独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到，本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：　　年　　月　　日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于　　保密□，在_____年解密后适用本授权书。

不保密□。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：　　指导教师签名：

日期：　　年　　月　　日　　日期：　　年　　月　　日

1 绪 论

1.1 雷达对抗概述

现代军事技术的一个重要特点[1]，就是各种武器装备越来越广泛地采用和依赖于无线电技术，战略和战术武器普遍采用无线电探测、控制、通信等电子技术，而各种武器装备威力的发挥，战区的监视和警界，诸兵种协同作战的调配、联系、指挥和控制等，都越来越多地依赖于雷达的效能。雷达对抗是电子战的主要组成部分。它是以雷达为主要作战对象，通过电子侦察获取敌方雷达、携带雷达的武器平台和雷达制导武器系统的技术参数及军事部署情报，并利用电子干扰、电子欺骗和电子攻击等软硬杀伤手段，削弱、破坏敌方雷达的作战效能而进行的电子斗争。雷达对抗的目的[2]就是通过对雷达的侦察和干扰，获取敌方武器装备、兵力部署、作战指挥等方面的重要情报；在重要的战斗和战役进程中，使敌方的武器系统失效、指挥控制失灵，为消灭敌人、保存自己、取得战争胜利创造条件。

在现代战争中，每一个作战装备和作战人员都会因其在战争中的地位和作用而受到多种雷达和武器系统的威胁、杀伤。任何一架作战飞行中的军用飞机，都有可能会同时遭受到敌方数种雷达、杀伤武器的威胁。如果它或它所在方不能有效地对抗敌方诸多的威胁雷达和武器系统，则其不仅不能完成预定的作战任务，甚至不能保证自己的生存。而雷达对抗[2, 3]是一切从敌方雷达及其武器系统获取信息（雷达侦察），破坏或扰乱敌方雷达及其武器系统的正常工作的战术、技术措施的总称。因此，可以说雷达对抗在现代战争中处于举足轻重、日益重要的地位。

从近现代几场局部战争中，我们也不难看出雷达对抗不仅是取得军事优势的重要手段和保证，也是每一种武器系统和军事目标生存与发展的必不可少的自卫武器。越南战争中[1]，美军综合采用了多种雷达对抗措施，曾一度使越方地空导弹的杀伤概率降到 2%，防空火炮的杀伤概率降到 0.5%以下；海湾战争中，以美国为首的多国部队凭借高科技的优势，从战争开始前数周至战争结束，对伊军的整个战区进行了连续不断的电子侦察和强大的电子干扰，不仅使伊军的全部雷达无法正常工作，通信中断，指挥失灵，甚至成为招致各种反辐射武器直接攻击的靶源，损失惨重。这场战争仅持续两个月，双方的人员损失分别为百余人比数十万人，开创了世界军事

史上的奇迹，也充分展示了现代高科技战争的魅力。

主动雷达必须发射探测脉冲和接收照射目标的回波才能发现目标、测定目标的空间位置和对目标跟踪。雷达干扰设备则是利用雷达这一工作过程来破坏雷达对目标信息的获取，雷达干扰设备通过对雷达高功率探测脉冲的截获，可以在远距离上发现雷达，并可根据对雷达信号的分析而准确测知雷达的属性和威胁的程度。甚至发射与雷达频率相同的各种干扰信号，使它进入雷达接收机以压制雷达对目标回波的接收，并在其显示器上遮盖目标回波或制造假的目标回波进行欺骗，进入雷达接收机的干扰信号还可以其特有的调制破坏雷达对目标的跟踪。而雷达抗干扰的任务就是滤除和抑制干扰的影响，最大可能地获取及时、准确的目标信息[4]。

随着各种新技术、新体制雷达不断涌现，现代的雷达对抗技术已经发展到了相当高的水平。现代雷达为了抑制干扰，往往采用多种抗干扰手段[5]；相应地，一些新型干扰装备和干扰技术也随之出现。雷达干扰和雷达抗干扰作为一对对立统一体，正是在这种相互制约相互促进的过程中共同发展的。

1.2 毫米波雷达抗干扰技术概况

1.2.1 研究现状

毫米波雷达的研制是从 20 世纪 40 年代开始的，50 年代出现了用于机场交通管制和船用导航的毫米波雷达[6] (工作波长约为 8 毫米)。最初，对发展毫米波雷达的推动力主要来自于用小口径天线即可获得比微波雷达更窄的天线波束、更高的天线增益。窄波束具有高分辨率和由于空间选择性好而带来的高抗干扰能力。但是，由于技术上的困难(功率源输出效率低、接收机混频器和传输线损失大等)，毫米波雷达的发展一度受到限制。70 年代中期，随着毫米波元器件的发展，毫米波技术有了很大的进展。近年来，毫米波技术的迅速发展，特别是以 GaAs MESFET 为基础的毫米波单片集成电路(MMIC)技术的成熟，有力地推动了毫米波雷达在雷达电子战领域的发展和应用。

毫米波雷达实施抗干扰技术的优势[7]在于因采用较短的波长容易实现较窄的波束宽度，从而在目标监视方面有高的角分辨力和低仰角跟踪能力；能够用小尺寸天线获得高增益；极宽的可用频带便于提高距离分辨力，且提高了抗干扰能力。目前，国外已能把毫米波雷达应用于导弹、精确制导炸弹以及目标跟踪系统等多种武器装

备中，毫米波抗干扰技术研究也如火如荼地进行中。如美国的霍克地空导弹系统和前苏联的 SA210 地空导弹系统都采用了毫米波制导技术。毫米波雷达抗干扰技术之所以引起国外如此重视的一条重要原因是，近几年的几场局部战争的实践已经表明，“远程打击，精确打击”技术在军事应用中非常重要，高精度、高分辨测量、精确制导和精确目标指示、实现自动目标识别（ATR）等需求比以往任何时候都显得更加迫切，而且雷达对抗新技术的不断涌现、战场环境的日益复杂化，也对毫米波雷达抗干扰技术提出了更高的要求。目前，毫米波技术在国外的应用程度，已渐进成熟和完善，美、俄等国均在努力探讨适应于电子对抗的毫米波设备，大都是从抗复杂的电子干扰和无源干扰角度出发，在跟踪和火控系统，测量和辐射方面，自动寻的装置和末制导导弹等方面，均得到应用，其使用效果比微波和光电具有独到之处。

尽管毫米波雷达比微波雷达在抗干扰性能方面具有诸多优点，但毫米波对抗仍需要解决宽带高灵敏度接收、窄脉冲处理、宽带功率放大、快速高精度方位/频率引导等一系列技术问题。我国在毫米波雷达抗干扰技术研究上起步较晚，整体上落后于西方国家。在国内开展毫米波抗干扰技术研究还存在着以下几个问题[8]：

1) 毫米波及电子战理论研究。无论是毫米波系统、元器件的构成还是抗干扰技术的实现都需要许多新概念和创新的思想，并进行深刻的理论研究，从而给出新的设计方法。

2) 毫米波器件。宽带毫米波功率源和宽带毫米波器件制造比较困难，为此需要采用上、下变频措施，在微波频段进行参数测量和信号调制，然后再上变频到毫米波放大等一些特殊的设计技术。

3) 毫米波测试仪表和测试设备问题。目前先进的毫米波测试仪器主要来自于国外厂商，因此迅速提升国内毫米波测试设备的自主研发能力，显得尤为重要。

4) 毫米波对各种无源干扰的反射特性和基本传播特性的定量分析及测试研究有待进一步深入开展，并基于分析给出有效的抗干扰方法。

5) 材料的支持。毫米波元器件的发展需要更好的材料支持[9]，例如半导体器件需要更好的 MBE 材料，旋磁器件需要在毫米波段损耗小的旋磁材料，真空器件需要磁能积更高的磁性材料等。

1.2.2 发展趋势

随着毫米波雷达抗干扰技术在现代战场上的广泛应用，毫米波技术研究也在深入开展中。为了扩大毫米波雷达的使用范围[8]，进一步开发毫米波器件和选择合适的大气窗口，继续发展毫米波集成电路，有利于降低成本、使毫米波设备更加轻小型化；研制更为先进的毫米波段多功能相控阵雷达和自适应雷达，同时发展毫米波雷达、微波雷达以及红外、激光、电视等设备组成的多频系统。为了提高从杂波背景中识别目标的能力，应发展毫米波信号处理技术，特别是自适应信息处理和多维信息处理技术。

雷达对抗日益激烈化，毫米波雷达抗干扰技术也宜快速升级，提高自身的功能，从这方面考虑，毫米波雷达就必须结合微波雷达已广泛采用的各种新体制和新技术，如扩频技术、频率捷变技术、脉冲多普勒和自适应技术等，并利用自身的优势，发展多个频段或模式复合的技术，以提高自身的生存能力。随着光电干扰技术、隐身技术和反辐射导弹技术的发展，单一的制导模式由于自身的局限性很难适应现代战争的需要，不能达到现代战争中的抗干扰性能指标。而复合制导模式可以充分发挥各种制导模式的优势，互为补充，可以有效提高反舰导弹的作战效能。因此，复合制导是未来制导武器的发展方向。毫米波/红外复合制导是复合制导体制中最有前途的一种。可以预测，随着毫米波技术理论和材料科学的发展，未来的毫米波雷达抗干扰将是多方位、多层次的。

1.3 本文主要工作及内容安排

毫米波雷达作为一种新体制的雷达，具有窄波束、低旁瓣、高定向性、宽频带和抗干扰能力强等优点，特别是像脉冲压缩、频率捷变、单脉冲角跟踪等技术在毫米波雷达中得到广泛的应用，使毫米波雷达有更强的抗干扰能力。本文研究毫米波雷达各类抗干扰技术，主要针对毫米波脉冲压缩和单脉冲测角过程中的有效干扰，分析给出基于独立分量分析（ICA）的信号分离抗干扰方法。全文各章节内容安排如下：

第一章对现代雷达对抗情况进行了简要的介绍，并阐述了毫米波雷达抗干扰技术的研究现状及发展趋势。

第二章介绍了毫米波雷达各种抗干扰技术。结合毫米波雷达的优点，按雷达抗

干扰的原理分类，对毫米波雷达抗干扰技术进行了较全面的介绍。

第三章研究毫米波脉冲压缩雷达抗干扰性，针对移频干扰对线性调频脉冲压缩信号形成距离假目标欺骗，分析提出调整信号带宽以及基于独立分量分析（ICA）的抗干扰方法。仿真表明，两种方法均能有效地抑制移频干扰。

第四章研究单脉冲测角的抗干扰性能，针对强噪声对单脉冲测角形成压制式干扰，同样将基于 ICA 的信号分离方法应用到单脉冲测角的抗干扰中，从而提高测角精度。最后研究毫米波/红外复合抗干扰技术在对抗诱饵欺骗中的应用。

第五章是全文总结和对未来工作的建议。

2 毫米波雷达抗干扰技术

2.1 毫米波雷达

当代高科技军事斗争的需求推动了毫米波技术发展。90 年代后随着毫米波单片集成电路研制取得重大突破，新型高效的大功率毫米波行波管，微带平面介质天线和集成天线，低噪声接收机芯片等相继问世，为毫米波雷达的发展奠定了坚实的基础。

毫米波是介于微波与红外之间的电磁波，通常毫米波频段为 30GHz～300GHz（相应的波长为 1mm～10mm）。目前绝大多数的应用研究集中在几个“ 窗口 ”频率，包括 35、94、140、220GHz 和三个吸收峰(60、120、200GHz 频率上)。而任何一个窗口的可用带宽几乎都可以把包括微波频段在内的所有低频频段容纳在内，毫米波的可用频带宽度非常丰富。毫米波雷达具有以下特性[10, 11]：

（1）频带极宽[12]。如在 35GHz、94GHz、140GHz、220GHz4 个主要大气窗口中可利用的带宽分别为 16GHz、23GHz、26GHz 和 70GHz，均接近或大于整个厘米波频段的宽度，适合于各种宽带信号处理。频带越宽就意味着雷达在采取抗干扰措施时可利用的频率资源越丰富，有利于在频率域实施各种抗干扰技术，如频率捷变、频率分集、扩频、快速跳频等，同时也有利于避免相邻频率雷达间的相互干扰。另外，频带较宽有利于提高距离分辨率，从而提高雷达的跟踪精度和目标识别能力。

（2）容易得到较窄的天线波束，方向性好，具有很高的空间分辨力，跟踪精度较高。较窄的波束使地面杂波和多径效应对其影响小，低空角跟踪性能较好，对横向区域成像时也获得较高的角分辨率。由于毫米波雷达以窄波束发射，因而使敌方在电子对抗中难以截获，因而具有较强的抗干扰能力。

（3）有较宽的多普勒带宽，多普勒效应明显，具有良好的多普勒分辨力，测速精度较高。由于毫米波频率很高，目标径向运动时引起的多普勒频移就较大，因此就有利于毫米波雷达前视成像的分辨率和目标识别能力，也提高了雷达的动目标显示(MTI)性能。

（4）良好的反隐身性能：目前隐身飞行器等目标设计的隐身频率范围局限于 1GHz～20GHz，又因为机体等不平滑部位相对毫米波来说更加明显，这些不平滑部位

都会产生角反射，从而增加有效反射面积，所以毫米波雷达具有一定的反隐身能力。

因而，毫米波电子设备在结构小、重量轻、分辨力高、作用距离近和具有良好多普勒处理特性的场合得到了广泛的应用。与微波相比，毫米波受恶劣气候条件影响较大，但分辨力高，结构轻小；与红外和可见光相比，毫米波系统虽没有那样高的分辨力，但它具有穿透烟、灰尘和雾的能力，可全天候工作。

毫米波雷达的缺点[10]主要是受大气衰减和吸收的影响，目前作用距离大多限于数十千米之内。另外，与微波雷达相比，毫米波雷达的元器件目前批量生产成品率低。加上许多器件在毫米波频带均需涂金或涂银，因此器件的成本较高。然而随着新型毫米波系统研究开发臻于成熟，它将在新世纪的军事以及民用中崭露头角。

2.2 毫米波雷达抗干扰技术分类

毫米波具有窄波束、低旁瓣、高定向性、宽频带等优点。毫米波雷达作为一种新体制雷达，一旦结合微波雷达中已经广泛应用的抗干扰技术[13]，必然会大大提高系统的测量精度、分辨力和抗干扰能力。毫米波雷达抗干扰的技术措施有很多种，也有多种不同的分类方法。文献[14]按雷达抗干扰的原理，将其分为：波形选择、空间与极化选择、功率对抗、频率选择、最佳接收、动目标处理技术等方面。下面本节就对几种主要抗干扰技术的基本原理进行介绍。

2.2.1 波形选择

雷达信号的形式与雷达的威力、精度、分辨率、抗干扰能力等主要战术指标都有密切关系。雷达的发射机、接收机、信号处理设备也都与雷达信号波形有关。因此，在雷达具体工作过程中，我们选择信号的原则总倾向于信号既容易形成又容易从收到的回波信号中提取出有用信息，消除干扰。所以，从提高毫米波雷达抗干扰性能的角度来研究雷达信号的波形就很有必要了。

目前，雷达信号形式多种多样，分类方法也各不相同，图 2-1 所示是一种简单的分类方法。

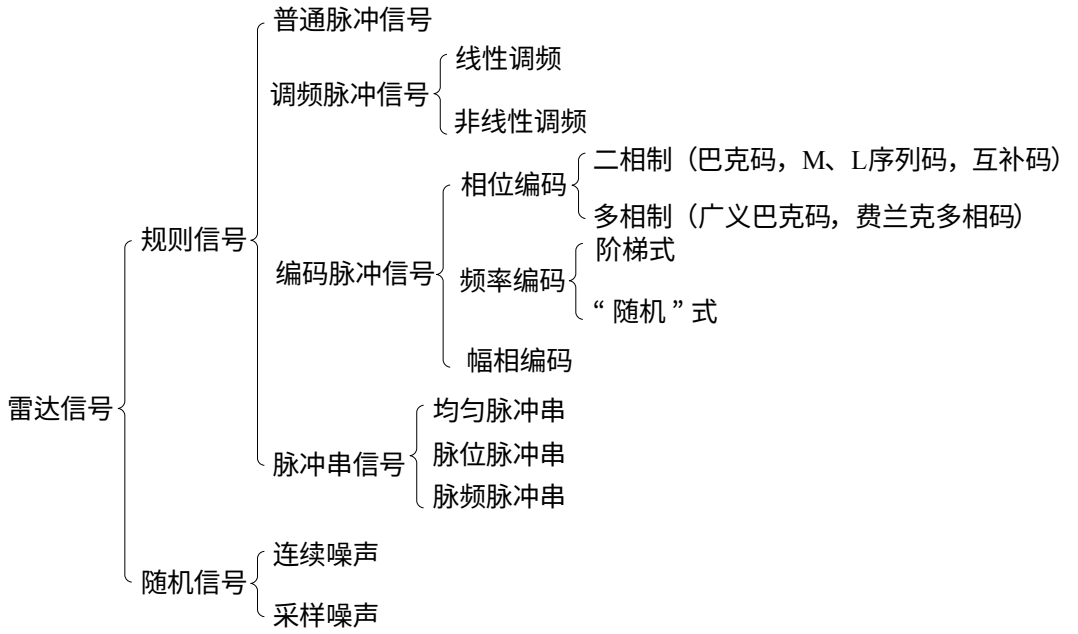

图 2-1　雷达信号的分类

通常，一部雷达采用什么样的发射信号为佳，是根据雷达的主要战术技术指标、技术上的难易程度以及经济性等因素加以全面考虑的。因此，雷达信号波形设计是雷达总体设计工作的一部分[15]。然而现在我们暂且抛开其他因素不考虑，下面仅从抗干扰角度列举一些雷达信号波形选择的实例。

1）抗噪声调频干扰。噪声调频干扰[16]由于容易达到宽的干扰带宽和较大的噪声功率，并且经过适当处理，还可以获得在干扰带宽范围内较均匀的功率谱，所以成为目前噪声干扰的主要形式，一般的宽带信号和跳频方法对其都无明显的抗干扰效果。目前国内外研制宽—限—窄电路对抑制这种干扰有一定的效果，但是需要从雷达信号波形上采取措施，尽量压窄信号带宽，使下面的不等式成立，才能有较好的抗干扰效果：

$$f_e \gg F_0 \gg B_1 \gg B \tag{2.1}$$

f_e 为调频噪声的有效带宽；F_0 为调制噪声的带宽；B_1 为限幅器前带宽；B 为限幅后带宽（即匹配滤波器带宽）。

上式中，$f_e \gg F_0 \gg B_1$ 是将连续噪声干扰转换成空度比较大的干扰脉冲的条件，$B_1 \gg B$ 是将干扰脉冲加以有效地平滑的条件。

2）抗距离、速度欺骗干扰。距离欺骗和速度欺骗干扰都属于回答式干扰[17]，即

干扰设备在截获雷达发射信号后，经过虚假信息调制再转发出去进行干扰。对于非相干回答式干扰，转发的调制干扰信号很难完全复制发射信号的信号特征。如果雷达发射信号采用复杂的脉内调制，如脉内调频、相位编码调制等信号，干扰机调制转发后就会出现严重失真。雷达接收系统对目标回波信号是匹配的，其输出为：

$$\chi(\tau,\xi)=\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{u}(t)u^{*}(t+\tau)e^{j2\pi\xi t}dt \tag{2.2}$$

而此时的回答式干扰信号与接收系统则是严重失配的，其输出为：

$$\chi_{J}(\tau,\xi)=\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{v}(t)u^{*}(t+\tau)e^{j2\pi\xi t}dt \tag{2.3}$$

通常，目标回波信号和干扰信号经雷达接收系统匹配输出后，输出信号都会有一个自己的主峰。但是如果调制转发的干扰信号是严重失真的信号脉冲复本，它的主峰就会偏离目标信号的主峰。也就是说，在雷达接收系统中，干扰信号必然会受到抑制。受抑制的程度取决于干扰脉冲的失真程度，而失真的大小又与雷达发射信号波形有关[18]。例如发射信号采用$\tau B\gg 1$的线性调频信号时，干扰机转发的是宽度等于发射脉冲宽度的普通脉冲信号，而目标回波则保持原来的线性调频结构，两者通过匹配滤波器后，由于目标回波信号与滤波器匹配而干扰信号失配，因而信干比提高τB倍。这就造成了抗距离欺骗和速度欺骗的有利条件。

3）抗无源干扰。如果说功率对抗是抗有源干扰的一种有效手段，那么，正好相反，对于无源干扰功率对抗就完全失效了。这种情况下雷达信号波形的选择是具有重要意义的手段，根据信号模糊原理[14]：不同的信号形式具有不同形状的模糊图，但是只要信号的能量相同，它们的模糊体积就是一定的，而且是相同的，只是它们的主峰和副峰所占比例不同。进行抗干扰波形选择时，只能在这个模糊原理的约束下来改变模糊图的形状，其主峰避开干扰；并尽量压低副峰或将副峰移到无关紧要的区域去。

2.2.2 空间选择

空间选择抗干扰是指为了减少或避免敌方从空间上进行干扰所采取的相关措施。空间选择抗干扰技术主要是通过雷达天线的设计来实现的，从而提高雷达的空间分辨和滤波的能力。具体技术包括：低旁瓣和超低旁瓣天线技术；空间滤波；旁

瓣消隐技术；旁瓣对消技术；天线自适应抗干扰技术等。

1）低旁瓣和超低旁瓣天线技术。雷达分辨体积单元ΔV_s是指由α、β、τ所构成的空间体积，如图 2-2 所示。其表达式为：

$$\Delta V_s = R\alpha \times R\beta \times \frac{1}{2}c\tau \tag{2.4}$$

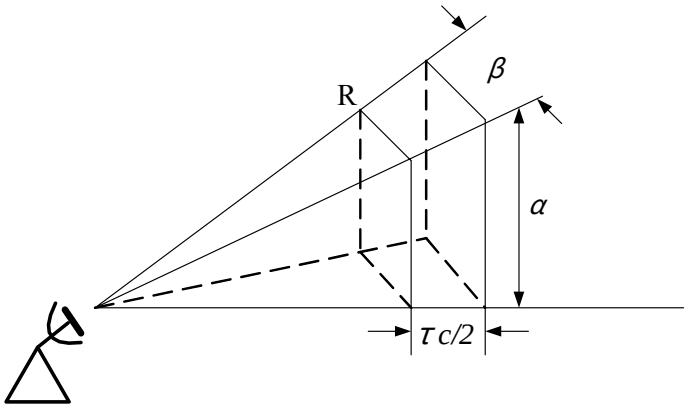

图 2-2　雷达分辨体积单元

减小ΔV_s，不仅能够减小进入雷达的干扰功率，而且还降低了雷达信号被敌方侦察设备截获的概率。由天线增益与波束宽度之间的关系可得，减小α、β，将使天线增益提高。当波束足够窄，旁瓣足够低时，雷达将只接收目标回波信号，而将目标周围空间的各种干扰抑制掉，能够提高雷达接收的信干比。

目前，低旁瓣和超低旁瓣天线已经成为提高雷达系统整体性能的一个重要方面。要想使雷达能在严重地物干扰和电子干扰环境中有效地工作，必须尽可能采用低旁瓣的天线。低旁瓣和超低旁瓣天线还能有效地避免雷达遭反辐射导弹的袭击。一般天线的最大旁瓣电平约为-12dB~-30dB，低旁瓣天线的最大旁瓣电平为-30dB~-40dB，而超低旁瓣天线的最大旁瓣电平在-40dB 以下。

2）空间滤波。雷达干扰信号不仅可以从旁瓣而且可以从主瓣进入对雷达进行干扰，因而如果我们将天线波束做得很窄的话，那么进入的干扰信号就较少，否则，反之。从这一角度来看，雷达天线波束实质上是一个空间滤波器，起着空间滤波的作用。根据空间滤波特征的不同，可以将其分为峰值滤波器和零值滤波器。

a)　峰值滤波器。对于干扰均匀分布的环境（如分布式消极干扰或大范围的点式

干扰），减小天线波束宽度，使波束主瓣足够窄，天线增益足够高，旁瓣尽量低，就能使信干比达到最大。因为这种方法滤去干扰，而使信干比达到最大，因此称为峰值滤波器，又称为波束匹配。常规雷达天线的波束实际上就是一种峰值滤波器，因此，为了提高雷达的抗干扰能力应尽量减小天线波束主瓣宽度，提高天线增益，压低旁瓣。大型相控阵面天线波束宽度窄，且波束指向可以捷变，是一种良好的天线峰值滤波器。

b) 零值滤波器。当目标周围只有少数几个点式干扰源（如压制性积极干扰）时，干扰源可以看成是点源，把天线波束零点对准干扰源方向即可滤除干扰，称之为零值滤波器。因为零值滤波器滤去零值方向的干扰，所以在其他方向就不再受这个干扰的影响，可以正常地接收目标信号。由于干扰源在空间相对位置是变化的，零值滤波器的零值位置也要相应变化。

3）旁瓣消隐（SLB）技术。雷达天线旁瓣的存在，使敌方能够实施旁瓣干扰，而且是很强的干扰甚至能形成全方位的干扰扇面。旁瓣消隐技术是在原雷达接收机（主路接收机）基础上增设一路辅助接收机，主路接收机所用的主天线为原雷达天线，辅助接收机所用的辅助天线为全向天线，其增益略大于或等于主天线最大旁瓣增益（远小于主瓣增益）。主天线和辅助天线的方向图如图 2-3 所示。

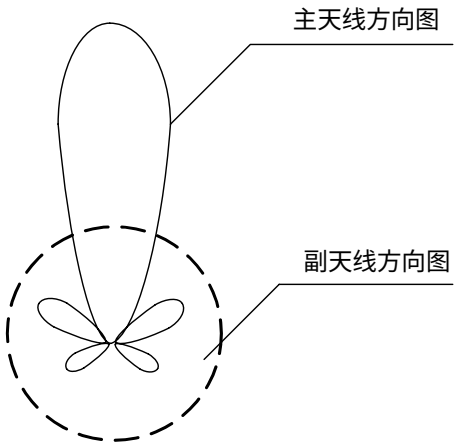

图 2-3　主副天线方向图

旁瓣消隐的原理框图如图 2-4 所示。主天线和辅助天线的输出信号或干扰分别经过主路接收机和辅助接收机送至比较器，在比较器中进行比较。当主路输出大于辅助支路输出时。选通器开启，将主路接收机的信号经过选通器送至显示器，这是目标处于主瓣方向的情况。当主路输出的信号或干扰小于（或等于）辅助支路输出时，则产生消隐脉冲送至选通器关闭选通器，没有信号送往显示器，从而消除了来

自旁瓣的干扰。

这种方法的优点是结构简单，易于实现。其缺点是只对低工作比的脉冲干扰有效，对于杂波干扰和高工作比的脉冲干扰，因为主瓣大部分时间处于关闭状态，所以不适用。

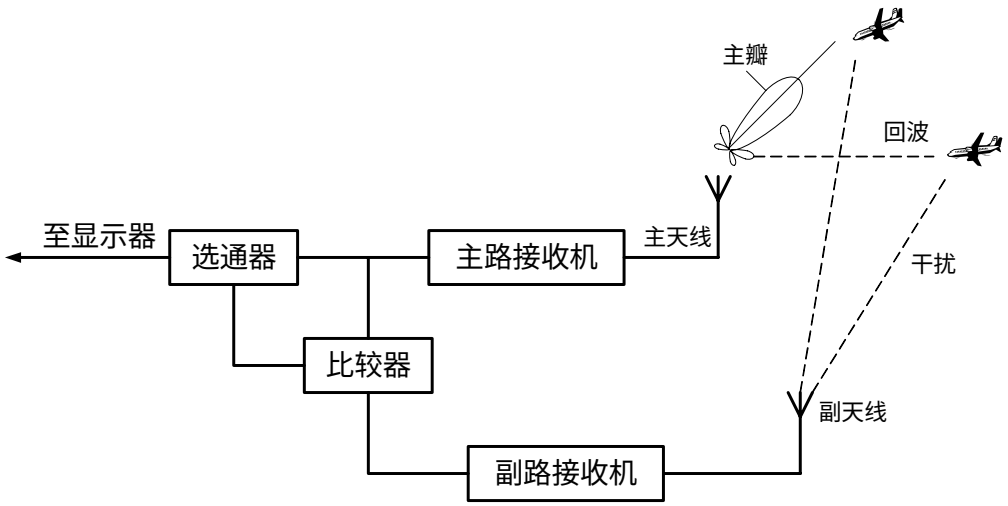

图 2-4　旁瓣消隐原理框图

4）极化滤波。它是利用目标回波信号和干扰之间在极化上的差异来抑制干扰提取目标信号的技术。利用雷达的极化特性抗干扰有两种方法：

第一种方法是尽可能降低雷达天线的交叉极化增益，以此来对抗交叉极化干扰。为了能抗一般的交叉极化干扰，通常要求天线主波束增益比交叉极化增益高 35dB 以上。

第二种方法是控制天线极化，使其保持与干扰的极化失配，能有效地抑制与雷达极化方向正交的干扰信号。从理论上看，当雷达的极化方向与干扰机的极化方向垂直时，对干扰的抑制度可达无穷大。但实际上，由于受天线极化隔离度的限制，仅能得到 20dB 左右的极化隔离度。极化失配对干扰信号的抑制水平参见表格 2-1。

表格 2-1　极化干扰抑制量

抑制量/dB　干扰机 / 雷达		极化方式			
		水平	垂直	左旋	右旋
极化方式	水平	0	∞①	3	3
	垂直	∞①	0	3	3
	左旋	3	3	0	∞①
	右旋	3	3	∞①	∞①
①实际极限约为 20dB					

由于敌方干扰信号的极化方向事先是未知的，所以要实现极化失配抗干扰就必须采用极化侦察设备和变极化天线，自适应地改变发射和接收天线的极化方向，使接收的目标信号能量最大而使接收到的干扰能量最小，极化抗干扰的原理框图如图 2-5 所示。当自卫干扰机或远距离支援干扰机正使用某种极化噪声干扰信号时，通过极化测试仪可以测得干扰信号的极化数据，由操纵员或自动控制系统控制雷达天线改变天线极化方式，最大限度地抑制干扰信号，获得最大的信号干扰比。

此外，极化抗干扰技术还包括极化捷变、极化分集等，其基本原理都是通过对天线极化方向的调整抑制对干扰信号的接收。

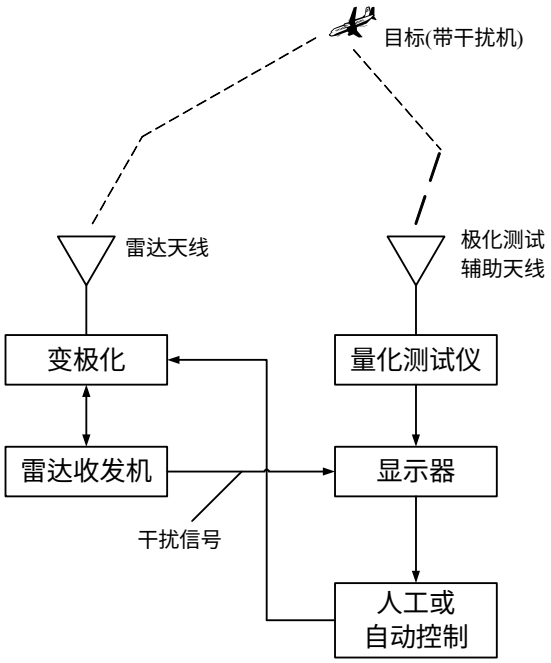

图 2-5 极化抗干扰原理图

2.2.3 频率选择

频率选择就是利用雷达信号与干扰信号频域特征的差别来滤除干扰。当雷达迅速地改变工作频率，跳出干扰频率范围时，就可以避开干扰。通常，选择靠近敌方雷达载频的频率工作能起到避开干扰的效果，因为敌人无法对这一频率施放干扰，否则，自身雷达就不能正常工作。另外，常用雷达密集频段为 200MHz～40GHz，敌方干扰机也重点针对这些频段实施干扰，因此对于毫米波雷达而言，在抗干扰方面有着明显的优势。除此之外，常用频率选择抗干扰的方法还有：快速跳频；频率捷变；频率分集等。

1）频率捷变技术。频率捷变雷达[19]是一种脉冲载频在脉间（或脉组之间）做有规律或随机变化的脉冲雷达。目前，频率捷变雷达已经成为军用雷达的一种常规体制。频率捷变技术有两种类型：一是采用捷变频磁控管的非相参型；二是利用频率合成技术的主振放大式的全相参型。从抗干扰的角度来看，跳频的跨度越大、跳频速度越快，抗干扰效果越好，但由此带来的复杂性和实际条件的限制，使这两个指标不能做得很高。一般要求相邻脉间频率差大于雷达整个工作频带的 10%。与固定载频雷达相比，频率捷变雷达在性能上有所提高，并具有很强的抗干扰能力，具体表现在：a) 提高雷达作用距离；b) 提高跟踪精度；c) 改善角分辨力和距离分辨力；

d) 消除二次（或多次）环绕回波；e) 提高抗干扰能力。

毫米波雷达的宽频带给脉冲载频提供了更大的捷变范围，进一步强化了频率捷变的抗干扰性，使频率捷变技术在毫米波雷达中得到广泛的应用。毫米波雷达频率捷变技术的抗干扰能力主要体现在以下几个方面：

1．有效地对抗人为电子干扰

频率捷变雷达的工作特点使敌方侦察设备很难侦察到我方雷达的存在或者测量的参数不准，因此难以进行有效的干扰。除此之外，频率捷变技术对抗窄带瞄准式干扰有着与生俱来的优势，这就迫使敌方采用宽带阻塞式干扰，这样一来干扰能量就大大分散了，若要提高干扰效果，必须增大总的干扰功率。对于强功率宽频带的阻塞式干扰，简单的跳频技术是无能为力的，但具有干扰频谱分析能力的自适应频率捷变雷达，可使雷达工作在干扰频谱的弱区，减小干扰的影响。

2．避免雷达相互干扰

在雷达密集的环境，如舰艇上往往装有多部雷达，雷达间的互相干扰是很严重的。当采用频率捷变体制时，各雷达接收到邻近雷达发射信号的概率极小，约等于雷达的工作带宽与捷变总带宽之比，可以说基本上排除了相互干扰。

3．对海杂波的抑制能力

通常，海面搜索雷达对贴近海面的小型目标的检测能力受到海浪杂波相关性的限制，采用脉间捷变频技术能降低这种相关程度，从而提高海面目标的检测能力。因此频率捷变体制也特别适用于机载或舰艇雷达，用以检测海面低空或海上目标。频率捷变可以使相邻周期的杂波去相关。去相关后的杂波，其统计特性完全与噪声类似，因此，采用普通的非相参积累就可以实现提高信杂比的目的。虽然频率捷变也会使目标回波去相关而变为快速起伏，但只要积累一定数目的回波后，目标的回波幅度逐渐趋近于其平均值，而杂波的方差却大为减小。

2）频率分集技术。频率分集是为完成同一任务采用相差较大的多个频率，同时或近似同时工作的一种技术。频率分集可以采用由若干个雷达工作在不同频率上这种形式，也可以是单个雷达系统采用多个不同频率这种形式。对于后一种形式，在同步脉冲的作用下，几个不同频率的雷达发射机，以一定间隔（或彼此衔接）产生等幅、等宽的高频强功率脉冲，经各自的带通滤波器进入高频功率合成器，经天线射向空间。天线形成几个不同频率的波束。这几个波束形状相近并重合在一起，也

可以将几个波束自上而下地依次排列开，这样可减小盲区。接收时，天线将收到的目标回波信号送往高频滤波器，由高频滤波器按频率将信号分路并送入各自的接收通道，经高放、混频、中放、检波后将视频信号送入信号的组合逻辑电路。该电路对各路信号进行相应的时间延迟，使各路信号的到达时间相同，叠加后加到雷达终端。

由于频率分集雷达能增加雷达总的发射功率，降低目标起伏对测角精度的影响，消除地面反射引起波瓣分裂的影响，从而显著地改善了雷达的工作性能，提高了雷达对目标的探测能力。同时，由于采用多部收发设备，还提高了雷达的可靠性。在抗干扰方面，由于频率分集雷达工作于多个不同的频率值，所以当敌方施放瞄准式干扰时，只能使其一路或几路通道失效，其他通道仍能正常工作。频率分集雷达还能迫使阻塞式干扰机加宽干扰频带，从而降低干扰的功率密度，达到一定的抗干扰效果。

2.2.4 功率域抗干扰

根据信号检测理论，对于高斯白噪声的干扰信号，接收机的最大输出信噪比与发射信号的形式无关，仅决定于发射信号的能量[20]。在电子防卫中，功率对抗是抗有源干扰特别是抗主瓣干扰的一个重要措施。所以，增大雷达发射功率是毫米波雷达抗干扰的一种有效方法。提高雷达的发射功率有两种方法，一是提高脉冲功率，另一个是提高平均功率。提高脉冲功率受到器件的限制；提高平均功率可采用宽脉冲信号，此时采用脉冲压缩技术[21]便可起到很好的抗干扰效果。下面重点介绍一下线性调频脉冲压缩的基本原理。

线性调频脉冲信号是通过非线性相位调制或线性频率调制（LFM）来获得大时宽-带宽积的，它又被称作 chirp 信号。这种信号是研究的最早、应用最广泛的信号。开始时人们用它来解决雷达作用距离与距离分辨率之间的矛盾，现在人们把它作为抗干扰的一种有效手段。

线性调频脉冲信号的时域表达式用复数形式可表示为：

$$s(t) = rect(\frac{t}{T})e^{j2\pi(f_c t+\frac{K}{2}t^2)} \tag{2.5}$$

式中， $rect(\frac{t}{T})=\begin{cases}1 & |\frac{t}{T}|\le\frac{1}{2}\\ 0 & |\frac{t}{T}|\ge\frac{1}{2}\end{cases}$ 为矩形函数。

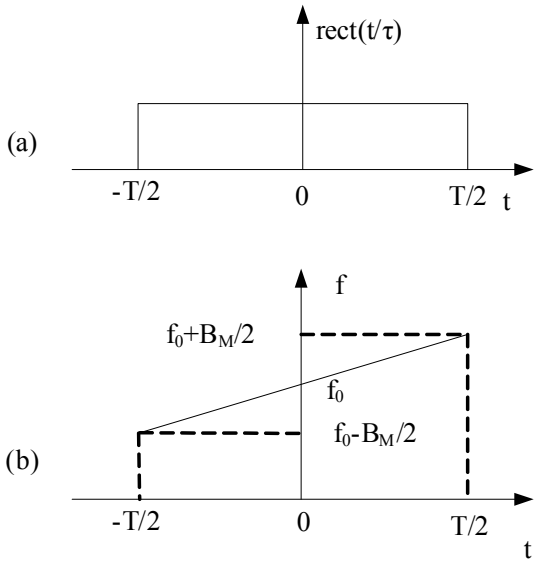

图 2-6　线性调频脉冲信号示意图

如图 2-6 所示(a)为线性调频脉冲信号包络的图形，(b)为线性调频脉冲信号的频率随时间变化的图形。

线性调频信号通过匹配滤波器（匹配网络）后即可实现脉冲信号的压缩。信号的匹配滤波器的时域脉冲响应为：

$$h(t)=s^{*}(t_0-t) \tag{2.6}$$

式中，t_0 是使滤波器物理可实现所附加的时延。理论分析时，可令 $t_0=0$，重写式（2.6）：

$$h(t)=s^{*}(-t) \tag{2.7}$$

将（2.5）式代入式（2.7）得：

$$h(t)=rect(\frac{t}{T})e^{-j\pi Kt^2}\times e^{j2\pi f_c t} \tag{2.8}$$

图 2-7　线性调频信号匹配滤波处理

Chirp 信号经过匹配网络后，匹配滤波器输出信号为：

$$s_0(t) = T\frac{\sin \pi KT(1-\frac{|t|}{T})t}{\pi KTt} rect(\frac{t}{2T})e^{j2\pi f_c t} \tag{2.9}$$

由式（2.9）可见，线性调频脉冲经过匹配滤波器之后，其输出信号包络近似为辛克（sinc）波形，如图 2-8 所示，其主瓣窄而高，集中了信号主要能量。

$$S_0(t) = TSa(\pi KTt)rect(\frac{t}{2T}) = TSa(\pi Bt)rect(\frac{t}{2T}) \tag{2.10}$$

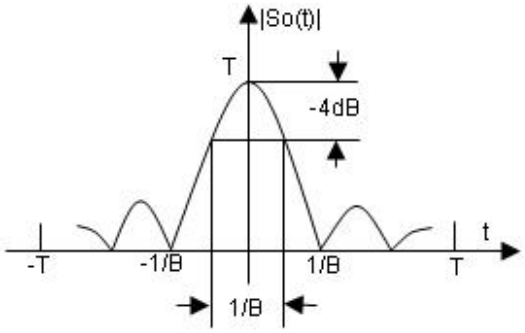

图 2-8　匹配滤波的输出信号

由以上公式及分析可以得出，线性调频信号的脉冲压缩比为：D=TB，B=KT 为信号调频宽度，D 为信号的时宽-带宽积。目前，脉冲压缩雷达的压缩比可以做得非常大，可达到 10^6 数量级，这对提高检测概率和距离分辨率都有很大的好处。

2.2.5　接收机内抗干扰

接收机内抗干扰就是根据干扰与目标信号某些特性的差异，设法最大限度地抑制干扰，同时输出目标信号。目前，对于特定的干扰有许多种接收机内抗干扰技术，如脉冲串匹配滤波、相关接收、脉冲积累、宽—限—窄电路、反距离波门拖引、恒

虚警电路、雷达杂波图控制技术等[22]。这里仅介绍其中几种基本的技术。

1）相关接收。相关接收技术是利用信号与噪声的自相关函数的明显不同，在强噪声背景中提取出微弱的目标信号。实现相关接收需要相关器（或相关积分器）来计算相关函数，按相关器的输入信号的不同，可以分为自相关器和互相关器两种。自相关器的原理框图如图 2-9 所示，输入信号为目标回波与干扰的混合信号，即 $s_i(t)+n_i(t)$，经自相关器运算后输出为：

$$\begin{aligned} R_x(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} [s_i(t)+n_i(t)][s_i(t-\tau)+n_i(t-\tau)]dt \\ &= R_{ss}(\tau)+R_{nn}(\tau) \end{aligned} \tag{2.11}$$

式中，$R_{ss}(\tau)$ 为目标信号的自相关函数；$R_{nn}(\tau)$ 为噪声的自相关函数。可以证明，当输入噪声为白噪声时，$R_{nn}(\tau)$ 为 δ 函数，而噪声为窄带高斯噪声时，其自相关函数为

$$R_{nn}(\tau)=\sigma^2\frac{\sin(\frac{\Delta\omega\tau}{2})}{\frac{\Delta\omega\tau}{2}}\cos\omega_0\tau \tag{2.12}$$

显然，τ 越大，$R_{nn}(\tau)$ 就越小；当 τ 足够大时，$R_{nn}(\tau)\to 0$，$R_x(\tau)\approx R_{ss}(\tau)$。但 τ 不能过大，否则 $R_{ss}(\tau)$ 也将很小。因此，当 τ 选择适当时，自相关器的输出中仅有目标回波的自相关函数而消除了干扰。

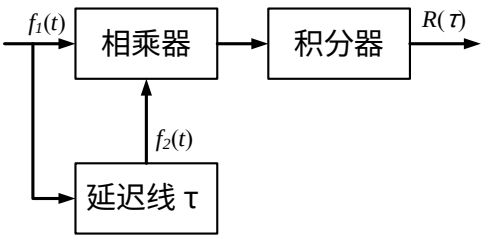

图 2-9　自相关器

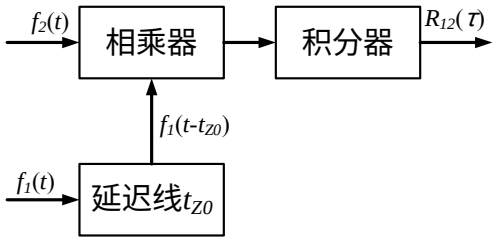

图 2-10　互相关器

互相关器的原理框图如图 2-10 所示，其输入有两路信号：一路为目标回波与干扰的混合信号，另一路为发射参考信号，经互相关器运算后输出为：

$$R_x(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} s_i(t-\tau)[s_i(t)+n_i(t)]dt=R_{ss}(\tau) \tag{2.13}$$

不论是自相关器还是互相关器，其输出信号的信干比都有了明显的改善，尤其是当输入信干比较小时，其他抗干扰方法很难达到这样的改善效果。

2）宽—限—窄抗干扰电路。宽—限—窄电路就是在宽带中放后再与限幅器和窄带中放（与信号脉宽匹配）级联形成的电路，如图 2-11 所示。宽—限—窄电路是一种利用频域信号处理技术的抗干扰电路，主要用于抗噪声调频干扰和其他快速扫频干扰。

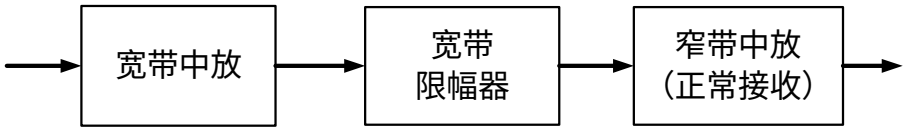

图 2-11　宽—限—窄电路组成

由于宽带中放带宽很宽，噪声调频干扰信号经宽带中放后变成一系列离散的随机脉冲。这样，抗噪声调频干扰的问题就变成了抗脉冲干扰的问题。而抑制离散调频干扰脉冲的最简便的方法就是对干扰信号进行限幅。采用双向硬限幅并将限幅电平设定在目标回波信号脉冲的幅度上，即可将干扰能力的很大一部分消除掉，使得限幅器输出端的信干比得到较大的提高。由于窄带中频放大器的带宽与目标回波信号的频谱宽度相匹配，所以目标信号能量能够无损失或损失很小地通过窄带中频放大器；而干扰脉冲的频谱较宽，通过窄带中放时一部分频率分量将被滤除，这就进一步提高了窄带中放输出端的信干比。

此外，未加宽—限—窄电路时，由于干扰信号比目标信号强很多，在检波器中将产生严重的强压弱现象，使检波器输出端的信干比进一步变坏；而加了宽—限—窄电路后，检波器输入端的信干比接近于 1 甚至大于 1，检波器中就不会发生强干扰压制弱信号的现象，从而减小了检波器中信干比的损失。

3）恒虚警率（CFAR）处理技术。恒虚警率处理[23]是指在内部噪声和外界干扰强度变化时使雷达虚警概率保持恒定的一种技术措施。在自动检测系统中，采用恒虚警率处理技术可以防止因干扰太强而使计算机过载；在人工检测雷达中，恒虚警率处理技术能在强杂波干扰下，使显示器画面清晰、便于观测。因此，恒虚警率处理技术不仅是计算机化雷达中处理杂波干扰的一个重要途径，而且也是改进现有常

规雷达使之在强杂波干扰下仍能工作的一个有效方法[24]。

目前常用的恒虚警率（CFAR）处理方法可分为慢门限恒虚警率处理和快门限恒虚警率处理两大类[25]。慢门限恒虚警率处理是针对接收机内部噪声，由于内部噪声变化缓慢，调整门限的周期较长，所以叫做慢门限恒虚警率处理；快门限恒虚警率处理是针对杂波环境下的雷达自动检测。由于杂波具有一定的区域性，并且强度大、变化快，要保持恒定的虚警率就必须对门限进行快速的调整，故称为快门限恒虚警率处理。现代雷达中，一般同时设有慢门限 CFAR 和快门限 CFAR，根据干扰环境的变化而自动转换。下面就简单介绍一下慢门限 CFAR 的处理过程。

慢门限恒虚警率处理电路首先对噪声取样，产生可自动调整的门限电平，然后根据噪声电平的高低调整第一门限的门限电平，达到恒虚警概率的目的，其组成框图如图 2-12 所示。

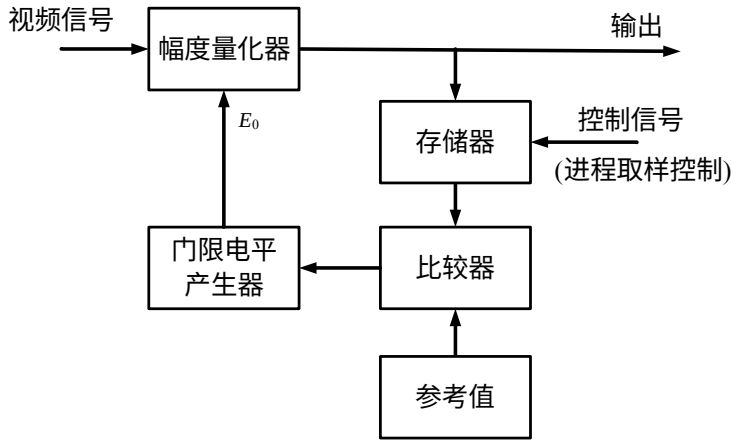

图 2-12　慢门限恒虚警率处理的组成框图

接收机输出的视频信号送至幅度量化器，与门限电平 E_0 比较后，输出二进制序列。控制电路在雷达工作的休止期将控制信号送至存储器，使存储器可以接收量化器输出的脉冲。由于在休止期中没有目标回波，超过门限电平的脉冲都是由噪声产生的，这些脉冲的数目代表了噪声电平的高低。经过若干个休止期的积累，把存储的脉冲数与代表了允许噪声电平的参考值进行比较，比较以后形成一个可以说明当前的噪声电平是超过允许值还是低于允许值的差值，在利用这个差值去控制门限电平产生器获得新的门限电平 E_0，即可达到恒虚警率的效果。

2.3 本章小结

本章主要介绍了毫米波雷达在抗干扰中的先天优势，如频带宽，波束窄，定向性好等。并对毫米波雷达抗干扰技术按抗干扰原理进行了分类介绍，无论是从波形、空间或是频率等方面选择抗干扰技术，都要从实现难易程度以及经济性等方面综合考虑，通常，要获得更好的抗干扰效果，往往是多种抗干扰技术的结合使用。

3 毫米波脉冲压缩雷达抗干扰研究

3.1 脉冲压缩技术

脉冲压缩的概念始于第二次世界大战初期，由于技术实现上的困难，直到 20 世纪 60 年代初，脉冲压缩信号才开始适用于超远程警戒和远程跟踪雷达。70 年代以来，由于理论上的成熟和技术实现手段的进步，使得脉冲压缩技术广泛的应用于三坐标、相控阵、侦察、火控等雷达，从而明显地改善了这些雷达的性能。

雷达的距离分辨力为 $\Delta R = c\tau / 2 = c/(2B)$ $(B = 1/\tau$, 系发射信号宽度），可知提高雷达的距离分辨力是以增大信号带宽为代价的。对脉冲雷达来说，脉冲信号的能量 $E = P_t * \tau$ ，P_t 为脉冲功率，τ 为脉冲宽度。当要求雷达探测目标的作用距离增大时，应该加大信号能量 E。增大发射机的脉冲功率是一个途径，但它受到发射管峰值功率及传输线功率等因素的限制，只能有一定的范围。在发射机平均功率允许的条件下，可以用增大脉冲宽度 τ 的办法提高信号能量。但是增大脉冲宽度带来的影响是雷达的距离分辨率的降低。为了克服这种矛盾，引入了脉冲压缩信号波形。

综上所述，脉冲压缩系统最显著的特点[26]是：

1) 它的发射信号采用载频按一定规律变化的宽脉冲，使其脉冲宽度与有效频谱宽度的乘积 $B_e\tau \gg 1$，这两个参数基本上是独立的，因而可以分别加以选择来满足战术要求。在发射机峰值功率受限的条件下，它提高了发射机的平均功率 P_{av}，增强了发射信号的能量，因此扩大了探测距离。

2) 在接收机中设置一个与发射信号频谱相匹配的压缩网络，使宽脉冲的发射信号（一般认为也是接收机输入端的回波信号）变成窄脉冲，从而实现脉冲压缩，也获得了良好的距离分辨力。

3) 有利于提高系统的抗干扰能力。对有源噪声干扰来说，由于信号带宽很大，迫使干扰机发射宽带噪声，从而降低了干扰的谱密度。对回答式干扰也由于采用了复杂的脉冲内调制，在信号的延迟、放大、转发过程中会产生更大的畸变，从而得到一定的抑制。至于消极干扰，则由于提高了系统的分辨能力，抗干扰性能也有一定的改善。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/195132121201011102