机载自卫闪烁干扰作战效能评估

高 彬 韩 轲

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191) (空军指挥学院 研究生管理大队, 北京 100097)

摘 要: 为了得到机载自卫电子对抗作战样式中的闪烁干扰对工作于角度跟踪状态的敌防空武器控制系统电子设备进行无线电抑制的作战效能, 通过对该干扰样式的剖析, 对其具体实施过程进行详尽建模, 并结合相关评估指标来实施评估工作. 首先, 根据闪烁干扰的基本原理, 通过对闪烁干扰作战过程的建模分析, 然后, 以脱靶量为衡量标准, 考虑导弹在攻击期间能修正的误差距离值, 推导出来袭导弹的合成均方根偏差, 最后得到电子对抗设备所掩护飞机的杀伤概率评估指标的详细模型. 仿真算例表明了干扰机功率、被掩护飞机的飞行速度和反射截面积、双机平均闪烁周期等参数对杀伤概率和双机编队参数的影响.

关 键 词: 电子对抗; 自卫干扰; 闪烁干扰

中图分类号: TN 972^{+}. 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008) 09-1101-04

Measures of effectiveness for blinking jamming under airborne self-protection operations

Gao Bin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Han Ke

(Department of Graduate Management, Airforce Command College, Beijing 100097, China)

Abstract According to blinking jamming on analysis and modeling about operation procedure of blinking jamming, the measures of effectiveness for blinking jamming against angle guided missiles using radar seekers were evaluated by relational index. Firstly, the basic principle of blinking jamming was obtained, and then the operation process with blinking jamming was analyzed and modeled. With the reference standard of miss distance, the synthetic root mean square deviation was derived. Finally, the kill probability for covered airplanes by self-protection EW (electronic warfare) systems was introduced as the effectiveness index. The simulation results show that the influences between jammer power, covered airplanes velocity, airplanes RCS, mean blinking cycle and kill probability, dual airplanes formation parameter.

Key words electronic warfare(EW); self-protection jamming; blinking jamming

在机载自卫作战样式中, 闪烁干扰一般由两部干扰机在同一时间对同一个目标实施非相干干扰. 闪烁干扰是对付雷达寻的制导导弹的十分有效的电子对抗措施[1-2]. 当干扰发射机安置在不同平台上时, 各干扰机之间保持协同工作, 以某个速率循环打开一部干扰机, 当跟踪雷达从一个干扰源转向另外一个干扰源时, 激励了角度跟踪伺服装置的步进响应, 使雷达天线平滑地在各个干扰机之间移动, 如果伺服装置过冲, 就能引起越来越大的扰动, 最终将导致雷达失锁[3-4]. 本文使用电子对抗设备所掩护飞机的杀伤概率作为评估指标, 就机载自卫电子对抗作战样式中的闪烁干扰对工作于角度跟踪状态的敌防空武器控制系统电子设备进行无线电抑制的效能进行评估.

收稿日期: 2007-09-18

作者简介: 高 彬(1977-), 男, 山东济南人, 博士生, gaobin@ee.buaa.edu.cn.

1 闪烁干扰作战效能评估模型

1.1 闪烁干扰作战效能评估指标

效能评估指标选取闪烁干扰下双机之间的合理距离 d_c, 拦截导弹的脱靶量 L_m, 对双机中的一架飞机在一次射击时的杀伤概率 P_{kill}.

1.2 闪烁干扰下的无线电电子设备的分辨角

闪烁干扰的模型可以用以下式子表示:

$$x(t) = U_1(t)A_1(t)\cos[\omega_0 t + \theta_1(t)] + U_2(t)A_2(t)\cos[\omega_0 t + \theta_2(t)]$$

式中 $U_1(t)$, $U_2(t)$为取值 0或 1的矩形波. 在一段时间内, 接收机只能测量到一个辐射源的方位. 当两个辐射源互相转换时, 快速测角系统将出现测角数据的突变. 闪烁干扰下角跟踪系统是一个非线性系统, 在双点激励的情形下, 天线随动系统是一个受周期变力强迫作用的系统, 闪烁干扰参数 $\tau = T_k/T$, 表征闪烁周期 T_k 与电路滤波器的时间常数 T的关系. 闪烁干扰参数 $\mu = aKU$, a 为衰减器的增益衰减系数, K 为 AGC(Automatic Gain Contral)检波器和放大器的传输系数, μ与 AGC增益衰减特性和干扰源能量有关. 根据双点源闪烁干扰天线电轴与波束角比, 参数 τ, μ取不同值时可得到相应导引头的目标分辨角 θ_s[5]. 计算表明闪烁干扰下目标分辨角随着 τ的变小而变小. 为了提高干扰效率, 要求闪烁频率选取合适, 频率太高干扰效果趋于两点恒定干扰, 太低反而成为目标. 在 $\tau = 1$附近, 此时干扰导致导弹的临界分辨角最大.

1.3 最佳闪烁周期

闪烁干扰最重要的参数是闪烁周期. 为了使雷达跟踪系统能跟踪正在移动着的能量中心, 干扰机的交换频率应和雷达跟踪系统的带宽相匹配. 在选择闪烁周期时, 应尽可能使被压制的无线电电子设备的分辨角达到最大. 设两机的闪烁周期分别为 T_1和 T_2, 从而, 闪烁的平均周期为 $T_m = T_1T_2/(T_1 + T_2)$, 文献[6]给出了双机干扰台的最佳闪烁周期 $T_{opt} = 2V_p\theta_s/(\alpha_n g)$, V_p为导弹的平均飞行速度; α_n 为导弹惯性系数; g 为重力加速度. 实际作战时应该使得平均闪烁周期接近或等于最佳闪烁周期.

1.4 闪烁干扰作战效能评估指标解算

闪烁干扰对雷达导引头干扰的目的是使脱靶量大于拦截导弹的杀伤半径, 致使导弹不能摧毁真实目标. 闪烁干扰对导引头的干扰效果与干扰发射功率、导弹攻击角、闪烁频率、双机距离等战术参数密切相关. 本节首先通过建模找出导弹脱靶量与闪烁干扰战术参数的定量关系, 进而确定其他指标.

在非相干干扰源条件下, 由导引头的动态跟踪特性可知, 导弹运动轨迹与导弹天线分辨角 θ_R密切相关: 当 $\theta < \theta_R$ 时, 单脉冲雷达天线指向位于干扰源之间的能量重心方向; 当 $\theta = \theta_R$ 时, 导引头开始分辨两干扰源; 当 $\theta > \theta_R$ 时, 导引头已经分辨出两点源, 并能稳定跟踪其一, 这时导弹以最大过载 n_x 向所跟踪的干扰源运动, 在这期间导弹能修正的误差距离: $R_{cor} = 0.5n_x g R_{mo}^2/V_m^2$. V_m 为导弹速度; R_{mo}为导弹和能量重心 O 点距离. 从而, 两点源引起的导弹脱靶量为 $L_m = R_{to} - R_{cor}$, R_{to}为导弹在自引导期两点源引起的攻击误差距离. 根据图 1所示几何关系, 由正弦定理得:

$$R_{to} = R_t \sin\theta_2/\sin(\pi - (\alpha - \theta_R) - \theta_2)$$

而 $\theta_2 = \beta^2\theta_R/(1 + \beta^2) = (J/S)\theta_R/(1 + J/S)$.

又因为 $R_{mo} = R_{to}\sin(\alpha - \theta_R)/\sin\theta_2$, 所以可以得到导弹脱靶量的解析式.

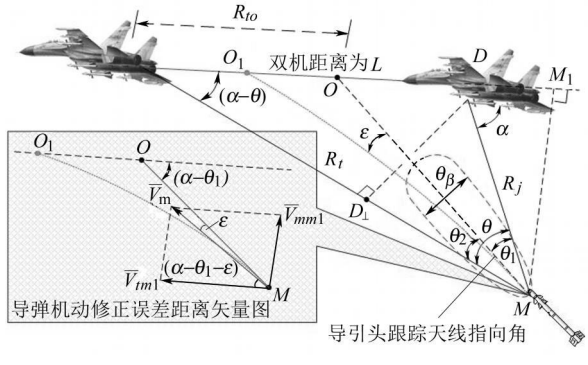


图 1 闪烁干扰作战空中几何态势

上面所得到的导弹修正误差距离 R_{cor}值是在假设导弹飞行时间为导弹自由下落 MM_1 段距离所需时间的基础上, 忽略了导弹自身具有 MM_1 方向速度分量的事实, 误差较大. 通过对导弹机动修正误差距离过程进行建模, 得到较准确的 R_{cor}值. 如图 1示, 导弹从 M 点开始能够分辨两点源, 此时 O 为导弹处于临界位置时的瞄准方向, O_1 为落弹点, ε为某时刻导弹飞行方向与初始瞄准方向间的夹角. 导弹从临界位置 M 点开始至 O_1 点所需时间为 T_0, 据图 1可得:

$$h = |MM_1| = \int_0^{T_0} V_m \sin(\alpha - \theta_1 + \varepsilon)\,dt$$

则在导弹到达 O_1 点之前, 其修正距离 $R_{cor} = |MO|\cos(\alpha - \theta_1) - \int_0^{T_0} V_m \cos(\alpha - \theta_1 + \varepsilon)\,dt$, 上式中 ε近似表示为: $\varepsilon \approx \frac{n_x g t^2}{2V_m t} = \frac{n_x g t}{2V_m}$, 所以 h 和 R_{cor}

的表达式为

$$h = \frac{2V_m^2}{n_x g}\left[\cos(\alpha - \theta_1) - \cos\left(\alpha - \theta_1 + \frac{n_x g T_0}{2V_m}\right)\right]$$

$$R_{cor} = |MO|\cos(\alpha - \theta_1) - \frac{2V_m^2}{n_x g}[\sin(\alpha - \theta_1 + n_x g T_0/(2V_m)) - \sin(\alpha - \theta_1)]$$

根据 $|MM_1| = R_j \sin\alpha$ 及 $R_{mo} = R_{to}\sin(\alpha - \theta_R)/\sin\theta_2$, 得 T_0 和 R_{cor}的解:

$$T_0 = \frac{2V_m}{n_x g}\{\theta_1 - \alpha + \arccos[\cos(\alpha - \theta_1) - n_x g R_j \sin\alpha/(2V_m^2)]\}$$

从而, 得到导弹脱靶量 L_m, 进而得到干扰作用引起的杀伤兵器均方根偏差分量[6]

$$\sigma_{jam} = (0.3 \sim 0.4)L_m$$

而来袭导弹的合成均方根偏差为

$$\sigma_{com} = \sqrt{\sigma_{self}^2 + \sigma_{jam}^2}$$

式中, σ_{self}为导弹自身的均方根偏差. 从而, 在闪烁干扰作用下, 一次射击对被掩护飞机中某架飞机的杀伤概率

$$P_{kill} = 2\Phi\left(\frac{R_p}{\sigma_{self}}\right)\left[\Phi\left(\frac{R_p + L_m}{\sigma_{com}}\right) + \Phi\left(\frac{R_p - L_m}{\sigma_{com}}\right)\right]$$

式中, R_p为导弹(弹头)杀伤区半径, $\Phi(x)$为拉普拉斯函数.

2　仿真分析

场景设计: 假设没有闪烁干扰条件下, 某地空导弹防御系统的一枚防空导弹对某型飞机的杀伤概率为 0.7, 干扰机闪烁周期范围为 1~5 s, 根据某型飞机双机战斗队形参数、有源干扰台的工作状态, 计算闪烁干扰条件下, 该某地空导弹系统火力组对双机的杀伤概率.

由场景所示的自卫对抗条件下, 施放闪烁干扰时, 当双机编队保持最佳间距为 150m时, 可以使一枚地空导弹对被掩护飞机的杀伤概率降低 62.86%. 图 2~图 8给出了实施闪烁干扰条件下, 双机参数与杀伤概率及双机编队参数之间的关系.

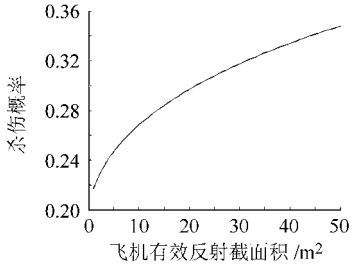


图 2　飞机 RCS与杀伤概率关系

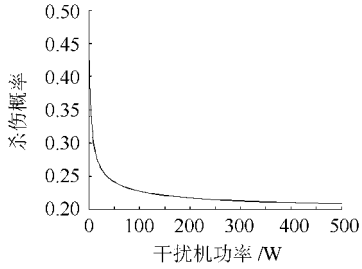


图 3　干扰机功率与杀伤概率关系

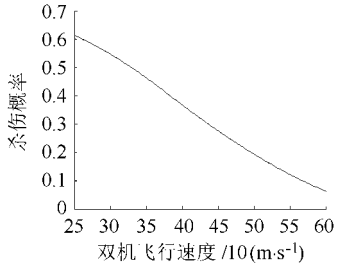


图 4　双机速度与杀伤概率关系

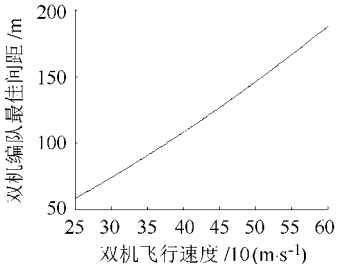


图 5　双机速度与最佳间距关系

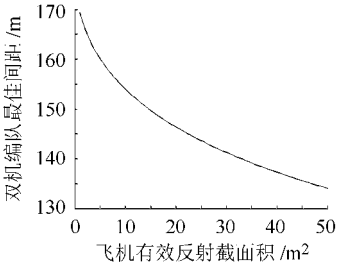


图 6　飞机 RCS与最佳间距关系

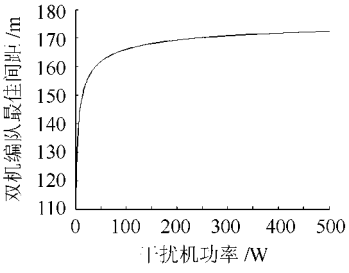


图 7　干扰机功率与最佳间距关系

由图 2~图 7可以看出: 杀伤概率随飞机的 RCS(Radar Cross Section)的增加而增加, 基本呈正比例关系, 而双机编队最佳间距参数随飞机的 RCS的增加而降低, 基本呈反比例关系; 杀伤概率随干扰功率的增加而降低, 基本呈负指数函数关

系,当干扰功率大于 50W 以后,杀伤概率降低趋缓,而双机编队最佳间距参数随干扰功率的增加而增加,基本呈正指数函数关系,当干扰功率大于 50W 以后,最佳间距增加趋缓;杀伤概率随双机速度的增加而降低,基本呈反比例函数关系,双机编队最佳间距参数与双机速度呈正比例函数关系.图 8为平均闪烁周期与长机和僚机闪烁周期的关系,可知在长机和僚机都取 5 s时其平均闪烁周期达到最大,近似为 2 5 s,而此处的最佳闪烁周期近似为 3 s,故在长机和僚机闪烁周期取 5 s 时,可使杀伤概率达到最小,如图 9所示.

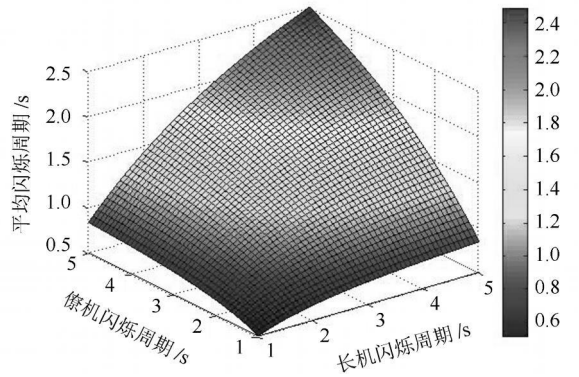


图 8 平均闪烁周期

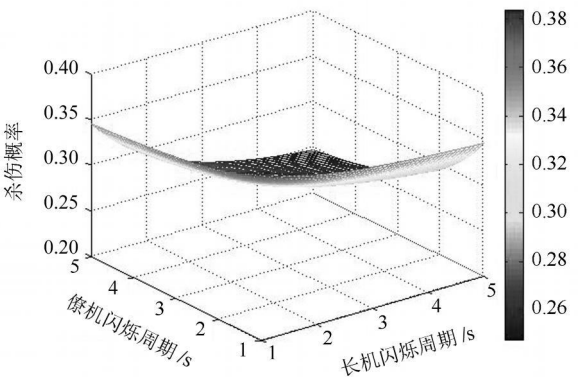


图 9 平均闪烁周期与杀伤概率的关系

3 结束语

由本文所建立的机载自卫闪烁干扰效能评估模型可知,为了获得最佳的闪烁干扰效能,应尽可能地增加闪烁干扰功率,增大飞机的飞行速度,并缩减飞机的瞬时 RCS;而当飞机的飞行速度和 RCS一定的条件下,闪烁干扰功率超过大致 50W 以后对闪烁干扰效能的提升并不明显;双机的平均闪烁周期应尽可能地接近于最佳闪烁周期,以求最大的闪烁干扰效能;另外还需要注意双机编队间距的设置对效能的影响.在具体的自卫电子对抗作战场景中,应协同好诸因素之间的关系,以求得最佳的闪烁干扰效能.

参考文献 (**References**)

[1] Skolnik M I. Introduction to radar systems[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2001

[2] Sarkar T K, Wang Hong. Adve R S, A deterministic least-squares approach to space-time adaptive processing (STAP) [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2001, 49(1): 91-103

[3] 高彬,吕善伟,郭庆丰,等.遗传算法在电子战干扰规划中的应用[J].北京航空航天大学学报, 2006, 32(8): 933-936
Gao Bin, Lü Shanwei, Guo Qingfeng, et al. Genetic algorithm approach to the jammer's layout for EW[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(8): 933-936 (in Chinese)

[4] 方宁,宁焕生,王宝发.复杂目标可视化角闪烁偏差计算[J].北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 186-189
Fang Ning, Ning Huansheng, Wang Baofa. Visual computation of glint error for complex targets[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(2): 186-189 (in Chinese)

[5] 孙毓富,栗苹,吕红剑,等.两种非相干干扰对空空导弹毁伤压制的比较[J].弹箭与制导学报, 2007, 27(2): 50-56
Sun Yufu, Li Ping, Lü Hongjian, et al. The comparison of kill probability of AAM response to two incoherent jamming methods [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(2): 50~56 (in Chinese)

[6] (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
(Russia) Jia Jialin Airforce College. The calculation method of battle and strategy for EW[M]. Translated by Hu Xiaohui. Beijing: Airforce Command Collegy Press, 2002 (in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)