



国防科技图书出版基金

# RADAR

# 雷达抗干扰技术

## Radar Anti-jamming Technology

王满玉 程柏林 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 雷达抗干扰技术

Radar Anti-jamming Technology

王满玉 程柏林 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

雷达抗干扰技术/王满玉,程柏林编著. —北京:国防工业出版社,2016.3

ISBN 978-7-118-10812-5

I. ①雷… II. ①王… ②程… III. ①雷达抗干扰-研究 IV. ①TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 041011 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16 字数 323 千字

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 85.00 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

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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。

**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总装备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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作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	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	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		

# 序

随着现代电子技术的迅猛发展,电子战在战争中所起的作用越来越大,已成为未来战争获胜的关键因素之一。雷达是现代信息化作战条件下战场信息获取、态势感知的关键装备,伴随着雷达在作战中作用的日益突显,反雷达技术也在迅速发展。尤其是在当前基于信息系统体系作战条件下,战场的电磁环境变得极其复杂,这就对雷达的工作性能与生存能力构成了严峻威胁与挑战。在复杂电磁环境作战条件下雷达能否具备较强的抗干扰能力和生存能力,以确保其作战效能得到充分发挥,已成为现代战争取胜的重要因素。因此,如何确保在现代战争复杂电磁环境中己方雷达正常工作的同时,又不被敌方发现和遭受攻击,是世界各国备受重视和努力探索的课题之一。

本书对雷达在复杂电磁环境下的抗干扰技术理论与方法进行了全面系统的梳理分析。内容涵盖了当前已得到广泛应用的雷达自适应频率捷变、空间滤波、功率选择、杂波抑制、极化对抗等雷达抗干扰技术。同时,本书还介绍了近年来出现的雷达被动探测和定位等抗干扰新方法、新成果,对解决雷达受到强干扰时无法准确获取目标位置信息的技术难题,具有重要意义。

本书所涉及的雷达抗干扰技术工作原理、实现方法等,阐述清晰、内容全面。本书的出版对研究雷达在复杂电磁环境中的对抗技术具有很好的借鉴和实用价值,可作为从事雷达科研和教学工作者的的重要参考。

中国工程院院士 毛二可  
2016年3月于北京

# 前 言

现代战争是以电子战为先导,陆海空天电为一体的立体化高科技战争,战场电磁环境非常复杂,各种有意、无意电磁干扰对雷达工作构成了严重威胁,雷达能否在强电子对抗环境下正常工作,对于战争的胜负有着至关重要的作用。因此,深入研究复杂电磁环境下的雷达抗干扰技术,对于提高雷达在现代战争基于信息系统体系作战条件下的生存能力和作战效能,具有重大现实意义。

本书全面系统地总结分析了雷达的抗干扰技术理论和方法。特别是针对在强电磁干扰条件下,雷达对目标“看不见”、“跟不稳”等问题,研究分析了国内外近年来得到应用的雷达被动探测和定位等抗干扰新体制、新方法,以提高雷达在复杂电磁环境下的工作能力和综合作战效能。

全书共分10章。第1章介绍了复杂电磁环境,雷达干扰分类及特点,雷达抗干扰研究现状、基本思路和评估方法,以及抗干扰技术新特点及发展方向等内容;第2章介绍了雷达自卫距离;第3章介绍了典型雷达信号特点和雷达抗干扰信号设计;第4章介绍了固态功率合成和脉冲压缩等功率对抗技术;第5章介绍了副瓣对消、副瓣消隐和自适应等空间对抗技术;第6章介绍了频率分集和频率捷变等频率对抗技术;第7章介绍了雷达信号全相参技术,固定和慢动杂波抑制技术;第8章介绍了极化对抗技术;第9章介绍了单/多机被动探测与定位技术;第10章介绍了多种新体制雷达抗干扰性能等内容。

本书可供从事雷达科研工作的工程技术人员参考,也可为高等院校雷达工程专业师生提供借鉴。

本书在编写过程中得到尹自生、吴彩华、李海鸿、胡乔林等专家教授大力支持和帮助。全书由尹自生教授审校。在编写本书时,参阅或引用了许多宝贵的文献资料。在此谨向上述各位和诸位作者表示衷心的感谢!

由于编者的学术和理论水平所限,书中难免存在错误和疏漏,敬请读者批评指正。

作者

2016年3月



# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 复杂电磁环境	1
1.1.1 复杂电磁环境基本概念	1
1.1.2 复杂电磁环境基本特征	4
1.1.3 复杂电磁环境对雷达探测的影响	6
1.2 雷达干扰	9
1.2.1 雷达干扰分类	9
1.2.2 雷达干扰特点	10
1.2.3 基本原理与干扰样式	11
1.3 雷达抗干扰	18
1.3.1 雷达抗干扰研究现状	18
1.3.2 研究雷达抗干扰基本思路	20
1.3.3 典型的雷达抗干扰能力评估指标	23
1.4 雷达抗干扰技术新特点与发展方向	27
1.4.1 雷达抗干扰技术新特点	27
1.4.2 雷达抗干扰技术发展方向	28
第 2 章 雷达自卫距离	33
2.1 正常条件下雷达距离方程	33
2.2 压制性积极干扰条件下雷达的自卫距离方程	34
2.2.1 干扰信号从主瓣进入时雷达自卫距离方程	34
2.2.2 干扰信号从副瓣进入时雷达自卫距离方程	36
2.3 杂波环境下雷达自卫距离方程	37
2.3.1 面分布杂波环境下雷达自卫距离方程	37
2.3.2 体分布杂波环境下雷达自卫距离方程	38

第3章	雷达信号设计 .....	40
3.1	典型雷达信号的特点 .....	40
3.1.1	固定载频矩形脉冲信号 .....	40
3.1.2	线性调频矩形脉冲信号 .....	41
3.1.3	相参脉冲串信号 .....	41
3.1.4	噪声信号 .....	43
3.2	雷达理想抗干扰信号设计 .....	45
3.2.1	从抗干扰的观点进行雷达设计 .....	45
3.2.2	抗干扰雷达信号形式选择基本原则 .....	47
3.2.3	典型雷达信号的抗干扰性能 .....	49
3.2.4	抗干扰雷达信号设计 .....	50
第4章	功率对抗技术 .....	54
4.1	固态功率合成技术 .....	55
4.1.1	新型雷达发射机 .....	55
4.1.2	固态功率合成原理 .....	56
4.2	脉冲压缩技术 .....	60
4.2.1	线性调频脉冲压缩原理 .....	61
4.2.2	相位编码脉冲压缩原理 .....	67
4.3	提高发射脉冲重复频率和积累技术 .....	72
4.3.1	提高雷达发射脉冲的重复频率 .....	72
4.3.2	雷达回波信号的积累技术 .....	73
第5章	空间对抗技术 .....	76
5.1	雷达受干扰空间 .....	76
5.1.1	雷达空间对抗能力与天线波束参数 .....	76
5.1.2	雷达天线波束参数及其限制 .....	77
5.2	空间滤波技术 .....	80
5.2.1	空间滤波概念 .....	80
5.2.2	副瓣对消技术 .....	81
5.2.3	副瓣消隐技术 .....	83
5.2.4	自适应副瓣对消技术 .....	83

5.2.5	自适应天线阵抗干扰	85
<b>第6章</b>	<b>频域对抗技术</b>	<b>88</b>
6.1	频率分集技术	89
6.1.1	频率分集雷达工作原理	89
6.1.2	多种信号同时照射目标对检测性能的影响	90
6.1.3	频率分集雷达的优点	91
6.2	频率捷变技术	92
6.2.1	频率捷变对抗原理	92
6.2.2	频率捷变技术	97
6.2.3	自适应频率捷变技术	106
<b>第7章</b>	<b>杂波抑制技术</b>	<b>111</b>
7.1	全相参原理	111
7.1.1	全相参技术	111
7.1.2	多普勒频移	112
7.1.3	正交双通道相参检波	113
7.1.4	全相参回波信号特点	114
7.2	固定杂波抑制技术	116
7.2.1	固定杂波抑制原理	116
7.2.2	固定杂波抑制滤波器	117
7.3	慢动杂波抑制技术	120
7.3.1	慢动杂波抑制原理	120
7.3.2	MTI 杂波抑制技术	122
7.3.3	MTD 杂波抑制技术	123
7.3.4	自适应杂波抑制技术	125
7.3.5	空—时自适应杂波抑制技术	127
7.4	恒虚警率检测技术	129
7.4.1	检测门限与虚警概率	129
7.4.2	N - CFAR 组成和工作原理	131
7.4.3	C - CFAR 组成和工作原理	132
<b>第8章</b>	<b>极化抗干扰技术</b>	<b>136</b>
8.1	雷达极化抗干扰原理	136

8.1.1	电磁波的极化 .....	136
8.1.2	目标散射的极化性质 .....	142
8.1.3	任意极化波与任意极化天线之间的能量转换——极化 系数概念 .....	147
8.2	极化对抗技术 .....	150
8.2.1	双通道双差相移段变极化器 .....	151
8.2.2	极化主瓣对消技术 .....	156
8.2.3	自适应极化滤波 .....	157
<b>第9章</b>	<b>被动探测与定位技术</b> .....	<b>161</b>
9.1	被动探测与定位概述 .....	161
9.1.1	单机被动探测与定位 .....	162
9.1.2	双/多机被动探测与定位 .....	162
9.2	单机测角被动探测与定位技术 .....	163
9.2.1	数学模型 .....	164
9.2.2	算法讨论 .....	165
9.3	多机被动探测与定位技术 .....	170
9.3.1	坐标系及坐标转换 .....	170
9.3.2	多机被动探测与定位模型 .....	177
<b>第10章</b>	<b>新体制雷达抗干扰性能</b> .....	<b>183</b>
10.1	相控阵雷达抗干扰性能 .....	183
10.1.1	相控阵雷达特点 .....	184
10.1.2	相控阵雷达抗干扰措施 .....	188
10.2	超视距雷达抗干扰性能 .....	191
10.2.1	超视距雷达特点 .....	192
10.2.2	超视距雷达抗干扰措施 .....	196
10.3	双/多基地雷达抗干扰性能 .....	204
10.3.1	双/多基地雷达特点 .....	206
10.3.2	双/多基地雷达抗干扰措施 .....	208
10.4	合成孔径雷达抗干扰性能 .....	212
10.4.1	合成孔径雷达特点 .....	213
10.4.2	合成孔径雷达抗干扰措施 .....	213

10.5	毫米波雷达抗干扰性能 .....	222
10.5.1	毫米波雷达的特点 .....	222
10.5.2	毫米波雷达的抗干扰措施 .....	223
10.6	MIMO 雷达抗干扰性能 .....	225
10.6.1	MIMO 雷达特点 .....	227
10.6.2	MIMO 雷达抗干扰措施 .....	228
10.7	智能雷达初探 .....	230
10.7.1	智能雷达基本组成 .....	231
10.7.2	智能雷达技术 .....	233
	参考文献 .....	236

# Contents

<b>Chapter 1 Summary</b> .....	1
1.1 Complex Electromagnetic Environment .....	1
1.1.1 The basic concepts of complex electromagnetic environment ...	1
1.1.2 The basic characteristics of complex electromagnetic environment .....	4
1.1.3 Impact of complex electromagnetic environment on radar detection .....	6
1.2 Radar Jamming .....	9
1.2.1 Radar jamming classification .....	9
1.2.2 Radar jamming features .....	10
1.2.3 The basic principle and jamming mode .....	11
1.3 Radar Anti-Jamming .....	18
1.3.1 Research status on radar anti-jamming .....	18
1.3.2 The basic idea of radar anti-jamming .....	20
1.3.3 The typical evaluation index of radar anti-jamming .....	23
1.4 New Features and Development Direction on Radar Anti-Jamming .....	27
1.4.1 New features .....	27
1.4.2 Development direction .....	28
<b>Chapter 2 Radar Self-Protection Distance</b> .....	33
2.1 Radar Self-Protection Distance Under Normal Conditions .....	33
2.2 Radar Self-Protection Distance Under Active Blanket Jamming Condition .....	34
2.2.1 Radar self-protection distance under the interference signal from radar main lobe .....	34
2.2.2 Radar self-protection distance under the interference signal from radar side lobe .....	36

2.3	Radar Self-Protection Distance Under Clutter Environment .....	37
2.3.1	Radar self-protection distance under surface distribution clutter environment .....	37
2.3.2	Radar self-protection distance under body distribution clutter environment .....	38
<b>Chapter 3</b>	<b>Radar Signal Design .....</b>	<b>40</b>
3.1	The Features of Typical Radar Signal .....	40
3.1.1	Fixed carrier frequency rectangular pulse signal .....	40
3.1.2	Linear frequency modulation rectangular pulse signal .....	41
3.1.3	Coherent pulse train signal .....	41
3.1.4	Noise signal .....	43
3.2	Ideal Radar Anti-Jamming Signal Design .....	45
3.2.1	Radar design from anti-jamming .....	45
3.2.2	The basic principles of radar anti-jamming signal form design .....	47
3.2.3	The anti-jamming performance of typical radar signal .....	49
3.2.4	The design of anti-jamming radar signal .....	50
<b>Chapter 4</b>	<b>Power Countermeasure Technology .....</b>	<b>54</b>
4.1	Solid-State Power Combining Technology .....	55
4.1.1	New-type radar transmitter .....	55
4.1.2	The principle of solid-state power combining .....	56
4.2	Pulse Compress Technology .....	60
4.2.1	The principle of linear frequency modulation pulse compress .....	61
4.2.2	The principle of phase encoding pulse compress .....	67
4.3	Improving Transmit Pulse Repetition Frequency and Accumulation Technology .....	72
4.3.1	Improving radar transmit pulse repetition frequency .....	72
4.3.2	Accumulation technology of radar echo signal .....	73
<b>Chapter 5</b>	<b>Space Countermeasure Technology .....</b>	<b>76</b>
5.1	Space Radar Jammed .....	76
5.1.1	Radar space countermeasure capability and antenna beam	

parameters .....	76
5.1.2 Radar antenna beam parameters and restrictions .....	77
5.2 Spatial Filtering Technique .....	80
5.2.1 The concept of spatial filtering .....	80
5.2.2 Sidelobe cancellation technology .....	81
5.2.3 Sidelobe blanking technology .....	83
5.2.4 Adaptive sidelobe cancellation technology .....	83
5.2.5 Adaptive antenna array anti-jamming .....	85
<b>Chapter 6 Frequency Domain Countermeasure Technology .....</b>	<b>88</b>
6.1 Frequency Diversity Technique .....	89
6.1.1 The working principle of frequency diversity radar .....	89
6.1.2 The influence on detection performance when multiple signals illuminating the target .....	90
6.1.3 Advantages of frequency diversity radar .....	91
6.2 Frequency Agility Technique .....	92
6.2.1 The principle of frequency agility .....	92
6.2.2 Frequency agility technique .....	97
6.2.3 Adaptive frequency agility technique .....	106
<b>Chapter 7 Clutter Rejection Technology .....</b>	<b>111</b>
7.1 The Principle of Full Phase Parameter .....	111
7.1.1 Full phase parameter technique .....	111
7.1.2 Doppler shift .....	112
7.1.3 Orthogonal double-channel coherent detection .....	113
7.1.4 The features of full phase parameter echo signal .....	114
7.2 Fixed Clutter Rejection Technology .....	116
7.2.1 The principle of fixed clutter rejection .....	116
7.2.2 Fixed clutter rejection filter .....	117
7.3 Slow Moving Clutter Rejection Technology .....	120
7.3.1 The principle of slow moving clutter rejection .....	120
7.3.2 The method of MTI clutter rejection .....	122
7.3.3 The method of MTD clutter rejection .....	123
7.3.4 The method of adaptive clutter rejection .....	125
7.3.5 The method of space-time adaptive clutter rejection .....	127



7.4	Constant False Alarm Rate Detection Technology .....	129
7.4.1	Detection threshold and CFAR .....	129
7.4.2	The component and the working principle of N-CFAR .....	131
7.4.3	The component and the working principle of C-CFAR .....	132
<b>Chapter 8</b>	<b>Polarization Countermeasure Technology .....</b>	<b>136</b>
8.1	The Principle of Radar Polarization Anti-Jamming .....	136
8.1.1	Polarization of electromagnetic wave .....	136
8.1.2	Polarization property of target scattering .....	142
8.1.3	Energy conversion between arbitrary polarization wave and arbitrary polarization antenna the concept of polarization coefficient .....	147
8.2	Polarization Countermeasure Technology .....	150
8.2.1	Double-channel and double difference phase shift change polarizer .....	151
8.2.2	Polarization main lobe cancellation technology .....	156
8.2.3	Adaptive polarization filtering .....	157
<b>Chapter 9</b>	<b>Passive Detection and Location Technology .....</b>	<b>161</b>
9.1	The Summary of Passive Detection and Location Technology .....	161
9.1.1	Single machine passive detection and location .....	162
9.1.2	Dual/multi machines passive detection and location .....	162
9.2	Single Machine Angle Measurement Passive Detection and Location .....	163
9.2.1	Mathematical model .....	164
9.2.2	Algorithm discussed .....	165
9.3	Dual/Multi-Machines Passive Detection and Location Technology .....	170
9.3.1	Coordinates and coordinate conversion .....	170
9.3.2	Model of multi-machine passive detection and location .....	177
<b>Chapter 10</b>	<b>The Anti-Jamming Performance of New System Radar .....</b>	<b>183</b>
10.1	The Anti-Jamming Performance of Phased Array Radar .....	183
10.1.1	The features of phased array radar .....	184
10.1.2	The anti-jamming measures of phased array radar .....	188
10.2	The Anti-Jamming Performance of OTH Radar .....	191
10.2.1	The Features of OTH radar .....	192