

雷达干扰对防空导弹射击效能的影响分析*

周哲帅, 方红兵

(解放军电子工程学院, 合肥 230037)

摘要:在研究雷达受干扰时发现概率及探测距离变化的基础上,分析了干扰对防空导弹射击次数及合成杀伤概率的影响,建立了角度闪烁干扰时防空导弹一次射击对目标杀伤概率的计算模型。通过设定仿真场景,验证了模型的有效性,研究结果可用于评估干扰条件下防空导弹武器系统的作战效能。

关键词:雷达干扰;射击效能;杀伤概率;探测距离;闪烁干扰

中图分类号:TJ761.13 文献标志码:A

The Analysis of Influence of Radar Jamming on Shooting Effectiveness of Air-defense Missile

ZHOU Zheshuai, FANG Hongbing

(Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: Based on the study of the changes of detection probability and detection distance when radar is jammed, the influence of air-defense missile on target shooting degrees and synthetic kill probability under jamming condition was analyzed, the calculation model of kill probability which air-defense missile one shot on target when radar jammed by angle blinking jamming was built. The effectiveness of the model was demonstrated by setting simulation scene; the result could be applied to evaluate operational effectiveness of air-defense weapon system in jamming condition.

Keywords: radar jamming; shooting effectiveness; kill probability; detection distance; blinking jamming

0 引言

电子设备在军事领域的广泛应用一方面增强了武器系统的作战效能,另一方面又构成了复杂的战场电磁环境,电子设备和信息化武器系统也会受到各种电子干扰的威胁。因此,如何评估电子干扰对作战毁伤的影响是十分有意义的。

目前,国内外文献对各种干扰条件下雷达的发现概率、探测距离研究较多,而对整个武器系统在干扰条件下射击效能受到的影响研究不够深入。文中以防空作战为背景,分析雷达干扰对射击效能的影响。

1 雷达干扰对预警探测效能的影响分析

1.1 警戒雷达对目标的发现概率

发现目标是防空武器系统进行射击的前提。在扫描过程中,当运动目标落入雷达波瓣时,雷达与目标发生能量接触,在雷达荧光屏上能否检测出目标信号,取决于信号能量与噪声能量之比的大小。警戒雷

达受到干扰时,发现概率取决于单个脉冲的信干比^[1-3],有:

$$P_{ji} = \begin{cases} 1 - \Phi\left(\frac{4.75 - \sqrt{n}S_j}{1 + S_j}\right), \text{捷变频、频率分集雷达} \\ \exp\left(-\frac{4.75}{\sqrt{n}S_j}\right), \text{常规雷达} \\ \exp\left(-\frac{9.5}{\sqrt{n}S_j}\right), \text{PD 雷达} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{ji} 为警戒雷达对目标的发现概率; n 为一次扫描的脉冲积累数; S_j 为单个脉冲的信干比; $\Phi(x) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt。$$

1.2 干扰条件下雷达的探测距离

1.2.1 自卫干扰时雷达的探测距离

当干扰机置于被保护目标上,360°对雷达进行自卫干扰。由于雷达跟踪目标主瓣波束始终指向目标,

* 收稿日期:2011-03-03

基金项目:电子工程学院博士生创新基金(2009YB025)资助

作者简介:周哲帅(1984-),男,浙江兰溪人,博士研究生,研究方向:效能分析与评估。

干扰信号由主瓣进入雷达接收机,故雷达对目标探测距离缩小为^[4]:

$$R_{j,\min} = \left(\frac{K_j P_i G_r \sigma}{4\pi\gamma_j P_j G_j} \right)^{1/2} \quad (2)$$

1.2.2 远距离支援干扰时雷达的探测距离

远距离支援干扰是属于干扰机不配置在目标上的情况,以雷达为极点,雷达与干扰机的连线为极轴,建立极坐标系。在 θ 方向上雷达探测距离被压缩为^[5]:

$$R_{j,\min}^2(\theta) = \begin{cases} R_0 R_j & |\theta| \leq \theta_{0.5}/2 \\ \frac{R_0 R_j}{\sqrt{q}\theta_{0.5}} \cdot |\theta| & \theta_{0.5}/2 < |\theta| \leq 90^\circ \\ \frac{90R_0 R_j}{\sqrt{q}\theta_{0.5}} & 90^\circ < |\theta| \leq 180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

2 雷达干扰对合成抗击效能的影响分析

雷达干扰对防空兵合成抗击效能的影响最终体现在防空导弹对目标合成杀伤概率的影响。在雷达干扰条件下,由于防空火力单元发现概率和探测距离的减小,使得对目标的抗击次数也相应的减少,从而导致防空导弹对目标的合成杀伤概率降低。

2.1 防空导弹对目标的射击次数

在无干扰的情况下,防空导弹对目标可能预期的射击次数为:

$$n_0 = Q \left\langle \frac{\min(D_{sh,\max}, R_{\max}) - D_{sh,\min}}{V_c \cdot t_s} + 1 \right\rangle \quad (4)$$

式中: $D_{sh,\min}$ 为导弹发射区近界; $D_{sh,\max}$ 为导弹发射区远界; R_{\max} 为雷达最大作用距离; V_c 为目标飞行速度; t_s 为导弹平均射击周期; $\langle \cdot \rangle$ 为下取整运算; Q 为导弹在各航向角射击可能性系数。

当雷达受到干扰时,目标进入雷达探测区后,防空导弹射击目标的预计次数为:

$$n_{0,j} = Q_j \left\langle \frac{\min(D_{sh,\max}, R_{j,\min}) - D_{sh,\min}}{V_c \cdot t_s} + 1 \right\rangle \quad (5)$$

式中 $R_{j,\min}$ 为干扰条件下雷达最大探测距离。当 $R_{j,\min} \leq D_{sh,\min}$ 时,取 $Q_j = 0$ 。

2.2 防空导弹对目标的合成杀伤概率

在无干扰的情况下,防空导弹对目标的合成杀伤概率为:

$$W_{0,\Sigma} = 1 - (1 - W_0)^{n_0} \quad (6)$$

式中 W_0 为无干扰时,防空导弹对目标一次射击的杀伤概率。

当雷达受到干扰时,防空导弹对目标的合成杀伤概率为:

$$W_{j,\Sigma} = 1 - (1 - W_j)^{n_{0,j}} \quad (7)$$

式中 W_j 为受到干扰时,一次射击对目标的杀伤概率。

3 雷达干扰对一次射击杀伤概率的影响

3.1 无干扰时的杀伤概率

破片杀伤方式的导弹,一次射击的杀伤概率为^[6-7]:

$$W_0 = 1 - \exp\left(-\frac{R_r^2}{2\alpha_r}\right) \quad (8)$$

式中: R_r 为导弹对目标的杀伤半径; α_r 为防空导弹射弹散布均方根误差。

命中杀伤方式的导弹,将目标被命中面等效为一个圆。要保证导弹能够毁伤目标,其弹着点 (x, y) 必须落在在杀伤半径内,则一次射击的杀伤概率为:

$$W_0 = P\{-R_r \leq x \leq R_r\} \cdot P\{-R_r \leq y \leq R_r\} = 4\left[\Phi_0\left(\frac{R_r}{\alpha_r}\right)\right]^2 \quad (9)$$

式中, $\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$ 。

3.2 角度闪烁干扰时防空导弹的杀伤概率

文中考虑双机编队对火控制导雷达实施闪烁干扰相互保护的情形,如图 1 所示。

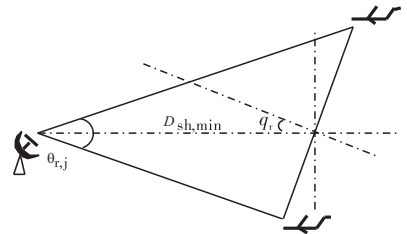


图 1 双机飞行闪烁干扰示意图

1) 在受到闪烁干扰时,制导雷达角度分辨率的增加量 $\Delta\theta_{r,j}$

可以用以下经验公式^[8]计算:

$$\Delta\theta_{r,j} = \theta_r \frac{\sqrt{P_j}}{\sqrt{P_s} + \sqrt{P_j}} = \theta_r \frac{\sqrt{J_s}}{1 + \sqrt{J_s}} \quad (10)$$

式中 θ_r 为制导雷达天线主瓣宽度。

于是,制导雷达角度跟踪系统分辨角增加为:

$$\theta_{r,j} = \theta_r + \Delta\theta_{r,j} = \theta_r \left(\frac{1 + 2\sqrt{J_s}}{1 + \sqrt{J_s}} \right) \quad (11)$$

在实际计算中,若 $J_s \gg 1$ 时,有:

$$\theta_{r,j} \approx 2\theta_r \quad (12)$$

2) 目标双机闪烁干扰的最佳基线距离对配有遥控指挥的系统(如目标跟踪雷达)的防

空导弹进行双机闪烁干扰时,根据图 1 中的几何关系容易得出双机间的最佳基线距离 L_{opt} (单位:m) 为:

$$L_{\text{opt}} = D_{\text{sh},\text{min}} \frac{\pi\theta_{r,j}}{180 \cdot |\cos q_r|} \quad (13)$$

式中 q_r 为目标相对于雷达的航向角。

对配有自寻系统(如主动、半主动末制导雷达)的制导导弹进行双机闪烁干扰时,根据寻的导弹的动态特性,可以将导弹的横向运动看成加速度为 a_{xd} 的匀加速运动,有:

$$a_{\text{xd}} = a_u g n_r \quad (14)$$

式中: $a_u = 0.5 \sim 0.7$ 为导弹惯性系数; $g = 9.8\text{m/s}^2$ 为重力加速度; n_r 为在被掩护飞机的高度上,导弹允许的过载。

于是最佳基线距离应满足^[9]:

$$\left(\frac{V_{\Sigma} \cdot \theta_{r,j}}{57.3}\right)^2 = 2a_{\text{xd}}L_{\text{opt}} |\cos q_r| \quad (15)$$

式中 V_{Σ} 为导弹与被掩护飞机的接近速度。

式(14)和式(15)联立可以得到双机间最佳基线表达式为:

$$L_{\text{opt}} = \frac{1.52 \times 10^{-4} (V_{\Sigma} \cdot \theta_{r,j})^2}{a_u g n_r \cdot |\cos q_r|} \quad (16)$$

3) 防空导弹射击目标的脱靶量 d_j

配有遥控指挥系统的导弹,对每个目标的脱靶量应是掩护目标到双机质心的距离,它近似等于可见基线的一半:

$$d_j = \frac{L_c}{2} |\cos q_r| \quad (17)$$

式中 L_c 为双机距离(m)。

对于自寻的导弹,一旦分辨出目标和干扰器后,可以按自导方式去跟踪真目标,此时要对初始脱靶量进行补充修正计算,有修正脱靶量 d'_j :

$$d'_j = d_j - \Delta d_j = \frac{L_c}{2} \cdot |\cos q_r| \cdot \left(1 - \frac{L_c}{2L_{\text{opt}}}\right) \quad (18)$$

式中 Δd_j 为导弹从分辨出目标和干扰器的瞬间到与目标相遇的时间里修正偏差的数学期望(m)。

当 $L_c = L_{\text{opt}}$ 时,有:

$$d'_j = \frac{L_c}{4} \cdot |\cos q_r| \quad (19)$$

与式(17)相比较,易知,自寻的导弹比非自寻的导弹的脱靶量减少了一半。

4) 双机闪烁干扰时,防空导弹一次射击对目标的杀伤概率 $W_{0,j}$

设导弹自身的均方根误差是 α_r ,对目标的杀伤半径是 R_r ,则由干扰引起的均方根误差分量 α_j (单位 m)

有经验公式^[10]:

$$\alpha_j = (0.3 \sim 0.4)d_j \quad (20)$$

防空导弹的合成均方根误差:

$$\alpha_{\Sigma} = \sqrt{\alpha_r^2 + \alpha_j^2} \quad (21)$$

假定防空导弹射击目标时瞄准点只沿基线移动,要保证导弹能够毁伤目标,其弹着点 (x, y) 必须落在杀伤半径内。那么在干扰条件下,一次射击对被掩护目标中某个目标的杀伤概率 $W_{0,j}$ 为:

$$W_{0,j} = \int_{-R_r}^{R_r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha_{\Sigma}} e^{-\frac{(x-d_j)^2}{2\alpha_{\Sigma}^2}} dx \cdot \int_{-R_r}^{R_r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha_{\Sigma}} e^{-\frac{y^2}{2\alpha_{\Sigma}^2}} dy = 2\Phi_0\left(\frac{R_r}{\alpha_r}\right) \cdot \left[\Phi_0\left(\frac{R_r+d_j}{\alpha_{\Sigma}}\right) + \Phi_0\left(\frac{R_r-d_j}{\alpha_{\Sigma}}\right)\right] \quad (22)$$

4 算例分析

4.1 场景假设

如图 1 所示,蓝方出动两架 RB-57D 侦察机对红方某区存在的高价值目标(如某空军基地)实施侦察任务,机上装载电子干扰系统,双机通过编队对红方地面防空火控制雷达实施闪烁干扰,以保护己方侦察机顺利完成侦察任务。红方的前方警戒雷达在发现蓝方空中目标后,指挥所下达射击命令,发射萨姆 2 型地空导弹试图击落蓝方侦察机。

4.2 基本参数

考虑到 RB-57D 侦察机飞行高度一般在 19 ~ 20km,属于高空飞行,故设萨姆 2 型地空导弹对目标的杀伤半径 $R_r = 250\text{m}$,射弹散布均方根误差 $\alpha_r = 160\text{m}$,火控制雷达天线主瓣宽度 $\theta_r = 0.06^\circ$,雷达接收机的功率干信比 $J_s \gg 1$,萨姆 2 型地空导弹的最小射击距离 $D_{\text{sh},\text{min}} = 3000\text{m}$,蓝方侦察机相对于雷达的航向角为 $q_r = 30^\circ$ 。

4.3 射击效能评估

依据前文所建立的评估模型,在蓝方不采取雷达对抗干扰的情况下,由式(8)可得红方发射单枚萨姆 2 型能杀伤蓝方 RB-57D 侦察机的概率为:

$$W_0 = 1 - \exp\left[-0.5 \left(\frac{250}{160}\right)^2\right] = 70.65\%$$

在受到双机闪烁干扰时,由于 $J_s \gg 1$,通过式(12)可近似得到火控制雷达分辨角增大到 $\theta_{r,j} = 0.12^\circ$;由式(13)可求出目标双机闪烁干扰的最佳基线距离 $L_{\text{opt}} = 415.7\text{m}$;令 $L_c = L_{\text{opt}}$ 时,由式(19)可求出导弹脱靶量 $d_j = 180\text{m}$;由式(21),在 $\alpha_j = 0.4d_j$ 的条件下,可求得干扰引起导弹合成均方根误差 $\alpha_{\Sigma} =$

175.45m;最后由式(22)得在受到双机闪烁干扰时, 导弹一次射击对目标的杀伤概率为:

$$W_{0,j} = 2\Phi_0\left(\frac{250}{160}\right)\left[\Phi_0\left(\frac{250+180}{175.45}\right) + \Phi_0\left(\frac{250-180}{175.45}\right)\right] = 55.57\%$$

易知,在受到双机闪烁干扰后,萨姆2型导弹对RB-57D侦察机的杀伤概率明显降低了。图2、图3分别给出了实施闪烁干扰条件下,双机编队参数与杀伤概率之间的关系。

由图2可以看出:当飞机相对于雷达的航向角在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内时,杀伤概率随角度的增加而增加,基本成正比比例关系,而当航向角在 $[90^\circ, 180^\circ]$ 范围内时,杀伤概率随角度的增加而降低,基本成反比例关系;由图3可以看出:杀伤概率随着双机距离的增大而降低,基本成反比例关系。结合图2、图3可以发现一个现象:当航向角接近 90° ,且双机距离小于300m时,闪烁干扰条件下的杀伤概率要比无干扰时略高,这是由于双机前后飞行且距离过近造成了目标的有效反射截面增大,进而提高了的杀伤概率。

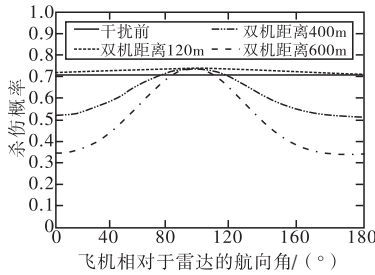


图2 飞机相对于雷达的航向角与杀伤概率的关系

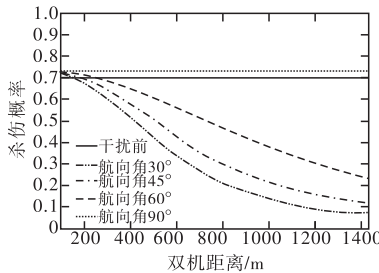


图3 双机距离与杀伤概率的关系

5 结束语

文中从警戒雷达发现概率和探测距离、对敌抗击次数、角度欺骗性干扰下射击杀伤概率计算等方面,对雷达干扰条件下火力杀伤效能进行了定量分析。研究成果对于防空作战的兵力需求、火力分配、作战效能评估等都有着极其重要的意义。

参考文献:

- [1] 杨正,曹志耀. 防空警戒雷达以一种频率对空中目标的检测概率计算[J]. 电光与控制, 2007, 14(2): 41-43.
- [2] 宁伟华,席吉虎,陈永革. 电子对抗条件下防空导弹单次连射杀伤概率计算[J]. 空军工程大学学报, 2006, 7(2): 18-21.
- [3] 曹志耀. 计算机作战模型系统设计原理[M]. 北京:解放军出版社, 1998: 398-401.
- [4] 邵国培,曹志耀,刘湘伟,等. 电子对抗作战效能分析[M]. 北京:解放军出版社, 1998.
- [5] 张顺建,邵国培. 警戒雷达抗干扰效能的计算方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2004, 18(4): 59-62.
- [6] 王国玉,汪连栋. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [7] 张安. 航空武器系统分析导论[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2001.
- [8] (俄)加加林空军学院. 电子战战役战术计算方法[M]. 胡晓惠,译. 北京:空军指挥学院编译出版, 2002.
- [9] 邵国培. 电子对抗战术计算方法[M]. 北京:解放军出版社, 2008: 29-30.
- [10] 倪忠仁,王月平,陆关生,等. 地面防空作战模拟[M]. 北京:解放军出版社, 2001.

2011年第5期 孙涛等:纯方位目指条件下空舰导弹目标搜索策略研究,文中图9、图10、图11不很清晰,现以修正。

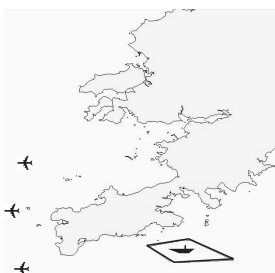


图9 载机第3次探测结果

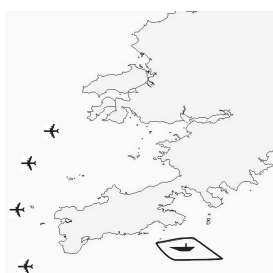


图10 载机第4次探测结果

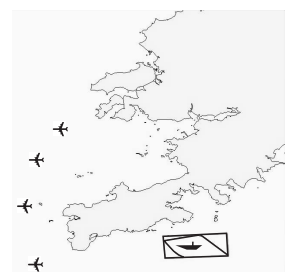


图11 提取的目标搜索区