多点源诱偏系统对抗反辐射导弹效能分析

赵娟娟 马东立 郑江安

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：基于有源诱偏系统对抗反辐射导弹(ARM，Anti-Radiation Missile)的理论，导出诱偏误差公式，以3种典型布局方案(三点源布局1、三点源布局2及四点源布局)为例，对误差公式进行简化处理，通过数值计算得到诱偏误差曲线，分析不同布局方案下辐射源功率比对诱偏误差的影响；同时分析ARM的实际攻击过程，引入ARM机动修正，通过仿真分析得到ARM落点图和雷达保护概率曲线，对比不同布局方案下的诱偏效果，结果表明四点源布局为最优方案，对研究多点源诱偏系统对抗ARM的作战效能具有指导意义.

关 键 词：反辐射导弹；诱偏；作战效能；多点源

中图分类号：TJ 762.2；TN 974

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)09-1139-05

Effectiveness analysis of multi-source decoying system against ARM

Zhao Juanjuan Ma Dongli Zheng Jiang'an

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the theory of active decoying system against anti-rediation missile(ARM), decoy error formula was derived. Three typical distributions, which were the first three-source distribution, the second three-source distribution and four-source distribution were discussed as examples, and the error formulae of them were simplified, and decoy error curves were obtained with numerical calculation, then the influence of radiation source power rate on decoy error under different distributions was analyzed. Besides, the real attack process of ARM was also analyzed, and ARM's mobile correction was inducted. Then diagrams of ARM's point of impact and radar's protect probability curves were obtained with simulation analysis. Decoy effect of different distributions was compared with each other, and the results show that four-source distribution is the best plan. These conclusions have great significance in researching the operational effectiveness of multi-source decoying system against ARM.

Key words: anti-rediation missile(ARM); decoy; operational effectiveness; multi-source

反辐射导弹(ARM，Anti-Radiation Missile)自1965年在越南战场上问世以来，得到迅速发展，对防空雷达构成致命威胁[1]. 开展对抗反辐射导弹技术及其效能研究已成为当务之急. 本文基于有源诱偏系统对抗反辐射导弹的理论，以3种典型布局方案为例，首先通过数值模拟计算分析不同布局方案下的诱偏误差，然后结合ARM的实际攻击过程，引入ARM机动修正，仿真分析不同布局方案及其相关参数对诱偏效果的影响.

1 诱偏误差公式

假设多点源诱偏系统由雷达和 n 个附加辐射源组成，以雷达所在位置为原点建立坐标系，第 i 个辐射源($i=1,2,\cdots,n$)的坐标为(x_i，y_i，z_i)，ARM坐标为(x_A，y_A，z_A)，如图1所示.

经推导可得，ARM导引头跟踪方向与地面($z=0$)的交点坐标为

收稿日期：2008-09-17

作者简介：赵娟娟(1982—)，女，陕西商洛人，博士生，juanjuan0410@ase.buaa.edu.cn.

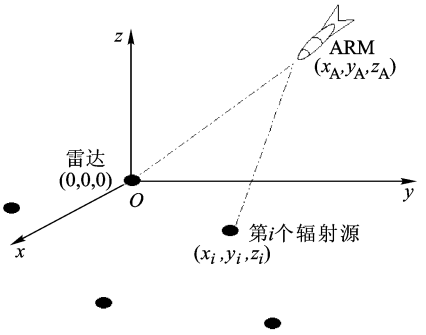


图1 多点源诱偏系统空间示意图

$$x\mid_{z=0}=\frac{\sum_{i=0}^{n}\sum_{k=0}^{n}E_{0i}E_{0k}\dfrac{x_kz_A-x_Az_k}{\lambda_kr_k}\cos(\varphi_i-\varphi_k)}{\sum_{i=0}^{n}\sum_{k=0}^{n}E_{0i}E_{0k}\dfrac{z_A-z_k}{\lambda_kr_k}\cos(\varphi_i-\varphi_k)} \tag{1}$$

$$y\mid_{z=0}=\frac{\sum_{i=0}^{n}\sum_{k=0}^{n}E_{0i}E_{0k}\dfrac{y_kz_A-y_Az_k}{\lambda_kr_k}\cos(\varphi_i-\varphi_k)}{\sum_{i=0}^{n}\sum_{k=0}^{n}E_{0i}E_{0k}\dfrac{z_A-z_k}{\lambda_kr_k}\cos(\varphi_i-\varphi_k)} \tag{2}$$

式中，E_{0i} 为第 i 个辐射源辐射电磁波的电场强度；λ_i 为第 i 个辐射源的角频率；φ_i 为第 i 个辐射源的相位；r_i 为第 i 个辐射源到 ARM 的距离.

由于雷达位于坐标原点，故式(1)和式(2)亦为 ARM 导引头跟踪偏差的 x 和 y 分量，也可作为诱偏效果的定量表达式，即通用的多点源三维空间诱偏误差公式，具体推导过程可参考文献[2].

2 多点源诱偏误差理论分析

确定辐射源数目及附加辐射源位置坐标后，即可对式(1)、式(2)进行赋值化简，从而得到两点源、三点源、四点源的诱偏误差表达公式. 结合相关假设条件可进一步对公式进行化简，通过计算机进行数值模拟计算，进而对诱偏效果作出理论分析. 文献[3]已对两点源诱偏系统进行了详细分析说明，因此本文不再对两点源系统进行研究，而是分别以三点源和四点源为例，分析辐射源与雷达功率比以及辐射源布站方式对诱偏误差的影响. 本文假设多点源诱偏系统各辐射源均处于同一水平面，即 z 坐标均为 0，不同高度多点源诱偏系统对抗 ARM 的情况可参考文献[4].

2.1 三点源诱偏

三点源诱偏系统有多种布局方式，对于任意布置的三点源，其布站方式可用图2表示.

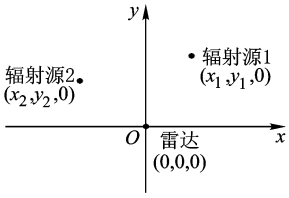
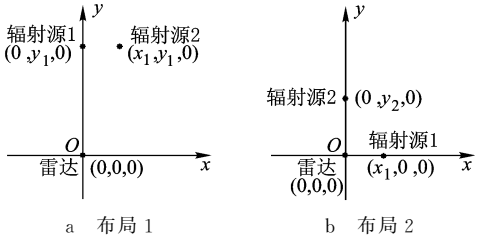


图2 三点源诱偏系统布站示意图

对于三点源诱偏系统，当 ARM 为远距离时，可以认为 $E_{01}=E_{02}$，$\lambda_0r_0\approx\lambda_1r_1\approx\lambda_2r_2$. 令辐射源功率比 $K=E_{01}/E_{00}=E_{02}/E_{00}$，$\Delta\varphi_{01}=\varphi_0-\varphi_1$，$\Delta\varphi_{02}=\varphi_0-\varphi_2$，$\Delta\varphi_{12}=\varphi_1-\varphi_2$，$z_1=z_2=z_0=0$，则式(1)可化简为

$$x=(1+2K^2+2K(\cos\Delta\varphi_{01}+\cos\Delta\varphi_{02})+2K^2\cos\Delta\varphi_{12})^{-1}(Kx_1\cos\Delta\varphi_{01}+Kx_2\cos\Delta\varphi_{02}+K^2(x_1+x_2)(1+\cos\Delta\varphi_{12})) \tag{3}$$

式(2)与式(1)形式相似，用 y 替换 x 即得 y 分量的表达式，在此不再赘述. 由式(3)不难得出，诱偏误差的大小不仅与辐射源功率比 K 有关，而且受各点源坐标位置以及辐射源相位差的直接影响. 本文对两种典型的三点源布局方案进行讨论，这两种方案如图3所示.



a 布局1 b 布局2

图3 三点源布局示意图

2.1.1 三点源布局1

设雷达位于(0,0,0)，两附加辐射源比较靠近，但都离雷达较远，其坐标分别为(0，y_1，0)，(x_1，y_1，0)，其中$|x_1|\ll|y_1|$. 令 $x/x_1=x_0$，$y/y_1=y_0$，假设 $\Delta\varphi$ 在$(0,2\pi)$内均匀分布，由计算机随机抽样，代入化简公式进行计算，以求出 x_0 与 y_0 的平均值，计算结果如图4所示.

从图4可以看出，$K\geqslant1$ 之后，$x/x_1=x_0$ 恒大于 0.28，$y/y_1=y_0$ 恒大于 0.59. 因此当 ARM 逐步飞近时，雷达首先偏离 ARM 导引头的主轴方向，使 K 进一步增大，则 y/y_1 进一步增大，从而最终使雷达脱离 ARM 导引头视场，达到引偏的目的. 当 ARM 导引头视场内只包含两个辐射源时，问题就转化为类似 $K=1$ 的两点源系统，即两个附加辐射源中一个可以认为是雷达，另一个认为是附加辐射源，但始终可保持 $K=1$. 此时 ARM 跟踪方向与地面交点坐标为

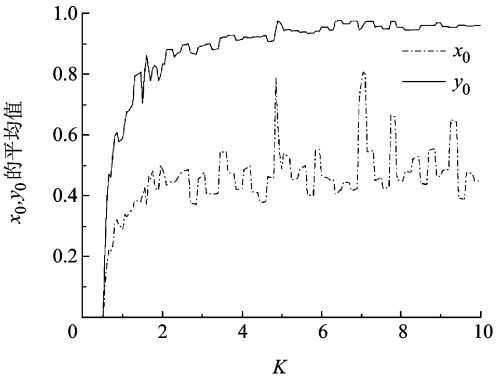


图 4　三点源布局 1 的 x_0,y_0 平均值与 K 的关系

$$x_0 = x/x_1 = 0.5 \tag{4}$$

$$y_0 = y/y_1 = 1 \tag{5}$$

从而既保护了雷达,又保护了两个附加辐射源,因此布局 1 为一个比较实用的诱偏系统方案.

2.1.2　三点源布局 2

设雷达位于(0,0,0),两个附加辐射源坐标分别为(x_1,0,0),(0,y_2,0),同理对化简所得公式进行数学处理,通过统计计算,结果如图 5 所示.

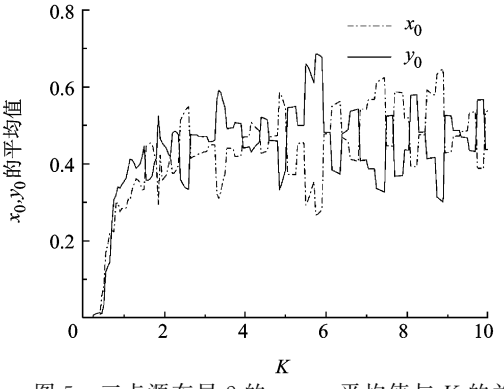


图 5　三点源布局 2 的 x_0,y_0 平均值与 K 的关系

从图 5 可以看出,$K \geqslant 1$ 之后,$x/x_1 = x_0$ 恒大于 0.28,$y/y_1 = y_0$ 恒大于 0.35,即 ARM 导引头基本上瞄准三点的中心,x_0 和 y_0 的曲线大致相同.由于瞄准点不是离雷达最远,故布局 2 不是很实用的诱偏布局方案.

2.2　四点源诱偏

与三点源诱偏系统类似,任意布置的四点源诱偏系统,同样可以对诱偏误差公式进行化简.无论是几点源,影响诱偏误差大小的因素是不变的.本文研究的四点源布站方式,如图 6 所示.

在此布局方式下,雷达位于(0,0,0),3 个附加辐射源相互比较靠近,但都离雷达较远,坐标分别为(x_1,my_3,0),($-x_1$,my_3,0),(0,y_3,0),其中$|x_1| \ll |y_3|$.假设 ARM 为远距离时,同样有 $r_0\lambda_0 \approx r_1\lambda_1 \approx r_2\lambda_2 \approx r_3\lambda_3$,则式(1)、式(2)可化简为类似三点源布局的形式,并且引入 $\Delta\varphi_{03}$,$\Delta\varphi_{13}$,$\Delta\varphi_{23}$.

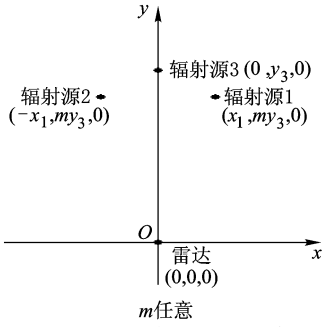


图 6　四点源布局方式示意图

当 $m=0.8$ 时,结果如图 7 所示.

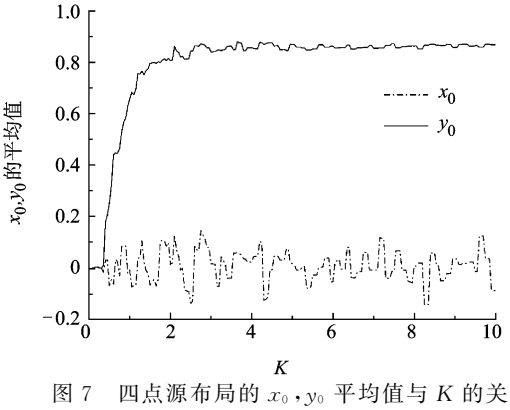


图 7　四点源布局的 x_0,y_0 平均值与 K 的关系

从图 7 可以看出,$K \geqslant 1$ 之后,$x/x_1 = x_0$ 基本在 0 附近,而 $y/y_1 = y_0$ 恒大于 0.63,即 ARM 导引头的瞄准点离雷达更远些.此种布局同三点源布局 1 相比,雷达更为安全.而且一旦雷达脱离 ARM 导引头视场后,导引头即跟踪 3 个附加辐射源的中心,附加辐射源中即使有一个发生故障,仍可确保 ARM 导向剩余两个辐射源形成的中心,从而使 ARM 不会击中任何一个辐射源.无论从雷达更为安全,还是附加辐射源更为安全考虑,四点源诱偏系统都是最佳选择.五点源虽然更好,但由于辐射源增加,成本更高,因此不予考虑.此外 ARM 对诱偏系统的攻击为连续过程,故应考虑 ARM 由发射到落地的整个运动过程,下文通过引入 ARM 机动修正项,以 ARM 弹着点位置和诱偏系统对雷达的保护概率为评价指标,对多点源诱偏系统对抗 ARM 的效能进行仿真分析.

3　多点源诱偏系统仿真分析

3.1　ARM 攻击过程分析[5]

在导引信号作用下,ARM 将由实际攻击方向向导引头实测方向靠近,靠近程度由导弹最大过载和速度决定.忽略重力加速度的影响,ARM 将作圆弧运动,O 为圆心,k 时刻 ARM 的运动过

程如图8所示.

A_k 为导弹 k 时刻的位置;A_{k+1} 为 $k+1$ 时刻的位置;M_{k-1} 为 $k-1$ 时刻导引头瞄准方向与地面的交点坐标;M_k 为 k 时刻导引头瞄准方向与地面的交点坐标.假设ARM实际攻击方向与导引头实测方向夹角为 α,将ARM飞行时间离散化,结合几何关系,即得ARM运动的仿真计算迭代过程[6],从而求出ARM的最终落点及诱偏系统对雷达的保护概率,对诱偏效果进行分析评估.

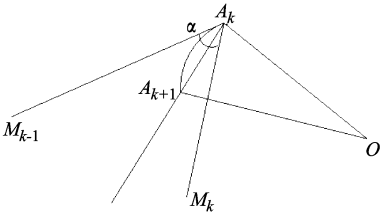


图8 k 时刻ARM飞行状态示意图

3.2 典型诱偏布局仿真实例及结果分析

结合已有的诱偏误差公式和分析的ARM攻击过程,针对三点源布局1、三点源布局2及四点源布局3种典型布局方案,利用MATLAB进行仿真.仿真初始条件如下:ARM速度 $v=1\,020$ m/s,分辨角 $\Delta\theta_R=30°$,杀伤半径 $R_d=30$ m,最大过载 $n_{max}=9$;各点源功率相同,电磁波频率均为10 GHz,初始相位随机,离散时间间隔 $\Delta t=0.05$ s;ARM发射位置距雷达7 km,俯仰角范围为(10°,90°),方位角为全方位360°,仿真时间隔2°均匀取值,导弹初始发射时对准瞄准方向.令 $x_1=150$,$y_1=600$,$y_2=300$,$y_3=1\,300$,三点源布局1、三点源布局2及四点源布局的ARM弹着点分别如图9~图11所示.

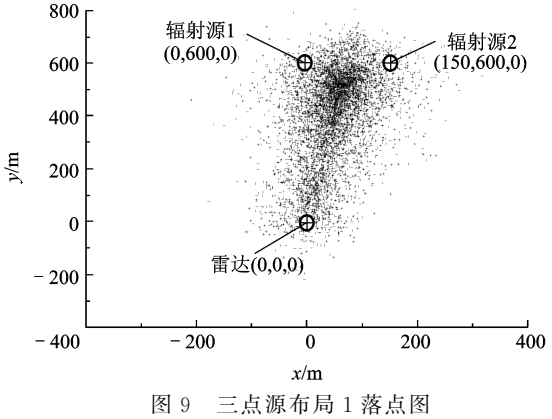


图9 三点源布局1落点图

对比图9~图11,四点源最佳布局在最大限度上既保护了雷达,又保护了附加辐射源,诱偏效果最好,三点源布局1次之,布局2最差.这与本文第二节的理论分析结果一致.

固定俯仰角为30°,其它仿真初始条件不变,可以得到3种典型布局下诱偏系统对雷达的保护概率随方位角的变化曲线,如图12~图14所示.图中 P_0 表示诱偏系统对雷达的保护概率.

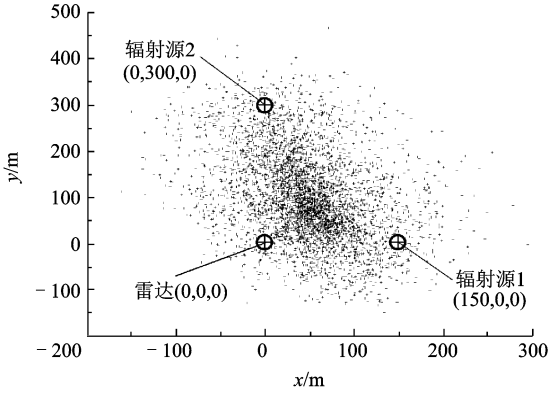


图10 三点源布局2落点图

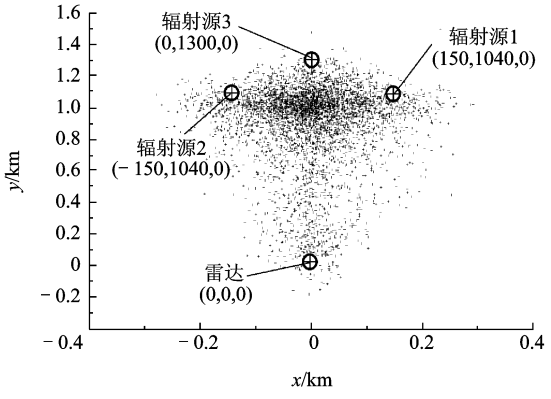


图11 四点源布局落点图

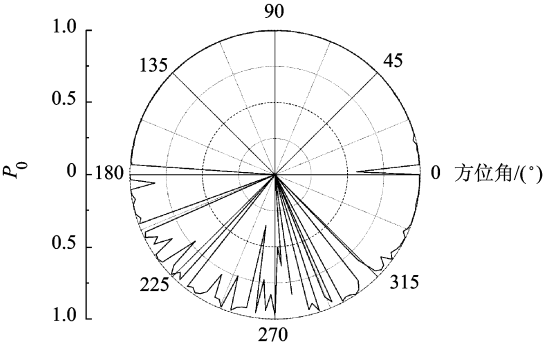


图12 三点源布局1概率图

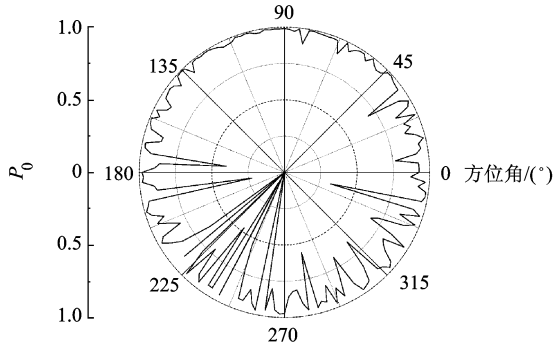


图 13　三点源布局 2 概率图

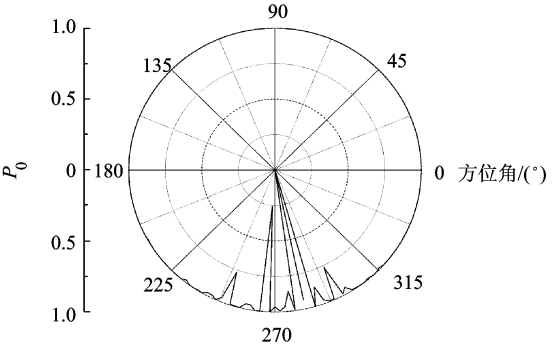


图 14　四点源布局概率图

由图 12～图 14 可以看出,对于三点源布局 1、三点源布局 2 及四点源布局,P_0 在方位角(175°,325),(160°,346°),(230°,320°)范围内均有显著降低.原因为当 ARM 背向来袭时,P_0 将大大降低.同理固定方位角,其它仿真初始条件不变,亦可得到 3 种典型布局下 P_0 随俯仰角的变化曲线,在一定俯仰角范围内,P_0 均有明显降低,原因同上.与此同时,对比 3 种典型布局,四点源布局对雷达的保护空域(此处表征量为方位角)最为广阔,三点源布局 1 次之,三点源布局 2 最狭窄.这与上文理论分析部分所得结论一致.ARM 技术参数(速度、机动过载、导引头分辨角、初始发射偏角)及辐射源功率比对雷达保护概率的影响,文献[7]已做出详尽的仿真分析,故本文不再赘述.

4　结　论

多点源诱偏系统对抗 ARM 的诸多效能影响因素中,布局方案的选定是关键.对比文中涉及的 3 种典型布局方案,无论从弹着点分布图,还是从诱偏系统对雷达的保护概率来看,四点源布局的诱偏效果都是最优的.本文给出的仿真结果及相关结论对研究有源诱偏系统对抗 ARM 的作战效能很有意义.

参考文献(References)

[1] McWhorter L V. Response of various monopulse seekers to a multi-source environment[C]//Southeastlon 1981 Conference Proceedings. San Diego,California: IEEE, 1981:698－709

[2] 顾尔顺. 有源诱偏反辐射导弹的理论[J]. 现代防御技术,1993(3):25－34
Gu Ershun. The theory of active decoying system against anti-radiation missile [J]. Modern Defence Technology,1993(3):25－34(in Chinese)

[3] 顾尔顺. 对反辐射导弹导引头进行有源诱偏的原理[J]. 现代防御技术,1992(3):40－57
Gu Ershun. The theory of active decoying system against anti-radiation missile seeker [J]. Modern Defence Technology, 1992(3):40－57(in Chinese)

[4] 关成斌,陈铁柱,王国宏,等. 用不同高度有源诱偏系统对抗 ARM [J]. 雷达科学与技术,2004,2(4):193－197
Guan Chengbin, Chen Tiezhu, Wang Guohong, et al. ARM countering of active decoying system with different height baits [J]. Radar Science and Technology,2004,2(4):193－197(in Chinese)

[5] 谭帆,苏东林,姜铁华. 诱偏反辐射导弹四点源诱饵系统布站仿真[J]. 信息技术,2005(12):96－97
Tan Fan, Su Donglin, Jiang Tiehua. Simulation of four-source decoy system distribution for decoy anti-radiation missile [J]. Information Technology,2005(12): 96－97(in Chinese)

[6] 闵涛,姜文利,周一宇,等. 诱偏反辐射导弹三点源诱饵系统布站研究[J]. 航天电子对抗,2000(3):13－15
Min Tao, Jiang Wenli, Zhou Yiyu, et al. The study on the topology of decoying system with three resources against anti-radiation missile [J]. Aerospace Electronic Warfare,2000(3):13－15(in Chinese)

[7] 姜铁华,王国玉,苏东林,等. 反辐射导弹技术参数对诱偏系统性能的影响研究[J]. 航空学报,2007,28(增刊):S146－S150
Jiang Tiehua, Wang Guoyu, Su Donglin, et al. Study on effects of ARM technical property on decoying performances of active decoying system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(Supplement):S146－S150 (in Chinese)

(责任编辑:李　晶)