



陕西出版资金资助项目

雷达前言技术丛书

# 雷达干扰与抗干扰 技术应用

曹 菲 薛龙强 许剑锋 著 ●  
张 辉 毋 凡 胡中泽

西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

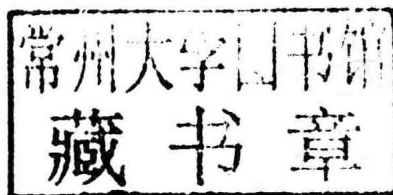


陕西出版资金资助项目

雷达前沿技术丛书

# 雷达干扰与抗干扰技术应用

曹 菲 薛龙强 许剑锋 著  
张 辉 毋 凡 胡中泽



西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

现代雷达已成为目标探测和精确制导领域中使用最广泛、地位最重要的装备之一,在日益复杂的电磁环境中,雷达系统面临各种干扰和抗干扰问题。本书在对雷达弹载有源干扰和抗干扰技术研究的基础上,分析了弹载有源干扰技术,介绍了弹载干扰组网技术,提出了一种约束化子空间跟踪算法和基于子空间正交投影与最大化载噪比的联合波束形成算法。

本书注重结构的完整性和内容的系统性,注重理论与实践相结合,注重对新概念、新理论、新算法的介绍,突出了仿真实验,内容的可操作性强。

本书可供电子工程、信息工程及相关专业本科生和研究生作为教材使用,也可供部队院校的相关学院作为教学参考书使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

雷达干扰与抗干扰技术应用/曹菲等著. —西安:西安电子科技大学出版社,2018.2

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4755 - 5

I. ①雷… II. ①曹… III. ①雷达干扰—研究 ②雷达抗干扰—研究

IV. ①TN972 ②TN974

## 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 016891 号

策 划 陈 婷

责任编辑 杜 萍 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 虎彩印艺股份有限公司

版 次 2018年2月第1版 2018年2月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印张 8

字 数 154千字

定 价 21.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4755 - 5/TN

**XDUP 5057001 - 1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*



## 前 言

雷达干扰与抗干扰是现代电子战的一个重要内容,两者是一对矛盾的两个方面,它们相互竞争、相互促进。有干扰,就有抗干扰措施,新的抗干扰措施又会引起新的干扰方法,两者循环往复,促使雷达干扰与抗干扰技术不断向前发展。雷达干扰与抗干扰之间的斗争,已经在空域、时域、频率域、功率域或空频、空时联合域内全面展开。本书对雷达干扰技术和抗干扰技术进行研究,以弹载有源干扰技术和脉冲压缩雷达信号为研究对象,采取了理论研究和实验仿真相结合的方法,重点研究了基于DRFM的弹载干扰机系统、弹载多点源交叉眼干扰技术和基于噪声卷积调制的间歇采样转发干扰技术,讨论了自适应数字阵列天线在雷达抗干扰中的应用,为雷达弹载有源干扰技术的研究提供了参考。

本书共10章。第1章首先介绍了雷达系统,论述了雷达干扰和抗干扰技术研究的背景和意义;其次对雷达干扰和抗干扰技术发展的概况和研究现状进行了介绍,分析了雷达干扰技术各个阶段的特点和技术方法,并指出了雷达抗干扰研究的发展趋势;最后对雷达弹载干扰技术进行了介绍并对现有的干扰技术进行了简要的分析和研究。第2章首先简要介绍了雷达干扰技术理论,对雷达干扰的分类、干扰设备的基本组成、作战对象、基本方法和干扰条件作了阐述,然后对雷达弹载干扰方程进行了数学推导和分析,最后对几种典型的雷达压制式干扰技术和欺骗式干扰技术进行了研究。第3章首先介绍了干扰机的构成,分别讨论了实现遮盖式干扰与欺骗式干扰时干扰机的基本组成、工作原理和主要的性能要求;然后讨论了这两种干扰机的有效干扰空间以及有效干扰空间的能量计算和时间计算问题;最后讨论了有关干扰信号的产生、调制和控制方面的关键技术。第4章介绍了DRFM的工作原理和系统组成,对基于DRFM的正交双通道进行了数学建模,提出了基于DRFM的弹载组网干扰技术方案,并对新的弹载组网干扰技术方案的工作模式和工作流程进行了研究,最后分析了弹载组网对频率分集雷达、射频掩护雷达、频率捷变雷达和组网雷达的干扰效果。第5章对单脉冲雷达

的弹载干扰技术进行了研究,主要介绍了交叉眼干扰对单脉冲雷达的干扰原理,针对两点源交叉眼的不足提出了弹载多点源交叉眼干扰,并对基于比幅测角的单脉冲雷达进行了干扰建模和仿真计算。结果表明,弹载多点源交叉眼干扰较两点源交叉眼的干扰能力更强、更稳定,并且可以进行欺骗角度参数的设定。第6章首先对基于噪声卷积调制的干扰样式进行了数学建模和仿真分析,结果表明噪声卷积调制干扰和雷达信号具有很强的相干性,干扰能力可以得到充分利用;然后对基于间歇采样转发的弹载干扰样式进行了数学建模的仿真分析,结果表明间歇采样转发干扰可以对雷达形成假目标串;最后提出了基于噪声卷积调制的弹载间歇采样转发干扰样式,研究结果表明该干扰样式具有很好的干扰效果。第7章首先介绍了射频干扰的类型和雷达的基本原理,建立了脉冲压缩雷达信号的基本模型;其次分析了相位编码脉冲压缩雷达信号和自适应天线阵列,并建立了天线阵列信号模型,为后面的研究提供了数学基础。第8章在介绍常用的自适应波束形成准则的基础上,提出了将子空间正交投影算法应用到脉冲压缩雷达信号的自适应抗干扰中,针对子空间分解过程中特征向量不能完全正交的问题,提出了约束化的子空间正交投影技术,最后通过仿真实验验证了该算法的有效性。第9章根据脉冲压缩雷达接收机的信号处理特性,提出了一种联合的自适应波束形成算法。通过仿真实验证明了提出的算法既有效地抑制了强干扰信号,又提高了雷达接收机的信号检测能力。第10章是全文的工作总结和技术展望。

本书由曹菲、薛龙强、许剑锋、张辉、毋凡、胡中泽共同编写。其中,曹菲、薛龙强负责章节大纲的拟定、第1章至第5章和第10章的撰写以及全书的统稿,毋凡负责第6章的撰写,许剑锋负责第7章的撰写,张辉负责第8章的撰写,胡中泽负责第9章的撰写。

本书在编写过程中,采纳了几位硕士研究生的意见和建议,这些意见和建议对于改进本书的可读性和易懂性起到了重要的作用,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作者

2017年9月



# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1	2.4.3 噪声调频干扰 .....	16
1.1 研究背景与问题的提出 .....	1	2.4.4 噪声调相干扰 .....	16
1.1.1 现代雷达系统 .....	2	2.5 欺骗式干扰 .....	16
1.1.2 雷达对抗技术 .....	2	2.6 本章小结 .....	17
1.1.3 雷达弹载干扰系统 .....	3	第 3 章 干扰机的构成 .....	18
1.1.4 问题提出 .....	3	3.1 干扰机的基本组成和主要性能 .....	18
1.2 相关领域发展概况与研究现状 .....	4	3.1.1 干扰机的基本组成 .....	18
1.2.1 雷达干扰技术的发展概况 .....	6	3.1.2 干扰机的主要性能 .....	20
1.2.2 弹载有源干扰技术的研究现状 .....	6	3.2 干扰机的有效干扰空间 .....	22
1.3 雷达抗干扰技术的发展趋势 .....	8	3.2.1 干扰方程 .....	22
1.4 本书的主要内容与章节安排 .....	8	3.2.2 干扰机的时间计算 .....	24
第 2 章 雷达弹载有源干扰理论 .....	10	3.3 干扰机的收发隔离 .....	26
2.1 引言 .....	10	3.4 射频信号存储技术 .....	28
2.2 雷达有源干扰概述 .....	10	3.4.1 模拟储频技术(ARFM) .....	29
2.2.1 干扰分类 .....	10	3.4.2 数字储频技术(DRFM) .....	30
2.2.2 干扰设备基本组成 .....	12	3.5 载频移频技术 .....	33
2.2.3 作战对象 .....	12	第 4 章 基于 DRFM 的弹载干扰机系统研究 .....	35
2.2.4 基本方法 .....	13	4.1 引言 .....	35
2.2.5 干扰条件 .....	13	4.2 DRFM 概况 .....	35
2.3 雷达弹载干扰方程 .....	14	4.2.1 DRFM 的工作原理与系统组成 .....	35
2.4 压制式干扰技术 .....	15	4.2.2 DRFM 的实现结构与数学建模 .....	36
2.4.1 射频噪声干扰 .....	15	4.2.3 DRFM 的储频技术 .....	37
2.4.2 噪声调幅干扰 .....	16	4.2.4 主要性能指标 .....	38

4.3 基于 DRFM 的弹载组网干扰系统 .....	39	6.2 基于噪声卷积调制的弹载干扰 样式研究 .....	50
4.3.1 弹载干扰机组网干扰系统的组成及工 作原理 .....	39	6.2.1 噪声卷积调制干扰原理 .....	50
4.3.2 组网干扰关键技术 .....	40	6.2.2 噪声卷积调制对线性调频信号的 干扰分析 .....	51
4.4 弹载组网干扰效果分析 .....	40	6.2.3 仿真分析 .....	52
4.4.1 干扰频率分集雷达 .....	40	6.3 基于间歇采样转发的弹载干扰 样式研究 .....	54
4.4.2 干扰射频掩护雷达 .....	41	6.3.1 间歇采样转发干扰数学建模 .....	54
4.4.3 干扰频率捷变雷达 .....	41	6.3.2 间歇采样转发对线性调频信号 的干扰 .....	55
4.4.4 干扰组网雷达 .....	41	6.3.3 仿真分析 .....	57
4.5 本章小结 .....	41	6.4 基于噪声卷积调制的弹载间歇采样转发 干扰研究 .....	58
<b>第 5 章 基于 DRFM 的弹载多点源交叉眼干扰</b> .....	42	6.4.1 基于噪声卷积调制的间歇采样转发 干扰数学建模 .....	58
5.1 引言 .....	42	6.4.2 对线性调频信号的干扰研究 .....	59
5.2 振幅和差式单脉冲雷达定向原理 .....	42	6.4.3 干扰效果分析 .....	61
5.3 单脉冲雷达弹载干扰概述 .....	44	6.4.4 仿真分析 .....	63
5.3.1 闪烁干扰 .....	44	6.5 本章小结 .....	64
5.3.2 相干干扰 .....	44	<b>第 7 章 雷达系统及其抗干扰技术</b> .....	65
5.3.3 交叉眼干扰 .....	45	7.1 干扰源分析 .....	66
5.4 弹载多点源相干干扰数学建模 .....	45	7.1.1 雷达杂波 .....	66
5.4.1 假设场景 .....	45	7.1.2 射频干扰 .....	66
5.4.2 数学建模 .....	46	7.2 脉冲压缩雷达 .....	69
5.4.3 存在交叉眼干扰时雷达导引头角跟踪 误差分析 .....	47	7.2.1 雷达系统的基本原理 .....	69
5.5 存在多点源交叉眼干扰时的角度误差仿真 计算 .....	48	7.2.2 脉冲压缩雷达信号 .....	71
5.6 本章小结 .....	49	7.3 相位编码 .....	72
<b>第 6 章 基于 DRFM 的雷达弹载有源干扰技术研究</b> .....	50	7.3.1 $M$ 序列码 .....	72
6.1 引言 .....	50	7.3.2 相位编码的实现 .....	74

7.4	自适应波束形成 .....	75	第9章	一种联合自适应波束形成算法 .....	97
7.4.1	数字阵列雷达 .....	75	9.1	雷达接收机 .....	97
7.4.2	均匀线性阵列模型 .....	77	9.1.1	数字接收机的工作原理 .....	97
7.4.3	数字阵列信号模型 .....	78	9.1.2	信号处理流程 .....	98
7.5	本章小结 .....	79	9.2	联合波束形成算法 .....	100
第8章	自适应天线抗干扰性能研究 .....	80	9.2.1	最大化载噪比 .....	100
8.1	适用于雷达抗干扰的自适应波束 形成准则 .....	80	9.2.2	基于子空间正交投影和最大化载噪比 的波束形成算法 .....	101
8.1.1	MMSE 准则 .....	80	9.3	性能仿真 .....	104
8.1.2	LCMV 准则 .....	81	9.3.1	抗干扰性能对比 .....	104
8.1.3	MSNR 准则 .....	82	9.3.2	信号检测性能对比 .....	106
8.2	子空间正交投影 .....	83	9.4	本章小结 .....	108
8.2.1	算法原理 .....	83	第10章	总结与展望 .....	109
8.2.2	干扰子空间维数估计 .....	86	10.1	本书工作总结 .....	109
8.2.3	子空间跟踪算法 .....	87	10.2	今后工作展望 .....	110
8.2.4	约束化的子空间跟踪算法 .....	89	附录1	主要缩略词说明 .....	111
8.3	抗干扰性能仿真 .....	90	附录2	IEEE 标准雷达频率字母频段名称 .....	113
8.3.1	约束化的子空间跟踪算法的 抗干扰性能 .....	90	附录3	空间内民用电子、电气设备产生的 各种电磁辐射信号 .....	114
8.3.2	干信比与零陷深度的关系 .....	95	参考文献	.....	116
8.4	本章小结 .....	96			



# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景与问题的提出

雷达干扰与抗干扰是现代电子战的一个重要内容,两者是一对矛盾的两个方面,它们相互竞争、相互促进。有干扰,就有抗干扰措施,新的抗干扰措施又会引起新的干扰方法,两者循环往复,促使雷达干扰与抗干扰技术不断向前发展。雷达干扰与抗干扰之间的斗争,已经在空域、时域、频率域、功率域或空频、空时联合域内全面展开。

从近些年的几次战争中可以看出,传统的陆、海、空战已发展形成了“多维立体战”,电子对抗(ECM)以“软杀伤”为主要特点贯穿于战争的全过程。1982年的贝卡谷地之战,以军把电子对抗技术和电子战战术发挥得淋漓尽致,以极小的代价取得了一举将叙军19个地空导弹阵地全部摧毁的胜利,此战成为现代电子战的典范。以军不仅充分利用已掌握的电磁优势,而且在作战中更多地注入谋略因素,有计划、有组织地运用无人侦察机、预警机、电子战飞机等武器装备,辅助和指挥己方的战斗机、攻击机实施精确打击,从而取得了惊人的战果。在科索沃战争中,北约在空袭中使用了各类性能先进的预警飞机和专用电子战飞机,分别对南军的预警、火控雷达和指挥控制系统实施“致盲”、“致聋”打击。通过软硬兼施的电子攻击,北约始终掌握着作战地区的信息主动权,使南联盟的军队处于被动挨打的境地。在阿富汗战争中,美军实现了信息系统与作战系统的高度一体化。为实现在信息获取系统和空中打击系统的信息实时传输,美军专门在沙特的苏丹王子空军基地建立了一个新型联合空战中心。联合空战中心配备了最新型的C4ISR系统,综合分析、处理由美军各种战场侦察系统所获取的战场信息数据,并将处理过的战场信息数据实时传输到预警机、雷达等各种作战平台。在伊拉克战争中,虽然出于战术上的种种考虑,美军没有以强大的电子战拉开帷幕,但是,随着战争的逐渐展开,美军还是出动了EA-6B“徘徊者”电子战飞机等对伊拉克的防空雷达进行干扰。海湾战争是另一场规模更大的、以电子战为发端且电磁斗争贯穿始终的现代战争。在“沙漠风暴”开始之前5个小时,多国部队就派出EA-6B、EF-111、F-4G、EC-130等专用电子对抗飞机,对伊拉克境内的雷达、通信、指挥设施和防空系统进行了强烈的电磁干扰,使伊军雷达荧光屏一片“白雪”。大规模空袭发起后的头一个小时内,在前头开路的F-4G等飞机就向伊军雷达和防空阵地发射了200余枚高速

反辐射导弹,从而保障了攻击编队的安全突防。多国部队实施的“白雪”电子战造成了伊军通信中断、雷达迷盲、指挥瘫痪、防空导弹失灵,大大提高了己方作战飞机的生存率和行动自由度。实战结果再次证明,只有夺得整个战场的制电磁权才能获取制空权,进而以较少的损失赢得战争的胜利,因此,对雷达进行干扰与抗干扰技术研究已成为雷达界所面临的首要任务。

经过 20 世纪后期雷达技术发展的高峰期后,雷达电子对抗技术突飞猛进,但部分现役装备的战术性能无法得到保证。一般来说,雷达抗干扰性能不易从实战中马上得出明确结论,所以往往需要组织实兵对抗演习,从雷达的受干扰情况进行实际分析。美国为检验电子站设备的效能,收集并仿制了多种苏联雷达,在试验场中与电子战设备进行对抗试验,从而发现问题并进行改进。用实兵演习的方法虽然比较逼真,但耗资巨大,而且只能进行中、小型规模演习,无法形成近似实战的密集复杂信号环境,更无法支撑尚未出现的电子设备进行试验。因此,实兵演习的方法带有很大的局限性,从经济角度来看,也是很不合算的。针对上述问题,基于软件无线电设计原理的雷达抗干扰研究得到了众多国家的青睐,其优点是可以在一个通用的硬件平台上研究抗干扰措施是否对某种干扰有效,而且其大部分功能可以由软件实验完成,使得系统具有很强的可维护性以及可复用性,具有重要的军事意义和突出的经济效益,这也是研究雷达抗干扰算法的意义<sup>[1]</sup>。

### 1.1.1 现代雷达系统

现代雷达系统是武器装备系统的“千里眼”,它为打击目标提供了精确情报支撑。如美国的“宙斯盾”导弹防御系统<sup>[2]</sup>的 AN/SPY-1 是一部工作于 S 波段的多功能相控阵雷达,它对空搜索最大作用距离为 400 km,可同时监视 400 批目标,自动跟踪 100 批目标。现代雷达系统已经广泛应用于探测地面、空中、海上、太空甚至地下目标,随着大型相控阵技术、脉冲压缩技术、雷达组网技术和各种抗干扰技术(频率捷变、旁瓣隐消等)在现代雷达中的广泛应用,使得现代雷达探测距离更远,探测精度更高,抗干扰能力更强。

### 1.1.2 雷达对抗技术

雷达对抗是与雷达紧密联系在一起的。众所周知,雷达为了获取目标信息,必须首先将高功率的电磁波能量照射到目标上,由于目标的电磁散射特性,将对照射能量产生相应的调制和散射。雷达接收到经目标调制的一部分微弱的散射信号后,再根据收、发信号调制的相对关系,解调出目标信息。

雷达对抗设备中的侦察设备接收到雷达发射的直达信号,测量该雷达的方向、频率和其他调制参数,然后根据已经掌握的雷达信号的先验信息和先验知识,判断该雷达的功能、工作状态和威胁程度等,并将各种信号处理的结果提供给干扰机和其他有关的设备。由此可见,实现雷达侦察的基本条件是:① 雷达向空间发射信号;② 侦察接收机接收到足够强

的雷达信号；③ 雷达信号的调制方式和调制参数位于侦察机信号检测处理的能力与范围之内。

根据雷达对目标信息检测的过程，对雷达干扰的基本方法包括：① 破坏雷达探测目标的电波传播路径；② 产生干扰信号进入雷达接收机，破坏或扰乱雷达对目标信息的正确检测；③ 减小目标的雷达的截面积等。

雷达对抗的主要技术特点包括：

(1) 宽频带、大视场。

雷达对抗要能够作用于广阔地域内各种工作频率的雷达，在具有众多威胁雷达的信号环境中进行对抗。因此，雷达对抗设备的工作视场往往是半空域或者全空域，工作带宽往往是一倍频程或多倍频程的。

(2) 瞬时信号检测、测量和高速信号处理。

由于雷达信号大多为射频脉冲，持续时间很短，而且雷达侦察设备预先并不知道雷达信号的调制特性、到达的时间和空间等，在信号严重失配的情况下，对于射频脉冲信号的检测、测量等都必须短暂的脉冲期间内完成。导弹末制导雷达、近炸引信等武器设备的发射信号时间很短，要求雷达对抗系统的信号处理必须尽快完成，及时作出有效的反应。

### 1.1.3 雷达弹载干扰系统

雷达弹载干扰系统<sup>[3]</sup>用于干扰和欺骗敌方雷达探测系统对突防导弹的探测、识别和跟踪。弹载干扰分为弹载无源干扰和弹载有源干扰。弹载无源干扰是利用箔条、诱饵、隐身涂层等方法干扰敌方雷达的探测和识别；弹载有源干扰是用弹载干扰机释放雷达干扰信号，对敌方雷达接收机进行压制或欺骗，使得敌方雷达探测不到或探测不准我方导弹目标，从而不能对导弹目标进行拦截。随着雷达探测技术和抗干扰技术的不断发展和成熟，弹载无源干扰的干扰效果大打折扣。相对于弹载无源干扰来说，弹载有源干扰更灵活，因此更具发展潜力，所以弹载有源干扰技术成为雷达弹载干扰系统的主要发展方向。

### 1.1.4 问题提出

伴随着导弹防御系统的出现和发展，导弹突防和防御之间的矛盾不断升级。一方面，各个军事大国不断探索新的突防技术以使导弹顺利躲避雷达系统的探测（如隐身涂层技术、多弹头技术、智能诱饵技术、电子干扰等）；另一方面，各个军事大国也在研究新的探测技术使自己的导弹防御系统能够对敌方的导弹实施精确的探测。导弹防御系统技术的日益成熟使导弹的突防难度不断加大，如何提高突防导弹的生存概率成为了各个军事大国的研究热点。目前关于导弹的突防保护措施有很多，主要分为技术和战术两类方法。技术类方法主要有隐身技术、机动变轨技术、多弹头技术、诱饵技术、箔条干扰技术和弹载干扰机技术等；战术类方法主要是通过机动导弹发射、饱和攻击技术和合理的导弹突

防弹道等进行突防保护。通过雷达弹载干扰机保护突防弹头是突防保护中应用最广泛、最灵活、最有发展潜力的技术手段，因此，研究干扰能力更强的雷达弹载干扰机技术是总的发展趋势。

导弹防御系统和突防导弹之间矛盾的本质就是雷达和雷达弹载干扰机之间的电子战(EW)。弹载干扰不同于其他载体干扰，它相对于地面、舰载、机载、星载干扰方式具有很大优势：一是弹载干扰机相对于其他干扰机的飞行高度更高，它可以使弹载干扰机对更大范围内的雷达进行干扰；二是弹载干扰机具有和突防导弹相似的运行轨迹，这可以使干扰信号从雷达的主瓣进入雷达接收机；三是每枚导弹可以携带多个弹载干扰机对雷达进行分布式干扰。但是目前的弹载干扰机由于技术和条件所限，也有其不足之处：一是由于导弹载荷限制了弹载干扰机干扰信号的功率；二是各个弹载干扰机缺乏信息交互而不能进行协同干扰，从而不能有效利用弹载干扰资源；三是弹载干扰机实施干扰主要是按照预设的程序执行，干扰方式不够灵活。因此，需要针对雷达弹载有源干扰技术进行研究，为弹载干扰机技术提供技术支撑。

## 1.2 相关领域发展概况与研究现状

雷达电子反对抗(ECCM)与雷达电子对抗是同时产生和发展的。雷达电子反对抗在文献[4]中被定义为“电子战的一部分，当敌方进行电子战时，仍能保证己方有效地使用电磁频谱”。雷达电子反对抗发展比较快的时期是第二次世界大战期间，当时许多雷达抗干扰方法都得到了实际应用，如“寂静”接收机、采用抗饱和电路的接收机、高通滤波器、具有短时间常数的视频滤波器、具有机械频率调谐功能的发射机等。同时，已经实验成功的有低旁瓣天线、动目标显示(MTI)、接收机鉴频器等技术，在理论上取得突破的有大功率全相干的发射系统、频率捷变和对抗箔条干扰的线性调制窄脉冲等技术。

第二次世界大战后，雷达电子反对抗的发展大致分为三个阶段。第一阶段是战后至20世纪50年代。在这一时期，具有对抗锥扫欺骗式干扰的单脉冲跟踪雷达研制成功，同时，具有较强抗干扰能力的新体制雷达正在研究中，包括线性调频脉冲雷达、脉冲多普勒雷达和相位编码脉冲雷达。第二阶段为20世纪50年代末到60年代末。由于半导体器件和数字电路突飞猛进的发展，恒虚警电路(CFAG)和数字动目标显示(DMTI)的应用极大地改进了雷达的抗干扰能力。当时的雷达对噪声调频干扰已经广泛采用宽-限-窄电路技术，此技术在相控阵雷达中得到了大量运用，在地基雷达和脉冲多普勒雷达中也得到了广泛应用。第三个阶段为20世纪70年代至今。高质量的自适应MTI和动目标检测器(MTD)系统极大地改进了雷达的抗地杂波及箔条干扰的能力。同时，由于高稳定度的晶振、超低旁瓣天线和多范围多普勒信号处理技术的发展，远距离的机载脉冲多普勒搜索雷达得到了应用。此外，抗有源干扰的相控阵、自适应天线阵系统在战术雷达中也广为采用。

雷达抗干扰就是判定雷达识别跟踪系统是否受到了干扰,然后采取相应的对抗措施。通常是采用特殊的信号处理电路以及相应的算法滤除干扰信号,得出目标信息,并进行自动跟踪。目前主要是利用计算机的记忆和快速计算能力,应用人工智能技术对雷达跟踪系统受干扰前后收集到的所有信号的特征信息进行及时分析,从而自动改变跟踪环参数,使得系统始终能跟踪上正确的目标。Ghouz H. H. M. 等<sup>[5]</sup>提出了一种用自适应滤波技术抑制相控阵搜索雷达系统干扰的方法。干扰包括干扰信号、噪声和地物杂波。这种滤波过程是基于干扰的空间分布和目标多普勒频移去自适应地抑制不需要的信号,通过用直接矩阵倒置算法估计干扰空间的协方差矩阵去计算自适应滤波器的最优化权重来实现的。Mehrdad Soumekh<sup>[6]</sup>从波形设计的角度提出了一种 SAR 雷达对抗欺骗式干扰的干扰抑制方法。Yue Hann Chin<sup>[7]</sup>针对拖曳式欺骗干扰,提出了保证雷达正确跟踪真实目标回波信号来正常发挥雷达作战效能的脉冲前沿跟踪算法。Blair W. D.<sup>[8]</sup>研究了 ECM(包括远程支援干扰及距离拖引干扰)下相控阵雷达跟踪机动目标的最佳跟踪算法。

近年来,提高雷达的抗干扰能力是各国都在加大研究的项目,美国走在研究领域的前沿。美国空军 E-3C 预警机装备的 AN/APY-2 雷达工作于 S 波段,具有脉冲和脉冲多普勒两种体制以及五种工作方式,采用高脉冲重复频率、低旁瓣天线和先进的数字处理等技术来实现全方位覆盖,使雷达具有高可靠性和良好的抗干扰能力。新型机载相控阵天线技术是目前正在开发的主要抗干扰技术,如以色列的“费尔康”共形相控阵天线、瑞典正在研制的“相似平衡木”双面相控阵天线、美国的横列定向型相控阵天线和“灵巧蒙皮”共形相控阵天线等。此外,新一代对空情报雷达的抗干扰能力更高,它主要从体制、参数选择和附加措施三个方面来进一步提高抗干扰能力,如法国的 TRS-2140(Fair)、美国的 ASTAR 雷达系列和西班牙的“伦塞”三坐标监视雷达。

国内关于雷达抗干扰研究在期刊上以论文形式发表的研究成果有:赵雪飞等<sup>[9]</sup>对 PD 雷达抗距离-速度同步拖引干扰的频谱识别法进行了研究。黄高明等<sup>[10]</sup>针对多阵元雷达抗有源压制式干扰分别将盲源分离与典范相关分析引入到雷达抗干扰技术中。侯民胜和张治海<sup>[11]</sup>提出了利用“边沿跟踪法”抗距离欺骗干扰的方案,并用计算机仿真的方法对该方案进行了验证。在系统地阐述雷达自适应抗干扰原理和依据的基础上,李潮等<sup>[12]</sup>利用计算机自动控制技术,对雷达自适应抗干扰系统的设计与实现作了初步的想定和研究。吕强等<sup>[13]</sup>提出了一种基于神经网络和模式识别技术的目标与干扰的识别方法,该方法将抗干扰过程看做对目标和干扰进行识别的过程,利用干扰信号和目标的能量差别及起伏特性的差异,确定出用于分类的特征因子,使该特征因子受信干比的影响远小于用传统检测方法时的影响。陈建春等<sup>[14]</sup>针对调频连续波(FMCW)雷达,提出了采用自适应线性预测滤波预处理实现速度欺骗式干扰的检测,通过在干扰期内保持速度跟踪环处于记忆跟踪状态、在干扰休止期恢复对目标的跟踪来对抗速度欺骗式干扰。基于速度波门拖引干扰的信号模型,陈浩等<sup>[15]</sup>提出了一种基于小波分解的抗速度波门拖引干扰的方法,通过对目标多普勒回波信号

进行小波分解,选取适当的阈值,滤除波门拖引的调频部分,并对回波信号进行小波重构修正,得到消除干扰的回波信号,再进行目标的跟踪检测。Xu Dihua 等<sup>[16]</sup>针对密集干扰环境中的米波段 UCA 雷达提出了一种改进的抗干扰方法,这种方法基于最小均方(LS)无约束和 Gram-Schmidt 正交化方法(GSO)对干扰进行抑制。

总之,由于一系列新技术在雷达上的应用,如全固态、全相参、捷变频、脉压、层叠波束、超低副瓣天线、数字波束形成、自适应、相控阵以及在发射机上增加输出功率管理系统等,使雷达能够自适应于各种作战环境,参数选择上实现了波形可变、脉宽可变、重频可变、极化可变以及自适应发射频率选择、瞬时寂静等,抗干扰能力明显提高。

### 1.2.1 雷达干扰技术的发展概况

雷达干扰技术是随着雷达探测技术的出现而出现的,它们相互促进,共同发展,在过去半个多世纪里经历了以下三个发展阶段<sup>[17,18]</sup>:第一个发展阶段是 20 世纪 40~50 年代,这一阶段为雷达干扰技术的发展初期。由于此阶段雷达发射信号频率不变,发射信号波形也很简单,所以相对应的干扰样式也很少,此阶段主要采取的是压制式干扰<sup>[19]</sup>,如宽带阻塞式干扰和窄带瞄准式干扰等,因此能否对雷达形成有效干扰主要看是否有足够的功率和频率对准。第二个发展阶段是 20 世纪 60~70 年代,这一阶段为雷达干扰技术的发展期。此时雷达已经开始广泛运用多种抗干扰技术措施,如频率捷变技术和脉宽捷变技术等。雷达干扰技术不仅是压制式干扰,还包括欺骗式干扰。在压制式干扰方面主要提高了干扰机的干扰功率并扩大了干扰频段,在欺骗式干扰方面提出了多种干扰样式,如距离欺骗、角度欺骗和速度欺骗等欺骗干扰样式。此外,在此基础上研制了具有多种欺骗干扰能力的应答式和转发式干扰机。第三个发展阶段是从 20 世纪 70 年代末至今,这一阶段为雷达干扰技术的成熟期。由于各种新体制雷达(合成孔径雷达、脉冲多普勒雷达、大型相控阵雷达和脉冲压缩雷达)的出现和发展,雷达的探测性能和抗干扰能力有了非常大的提升,但同时雷达的干扰技术也在不断地向前发展,如雷达干扰技术在干扰方式、干扰信号样式、干扰设备和干扰载体等方面不断发展,灵巧噪声干扰技术、数字阵列干扰技术、自适应干扰技术、组网干扰技术等新的干扰技术相继产生。在干扰设备中采用了很多先进的数字电子技术,如数字储频技术、直接数字频率合成技术等。特别是随着大规模、超高速集成电路的发展,使得雷达干扰设备的复杂度和成本降低,可靠性提高,从而使雷达相干干扰技术大大发展,雷达相干干扰逐渐成为雷达干扰技术的主流。在干扰载体方面,舰船、飞机、卫星、导弹的快速发展,使得雷达干扰的实施更加灵活和方便。

### 1.2.2 弹载有源干扰技术的研究现状

弹载有源干扰技术是一种新型干扰技术,它具有其他干扰技术不可比拟的优势,它是利用导弹作为干扰机运载平台对敌方雷达进行有源干扰的技术。弹载干扰必须考虑弹载干

扰机体积小、功率小、数量多、作用距离远等特点,因此应该大力提高弹载干扰机能量的利用率和干扰资源的利用率,增强干扰机之间的信息交互能力。为了使各个干扰机可以进行协同干扰,弹载干扰信号必须和雷达信号具有很强的相干性,这样才能保证干扰能量尽可能多地进入雷达接收机,从而获得雷达的最大处理增益,在对抗组网雷达时充分发挥弹载干扰资源的最大效能。文献[20]~[22]针对线性调频脉冲压缩雷达进行了研究,并提出了移频干扰的方法。该干扰方法对基于线形调频的脉冲压缩雷达的干扰效果较好,它通过频谱搬移可以形成雷达假目标,假目标既可以超前,也可以滞后于真实的目标信号,从而实现了对线形调频脉冲压缩雷达的距离假目标进行干扰。文献[23]~[25]对卷积干扰技术进行了研究,从原理上对噪声卷积干扰进行了严格分析。分析结果表明,卷积干扰信号和雷达发射信号具有相同的频谱范围和很强的相干性,干扰能量可以完全进入雷达接收机,因此功率利用率很高,具有很强的功率优势。文献[26]~[28]对基于噪声卷积调制的灵巧噪声干扰进行了数学建模和仿真分析。仿真分析结果表明,灵巧噪声干扰能够获得脉冲压缩处理增益,而且和雷达发射信号处于同一频谱范围,从而有效降低了干扰机的干扰功率。文献[29]提出了用不同噪声信号与雷达信号相乘调制的干扰方法。通过仿真分析得出结论,不同的噪声调制信号具有不同的干扰效果,选择合适的噪声调制信号可以对线形调频脉冲压缩雷达达到压制式干扰或欺骗式干扰的效果。文献[30]提出了基于DRFM的弹载自卫式单脉冲雷达干扰技术,并介绍了交叉眼干扰技术的原理、特点和技术难点。文献[31]提出了利用波前扭曲引起跟踪雷达的角度跟踪失控,并给出了被干扰雷达角误差的分析和计算机仿真结果。文献[32]对基于两点源单脉冲雷达干扰技术进行了数学建模和仿真计算。结果表明,单脉冲雷达所接收的雷达信号与目标回波信号存在多普勒频差,并且随着距离的减小逐渐增大,当干扰信号功率不足时可能导致诱偏方向失控,当干扰信号功率相等时诱偏能力最强。文献[33]针对线性调频信号脉冲压缩雷达提出了间歇采样转发干扰的方法,并对该方法进行了数学建模和仿真分析。该方法采用DRFM对大时宽带宽积信号进行分段采样和转发,得到了很好的干扰效果,因此该方法可以对脉冲压缩雷达形成的逼真度很高的假目标串进行干扰。文献[34]对干扰机组网技术进行了研究,从理论上论证了多干扰机组网干扰的可行性,并给出了几种组网干扰方案。研究表明,组网干扰方式相对于其他干扰方式有很大的优势,它可以发挥网内各干扰机的最大效能使得干扰效果最优,而且对现代雷达的频率分集、频率捷变及射频掩护信号具有很好的干扰效果。

由于弹载干扰机在体积、功率和距离等多方面的限制,其干扰效果不佳,因此应当根据雷达的发射波形和抗干扰措施选择合适的干扰样式和协同干扰方式,充分发挥弹载干扰机的最大效能,实现干扰资源的最大化利用。由于突防导弹在不同的飞行阶段需要不同的干扰保护,因此通常要求弹载干扰机能够形成多种干扰样式,即通过参数的设置可以实现压制式干扰和欺骗式干扰两种干扰效果。

### 1.3 雷达抗干扰技术的发展趋势

根据近年来的相关文献资料,雷达抗干扰技术的最新发展方向主要集中在以下几个方面:

(1) 在信号处理领域,基于空时的自适应信号处理的雷达抗干扰技术受到了极大的重视。

(2) 对 ISAR 与 SAR 的欺骗式干扰及抗干扰研究是目前研究的难点和热点。

(3) 采用雷达组网体制或双(多)基地雷达技术,雷达针对抗欺骗式干扰的性能得到了很大的提高。

(4) 采用人工智能技术,雷达方具备根据复杂的干扰环境,自发地、实时地、智能地调整工作状态参数,从而实现回避干扰或在干扰时维持正常工作的能力。

(5) LPI 雷达可以降低干扰方侦察捕获雷达的概率<sup>[35]</sup>,从根本上减小雷达受干扰的可能性,具有很好的发展前景。

纵观雷达抗干扰技术的发展趋势,将国内外的研究现状进行对比,发现国内在雷达抗干扰领域与国外还存在着较大的差距,主要表现在以下方面:一是研究时间晚。例如,将智能方法用于雷达抗干扰的研究方面,国外在 20 世纪 80 年代初期就开始了,国内由于投入的经费和人力少,前期重视不够,90 年代中期才开始相关的研究。二是研究不够全面。例如, Van Brunt<sup>[36]</sup> 在 1982 年就非常全面且系统地论述了各种雷达干扰和抗干扰措施,而国内出现的相关专著未见如此全面介绍该方面的研究成果。此外,国外将多种技术与方法融合应用于雷达的抗干扰研究中,如将神经网络与遗传算法相结合、神经网络方法与时频分析相结合等。但目前国内进行的雷达抗干扰新技术、新方法的研究还比较孤立,研究深度不够。三是验证实现与应用有较大差距。发达国家的很多理论研究成果已成功应用于武器装备,实现了理论与装备的实际结合,但国内的许多理论与方法还没有很好地和武器装备结合起来。四是研究成果有较大差距。例如, SAR、ISAR 以及有源相控阵等新体制雷达的抗干扰能力研究和美国还存在很大差距。

### 1.4 本书的主要内容与章节安排

本书对雷达干扰技术和抗干扰技术进行研究,采取了理论研究和实验仿真相结合的方法,得到了一些有意义的结论,为雷达弹载有源干扰技术的研究提供参考。

本书共分为 10 章。

第 1 章为绪论,首先介绍了雷达系统,论述了雷达干扰和抗干扰技术研究的背景和意义;其次对雷达干扰和抗干扰技术发展的概况和研究现状进行了介绍,分析了雷达干扰技



术各个阶段的特点和技术方法,并指出了雷达抗干扰研究的发展趋势;最后对雷达弹载干扰技术进行了介绍并对现有的干扰技术进行了简要的分析和研究。

第2章首先简要介绍了雷达干扰技术理论,对雷达干扰的分类、干扰设备的基本组成、作战对象、基本方法和干扰条件作了阐述;然后对雷达弹载干扰方程进行了数学推导和分析;最后对几种典型的雷达压制式干扰技术和欺骗式干扰技术进行了研究。

第3章首先介绍了干扰机的构成,分别讨论了实现遮盖式干扰与欺骗式干扰时干扰机的基本组成、工作原理和主要的性能要求;然后讨论了这两种干扰机的有效干扰空间以及有效干扰空间的能量计算和时间计算问题;最后讨论了有干扰信号的产生、调制和控制方面的关键技术。

第4章介绍了DRFM的工作原理和系统组成,对基于DRFM的正交双通道进行了数学建模,提出了基于DRFM的弹载组网干扰技术方案,并对新的弹载组网干扰技术方案的工作模式和工作流程进行了研究,最后分析了弹载组网对频率分集雷达、射频掩护雷达、频率捷变雷达和组网雷达的干扰效果。

第5章对单脉冲雷达的弹载干扰技术进行了研究,主要介绍了交叉眼干扰对单脉冲雷达的干扰原理,针对两点源交叉眼的不足提出了弹载多点源交叉眼干扰,并对基于比幅测角的单脉冲雷达进行了干扰建模和仿真计算。结果表明,弹载多点源交叉眼干扰较两点源交叉眼的干扰能力更强、更稳定,并且可以进行欺骗角度参数的设定。

第6章首先对基于噪声卷积调制的干扰样式进行了数学建模和仿真分析,结果表明,噪声卷积调制干扰和雷达信号具有很强的相干性,干扰能力可以得到充分利用;然后对基于间歇采样转发的弹载干扰样式进行了数学建模的仿真分析,结果表明,间歇采样转发干扰可以对雷达形成假目标串;最后提出了基于噪声卷积调制的弹载间歇采样转发干扰样式,研究结果表明该干扰样式具有很好的干扰效果。

第7章首先介绍了射频干扰的类型和雷达的基本原理,建立了脉冲压缩雷达信号的基本模型;其次分析了相位编码脉冲压缩雷达信号和自适应天线阵列,并建立了天线阵列信号模型,为后面的研究提供了数学基础。

第8章在介绍常用的自适应波束形成准则的基础上,提出了将子空间正交投影算法应用到脉冲压缩雷达信号的自适应抗干扰中,针对子空间分解过程中特征向量不能完全正交的问题,提出了约束化的子空间正交投影技术,最后通过仿真实验验证了该算法的有效性。

第9章根据脉冲压缩雷达接收机的信号处理特性,提出了一种联合的自适应波束形成算法。通过仿真实验证明了提出的算法既有效地抑制了强干扰信号,又提高了雷达接收机的信号检测能力。

第10章是全文的工作总结和技术展望。