

一种频率可重构微带天线的快速优化设计方法

胡梦中 尹成友 宋 铮

(脉冲功率激光技术国家重点实验室 解放军电子工程学院 合肥 230037)

摘 要: 该文针对目前频率可重构微带天线的优化设计常依赖于反复实验的现状, 提出了一种快速有效的频率可重构微带天线优化设计方法, 该方法将新型量子遗传算法与通用的空域矩量法结合, 在计算阻抗矩阵时利用了直接矩阵操作技术, 大大节约了计算时间。利用该方法, 优化出一副可工作在十个甚至更多的窄频段的变频圆柱共形可重构微带天线, 优化结果与相关软件结果的比较显示了该文方法的正确性及高效性。

关键词: 微带天线; 频率可重构; 矩量法; 量子遗传算法; 矩阵直接操作技术

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1377-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01437

A Fast Method for Optimization and Design of Frequency Reconfigurable Microstrip Antenna

Hu Meng-zhong Yin Cheng-you Song Zheng

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Institute of Electronic Engineering of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: For changing the status that optimization and design of frequency reconfigurable microstrip antenna recently is usually depended on repeated experiments, an efficient and fast method is proposed in this paper. A Novel Quantum Genetic Algorithm (NQGA) is combined with universal spatial MoM in the proposed method and calculating time is saved by using Direct Matrix Manipulation (DMM) technique used in computing Z-matrix. Using this method, a frequency reconfigurable cylindrical conformal microstrip antenna is obtained that can work at ten or more narrow frequency-bands. Comparing the optimization results in the paper with commercial software results shows that the method in this paper is correct and efficient.

Key words: Microstrip antenna; Frequency reconfigurable; MoM; Quantum Genetic Algorithm (QGA); Direct Matrix Manipulation (DMM)

1 引言

可重构微带天线是近些年来才发展起来的一种新型天线技术, 该天线技术通过控制 MEMS 开关的接通与断开状态, 可以用非机械的方式实现辐射方向图、工作频带、输入阻抗、极化方式等电参数的重构^[1], 从而使得一副天线能拥有几副甚至几十副普通天线的功能。有资料显示, 可重构天线的研究带来了天线技术的一次革命, 为提高无线综合信息系统的容量、扩展系统功能、增加系统上工作带宽等方面提供了重要的技术保障, 总之, 它将对现代通信技术带来深远影响。目前, 国外对该天线技术的研究十分重视, 关于可重构天线的相关项目得到陆海空三军的支持, 近些年, 国外部分学者对极化可重构及方向图可重构天线的设计进行了一定的研究, 如文献[2-4], 国内对该天线技术的研究较多的主要是西安电子科技大学肖绍球博士, 他在 2002 年就在国内首次提出了可重构微带天线的概念并做了

初步的研究, 可重构微带天线的研究近些年逐渐引起国内学者的注意, 但从国内外文献资料分析来看, 该天线设计目前大多是通过商业的电磁仿真软件结合反复实验的方法, 还没有形成一种较为快速有效的设计方法给予这种新型天线的设计理论上的指导。另外, 目前的商业电磁软件优化设计功能比较有限, 不能有效用于可重构微带天线的设计。基于以上原因, 本文提出了一种快速有效的微带可重构天线优化设计方法, 该方法将新型量子遗传算法有效地与空域矩量法相结合并利用 Direct Matrix Manipulation(DMM)技术成功实现对可重构微带天线的快速优化设计, 从而为新型可重构天线的研发提供一定的指导, 也为目前商业电磁仿真软件天线优化功能上的不足做一定的补充。

2 NQGA 的量子旋转门及其算法流程

量子遗传算法不同于传统的遗传算法, 它采用了量子位染色体编码方式, 并利用量子门作用完成更新父代个体, 从而产生新的子代个体, 其原理是利用量子态的叠加特性对量子概率幅进行操作。量

子遗传算法主要采用的量子门是“量子旋转门”，即

$$U = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中 θ 为旋转角，关于 θ 的大小及方向的确定很多文献不尽相同，以求极大值问题为例(极小值问题可以转化为求极大值问题)，为了使旋转角取值更加合理和通用，本文旋转角的大小与方向的确定如表1所示，在表1中 x_i 为当前染色体的第 i 位， best_i 为当前的最优染色体的第 i 位； $f(x)$ 为适应度函数， $\Delta\theta_i$ 为旋转角度的大小，控制算法收敛的速度； θ_0 为优化过程中采用动态旋转角的每一个值，若期望旋转角在优化时逐渐变小且其仅在 $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$ 范围内变化，假定优化代数 G 代，则第 i 代的旋转角公式为

$$\theta = \theta_{\max} + C \cdot (e^{-i/G} - e^{-1/G}) \quad (2)$$

其中 $C = (\theta_{\max} - \theta_{\min})(e^{-1/G} - e^{-1})^{-1}$ 。表1中 $S(\alpha_i\beta_i)$

为旋转角度的方向，保证算法的收敛。 \times 表示该种情况不存在。对于以上本文提出的量子旋转门操作做如下说明：

(1)在文献[5-7]基础上，本文给出的量子旋转门操作同时也考虑了 x_i 及 best_i 取相同值时的旋转角的取值，使得通用性更强。

(2)旋转角的取值采用了动态形式，不同于传统的固定旋转角取值，使得量子门操作与优化进度有关，故更加灵活与适用，以上给出的动态旋转角表达式也非常通用。

(3)表1中在 x_i 及 best_i 取相同及不同值时给出了不同旋转角值，因为当 x_i 及 best_i 取相同值时， x_i 及 best_i 对应的量子编码极可能比 x_i 及 best_i 取不同值时靠得更近些，故设定的旋转角值相对较小，另外，文献[6]以背包问题研究发现， x_i 及 best_i 取相同值时旋转角取0比取较大旋转值的结果较好。

表1 本文中旋转角大小与方向的确定

x_i	best_i	$f(x) \geq f(\text{best}_i)$	$\Delta\theta_i$	$S(\alpha_i\beta_i)$			
				$\alpha_i\beta_i > 0$	$\alpha_i\beta_i < 0$	$\alpha_i = 0$	$\beta_i = 0$
0	0	否	$0.25\theta_0$	-1	+1	\times	0
0	0	是	0	0	0	\times	0
0	1	否	θ_0	+1	-1	\times	± 1
0	1	是	0	0	0	\times	0
1	0	否	θ_0	-1	+1	± 1	\times
1	0	是	0	0	0	0	\times
1	1	否	$0.25\theta_0$	+1	-1	0	\times
1	1	是	0	0	0	0	\times

上述的旋转变换仅仅是经典量子变换的一种，针对具体问题，可以应用不同的量子变换，也可根据需要设计自己的幺正变换矩阵。为了克服算法的固有早熟收敛的缺点，本文还采用量子交叉及量子灾变等遗传操作。本文所采用的NQGA算法流程如图1所示。

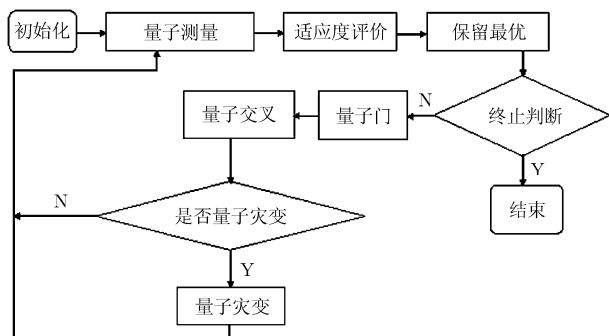


图1 本文NQGA算法流程图

为了检验本文算法NQGA优化性能，选择一测试函数利用3种不同算法进行优化，测试函数为：

$F1 = \min(x_1^2 + x_2^2)$, $x_1, x_2 \in [-5.12, 5.12]$ ，分析可知该函数极值点只有一个，极值点 $x_0 = (0, 0)$ ，极小值=0。采用的3种优化算法分别为一般量子遗传算法(CQGA)、遗传算法(GA)以及本文的NQGA，3种算法的优化代数均为500，每个变量编码均为10个，种群个数均为100，运行次数均为69，优化结果如图2及表2所示，可以看出NQGA具备了CQGA收敛快和GA的鲁棒性强的优点。由于算法中采用动态旋转角且又加入了量子交叉，量子灾变等操作，种群多样性增强，较好的克服了传统量子遗传算法的“早熟”现象，算法优化性能得到了改进。

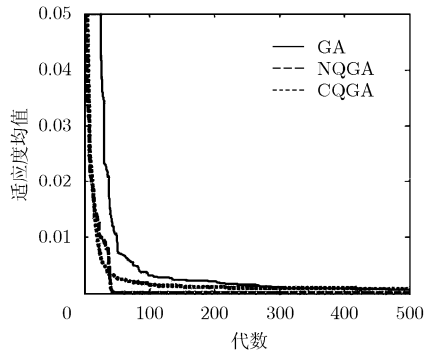


图2 测试函数优化结果比较

表2 测试函数3种算法性能比较

算法类别	搜索到的F1最佳值	搜索到的F1平均值	最佳值出现次数	最佳值平均所用的代数	优化20代所用时间(s)
GA	5.0098e-5	7.1516e-4	7	>500	1.953
CQGA	5.0098e-5	8.3714e-4	28	>500	1.906
NQGA	5.0098e-5	5.0098e-5	69	= 55	1.985

3 基于 NQGA-MoM 的可重构微带天线优化设计方法

3.1 NQGA 与 MoM 的结合

利用笔者在文献[8]中提出的 RWG-SWG (RWG-SWG 表示三角面对基函数与四面体对基函数的混合, 故用这两种基函数提出者名字的首字母缩写表示) 矩量法可以实现有限大任意形状微带天线的数值计算, 将其与 NQGA 结合就可以实现有限大微带天线的优化设计, 从而实现可重构微带天线的优化设计。总之, 要将矩量法与 NQGA 有效结合而实现优化功能需进行如下操作:

(1) 获取阻抗矩阵 \mathbf{Z} 及电压矩阵 \mathbf{V} 数据 由矩量法矩阵方程可得

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (3)$$

考虑介质与金属边界条件后

$$\mathbf{V} = (\mathbf{Z} + \Delta\mathbf{Z})\mathbf{I} \quad (4)$$

设所有 RWG 有 N 个, SWG 有 M 个而需要考虑介质与金属边界条件处的半 SWG 基函数有 k 个, 则 \mathbf{Z} 和 $\Delta\mathbf{Z}$ 均为 $(N + M - k) \times (N + M - k)$ 矩阵, $\Delta\mathbf{Z}$ 为考虑介质与金属边界条件而对原阻抗矩阵 \mathbf{Z} 所做修改和补充的矩阵。由于微带贴片及地板上的 RWG 在矩量法中模拟的是其上下总电流, 故目前不便严格考虑此处介质与金属边界条件, 其实, 文献[9]也未考虑此问题, 本文也暂不考虑。所以, 本文只在探针处考虑介质与金属的边界条件。分析

可知, 式(4)中 $\Delta\mathbf{Z}$ 只有前 N 列有非零值, 而 $\mathbf{Z} + \Delta\mathbf{Z}$ 可以写成如下形式:

$$\mathbf{Z} + \Delta\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{cc'} & \mathbf{Z}_{cm'} \\ \mathbf{Z}_{mc'} & \mathbf{Z}_{mm'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{cc'_{mn}} \\ \mathbf{Z}_{mc'_{mn}} \end{bmatrix}_{m=1, \dots, N} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{cc'_{mn}} \\ \mathbf{Z}_{mc'_{mn}} \end{bmatrix}_{m=1, \dots, M-K, n=1, \dots, N} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{cm'_{mn}} \\ \mathbf{Z}_{mm'_{mn}} \end{bmatrix}_{m=1, \dots, N, n=1, \dots, M-K} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{cm'_{mn}} \\ \mathbf{Z}_{mm'_{mn}} \end{bmatrix}_{m, n=1, \dots, M-K} \quad (5)$$

式(5)中 $\mathbf{Z}_{cc'_{mn}}$ 代表的是 RWG 对 RWG 的阻抗作用, $\mathbf{Z}_{cm'_{mn}}$ 代表的是 SWG 对 RWG 的阻抗作用, 其他依次类推。若研究微带天线的辐射特性, 则只需求出式(4)中所有 RWG 基函数的电流系数, 而无需求出 SWG 基函数的系数, 故可以利用下式进行求逆:

$$\mathbf{I}_1 = [\mathbf{Z}_{cc'} - \mathbf{Z}_{cm'} \cdot (\mathbf{Z}_{mm'})^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{mc'}]^{-1} \cdot \mathbf{V}_1 \quad (6)$$

在优化计算中, 利用 RWG-SWG 矩量法需计算出待优化的微带天线的所有频率点的阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{cc'}$, $\mathbf{Z}_{cm'}$, $\mathbf{Z}_{mc'}$, $(\mathbf{Z}_{mm'})^{-1}$ 及电压矩阵 \mathbf{V}_1 并将其保存为数据文件。注意, 由于式(6)只用到 $(\mathbf{Z}_{mm'})^{-1}$, 故保存该数据而不去保存 $\mathbf{Z}_{mm'}$ 可以节省后面优化计算中重复的 $\mathbf{Z}_{mm'}$ 求逆所用的时间。以上保存的数据文件将在 NQGA 适应度评价中被调用。

(2) 构建待优化小贴片上所有 RWG 与阻抗矩阵 \mathbf{Z} 及电压矩阵 \mathbf{V} 相关联的关联矩阵 可重构微带天线的优化设计主要是针对天线开关的状态进行设计, 所以在矩量法中预先要产生每个待优化小开关上的 RWG 对应的 \mathbf{Z} , \mathbf{V} 矩阵的序号, 构建关系矩阵以备优化程序调用。

(3) 解码并将解得的二进制编码与待优化的开关状态对应起来 根据可重构天线的开关数设定量子编码数, 产生初始群体, 解码后所得的二进制编码代表对应贴片的有与无(注意保证馈电及短路探针处对应的贴片单元编码始终代表有)。

(4) 采用 DMM 技术加速适应度评价 优化循环开始, 在适应度评价中采用 DMM 技术计算各优化群体在某几个感兴趣频点的电参数值, 评价各群体的适应度。由于可重构微带天线的优化是针对贴片上开关所对应的 RWG, 故 DMM 技术只对式(6)中的 $\mathbf{Z}_{cc'}$ 矩阵进行操作, DMM 技术具体过程可参考文献[10]。若对天线的 S_{11} 参数进行优化设计, 可将适应度函数设计如下以满足单频、双频、宽频及多频天线的优化设计:

$$F = w_0 \frac{f_{\text{num1}}}{f_{\text{num}}} + \prod_{\substack{i=1 \\ i \notin \Gamma}}^n (|S_{11}(f_i)|)^{w_i} \quad (7)$$

式(7)中 $S_{11}(f_i)$ 为优化需要产生凹陷的第 i 个中心工作频率点对应的 S_{11} 值; Γ 为所感兴趣的频点中那些 S_{11} 参数满足小于 -10 dB 的部分; w_0 及 w_i 为加权系数, 可以选择相等, 但为了强调某优化目的, 可适当增大其加权系数; f_{num1} , f_{num} 分别为 $S_{11} < -10$ dB 的频点个数和总采样频点个数, 当优化双频天线时, 可将 n 取为 2, 这两个频点应相距较远些, 而优化宽频天线时, 这两个频点应为相距较近的两个频点。若对天线的方向图进行优化设计, 根据不同的优化目的, 适应度函数形式是多种多样的, 但其最终的形式都是将优化问题转化为求极值问题。值得注意的是, 由于天线本身固有的限制, 有时优化目的并不能很好达到, 为此, 待优化天线结构形式的合理选择将非常重要, 关于待优化天线结构形式的选取, 目前尚无完善且全面的理论资料, 大多根据经验及反复的实验最终确定。

(5)输出结果 优化结束后得到一组二进制编码, 解码得出微带贴片各单元或开关的有无状态, 从而输出其相关的性能参数。

3.2 FEKO 软件分割网格的特殊考虑及柱体探针模型

微带可重构天线的优化设计中, 获取能用于该天线优化的分割网格是一个难点, 针对该问题, 本文巧妙利用 FEKO 软件中的 CADFEKO 模块进行特殊分割, 然后通过 *.Out 文件将分割数据导出, 最后再利用 VC++ 编写数据处理程序将分割数据按需求导入计算程序。下面以一实例说明 FEKO 分割网格的特殊考虑。

选择一有限大矩形平面微带天线为待优化天线, 假如要实现如图 3(a)所示的可重构微带天线的变频优化设计, 那么, 需要对该天线的贴片进行特殊的处理才能获得优化需要的网格分割数据。

第 1 步, 利用 CADFEKO 分割工具(图标为

图 1)及合并工具(合并的按钮图标是图 2)将原矩形贴片天线的贴片分割及组合成如图 3(a)所示。注意, 要保留代表 MEMS 开关的每个小正方形贴片的四条边, 因为这些边可以在下一步的网格生成中起到规范分割网格的作用。第 2 步, 设置好天线各部分材料属性及分割粗细, 利用分割工具分割天线各部分获取分割数据。贴片特定分割后的三角网格如图 3(b)所示, 图中开关对应的 16 个小矩形单元各用一种颜色表示, 由图可知每个开关包含了两个三角形网格, 可见在第 1 步中画出的边在网格生成中确实起到了规范分割网格的作用, 在 POSTFEKO 下点击开关所包含的三角形网格可获得该三角形全局序号, 由该序号结合第一步导出的分割数据容易确定每个开关所对应的 RWG 序号, 这样就为 DMM 技术的实施打下了基础。需要说明的是, 对探针的模拟, 本文提出了如图 4 所示的柱体模型, 在柱体上采用了 RWG 分割, 使其满足了电流的连续性。该方法较文献[11]更接近实际模型, 特别是当采用多边形柱体模拟探针时就更为精确。

4 仿真试验

根据以上理论及 NQGA 算法流程图, 就可以实现可重构微带天线的优化设计。为了说明算法的通用性, 下面以接地板有限的圆柱共形可重构微带天线优化问题为例, 优化设计一个可以在十个甚至几十个窄频段工作的可重构圆柱共形微带天线。为了优化计算简单, 可选择介质为空气, 由于可重构天线通过 MEMS 开关控制贴片电流分布, 故利用 NQGA 优化出几种甚至几十种(与开关个数有关系)这些 MEMS 开关通断状态分布, 将其储存备用就可以实现变频工作的目的。关于可重构天线的设计, 原天线的选择极为重要, 研究者大多通过前人积累的经验及大量尝试以得到尽可能好的原天线结构, 通过参考相关文献^[1,12,13]及反复的尝试, 本文用于优化的原天线结构选择如图 5 所示, 图中黑色小矩形

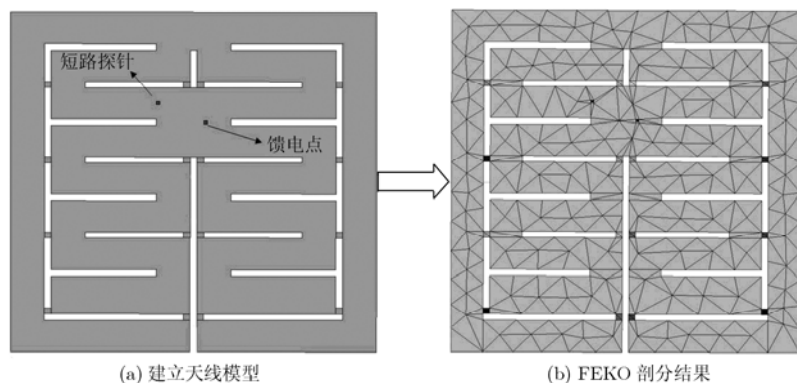


图 3 FEKO 软件特殊分割示意图

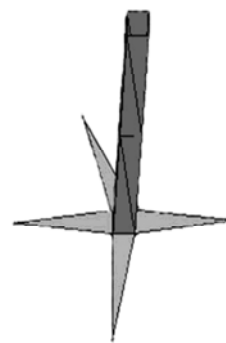


图 4 柱体探针模型

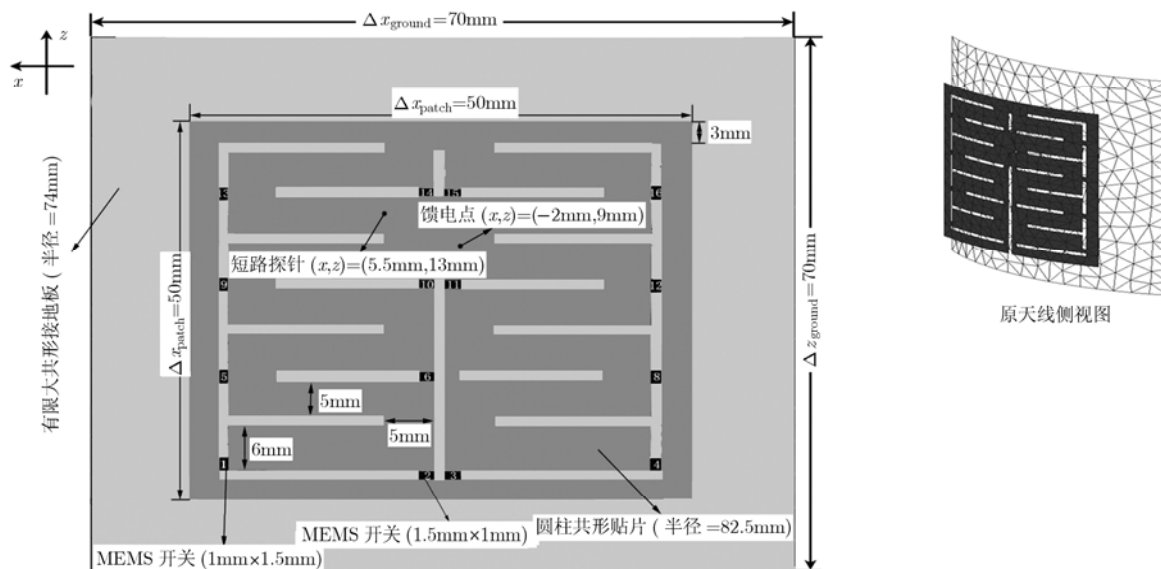


图5 变频优化设计所用的原天线示意图

代表 MEMS 开关, 从下至上从左至右共有 16 个, 按序均做了标记。该天线尺寸各参数如下(图中也做了简单的标记说明):

(1)有限大圆柱共形接地板: 半径=74 mm, 在 x 轴及 z 轴上投影长度均为 70 mm。

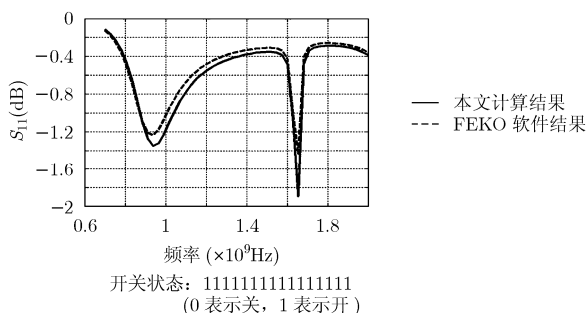
(2)矩形贴片: 半径=82.5 mm, 在 x 轴及 z 轴上投影长度均为 50 mm。

(3)MEMS 开关: 第 1, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 16 开关在 x 轴上投影长度为 1 mm 在 z 轴上投影长度为 1.5 mm。第 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15 开关在 x 轴上投影长度为 1.5 mm 在 z 轴上投影长度为 1 mm。

(4)贴片上的缝隙: 各缝隙的宽在 x 轴上或在 z 轴上投影长度均为 1 mm。

(5)探针位置: 馈电点的探针在 xoz 平面内的位置为 $(-2 \text{ mm}, 9 \text{ mm})$, 短路探针在 xoz 平面内的位置为 $(5.5 \text{ mm}, 13 \text{ mm})$ 。探针半径均为 0.25 mm。

原天线的 S_{11} 参数计算结果与 FEKO 软件计算结果比较图见图 6, 由图可知, 本文计算结果与 FEKO 软件计算结果吻合良好, 保证了优化设计的准确性。另外, 可以看出这种在开关均为接通状态

图6 原天线 S_{11} 参数计算结果

时的天线性能较差。

对该天线进行优化设计, 采用的 NQGA 优化算法参数设置如下:

优化代数取 150 代, 量子交叉概率取 0.2, 种群个数取 10, 16 个 MEMS 开关状态的量子编码对应取 16 位编码, 旋转角采用上述的动态形式, 另外在算法中加入移民策略, 即当优化接连 15 代没有变化时采取量子移民操作。图 7-图 9 给出了 3 种优化结果的 S_{11} 比较图以验证优化效果, 表 3 列出了 10 种优化结果, 给出对于频段 16 个开关的通断状态。

仿真结果如图 7-图 9 所示, 优化结果与 FEKO 软件仿真结果吻合较好, 验证了优化算法的正确性, 从而实现了变频优化的目的。表 3 列出的 10 种优化结果说明: 根据优化结果设置 16 个 MEMS 开关的接通状态可以使得该可重构天线成功实现 10 个窄频段的变频工作的需求。实际上, 通过更深入的优化研究, 可以实现更多频段的变频工作的需求, 可获得更多的有用的开关状态分布结果, 可见本文的优化设计算法使得该可重构天线通过一个天线口径成功实现了十个甚至几十个天线的功能, 具有很好的经济效应。若对该天线采用传统的设计方法, 则 16 个开关有 2^{16} 种可能状态, 利用目前的商业电磁仿真软件, 则只能采取反复尝试的方法设计, 可想而知, 这根本无法完成这副天线的设计, 更无法获得表 3 中 10 种变频优化结果。

5 结束语

目前, 频率可重构微带天线的优化设计常常依赖于反复实验, 本文提出了一种快速有效的可重构微带天线优化设计方法。首先, 对量子优化算法做

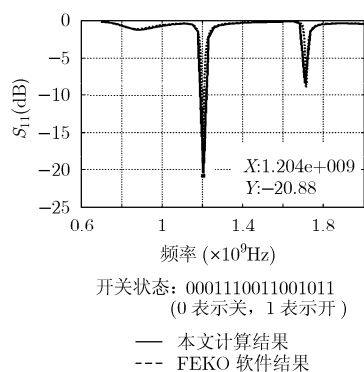


图7 1.204 GHz 优化结果验证

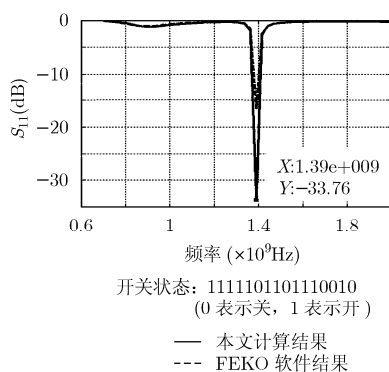


图8 1.39 GHz 优化结果验证

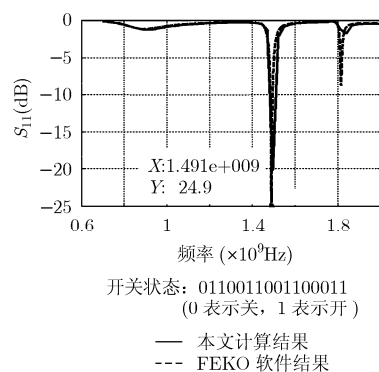


图9 1.496 GHz 优化结果验证

表3 变频优化的10种优化结果及对应的16个状态分布

优化后的谐振频点 (GHz)	MEMS 开关序号															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1.098	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
1.204	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
1.231	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1.284	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
1.390	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
1.496	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
1.629	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.682	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
1.761	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
1.788	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1

注：表3中0表示开关断开，1表示开关接通。

了进一步的改进，包括提出了一种动态旋转角及其他新型的遗传操作的运用，使得优化算法能克服早熟而尽可能达到最佳优化。其次，对于微带天线特定优化目的的剖分网格数据获取问题，文中利用FEKO软件，成功实现了任意形状共形微带天线的特殊优化目的的剖分网格数据的获取问题。最后，利用该方法，设计了一副变频圆柱共形微带可重构天线，这副结构奇特的可重构天线可变频工作在十个甚至几十个窄频段，可满足广泛的变频工作的需求，大大显示了该优化设计方法的优越性。另外，本文提出的优化设计方法容易实现如文献[10]的贴片优化设计，以满足宽频，多频天线的优化设计，同样，也可以实现天线方向图的优化设计，总之，只要合理选择待优化的可重构天线的原天线结构，以上优化目的都容易实现，可见，本文的优化方法具有广阔的应用前景，对新型微带天线的研发具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 王小玲. 集成 MEMS 开关的可重构分形天线的设计及制作.

[硕士论文], 华东师范大学, 2008, 5: 1-2.

Wang Xiao-ling. The design and fabrication of the reconfigurable fractal antenna integrated with MEMS switches. [Master dissertation], East China Normal University, May, 2008, 5: 1-2.

- [2] Riel M, and Laurin J. Design of an electronically beam scanning reflect array using aperture-coupled elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, S5(4): 1260-1266.
- [3] Chen S, Row J, and Wong K. Reconfigurable square-ring patch antenna with pattern diversity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(2): 472-475.
- [4] Yang F and Rahmat Y. Patch Antennas with Switchable Slots (PASS) in wireless communications: Concepts, designs, and applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2005, 47(4): 13-29.
- [5] 周传华, 钱锋. 改进量子遗传算法及其应用, 计算机应用, 2008, 28(2): 286-288.

Zhou Chuan-hua and Qian Feng. Improvement of quantum genetic algorithm and its application. *Computer Applications*, 2008, 28(2): 286-288.

- [6] Han H and Kim H. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization. *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, 2002, 6(6): 580-593.
- [7] 孙力娟, 王汝传. 量子计算与遗传算法的融合及其在计算机通信网优化中的应用. *电子与信息学报*, 2007, 29(4): 920-923.
Sun Li-juan and Wang Ru-chuan. Application of combination of quantum computation and genetic algorithm to computer network optimization. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(4): 920-923.
- [8] Hu Meng-zhong and Yin Cheng-you. An universal method for full wave analysis of arbitrarily shaped microstrip antenna on finite grounded substrate. The 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory Proceedings, Kunming, China, Nov. 2-5, 2008: 1128-1131.
- [9] Ning Yuan and Tat Soon Yeo *et al.* Analysis of probe-fed conformal microstrip antenna on finite grounded substrate. *IEEE Transactions on Antennas Propagate*, 2006, 54(2): 554-563.
- [10] Johnson J. Genetic Algorithms and Method of Moments (GA/MOM) for the design of integrated antennas. *IEEE Transactions on Antennas Propagate*, 1999, 47(10): 1606-1614.
- [11] Makarov N. Antenna and EM Modeling with MATLAB. Beijing University of Posts and Telecommunications Press. 2006, 9.
- [12] Song Zhao-hui, Liu Ying-hong, and Chen Wei. Reconfigurable multiple-band antenna using switches. The 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory Proceedings, Kunming, China, Nov. 2-5, 2008: 441-444.
- [13] Nikolaou S, Bairavas R, and Cesar L. Pattern and frequency reconfigurable annular slot antenna using PIN diodes. *IEEE Transactions on Antennas Propagate*, 2006, 54(2-1): 439-448.
- 胡梦中: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为微带天线理论、数值分析以及微带天线优化设计.
- 尹成友: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为天线与电波传播、近地复杂线天线分析、微带天线理论及数值分析、数据融合及阵列信号处理等.
- 宋 铮: 女, 1956 年生, 教授, 研究方向为天线与电波传播、自适应天线、微带天线理论及数值分析及优化算法.