国防科技图书出版基金

“十二五”国家重点出版规划项目

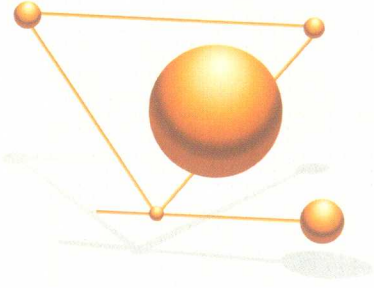
雷达与探测前沿技术丛书

极化雷达信号处理与抗干扰技术

Signal Processing and Anti-interference Techniques of Polarimetric Radar

施龙飞 马佳智 庞晨 等著

- 极化测量波形设计与处理
- 极化与阵列联合滤波处理
- 复杂干扰环境下目标检测
- 欺骗假目标干扰极化识别



国防工业出版社
National Defense Industry Press

需要全本请访问 www.ertongbook.com

国防科技图书出版基金

“十二五”国家重点出版规划项目
雷达与探测前沿技术丛书

极化雷达信号处理与抗干扰技术

Signal Processing and Anti – interference Techniques for Polarimetric Radar

施龙飞　马佳智　庞　晨　李永祯　著

哈尔滨工程大学 藏書 图書馆

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

极化雷达信号处理与抗干扰技术 / 施龙飞等著.
—北京 : 国防工业出版社, 2019.10
(雷达与探测前沿技术丛书)
ISBN 978-7-118-11936-7

Ⅰ. ①极… Ⅱ. ①施… Ⅲ. ①极化(电子学)-雷达信号处理-研究②极化(电子学)-雷达抗干扰-研究 Ⅳ. ①TN957.51②TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 214749 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京龙世杰印刷有限公司印刷
新华书店经售
*
开本 710×1000 1/16 **印张** 16¾ **字数** 301 千字
2019 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 **印数** 1—2000 册 **定价** 99.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777 发行邮购:(010)88540776
发行传真:(010)88540755 发行业务:(010)88540717

致　读　者

本书由中央军委装备发展部**国防科技图书出版基金**资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就，国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作，使有限的基金发挥出巨大的效能，需要不断摸索、认真总结和及时改进，更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金
第七届评审委员会组成人员

主任委员	柳荣普			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	许西安	谢晓阳		
委员 （按姓氏笔画排序）	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨　伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆　军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

随着电磁用频活动的增长、电子对抗的升级以及雷达探测场景的拓展，先进电子干扰、工业电磁干扰以及自然环境杂波干扰大量涌入雷达接收机，严重影响雷达的正常探测，甚至使其丧失工作能力。

极化用以描述电磁波的矢量特征，是除幅度、频率、相位以外的基本参量。极化与雷达探测过程密切相关，包括天线辐射、大气传播、目标散射、有源干扰辐射/无源干扰散射、杂波散射、天线接收以及信号处理等在内的诸多环节，深入分析这些环节中与极化有关的特性、机理，进而对雷达体制、波形、信号处理进行优化设计，将会有效地提高雷达的检测能力、识别能力以及抗干扰能力。随着近年来雷达面临干扰威胁的不断增大，研究者们已经愈加重视挖掘雷达目标与雷达干扰在极化域的差异，抑制干扰并提升雷达在干扰环境下对目标的发现能力、测量能力以及识别能力。

本书作者在2009年出版了《雷达极化抗干扰技术》，该书是国内第一本专门讲述雷达极化域抗干扰技术的专著。近年来，围绕这一方向，作者在该领域持续研究，已经大大丰富了极化域抗干扰的技术体系，从干扰极化特性、干扰抑制方法、干扰识别方法、干扰背景下目标检测与参数测量方法等，从理论模型、效应机理、应用技术以及性能分析等方面全面地拓展了极化抗干扰技术，并且在关键技术试验验证、现役雷达极化抗干扰改造、新体制极化雷达系统论证等方面取得了大量实质性进展。

本书较为系统地介绍了极化雷达抗干扰方法及其信号处理问题，可供相关领域的科技工作者阅读参考。全书共分6章：第1章，介绍雷达面临的干扰威胁以及雷达抗干扰、极化抗干扰技术研究现状和存在的问题；第2章介绍典型的极化雷达体制、极化信息测量方法和校准方法；第3章按照从简单到复杂的顺序，介绍典型压制干扰的极化域及联合域抑制方法；第4章研究极化雷达目标检测问题，特别针对主瓣多点源干扰等复杂干扰场景，研究基于联合谱特征的目标检测方法；第5章研究极化雷达目标测角问题，主要围绕角度诱偏干扰、角闪烁干扰对象，研究干扰背景下的目标测角方法；第6章系统研究有源假目标干扰的极化鉴别问题，干扰对象包括单极化、双极化、全极化干扰以及组合干扰。

本书由施龙飞研究员、马佳智讲师、庞晨副研究员、李永祯研究员执笔。在

撰写过程中，宗志伟、任博、毛楚乔、胥文泉、张梦琪、王福来、崔刚、全源、陆雅薇、范金涛等研究生提供了大量帮助。

书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

著者

2019.1

目　录

第1章　绪论 …… 001
1.1　引言 …… 001
1.2　雷达面临的干扰威胁 …… 002
1.2.1　雷达干扰技术的发展历程 …… 002
1.2.2　雷达干扰技术的发展趋势 …… 003
1.3　雷达抗干扰技术发展现状 …… 005
1.3.1　空域雷达抗干扰 …… 005
1.3.2　频域雷达抗干扰 …… 006
1.3.3　时域雷达抗干扰 …… 007
1.3.4　“功率域”雷达抗干扰 …… 008
1.3.5　“调制域”雷达抗干扰 …… 008
1.3.6　极化域雷达抗干扰 …… 009
1.3.7　相控阵雷达抗干扰 …… 009
1.3.8　雷达组网抗干扰 …… 009
1.4　雷达极化抗干扰技术发展现状 …… 010
1.4.1　干扰极化抑制方面 …… 011
1.4.2　干扰背景下目标极化增强方面 …… 011
1.4.3　极化与时－频－空域联合干扰抑制方面 …… 012
1.4.4　有源假目标干扰的极化鉴别方面 …… 012
1.4.5　无源诱饵的极化识别方面 …… 013
参考文献 …… 013
第2章　雷达极化测量体制与方法 …… 017
2.1　极化雷达体制概述 …… 017
2.1.1　极化雷达体制发展历程 …… 017
2.1.2　极化雷达系统发展 …… 020
2.2　雷达极化测量方法 …… 022
2.2.1　分时极化体制测量方法 …… 023
2.2.2　同时极化体制测量方法 …… 025
2.2.3　复合编码同时极化测量方法 …… 029

2.2.4 准同时极化体制测量方法 …… 036
2.3 雷达极化校准方法 …… 038
2.3.1 雷达极化校准概念 …… 038
2.3.2 雷达极化校准主要方法 …… 040
2.3.3 极化测量与校准小结 …… 045
参考文献 …… 046
第3章 极化雷达有源干扰抑制 …… 049
3.1 多点源干扰的雷达极化特性 …… 049
3.1.1 多点源干扰的极化比分布特性 …… 050
3.1.2 多点源干扰的极化度特性 …… 062
3.1.3 小结 …… 073
3.2 主瓣干扰的极化对消技术 …… 073
3.2.1 极化对消系数的迭代计算方法 …… 074
3.2.2 极化对消系数的直接计算方法 …… 084
3.3 主旁瓣同时干扰的主辅阵联合极化滤波 …… 092
3.3.1 双极化主辅阵构型及信号模型 …… 092
3.3.2 阵列加权系数的迭代计算方法 …… 095
3.3.3 阵列加权系数的协方差矩阵计算方法 …… 097
3.3.4 仿真实验与分析 …… 100
3.3.5 外场实验验证 …… 103
3.4 主瓣干扰/地杂波的频域—极化域联合对消技术 …… 106
3.4.1 基本原理 …… 106
3.4.2 仿真实验 …… 108
参考文献 …… 108
第4章 干扰背景下极化雷达目标检测 …… 110
4.1 无干扰情况下极化雷达目标检测能力分析 …… 110
4.1.1 双极化接收雷达的双阈值检测方法 …… 110
4.1.2 发射极化优化对雷达检测性能的改善 …… 120
4.2 主瓣干扰背景下极化雷达目标检测技术 …… 121
4.2.1 极化对消的 SINR 改善性能分析 …… 121
4.2.2 雷达收发极化联合优化与目标检测 …… 128
4.3 主瓣多点源干扰背景下极化雷达目标检测技术 …… 136
4.3.1 极化—空域联合谱模型 …… 136
4.3.2 基于联合谱极化散度特征的目标检测方法 …… 139
4.3.3 基于联合谱极化分布特征的目标检测方法 …… 144

4.3.4 小结 …… 151
4.4 杂波背景下极化雷达目标检测方法概述 …… 151
4.4.1 杂波背景下极化似然比检测器 …… 151
4.4.2 杂波背景下极化特征检测器概述 …… 155
参考文献 …… 156
第5章 干扰背景下极化雷达目标测角 …… 158
5.1 极化雷达测角体制 …… 158
5.1.1 极化单脉冲测角体制 …… 158
5.1.2 极化阵列测角体制 …… 164
5.2 主瓣干扰背景下极化单脉冲雷达测角方法 …… 165
5.2.1 双极化单脉冲信号模型 …… 165
5.2.2 极化滤波对单脉冲测角的误差形成机理 …… 169
5.2.3 主瓣干扰背景下单快拍目标角度估计方法 …… 172
5.2.4 主瓣干扰背景下多快拍目标角度估计方法 …… 177
5.3 低空角闪烁背景下极化雷达目标测角方法 …… 186
5.3.1 低空目标镜像角闪烁效应形成机理 …… 187
5.3.2 低空目标镜像角闪烁的极化效应分析 …… 189
5.3.3 基于极化分集的低空镜像角闪烁抑制方法 …… 197
5.4 小结 …… 205
参考文献 …… 205
第6章 有源干扰极化特征鉴别 …… 208
6.1 有源干扰极化特征鉴别技术分类 …… 208
6.2 基于双极化接收雷达体制的有源干扰极化鉴别方法 …… 210
6.2.1 固定极化窄带有源多假目标鉴别 …… 210
6.2.2 宽带有源假目标鉴别 …… 216
6.3 基于发射极化分集体制的有源干扰极化鉴别方法 …… 222
6.3.1 随机极化假目标鉴别 …… 222
6.3.2 脉内极化调制假目标鉴别 …… 228
6.3.3 全极化假目标鉴别 …… 237
6.3.4 压制干扰背景下有源假目标的组合鉴别方法 …… 245
6.4 小结 …… 250
参考文献 …… 251

Content

Chapter 1 Introduction ····· 001
1.1 Foreword ····· 001
1.2 Radar interference threat ····· 002
1.2.1 The development of radar interference technology ····· 002
1.2.2 The development trend of radar interference technolagy ····· 003
1.3 Development of the radar anti – interference technology ····· 005
1.3.1 Spatial domain radar anti – interference ····· 005
1.3.2 Frequency domain radar anti – interference ····· 006
1.3.3 Time domain radar anti – interference ····· 007
1.3.4 Power domain radar anti – interference ····· 008
1.3.5 Modulation domain radar anti – interference ····· 008
1.3.6 Polarization domain radar anti – interference ····· 009
1.3.7 Phased radar anti – interference ····· 009
1.3.8 Radar netting anti – interference ····· 009
1.4 Development of the radar polarization anti – interference technology ····· 010
1.4.1 Interference polarization suppression ····· 011
1.4.2 Target polarization enhancement in interference background ····· 011
1.4.3 Polarization and time – frequency – spatial domain joint interference suppression ····· 012
1.4.4 Polarization discrimination of active false target jamming ··· 012
1.4.5 Polarization recognition of passive decoy ····· 013
References ····· 013
Chaptet 2 Schemes and methods of the radar polarimetry ····· 017
2.1 Overview of the polarimetric radar schemes ····· 017
2.1.1 Development of the polarimetric radar schemes ····· 017
2.1.2 Development of the polarimetric radar systems ····· 020
2.2 Methods of the radar polarimetry ····· 022

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.2.1 Interleaved – pulsed polarimetric measuring method ····· 023
2.2.2 Simultaneous pulsed polarimetric measuring method ····· 025
2.2.3 Simultaneous pulsed polarimetric measuring method with composite coded signal ····· 029
2.2.4 Quasi – simultaneous pulsed polarimetric measuring method ····· 036
2.3 Polarimetric radar calibration methods ····· 038
2.3.1 Concept of polarization calibration ····· 038
2.3.2 Main method of polarization calibration ····· 040
2.3.3 Conclusions of polarization measurement and calibration ····· 045
References ····· 046
Chapter 3 Active interference suppression of the polarimetric radar ··· 049
3.1 Polarization characteristics of multi – point interference ····· 049
3.1.1 Polarization ratio distribution of the multi – point interference ····· 050
3.1.2 Degree of polarization characteristics of multi – point interference ····· 062
3.1.3 Conclusion ····· 073
3.2 Polarization cancellation techniques for mainlobe interference ····· 073
3.2.1 Iterative calculation method for the polarization cancellation coefficient ····· 074
3.2.2 Direct calculation method for the polarization cancellation coefficient ····· 084
3.3 Joint polarization filtering of main and auxiliary antenna for mainlobe and sidelobe simultaneous interferences ····· 092
3.3.1 Polarization array design ····· 092
3.3.2 Iterative calculation method for the array weighting coefficient ····· 095
3.3.3 Covariance matrix calculation method for the array weighting coefficient ····· 097
3.3.4 Simulations and analysis ····· 100
3.3.5 Field experiments ····· 103
3.4 Polarization – frequency domain combined cancellation technique for mainlobe interference and ground clutter ····· 106
3.4.1 Fundamental ····· 106

3.4.2 Simulations ····· 108
References ····· 108
Chapter 4 Target detection of polarimetric radar in interference background ····· 110
4.1 Analysis of target detection ability of Polarimetric Radar without interference ····· 110
4.1.1 Dual – threshold detection method for dual – polarization receiving radar ····· 110
4.1.2 Improvement of radar detection performance with the optimization of transmitted polarization ····· 120
4.2 Target detection technology of polarimetric radar under the background of mainlobe interference ····· 121
4.2.1 Performance analysis of SINR for polarization cancellation ····· 121
4.2.2 Joint optimization of radar transceiver polarization and target detection ····· 128
4.3 The target detection technology of polarimetric radar under the background of mainlobe multi – point source jamming ····· 136
4.3.1 Polarization – spatial joint spectral model ····· 136
4.3.2 Target detection method based on polarization divergence feature of joint spectral ····· 139
4.3.3 Target detection method based on polarization distribution feature of joint spectral ····· 144
4.3.4 Conclusion ····· 151
4.4 Summary of Target Detection methods for polarimetric radar under clutter background ····· 151
4.4.1 Polarimetric likelihood ratio detector in clutter background ··· 151
4.4.2 Summary of polarization characteristic detector in clutter background ····· 155
References ····· 156
Chapter 5 Angle measurement of polarimetric radar target in interference background ····· 158
5.1 Polarimetric radar angle measurement system ····· 158
5.1.1 Polarized monopulse angular measurement system ····· 158
5.1.2 Polarized array angular measurement system ····· 164

5.2 Angle measurement method of polarimetric monopulse radar under the background of main lobe interference ····· 165
5.2.1 Dual polarization monopulse signal model ····· 165
5.2.2 The error caused by polarization filter for monopulse angle measurement system ····· 169
5.2.3 A single – snapshot approach for estimating target angle under the ground of main – lobe interference ····· 172
5.2.4 A multi – snapshot approach for estimating target angle under the ground of main – lobe interference ····· 177
5.3 A target angle measurement method for polarimetric radar under the background of low altitude angular glint ····· 186
5.3.1 Formation mechanism of low altitude target angular glint ··· 187
5.3.2 Polarization effect analysis of low altitude target angular glint ····· 189
5.3.3 Angular glint suppression method based on polarization diversity ····· 197
5.4 Conclusion ····· 205
References ····· 205
Chapter 6 Active jamming polarization characteristic identification ····· 208
6.1 Classification of polarization characteristics of active jamming ····· 208
6.2 Active jamming polarization identification method based on dual polarization receiver radar system ····· 210
6.2.1 Identification of fixed polarization active multi – false target ····· 210
6.2.2 Identification of active wideband false target ····· 216
6.3 Active jamming polarization discrimination method based on transmit polarization diversity scheme ····· 222
6.3.1 Identification of polarization agile false target ····· 222
6.3.2 Identification of intrapulse polarization modulation false target ····· 228
6.3.3 Identification of fully polarized false target ····· 237
6.3.4 A combined identification method for active false target under the background of suppression jamming ····· 245
6.4 Conclusion ····· 250
References ····· 251

第1章 绪论

1.1 引 言

随着电子对抗的升级、电磁用频活动的增长以及雷达探测场景的拓展，先进电子干扰、工业电磁干扰以及自然环境杂波干扰大量涌入雷达接收机，以压制、欺骗等方式破坏雷达对目标信号的检测、测量、跟踪和识别。无论是民用气象雷达、航管雷达、遥感雷达，还是军用情报雷达、火控雷达，无不深受干扰的影响。

雷达干扰技术自第二次世界大战首次运用以来，经历多个历史时期的发展，已经成为现代信息战场的主角。全数字、分布式、智能化的先进干扰平台，灵巧、精确化的干扰样式，以及新型突防干扰战术的出现，都使得雷达探测面临着极大的威胁，有限的抗干扰手段在复杂的干扰环境威胁下“捉襟见肘”。

雷达抗干扰本质上是利用干扰信号与目标信号的特性和特征差异，抑制干扰而保留或增强目标信号。干扰信号与目标信号的差异可能在时域、频域、空域和极化域的任一域中出现，相应地也存在着不同域的抗干扰方法。

极化用以描述电磁波的矢量特征，是除幅度、频率、相位以外的基本参量，且与雷达探测过程中诸多环节密切相关，充分获取并有效利用这些极化信息，对于提高雷达抗干扰能力具有重要作用。近年来，目标与干扰在极化域的差异已为人们所逐步重视，极化域抗干扰技术获得了重要进展，在主瓣干扰抑制等方面获得了有力的应用，证明了极化抗干扰的重要潜力。随着雷达抗干扰朝综合化（综合利用时域、频域、空域、极化域的多种信息、多种技术手段，综合利用多个平台）的方向发展[1-3]，极化信息作为电磁波的一种重要基本信息，与传统的时域、频域、空域信息的联合使用，对于解决雷达面临的诸多抗干扰难题，具有十分重要的推动作用。

本书作者十多年来一直从事雷达极化信号处理与抗干扰技术方面的研究，较为系统地研究发展了雷达极化抗干扰技术，若干关键技术在现役雷达、雷达导引头改造中获得了成功验证，已将一些新的方法运用到新型号雷达中。本书内容对于雷达系统论证、雷达抗干扰方法改进都具有指导意义。

下面简要介绍雷达干扰、抗干扰以及极化抗干扰技术的发展现状及面临的问题。

1.2 雷达面临的干扰威胁

电子干扰技术的发展可追溯到20世纪初，首次应用是1904—1905年日俄战争中对舰载无线电通信设备的干扰，而1914年的第一次世界大战中，德国军舰向英国军舰无线电台发射的强噪声干扰是电子干扰首次在实战中的专门运用。第二次世界大战时期，电子干扰技术得到迅速发展，干扰领域从通信发展到雷达，干扰范围从海战场扩展到空战场和陆战场。越南战争、中东战争时期，电子干扰技术得到全面的应用与发展，逐步从一种作战保障技术上升为一种战斗手段。自海湾战争以来，包括雷达干扰在内的电子干扰技术的运用已成为美国等西方国家实施大规模军事行动的核心作战手段，E/A－6B电子战飞机、EC－130H通信干扰飞机成为战争期间掩护美军突防打击力量的必备选择，贯穿战争全过程。

1.2.1 雷达干扰技术的发展历程

雷达干扰技术的发展与雷达工作体制以及雷达抗干扰技术的发展息息相关，它的发展过程大致分为以下三个阶段[4]：

（1）20世纪40—50年代，雷达波形比较简单，工作频段相对固定，几乎没有抗干扰能力，这一时期的雷达干扰样式也比较简单，主要是瞄准式和阻塞式噪声干扰，干扰对象主要是警戒雷达或目标指示雷达。

（2）20世纪60—70年代，雷达系统运用了许多反干扰技术，如频率捷变、脉宽捷变、重复周期捷变等，有效地减轻或消除了噪声干扰和简单欺骗干扰的影响，此阶段干扰技术研究也相应出现了一个高潮，具体表现：一方面研究了更大功率的噪声干扰技术和频率覆盖范围更宽的噪声干扰技术，以改善噪声干扰的压制效果；另一方面开发了具有多种欺骗干扰样式的应答式和转发式干扰机，干扰样式包括距离欺骗、角度欺骗、速度欺骗、倒圆锥扫描、距离波门拖引以及噪声/欺骗双模干扰等，并先后成功应用于干扰机系统。

（3）20世纪70年代以后，随着计算机、大规模集成电路、固态功率放大器、微波单片集成电路、高效固态功率模块、固态相控阵天线以及低噪声固态功率放大器等技术或器件的成熟与应用，一些新体制雷达（如脉冲多普勒雷达、脉冲压缩雷达、相控阵雷达、合成孔径雷达等）开始得到了广泛应用，这些新体制雷达采用了许多新技术，如波形调制、相参积累、超低旁瓣天线技术、旁瓣对消等，大大提高了雷达系统的抗干扰能力，这也就促进了新型雷达干扰技术的发展，射频存储转发、间歇采样等干扰技术，机载拖曳式诱饵、舷外有源诱饵等角度欺骗干

扰，以及航迹欺骗干扰、狼群干扰、蜂群干扰、空射诱饵等新型干扰方式不断涌现，雷达面临的干扰环境威胁愈加严重。

1.2.2　雷达干扰技术的发展趋势

现代战场雷达对抗的不断升级、器件水平的不断提升，给雷达干扰技术的发展带来了新的动力和契机，呈现出新的发展趋势，如平台一体化、分布式协同、智能化等。

例如，对于机载雷达对抗而言，在综合电子战（IEWS）一体化的设计理念下，雷达对抗的各项功能已经融入 IEWS 系统中，改变了各功能设备相互独立的传统体制。借助于宽带高速全数字处理平台、综合射频孔径、宽带相控阵等先进技术的不断突破和成熟，基于一体化的总体设计，新型雷达对抗设备已经打破了电子情报（ELINT）、电子支援（ESM）、雷达告警（RWR）、测向（DOA）以及干扰功能之间的界限，甚至在雷达、雷达侦察、雷达干扰、通信、通信干扰之间实现射频和数字器件的整合，平台一体化程度不断提高。

此外，分布式协同干扰成为一种重要的发展趋势，其利用多个干扰平台之间的协同工作提高系统综合对抗能力，能够合理分配干扰资源以实现电磁频谱对空域、时域的合理覆盖与控制，也能够实现基于平台间信号协同的各种新型干扰样式。近年来，随着低成本无人机平台技术的发展，以分布式、无人化为主要特点的蜂群干扰得到了飞速发展。蜂群干扰一般由携载小型干扰机的大规模集群无人机平台组成，利用蜂群控制与管理、自主编队飞行、蜂群通信和集群感知与态势共享等技术进行协同作战，相比于传统干扰，小型无人机反射面积更小、成本更低，可以快速补充，且系统具有稳定性，损失一定数量的无人机并不会对战斗力造成致命的损失。其主要优点包括[5]：尺寸较小，隐蔽性好；成本低廉，战损比高；数量优势，饱和攻击；单个平台对于整个集群的影响不大；不同无人机搭载不同载荷，整体执行任务。

蜂群干扰主要有以下两种作战形式[6,7]：

（1）雷达诱饵。运用低成本蜂群，诱导敌方防空系统开机，可以获取敌方雷达各种参数进而引导反辐射导弹攻击。

（2）饱和式电子攻击。利用蜂群无人机的数量优势、隐蔽性实施抵近干扰（图 1.1），使敌方防空系统能力饱和或瘫痪。

此外，蜂群无人机还可以进行自杀式袭击，在装载战斗部后，利用数量优势和隐蔽性，越过敌方防御系统并通过碰撞实施目标摧毁。

随着现代战场智能化作战的不断发展，干扰样式也逐渐朝着精确化、智能化的方向发展，认知电子战也逐渐进入人们视野。

精确干扰技术是通过在对威胁雷达信号“认知”的基础上，精确控制干扰时

需要全本请访问 www.ertongbook.com