

基于改进遗传算法的天波超视距雷达二维阵列稀疏优化设计

严 韬* 陈建文 鲍 拯
(空军预警学院重点实验室 武汉 430019)

摘 要: 针对均匀矩形平面阵在 2 维阵天波超视距雷达(OTHR)工程应用时阵元数目庞大问题, 该文提出利用改进遗传算法进行稀疏优化设计的解决办法。从波束赋形角度出发建立了稀疏矩形平面阵的布阵优化模型; 以俯仰波束能分辨 OTHR 多模传播的波达角(DOA)为原则确定了遗传算法的初始种群; 为避免遗传进化中出现早熟和随机漫游现象修正了适应度函数; 为实现稀疏率精确控制改进了交叉和变异算子。仿真结果表明, 该文算法不仅实现了稀疏率的精确控制, 同时提高了优化性能。该文最后对 2 维稀疏阵列在 OTHR 工程应用时的可行性进行了分析, 指出其应用条件和存在的技术难点, 并给出了相应的解决方案。

关键词: 天波超视距雷达; 二维阵; 遗传算法; 峰值副瓣电平; 稀疏率

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)12-3014-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.02011

Optimization Design of Sparse 2-D Arrays for Over-The-Horizon Radar (OTHR) Based on Improved Genetic Algorithm

Yan Tao Chen Jian-wen Bao Zheng

(Key Research Laboratory, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: In light of the fact that enormous elements exist when applying the uniform rectangular planar array to skywave Over-The-Horizon Radar (OTHR), the sparse optimization approach of the uniform 2-D arrays using an improved genetic algorithm is proposed as follows: an optimal model for the sparse rectangular planar array is established from the view of beam shaping; initial population of the genetic algorithm is identified by elevation beam on the bases of the Direction-Of-Arrival (DOA) of multi-mode propagation echoes; the fitness function is revised for the purpose of avoiding early maturing and random walk; and both crossover and mutation operators are improved in order to achieve precise control of the sparsity ratio. Simulation results indicate that the precise control of the sparsity ratio and the optimized performance are obtained by using the improved genetic algorithm. Finally, the paper analyses the feasibility of 2-D arrays application into the OTHR engineering, indicates the conditions for application and existing technical challenges, and then presents the solutions accordingly.

Key words: Skywave Over-The-Horizon Radar (OTHR); 2-D arrays; Genetic Algorithm (GA); Peak SideLobe Level (PSLL); Sparsity ratio

1 引言

天波超视距雷达(Skywave Over-The-Horizon Radar, OTHR)的接收阵列采用宽口径大型 1 维相控阵天线, 方位上采用同时多窄波束实现与发射天线方位宽波束的空间同步, 俯仰上直接采用宽波束与发射天线俯仰宽波束同步^[1]。OTHR 的阵列结构保证了其具有较好的方位角分辨率和测向精度, 但缺乏俯仰波束控制能力, 在电离层多层结构下易使目标点迹产生“模式模糊”和“多径效应”, 对于与

检测目标回波同方位不同俯仰角度的空间干扰的抑制能力也较差, 制约了 OTHR 目标检测性能。针对上述问题, 基于 2 维阵列的新一代 OTHR 已成为雷达领域研究的热点之一, 美国把 2 维阵列结构列入了其“下一代天波(Next Generation OTHR, NGOTHR)”计划^[2], 法国成功研制并装备了一部单基地 2 维阵天波雷达, 即 Nostradamus 雷达^[3], 澳大利亚利用 JORN 系统^[4]展开了大量 2 维阵天波雷达的试验论证, 文献^[5]指出 2 维阵列 OTHR 具有解决多模多径传播问题、提高抗干扰性能, 以及改善测高精度等优点。

2 维阵列天线在微波雷达领域的应用已十分成熟, 其在 OTHR 的应用呈现出新的特点^[6], 如果在

2013-12-23 收到, 2014-05-23 改回

国家自然科学基金(61072132)资助课题

*通信作者: 严韬 yantaokjld@163.com

庞大的 OTHR 接收阵列孔径上直接进行 2 维布阵, 则意味着上万个阵元及相应的附属设备, 雷达成本高且难以实现。一种有效解决上述问题的方法是采取 2 维稀疏分布阵列。阵列稀疏优化的方法很多, 主要可以分为两大类: (1)解析类方法。文献[7]基于阵列因子与激励之间存在的傅里叶变换关系利用迭代 FFT 算法对平面阵进行稀疏优化, 文献[8]和文献[9]分别利用矩阵束方法和增广矩阵束方法对可分离型分布的平面阵列和不可分离型分布的平面阵进行优化设计。(2)智能优化算法。文献[10,11]研究了遗传算法及其改进算法在阵列稀疏设计中的应用, 文献[12]利用模拟退火算法设计对称稀疏平面阵, 文献[13]利用改进的免疫算法优化矩形平面稀疏阵列, 文献[14]指出经模拟退火算法优化后的平面稀疏阵列比经粒子群算法优化后的平面稀疏阵列更能够有效地抑制副瓣。

总的来说, 解析类算法具有运算量小、易实现的优点, 但其通用性较差, 例如迭代 FFT 算法仅适用于阵元按矩形栅格或三角栅格均匀分布的平面阵列天线的稀疏优化, 而矩阵束(或增广矩阵束)方法的稀疏率不能实现精确控制。智能优化算法通用性强, 更适合解决阵列优化这类多变量、多约束、非线性全局优化问题。鉴于遗传算法是目前应用最广、最受研究者关注的智能优化算法, 本文从波束赋形的角度出发, 采用改进的遗传算法对均匀矩形平面阵的阵元位置进行稀疏优化, 寻求适合 OTHR 工程应用的 2 维阵列。

2 稀疏 2 维阵列布阵优化模型

在均匀矩形栅格平面阵内按一定比例对阵元进行抽取从而构成稀疏矩形栅格平面阵, 其边界形状可以是矩形、圆形、三角形等各种 2 维形状, 本文主要研究矩形边界的稀疏平面阵。在此方面, 现有文献多采用对称性稀疏建模^[8-10,12-14], 通过压缩解空间来降低运算量, 但不能保证在整个阵列孔径内取得最优的稀疏布局。本文采用非对称结构建模, 以孔径边缘为坐标原点建立坐标系, 阵面法线方向为 z 轴, 如图 1 所示。假设整个矩形栅格孔径大小为 $N_x \times N_y$, 其在 x 方向和 y 方向的间距分别为 d_x 和 d_y , 观察方向与阵面法线方向的夹角为 θ , 观察方向在 xoy 平面的投影与 x 轴的夹角为 φ 。定义稀疏率为

$$\eta = 1 - N_0 / (N_x \times N_y) \quad (1)$$

式中 N_0 表示栅格中放置阵元的个数。对栅格位置进行顺序编号, 坐标原点为 (1,1), 其余依次类推。假设各阵元为各向同性单元, 则图 1 所示的阵列模型的方向图函数为

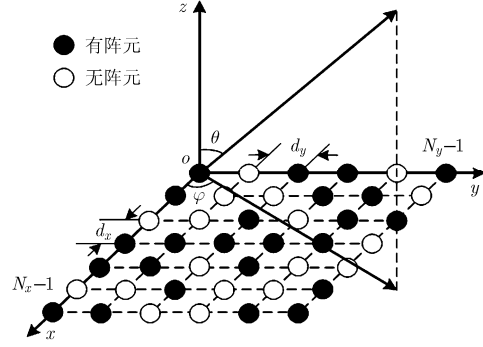


图 1 稀疏矩形栅格平面阵模型

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} p_{m,n} w_{m,n} \exp\{jk[(m-1)d_x \cdot (\sin \theta \cos \varphi - \sin \theta_0 \cos \varphi_0) + (n-1)d_y (\sin \theta \sin \varphi - \sin \theta_0 \sin \varphi_0)]\} \quad (2)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 表示信号波长, θ_0 和 φ_0 分别表示主波束的俯仰角和方位角。 $p_{m,n}$ 表示阵元的位置函数, $p_{m,n} = 1$ 表明此位置有阵元; $p_{m,n} = 0$ 则表明该位置无阵元。 $w_{m,n}$ 表示激励函数, 当 $p_{m,n} = 0$ 时 $w_{m,n} = 0$ 。将 θ 与 φ 离散化: $\mathbf{Q} = [0, \Delta\theta, 2\Delta\theta, \dots, \pi/2]$, $\mathbf{G} = [0, \Delta\varphi, 2\Delta\varphi, \dots, 2\pi]$, 定义 2 维空间角向量为

$$\begin{cases} \mathbf{U} = \sin(\mathbf{Q}^T) \cos(\mathbf{G}^T) \\ \mathbf{V} = \sin(\mathbf{Q}^T) \sin(\mathbf{G}^T) \end{cases} \quad (3)$$

则式(2)的矩阵表示形式为

$$\mathbf{F}(\theta, \varphi) = \text{vec}(\mathbf{P}) \cdot \text{vec}(\mathbf{W}) \cdot \exp\left[\mathbf{D}_x \otimes \mathbf{I}_{N_x} \otimes (\mathbf{U} - \mathbf{U}_0) + \mathbf{D}_y \otimes \mathbf{I}_{N_y} \otimes (\mathbf{V} - \mathbf{V}_0)\right] \quad (4)$$

其中“ \otimes ”表示 Kronecker 积, “vec”表示矩阵拉直运算, \mathbf{I} 表示单位向量, $\mathbf{D}_x = [0, d_x, 2d_x, \dots, (N_x - 1) \cdot d_x]$ 表示行栅格因子, $\mathbf{D}_y = [0, d_y, 2d_y, \dots, (N_y - 1)d_y]$ 表示列栅格因子, \mathbf{U}_0 (或 \mathbf{V}_0) 为大小和 \mathbf{U} (或 \mathbf{V}) 矩阵相等且所有元素均等于 u_0 (或 v_0) 的矩阵, 其中 $u_0 = \sin(\theta_0) \cos(\varphi_0)$, $v_0 = \sin(\theta_0) \sin(\varphi_0)$ 。式(4)为矩形平面阵方向图计算统一模型, 当 \mathbf{P} 中元素全为“1”时, \mathbf{F} 为满阵方向图函数; 当 \mathbf{P} 中元素含有“0”时, \mathbf{F} 则为稀疏阵方向图函数。

由式(4)可以看出, 影响阵列方向图的因素主要有阵元个数(由栅格大小和稀疏率共同决定)、阵元空间位置和阵元激励, 稀疏优化的本质就是在指定的优化函数下求取上述各参量的过程。本文通过给定的稀疏率以两个相互垂直平面 ($\varphi = 0$ 面和 $\varphi = \pi/2$ 面) 的方向图副瓣性能最低为优化目标对矩形栅格平面阵的阵元位置进行稀疏优化, 采用均匀激励, 其优化布阵模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} & \min \left\{ \max \left| \frac{\mathbf{F}(\theta, 0)}{\mathbf{F}_{\max}} \right| + \max \left| \frac{\mathbf{F}(\theta, \pi/2)}{\mathbf{F}_{\max}} \right| \right\} \\ & \text{s.t. } 1 < m < N_x, \quad 1 < n < N_y \\ & p_{1,1} = 1, \quad p_{N_x, N_y} = 1 \\ & p_{1, N_y} = 1, \quad p_{N_x, 1} = 1 \\ & \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} p_{m,n} = N_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 θ 的选取区间需排除主瓣区域。为了保持主瓣性能, 需使得稀疏阵保持最大的口径尺寸, 规定栅格平面的 4 个角位置不被稀疏。当边界为圆形或其他形状时, 只需改变其约束条件即可。

3 基于改进遗传算法的矩形平面阵列稀疏优化

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是借鉴生物界自然选择和群体进化机制形成的一种自适应全局优化概率搜索算法^[15], 具有鲁棒性强、适于并行处理等特点, 但标准的遗传算法存在早熟和随机漫游的缺陷。本节以识别 OTHR 多模传播为背景构建初始种群, 同时改进了算法中的适应度函数、交叉算子和变异算子, 进而利用改进后的遗传算法进行阵列稀疏优化。

3.1 初始种群

建立初始种群需要确定染色体的长度和编码方式, 此处的染色体即为位置矩阵, 其长度由栅格大小决定。本文以矩形平面阵俯仰波束分辨多模传播的回波到达角来确定栅格孔径的大小。建立一种同地心等效镜面反射电离层模型, 如图 2 所示, 不同地面距离目标的回波经不同的电离层反射有相同的射线传播距离 ($\text{dis}(TAD) = \text{dis}(TBE) = \text{dis}(TCF)$), 其中 $\text{dis}(TAD)$ 表示从点 T 到点 A 再到点 D 的射线传播距离), 从而被认为是同一目标的回波, 这就是 OTHR 多模传播的基本机理。不难发现, 3 条回波路径在接收端的波达角是不一样的, 这为 2 维阵 OTHR 利用俯仰波束控制实现传播模式识别提供了可能性。采用等效反射路径来分析射线传播距离和射线仰角的关系, 如图 2 所示, 以 F1 层反射为例, TB_0E 即为 TBE 等效反射路径, 射线仰角 β 和等效反射高度 h 的关系式可表示为^[16]

$$\tan \beta = [(1 + h/R_0) \cos \alpha - 1/(1 + h/R_0) \sin \alpha] \quad (6)$$

式中 R_0 表示地球半径(6370 km), α 为接收点和反射点到地心的夹角。由几何关系可知

$$\frac{S/2}{\sin \alpha} = \frac{R_0 + h}{\sin(\beta + \pi/2)} \quad (7)$$

$$(S/2)^2 = R_0^2 + (R_0 + h)^2 - 2R_0(R_0 + h) \cos \alpha \quad (8)$$

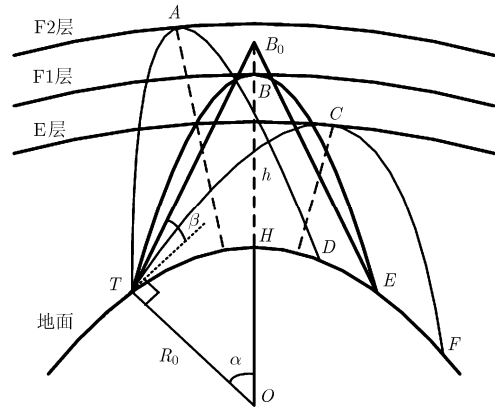


图2 同地心等效镜面反射电离层模型

其中 S 表示射线传播路径的长度。将式(6)和式(7)代入式(8)可得

$$S^2 + 4R_0 \tan \beta \sin \beta \cdot S - 4(2Rh + h^2) = 0 \quad (9)$$

利用俯仰波束控制实现传播模式识别, 即使俯仰主波束能分辨多模传播回波的波达角。图 3 为射线仰角和传播距离的关系示意图, 3 个电离层等效反射高度分别取 $h_1 = 100$ km, $h_2 = 250$ km, $h_3 = 350$ km。可以看出, 仰角越小探测距离越远, 但对于平面阵俯仰波束来说, 仰角越小其波束主瓣展宽越严重, 甚至出现波束打地情形, 因此射线仰角不能过小。考虑 3 种传播模式同时存在的情况, 以 E 层射线仰角 $\beta_1 = 5^\circ$ 为例, 计算出发生多模传播时 F1 层和 F2 层的射线仰角分比为 $\beta_2 = 21.9^\circ$, $\beta_3 = 27.8^\circ$ 。主波束指向 (θ_0, φ_0) 的矩形平面阵的俯仰平面半功率波束宽度可由式(10)表示^[17]。

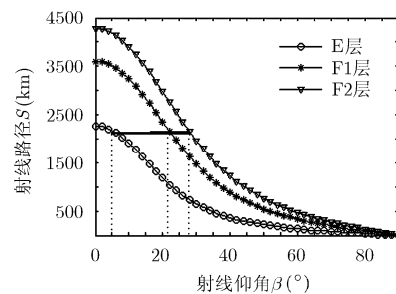


图3 射线仰角和射线距离的关系示意图

$$\Theta_\nu = \sqrt{1 / \left[\cos^2 \theta_0 \cdot (\Theta_{x_0}^{-2} \cos^2 \varphi_0 + \Theta_{y_0}^{-2} \sin^2 \varphi_0) \right]} \quad (10)$$

式中 Θ_{x_0} 和 Θ_{y_0} 分别表示阵元个数为 N_x 和 N_y 的端射阵半功率波束宽度。要求在 $\varphi = 0$ 面和 $\varphi = \pi/2$ 面的俯仰波束都能区分多模传播的回波到达角, 进而可求得 $N_x = N_y = 70$ 。

针对阵列稀疏优化问题采用的遗传编码通常有二进制编码和实数编码。文献[18]针对二进制编码稀

疏率难以控制的问题提出采用实数编码的设计方法,但其是针对 1 维线性阵提出的,当扩展到 2 维阵列时,染色体长度加倍,运算复杂度增加。本文对遗传操作算子进行改进,在二进制编码下实现稀疏率精确控制。初始种群中单个染色体可表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & p_{1,2} & \cdots & 1 \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,70} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & p_{70,2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 $p_{i,j}$ 的取值为“0”或“1”,为保证稀疏率,矩阵中“1”的个数为 N_0 。

3.2 适应度函数

利用式(5)中的目标函数建立最大值模型的基本适应度函数:

$$\text{fit} = \alpha_1 / \max \left| \frac{\mathbf{F}(\theta, 0)}{\mathbf{F}_{\max}} \right| + \alpha_2 / \max \left| \frac{\mathbf{F}(\theta, \pi/2)}{\mathbf{F}_{\max}} \right| \quad (12)$$

式中 α_1 和 α_2 为权值系数,本文取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。为避免基本遗传算法局部早熟和随机漫游现象,增强遗传选择功能,本文对基本适应度函数进行修正,提出一种自适应适应度函数,其计算方式为

$$\text{fit}'(t) = \text{fit}(t) - \text{fit}(t)_{\min} + \sigma \cdot \xi^{t-1} \quad (t \geq 1) \quad (13)$$

其中 t 为进化代数, $\text{fit}(t)_{\min}$ 为第 t 代个体的最小适应度值, ξ^t 为调节值,且有 $\xi^0 = c_0$ 。 σ, c_0 均为常数,本文取 $\sigma = 2, c_0 = 0.9$ 。

3.3 遗传操作

(1)选择 采用比例选择和最优保留策略相结合的方式:通过计算每个个体适应度值在所有适应度和中所占的比例来确定其选择概率,同时利用每一代中的最优个体替换当前群体中的最差个体。

(2)交叉 对算术交叉算子进行改进,提出一种保持稀疏率恒定的交叉算法,其基本步骤为

步骤 1 对选择出的交叉个体进行算术交叉

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_3^{t+1} &= a \cdot \mathbf{X}_1^t + b \cdot \mathbf{X}_2^t \\ \mathbf{X}_4^{t+1} &= a \cdot \mathbf{X}_2^t + b \cdot \mathbf{X}_1^t \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中 \mathbf{X}_1 和 \mathbf{X}_2 是选定的两个交叉的个体, a 和 b 为交叉参数且有 $a + b = 1$;

步骤 2 假设新个体 \mathbf{X}_3 中元素“1”的个数为 N_1 ,在 \mathbf{X}_3 中随机选择 $a \times (N_0 - N_1)$ 个“a”等于“1”(如果为小数则向下取整),同时选择 $b \times (N_0 - N_1)$ 个“b”等于“1”(如果为小数则向上取整),其余的 a 和 b 均等于 0,这样就保证了新个体 \mathbf{X}_3 中“1”的个数为 N_0 。个体 \mathbf{X}_4 重复此操作;

步骤 3 选取 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4$ 中适应度较大的两个个体作为交叉操作的输出。本文取 $a = 0.6, b = 0.4$ 。

(3)变异 为保证稀疏率恒定,提出一种成对多点变异方法,其基本思想为:选定的变异个体为 \mathbf{X}_0 ,随机选择其中 q 个(不包含边界)“1”进行单点变异,同时随机对 q 个“0”进行单点变异,即在每一次变异过程中都有 q 对基因进行变异,从而保证稀疏率不变。参数 q 的选择可以为固定数值,也可以采取自适应确定方式,不管怎样选择, q 必须满足 $q \leq N_0 - 4$ 。本文取 $q = 4$ 。

4 计算机仿真分析

本节分别采用基本遗传算法(采用比例选择算子、单点交叉算子、基本位变异算子和基本适应度函数)和本文提出的改进遗传算法(采用比例选择和最优保留策略、改进算术交叉算子、成对多点变异算子和自适应适应度函数)进行阵列稀疏优化的仿真分析,选取的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

阵列参数	参数值	算法参数	参数值
工作频率	15 MHz	种群数	50
栅格孔径	70×70	进化代数	1000
阵元间距	10 m	交叉概率	0.90
俯仰主波束	60°	变异概率	0.05

仿真 1 俯仰方向图对比

图 4 和图 5 分别为采用基本遗传算法和本文改进算法稀疏后的俯仰方向图对比,初始种群的稀疏率取为 $\eta = 0.8$ 。由仿真结果可以看出,总体上,稀疏优化后的方向图主瓣性能基本保持不变,峰值副瓣电平(Peak SideLobe Level, PSL)降低,远区副瓣电平升高。从算法的优化性能来看,相较于满阵情形,采用基本遗传算法时,两个平面的 PSL 分别下降 5.24 dB 和 3.37 dB,如图 4 所示;采用本文改进算法时其 PSL 分别下降 8.82 dB 和 8.19 dB,取得了更优的性能,如图 5 所示。同时,采用标准遗传算法稀疏后的阵元个数为 959 个,其稀疏率 $\eta = 0.81$,较初始种群发生了变化;采用本文算法稀疏后的阵元个数为 980 个,稀疏率得到了精确控制,图 6 为利用本文算法稀疏后的阵元分布图。

仿真 2 最大适应度值对比

图 7 为进化过程中的最大适应度值对比。可以看出,在进化初期,基本遗传算法易陷入局部最优解,而本文算法则有效避免了这种现象。在进化中后期,基本遗传算法出现随机漫游现象,其最大适应度随进化代数的变化而变化,而本文算法的最大适应度基本趋于稳定,具有更好的收敛性。需要说

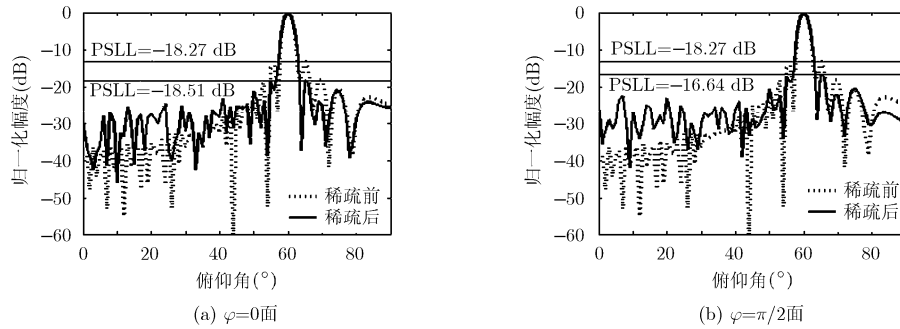


图 4 采用基本遗传算法稀疏前后的俯仰方向图

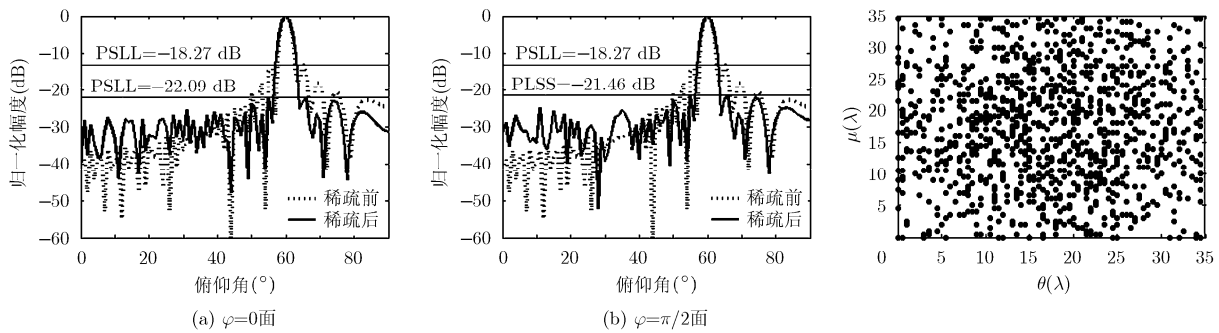


图 5 采用本文算法稀疏前后的俯仰方向图

图 6 采用本文算法稀疏后的阵元分布图

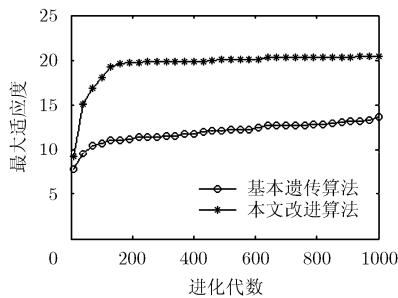


图 7 最大适应度对比

表 2 不同算法的 PSL(dB)

	PSO ^[14]	SA ^[14]	本文算法
(0,30°)	13.75	16.35	19.76
(0,60°)	13.75	16.32	19.26

说明在相同的仿真条件下本文算法性能优于 PSO 算法和 SA 算法。

5 工程应用分析

5.1 布阵方式

理论上讲, OTHR 的发射天线和接收天线都可以使用 2 维稀疏平面阵列。在工程实践中, 一方面, 为了提高全域搜索效率和保持必需的数据率, OTHR 发射天线通常采用宽波束照射, 其阵列规模相对于有窄波束要求的接收天线要小得多, 采用满阵结构是可以接受的; 另一方面, 从发射效率的角度出发, 稀疏率越高, 阵元个数就越少, 相应的阵列增益就越小。表 3 给出了在本文阵列模型下不同稀疏率不同波束指向时的阵列增益对比, 可以看出, 当稀疏率增大和波束偏离阵列法线方向时阵列增益降低, 因此如果发射天线采用稀疏阵列, 则为了避免主瓣能量损失其稀疏率不易过高。OTHR 的接收阵列通常要求有较高的方位分辨率, 从文中仿真可以看出, 在相同的阵列孔径下稀疏阵列基本保持了方向图主瓣性能, 满足分辨率要求。尽管其增益有

明的是, 为便于统一比较, 此处的适应度值均按照文中式(12)的基本适应度进行计算, 前文所述的自适应适应度函数仅用来调节每一次进化中不同个体的选择概率, 而非此处的计算值。

仿真 3 本文算法与粒子群优化算法和模拟退火算法的对比

利用本文算法对栅格大小为 61×21 、实际阵元个数为 256 个的稀疏平面阵列^[14]进行优化, 从而对比本文算法与粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法和模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法的性能。表 2 列举了两个角度下 3 种算法优化后的阵列方向图的 PSL, 其中 PSO 算法和 SA 算法的优化结果为文献[14]中给出的数据, 以 $(0, 30^\circ)$ 为例, 相较于 PSO 算法和 SA 算法, 本文算法的 PSL 分别改善了 6.01 dB 和 3.41 dB,

表 3 阵列增益对比(dB)

	$\eta=0$	$\eta=0.4$	$\eta=0.6$	$\eta=0.8$
$\theta_0=0^\circ$	41.75	39.53	37.77	34.76
$\theta_0=30^\circ$	41.12	38.91	37.14	34.13
$\theta_0=60^\circ$	38.74	36.52	34.76	31.75

所损失,但对于 OTHR 来讲,以损失部分增益换取俯仰方向图控制是可取的,因此 2 维稀疏平面阵列适用于 OTHR 的接收阵列。布阵方式的选取还要结合实际国情和任务需求,如法国的 Nostradamus 雷达采取单基地模式就是从法国国土面积不大、纵深较小的国情和全方向预警的战略需求出发而设计的,因此稀疏阵的工程应用应综合考虑阵列本身的性能、基本国情和实际应用需求等多方面因素。

5.2 信号处理技术

在信号处理技术方面,2 维稀疏阵列应用于 OTHR 主要有 3 方面的难点需要考虑:

(1)相对于均匀 2 维平面阵,2 维稀疏阵列减小了系统复杂度,但较传统 1 维接收阵列来讲其阵元个数还是有所增加,在接收端直接进行阵元级的处理显然是不可取的,基于子阵级的处理和一些降维降秩类算法仍然是研究的重点。

(2)2 维阵列在一定程度上增加了阵列误差,这给空域自适应波束形成带来了严重的影响,必须寻求最佳的阵列校准技术和方案,可以借鉴空时自适应处理(Space Time Adaptive Processing, STAP)的理念,将阵列误差视为一种与方向变化相似的随机因素,自适应地加以克服。

(3)由于阵列流型矩阵不满足均匀线阵阵列流型矩阵的 Vandermonde 结构,稀疏阵的 DOA 估计易出现模糊特性^[19]。针对模糊问题,文献[20]采用介质基片法消除稀疏阵模糊集,文献[21]提出一种基于 MUSIC 功率估计消除稀疏阵模糊集的算法,这些研究为稀疏阵的工程应用奠定了理论基础。

6 结束语

本文提出利用改进遗传算法对 2 维阵列 OTHR 的阵列结构进行稀疏优化,以最低化两个垂直俯仰平面的峰值副瓣电平为目标建立了 OTHR 稀疏 2 维平面阵布阵优化模型,以俯仰波束能分辨 OTHR 多模传播的回波到达角为原则建立初始种群,为避免遗传进化中早熟和随机漫游修正了适应度函数,为实现稀疏率精确控制改进了遗传操作算子,计算机仿真结果表明了本文算法的有效性。本文工作为 2 维阵 OTHR 的工程应用提供了理论依据。

参考文献

- [1] Fabrizio G A. High Frequency Over-The-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2013: 16-20.
- [2] Miller L C B. NORAD: moving forward with risk reduction [R]. North American Aerospace Defense Command, 2009.
- [3] Bazin V, Molinie J P, Munoz J, et al. Nostradamus: an OTH radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System Magazine*, 2006, 21(10): 3-11.
- [4] Cameron A. The Jindalee operational radar network: its architecture and surveillance capability[C]. Proceedings of the IEEE National Radar Conference, Alexandria, Egypt, 1995: 692-697.
- [5] 吴瑕, 陈建文, 鲍拯, 等. 新体制天波超视距雷达的发展与研究[J]. *宇航学报*, 2013, 34(5): 671-678.
Wu Xia, Chen Jian-wen, Bao Zheng, et al. Development and research on new system skywave over-the-horizon radar[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(5): 671-678.
- [6] Berizzi F, Mese E D, Monorchio A, et al. On the design of a 2D array HF skywave radar[C]. Proceedings of the IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1-6.
- [7] 张飞, 黄伟, 陈客松. 运用迭代 FFT 算法优化平面稀疏阵列[J]. *全球定位系统*, 2012, 37(2): 38-42.
Zhang Fei, Huang Wei, and Chen Ke-song. An optimum method of thinned planar array based on iterative FFT algorithm[J]. *GNSS World of China*, 2012, 37(2): 38-42.
- [8] 陈客松, 郑美燕, 刘卫东, 等. 运用矩阵束方法稀布优化可分离分布的平面阵[J]. *电波科学学报*, 2012, 27(6): 1180-1187.
Chen Ke-song, Zheng Mei-yan, Liu Wei-dong, et al. Matrix pencil method for sparse separable antenna array synthesis[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(6): 1180-1187.
- [9] 唐斌, 郑美燕, 陈客松, 等. 运用增广矩阵束方法稀布优化平面阵[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(3): 540-546.
Tan Bin, Zheng Mei-yan, Chen Ke-song, et al. Sparse antenna array synthesis using matrix enhancement matrix pencil[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(3): 540-546.
- [10] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(7): 993-999.
- [11] Ha Bui-van, Zich R E, Mussetta M, et al. Improved compact Genetic Algorithm for thinned array design[C]. Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP), Gothenburg, Sweden, 2013: 1807-1808.
- [12] 廖先华, 杨建红, 张立军, 等. 基于模拟退火算法的平面稀疏阵优化[J]. *现代雷达*, 2012, 34(10): 57-60.
Liao Xian-hua, Yang Jian-hong, Zhang Li-jun, et al.

- Optimization of planar sparse array using simulated anneal algorithm[J]. *Modem Radar*, 2012, 34(10): 57-60.
- [13] 张建华, 王玉峰, 庞伟正. 矩形平面稀布阵旁瓣电平的免疫算法优化[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(4): 741-744.
Zhang Jian-hua, Wang Yu-feng, and Pang Wei-zheng. Sidelobe level optimization with immune algorithm in rectangular plane thinned array[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(4): 741-744.
- [14] 史东湖, 习靖, 周志伟. 对称平面稀疏阵列阵形优化方法研究[J]. *飞行器测控学报*, 2013, 32(4): 302-305.
Shi Dong-hu, Xi Jing, and Zhou Zhi-wei. Research on optimization method of symmetric thinned planar array[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2013, 32(4): 302-305.
- [15] Francisco J and Pena A. Genetic algorithm in the design and optimization of antenna array pattern[J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1999, 47(3): 506-510.
- [16] 周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 424-429.
- [17] 张力. 数字多波束微波辐射计[D]. [硕士论文], 华中科技大学, 2006.
- [18] 何学辉, 朱凯然, 吴顺君. 基于整数编码遗传算法的稀疏阵列综合[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(9): 2277-2281.
He Xue-hui, Zhu Kai-ran, and Wu Shun-jun. Thinned array synthesis based on integer coded genetic algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2277-2281.
- [19] Khan D and Bell K L. Analysis of DOA estimation performance of sparse linear arrays using the Ziv-Zakai bound[C]. *Proceedings of the IEEE Radar Conference*, Washington D C, USA, 2010: 746-751.
- [20] He Zi-yuan, Zhao Zhi-qin, Nie Zai-ping, *et al.* Resolving manifold ambiguities for sparse array using planar substrates[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(5): 2558-2562.
- [21] He Zi-yuan, Zhao Zhi-qin, Nie Zai-ping, *et al.* Method of solving ambiguity for sparse array via power estimation based on MUSIC algorithm[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(2): 542-546.
- 严 韬: 男, 1987年生, 博士生, 助理工程师, 研究方向为天波超视距雷达信号处理.
- 陈建文: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为超视距雷达信号处理、机载预警雷达信号处理、阵列信号处理及目标检测与识别等.
- 鲍 拯: 男, 1977年生, 博士, 讲师, 研究方向为超视距雷达信号处理、阵列信号处理、目标检测与识别.