

文章编号 1005-0388(2008)02-0352-04

超宽带 TEM 喇叭天线阵列的 微遗传算法优化*

覃延明[☆] 廖成卫 汪涛 刘昆

(西南交通大学电磁所, 四川 成都 610031)

摘要 采用阵列天线是提高超宽带天线增益和方向性, 降低副瓣电平的有效途径。应用时域有限差分法对超宽带 TEM 喇叭天线进行了时域模拟和分析, 利用叠加原理, 得到了九元 TEM 喇叭线阵的时域辐射场信息; 结合微遗传算法, 对线阵天线的能量方向图进行了优化, 获得了较窄的天线波束宽度, 同时限制了天线阵列的最大旁瓣电平。与传统遗传算法相比, 微遗传算法能更快获得收敛。

关键词 微遗传算法; 时域有限差分法; 超宽带天线; TEM 喇叭天线; 天线阵列

中图分类号 TN822.8 **文献标志码** A

Optimization of ultra-wide band TEM horn antenna array based on micro-genetic algorithm

QIN Yan-ming LIAO Cheng WEI Tao LIU Kun

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University,
Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract The application of antenna array is an effective way to improve the gain and directivity and reduce the side lobe for the ultra-wide band (UWB) antenna. It is different from the traditional narrowband antenna analyzed in frequency domain, the finite-difference time-domain method (FDTD) was used to simulate the UWB transverse electromagnetic (TEM) horn antenna in time domain. According to principle of superposition, the time-domain radiated field of a 9-element linear TEM horn array was then obtained. Combined with micro-genetic algorithm (MGA), the energy pattern of linear array is optimized and a narrow beam-width is available, while the maximal side-lobe level of the array is limited. Compared with conventional genetic algorithm (GA), MGA converges more rapidly.

Key words. MGA; FDTD; UWB antenna; TEM horn antenna; antenna array

1 引言

基于时域概念的瞬态场天线—超宽带短脉冲天线在雷达系统、通信领域、高功率电磁脉冲的辐射等许多领域具有广阔的应用前景, 受到了越来越多的关注。

TEM(transverse electromagnetic)喇叭天线及其变形结构是被广泛应用的高功率超宽带天线, 其设计简单, 体积相对较小, 易于工程实现。但作为单独应用的天线, 其方向图太宽, 增益不高, 采用阵列天线的技术可以大大提高天线增益和方向性。

对于超宽带天线及其阵列, 由于其超宽带特

* 收稿日期: 2007-02-12.

基金项目: 国家自然基金资助项目(60771020)

☆E-mail: superfoxqym@163.com

352

性,不适合使用频域的方法分析。而基于时域的解析方法目前还不成熟,通常用数值方法研究超宽带天线设计问题。时域有限差分法(finite-difference time-domain method, FDTD)具有在时域直接描述辐射场的优势,适合于超宽带天线及其阵列的仿真研究^[1,2]。

近年来,遗传算法(conventional genetic algorithm, GA)在天线设计和天线阵列方向图综合中取得了越来越多的应用,如 Altshuler^[3]使用二进制遗传算法优化带折合段的加载单极天线,使其在整个半球空间具有均匀的功率方向图分布;任盛海和马云辉等人^[4,5]将遗传算法应用于阵列天线方向图综合等。微遗传算法(micro-genetic algorithm, MGA)与普通遗传算法相比具有群体规模小、收敛到近优区域快等特点^[6,7],已被应用于微波结构设计^[8]、微带可重构天线优化设计^[9]等方面,但在时域超宽带天线阵列上的应用还未见相关报导。

作者应用 FDTD 方法分析了单元 TEM 喇叭天线,获得其时域信息,根据叠加原理,得到了阵列天线能量方向图;结合改进的遗传算法—微遗传算法,对阵列的方向图进行优化,在获得较窄波束宽度的同时,限制了最大副瓣电平。图 1 为基本 TEM 喇叭天线结构。

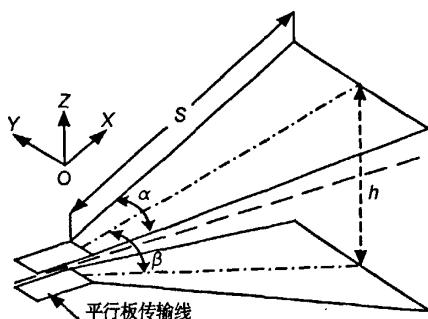


图 1 TEM 喇叭天线的几何结构

2 微遗传算法

遗传算法是求解最优化问题的高效并行全局优化方法。对于多维搜索空间,传统的遗传算法,需要很大的初始群体(通常 100-10000)和多代进化才能达到或者接近最优解,这需要耗费大量的计算资源和计算时间。如果设定群体规模小,搜索有可能停止在未成熟阶段。克服这一困难,就需要有小群体的串行遗传算法(并行会产生大量的通信开销),且要求其收敛效率高,能够克服早熟现象。

MGA(初始种群通常为 5-50 个)可以满足这些要求。它的繁殖过程与传统的遗传算法相类似,但是在实现随机搜索方面却存在着巨大的差异。简单地说,MGA 就是从随机的非常小的初始群体出发,进行正常的遗传操作,很快即收敛;此时,在保留已经产生的最优个体的基础上加入随机产生的新的个体重新开始遗传操作,如此重复开始、重新开始的过程。它通过使用群体重设策略避免得到局部极值并且运用精英操作以确保将最好的个体一代一代传送下去,由于其初始群体很小,一般不进行变异操作。

在时域超宽带天线及其阵列优化设计中,通常需要对多个变量、多个目标进行优化,例如天线结构的物理量,阵列单元间距,激励信号的幅度和时延,天线(阵)增益副瓣电平等。这是一个多维和多目标优化问题,常规方法往往无能为力,宜于采用 MGA 进行优化设计。

3 超宽带天线阵方向图

由于超宽带天线辐射的是脉冲信号,不同辐射方向的辐射波形不同,所以常从时域和能量的角度来描述天线的性能^[10]。天线归一化能量方向图定义为

$$F_n(\theta, \varphi) = \frac{\int_0^t E^2(\theta, \varphi; t - \frac{r}{c}) dt}{\left(\int_0^t E^2(\theta, \varphi; t - \frac{r}{c}) dt \right)_{\max}} \quad (1)$$

假设有 N 个等幅同相相似阵元,沿 Z 轴排成叠状线阵,第 n 个单元和中心元间距为 d_n ,如图 2 所示。在观察点 $P(\theta, \varphi, r)$ 处产生的电场为 $E_n(\theta, \varphi; t - \frac{r}{c})$,根据叠加原理,线阵在观察点产生的场等于各阵元在观察点产生场的矢量和

$$E(t) = \sum_{n=0}^{N-1} E_n\left(\theta, \varphi; t - \frac{r}{c} + \frac{d_n \cos \theta}{c}\right) \quad (2)$$

线阵的归一化方向图同样可由式(1)求出。

对于上述沿 Z 轴放置的叠状线阵,增大单元个数和单元间距,其 E 面(图 1 中 XOZ 面)方向图主瓣宽度会变窄,而与 H 面(XOY 面)方向图无关,这点与辐射单频信号的窄带天线阵列的性质是类似的;所不同的是超宽带天线阵列的单元间距是没有限制的^[11],而且由于是短脉冲的叠加,所以不会出现频域天线阵列存在的栅瓣现象,但是会出现“旁瓣”,“旁瓣”是由阵列中每个天线的接收波形在偏离主轴方向时延相同叠加所致。

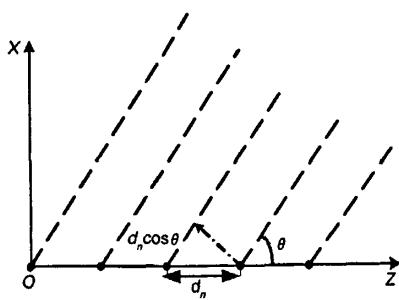


图2 N元线性天线阵示意图

4 仿真和分析

应用FDTD方法研究了单个TEM喇叭阵元天线的脉冲辐射问题。同轴线通过平行板传输线给天线馈电,其特性阻抗为 50Ω 。利用一维传输线模型模拟了同轴线馈电^[12],以二阶Mur吸收边界条件截断外边界,为了获取远区辐射场值,由惠更斯原理进行近远场转换。

设置单元TEM喇叭天线极板长 $s=15\text{ cm}$,喇叭顶角 $\alpha=30.9^\circ$,极板间夹角 $\beta=74.5^\circ$,喇叭口径高度 $h=18.5\text{ cm}$,激励源为微分高斯脉冲形式。图3是经FDTD仿真得到的单元天线和沿Z轴等间距放置的九元线阵(激励相同,相邻单元极板间距 $x=2\text{ cm}$)的E面能量方向图。图4是相邻单元极板间距 x 分别固定为20 cm和40 cm时得到的均匀排列九元线阵E面能量方向图(激励相同)。

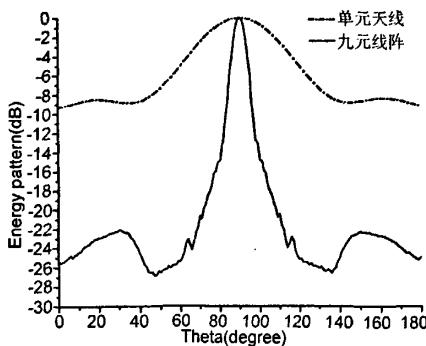


图3 单元天线和九元线阵E面的能量方向图

由图3中可以看出,采用天线阵列可以提高超宽带天线的方向性,减小天线主瓣波束宽度,降低副瓣电平。由图4可以得到,均匀线阵的波束宽度随着阵元间距的增加而变窄,因为随着阵元间距的增加,阵元间的波程差增大,主轴上远场的辐射脉冲的有效叠加面积减少了,其副瓣电平也随之增大了,副

瓣是由阵列中每个阵元的辐射波形在偏离主轴方向时延相同叠加所致,我们可以看到, $x=60\text{ cm}$ 时,在主波束旁边有两个明显的突起,其最大副瓣电平仅为-9.98dB。

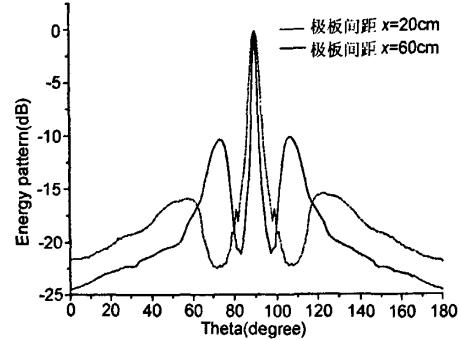


图4 不同极板间距的均匀线阵E面能量方向图

因此,我们将对激励相同的线阵天线的单元间距进行优化,稀疏布阵,在减小波束宽度的同时,抑制其最大副瓣电平。

5 阵列优化

针对上述单元喇叭天线,我们设定所要优化的目标为:对于E面能量方向图,天线的波束宽度(主波束宽度)为 10° ,其最大副瓣电平 $SLL_{max} \leq -14\text{ dB}$ 。根据需要优化的天线性能参数,我们设计了相应的目标函数:

$$f = w_1 \times (SLL_{max} - SLL_{design}) + w_2 \times (BW - BW_{design}) \quad (3)$$

式(3)中, SLL_{max} 和 SLL_{design} 分别是计算最高副瓣电平和目标副瓣电平, BW 和 BW_{design} 分别代表计算波束宽度和目标波束宽度, w_1 和 w_2 为各自的权重系数,取值大小由具体的副瓣电平和波束宽度来定,以均衡各优化指标的寻优速度从而获得全局最优解。

对九元非均匀TEM喇叭线阵进行优化,将相邻阵元极板间的间距作为优化参量,则有八个待优化变量,其优化范围为 $0\sim60\text{ cm}$,变化步长为 1 mm ,权重系数 $w_1=2$, $w_2=1$ 。微遗传算法的初始群体数设为20,迭代次数最大设为100,交叉概率设为0.6,变异概率一般设为0。

经过33代遗传迭代后,得到满足设计要求的解,程序终止。将MGA与GA分别优化获得的结果进行了对比,如表1所示。通过计算,我们可以得到非均匀线阵经MGA和GA优化后得到的远区E

面能量方向图,如图 5 所示。

由表 1 可以看到,经过 MGA 和 GA 优化后得到的 E 面能量方向图都满足了设计要求。与 GA 优化结果相比,MGA 优化得到的主波束宽度稍大,但最大副瓣电平更小,其运算量仅为 GA 运算量的 14.7% (运算量=运算代数×人口数目×单个人口运算量),能更快获得收敛。

在上述优化过程中,我们仅对超宽带线阵进行了仿真分析,实际应用中可以采取多种布阵方式,并针对不同的待优化变量和优化目标进行优化。

表 1 GA 和 MGA 优化结果对比

	主波束宽度 (°)	最大副瓣电平 (dB)	运算代数	人口数目
GA	8	-14.03	45	100
MGA	10	-14.88	33	20

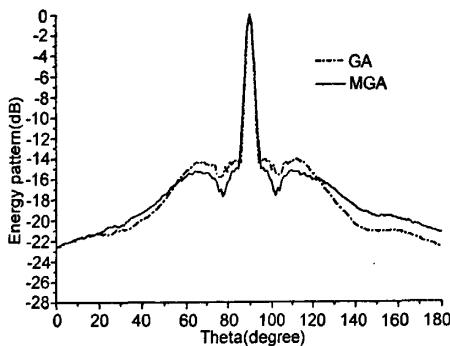


图 5 九元 TEM 喇叭线阵经 MGA 和 GA 优化后的 E 面能量方向图

6 结论

为研究时域超宽带天线阵列的方向图优化问题,应用 FDTD 方法分析了单个超宽带 TEM 喇叭天线,通过叠加原理,分析了超宽带天线阵列的一般特性,并结合微遗传算法进行优化。最后的结果表明,时域有限差分法结合微遗传算法,可以有效应用于超宽带天线阵方向图的优化问题。

参考文献

- [1] K L Shlager, G S Smith, J G Maloney. Accurate analysis of TEM horn antennas for pulse radiation [J]. IEEE Trans. on EMC, 1996, 38(3):414-423.
- [2] 吴峰涛,张光甫,张伟军等. FDTD 分析时域平面 TEM 喇叭天线阵 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28 (4):54-58.
- [3] E E Altshuler. Design of a loaded monopole having

hemispherical coverage using a genetic algorithm [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1997, 45 (1):1-4.

- [4] 任盛海,吴志忠. 遗传算法在阵列方向图综合设计中的应用 [J]. 电波科学学报, 1996, 11(4):62-67.
- [5] Ren S H, Wu Z Z. Application of genetic algorithms in the synthetic design for the radiation pattern of an array antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996, 11(4):62-67.
- [6] 马云辉. 阵列天线的遗传算法综合 [J]. 电波科学学报, 2001, 16(2):172-176.
- [7] Ma Y H. Synthesis of the array antennas using genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(2):172-176.
- [8] S A Kazarlis, S E Papadakis, J B Theocaris. Microgenetic algorithm as generalized hill-climbing operators for GA optimization [J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2001, 5(3):204-217.
- [9] 覃延明,廖成,卫涛. 基于微遗传算法的超宽带天线优化 [J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(1):40-43.
- [10] S Chakravarty, R Mittra, N R Williams. Application of a microgenetic algorithm to the design of broad-band microwave absorbers using multiple frequency selective surface screens buried in dielectrics [J]. IEEE Trans. Antenna and Propagation, 2002, 50(3):284-296.
- [11] 肖绍球,王秉中. 基于微遗传算法的微带可重构天线设计 [J]. 电子科技大学学报, 2004, 32(2):137-141.
- [12] E A Oliver, A H David. Time-domain antenna characterizations [J]. IEEE Trans. on EMC, 1993, 35(3):339-346.
- [13] 杨周炳. 超宽带天线阵列特性研究 [A]. 第一届高能电子学学术交流会会议文集 [C], 1999, 166-168.
- [14] J G Maloney, K L Shlager, G S Smith. A simple FDTD model for transient excitation of antennas by transmission lines [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1994, 42(2):289-292.



覃延明 (1980—), 男, 广西人, 西南交通大学电磁所博士生。主要研究方向为计算电磁学、天线理论与技术。

廖成 (1964—), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师。先后在国内外发表学术论文 80 余篇, 主持和主研多项国家自然科学基金项目, 主要研究方向为计算电磁学、天线理论与技术、电磁散射与逆散射。

卫涛 (1975—), 男, 山西人, 西南交通大学电磁所博士生。主要研究方向为电磁散射和逆散射。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>