

文章编号: 2095-4980(2018)06-1033-06

整机级 HIRF 仿真验证测试方案及测试自动化

钟龙权^{1a,1b}, 赵刚^{1a,1b}, 马弘舸^{1a,1b}, 鲍献丰^{1a,1d,2}, 李瀚宇^{1a,1d,2},
吴双^{1a,1b}, 刘璐瑶^{1b,1d}, 吴欢成^{1b,1d}

(1.中国工程物理研究院 a.复杂电磁环境重点实验室; b.应用电子学研究所; c.研究生院, 四川 绵阳 621999;
d.高性能数值模拟软件中心, 北京 100088; 2.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要:高强度辐射场(HIRF)防护逐渐受到重视,并成为飞机设计和机载设备装机的必要条件。其中,整机 HIRF 电磁耦合仿真及低电平耦合测试验证是飞机 HIRF 安全性验证的最重要途径。数值模拟中为节约计算资源,采用了平面波/球面波、归一化输入等理想条件。介绍了与仿真条件可比拟的验证测试方案设计过程,包括测试系统组成、测试参数选择及测试条件设置;并阐述了保证测试准确性前提下收发系统的自动化测试策略及实现。实验表明,该测试系统及方案有效满足了整机 HIRF 仿真的验证测试需求,仪器控制及测试自动化大大提高了验证测试效率。

关键词:校验测试;方案设计;测试自动化;高强辐射场;整机级

中图分类号: TN03

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.1033

Verification test planning and test automation to HIRF simulation of aircraft-level

ZHONG Longquan^{1a,1b}, ZHAO Gang^{1a,1b}, MA Hongge^{1a,1b}, BAO Xianfeng^{1a,1d,2}, LI Hanyu^{1a,1d,2},
WU Shuang^{1a,1b}, LIU Luyao^{1b,1d}, WU Huancheng^{1b,1d}

(1a.Complicated Electromagnetic Environment Laboratory; 1b.Institute of Applied Electronics; 1c.Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China; 1d.Software Center for High Performance Numerical Simulation, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China; 2.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: High Intensity Radiation Field(HIRF) has attracted more and more attention and has become a necessary condition for aircraft design and equipment installation. Aircraft-level electromagnetic coupling simulation and low-level coupling test is one of the most important routes. As for economizing computation resource, ideal approximation conditions are chosen, such as plane wave or spherical wave, normalization conditions, et al. The procedure of test planning of verification is introduced, including system makeup, the choice of test parameters and setup of test conditions. The strategy of test automation and its realization are specified. Results show that the requirement of verification test is fulfilled, and the test efficiency is greatly improved.

Keywords: verification test; planning; test automation; High Intensity Radiation Field; aircraft-level

随着高强度辐射场(HIRF)环境越来越严酷,现代飞机安全飞行和降落功能对电子/电气系统依赖性越来越强,飞机复合材料的广泛应用也同时降低了电磁屏蔽效能等因素,使得高强度电磁辐射已成为影响飞机安全性的一个重要因素。美国、欧洲和中国先后将 HIRF 安全性合格审定纳入航空器的适航认证流程^[1-3],通过 HIRF 安全性验证已成为机载设备装机和飞机适航取证的必要条件。

1 HIRF 符合性验证方法

方法论上,HIRF安全性符合验证流程是依据分类、分级、分步骤完成的。在对象上将民航飞机分为固定翼飞机、旋翼飞机、小型飞机等类型;根据飞机上的电子/电气设备功能及重要性不同,分为A级、B级和C级3个等

级。其中A级系统指其执行的功能失效将妨碍飞机继续安全飞行和着陆,可引起灾难性后果,使飞行机组致命或丧失能力,并造成多名乘客死亡;B级和C级的重要性和影响依次降低。3个级别的设备需完成的验证项目及流程不尽相同,A级系统流程最全面。A级系统HIRF防护符合性验证路线^[2]如图1所示。

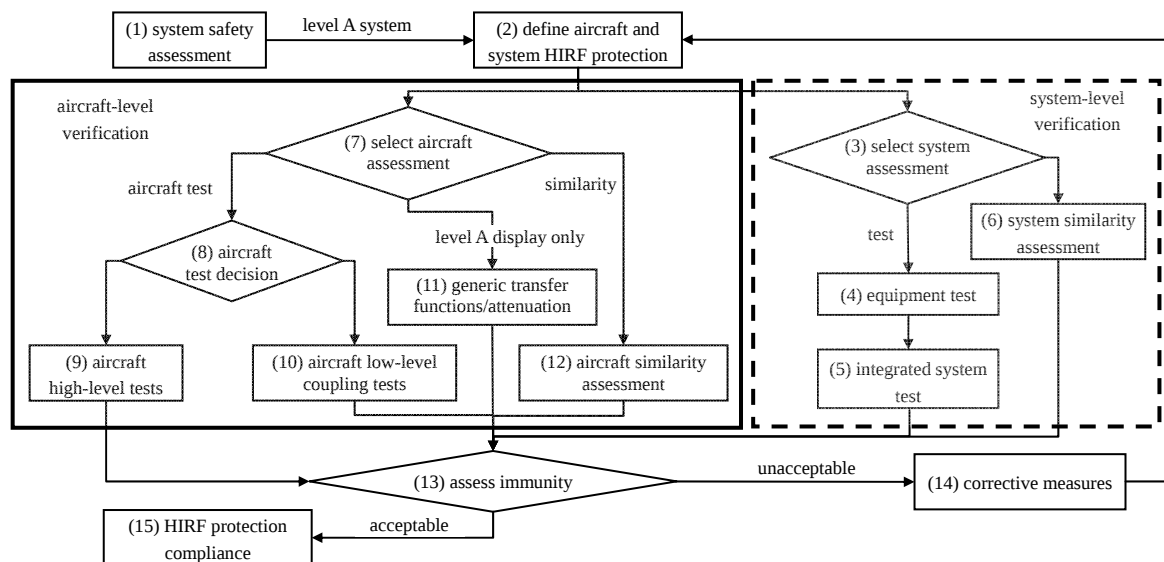


Fig.1 Routes to compliance for level-A system
图 1 A 级系统 HIRF 防护符合性验证路线

图 1 中, A 级系统有系统级和飞机级验证 2 条路线, 其中实线框内为飞机级验证, 虚线框内为系统级验证。对于 A 级系统必需完成设备级、系统级及飞机级试验, 即 A 级系统既要开展图 1 中系统级也要开展飞机级试验。B 级、C 级机上电子系统只需完成设备级试验, 但为增强系统的可信度, 也可进行相应的系统级试验。设备级试验直接参照 DO160^[4]或 ED14 标准执行, 其中“射频敏感度”章节详细规定了辐照及注入试验程序和要求。针对系统级试验和飞机级试验, 美欧出台了相应的指南, 如 ARP5583A 等, 有一定的指导性。

图 1 中系统级验证和飞机级验证中的相似性分析方法一般用于飞机的改进/改型, 是原飞机/系统先前就已获得 HIRF 合格审定认可才适用, 分析时只需评估先前获合格审定的飞机/系统与新飞机/系统之间的差异。如只有细微的差别, 则不需要额外的试验。如果评估后差异影响有不确定性, 则应进行额外的试验和分析。但如果差异显著, 相似性方法不能作为飞机/系统级验证的基础。针对新研制系统或飞机, 则必须开展系统级和飞机级实验。因飞机级实验系统复杂, 对实验场地及设备都有较高要求, 且实验条件较为严苛, 成本非常高, 目前仅美国和欧洲具备全系统能力和资质。我国仅有一些设备级的 HIRF 实验能力, 尚无专业的全项 HIRF 实验室, 实验能力也较为欠缺。同时, 仿真分析作为 HIRF 验证的重要辅助手段^[5-7], 不仅可以在飞机设计初期分析飞机结构的耦合作用, 发现设计的不足之处并及时优化, 同时在实验验证阶段也可以分析场分布及能量聚集区域, 进行更为细致的数据分析等, 弥补试验参数的有限性及不足。

重点实验室根据已有大型并行计算能力及大型暗室等实验条件, 开展某型飞机的电磁耦合仿真分析和低电平验证测试, 探索实践整机级 HIRF 安全性验证路线, 为积累完善 HIRF 测试能力奠定基础。由于是探索式研究, 与 HIRF 验证的宽频段和多状态相比, 仅开展了部分频段、部分状态的仿真及测试验证。

2 整机级 HIRF 仿真

通过激光测绘系统完成对飞机的可计算建模, 几何模型如图 2 所示。模型包含主要舱段及大量精细结构、模型组件化封装, 并根据部件位置、材料拆分成多个几何实体, 仿真时设置相应的电磁材料参数。采用万核级并行计算能力的 JEMS-FDTD 软件开展数值模拟^[8], 针对飞机整机这种典型的电大尺寸平台级目标的电磁辐射、传输、耦合、散射等问题, 通过精确建模及全波电磁模拟获取时域近场和远场电磁信息。

考虑到验证测试的可实现性, 同时权衡仿真计算的精确度和效率, 仿真时设计了球面波等效源激励方法, 入射条件设置为 0~3 GHz 调制高斯脉冲, 覆盖 1~2.5 GHz 的测试频率范围, 电场强度归一化处理。入射方向、角度、极化方向、场监测点等与验证测试一致。计算时采用 5~10 mm 空间步长, 网格数约 15 亿, 96 CPU 核完成计算。

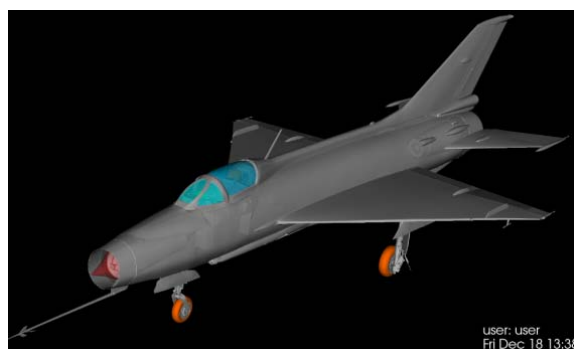


Fig.2 View of aircraft model
图 2 飞机模型示意图

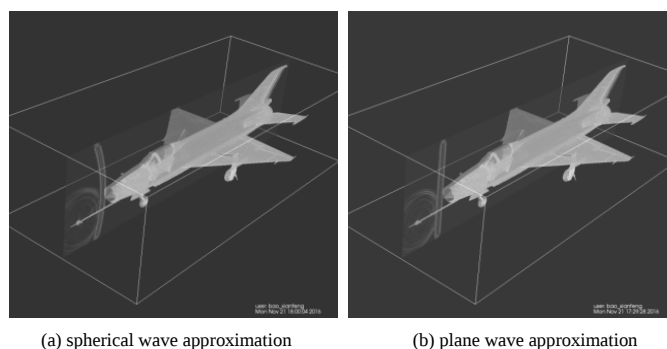


Fig.3 Time domain electric field distribution
图 3 时域电场分布

图 3 给出了迎机头方向正面入射、水平极化下平面波及球面波条件下仿真得到的时域电场分布。球面波近似中理想点源位置参照天线布设位置设置。由图 3 可见, 2 种近似条件下的时域电场分布存在较大差异, 天线近场效应显著。

3 验证测试方案设计

飞机级 HIRF 测试是 A 级系统必不可少的环节, 但飞机级 HIRF 测试并没有严格的测试标准可以依循。图 1 中飞机级高电平测试(步骤 9)是指直接产生能够覆盖飞机整机、且满足 HIRF 环境要求的电磁场的方式进行飞机级电子/电气设备的试验^[9]。这种方法最直接有效, 但对实验的发射、接收、监测等系统要求也最高, 各分系统协同复杂, 成本最高。而且由于放大器的限制, 目前仅能开展较小尺寸飞机对象(如旋翼飞机、小型机等)在一定频段范围内的整机高电平测试验证。通常针对更大尺寸的固定翼飞机, 或者全频段的飞机级测试时, 采用低电平耦合测试(步骤 10)方法, 包括注入、扫频电场、扫频电流等。如文献[10]介绍了针对 A380 飞机的低频 HIRF 传输函数测量, 获得飞机舱室电磁耦合传输曲线, 根据外部环境计算得到设备级验证所需的电平, 再依托设备级测试结果进行验证。本文介绍整机级低电平扫频电场法对飞机驾驶舱等部位进行仿真校验测试的方案设计过程。

3.1 验证测试布局及系统组成

在大型微波暗室($60\text{ m} \times 35\text{ m} \times 20\text{ m}$)内转台(直径 8 m , 旋转 360° 范围内方位精确度 0.1°)上, 水平静止停放该型飞机, 周围铺设吸波材料; 暗室中间布设发射天线及放大器, 场接收探头置于飞机内外的监测点, 总体控制及数据存储均在暗室旁的屏蔽间内, 实验测试布局如图 4 所示。

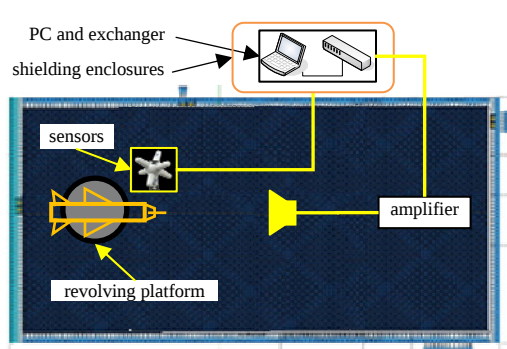


Fig.4 Schematic diagram of aircraft level test layout
图 4 飞机级测试布局示意图

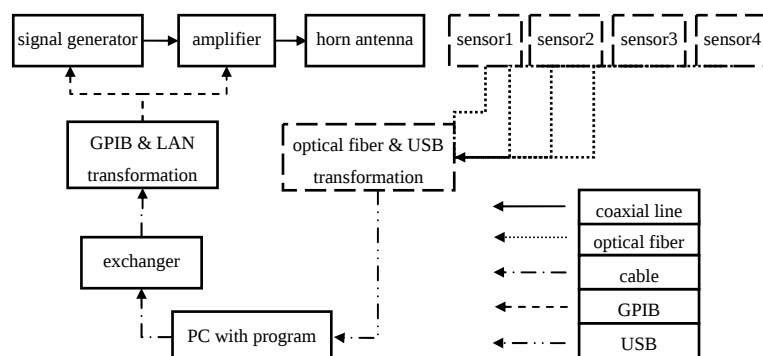


Fig.5 Set-up of aircraft level test system
图 5 飞机级测试系统连接框图

场发射系统由信号源、功率放大器、大功率发射天线组成, 其中功放及天线置于暗室内, 控制台在暗室外的屏蔽间内。接收系统主要由 4 个各向同性的场探头与计算机软件组成, 探头将接收的场信息直接转化为数字光信号, 通过光纤传输至光电转换, 再接入计算机读取显示及记录, 系统连接框图如图 5 所示。目前以 4 个场探头组成阵列测试系统, 在同一次电磁波辐照中可以同时采集 4 个监测位置的场信息, 提高了测试效率; 现有条件下若通过进一步扩展, 该阵列测试系统可以支持数十支场探头同时进行测试, 达到更高的并行测试效率。

3.2 发射系统参数及场监测点设置

DO160 标准中可以用连续波或调制方波脉冲辐照, 本系统测试时采用单频点连续波发射^[4], 数据采集完成后跳至下一频率发射。测试发射频点依据 DO160F 中 10 倍频范围内对数均匀地取 100 个频点的规则确定, 在测试的 1.0~2.5 GHz 范围内确定了 41 个频点。每个频点发射功率均校准为 800 W, 场探头工作范围为 0.5~500 V/m, 实际接收场强范围在 2~400 V/m, 接收动态范围达到 46 dB。

场监测点的设置主要根据机载设备的重要性及安装位置设置, 本次试验以无线电高度表、罗盘、收发信机等导航通信电子仪表为参考对象, 在驾驶舱、设备舱、起落架舱等区域设置 40 个场监测点, 电磁耦合数值仿真时的场监测点设置与测试方案一致。

3.3 发射天线布局设计

实验系统中发射天线的布设至关重要, 一方面若天线距离受试飞机太远, 则照射到探头位置处的场较小, 接收动态范围减小, 特殊位置可能接收不到; 另一方面若发射天线距离飞机太近, 则与平面波/球面波近似条件差异较大, 且较近时天线 3 dB 波束覆盖范围较小, 不能覆盖所关心的飞机区域或部位。结合天线波束角计算得到 14 m 是较为合理的距离, 因此在飞机机身中轴线的水平面上, 机头方向入射时在距飞机中心 14 m 的位置放置发射天线, 能够将翼展范围置于天线 3 dB 覆盖区域, 目标位置场强估算也满足测试动态范围要求, 如图 6(a)所示; 同理, 机翼方向入射(与机头方向垂直)时, 若天线 3 dB 范围覆盖整机, 则距离较远不能满足接收动态范围要求, 最终侧面天线布设以驾驶舱位置为中心, 3 dB 范围覆盖所有监测点, 距离飞机中轴线 12 m, 如图 6(b)所示。指南中还有其他入射方向的要求, 如与飞机中心线呈 45°方向入射等, 设计思路类似, 本文由于是飞机级验证测试方法探索, 未考虑。垂直面入射角度设置 0°和-5°两个参数, 水平 0°入射与指南要求一致, -5°入射作为验证测试环境对比项设置, 如图 6(c)所示。

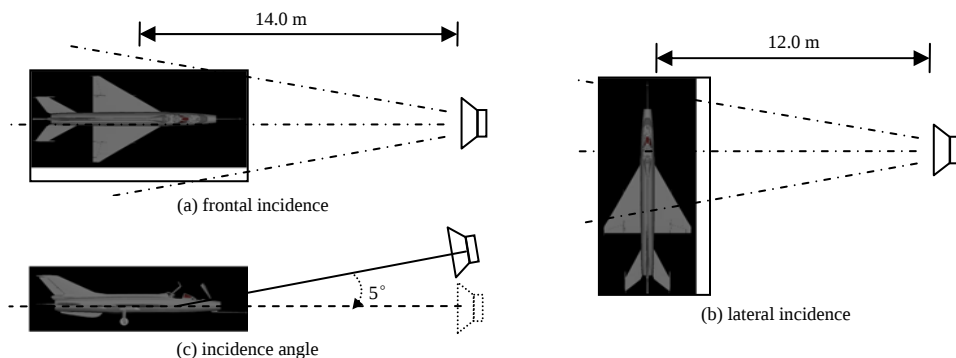


Fig.6 Schematic diagram of transmitting antenna set-up in aircraft level test
图 6 飞机级测试发射天线布设示意图

至此, 探索性的飞机级 HIRF 低电平耦合场扫频测试系统及方案基本确立。为获得传输耦合曲线, 还需在相同布设及参数条件下, 测试没有飞机状态下的监测点场强作为对比项。此外, 电场强度归一化的仿真结果校验时也需要测试数据归一化, 因此, 相同状态参数条件下无飞机时的本底测试必不可少。

4 自动化测试

从以上测试方案可知, 即使是探索性的飞机级测试, 其测试工作量也非常巨大。以 41 个频点、40 个场监测点, 2 个人射角度, 2 个人射方向, 2 个天线极化方向, 有/无飞机 2 种状态为例, 若每个数据重复测量 5 次, 则数据量达 13 万余条。因此实现收发系统所有设备的远程通信控制及自动化测试显得尤为重要, 包括自动数据采集记录和测试参数自动跳转等, 一方面可以提高测试准确性, 另一方面可以大大提高测试效率。

4.1 数据采集准确性

数据采集准确性指在已有收发系统硬件条件下, 通过数据采集时序、重复采集次数等控制策略, 尽可能减小测试误差。主要考虑以下 3 点: 首先, 需要对微波信号源和放大器组成的发射系统进行自动校准, 并存储校准数据; 其次, 布设在监测点的场探头需要发射开始后等待一定时间, 即辐射场达到稳态后再开始采集数据, 这个时间设置为 2 s; 最后, 在每个频点及状态采集 5 次测量结果并做平均, 记为该频点状态下的最终值。

4.2 自动测试及程序

整个收发系统自动测试控制流程如图 7 所示。微波信号源和放大器读入校准数据后定功率连续波输出, 2 s 后探头阵列开始采集, 数据自动记录并计数, 当完成 5 次采集要求后关闭发射, 进行平均值计算并存储结果, 1 s 后跳转至下一频率继续测试直至结束。利用程序语言编制自动控制程序, 实现上述过程。通常在 10 min 内可完成一组测试, 包括 4 个监测点(探头)、41 个频率的数据采集。

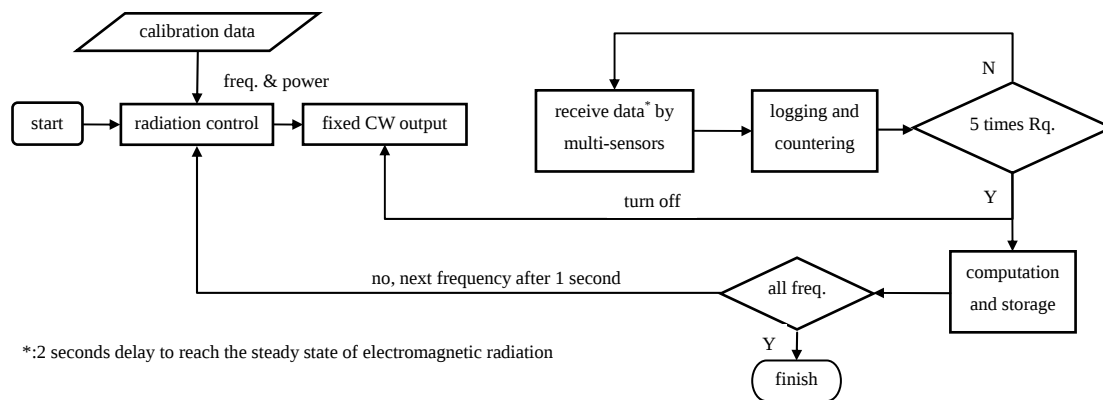


Fig.7 Flow chart of transmitting and receiving system auto control

图 7 收发系统自动控制流程

下一步计划利用编程语言和相关硬件^[11]开发一套 HIRF 低电平耦合测试自动化软件测试平台, 对整机级飞机 HIRF 低电平耦合测试的场信号及耦合电流等数据进行采集、计算及分析, 从而进一步提高测试效率, 更好地展示测试数据及结果, 使自动化测试在 HIRF 测试中具有更高的实际意义和价值。

5 试验验证

经探索性飞机级 HIRF 低电平扫频场强测试验证, 收发测试系统简洁高效, 天线布设合理, 测试接收场强动态范围超过 46 dB, 基本满足试验需求。数据采集策略保证了测试准确性, 同一状态条件下单频点接收场强一致性较高, 通常 5 次重复采集数据中最大最小值之差不超过 0.1 V/m。自动化测试实现了收发系统的远程控制、自动数据采集记录及计算, 加上 4 个探头组成的阵列测试, 大大提高了测试效率。

后续试验测试结果与仿真结果校验对比, 并应用特征选择评估方法, 得到与欧洲 HIRF-SE 项目评估 C-295 型飞机 HIRF 环境适应性的仿真-测试数据一致性等级一致^[12-13]。充分说明了仿真结果的可指导性、试验测试结果的正确性。

在收发系统频率扩展情况下, 加之更全面的参数状态设置, 实验室初步具备 1~18 GHz 飞机级低电平扫频电场法试验能力。

6 结论

分析了 A 级系统的 HIRF 符合性验证方法, 完成了探索性飞机级 HIRF 低电平扫频场强法测试方案设计, 建立了大功率测试系统, 实现了收发系统远程控制及自动控制程序。经后续工作检验, 证明了方案的合理性、结果的正确性和测试的高效性。

参考文献:

- [1] ARP 5583A-2010. Guide to certification of aircraft in a High Intensity Radiated Field(HIRF) environment[S]. 2010.
- [2] AC 20.158. The certification of aircraft electrical and electronic systems for operation in HIRF environment[Z]. U.S. Department of Transportation,FAA, 2007(07):30.
- [3] CCAR-25-R4 中国民用航空规章第 25 部 运输类飞机适航标准[S]. 2011(4):241-242. (CCAR-25-R4 PART 25, Airworthiness standard for transport aircraft[S]. 2011(4):241-242.)
- [4] RTCA/DO-160F. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment[S]. 2007.
- [5] PERALA R,ELLIOTT J. Numerical simulations for HIRF certification benefits and challenges[C]// Proc. EUROEM. Toulouse, France:[s.n.], 2012.

- [6] 章光灿. 民用飞机高强度辐射场(HIRF)防护适航验证方法研究[J]. 科技视界, 2016(6):97-98. (ZHANG Guangcan. Research on airworthiness verification means for HIRF protection[J]. Science & Technology Vision, 2016(6):97-98.)
- [7] 高伟,梁子长,高鹏程. 舱室内 HIRF 场强快速仿真与检验检测研究[J]. 制导与引信, 2014,35(3):38-41. (GAO Wei, LIANG Zichang,GAO Pengcheng. Fast simulation of HIRF effects in aircraft cabin and measurement research[J]. Guidance & Fuze, 2014,35(3):38-41.)
- [8] 鲍献丰,李瀚宇,伍月千,等. JEMS-FDTD 软件在飞机 HIRF 仿真中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2017,29(10):67-70. (BAO Xianfeng,LI Hanyu,WU Yueqian,et al. Application of JEMS-FDTD in HIRF simulation on a real aircraft[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017,29(10):67-70.)
- [9] 苏多,栗牧怀,舒小华. 民用航空器 HIRF 防护适航验证方法和审定政策研究[J]. 国际航空, 2009(10):72-75. (SU Duo, LI Muhuai,SHU Xiaohua. Research on regulations and compliance means for HIRF protection[J]. International Aviation, 2009(10):72-75.)
- [10] LEMAIRE D,GARRIDO F. A unified approach for lightening and low frequencies HIRF transfer functions measurements on A380[C]// Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. Athens,Greece:[s.n.], 2009:1-4.
- [11] 卢航,高峰,程刚. LabVIEW 现场可编程门阵列模块数据采集系统仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6):977-980. (LU Hang,GAO Feng,CHENG Gang. Data acquisition system simulation based on LabVIEW FPGA module[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):977-980.)
- [12] European Commission. HIRF-SE[EB/OL]. [2016-05-10]. <http://www.hirf-se.eu>.
- [13] GUTIERREZ G G,ALVAREZ J,PASCUAL-GIL E,et al. HIRF virtual testing on the C-295 aircraft:on the application of a pass/fail criterion and the FSV method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014,56(4):854-863.

作者简介:



钟龙权(1985-),男,四川省中江县人,助理研究员,主要研究方向为微波效应、复杂电磁环境效应与防护.email:zhonglq_iae@caep.cn.

赵刚(1981-),男,四川省绵阳市人,副研究员,主要研究方向为微波效应、复杂电磁环境效应与防护.

马弘舸(1973-),男,四川省绵阳市人,研究员,主要研究方向为强电磁脉冲效应,复杂电磁环境相关技术.

李瀚宇(1983-),男,四川省资阳市人,副研究员,主要研究方向为高性能电磁计算.

吴欢成(1991-),男,武汉市人,硕士,主要从事强电磁脉冲效应与防护技术研究.

鲍献丰(1987-),男,浙江省海宁市人,助理研究员,主要研究方向为高性能电磁计算.

吴双(1992-),男,四川省绵阳市人,工程师,主要研究方向为微波效应实验技术.

刘璐瑶(1992-),女,四川省绵阳市人,在读硕士研究生,主要从事高功率微波效应、统计电磁学研究.

(上接第 1026 页)

作者简介:



李爽爽(1991-),女,山东省枣庄市人,硕士,助理工程师,主要从事雷达信号处理与数据处理.email:575958745@qq.com.

王志诚(1983-),男,江苏省无锡市人,硕士,高级工程师,主要从事雷达总体设计.

肖金国(1987-),男,山东省潍坊市人,硕士,助理工程师,主要从事雷达目标检测识别处理.

李芬(1991-),女,山东省聊城市人,硕士,助理工程师,主要从事雷达波控设计.

李梦妍(1992-),女,江苏省沭阳县人,硕士,助理工程师,主要从事雷达目标信号处理.

李鸿志(1990-),女,浙江省诸暨市人,硕士,助理工程师,主要从事雷达目标检测识别处理.