



装备科技译著出版基金



清华大学中俄科技合作丛书

波武器

电子系统强力毁伤

РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ БОРЬБА
СИЛОВОЕ ПОРАЖЕНИЕ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

【俄】 В.Д. Добыкин А.И. Куприянов
В.Г. Пономарев Л.Н. Шустов
董戈 刘伟 孙文君 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

清华大学中俄科技合作项目

波 武 器

——电子系统强力毁伤

РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ БОРЬБА
СИЛОВОЕ ПОРАЖЕНИЕ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

[俄] В. Д. Добыкин А. И. Куприянов
В. Г. Пономарев Л. Н. Шустов

董戈 刘伟 孙文君 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2009-058 号

图书在版编目(CIP)数据

波武器:电子系统强力毁伤/(俄罗斯)多贝金等著;董戈,刘伟,孙文君译. —北京:国防工业出版社,2014. 1
(清华大学中俄科技合作丛书)
ISBN 978-7-118-09008-6

I. ①波... II. ①多... ②董... ③刘... ④孙...
III. ①微波武器-研究 IV. ①TJ864

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 295019 号

Translation from the Russian language edition: РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ
БОРЬБА СИЛОВОЕ ПОРАЖЕНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
СИСТЕМ

本书简体中文版由 А. И. Куприянов 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

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公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 23 $\frac{3}{4}$ 字数 418 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 88.00 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

前 言

现代军事学家认为 21 世纪的战争进入了电子战时代。作为电子战的重要利器,波武器越来越受到各国科技工作者的重视,在未来的军事战争中必定会发挥越来越神奇的作用和威力。本书深入浅出地介绍了以利用电磁波和声波为手段实现对电子系统的功能性攻击为目的新概念武器,(包括微波武器、激光武器、声波武器和反雷达导弹等)详细阐述了工作原理、系统构成、设计原则、现状和发展方向等重要问题。

本书分为 3 个部分共 12 章。第 1 部分:用电磁场毁伤无线电电子系统和电子设备,主要介绍电磁武器,共有 8 章。第 1 章介绍了电磁武器的工作原理、分类、理论分析方法与应用以及电磁武器实施功能毁伤的临界能量等级等问题,第 2 章介绍了大功率电磁波对电子设备进行功能毁伤的物理原理,第 3 章通过介绍雷电、大功率雷达、工业辐射和核爆的微波辐射等自然和人造辐射源对电子设备功能毁伤的原理来引出电磁武器设计的基础,第 4 章介绍一次性功能毁伤型微波武器,第 5 章介绍重复使用的功能毁伤型微波武器,第 6 章介绍功能毁伤型激光武器,第 7 章介绍大功率电磁脉冲在地球大气层中的传播问题,第 8 章介绍大功率电磁辐射对无线电电子设备被毁伤元件的侵彻路径。第 2 部分:用声波辐射实施功能毁伤,主要介绍声波武器,共 2 章。第 9 章介绍声波武器的理论、器件和系统,第 10 章介绍声波武器的分类及应用效果。第 3 部分:用自动导向无线电辐射源的导弹毁伤无线电电子系统,介绍了利用微波导引头的反雷达导弹,共 2 章。第 11 章介绍反雷达导弹和控制及导引头的结构,第 12 章介绍反雷达导弹的无线电位标器的结构、工作原理和组成部分。

原书名直译为《电子对抗——无线电电子系统的强力毁伤》。作者把利用电磁波和声波手段对电子系统进行功能和性能干扰与摧毁的武器列为功能毁伤型武器,介绍了电磁(微波和激光)武器、声波武器和反雷达导弹 4 种类型的武器。目前国际上更加习惯于利用武器杀伤手段命名武器类型,例如,生化武器、核武器等,故我们以全书重点介绍的微波武器、激光武器和声波武器为基础,将本书译名定为《波武器——电子系统强力毁伤》。

本书 3 个部分各成体系,分别介绍电磁武器(微波武器和激光武器)、声波

武器和反雷达导弹。如此全面翔实介绍相关领域学术理论和工程实践的专业著作还比较少,因此无论是作为高等院校相关专业的教材和参考书,还是相关专业领域的培训教材和参考书,甚至是作为科研院所设计和工程实践的参考书籍,本书都是难得一见的文献,对夯实专业知识基础大有裨益。

本书翻译过程中克服了专业翻译人才奇缺的困难,力求忠实原文,语句通畅,通俗易懂。本书内容涉及领域较广,因水平所限,书中有些技术术语难免把握不准,加之一些新概念,译文尚存不尽人意之处,疏漏差错在所难免。恳请读者,特别是相关领域的专家不惜赐教,多提宝贵意见和建议,以便我们修改完善。

清华大学中俄战略合作研究所经过精心遴选,将本书列为中俄科技合作系列丛书之一,并对本书的翻译和出版给予了大力支持。

最后,感谢本书通稿作者 A. I. 库普里亚诺夫给予我们的指导。

董戈、刘伟、孙文君

2013 年 10 月清华园

原 著 序

近几十年来大功率技术的迅猛发展决定了信息技术的变革,也引发了无线电电子系统质的变化。这些变化体现在无线电电子系统及其工作环境之间形式和内容的辩证矛盾。以前,信息系统理论和技术发展完善的动力是解决无线电电子系统与大自然之间的冲突,就像爱因斯坦格言所说,“大自然智慧而且调皮”。到了 20 世纪末,经验与知识的积累使工程技术人员掌握了信息传输理论、抗干扰理论和无线电电子系统统计学理论等设计方法。以此为基础,同时利用工程设计和应用中积累的大量实践经验,工程技术人员开发出了解决大自然造成的干扰且满足性能指标要求的无线电电子系统。可以说,大自然对人类活动各个领域的抵抗力非常薄弱。随着系统不断升级和完善,今天的电子系统已经能够克服自然环境的影响,达到需要的功能和性能要求。

从 20 世纪下半叶开始,无线电电子系统的工作条件已经有了显著改变。伴随人类文明的发展,矛盾和冲突已经超出了国土和水域范围。冲突范围已包含领空、领海和宇宙空间,而且发展到一个重要的矛盾冲突领域,即无线电电子系统工作的信息空间。

20 世纪末期,恐怖团体和联合势力向地球上的人类文明发出了又一挑战,既不受领土空间和国家边界的限制,也不受传统道德、习俗惯例和法律约束的恐怖活动。

特别重要的是这种对抗已经发展到军事领域。最鲜明的表现是 20 世纪最后几十年的战争和武装冲突。对这些事件的分析极其明显地证明任何规模的现代军事行为的进程和结局,在很多方面是由信息领域对抗,其中包括由无线电电子对抗的水平决定的。

信息空间中的武装斗争必须以使用特种武器为前提。进攻性武器是有选择地打击敌人的信息设备、信息系统和网络。在目前以及可预见的未来,防御性信息武器主要是对抗进攻性武器的无线电电子和声学系统技术基础上的各种信息系统。

当然,无论是信息冲突出现的形式,还是信息对抗中采用的设备手段,都是各种各样的。工业和军事发达国家出版了大量的关于信息冲突和无线电电子对

抗的文献和著作,从不同角度介绍信息冲突和电子对抗技术。本书只讨论很有限的一部分问题,这就是目前无线电电子对抗中很重要的问题,利用电磁场和声波场的大功率辐射,以及装备有无线电辐射源的被动导引设备的高精度武器来毁伤无线电电子设备和手段的可能性。

有针对性地选用这种武器来毁伤无线电电子设备,按常规不会导致灾难性的毁坏及不可弥补的损失。这类武器使无线电电子装置丧失正常的、设定的功能(更准确地说是降低效果直至极端情况——出现故障)。因此这些无线电电子对抗强力毁伤设备有了更通俗的名称,它们被称为功能毁伤型武器。这种称呼在某种程度上是与传统的术语命名相矛盾的,根据传统是按实施打击的武器来命名(喷火杀伤、火炮杀伤、导弹杀伤、化学武器杀伤、辐射杀伤等),但是,“功能毁伤”的叫法在专家圈子内相当普遍,本书作者就采用了专业领域俗称的这种叫法(本书译者在翻译过程中遵循了国内通用的叫法——“波武器”)。

目前,还很少有文献详实地介绍和讨论无线电电子对抗中功能毁伤技术这一复杂的综合性问题。首先,由于政治、经济和社会因素影响,无线电电子对抗领域还未能广泛的专家和技术人员范围公开地进行讨论。其次,功能毁伤型武器的技术课题才刚刚开始,还有许多问题、课题和技术方案需要进一步的深入研究。但是,从总体来看,对无线电电子系统和设备实施功能毁伤的课题还有大量技术问题需要解决。本书作者以向广大读者公开发表的资料内容范围为基础,力争使论述的内容更系统。因此,作者希望读者谅解由于上述原因造成的限制,不会严格地评论本书的不完整性和不直接性。

作者感谢尊敬的出版审查人、俄联邦科学功勋活动家、工程科学博士穆欣 V. I. 教授,也感谢本书在出版不同阶段参与工作和从形式到内容帮助改进本书质量的所有人员。

原著前言

为了满足当今世界和未来的发展需求,军事发达国家提高作战潜能的主要方向是发展侦察、通信、导航、制导和电子对抗,也就是说,在武装斗争所有领域内的信息化基础上,高质量地完善武器和军事装备。鉴于此,发达国家正在对军事建设观念进行反思,反思的对象是发展传统类型的武器和军事装备的观念。部队开始广泛引进、采购和装备信息化的电子设备(无线电设备、光电设备、计算机设备),在这个过程中需要解决的问题是提高武器装备的无线电电子对抗能力。无线电电子对抗是信息空间中的斗争,最近几年活跃在保障作战行动的传统框架外,成为武装力量新兵种,能够对战役的进程和结局施加相当大的影响。

正如在越南、远东、南斯拉夫和伊拉克等地的局部战争经验所表明的那样,由于在战役和作战行动中采用了无线电电子对抗装备,陆军的作战能力提高了1.5倍,飞机的损失降低至 $1/4 \sim 1/6$,战舰的损失也降低至 $1/2 \sim 1/3$ 。这种损失降低对于无线电电子抑制的传统设备来说,已经接近于平均能达到的极限水平。同时,无线电电子对抗装备的成本与武器基本类型的成本相比,仅是后者的5%~8%。

这样,从军事经济角度看,无线电电子对抗装备的采用是极其有利的。但是,从战略战术角度看,对无线电电子对抗性能的要求也越来越高。

上述的一切,强调为了降低潜在敌人的无线电电子设备和系统作用效果,必须寻找新的解决问题途径的迫切性。这种途径之一是研制功能毁伤型电磁武器。

在各种不同类型的电磁武器中,发展最成功的是微波武器和激光武器。导致电子设备性能变差、不可逆地或临时性出现故障的微波辐射作用机理获得了“功能毁伤”的名称。

对激光和微波辐射作用最敏感的是半导体器件和集成微电路,它们的所有元器件和元器件之间的连接都是以半导体晶体为基础的表面或立体结构。因此,半导体器件和微电路是用电磁辐射方式实施毁伤的主要对象。

首先,最先使用功能毁伤型微波武器作战是在1991年与伊拉克的战争中,

美国使用的巡航导弹上配备了大功率电磁辐射器来取代战斗部。其次,1999年3月,北大西洋公约组织国家在与南斯拉夫的战争中也采用了微波武器。还有,在2003年3月26日与伊拉克的第二次战争中再次使用。最早使用这种武器的国家是美国,用于摧毁配备有大量电子技术装备、电子工程设备和电缆系统的指挥机构(目标)。

根据西方军事专家的评估,在对抗自动化通信系统、指挥系统、未来的监控和侦察系统中,功能毁伤型微波武器的使用与常规非核武器相比,将是更为有效和更为经济的一种毁伤方法,可以较少的武装力量来解决军事问题。

在2002年的柏林航展上,俄罗斯的工业部门展示了一种激光系统,它用于施放干扰以保护飞行器免遭配备有红外自动导引头的导弹的攻击。系统的基础是化学激光器,它利用了氙与氟相互作用时释放出来的能量。用1.5s的激光发射来抑制自动导引头,其毁伤(抑制)概率估计大约为0.8。

下面一点也是很重要的,激光器工作频段为 $3.8\mu\text{m}$,地球大气透射窗口在光学波段正好对应这个波段。由此可见,存在着提高激光辐射功率和将激光器转化为功能毁伤型激光武器的可能性。

也可以通过声波武器保证实现功能性毁伤。特别应该强调的是超声波武器对生理器官(生物目标)的作用。在20世纪初,法国科学家嘎弗洛B.研究了超声振荡对人器官的影响,并得到结论:我们机体的不同部位是具有不同调谐频率的谐振器。例如心脏调谐频率是6Hz左右,眼睛调谐频率为40~100Hz,头部为20~30Hz等。

在辐射源作用区域内,我们器官的反应是开始振荡,提高固有调谐频率将导致机体生理和心理的损害(病态感觉、呕吐、不自觉地恐怖发作、精神运动功能紊乱等)。集中在极小立体角中的声能(“声波子弹”)在达到了某个临界值时,就能够引起人短时间地丧失行为能力,以及破坏电子信息传感器的功能。

在相对论等离子体电子学已获得成就的基础上,在研制大功率激光辐射源和微波辐射源领域内达到的主要成果,将促使科研人员在不久的将来解决研制电磁武器的实际问题,实现动力学毁伤(类似于工程师加凌的著名双曲面)。在功能毁伤电磁武器和动力学毁伤电磁武器之间占据中间特色位置的是制导武器,能将武器引导到电磁辐射源。这就是“空对雷达”级别的导弹,它在进攻型电子对抗中占有重要地位。按照上面所说的原因,本书对这类导弹也给予较大篇幅的描述。

目 录

第 1 部分 用电磁场摧毁无线电系统和电子设备

第 1 章 功能毁伤型的电磁武器	1
1.1 功能毁伤型武器的工作原理和应用	1
1.2 多次使用的功能毁伤型微波武器	11
1.3 一次使用的功能毁伤型微波武器	13
1.4 功能毁伤方程	17
1.5 对电子设备实施功能毁伤的临界能量等级	21
第 2 章 对电子设备进行功能毁伤的物理原理	24
2.1 强电磁场对物质的作用	24
2.2 大功率脉冲式电磁辐射对无线电电子设备的作用	25
2.2.1 电磁场对金属的作用	25
2.2.2 电磁场对电介质的作用	26
2.2.3 强电磁场对半导体的作用	28
2.3 无线电电子设备结构、工艺和电路特点以及元件基础特点 对功能毁伤临界能量等级的影响	34
2.4 电磁脉冲对半导体器件的热毁伤	51
2.4.1 文什 - 贝尔毁伤模型	51
2.4.2 以加温温度与电磁脉冲功率和脉宽关系为基础的毁伤 模型	53
第 3 章 天然的和人造的强电磁场场源	62
3.1 强电磁场场源	62
3.2 雷电	66
3.2.1 雷电对无线电电子仪器的作用类型和物理机理	79
3.2.2 雷电电磁环境的评估	82
3.2.3 雷电损毁特征类型	86

3.2.4	雷达损毁无线电电子仪器的定量指标·····	88
3.3	高能量雷达辐射对无线电电子设备的作用·····	93
3.4	工程型辐射对无线电电子仪器的作用·····	95
3.4.1	高压输电线路·····	95
3.4.2	铁路的馈电滑接网·····	96
3.4.3	高电压装置·····	97
3.5	核爆炸的电磁脉冲·····	97
3.5.1	无线电元件遭受核爆电磁脉冲毁伤的类型·····	99
3.5.2	核爆电磁脉冲对无线电电子仪器作用的评估·····	102
3.5.3	核爆电磁脉冲作用特点的考虑·····	102
3.5.4	指标和准则的考虑·····	103
第4章	一次性使用的功能毁伤型武器·····	105
4.1	磁爆发生器·····	105
4.2	获取高能量电磁场的物理原理·····	106
4.3	爆炸压缩时电磁场能量的转换·····	110
4.4	磁爆发生器的能量特性·····	114
4.5	以磁爆发生器为基础的电磁武器·····	117
第5章	多次使用的功能毁伤型微波武器·····	123
5.1	多次使用的功能毁伤型微波武器的功能和任务·····	123
5.2	多次使用的功能毁伤型武器的功能·····	124
5.3	多次使用的功能毁伤型微波武器的组成·····	128
5.4	超强微波脉冲发生器·····	129
5.5	强电流电子加速器·····	132
5.5.1	强电流电子加速器电路图·····	133
5.5.2	强脉冲发生器·····	136
5.5.3	电子爆炸发射的二极管·····	144
5.6	电动力系统·····	147
5.7	超强真空微波振荡器·····	150
5.7.1	契伦科夫振荡器·····	151
5.7.2	契伦科夫多波振荡器·····	151
5.7.3	回旋管·····	157
5.8	等离子体超强功率微波振荡器·····	161
5.9	虚阴极器件·····	166

5.10	磁绝缘线性振荡器	172
5.11	大功率超宽频带脉冲发生器	174
5.12	功能毁伤型装置的天线	176
第6章	功能毁伤型激光武器	187
6.1	激光器作用原理	188
6.2	激光器应用特点	190
6.3	激光器毁伤作用的评估	192
6.4	激光器类型	195
第7章	大功率微波脉冲在地球大气层中的传播	204
7.1	对流层中气体介质对微波能量的吸收	204
7.2	水蒸气吸收微波辐射的评估	205
7.3	氧气吸收微波辐射的评估	208
7.4	大功率微波辐射通过近地大气层时对击穿现象的分析	209
7.4.1	微波连续辐射作用时击穿的判据	210
7.4.2	脉冲式微波辐射作用时击穿的判据	212
7.4.3	在微波短脉冲的强场中大气击穿的判据	217
第8章	大功率微波辐射对无线电电子设备毁伤元件的路径	222
8.1	微波辐射对天线—馈线系统的作用	222
8.2	屏蔽对电磁场的衰减	222
8.3	电磁脉冲场中的无线电电子设备的屏蔽—壳体	229
8.4	非铁磁材料的屏蔽—壳体对电磁脉冲的衰减作用	231
8.5	非磁性材料的屏蔽—壳体对电磁脉冲的衰减作用	233
8.6	无线电电子设备的多层屏蔽—壳体	235
8.7	非金属壳体对脉冲电磁场的屏蔽作用	235
8.8	电磁屏蔽的连续性	236

第2部分 用声波辐射实施功能毁伤

第9章	实施功能毁伤的声波装置	240
9.1	声波武器	240
9.2	声波	242
9.3	声波的能量特性	249
9.4	声波的衰减	251

9.5 声波的相干性	254
9.6 声波辐射器	259
9.6.1 单个辐射器	259
9.6.2 辐射器系统	266
第 10 章 用不同波段的声波对目标实施声波毁伤的特点	275
10.1 次声波	275
10.2 可听声波	279
10.3 超声波	283
10.4 功能毁伤型装置	286
10.4.1 一次性使用的声波毁伤装置	287
10.4.2 多次使用的声波毁伤装置	289
10.5 声波毁伤效果	292
10.6 声波信号的隐蔽	293

第 3 部分 用自动导向无线电辐射源 的导弹毁伤无线电电子系统

第 11 章 用高精度武器打击无线电电子系统	297
11.1 反雷达导弹作为控制对象	301
11.1.1 利用气动力实现控制	305
11.1.2 利用反作用力和力矩实现控制	307
11.2 反雷达导弹运动控制算法的最优化	308
11.3 反雷达导弹导引头器件结构和组成	311
11.3.1 具有稳定天线的自动导引系统功能示意图	311
11.3.2 具有陀螺随动传动装置的自动导引系统功能示意图	316
11.3.3 具有自动跟踪天线和速度校正的自动导引系统功能图	319
第 12 章 反雷达导弹的无线电位标器	322
12.1 被动式无线电自动导引头定向仪的结构	322
12.2 反雷达导弹自动导引头的天线	327
12.2.1 宽频带天线设计原理	328
12.2.2 反雷达导弹的天线系统	332
12.3 无线电自动导引头天线的整流罩	333
12.3.1 反雷达导弹天线整流罩的工作条件	333

12.3.2	按透射系数实现反雷达导弹尖端形整流罩的优化·····	339
12.3.3	角度误差的补偿·····	340
12.3.4	红外和无线电兼容波段的整流罩·····	341
12.4	反雷达导弹无线电导引头的探测器·····	343
12.5	被动式无线电自动导引头的目标推算器·····	348
结论	·····	352
缩略语	·····	353
参考文献	·····	356

第 1 部分 用电磁场摧毁无线 电系统和电子设备

第 1 章 功能毁伤型的电磁武器

1.1 功能毁伤型武器的工作原理和应用

军事百科全书^[38]给电磁武器的定义为:一种利用射频辐射(微波武器)、相干光学辐射(激光武器)、非相干光学辐射或 X - 射线(具有核泵浦的 X - 射线激光)辐射的大功率电磁波束作为杀伤手段的武器。在许多文献中,电磁武器只包括无线电波段的辐射频谱^[39]。

目前技术发展水平还不允许我们开发能保证对所选定的目标实施完全物理摧毁的微波武器。但是,大功率的微波辐射可能对设备和系统中的电子元器件产生内部结构的特殊变化。这样的作用被称作功能毁伤。大功率辐射源、专用电源和信息保障分系统(侦察设备)组合成的整体通常被称为功能毁伤超高频武器。其他文献中还使用“微波武器”或“波束武器”的定义。

功能毁伤型微波武器在 21 世纪的出现和发展的主要原因有 3 方面。

首先,无线电电子对抗发展的辩证矛盾关系决定了无线电电子设备的防护和毁伤之间的斗争结果。

其次,人类文明发展阶段,已进入了微电子时代。现在已经出现了活性区尺寸小于 100ns 的量子力学仪器。不久的将来,可能出现仪器尺寸与德·布罗利电子的波长或电子自由行程相比拟的电子仪器^[31]。电子装备的微型化使得功能毁伤难度降低,这是由于微型化的同时电子装备功能毁伤的外部作用能量降低了。

第三,研制开发大功率电磁辐射源领域取得的巨大成就使微波武器的研制成为可能。在磁爆和磁流体动力电能发生器中由凝聚炸药爆轰时产生的超高压电力作用下压缩金属载流壳体,等离子相对论、微波电子学和磁通量快速聚合是这

一成就的理论基础。

军用无线电电子学在最近 30 年的发展,表现出的特点是用于部队(武装力量)信息保障的无线电电子设备作为一方,与实施无线电设备干扰为另一方的双方的激烈对抗。当然,干扰的使用又刺激了抗干扰措施、方法和设备的发展和完善。无线电电子设备在抗干扰能力方面已经取得了很大的成绩。在设置干扰的传统方法和手段与抗干扰设备和措施的平衡中,抗干扰占有一定上风。

针对传统的干扰类型,提高无线电电子设备(无线电工程设备、光学电子设备、计算机设备等)抗干扰潜在能力的主要方向可归结如下几点。

(1) 扩宽军用无线电电子设备的工作频率范围,无论是单台设备还是多台设备组合成的系统都需要相应的扩频工作。

(2) 提高雷达站的能量至 90 ~ 100dBW。

(3) 根据无线电电子设备工作区干扰应用策略的变化和无线电电子环境的变化,全面地引入辐射能自适应控制。

(4) 使用具有自适应功能的设备,改变信号类型、参数以及处理方法以适应特种干扰处理环境和战术形势。这种适应性对干扰环境进行分析,由一个脉冲至另一个脉冲或一个脉冲串至另一个脉冲串的载波频率快速重调(捷变频)、脉冲重复频率变化、具有不同调制类型和不同相干度信号的应用和同时在几种频率上工作,最终迫使敌方不由自主地过渡到设置抑制性噪声干扰进行接收状态,从而实现了自身的保证。

(5) 自适应控制扫描规律和无线电电子设备工作区参数的应用,其中包括扫描周期和先后顺序的变化,照射目标的次数、时间、天线方向图波束宽度和扫描(探测)区域的变化等。

(6) 利用相控阵天线,形成一定形状的天线方向图,副瓣电平很低,波束指向可在雷达站工作扇型区内以微秒量级在任何方向上变化。

(7) 实现的工作方式能保证同时解决目标的搜索和跟踪(在搜索中自动跟踪)问题,确定方位测定中的目标国籍属性和引导导弹。

(8) 通过缩短雷达对目标的照射时间并使用超宽带信号,提高无线电电子设备的隐蔽性。

(9) 采用信号发射和接收的空间异地配置的多基站系统。

(10) 综合利用不同物理传感器得到的同一目标的信息。

(11) 利用信号和信息的多种处理方法,并结合目标的距离和角坐标参数及其微分参数进行筛选。常用的信号处理方法包括脉冲压缩法、快速傅里叶变换算法进行信号脉冲—多普勒滤波、多通道信号处理、利用干扰反射地图的运动目标检测、有限脉冲特性滤波器、两个正交极化信号的处理等。

(12) 使用补偿器,可以降低由天线方向图旁瓣传入的干扰为 15 ~ 20dB。

(13) 在雷达系统中增加计算机设备,以提高雷达系统的工作能力(增加同时跟踪目标和对目标进行射击的数量)。

(14) 预先设定了可控性杀伤武器自动导向电磁脉冲源目标。

(15) 降低飞行器在光学和雷达波段的可探测性。

需要强调的是,具体无线电电子设备抗干扰能力是由硬件和软件算法相结合得以保障的。为了获得更有效的抗干扰能力,通常使用以下硬件设备的不同组合。

(1) 依靠被接受的脉冲串能量积累,实现干扰背景下弱信号分离的视频积分器。

(2) 利用信号之间的统计关系,将非相关干扰信号背景中的有效信号分离出来的视频相关器。

(3) 利用高相干性的探测信号发生器,再结合能保证信噪比能量关系高于非相干接收时 $\sqrt{n}$ 倍的相干接收机(n 为脉冲串中的脉冲个数)。

(4) 利用信号的多频发射和接收装置,频点间隔几十甚至几百兆赫兹,这样减少了目标反射信号波动的影响,提高了雷达系统的抗干扰能力,但是往往牺牲了雷达作用距离。

(5) 利用多波束天线,多波束的方向图可以提高观测空间区域的扫描速度,提高角度坐标的分辨能力。

比较有效的提高抗干扰能力的方法和算法包括以下几点。

(1) 进行工作频带内噪声频谱密度分析,以确定噪声频谱密度最小的工作载波频率,这样可以保证无线电电子设备工作在这类干扰环境下有最高的信噪比。

(2) 使信号极化进行转换,从而实现该信号与干扰信号的极化正交,这样可使无线电电子设备接收机输入端的干扰功率降低 6 ~ 7dB。

(3) 在设置有源干扰的方向上形成“零电平”天线方向图,对零方向进行自适应控制,所有这些可使干扰作用降低 10 ~ 20dB,很有希望会降低 20 ~ 30dB。

(4) 在闪烁干扰和两点相干干扰作用时,离散干扰源信号接收的消隐(角选通)可以改善雷达的分辨能力。

(5) 雷达站的能量按搜索区域进行程序分配或自适应分配(根据当时干扰环境),可以实现干扰信号的“强制抑制”。

(6) 对信号进行逻辑筛选,可以根据目标的重要性(危险性)进行排序分类予以摧毁。

上述列举的抗干扰措施作用等效于降低干扰能量等级,与不采用这些抗干