

电子干扰下的编队防空探测距离及杀伤区*

姚跃亭, 赵建军, 杨利斌, 王毅

(海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

摘要:研究了电子干扰下的舰艇编队雷达探测距离及水平杀伤区。分析了有源压制干扰、无源干扰和分布式干扰下的雷达作用距离模型,给出了受雷达作用距离限制的舰空导弹杀伤区远界计算方法,并对电子干扰下编队协同防空时的雷达重叠探测区、导弹水平杀伤区及舰艇间距进行了仿真。分析表明:干扰情况下,编队的雷达威力范围下降了约30%,不具备全向攻击能力的舰空导弹水平杀伤区范围下降了约75%;抗击亚音速飞机类目标时,编队间距宜保持在16km。

关键词:电子干扰;雷达作用距离;杀伤区

中图分类号:TN972 **文献标志码:**A

Detection Range and Kill Zone of Fleet Air Defense under Electronic Jamming

YAO Yueting, ZHAO Jianjun, YANG Libin, WANG Yi

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

Abstract: In this essay, the radar detection range and anti-air missile horizontal kill zone in fleet coordinate air defense were studied. The radar detection range model under active blanket jamming, passive jamming and distributed jamming was analyzed. The far boundary of anti-air missile kill zone calculation algorithm was also given. Then the overlapped radar detection area, horizontal kill zone in fleet coordinate air defense and spacing length of ships under jamming were simulated. Results show that when jammed, the radar detection area reduces by 30%; ship-to-air missile kill zone area reduces almost by 75%. If targets are planes with subsonic speed, the distance between formations should be 16 kilometers.

Keywords: electronic jamming; radar detection range; kill zone

0 引言

现代空袭作战中,电子干扰已成为空袭方必不可少的手段。电子干扰的目的是影响防空探测设备的作用距离和探测概率等指标,压制甚至消除防空武器的作用,以提高空袭兵器的生存能力。舰艇编队以一定队形配置可以通过重叠的探测区和杀伤区来提高舰艇编队防空作战的效能。目前对舰空导弹武器系统的杀伤区及耦合杀伤区已有许多成果,但是,对在电子干扰下的编队协同防空探测区和杀伤区研究还不多。文中从电子干扰下的雷达跟踪距离模型入手,分析了干扰下的舰艇编队杀伤区远界计算方法,对编队雷达探测距离的形状、大小及重叠杀伤区纵深进行了仿真,对该纵深与编队舰艇间距的关系进行了研究。

1 电子干扰下的雷达作用距离模型

电子干扰能够对雷达的跟踪距离产生较大影响,

极大的压缩杀伤区的大小,从而使舰空导弹武器系统的杀伤区远界和高界大大减小。为简单起见,文中只研究水平杀伤区的远界。目前空袭中常用的电子干扰包括有源压制干扰和无源压制干扰。不同类型的干扰对雷达的探测影响程度不同。

1.1 有源压制干扰

现代空袭中目标流以导弹流和飞机、导弹流混合为主。空袭时,攻击方会进行远距离干扰,在导弹流中会携带拖曳式干扰机,而机载的自卫电子战设备更是层出不穷,因此,有源压制干扰从战术运用的角度来说包括远距离支援干扰、随队干扰和自卫干扰等。

远距离支援干扰的主要特点是干扰机功率较大,作用距离较远,一般在某一区域内巡航飞行,在掩护空袭编队的同时保护自己。此时雷达的最大作用距离模型为^[1-2]:

$$R_{\max} = \left(\frac{K_j P_r G_r^2 \sigma R_j^2 B_j}{4\pi\gamma P_j G_j G_r(\theta) B_r} \right)^{1/4} \quad (1)$$

式中: K_j 为目标功率信号的干信比,也称为压制系

* 收稿日期:2010-11-12

作者简介:姚跃亭(1980-),男,浙江兰溪人,讲师,博士研究生,研究方向:武器装备与作战指挥一体化。

数; P_r 为雷达发射功率; G_r 为雷达天线主瓣方向上的增益; σ 为目标的雷达信号反射面积; P_j 为干扰机发射功率; G_j 为干扰天线增益; γ_j 为干扰信号对雷达天线的极化系数; B_j 为干扰机频带宽度; B_r 为雷达频带宽度; R_j 为雷达距干扰机的距离; θ 为雷达与干扰机连线和雷达主瓣照射方向(或者雷达与目标连线)的夹角; $G_r(\theta)$ 为雷达天线在干扰机方向上的增益, 该增益可用下式求取:

$$G_r(\theta) = \begin{cases} G_r & 0 \leq |\theta| \leq \theta_{0.5}/2 \\ K \left(\frac{\theta_{0.5}}{\theta}\right)^2 G_r & \theta_{0.5}/2 \leq |\theta| \leq \pi/2 \\ K \left(\frac{\theta_{0.5}}{90}\right)^2 G_r & \pi/2 \leq |\theta| \leq \pi \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\theta_{0.5}$ 为雷达主瓣波束半功率点宽度; K 为常数, 对于高增益方向性天线, $K = 0.07 \sim 0.1$, 对于波束较宽、低增益的天线, $K = 0.04 \sim 0.06$ 。

随队干扰不但会引起雷达探测距离的变化, 还可能由于干扰机与被保护目标的距离过近造成雷达测角干扰。对测角的干扰, 文中不作深入研究。随队干扰机在其干扰距离和干扰增益上对探测距离产生了影响, 满足主瓣干扰的条件。则^[3]:

$$R_{\max} = \left(\frac{K_j P_r G_r \sigma}{4\pi \gamma_j P_j G_j}\right)^{1/2} \quad (3)$$

目标搜索指示雷达一般为脉冲多普勒三坐标雷达, 因此, 自卫干扰条件下, 目标搜索指示雷达和非单脉冲体制跟踪雷达的最大作用距离与随队干扰一样, 其距离模型与随队干扰距离模型一致。

1.2 无源压制干扰

箔条干扰是无源干扰的典型代表。箔条干扰下雷达探测距离模型为^[4]:

$$R_{\max} = \left(\frac{2\sigma V}{N c \tau \theta_a \theta_\phi S_{N,\min} \bar{\sigma}_{\lambda/2}}\right)^{1/2} \quad (4)$$

式中: σ 为目标的反射面积; V 为箔条散布的空间体积; $\bar{\sigma}_{\lambda/2}$ 为每根箔条的有效反射面积; N 为箔条根数; c

为电磁传播速度; τ 为雷达脉冲宽度; θ_a 、 θ_ϕ 分别为雷达的水平、垂直半功率波瓣宽度; $S_{N,\min}$ 为雷达能够识别的最小信噪比。

1.3 分布式干扰

分布式干扰是攻击方为了掩护特定区域内的目标, 将多个干扰设备进行分布式部署, 散布在被干扰目标的空域内, 从而达到多重干扰的目的。当攻击方进行远距离分布式干扰时, 对雷达网的影响尤其严重。分布式干扰时雷达探测距离为^[5]:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_r G_r^2 \sigma}{4\pi \gamma_j B_r K_j \sum_{i=1}^n \frac{P_{ji} G_{ji}(\phi_i) G_r(\theta_i)}{R_i^2 B_i}}\right]^{1/4} \quad (5)$$

式中: n 为干扰机数目, $G_i(\phi_i)$ 可参考文献进行求解。

2 干扰下的舰艇编队杀伤区远界

2.1 单舰杀伤区远界^[6]

由于电子干扰的影响, 雷达的探测距离受到压缩, 此时, 若探测距离大于发射区远界, 则杀伤区远界不受影响; 若探测距离小于发射区远界, 则杀伤区远界必然减小。假设目标水平等速直线飞行, 以雷达部署点为原点, 建立地面大地参数直角坐标系。 M_0 、 M_1 和 M_2 均为目标经过的航迹点在水平面的投影。当目标位于 T_0 点时, 雷达发现目标; 目标飞到 T_1 点时, 舰艇发射导弹; T_2 点为弹目遭遇点。干扰下的舰空导弹抗击目标几何关系如图 1 所示。则有:

$$\begin{cases} \|OM_0\| = \sqrt{R_{\max}^2 - H_t^2 - P_t^2} \\ \|OM_1\| = \|OM_0\| - v_t t_{fy} \\ \|OM_2\| = \|OM_0\| - v_t (t_{fy} + t_{fx}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: H_t 为目标高度; P_t 为目标航路捷径; v_t 为目标飞度; t_{fy} 为系统反应时间; t_{fx} 为导弹的飞行时间。

依据弹目遭遇点的内涵和几何关系, 可求得舰空导弹的飞行时间满足:

$$t_{fx} = \frac{-v_m \|OM_1\| + \sqrt{v_t^2 \|OM_1\|^2 + (v_m^2 - v_t^2)(H_t^2 + P_t^2 + \|OM_1\|^2)}}{v_m^2 - v_t^2} \quad (7)$$

式中: v_m 为舰空导弹平均飞行速度。

联立式(6)和式(7), 可得到干扰下的水平杀伤区远界 $\|OM_2\|$ 。

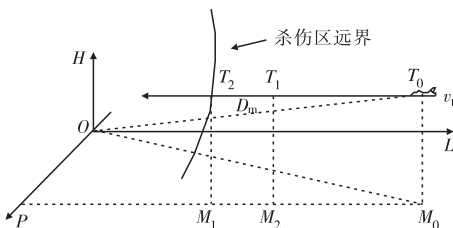


图 1 舰空导弹抗击目标几何关系图

2.2 编队重叠杀伤区远界

舰艇编队防空时, 以一定的队形将编队内相近射程的防空武器系统在横向上进行重叠配置, 在重点部署区域将同型或异型的火力单元杀伤区进行重叠, 能改善火力结构, 提高集火能力, 特别是在敌方使用电子压制兵器和其它对抗方法条件下, 更能达到上述目的, 从而提高重点方位和区域的防空能力。电子干扰下线形配置的典型舰艇编队位置关系如图 2 所示。

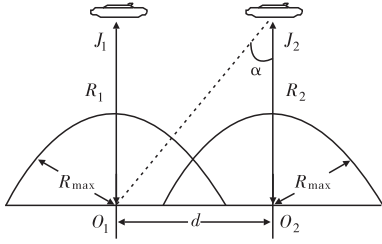


图 2 电子干扰下线形配置的舰艇编队位置关系

图 2 中, O_1 、 O_2 为编队的雷达部署点位置, 两舰间距为 d , J_1 、 J_2 为分布式配置、作小范围盘旋运动的远距离支援干扰机, 与 O_1 、 O_2 舰的距离分别为 R_1 、 R_2 。由于干扰机的发射功率较大, 每舰的探测雷达同时受 2 部干扰机作用。此时, 1 号干扰机作用下 O_1 舰雷达探测距离仍可用式(1)和式(2)求解。2 号干扰机与 O_1 舰的雷达主瓣方向夹角为 α , 且 $\alpha = \arctan(d/R_{j1})$ 。令 $\theta \in [0, 2\pi]$, 则式(2)变为:

$$G_r(\theta) =$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} K \left(\frac{\theta_{0.5}}{\alpha - \theta} \right)^2 G_r & \theta \in \left[0, \alpha - \frac{\theta_{0.5}}{2} \right) \\ G_r & \theta \in \left[\alpha - \frac{\theta_{0.5}}{2}, \alpha + \frac{\theta_{0.5}}{2} \right) \\ K \left(\frac{\theta_{0.5}}{\theta - \alpha} \right)^2 G_r & \theta \in \left[\alpha + \frac{\theta_{0.5}}{2}, \alpha + \frac{\pi}{2} \right) \\ K \left(\frac{\theta_{0.5}}{90} \right)^2 G_r & \theta \in \left[\alpha + \frac{\pi}{2}, \alpha + \frac{3\pi}{2} \right) \\ K \left(\frac{\theta_{0.5}}{2\pi + \alpha - \theta} \right)^2 G_r & \theta \in \left[\alpha + \frac{3\pi}{2}, 2\pi \right) \end{array} \right. \quad (8)$$

同理, 对 $G_j(\phi_i)$ 进行相应改变, 再依据式(1), 可求得 O_1 舰雷达在 2 部干扰机同时干扰下的作用距离。对 O_2 舰亦作同样处理, 将得到的两舰雷达作用距离进行综合, 可得到间隔距离为 d 的双舰编队在 2 部干扰机干扰下的雷达威力范围。利用式(6)~式(7)可求得双舰编队防空时的重叠杀伤区远界及其纵深。

3 仿真分析

为简化计算, 文中假设编队成横向上的线列队形, 看齐角为 90° , 装备同型号的舰空导弹和跟踪雷达, 认为舰空导弹具有全向攻击能力而无须考虑其射界。干扰机为远距离支援干扰机, 其类型、参数以及与两舰的距离一致。令: $P_r = 80\text{kW}$, $G_r = 40\text{dB}$, $\lambda = 5\text{cm}$, $L = 8\text{dB}$, $B_r = 2\text{MHz}$, $v_m = 1200\text{m/s}$; $P_j = 5\text{kW}$, $\gamma_j = 0.5$, $L_j = 3\text{dB}$, $B_j = 10\text{MHz}$; $v_i = 300\text{m/s}$, $\sigma = 3\text{m}^2$ 。

图 3 为 2 部远距离支援干扰机同时作用下的单部雷达威力范围。由图 3 可知: 受到干扰时, 跟踪雷达威力范围在干扰机作用的正面被极大的压缩, 当雷达与目标连线位于正对干扰机的雷达主瓣波束宽度范围

内时, 作用距离极小, 已经很难对目标实施抗击。

当双舰编队以间隔距离 d 进行协同防空时, 受 2 部干扰机干扰的雷达威力范围如图 4 所示。由图 4 可知, 当两舰间隔距离为 30km, 无干扰的雷达重叠探测区域纵深约为 31.5km, 双干扰机同时工作时, 重叠探测区域纵深仅有约 10km。依据式(6)~式(7)得到如图 5 所示的双舰编队在 2 部干扰机下的协同杀伤区。在无干扰时, 协同杀伤区的纵深约为 22km, 同时在 2 部干扰机的干扰下, 该纵深被压缩至 9.2km。

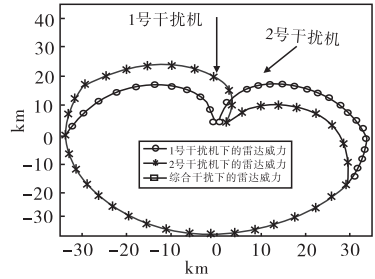


图 3 远距离支援干扰下

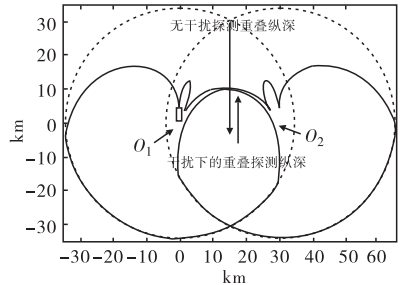


图 4 双干扰机下的双舰编队雷达威力范围

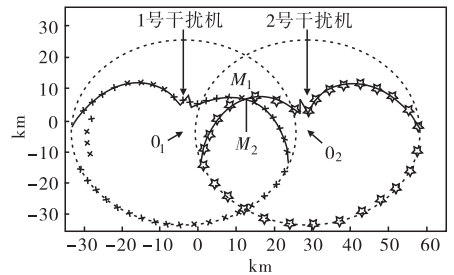


图 5 双干扰机下的双舰编队协同杀伤区

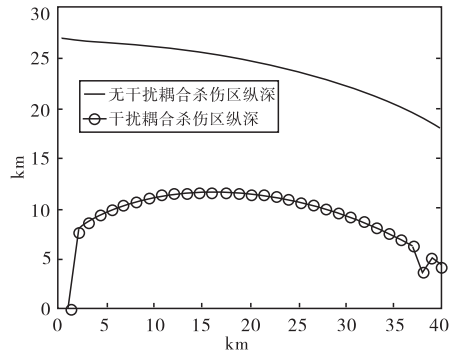


图 6 双舰编队协同杀伤区纵深与间距关系图

为更加精确的描述舰艇编队探测区和杀伤区的变化情况, 利用积分法^[5]对图 3~图 5 求得曲线所包围的面积, 与未受干扰时的探测面积和杀伤面积相

(下转第 240 页)

(3): 575—578.

- [6] 郭伟, 赵亦工, 谢振华, 等. 基于非参数统计的云层背景描述与红外弱小目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(5): 383—388.
- [7] 武斌, 姬红兵, 郭辉. 一种新的红外弱小运动目标检测算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2009,

36(1): 116—121.

- [8] 杨进, 杨杰, 王芳林. 一种改进的红外多目标跟踪算法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(3): 437—442.
- [9] Riedl M J. Optical design fundamentals for infrared systems[M]. 2nd. Washington: SPIE Press, 2001.

(上接第 236 页)

比,可知,在单部干扰机作用下,雷达威力范围下降了约 30%;在 2 部干扰机的同时干扰下,单部雷达的威力范围比无干扰时减小了约 35%。若假设舰空导弹武器系统不具备尾追杀伤能力,且考虑其射界约束,则图 3~图 5 中的负半轴所示区域不再存在,此时,探测区及杀伤区威力范围较无干扰时分别下降了约 35%和 75%。

双舰编队的间隔距离对编队的协同杀伤区有较大影响。改变间隔距离大小,可得到如图 6 所示的协同杀伤区纵深与间距的变化关系图。

无干扰时,协同杀伤区纵深与舰空导弹杀伤区远界和两舰间距相关。有干扰时,依据式(2)可知,当两舰间距非常近时, θ 角较小,在目标来袭方向上双舰雷达均受到严重干扰,探测距离接近于 0,使杀伤区纵深也接近 0。在图 2 中, d 增大, α 增大, O_2 舰与第一部干扰机的距离增大,变相的增大了探测范围和杀伤范围,在间距约为 16km 时,协同杀伤区纵深达到最大的 11.6km。因此,在 2 部干扰机的远距离支援干扰下,双舰编队抗击亚音速飞行的飞机目标时,舰舰间距宜保持在 10~20km 的范围内,超出或低于该范围,则很难取得理想的抗击效果。

4 总结

为了分析电子干扰下的舰艇编队防空雷达探测区和舰空导弹杀伤区特性,文中研究了典型电子干扰方式下雷达跟踪距离模型,并给出了基于雷达跟踪距离的舰空导弹杀伤区远界计算方法,并对舰艇编队的重叠探测区和重叠杀伤区进行了仿真分析,对干扰下的雷达威力范围和协同杀伤区相对无干扰时的下降程度进行了量化,得到了一些有益的结论。

参考文献:

- [1] 赵国庆. 雷达电子对抗原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999.
- [2] 穆富岭,罗鹏程,周经纶. 空中有源干扰下的防空雷达探测距离模型研究[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(2):276—279.
- [3] 罗金亮,汤金平,党立坤,等. 压制干扰下火控雷达最大探测距离的评估[J]. 舰船电子对抗,2008,31(5):41—43.
- [4] 李潮,张多林,刘付显. 压制干扰对地空导弹武器系统杀伤区的影响[J]. 现代防御技术,2008,36(6):54—56.
- [5] 曹永辉,李侠,蔡万勇. 分布式干扰条件下的雷达网探测威力研究[J]. 中国雷达,2008,36(6):71—75.
- [6] 丁晓东,刘毅,李为民. 多重电子干扰下地空导弹杀伤区计算方法[J]. 现代防御技术,2008(3):14—17.