

# 大型阵列降维-和差多波束形成的联合优化算法

孙晨伟<sup>1</sup>,陶海红<sup>1</sup>,王莹<sup>1</sup>,吕红丽<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室,陕西西安 710071;

2. 中国电子科技集团公司西安导航技术研究所,陕西西安 710068)

**摘要:** 大型、超大型相控阵列由于具有高增益、指向性强等优点得到越来越广泛的应用,数字波束形成具有抗干扰、波束切换灵活等优点,而基于大型全阵列数字波束形成需要庞大馈电网络与接收/发射通道而面临高成本、低实时性等缺点.针对此,本文提出了一种用于大型阵列的阵列降维-和差数字多波束形成的联合优化算法,该算法对大型阵列采用模拟和数字联合和差多波束形成,通过基于模拟退火、遗传算法和粒子群智能优化算法的子阵划分优化和子阵级与阵元级的和差联合加权逼近优化,保证在模拟子阵方向图内无栅瓣的同时,获得尽可能好的和差波束主副比及差波束零陷深度,且增益损失较小.最后仿真实验和性能分析验证了所提算法的有效性和可行性.

**关键词:** 大型、超大型阵列; 阵列降维; 智能优化算法; 和差多波束联合优化

**中图分类号:** TN957.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013)03-0519-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.017

## Dimensionality Reduction of Large Scale Phased Array-Joint Optimization of Sum and Difference Multiple Beams

SUN Chen-wei<sup>1</sup>, TAO Hai-hong<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, LÜ Hong-li<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Xi'an Research Institute of Navigation Technology of CETC, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

**Abstract:** Large and ultra large scale phased arrays have been more and more widely applied because of its high gain and directiveness in the desired directions. However, the enormous feed networks and receiving/transmitter channels, required by digital beam-forming for the whole array, need huge cost and have poor real time. A novel algorithm, optimized for both subarray division and synthesis subarray weighting of sum and difference patterns, is proposed in the paper, in order to avoid grating lobes and acquire lower sidelobe, deep null of difference patterns and fewer cost of beam gain. The simulation results and performance analysis are given to demonstrate the effectiveness and feasibility of the presented algorithm.

**Key words:** large and ultra-large scale phased array; subarray division; intelligent optimization algorithm; joint optimization of sum and difference multi beams

### 1 引言

现今数字波束形成技术多采用阵元数目较多的大型阵列波束形成技术,一般含有几百、几千乃至上万个阵元<sup>[1]</sup>.大型、超大型相控阵雷达应用于各类空间卫星、航天飞行器和战略弹道导弹的监视、跟踪等<sup>[2]</sup>.例如美国的“铺路爪”(Pave Paws)雷达,由两个圆形平面天线阵构成,每个阵面由2000个阵元组成<sup>[3]</sup>.针对阵元数过多造成的应用实时性、成本过高和硬件实现困难的问题,

现在普遍采用直接模拟合成和模拟、数字分级波束形成的方法,分级波束形成即在阵元级模拟加权,子阵级数字多波束加权,多波束指向均限制在阵元级模拟波束主瓣范围内.此方法极大程度上减少了接收/发射通道数和馈电网络的使用,降低硬件成本与工程实现的难度,同时保持了原有天线的孔径,对空间增益的损失较少,且保证了角度分辨率.

均匀划分的阵列方向图会出现栅瓣<sup>[5]</sup>,子阵不均匀划分结构的设计能够打破均匀划分子阵等效相位中心

的均匀排布性,从而克服栅瓣的形成.在常规的波束形成中,基于子阵级与阵元级的联合方向图最好的逼近全阵波束形成方向图的思想,通常选取以下两种准则设计最优子阵划分的目标函数<sup>[6]</sup>:一类是优化后合成方向图的某些性能参数的优劣,例如优化方向图主副比或者优化波束宽度;另一类是权矢量逼近的误差大小,当子阵划分后的两级权值与全阵理想加权的误差越小,所得方向图也就越逼近期望方向图.本文中首先按照第一准则优化非均匀子阵的划分,在此基础上根据第二条准则优化子阵的和差加权. M. Alvarez-Folgueiras 与 J. Rodriguez-Gonzales 提出基于模拟退火算法的非均匀线阵的权值优化,并随后提出基于遗传算法的优化方法<sup>[7]</sup>;在前人成果的基础上, Andrea F. Morabito 与 Paolo Rocca 提出以主副比与主瓣宽度等性能参数加权最优为准则的非均匀线阵和差波束的联合迭代优化<sup>[8]</sup>. Siddharth Pal 提出用多目标优化算法得到最优子阵分布与和差波束最大主副比及波束宽度<sup>[9]</sup>.以上波束形成方向图与权值的优化仅限于线阵,工程应用性不够广泛.

本文利用粒子群优化算法优化给定阵列的二级子阵划分,继而优化子阵级与阵元级的联合和差加权,使之最大程度逼近全阵的最优加权.最后给出了仿真实验和性能分析.

## 2 大型阵列模型

平面阵模型如图 1 所示,以原点为参考点,设阵元

位置为  $(x_k, y_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ),  $N$  为阵元数,信号方向的方位角、俯仰角为  $(\varphi_i, \theta_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ),  $M$  为信号源个数.均匀面阵的阵列流形为:

$$\mathbf{a}(\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}) = [e^{-j\omega_0\tau_1}, e^{-j\omega_0\tau_2}, \dots, e^{-j\omega_0\tau_N}]^T \quad (1)$$

其中,  $\tau_k = ((k-1)d\sin\varphi\sin\theta + (i-1)d\cos\varphi\sin\theta)/c$  为阵元间时延,  $d$  为阵元间距,  $\omega_0$  为信号的角频率.在窄带远场信号假设下,阵元接收信号的  $N \times 1$  维快拍数据矢量为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{S}(t)$  为空间信号包络的  $M \times 1$  维矢量,  $\mathbf{N}(t)$  为  $N \times 1$  维噪声矢量,  $\mathbf{A}$  为阵列的  $N \times M$  维流型矩阵,表示为:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1(\omega_0) \quad \mathbf{a}_2(\omega_0) \quad \dots \quad \mathbf{a}_M(\omega_0)] \quad (3)$$

在雷达系统中,对和差波束的低旁瓣要求是最基础且最重要的.通常采用 Taylor/Byliss 权函数加权得到低旁瓣的和差波束<sup>[10]</sup>, Taylor 加权得到和波束, Bayliss 加权得到差波束.本文采用的和差波束形成网络如图 2 所示.

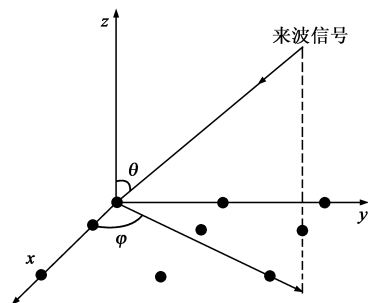


图1 平面阵模型

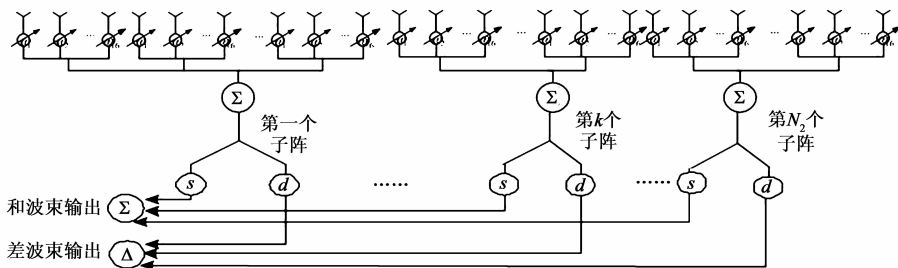


图2 和差波束形成网络图

和差波束的方向图可表示为:

$$\mathbf{F}_{\text{sum}}(\varphi, \theta) = (\mathbf{T}^H \mathbf{a}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}))^H \mathbf{W}_{\text{tay}} \odot \mathbf{W} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{\text{diff}}(\varphi, \theta) = (\mathbf{T}^H \mathbf{a}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}))^H \mathbf{W}_{\text{byl}} \odot \mathbf{W}$$

式(4)中,  $\mathbf{T}$  为  $N_1 \times N_2$  维的降维矩阵,通过粒子群算法优化后获得,  $N_1$  为阵列均匀划分后第一级子阵的个数,  $N_2$  为降维后最终的二级子阵个数;  $\mathbf{W}_{\text{tay}}$ 、 $\mathbf{W}_{\text{byl}}$  分别为二级子阵和差加权,即 Taylor、Byliss 加权,  $\mathbf{W}$  为阵元级加权.

本文中拟采用的大型天线阵面的辐射单元采用矩阵排列方式,单元间距为:  $dx = 0.1\text{m}$ ,  $dy = 0.08\text{m}$ .方位方向最大单元数为 64,俯仰方向最大单元数为 60.整个阵面共有 3840 个辐射单元.阵列排布方式如图 3 所示.

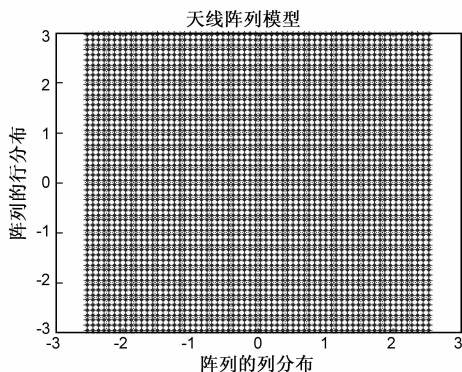


图3 大型天线阵列阵元排布

### 3 基于粒子群算法的阵型优化算法

粒子群优化算法是一种基于群体智能的优化算法<sup>[11]</sup>. 设在一个  $n$  维空间中, 由  $m$  个粒子构成种群,  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_m\}$ , 其中第  $i$  个粒子的位置为  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ , 每个  $\mathbf{x}_i$  都是一个候选解, 其速度为  $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ , 维数  $n$  表示需要优化变量的个数. 粒子的个体极值为  $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ , 种群的全局极值为  $\mathbf{p}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ , 根据上述追随最优粒子的原理, 粒子  $\mathbf{x}_i$  将按照式(5)改变其速度和位置:

$$\begin{aligned} v_{id}^{(t+1)} &= v_{id}^{(t)} + c_1 r_1 (p_{id}^{(t)} - x_{id}^{(t)}) + c_2 r_2 (p_{gd}^{(t)} - x_{id}^{(t)}) \\ x_{id}^{(t+1)} &= x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $d = 1, 2, \dots, n$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为种群规模,  $t$  为当前进化代数,  $r_1$  和  $r_2$  均为分布于  $[0, 1]$  间的随机数,  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子或加速常数.

针对本文问题, 由于阵列规模较大, 首先将阵列均匀划分为构成阵元数相等的一级子阵, 然后通过优化算法确定二级子阵的划分合成方式. 在优化算法的进化过程中, 对适应度函数的评价是进行进化操作的依据, 同时与算法的迭代终止条件和问题约束条件的处理等也有一定的关系. 因此根据求解问题本身的要求进行适应度函数设计. 本文选波束主副比和半功率波束宽度倒数值的加权和为适应度函数, 可表示为:

$$\text{Fitness} = w_1 \cdot \text{Psl} + w_2 \cdot 1/\text{Bwid\_ele} + w_3 \cdot 1/\text{Bwid\_azi} \quad (6)$$

其中 Fitness 表示用优化算法进行子阵划分时候的评价函数, Psl 表示和波束的主副比, Bwid\_ele 表示主波束俯仰维的波束宽度, Bwid\_azi 表示主波束方位维的波束宽度. 本文子阵划分中优先考虑阵列合成方向图中的波束主副比, 同时在优化过程中加和的三个部分的值须处在同一个数量级上, 故上式中权值的设置为  $w_1 = 0.6$ ,  $w_2 = w_3 = 0.2$ . 根据设定的适应度函数, 选取迭代完成后最大的适应度值对应的最优个体, 即得到优化后的降维矩阵  $\mathbf{T}$ .

粒子群优化参数中初速度选择不能太大, 否则将使得在粒子即子阵中的个数每代进行更新时下一代的子阵数必大于前一代的子阵数, 不符合实际情况且无法遍历解空间. 常量  $c_1$  和  $c_2$  不能选择太小, 否则总为正值的第一项将主要影响更新速度, 综上考虑, 优化参数分别设定为  $v_{\max} = 2$  (初始化速度在  $[-v_{\max}, v_{\max}]$  范围内随机产生);  $c_1 = 2$ ;  $c_2 = 2$ .

### 4 降维后大型阵列的和差波束联合优化算法

降维后阵列子阵级上加 30dB 的 Taylor 权与 32dB 的 Bayliss 权. 设定全阵参考和差波束加权为  $\mathbf{W}_{\text{sum0}}$ 、 $\mathbf{W}_{\text{diff0}}$ ,

第二级子阵与第一级子阵和差加权分别为  $\mathbf{W}_{\text{sub2\_sum}}$ 、 $\mathbf{W}_{\text{sub2\_diff}}$  和  $\mathbf{W}_{\text{sub1\_sum}}$ 、 $\mathbf{W}_{\text{sub1\_diff}}$ , 阵元级的和差加权为  $\mathbf{W}_{\text{ele}}$ . 优化子阵的和差加权, 使和差波束等效联合阵元级加权与参考全阵的和差加权误差尽可能小, 数学公式表述为:

$$\min_{\mathbf{W}_{\text{sub\_diff}}, \mathbf{W}_{\text{sub\_sum}}, \mathbf{W}_{\text{ele}}} \left\{ \begin{aligned} &\left\| \mathbf{W}_{\text{sub2\_sum}} \odot \mathbf{W}_{\text{sub1\_sum}} \odot \mathbf{W}_{\text{ele}} - \mathbf{W}_{\text{sum0}} \right\| \\ &\left\| \mathbf{W}_{\text{sub2\_diff}} \odot \mathbf{W}_{\text{sub1\_diff}} \odot \mathbf{W}_{\text{ele}} - \mathbf{W}_{\text{diff0}} \right\| \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中,  $\|\cdot\|$  表示矢量的 2 范数. 可以通过引入权重系数将多目标优化转化为单目标优化, 同时由于阵元级衰减器不能放大, 须加入约束条件, 式(7)变为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{W}_{\text{sub\_diff}}, \mathbf{W}_{\text{sub\_sum}}, \mathbf{W}_{\text{ele}}} \quad &\lambda_s \left\| \mathbf{W}_{\text{sub2\_sum}} \odot \mathbf{W}_{\text{sub1\_sum}} \odot \mathbf{W}_{\text{ele}} - \mathbf{W}_{\text{sum0}} \right\|^2 \\ &+ \lambda_d \left\| \mathbf{W}_{\text{sub2\_diff}} \odot \mathbf{W}_{\text{sub1\_diff}} \odot \mathbf{W}_{\text{ele}} - \mathbf{W}_{\text{diff0}} \right\|^2, \\ \text{s.t.} \quad &\left\| \mathbf{W}_{\text{ele}} \right\|_{\infty} \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\lambda_s$  与  $\lambda_d$  表示和差加权重, 且  $\lambda_s + \lambda_d = 1$ ;  $\|\cdot\|_{\infty}$  表示矢量的  $\infty$  范数; 该公式表示在子阵划分给定下优化子阵级与阵元级联合加权, 使之逼近全阵参考加权. 调整权重  $\lambda_s$ 、 $\lambda_d$  的值, 即改变了待优化的和差加权误差的比重, 最终加权所得和差波束方向图与理想加权下方向图的逼近程度随之改变. 增大和波束加权重  $\lambda_s$ , 可增加加权逼近优化后和波束的主副比, 同时会降低差波束主副比, 反之亦然.

在式(8)中, 权值求解不是凸优化问题, 但在平面阵的  $1/4$  阵面上述权值均为正实数, 因此可通过对公式的对数变化处理, 权值的优化问题可理解为窗函数的逼近问题, 式(8)转换为和差加权的凸优化, 同时为防止某一阵元的衰减过大, 加入阵元级加权的最大衰减的约束. 如式(9)所示:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{W}_{\text{sub\_diff}}, \mathbf{W}_{\text{sub\_sum}}, \mathbf{W}_{\text{ele}}} \quad &\lambda_s \left\| \mathbf{W}_{\text{sub2\_sum}} + \mathbf{W}_{\text{sub1\_sum}} + \mathbf{W}_{\text{ele}} - \mathbf{W}_{\text{sum0}} \right\|^2 \\ &+ \lambda_d \left\| \mathbf{W}_{\text{sub2\_diff}} + \mathbf{W}_{\text{sub1\_diff}} + \mathbf{W}_{\text{ele}} - \mathbf{W}_{\text{diff0}} \right\|^2, \\ \text{s.t.} \quad &\alpha \leq \mathbf{W}_{\text{ele}} \leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\alpha$  为阵元级衰减器的最大衰减.

### 5 仿真实验和性能分析

针对本文的大型阵列模型, 天线阵列中每  $4 \times 4$  个阵元构成一个子阵, 形成 240 个一级子阵, 子阵内阵元之间采用模拟加权, 该子阵每个单元具备一个衰减器. 第一级子阵再通过馈线网络组合成二级子阵, 馈线网络具备精度为 0.5dB 的衰减器. 二级子阵合成后送给接收机通道, 模数转换为数字信号后再进行数字波束形成. 中心频率 1GHz, 带宽 80MHz. 二次子阵的优化采用智能方法进行全局优化. 在划分好的子阵上进行阵元级和

子阵级的和差加权的联合优化,在约束条件下最大程度地逼近全阵参考加权.

### 5.1 阵列降维优化仿真实验和性能分析

阵列经第一次均匀划分后包含 240 个一级子阵,将每一列中参与某二级子阵构成的单元合成进行优化操作的个体,通过迭代优化选取满足最优适应度值,阵元级加主副比逼近 32dB 的 Taylor 窗.粒子群优化算法与遗传算法的种群数均为 15,最大进化代数数为 40.模拟退火算法操作基于个体,故最大迭代次数设置为 600 代.利用粒子群算法优化子阵划分结果如图 4 所示,得到二级子阵个数为 46.利用遗传算法与模拟退火算法进行子阵划分优化后,分别得到 60、74 个第二级子阵,利用粒子群算法优化后的二级子阵划分如图 4 所示.

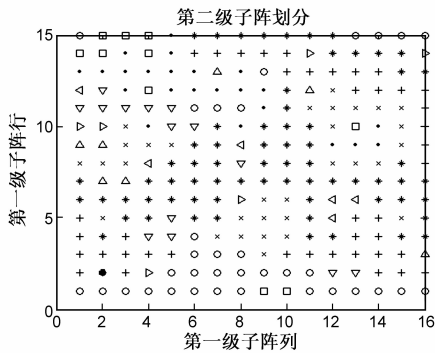


图4 基于粒子群算法的子阵优化

经粒子群算法优化后二级子阵与阵元合成方向图的主副比为 14.2088dB,波束宽度沿俯仰维和方位维均为  $4^\circ$ .图 5 为合成多波束总方向图、一级子阵与二级子阵的阵列方向图沿方位维的切面图.多波束的指向方位角、俯仰角分别为  $(-4,0)^\circ$ 、 $(0,0)^\circ$  和  $(4,0)^\circ$ ,阵元级、二级子阵及合成总方向图在图中均有所展示,可以看到优化后的波束扫描范围阵元级方向图主瓣内无栅瓣影响,经过方向图的合成,阵元级主瓣外的栅瓣被抑制.图 6 中多波束的指向方位角、俯仰角分别为  $(45,0)^\circ$ 、 $(50,0)^\circ$  和  $(55,0)^\circ$ ,通过不同波束指向的阵列合成方向图对比可知,当波束指向偏离法线较远时,形成波

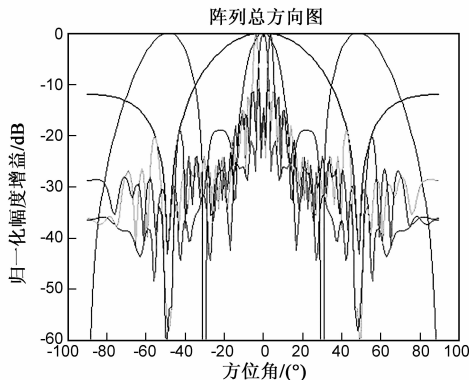


图5 阵列合成方向图(法线方向)

束的旁瓣升高,导致主副比下降,同时主波束宽度展宽.

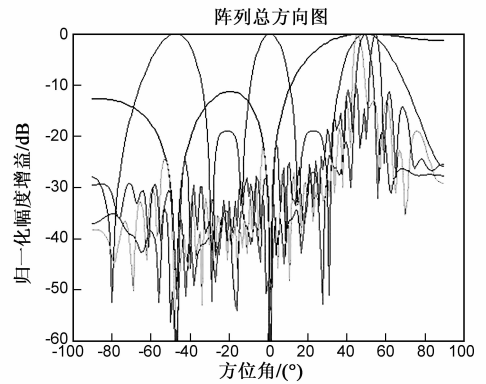


图6 阵列合成方向图(远离法线)

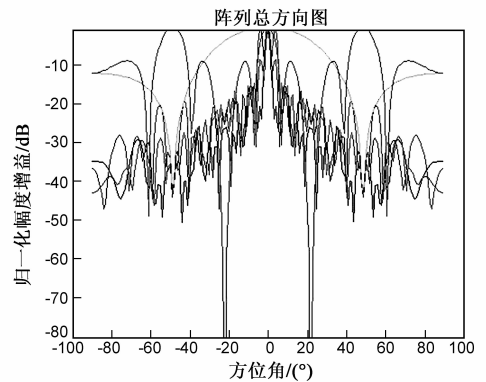


图7 基于遗传算法优化的阵列合成方向图

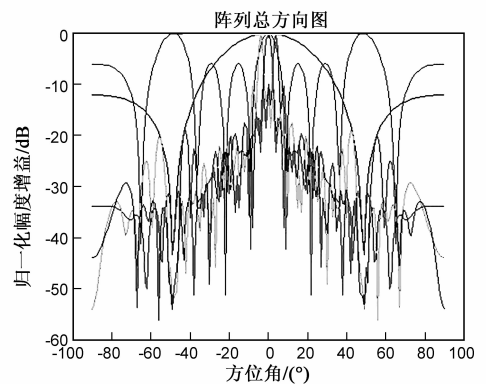


图8 基于模拟退火优化的阵列合成方向图

表 1 优化结果对比表

智能优化算法	波束宽度/ $^\circ$		主副比/dB	优化后子阵个数
	方位维	俯仰维		
模拟退火算法	4	4	12.3566	74
遗传算法	4	6	12.6075	60
粒子群优化算法	4	4	14.2088	46

通过仿真实验对比可知,粒子群优化算法优化后的二级子阵个数最少,更好节省硬件成本,降低系统实现难度.且阵列方向图的波束主副比和主波束宽度最优.本文提出基于粒子群优化的阵列算法实现复杂度

低,运行效率高,而且不会陷入局部最优.这是因为相比模拟退火算法,粒子群优化算法不是从某一个个体开始优化,而是从一个集合开始,从而提高了算法的全局搜索能力,降低陷入局部极小值的可能性.与遗传优化算法不同,粒子群优化算法应用没有交叉和变异运算,通过粒子速度改变位置完成搜索;粒子具有记忆性,粒子和全体的最优值可以记忆并传递给全部粒子;需要调整的参数较少,结构简单,从而易于实现;算法中采用实数编码,直接由问题解的变量数决定粒子的维数;算法收敛速度快,在进化过程中只有最优的粒子把信息传递给其他粒子,信息单向流动.

### 5.2 和差波束联合优化仿真实验和性能分析

如前所述,通过对阵列的线 Taylor 加权得到和波束,线 Byliss 加权得到差波束,权值十字相乘即可得平面阵的加权.固定阵元级加权,在第一级子阵上形成和差波束,使等效加权与线性 Taylor 和 Byliss 加权最大误差最小.在此基础上进行第二级子阵加权的逼近,使用第一级子阵的固定加权和第二级子阵的和差波束加权逼近第一级子阵的直接和差加权.和差加权分别逼近 32dB 的 Taylor 权和 30dB 的 Byliss 权.

改变和差加权的权重  $\lambda_s$ 、 $\lambda_d$ , 和差波束主副比也随之改变.设定  $\lambda_s + \lambda_d = 1$ , 且权重比值  $\lambda_s/\lambda_d$  为  $[1/10, 1/9, 1/8, 1/7, 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1:1:10]$ , 统计方向图和和差波束主副比.本文中优先考虑和波束的性能,设定  $\lambda_s = 5/6, \lambda_d = 1/6$ .在此权重下参考加权与优化加权的

阵面口径分布如图 9~11 所示.

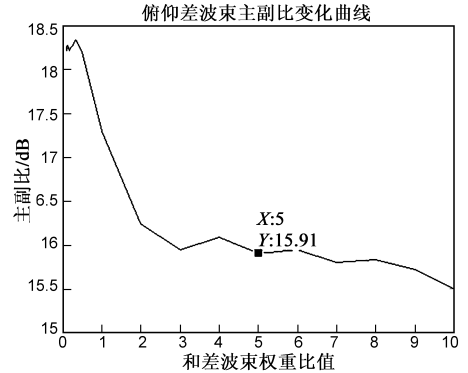


图10 俯仰差波束主副比随和差权重变化图

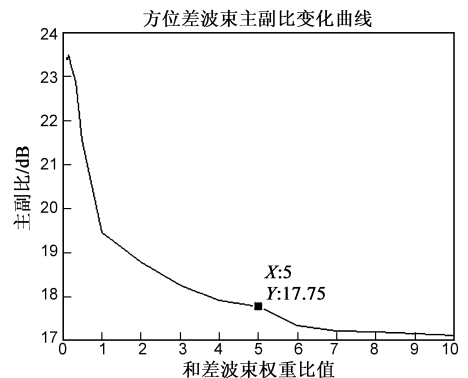


图11 方位差波束主副比随和差权重变化图

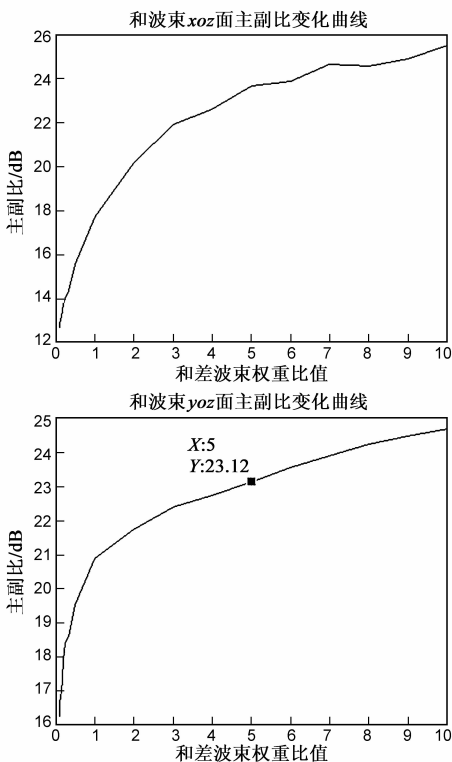


图9 和波束主副比随和差权重变化图

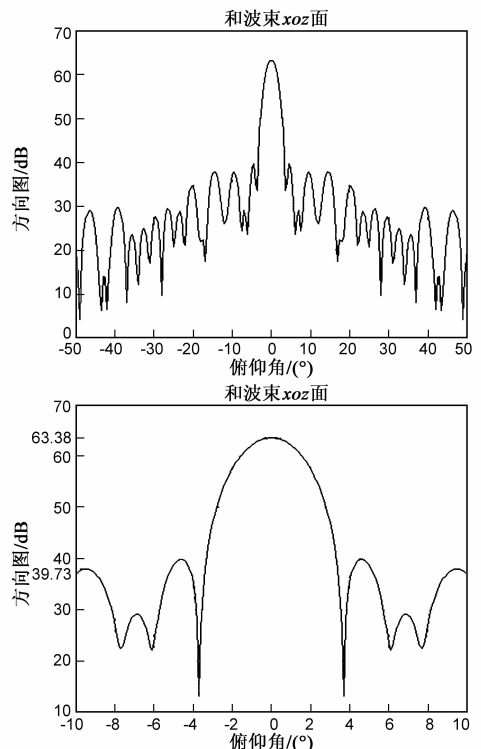


图12 等效加权下的和波束方向图(xoz面)

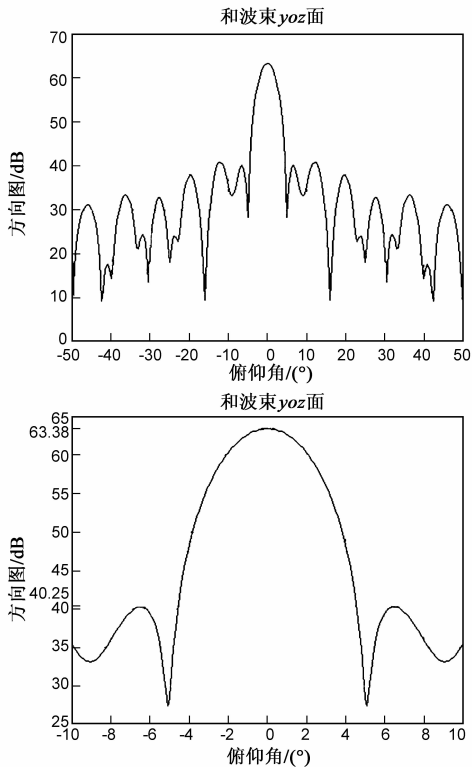


图13 等效加权下的和波束方向图(yoz面)

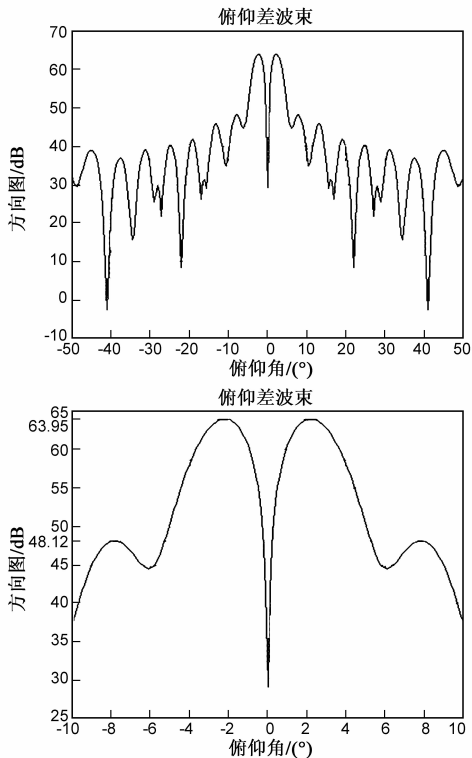


图14 等效加权下的俯仰差波束方向图

权值逼近形成和差波束方向图沿俯仰维与方位维的切面图如图 12~15 所示,扫描角度步长分别为  $0.5^\circ$

和  $0.1^\circ$ 。

由图可以看出,经权值逼近后可得到性能良好的和差波束方向图,具体性能参数见表 2。

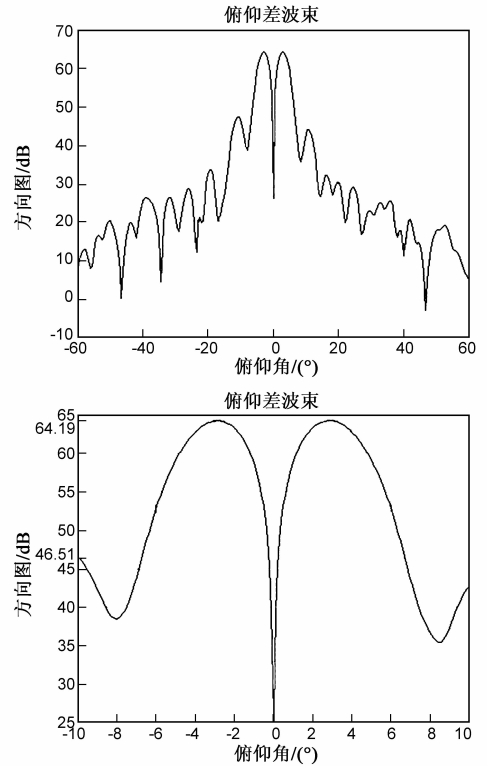


图15 等效加权下的方位差波束方向图

表 2 和差波束性能参数

波束类型	最大增益/dB	主副比/dB
和波束	63.38	23.65
俯仰差波束	63.95	15.91
方位差波束	64.19	17.75

和波束主副比较未进行权值优化前的方向图主副比 14.2088dB 明显增大,俯仰差与方位差波束方向图的零陷深度均大于 30dB,可满足利用鉴角曲线准确测向的要求.当目标信号偏离法线方向时,和差波束性能有所减退,但仍可满足测向指标要求。

## 6 总结

针对大型阵列的降维优化,本文给出了基于粒子群算法的子阵划分方法,与模拟退火和遗传算法的优化仿真实验结果对比证实,在同等算法仿真参数设定下,粒子群优化得到的子阵划分方式子阵规模小,子阵划分后天线的合成方向图性能参数主副比和半功率波束宽度更优.在给定子阵划分的基础上,建立了和差波束联合优化的数学模型,然后对阵元级和子阵级联合和差加权逼近优化以实现直接和差波束形成,获得

低旁瓣、低增益损失和差凹口深的和差波束。本文对非均匀划分的子阵进行了和差权值优化,子阵亦可形成自适应零点,在今后的工作和下一篇文章中将进行子阵自适应处理相关的论证和仿真。

#### 参考文献

- [1] 张光义. 共形相控阵天线的应用与关键技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 331 - 336.  
Zhang Guangyi. Applications and key technologies of conformal phased array antenna[J]. Journal of CAEIT. 2010, 5(4): 331 - 336. (in Chinese)
- [2] 熊子源, 徐振海, 等. 阵列雷达最优子阵划分研究[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(4): 370 - 376.  
Xiong Ziyuan, Xu Zhenhai, et al. A summary of optimum subarray partitioning problem in array radar[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(4): 370 - 376. (in Chinese)
- [3] Qiao Yongjie, Liu Jinrong, Bai Liping. Detection probability of early warning radar against hypersonic cruise missile[A]. International Conference on Radar [C]. Chengdu, China: IEEE, 2011. 1733 - 1736.
- [4] Benjamin Fuchs. Shaped beam synthesis of arbitrary arrays via linear programming[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2010, 9(6): 481 - 484.
- [5] 王文昌. 子阵级波束形成研究[D]. 四川成都: 电子科技大学. 2010.
- [6] 熊子源, 徐振海, 等. 基于聚类算法的最优子阵划分方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2615 - 2621.  
Xiong Ziyuan, Xu Zhenhai, et al. Research on the optimal subarray partition based on the clustering algorithm[J]. Acta Electronica Sinica. 2011, 39(11): 2615 - 2621. (in Chinese)
- [7] M Alvarez Folgueiras, J Rodriguez Gonzales, F Ares Pena. Optimal compromise in the channels of monopulse antennas: use of subarrays and distributions with common aperture tail[A]. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation[C]. Barcelona, Spain: IEEE, 2010. 1 - 4.

- [8] Andrea F Morabito, Paolo Rocca. Optimal synthesis of sum and difference patterns with arbitrary sidelobes subject to common [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, 2010, 9(7): 623 - 626.
- [9] Siddharth Pal, Aniruddha Basak, Swagatam Das, et al. Synthesis of difference patterns for monopulse antenna arrays-an evolutionary multi-objective optimization approach [J]. Lectures Notes in Computer Science, 2010, 6457: 504 - 513.
- [10] P Pocca, A F Morabito, T Isernia. Synthesis of arbitrary sidelobes sum and difference patterns with common excitation weights[A]. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)[C]. Toronto, Canada: IEEE, 2010. 1 - 4.
- [11] 吴晓军, 杨战中, 等. 均匀搜索粒子群算法[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1261 - 1266.  
Wu Xiaojun, Yang Zhanzhong, et al. A uniform searching particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1261 - 1266. (in Chinese)

#### 作者简介



孙晨伟 女, 1988 年生于山东济南, 西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室在读硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、智能优化算法在信号处理中的应用。

E-mail: sun\_chenwei@163.com



陶海红 女, 1976 年生于安徽省亳州市, 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室教授, 博士生导师, 从事信号与信息处理的研究与教学工作, 主要研究方向为阵型优化设计和自适应波束形成及智能方法在信号处理中的应用。