

机载通信系统 EMC 设计中天线布局优化设计

邱扬 俞智敏 袁军 田锦

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

摘要:首先介绍了电磁兼容(EMC)技术中计算天线间耦合度的一种数学模型并在此基础上提出了机载通信系统天线布局优化的目标函数,然后详细介绍了利用遗传算法(GAs)实现天线布局优化的方法,最后给出了一个优化实例。

关键词:电磁兼容;优化;耦合度;天线;遗传算法

中图分类号:TN03

1 引言

天线作为一种高效的发射和接收设备目前应用十分广泛,车辆、飞机、舰船以及各式各样的通信设备几乎都离不开天线,因此,天线的干扰特性研究也就成为 EMC 技术中不可忽视的一个课题。在 EMC 技术中,衡量天线间干扰程度大小的一个重要指标参量就是耦合度,而 EMC 设计时天线的布局优化设计也是从如何降低天线间的耦合度提高其有用信号的传输效率的角度出发的。

在机载通信系统中,由于系统中无线通信设备比较多,而且由于考虑到飞机的飞行性能,安放天线的位置有一定的局限,因此系统中 EMC 问题比较突出。在系统上装设备自身 EMC 性能无法在提高的前提下,要降低这种干扰只能通过天线布局优化的方法,通过降低各天线对间的耦合度达到减小干扰的目的。

传统的 EMC 设计中天线布局优化大多是采用实测探的方法,拟定多个方案进行布局实测,然后从多种天线布局中选取一种最优的方案。这种方法由于缺乏理论上的指导往往试验了很多种方案后仍不能找出一种最好的方案,白白耗费很多时间。因此,寻找到一种天线布局设计快捷而准确的方法很有必要。本文首先介绍了机载天线间耦合度计算的一个数学模型,并在此基础上提出了天线布局优化的目标函数,然后采用遗传算法(GAs)这种前沿的数学优化算法给出了机载通信系统 EMC 设计中天线布局优化设计的一种方法。

2 耦合度计算的数学模型

耦合度是判断天线间干扰程度的重要参数,对于机载通信天线由于天线间距离较大且工作频率

较高,可以把天线间的干扰考虑为远场干扰。

天线间耦合度定义如下:

$$c = 10 \log \frac{P_r}{P_t} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

上式中 P_r 接受天线端口的输入功率, P_t 是发射天线端口的输出功率,如图 1 所示。

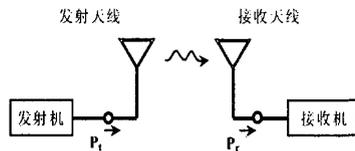


图 1 发射及接收天线系统

式(1)只适用于远场耦合度计算,其中

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 S}{(4\pi L)^2} \quad (2)$$

上式中, G_t 和 G_r 分别是接收天线及发射天线的增益, λ 为波长, S 是接收及发射天线间的极化匹配系数, L 是两天线间的最短距离。把(2)式代入到(1)中,就可以得到远场耦合度的计算公式:

$$c = 10 \log(G_t) + 10 \log(G_r) + 10 \log(S) + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right) \quad (3)$$

考虑到机身的遮挡效应,应该在机载通信系统天线间耦合度计算公式中加入屏蔽系数^[1]。

$$K_1 = \frac{A}{\eta A + \zeta} \quad K = 10 \log_{10} K_1 \quad (4)$$

上式中

$$A = \rho V_s^2 \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda L}} \quad (5)$$

η 和 ζ 的值取决于 A 的值,如下

$$\eta = \begin{cases} 5.476 \times 10^{-3}, & \text{当 } A < 26 \\ 3.340 \times 10^{-3}, & \text{当 } A \geq 26 \end{cases} \quad (6)$$

$$\zeta = \begin{cases} 0.5083, & \text{当 } A < 26 \\ 0.5621, & \text{当 } A \geq 26 \end{cases} \quad (7)$$

(5)式中, ρ 是圆柱的半径, Ψ_s 是两天线的夹角, L 是两天线间的最短距离, 详见图2。

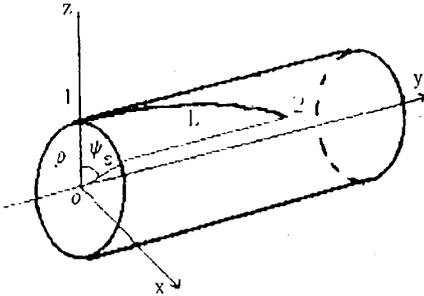


图2 屏蔽系数计算模型

加入屏蔽系数后, 耦合度公式如下

$$c = 10\log(G_t) + 10\log(G_r) + 10\log(S) + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right) - K \quad (8)$$

下面本文将介绍耦合度公式(8)中一些参数的计算过程。

2.1 天线极化匹配系数

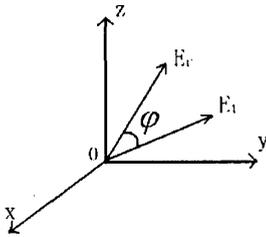


图3 天线线性极化

这里我们把接收和发射天线都看成线性极化, 见图3。图中 φ 是发射和接收天线极化平面的夹角, E_t 和 E_r 分别是两天线产生的电场强度。

接收天线上的感应电动势 e 与接收天线的高度 h 、 E_t 及 $\cos\varphi$ 成正比, 见下式

$$e \sim hE_t \cos\varphi \quad (9)$$

从上式可以知道接收天线收到的干扰功率 P_r 正比于

$$P_r \sim h^2 E_t^2 \cos^2\varphi \quad (10)$$

极化匹配系数是标量, 它没有方向性, 见下式

$$S = \frac{P_r}{P_{r_{\max}}} \quad (11)$$

式中

$$P_{r_{\max}} \sim h^2 E_t^2 \quad (12)$$

把(12)代入(11)式中得到极化匹配系数如下

$$S = \frac{h^2 E_t^2 \cos^2\varphi}{h^2 E_t^2} = \cos^2\varphi \quad (13)$$

从式(13)中可以看出当两天线极化方向相同, 即 $\varphi = 0$ 时, 匹配系数最大为 $S = 1$ 。

2.2 天线间最短距离 L

计算过程中把飞机机身等效为一个圆柱体, 因

此求天线间最短距离的问题就可以等效为求解圆柱体表面两点间在圆柱体表面上的最小距离, 如图4所示。显然在直角坐标系 (x, y, z) 中求这个距离比较复杂, 我们将其转化到圆柱坐标系 (ρ, φ, y) 中求解, 这里

$$\rho = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (14)$$

φ 的值取决于直角坐标系中 x 和 y 的大小及符号

$$\varphi = \tan^{-1}\left[\frac{z}{x}\right], \text{ 当 } x > 0, z \geq 0 \quad (15)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \text{ 当 } x = 0, z > 0 \quad (16)$$

$$\varphi = \pi + \tan^{-1}\left[\frac{z}{x}\right], \text{ 当 } x < 0 \quad (17)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \text{ 当 } x = 0, z < 0 \quad (18)$$

$$\varphi = 2\pi + \tan^{-1}\left[\frac{z}{x}\right], \text{ 当 } x > 0, z \leq 0 \quad (19)$$

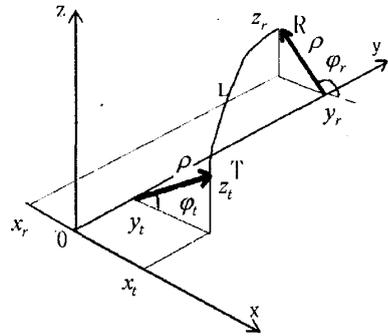


图4 天线间最短距离

从图4中可以看出, 在圆柱坐标系中, 安装在机身上的两天线之间沿着机身表面的最小距离为

$$L = \sqrt{\rho^2(\varphi_r - \varphi_t)^2 + (z_r - z_t)^2} \quad (20)$$

式中, ρ 表示机身的半径, 下标 t 和 r 分别代表接收和发射天线。

3 天线布局优化的数学模型及实现

3.1 优化模型

在前面的论述中, 我们建立了机载通信天线间耦合度计算的数学模型, 在此基础上, 我们接下来建立天线布局优化设计的数学模型。

如前所述, 工作在一定频率下的天线间耦合度只与两天线间距离有关, 因此天线布局优化中自变量就是天线的几何坐标而耦合度就是随天线的几何位置参量而变化的因变量。

对于一个多天线系统, 在进行 EMC 设计时, 天线布局优化的目标是降低整个天线系统的耦合度, 即使所有天线对耦合度值的整体趋势保持最

低,而不是只保证某对天线的耦合度能达到最小值。对于一个 N 天线系统,其耦合天线对的数目为 $m = C_N^2$,由此我们结合权重系数法给出天线布局优化的目标函数表达式如下:

$$\begin{cases} f(\Psi) = \sum_{i=1}^m w_i C_i(\Psi_1^i, \Psi_2^i, \Psi_3^i, \dots) \\ \Psi_{1\min}^i \leq \Psi_1^i \leq \Psi_{1\max}^i \\ \Psi_{2\min}^i \leq \Psi_2^i \leq \Psi_{2\max}^i \\ \Psi_{3\min}^i \leq \Psi_3^i \leq \Psi_{3\max}^i \\ \dots \dots \dots \end{cases} \quad (21)$$

上式中解向量为 $\Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \dots]^T$,解向量中各元素为天线对中各天线的几何位置参量。 w_i 为第 i 个天线对的权重系数,代表这对天线间的耦合度在整个系统的耦合度曲线中的重要程度, $C_i(\Psi^i)$ 为这对天线以几何参量为自变量的耦合度函数。

3.2 优化算法及优化过程的实现

从优化模型看出,优化过程实际上是一个有约束条件的最小值问题。遗传算法(GA)适用于各种各样复杂形式的函数,比如连续函数、离散函数、凹函数、凸函数、低维函数、高维函数、确定函数和随机函数。它的执行条件简单,只需要搜索方向和相应的适应度函数,而且它采用的是多点概率搜索法,执行效率高。因此我们采用 GA 来求解这个问题。

首先要对解向量进行编码,将 n 维向量 $\Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n]^T$ 用 n 个记号 $\Psi_i (i=1, 2, \dots, n)$ 所组成的符号串 Ψ 来表示:

$$\Psi = \Psi_1 \Psi_2 \dots \Psi_n \Rightarrow \Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n]^T \quad (22)$$

把 Ψ_i 看作一个遗传基因,这样 Ψ 就可以看作是 n 个遗传基因构成的染色体。所有的染色体 Ψ 组成了问题的搜索空间,因此对问题的最优解的搜索是通过对染色体 Ψ 的搜索来完成的。染色体 Ψ 也称个体 Ψ ,在本文的算法中,对于每一个个体我们通过以下公式函数计算其对应的适应度。

$$F(\Psi) = \begin{cases} C_{\max} - f(\Psi), & \text{if } f(\Psi) < C_{\max} \\ 0, & \text{if } f(\Psi) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (23)$$

遗传算法的对象是由 M 个个体组成的集合,称为群体。算法是一个反复叠代的过程,第 t 代群体表示为 $P(t)$,过经一代遗传及进化后,得到 $t+1$ 代群体,以此类推,群体经过不断的遗传及进化,并且每次都按照优胜劣汰的规则把适应度较高的个体更多的遗传到下一代,这样最终在群体中能够得

到最优良的个体 Ψ ,对其进行解码就能得到问题的最优解。遗传算法中主要用以下三种算子对群体进行遗传操作:

- 选择算子;
- 交叉算子;
- 变异算子。

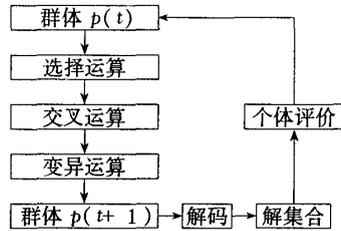


图5 遗传算法运算过程示意图

图5中所示为遗传算法的运算过程示意图。在本文的遗传算法优化过程中,遵循以下几条基本原则:

- (1) 优化变量采用二进制编码方式;
- (2) 采用轮盘赌选择方式;
- (3) 采用当点交叉算子;
- (4) 采用二进制变异。

4 天线布局优化实例

下面我们将给出一个飞机机身天线布局优化的例子。如图5所示,机身长为40米,半径为2米,在机身腹部共准备架设3根UHF,例子中假定有一根天线的位置固定,其坐标为(0, 15.0, -2.0),单位为米。

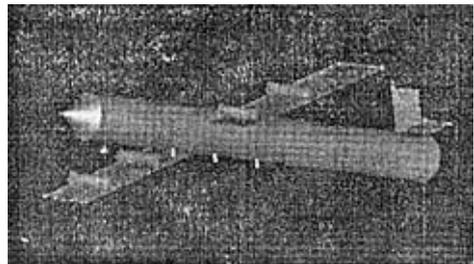


图6 飞机模型

图6中坐标系的选择与图2相同。对于第二和第三根天线我们对它的安装范围进行了限定,要求如下:

$$\begin{cases} -2.0 \leq x_2 \leq 2.0 \\ 5.0 \leq y_2 \leq 10.0 \\ -2.0 \leq z_2 \leq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} -2.0 \leq x_3 \leq 2.0 \\ 20.0 \leq y_3 \leq 25.0 \\ -2.0 \leq z_3 \leq 0 \end{cases}$$

当然,为了保证天线安装在飞机表面,上面式

子中 x 和 y 坐标还必须满足以下条件:

$$\sqrt{x^2 + z^2} = 2.0$$

给定上述条件后我们就可以通过遗传算法确定第2和第3根天线的位置以使这三根天线间的干扰特性在VHF频段内达到最优。在此我们给出600MHz这个频点的优化实例,对于其它的频点优化过程完全相同。

由于天线工作的频点为600MHz,各个天线间的耦合方式为远场耦合,因此可以应用本文中的耦合度模型来计算天线间耦合度。

对于这个简单的天线布局优化的算例,采用SMA只用一两步叠代就确定了天线2和天线3的最优位置。天线2的坐标为:

$$x_2 = -2.0m, y_2 = 5.0m, z_2 = 0;$$

天线3的坐标为:

$$x_3 = 2.0m, y_3 = 25.0m, z_3 = 0;$$

各个天线间的耦合度值如下所示:

$$c_1 = -48.88dB, c_2 = -58.95dB, c_3 = -48.88dB;$$

求解过程中遗传算法运行参数的设置如表1所示。

表1 遗传算法运行参数

种群大小	30
最大世代数	100
选择方法	轮盘赌
交叉率	0.6
变异率	0.03
染色体长度	40

考虑到系统中各天线对间耦合重要性都是相同的,因此以上优化过程中目标函数中的各个权值取1。算例中优化变量较少,随着天线

数量的增加,优化过程中只是增加了优化的变量,

(上接第104页)

数据遭到破坏,影响程序的正确运行,可在RAM相距较远的不同区域内存放若干个数据备份,并在该数据区的特定单元内存入标志字,当发现某些标志遭到破坏时,可在其余的备份数据区调用备份数据恢复它,这样,可使部分数据出现差错时不影响系统的正常工作。

3.6.2 在外存中保护

定时将需要保护的数据送到外存存放,重新启动后调出来使用,使系统受到的影响减少。

3.7 程序固化

通信和控制系统中的专用操作系统软件应当固化在内存中,可以提高系统软件可靠性。

4 结束语

通信和控制控制系统的抗干扰设计是工程实

际中遇到的普遍问题,在工作中必须认真分析各种干扰信号的来源,采取各种有效措施,提高系统的可靠性。

参考文献

- [1][日]山奇弘郎. 电子电路的抗干扰技术[M]. 北京:科学出版社,1989
- [2]王定华. 电磁兼容原理与设计[M]. 电子科技大学出版社,1995
- [3]高树先. 军用加固计算机抗干扰技术[J]. 红外与激光工程,1996,(12)
- [4]周玉兰,牟安成. 海军舰船电磁兼容性技术[M]. 海潮出版社,1999
- [5]太原市依福特信息技术有限公司. 电磁兼容技术指南[C],2003

5 结束语

本文通过建立天线布局优化的数学模型,为电磁兼容技术中的天线布局设计技术提供了理论上的支持,使优化过程有理可依,增强了优化过程的准确性;而采用遗传算法这种比较先进的数学优化算法作为天线布局优化的算法又使优化的效率得到了充分的保证。对实际工程中机载天线的布局优化有较好的指导作用。

参考文献

- [1]M. D. Siegel. Aircraft antenna-coupled interference analysis[M]. in Proc. Nat. Aerospace Electronic Conf., OH, 1969:535-540
- [2]E. A. Ibatoulline. Electromagnetic compatibility of antennas on a mobile board[M]. in Proc. 3rd Int. Symp. EMC, St. Petersburg, Russia, 1997:79-83
- [3]王小平,曹立明. 遗传算法-理论 应用与软件实现[M]. 西安交通大学出版社,2002
- [4]周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 国防工业出版社,1999
- [5]陈穷. 电磁兼容性工程设计手册[M]. 国防工业出版社,1993
- [6]刘鹏程,邱扬. 电磁兼容原理及技术[M]. 高等教育出版社,1993

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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),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>