

基于遗传算法的三端口微带功率分配器参数优化设计

朱德进, 刘长军

(四川大学电子信息学院 四川 成都 610064)

摘要:介绍了遗传算法(GA)的特点与应用,并将其运用到一种新型S波段三端口微带功率分配器的参数设计与优化中,得到了三端口微带功率分配器的优化结构.

关键词:遗传算法;功率分配器;微带传输线

中图分类号:TN626

文献标识码:A

文章编号:1006-0375(2006)02-0038-05

1 引言

在天线阵技术的馈电网络中,经常要用到微带功率分配器将功率分配到各个阵列元中.微带功率分配器的优化设计目标是更好地实现功率分配与传输并实现小型化.

本文讨论了一种磁性衬底U型结构S波段微带功率分配器的设计方法,并使用当前应用广泛的遗传算法对U型结构中半径 r 与衬底相对导磁率 μ_r 等参数进行了优化,得到了最优功率分配和传输.

2 遗传算法

遗传算法(GA: Genetic Algorithm)以其全局搜索能力强,通用性好等优点,在电磁学领域中的天线与电磁器件设计等方面获得了广泛的应用.与传统的优化方法不同,GA是用目标函数的适应度来评价构成解空间的群体中适者生存的规则.GA利用对设计变量编码的交叉与变异等繁殖手段,模拟生物进化中的基因遗传过程,从而搜索到最优解^[1].图1为遗传算法流程图.

在GA中,首先将要优化的参数编成二进制码,称为基因.若干个基因的排列称为染色体.若优化过程中存在 n 个基因: $G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$,则染色体表示为:

$$C = [G_1 G_2 G_3 \dots G_n]$$

针对每一染色体,算法要求给出一个适应度函数来衡量该染色体存活概率大小.适应度低的染色体将被淘汰,适应度高的染色体被保留下来作为下一代的“父本”继续参与进化.

“父本”两两配对,在某一交叉点进行交叉,交换部分基因,从而产生两个新的子代染色体.如父代染色体 c_0, C_0 分别为:

$$c_0 = [g_1 g_2 g_3 \dots g_n], \quad C_0 = [G_1 G_2 G_3 \dots G_n]$$

进行检点交叉时,随机设定一个交叉点,父本之间部分结构互换后得到子代染色体为:

$$c_1 = [g_1 g_2 \dots g_l G_{l+1} G_{l+2} \dots G_n], \quad C_1 = [G_1 G_2 \dots G_l g_{l+1} g_{l+2} \dots g_n]$$

父代染色体要配对产生足够子代染色体以保证每一代染色体总数不改变.

变异是以较小概率对某基因座的值进行变动,即将某位基因值由“0”变成“1”或者由“1”变

收稿日期:2005-10-18

作者简介:朱德进(1979-),男,湖北利川人,硕士研究生.研究方向:天线馈电系统,微带天线与分形天线等.

成“0”，其作用是避免算法陷入局部最优解。完成变异之后，GA 继续计算新的子代染色体的适应度函数值，并重复选择、交叉、变异过程，直至求得全局最优解为止。

3 功率分配器理论分析

图2为三端口微带功率分配器结构示意图。功率由端口1输入，端口2、3输出。设端口1特性阻抗为 $Z_{01} = Z_0$ ，电压为 V_1 ；端口2、3的特性阻抗为 Z_{02} 、 Z_{03} 输入阻抗为 Z_{in2} 、 Z_{in3} ，电压为 V_2 、 V_3 ；负载为 Z_2 、 Z_3 ^[2]。三端口网络作为功分器必须满足的条件为：

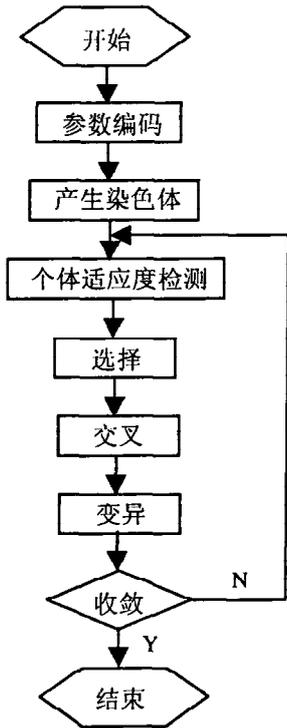


图1 遗传算法流程图。

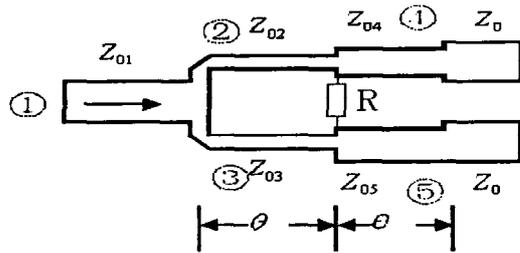


图2 三端口功率分配器

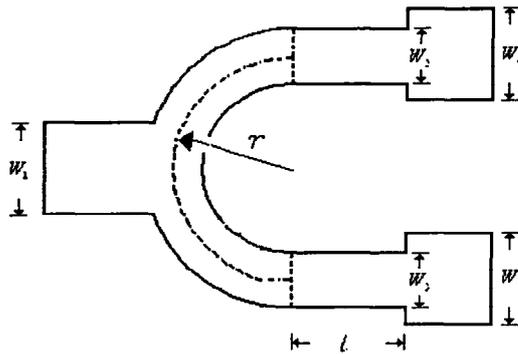


图3 设计实例

① 输入端口无反射输出：

$$\frac{V_1}{Z_0} = \frac{V_1}{Z_{in2}} + \frac{V_1}{Z_{in3}}$$

即

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{Z_{in2}} + \frac{1}{Z_{in3}} \tag{1}$$

输出端口输出功率比为指定值 $(1/k^2)$ ；

$$P_3 = k^2 P_2 \tag{2}$$

② 输出端口的输出电压相等：

$$V_2 = V_3 \tag{3}$$

中心频率处， $\frac{\lambda_{g0}}{4}$ 传输线的输入阻抗为：

$$Z_{in2} = \frac{Z_{02}^2}{Z_2}, \quad Z_{in3} = \frac{Z_{03}^2}{Z_3} \tag{4}$$

取 $Z_2 = kZ_0$ ，则 $Z_3 = \frac{Z_0}{k}$ ，联立 (2)、(3)、(4) 式得：

$$k^2 = \frac{p_3}{p_2} = \frac{V_3^2}{V_2^2} \frac{Z_{in2}}{Z_{in3}} = \frac{Z_{02}^2}{Z_{03}^2} \frac{Z_3}{Z_2} = \frac{1}{k^2} \frac{Z_{02}^2}{Z_{03}^2}$$

$$Z_{02} = k^2 Z_{03}$$

于是:

代入(1)式得:

$$Z_{02} = Z_0 \sqrt{k(1+k^2)}, \quad Z_{03} = Z_0 \sqrt{\frac{1+k^2}{k^3}} \quad (5)$$

$$Z_{in2} = (1+k^2)Z_0, \quad Z_{in3} = \frac{(1+k^2)Z_0}{k^2} \quad (6)$$

当输出端口所接负载为 Z_0 时, 可以采用由长度为 $\frac{\lambda}{4}$ 的微带线作为阻抗变换器. 其特性阻抗值 Z_{04} 、 Z_{05} 由下式给出:

$$Z_{04} = \sqrt{Z_0 Z_2} = \sqrt{k} Z_0, \quad Z_{05} = \sqrt{Z_0 Z_3} = \frac{Z_0}{\sqrt{k}} \quad (7)$$

为尽量减小传统微带功分器 90° 转角所带来的拐角电容, 抵消不连续性的影响, 可采用匹配斜切直角拐角, 即将拐角外边切成 45° 斜角. 对于 50Ω 微带线, 斜切后, 斜角边长度为微带线宽度的1.6倍左右, 此时从L波段到X波段均能得到较好的匹配. 实际设计中, 可以进一步采用圆弧转角, 如本文中所采取的U型结构, 以得到更小的反射系数^[3, 4].

4 设计实例

设计一个S波段, 3分贝($k=1$)的三端口功率分配器, 各端口引出传输线为 50Ω 微带线. 衬底相对介电常数 $\epsilon_r=9$, 相对导磁率 μ_r , 厚度 $h=3\text{mm}$. 计算可得:

$$Z_{02} = Z_{03} = 50\Omega * 1.414 = 70.7\Omega; \quad Z_{04} = Z_{05} = 50\Omega;$$

$W_1 = W_4 = W_5 = 0.9947h \approx 2.98\text{mm}; \quad W_2 = W_3 = 0.4388h \approx 1.31\text{mm}$ 频率为 3GHz 时, $\lambda_0 = 100$:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{\epsilon_r - 1}{4.6} \frac{t/h}{\sqrt{w/h}} \approx 5.78$$

式中 $t=0.031\text{mm}$, 为微带线厚度;

$$L = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{1}{4} \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \approx 0.1040 \lambda_0 = 10.4\text{mm}$$

如果采用圆弧转角, 以减小反射系数的话, 转角长度缩减量 Δl 满足^[5]:

$$\frac{\Delta l}{D} = 0.16 \left[2 - \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right] \quad (8)$$

其中:

$$D = \frac{\eta_0 h}{Z \sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

这里 $\eta_0 = 376.73\Omega$, $Z = 70.7\Omega$, 为微带线的特性阻抗. f_p 为第一高阶模截止频率,

且有:

$$f_p [\text{GHz}] = 0.4Z/h [\text{mm}] \quad (10)$$

设 90° 圆弧转角的半径为 r , 则 $\frac{1}{4}$ 圆弧长度为 $\frac{1}{2}\pi r$. 设端口 2, 端口 3 分别引出长度为 l 的微带线.

则有:
$$\frac{1}{2}\pi r = L - l - \Delta l \quad (11)$$

由 (8) ~ (11) 式得:
$$r = \frac{2}{\pi} \left\{ L - l - \frac{0.16\eta_0 h}{Z\sqrt{\epsilon_e}} \left[2 - \left(\frac{fh}{0.4Z} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

功分器实际结构如图 3 所示.

5 参数优化

在设计实例中, 圆弧半径 r 是以端口引出长度 l 为自变量的函数. 改变参数 l , 半径 r (由 12 式可知, 取值范围为 $0 \sim 13\text{mm}$) 会随之变化, 并相应地影响到传输特性. 功率分配器衬底的相对磁导率 μ_r 的取值范围通常为 $1 \sim 2.5$ 之间. 如果 μ_r 太大, 损耗会快速增大, 影响功率分配传输效果. 因此采用 GA 算法对这两个参数进行多目标问题优化.

在对设计实例中圆弧半径 r 和衬底磁导率 μ_r 进行优化时, 本文采用多目标直接加权因子平均算法, 建立相应的多目标优化问题适应度函数为:

$$F(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^m k_i - \left[k_1 \frac{r}{r_0} + k_2 \frac{\mu_r}{\mu_{r0}} \right] & \forall F(x) < 0 \\ 0.001 & \end{cases}$$

其中, k_i 为权重; r_0 为半径 r 在取值范围内的估计值; μ_{r0} 为磁导率 μ_r 的估计值. 当适应度函数小于零时, 对其赋值为一极小值, 这里取 0.001, 以保证其非负性.

图 4, 图 5 分别给出了采用 GA 对参数进行优化前后的频率 - S 参数值曲线 (图 5 中, $r = 3.48\text{mm}$, $\mu_r = 1.17$ 为最终优化结果). 从图中可以看到, 优化后比优化前得到了更好的功率分配与传输.

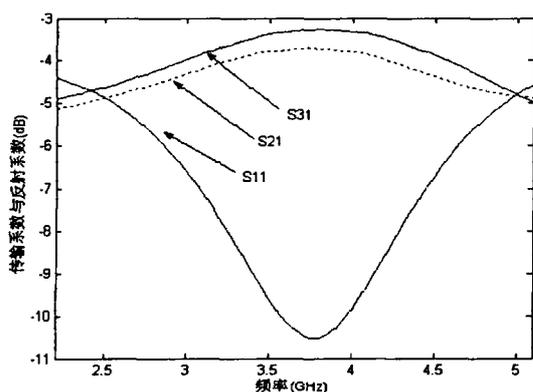


图 4 优化前频率 - S 参数值曲线

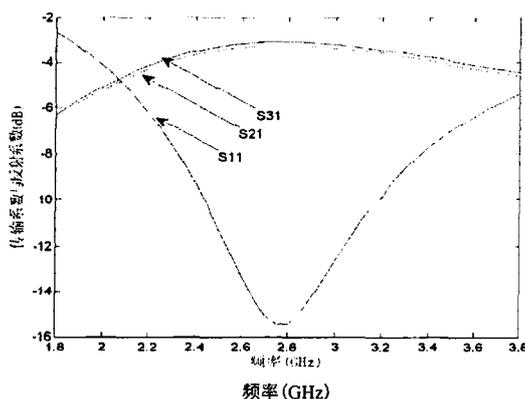


图 5 优化后频率 - S 参数曲线

6 结束语

微带功率分配器在通讯系统中应用广泛, 本文讨论了一种新的 S 波段三端口微带功率分配器的设计.

GA 是一种行之有效的全局优化算法, 其主要特点包括只对参数编码而不是参数本身进行运算; 不需要进行复杂的梯度运算; 包含大量的随机运算. 遗传算法不易陷入局部最优解, 因此在微带元

器件的参数优化中,能够快速得到较好的优化解^[6]。本文运用GA算法对设计实例的参数进行优化,得到了比较理想的结果。

参考文献:

- [1] 缪希仁, 张培铭. 基于遗传算法的电磁电器优化设计[J]. 低压电器, 1998, (5): 11 ~ 15.
- [2] 梁昌洪. 计算微波[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1985. 275.
- [3] 于清环, 曹伟, 吴志忠. 非隔离式三端口微带功率分配器的分析与设计[J]. 南京邮电学院学报, 1996, 16(1): 13 ~ 18.
- [4] 吴明英, 毛秀华. 微波技术[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1985. 72.
- [5] E. Hammerstad. Computer-aided design of microstrip couplers with accurate discontinuity models[Z]. IEEE MTT-S symp Dig, 1981, 54 ~ 56.
- [6] 洪伟. 计算电磁学研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(3): 335 ~ 339.

Parameters Optimization Design of the Three-Port Microstrip Line Power Divider on Genetic Algorithms

ZHU De-jin, LIU Chang-jun

(School of Electronics and Information Science, Sichuan University, Chengdou, Sichuan, 610064)

Abstract: The characteristics and applied methods of genetic algorithms (GA) are presented, which is applied to optimize the parameters of a new S band three-port microstrip line power divider and an optimum result is achieved.

Key words: genetic algorithms; power divider; microstrip line