

一种移动式强电磁脉冲干扰模拟试验系统的集成设计研究

赵晓凡, 杜晓琳

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: **目的** 基于地面平台系统对雷达脉冲瞬态等强脉冲干扰环境的适应性试验需求, 研究一种移动式强电磁脉冲干扰模拟试验系统的集成设计方案。**方法** 研究试验系统的基本组成, 对影响试验系统指标的三个关键因素测试距离、发射功率和天线增益进行仿真分析与优化匹配设计。提出工程化的实施方案, 并且完成试验系统的构建集成, 对功率、场强等关键性指标进行实际测试验证。**结果** 脉冲功率放大器的功放在各频点的峰值功率均为 300 kW 以上。所构建的试验系统在 5, 10 m 距离的场强分别大于 5000, 2500 V/m, 达到设计指标要求, 同时也满足移动性、照射区域等试验使用要求。**结论** 该测试平台全面考虑了信号形式、功放输出功率、信号驻波反射、系统匹配等条件, 确保了高场强环境下场强量值分布、辐照区域大小等技术参数。可以准确量化系统测试的技术参数, 明确定义测试条件及执行步骤, 大幅提高了测试的一致性、重复性。同时兼顾考虑了进行军械系统电磁辐射危害(EMRADHAZ)试验的能力。

关键词: 强脉冲干扰; 移动式; 集成设计

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.04.010

中图分类号: TJ86

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)04-0045-06

Integration Design Research of a Moveable Intensive Electromagnetic Pulse Interference Simulation Test System

ZHAO Xiao-fan, DU Xiao-lin

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: Objective Based on the adaptability test requirement of radar pulse transient interference environment for ground platform system, a moveable intensive electromagnetic pulse interference simulation test system is studied. **Methods** System basic composition is studied, and the three key indicators affecting test system including test distance, transmit power and antenna gain are simulated and optimal designed. **Results** The output power of pulse amplifiers are all above 300kW. The field strength of test system is above 5000V/m at 5m distance, 2500V/m at 10m distance. Meanwhile the test system can meet the use requirements of movability and radiation area. **Conclusion** The signal form, output power of amplifier, VSWR, system match indicators of the test system are fully considered to ensure field strength distribution and radiation area. The technical parameters of the test system and the test conditions including implementation steps are accurately defined, and then the consistency and repeatability of test are greatly improved. At the same time, the test system can also be used in electromagnetic radiation hazard test of the ordnance system (EMRADHAZ).

KEY WORDS: intensive pulse interference; moveable; integration design

军用车辆由于其机动的特性和灵活的承载能力,决定了其将面对友邻、敌方各种电磁环境的影响,其中不乏大功率的雷达发射装备、通信发射基站以及电磁脉冲弹、高能微波武器等恶意的电磁打击^[1]。这些干扰源形成的高场强电磁环境对武器装备的战斗力和生命力构成了致命的威胁。其中,雷达瞬态的强脉冲干扰是地面装备面临的主要干扰之一^[2]。开发研制一种移动式强脉冲干扰模拟试验系统,对武器平台进行脉冲峰值电磁辐射效应试验和考核是最接近现实环境的一种检验方式。该试验系统不仅能够完成系统外部电磁环境试验,同时还应具备进行系统级外部电磁环境安全裕度的试验能力。

1 系统组成

移动式强脉冲干扰模拟试验系统是一种可控的(辐射频率、辐射强度、照射时间、照射位置等)外部强电磁干扰环境模拟装置,可以产生一个很高峰值的脉冲电磁场,对大型平台系统进行直接和多角度的照射,并且可以根据要求模拟特定电磁环境条件来检测武器平台系统的响应,以及该响应对系统工作性能的影响。试验模拟装置就是要考核被测系统平台在不同强度电磁场照射条件下是否能够正常工作,并评估系统平台对强电磁场耐受能力的极限值。基于以上要求,该试验装置的系统构成如图1所示。

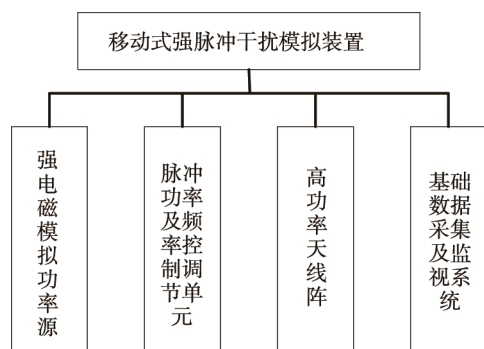


图1 移动式强脉冲干扰模拟试验系统组成

参考 GJB 1389A—2005 中 5.3 节“地面系统的外部电磁环境峰值电场与平均值电场环境”要求^[3],根据地面武器装备重点关注的环境特性,该系统设计集成后要求能够在 800 MHz~1.4 GHz 频率范围内,距辐射天线口面 10 m 处,产生峰值的脉冲场强 ≥ 2500 V/m,平均值场强 ≥ 50 V/m,系统能够对试验过程的峰值电场强度等指标进行实时监测,可对测试场地进行标定。

1.1 瞬态强电磁环境模拟功率源

瞬态强电磁环境模拟功率源通过信号发生器产生一个可设定频率的脉冲调制信号,并通过功率放大

器对该信号进行放大,最终产生数百千瓦的脉冲信号输出。将频率相连的功率源连接,即可产生连续可调频率的大功率脉冲信号。脉冲功率放大器主要由高压电源、调制器及大功率磁控管等部件组成,其中高压电源设计需考虑纹波对放大器输出谐波的影响,需采取必要的滤波措施,同时应附加安全放电装置,避免高压对操作人员的安全造成威胁。脉冲功率放大器的输出信号通过环形器、定向耦合器至馈线输出,可实现对功放的保护及对前向、反向功率的实时监测。瞬态强电磁环境模拟功率源的组成如图2所示。

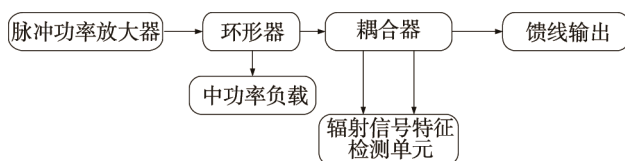


图2 瞬态强电磁环境模拟功率源组成

1.2 脉冲功率及频率控制调节

脉冲功率控制和调节单元用于对脉冲功率放大器的输出功率进行控制,其内部装有可编程序控制器,通过程序控制实现对脉冲功率放大器的输出功率控制,以及通风、预热、高压通断、安全保护、故障指示、电流指示和工作时间指示等重要的辅助功能,如图3所示。

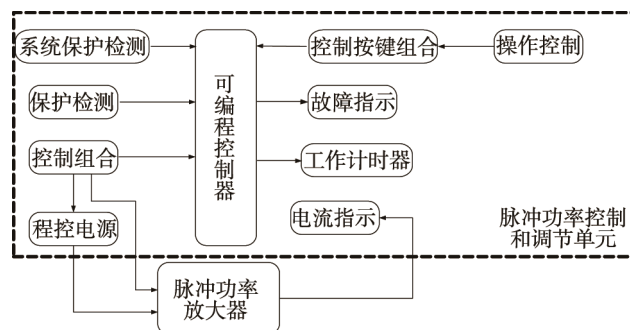


图3 脉冲功率控制和调节单元组成

信号频率控制单元(MFCU)用于对脉冲功率放大器的输出频率进行控制,内置频率跟踪、伺服控制、频率设置、电源控制等功能模块,如图4所示。

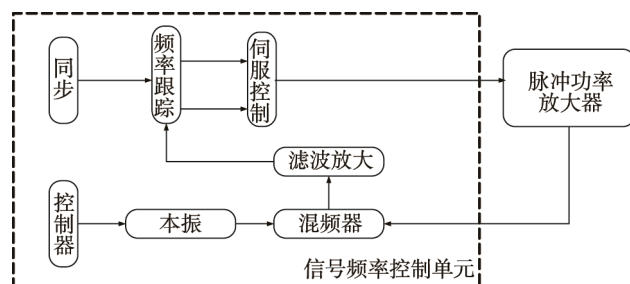


图4 信号频率控制单元组成

1.3 高功率发射天线阵列系统

高功率发射天线阵列系统将大功率的脉冲信号

转化成空间传播的电磁场形式,对受试系统进行照射。由于辐射到空间电磁场的分布形式可以是多种多样,因此可有效地控制电磁场的空间分布形式,以使电磁波在抵达被测体位置时幅度满足设计要求,是该天线系统的主要功能。天线系统的合理设计,是保证系统满足指标及操作要求的要素。

首先根据实际发射机输出功率及传输线损耗,按照实际的传输距离的电场需要,确定达到标准要求所需要的天线最小增益^[4]。进行增益计算时,需考虑天线在整个工作频段内的工作频率。其次根据照射斑点的需要,在满足增益条件的同时,尽量选择较大的照射斑点。最后根据照射距离的限制,对于工作在近场区域的天线进行近场优化,同时保证天线及天线支架的结构适合于移动及外场环境工作需要。

1.4 强电磁环境基础数据采集及监视系统

试验过程中首先对脉冲电磁场的强度和分布进行校准,确定照射区域。强电磁环境基础数据采集单元可以完成对不同环境电磁场如雷达天线辐射场、高强度脉冲辐射场、通讯天线辐射场及空间电磁环境场的测量及场强检测,完成对外场和实验室的电磁场照射区域进行标定或评估。

试验过程中需要强电磁环境监视单元对受试系统的主要参数进行实时监控。强电磁环境监视单元包括直观的音视频传输系统,用于监测受试系统的显示界面及发动机声音等参数。同时也引入总线信号传输模块、传感器信号传输模块,用于对受试系统的信号参数进行精确记录与传输。监视单元本身必须有屏蔽加固设计,应能够耐受强脉冲干扰,信号传输应选择不易受到干扰的光信号,其数量及响应速度等指标应根据受试系统的监控需求来进行配置。

2 系统实现关键因素及仿真分析

该试验系统指标实现的三个关键因素是:测试距离、发射功率和天线增益。这三个关键因素相互制约和最佳匹配决定系统最终辐射效果。试验系统的布置如图5所示。

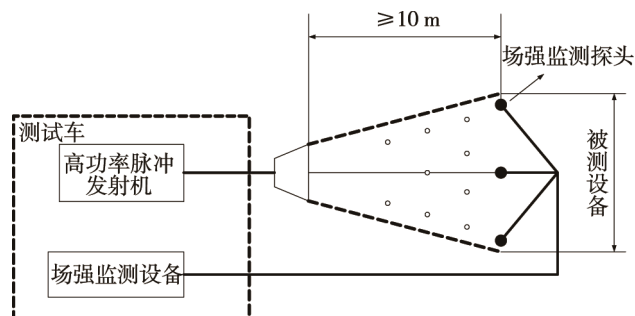


图5 试验布置

2.1 测试距离

测试距离通常和被测体的大小尺寸有关。作为武器系统或平台(飞机、坦克、大型车辆等),由于其巨大的外形尺寸,测试通常需要在外场进行,且被测体和辐射天线应保持一定的距离,以便于测试操作和降低电磁波反射的影响。同时必须有足够大的照射区域(3 dB波束照射区域),才能提高试验效率,达到试验效果。在同样峰值场强的要求下,较大的距离就意味着采用更大的发射功率。当然,较远的测试距离也意味着被测物体更多的部分置于辐射电磁场的主波束之中。

通过仿真得到图6的结果,假设距天线口面5 m处的电场强度为8000 V/m,10 m处的电场强度约为3000 V/m,电场强度和距离的平方成反比,距离越远,电场衰减越大。实际的场强会比计算值更大一些,主要是由于在天线近场区域仿真会产生误差。总的看来,峰值电场强度在距天线口面50 m处已经衰减到很小。从试验安全角度出发,建议至少保证50 m以上(推荐100 m)的测试距离(天线轴线方向)内不要有人员、敏感电子设备等。由于天线方向性较强,两侧的辐射强度很小,因此两侧的安全距离可以相应减少一些。

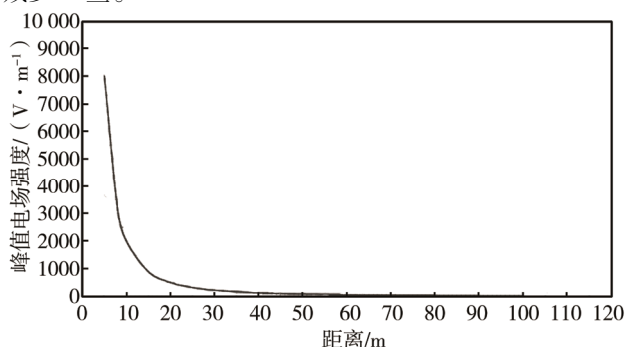


图6 峰值电场强度随距离的衰减曲线

2.2 发射功率

根据测试条件计算出总发射功率需求,选择相应功率输出的放大器。该试验系统的特殊性就是没有商业化宽频带高峰值功率的放大器可供选择,必须依照需求进行定制或者选择实际威胁源。如果选择实装的威胁源,就面临着频段窄,模式单一,辐射频率、功率难以调节等问题,且为实现很宽的频带而选择数十台不同发射功率和工作模式的发射机也是不经济和难以使用的。因此功率放大器的设计在基础频率范围上采用了扩频设计技术,同时重点考虑高集成度设计、功率稳定性设计、谐波分量设计及高可靠性设计等关键因素。

2.3 天线增益

天线是提高辐射电磁场效果的一种重要手段。在

同样的辐射功率和测试距离的前提下,天线增益的提高对于照射强度的提高是非常明显的。当天线增益提高后,天线的主波束宽度变窄,即照射斑点减小,就增加了测试的次数。

2.4 三因素的制约性及匹配

由以上分析可以看出,三个因素是互相制约的,集成设计过程中需要兼顾考虑,找到其中的一个最佳配合方案。

首先外场测试的被测体尺寸较大,结构不规整,位置调整(角度变换)一次比较复杂,为保证对被测体照射面积尽可能大,故需要与辐射天线保持一定的距离。其次由于测试距离的增大,同样的输入功率产生的场强就会降低,为保证尽可能达到更高的场强,采用优化增益的大尺寸天线就是一种比较理想的选择。当然,天线的尺寸也不宜过大,过大尺寸会导致波束宽度变窄,即照射斑点过小,且如果测试距离过大,电磁波传输距离过长损耗过大,即造成能量的浪

费,所以这里把系统的基本测试距离定义为 10 m,这样既可以节省场地又便于试验人员的操作。

2.5 天线阵列的仿真优化

采用高频电磁仿真软件对天线阵列的各主要参数进行了优化仿真(仿真过程略)^[5-8],结果如图 7、图 8 所示。

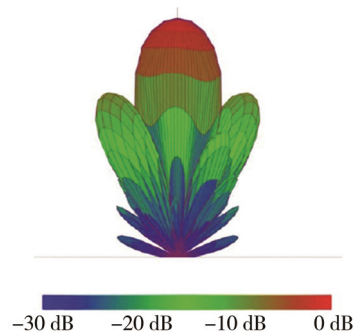


图 7 天线阵列的增益、波瓣三维仿真

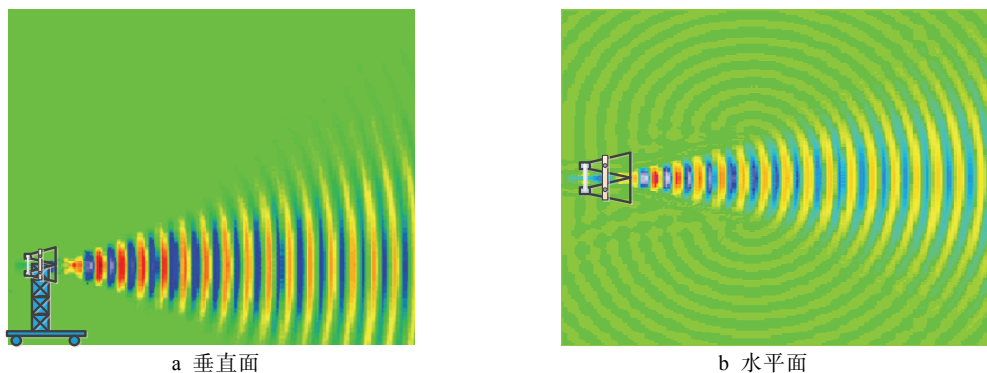


图 8 天线阵列发射相关参数仿真结果

3 系统集成基本设计方案

外场测试主要应用于体积庞大的武器系统平台,如主战坦克、装甲和通讯车辆、直升机等。此类测试需要在一个环境比较开阔的场地来进行。这样的测试场可能是在郊外、基地或远离城市的地方,同时考虑安全性和操作的方便性,要求试验系统能够放置在车载的方舱中,便于设备的长距离运输和现场的实验开展,相当于一个移动的实验室。因此从工程实用的角度分析,在系统集成设计过程中需要重点考虑以下因素。

1) 产生可控的试验环境。在系统覆盖的频率范围内,高强度脉冲波射频电磁干扰环境的模拟实验装置能够产生特定的强辐射电磁环境,其中测试频点、步进、脉冲功率幅度、测试距离、照射时间等参数都可以根据要求由操作人员进行调整,以模拟实际的电磁环境。通过各种检测和测量装置对被检测系统的响应进行测量和监视,进一步考核和评估该响应对系统工作性能的影响。

2) 独立工作可移动的测试平台。试验平台搭载在车辆底盘的屏蔽测试方舱内,将根据工作频段需要确定屏蔽方舱的数量。每个测试方舱都是一个独立的、可移动的测试平台。

3) 高度集成化模块化,独立进行。每个屏蔽方舱测试平台内部装有高功率脉冲发射机,以及相应的控制设备、检测仪器和监测设备,并且配有操作控制舱。操作人员可以在舱内完成对该频段的发射机控制、试验操作、以及被测系统平台监测的试验任务,即每个频段的测试工作由相应的测试平台完成。

4) 屏蔽方舱设计适于外场测试。考虑到试验主要以外场测试(即露天试验场)为主,所有的仪器设备都可以放置于方舱内部,便于长途运输和试验展开。方舱采用屏蔽设计^[9],降低大功率辐射源产生的电磁场对测试仪器设备的干扰,同时保证了测试和试验人员的安全,免于遭受有危害的电磁辐射照射^[10]。

5) 高功率集成辐射天线,照射效果更好。根据测试频段的不同,每个测试车都配有单独的经过优化

的辐射天线系统。根据工作频率、发射机输出功率、测试距离等参数对天线的尺寸和增益进行了优化设计, 确保对被测系统照射的效果最佳。

6) 可多频段、多角度同时照射。由于每个测试移动都是一个独立的工作站, 既可以单独工作, 对被测系统平台进行单频点多位置照射, 又可以几个测试平台同时工作, 对被测系统进行多频点、多角度同时照射, 模拟战场复杂的电磁环境^[11], 如图 9 所示。

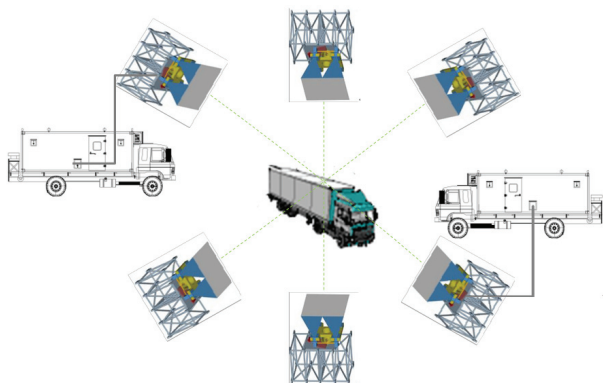


图 9 全方位多角度电磁辐照试验

4 测试结果

4.1 功率放大器输出功率

通过脉冲功率计对脉冲功率放大器的定向耦合器前向功率输出值进行测量, 根据定向耦合器耦合度的计量值可计算出脉冲功率放大器的输出峰值功率。

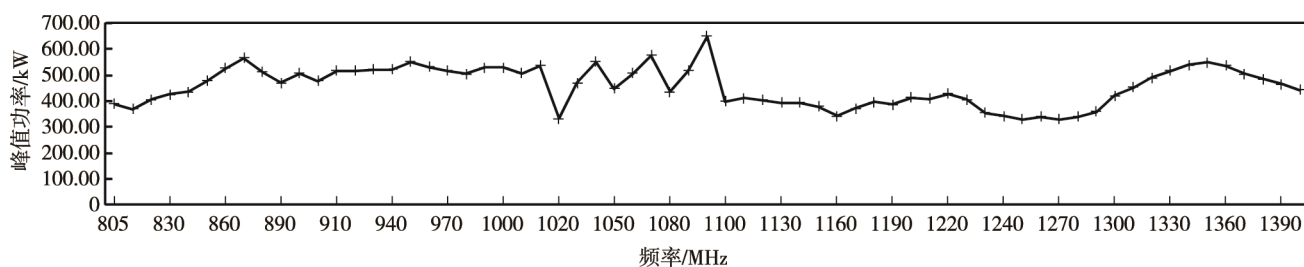


图 10 脉冲功率放大器输出峰值功率

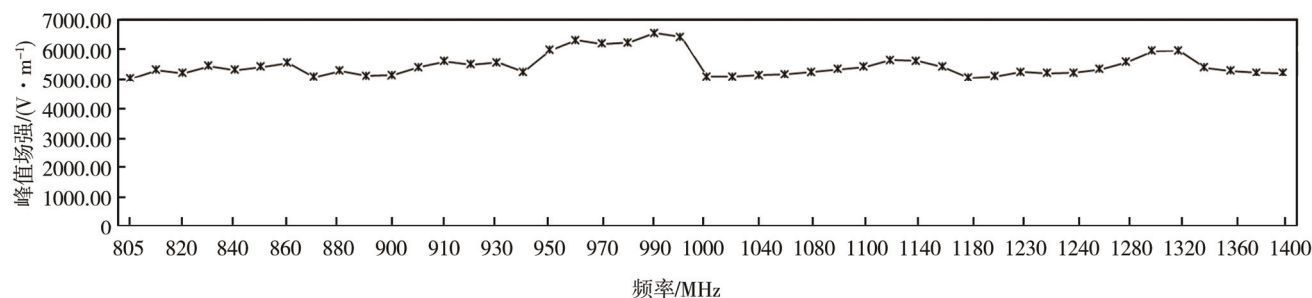


图 11 5 m 距离处峰值场强测试结果

经测试所得各频点的输出峰值功率如图 10 所示, 功放在各频点的峰值功率均为 300 kW 以上。

4.2 5 m 距离辐射电场强度

将脉冲功率放大器设置为额定功率输出, 将峰值场强探头放置于距离天线口面 5 m 处, 正对天线辐照中心位置, 在方舱内通过场强仪读取各个频点的峰值场强。经测试所得各频点的峰值场强如图 11 所示, 各频点峰值场强均大于 5000 V/m。

4.3 10 m 距离辐射电场强度

将脉冲功率放大器设置为额定功率输出, 将峰值场强探头放置于距离天线口面 10 m, 正对天线辐照中心位置, 在方舱内通过场强仪读取各个频点的峰值场强。经测试所得各频点的峰值场强如图 12 所示, 各频点峰值场强均大于 2500 V/m。

4.4 辐射照射区域

地面平台系统级装备具有体积大、结构复杂等特点, 试验装置可产生辐射照射区域的大小是重要指标。通过实际测试, 在满足最大辐射场强 ≥ 2500 V/m (Peak)条件下, 与天线口面平行面的 3 dB 波束照射区域 (即边界为能够达到中心场强的 0.707 倍的照射区域), 在距离 10 m 距离辐照区域可达 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$; 在距离 15 m 处, 辐照区域可达 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$; 在距离 20 m 处, 辐照区域可达 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 达到设计指标的要求。这些测量数据能够为试验距离、位置、场强等参数的选择提供参考, 为实现大型装备的全面辐照试验评估奠定基础。

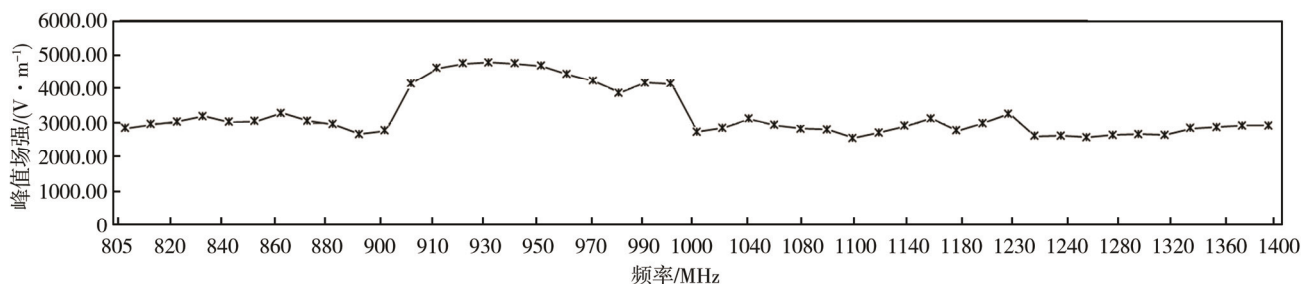


图 12 10 m 距离处峰值场强测试结果

5 结语

文中介绍了一种移动式强脉冲干扰模拟试验系统的设计方案,可用于在外场进行整车级全方位辐照试验。该测试平台全面考虑了信号形式、天线输出功率、信号驻波反射、系统匹配等条件,确保了高场强环境下功放输出功率、场强量值分布、辐照区域大小等技术参数。通过对场强与频率关联控制技术的研究,可以准确量化系统测试的技术参数,明确定义测试条件及执行步骤,大幅提高了测试的一致性、重复性,有利于大型武器装备平台的测试敏感度判定、测试结果评估、整改验证。同时,该系统兼顾考虑了进行军械系统电磁辐射危害(EMRADHAZ)试验的能力,具备了开展电磁辐射对人员的危害(HERP)、电磁辐射对燃油的危害(HERF)、电磁辐射对军械的危害(HERO)试验^[12-14]、高强度辐射场(HIRF)^[15]评估的基础条件。

参考文献:

- [1] 刘尚合. 电磁环境效应及其发展趋势[J]. 国防科技, 2008(1): 1—6.
- [2] 夏明飞, 马飒飒, 夏明旗. 通用雷达装备电磁环境效应评估及其防护技术[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(12): 145—147.
- [3] GJB 1389A—2005, 系统电磁兼容性要求[S].
- [4] 薛正辉. 阵列天线分析与综合[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [5] 张祖稷. 雷达天线技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [6] JOHN D K. 天线 [M]. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [7] KELLEY D F, STUTZMAN W L. Array Antenna Pattern Modeling Methods that Include Mutual Coupling Effects[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1993, 41(12): 1625—1632.
- [8] 刘庆刚, 张光生. 阵列天线仿真研究[J]. 通信对抗, 2012(2): 49—51.
- [9] 周运福, 曾阳, 李舜. 60 dB 电磁屏蔽方舱设计[J]. 军民两用技术与产品, 2016(16): 131—132.
- [10] 屈明玥, 廖远祥. 军事作业环境电磁辐射的健康危害与对策[J]. 解放军预防医学杂志, 2016, 34(4): 592—593.
- [11] 张世巍, 赵晓凡. 军用车辆外部射频干扰试验测试技术研究[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(1): 7—13.
- [12] DEFSTAN 59-411/4, Electromagnetic Compatibility[S].
- [13] MIL-HDBK-237, Electromagnetic Environmental Effects and Spectrum Supportability Guidance for the Acquisition Process[S].
- [14] MIL-STD-464, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems[S].
- [15] DO-160, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment[S].