

# RHS 技术在舰载天线优化布局中的应用

张 崎<sup>1,2</sup> 赵晓楠<sup>1,2</sup> 吴 炜<sup>2</sup> 喻 菁<sup>1,2</sup>

(1 电磁兼容性国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430064;

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 针对舰载通信天线布置特性, 综合应用典型启发式随机搜索技术(RHS)和数值仿真技术, 对传统天线布局方法进行改进。以遗传算法为例, 建立其与舰载天线优化布局的两类对应关系: 天线优化布置参数与遗传算法特征值的关系; 天线优化布置操作与遗传算子的关系。通过矩量法、多目标优化算法和权重系数变化法, 对天线优化布局问题进行量化分析, 解决了多参数协调控制复杂平台天线优化布局问题。在此基础上构造了一个具有理想导电面的舰船平台, 以具体实例验证了理论模型的正确性。最终数值计算结果和试验结果符合较好, 表明采用 RHS 技术获取的天线布局方案优于传统的天线布局方法, 且可兼顾精度和效率。

**关 键 词:** 舰载天线; 优化布局; 启发式随机搜索; 遗传算法; 矩量法

中图分类号: U675.7 文献标识码: A 文章编号: 1671-4512(2008)07-0037-04

## Application of random heuristic search to ship-boarded antenna arrangement

Zhang Qi<sup>1,2</sup> Zhao Xiaonan<sup>1,2</sup> Wu Wei<sup>2</sup> Yu Jing<sup>1,2</sup>

(1 The National Key Laboratory of EMC, Wuhan 430064, China; 2 China Ship Development and Design Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** According to the characteristics of ship-boarded antenna arrangement, the traditional approach to optimization of antenna arrangement was improved by using typical random heuristic search and numerical simulation technology. The optimization of antenna arrangement controlled by many parameters was quantitatively solved by using the moment method (MoM), multi-objective optimization algorithm and the weight coefficients approach. An ideal naval vessel was modeled. The correctness of proposed theoretical model was validated by the simulation results. The numeric result is consistent with experiments result. It is indicated that the approach of antenna placement based on RHS is superior to the traditional approach, and can take account of accuracy and efficiency.

**Key words:** ship-boarded antenna; optimal arrangement; random heuristic search(RHS); genetic algorithms(GAs); moment method (MoM)

舰载天线布局是逐步“寻优”的过程。诸如统计方法<sup>[1]</sup>、物理仿真技术<sup>[2]</sup>和数值仿真技术<sup>[3]</sup>等传统舰载天线布局方法, 获得的试验或计算数据对天线布局的支撑都是单向的。国外有报导采用优化方法解决了单目标、无约束条件的机载天线优化布局问题<sup>[4]</sup>。该方法至今还未拓展到舰船领域, 关键是舰载天线布局属于复杂多目标约束优化问题。本文从舰船总体电磁兼容性设计角度出

发, 针对通信天线布置特性, 采用数值仿真技术和典型启发式随机搜索技术实现舰载通信天线优化布局。

## 1 天线布局与遗传算法对应关系

遗传算法<sup>[5]</sup>是一种典型的启发式随机搜索方法。分析发现, 在舰载天线优化布局与遗传算法之

收稿日期: 2006-11-14.

作者简介: 张 崦(1981-), 女, 工程师, E-mail: zhangqi0225@yahoo.com.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50209003)。

间存在两种对应关系:舰载天线优化布置参数与遗传算法特征值的对应关系;舰载天线优化布置操作与遗传算子的对应关系。

本文研究的舰载天线布局问题是在天线自身电性能参数和结构尺寸一定的前提下,进行优化布置的。为此,选取待优化天线的位置坐标作为优化变量,即遗传算法所处理的对象。此外,舰船上可供天线布置的空间十分有限,通信天线通常是布置在舰船的甲板面上,而甲板上有些区域是不宜布置天线的,如直升飞机使用区域、导弹发射区域、燃油装卸区域和军械储藏区域附近。同时,在舰艇的有限空间内,收发天线是分区布置的。因此,甲板上可供通信天线布置的区域是离散的,天线在舰上所处的位置具有随机性。将天线的位置坐标作为优化变量能较好地处理变量取值区间离散化的问题。

当舰载天线布局的变量与遗传算法处理对象的对应关系确定后,遗传算法所包含的个体、群体和染色体等特征值在舰载天线布局问题中的具体涵义可表征如下:**a.** 个体。表示某种天线布局方案,可由参与优化的所有天线位置集合表示。该集合可用于表征天线布置的坐标空间特征。**b.** 群体。表示  $N$  种天线布置方案( $N$  为群体规模)。**c.** 染色体。表示某种天线布局方案的表征形式,即参与优化的所有天线位置集合的编码组合。**d.** 遗传基因。表示参与优化的某副天线在某方位轴上的位置坐标。**e.** 编码方式。采用实数编码方式,以便在优化中引入与本问题相关的启发式信息。

舰载通信天线布局关心的众多参数中,天线间的隔离度和天线方向图是两项最主要的技术参数,它们分别表征了天线不同的电磁参数。为此,优化目标是使整个天线系统的隔离度提高和方向图失真度降低。因此,遗传算法中的适应度函数是用于评价各种天线布局方案优劣程度的函数。

舰载天线优化布置操作与遗传算子的对应关系可表述如下:

- a. 选择。** 用于将每一代群体中适应度函数值较大的天线布局方案保留下来并遗传到下一代。
- b. 交叉。** 用于在天线的可布置区域内搜索天线的安装位置。它不仅将原有的优良天线位置遗传给下一代布局方案,并产生新的天线布局方案。
- c. 变异。** 保证了天线布局方案的多样性,用于在局部范围内搜索天线的安装位置,避免在搜索中丢失有用的位置信息而陷入局部解。通过该遗传算子,可以从局部角度出发使天线布局方案更加逼近最优方案。

## 2 天线优化布局问题的量化分析

舰载通信天线多为鞭天线,鞭天线问题可以等效成线状结构。假设截面积半径为  $a$  和长度为  $L$  的天线为良导体,则天线表面处的场强<sup>[6]</sup>

$$E_z = [1/(j\omega \epsilon_0)] \cdot$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} \left[ \frac{\partial^2 G(z, z')}{\partial z^2} + k^2 G(z, z') \right] I(z') dz', \quad (1)$$

式中:  $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ ;  $I(z')$  为沿线电流分布;  $z$  和  $z'$  为导体表面上和轴上任意一点的坐标。自由空间格林函数

$$G(z, z') = e^{-jk\sqrt{a^2 + (z - z')^2}} / (4\pi \sqrt{a^2 + (z - z')^2})$$

因此,式(1)可化为

$$E_z = \frac{1}{j4\pi a \epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} I(z') e^{-jkr} r^{-5} \cdot$$

$$[(1 + jkr)(2r^2 - 3a^2) + k^2 a^2 r^2] dz',$$

式中  $r = \sqrt{a^2 + (z - z')^2}$ 。因导体表面上各点电场的切线分量为零,即

$$(E_z^{(i)} + E_z) |_t = 0, \quad (2)$$

式中  $E_z^{(i)}$  表示外加在天线上的电场强度。式(2)还可表示为

$$E_z^{(i)} |_t = -\frac{1}{j4\pi a \epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} I(z') G_1(z, z') dz', \quad (3)$$

式中

$$G_1(z, z') = (e^{-jkr} / r^5) [(1 + jkr) \cdot (2r^2 - 3a^2) + k^2 a^2 r^2].$$

对包括载体结构(甲板、桅杆、桥楼、烟囱等)在内的天线——散射体系统,采用矩量法的基本原理可以较容易地求解式(3)中的  $I(z')$ 。采用整域基余弦函数和点匹配法,式(3)可化为

$$E_z^{(i)} |_t = \frac{j}{4\pi a \epsilon_0} \sum_{n=1}^N I_n \int_{-L/2}^{L/2} G_1(z_m, z') \cdot \cos(2n-1)(\pi z'/L) dz', \quad (4)$$

式中:  $N$  表示天线全长  $L$  上的整域基余弦函数的数目;  $m$  表示匹配点的位置,  $m=1, 2, \dots, N$ 。将式(4)写成代数形式,有

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = E_z^{(i)} |_t;$$

$$Z_{mn} = \frac{j}{4\pi a \epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} G_1(z_m, z') \cdot \cos(2n-1)(\pi z'/L) dz'.$$

相应的矩阵形式为

$$[Z][I] = [U], \quad (5)$$

式中  $[Z]$ ,  $[I]$  和  $[U]$  分别为广义阻抗、电流和电压矩阵。采用矩阵反演或解复系数线性方程组的方

法,可求解出式(5)中的电流矩阵 $[I]$ ,得出电流分布函数 $I(z')$ ,进而求出天线的隔离度 $L$ 和方向图参数.方向图的优劣由失真度 $\sigma$ 进行表征,

$$\sigma = \left[ \frac{1}{M' - 1} \sum_{q=1}^{M'} (E_q - E_a)^2 \right]^{1/2},$$

式中: $M'$ 表示方向图上所取的计算点数; $E_q$ 为方向图上各计算点的值,表示某方位上的场强值; $E_a$ 表示方向图上各计算点的算术平均值,即场强平均值, $E_a = \frac{1}{M'} \sum_{q=1}^{M'} E_q$ .

通过对天线的坐标空间特征和频率空间特征进行分析,以天线的位置参数为优化变量,同时考虑全频段的天线优化布局问题,采用权重系数变化法将多目标优化问题转化为单目标问题求解,建立如下舰载通信天线优化布局的目标函数

$$\min F(C, f_p) = \sum_{p=1}^n \omega_p F_p(C, f_p), \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} F_p(C, f_p) = & -a_1 \sum_{i=1, j=1, i < j}^M d_{ij} \cdot \\ & L_y(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, f_p) + \\ & L_y^0(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j, f_p) + \\ & a_2 \sum_{i=1}^M t_i \frac{\sigma_i(x_i, y_i, z_i, f_p)}{\sigma_i^0(x_i, y_i, z_i, f_p)}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{m'}\} = \{(x_1, y_1, z_1),$$

$$(x_2, y_2, z_2), \dots, (x_{m'}, y_{m'}, z_{m'})\},$$

$C$ 为参与优化的天线位置集合,即遗传算法中的个体,群体可表示为 $[C_1, C_2, \dots, C_N]^T$ , $c_i$ 为优化变量; $m'$ 为参与优化的通信天线数量; $x_i, y_i$ 和 $z_i$  $(i=1, 2, \dots, m')$ 分别为天线 $i$ 的 $x, y$ 和 $z$ 坐标; $n$ 为频率点的个数; $F_p(\cdot)$ 表示在频率 $f_p$ 时的目标函数; $\omega_p$ 为权重系数, $\omega_p \in [0, 1]$ 且 $\sum_{p=1}^n \omega_p = 1$ ; $M$ 表示需要考虑的天线数量且 $M \geq m'$ ; $L_y(\cdot)$ 表示天线 $i$ 与 $j$ 之间的空间隔离度; $\sigma_i(\cdot)$ 表示天线 $i$ 的方向图失真度; $L_y^0(\cdot)$ 和 $\sigma_i^0$ 均为常量,且满足 $\forall L_y(\cdot) \leq L_y^0(\cdot)$ 和 $\forall \sigma_i(\cdot) \leq \sigma_i^0(\cdot)$ ; $d_{ij}$ , $t_i$ , $a_1$ 和 $a_2$ 为权重系数,取值区间均为 $[0, 1]$ 且满足 $\sum_{i=1, j=1, i < j}^M d_{ij} = 1$ , $\sum_{i=1}^M t_i = 1$ 和 $a_1 + a_2 = 1$ .

遗传算法对目标函数的使用是由适应度函数来体现的.为此,根据遗传算法的特征,对式(6)和(7)进行一定的转化,导出相应的适应度函数 $F'(C, f_p)$ ,即有

$$\max F'(C, f_p) = \sum_{p=1}^n \omega_p F'_p(C, f_p),$$

式中 $F'_p(C, f_p)$ 表示天线工作在 $f_p$ 时的适应度函数,

$$\begin{aligned} F'_p(C, f_p) = & a_1 \sum_{i=1, j=1, i < j}^M d_{ij} \frac{L_y(\cdot)}{L_y^0(\cdot)} + \\ & a_2 \sum_{i=1}^M t_i \frac{\sigma_i^0(\cdot)}{\sigma_i(\cdot)}. \end{aligned}$$

考虑舰载通信天线的布置特性和标准规范中关于舰载天线布局的电磁兼容性要求<sup>[6]</sup>,构建相应的约束条件模型

$$D_{r_{ij}}(\cdot) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq 3;$$

$$D_{t_{ij}}(\cdot) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq$$

$$\min\{l_{t_i}, l_{t_j}\};$$

$$D_{r_{ij}}(\cdot) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq D_1(\cdot);$$

$$\sqrt{(x_i - x')^2 + (y_i - y')^2} > D_2(x_i, y_i, x', y');$$

$$L_{1r_{ij}}(\cdot) \geq 40 \text{ dB}; \quad \sigma_i(\cdot) \leq 6 \text{ dB},$$

式中: $D_{r_{ij}}(x_i, y_i, x_j, y_j)$ 为同时工作的接收天线 $i$ 和 $j$ 之间的水平距离; $D_{t_{ij}}(x_i, y_i, x_j, y_j)$ 为同时工作的发射天线 $i$ 和 $j$ 之间的水平距离; $l_{t_i}$ 和 $l_{t_j}$ 分别表示发射天线 $i$ 和 $j$ 的长度; $D_{r_{ij}}(x_i, y_i, x_j, y_j)$ 为天线 $i$ 和 $j$ 之间的水平距离; $D_1(x_i, y_i, x_j, y_j)$ 为天线 $i$ 和 $j$ 必须要满足的间距; $D_2(\cdot)$ 为布置于同一平面上的天线与舰面设备之间规定的最小距离; $(x', y')$ 为舰面设备上任意一点的 $x$ 和 $y$ 坐标; $L_{1r_{ij}}(\cdot)$ 为主接收天线 $i$ 与主发射天线 $j$ 之间的隔离度.

### 3 数值计算分析

本文构造了一个具有理想导电面的舰船平台,并且该平台具备驱逐舰的主要结构形式和布置形式,如图1所示.

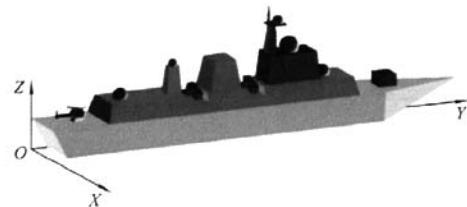


图1 舰船平台的三维实体模型

假设在舰船平台上布置9副通信天线( $1^\circ \sim 9^\circ$ ),其中天线 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ 和 $3^\circ$ 为接收天线,布置于艏部;天线 $4^\circ$ 和 $5^\circ$ 分别布置于烟囱的两侧;天线 $6^\circ \sim 9^\circ$ 为发射天线,布置于艉部,假定天线 $1^\circ \sim 7^\circ$ 的位置固定,见图2.本文将分别采用缩尺船模法和遗传算法来获取天线 $8^\circ$ 和 $9^\circ$ 的最优位置.此外,要求这两副天线对称分布于舰船02甲板的左右舷,以保证这两副天线在 $360^\circ$ 范围内的通信.天线 $8^\circ$ 和 $9^\circ$ 的可布置区域如图3中阴影部分所

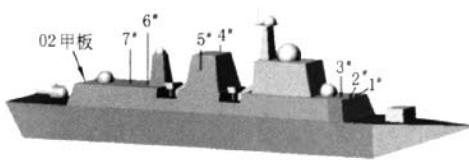


图2 天线1°~7°的布局示意图

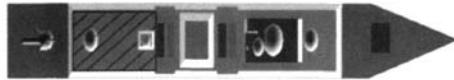


图3 俯视图:天线8°和9°的可布置区域

(剖面图部分)

示,即 $x \in [1.6, 14.4]$ 、 $y \in [21, 51]$ 且 $z=16$ ,为此,天线8°和9°的安装位置坐标分别限定为:

$$8^{\circ} \begin{cases} x_8 \in [1.6, 14.4], \\ y_8 \in [21, 51], \\ z_8 = 16; \end{cases}$$

$$9^{\circ} \begin{cases} x_9 \in [1.6, 14.4], \\ y_9 \in [21, 51], \\ z_9 = 16. \end{cases}$$

采用缩尺船模法和遗传算法得到的天线8°和9°的最优位置分别如图4和5所示,两种布局方案的天线位置坐标见表1,表中:a为缩尺船模

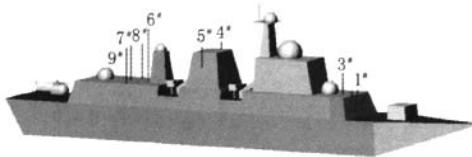


图4 缩尺船模法获得的天线布局方案

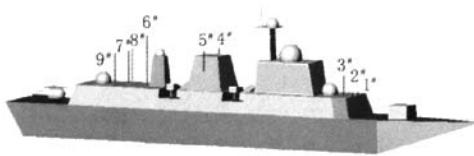


图5 基于遗传算法的数值仿真技术获得的天线布局方案

法;b为基于遗传算法的数值仿真法.从表1中可以看出:在满足约束条件的前提下,遗传算法优化获得的天线布局方案与缩尺船模法获得的布局方案具有较好的一致性.相比于后者,遗传算法获得的天线8°和9°的位置都更加靠近两舷和舰艉.经分析可知,天线8°和9°所处的位置都更加远离舰艉的接收天线和上层建筑,使得收发天线的

表1 天线8°和9°的两种布局方案

方法	位置	
	天线8°	天线9°
a	(3.9, 36.0, 16)	(12.1, 36.0, 16)
b	(2.3, 33.2, 16)	(13.7, 33.2, 16)

隔离度增大,发射天线的方向图受到上层建筑的影响减小,天线布局方案朝着最优的方向发展.进一步分析可知:在天线优化布置过程中,遗传算法产生了大量截然不同的高性能天线布局方案,保证了天线布局方案的多样性.随着迭代次数的增加,天线8°和9°的位置逐步趋近于问题的最优解.此时,遗传算子根据获取的遗传信息仍将继续对搜索空间的细节进行局部搜索,从而获得问题的全局最优解.

通过本文的研究可得出以下结论:

a. 在数值仿真技术中引入启发式随机搜索技术,实现了舰载通信天线优化布局.数值计算表明:该方法获取的天线布局方案优于传统的天线布局方法.同时,采用启发式随机搜索技术进行舰载天线布局可兼顾精度和效率.

b. 采用权重系数变化法解决了多参数协调控制复杂平台天线优化布局问题.

## 参 考 文 献

- [1] Best S R. On the use of scale brass models in HF shipboard communication antenna design[J]. IEEE Antenna's and Propagation Magazine, 2002, 44(2): 12-22.
- [2] Logan J C, Li S T, Olson I C. A role model for electromagnetic system design[J]. IEEE Potentials, 1988, 7(4): 34-38.
- [3] Rockway J W, Li S T, Russell L C. EM design technology for topside antenna system integration[J]. Naval Engineers Journal, 2001, 113(1): 33-43.
- [4] Ibatoulline E A. The antennas on a mobile board and their electromagnetic compatibility[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1): 119-124.
- [5] Davis L D. Handbook of genetic algorithms[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [6] Werner D H, Werner P L, Breakall J K. Some computational aspects of Pocklington's electric field integral equation for thin wires[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1994, 42(4): 561-563.

## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、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](http://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>