

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.002

敌我识别定向应答技术

焦 阳, 俄广西

(中国电子科技集团公司第十研究所敌我识别事业部, 成都 610036)

摘要: 为解决敌我识别采用询问-应答的协同工作方式, 存在对其他询问机造成干扰和被敌方干扰的问题, 提出一种敌我识别定向应答技术。利用圆形阵列天线和阵列信号处理算法计算得到询问信号的到达方向, 形成指向询问方的窄波束进行应答。仿真结果表明: 该技术能实现定向应答, 减少对其他方向询问机的干扰, 降低应答功率。

关键词: 敌我识别; 询问; 圆形阵列; 定向应答

中图分类号: TN911.72 **文献标志码:** A

Identification of Friend or Foe Targeted Response Technology

Jiao Yang, E Guangxi

(Department of Identification of Friend or Foe, No. 10 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: In order to solve the problem of interference to other interrogators and being interfered by enemies in the collaborative work mode of inquiry response for identification of friend or foe, a directed response technology for identification of friend or foe is proposed. Using circular array antennas and array signal processing algorithms, the direction of arrival of the interrogation signal is calculated, forming a narrow beam pointing towards the interrogator for response. The simulation results show that this technology can achieve directional response, reduce interference to other direction interrogators, and reduce response power.

Keywords: friend or foe identification; interrogation; circular array antenna; directional response

0 引言

目前,敌我识别系统一般采用协同式识别方式,一方询问,另一方对询问做出应答从而完成敌我识别。敌我识别中的应答机,一般采用全向天线,接收从空间各个方向到达的询问信号,以确保不会漏失目标的询问,避免遭到“己方”的误伤^[1]。采用全向天线也会导致应答机很容易被敌方恶意干扰,此外当应答机回复询问发出应答信号时,也是对各个方向近乎等功率发射电磁信号,极易被敌方截获,致使自身方位暴露造成损失;因此,笔者对敌我识别定向应答技术进行研究。

1 技术方案

实现定向应答方式: 1) 采用定向高增益天线结合机械伺服转台的传统方式,通过机械伺服驱动定向天线实现定向应答; 2) 采用阵列天线,结合波束形成技术实现定向应答。方式 2) 具有无需机械设备驱动,仅采用电子扫描技术即可实现,具有体积小、重量轻、功耗低、波束指向精度高等优点;因此,笔者采用阵列天线实现定向应答。

为了实现方位上的增益均匀性,尽量接近全向天线的特性,笔者采用圆形阵列天线(简称圆阵),结合波束形成算法可以覆盖 $0\sim 360^\circ$ 方向。由于采用圆形阵列,在方位上具有良好的几何对称性,进行波束扫描时,波束变形小、主瓣不会展宽、副瓣不抬高。定向应答系统的组成如图 1 所示。

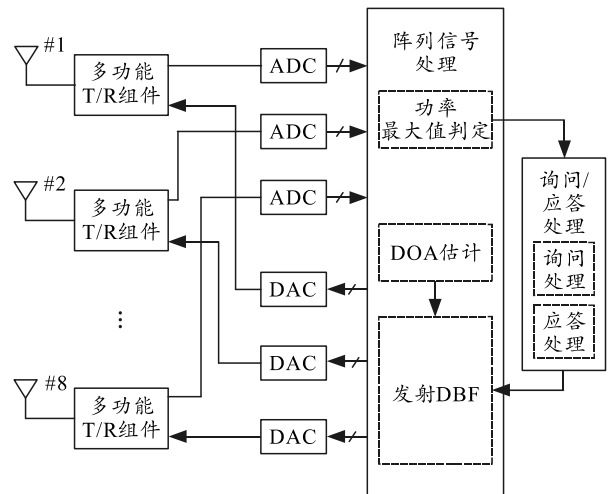


图 1 定向应答系统

定向应答系统由圆阵、多功能 T/R 组件、模数

转换器(analog to digital converter, ADC)、数模转换器(digital to analog converter, DAC)、阵列信号处理和询问/应答处理模块组成。多功能 T/R 组件的功能是完成询问信号的低噪声放大、下变频和带通滤波形成中频信号,并对 DAC 输出的模拟信号进行放大、上变频和带通滤波,形成射频发射信号;ADC 完成对多功能 T/R 组件输出中频信号的模数转换,形成数字信号;DAC 完成对发射数字信号的数模转换,形成发射模拟信号;阵列信号处理主要包含功率最大值判定、到达方向(direction of arrival, DOA)估计和发射数字波束形成(digital beam forming, DBF)模块组成,其中功率最大值判定完成对圆阵各通道信号功率计算,将功率最大的通道信号输出到询问处理模块;DOA 估计模块采用 DOA 估计算法计算得到询问信号的到达方向;发射 DBF 模块对圆阵的通道信号进行加权,形成发射波束形成。

2 工作原理

圆阵接收询问信号,经过多功能 T/R 组件的低噪声放大、变频和滤波后送入 ADC,转换为数字信号输出到阵列信号处理模块。功率最大值判定模块对所有的通道信号做平方运算,然后平滑,得到各个通道的信号功率,选择其中功率最大的一路作为询问信号,输出到询问处理模块,完成询问信号的解调解码等处理,确定是否“我方”询问信号,同时 DOA 估计模块利用阵列信号处理算法对圆阵的输出信号进行计算,得到询问信号的到达方向,用于定向应答。

当询问处理模块判定为“我方”询问时,需要对询问信号进行应答。应答处理模块形成应答信息,经过调制、扩频等相应处理后生成应答数字基带信号,然后输出到发射 DBF 模块。发射 DBF 模块根据 DOA 估计模块计算得到的询问信号到达方向,计算出圆阵各个发射通道对应的加权矢量,对应答数字基带信号加权计算后送入 DAC 转换为模拟信号,再输出到多功能 T/R 组件,经过放大、上变频和滤波后得到射频发射信号,馈送到圆阵发射出去。

3 圆阵设计

为了实现全向接收、信号到达方向估计和定向应答,采用圆环状 8 元阵列天线,阵列流形如图 2 所示。

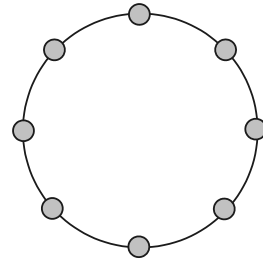


图 2 阵列流形

阵元采用微带天线,具有体积小、结构简单等优点,可以覆盖应答信号对应的工作频段。通过设计合适的阵元间距,可以较好地抑制天线阵元之间的互耦。

4 算法设计

4.1 DOA 估计算法

由于圆阵阵元较少,询问信号的信噪比相对较高,DOA 估计模块可以采用多重子空间分类(multiple signal classification, MUSIC)算法计算询问信号的到达方向。MUSIC 算法利用矩阵分解得到相互正交的信号子空间和噪声子空间,将信号子空间投影到噪声子空间形成空间谱,搜索空间谱峰值即可得到信号的到达方向,具有很高的方向分辨率^[2]。

圆阵的输出信号为:

$$x(t) = \mathbf{a}(\phi)s(t) + n(t). \quad (1)$$

式中: ϕ 为询问信号的到达方向; $s(t)$ 为问信号; $\mathbf{a}(\phi)$ 为对应圆阵的方向矢量; $n(t)$ 为白噪声。

阵列输出信号的协方差矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx}(t) &= E[x(t)x(t)^H] = E[(\mathbf{a}(\phi)s(t) + \\ &n(t))(\mathbf{a}(\phi)s(t) + n(t))^H] = \\ &\mathbf{a}(\phi)\mathbf{a}(\phi)^H E[s(t)s(t)^H] + \sigma_n^2 \mathbf{I}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $[\cdot]^H$ 为 Hermitian 转置; σ_n^2 为高斯白噪声的均方差; \mathbf{I} 为 8 维单位矩阵。

MUSIC 算法的核心思想是对 $\mathbf{R}_{xx}(t)$ 作特征分解,把 $\mathbf{R}_{xx}(t)$ 的特征空间分成信号子空间 U_s 和噪声子空间 U_n 。信号子空间与噪声子空间正交,对应入射信号入射角的方向矢量全部位于信号子空间内。

定义 MUSIC “空间谱”:

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)U_n U_n^H \mathbf{a}(\theta)}. \quad (3)$$

式中 θ 为与谱峰对应的询问信号到达方向。

仿真采用 8 元圆阵,阵元间距等于半波长。系统中有一个信号入射到阵列天线,其波达方向为

-30° ，信号的信噪比为 15 dB。图 3 为对入射信号波达方向的 MUSIC 谱。

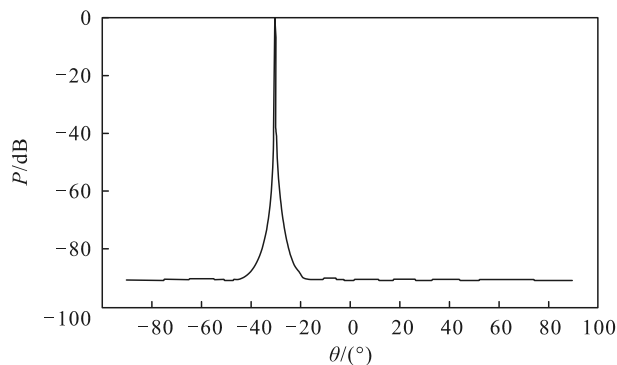


图 3 DOA 估计仿真

谱峰对应的角度为 -30° ，正是询问信号的 DOA。由仿真结果可以看出，采用 MUSIC 算法可以准确地估计询问信号的波达方向。

4.2 自适应波束形成算法

DOA 估计模块计算得到询问信号的到达方向，为了使得定向应答具备扩展系统的自适应抗干扰能力，可以采用线性约束最小方差 (linearly constrained minimum variance, LCMV) 算法^[3]。询问信号的 DOA 已知，其方向矢量记为 $\tilde{\mathbf{a}}$ ，为了使期望信号无损失的通过，并能抑制干扰，则基于 LCMV 的自适应波束形成的数学表达式为：

$$\mathbf{w} = \arg \min(\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}) \text{ s.t. } \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{a}} = 1. \quad (4)$$

LCMV 算法的物理意义是保持在期望方向上的增益恒定，在其他方向上输出功率最小。使用拉格朗日算子可以计算得到最优加权矢量为：

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = (\tilde{\mathbf{a}}^H \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{a}})^{-1} \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}. \quad (5)$$

根据式(5)得到的加权矢量可以实现在抑制干扰的同时，保证期望信号的增益恒定。

为了简化计算可选用 LMS 算法来实现，利用拉格朗日代价函数可以推导得到加权矢量的迭代公式：

$$\mathbf{W}_{n+1} = \mathbf{W}_n - u(2\mathbf{R}\mathbf{W}_n + \lambda_n \tilde{\mathbf{a}}); \quad (6)$$

$$\lambda_n = \frac{1}{u} (\tilde{\mathbf{a}}^H \tilde{\mathbf{a}})^{-1} (\tilde{\mathbf{a}}^H \mathbf{w}_n - 2u\tilde{\mathbf{a}}^H \mathbf{R} \mathbf{w}_n - 1). \quad (7)$$

仿真中设定目标数为 1，方向为 5° ；干扰信号数目为 3，方向分别为 -50° 、 -20° 、 30° 。采用 LCMV 算法形成的波束如图 4 所示。

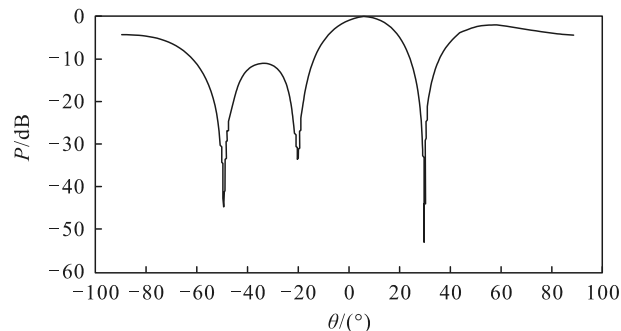


图 4 LCMV 波束形成仿真

图 4 中，主波束指向 5° ，3 个零陷分别指向 -50° 、 -20° 和 30° ，零深分别为 -44 、 -34 、 -53 dB。仿真结果表明，LCMV 算法可以有效地抑制干扰。

5 结束语

采用圆形阵列天线，结合自适应阵列信号处理算法，可以准确计算询问信号的到达方向。利用自适应波束形成算法能够实现定向应答，同时由于阵列天线提供了阵列增益，可以在同等 EIRP 指标要求的情况下降低对发射功率的要求，有利于降低应答机的功耗。仿真结果证明了该定向应答技术的有效性和可行性。

参考文献：

- [1] 张祥志，贾畅宇，刘湘伟. 雷达敌我识别干扰方法研究[J]. 电子对抗, 2010(4): 1-5, 45.
- [2] 黄成芳，何利民. 敌我识别 MK XIII A 浅析[J]. 电讯技术, 2007, 47(4): 66-71.
- [3] 白冰，马飞，范江涛. 雷达敌我识别系统干扰方法研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(4): 110-112, 126.