

# 遗传算法在微带天线优化中的应用

杨 帆,张雪霞

(清华大学电子工程系,北京 100084)

**摘 要:** 本论文将遗传算法成功地应用到微带天线的优化中. 论文中详细讨论微带天线采用遗传算法进行优化的一些基本问题,如基因串的定义,遗传算法与矩量法的结合,适应度函数的设计以及控制参数的选择等. 最后,论文成功地应用遗传算法,优化出宽带天线,带宽由初始 5% 展宽到 16.6%;并优化出双频工作天线,双频比为 1:1.31,而且具有同向的线极化.

**关键词:** 遗传算法; 微带天线; 矩量法; 宽带天线; 双频天线

**中图分类号:** TN821<sup>+</sup>.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 09-0091-05

## The Application of Genetic Algorithms in Microstrip Antenna Optimization

YANG Fan, ZHANG Xue-xia

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Genetic algorithms (GAs) are successfully applied to the optimization of microstrip antenna design. This paper discusses some basic problems in this application thoroughly, such as the definition of genetic series, the combination of GAs and method of moment, the design of fitness function and the selection of control parameters. Using GAs, a wide band microstrip antenna is designed, the bandwidth expands from 5% to 16.6%. A dual frequency antenna is also optimized. The ratio of these two frequencies is 1:1.31 and both frequencies have the same linear polarization.

**Key words:** genetic algorithms; microstrip antennas; moment of method; broadband antenna; dual frequency antenna

### 1 引言

遗传算法是一类借鉴生物界遗传机制进行随机搜索的优化算法<sup>[1]</sup>. 作为一种新的全局优化搜索算法,遗传算法以其简单通用、鲁棒性强、适于并行处理等显著特点吸引了许多研究者的注意. 其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换,其搜索不依赖于梯度信息. 由于上述特点,遗传算法已经在组合优化、图像处理、系统识别等众多领域得到成功的应用,而且其应用范围也越来越广.

微带天线近年来受到极大关注,发展迅速. 与其他天线相比,它具有以下优点:体积小,重量轻,剖面低,容易与载体共形;电性能多样化,容易实现多种极化、多频工作等要求;平面结构,易于与馈线、匹配网络、固体器件等集成,降低成本. 但它也具有一些缺点,如频带窄,损耗大,效率低等. 设计合适形式的微带天线,使其克服缺点,发挥优势,是微带天线设计中的一个主要内容.

随着微带天线设计理论的不不断发展,遗传算法也开始应用到微带天线的设计中来<sup>[2]</sup>. 通过遗传算法的优化设计,可以得到合适形状的微带天线,满足某些特定的性能要求. 本论文中将遗传算法成功地应用到微带天线的优化中,讨论了遗传算法应用到微带天线的优化中的一些具体问题,如基因串的定义,适应度的设计以及控制参数的选择等;并利用遗传算

法,分别优化出了具有宽带特性和双频特性的微带天线,克服了微带天线窄带的缺点,实现了微带天线电性能的多样化.

### 2 微带天线设计中的遗传算法优化

本文中,主要讨论对微带天线形状的优化. 其基本问题如下图所示:

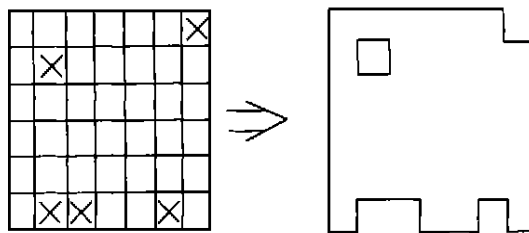


图1 微带天线贴片初始形状及优化后的形状

微带天线贴片的初始形状是一个矩形. 将矩形贴片划分为若干个小的矩形单位贴片,如图1左侧. 通过优化,保留其中的一些贴片,去除其中的一些贴片,图中,打“X”的贴片代表要去除的贴片,得到优化后的贴片形状如图1右侧. 从物理意义上理解,去除这些贴片等效于在天线这个谐振腔中加入合适的电感、电容或匹配元件,从而实现要求的特性.

遗传算法优化的基本流程如图 2 所示:

遗传算法是一种群体型操作,该操作以群体中的所有个体为对象.选择(selection)、交叉(crossover)和变异(mutation)是遗传算法的三个主要操作算子,它们构成了所谓的遗传操作,使遗传算法具有了其它传统方法没有的特点.将遗传算法应用到微带天线的研究中,主要要解决的几个问题包括:基因串的定义,遗传算法与矩量法的结合,适应度函数的设计,控制参数的选择等等.下面就这些问题逐一进行讨论.

## 2.1 基因串的定义

如前所述,在微带天线的优化问题中,待优化的参数是天线的形状.而遗传算子操作的是二进制的基因串.因此必须将天线的形状映射为合适的基因串.从图 1 中可以看出,优化所得到的天线,实际是将原天线去掉某些矩形单元得到的.具体的过程就是,首先将天线的矩形贴片划分为若干个小矩形单元,如图 3,是  $42(7 \times 6)$  个矩形单元.然后通过优化程序,确定哪些单元应该保留,那些单元应该去掉.最后得到优化后的天线.这个过程提示我们,可以将每一个矩形单元对应于基因串的每一位,实现从贴片形状到基因串的映射,即自然空间到遗传空间的转化.图 3 给出了一个这样转化,即编码的例子.

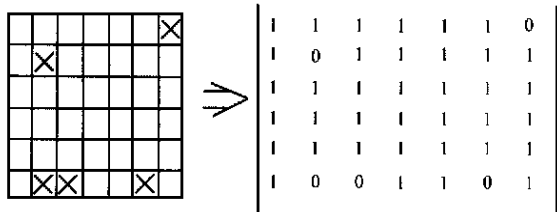


图 3 微带天线形状的编码

从图中可以看出,将天线的形状转化为一个二进制的  $7 \times 6$  的基因矩阵.当矩形单元要保留时,对应位上的代码定义为 1;反之,当矩形单元要去除时,对应位上的代码定义为 0.然后将这个矩阵按行的顺序写成一串,就得到了一个基因串.这样,就将天线的形状转化为对应的基因串.而且,这种映射是一对一的,即给定一个天线的形状,必然可以写出唯一的一个基因串与其相对应;同样给出一个基因串,也必然可以画出唯一的一种天线形状对应于这个基因串.

## 2.2 遗传算法与矩量法的结合

这里采用基于全波分析的矩量法对微带天线进行分析<sup>[3]</sup>.应用矩量法,可以对微带天线得到比较精确的分析结果.但应用矩量法进行分析的一个缺点就是计算时间比较长.而导致时间长的主要原因在于  $z$  矩阵的填充要花费很长时间,因为  $z$  矩阵的每个元素都要通过多重积分得到.因此,在优化中,如果对不同形状的天线贴片均分别填充  $z$  矩阵,那

么整个优化的时间是不可想象的.尤其遗传算法是以群体为操作对象,假设群体大小为 64,那么一代分析的时间就接近于一个天线分析时间的 64 倍,这是实际条件无法允许的.实际应用中,采用矢量三角形基函数<sup>[4]</sup>,并用下面的“母矩阵”技术<sup>[5]</sup>,节约了计算时间.

基因矩阵中的每一个元素对应的是天线贴片上的每一个矩形单元;而矩量法矩阵中每个元素对应的是一个矢量三角形基函数.两者并不一样,但是存在一定的联系.图 4 给出了两者之间的一个对应关系.图 4 中去掉了带阴影的矩形.带阴影的矩形包括了五条边,即边界的四条边和中间的一条斜边.设这些边的编号分别为  $n1, n2, n3, n4, n5$ .当这个矩形被去掉以后,根据物理意义,这五条边上也就自然没有法向电流.因此,解矩量方程的时候,电流系数向量  $I$  中这几条边对应的电流系数应该为零.所以,新的贴片形状所对应的矩量方程中的矩阵可以由原矩阵去掉这些行和列得到,如图 4 中去掉  $n1, n2, n3, n4, n5$  这五行五列.即将原来完整贴片的  $z$  矩阵理解为“母矩阵”,其他形状贴片的天线的  $z$  矩阵都可以由它们简单地去掉某些行和列得到,不需要重新计算就可以得到现在形状下的  $z$  矩阵.这样可以大大地节省  $z$  矩阵的计算时间,提高优化效率.

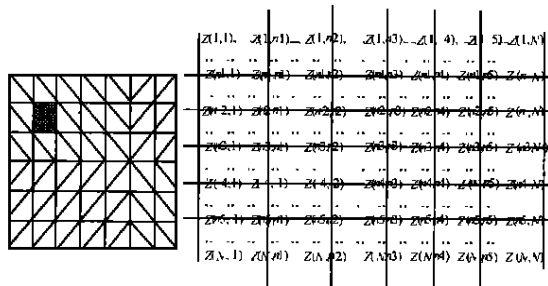


图 4 基因矩阵与矩量法中  $z$  矩阵的关系

## 2.3 适应度函数的设计

适应度设计是遗传算法优化中的一个十分关键的问题.适应度设计的好坏直接关系到收敛速度和准确度.通过对个体适应度的评估,可以判断是否优化出需要的解;如果没有,可以以每个个体的适应度为根据,进行选择算子等遗传操作.

实际应用中,常采用待优化的目标函数作为适应度评估函数.下面以宽频带微带天线的优化为例说明适应度的设计.我们的目标是设计出一个输入阻抗带宽超过 10% 的微带天线.转化为具体的参数指标,即优化出在频率范围 2.5 - 2.9GHz 内反射系数  $S_{11} < -10\text{dB}$  的微带天线.当在带内选取三个频率点  $f_1, f_2, f_3$  作为抽样点,以其反射系数作为适应度.可以得到下面的适应度评估函数:

$$F = \frac{|S_{11}(f_1)| + |S_{11}(f_2)| + |S_{11}(f_3)|}{3} \quad (1)$$

其中,  $F$  表示某一形状的天线对应的适应度值 (Fitness), 其大小等于在三个抽样点的  $S_{11}$  的平均值.这里,  $S_{11}$  取 dB 为单位,而且要加上绝对值,因为下面进行选择算子操作时,适应度必须为非负数.

实际应用中,还必须注意如下几个问题:

(1) 抽样点数的选择. 式 1 中选择了三个点作为抽样点. 由于反射系数的曲线是连续变化的, 因此一般情况下, 如果这三个频率点的反射系数均小于  $-10\text{dB}$  的时候, 整个频带内的反射系数都会小于  $-10\text{dB}$ . 但是也有反射系数曲线变化很剧烈的情况, 这样就必须取多个抽样点. 另外, 频带范围较大, 三个频点难以概括整个频带的变化特性时, 也需要取多个频率点. 一般来说, 抽样频率点的数目取得越多, 计算得到的精度也会越高. 但是由于计算的频点增加, 整体的计算时间也会增加.

(2) 反射系数作为适应度的补充. 由于反射系数转化为以  $\text{dB}$  为单位的时候, 是做了一次对数计算的, 在天线匹配得很好的情况下, 即反射系数很小的时候, 反射系数转化为  $\text{dB}$  时其绝对值就会很大. 这样, 即使其它两个频率处的反射系数转化为  $\text{dB}$  很小, 整体的适应度也可能还是比较大, 甚至还要大于三个点都匹配的情况. 因此, 必须要对反射系数作为适应度做一补充:

$$|S_{11}| = \begin{cases} |S_{11}|, & |S_{11}| \leq 20 \\ 20, & |S_{11}| > 20 \end{cases} \quad (2)$$

(3) 频率带外的限制. 在宽带优化设计中, 主要考虑的是带内的反射系数小于  $-10\text{dB}$ , 对于带外没有什么限制. 但是, 在其它优化目标下, 还必须考虑带外的限制, 这一点类似于滤波器的带外衰减的要求. 比如, 当我们考虑优化双频工作的天线时, 除了在指定的频率处反射系数比较小外, 还要求在其它频率处没有谐振现象, 即反射系数比较大. 假设要工作的双频为  $f_1, f_2$ , 要限制的频率为  $f_3$ , 则适应度函数可以定义为:

$$F_1 = |S_{11}(f_1)| + |S_{11}(f_2)| / 2 \quad (3)$$

$$F_2 = 20 - |S_{11}(f_3)| \quad (4)$$

式中,  $F_1, F_2$  分别对应为通带和阻带的适应度值.

## 2.4 微带天线遗传算法优化中控制参数的讨论

微带天线中采用遗传算法进行优化过程中, 有一些控制参数. 合适地选取这些控制参数, 可以提高优化的效率, 得到更好的优化结果. 几个主要的优化参数为: 贴片去除的概率, 群体的规模, 遗传世代, 变异概率.

(1) 贴片去除的概率. 初始群体是在遗传空间里采用随机的方法生成. 在生成微带天线的初始群体时, 有一个重要问题就是: 基因矩阵中应该有多少个是零, 或者说, 被去除的矩形单元的概率是多少. 显然, 这个概率不能太大. 因为如果被去除的单元过多, 就失去了微带天线的特点了. 而在这个概率太小, 就达不到调整天线输入阻抗的目的. 实际应用中, 取这个概率为  $1/5$ .

(2) 群体的规模. 遗传算法是一种并行算法, 它同时处理整个群体. 群体的规模大, 则可以包含更多的基因模式, 群体的多样性丰富. 从图 4 中看出, 天线被分为 42 个矩形单元, 天线形状共有  $2^{42}$  个不同选择. 只有取的群体规模比较大, 才有可能得到较好的全局特性, 避免陷入局部的极值. 但是群体的规模越大, 计算的时间也就越长, 相应的收敛速度也就越慢. 实际计算中, 采用了规模为 16, 32, 64 和 128 的不同群体. 当群体规模为 16 的时候, 优化过程很快能收敛, 但是没有得到合

适的优化结果, 这是由于基因型太少的原因. 采用规模为 128 的群体时, 收敛十分慢. 但是, 当计算到第四代群体的时候, 已经有合适的个体产生. 由于规模太大, 这种群体每一代的计算时间都十分长. 综合考虑计算时间和优化结果, 最后选取大小为 64 的群体.

(3) 遗传世代. 遗传世代是指遗传的群体更新次数. 一般来说, 遗传的世代越多, 得到的优化结果也就越好. 一般的优化问题, 优化终止有两种办法, 一个是优化的结果收敛到某一优化值; 另一个办法是优化结果已经达到了要求的指标从而结束优化过程. 遗传世代是遗传算法中的一个控制优化次数, 终止优化的参数. 微带天线优化中, 它主要受计算时间的限制. 这个参数的设定一般与群体规模成反比. 如当群体规模为 16 时, 遗传世代选为 32; 而当群体规模为 128 时, 遗传世代选为 4. 当然, 遗传算法也可以同时采用另外两种优化终止的办法结束优化过程.

(4) 变异概率. 上一节中简单介绍了变异操作的实现方法. 变异操作是遗传算法中一个十分微妙的操作. 通过变异操作, 可以产生原来群体中所不包含的基因模式, 挖掘出群体的多样性, 克服优化陷入局部解的危险, 产生更好的优化结果. 变异概率就是变异操作中的控制参数, 变异概率如果取得太大, 则选择操作和遗传操作的结果就会被破坏, 失去了遗传算法的特点. 如果变异概率取得过小, 又难以产生新的基因模式. 在计算中, 设定变异概率为 0.02. 对于大小为 64, 基因串长度为 42 的群体, 所需要变异的位为 54 位.

## 3 微带天线的优化结果

利用遗传算法, 对微带天线的形状进行了优化. 针对微带天线窄带的缺点, 设计了一幅宽带天线; 同时设计了合适的微带天线形状, 实现双频工作. 图 5 给出了一个同轴微带天线的初始结构. 馈电点左侧均匀分成  $5 \times 6$  个矩形片, 右侧均匀分成  $2 \times 6$  个矩形片, 并将矩形片由左至右, 由下而上进行统一编号.

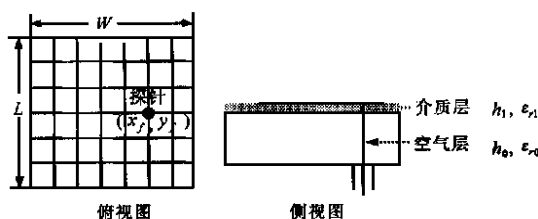


图 5 同轴馈电微带天线结构图

微带天线的参数为:

$$L = 48\text{mm}, W = 48\text{mm}, (x_f, y_f) = (36, 24)\text{mm}$$

$$h_0 = 4.2\text{mm}, \epsilon_0 = 1, h_1 = 0.8\text{mm}, \epsilon_1 = 2.65$$

### 3.1 宽频带微带天线

微带天线的一个很大缺点是其频带太窄. 设计各种方法以展宽微带天线的频带, 是微带天线研究中的一个热点问题. 常用的方法是多谐振贴片的方法, 即采用寄生的微带贴片, 通过不同贴片的尺寸不同分别谐振于不同频率, 来实现展宽频带的目的. 近年来, 通过设计合适的贴片形状来达到展宽频带

的文献也时有报道,比较突出的是 U 形缝微带天线和平行双槽微带天线. 这里,采用第二种方法,即通过遗传算法对微带天线形状的优化功能,设计出合适的天线形式,实现宽带的要求.

优化目标:

在 2.5~2.9GHz 频带内,反射系数小于 -10dB.

适应度函数:

$$F = \sum_{i=1}^3 S_i / 3 \quad (6)$$

$$S_i = \begin{cases} |S_{11}(f_i)|, & 5 \leq |S_{11}| \leq 20 \\ 20, & |S_{11}| > 20 \\ 0, & |S_{11}| < 5 \end{cases} \quad (7)$$

选取抽样点数目为 3,频率分别为 2.5,2.7 和 2.9GHz. 这里,除了上限 20dB 以外,当  $|S_{11}|$  小于 5dB 时,设  $S_{11} = 0$ ,相当于对不匹配的形状加上一个惩罚项.

控制参数的选取:

贴片去除概率:  $p_d = 0.2$ ; 群体规模:  $N = 64$ ;

遗传世代: 8; 变异概率: 0.02.

经过优化,去除贴片 (2,4,5,6,14,30,42), 得到如图 6 所示的微带天线:

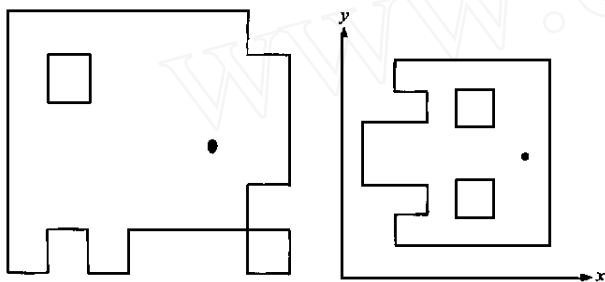


图 6 宽带微带天线形状

图 7 给出了天线反射系数曲线的实验值与理论值的对比. 从图中可以看到,微带天线的初始带宽为 5%, 而采用遗传算法优化后天线的带宽展宽为 16.6%. 理论与实验结果符合得很好.

### 3.2 双频工作微带天线

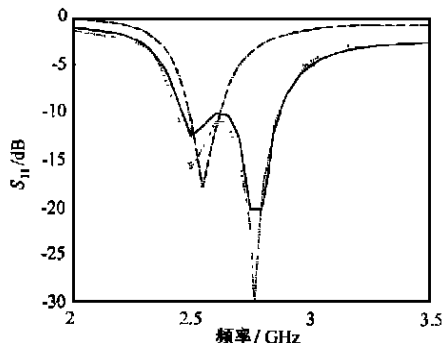


图 7 宽带微带天线的反射系数. ———初始形状天线的  $S_{11}$ , ———优化后天线的  $S_{11}$ (理论值), .....优化后天线的  $S_{11}$ (实验值)

随着通信技术的发展,对天线的电性能也提出了许多应

用的要求. 例如,在一幅天线上实现收发双工. 区分收发最简单的方法是频率区分的方法. 让天线在收发的时候工作于不同频段,从而实现收发的分开. 因此,设计合适的双频天线,是天线研究中的一个重要问题. 微带天线的研究也遇到了这个问题,就是如何设计合适的形状,以使其工作于两个指定的频段. 论文工作中,采用遗传算法优化,得到了一幅同时工作于 2.9GHz 和 3.8GHz 的微带天线.

优化目标: 在 2.9GHz 和 3.8GHz 处,反射系数小于 -10dB.

适应度函数:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} S_i}{n_1} + \frac{\sum_{i=1}^{n_2} (20 - S_i)}{n_2} \quad (8)$$

$$S_i = \begin{cases} |S_{11}(f_i)|, & 5 \leq |S_{11}| \leq 20 \\ 20, & |S_{11}| > 20 \\ 0, & |S_{11}| < 5 \end{cases} \quad (9)$$

选取抽样点数目为 5, 通带频率为 2.9GHz, 3.8GHz; 阻带频率为 2.7GHz 和 3.3GHz 和 4GHz.

控制参数的选取:

贴片去除概率:  $p_d = 0.2$  群体规模:  $N = 64$

遗传世代: 5 变异概率: 0.02

经过优化,去除贴片 (1,7,8,9,11,14,21,28,29,30,32,35,36,42), 得到如图 8 所示的微带天线:

图 9 给出了天线反射系数曲线的实验值与理论值的对比. 从图中可以看到,初始形状的微带天线只有一个谐振频率,在 2.55GHz 处. 经过遗传算法优化后,天线实现了双频工作的目的. 两个工作频率分别为 2.9GHz 和 3.8GHz, 双频比为 1:1.31. 图中看出,理论和实验符合得很一致.

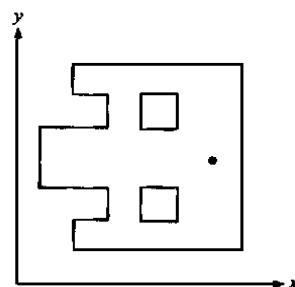


图 8 双频微带天线形状

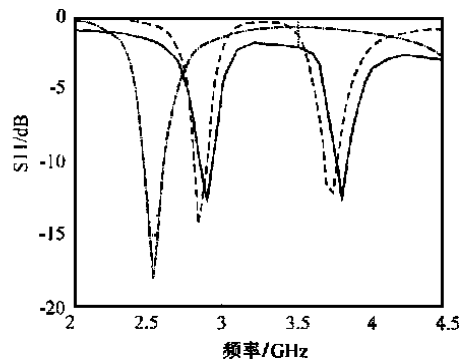


图 9 双频微带天线的反射系数. ———初始形状天线的  $S_{11}$ , ———优化后天线的  $S_{11}$ (实验值), .....优化后天线的  $S_{11}$ (理论值)

图 10 给出了天线的极化曲线. 从图中可以看出,在两个频率处极化方向一致,都是  $x$  方向线极化. 在实际应用中,有

时需要同向的线极化。对于普通的同向线极化的双频工作,就必须同时激励起微带贴片下电磁场的一次模与三次模,但是这样双频比就很大,不可能达到如图 9 那么小的双频比(1:1.31)。这也是这种形状双频天线的的一个很好的特点。

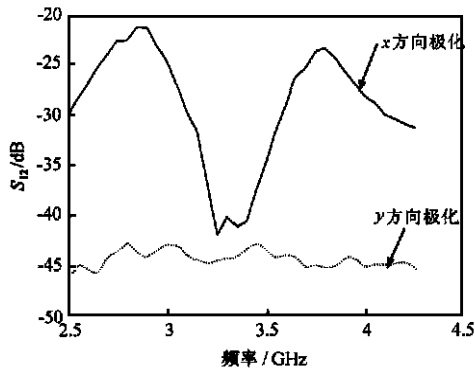


图 10 双频天线的  $S_{12}$  曲线

#### 4 结论

论文成功地在微带天线的设计中引入了遗传算法进行优化,讨论了优化中的一些基本问题,如基因串的定义,遗传算法与矩量法的结合,适应度函数的设计以及控制参数的选择等。论文中还采用遗传算法,优化出不同形状的微带天线,分别具有宽带和双频的特点。宽带天线的设计克服了以往微带天线窄带的缺点,将天线带宽从 5% 扩展到 16.6%。双频天线的双频比为 1:1.31,而且是同向的线极化。这两个例子充分说明了遗传算法在微带天线优化中的有效性。

#### 参考文献:

[1] 陈国良,等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京:人民邮电出版社, 1996.

- [2] J. Michael Johnson, Yahya Rahmat-Samii. Genetic algorithms in engineering electromagnetics [J]. IEEE AP Magazine, 1997, 39 (4) : 7 - 21.
- [3] E. H. Newman, P. Tulyathan. Analysis of microstrip antennas using moment methods [J]. IEEE Trans. AP, 1981, 29: 47 - 53.
- [4] S. M. Rao, D. R. Wilton, A. W. Glisson. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Trans. AP, 1982, 30: 409 - 418.
- [5] J. M. Johnson, Y. Rahmat-Samii. Genetic algorithms and method of Moments (GA/MoM): A novel integration for antenna design [J]. IEEE AP's Digest, 1997: 1664 - 1667.

#### 作者简介:



杨帆 分别于 1997 年, 1999 年获清华大学电子工程系学士、硕士学位。现在美国加州大学洛杉矶分校攻读博士学位。目前研究方向包括: 微带天线、光子带隙结构在天线中的应用以及电磁场数值解法。



张雪霞 清华大学电子工程系教授, 中国电子学会会士。1958 年毕业于清华大学无线电电子学系, 1959 年 - 1961 年为前苏联莫斯科动力学院访问学者。长期从事天线、微波技术、波导理论等方面的教学和科研工作。

(上接第 107 页)

- [4] J. M. Song, W. C. Chew. Multilevel fast multipole algorithm for solving combined field integral equation of electromagnetic scattering, microwave and optical technology letters [C]. 10, 1, September 1995: 14 - 19.
- [5] C. C. Lu, W. C. Chew. A multilevel algorithm for solving boundary-value scattering [J]. Micro. Opt. Tech. Lett. July 1994, 7(10): 466 - 470.
- [6] J. M. Song, C. C. Lu, W. C. Chew, et al. Introduction to fast Illinois solver code (FISC) [A]. IEEE Proceedings of '97 Inter. Symp. on Antennas and Propagation, 1997: 48 - 51.
- [7] R. L. Wagner, W. C. Chew. A ray-propagation fast multipole algorithm [J]. Microwave and Opt. Tech. Lett. July 1994, 7(10): 435 - 438.
- [8] J. Song, et al. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects [J]. IEEE Trans. Antennas and Propag., 1998, 145(10): 1488 - 1498.
- [9] J. Song, et al. Fast illinois solver code (FISC) [J]. IEEE Antennas and Propag. Magazine June 1998, 40(3): 27 - 34.
- [10] 胡俊, 聂在平, 姚海英, 王浩刚, 王军. 多层快速多极子方法中的树型算法 [J]. 电波科学学报, 1999, 14(增刊): 99 - 102.
- [11] 胡俊, 聂在平, 姚海英, 王浩刚. 用于复杂目标三维矢量散射的一种高效数值方法 [J]. 电子学报, 1999, 27(6): 104 - 109.
- [12] 聂在平. 面向实际工程应用的电磁场数值方法进展 [J]. 电波科学学报, 1999, 14(增刊): 155 - 158.
- [13] 聂在平, 胡俊. 三维矢量电磁散射高效数值分析中新的迭代算法 [J]. 电波科学学报, 1999, 14(增刊): 99 - 102.
- [14] Hu Jun, Nie Zaiping. Solving electromagnetic scattering from two-dimensional cavity by FMM with complexifying k technique [J]. Microwave Optical Tech. Lett., 1999, 3.
- [15] A. Brandt. Multilevel computations of integral transforms and particle interactions with oscillatory kernels [J]. Comput. Phys. Commun., 1991, 65: 24 - 38.
- [16] Vikram Jandhyala, Balasubramaniam Shanker, Eric Michielssen, W. C. Chew. A combined steepest descent-fast multipole algorithm for the analysis of three-dimensional scattering by rough surfaces [A]. 1997 Inter. IEEE Antennas and Propagation symposium: 2308 - 2311.
- [17] W. C. Chew. Waves and Fields in Inhomogeneous Media [M]. Van Nostrand Reinhold, New York.