

合成孔径雷达对抗导论

李宏 杨英科 许宝民 等著

合成孔径雷达 对抗导论

HECHENG KONGJING LEIDA
DUIKANG DAOLUN

李宏 杨英科 许宝民 等著

北



国防工业出版社

National Defense Industry Press

合成孔径雷达对抗导论

李 宏 杨英科 许宝民 著
郑光勇 宋胜利

国防工业出版社

·北京·

前 言

进入 21 世纪,以电子战为主要作战形式的信息化战争逐步成为战争的主导形态。在以信息为核心,以网络为平台的高技术信息化战争中,信息、信息系统、信息化平台逐步成为战场上的主战装备。战场武器装备的体系化、信息化成为重要发展趋势,谁控制了信息,就控制了战场的主动权。合成孔径雷达作为继光学侦察后新一代的战场侦察系统,以可全天时、全天候工作的优势,逐步成为战场电子战领域的骨干装备。本书正是综合了合成孔径雷达的技术特点、作战方式等因素,对该领域的对抗技术进行了研究和介绍。

全书共分八章。第 1 章为绪论,对电子战,雷达电子战以及合成孔径雷达电子战的基本概念与涉及到的技术进行了简要介绍;第 2 章为合成孔径雷达系统,包括合成孔径雷达原理、合成孔径雷达方程、合成孔径雷达检测统计特性、合成孔径雷达系统设计等;第 3 章为合成孔径雷达对抗技术,包括合成孔径雷达侦察技术、合成孔径雷达干扰技术、合成孔径雷达侦察干扰方程、对合成孔径雷达干扰中的谱分析、对合成孔径雷达干扰系统设计等;第 4 章为合成孔径雷达抗干扰技术,包括合成孔径雷达的时域、频域、空域等抗干扰技术;第 5 章为合成孔径雷达及其对抗试验,包括合成孔径雷达校飞试验、合成孔径雷达侦察性能试验、合成孔径雷达干扰效能试验等;第 6 章为对合成孔径雷达干扰效果评估,包括各种主观、客观以及综合评估方法等;第 7 章为反辐射攻击,包括对合成孔径雷达反

辐射攻击技术与对抗技术等;第8章为国外典型合成孔径雷达,包括部分国外典型星载、机载合成孔径雷达,逆合成孔径雷达等。

本书属电子战技术领域的著作,是作者多年理论研究和工程实践的总结,内容新颖、系统性强,对合成孔径雷达及其对抗系统的研制、试验、应用均具有广泛的指导意义,具有较高的学术水平和应用价值。

在本书编写的过程中,参考借鉴了多名专家学者的著作和科技文献,汲取了先进的学术观点,这些成果为本书的编写奠定了坚实的基础,在此表示诚挚的感谢。另外,还要感谢李自力、俞静一等同志对编写工作的大力支持。黄默、李飞、冯锦、刘磊、杨成林、陆静、李军虎、高云芳、石海、吴新、石长安、朱少广、何芳、徐阳等同志为本书提供了大量的资料和信息,王润枚高工对全书进行了校对,在此一并表示感谢。

受作者水平限制,书中可能存在不少的缺点和错误,敬请读者批评指正。

作者
2010.5

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电子战	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 雷达电子战	2
1.1.3 发展趋势	7
1.2 合成孔径雷达及对抗	9
1.2.1 合成孔径雷达	9
1.2.2 合成孔径雷达对抗	10
参考文献	14
第2章 合成孔径雷达系统	15
2.1 合成孔径雷达原理	15
2.1.1 距离分辨率	15
2.1.2 方位分辨率	16
2.1.3 孔径合成原理	17
2.1.4 成像算法	20
2.1.5 运动补偿	23
2.2 合成孔径雷达分类	23
2.2.1 按雷达与目标的相对运动分	23
2.2.2 按测绘区域分	24
2.2.3 信号处理	26
2.2.4 成像维度	26
2.2.5 应用领域	27
2.2.6 其他	27

2.3	合成孔径雷达方程	27
2.3.1	常规雷达方程	27
2.3.2	合成孔径雷达方程	28
2.4	合成孔径雷达检测统计特性	30
2.4.1	引言	30
2.4.2	常规雷达的检测统计特性	30
2.4.3	分布式目标的检测统计特性	30
2.4.4	孤立型目标的检测统计特性	36
2.5	合成孔径雷达辐射标定	37
2.5.1	误差源	38
2.5.2	辐射定标模型	39
2.6	合成孔径雷达系统设计	41
2.6.1	设计原则	42
2.6.2	需求分析	42
2.6.3	系统组成	43
2.6.4	可靠性	48
2.6.5	可维修性	49
2.6.6	主要指标	49
2.6.7	关键技术	53
	参考文献	54

第3章	合成孔径雷达对抗技术	55
3.1	对合成孔径雷达侦察技术	55
3.1.1	测向技术	55
3.1.2	测频技术	60
3.1.3	信号分选识别	63
3.2	对合成孔径雷达干扰技术	64
3.2.1	引言	64
3.2.2	非相干干扰	64
3.2.3	相干干扰	67
3.2.4	部分相干干扰	78

3.2.5	无源干扰	87
3.3	合成孔径雷达侦察干扰方程	92
3.3.1	雷达侦察方程	92
3.3.2	雷达干扰方程	94
3.3.3	合成孔径雷达干扰方程	94
3.3.4	合成孔径雷达信干比	105
3.4	对合成孔径雷达干扰中的谱分析	106
3.5	对合成孔径雷达侦察干扰系统设计	118
3.5.1	系统功能	118
3.5.2	系统组成	118
3.5.3	主要战技指标及设计	120
3.5.4	关键技术	121
	参考文献	123

第4章	合成孔径雷达抗干扰技术	125
4.1	空域抗干扰技术	125
4.1.1	超低副瓣技术	126
4.1.2	自适应阵列天线技术	129
4.1.3	数字波束形成技术	134
4.2	频域抗干扰技术	137
4.2.1	频率捷变技术	137
4.2.2	射频掩护技术应用分析	140
4.2.3	频率分集技术应用分析	141
4.2.4	多频段 SAR 技术	142
4.3	时域抗干扰技术	143
4.3.1	变重频技术	143
4.3.2	抗干扰性能分析	144
4.3.3	结果分析	147
4.4	辐射定标抗干扰技术	148
4.4.1	辐射定标	148
4.4.2	抗干扰性能分析	149

4.5 其他抗干扰技术	150
4.5.1 信号鉴别	150
4.5.2 极化选择	150
4.5.3 幅度鉴别	150
4.5.4 波形设计	151
参考文献	151
第5章 合成孔径雷达及其对抗试验	152
5.1 合成孔径雷达校飞试验	152
5.1.1 试验内容	152
5.1.2 试验方法	153
5.1.3 试验数据处理	156
5.2 对合成孔径雷达侦察性能试验	159
5.2.1 试验内容	159
5.2.2 试验方法	160
5.2.3 试验数据处理	161
5.3 对合成孔径雷达干扰效能试验	165
5.3.1 试验内容	165
5.3.2 试验方法	166
5.3.3 试验数据处理	166
5.4 对逆合成孔径雷达侦察干扰试验	167
5.5 无源干扰试验	170
5.6 小结	172
参考文献	172
第6章 对合成孔径雷达干扰效果评估	173
6.1 主观评估法	173
6.2 客观评估法	175
6.2.1 图像质量指标评估方法	176
6.2.2 图像的目标检测与识别效果评估方法	181
6.2.3 图像相干测度评估法	184

6.2.4	基于熵的评估方法	190
6.2.5	其他干扰效果度量的指标	192
6.3	综合评估法	204
	参考文献	204
第7章	反辐射攻击	205
7.1	概述	205
7.2	反辐射攻击	207
7.2.1	反辐射攻击模式及态势	207
7.2.2	反辐射攻击过程	208
7.3	对抗反辐射攻击	210
7.3.1	概述	210
7.3.2	反辐射对抗	211
7.4	反辐射武器技术发展趋势	215
7.5	典型反辐射武器	217
7.5.1	反辐射导弹	217
7.5.2	反辐射无人机	220
	参考文献	221
第8章	国内外典型合成孔径雷达	223
8.1	合成孔径雷达发展历程	223
8.2	典型星载合成孔径雷达	224
8.2.1	美国的星载 SAR 系统	224
8.2.2	欧空局的星载 SAR 系统	234
8.2.3	加拿大的星载 SAR 系统	240
8.2.4	日本的星载 SAR 系统	244
8.2.5	印度的星载 SAR 系统	247
8.2.6	俄罗斯的星载 SAR 系统	248
8.3	典型机载合成孔径雷达	251
8.3.1	美国“全球鹰”无人机 SAR 系统	253
8.3.2	意大利无人机载毫米波战场侦察系统	254

8.4 典型逆合成孔径雷达 255

8.5 小结 260

参考文献..... 261

缩略语 262

第1章 绪 论

1.1 电 子 战

1.1.1 引 言

现代电子战(EW)的出现可以追溯到20世纪初,它是随着通信技术的出现和广泛应用而产生的。从1904年的日俄战争到第一次世界大战前,出现了以自发的、无意识的、有限的通信窃听和干扰为主要形式的电子战萌芽。而第一次世界大战为电子战提供了历史舞台,可以认为是电子战的真正开始。这一时期电子战的主要特点表现为对无线电通信的侦察、破译和分析。第二次世界大战期间,首次使用了雷达、原子弹等新式武器和技术,电子战也得到了快速发展和广泛运用。这一时期的战争中,通信对抗全面展开,导航对抗和雷达对抗趋于成熟,制导对抗也初露锋芒,是电子战的快速发展时期。第二次世界大战之后,直到20世纪80年代末的东欧巨变、苏联解体,电子战作为“冷战”的重要作战形态,得到了美、苏两国的高度重视。美、苏两国通过军备竞赛,不择手段地对对方进行电子侦察和电子干扰,这在客观上促使了电子战基础技术的稳步发展。21世纪,电子战技术已逐步发展成熟,并在几次局部战争中得到了淋漓尽致的应用,成为战争的重要形式和因素,并决定着战场态势,制约着战争进度^[1]。

1991年的海湾战争被称为硅片战胜钢铁的战争,之后,信息、信息系统、信息化平台逐步成为战场上的主战装备,战场武器装备的体系化、信息化、精确化、隐身化、轻小型化、无人化成为重要发展趋势。这一切都预示着战场信息战时代的到来。而电子战作为战场信息战的重要作战形态、主要支柱和战略要素以及战争中夺取信息优势的重要手段,随之受到世界各国的极大关注。

在飞速发展的信息化时代,以电子战为主要作战形式的信息化战争将逐步成为战争的主导形态,在以信息为核心的高技术信息化战争中,谁控制了信息,就控制了战场的主动权。

1.1.2 雷达电子战

根据海湾战争后美国参谋长联席会议的新定义^[2],电子战为“利用电磁能和定向能以控制电磁频谱或攻击敌人的任何军事行动”。加以细分可以包括电子支援措施(ESM)、电子对抗(ECM)和电子反对抗、抗干扰(ECCM)等内容。这种定义突出了电子支援侦察在整个电子战中的地位 and 作用,强调 ESM 不仅为电子对抗,而且为电子反对抗提供情报数据支持。

电子对抗与电子反对抗构成了现代电子战中的“矛”和“盾”。前者指电子侦察和电子干扰,目前,世界各国都在积极开展系列化的电子侦察和干扰装备,复杂的战场威胁使得任何单一的电子对抗设备都无法赢得电子战的胜利。因此,研制综合一体化电子战系统已成为电子对抗的发展方向。后者又称为电子御防,它是为保障己方电子设备能正常工作而采取的反侦察、反干扰和反摧毁措施,电子侦察有独立的电子设备和系统,而它是将各种措施附设在电子信息系统(武器系统或平台)中或战术运用中,且在不断变化和发展。反对抗措施一般从战术和技术两个方面来考虑实现,一是从战术角度出发,在电子设备的配置和操作使用上采取一系列组织措施;二是从技术设计上采取措施来提高电子装备的反探测、反侦察、抗干扰和抗摧毁能力。目前,各国对发展电子反对抗装备极为重视,抗干扰能力已成为现代武器系统设计必不可少的重要指标。

电子战的分类方法有很多种,从空间范围上可以将电子战划分为水下电子战、海基电子战、陆基电子战、空中电子战、空间电子战和多维一体化电子战等;从专业应用领域可以将电子战可以分为雷达电子战、通信电子战、光电电子战、声学电子战、指挥控制系统电子战等。而且在每个领域内,电子战的频段范围都在不断扩展(图 1-1)^[4]。本文提到的针对合成孔径雷达的对抗属于雷达电子战范畴。

电子战主要包括雷达电子战、通信电子战和光电电子战等领

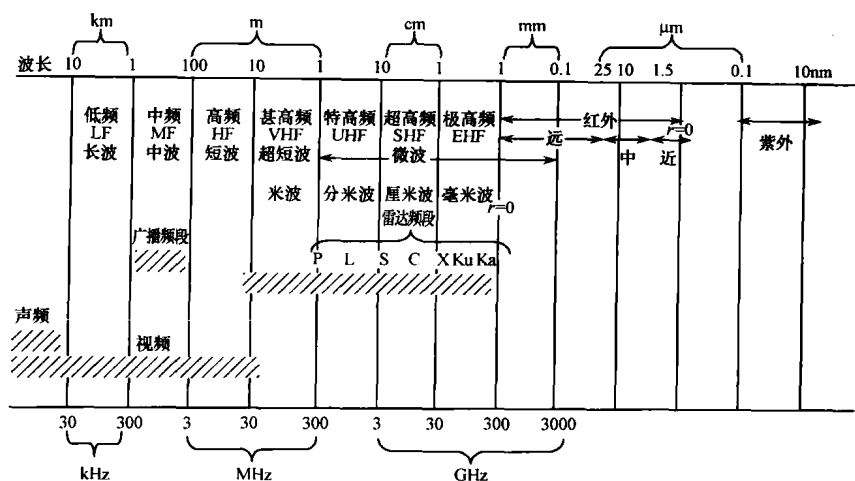


图 1-1 电磁波频谱

域^[5],其中,雷达电子战是电子战在雷达专业应用领域的重要体现。根据雷达电子战的概念及内涵,其技术体系如图 1-2 所示。

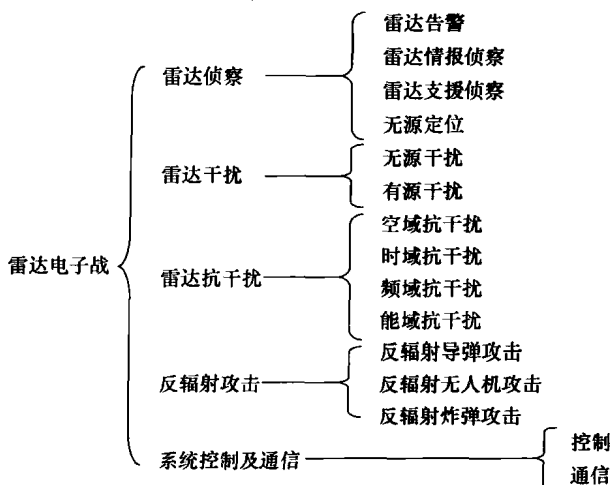


图 1-2 雷达电子战体系

综合作战应用需求和技术发展趋势等因素,雷达电子战系统应包括雷达系统、雷达侦察系统、雷达干扰系统和相关接口与协议等。鉴于

反辐射武器在自越南战争以来的历次局部战争中,特别是1991年的海湾战争中发挥了重要作用,反辐射攻击逐步成为独立于传统雷达电子干扰和电子侦察之外新兴的雷达电子战门类。

1. 雷达系统

雷达是在作战应用的需求牵引下,在微电子技术、计算机技术、通信技术和信号处理技术推动下发展起来的,迄今为止最有效的远程无线电探测装备。它主要利用目标对电磁波的散射特性实施探测和定位。对其作战性能的考核和评估一般可以从威力、精度、多目标能力和抗干扰性能等几个方面来进行。

雷达从工作频段上可分为米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达和毫米波雷达等;从工作平台的不同可分为舰载雷达、陆基雷达、机载雷达、球载雷达和星载雷达等;从用途上可分为警戒雷达、目标指示雷达、制导雷达、精密测量雷达、火控雷达、气象雷达等;从对目标的测量特性上可分为常规体制雷达和微波成像雷达(包括实孔径成像雷达、合成孔径成像雷达和逆合成孔径成像雷达)等;从技术体制的引进上还可以把雷达分为MTI雷达、MTD雷达、相控阵雷达、CFAR雷达、PD雷达、脉冲压缩雷达、频率捷变雷达等。

与传统的雷达相比,现代雷达的发展主要呈现以下几个特点:

(1)测量元素多维化发展。现代雷达突破了测量目标距离、角度和速度等信息的限制,正在加强对目标极化特性、RCS和图像等更加详细信息的测量。

(2)数字信号处理机的引进及加强。雷达信号处理机从接收系统中分离出来是雷达技术的一次改革,这次改革从设计上为更多的以提高雷达探测性能而出现的处理措施提供了运行平台。并且随着器件水平的发展,信号处理机平台的资源优势将更加突出。

(3)复杂电子环境的适应性增强。现代战场电磁环境非常复杂,特别是针对性较强的,有意识的电子干扰对雷达的探测性能造成了很大的威胁,采取丰富的抗干扰措施成为现代雷达必不可少的环节。

(4)组网化发展。网络技术的突飞猛进使雷达组网得以实现,组网后的防御系统无论是单套装备,还是整个军事防御系统,其抗摧毁性都大大增强。除了传统意义上的组网外,以网络为基础、接口协议为组

带的 MIMO 雷达研究将会引起新的雷达技术革命。

(5) 远控化、无人化发展。现代网络和通信技术的发展为电子信息装备的远控化和无人化发展提供了技术支持,小型装备的远程遥控和大型装备的部分遥控已经实现,相信随着技术的发展,实现大型装备的远控化和无人化很快就会成为现实。

2. 雷达侦察系统

雷达侦察系统主要通过对方电子信息装备辐射电磁信号的搜索、截获、分选和识别,实现对己方的情报支援。20 世纪初几次战争中对无线电信号无意识的监听和人工分析可以看成是最早的无线电侦察系统^[1]。随着战场情报对战争胜负的重要性日益显著,有意识的无线电侦察和情报获取逐步出现并受到重视。特别是作为现代电子战的情报支援系统,得到了各国的大力投资,获得了长足发展。对雷达侦察系统性能的检验与评估可以从复杂电磁环境的适应性、探测距离、辐射源分选能力等几个方面进行。

雷达侦察系统与雷达装备相比,只有接收和处理系统,没有发射系统,因此,少了受到反辐射武器(ARW)攻击的威胁。另外,雷达检测目标时回波信号功率与距离的四次方成反比,而雷达侦察系统直接利用目标辐射的电磁波进行探测,信号功率与距离的二次方成反比,因此,在侦察距离上具有雷达无法相比的优势。雷达侦察系统类型除了随所配属电子战系统按照波段划分外,更多的是按照接收机的技术体制划分,一般情况下分为晶体视放接收机型、超外差接收机型、信道化接收机型和混合式接收机型四种;还可以从侦察站的数量上分为单站侦察定位系统和多站侦察定位系统等。另外,从广义的角度而言,反辐射导引头也属于雷达侦察系统的范畴。

现代雷达侦察系统主要立足于晶体视放接收机、超外差接收机、信道化接收机和混合式接收机构建其接收分系统,每种类型的接收机都有明显的优势和缺点,所以,在建设体制的选取上只需考虑应用需求和经费支撑等因素。另外,随着微电子技术的发展,信道化接收机将逐步克服结构与重量上的一些缺点,成为雷达侦察机接收分系统的主干类型。

3. 雷达干扰系统

雷达干扰是为限制和削弱敌方对战场电子频谱利用而采取的积极

的软杀伤措施。虽然作为军事手段,电子干扰的出现滞后于电子侦察,但其表现出的卓越效果使其很快成为现代电子战的主体和核心内容,并受到空前的关注。在一定程度甚至可以说,现代电子战系统的技术水平主要取决于干扰机的水平,现代电子战装备也主要是指电子干扰装备。对于雷达干扰系统,其战术技术性能主要体现在压制性和欺骗性两个方面。具体可以从压制距离、压制扇面和欺骗概率等几个方面进行检验和考核。

雷达干扰系统的分类方法也很多,可以按照频段划分为 HF、VHF、UHF、L、S、C、X、Ku、Ka 和 mm 干扰系统等;按照干扰效果可以分为压制性干扰、欺骗性干扰、组合性干扰等;按照干扰信号的样式可分为射频噪声干扰、噪声调频干扰、噪声调幅干扰、噪声调相干扰、组合调制噪声干扰、杂乱脉冲干扰、假目标信号干扰、密集多假目标信号干扰等;按照是否辐射电磁信号分为有源干扰、无源干扰和混合式干扰;按照实施方式可以分为辐射式干扰、投掷式干扰和布设式干扰等。除此之外,还有很多其他分类方法。

为适应现代战场复杂的电磁环境,雷达多采用丰富的抗干扰措施以改善探测性能,其中立足于已有的工作模式、工作频段和信号样式实施“捷变”,是雷达常采用的重要措施和方式之一。针对这种变化,传统的雷达干扰系统(完全依靠发射宽带干扰信号,通过大功率来实施压制的干扰系统除外)已无法独立履行软杀伤职能,必须依靠一定的情报侦察系统实施引导。两者一起构成了现在所谓的有源电子战系统。

4. 反辐射武器

反辐射武器(包括反辐射导弹和反辐射无人机等)作为电子战“硬杀伤”的一种手段,主要利用电子侦察技术对电磁辐射源进行探测、跟踪、识别,进而自动实施攻击,以达到摧毁辐射源的目的。对其作战性能的考核和评估一般主要从攻击精度和抗干扰性能(抗诱偏性能)等方面进行。

反辐射武器根据其反辐射导引头的载体不同可分为反辐射导弹、反辐射无人机和反辐射炸弹等类型。根据工作频段的不同也可以把反辐射武器分为 UHF、L、S、C、X 等波段反辐射武器。

作为一种积极有效的电子战进攻武器,反辐射武器可以在战场上摧毁、压制敌雷达和干扰设备等辐射源,已成为一种重要的突防和掩护力量。由于反辐射导弹的威力巨大,世界各国在发展反辐射导弹的同时也在大力研究如何对抗敌方反辐射武器的技术。这些技术中,有源诱偏干扰被认为是最为方便和有效的方法之一。

5. 相关接口和协议

雷达电子战系统的接口和协议主要包括与武器平台之间的接口和协议、与指挥控制中心的接口和协议以及与其他电子信息装备之间的接口和协议等。作为现代雷达电子战系统的重要组成部分,接口和协议是为了适应电子信息装备组网的需要而建设和规划的,这既是技术发展的必然趋势,也是现代及未来战场应用的需求。因此,建立、完善、规范雷达电子战装备的接口和协议,不但是电子战装备建设的重要内容,也是作战各方实现从装备级电子攻防到系统级电子攻防的先决条件。

1.1.3 发展趋势

随着通信技术、计算机技术、微电子技术、航空航天技术及其他相关技术的迅猛发展及在军事上的广泛应用,信息与作战武器相结合,产生了信息化武器,极大地提高了武器系统和平台的作战效能,标志着信息化战场的逐步形成和信息战的开始,这也是传统电子战在信息技术高度发展条件下的延伸。

电子战作为信息战在电磁频谱空间的体现,获取“制电磁权”成为“制信息权”最核心的内容和手段,谁掌握了“制电磁权”,谁就获取了“制信息权”,谁就真正控制了战场。

综观雷达电子战的发展历程,其未来发展趋势将进一步向系统化、系列化、侦察、干扰一体化及标准化、模块化方向发展,四维战场空间制电磁频谱权的争夺将会空前激烈。具体如下:

(1) 电子干扰的频段不断扩展,干扰功率不断提高。现代各种新型军用电子设备的频段不断扩展,从长波、短波、微波发展到毫米波频段。美国早期生产的干扰机只能工作在 S 频段,20 世纪 80 年代,干扰设备的工作频率已扩充到 0.5GHz ~ 18GHz。到 20 世纪末,干扰