

# VHF/UHF 天线宽带匹配网络的优化设计与实验研究

孙保华, 纪奕才, 刘其中

(西安电子科技大学天线与电磁散射研究所, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 本文系统地研究了 VHF/UHF 天线宽带匹配网络的设计与制作. 提出遗传算法与模拟退火法相结合的优化设计方法, 解决 VHF/UHF 天线宽带匹配网络制作过程中元件值随频率较大变化引发的难题. 最后, 利用该方法研制了 30 ~ 450 MHz 全向宽带小型化天线的宽带匹配网络. 实验表明, 带内 VSWR < 3.0, 且计算结果与测试结果十分吻合.

**关键词:** 天线; 宽带匹配网络; VHF/UHF; 遗传算法; 模拟退火法

**中图分类号:** TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0797-03

## On the Optimal Design and Experiment of a Broadband Matching Network for a VHF/ UHF Antenna

SUN Bao-hua, JI Yi-cai, LIU Qi-zhong

(Institute of Antennas and EM Scattering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** A study of a broadband matching network for a VHF/UHF antenna is made. First, a new optimal-designing approach is presented, which combines the genetic algorithm (GA) and the simulating annealing method (SA). Second, the problem due to the variation of value of a lumped component in VHF/UHF frequency band is solved. Finally, based on the above method, a broadband matching network for an omnidirectional broadband miniature antenna, with VSWR < 3.0 in 30 ~ 450 MHz, is designed and manufactured, and the calculated results are in good agreements with the experimental results.

**Key words:** antenna; broadband matching network; VHF/UHF; GA; SA

### 1 引言

现代战术保密通信系统中跳扩频技术的快速发展, 对通信系统的关键部件天线的宽带化小型化提出了越来越高的要求. 然而, 单纯依靠调整天线的结构, 往往难以同时满足上述设计要求. 使用天线宽带匹配网络, 则是实现或进一步改善天线宽频带特性的一种有效技术. 然而, 由于天线阻抗一般难以解析表示, 在设计天线匹配网络时传统解析的设计方法<sup>[1]</sup>不再适用. 近年来, 一些学者围绕天线宽带匹配问题进行研究, 并逐渐形成了一些较为实用的数值设计方法. 采用实频数据法(RFM)设计 20 ~ 90 MHz 阻容加载天线宽带匹配网络<sup>[2]</sup>, 采用实频数据法与直接法相结合的方法设计 3 ~ 10 MHz 套筒天线宽带匹配网络<sup>[3]</sup>. 但实用中发现, 上述设计方法存在一些明显的缺陷: (1) 采用局部搜索算法, 使得设计结果对初值的选取较为敏感, 难以获得全局最优解. (2) 在 RFM 设计过程中, 两次优化计算使得设计过程冗长和复杂. (3) 设计包含谐振回路的宽带匹配网络存在一定的困难等. 文献[4]采用一种改进交叉算子的遗传算法, 将网络拓扑和网络元件值进行混合变量的全局优化设计, 克服了上述缺陷.

值得提起的是, 在 VHF/UHF 频段, 实测网络元件特别是较大的电感, 由于分布参数的影响, 其元件值随频率发生较大的变化, 甚至是感性容性畸变. 若仍采用上述方法设计 VHF/UHF 天线宽带匹配网络, 由于设计过程中网络拓扑任意, 使得设计结果最终难以实现. 针对这一问题, 本文将研究一种新方法, 即在设计天线宽带匹配网络时, 采用遗传算法(GA)与模拟退火法(SA)相结合的方法, 对合理的网络形式进行优化计算; 在天线宽带匹配网络制作过程中, 使用所谓的阻抗等效办法, 解决元件值随频率较大变化而引发的难题.

法, 即在设计天线宽带匹配网络时, 采用遗传算法(GA)与模拟退火法(SA)相结合的方法, 对合理的网络形式进行优化计算; 在天线宽带匹配网络制作过程中, 使用所谓的阻抗等效办法, 解决元件值随频率较大变化而引发的难题.

### 2 GA 与 SA 相结合的优化设计方法

#### 2.1 问题描述

图 1 所示为天线宽带匹配问题的一般模型. 其中  $Z_a$  表示天线输入阻抗,  $Z_c$  表示馈线特性阻抗,  $U_g$  和  $R_g$  分别表示信号源电压和内阻. 工程上,  $Z_c$  和  $R_g$  通常采用 50  $\Omega$ . 为了在工作频带内实现天线与信号源之间预定的匹配指标, 在天线与馈线之间串联使用了一个宽带匹配网络. 该宽带匹配网络一般采用集总参数元件(如电感 L、电容 C 和阻抗变换器 T 等)组成, 因而是一个线性、无源、互易二端口网络. 为了便于描述, 可将上述宽带匹配网络概括为 T 型和  $\pi$  型两种类型, 同时, 将其网络支节概括为 L、C、LC 串联、LC 并联、开路和短路六种情况<sup>[3,4]</sup>.

#### 2.2 优化设计

本文采用遗传算法(GA)与模拟退火法(SA)相结合的方法<sup>[7]</sup>优化设计天线宽带匹配网络, 采用使带内采样点上最大驻波比最小为最优化计算的目标函数, 即

$$f = \min \left\{ \max_{i=1, \dots, N} |VSWR(f_i)| \right\}$$

式中,  $f_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  表示带内  $N$  个频率点,  $|VSWR(f_i)|$  和  $VSWR(f_i)$  分别表示频率为  $f_i$  时端口 2 的反射系数和电压驻

收稿日期: 2001-03-19; 修回日期: 2001-10-30

基金项目: “十五”国防科技预研项目 (No. 410010202, 401060302)

波比.

GA 和 SA 相结合优化设计天线宽带匹配网络基本过程是:

(1) 选择网络形式 依据天线输入阻抗具体数据, 兼顾 VHF/UHF 天线宽带匹配网络制作的特点, 选择合理的网络形式, 其方法将在第 3 节中作具体讨论.

(2) 随机产生初始群体  $\{x_i, i=1, \dots, M\}$  个体  $x_i$  由天线宽带匹配网络的所有元件值组成,  $x_i [L_1, \dots, L_r, C_1, \dots, C_q, T]$ . 在进行遗传算法优化设计时,  $x_i$  采用二进制编码表示.

(3) GA 优化设计 遗传算法是借鉴生物界自然选择和遗传机制而形成的一类随机搜索算法<sup>[5]</sup>, 该方法以其简单通用、鲁棒性强的优点, 近年来, 在电磁学研究领域得到了较为广泛的应用<sup>[4,6]</sup>. 选择、交叉和变异是遗传算法的 3 个主要算子, 本文分别采用随机竞争和最佳个体保存的选择机制、一点交叉和位点变异. 电感、电容值均采用 15 位二进制编码表示, 阻抗变换器采用 10 位二进制编码表示<sup>[4]</sup>. 另外, 为了提高计算效率, 克服“早熟”现象的发生, 还使用了基于共享机制的小生境技术<sup>[7]</sup>. 最后, 通过控制遗传的总代数, 获得最优解  $x_1$ .

(4) SA 优化设计 模拟退火法<sup>[8]</sup>是一种基于热力学退火原理建立的随机搜索算法, 通过采用概率双向随机搜索技术, 克服了爬山法极易陷入局部最优解的缺点, 因而是一种能够收敛于全局最优解的优化算法. 以  $x_1$  为初始值, 给定 SA 的初始温度  $T$  和降温系数  $k$ , 进行二次优化计算, 获得最优解  $x_2$ .

(5) 判断是否终止 计算  $(x_1, x_2)$ , 若  $(x_1, x_2) > 0$ , 将  $x_2$  作为一个新个体, 转(2)重新进行计算; 若  $(x_1, x_2) = 0$ ,

则终止, 且  $x_2$  为最优解. 式中的  $\epsilon$  为预先给定的一个常数,  $(x_1, x_2)$  采用

$$(x_1, x_2) = \max_{i=1, \dots, N} |VSWR_1(i) - VSWR_2(i)|$$

其中  $VSWR_1$  和  $VSWR_2$  分别表示网络参数取  $x_1$  和  $x_2$  时端口 2 的电压驻波比.

上述设计过程中具有两个明显的优点: 一方面, GA 与 SA 相结合的设计方法, 不仅消除了单纯使用 GA 因编码造成的量化误差, 而且通过比较两种全局搜索算法的最优解, 提供了一种简单、可靠、易于编程的终止条件, 可以更好的收敛于最优解<sup>[7]</sup>; 另一方面, 对选定的网络拓扑进行优化设计, 不仅提高了计算的效率, 同时由于兼顾了 VHF/UHF 频段网络元件特性, 使得设计结果具有良好的可实现性.

### 3 实测元件值随频率变化问题及其解决方案

在 VHF/UHF 频段, 用于制作天线宽带匹配网络的元件特别是较大的电感, 由于分布参数的影响, 实测值与理想值存在较大的差别, 甚至感性容性发生改变. 图 2 给出了一组具体的对比结果, 其中  $L = 346\text{nH}$ , 采用  $0.4\text{mm}$  漆包线空心绕成. 由图示, 由于分布电容的影响, 实测电抗值在  $f = 420\text{MHz}$  附近发生并联谐振, 而当  $f > 420\text{MHz}$  时, 实测电感已呈现容性. 值得提起的是, 在电感的制作过程中, 改变漆包线的线径、电感线圈的绕制方式, 以及加装磁芯等, 可在很小程度上使上述问题得以改善, 但终不能解决较大的电感随频率较大变化的难题. 另一方面, 在 VHF/UHF 天线宽带匹配网络中, 较大的电感又是获得良好匹配所必需的. 解决这一矛盾的关键就是兼顾实测元件值特性, 选择合理的网络形式进行优化设计.

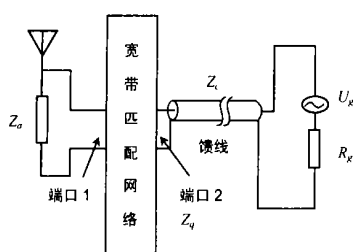


图1 天线宽带匹配问题一般模型

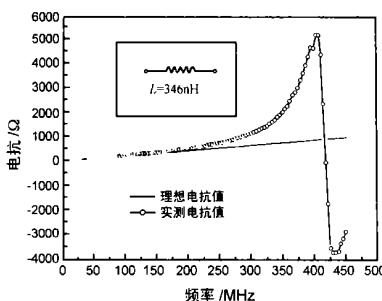


图2 电感实测值与理想值对比曲线

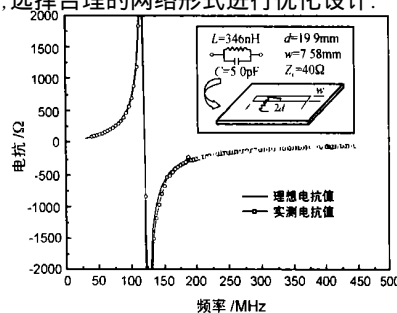


图3 LC 并联谐振电路实测和理想电抗曲线

实验表明, 对于 T 型或  $\pi$  型的 VHF/UHF 天线宽带匹配网络, 在串联支节中, 电感值一般较小, 且元件值随频率变化也较小. 而在并联支节中, 电感值一般较大, 存在上述感性容性畸变现象. 为此, 在确定网络拓扑时, 串联支节可依据天线阻抗, 选用 6 种电路形式中除开路外的任意一种. 而并联支节需采用 LC 并联电路, 以便使用“阻抗等效”办法解决网络制作的难题.

所谓的阻抗等效, 就是将电感的分布电容  $C_p$  归属于 LC 并联谐振电路的电容  $C$  中, 使  $C = C_p + C$ , 其中  $C$  为实际制作网络时的电容值. 这样, 即使  $L$  在带内发生感性容性的改变, LC 电路的电抗实测值与理想值仍可做到较为接近. 图 3 给出了一组具体的对比结果,  $L = 346\text{nH}$ ,  $C = 5.0\text{pF}$ . 由于电感分布电容的影响, 实际制作 LC 并联电路时  $C < C$ . 为了便于

实验调整, 同时考虑到  $C$  的值较小, 制作时  $C$  采用微带开路传输线实现. 对比图中的两条曲线发现, 尽管图 2 所示的电感实测值与理想值存在较大差别, 而 LC 电路的实测值与理想值却十分接近, 从而为网络的整体制作提供了保证. 顺便指出, 在 VHF/UHF 频段, 电容的特性容易保证, 特别是采用贴片式电容, 其元件值随频率变化很小.

### 4 应用实例

VHF/UHF 全向宽带小型化天线<sup>[9]</sup>, 工作频率覆盖  $30 \sim 450\text{MHz}$ , 属于超宽带天线系列. 为增大天线带宽, 该天线采用分段加载单极子天线的形式, 天线高度为  $1.75\text{m}$ , 直径为  $0.019\text{m}$ . 为了满足战术通信系统的需要, 要求天线带内输入驻波比小于 3 和水平方向增益大于  $-3.5\text{dBi}$ <sup>[9]</sup>. 在设计安装宽带匹配网络前, 该天线带内 VSWR 测试结果如图 4(b) 所示.

显然,尽管采取了分段加载措施,带内 VSWR 仍远远不能满足设计要求。

为此,我们利用本文方法优化设计该天线的最佳匹配网络,设计中采用了许多种网络形式分别进行优化,最后选取驻波比特性最好,网络元件最少并易于加工的网络形式。优化设计的最终结果选定为图 4(a) 所示的宽带匹配网络,这是一个 3 阶的 T 型 LC 电路。其中  $L_1 = 68.4\text{ nH}$ ,  $L_2 = 346.0\text{ nH}$ ,  $C_2 = 5.0\text{ pF}$ ,  $L_3 = 35.1\text{ nH}$ ,  $C_3 = 348.0\text{ pF}$ ,  $T = 1.0$ 。带内最大驻波比为 3.5。具体制作时,电感采用了  $0.4\text{ mm}$  漆包线空心绕成,电容  $C_2$  采用微带开路传输线等效,  $C_3$  为贴片式电容,阻抗变换器采用传输线变压器实现,且磁芯选用 NX60 高频磁环,印刷电路板选用厚度  $h = 2.0\text{ mm}$ ,介电常数  $\epsilon_r = 2.65$  的微带板制

成。将匹配网络安装于天线系统中,测试带内 VSWR,其结果如图 4(b) 所示。不难看出,带内 VSWR 得到了极大的改善,同时计算结果与测试结果亦良好吻合。

应该指出的是,不论何种优化方法都是想方设法追求最优解,本文方法乃全局搜索算法,研究表明该方法可以很好的收敛于最优解<sup>[7]</sup>。但受天线固有的输入阻抗的影响,加上最优匹配网络后依然有部分频点无法满足 VSWR  $\leq 3.0$  的设计指标。考虑到天线系统的综合指标,工程上一般采用牺牲小部分增益的方法来换取驻波带宽<sup>[10]</sup>。于是,在匹配网络与馈线之间,进一步使用了一个  $1.0\text{ dB}$  型衰减器予以调节。最后测试结果如图 5 所示。显然,在整个带内 VSWR  $\leq 3.0$ ,而加上衰减器后整个天线网络系统的增益  $> -3.2\text{ dB}$ ,仍满足设计要求。

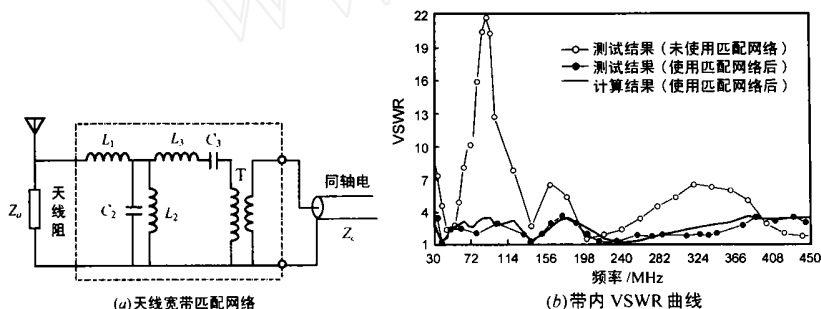


图 4 VHF/UHF 全向宽带小型化天线宽带匹配网络及其测试结果

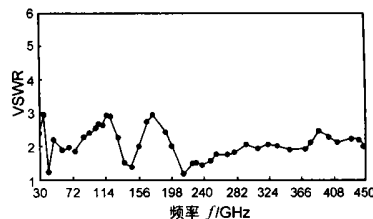


图 5 VHF/UHF 全向宽带小型化天线 VSWR 测试曲线(使用宽带匹配网络和衰减器)

## 5 结论

诚如文中所述,在 VHF/UHF 频段,元件值随频率发生较大的变化,是妨碍天线宽带匹配网络设计与制作的难题。本文介绍了一种实用新方法,即在匹配网络设计过程中,采用 GA 与 SA 相结合的方法,优化设计合理的网络拓扑;在匹配网络制作过程中,使用所谓的阻抗等效办法,成功的解决了这一难题。最后,利用上述方法设计  $30 \sim 450\text{ MHz}$  全向宽带小型化天线的宽带匹配网络,获得了满意的匹配效果。

## 参考文献:

- [1] W K Chen. Theory and Design of Broadband Matching Networks [M]. New York: Pergamon Press, 1976.
- [2] O M Ramahi, R J Mittra. Design of a matching network for an HF antenna using the real frequency method [J]. IEEE Trans on AP, 1989, 47(4): 506 - 509.
- [3] 孙保华,周良明,肖辉. 天线宽带匹配网络的设计与计算方法 [J]. 西安电子科技大学学报. 1999, 27(6): 293 - 297.
- [4] 孙保华,焦永昌,刘其中,张福顺. 遗传算法设计宽带匹配网络 [J]. 电波科学学报. 1999, 14(增刊): 326 - 329.
- [5] D E Goldberg. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning [M]. New York: Addison Wesley, 1986.
- [6] D S Weile, E Michielssen. Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review [J]. IEEE Trans on AP, 1997, 45(3): 343 - 353.
- [7] 陈国良,王煦法,庄镇泉,王东生. 遗传算法及其应用 [M]. 北京:人民邮电出版社, 1999, 5: 101 - 113.

- [8] S Kirkpatrick, J C D Gelatt, M P Vecchi. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220: 671 - 680.
- [9] 刘其中,孙保华,等. 舰载 VHF/UHF 全向宽带小型化天线 [R]. 西安:西安电子科技大学天线与电磁散射研究所, 1999, 12.
- [10] Al Boag, Am Boag, E Michielssen, R Mittra. Design of electrically loaded wire antennas using genetic algorithms [J]. IEEE Trans on AP, 1996, 44(5): 687 - 695.

## 作者简介:



孙保华 男, 1969 年生于河北, 1996 年在西安电子科技大学获工学硕士学位, 现为该校博士研究生, 主要研究方向为宽带小型化天线。



纪奕才 男, 1974 年生于山东, 西安电子科技大学博士研究生, 主要研究方向为宽带小型化天线、智能天线。