

引用格式: 刘雷, 金佳佳, 孙照清, 等. 舰船系统间电磁兼容性的层次化优化方法[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(2): 22-28.

LIU Lei, JIN Jiajia, SUN Zhaoqing, et al. A hierarchical method of optimization on the inter-system compatibility of a warship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 22-28.

舰船系统间电磁兼容性的层次化优化方法

刘雷, 金佳佳, 孙照清, 姜弢

哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 为优化多通信设备系统间的电磁兼容性, 提出同频干扰抑制和乱真响应抑制两个层级相分离的层次化优化方法。同频干扰抑制采用多目标遗传算法, 以设备安装位置为决策变量, 调整设备安装位置和天线方向性来降低干扰影响; 在设备布局优化的基础上分析进一步降低同频干扰和潜在乱真响应影响的技术方法, 提出针对性的电磁兼容指标优化方案。通过层次化的预测和优化, 实现了对通信系统总体电磁兼容性的量化控制, 使得电磁兼容指标变动方案与系统总体电磁兼容性优化结果的内在关联更明晰。

关键词: 电磁兼容性; 层次化; 量化; 遗传算法; 多目标优化

中图分类号: U665.26

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2015.02.005

A hierarchical method of optimization on the inter-system compatibility of a warship

LIU Lei, JIN Jiajia, SUN Zhaoqing, JIANG Tao

College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: To separate co-channel interference inhibition and spurious response inhibition, a hierarchical method is proposed in this paper to optimize the inter-system compatibility of the communication equipment. The multi-objective genetic algorithm is used to restrain co-channel interference, in which the equipment installation locations serve as decisive variables so that the effects of interference reduction mainly depend on adjusting locations of equipment and the antenna directivity. Based on the equipment location optimization, a set of optimization proposals related to specific electromagnetic compatibility indicators is put forward to further suppress potential spurious response and residual co-channel interference. With the presented hierarchical prediction and optimizing, the overall electromagnetic compatibility of the communication equipment has been significantly improved.

Key words: electromagnetic compatibility (EMC); hierarchicalization; quantification; genetic algorithm; multi-objective optimization

0 引言

电磁兼容性 (electromagnetic compatibility, EMC) 问题的最新研究阶段——EMC 分析预测

——分别在芯片、部件和系统 3 个层级对相应研究对象的电磁特性进行分析预测, 在整个设计过程中合理分配并不断完善各项指标要求, 使其工作于合理状态。当前, 对系统间的电磁兼容性

收稿日期: 2014-11-10

网络出版时间: 2015-3-30 15:15:42

基金项目: 国家级重大基础研究项目; 国家部委基金资助项目; 哈尔滨市科技创新人才专项基金资助项目 (2013RFXJ083); 哈尔滨工程大学中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (HEUCF131602)

作者简介: 刘雷, 男, 1989年生, 硕士生。研究方向: 系统级电磁兼容。E-mail: thinkthencchange@sina.cn

姜弢 (通信作者), 男, 1973年生, 博士, 教授。研究方向: 电波传播及电磁环境建模与仿真。

E-mail: jiangtao@hrbeu.edu.cn

预测研究呈现出3个主要特点:

1)在分系统和设备(后文中将用“设备”代指“分系统和设备”)的研制过程中,在满足功能性需求的同时注重多设备共存时的兼容性^[1];

2)在满足电磁标准规范的基础上,进一步尝试对设备进行个性化的EMC研究和建模,以明确符合设备自身特点的EMC要求^[1];

3)逐渐减轻对“问题解决法”的依赖,统筹规划整个系统的EMC指标,并呈现出EMC分析预测与优化算法相结合的系统间EMC研究趋势^[2-4]。

由于系统间EMC分析预测的极端复杂性,现有的一些研究依然存在若干待解决的难题:

1)主流的研究思路是对系统中所有设备进行电磁建模和问题预测,进而以“解决预测出的问题”为目的,选定、更新某些EMC指标,直到系统出现满意状态。这种方法虽然较易取得有效的EMC优化方案,却难以确认其是否为最优解。

2)引入优化算法的系统间EMC研究多寄希望于通过改动设备布局^[2-4]来解决所预测出的EMC问题,既没有考虑系统载体事实上的空间有限性,也忽略了导致接收机同频干扰及乱真响应的其他EMC指标。而且,这些缺乏启发性的优化算法一旦增加解的复杂性,即考虑更多的EMC指标(不仅限于设备布局),搜索难度将急剧增大,以致优化算法在系统间EMC研究中的实用性受到质疑。

为解决上述问题,本文拟提出一种层次化的优化方法:第1层,以多目标遗传算法搜索最佳的设备布局方案,从而最大限度地抑制同频干扰;第2层,通过分析其他EMC指标与接收机受扰功率之间的量化关系,来研究进一步抑制干扰的方案。通过这两个层级的优化工作,最终实现舰船平台上多通信设备之间满足既定要求的电磁兼容性能。

1 敏感设备电磁兼容性能的定量表示

电磁干扰由干扰源耦合至通信接收机的途径是多种多样的,这里仅限于讨论天线间耦合引发的敏感设备受扰。一个基本的潜在干扰发生在发射机(后文中将用“干扰设备”代指)中心频率处于接收机(后文中将用“敏感设备”代指)调谐频率20%之内的时候,另一个则表现为若干带外频率所引发的接收机乱真响应^[5]。这里规定前者属于同频干扰的范畴。在分析同频干扰时,应合理规

定敏感设备的要求接收带宽(required acceptance bandwidth, RABW),以避免漏算过多同频干扰;同理,干扰设备占有带宽(occupied bandwidth, OBW)应包含所有发射的大部分能量。

1.1 同频干扰计算方法

可在弗里斯传输方程^[6]的基础上进一步考虑非理想传输情况下的同频干扰。设干扰设备与敏感设备的数目分别为 n 和 m ,第 j 个敏感设备在多通信设备载体上获取的同频干扰 P_{vj} 如式(1)所示。

$$P_{vj} = \sum_{i=1}^n \int_{f_{Lj}}^{f_{Uj}} P_{ui}(f) L_{ui}(f) G_{ij}(\theta_{ij}, \phi_{ij}, f) L_{ij}(f) L_{vj}(f) G_{vj}(\theta_{ij}, \phi_{ij}, f) \left[\frac{\lambda(f)}{4\pi d_{ij}} \right]^2 S_{vj}(f) df, j=1, \dots, m \quad (1)$$

式中: $P_{ui}(f)$ 和 $L_{ui}(f)$ 分别为第 i 个干扰设备的功率谱密度和天线馈线损耗; $G_{ij}(\theta_{ij}, \phi_{ij}, f)$ 为第 i 个干扰设备的发射天线在第 j 个敏感设备方向上的功率增益; $L_{ij}(f)$ 为第 i 个干扰设备的发射天线与第 j 个敏感设备的接收天线间的空间损耗,如天线遮挡衰减、极化衰减及绕射衰减等; $G_{vj}(\theta_{ij}, \phi_{ij}, f)$ 为第 j 个敏感设备的接收天线在第 i 个干扰设备方向上的功率增益; $L_{vj}(f)$ 和 $S_{vj}(f)$ 分别为第 j 个敏感设备的天线馈线损耗和射频放大器输入端到混频器输入端的选择特性曲线; f_{Lj} 和 f_{Uj} 分别为该设备RABW的上、下限频率; $\lambda(f)$ 为对应于频率 f 的电磁波波长; d_{ij} 为两设备的空间距离。

每个敏感设备的电磁兼容性能以干信比 J_{sr} ^[7](jamming-to-signal power ratio, JSR)来定量表示,如式(2)所示。

$$J_{sr} = 10 \lg \left(\frac{J}{S} \right) \quad (2)$$

式中: J 为敏感设备接收到的干扰功率; S 为敏感设备灵敏度。 S 已知时,只需计算出 P_{vj} 并赋值于 J 即可求得第 j 个敏感设备的JSR值,从而评价其电磁兼容性能。

1.2 相关频谱曲线描述方法

为由式(1)方便地计算同频干扰 P_{vj} ,利用折线拟合法^[8]根据实测曲线确定 $P_{ui}(f)$, $L_{ui}(f)$, $L_{ij}(f)$ 及 $S_{vj}(f)$ 的近似表达式,拟合精度取决于采样点数。

GJB 151B-2013中CE106项对天线端子的谐波发射及乱真发射已做出限制^[9],故为降低计算量,干扰设备的OBW将不再包含三次谐波之外的部分。

1.3 天线功率增益描述方法

为直接利用天线的三维功率增益方向图计算 P_{ij} , 需为所有天线建立相应的天线坐标系, 并将所有设备置于共同的参考坐标系中。如图1所示, 通信设备装载平台为某型号舰船^[10], 参考坐标系 $O-XYZ$ 的原点 O 可选定为船艏甲板上表面某点, OX 轴与船中轴线平行且指向舰艏, OZ 轴竖直向上。 $O_t-X_tY_tZ_t$ 为某干扰设备发射天线的天线坐标系, $O_r-X_rY_rZ_r$ 为某敏感设备接收天线的天线坐标系。图2为天线坐标系 $O_t-X_tY_tZ_t$ 的建立方法。原点 O_t 为天线波束起始点, O_tX_t 轴与

波束主轴重合, $X_tO_tY_t$ 面与天线H面重合, $X_tO_tZ_t$ 面与天线E面重合。类似地, 可以为接收天线建立相应的天线坐标系。如图3所示, 天线坐标系可由参考坐标系依次环绕 OZ 轴、 OY 轴及 OX 轴旋转 α, β, γ 后, 再经过平移得到。为方便观察, 图3将天线坐标系原点与参考坐标系原点设为同一点, 实际上它们需要平移操作才能重合。设某接收天线的天线坐标系原点 O_r 在 $O-XYZ$ 中的坐标为 (x, y, z) , 且设发射天线的天线坐标系原点 O_t 在 $O-XYZ$ 中的坐标为 (x_t, y_t, z_t) , 则 O_r 在 $O_t-X_tY_tZ_t$ 中的坐标 (x_{tr}, y_{tr}, z_{tr}) 可由式(3)求得。

$$\begin{bmatrix} x_{tr} \\ y_{tr} \\ z_{tr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta \sin \gamma \cos \alpha - \sin \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \gamma \cos \beta \\ \sin \beta \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

最后, 可由式(4)及式(5)求得 O_r 在发射天线功率增益方向图中的两个角 θ_r 和 φ_r 。类似地, 可以求得 O_t 在接收天线功率增益方向图中的两个角 θ_t 和 φ_t 。

$$\theta_r = \arccos \left(\frac{z_{tr}}{\sqrt{x_{tr}^2 + y_{tr}^2 + z_{tr}^2}} \right) \quad (4)$$

$$\varphi_r = \arctan \left(\frac{y_{tr}}{x_{tr}} \right) \quad (5)$$

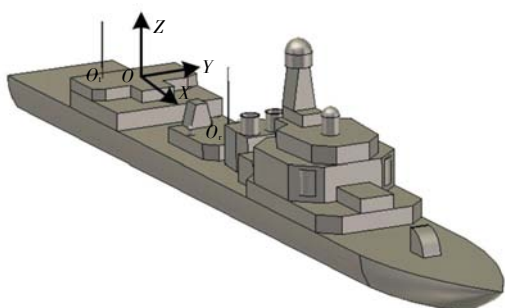


图1 舰船平台上的参考坐标系
Fig.1 The reference coordinate on a warship

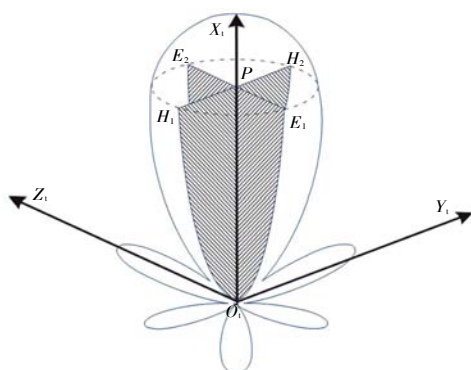


图2 天线坐标系示意图
Fig.2 An antenna coordinate diagram

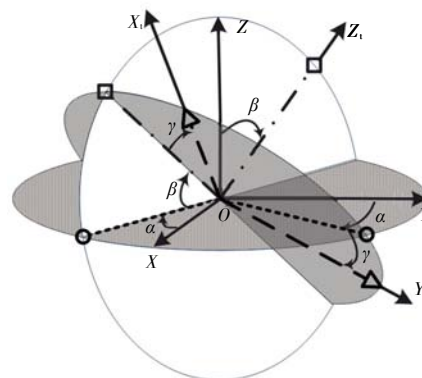


图3 参考坐标系到天线坐标系的旋转示意图
Fig.3 A diagram about rotation from the reference coordinate to an antenna coordinate

因此, 只要预先测知各频点处所有天线的方向图 $G(\theta, \varphi, f)$, 就可以根据收、发天线在参考坐标系中的坐标和天线坐标系相对于参考坐标系的3个旋转角(即 α, β, γ)来获知所需方向的功率增益。

2 基于多目标遗传算法的布局优化

舰船通信系统的设备布局优化实质上属于多目标优化问题, 即所有单个敏感设备的EMC表现以一定的评价机制综合体现为系统总体的电磁兼容性。多目标优化问题的特点在于很难找到一个使得所有目标都达到最优的解, 因而只能借助某种偏好结构来搜索 Pareto 解^[11]。

2.1 适应度函数和决策向量

选用妥协方法^[12]构建适应度函数 $f(\mathbf{M}; \mathbf{w})$, 其含义为: 在判据空间中选定理想点 \mathbf{M}^* , 通过减小判据空间中 Pareto 解 \mathbf{M} 到理想点 \mathbf{M}^* 的某种距

离函数值来逐步逼近 M^* , 如式(6)所示。其中, 参数 p 源自加权 L_p 范数意义下的距离函数, 令其值为 1, 则每个 $|M_j - M_j^*|$ 得到同等程度的重视。理想解向量 M^* , Pareto 解向量 M 和权重向量 w 分别如式(7)、(8)和(9)所示, m 为敏感设备的数量(即优化目标数)。

$$f(M; w) = \|M - M^*\|_{p,w} = [\sum_j^m w_j |M_j - M_j^*|^p]^{1/p} \quad (6)$$

$$M^* = \{J_{sr1}^*, J_{sr2}^*, \dots, J_{srm}^*\} \quad (7)$$

$$M = \{J_{sr1}, J_{sr2}, \dots, J_{srm}\} \quad (8)$$

$$w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\} \quad (9)$$

式中: J_{srj}^* 和 J_{srj} 分别表示第 j 个敏感设备的理想 JSR 和实际 JSR; w_j 表示第 j 个优化目标的权重系数, 其值直接决定了对相应敏感设备电磁兼容性能的重视程度。

决策向量(Pareto 解的表现型) s 的组成如式(10)所示, 其中, x_{ui}, y_{ui}, z_{ui} 为第 i 个干扰设备在 $O-XYZ$ 中的三维坐标, $\alpha_{ui}, \beta_{ui}, \gamma_{ui}$ 为其在相应天线坐标系中的旋转角。相应于第 j 个敏感设备, $x_{vj}, y_{vj}, z_{vj}, \alpha_{vj}, \beta_{vj}, \gamma_{vj}$ 具有类似含义, 不再赘述。

$$s = [x_{t1}, y_{t1}, z_{t1}, \alpha_{t1}, \beta_{t1}, \gamma_{t1}, \dots, x_{tm}, y_{tm}, z_{tm}, \alpha_{tm}, \beta_{tm}, \gamma_{tm}] \quad (10)$$

2.2 编码方法、选择、交叉及变异操作

由式(10)可知决策向量 s 的多维特点, 且每添加一个设备, 将为 s 增加 6 个维度, 结合文献[13]对各种编码方法优缺点的讨论, 采用实数编码方法。选择操作选用“($\mu + \lambda$) - 选择”[14]方法, 以确保父代和子代同样具有竞争机会, 且可避免交叉和变异操作引入过大的不稳定性。

根据凸集[15]理论定义交叉操作。如图 4 所示, 以交叉概率 p_c 从种群中随机选出要进行交叉

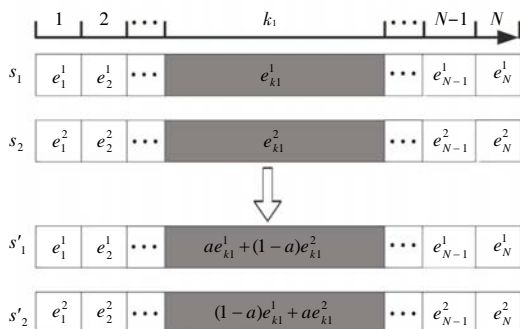


图 4 交叉操作示意图

Fig.4 A diagram about interlace operation

操作的个体, 设 s_1 和 s_2 为其中两个, 经交叉操作后得到的新个体为 s'_1 与 s'_2 , N 为决策向量的维数。交叉点的位置 k_1 可随机选定, 权值 $a \in (0, 1)$ 。

以变异概率 p_m 随机选出要进行变异操作的个体, 随机选定变异点位置 k_2 , 设待变异个体在该位置处的基因为 e , 则规定其变异后的值 e' 为服从均匀分布 $U[e_L, e_H]$ 的一个随机数。其中, e_L 与 e_H 分别为决策向量在位置 k_2 处基因的表现型(由于采用实数编码, 决策向量的基因型与表现型相同)约束区间的上、下限值。

2.3 算法终止规则

观察式(6)可知, 个体的理想适应度值为 0 (当某设备的实际 JSR 优于理想 JSR 时, 仍将其对应的 $|M_j - M_j^*|$ 式置 0)。由于不能确认通信设备布局优化可以得到适应度值为 0 的最优个体, 或者说不能保证该优化过程能够提供出使得所有敏感设备具有理想 JSR 的布局方案, 因而不能采用“搜索优良个体直至出现适应度值为零的情况”这一条件来作为遗传算法的唯一终止规则。

为了兼顾“有限的算法运行时间”与“追求理想适应度值”这两个可能矛盾的目标, 将算法的终止规则分解为 3 个不同的条件:

- 1) 有个体的适应度值达到理想值 0;
- 2) 连续两代种群中最优个体的适应度值差别小于某值, 该值可根据精度需求预先设定;
- 3) 种群更新代数到达某预设值。前述 3 个条件中的任何一个出现时, 即终止算法, 并输出所有设备的布局信息与天线的方向信息。

3 设备布局优化基础上的 EMC 优化方案

后续优化工作的进行取决于算法终止原因。结合 2.3 的内容, 若终止原因为条件 1), 则直接分析每个敏感设备可能产生的乱真响应并予以抑制; 若算法终止原因是条件 2) 或条件 3), 则需固定当前设备布局, 总结敏感设备的受扰情况, 并提供抑制残余同频干扰的 EMC 指标优化方案, 最后分析潜在的乱真响应。

3.1 残余同频干扰的抑制方案

当算法因条件 2) 或条件 3) 终止后, 需要考虑通过优化除设备布局之外的其他 EMC 指标来抑制残余的同频干扰。为此, 如表 1 所示, 依次以每个敏感设备 R_j 为研究对象, 计算各干扰设备 T_i 对其产生的干扰功率 P_{ji} , 并根据敏感设备灵敏度

S_j , 理想JSR J_{sj}^* , 通过式(2)计算其最大受扰总功率 P_{Tj} 。 R_j 接收的实际受扰总功率 P_j 是所有干扰设备对其产生干扰功率 P_{ji} 的和, 因此为将 P_j 的值降至 P_{Tj} , 可考虑选取并优化下列参数:

1) 频率指配。如果各设备的工作频率已经固定, 则不再考虑该指标。另外, 一旦工作频率出现变动, 必须重新进行设备布局优化。

2) 干扰设备发射功率。干扰设备的发射功率对设备的功能而言至关重要, 因此需慎重考虑选用该指标来降低敏感设备的受扰功率。

3) 干扰设备发射带外衰减。计算同频干扰时将OBW作为干扰设备的频谱范围, 而决定干扰设备工作性能的频带为其必需带宽(Necessary Bandwidth, NB), 因而可以通过抑制干扰设备NB之外的发射来降低对敏感设备的干扰。

4) 天线旁瓣抑制。收、发天线方向图旁瓣将导致无用的电磁发射或接收, 尤其应该注意减少敏感设备工作频率处天线的旁瓣辐射。

5) 时间分隔^[16]。在时间上将相互干扰的设备分隔是避免干扰的最直接方法, 但必须建立在不影响作战效能的基础上。

6) 其他参数。还可以选用如空间衰减、极化衰减等参数来降低干扰, 但应避免影响设备的正常工作性能。

表1 敏感设备受扰情况详情

Tab.1 Details about the interference suffered by disturbed equipment

Sensitive equipment	Jamming equipment					Total interference power	
	T_1	...	T_i	...	T_n	Actual power	Maximum power
R_1	P_{11}	...	P_{i1}	...	P_{n1}	P_1	P_{T1}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
R_j	P_{j1}	...	P_{ji}	...	P_{jn}	P_j	P_{Tj}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
R_m	P_{m1}	...	P_{mi}	...	P_{mn}	P_m	P_{Tm}

3.2 乱真响应抑制

当算法因条件1)终止后, 即进行乱真响应抑制。通常情况下, 混频器会产生比其他非线性器件(如放大器)更多的失真成分, 接收机中绝大多数失真往往来自于混频器^[17]。结合文献[18]所提出的CS03, CS04与CS05这3项敏感度要求, 重点讨论多通信设备环境下敏感设备的互调干扰、寄生干扰与交调干扰影响预测与抑制方案。

仍然按照CS03, CS04及CS05所提供的方法测试敏感设备的互调敏感度门限值 S_{TI} , 寄生信号敏感度门限值 S_{TS} 和交叉调制敏感度门限值 S_{TC}

(所谓门限值是指敏感设备刚好不出现敏感现象时的干扰值, 这在文献[9]中有详细描述)。一般情况下, 敏感度门限值是频率的函数, 但为规避混频器建模的复杂性, 取 S_{TI} , S_{TS} , S_{TC} 为它们各自函数的最小值, 当干扰设备在工作频率 f_0 (f_0 在敏感设备的RABW之外)处的干扰功率超过敏感度门限值时, 即认为该干扰会引发敏感设备的乱真响应。需要强调的是, 干扰功率均是按照式(1)中积分式(不包含叠加运算)所计算出来的敏感设备输入端的功率值。

筛选出具有潜在乱真响应威胁的“干扰设备—敏感设备”组合, 则可从两个角度来设计抑制方案: 可参照3.1节同频干扰的抑制方法来提出EMC指标优化方法, 也可以参考文献[17]中改善接收机性能(亦即提高敏感设备敏感度门限值)的相关思路, 限于篇幅不再展开阐述。

4 EMC优化示例

为说明所提出的EMC层次化优化方法的有效性, 以某型舰船和3款通信设备为例进行验证。 D_1 为某干扰设备的四单元八木天线阵, D_2 为与某超短波敏感设备相连的同轴天线, D_3 为某超短波通信台(具有干扰设备和敏感设备两种身份)的非对称天线, 3款天线在舰船上的初始布局如图5所示, 图6给出了布局优化(1000次进化)后的布局情况, 表2给出了这3个天线的天线坐标系原点(在 $O-XYZ$ 中的)坐标在布局优化前后的具体数值以及它们各自的3个旋转角变化。需要说明的是, 由于本例所选用的3款天线均为全向天线(八木天线阵实际工作时会在水平面内进行 360° 旋转, 因此令其定向方向图在水平面 360° 角度范围内扫描并合成全向方向图), 为了不影响它们的全向辐射功能, 3个 β 角被固定为初始角 0° 。

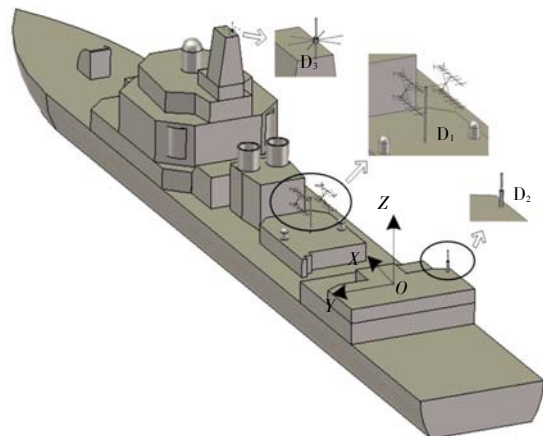


图5 EMC优化前的设备布局

Fig.5 The equipment location before an EMC optimizing

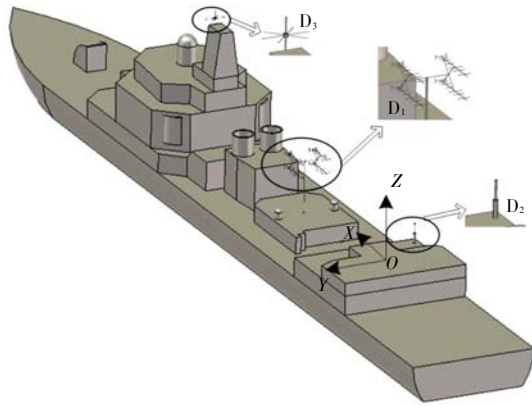


图6 EMC优化后的设备布局

Fig.6 The equipment location after an EMC optimizing

表2 优化前后的设备布局数据

Tab.2 Location data of equipment before/after optimizing

Device	Before/after optimizing	Coordinates in O-XYZ/m			Rotation angles/rad		
		X	Y	Z	α	β	γ
D ₁	Before	18.1	0.0	1.6	π	0.0	0.0
	After	25.2	0.0	2.4	1.5	0.0	0.5
D ₂	Before	0.0	0.0	0.0	π	0.0	0.0
	After	6.5	-7.9	-1.8	-0.7	0.0	0.3
D ₃	Before	57.0	0.0	16.0	π	0.0	0.0
	After	61.2	0.1	16.0	0.6	0.0	-0.2

图7和图8分别给出了1000代进化过程中设备D₂与设备D₃的受扰变化情况,图中,左侧纵轴标度受扰功率值,右侧纵轴标度敏感设备的JSR。图7中的4条曲线分别表示“设备D₂的JSR曲线”,“设备D₁和设备D₃对设备D₂的干扰总功率”,“设备D₁对设备D₂的干扰功率”及“设备D₃对设备D₂的干扰功率”,图8中虚线表示“设备D₃的JSR曲线”,实线表示“设备D₁对设备D₃的干扰功率(对设备D₃而言,周围只存在D₁这一个干扰设备,因此来自D₁的干扰功率即为D₃所承受的总干扰功率)”。从图7中可以发现,如果以15 dB作为敏感设备的理想JSR^[7],则设备D₂的JSR经过布局优化已从最初的119 dB降至10 dB,即满足了EMC要求。观察图8可知,设备D₃在经过布局优化后,其JSR仍然维持在42 dB这一较大数值,为将其降至15 dB,需按照3.1节给出的建议找到进一步优化的EMC指标(比如可选用 $L_{ij}(f)$,即借助空间遮挡等来增加衰减),使D₁和D₃之间对干扰的衰减再增加至少27 dB。乱真响应的预测和优化过程参考3.2节内容即可,这里限于篇幅不再展开详述。

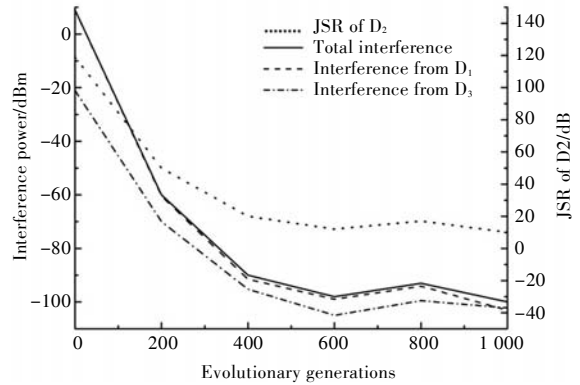


图7 1000代进化过程中D₂设备的受扰变化

Fig.7 Interference change suffered by D₂ during the evolutionary process of 1000 generations

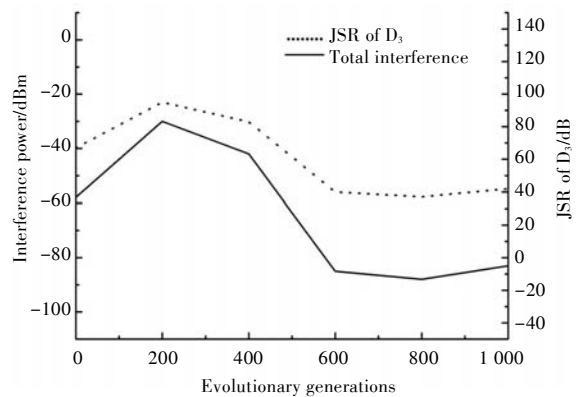


图8 1000代进化过程中D₃设备的受扰变化

Fig.8 Interference change suffered by D₃ during the evolutionary process of 1000 generations

5 结 语

前述示例通过设备布局EMC优化和其他EMC指标优化这两个层次的优化工作,明确了最优设备布局方案及执行该方案后剩余的干扰量,进而提出进一步抑制干扰的EMC指标调整方案,这使得预测、量化优化方案与系统间EMC之间的关联具有了可操作性和实用性,是对系统间电磁兼容性研究方法的有益探索和发展。为了使得优化结果更加符合实际情况,下一步将考虑通信设备载体平台上建筑物对天线方向图的影响,并将之加入干扰的计算模型中。

参考文献:

[1] 苏东林,王冰切,金德琨.电子战特种飞机电磁兼容预设计技术[J].北京航空航天大学学报,2006,32(10):1241-1245.
 SU Donglin, WANG Bingqie, JIN Dekun. EMC pre-design technologies on EW special aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006,32(10):1241-1245.

- [2] 朱启龙,陈少昌.多目标优化算法在舰船天线布局中的应用[J].舰船科学技术,2014,36(9): 132-135.
ZHU Qilong, CHEN Shaochang. Ship antennas layout based on multi-objective optimization algorithm [J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(9): 132-135.
- [3] 崔宏梅,倪为民,钱祖平.用单纯形算法优化简单电大导体天线布局[J]. 军事通信技术,2009,30(2): 80-84.
CUI Hongmei, NI Weimin, QIAN Zuping. Optimal placement of antennas on simple electrically large conductive surface using simplex nelder-mead algorithm [J]. Journal of Military Communications Technology, 2009, 30(2): 80-84.
- [4] 方金鹏,梁子长,武亚军,等.某机载VHF天线布局优化仿真分析[J]. 制导与引信,2013,34(1): 36-39.
FANG Jinpeng, LIANG Zichang, WU Yajun, et al. Simulation analysis of airborne VHF antenna layout and optimization [J]. Guidance & Fuze, 2013, 34(1): 36-39.
- [5] WESTON D A. Electromagnetic compatibility: principles and applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 1991.
- [6] GURU B S, HIZIROGLU H R. Electromagnetic field theory fundamentals [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [7] POISEL R A. Introduction to communication electronic warfare systems [M]. Norwood, MA: Artech House Publishers, 2008.
- [8] 赵家升,杨显清,杨德强.电磁兼容原理与技术[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [9] 中国人民解放军总装备部.GJB 151B-2013 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. 北京:总装备部军标出版社,2013.
- [10] 孙越山.舰船典型结构对短波天线隔离度的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
- [11] 肖晓伟,肖迪,林锦国,等.多目标优化问题的研究综述[J]. 计算机应用研究,2011,28(3): 805-827.
XIAO Xiaowei, XIAO Di, LIN Jinguo, et al. Overview on multi-objective optimization problem research [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 805-827.
- [12] GEN M, CHENG R W. Genetic algorithms and engineering optimization [M]. New York: Wiley-Interscience, 1999.
- [13] 张超群,郑建国,钱洁.遗传算法编码方案比较[J]. 计算机应用研究,2011,28(3): 819-821.
ZHANG Chaoqun, ZHENG Jianguo, QIAN Jie. Comparison of coding schemes for genetic algorithms [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 819-822.
- [14] 蒋艳,黎向锋,左敦稳,等.多种改进选择算子的遗传算法性能比较与应用研究[J]. 中国制造业信息化,2010,39(11): 46-50.
JIANG Yan, LI Xiangfeng, ZUO Dunwen, et al. A comparison and application on performances of multiple genetic algorithms adopting improved selection operators [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2010, 39(11): 46-50.
- [15] 王燕军,梁治安.最优化基础理论与方法[M]. 上海:复旦大学出版社,2011:16-17.
- [16] 毕季明,黄小华.海军舰船电磁兼容控制技术与措施[J]. 舰船电子工程,2007,27(2): 201-203.
BI Jiming, HUANG Xiaohua. Control technology and measures of ship electromagnetic compatibility [J]. Ship Electronic Engineering, 2007, 27(2): 201-203.
- [17] 顾宝良.通信电子线路[M]. 北京:电子工业出版社,2013:75-79.
- [18] 中国人民解放军海军装备部.HJB 34A-2007舰船电磁兼容性要求[S]. 上海:海军标准化办公室,2007.

[责任编辑:田 甜]