



雷达目标检测的分形理论及应用

|| 关 键 刘宁波 黄 勇 等著 ||



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息科技专著出版专项资金资助出版

雷达目标检测的 分形理论及应用

关 键 刘宁波 黄 勇 等著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

这是一本分形理论与雷达目标检测理论相结合的专著,它既有深刻的理论背景,又有较强的应用性。本书在大量实测雷达海杂波数据基础上,对分形理论和基于分形理论的目标检测方法进行了深入详细的讨论和实验分析,使本书兼具知识性和实用性。

全书内容共分10章。第1章总结了混沌分形理论在目标检测领域的研究现状;第2章介绍了分形理论的数学基础、数学基本概念、相关参数及其理论计算方法;第3章介绍了雷达目标自动检测的基本原理和几种常用的恒虚警检测器;第4章介绍了单一分形参数在海杂波目标检测中的应用;第5章介绍了多重分形理论及其在海杂波微弱目标检测中的应用;第6章介绍了海杂波的多重分形关联特征及其在微弱目标检测中的应用;第7章介绍了分形自仿射理论在海杂波预测与目标检测中的应用;第8章介绍了分形理论的一些最新应用,包括新的分形参数的引入以及分形特征与其他理论的结合运用;第9章介绍了分形理论在其他信号处理领域中的应用;第10章进行了总结。

本书可供信息与通信工程学科各专业的研究生和教师使用,也可供从事信号与信息处理技术的广大工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

雷达目标检测的分形理论及应用 / 关键等著. —北京: 电子工业出版社, 2011.7
ISBN 978-7-121-13679-5

I. ①雷… II. ①关… III. ①雷达目标—目标检测—研究 IV. ①TN951

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第101227号

责任编辑: 王春宁

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 16 字数: 403千字

印 次: 2011年7月第1次印刷

印 数: 3 500册 定价: 59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

我们面临的世界是多么丰富多彩，天空漂浮着变幻莫测的云彩，地球表面雄浑壮阔的地貌，海洋上风起云涌时的滔天巨浪，以及各种犬牙交错的边界线。对那么多奇怪的图形，多少年来，人们习惯于用传统的几何方法对它们进行描述，这种描述与现实是有相当大的差距的。

1975 年以来，随着著名数学家 B. B. Mandelbrot 几本专著的出版，一种新型的几何语言诞生了，这就是分形几何。分形几何的出现可以看成是数学史上的一次重大变革，它可以用有效地描述自然界中及科学研究中遇到的各种各样的复杂图形。一旦掌握了分形几何这种语言，你就有了处理分析和绘制各种不规则图形的强有力手段。

分形几何，这门新的数学分支一创立，就日益受到各国学者的重视，在过去的几十年里，分形科学已有了很大的发展。它在纯数学、物理学、材料科学、地质勘探、疾病诊断、股价预测、计算机、信号处理等领域都得到了广泛的应用。并且，分形几何方法的引入，使一些正在蓬勃发展的新学科获得了新的巨大推动力。分形几何与雷达信号处理领域的结合就是一个明显的例证。一方面，分形理论推动了雷达信号处理朝着新的方向发展，即出现了新的特征以及新的方法推动雷达目标检测方法向更低的信杂比要求和更高的发现概率方向不断迈进；另一方面，这些方法在大量实测数据上的应用也推动了分形理论的发展，雷达信号处理领域为分形理论的运用提供了“肥沃的土壤”。

本书立足于分形及其相关理论，重点阐述分形及其相关理论在雷达信号处理领域的发展和最新运用，其中包括作者在雷达信号处理领域的一些研究成果。我们编著本书的目的，是奉献给读者一本既有深刻的理论背景，又有较强的应用性的分形理论与雷达信号处理学科相结合的专著。本书在撰写过程中所采用的数据均来自于雷达对物理海面照射的回波，当电磁波照射海面等大面积的非规则散射体时，反射的回波在形式上具有杂乱时序特性，一般称为海杂波，海杂波受到照射海平面的几何形状和电磁特性等多种因素的影响，其中隐含了海洋的多种信息，如海浪高度与速度、海水温度、含盐度、海水介电系数等，这些包含在海杂波中的重要内涵是海洋监视、海洋导航和海洋遥感等研究的主要信息源，因此海杂波的研究是海洋监视等课题研究的基础；同时，由于海杂波具有非常强的时间与空间属性，对比的研究是对海雷达信号处理不可避免而又复杂的步骤，具有强烈的实用需求。

全书从总体上分为三部分：

第一部分为研究现状和基础理论部分，包括第 1~3 章。第 1 章总结了混沌分形理论在目标检测领域的研究现状；第 2 章主要介绍了掌握分形理论所必需的基础数学知识，分形的一些基本概念与数学特征；第 3 章主要介绍了雷达目标自动检测的基本原理和几种常用的恒虚警检测器。

第二部分为本书的主体部分，包括第 4~8 章。

第 4 章介绍了一维分形海面模型，从理论上证明了回波信号具有与海面相同的分形维数。将各种简单分形特征引入到雷达微弱目标检测中来，如单一分形维数、分形相关系数、模糊分形参数、扩展分形特征、高阶分形特征以及分形模型拟合误差和分维尺度变化量，给出了相应的检测方法。每种方法均采用实测海杂波数据验证，并以已有的传统检测方法作为参照，

分析比较了本章中各种雷达目标检测方法的检测性能。

第5章将多重分形理论引入到雷达目标检测中,改进了海杂波无标度区间客观自动确定方法,并将多重分形谱与BP神经网络相结合进行目标检测。另外,本章进一步将多重分形理论引入到扫描模式海杂波中的目标检测中,给出了扫描模式下分形维数的计算方法,并对多重分形参数估计方法进行了相应的约束,得到扫描模式海杂波的局部多重分形分析方法,解决了扫描模式下海杂波多重分形参数估计采样点数无法满足的难题。

第6章在第5章的基础上进一步考虑计盒维数计算过程中盒子内两点的空间相关特性,得到了多重分形关联理论。本章介绍了多重分形关联理论的基本概念及其参数估计方法,给出多重分形关联谱的计算方法,利用杂波与目标的多重分形关联谱的差异,并与隶属度函数和支持向量机相结合进行目标检测。虽然采用多重分形关联可以得到比采用单一分形、多重分形更好的检测结果,但随着考虑因素的增多,计算量也大幅上升,所需的确知性采样点数也大幅上升,进而实时性下降了,这就限制了其在实时雷达目标检测中的应用。

第7章将分形自仿射理论应用于雷达目标检测中。自仿射与自相似不同,它需要在不同方向上用不同放大倍数放大后才和整体等同,也就是说它的条件比自相似更宽泛了,在某种意义上说是一种推广(或说是扩展)。本章根据海杂波序列的非线性和分形结构,利用分形自仿射预测海杂波数据,根据目标和杂波的预测误差的差异,提出了一种基于分形自仿射预测误差的微弱目标检测方法(FSPED)。

第8章介绍了一些其他的分形检测方法,主要是关于几种不同范畴的特征参数结合运用进行目标检测的。

第三部分包括第9、10章。第9章主要介绍分形理论在其他信号处理领域中的运用;第10章对全书进行总结,并指出下一步的研究方向。

本书由烟台海军航空工程学院关键教授、刘宁波、黄勇博士、陈小龙、张建、李秀友执笔,并由关键教授对全书进行了统稿。本书作者一直从事雷达信号处理领域的研究工作,对雷达目标检测方向的研究所遇到的困难和问题有着切身的体会和经验教训。因此,本书在撰写过程中力求贴近实际,为广大学习者和使用者提供有益的帮助。

在本书出版之际,首先要感谢烟台海军航空工程学院何友教授对本书提出的许多宝贵意见和建议;还要感谢于仕财副教授,以及宋杰博士、王国庆博士、蔡复清博士、柴勇博士、张晓利、周伟、李宝等研究生,他们参与了本书的校对工作,并提出了宝贵意见。书中引用了一些作者的论著及其研究成果,我们在此也向他们表示深深的谢意。作者同样要感谢海军航空工程学院同仁和电子工业出版社,特别是电子工业出版社的王春宁编辑,正是由于他们的大力支持才保证了本著作按期高质量出版。

作者最后要感谢电子信息科技专著出版专项资金对本书出版的资助。

恳请广大读者对本书提出宝贵意见和建议。

联系人:刘宁波;E-mail:lnb198300@yahoo.com.cn;联系地址:山东烟台海军航空工程学院雷达与信息教研室(邮编264001)。

关 键 刘宁波 黄 勇
二〇一一年五月二十八日
于烟台海军航空工程学院

作者简历

吴键 1968 年 6 月出生，男，辽宁锦州人，1990 年和 1994 年于海军航空工程学院分别获学士和硕士学位，2000 年于清华大学信息与通信工程学科获博士学位，2001 年至 2002 年在清华大学电子科学与技术博士后流动站做博士后。现任海军航空工程学院雷达与信息教研室主任、教授、博士生导师；中国电子学会和中国图像图形学会青年工作委员会委员、中国青年科技工作者协会会员、中国电子学会雷达系统专业委员会委员、中国航空学会信息融合分会委员、全国学位与研究生教育评估专家、《雷达科学与技术》编委。感兴趣的研究方向为目标的检测、定位、跟踪与识别，在雷达目标检测恒虚警处理、多传感器分布式检测、侦察图像中目标检测跟踪与识别、海杂波中微弱目标检测与跟踪，以及信息融合在上述问题中的应用方面进行了持续深入的研究。发表论文 130 余篇，被三大检索收录 70 余篇。先后获国家科技进步二等奖 1 项；军队科技进步一等奖 2 项、二等奖 1 项；国家发明专利 3 项；2002 年获“全国优秀博士学位论文”奖。曾被评为全军优秀研究生、海军十杰青年，荣立二等功 2 次、三等功 1 次。“新世纪百千万人才工程”国家级人选，入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”、“军队高层次科技创新人才工程”和“海军高科技人才工程”，享受国务院政府特殊津贴和军队优秀专业技术人才岗位津贴。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 传统目标检测方法的不足	(1)
1.2 混沌理论在目标检测中的应用	(3)
1.3 分形理论在目标检测中的应用	(6)
1.4 本书内容安排	(10)
参考文献	(11)
第 2 章 分形理论基础	(23)
2.1 数学背景	(23)
2.2 自相似与自仿射	(27)
2.3 标度不变性	(29)
2.4 Hausdorff 测度与维数	(29)
2.5 计盒维数	(31)
2.6 小结	(35)
参考文献	(35)
第 3 章 雷达目标自动检测理论基础	(37)
3.1 引言	(37)
3.2 固定门限检测	(37)
3.2.1 检测过程	(37)
3.2.2 奈曼-皮尔逊准则	(40)
3.2.3 雷达信号的门限检测	(42)
3.3 CFAR 检测器	(46)
3.3.1 基本模型	(46)
3.3.2 CA-CFAR 检测器	(48)
3.3.3 非参量 CFAR 检测器	(50)
3.4 小结	(50)
参考文献	(50)
第 4 章 单一分形特性与目标检测	(53)
4.1 分形海面的电磁散射信号特性	(53)
4.1.1 一维分形海面模型	(53)
4.1.2 散射系数估计	(56)
4.1.3 理论分析	(57)
4.1.4 仿真分析	(64)
4.2 分形判定与无标度区间	(68)
4.3 分形参数估计与分析	(70)
4.4 分形维数值的影响因素	(73)

4.5	利用单一分形维数的目标检测方法	(81)
4.6	基于分形相关系数的目标检测方法	(85)
4.7	海杂波的模糊分形特性与目标检测	(88)
4.7.1	海杂波的模糊分形分析	(88)
4.7.2	基于 LGF 的海杂波中微弱目标检测	(90)
4.8	基于扩展分形特征的目标检测方法	(95)
4.8.1	扩展分形特征	(95)
4.8.2	基于 Bayes 分类的目标检测方法	(96)
4.8.3	试验结果分析	(97)
4.9	基于组合分形参量的模糊目标检测方法	(100)
4.9.1	分形模型拟合误差与分维尺度变化量	(100)
4.9.2	组合分形参量下的模糊检测与性能分析	(101)
4.10	基于高阶分形参数的目标检测方法	(103)
4.10.1	隙缝的概念与计算方法	(103)
4.10.2	杂波与目标信号的隙缝特征	(104)
4.10.3	基于累积缝隙值尺度变化率的目标检测方法	(105)
4.11	小结	(106)
	参考文献	(107)
第 5 章	多重分形特性与目标检测	(110)
5.1	多重分形的基本理论	(110)
5.1.1	多重分形的基本概念	(110)
5.1.2	多重分形的描述参数	(110)
5.2	无标度区间的自动确定	(113)
5.2.1	相空间重构	(113)
5.2.2	无标度区间自动选取	(113)
5.2.3	实测数据验证与分析	(115)
5.3	海杂波的多重分形判定	(117)
5.3.1	海杂波的幅度分布与时间相关特性	(117)
5.3.2	海杂波的随机乘法模型	(119)
5.3.3	多重分形判定	(120)
5.3.4	基于结构函数的多重分形分析	(122)
5.4	海杂波的多重分形特征与分析	(129)
5.4.1	广义分形维数	(129)
5.4.2	多重分形谱	(133)
5.5	基于多重分形谱和 BP 神经网络的检测方法	(134)
5.6	雷达扫描模式下的分形维数及多重分形特征	(136)
5.6.1	扫描模式海杂波的分形维数	(137)
5.6.2	扫描模式海杂波的局部广义分形维数与局部多重分形谱	(137)
5.6.3	雷达扫描模式下目标的模糊检测方法和性能分析	(139)
5.7	小结	(143)

参考文献	(144)
第 6 章 多重分形关联特性与目标检测	(146)
6.1 多重分形关联理论基础与参数估计	(146)
6.2 多重分形关联特性分析	(149)
6.2.1 多重分形关联谱估计	(149)
6.2.2 多重分形关联谱分析	(153)
6.3 海杂波中微弱目标的多重分形关联检测方法	(155)
6.3.1 隶属度分析	(155)
6.3.2 支持向量机二元分类	(155)
6.4 海杂波中微弱目标的多重分形关联检测性能分析	(157)
6.5 小结	(161)
参考文献	(161)
第 7 章 基于分形自仿射的目标检测	(164)
7.1 分形自仿射理论基础与表示	(164)
7.1.1 分形自仿射理论基础	(164)
7.1.2 分形自仿射的表示	(165)
7.2 分形自仿射信号的预测	(166)
7.2.1 收缩因子的 AR 过程	(166)
7.2.2 子区间边界值的最小均方估计	(166)
7.3 基于分形自仿射的预测结果	(167)
7.4 基于预测误差的目标检测方法 with 性能分析	(168)
7.5 小结	(170)
参考文献	(170)
第 8 章 其他目标检测方法	(172)
8.1 基于 FB-VSLMS 算法的目标检测方法	(172)
8.1.1 FB-LMS 算法	(172)
8.1.2 目标检测模型	(175)
8.1.3 目标检测性能分析	(176)
8.2 基于 VFDT 的目标检测方法	(182)
8.2.1 方差分形维	(183)
8.2.2 方差分形维轨迹	(183)
8.2.3 海杂波的 VFDT	(184)
8.2.4 海杂波中目标的 VFDT 检测方法	(187)
8.2.5 实测数据的 VFDT 模糊检测	(192)
8.3 基于 EMD 和盒维数的固定微弱目标检测	(195)
8.3.1 Hilbert-Huang 变换与海杂波特性分析	(195)
8.3.2 盒维数与微弱目标检测方法	(199)
8.3.3 仿真分析	(200)
8.4 分数阶 Fourier 变换域海杂波的分形特性与目标检测	(202)
8.4.1 分数阶 Fourier 变换	(203)

8.4.2	FRFT 域海杂波分形特性分析	(204)
8.4.3	基于 FRFT 域分形维数差异的动目标检测	(211)
8.4.4	FRFT 域海杂波中动目标的分形联合检测	(212)
	参考文献	(217)
第 9 章	分形理论在其他信号处理领域中的应用	(220)
9.1	分形在图像处理中的应用	(221)
9.1.1	分形与小波结合在图像处理中的应用	(221)
9.1.2	分形在图像压缩中的应用	(224)
9.2	分形理论在语音信号处理中的应用	(226)
9.3	分形在机械检测与监测中的应用	(228)
9.4	小结	(229)
	参考文献	(230)
第 10 章	总结与展望	(232)
10.1	本书总结	(232)
10.2	下一步研究方向	(234)
附录 A		(235)
附录 B		(237)
附录 C		(239)
附录 D		(242)
附录 E		(244)

第1章 绪 论

复杂背景下的目标检测在军事目标跟踪、战场环境监视、远程战略预警、遥感图像处理、空间目标研究等方面有着大量的应用。半个多世纪以来，国内外众多学者和研究人员对复杂背景中的目标检测进行了深入的研究，发展了许多新技术，使得复杂背景中的目标检测技术发展到了一个新的阶段。但是，随着应用需求的提高，尤其是特殊情况下，如远距离、小目标、有遮盖、实时处理等，现有的技术和方法还有很多不足之处。因此，引入新理论，发展新的技术和方法，成为目标检测领域研究重要的工作之一^[1~8]。

利用目标的电磁、声光散射等特性发现目标是进行目标检测的基本机理^{[1][2]}，而目标存在或隐蔽于周围环境之中，环境的散射对目标信号检测产生的干扰称为杂波，而目标检测所面临的主要困难就是来自于各种环境杂波的干扰。对杂波特性的深入研究有助于目标检测方法的选取，从而保证乃至提高传感器的整体性能，这是实际目标检测应用中急需解决的问题。几十年以来，经过各个领域诸多研究人员的共同努力，已经取得了许多有意义的结果^{[1~6][9]}，而近年来，随着混沌、分形理论以及其他非线性理论在电子信息领域的发展，又为环境杂波分析与其中的目标检测提供了新思路。

1.1 传统目标检测方法的不足

一般情况下，噪声都是作为随机信号看待，而由于杂波的似噪声性，一般都将传统杂波条件下的目标检测问题看成是统计检验理论问题^{[1~3][10]}，通常做法是将地面、海面、水下等环境杂波建模为各种各样的统计分布，然后作统计假设检验。此时的目标信号检测问题即为一个二元假设检验问题，经典二元信号假设检测一般采用基于似然比的假设检验的方法，如图 1.1 所示。在计算似然比函数时，传统目标检测方法根据情形不同对目标信号、杂波与噪声作不同假设，从而形成多种不同的最佳检测系统，如各种相关检测器、匹配滤波器等。图 1.1 中判决门限主要采用贝叶斯、极小 / 极大、尼曼-皮尔逊等基本准则进行选取。综上所述可知，传统的目标检测方法一般是对检测信号的时域或者频域幅度进行建模与处理，因而可以将其归为能量检测器的范畴。因此，其检测性能与信杂（噪）比高低有很大关系，而在信杂比较低时，能量检测器通常难以发挥出良好的检测性能。下面以海杂波中的雷达目标检测为例，进行概述性总结并说明经典目标检测方法存在的问题。

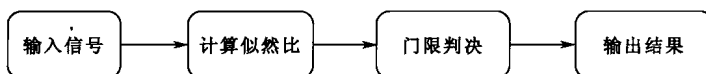


图 1.1 经典目标检测流程图

海杂波的研究已经走过了半个多世纪的历程，许多研究者从不同角度对海杂波的研究都付出了诸多努力，对其的认识也经历了从简单到复杂，从平稳到非平稳，从线性到非线性，从不相关到相关再到部分相关，从随机过程到混沌、分形，从幅度拟合到从物理层面解释

等^{[11~14][18~21]}几个主要的发展阶段。

由于波动幅度不一的海浪以及它们呈现出来的几乎无限的反射角度,海杂波通常表现出非高斯特性,尤其在高海情、高分辨率雷达的情况下,非高斯特性尤为明显,因此,海杂波的准确建模与目标检测比较困难。迄今为止,海杂波中的目标检测方法大体上分为两大类,即基于统计理论目标检测方法^[11~17]和基于混沌、分形理论的目标检测方法^[18~21]。

在经典的海杂波中雷达目标检测理论是建立在认为海杂波是随机过程的基础之上的,海杂波的统计模型研究时间最长、发展最成熟,同时又是最基本的一种海杂波模型。海杂波的产生通常依赖于诸多因素,包括雷达的工作状态(入射角、发射频率、极化、分辨率等),以及背景状况(如海况、风速、风向等),因此把海杂波当做一种随机过程仅是从时间序列层面分析其统计特性,很少考虑各个因素之间的相互作用,也没有揭示出海杂波产生的物理机制。

基于统计理论的海杂波建模研究主要集中在海杂波的幅度分布上,在早期的低分辨率雷达中杂波模型是高斯型的,认为杂波同相(I)和正交(Q)两路分量分别服从高斯分布,海杂波幅度分布服从瑞利分布。随着雷达分辨率的提高并工作在小擦地角下时,海杂波幅度分布明显偏离高斯模型,有较长的拖尾,此时高斯杂波模型已经不适合了,基于此模型的目标检测性能将急剧下降,因此非高斯杂波幅度统计模型相继出现。最早采用的非高斯模型是对数正态分布和污染正态分布,1970年由 Trunk 和 George^[22]提出。1976年, Schileher^[23]研究了海杂波幅度韦布尔(Weibull)分布情况的目标检测;同年, Jakeman 和 Pusey^[24]中第一次将 K 分布模型用于海杂波描述;1980年,日本的 Sekine^[25]等人分析 L 波段雷达实测海杂波数据,认为其幅度服从对数韦布尔分布(Log-Weibull);此外,莱斯分布、Rician 分布也被用来描述海杂波的幅度分布^{[26][27]}。

仅仅从海杂波的幅度分布上描述海杂波对海杂波包含的信息利用得太少,因此出现了同时兼顾雷达脉冲间的时空相关特性与幅度统计特性的海杂波模型。1981年, Ward^[28]用 K 分布模型描述高分辨率海杂波的复合模型。海杂波复合模型包含了杂波间的相关信息,揭示了 K 分布模型所蕴含的物理意义。从此, K 分布模型成为一种主要的描述海杂波分布的统计模型^[29~31]。在海杂波复合模型的基础上,进一步考虑地杂波、云雨回波及接收机的热噪声的影响,即出现了改进的混合模型。1987年, Watts^[32]研究了热噪声影响下的海杂波,并指出可以修正 K 分布的形状参数 ν ,从而考虑接收机噪声对杂波模型的影响。1994年, Anastassopoulos 和 Lampropoulos^[33]采用 Watts 近似法在雷达杂波模型中考虑了热噪声的影响。1995年, Farina^[34]等研究了混合杂波,并将修正的杂波模型应用于目标检测,利用似然比得到了最佳检测策略。

随着对海杂波的了解越来越深入,另外一些新的海杂波统计模型也相继被提出来,包括广义复合概率密度函数(GC-PDF)^{[35][36]}、高斯混合模型^{[37][38]}、 α 稳定分布模型^{[39][40]},调制成分不为 Γ 分布的复合高斯模型^[41~43],基于最大似然估计的复合高斯模型^[44], KK 分布模型^[45]等。这些模型适用于描述不同体制的雷达和不同环境条件下的海杂波,基于这些模型的目标检测技术也得到了相应的发展,这进一步充实了海杂波中目标统计检测理论体系。

随着基于统计理论的目标检测方法研究的不断向复杂化发展^{[46][47]},新的统计模型更能贴近实际,但都是针对特定背景或者特定环境的,不能很好地反映物理海面的非线性动力学特征,而且所提出的越来越复杂的检测方法带来的是实时性的急剧降低或者缺乏可实现性。不仅仅在雷达目标检测中存在这些问题,在声纳、红外和 SAR 图像、声光等目标检测中也存在类似的问题。

综上所述,经典的目标检测方法在日益复杂的目标检测环境和日益提高的现代目标检测要求下,越来越显得捉襟见肘,主要表现在如下两方面:

1) 难以适应现代多样化的目标检测模型

目标检测研究发展至今,待检测目标与目标所处的环境都已经相当复杂,目标模型和杂波模型均呈多样化发展趋势,尤其是杂波分布模型,在现代目标检测的复杂情况中往往不成立或不完全成立,这就使经典目标检测方法由于模型失配而不能取得预期的检测结果。

2) 对目标检测环境的时变性、非平稳性考虑不足

目标检测所面临的是种类繁多的杂波与干扰,由它们构成的环境往往是非线性的、时变的,尤其随着传感器自身的发展,如新体制的采用、分辨率的提升等使回波信号变得非平稳、非高斯了。这样经典的目标检测所作的独立、线性、平稳、高斯背景等假设不成立或者不完全成立了,在这种情况下,原来所设计的最佳目标检测策略的性能必然会下降。

1.2 混沌理论在目标检测中的应用

1963年,美国气象学家 Lornex 首次提出混沌系统的概念。混沌是介于确定论与概率论之间的过程,描述了某种不规则性,而这种不规则性是确定性系统内部非线性相互作用的结果,而且混沌系统都表现出对初始条件的敏感依赖性。简而言之,混沌是由确定性非线性系统产生的对初始值敏感的复杂过程。混沌运动是在系统非线性条件下发生的,确定一个系统是否存在混沌,可以从以下三方面进行:①观察信号随时间变化的相轨迹图或波形图;②分析并计算系统是否具有收敛的分数吸引子维数,若存在则意味着系统存在混沌;③计算 Lyapunov 指数,它刻画动力系统对初值的敏感程度,正的 Lyapunov 指数则意味着系统存在混沌。

由混沌概念可知,即使是相当小数目自由度也可导致极其不规则的“确定性混沌”,而且混沌时间序列及其相空间折叠与奇怪吸引子似乎显示出比随机模型更能深刻地描述自然界中的不规则行为,在杂波或噪声中则表现为混沌模型可以比随机模型从实验数据中提取出更多有用信息。目前混沌理论在各个领域都得到了广泛的应用,如海面目标检测、水下目标检测、图像(红外图像、SAR 图像等)中的目标检测以及其他微弱周期信号或瞬态信号检测等。基于混沌理论的(目标)信号检测分为两个大类:一类是混沌作为杂波或者噪声出现,如在混沌海杂波背景中的微弱目标检测问题,这时信号处理的目的是抑制混沌信号;另一类是混沌信号是我们所要期望得到的信号,如目标 RCS 序列产生的混沌等。

在对海雷达目标检测方面,Leung 和 Haykin^[48]于 1990 年首次用混沌模型研究了海杂波的奇怪吸引子的存在性,认为存在一个低维的动力学吸引子控制着海杂波的行为,并采用 G-P (Grassberger-Procaccia)算法计算出海杂波相关维数值在 6~9 之间。1992 年,He Nan 和 Haykin 又计算得出海杂波的最大 Lyapunov 指数为一正值^[49],从而进一步说明了海杂波的混沌特性。另外,Palmer 等人^[50]对 VV 极化海杂波数据和海面水平风速序列进行分析与研究,发现其确实存在一个低维的混沌吸引子。1993 年,Leung^{[51][52]}等人又进一步研究了海杂波的相关维数、Lyapunov 指数、Lyapunov 谱^[53],并构造了神经网络预测器尝试将混沌理论应用于雷达目标检测^[54]。1995 年,Haykin 等人^[55]又继续研究了混沌信号的检测问题,认为海杂波具有有限的关联维数,其最大 Lyapunov 指数为正,并且认为海杂波是短时可预测的。这些结论在其学生 Li Xiaobo 的博士学位论文^[56]中进行了较为详细的阐述。1996 年,Abarbanel^[57]出版专著对

混沌数据分析的理论与方法进行了全面而详尽的阐述。此后,海杂波混沌理论得到了不断的充实与发展。例如,Xie 等人对海杂波单一混沌模型进行了扩展,提出一种多模型的海杂波模型及预测方案^[58]。董华春等人^[59]研究了高频雷达回波特性,发现其具有混沌特性。姜斌等人^{[60][61]}对 S 波段海杂波进行分析,计算其分形维数与 Lyapunov 指数,发现 S 波段海杂波具有混沌分形特性。马晓岩等人^[62]提出运用旋转超盒分类取代基于记忆库非线性预测中的 NP-CFAR 方法进行目标检测,并探讨了运用盒维数特征提取进行预处理以节省运算开销的问题。随着海杂波混沌模型研究的深入,王福友等人^[63]发现虽然混沌对海杂波建模提供了一个很好的理论支撑,但它并没有开发出包含在海面回波里的所有信息,原因是混沌是一个严格时间意义的理论,其假设空间结构是不动的,而对于海杂波而言空间效应是不能忽略的,因为回波信号来自于一个移动的海面,海面的电磁波散射是一个时空现象。因此引入时空混沌^{[64][65]}的理论,提出将海杂波建模由原来的时域拓展到时空域建模,采用径向基耦合映像格子算法来重构海杂波的时空混沌动态特性,进而对嵌入在海杂波的小目标进行检测。行鸿彦等人^[66]提出一种改进的提取混沌背景中微弱信号的最小二乘支持向量机(LS-SVM)的方法,通过将信号以 db3 小波逐层分解,进行 LS-SVM 预测,再进行重构,同时通过增加对偶约束项、改进核函数的方法,建立改进的混沌序列一步预测模型,从预测误差中检测淹没在混沌背景中的微弱目标信号(包括周期和瞬态信号)。随着低空、超低空突袭兵器技术的不断发展,防空导弹引信面临着越来越强的地海杂波的干扰。2009 年薛永先等人^[67]以相空间重构理论为基础,提出了基于神经网络的混沌时间序列建模与预测方法,探讨了相空间重构技术在引信信号检测中的应用。另外,其他学者还研究了利用神经网络、支持向量机或自适应滤波器等的海杂波预测、抑制与目标检测技术^[68~72]。

2002 年, Haykin 通过对大量实测海杂波数据的研究对之前得到的结论提出了质疑,即海杂波并非由确定性的混沌现象产生的,但并不排除是随机混沌或多个确定性混沌及随机过程混合而成的非线性动力系统^{[16][74]}。Gao^{[75][76]}等人采用一种更为严格的混沌判定准则对一个持续两分钟左右的海杂波数据进行检验,结果表明并不是混沌的,而是多重分形的。2005 年, J. Hu 等人^[77]又分析了混沌杂波中 0-1 检测的可靠性问题,又一次从侧面证实了杂波混沌模型存在的争议性。目前,仍有研究在运用混沌理论进行预测、微弱目标检测,但事实上 Davies、Cowper 和 McDonald 等^[78~81]许多人都对海杂波是否是混沌动力系统提出了质疑,目前这一问题没有十分确切的答案,这一领域仍需要更深入的研究。

在水下目标检测方面,由水动力学和水声学原理可知,水声信号是一种复杂且不规则的信号,传统的方法是认为采集到的声纳信号是随机信号,基于随机系统理论和统计检测理论的信号处理方法一直是这一领域重要的理论工具,但水声信号并非纯粹的随机信号,而且传统的方法也无法利用舰船辐射噪声的细微结构和精细特征。近年来研究发现,水声信号具有混沌分形的特性^{[55][56][82~85]},利用混沌理论,在某些方面更能客观地反映水声信号的非线性本质。目前的应用中都是利用背景噪声的混沌特点,建立混沌检测的预测模型,从接收信号中减去预测的混沌信号,将淹没在混沌背景中的瞬态信号检测出来。混沌的前提是非线性,所以讨论一个回波序列是否具有非线性对进一步进行混沌特性分析很有意义。2001 年,侯平魁等人^[86]运用替代数据法,分析水下目标辐射噪声信号,得到了水下目标辐射噪声信号中存在非线性成分,且这种非线性不是由静态测量函数的非线性引起的,为采用非线性分析方法分析水下目标噪声信号提供了理论依据。在判定了水下目标辐射噪声为混沌的基础上,李亚安等人^{[87][88]}采用混沌模型进行局部短时预测或者采用 Lyapunov 指数上的差异来检测噪声背

景中的小目标,取得了较好的效果。2006年,侯楚林等人^[89]尝试将互相关理论与混沌理论结合,构成一个新的微弱正弦信号检测系统,通过混沌系统相轨迹变化来检测目标信号,实现了强噪声背景下弱信号的检测。2008年,利用混沌理论检测水下微弱信号在DSP上得以实现,将混沌理论的应用向实际推进了一步。相空间重构是混沌分析过程中的重要环节,会直接影响重构空间上的混沌分析的结果,也直接影响水下目标辐射信号分析效果。为检验不同重构方法处理水下目标辐射声信号的效果,王佳等人^[90]通过分析比较认为采用相关&G_P方法、奇异值方法可以得到较好的重构效果。2009年,周胜等人^[91]针对进出港口的舰船噪声低,难以检测的问题,采用了混沌振子检测理论,将其应用在舰船弱信号检测中,采用了参数抑制法,同时设计了微弱信号的混沌检测系统。

在图像中的目标检测方面,1985年,Wolf等首先提出了从时间序列估计Lyapunov指数的轨道跟踪法,其直接基于相轨线、相平面和相体积等的长期演化来估计Lyapunov指数^[92]。1993年,Rosenstein等基于轨道跟踪法思想,对Wolf方法进行了改进,提出了计算最大Lyapunov指数的小数据量法^[93],该方法充分利用了所有能够利用的数据,获得了比较高的精度。小数据量法运算速度快,易于实现,对嵌入维、时延以及数据量的规模均表现出较强的鲁棒性。杨绍清等人对Wolf方法进行了改进^[94],提出了一套简单易行的相空间重构方法,并针对轨道跟踪法计算量大、精度不高等问题提出了一种新的计算最大Lyapunov指数的方法,算法的计算量小,所需存储空间小,收敛速度较快,能获得较高的精度。2002年,杨绍清等人又对几种相空间重构方法进行了分析对比,给出了两种实用的重构方法^[95]。依据改进的Wolf方法,何四华等人研究二维图像信号中海面等自然背景的混沌特征^[96],利用图像区域最大灰度距离Lyapunov指数的变化检测淹没在混沌背景信号中的目标信号。2000年,张家树等人^[97]基于Volterra级数展开式和混沌序列高阶奇异谱特征,提出了一种高阶非线性傅里叶红外(HONFIR)滤波预测模型用于混沌时间序列的自适应预测,这种HONFIR自适应滤波器能够有效地预测一些超混沌序列且具有一定的抗噪能力,其自适应预测的性能与其输入维数的关系不受Takens嵌入定理的约束。赵翠芳等人在分析了云背景红外图像空间分布上存在混沌现象的基础上,将Volterra级数引入到云背景红外图像的混沌预测中^[98],取得了较好的云背景杂波抑制效果。此外,2008年,张亚飞等人^[99]利用海杂波的混沌预测误差对海面SAR图像中的分布目标进行CFAR检测,然后用形态学变换来改善检测效果,此方法可对任意类型的海面分布目标进行检测。鉴于混合遗传算法在解决组合最优化问题所表现出的极佳求解性能,吴一全等人^[100]在此基础上再引入混沌模型用于预测,解决了红外图像中的小目标检测问题,与仅采用遗传算法相比,提高了检测概率,提升了性能。

在采用混沌理论分析目标RCS序列并进行检测方面,研究对象主要为空间目标。随着开发太空步伐的加快,人类航天活动越来越频繁,由此产生的空间碎片日益增多,导致了空间环境逐步恶化,这对人类航天活动构成了严重的威胁,使卫星的发射和监测面临越来越严峻的挑战。为了确保航天活动的安全可靠,保卫本国太空安全,促进人类航天事业的发展,如何有效地对空间目标(卫星、碎片等)进行监视、识别和编目将具有重要意义。由于保密的原因,实测数据较难获得,基于RCS的空间目标研究文献较少,主要是国内的文献。2008年,曹占辉等人采用混沌理论对空间目标RCS序列特性进行了研究,采用重整标度分析法(R/S)和最大Lyapunov指数对RCS序列进行分析^{[101][102]},结果均表明与旋转目标相比,三轴稳定目标RCS序列较复杂和不规则,同时研究中发现,Kolmogorov熵可作为空间目标识别的有效特征^[103]。

此外,混沌理论在微弱周期信号或瞬态信号检测中也有较为广泛的应用。对于一个非线性系统,当其敏感参数在一定范围内摄动时,将引起其周期解发生本质变化^[104]。将混沌理论用于微弱信号检测主要是应用了其在一定条件下对微弱信号具有敏感性同时对噪声具有免疫力的特性。1992年,Birx初次尝试了采用混沌振子检测微弱信号^[105],但由于当时有关基础理论尚不完善,因而缺乏深入理论研究。近年来,基于Duffing振子的微弱周期信号检测方法得到了深入研究^[106~111]。最初是利用对Duffing-Holmes方程的强迫激励项进行微扰来实现检测,信噪比工作门限可以达到常规方法的下限,而对参数进行微扰等形式也是有效的途径,如修正Duffing-Holmes方程系统和双耦合Duffing振子系统,可以进一步降低信噪比工作下限。这些混沌系统检测方法的基本原理都是通过非自治混沌系统的参数共振微扰实现混沌抑制,所采用的模型也以Duffing-Holmes方程及其修正形式为主。这种系统在强噪声影响下的分叉特性非常复杂且临界参数无法直接计算^[112],容易出现类似混沌状态的假象,造成错误判决,因而只有噪声功率很低时才能获得较好的检测效果。以上这些问题是由Duffing系统的固有特性决定的,仅通过对方程进行修正难以完全解决。而以Lorenz系统为代表的自治混沌系统较好地解决了这些问题。Soong和Choe等人^{[113][114]}分别对Lorenz系统进行了研究,为进一步开发利用Lorenz系统进行微弱信号检测提供了良好的理论基础。王德石等人^[115]利用Lorenz系统的参数非共振激励混沌抑制原理,实现强噪声背景下微弱周期脉冲信号的检测,检测方法简便易行,适于在目标探测领域推广应用。徐艳春等人^[116]采用高阶Rossler混沌振子及比例微分控制方法相结合,将含有待检信号的Rossler混沌振子从混沌态控制到周期态,然后利用谱分析的方法检测待检信号的频率。该方法突破了以往Duffing方程检测信号频率需要使用较多振子的局限,较大提高了检测精度和检测稳定性。

综合以上几个方面的应用,混沌理论无论是对时间序列还是对图像进行处理,最主要的是运用混沌理论进行预测,然后对预测误差进行后续处理或者与其他理论结合来进行目标检测。其次是运用混沌系统对某些参数的敏感性来检测淹没于噪声或杂波中的微弱周期或瞬态信号。就目前的研究状况,可以发现混沌理论已经初步实现了与神经网络、支持向量机等结合运用,混沌理论与统计理论、随机理论等的结合也崭露头角。但要很好地解决目标检测中的预测问题,仅仅靠混沌理论是非常艰难的,结合混沌理论与其他理论方法的优点加以运用是一个比较可行的方法。因此,尽管目前不少研究成果距离在实际目标检测中运用还有一定差距,但它们在很大程度上表明了混沌理论在目标(信号)检测中良好的应用前景。

1.3 分形理论在目标检测中的应用

分形理论是在20世纪70年代,Mandelbrot^[25]为了表征复杂图形和复杂过程引入的,是非线性科学研究中的一个十分活跃的分支。分形理论研究的对象是自然界中的不光滑和不规则的几何体,它深刻揭示了实际系统与随机信号中广泛存在的自相似性和标度不变性。分形理论的提出拓宽了人们的视野,并且已经在自然科学的多个领域获得广泛的应用,尤其是在物理学、地质学、生物学和信息科学等方面具有重要的应用价值和广阔的发展前景。

对于复杂背景下的目标检测问题,基于随机与统计理论的目标检测方法已经取得了很多非常有意义的成果。随着国防科学技术、民用探测技术的日益发展,检测系统面临的目标及所处环境越来越复杂,传统检测技术仍具有局限性。基于分形理论的目标检测方法就是在这种情况下迅速发展起来的,是针对复杂背景下人造目标进行自动检测较为适合和有效的方法

之一,并拉开了分形理论在雷达目标检测、图像中纹理分割与目标检测、红外目标检测中应用的序幕。其常用的理论基础包括迭代函数系统(IFS)理论、分形布朗随机场、单一分形、扩展分形、多重分形、多重分形关联、多分辨分析等。在分形理论应用中,人造目标一般表现为相对规则的几何单元,而自然背景则由极不规则的复杂环境构成,研究中通常利用人造目标与自然背景在几何构成上的差别,通过提取分形几何变化特征进行目标检测。

在导航、警戒、环境监测等雷达的目标检测方面,由于分形理论在处理非线性、非平稳信号方面所具备的固有优势,同时又由于物理海面本身所具有的非线性动力学特征,分形作为一种“空间上的混沌”在对海雷达杂波的建模与目标检测方面得到了很好的运用与发展。

海洋表面是一个复杂的动态粗糙面,它是在近似周期性的大尺度波浪上叠加着小尺度的波纹,变化极不规则,但同时又不是完全随机的,传统的方法不能很有效地描述海面,分形理论为海面建模提供了新的途径。分维散射的研究表明^[118]:散射表面的分维特性将携带到散射信号中去。因此,海面散射信号的分维特性反映了海面的分维结构,且与电磁波入射角有一定关系。研究发现,海面重力波长在大约0.1~100 m的范围内是似分形结构的,在此范围采用分形方法进行建模无疑很有优势。分形函数构造简单,对其加入时间因子,可以反映出海面高度起伏的动态变化。

分形理论的引入提供了新的海杂波描述思路,海杂波波形在不同尺度下表现出一定的相似性,可以用分形参量进行描述。1993年,T. Lo^[21]等人在分形理论的基础上提出了一种新的目标检测方法,即基于分形维数的目标检测方法。当海杂波中存在舰船等目标信号时,海面原本的分形程度降低了,分形特征的数值将发生明显变化,信杂比越高这种差别也越容易分辨,此种方法利用人造目标和自然背景之间的分形维数差异来检测出自然背景中的人造目标。由于分形模型能够很好地描述自然景物的形状和特点,以及这种方法的实现过程很简单,因此它能够很好地弥补经典统计目标检测方法的不足,成为一种通用性较强且计算简便的目标检测方法^[120],而且 Salmasi 等人^[121]利用同一组数据不同数据段的分形维数服从高斯分布的特点,针对高分辨率雷达设计了一个分形检测器,解决了利用分形维数进行检测难以实现 CFAR 的问题。1993年,Kaplan^[122]等人采用小波变换的方法计算信号的分形特征,提高了 Hurst 指数的计算精度,并且这一数学处理方法在后续取得了较好的应用与发展^[123~126]。紧接着,Kaplan^[127]等人又研究了分数布朗运动的扩展自相似特性,对简单的单一分形特征进行了推广,并在之后几年对其在分类与检测方面的应用进行了相应的研究^{[128][129]}。前面阶段对实测雷达回波信号进行分形分析时,绝大部分研究人员采用的是加拿大 IPIX 雷达实测数据,其观察目标为一静止目标,因此,其所涉及的分维差异都是在杂波与静止目标之间进行的。1995年,刘中、顾红等人^[130]分析了动目标多普勒信号回波的分维特性,发现不同动目标具有不同的分维数。1997年,Zhou^[131]等人采用自相似线性映射预测分形信号,并且将其应用于真实海杂波的预测中,对于海杂波中的目标检测又提供了一种思路。之后,杜干^[132]、谢维信^{[133][134]}等人分别研究了海杂波的其他分形特征,提出了基于分布函数方差和分形拟合误差的目标检测方法。2000年,杜干等人研究了海杂波的高阶分形特征^[135]与多重分形特征^[136],给出了多组海杂波数据的缝隙值变化规律与多重分形谱图形,并提出了海杂波中目标的模糊检测方法^[23]。2002年,Chang^[138]等人给出了一种快速的离散分数布朗运动的 Hurst 参数估计方法,将分形理论向实际应用又推进了一步。Xu^[139]基于起伏分析提出一种基于联合分形特性的海杂波中微弱目标检测方法,进一步充实了单一分形特征在目标检测中的应用。随着分形理论应用的进展,2002年 Gao^[75]等人分析了海杂波的幅度分布、时空相关等特性,并从理论上证明了