

文章编号: 2095-4980(2019)04-0671-05

一种基于遗传算法的不等间距二维非周期阵面

谢少毅, 李佳伟, 郭乐田, 邓广健, 巴 涛, 姜 悦, 邵 浩

(西北核技术研究院 强电磁物理研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 目前大规模地基固态相控阵由于成本原因, 普遍采用大单元间距以减少通道数。在这种间距下, 可视空间会出现栅瓣效应, 天线性能恶化, 雷达扫描范围受限。对阵面设计方法进行研究, 提出一种不等间距阵面优化方法。仿真结果表明, 在 $\lambda \times \lambda$ 单元口径下, 实现 $\pm 20^\circ$ 的扫描角度内栅瓣低于 -20 dB; 由于阵面口径增大, 阵面方向性增强, 单元数减少 18%。

关键词: 阵列天线; 不等间距; 二维非周期阵; 遗传算法

中图分类号: TN822.8

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0671

A genetic algorithm based unequal spacing 2D aperiodic array design

XIE Shaoyi, LI Jiawei, GUO Letian, DENG Guangjian, BA Tao, JIANG Yue, SHAO Hao

(Institute of Strong Electromagnetic Physics, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: Large spacing is widely used in building large scale ground based solid state phased array due to the cost. Grating lobe will appear under this large spacing, which leads to performance deterioration. The sweep angle can be broadened by using the thinning method. In this paper, the array design methods are studied, and an unequal spacing optimization method is presented. An array with grating lobe lower than -20 dB is implemented in $\pm 20^\circ$ sweep angle by using $\lambda \times \lambda$ element. The number of units is reduced by 18% due to the enlarged aperture.

Keywords: array antenna; unequal spacing; 2D aperiodic array; genetic algorithm

根据相控阵理论^[1], 在一个波长以上间距的阵面系统中, 可视空间会出现栅瓣。栅瓣不仅会降低主瓣能量, 还会增加系统被干扰的机率。一个波长的阵面系统, 在紧凑排列下, 阵面扫描角度不足 $\pm 10^\circ$, 实用性不强。为抑制栅瓣影响, 需要对阵面进行优化。目前对阵面优化的研究主要集中在三方面: 对单元激励幅度的优化, 对激励相位的优化以及对单元位置的优化。由于系统对发射功率的要求, 无法对激励幅度及相位进行优化, 只能对单元位置进行优化。国外早在 20 世纪 60 年代就有了对不等间距阵面优化的研究^[2-5], 国内起步较晚, 但是发展比较快^[6-7]。本文对单元级非周期阵位置优化方法进行研究, 并基于遗传算法进行优化设计, 仿真结果表明在 $\lambda \times \lambda$ 单元口径下可以实现 $\pm 20^\circ$ 扫描。

1 阵因子计算

研究阵面性能, 阵因子计算是第一步。本文中阵列涉及二维非周期阵, 因此需采用以下公式, 以便可以得到非均匀分布的阵因子^[1]。

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^N \left(\frac{I_n}{I_0} \right) \exp \left[jk \sin \theta (P_{xn} \cos \varphi + P_{yn} \sin \varphi) \right] \quad (1)$$

式中: P_{xn}, P_{yn} 为单元 n 的位置坐标; N 为单元个数; θ, φ 为阵面扫描角; I_n 为单元 n 的信号强度; I_0 为单元放置在零点的信号强度。当进行波束扫描时, 该式改写成:

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^N \left(\frac{I_n}{I_0} \right) \exp \left[jk \sin \theta \sin \theta_r (P_{xn} \cos \varphi \cos \varphi_r + P_{yn} \sin \varphi \sin \varphi_r) \right] \quad (2)$$

式中 θ_r, φ_r 为阵列扫描角。基于以上 2 个公式, 利用 Matlab 可以对任意阵列的阵因子进行分析^[8]。

收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2018-01-14

2 阵面分析

规则排布下, 当单元间距 d 满足以下条件时, 可视空间不会出现栅瓣。

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\max}} \quad (3)$$

式中 $\theta_{\max}$ 为最大扫描俯仰角。当 d 不满足式(3)时, 空间将会出现栅瓣。通过式(3)可以知道, $\lambda \times \lambda$ 单元口径紧凑排列下会出现栅瓣, 但由于单元天线的增益将栅瓣抑制, 因此栅瓣对探测的影响可忽略。当扫描角度增大时, 栅瓣由于逐渐靠近单元天线主瓣方向, 能量开始增强, 限制了阵面的扫描范围。对阵元位置进行不规则处理可以降低栅瓣的影响。对阵元位置的优化可以看作是一个非线性多元组合优化问题, 遗传算法比较适合解决此类问题^[9-13]。等效辐射功率(Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP)与输入功率 P 有关, 也与天线增益 G 有关($P_{\text{EIR}} = P \times G$)。对阵元位置进行优化后, 口面会增大, 天线方向性会增强, G 增大, EIRP 不变的情况下, P 可以适当降低, 通道个数会减少, 在一定程度上不等间距优化后的阵面可以节约成本。

3 算法说明

对于阵列优化, 目前有很多种方法进行优化计算, 本文采用遗传算法进行问题建模及优化。基本的遗传算法主要包括编码、个体评价、选择算子、交叉算子、繁殖算子、变异算子 6 个关键步骤。下面将根据这 6 个方面对本文所采用的遗传算法进行说明, 本文种群中个体数目为 10。

3.1 编码

编码过程, 主要是将阵列位置如何转换成可以进行遗传算法的个体。对于连续变换的优化问题, 可以采用十进制编码来描述个体。一般有以下 3 种方法对阵元位置进行优化。

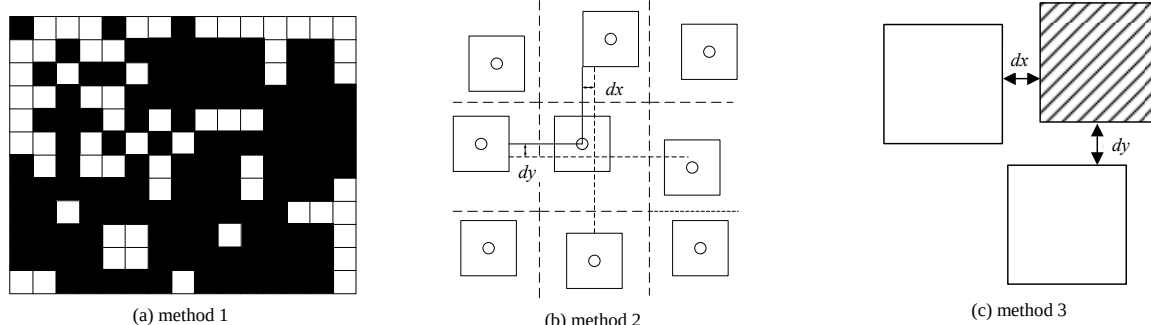


Fig.1 Optimization methods of position encoder

图 1 位置编码优化方法

图 1 所示第一种方法, 编码长度最短, 每个阵元仅用 1 位来表示, 1,0 代表阵元有或没有激励, 但是该方法只能用在副瓣优化中, 对栅瓣抑制不起作用。第二种方法是在均匀阵的基础上, 在比口径更大的一个栅格内放置阵元, 对阵元位置进行微扰^[4]。这种方法可以从一开始就确定阵面大小, 同时不需要检测阵元间是否有重合, 编码长度根据在栅格内所能够移动的最大距离来确定, 但是其从整体上还是呈现出一种规则性, 导致栅瓣抑制能力较弱。方法三是以阵元间距为编码量, 按照从左到右、从下到上的顺序对每个阵元编号。每个编号都有一对 d_x, d_y ($0 \sim 15$ mm 的范围), 分别对应 x 方向相对于上一个单元的位移量及 y 方向上相对于上一个单元的位移量(边上的单元特殊处理)。在初始种群时, 生成一个随机矩阵, 对应每个单元的位移量, 计算阵因子时, 按照设计规则将位移量转换为阵元实际位置, 并判断是否有小于单元口径的相邻点, 剔除重合点。

3.2 个体评价

个体评价主要通过适应度函数来表示, 既对种群中的个体给出性能评价, 也是优胜劣汰的前提。适应度函数的选取影响最终的优化结果。本文选取可视区域中主瓣以外的区域内的最大值, 即最大旁瓣:

$$\text{Fitness} = A \times (20 + \max(SLL_{\text{dB}})) + (1 - A) \times \text{Aperture} \quad (4)$$

式中: A 为优化目标的权值, 取 0.7; SLL_{dB} 为可视空间旁瓣大小; Aperture 为阵面口径面积。方向图函数进行了归一化, $20 + \max(SLL_{\text{dB}})$ 表示用一个足够大的数保证最大旁瓣非负。最大旁瓣越小, 口径越小, 则适应度函数值越小, 个体性能越好。

3.3 选择算子

选择算子用来选择可用于产生下一代的个体，该个体可以直接进入下一代作为种群一员，也可作为父代，与同代染色体进行交叉、变异，产生子代。本文将适应度性能最好的 2 个个体作为父代，并将其他个体平分为 2 组，分别与其进行交换染色体，以降低单一父代容易进入局部最优的影响。同时，这 2 个个体连同其子代形成新一代的基因库。

3.4 交叉算子

挑选的父代与对应的同代个体需要进行部分染色体交换，本文中交换基因片段的位置及长度，随机产生。根据上述参数，将子代所选基因更换成父代对应的基因，完成交叉操作。交叉算子是保证种群性能最好的个体基因能够保证代代保存的关键。

3.5 变异算子

如果只有交叉算子，没有变异算子，在生物界中就会导致后代越来越像，在优化问题中就会陷入局部最优。经过交叉算子后的种群，如果整个种群各个体的适应度标准差与平均值的比值较小时，最大变异染色体的个数确定为总体的 0.8 倍；如果较大时，为 0.4 倍。这种做法是为了增大种群之间差异较小时的变异概率，降低陷入局部最优的概率。变异的染色体个数、片段个数及位置均为随机产生，如果检查到是父代，则会有一定的概率跳过变异，直接遗传，起到保护优秀基因的作用。

3.6 繁殖算子

繁殖算子比较简单，主要是将父代以及经过交叉算子后的子代一同送入变异算子，经过变异后产生最终的子代。通过对繁殖次数及种群性能的检测，控制是否继续繁殖或停止繁殖。

3.7 单元设计

阵面方向图性能、扫描特性等分析都是基于单元设计的存在，并且在阵面分析的过程中需要考虑单元口径的尺寸选择问题，因此单元设计与阵面设计需同时进行。本文 $\lambda \times \lambda$ 单元口径的喇叭天线选为变张角隔板喇叭^[14]，中心频率为 9 GHz，如图 2 所示，并对其进行优化。图 3 为优化的单元方向图，可以看出， $\lambda \times \lambda$ 单元尺寸喇叭天线在 $\theta=20^\circ$ 时增益下降为 2 dB，可以满足一般的扫描要求。

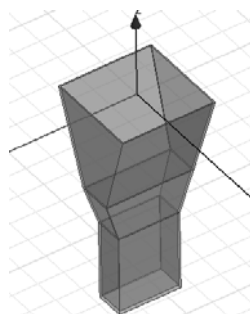


Fig.2 Structure view of element with size of $\lambda \times \lambda$
图 2 $\lambda \times \lambda$ 尺寸单元天线结构图

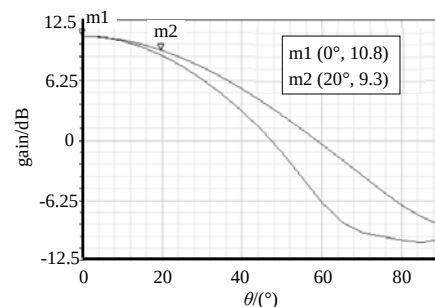


Fig.3 Radiation pattern of element
图 3 单元天线方向图

4 结果分析

利用 Matlab 对阵面建模，并导入在 HFSS 中建模仿真的单元天线方向图，首先计算紧凑排列的阵面性能。假定通道功率为 0 dBW，按照等效辐射功率为 85 dBW 进行设计。

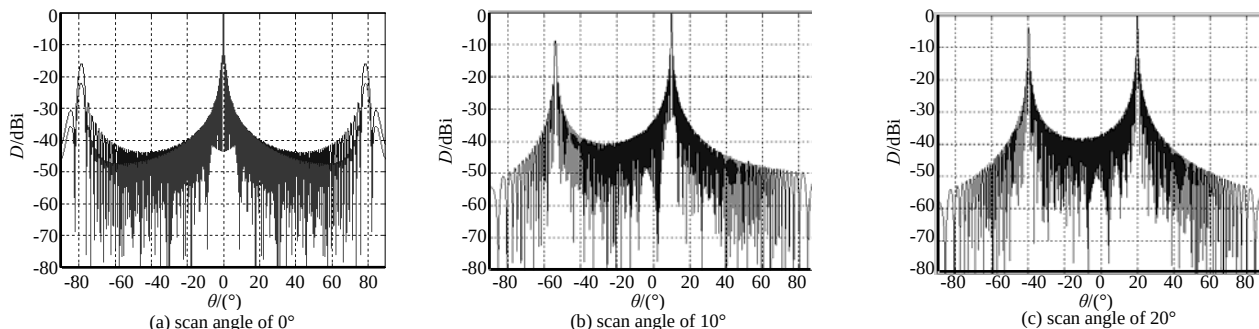


Fig.4 Radiation pattern of compact array
图 4 紧凑排列阵面方向图

通过仿真,设计出 7 921 个单元紧凑排列的阵面,可满足 85 dBW 等效辐射功率的要求。由图 4 可看出,在 $\lambda \times \lambda$ 的单元口径紧凑排列下的阵面方向图 0° 扫描时,栅瓣在后向出现,并由于单元天线方向性的抑制作用,栅瓣被压低; 10° 扫描时,栅瓣在 -10 dB 左右,无法满足探测要求。因此需要进行阵面优化,扩大扫描范围。

按照前文所介绍的遗传算法流程进行优化计算。首先按照紧凑阵的规模进行阵面优化,由于单元间距的拉大,导致所需单元数减少。对输入规模数进行修正,重新优化。通过几次迭代,确定最终单元数。在 $\lambda \times \lambda$ 的单元口径下,优化后,达到 85 dBW 等效辐射功率需要 6 480 个单元。对单元数的 1/4 阵面大小的子阵进行优化,优化结果按照对称排列方式构成最终阵面,如图 5 所示。

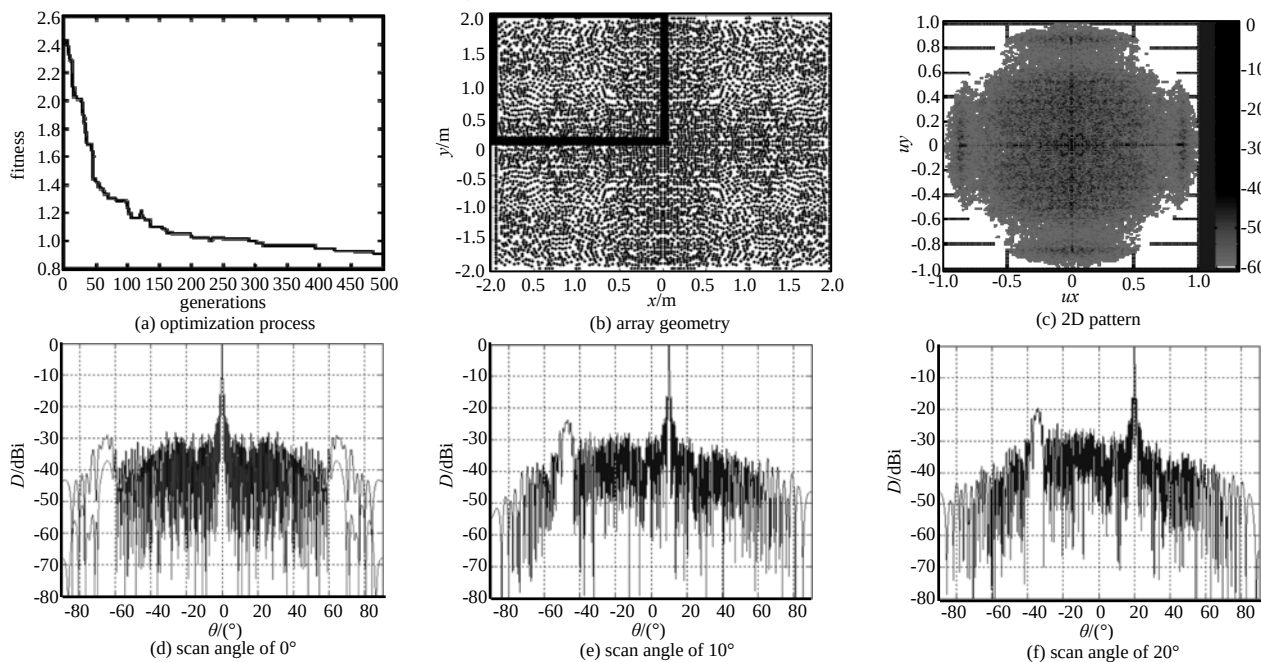


Fig.5 Optimization results of array
图 5 优化后阵面结果

可以看出,经过优化后,扫描角度在 20° 时,栅瓣抑制到 -20 dB 以下;由于阵面口径增大,阵面方向性增强,单元数减少 18%,结果见表 1。

表 1 紧凑排列、非周期优化后对比结果

Table1 Comparisons between compact array and optimized aperiodic array		
type	compact array	optimized aperiodic array
element size	$\lambda \times \lambda$	$\lambda \times \lambda$
element number	7 921	6 480
array aperture/m	3.2×3.2	3.88×3.88
beamwidth/(°)	0.54×0.54	0.46×0.46
EIRP/dBW	88.7	88.7
sidelobe/dB (scan angle of 0°)	-16@(-78.6°, 0°)	-28@(-31°, 0°)
sidelobe/dB (scan angle of 10°)	-9@(-53.9°, 0°)	-23.8@(-46.7°, 0°)
sidelobe/dB (scan angle of 20°)	-4@(-39.5°, 0°)	-19.7@(-34°, 0°)

5 结论

本文通过对阵面分析、遗传算法设计、单元天线设计等方面研究了不等间距非周期阵在大规模阵列天线的应用及优势。结果表明,在通过阵面优化后,可以有效抑制大口径单元尺寸带来的栅瓣影响,并能够减少通道数量。但该方法在工程实现上还有亟需解决的问题,如大批量模块化生产、相控控制命令字的快速产生等。因此,需要进一步研究基于子阵的非周期优化技术,提高工程化水平。

参考文献:

- [1] 汪茂光,李周森,吴黎明. 阵列天线分析与综合[M]. 成都:电子科技大学出版社,1999. (WANG Maoguang, LI Zhoumiao, WU Liming. Array antenna analysis and synthesis[M]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology Press, 1999.)

- [2] ISHIMARU A, CHEN Y-S. Thinning and broadbanding antenna arrays by unequal spacings[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965,13(1):34-42.
- [3] HARRINGTON R F. Sidelobe reduction by nonuniform element spacing[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1961,9(2):187-192.
- [4] KUMAR B P, BRANNER G R. Design of unequally spaced arrays for performance improvement[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999,47(3):511-523.
- [5] TOYAMA N. Aperiodic array consisting of subarrays for use in small mobile earth stations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005,53(6):2004-2010.
- [6] 陈客松, 何子述, 韩春林. 非均匀线天线阵优化布阵研究[J]. 电子学报, 2006,34(12):2263-2269. (CHEN Kesong, HE Zishu, HAN Chunlin. Research on synthesis of the linear sparse arrays[J]. Acta Electronica Sinica, 2006,34(12):2263-2269.)
- [7] 费阿莉, 朱瑞平, 刘明昱. 非周期阵列形式研究[C]// 中国天线年会. 成都: 中国电子学会, 2009:714-717. (FEI Ali, ZHU Ruiping, LIU Minggang. Study of the forms of aperiodic array[C]// National Conference on Antenna. Chengdu, China: China Electronics Society, 2009:714-717.)
- [8] 徐茜, 宫海波. 基于 Matlab 的阵列天线数值分析[J]. 现代电子技术, 2013,36(13):84-89. (XU Qian, GONG Haibo. Matlab-based numerical analysis of array antenna[J]. Modern Electronics Technique, 2013,36(13):84-89.)
- [9] 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. (MA Yunhui. Synthesis of the array antennas using genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001,16(2):172-176.)
- [10] 韩志甲, 邓海峡, 李晓平. 基于遗传算法的排产优化方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(4):595-599. (HAN Zhijia, DENG Haixia, LI Xiaoping. Scheduling optimization based on genetic algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):595-599.)
- [11] 张浩斌, 杜建春, 聂在平. 稀疏阵列天线综合的遗传算法优化[J]. 微波学报, 2006,22(6):48-54. (ZHANG Haobin, DU Jianchun, NIE Zaiping. Thinned array synthesis using genetic algorithm[J]. Journal of Microwaves, 2006,22(6):48-54.)
- [12] 逯志宇, 王大鸣, 王建辉, 等. 基于多种群并行遗传算法的融合定位[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):195-200. (LU Zhiyu, WANG Daming, WANG Jianhui, et al. Fusion location based on parallel genetic algorithm of multi-population[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):195-200.)
- [13] 王玲玲, 方大纲. 运用遗传算法综合稀疏阵列[J]. 电子学报, 2003,31(12):2135-2138. (WANG Lingling, FANG Dagang. Genetic algorithm for the synthesis of thinned array[J]. Acta Electronica Sinica, 2003,31(12):2135-2138.)
- [14] BIRD T S, GRANET C. Optimization of profiles of rectangular horns for high efficiency[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(9):2480-2488.

作者简介:



谢少毅(1987-), 男, 河南省滑县人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为阵列天线优化设计. email: xieshaoyi@nint.ac.cn.

李佳伟(1985-), 男, 辽宁省沈阳市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为高功率微波.

郭乐田(1990-), 男, 济南市人, 博士, 研究实习员, 主要研究方向为高功率微波.

邓广健(1990-), 男, 吉林省德惠市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为高功率微波.

巴 涛(1982-), 男, 山东省德州市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为高功率微波.

姜 悦(1989-), 女, 山东省蓬莱市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高功率微波.

邵 浩(1971-), 男, 河南省平顶山市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波.