

利用 GA 实现非对称稀疏线阵旁瓣电平的优化

陈客松 何子述 韩春林
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 该文讨论运用遗传算法综合非对称的稀疏直线阵列(阵元从规则栅格中稀疏)。阵元在中心两侧非对称分布的布阵方式提供了可利用的优化自由度,将更有利于提高稀疏阵列的性能。构造了阵元关于阵中心非对称时优化旁瓣电平的适应度函数,仿真结果表明,无对称约束的阵元排列,不仅可以进一步抑制稀疏线阵的相对旁瓣电平(RSLL),而且当阵列由有向阵元组成时,有益于改善阵列波束扫描过程中 RSLL 的恶化。

关键词: 稀疏阵列; 遗传算法(GA); 旁瓣电平; 优化布阵

中图分类号: TN 820.1+ 5, TN 820.1+ 3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0987-04

Sidelobe Reduction of Asymmetric Linear Thinned Arrays Using Genetic Algorithm

Chen Ke-song He Zi-shu Han Chun-lin

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: This paper presents how to synthesize asymmetric linear arrays using genetic algorithms. The asymmetric configuration is an available degree of freedom to control the characters of thinned arrays. In this paper, the Genetic Algorithms (GA) determines which elements are turned off in a periodic array to yield the lowest maximum Relative SideLobe Level (RSLL). Fitness function of GA for asymmetric linear arrays synthesis is designed. Simulation results show that the optimized asymmetric linear arrays which lack the design constraint of bilateral symmetry can not only obtain lower sidelobes, but also weaken the deterioration of scanning beam if the thinned arrays are made up of the directional elements.

Key words: Thinned arrays; Genetic Algorithms (GA); Sidelobe level; Optimum arrays

1 引言

阵列天线的最大相对旁瓣电平(maxRSLL)是评价天线性能的重要参数,在一定条件下综合出尽量低的旁瓣电平是阵列天线综合中的一类重要课题。在综合单元从规则栅格中稀疏的稀疏直线阵列时,如果给定了阵元总数和稀疏率,可以不仅优化阵元间距,而且优化馈电流幅值及相位来最大限度地降低旁瓣电平^[1],这样提供了更多的自由度来控制稀疏阵列的性能。然而,以前优化稀疏线阵的研究工作^[1-5]多是针对阵元位置在中心两侧对称分布的情形。文献[6]中, Murino, Trucco和Regazzoni在用模拟退火法综合稀疏阵列时,引入了阵元位置在中心两侧非对称分布的排列方式,得到了旁瓣电平性能更优的稀疏阵列。这表明在综合稀疏阵列时,不限制阵元位置在中心两侧对称分布的布阵方式,相对于对称阵而言,实质上是在可优化阵元间距、馈电流幅度、相位等自由度的基础上进一步增加了可利用的优化自由度,合理有效地利用它将更有利于提高稀疏阵列的性能。

本文为运用GA综合非对称稀疏直线阵列,构造了阵元

位置非对称时优化旁瓣电平的适应度函数,将天线位置作为优化变量降低一个均匀馈电的满足给定稀疏率的稀疏阵的旁瓣电平。为便于与对称布阵比较,计算机仿真了与Haupt^[5]和文献[1,7]中形状、口径、阵元个数和稀疏率相同的非对称稀疏阵列,结果显示无对称约束布阵的稀疏阵列不仅有更低的旁瓣电平,而且它由有向阵元组成时,波束扫描过程中的RSLL恶化程度更小。通过对等幅均匀馈电稀疏直线阵列旁瓣电平的优化,用遗传算法证实了取消关于阵列中心严格对称这一限制的布阵方式有利于进一步提高稀疏阵列多方面的性能。

2 遗传算法用于稀疏阵列天线旁瓣电平优化

2.1 遗传算法(GA)

遗传算法是一种借鉴生物的自然选择和遗传进化机制开发出的全局优化自适应概率搜索算法,其基本思想是模拟生物进化过程。其主要特点是采取群体搜索策略和在群体中个体之间进行信息交换,利用简单的编码技术和繁殖机制来表现复杂的现象,不受搜索空间的限制性假设的约束,不要求诸如连续性、导数存在和单峰等假设。遗传算法目前已经应用于天线系统中大量复杂的最优化问题中。GA 一般是从一个初始群体开始,根据适应度函数评价每个个体的优劣,

历经挑选优势个体的选择、交换优势个体的信息的交叉、和保持群体信息多样性的变异等遗传操作,产生新一代群体,群体一代一代地进化,直到达到预先给定的精度或遗传代数。GA 的设计过程中,包含参数编码方式的选用、初始群体的建立、适应度函数的构造、遗传操作的设计、控制参数的设定。算法的收敛性取决于这 5 个方面的设计以及数值精度和收敛速度的一些折衷。

2.2 GA 优化非对称稀疏阵列的适应度函数构造

在 GA 中,用适应度函数(fitness function)来评价每个个体(染色体)的优劣,通常根据具体问题的优化目标要求来构造。在文献[5]中,Haupt 构造了均匀馈电的关于阵列中心严格对称的稀疏阵列的适应度函数。该文以天线位置为决策变量,以降低非对称稀疏阵列的旁瓣电平为优化目标来构造适应度函数。

根据方向图相乘原理,阵列方向图 S 等于单元方向图 elpat 与阵因子 $\text{AF}(\phi)$ 之积:

$$S = \text{elpat} \text{AF}(\phi) \quad (1)$$

一个 N 单元等间距阵列的阵列方向图可写为

$$S = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{j\phi_n} e^{jnk d(\cos\phi - \cos\phi_0)} \text{elpat}(n) \quad (2)$$

式中 N 为天线单元数; I_n 和 ϕ_n 是第 n 个天线单元的激励幅度和相位; $k = 2\pi/\lambda$; d 是单元间距; ϕ 是从线阵方向开始所扫描的角度; ϕ_0 是主波束指向位置; $\text{elpat}(n)$ 是第 n 个天线单元的方向图。

对每个规则栅格上都有天线单元的等间距均匀线阵,将一些天线单元从规则栅格中随机稀疏后,就得到非对称的稀疏线阵。这里,规定 $I_n > 0$,引入天线标志位 a_n 来表示稀疏线阵的第 n 个天线位置上是放置天线单元还是不放置天线单元,即 a_n 为“1”表示第 n 个栅格上有天线单元; a_n 为“0”表示第 n 个栅格上无天线单元。以降低非对称稀疏线阵的旁瓣电平为优化目标,依据最大相对旁瓣电平(maxRSL)构造适应度函数:

$$\text{Fitness} = \max \left| \frac{\sum_{n=1}^N a_n I_n e^{j\phi_n} e^{j(n-1)k d u}}{\text{FF}_{\max}} \text{elpat}(n) \right|, \quad \frac{\lambda C_0}{Nd} \leq |u| \leq 1 \quad (3)$$

式中 FF_{\max} 是主瓣峰值; N 是栅格总数; d 是规则栅格的栅格间距; $u = \cos\phi - \cos\phi_0$; u 的取值区间需排除主瓣区域,均匀阵列的第一对零点出现在 $u = \pm\lambda/(Nd)$,由于天线单元的随机稀疏及其引起的阵元非严格对称会造成第一对零点的偏移,故引入修正常数 C_0 。

若考虑全向性的天线单元排列而成的非对称稀疏线阵,各天线单元等幅均匀馈电,取 $I_n = 1$, $\phi_n = 0$, $\phi_0 = \pi/2$,

栅格间距 $d = \lambda/2$, $\text{elpat}(n) = 1$, 则适应度函数简化为

$$\text{Fitness} = \max \left| \frac{\sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)k d u}}{\text{FF}_{\max}} \right|, \quad \frac{C_0'}{N} \leq |u| \leq 1 \quad (4)$$

式中 $C_0' = 2C_0$ 。

3 用 GA 优化非对称稀疏线阵

3.1 遗传算法的应用

Haupt^[5]和文献[1]和文献[7]中,综合了栅格间距为半波长、栅格数为 200(即阵列口径为 99.5λ)的稀疏线阵,单元在中心两侧呈对称分布,这里我们综合的稀疏线阵的栅格间距、栅格数和稀布率不变,但取消阵元关于阵中心两侧呈对称分布这一限制,即允许阵元在中心两侧非对称布阵。为保证阵列口径不变,第 1 个和第 200 个栅格上始终放置阵元,用遗传算法求取其他栅格上布放余下的阵元的方式。优化变量(即阵元位置分布,是天线标志位 a_n 组成的序列)采用二进制编码,则将此线阵结构等效成染色体时,将形成长度为 200 的由“1”和“0”组成的基因串,一个基因串代表一个个体。GA 中初始群体的生成可以参考已有的研究成果,使初始群体里含有更多优势个体,这样可以提高遗传算法的收敛速度,根据 Lo 和 Lee^[2]的穷举法优化布阵的统计研究,在获得相对旁瓣电平最优的一组阵列中,大多数是阵元位置呈间隔锥形分布,即越靠近中心,阵元分布密度越大。因此在生成初始群体时,采用一个具有锥形分布特征的参考幅度分布函数,它可以是 Taylor, 正态或余弦分布。若天线单元等幅均匀馈电, $d = \lambda/2$, 遗传算法以阵列的副瓣电平为优化目标,以阵元位置为优化变量,按式(4)计算父代个体的适应度,采用截断选择法,截断阈值为 50%,接下来在优势群体中进行均匀多点交叉,交叉概率为 0.5,均匀多点变异,变异概率为 0.01。遗传操作中除保持稀布率不变外,还需保证阵列边缘的栅格上始终有天线单元,以保证阵列口径不变。

3.2 仿真结果

(1)全向天线单元组成的稀疏阵 GA 的初始群体为 100,扫描角范围 $0 \sim 180^\circ$ 的采样点数 1024,遗传代数 300,对栅格间距为半波长,总栅格数为 200,全向天线阵元数是 154(即稀布率为 0.77)的非对称稀疏线阵,不扫描时优化副瓣电平得到的非对称阵列方向图如图 1 所示,副瓣电平为 -24.03dB ;图 2 是该阵列的标志位序列;图 3 和图 4 是综合的稀疏阵列分别扫描到 120° 和 60° 时的方向图,副瓣电平都为 -23.57dB ,比侧射时抬高 1.9%,可见阵列天线扫描时,由于天线单元是全向性的,阵因子主瓣扫描对阵列方向图的最大副瓣电平影响很小。

文献[5]中,Haupt 综合了栅格间距为半波长、栅格数为 200、阵元数为 154(即稀布率为 0.77)的全向单元的稀疏线阵,单元在中心两侧对称分布,不扫描时优化得到的副瓣电平为

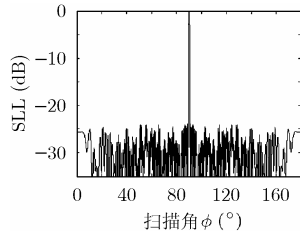


图1 不扫描时优化副瓣电平得到的非对称阵列方向图, 副瓣电平为-24.03dB

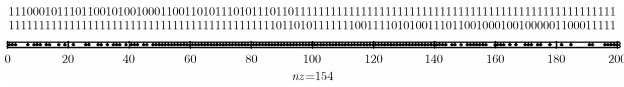


图2 稀疏阵列标志位(黑点表示该位置上有阵元)

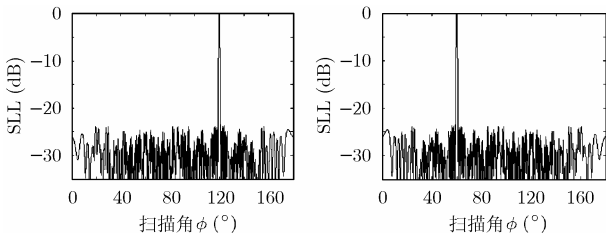


图3 图1的阵列扫描到120°时的方向图, 副瓣电平为-23.57dB

图4 图1的阵列扫描到60°的方向图, 副瓣电平为-23.57dB

-22.09dB。可见, 非对称布阵在此例中使副瓣电平改善了1.94dB。

(2)有向天线单元(单元因子为 $|\sin\phi|$)组成的稀疏阵 如果天线由方向性阵元组成, 不扫描时优化可以得到更低副瓣电平的稀疏阵, 但扫描时该阵列方向图的最大副瓣电平将变高^[5], 因此, 虽然GA的适应度函数已计及扫描范围内出现的最大副瓣电平, 使得副瓣电平在整个扫描范围内优化, 但是通常是在最大扫描角时优化^[5], 譬如天线从60°扫描到120°, 就在天线扫描到60°或120°时优化。

Haupt 综合了单元方向图为 $|\sin\phi|$, 栅格间距为半波长、栅格数为200、阵元数为150(即稀布率为0.75)的稀疏线阵, 单元在中心两侧对称分布, 天线不扫描时优化, 得到的最大副瓣电平是-23.69dB, 该阵列扫描到120°时最大副瓣电平变高到-18.8dB, 恶化20.6%, 不扫描时优化得到的方向图和所得稀疏阵扫描到120°时的方向图参见文献[5]的图3(b)和图4。运用遗传算法, 我们同样优化单元方向图为 $|\sin\phi|$, 栅格间距为半波长、栅格数为200、阵元数为150(稀布率为0.75)的稀疏线阵, 允许单元在中心两侧非对称分布, 天线不扫描时优化, 得到了最大副瓣电平为-25.25dB的稀疏线阵, 该阵列扫描到120°时最大副瓣电平变高到-21.2dB, 恶化15.8%。此例表明, 无对称约束的布阵方式不仅使maxRSLL改善了1.56dB, 还使阵列波束在扫描过程中RSLL的恶化程度改善了4.8%。

文献[1]中综合了单元方向图为 $|\sin\phi|$ 、栅格间距为半波长、栅格数为200、阵元数为154(稀布率为0.77)的稀疏线阵, 单元在中心两侧对称分布, 天线扫描到120°时优化, 得到的

最大副瓣电平是-22.19dB, 优化得到的方向图和所得稀疏阵不扫描的方向图参见文献[1]的图1(a)和图1(b), 由文献[1]的图2给出的标志位, 我们可以算得该阵不扫描时的副瓣电平是-22.71dB, 以不扫描时的maxRSLL为基准, 扫描到120°时RSLL恶化了2.3%。我们同样优化单元方向图为 $|\sin\phi|$, 栅格间距为半波长、栅格数为200和阵元数为154(稀布率为0.77)的稀疏线阵, 但单元在中心两侧无对称约束, 天线扫描到120°时优化, 得到的最优稀疏阵的方向图如图5所示, 其最大副瓣电平为-23.35dB; 图6是该阵列的标志位; 该阵列回扫到侧射时的最大副瓣电平为-23.46dB, 方向图如图7所示, 主波束由侧射扫描到120°时RSLL仅恶化了0.046%, 该阵列扫描到60°时的方向图如图8所示, 这时的最大副瓣电平与扫描到120°时的最大副瓣电平相同, 均为-23.35dB。

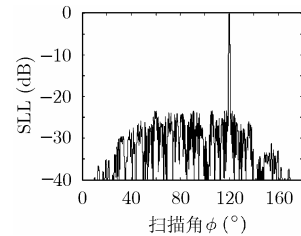


图5 主波束指向120°时优化单元因子为 $|\sin\phi|$ 的稀疏阵时得到的方向图, 副瓣电平为-23.35dB

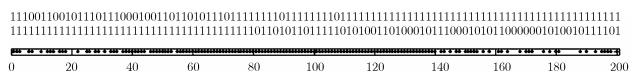


图6 稀疏阵列标志位(黑点表示该位置上有阵元)

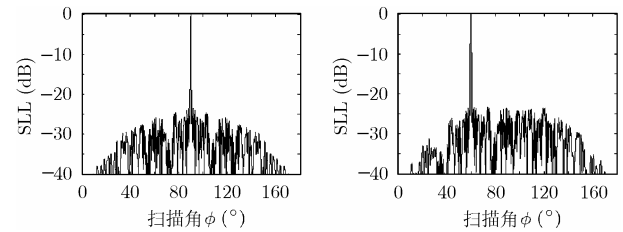


图7 图5对应阵列不扫描时的方向图, 副瓣电平为-23.46dB

图8 图5对应阵列扫描到60°时的方向图, 副瓣电平为-23.35dB

4 遗传优化的非对称稀疏阵列与对称稀疏阵列旁瓣电平对比

文献[1,5,7]都用遗传算法优化了栅格间距为半波长、栅格数为200的等幅均匀馈电稀疏线阵, 阵元在中心两侧对称分布, 现将他们优化的对称稀疏线阵与本文优化的同型但非对称稀疏线阵的旁瓣电平的仿真结果列在表1中进行对比, 由表1分析可以看出, 无对称约束布阵使得非对称线阵比同口径、同阵元数、同栅格间距的对称线阵的旁瓣电平降低了1至2dB, 而且如前文所述, 非对称有向阵元阵列在天线扫描时旁瓣电平恶化程度更小。分析这些仿真实例可见, 阵元配置无对称约束的布阵方式不同程度地提高了稀疏阵列多方面的性能。

表1 非对称稀疏阵列与对称稀疏阵列的旁瓣电平性能对比

组别	稀布率	单元因子	优化时波束	布阵方式	max RSSL(dB)	非对称使 RSSL 改善量	主波束指向其他位置时的 max RSSL(dB)	参考文献
1	0.77	1	不扫描(90°)	对称	-22.09	1.94dB	60°或 120°时为-22.09	[5]
				非对称	-24.03		60°或 120°时为-23.57	
2	0.75	sin ϕ	不扫描(90°)	对称	-23.69	1.56dB	60°或 120°时为-18.8	[5]
				非对称	-25.25		60°或 120°时为-21.2	
3	0.78	sin ϕ	120°	对称	-22.22	1.03dB	不扫描时为-21.26	[5]
				非对称	-23.05		不扫描时为-23.12	
4	0.77	sin ϕ	120°	对称	-22.19	1.16dB	不扫描时为-22.71	[1]
				非对称	-23.35		不扫描时为-23.46	
5	0.71	1	不扫描(90°)	对称	-22.34	1.97dB	60°或 120°时为-22.34	[7]
				非对称	-24.31		60°或 120°时为-24.27	

5 结束语

本文构造了稀疏线阵的阵元无对称约束时运用遗传算法优化旁瓣电平的适应度函数,介绍了将阵元位置作为优化变量,旁瓣电平为优化目标的稀疏阵遗传优化布阵方法。仿真验证了阵元在阵中心两侧的分布方式是可利用的优化自由度,无对称约束的布阵方式更有利于提高稀疏阵列的性能。指出无对称约束的稀疏布阵比对称稀疏布阵不仅进一步抑制了旁瓣电平,而且有益于改善有向阵元阵列波束扫描过程中 RSSL 的恶化。本文的探讨丰富了遗传算法在稀疏阵列综合中的应用,对其他种类的优化稀疏布阵提供了有益的启示,为工程应用提供了有价值的参考。

参考文献

- [1] 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(12A): 2135-2138.
- [2] Lo Y T and Lee S W. A study of space-tapered arrays[J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1966, AP-14(1): 22-30.
- [3] Arora R K and Krishnamacharyulu N C V. Synthesis of unequally spaced arrays using dynamic programming [J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1968, AP-16(7): 593-595.
- [4] Skolnik M I, Nemhauser G, and Sherman J W. Dynamic programming applied to unequally spaced arrays [J]. *IEEE*

- Trans. on Antennas Propagat.*, 1964, AP-12(1): 35-43.
- [5] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithms [J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1994, AP-42(7): 993-999.
- [6] Murino V, Trucco A, and Regazzoni C S. Synthesis of unequally spaced arrays by simulated annealing [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1996, 44(1): 119-123.
- [7] 付云起,袁乃昌,毛钧杰. 基于遗传算法和模拟退火的不等间距稀布阵的设计[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(7): 700-704. Fu Yunqi, Yuan Naichang, and Mao Junjie. Design of unequally spaced thinned arrays based on genetic algorithm and simulated annealing[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2001, 23(7): 700-704.
- [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: 1-9.
- [9] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 10-50.

陈容松: 男, 1973年生, 博士生, 从事阵列天线、相控阵雷达、优化算法等方面的研究工作。

何子述: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 主要从事阵列信号处理、智能天线、相控阵雷达、光控相控阵技术等方面的研究工作。

韩春林: 男, 1962年生, 教授, 主要从事阵列信号处理、合成孔径雷达技术, 雷达成像等方面的研究工作。