

# 复杂环境下主导干扰来源快速诊断方法

倪子楠, 张 榕, 石海然, 陈腾博, 李俊珊

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 随着装备系统中电子设备的频带日益加宽, 功率逐渐增大, 灵敏度也不断提高, 各种电磁敏感设备暴露在越来越复杂的电磁环境下; 尤其在宽带接收系统中, 用频设备带外发射, 天线旁瓣效应等因素的存在, 使得即使频率规划良好、天线布局规范的系统也会存在潜在的电磁兼容问题; 在多个用频设备同时干扰一个宽带接收系统时, 由于电磁环境复杂, 考虑因素较多, 目前还没有一个从整个系统角度, 针对性强, 行之有效的快速诊断优化方法; 通过采用拟合环境中等效噪声干扰, 再还原定位到对应频段主导噪声干扰来源的方法, 使得故障定位更准确、优化措施更高效。

**关键词:** 复杂环境; 宽带系统; 主导干扰; 快速诊断

## Rapid Diagnosis Method of Dominant Interference Source in Complex Environment.

Ni Zinan, Zhang Lu, Shi Hairan, Chen Tengbo, Li Jiaoshan

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** With the widening of the frequency band of the electronic equipment in the equipment system, the power gradually increases and the sensitivity is increasing. All kinds of electromagnetic sensitive equipment are exposed to more and more complex electromagnetic environment. Especially in the broadband receiving system, there are some factors such as the band off of frequency equipment and the side lobe effect of the antenna, so that even the system with good frequency planning and antenna layout will have potential EMC problems. When multiple frequency equipment interferes with a broadband receiving system, because of the complexity of the electromagnetic environment and many factors, there is not a fast and effective method of rapid diagnosis and optimization from the point of view of the whole system. By fitting the equivalent noise interference in the environment, and then the dominant noise interference source in the corresponding frequency band is restored, so that the fault locations are more accurate and the optimization measures are more efficient.

**Keywords:** complex environment; broadband system; dominant interference; rapid diagnosis

## 0 引言

随着装备载荷信息处理能力的不断提高, 电子设备大幅度增加, 而且电子设备的频带日益加宽, 功率逐渐增大, 灵敏度也不断提高。各种设备将暴露在越来越复杂的电磁环境下。一方面, 随着灵敏度的提高, 意味着, 噪声干扰的门限也随之抬高, 另一方面, 频带宽度的拓宽, 潜在频段的噪声也会落入到带内来。同时在宽带接收系统中, 用频设备带外发射, 天线旁瓣效应等因素的存在, 使得即使频率规划良好、天线布局规范的系统也会存在潜在的电磁兼容问题。尤其在多个用频设备同时干扰一个宽带接收系统时, 由于电磁环境复杂, 考虑因素较多, 目前还没有一个从整个系统角度, 针对性强, 行之有效的快速诊断优化方法。通过采用拟合环境中等效噪声干扰, 再还原定位到对应频段主导噪声干扰来源的方法, 使得故障定位更准确、优化措施更高效。

## 1 电磁兼容三要素

形成系统电磁干扰必须同时具备 3 个基本要素: 电磁干扰源、耦合路径和敏感设备。

### 1.1 电磁干扰源

电磁干扰源是指某干扰设备或自然现象, 它能使共享同一环境的其它设备、分系统或系统发生电磁危害, 导致性能降级或失效; 也可能会使人或其它生物受到伤害。干扰源有多种分类方式: 根据干扰源产生的原因可分为自然干扰源和人为干扰源; 根据干扰源作用时间可分为长期起作用的连续干扰源和短期起作用的间隙干扰源及偶然单次开关切换、时间很短并且非周期性作用的瞬变干扰源; 根据频谱区分有宽带干扰和窄带干扰。

### 1.2 耦合路径

耦合路径是指传输电磁骚扰的通路或媒介。任何干扰的产生必然通过某些耦合路径由电磁骚扰源耦合到敏感设备, 常见的耦合方式如图 1 所示, 即传导耦合和辐射耦合方式。在近场情况下, 辐射耦合可能以磁场耦合为主, 也可能以电场耦合为主; 而在远场情况下, 将通过电磁波来耦合, 并且电场与磁场有固定的比。对于非常接近的电路和导线, 一般认为耦合或串扰是通过互感和电路间的电容

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-15。

基金项目: 国家科技支撑计划项目子课题(2014BAK02B01)。

作者简介: 倪子楠(1985-), 男, 浙江杭州人, 工程师, 主要从事航天器系统级 EMC 与射频设计方向的研究。

产生的, 不过通常只有一种耦合方式起着主导作用。噪声源可以是电源线、信号线、逻辑电路或载流的接地线。传导路径可能是电阻性的, 也可能是有意或无意存在的电感或电容, 而且是这些因素的综合作用。电抗性元件常常会导致谐振, 在谐振频点将伴随着电流的增加或减少。

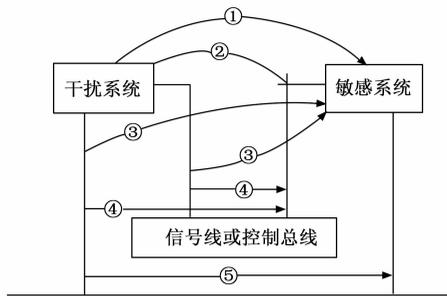


图 1 耦合干扰路径

①和②是其中从干扰源辐射到敏感设备与电缆; ③和④是从干扰源的线缆(包括信号线和电力线)辐射到敏感系统及所交联线缆; ⑤是从干扰源直接由公共导体传导到敏感系统。

### 1.3 敏感设备

接收系统的电磁敏感响应是各分立器件共同作用的结果, 放大器和混频器作为射频接收系统的关键模块, 其非线性敏感效应直接影响接收系统的电磁敏感性。因此研究接收系统对干扰信号的敏感特性, 就需要研究各分立器件对干扰信号的敏感特性, 尤其是位于射频前端的低噪声放大器。

根据干扰信号频谱与接收系统工作带宽的关系, 把电磁干扰分为带内和带外两种情况。带内干扰也即同频干扰, 它是指处在接收系统工作频率或者接近接收系统工作频率处的干扰。由于处于接收机的工作通道内, 所以带内干扰很难被滤波器滤除。因此接收机对带内干扰十分敏感。当理想状态下时, 系统敏感度阈值以对数形式表达为:。由公式可知, 接收系统基底噪声、工作带宽、噪声系数以及所要求的输出信噪比共同决定了接收机带内敏感度阈值。

## 2 电磁兼容关键参数仿真提取

仿真算例基于公开市场较为常见的系统模型, 仅作为示范说明。将分别通过仿真的手段, 提取干扰源、耦合路径、敏感设备的电磁兼容关键参数。

### 2.1 干扰设备仿真计算

算例中干扰设备采用二次上变频的结构形式。该发射设备产生主频为 1GHz, 带宽为 10MHz 的信号。中频信号通过二级混频之后, 形成主频信号, 并通过发射天线发射出去。干扰设备的系统行为级模型如下:

采用瞬态仿真器仿真, 做一次傅里叶变换后得到它的高次谐波的幅度, 其发射的带外频谱如下:

通过频谱图可以发现, 该发射器的谐波抑制做的不是很好, 谐波点的谐波干扰分量毛刺表现很高, 在靠近主频 1

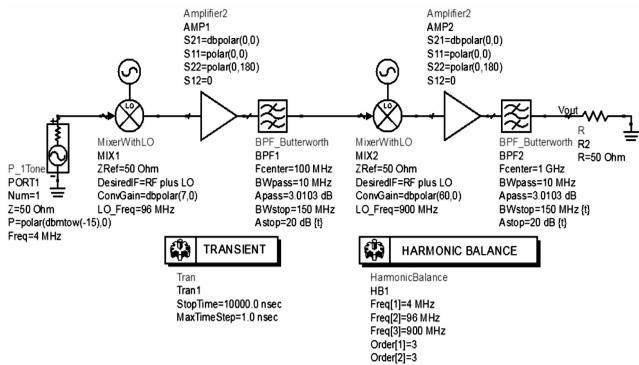


图 2 干扰设备系统行为级仿真模型

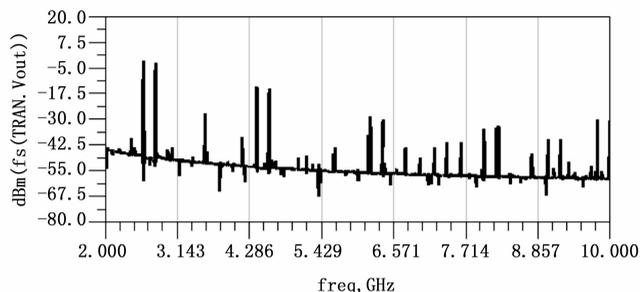


图 3 发射信号的带外频谱

GHz 附近的谐波分量表现尤为明显。各阶谐波分量随着频率的增加而逐渐变小。

### 2.2 干扰路径仿真计算

干扰路径算例采用在工程中较为常见的 S 参数法计算出某大功率用频设备与宽带敏感接收系统接收天线端口之间的天线隔离度。在该两个设备天线端口上分别设置端口 1, 端口 2, 直接计算其参数, 其形式的绝对值即是隔离度。但是该方法需要考虑去除两天线模型引入的失配损耗。

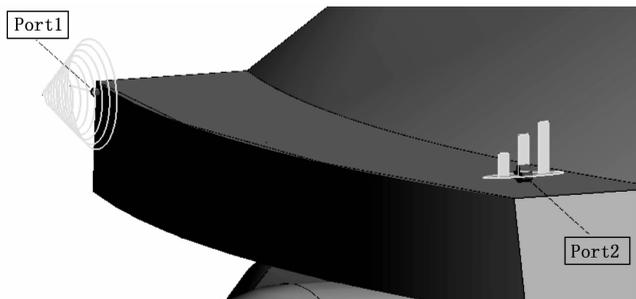


图 4 系统天线间隔离度仿真模型

通常情况下, 我们直接用作天线间的隔离度, 从量级上考虑天线失配引入的损耗, 有公式, 天线反射不超过 0.3 时, 引入的误差不超过 1dB, 当天线严重失配时, 会引入几十甚至几百的误差, 这个是不能容忍的, 所以使用这种方法一定要注意天线匹配状况。通过 S 参数仿真计算某大功率干扰源与受扰设备之间的隔离度, 如下图:

### 2.3 干扰路径仿真计算

干扰路径算例对基于 ATF54143 芯片低噪声受扰敏感电路的噪声系数进行仿真分析。

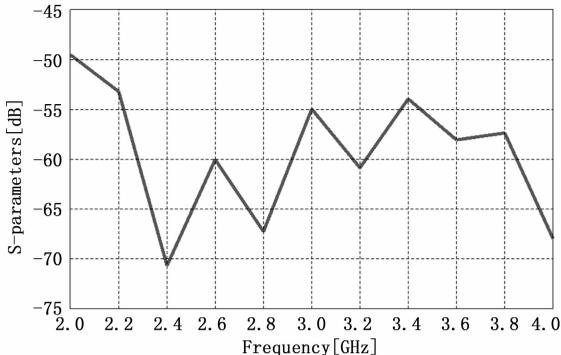


图 5 某大功率干扰源与受扰设备间隔曲线

关注两个参数：功率和信噪比。射频前端系统的噪声系数，以形式表达。接收系统端口处的噪声门限，由接收灵敏度要求和接收端口处的信噪比要求决定，以形式表达：

所以接收系统端口的噪声门限可计算为：，将噪声门限推广到整个频带上可在宽带的频谱上可表现为一条噪声门限频谱曲线。

### 3 宽带干扰链路

在《军用设备和分系统电磁发射和灵敏度要求与测量》(GJB151B—2013)中只提出了针对单个设备或分系统的电磁发射和灵敏度要求。该方法孤立了多个设备之间的交联特性，忽略了多种干扰因素的优先级关系。

一般的，在单频点干扰分析中，当干扰设备的带外发射落入接收系统工作频带范围之内时，就会对接收系统产生潜在干扰可能。当这一带外发射（干扰设备产生的带外发射能量值，简称为带外发射）要经过线缆损耗、发射机天线增益、空间衰减、接收系统天线增益、线缆损耗等 5 个过程会对接收系统产生端口处的干扰，可由形式表达为

。当超过接收系统的干扰门限时，接收系统就会受到干扰。其分析模型可由下图表示。

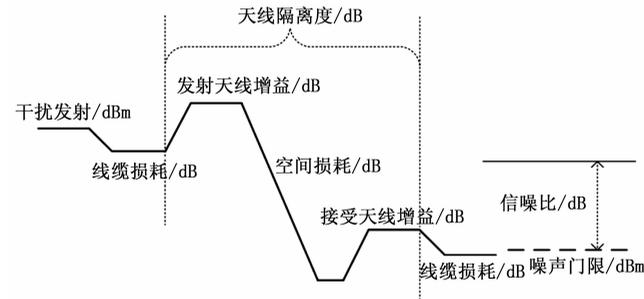


图 9 单频点干扰链路示意图

在分析单一设备对宽带接收系统的干扰分析中，由于接收系统的工作频带宽达数 GHz，在分析时一般都要将带宽因素考虑进去：

首先，在干扰设备的工作频带之外会有窄带谐波、宽带杂散波等干扰均会落在宽带接收系统的工作频带之内，可视为一条频率响应曲线；

其次，综合考虑宽带发射天线增益、宽带空间衰减和宽带接收天线增益三者因素的天线隔离度也是随着频率变化而变化的，可视为一条频率响应曲线；

最后，对于任何接收系统可供解调的中频输出的信噪比是确定唯一值，然而对于宽带接收系统噪声系数是随频率改变的，在《射频电路设计—理论与应用》第 334 页中提到，表示噪声系数，表示最小（也称为最佳）噪声系数，表示系统的等效噪声电导，表示源电阻，表示源阻抗，表示最佳源阻抗。那么等效到接收系统端口的干扰门限也可视为一条频率响应曲线。

在得到干扰设备等效到接收系统端口处的等效干扰曲线以及接收系统干扰门限曲线后，逐点对比等效干扰的幅

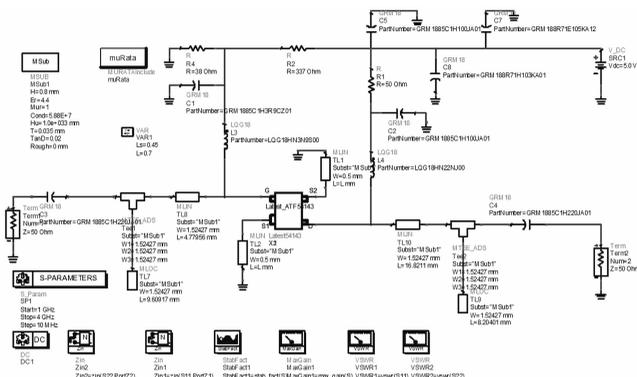


图 6 受扰敏感电路的噪声系数仿真模型

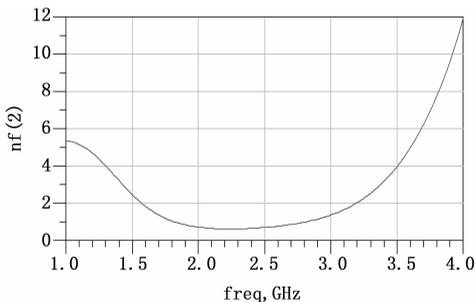


图 7 噪声系数仿真结果

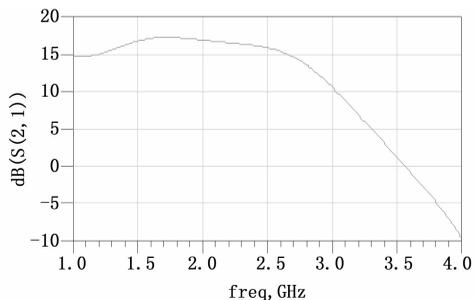


图 8 S (2, 1) 曲线仿真结果

在 2.45 GHz 处，增益为 15 dB，NF 小于 0.7 dB，输入、输出反射系数都在 -15 dB 以下，VSWR 在 1.3 左右，且整个电路无条件稳定。

在接收系统射频前端的中频输出端面向下级电路主要

值和接收系统的干扰门限, 可得到在接收系统整个工作频带上的受扰频段情况。即, 干扰设备带外发射频率响应曲线、干扰设备线缆损耗曲线、天线隔离度频率响应曲线、接收系统线缆损耗曲线和接收系统干扰门限曲线。其分析模型如下图所示, 具体操作过程为:

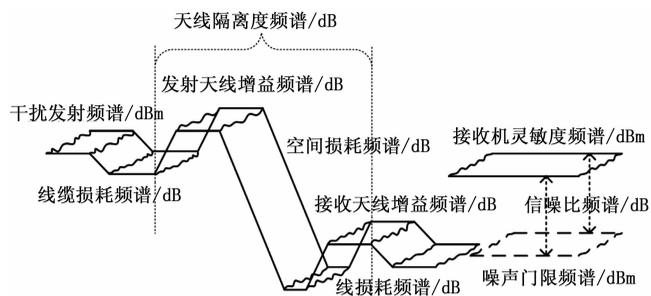


图 10 宽带干扰链路示意图

### 4 主导噪声来源定位

第一步, 仿真得到分析链路中的五条曲线

运用 ADS 仿真软件得到干扰设备的带外发射的干扰频率曲线。运用电磁场仿真软件 FEKO 得到将收发天线增益和空间衰减考虑在内的天线隔离度曲线。运用 ADS 仿真软件得到干扰设备和接收系统的线缆损耗频率响应曲线。运用 ADS 仿真软件仿真得到接收系统的噪声系数频率响应曲线, 联系中频输出的信噪比要求、接收灵敏度, 从而最终得到接收系统干扰门限频率响应曲线。

第二步: 得出各干扰设备等效到接收系统端口的等效干扰频率响应曲线

由于信号传输时符合线性性质, 而其中 4 个要素都是频率的线性变化函数, 所以将宽带分析模型视为单频点分析模型的在频域方向的线性延伸。则有, 每个干扰设备通过、和在频域上线性相加后, 即可得到各干扰设备等效到接收系统端口的等效干扰频率响应曲线。

第三步, 确定系统总等效干扰曲线。

在  $n$  个干扰设备同时干扰一个接收系统的系统中, 针对  $n$  个单独干扰一敏感对, 分别通过上述第一步和第二步, 得到  $n$  条等效干扰曲线、…。将这  $n$  条曲线同时放置在同一个图中。在每个频点上取这  $n$  条曲线的最大值而形成系统总等效干扰曲线, 其曲线构形如图 11 所示, 由图可知, 系统总等效干扰曲线由 A 设备的等效干扰曲线和 B 设备的等效干扰曲线的最大值决定。

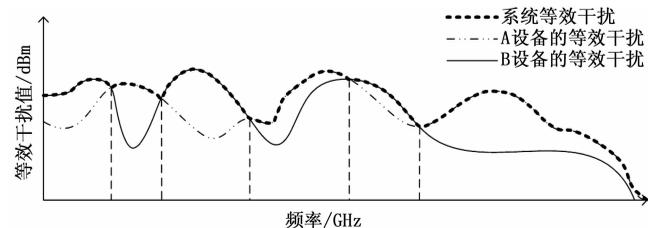


图 11 系统等效干扰示意图

第四步, 确定各干扰频段内的主导干扰来源。

将第三步中得到的系统总等效干扰曲线与第一步中得到的接收系统门限频率响应曲线作比较, 获得出现干扰的频率段。进一步的, 确定其主要来源于、…中的主导干扰来源。

该方法中, 主导干扰来源是指在一个特定频带内对接收系统产生最大干扰的干扰设备及其干扰的途径。

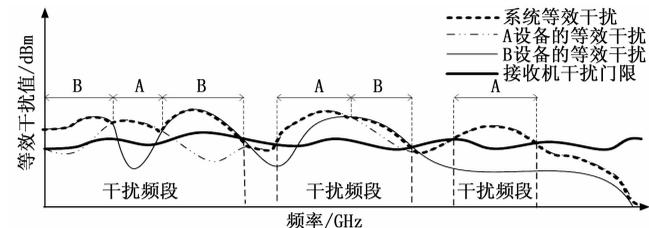


图 12 主导干扰来源示意图

### 5 快速诊断优化实例

在一个系统中, 有 A、B、C3 个潜在干扰设备对接收敏感设备 S 会发生潜在干扰, 接收敏感系统 S 为宽带接收系统, 选取接收系统中具有表征意义的 1 GHz、1.5 GHz、2 GHz、2.5 GHz、3 GHz、3.5 GHz 等 6 个频点进行分析。

第一步, 通过仿真手段获取 A、B、C3 个潜在干扰设备带外杂散发射以及空间隔离度, 分别拟合出干扰设备 A、B、C 在敏感设备 S 接收端口的等效噪声曲线值。

表 1 干扰设备 A 对敏感设备 S 等效干扰

频率(GHz)	1	1.5	2	2.5	3	3.5
A 干扰/dBm	-125.3	-133.8	-120.4	-114.2	-118.4	-120

表 2 干扰设备 B 对敏感设备 S 等效干扰

频率(GHz)	1	1.5	2	2.5	3	3.5
B 干扰/dBm	-124.8	-116.9	-131.8	-124.7	-120.5	-113.8

表 3 干扰设备 C 对敏感设备 S 等效干扰

频率(GHz)	1	1.5	2	2.5	3	3.5
C 干扰/dBm	-105.4	-117.3	-124.3	-128	-118.4	-119.3

第二步, 综合 A、B、C3 个设备的等效噪声曲线得出系统合成等效噪声曲线, 作为对敏感设备 S 的合成环境总噪声曲线。由表 4 知, 敏感设备 S 所处电磁环境中, 不同频段内的主导干扰来源于不同干扰设备。

表 4 系统合成环境等效噪声曲线

频率(GHz)	1	1.5	2	2.5	3	3.5
A 干扰/dBm	-125.3	-133.8	-120.4	-114.2	-118.4	-120
B 干扰/dBm	-124.8	-116.9	-131.8	-124.7	-120.5	-113.8
C 干扰/dBm	-105.4	-117.3	-124.3	-128	-118.4	-119.3
系统干扰/dBm	-105.4	-116.9	-120.4	-114.2	-118.4	-113.8
主导来源	C	B	A	A	A、C	B

第三步, 通过仿真手段, 得到敏感设备 S 的噪声干扰门限曲线, 见表 5。

表 5 敏感设备 S 干扰门限曲线

频率(GHz)	1	1.5	2	2.5	3	3.5
干扰门限/dBm	-113.5	-110.2	-107.8	-118.3	-112.6	-117.3

第四步, 通过综合 A、B、C3 个设备的等效噪声曲线所得出系统合成等效噪声曲线, 将其与接收系统的噪声门限曲线作比较, 即判断出接收系统受到干扰的频段, 并确定其主导干扰来源。

表 6 受扰频段内主导干扰来源

频率(GHz)	1	1.5	2	2.5	3	3.5
系统干扰/dBm	-105.4	-116.9	-120.4	-114.2	-118.4	-113.8
干扰门限/dBm	-113.5	-110.2	-107.8	-118.3	-112.6	-117.3
是否干扰	干扰	合格	合格	干扰	合格	干扰
主导来源	C	--	--	A	--	B

从上表中可以看到, 系统在 1 GHz、2.5 GHz、3.5 GHz3 个频点上对接收系统产生干扰, 这些干扰分别来源于设备 C、A、B。

第五步, 在确定主导干扰来源后, 就能有针对性地在这些频点上, 对这些干扰链路进行整改。在整改后的干扰情况如表 7 所示。

表 7 宽带接收系统整改后干扰情况

频率(GHz)	1	1.5	2	2.5	3	3.5
A 干扰/dBm	-125.3	-133.8	-120.4	-120.4	-118.4	-120
B 干扰/dBm	-124.8	-116.9	-131.8	-124.7	-120.5	-119.4
C 干扰/dBm	-114.5	-117.3	-124.3	-128	-118.4	-119.3
系统干扰/dBm	-114.5	-116.9	-120.4	-120.4	-118.4	-119.3
干扰门限/dBm	-113.5	-110.2	-107.8	-118.3	-112.6	-117.3
是否干扰	合格	合格	合格	合格	合格	合格
主导干扰源	无	无	无	无	无	无

分别在 2.5 GHz 对 A 设备干扰接收系统链路做整改, 在 3.5 GHz 对 B 设备干扰接收系统链路做整改, 在 1 GHz 对 C 设备干扰接收系统链路做整改。可在整个系统范畴内改善接收敏感设备的受扰特性。

### 6 总结

通过对干扰链路从干扰设备的干扰发射、干扰路径的隔离度、宽带接收系统的噪声门限 3 个方面进行仿真计算, 拟合出一条复杂环境拟合到宽带接收系统接收端口的等效干扰噪声频谱, 将其和宽带接收系统的噪声干扰门限比较, 即可方便确定出受到干扰的频段, 及其主导干扰来源。快速定位出这些频段上受到干扰的主导干扰链路对, 可进一步提升复杂环境下电磁兼容故障诊断优化效率。

### 参考文献:

[1] 苏东林, 何洪涛. VHF/UHF 波段发射机互调抑制比测试方法研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43 (2): 224-232.

[2] Ni Zinan, Su Donglin, Chen Wenqing, Liu Ke. EMC Improvement in Multi-Radio Interfering UWB Receiver [A]. 2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband [C]. 2010: 869-871.

[3] Ni Zinan, Su Donglin, Chen Wenqing, Wang Fangming. A Method Based on Marginal Utility Theory for EMC-Target Allocation Problem [A]. 2010 International Symposium on Signals, Systems and Electronics [C]. 2010: 282-285.

[4] 黎柯. 舰载通信系统电磁兼容问题及控制 [J]. 舰船电子工程, 2011 (8): 183-186.

[5] 马江. 机载超短波通信常见电磁干扰及对策分析 [J]. 电讯技术, 2008, 48 (7): 119-123.

[6] 李胤, 郑重, 刘久文, 等. 基于行为级建模的通信电台同址干扰预测分析 [J]. 电子测量技术, 2011, 34 (11): 122-126.

[7] 金梅, 曾小军, 苏东林. 某气象雷达对高度表电磁干扰的预测和分析 [J]. 电子测量技术, 2007, 30 (7): 34-36.

[8] V. Prasad Kodali 著, 陈淑凤, 高攸纲, 苏东林, 周壁华译. 工程电磁兼容—原理、测试、技术工艺及计算机模型 (第二版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.

(上接第 57 页)

[11] 张杰, 石为人, 涂巧玲, 等. 基于无线传感器网络的信息采集监测系统设计 [J]. 传感技术学报, 2009, 7: 54-56.

[12] 刘宝礼, 张文东, 庄威, 等. 基于物联网技术的智能安防系统 [J]. 探测与控制学报, 2013, 35 (4): 79-83.

[13] 束慧. 基于物联网技术的污水处理过程动态监控系统 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (8): 2441-2443.

[14] 王春玲, 余佐彬. 基于物联网的古树名木监控管理研究 [J]. 计算机工程, 2015, 41 (5): 316-321.

[15] Fei L, Zhou W, Xin X, et al. Research on Sensor-Gateway-Terminal Security Mechanism of Smart Home Based on IOT [J]. Communications in Computer and Information Science,

2012, 312: 415-422.

[16] 王祎茜. 基于 Web 的物联网应用体系架构和关键技术研究 [J]. 硅谷, 2014, (12): 49-50.

[17] 田仲富, 王述洋. 基于物联网近程无线组网技术的嵌入式智能家居监控系统设计 [J]. 重庆理工大学学报, 2017, 31 (1): 79-86.

[18] 宋朋涛, 李超, 徐莉婷, 等. 基于个人计算机的智能家居边缘计算系统 [J]. 计算机工程, 2017, 43 (11): 1-7.

[19] 汤瀑, 叶林, 郭立鹏, 等. 物联网系统的组合与验证 [J]. 计算机工程, 2013, 39 (9): 45-48.

[20] 卢旭, 程良伦. 物联网中无线传感节点跨层数据收集协议 [J]. 计算机工程, 2013, 39 (5): 110-113.