

共享孔径交错阵列综合优化方法

胡继宽, 王布宏, 李龙军

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 共享孔径稀疏交错布阵作为多功能综合传感器系统的关键技术基础,可以减少天线的数量,节省空间,降低载荷和制造成本。利用差集构造的共享孔径交错阵列,由于阵元的非均匀稀疏分布而导致存在较高的旁瓣电平,提出一种将差集理论和遗传算法相结合对阵列进行优化的方法。首先由差集确定交错阵列的阵元位置,再以激励幅度分布为决策变量,利用遗传算法同步降低各子阵的旁瓣电平,使得共享孔径交错阵列的整体性能得到提升。仿真结果表明,该方法有效抑制了阵列的旁瓣电平,是一种有效的交错阵列优化方法。

关键词: 共享孔径天线; 交错阵列; 差集; 遗传算法

中图分类号: V271.4; TN820

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)08-0033-04

Synthesis Optimization of Shared-Aperture Interleaved Arrays

HU Jikuan, WANG Buhong, LI Longjun

(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The shared-aperture thinned interleaved arrays design technology is an important infrastructure of integrated sensor system (ISS). It can reduce the quantity of antennas, save space, and reduce the loads and manufacture costs. The shared aperture interleaved arrays based on difference sets usually have high sidelobe levels, because of the asymmetric distribution of the thinned sub-arrays elements. A method of optimized interleaved arrays was proposed based on difference sets and genetic algorithm. First, the difference sets were used to determine the position of array elements, and the current magnitude distribution of arrays was taken as the decision-making variable. The genetic algorithm was used to lower the maximum sidelobe level, thus to improve the performance of the whole shared aperture interleaved arrays. The simulation results show that the method is effective to restrain the sidelobe levels and useful for interleaved array optimization.

Key words: shared-aperture antenna; interleaved array; difference set; genetic algorithm

0 引言

共享孔径天线整合多个天线的功能于一个单一的孔径,交错稀疏阵的设计需要实现“稀疏布阵”和“子阵交错机制”两个关键技术的有机“协同”。国内在共享孔径天线方面已有一些优秀的研究成果,但仍然主要集中在共享孔径天线单元的规则嵌套阵设计方面^[1-2],以 Coman C. I 和 Simeoni M 为代表的研究小组,利用循环差集及其“补集”实现了多子阵的稀疏交错布阵^[3],但差集的参数严格限制了阵列的结构,基于

差集设计的阵列往往不是最优解^[4-5],子阵存在较高的旁瓣电平,可通过全局优化方法进一步优化,文献[6]针对单一稀疏阵列的激励幅度利用模拟退火算法进行了优化,但没有涉及交错阵列中多子阵优化问题。遗传算法适用于解决传统搜索方法难以解决的复杂和非线性问题,并且简单通用^[7-9],本文将差集理论和遗传算法相结合实现阵列的优化综合,实现了对交错子阵的同步优化,有效抑制了阵列的旁瓣电平,很好地改善了阵列的方向图性能。

1 差集

一般地,循环差集 $D(V, K, A)$ 可定义为 $D = [d_0, d_1, \dots, d_{K-1}]$, d_i 为非负整数且满足 $0 \leq d_i \leq V-1$, 并且对于任意整数 $\alpha (1 \leq \alpha \leq V-1)$, D 中有且仅有 A 个有

收稿日期:2013-03-20

修回日期:2013-03-31

基金项目:国家自然科学基金(61172148)

作者简介:胡继宽(1989—),男,山东菏泽人,硕士生,研究方向为阵列信号处理。

序对 (d_i, d_j) ,使得等式 $d_i - d_j = \alpha \pmod{V}$ 成立,其中 $i \neq j$,“ \pmod{V} ”指的是对 V 求模,并且差集的补集 D^* 仍为差集。利用差集可以构造一个二值序列为

$$a(i) = \begin{cases} 1, & i \in D \\ 0, & i \notin D \end{cases} \quad (1)$$

式中, $i=0,1,\dots,V-1$ 。利用 a 中的“1”元素来确定阵列中放置阵元的位置,稀疏掉“0”值对应的阵元,由此可以得到稀疏程度很高的阵列,用这种方式构造的阵列所形成的方向图主瓣宽度、峰值与未经稀疏的均匀阵列相同,旁瓣电平较低,运算量很小^[10],差集方法有效降低了稀疏布阵的运算时间和复杂度,但通常无法保证最优解,线性交错阵列结构见图1。

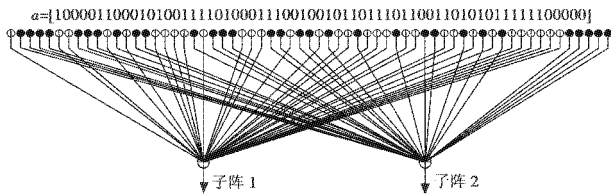


图1 线性交错阵列结构图

Fig.1 Schematic diagram of linear interleaved arrays structure

2 共享孔径交错阵列构造

2.1 交错线阵

由差集性质可知,可以利用差集 D 及其补集 D^* 将一个 V 元线性均匀阵列分为两个相互交错且不重叠的非均匀线性子阵列。

以差集 $D(63,32,16)$ 为例,构造交错阵列如图1所示,阵列方向图函数为

$$F(\phi) = \sum_{n=0}^{V-1} I_n a(n) e^{jnk d (\cos \phi - \cos \phi_0)} \quad (2)$$

式中: V 表示阵列单元总数; I_n 表示第 n 个单元激励幅度; $a(n)=1$ 表示第 n 个阵元存在, $a(n)=0$ 表示该点阵元稀疏掉; $k=2\pi/\lambda$; d 为阵元间距; λ 为波长; ϕ 表示线阵扫描角度; ϕ_0 表示主波束指向位置。最大相对旁瓣为

$$M_{SL} = \max \left(\frac{\sum_{n=0}^{V-1} a(n) I_n e^{jnk d u}}{F_{\max}} \right) \quad (3)$$

式中: F_{\max} 为阵列的主瓣峰值; $u = \cos \phi - \cos \phi_0$, u 的取值排除主瓣区域。

2.2 交错面阵

同样利用差集 $D(V,K,A)$ 来设计矩形平面稀疏阵列,设阵列大小为 $V_x \times V_y$,此时差集构造的序列为

$$a(m,n) = \begin{cases} 1, & i \in D \\ 0, & i \notin D \end{cases} \quad (4)$$

式中: $m=i \pmod{V_x}$; $n=i \pmod{V_y}$; $i=0,1,\dots,V-1$ 。

以 $a(m,n)$ 中的“1”元素表示子阵1中阵元,“0”元素表示子阵2中阵元,构造平面交错阵列,以差集 $D(63,32,16)$ 为例,当 $V_x=9, V_y=7$ 时,得到阵列结构如图2所示。

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

图2 平面交错阵列 9×7

Fig.2 Planar interleaved array of 9×7

阵列方向图函数为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{V_x-1} \sum_{m=0}^{V_y-1} a(m,n) I_{m,n} e^{-j(x_{m,n} \cos \theta \cos \varphi + y_{m,n} \sin \theta \cos \varphi) \frac{\pi}{\lambda}} \quad (5)$$

式中: $(x_{m,n}, y_{m,n})$ 表示第 (m,n) 个阵元位置坐标; $I_{m,n}$ 表示第 (m,n) 个单元激励幅度; θ 表示方位角; φ 为俯仰角。最大相对旁瓣为

$$M_{SL} = \max \left(\frac{F(\theta, \varphi)}{F_{\max}} \right) \quad (6)$$

式中: F_{\max} 为阵列主瓣峰值; $F(\theta, \varphi)$ 的取值排除主瓣区域。

3 遗传算法

遗传算法是一种自适应全局优化概率搜索算法,其基本思想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,并以此为依据模仿生物的选择、交叉以及变异的整个过程,最终获得最优解,计算流程如图3所示。

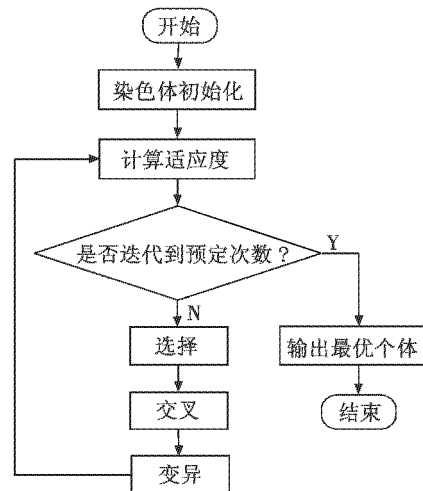


图3 遗传算法流程图

Fig.3 Flow chart of genetic algorithm

1) 采用实数编码,以第 n 个阵元的激励 I_n 作为基

因的编码方式,构造染色体序列 $I = [I_1, I_2, \dots, I_{62}]$ 。

2) 本文以降低交错阵列各子阵的旁瓣电平为优化目标,激励幅度作为遗传算法的优化变量,选择各子阵最大旁瓣峰值的和作为适应度函数,定义为

$$F_{\text{fitness}} = |M_{\text{SL1}} + M_{\text{SL2}}| \quad (7)$$

式中, M_{SL1} , M_{SL2} 分别表示子阵 1 与子阵 2 的最大相对旁瓣电平,在线阵中由式(3)确定,面阵中由式(6)确定。

3) 计算群体中每个个体的适应度,并以此为依据,对群体进行选择、交叉、变异操作,得到适应度最高个体即为最终解。

4 仿真结果分析

实验仿真采用差集 $D(63, 32, 16)$, 阵元间距 $d = \lambda/2$, 优化前阵元激励权值均为 1, 利用遗传算法对其电流幅度分布进行优化, 激励幅度变化范围为 (0, 1, 1.5), 遗传算法条件设置: 初始群体数为 100, 最大迭代 400 次, 采用轮盘赌选择、单点交叉及均匀变异操作。

实验 1 交错线阵结构如图 1 所示, 利用差集设计的阵列, 稀疏程度高, 且均匀占有整个孔径, 每个稀疏分布的子阵可以获得与原孔径近似相同的孔径尺寸, 孔径能够得到充分利用, 主瓣增益与宽度损失较小, 稀疏处理之后的阵列由于天线单元的减少必然会导致旁瓣电平抬高, 得到的归一化阵列方向图如图 4 和图 5 所示。

表 1 优化后的激励幅度分布

Table 1 The optimized current magnitude distribution

| I_n | 激励幅度权值 | | | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| $I_0 \sim I_8$ | 0.5723 | 0.6963 | 0.9698 | 0.3908 | 1.1168 | 0.9331 | 0.3937 | 1.0156 | 1.1691 | |
| $I_9 \sim I_{17}$ | 1.0975 | 0.9256 | 0.2466 | 0.9537 | 1.1527 | 1.0163 | 0.8820 | 1.2907 | 1.1703 | |
| $I_{18} \sim I_{26}$ | 0.8336 | 1.4580 | 0.4761 | 0.5203 | 0.3068 | 0.5772 | 1.1258 | 1.0726 | 1.2443 | |
| $I_{27} \sim I_{35}$ | 1.4003 | 1.3546 | 1.1009 | 0.9976 | 1.4407 | 0.6779 | 0.8985 | 0.4746 | 1.2881 | |
| $I_{36} \sim I_{44}$ | 1.1408 | 0.6337 | 1.3261 | 1.1022 | 1.4108 | 0.6685 | 1.4127 | 0.9390 | 1.1155 | |
| $I_{45} \sim I_{53}$ | 0.3691 | 0.8628 | 1.0492 | 0.7634 | 0.6932 | 1.3198 | 1.0966 | 1.0122 | 0.8278 | |
| $I_{54} \sim I_{62}$ | 0.1810 | 0.7649 | 0.1017 | 0.7326 | 0.6189 | 0.3901 | 0.8061 | 0.7368 | 0.5871 | |

实验 2 仿真采用的交错面阵结构如图 2 所示, 归一化阵列方向图结果如图 6 和图 7 所示。优化前子阵 1 与子阵 2 方向图的最大旁瓣电平分别为 $M_{\text{SL1}} = -8.419$ dB 和 $M_{\text{SL2}} = -10.637$ dB, 优化后最大旁瓣电平分别为 $M_{\text{SL1}} = -10.670$ dB 和 $M_{\text{SL2}} = -11.881$ dB。通过仿真结果可以看出, 子阵 1 与子阵 2 均不同程度存在较高的旁瓣, 最后通过改变阵列的激励幅度, 使交错阵列的两个子阵性能均有了一定的改善, 实现了近似相同的方向图特性, 也证实了差集与遗传算法相结合对交错阵列的优化是有效的。

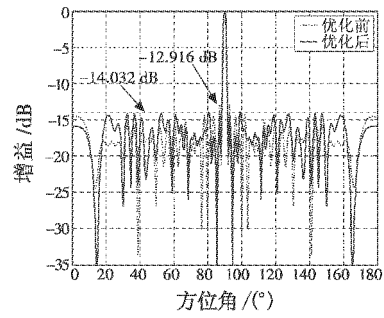


图 4 子阵 1 方向图

Fig. 4 Radiation pattern of sub-array1

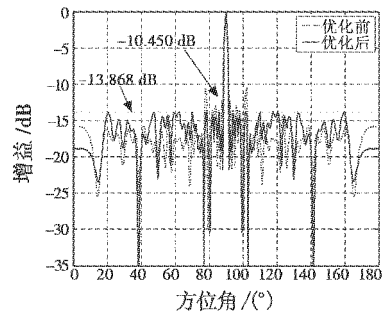
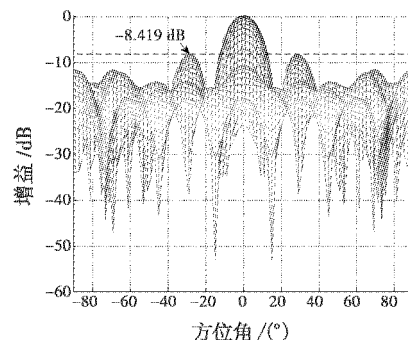


图 5 子阵 2 方向图

Fig. 5 Radiation pattern of sub-array2

从图中也可以看到优化前后两个子阵的主瓣宽度都基本保持不变, 优化前子阵 1 与子阵 2 方向图的最大旁瓣电平分别为 $M_{\text{SL1}} = -12.916$ dB 和 $M_{\text{SL2}} = -10.450$ dB, 优化后最大旁瓣电平分别为 $M_{\text{SL1}} = -14.032$ dB 和 $M_{\text{SL2}} = -13.868$ dB, 整个阵列的激励幅值结果如表 1 所示。



a 优化前

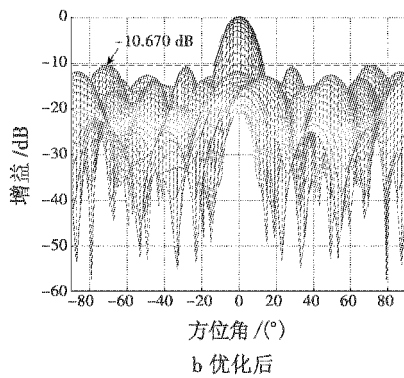


图6 子阵1方向图

Fig. 6 Radiation pattern of sub-array1

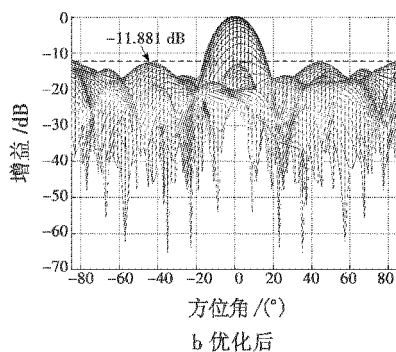
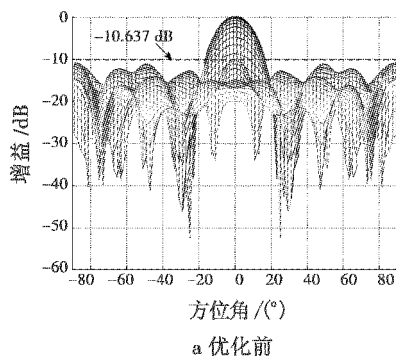


图7 子阵2方向图

Fig. 7 Radiation pattern of sub-array2

5 结束语

已知的差集十分丰富,通过选取不同参数的差集,可以构造出稀疏程度各不相同的交错阵列,实现多子阵孔径共享,通过子孔径频带的叠加可以实现宽带天线,对工程实践有较大应用价值。本文将差集与遗传

算法相结合,有效降低了共享孔径稀疏交错阵的旁瓣电平,改善了交错阵列的性能,是一种有效的阵列综合方法。

参考文献

- [1] GAO Guoming, ZHANG Yumei, LI Ang, et al. Shared-aperture Ku/Ka bands microstrip array feeds for parabolic cylindrical reflector [C]//Proceedings of 2010 ICMMT, 2010:1028-1030.
- [2] ZHONG Shunshi, SUN Zhu. Tri-band dual-polarization shared-aperture microstrip array for SAR Application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(9):4157-4165.
- [3] COMAN C I, LAGER I E, LIGTHART L P. A deterministic solution to the problem of interleaving multiple sparse array antennas [C]//Proceedings of 2nd European Radar Conference-EuRAD, Paris, France, Oct. 2005:243-246.
- [4] CAORSI S, LOMMI A, MASSA A, et al. Peak sidelobe level reduction with a hybrid approach based on GAs and difference sets [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(4):1116-1121.
- [5] OLIVERI G, MASSA A. Genetic algorithm (GA) enhanced almost difference set (ADS) based approach for array thinning [J]. IET Microwaves, Antennas Propagation, 2011, 52(3):305-315.
- [6] 郭陈江,张锋,丁君,等.基于循环差集与模拟退火法的阵列综合[J].电波科学学报,2007,22(6):962-964.
- [7] 王玲玲,方大刚.运用遗传算法综合稀疏阵列[J].电子学报,2003,31(12):2135-2138.
- [8] 陈睿松,何子述,韩春林.运用GA和FFT确定稀疏阵列的激励幅度[J].系统工程与电子技术,2006,28(1):15-19.
- [9] 杨啸天,冯金富,冯媛,等.基于遗传粒子群的多传感器目标分配算法[J].电光与控制,2011,18(3):5-8.
- [10] LEEPER D G. Isophoric arrays-massively thinned phased arrays with well-controlled sidelobes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(12):1825-1835.