

天线辅助设计 IGA 方法

杨建华^{1,2}, 孙 钢²

(1. 浙江大学 科学技术研究院, 杭州 310027, jhyang@zju.edu.cn; 2. 浙江大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310027)

摘要: 为了高效设计高性能的天线, 将免疫遗传算法引入天线辅助设计领域. 在传统遗传算法的基础上增加抗原识别、记忆功能和浓度调节, 同时引入一种新型的混合编码技术简化天线结构描述及交叉、变异等遗传操作, 实现天线结构的快速优化设计. 仿真结果表明, 相比传统遗传算法, 在天线结构设计中应用免疫遗传算法, 迭代次数明显减少, 收敛速度提高 50% ~ 60%, 算法执行效率显著提高, 在频率为 8.47 GHz 时设计所得天线的最大平均增益和最小平均增益分别提高 119.91% 和 258.89%, 性能优异. 免疫遗传算法克服了遗传算法由于交叉搜索而在局部搜索解空间时效率较差的缺点, 有效地避免了未成熟收敛的问题, 收敛稳定且速度明显加快, 体现了免疫遗传算法在天线辅助设计中的优异性和高效性.

关键词: 免疫遗传算法; 混合编码; 浓度调节; 记忆库; 天线结构设计

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)02-0317-06

A novel immune genetic algorithm for antenna design

YANG Jian-hua^{1,2}, SUN Gang²

(1. Sci-Tec Academy of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China, jhyang@zju.edu.cn;

2. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The immune genetic algorithm (IGA) was introduced into the fast optimization of antenna design. By employing antigen recognition, concentration regulation as well as memory mechanism, and adopting a new hybrid encoding to simplify the description of antenna structure and the operations of crossover and mutation, the fast optimization of antenna structure was realized. The simulation of ST5 satellite antenna was carried out to verify the proposed method. Results show that the iteration times are reduced evidently in the antenna design, the convergence rate is sped up about 50% - 60%. The maximum and minimum average gains for the designed antenna at 8.47 GHz are increased by 119.91% and 258.89%, respectively. Compared with traditional genetic algorithms, IGA overcomes their shortcomings in local search and avoids the problem of immature convergence, which proves the effectiveness of IGA in the antenna design.

Key words: immune genetic algorithm; hybrid encoding; concentration regulation; memory mechanism; antenna structure design

随着移动通信技术的发展, 卫星、雷达、声纳等设备的天线, 正在朝高性能、可扩展、可重配置、智能化方向发展^[1]. 传统天线设计方法或依靠经验进行手工设计, 或利用矩量法、粒子群优化算法等进行计算机辅助设计. 文献[2]通过合理设计辐射贴片和介质基板的尺寸及形状, 设计了一种

适用于短距离无线通信的超宽带楔形微带喇叭天线; 文献[3]应用遗传算法和有限元方法, 对阵列天线 ESPAR 进行结构优化, 从而使天线获得最大的主瓣增益; 文献[4]以矩量法为基础, 通过期望辐射场与辐射场正交基的正交运算来设计阵列天线, 减少了设计的时间复杂度; 文献[5]在分析了 U 型的天线结构之后, 用时域有限差分法设计了 U 型微带天线, 具有良好的阻频带宽和增益带宽; 文献[6]设计了一种智能天线阵列, 集成了遗传算法和有限时域差分法, 实现了天线快速优化

收稿日期: 2008-08-07.

基金项目: 预研基金资助项目(9140A07050106JW0404).

作者简介: 杨建华(1973—), 男, 博士, 副研究员.

的目的。

本文在遗传算法的基础上引入免疫因子,应用免疫遗传算法(Immune Genetic Algorithm, IGA)实现天线结构辅助设计及优化,算法融合了遗传算法和人工免疫算法的优点^[7-8],可以很好地解决传统天线设计方法存在的问题,在遗传算法的框架上增加了抗原识别、记忆功能和调节功能,没有附加复杂的操作,没有降低遗传算法的鲁棒性,与传统遗传算法相比,克服了其执行效率低、易未成熟收敛等缺陷,实验证明,在天线结构辅助设计中应用免疫遗传算法,收敛速度明显加快,执行效率显著提高,系统运行时间明显减少,设计的天线结构性能优异,显示了IGA在天线设计中的优异性和高效性。

1 IGA 算法

应用免疫遗传算法进行天线结构辅助设计,需解决IGA中的编码方法、浓度调节机制、记忆机制、适应度函数设计等关键技术。IGA通过编码技术将天线结构与算法中的染色体一一对应,编码的设计方法直接影响到免疫遗传算法的交叉算子、变异算子等运算操作,采用一种实数编码和二进制编码混合的新型编码方式;IGA通过浓度调节抑制同种天线结构在种群中出现次数过多,从而保持种群的多样性,克服了种群多样性减少而导致的未成熟收敛问题;IGA通过记忆机制避免天线设计过程中对相同或相似天线结构的重复计算,从而大大缩短了天线结构优化的计算时间;IGA适应度函数的设计直接关系到算法收敛的速度,合适的适应度函数可促使算法快速向最优解靠近,寻找最优的天线结构,本文采用权重系数的方法来构造合适的适应度函数。

2 算法框架

IGA保留了遗传算法框架,同时将天线的性能需求和约束条件作为抗原,将进化的天线个体作为抗体,设定ANTIGEN为抗原集合,PERFORMANCE REQUIRMENTS(PR)为天线性能要求,RESTRICTIONS为天线的限制条件,设定ANTIBODY为抗体集合;在免疫遗传操作层次对种群进行选择、交叉、变异等操作,其中,G设定为抗体种群,H设定为记忆库种群。用算法描述天线结构设计的IGA框架。

```

10 ANTIGEN  $\xrightarrow{\text{define}}$  (PR, RESTRICTIONS);
20 PR  $\xrightarrow{\text{define}}$  { requirment1, requirment2, ...,

```

```

requirmentn };
```

```

30 RESTRICTIONS  $\xrightarrow{\text{define}}$  { restriction1, restriction2, ..., restrictionn };
```

```

40 ANTIBODY  $\xrightarrow{\text{define}}$  { antibody1, antibody2, ..., antibodyn };
```

```

50 for( i = 0; i < N; i ++ ) //产生初始抗体种群
```

```

60     Generate( G_antibodyi );
```

```

70 G = { G_antibody1, G_antibody2, ..., G_antibodyN }  $\subset$  ANTIBODY,  $\forall$  G_antibodyi  $\in$  ANTIBODY
```

```

80 for( i = 0; i < N; i ++ ) //产生记忆库种群
```

```

90     Generate( H_antibody );
```

```

100 H = { H_antibody1, H_antibody2, ..., H_antibodyM }  $\subset$  ANTIBODY,  $\forall$  H_antibodyi  $\in$  ANTIBODY
```

```

110 for( i = 0; i < M; i ++ ) //计算记忆库内抗体的适应度值
```

```

120     CalculateFitness( H_fitness )
```

```

130     while( TURE ) {
```

```

140         for( i = 0; i < N; i ++ ) { //计算抗体种群内抗体的亲和力值和浓度
```

```

150             CalculateAffinity( G_affinity );
```

```

160             CalculateConcentration( G_concentration );
```

```

170         }
```

```

180         for( i = 0; i < N; i ++ ) //对抗体进行浓度检验,若过高则对其进行变异操作
```

```

190             if( G_concentration > CONENTRATION )
```

```

200                 Mutation( G_antibody );
```

```

210         for( i = 0; i < N; i ++ ) //计算抗体种群G内抗体的适应度值
```

```

220             CalculateFitness( G_fitness );
```

```

230         Update( H ); //更新记忆库种群
```

```

240         if( Perform( H ) == TURE ) //若天线性能满足要求则退出
```

```

250             return;
```

```

260         CrossoverOperate( G );
```

```

270         MutationOperate( G );
```

```

280         GenerateNextPopulation( );
```

```

290     }
```

3 算法实现

天线结构IGA辅助设计方法可分为亲和力计算、浓度调节、适应度计算和编码等过程。首先

结合二进制编码和实数编码的优点对天线个体进行混合编码,然后通过遗传算法染色体的交叉和变异等遗传操作优化天线抗体种群,同时引入人工免疫算法的亲合力、浓度、记忆库等免疫因子,逐渐优化抗体种群中的天线结构,改善天线性能,寻求天线结构的最优解。

1) 亲合力函数. 以亲合力表示天线结构的相似度,天线设计模型的亲合力函数为

$$d_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \sum_{k=1}^K D_{M_{ik}M_{jk}} \quad (1)$$

$$D_{i,j} = 1 / (1 + \sum_{k=1}^K D_{M_{ik}M_{jk}}) \quad (2)$$

式中: k 为抗体 i 上空间点的个数; d_i 为抗体 x_i 与其他所有抗体在天线集合上的距离之和; N 为抗体种群内抗体的个数; M_{ik} 、 M_{jk} 分别为抗体 i 和抗体 j 上的第 k 个三维空间点; $D_{M_{ik}M_{jk}}$ 为三维空间点 M_{ik} 和 M_{jk} 的直线距离; $D_{i,j}$ 为抗体 i 和抗体 j 之间的亲合力值。

IGA 算法通过亲和力的计算来识别抗原和抗体、抗体和抗体之间的相似度。

2) 浓度调节. 以 $C(x_i)$ 表示浓度,对于每一种天线结构 x_i ,判断其浓度值 $C(x_i)$ 是否过高,过高则说明这种天线结构在抗体种群中个数过多,取出 60% ~ 80% 部分此类天线进行变异,这样既可保证了天线抗体种群的多样性,又避免算法过早收敛。

浓度值 $C(x_i)$ 的计算为

$$C(x_i) = 1 - d_i / \sum_{i=1}^N d_i \quad (3)$$

IGA 算法在构造天线初始抗体种群的同时构造天线的记忆库种群,记忆库种群的规模一般取初始抗体种群的 10% ~ 20%。

3) 适应度函数. 以 fitness 表示适应度值,采用权重系数方法构造适应度函数为

$$\text{fitness} = M_1 - A \times \sum_{\phi=\theta_1}^{\theta_2} (\max \text{Gain}_{\phi} - M_2)^2 - B \times \text{VSWR} \quad (4)$$

式中: A 、 B 分别为权重系数; ϕ 为天线仰角, θ_1 为仰角下限, θ_2 为仰角上限, M_1 、 M_2 分别为指定的常数,保证适应度值始终大于 0; $\max \text{Gain}_{\phi}$ 为天线在仰角为 ϕ 时的最大增益, VSWR 为电压驻波比。

4) 混合编码. 有机结合实数编码和二进制编码方法对天线结构进行编码,产生形如二进制“010...11”编码串的“ $M_1M_2 \cdots M_n$ ”式的链表编码,其中, M_i 为一个三维随机点 (X_i, Y_i, Z_i) , X_i , Y_i , Z_i 分别为三维随机点的坐标. 解码时, 编码

“ $M_1M_2 \cdots M_n$ ”产生 $n - 1$ 条天线线段,其中,第 i 条天线线段的起点为 M_i , 终点为 M_{i+1} 。

5) 交叉变异. 针对天线结构所用的编码方式,交叉操作首先在相互配对的两个染色体中随机设置两个交叉点,取设定交叉点间的两个三维随机点 M_1^d 、 M_2^d 进行算术交叉,交叉后生成两个新个体为

$$\begin{cases} M_1^{d+1} = (M_2^d - M_1^d) \times \alpha(d) + M_1^d \times \beta \\ M_2^{d+1} = (M_1^d - M_2^d) \times \alpha(d) + M_2^d \times \beta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha(d) = \beta \times r^{(1-d/\text{Maxgen}) \times b}$, d 为系统运行到第 d 代; $\alpha(d)$ 为 d 的分段不连续函数,为了防止过早收敛,在种群运行代数较低的时候, $\alpha(d)$ 值较小,当代数增加的时候, $\alpha(d)$ 值变大; $\beta \in [1, 2)$; r 为 $[0, 1]$ 范围内的一个随机值; Maxgen 是最大的进化代数。

针对每个基因,根据变异概率判断其是否需要变异. 若设点 M_i 需要进行变异操作,对其作随机扰动,以扰动后的结果作为变异后的新基因值。

当变异个体的适应度值 fitness 小于平均适应度值 f 时,变异后新的基因值为

$$M'_i = M_i \times (1 + \varphi(d))$$

式中: $\varphi(d)$ 为 $[1, \text{Max}]$ 内符合非均匀分布的一个随机值。

否则:

$$M'_i = M_i \times (1 + \Delta(d))$$

式中: $\Delta(d)$ 为 $[0, 1]$ 内符合非均匀分布的一个随机值。

4 仿真实例

基于 NEC2 V2.0 天线仿真软件,以 NASA 的 ST5 Mission 的卫星天线^[9]为仿真实例验证了免疫遗传算法的性能. 天线主要性能要求如表1 所示。

表1 ST5 卫星天线性能要求

性能	规格
发送频率/MHz	8 470
接收频率/MHz	7 209. 125
电压驻波比	< 1.2: 1 (发送频率) < 1.5: 1 (接收频率)
增益/dB ($0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$)	≥ 0 ($40^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$) < 1 ($\theta = 80^\circ$) < 4 ($\theta = 90^\circ$)
输入阻抗/ Ω	50
天线直径/cm	< 15. 24
天线高度/cm	< 15. 24
天线重量/g	< 165

根据 ST5 卫星天线的性能要求,实验设定免

疫遗传算法的抗体种群规模为 100, 优化代数
为 200 代, 记忆库种群的规模为 10, 天线抗体种群的
交叉概率为 80%, 变异概率为 1%.

优化世代数为 50、100、150 和 200 时的天线
结构仿真实例如图 1 所示.

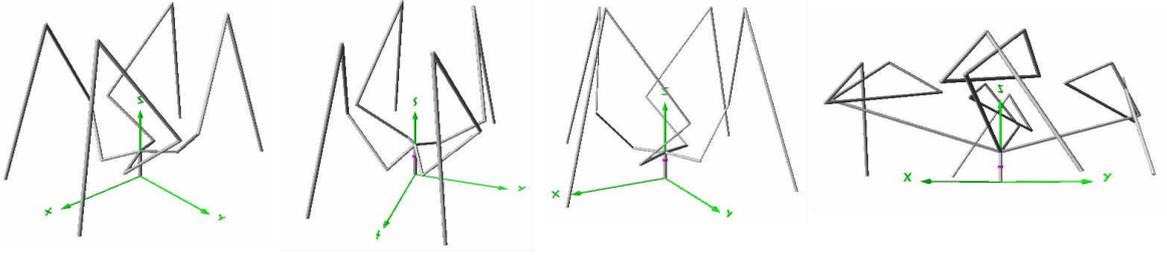
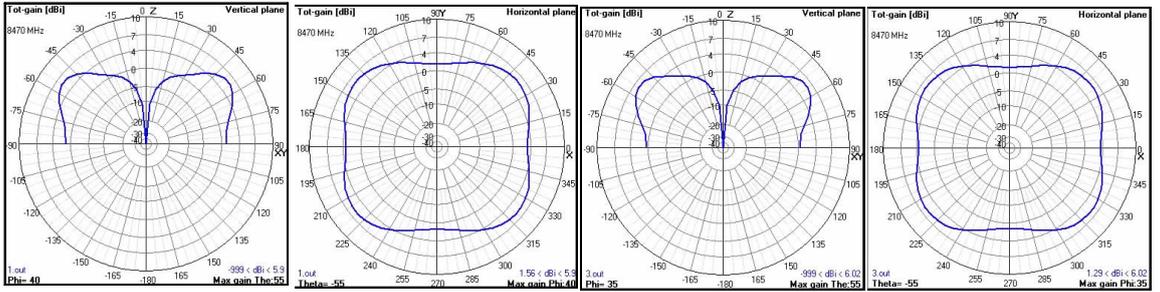


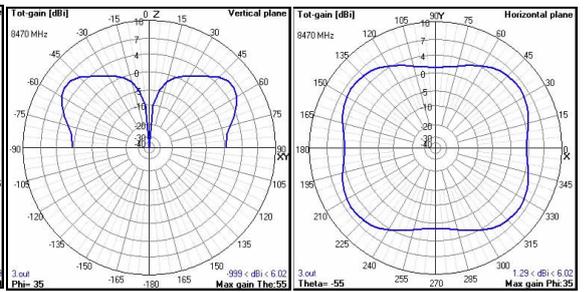
图 1 优化世代 50、100、150、200 的天线结构实例

优化世代数为 50、100、150 和 200 时, 该天线
在发送频率为 8470 MHz 的水平方向和垂直方向

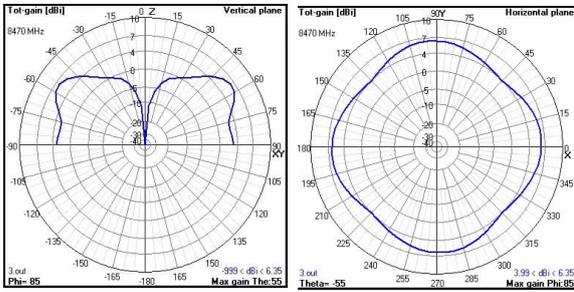
的增益效果如图 2 所示.



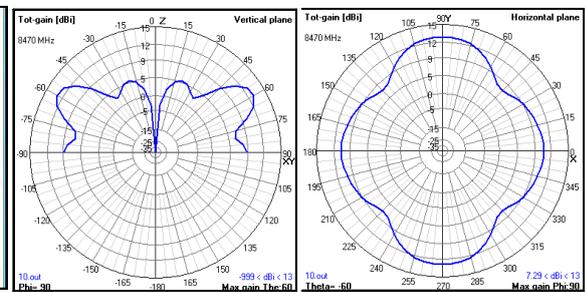
(a) 优化世代: 50



(b) 优化世代: 100



(c) 优化世代: 150



(d) 优化世代: 200

图 2 增益效果图 (发送频率 8 470 MHz)

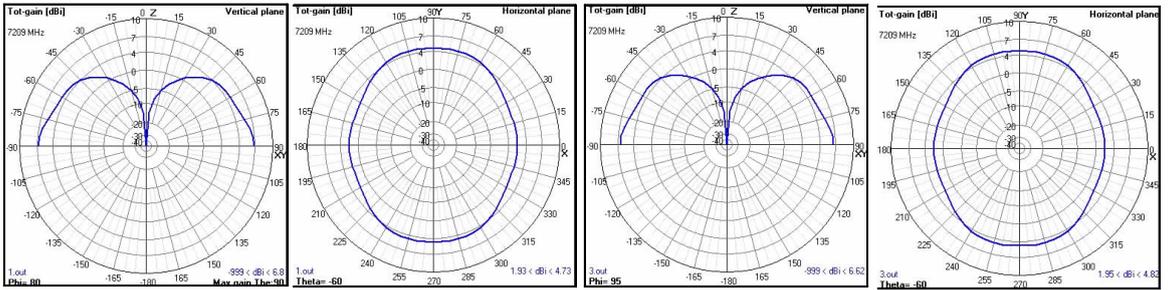
优化世代数为 50、100、150 和 200 时, 该天线
在接收频率 7 209 MHz 时水平方向和垂直方向的
增益效果如图 3 所示.

优化世代数为 50、100、150、200 时, 该天线在
接收频率 7 209 MHz 和发送频率 8 470 MHz 时的
最大平均增益和最小平均增益如表 2 所示.

最后优化世代 200 次仿真得出的天线在频率
为 8 470、7 209 MHz 时总的增益效果如图 4、图 5
所示, 电压驻波比如图 6 所示.

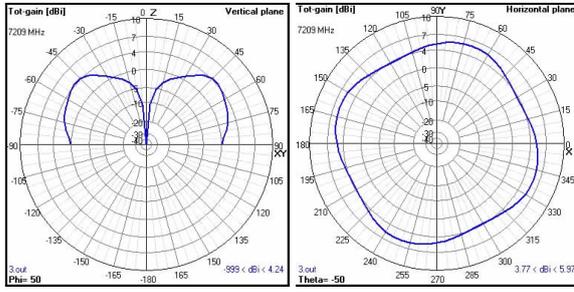
与用传统遗传算法设计出来的 ST5 天线相比,
仿真得出的天线增益提高很多, 主要性能参数
比较见表 3. 在频率为 8.47 GHz 时应用 GA 设计
的天线最大平均增益为 4.69 dB, 最小平均增益

为 1.474 dB, 而同样频率时应用 IGA 设计的天线
最大平均增益为 10.314 dB, 最小平均增益为
5.29 dB, 仿真结果证明, 与传统遗传算法相比, 最
大平均增益和最小平均增益分别提高了
119.91% 和 258.89%; 在频率为 7.2 GHz 时应用
GA 设计的天线最大平均增益为 5.00 dB, 最小平
均增益为 2.536 dB, 而同样频率时应用 IGA 设计
的天线最大平均增益为 9.922 dB, 最小平均增益
为 3.064 dB, 实验结果表明, 与传统遗传算法想
法比, 最大平均增益和最小平均增益分别提高了
98.44% 和 20.8%. IGA 设计的天线可以满足 ST5
Mission 的宽幅高增益、低 VSWR 的性能需求.



(a)优化世代:50

(b)优化世代:100



(c)优化世代:150

(d)优化世代:200

图3 增益效果图(接收频率7209 MHz)

表2 最大和最小平均增益

优化世代数	7 209 MHz 时增益/dB		8 470 MHz 时增益/dB	
	Max	Min	Max	Min
50	8.844	2.648	9.587	4.867
100	9.473	2.870	10.047	5.181
150	9.688	2.912	10.126	5.217
200	9.922	3.064	10.314	5.290

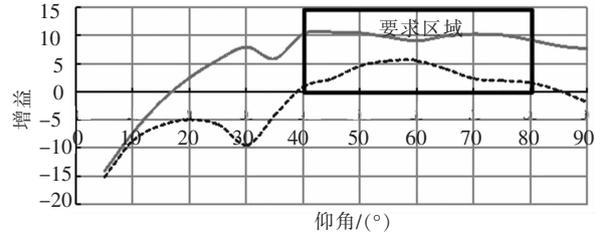


图5 最小增益和最大增益(接收频率7209 MHz)

发送频率时的增益图(8.47 GHz)

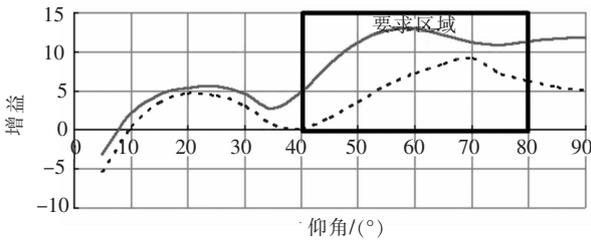


图4 最小增益和最大增益(发送频率8.47 MHz)

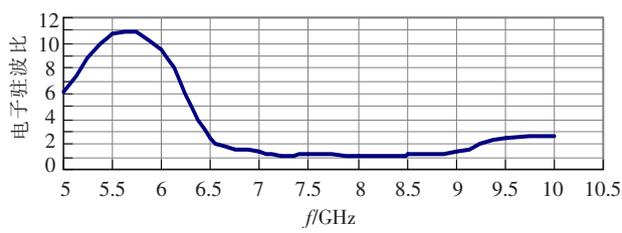


图6 VSWR 示意图

表3 GA 与 IGA 设计的卫星天线性能比较

		仰角/(°)	40	50	60	70	80	平均增益/dB
GA (传统遗传算法)	7.2 GHz	MaxGain	4.23	5.22	5.2	6.15	4.2	5.00
		MinGain	2.49	3.12	2.91	3.1	1.06	2.536
	8.47 GHz	MaxGain	4.27	5.06	5.1	5	4.02	4.69
		MinGain	0.83	3.02	1.52	2.01	-0.01	1.474
IGA (免疫遗传算法)	7.2 GHz	MaxGain	10.4	10.5	9.09	10.4	9.22	9.922
		MinGain	0.9	4.72	5.64	2.42	1.64	3.064
	8.47 GHz	MaxGain	4.87	11.2	13	11.2	11.3	10.314
		MinGain	0.11	3.52	7.29	9.17	6.36	5.29

此外,在相同测试环境下(在配置有 24 个节点 Cluster 集群中任选 10 个软硬件配置完全相同

的节点),天线设计 GA 算法和 IGA 算法分别进行 50 次实验(10 次/d × 5 d),实验结果如表 4 所示.

表 4 GA 与 IGA 时间性能比较

天数	GA 运行时间/h										IGA 运行时间/h									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
第 1 天	12.80	9.84	9.58	11.87	11.20	11.56	10.10	10.56	10.48	9.46	8.14	7.81	8.09	8.32	7.91	8.16	7.81	7.99	7.87	8.11
第 2 天	11.65	10.24	11.23	10.32	10.11	9.46	11.41	10.60	9.13	8.89	8.26	8.20	7.92	8.13	8.29	7.87	8.10	7.87	8.05	8.13
第 3 天	10.25	11.46	10.82	8.56	10.46	11.79	10.36	11.13	12.46	10.25	8.11	8.19	7.98	7.86	8.14	7.90	8.23	7.93	7.94	7.78
第 4 天	10.24	9.46	8.99	10.67	12.5	10.86	11.46	11.97	10.92	10.64	8.28	8.07	7.87	7.75	8.05	7.92	7.96	8.29	8.42	7.95
第 5 天	12.43	10.56	10.32	9.98	11.87	9.78	10.75	10.95	9.98	10.64	7.95	7.91	8.18	8.16	8.09	8.35	7.84	7.80	8.23	7.84
平均值	10.66										8.04									

由表 4 可知,在相同测试环境下, GA 的平均计算时间为 10.66 h, IGA 的平均计算时间为 8.04 h. 比较结果可知,IGA 要比 GA 快 24.6%,说明基于 IGA 的天线辅助设计方法具有更高的执行效率. 同时,IGA 运行时间都集中在 7.5 ~ 8.5 h 之间,时间稳定性较好,而 GA 运行时间则分布比较分散,最长时间到达 12.80 h,而最短时间则是 8.56 h,时间稳定性较差.

5 结 论

1) 以 ST5 卫星天线为实例,仿真验证了免疫遗传算法在天线结构设计领域的可行性,特别是比较了 IGA 算法和 GA 算法的计算时间性能及辅助设计的卫星天线性能.

2) 实验表明,在天线辅助设计中应用免疫遗传算法,设计的天线增益高,电压驻波比小,性能优异,同时与传统遗传算法相比,收敛速度明显加快,算法执行效率显著提高,运行时间开销减少 20% ~ 30%,同时稳定性提高,体现了免疫遗传算法在天线辅助设计中的优异性和高效性.

3) 基于免疫遗传算法的天线结构辅助设计方法,不仅可设计卫星天线,也可用于其他类型天线,如雷达阵列天线、车载或舰载小型化天线等.

参考文献:

[1] HWANG YeongMing. Satellite antennas[J]. Proceedings of the IEEE, 1992,80(1):183 - 193.

[2] 李育红,杨程,周正. 一种新颖的超宽带楔形微带准喇叭天线设计[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(1): 143 - 146.

[3] SCHLUB R, LU Junwei, OHIRA T. Seven-element ground skirt monopole ESPAR antenna design from a genetic algorithm and the finite element method[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2003, 51(11): 3033 - 3039.

[4] 张云峰,曹伟. 一种基于稻垣模的新型阵列天线设计方法[J]. 微波学报, 2007,23(3): 20 - 23.

[5] CHAI Wenwen, ZHANG Xiaojuan. A novel wideband antenna desing using u-slot[J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 25(2):192 - 196.

[6] GAO Feng, LIU Qi-zhong, SHAN Run-hong. Optimal design of smart antenna array[J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 21(4):342 - 345.

[7] JIAO Li cheng, WANG Lei. A novel genetic algorithm based on immunity[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A, IEEE Transactions on, 2000, 30(5): 552 - 561.

[8] 行小帅,霍冰鹏. 基于免疫的并行单亲遗传算法研究[J]. 通信学报, 2007, 28(8):99 - 104.

[9] LOHN J D, HORNBY G S, LINDEN D S. An evolved antenna for deployment on nasa's space technology 5 mission[C]//Proceedings of Genetic Programming Theory Practice 2004 Workshop(GPTP - 2004). [s. n.]: [s. l.], 2004.

(编辑 张 红)