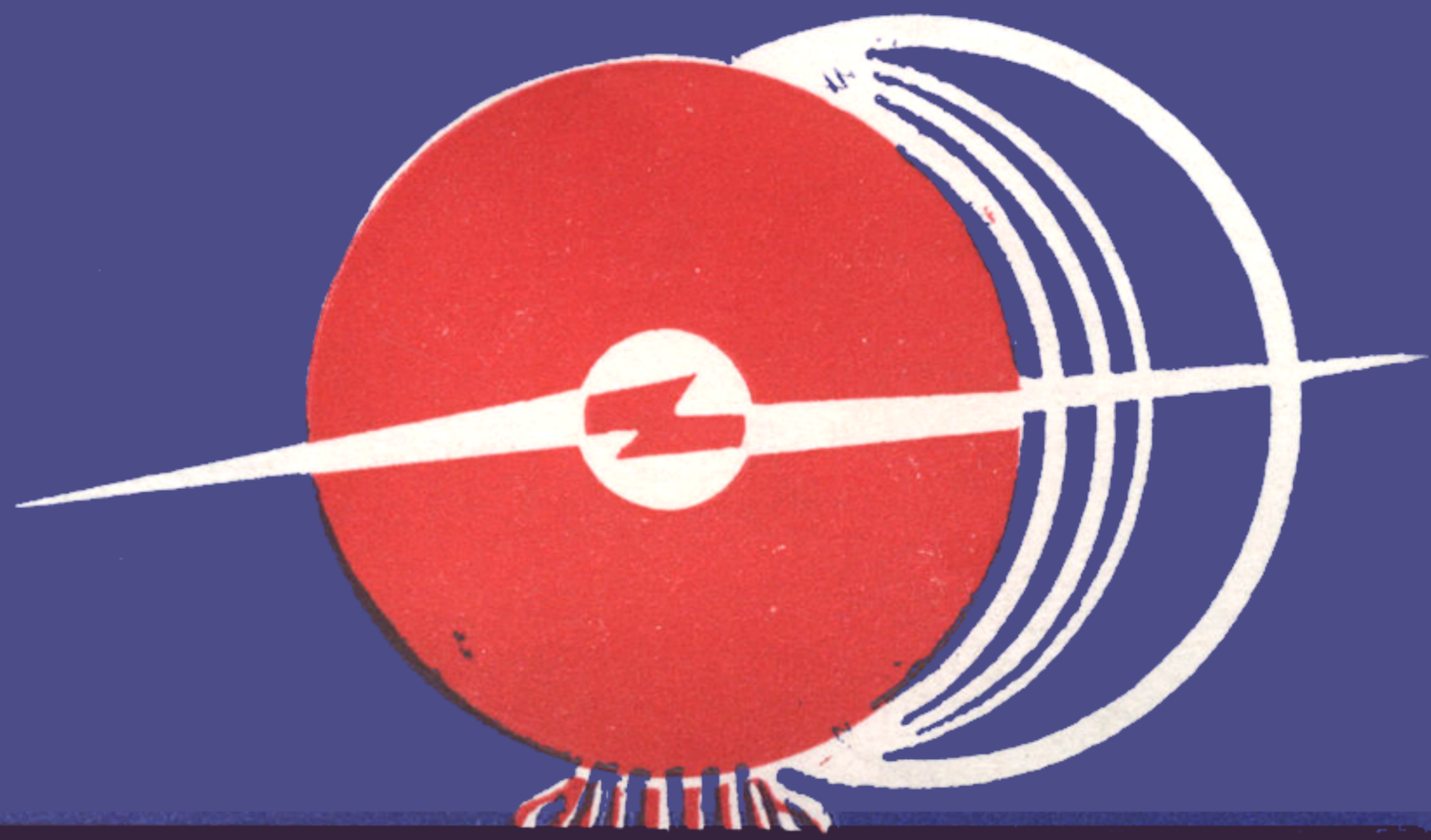


# 雷达反对抗的基本理论与技术

刘德树 编

北京理工大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 雷达反对抗的基本理论与技术

刘德树 编

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本书从电子反对抗的观点出发，论述了各种雷达技术的基本原理和实现方法，介绍了为提高雷达反对抗能力的各种技术，包括波形设计，动目标检测方法，频率捷变，自适应阵天线技术，反模拟干扰，低截获率技术及反隐身技术等。

本书可作为雷达专业研究生教材，也可作为有关专业人员的参考书。


# 雷达反对抗的基本理论与技术

刘德树　编

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米　32开本13.875 印张310千字

1989年 8 月第一版　　1989年 8 月第一次印刷

ISBN 7-81013-203-2/TN·15

印数：1—1700册　　定价：3.15元

# 前　言

本书是为《通信与电子系统》学科研究生学习雷达反对抗课程而编写的教材。全书共七章，主要讨论雷达反对抗的基本理论及其一些基本技术。第一章概述了目前电子对抗与反对抗的斗争、目标和干扰信号特性，以及反干扰的度量，第二章在简述目标信号检测和估计的基础上，从反干扰的角度讨论了信号波形的选择和设计，第三、四章讨论了频域反干扰的基本方法，第五章研究了极化反干扰和空域反干扰，着重讨论了自适应阵列的零点技术，第六章简述了时域反干扰和反模拟干扰，第七章介绍了反隐身目标的基本途径和一些技术措施。

本书是从反对抗的角度论述各种技术措施，有些技术可以用在反干扰、反隐身和对抗反辐射导弹等领域，而不是以各种雷达体制为线索来进行研究的。各章末附有大量的参考文献，便于读者对有关问题作深入的研究。

本书内容涉及面广，并力图多介绍一些新技术，虽然有些技术还不成熟，尚在研究阶段，为了使读者对这方面的发展有所了解，本书也作了简要的介绍。

本书由北京理工大学周思永教授主审。西安电子科技大学戴树荪和张以杰教授对本书初稿提出了宝贵意见，这里表示衷心的感谢，由于编者水平所限，错误和缺点在所难免，请读者批评指正。

编者　　1988.4

# 目　录


**第一章　概述** …… 1

§1.1　对抗与反对抗简介 …… 2

§1.2　目标回波特性 ……18

§1.3　干扰特性 ……25

§1.4　反干扰性能的度量 ……37

参考文献 ……43

**第二章　雷达信号的选择** ……45

§2.1　概述 ……45

§2.2　信号的模糊函数 ……56

§2.3　信号形式选择及波形设计 ……77

§2.4　低截获概率雷达 ……90

参考文献 ……102

**第三章　频域反有源干扰** ……104

§3.1　频率分集（FD） ……104

§3.2　频率捷变反有源干扰 ……109

§3.3　频率捷变对检测和估计的影响 ……114

§3.4　频率捷变对海浪杂波干扰的抑制 ……130

§3.5　频率捷变信号的产生和处理 ……137

§3.6　自适应频率捷变 ……160

§3.7　毫米波雷达 ……172

参考文献 ……176

**第四章　频域反无源干扰** ……178

§4.1　概述 ……178

§4.2　自适应动目标显示 ……191


需要全本请访问 www.ertongbook.com

§4.3 动目标检测（MTD）……196
§4.4 相参接收系统……206
§4.5 数字稳定校正技术……212
§4.6 频率捷变与 MTI 兼容……236
参考文献……255
**第五章 极化和空域反干扰**……257
§5.1 极化反干扰……257
§5.2 超低旁瓣天线……264
§5.3 旁瓣抑制和匿影技术……271
§5.4 自适应阵的最佳权向量……276
§5.5 最佳权向量的实现……294
§5.6 自适应旁瓣对消……320
§5.7 与信号相关干扰的处理……338
参考文献……348
**第六章 时域反干扰和反模拟干扰**……351
§6.1 脉宽鉴别和反异步干扰……351
§6.2 宽限窄电路……359
§6.3 反有源模拟干扰……367
§6.4 反无源模拟干扰……377
参考文献……381
**第七章 反隐身技术**……382
§7.1 概述……382
§7.2 非正弦信号雷达……388
§7.3 双（多）基地雷达……401
§7.4 无源定位……419
参考文献……428
附录A 调制信号通过压缩滤波器……430
附录B 去相关平滑处理……436

# 第一章　概　述

随着科学技术的日益发展，现代战争已由海陆空的三维立体战发展到加上电子战（EW）❶的四维战。在近期的中东战争、马岛之战以及美国袭击利比亚的战斗中业已表明：电子战已从以战斗保障为目的，发展到成为一种重要的作战手段，战争的胜负在某种意义上是电子战的胜负。电子战是包含电子对抗（ECM）❷和电子反对抗（ECCM）❸两个相互矛盾方面的统一体，目前它已从原有的单纯电磁软对抗扩展为火力摧毁和反摧毁的硬对抗；从飞行器凭借地形地物掩护突防，发展为隐身与反隐身的对抗。电子战大致可分为四类：电子侦察与反侦察；电子干扰与反干扰；摧毁与反摧毁；隐身与反隐身。电子战的历史可追溯到无线电发展的初期，但是，在早期人们对电子反对抗并没有象电子对抗那样重视，因而在实战中付出了昂贵的代价。从第二次世界大战期间至现在，人们吸取了这个教训，世界各强国都投入了大量的人力、物力与财力来研究和发展反对抗的理论与技术，并取得了相当的进展。

---

❶ Electronic Warfare的缩写

❷ Electronic Countermeasures的缩写

❸ Electronic Counter-Countermeasures的缩写

## §1.1 对抗与反对抗简介

为了对电子对抗和反对抗的现状及其发展趋势，以及各种反对抗技术在反对抗中的运用有一个总的概念，下面将概略地介绍各种对抗和反对抗的现状。

### 一、电子侦察与反侦察

电子侦察也称电子战支援措施（ESM)❶，它是实现对电磁目标进行干扰或摧毁的先决条件，其任务是搜索、截获、定位（或定向）、录取和识别敌方辐射的电磁信号参数。根据所得到的参数进行有效的快速干扰，或实现回避和摧毁等措施。目前电磁信号密度是很高的，仅雷达信号密度即可达每秒25～100万个脉冲。因此，电子侦察接收机（截获接收机）必须具有全波段、全方位、大容量、高速的信号处理功能。

反侦察的任务是要使敌方不能或难于截获和识别，即使被敌人识别了也不易（或需要较长的时间）复制。若敌截获接收机或跟踪接收机已经截获和识别了雷达信号，随后施放干扰或用反辐射导弹实施摧毁，雷达应有快速改变电磁参数的能力进行躲避。因此，侦察和反侦察的对抗总是不断地进行，在某种意义上讲，谁的反应速度快，谁就可以赢得电子战的主动权。

目前反侦察的途经有：

**1．采用不易识别的信号形式**

普通的定频、定脉冲宽度和定重复周期的常规雷达信号

❶ Electronic Support Measures的缩写

最为简单和容易实现，但它也最容易被识别。在理论上，最不容易识别也不能复制的信号形式要算噪声信号，但对这种信号很难获得大的辐射功率，信号处理也遇到很大的困难，所以，目前尚未见到纯噪声雷达信号形式，仅采用噪声调频信号。虽然它是个限带信号，也可获得满意的效果。正因为噪声信号作为雷达信号有困难，人们均采用伪噪声信号，例如脉冲调频（线性或非线性）信号，脉内伪随机编码信号和伪随机重复频率信号等。这类信号形式的产生、传输和处理都有较为成熟的办法，而且敌人要识别它们，却较为困难，因而它具有一定的反侦察能力。

**2. 采用低截获概率（LPI）❶雷达**

我们知道，雷达接收的目标反射信号功率与距离的四次方成反比，而侦察接收机的接收功率仅与距离平方成反比。因此，在其它相同的条件下，侦察接收机可能从雷达不能发现的距离和方向上截获到雷达信号而实施对抗措施。目前发展的低截获概率雷达，其基本性能是降低雷达作用距离与截获距离的比值，这个比值称为截获因子。它是采用大时宽频宽积的信号形式，如噪声或类噪声信号，和利用超低旁瓣天线完成的。

**3. 采用频率捷变**

快速跳频是反侦察的一种重要手段，特别是采用随机跳频，只要跳频的速度足够快（如脉间跳频），和跳频范围足够宽，要对它侦察和实施跟踪干扰或将其摧毁是很困难的。干扰机只能在比雷达跳频范围更宽的频带内实施宽带压制性干扰，这就降低了雷达工作频率上的干扰功率密度，有利于提高雷达的信号检测能力。

❶ Low Probability of Intercept的缩写

### 4. 采用双（多）基地雷达或无源定位

侦察是借助截获的雷达信号而获得信息，若采用双(多)基地雷达体制，即使能截获雷达信号，它只能对雷达发射基地的方向实施对抗，而接收基地是处在与发射基地不同的地域，因此，无法全方位地对接收基地实施干扰或摧毁。这种体制的核心是数据处理系统，发射系统仅提供信息运载工具，设备相对简单，付出代价较小。若把发射基地配置在不易受攻击的地方（如远后方或空中），那么，这种体制的雷达具有较强的反对抗能力。

若能诱发目标开动干扰机或利用目标本身辐射的电磁信号，则可用无源定位的方法确定目标参数，以防止被侦察。

## 二、电子干扰与反干扰

电子干扰按干扰源区分，可分为有源干扰和无源干扰；按其目的可分为有意和无意的；按其作用可分为压制性和欺骗性。各种干扰又可分成不同的模式，其分类见表 1-1，

表1-1　雷达干扰分类

- 雷达干扰
  - 有源干扰
    - 敌干扰源（模拟）
      - 压制性：瞄准式；堵塞式；扫频式。
      - 欺骗性：距离；角度；速度。
    - 邻近无线电设备发射的电磁干扰
    - 天然干扰：雷电；宇宙射线。
  - 无源干扰
    - 敌施放的反射体
      - 压制性。
      - 欺骗性。
    - 自然干扰：地形，地物，海浪，云雨。

压制性的有源干扰是以强大的功率和随机起伏的信号，压制和遮盖雷达对目标回波的检测，甚至使雷达接收机过载。

压制性的无源干扰是飞行器（或载体）在要掩护的空间投掷大量的高密度的反射体，如箔条、干扰丝等，以形成长宽数公里的“干扰云”。在这空域中，干扰云产生强大的回波，从而使雷达不能在此区域内发现目标。

欺骗性的有源干扰是目标在截获雷达探测信号后，发射一个同载频而在时延、频移和调制波形有差异的信号，使雷达误以为此模拟信号为真目标回波。欺骗性无源干扰是在目标点投反射体（如角反射器），它将产生比目标回波强得多的信号，使雷达错误跟踪这些反射体，达到以假乱真的欺骗目的。

无源自然干扰是检测低速目标和低空目标的严重障碍。这种干扰所形成的杂波，其特点是频移小或没有频移，杂波功率大（比目标回波功率高 40dB 以上）。飞行器或军舰，可借助地形地物或海浪的掩护突防。因此，反地杂波和海浪杂波干扰是当前雷达反干扰的重要课题之一。

雷达反干扰的方法可分为两大类：一类是使干扰不进入或少进入雷达接收机中；另一类是当干扰进入接收机后，利用目标回波和干扰的各自特性，从干扰背景中提取目标信息。它们都可归结为滤波问题，包括频域、时域、时频域、空域和极化等领域的滤波。关于反干扰的各种具体技术，文献〔1，2〕已有较全面的叙述。这里仅从反干扰的几个领域简述如下：

### 1．功率对抗

根据信号检测理论，对于高斯白噪声的干扰信号，其接收机最大的输出信噪比与发射信号形式无关，仅决定于发射信号的总能量。因此，提高雷达反干扰能力的最简单的方法是尽可能地增加发射能量。其途径是加大发射功率、增加天



需要全本请访问 www.ertongbook.com

线增益、提高接收机的灵敏度和提高发射脉冲信号的工作比(即减小重复周期或增大发射脉冲宽度)。目前发射的峰值功率可达 50～100MW，要做成更大的峰值功率受到器件的 限制，增大脉冲宽度又会引起距离分辨力的下降，而减小重复周期又会导致距离模糊。因此，在峰值功率一定的条 件 下，提高发射能量要解决它与距离分辨力矛盾的问题。解决这个问题比较成熟的方法是采用脉冲压缩，例如用宽脉冲调频和相位编码。这种信号形式还具有一定的反欺骗性的有源干扰和反侦察的能力。利用可变脉冲重复周期可解决距离模糊的问题，例如采用参差脉冲重复频率或随机抖动脉冲重复频率。这种可变重复频率的信号形式对欺骗性的有源干扰和反侦察也有良好的效果。

**2. 频域滤波**

利用频域滤波反压制性干扰是最重要最有效的方法之一，它的基本思想是利用目标回波信号与干扰信号在频域结构上的差异，采用特定的滤波器，滤去干扰而保留目标回波信号。

对有源瞄准式干扰可采用与之不同频率的雷达信号，如频率分集和多频雷达。实际上，有限个频率固定的雷达是很容易被跟踪瞄准的，因此，要摆脱干扰的跟踪就必须随时地改变雷达的工作频率，这就是目前常用的频率捷变雷达(FAR)❶。它是在脉间实现频率的跳变，频率跳变的速度在微波波段上，可达每秒几百到几千千兆赫，跳频范围可达几百到几千兆赫。频率捷变雷达可分为全相参和非相参两种形式。全相参式频率的跳变可以做到用随机或伪随机信号来控制，使敌难以侦察和预测，也免去了接收系统频率跟踪的困难，但这种方式

❶ Frequency Agility Radar 的缩写

结构比较复杂。非相参式设备比较简单，当它配置有发射频率读出装置的发射系统时，接收系统的频率跟踪困难也不大，但这种频率跳变比较难做到随机控制。

若频率捷变雷达的跳频速度足够快，跳频范围足够宽，跳频是随机的时，对它实施瞄准干扰是十分困难的，只能实施堵塞式压制干扰，这就分散了干扰功率密度，相对地提高了信干比。这种体制的雷达除了有躲避干扰的作用外，还具有提高作用距离和测角精度及反海浪杂波干扰等优点。

随着目标姿态和电磁环境的不断变化，频率捷变雷达应具有自适应能力，它包括对目标的自适应和对干扰的自适应。一个复杂目标的姿态及其反射回波的大小与雷达的工作频率是有关的，因此，雷达的工作频率应随着目标姿态的变化，自适应地工作在最有利的频率上。在实施宽带堵塞式干扰时，由于种种原因而引起在雷达接收端干扰功率谱的不均匀，这种不均匀性可能是随机地改变的，那么，可根据干扰谱的变化，使雷达自适应地选择工作频率处在干扰功率最弱的频率区或点上，以求获得最大的信干比。

开拓新的频域也是反有源压制性干扰的重要途径。目前，已把雷达的工作频率从厘米波向更短的毫米波、亚毫米波及激光红外方向扩展，也从长米波向短波方向发展。问题是：对更短的波长如何获得大功率、高效率的振荡源和高增益低噪声的放大器、混频器，对短波要解决在常规频率雷达中不曾碰到的天电、无线电干扰和电波传播中的衰落起伏等对信号检测影响的问题。

### 3. 空域滤波

空间滤波是反有源干扰的有效措施之一，它只允许雷达所需方向的信号（包括在这空域内的干扰）进入接收系统。

空间滤波的办法有：窄波束超低旁瓣天线；自适应波束形成和零点技术以及干扰对消技术。

**4．极化滤波**

极化是信号特征之一，根据目标回波的极化特性实现反干扰称为极化滤波。采用与干扰信号极化正交的收发系统可以滤去干扰，例如收发采用同极化的圆极化天线，可以滤去雨滴产生的杂波干扰。极化滤波反干扰技术有：极化分集；极化捷变和自适应极化技术。

**5．接收系统信号处理反干扰**

前面所述的几种反干扰技术，其主要目的是设法提高接收系统输入端的信干比。但是，在一般情况下，干扰电平总是比所需的目标回波信号大得多，即使采用了以上某种技术，干扰信号仍或多或少地会漏入接收系统。有些干扰，如无源杂波干扰和有源欺骗性干扰以及邻频无线电设备的电磁信号，用前述方法无法阻止这些干扰进入接收系统。这时只能依靠接收系统本身的信号处理方法，提高雷达的信号检测能力。信号处理可以采用频域、时域，或时频域处理技术。

要在强干扰背景下利用信号处理的方法提取目标回波信息，其首要的条件是信号经接收机时不能丢失信息，这就要求接收机有足够的通频带和足够的动态范围。常用的反过载措施有各种形式的增益控制电路，在自动检测中这必须有恒虚警率处理。

用滤波器抑制干扰而保留信号，实际上有两个方面的问题。首先是从接收到的信号中要判断有没有目标回波信号，这是信号的检测问题；而后，在此基础上来估计目标信号的参数或波形，这是信号的估计问题。

信号检测需要规定一个准则，即在什么条件下判决有目

标信号。很显然，对于线性处理系统，它的输出信噪比越大，信号检测就越容易。因此，可认为获得最大信噪比的线性滤波器是最优滤波器，这个滤波器称为匹配滤波器。根据匹配滤波器的理论，在平稳高斯白噪声中获取目标信号，滤波器获得最大信噪比输出的条件是：其传输函数应等于输入目标信号频谱的共轭，在时域，则其脉冲响应函数是信号的共轭镜象。在有色噪声环境中，匹配滤波器的特性还与噪声特性有关。由于在未来的电子战中，电磁环境不断地变化，要获得最优的检测性能，滤波器应具有自适应能力。必须指出，匹配滤波器是一种线性最优处理，它只应用了噪声的一、二阶矩特性，一般说来，仅有这些知识还不能完全描述噪声的特性，因此，要获得这类干扰下的最优处理，应允许系统中含有非线性环节，在这种情况下，应按最大似然比作为最优处理判决的准则。

从接收到的信号中估计目标信号参数或波形称为信号的估计。对于搜索雷达只要对目标信号的时延和频移等参数进行估计，而对跟踪雷达或模式识别应对信号波形进行估计。最优估计应是无偏的和估计的均方误差最小或称均方意义下的最优估计。对于平稳随机过程，可采用维纳(Wiener)滤波器以获得最优估计，对于非平稳过程的估计则采用卡尔曼(Kalman)滤波器。维纳滤波和卡尔曼滤波是解决线性状态空间模型的最优处理，对于非线性的状态模型，要找到最优的估计器是很困难的，通常采用近似的估计方法，如围绕已知的标称值或估计值进行线性化等。

反欺骗性干扰常采用时域滤波的方法，如脉宽鉴别电路、反异步干扰电路，脉冲干扰消除或抑制电路及消隐技术等。

必须指出，所有反干扰的措施中的某种反干扰技术，对

某种干扰模式可得益多一些，而对另一种干扰的得益可能比较少，甚至反而有害。根据博奕论方法来评价各种雷达反干扰技术的得益，如表 1-2 所示[8]。表中数值的符号“+”表示反干扰得益，数值越大，得益越多，而符号“—”表示反干扰损失，即干扰得益，绝对值越大，干扰效果越好。

表1-2　　各种反干扰对干扰类型的得益

| 技术措施 | 宽带噪声 | 扫频干扰 | 长脉冲 | 短脉冲 | 瞄准式 | 副瓣转发器 | 主瓣转发器 | 距离拖引 | 速度拖引 | 角度通选 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 捷变频 | + 3 | + 10 | + 10 | + 5 | + 10 | + 5 | + 5 | + 3 | + 3 | + 3 |
| 编码/脉冲压缩 | + 3 | + 3 | + 5 | + 5 | + 5 | + 5 | + 5 | + 5 | − 3 | − 3 |
| 可变脉冲参数 | − 3 | + 2 | + 5 | + 5 | + 2 | − 3 | − 3 | + 3 | − 3 | − 3 |
| 多普勒处理 | − 5 | + 2 | + 2 | + 2 | + 10 | − 5 | − 5 | + 5 | + 5 | + 5 |
| MTD | − 4 | + 2 | + 2 | + 2 | + 8 | − 4 | − 4 | + 4 | + 4 | + 4 |
| 单脉冲 | − 4 | − 4 | − 4 | − 4 | − 4 | + 5 | + 5 | − 4 | − 4 | + 10 |
| 抖动重复频率 | − 3 | − 3 | + 2 | + 2 | − 3 | − 3 | − 3 | + 3 | + 3 | − 3 |
| 恒虚警处理 | + 3 | + 3 | + 2 | − 3 | − 2 | − 2 | − 2 | − 2 | − 2 | − 2 |
| 快速AGC | − 2 | − 2 | + 4 | − 2 | − 2 | − 2 | − 2 | − 2 | − 2 | − 2 |
| 信号限幅 | − 4 | + 5 | − 4 | + 2 | − 4 | − 4 | − 4 | − 4 | − 4 | − 4 |
| 宽限窄 | + 6 | + 5 | − 2 | + 10 | − 3 | − 3 | − 3 | − 3 | − 3 | − 3 |

## 三、摧毁与反摧毁

电子干扰仅仅使雷达暂时地失效或性能降低，目前各国雷达都有各种反电子干扰设备，加上战术上雷达网的合理配置，攻击型飞行器仅靠一般的电子干扰实施突防是很困难的。最好的方法是用火力摧毁对突防威协最大的辐射器（雷达）。从而产生了以摧毁敌方雷达为目的的导弹，称为反辐射(反雷

达）导弹（ARM）❶，这种导弹是利用敌方雷达辐射的电磁波引导而攻击目标的。

最早实战使用的反辐射导弹是美国在1965年侵越战争时的“百舌鸟”反辐射导弹，随后，英、法、苏、西德、瑞典、挪威和以色列等国也相继研制和生产了各种反辐射导弹，并装备部队。反辐射导弹的发展是很快的，表现在：使用范围上已从空对地发展到空对空、舰对舰和地对地，或者既能空对地也能空对空；在制导方面从被动雷达制导发展到红外、电视、惯性和主动雷达制导及激光制导等多种制导方式，有的还配有记忆装置，即使雷达已发现导弹跟踪而关机也能击中目标雷达；反辐射导弹在性能上也有很大的提高，它反映在飞行速度、射程和威力上，目前导弹的飞行速度可高达3～4($M$)，发射高度可从超低空（几十米）到高空；最大射程可达170km；杀伤半径也大大地增加了。目前各国生产使用的反辐射导弹的性能如表1-3所示[4]。

从贝卡谷战斗到美国空袭利比亚的战例表明，使用反辐射导弹已成为现代战争的主要手段之一。因此，研究对抗反辐射导弹技术已成为保证雷达的战斗力和生存能力的重要课题。目前对付反辐射导弹的措施有技术上的，也有战术上的。

技术上采用低截获率雷达，它至少可避免或减少反辐射导弹从远距离或雷达非检测方向的威胁。采用多基地雷达和无源定位系统。反辐射导弹只能攻击雷达的辐射系统，而其核心部分——接收和数据处理系统是安全的。若把发射站配置在严密设防的后方或预警飞机上，则发射站的安全也有比较可靠的保证。利用反辐射导弹大的径向速度而采用多普勒

❶ Antiradiation Missile，或Antiradar Missile的缩写



需要全本请访问 www.ertongbook.com