

相控阵雷达波束和极化参数联合调控方法

陈浩川¹, 楚雪梅¹, 李凉海², 张振华³

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 中国航天电子技术研究院 北京 100094;

3 北京航空航天大学 北京 100191)

摘要: 考虑到成本和集成度等约束, 传统的相控阵天线通常是单极化的或分时多极化的, 并不对发射或接收信号时的极化形式进行精细调控, 这会制约相控阵天线极化域效能的发挥。针对此问题, 本文基于异构全极化相控阵, 对其波束指向和极化参数进行联合调控, 力图以较低的成本实现相控阵天线的全极化应用。首先, 提出异构全极化相控阵的概念; 然后, 建立异构全极化相控阵的波束指向和极化参数联合调控数学模型; 最后, 提出联合调控方法并进行数学仿真。仿真结果证明了异构全极化相控阵的波束指向和极化参数联合调控方法的正确性和有效性。

关键词: 异构全极化相控阵; 波束指向控制; 极化参数控制

中图分类号: TN958.92; TN821+.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2024)06-0112-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240322001

引用格式: 陈浩川, 楚雪梅, 李凉海, 等. 相控阵雷达波束和极化参数联合调控方法[J]. 遥测遥控, 2024, 45(6): 112-120.

A Joint Regulation Method for Phased Array Radar Beam and Polarization Parameters

CHEN Haochuan¹, CHU Xuemei¹, LI Lianghai², ZHANG Zhenhua³

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. China Aerospace Electronics Technology Research Institute, Beijing 100094, China;

3. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Considering cost and integration constraints, traditional phased array antennas are usually single-polarized or time-multiplexed polarized and do not finely regulate the polarization form when transmitting or receiving signals, which constrains the polarization domain efficiency of phased array antennas. To address this issue, this paper is based on heterogeneous fully polarized phased arrays and jointly regulate their beam pointing and polarization parameters, in an attempt to achieve the full polarization application of phased array antennas at a lower cost. Firstly, the concept of heterogeneous fully polarized phased arrays is proposed; then, the mathematical model for the joint regulation of beam pointing and polarization parameters of heterogeneous fully polarized phased arrays is established; finally, a joint regulation method is proposed and mathematically simulated. The simulation results demonstrate the correctness and effectiveness of the joint regulation method for beam pointing and polarization parameters of heterogeneous fully polarized phased arrays.

Keywords: Heterogeneous fully polarized phased array; Beam pointing control; Polarization parameter control

Citation: CHEN Haochuan, CHU Xuemei, LI Lianghai, et al. A Joint Regulation Method for Phased Array Radar Beam and Polarization Parameters[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(6): 112-120.

0 引言

在现代作战应用背景下, 射频末制导系统面

临的作战环境呈现出“高动态、多目标、强对抗”等趋势, 电磁环境极端复杂, 干扰信号、场景杂波和目标信号在时域、频域、空域等维度上的特

征差异被严重压缩,导致难以发现和识别目标。而对于实施主动干扰的干扰机而言,期望接收信号时是极化不敏感的(减少极化失配),发射干扰信号时和待干扰目标的极化相适配(提升干扰效能)。全极化相控阵技术被认为是应对上述难题的有效手段,是当前技术的重要发展趋势。国内相关学者对极化相控阵天线的研究重心通常聚焦于全阵分时多极化,或者以划分子阵的方式对不同的子阵采用不同的极化,这种方式虽然控制了成本但是未能发挥相控阵天线在极化域的最大效能,影响工程应用。

文献[1]提出一款 $\pm 45^\circ$ 双极化相控阵,可以实现 $-45^\circ \sim +45^\circ$ 的线极化波束扫描和圆极化波束扫描,但是不能按需实现任意极化的波束扫描。文献[2]提出一种高效率双波段双极化共口径天线子阵,实现了C/L双波段、双极化共口径天线子阵设计,其中C波段为双极化工作、L波段为单极化工作,C波段和L波段占据不同的子阵,亦不支持任意的极化形式。上述研究工作均制约了相控阵天线极化域的使用灵活性。

针对按需形成极化并进行波束指向控制的难题,本文提出一种异构全极化相控阵技术,并实现波束指向和极化参数联合调控。首先,提出异构全极化相控阵的概念;然后,建立异构全极化相控阵的波束指向和极化参数联合调控数学模型;最后,提出联合调控方法并进行数学仿真,以证明方法的可行性和有效性。

1 异构全极化相控阵概念

考虑到设计加工的便捷性和一致性,传统相控阵天线架构往往默认天线单元被规则布置在阵面孔径栅格之上,即每个天线单元除了在阵列中的位置不同,其它(包含天线单元的极化形式)都相同,这种架构的阵列被称为“同构相控阵”。为了突出双极化或多极化的优势,传统同构相控阵需要把每个天线单元都设计成双极化形式,并配备不同的极化端口,天线单元后端的T/R组件中设计切换开关,以实现不同的极化形式切换,或者将T/R组件的通道数翻倍,每一个极化端口配置一个T/R通道。这种传统方式只能在几种极化形式中选择,而不能实现按应用需求形成所需的任意极化,且可能由于T/R组件的通道数翻倍而导致系统复杂

度和成本大幅增加。

异构全极化相控阵是相对于同构而言的,直观上可以理解为阵列布局非规则,或天线单元之间不再具有一致性,即通过对阵列进行差异化设计实现更优的阵列性能和更低的阵列成本。根据异构形式的不同,可分为天线单元级异构、子阵级异构和空间分布级异构。单元级异构是指每个天线单元的极化形式是不同的;子阵级异构是指相控阵天线的每个子阵的极化形式是不同的,但子阵内是相同的;空间分布级异构是指编队中每个雷达的极化形式都不相同。为了不失一般性,后文的讨论均基于天线单元级异构,其示意图如图1所示,采用了不同极化混合排布和旋转排布两种方式实现天线单元级异构。

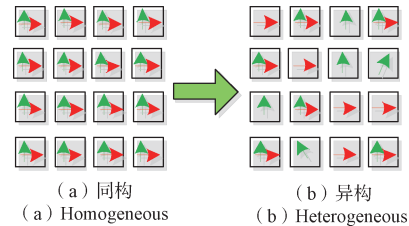


图1 单元级异构全极化相控阵天线

Fig.1 Unit level heterogeneous fully polarized phased array antenna

2 异构全极化相控阵波束指向和极化参数联合调控数学模型

如图2所示,将异构全极化相控阵天线阵面放置于 XOY 平面内。假设期望的波束指向为 $[\theta, \varphi]$,其中 θ 为方位角、 φ 为俯仰角。为了简化分析,假设相控阵天线中每个天线单元都是线极化的,但是它们各自的极化指向不同,且极化指向均在 XOY 平面内,定义任意天线单元 i 的极化指向角 α_i ($i=1,2,\dots,N$)为天线单元 i 的极化指向同 OX 轴正方向的夹角, N 为总的天线单元数。

波束指向在空间直角坐标系上的方向单位矢量为^[3-7]:

$$\mathbf{r} = (\cos\varphi\cos\theta, \cos\varphi\sin\theta, \sin\varphi) \quad (1)$$

记 \mathbf{l}_i 为各个天线单元的位置矢量,则各天线单元上的空域相移因子为:

$$u_i = e^{-j2\pi\lambda(\mathbf{l}_i \cdot \mathbf{r}^T)}, i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

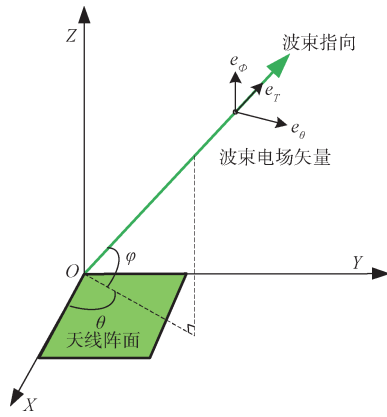


图 2 异构全极化相控阵天线波束指向定义

Fig. 2 Definition of beam pointing for heterogeneous fully polarized phased array antennas

则波束指向上的导向矢量为:

$$\mathbf{a} = \mathbf{r}(\theta, \varphi) \mathbf{B} \boldsymbol{\phi}(\theta, \varphi) \mathbf{h}(\gamma, \eta) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{r}(\theta, \varphi) = \text{diag}\{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 为波束指向在阵列各单元处空域相移因子构成的对角阵, 只和波束指向的方向角度有关; \mathbf{B} 为天线单元的极化敏感矩阵, 同各天线单元的极化指向有关; $\boldsymbol{\phi}(\theta, \varphi)$ 是与波束指向相关的矩阵; $\mathbf{h}(\gamma, \eta)$ 为与需要调控极化辅助角、极化相位差角等极化参数相关的矩阵。它们的表示式如下:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & \text{zeros}(1, 4) \\ \sin\alpha_2 & \cos\alpha_2 & \text{zeros}(1, 4) \\ \sin\alpha_3 & \cos\alpha_3 & \text{zeros}(1, 4) \\ \sin\alpha_4 & \cos\alpha_4 & \text{zeros}(1, 4) \\ \dots & \dots & \dots \\ \sin\alpha_N & \cos\alpha_N & \text{zeros}(1, 4) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{zeros}(1, 4) = [0, 0, 0, 0]$$

$$\boldsymbol{\phi}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \sin\varphi\cos\theta \\ \cos\theta & \sin\varphi\sin\theta \\ 0 & -\cos\varphi \\ \sin\varphi\cos\theta & \sin\theta \\ \sin\varphi\sin\theta & -\cos\theta \\ -\cos\varphi & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{h}(\gamma, \eta) = \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma e^{j\eta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

依据上述数学模型, 计算波束指向上的导向矢量 \mathbf{a} , 得到各天线单元的幅相配置值, 将异构全极化相控阵波束指向和极化参数的联合调控问题转化为对天线单元的幅相控制问题, 并付诸执行,

即可达到联合调控的目的。

3 原理性仿真

采用数学仿真的方式进行异构全极化相控阵的波束指向和极化参数联合调控方法原理性仿真, 仿真条件如表 1 所示。在如图 3 所示的异构全极化相控天线排布方式下, 仿真结果如图 4 所示。

表 1 原理性仿真条件

Table 1 Principled simulation conditions

参数名称	参数取值	备注
相控阵阵元规模	20 × 20	
布阵形式	正方形平面布阵	
阵元间距/mm	$d_x = 9, d_y = 9$	
天线单元的极化形式	水平极化、垂直极化两种极化形式随机分布, 且各占 50%	
目标波束指向	方位角 0°, 俯仰角 80° (即波束指向同 Z 轴正方向夹角为 10°)	
目标极化参数	极化辅助角 45°、极化相位差角 0° 即 45° 线极化	
信号频率	16 GHz	

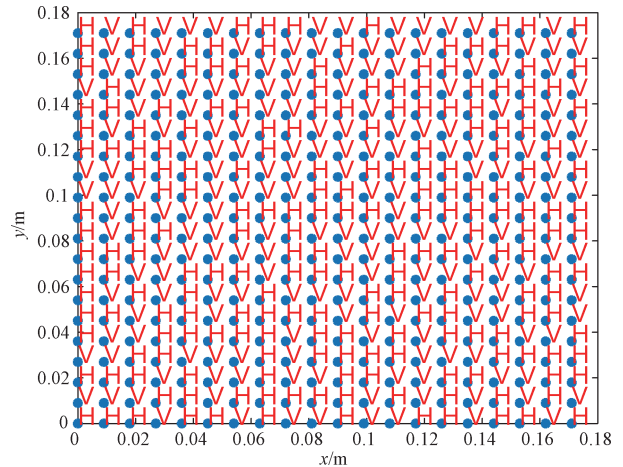


图 3 异构全极化相控阵天线阵单元排布及其极化形式 (H=水平极化, V=垂直极化)

Fig. 3 Heterogeneous fully polarized phased array antenna element arrangement and polarization form (H=horizontal polarization, V=vertical polarization)

保持其他所有条件不变, 将目标波束指向更改为方位角 $\theta = 10^\circ$ 、俯仰角 $\varphi = 60^\circ$ (即波束指向同 Z 轴正方向夹角为 30°), 将目标极化参数更改为极化辅助角 45°、极化相位差角 90° (即圆极化), 方向图仿真结果如图 5 所示。

从上述仿真结果可以看出: 本文提出的异构全极化相控阵的波束指向和极化参数联合调控方

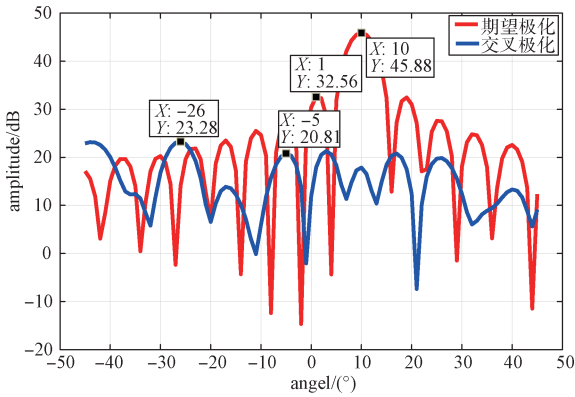


图4 异构全极化相控阵天线方向图(俯仰切面, $\theta=0^\circ, \phi=80^\circ$)

Fig. 4 Heterogeneous fully polarized phased array antenna pattern(elevation section, $\theta=0^\circ, \phi=80^\circ$)

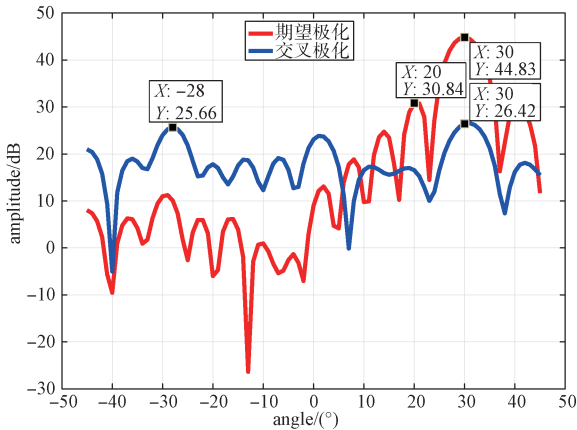


图5 异构全极化相控阵天线方向图(俯仰切面, $\theta=10^\circ, \varphi=60^\circ$)

Fig. 5 Heterogeneous fully polarized phased array antenna pattern(elevation section, $\theta=10^\circ, \varphi=60^\circ$)

法正确有效,在保证波束指向和极化参数正确的条件下,还保证了方向图的副瓣电平性能(主副瓣电平相差约13 dB,和正方形布阵的13 dB主副瓣电平差一致),原理正确。

4 采用遗传算法对天线阵进行性能优化

遗传算法是模拟生物种群进化过程中优胜劣汰、适者生存法则的全局随机优化算法。类比生物繁衍过程,种群中的大量个体进行基因交叉和基因突变,选择性能优异的后代个体,对保留的个体进行繁殖后代,直到满足需求的个体出现。作为全局性的概率优化算法之一,遗传算法适用范围广,简单易操作,对于解决传统搜索方法中难以处理的复杂非线性问题有着很强的适用性^[8]。

经典的遗传算法包含种群的生成、选择、交叉、变异等过程^[9-11]。针对相控阵天线雷达波束和极化参数联合调控的优化设计,其约束条件包括阵元的位置、部分阵元的关断(相当于进行幅度加权)、各个阵元的极化形式选择等。为了简化分析,本文不对阵元位置进行优化,并将降低天线方向图旁瓣和最大化期望极化与交叉极化在波束指向上的电平差作为优化目标,在波束指向和极化参数联合调控时自适应地关断部分阵元,自适应地选择各阵元的极化形式,以达到优化目的。

4.1 初始种群

采用遗传算法对天线阵分两个阶段进行性能优化,第一阶段为降低天线方向图旁瓣阶段,第二阶段为最大化期望极化与交叉极化在波束指向上的电平差阶段。

在第一阶段将种群个体设置为每个阵元的打开关断标志矩阵,该矩阵中每个元素为0或1,并令0表示关断、1表达打开,矩阵的行数、列数与相控阵天线阵列的行数、列数分别相同。为了保证性能,还应控制被关断阵元的占比。每个种群个体满足的约束条件如下:

$$\begin{cases} s_{i,k} \in [0, 1] \\ i \in [1, M], k \in [1, N] \\ N_0/N_{\text{all}} \leq p \end{cases} \quad (7)$$

式中, $s_{i,k}$ 为第一阶段任意一个种群个体第 i 行、第 k 列元素, M 为种群个体行数, N 为种群个体列数, N_0 为0元素的个数, $N_{\text{all}} = M \times N$ 为第一阶段任意一个种群个体所有元素的个数, p 为被关断阵元的最大占比,且 $s_{i,k}$ 取0或取1是随机的。每个种群个体取相同的 p 值。

在第二阶段将种群个体设置为每个阵元的极化标志矩阵,为了简化分析,每个阵元的极化形式为水平极化或垂直极化(二者选一)。该矩阵中每个元素为0或1,并令0表示水平极化、1表达垂直极化,矩阵的行数、列数与相控阵天线阵列的行数、列数分别相同。每个种群个体满足的约束条件如下:

$$\begin{cases} g_{i,k} \in [0, 1] \\ i \in [1, M], k \in [1, N] \\ N_0/N_{\text{all}} \leq q \end{cases} \quad (8)$$

式中, $g_{i,k}$ 为第二阶段任意一个种群个体第 i 行、第 k 列元素, M 为种群个体行数, N 为种群个体列数,

N_0 为 0 元素的个数, $N_{\text{all}} = M \times N$ 为种群个体所有元素的个数, q 为水平极化的阵元个数的最大占比, 且 $g_{i,k}$ 取 0 或取 1 是随机的。每个种群个体取不同的 q 值。

4.2 适应度函数

在 4.1 节所述的第一阶段, 适应度函数设置为期望波束指向上, 方向图方位俯仰两个切面最高旁瓣电平与期望指向电平差值的和, 示意图如图 6 所示。

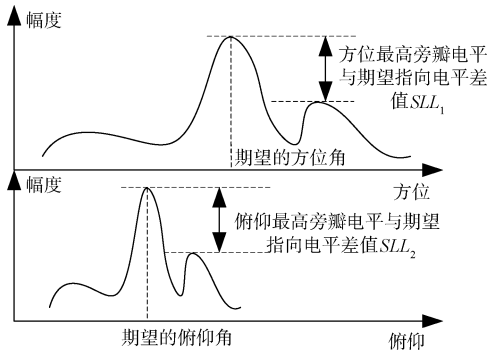


图 6 方向图方位俯仰两个切面最高旁瓣电平示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the highest sidelobe level in the azimuth and pitch of the two sections

第一阶段的优化目标为尽可能降低天线方向图旁瓣, 优化模型为:

$$\begin{cases} \max \{ SLL_1(\theta, \phi) + SLL_2(\theta, \phi) \} \\ s_{i,k} \in [0, 1] \\ i \in [1, M], k \in [1, N] \\ N_0/N_{\text{all}} \leq p \end{cases} \quad (9)$$

式中, SLL_1 为方位最高旁瓣电平与期望指向电平差值, SLL_2 为俯仰最高旁瓣电平与期望指向电平差值, θ 为期望的方位角, ϕ 为期望的俯仰角。

第一阶段适应度函数为:

$$fit1 = |\max \{ SLL_1(\theta, \phi) + SLL_2(\theta, \phi) \}| \quad (10)$$

在 4.2 节所述的第二阶段, 适应度函数设置为期望波束指向上, 方向图方位俯仰两个切面主极化和交叉极化电平差值的和, 示意图如图 7 所示。

第二阶段的优化目标为尽可能最大化期望极化与交叉极化在波束指向上的电平差, 优化模型为:

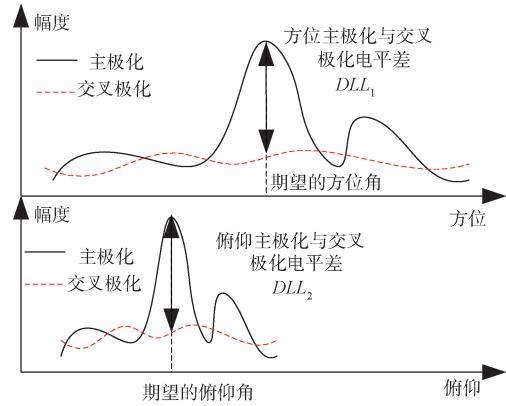


图 7 方向图主极化和交叉极化电平差值示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the difference between the main and cross polarization levels of the pattern

$$\begin{cases} \max \{ DLL_1(\theta, \phi) + DLL_2(\theta, \phi) \} \\ g_{i,k} \in [0, 1] \\ i \in [1, M], k \in [1, N] \\ N_0/N_{\text{all}} \leq q \end{cases} \quad (11)$$

式中, DLL_1 为方位主极化与交叉极化电平差值, DLL_2 为俯仰主极化与交叉极化电平差值。

第二阶段适应度函数为:

$$fit2 = |\max \{ DLL_1(\theta, \phi) + DLL_2(\theta, \phi) \}| \quad (12)$$

4.3 遗传操作

采用如下的步骤进行遗传操作。

步骤 1: 生成第一阶段初始化种群, 初始化迭代次数、种群大小等参数。

步骤 2: 采用基于轮盘赌的复制操作、基于概率的交叉操作和基于概率的变异操作, 进行第一阶段遗传优化。

步骤 3: 计算第一阶段每个个体的适应度, 保存最佳个体。

步骤 4: 生成第二阶段初始化种群, 初始化迭代次数、种群大小等参数。

步骤 5: 在第一阶段最佳个体的基础上, 采用基于轮盘赌的复制操作、基于概率的交叉操作和基于概率的变异操作, 进行第二阶段遗传优化。

步骤 6: 计算第二阶段每个个体的适应度, 保存最佳个体。

步骤 7: 输出最佳个体, 得到最后的最优解。

4.4 性能优化仿真

采用数学仿真的方式进行异构全极化相控阵的波束指向和极化参数联合调控方法性能优化仿真, 仿真条件如表 2 所示。

表2 性能优化仿真条件
Table 2 Performance optimization simulation conditions

参数名称	参数取值	备注
相控阵阵元规模	60×60	
布阵形式	正方形平面布阵	
阵元间距/mm	$d_x=9, d_y=9$	
第一阶段优化参数	种群数量30,最大迭代次数30,交叉率0.8,变异率0.1,允许被关断阵元的最大占比0.1	
第二阶段优化参数	种群数量30,最大迭代次数30,交叉率0.8,变异率0.1,每个种群个体极化形式为水平极化的阵元个数的最大占比,在0到1之间均匀分布随机取值	
目标波束指向	方位角40°,俯仰角75°(即波束指向同Z轴正方向夹角为15°)	
目标极化参数	极化辅助角45°、极化相位差角90°	
信号频率	16 GHz	
引入的工程实现误差	各阵元相位误差服从均值为0,方差为5°的正态分布;各阵元幅度误差服从均值为0,方差为1 dB的正态分布	多次迭代过程中工程实现误差保持不变

经过两阶段优化后的最终结果如图8~图12所示。

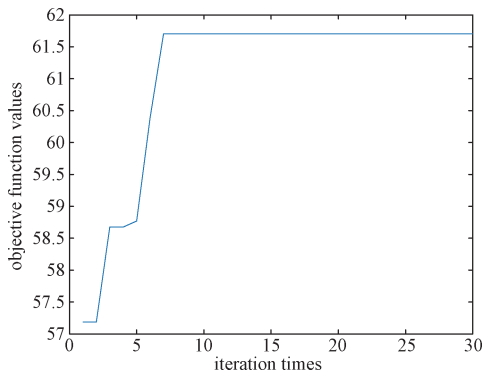


图8 第一阶段优化适应度进化曲线

Fig. 8 The first stage optimizes the fitness evolution curve

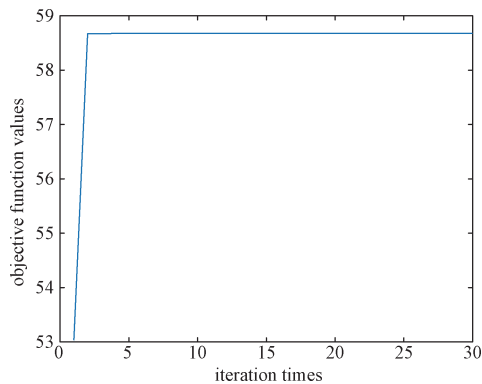


图9 第二阶段优化适应度进化曲线

Fig. 9 The second stage optimizes the fitness evolution curve

从图8~图9的仿真结果可以看出：采用遗传算法对天线阵进行性能优化时，两阶段优化均在迭代10次以内收敛，具有良好的收敛特性。从图10的仿真结果可以看出：两阶段优化后获得了打开

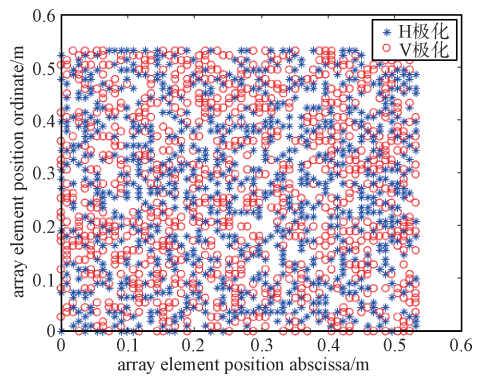


图10 天线阵最终优化结果(阵元空缺的位置表示该阵元关闭)

Fig.10 The final optimization result of the antenna array (the vacant position of the array element indicates that the array element is closed)

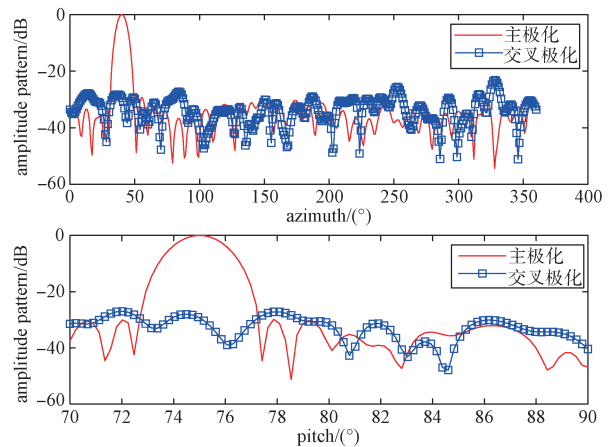


图11 优化后方向图

Fig. 11 Optimized the rear pattern

和关闭阵元的位置及各阵元的极化形式，为后续的雷达波束和极化参数联合调控提供了控制依据。

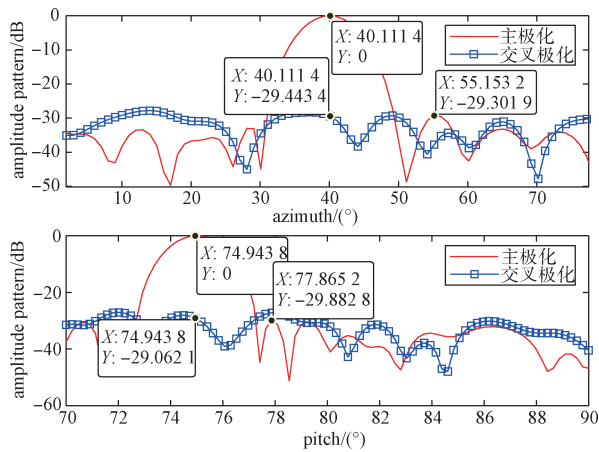


图 12 优化后方向图局部放大

Fig.12 After optimization, the pattern is partially enlarged

从图 11~图 12 的仿真结果可以看出：优化后方位切面主极化最高旁瓣为 -29.3 dB、主极化和交叉极化的电平差为 29.4 dB，俯仰切面主极化最高旁瓣为 -29.9 dB、主极化和交叉极化的电平差为 29.1 dB，具有良好的性能。

上述仿真是针对 16 GHz 这一个频点进行优化的，为了进一步检验优化后天线阵列的性能，不改变表 2 的其他仿真条件，只改变不同的频点，不同频点下的阵列性能如图 13 所示。从图 13 可以看出：优化后的天线阵列在不同的频点上同样性能优良，达到了设计目的。

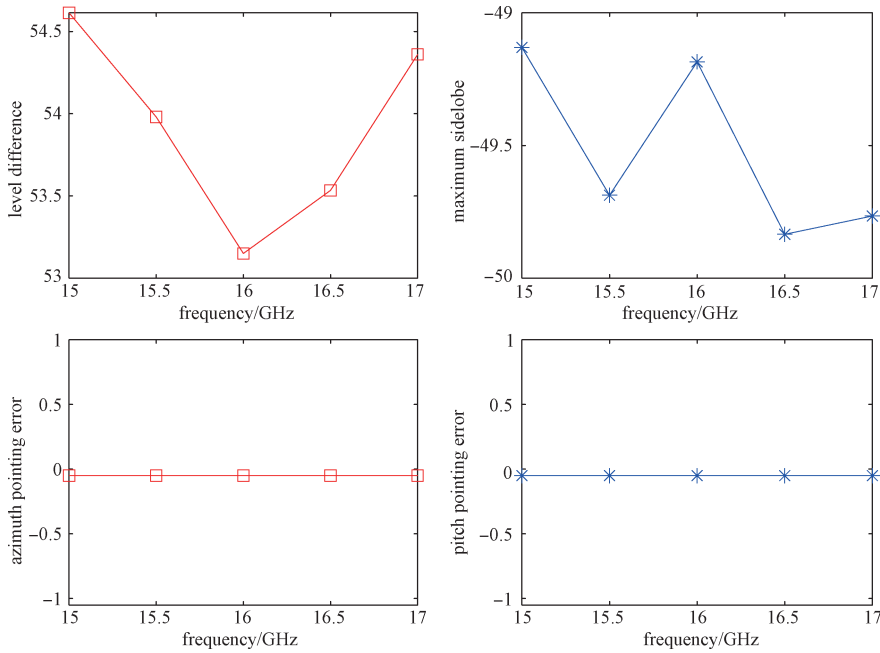


图 13 优化后天线阵列在不同频点上的性能

Fig.13 The performance of the antenna array at different frequency points

5 先进性与优势分析

5.1 本文阵列优化算法优势分析

常用的阵列优化方法有基于精确模型的确定性优化方法和数值优化方法等。确定性优化方法依赖于解析公式或给定的模型，当阵列规模较大时复杂度显著提高，设计难度加大。数值方法如迭代傅里叶方法等计算量大。本文采用基于遗传算法的智能优化方法，优势在于：

① 本文所提算法以一种方法实现了两个不同类型问题的优化，即第一阶段采用稀疏布阵的方

式降低了天线方向图旁瓣，第二阶段采用极化异构的方式最大化了期望极化与交叉极化在波束指向上的电平差；

② 本文所提算法从问题解的串集开始搜索，而不是从单个解开始，传统优化算法是从单个初始值迭代求最优解的，容易陷入局部最优解，遗传算法从串集开始搜索，覆盖面大，可以并行运算，利于全局择优；

③ 本文所提算法基本上不用搜索空间的知识或其他辅助信息，而仅用适应度函数来评估个体，在此基础上进行遗传操作，适应度函数不仅不受

连续可微的约束,而且其定义域可以随意设定;

④ 本文算法不是采用确定性规则,而是采用概率的变迁规则来指导搜索方向,方法简单灵活;

⑤ 本文算法具有自组织、自适应和自学习性,利用进化过程获得的信息自行组织搜索时,适应度大的个体具有较高的生存概率,并获得更适应环境的基因结构;

⑥ 本文算法便于进一步改进和优化,可采用动态自适应技术在进化过程中自动调整算法控制参数和编码精度,进一步提升性能。

5.2 波束指向和极化参数联合调控方法优势分析

传统波束指向和极化参数调控方法波束指向控制和极化参数调控通常是分开的。波束指向通过对相控阵天线单元的幅相加权实现;极化的调控通常利用模拟方法实现,如利用开关网络选择不同极化形式的天线单元来获得所需要的极化形式,或设计专门的极化合成电路来实现极化参数控制,通常只能获得有限种类数的极化形式而难以得到任意形式的极化,如文献[1]提出的一款 $\pm 45^\circ$ 双极化相控阵只能实现线极化和圆极化。本文方法将异构全极化相控阵波束指向和极化参数的联合调控问题转化为对天线单元的幅相控制问题,原理简单、成本低,并可在任意波束指向上形成任意形式的极化。

5.3 与极化同构阵相比的性能优势分析

异构全极化相控阵具有联合处理信号空域和极化域信息的能力,在雷达、通信等领域有着广泛应用。与同构阵相比,异构阵由于具有更丰富的极化信息,从而能获得更好的性能,如更高的阵列自由度、更高的角度分辨率、更大的通信用户容量和更强的抗干扰能力等,并且异构稀疏阵列能够大幅度降低相控阵天线系统的成本。

6 结束语

极化作为电磁波的本质属性,是幅度、频率、相位以外的重要基本参量,描述了电磁波的矢量特征^[12]。对于探测而言,目标散射电磁波的极化深刻反映了目标的形状、结构、材质等物理特征,也蕴含了背景信号的丰富特征信息。对于主动干扰而言,期望接收信号时是极化不敏感的(减少极化失配)、发射干扰信号时和待干扰目标的极化相适配(提升干扰效能)。这对设计低成本的全极化相控阵提出了新的要求。本文提出了一种异构全极

化相控阵的波束指向和极化参数联合调控方法,经仿真验证,算法正确有效、性能优良,可作为设计和使用低成本全极化相控阵天线的有益参考。

参考文献

- [1] 王淋平,丁霄,曾羽. 一款 $\pm 45^\circ$ 双极化相控阵[C]//中国电子学会微波分会. 2020年全国微波毫米波会议论文集(下册). 北京,中国电子学会微波分会. 2020: 677-679.
- [2] 张智慧,汪伟,陈明,等. 一种高效率双波段双极化共口径天线子阵[J]. 电子测试, 2019(4): 71-72, 140. ZHANG Zhihui, WANG Wei, CHEN Ming, et al. High efficiency dual-band dual-polarization subarray antenna[J]. Electronic Test, 2019(4): 71-72, 140.
- [3] 曾富红,曲志昱,司伟建. 极化敏感阵列的DOA及极化参数降维估计算法[J]. 应用科技, 2017, 44(3): 39-42, 90. ZENG Fuhong, QU Zhiyu, SI Weijian. Dimension-reduction for DOA and polarization estimation based on polarization sensitive array[J]. Applied Science and Technology, 2017, 44(3): 39-42, 90.
- [4] 司伟建,朱瞳,张梦莹. 平面极化天线阵列的DOA及极化参数降维估计方法[J]. 通信学报, 2014, 35(12): 28-35. SI Weijian, ZHU Tong, ZHANG Mengying. Dimension-reduction MUSIC for jointly estimating DOA and polarization using plane polarized arrays[J]. Journal on Communications, 2014, 35(12): 28-35.
- [5] 李京书,陶建武. 信号DOA和极化信息联合估计的降维四元数MUSIC方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 106-111. LI Jingshu, TAO Jianwu. The dimension reduction quaternion MUSIC algorithm for jointly estimating DOA and polarization[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(1): 106-111.
- [6] FANG Q, HAN Y, JIN M, et al. Joint DOA and polarization estimation for unequal power sources[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2015(1): 1-10.
- [7] 司伟建,万良田,刘鲁涛,等. 共形阵列天线超宽带波达方向实时估计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(7): 913-918. SI Weijian, WAN Liangtian, LIU Lutao, et al. Real-time ultra-wideband direction finding for the conformal array antenna[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(7): 913-918.
- [8] JUNKER G P, KUO S S, CHEN C H. Genetic algorithm optimization of antenna arrays with variable interelement spacings[C]// IEEE Antennas and Propagation Society In-

- ternational Symposium, June 21-26, 1998, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE, 1998: 50-53.
- [9] 盼小辉. 遗传算法(Genetic Algorithm)详解与实现[EB/OL]. (2023-09-15) [2024-04-27]. <https://blog.csdn.net/LOVEmy134611/article/details/111639624>.
- [10] 秦虎. 遗传算法入门详解[EB/OL]. (2022-03-22) [2024-04-27]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/100337680>.
- [11] 景岸意浮沉. 遗传算法超详细图解[EB/OL]. (2023-05-18) [2024-04-27]. <https://blog.csdn.net/qq45054243/article/details/130739614>.
- [12] 王雪松, 王占领, 庞晨, 等. 极化相控阵雷达技术研究综述[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(4): 349-370.
- WANG Xuesong, WANG Zhanling, PANG Chen, et al. Review on polarimetric phased array radar technologies [J]. Radar Science and Technology, 2021, 19: 349-370.

[作者简介]

- 陈浩川 1979年生, 硕士, 研究员。
楚雪梅 1991年生, 硕士, 工程师。
李凉海 1965年生, 硕士, 研究员。
张振华 1977年生, 教授, 博士生导师。

(本文编辑: 傅 杰)

(英文编辑: 赵尹默)