

文章编号: 1001 - 893X(2011)03 - 0106 - 05

# 机载自卫电子战系统对引信信号侦察的作用评估\*

廖辉荣<sup>1</sup>, 李国林<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 战略导弹工程系, 山东 烟台 264001)

**摘要:**分析了引信对抗的发展形势及其面临的复杂战场电磁环境, 论证了机载平台面临特定战术情况下自卫电子战系统对威胁导弹的无线电引信信号进行侦察的必要性。根据效率评定准则和功率评定准则, 建立了有侦察引导的对引信欺骗干扰的评估模型, 通过仿真计算与无侦察引导的噪声干扰模式进行比较。结果表明, 具有侦察引导的欺骗式干扰比噪声压制干扰能更好地降低来袭导弹引战配合效率, 提高机载平台的生存能力, 降低对干扰机功率的要求。

**关键词:**电子战; 电子对抗; 杀伤概率; 引战配合; 信号侦察

**中图分类号:** TN97      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.03.024

## Essentiality of Airborne Self-Protection Electronic Warfare System to Scout Fuze Signal

LIAO Hui-rong<sup>1</sup>, LI Guo-lin<sup>2</sup>

(1. Graduate Students' Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Department of Strategy Missile Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** The recent developing tendency and the complex electromagnetic environment of fuze countermeasure are analysed. The essentiality of the airborne self-protection electronic warfare (EW) to scout the attacking missile's fuze signal is demonstrated when the aircrafts are in special tactical environment. According to the assessment criteria of efficiency and power, an assessment model is established to compare deception jammer to noise jammer. Simulation indicates that deception jammer for electronic countermeasures (ECM) can decrease the effectiveness of the fuze warhead coordination, increase the probability of the aircraft's survival and reduce the power requirement of jammer more than the noise jammer.

**Key words:** electronic warfare (EW); electronic countermeasure (ECM); kill probability; fuze warhead coordination; signal detection

### 1 引言

纵观世界最近几次高技术局部战争, 从科索沃战争到第二次伊拉克战争, 都显示机载作战平台已严重受到地空导弹的威胁, 升级作战飞机上的现有电子战系统, 提高飞机生存能力已经成为共识。机载自卫电子对抗系统主要由威胁告警、侦察监视和

电子干扰等设备组成, 从战术使用上大体可以分为 4 个层次: 第一层即针对搜索截获系统的对抗; 第二层为针对跟踪雷达的告警和对抗; 第三层为针对制导系统的侦察和干扰; 第四层为针对引信的侦察和对抗。其中针对引信的对抗由于难度极大, 其发展尚处于薄弱状态, 实用装备中基本上都是采用简单的噪声压制干扰。

\* 收稿日期: 2010 - 10 - 20; 修回日期: 2011 - 02 - 23

随着引信信号形式及处理能力的发展,引信抗噪声干扰的能力越来越强,在复杂电磁环境中采用简单的阻塞式噪声压制或进行简单的测频引导干扰,其效果已经很有限。战场电磁环境的复杂性特征主要表现在信号密集、样式复杂、冲突激烈和动态交迭叠4个方面<sup>[1]</sup>,而其复杂程度可以根据信息装备和武器装备信息系统受其影响而丧失作战效能的情况来划分等级。

机载自卫电子战系统面临的战场环境中主要有自身机载平台的雷达、通信数据链信号,来袭导弹的跟踪制导雷达信号及无线电引信信号,防空系统的搜索及跟踪雷达信号,敌我识别器信号,敌方无线电通信信号,地面杂波及环境噪声等各种信号,信号样式繁杂,体制多样。无线电引信抗干扰能力较强的信号就有噪声引信、伪码脉冲引信、调频脉冲引信等多种信号波形。各种信号在空域、时域及频域冲突交错和动态交叠,严重制约着简单干扰模式的干扰效果,因此,十分有必要研究在对引信进行侦察的条件下进行新体制干扰。

本文通过分析导弹无线电引信对抗的现状,从效率评定准则和功率评定准则着手,建立了有侦察引导的对引信欺骗干扰的评估模型,来论证机载自卫电子战系统对导弹无线电引信信号侦察的必要性。

## 2 机载自卫电子战系统中的引信对抗

所谓的机载平台自卫电子战系统本质就是获取威胁信息,启动或调整相应的对抗措施。例如,俄产新型L370光电干扰机用于保护战斗和空降突击直升机免遭来袭导弹系统以及战斗机的攻击。当探测到威胁时,自动操作系统会通过多功能显示器及音频信号向机组人员发出告警,启动对抗措施并给出机动提示。

目前,机载自卫电子战系统总体思想上是对预警雷达和引信系统实施了压制性干扰,对导弹攻击雷达实施欺骗性干扰的电子战措施。例如,以色列的“飞行卫士(Flight Guard)系统”、韩国的“ALQ-X电子干扰系统”等针对射频引信的干扰方式都是采用噪声压制干扰。

噪声干扰波形具有自身固有的缺陷性。比如噪声质量因子,它是指理想情况下干扰机噪声应当尽可能接近高斯白噪声(例如接收机噪声)。对目前可行的在役或在研的干扰机的测量表明,与理想噪声

波形相比其噪声质量因子可引起大到17 dB的损失<sup>[2]</sup>。即便是对引信进行噪声干扰也需要对引信信号进行侦察测频,得到敌方射频引信的频率范围,以便对噪声干扰机进行快速频率引导,进行瞄准式噪声压制干扰,会比扫描式或阻塞式噪声干扰更经济高效。

同时,引信抗干扰技术不断发展,引信信号波形设计更加复杂先进,简单的噪声干扰越来越失去对引信的作用效果。例如,采用扩频体制的伪码脉冲引信能从较宽的接收带宽相干解调到较窄的信号带宽,从而得到很大的处理增益,取得对输入噪声很大的抗干扰能力。这就迫使对射频引信采用转发式或应答式的欺骗干扰方式。欺骗式干扰需要得知更多的目标信号的特征参数,对引信信号进行侦察和识别就必不可少。

## 3 效率评定准则下干扰性能对比分析

设对引信施加的干扰为 $\xi(t)$ ,引信接收机输入信号可表示为

$$x(t) = s(t; \alpha) + \xi(t) \quad (1)$$

式中, $s(t; \alpha)$ 为目标反射信号。设 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) \in \mathbf{B}$ 是表征目标距离、速度、DOA等信息的参数矢量, $\mathbf{B}$ 为引信作用区域内目标的 $k$ 维目标参量空间,当 $\beta \in \mathbf{B1} \subset \mathbf{B}$ 时,无线电引信发出执行指令, $\beta = \beta_0$ 时是无线电引信发出执行指令的最佳时刻;回波信号 $s(t, \alpha)$ ( $0 \leq t \leq T$ )可看作函数空间 $\mathbf{S}$ 中一个点, $T$ 为观测时宽, $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l) \in \mathbf{A}$ 为表征回波信号幅度、频率、相位、时延等参数的矢量, $\mathbf{A}$ 为 $l$ 维回波信号参数空间。无线电引信信号处理系统的任务是根据输入信号 $x(t)$ 判定 $s(t; \alpha)$ 是否属于启动区域内目标的回波信号。根据统计学知识,可将判决归结为二元假设检验问题,即检验如下两个假设 $H_0$ 和 $H_1$ 哪个为真:

$$\left. \begin{aligned} H_0: s(t) \notin \mathbf{S1} \text{ or } \alpha \notin \mathbf{A1} \text{ or } \beta \notin \mathbf{B1} \\ H_1: s(t) \in \mathbf{S1} \text{ or } \alpha \in \mathbf{A1} \text{ or } \beta \in \mathbf{B1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对应的判决也有两个: $d_0$ 表示作出 $H_0$ 为真的判决, $d_1$ 表示作出 $H_1$ 为真的判决。以 $C_{ij}$ 表示假设 $H_j$ 为真时而判决为 $d_i$ 时引入的损失或风险,得到风险矩阵为

$$\begin{matrix} & d_0 & d_1 \\ H_0 & \left[ \begin{array}{cc} C_{00} & C_{10} \\ C_{01} & C_{11} \end{array} \right] & \end{matrix} \quad (3)$$

如果先验概率  $P(H_0)$  和  $P(H_1)$  以及风险矩阵已知,那么可以根据 Bayes 准则得出判决规则为<sup>[3]</sup>

$$\Delta(x) = \frac{P(x|H_0)}{P(x|H_1)} \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} \frac{P(H_1)C_{01} - C_{11}}{P(H_0)C_{10} - C_{00}} \triangleq \Delta_0 \quad (4)$$

式(4)中的似然比  $\Delta(x)$  定义为假设  $H_0$  和  $H_1$  分别成立时,观测值  $x$  的条件概率之比。图 1 给出了根据一次观测值  $x(t)$  在假设  $H_0$  和  $H_1$  的条件下的条件概率密度函数的示意图。根据式(4)和图 1 解释无线电引信发生“早炸”和“瞎火”为:“早炸”就是当  $H_0$  为真而判决为  $d_1$ ,即  $\beta \notin B_1$  时就给出了启动信号;当  $H_1$  为真而判决为  $d_0$  时,即  $\beta \in B_1$  却没有给出启动信号,这时引信“瞎火”。

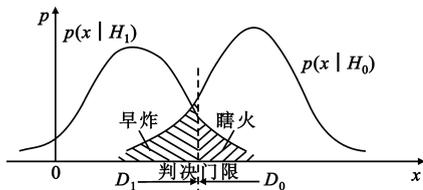


图 1 无线电引信早炸与瞎火的示意图  
Fig.1 Illustration of wireless jamming effects

如果限于单次观测,那么无线电引信可能发生两种错误,即“早炸”与“瞎火”。实际上,无线电引信一旦进入作用区域,就会对目标进行持续观测,并把处理后观测结果持续与能量门限进行比较,一旦超过门限就会引爆战斗部。这个过程可以理解为:在弹目交会过程中,引信接收机先对  $[0, T]$  内的观测信号进行处理判决,如果结果选择  $H_0$ ,那么继续对  $[dt, T + dt]$  内的观测信号进行判决,  $dt$  在模拟接收机中代表电路的延迟时间,而在数字接收机中代表一个采样间隔,如此不断进行处理和判决,一旦结果选择  $H_1$ ,则引爆战斗部。假设单次观测的“早炸”与“瞎火”概率都为 1%,那么可以算出 460 次独立观测的“早炸”概率为 99%,而连续 460 次独立观测的“瞎火”概率几乎为零。尽管在弹目交会的时间内独立观测次数不能达到这个数值,但它能说明:如果不存在闭锁电路或者干扰造成引信电路硬杀伤的情况下,有源干扰很难造成无线电引信的瞎火,因此干扰无线电引信的主要目的是造成无线电引信的早炸。

目前装备的电子战武器对导弹引信系统的干扰主要采用压制性干扰,引信系统因接收到大量的干扰信号而过早引爆战斗部,使战斗部杀伤效率下降。导弹杀伤效率的发挥,依赖于引信实际引爆区与战斗部有效启爆区的一致程度,这就是引战配合特性。

为了清楚地表示配合概率,我们假设机载平台的中心或质心为相对速度坐标系原点,坐标系如图 2 所示。

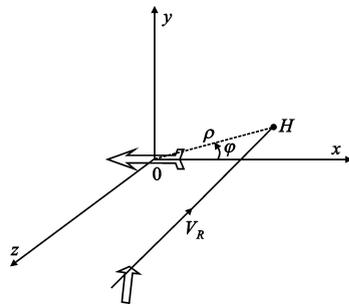


图 2 弹目交会几何关系图  
Fig.2 Geometric map of missile-target encountering

图 2 中  $\rho$  为脱靶量,  $\rho_{max}$  为最大脱靶距离,  $\varphi$  为脱靶方位角。设启动点为  $(z/\rho, \varphi)$  时,战斗部的条件杀伤概率为  $p_d(z/\rho, \varphi)$ ;弹着点为  $(\rho, z)$  时,引信启动点(炸点)沿坐标  $z$  轴分布的启动概率密度函数为  $f(z/\rho, \varphi)$ ;  $m_z$  为沿  $Z$  轴的平均启动位置,  $\sigma_z$  为启动位置散布的均方根值,  $g(\rho, \varphi)$  为由导引误差确定的,落点为  $(\rho, \varphi)$  时的概率密度函数,  $k$  为导弹武器系统的可靠性系数,则引战配合概率函数为

$$P_{df}(\rho, \varphi) = \int_{m_z - 3\sigma_z}^{m_z + 3\sigma_z} p_d(z/\rho, \varphi) f(z/\rho, \varphi) dz \quad (5)$$

而单发导弹毁伤概率表示为

$$p_1 = k \int_0^{\rho_{max}} \int_0^{2\pi} P_{df}(\rho, \varphi) g(\rho, \varphi) d\varphi d\rho \quad (6)$$

从式(5)可看出,只有当引信实际引爆区(启动点概率密度函数)落入战斗部有效启爆区(战斗部条件杀伤概率)内时,战斗部动态杀伤区才会穿过目标要害部位,杀伤概率增大,也就是引战配合效率提高。

图 3 表示的是在理想的引战配合效率情况下,引信实际引爆区与战斗部有效启爆区的关系。图 4 表示的是“早炸”情况下,引信实际引爆区与战斗部有效启爆区错位的情况下,引战配合效率形成情况。

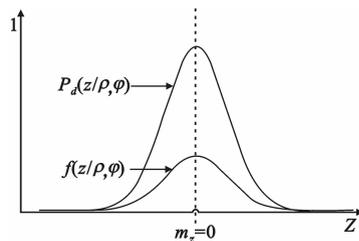


图 3 理想的引战配合效率示意图  
Fig.3 Illustration of idea fuze warhead coordination effectiveness

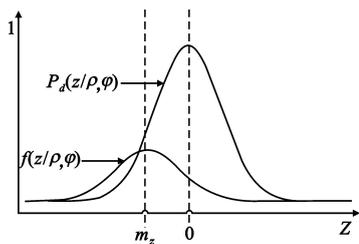


图 4 “早炸”情况下的引战配合效率图  
Fig. 4 Illustration of fuze warhead coordination effectiveness under early burst condition

### 4 功率评定准则下干扰性能对比分析

对引信的压制干扰,无论是阻塞式干扰还是扫描干扰,要想达到干扰引信的目的(使其“早炸”),必须有足够的功率压制引信的功率。

在引信具有抗干扰设计的情况下,干扰机为达到预期的干扰效果所需的最小干扰功率为<sup>[4]</sup>

$$P_g = \frac{(4\pi r_0)^2}{G_g(\theta) G_r(\theta_j) \lambda^2 \gamma_g} \left( \frac{\Delta F_{ge}}{2\Delta f_a} \right) \delta_r P_{rs} \quad (7)$$

式中,  $\delta_r$  为引信接收机中采用干扰识别和抗干扰电路时其功率改善因子,  $P_{rs}$  为引信正常启动信号功率电平,  $\Delta f_a$  为引信接收机带宽,  $\Delta F_{ge}$  为干扰机噪声调频等效频偏,  $G_g(\theta)$  为干扰机天线在引信方向上的增益,  $G_r(\theta_j)$  为引信天线在干扰机方向上的增益,  $\gamma_g$  为极化失配系数。

设  $\eta = \frac{\Delta F_{ge}}{2\Delta f_a}$  为频谱系数,由式(7)可知,最小干扰功率是与  $\eta \delta_r$  成正比的。一般在压制干扰情况下,引信频谱系数和改善因子都能达到 20 dB 以上。而在对引信信号进行侦察识别后,引导干扰机进行欺骗式干扰,频谱系数和改善因子能降到接近 0 dB,也就是说对干扰功率的要求降低近百倍。

如果干扰功率增大,就意味着干扰设备的体积、质量增大,成本也增高,特别是机载自卫电子对抗系统的体积和质量都受到严重限制。

### 5 同等干扰功率下对引战配合效率影响的对比仿真分析

由式(7)可知,在一定的干扰功率下,使引信启爆的弹目距离可表示如下:

$$r_0 = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{P_g}{P_{rs}} \cdot \frac{G_g(\theta) G_r(\theta_j) \lambda^2 \gamma_g}{\eta \delta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

在此种干扰情况下,引信沿 Z 轴平均启爆位置  $m_z$

可从几何关系上推导如下:

$$m_z = (r_0^2 - \rho^2)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

把式(8)代入式(9),再把式(9)代入到式(5)中,并根据数理统计理论中的中心极限定理,可以认为启动点分布密度函数为正态分布函数,因此可设:

$$f(z/\rho, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left\{-\frac{(z - m_z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \quad (10)$$

同理可设:

$$P_d(z/\rho, \varphi) = \exp\left\{-\frac{z^2}{2\sigma_d^2}\right\} \quad (11)$$

这样就得到下式:

$$P_{df} = \int_{m_z - 3\sigma_z}^{m_z + 3\sigma_z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left\{-\frac{(z - m_z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \exp\left\{-\frac{z^2}{2\sigma_d^2}\right\} dz \quad (12)$$

其中:

$$m_z = \left[ \frac{1}{4\pi P_{rs}} \frac{P_g G_g(\theta) G_r(\theta_j) \lambda^2 \gamma_g}{\eta \delta_r} - \rho^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

噪声压制干扰与欺骗式干扰的影响区别主要在于对式(13)中参数  $\eta \delta_r$  的影响。在其它参数取典型值的情况下,  $\eta \delta_r$  取 0 ~ 10 dB,进行仿真计算,结果如图 5 所示。

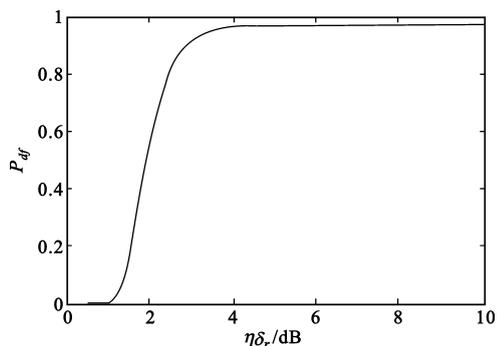


图 5 引战配合效率变化仿真图  
Fig. 5 Simulation result of the change of fuze warhead coordination effectiveness

从图中可以看出,在其它参数取经典值的情况下,当  $\eta \delta_r$  降到 4 dB 以下时,引信的引战配合效率会随着急剧降低,而  $\eta \delta_r$  的下降与对引信信号侦察识别引导干扰机进行对抗有直接关系。

### 6 欺骗式干扰中的信号侦察

欺骗式干扰波形能更有效地利用干扰能量来干扰引信系统,其主要优点就是所有干扰功率均能被

引信接收机所吸收,引信系统的抗干扰信号处理增益也可部分被抵消或全部被抵消<sup>[5]</sup>。例如转发式欺骗干扰对脉冲多普勒引信极有效(与噪声干扰相比),因为这种引信采用相干积累技术,对噪声干扰有很大的处理增益,可将噪声干扰信号衰减 20 ~ 60 dB,而类似回波信号的转发式欺骗干扰信号则不会被衰减。

但转发式欺骗干扰必须截获并存储引信信号波形的基本频谱和时域特性<sup>[6]</sup>,这就需要自卫电子战系统在复杂电磁对抗环境中侦察截获并识别引信信号,对信号进行瞬时测频。要实现引信信号的识别就必须对信号的时域参数如脉冲宽度、脉冲重复频率等进行侦测。

应答式欺骗干扰则是典型的先侦察后引导干扰的干扰方式,首先侦察接收机捕获信号环境,然后分析环境以便分选出特定类型引信信号,再进行参数识别并作出实施干扰的决定。把压控振荡器(VCO)或直接数字频率合成器(DDS)调谐到引信信号频率并进行时域调制,在合适的时间将此干扰波形信号发射回去,使引信早炸或瞎火,降低引战配合效率。

采用 DDS 技术可以精确产生侦察到的复杂引信脉内波形,从而合成目标引信信号波形,例如脉冲压缩或编码波形。这样,干扰波形可以进入引信接收机的匹配滤波网络,从而抵消引信的处理增益。

## 7 结 论

从干扰对引信抗干扰功率改善因子及干扰频谱系数的作用来计算分析干扰对引信引战配合效率的影响,证明了具有侦察引导的欺骗式干扰比噪声压制干扰能更好地降低来袭导弹引战配合效率,提高机载平台的生存能力,降低对干扰机功率的要求。在电磁环境日趋复杂以及引信对抗面临新的挑战情况下,有侦察引导的欺骗式干扰将得到更充分的重视并发挥更大的价值。

### 参考文献:

[1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京: 解放军出版社, 2006: 17.

WANG Ru - qun. Electromagnetic environment of battlefield [M]. Beijing: PLA Press, 2006: 17. (in Chinese)

[2] Curtis D Schleher. Electronic Warfare in the Information Age [M]. New York: Artech House, 1999: 151 - 153.

[3] 张旭东, 郑世举, 于德瑛. 国外无线电引信干扰机的发展状况[J]. 制导与引信, 2004, 25(4): 22 - 25.

ZHANG Xu - dong, ZHENG Shi - ju, YU De - ying. The recent development of abroad radio fuze jammer[J]. Guidance and Fuze, 2004, 25(4): 22 - 25. (in Chinese)

[4] 梁棠文. 防空导弹引信设计及仿真技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 135.

LIANG Tang - wen. Fuze design and simulation technique of anti - aircraft missile [M]. Beijing: Aerospace Press, 1995: 135. (in Chinese)

[5] 杜汉卿. 无线电引信抗干扰实验研究与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 1996: 5.

DU Han - qing. The study and analysis on anti - jamming experiment of radio fuze [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1996: 5. (in Chinese)

[6] 王雪松, 刘建成, 张文明, 等. 间歇采样转发干扰的数学原理[J]. 中国科学(E 辑), 2006, 36(8): 891 - 901.

WANG Xue - song, LIU Jian - cheng, ZHANG Wen - ming, et al. The principles of mathematics in repeater jamming base on interrupted sampling [J]. Science in China (Series E), 2006, 36(8): 891 - 901. (in Chinese)

### 作者简介:

廖辉荣(1982 - ), 男, 湖南衡阳人, 海军航空工程学院博士研究生, 主要研究方向为目标中近程探测识别、信息对抗与数据融合;

LIAO Hui - rong was born in Hengyang, Hunan Province, in 1982. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research interests include short - range target detection, information warfare and data fusion.

Email: liaohuirong8205@163.com

李国林(1955 - ), 男, 吉林省吉林市人, 1999 年获博士学位, 现为教授、博士生导师, 主要研究方向为目标中近程探测识别、信息对抗。

LI Guo - lin was born in Jilin, Jilin Province, in 1955. He received the Ph. D. degree in 1999. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include short - range target detection and information warfare.