

doi: 10.7690/bgzd.2014.01.016

## 舰空导弹网络化协同反导杀伤区空域建模与仿真

张林<sup>1</sup>, 刘新科<sup>2</sup>, 马良<sup>3</sup>(1. 海军大连舰艇学院导弹系, 辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院政治系, 辽宁 大连 116018;  
3. 海军大连舰艇学院舰船指挥系, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 针对以平台为中心的传统防空作战存在的局限性, 建立舰艇编队协同反导作战中舰空导弹网络化协同反导杀伤区空域模型。结合舰空导弹武器系统\杀伤区的概念, 利用解析方法, 建立了单舰制导条件下的舰空导弹杀伤区边界模型, 在此基础上建立了在协同制导条件下编队杀伤区边界模型, 并对其进行仿真计算。仿真结果证明: 舰空导弹网络化协同反导作战能有效扩展整个编队内部舰空导弹武器系统的协同反导杀伤区空域面积, 发挥编队协同反导的作战优势, 可为指挥员防空作战的队形配置提供理论参考。

**关键词:** 舰空导弹网络化; 协同反导; 杀伤区空域; 杀伤区边界模型  
**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Ship to Air Missile Damage Zone Airspace Anti-Missile Collaborative Modeling and Simulation

Zhang Lin<sup>1</sup>, Liu Xinke<sup>2</sup>, Ma Liang<sup>3</sup>(1. Department of Missile, Dalian Warship Academy of PLA Navy, Dalian 116018, China;  
2. Department of Political Science, Dalian Warship Academy of PLA Navy, Dalian 116018, China;  
3. Department of Surface Ship Command, Dalian Warship Academy of PLA Navy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** Aiming at the limitation of traditional air defense combat which based on platform, established ship to air missile network collaborative anti-missile damage zone airspace model in ship formation collaborative anti-missile combat. Combined with ship-to-air missile weapon system\damage zone concept, use analysis method to establish ship-to-air missile boundary model under single ship missile guidance conditions. Based on this, established ship formation damage zone boundary model under collaborative guidance condition, then carry out simulation calculation. The simulation results show that the ship to air missile network collaborative anti-missile combat can effectively expand collaborative anti-missile damage zone airspace of ship internal ship-to-air missile weapon system, and make full use of advantages of collaborative anti-missile, and provides theory reference for commander in air defense combat formation configuration.

**Keywords:** ship to air missile network; collaborative anti-missile; damage zone airspace; damage zone boundary model

## 0 引言

未来防空作战将面临由多种空袭武器及其伴随的电磁干扰组成的复杂多变的一体化空袭体系, 使得独立依靠单个防空系统摧毁来袭的敌方导弹或飞机的概率大大降低, 未来的攻防对抗不仅仅是平台与平台之间的对抗, 更是系统与系统、体系与体系之间的对抗。水面舰艇编队协同反导是在编队指挥控制网的协同指挥控制下, 以编队雷达网提供信息保障为基础, 通过调整舰空导弹网络防空火力节点的数量组成及空间部署, 形成舰空导弹网络化的协同作战态势<sup>[1]</sup>。综合运用各种防空火力协同方式, 构建舰空导弹网络化防空火力配系, 使舰空导弹网络化火力防线对目标的拦截概率最大, 从而提高整个编队的防空作战效能。

传统的以平台为中心的防空作战中, 对目标的探测、导弹的发射、中制导和末制导都在同一平台

上进行, 使用该平台的设备和数据。这种单平台的作战方式使导弹的作战范围(与杀伤区密切相关)依赖于发射平台探测和跟踪目标的能力。区别于传统的以平台为中心的防空作战, 舰艇编队协同反导作战中导弹的发射和制导过程可以利用不同平台获取的数据完成; 因此, 笔者对作战单元之间实现极短延时的火控级战术信息共享进行研究。

## 1 舰空导弹网络化协同反导

水面舰艇编队协同防空的杀伤区空域取决于编队协同防空舰艇的规模和编成, 当编队内部协同防空舰艇较多时, 整体杀伤区空域的确定就需对每个防空舰艇的杀伤区空域进行“叠加”, 这样计算网络化协同制导条件下杀伤区空域是个复杂的过程。

舰空导弹网络化协同反导能增大协同杀伤区的空域, 通过对舰空导弹杀伤区概念的扩展, 可类似的给出网络化协同制导杀伤区的概念<sup>[2-3]</sup>。一般水面

收稿日期: 2013-08-06; 修回日期: 2013-09-04

基金项目: 海军大连舰艇学院科研发展基金(2012024)

作者简介: 张林(1981—), 男, 河南人, 博士, 讲师, 从事导弹作战使用、导弹突防与对抗研究。

舰艇防空反导作战以舰艇为中心，其杀伤区受到舰载雷达视距范围的限制。而在网络化协同制导的条件下，网络化协同制导的舰空导弹杀伤区有可能超出单舰的雷达视距范围从而进行超视距拦截<sup>[4]</sup>。

研究单舰的杀伤区空域是编队防空的基础，根据不同防空类型，可把编队防空杀伤区简化为具有协同能力的两舰或三舰协同杀伤区，对于不同的防空态势，可选取相应的协同制导的杀伤区空域模型。

在协同作战信息网络的支持下，各舰艇平台之间共享目标信息协同防空<sup>[5]</sup>，其优势是可以利用舰空导弹网络化的感知系统获取来袭目标的信息，网络中的指控系统可以根据我舰艇编队的防空队形，优化选择适合防空的作战兵力进行拦截，其他防空兵力也可进行协同防空从而提高整体作战效能。

图 1 为多个舰艇平台之间一种作战协同方式的示意图。

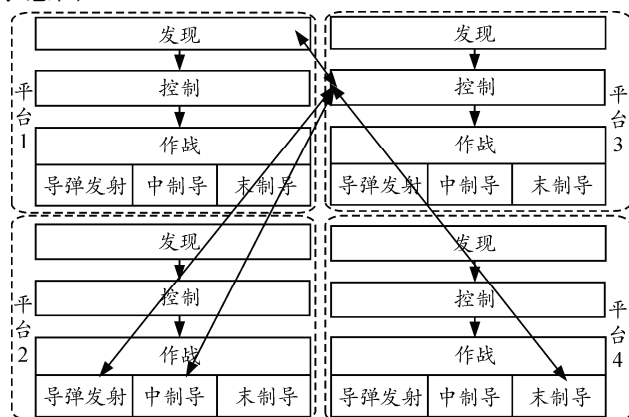


图 1 舰艇平台间协同作战示意图

图 1 中显示，平台 1 首先发现目标，并将目标信息传给指挥平台 3。由平台 3 负责指挥控制整个作战过程，给合适的平台分配导弹的发射和制导任务。而作战使用的是平台 2 的舰空导弹，且最后的末制导由平台 4 完成。

## 2 协同杀伤区空域建模

### 2.1 单舰制导下舰空导弹杀伤区边界模型

建立如图 2 所示的坐标系，Y 轴的反方向为目标来袭方向，X 轴表示目标航路捷径；O 为舰空导弹发射点在海平面内投影的位置，可认为是舰艇的位置； $R_0$  表示杀伤区近界到发射点的距离，即舰空导弹的引入距离，假设已知； $R_1$  表示舰艇对目标的跟踪制导半径，由舰载雷达安装高度  $h_1$  和目标飞行高度  $h_2$  决定； $v_m$  为目标速度， $v_T$  为导弹速度，令  $k$  为两者的比值，有：

$$k = v_T / v_m \quad (1)$$

单舰杀伤区边界基本形状如图 2 所示。此时不考虑目标高度，近似在水平面内处理时，与没有协同制导的一般情况下的舰空导弹杀伤区低界相同。

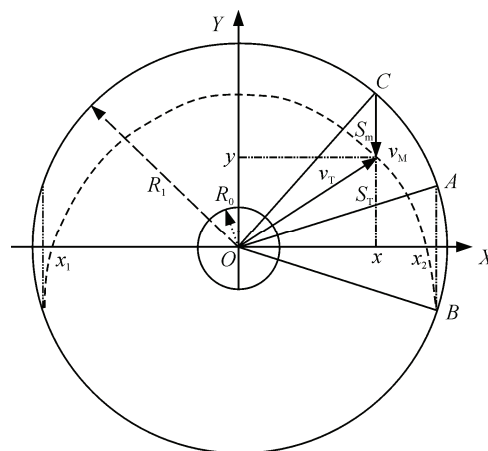


图 2 导弹载舰杀伤区边界计算

图 2 中，虚线所围区域表示杀伤区边界，由 2 部分组成：一部分为载舰雷达跟踪制导圆的一段弧，由  $R_1$  确定；另一部分由相遇点的连线组成。

如图 2 所示，计算过程如下：一旦发现目标就发射导弹，两者同时按各自方向分别以速度  $v_T$  和  $v_m$  运动，经过时间  $t$ ，飞至相遇点。此时：

$$\begin{cases} S_m = v_m \cdot t \\ S_T = v_T \cdot t \end{cases} \quad (2)$$

其中： $S_T$  为相遇点到原点的长度，即舰空导弹时间  $t$  内飞行的距离； $S_m$  为目标时间  $t$  内飞行的距离。相遇点的连线就能描绘出迎击时的杀伤区边界。

为了描绘相遇点连线，首先确定相遇点的航路捷径范围，即图 2 中的  $x_1, x_2$  的值。在等腰三角形  $AOB$  中有：

$$\begin{cases} OA = OB = R_1 \\ AB = S_m \\ OB = S_T = R_1 \end{cases} \quad (3)$$

结合式 (1) 和式 (2)，通过计算得到  $S_1$  所在的目标航路捷径的范围可由下式确定：

$$x^2 = R_1^2 (1 - 1/4k^2) \quad (4)$$

其中  $x_1, x_2$  为方程 (3) 的解，并约定正值为  $x_2$  负值为  $x_1$ 。

当  $x$  在  $x_1 \leq x \leq x_2$  内取值时，在三角形  $xOC$  中有：

$$\begin{cases} S_T^2 = Ox^2 + Oy^2 \\ R_1^2 = Ox^2 + xC^2 \\ xC = S_m + Oy \end{cases} \quad (5)$$

其中  $Ox = x, Oy = y$ ，同时结合式 (1) 和式 (2)，得

到  $S_T$  满足下式:

$$\sqrt{R_1^2 - x^2} - S_T/k = \sqrt{S_T^2 - x^2} \quad (6)$$

若设相遇点的坐标为  $(x, y)$ , 则有下列式成立:

$$S_T^2 = x^2 + y^2 \quad (7)$$

由式 (6) 和式 (7) 可以确定  $x, y$  的关系, 进而描绘出导弹载舰杀伤区边界。导弹载舰杀伤区边界的计算相对比较简单, 并且杀伤区相对 Y 轴对称。

### 2.2 协同制导杀伤区模型

根据现有数据链的要求, 为保证编队之间的通信和制导, 舰艇都必须处在彼此雷达视距范围之内, 相对距离  $L$  应满足<sup>[6]</sup>:

$$L \leq \min\{R_1, R_2\} \quad (8)$$

其中  $R_2$  为舰载雷达跟踪制导距离。受地球曲率的影响, 雷达最大发现距离为

$$R = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (9)$$

如图 3 所示,  $O'$  为协同制导载体的跟踪制导雷达在海平面内投影的位置;  $\alpha$  为  $O'O$  连线与 Y 轴的夹角,  $O'$  在第 1 象限内时,  $\alpha$  为正,  $O'$  在第 2 象限内时,  $\alpha$  为负;  $L$  为两者在海平面内的投影的相对距离<sup>[7]</sup>。

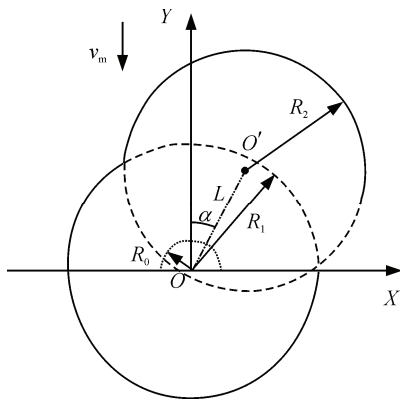


图 3 协同作战复合视距示意图

由图 3 的复合视距可见, 此时杀伤区可分为 2 部分, 一部分是以导弹发射舰艇为基准的杀伤区, 另一部分是以协同制导舰艇为基准的杀伤区。但在一些情况下可能出现两者协同时才会有的一部分。

如图 4 所示, 一旦发现目标就对其进行导弹拦截, 舰空导弹与反舰导弹同时按各自方向分别以速度  $v_m$  和  $v_T$  运动, 经过时间  $t$ , 飞至相遇点。此时:

$$\begin{cases} S_m = v_m \cdot t \\ S_T = v_T \cdot t \end{cases} \quad (10)$$

通过对相遇点的连线就能描绘出迎击时的杀伤区边界。同时, 根据杀伤区的定义可知, 追击时的

边界由可复合视距的下半圆的一段弧确定, 如图 4 圆  $O'$  中  $x_1, x_2$  之间的短弧部分。

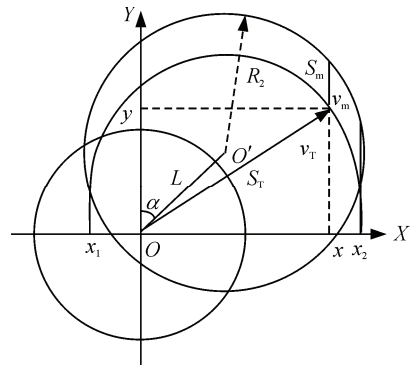


图 4 协同制导杀伤区计算原理示意图

协同制导载体的杀伤区是指协同制导载体对导弹载舰发射的导弹进行目标指示和协同制导, 从而对来袭目标进行拦截, 该杀伤区是以协同制导载体的位置为基准的一个区域, 是传统舰空导弹杀伤区概念的扩展。基本形状如图 5 所示之虚线所围区域。

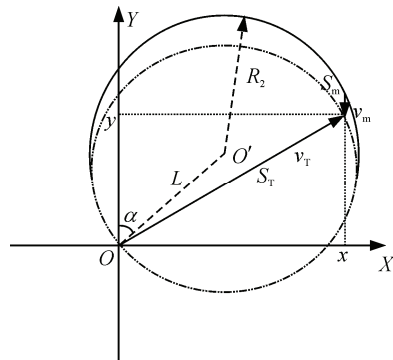


图 5 协同制导载体杀伤区边界示意图

此时的杀伤区边界也可分为 2 部分: 一部分为相遇点的连线, 另一部分为协同制导载体的雷达跟踪制导下半圆的一段圆弧。

首先计算相遇点坐标  $(x, y)$ 。同样必须先计算出相遇点分布的航路捷径范围, 即图 6 中的  $x_1, x_2$  的值,  $x_1$  为负,  $x_2$  为正。

由图 6 中的几何关系可得如下关系式:

$$\begin{cases} S_T^2 = Ox_2^2 + Bx_2^2 \\ L \cos \alpha = CB + Bx_2 \\ CB = 1/2 S_m \\ \alpha x_2 = L \sin \alpha + O'C \\ R_2^2 = CB^2 + O'C^2 \end{cases} \quad (11)$$

结合式 (1) 和式 (2), 根据已知的相对位置关系  $\alpha$  和  $L$ , 以及协同制导载体对低空目标的跟踪制导半径  $R_2$ , 可以确定能够被协同制导载体雷达截获跟踪

的目标航路捷径范围<sup>[8]</sup>。可由式 (12) 求得：

$$\frac{\sqrt{R_2^2 - (x - L \sin \alpha)^2} + \sqrt{4k^2 R_2^2 - 4k^2 (x - L \sin \alpha)^2 - x^2}}{L \cos \alpha} = L \cos \alpha \quad (12)$$

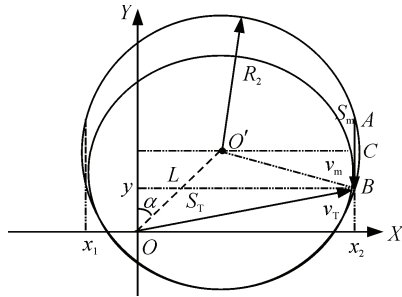


图 6 协同制导载体杀伤区航路捷径范围计算

解关于  $x$  方程可得正负 2 个根，正值为  $x_2$ ，负值为  $x_1$ 。在此航路捷径范围内，可先求得  $S_T$  满足的关系式，进而求得相遇点坐标  $(x, y)$ 。

根据图 7 中的几何关系可得：

$$\begin{cases} R_2^2 = AC^2 + W'C^2 \\ W'C = Wx - L \sin \alpha \\ AC = S_m + BC \\ BC = Bx - L \cos \alpha \\ S_T^2 = Bx^2 + Wx^2 \end{cases} \quad (13)$$

再与式 (1) 和式 (2) 联立，得到航路捷径  $x$  在  $x_1 \leq x \leq x_2$  内取值时， $S_T$  满足：

$$\sqrt{R_2^2 - (x - L \sin \alpha)^2} + L \cos \alpha - S_T/k = \sqrt{S_T^2 - x^2} \quad (14)$$

杀伤区边界的另一部分为协同制导载体的雷达跟踪制导下半圆的一段圆弧，如图 7 所示，假设其坐标点为  $(x, y)$ ，根据几何关系可得：

$$R_2^2 = (x - L \sin \alpha)^2 + (L \cos \alpha - y)^2 \quad (15)$$

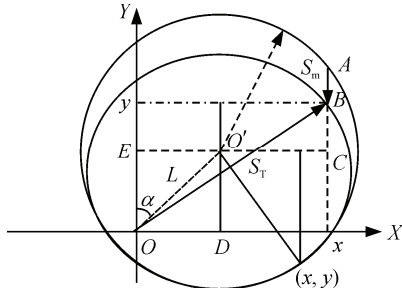


图 7 协同制导载体杀伤区边界计

由于协同制导载体杀伤区边界不是一个对称的区域<sup>[9]</sup>，所以对其计算比导弹载舰复杂。建立图 8 所示的坐标系，Y 轴的反方向为目标来袭方向，X 轴表示目标航路捷径； $O_1$  为舰空导弹发射点的位置， $O_3$  为侦察舰跟踪制导雷达的位置， $\alpha$  为两舰连线  $O_1 O_3$  与 Y 轴的夹角，第 1 象限内为正，第 2 象

限内为负； $W_3$  侦察舰的杀伤空域是两舰处于图 8 所示的相对位置， $W_3$  侦察舰利用  $W_1$  舰发射的导弹拦截来袭目标时的杀伤区。 $W_3$  侦察舰的杀伤区的基本形状如图 8 所示。 $R_0$  表示杀伤区近界到发射点的距离，即舰空导弹的引入距离； $R_1, R_3$  分别表示  $W_1$  舰和  $W_3$  舰对低空目标的跟踪制导半径。

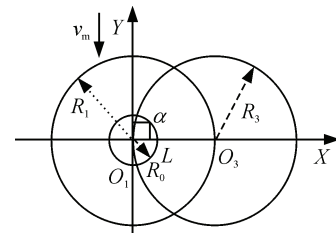


图 8 协同作战复合视距示意图

如图 9 所示， $R_3$  为  $W_3$  侦察舰雷达跟踪制导距离，图 9 中实线所围区表示杀伤空域。杀伤区边界为实线边界一部分为  $S_3$ ，另一部分为侦察舰雷达跟踪制导圆的一段弧。先计算边界  $S_3$ 。首先根据两舰的相对位置关系  $\alpha$  和  $L$ ，以及  $W_3$  侦察舰雷达跟踪制导距离  $R_3$ ，可以确定能够被  $W_3$  侦察舰雷达截获跟踪的目标的航路捷径的范围。取  $\alpha$  为  $\pi/2$ ，则  $x_1$  为 0， $x_2$  可由式 (16) 求得：

$$4k^2 x^2 - 2Lx(4k^2 - 1) + (4k^2 - 1)(L^2 - R_3^2) = 0 \quad (16)$$

在此航路捷径范围内，可求得  $S_3$ 。即航路捷径  $x$  取  $x_1 \leq x \leq x_2$  的值时， $S_3$  满足下式：

$$\sqrt{R_3^2 - (x - L)^2} - S_3/k = \sqrt{S_3^2 - x^2} \quad (17)$$

可求得  $S_3$  为：

$$S_3 = 3 \times \sqrt{R_3^2 - x^2 + 2xL - L^2} - \frac{27}{8}x + \sqrt{(L - x + R_3)(-L + x + R_3)} + \frac{3}{8} \times (9R_3^2 - x^2 + 18xL - 9L^2)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

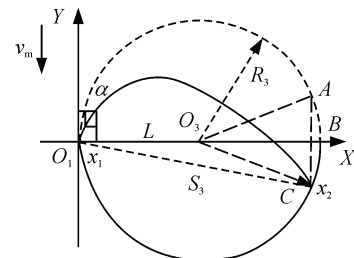


图 9  $W_3$  舰杀伤区低界示意图

设点  $(x, y)$  为侦察舰杀伤区边界上的点。根据图 9 有如下坐标关系：

$$S_3^2 = x^2 + y^2 \tag{19}$$

由式 (17) 和式 (19) 可以求得杀伤区上边界, 其方程为:

$$y = \begin{cases} \sqrt{S_3^2 - x^2} & x_1 \leq x < d \\ -\sqrt{S_3^2 - x^2} & d \leq x \leq x_2 \end{cases} \tag{20}$$

其中  $d = \frac{k}{2(k^2+1)}(2kL + 2\sqrt{k^2R_3^2 + R_3^2 - L^2})$ 。

由于  $W_3$  舰舰载雷达跟踪制导圆的边界方程为

$$(x - L)^2 + y^2 = R_3^2 \tag{21}$$

则可以求得杀伤区下边界的方程为

$$y = -\sqrt{R_3^2 - (x - L)^2} \quad x_1 \leq x \leq x_2 \tag{22}$$

杀伤区近界的方程为

$$y = \begin{cases} -\sqrt{R_0^2 - x^2} \\ \sqrt{R_0^2 - x^2} \end{cases} \quad -R_0 < x \leq R_0 \tag{23}$$

### 2.3 仿真计算及结果分析

将协同制导载体的水面舰艇称为侦察舰, 给出仿真初始条件: 舰载雷达安装高度均为  $h_1=0.02$  km, 反舰导弹飞行高度  $h_3=0.02$  km; 地球半径为 6 370 km, 单舰发射的杀伤区近界半径  $r=3$  km; 由上述模型得舰载雷达跟踪制导距离为  $R_1=R_2=R_3=22.35$  km; 舰空导弹与目标的速度之比  $k=3$ ; 舰空导弹有效射程为 120 km, 大于空中雷达平台探测半径。

按照建立数学模型的过程, 分别绘出不同条件下编内三舰协同制导下杀伤区, 得到图 10 和图 11。

图 10 和图 11 中阴影部分为通过应用几何关系建立的, 网络化协同制导舰空导弹抗击反舰导弹的杀伤区。第 1、2 象限内为迎击目标, 第 3、4 象限内为追击目标。

图 10 和图 11 是三艘舰艇协同反导时的杀伤区, 多艘舰艇协同反导杀伤区的仿真结果可与此类似。

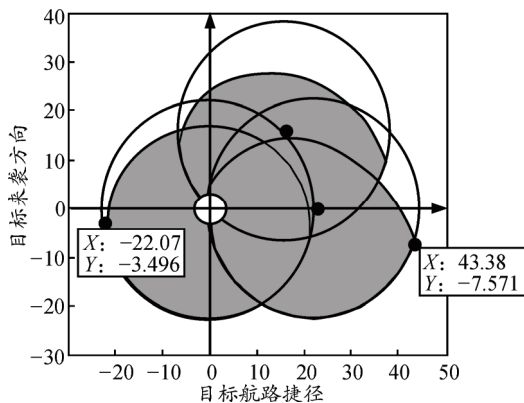


图 10  $\alpha = \pi/4$  时舰空导弹杀伤区

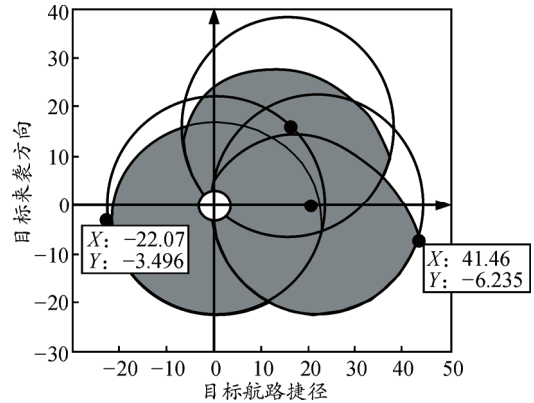


图 11  $\alpha = \pi/3$  时舰空导弹杀伤区

### 3 结束语

该舰空导弹反导解析方法能方便地建立两舰协同或多舰网络化协同制导舰空导弹低空反导的理论杀伤区, 但是其计算的前提是必须假设舰空导弹作匀速直线运动, 而舰空导弹拦截反舰导弹过程中, 舰空导弹实际做高速机动运动, 故不好处理。特别是伴随着反舰导弹采用超音速掠海飞行, 末段实施机动突防, 使得反舰导弹也大大提高了低空和超低空掠海攻击能力, 缩短了系统反应时间, 增强了其高速机动能力。下一步的研究工作将针对舰空导弹实施机动时对反舰导弹巡航段拦截过程, 构建低空反导杀伤区的模型方法。

### 参考文献:

- [1] 滕克难. 基于多 Agent 舰空导弹协同反导作战体系结构研究[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(3): 117-119.
- [2] 孙晓峰, 徐新林. 中远程舰空导弹禁危区探析[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(5): 559-563.
- [3] Cheng Shunwen. Very Long Range Anti-Air Missile Systems Design. 2003IEEE Aerospace Conference Proceedings: Volume 6 of 8.
- [4] 林晓蕾. 舰载超视距雷达发展综述[J]. 电子工程信息, 2003(6): 8-9.
- [5] 滕克难, 王国田. 舰空导弹系统原理与分析[M]. 北京: 解放军出版社, 2003: 78-79.
- [6] 马雷挺, 方立恭, 金钊, 等. 舰空导弹对飞机目标近快战发射区研究[J]. 现代防御技术, 2008, 36(3): 17-21.
- [7] Thomas R. Foard, Theater Air Defense Cornerstones[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2000, 21(3): 387-392.
- [8] 郭磊, 方立恭, 张德源. 增量比例导引规律仿真研究[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(2): 91-93.
- [9] 张春刚, 李博. 制导雷达对杀伤区边界的限制及其低空性能分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2003(6): 8-9.
- [10] 彭绍雄, 李学园, 袁洪武, 等. 舰空导弹双模复合制导交班误差模型分析[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 64-67.