

# 一种广域稀布雷达低旁瓣波束形成方法

李鑫宇<sup>1</sup>, 王鹏毅<sup>1</sup>, 夏双志<sup>1</sup>, 宋晨<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050081;

2. 中国卫星海上测控部, 江苏省 江阴 214400)

**摘要:** 广域稀布雷达具有抗干扰、抗摧毁能力强等优点, 但是其方向图会因阵元稀布而存在大量的高旁瓣; 提出一种脉组内捷变频联合波束形成方法, 通过在雷达的连续脉组内发射不同频率的信号, 并将不同频率的信号进行相参合成, 在使主瓣电平不变的情况下, 得到更低的旁瓣电平; 通过与遗传算法相结合, 并设定适当的约束和适应度函数, 经迭代优化后的布局, 可以得到具有更低的旁瓣电平的波束形成方法; 仿真结果表明: 经该方法优化后, 广域稀布线阵旁瓣电平降低至  $-11.85$  dB, 广域稀布面阵方位向和俯仰向旁瓣电平分别降低至  $-14.18$  dB 及  $-14.73$  dB; 该方法可以有效降低广稀疏阵列的旁瓣电平。

**关键词:** 广域稀布雷达; 捷变频; 波束形成; 低旁瓣; 遗传算法

## A Beam-forming Method with Low Side-lobe for Widely Sparse Radar

LI Xinyu<sup>1</sup>, WANG Pengyi<sup>1</sup>, XIA Shuangzhi<sup>1</sup>, SONG Chen<sup>2</sup>

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China; 2. CSMTC, Jiangyin 214400, China)

**Abstract:** Widely sparse radar has the advantages of anti-interference and anti-destruction capability. However, its radiation pattern will contain a large number of high side-lobe due to sparse array elements. A beam-forming method is proposed by combining with intra-pulse frequency agility signals, which can form lower side-lobe level while maintaining the main-lobe level by emitting the signals of different frequencies in pulses group of the radar and coherently synthesizing the signals of different frequencies in the airspace. By combining with the genetic algorithm and setting the appropriate constraints and fitness functions, the radiation pattern with the lower side-lobe flap can be formed after the iterative optimization. The simulation results show that after optimization by this method, the side-lobe level of the widely sparse linear array is reduced by  $-11.85$  dB, and the azimuthal and pitch side-lobe levels of the widely sparse planar array by  $-14.18$  dB and  $-14.73$  dB respectively. The method can effectively reduce the side-lobe level of the widely sparse array.

**Keywords:** widely sparse radar, frequency agility, beam-forming, low side-lobe, genetic algorithm

## 0 引言

广域稀布雷达作为一种新体制雷达, 其阵元广域部署, 在部分单元雷达受到干扰或破坏时, 不会对整个雷达系统造成太大影响, 同时可以从不同方向对目标进行探测, 充分利用空域信息, 提高目标的探测效率, 很好的满足了“三反一抗”(反侦察、反干扰、反隐身、抗反辐射打击)的要求。对于由  $N$  个相同孔径的阵元构成的广域稀布雷达系统, 通过信号级合成处理, 其信噪比增益可达到单元孔径的  $N^3$  倍, 也满足了对于雷达系统大威力的需求<sup>[1-2]</sup>。对于广域稀布雷达阵列, 方向图中会产生较高的旁瓣。高旁瓣的干扰, 会在探测时容易产生虚假的目标。对于降低方向图旁瓣电平的方法, 国内外对此已经进行了一定的研究。付云起等利用遗传算法和模拟退火对不等间距稀布阵进行了综合设计, 使得阵列旁瓣电平得到了改善<sup>[3]</sup>。文献[4]提出一种基于自监督差分算子的自适应遗传算法的天线位

置优化方法, 并利用自监督微分算子进行突变, 使得方向图可以产生较低的旁瓣电平。郑志东等提出了一种利用接收波束合成的算法来对消发射阵元的栅瓣, 有效地抑制了高的旁瓣电平<sup>[5]</sup>。文献[6]提出了一种多阶量化幅相加权的方法, 优化后的方向图在所有频段和扫描范围内均存在较低且稳定的低旁瓣, 增益损失小, 原理简单易于工程实现。文献[7]提出了一种改进的粒子群算法, 该算法将 MIMO 雷达的联合收发波束作为适应度函数, 分别对发射阵列及接收阵列进行了优化, 该算法收敛速度较快, 且可以达到主瓣不展宽的条件下, 降低方向图的旁瓣电平。文献[8]提出了一种幅度加权的波束形成算法, 该算法可以在小范围展宽主瓣波束宽度的条件下, 实现大幅度降低旁瓣电平的效果。文献[9]提出了一种综合算法, 对于由迭代傅里叶算法得到的稀疏阵列, 以阵元间距大于半波长的阵元作为优化对象并采取差分进化算法, 经优化后的阵列旁瓣电平得到较好的降低效果文献[10]提出一种改进的

收稿日期:2023-02-09; 修回日期:2023-02-15。

作者简介:李鑫宇(1996-),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要从事航天测控信号处理方向的研究。

引用格式:李鑫宇,王鹏毅,夏双志,等.一种广域稀布雷达低旁瓣波束形成方法[J].计算机测量与控制,2023,31(5):271-277.

遗传算法, 通过用多个矩阵组合对 MIMO 阵列进行表示, 并应用基于混沌序列的方法扰动种群, 以避免优化过程中局部收敛的情况, 该优化算法很好地解决了 MIMO 阵列的排布问题, 且实用性强。然而, 现有文献的方法主要应用于非稀布阵列或阵元间距略大于的半倍波长的阵列, 而广域稀布阵列的阵元间距大多为百倍甚至千倍的半倍波长。其中以遗传算法为代表的搜索算法, 通过优化布阵而降低旁瓣的作用十分有限, 难以满足雷达系统对目标探测的要求。且阵元间距过大会导致搜索范围扩大, 在提高计算量的同时, 也难以避免陷入局部最优解<sup>[13]</sup>, 所以需要进一步采取抑制旁瓣的综合方法。

对此, 本文以稀布线阵为例, 提出一种脉组内捷变频联合波束形成的方法, 通过将不同频点下的信号方向图相参的形式进行联合, 并结合遗传算法进行布阵优化。仿真结果表明, 二者相结合后的算法可以进一步降低稀布线阵的旁瓣电平。最后将其拓展至稀布面阵, 验证了本文方法在稀布面阵中同样具有良好的效果。

## 1 广域稀布阵列模型

如图 1 所示是一个由  $N$  个阵元组成的稀布阵列模型, 每个阵元的坐标为  $(x_n, y_n, z_n)$ 。

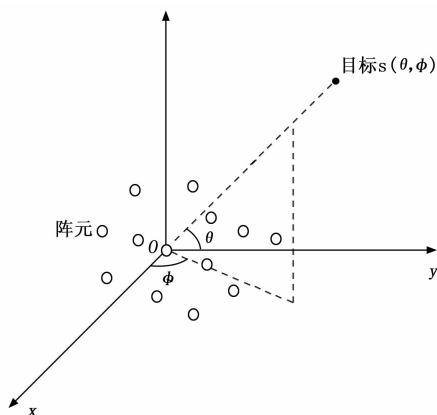


图 1 稀布阵列模型

由阵列天线的远场方向图乘积原理, 阵列天线方向图等于阵元因子乘阵列因子, 得:

$$F(\varphi, \theta) = \sum_{n=1}^N f_n(\varphi, \theta) S_n \quad (1)$$

其中: 每个阵元方向图  $f_n(\varphi, \theta)$  相同, 不失一般性, 假设阵元方向图范围足够大, 满足全向性, 即  $f_n(\varphi, \theta) = 1$ ; 阵列因子为

$$S_n = A_n \exp \left[ j \frac{2\pi f}{c} (\Delta R_n - \Delta R_0) \right] \quad (2)$$

其中:  $\Delta R_n = x_n \cos \theta \cos \varphi + y_n \cos \theta \sin \varphi + z_n \sin \theta$ ,  $\Delta R_0 = x_0 \cos \theta_0 \cos \varphi_0 + y_0 \cos \theta_0 \sin \varphi_0 + z_0 \sin \theta_0$ 。  $f$  为工作频率,  $(\theta_0, \varphi_0)$  为波束指向,  $\theta$  为俯仰角,  $\varphi$  为方位角。天线的照射孔径函数是等幅分布的, 即不进行幅度加权, 则幅度加权系数为  $A_n = 1$ 。稀布阵列方向图函数可表示为<sup>[6,10]</sup>:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \exp \left[ j \frac{2\pi f}{c} (\Delta R_n - \Delta R_0) \right] \quad (3)$$

## 2 算法分析

本章以线阵为模型, 提出了一种脉组内捷变频联合波束形成方法, 并将该方法与遗传算法相结合。

一个阵列孔径为  $L$  的直线阵列方向图函数表达式可由式 (3) 简化为:

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N e^{j \frac{2\pi f}{c} d_n (\sin \theta - \sin \theta_0)} \quad (4)$$

其中:  $d_n$  表示第  $n$  个阵元到第一个阵元的距离, 且  $n \leq N$ 。

### 2.1 遗传算法

遗传算法最早由美国的 J. H. Holland<sup>[17]</sup> 教授提出, 是通过对自然界生物进化机制的探究而发展起来的一种全局优化方法, 诞生于 20 世纪 60 年代; 经过一系列后续的研究发展, 在 80 年代, 遗传算法经 D. E. Goldberg 大量的研究总结归纳后形成。

遗传算法的本质是一种高效的全局搜索算法, 它可以在搜索过程中获得并积累搜索空间的信息, 并通过自适应的方式控制搜索过程从而求得最优解。遗传算法在每一代中, 以个体为单位在问题域中通过适应度值以及交叉、变异、选择等遗传操作, 产生新的个体。这个过程产生的新的个体比原个体对环境的适应度更大, 从而最终提升了整个种群的适应度。目前遗传算法已广泛应用于各个领域, 并在布阵优化中产生了较好的效果。

简单来说, 遗传算法通过把种群当做问题的一组解, 对其采用选择。交叉和变异等一系列遗传学操作从而产生新的种群, 并反复迭代使种群进化到近似最优解的状态。遗传算法是自然遗传学与计算机科学互相融合而形成的算法, 下面介绍有关的生物学中的基本概念和术语<sup>[6]</sup>。

1) 群体和个体: 群体是生物进化过程中所有个体的集合, 种群的规模表示可行解集。个体是种群的基本单元, 表示一个可行解。

2) 染色体和基因: 染色体包含生物所有的遗传信息, 通常是可行解的一段编码。基因是遗传信息的基本单位, 是染色体的一部分, 即可行解编码的一部分。

3) 遗传编码: 遗传编码通常以二进制编码和十进制编码为主。

4) 实数编码: 因为二进制编码是离散的, 存在较大误差, 有时也不利于反应问题的特定知识, 故本文采用实数编码的方式, 其特点是精确度较高, 便于和连续优化算法结合, 更实用与数值优化的问题。

5) 适应度: 适应度是用来评估个体适应生存环境的能力。适应度函数则用来评价个体的优劣。

6) 遗传操作: 遗传操作是“选择”“交叉”“变异”的统称。优势个体的保留和劣势个体的淘汰称作“选择”, 个体间基因的随机交换称作“交叉”, 个体间基因的随机变换称作“变异”。

7) 选择: 选择即是通过计算个体的适应度值, 通过特定的方法或规则, 从第  $t$  代群体中选出优良的个体遗传到下

一代。“轮盘赌”的选择方法是一种最早提出的选择方法,它是一种基于比例的选择方法,对于每个个体,适应度值所占比例大的后代更容易被保留;反之,适应度值所占比例小的后代则更容易被淘汰。为了选择交叉及变异的个体需要进行多轮选择,选择的作用主要在于保留更优良的基因,保证全局更好的收敛性能。

8) 交叉: 交叉是指将经过选择操作后的群体,对每个个体以特定的交叉概率,交换他们的部分同一位置的基因,从而产生新的个体。交叉运算是产生新的子代的主要方式,也在一定程度上可以起到避免群体的局部收敛的作用。

9) 变异: 变异是指对群体的每一个个体,依据特定的变异概率对染色体上的基因改为其他等位基因值,从而形成新的个体。变异和交叉同样产生新的个体,和交叉操作共同保证遗传算法向更优良的群体方向进化。

如下为遗传算法的具体流程:

1) 种群初始化。在值域范围内用随机数生成  $N$  个个体,同时设置最大进化代数  $G$ 。设置进化代数计数器  $g=0$ 。

2) 适应度值个体评价。计算群体中的每个个体的适应度值。

3) 选择: 把选择算子作用到群体。计算个体的适应度,并根据适应度将优良的个体遗传到下一代。

4) 交叉: 把交叉算子作用到群体,对每个个体依概率交换其部分基因,产生新的个体。

5) 变异: 把变异算子作用到群体,对每个个体依概率改变某些基因为值域内的其他基因。

6) 终止条件判断。当  $g \leq G$ ,则  $g = g + 1$ ,并重复步骤2);当  $g > G$  时,终止循环,并将最大适应度值的个体输出。

如图2为遗传算法的流程图,这里种群的个体数量设置为  $N_p$ ,每个个体都是一个实数值参数向量,设置其长度为  $L$ ,表示为:

$$x_{i,g} (i = 1, 2, \dots, N_p) \quad (5)$$

式中,  $g$  为遗传代数,  $i$  为每一代种群中个体的序号,  $N_p$  为每一代种群中个体的数量。

首先对种群的每个个体进行初始的编码,从而创建优化的起点。由优化模型可知,搜索空间的范围为  $[0, L]$ 。为了保证阵列的孔径大小不发生变化,需要使阵列的首尾都存在一个阵元。同时约束相邻两阵元的最小距离间隔为常数  $d_c$ ,则约束条件设置为:

$$\begin{cases} \min\{d_i - d_j\} \geq d_c, 1 \leq j < i \leq N \\ d_1 = 0 \\ d_N = L \end{cases} \quad (6)$$

这里把  $d_i$  分成  $x_i$  和  $(i-1)d_c$  两部分,则有:

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_{N-1} \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 + d_c \\ x_3 + 2d_c \\ \vdots \\ x_{N-2} + (N-2)d_c \\ x_{N-1} + (N-1)d_c \end{bmatrix} =$$

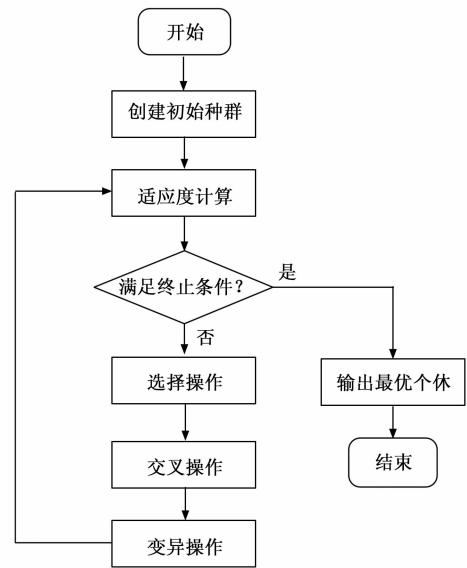


图2 遗传算法的运算流程

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_c \\ 2d_c \\ \vdots \\ (N-2)d_c \\ (N-1)d_c \end{bmatrix} = x + \begin{bmatrix} 0 \\ d_c \\ 2d_c \\ \vdots \\ (N-2)d_c \\ (N-1)d_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_N \quad (8)$$

由上式可得:

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_N \in [0, L - (N-1)d_c] \quad (9)$$

经过上述的操作,就可以把个体的基因距离间隔  $d_m$  间接地转化成  $x_i$ ,搜索空间的范围从  $[0, L]$  减小为  $[0, L - (N-1)d_c]$ ,并通过随机数生成器在搜索空间内生成  $N$  个随机数。

此外,要想使(8)式成立,需要将种群初始的中间变量进行从小到大的排序,通过式(7)求出真实距离间隔种群  $d$ ,并令  $d_1 = 0, d_N = L$ 。至此完成了种群的初始化。

接下来是优化变量适应度函数。对于波束指向为  $\theta_i$  的阵列,由方向图的最大旁瓣电平(MSLL)定义可以得到计算公式为:

$$MSLL_i = \max_{\varphi \in S} \{F_{dB}(\theta, \theta_i)\} = \max_{\varphi \in S} \left\{ \left| \frac{F(\theta, \theta_i)}{\max(F(\theta, \theta_i))} \right| \right\} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

其中:  $S$  为线阵方向图的旁瓣区间,  $F_{dB}(\theta)$  为归一化的线阵方向图函数。

$S = \{\theta \mid \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_i - \varphi_0 \cup \theta_i + \varphi_0 \leq \theta \leq \theta_{\max}\}$ ,其中  $2\varphi_0$  是方向图的主瓣的零功率点。从而可以定义如下适应度函数为:

$$fitness(d_1, d_2, \dots, d_N) = \min_x [\max(MSLL_i)] \quad (11)$$

式中,  $\theta_i$  为空域内指定的  $i$  个波束指向。遗传算法通过该适

应度函数优化阵元的位置,使得阵列方向图在空域内的指定指向中,所有方向图中最大的旁瓣电平最低。

然后进行选择操作。采用“轮盘赌”的思想,利用每个个体适应度大小来决定保留其子代的概率,若种群大小是  $N_p$ , 个体的适应度是  $fit_i$ , 则该个体被选择的概率为:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{N_p} fit_i} (i = 1, 2, \dots, N_p) \quad (12)$$

最后进行交叉和变异操作。将选择操作后的个体分为奇数及偶数组个体,并根据设置的交叉概率  $P_c$  依概率对奇数组个体及偶数组个体进行部分基因的交换。具体操作为:选择要交叉的一对个体,若个体的长度为  $L$ ,则在  $[1, L-1]$  的范围内选择整数  $k$  作为交叉位置,并根据交叉概率进行交叉操作,双方交换交叉位置的基因,从而形成一对新的个体。

变异操作是为了使种群保证其多样性,同时可以防止遗传算法达到局部最优解而收敛。具体操作为:对于交叉操作完成的种群,对每个个体的所有基因以  $[0, 1]$  区间内的随机数  $r$  进行变异操作,若  $r < P_m$  ( $P_m$  表示变异概率),则对选择的基因进行变异,即在值域中用随机生成的数代替它,直到对所有基因完成此操作,就完成了种群的变异操作。

通过以上操作完成一次遗传操作,完成后需要保证阵列的孔径不变,即首尾需要保证有阵元,同时计算每个个体的适应度计算,保留最优个体到下一代,并进行下一代的遗传操作,当上述步骤重复至一定次数或者满足一定条件时,遗传算法完成,此时的最优个体为最终的优化结果。

## 2.2 脉组内捷变频联合波束形成方法

本节提出一种脉组内捷变频联合波束形成方法,该方法将若干频点下的方向图以相参的形式进行联合,可以形成具有低旁瓣的方向图,如下为具体实现过程。

首先确定一个可用频段范围  $[f_{\min}, f_{\max}]$ , 并确定一个的频点数  $M$ , 并通过(13)式确定  $M$  个频点中第  $i$  个频点的频率  $f_{iM}$ :

$$f_{iM} = \begin{cases} \frac{f_{\min} + f_{\max}}{2}, & i = 1, M = 1 \\ f_{\min}, & i = 1, M \neq 1 \\ f_{\min} + (i-1) \cdot \frac{f_{\max} - f_{\min}}{M-1}, & i \neq 1, M \neq 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $f_{\min}$  表示可用频段范围内最低频点,  $f_{\max}$  表示可用频段范围内最高频点。

对选用的  $M$  个频点按照(4)式进行波束形成,通过(14)式进行联合波束形成,并计算最大旁瓣电平:

$$MSLL_M = \max_{\theta \in S} \left\{ \left| \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N e^{j \frac{2\pi}{c} f_{iM} d_n (\sin\theta - \sin\theta_0)} \right| \right\} \quad (14)$$

其中:  $f_i$  为第  $i$  个频点,  $c$  为光速,  $S$  表示方向图的旁瓣区间,若方向图主瓣的零功率点为  $2\varphi_0$ , 则  $S = \{\theta | \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_i - \varphi_0 \cup \theta_i + \varphi_0 \leq \theta \leq \theta_{\max}\}$ 。

同理,通过改变选用的频点数  $M$ ,可以得到多个频点组合下的方向图函数,并根据(15)式选取使得  $MSLL_M$  最小的频点数目  $k$ :

$$k = \operatorname{argmin}_M (MSLL_M) \quad (15)$$

最后按照下式将选定的  $k$  个频点进行联合波束形成:

$$F_k(\theta) = \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^N e^{j 2\pi f_{m,k} / c d_n (\sin\theta - \sin\theta_0)} \quad (16)$$

由此可以实现对稀布阵列的脉组内捷变频联合波束形成。

## 2.3 结合遗传算法的脉组内捷变频联合波束形成

对于均匀线阵,脉组内捷变频联合波束形成方法对于降低方向图的旁瓣电平具有一定效果,但对于稀布线阵而言效果仍不足。在确定适用的频段及频点数后,结合遗传算法对稀布线阵进一步优化,优化后的阵元布局,具有更低的旁瓣电平。方向图的最大旁瓣电平 ( $MSLL_{ii}$ ) 可以表示为:

$$MSLL_{ii} = \max_{\varphi \in S} \{F_{dB}(\theta, f_{ik}, \theta_{ii})\} = \max_{\varphi \in S} \left\{ \left| \frac{\sum_{i=1}^k F(\theta, f_{ik}, \theta_{ii})}{\max \left( \sum_{i=1}^k F(\theta, f_{ik}, \theta_{ii}) \right)} \right| \right\} \quad (17)$$

其中:  $\theta_{ii}$  为波束指向,  $f_{ik}$  为确定的  $k$  个频点中第  $i$  个频点,  $S$  为线阵方向图的旁瓣区间,  $F_{dB}(\theta)$  为归一化的方向图函数。

遗传算法通过设置适应度函数对种群进行多次的迭代优化,从而可以得到更优良的子代。本文中适应度函数定义为使阵列在指定的若干个指向中形成的方向图的最大旁瓣最小。因此遗传算法的适应度函数可定义为:

$$\begin{aligned} fitness &= \min_x [\max(MSLL_{ii})] \\ ii &= 1, 2, 3 \dots \end{aligned} \quad (18)$$

其中:  $x$  为阵元位置,设定遗传算法的约束条件为:保证优化后阵列孔径不变,且相邻阵元间距不小于指定距离。由此适应度函数进行优化后的阵列,可得到具有更低旁瓣的方向图。

## 3 仿真与分析

本章先后对稀布线阵及面阵进行仿真,结果验证了本文方法对于降低广域稀布雷达阵列的旁瓣具有较好的效果。

### 3.1 广域稀布线阵

设定如下直线阵列,阵元数  $N=20$ , 工作频率  $f=2.3$  GHz, 孔径为 1 900 m, 波束指向为  $0^\circ$ , 当阵列均匀分布时,即阵元间距  $d=100$  m, 阵列方向图如图 3 所示。

根据仿真结果可以看出对于阵元间距远大于半倍波长的均匀线阵,阵元间互耦效应十分明显,方向图中产生了大量高旁瓣。

对此均匀线阵,分别选取  $2 \sim 2.2$  GHz,  $2 \sim 2.4$  GHz,  $2 \sim 2.6$  GHz,  $2 \sim 2.8$  GHz,  $2 \sim 3$  GHz 五个频段下的  $2 \sim 10$  个频点,进行脉组内捷变频联合波束形成仿真,部分仿真结果如下。

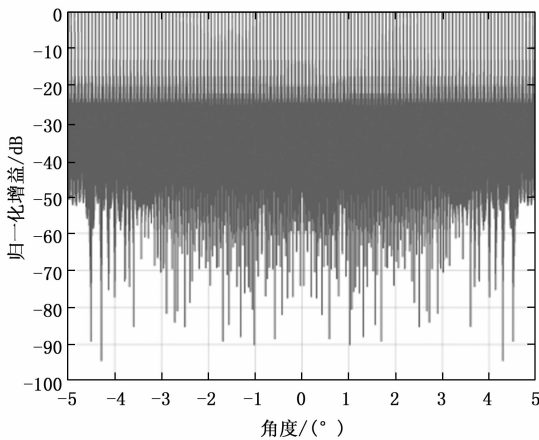


图 3 均匀直线阵列方向图

1) 在 2~2.4 GHz 频段下, 3、7、10 个频点联合波束形成的方向图如图 4 所示。

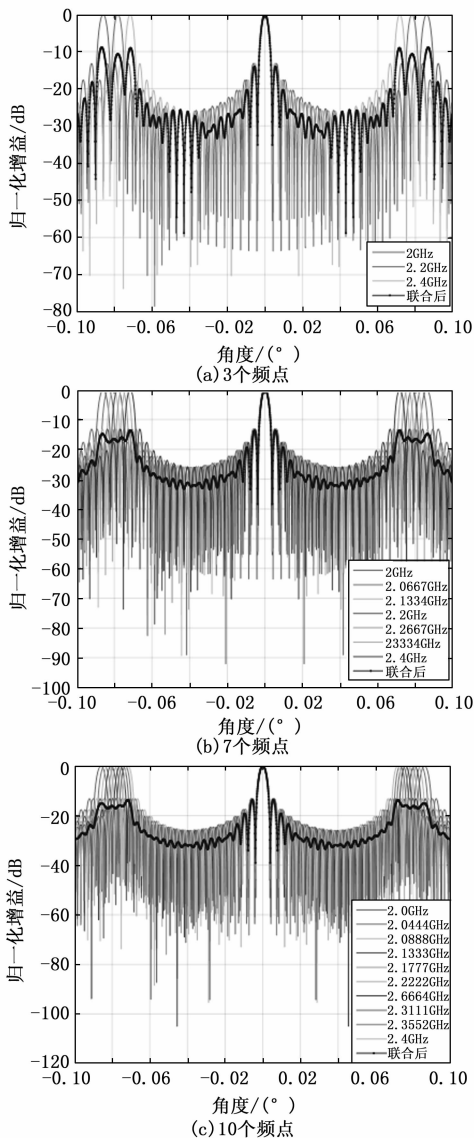


图 4 2~2.4 GHz 频段下 3、7、10 个频点联合波束形成方向图

由仿真可以看到, 联合波束形成后方向图中不存在和主瓣相同增益的旁瓣, 经过 3 个频点的联合波束形成, 阵列方向图中最大旁瓣降低为 -8.95 dB, 经过 7 个频点的联合波束形成, 阵列方向图中最大旁瓣降低为 -13.71 dB, 经过 10 个频点的联合波束形成, 阵列方向图中最大旁瓣降低为 -13.89 dB。由此可以初步得到结论: 进行联合波束形成所采用的频点数越多, 旁瓣降低的效果越好。

2) 不同频段下的不同频点联合后的最大旁瓣电平如图 5 所示。

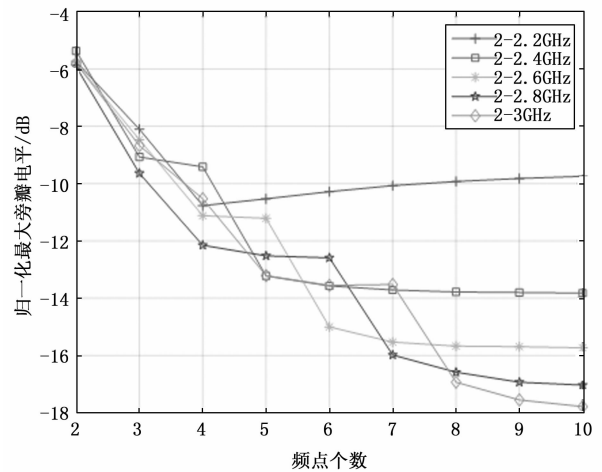


图 5 不同频段不同频点联合后的最大旁瓣电平

由仿真结果可以看到:

1) 联合波束形成能达到的最好的降低旁瓣的效果会随着频带宽度的增大而增大。

2) 对于所有频段, 当使用的频点数较少时, 其旁瓣降低的效果相近, 这是因为各频点方向图的旁瓣间距离较大, 难以产生较好的联合效果。

3) 在每个频段下, 联合波束形成后旁瓣降低的效果都随着频点数的增大而增大, 并逐渐达到一个上限, 当进行联合的频点达到一定数量后, 再继续增加频点数, 降低旁瓣电平的效果将不再明显。这是因为当频点数较多时, 各频点方向图的旁瓣间距较小, 且对于高频部分将变得较为密集, 使联合效果降低。因此, 对于频带宽度的选择而言, 小的频带宽度效果较差, 大的频带宽度虽然效果优良, 但是实施难度也会增加; 对于频点数的选择而言, 频点数少旁瓣降低的效果差; 频点数过多, 会增加较大的计算量, 故应选取能够达到上限的最小频点数。

经比较, 选择 2~2.4 GHz 频段下的 7 个频点与遗传算法相结合并进行仿真, 优化前的方向图如图 6 所示。

可以看到距主瓣较远处仍存在较高的旁瓣, 在  $[-9^\circ, 9^\circ]$  的范围内最大旁瓣电平为 -7.76 dB。对于遗传算法, 优化的约束为保证阵列孔径不变, 即阵列首尾都要有阵元, 优化后阵元最小间隔不小于 1 m, 在  $[-20^\circ, 20^\circ]$  的扫描范围内, 保证在  $[-9^\circ, 9^\circ]$  的范围内以  $3^\circ$  的间隔, 使所

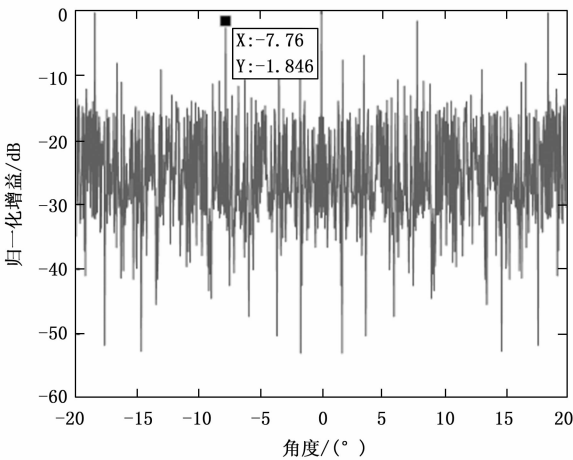


图 6 7 频点联合波束形成后的方向图

有指向中最大的旁瓣电平最小。优化后的阵列方向图如图 7 所示。

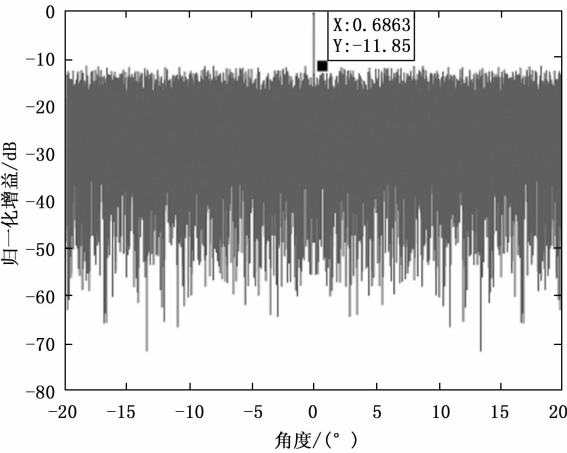


图 7 结合遗传算法的脉组内捷变频联合波束形成的方向图

由仿真结果可以看到，两种方法优化后，在  $[-9^{\circ}, 9^{\circ}]$  的空域范围内，最大旁瓣电平从  $-7.76\text{ dB}$  进一步降低为  $-11.85\text{ dB}$ ，降低了  $4.09\text{ dB}$ 。表 1 为前后两种方法的进行的对比结果。

表 1 两种方法优化后最大旁瓣电平比较(线阵)

算法	捷变频联合波束形成	捷变频联合波束形成+遗传算法
最大旁瓣电平/dB	-7.76	-11.85

3.2 广域稀布面阵

由 3.1 中仿真结果可以看到本文方法对于线阵具有较好的效果，由于面阵原理与线阵原理相似，在此将本文方法直接应用于稀布面阵中。

设定如下稀布面阵，阵列孔径  $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ ，工作频率  $f=2.3\text{ GHz}$ ，阵元数  $N=100$ ，波束指向为  $(0^{\circ}, 0^{\circ})$  如图

8 为  $10 \times 10$  均匀布置时的方向图。

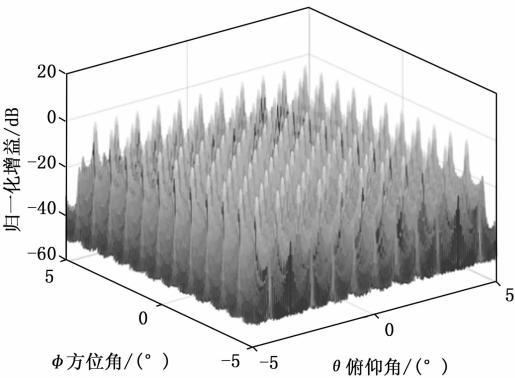


图 8 均匀面阵方向图

可以看到对于阵元间隔远大于半倍波长的均匀面阵，方向图中同样产生大量高旁瓣。

对于均匀面阵，同样选取  $2 \sim 2.2\text{ GHz}$ ， $2 \sim 2.4\text{ GHz}$ ， $2 \sim 2.6\text{ GHz}$ ， $2 \sim 2.8\text{ GHz}$ ， $2 \sim 3\text{ GHz}$  五个频段下的  $2 \sim 10$  个频点，进行联合波束形成仿真，仿真结果如下（对均匀面阵，方位向和俯仰向的结果相同，故只展示方位向的结果）。

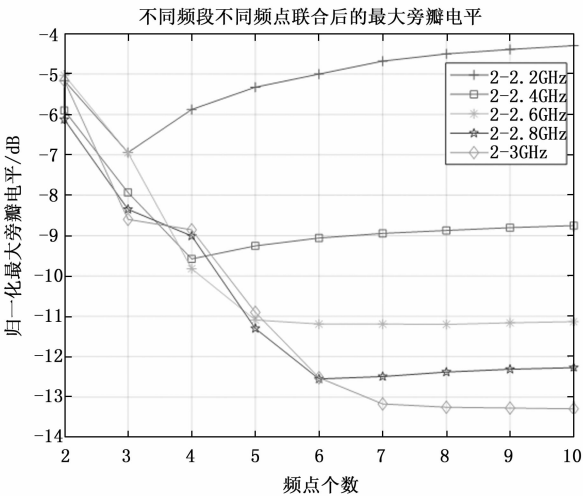


图 9 不同频段不同频点联合后的最大旁瓣电平（方位向）

由仿真可以看到结论和 3.1 节中均匀线阵基本一致。

本节选择  $2 \sim 2.6\text{ GHz}$  频段下的 6 个频点，结合遗传算法对平面阵列进行优化，其中遗传算法优化的约束为保证阵列孔径不变，即阵列 4 个角都要有阵元，优化后阵元最小间隔不小于，在方位向及俯仰向的  $[-20^{\circ}, 20^{\circ}]$  的扫描范围内，保证在  $[-9^{\circ}, 9^{\circ}]$  的范围内以  $3^{\circ}$  的间隔，使所有指向中最大的旁瓣电平最小。优化后的阵列方向图的仿真结果如图 10 所示。

由仿真结果可以看到优化后方位向的最大旁瓣降低为  $-14.18\text{ dB}$ ，俯仰向的最大旁瓣电平降低为  $-14.73\text{ dB}$ 。

由稀布线阵及面阵的仿真结果可以得出结论：通过将

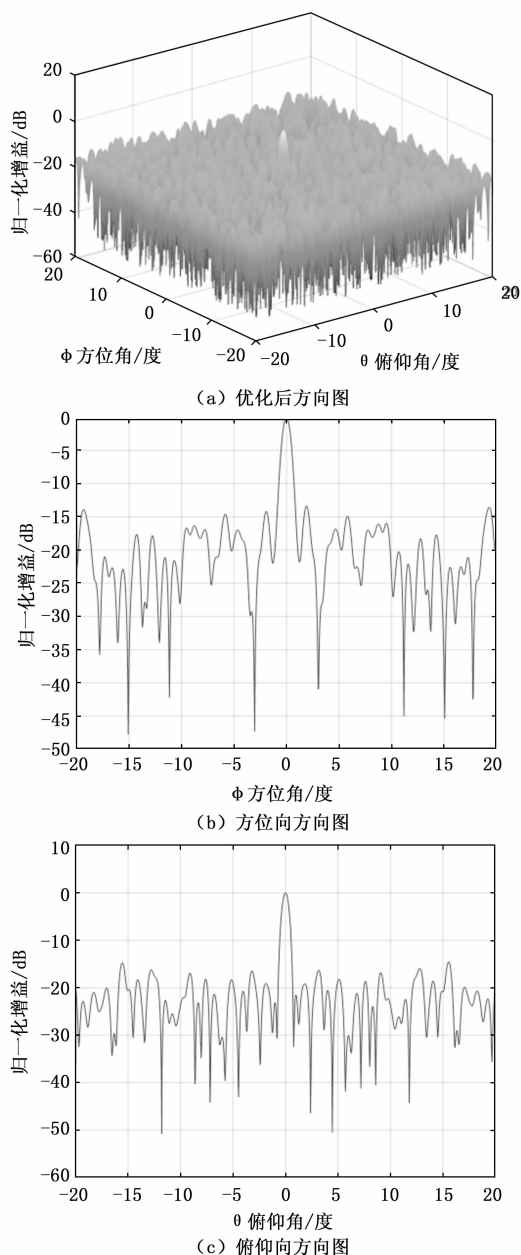


图10 结合遗传算法的脉组内捷变频联合波束形成的方向图

脉组内捷变频联合波束形成方法和遗传算法相结合,可以有效的降低广域稀布阵列方向图旁瓣电平。

#### 4 结束语

针对广域稀布雷达阵列方向图会产生大量高旁瓣的问题,本文提出一种结合遗传算法的广域稀布阵列脉组内捷变频联合波束形成方法。首先在一定带宽,一定频点范围内,选择合适的频点组合,并结合遗传算法,通过约束阵列孔径,最小阵元间距,并通过多个指向对适应度函数进行设置进行优化。仿真结果表明,本文方法可以保证广域稀布雷达阵列在满足自身的强抗干扰能力的同时,也能获

得低旁瓣的方向图,对广域稀布雷达低旁瓣的波束形成方法具有一定参考意义。对于如何选择合适的频点数及更好的联合方式将是下一步的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] 鲁耀兵,高红卫,周宝亮. 分布式孔径相参合成雷达技术[J]. 雷达学报, 2017, 6 (1): 55-64.
- [2] 鲁耀兵,张履谦,周荫清,等. 分布式阵列相参合成雷达技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (8): 1657-1662.
- [3] 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 (7): 700-704.
- [4] YANG X, LI Y, LIU F, et al. Antenna position optimization method based on adaptive genetic algorithm with self-supervised differential operator for distributed coherent aperture radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2021, 15 (7): 677-685.
- [5] 郑志东,张剑云. MIMO 雷达波束方向图及其旁瓣抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32 (2): 287-290.
- [6] 殷洪沛,叶素珍,林桂道,等. 超宽带相控阵天线的低副瓣设计[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32 (1): 81-84.
- [7] 张筱,魏钰洁,姬伟杰,等. 基于改进粒子群算法的 MIMO 雷达布阵优化[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38 (5): 75-78.
- [8] 赵麟,高申伟,蔚保国,等. 一种低副瓣阵列天线指数幅度加权算法及仿真[J]. 无线电通信技术, 2015, 41 (2): 38-40.
- [9] 王新宽,王桂宝,贾建科. 一种低副瓣稀布阵列天线的方向图综合算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31 (5): 641-648.
- [10] 秦自立,杨冠,王方力,等. 改进遗传算法优化 MIMO 稀布阵列[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19 (3): 442-447.
- [11] 包子阳,余继周. 基于 MATLAB 的遗传算法及其在稀布阵列天线中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [12] 冯晶晶,陈祝明,江朝抒. 非均匀分布式星载雷达栅瓣抑制技术[J]. 现代雷达, 2010, 32 (4): 50-53.
- [13] SRINIVAS M, PARTNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1994, 24 (4): 656-667.
- [14] 陈客松. 稀布天线阵列的优化布阵技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [15] 张小飞,李建峰,徐大专,等. 阵列信号处理及 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [16] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [17] HOLLAND J H. Adaption in natural and artificial systems[M]. Ann Arbor: University of Michigan press, 1975.
- [18] 包子阳,余继周. 智能优化算法及其 MATLAB 实例(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [19] 梁旭,黄明,宁涛,等. 现代智能优化混合算法及其应用(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [20] 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.