

一种基于柔性形变天线的极化波束在线重构技术

陈志坤^① 崔津赫^{*②} 王伟^③ 陈智斌^② 郭云飞^①

^①(杭州电子科技大学自动化学院 杭州 310018)

^②(杭州电子科技大学圣光机联合学院 杭州 310018)

^③(钱塘科技创新中心 杭州 310018)

摘要: 针对柔性极化阵列天线因其结构实时形变而难以波束重构以及性能受损的问题, 该文提出一种基于柔性形变天线的极化波束在线重构技术。首先, 基于无人机机翼模型的柔性形变状态进行阵列建模, 借助于模态法得到实时形变数据, 在线重构天线阵列模型; 其次, 基于矢量阵列天线的阵元响应, 构建3维空间中的柔性阵列信号模型; 最后, 将循环算法(CA)与2阶锥规划(SOCP)进行深度结合设计以求解最优极化波束重构的动态优化问题。仿真结果表明: 在一定的形变范围内, 即在环境载荷对不同弧度与角度需求下, 该文所提方法能够实现在线天线阵列重构, 并根据所测量应变位移数据而实现最优极化波束在线重构, 方向图增益、波束宽度以及极化匹配设计均能满足工程应用要求。

关键词: 柔性阵列天线; 极化波束形成; 天线阵列重构

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)YU-0001-09

DOI: 10.11999/JEIT240070

Polarized Beam Online Reconfiguration Technique For Flexible Deformation Antennas

CHEN Zhikun^① CUI Jinhe^② WANG Wei^③ CHEN Zhibin^② GUO Yunfei^①

^①(College of Automation, HangZhou DianZi University, Hangzhou 310018, China)

^②(ITMO joint institute, HangZhou DianZi University, Hangzhou 310018, China)

^③(Qiantang Science and Technology Innovation Center, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In response to the challenges posed by the deformation of flexible polarized array antennas, which results in difficulties in beam reconstruction and compromised beam performance, polarization beam online reconstruction technique based on flexible deformation polarized antennas is proposed in this paper. Firstly, the deformation state of the array is modeled based on a wing model, and real-time deformation data is obtained using modal analysis to reconstruct the antenna array model online. Secondly, the element response of vector array antenna is utilized to construct a flexible array antenna signal model in three-dimensional space. Finally, a deep integration of the Cyclic Algorithm (CA) and Second-Order Cone Programming (SOCP) is employed to solve the dynamic optimization problem of this optimal polarization beam reconstruction. Simulation results demonstrate that within a certain range of deformation and under different arc and angle requirements from environmental loads, the proposed method can achieve online antenna array reconstruction and real-time optimal polarization beam reconstruction based on the dynamic antenna array model. The directional gain, beamwidth, and polarization matching design all meet the requirements for practical engineering applications.

Key words: Flexible array antenna; Polarization beamforming; Antenna array reconstruction

1 引言

随着战场环境和雷达任务的复杂化, 机载相控

收稿日期: 2024-01-30; 改回日期: 2024-03-27; 网络出版: 2024-04-11

*通信作者: 崔津赫 212320070@hdu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701148, 62371173)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701148, 62371173)

阵雷达对天线与承载方式提出更高要求。柔性天线阵列因其可与机身共形设计且孔径可伸展而备受青睐^[1]。例如, 歼-20战机采用柔性形变天线技术, 使整架战机实际上成为一个传感器, 实现了“战机即传感器”的目标。与此同时, 随着无人机在目标探测中的广泛应用, 柔性天线阵列可利用有效机身面积实现天线孔径的最大化, 因此在无人机探测领域

中也具有广阔的应用前景^[2]。形变测量是柔性阵列波束重构的前提条件,已有很多学者对其展开详细研究。如文献^[3]描述了基于光纤光栅传感器测量天线应变和位移,并利用模糊神经网络进行训练,以及模糊网络的自构架算法,实现对应变与位移之间复杂非线性关系的逼近。文献^[4]提出了一种基于迁移学习的机翼蒙皮天线形变重构方法,通过将少量目标数据迁移到基于模态法获得的仿真数据源上,实现对天线位移的精确重构。然而,当前关于柔性形变阵列的研究主要集中在形变位移的测量与位移重构方法,很少涉及波束在线重构的技术问题。波束在线重构是柔性形变天线工程应用的最终体现,需要一种能根据形变测量数据进行在线优化的模型。

考虑到单极化相控阵雷达受限于其有限的自由度^[5,6],在未来更精细化的目标探测需求中,空时自适应处理性能难以进一步提升。因此,本文选用极化相控阵雷达作为研究对象,其极化测量能力将可增强目标识别和干扰抑制能力^[7]。在极化波束形成方面,文献^[8]提出基于双极化共形阵列的波束形成算法,但仅适用于半圆形阵列,无法满足柔性化阵列的实时形变需求。且其所构建的导向矢量难以适应在线波束重构的需求^[9]。文献^[10]探讨了一种共形垂直极化天线设计,但未实现主瓣极化自适应匹配设计。实质上,传统标量优化算法在解决自适应极化波束形成这种矢量优化问题上具有一定的建模难度。文献^[11]提出基于2阶锥规划(Second-Order Cone Programming, SOCP)的2维极化波束形成方法,该方法充分利用了凸优化的高效和全局最优性,有效地解决了自适应极化波束形成的矢量优化问题,但仅适用于2维平面规则阵列天线。鉴于柔性形变阵列的时变性和空间立体性,极化波束在线重构若要充分利用SOCP方法的优势,需要对其所表述的优化模型在时间和空间维度进行理论推导和验证。综上,当前关于柔性形变阵列天线的极化波束在线重构研究缺乏足够的理论研究和验证。

针对以上分析,本文提出一种基于柔性形变阵列天线的在线极化波束重构技术,即通过实时更新柔性天线模型,以模拟机载柔性天线在其工作环境和目标引导下的变化状态,进而结合实时重构的天线模型,得到在线构建柔性天线极化响应模型的方法,以方向图增益作为目标函数,以极化匹配设计作为约束条件,将循环算法(Cyclic Algorithms, CA)方法结合SOCP方法求解该动态优化的问题模型以得到最优的极化波束,由此提升柔性天线的目标识别能力和干扰抑制能力。本技术有望填补目前该领域的技术空白,为机载相控阵雷达系统的性能提升提供技术支撑。

2 柔性阵列天线的阵列模型与信号模型

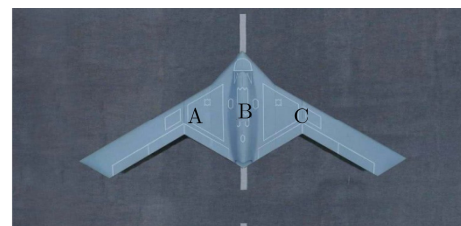
2.1 基于模态法的阵列构型重构

本文所设计的柔性形变相控阵天线针对折叠翼无人机(以彩虹无人机-7为例)的机身弧面及两翼斜面进行构型和布阵,并可被分成3部分进行共形承载设计。首先,中间部分(图1中的B部分)由 $N \times N$ 个阵元构成,其可变弧度的弧面能够实时调整。其次,两侧(图1中的A和C部分)分别由 $N \times N$ 个阵元构成,两个斜面夹角可设为随着不同机型而灵活调整。该阵元分布将有利于无人机设计成最优的气动外形,并且可以根据目标探测任务需求搭载在不同表面形状的无人机上,具有一定的普适性^[12,13]。具体而言,图1(a)中表示彩虹7无人机的实机中的柔性阵列天线的阵元安放位置图,图1(b)则展示了中间弧面弧度为 60° ,两侧斜面夹角为 33° 的柔性形变天线阵列模型。两者之间的关系可以通过将图1(a)和图1(b)中的A, B, C 3部分互相印证。

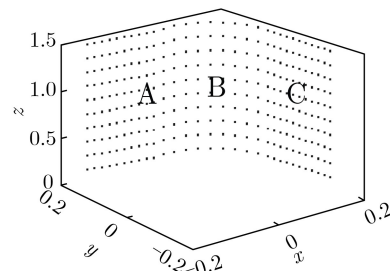
设 r 为柔性阵中的弧面半径, N 为阵面的行数, M 为阵面的列数, d 为阵元间距, $k(t)$ 为两翼的斜面角度加权值。 φ 为弧面圆心点的方位角。由于柔性阵在时间维度上仅调整弧面曲率及两翼与机身夹角,故 Z 轴坐标不随时间变化。 t 时刻的柔性天线的阵元坐标 $(x(t), y(t), z(t))$ 可如式(1)所示

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= r \cos \varphi \pm k(t) \times M \times d \\ y(t) &= r \sin \varphi \pm k(t) \times M \times d \\ z(t) &= N \times d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

考虑到载体在飞行中会受到来自冲击、气流、高温等多种环境因素的影响导致无人机的机身将会



(a) 彩虹7无人机俯视图



(b) 柔性阵列模型示意图

图1 柔性阵列天线载体与阵列模型示意图

产生变形，柔性天线阵列模型在时间维度上出现不同形状的拉伸变形。故柔性阵列天线进行在线的模型重构是其极化波束形成的前提条件。一种常用的形变测量方法是通过在柔性天线中嵌入嵌入式光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器，以此实时监测柔性阵列天线的应变数据。根据模态理论中的模态叠加原理，当在柔性阵列天线中嵌入 m 个传感器，在各种载荷的作用下，在 t 时刻天线的应变 $\varepsilon(t)$ 和位移 $s(t)$ 可通过其各阶应变模态和位移模态的线性组合来表征，即

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^r \phi_i(t) q_{r,i}(t) = \Psi(t) \mathbf{q}_r(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{s}(t) = \sum_{i=1}^r \gamma_i(t) q_{r,i}(t) = \Gamma(t) \mathbf{q}_r(t) \quad (3)$$

其中， r 为截取的模态数， \mathbf{q}_r 为广义模态坐标， $\Psi(t)$ 为 $m \times r$ 阶的应变模态矩阵， $\Phi(t)$ 为 $m \times r$ 阶的位移模态矩阵，且 $m > r$ ，则由式(2)、式(3)可以得出应变-位移矩阵 $\mathbf{B}(t)$ ，结合各种载荷所造成的应变 ε ，可转换成天线各个阵元的位移值 $\mathbf{s}(t) = [\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)]^T$ ，如式(4)所示

$$\mathbf{s}(t) = \Gamma(t) (\Psi^T(t) \Psi(t))^{-1} \Psi^T(t) \varepsilon(t) = \mathbf{B}(t) \times \varepsilon(t) \quad (4)$$

基于以上的分析，在线重构柔性阵列天线的实际阵元位置的表达式为

$$\left. \begin{aligned} x'(t) &= x(t) + \Delta x(t) \\ y'(t) &= y(t) + \Delta y(t) \\ z'(t) &= z(t) + \Delta z(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.2 柔性极化阵列天线的信号模型

依据极化敏感阵列理论可知^[14]，极化阵列天线的阵元由相互正交的电偶极子和磁偶极子所构成，由此实现对电磁波极化信息的发射与接收^[15]。每个阵元最多由6个相互正交的偶极子构成，即3个电偶极子和3个磁偶极子，如图2(a)所示。鉴于简化设计的要求，柔性极化阵列天线的每个阵元由一对正交的电偶极子组成，以实现电磁波的垂直与水平极化分量的接收^[16]。其局部阵元如图2(b)所示。

当3维空间中有一沿 \mathbf{r} 方向传播电磁波信号，其方位角为 $\varphi \in [0, 2\pi]$ ，俯仰角为 $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。假设在 \mathbf{r} 方向上有一柔性阵列天线阵元 i ，其信号与阵列的空间位置关系如图2(b)所示，对于阵元响应 $\mathbf{V}_i(\mathbf{r})$ 而言，直角坐标系和球坐标系的转换关系可进行空间坐标变换。在阵元 i 处的球坐标系下，根据前述的阵列模型，其阵元响应 $\mathbf{V}_i(\mathbf{r})$ 可表示为

$$\mathbf{V}_i(\mathbf{r}) = [v_{H,i}(\mathbf{r}), v_{V,i}(\mathbf{r})] = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_i \cos \theta_i \cos \varphi_i \\ \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中， $v_V(\mathbf{r})$ 表示垂直分量， $v_H(\mathbf{r})$ 表示水平分量。考虑到柔性相控阵列天线的阵元排布方式与平面阵列不同，其阵元位于空间不同平面中，并不满足方向图乘积原理，其阵列响应 $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ 应表示为每个阵元的阵元响应 $\mathbf{V}_i(\mathbf{r})$ 与阵因子 $f_i(\mathbf{r}) = e^{-jk\mathbf{r} \cdot \mathbf{x}_i}$ 的乘积单独计算之后再相加，其中， λ 为波长， k 为传播系数，定义为 $k = 2\pi/\lambda$ ， $\mathbf{x}_n (1 \leq n \leq 3N^2)$ 为阵元位置。则柔性阵列天线的阵列响应 $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{r}) &= \sum_{i=1}^{3N^2} f_i(\mathbf{r}) \times \mathbf{V}_i(\mathbf{r}) \\ &= \left\{ e^{-jk\mathbf{r} \cdot \mathbf{x}_i} \begin{bmatrix} -\sin \varphi_i \cos \theta_i \cos \varphi_i \\ \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_i \end{bmatrix}, \dots, \right. \\ &\quad \left. e^{-jk\mathbf{r} \cdot \mathbf{x}_{3N^2}} \begin{bmatrix} -\sin \varphi_{3N^2} \cos \theta_{3N^2} \cos \varphi_{3N^2} \\ \cos \varphi_{3N^2} \cos \theta_{3N^2} \sin \varphi_{3N^2} \end{bmatrix} \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

其中，波束的极化状态主要由其电场的水平与垂直分量的幅值比及相位差决定。这里，电磁波的极化特性可以通过观察电场矢量端点随时间的空间变化轨迹来描述，可分为线极化、圆极化和椭圆极化3种主要形式。其中，线极化和圆极化均为椭圆极化的特例。因此，椭圆极化的特性可由倾斜角 α 、椭圆角率 β 和椭圆尺寸 A 等参数进行描述，进而构建电场与极化椭圆之间的数学关系，如式(8)所示

$$\mathbf{E} = A \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta \\ j \sin \beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(8)可知，当调整柔性极化相控阵天线中的各个阵元的复权值时，该方程式不仅可以调节所期望的方向图的幅度，也实现对期望波束的极化状态的控制。更进一步地说，考虑到柔性阵列天线具备实时形变能力，其各阵元的复权值需要随其阵元中心坐标位置的实时变化而进行在线优化，确保波束的性能持续稳定并满足设计要求。

假设电磁波传播介质、阵元通道均为理想状态。则每个阵元在 t 时刻的实时复权值可表示为 $\mathbf{W}(t) = [\mathbf{w}(t)_1, \mathbf{w}(t)_2, \dots, \mathbf{w}(t)_{3N^2}]^T$ ，其中

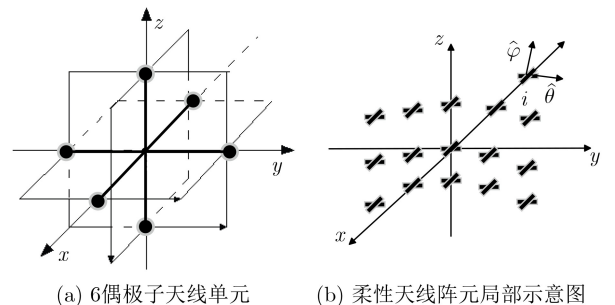


图2 柔性极化阵列天线阵元示意图

$\mathbf{w}(t)_i = [\mathbf{w}_H(t)_i, \mathbf{w}_V(t)_i]^T$, $\mathbf{W}_H(t)$ 和 $\mathbf{W}_V(t)$ 分别表示在 t 时刻每个阵元的两个电偶极子的权值。电场的水平和垂直分量表示为 $\mathbf{E}_H(\mathbf{r})$ 和 $\mathbf{E}_V(\mathbf{r})$, 柔性阵列天线的阵列响应为 $\mathbf{A}(\mathbf{r})$, 则远场观察点的电场可由式(9)所表示

$$\mathbf{E}(t, \mathbf{r}) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_H(t, \mathbf{r}) \\ \mathbf{E}_V(t, \mathbf{r}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_H^T(\mathbf{r}) \mathbf{W}_H(t) \\ \mathbf{A}_V^T(\mathbf{r}) \mathbf{W}_V(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 基于CA-SOCP算法的柔性形变天线极化波束在线重构方法

基于前述的分析, 柔性阵列天线因其独特的实时形变能力导致极化波束形成的静态优化问题求解变为动态优化的问题。鉴于此, 本文旨在针对柔性形变天线的极化波束进行在线重构, 以应对其随阵列模型实时变化的问题。本节将SOCP的最优解作为CA的算子, 再以外载荷引起的拉伸变形构为时间维度的自变量, 进而构建极化波束重构优化问题的在线求解框架。本算法框架以最小峰值旁瓣作为目标函数, 以主瓣区域的极化匹配作为约束条件, 在时间维度上评估柔性形变天线在各种形变状态下的极化波束性能。本算法框架不仅为柔性形变天线的性能提供了保障, 而且为其结构的自适应调整提供了理论依据。为了直观呈现所提的方法, 柔性形变天线极化波束在线重构的方案可设计为图3所示。

首先, 初始化各个阵元的位置, 通过精确控制每个阵元的复权值可实时调节所期望的方向图和波束的极化状态。其次, 在 t_0 时刻, 以波束指向 \mathbf{r}_0 , 主瓣椭圆极化参数 (α_0, β_0) 为约束条件, 在峰值旁瓣 τ 最低的目标下, 寻找各个阵元的最优复权值 $\mathbf{W}(t_0)$, 在线生成柔性阵列天线最优的极化波束。其问题模型可表示为

$$\begin{aligned} & \min \tau \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{A}_H \varphi(\mathbf{r}_0) \mathbf{W}_H(t_0) \\ \mathbf{A}_V \varphi(\mathbf{r}_0) \mathbf{W}_V(t_0) \end{cases} \\ & = e^{j\varphi} \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 & \sin \alpha_0 \\ -\sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_0 \\ j \sin \beta_0 \end{bmatrix}, \\ & \max_{\mathbf{r}_s \in S_r} \left\{ |\mathbf{A}_H(\mathbf{r}_s) \mathbf{W}_H(t_0)|^2 + |\mathbf{A}_V(\mathbf{r}_s) \mathbf{W}_V(t_0)|^2 \right\} \leq \tau \end{aligned} \quad (10)$$

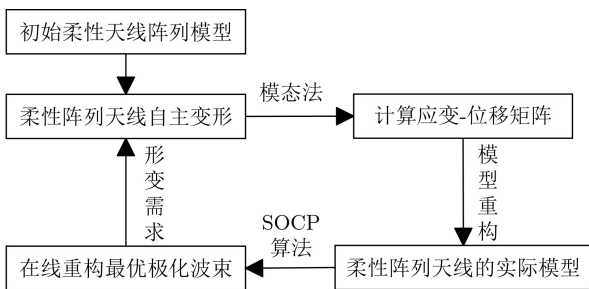


图3 柔性形变天线极化波束在线重构方案框图

在求解上述极化波束在线重构的SOCP问题时, 本节将考虑到柔性极化阵列因多维数据特性导致了大规模的过程变量数据, 2阶锥规划问题在其结构上具有自对偶性, 传统的求解方法在此问题上效果并不理想。为了提高算法的性能, 本节采用了针对大规模2阶锥规划问题的原始对偶内点法(Scalable-Primal-Dual Interior Point Method, S-PDIPM)。S-PDIPM的核心是基于中心路径策略, 本节引入障碍函数和辅助目标函数等, 逐步迭代收敛至全局最优解。首先, 构造障碍函数为

$$F(x) = - \sum_{j=1}^n \ln(u_j) \quad (11)$$

并给定 $\mu > 0$, 定义另一目标函数为

$$\begin{aligned} \min \tau + \mu F(x) = \min_{\mathbf{r}_s \in S_r} \max \left\{ & |\mathbf{A}_H(\mathbf{r}_s) \mathbf{W}_H(t_0)|^2 \right. \\ & \left. + |\mathbf{A}_V(\mathbf{r}_s) \mathbf{W}_V(t_0)|^2 \right\} + \mu F(x) \end{aligned} \quad (12)$$

对于式(12)中目标函数的最优求解问题, 本节通过牛顿法求出局部最优解, 但其最优解并不是原问题的最优解, 故迭代需沿着中心路径的方向逼近, 即不断减小 μ 值, 当 $\mu \rightarrow 0$ 时, 式(12)中的目标函数趋近于式(10)中的原目标函数, 即峰值旁瓣 τ 的最小值。定义初始值为 $\mu^0 > 0$, 则其迭代过程可表述为

$$\tau(\mu^0), \tau(\mu^1), \dots, \tau(\mu^k), \mu^0 > \mu^1 > \dots > \mu^k \quad (13)$$

可见, 该方程式可生成一系列可行迭代, 最终收敛至最优解, 从而实现柔性形变天线在初始时刻 t_0 的最优极化波束形成。

随着柔性阵列天线的模型会随时间 t 发生变化而导致的动态优化问题, 本节提出一种利用循环优化(CA)策略作为动态优化的算法框架, 详细如图3所示。该策略可根据 t 从 $t_0 \sim t_n$ 的不断变化, 实时地重构柔性形变天线的极化波束, 确保其持续的最优性能。具体而言, 在时刻 t_i , 该策略可利用式(2)和式(3)计算应变-位移矩阵 $\mathbf{B}(t_i)$, 再依据式(5)确定在该时刻下天线阵列模型的真实阵元位置 $[x(t_i), y(t_i), z(t_i)]^T$ 。这里, 可设柔性阵列天线的弧面的弧度为 $d(t_i)$, 其形变范围为 $(60^\circ, 100^\circ)$, 步长为 a 。对于两翼部分, 本节以机身弧面最外围两列阵元的切面方向作为参考, 设两翼斜面的夹角权值为 $k(t_i)$, 其形变范围为 $(17.94^\circ, 131.90^\circ)$, 步长为 c , 将通过原始对偶内点法求解出的最优波束以及最小峰值旁瓣 τ , 作为CA优化框架的算子, 进而以弧面和两翼的形变作为优化的自变量, 确保在整个形变范围内达到最优性能, 其问题模型为

$$\begin{aligned}
& \min \tau \\
& \text{s.t. } d(t_i) = d(t_{i-1}) + a, \\
& \quad k(t_i) = k(t_{i-1}) + c, \\
& \quad [x(t_i), y(t_i), z(t_i)]^T \\
& \quad = [x(t_{i-1}), y(t_{i-1}), z(t_{i-1})]^T \\
& \quad + s(t_{i-1}), i = 1, 2, \dots, n \quad (14)
\end{aligned}$$

其中，某个时刻的最优极化波束问题模型是由原始对偶内点法对其进行求解。在 $t_0 \sim t_n$ 的时间段里，基于CA的思想，由此推导得到上述问题模型，进而实现柔性形变天线的最优极化波束重构。综上所述，基于CA-SOCP的柔性形变天线的最优极化波束重构算法步骤如**算法1**所示。

考虑到柔性阵列天线涉及到极化波束重构等复杂性，本节对CA-SOCP算法的复杂度进行分析与计算。首先建立 $3 \times N \times N$ 个天线阵元模型并进行阵列模型重构需要的时间复杂度为 $2 \times 3 \times O(N^2)$ ，假设采样点个数为 M ，建立导向矢量需要的时间复杂度为 $O(M^2 \times N^2)$ ，计算极化椭圆参数需要 $O(M^2)$ 。若柔性天线进行自主形变 n 次，则总的复杂度为 $n \times O(6N^2 + M^2 + M^2 \times N^2)$ 。

4 仿真实验

针对柔性形变天线的极化波束在线重构问题，本节进行一系列仿真实验以验证提出的方法的有效性。考虑阵元之间的互耦效应，设置各阵元间距为半个波长。具体实验包括：**仿真1**：基于理想阵列模型进行，目的是通过比较多种2阶锥规划求解算法，论证原始对偶内点法在基于CA-SOCP的最优极化波束形成算法中的优越性。**仿真2**：对比理想阵列模型下的最优极化波束形成与实际重构阵列模型下的极化波束重构效果，旨在深入探讨柔性天线阵列重构对极化波束形成的实际影响。**仿真3**：模拟载体模型需求实时更新弧面弧度、两翼与弧面夹角，并求解实时的应变-位移矩阵，重构柔性天线的阵列模型。利用CA-SOCP算法实现最优极化波束重构，同时寻找最优的极化波束响应和主瓣极化匹配参数。

算法1 极化波束在线重构算法的实现步骤

输入：阵列模型变形时间，天线载荷，目标天线阵列模型，目标波束方向，目标主瓣极化参数

循环开始： i 从 $0 \sim n$ 开始循环

步骤1 初始化，产生变形前柔性阵列天线模型。

步骤2 在 t_i 时刻，柔性阵列天线阵列模型发生自主变形，通过模态法计算应变-位移矩阵，得到实际阵列模型。

步骤3 SOCP求解，通过原始-对偶内点法，根据实时阵列模型，得到最优极化状态以及波束矩阵。

循环结束

仿真1 柔性阵列天线基于CA-SOCP的最优极化波束形成算法。

假设机载柔性形变天线模型由弧度为 90° 的 10×10 弧面和两翼皆为夹角为 33.7° 的 10×10 的斜面所组成。为验证S-PDIPM算法对最优极化波束形成问题(式(14))的求解优势，本节分别使用针对整数规划的原始对偶内点法(Integer Programming-Primal-Dual Interior Point Method, IP-PDIPM)^[8]以及不可行的路径跟踪算法(Infeasible Path Following algorithm, IPF)^[11]与其在求解时间 t 、半功率波束宽度、极化匹配参数 (α, β) 以及主瓣指向 r_0 上进行对比分析。设定主波束指向 $(\theta, \varphi) = (45^\circ, 90^\circ)$ ，主瓣极化匹配参数为 $\alpha = 10^\circ, \beta = 20^\circ$ ，半功率波束宽度分别为 $\theta_{-3 \text{ dB}}$ 和 $\varphi_{-3 \text{ dB}}$ 。通过上述的仿真设定，得到**图4**的仿真结果。

天线增益 G 是天线最重要的参数之一，在俯仰角和方位角切面，根据俯仰角和方位角切面的半功率波束宽度 $\theta_{-3 \text{ dB}}$ 和 $\varphi_{-3 \text{ dB}}$ ，其对应的主瓣增益为

$$G = 10 \lg \{32\,000 / (\theta_{-3 \text{ dB}} \times \varphi_{-3 \text{ dB}})\} \quad (15)$$

若考虑以干扰抑制作为工程应用需求时，这种极化波束可分别在空域和极化域对干扰信号进行正交极化抑制，极化抑制干扰的能力可由极化失配因子所体现，即

$$m_p = \cos^2(\eta) \quad (16)$$

其中， m_p 表示阵列天线的功率损耗， η 表示极化角差，因此，当 $\eta = 90^\circ$ 表示主瓣的极化状态与干扰信号的极化状态正交，即干扰信号理论上可被极化隔离。故本文所提出的极化匹配是以假设干扰的正交极化来设定其极化椭圆参数。由以上仿真，仿真结果可统计如**表1**所示。

从**表1**的数据可以观察到，3种算法均能成功地在预定的主瓣方向上得到最优极化波束。但若进一步观察，IPF算法在 -3 dB 波束宽度和主瓣增益两个方面的表现稍显不足且计算时间较长。相比之下，IP-PDIPM算法在极化匹配度上表现出色，但其算法的计算时间过长，这使得它难以满足柔性阵列天线对实时波束重构的快速响应需求。相较于这两种算法，本节所采用的S-PDIPM算法在各个评估标准上都显示出了较好的整体性能，也验证了其在该应用场景下的适用性和优越性。

仿真2 柔性天线阵列重构对极化波束形成的影响。

为了贴近实际机型结构的承载需求，本节假设机载柔性形变天线模型与**仿真1**在总体上保持一致。本仿真考虑两种结构模型：(1)理想情况下，

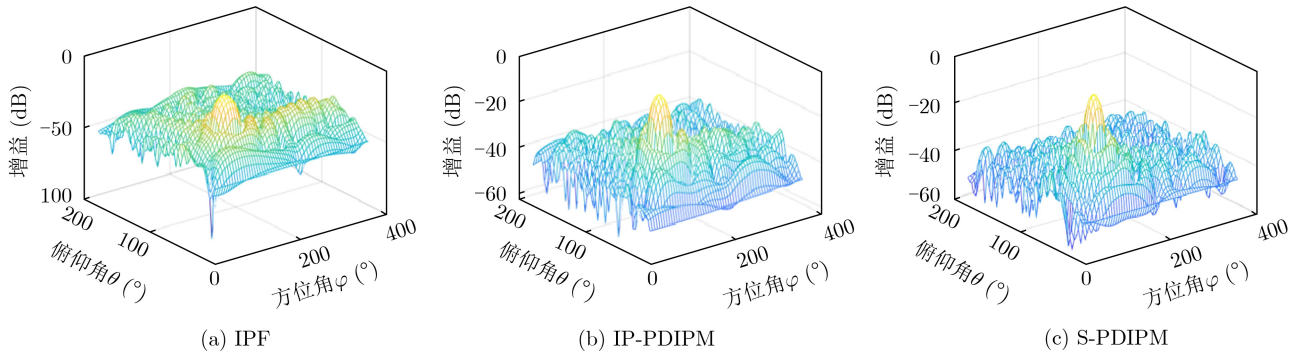


图4 不同算法的最优化波束形成

表1 不同算法求解最优极化波束形成指标分析

算法	r_0	$\theta_{-3\text{ dB}} (^{\circ})$	$\varphi_{-3\text{ dB}} (^{\circ})$	G	α	β	$t(\text{s})$
IPF	(45.83°, 91.67°)	12.7	26.8	19.7	7.32	17.34	335.62
IP-PDIPM	(45.83°, 91.67°)	11.2	24.2	20.7	10.01	20.01	4 619.92
S-PDIPM	(45.83°, 91.67°)	9.7	20.8	22.0	7.51	17.85	26.81

阵元位置和间距按照设计要求进行部署并一直保持不变；(2)实际机身载荷所导致的天线拉伸与变形，根据应变—位移矩阵，计算出各阵元的位移值，重新校准各阵元位置，进行柔性天线的阵列模型重构。两种柔性天线阵列模型如图5所示。

图5(a)为柔性天线的理想阵列模型，图5(b)为加入了此刻应变位移矩阵后柔性天线阵列各个阵元的实际位置。设定主波束指向 $(\theta, \varphi) = (45^{\circ}, 90^{\circ})$ ，主瓣极化匹配参数为 $\alpha = 10^{\circ}, \beta = 20^{\circ}$ 。根据上述推导得到的式(17)，设峰值旁瓣电平为 p ，半功率(-3 dB)波束宽度分别为 $\theta_{-3\text{ dB}}$ 和 $\varphi_{-3\text{ dB}}$ ，并根据重构的实际阵列模型进行最优极化波束形成实验，其最优波束形成的仿真结果如下。

图6为理想阵列模型和重构阵列模型的最优化波束形成仿真结果对比。各项参数对比如表2所示。

由图6和表2可知，柔性阵列天线在理想状态下和重构之后都能够在保证最大峰值旁瓣较低的前提下，生成在目标方向上的主波束，并且达到了接近正交的抗干扰极化抑制状态。

仿真3 柔性形变天线的最优极化波束在线重构。

为了更加准确模拟柔性形变阵列天线的实际变形需求和外部载荷的影响，本节实时更新了天线的阵列模型。对于机身的弧面部分，其弧度记为 $d(t)$ ，并设定步长为 10° 。因此，弧度的取值范围定为 $(60^{\circ}, 100^{\circ})$ 。而在两翼部分，通过为两翼斜面角度赋予权值 $k(t)$ 来调整其与机身弧面的夹角，其中权值的步长定为0.2。本仿真以10 s为时间间隔对天线的阵元位置信息进行更新。因此，每一个时刻 t 都与一个的应变-位移矩阵 $\mathbf{B}(t)$ 相对应，整个仿真持续时间为50 s。本仿真旨在验证柔性极化阵列天线在特定形变条件下的波束形成能力，并进一步探究最佳的柔性阵列模型配置。本仿真将半波束宽度限制在 2° ，并设定主波束的指向为 $(\theta, \varphi) = (45^{\circ}, 90^{\circ})$ ，同时主瓣的极化匹配参数设置为 $\alpha = 10^{\circ}, \beta = 20^{\circ}$ 。在这些条件下，目标是在峰值旁瓣最低的前提下，对柔性阵列天线的在线极化波束形成进行仿真验证。为了方便统计，表3和表4分别记录了在不同时

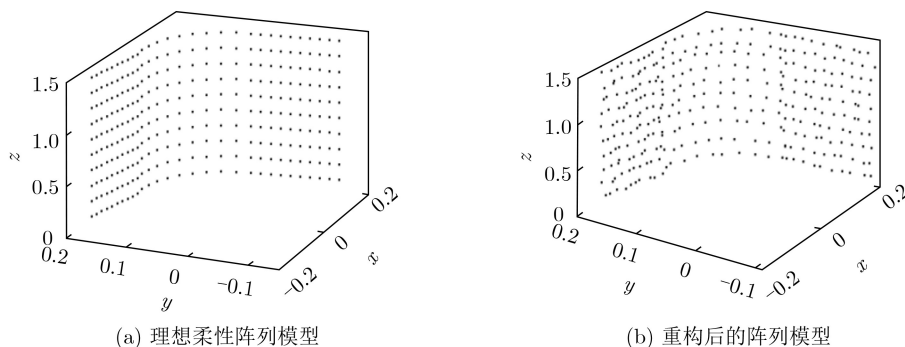


图5 两种柔性形变天线阵列模型

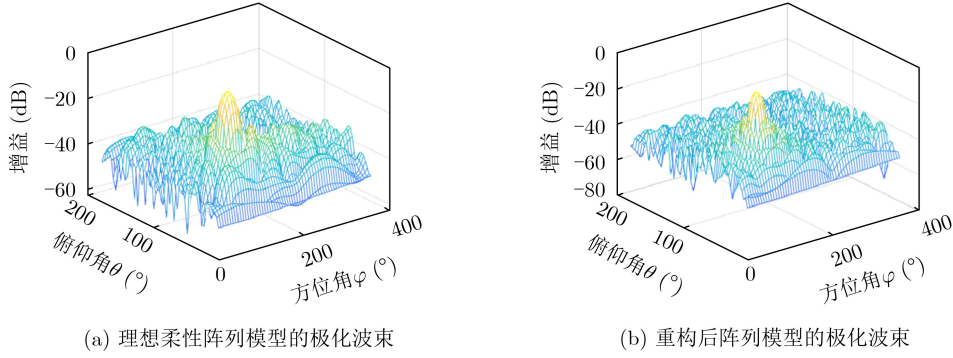


图6 理想阵列模型与重构阵列模型的最优波束形成

刻下的机身弧面弧度和两翼斜面夹角下极化波束响应与主瓣极化匹配的相关结果。

根据表3和表4的数据，当柔性阵列天线的参数 $d(t) \in (60^\circ, 100^\circ)$ ，以及 $k(t) \in (0.2, 1.0)$ 时，该天线的在线极化波束重构表现出色。尤其是当机身弧面的弧度为 90° 和两翼的夹角权值为 0.8 时，所得到的极化波束达到了最优状态。在这种条件下，除了主瓣增益显著增加外，峰值旁瓣电平也可降低到期望的水平。为了更直观地显示优化性能，以下将展示该柔性极化天线的极化波束的4维图示以及其对应的等高线图。

由图7可知，在最小峰值旁瓣的约束下，本仿真实例完成了主波束指向 $(\theta, \varphi) = (45^\circ, 90^\circ)$ ，其峰

值旁瓣电平约为 -16.9 dB，半功率波束宽度约为 $(\theta_{-3\text{ dB}}, \varphi_{-3\text{ dB}}) = (8.6^\circ, 22.6^\circ)$ ，且其主瓣增益为

$$G = 10 \lg \{32\ 000 / (\theta_{-3\text{ dB}} \times \varphi_{-3\text{ dB}})\} = 22.1(\text{dBi}) \quad (17)$$

由表3和表4的结果可见，柔性极化相控阵天线在 $d(t) \in (60^\circ, 100^\circ)$, $k(t) \in (0.1, 1.0)$ 时的主瓣极化匹配以及极化波束形成效果良好，并且在机身弧面弧度为 90° ，两翼夹角权值为 0.2 (夹角约为 33.7°) 时，主瓣极化匹配达到最佳。当主瓣极化状态设置为 $(10^\circ, 20^\circ)$ 时，主瓣极化状态实际值为 $(7.67^\circ, 17.68^\circ)$ ，其极化角差为 $(87.67^\circ, 87.68^\circ)$ ，说明实际情况下，柔性极化天线在主瓣区域 α 和 β 大致保持在目标极化状态，且通过极化正交抑制干扰的能力良好。

表2 理想阵列与重构阵列的波束效果对比

阵列	p	$\theta_{-3\text{ dB}} (^\circ)$	$\varphi_{-3\text{ dB}} (^\circ)$	G	α	β
理想阵列	-16.9	12.7	26.8	19.7	7.32	17.34
重构阵列	-17.1	9.7	20.8	22.0	7.511	17.85

5 结束语

本文提出一种基于柔性形变天线阵列的极化波束在线重构技术。首先，对柔性形变阵列天线进行构型与建模，在兼顾其自主形变和拉伸变形求得其

表3 不同时刻柔性阵列机身弧面弧度对应极化波束响应($d(t) \in (60^\circ, 100^\circ)$)

参数	t (s)				
	10	20	30	40	50
d	60	70	80	90	100
p	-16.3	-16.5	-16.8	-16.5	-16.5
$(\theta_{-3\text{ dB}}, \varphi_{-3\text{ dB}})$	$(9.2, 25.3)^\circ$	$(9.2, 23.2)^\circ$	$(9.0, 23.6)^\circ$	$(8.5, 25.3)^\circ$	$(9.3, 20.7)^\circ$
G	21.3	21.7	21.7	21.7	22.2
(α, β)	$(7.30, 17.10)$	$(7.28, 17.01)$	$(7.51, 17.39)$	$(7.65, 17.47)$	$(7.51, 17.82)$

表4 不同时刻柔性阵列两翼斜面夹角对应极化波束响应($k(t) \in (0.1, 1.0)$)

参数	t (s)				
	10	20	30	40	50
k	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
p	-15.8	-17.0	-14.6	-14.4	-14.2
$(\theta_{-3\text{ dB}}, \varphi_{-3\text{ dB}})$	$(10.8, 19.4)^\circ$	$(13.2, 23.5)^\circ$	$(11.2, 20.8)^\circ$	$(10.5, 22.5)^\circ$	$(11.3, 19.7)^\circ$
G	21.8	20.1	21.3	21.3	21.5
(α, β)	$(7.67, 17.68)$	$(6.91, 17.81)$	$(7.10, 17.30)$	$(7.13, 17.43)$	$(6.91, 17.53)$

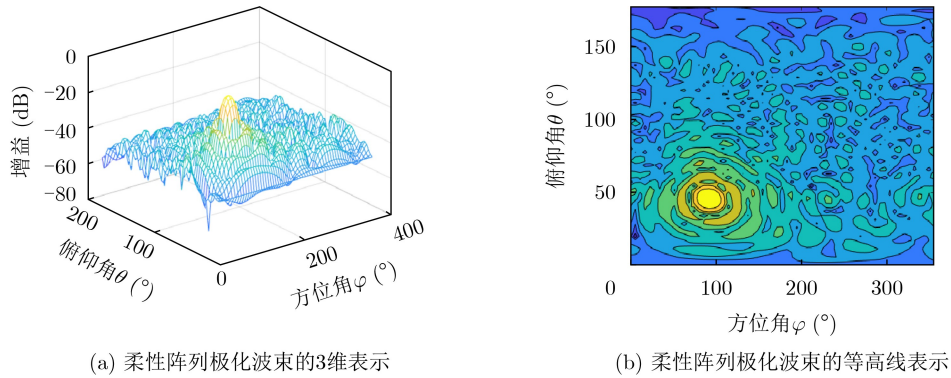


图7 $d = 90^\circ, k = 0.8$ 时, 柔性阵列天线的最优极化波束

应变-位移矩阵实时重构阵列模型; 其次, 考虑柔性阵列天线的空间特殊性构造柔性极化阵列的信号模型, 提出了一种基于CA-SOCP的柔性极化阵列在线波束重构方法, 得到具有主瓣极化约束的最优极化波束。仿真结果表明, 本文所提方法在特定形变范围内能够有效地满足空域的主波束指向和极化域的主瓣极化约束, 不仅增强了天线的极化匹配性能, 进一步也显著提升了天线的波束指向性能。鉴于柔性阵列的多功能性, 未来的研究将进一步探索不同柔性阵列天线的极化波束形成策略。

参考文献

- [1] ASADALLAH F, SHEHADEH G, COSTANTINE J, *et al.* A digitally tuned flexible reconfigurable antenna for IoT devices[C]. 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, Canada, 2020: 1803–1804. doi: [10.1109/IEEECONF35879.2020.9329456](https://doi.org/10.1109/IEEECONF35879.2020.9329456).
- [2] 何小静. 弹载共形阵列设计与波束综合[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2020. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2020.001137](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2020.001137).
HE Xiaojing. Design and beam synthesis of missile-borne conformal array[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2020. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2020.001137](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2020.001137).
- [3] GAN T H, LIU Ankang, TAN P K, *et al.* A bendable wideband dual-polarization conformal phased-array antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(8): 1952–1956. doi: [10.1109/LAWP.2023.3270431](https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3270431).
- [4] 南荣昌, 周金柱, 唐宝富, 等. 机翼蒙皮天线的形变重构方法和实验[J]. *电子机械工程*, 2020, 36(5): 1–6, 54. doi: [10.19659/j.issn.1008-5300.2020.05.001](https://doi.org/10.19659/j.issn.1008-5300.2020.05.001).
NAN Rongchang, ZHOU Jinzhu, TANG Baofu, *et al.* Deformation reconstruction method and experiment of wing skin antenna[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2020, 36(5): 1–6, 54. doi: [10.19659/j.issn.1008-5300.2020.05.001](https://doi.org/10.19659/j.issn.1008-5300.2020.05.001).
- [5] 闫敏. 极化相控阵雷达波束形成与极化合成技术研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2016.
CHEN Zhikun. Research on adaptive waveform design and
- [6] XIAO Jinjun and NEHORAI A. Optimal polarized beam pattern synthesis using a vector antenna array[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(2): 576–587. doi: [10.1109/TSP.2008.2007107](https://doi.org/10.1109/TSP.2008.2007107).
- [7] 陈志坤, 乔晓林, 李风从. 基于极化波束形成的相控阵雷达导引头抗干扰技术研究[J]. *航空兵器*, 2016(6): 16–20. doi: [10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2016.06.004](https://doi.org/10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2016.06.004).
CHEN Zhikun, QIAO Xiaolin, and LI Fengcong. Research on anti-interference technology for phased array radar seeker based on polarized beam synthesis[J]. *Aero Weaponry*, 2016(6): 16–20. doi: [10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2016.06.004](https://doi.org/10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2016.06.004).
- [8] XIE Peng, WANG Guangming, LI Haipeng, *et al.* A dual-polarized two-dimensional beam-steering Fabry-Pérot cavity antenna with a reconfigurable partially reflecting surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2370–2374. doi: [10.1109/LAWP.2017.2718567](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2718567).
- [9] WANG Peipei, LIU Junmin, HE Yanliang, *et al.* Arbitrary cylindrical vector beam generation using cross-polarized modulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 873–876. doi: [10.1109/LPT.2019.2910989](https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2910989).
- [10] 苏月, 谢拥军, 张春刚, 等. 飞机V形尾翼共形垂直极化合成天线[J]. *电讯技术*, 2021, 61(2): 230–235. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2021.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2021.02.016).
SU Yue, XIE Yongjun, ZHANG Chungang, *et al.* A vertically polarized synthetic antenna conforming to V-shaped tail of an aircraft[J]. *Telecommunication Engineering*, 2021, 61(2): 230–235. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2021.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2021.02.016).
- [11] 陈志坤. MIMO雷达自适应波形设计与阵列优化研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2016.
CHEN Zhikun. Research on adaptive waveform design and

- array optimization for MIMO radar[D]. [Ph. D. dissertation], Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] MOULDER W F, DAS R N, MACCABE A C, *et al.* Rigid-Flexible Antenna Array (RFAA) for lightweight deployable apertures[C]. 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020: 1–5. doi: [10.23919/EuCAP48036.2020.9135627](https://doi.org/10.23919/EuCAP48036.2020.9135627).
- [13] TANG Hong, BULGER C J, ROVERE T, *et al.* A low-profile flexible dual-band antenna with quasi-isotropic radiation patterns for MIMO system on UAVs[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(1): 49–53. doi: [10.1109/LAWP.2022.3201492](https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3201492).
- [14] 陈志坤, 杜康, 彭冬亮, 等. 极化智能天线的二维矢量波束形成方法研究[J]. 信号处理, 2020, 36(2): 275–282. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.015](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.015).
CHEN Zhikun, DU Kang, PENG Dongliang, *et al.* Research on method of 2-D vector beamforming for polarized smart antenna[J]. *Journal of Signal Processing*, 2020, 36(2): 275–282. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.015](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2020.02.015).
- [15] NIA B A, DE FLAVIIS F, and SAADAT S. Ultra thin dual-polarized flexible patch antenna for the 5G communication[C]. 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI), Denver, USA, 2022: 1012–1013. doi: [10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886890](https://doi.org/10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886890).
- [16] WANG Yuxin and QU Siwei. Dual-polarized conformal transparent antenna array with hemispherical beam coverage[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(10): 2452–2456. doi: [10.1109/LAWP.2023.3291013](https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3291013).
- 陈志坤：男，博士，副教授，硕士研究生导师，研究方向为雷达阵列信号处理与电子侦察。
- 崔津赫：男，硕士生，研究方向为相控阵波束形成技术。
- 王伟：男，博士，研究方向为柔性天线设计。
- 陈智斌：男，硕士生，研究方向为相控阵波束形成技术。
- 郭云飞：男，博士，教授，博士生导师，研究方向为目标跟踪，信息融合。
- 责任编辑：余蓉