

遗传算法在波导裂缝阵列天线设计中的应用

王宏建¹, 高本庆¹, 刘瑞祥¹, 范斌²

(1 北京理工大学电子工程系, 北京 100081;

2 航空工业总公司613所光电部, 河南洛阳 471009)

摘要: 本文采用遗传算法分两步优化矩形波导裂缝天线阵, 首先对天线阵元激励幅值进行了初步优化, 直接利用可分离型分布, 大大简化了初步设计的过程, 并将阵元激励幅值比值作为优化参量以利于波导结构的馈电; 在随后进行的波导裂缝阵列阵元的偏置量和缝隙长度的优化上动态处理阵元的互耦并结合 Elliott 设计思想, 采用遗传算法得出的 $3\text{cm}(1 \times 4)$ 缝阵结果验证了 GA 算法的有效性和准确性, 并完成了 72 元矩形波导裂缝阵列的阵面优化, 为大型阵列优化提供了一种有效的方法。

关键词: 波导裂缝阵列天线; 遗传算法; 优化

中图分类号: TN820.1⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)03-0309-04

The Application of Genetic Algorithms(GAs) on the Design of the Waveguide Slotted Array

WANG Hong-jian¹, GAO Ben-qing¹, LIU Rui-xiang¹, FAN Bin²

(1. Dept. of Electronic Engineering, Beijing Inst. of Technology, Beijing 100081, China;

2. Dept. of Optical and Electronics, No. 613 Inst. of National Aerospace Company, Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: Genetic algorithms(GAs), one of the global maximum method, was firstly used to the elementary optimization of the amplitude of the slots in the rectangular slotted waveguide array, which simplify the design procedure greatly. Secondly, GAs, combined with the dynamic mutual coupling among all the slots were applied to optimize the offsets and the resonant lengths of the slots, which were the key factors of the antenna arrays. The results of the small array show the the validity of this method, the array of medium size (72 elements) array is also analyzed, and the same method can be extended to the large array design.

Key words: slotted waveguide antenna array; genetic algorithm; optimization

1 引言

波导裂缝天线阵由于具有体积小、增益高、副瓣低、口径利用率高、口径场分布易于实现等优点从而被广泛应用于雷达、导引头系统, 一般采用的是谐振阵。通常裂缝阵列的设计是十分复杂的, 大致可分为三个步骤: (1) 按对天线的电气指标要求, 确定波导尺寸, 面阵元数, 各缝上的电压; 在不考虑互耦时根据缝位置和缝电压估算各个缝的偏置量和缝长; (2) 考虑各个缝间互耦由 Elliott 设计方程调整缝长及偏置量; (3) 重复步骤(2)直到阵中缝处于谐振状态并满足所要求的电压分布。因此裂缝阵列的设计包含两次优化—初步函数逼近、量化及对激励幅度的初次优化, 以及对缝隙单元偏置量和缝隙长度的确定, 这里称之为二次优化。

传统优化方法(比如梯度法)是在初始值附近搜索最优解, 当只有很少参数问题的优化时是十分有效的。然而当优化参数增多时, 解空间增加很大以至于优化结果过分依赖于初始值的选取, 如果初始值选择落入差的区间, 则优化结果就被

限定为这区间的最优解; 而影响大、中型天线阵性能的因素很多, 不可能给出足够准确的初值, 况且对于大型阵列方程组往往陷入病态给不出结果。

遗传算法是一种类似生物界遗传机制进行搜索的全局优化算法^[1,9], 其求解搜索不依赖于梯度信息, 能得到全局最优解而不仅仅是局部最优解, 然而又比穷举搜索快得多。由于具有简单、鲁棒性强等优点近年来也被广泛应用于电磁场领域^[2-5], 但多为线天线、阵列天线间距或电流幅度的优化以及微带天线结构优化。

本文对波导裂缝各缝隙的激励幅度采用简单的可分离 Chebyshev 分布设计, 采用遗传算法对方向图各剖面进行优化, 大大简化了设计过程, 针对波导缝隙阵列馈电结构限制相邻单元激励幅度比值不会过大, 将激励幅度比值也作为其中的优化参量, 以利于波导系统的馈电设计; 首次采用遗传算法完成了考虑缝间动态互耦及缝间电压分布的设计, 在设计中充分考虑了裂缝间距、缝长等对结果影响的不同构造了合适

的适应度函数,在互耦项处理上采用动态调用,3cm 的对照结果验证了 GA 算法的准确性,完成了中型 8mm 阵列的设计,并为大型阵列设计提供了参考。

2 遗传算法在裂缝阵设计中的应用

图 1 为波导裂缝天线结构示意图,天线的电气性能是靠天线口面上电磁场的幅度和相位来实现的,因此天线阵的综合也就是天线口面各个缝隙的位置的确定过程,包括两部分优化:(1)给定电气指标的初步优化(缝电压);(2)考虑互耦等因素而进行的二次优化(缝偏置量和缝隙长度),其中初步优化可以给出缝隙的初始参量,进而为二次优化提供初值。

2.1 遗传算法在波导裂缝阵中的应用简介

遗传算法是一种群体运算,选择、交叉、变异是三个主要算子;遗传算法应用到天线设计及优化分析中主要是进行基因串定义、适应度函数设计、优化参数与适应度函数的连接等工作。作者运用遗传算法于波导裂缝阵列天线的流程为第一步对 Chebyshev 阵列单元激励作为初始群体,计算方向图并对单元激励评估实施遗传操作,达到初步设计指标;以第一步设计值为初始群体,计算天线等效导纳和有源导纳及阵元间互耦,通过对阵元参数评估实施遗传操作,得出辐射单元的缝隙长度和偏置量,完成整个阵面的优化。

2.2 遗传算法在初步优化的参数选取及应用

(1) 优化参数及编码。对于缝电压的初步选取,优化参数很明显就是各个缝的激励幅度,由于幅度为连续变化的,需要进行二进制编码与十进制函数的转换,二进制编码位数越多则结果越精确,其编码公式为

$$BL = \log_2 \left(\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{res}}} + 1 \right) \quad (1)$$

$$I = I_1, I_2, \dots, I_{BL} \quad (2)$$

式中 I 代表激励幅度, BL 代表激励幅度的编码数, I_{res} 代表离散值增量,解码公式为

$$I = I_{\min} + \sum_{k=1}^{N_j} I_{\text{res}} I_k 2^{k-1} \quad (3)$$

其中 N_L 代表阵元总数, I_k 代表阵元电流的二进制代码。

(2) 群体数量。群体数量大,则可以有更多的基因模式和群体多样性,由于此处计算只牵涉到简单的方向图计算,数量的大小对计算速度的影响不是太明显,数量定为 200。

(3) 遗传世代。世代越多,优化结果越好,此处选为 30。

(4) 变异概率。取为 0.02。

(5) 适应度函数。优化目标为天线远区方向图

$$f = \sum_i (D_i - D_{i, \text{des}})^2 + \sum_j \left(\frac{I_j}{I_{j+1}} \right)^2 \quad (4)$$

其中 f 为适应度, D_i 为方向图, $D_{i, \text{des}}$ 为所要求方向图, i 为所选取的不同剖面 and 不同角度的参数,比如选取 10 个剖面和 10 个角度的方向图, i 的取值区间为 1 到 100,这样做使得方向图逼近所要求的值, j 为缝的编号,式中第二项为相邻阵元电流的比值。

对于矩形栅格阵列来讲,若口径分布为可分离型,则设计是简单的,但合成方向图主瓣展宽、非主平面方向图副瓣远低

于主平面方向图副瓣,造成增益下降^[6];而采用不可分离型设计则设计过程复杂且要求阵列行中的单元数等于列中的单元数^[6],因此在一般情况下不满足文献[6]中条件时为设计者提出了难题,但如今即使采用可分离 Chebyshev 分布设计,只需要将连续的幅度值量化,其余的工作就是适应度的构造,结合遗传算法则可以将初步设计大大简化,此外由于裂缝阵的结构所限,相邻阵元电流幅值相差不会过大,还可将其作为对象进行处理。

2.3 遗传算法在裂缝阵列设计中的二次优化

(1) 优化参数及编码。此处的优化为各个裂缝的偏置量和缝隙长度,编码则为两个参量的合成,可以采用顺序也可采用交叉编码。

(2) 群体数量。群体数量大,则可以有更多的基因模式和群体多样性,但此处计算包括复杂的互耦计算,计算量是很大的,为此采用所谓的微型遗传算法^[7],群体数量为 5,但由于它是以各个局部最优解作为起始值,所以仍能以很少的群体数量得到全局最优解。

(3) 遗传世代。此处选为 800。

(4) 变异概率。取为 0.02。

(5) 小生境优化。由于优化参数较多,需要在满足约束的解空间里选取最佳解的过程。

裂缝阵列的目标函数是比较复杂的,它基于 Elliott 设计理论,此处构造出适应于波导裂缝阵二次优化的适应度:

$$F = \sum_{j=1}^{N} c \times \left[\frac{\text{imag} \left(\frac{Y_n(i, j)}{G_0} \right)}{\text{real} \left(\frac{Y_n(i, j)}{G_0} \right)} + \sum_{p=1, N, M-1} d \left(\frac{Y_{i, j}(G_0)}{f_{i, j}} \right) + e \left(\sum_{i=1, N} \left(\frac{Y_{i, j}}{G_0} \right) - C_0 \right) \right] \quad (5)$$

其中, F 为适应度, C, D, E 为系数, C_0 为输入导纳限制系数,限于篇幅其他参量解释见文献[8]。

计算小型阵列时过去采用求解多阶方程组来得出缝的参数,由于求解的方法多为局部最优解法,过分依赖于初值的选定和函数的连续及可导,对于单元少的小阵是可行的,但当缝的个数过多时,该方法由于变量太多因而使得多阶方程组陷入病态不能求解,即使有结果也往往是不适用的病态解。

而 GA 算法通过适应度的构造包含了 Elliott 的设计思想,实施起来更灵活、更方便;此外由于遗传算法不受约束条件的限制,因此为了保证缝隙偏置量处于有利的动态范围,可以在目标函数中加上对各条波导的约束。

2.4 遗传算法与互耦项的处理

以前求解线性方程组时,往往将互耦项看作定态的,比如其中第 (i, j) 个缝隙与其他缝隙的互耦在整个计算过程中认为是不变化的,然而,实际上每迭代一步,总有一个或多个缝隙的偏置量和缝隙长度是不同的,这样得出的结果不能反映出真实的耦合。而在本文里互耦项是动态的,每迭代一次互耦项随着缝隙参数的变化而变化,因而结果会更准确。需要指出的是由于此处采用全高波导,波导内高次模产生的影响可忽略不计^[10]。

3 波导裂缝阵列天线的优化结果

3.1 缝隙激励的初步优化

此处优化对象是 8mm 矩形波导裂缝阵列天线, 阵元数为 72(6×12), 6 行 12 列, 分为 4 个区, 以利于形成和差方向图, 其设计指标为 $SLL = -20\text{dB}$, 3dB 宽度 E 面 14 度, H 面 7 度, 增益为 18dB.

由于不满足曾和郑的条件^[6], 这里采用可分离 Chebyshev 分布. 由图 2、图 3 可见, 在两个主平面上设计结果与要求是

一致的, 但在不同的剖面上副瓣大大低于设计要求, 从而造成方向图变宽和增益下降, 由图 3 可以看到 $\varphi = 20$ 度剖面上 3dB 宽度为 19 度远大于要求指标. 图 4、图 5 为遗传算法优化后的方向图, 可以看出无论两个主平面还是不同的剖面方向图与设计要求相当吻合, 并且考虑到波导阵列馈电结构所限, 相邻单元激励幅度比值最大为 1.3, 阵元幅度最大最小比值为 3, 相邻单元激励比值的可实现性得到了提高, 而优化前相邻单元幅度比值最大为 1.5, 阵元幅度最大最小比值为 9.

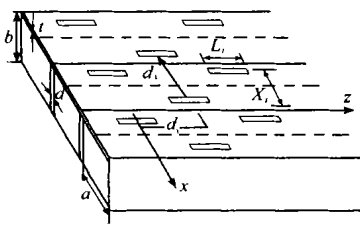


图 1 波导裂缝阵列天线结构示意图

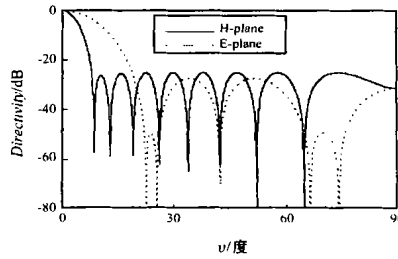


图 2 天线主平面初始方向图

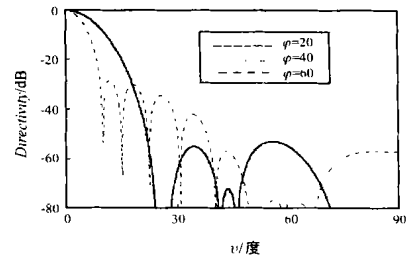


图 3 天线剖面初始方向图

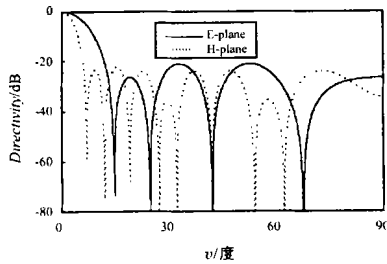


图 4 天线主平面优化方向图

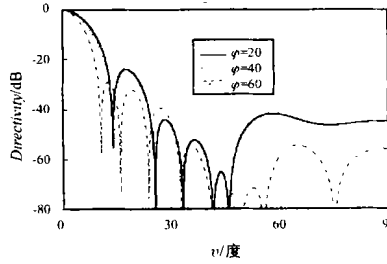


图 5 天线剖面优化方向图

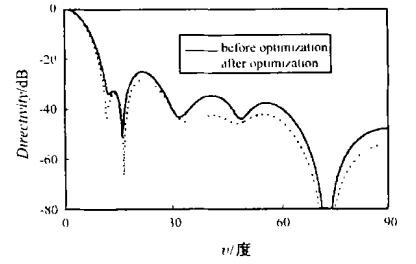


图 6 优化前后考虑互耦时的 72 元阵列天线方向图比较

3.2 缝隙结构参数的二次优化

为了验证 GA 的有效性和准确性, 此处优化对象一是 3cm 矩形波导裂缝阵列天线^[6], 阵元数为 4(1×4), 1 行 4 列, 表 1 为优化前后缝隙的结构参数.

表 1 1×4 缝隙阵列的缝隙偏置和缝隙长度 (Dx 单位 cm, L 单位缝长/缝隙长度^[6])

	Dx_1	Dx_2	Dx_3	Dx_4	L_1	L_2	L_3	L_4
[6]	0.2184	-0.4471	0.4471	-0.2184	1.0125	1.0099	1.0099	1.0125
Gas	0.2134	-0.4445	0.4445	-0.2134	1.0131	1.0096	1.0096	1.0131

表中 Dx 代表偏置量, L 代表缝隙长度, 由于对称性可得到另外的 4 个缝隙参量, 需要指出的是采用方程组解法初值的选定误差对于本例应在 4% 以内, 否则方程组无解, 对于小阵尚且如此, 大阵的初值更要精确, 这就为设计者造成很大困难, 而 GA 算法不受此限制, 为加快计算这里选取 15% 的初值误差. 由表可以看出, 文献[6]中数据和 GA 方法所得结果存在一定的差别, 这是由于文献[6]中裂缝之间的互耦是定态的, 在整个计算过程中互耦项仅仅取决于初始缝隙的位置及长度, 然而实际上缝隙之间的互耦值随着裂缝位置及长度的变化而改动, 因此这种算法会造成一定程度的误差. 而在本文的 GA 运算中充分体现了动态互耦项的影响, 另外方程组解法对于动态互耦动态范围要求过高而难以计入, 也就是说必须有足够精确的初值条件(约 1%) 才能进行动态设计, 尽管

存在着一定的差别但总的看来, GA 算法和文献[6]中数据吻合得较好, 说明 GA 算法应用到波导裂缝阵列设计是可行的.

影响大、中型天线阵性能的因素很多, 不可能给出足够准确的初值, 况且对于大型阵列方程组往往陷入病态给不出结果. 为了克服方程组解法对大、中型阵列的局限性, 此处优化对象二为 3.1 节的 8mm 中型波导裂缝阵列, 表 2 为优化后缝隙的结构参数. 图 6 为优化前后考虑互耦的方向图比较.

Dx 为偏置量, L 为缝隙长度. 需要指出的是本文设计的 6×12 阵列, 为拓展频带一般阵列对称分为 4 个区, 共两个区的参数需要计算出来(比如第一区和第四区或第一区和第二区), 根据对称性可得出整个阵列的参数, 限于篇幅表二示出的仅仅是第一区的参数.

表 2 72 元(6×12) 缝隙阵列的缝隙偏置和缝隙长度 (Dx 、 L 单位均为毫米)

Dx_{11}	Dx_{12}	Dx_{13}	Dx_{14}	Dx_{15}	Dx_{16}	Dx_{21}	Dx_{22}	Dx_{23}
1.423	-0.939	0.927	-0.744	0.717	-0.688	0.954	-1.473	1.091
Dx_{24}	Dx_{25}	Dx_{26}	Dx_{31}	Dx_{32}	Dx_{33}	Dx_{34}	Dx_{35}	Dx_{36}
-0.778	0.606	-0.265	1.313	-1.692	1.063	-0.817	0.342	0.344
L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	L_{16}	L_{21}	L_{22}	L_{23}
4.121	4.121	4.128	4.138	4.136	4.118	4.119	4.134	4.114
L_{24}	L_{25}	L_{26}	L_{31}	L_{32}	L_{33}	L_{34}	L_{35}	L_{36}
4.139	4.128	4.122	4.122	4.138	4.122	4.139	4.145	4.147

为了比较优化前后的电压变化,用所得天线参数对各个裂缝单元电压进行反演,未经二次优化的各个缝隙电压在考虑互耦时并非原来的取值,无论是幅度还是相位均产生较大变化。作者计算出考虑互耦前后相位最大相差 19 度,因此造成方向图误差也是必然的,而经 GA 二次优化考虑互耦时相位最大相差 2 度,由此产生的误差完全会被加工误差所替代。

4 结论

本文首次在波导裂缝天线设计中引入遗传算法,将遗传算法运用到缝隙阵元激励幅度的初步设计,对于常见的不足曾和郑^[6]的结构采用简单的可分离 Chebyshev 分布设计,运用遗传算法对方向图进行优化,大大简化了设计过程,同时考虑到波导阵列结构限制将相邻阵元激励比值作为优化因子,完成阵列的初次优化;在处理各个阵元结构参数偏置量和缝长时首次将 Elliott 设计思想转化为适应度函数的构造,将难以求解的多阶方程组转化为适应度的约束条件,此外动态地将阵元间的互耦结合到设计过程,更精确地反映出耦合对于阵列设计的影响,同时采用微型遗传算法完成了中、小型阵列的设计,设计结果显示了遗传算法在波导裂缝天线设计中的有效性和准确性,该方法还可用于大型阵列的设计。

参考文献:

- [1] D E Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning [M]. Addison Wesley, Reading, Mass., 1989.
- [2] J M Johnson, Y Rahmat samii. Genetic algorithms and method of moment (GA/ MoM): A novel integration for antenna design [J]. IEEE AP S digest, 1997: 1664- 1667.
- [3] R L Haupt. Thinned arrays using genetic algorithms [J]. IEEE Trans. Antenna Propagation, July 1994, AP- 42: 993- 999.

- [4] A Boag, E Michielessen, R Mittra. Design of electrically loaded wire antennas using genetic algorithms [J]. IEEE Trans Antenna Propagation, May 1996 AP 44, 5, : 687- 695.
- [5] Eric A Jones, William T Jones. Design of yagru da antennas using genetic algorithms [J]. IEEE Trans Antenna Propagation, Sep. 1997, Apr 45, 9: 1386- 1392.
- [6] R S 埃利奥特编著,汪茂光,陈顺生,谷深远,译.天线理论与设计[M].国防工业出版社,1992:240,273,467.
- [7] K Krishnakumar. Micro genetic algorithm for stationary and non stationary function optimization [J]. SPIE 1196, 1989.
- [8] R S Elliott. An improved design procedure for small arrays of slant slots [J]. IEEE Trans. Antenna Propagation, 1983, AP- 31: 45- 53.
- [9] 陈国良.遗传算法及其应用[M].人民邮电出版社,1996
- [10] R S Elliott, William R O' Loughlin. The design of slot arrays including internal mutual coupling [J]. IEEE Trans. Antenna Propagation, 1986 AP 34: 1149- 1154.

作者简介:



王宏建 男, 1969 年 3 月生于河南省孟津县。1993 年毕业于武汉大学空间物理系, 获理学硕士学位。现为北京理工大学电子工程系博士生, 主要研究方向为天线分析与设计, 电磁场数值计算。

高本庆 男, 1936 年 12 月生于安徽省舒城县。1959 年毕业于北京工业学院电子工程系, 现为北京理工大学教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员。近期科研工作涉及毫米波技术、计算电磁学、电磁兼容与生物电磁学等。