高性能探测成像与识别的研究进展及展望

王雪松^{①*}, 戴琼海^②, 焦李成^③, 洪文^④, 徐立军^⑤, 邢孟道^⑥, 冯德军^⑦,
陈思伟^⑦, 代大海^⑦

① 国防科学技术大学理学院, 长沙 410073

② 清华大学自动化系, 北京 100084

③ 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071

④ 中国科学院电子学研究所, 北京 100190

⑤ 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

⑥ 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071

⑦ 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

* 通信作者. E-mail: wxs1019@vip.sina.com

收稿日期: 2016-04-27; 接受日期: 2016-08-26; 网络出版日期: 2016-09-18

国家自然科学基金 (批准号: 61372170, 61490690) 资助项目

摘要 高性能探测成像与识别是现代信息科学领域发展最为迅速的前沿学科之一, 近年来对其应用的迫切需求加速推动了该学科的发展. 本文针对高性能探测成像与识别的 4 个重点领域, 即多维度微波探测成像、微弱信号检测与识别、多模态成像理论与信息重建、计算成像理论与方法, 较系统地阐述了这几个领域的概念与内涵、发展脉络与国内外研究现状、当前的研究热点与难点、典型应用及未来发展趋势, 并对其其中的一些科学问题进行了探讨和总结. 尽管各个领域面临的具体问题各有不同, 但均存在着一些共性基础性问题有待深入认知, 主要表现在探测成像手段与目标之间的相互作用机理、探测成像的数据获取机制、探测成像后的目标参数特征提取与重建等几个方面.

关键词 多维度 多尺度 弱信号检测 认知成像 计算成像 多模态成像 信息重建 目标智能识别

1 概述

通过图像认知目标与环境是人类认知客观世界的直观形式. 探测成像是以声、光、电、磁等多种探测手段, 通过多种传感器与先进技术, 获取目标与环境的图像数据和信息, 以实现目标与环境的探测、成像与分类识别. 由于探测与成像所天然具备的直观性与精确性, 因此在医疗诊断、空间探测、对地观测、工业探测等领域保持了旺盛的需求增长, 一直是信息科学领域的理论与技术探索制高点之一. 特别是近年来, 工艺和器件水平的飞速提升极大地提高了探测与成像的实时性, 进一步催生了对探测成像信息获取与处理理论、方法与技术的更高要求. 以美国为代表的西方国家在探测成像研究领域走

引用格式: 王雪松, 戴琼海, 焦李成, 等. 高性能探测成像与识别的研究进展及展望. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 1211–1235, doi: 10.1360/N112016-00111

在世界的前列, 而我国虽然在该领域的学术与应用研究日益接近世界前沿, 但在基础理论与关键技术研究方面仍处于跟踪阶段。

所谓高性能探测成像与识别, 是指建立目标像空间谱之间更加精确的联系, 提高二维、三维宽谱域范围内的成像精确度和分辨率, 在获取高质量图像的基础上进一步发展探测成像处理的理论与方法, 以更加准确地重建或反演目标的物理参数, 实现对目标的精确感知、分类与识别^[1]。近年来, 应用数学和信号处理等相关学科和领域的新理论、新方法不断涌现, 为高性能探测成像提供了新的工具与手段。多维度微波探测成像、认知探测成像、多模态成像、计算成像等新的概念与方法的推出使成像的分辨率精确度、实时性数据率等大为提高。我国在高性能探测成像领域的理论与应用探索方面取得了显著进展, 通过一批国家重大科技计划, 缩小了和世界先进水平的差距, 某些单项技术指标方面已能达到与国外同步, 这为本领域的进一步前沿探索奠定了良好的基础。尽管取得了长足的进展, 但在雷达探测成像、空间探测成像、工业探测成像等具体的应用领域, 仍然存在着很多共性的基础问题需要攻克。

首先, 探测成像手段与目标之间的相互作用机理有待深入认知。由于探测成像需要借助声、光、电、磁等一种或多种探测手段, 探测成像手段与目标的相互作用机理十分复杂, 对这种复杂作用机理的认知也十分困难, 这始终是限制探测成像领域发展的一个瓶颈问题。以雷达探测成像为例, 工作频带日益加宽是雷达成像的基本趋势, 但大带宽条件下目标的响应特性相差很大, 在成像期间内其特性不再符合时不变的前提假定; 此外, 各种新型材料的出现, 特别是吸波材料的出现, 使得许多非合作目标具有低可探测性, 这给探测成像带来了很大的困难^[2]。目前, 已经有国内外研究者试图从新的角度来认知成像手段与目标之间的这种作用机理, 比如一体化成像、智能化成像等^[3], 但大多还处于起步阶段, 其理论的科学性、技术的有效性还需深入发掘。

其次是探测成像的数据获取机制有待不断创新。在实际应用中, 由于探测成像具有很强的应用目的并受到应用条件的限制, 所获取的目标多维度谱域数据通常是不完整的, 分辨率也难以满足实用需求, 因此需要探索探测成像处理的数据获取机制, 发展二维、三维宽谱内精确获取数据理论与方法, 这也是探测成像系统发展并进一步应用所需要解决的核心问题^[4]。以空间探测成像为例, 空间目标探测成像对于载人航天的安全与规避起着十分重要的作用, 但由于其尺寸小, 传统方法很难达到目标识别所需的分辨率, 采用大口径光学成像又面临着费用高、受环境影响大等不利因素, 因此有研究者提出了多维度探测成像、光学强度关联成像、压缩感知成像等新方法^[1]。如何更好地获取探测成像数据、改善成像质量、提高分辨率将是探测成像领域一直追逐的主题。

第三是探测成像后的目标参数特征提取与重建有待进一步完善。由于探测成像手段与目标作用机理的复杂性以及成像数据获取机制的限制, 通常探测器获取的数据为多维度不完备谱数据, 这给成像目标参数特征提取与重建带来了很大的困扰, 因而需要解决如何充分利用多维度不完备谱域数据准确获取目标几何和电磁参数、重建目标物理参数(特征)的问题。以工业探测成像为例, 为重建不完备谱数据, 有研究者提出了多维信息重建理论与方法、非规则阵列的重建理论与方法、计算光谱成像图谱反演^[5]等多种成像重构与反演方法。总体来说, 对于合作目标的重构与反演取得了较大的进展, 而对于非合作目标来说, 由于先验信息的匮乏, 准确的目标参数特征提取与重建仍然有待于理论和方法上的创新与突破。

本文对探测与成像领域进行系统性的介绍, 全文分为6个部分, 第2~5节对高性能探测成像与识别的现状与未来发展进行了分类评述, 内容涉及多维度探测成像、微弱信号检测与识别、多模态成像、计算成像等, 较系统地阐述了这几个领域的发展脉络、现状以及未来的发展趋势, 最后进行了全文的总结。

2 多维度微波探测成像

2.1 概念与内涵

微波成像技术是以微波谱段的电磁波作为探测手段, 利用成像传感器获取观测对象散射特征和相关信息的信息获取技术. 与传统的光学成像相比, 微波成像不受日照和天气条件的限制, 能够全天时、全天候的对目标或场景进行观测, 已发展成为资源勘察、环境监测和灾害评估的重要手段, 是 21 世纪最具发展潜力的战略高技术领域之一. 微波成像技术向多维度方向发展, 是其技术本身持续不断的发展完善与国家重大应用需求的推动二者之间契合的结果. 其中最有代表性、发展潜力最大的探测手段是具有高分辨率成像能力的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR).

随着技术的发展及其应用需求的推动, 数据获取方式日臻多样化, SAR 逐步由最初的单极化、单角度和单波段发展到多极化、多频率、多角度和多时相等不同观测方式的组合. 从 SAR 成像技术自身的发展而言, 在联合观测条件下, 被观测对象的散射机理及其在图像中的表征呈现出特性上的差异, 上述特性直接关系到对观测对象的认知和理解. 原有的针对单一观测量或几个观测量简单组合的 SAR 成像理论和方法已经不适于描述观测对象的复杂散射特征, 也不利于提高定量遥感精度^[6~13]. 另一方面, 国家重大应用需求对未来 SAR 成像理论和方法提出了更高的要求. 例如在高精度测绘 (地形测量和地表覆盖物制图) 方面, 获取极化、频率、角度和时相多个空间内联合观测量的 SAR 成像技术具有解决迭掩、阴影和体散射去相干等瓶颈问题的潜力. 在海洋复杂环境观测方面, 利用多时相的 SAR 成像数据可提高水下地形的探测精度, 而利用多极化 SAR 成像数据可提高海冰的分类精度. 此外, 在森林资源和生态质量监测方面, 多波段、多时相、极化和极化干涉 SAR 对于提高森林三维空间分布信息的遥感提取精度具有独特的优势^[14~18].

多维度微波探测是在一定约束条件下, 以微波探测的基本观测方式在极化、频率、角度和时相空间中的至少两个空间内, 分别获得多个观测量集合的联合观测技术手段^[19]. 与之相对的是, 在单一空间内获取单/多个观测量集合的探测手段是单维度微波探测. 多维度微波成像技术通过信号与信息综合处理, 有可能更准确地区分被观测对象的不同散射机理, 进而更准确地获得其几何特征和物理特征, 针对特定应用, 分别从数据域、信号域和特征域对观测对象进行客观描述. 以观测对象与电磁波之间的相互作用规律为基础, 发展成像机制优化方法、成像处理技术和信息提取方法, 并最终实现对观测对象各类特征的精细刻画和定量反演. 通过在极化、频率、角度和时相四个空间对发射/接收电磁波的描述, 并结合现有微波成像雷达的观测能力、使用模式及获取信息的完备性分析, 可以将多维度微波探测定性地描述为以极化空间为核心, 能够获取可以反映观测对象散射特征随频率、角度和时相变化的离散多维度观测量子集, 结合多维度信号处理方法来拟合目标在极化、频率、角度和时相 4 个空间坐标上的完整散射特征像, 用于直接定量化反演观测对象的生物物理参数.

多维度微波探测的基本理论包括以下几点^[19]:

(1) 多维度空间坐标表示. 将每个时间轴上的时刻作为圆心, 构成 Poincare 球. 再以每个 Poincare 球表面上的每一点作为圆心构成 K 球. 其中代表极化空间的 Poincare 球因具有完备性而成为关联其他空间的纽带.

(2) 多维度信号模型. 一定假设条件下, 观测量的复相关的期望是多种独立散射机制下的 Kronecker 积之和. 该模型涵盖了从在单一时刻下获取的单极化、单频率和单角度的观测对象的复散射系数到全极化、干涉、极化干涉、差分极化干涉以及极化层析成像在内的完整的多维度 SAR 观测量子集.

(3) 多维度 SAR 中的维度定义. 由极化、频率、角度和时相空间所张成雷达观测空间, 由不同雷

表 1 SAR 工作方式的多维度表述
Table 1 Multidimensional statement of SAR configurations

工作方式	空间样本							
	极化	频率	角度	时相	观测空间维度	多维度数	散射矢量	新增反演量 (复)
SAR(基准)	1	1	1	1	{1,1,1,1}	0	K_1	包含相位的复 σ_0 图
干涉	1	1	2	1	{1,1,2,1}	1	K_2	DXM(垂直分布散射中心的平均高程位置, 在这里包含了 DSM, DEM 和 DTM)
极化	4	1	1	1	{4,1,1,1}	1	K_4	三类基本散射
极化干涉	4	1	2	1	{4,1,2,1}	2	K_8	三类基本散射的多层分布
差分干涉 SAR	1	1	1	N	{1,1,1,N}	1	N 个 K_1	包含相位变化的复 σ_0 变化图
多航过双天线干涉	1	1	2	N	{1,1,2,N}	2	N 个 K_2	DXM(垂直分布散射中心的分层、平均高程位置)
多航过极化	4	1	1	N	{4,1,1,N}	2	N 个 K_4	σ_0 变化图 + 基本散射变化图
多航过双天线极化干涉	4	1	2	N	{4,1,2,N}	3	N 个 K_8	三类基本散射的精细垂直结构 (生物量, 碳储量)
多波段 SAR	1	M	1	1	{1,M,1,1}	1	M 个 K_1	M 个 σ_0 图
多波段干涉	1	M	2	1	{1,M,2,1}	2	M 个 K_2	M 个 DXM(垂直分布散射中心的平均高程位置)
多波段极化	4	M	1	1	{4,M,1,1}	2	M 个 K_4	M 个三类基本散射
多波段极化干涉	4	M	2	1	{4,M,2,1}	3	M 个 K_8	M 个三类基本散射的多层分布
单航过多波段多角度极化	4	M	L	1	{4,M,L,1}	3	ML 个 K_4	M 个三类基本散射的精细垂直结构
多航过多波段多角度极化	4	M	L	N	{4,M,L,N}	4	MLN 个 K_4	待研究

达工作方式所获取的观测量构成雷达观测空间中的一个或多个样本. 多维度数定义为包含多样本的空间数量.

表 1 列出了部分常见的 SAR 工作方式, 表中加粗的工作方式都属于多维度 SAR 观测.

2.2 国内外现状

伴随着各种先进技术的出现、定量化应用需求的增加以及科学研究的不断深入, 国际上 SAR 成像技术在极化、频率、角度和时相等空间观测能力的发展大致历经了以下几个重要阶段:

第 1 阶段主要是从距离向压缩到方位向合成孔径, 再发展到干涉高程测量. 1951 年美国的 Carl Wiley 首先提出频率分析方法改善雷达角分辨率, 从而使得对观测区域的方位向合成孔径成像成为可能. 1969 年, Rogers 等提出将雷达干涉技术应用于金星表面观测. 1974 年, 美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 利用机载 SAR 系统首次对地球地形进行了雷达干涉测量, 从而使得微波成像技术开始向干涉高程测量发展. 从 1996 年到 2001 年, 美国启动“航天飞机雷达地形测量任务”(SRTM) 计划, 利用“奋进号”航天飞机完成了约占全球 80% 陆地面积的测绘, 经处理可制成地球表面的数字高程模型 [6,8,10,13,18].

第 2 阶段重点是在单一观测空间内的延伸. 主要包括极化、角度、频率等. 波段由微波波段向

低波段和太赫兹 (THz) 扩展; 极化由单极化向多极化到全极化发展, 如日本的星载全极化 SAR 系统 ALOS/PALSAR, 德国全极化 SAR 系统 TerraSAR-X 和加拿大的 RADARSAT-2, 极化 SAR 技术已成为全球环境监测和地表测绘的重要手段之一; 观测角度由单站 SAR 成像向双/多基方向发展^[20~22].

第 3 阶段是对两个观测空间的综合研究, 是目前国外的研究热点. 在综合极化和角度两个观测空间方面, 极化干涉 SAR 已开展了大量的研究工作. 最近, 又提出了将频率和角度结合的 MIMO-SAR. 1997 年, Papathanassiou 等首先利用 SIR-C/X-SAR 数据研究了频率、极化对干涉相干性的影响, 这是极化信息和干涉信息相结合的极化干涉 SAR 的最初起源. 极化干涉 SAR 充分利用了干涉 SAR 对地表散射体高程敏感的特性和极化 SAR 对体散射体的形状、方向和介电特性敏感的特性, 具有提高传统干涉测量相干性的能力以及提取体散射体结构信息的潜力, 使得 SAR 应用于体散射体结构提取等成为可能. 目前, 国际上针对于极化干涉研制了不同种类的机载实验平台, 主要有德国 DLR E-SAR (P/L/S 三波段全极化)、日本 PiSAR (L/X 双波段全极化)、美国 AIRSAR (P/L/C 三波段全极化) 以及法国 RAMSES 系统 (P/L/S/C/X/Ku/Ka/W 多波段全极化) 等, 都具有重复飞行极化干涉测量能力, 可实现多频、高空间分辨和干涉测量等多种组合模式的数据获取. 近年来, 欧洲、美国和加拿大等已经开始星载极化干涉 SAR 系统的初步研究, 以及收发分置星载极化干涉 SAR 系统的可行性论证. 星载极化和极化干涉 SAR 系统已成为目前国外研究和研制的重点, 从 2003 年起, 欧空局隔年组织一次全球范围的 POLinSAR 研讨会, 到目前为止一共举行了七届, 进一步使得该技术的应用研究获得了广泛关注, 利用 E-SAR, AIRSAR, RAMSES 等系统获取的机载极化干涉 SAR 数据, 以及 ENVISAT ASAR, ALOS/PALSAR, TerraSAR-X 和 RADARSAT-2 等星载重复飞行极化干涉数据开展大量的理论和方法研究.

从 20 世纪 70 年代开始, 中国科学院电子学研究所开展 SAR 成像技术的研究, 并于 1979 年成功研制第一部机载 SAR 原理样机. 中国航空工业第 607 研究所、中国电子科技集团公司第十四研究所和中国电子科技集团公司第三十八研究所等单位也相继开展了 SAR 系统的研制工作. 经过近 30 年的发展, 尤其是近 10 年来, 我国的 SAR 成像技术得到了迅猛的发展, 二维成像分辨率已由最初的几十米提高到目前的亚米级, 从而为目标的检测与识别等应用奠定了坚实的基础. 国内的多家高校和研究所以等机构开展了与多维度微波探测相关的散射建模、信号处理和应用研究等.

2009 年起, 在国家自然科学基金重大项目的资助下, 中国科学院电子学研究所吴一戎院士主持了“多维度微波成像基础理论与关键技术”的研究工作, 与北京理工大学、西安电子科技大学、中国林业科学研究院资源信息研究所、武汉大学和国家海洋局第一海洋研究所紧密合作, 取得了一系列的重要研究成果, 主要包括: 提出了多维度微波成像的概念, 从波动方程出发, 推导出多维度微波成像的数学模型, 进而给出多维度微波成像的定义; 以极化干涉、多波段多极化和多频多极化层析等不同层次维度综合的 3 类典型试验数据为牵引, 研究极化、角度和频率多维度观测方法, 获取新的微波成像观测, 提出和发展了一系列面向陆地、海洋遥感典型应用的信息提取模型和方法; 建立了多维度微波成像仿真系统、地面试验系统, 突破了机载多维度微波成像试验的若干关键技术, 获取了多维度微波成像试验数据, 在国内首次开展了机载圆迹极化层析成像试验; 形成了散射模型、成像机制、处理方法、反演模型、信息提取方法和试验验证研究相互支撑的研究体系架构. 在研究成果基础上提出的“多维度合成孔径雷达 (SAR)”研究建议, 获得“高分辨率对地观测系统”重大专项 (简称“高分重大专项”) 立项支持.

2.3 当前研究的难点

在多维度 SAR 应用的第 1 个层面上, 通过融合单维度复 RCS 图便具有了一定的观测对象散射特征反演能力, 不存在维度间的相干获取限制; 在多维度 SAR 应用的第 2 个层面上, 通过层析或三维

成像等信号处理方法在维度间直接形成多维度复 RCS 图像, 此类多维度 SAR 应用对相干获取有一定要求, 反演精度中等; 在多维度 SAR 应用的第 3 个层面上, 通过提取和分离相干散射形成的相位信息来直接反演观测对象的生物物理参数, 这是在多维度 SAR 应用中对相干获取的要求最高但反演也最精确的类型, 也是当前多维度微波成像探测技术的研究难点, 具体地可以归纳为以下 3 个方面:

(1) 多维度微波成像散射机理. 地物散射机理是微波成像机理及应用的基础. 实际散射过程为体散射, 比如森林、农作物区、城区、雪地、冰层、沙层和干燥的土壤区等均为典型的体散射体. 因微波穿透能力不同、形式多样、内部结构复杂、对分布和指向等特性敏感等, 使得体散射效应成为当前的研究难点. 对于多角度、多时相、多频段以及多极化的微波成像信号, 各种体散射体的回波分别呈现出不同的强度、敏感度及变化趋势. 准确地对各种体散射体进行散射建模, 确定模型所包含的散射类型和经验方程中的参数, 需要大量的理论研究和实验分析.

(2) 多维度微波成像信号表示及其逆问题. 常规微波成像的分辨率较低, 并以单极化和单视角工作, 只能对几何特征进行概略描述, 其信号表示和成像逆问题也相对简单. 在多维度微波成像观测条件下, 信号表示是建立观测对象几何、物理和时变特征空间到距离时间、方位时间、分辨、频率、极化、角度、时相等多维信号空间的映射过程. 该映射过程将是观测对象的多个特征与信号的多个维度间的紧耦合, 其成像逆问题的数学求解比较困难. 另外, 受到成像平台扰动的调制, 微波成像信号表示不是一个理想的模型, 进一步加大了成像计算反演的难度.

(3) 典型地物多维度微波响应特征与参数反演. 在地物多维度微波响应特性分析基础上, 建立高敏感和高相关性多维度微波信息与反演参数之间的统计模型、半经验物理模型、物理模型等正向模型, 进而发展海冰厚度、海洋水下地形、植被覆盖下地形、森林高度、树冠层厚度等垂直结构参数的高精度定量反演模型. 研究地物的多维度微波信息概率统计分布模型, 用于发展主要土地覆盖类型、森林类型、冰间水道、海冰外缘线等地物的高精度分类与识别方法.

2.4 下一步发展趋势与建议

(1) 多个维度空间信息结合的新观测体制. 目前多个维度空间的研究已经发展出一些典型的联合方式, 比如极化和角度结合的极化干涉和极化层析、频率和角度结合的 MIMO 等. 其中最为成功的是极化干涉技术. 它通过极化和角度两个空间的信息综合, 同时具有了干涉对地表散射体位置敏感的特性和极化对体散射体的形状、方向和介电特性敏感的特性, 因而在森林高度、林下地形、森林垂直结构以及海冰厚度等体散射应用中取得了一系列突破性的研究成果. 然而, 极化和角度维度相结合的可能性并不止于此. 极化干涉和极化层析都是将雷达观测的小角度变化与极化结合. 如果利用例如圆迹的全角度或多角度观测和极化结合, 则能够获取目标的三维极化散射信息用于特征描述和地物分类, 同时提高成像的分辨率和信噪比. 这种极化多角度观测体制有助于更精细地提取目标几何特征、抑制阴影, 从而提高目标检测概率、地物分类精度.

(2) 基于多传感器数据融合的定量参数反演. 如前所述, 通过观测数据来直接定量反演观测对象的生物物理参数, 是多维度研究中困难最大, 精度要求最高的应用层次. 这种情况下, 往往需要与其他类型传感器的获取数据联合分析, 才能更有效地解决信息提取过程中的问题, 提高定量反演的准确度, 例如主动微波数据与被动微波数据融合、主动微波数据与光学数据融合等. 已有研究表明, 主被动微波探测结合的方式是最适合土壤湿度反演应用的融合方式, 美国宇航局于 2015 年刚刚发射的 SMAP (Soil Moisture Active Passive) 卫星任务使得该融合方式受到了更广泛的关注. 在森林生物量估计方面, 采用长波波段的 SAR 数据先进行林区分类, 再利用激光雷达和短波波段 SAR 数据提取树高的方法, 能够大大提高估计精度. 此外, 高光谱数据所具有的同质异谱和同谱异质的特性在植被分类、农业

和草原旱情及病虫害等遥感方面具有独特优势, 并能够与微波探测数据融合, 进而优化其他生物物理参数的定量反演结果.

(3) 多维目标特性与信息表征. 多维度观测带来单一维度观测所无法比拟的多维目标信息, 除了散射截面积信息, 还包括几何信息、极化信息、三维信息、多角度散射信息等, 这些信息的联合获取使我们对目标的认知更为立体和全面. 如何对多维信息进行优化整合与表征, 形成可用的多维目标特征及其可视化, 成为进一步提高 SAR 在目标识别分类、判读解译等领域应用效能的重要环节. 目前, 国际上在这方面有一些新的尝试, 但仍处于探索阶段, 例如市区建筑的三维信息、形变信息的联合表征形成了耳目一新的 4D SAR 影像, 全方位散射信息与三维信息的联合表征展示了典型目标精细的几何结构特征, 极化信息与三维信息的联合表征给出了目标的分层结构特征.

(4) 数据规范与高性能计算技术. 多源、高分辨率、多维度的海量遥感数据体量大、类型杂、时效强、信息提取难度大, 现有的数据处理技术、信息提取模式难以满足当前遥感大数据应用的要求. 由于遥感数据的维度高、数量大、多源、异质的特性, 其分布式存储和访问是非常复杂的, 需要设计恰当的数据规范和存储机制以方便有效地进行索引管理、高效访问. 同时, 多维度卫星数据处理当中大规模任务的并发、可控地执行, 需要对多种数据处理、信号处理、信息处理算法进行多层次并行化设计, 并利用最新的高性能计算方法等. 构建基于规范的数据格式、高性能计算方法为核心的多维度遥感数据管理和处理体系是未来重要的发展趋势之一.

3 微弱信号检测与识别

3.1 概念与内涵

随着现代战场环境的改变和武器系统的发展, 雷达对一些目标 (如隐身飞机、小型舰船、无人艇、掠海飞行导弹等) 的检测和跟踪能力面临巨大的挑战. 主要表现在两个方面: 一是目标检测概率的降低, 造成目标的漏检; 二是雷达探测的有效距离缩短, 以致没有足够的时间对目标做出反应. 由于回波信号信杂噪比较低而难以检测和跟踪的目标, 通常称为微弱目标. 微弱目标检测不同于线目标和面目标检测, 不能采用传统的模板匹配方法, 也不能采用其他的数字图像检测的方法. 当微弱目标为点目标时, 其特性与噪声相似, 更增加了检测的难度.

在微弱目标检测和跟踪的应用中, 雷达接收的远距离目标回波强度非常弱, 信噪比很低, 目标易被噪声淹没, 单个脉冲回波的信噪比甚至是负的, 不能可靠地检测目标. 在预警雷达应用中, 由于运动目标距离雷达较远, 又处在强杂波环境中, 对微弱目标的检测与跟踪成为提升雷达系统性能的一个重要研究课题.

雷达目标检测与跟踪的能力主要取决于接收机接收信号的功率高低, 也即信噪比的大小. 目标反射功率越强, 在接收机系统噪声一定的情况下, 信噪比越高, 目标越容易被检测与跟踪. 目标与接收机距离和发射功率一定等条件下, 接收信号功率正比于雷达有效反射面积 (RCS). 敌方飞行器只要设法降低飞行器 RCS 就可以达到降低接收机信噪比的目的. 随着电子对抗技术的进一步发展, 增大雷达发射功率往往容易暴露自身, 生存能力严重降低, 低截获率 (LPI) 雷达发射功率往往很低, 即使对于高灵敏度的接收设备, 输入信噪比大都也是低于 0 dB, 这就使得常规的雷达侦察机对这类信号的检测和跟踪变得非常困难, 甚至可能无法发现目标. 为了解决上述雷达应用中的问题, 在信号处理层面进行微弱目标检测方法的研究具有很高的实用价值.

另外, 在军事应用领域中, 车辆、飞机等都是很重要的军事目标, 这些目标不但体积较小, 而且通

常都是运动的. 微弱小目标识别问题之所以复杂, 根本原因在于目标本身体积过小, 大多数的传感器都难以发现. 对雷达来说, 地面杂波能够将小目标回波完全淹没, 传统的解决方法是利用目标回波同杂波在速度上的差异来区分目标和杂波, 但当目标慢速运动时, 传统的雷达对这类目标也无能为力. 因此需要综合利用目标和背景的信息设计新的方法.

3.2 国内外现状

强杂波背景下微弱目标检测与识别通常需要解决 3 方面的问题: 一是对强杂波的抑制, 二是雷达微弱目标的有效检测, 三是微弱目标的识别. 研究杂波抑制技术必须建立在对各种地、海杂波的特性和模型等方面研究的基础上. 微弱目标检测主要从雷达信号检测的基本原理入手, 研究微弱目标的非相干和相干积累方法, 研究基于目标回波特征的检测技术、恒虚警检测方法、微弱目标检测新算法等等. 微弱目标的识别则是为目标打击提供可靠的依据.

(1) 强杂波的抑制方面. 雷达接收信号中不仅含有来自目标的回波信号, 也有地物散射及人为干扰(如箔条等)产生的杂波, 而且这些杂波往往比目标信号强得多. 为了克服这种强杂波环境, 提高目标检测能力, 需要研究杂波抑制的方法. 对雷达回波信号进行杂波抑制的目的是尽可能的保留目标信号, 对背景杂波进行抑制, 提高信杂比, 以利于目标检测. 目前常用的杂波抑制技术主要包括: 频率捷变技术、发射大带宽信号、雷达天线的超低副瓣技术、动目标显示 (MTI)、自适应动目标显示 (AMTI)、空时二维自适应处理 (STAP) 等等.

杂波的幅度分布特性对雷达信号处理、检测和识别等均具有十分重要的意义. 幅度分布是雷达杂波的主要统计特性之一. 地杂波和海杂波的幅度分布特性相对复杂, 一般都是采用统计学的方法对它们进行分析或对实测数据进行拟合, 从而对雷达杂波的幅度分布进行建模. 对杂波统计模型的研究也是近年来雷达信号处理研究的热点问题.

杂波的统计模型大致可分为两大类: 参量模型和非参量模型. 参量模型是指在统计分布模型已知的情况下, 对模型的参数进行估计, 以此来确定可以描述杂波的正确统计模型. 主要包括 Rayleigh 分布、广义 Gauss 模型、Gamma 分布、对数正态分布、Weibull 分布、广义 Gamma 分布等等. 非参量模型是指从杂波的真实训练样本考虑, 不对分布模型做出任何假设, 通过加权求和来获取杂波数据的统计建模过程. 主要包括 Parzen 窗方法、基于神经网络 (neural networks, NN) 和基于支撑向量机 (support vector machine, SVM) 的方法. 非参量模型的建模过程需要大量的训练样本数据, 因此非参量模型的建模过程比较复杂, 计算耗费的时间比较长, 不能满足实际应用的需要. 而参量模型通过简单的参数估计就可以对杂波的真实数据进行统计建模, 因此得到了更为广泛的研究与应用. 近年来, 基于单模型线性组合的有限混合模型^[23~25]被用来模拟不同的杂波. 然而, 由于雷达数据中相干斑噪声的存在, 上述模型不能较精确地对杂波进行建模, 特别是异质的区域, 如城市等. 因此设计有效的针对复杂异质杂波的统计建模方法对于杂波抑制技术的研究具有重要意义.

(2) 雷达微弱目标的检测方面. 雷达信号检测的研究主要是基于 Rice, North 和 Swerling 等提出的最大信噪比准则下的匹配滤波器理论和相关接收技术^[26]. 在单帧回波数据信杂比较高的情况下, 经典雷达目标检测系统通常采用先检测后跟踪 (detect before track, DBT) 的方法. 雷达接收机首先对每个脉冲的回波进行匹配滤波, 实现脉压处理, 对脉冲压缩后的数据进行动目标显示 (MTI) 和动目标检测 (MTD) 实现杂波抑制和目标检测. 这类方法在信噪比较高时可以取得很好的效果. 而微弱目标回波信噪比通常很低, 要实现这类目标的检测, 一种有效的办法是采用长时间相参积累或非相参积累技术. 但随着积累时间的延长, 在观测期间内由于目标运动, 脉压后的信号有可能产生距离单元的走

动, 非匀速运动的目标 Doppler 也会一定程度上展宽, 因此实现长时间脉冲积累必须解决距离走动与 Doppler 展宽的问题.

对微弱目标进行有效的检测及跟踪的另一方法是检测前跟踪 (track before detect, TBD), 相比于 DBT 类的方法, TBD 方法利用运动特性对目标状态进行描述, 将目标的检测问题简化为轨迹的检测. 这类方法对单次观测信号先不进行判断, 而是结合雷达图像特点, 对目标进行多次观测, 计算出目标在各帧图像之间的移动规律, 预测目标在下一帧图像的可能位置, 同时在帧与帧之间将多次扫描得到的数据沿着预测轨迹进行相关处理, 从而改善目标的信噪比, 在得到检测结果的同时获得目标航迹. 具有代表性的 TBD 方法主要包括基于动态规划的 TBD 算法、基于 Hough 变换的 TBD 算法、基于粒子滤波的 TBD 算法, 以及三维匹配滤波 TBD 算法 (3DMF-TBD).

(3) 微弱目标的识别方面. 微弱小目标识别技术, 是从大量的数据中提取与发掘目标信息并予以识别, 为军事目标打击提供可靠的手段. 它不仅是有噪的、不完全的、模糊的, 也是非 Gauss 非平稳的, 已有的方法还不能完全解决这些问题.

由于在不同地物环境下, 微弱小目标的电磁和光学等特性均会有所变化, 因此分析和研究复杂环境下微弱小目标的电磁特性是一个非常关键的问题. 尤其是如何在复杂的背景中通过实验获取有关数据, 并经过理论建模、修正、建库完成对目标特性的描述, 对微弱小目标识别具有重要指导作用.

目标特征提取与选择是微弱小目标识别的关键环节, 在某些复杂的地物环境下, 由于受到地物的遮挡或者干扰, 尺寸相对较小的目标在图像中的特性极为微弱, 很多时候是弱对比度下的小目标, 因此其特征提取是一个十分困难的问题. 此外, 由于目标的几何特征和复杂的内部结构特征, 以及所处环境的纹理特征等非常丰富, 合理有效的目标识别系统要尽量选择能反映目标特性的特征, 并对图像进行适当处理, 如目标增强等, 以利于目标特征的精确提取, 然后分析对比所提取的特征, 并在此基础上进行目标识别.

由于受到人为伪装等手段以及地物背景造成的干扰等影响, 微弱小目标信息往往不完全, 目标信息的缺失使得很多传统技术无法有效用于小目标的识别. 针对这一问题, 一方面可以通过多源数据的特征提取和特征融合, 来获取更完整更全面的 target 信息, 提高小目标的识别率; 另一方面, 还可以采用更为先进的机器学习理论和方法, 更大程度的利用可获取数据中包含的地物信息. 另外, 迁移学习可以从已有的学习中, 对原有概念和信息进行推广, 从而补充缺省信息, 该理论也可以引入伪装和隐蔽目标识别中, 以补充由于目标伪装等引起的信息缺失.

由于场景的复杂性, 所获得的海量雷达数据呈现出高度的非结构化特点. 这种非结构化数据的特点可以总结为: 形式上高维、海量、异构与动态; 内容上不完整、不确定、无序与歧义; 表达上难以用有限的规则来刻画; 解译与应用上依赖于信息利用主体的感知等. 因此, 如何有效的获取、表征、度量这类信息并进行有效利用, 已成为雷达微弱小目标识别领域的瓶颈问题^[27~29].

针对这些瓶颈问题, 目前的研究大都采用如下思路: 先提取散射特征^[30,31]或利用数据挖掘技术^[32~38]抽取图像特征, 再利用机器学习方法完成识别^[39~42]. 但常用的数据挖掘和机器学习方法基本上都是以数据结构和产生数据的物理机制为基础的, 所获得的数据处理结果通常不具有认知意义. 因此, 这些常见的方法难以高效地描述与处理非结构化的雷达数据. 以变换为代表的定制特征可以解决很多对象识别问题, 但这些特征只能描述底层特征 (关键点、边缘信息), 难以描述高层特征 (对象、场景). 近年来发展起来的“深度学习” (deep learning) 方法^[43~45], 可以直接从数据中无监督地学习层次式的特征表示, 用来描述底层特征及高层特征. 深度学习是关于学习多个表示和抽象层次的, 这些层次帮助解释数据, 例如雷达数据. 它被认为是人工智能革命性的一种新技术. 它为更好地模拟人眼从看到目标到识别出目标提供了一种更智能的方法.

微弱小目标的检测和识别本质上与对雷达信息的理解有关。从某种意义上讲, 人对图像的判读和解译是基于知识和经验的, 具备高层次的场景理解能力。因此要实现真正意义上的雷达微弱小目标识别, 其中最为关键的就是如何良好地运用我们可以获取的经验和雷达数据本身的一些启发式知识。然而, 要做到这一点是很困难的。原因在于计算机对雷达数据的理解是基于最简单的底层特征的, 而这种底层的物理特征与人的高层认识之间存在难以跨越的“语义鸿沟”, 即单纯的雷达数据是无法精确地表示目标的高层语义信息的。如何从底层特征上升到对象层, 结合经验和启发式知识, 利用对象来实现对雷达数据的认知, 从而建立适用的感知模型, 是实现微弱小目标高可靠性检测和识别的关键问题。

3.3 研究难点与未来发展

雷达技术从过去的单极化、单波段、固定入射角、单模式, 已经迅速发展成为高分辨、多极化、多波段、多模式、多平台的雷达, 这些大量新型雷达数据包含的丰富信息为微弱目标检测和识别提供了直接的手段。如何更为有效、全面地分析和利用这些数据集, 实现真正意义上的目标认知是当前雷达领域研究的关键问题。然而, 人们对这些新数据的认识和利用程度远远跟不上雷达设备收集信息的速度。因此, 如何充分利用这些雷达数据实现微弱目标检测与识别成为目前研究的焦点和热点问题, 主要集中在以下 3 个方面:

(1) 适用的杂波模型。随着雷达数据获取和成像技术的不断突破, 更多新型雷达图像 (如高分辨 SAR 和极化 SAR) 的出现为我们提供了更多信息。由于自身成像机理的原因, 雷达图像总是受到相干斑噪声的影响。相干斑使图像的质量退化, 影响了目标检测与识别。目前已有的杂波模型并不能有效表示复杂的地物类型, 具有很大的局限性。因此, 如何结合雷达的散射机理, 建立杂波模型与知识库, 是微弱目标检测与识别首要解决的关键问题。

(2) 高效的目标认知。传统的信息处理通常采用“特征表示 + 学习算法”的浅层学习模式。“特征表示”通常采用变换的形式, 通过合适的变换, 例如小波变换、多尺度几何变换等, 描述出我们的视觉系统在观察目标时提取的用于区分目标的特征以及目标之间的连接关系。“学习算法”, 对于图像, 最直观的描述方法就是像素, 传统的方法为有监督学习。由于地面环境背景与观测目标复杂多样, 导致雷达图像的处理缺乏明确的数学模型, 对不同的目标提取特征的有效性难以保证, 增加了雷达图像解译的难度。另一方面, 传统的学习算法需要训练样本, 样本的选择直接影响识别结果, 而且对特征太敏感。如何突破传统机器学习算法基于浅层特征表示的局限性, 发现雷达数据复杂的、高级的特征表示, 捕获数据中的潜在规律, 成为微弱目标检测与识别的关键问题。

(3) 高性能计算模型。雷达的数据获取能力不断增强, 空间分辨率从十米级到米级甚至厘米级 (如 PicoSAR)。相对不断增强的雷达数据获取能力, 数据自动化处理水平还相对较低, 从数据获取到信息提取再到应用产品过程中人工干预较多, 一些信息提取和目标识别等应用工作还主要以人工辅助和解译为主, 信息服务难以保障时效性, 难以满足实际应用需求。随着并行计算体系和相关技术的不断成熟, 并行计算相比串行计算在计算效率上的飞跃为解决上述问题提供了良好的平台。因此, 如何基于高性能计算平台, 利用并行中的分布式计算功能降低算法的运行时间成为微弱目标检测与识别实用化的关键问题。

结合现实需求, 就未来发展而言, 本领域的主要研究热点预计将主要集中在以下几个方面: 一是杂波和目标散射机理及目标特性建模方法; 二是微弱目标认知模型与自适应信息获取理论与方法; 三是雷达数据稀疏编码模型和深度认知学习理论和方法; 四是雷达微弱目标检测与识别推理模型和方法; 五是微弱目标检测与识别的 GPU/CPU 并行加速算法等。

4 多模态成像理论与信息重建

4.1 概念与内涵

成像是分布参数反演 (或重建) 结果的一种空间表示, 具体为被测对象在空间坐标点上若干属性参数的数值分布. 一般的成像方式主要有投影成像和反演 (层析) 成像. 通常认为, 针对某一物质属性, 对被测对象进行参数反演或重建的过程, 属于单模态成像, 比如利用 X 射线信号衰减的幅值进行衰减系数的反演成像, 亦称为层析成像. 随着成像应用领域的不断拓展, 人们对不同模态成像方式的机理及特点的认识不断深入, 在科学研究、医疗诊断、工业生产等诸多领域也提出了一系列的多模态成像方式. 多模态成像通常将电磁波谱的不同波段或电磁场与机械波的机理融合在一起, 针对被测对象在电磁场及机械波作用下的不同属性统一描述、取长补短. 多模态成像理论与技术的发展又大大推动了成像技术自身的发展, 使得核磁共振 (MRI)、正电子发射断层成像 (PET)、超声成像、THz 波成像、X 射线成像、微波成像、低频电磁成像等成像方式的内涵得到更大的拓展, 并在诸多领域获得成功应用.

目前, 国内外对于多模态成像尚无统一的定义, 但一般认为, 针对被测对象两种及两种以上不同属性进行融合成像的图像重建过程, 均属于多模态成像. 常见的多模态成像包括: 电学和光学、电学和射线、电学和声学、电学和磁学、电容和电阻成像等. 时至今日, 多模态成像理论及技术的发展已深入社会、生活的各个方面. 囿于篇幅所限, 本部分主要围绕反演 (层析) 成像, 结合工业过程的多模态过程成像展开论述.

4.2 国内外研究现状

目前的成像技术可划分为两大类, 即硬场成像与软场成像. 硬场成像指探测射线或探测场的灵敏度分布与被测场域物质属性分布无关的一类成像方式, 常见的如 X 射线成像. X 射线在其路径上的传播方式不受被测场域物质属性分布的影响, 而被测场域物质属性分布仅影响其衰减程度. 而软场成像指其灵敏度分布受被测场域物质属性分布影响的成像方式, 典型的是电学成像, 被测场域电学参数的分布直接对电力线分布造成扰动, 其灵敏度分布与不存在被测物体时不同. 由于层析成像技术具有“看透”物体内部被测属性分布的技术优势, 其一经问世, 即受到广泛关注, 利用相关技术的发明及发现多次获得诺贝尔奖.

层析成像技术的发展, 开始于单一模态的成像技术. 单一模态的成像理论与技术的发展可追溯到 20 世纪之初, 随着 X 射线的发现, 利用 X 射线多角度投影数据进行物体断层成像引起了研究人员的关注. 2005 年, 德国研究人员 Fischer, Hampel 等构造了采用电子束扫描装置的超高速 X 射线 CT 系统. 实现了 X 射线的高速多角度扫描, 最高成像速度可以达到 7000 帧/秒, 成像分辨率可达 1 mm, 反映了当今工业单一模态成像的最高速度. 但是, X 射线 CT 系统体积庞大、价格昂贵, 且有辐射泄漏的潜在危险, 使其在工业应用领域受到了很大限制.

电学成像 (electrical tomography) 系统结构简单、可靠性高, 尤其适合工业过程对象的测量问题. 国内外的多模态过程参数成像研究也主要围绕电学成像开展. 在电学成像技术领域, 始终存在着测量数据有限、逆问题病态性严重的问题. 尽管可以利用各种数学技巧对逆问题进行处理, 但可利用的信息不足, 而难于从根本上解决算法稳定性、抗噪性、收敛性差的问题. 由有限信息重建图像的电学成像方法往往只能生成比较粗糙的重建图像, 且会偏离真实情况, 限制了电学成像技术的发展.

利用多传感器的信息融合获得有关目标的知识, 可以避免单一传感器的局限性, 减少不确定性误差的影响. 随着电学成像技术发展, 国内外各研究组开始试图整合多种成像技术, 通过增加信息量扩

展电学层析成像技术的应用范围、提高测量精度. 在 1999 年举行的第一届国际工业过程成像会议上, Leeds 大学的 West 与 Williams 发表了题为“多模态层析成像数据融合的机遇”的论文, 认为将多个模态的成像技术用于工业过程监测的时机已经成熟. 他们分析了多模态信息融合中存在的一些机遇和挑战, 给出了将电阻层析成像 (electrical resistance tomography, ERT) 与超声成像融合的双模态成像技术用于水力旋流器检测的实例. 英国 Manchester 大学 Yang 课题组, 对电阻、电容及静电测量的多模态融合进行了有益的探索, 并进行了试验验证. 挪威 Bergen 大学 Johansen 课题组在多相流检测领域开展了多模态成像技术研究, 利用油、气、水三相在密度、电导率、介电常数上的不同, 研究了 Gamma 射线成像与电容层析成像技术的双模态融合的方法, 得到了较好的成像结果. 英国 Leeds 大学已初步建立了整合 ERT、电容层析成像 (electrical capacitance tomography, ECT) 及超声计算成像 (ultrasonic computed tomography, UCT) 多种模态的测量系统, 并开展了多相流成像实验^[46]. 除了多种独立模态的信息融合以外, 如何将不同的测量原理相融合亦是研究的热点. 1994 年韩国建国大学 Woo 等将核磁共振的电流测量与电学成像的激励方式相结合, 提出了基于核磁共振的电学成像^[47]. 2008 年法国 Fourier 大学的 Ammari 等将超声与电学成像从原理上相融合, 提出了超声调制的电学成像方法, 为高精度过程成像提供了新思路^[48].

目前国内从事用于过程参数监测的多模态成像研究主要集中在多相流体参数监测领域. 天津大学利用电容、电阻与 γ 射线衰减的不同特性, 将电学成像与 γ 射线成像相结合, 实现了电容和电阻、电容和 γ 射线的双模态成像, 并在多相流测试系统中进行了原理验证^[49~52]. 北京航空航天大学从电学层析成像图像重建问题的本质出发, 充分利用电学成像的“软场”特性, 直接利用阻抗所包含的实部与虚部信息, 实现了电容、电阻的双模态直接成像, 并在实验室测试平台得到验证. 而以往的工作需要单一模态重建后进行信息融合, 限制了电学不同模态信息的融合^[53]. 同时, 针对燃烧过程中不同组分的电学、光学特性差异, 北京航空航天大学开展了电学和激光吸收光谱双模态成像的研究工作^[54,55]. 清华大学、浙江大学等单位的研究人员也在多模态传感器及信息融合方面做了积极的探索^[56~58].

总体来说, 当前国内的多模态过程成像研究较多停留在实验室研究阶段, 有待进一步结合工业过程开展应用研究. 已开展工业应用的主要是单一模态成像, 如天津大学课题组将电学成像技术用于西门子的多相流研究和太原理工大学的粉料输送研究; 北京航空航天大学课题组将电学成像技术用于油田水平井可视化监测, 并与中国科学院工程热物理研究所合作, 用于循环流化床的动态监测等. 单一模态的系统, 结合工业应用已取得初步进展, 初步解决了从实验室到工业现场的一系列实际问题, 为工业过程监测及科学研究提供了新的必要数据, 同时也为后续将多模态成像应用于工业过程监测打下了很好的基础.

由于每种成像模态都有其局限性, 多模态数据融合是层析成像技术发展的必然趋势, 可为医学诊断、科学实验、工业过程监测等提供更加丰富、可靠的测量数据, 具有更加广阔的发展前景. 目前, 多模态成像技术的发展也存在很多问题, 由于涉及多种机理, 多模态成像技术都比较复杂, 需要探索多种单一模态的最优融合方式, 通过结合传感器设计及应用需求, 探索新的多模态成像方法与技术. 多传感器的数据融合亦存在诸多困难, 同时也是传感成像技术发展的必然趋势, 很有必要在这一领域投入更大的研究力量.

4.3 当前研究的难点

(1) 提高重建图像空间分辨率和物质属性区分能力的新机理和新方法. 提高重建图像的空间分辨率或者物质属性区分能力, 在工业领域具有广泛的需求. 比如增强油气开采中油、气、水三相之间的对比度, 区分高速列车铁轨的正常部件与瑕疵等. 传统的单模态成像技术有时无法对相关属性相近的

物质进行区分,简单的多模态组合亦无法充分体现不同模态之间的融合信息.利用电磁波及机械波在不同频段的特征信息,发展新型的结合物质属性特征成像和测量新手段,提高成像的空间分辨率和物质属性区分能力,仍是值得关注的研究方向.新的研究方向包括能谱射线成像、多光谱多参数成像、电学频谱成像等.

(2) 采样空间受限(不完整边界和不均匀空间采样等)的成像方法.图像重建所利用的投影数据中,往往仅有小部分起主要作用,大量的投影数据对提高重建质量贡献很小.而大量冗余投影数据的采集,不仅加重了重建计算负担及硬件复杂度,也影响了成像速度.利用欠采样理论及被测对象的特征,实现采样空间受限的成像,是未来过程成像有待解决的问题之一.新的研究方向包括基于压缩感知的传感器阵列优化及图像重建.

(3) 基于重建的参数或特征估计方法.通常,工业过程中被测参数具有一定的先验知识,所需参数有时是集总参数,大大降低了重建的病态程度.如在多相流测量中,工业上关注的分相的含率属于集总参数.利用多角度投影数据及多物理场模型,提高主要参数或特征的重建精度.新的研究方向包括融合多物理场模型的多模态参数重建.

(4) 数据处理和图像重建的加速方法.目前,计算机处理和存储能力有了大幅度提高,但对于三维高分辨成像而言,数据处理和图像重建速度仍然不足.特别是一些基于目标优化的迭代类算法,不能进行实际应用的主要障碍是计算速度问题.为此,一方面需要研究高效、并行的数据处理和图像重建算法,另一方面需要结合硬件特性发展算法的高性能实现方法,如多核多 GPU 实现方法、网络计算方法等.

4.4 未来发展趋势与建议

(1) 基于新原理、新模态的成像

(i) 多谱线、少角度的光学频谱成像.传统的激光吸收光谱层析成像只采集待测气体的一条或者两条吸收谱线.为获取足够的流场信息,需在多个方向、多个位置进行测量,才能实现流场的精确重建.因此,该技术用旋转台对流场进行扫描,时间分辨率只能达到秒量级,远远不能满足高速流场的测量要求,例如航空发动机燃烧室出口温度场和组分浓度分布的测量.另外,该技术只适用于压力分布已知且恒定的情况.然而,对于从事燃烧室设计、燃烧机理研究而言,模型燃烧室内部的流场测量非常必要.但由于测量环境非常恶劣,高温、高压,上述假设并不成立,因而采用传统方法会产生较大测量误差.同时,高温高压的模型燃烧室允许开光学窗口的数目是非常有限的,因此发展多谱线、少角度的光学频谱成像是非常必要的.

(ii) 基于不完整边界信息的电学双模态耦合成像.工业应用中常要求电极阵列仅布置于被测区域的部分边界上,但电学传感器中的电极阵列通常需环绕被测区域一周.如何适应工业需求,通过部分边界上电极阵列的信息,结合电学敏感场的“软场”特性,高精度重构被测区域内的物质分布是有待深入研究的课题.

(iii) 基于光与介质相互作用原理的量子器件的计算成像.与核磁共振需要施加外加激励磁场不同,利用地磁场或无磁情况下对被测物体自身产生的磁场进行探测,并实现被动成像,是未来成像探测的热点之一.其中探测器件可以是利用量子效应的微弱磁强计.

(iv) 突破传统衍射极限的微纳成像.利用量子态纠缠效应,突破衍射极限,达到纳米级分辨率测量(比如利用可见光波段),对溶液或物体表面纳米颗粒实现微纳成像,也将是未来成像探测的热点之一.

(v) 利用单光子探测技术的瞬态成像.结合新型微弱电磁场探测技术及信号处理手段,如压缩传感、关联成像等,利用量子器件的高灵敏度特点,实现无需主动光源的被动式高分辨瞬态成像.

(2) 与应用紧密结合的新的成像方式

- (i) 结合高速铁路裂纹、疲劳、磨损等故障状态监测的多模态、多参数成像.
- (ii) 结合国家十三五期间航空发动机和燃气轮机科技重大专项的燃烧过程多参数多模态成像.
- (iii) 结合大型油气田与煤层气开采国家重大需求的深井钻探与测井的多模态成像.

5 计算成像理论与方法

5.1 概念与内涵

在数百年来光学发展过程中, 成像模型不断被完善与创新, 光源、光学系统、传感器、光学调制器等成像要素不断革新, 从而能够对光信号进行高维高分辨率的调制与采集; 另一方面, 伴随着信息时代的到来, 数字信号计算与处理、机器视觉与学习、大数据等领域都有了本质飞跃, 使得更庞大更迅捷的智能信息计算成为了可能. 在这样的大背景下, 上述两大领域碰撞出了革命性的火花, 催生了计算成像理论.

从计算成像技术的理论框架来看, 其主要涵盖编码光学设计、耦合采集与计算重建 3 个部分. 相对于经典成像模型, 计算成像理论采用新型光学器件, 多种成像方式, 各类新材料对于成像过程进行特定调制, 从而耦合待采集信息; 其次, 以需求为目标设计新型成像系统, 直接或间接地采集含有目标信息的多样化信号; 最后利用现代计算机的强大计算能力, 从采集得到的信号中恢复重建目标物体不同维度的视觉信号, 或进一步调节成像光路, 引入反馈机制, 达到最终成像目的. 计算成像理论通过赋予传统光学设计更多计算的特征, 包括建模、优化、耦合与解耦等等, 克服了传统成像器件的不足与局限性, 增强、扩展了数字成像技术能力, 真正从系统层面处理整个成像过程, 而不仅仅着眼于基础成像器件, 从而能够生成更高维度, 更多尺度, 更为丰富、生动, 更具有视觉表现力的多样视觉信息, 突破传统成像极限, 为生命科学、医学、材料科学、计算机视觉、图形学等领域带来了全新的发展契机.

5.2 历史发展脉络

计算成像这样一种将计算与成像相互融合相互促进的思维方式, 早在成像技术的发展初期就已经萌芽. 通过记录各类介质通过物体后发生干涉与衍射带来的强度变化, 虽然不能直观地显现物体的空间信息, 但通过推理计算, 可以让我们得出传统强度成像所无法展现的相干光场的相位信息、光谱信息, 甚至是物体本身的三维结构等等. 早期的诺贝尔奖工作包括干涉仪以及通过 X 射线衍射估计晶体结构等等, 都是这样一种成像后再计算的例子. 随后人们通过在传统光路中加入特定的相位调制, 使得光信号在其他维度的信息, 包括光谱、相位、角度等等能够体现在强度变化上, 相衬显微镜^[59]的诞生就是一个很好的样例. 而伴随着第一台电子计算机的诞生, 人类所能掌握的计算能力开始有了质的飞跃, 为计算成像在这一时期的蓬勃发展奠定了物质基础, 使得人们能够对于更大数据量的采集信息, 进行快速地计算重建, 真正地实现了计算后的再成像过程.

CCD, CMOS 等等图像传感器的诞生, 为计算成像提供了更庞大的数据基础. 快速密集的光信号采集能力, 提供了更大的采样空间, 既使得数字全息技术^[60]成为了可能, 也诞生了一种计算成像的理论, 即通过各类光学器件的组合, 将光信号的其他维度信息复用至空间维度, 换言之就是将高维信号体现在耦合的二维采样中, 通过计算重建实现快速的高维成像. 近年来, 各种空间光调制器的普及, 也为计算成像带来了更多样化的研究手段, 在采集端以及光照端的各个位置通过放置空间光调制, 能够实现不同程度的相位调制或者幅度调制, 结合光栅、棱镜等器件, 就能实现对于高维光信号的编码, 更

利于最终的计算重建. 同时, 也带动了自适应光学的发展^[61], 获得了各类极端条件下的成像能力, 突破了传统光学成像的局限. 压缩感知理论^[62]的提出则为设计更优化的重建算法与系统打下了理论基础. 近年来, 飞秒激光技术的进一步突破以及发光二极管 (LED) 的普及, 为计算成像领域在光照端提供了新的工具与思路, 各类超光速成像方法随之诞生, 而基于 LED 的各类成像系统结合计算成像的方法大大降低了传统高性能成像技术的成本. 未来的计算成像技术, 也必将进一步拓展人类的观测极限, 降低各类高性能成像装置的成本, 充分发挥交叉学科优势, 不断应用新材料, 融合多种成像方法, 朝着多维多尺度的方向发展, 其每一次重大突破, 必将带动各类学科的共同进步.

5.3 计算成像的前沿理论与系统

近十年来, 伴随着信息时代的浪潮, 计算成像技术蓬勃发展. 在光信号的各个维度上, 都大大拓展了传统成像系统的极限. 无论是在单一维度下探测能力的不断提升, 还是多维度联合高维信息的获取, 都为其他学科包括生命科学、医学、材料科学等等提供了更多的研究工具. 下面将从各个维度出发, 介绍当今计算成像理论发展过程中的一些前沿理论与系统.

(1) 空间维度. 传统成像方法的空间维度成像主要受到 3 个方面的限制: 1) 使用光学方法成像会受到衍射极限的限制, 难以实现分辨率超过 100 nm 的显微成像; 2) 受制于物镜的成像分辨率和空间带宽积, 目前的相机仅仅可以达到千万像素级别, 难以实现更高像素数量的成像; 3) 难以解决视野范围和空间分辨率的矛盾关系, 如果扩大成像的视野就会牺牲空间分辨率, 而如果想提升分辨率, 就会使得观测的视野变小, 没有办法对较大范围的对象进行精细成像. 因此本部分重点对计算超分辨率成像和大视野高分辨率两个方向的研究工作进行介绍.

近年来, 研究者通过改进成像的原理, 实现了突破衍射极限的超分辨成像, 其中的典型工作包括受激发射损耗显微技术 (stimulated emission depletion, STED)^[63], 基于“光子可控开关的荧光探针”的光敏定位显微 (photo activated localization microscopy, PALM)^[64], 随机光学重建显微 (stochastic optical reconstruction microscopy, STORM)^[65], 以及基于结构光照的显微成像 (structured illumination microscopy, SIM)^[66]. 2014 年的诺贝尔化学奖颁发给了超分辨率成像的突出科学工作者以表彰他们在这一领域取得的突破.

另一方面, 很多生物现象需要对大视野内的成像样本进行大尺度范围内的精细成像, 以观察不同部分之间的协同作用, 在这方面的主要代表工作包括空域拼接十亿像素成像和频域拼接成像 (Fourier ptychographic microscopy)、Brady 等^[67]利用微摄像头阵列设计开发的高分辨率成像设备 AWARE-2、Zheng 等^[68]通过改变显微成像中入射光照角度的宽频率域信息成像方法.

(2) 时间维度. 传统成像方法采用二维空间维度和一维时间维度的时空采样, 成像的时间分辨率受到传感器感光灵敏度、数据转化和存储速率的限制, 很难达到较高的时间分辨率, 目前已经商用的高速相机最快的时间分辨率仅为约 1 μ s. 近年来, 超快速成像领域通过将场景的时间维度信息编码到空间维度或光谱维度, 将成像的时间分辨率提升到皮秒甚至飞秒量级. 该领域的代表性工作包括: Velten 等^[69]利用条纹相机将时间维度映射到空间维度; Goda 等^[70]将空间维度编码耦合到光谱维度, 再利用单像素相机的超高时间分辨率来提升成像的时间分辨率; Goda 等^[71]先将时间维度信息编码耦合到光谱维度, 进而映射到不同的空间位置, 获得时间分辨率的提升.

Zewail 教授发明了飞秒成像技术, 并将其用于观测化学反应中化学键断裂等现象, 并以此获得了 1999 年的诺贝尔化学奖. 2012 年, 美国 MIT (Massachusetts Institute of Technology) 的 Velten 等将这一技术应用于宏观物体成像, 其时间分辨率达到了 2 ps, 可以对光在整个场景中的传播过程进行成像^[69], 打破了光的稳态场景成像的约束. 这种飞秒成像的方法通过精确地区分出多次散射和反射的

图 1 多角度相关计算成像系统

Figure 1 Multiangle correlation computed imaging system. (a) Multiangle illumination; (b) multiangle obtaining acquisition

传播过程, 可以对不在视野范围内的被障碍物遮挡的物体进行成像, 再结合特定光的不同传播时间, 实现三维“拐角成像”的效果 [72].

Goda 等 [71] 开发出 STEAM 连续成像系统, 实现对观测场景的连续高速观测, 其拍摄帧率为 6.1 MHz, 快门时间为 440 ps. 该方法结合微流控技术可以用于对高速的细胞流进行成像, 大幅提升细胞检测的速度. 与 STEAM 技术类似, STAMP [71] 也利用光谱维度进行调制, 并利用不同光谱的色散特性, 将不同谱段色散到不同的空间位置, 可以使用传统的成像设备进行拍摄.

(3) 角度维度. 在传统图像中, 光线的角度信息几乎是完全丢失的, 而这一信息却真实地反应了场景的光照、材质以及三维结构等等性质. 众多的计算成像技术通过采集同一场景在不同角度下的信息, 配合计算重建算法, 以获得更高维或者高分辨率的场景数据. 图 1 中展示了近年来一些基于多角度信息计算成像的经典系统, 从相干光、部分相干光到非相干光, 从微观到宏观, 从多角度光照到多角度采集, 利用多角度信息能够在各类条件下恢复场景的高维高分辨率信息.

在相干光下的多角度信息重建算法中往往将光场以复数场建模, 结合波动光学的理论计算, 往往应用于显微成像领域, 如图 1 中的三维折射率重建系统 [73]、十亿像素成像显微系统. 而在部分相干光下往往使用 Wigner 分布来描述光场, 如图 1 中相位空间四维采集系统, Waller 等配合空间调制器, 在采集端实现了密集地多角度信息采集, 从而获得相位 - 空间的四维信息 [74], 帮助人们更好地理解非线性的光传播理论. 对于非相干光而言, 四维光场即能很好地描述场景的空间信息. Stanford 大学的 Marc Levoy 团队在采集端通过微透镜阵列或者相机阵列的手段, 实现了四维光场信息的快速采集, 从而实现动态的深度探测与数字重聚焦 [75]. Prevedel 等利用这一技术首次实现了对于秀丽线虫的动态脑神经钙成像, 为神经回路变化的三维动态观测提供了可能 [76].

总而言之, 光照端多角度信息的引入, 配合计算成像技术往往能以更低的成本突破传统透镜成像的极限, 引入更多的三维信息, 弥补成像透镜现有工艺水平上的不足, 从而实现更高性能更高维度的成像. 而采集端多角度信息的引入, 则能够将物体的三维信息耦合至二维采样中, 配合计算重构, 使得通过二维传感器实现快速三维成像成为了可能.

(4) 光谱维度. 光谱信息能够反应出光源、物体以及场景的自然属性, 因此光谱采集技术已成为了进行科学研究与工程应用的重要工具. 近些年来, 高分辨率超光谱成像技术的研究日益增多, 基于超光谱成像技术得到的光谱信息为研究者与应用人员提供了场景更多的特征.

图 2 超光谱显微相关研究

Figure 2 Related research on hyperspectral microscopy. (a) Gigapixel multispectral microscopy; (b) hyperspectral light sheet microscopy

图 3 量化相位成像相关研究

Figure 3 Related research on quantitative phase imaging. (a) Fully coherent light; (b) partially coherent light

清华大学的鲍捷教授提出了一种基于胶体量子点纳米材料制作微型光谱仪的新方法^[77], 这是国际上首次将胶体量子点纳米材料用于制作微型光谱仪. 作为一种光谱仪微型化方法的新突破, 这种方法为制作高性能、低造价、体积小于智能手机摄像头的微型光谱仪铺平了道路. 其未来应用包括太空探索、个性化医疗、微流控芯片实验室诊断平台等.

微观尺度上的光谱采集同样得到了研究者的广泛关注和深入研究, 如图 2 所示. 美国 Harvard 大学的 Orth 教授发明了具有亿万像素级成像能力的光谱显微镜技术, 这种荧光光谱显微成像技术能够获得高达 13 亿像素的空间成像分辨率, 使得细胞内部结构等生物样本或目标得到有效的可视化和观测. 这是当前具有最高空间分辨率的光谱显微成像装置, 这项技术的实现能够通过更为直观的成像能力助力于生物医学、药品研发等诸多领域. 德国的 Jahr 教授等发明了光谱片层显微系统 (hyperspectral light sheet microscopy), 这一系统基于扫描式主动光照的光学设计和计算重建的方法, 能够有效地对大型生物活体样本进行光谱成像, 既能得到整个组织的光学切片与 3D 图像, 同时又能保证细胞水平

的空间分辨率. 这一技术为涉及生物活体检测成像的领域带来了全新的契机.

(5) 相位成像. 由于大多数显微样本在不染色的情况下近似透明, 比如一些原生动物、细菌等等. 当光线照射物体后, 物体对光线的吸收很小, 故而在聚焦情况下几乎没有强度变化. 而通过相位成像, 就能获得很好的物体轮廓, 实现无标记细胞成像. Zernike 相衬显微镜, 即是相位成像最早的一种体现, 为人们提供了一种观测透明样本的新工具. 量化相位成像进一步实现了透明显微样本的高精度相位测量, 结合多角度或者不同聚焦深度信息就能进一步实现无标记下三维折射率成像^[73].

量化相位成像技术主要可以分为迭代式相位成像以及非迭代式相位成像两类. 迭代式相位成像利用了相干光或者部分相干光传播的物理模型, 通过空间或者 Fourier 域的约束, 设计迭代算法, 从强度信息的采集中迭代计算得到相位信息. 这类方法往往需要更多的计算量以及多次的数据采集, 其中最为著名的方法是 G-S 迭代法. 对于非迭代式技术而言, 一般分为完全相干光条件下与部分相干光条件下两类, 一些经典的成像系统如图 3 所示.

自激光诞生以来, 完全相干光类量化相位成像技术开始被广泛应用, 其中最传统最典型的例子就是数字全息术以及一些移相干涉测量方法. 另一些方法通过在 Fourier 面进行相位或强度调制, 结合多角度相干光下的量化相位成像, 能够实现对于透明样本的无标记三维折射率重建, 为更多无标记下生命科学应用提供了可能^[73]. 然而在相干光照条件下仍然存在的一些问题, 包括相位周期性带来的展开问题、激光散斑干扰、较低的空间分辨率、大功率激光较为昂贵等等, 更多的量化相位成像研究开始集中于显微成像中最为常见的部分相干光下. 在部分相干光下物体的相位信息虽然在聚焦面上难以体现, 但是在其散焦面上往往会在强度上有所展现, 通过对物体在轴向的多次测量, 结合光传输方程的相位重建算法, 为部分相干光下的量化相位重建提供了一种新的思路.

5.4 未来发展趋势与建议

计算成像方法相对于传统成像方式具备了更大的灵活性与创新性, 使得其能够更好地包容各个学科领域的新技术与新突破. 随着各个国家对于脑科学研究、医学检测、疾病机理研究等等方面的重视, 驱动着成像技术不断地往前进步. 多学科交叉已经成了计算成像下一步发展的必然趋势. 各个领域的新材料的诞生, 总能在计算成像领域找到相应的应用点, 而成像技术开发的需求也促使着人们寻求新的工具带来新的灵感, 这一现象在近年来表现得尤为突出. 开关可控荧光蛋白的发现为荧光超分辨率显微技术带来了重大突破^[65], 而通过量子点这一新材料的灵活运用, 大大降低了光谱仪的使用成本^[77]. 同时这一多学科交叉的发展趋势也体现在多种成像方式的相互融合中, 取长补短, 在各个尺度上不断地突破着人类探索的极限. 在未来, 如何将更多的成像方式巧妙地融合起来, 创造成像能力的新记录, 将是计算成像领域亟待解决的一个问题. 而材料科学、应用化学等其他学科领域的重大突破也必将为计算成像提供更多的可能.

(1) 多维多尺度. 随着对物理世界的完整捕获与感知变得愈发重要, 具有更多维度、更多尺度成像能力的系统与技术方法将会获得更大的关注度, 成为计算成像方法的代表性方向之一. 而 *Nature Methods* 杂志也将高度复合成像列为了 2016 最值得关注的 8 项技术之一. 从维度角度来看, 基于计算成像技术的亿万像素级成像系统正在深入研究中; 时间分辨率上, 高速成像技术已经达到飞秒数量级, 成像速度的大幅度提升也开启了暂态光学等全新领域; 此外, 在光谱、角度等其他维度上, 成像技术的发展也正在逐渐将不可能变为可能, 将“看不见”变为“看得见”, 将“看不清”变为“看得清”, 光谱视频采集装置、光场相机、深度相机、飞秒时空聚焦等新技术、新方法正在不断给计算成像理论方法带来新的契机, 实现维度上的不断突破. 从成像技术的尺度角度来看, 不同学科不同领域的成像需求不断提升, 例如生物、化学、材料等基础学科需要针对微观结构进行更为高效、精确、可视化的视

觉采集; 而视觉、图形学、遥感、无人机等其他领域则可能需要更大尺度上的成像能力. 因此, 从未来发展来看, 具有不同尺度成像能力的计算成像系统将成为技术进步的趋势, 其能够服务于不同学科的不同需求, 带来灵活、自适应与更为丰富的成像能力.

(2) 极弱光照与散射介质. 极弱信号成像, 穿透散射介质的深层成像等同样是当前制约成像技术的主要难点, 也是未来计算成像研究过程的一个重要方向. 对于极弱信号成像的需求主要来自生物样本在体成像, 对于在体细胞进行成像的过程中必须使用较弱光进行激发, 以避免过强光照对在体细胞的伤害, 特别是对于某些标记信号表达很弱的荧光现象的观测, 需要对极弱的少量光子信号进行成像. 尽管当前 ICCD, sCMOS 等阵列传感器发展迅速, 但是仍难以探测这种极弱信号. 一个可能的发展趋势是利用单像素鬼成像的计算方法对极弱光进行成像, 单像素鬼成像的优势主要体现在如下几个方面: 首先单像素成像过程中将所有的光子收集到一个探测器, 并且单像素具有光子计数的敏感特性, 对弱光信号具有较强的探测能力; 其次单像素探测器对比阵列传感器对全谱段都具有较强的敏感性, 特别是对于某些远红外谱段; 再次相对于 ICCD 和 sCOMS, 单像素探测器造价较低, 具有配套的高速采集设备. 同时配合 TOF 原理或者光照端的光谱调制, 采集其他维度的观测样本信息. 而对于突破散射介质成像而言, 其目的是使得成像面更深入组织内部, 在神经科学成像领域, 人们迫切需要在活体下对更深层的神经细胞进行成像, 而不仅仅只是停留于表层细胞, 但是由于可见光的波长限制, 介质的强散射性质, 导致穿透深度受限, 这一方向的发展趋势是利用双光子或者多光子结合共焦显微镜进行成像, 但是目前其穿透深度仍显不足, 空间分辨率和时间分辨率较低, 若需更直观更清晰地对神经活动进行观测, 这一问题亟待解决.

6 展望总结

作为信息科学中发展最为迅速的分支, 探测与成像在社会安全、医疗、空间探测、国防等领域应用极为广泛, 它也是当前信息技术发展的高地之一. 本文简要介绍了高性能探测与成像的基本概念, 着重阐述了多维度微波探测、微弱信号检测与识别、多模态成像理论与信息重建、计算成像理论与方法这 4 个最具活力的子领域, 介绍了其典型应用及发展趋势, 并对其其中的一些科学问题进行了探讨和总结. 尽管着眼点有所不同, 但在探测成像领域, 存在着共性的科学任务, 也面临着一些共性基础性问题. 总的来说, 探测成像系统需要利用声、光、电、磁等传播媒介, 激励探测目标, 获取目标的二维、三维宽谱精确信息, 以实现有效成像和精确感知. 具体到各个应用领域, 未来的发展重点各有特点.

对雷达探测与成像系统来说, 它的主要特点是应用背景差别较大且受到应用条件的制约, 重点关注的是充分利用目标的不完备谱域数据, 准确获取目标几何和电磁参数, 以达到重建或反演目标的目的. 结合当前的发展现状, 在雷达探测成像领域的研究重心主要包括如下几个方面: 一是复杂背景下的微弱目标检测与识别, 通过建立更为精确的背景模型, 突破传统机器学习算法基于浅层特征表示的局限性, 发现雷达数据复杂的、高级的特征表示, 捕获数据中的潜在规律; 二是多维度雷达探测成像的新机制、理论与方法, 通过探索新的成像机理, 通过主动、被动等多种工作方式, 实现多种信息维度下的融合信息获取, 利用张量等数学工具来解决多维度量化所面临的获取机制优化、信号处理及参数反演等问题; 三是发展运动目标一体化探测成像的理论和方法, 重点是高速低可探测目标的散射机理及其一体化探测成像理论与方法.

对空间探测成像系统来说, 它主要有两大类成像方式, 即大口径光学系统以及合成孔径雷达成像系统, 这两类成像系统的成像机理不同, 面临的问题也迥异. 概括来说, 空间探测成像未来的研究重心包括如下几个方面: 一是复杂气象条件下的大口径光学系统成像新机理与新方法, 主要研究大气环境

对大口径光学成像系统的影响, 探索对大气变化不敏感的强度关联成像探测方法; 二是光学雷达一体化成像方法, 主要研究基于卫星平台的合成孔径光学探测成像方法, 基于强度关联的微波高分辨空间目标成像新方法等; 三是探索提高空间分辨率的成像新方法, 主要研究新的高分辨成像机理、主被动一体化融合成像等新方法。

对工业探测成像来说, 成像信息获取方法主要包括阵列成像和扫描成像, 成像方式也有两大类, 即直接成像和信息重建成像。相比之下, 工业探测成像媒介更多, 包括次声波成像、音频成像、超声成像、光学成像、粒子成像、辐射成像等; 应用更广, 包括工业 B 超、射线成像、涡流成像、核磁共振成像、阻抗层析成像等。概括来说, 工业探测成像未来的研究重心包括如下几个方面: 一是物理信息及其特征转换的成像理论与方法, 探索成像媒介传输过程中各维度之间的耦合特性, 以实现高分辨率高维度场景信息的联合重构; 二是非规则阵列的重建理论与方法, 主要利用阵列信号处理、压缩感知等新的处理工具, 实现采样数据的高精度重构, 需要攻克反演算法的研究和编码空间的有效设计等关键技术; 三是复合媒体融合成像理论与新型成像材料, 多种成像方式的融合是未来的基本特点之一, 例如, 相干场成像与计算层析成像、结构光照明显微成像等的结合等, 这意味着需要更复杂的成像设备与材料, 可以预见, 随着高功率微波器、高精度跟踪与成像捕获器件的发展, 高分辨成像、三维成像等也将是探测成像领域追逐的主题。

致谢 本文撰写过程中得到国防科学技术大学黄晓涛教授、首都师范大学张鹏教授、国防科学技术大学李永祯副研究员等学者的帮助, 国防科学技术大学邢世其讲师、庞晨讲师、博士生徐乐涛、硕士生张然等在论文成文过程中也作了贡献, 基金委信息学部、信息一处对本项工作给与了大力支持, 在此向他们一并表示感谢!

参考文献

- 1 Varshney K R, Cetin M, Fisher J W, et al. Sparse representation in structured dictionaries with application to synthetic aperture radar. *IEEE Trans Signal Process*, 2008, 56: 3548–3561
- 2 Li W Q, Gao J, Cao X Y, et al. A kind of shared aperture radar absorbing material with absorber and phase cancellation characteristics. *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 1–7 [李文强, 高军, 曹祥玉, 等. 一种具有吸波和相位相消特性的共享孔径雷达吸波材料. *物理学报*, 2014, 63: 1–7]
- 3 Xue Q S, Huang Y, Lin G Y. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer. *Acta Opt Sin*, 2011, 31: 0822001
- 4 Johnson M K, Cole F, Raj A, et al. Microgeometry capture using an elastomeric sensor. *ACM Trans Graph*, 2011, 30: 46
- 5 Qian L L. Research on computational imaging spectroscopy. Dissertation for Ph.D. Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013 [钱路路. 计算光谱成像技术研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科技大学, 2013]
- 6 Sherwin C W, Ruina J P, Rawcliffe R D. Some early developments in synthetic aperture radar systems. *IRE Trans Military Electron*, 1962, 6: 111–115
- 7 Brown W M. Synthetic aperture radar. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 1967, 3: 217–229
- 8 Wiley C A. Synthetic aperture radar. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 1985, 21: 440–443
- 9 Moreira J, Schwabisch M, Fornaro G. X-SAR interferometry: first results. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1995, 33: 950–956
- 10 Gabriel A K, Goldstein R M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *Inter J Remote Sens*, 1988, 9: 857–872

- 11 Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimension phase unwrapping. *Radio Sci*, 1988, 23: 713–720
- 12 Hoen E W, Zebker H A. Penetration depths in inferred from interferometric volume decorrelation observed over the Greenland ice sheet. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, 38: 2571–2582
- 13 Bamler R, Eineder M. ScanSAR processing using standard high precision SAR algorithms. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1996, 34: 212–218
- 14 Prati C, Rocca F. Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 1993, 29: 135–143
- 15 Curlander C, McDonough R N. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. New York: Wiley, 1991
- 16 Langenberg K J, Brandfaß M, Fellingner P, et al. *Radar Target Imaging*. Berlin: Springer-Verlag, 1994. 113–151
- 17 Huynen J R. Phenomenological theory of radar targets. Dissertation for Ph.D. Degree. Delft: Delft University of Technology, 1970
- 18 Boener W M. Need for developing multi-band single and multiple pass PolInSAR platforms in air and space. In: *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toulouse, 2003, 25: 422–424
- 19 Wu Y R. Concept of multidimensional space joint-observation SAR. *J Radars*, 2013, 2: 135–142 [吴一戎. 多维度合成孔径雷达成像概念. *雷达学报*, 2013, 2: 135–142]
- 20 Cloude S R, Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 68–78
- 21 Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36: 1551–1565
- 22 Cafforio C, Prati C, Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 1991, 27: 194–207
- 23 Moser G, Serpico S B, Zerubia J. Dictionary-based stochastic expectation maximization for SAR amplitude probability density function estimation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 188–200
- 24 Moser G, Krylov V, Serpico S B, et al. High resolution SAR image classification by Markov random fields and finite mixtures. *Proc SPIE*, San Jose, 2010, 7533: 753308
- 25 Krylov V A, Moser G, Serpico S B, et al. Enhanced dictionary-based SAR amplitude distribution estimation and its validation with very high-resolution data. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2011, 8: 148–152
- 26 Ding L F, Zhang P. *Radar System*. Xi'an: Publishing house of Xidian University [丁鹭飞, 张平. *雷达系统*. 西安: 西安电子科技大学出版社]
- 27 Gao G, Liu L, Zhao L, et al. An adaptive and fast CFAR algorithm based on automatic censoring for target detection in high-resolution SAR images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 1685–1697
- 28 Hwang S I, Ouchi K. On a novel approach using MLCC and CFAR for the improvement of ship detection by synthetic aperture radar. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 7: 391–395
- 29 Brusch S, Lehner S, Fritz T, et al. Ship surveillance with TerraSAR-X. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49: 1092–1103
- 30 Zhu C, Zhou H, Wang R, et al. A novel hierarchical method of ship detection from spaceborne optical image based on shape and texture features. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 3446–3456
- 31 Gao G. An improved scheme for target discrimination in high-resolution SAR images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49: 277–294
- 32 Bin L, Wang H Y, Wang K Z, et al. A foreground/background separation framework for interpreting polarimetric SAR images. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2011, 8: 288–292
- 33 Candes E J, Donoho D L. *Curvelets—a Surprisingly Effective Nonadaptive Representation for Objects with Edges*. Technical Report, Stanford University, 1999

- 34 Le Pennec E, Mallat S. Sparse geometric image representation with bandelets. *IEEE Trans Image Process*, 2005, 14: 423–438
- 35 Itti L, Koch C. Computational modeling of visual attention. *Nature Rev Neurosci*, 2001, 2: 194–203
- 36 Karklin Y, Lewicki M S. Emergence of complex cell properties by learning to generalize in natural scenes. *Nature*, 2009, 457: 83–86
- 37 Lee H, Battle A, Raina R, et al. Efficient sparse coding algorithms. In: *Proceedings of Conference on Neural Information Processing System*, Vancouver, 2007. 801–808
- 38 Yang J, Yu K, Gong Y, et al. Linear spatial pyramid matching using sparse coding for image classification. In: *Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami, 2009. 1794–1801
- 39 Bai X, Zhang H, Zhou J. VHR object detection based on structural feature extraction and query expansion. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2014, 52: 1–13
- 40 Huang X, Zhang L. An SVM ensemble approach combining spectral, structural, and semantic features for the classification of highresolution remotely sensed imagery. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2013, 51: 257–272
- 41 Bengio Y, Courville A, Vincent P. Representation learning: a review and new perspectives. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2013, 35: 1798–1828
- 42 Shao L, Wu D, Li X. Learning deep and wide: a spectral method for learning deep networks. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2014, 25: 2303–2308
- 43 Bengio Y, Lamblin P, Popovici D, et al. Greedy layerwise training of deep networks. In: *Proceedings of Conference on Neural Information Processing System*, Vancouver, 2006. 153–160
- 44 Plebe A. A model of the response of visual area V2 to combinations of orientations. *Netw Comput Neural Syst*, 2012, 23: 105–122
- 45 Hinton G, Osindero S, Teh Y. A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neu Comput*, 2006, 18: 1527–1554
- 46 Yuan Y, Sun J, Mao S. PFA algorithm for airborne spotlight SAR imaging with nonideal motions. *IEE Proc Radar Sonar Nav*, 2002, 149: 174–182
- 47 Zhu D Y, Zhu Z D. Range resampling in the polar format algorithm for spotlight SAR image formation using the chirp-Z transform. *IEEE Trans Signal Process*, 2007, 55: 1011–1023
- 48 Cao F, Hong W, Wu Y R, et al. An unsupervised segmentation with an adaptive number of clusters using the SPAN/H/a/A space and the complex wishart clustering for fully polarimetric SAR data analysis. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 3454–3467
- 49 Yang J, Yamaguchi Y, Yamada Y, et al. The characteristic polarization states and the equi-power curves. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, 40: 305–313
- 50 Tao Z, Cherniakov M, Teng L. Generalized approach to resolution analysis in BSAR. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 2005, 41: 10–20
- 51 He X, Cherniakov M, Zeng T. Signal detectability in SS-BSAR with GNSS non-cooperative transmitter. *IEE Proc Radar Sonar Nav*, 2005, 152: 124–132
- 52 Ender J H G, Brenner A R. PAMIR — a wideband phased SAR/MTI system. *IEE Proc Radar Sonar Nav*, 2003, 150: 165–172
- 53 Li Z F, Bao Z, Li H, et al. Image auto-coregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection. *IEEE Trans GRS*, 2006, 44: 288–297
- 54 Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans GRS*, 1998, 36: 1551–1565
- 55 Li Z F, Bao Z, Wang H Y, et al. Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 2006, 42: 436–452
- 56 Wang T, Bao Z. Improving the image quality of spaceborne multiple-aperture SAR under minimization of sidelobe clutter and noise. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2006, 3: 297–301

- 57 Zhang Z H, Xing M D, Ding J S, et al. Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in the wavenumber domain. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 3633–3645
- 58 Wang T, Bao Z, Zhang Z H, et al. Improving coherence of complex image pairs obtained by along-track bistatic SARs using range–azimuth prefiltering. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 3–13
- 59 Zernike F. How I discovered phase contrast. *Science*, 1955, 121: 345–349
- 60 Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography. *Opt Lett*, 1997, 22: 1268–1270
- 61 Bifano T. Adaptive imaging: MEMS deformable mirrors. *Nature Photon*, 2011, 5: 21–23
- 62 Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Trans Inf Theory*, 2004, 52: 489–509
- 63 Hell S W, Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy. *Opt Lett*, 1994, 19: 780–782
- 64 Hess S T, Girirajan T P K, Mason M D. Ultra-high resolution imaging by fluorescence photoactivation localization microscopy. *Biophys J*, 2006, 91: 4258–4272
- 65 Rust M J, Bates M, Zhuang X. Sub-diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM). *Nat Methods*, 2006, 3: 793–796
- 66 Gustafsson M G L. Nonlinear structured-illumination microscopy: wide-field fluorescence imaging with theoretically unlimited resolution. *Proc Natl Acad Sci United States of America*, 2005, 102: 13081–13086
- 67 Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. Multiscale gigapixel photography. *Nature*, 2012, 486: 386–389
- 68 Zheng G, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy. *Nature Photon*, 2013, 7: 739–745
- 69 Velten A, Wu D, Jarabo A, et al. Femto-photography: capturing and visualizing the propagation of light. *ACM Trans Graph*, 2013, 32: 44
- 70 Goda K, Tsia K K, Jalali B. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena. *Nature*, 2009, 458: 1145–1149
- 71 Nakagawa K, Iwasaki A, Oishi Y, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP). *Nature Photon*, 2014, 8: 695–700
- 72 Velten A, Willwacher T, Gupta O, et al. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging. *Nat Commun*, 2012, 3: 745
- 73 Choi W, Fang-Yen C, Badizadegan K, et al. Tomographic phase microscopy. *Nat Methods*, 2007, 4: 717–719
- 74 Waller L, Situ G, Fleischer J W. Phase-space measurement and coherence synthesis of optical beams. *Nature Photon*, 2012, 6: 474–479
- 75 Levoy M, Ng R, Adams A, et al. Light field microscopy. *ACM Trans Graph*, 2006, 25: 924–934
- 76 Prevedel R, Yoon Y G, Hoffmann M, et al. Simultaneous whole-animal 3D-imaging of neuronal activity using light field microscopy. *Nat Methods*, 2014, 11: 727–730
- 77 Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer. *Nature*, 2015, 523: 67–70

Developments and prospects of high-performance detection imaging and identification

Xuesong WANG^{1*}, Qionghai DAI², Licheng JIAO³, Wen HONG⁴, Lijun XU⁵, Mengdao XING⁶,
Dejun FENG⁷, Siwei CHEN⁷ & Dahai DAI⁷

1 College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2 Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3 School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

4 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

5 School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

6 National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;

7 School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

*E-mail: wxs1019@vip.sina.com

Abstract High-performance detection imaging and identification is one of the frontier areas in modern information science. It has developed rapidly in recent years, and the urgent need for its applications has accelerated the development. In this paper, four key areas of high-performance imaging detection and identification, namely multi-dimensional microwave detection imaging, weak signal detection and recognition, multi-mode imaging theory and information reconstruction, and computational imaging theory and methods, are systematically expounded in the areas of concept and content, development status both at home and abroad, current popularity and difficulty, typical applications, and future developing trends. In addition, related scientific issues are discussed and summarized. Although the specific problems faced in each field differ from each other, some common and fundamental issues, which should be investigated, include the interaction mechanism between the imaging measures and the target, the acquisition mechanism of detection-imaging data, and target-feature extraction and reconstruction after detection imaging.

Keywords multi-dimension, multi-scale, weakness signal detection, cognitive imaging, computational imaging, multi-modal imaging, information reconstruction, target intelligent recognition

Xuesong WANG was born in 1972. He received his B.E. and Ph.D. degrees from the College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology (NUDT), China in 1994 and 1999, respectively. His Ph.D. dissertation was recognized as one of "the 100 outstanding Ph.D. dissertations" in China in 2001 (two years after his graduation). He currently works as a professor at NUDT and is also the dean of the College of Science, NUDT. His research interests include polarimetric radar information processing and target recognition.

Qionghai DAI received his M.S. and Ph.D. degrees in Computer Science and Automation from Northeastern University, Shenyang, China, in 1994 and 1996, respectively. He is currently a professor in the Department of Automation and is the director of the Broadband Networks and Digital Media Laboratory at Tsinghua University, Beijing. His research interests include computational photography and microscopy, computer vision and graphics, and intelligent signal processing.

Licheng JIAO received his B.S. degree from Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, in 1982 and his M.S. and Ph.D. degrees from Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, in 1984 and 1990, respectively. He is currently a distinguished professor with the School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an. His research interests include signal and image processing, natural computation, and intelligent information processing.

Wen HONG was born in Shaanxi, China, in 1968. She received her Ph.D. degree from Beihang University, Beijing, China, in 1997. She currently works in the National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging at the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing. Her main research interests include polarimetric/polarimetric-interferometric synthetic aperture radar (SAR) data processing and applications, 3-D SAR signal processing, circular SAR signal processing, and sparse microwave imaging with compressed sensing.

Lijun XU was born in 1968. He received his Ph.D. degree in Instrumentation Science and Technology from Tianjin University, Tianjin, China, in 1996. He is currently a professor and the dean of the School of Instrumentation Science and Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing, China. His current research interests include tomographic imaging, scanning imaging, and dynamic process monitoring.