

复杂电磁环境下现代雷达抗干扰技术分析

张国龙

南京电子技术研究所 江苏南京 210039

摘 要: 随着电子技术的不断进步及其在军事领域的广泛应用,战场的电磁环境变得愈发复杂,对雷达功能的充分发挥造成了很大影响。为了最大限度地保证雷达探测效能的发挥,必须强化抗干扰技术的运用尽可能地减少复合电磁环境对雷达信息获取的实时性和真实性的影响。本文针对抗干扰技术的运用、雷达抗干扰效能评估准则及复杂电磁环境下如何提高维修保障能力等方面做了详细分析。

关键词: 复杂电磁环境; 现代雷达; 抗干扰技术

Analysis of modern radar anti-jamming technology in complex electromagnetic environment

Guolong Zhang

Nanjing Institute of Electronic Technology Jiangsu Nanjing 210039

Abstract: With the continuous advancement of electronic technology and its widespread application in the military domain, the electromagnetic environment on the battlefield has become increasingly complex, significantly impacting the full functionality of radar systems. To maximize the effectiveness of radar detection, it is crucial to enhance the application of anti-jamming techniques and minimize the impact of complex electromagnetic environments on the real-time and authentic acquisition of radar information. This paper provides a detailed analysis of the application of anti-jamming techniques, criteria for evaluating radar anti-jamming effectiveness, and strategies for improving maintenance and support capabilities in complex electromagnetic environments.

Keywords: complex electromagnetic environment; Modern radar; Anti-interference technology

前言

随着科技水平不断提高和高强度的电子器件的广泛应用,雷达设备受到越来越强的电磁干扰。按产生干扰的意愿和目的,雷达干扰分为有意干扰和无意干扰,其中有意干扰又分为有源干扰(瞄准式干扰、扫频式干扰、距离欺骗干扰、速度欺骗干扰等)和无源干扰(箔条走廊干扰、无源雷达诱饵等),无意干扰又分为人为干扰(工业干扰、建筑干扰等)和自然干扰(雷电干扰、鸟群干扰等)。这些数量庞大的电磁辐射干扰组成了复杂的电磁环境。

一、复杂电磁环境定义及其特点

1.1 复杂电磁环境的定义

复合电磁环境是指在有限的时空里,一定的频段上,多种电磁信号密集、交叠、妨碍信息系统和电子设备正常工作,对武器装备运用和作战行动产生显著影响的战场电磁环境。复杂电磁环境是继陆海空天四维战场新增的第五维战争空间所形成的战场环境,由于其辐射信号是看不见、摸不着的,故又被称为“无形”战争环境。

1.2 复杂电磁环境的特点

复杂电磁环境的特点主要通过时间上持续交织、空间上

交叉、频率上拥挤、能量上强度不同^[1]来全面、完整的描述出来。

1.2.1 时间上持续交织

复杂电磁环境的时间特性主要表现为电磁辐射信号随时间的变化情况,战争中电磁辐射信号既有脉冲辐射也有连续辐射,同时随着电子侦察、电子对抗与电子控制等手段的介入,复杂电磁环境在时间上表现出时而非常密集,时而相对静默,整体呈现为持续交织的特征。

1.2.2 空间上交叉

复杂电磁环境的空间特征,具体表现为电磁辐射源及电磁辐射信号在空间的分布状态,在现代战场中,敌我双方所争夺与利用的电磁波空域内,两个阵营所发出的电磁波都是集中交织在一处的,电磁环境呈现出辐射源高度密集、空间内辐射信号交叉重叠的特征。

1.2.3 频谱重叠

伴随着现代科技的持续发展,电子信息技术得到了飞速发展,各类新的雷达装置和通信系统也随之涌现出来,在现代化的战争环境中,电磁辐射在频谱占用的总体情况呈现频率拥挤、相互重叠的态势。

1.2.4 能量密度分布不均匀

因为各种天线及控制技术的应用,电磁能量可以被辐射到制定的区域,但在传输过程中容易被其它因素所干扰,加之战争中两军交战时所选取的靶点不一致,使得在战场上,有些区域的电磁信号强烈而又密集,有些区域的电磁信号则是微弱而又稀疏,分布非常不均衡。

二、复杂电磁环境下的雷达干扰设计手段

2.1 复杂电磁环境下雷达面临的主要威胁

2.1.1 会使雷达装备丧失保障能力

高功率的 EC-130H 和 EAT-3 型电子战飞行器,可以对雷达进行宽带高功率的持续不断的干扰,从而使得第一线的雷达失去战斗力。像是反辐射导弹这样的暴力破坏方式,也会让雷达设备失去作用,从而造成长时间干扰,对战斗结果也有很大影响。

2.1.2 会增加雷达情报保障难度

强烈的电磁辐射会使芯片内产生附加的电感,从而对雷达工作参数及性能造成不利的影响。最明显的效果就是导致了雷达误判,制造了虚假目标,混淆了实际信息。EMI 装置更容易在我们的雷达荧光屏上制造出错误的目标,从而干扰了我们的雷达探测和辨识出的可靠信息。

2.1.3 会给雷达装备带来巨大经济损失

在高山或者海岛上,由于雷电的频繁出现,强烈的辐射电流很可能会导致雷达中的大型或超大规模的集成电路超载,从而导致模块化、集成化的电路板的使用寿命下降,甚至有可能导致芯片被烧坏,而这种高技术的集成化电路板的成本也是很高的,不但会造成巨大的经济损失,还会对情报安全造成不利的影响^[2]。

2.2 复杂电磁环境下的雷达干扰基本思路

2.2.1 极化域抗干扰

极化与幅度、相位都是雷达特征参数的一种,极化对抗就是利用雷达回波信号与干扰信号的极化特性差异完成抗干扰的,从原理上分析,雷达回波信号的极化特征与干扰极化特征正交的情况下,可以实现抗干扰。基于目标回波的偏振特性,有学者提出了一种基于偏振特性的偏振滤波方法。极化分集,极化捷变,和自适应+极化捷变等三个方面构成了这一技术的整体框架。

自适应极化捷变就是设置雷达发射信号的极化特性,使其与干扰信号的极化特性实时正交,由于目标回波的极化特性是随着目标的姿态变化的,其变化相对较快,可以在脉内

或脉间完成,而干扰信号的极化特性变化相对较慢,这样实时变化发射信号的极化特性就可以有效地实现极化抗干扰。

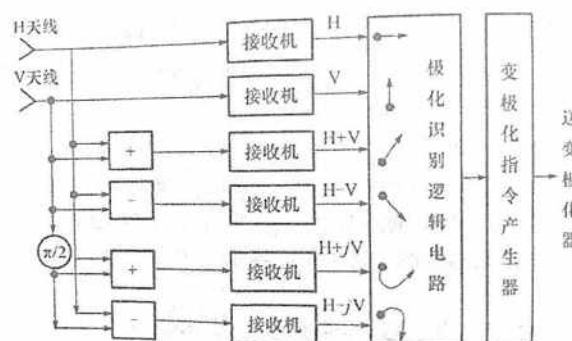


图 2-1 雷达自适应极化滤波抗干扰原理图

雷达自适应极化滤波抗干扰原理如图 2-1, 通过水平天线及垂直天线接收到干扰信号, 将水平与垂直干扰信号做加、减、移相处理, 得到干扰信号的水平极化、垂直极化、斜线极化、左旋极化、右旋极化等六种极化分量, 将信号送至极化识别逻辑电路并通过比幅处理得到幅度最小的极化方式, 将此极化方式送至变极化指令产生器, 生成相应指令送至发射机, 当干扰信号的极化方式变化时, 可以此方式同步控制发射信号的极化方式。

2.2.2 功率域抗干扰

在对噪声干扰进行能量对抗时, 提高发射机发射功率、提高发射脉冲的重复频率, 可增大雷达的有效射程, 加强抗干扰特性。同时随着脉冲压缩技术的广泛应用, 增大发射脉冲的宽度可提高发射信号的平均功率, 通过脉冲压缩匹配滤波器获得窄脉冲回波信号, 保证距离分辨率的同时提高抗干扰性能。

2.2.3 空域抗干扰

在复杂的电磁环境中, 各种类型的电磁场都会对雷达的工作造成一定的影响, 因此, 研究基于空域的雷达抗干扰技术, 是解决此问题的一条行之有效的途径。在具体的应用方面, 包括极低副瓣天线, 单脉冲角度测量、自适应天线阵等。

低副瓣天线在空间域的抗干扰中起着重要作用。一般来说, 在现代雷达的应用中, 通过设计低副瓣天线, 雷达系统的抗干扰能力可以显著提高各种侧波瓣。例如, 这种军用反干扰技术可以防止敌人的干扰、侧向跟踪、搜索等。

单脉冲测量角的抗干扰保护主要通过多个天线同步接收回波信号, 回波信号的相位和振幅可以直接用于计算目标的角度位置。在实际应用中, 这种抗干扰技术可以有效地抵

抗角度欺骗。目前，现代雷达主要采用单脉冲测角^[3]。

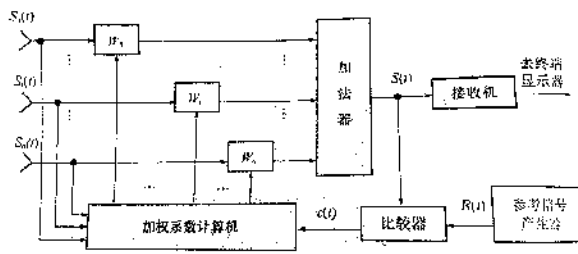


图 2-2 自适应天线阵抗干扰原理图

自适应天线阵主要抑制的是有源干扰，其主要手段是通过改变天线阵的天线方向图使有源干扰落在天线零点上，具体抗干扰原理见图 2-2，自适应天线阵由 n 个馈电单元组成，每个单元接收的回波信号设为 $S_i(t)$ ，经过加权网络得到回波信号 $S(t)$ ，将 $S(t)$ 与参考信号 $R(t)$ 进行比较得到 $\varepsilon(t)$ ，将 $\varepsilon(t)$ 送至加权系数计算机中产生新的加权系数 W_i ，经过加权得到新的回波信号 $S(t)$ ，此时的 $S(t)$ 即是抑制有源干扰后得到的回波信号。

2.2.4 频域抗干扰

在当今的雷达对抗技术中，频率域对抗是一个非常重要的方面。频率干扰是当前雷达工作中普遍存在的一种干扰，特别是在一些比较复杂的电磁环境中。在频域的抗干扰方面，抗干扰方法主要有频率捷变、频谱扩展等。

自适应快速变频作为频率捷变技术中主要抗干扰方法，其主要原理是通过侦察天线对干扰频谱进行接收并分析，由于干扰发射机的缺陷导致干扰频谱呈现不均匀特性，即在某些频点处干扰功率较弱，同时这些较弱的区域也会实时变化，自适应快速变频雷达即是利用这一特性，将雷达发射信号的载频同步设置到相对应的干扰较弱的频点，以提高雷达的抗干扰能力，保证雷达威力的最优化。

2.3 雷达抗干扰效能的评估准则

2.3.1 信息准则

信息制导是基于雷达的工作目标，即在战斗中获取有价值的信息，而抗干扰效率则旨在丢失干预后早期获得的信息和数据。这种判据能够精确地评价雷达的抗干扰性，但是由于其运算繁琐，还没有得到广泛应用。

2.3.2 概率准则

有学者提出了一种基于概率的雷达抗干扰能力评估方法。在不参照特定的干扰手段的情况下，对无干扰情况下的雷达完成任务的可能性进行比较和分析。其主要的可能性有：

发现可能性、破坏可能性、引导可能性、被欺骗可能性等。就像信息指导方针，这个指导方针具有明确的概率，但是很难计算。

概率准则下雷达抗干扰能力品质因数 (Q_{njs})，雷达在干扰下完成任务的概率可表示为

$$P_{aj} = P_j P_{nj} + (1 - P_j) P_n \quad (2-1)$$

式中： P_{aj} 为搜索雷达执行作战任务时，受干扰的概率； P_j 为雷达仅受自然干扰时，完成任务概率； P_{nj} 为雷达同时受自然、人为干扰时，完成作战任务的概率。

再用 P_{aj} 与 P_n 的比作为衡量搜索雷达抗干扰能力的品质因数：

$$Q_{njs} = \frac{P_{aj}}{P_n} = P_j \left(\frac{P_{nj}}{P_n} \right) + (1 - P_j) \quad (2-2)$$

2.3.3 战术应用准则

这一判据已被广泛应用于测试与分析。利用有效距离和测量精度等技术指标对雷达装备的抗干扰性能进行了评价。其优点是全面性、直观性和可测试性。

2.3.4 功率准则

功率指标由雷达的抗干扰增强因子、自卫距离、烧穿距离以及干扰抑制因子来表示。该方法以电子对抗中的扰动方程为基础，其结果可以应用于电子学的功能模拟。该判据充分反映了电力博弈的经典理念，具有概念清晰、易于计算和度量的特点。

三、雷达抗干扰技术发展的新方向

随着国家整体实力的提高，雷达在军事、航空航天和海洋探测等领域的应用越来越多，在某些领域中，因其所处的电磁环境十分复杂，给其正常工作带来了很大的影响。所以，在现代雷达的设计中，最重要的就是要对其进行有效的抗干扰技术的研究和运用。雷达抗干扰技术能够使雷达受到的各类干扰减小到最小程度，是保证雷达工作正常的重要手段。尽管我国的雷达抗干扰技术已取得了一些进展，但在今后的发展中仍有许多可以继续研究的方向。

3.1 相控阵技术

相控阵技术是未来雷达抗干扰技术发展的重要趋势。相控阵雷达指的是采用相控阵天线的雷达，与传统雷达相比，天线无需转动就可以快速实现对波束指向、波束形成的控制，

在雷达抗干扰方面具有很强的自适应能力,该特点将越来越受先进算法和软件编程相关技术的影响。

近年来,随着半导体技术的迅速发展,相控阵技术得到了极大地推进,要保证相控阵雷达在复杂电磁环境下的工作能力,就必须针对各种干扰采取相应的抗干扰手段,但抗干扰手段越多,系统电路的设计复杂度越高,调度和使用的控制逻辑的实现也约困难,所以相控阵雷达抗干扰设计需要折中的设计。根据前人的设计经验,相控阵雷达的最佳抗干扰手段就是阻止干扰信号进入雷达接收机,通过天线设计抑制空间干扰,具体采取措施及得益见表 3-1。

表 3-1 相控阵雷达抗干扰措施及得益

序号	抗干扰措施	得益
1	扩大天线有效口径	获得窄波束、高增益
2	收、发天线采用不同幅度加权方式	大幅降低副瓣
3	单脉冲测角	对抗角度欺骗干扰
4	自适应阵列技术	抑制高占空比的噪声干扰
5	副瓣匿影	抑制低占空比的脉冲式干扰

3.2 毫米波技术

目前,军队实力已经成为各国在进行国际战略较量时的一个主要指标,而科技水平的不断提高,军队实力的强弱将越来越明显地表现在雷达干扰上。雷达对抗日趋白热化,以"毫米波段"和"微波段"相融合的方式为主,而"扩频"、"脉冲多普勒"和"自适应"等技术则是目前和今后的发展方向,这无疑会大大提高雷达的抗干扰性。

毫米波雷达实施抗干扰技术的优势在于:

毫米波频段为 30-300GHz(相应波长为 1~10mm)波长较短,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率和低仰角跟踪能力;

由于频段高,天线孔径可以在设计的比较小的前提下,获得高增益、得到较窄的波束,从而获得较好的方向性、较高的空间分辨率;

毫米波可利用的“大气窗口”中心频率分别为 35GHz、94GHz、140GHz、220GHz,频带宽度分别为 16GHz、23GHz、26GHz、70GHz,极宽的可用频带便于提高距离分辨率。

四、结束语

复杂的电磁条件会对现代化的雷达工作造成极大的干扰,从而造成雷达所收到的信息发生畸变、被截取等问题,因此,要想最大限度地保证现代化雷达工作,就需要提高雷达的抗干扰能力,防止受干扰的信息对雷达工作造成不利的影响。

参考文献:

[1]张宇.复杂电磁环境下现代雷达抗干扰技术研究[J].中国新通信,2020,22(14):77.

[2]徐家迅.复杂电磁环境下雷达抗干扰能力分析[J].电子世界,2012(08):19-20.

[3]蒋国阳.复杂电磁环境下雷达抗干扰相关问题[J].电子技术与软件工程,2018(01):74.

作者简介:

张国龙(1990-),男,吉林省通化市人。硕士学位。现为南京电子技术研究所工程师。研究方向为雷达系统集成与工程化设计。