

# 对制导雷达无源自卫干扰的效能评估及战术计算

周哲帅, 邵国培, 方红兵, 冯言志

(电子工程学院,安徽合肥,230037)

**摘要** 雷达干扰效能评估及战术计算是雷达对抗部队迫切需要解决却又缺乏系统研究的难题。为解决这一难点问题,针对制导雷达,运用解析法,首先建立了无源自卫干扰条件下导弹射击的预计次数、一次射击的杀伤概率及合成毁伤能力效能评估模型,然后给出了无源自卫干扰时一个雷达诱饵中反雷达反射体束的数量、连续投放的时间间隔及总消耗量等战术问题的计算方法,最后通过算例分析验证了模型的可行性和有效性,得出了具有实用价值的结论,可为空袭作战中作战效能评估、机载武器配备等提供参考。

**关键词** 制导雷达;无源自卫干扰;杀伤概率;雷达诱饵;反雷达反射体束

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.02.011

**中图分类号** TN82 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)02-0049-05

目前,对雷达干扰效能评估的研究取得了不少成果。文献[1-2]在研究有源压制性干扰特点的基础上,建立了雷达有源干扰的效能评估模型。文献[3]对箔条压制性干扰的性质和特点进行了分析,建立了箔条干扰走廊对雷达电磁信号的信号功率衰减模型。文献[4]从理论上阐述了无源欺骗性干扰对雷达探测能力的影响,但也仅仅是停留在定性分析阶段,且未涉及对雷达干扰的战术运用。本文主要研究对制导雷达进行无源自卫干扰<sup>[5]</sup>时的效能评估和战术计算方法,并通过算例对模型进行验证。

## 1 对制导雷达无源自卫干扰的效能评估

### 1.1 干扰条件下导弹射击的预计次数

由于雷达受到干扰,实际探测距离<sup>[6]</sup>的缩减使得导弹的发射距离相应的减少,在不考虑弹药消耗量的前提下,飞机编队进入火力单元实际发射区后,导弹射击的预计次数为:

$$n_{sj} = Q_j \text{int} \left[ \Pi_{sm} \left( \frac{D_{fs} - D_{fsmin}}{V_c} - (n-1)t_d \right) + 1 \right] \quad (1)$$

式中: $\text{int}[X]$ 表示对 $X$ 下取整; $D_{fs}$ 为可实现发射距离; $D_{fsmin}$ 为发射区近界; $\Pi_{sm}$ 为平均射击密度,其计算方法参见文献[7]; $n$ 为一次射击发射导弹的总数; $t_d$ 为发射2发导弹的时间间隔; $Q_j$ 表示导弹在各种航向角射击飞机的可能性系数,对其取值需进行以下讨论:

- 1) 当  $D_{fs} \geq D_{fsmin}$  且地空导弹只从前半球(即迎头攻击)或后半球(即尾随攻击)进行射击时,取  $Q_j = 1$ ;
- 2) 当  $D_{fs} \geq D_{fsmin}$  且导弹能从2个半球(前半球和后半球)进行射击时,取  $Q_j = 2$ ;
- 3) 当  $D_{fs} < D_{fsmin}$  时,取  $Q_j = 0$ 。

### 1.2 雷达诱饵干扰时导弹一次射击的杀伤概率

飞机投放诱饵对制导雷达进行自卫干扰,当空袭飞机和诱饵同处于制导雷达分辨单元时,地空导弹将被诱偏飞向雷达诱饵和飞机的质心,见图1中的A点。

由比例关系,易得质心A到飞机的距离 $d_j$ 为:

\* 收稿日期:2011-07-11

基金项目:国家部委基金资助项目(2009YB025)

作者简介:周哲帅(1984-),男,江西上饶人,博士生,主要从事电子对抗作战效能评估研究. E-mail:tasiby@163.com

$$d_j = \frac{n_j \sigma_j \beta_j}{n_j \sigma_j \beta_j + \sigma_c} d \quad (2)$$

式中: $\sigma_j$ 为单个诱饵反射体束的有效雷达反射面积; $n_j$ 为诱饵中反射体束个数; $\sigma_c$ 为飞机的雷达反射面积; $d$ 为诱饵到目标的距离; $\beta_j$ 为雷达动目标选择系统对诱饵反射信号的衰减系数。

制导雷达受到诱饵干扰,假定射击时弹着点只沿飞机与诱饵的连线移动,为了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。设 $R_r$ 为导弹的杀伤半径,则地空导弹一次射击飞机的杀伤概率 $P_{kj}$ 为:

$$P_{kj} = \int_{-R_r}^{R_r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha_\Sigma} e^{-\frac{(x-d_j)^2}{2\alpha_\Sigma^2}} dx \int_{-R_r}^{R_r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha_\Sigma} e^{-\frac{y^2}{2\alpha_\Sigma^2}} dy = 2\Phi_0\left(\frac{R_r}{\alpha_r}\right) \left[ \Phi_0\left(\frac{R_r + d_j}{\alpha_\Sigma}\right) + \Phi_0\left(\frac{R_r - d_j}{\alpha_\Sigma}\right) \right] \quad (3)$$

式中: $\alpha_\Sigma = \sqrt{\alpha_r^2 + \alpha_j^2}$ ,为地空导弹的合成均方根误差, $\alpha_j$ 为干扰引起的均方根误差分量,一般取 $(0.3 - 0.4)d_j$ ; $\alpha_r$ 为导弹自身的均方根误差; $\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ 。

### 1.3 干扰条件下导弹的合成毁伤能力

干扰对导弹射击飞机合成毁伤能力的影响最终体现在对飞机合成杀伤概率的影响。射击次数的减少及一次射击杀伤概率的降低是导致地空导弹合成杀伤概率降低的主要原因。由1.1节知,干扰条件下地空导弹对飞机的预计射击次数为 $n_{sj}$ ,于是,根据概率公式,地空导弹火力单元在整个射击周期内对飞机的合成杀伤概率可表示为:

$$P_{j\Sigma} = 1 - (1 - P_{kj})^{n_{sj}} \quad (4)$$

## 2 对制导雷达无源自卫干扰的战术计算

### 2.1 单部雷达诱饵中反雷达反射体束的数量

无源干扰时对制导雷达的压制系数<sup>[8]</sup>为:

$$K_j = \beta_j J_s \quad (5)$$

式中 $J_s$ 为在给定防护概率 $W_n$ 的条件下,进入制导雷达接收机所需的有效能量干信比,可用下式计算:

$$J_s = \frac{W_n}{1 - W_n} \quad (6)$$

无源干扰有效的临界条件<sup>[9]</sup>为压制系数 $K_j$ 恰好等于反雷达反射体束有效雷达散射面积与目标有效雷达散射面积之比,即:

$$\frac{n_j \sigma_j}{\sigma_c} = K_j \quad (7)$$

结合式(5)、(7)可以求出:

$$n_j = \text{int} \left[ \frac{\beta_j J_s \sigma_c}{\sigma_j} + 1 \right] \quad (8)$$

式中各参量含义同式(2)。

### 2.2 连续投放反雷达反射体束的时间间隔

雷达诱饵对制导雷达的干扰作用<sup>[10]</sup>与自卫飞机的航向角 $q_r$ 有关,不同的 $q_r$ 取值范围,反雷达反射体束的投放时间间隔也有不同,下面分情况进行讨论。

1) 当 $-30^\circ \leq q_r \leq 30^\circ$ 或 $150^\circ \leq q_r \leq 210^\circ$ 时,诱饵主要作用于雷达的距离自动跟踪系统,见图2,自卫飞机应该在制导雷达的距离分辨单元内施放干扰。根据图中几何关系,可得飞机飞过距离分辨单元的时间为:

$$t_D = \frac{0.5c\tau 10^{-6}}{V_c |\cos q_r|} \text{ (s)} \quad (9)$$

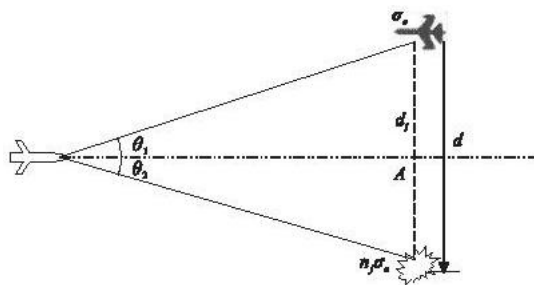


图1 雷达诱饵干扰制导雷达示意图

Fig.1 Schematic diagram of the guidance radar is jammed by radar decoy

式中:  $c = 3.0 \times 10^8$  m/s, 为电磁波传播速度;  $\tau$  为制导雷达的脉宽 ( $\mu\text{s}$ );  $V_c$  为自卫飞机的飞行速度 (m/s)。

考虑到自卫飞机需在  $t_D$  的时间内施放  $n_j$  个反雷达反射体束, 于是有反雷达反射体束的投放时间间隔  $t_{jD}$  为:

$$t_{jD} = \frac{t_D}{n_j - 1} \frac{0.5c\tau 10^{-6}}{(n_j - 1)V_c |\cos q_r|} \quad (10)$$

2) 当  $30^\circ < q_r < 150^\circ$  或  $210^\circ < q_r < 330^\circ$  时, 诱饵主要作用于制导雷达的目标方向自动跟踪系统, 见图 3。

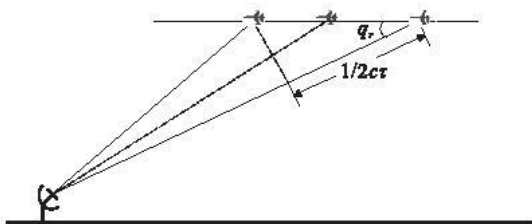


图2 制导雷达目标距离自动跟踪系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of radar distance automatic tracking system

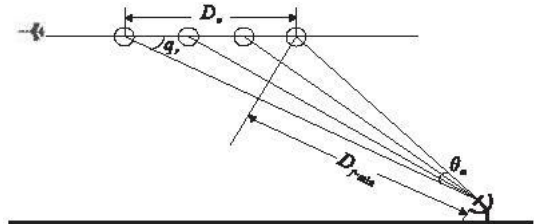


图3 制导雷达目标方向自动跟踪系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of radar direction automatic tracking system

根据图中几何关系容易得出自卫飞机可投放一个雷达诱饵的距离为:

$$D_c = \frac{D_{fsmin} \theta_a \frac{\pi}{180}}{|\sin q_r|} \quad (11)$$

式中  $\theta_a$  为制导雷达的方位方向图宽度。

自卫飞机可投放一个雷达诱饵的时间为:

$$t_\phi = \frac{D_c}{V_c} = \frac{D_{fsmin} \theta_a \frac{\pi}{180}}{V_c |\sin q_r|} \quad (12)$$

考虑到自卫飞机需在  $t_\phi$  的时间内施放  $n_j$  个反雷达反射体束, 于是有反雷达反射体束的投放时间间隔  $t_{j\phi}$  为:

$$t_{j\phi} = \frac{t_\phi}{n_j - 1} = \frac{D_{fsmin} \theta_a \frac{\pi}{180}}{(n_j - 1)V_c |\sin q_r|} \quad (13)$$

一般情况下, 自卫飞机在飞行过程中连续投放反雷达反射体束, 此时投放的时间间隔  $t_j$  可由下式计算:

$$t_j = \min(t_{jD}, t_{j\phi}) \quad (14)$$

### 2.3 反雷达反射体束的总消耗量

自卫飞机在飞过地空导弹杀伤区时, 所需要的雷达诱饵数量  $n_{j\Sigma}$  与地空导弹火力单元自身的性能有关, 根据式(1)的计算方法有:

$$n_{j\Sigma} = \text{int} \left[ \prod_{sm} \frac{D_{fsmax} - D_{fsmin}}{V_\Sigma} + 1 \right] \quad (15)$$

式中  $V_\Sigma$  为自卫飞机与导弹的接近速度, 由下式计算:

$$V_\Sigma = V_r + V_c \cos q_r \quad (16)$$

式中:  $V_r$  为地空导弹的飞行速度 (m/s);  $V_c$  为自卫飞机的飞行速度 (m/s)。

由式(8)可知施放一个雷达诱饵需要  $n_j$  个反雷达反射体束, 结合式(15)可得飞机飞过地空导弹杀伤区时反雷达反射体束的总消耗量  $N_\Sigma$  为:

$$N_\Sigma = n_j n_{j\Sigma} \quad (17)$$

## 3 算例分析

### 3.1 场景假设

假设红方出动多架轰炸机对蓝方某高价值目标实施轰炸任务,机上配有假目标投放装置,并携带若干干扰弹。红方通过对蓝方地面防空火控制雷达实施无源自卫干扰,以保护轰炸机顺利完成任务。蓝方在前方警戒雷达发现空袭目标后,由指挥所下达射击命令,制导雷达每次引导一发地空导弹试图击落红方飞机。

### 3.2 基本参数

设某地空导弹对目标的杀伤半径  $R_r = 20$  m, 射弹散布均方根误差  $\alpha_r = 11.1$  m, 导弹飞行速度  $V_r = 615$  m/s, 发射区远界  $D_{f_{\max}} = 42$  km, 发射区近界  $D_{f_{\min}} = 2.5$  km, 无干扰时单发导弹的杀伤概率  $P_k = 0.8$ , 导弹的平均射击密度  $\Pi_{sm} = 0.025$  s<sup>-1</sup>; 地面制导雷达的波瓣宽度  $\theta_r = 2.8^\circ$ , 波长  $\lambda_r = 2.7$  cm, 重频为  $F_r = 700$  Hz, 脉宽  $\tau = 0.4$   $\mu$ s, 反射信号的衰减系数  $\beta_r = 1.1$ ; 轰炸机的飞行速度  $V_c = 250$  m/s, 有效反射面积  $\sigma_c = 10$  m<sup>2</sup>, 相对于制导雷达的航向角  $q_r = 120^\circ$ ; 假目标投射装置可保证齐射 2、3、6 枚干扰弹或单独连射 6 枚干扰弹, 间隔时间  $t_i$  为 0.05、0.1、0.5 s; 干扰弹在抛射后 1–2 s 能形成有效反射面积  $\sigma_j = 30$  m<sup>2</sup> 的反雷达反射云; 假定反雷达反射云质心与轰炸机的距离  $d_j = 15$  m。

### 3.3 模型应用与分析

根据算例给出已知参数  $d_j$  和  $\alpha_r$  的值, 在干扰引起的均方根误差分量  $\alpha_j = 0.4d_j$  的条件下, 可求得地空导弹受到干扰时的合成均方根误差  $\alpha_\Sigma = 12.6$  m, 由式(3)得制导雷达受到无源自卫干扰时, 地空导弹对目标一次射击的杀伤概率  $P_{kj} = 0.704$ 。对比无干扰时单发导弹的杀伤概率  $P_k = 0.8$ , 易知, 地空导弹受到干扰后, 对目标的杀伤概率明显降低了。

为有效保护己方轰炸机的安全, 需要连续投放反雷达反射体束, 下面分别计算在上述假设场景下, 防护概率  $W_n = 0.8$  时投放一个雷达诱饵中反雷达反射体束的数量、连续投放的时间间隔及反雷达反射体的总消耗量。

由式(6)知, 地面制导雷达接收机输入端, 干扰信号与有效信号能量比  $J_s = 4$ , 根据式(8)易得一个雷达诱饵中反雷达反射体束的数量  $n_j = 2$ , 表明为了形成一个雷达诱饵, 必须齐射 2 枚干扰弹。由于  $30^\circ < q_r < 150^\circ$ , 根据式(13)可求得连续投放反雷达反射体束的时间间隔  $t_{j\text{th}} = 0.56$  s。由式(15)知, 飞机在飞过蓝方地空导弹杀伤区时, 所需要的雷达诱饵数  $n_{\Sigma} = 3$ , 最后由式(16)可得出干扰弹的总消耗量  $N_\Sigma = 6$ 。

航向角  $q_r$  与反雷达反射体束投放时间间隔的变化关系见图 4。通过观察可以发现, 无论航向角如何变化, 最大投放时间间隔均不超过 1 s, 远小于地空导弹的发射周期 40 s, 故不会影响反雷达反射体束投放的连续性。

结论: 根据以上计算结果可知, 只要抛射装置进行 3 次齐射, 每次齐射 2 枚干扰弹, 齐射时间间隔 0.56 s, 这样就能够保证诱偏地空导弹的攻击, 使得对飞机的防护率达到 80%。

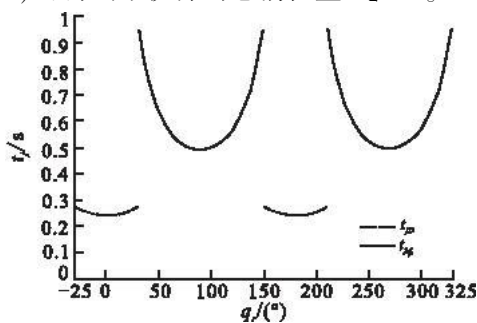


图 4 航向角与投放时间间隔的关系

Fig. 4 Relationship between heading angle and time interval

## 4 结束语

本文从射击预计次数、杀伤概率和合成毁伤能力等方面, 对无源自卫干扰条件下导弹的火力杀伤效能进行了深入研究, 给出了一定防护概率时自卫飞机投放雷达诱饵的战术计算方法, 并结合算例对计算结果进行了定量分析。研究成果对于空袭作战中作战效能评估、机载武器配备、战术运用等都有着极其重要的意义。

### 参考文献:

- [1] YAN Xiaopeng, LI Ping, LI Hongkun. Research on stand off jamming dynamic suppressible area of warning radar's simulation [C]//8th international symposium on test and measurement. Los Angeles, USA:SSC press, 2009:3807–3810.
- [2] 金虎兵, 李政杰. 雷达抗有源压制性干扰综合效能评估[J]. 电讯技术, 2008, 48(10):55–58.  
JIN Hubing, LI Zhengjie. Comprehensive evaluation on effectiveness of radar against active blanket jamming [J]. Telecommunication engineering, 2008, 48(10):55–58. (in Chinese)

- [3] 胡松,卢景双,徐铜. 箔条压制性干扰对雷达信号衰减的效能评估[J]. 吉林大学学报,2008,26(3):259-262.  
HU Song, LU Jingshuang, XU Tong. Effect evaluation of chaff suppress jamming on power attenuation of radar signal [J]. journal of Jilin university, 2008, 26(3):259-262. (in Chinese)
- [4] LI Jianxun, LÜ Qiang, GUO Jianming. An intelligent signal processing method of radar anti deceptive jamming [C]//8th international symposium on test and measurement. Los Angeles, USA: SSC press, 2009:1057-1060.
- [5] 陈德峰,高梅国,傅雄军. 参数侦测误差对 SAR 欺骗干扰的影响[J]. 北京理工大学学报,2009,29(7):639-643.  
CHEN Defeng, GAO Meiguo, FU Xiongjun. Effect of parameters detection error to SAR deception jamming [J]. Journal of Beijing institute of technology, 2009, 29(7):639-643. (in Chinese)
- [6] 唐政,高晓光,张莹. 机载自卫有源压制干扰效果评估模型研究[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(2):236-239.  
TANG Zheng, GAO Xiaoguang, ZHANG Ying. Research on the model evaluating the efficiency of the airborne active self-defense jamming system [J]. Systems engineering and electronics, 2008, 30(2):236-239. (in Chinese)
- [7] 崔晓宝. 航空兵作战模拟概论[M]. 北京:蓝天出版社,2001.  
CUI Xiaobao. Introduction to air force combat simulation [M]. Beijing: Blue sky press, 2001. (in Chinese)
- [8] 祁登峰. 雷达干扰战术计算方法研究[D]. 合肥:电子工程学院,2009.  
QI Dengfeng. Tactical calculation method research of radar jamming [D]. Hefei: Electronic engineering institute, 2009. (in Chinese)
- [9] 邵国培,曹志耀,何俊,等. 电子对抗作战效能分析[M]. 北京:解放军出版社,1998.  
SHAO Guopei, CAO Zhiyao, HE Jun, et al. Electronic warfare operational effectiveness analysis [M]. Beijing: The publishing house of PLA, 1998. (in Chinese)
- [10] LI Yunjie, ZHANG Yanbin, GAO Meiguo. Parameters design of pull-off deceptive jamming to terminal guidance radar [J]. Journal of Beijing institute of technology, 2010, 19(3):362-366.

(编辑:田新华)

## Efficiency Evaluation and Tactics Calculation of Guidance Radar Passive Self - defensive Jamming

ZHOU Zhe - shuai, SHAO Guo - pei, FANG Hong - bing, FENG Yan - zhi  
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The efficiency evaluation and tactics calculation of radar jamming is a puzzle that the troops of radar countermeasure have met and urgently need to solve but lack of system research. To solve this puzzle, the efficiency evaluation models of shooting degrees and kill probability against guidance radar under passive self - defensive jamming condition are established by analytical method, then, the tactics calculation methods of anti - radar reflector beam numbers, expending time interval and total wastage are also given. Finally, the effectiveness and feasibility of the models are illustrated with a numerical example and some valuable conclusions are reached, which can provide a reference for the operational efficiency evaluation and airborne weapon equipment.

**Key words:** guidance radar; passive self - defensive jamming; kill probability; radar bait; anti - radar reflector beam