

# 雷达装备强电磁脉冲防护现状及发展考虑

张 龙<sup>1</sup>, 田明宏<sup>1</sup>, 宋正鑫<sup>1</sup>, 李 进<sup>2</sup>

(1. 解放军 93209 部队, 北京 100085; 2. 解放军 95806 部队, 北京 100085)

**摘要:**介绍了电磁脉冲武器的特点及发展趋势,分析了美、俄、英等国的电磁脉冲武器研究动态,指出了其对雷达装备战场生存能力构成严重威胁,并引出了雷达装备强电磁脉冲防护技术的发展。文中通过分析雷达装备电磁脉冲防护技术研究现状,并结合电磁脉冲防护技术的装备应用,指出当前电磁脉冲防护技术主要集中在前门/后门耦合的防护上。强调根据电磁脉冲武器研究进展,雷达装备需同步开展电磁脉冲防护技术、防护手段研究以及电磁脉冲防护能力评估方法的研究,并向构建防护能力指标体系方向发展。

**关键词:**电磁脉冲;雷达;防护能力;评估

中图分类号:TN956 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2020)05-0013-04

引用格式:张 龙, 田明宏, 宋正鑫, 等. 雷达装备强电磁脉冲防护现状及发展考虑[J]. 现代雷达, 2020, 42(5): 13-16.

ZHANG LONG, TIAN Minghong, SONG Zhengxin, et al. Current situation and development consideration of strong electromagnetic pulse protection for radar equipment[J]. Modern Radar, 2020, 42(5): 13-16.

## Current Situation and Development Consideration of Strong Electromagnetic Pulse Protection for Radar Equipment

ZHANG Long<sup>1</sup>, TIAN Minghong<sup>1</sup>, SONG Zhengxin<sup>1</sup>, LI Jin<sup>2</sup>

(1. The Unit 93209 of PLA, Beijing 100085, China; 2. The Unit 95806 of PLA, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The characteristics and development trend of electromagnetic pulse (EMP) weapons are introduced. The research trends of EMP weapons in the United States, Russia, Britain and other countries are analyzed. The EMP weapons are becoming a serious threat to the battlefield viability of radar equipment and the development of strong EMP protection technology for radar equipment is caused. Based on the analysis of the research status of EMP protection technology for radar equipment and its application, it is pointed that the current EMP protection technology mainly concentrates on the research of front door/back door coupling protection. According to the research progress of EMP weapons, the research of EMP protection technology, protective means and evaluation methods should be carried out synchronously. And the development consideration of building protective capability index system is put forward.

**Key words:** electromagnetic pulse; radar; protection capability; evaluation

## 0 引 言

电磁脉冲(EMP)武器是一种利用强电磁场使敌方武器系统失效或毁伤的新型作战武器<sup>[1]</sup>,其辐射功率达千兆瓦量级,脉冲宽度以纳秒为量级。目前,世界发达国家多数开展了电磁脉冲武器研究,电磁脉冲武器在实用化基础上,其杀伤威力更强,辐射频谱会更宽,实战价值更大。

### 1 电磁脉冲武器研究现状

#### 1.1 电磁脉冲武器研究动态

美国较早地开始了电磁脉冲武器研究与试验,在海湾战争中投入使用,利用巡航导弹携带电磁脉冲弹头进行攻击,使得伊拉克的指挥中心电子系统因电磁干扰而失效,部分设备甚至毁伤;北约对南联盟的轰炸

中,美国利用高功率微波(HPM)武器,使南联盟的通信线路中断<sup>[2]</sup>;2012年10月,美国波音公司与美空军研究实验室联合完成了无人飞行器携带 HPM 武器进行电子系统攻击试验,无人飞行器在低空飞行,使七个不同目标的电子系统降级或失效;2016年,美国开始常规空射巡航导弹级二代高功率微波武器的设计与开发,并开展了多目标型的高功率微波巡航导弹试验;美国计划在 2024 年实现联合空地防区外导弹增程型 HPM 武器,在 2029 年将高功率微波武器集成至第五代战机和无人机。

俄罗斯的高功率电磁脉冲技术研究也处于世界领先地位。1990年,俄罗斯研制出用于防空的 HPM 武器系统样机,并进行了外场试验;2001年,研制出两种射频武器 Ranets-E 和 Rosa-E,其中后者为微波弹。俄罗斯研制的防空型高功率微波武器峰值功率达 1 GW,经多次外场试验,作用距离 1 km 处的功率密度达 400 W/cm<sup>2</sup>,

该装备不仅能使敌方武器系统受电磁辐射而失效,其自身也增强了防辐射能力设计。

自 20 世纪 80 年代以来,英国便一直大力发展 HPM 技术,其研制的高功率微波炸弹功率达千兆瓦级,采用飞机或导弹携带进行攻击,杀伤威力巨大。据报道,近期英国成功试验了某种微波武器,载荷为无人机或防区外飞行的巡航导弹,研究集中在小型化和提高功率方面,并向可重复使用方面发展。

### 1.2 电磁脉冲武器对雷达的威胁

总体上看,高功率电磁脉冲武器及超大功率脉冲源辐射技术正逐步成熟,具有组合脉冲波形多变、辐射场极高、频谱极宽等特征。预计在不远的将来,高功率电磁脉冲武器将大规模应用于局部信息战争。

在信息化战争中,雷达作为现代军事战争的重要目标探测装备,主要获取目标的距离、方位和速度等参数,其发挥的作用如下:一是搜索发现敌方飞机或导弹目标,对其进行定位、跟踪;二是指挥引导我方飞机执行作战任务。雷达是指挥中心获取战场态势的核心装备,发挥着“千里眼”作用。因此,其不可避免地成为敌方高功率微波武器的攻击对象,尤其是以非核高功率微波为代表的高功率电磁脉冲武器,其产生的电磁脉冲场,具有功率大、上升沿极快、频带宽、热效应突出等特点,对雷达系统构成了严重威胁。

雷达在面对高功率电磁脉冲武器攻击时,高功率电磁脉冲可通过前/后门耦合多种途径进入系统对其造成毁伤,如图 1 所示。

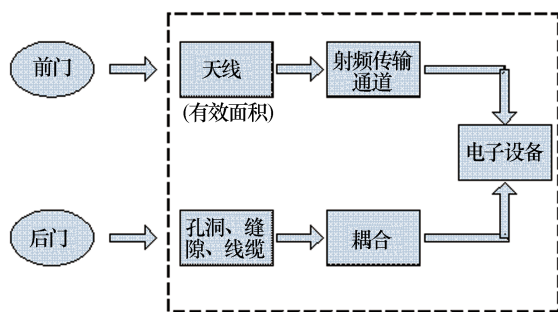


图 1 高功率电磁脉冲耦合途径

由图 1 可知,高功率微波武器对雷达装备的耦合路径一是通过前门耦合,强电磁脉冲从雷达天线耦合进入内部电子设备;二是通过孔缝、线缆等通道进入雷达系统,使内部电子设备遭受毁伤,特别是 HPM 可覆盖 L、S、X 等多个频段,其频率可与各种雷达系统的工作频率吻合,甚至可利用脉冲调制的窄谱 HPM 对雷达系统实施通带内的瞄准式攻击,使高功率电磁脉冲通过天线耦合进入射频通道,对雷达系统的射频通道造成严重威胁。因此,雷达系统高功率电磁脉冲武器攻击下的生存能力受到极大影响。

## 2 雷达装备电磁脉冲防护技术现状

电磁脉冲武器的发展必然带动电磁脉冲防护的研究,电磁脉冲的打击和防护就像有矛必有盾一样。研究电磁脉冲武器的同时,电磁脉冲的防护研究即同步开始。美俄等国研究较早,形成了一套系统的电磁脉冲武器防护措施及试验验证体系,针对武器系统提出明确的电磁脉冲防护标准<sup>[3-5]</sup>。

### 2.1 防护技术研究动态

美俄等国对电磁脉冲的威胁认识较早,在开展电磁脉冲武器研制的同时,即开展了相应的防护工作研究。美国近三十年来,相继颁布了与系统电磁环境效应相关的 MIL-E-6051(1988)、MIL-STD-1818(1992)以及 MIL-STD-464(2006)等标准,提出了完善的系统加固指标分配方法、屏蔽和防护装置设计规范、电缆铺设及其屏蔽设计规范、电路元件和部件布局设计规范、浪涌保护(保护电路和滤波电路)设计规范(MIL-STD-188-125)等,且在实际装备中开展了广泛应用。

俄罗斯同样很重视强电磁脉冲的效应防护,20 世纪 90 年代就针对微电子电路开展了强电磁脉冲辐照试验和防护技术研究,并在武器系统研制过程中强调增强电磁脉冲防护措施。为提高武器系统的强电磁脉冲防护能力,俄罗斯开发出技术领先的高功率电磁脉冲阻隔芯片,并将其应用在指挥、控制、通信、计算机、情报、监视及侦察(C4ISR)系统中,防护技术居于领先地位<sup>[6]</sup>。

早在 20 世纪 80 年代中期,电磁拓扑概念就应用到电磁脉冲防护领域,通过对系统构造拓扑图,进行分层建模,建立关联矩阵,进而推导出 BLT 方程,从而为复杂电子系统抗强电磁脉冲研究提供了一套系统分析的理论工具。另外,采用基于矩量法(MOM)的 NEC 软件、基于多层快速多极子算法(MLFML)等电磁仿真软件,对复杂电子系统进行强电磁脉冲耦合的仿真,获得传输到这些电路与器件上的干扰量级及时频域特征,从而为效应研究与加固研究提供了准确依据,为开展电磁脉冲防护研究提供了方法支撑。

### 2.2 防护技术应用情况

随着电磁脉冲武器及强电磁脉冲防护技术的发展,先进装备或尖端装备增强的电磁脉冲防护加固技术,如 E-3 预警机和 B-1B 轰炸机等大型平台实施了强电磁防护加固。国外一些高校和科研院所分别开展了电磁脉冲防护理论及新型电磁屏蔽材料研究,如频率选择表面(FSS)材料得到广泛的应用,该材料由二维周期性结构构成,用作空间电磁波的滤波器。F-22 隐身飞机具有良好的隐身性能,它的雷达反射面积只有  $0.01 \text{ m}^2$ ,不仅在于其外形设计,吸波材料等高性能材

料的应用显著增强了其隐身能力。另外,其机载雷达天线罩设计中采用了高性能 FSS,可使天线工作频段内的信号能完全通过,而对天线频段外的信号呈现全反射特性,在强电磁辐射条件下,对雷达接收机进行了有效防护<sup>[7]</sup>。

瑞典研发了基于先进半导体材料制成的单片限幅器芯片,为电磁防护装备实施了前端加固;欧盟研制了用于雷达、通信和导航信息化武器装备射频前端强电磁防护的典型限幅器芯片;美国研制生产系列化的各类设备及设施级的电源滤波器、电话及总线滤波器、射频滤波器,在电磁脉冲防护基础研究方面具有较大优势。

面对日益增强的强电磁脉冲威胁,美军已经开始寻求对抗强电磁脉冲的远程弹道导弹预警雷达,表示采用增强型美国弹道导弹防御雷达系统,以抵御 EMP 效用。同时,进行地面高空 EMP 认证项目,并对雷达系统进行维护和系统管理。因此,强电磁脉冲防护技术开始在雷达整机系统级别上受到越来越多的开发和应用。

### 2.3 防护技术研究方向

根据电磁脉冲对系统的耦合途径分为前门耦合和后门耦合,电磁脉冲防护技术研究主要集中在电磁脉冲前门防护技术和后门防护技术两个方面<sup>[8]</sup>,主要技术途径如图 2 所示。

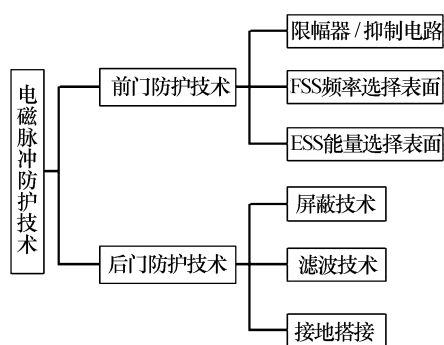


图 2 电磁脉冲防护技术途径示意图

#### 1) 后门防护

防护技术途径主要包括屏蔽、滤波、接地、搭接等技术,可根据较为成熟的电磁兼容设计方法进行防护<sup>[9-10]</sup>。上海交通大学、东南大学和浙江大学等单位进行了多系列小型化宽带滤波器优化设计方法和应用研究,为雷达、通信和导航等信息化装备的射频前端通道电磁防护提供了重要手段。

#### 2) 前门防护

目前主要采用的防护技术途径主要有:(1) FSS 技术;(2) 能量选择表面(ESS)技术<sup>[11]</sup>;(3) 限幅器/射频电路抑制技术<sup>[12-13]</sup>。

其中,ESS 是一种利用强电磁效应改变阻抗特性,

实现能量选择的电磁防护表面。其工作原理是强电磁脉冲作用下,构成能量选择表面的 PIN 二极管两端感应出的射频电压使二极管导通,此时能量选择表面相当于金属屏蔽网,对强电磁脉冲产生屏蔽作用;当较低能量的电磁脉冲辐照时,PIN 二极管两端感应的射频电压不足以使其导通,不能形成屏蔽网,从而使得弱信号透过。因此,能量选择表面实现了对强电磁脉冲屏蔽,允许弱信号通过,从而建立一种能量选择机制,限制强电磁脉冲进入内部系统,且不影响有效信号传输,避免系统遭受强电磁脉冲干扰或损伤<sup>[14]</sup>。

### 3 雷达电磁脉冲防护发展考虑

现代战争中,制信息权已经成为克敌制胜的重要手段之一<sup>[15]</sup>。集大量微电子设备的雷达是获取战场信息态势的核心装备,然而在强电磁脉冲武器攻击下,其生存能力面临极大挑战。因此,开展强电磁脉冲作用下的雷达防护技术研究,提高其战场生存能力,对掌握未来高强度信息战争主动权具有举足轻重的作用<sup>[16-18]</sup>。

#### 1) 加强电磁脉冲武器研究进展跟踪

对电磁脉冲武器的辐射量级、脉冲宽度及电磁脉冲武器攻击方式开展研究,只有掌握攻击对象的能力底数,做到知己知彼,才能更有效地开展雷达装备的强电磁脉冲防护工作。

#### 2) 加强雷达装备对抗强电磁脉冲武器研究

一是从技术方面开展电磁脉冲防护顶层设计,在雷达设计阶段考虑强电磁脉冲防护问题,并开展新防护材料、新防护理论的研究,加快强电磁脉冲防护专利向工程应用转变;二是考虑从战术方面对抗强电磁脉冲武器,尤其是机载脉冲武器或弹载脉冲武器,探讨在其有效杀伤距离之外尽早发现目标,采用多装备协同作战方式对抗电磁脉冲武器,从而提升雷达装备在强电磁脉冲武器攻击下的生存能力。

#### 3) 开展雷达装备强电磁脉冲防护能力评估方法研究

在加强强电磁脉冲防护技术研究的同时,开展电磁脉冲防护能力评估方法研究,尤其是装备级的防护能力评估方法研究,并构建电磁脉冲防护标准体系,为验证雷达装备的电磁脉冲防护能力提供支撑,对提升装备的抗电磁脉冲武器能力发挥指导作用。

### 4 结束语

电磁脉冲武器的发展对雷达装备的战场生存能力构成严重威胁,为提升雷达装备的战场生存能力,电磁脉冲防护技术研究围绕电磁脉冲武器的发展同步进

行,从防护理论、防护技术、防护手段等多方面开展<sup>[16-18]</sup>。另外,电磁脉冲防护能力评估方法和防护标准体系的研究也是电磁防护技术的重要部分,加强该方面研究对提升雷达装备的电磁脉冲防护能力具有指导促进作用。

### 参考文献

- [1] 孟范江. 电磁脉冲武器发展和应用[J]. 光机电信息, 2010, 27(9): 81-84.  
MENG Fanjiang. Development and application of electromagnetic pulsed weapon[J]. Opto Information, 2010, 27(9): 81-84.
- [2] 宋 扬, 刘赵云. 电磁脉冲武器技术浅析[J]. 飞航导弹, 2009(2): 24-29.  
SONG Yang, LIU Zhaoyun. The analysis of electromagnetic pulse weapon technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2009(2): 24-29.
- [3] United States Department of Defense. Electromagnetic environment effects requirements for systems [S]. MIL-STD-464C-2010. Washington D. C.: United States Department of Defense Interface Standard, 2010.
- [4] United States Department of Defense. High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) environment[S]. MIL-STD-2169B. Washington D. C.: United States Department of Defense Interface Standard, 2012.
- [5] MILLER C R. Electromagnetic pulse threats in 2010[J]. Electromagnetic Pulse Threats in, 2005, 16(7): 903-904.
- [6] 卢新科. 电磁脉冲的耦合及防护[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.  
LU Xinke. The coupling and defense of electromagnetic pulse[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [7] 才长帅, 冀鑫炜, 王华彬. 地面预警雷达系统电子防御研究[J]. 现代雷达, 2018, 40(7): 1-4.  
CAI Changshuai, JI Xinwei, WANG Huabin. A study on electronic defense of ground radar[J]. Modern Radar, 2018, 40(7): 1-4.
- [8] 冀鑫炜, 田 锦, 孙珊珊, 等. 地面雷达系统强电磁脉冲防护分析[J]. 现代雷达, 2018, 40(7): 23-26.  
JI Xinwei, TIAN Jin, SUN Shanshan, et al. Analysis of high intensity electromagnetic pulse protection for ground radar system[J]. Modern Radar, 2018, 40(7): 23-26.
- [9] 杨继坤, 牛龙飞, 李 进, 等. 舰船系统级强电磁脉冲防护试验与关键技术[J]. 现代防御技术, 2016, 44(1): 22-26.  
YANG Jikun, NIU Longfei, LI Jin, et al. System level electromagnetic pulse protection test and key technology to ship-flat[J]. Modern Defense Technology, 2016, 44(1): 22-26.
- [10] 曹 帅, 曾清平. 雷达后门电磁脉冲防护概述[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(6): 27-31.  
CAO Shuai, ZENG Qingping. Summarization of electromagnetic pulse protection of radar backdoor[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2011, 34(6): 27-31.
- [11] 杨 成, 刘培国, 刘继斌, 等. 能量选择表面的瞬态响应[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(4): 1045-1049.  
YANG Cheng, LIU Peiguo, LIU Jibin, et al. Transient response of energy selective surface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(4): 1045-1049.
- [12] 王立蒙. 电磁脉冲弹对典型电子器件的毁伤机理[D]. 太原: 中北大学, 2016.  
WANG Limeng. Damage mechanism of electromagnetic pulse bomb to typical electronic components[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [13] 李名杰, 谭志良, 耿利飞. 射频前端强电磁脉冲前门耦合研究[J]. 现代防御技术, 2016, 44(4): 159-164.  
LI Mingjie, TAN Zhiliang, GENG Lifei. Research on high power EMP coupling into RF front-end through front-door[J]. Modern Defense Technology, 2016, 44(4): 159-164.
- [14] 张 凯. 电磁脉冲对相控阵设备的耦合效应分析[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(3): 96-99.  
ZHANG Kai. Analysis of the coupling effect of EMP to phased array equipment[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2013, 36(3): 96-99.
- [15] 周壁华, 陈 彬, 石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.  
ZHOU Bihua, CHEN Bin, SHI Lihua. Electromagnetic pulse and engineering defense[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [16] XIAO J S, LIU W H, ZHANG S Y, et al. Study of damage mechanism of high power microwave on electronic equipments[C]// 2008 China-Japan Joint Microwave Conference. Shanghai: IEEE Press, 2008: 454-457.
- [17] ANONYMOUS. Lockheed achieves design milestone for U.S. navy surface ship electronic defense[J]. Sea Technology, 2011, 52(4): 58-59.
- [18] MISHRA A K, VERSTER R S. Electronic defense systems[M]. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017.

张 龙 男, 1976 年生, 博士, 工程师。研究方向为预警装备总体。

田明宏 男, 1974 年生, 博士, 高级工程师。研究方向为预警探测。

宋正鑫 男, 1978 年生, 博士, 高级工程师。研究方向为预警监视装备体系论证、型号论证。

李 进 男, 1979 年生, 硕士, 工程师。研究方向为预警探测。