

文章编号: 1001- 2486(2010) 05- 0069- 06

极化域- 空域联合估计在反辐射导弹抗诱偏中的应用研究*

吴迪军, 徐振海, 来庆福, 王雪松, 肖顺平
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出了将极化阵列应用到反辐射导引头上, 导引头利用目标与诱饵的极化差异, 采用极化域- 空域联合估计方法抗诱偏。首先, 利用波达方向矩阵法, 估算出雷达与诱饵的空间二维到达角和极化参数, 将估算出来的二维到达角信息为反辐射导引头提供导引, 极化参数用来鉴别雷达与诱饵, 从而达到抗诱偏的目的。然后, 结合导弹运动方程及导引方程对反辐射导弹抗三点源诱偏进行了全弹道数字仿真, 并且采用 Monte Carlo 方法对全弹道仿真进行了多次实验, 仿真结果证明了将极化域- 空域联合估计应用于反辐射导引头抗诱偏的可行性。

关键词: 反辐射导弹; 极化域- 空域联合估计; 均匀圆阵; 波达方向矩阵法; 全弹道仿真
中图分类号: TN974 **文献标识码:** A

Research on Anti-decoy in Anti-radiation Missile Using Joint Estimation of Polarizational and Spatial Domains

WU Di jun, XU Zhen hai, LAI Qing fu, WANG Xue song, XIAO Shun ping

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The study proposed the polarization array in anti-radiation seeker, which uses joint estimation of polarizational and spatial domains anti-decoy by the differences of the target and decoy. At first, it estimated DOA (direction of angle) and polarimetric parameters of radar and decoys, the DOA supply to guide the ARM and the polarimetric parameters apply to discriminate the radar or decoys, for the purpose of preventing decoy. Then, the all-trajectory simulation on ARM against three point sources bait is accomplished by combining ARM motion equation and guide equation. Many experiments on all-trajectory simulation are done by Monte Carlo. The simulation results demonstrate the effectiveness on anti-decoy in anti-radiation missile using joint estimation of polarizational and spatial Domains.

Key words: anti-radiation missile (ARM); joint estimation of polarizational and spatial domains; uniform circular array; DOA matrix method; all-trajectory warfare simulation

点源诱偏是各点源利用在空间合成场强的畸变, 使反辐射导弹(ARM)不能瞄准各点源, 而是瞄准各点源合成的能量中心; 或者各点源利用反辐射导弹的脉冲前沿跟踪技术的缺点, 设置脉冲前沿陷阱, 即诱饵的脉冲前沿总是超前雷达的脉冲前沿, 使导弹跟踪偏向诱饵而无法命中雷达目标。

针对这种情况, 国内外对 ARM 导弹抗诱偏技术进行了专门研究, 主要方法集中在三个方面: 复合制导技术, 窄波束天线与高分辨测向技术^[1-3]。采用复合制导技术效果好, 但实现难度大; 采用窄波束天线不利于对目标的搜索跟踪; 采用高分辨测向技术抗诱饵诱偏越来越受到关注。然而, 这些方法主要是想通过提高导引头的测向精度和角度分辨力, 使反辐射导弹能尽早地分辨出雷达和诱饵, 从而有足够的时间修正失误距离, 但是无法鉴别哪个是雷达, 哪个是诱饵, 导弹只能朝着能量大的点源或相位导前的点源目标进行攻击。因此, 本文提出了将极化阵列应用到 PRS 上, 采用极化域- 空域联合估计的算法, 估算出雷达与诱饵的空间二维到达角和极化参数, 利用到达角信息为反辐射导弹导引头提供导引, 利用极化参数来鉴别雷达与诱饵。

目前, 对极化域- 空域联合估计的算法研究多, 但结合应用研究的报导少。殷勤业提出了采用波达方向矩阵法对空间二维到达角进行高分辨估计^[4]。香港大学的 Wong 针对矢量传感器阵列, 提出了采用

* 收稿日期: 2010- 05- 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60901072)

作者简介: 吴迪军(1982-), 男, 博士生。

ESPRIT 算法可以对任意传感器位置情况下信号源空间到达角和极化参数的估计^[5-6]。成都电子科技大学的王建英针对 L 形阵和矩形阵,提出了采用 ESPRIT 和整数搜索解模糊算法估计信号频率、空间二维到达角和极化参数,解决了角度估计模糊问题^[7-8]。吉林大学的黄家才提出了在扰动情况下采用四阶累积量对均匀圆阵频率、波达方向和极化参数进行了估计^[9]。俄亥俄州立大学电子工程系 Li 也利用 ESPRIT 方法研究了不同阵列布阵方式下极化敏感阵列多参量估计问题^[10-11]。国防科技大学徐振海对极化敏感阵列滤波、检测和估计进行了全面的系统的分析研究^[12-13]。

1 极化阵列导引头抗诱偏模型

1.1 信号模型

假设反辐射导引头由 N 个特性一致的紧凑电磁矢量传感器(阵元)组成的均匀极化圆阵构成,阵元均匀分布在半径为 R 的圆周上,如图 1(a)所示。每个阵元由两个空间上靠得很近、相互正交的电偶极子和磁偶极子组成,如图 1(b)所示。其中磁偶极子与坐标系中的 $x-y$ 平面共面,感应入射电磁波在 z 轴方向的磁场分量;电偶极子与 $x-y$ 平面垂直,感应入射电磁波在 z 轴方向的电场分量。为了使圆周上相邻两个紧凑电磁矢量传感器间的距离等于或小于 $\lambda_{\min}/2$,均匀圆阵的半径必须为 $R \leq \lambda_{\min}/(4\sin(\pi/N))$, λ_{\min} 为入射信号的最小载波波长。第 n 个紧凑电磁矢量传感器的空间位置为: $(x_n, y_n, z_n) = (R \cos \varphi_n, R \sin \varphi_n, 0)$, $\varphi_n = 2\pi n/N$ 。

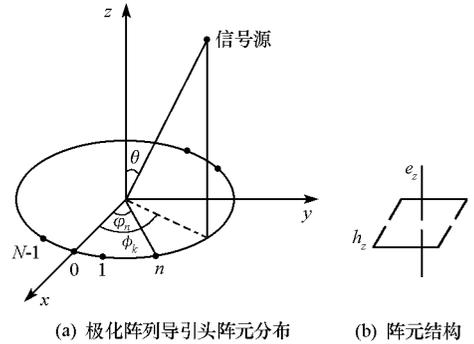


图 1 均匀极化圆阵

Fig. 1 Uniform polarized circular array

则极化敏感阵列接收信号极化矢量为

$$\mathbf{s}_k = \begin{bmatrix} e_{zk} \\ h_{zk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \gamma_k \sin \theta_k e^{j\eta_k} \\ \cos \gamma_k \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

以圆点为参考点,第 k 个信号在阵元 n 与参考点之间的相位延迟为

$$\Psi_n = e^{j2\pi R \sin \theta_k \cos(\phi_k - \varphi_n)/\lambda} = e^{j\xi_k \cos(\phi_k - \varphi_n)} \quad (2)$$

式中: $\xi_k = 2\pi R \sin \theta_k / \lambda$, λ 为信号的波长。

极化圆阵的空域导向矢量为

$$\mathbf{q}(\theta_k, \phi_k) = [e^{j\xi_k \cos(\phi_k - \varphi_0)} \quad e^{j\xi_k \cos(\phi_k - \varphi_1)} \quad \dots \quad e^{j\xi_k \cos(\phi_k - \varphi_{N-1})}]^T \quad (3)$$

则圆阵的空域-极化域联合导向矢量为

$$\mathbf{a}_1(k) = h_{zk} \otimes \mathbf{q}(\theta_k, \phi_k) = \cos \gamma_k \sin \theta_k \otimes \mathbf{q}(\theta_k, \phi_k) \quad (4)$$

$$\mathbf{a}_2(k) = e_{zk} \otimes \mathbf{q}(\theta_k, \phi_k) = -\sin \gamma_k \sin \theta_k e^{j\eta_k} \otimes \mathbf{q}(\theta_k, \phi_k) \quad (5)$$

在时刻 t ,磁偶极子和电偶极子圆阵的输出分别为

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}_1(k) s_k(t) + \mathbf{n}_1(t) = \mathbf{A}_1 \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_1(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}_2(k) s_k(t) + \mathbf{n}_2(t) = \mathbf{A}_2 \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_2(t) = \mathbf{A}_1 \Phi \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_2(t) \quad (7)$$

其中: $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \quad s_2(t) \quad \dots \quad s_K(t)]^T$, $s_k(t)$ 为第 k 个信号的复包络; $\mathbf{n}_1(t)$, $\mathbf{n}_2(t)$ 分别为极化阵列阵元接收机噪声矢量; \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 分别为磁偶极子和电偶极子的空域-极化域导向矩阵,其值为

$$\mathbf{A}_1 = [\mathbf{a}_1(1), \dots, \mathbf{a}_1(K)] = [\cos \gamma_1 \sin \theta_1 \otimes \mathbf{q}(\theta_1, \phi_1), \dots, \cos \gamma_K \sin \theta_K \otimes \mathbf{q}(\theta_K, \phi_K)] \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_2 = [\mathbf{a}_2(1), \dots, \mathbf{a}_2(K)] = [-\sin \gamma_1 \sin \theta_1 e^{j\eta_1} \otimes \mathbf{q}(\theta_1, \phi_1), \dots, -\sin \gamma_K \sin \theta_K e^{j\eta_K} \otimes \mathbf{q}(\theta_K, \phi_K)] \quad (9)$$

Φ 为极化域旋转矩阵:

$$\Phi = \begin{bmatrix} -\tan \gamma_1 e^{j\eta_1} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & -\tan \gamma_K e^{j\eta_K} \end{bmatrix} \quad (10)$$

为了便于分析,并排除一些非理想因素的影响,作如下假设:

(1) 假设反辐射导弹在飞行过程中,不随导弹的轴向自转,这样就保证了各个阵元与中心轴的相对固定关系;

(2) 各阵元信道内部噪声是均值为零,方差为 σ^2 的平稳随机过程;

(3) 噪声、干扰与雷达信号之间相互独立,而且噪声之间互不相关;

(4) Φ 中对角线元素互不相同,即雷达信号及诱饵极化状态不同。

1.2 波达方向矩阵构造

磁偶极子圆阵和电偶极子圆阵的自相关矩阵以及互相关矩阵为

$$\mathbf{R}_{XX} = E\left\{ \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t) \right\} = \mathbf{A}_1 \mathbf{R}_s \mathbf{A}_1^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{YX} = E\left\{ \mathbf{Y}(t) \mathbf{X}^H(t) \right\} = \mathbf{A}_1 \Phi \mathbf{R}_s \mathbf{A}_1^H \quad (12)$$

式中: $\mathbf{R}_s = E\left\{ s(t) s^H(t) \right\}$ 为信号的自相关矩阵, \mathbf{I}_N 为 $N \times N$ 单位阵。

将式(11)中自相关矩阵的信号部分记为

$$\mathbf{R}_{XX0} = \mathbf{R}_{XX} - \sigma^2 \mathbf{I}_N = \mathbf{A}_1 \mathbf{R}_s \mathbf{A}_1^H \quad (13)$$

由 \mathbf{R}_{YX} 和 \mathbf{R}_{XX0} 按下式构成的矩阵为波达方向矩阵

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{YX} \mathbf{R}_{XX0}^\# \quad (14)$$

式中: $\mathbf{R}_{XX0}^\#$ 为 \mathbf{R}_{XX0} 的一种伪逆,即 \mathbf{R}_{XX0} 的 K 个大特征值构成的信号子空间。其定义为

$$\mathbf{R}_{XX0}^\# = \sum_{i=1}^K \mu_i^{-1} \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \quad (15)$$

其中: $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K$ 为 \mathbf{R}_{XX0} 的特征值,而 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K$ 是相应的特征向量。

根据波达方向矩阵法原理以及假设,可得

$$\mathbf{R} \mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_1 \Phi \quad (16)$$

上式说明, Φ 的对角元素和信号的空域-极化域导向矢量分别是波达方向矩阵 \mathbf{R} 的非零特征值和相应的特征向量。

1.3 极化参数估计

对 \mathbf{R} 进行特征分解:

$$\mathbf{R} = \sum_{k=1}^K \lambda_k \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H \quad (17)$$

其中 λ_k, \mathbf{V}_k 分别为 \mathbf{R} 的特征值和相应的特征向量。根据式(10)以及特征值 λ_k ,即可估计出信号的极化参数:

$$\hat{\gamma}_k = \arctan\left(\left| \lambda_k \right| \right) \quad (18)$$

$$\hat{\eta}_k = \arg(-\lambda_k) \quad (19)$$

1.4 DOA 估计

根据式(16),利用最小二乘方法(LS)得到

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_k & \hat{\beta}_k \end{bmatrix}^T = \left(\mathbf{Z}^H \mathbf{Z} \right)^{-1} \mathbf{Z}^H \Theta \quad (20)$$

$$\text{式中: } \mathbf{Z} = \mu \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \sin \Delta & \cos \Delta \\ \vdots & \vdots \\ \sin[(N-1)\Delta] & \cos[(N-1)\Delta] \end{bmatrix}, \Theta = \begin{bmatrix} \arg[\mathbf{V}_k(0)] \\ \arg[\mathbf{V}_k(1)] \\ \vdots \\ \arg[\mathbf{V}_k(N-1)] \end{bmatrix}, \mu = 2\pi R / \lambda, \Delta = 2\pi / N, \hat{\alpha}_k =$$

$\sin(\hat{\theta}_k) \sin(\hat{\phi}_k), \hat{\beta}_k = \sin(\hat{\theta}_k) \cos(\hat{\phi}_k)$ 。

根据估值可得到信号空间到达角估计为

$$\hat{\theta}_k = \arcsin\left(\sqrt{\hat{\alpha}_k^2 + \hat{\beta}_k^2} \right) \quad (21)$$

$$\hat{\phi}_k = \begin{cases} \arccot\left(\frac{\hat{\beta}_k}{\hat{\alpha}_k} \right) & \hat{\alpha}_k \geq 0 \\ \pi + \arccot\left(\frac{\hat{\beta}_k}{\hat{\alpha}_k} \right) & \hat{\alpha}_k < 0 \end{cases} \quad k = 1, \dots, K \quad (22)$$

由式(10),(16)可知,矩阵 Φ 的每个元素仅与信号的极化状态相关。这意味着只要雷达和诱饵的极化参数互异,即使它们的空间位置相同也能被正确分辨出。从上述处理可以看出,同一信号的极化参数和二维 DOA 估计由特征值和特征向量的对应关系自动配对。

2 计算机仿真与分析

2.1 导弹全弹道仿真流程图

为了验证极化阵列导引头的有效性,对空地反辐射导弹进行全弹道仿真。仿真中用到的导弹动力学和运动学方程参见文献[14],采用比例导引法导引,反辐射全弹道作战仿真流程图如图2所示。

常规反辐射导引头瞄准的是各点源的能量中心,弹目视线角依从能量中心的变化而变化,导引头依据导弹与能量中心角变化率进行制导;而采用极化敏感阵列后,导引头能够利用极化信息鉴别雷达和诱饵,导引头瞄准的是雷达,弹目视线角随着估计的雷达的二维 DOA 变化而变化,导引头根据导弹与雷达角变化率进行制导。因而,从理论上分析,采用极化敏感阵列能够提高反辐射导弹抗有源诱偏干扰能力。

2.2 全弹道仿真

为了验证模型的可靠性,主要针对反辐射导弹抗三点源诱偏进行了全弹道数字仿真。

(1) 仿真具体条件

PRS 采样快拍数为 200,圆阵中阵元个数为 6 个,半径为 15cm;雷达坐标为(0,0,0),诱饵 1 的坐标(200,200,0),诱饵 2 的坐标(200,-200,0);雷达的初始相位为 0;雷达极化参数 $(\gamma, \eta) = (30^\circ, 15^\circ)$,诱饵 1 极化参数 $(\gamma_1, \eta_1) = (20^\circ, 10^\circ)$,诱饵 2 极化参数 $(\gamma_2, \eta_2) = (10^\circ, 15^\circ)$;诱饵和雷达构成非相干诱偏系统,工作的频率均为 10GHz,在导引头攻击频率范围内;雷达发射功率 30kW,天线增益 30dB;诱饵 1 和诱饵 2 发射功率均为 30kW,天线增益均为 30dB;导弹发射坐标为(8000,10000,8000),分辨角 $\Delta\theta_r = 15^\circ$,跟踪角速度 $15^\circ/\text{s}$,最大过载为 $n_{\max} = 20g$,导弹发射时初始速度为 265m/s , $k = 4.3$,导弹的杀伤半径为 30m,采用极化阵列抗诱偏。

(2) 单次仿真的全弹道曲线

仿真结果如图 3 所示。图 3(a)给出了 ARM 全弹道运动轨迹,并得到 ARM 的弹着点坐标为(15.20, 2.32, 0),弹着点与雷达、诱饵 1、诱饵 2 的距离分别为 15.38m、270.61m、274.02m,导弹命中了雷达,此次采用极化阵列抗诱偏成功。图 3(b)为 ARM 导弹速度随时间变化曲线,由图可以看出,导弹发射后加速到最大速度约为 1250m/s,随着导弹燃料耗尽,导弹开始减速,同时方便调整导弹姿态。图 3(c)、(d)分别为偏航角和俯仰角随时间的变化规律,开始导弹没有完全对准目标,通过比例导引对导弹航向进行调整,从而控制导弹攻击目标。

(3) 多次仿真统计结果

下面采用 Monte-Carlo 法对反辐射导弹攻击三点源进行仿真实验,仿真次数为 800 次,仿真参数与单次仿真参数相同,不同的是导引头分辨角和是否采用极化阵列抗诱偏。其仿真结果如图 4 所示。

图 4(a)为常规雷达导引头分辨角 15° 时,导引头瞄准能量中心进行攻击时的弹着点统计分布图,导弹的命中概率为 9.3%。原因是反辐射导弹从远处攻击点源时,各点源均在导引头的视线角内,随着导

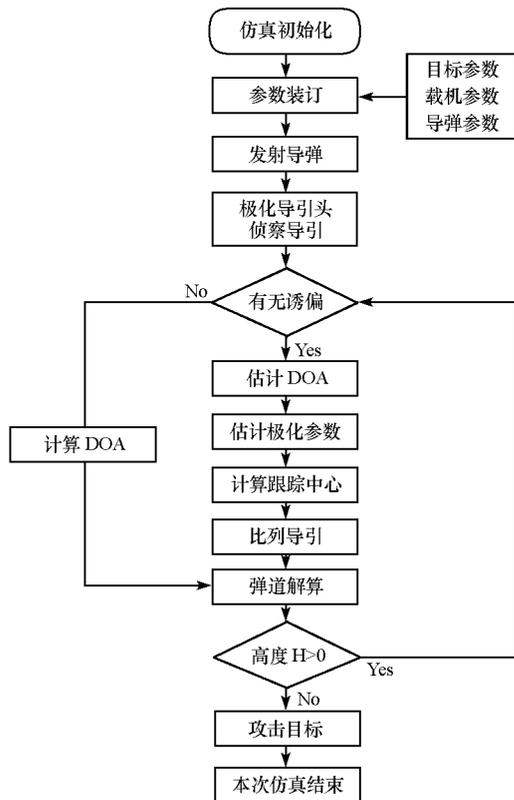


图2 反辐射导弹全弹道作战仿真流程图

Fig. 2 Flow chart on all trajectory warfare simulation of ARM

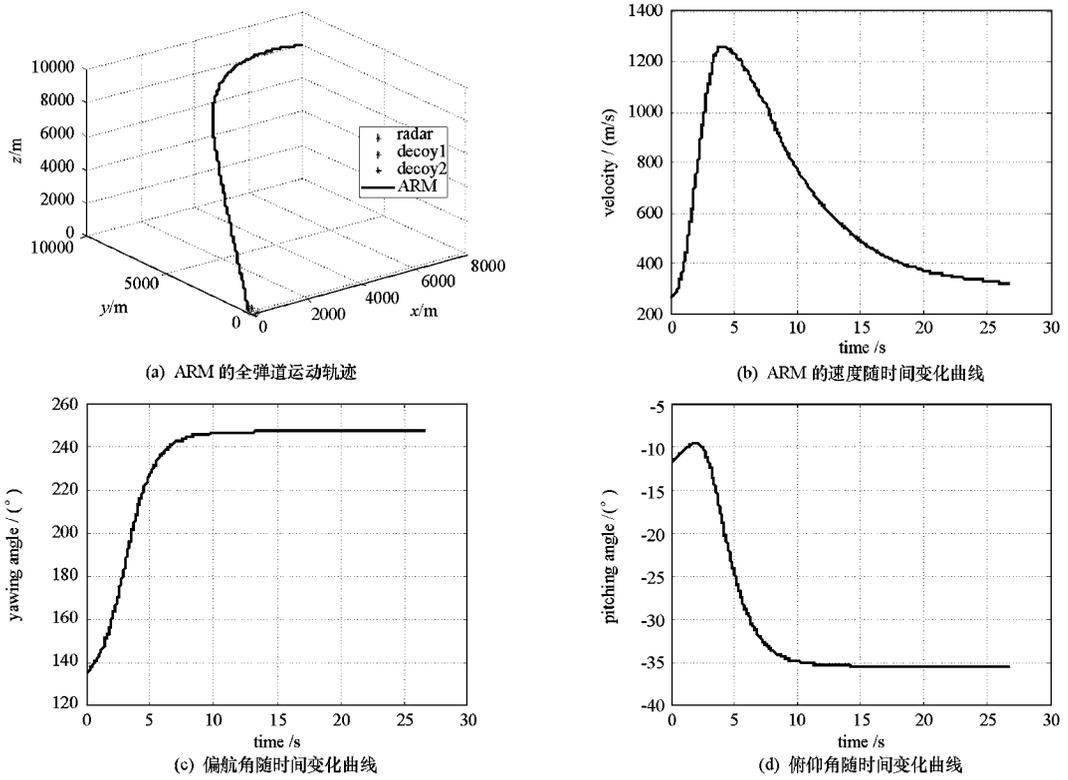


图3 导弹全弹道仿真图

Fig. 3 All trajectory simulation of ARM

弹接近目标,导引头才开始分辨点源,并随机地选择点源进行攻击,由于导弹过载有限来不及修正,所以大部分弹着点还是位于各点源能量中心附近。图4(b)为采用极化阵列导引头抗诱偏,导引头利用估算出来的DOA为导引头提供导引,利用估算出来的极化参数来鉴别雷达和诱饵,从而控制导弹攻击雷达。由于导引头能够尽早地区分雷达和诱饵,使得导弹有足够的时间修正弹道,命中概率为88.4%,明显高于常规导引头。比较图4(a)和图4(b),证明采用极化阵列导引头抗诱偏是有效的。

图4(c)为常规雷达导引头分辨角 30° ,导引头瞄准能量中心进行攻击时弹着点统计分布图。比较图4(c)和图4(a),导引头分辨角为 15° 时,导引头能够早点分辨出各点源而选择剩下点源进行攻击,可以有多点时间修正导弹进行攻击,因此命中概率也略高于导引头分辨角为 30° 的导弹。这和文献[3]中要想办法提高测角精度,增加导引头的抗诱偏能力相符。

图4(d)为采用极化阵列导引头抗诱偏,分辨角为 30° 时,命中概率为85.5%,与分辨角为 15° 时的命中概率88.4%基本相当。说明采用极化阵列抗诱偏时,导引头分辨角差异对命中概率影响不大。

其统计结果如表1所示。得出了不采用抗干扰措施情况下,辐射源的功率和导弹的分辨角是影响导弹命中概率的主要因素,并且命中概率低;采用极化阵列抗诱偏时,导弹命中雷达的概率明显提高,从而达到了抗诱偏的目的。

表1 反辐射导弹对各点源的命中概率

Tab. 1 Hit probability of ARM

参数配置	不采用抗干扰措施 情况下命中概率			采用极化敏感阵列 抗诱偏情况下命中概率		
	雷达	诱饵1	诱饵2	雷达	诱饵1	诱饵2
功率比1:1:1;分辨角 30°	2.4%	3.1%	3.4%	85.5%	4.1%	5.4%
功率比1:1:1;分辨角 15°	9.3%	10.3%	9.8%	88.4%	5.3%	4.7%
功率比2:1:2;分辨角 30°	4.5%	2.2%	4.3%	85.8%	5.2%	4.8%
功率比2:1:2;分辨角 15°	9.8%	8.5%	10.6%	89.7%	2.9%	3.6%

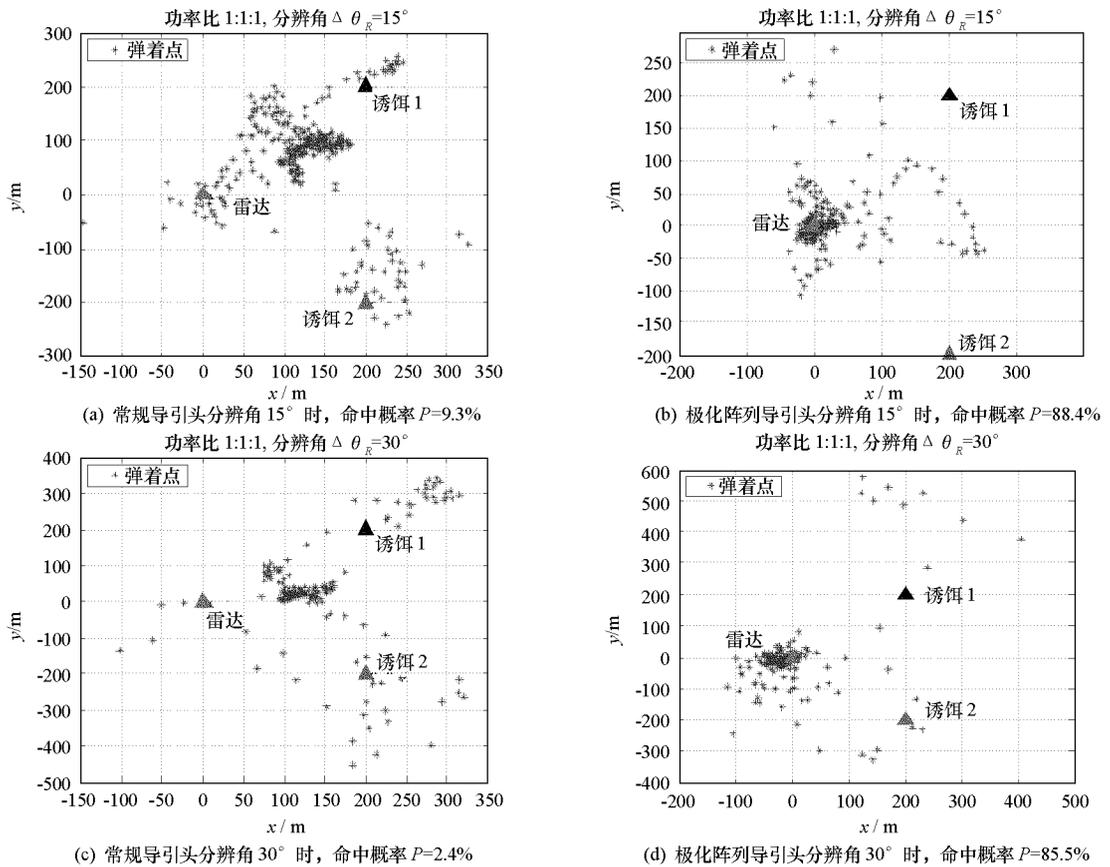


图4 弹着点统计分布图

Fig. 4 Statistical distributed chart on point of fall

3 结论

从仿真结果可以看出, ARM 采用极化阵列后, 导引头通过波达方向矩阵法估计出雷达与诱饵的空间到达角和极化参数, 能够尽早鉴别雷达与诱饵, 使得反辐射导弹有足够时间去修正导弹的运动, 从而达到了很好的抗诱偏效果。仿真结果验证了将极化域-空域联合估计应用于反辐射导引头抗诱偏的可行性。

参考文献:

- [1] 司锡才, 赵利军. 反辐射导弹抗诱饵诱偏技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 550-554.
- [2] 李一兵, 司锡才. 反辐射导弹抗诱饵欺骗干扰技术研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 20(5): 100-102.
- [3] 司锡才. 对付“爱国者”雷达的反辐射导弹及其被动雷达导引头的技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 1995, (4): 31-43.
- [4] 殷勤业, 邹理, Robert WN. 一种高分辨率二维信号参量估计方法-波达方向矩阵法[J]. 通信学报, 1991, 12(3): 1-7.
- [5] Wong K T, Zoltowski M D. Uni-Vector Sensor ESPRIT for Multisource Azimuth, Elevation, and Polarization Estimation [J]. IEEE Trans. AP, 1997, 45(10): 1467-1474.
- [6] Wong K T, Zoltowski M D. Closed form Direction Finding and Polarization Estimation with Arbitrarily Spaced Electromagnetic Vector sensors at Unknown Locations [J]. IEEE Trans. AP, 2000, 48(5): 671-680.
- [7] 王建英, 王激扬, 陈天麒. 宽频段空间信号频率、二维到达角和极化联合估计[J]. 中国科学(E辑), 2001, 31(6): 526-532.
- [8] 王建英, 陈天麒. 频率、二维到达角和极化联合估计[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 74-76.
- [9] 黄家才, 石要武, 陶建武, 等. 扰动情况下极化圆阵的波达方向、频率和极化参数的联合估计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(6): 1420-1425.
- [10] Li J, Compton R T, Jr. Angle and Polarization Estimation Using ESPRIT with a Polarization Sensitive Array [J]. IEEE Trans. AP, 1991, 39(9): 1376-1383.
- [11] Li J, Compton R T, Jr. Angle Estimation Using a Polarization Sensitive Array [J]. IEEE Trans. AP, 1991, 39(10): 1539-1543.
- [12] 徐振海, 肖顺平, 王雪松, 等. 极化域-空域联合谱分辨率研究[J]. 信号处理, 2008, 24(1): 8-10.
- [13] 庄钊文, 徐振海, 肖顺平, 等. 极化敏感阵列信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [14] 钱杏芳, 林瑞雄. 导弹飞行力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.