

太阳低频射电阵列的设计研究

付越^{1,2} 陈林杰*² 周志超²

1(太阳活动与空间天气全国重点实验室, 中国科学院国家空间科学中心, 北京, 100190)

2(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要 太阳活动是地球空间环境扰动的最终源头, 而行星际空间是扰动传播的重要通道, 为了实现对日地空间环境进行全链条的监测, 利用低频射电望远镜探测太阳的低频辐射是一种重要的手段。对于低频射电阵列来说, 阵型的设计至关重要, 其与科学目标的实现密切相关, 是其中一项关键技术。秘鲁低频射电望远镜是国际子午圈计划拟新建的一台监测设备, 工作在 1-80MHz 频段。它包含 16 个低频射电天线, 通过波束合成的方式实现对太阳的跟踪和频谱监测, 也将开展电离层测量相关的研究。针对这一望远镜的阵型设计, 本文提出了一种基于改进的遗传和粒子群混合优化算法, 该算法在圆域内求解阵列的天线布局, 以获得更好的全天空合成波束旁瓣比分布。仿真结果表明, 该算法设计的阵列在满足望远镜技术指标的前提下, 相比于随机阵、均匀阵以及平方公里阵 SKA 采用的 Vogel 螺旋阵, 大幅度提高了全天空的旁瓣比分布。研究结果将应用到秘鲁低频射电望远镜的建设之中, 也可以为我国未来的大型低频太阳射电望远镜阵列的设计提供参考。

关键词 稀布阵; 遗传算法; 粒子群算法; Vogel 螺旋阵; 旁瓣比

中图分类号 P161

Research on the Design of Solar Low-Frequency Radio Array

FU Yue^{1,2} CHEN Linjie¹ ZHOU Zhichao¹

1 (Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2 (School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Solar activity is the ultimate source of disturbances in the geospace environment, and interplanetary space is an important channel through which these disturbances propagate. To achieve end-to-end monitoring of the Sun-Earth space environment, detecting low-frequency solar radio emission with low-frequency radio telescopes is an important observational approach. For low-frequency radio arrays, the design of the array configuration is of critical importance. It is closely related to the realization of the scientific objectives of the instrument and to whether these objectives can ultimately be achieved in practice, and it constitutes one of the key technologies in the overall system design. The Peru Low-Frequency Radio Telescope is a monitoring facility planned to be newly constructed

* 基金项目: 受国家重点研发计划项目 (课题编号: 2022YFF0503801) 和中国科学院技术支撑人才基金项目资助

投稿日期: 2026. 3. 18

E-mail: chenlinjie@nssc.ac.cn

under the International Meridian Circle Program and will operate in the 1-80 MHz frequency band. It contains 16 low-frequency radio antennas. Through beamforming with these antenna elements, the telescope will track the Sun and perform spectral monitoring, and it will also carry out studies related to ionospheric measurements. For the array-configuration design of this telescope, this paper proposes an improved hybrid optimization algorithm based on genetic algorithm and particle swarm optimization. The algorithm searches for the antenna layout of the array within a circular aperture, with the goal of obtaining a better all-sky distribution of the main-lobe-to-sidelobe ratio for the beamformed array pattern. The simulation results show that, while satisfying the technical specifications required for the telescope, the array designed by the proposed algorithm greatly improves the all-sky main-lobe-to-sidelobe ratio distribution compared with a random array, a uniform array, and the Vogel spiral array adopted by the Square Kilometre Array (SKA). The results of this study will be applied to the construction of the Peru Low-Frequency Radio Telescope and can also provide a reference for the design of future large-scale low-frequency solar radio telescope arrays in China.

Key words sparse array; genetic algorithm; particle swarm optimization; Vogel spiral array; sidelobe ratio

0 引言

在低频频段，宇宙天体的射电辐射及日地空间环境事件普遍具有大尺度、分布范围广、快速时变的特征，这就要求低频射电望远镜尽可能地实现宽视场观测及成像，甚至是全天空成像观测。在太阳物理与空间天气研究中，太阳爆发活动引发的日冕物质抛射、行星际激波，以及地球电离层的大尺度扰动与湍流结构，均具有广域传播和全域演化的特征，在射电频段，利用全天空射电成像能够同步追踪太阳爆发活动从日冕到行星际、再到地球电离层的完整因果链，并与地球空间全耦合监测系统有效衔接，为空间天气预报提供全链路的观测数据支撑。此外，低频射电观测受地球电离层的相位畸变影响极为严重，而全天空成像阵列可以利用数字波束技术快速捕获大量分布于全天的亮定标源，通过多视线方向的同步测量，实现电离层全天空三维结构的层析成像与实时校准，这是固定指向观测模式无法实现的优势；同时，全天空成像可以将阵列的观测效率最大化，在同一观测时段内同时满足多个科学目标的观测需求，实现望远镜科学产出效率的大幅提升。

在国际上已建成并运行的低频射电阵列中，荷兰主导的 LOFAR[1]与美国研制的 LWA[2]是两大代表性的射电观测设备，它们均对包括太阳、行星、河外星系等在内的射电源作为重要的科学目标进行观测。而在技术上，这两大阵列围绕全天空成像的科学需求开展了系统性的架构设计与技术实现，形成了不同的技术路径，为低频全天空射电成像阵列的研制奠定了重要的技术基础。

LOFAR 是国际上首个大型宽频带低频干涉阵列，工作频段覆盖 10MHz 至 240MHz，其全天空成像能力通过“层级化阵列架构+数字化波束形成+综合孔径成像”的技术体系实现[1]。在阵列构型上，LOFAR 采用了“核心阵+远郊台站+国际台站”

的分布式架构，由约 52 个台站构成，最长基线可达数千公里；每个台站内部包括低频子阵和高频子阵，低频子阵由 96 个低频有源偶极天线 LBA（10~80MHz）组成，高频子阵由 24/48/96 个高频天线 HBA（110~240MHz）相控阵单元组成；低频子阵以类似分形的稀疏构型排布，单站直径约 65m，通过分级控制的方式实现波束的灵活调控，这种设计既通过长基线实现了高角分辨率，又通过台站内部的密集排布保证了短基线 uv 覆盖，解决了全天空成像的大尺度结构重建问题。

LWA 是工作在 10~88MHz 低频射电干涉阵列，其设计围绕低频段、高时间分辨率和全天空成像的需求展开，重点突破了低频相控阵波束优化与电离层实时校准两大核心难题，形成了适用于低频全天空成像的独特技术方案[3]。在阵列与台站构型上，LWA 采用“单站相控阵+多站综合孔径”的两级架构，规划建设 53 个台站，每个台站由 256 个宽带有源偶极子天线构成，单站直径约 100m；为满足全天空成像的旁瓣抑制需求，LWA 开展了台站构型优化设计的系统化研究，从早期的伪随机稀疏阵、均匀紧凑阵性能对比，到后续基于迭代优化算法的椭圆形台站设计，通过以全天空最大旁瓣电平最小化为目标的迭代优化算法，完成了阵元位置排布的精细化设计，最终确定了 110m×100m 的椭圆台站构型，实现了任意波束指向下全天空旁瓣电平低于 -17.9dB 的性能，从设备源头避免了全天空成像中的旁瓣杂散与虚假源问题。在全天空成像的技术实现上，LWA 的核心优势在于极致的波束灵活性与电离层校准能力，每个台站可独立生成 4 个快速可重构的数字波束，波束的频率与天区指向可完全独立调控，其中专门设计了电离层校准波束与太阳监测波束，可在开展天体物理成像的同时，同步完成全天空电离层监测。

除此之外，国际上还建设了其他大型的低频射电阵列，如澳大利亚的默奇森宽视场阵（Murchison Widefield Array, MWA）[4]和法国的低频射电望远镜（New Extension in Nançay Upgrading LOFAR, NenuFAR）[5]，基于国际合作的世界最大的低频射电阵列—平方公里阵（SKA-Low）也正在建设中[6]。而这些阵列无一例外都将太阳和空间天气研究作为其主要的科学目标之一。

为了满足未来我国建设大型低频全天空射电成像阵列以观测太阳、行星以及其他射电源等的需求，本文聚焦于低频射电阵列的布局优化设计研究。针对现有阵列布局方法在宽频带、全天空、多约束条件下的优化短板，开展了系统性的算法设计与仿真验证工作，并将结果应用到“国际子午圈大科学计划”拟建设的秘鲁低频射电望远镜中。本文整体的章节内容安排如下：第 0 节为引言，阐述低频全天空射电成像的科学和技术背景；第 1 节介绍了拟建设的秘鲁低频射电望远镜；第 2 节介绍天线阵列方向图的合成原理；第 3 节为阵列构型设计与优化算法的实现；第 4 节为仿真结果与性能对比分析；第 5 节为总结与展望。

1 秘鲁低频射电望远镜

秘鲁低频射电望远镜是国际子午圈大科学计划“日不落”分系统拟新建的一台太阳射电监测设备，可以与子午二期建设的明安图米波-厘米波-分米波射电频谱仪及明安图射电频谱日像仪（MUSER）组网联测，覆盖 [0~10, 13~23] 时段，实现太阳外冕区域射电辐射的近“日不落”覆盖。该望远镜将通过高时间、高频谱分辨率的太阳射电

频谱观测，在捕捉日冕低频爆发与 CME 早期信号、揭示日冕三维磁场结构与动态演化以及支持空间天气科学研究等方面发挥重要的作用。为了在冬天也能实现至少 10 小时的太阳观测，需要望远镜能够至少对高度角仅为 8.6° 的太阳进行跟踪观测。此外，秘鲁低频望远镜也将与天主教大学负责运行的利马 Jicamarca 电离层设备联合观测，开展电离层研究。通过观测分布于全天空的亮射电源，可以利用多视线方向的同步测量实现电离层三维结构的层析成像。为此，秘鲁低频射电望远镜需具备全天空视场覆盖的能力。

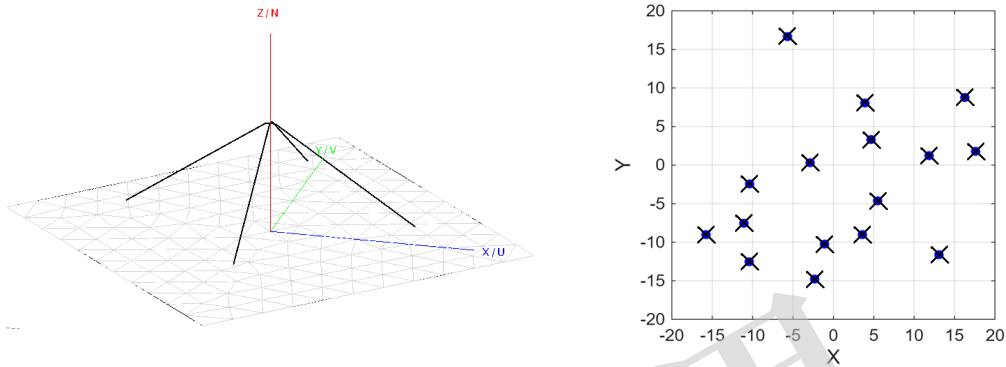


图 1 秘鲁低频射电望远镜天线单元及阵列分布示意图

Figure 1 Schematic diagram of antenna element and array layout for Peru low frequency radio telescope

秘鲁低频射电望远镜工作于 1~80MHz，将建设在秘鲁天主教大学位于安第斯山脉的站点（南纬 12° ，西经 77° 附近）。设备采用模块化、轻量化的相控阵天线方案，由 16 个宽带有源偶极子天线组成，受场地所限，所有天线需分布于 $40\text{m} \times 40\text{m}$ 的范围内。系统采用超宽带的射频前端和数字化接收机，通过电缆传输数据至站内处理中心，利用 GPU 加速实现实时频谱显示；配套本地噪声校准源，结合基于机器学习的动态电离层校正算法[7]，最终输出太阳射电动态频谱。其具体技术指标如下表所示：

表 1 秘鲁低频射电望远镜的技术指标

Table 1 Specifications of Peru low frequency radio telescope

参数	指标
天线	16 套倒 V 交叉阵子
视场	全天空
波束	旁瓣比 $\leq -8\text{dB}$ @天顶（全频段）
频率范围	1~80MHz
频率分辨率	$\leq 50\text{kHz}$
极化方式	双线极化
积分时间	1ms

2 波束合成技术原理

阵列天线的方向图可表示为单个天线方向图与阵列因子的乘积，其中阵列因子等效于全向天线单元组成的阵列方向图。假设阵列由多个相同参数的天线单元组成，每个单元接收的信号均带有一个相位延迟，该延迟由单元位置和信号入射方向共同决定。

将所有单元的信号进行相干叠加，即可得到阵列的总辐射场，如公式 (1) 所示：

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \sum_n \vec{E}_n = C \frac{e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}}}{|\vec{r}|} \sum_{n=1}^{N_a} e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}_n(\theta, \varphi)} = C \frac{e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}}}{|\vec{r}|} S(\theta, \varphi) \quad (1)$$

其中， $\vec{E}(\theta, \varphi)$ 为总辐射远场， $\vec{E}_n$ 为第 n 个阵元辐射场， $\vec{r}_n(\theta, \varphi)$ 为第 n 个阵元的位矢， $S(\theta, \varphi)$ 为阵列因子， $\vec{r}$ 为接收点相对阵列的位矢， $\vec{k}$ 为波矢， θ 、 φ 为入射方向， N_a 为阵元数量， C 是由天线参数决定的常数。因此，阵列方向图是指向相同方向的天线单元共同作用的结果，如公式 (2) 所示。旁瓣比则定义为功率方向图的旁瓣电平与主瓣电平之比的对数值。

$$FdB(\theta, \varphi) = 20 \lg \left(\frac{|\vec{E}(\theta, \varphi)|}{|\vec{E}_{\max}(\theta, \varphi)|} \right) \quad (2)$$

其中， $FdB(\theta, \varphi)$ 为归一化的功率方向图， $|E(\theta, \varphi)|$ 是 (θ, φ) 方向的电场强度， $|E_{\max}(\theta, \varphi)|$ 是电场强度的最大值。

3 阵列优化算法

阵列构型是决定低频射电阵列成像性能的核心因素，不同的阵元排布方式将直接产生不同的波束特性与旁瓣比分布，进而决定全天空成像的动态范围与观测灵敏度。本研究的核心优化目标，是在相同的圆域孔径、阵元数量、最小阵元间隔的条件下，优化阵列合成波束的全天空旁瓣比分布。

在本文中，我们将旁瓣比作为评价阵列的标准。在实际求解合成波束最大旁瓣比的过程当中，首先找到合成波束增益最大值和位置，然后从主瓣出发抠掉 8 个相邻像素中比主瓣更小的像素并记录下来，再根据新抠下来的像素分别抠掉相邻像素中比它更小像素（忽略已经抠掉的）并记录下来。依此类推，再利用上一轮的新像素分别抠掉相邻像素中比它更小的像素（忽略已经抠掉的）并记录下来，直到没有新抠下来的像素，即得到抠掉主瓣的合成波束。最后，我们计算抠掉主瓣后的波束最大值，就得到了最大旁瓣比。对于原始波束和去掉主瓣后的波束如图 2 所示：

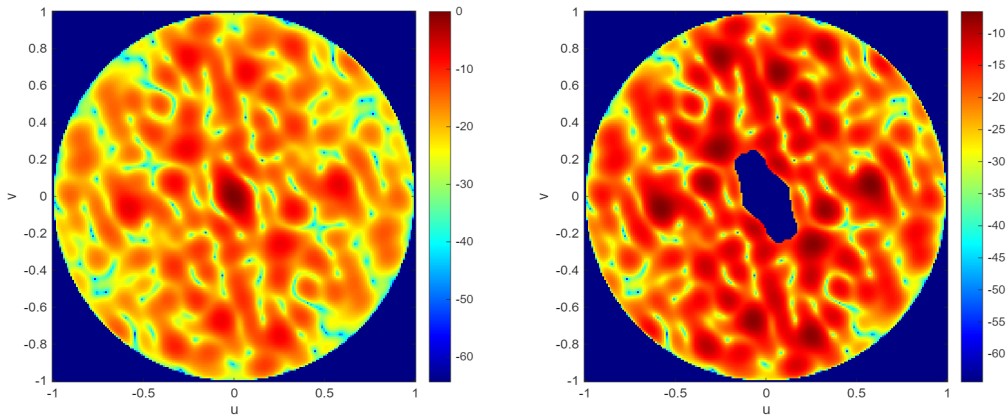


图 2 阵列合成波束的主瓣扣除前（左）后（右）示意图

Figure 2 Synthesized beam before (left) and after (right) main-lobe removal

3.1 Vogel 螺旋阵算法

在现有的稀布阵构型中，平方公里阵 SKA 单个站点采用的 Vogel 螺旋阵代表了孔径阵列设计的最新研究进展，其拥有优异的全天空波束性能。在阵列设计中，若将阵列视为一个具有径向均匀面密度的稀疏采样圆形孔径，则其径向采样密度应随半径的平方增加，等效地，阵列的半径 r 与天线数量 n 的平方根成正比：

$$r = c\sqrt{n} \quad (3)$$

为实现切向采样的最大多样性，可借鉴自然界中向日葵、雏菊等植物花瓣的黄金角分布模式，其方位角 θ 的数学表达为：

$$\theta = n \times (3 - \sqrt{5}) \times 180^\circ \quad (4)$$

通过上述公式得到的阵列有时不一定满足阵元间隔的要求，因此需要对 Vogel 螺旋阵做适当的调整，我们从公式（3）的径向采样开始，但考虑将公式（4）给出的角度作为方位角的起始集合。针对每个天线依次寻求对方位角最小可能的绝对调整（在 -180 到 $+180$ 度范围内），以确保完全遵守所有内部天线的足迹约束。如果找不到完全满足非重叠条件的解决方案，则采用最接近的方案。通过上述方法，得到的 Vogel 螺旋阵如图 3 所示：

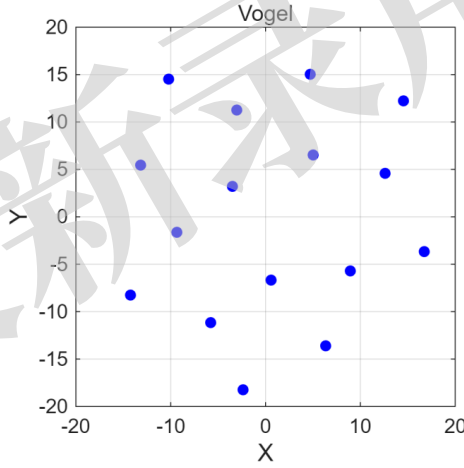


图 3 平方公里阵 SKA 采用的 Vogel 螺旋阵法得到的阵列布局

Figure 3 Array layout obtained using the Vogel spiral method adopted in the Square Kilometre Array (SKA)

3.2 遗传和粒子群混合算法

首先，我们对遗传算法、粒子群算法和阵列之间的关系做简单的介绍。本文的“个体/粒子”对应某个阵列的布局，即由 16 个阵列单元的二维位置坐标构成；“速度”代表阵列位置在一次迭代中的变化量。遗传算法（genetic algorithm, GA）[8]具有全局搜索能力强、能够很好跳出局部最优解的优点；粒子群算法（particle swarm optimization, PSO）[9]具有参数少、在连续空间局部寻优中收敛快的优点。因此，我们可以将两者结合起来，使混合算法具有跳出局部最优解的能力且收敛速度更快。

对于基于遗传算法的优化算法，首先在一定区域内生成 NP 个满足最小阵元间隔的随机阵，计算每个阵列的适应度值，即不同频率以及指向天区对应的合成波束旁瓣比平均值的负数。之后，对阵列进行选择、交叉、变异操作更新阵列的布局，“选

“选择”就是通过“转盘赌选择”让适应度值大的个体以更大可能性遗传给下一代，“交叉”就是让按序两两配对阵列中坐标位置最接近的两个阵元交换位置，且在交换之后仍然可以满足最小阵元间隔的要求，否则不交换。在所有阵列完成“交叉”操作之后就随机打乱它们的排列顺序[10]。“变异”就是在满足最小阵元间隔的条件下重新随机生成这个阵元坐标。整个遗传算法的程序流程图如图 4 所示。在实际优化过程中，我们对区域内生成的随机阵，随机初始化每个个体的速度（速度的上限设置为优化圆域半径的一半），按照上述遗传算法相同的方法计算适应度值，之后初始化全局最优解和个体最优解。

在利用粒子群算法更新阵列过程中，我们使用了一个衰减的惯性系数 W （0.8~0.4），是为了加速后期的收敛速度[11]。在更新惯性系数之后，我们利用公式（5）更新每个个体的速度。

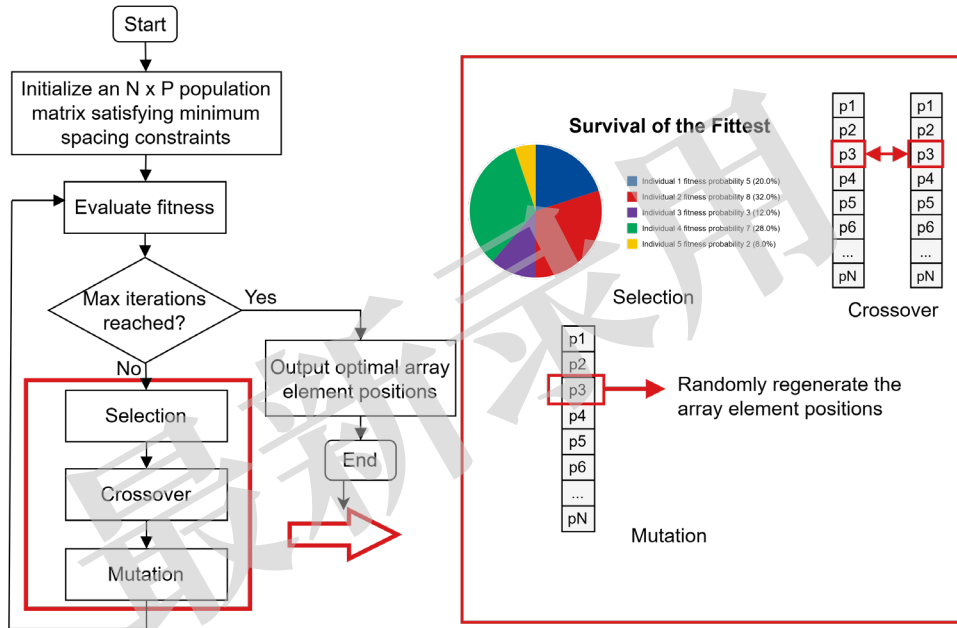


图 4 遗传算法流程图

Figure 4 Genetic algorithm flowchart

$$V_{i,new} = W \times V_{i,old} + C_1 \times (Array_{Best} - Array_i) + C_2 \times (Array_{i,best} - Array_i) \quad (5)$$

其中 C_1 和 C_2 是全局最优解和个体最优解的学习因子，取值 1.5； $V_{i,new}$ 是更新后的粒子速度； $V_{i,old}$ 是更新前的粒子速度； $Array_i$ 更新前第 i 个阵列的位置。之后，检测每个粒子的速度是否越界（速度不超过圆域半径的一半），否则对越界粒子的速度重新随机生成。我们再利用更新的速度更新每个阵列的布局位置，如式（6）所示：

$$Array_{i,new} = Array_{i,old} + f \times V_{i,new} \quad (6)$$

其中 $Array_{i,old}$ 和 $Array_{i,new}$ 是阵列位置更新前后的位置， f 是自适应因子，从 0.1 步长为 0.01 衰减到 0.01 来计算新的阵列位置，直到第 i 个阵元的位置和其他阵元彼此之间满足最小阵元间隔的要求。对于更新后位置越界的阵元，重新随机生成位置

并满足最小阵元间隔的要求。我们在得到新的阵列位置之后，更新全局和个体最优解。整个粒子群算法流程图如图 5 所示：

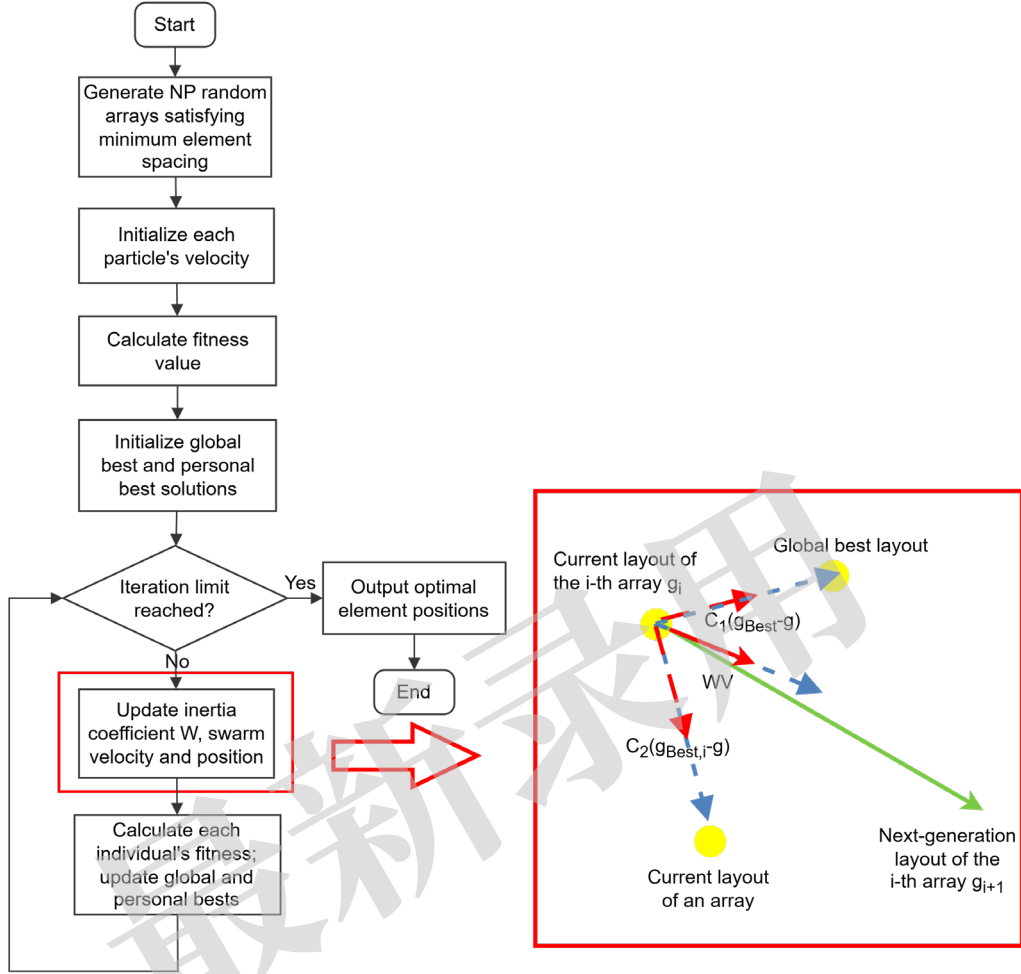


图 5 粒子群算法流程图

Figure 5 Particle swarm algorithm flowchart

基于遗传算法和粒子群算法的特点，本文的研究采用了遗传和粒子群混合优化的算法。我们首先在半径为 20m 的区域内随机初始化 50 个保持 4m 最小阵元间隔的 16 单元阵列，以及每个粒子的初始速度（模不超过圆域半径的一半），并计算每个粒子的适应度值，即阵列在不同指向天区（天顶角 $0\sim 75^\circ$ 区域）、频率（1, 10, 20, ...80MHz）以及双极化下的旁瓣比（MSLL）平均值再取负号。然后通过适应度值初始化全局最优的阵列位置 $Array_{best}$ 和每个个体最优的阵列位置 $Array_{i,best}$ 。

在迭代更新的过程中，我们通过上述的粒子群方法更新惯性系数 W （0.8 逐渐衰减至 0.4）、群体速度和位置，再计算更新后的个体适应度值并得到全局最优解和个体最优解。在进入遗传算法更新之前，我们对群体速度进行一次更新，之后我们按照选择、交叉、变异操作更新阵列布局，并计算更新后的个体适应度值并得到全局最优解和个体最优解。为了兼顾收敛速度和迭代过程中优良结构的保持，我们设置交叉率 $P_c=0.8$ ，变异率 $P_m=0.05$ 。在上述遗传和粒子群算法迭代过程中，我们都会直

接把最优的阵列保留至下一代，并在满足迭代次数之后，输出最优的阵列。从理论上来说，本文的算法可以应用到任何区域内的阵列优化，而非仅仅是圆形区域内的阵列优化。遗传和粒子群混合优化算法的程序流程图如图 6 所示：

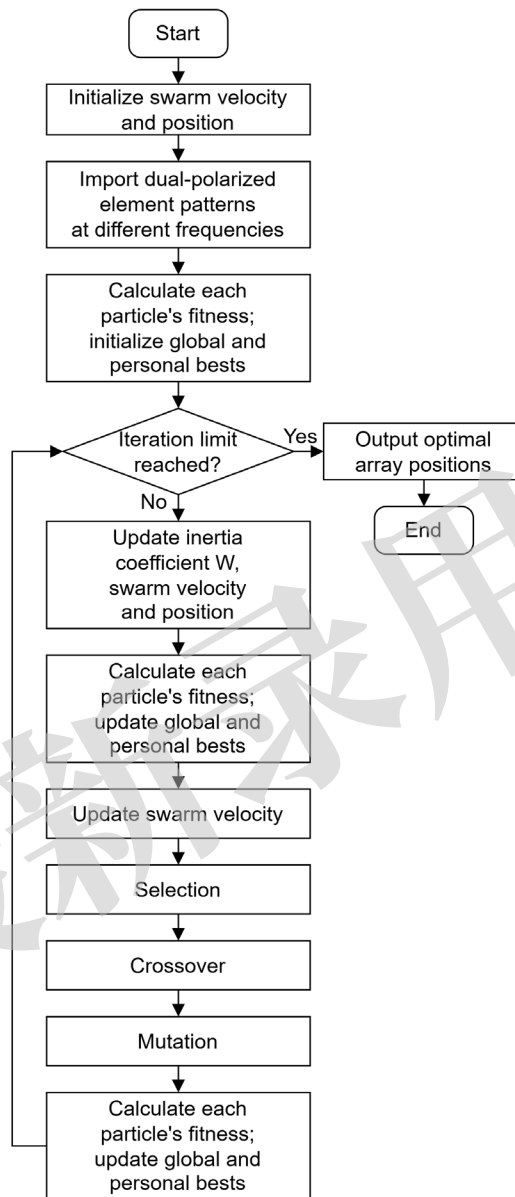


图 6 遗传和粒子群混合优化算法流程图

Figure 6 Hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm flowchart

利用本文提出的遗传和粒子群混合优化算法，经过 500 次迭代，最终得到优化后的阵列布局，同时记录了适应度值的演化过程，如图 7 所示。

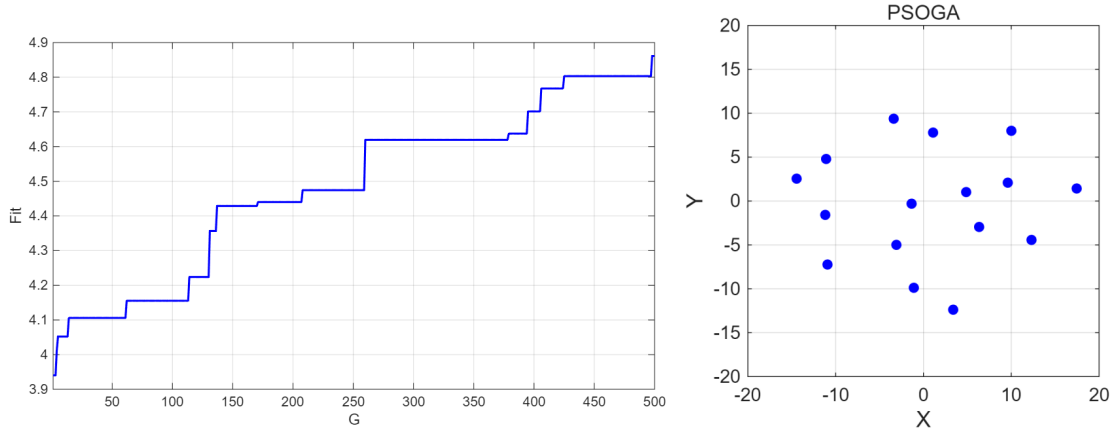


图7 适应度值迭代曲线（左）以及遗传和粒子群混合算法求解的阵列布局（右）

Figure 7 Fitness evolution curve (left) and array layout obtained using the hybrid genetic and particle swarm optimization algorithm (right)

4 仿真结果对比图

为了评估本文中混合优化算法得到的阵列布局的性能，我们对几种常见的阵列布局（包括随机阵和均匀阵，如图8所示）、SKA采用的Vogel螺旋阵以及本文得到的阵列布局进行了仿真分析。

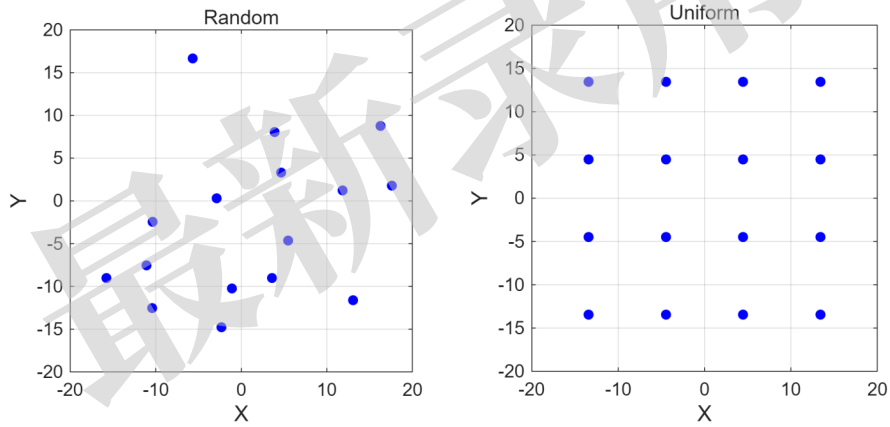


图8 16单元的随机阵（左）和均匀阵（右）阵列布局示意图

Figure 8 Schematic diagram of the array layout of a 16-element random array (left) and a uniform array (right)

在上述优化算法和本节计算阵列波束方向图当中，我们考虑了单元方向图，即实际方向图等于阵列因子和单元方向图的乘积。我们首先给出了不同频率和不同极化下的单元方向图：

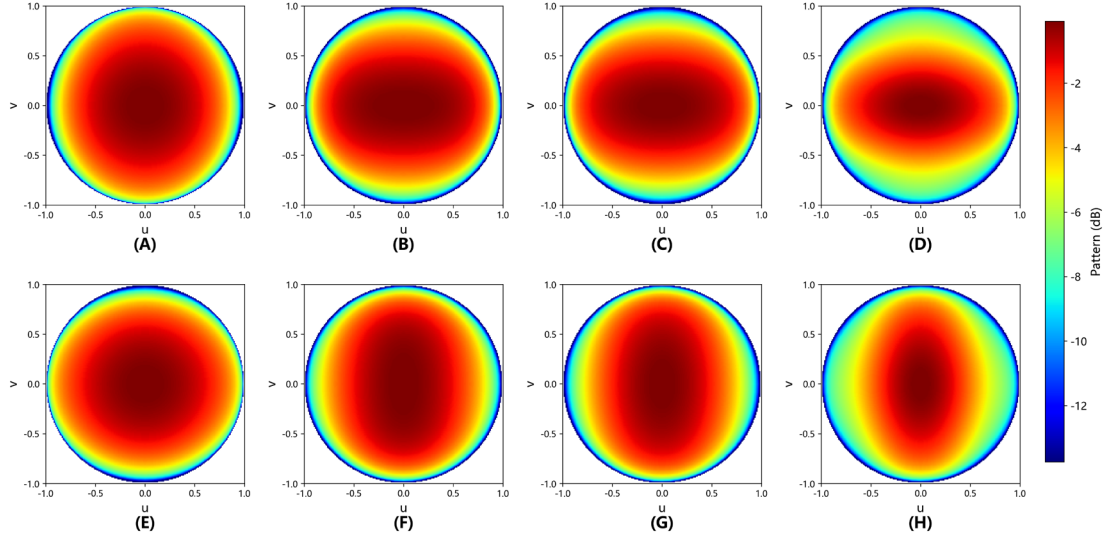


图 9 10MHz、30MHz、50MHz、80MHz 频率下的双极化单元方向图（上面一行是 X 极化，下面是 Y 极化）

Figure 9 Radiation patterns of the dual-polarized element at 10 MHz, 30 MHz, 50 MHz, and 80 MHz (top row: X-polarization; bottom row: Y-polarization)

在不同频率（10MHz、30MHz、50MHz 和 80MHz）和极化下，我们分别计算了上述随机阵、均匀阵、Vogel 螺旋阵、遗传和粒子群混合算法求解的阵列的合成波束全天空旁瓣比分布，如图 10-图 13 所示，从左到右分别是随机阵、均匀阵、Vogel 螺旋阵、基于遗传和粒子群混合优化算法的阵列（以下简称 PSOGA 优化阵）。

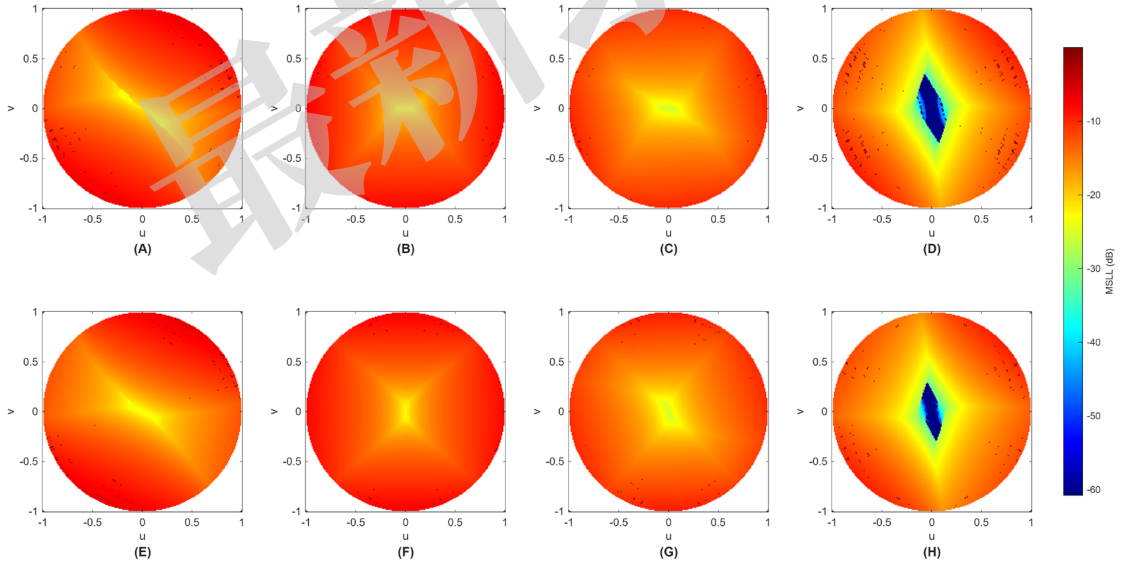


图 10 10MHz 频率下 X 和 Y 极化合成波束旁瓣比分布图（上面一行是 X 极化，下面是 Y 极化）

Figure 10 Distribution of X and Y polarization synthetic beam sidelobe ratios at 10 MHz (the top row is X-polarization, the bottom row is Y-polarization)

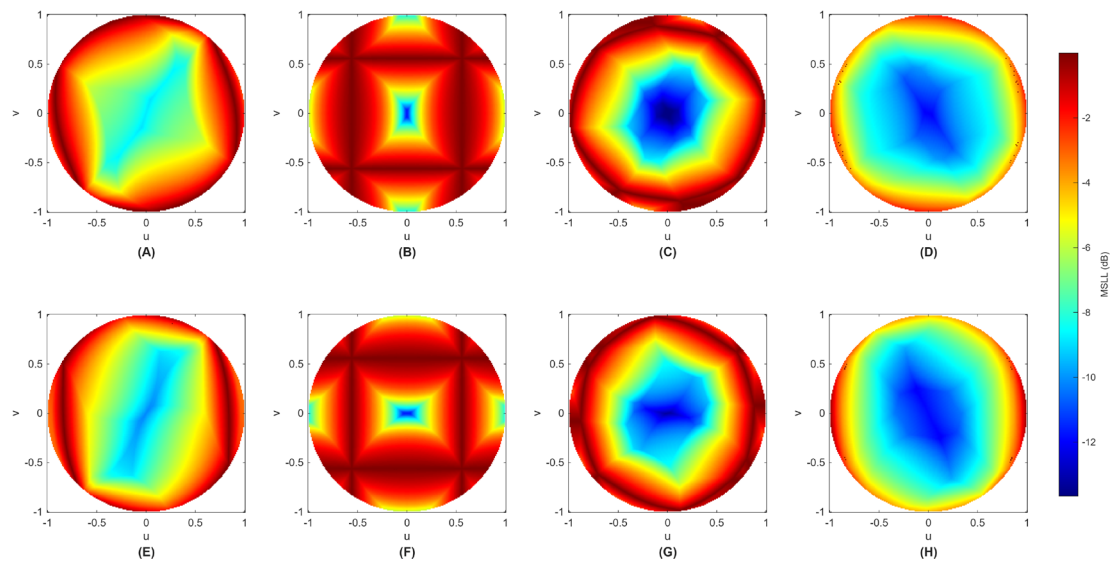


图 11 30MHz 频率下 X 和 Y 极化合成波束旁瓣比分布图（上面一行是 X 极化，下面是 Y 极化）

Figure 11 Distribution of X and Y polarization synthetic beam sidelobe ratios at 30 MHz (the top row is X-polarization, the bottom row is Y-polarization)

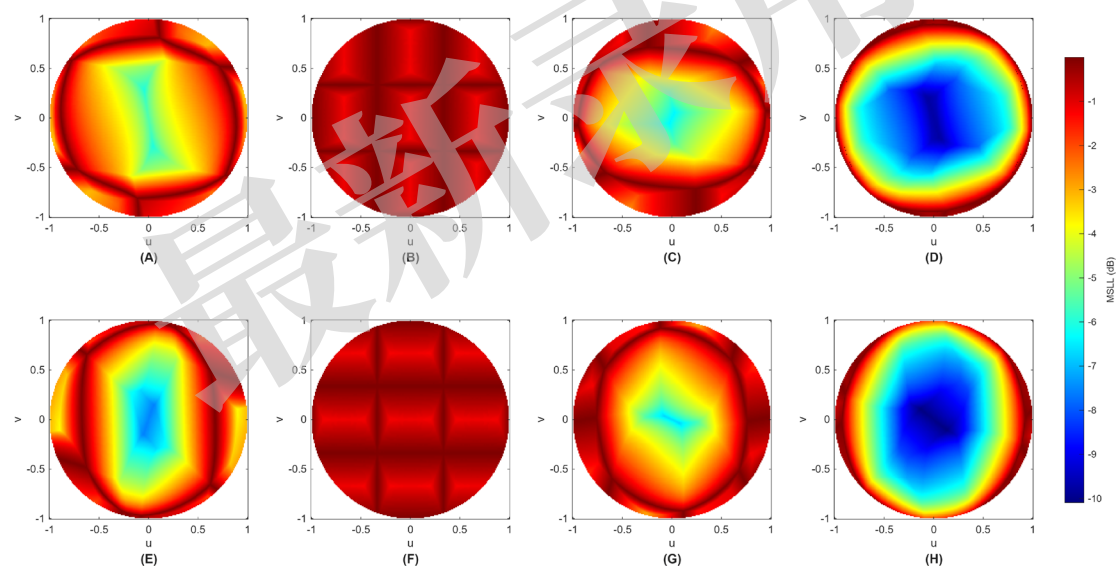


图 12 50MHz 频率下 X 和 Y 极化合成波束旁瓣比分布图（上面一行是 X 极化，下面是 Y 极化）

Figure 12 Distribution of X and Y polarization synthetic beam sidelobe ratios at 50 MHz (the top row is X-polarization, the bottom row is Y-polarization)

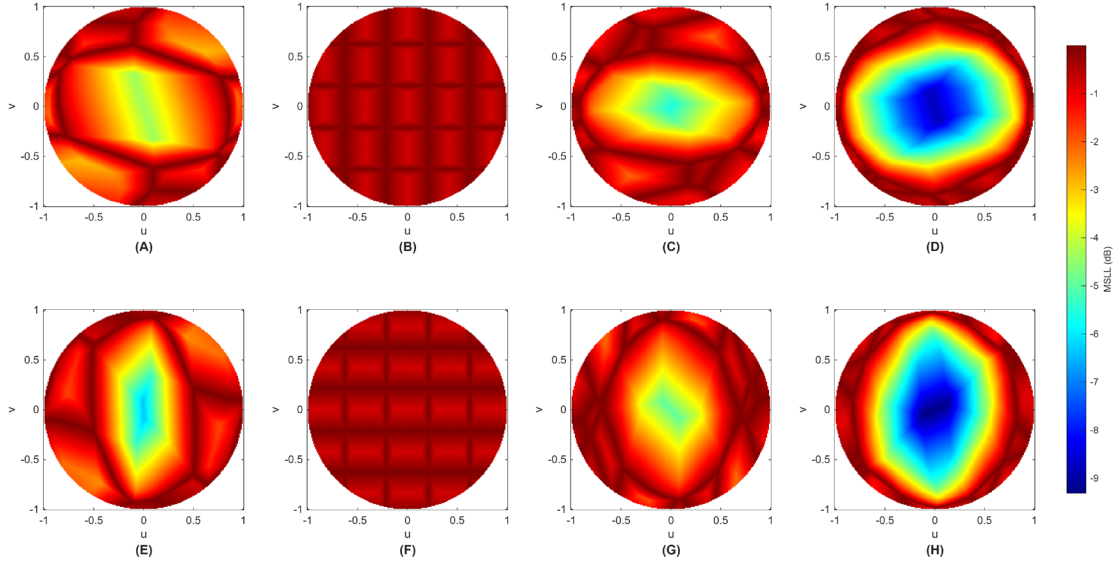
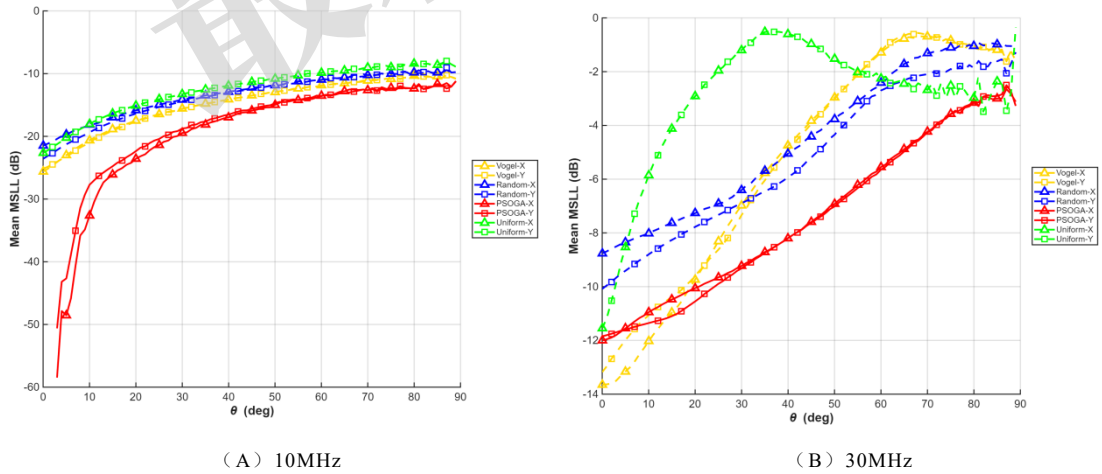


图 13 80MHz 频率下 X 和 Y 极化合成波束旁瓣比分布图（上面一行是 X 极化，下面是 Y 极化）

Figure 13 Distribution of X and Y polarization synthetic beam sidelobe ratios at 80 MHz (the top row is X-polarization, the bottom row is Y-polarization)

从上述仿真结果可以看出，在所有的频率上，在全天空的绝大部分区域内，本文提出的遗传和粒子群混合优化算法得到的阵列的合成波束都具有明显的优势；仅在 30MHz 频率左右，本文算法得到的阵列在天顶周围略差于 Vogel 螺旋阵的旁瓣比，但也满足秘鲁低频射电望远镜的技术指标要求。

为了进一步分析不同天顶角下阵列的合成波束性能，我们对上述四种不同阵列在不同频率和极化下分别计算了每 1 度天顶角间隔的合成波束旁瓣比，然后对每 1 度的波束旁瓣比求平均，得到的平均旁瓣比随天顶角的变化曲线，如图 14 所示。



(A) 10MHz

(B) 30MHz

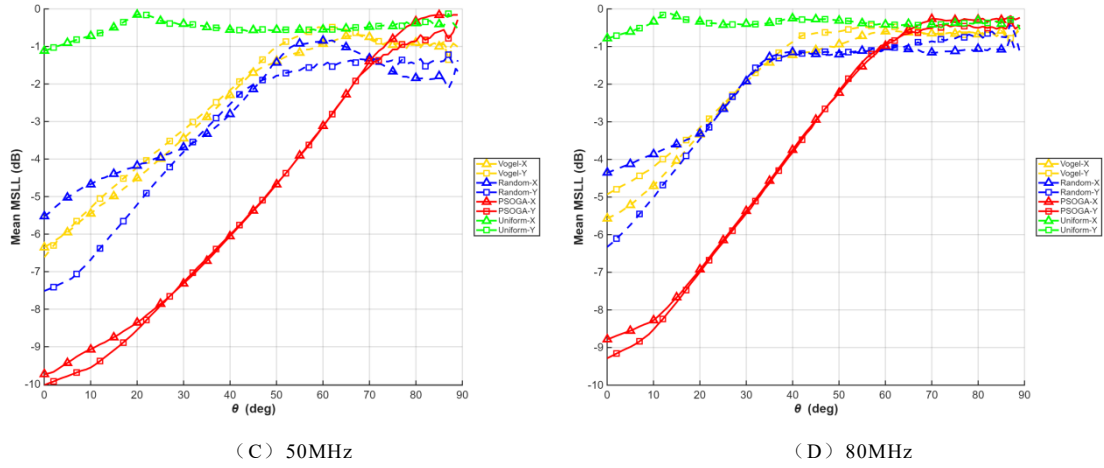


图 14 在 10、30、50 和 80MHz 频率下合成波束平均旁瓣比随天顶角的变化曲线图

Figure 14 Curves of the average sidelobe ratio of the synthetic beam as a function of zenith angle at frequencies of 10, 30, 50, and 80 MHz

由图 14 可以看到，虽然 10MHz 频率比较低，所有四种阵列的旁瓣都比较低，但本文算法得到的阵列在所有天顶角下的旁瓣比都优于其他阵列。在 30MHz 频率，本文优化得到的阵列在天顶 15 度以内，旁瓣比略高于 Vogel 螺旋阵约 1~2dB，而在其他天顶角方向上均优于其他阵列。在 50MHz 和 80MHz 频率上，本文设计的阵列分别仅在 20 度和 30 度仰角以下旁瓣比略差于其他阵列，而在其他方向上比随机阵、均匀阵和 Vogel 螺旋阵的旁瓣比平均提高约 2dB。而在实际的研究中，由于地面反射会带来的额外热噪声，且低仰角下所有稀疏孔径阵列的合成波束性能都较差，因此大多数情况下我们更关注高仰角天区的观测。综上，本文基于遗传和粒子群混合算法优化后得到的阵列布局整体上具有更优的性能，且满足望远镜的技术指标要求。

与此同时，在 $40\text{m} \times 40\text{m}$ 范围内，假定最小阵元间隔为 4m，我们测试了不同阵元数量下阵列优化算法迭代 50 次所需时间，如表 2 和图 15 所示：

表 2 不同阵元数量下的迭代时间

Table 2 Iteration Time for Different Numbers of Array Elements

阵元数量	50 次迭代总时间	每代平均时间
16	7991s	159.82s
32	7998s	159.96s
48	8105s	162.1s

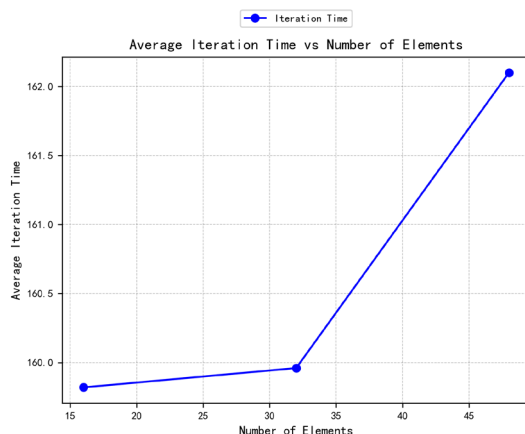


图 15 迭代 50 次不同阵元数量下的平均迭代时间

Figure 15 Average Iteration Time over 50 Iterations for Different Numbers of Array Elements

从上图 15 可以看出，当阵元数量增加后，优化所需的时间几乎不变，这是因为迭代过程中算法所花的时间主要在抠取主瓣求解旁瓣比上。当阵元数量增多时，抠取主瓣的时间影响并不是很大，致使整个迭代过程所花的时间几乎不变。因此，本算法的时间复杂度与阵列单元数关系并不大，对于大规模阵列优化仍然具有良好的效果。

5 总结

对于太阳爆发活动产生的 CME、行星际激波、高能粒子，以及受它们调制的太阳风等空间天气事件，低频射电观测是最直接也是最主要的探测手段。针对国际子午圈“日不落”分系统拟建设的秘鲁低频射电望远镜阵，本文提出了基于改进遗传和粒子群混合算法的阵列布局优化方法，旨在降低 1~80MHz 频段阵列的全天空的平均旁瓣比，从而提升望远镜灵敏度。通过仿真分析发现，本文算法求解的阵列布局比随机阵、均匀阵、Vogel 螺旋阵在所有频段、不同极化以及全天空大部分区域有着更优的合成波束旁瓣比。这一设计可以为秘鲁低频射电望远镜的建设提供重要的依据，也可以为未来大型低频射电望远镜阵列的设计提供参考。

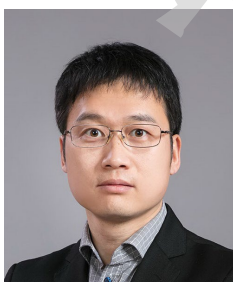
参考文献

- [1] VAN HAARLEM M P, WISE M W, GUNST A W, *et al.* LOFAR: the low-frequency array[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2013, **556**: A2
- [2] ELLINGSON S W, TAYLOR G B, CRAIG J, *et al.* The LWA1 radio telescope[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, **61**(5): 2540-2549
- [3] HENNING P, ELLINGSON S W, TAYLOR G B, *et al.* The first station of the long wavelength array[C]//3rd International SKA Forum, Science Meeting (ISKAF 2010). Assen: ISKAF, 2010: 024
- [4] OBEROI D, MATTHEWS L D, CAIRNS I H, *et al.* First spectroscopic imaging observations of the sun at low radio frequencies with the munchison widefield array prototype[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, **728**(2): L27
- [5] ZARKA P, TAGGER M, DENIS L, *et al.* NenUFAR: instrument description and science case[C]//2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kharkiv: IEEE, 2015: 1-6

- [6] BOLLI P, DAVIDSON D B, BERCIGLI M, *et al.* Computational electromagnetics for the SKA-Low prototype station AAVS2[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2022, **8**(1): 011017
- [7] WANG J, DUAN C S, YU Q, *et al.* Predicting low ionospheric parameters and low frequency sky wave propagation strength using machine learning[J]. *Scientific Reports*, 2025, **15**(1): 4079
- [8] HOLLAND J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975
- [9] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE, 1995, 4: 1942-1948
- [10] DI J R, DONG L, HE W. Sparse optimization of planar radio antenna arrays using a genetic algorithm[J]. *Astronomical Techniques and Instruments*, 2025, **2**(2): 100-110.
- [11] LIU Jiangling, WANG Xiaomo. An improved particle swarm optimization for synthesis of the linear sparse arrays with constraint of minimum element spacing[J]. *Journal of Microwaves*, 2010, **26**(5): 7-10. DOI: 10.14183/j.cnki.1005-6122.2010.05.012 (刘姜玲, 王小谟. 改进粒子群算法综合有间距约束的稀布阵列[J]. 微波学报, 2010, **26**(5): 7-10. DOI: 10.14183/j.cnki.1005-6122.2010.05.012)



付越 男，2002 年 11 月出生于湖北省十堰市，中国科学院大学天文技术与方法专业读硕士，主要研究方向为基于优化算法的低频射电阵列设计。



陈林杰 男，1981 年 7 月出生于河南省南阳市，现为中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师，主要研究方向射电综合孔径阵列数据处理、校准与成像，低频射电天，高能宇宙线和中微子的射电探测等。