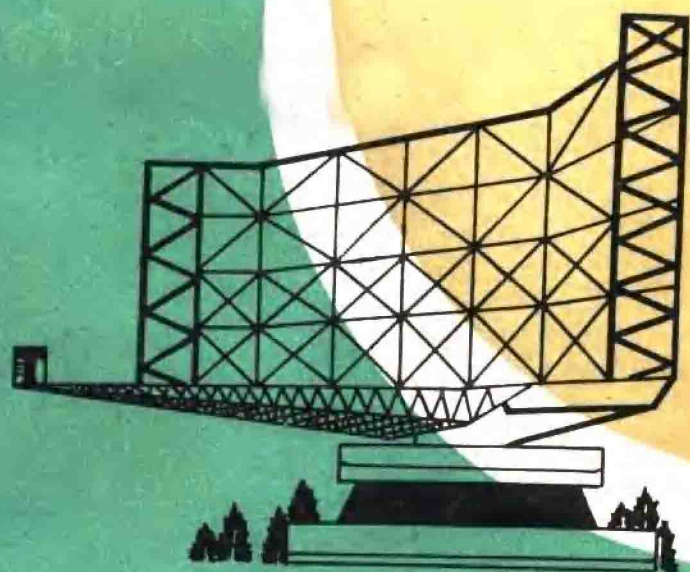


雷达抗干扰原理

张锡熊 陈方林 编著



科学出版社

雷达抗干扰原理

张锡熊 陈方林 编著

内 容 简 介

本书简要地介绍了雷达对抗的概貌，系统地分析了在空域和时频域上雷达抗干扰的基本原理，扼要地论述了雷达的反侦察和抗模拟干扰，具体地提出了雷达抗干扰量度的几种标准，并从抗干扰观点讨论了雷达的设计。

本书可供从事电子对抗、雷达等方面工作的有关人员参考，也可供大专院校有关专业的师生阅读。

雷 达 抗 干 扰 原 理

张锡熊 陈方林 编著

责任编辑 刘兴民

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 11 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1981 年 11 月第一次印刷 印张：9 1/2

印数：0001—3,050 字数：213,000

统一书号：15031·371

本社书号：2362·15—7

定 价： 1.50 元

前 言

从第二次世界大战以来,雷达的发展非常迅速,现已广泛地应用于军事。从对洲际导弹的预警、跟踪到战场前沿的侦察,都需要雷达。在现代战争中,雷达占有十分重要的地位。从雷达开始出现在战场上,就产生了它的对立面——对雷达的侦察和干扰,随着雷达的发展,干扰和抗干扰的斗争也日益激烈。所以,雷达对抗是现代军事上发展最快、最活跃的一个领域。

在雷达发展中,雷达的抗干扰问题逐步从附属地位上升到主导地位,成为决定雷达技术发展的重要因素。对雷达抗干扰技术的研究正在广泛地展开,很多抗干扰措施已被应用于现代各种雷达中。虽然已有不少关于雷达抗干扰的文章,但迄今为止,雷达抗干扰还处于具体技术问题的研究阶段,比较系统的抗干扰理论尚未建立。关于白噪声中的信号检测问题,已经有了比较完整的理论体系,但对于干扰环境中的信号检测,却缺乏比较全面的论述。

雷达对抗的特点是变化快,保密性强,涉及面广,式样繁多。但是,任何事物的发展都有一定的基本规律和基本特点。雷达对抗也必然有它自己的发展规律,只有认识了它的基本规律和基本特点,才能对各种抗干扰措施的作用和效果有更深刻的理解,才能为抗干扰技术的发展找到正确的方向,并开辟新的途径。

本书试图比较系统地阐述雷达抗干扰的基本原理,从各种错综复杂的抗干扰措施中探讨其基本规律和基本特点,使

从事雷达工作的同志建立比较系统和清晰的概念，并力求理论联系实际，希望能对雷达研制工作起到抛砖引玉的作用。

本书分为七章，为了便于阅读，各章都有一定的独立性。第一章介绍雷达抗干扰概论，主要是阐述雷达对抗的概貌。以几个实例的分析说明雷达抗干扰的重要性；讨论了雷达对抗的基本模型，雷达和干扰的基本特性；对现代干扰的水平，未来的干扰方式和未来的干扰模型作了估计；简要地论述了雷达抗干扰与干扰斗争的五个重点。

第二章讨论雷达的空间抗干扰特性。介绍了雷达最基本的空间特性——雷达的信息单元和信息空间；讨论了在压制性干扰下受干扰的空间；分析了在干扰环境中使雷达的能量密度、波束形状与空间的目标相匹配的方法；指出了极大地缩小信号的空间体积将使雷达抗干扰能力产生一个质的进展，并讨论了限制空间体积缩小的因素；叙述了低副瓣的抗干扰性及其与雷达自卫距离的关系；最后阐述了极化抗干扰的原理、效果和局限性。

第三章论述雷达在时频域上的抗干扰能力。本章分四个部分，第一部分介绍了信号时频特性的一些基本理论，阐述了即时频谱（历程频谱）的概念，叙述了时频特性的量度和时频特性图；第二部分主要分析了雷达抗压制性积极干扰的能力，提出了潜在抗干扰能力的普遍表示式和信干比的改善度，讨论了变频抗干扰的基本特点和发展方向；第三部分主要分析了雷达抗分布式消极干扰的能力，讨论了反消极干扰的波形设计；第四部分主要分析了抗干扰的信号形式和信息处理，比较了各种雷达信号的抗干扰能力，提出了最佳抗干扰接收机的概念和实现的可能性。

第四章介绍雷达抗模拟干扰。首先简述了模拟干扰的特点和雷达被干扰的准则，阐明了目标信号和模拟干扰参量的

差别;然后分析了雷达抗回答式干扰和无源假目标的能力;也讨论了各种信号形式的抗模拟干扰能力,介绍了目标识别的各种方法,指出了抗模拟干扰发展的方向。

第五章介绍雷达的反侦察特性。反侦察是雷达抗干扰的重要组成部分,这里简述了侦察的一般原理,分析了反侦察的信号形式和反侦察雷达体制。

第六章论述雷达抗干扰能力的量度。讨论了单个雷达和雷达系统的抗干扰量度的几种准则,并阐述了标志单个雷达和雷达网抗干扰能力的基本参数。

第七章从抗干扰观点讨论了雷达设计。综述了雷达抗干扰系统的基本结构和各种抗干扰措施的效果,提出了抗干扰的雷达设计思想和设计准则,并以两种新型雷达设计为例论述了雷达设计方案和参数的选择原则。

本书所阐述的论点和概念,有的还不太成熟,希望读者指正。

在本书写作过程中,丁鹭飞等同志参加了讨论,提出了许多宝贵意见;书稿写成后,又经冯世章和申毅等同志审阅。在此一并致谢。

1979年12月

目 录

第一章 概论	1
第一节 雷达抗干扰的重要性	1
第二节 雷达干扰的基本方式	6
第三节 现代的干扰水平和今后的发展	11
一、干扰水平的估计	11
二、未来干扰方式的发展	12
三、未来的雷达干扰环境	13
第四节 雷达对抗的基本模型	14
第五节 雷达抗干扰与干扰斗争的重点	17
一、频域上的斗争	17
二、能量上的斗争	18
三、信号形式和信息处理	19
四、综合干扰与综合抗干扰	20
五、干扰和抗干扰的自适应能力	22
第二章 雷达的空间抗干扰特性	24
第一节 雷达的信息单元和信息空间	24
一、雷达的信息单元	24
二、雷达的信息空间	25
第二节 雷达的自卫距离	27
一、雷达的正常作用距离	27
二、雷达在压制性积极干扰下的自卫距离	30
三、雷达在分布式消极干扰下的自卫距离	33
第三节 雷达受干扰的空间	38
第四节 雷达的空间能量密度与干扰环境的匹配	41
第五节 雷达波束与空间干扰环境的匹配	47

一、空间滤波器	47
二、雷达角度单元对抗干扰能力的影响	51
三、角度单元缩小的极限	52
四、缩短波长的极限	55
第六节 低副瓣的抗干扰性	60
第七节 极化抗干扰	66
一、不同极化形式的电场矢量表示式	66
二、目标信号的极化形式	68
三、极化匹配接收	68
四、干扰环境中雷达的极化匹配	70
第三章 雷达在时频域上的抗干扰能力	73
第一节 信号的时频特性	73
一、信号的类型和特点	73
二、雷达信号和干扰信号	75
三、信号的频谱分析	76
四、各种信号的频谱	82
五、雷达信号的不确定性	99
六、即时频谱	99
七、信号时频特性的量度	106
第二节 雷达抗积极干扰的分析	112
一 雷达检测目标的准则	112
二、雷达被干扰的功率界限	114
三、雷达在压制性干扰作用下, 被干扰的准则	116
四、雷达在时频域上的潜在抗干扰能力	118
五、变频抗干扰	136
第三节 雷达目标信号的相参特性	144
第四节 雷达抗消极干扰的分析	148
一、目标信号和分布式消极干扰的差别	149
二、分布式消极干扰的特性	152
三、雷达抗分布式消极干扰的能力	155
四、抗消极干扰的波形设计	164

第五节	抗干扰的雷达信号形式与处理方法	171
一、	对雷达信号的要求	171
二、	各种常用信号的抗干扰能力	172
三、	最佳抗干扰信号形式的探讨	173
四、	抗饱和	175
五、	抗干扰的信息处理——最佳抗干扰接收机	177
第四章	雷达抗模拟干扰	191
第一节	雷达对模拟干扰的识别能力	191
一、	标志雷达信号的参量	192
二、	雷达目标信号和模拟干扰参量的差别	192
三、	雷达识别能力的分析	196
第二节	雷达抗回答式模拟干扰的能力	199
一、	回答式模拟干扰的特点	199
二、	雷达抗回答式欺骗干扰	202
三、	雷达抗回答式假目标	207
第三节	雷达抗无源假目标	208
第四节	雷达信号形式对雷达抗模拟干扰的影响	210
第五节	目标的识别	212
一、	通过分辨目标外形来识别目标	212
二、	利用目标的空间散射场的特性来识别目标	215
三、	利用目标的极化特性识别目标	215
四、	利用目标的频率特性识别目标	217
第五章	雷达的反侦察特性	223
第一节	侦察的参量和侦察概率	223
一、	侦察的参量	223
二、	侦察概率	224
第二节	反侦察的雷达信号和雷达体制	231
一、	反侦察的雷达信号	231
二、	反侦察的雷达体制	232
第六章	雷达抗干扰的量度	237
第一节	衡量雷达抗干扰能力的标准	237

一、衡量单个雷达抗干扰能力的标准·····	237
二、衡量含有雷达的系统的抗干扰能力的标准·····	250
第二节 标志雷达抗干扰能力的基本参数·····	251
一、标志单个雷达抗干扰能力的基本参数·····	251
二、标志雷达网抗干扰能力的基本参数·····	256
第七章 从抗干扰观点论雷达的设计·····	261
第一节 雷达抗干扰技术综述·····	261
一、雷达抗干扰系统的组成·····	261
二、常用的雷达抗干扰技术·····	262
第二节 从抗干扰观点设计雷达·····	264
一、雷达设计思想的变革·····	264
二、从抗干扰观点进行雷达设计的准则·····	266
第三节 对现有三种雷达抗干扰能力的分析·····	272
一、远程警戒雷达 AN/FPS-3 ·····	273
二、引导雷达 AN/CPS-60·····	274
三、炮瞄雷达 SCR-584 改进型 ·····	276
第四节 雷达方案和参数的选择·····	277
一、新型引导雷达的设计·····	278
二、新型火控雷达的设计·····	287

第一章 概 论

第一节 雷达抗干扰的重要性

第二次世界大战中,无线电电子设备就已大量使用。战后,无线电电子设备得到迅速发展。在现代战争中,通信联络、作战指挥、军事情报和兵器控制等日益依赖无线电电子设备。无线电电子设备的广泛应用,导致现代战争中出现一个新的领域——电子对抗。电子对抗也称电子战。

所谓电子对抗,就是敌对双方利用电子设备或器材所进行的电磁斗争。在这场斗争中,敌对双方都力求掌握对方无线电电子设备的性能及部署情况,以便进行相应的电子干扰,使对方的雷达迷盲、无线电通信中断、作战指挥失灵,制导兵器失控;同时,又必须采取相应的对抗措施,保证己方的雷达、无线电通信和制导系统等电子设备正常工作。电子对抗的范围相当广泛,它包括雷达对抗、通信对抗、导航对抗、红外对抗和激光对抗等。电子对抗的基本内容包括电子侦察与反侦察、干扰与反干扰。反干扰也称为抗干扰。

雷达对抗是电子对抗的一个重要组成部分。它由两个方面组成。一方面,敌对双方采取各种手段获取对方雷达性能和部署的情报,进而扰乱和破坏对方雷达的正常工作,通常把前者称为雷达侦察,而把后者称为雷达干扰。另一方面,敌对双方采取种种措施隐蔽己方雷达的性能和部署,并想方设法使己方雷达消除或减弱对方干扰的影响,通常把前者称为雷达反侦察,而把后者称为雷达抗干扰。

雷达的干扰和抗干扰是一个矛盾着的两个方面。有雷达就有干扰，有干扰又必然有抗干扰。一种新型雷达的出现就会引出一种新的干扰技术，而新的干扰技术又必然促进新的抗干扰措施的产生，这样循环不止，促使干扰技术和抗干扰技术向前发展。所以，干扰与抗干扰是相对的，没有不能干扰的雷达，也没有不能对抗的干扰。任何雷达都是可以干扰的，任何干扰也都是可以对抗的。随着电子技术的发展，雷达的干扰和抗干扰，将会出现更加复杂、更加激烈的局面。

在现代战争中，雷达往往是在干扰环境中工作的。所以，雷达抗干扰问题是十分重要的问题。没有抗干扰能力的雷达，尽管平时可以很好地工作，但在战争中，一旦受到对方的干扰，就会失去作用或者造成错觉，给战局带来重大损失。

雷达抗干扰的重要性，远在第二次世界大战期间就已表现出来。1944年英美联军在诺曼底半岛登陆战役中，由于对德军雷达实施大规模的干扰，获得重大战果；而德军，由于其雷达缺乏抗干扰能力，造成严重失利。当时，德军在诺曼底半岛部署了一百二十多部雷达，并集结了大量的歼击机、海防快艇和其他防御力量。在战役的准备阶段，英美联军对德军的这些雷达的性能和部署情况都进行了详细的侦察。战役发起前夜，英美联军在佯攻方向的布伦地区，出动大量的小艇，小艇上装着角反射器¹⁾，并拖着涂铝的气球。由于角反射器和涂铝气球对雷达发射的电磁波产生强烈的反射，使小艇在德军雷达显示器上所呈现的信号类似于大型军舰的信号；英美联军还用飞机在这些小艇上空投放大量的铝箔条，铝箔条对雷达发射的电磁波也会产生强烈的反射，这些反射信号，被德军雷达操纵员看成是大批护航机。这就造成了大批护航机掩护

1) 角反射器是由三个互相垂直的金属平面组成的反射体，如图 1-1 所示。

登陆的假象。此外，英美联军还以小批装有干扰设备和铝箔条的飞机，模拟成飞向布伦地区的大规模轰炸机群。英美联军施放干扰的时间长达三、四个小时，使德军造成错觉，误认为英美联军要在布伦地区登陆，于是希特勒就从诺曼底半岛及其他地区调动大量的海军、空军以及其他防御部队向布伦方向增援。登陆开始时，英美联军在真登陆方向上用 20 架专门施放干扰的飞机对德军雷达实施压制性干扰，使德军雷达陷于瘫痪，从而保证了这次登陆作战的成功。在这次登陆战役中，英美联军参加登陆的 2127 艘舰艇，只有 6 艘被德军击沉。

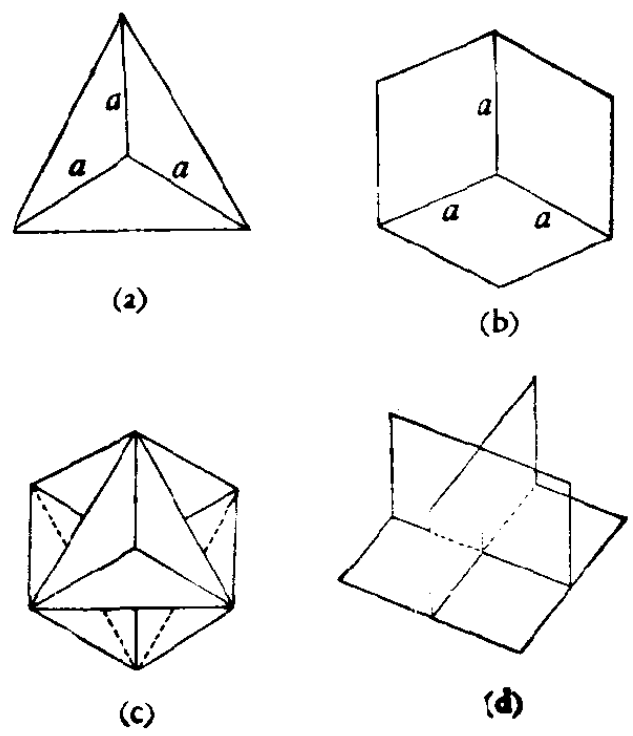


图 1-1 角反射器

(a) 三角形角反射器；(b) 正方形角反射器；
(c) (d) 多方向性的角反射器

1972 年美军大规模轰炸河内时，对越方雷达进行了全面的干扰，越方雷达采取了各种抗干扰措施。这次战役中，雷达

干扰和抗干扰是代表现代水平的一次雷达对抗。美军把它描述为“这是大规模进攻和大规模防御之间最大限度的电子对抗战。”这次战役中,美军使用了专门的干扰飞机,有些在战区之外施放干扰掩护 B-52 轰炸机,实施远距离支援;有些用来在其攻击航线上投放大量的干扰丝(涂金属的玻璃纤维丝、尼龙丝),形成宽 15—20 公里、长 80—120 公里的干扰区。在轰炸机群内还配有干扰飞机,在编队内施放干扰掩护轰炸机群。B-52 轰炸机上除装有 15 部干扰机外,还带有干扰丝和其他干扰器材。越方则在河内地区,配置了多种雷达,形成一个密集的雷达网,并在战术上和技术上采取了各种抗干扰措施,从而保证了及时发出空袭警报和对防空导弹、高炮的控制。这次战役的结果, B-52 被击毁的概率为来袭架次的 3—4%。

1967 年的第三次中东战争和 1973 年的第四次中东战争,更加生动地说明了雷达抗干扰能力的强弱对战局的重要影响。第三次中东战争时,以色列对埃及发动了突然袭击,摧毁了埃及几乎所有的飞机和防空导弹。这次战争以色列取得成功的因素之一,是由于战前对埃及进行了电子侦察,获得了埃及雷达性能、部署的情报。战争开始时,以色列飞机以超低空飞行潜入埃及雷达的盲区,并施放压制性干扰。由于埃及雷达无抗干扰能力而失去作用,致使情报中断,武器失控,二十多个由雷达制导的防空导弹连无法还击。第四次中东战争时,埃及使用了多种防空导弹和四管 23 毫米高炮。由这些防空导弹和高炮组成的防空体系,配置了各种不同频段的雷达。炮瞄雷达是 K 波段,制导雷达除了 G、H、I、J、F 五个波段外,还有红外制导。而且各种防空导弹的制导方式也是多种的:有指令制导、半主动寻的制导和被动制导。各种雷达都有抗干扰措施,如:它们都装有动目标选择装置。所以,这

个防空体系的火控雷达网具有较强的综合抗干扰能力。由于以色列事先没有侦察到埃及火控雷达网的新体制和新频段，缺乏必要的侦察干扰设备，使得以色列在雷达对抗中处于劣势。因此，尽管以色列掌握空中优势，但在战争开始期间，飞机损失严重，头两天就被埃及击落三十多架，第一周内被击落七十多架。

埃及和以色列的二次海战，却完全是另一种情况。1967年，埃及导弹艇发射六枚苏制“冥河”式舰对舰导弹，四枚击中以色列的“艾拉特”号驱逐舰，二枚击中商船，六发六中。当时曾引起各国的震动。以色列总结了教训，研制了对付舰对舰导弹的干扰措施。在第四次中东战争时，埃及导弹艇与以色列导弹艇作战，埃及的导弹射程远，处于优势，先进行攻击。由于以色列施放了雷达干扰，使埃及发射50枚导弹，一枚也未命中。后来，以色列快艇进行反击，也发射舰对舰导弹，击沉埃及导弹艇多艘。

从这些比较典型的雷达对抗战例中，可以清楚地看到雷达抗干扰能力在战争中的重要作用。总结历史上的经验教训，可以得到如下的启示：

(1) 要重视雷达对抗的战术和技术的研究。平时有所准备，战时才有对抗各种干扰的能力。不然，一旦遇到强烈电子干扰，就会措手不及。

(2) 要重视雷达对抗的训练。如果没有严格的训练和熟练的水平，即使有良好抗干扰能力的雷达系统，也很难发挥作用。所以，要求指战员应具有在复杂的干扰环境中指挥和操纵雷达的能力，能正确运用各种抗干扰措施。

(3) 要了解各国雷达对抗发展的情报，掌握敌方雷达对抗的水平和发展的方向。知己知彼，是成功地进行对抗所必需的。

(4) 要有快速反应的能力。雷达对抗是相对的，没有一种对抗的手段是永远有效的。在战争过程中将不断出现新的对抗手段。因此，必须迅速作出反应，采取有效对策。

(5) 电子技术水平是雷达对抗技术的基础。如开辟新的频段一定要解决新的器件。数字计算机的进展为雷达对抗采用自适应系统提供了条件。所以，没有先进的电子技术，雷达对抗的发展就要受到很大的限制。

第二节 雷达干扰的基本方式

要解决雷达抗干扰问题，首先要了解雷达干扰问题。为此，我们在本节对雷达干扰的基本方式作一简单介绍。

根据干扰的来源，雷达干扰可分为积极干扰和消极干扰。积极干扰又称有源干扰，它是利用专门的干扰设备发射电磁波所形成的干扰，它包括杂波干扰、连续波干扰和回答式干扰等。消极干扰又称无源干扰，它是由某些物体反射雷达电磁波所产生的干扰。消极干扰，按其产生的原因，可分为自然消极干扰和人为消极干扰；按其性质，可分为分布式消极干扰和点式消极干扰。国外有不少文献把空间媒质的改变，在目标上涂覆吸收层以减小目标的反射面积，也列入消极干扰的范围。但这些干扰，在性质上与上述消极干扰很不相同，应单独考虑比较合适，对于这种干扰，本书不准备分析。

形成积极干扰的设备通常称为干扰机，它可以安装在飞机上、舰艇上或地面上。最近发展的一种投掷式干扰机，可以用气球、火箭或飞机投放到对方雷达附近，因此，很小的干扰功率可以产生很强的干扰信号。这种干扰机只能一次使用，故又称为一次使用干扰机。人为消极干扰的干扰物，通常由飞机或火箭投放。装置干扰机和干扰物的无人驾驶飞机是一

种新的干扰形式,这种无人驾驶飞机既能施放各种干扰,又会被雷达观察员误认为真目标,有很大欺骗性。

根据干扰的作用,雷达干扰则可分为压制性干扰和模拟性干扰。压制性干扰是用连续波信号或大量杂乱信号,压制或掩盖雷达目标信号。模拟性干扰是施放和目标信号十分相似的干扰信号,使雷达操纵员难以辨别真假,将干扰误认为目标。所以,模拟性干扰也称为欺骗式干扰。

压制性干扰包括杂波干扰、分布式消极干扰、脉冲调幅干扰和连续波干扰。

杂波干扰包括纯噪声干扰和各种噪声调制干扰,由于它对各种雷达都能干扰,因而它是最重要的干扰方式之一。图1-2是雷达遭受杂波干扰后A式显示器的画面,目标回波被杂波所掩盖。纯噪声干扰是直接将噪声放大,然后发射出去以干扰雷达。噪声调制干扰包括噪声调幅干扰和噪声调频干扰,它是由噪声信号去调制高频振荡所产生的干扰,由于它能得到较高的干扰功率,所以它在杂波干扰中用得最多。根据

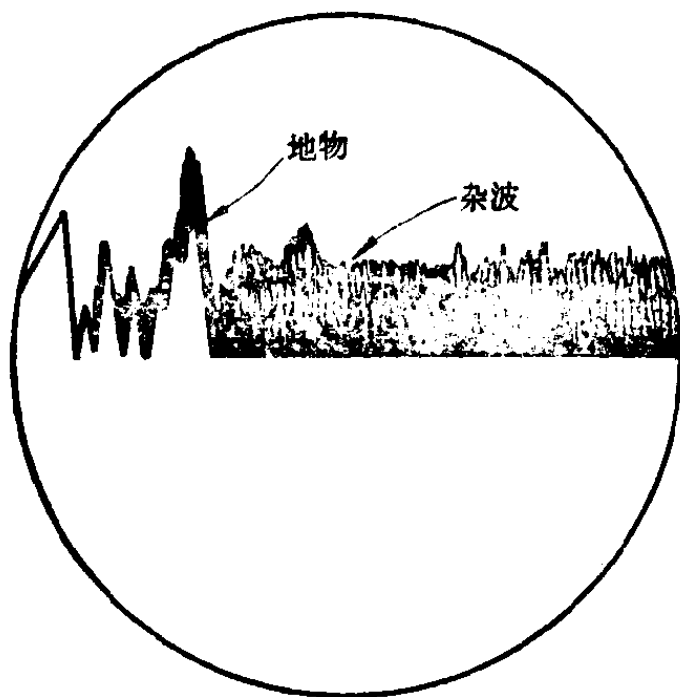


图1-2 雷达受到杂波干扰时,A式显示器的画面