

弯曲阵面机载共形阵列雷达方向图与杂波相关性研究

张涛* 宋婷 李晓明 路成军

(中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所 无锡 214063)

摘要: 针对载体弯曲效应对机载共形阵列雷达方向图和杂波特性的影响, 该文在正侧视条件下评估均匀圆环阵方向图性能, 分析不同位置阵元对弯曲阵面方向图合成效率的影响, 发现边缘阵子不仅对共形阵列方向图主瓣增益贡献较小, 反而更易引起旁瓣抬升等挑战, 降低共形阵的孔径利用效率。另一方面, 通过严格的理论推导完成共形阵列雷达方向图特性与杂波扩展效应内在物理联系的分析, 发现弯曲阵面引起的方向图非理想畸变是共形阵杂波非均匀扩展的核心影响因素。在此基础上, 进一步分析共形雷达单个贴片微带阵元加工和安装结构组件将增大阵元物理尺寸, 使得共形阵列雷达相邻阵元间距大于半波长, 当阵元间隔增大到一定程度时, 在方向图远区会形成较高的栅瓣, 进一步影响机载共形阵列雷达的杂波分布, 通过仿真分析发现在特定的脉冲重复频率(PRF)条件下, “栅瓣杂波”折叠进入主瓣杂波, 该文提出通过优化雷达PRF设计, 避免栅瓣杂波的折叠效应对机载共形阵列雷达信号处理性能的影响, 相关仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 共形阵列雷达; 弯曲阵面; 机载; 方向图; 杂波

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)03-0572-08

DOI: [10.11999/JEIT200572](https://doi.org/10.11999/JEIT200572)

Research on The Relation between the Beam pattern and Clutter Distribution of Curved Surface Array for Airborne Conformal Array Radar

ZHANG Tao SONG Ting LI Xiaoming LU Chengjun

(AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: To demonstrate the performance of beam-pattern and clutter distribution for airborne conformal radar due to the bending effect of carrier, the half-uniform circular array and fan-shaped array with the same radius are compared in the array synthesis characteristic, in the case of vertical side-looking. It is found that the edge elements have little contribution on the main-beam gain, alternatively, but enhances the side-lobe level so obvious that the combination property of the radar and aperture efficiency suffers degradation. Simultaneously, the inherent relation between the beam-pattern and the clutter spread is proved that the beam distortion resulting from the curved surface is the core factor on the clutter distribution inhomogeneity, through strict theoretical reduction. On the basis of the previous discussion, the additional structure of manufacture and installation, which would increase the physical dimension, is considered to enlarge the space between the adjacent radiators. In particular, the grating-lobe has appeared on the far-field pattern and made further efforts on the clutter distribution for Conformal Array Radar (CAR), in the condition of the reasonable element interval. One to be noted is that the grating-lobe clutter is folded to the main-lobe clutter region under the specific Pulse Repetition Frequency (PRF). To avoid the foldover of clutter, the PRF of CAR can be optimized and the related simulation is conducted to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: Conformal Array Radar (CAR); Curved array surface; Airborne; Beam-pattern; Clutter

收稿日期: 2020-07-13; 改回日期: 2021-02-27; 网络出版: 2021-03-01

*通信作者: 张涛 zhtt@mail.ustc.edu.cn

基金项目: 博士后科学基金(2019M651994), 航空科学基金(20172007002)

Foundation Items: China Postdoctoral funded Project(2019M651994), The Aviation Science Foundation of China (20172007002)

1 引言

近年来, 机载共形相控阵技术受到了国外军方科研机构的极大关注。美国空军研究实验室和雷神公司进行了“X波段薄形雷达孔径”研制, X波段薄形雷达采用承载型共形阵天线。美国国防预先研究计划局开展应用于下一代无人机上的共形相控阵雷达, 将主要用于对地面目标的搜索。目前, 美国空军开展了“射频多功能共形结构孔径”的研究项目, 其主要目的在于进一步提高天线孔径的综合程度和承载能力, 实现全机天线的有效整合并与机体蒙皮实现一体化集成。

共形阵虽然有着突出的优势和应用潜力, 但是载体弯曲引起的阵元各向异性和载体遮挡效应是共形阵与平面阵相比突出的技术难点, 制约着波束形成^[1-5]和杂波抑制等处理性能^[6,7]。国外, 麻省理工学院Zatman博士^[6]针对圆环共形阵STAP技术的研究取得了丰硕的成果。Hersey等人^[7]针对工形阵的杂波抑制技术提出了完整的技术思路。国内, 西安电子科技大学、国防科技大学和空军工程大学等众多高校在阵列流形建模^[8]共形阵波束形成^[9,10]、杂波建模与抑制^[11-14]相关理论方面进行了系统性研究。但是现有成果缺乏基于实际工程需求的方向图和杂波相关性分析研究, 尤其是共形阵特殊的方向图响应和杂波扩展效应之间内在的物理联系。

本文基于工程化的设计思想, 针对典型弯曲阵面开展波束形成和杂波特性分析研究, 采用严格的理论建模和仿真, 评估共形阵方向图和杂波分布特性之间的内在联系, 研究具备较高工程化引用价值的技术解决方案, 支持新一代机载共形阵列雷达项目的研究和应用。

2 共形雷达弯曲阵面方向图建模

设载机作匀速直线飞行, φ 方位角, θ 为俯仰角, 假设天线主瓣指向为 (θ_0, φ_0) , 定义波束指向单位矢量 $\mathbf{K}(\theta_0, \varphi_0)$ 为

$$\mathbf{K}(\theta_0, \varphi_0) = [\cos \varphi_0 \sin \theta_0, \cos \varphi_0 \cos \theta_0, \sin \varphi_0]^T \quad (1)$$

理想条件下共形天线能够依据任一形状复杂曲面采取灵活的布阵和安装方式, 但是考虑到实际工程实现可行性, 更倾向于采用相对规则的弯曲孔径构型构建共形天线, 满足探测功能和平台安装需求。典型的弯曲孔径包括圆锥、圆柱和双曲面等。不管采用哪种阵列构型, 其基本的构成单元都是圆环阵或者椭圆环阵。由于阵面弯曲效应的影响, 共形阵列方向图综合过程与平面阵相比存在明显差异, 为简化建模过程, 以圆环阵为例分析共形阵列

方向图综合的特殊性, 探究共形阵列方向图特殊性形成的物理本质。

均匀圆环阵由 N_e 个阵元组成, R 为圆环半径, 每层阵列之间等间隔放置, 则第 n 个阵元的位置坐标向量为

$$\mathbf{P}_n = \left[R \cos \left(\frac{2(n-1)\pi}{N_e} \right), R \sin \left(\frac{2(n-1)\pi}{N_e} \right), 0 \right]^T \quad (2)$$

其中, $n = 1, 2, \dots, N_e$, X 轴上的阵元为 $n = 1$, 同时定义

$$\varphi_n = \frac{2(n-1)\pi}{N_e} \quad (3)$$

在给定阵元位置坐标和摆放角度, 可以通过式(4)获得整个圆环阵的方向图

$$F(\theta, \varphi) = \sum_n \omega_n \cdot g_n(\theta, \varphi) \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{P}_n \cdot (\mathbf{K}(\theta_0, \varphi_0) - (\cos \varphi \sin \theta, \cos \varphi \cos \theta, \sin \varphi)^T) \right\} \quad (4)$$

其中, λ 为波长, ω_n 为阵元加权, $g_n(\theta, \varphi)$ 为阵元方向图, $\mathbf{K}(\theta_0, \varphi_0) = [\sin \theta_0 \cos \varphi_0 \quad \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \quad \cos \theta_0]^T$ 为波束指向向量, (θ_0, φ_0) 为波束指向。考虑到阵面的弯曲效应, 各阵元在方位 (θ, φ) 上的响应不一致, 需要利用欧拉变换^[8]对各阵元的方向图贡献进行折算。考虑到某些特殊的布阵条件下, 如圆锥阵列构型等, 由于载体倾斜, 每层圆环阵中单个阵元也存在一定的倾斜安装, 如图1所示, 欧拉坐标变换需要的欧拉变换角

$$D_n = \varphi_n, E_n = \frac{\pi}{2} - \beta, F_n = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos D_n & \sin D_n & 0 \\ -\sin D_n & \cos D_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos E_n & 0 & \sin E_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin E_n & 0 & \cos E_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, 坐标转换矩阵 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z$, 利用式(6)~式(8)可以在方向图综合模型式(4)中对阵元局部方向图 $g'_n(\theta'_n, \varphi'_n)$ 进行折算, 则共形阵方向图合成方程可以重构为

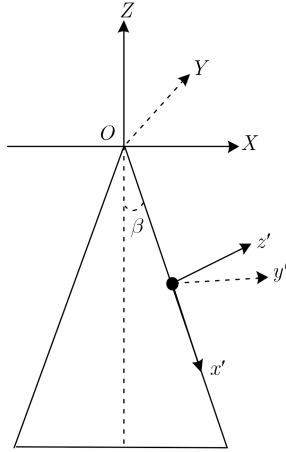


图1 圆锥全局坐标系OXYZ和阵元局部坐标系

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\theta, \varphi) = & \sum_n \omega_n \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{g}'_n(\theta'_n, \varphi'_n) \\ & \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{P}_n \cdot (\mathbf{K}(\theta_0, \varphi_0) \right. \\ & \left. - (\cos \varphi \sin \theta, \cos \varphi \cos \theta, \sin \varphi)^T \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

设 $\mathbf{g}_n = [(g_n)_X, (g_n)_Y, (g_n)_Z]^T$ 为阵列全局坐标系下的单元方向图, $\mathbf{g}'_n = [(g'_n)_X, (g'_n)_Y, (g'_n)_Z]^T$ 为阵元局部坐标系下的单元方向图, 经过欧拉变换运算, 将局部方向图折算为全局方向图, 依照式(9)进行方向图合成运算。根据式(9)对弯曲阵面引起的波束合成效率进行分析, 为简化分析起见, 考虑规则微带天线单元电磁场辐射特征, 一般假定 $(g'_n)_Z = 0$, 如式(10)所示

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} (g_n)_X \\ (g_n)_Y \\ (g_n)_Z \end{bmatrix} &= \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{g}'_n \\ &= \begin{bmatrix} \cos E_n \cos D_n & -\sin D_n & \sin E_n \cos D_n \\ \cos E_n \sin D_n & \cos D_n & \sin E_n \sin D_n \\ \sin E_n & 0 & \cos E_n \end{bmatrix} \\ & \cdot \begin{bmatrix} (g'_n)_X \\ (g'_n)_Y \\ (g'_n)_Z \end{bmatrix} \quad (10) \end{aligned}$$

定义阵元局部坐标系下阵元的波束指向为 (θ'_n, φ'_n) , 全局坐标系的波束指向则为 (θ_n, φ_n) , 基于3维空间坐标系几何关系, 阵列全局坐标系下, 利用式(10), 可以确定阵元局部坐标系下, $(g'_n)_X$, $(g'_n)_Y$ 和 $(g'_n)_Z$ 转换到全局坐标系下 $(g_n)_X$, $(g_n)_Y$ 和 $(g_n)_Z$ 之间的空间角度关系, 如式(11)所示

$$\varphi_n = a \tan \left(\frac{\cos E_n \sin D_n + \cos D_n \tan \varphi'_n}{\cos E_n \cos D_n - \sin D_n \tan \varphi'_n} \right) \quad (11)$$

根据式(11)可以发现, 弯曲阵面条件下, 考虑到阵元位置 D_n 和阵面斜率 E_n 的影响, 参与共形阵列全局方向图在某一角度 (θ_n, φ_n) 各分量合成的各

阵元方向图响应不同, 即全局方向图中的角度 (θ_n, φ_n) 对应不同位置阵元不同的角度 (θ'_n, φ'_n) , 因此共形阵列全局方向图的最大分量并不对应全部阵元的最大辐射分量, 造成方向图主瓣扩展, 副瓣抬升, 这也是共形阵与直线阵及平面阵在方向图合成原理上最大的区别。

另一方面, 考虑到实际工程条件下共形天线单元的封装和拼接特征^[15,16], 还需要额外的封装和结构件在贴片单元的外部进行安装, 造成相邻辐射器单元之间的物理间距增大, 容易引起方向图栅瓣和杂波, 给后续信号处理带来困难。

3 杂波建模与扩展效应分析

阵面的弯曲效应使得在同一波束指向条件下, 各阵元的方向图增益响应不一致, 因此共形阵列导向矢量与传统线阵和平面阵相比存在着较大差异, 定义 $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 为共形阵列导向矢量

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = \hat{\mathbf{g}}(\theta, \phi) \odot \hat{\mathbf{s}}(\theta, \phi) \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{g}}(\theta, \phi) = [g_1(\theta, \phi), \dots, g_n(\theta, \phi), \dots, g_{N_e}(\theta, \phi)] \quad (13)$$

其中, $\hat{\mathbf{g}}(\theta, \phi)$ 为天线阵列方向图向量, $\hat{\mathbf{s}}(\theta, \phi)$ 为阵元位置关系定义的空间导向矢量, \odot 为Hardmad积运算符。

定义 \mathbf{P}_n 为阵元的位置矢量, $1 \leq n \leq N_e$, 则

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}(\theta, \phi) = & \left[\exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{K}(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{P}_1 \right), \dots, \right. \\ & \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{K}(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{P}_n \right), \dots, \\ & \left. \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{K}(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{P}_{N_e} \right) \right] \quad (14) \end{aligned}$$

时域导向矢量与常规雷达一致, 不受雷达阵面几何构型的影响, 如式(15)所示

$$\mathbf{b}(\theta, \phi) = [1, \dots, \exp(j2\pi f_d (m-1) \text{PRI}), \dots, \exp(j2\pi f_d (M-1) \text{PRI})] \quad (15)$$

其中, M 为雷达一个帧周期内的脉冲数, PRI 为雷达脉冲重复周期, f_d 为多普勒频率。

$$f_d = 2\mathbf{K}(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{v} / \lambda \quad (16)$$

其中, \mathbf{v} 为目标与雷达相对速度, λ 为雷达工作波长。由式(12)和式(15)构建共形阵列的空时导向矢量 \mathbf{v} , 其中 \otimes 为Kronecker积。

$$\mathbf{v}(\theta, \phi) = \mathbf{b}(\theta, \phi) \otimes \mathbf{a}(\theta, \phi) \quad (17)$$

构建共形阵的杂波模型, 如式(18)所示

$$\boldsymbol{\chi}_c = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_c} \alpha_{ik} \mathbf{v}(\theta_i, \phi_k) \quad (18)$$

θ_i 为杂波环的俯仰角, ϕ_k 为第 k 个杂波块的方位角, $1 \leq i \leq N_r$, $1 \leq k \leq N_c$, α_{ik} 为第 i 个杂波环第 k 个杂波块的杂波幅度, 各杂波块杂波分量之间满足不相关性。

定义空间频率 $\vartheta_c = \frac{\mathbf{K} \cdot \Delta \mathbf{P}_n}{\lambda_0}$, $\Delta \mathbf{P}_n$ 为共形阵列同层圆环中相邻阵元间的位置差向量

$$\Delta \mathbf{P}_n = \mathbf{P}_n - \mathbf{P}_{n+1} \quad (19)$$

则阵列的多普勒频率重新定义为

$$\tilde{f}_d = \frac{2 \|\boldsymbol{\nu}\|}{\|\Delta \mathbf{P}_n\| \text{PRF}} \vartheta_c \eta(\mathbf{K}, \boldsymbol{\nu}, \Delta \mathbf{P}_n) \quad (20)$$

其中, $\eta(\mathbf{K}, \boldsymbol{\nu}, \Delta \mathbf{P}_n) = \frac{\cos \langle \mathbf{K}, \boldsymbol{\nu} \rangle}{\cos \langle \mathbf{K}, \Delta \mathbf{P}_n \rangle}$, $\cos \langle \mathbf{K}, \boldsymbol{\nu} \rangle$ 和 $\cos \langle \mathbf{K}, \Delta \mathbf{P}_n \rangle$ 分别为波数矢量 \mathbf{K} 与速度向量 $\boldsymbol{\nu}$ 以及相邻阵元间的位置差向量 $\Delta \mathbf{P}_n$ 之间的广义余弦。分析式(20), 应用于传统线阵和平面阵杂波块多普勒模型中, 正侧视条件下, $\mathbf{K} \perp \boldsymbol{\nu}$, $\mathbf{K} \perp \Delta \mathbf{P}_n$, $\tilde{f}_d = 0$, 此时定义

$$\eta(\mathbf{K} \perp \boldsymbol{\nu}, \mathbf{K} \perp \Delta \mathbf{P}_n) = 0 \quad (21)$$

正前视条件下, $\eta = 1$, $\tilde{f}_d = \frac{2 \|\boldsymbol{\nu}\|}{\|\Delta \mathbf{P}_n\| \text{PRF}}$ (标准最大值形式)。

以均匀圆环阵为例, 如图2所示, 考虑到共形阵特殊的载体弯曲效应, 同层圆环中相邻阵元间的位置差向量 $\Delta \mathbf{P}_n$ 不平行, 曲面安装造成各阵元波束指向不一致。以正侧视条件为例进行说明, 区别于平面阵和直线阵, 圆环阵只有完全垂直于波束指向的阵元才满足 $\cos \langle \mathbf{K}_n, \boldsymbol{\nu} \rangle = 0$ (n_c 为正中间阵元编号), 接收的回波信号多普勒频率才为0, 两侧阵元的波束指向均不与雷达的轴向重合, $\cos \langle \mathbf{K}_n, \boldsymbol{\nu} \rangle \neq 0$, 因此共形阵与传统直线阵和平面阵相比, 存在明显的主杂波多普勒展宽, 正侧视条件下, 仅有一半的阵元发挥作用, 除轴向阵元(编号 n_c)外, 其它有效阵元的波束指向向量与平台运动方向向量不垂直, 不同阵元间 \mathbf{K}_n 与 $\boldsymbol{\nu}$ 以及 \mathbf{K}_n 与 $\Delta \mathbf{P}_n$ 之间的夹角均不同, 变量 η 的值在圆环阵不同阵元之间有较大差异, 造成同一杂波块的回波信号在不同阵元之间存在一定的多普勒频率差异, 引起杂波展宽和非均匀现象。

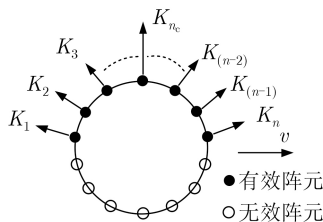


图2 圆环阵阵元波数向量指向差异

根据式(20)定义共形阵杂波脊 β_n

$$\beta_n = \frac{2 \|\boldsymbol{\nu}\|}{\|\Delta \mathbf{P}_n\| \text{PRF}} \eta(\mathbf{K}, \boldsymbol{\nu}, \Delta \mathbf{P}_n) \quad (22)$$

由式(22)可知, 共形阵每一个阵元的杂波脊与阵元波数向量、相对位置关系和运动速度相关, 呈现3维空间分布特性, 因此每个阵元的杂波脊分布都不相同, 这也与以上讨论的结论一致。可以通过仿真比较典型的正中间阵元和边缘阵元的杂波脊特性, 分析不同阵元之间杂波分布的特性差异。

另一方面, 如上所述, 由于采用贴片阵子通过组合拼接的方式实现共形阵列天线, 容易在高频段引起阵元间距扩大带来的方向图栅瓣效应, 尤其在多普勒模糊的条件下, 栅瓣杂波可能折叠进入主杂波。为有效避免这种潜在现象的影响, 通过优化雷达脉冲重复频率PRF的设计, 规避栅瓣杂波的折叠效应, 避免影响SAR等雷达低重模式的处理性能。假定方向图在主瓣 ϕ_0 外左右两侧还存在较高的栅瓣, 分别处于方位 ϕ_1 和 ϕ_2 , 则主瓣和两侧的栅瓣分别对应的杂波多普勒频率分别为

$$\left. \begin{aligned} f_{d0} &= \frac{2\nu}{\lambda} \cos \phi_0 \\ f_{d1} &= \frac{2\nu}{\lambda} \cos \phi_1 \\ f_{d2} &= \frac{2\nu}{\lambda} \cos \phi_2 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

在某些特定的PRF条件下, 存在多普勒模糊, 栅瓣杂波可能会折叠进入主杂波, 关系如式(24)

$$f_{di} = k_i \cdot \text{PRF} + \Delta f_{di}, i = 1, 2, k_i = 1, 2, \dots \quad (24)$$

通过优化PRF设计, 使得PRF大于典型栅瓣杂波最大的多普勒频率, 使得栅瓣杂波不会折叠进入主杂波, 如式(25)所示

$$\text{PRF} > \max \{f_{d1}, f_{d2}\} \quad (25)$$

4 仿真分析

本文以均匀圆环阵为例分别分析共形阵方向图和杂波分布特性及二者间的在联系。首先以工作频点10 GHz, 半径 $R=0.25$ m, 阵元在圆环方位向均匀等间隔分布的均匀圆环阵为例, 如图3所示, 阵元分布在方位角区间 $\varphi \sim [-\varphi_0, \varphi_0]$, φ_0 分别取 60° (阵元数 $N_e = 20$)和 90° (阵元数 $N_e = 30$), 同时比较相同孔径长度和工作频点条件下的均匀直线阵方向图, 阵列孔径长度与圆环阵弧长一致 $L = \pi R \varphi_0 / 90$, 阵元间隔 $\Delta d = L / (N_e - 1)$ 。

根据式(11)计算在4种典型波束指向条件下($\phi_0 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)均匀半圆环阵($\varphi_0 = 90^\circ$, $N_e = 30$)中各阵元全局坐标系下的波束指向角, 如图4所

示, 在 $\phi_0 = 0^\circ$ 指向条件下, 各阵元局部坐标系下的波束指向角呈现对称分布, 且集中在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 各阵元均发挥作用, 当 ϕ_0 在 15° , 30° 和 45° 时, 边缘阵元局部坐标系下的波束指向角折算结果在 -90° 和 90° 出现反折(反正切运算输出结果在 -90° 和 90° 会出现对称反折), 此时边缘阵元不发挥作用, 与理论预期一致, 以此为基础开展共形阵列的方向图合成仿真研究, 并与均匀直线阵进行比较。

如图5(a)所示, 在正侧视模式下, 相同孔径长度均匀直线阵与均匀圆环阵的主瓣宽度几乎一致, 但是副瓣水平差异较大, 均匀圆环阵的波束合成受到载体弯曲效应影响, 副瓣电平都较高, 两者相差

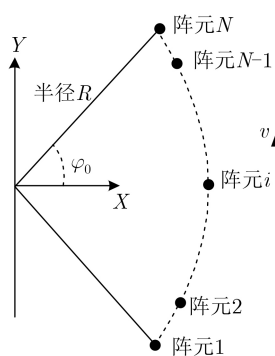


图3 扇形均匀圆环阵

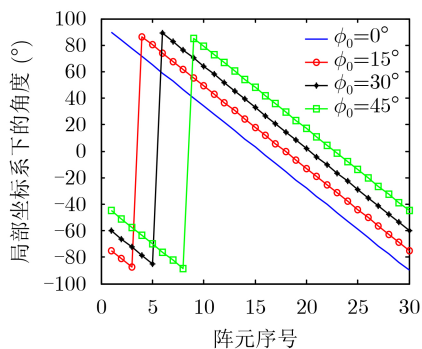
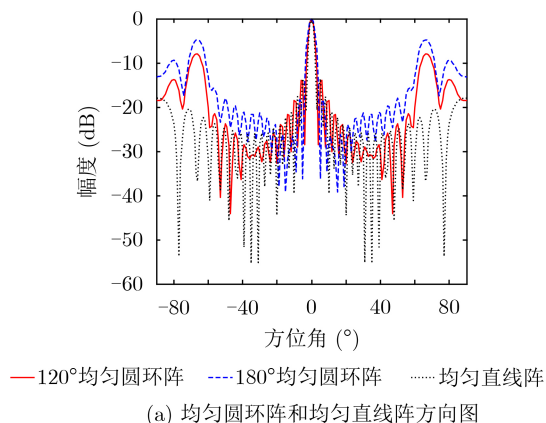


图4 不同波束指向下各阵元局部坐标系对应角度

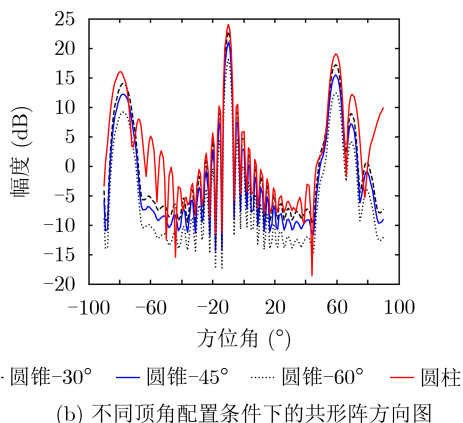


(a) 均匀圆环阵和均匀直线阵方向图

近20 dB, 该结果说明, 在相同的孔径长度条件下, 弯曲阵面孔径布局对共形阵列方向图副瓣影响较大, 与均匀直线阵相比存在明显的抬升。另一方面, ϕ_0 取 90° 条件下的均匀圆环阵方向图副瓣电平明显高于 ϕ_0 取 60° 条件的方向图, 并且主瓣存在少许的展宽, 因此对于弯曲阵面, 在超过法线方向 $\pm 60^\circ$ 范围外的阵元对波束合成的主瓣增益的贡献程度较低, 并且会进一步抬升方向图的副瓣电平, 效率有限, 建议关停超过法线方向 $\pm 60^\circ$ 范围以外的边缘阵元, 提升圆环阵的工作效率, 类似措施可以进一步推广到一般性的共形阵列当中去。

另一方面, 如果采用圆锥布阵形式, 阵元位置和圆锥顶角都会对共形阵的波束合成造成影响, 不同的圆锥顶角 β 配置方案, 表现在阵列方向图上的特性有差异, 通过仿真 $\beta = 30^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\beta = 60^\circ$ 3种不同顶角条件下的方向图, 如图5(b)所示可以发现随着圆锥顶角的增大, 圆锥共形阵列方向图在前向 $\phi_0 = 90^\circ$ 方向的增益呈现逐步下降的趋势。

在方向图仿真的基础上, 考虑到在特定波束指向条件下, 弯曲阵面上不同位置阵元的响应差异, 如图6(a)所示, 选择不同位置的典型阵元, 分别为第1个阵元(边缘阵元), 第8个阵元(斜向阵元), 第15个阵元(正中间阵元), 仿真波数向量从 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 变化范围内3个阵元接收杂波的归一化多普勒频率和归一化空间频率的变化关系(杂波脊), 进一步研究弯曲阵面对雷达杂波分布的影响, 如图6(b)所示, 由于弯曲阵面的影响, 3个典型位置阵元的杂波脊差异甚大, 其中第1个阵元和第8个阵元的杂波脊呈现典型的非线性特征, 在一定范围波束指向内出现明显的多普勒模糊, 第1个阵元的杂波多普勒模糊角度范围远大于阵元8, 而对于第15个阵元, 其杂波脊呈现较为理想的线性关系, 不存在不同波数方向下多普勒频率的模糊现象。基于以上分析, 可以发现在正侧视条件下, 弯曲阵面的边缘阵元存



(b) 不同顶角配置条件下的共形阵方向图

图5 阵列方向图

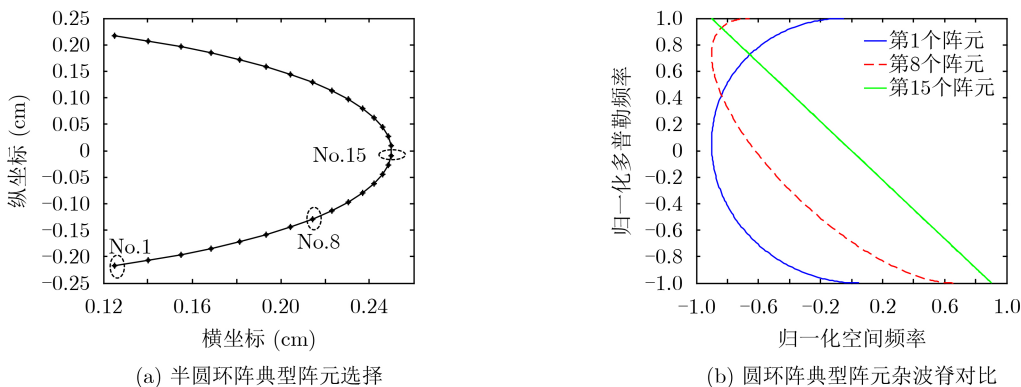


图6 阵元选择和阵元杂波脊对比

在杂波多普勒模糊，引起杂波区域的扩展。阵列构型或辐射方式的特殊性对杂波非均匀的影响在其它类型复杂阵列雷达如端射阵中体现的亦十分明显^[17]，给后续的杂波抑制和信号处理技术提出了全新的挑战。

基于典型圆环阵阵列构型 $[-60^\circ, 60^\circ]$ (阵元数20)， $[-90^\circ, 90^\circ]$ (阵元数30)，平台运动速度 $\nu = 60 \text{ m/s}$ ，PRF = 9 kHz(无多普勒模糊)，仿真正侧视条件下均匀圆环阵杂波分布，并与同等孔径长度和阵元数的均匀直线阵的杂波分布进行比较，评估弯曲效应引起的杂波扩展，如图7所示，分别为半圆环UCA正侧视杂波2维频谱、扇形圆环UCA正

侧视杂波2维频谱、ULA正侧视杂波2维频谱，通过对比两种阵型的典型正侧视2维频谱可知弯曲阵面(半圆环阵和扇形圆环阵)和均匀直线阵的主瓣杂波宽度为 $B_M = 0.3544 \text{ kHz}$ ，但是弯曲阵面的旁瓣杂波抬升明显，造成了明显了杂波频谱扩展，同时如图5(a)所示，由于半圆环阵方向图副瓣电平更高，主瓣存在一定的展宽，其主瓣杂波会出现一定的减弱，但是副瓣杂波更强，扩展效应更加明显，以上讨论的杂波特征与图5(a)所示3种典型阵列构型的方向图特性是对应的。

另一方面，由于采用贴片单元实现弯曲阵面时，容易在共形阵列方向图远区引起较高的栅瓣，当共

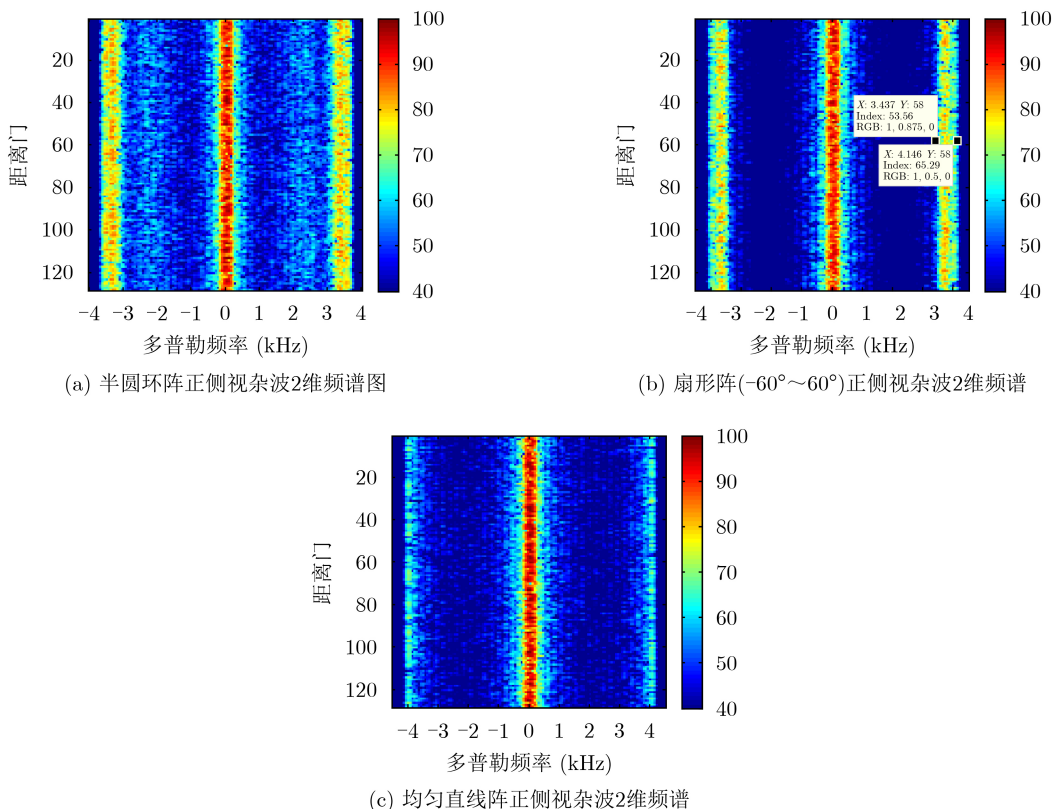


图7 杂波2维频谱图

形阵列雷达工作在低重模式下时,容易引起栅瓣杂波折叠进入主瓣杂波,如图7所示,弯曲阵面的方向图栅瓣分别位于 -66° 和 66° ,对应的栅瓣杂波多普勒频率分别为 $f_{d1} = -3.65$ kHz和 $f_{d2} = 3.65$ kHz,以右边带的栅瓣杂波为例,边缘频率分量 $f_{s1} = 4.146$ kHz, $f_{s2} = 3.437$ kHz,则栅瓣杂波宽度($B_{g1} = B_{g2} = 0.709$ kHz),正侧视条件下, $PRF < 4\nu/\lambda = 4$ kHz时,杂波出现多普勒模糊,并且正侧视条件下当 $\{rem(f_{d2}, PRF) - 0.5 \times PRF\} \in$ 主瓣杂波频率范围,栅瓣杂波折叠进入主瓣杂波区域,对SAR成像等相关处理产生较大影响,如图8(a)所示,当雷达工作在 $PRF = 3.8$ kHz时,两侧的栅瓣

杂波会折叠进入主瓣杂波区域,造成明显的主瓣杂波展宽($B_M = 0.5686$ kHz),为有效避免高电平的栅瓣杂波折叠效应的影响,雷达PRF设计应至少保证

$$PRF > f_{s1} + B_M + B_{g1} \quad (26)$$

考虑自适应处理中的主杂波保护单元个数,实际的PRF选取在式(26)的基础上,还应当适当增大, $PRF > f_{s1} + B_M + B_{g1} + B_p$,选择 $PRF = 6$ kHz,共形阵列的杂波2维频谱如图8(b)所示,两侧的栅瓣杂波未折叠进入主瓣杂波频谱区域,主瓣杂波未展宽,证明了通过优化PRF设计,规避较强栅瓣杂波折叠效应方法是可行的。

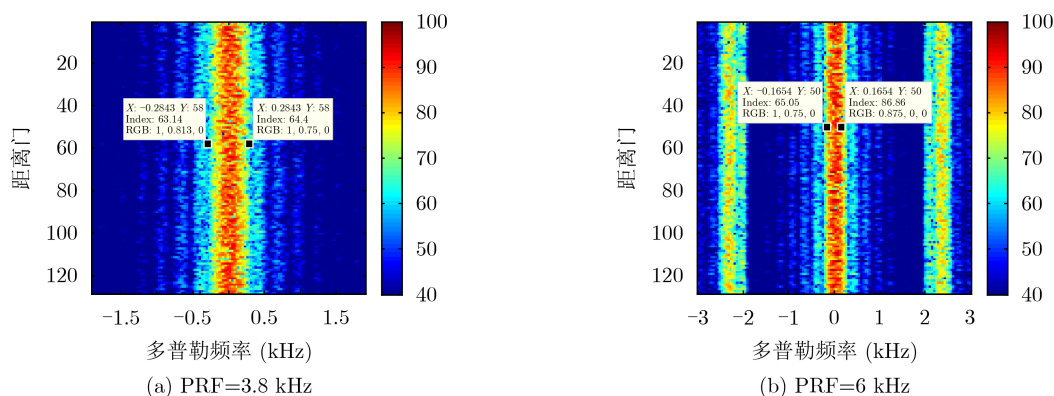


图8 不同波形下扇形阵($-60^\circ \sim 60^\circ$)正侧视杂波2维频谱

5 结束语

与传统均匀线阵和平面阵相比,机载共形阵列雷达的方向图和杂波特性受到载体弯曲效应的影响,显示出一定的非理想特征,影响机载共形阵列雷达工作效率和后续处理性能。本文通过理论建模和仿真分析发现载体弯曲引起共形阵列边缘阵元贡献程度降低甚至完全失效,在主瓣增益相差不大的前提下,半圆环阵的副瓣和栅瓣电平明显高于扇形圆环阵,扇形圆环阵的合成效率明显高于半圆环阵,同时较高的副瓣和栅瓣会造成共形阵列雷达杂波展宽。同时考虑到实际工程实现条件下的单元阵元加工和安装结构件引起阵元间距扩大,导致共形阵列方向图主瓣两侧会出现高的栅瓣,并在特定的脉冲重复频率条件下,栅瓣杂波会折叠进入主瓣杂波,造成主杂波展宽,影响后续雷达信号处理的性能。通过优化雷达脉冲重复频率设计,可以有效规避该问题,相关仿真结果验证了本文所提方法的有效性,进一步提升了机载共形阵列雷达工作效率和稳健性。

参考文献

[1] MORTON T E and PASALA K M. Performance analysis of

conformal conical arrays for airborne vehicles[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 876–890. doi: 10.1109/TAES.2006.248218.

[2] 叶恺, 禹卫东, 徐伟, 等. 基于柱形抛物面天线的MIMO SAR研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(8): 1816–1822. doi: 10.11999/JEIT171105.

YE Kai, YU Weidong, XU Wei, *et al.* Investigation on parabolic cylinder reflector based MIMO SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1816–1822. doi: 10.11999/JEIT171105.

[3] PAL A, MEHTA A, GOONESINGHE H, *et al.* Conformal beam-steering antenna controlled by a raspberry pi for sustained high-throughput applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(2): 918–926. doi: 10.1109/TAP.2017.2779518.

[4] NAN Hao, LIU Shiyu, BUCKMASTER J G, *et al.* Beamforming microwave-induced thermoacoustic imaging for screening applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(1): 464–474. doi: 10.1109/TMTT.2018.2880901.

[5] QIN Peiyuan, SONG Lizhao, and GUO Y J. Beam steering conformal transmitarray employing ultra-thin triple-layer slot elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and*

- Propagation*, 2019, 67(8): 5390–5398. doi: [10.1109/TAP.2019.2918496](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2918496).
- [6] ZATMAN M. Circular array STAP[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 510–517. doi: [10.1109/7.845235](https://doi.org/10.1109/7.845235).
- [7] HERSEY R K, MELVIN W L, MCCLELLAN J H, et al. Adaptive ground clutter suppression for conformal array radar systems[J]. *IET Radar, & Navigation*, 2009, 3(4): 357–372. doi: [10.1049/iet-rsn.2008.0149](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2008.0149).
- [8] 王布宏, 郭英, 王永良, 等. 共形天线阵列流形的建模方法[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 481–484. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2009.03.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2009.03.010).
WANG Buhong, GUO Ying, WANG Yongliang, et al. Array manifold modeling for conformal array antenna[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 481–484. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2009.03.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2009.03.010).
- [9] 周建卫, 李道京, 田鹤, 等. 基于共形稀疏阵列的舰载外辐射源雷达性能分析[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1058–1063. doi: [10.11999/JEIT160846](https://doi.org/10.11999/JEIT160846).
ZHOU Jianwei, LI Daojing, TIAN He, et al. Performance analysis on airship-borne passive radar based on conformal sparse array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1058–1063. doi: [10.11999/JEIT160846](https://doi.org/10.11999/JEIT160846).
- [10] 韩国栋, 张宙, 王焕菊. 一种DBF体制卫星接收共形相控阵天线[J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 322–329. doi: [10.13443/j.cjors.2018043005](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2018043005).
HAN Guodong, ZHANG Zhou, and WANG Huanju. A novel conformal DBF receiving phased array on satellite application[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2018, 33(3): 322–329. doi: [10.13443/j.cjors.2018043005](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2018043005).
- [11] 段克清, 谢文冲, 王永良. 共形阵机载雷达杂波非平稳特性及抑制方法研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 54(10): 2170–2177. doi: [10.1007/s11432-011-4389-2](https://doi.org/10.1007/s11432-011-4389-2).
DUAN Keqing, XIE Wenchong, and WANG Yongliang. Nonstationary clutter suppression for airborne conformal array radar[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(10): 2170–2177. doi: [10.1007/s11432-011-4389-2](https://doi.org/10.1007/s11432-011-4389-2).
- [12] 辛志慧, 廖桂生, 杨志伟. 机身共形圆台阵结构对地杂波谱特性影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(7): 1481–1487. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.07.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.07.01).
XIN Zhihui, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. Analysis of the effect of the fuselage conformal frustum array structure on the property of the ground clutter spectrum[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(7): 1481–1487. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.07.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.07.01).
- [13] JIANG Hao, RAO Nini, CHEN Xingbo, et al. Study on clutter model and characteristics of airborne radar with parabolic conformal phased array[J]. *Journal of Electronic Science and Technology*, 2016, 14(1): 49–53.
- [14] TAO Fuyu, WANG Tong, WU Jianxin, et al. A knowledge aided SPICE space time adaptive processing method for airborne radar with conformal array[J]. *Signal Processing*, 2018, 152: 54–62. doi: [10.1016/j.sigpro.2018.05.015](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.05.015).
- [15] 孙丹. 机载共形宽带有源相控阵天馈系统研究[D]. [博士学位论文], 东南大学, 2012.
SUN Dan. Researches on antenna feed system of airborne conformal broadband active phased array[D]. [Ph. D. dissertation], Southeast University, 2012.
- [16] 倪国旗, 刘曼霞. 圆柱共形介质埋藏微带天线设计与研究[J]. 电波科学学报, 2018, 33(2): 119–125.
NI Guoqi and LIU Manxia. Design and research of dielectric embedded microstrip antenna with cylindrical conformal[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2018, 33(2): 119–125.
- [17] 李永伟, 谢文冲. 基于空时内插的端射阵机载雷达杂波补偿新方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2115–2122. doi: [10.11999/JEIT181131](https://doi.org/10.11999/JEIT181131).
LI Yongwei and XIE Wenchong. A novel clutter spectrum compensation method for end-fire array airborne radar based on space-time interpolation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(9): 2115–2122. doi: [10.11999/JEIT181131](https://doi.org/10.11999/JEIT181131).
- 张涛: 男, 1987年生, 博士后, 高级工程师, 主要研究方向为先进机载雷达总体及信号处理技术等.
- 宋婷: 女, 1991年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为认知雷达、机载雷达杂波抑制与目标检测等.
- 李晓明: 男, 1981年生, 博士后, 研究员, 副总工程师, 主要研究方向为先进机载火控雷达总体及信号处理技术等.
- 路成军: 男, 1984年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为先进机载雷达总体及信号处理技术等.

责任编辑: 马秀强