

对称线阵的优化稀疏研究

陈睿松 何子述 唐海红
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 对稀疏率一定的稀疏线阵进行优化设计时, 仅对孔径外边缘部分的阵元进行优化稀疏就能达到优化设计整个稀疏天线阵的目的。该文运用统计的方法对大量的最优对称稀疏线阵的阵元分布规律进行了分析和研究, 提出一种对称稀疏线阵的布阵模型, 经过分析和验证表明, 利用该模型可以在保证优化性能的同时, 有效地降低优化布阵算法的计算量, 提高优化设计的效率。

关键词: 阵列天线; 稀疏阵列; 穷举算法; 最优化

中图分类号: TN 820.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1490-03

Research on Synthesis of Symmetrical Thinned Linear Arrays

Chen Ke-song He Zi-shu Tang Hai-hong

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

Abstract: For the synthesis of the symmetrical sparse linear arrays with some thinned rate, only taking some elements rounds the end of the aperture into account will have the same effect on the peak side lobe level with taking all the elements into account. Using statistical method, the distribution characteristic of elements of many optimum thinned arrays are studied in this paper firstly, then a aperture release model is presented to synthesize the symmetrical thinned arrays, this model can reduce the computing burden and improve the efficiency in the optimization without expense of performance. Finally, some test and analysis to testify the advantages are presented.

Key words: Antenna arrays; Thinned arrays; Exhaustive method; Optimization

1 引言

阵列天线的最大相对旁瓣电平(maxRSL)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^[1-7]。为了在降低阵列天线成本的同时保持阵列的孔径和最优的旁瓣性能, 需要对阵列天线进行复杂的稀疏优化设计, 得到的就是稀疏天线阵列, 这类阵列已是一种近六十年来受到广泛深入研究并已经开始实际应用于雷达和射电天文等领域的一种阵列天线^[2,4]。它是一种从均匀阵列中随机地优化稀疏部分天线单元而得到的, 由于天线单元数减少, 天线系统的成本降低; 如果优化稀疏过程中保持阵列的孔径不变, 可使稀疏阵列天线的空间分辨率保持着原均匀阵列的分辨率; 天线单元随机稀疏, 可保证可视区不出现栅瓣。然而, 由于对阵列单元的位置进行最优化设计并非是一个线性最优化问题, 这使得阵列天线的优化稀疏研究一直是未解决得很好的一个最优化问题^[3,6]。几十年来, 天线领域的研究者对这一复杂的优化设计问题进行了不断的探索和不懈的努力。为了得到峰值旁瓣性能良好的稀疏阵, 采用过的研究方法有穷举法^[3,5], 动态规划方法^[6],

统计方法, 模拟退火法, 遗传算法^[7-9], 粒子群算法, 差分进化算法, 混合优化算法等。其中只有穷举法可以获得真正的最优稀疏阵, 其他方法得到的只是近似最优稀疏阵(工程满意解), 但由于优化设计的计算量随阵列规模呈指数规律增长, 所以它只适用于阵元数目较小的中小规模稀疏阵列的优化。寻求解决有较多(数百乃至数千个)天线单元的大型稀疏阵列天线的有效的优化设计方法是近年来受到相当关注的重要研究课题。

Lo 和 Lee 的穷举研究^[3]和文献[10]的布阵研究都表明, 旁瓣性能最佳的一小部分稀疏直线阵列的阵元分布表现出一个显著的特点: 即阵列中心都连续地分布着较多的阵元。文献[9]在研究六边形平面天线阵的优化稀疏布阵时指出, 仅对阵列天线边缘部分单元进行优化稀疏处理可以达到与全部单元进行优化稀疏处理相同的性能改善。可见, 在求解近似最优稀疏阵的工程实际中, 如果确定了最佳对称稀疏直线阵的中心连续分布的阵元数目和稀疏率以及阵列孔径之间的关系, 那么在优化稀疏布阵时, 就可以相应地减小寻优算法的规模和计算量, 提高大型稀疏阵优化设计的效率, 但目前国内外还没见到对这一研究工作的报道, 本文将围绕这一中心问题展开研究和讨论。

2 最优稀疏阵列免布模型的建立

2.1 免布模型的建立

将对称稀疏线阵的阵列孔径 $M\lambda$ 等分为 $2M$ 个栅格, $2M+1$ 个栅格点, 相邻栅格点的间距为 $\lambda/2$, 均匀满阵的阵元数目为 $2M+1$, 若优化稀疏后的阵元数为 $2N+1$, $N < M$, λ 为工作波长, 则稀疏率可定义为

$$\eta = \frac{2N+1}{2M+1} \times 100\% \quad (1)$$

对称稀疏线阵的中心区域有 $2K+1$ 个连续布置的阵元, 则该稀疏阵列的累积率可定义为

$$\rho = \frac{2K+1}{2M+1} \times 100\% \quad (2)$$

本文尝试确定累积率和稀疏率的关系, 称为最优稀疏阵列的免布模型。建立了该模型后, 优化设计问题转换为在更小的阵列孔径上优化稀疏更少的阵元, 寻优空间将缩小, 需计算的稀疏阵列数量将相应地减小。

考虑全向阵元, 遵循的最佳布阵问题的优化准则参看文献[5], 运用遗传算法搜索最优稀疏阵列的方法参看文献[8], 本文不再赘述。

就目前的个人计算机的计算能力而言, 对于阵元数小于 50 的对称阵列进行任意稀疏率的优化稀疏, 可以直接应用穷举法实现。要高效地优化出大中型最优稀疏阵(阵元数远大于 50)的布阵结果, 现实的技术途径是采用诸如模拟退火、遗传算法等现代计算智能优化方法。基于上述原因, 本文仅以阵元数大于 50 且稀疏率在 0.2 以上的最优稀疏阵列的阵元分布为研究对象, 这些最优布阵结果是运用遗传算法仿真试验得到的, 它们是本文建立最优稀疏阵列免布模型的依据。

设归一化孔径的免布模型为 $\rho = f(\eta)$, 确定模型的参数后, 对于稀疏率为 η 的稀疏阵, 则在靠近阵中心的 ρ 倍孔径内连续地累积着阵元, 所以可不予考虑如何在这个区域里布置阵元, 故称该模型为最优稀疏阵列的免布模型。累积率反映了归一化孔径上不予考虑如何布放阵元的区域大小, 因而也可称为免布率。

设定阵元数, 阵列孔径后, 应用遗传算法进行优化稀疏, 以最大相对旁瓣电平最低为优化目标, 计算出旁瓣性能最优的很小一部分稀疏阵列(约总阵列数目的 0.03%~0.3%), 取该群体中的最低累积率为对应于该稀疏率的最优稀疏阵列的累积率。

对孔径在 26λ 和 101λ 之间的共 7 种孔径, 不同稀疏率的对称线阵, 运用遗传算法以旁瓣性能最优为适应度函数进行寻优, 得出最优阵的累积率, 作出如图 1 所示的最优稀疏阵列的累积率与稀疏率的关系, 观察分析累积率随稀疏率变化的趋势可用一线性模型来描述, 由此可以建立归一化孔径的免布模型:

$$\rho = k_1\eta + b_1 \quad (3)$$

对于孔径在 151λ 和 451λ 之间的共 7 种孔径, 不同稀疏率的对称线阵, 运用遗传算法以旁瓣性能最优为适应度进

行寻优, 得出最优阵的累积率, 可作出如图 2 所示的最优稀疏阵列的累积率与稀疏率的关系, 观察分析累积率随稀疏率变化的趋势可用一分段的线性模型来描述, 由此建立的免布模型为

$$\left. \begin{aligned} \rho &= a_1, & \eta &\leq 0.72 \\ \rho &= k_2\eta + a_2, & 1 > \eta > 0.72 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

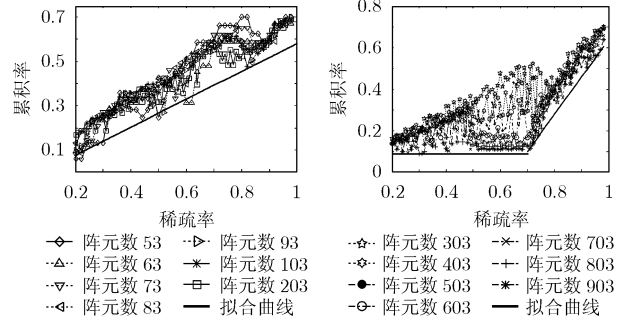


图 1 孔径大于 26λ 小于 101λ 时累积率与稀疏率的关系 图 2 孔径大于 151λ 小于 451λ 时累积率与稀疏率的关系

2.2 模型参数的确定

为了提高免布模型的准确性, 模型参数的确定采用最小二乘法来拟合出线性模型的参数, 对于一种孔径不同稀疏率的稀疏阵, 可拟合出一条直线, 最后选取每组中拟合直线的最小斜率为该组免布模型的最终斜率, 最小截距为最终截距。

当孔径在 26λ 和 101λ 之间时, 拟合得到免布模型为

$$\rho = 0.629\eta - 0.049 \quad (5)$$

该线性模型已在图 1 中用粗实线画出。

当孔径在 151λ 和 451λ 之间时, 拟合得到免布模型为

$$\left. \begin{aligned} \rho &= 0.09, & \eta &\leq 0.72 \\ \rho &= 1.8\eta - 1.161, & 1 > \eta > 0.72 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

图 2 中的粗实线表示了该分段线性模型。

3 应用免布模型布阵的计算量分析

用穷举法优化布阵, 这里分析采用式(5)表示的免布模型前后的计算量的变化。算法所需计算量可用需评价的所有布阵方案数来近似表示^[3]。以栅格点数为 M 的稀疏阵为例, 穷举法需计算的布阵方案数为组合数

$$L_c = C_M^{\lceil \eta M \rceil} \quad (7)$$

应用免布模型后, 需计算的布阵方案数为组合数

$$L_m = C_{\lfloor M(1-\rho) \rfloor}^{\lceil M(\eta-\rho) \rceil} \quad (8)$$

式中, M 为半孔径的栅格数, η 为稀疏率, ρ 为免布率, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整函数。

栅格点数为 80 的稀疏阵列为例, 为 $\lambda/2$ 的栅格, 该阵列的孔径为 39.5λ , 79 个间距, 稀疏率从 0.5 变化到 0.8 时, 应用穷举法优化布阵时, 图 3 为使用免布模型前后的计算量之比 $\gamma = L_c/L_m$ 随稀疏率的变化曲线。譬如从图中可用看出,

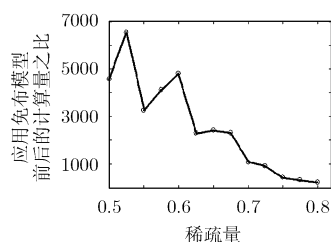


图3 使用免布模型前后的计算量之比 γ 随稀疏率的变化曲线

当稀疏率为0.5时运用免布模型前计算量是运用免布模型后的4588倍,稀疏率为0.8时运用免布模型前计算量是运用免布模型后的240倍。

4 模型的准确性验证

可以用已有文献上的最优布阵结果来验证免布模型的准确性,对式(5)的线性模型,可用文献[8, 10]的仿真结果验证,如表1所示。

表1 式(5)的免布模型的准确性验证

稀疏率	0.77	0.77	0.78	0.83
阵列孔径	99.5 λ	99.5 λ	99.5 λ	99.5 λ
参考文献得到的免布率	0.47	0.44	0.46	0.61
免布模型计算的免布率	0.43	0.43	0.442	0.473
参考文献	文献[9] 图2	文献[8] 图3(a)	文献[8] 图5(a)	文献[8] 图6(a)

分析表1的数据,可以发现由免布模型计算的免布率稍小于参考文献的试验结果的免布率,表明实际应用免布模型不会牺牲最优稀疏阵的性能,且可以减少优化算法的计算量,提高优化效率,故免布模型具有相当的准确性和实用性。

式(6)的免布模型可用于孔径在151 λ 和451 λ 之间的稀疏阵列,稀疏率为1(满阵)时阵元数可达903,由于计算量巨大,目前在个人计算机上用穷举法搜索此类最优稀疏阵还不具时效性,推荐运用计算智能方法寻找近似最优解(工程满意解)。由于从目前的文献上还难以找到相应的最优布阵结果,所以该模型的准确性有待以后出现的计算结果来验证。

5 结论

本文基于遗传算法对不同稀疏率下的最优稀疏阵的最优化设计结果,建立了一种用于对称稀疏线阵综合的免布模型。综合此类稀疏阵时,由免布模型确定的孔径中心免布区域不再需要优化布阵,相当于减小了优化问题的解空间,因而能有效地减小计算量,提高优化设计的效率。实际中应用穷举法搜索最优布阵时,若先应用免布模型,可以通过穷举出更小的布阵方案数来提高优化效率,在应用遗传算法等现代计算智能方法优化布阵时,可以用免布模型提供的先验信息来产生初始群体,从而有利于算法快速收敛到最优解。

参考文献

- [1] 胡星航,林德云. 矩形平面阵列天线旁瓣电平优化的遗传算法[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 119-120.
Hu Xing-hang and Lin De-yun. Sidelobe reduction of plane array using genetic algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(12): 119-120.
- [2] 胡梦中,宋铮,丁刚. 基于遗传算法的任意布阵天线方向图优化[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 9(1): 37-41.
Hu Meng-zhong, Song Zheng, and Ding Gang. Optimization of the radiation pattern of an array antenna using GA [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2007, 9(1): 37-41.
- [3] Lo Y T and Lee S W. A study of space-tapered arrays. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 1966, 14(1): 22-30.
- [4] 赵光辉,陈伯孝. 基于二次编码的MIMO雷达阵列稀疏与天线综合[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 7(6): 39-43.
Zhao Guang-hui and Chen Bai-xiao. Pattern synthesis of antenna array in MIMO radar by using two-layer coding[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 7(6): 39-43.
- [5] 陈客松,何子述,韩春林. 最佳稀疏直线阵列的分区穷举法[J]. 电子与信息学报. 2006, 28(11): 2030-2032.
Chen Ke-song, He Zi-shu, and Han Chun-lin. Divisional exhaustive method applied to optimum thinning of linear arrays. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(11): 2030-2032.
- [6] Skolnik M I, Nemhauser G, and Sherman J W. Dynamic programming applied to unequally spaced arrays [J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 1964, AP-12(1): 35-43.
- [7] 尚飞,蔡亚星,张颖,高本庆. 阵列天线的双种群遗传算法综合[J]. 电波科学学报, 2007, 11(2): 50-54.
Shang Fei, Cai Ya-xing, Zhang Ying, and Gao Ben-qing. Synthesis of array antenna using double population genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 11(2): 50-54.
- [8] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithms [J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1994, AP-42(7): 993-999.
- [9] 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.
Wang Ling-ling and Fang Da-gang. Genetic algorithm for the synthesis of thinned array [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12A): 2135-2138.
- [10] 李东风,龚中麟. 六边形平面天线阵优化稀疏布阵研究[J]. 电子学报, 2002, 30(3): 376-380.
Li Dong-feng and Gong Zhong-lin. Research on thinning the hexagonal planar array [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(3): 376-380.

陈客松: 男, 1973年生, 博士, 副教授, 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。

唐海红: 男, 1978年生, 硕士。