

# 基于微遗传算法的微带可重构天线设计

肖绍球, 王秉中

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了一种微带可重构天线方案,并将微遗传算法与时域有限差分法相结合,对天线的可重构能力进行了探索。在特定工作频率条件下,优化设计了一方向图可重构天线。优化结果表明,在工作频率为6.5 GHz时,该微带可重构天线能够通过三种工作状态在特定平面内实现方向图扫描,同时也表明了遗传算法在可重构天线设计中的巨大潜力。

**关键词** 方向图可重构天线; 微遗传算法; 时域有限差分法; 微带天线

**中图分类号** TN821 **文献标识码** A

## Reconfigurable Microstrip Antenna Design Based on Microgenetic Algorithm

Xiao Shaoqiu, Wang Bingzhong

(School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** A scheme of reconfigurable microstrip antenna is presented, and the reconfigurability of the antenna are explored using microgenetic algorithm(MGA) in conjunction with the finite-difference time-domain(FDTD) method. A pattern reconfigurable antenna with a fixed operation frequency is optimized and designed. The optimized results indicate that a capability of pattern scanning within a single plane can be achieved by using three switchable states at 6.5 GHz. This work also shows the potential application value of GA in the optimizing and designing of reconfigurable antenna.

**Key words** pattern reconfigurable antenna; microgenetic algorithm; finite-difference time-domain method; microstrip antenna

现代大容量、多功能、超宽带综合信息系统的迅猛发展,使得在同一信息平台上搭载的信息子系统数量增加,天线数量也相应增加。从降低无线综合信息的整体成本、减轻重量、减小系统的雷达散射截面、实现良好的电磁兼容特性等方面来看,这种现象非常有害,也成为制约无线综合信息系统进一步发展和应用的一大瓶颈,“可重构天线”就是为克服这一瓶颈而提出来的<sup>[1-5]</sup>。可重构天线研究旨在寻找一种天线方案,该方案能够将诸多天线的功能融合到同一天线口径中,从而用一个天线口径达到“万能”的目的<sup>[3]</sup>。现代可重构天线研究依赖于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)技术<sup>[5]</sup>,将MEMS开关集成在通用天线口径中,通过实时调整开关状态从而重构天线特性。

可重构天线设计是一种非常复杂的电磁问题。天线结构特征和电磁特征之间的关系具有高度非线性、多极值、不可微分等明显特点。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种高效优化方法,具有高度并行、原理简单易于操作、适合于搜索多变量、非线性问题的最优解等突出优点<sup>[6]</sup>,因此遗传算法非常适用于现代可重构天线设计。最近提出的一种微遗传算法(Microgenetic Algorithm, MGA)与普通遗传算法相比具有群体规

收稿日期: 2003-11-05

基金项目: 国家863计划资助项目(2001AA123043); 国家自然科学基金资助项目(60371008)

作者简介: 肖绍球(1975-),男,博士,主要从事可重构天线、计算电磁学等方面的研究。

模小、收敛到近优区域快等特点,已被应用于微波结构设计中<sup>[7]</sup>。本文提出了一种微带可重构天线方案,并采用MGA结合时域有限差分(FDTD)法优化设计了一种方向图可重构天线<sup>[8]</sup>。

## 1 可重构天线结构及设计目标

提出的微带可重构天线结构如图1所示。天线辐射体由一矩形微带环包围着一均匀碎片元阵组成,在相邻碎片元之间和靠近矩形微带环的碎片元与环之间有开关连接。微带馈线从矩形环的一边中点进行馈电。微带衬底厚度为 $h$ ,介电常数为 $\epsilon_r = 6.0$ ,微带馈线宽度为 $W_f$ ,其特性阻抗约 $50\ \Omega$ 。矩形微带环的外围尺寸为 $L_y \times L_z$ ,环宽度为 $W_r$ ,微带碎片元的大小为 $W_{fry} \times L_{fz}$ ,开关的面积为 $W_{sw} \times L_{sw}$ 。开关尺寸大小与实际的MEMS开关相当<sup>[9]</sup>。各参量具体的值如表1所示。天线的地平面选取为理想地平面。

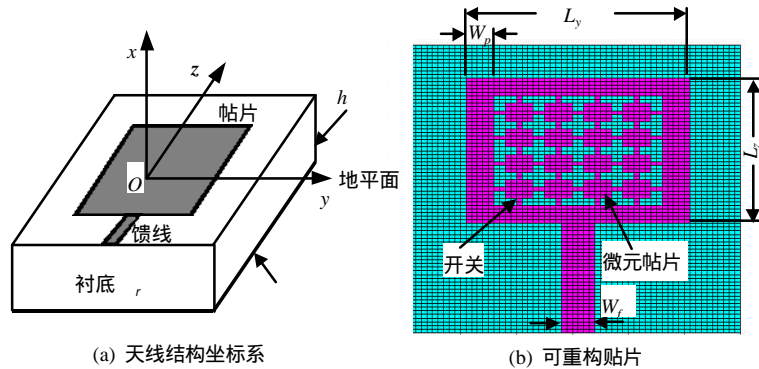


图1 由微带碎片元阵和开关阵构成的微带可重构天线方案

表1 可重构天线结构参数

参数	值/mm	参数	值/mm
$W_f$	2.4	$L_y$	16.0
$W_r$	2.0	$L_z$	22.4
$W_{fry}$	2.0	$W_{sw}$	0.4
$L_{fz}$	3.6	$L_{sw}$	0.8
$h$	1.5		

在图1a所示坐标系中,期望天线能够在 $xoz$ 平面内以平行极化( $q$ )分量实现方向图扫描,并希望这一扫描特性由3种工作状态完成,3种状态的最大辐射方向分别为:  $(q, j) = (45^\circ, 0^\circ), (90^\circ, 0^\circ)$ 和 $(135^\circ, 0^\circ)$ ,因此对天线设计要分三次进行。要求该天线工作频率为 $f_0 = 6.5\ \text{GHz}$ ,此时天线可以工作在高阶模式,满足文献[10]中描述的重构天线辐射方向图的必要条件。

## 2 用微遗传算法设计可重构天线

### 2.1 遗传算法中的开关编码

使用GA优化设计此天线,首先必须将开关阵的状态与遗传算子空间中的二进制基因对应起来。由图1b可以看出,开关由4个开关为一行共5行和4个开关为一列共5列的两组开关组成,共有40个开关。将每一个开关用染色体的一个基因位来表示,当开关闭合时用1表示,开关断开时用0表示。这样图1b中所示开关阵的每一种状态可用一个有40个基因位的染色体表示。码元排列次序遵循先行开关后列开关的原则,行排列先后次序为由下而上,行中开关排列次序为从左到右,列排列先后次序为由左而右,列中开关排列次序为从下到上。为了抑制天线在 $xoz$ 平面内的交叉极化分量即垂直极化分量,让关于 $xoz$ 平面对称的开关具有相同的工作状态,这样问题空间的解有 $2^{22}$ 个。采用FDTD法对天线进行仿真时,将开关采用理想的开关模型代替,当开关导通时,用一金属贴片直接连接代替,当开关断开时,则去掉该金属贴片。由于MEMS开关具有优良的射频性能<sup>[9]</sup>,且文献[4]表明使用理想开关模型与使用实际开关的结果吻合很好,说明了该理想开关简化模型的合理性。

### 2.2 遗传算法中的适应度函数设计

适应度函数是GA优化过程中选择算子等遗传操作的依据,适应度函数的值用以判断个体的优良程度。为了全面考察天线的特性,将天线个体的适应度函数包含五个部分,即 $S_{11}$ 参数(回波损失)适应度、方向性系数适应度、旁瓣适应度、增益适应度和极化特性适应度部分。最后总的适应度函数为各适应度函数的加权和。

为了详细描述天线匹配特性,将 $S_{11}$ 参数的可能取值分成8种情况,天线匹配越理想其适应度值越高。所选择的 $S_{11}$ 参数适应度函数如下

$$F_1 = \begin{cases} 1.0 & S_{11} < -20.0 & 0.9 & -20.0 & S_{11} < -15.0 \\ 0.8 & -15.0 & S_{11} < -12.0 & 0.7 & -12.0 & S_{11} < -9.0 \\ 0.6 & -9.0 & S_{11} < -7.0 & 0.5 & -7.0 & S_{11} < -6.0 \\ 0.4 & -6.0 & S_{11} < -4.0 & 0.3 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

记天线归一化方向性系数为  $D(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ ，这里方向性系数考察的参量为  $\mathbf{q}$  极化分量。归一化的参考值是全可视空间中的  $\mathbf{q}$  极化分量和  $\mathbf{j}$  极化分量幅度最大值，设期望的最大辐射方向为  $(\mathbf{q}_0, \mathbf{j}_0)$ ，定义的方向性系数适应度函数为

$$F_2 = \begin{cases} 1.0 & -0.2 & D(\mathbf{q}_0, \mathbf{j}_0) & 0.9 & -0.5 & D(\mathbf{q}_0, \mathbf{j}_0) < -0.2 \\ 0.8 & -1.0 & D(\mathbf{q}_0, \mathbf{j}_0) < -0.5 & 0.7 & -2.0 & D(\mathbf{q}_0, \mathbf{j}_0) < -1.0 \\ 0.6 & -3.0 & D(\mathbf{q}_0, \mathbf{j}_0) < -2.0 & 0.5 & -4.0 & D(\mathbf{q}_0, \mathbf{j}_0) < -3.0 \\ 0.4 & -5.0 & D(\mathbf{q}_0, \mathbf{j}_0) < -4.0 & 0.3 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

为了抑制旁瓣还设定了旁瓣抑制适应度函数。设旁瓣区的  $\mathbf{q}$  角范围为  $(\mathbf{q}_1 \sim \mathbf{q}_2)$ ，对于不同的目标方向定义的旁瓣区不同。目标方向为  $(45^\circ, 0^\circ)$  时旁瓣区为  $(90^\circ \sim 180^\circ)$ ，目标方向为  $(135^\circ, 0^\circ)$  时旁瓣区为  $(0^\circ \sim 90^\circ)$ ，而目标方向为  $(90^\circ, 0^\circ)$  时旁瓣区为  $(0^\circ \sim 45^\circ)$  和  $(135^\circ \sim 180^\circ)$ ，各旁瓣区的  $\mathbf{j}$  角覆盖范围均为  $(-90^\circ \sim +90^\circ)$ 。在旁瓣区内归一化方向性系数最大值为  $D_{lobe}$ ，其适应度函数为

$$F_3 = \begin{cases} 1.0 & D_{lobe} < -10.0 & 0.9 & -10.0 & D_{lobe} < -8.0 \\ 0.8 & -8.0 & D_{lobe} < -7.0 & 0.7 & -7.0 & D_{lobe} < -6.0 \\ 0.6 & -6.0 & D_{lobe} < -5.0 & 0.5 & -5.0 & D_{lobe} < -3.0 \\ 0.4 & -3.0 & D_{lobe} < -2.0 & 0.3 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

为了在目标方向上获得良好的增益特性，还设定了目标方向增益  $G$  的适应度函数，增益  $G$  是由目标方向上规定极化分量的标准方向性系数与天线效率的乘积表示，增益  $G$  的适应度函数为

$$F_4 = \begin{cases} 1.0 & 5.0 < G & 0.9 & 4.0 < G & 5.0 \\ 0.8 & 3.0 < G & 4.0 & 0.7 & 2.0 < G & 3.0 \\ 0.6 & 1.0 < G & 2.0 & 0.5 & 0.0 < G & 1.0 \\ 0.4 & -1.0 < G & 0.0 & 0.3 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

设计中希望天线用单一极化 ( $\mathbf{q}$  极化) 分量进行方向图扫描，所以天线的线极化特性也是必须考察的参量，设可视空间中天线的  $\mathbf{j}$  极化分量的最大归一化方向性系数为  $X$ ，则设置的极化特性适应度函数为

$$F_5 = \begin{cases} 1.0 & X < -20 & 0.9 & -20.0 < X & -15.0 \\ 0.8 & -15.0 < X & -12.0 & 0.7 & -20.0 < X & -9.0 \\ 0.6 & -9.0 < X & -6.0 & 0.5 & -6.0 < X & -4.0 \\ 0.4 & -4.0 < X & -3.0 & 0.3 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

最后每个个体总的适应度函数为各适应度函数加权和

$$F_{all} = \sum_{i=1}^5 w_i F_i \quad (6)$$

式中  $w_i$  为权系数。上面适应度函数中，回波损失、天线增益和方向性系数适应度函数只有两个是独立的，最终的和只是增加了这一部分适应度函数的加权值。传统GA中群体规模一般要取在100~10000之间，而MGA群体规模一般取在5~50之间<sup>[7]</sup>。该问题优化中由于采用了MGA，其基因群体规模选择为10，遗传世代选择为40代，子代的产生由随机竞争法(适应度比例法)结合杂交操作确定，杂交策略采用均匀杂交方法，杂交概率选择为50%，变异操作概率选择为2%。适应度函数式(6)中，各权值  $w_i$  均取为1，总适应度函数最大值及其对应的染色体为所需要的最终结果。采用FDTD法计算各个体的适应度函数，将FDTD法程序嵌入到MGA程序中，便可对该天线进行仿真优化。

### 3 可重构天线优化结果

通过使用MGA结合FDTD法的优化方法,根据所选定的目标对天线开关阵的状态进行了优化设计,得到了各目标对应的开关状态,天线状态的染色体如表2所示。图2所示分别给出了优化所得三种目标天线结构  $S_{11}$  参数及商用电磁仿真软件HFSS仿真所得  $S_{11}$  参数。从图2可以看出,通过使用MGA优化,优化所得三种目标天线结构在频率为6.5 GHz附近可以获得良好的匹配,除了目标方向为(90°,0°)时由HFSS仿真的  $S_{11}$  参数与FDTD法结果吻合较差外,另外两种情况吻合良好。

表2 优化所得重构天线方向图的三种开关状态

目标方向	开关状态染色体表示
(45°,0°)	0000100101100000100110100010110100101010
(90°,0°)	000001010000000010011100111111111111100
(135°,0°)	1111000010010000111101000011010000110100

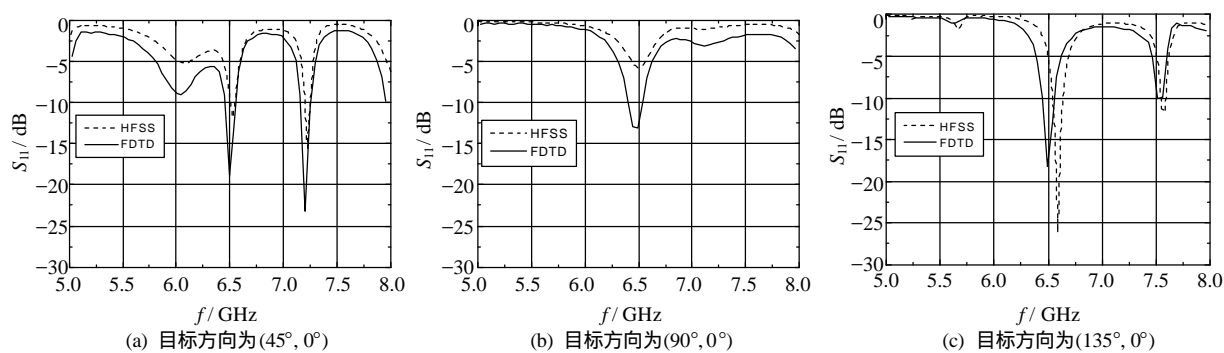


图2 在三种优化目标条件下分别所得的  $S_{11}$  参数

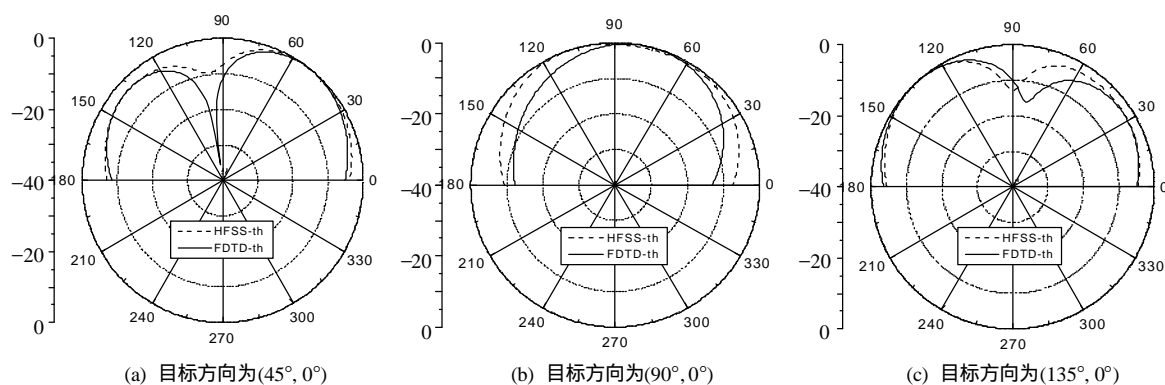


图3 在三种优化目标条件下分别所得的  $xoz$  平面内方向图

图3所示分别给出了三种目标天线状态在  $xoz$  平面内的主极化辐射方向图,由于交叉极化分量小于 -40 dB,故没有将交叉极化分量列出。图3分别给出了三种状态由HFSS软件仿真所得方向图,结果表明两种软件所得结果一致性良好。从方向图中看出天线在  $xoz$  平面内以  $q$  极化形式实现方向图扫描,由FDTD法所得三种目标状态3 dB波束  $q$  角范围分别为(15°~75°)、(45°~115°)和(105°~175°)。另外,目标1和3的方向图副瓣较高、目标2和3对应方向图主瓣波束较宽、目标1和2以及目标2和3对应的方向图3 dB波束范围重叠较多等均与遗传算法优化次数较少有关,而方向图3 dB波束范围重叠较多还与目标方向确定有关。目标1、2和3的终止迭代代数均为40代,其仿真分析的个体仅仅400个,相当于总体  $2^{22}$  种解的万分之一,可见要寻找到最佳开关状态,优化迭代次数有待进一步增加。目前使用的FDTD法程序仿真一个个体需要约10 min时间,增加优化次数必将花费更多的时间,因此为进一步提高优化效率,应研究更高效的仿真算法。

为使可重构天线的每一状态获得更好的带宽和辐射方向图扫描效果,除了增加遗传算法优化次数外,还可采用进一步扩展碎片元阵面积、增加碎片元数目或研究更为有效的碎片元阵和开关阵拓扑结构等方法,其中后者是可重构天线研究的重要方向之一。

如果在不同工作频率条件下执行上述优化过程,天线将能够在宽带甚至超宽带范围内的不同频率点上通过开关状态重构实现方向图扫描,这样天线的实用价值也将进一步提高。该工作使用MGA结合FDTD法通过较少的优化次数搜索出了良好的结果,说明了遗传算法在可重构天线设计中的有效性和巨大潜力。

## 4 结束语

本文提出了一种微带可重构天线方案,并用MGA结合FDTD法对天线的可重构特性进行了优化设计。天线工作频率为  $f_0 = 6.5$  GHz。遗传算法优化结果表明天线能够通过3种工作状态在  $xoz$  平面内以平行极化形式实现方向图扫描。对可重构天线的进一步研究具有重要参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Bozler C, Drangmeister R, Duffy S, *et al.* MEMS microswitch arrays for reconfigurable distributed microwave components[C]. IEEE AP-S, 2000, 587-591
- [2] Gupta K C, Li J, Ramadoss R, *et al.* Design of frequency-reconfigurable rectangular slot ring antenna[C]. IEEE AP-S, 2000, 326-326
- [3] Fathy A, Rosen A, McGinty F, *et al.* Silicon based reconfigurable antennas[C]. IEEE AP-S, 2000, 325-325
- [4] Coleman C M, Rothwell E J, Ross J E, *et al.* Self-structuring antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation magazine, 2002, 44(3): 11-22
- [5] 杨雪松, 王秉中. 可重构天线的研究进展[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 417-421
- [6] Weile D S, Michielssen E. Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: a review[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 1997, 45(3): 343-353
- [7] Chakravarty S, Mittra R, Williams N R. Application of a microgenetic algorithm to the redesign of broad-band microwave absorbers using multiple frequency selective surface screens buried in dielectrics[J]. IEEE Trans. Antenna Propag., 2002, 50(3): 284-296
- [8] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [9] Rebeiz G M, Muldavin J B. RF MEMS switches and switch circuit[J]. IEEE Microwave Magazine, 2001, 2(10): 59-71
- [10] 肖绍球, 王秉中. 微带可重构天线的初步探讨[J]. 电波科学学报, 2002, 17(4): 386-390

编 辑 孙晓丹