
- [7] Kreithen D E, Halversen S D, and Owirka G J. Discriminating targets from clutter[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1993, 6(1): 25–52.
- [8] Meth R and Chellappa R. Feature matching and target recognition in synthetic aperture radar imagery[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Phoenix, AZ, March 1999: 3333–3336.
- [9] Nicoli L P and Anagnostopoulos G C. Shape-based recognition of targets in synthetic aperture radar images using elliptical Fourier descriptors[C]. Proc. SPIE 6967, Automatic Target Recognition XVIII, Orlando, FL, April 2008.
- [10] Liu Xian, Huang Yu-lin, Pei Ji-fang, *et al.*. Sample discriminant analysis for SAR ATR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12): 2120–2124.
- [11] Park J I, Park S H, and Kim K T. New discrimination features for SAR automatic target recognition[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 476–480.
- [12] Huang Yu-lin, Pei Ji-fang, Yang Jian-yu, *et al.*. Neighborhood geometric center scaling embedding for SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 180–192.
- [13] Mishra A K. Validation of PCA and LDA for SAR ATR[C]. TENCON 2008-2008 IEEE Region 10 Conference, Hyderabad, Nov. 2008: 1–6.
- [14] 宦若虹, 杨汝良. 基于小波域NMF特征提取的SAR图像目标识别方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 588–591.
Huan Ruo-hong and Yang Ru-liang. Synthetic aperture radar images target recognition based on wavelet domain NMF feature extraction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(3): 588–591.
- [15] Dong Gang-gang and Kuang Gang-yao. Classification on the monogenic scale space: Application to target recognition in SAR image[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*,

- 2015, 24(8): 2527–2539.
- [16] Jones G and Bhanu B. Recognition of articulated and occluded objects[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(7): 603–613.
- [17] Liu Jun. Model learning with probabilistic networks[D]. [Ph. D. dissertation], George Mason University, 1997.
- [18] Kottke D P, Fwu J K, and Brown K. Hidden Markov modeling for automatic target recognition[C]. Conference Record of the 31st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 1997: 859–863.
- [19] Sun Yi-jun, Liu Zhi-peng, Todorovic S, *et al.* Adaptive boosting for SAR automatic target recognition[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 112–125.
- [20] Zhao Zhi-qiang, Jiao Li-cheng, Zhao Jia-qi, *et al.* Discriminant deep belief network for high-resolution SAR image classification[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 61: 686–701.
- [21] El-Dawlatly S, Osman H, and Shahein H I. Enhanced SVM versus several approaches in SAR target recognition[C]. IEEE International Conference on Computer Engineering and Systems, Cairo, Nov. 2006: 266–270.
- [22] Thiagarajan J J, Ramamurthy K N, Knee P, *et al.* Sparse representations for automatic target classification in SAR images[C]. 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, Limassol, Mar. 2010: 1–4.
- [23] Krizhevsky A, Sutskever I, and Hinton G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[C]. International Conference on Neural Information Processing Systems, Lake Tahoe, Nevada, USA., Dec. 2012: 1097–1105.
- [24] Ding Jun, Chen Bo, Liu Hong-wei, *et al.* Convolutional neural network with data augmentation for SAR target recognition[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(3): 364–368.
- [25] Du Kang-ning, Deng Yun-kai, Wang R, *et al.* SAR ATR based on displacement-and rotation-insensitive CNN[J]. *Remote Sensing Letters*, 2016, 7(9): 895–904.
- [26] Li Xuan, Li Chun-sheng, Wang Peng-bo, *et al.* SAR ATR based on dividing CNN into CAE and SNN[C]. 2015 IEEE 5th-Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Singapore, Sep. 2015: 676–679.
- [27] Morgan D A E. Deep convolutional neural networks for ATR from SAR imagery[C]. Proc. SPIE 9475, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XXII, Baltimore, Maryland, United States, Apr. 2015.
- [28] Chen Si-zhe, Wang Hai-peng, Xu Feng, *et al.* Target classification using the deep convolutional networks for SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4806–4817.
- [29] Keydel E R, Lee S W, and Moore J T. MSTAR extended operating conditions: A tutorial[C]. Proc. SPIE 2757, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery III, Orlando, FL, April 1996: 228–242.
- [30] Diemunsch J R and Wissinger J. Moving and stationary target acquisition and recognition (MSTAR) model-based automatic target recognition: Search technology for a robust ATR[C]. Proc. SPIE 3370, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery V. Orlando, Florida, 1998: 481–492.
- [31] Ross T D, Bradley J J, Hudson L J, *et al.* SAR ATR: So what's the problem? An MSTAR perspective[C]. Proc. SPIE 3721, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VI, Orlando, FL, Apr. 1999: 662–672.
- [32] Chew W C, Michielssen E, Song J M, *et al.* Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics[M]. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 2001: 94–96.
- [33] Hurst M and Mittra R. Scattering center analysis via Prony's method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, 35(8): 986–988.
- [34] Potter L C, Chiang D M, Carriere R, *et al.* A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(10): 1058–1067.
- [35] Sacchini J J, Steedly W M, and Moses R L. Two-dimensional Prony modeling and parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(11): 3127–3137.
- [36] Potter L C and Moses R L. Attributed scattering centers for SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(1): 79–91.
- [37] Gerry M J, Potter L C, Gupta I J, *et al.* A parametric model for synthetic aperture radar measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(7): 1179–1188.
- [38] Li Jian, Wu Ren-biao, Bi Zhao-qiang, *et al.* Robust semiparametric method for feature extraction and SAR image formation of targets consisting of trihedrals and dihedrals[C]. Proc. SPIE 3721, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VI, Orlando, FL, April 1999: 92–103.
- [39] Ai Fa-zhi, Zhou Jian-xiong, Hu Lei, *et al.* The parametric model of non-uniformly distributed scattering centers[C]. IET International Conference on Radar Systems (Radar 2012), Glasgow, UK, Oct. 2012: 1–5.
- [40] 周剑雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论与技术[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2006.

- Zhou Jian-xiong. Theory and technology on reconstructing 3D scattering centers of radar targets in optical region[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006.
- [41] Zhou Jian-xiong, Shi Zhi-guang, Xiao Cheng, *et al.*. Automatic target recognition of SAR images based on global scattering center model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3713–3729.
- [42] Zhou Jian-xiong, Shi Zhi-guang, and Fu Qiang. Three-dimensional scattering center extraction based on wide aperture data at a single elevation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1638–1655.
- [43] He Yang, He Si-yuan, Zhang Yun-hua, *et al.*. A forward approach to establish parametric scattering center models for known complex radar targets applied to SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(12): 6192–6205.
- [44] Richards J A. Target model generation from multiple synthetic aperture radar images[D]. [Ph.D. dissertation], MIT, 1996.
- [45] Rigling B D. Signal processing strategies for bistatic synthetic aperture radar[D]. [Ph.D. dissertation], The Ohio State University, 2003.
- [46] Jackson J A and Moses R L. An algorithm for 3D target scatterer feature estimation from sparse SAR apertures[C]. Proc. SPIE 7337, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI, Orlando, Florida, USA, Apr. 2009.
- [47] Jackson J A and Moses R L. Feature extraction algorithm for 3D scene modeling and visualization using monostatic SAR[C]. Proc. SPIE 6237, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIII, Orlando (Kissimmee), FL, Apr. 2006.
- [48] Jackson J A. Three-dimensional feature models for synthetic aperture radar and experiments in feature extraction[D]. [Ph.D. dissertation], The Ohio State University, 2009.
- [49] 吴敏, 张磊, 段佳, 等. 基于属性散射中心模型的SAR超分辨率成像算法[J]. 宇航学报, 2014, 35(9): 1058–1064.
- Wu Min, Zhang Lei, Duan Jia, *et al.*. Super resolution SAR imaging algorithm based on attribute scattering center model[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(9): 1058–1064.
- [50] 吴敏, 张磊, 邢孟道, 等. 基于分布式压缩感知的全极化雷达超分辨率成像[J]. 电波科学学报, 2015, 30(1): 29–36.
- Wu Min, Zhang Lei, Xing Meng-dao, *et al.*. Full polarization super-resolution radar imaging algorithm based on distributed compressive sensing[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(1): 29–36.
- [51] 黄大荣, 张磊, 郭新荣, 等. 全极化频谱外推的合成孔径雷达成像分辨率增强方法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(5): 799–806.
- Huang Da-rong, Zhang Lei, Guo Xin-rong, *et al.*. Enhanced resolution in fully polarimetric synthetic aperture radar imaging using bandwidth extrapolation[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(5): 799–806.
- [52] Mittra R, Lee S W, and Chuang C A. Analytic radar target modeling[R]. AD755854, 1972.
- [53] Shirman Y D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking[M]. Boston: Artech House Publisher, 2002.
- [54] 罗宏, 许小剑, 黄培康, 等. 目标宽频雷达特征信号的建模与预测[J]. 电子学报, 1999, 27(9): 41–44.
- Luo Hong, Xu Xiao-jian, Huang Pei-kang, *et al.*. On the modeling and prediction of wideband radar signals[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(9): 41–44.
- [55] 钟金荣. 目标三维电磁散射参数化模型反演方法研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2016.
- Zhong Jin-rong. Inverse methods for three dimensional parametric scattering model of target[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2016.
- [56] Chiang H-C, Moses R L, and Potter L C. Model-based classification of radar images[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(5): 1842–1854.
- [57] Wissinger J, Ristroph R, Diemunsch J R, *et al.*. MSTAR's extensible search engine and model-based inferencing toolkit[C]. Proc. SPIE 3721, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VI, Orlando, FL, Aug. 1999: 554–570.
- [58] 丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 等. 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): 357–365.
- Ding Bai-yuan, Wen Gong-jian, Zhong Jin-rong, *et al.*. The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(3): 357–365.
- [59] Ma Cong-hui, Wen Gong-jian, Ding Bo-yuan, *et al.*. Three-dimensional electromagnetic model-based scattering center matching method for synthetic aperture radar automatic target recognition by combining spatial and attributed information[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(1): 016025.
- [60] Ma Cong-hui, Wen Gong-jian, Huang Xiao-hong, *et al.*. Scatterer-based approach to evaluate similarity between 3D em-model and 2D SAR data for ATR[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2017, 11(2): 254–259.
- [61] Ding Bai-yuan, Wen Gong-jian, Zhong Jin-rong, *et al.*. Robust method for the matching of attributed scattering centers with application to synthetic aperture radar automatic target recognition[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(1): 016010.
- [62] Ding Bai-yuan, Wen Gong-jian, Zhong Jin-rong, *et al.*. A robust similarity measure for attributed scattering center sets with application to SAR ATR[J]. *Neurocomputing*, 2017, 219: 130–143.

作者简介



文贡坚(1972-), 男, 湖南宁乡人, 教授, 博士生导师, 研究方向为遥感图像处理。



马聪慧(1987-), 女, 湖北襄阳人, 博士研究生, 研究方向为SAR自动目标识别。



朱国强(1959-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂目标电磁散射、电磁场理论与工程应用。



闫 华(1981-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师, 研究方向为目标电磁散射建模与特性分析。



殷红成(1967-), 男, 江西余江人, 研究员, 现为电磁散射重点实验室专业总师, 博士生导师, 主要研究方向为电磁散射、雷达目标特性、目标识别等。

E-mail: yinhc207@126.com



丁柏圆(1990-), 男, 安徽池州人, 博士研究生, 研究方向为SAR自动目标识别。



邢孟道(1975-), 男, 浙江嵊州人。西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理。

E-mail: xmd@xidian.edu.cn



钟金荣(1985-), 男, 广西玉林人, 博士, 研究方向为SAR自动目标识别。



杨 虎(1973-), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁场与微波技术。