

合成孔径雷达微动干扰

王雪松 肖顺平 李永祯 著
王 伟 代大海 王 涛



科学出版社

合成孔径雷达微动干扰

王雪松 肖顺平 李永祯 著
王 伟 代大海 王 涛

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地论述了对合成孔径雷达(SAR)的微动干扰理论与技术。内容主要包括三部分:第一部分着重阐述雷达目标的微动调制效应,包括SAR观测几何模型与目标瞬时多普勒模型、典型运动目标的微多普勒模型、微动目标SAR成像特性等;第二部分是本书的重点,阐述对常规SAR、SAR-GMTI和InSAR等先进体制成像雷达的微动干扰方法;第三部分介绍SAR微动干扰效果的评估方法,主要包括基于人眼视觉特性的干扰效果评估方法、基于反馈机制的SAR微动干扰综合效果评估方法以及基于轨道SAR对抗实验的干扰效果评估实例。

本书可供从事雷达、电子对抗领域研究的研究生以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达微动干扰/王雪松等著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-046784-3

I. ①合… II. ①王… III. ①合成孔径雷达-雷达干扰 IV. ①TP958
②TN972

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第307957号

责任编辑:张艳芬 纪四稳 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:334 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种区别于红外和可见光的主动式微波成像传感器,能获得类似光学照片的目标图像,具备全天时、全天候、处理增益高、抗干扰能力强等特点,是战略侦察和战场侦察系统中的重要组成部分。随着科学技术的发展和军事需求的增长, SAR 在战略侦察、战场监视、攻击引导和打击效果评估等方面发挥着日益重要的作用。相应地,以扰乱和破坏 SAR 成像为目的的干扰技术成为当前电子对抗领域的研究热点和难点。现有 SAR 干扰技术已初具规模体系,但在应对先进体制 SAR 方面仍存在诸多不足,创新发展 SAR 干扰的理论与技术任务紧迫且意义重大。

本书反映了国防科学技术大学十年来在 SAR 电子对抗领域取得的一些研究进展,着重介绍团队在 SAR 电子对抗领域的最新研究成果,即 SAR 微动干扰理论与技术。内容涵盖微动目标 SAR 回波及成像特性、对常规 SAR 以及 SAR-GMTI(ground moving target indication)和 InSAR(interferometric SAR)等先进体制成像雷达的微动干扰理论和方法,在此基础上介绍针对微动干扰等新型干扰的评估方法。本书内容既有相对抽象的数学模型、详细的理论分析,也有充分的仿真实验以及外场实验,既注重 SAR 电子对抗领域的前沿思想和方法,也注重介绍 SAR 干扰系统研制中的工程实际问题。本书内容对广大从事 SAR 成像技术及电子对抗技术领域研究的硕士、博士研究生及工程技术人员均有参考价值,既可以为微动目标成像机理、微动目标特征提取与识别、微动干扰抑制等领域的研究人员提供理论和模型借鉴,也可作为 SAR 电子对抗领域研究人员的技术参考书籍。

全书共 6 章:第 1 章介绍对 SAR 干扰技术以及干扰效果评估方法的研究现状和最新进展情况;第 2 章介绍运动目标的成像雷达调制效应,主要包括 SAR 的观测几何模型与目标瞬时多普勒模型、典型运动目标的微多普勒模型、实际 SAR 系统中的参数近似以及典型运动目标的 SAR 图像特征;第 3 章介绍对 SAR 的微动干扰,主要包括对 SAR 微动干扰信号模型、基于微动调制的复合干扰、周期调制干扰、基于时频交叉乘积的 SAR 干扰信号快速生成方法;第 4 章介绍对 SAR-GMTI 的微动干扰,主要包括微动目标的 SAR-GMTI 成像特性、微动干扰的 SAR-GMTI 成像输出以及基于微动调制的 SAR-GMTI 复合干扰;第 5 章介绍对 InSAR 的微动干扰,主要包括常规 SAR 干扰的干涉相位和“斜坡”效应、旋转微动目标的 InSAR 成像特性、基于微动调制的 InSAR 干扰;第 6 章介绍 SAR 微动干

扰效果评估,主要包括基于人眼视觉特性的干扰效果评估方法、基于反馈机制的 SAR 微动干扰效果综合评估方法以及基于轨道 SAR 对抗实验的干扰效果评估实例。

本书第 1 章由王雪松、肖顺平执笔,第 2 章由王雪松、代大海执笔,第 3 章由李永祯、邢世其执笔,第 4 章由王伟、代大海执笔,第 5 章由王雪松、肖顺平、张静克执笔,第 6 章由王涛、庞礴执笔。特别感谢博士研究生吴晓芳、刘阳、刘庆富、杨伟宏、刘永才、刘业民和硕士研究生韩国强、韦超、孙豆、刘梦祥等为本书做出的贡献。

特别感谢电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室(CEMEE)对本书的资助。

本书是作者及其研究团队在 SAR 对抗领域的理论探索和应用实践成果总结,对 SAR 对抗理论发展及其系统的研制、实验、应用均有参考价值。由于新体制 SAR 对抗的新理论、新方法不断涌现,加之作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015 年 9 月于湖南长沙

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 SAR 干扰技术的研究现状	3
1.2.1 SAR 有源干扰技术的研究现状	4
1.2.2 SAR 无源干扰技术的研究现状	8
1.2.3 SAR 干扰效果评估方法的研究现状	8
1.3 近年 SAR 干扰技术的研究进展	10
参考文献	12
第 2 章 雷达目标的微动调制效应	17
2.1 SAR 的观测几何模型与目标瞬时多普勒模型	18
2.1.1 SAR 观测中的几何模型	18
2.1.2 SAR 观测中的瞬时多普勒模型	21
2.1.3 静止点目标的瞬时多普勒特性	23
2.1.4 动目标距离像特性分析	26
2.2 典型微运动目标的微多普勒模型	40
2.2.1 复合运动目标的瞬时多普勒模型	41
2.2.2 旋转运动目标的微多普勒模型	41
2.2.3 简谐振动运动目标的微多普勒模型	44
2.3 实际 SAR 系统中的参数近似	45
2.3.1 正侧视条件下的参数近似	46
2.3.2 斜侧视条件下的参数近似	55
2.3.3 结论及实测数据	63
2.4 典型运动目标的 SAR 图像特征	65
2.4.1 距离压缩成像图	66
2.4.2 R-D 成像图	67
2.4.3 外场实验验证	73
参考文献	74
第 3 章 对 SAR 的微动干扰	76
3.1 对 SAR 微动干扰的信号模型	76
3.1.1 微动干扰信号模型	77

3.1.2 微动干扰参数选择	78
3.1.3 微动干扰功率分析	79
3.1.4 仿真实验与结果分析	82
3.2 基于微动调制的复合干扰	83
3.2.1 距离向复杂移频干扰	84
3.2.2 方位向复杂多普勒调制干扰	94
3.3 周期调制干扰	102
3.3.1 周期调制干扰的数学模型	102
3.3.2 SAR 周期调制干扰	106
3.3.3 轨道 SAR 对抗实验与结果	109
3.4 基于时频交叉乘积的 SAR 干扰信号快速生成方法	114
3.4.1 时频交叉乘积调制干扰的数学模型	114
3.4.2 乘积调制干扰原理	117
3.4.3 仿真实验与结果分析	126
3.4.4 轨道 SAR 对抗实验及结果分析	131
参考文献	138
第 4 章 对 SAR-GMTI 的微动干扰	139
4.1 微动目标的 SAR-GMTI 成像特性	139
4.1.1 多孔径 SAR-GMTI 原理	139
4.1.2 DPCA 方式下微动目标的成像特性	141
4.1.3 ATI 方式下微动目标的成像特性	148
4.2 微动干扰的 SAR-GMTI 成像输出	151
4.2.1 无源微动干扰的 SAR-GMTI 成像输出	151
4.2.2 有源微动干扰的 SAR-GMTI 成像输出	158
4.2.3 SAR-GMTI 对无源微动干扰的对消效果	162
4.2.4 SAR-GMTI 对有源微动干扰的对消效果	166
4.3 基于微动调制的 SAR-GMTI 复合干扰	169
4.3.1 干扰机理和干扰信号形式	169
4.3.2 干扰效果分析	171
4.3.3 常规 SAR 的干扰效果仿真实验	177
4.3.4 SAR-GMTI 工作模式的干扰性能	179
参考文献	182
第 5 章 对 InSAR 的微动干扰	183
5.1 常规 SAR 干扰的干涉相位	183
5.1.1 双航过工作模式	183
5.1.2 单航过工作模式	187

5.1.3 仿真实验与结果分析	190
5.2 常规 SAR 干扰的“斜坡”效应	194
5.2.1 单天线干扰的相干质量图	194
5.2.2 单天线干扰的三维高程反演	196
5.2.3 仿真实验与结果分析	200
5.3 旋转微动目标的 InSAR 成像特性	206
5.3.1 旋转微动目标的三维几何模型	206
5.3.2 旋转微动目标的 SAR 成像结果	209
5.3.3 旋转微动目标的干涉相位	210
5.3.4 旋转微动目标 InSAR 成像的“栅栏”效应	213
5.3.5 仿真实验与结果分析	214
5.4 基于微动调制的 InSAR 干扰	220
5.4.1 InSAR 微动调制干扰方法	220
5.4.2 微动调制干扰的 InSAR 成像结果	221
5.4.3 InSAR 微动调制干扰效果分析	222
5.4.4 仿真实验与结果分析	224
参考文献	227
第 6 章 SAR 微动干扰效果评估	229
6.1 基于人眼视觉特性的干扰效果评估方法	230
6.1.1 常用的几类干扰效果客观评估方法	230
6.1.2 人眼视觉特性与图像的小波变换	233
6.1.3 基于人眼视觉特性的干扰效果评估	235
6.1.4 不同 SAR 干扰效果评估对比	239
6.1.5 基于人眼视觉效果干扰的干扰优化方法	245
6.2 基于反馈机制的 SAR 微动干扰效果综合评估方法	248
6.2.1 基于目标轮廓变化的欺骗度分析	248
6.2.2 基于图像质量指标的压制度分析	252
6.2.3 综合评价模型的建立	252
6.2.4 内场仿真实验	254
6.3 基于轨道 SAR 对抗实验的干扰效果评估实例	258
6.3.1 轨道 SAR 系统简介	258
6.3.2 实验数据分析与效果评估	259
参考文献	262
附录 符号表	264
索引	265

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

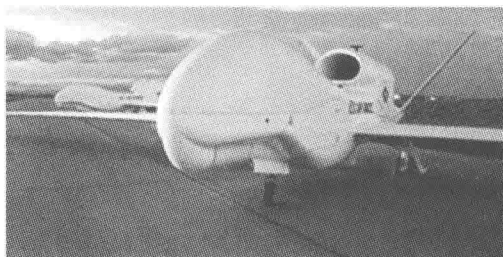
合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种先进的微波成像设备,能获得类似光学照片的目标图像,具备全天时、全天候、处理增益高、抗干扰能力强等特点,是战略情报侦察和战场侦察的重要手段。SAR 在近些年爆发的海湾战争、科索沃战争、阿富汗战争、伊拉克战争等高技术局部战争中发挥了重要作用,已日益成为信息战中获取重要情报的关键节点。随着 SAR 成像技术的发展,其军事应用呈现出“侦察打击一体化”“动静目标兼顾化”“平时战时结合化”等新特点、新趋势,不仅具有对静态目标高分辨成像侦察能力,而且具备地面运动目标指示(ground moving target indication, GMTI)能力以及利用干涉 SAR(interferometric SAR, InSAR)对目标实现精确的三维成像的能力。

目前,世界主要军事强国均大力发展以 SAR 为关键传感器的情报侦察、火力引导和“察打一体”系统,其中已发展的有代表性的情报侦察系统包括美国“长曲棍球”SAR 成像卫星、“全球鹰”无人机,日本 PALSAR 成像卫星,德国 TerraSAR 成像卫星,有代表性的“察打一体”系统包括美国的 F-22、F-35,中国台湾的 F-16,印度的“光辉”战斗机,以及“捕食者”系列无人机等。这些系统都具备多普勒波束锐化(Doppler beam sharpening, DBS)、条带 SAR、聚束 SAR 和 GMTI 成像能力。不同成像模式服务于不同作战需求,DBS 和条带 SAR 模式成像分辨率较低,一般用于大范围目标搜索,聚束 SAR 成像分辨率高,主要用于小范围感兴趣目标区域详查,GMTI 则用于捕获成像区域内运动目标。这些系统不仅能够全天时、全天候进行区域侦察,使得对方武器装备的部署、机动、日常训练面临极大的暴露风险,而且有人/无人机载“察打一体”系统还具备在复杂地形和恶劣气象条件下对战场地面目标实施快速、精确打击的能力,从而使得对方高价值军事目标的战时生存面临直接威胁。图 1.1 为典型机载火力引导以及“察打一体”系统。

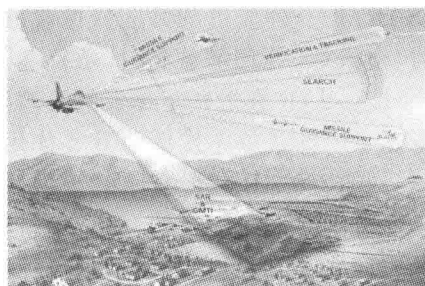
为了在信息战中占领主导和控制地位,各主要军事强国不断研究新的电子干扰技术和系统,以适应未来战场的需求。出于保密等原因,目前国外有关 SAR 电子对抗的公开文献较少。有限的相关文献所涉及的单位有英国国防部海军研究所、英国系统工程与评估有限公司、美国海军研究院、美国布法罗大学、澳大利亚阿德莱德大学、德国柏林技术大学及法国雷恩大学等。国内关于 SAR 对抗方面的



(a) 美国 E-8C“联合星”



(b) 美国“全球鹰”无人机



(c) 印度“光辉”战斗机



(d) 中国台湾“锐鸢”无人机



(e) 中国台湾 F-16



(f) 日本“心神”战斗机



(g) 美国 F-35 战斗机



(h) 美国 F-22 战斗机

图 1.1 典型机载火力引导以及“察打一体”系统

研究近 20 年来比较活跃,在此方向研究工作比较突出的单位包括中国电子科技集团公司第 14 研究所、第 29 研究所、第 38 研究所,国防科学技术大学,电子科技大学,北京航空航天大学,西安电子科技大学,南京航空航天大学,中国科学院电子学研究所及解放军电子工程学院,装备学院,第二炮兵工程大学等。尽管有诸多方面的限制,但是强烈的军事需求仍促使 SAR 对抗理论和技术不断发展和完善。

目前,国内外已有一些 SAR 对抗方面的学术专著,其对 SAR 电子对抗的基本概念和内涵、技术分类以及实验评估方法进行了介绍。本书结合国防科学技术大学近年来在 SAR 干扰领域取得的研究进展,重点讨论一种新的对 SAR 干扰的理论和方法,即微动干扰理论和方法,详细介绍微动干扰对常规 SAR 的干扰效果、SAR-GMTI 和 InSAR 的干扰模型及实现方法,在此基础上讨论对微动干扰的评估问题。

1.2 SAR 干扰技术的研究现状

对 SAR 进行干扰的目的是阻止敌方从 SAR 图像中检测、识别目标及获得有用信息。目前,对 SAR 干扰的研究主要集中在干扰样式、调制样式以及效果评估方面。由于同种干扰样式根据不同的分类原则可被划分到不同的类别当中,所以,很难做到严格地对各种干扰样式的类型进行区分。本节将按照图 1.2 的分类方法对 SAR 干扰技术进行简要介绍,其中大致地按照干扰的相参性对有源干扰进行分类并依次列出现有已公开报道的干扰样式。

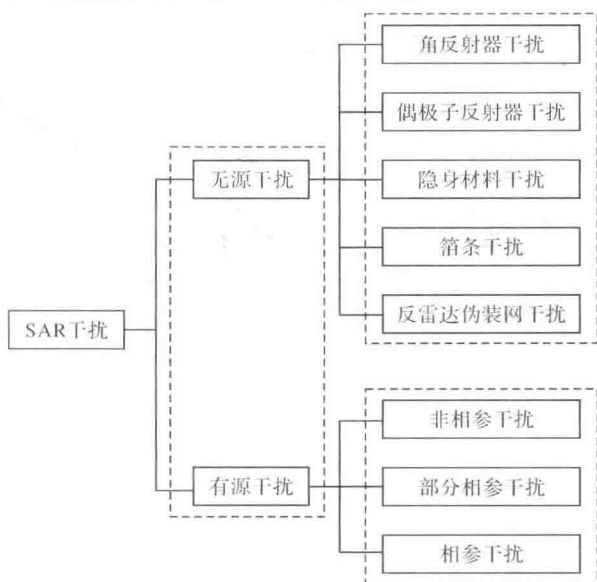


图 1.2 SAR 干扰方式简要分类

1.2.1 SAR 有源干扰技术的研究现状

1) 对 SAR 非相参干扰技术

非相参干扰是指干扰机产生的干扰信号与 SAR 信号不相参的干扰样式。由于无法获得雷达处理增益,因此非相参干扰通常需要大功率才能达到理想的干扰效果,典型的非相参干扰样式为噪声干扰。噪声干扰通过在 SAR 工作频带内发射射频噪声或调频噪声等方式,使得 SAR 接收机饱和或者使得 SAR 成像的对比度和可读性降低。噪声干扰具有方法实现简单,对侦察的依赖度低等优势,但缺点是需要很大的干扰发射功率,干扰机容易暴露自身的位置,且干扰容易被辨别并可以被 SAR 通过空域滤波等方式对消或抑制。

Goj 是最早提出噪声干扰技术的学者,1989 年,Goj 首次提到了噪声干扰技术^[1],分析了在特定空间位置的干扰机的干扰性能,并给出了等功率密度线的概念。1990 年,英国学者 Condley 开展了 SAR 电子对抗的研究,分析了噪声干扰的可行性^[2]。1997 年,英国的 Dumper 等详细给出了 SAR 干扰方程,指出了平均发射功率、干扰机有效辐射功率、成像的几何场景和 SAR 系统参数等对干扰效果的影响,描述了 SEA SAR 处理软件,为 SAR 噪声干扰的研究提供了重要的理论基础平台^[3]。

在国内,众多学者也开展了很多关于 SAR 噪声干扰的研究,1995 年,西安电子科技大学的梁百川分析了对 SAR 实施干扰的可能性以及阻塞式干扰、瞄准式干扰等噪声干扰方式的效果^[4]。1997 年,中国电子科技集团公司第 29 研究所利用等功率密度曲线分析了噪声干扰机有效辐射功率与 SAR 成像区域的关系,提出了一种干扰结构^[5],并相继研制出不同的 SAR 大功率噪声干扰机。在 2003 年的 CSAR 会议上,中国电子科技集团公司第 29 研究所继续以 SAR 大功率噪声干扰为研究主题,吴玮琦、俞永福等对干扰功率的需求进行了具体研究,论证了从距离向和方位向进行干扰的可行性^[6,7]。2004 年,北京航空航天大学王兵研究了不同带宽的噪声干扰对 SAR 成像的影响,提出了对 SAR 噪声干扰需要宽带噪声和窄带噪声相结合的方法^[8]。同年,西安电子科技大学的高建卫等具体研究了噪声调频对 SAR 干扰的方法^[9];国防科学技术大学的袁翔宇等对宽带噪声干扰进行建模,并建立了一套响应的仿真系统^[10];北京航空航天大学的李兵等利用机载雷达实测数据研究了噪声干扰的效果^[11]。2008 年,解放军电子工程学院杨瑛提出利用混沌噪声调频信号对 UWB-SAR/ISAR 进行干扰,该方法只需侦察到载频、调频等参数^[12]。同年,国防科学技术大学刘阳等分析了噪声调频信号对宽带线性调频雷达的干扰机理^[13],随后提出了基于方位向、距离向采取固定噪声样本的转发干扰,这种干扰样式相比纯噪声干扰有一定的干扰功率优势^[14],到目前,该种干扰样式的发展已经相当成熟。

2) 对 SAR 部分相参干扰技术

部分相参干扰是指干扰机产生的干扰信号与 SAR 信号部分相参的干扰样式。部分相参干扰能够获得部分处理增益,典型的部分相参干扰包括类杂波干扰、相干压制干扰和噪声卷积调制干扰。

类杂波干扰以 SAR 点目标回波为基本单元,通过在时域、频域及多普勒域密集覆盖,形成参数可控的具有 SAR 场景特征的一种压制性干扰。该干扰方法实现较为简单,对侦察的依赖度较低,但需要较大的干扰功率,干扰机容易暴露自身位置,干扰较容易被辨别并可以被 SAR 通过空域滤波等方式对消或抑制。2005 年,成都电子科技大学的李江源等提出了可对高分辨 SAR 时域、频域和多普勒域多维匹配覆盖的类杂波干扰方法,并讨论了数字储频式的软硬件实现问题^[15,16]。2006 年,李江源还研究了基于参数引导的对宽带 SAR 的类杂波干扰,提出了一种时、频、多普勒域多维匹配覆盖的类杂波干扰^[17],随后,成都电子科技大学的吴锡设计了该干扰的工程实现方法^[18]。

相干压制干扰利用 SAR 成像的距离向或方位向匹配滤波特性,通过持续地转发 SAR 发射的信号来达到对 SAR 成像进行压制的一种干扰。典型的实现方式是通过在 SAR 工作频带内发射固定时序或者随机时序的脉冲来对 SAR 成像进行压制。该干扰方法实现较为简单,在距离向上或方位向上可以获得匹配滤波增益,干扰功率的利用率比噪声干扰的要高;对侦察的依赖性较小,便于工程实现。但在方位向上或者距离向上为部分相干的压制干扰,为达到较好的压制干扰效果,仍需要较大的干扰功率。从干扰的成像效果看,相干压制干扰仍属于压制干扰。国内众多学者在这一领域开展了大量研究工作:1995 年,西安电子科技大学的梁百川等研究了对 SAR 的随机脉冲卷积干扰^[4];2002 年,中国科学院吴一戎等提出了调频率失配脉间去相干压制干扰方法,因利用了 SAR 信号的距离相干特性,可得到比噪声调制干扰更有效的压制干扰效果^[19];2003 年,船舶重工集团公司的张连江等分析了连续序列相干信号干扰对合成孔径图像的影响^[20];2006 年,北方电子设备研究所的焦逊等分析了星载 SAR 有源干扰技术及压制功率^[21];2008 年,国防科学技术大学吕波研究了对 SAR 的随机脉冲卷积干扰,并且指出了该干扰技术可以获得雷达距离压缩处理的部分增益,干扰效果明显优于等信噪比情况下的射频噪声压制干扰^[22];2011 年,第二炮兵工程学院的朱守保等研究了复合的 SAR 压制干扰方法^[23];2012 年,国防科学技术大学的黄洪旭等研究了时延脉间抖动转发干扰,该干扰可获得距离向匹配处理增益,成像输出为在距离向占据一定宽度的似噪条带^[24]。

噪声卷积调制干扰是指干扰机利用噪声信号与截获的 SAR 信号卷积或者乘积形成干扰信号的一种干扰技术。该方法相较于传统的噪声干扰,能够获得一定的处理增益,有较好的功率利用率。2004 年,西安电子科技大学高建卫研究指出

噪声调频干扰信号与 SAR 雷达信号相乘可生成相干噪声^[25],提高干扰的脉压增益。2009~2010 年,解放军电子工程学院的沈爱国提出了利用 SAR 发射信号与噪声进行复卷积的干扰,该干扰可以获得与目标相当的处理增益,为此降低了对干扰功率的要求^[26,27]。2010 年,国防科学技术大学 Lv 和 Ye 等研究了对 SAR 的噪声卷积调制干扰(即灵巧式噪声干扰)^[28,29],该方法通过噪声信号与干扰机截获雷达信号卷积形成与雷达信号相参的干扰信号,可以获得脉压增益,不仅可以灵活控制干扰距离向压制范围,而且大大提高了输出干信比。2014 年,解放军电子工程学院房明星等进一步研究了基于 SAR 的二维噪声卷积调制干扰^[30],通过二维噪声调制,有效控制了干扰的二维压制范围,进一步提高了脉压后的干信比,增强了噪声干扰信号的压制干扰效果。同年,国防科学技术大学 Gong 等基于卷积调制和乘积调制研究了宽带 LFM 雷达一维和二维离散相参噪声干扰生成方法^[31],通过二维窗函数控制干扰效果的覆盖范围和能量分布,并对其覆盖范围进行离散化,进一步提高了输出干信比。

3) 对 SAR 相参干扰技术

相参干扰是干扰机产生的干扰信号与 SAR 信号完全相参,能够获得全部的相干处理增益,代表性的干扰样式包括二维卷积欺骗干扰、移频干扰和间歇采样转发干扰。

二维卷积欺骗干扰是指干扰机通过卷积来逼真地模拟具有特定虚假散射特性目标回波,在 SAR 图像中形成虚假场景或虚假目标的一种干扰。欺骗干扰可以形成逼真的欺骗假目标,获得二维处理增益,但对侦察的要求很高。2003 年,南京电子技术研究所王盛利等根据 SAR 成像原理和地面回波信号模型,基于干扰信号与真实回波相匹配的思想,阐释了卷积调制干扰实现欺骗的原理,并给出了一种频域实现方法^[32]。这种卷积调制干扰影响非常大,很多后续研究不同程度地借鉴了它的思想。2004 年,法国的 Leducq 给出了一种合成式 SAR 干扰方法和软硬件实现框图,并通过采用全极化的目标信息数据库来实现对极化 SAR 的干扰。该方法的基本过程就是卷积处理,可以合成单点目标或者分布式目标的虚假干扰信息,其难点在于对侦察精度要求高、卷积运算量大,难以实时实现^[33]。同年,挪威国防研究院研制了 EKKO II 合成目标产生器,具有产生多个同一信号样本的能力,NATO 开展了基于 EKKO II 干扰机的外场实验,成功地对 MRS(modular radar system)高精度成像雷达实现了从距离和多普勒域的同时干扰^[34]。同年,解放军电子工程学院研究了星载 SAR 应答式欺骗干扰,通过分析真实目标回波的多普勒频移和调频速率,指出可通过对干扰机接收信号补偿适当的多普勒频偏、调频速率以及时延得到相应的干扰信号^[35],其实质是卷积干扰的一种简化形式。2005 年,国防科学技术大学的李伟等介绍了虚假场景干扰的信号形式和产生方法,研究了干扰所应该考虑的一些关键因素,分析了雷达定位误差对干扰效果的

影响,提出了干扰布阵的方法,解决了实施虚假场景干扰时可能遇到的问题^[36]。为了解决卷积欺骗干扰实时运算量大的问题,很多研究者开展了卷积欺骗干扰快速实现方法的研究。2009年,西安电子科技大学的孙光才等研究了虚假场景 SAR 欺骗式干扰技术及实时性,该方法的主要思路是先通过快速算法对虚假场景进行图像预生成,然后把预生成的虚假图像和 SAR 信号进行卷积^[37]。2012年,第二炮兵工程学院的朱守保等研究了 SAR 虚假图像干扰信号快速生成方法,着力于解决产生虚假图像回波信号的实时性要求^[38]。2012年和2013年,西安电子科技大学的 Zhou 等研究了虚假大场景 SAR 快速转发式欺骗干扰方法^[39,40],将干扰机调制项分为可预先生成的慢时间无关项和需实时生成的慢时间有关项,然后对大场景干扰图像模板进行分块并行调制,大大降低了运算量,保证了大场景欺骗干扰算法的实时性。2012年,北京理工大学的刘国满等研究了卷积干扰信号发生器的设计与实现^[41]。同年,国防科学技术大学的林晓烘等研究了基于逆 $\omega\kappa$ 算法的 SAR 欺骗干扰方法^[42],利用逆 $\omega\kappa$ 算法,将一幅雷达灰度图像转化为干扰信号。2014年,国防科学技术大学的 Liu 等针对虚假大场景 SAR 快速转发式欺骗干扰方法存在的一些问题,进一步提出了一种频域三阶段法^[43],能够很好地兼顾干扰信号快速生成和虚假目标聚焦的效果。鉴于 SAR 发射 LFM 信号的时频耦合性,2013年,国防科学技术大学的刘庆富提出了乘积调制干扰^[44],该干扰方法适用于在高分辨大场景条件下的欺骗假目标生成,相对于卷积干扰,该干扰方法在能量利用率上略有下降,但在高分辨成像条件下其所需的实时运算量会大为降低。

移频干扰是指干扰机截获到 SAR 发射的线性调频信号后,利用该信号的时频耦合特性,在截获的 SAR 原信号基础上额外调制附加多普勒频移,再转发给 SAR,实现在 SAR 图像上形成虚假目标的干扰方法。该干扰方法样式灵活,容易在 SAR 成像的距离向或方位向上扩展形成虚假目标,成像处理增益较高,对于干扰功率的要求较低,但干扰的能量利用率随着移频量的增大而降低。移频干扰在常规雷达干扰中早有报道,国防科学技术大学在国内最早将移频干扰应用于对 SAR 干扰中。2006年,国防科学技术大学黄洪旭建立了 SAR 移频干扰的数学模型,推导了移频干扰对采用脉压体制的 SAR 的干扰输出形式,研究表明移频干扰的移频量与 SAR 方位向处理的多普勒带宽无关,只能形成点目标或线目标干扰^[45]。2007年,该大学还研究了对 SAR 的随机移频干扰,并且指出:脉间去相关的随机移频干扰经 SAR 距离向和方位向处理后,成像输出为距离向占据一定宽度的似噪条带,可用于压制分布目标^[46]。此后,国防科学技术大学吴晓芳等在固定移频和随机移频的基础上,进一步研究了步进移频和分段移频等多种干扰样式,SAR 移频干扰理论得到了很大丰富^[47-49]。根据 SAR 方位向信号实质可视为线性调频信号,同样具有时频耦合性,吴晓芳等于2010年提出了 SAR 方位向多普勒调制

干扰^[50],研究了不同多普勒调制样式对 SAR 的干扰效果。2014 年,西安高技术研究所 Cai 等提出了 SAR 脉间分段随机移频干扰方法,并研究了其具体应用问题^[51],指出该方法能够有效地防护分布式目标。

间歇采样转发干扰是通过对 SAR 发射的 LFM 信号进行脉内或者脉间间歇地采样和转发,使得 SAR 成像的距离向或方位向出现多个假目标。这种干扰样式可以解决干扰机在工程实现中的收发隔离问题,工程应用价值很高,且干扰样式灵活,容易在 SAR 成像的距离向或方位向形成虚假目标,成像处理增益较高。间歇采样转发干扰的缺点是对干扰的时间利用率会降低,干扰效率易受占空比的影响。间歇采样转发干扰由国防科学技术大学王雪松团队独创,2006 年,该团队独创性地提出了利用间歇采样转发实现对一维成像雷达的干扰,并对该种干扰的原理和特性进行了深入研究^[52]。之后,该团队刘忠等继续研究了间歇采样转发干扰的工程实现问题^[53,54]。2009 年,该团队吴晓芳等在之前的研究基础上,研究了对 SAR 的间歇采样转发干扰,利用该方法形成距离向前移和滞后的多假目标,产生逼真的相干假目标串的干扰效果^[55]。2010 年,吴晓芳等又将间歇采样应用于 SAR 方位向,提出了对 SAR 方位向间歇采样转发干扰。在此基础上,2011 年,装备指挥学院贾鑫等进一步研究了 SAR 二维间歇采样转发干扰^[56]。2014 年,解放军电子工程学院房明星等针对间歇采样转发干扰的假目标具有很强的周期性,假目标之间间隔相等,有效假目标个数有限,且难以控制好干扰功率在所产生的主假目标与次假目标群之间的分布等固有特性,提出将卷积调制和二维间歇采样转发干扰结合的干扰方法,可形成更加灵活可控的干扰效果^[57]。同年,西安高技术研究所蔡幸福等研究了 SAR 二维间歇采样延迟转发干扰技术的具体应用问题^[58],指出二维间歇采样转发干扰是区域防护中的理想干扰样式之一。

1.2.2 SAR 无源干扰技术的研究现状

目前对 SAR 无源干扰主要包括无源角反射器干扰^[59]、偶极子反射器干扰^[60]、隐身材料干扰^[61]、箔条干扰^[62,63]和反雷达伪装网干扰^[60]等。无源干扰虽然成本低廉,但对 SAR 的干扰效果有限,因此研究相对比较少。2004 年,南京电子技术研究所龙伟军等采用光学处理的办法对 SAR 产生的信号受箔条干扰的机理进行了分析,构建了箔条处于不同特征尺寸下的干扰模型^[62]。2008~2010 年,国防科学技术大学吴晓芳等研究了箔条干扰以及等离子体隐身技术在 SAR 对抗中的应用问题^[61,63]。2010 年,西安电子科技大学孙光才等提出了利用旋转角反射器实现压制干扰的方法^[64]。

1.2.3 SAR 干扰效果评估方法的研究现状

SAR 干扰效果评估的难点在于对 SAR 图像信息的理解和提取是一个复杂的

课题。一方面其具有一般图像理解的共性,另一方面又因为 SAR 图像体现的是宽带电磁波信号散射的结果,而非人类感知领域所熟知的目标的实际物理特性。从而造成了对 SAR 图像的理解和信息提取既不同于常规雷达目标处理,也难以直接借用光学图像分析的先进成果。最初的干扰效果评估没有考虑具体的干扰手段,而是伴随着对 SAR 干扰可行性研究同时诞生的,其度量手段是干扰功率。Goj 于 1993 年提出了一种用等功率曲线图来衡量干扰效果的方法^[65]。西安电子科技大学魏青等提出了基于干信比的“等廓线”概念^[66]。

图 1.3 对目前 SAR 的干扰效果评估的研究成果进行了简单归类。总体可分为主观评估和客观评估两大类。主观评估是根据领域专家的经验 and 知识,按照应用目的,对图像中的干扰效果进行评价。该方法受评价者的知识面、理解水平和看问题的角度及立场影响。另外,每次评估需要组织若干专家对大量图像进行逐一评分,实施困难。客观评估是利用一定的数学模型,通过独立于个人主体客观计算得到定量的评估指标。客观评估可重复性好、易于再现,不受个人因素影响,且易于自动化实现,是当前干扰效果评估的主要思路。客观评估根据建模对象的不同,大致分为四个方向:基于图像质量、基于干扰前后图像变化率、基于目标检测性能及目标特征提取和基于图像灰度统计特性。客观评估方法难以体现人的视觉、心理特性以及图像内容有用性,因此 SAR 干扰效果评估研究也开始尝试把主观与客观的评价方法有机结合起来。

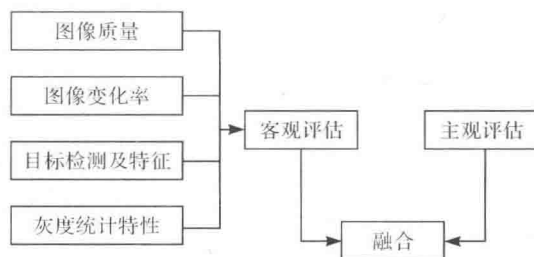


图 1.3 干扰效果评估研究成果分类

在基于图像质量方面的研究过程中,马俊霞从欧几里得距离空间的概念出发,给出了 SAR 压制干扰效果评估方法^[67];苗艳红从相关系数和等效视数角度来对干扰效果进行评估^[68];张孝乐等用峰值旁瓣比和积分旁瓣比来定量地评价有源噪声压制干扰对点目标成像的干扰效果^[69];韩中生利用 SAR 图像质量指标中的均值、方差和动态范围研究了噪声压制干扰下的 SAR 对抗效果评估问题^[70]。

基于图像变化率的评估最初源于对 SAR 图像打击效果的评估^[71]。该方法不是直接使用图像质量作为评估指标,而是计算干扰前后图像质量的变化率来评估干扰效果。谢虹和苏娟等也对其进行了论述^[72,73]。