

被动雷达导引头对抗有源诱偏干扰技术

宋海方¹, 吴华¹, 程嗣怡¹, 王俊明²

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西西安, 710038; 2. 空军驻无锡地区代表室, 江苏无锡, 214063)

摘要 对反辐射导弹在有源诱偏下的失误距离进行了分析, 讨论了减小失误距离的途径; 针对反辐射导弹抗诱偏对导引头分辨角的需求, 建立了基于均匀圆阵的二维 DOA 估计模型, 讨论了角分辨算法在导引头中的具体应用; 通过对不同信噪比和快拍数下导引头分辨概率的仿真, 表明该算法能够满足分辨角的要求。

关键词 被动雷达导引头; 分辨角需求; 二维 DOA 估计

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.02.010

中图分类号 TN973 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)02-0044-05

反辐射导弹(Anti Radiation Missile, ARM)是对抗雷达或其他辐射源的主要武器^[1-3]。作为反辐射导弹的关键部件, 被动雷达导引头(Passive Radar Seeker, PRS)使用传统的单脉冲测角方法在有源诱偏干扰时测角性能下降严重^[4]。提高 ARM 对抗有源诱偏的途径主要有 3 种^[5]: 复合制导技术、窄波束天线和高分辨测角方法。复合制导技术实现难度较大; 窄波束天线难以满足导引头视场要求^[6]; 空间谱估计方法能有效提高辐射源 DOA 估计的精度及分辨率, 所以超分辨导引头成为对抗有源诱偏的有效方法。本文针对 ARM 对抗有源诱偏对分辨角的需求, 建立了基于均匀圆阵(Uniform Circular Array, UCA)的二维 DOA 估计模型, 并对算法的性能和具体应用进行了研究。

1 导引头分辨角需求分析

防空雷达为对抗 ARM, 与有源诱饵配合对 ARM 实施诱偏。以 2 点源为例, 有源诱偏的原理见图 1。通过设置雷达及诱饵合适的参数^[7], 可以对 ARM 进行有效诱偏。

对于非相干干扰源, 导弹的跟踪角 θ_0 为:

$$\theta_0 = \frac{\Delta\theta}{(1 + \beta)} \quad (1)$$

式中: $\Delta\theta$ 为 2 干扰源相对导引头的张角; β 为 2 信源的幅度比。对于相干 2 点源^[8]:

$$\theta_0 = \frac{\Delta\theta}{2} \frac{1 + \beta^2}{1 + \beta^2 + 2\beta\cos\phi} \quad (2)$$

式中 ϕ 为 2 个干扰源的相位差。导弹的攻击角为 q , 单脉冲导引头的分辨角为 θ_R ($\theta_R \approx 0.8 - 0.9\theta_{3dB}$), ARM 的最终失误 e 为^[5]:

$$e = \frac{L}{2} \cos q - \frac{1}{2} j_{\max} \left(\frac{\cos q L}{2} \right)^2 / \tan^2 \left(\frac{\theta_R}{2} \right) v_{\text{rel}}^2 \quad (3)$$

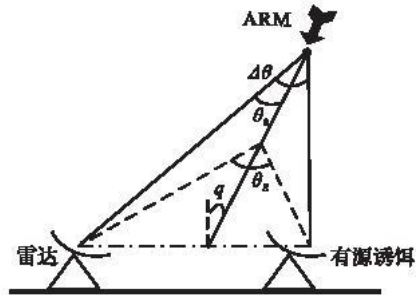


图 1 有源诱偏干扰示意图

Fig. 1 Sketch map of active decoy jamming

* 收稿日期: 2011-12-15

基金项目: 电子信息控制国防重点实验室基金资助项目(9140C1005051103); 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(201113Y01)

作者简介: 宋海方(1989-), 男, 山西长治人, 硕士生, 主要从事电子对抗理论与技术研究。

E-mail: simlife261@qq.com

式中: L 为 2 个干扰源之间的距离; j_{\max} 为导弹最大过载; v_{rel} 为导弹速度。

假设 ARM 的杀伤半径为 r , 若 $e \leq r$, 则命中目标; 若 $e > r$, 则 ARM 失效。为保证 ARM 命中目标, 应使 $e \leq r$ 。从(3)式可以看出, 增大 j_{\max} 、减小 v_{rel} 、减小 θ_R 均可使 ARM 的 e 降低。 L 、 q 受到作战使用的影响, 一般 ARM 自身不可控制。而导弹的 v_{rel} 和 j_{\max} 受到战术使用和本身性能的限制, 一般也不能改变。所以, 减小 θ_R 是减小 e 的关键。保证 ARM 命中目标所需的 θ_R 为:

$$\theta_R = 2 \arctan \sqrt{\frac{j_{\max} (L \cos q)^2}{(4L \cos q - 8r) v_{\text{rel}}^2}} \quad (4)$$

仿真实例: 设导弹的速度为 $3 Ma$, 最大过载为 $10g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$), 导弹的杀伤半径为 10 m 。为了使导弹命中目标, 不同 L 、不同的 q 与 θ_R 之间的关系见图 2。

由图 2 可见, 在 ARM 的性能参数一定, 且在 ARM 的 v_{rel} 较大、杀伤半径 r 较小的情况下, 根据战场环境 (L) 和作战使用 (q) 的不同, θ_R 达到 5° 即可实现 ARM 有效命中目标, 但是一般单脉冲导引头主波束宽度约为 60° , 此时分辨角约为 54° 。显然单脉冲导引头不能满足失误距离的要求。需要对满足此分辨角需求的超分辨算法进行研究。

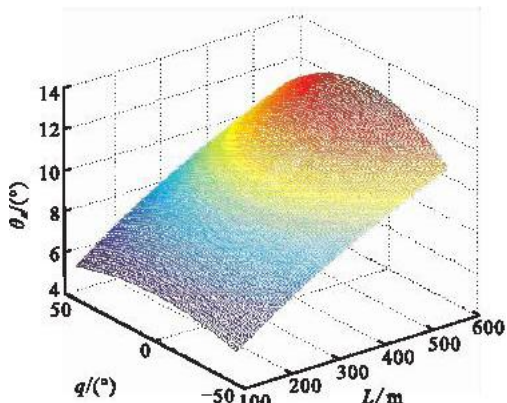


图 2 分辨角与攻击角和辐射源距离关系图

Fig. 2 Relationship between angular resolution and radiation distance and attack angles

2 均匀圆阵数学模型

与均匀线阵 (Uniform Linear Array, ULA) 相比, UCA 具有很多优良的性能^[9]。为了提高导引头测角性能和降低二维谱峰搜索运算量, 本文对估计过程进行降噪处理和采用变步长的方法进行谱峰搜索。

PRS 采用半径为 r 的均匀圆阵天线, 圆阵在弹体中垂直放置。见图 3, 在天线圆阵所在平面建立直角坐标系, 坐标原点同圆心重合。 OZ 轴为阵列平面的法线, 且与导引头电轴重合, 指向 PRS 头部方向, OX 轴和 OY 轴在天线平面内, 且与 OZ 轴构成右手关系。圆阵包含 M 个天线阵元, 设阵元 1 落在 X 轴上, 则第 m 个阵元与 X 轴的夹角表示为 $\alpha_m = 2\pi(m-1)/M, m = 1, 2, \dots, M$ 。设目标入射到天线阵面的到达角可以用方位角 θ 和俯仰角 φ 来表示, 方位角 θ 为目标与圆心的连线在 XOY 平面上的投影与 X 轴的夹角 (逆时针旋转), 且 $\varphi \in [0, 2\pi]$; 俯仰角 φ 为目标到圆心的连线与 Z 轴的夹角, 且 $\varphi \in [0, \pi]$ 。在实际应用中, PRS 依靠目标与电轴的偏角进行跟踪, α_0 和 β_0 分别为目标跟踪的视线纵向偏角、横向偏角, 且 $\alpha_0 = \angle T_{xz} OZ, \beta_0 = \angle T_{yz} OZ$ 。

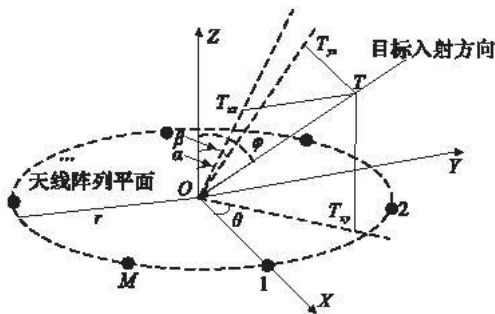


图 3 基于均匀圆阵的信号模型

Fig. 3 Signal model based on UCA

设 PRS 接收到空间远场处的 N 个目标辐射源窄带信号, 各信号源 $S_i(t)$ 互不相关, 载波波长为 λ 。用 (θ_i, φ_i) 表示第 i 个信号源的到达角。PRS 天线阵接收到的信号数学模型为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{S}(t)$ 为 t 时刻信号在圆心处的响应; $\mathbf{N}(t)$ 为阵元噪声组成的矩阵, 设为均值为零、协方差为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 的高斯白噪声; \mathbf{A} 为均匀圆阵的导向矢量矩阵:

$$\mathbf{A}(\theta, \varphi) = [\mathbf{a}_1(\theta_1, \varphi_1), \mathbf{a}_2(\theta_2, \varphi_2), \dots, \mathbf{a}_N(\theta_N, \varphi_N)] \quad (6)$$

式中导向矢量 $\mathbf{a}_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为:

$$\mathbf{a}_i(\theta_i, \varphi_i) = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi r}{\lambda} \sin\varphi_i \cos\theta_i} \\ e^{-j\frac{2\pi r}{\lambda} \sin\varphi_i \cos(\theta_i - \frac{2\pi}{M})} \\ \dots \\ e^{-j\frac{2\pi r}{\lambda} \sin\varphi_i \cos(\theta_i - \frac{2\pi(M-1)}{M})} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 超分辨导引头设计

3.1 基于UCA的二维DOA估计

接收信号的协方差矩阵 \mathbf{R}_X 为:

$$\mathbf{R}_X = \mathbf{A}\mathbf{R}_S\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_N \quad (8)$$

式中 \mathbf{R}_S 、 \mathbf{R}_N 分别为信号协方差矩阵和噪声协方差矩阵。对于空间理想的白噪声且噪声功率为 σ^2 , 则有 $\mathbf{R}_N = \sigma^2 \mathbf{I}$ 成立^[11], 对 \mathbf{R}_X 进行特征分解, 特征值从大到小依此排列为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$, 且满足:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N \geq \lambda_{N+1} = \dots = \lambda_M = \sigma^2 \quad (9)$$

实际运用中数据协方差矩阵用采样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_X$ 代替, 即数据协方差矩阵的最大似然估计为:

$$\hat{\mathbf{R}}_X = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{X}(i)\mathbf{X}^H(i) \quad (10)$$

式中 K 为快拍数。在实际估计过程中, 为了减小噪声的影响, 提高估计性能, 考虑执行如下降噪处理:

$$\mathbf{R}'_X = \hat{\mathbf{R}}_X - \zeta^2 \mathbf{I} = [\mathbf{A}\mathbf{R}_S\mathbf{a}_1^H, \mathbf{A}\mathbf{R}_S\mathbf{a}_2^H, \dots, \mathbf{A}\mathbf{R}_S\mathbf{a}_M^H] + \kappa^2 \mathbf{I} \quad (11)$$

式中, ζ^2 为阵列信号协方差矩阵估计最小的 2 个特征值的平均值, 当噪声为空间理想白噪声时有 $\zeta^2 = \sigma^2$ 且 $\kappa^2 = 0$ 。实际应用时 $\zeta^2 \neq \sigma^2$, κ^2 常常取不为零的极小数值代替。

对降噪处理后的阵列信号协方差矩阵 \mathbf{R}'_X 进行特征分解, 得到特征值和特征向量:

$$\mathbf{R}'_X = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}'\mathbf{U}^H = \sum_{i=1}^M \mu_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \quad (12)$$

式中: μ_i 为 \mathbf{R}'_X 的第 i 个特征值; \mathbf{u}_i 为与特征值对应的特征向量, 阵列信号的特征矢量矩阵 \mathbf{U} 与降噪前相同。容易验证, 若式(9)成立, 则有 $\mu_1 = \lambda_1 - \zeta^2$, $\mu_2 = \lambda_2 - \zeta^2$, \dots , $\mu_M = \lambda_M - \zeta^2$ 。

\mathbf{R}'_X 特征分解后可以分为 2 部分:

$$\mathbf{R}'_X = \sum_{i=1}^N \mu_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H + \sum_{i=N+1}^M \mu_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H = [\mathbf{U}_S, \mathbf{U}_N] \mathbf{\Sigma}' [\mathbf{U}_S, \mathbf{U}_N]^H = \mathbf{U}_S \mathbf{\Sigma}'_S \mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N \mathbf{\Sigma}'_N \mathbf{U}_N^H \quad (13)$$

式中 $\mathbf{\Sigma}'_S$ 、 $\mathbf{\Sigma}'_N$ 分别为信号和噪声的特征值减去噪声功率估计 ζ^2 后组成的对角阵, 且 $\mathbf{\Sigma}'_S$ 由 N 个大特征值构成, $\mathbf{\Sigma}'_N$ 由 $M - N$ 个小特征值构成。

由噪声子空间和导向矢量的正交性, 得均匀圆阵的二维空间谱函数为:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\sum_{i=N+1}^M \frac{1}{\mu_i} \|\mathbf{a}^H(\theta, \varphi) \mathbf{u}_i\|^2} \quad (14)$$

由上式构造空间谱, 进行谱峰搜索, 得到各个辐射源目标的波达方向。

为了减小二维 DOA 搜索的运算量, 加快运算速度同时保证搜索精度, 采用变步长搜索法^[12]。变步长搜索的思想为: 先利用较大的步长进行粗搜索, 确定大致搜索区域, 然后利用较小的步长进行细搜索, 获取谱峰的精确位置。

对于某次实验, 如果估计的 2 个信源的方位角 $\hat{\theta}_1$ 与 $\hat{\theta}_2$ 满足:

$$|\hat{\theta}_1 - \theta_1| + |\hat{\theta}_2 - \theta_2| < |\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2| \quad (15)$$

则称该次试验中 2 个信号源从方位角上可以正确分辨^[13]。基于UCA的二维DOA估计只需方位或俯仰上能够正确分辨即可。

3.2 角度波门设置

导引头对雷达及诱饵正确分辨之后, 通过设置角度波门对雷达进行攻击。PRS 根据目标与电轴的偏角进行跟踪, 偏角与 DOA 估计值的转换关系为:

$$\begin{cases} \alpha_0 = \arctan(\cos\hat{\theta}\tan\hat{\varphi}) \\ \beta_0 = \arctan(\sin\hat{\theta}\tan\hat{\varphi}) \end{cases} \quad (16)$$

这时需要根据式 15 将 DOA 估计值转换为电轴偏角对角度波门进行设置。

3.3 仿真分析

仿真 1: 导引头空间有限(直径一般为 10 - 30 cm),同时阵元数小于 6 个时会出现角度模糊^[14]。综合考虑算法精度和运算量之间的矛盾,将 UCA 的阵元数设置为 8 个。雷达和诱饵相对导引头的角度为 (155°, 50°) 和 (150°, 55°), 信噪比 SNR 为 20 dB, 快拍数 K 为 200, 空间谱见图 4。

仿真 2: 辐射源 DOA 不变, 快拍数为 200, 各进行 100 次蒙特卡罗实验, 识别概率 P_f 与 SNR 的关系见图 5。

仿真 3: 辐射源 DOA 不变, 信噪比为 20 dB, 各进行 100 次蒙特卡罗实验, 识别概率 P_f 与快拍数 K 的关系见图 6。

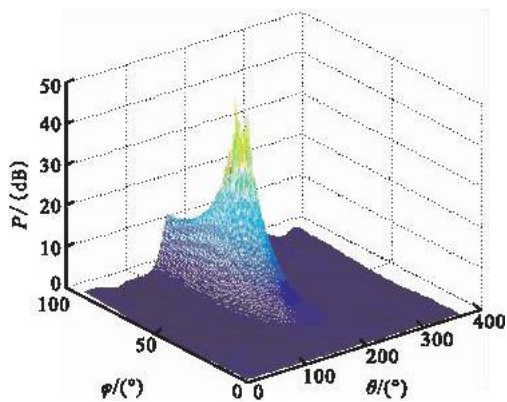


图 4 均匀圆阵二维 DOA 估计谱

Fig. 4 2D - DOA estimation based on UCA

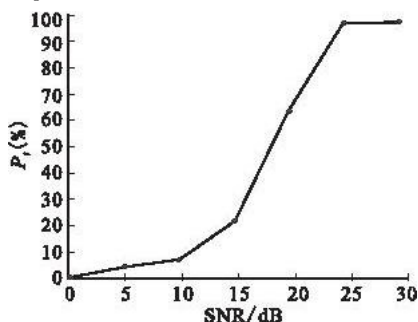


图 5 识别概率与信噪比的关系图

Fig. 5 Relation between identification probability and SNR

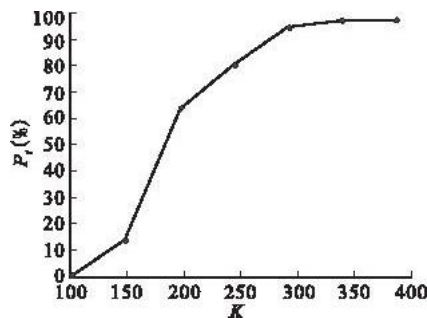


图 6 识别概率与快拍数的关系图

Fig. 6 Relation between identification probability and snapshots

4 结束语

通过对不同信噪比和快拍数下导引头分辨概率的仿真,在快拍数小于 200、信噪比小于 20 dB 时对张角为 5° 的辐射源的分辨概率依然大于 50%, 表明本文基于 UCA 的二维 DOA 估计算法能够满足 ARM 对抗有源诱偏干扰对导引头分辨角的需求。超分辨算法应该在满足分辨角需求的条件下向减小运算量、提高运算速度的方向发展,以满足算法的实时性和实用性要求。超分辨导引头对于 ARM 对抗有源与无源复合干扰也有一定的借鉴意义。

参考文献 (References):

- [1] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
WANG Xing. Principles of avionic electronic warfare [M]. Beijing: National defense industry press, 2008. (in Chinese)
- [2] Siouris G M. Missile and control system [M]. New York: Springer - verlag, 2004.
- [3] Si Xicai, Cui Donghuai. Technologies of ARM contradict LIP radar and bait [J]. Systems engineering and electronics, 2005, 27 (9): 1549 - 1552.
- [4] 高彬, 毛士艺, 孙进平. 拖曳式诱饵抗单脉冲雷达导引头效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2394 - 2397.
GAO Bin, MAO Shiyi, SUN Jinping. Effects of towed - decoys against antiaircraft missile with monopulse seeker [J]. Systems engineering and electronics, 2010, 32(11): 2394 - 2397. (in Chinese)

- [5] 刘剑,王丰华,黄知涛,等.阵列扩展用于反辐射导弹抗诱偏的研究[J].系统工程与电子技术,2007,29(3):365-367.
LIU Jian, WANG Fenghua, HUANG Zhitao, et al. Aperture extension for anti-decoy in anti-radiation missile [J]. System engineering and electronic, 2007, 29(3):365-367. (in Chinese)
- [6] 宋志勇,肖怀铁.基于角闪烁效应的拖曳式诱饵干扰存在性检测[J].信号处理,2011,27(4):522-528.
SONG Zhiyong, XIAO Huaitie. Detection of presence of towed radar active decoys based on angle glint [J]. Signal processing, 2011, 27(4):522-528. (in Chinese)
- [7] 高彬,韩轲.机载自卫闪烁干扰作战效能评估[J].北京航空航天大学学报,2008,34(9):1101-1104.
GAO Bin, HAN Ke. Measures of effectiveness for blinking jamming under airborne self-protection operations [J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 2008, 34(9):1101-1104. (in Chinese)
- [8] Shi Yule. A new DOA estimation algorithm of coherent signal [C]//IEEE 3rd international conference on signal processing systems. Yantai:IEEE press,2011:240-244.
- [9] 周林,赵拥军.一种新的均匀圆阵宽带波束域高分辨测向算法[J].信号处理,2009,25(3):394-397.
ZHOU Lin, ZHAO Yongjun. A new algorithm for wideband beam space high resolution DOA on circular arrays [J]. Signal processing, 2009, 25(3):394-397. (in Chinese)
- [10] 余岩,王宏远,谢雨翔.一种在未知噪声下的快速波达方向估计方法[J].系统工程与电子技术,2010,32(4):707-711.
YU Yan, WANG Hongyuan, XIE Yuxiang. Fast DOA estimation algorithm for signal sources under unknown correlated noise field [J]. System engineering and electronic, 2010, 32(4):707-711. (in Chinese)
- [11] Tayem N, Kwon H M, Lee Y H. DOA estimation for coherent sources with spatial smoothing without eigendecomposition under unknown noise field [C]//Proc of the IEEE global telecommunication conference. [S. l.]:IEEE press,2005:2311-2315.
- [12] Salameh A, Tayem N. Conjugate MUSIC for non-circular source [J]. Signal processing, 2009, 25(3):394-397.
- [13] Shan Z, Yum T-SP. A conjugate augmented approach to direction-of-arrival estimation [J]. IEEE on SP, 2005, 53(11):4104-4109.
- [14] 杨勇,谭渊,张晓发,等.基于MUSIC算法的反辐射导弹抗诱饵诱偏[J].弹箭与制导学报,2010,30(4):241-243.
YANG Yong, TAN Yuan, ZHANG Xiaofa, et al. ARM antagonizing bait decoy based on MUSIC algorithm [J]. Journal of projectiles rockets missiles and guidance, 2010, 30(4):241-243. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Research on Countering Measures of Passive Radar Seeker to Active Decoy Jamming

SONG Hai-fang¹, WU Hua¹, CHENG Si-yi¹, WANG Jun-ming²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Representative of Air Force Agencies in Wuxi, Wuxi 214063, Jiangsu, China)

Abstract: With respect to error range of Anti Radiation Missile (ARM) under active decoy interference, the solutions to improve the performance of ARM under interference are put forward; To satisfy the requirement of angular resolution, set the model of 2D-DOA estimation based on UCA, and discuss the implement of the algorithm in Passive Radar Seeker (PRS); Computer simulation indicates that 2D-DOA estimation algorithm based on UCA can meet the need of angular resolution.

Key Words: passive radar seeker; angular resolution requirement; 2D-DOA estimation