

# 一种波束内目标与诱饵 DOA 联合估计新方法\*

宋志勇,肖怀铁,付强,卢再奇

(国防科技大学 ATR 重点实验室,湖南长沙 410073)

**摘要:**拖曳式诱饵干扰下目标和诱饵 DOA 参数的准确估计是导引头实现目标分选的前提条件。波束内目标和诱饵的存在引起雷达回波混叠和观测耦合,导致常规观测提取与参数测量方法失效。通过挖掘雷达接收回波和、差通道信号条件概率分布协方差所包含的未知参数信息,获得了目标和诱饵 DOA 估计的解析表达式,针对估计求解中所需相对功率比未知的情况,提出了基于干扰检测、雷达测量与目标跟踪信息辅助循环估计相对功率比的 DOA 二次联合估计方法。不同干扰条件的仿真实验验证了估计方法的有效性。

**关键词:**拖曳式诱饵;DOA 估计;最大似然解;联合参数估计;末制导

**中图分类号:** TN973.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)05-0096-06

## A novel approach to jointly estimate the DOA of the target and decoy within the radar beam

SONG Zhiyong, XIAO Huaitie, FU Qiang, LU Zaiqi

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The direction-of-arrival (DOA) estimation for target and decoy under the towed radar decoy jamming is the precondition to achieve correct selection of target. The fact that target and decoy both exist within radar beam causes the merging of the radar echoes aliasing and measurement, and leads the regular processing of observation extraction and parameter measurement to fail. Through utilizing the information about the unknown parameter embodying in the covariance matrix of conditional probability distribution of the sum/diff channel echoes, the explicit solution for the DOA estimation of target and decoy was obtained. In order to satisfy the need of relative power ratio (RPR) in the estimation processing, the twice joint estimation algorithm for DOA based on circular estimation of RPR utilizing the information about jamming detection, radar measuring and target tracking was proposed. Simulation results with different conditions proved the performance effectiveness of the proposed method.

**Key words:** towed radar active decoy; DOA estimation; maximum likelihood solution; joint parameter estimation; terminal guidance

拖曳式诱饵是干扰末制导雷达导引头的有效手段,通过拖曳飞行且逼真模拟目标相关特性,形成导引头波束内非相干两点源,干扰和破坏导引头角度测量与跟踪系统,实现对制导雷达的角度欺骗<sup>[1]</sup>。

诱饵能够逼真模拟目标的飞行特征以及雷达散射特性,使得目标和诱饵在时、频和空域上的差异很小,雷达系统无法进行分辨。目标和诱饵的同时存在使得回波相互干涉混叠,造成观测耦合,导致常规基于单脉冲技术获取目标角度测量的方法不再有效。导引头波束内目标和诱饵的 DOA 估计与多目标参数估计具有一定的相似性,相关研究结论对于解决干扰条件下的估计问题具有借鉴意义。针对同一分辨单元内多个目标的 DOA 估计问题,文献[2]和[3]分别基于瞬时匹配矩方法和模型简化似然求解获得了 DOA 估计的解析表达式,这两

种方法结构简单、计算量适中,适合弹载应用,但是必须已知各目标的信号功率或者至少已知二者的相对功率比,对于拖曳式诱饵复杂干扰情况这一使用条件无法满足;文献[4]和[5]分别在各自参数模型条件下提出了基于接收回波条件分布的最大似然估计方法,但该类方法计算量很大,易陷入局部极值点,估计的实时性和精度有时难以满足末制导对抗要求;文献[6]提出通过计算质心角度与加窗聚类相结合的方法获取目标 DOA,但是该方法只适用于两个完全对等目标,无法推广到具有强压制比特征的诱饵干扰场景。

本文基于拖曳式诱饵干扰条件下的回波信号模型,在文献[3]简化模型似然求解 DOA 参数估计的基础上,结合诱饵干扰形式及特点,针对实际处理中所需相对功率比未知这一问题提出了相对功率比与 DOA 参数的二次联合估计方法。各种干扰

\* 收稿日期:2012-02-29

基金项目:国防科技重点实验室基金资助项目

作者简介:宋志勇(1983—),男,湖南长沙人,博士,E-mail:zhiyongsong@163.cm;

肖怀铁(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:htxiao@126.com

条件下的仿真实验验证了估计方法的有效性。

## 1 信号模型

诱饵释放后,波束内同时存在着目标和诱饵,以方位差通道为例,导引头接收回波可表示为<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} s_I = \alpha_T \cos \phi_T + \alpha_D \cos \phi_D + n_{sI} \\ s_Q = \alpha_T \sin \phi_T + \alpha_D \sin \phi_D + n_{sQ} \\ d_{aI} = \alpha_T \eta_{aT} \cos \phi_T + \alpha_D \eta_{aD} \cos \phi_D + n_{daI} \\ d_{aQ} = \alpha_T \eta_{aT} \sin \phi_T + \alpha_D \eta_{aD} \sin \phi_D + n_{daQ} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\alpha_T, \phi_T$  为目标幅度及相位,  $\alpha_D, \phi_D$  为诱饵幅度及相位,  $\eta_{aT}, \eta_{aD}$  分别为目标和诱饵的方位 DOA 参数,  $n_{sI}, n_{sQ} \sim N(0, \sigma_s^2)$ ,  $n_{daI}, n_{daQ} \sim N(0, \sigma_d^2)$  分别为和、差通道噪声, 相位  $\phi$  服从  $(-\pi, \pi)$  均匀分布。

设目标满足 Swerling II 模型, 诱饵采用 RCS 调制模拟真实目标特性, 因此诱饵与目标具有相似起伏特性, 即二者的回波幅度起伏服从瑞利分布<sup>[3]</sup>

$$p(\alpha_i) = \frac{\alpha_i}{a_{oi}} \exp\left(-\frac{\alpha_i^2}{2a_{oi}^2}\right), \quad (i = T, D) \quad (2)$$

其中  $a_{oi}$  为瑞利参数, 且有  $E[\alpha_i^2] = 2a_{oi}^2$ 。令

$$x_i = \alpha_i \cos \phi_i, y_i = \alpha_i \sin \phi_i \quad (i = T, D) \quad (3)$$

则式(1)的雷达接收回波表示可以进一步简化为

$$\begin{cases} s_I = x_T + x_D + n_{sI} \\ s_Q = y_T + y_D + n_{sQ} \\ d_{aI} = \eta_{aT} x_T + \eta_{aD} x_D + n_{daI} \\ d_{aQ} = \eta_{aT} y_T + \eta_{aD} y_D + n_{daQ} \end{cases} \quad (4)$$

诱饵和目标的信噪比以及相对功率比可定义为

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_T &= \frac{a_{0T}^2}{\sigma_s^2}, \quad \mathcal{R}_D = \frac{a_{0D}^2}{\sigma_s^2} \\ \rho &= \frac{E[\alpha_D^2]}{E[\alpha_T^2]} = \frac{\mathcal{R}_T}{\mathcal{R}_D} = \frac{a_{0D}^2}{a_{0T}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中相对功率比  $\rho$  即为通常所定义的干扰压制比 (Interference Suppression Ratio, ISR)<sup>[7]</sup>。目标信噪比  $\mathcal{R}_T$  的最大似然估计  $\hat{R}_T$  可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\hat{R}_T = Y_N - 1, \quad Y_N = 1/N \sum_{k=1}^N \mathcal{R}_{0k} \quad (6)$$

其中  $\mathcal{R}_{0k}$  为第  $k$  个子脉冲的观测信噪比。

## 2 DOA 估计解析方法

如前所述, 文献[4]和[5]的似然估计计算量大, 易陷入局部最优, 实时性差。从估计的简洁性、实用性考虑, 具有解析形式的估计方法更具吸

引力。因此本节首先基于(4)式信号模型, 在文献[3]基础上分析模型简化似然求解的 DOA 估计解析表达式。

根据(3)式和(4)式, 接收机和、差通道信号同相以及正交分量的条件概率满足零均值的高斯分布

$$\begin{aligned} p(s_I, d_{aI} | \eta_{aT}, \eta_{aD}) &= \frac{1}{|2\pi\mathbf{R}|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} s_I & d_{aI} \end{pmatrix} \mathbf{R}^{-1} \begin{pmatrix} s_I \\ d_{aI} \end{pmatrix}\right) \\ p(s_Q, d_{aQ} | \eta_{aT}, \eta_{aD}) &= \frac{1}{|2\pi\mathbf{R}|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} s_Q & d_{aQ} \end{pmatrix} \mathbf{R}^{-1} \begin{pmatrix} s_Q \\ d_{aQ} \end{pmatrix}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中协方差矩阵  $\mathbf{R}$  为<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_{0T}^2 + a_{0D}^2 + \sigma_s^2 & a_{0T}^2 \eta_{aT} + a_{0D}^2 \eta_{aD} \\ a_{0T}^2 \eta_{aT} + a_{0D}^2 \eta_{aD} & a_{0T}^2 \eta_{aT}^2 + a_{0D}^2 \eta_{aD}^2 + \sigma_d^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式表明如果能够利用导引头的和、差通道观测信号估计出协方差矩阵  $\mathbf{R}$ , 则采用矩阵对等原理可求解出其中包含的待估计参数  $\eta_{aT}, \eta_{aD}$  的表达式。

设由观测信号估计出的协方差矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  为

$$\hat{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

则由(4)式的信号模型,  $\hat{\mathbf{R}}$  中各元素可表示为<sup>[8]</sup>

$$p_{11} \approx \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [s_I(k)^2 + s_Q(k)^2] \quad (10)$$

$$p_{12} = p_{21} \approx \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [s_I(k)d_I(k) + s_Q(k)d_Q(k)] \quad (11)$$

$$p_{22} \approx \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [d_I(k)^2 + d_Q(k)^2] \quad (12)$$

将(10)~(12)式代入(9)式并与(8)式对应, 可得

$$a_{0T}^2 + a_{0D}^2 + \sigma_s^2 = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [s_I(k)^2 + s_Q(k)^2] \quad (13)$$

$$a_{0T}^2 \eta_{aT} + a_{0D}^2 \eta_{aD} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [s_I(k)d_I(k) + s_Q(k)d_Q(k)] \quad (14)$$

$$a_{0T}^2 \eta_{aT}^2 + a_{0D}^2 \eta_{aD}^2 + \sigma_d^2 = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [d_I(k)^2 + d_Q(k)^2] \quad (15)$$

不失一般性,设  $\eta_{aT} > \eta_{aD}$ , 通过求解(13) ~ (15) 式,并令

$$B_{a0} = \sum_{k=1}^N [d_{aI}(k)^2 + d_{aQ}(k)^2] - 2N\sigma_d^2 \quad (16)$$

$$B_{a1} = \sum_{k=1}^N [s_I(k)d_{aI}(k) + s_Q(k)d_{aQ}(k)] \quad (17)$$

$$B_{a2} = \sum_{k=1}^N [s_I(k)^2 + s_Q(k)^2] - 2N\sigma_s^2 \quad (18)$$

可得 DOA 估计  $\eta_{aT}, \eta_{aD}$  的表达式为<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} \hat{\eta}_{aT} = \frac{B_{a1} + \sqrt{(B_{a2}B_{a0} - B_{a1}^2)\gamma}}{B_{a2}} \\ \hat{\eta}_{aD} = \frac{B_{a1} - \sqrt{(B_{a2}B_{a0} - B_{a1}^2)\gamma}}{B_{a2}} \end{cases} \quad (19)$$

类似地,俯仰维 DOA 参数估计解析表达式也可以通过上述求解过程获得,这里不再赘述。

### 3 DOA 二次联合估计

(19) 式需要已知诱饵与目标的相对功率比  $\rho$ , 然而实际干扰过程中任意时刻诱饵和目标的功率是未知且时变的, 因此(19) 式的应用首先需要解决  $\rho$  的获取问题。文献[9] 通过高速采样获得各目标完全分离的采样点来估计相对功率比, 但却需要修改系统硬件。下面根据干扰体制和特点, 分析相对功率比的构成以及影响因素, 探索获取的方法。拖曳式诱饵干扰信号的产生主要有恒功率和恒增益两种体制<sup>[1]</sup>。当诱饵采用恒功率干扰体制时, 导引头接收回波中诱饵干扰信号与目标回波信号的功率比为

$$\rho = ISR = \frac{P_j}{P_n} = \frac{P_j G_{jT} 4\pi\mu_j r_T^4}{P_i G_i \sigma r_D^2} \quad (20)$$

式中  $P_j$  为诱饵干扰的最大发射功率,  $P_i$  为导引头发射功率,  $G_{jT}$  为诱饵发射天线增益,  $G_i$  为导引头雷达发射天线增益,  $\mu_j$  为极化损失系数,  $\sigma$  为目标雷达截面积。(20) 式中除弹目距离  $r_T$  和弹诱距离  $r_D$  外, 其他参数固定不变。可见恒功率体制下诱饵与目标相对功率比满足如下比例关系

$$\rho \propto r_T^4 / r_D^2 \quad (21)$$

当诱饵采用恒增益体制时, 对于收发分置的新型诱饵, 诱饵与目标之间的功率比为

$$\rho = ISR = \frac{P_j}{P_n} = \frac{G_{jR} G_j G_{jT} \lambda^2 \mu_j^2}{4\pi\sigma} \cdot \frac{r_T^2}{r_D^2} \quad (22)$$

式中  $G_{jR}$  为诱饵的接收天线增益,  $G_j$  为诱饵的恒定放大增益。可见这一条件下相对功率比满足

$$\rho \propto r_T^2 / r_D^2 \quad (23)$$

(21) 式和(23) 式表明, 干扰过程中诱饵和目标的相对功率比与弹目和弹诱距离的对应比值

成比例关系。因此可以利用干扰检测、雷达测量和跟踪等信息来实时循环获取波束内诱饵与目标的相对功率与 DOA 估计值, 处理过程可分为以下几个步骤。

Step1: 由于对空场景中噪声比较稳定, 可根据干扰检测信息通过顺序估计干扰发生前后的接收回波功率解算出干扰发生时刻的初始相对功率比。具体方法为: 诱饵释放前, 目标处于导引头稳定跟踪状态, 通过连续采集  $N$  个数据 ( $N$  的大小根据估计精度要求确定), 由(6) 式估计出当前时刻的目标信噪比  $\hat{\mathcal{R}}_T$  并存储于 FIFO 中。通过连续估计目标的信噪比  $\hat{\mathcal{R}}_T$ , 并不断更新存储值, 可以获得干扰发生前一时刻比较精确的目标信噪比值。当检测到干扰发生时, 采集当前时刻的  $N$  个样本, 同样由(6) 式可计算当前时刻目标和诱饵的总信噪比  $\hat{\mathcal{R}}$ 。由于干扰发生前后导引头回波的变化主要来源于诱饵干扰的存在, 因此总信噪比  $\hat{\mathcal{R}}$  是目标信噪比  $\hat{\mathcal{R}}_T$  与诱饵信噪比  $\hat{\mathcal{R}}_D$  的合成。利用干扰检测时刻获得的回波总信噪比  $\hat{\mathcal{R}}$  以及前一时刻估计的目标信噪比  $\hat{\mathcal{R}}_T$ , 就可以解算出诱饵信噪比  $\hat{\mathcal{R}}_D$ , 从而获得干扰发生时刻导引头接收回波中诱饵与目标的初始相对功率比  $\hat{\rho}_0$ 。

Step2: 根据  $\hat{\rho}_0$ , 利用(19) 式估计获得干扰初始时刻目标和诱饵对应的 DOA 参数  $\eta_{T,0}$  和  $\eta_{D,0}$ 。

Step3: 目标和诱饵在时频域不可分辨, 导引头雷达测量获得的弹 - 目距离实为导引头与目标和诱饵能量重心位置的距离  $r_c$ 。初始时刻, 弹目距离远, 目标和诱饵的夹角很小, 则  $r_{T,0} = r_{D,0} = r_{c,0}$ 。导引头根据干扰检测初始时刻获得的角度以及距离信息可分别建立目标和诱饵对应的航迹  $y_T$  和  $y_D$ 。

Step4: 根据目标和诱饵的航迹信息  $y_T$  和  $y_D$  以及状态方程, 通过计算可获得下一时刻的弹目、弹诱距离  $r_{T,k}, r_{D,k}$ 。

Step5: 根据不同干扰体制下的相对功率比关系式(21) 和式(23), 利用估计获得的  $r_{T,k}$  和  $r_{D,k}$ , 则可得当前时刻诱饵与目标之间的相对功率比估计  $\hat{\rho}_k$ 。

Step6: 将相对功率比估计  $\hat{\rho}_k$  代入式(19) 计算当前时刻的目标和诱饵 DOA 参数  $\hat{\eta}_{T,k}$  和  $\hat{\eta}_{D,k}$ 。

Step7: 根据估计结果进行航迹更新, 转入 Step3 进行循环估计。

上述循环估计中,  $r_{T,k}$  和  $r_{D,k}$  的估计误差将传递给 DOA 估计结果。幸运的是, 干扰中弹目、弹诱

绝对距离比较远,目标和诱饵的角度间隔不超过半波束宽度,而导引头雷达的波束宽度通常很窄(几度量级),因此实际中弹目、弹诱距离的估计误差并不大。

上述循环估计是在假定导引头天线波束增益恒定的条件下获得的。实际中目标和诱饵偏离天线电轴的角度不相同,对应天线波束增益也不一样。因此,相对功率比的估计需要将天线波束增益的影响考虑进去。设波束内目标所在位置对应 DOA 参数为  $\eta$ ,由于目标位置偏离波束中心,目标的实际信噪比与名义信噪比的关系为<sup>[4]</sup>

$$\hat{\mathcal{R}} = \mathcal{R} \cos^4\left(\frac{\eta\pi}{4\eta_{bw}}\right) \quad (24)$$

式中  $\eta_{bw}$  表示和通道天线波束增益的半功率点对应的 DOA 宽度。

设  $k$  时刻通过循环估计获得的相对功率比为  $\hat{\rho}_k$ ,目标和诱饵 DOA 参数分别为  $\hat{\eta}_{T,k}$  和  $\hat{\eta}_{D,k}$ ,根据相对功率比定义以及式(24),则实际估计过程中在考虑天线波束增益的影响下, $k$  时刻诱饵与目标的相对概率比可进一步修正为

$$\hat{\rho}_k = \hat{\rho}_k \frac{\cos^4\left(\frac{\hat{\eta}_{D,k}\pi}{4\eta_{bw}}\right)}{\cos^4\left(\frac{\hat{\eta}_{T,k}\pi}{4\eta_{bw}}\right)} \quad (25)$$

将(25)式的相对功率比估计值代入式(19),则可以获得更加符合实际情况的 DOA 参数估计结果。根据上述分析,拖曳式诱饵干扰下目标与诱饵 DOA 参数二次联合估计的处理流程如图 1 所示。

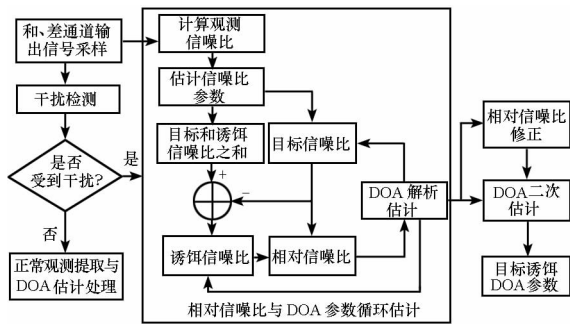


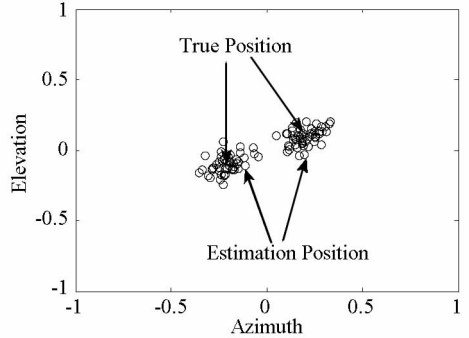
图 1 目标和诱饵 DOA 参数联合估计流程

Fig.1 Joint estimation process of the DOA of target and decoy

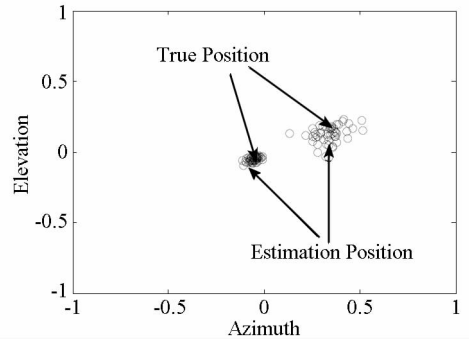
### 4 仿真实验

末制导拖曳式诱饵干扰场景下目标与诱饵的 DOA 估计是一个动态、时变、多分量的综合处理过程,参数估计影响因素多,实时性要求高。下面通过不同条件下的仿真实验分析验证 DOA 联合估计方法在典型诱饵干扰场景下的性能特点。其中导引头波束宽度  $\theta_{BW} = 6^\circ$ ,单脉冲误差斜率  $k_m = 1.6$ 。

首先,考察典型干扰条件下二次联合参数估计的效果。设目标信噪比  $\mathcal{R}_T = 13\text{dB}$ ,脉冲数  $N = 20$ ,考虑两种干扰压制比,  $\text{ISR} = 1$  时,目标和诱饵关于天线电轴对称,目标位置  $(\eta_{aT} = 0.2, \eta_{eT} = 0.10)$ ,诱饵位置  $(\eta_{aD} = -0.20, \eta_{eD} = -0.10)$ ;  $\text{ISR} = 10$ ,电轴偏离几何中心偏向诱饵,目标位置  $(\eta_{aT} = 0.35, \eta_{eT} = 0.15)$ ,诱饵位置  $(\eta_{aD} = -0.05, \eta_{eD} = -0.05)$ ,图 2 给出了 50 次实验结果。



(a) 干扰压制比  $\text{ISR} = 1$



(b) 干扰压制比  $\text{ISR} = 10$

图 2 目标与诱饵 DOA 联合估计结果

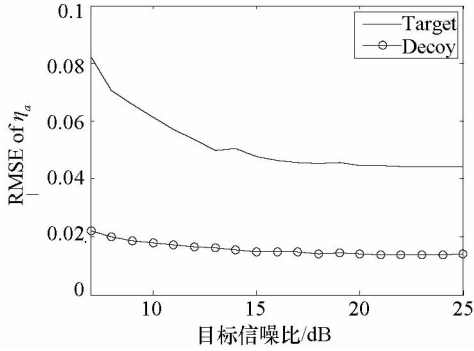
Fig.2 Results for estimation of target and decoy's DOA

图 2 中 DOA 估计的蒙特卡罗实验结果较好地集中在二者真实位置附近。  $\text{ISR} = 1$  时,目标和诱饵的 DOA 估计精度相近,而  $\text{ISR} = 10$  时,诱饵估计结果相比于目标估计结果,更紧密地集中于诱饵的真实值附近。主要原因是目标和诱饵地位不对等,诱饵功率远大于目标功率,对雷达的“吸引”作用更强。

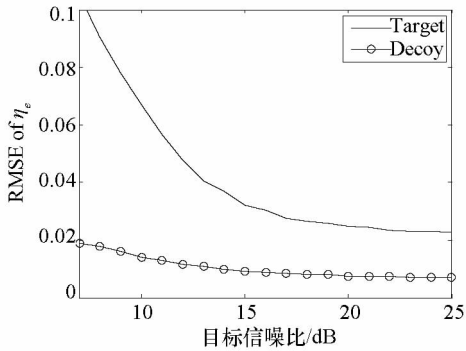
其次,考察信噪比对二次 DOA 联合估计的性能影响。设目标信噪比  $R_T = 7 \sim 25\text{dB}$ ,其他参数与上一实验中  $\text{ISR} = 10$  时设置相同,蒙特卡罗实验 1000 次。不同信噪比下方位及俯仰 DOA 估计的均方误差根(Root Mean Square Error, RMSE)曲线如图 3 所示。

图 3 表明,随着信噪比的增加,DOA 二次联合估计的 RMSE 逐渐下降,估计精度不断提高。同时,由于功率上的不对等,目标估计的 RMSE 大于诱饵估计 RMSE。当目标信噪比大于  $10\text{dB}$  时,

方位和俯仰的 DOA 估计误差较小,能够满足干扰对抗需求。



(a) 方位 DOA 估计



(b) 俯仰 DOA 估计

图 3 不同信噪比条件下 DOA 联合估计 RMSE 曲线

Fig. 3 RMSE for estimation of DOA under different SNR

然后,考察目标与诱饵角度间隔大小对 DOA 估计性能的影响。其中诱饵( $\eta_{aD} = -0.05, \eta_{eD} = -0.05$ )固定不变,二者方位和俯仰上的角度间隔变化为  $\Delta\eta_a, \Delta\eta_e = 0.1 \sim 0.8$ ,其他参数同上。不同角度间隔条件下目标与诱饵 DOA 估计 RMSE 曲线如图 4 所示。

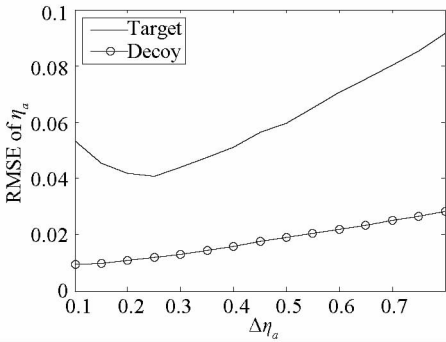
图 4 表明,随着目标与诱饵之间角度间隔的增大,二者 DOA 联合估计的误差也逐渐增大,参数估计效果逐渐变差。在拖曳式诱饵干扰中,目标和诱饵的角度间隔是逐渐增大的,对于抗干扰而言,越早实现对目标 DOA 的估计,越有利于导引头调整波束指向实现稳定跟踪。 $\Delta\eta \leq 0.5$  时,联合参数估计中目标 DOA 估计的 RMSE 能够控制在 0.06 以下,这对于导引头的干扰对抗将是十分有利的。

最后,结合迎头攻击干扰场景考察 DOA 联合估计方法在动态干扰条件下的性能特点。场景设置为:导弹采用比例制导方式<sup>[10]</sup>,目标在第 1s 内相对于导弹作匀速直线飞行,1s 后目标开始拖曳着诱饵在方位维上进行机动以形成三角态势,俯仰维上则不机动。当目标与诱饵的张角大于半波束宽度或弹诱距离小于导弹杀伤半径时,即认为目标已经逃离波束或导弹已命中诱饵,仿真停止。为简化分析,仿真中假定接收机噪声在攻击过程中保持不变,诱饵释放后,雷达导引头能够很快检测到干扰发生并转入 DOA 参数估计流程,忽略检测延时。仿真参数设置如表 1 所示,对应迎头攻击场景轨迹如图 5 所示。

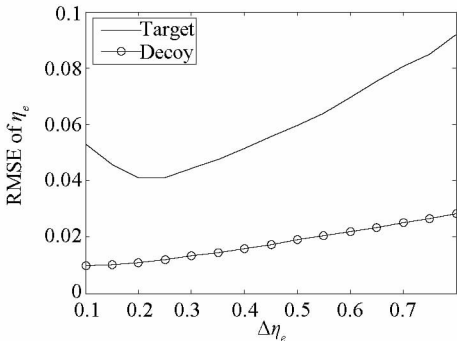
表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Parameter setting of the simulation

类别	参数设置
初始 导弹:	(0,0,0)
位置 目标:	(9850,1000,1000)
(m) 诱饵:	(10000,1000,1000)
飞行 导弹:	1000m/s; 目标:300m/s; 诱饵:300m/s
速度 目标、诱饵的法向加速度:	$6g \text{ m/s}^2$
其他 导引头波束宽度:	$6^\circ$ ; 比例导引系数:3
参数 拖曳线长度:	$L = 150\text{m}$ ; 初始干扰压制比: $K = 10$
导弹杀伤半径:	15m; 蒙特卡罗仿真: 1000 次



(a) 方位 DOA 估计



(b) 俯仰 DOA 估计

图 4 不同目-诱角度间隔下 DOA 联合估计 RMSE 曲线

Fig. 4 RMSE for estimation of DOA under different angle intervals of target and decoy

采用本文提出的 DOA 联合估计方法对图 5 动态攻击过程中导引头雷达接收回波进行参数估计处理,考虑到第 1s 内目标和诱饵做匀速直线运动,三角态势尚未形成,角度干扰比较弱,因此 DOA 联合估计动态性能的评价主要考虑 1s 以后的情况。迎头攻击过程中目标和诱饵的方位以及俯仰 DOA 动态估计 RMSE 曲线如图 6 所示。

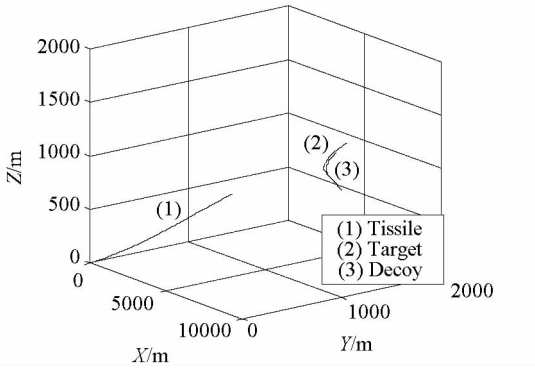
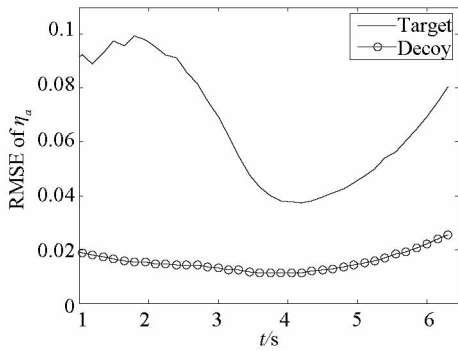
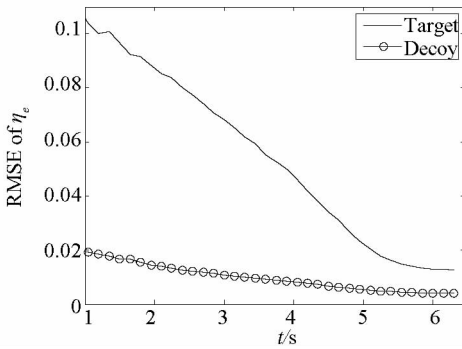


图5 迎头攻击动态干扰场景轨迹

Fig.5 Motion trail of the head-on attack scenario for jamming



(a) 方位 DOA 估计



(b) 俯仰 DOA 估计

图6 迎头攻击动态过程中方位和俯仰 DOA 估计 RMSE 曲线  
Fig.6 RMSE for estimation of DOA under dynamic course

图6表明,在图5所示的动态干扰场景中,随着攻击的进行,俯仰维目标和诱饵的 DOA 参数估计精度不断提高,而方位维 DOA 估计误差则起伏较大。在图5的迎头攻击过程中,弹目、弹诱距离随着攻击时间不断减小,目标和诱饵的角度间隔则随着三角态势的形成不断增大。由于目标和诱饵只在方位维进行机动,因此二者方位向的角度间隔远大于俯仰向的角度间隔。图3表明,DOA 估计精度随信噪比增加而改善,但是当信噪比增加到一定程度后,性能改善不明显,而图4表明 DOA 估计误差随着角度间隔的增大而不断增大。因此在图5所示的动态干扰场景中,由于方位向

角度间隔的增大以及信噪比的增加,目标和诱饵的方位 DOA 估计误差随攻击时间起伏较大,而俯仰向由于角度间隔很小,DOA 估计误差随信噪比的增加呈现下降的趋势。

## 5 结论

拖曳式诱饵干扰条件下,雷达接收回波条件概率分布的协方差矩阵包含目标和诱饵的 DOA 参数信息。本文在基于简化似然函数求解 DOA 估计的基础上,利用干扰检测、雷达测量和跟踪等信息实现了目标和诱饵相对功率比与 DOA 的循环估计,同时考虑天线增益影响提出了 DOA 二次联合估计流程。各种干扰条件下的仿真实验表明 DOA 联合估计方法估计精度较高,误差水平满足干扰对抗需求。

## 参考文献 (References)

- [1] Kerins W J. Analysis of towed decoy [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(4): 1222 - 1227.
- [2] Blair W D, Brandt-Pearce M. Monopulse DOA estimation of two unresolved Rayleigh targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 452 - 469.
- [3] Wang Z, Sinha A, Bar-shalom Y. Angle estimation for two unresolved target with monopulse radar[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2004, 40(3): 998 - 1019.
- [4] Sinha A, Kirubarajan T, Bar-shalom Y. Maximum likelihood angle extractor for tracking Rayleigh targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 183 - 203.
- [5] Zhang X, Willett P K, Bar-shalom Y. Monopulse radar detection and localization of multiple unresolved targets via joint bin processing [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2005, 53(4): 1225 - 1236.
- [6] Zhou L F, Zhang M, Zhao Y N. Angle estimation for two unresolved swerling I targets in monopulse radar [C]//proceedings. of International Conference on: Microwave and Millimeter Wave Technology, Chengdu, China, 2010: 1622 - 1625.
- [7] 白渭雄,唐宏,陶建峰. 拖曳式诱饵对单脉冲雷达的干扰分析[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 22(6): 39 - 42.  
BAI Weixiong, TANG hong, TAO Jianfeng. Analysis of towed decoy jamming on monopulse radar[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2007, 22(6): 39 - 42. (in Chinese)
- [8] Blair W D, Brandt-Pearce M. Unresolved Rayleigh target detection using monopulse measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 543 - 552.
- [9] Wang J, Yao J, Qiao X L. A practical approach of monopulse DOA estimation for multiple unresolved targets[C]//Proceedings of IET International Radar Conference, Guilin, China, 2009: 1 - 4. (in Chinese)
- [10] 朱华勇,彭双春,孙未蒙. 三维最优制导律设计的旋量方法[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(4): 110 - 115.  
ZHU Huayong, PENG Shuangchun, SUN Weimeng. A twist-based method for 3D optimal guidance law [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(4): 110 - 115. (in Chinese)