电波科学学报
Chinese Journal of Radio Science
中文核心期刊要目总览
• 中国科技核心期刊
• 中国科学引文数据库（CSCD）
• 中国科技论文与引文数据库（CSTPCD）
• 中国学术期刊文摘数据库（CSAD）
• 中国学术期刊（网络版）（CNKI）
• 中文科技期刊数据库
• 万方数据知识服务平台
• 中国超星期刊域出版平台
• 国家科技学术期刊开放平台
• 荷兰文摘与引文数据库（SCOPUS）
• 日本科学技术振兴机构数据库（JST）

机载分布式智能蒙皮波束综合算法研究

王　力，于大群，王　奇

Research on pattern synthesis of the distributed airborne smart skin

WANG Li, YU Daqun, and WANG Qi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023122

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于未知源域重构的无相位近场测量技术

The technique for near-field measurement based on reconstructing an unknown source domain using amplitude-only data

电波科学学报. 2021, 36(5): 807-814

基于自适应遗传算法的寄生电流抑制结构设计与研究

Design and research of parasitic current reduction structure based on adaptive genetic algorithm

电波科学学报. 2019, 34(2): 209-215

一种基于Kriging模型和受限差分进化的电磁结构快速优化算法

An efficient method for electromagnetic structure optimization based on Kriging and constrained differential evolution

电波科学学报. 2017, 32(3): 273-278

一种减小相控阵天线球面近场测量截断误差的方法

A method for reducing the truncation errors in spherical near-field measurements of phased array antennas

电波科学学报. 2018, 33(4): 470-476

一种超宽带多模喇叭的设计

Design of a wide-band multi-mode horn

电波科学学报. 2019, 34(5): 567-573

一种波导窄边裂缝天线缝隙倾角的改进方法

An improved method of slot incline angle of waveguide narrow wall slot antenna

电波科学学报. 2018, 33(1): 21-26

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王力, 于大群, 王奇. 机载分布式智能蒙皮波束综合算法研究[J]. 电波科学学报, 2024, 39(2): 237-243. DOI: 10.12265/j.cjors.2023122
WANG L, YU D Q, WANG Q. Research on pattern synthesis of the distributed airborne smart skin[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(2): 237-243. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023122

机载分布式智能蒙皮波束综合算法研究

王力[1*] 于大群[1] 王奇[2]
(1. 中国电子科技集团公司第十四研究所, 南京 210039; 2. 大连理工大学, 大连 116024)

摘 要 针对机载智能蒙皮天线孔径共形和分布化的特点, 开展了基于 Broyden 族算法的波束综合优化研究。算法以最小化副瓣电平为优化目标, 通过 K-S 函数连续化处理, 实现低副瓣波束赋形。通过不同的加权方式对算法的有效性进行了验证, 相与遗传算法 (genetic algorithm, GA) 等随机优化算法, 本文算法收敛速度快, 能够避免陷入局部最优, 适用于大规模非均匀共形天线阵列, 具有较高的工程应用价值。

关键词 智能蒙皮; 波束综合; 共形天线; 优化算法; 遗传算法 (GA)
中图分类号 TN958.92 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2024)02-0237-07
DOI 10.12265/j.cjors.2023122

Research on pattern synthesis of the distributed airborne smart skin

WANG Li[1*] YU Daqun[1] WANG Qi[2]
(1. *The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing* 210039, *China*; 2. *Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *China*)

Abstract In this paper, a fast optimization base on Broyden algorithm for the pattern synthesis of the distributed airborne conformal smart skin is presented. This algorithm takes minimizing the side lode level as the goal by continuative process using K-S function, and low side lobes can be realized. The efficiency for this algorithm is verified by simulation using different weighting method. Compared to the stochastic algorithm such as genetic algorithm, convergence velocity of this algorithm is faster and can avoid local optimum. This algorithm is suitable for pattern synthesis of the large scale conformal antenna array, and it can find wide engineering application value in the future.

Keywords smart skin; beam synthesis; conformal antenna; optimization; genetic algorithm

0 引 言

随着未来空战向着网络化、智能化方向发展, 下一代机载平台射频传感器也朝着全向感知、多功能一体、分布化和智能化方向发展。智能蒙皮作为新型天线孔径形态, 具有轻薄化、平台结构一体化的特征, 能够在机载平台表面按需布置, 功能按需生成, 孔径和波束按需重构, 具有极高的时空频自由度, 代表新型机载天线的发展方向。

在理想情况下, 我们通常认为智能蒙皮天线孔径内的辐射天线连续排布, 在扫描空域范围内满足相控阵天线基本原理, 即单元间距小于半波长。然而在工程实现中, 高频段有源阵列受到飞机结构框架、蒙皮外形、安装方式固定、天线厚度、有源电路可实现性和机热电接口等条件限制, 通常采用模块化轻薄子阵共形拼接方式来组成天线阵列, 子阵辐射面之间存在一定的间隙, 天线阵列排布为非均匀共形方式 (见图 1 示例), 常规加权方式 (例如均匀权、泰勒权或者切比雪夫权等) 会导致波束出现较大的量化瓣, 并且在大角度扫描情况下主瓣发生畸变, 增益和副瓣恶化, 影响天线正常使用。因此, 需要对天线孔径的幅相分布进行优化, 使增益和副瓣满足使用要求。

收稿日期: 2023-05-01
通信作者: 王力 E-mail: wangli860420@163.com



图 1 智能蒙皮天线孔径分布示意图

Fig. 1 Schematic of aperture distribution of smart skin antenna

对于天线阵列的波束综合，通常采用的方法包括解析法[1-2]、进化类算法 (包括遗传算法 (genetic algorithm, GA)[3-4]、粒子群算法[5-6] 和差分进化算法[7-8] 等)、凸优化算法[9-11]、混合类算法[12-13]、迭代傅里叶算法[14-15] 和神经网络算法[16-17] 等。上述算法的性能比较如表 1 所示。

表 1 不同算法的性能比较

Tab. 1 Comparison of different algorithms

方法	优点	缺点
解析法	优化速度快，优化效果好	适用范围窄，目前仅应用于均匀线阵或平面阵
进化类算法	适用范围广，小规模问题优化速度快，效果好	中等及大规模问题优化速度极慢，效果不佳，结果不唯一
凸优化算法	优化速度快，适用范围较广，优化效果好	需要进行额外的凸变换，解的全局最优性受影响
混合类算法	兼具两者的部分优势，优化效果有部分改善	中等及大规模问题优化速度很慢，结果不唯一
迭代傅里叶算法	优化速度很快，优化效果较好	适用范围窄，目前仅应用于均匀线阵或平面阵
神经网络算法	线下优化速度快，优化结果较好	需要大规模样本与线下学习，耗时长

未来智能蒙皮天线阵列呈非均匀共形分布，阵列规模大，对算法的求解速度和稳定性有较高要求，而且能够在硬件平台中实时计算。但是上述算法存在适用范围窄、随机性较强、收敛速度慢或者非全局最优解等问题，很难工程应用，因此需要开展新的高效快速波束综合算法研究。

本文针对智能蒙皮天线孔径非均匀共形阵列的波束综合，提出了基于 Broyden 族算法，以最小化副瓣电平为优化目标，通过 K-S 函数连续化处理，实现了对天线阵列幅相优化设计，得到较好的波束性能。作为比较，本文同时采用了 GA 进行优化。相比 GA，本文算法收敛速度快，可避免陷入局部最优，适用于大规模共形天线阵列，具有较高的工程应用价值。

1 优化方法

1.1 DFP 和 BFGS 算法

牛顿法是求解无约束优化问题最早使用的经典算法之一，它最突出的特点是具有局部二阶收敛速度。其基本思想是用迭代点 $\boldsymbol{x}_k$ 处的一阶导数 (梯度) 和二阶导数 (Hesse 矩阵) 对目标函数进行二次函数近似，然后把二次模型的极小点作为新的迭代点。牛顿法的优点是具有二阶的收敛速度，但是也具有一定的缺点，即在迭代时牛顿法对 Hesse 矩阵奇异性有要求，当 Hesse 矩阵奇异时，无法保证在迭代点处是下降搜索方向，进而迭代时就会出现目标值上升的情况。拟牛顿法就是充分考虑到牛顿法所存在的缺点进行相应改进的。拟牛顿法的基本思想是在基本牛顿法中用 Hesse 矩阵 $\boldsymbol{G}_k$ 的某个近似矩阵 $\boldsymbol{B}_k$ 取代 $\boldsymbol{G}_k$，其中近似矩阵 $\boldsymbol{B}_k$ 具有以下三个特点：1)$\boldsymbol{B}_k$ 近似等于 $\boldsymbol{G}_k$，使相应的算法产生的方向近似于牛顿方向，以确保算法具有较快的收敛速度；2)$\boldsymbol{B}_k$ 始终是对称正定的，保证新产生的迭代方向在 $\boldsymbol{x}_k$ 处是下降方向；3) 矩阵 $\boldsymbol{B}_k$ 的更新规则相对比较简单，通常采用一个秩为 1 或秩为 2 的矩阵进行校正更新。

拟牛顿法在每次迭代时矩阵 $\boldsymbol{B}_k$ 的更新规则为 $\boldsymbol{B}_{k+1}=\boldsymbol{B}_k+\boldsymbol{C}_k$，式中 $\boldsymbol{B}_{k+1}$ 为每次迭代更新后的近似矩阵，$\boldsymbol{B}_k$ 为迭代更新前的矩阵，而 $\boldsymbol{C}_k$ 称之为修正矩阵，故近似矩阵 $\boldsymbol{B}_{k+1}$ 的性质主要由 $\boldsymbol{C}_k$ 决定。矩阵 $\boldsymbol{C}_k$ 按照其秩的不同可分为两类算法：当 $\boldsymbol{C}_k$ 是秩为 1 的对称矩阵时，称之为对称秩 1 算法。这种算法较简单，构造容易。但其也存在着明显的缺点：1) 当 $\boldsymbol{B}_k$ 为正定矩阵时，下次更新的 $\boldsymbol{B}_{k+1}$ 不一定是正定矩阵，因此不能保证新的迭代方向是下降方向；2) 在更新迭代时，算法有可能会出现失效并且不稳定的情况。由于对称秩 1 算法存在着明显的缺点，所以这种算法很少应用在实际的优化算法中。当 $\boldsymbol{C}_k$ 是秩为 2 的对称矩阵时，称之为对称秩 2 算法。对称秩 2 算法可以很好地弥补对称秩 1 算法所存在的缺点。

对于无约束优化问题：$\min f(\boldsymbol{x})$，$\boldsymbol{x}\in R_n$，其中 $f(\boldsymbol{x}):R_n\to R$ 称为目标函数。理论分析表明，在各类求解此类问题的算法中，DFP(Davidon-Fletcher-Powell) 算法和 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 算法均属于对称秩 2 的拟牛顿算法一种，能够满足上述优化问题的求解。

DFP 算法的一般计算步骤如下：

$$\boldsymbol{d}_k=-(\boldsymbol{B}_k)^{-1}\boldsymbol{g}_k \tag{1}$$

$$\boldsymbol{x}_{k+1}=\boldsymbol{x}_k+a_k\boldsymbol{d}_k \tag{2}$$

$$\boldsymbol{B}_{k+1}=\boldsymbol{B}_k-\frac{\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k\boldsymbol{y}_k^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{y}_k\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_k}+\left(1+\frac{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_k}\right)\frac{\|\boldsymbol{y}_k\|_2^2}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_k}\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{g}_k=\nabla f(\boldsymbol{x}_k)$；$a_k$为步长因子，由具体的线搜索准则确定；$\boldsymbol{s}_k=a_k\boldsymbol{d}_k$，$\boldsymbol{y}_k=\boldsymbol{g}_{k+1}-\boldsymbol{g}_k$。DFP 算法是全局收敛的，但是这种算法需要很大存储量，对于大型的优化问题，其算法稳定性不够强。

BFGS 算法和 DFP 算法类似，表达式为

$$\boldsymbol{B}_{k+1}=\boldsymbol{B}_k-\frac{\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}+\frac{\boldsymbol{y}_k\boldsymbol{y}_k^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{y}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_k}\tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{s}_k=\boldsymbol{x}_{k+1}-\boldsymbol{x}_k$；$\boldsymbol{y}_k=\nabla f(\boldsymbol{x}_{k+1})-\nabla f(\boldsymbol{x}_k)$。BFGS 算法和 DFP 算法具有高度的对称性，差别在于 BFGS 算法利用 Hesse 矩阵的近似，避免了直接计算 Hesse 矩阵的麻烦，数值稳定性比 DFP 算法更好，在使用不精确一维搜索时，BFGS 是超线性收敛的，在求解凸函数的极小化问题中，具有全局收敛性。

1.2　Broyden 族算法

为了更好地结合 DFP 算法与 BFGS 算法的优点，由这两种算法的凸组合产生了一类校正族称之为 Broyden 族，其在每次迭代更新近似 Hesse 阵时去选择当前的更新公式，以确保$\boldsymbol{B}_k$始终以一个较优的值参与迭代。关于$\boldsymbol{B}_k$的 Broyden 族校正公式为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{B}_{k+1}^{\theta}&=\theta_k\boldsymbol{B}_{k+1}^{\mathrm{DFP}}+(1-\theta_k)\boldsymbol{B}_{k+1}^{\mathrm{BFGS}}\\&=\boldsymbol{B}_k-\frac{\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}+\frac{\boldsymbol{y}_k\boldsymbol{y}_k^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_k}+\theta_k\boldsymbol{u}_k\boldsymbol{u}_k^{\mathrm{T}}\end{aligned}\tag{5}$$

式中：θ_k为实参数；$\boldsymbol{u}_k=\sqrt{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}\left(\frac{\boldsymbol{y}_k}{\boldsymbol{y}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_k}-\frac{\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}\right)$。

不难发现，当θ_k的值为 0 时，即得到 BFGS 公式；当θ_k的值为 1 时，即得到 DFP 公式。Broyden 族算法有两个重要的特点：全局收敛性，局部超线性收敛。

Broyden 族算法步骤如下：

步骤 1　给定参数$\delta\in(0,1),\sigma\in(0,1),\alpha\in[0,1]$，初始点$x_0\in\mathbb{R}^n$，终止条件$k\leqslant 100$，初始对称正定阵$\boldsymbol{B}_0$(通常取单位阵)，令 k=0。

步骤 2　计算$\boldsymbol{g}_k=\nabla f(\boldsymbol{x}_k)$。

步骤 3　计算搜索方向$\boldsymbol{d}_k=-\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{g}_k$。

步骤 4　设m_k是满足下列不等式的最小非负整数：

$$f(\boldsymbol{x}_k+\delta^m\boldsymbol{d}_k)\leqslant f(\boldsymbol{x}_k)+\sigma\delta^m\boldsymbol{g}_k^{\mathrm{T}}\tag{6}$$

令步长$\alpha_k=\delta^{m_k},\boldsymbol{x}_{k+1}=\boldsymbol{x}_k+\alpha_k\boldsymbol{d}_k$。

步骤 5　由下面的校正公式确定$\boldsymbol{B}_{k+1}$：

$$\boldsymbol{B}_{k+1}=\begin{cases}\boldsymbol{B}_k,\ \boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_k\leqslant 0\\ \boldsymbol{B}_k-\dfrac{\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}+\dfrac{\boldsymbol{y}_k\boldsymbol{y}_k^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_k}+\theta_k\boldsymbol{u}_k\boldsymbol{u}_k^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{y}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_k>0\end{cases}\tag{7}$$

$$\boldsymbol{u}_k=\sqrt{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}\left(\frac{\boldsymbol{y}_k}{\boldsymbol{y}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_k}-\frac{\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}{\boldsymbol{s}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s}_k}\right)\tag{8}$$

步骤 6　令 k=k+1，转步骤 1。

在步骤 5 中，改进的 Broyden 族算法与 DFP 算法或 BFGS 算法相比，每一步的近似 Hesse 矩阵$\boldsymbol{B}_{k+1}$不是固定的，而是会根据每次迭代更新时当前步的一个条件去判断$\boldsymbol{B}_{k+1}$的具体形式，这样就可以避免在迭代时出现$\boldsymbol{B}_{k+1}$奇异性的问题。

2　计算实例

2.1　问题描述

为了验证本文算法的有效性，针对具体例子开展仿真分析。如图 2 所示，天线孔径由 10 个标准化六边形子阵构成，x 方向 3～4 列子阵，y 方向 3 行子阵，子阵之间的间隙大于 1 个波长，子阵中心沿球面排布，两个方向的曲率半径分别为 R_1 和 R_2，天线阵列整体呈共形非均匀排布。每个子阵内天线振子按照三角形栅格排布，构成六边形阵列。单元间距为 1/2 波长，每个子阵内包含 91 个天线振子，全阵共 910 个天线振子。当波束主瓣扫描到θ_0时，优化每个天线振子的幅度和相位，使得主瓣增益 G 大于目标增益G_0时，副瓣电平 (sidelobe level, SLL) 函数$S_l(\theta)$取得最大值，即最大 SLL 达到最小值。低副瓣主要来自于机载雷达在对地探测时对波束性能的要求。

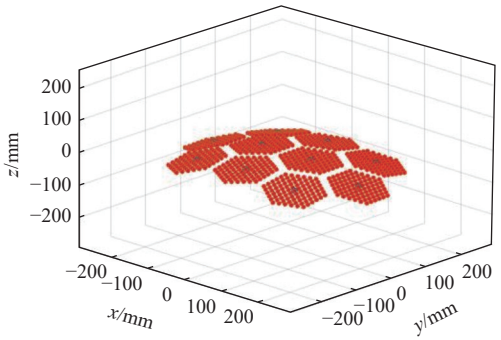


图 2　典型共形非均匀阵列排布

Fig. 2　Typical conformal array layout

2.2　阵列模型

方向图建模时充分考虑每个阵元的方向图差异、阵元互耦、极化等因素，假设天线振子的幅度和相位分别为A_n和ϕ_n，阵列方向图公式为

$$f(\theta)=\left|\sum_{n=1}^{N}a_n(\theta)\mathrm{e}^{\frac{-\mathrm{j}4\pi x_n\sin(\theta)}{\lambda}}\right|^2\tag{9}$$

$$a_n(\theta)=\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{E}_n(\theta)\cdot\boldsymbol{e}_n(\theta)A_i\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_i}S_{i,n}$$

式中：$\boldsymbol{E}_n(\theta)$为每个阵元辐射矢量电场角度分布函数；$\boldsymbol{e}_n$为主极化方向矢量；$S_{i,n}$为互耦系数。方向图计算求和时的每个单元到等相位面的程差按照三维坐标计算，如图 3 所示。则最优化问题可以描述为

$$\begin{cases} \text{find}\{A_n,\varphi_n\},n=1,\ldots,N \\ \min\max(S_l(\theta)) \\ 0\leqslant A_n\leqslant 1 \\ \text{s.t.}\ -\pi\leqslant\varphi_n\leqslant\pi \\ G>G_0 \end{cases} \tag{10}$$

对于一个给定主瓣宽度和增益的阵列，副瓣函数S_l并不是一个连续函数，无法直接求导，因此在优化过程中引入 K-S 函数，使得副瓣连续可偏导：

$$\max(S_{li}(x))=\text{KS}(\rho,x)=\frac{1}{\rho}\ln\left[\sum_{i=1}^{q}\text{e}^{\rho S_{li}(x)}\right] \tag{11}$$

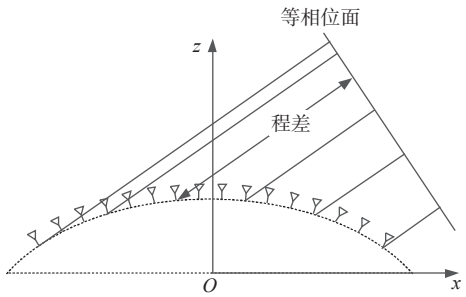


图 3 曲面阵列程差示意图

Fig. 3 Schematic of path difference of curved array

2.3 优化结果

基于上述 Broyden 族算法基本原理和数学优化模型，使用 MATLAB 编程，在普通办公计算机 (i5-3470, 12 G 内存) 进行仿真验证，分别计算了原始阵列投影加权、仅幅度加权、仅相位加权和幅度相位同时加权 4 种情况下法向和方位 50°扫描时的波束优化结果。作为对比，还同时采用 GA 进行优化。本文优化迭代次数均为 300 次，GA 采用 P=50 个种群数量、交叉比例 C=0.8、变异比例 M=0.2，适应度函数即为空域最大副瓣，和 Broyden 族算法目标函数一致。

1) 原始阵列投影加权优化

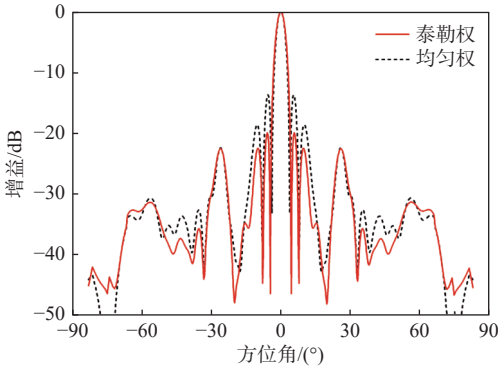
如图 4 所示，对原始阵列按照常规平面阵投影的方式进行均匀权和泰勒权赋形。可以看出，由于子阵之间的间隙，方向图出现了量化瓣，并且由于共形在等相位面上的投影非等间距，波束在指向大角度 (50°) 时出现畸变，第 1 零点抬高，第 1 副瓣和主瓣逐渐融合，影响正常使用。

2) 仅幅度加权优化

图 5 为仅幅度优化时，采用 Broyden 族算法和 GA，经过 300 次优化迭代后的一维方向图。可以看出：Broyden 族算法优化后最大副瓣达到−23.4 dB 以下，且整个副瓣区较为一致，都满足要求；而 GA 为随机算法，易陷入局部最优，最大副瓣仅能优化到−15.9 dB 左右。此外，Broyden 族算法在波束大角度扫描时同样具有较好的优化效果。

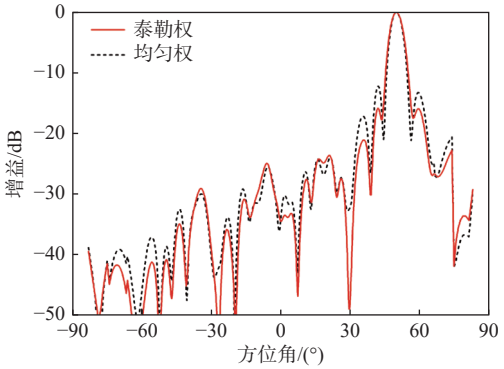
3) 仅相位加权优化

仅相位优化对应发射饱和输出的场景。图 6 为仅相位优化时，采用 Broyden 族算法和 GA，经过 300 次优化迭代后的一维方向图。可以看出：和幅度优化的结论类似，Broyden 族算法优化后最大副瓣达到−24.8 dB 以下，整个副瓣区较为一致；而 GA 最大副瓣仅能优化到−16.6 dB 左右。此外，波束指向大角度时的优化结论和法向类似。



(a) 波束指向法向

(a) Beam pointing normal

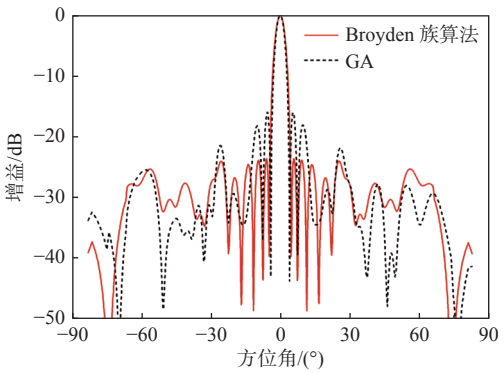


(b) 波束指向方位 50°

(b) Beam pointing azimuthal 50°

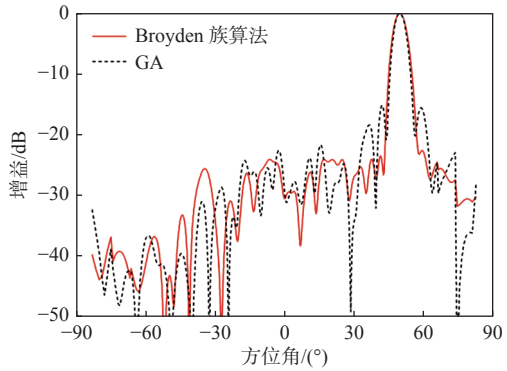
图 4 不同波束指向原始阵列投影加权优化的方向图

Fig. 4 Pattern of the original array after projection optimization with different beam pointing



(a) 波束指向法向

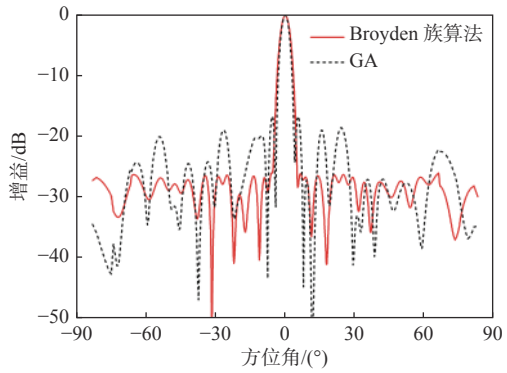
(a) Beam pointing normal



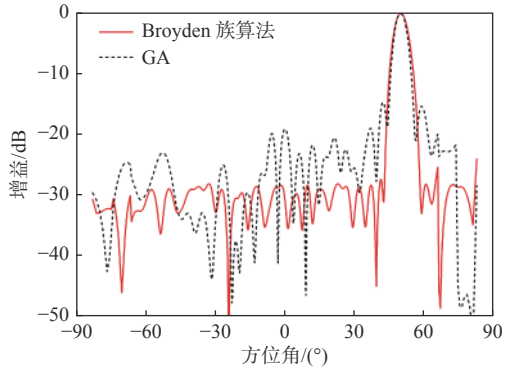
(b) 波束指向方位 50°
(b) Beam pointing azimuthal 50°

图 5　不同波束指向仅幅度加权优化后的方向图

Fig. 5　Pattern after amplitude weighted optimization with different beam pointing



(a) 波束指向法向
(a) Beam pointing normal



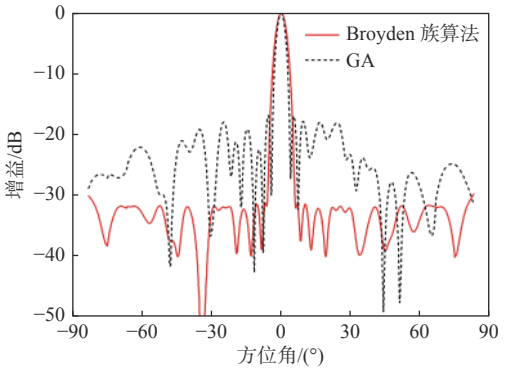
(b) 波束指向方位 50°
(b) Beam pointing azimuthal 50°

图 6　不同波束指向仅相位加权优化后的方向图

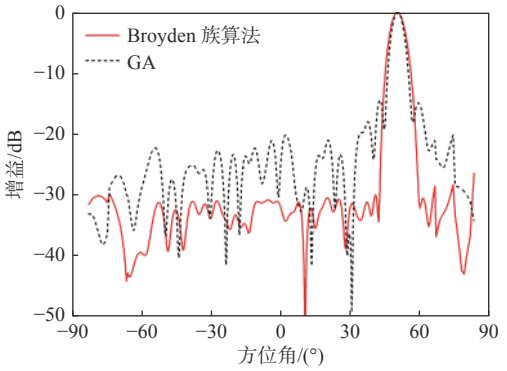
Fig. 6　Pattern after phase weighted optimization with different beam pointing

4) 幅度和相位同时加权优化

图 7 为幅度和相位同时优化时，采用 Broyden 族算法和 GA，经过 300 次优化迭代后的一维方向图。可以看出：Broyden 族算法优化后最大副瓣达到了 −29.8 dB 以下，主要是因为变量数目变为 2 倍，优化的自由度更多，但是优化时间也相应变长；GA 并没有随着变量的增加出现更好的优化结果，反而因为陷入局部最优，最大副瓣仅为−16.7 dB 左右。



(a) 波束指向法向
(a) Beam pointing normal



(b) 波束指向方位 50°
(b) Beam pointing azimuthal 50°

图 7　不同波束指向幅度和相位同时加权优化后的方向图

Fig. 7　Pattern after amplitude and phase weighted optimization with different beam pointing

5) 收敛性比较

从图 8 可以看出：Broyden 族算法在迭代 50 次时，最大副瓣能够快速收敛到−25 dB 左右，基本能够满足常规机载雷达使用，50 次以后收敛速度逐渐变慢，最终收敛在−32 dB 附近；而 GA 仅能收敛在−17 dB 左右，说明随机优化算法在处理大规模阵列问题时，很容易陷入局部最优，无法满足使用要求。作为对比，本文还比较了不同种群数 (P=50, 100)、交叉比例 (C=0.5, 0.8) 和变异比例 (M=0.1, 0.2, 0.3) 时 GA 的收敛特性。可以看出，改变种群数、交叉和变异比例

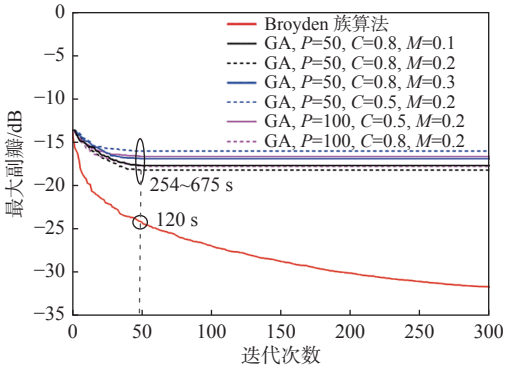


图 8　Broyden 族算法和 GA 收敛速度比较

Fig. 8　Convergence speed comparison of Broyden algorithm and GA algorithm

等参数对最大副瓣值的改善有限，仅从−16 dB 优化到了−18 dB，但是计算时间却增加到 2.6 倍，是 Broyden 族算法的 5.6 倍，见图 8 中 50 次迭代的时间标注。

6) 综合比较

最后给出不同算法波束性能和计算时间的比较，包括主瓣增益、最大副瓣、平均副瓣和 300 次迭代计算时间，结果见表 2。可以看出，Broyden 族算法与 GA 随机优化算法相比，优化后的主瓣增益下降少，副瓣更低，最大迭代时间仅为 GA 的一半左右。随着阵元数的增加，Broyden 族算法的速度优势会更加明显，主要因为该算法利用了二阶导数 (Hesse 矩阵)，避免了随机过程，加快了收敛速度。

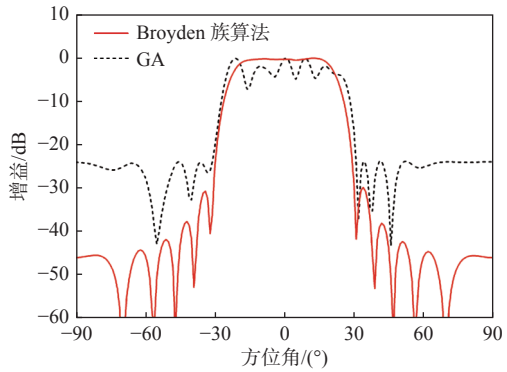
表 2 不同算法的波束性能和计算时间比较

Tab. 2 Comparison of beamforming performance and computation time of different algorithms

方法	加权方式	主瓣增益/dB	最大副瓣/dB	平均副瓣/dB	300次迭代时间/s
直接投影加权	均匀权	32.5	−13.6	−31.3	-
	泰勒权	32.2	−15.1	−32.5	-
Broyden族算法	仅幅度	32.2	−23.4	−32.0	299
	仅相位	30.8	−24.8	−29.7	402
	幅度+相位	31.5	−31.8	−34.6	721
GA(P=50, C=0.8, M=0.2)	仅幅度	32.1	−15.9	−30.6	1 260
	仅相位	30.4	−16.6	−27.0	1 227
	幅度+相位	29.5	−16.7	−25.5	1 491

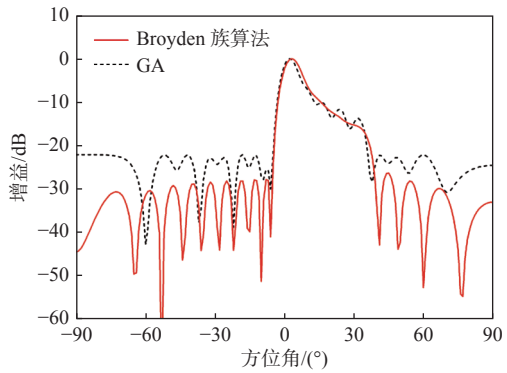
7) 其他算例

除了应用于共形天线波束综合，Broyden 族算法还可以应用于特殊波束如扇形波束、余割平方波束赋形等，图 9 优化结果表明 Broyden 族算法相比 GA 等算法依然有更好的效果。除此以外，该算法还可以应用于分布式孔径的同时同频空域对消，这里就不再赘述。



(a) 扇形波束

(a) Fan shaped beam



(b) 余割平方波束

(b) Square-cosec shaped beam

图 9 两种特殊波束的方向图

Fig. 9 Two special beam patterns

3 结 论

本文针对分布式智能蒙皮天线孔径非均匀共形阵列的波束综合，提出了基于 Broyden 族算法的优化算法。算法以最小化 SLL 为优化目标，首次引入 K-S 函数进行连续化处理，解决了离散的副瓣函数难以直接求导的问题，实现了非连续共形天线阵列的低副瓣波束赋形，并通过仿真对该算法的有效性进行了验证。与 GA 等随机优化算法相比，该算法收敛速度快、优化效果好，适用于大规模共形天线阵列波束综合和特殊波束赋形，还可以用于分布式孔径的同时同频空域对消等其他复杂优化场景，并且计算过程简单清晰，未来可以通过嵌入式硬件直接进行加速，最终达到实时波束赋形的目的，为智能天线前端和智能作战奠定了技术基础。

参考文献

[1] LIU Y H, LIU Q H, NIE Z P. Reducing the number of elements in multiple-pattern linear arrays by the extended matrix pencil methods[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(2): 652-660.

[2] GU P F, WANG G, FAN Z H, et al. An efficient approach for the synthesis of large sparse planar array[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2019, 67(12): 7320-7330.

[3] XU Z, LI H, LIU Q Z. Pattern synthesis of conformal antenna array by the hybrid genetic algorithm[J]. Progress in electromagnetics research, 2008(79): 75-90.

[4] 梁宇宏, 邓宓原, 张云, 等. 一种新型和差旁瓣抑制阵列天线[J]. 电波科学学报, 2022, 37(1): 137-145.
LIANG Y H, DENG M Y, ZHANG Y, et al. A novel sum-

difference side lobe suppression array antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2022, 37(1): 137-145. (in Chinese)

[5] KHODIER M M, CHRISTODOULOU C G. Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2005, 53(8): 2674-2679.

[6] 崔伟, 张冰, 余岚. 一种局部优化的粒子群低副瓣波束形成方法[J]. 现代电子技术, 2021, 44(5): 57-60.
CUI W, ZHANG B, YU L. Local optimization method for particle swarm low-sidelobe beam forming[J]. Modern electronics technique, 2021, 44(5): 57-60. (in Chinese)

[7] CHEN Y, YANG S, NIE Z. The application of a modified differential evolution strategy to some array pattern synthesis problems[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2008, 56(7): 1919-1927.

[8] YANG F, YANG S, CHEN Y, et al. A joint optimization approach for the synthesis of large 4-D heterogeneous antenna arrays[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2017, 65(9): 4585-4594.

[9] ECHEVESTE J I, GONZALEZD A M, ZAPATA J. Array pattern synthesis of real antennas using the infinite-array approach and linear programming[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(12): 5417-5424.

[10] KAJENSKI P J. Phase only antenna pattern notching via a semidefinite programming relaxation[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60(5): 2562-2565.

[11] 祁峥东, 邱明华, 蒋盈盈, 等. 基于凸优化理论的和、差波束方向图合成新方法[J]. 雷达与对抗, 2020, 40(4): 41-46.
QI Z D, QIU M H, JIANG Y Y, et al. A new synthesis method of sum and difference beam patterns based on convex optimization theory[J]. Radar & ECM, 2020, 40(4): 41-46. (in Chinese)

[12] YANG F, YANG S W, CHEN Y K, et al. An effective hybrid approach for the synthesis of pencil beams and shaped beams through 4D linear antenna arrays with constrained DRR[J]. Journal of electromagnetic waves and applications, 2019, 33(5): 584-600.

[13] ZHAO X, ZHANG Y, YANG O. A hybrid algorithm for synthesizing linear sparse arrays[J]. Progress in electromagnetics research C, 2016, 63: 75-83.

[14] WANG X K, JIAO Y C, TAN Y Y. Synthesis of large thinned planar arrays using a modified iterative Fourier technique[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(4): 1564-1571.

[15] MOHAMMED J R. Synthesizing sum and difference patterns with low complexity feeding network by sharing element excitations[J]. International journal of antennas and propagation, 2017, 2563901: 1-7.

[16] GONG Y, XIAO S, WANG B. An ANN-based synthesis method for nonuniform linear arrays including mutual coupling effects[J]. IEEE access, 2020, 6: 144015-144026.

[17] 任燕飞, 杜盈, 张劲东. 基于深度神经网络的自适应波束形成算法[J]. 电讯技术, 2022, 62(7): 852-858.
REN Y F, DU Y, ZHANG J D. An adaptive beamforming algorithm based on deep neural network[J]. Telecommunication engineering, 2022, 62(7): 852-858. (in Chinese)

作者简介

王力　(1986—), 江苏人, 中国电子科技集团公司第十四研究所高级工程师, 研究方向为相控阵天线理论和技术。E-mail: wangli860420@163.com

于大群　(1981—), 江苏人, 中国电子科技集团公司第十四研究所研究员, 研究方向为有源相控阵天线、超宽带天线设计、微带天线设计、基站天线设计等。E-mail: yulipii@163.com

王奇　(1988—), 辽宁人, 大连理工大学副教授, 研究方向为多学科与结构优化、拓扑优化技术等。E-mail: qiwang@dlut.edu.cn