

doi: 10.7690/bgzdh.2024.02.011

一种圆柱共形数字阵列天线波束跟踪与指向技术

张定云¹, 余治民²(1. 中国空空导弹研究院通信技术研究所, 河南 洛阳 471009;
2. 空装驻洛阳地区第一军事代表室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对圆柱形布阵的数字阵列天线, 分析基于多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法的测角跟踪算法和基于线性约束最小方差(linear constrained minimum variance, LCMV)的波束指向算法, 提出将2种算法联合使用的方法; 并分析通道误差对MUSIC和LCMV算法精度的影响。结果表明, 该方法为高速飞行器圆柱共形数字阵列天线工程化研制提供了理论依据。

关键词: 圆柱共形; 数字阵列天线; MUSIC; LCMV

中图分类号: TN763 **文献标志码:** A

Beam Tracking and Pointing Technology of Cylindrical Conformal Digital Array Antenna

Zhang Dingyun¹, Yu Zhimin²(1. Communication Technology Institute of China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;
2. The First PLA's Military Representative Office of Air Force Equipment in Luoyang District, Luoyang 471009, China)

Abstract: Based on the multiple signal classification (MUSIC), the analysis of cylindrical digital array antennas is carried out. The angle measurement tracking algorithm based on MUSIC algorithm and the beam pointing algorithm based on linear constrained minimum variance (LCMV) are proposed, and the method of combining the two algorithms is proposed. The influence of channel error on the accuracy of MUSIC and LCMV algorithms is analyzed. The results show that the method provides a theoretical basis for the engineering development of cylindrical conformal digital array antenna for high-speed aircraft.

Keywords: cylindrical conformal; digital array antenna; MUSIC; LCMV

0 引言

随着信息技术的发展, 武器系统从以平台为中心逐步转化为以网络为中心。网络为中心的作战体系要求体系内的各类飞行器均具备全空域网络化通信能力。同时, 电磁域的对抗需求又推动着武器通信系统抗干扰手段由传统的扩、跳频等频域抗干扰技术向空、时、频联合抗干扰方向发展; 因此, 具备空、时、频联合抗干扰能力的网络化通信技术将是下一阶段武器通信系统的主要发展方向之一。

目前, 国内研究重点基本集中在机载共形阵列天线和弹载雷达阵列天线的研究, 适用于弹载通信的圆柱形共形数字阵列天线跟踪及指向技术研究较少。穆健等^[1]针对机载平台共形相控阵超分辨 DOA 估计进行了分析, 何小静^[2]研究了用于目标探测的圆锥台共形阵列波束综合技术, 杨超^[3]研究了 S 波段弹载柱面共形微带天线, 但未涉及阵列信号处理算法。

笔者针对空域抗干扰通信需求, 提出一种适用于圆柱形共形阵列的基于多重信号分类(MUSIC)算法^[4]和线性约束最小方差(LCMV)算法^[5]的具备自跟踪波束指向和自适应干扰抑制能力的阵列信号处理方案, 并分析通道误差对波束指向和干扰抑制性能的影响。

1 阵列模型

阵列由 N 个半径为 r 的均匀圆阵在垂直方向上均匀分布于圆柱, 均匀圆阵间距为 h , 每个均匀圆阵上的阵元数为 M , 方位角 φ 和俯仰角 θ 如图 1 所示。空间任意点 P 可由 a 、 φ 和 θ 来唯一确定。

以 $(m, 1)$ 表示第 1 个圆周上的第 m 个阵元($m=1, 2, \dots, M$), 由空间 $P(a, \varphi, \theta)$ 点到阵元 $(m, 1)$ 的距离为:

$$R_{m,1} = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \varphi_m} \quad (1)$$

式中: $\cos \varphi_m = \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m)$, $\varphi_m = 2\pi(m/M)$; 在

收稿日期: 2023-10-15; 修回日期: 2023-11-15

第一作者: 张定云(1981—), 女, 河南人, 硕士。

远场情况下, $a \gg r$, 因此上式可简化为^[6]:

$$R_{m,1} = a - r \cos \varphi_m = a - r \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m). \quad (2)$$

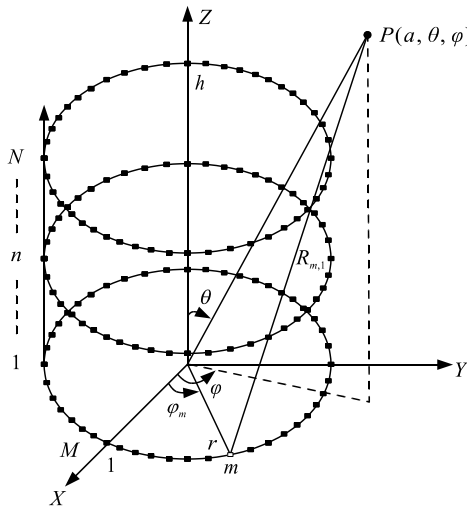


图 1 圆柱共形阵列的几何结构

因此, 阵元 $(m, n)(m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N)$ 到 $P(a, \theta, \varphi)$ 点的距离可写作:

$$R_{m,n} = R_{m,1} - (n-1)h \cos \theta = a - r \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m) - (n-1)h \cos \theta. \quad (3)$$

进而阵元 (m, n) 相对于坐标原点的波程差可写作:

$$d_{m,n} = R_{m,n} - a = -r \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m) - (n-1)h \cos \theta. \quad (4)$$

阵列天线在远场 $P(a, \theta, \varphi)$ 点的方向图函数可表示为:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp\{j[\psi_{mn} + k(r \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m) + (n-1)h \cos \theta)]\}. \quad (5)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$; ψ_{mn} 为相应阵元的初始相位。为使主波束指向 (θ_0, φ_0) 方向, 则 ψ_{mn} 的取值为:

$$\psi_{mn} = -k[r \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_m) + (n-1)h \cos \theta_0]. \quad (6)$$

2 角度跟踪算法

本文中角度跟踪使用 MUSIC 算法, 算法原理在此不再赘述, 直接给出空间谱函数如下:

$$P_{mu}(\theta) = 1/a^H(\theta) \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\theta). \quad (7)$$

式中: $\mathbf{a}(\theta)$ 为方向导向矢量; \mathbf{E}_n 为噪声子空间的特征向量。信号的协方差矩阵可通过 Jacobi 算法迭代分解, 信号数目通过特征值梯度门限法进行估计。目标搜索和跟踪时直接通过寻求上式峰值来得到波达方向的估计值。

以圆柱直径 230 mm, 工作频段中心频率 10 GHz 为例, 每环 48 个阵元, 由 3 个环组成圆柱形共形阵,

邻近的 2 列天线之间夹角为 7.5° , 每次 DOA 使用相邻 12 列。对俯仰 0° , 方位方向 30° 、 40° 、 50° 的 3 个目标进行 DOA 估计, 如图 2 所示。

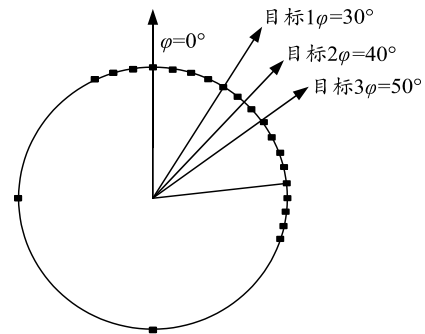


图 2 使用 MUSIC 估计的 3 个目标

对 30° 、 40° 、 50° 的 3 个目标 (信噪比分别为 10、50、20 dB) 进行 DOA 估计的结果如图 3 所示。

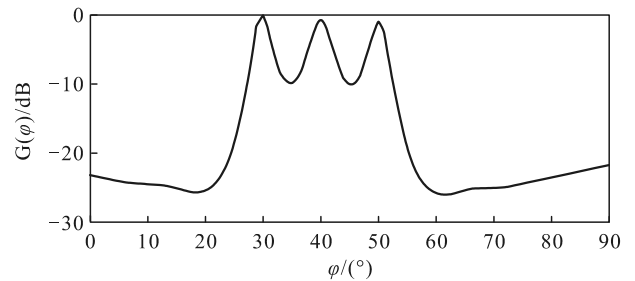


图 3 无误差条件下 3 个目标的 DOA 估计结果

当相位和幅度误差为正态分布, 相位误差方差为 5° , 幅度误差方差 2 dB 时, 其他条件不变, DOA 估计结果如图 4 所示。

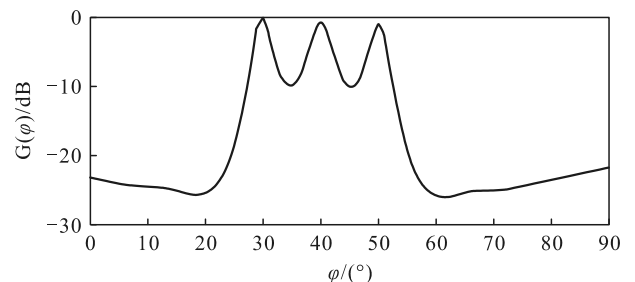


图 4 误差条件下 3 个目标的 DOA 估计结果

由仿真结果可见, 在上述误差下能正确获得目标方向。此误差在工程上通过通道校准较易达到。

在获得信号方向后, 由于通信系统为合作通信, 且武器通信链路中一般会带有各通信平台在惯性坐标系或者地理坐标系中的位置信息; 因此, 可通过位置信息获得通信目标的方向, 而通信目标方向以外的信号则视为干扰, 使用 LCMV 算法对通信目标方向进行约束, 即可实现对干扰的自适应抑制。

3 圆柱阵波束形成方法

本文中波束形成方法使用 LCMV 算法, 该算法

在期望信号方向保持增益的同时在干扰处形成零点。LCMV 算法公式如下：

$$\left. \begin{array}{l} \min_w \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{C} = \mathbf{f}^H \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中： \mathbf{R}_x 为阵列输出信号的协方差矩阵； \mathbf{C} 为约束矩阵； \mathbf{f} 为约束响应矢量。当期望信号为单位增益约束，并在特定方向进行零陷约束时， $\mathbf{C}=[\mathbf{a}(\theta_0), \mathbf{C}_{\text{null}}]$ ， $\mathbf{f}=[1, 0, \dots, 0]^T$ ， $\mathbf{a}(\theta_0)$ 表示期望信号导向矢量； $\mathbf{C}_{\text{null}}=[\mathbf{a}(\theta_{C_1}), \dots, \mathbf{a}(\theta_{C_{D-1}})]$ 为零点约束矩阵； θ_{C_j} ($j=1, 2, \dots, D-1$) 为约束零陷方向。可进一步求得 LCMV 的加权矢量为：

$$\mathbf{w}_{\text{LCMV}} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f} \quad (9)$$

由于 LCMV 对阵列误差和期望信号导向矢量误差敏感，因此工程上，LCMV 要进行鲁棒化改进，鲁棒性算法主要有对角加载 (DIAG) 和 ESB 等。

LCMV 算法需要对协方差矩阵 \mathbf{R}_x 和 $\mathbf{C}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C}$ 求逆，该求逆的过程同样可以先通过对矩阵进行 Jacobi 特征分解^[7]，然后对特征值对角矩阵求逆，进而得到原始矩阵的逆；因此，LCMV 算法和 MUSIC 算法的大部分矩阵计算过程是可以共用的，这也是 2 种阵列信号处理方法联合使用的优点之一。

对于本文中圆柱上某一组相邻的 12 列天线，以边缘某一列天线为方位方向 0° 的参考，在无误差情况下期望信号信噪比 10 dB，干扰的干噪比 20 dB，对俯仰 0° 方位 30° 方向的期望信号形成指向，对方位 40° 方向的干扰信号形成自适应零陷，期望信号角度误差 1° ，阵列通道无误差。期望角度误差是由测角误差、坐标转换误差等累积形成，在实际系统中也是不可避免的。仿真结果如图 5 所示。

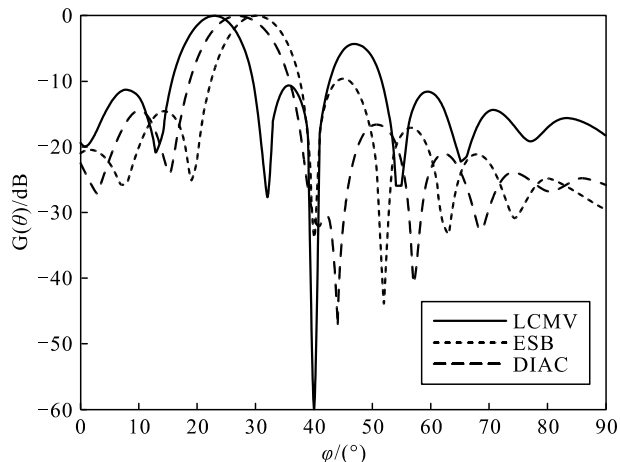


图 5 无误差条件下自适应波束成形结果

由仿真结果可知，期望信号角度误差将导致 LCMV 原始算法对期望信号形成零陷，在实际系统中无法使用。而 ESB^[8] 和对角加载^[9] 鲁棒算法可有效地抑制期望信号角度误差对主波束的指向影响。

当相位和幅度误差为正态分布，相位误差方差为 5° ，幅度误差方差 2 dB 时，信号角度误差 1° ，其他条件不变，形成的波束如图 6 所示。

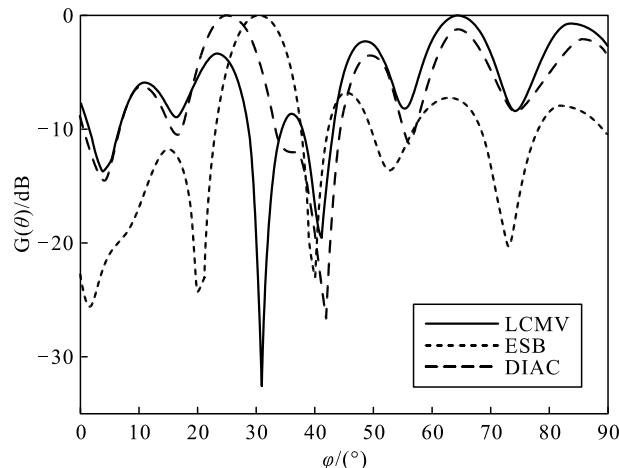


图 6 误差情况下的自适应波束成形结果

从仿真结果可以看出，对干扰的零陷由于采用了自适应算法，自适应算法的信息来自于接收数据协方差矩阵 \mathbf{R}_x ，即使阵列的通道带有误差，对零陷的位置影响不大，但会使得零陷的抑制降低，同时阵列误差对于阵列方向图的旁瓣也会产生影响。从工程实现来看，无论对角加载算法还是 ESB 算法都需要对数据协方差矩阵进行特征分解，这部分计算可以与 MUSIC 算法共用，从而大大降低算法整体的计算复杂度。

4 结束语

笔者给出一种采用 MUSIC 和 LCMV 算法的适用于圆柱形共形阵列天线跟踪与波束指向的实现方案，可对非合作信号进行自适应零陷；同时，在各种误差影响情况下都有较好的性能，可提高战术武器网络化通信系统的空域抗干扰能力。

参考文献：

- [1] 穆健, 袁安民, 徐建军. 机载共形阵天线阵列信号处理的关键技术[J]. 兵工自动化, 2008, 21(2): 74-76.
- [2] 何小静. 弹载共形阵列设计与波束综合[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021: 9-10.
- [3] 杨超. S 波段弹载柱面共形微带天线的设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 1-7.