文章编号: 1008-1542(2011)02-0147-05

强电磁脉冲对雷达接收机的天线耦合分析

甄可龙, 吕善伟, 张　岩

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京　100191)

摘　要: 针对强电磁脉冲可以通过天线、线缆及孔缝耦合方式进入雷达系统并造成威胁的问题, 对强电磁脉冲经由"前门"耦合进入雷达系统的干扰机制进行了分析, 给出了电磁脉冲对雷达天线的能量耦合公式, 设计了雷达接收系统, 并就强电磁脉冲对雷达接收机的干扰影响进行 ADS 仿真分析, 最后提出了相应的抗电磁脉冲的防护措施。

关键词: 强电磁脉冲; 耦合; 前门; 后门

中图分类号: TN97　　文献标志码: A

Analysis of antenna coupling of intense electromagnetic pulse to radar receiver

ZHEN Ke-long, LV Shan-wei, ZHANG Yan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Electromagnetic pulse causes serious threat by coupling with high energy into the radar system through the antenna, cable, gaps and so on. In this paper, the damage mechanism of electromagnetic pulse to radar through "front door" couple is analyzed, the antenna coupling formula of radars is given, and the interference effects on radar receiving system by EMP are simulated with ADS software. The measures of anti-EMP are proposed in the end.

Key words: intense electromagnetic pulse; coupling; front-door; back-door

电磁脉冲武器通过爆炸时产生强电磁脉冲, 干扰、击穿或烧毁目标平台上的电子设备[1]。同时随着电子设备的小型化和集成化, 雷达接收系统对电磁脉冲干扰的敏感度也越来越高。具有慢衰减、宽频谱特征的强瞬态电磁脉冲, 通过耦合可以对雷达接收系统在远距离处造成干扰, 在近距离处实施摧毁[2]。强电磁脉冲的耦合途径分为 2 种: "前门"耦合和"后门"耦合。"前门"耦合指高功率脉冲能量经天线耦合进入; "后门"耦合是指脉冲能量通过孔缝或电缆耦合等进入雷达系统进行干扰破坏[3]。

在强电磁脉冲的研发和防护方面, 以美国和俄罗斯的技术较为先进。由于国外严格的技术封锁, 目前中国的相关研究尚处于摸索阶段。总体看来, 中国的强电磁脉冲研究集中在以下 2 个方向: 经由孔缝线缆耦合的场计算、半导体分立器件损伤机理及损毁阈值实验分析, 基本都属于"后门"耦合研究范畴[4-6]。

处于工作状态的雷达接收机天线处于裸露状态, 并具有较高增益, 更容易受到电磁脉冲的干扰, 是雷达系统受强电磁脉冲干扰的首要通道, 因此, 针对于雷达接收系统的"前门"耦合研究具有重要现实意义。笔者针对强电磁脉冲的"前门"耦合进行研究, 并结合 ADS 仿真设计软件, 对强电磁脉冲干扰雷达回波信号进行时域仿真, 并提出相应的防护措施。

收稿日期: 2011-01-03; 责任编辑: 李　穆

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60901001); 国家 863 计划资助项目(2008AA12A216)

作者简介: 甄可龙(1976-), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 主要从事微波电路系统设计及仿真、雷达电子对抗技术等方面的研究。

1 脉冲功率“前门”耦合计算方法

电磁脉冲对雷达接收系统造成的破坏程度,取决于耦合进入雷达系统的电磁能量大小。对于前门耦合,强电磁脉冲通过天线进入雷达系统功率的推导,是以Friis公式为基础的。

假定电磁脉冲武器发射的脉冲能量在其工作频带内为均匀分布,则电磁脉冲的能流密度为

$$S=\frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad , \tag{1}$$

其中:P_t 为电磁脉冲武器发射功率;G_t 为电磁脉冲弹天线增益;R 为被攻击雷达与电磁脉冲武器之间距离。

由于被攻击雷达天线工作带宽的限制,仅有处于带宽之内的强电磁脉冲能量才能从天线主瓣耦合进入。因此耦合到雷达内部功率可用式(2)进行表述。

$$P_r=(P_t\frac{B_r}{B_t})\frac{G_t}{4\pi R^2}A_e\frac{1}{L_e}=\frac{P_t G_t G_r B_r\lambda^2}{(4\pi R)^2 B_t L_e} \quad , \tag{2}$$

其中:P_r 为电磁脉冲耦合到被攻击雷达内部功率;G_r 为被攻击雷达天线增益;λ为雷达的工作波长;$A_e=G_r\lambda^2/4\pi$ 为被攻击雷达接收天线的有效面积;B_r 为被攻击雷达天线带宽;B_t 为电磁脉冲武器的天线带宽;L_e 为综合损耗因子,包括天线罩损耗、馈线损耗、极化损耗等衰减因素。

为了方便工程上估算,式(2)可以用分贝值来表示为

$$P_r=P_t+G_t+G_r+B_r-32.45-20\lg R-20\lg f-B_t-L_e。 \tag{3}$$

用这个公式计算出来的耦合能量,是否超过器件或系统的损伤阈值,可以作为是否失效的一个判据。

2 强电磁脉冲的时频域特征分析

对强电磁脉冲的研究,最早源自于高空核爆炸,核爆电磁脉冲波形可由双指数函数模型形式来描述[7],如式(4)所示:

$$E(t)=kE_p(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \quad 。 \tag{4}$$

其中:E_p 为脉冲峰值;k 为峰值修正系数;α和β值分别为表征脉冲前沿、后沿的参数。与之对应的频谱函数为

$$E(j\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}E(t)e^{j2\pi ft}dt=kE_p(\frac{1}{\alpha+j\omega}-\frac{1}{\beta+j\omega}) \quad 。 \tag{5}$$

在此基础上,国内外针对强电磁脉冲的研究还经常采用高斯脉冲、双高斯脉冲以及正弦调制高斯脉冲等模型来描述,这些模型都是对强电磁脉冲特性的逼近。据研究表明:随着脉冲上升沿和脉冲宽度的缩短,电磁脉冲含有的高频能量越丰富,对目标耦合作用越明显[8-9]。因此电磁脉冲武器的发展趋势是所释放的强电磁脉冲功率更大,脉宽更窄(已经达到纳秒级),上升沿更短,频带更宽,干扰性更强。

3 强电磁脉冲对雷达接收系统的干扰分析

根据强电磁脉冲耦合能量的大小,影响程度可分为2种。一种是硬杀伤:当耦合进雷达前端能量较大时,超过半导体器件的损伤阈值造成损坏;第2种是软杀伤:当耦合能量较小时,形成强噪声干扰,严重时会使分机系统进入饱和状态,影响雷达系统正常工作。

3.1 强电磁脉冲对硬件的损伤阈值分析

电磁脉冲武器的发射功率已经超过GW量级,频谱范围从几十MHz扩展到几十GHz。国外很早前就开展关于高功率电磁密度、不同频率和脉宽的电磁脉冲的毁伤实验。

实验表明当使用0.01 μW/cm^2 能量密度的微波波束辐照时,就能对相应频段上的雷达、导航等电子设备实施干扰;当能量密度达到0.01~1 W/cm^2 时,可导致雷达通信设备性能下降或失效;当使用能量密度为10~100 W/cm^2 的微波能量照射目标,会使电路功能紊乱甚至烧毁。当能量密度到1 000~10 000 W/cm^2 时,能在瞬间摧毁目标、引爆炸弹或者导弹等武器[10]。实验同时表明,当增加器件的排线长度或缩短电磁脉冲上升沿时间情况下,器件的损伤阈值会降低。

雷达前端的敏感器件,例如低噪声放大器多采用微波场效应晶体管,为了能检测微弱信号,被要求具有低噪声、频带宽、高增益等特点,使其更容易被强电磁脉冲所损伤,实验表明多种雷达接收前端损伤阈值在百

瓦量级。

对于相控阵雷达系统, 最容易受损伤的是 T/R 组件。实验表明, 带有限幅器的 T/R 组件损伤阈值可达千瓦量级。

3.2　雷达接收系统仿真的组建

为了研究强电磁脉冲对雷达接收性能的影响, 在 ADS 软件环境下设计并组建雷达接收机系统, 并在正常雷达回波信号中引入强电磁脉冲干扰信号, 进行时域仿真分析。

首先设计收发切换开关 X1、低噪声放大器 X2、中频放大器 X3、镜像混频器 X4 等雷达接收机各分机系统的底层电路, 然后在 ADS 中级联起来, 构建雷达接收通道, 如图 1 所示。

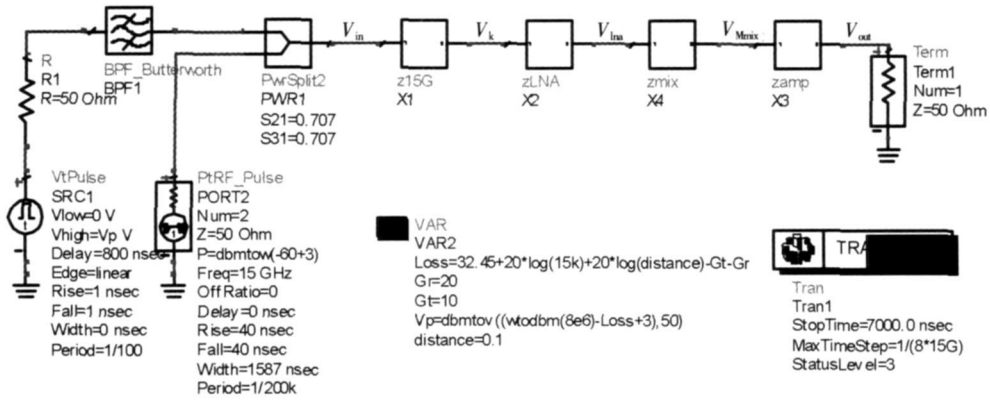

图 1　电磁脉冲干扰雷达系统仿真原理图

Fig. 1　Simulation circuits of radar receiver with interference

所组建雷达接收系统的工作频率为 15 GHz, 在工作频率处, 各分机系统的传输特性如下: 收发切换开关 X1 衰减为 0.4 dB, 低噪声放大器 X2 增益为 21 dB, 镜像混频器 X4 变频损耗为 6 dB, 在中频 28 MHz 处中频放大器 X3 的增益为 24 dB。

设定雷达回波信号均值功率为 – 60 dBm 的正弦调制脉冲, 由 ADS 系统中的调制脉冲源模块“PtRF_Pulse”提供; 强电磁脉冲干扰信号峰值功率为 100 MW(110 dBm), 脉冲上升沿和下降沿时间均为 1ns, 由 ADS 仿真系统中的时域脉冲源模块“VtPulse”提供。

根据方程式(2)、方程式(3), 在电磁脉冲的功率表达式 V_p 中引入距离因子, 用来仿真电磁脉冲武器和雷达接收机处于不同距离时, 强电磁脉冲对雷达回波信号的干扰变化规律。

在仿真过程中, 分别取在雷达接收天线输出节点 V_{in}、低噪声放大器输出节点 V_{lna} 以及混频器输出节点 V_{mix} 等节点的时域波形进行分析。

3.3　强电磁脉冲干扰下的雷达回波信号仿真

在上述所建雷达接收系统基础上, 进行瞬态时域仿真。

1) 当电磁脉冲武器和雷达接收机相距 500 m 时, 雷达接收天线输出节点 V_{in}、低噪声放大器输出节点 V_{lna} 以及混频器输出节点 V_{mix} 的时域电压波形如图 2– 图 4 所示:

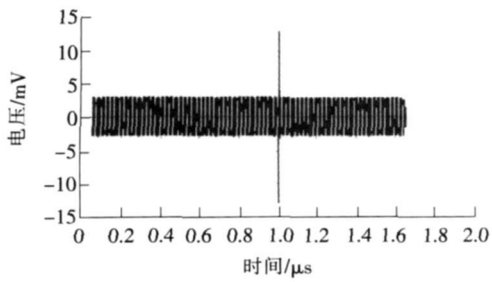

图 2　500 m 间距时接收天线输出端的时域波形

Fig. 2　Output of receiving antenna with distance 500 meters

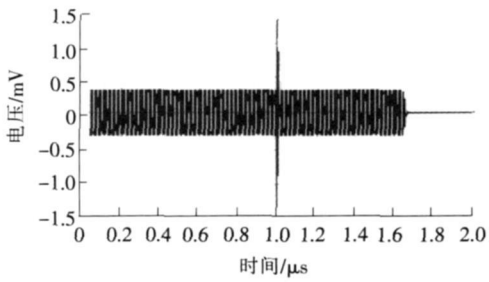

图 3　500 m 间距时低噪放输出端的时域波形

Fig. 3　Output of LNA with 500 meters space

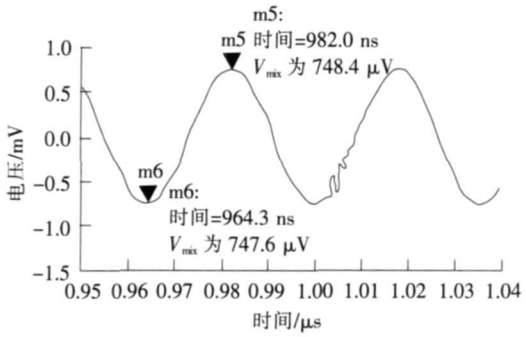

图 4 500 m 间距时混频器输出端的时域波形

Fig. 4 Output of mixer with 500 meters space

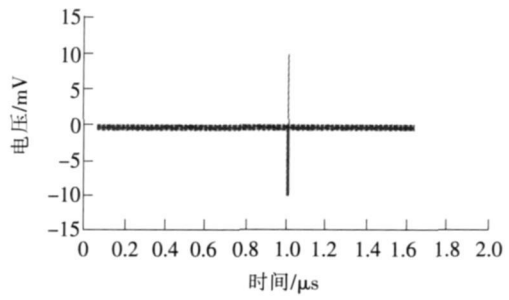

图 5 50 m 间距时接收天线输出端的时域波形

Fig. 5 Output of antenna with 50 meters space

2) 当电磁脉冲武器和雷达接收机相距 50 m 时, 雷达接收天线输出节点 V_{in}、低噪声放大器输出节点 V_{Ina} 以及混频器输出节点 V_{mix} 的时域电压波形如图 5– 图 7 所示。

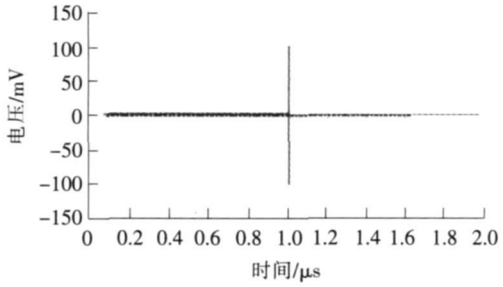

图 6 50 m 间距时低噪放输出端的时域波形

Fig. 6 Output of LNA with 50 meters space

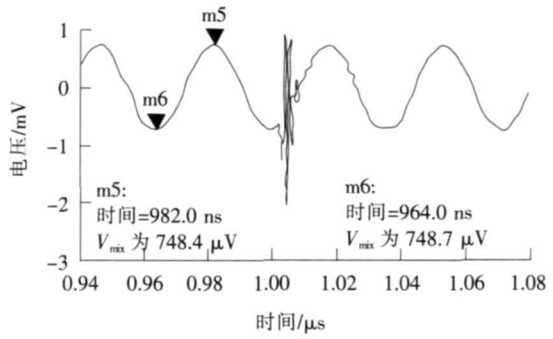

图 7 50 m 间距时混频器输出端的时域波形

Fig. 7 Output of mixer with 50 meters space

由仿真结果看出:

1) 强电磁脉冲干扰经天线耦合进入雷达接收机后, 表现为高强度的噪声信号, 和回波信号一起被放大、混频, 形成对雷达回波信号的干扰和压制。随着距离的接近对中频信号造成干扰程度越来越强。在相距 50 m 时, 电磁脉冲对中频信号的干扰已经不能忽略。

2) 脉冲干扰强度随着电磁脉冲弹和被攻击雷达之间距离接近而增强, 多组仿真数据表明, 强电磁脉冲的近距离干扰, 可能会造成低噪声放大器的烧毁和中频部分的饱和。

3) 通过对信道特性进行仿真分析, 有助于改善系统的动态范围、线性度, 从而提高整个系统的抗干扰能力。用仿真的分析方法, 可以降低实验成本, 提高改进效率。

4 雷达接收系统前门的电磁加固

电磁脉冲武器的出现对雷达防护提出更高要求, 发展大动态、快响应、以及高隔离度、和高功率容限的雷达保护技术已经迫在眉睫。

在器件级防护方面, 要采用新技术和新器件对雷达前端的敏感部位加以保护, 采用必要的滤波技术和限幅器对高能脉冲进行抑制, 把敏感组件上的能量耦合降低到损伤阈值之下。天线可以选用低损耗、低损耗正切、耐高温的材料, 设置极化栅来衰减极化方式不同的电磁脉冲能量。

在系统级防护方面, 从设计初期就应将抗电磁脉冲指标纳入规划。对各分机系统增益进行合理分配, 提高系统的线性度和动态范围等。

5 结　语

复杂电磁脉冲环境下的电子对抗是现代战争的热点,雷达系统的电磁脉冲防护研究显得尤为重要。分析了强电磁脉冲对雷达系统的干扰机制,推导出强电磁脉冲能量经天线系统耦合进雷达系统的计算方法,组建了雷达接收机系统,并采用 ADS 仿真的方法对雷达系统的抗干扰性能进行分析,最后对雷达系统防护措施提出了一些建议。

参考文献:

[1] WIK M W, BAUM C E. Introduction to special lssue on high-power electromagnetic and intentional electromagnetic interference [J]. IEEE Trans on EMC, 2004, 40 (3): 314-321.

[2] 陈　栋, 许黎明. 高功率微波武器对 C~4ISR 系统毁伤效应研究[J]. 装备环境工程(Equipment Environmental Engineering), 2010, 7(2): 48-50.

[3] 夏惠诚, 张世燎, 毛建舟. 电磁脉冲武器对舰船电子系统的毁伤机理分析[J]. 火力与指挥控制(Fire Control and Command Control), 2010, 35(7) : 109-115.

[4] LIU Qiang, QIAN Bao-liang, ZHU Zhan-ping. Numerical study on coupling of microwave pulses into different shaped cavities through slots[J]. High power Laser and Particle Beams, 2009, 21(12): 1 859-1 865.

[5] 柴常春, 席晓文, 任兴荣, 等. 双晶体管在强电磁脉冲作用下的损伤效应与机理[J]. 物理学报 (Acta Physica Sinica), 2010, 59(11): 8 118-8 123.

[6] 李用兵, 田国强, 王长河, 等. GaAs 器件电磁脉冲效应实验与毁伤机理研究[J]. 半导体技术(Semiconductor Technology), 2010, 35(7): 695-698.

[7] IANOZ M, NICOARA B I C, RADASKY W A. Modeling of an EMP conducted environment [J] . IEEE Trans on EMC, 1996, 38 (3): 400-413.

[8] 张忠连, 吴多龙, 阮成礼. 不同上升沿电磁脉冲对腔体耦合的研究[J], 机械与电子(Machinery and Electronics), 2009(2): 16-18.

[9] 程引会, 周　辉, 李宝忠, 等. 不同电磁脉冲对细导线的耦合[J]. 强激光与粒子束(High Power Laser and Particle Beams), 2000, 12(1): 91-94.

[10] 葛青林, 王莹莹, 涂拥军. 电磁脉冲武器对电子对抗装备损伤模式分析[J]. 内燃机与动力装置(Internal Combustion Engine and Power Plant), 2009(S1): 28-30.

(上接第 **146** 页)

了 BDD 冗余性,简化了其结构,提高了不交化最小路集的搜索效率。

参考文献:

[1] 武小悦, 沙基昌. 网络可靠度分析全概率分解法的计算机化算法[J]. 系统工程与电子技术(Systems Engineering and Electronics), 1998(6): 71-73.

[2] 金　星, 余浩章, 李　永, 等. 大型网络系统可靠度计算新方法[J]. 系统仿真学报(Journal of System Simulation), 2001, 13(4): 442-443.

[3] 范莹蔷. 利用极小割集数算法计算网络系统可靠度[J]. 应用数学与计算数学学报(Communication on Applied Mathematics and Computation), 2003, 17(1): 63-66.

[4] JOELLEN P L B. Reliability of networks of three-state devices[J]. Microelectronic and Reliability, 1987, 27(1): 175-178.

[5] 刘艳秋, 张　颖, 汪定伟, 等. 复杂装置网络可靠性评估模型与算法[J]. 东北大学学报(Journal of Northeastern University), 2004, 25(6): 539-543.

[6] 武小悦, 沙基昌. 网络系统可靠度的 BDD 算法[J]. 系统工程与电子技术(Systems Engineering and Electronics), 1999, 21(7): 72-73.

[7] 李东魁. 网络系统可靠度的 BDD 算法[J]. 通信技术(Communications Technology), 2009, 42(11): 149-151.