

典型天线感应核电磁脉冲研究

王江枫¹ 胡勇²

(¹二炮装备研究院五所, 北京, 100085; ²第二炮兵司令部通信总站, 北京, 100085)

摘 要: 核电磁脉冲感应需要通过试验研究, 典型短波、卫星通信天线感应 HEMP 情况经过试验得到一些数据, 并由此得出一些想法。

1 核电磁脉冲及其对电子器件的破坏

核电磁脉冲是核爆炸瞬发 γ 射线与周围物质(大气岩土介质等)作用产生的一种特殊辐射环境, 有时称它为环境电磁脉冲。核电磁脉冲场强很高, 在源区内场强可达 10^5 V/m 数量级, 高空爆核电磁脉冲(HEMP)电场强度可达 $(2 \sim 5) \times 10^4 \text{ V/m}$ 。核电磁脉冲频谱很宽, 从很低到上百 MHz, 覆盖了大部分无线电频段, 对军事通信的破坏和影响很大。核电磁脉冲作用范围很广, 低空核爆炸, 能对电气、电子设备造成干扰、破坏的范围约几十公里, 高空核爆炸时, 将覆盖地球广大的面积, 可达上千公里。

对于高空爆核电磁脉冲, 典型波形用以下函数描述,

$$E(t) = E_{01}(e^{-a_{11}t} - e^{-a_{12}t}) \quad (1)$$

式中: $E_{01}=5.2 \times 10^4 \text{ V/m}$, $a_{11}=1.5 \times 10^6 (\text{s}^{-1})$, $a_{12}=2.6 \times 10^8 (\text{s}^{-1})$ 。

孔缝耦合时用短脉冲, 短脉冲取以下表达式及参数,

$$E_b(t) = 1.2 E_{01}(e^{-a_{21}t} - e^{-a_{22}t}) \quad (2)$$

式中: $E_{01}=5.2 \times 10^4 \text{ V/m}$, $a_{21}=1.5 \times 10^7 (\text{s}^{-1})$, $a_{22}=2.6 \times 10^8 (\text{s}^{-1})$ 。

电磁脉冲电场频谱函数用下式描述

$$E(\omega) = \frac{E_0}{(\alpha_{11} + j\omega)} - \frac{E_0}{(\alpha_{12} + j\omega)} \quad (3)$$

式中: $E(\omega)$ —— 入射电场的频域函数。

HEMP 入射场波形、电场频谱归一化曲线见图 1 和图 2。

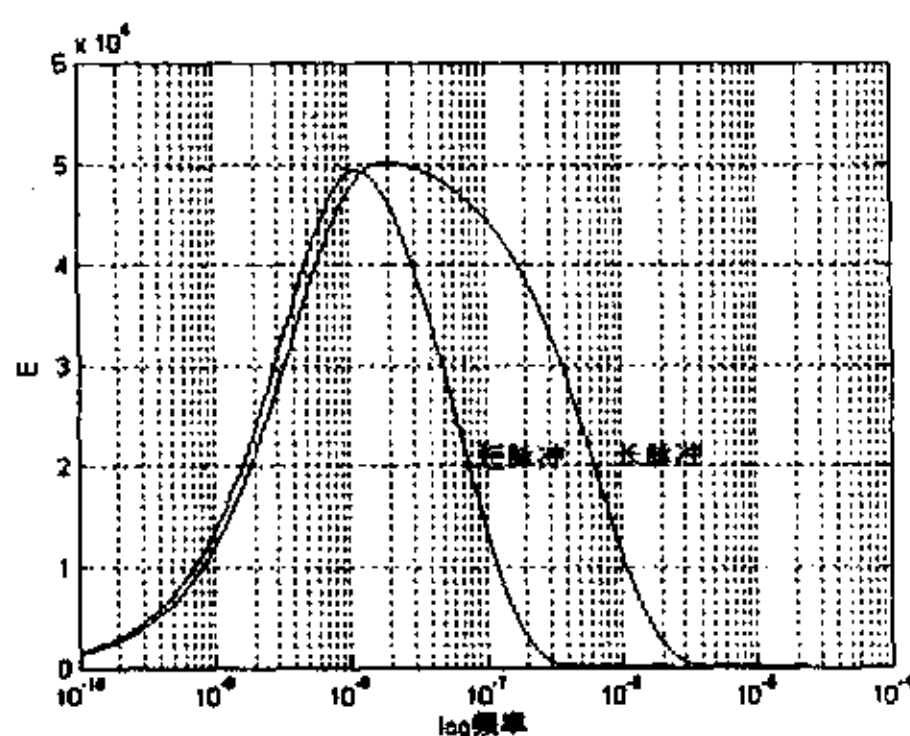


图1 HEMP 环境场波形

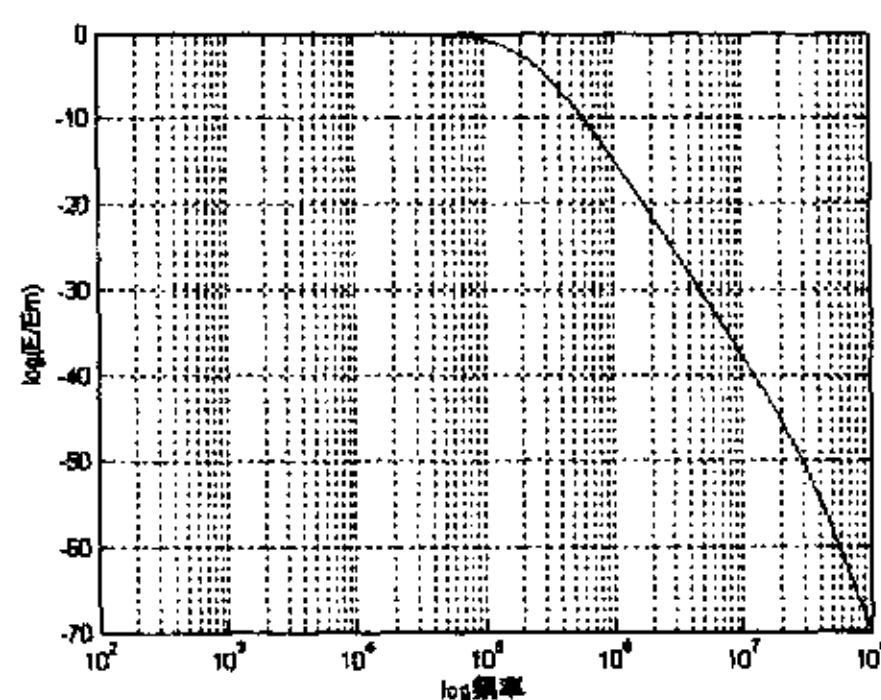


图2 电场归一化频谱曲线

核电磁脉冲 (NEMP) 是核爆炸的瞬时破坏因素, 当它作用于适当的接收体时, 能够产生电磁耦合, 电磁耦合可分为辐射耦合和传导耦合。一般说来, 辐射耦合和传导耦合往往同时存在, 空间电磁波经辐射耦合后, 可在电路上产生很高的电压和很强的电流, 通常又以传导耦合方式进入电子系统。EMP 耦合进入电子系统后会对电子元器件、线路乃至整个系统产生影响, 使性能下降甚至损坏电子元器件, 使指挥、控制以及通信系统失灵。电磁脉冲模拟器试验的结果表明, 能量约为 10^{-7}J 的非常短的脉冲足以使微波半导体二极管损坏, 能量约为 $5 \times 10^{-2}\text{J}$ 时, 将使低频晶体管损坏, 而使真空管损坏则需要 1J 能量。

无线、微波通信都使用天线发射、接收信号, 当发生高空核爆时, 天线将耦合 HEMP 形成强电流, 并传导到电子设备, 进而破坏电子器件, 导致通信设备损坏。为提高通信、指挥系统的生存能力, 必须进行天线感应 HEMP 研究。

2 典型天线感应 HEMP 试验

为进一步了解 HEMP 作用于通信天线时天线感应电流情况, 针对短波、微波通信典型天线, 我们做了以下试验。

2.1 试验内容

2.1.1 双极天线感应 HEMP 信号试验

双极天线 (架高 4 m) 架设于 EMP 辐射场之中, 将馈线引入屏蔽箱中, 接于阻抗匹配器上, 阻抗匹配器另一端接负载。阻抗匹配器及负载置于屏蔽箱内, 激发模拟辐射源, 测试天线感应电流。参试设备与辐射波模拟器的几何位置关系如图 3 所示。

2.1.2 卫星、微波天线

卫星天线架设于 EMP 辐射场之中, 将馈线引入屏蔽箱中接负载, 馈线进入屏蔽箱之前皮线接地。激发模拟辐射源, 测试感应电流。参试设备与辐射波模拟器的几何位置关系如图 4 所示。

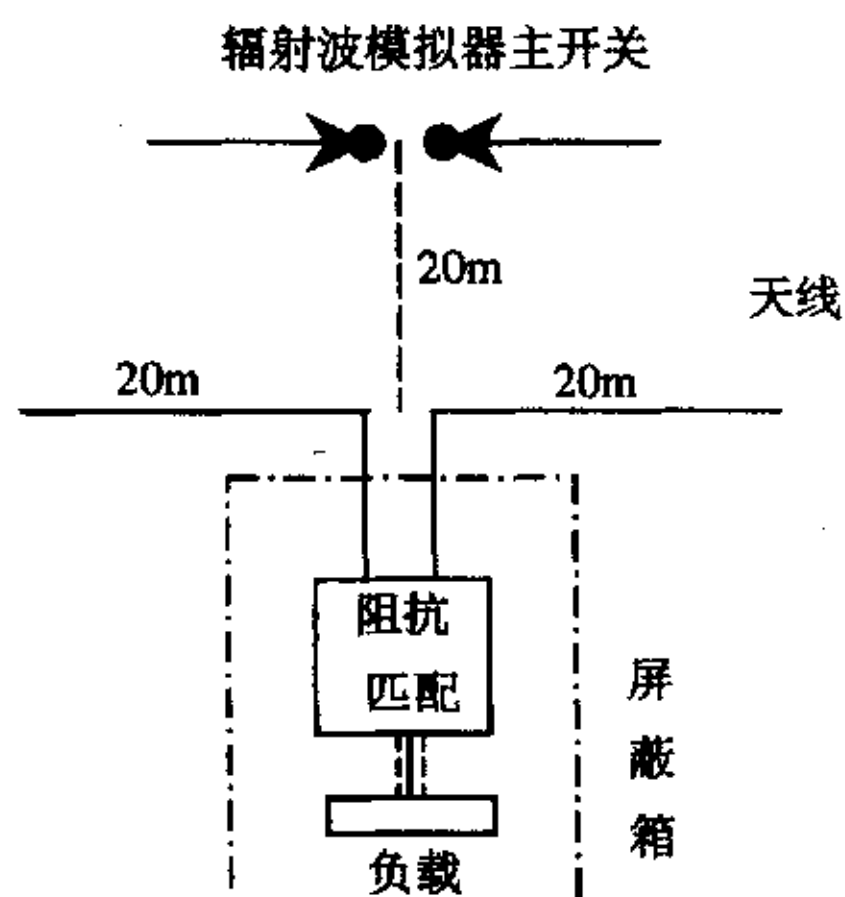


图3 双极天线试验图

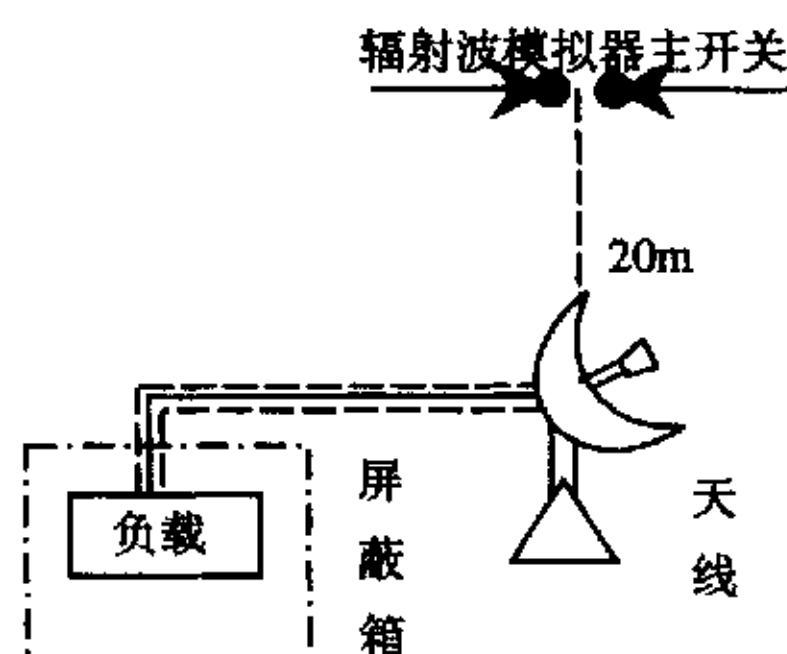


图4 微波天线试验图

2.2 试验分析

2.2.1 双极天线

外场波形与理论分析的 HEMP 波形有差别（从图 2 和图 5 可以看出），尤其是低频段总会有个别频点幅值非常高，这样会扰乱对感应电流的分析，但外场基本符合 HEMP 特性，可以作为试验源使用，只是分析时对低频部分另加注意即可。

天线感应电流非常高且上升沿变缓。外场上升沿为 5ns，天线感应电流上升沿为 18ns，上升沿变缓有利于保护电路的开发。天线感应电流频谱与外场频谱相比发生了很大变化，中、长波及更低频率部分受到一定的限制，感应电流较低，短波部分的幅值较大，米波以上频段感应较弱。一方面，天线具有带通性，其最佳接收频率为 2MHz ~ 10MHz，使得此频段感应很强；次佳接收频率为 10MHz ~ 30MHz，这一频段的感应电流显然在其次，而低频部分的频谱幅值较高，是由于外场本身能量不均匀造成的；另一方面，由于整个接收系统谐振作用，使能量发生转移。

双极天线引入的屏蔽箱内场波形非常复杂且场强极高，甚至高于外场。原因在于屏蔽箱太小，进入屏蔽箱的天线二次辐射，再经箱壁金属反射在较小的空间内振荡、叠加，造成内场场强非常高。内场与外场相比，较低频率频谱幅度大大超过了外场此频段频谱幅值，说明能量向较低频率方向转移。这是由于内场主要是由天线感应后二次辐射造成的，天线的选频性使得短波频段感应很强，屏蔽箱及系统的谐振作用使能量发生转移，结果短波以下频段幅值反大于外场，较高频率分量幅值明显降低。如此内场环境无异于核爆炸发生在屏蔽箱内，其危害是极其巨大的，不但与此天线连接的系统设备会遭到破坏，屏蔽箱内的其他设备也不能幸免于难。

阻抗匹配器后同轴电缆的芯电流频谱中 2MHz ~ 10MHz 幅值最大，10MHz ~ 30MHz 幅值其次，极为明显的表明了天线系统的频率选择性。天线的这种滤波作用对于滤除外场中幅

值较高的低频部分可以起到一定的作用, 从天线感应电流频谱看, 低频部分幅值相对较低, 而外场频谱中低频部分幅值是很高的, 由此可以证明天线滤除了部分低频部分的能量。

阻抗匹配器后的芯电流即送入终端设备的电流是我们最关心的电流。该电流能量集中在接收系统工作频段, 对终端电路具有致命的破坏作用, 如果不进行防护, 接收系统将遭到破坏的。另外, 工作频段以外的频率电流值也较高, 即使器件可以承受各频率点的电流值, 但是能量的积累同样可以损坏器件。因此, 对于芯电流的防护措施必须既有限幅又有滤波。

图 5、图 6 分别是外场和内场频谱; 图 7、图 8 是天线电流和同轴电缆芯电流频谱; 表 1 是对频谱进行的分析比较。表 1 中第一行是频率点; 第二行是外场场强在该频率点的幅值; 第三行是天线感应电流在该频率点的幅值; 第四行是天线感应电流与外场场强比值; 第五行是以 1.95MHz 频点时比值为基值, 各比值与其相除的比值数。从比值的比值可以明显看出, 天线对 2MHz ~ 30MHz 频段感应强, 对于频段外的频率相对来说有一定的衰减性, 而且距此频段越远衰减越强。

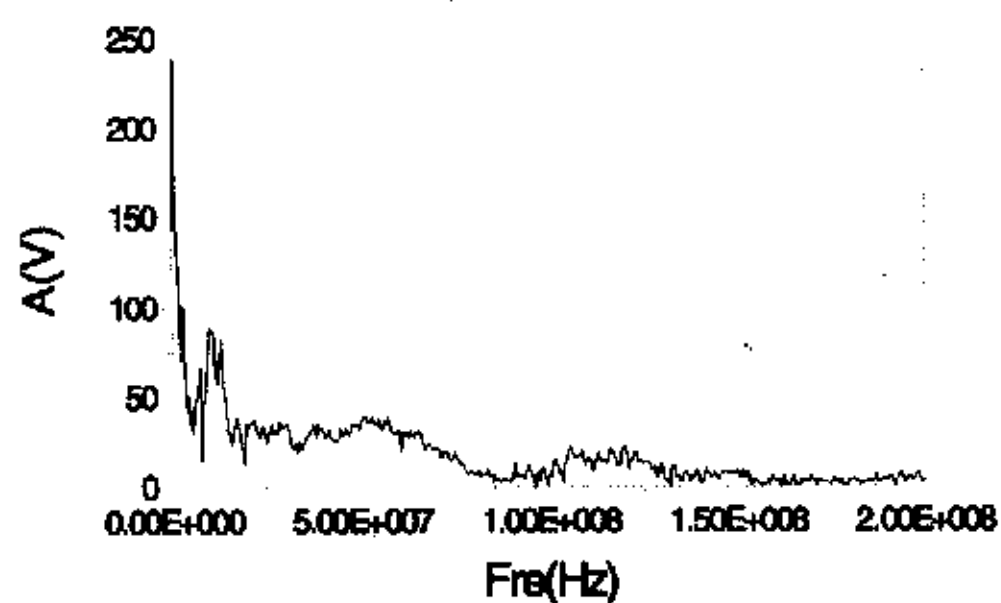


图 5 外场频谱

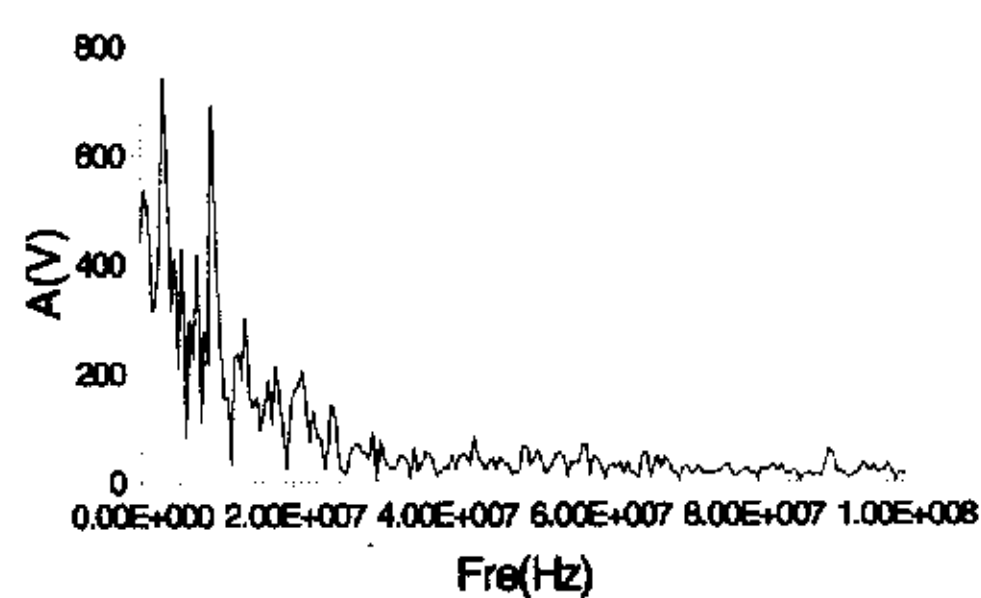


图 6 内场频谱

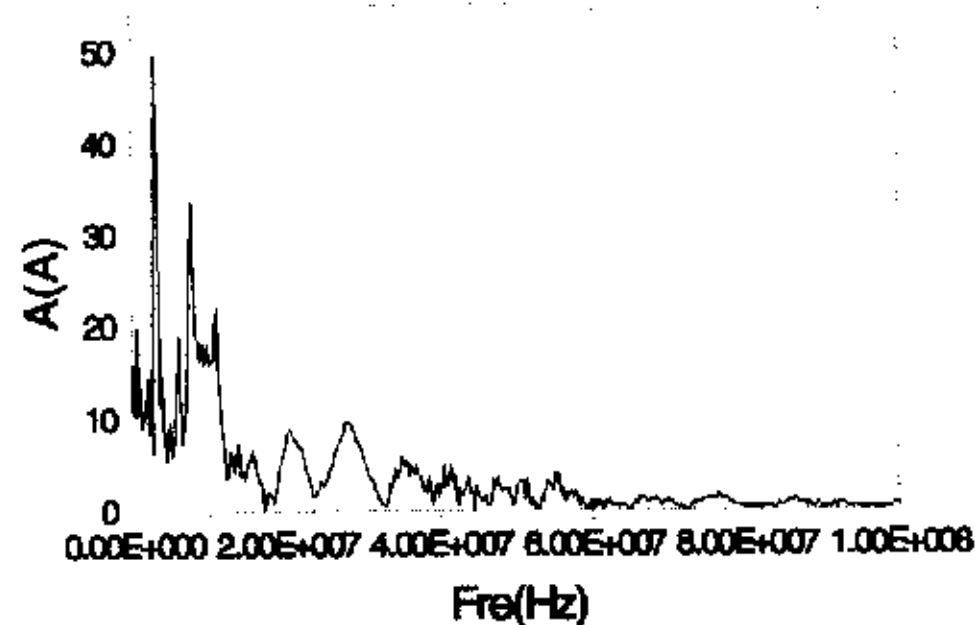


图 7 天线电流频谱

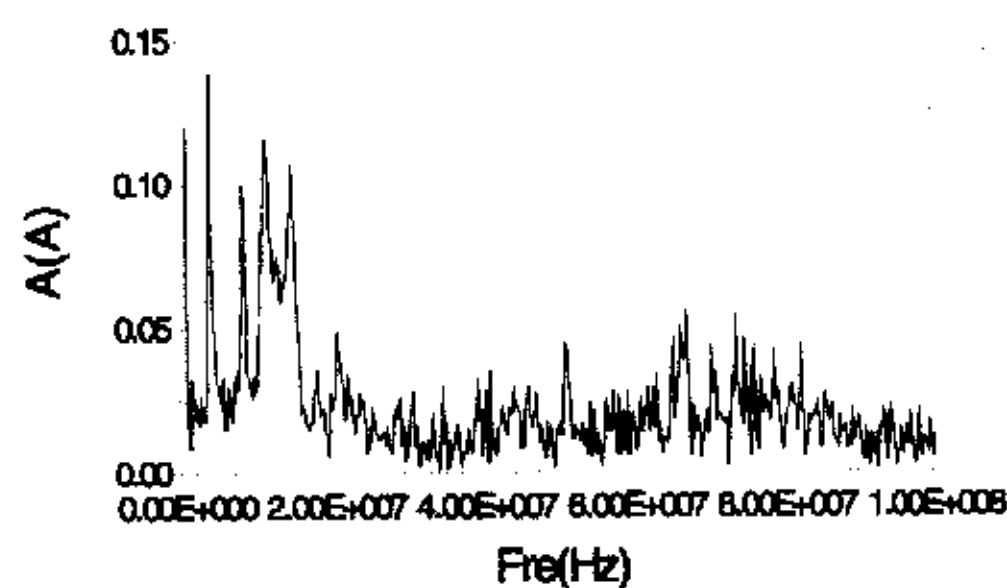


图 8 同轴电缆芯电流

表 1 对外场频谱和天线电流频谱的分析

频 率 (MHz)	0.488	0.977	1.95	3.2	7.8	10	13	20	28	50	100
外场场强 E(V/m)	238.7	148.5	90.8	73.3	14.3	88.6	67.3	33.8	33.4	38.5	7.9
天线感应 电流 I(A)	10.2	13.7	14.4	49.6	33.6	16.0	6.4	8.6	9.5	2.7	0.3
$A=I/E$	0.043	0.092	0.159	0.677	2.350	0.181	0.095	0.254	0.284	0.070	0.038
$A/A_{1.95}$	0.27	0.58	1	4.26	14.8	1.14	0.60	14.79	1.79	0.44	0.24

2.2.2 抛物面天线

抛物面天线试验中, 馈线进入屏蔽箱前皮线先接地再入箱, 接地后馈线皮电流很小, 屏蔽箱内场也很小。馈线皮线接地对降低皮电流起到了很大的作用, 进而有效地控制了皮电流二次辐射对周围设备的损害。此次面天线试验馈线很短, 只有 5m 长, 一般正常工作的面天线馈线长度绝对不会低于 40m, 裸露在外的 40m 馈线就是一幅短波天线, 其接收 HEMP 的能力在线天线试验中已经验证。虽然馈线主要是皮线感应 HEMP 形成皮电流, 但是, 一方面普通馈线的屏蔽能力有限, 会感应出较强的芯电流; 另一方面, 如果皮线不接地, 进入屏蔽箱的皮电流发生二次辐射, 会形成较强的内场, 进而影响周围设备, 这一点也可以在线天线试验中得到证实。因此, 抛物面天线的馈线应具有足够的屏蔽能力, 并且馈线接终端设备之前屏蔽皮线要先接地。

面天线试验中芯电流很小, 频谱分析后可以看到, 各频点电流值都很低不会对后面的器件造成损伤, 另外, 频率都在 500MHz 以下, 在卫星接收系统工作频段之外, 幅值很小而且频率在工作频段以外, 接收系统自身的滤波设备可以滤除, 不需要另加滤波, 就可以保证安全。但是, 要保证接收系统的终端设备不能直接裸露在 HEMP 场中, 否则有可能通过另外的感应途径对器件造成损伤。

图 9 和图 10 分别是试验时外场和内场频谱曲线图; 图 11、图 12 分别是屏蔽箱内同轴电缆的皮电流和芯电流频谱曲线图。

3 小结

在进行电磁脉冲屏蔽时, 电子设备应置于具有一定屏蔽能力的仓体内。由于天线不能置于仓体内, 必须采取措施进行防护加固, 避免天线感应电流传导进入电子设备造成损坏。根据试验数据及分析结果, 我们认为:

a) 短波通信天线对 HEMP 感应电流很强, 二次辐射也非常严重, 因此天线绝对不能直接进入屏蔽仓体。

b) 同轴电缆芯电流相对较低, 又比较容易进行防护加固, 因此应将短波通信天线转换成同轴电缆, 经过防护措施屏蔽后, 再接入屏蔽仓体。

c) 短波通信天线具有一定选频作用, 但是感应电流频带依然较宽, 而且有效频带内感应电流很强。因此保护器件应该即能滤波又要限幅。

d) 短波通信频段处于 HEMP 频段内, 保护器件可以保证电子设备的存货, 但是强脉冲的感应电流必定会带来误码, 这是保护器件无能为力的, 须从其他角度考虑解决这一问题。

e) 卫星通信天线主要工作频段在 HEMP 频段以外, 感应电流很小, 只要有效防止馈线感应电流进入屏蔽仓体, 天线感应电流可以不加防护。

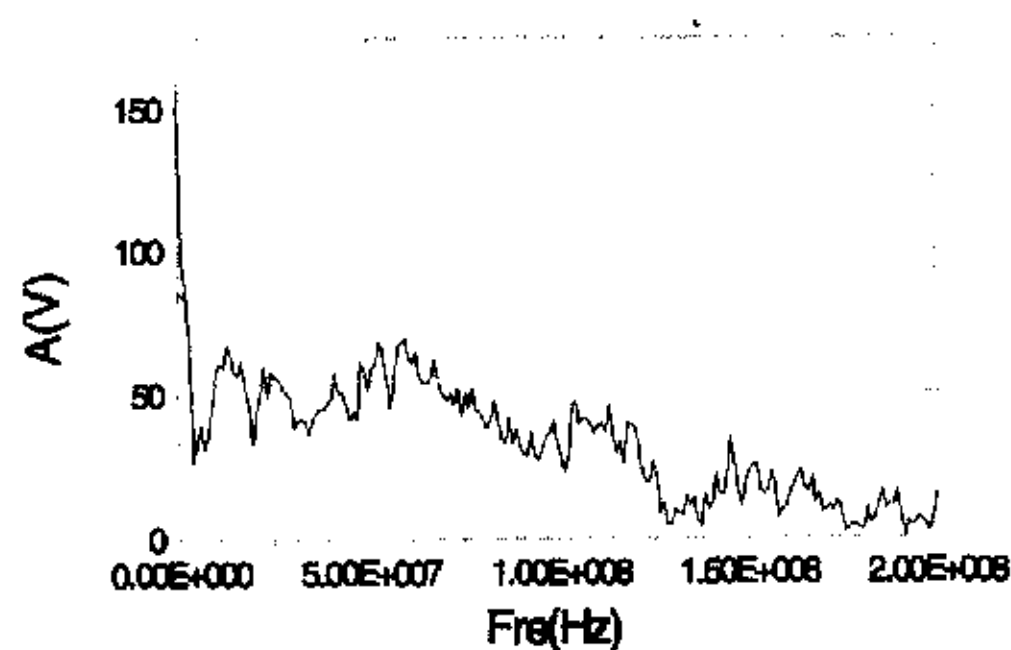


图9 外场频谱

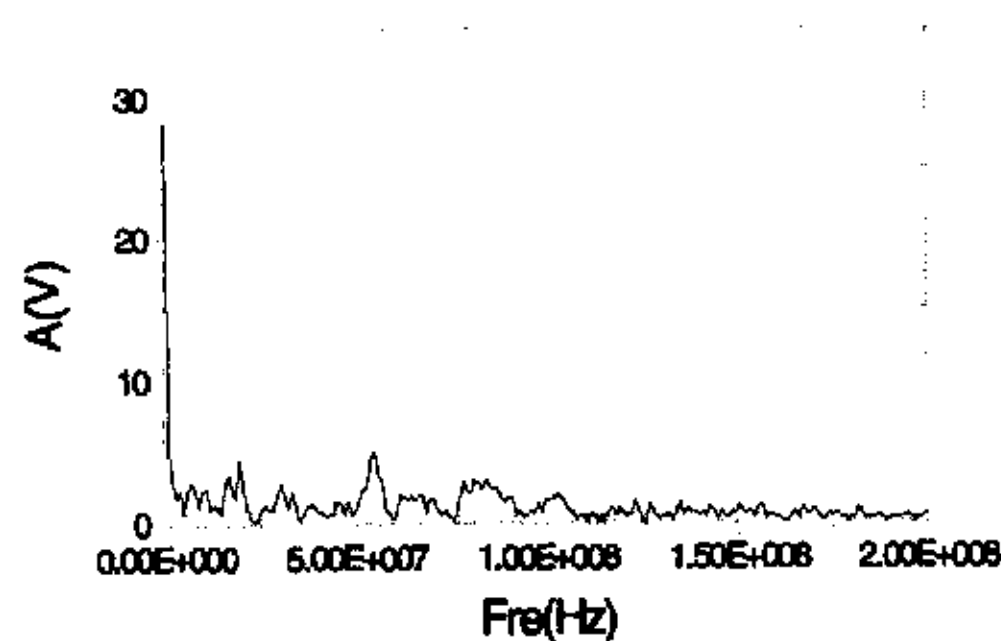


图10 内场频谱

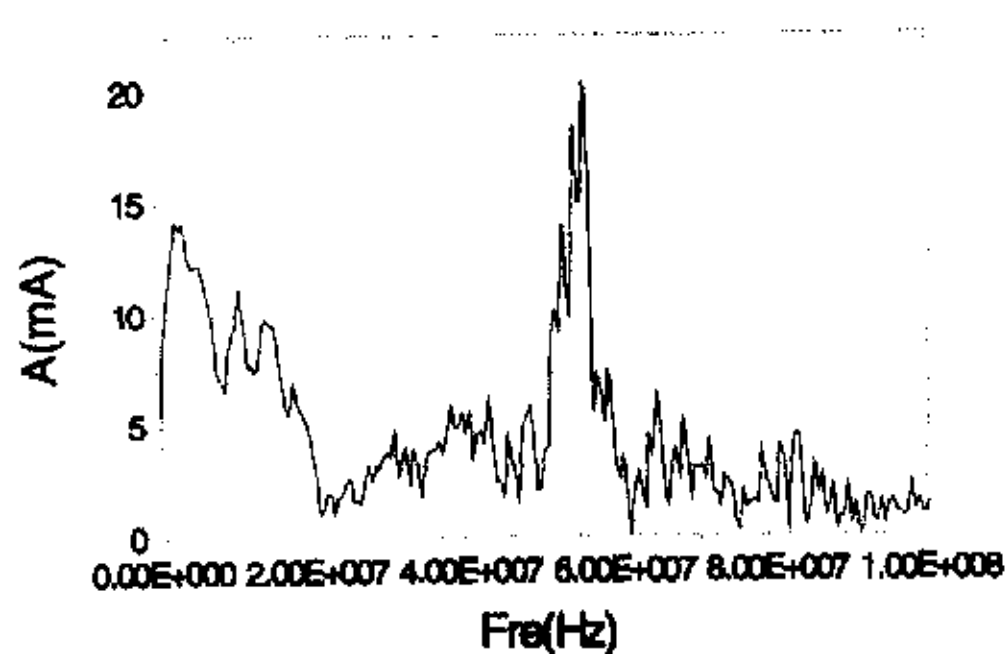


图11 箱内皮电流频谱

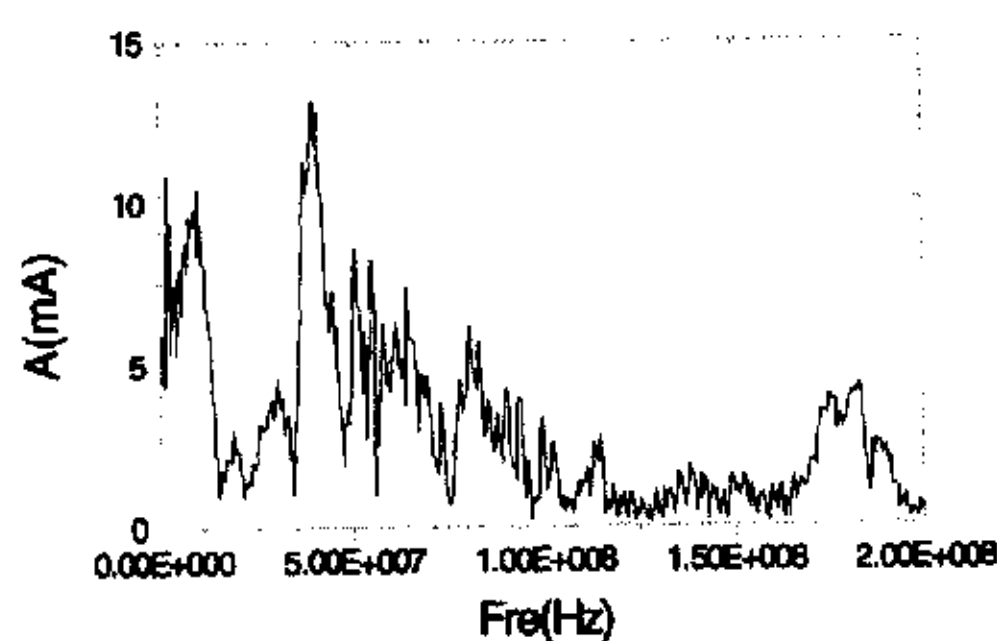


图12 箱内芯电流频谱

参考文献

- [1] 周璧华、陈彬等, 《电磁脉冲及其工程防护》, 国防工业出版社;
- [2] 王坚、李路翔, 《核武器效应及防护》, 北京理工大学出版社

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>