

唯相位方法实现方向图可重构阵列天线*

刘燕¹, 郭陈江², 丁君², 许家栋²

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077; 2. 西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

【摘要】 使用唯相位方法设计方向图可重构天线, 对阵列的激励电流幅度和相位同时进行优化, 得到一组电流幅度值, 使它适用于多种形状的方向图, 同时得到与每种方向图对应的相位值。优化算法选用实数编码的遗传算法。为了把设计结果应用于实践, 文中还对电流幅度的分布进行了一定的限制, 设计出了具有2种工作状态的方向图可重构天线, 最后给出了仿真结果, 结果表明, 文中讨论的方法在设计方向图可重构天线方面是有效的。

【关键词】 方向图可重构天线; 唯相位; 实数编码; 遗传算法

中图分类号: TN82 文献标识码: A

Pattern Reconfigurable Array Antenna with Phase-only Method

LIU Yan¹ GUO Chen-jiang², DING Jun², XU Jia-dong²

(1. Telecommunication Engineering Institute, AFEU, Xi'an 710077, China)

(2. College of Electrics and Information, NWPU, Xi'an 710072, China)

【Abstract】 Phase-only method used to design pattern reconfigurable array antenna is presented, and the element's current amplitude and phase of linear array antenna are optimized simultaneously by a real-code genetic algorithm. The amplitudes of the element currents are achieved common to all beams, and the phases are obtained corresponding to each beam. In order to use the results to practice, some restrictions are placed on current amplitudes. Simulation results for a pattern reconfigurable array antenna which has two switchable states are provided to indicate that the method discussed in this paper is efficient for designing pattern reconfigurable antenna.

【Key words】 pattern reconfigurable antenna; phase-only; real-code; genetic algorithm (GA)

0 引言

现代无线电系统通常要求同一部天线能够完成多种功能, 以降低系统的整体成本、减小电磁干扰、减轻重量等, 这种具有多种功能的天线被称为“可重构天线”。根据功能, 可重构天线一般分为3类, 第1类是方向图不变而频率可以改变的天线, 能宽频带或多频带工作; 第2类是频率不变, 方向图的形状可以改变的天线, 用于需改变方向图的场合, 如对地面移动目标搜索; 第3类是频率和方向图同时改变的天线, 用于电视接收、机载雷达等需要的宽频带, 并且需要改变方向图的场合^[1-4]。

所谓唯相位就是仅通过改变阵列馈电的相位, 而不改变馈电的幅度实现阵列方向图的控制, 这种方法免去了阵列馈电系统中的功率控制部件, 简化了馈电系统, 减小了馈电系统的损耗及成本。本文主要研究一种使同一天线阵列在共同的馈电幅度下, 仅通过改

变相位实现阵列方向图重构的问题。

1 可重构天线的基本原理及变量的设置^[5]

以一个 N 元等间距线阵为例, 如果需要该相同馈电幅度下, 仅通过改变馈电相位使该阵列能够产生 M 种方向图, 则优化变量 x 为一个 $MN + N$ 个元素的向量。其中, $x_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 为第 n 个天线单元馈电电流的幅度 I_n , $x_{mN+n} (m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N)$ 为第 m 种方向图时第 n 个单元馈电电流的相位 φ_{mn} , 这样, 第 n 个单元在第 m 种方向图时的馈电电流为

$$i_{mn} = I_n e^{j\varphi_{mn}} = x_n e^{jx_{mN+n}}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

由式(1)可以看出, 在优化的过程中, 这 M 种方向图始终使用同一组电流幅度, 只有电流的相位不同。

综合得到天线阵的第 m 种方向图为

$$F_m = \sum_{n=1}^N i_{mn} \cdot e^{jnk d \cos \theta}, \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

* 收稿日期: 2008-04-12 修订日期: 2008-06-15

式中: d 为阵元间的间距; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; λ 为自由空间波长; θ 为射线方向与阵列轴线之间的夹角。

2 适应度函数的选择^[6-7]

在遗传算法的计算过程中, 适应度函数的选择非常重要, 适应度函数选择的合适与否直接影响到算法的计算效率。本问题的适应度函数包括 3 部分的内容: 首先是方向图的主瓣区, 在主瓣区综合出的波束形状应尽量接近期望方向图, 使两者的均方误差尽可能小; 其次是旁瓣区, 旁瓣电平应低于一定值; 最后, 考虑到实际馈电实现的可能性, 电流分布的动态范围也不能太大。

下面讨论第 m 种方向图的适应度函数设计。

2.1 主瓣区目标函数设计

设期望的方向图为 E_m , 假设 $R_m(\theta)$ 表示允许的方向图起伏, $U_m(\theta)$ 和 $L_m(\theta)$ 分别表示赋形区 θ 点处方向图的上限值和下限值, 即综合得到的方向图必须落在 $U_m(\theta)$ 和 $L_m(\theta)$ 之间。

$$\begin{cases} U_m(\theta) = E_m(\theta) + R_m(\theta) \\ L_m(\theta) = E_m(\theta) - R_m(\theta) \end{cases} \quad (3)$$

因此赋形区的极小化目标函数为

$$e_{1m}(\theta) = \begin{cases} F_m(\theta) - U_m(\theta) & \text{if } F_m(\theta) > U_m(\theta) \\ 0 & \text{if } L_m(\theta) \leq F_m(\theta) \leq U_m(\theta) \\ F_m(\theta) - L_m(\theta) & \text{if } F_m(\theta) < L_m(\theta) \end{cases} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

在 Q 个采样点的均方根差为

$$J_{1m} = \left[\frac{1}{Q} \sum_{\theta=1}^Q |e_{1m}(\theta)|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

2.2 旁瓣区目标函数设计

最大旁瓣电平用 P_m 表示, 则旁瓣区的误差函数为

$$e_{2m} = \begin{cases} F_m(\theta) - P_m(\theta) & \text{if } F_m(\theta) \geq P_m(\theta) \\ 0 & \text{if } F_m(\theta) < P_m(\theta) \end{cases} \quad (6)$$

在 Q 个采样点误差函数的均方根差为

$$J_{2m} = \left[\frac{1}{Q} \sum_{\theta=1}^Q |e_{2m}(\theta)|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中 Q 也为采样点数。

则第 m 种方向图总的目标函数为

$$J_m = J_{1m} + J_{2m} \quad (8)$$

2.3 适应度函数的设计

目标函数的优化方向应该对应于适应度函数增大的方向, 因此适应度函数为

$$V_m = 1/(1 + J_m) \quad (9)$$

则对 M 种方向图同时优化时总的适应度函数为

$$V = \sum_{m=1}^M w_m V_m \quad (10)$$

其中 v_m 为权系数。显然, 该优化问题是一个最大化问题, 染色体越优, 则其适应度越高, 各个方向图的适应度函数值越接近于 1。即总的适应度函数越接近于 $\sum w_m$, 当与所要求的 M 个方向图完全吻合, 且 w_m 取为 1 时, 则总的适应度函数值为 M 。

3 电流分布的动态范围的限制

为了便于把仿真结果用于实际中, 相邻电流间的动态范围不能太大, 对电流幅度做如下的变量代换^[8]

$$\begin{aligned} I_1 &= 1.0 \\ I_2 &= I_1 [a + (b - a) \sin^2(P_1)] \\ I_3 &= I_2 [a + (b - a) \sin^2(P_2)] = \\ &\quad \prod_{i=1}^2 I_1 [a + (b - a) \sin^2(P_i)] \\ &\quad \vdots \\ I_N &= \prod_{i=1}^{N-1} I_1 [a + (b - a) \sin^2(P_i)] \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $0 \leq b < 1, 1 < a$ 。电流幅度 I_n 被限制在一定的范围内

$$bI_{n-1} < I_n \leq aI_{n-1} \quad (12)$$

而 P_1, P_2, \dots, P_{N-1} 是不受限制的, 由此优化的变量转化为

$$(P_1, P_2, \dots, P_{N-1}; \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N) \quad (13)$$

经过上面的变量代换, 有约束的优化问题变成了无约束问题, 大大简化了问题的复杂度。

4 仿真结果及分析

作为实例, 我们设计了一个具有 2 种方向图的 16 元可重构线阵: (1) 余割平方波束, (2) 平顶波束。其中要求赋形区允许的方向图起伏为 1 dB。图 1 和图 2 分别是采用 16 元阵优化出的余割平方波束和平顶波束的方向图。图 3 为优化得到的归一化电流幅度。图 4 为 2 种方向图馈电电流的相位分布, 实线为余割平方波束的激励电流的相位分布, 虚线为平顶波束的激励电流的相位分布。

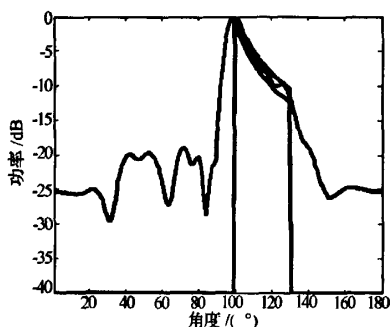


图1 余割平方波束

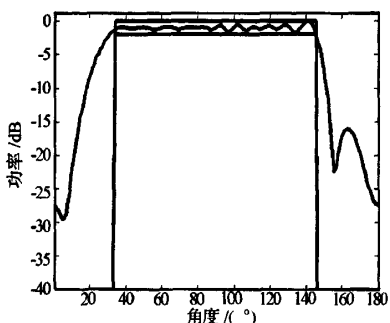


图2 平顶波束

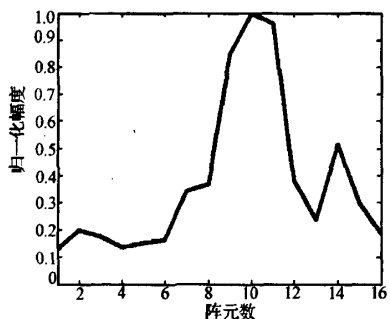


图3 归一化电流幅度分布

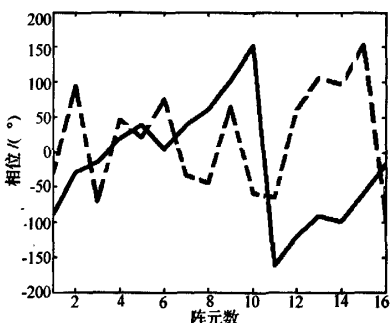


图4 各阵元的相位分布

由仿真结果可以看出,在相同的馈电幅度(如图3所示)下,仅仅通过改变馈电的相位(如图4所示)使同一阵列实现了图1和图2所示的2种不同形状的波

束。由图3可以看出,归一化阵列的最大相邻电流幅度比为2.51,最大电流幅度与最小电流幅度值比为7.68。

5 结束语

本文研究了一种设计方向图可重构天线的方案,在相同馈电幅度的情况下,仅通过阵列馈电相位的变化来实现具有不同形状的方向图。这种唯相位的波束赋形方法在降低系统成本,减轻重量等方面具有很多优势。文中使用实数编码的遗传算法进行优化,这种方法避免了编码解码的复杂过程,对处理大型问题非常有效。本文还对电流的幅度进行了有效的限制,使综合结果更有利于工程实现。

参考文献

- [1] 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,2004,33(2):137-141.
- [2] Aberle J T, Oh Sung-Hoon, Auckland D T, et al. Reconfigurable antennas for wireless devices [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(6):148-154.
- [3] Fathy A E, Rosen A, Owen H S, et al. Silicon based reconfigurable antennas-concepts, analysis, implementation, and feasibility [J]. IEEE Trans on MTT, 2003, 51(6):1650-1661.
- [4] 杨雪松,王秉中. 可重构天线的研究进展[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 417-421.
- [5] Michael J. Buckley. Synthesis of shaped beam antenna patterns using implicitly constrained current elements [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1996, 44(2):192-197.
- [6] 韩瑞峰,张永奎. 一种改进的实数编码遗传算法[J]. 计算机工程与应用,2002,13:78-80.
- [7] Haupt R L. An introduction to genetic algorithm for electromagnetics [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(2):7-15.
- [8] 汪茂光,吕善伟,刘瑞祥. 阵列天线分析与综合[M]. 成都:电子科技大学出版社,1989.

刘燕女,1982年生,硕士,助教。研究方向为电磁场与微波技术、天线等。

郭陈江男,1963年生,教授,博士。研究方向为电磁场与微波技术、天线、电磁特性等。

丁君女,1964年生,副教授,博士。研究方向为电磁场与微波技术、智能天线、电磁兼容等。

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,一直致力和专注于微波、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>