

电子对抗条件下防空导弹单次连射杀伤概率计算

宁伟华, 席吉虎, 陈永革
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:阐述了有源压制式干扰和箔条干扰条件下的信干比计算方法,构建了电子干扰条件下防空导弹单发杀伤概率的计算模型,引入了雷达抗干扰改善因子的概念,分析了欺骗式干扰的有效干扰概率和电子干扰条件下的目标发现概率,最后给出了电子对抗条件下防空导弹单次射击杀伤概率的计算模型。

关键词:电子对抗;单发杀伤概率;防空导弹;连射

中图分类号: TJ761.1⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)02-0018-04

现代高技术条件下的空防对抗,电子干扰和反干扰无处不在,并在很大程度上影响甚至决定着战争的发展和结局。分析和计算电子对抗条件下防空导弹的单次射击杀伤概率对于防空作战的兵力需求、兵力部署、火力分配、作战效能评估等都有极其重要的意义。

1 压制式干扰条件下雷达接收机的信干比

1.1 有源压制式干扰条件下雷达接收机的信干比

设来袭目标航线为直线,地空导弹武器雷达天线方向图最大方向对准目标,干扰机(远距离支援干扰机、随行掩护干扰机)与方向图最大方向的夹角为 θ (显然对于自卫干扰 $\theta=0^\circ$)。则雷达接收到的目标回波功率 P_r 可表示如下^[1]:

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad (1)$$

式中: P_t 表示雷达发射功率; G_t 表示雷达发射机主瓣方向增益; G_r 表示雷达接收机主瓣方向增益; λ 表示雷达波长; σ 表示目标有效雷达反射面积; R 表示目标与防空雷达间的距离; L 表示系统损耗因子。

对于单基地脉冲雷达通常是收发共用天线,即有: $G_t = G_r$,则式(1)又可写成:

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad (2)$$

在干扰功率谱覆盖接收机工作频带的前提下,雷达接收机收到的干扰功率 P_j 为^[2]

$$P_j = \frac{y_j P_j G_j G(\theta) \lambda^2 \Delta f_i}{(4\pi)^2 R_j^2 f_j} \quad (3)$$

式中: P_j 表示干扰机发射功率; G_j 表示干扰机主瓣增益; R_j 表示防空雷达与干扰机之间的距离; Δf_i 表示干扰机带宽; Δf_r 表示雷达接收机带宽; y_j 表示干扰信号与雷达信号极化不一致损失系数,一般取值为0.5; $G(\theta)$ 表示干扰信号在雷达主瓣方向上的增益,取值如下:

$$G(\theta) = \begin{cases} G_t, & |\theta| \leq \theta_{0.5}/2 \\ k_1 (\theta_{0.5}/\theta)^2 G_t, & \theta_{0.5}/2 < |\theta| \leq 90^\circ \\ k_1 (\theta_{0.5}/90)^2 G_t, & 90^\circ < |\theta| \leq 180^\circ \end{cases}$$

收稿日期:2005-05-17

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:宁伟华(1976-)男,山西稷山人,博士生,主要从事防空作战运筹决策分析研究。

其中: $\theta_{0.5}$ 表示雷达主瓣宽度; k_1 表示与雷达天线特性有关的常数,取0.04~0.1。于是,进入雷达接收机的信干比 S_j 计算公式如下:

$$S_j = \frac{P_r}{P_j} = \frac{P_i G_i^2 \sigma R_j^2 \Delta f_j}{y_j P_j G_j^4 \pi R^4 G(\theta) L \Delta f_r} \quad (4)$$

对于自卫式干扰,有 $R = R_j, G_r = (G\theta)$,对应信干比为

$$S_j = \frac{P_r}{P_j} = \frac{P_i G_i \sigma \Delta f_j}{y_j P_j G_j^4 \pi R^2 L \Delta f_r} \quad (5)$$

1.2 箔条干扰时的信干比计算

如图1所示,箔条在距离雷达 R_j 处,形成厚度为 d 的干扰带。考虑到箔条云对雷达电磁波产生两种作用:①反射作用,形成了干扰信号;②衰减作用,使目标回波的功率变小。

设单根箔条的平均等效散射面积为 σ_1 ,箔条云单位体积内的箔条数为 \bar{N}_1 ,雷达的分辨体积为 V_c ,则在雷达分辨体积内,箔条云形成的平均散射面积 σ_N 为

$$\sigma_N = \bar{N}_1 \sigma_1 V_c = \frac{1}{2} R^2 \Delta \theta_s \Delta \varphi_s c \tau_s \bar{N}_1 \sigma_1$$

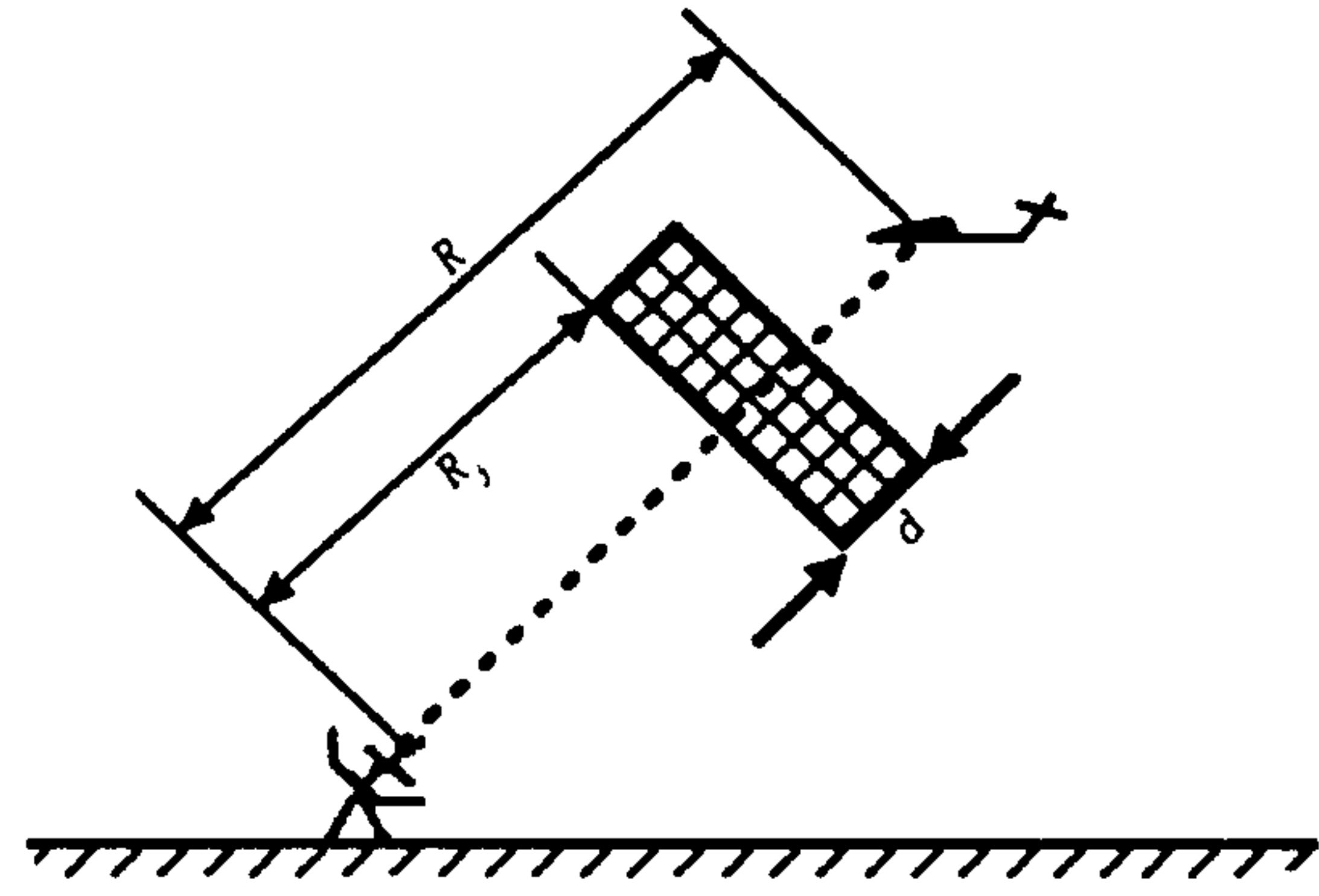


图1 箔条干扰示意图

式中: $\Delta \theta_s, \Delta \varphi_s$ 分别为天线波束横向和垂直方向宽度; R 表示雷达至空间分辨单元距离(m); τ_s 表示脉冲宽度(s); c 表示光速。

由雷达方程可知,雷达接收到的由于箔条云反射雷达电磁波而形成的干扰信号功率为

$$P_j = \frac{P_i G_i G(\theta) \lambda^2 \sigma_N}{(4\pi)^3 R_j^4 L} \quad (6)$$

由文献[3]可知,由于箔条对雷达信号的衰减作用,雷达接收到的目标回波信号功率为

$$P_r = \frac{P_i G_i A_r \sigma}{(4\pi)^2 R^2 L} \left[\frac{1}{R^2} - \frac{2}{R_j^2} (1 - e^{-0.17 \bar{N}_1 \lambda^2 d}) \right] \quad (7)$$

式中, λ 表示雷达的工作波长。雷达接收端的信干比为

$$S_j = \frac{P_r}{P_j} = \frac{\frac{P_i G_i A_r \sigma}{(4\pi)^2 R^2 L} \left[\frac{1}{R^2} - \frac{2}{R_j^2} (1 - e^{-0.17 \bar{N}_1 \lambda^2 d}) \right]}{\frac{P_i G_i G(\theta) \lambda^2 \sigma_N}{(4\pi)^3 R_j^4 L}} = \frac{R_j^4 \sigma}{R^2 \sigma_N} \left[\frac{1}{R^2} - \frac{2}{R_j^2} (1 - e^{-0.17 \bar{N}_1 \lambda^2 d}) \right] \quad (8)$$

2 电子干扰条件下防空导弹单发杀伤概率的简化计算

防空导弹击毁目标分为直接命中毁伤和破片毁伤两种方式,不同击毁方式下防空导弹的单发杀伤概率计算方法不同。

2.1 直接命中毁伤概率

假设导弹对目标的射弹散布服从圆正态分布 $f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$,导弹脱靶量 r 服从瑞利分布 f

$(r) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$, σ^2 是弹着点散布的均方差^[2]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2 \ln 2} \left[\frac{(c_1 R_{ave}^2 + c_2)}{S_j} + c_3 \right] \quad (9)$$

式中: S_j 表示制导雷达接收端的信干比; R_{ave} 表示平均射击距离, $R_{ave} = 0.619R$, R 为导弹射程; c_1, c_2, c_3 为拟合常数。

把目标被命中面等效为一个圆, r_0 为半径,则单发导弹直接击毁目标的概率可表示为^[2]

$$P_1 = 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

2.2 破片毁伤概率

导弹圆概率误差记为 CEP, 毁伤方式为破片毁伤, 设毁伤半径为 r_0 , 则毁伤概率为^[2]

$$P_1 = 1 - 0.5^{\frac{r_0}{\text{CEP}}} \quad (11)$$

其中: $\text{CEP} = [\alpha S_j R^2 + \beta S_j + \gamma]^{\frac{1}{2}}$, 系数 α 、 β 、 γ 可根据实验数据计算得出; R 为目标到雷达的距离; S_j 意义同上。

3 电子对抗条件下的防空导弹单发杀伤概率计算

以上在分析干扰条件下的单发杀伤概率时, 使用信干比来表征干扰强度, 并且在计算信干比时, 都没有考虑防空导弹武器的抗干扰能力。显然使用这样计算的信干比来求解单发杀伤概率是不合理的。为了体现防空导弹武器的抗干扰性能对干扰信号的抵消作用, 下面引入抗干扰改善因子的概念。

3.1 抗干扰改善因子

抗干扰改善因子^[4-5] (EIF) 是斯蒂芬·L·约翰斯顿于 1974 年提出来的, 而且已经被美国 IEEE 采纳。它适用于有源或无源压制式干扰。抗干扰改善因子是雷达未采取抗干扰措施时, 雷达输出端的信干比 P_{s0}/P_{j0} 与雷达中引入某种抗干扰措施后, 雷达输出端信干比 P'_{s0}/P'_{j0} 的比值, 即

$$F_i = \frac{P'_{s0}/P'_{j0}}{P_{s0}/P_{j0}} = \frac{P'_{s0}P_{j0}}{P_{s0}P'_{j0}} \quad (12)$$

如果雷达对某种干扰有几种抗干扰措施, 而且每种抗干扰措施的效果是不同的, 那么可用下列公式计算:

$$F_{i0} = F_{i1}F_{i2}\cdots F_{in} = \prod_{i=1}^n F_{ii} \quad (13)$$

其中: F_{ii} 表示采用第 i 种抗干扰措施时, 雷达的抗干扰改善因子; F_{i0} 表示雷达全部使用 n 种抗干扰措施后, 雷达的总抗干扰改善因子。

如果不采用抗干扰措施时, 雷达输出端信干比记为 S_j , 则采用 n 种抗干扰措施后, 雷达输出端的实际信干比为

$$S'_j = S_j F_{i0} \quad (14)$$

因此计算单发杀伤概率时, 应该用 S'_j 来代替原式中的 S_j 。

3.2 目标实施欺骗式干扰时防空导弹的单发杀伤概率

假定侦察设备的截获概率为 P_{j1} , 检测概率为 P_{j2} , 分选识别概率为 P_{j3} , 模拟雷达信号的概率为 P_{j4} , 雷达受干扰后不能识别或无抗干扰能力的概率为 P_{jR} , 那么欺骗式干扰的有效干扰概率, 即欺骗式干扰成功干扰的概率 P_j 为^[1]

$$P_j = P_{j1}P_{j2}P_{j3}P_{j4}P_{jR}$$

记防空雷达抗欺骗式干扰成功的概率为 P_{NJ} , 则有:

$$P_{NJ} = 1 - P_j = 1 - P_{j1}P_{j2}P_{j3}P_{j4}P_{jR} \quad (15)$$

欺骗式干扰可分为距离欺骗干扰、角度欺骗干扰和速度欺骗干扰等。当防空雷达同时受到多种欺骗式干扰时, 雷达的抗干扰成功概率为抗各种欺骗式干扰成功的概率的乘积, 即

$$P_{NJ} = P_{NJ1}P_{NJ2}\cdots P_{NJm} = \prod_{i=1}^m P_{NJi} \quad (16)$$

于是, 当空袭方采用欺骗式干扰时, 防空导弹的单发杀伤概率应作以下修正:

$$P'_1 = P_{NJ}P_1 \quad (17)$$

4 电子对抗条件下防空导弹单次射击杀伤概率计算

首先计算目标发现概率 P_f , 其计算公式如下:

$$P_f = P_{jj} [P_{tx} P_{yis} + (1 - P_{tx}) P_{cgs}] + (1 - P_{jj}) P_{cgs} \quad (18)$$

式中: P_{jj} 表示警戒雷达或机载预警雷达发现目标概率; P_{cgs} 表示目标指示雷达常规搜索时发现目标概率; P_{tx} 表示导弹阵地与警戒雷达/预警飞机是否通信畅通, 畅通为 1, 否则为 0; P_{yis} 表示目标指示雷达应急搜索时发现目标概率。其中:

$$P_{jj} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{4.75}{\sqrt{n}S_j}\right), \text{常规雷达} \\ \exp\left(-\frac{9.75}{\sqrt{n}S_j}\right), \text{PD 雷达} \\ 1 - \Phi\left(-\frac{4.75 - \sqrt{n}S_j}{1 + S_j}\right), \text{捷变频、频率分集雷达} \end{cases}$$

式中: S_j 表示单个脉冲信干比; n 表示一次扫描中雷达脉冲积累数; $\Phi(x)$ 为标准正态概率分布函数, $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$; P_{cgs} 的计算方法同 P_{jj} , $P_{yis} = 1 - (1 - P_{cgs})^{2\pi/\theta}$, θ 表示目标指示雷达应急搜索时的扇扫角度 (rad)。

设导弹一次射击发射 n_d 枚导弹, 则单次射击杀伤概率表达式如下:

$$P_{ds} = P_f [1 - (1 - P_1)^{n_d}] \quad (19)$$

式中, P_1 为电子对抗条件下的防空导弹单发杀伤概率。

参考文献:

- [1] 彭望泽. 防空导弹武器系统电子对抗技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [2] 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.
- [3] 周林, 娄寿春, 赵杰. 电子对抗环境下的目标探测模型研究[J]. 弹箭与制导学报, 2001, (1): 21 - 24.
- [4] 宗国明. 评估雷达抗干扰能力实用模型[J]. 火控雷达技术, 1995, (4): 70 - 75.
- [5] 余洪涛, 张永顺. 双基地雷达抗有源压制式干扰性能分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3(2): 34 - 36.

(编辑: 田新华)

Study of the Single Continuous Fire Kill Probability of Antiaircraft Missile under Electronic Countermeasure Conditions

NING Wei - hua, XI Ji - hu, CHEN Yong - ge

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: The computing method of S/N under the active blanket jamming and passive jamming conditions is presented. The computation model of the single - shot kill probability of antiaircraft missile under the electronic jamming condition is built. The concept of anti - jamming improvement factor is introduced. The effectual jamming probability of deception jamming and the target detecting probability under the electronic jamming condition are analyzed. Finally, the computation model of the single continuous fire kill probability of antiaircraft missile under electronic countermeasure conditions is given.

Key words: electronic countermeasure; single - shot kill probability; antiaircraft missile; continuous fire