

# 红外空空导弹抗干扰性能评估方法研究

胡朝晖, 闫杰

(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**为解决红外空空导弹抗干扰性能难于定量评估问题,给出了一种新的评估方法,用于在定型阶段对导弹的抗干扰性能进行鉴定。该方法首先规划了导弹抗干扰试验。为便于对试验结果进行深入研究,将导弹抗干扰试验分解为导引头抗干扰试验和导弹控制系统抗干扰试验。导引头抗干扰试验分为数字仿真、半实物仿真、系留飞行和靶场发射试验,导弹控制系统抗干扰试验分为数字仿真、半实物仿真和靶场发射试验,通过多层贝叶斯估计分别得到了导引头和控制系统抗干扰概率模型,再利用二阶矩等效方法,推导出了由导引头和控制系统串联组成的导弹系统抗干扰评估模型。算例分析表明,该方法与传统统计方法相比,具有结果可靠、精度高的优点,且能给出抗干扰概率的置信区间。

**关键词:**空空导弹;红外抗干扰;性能评估;多层贝叶斯估计;二阶矩等效方法

**中图分类号:** V328.5;TB114.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)04-0044-06

随着红外对抗技术的迅猛发展,电子战已经贯穿到整个空战过程中,抗干扰能力弱的红外空空导弹在未来的空战中作用将非常有限,这使导弹的抗干扰性能试验和评估受到了密切关注<sup>[1]</sup>。

对导弹抗干扰性能进行评估是研究和改进导弹抗干扰性能的重要内容。过去,由于无法对导弹的许多性能进行定量计算,常常采用专家打分法,由相关专业的专家根据已有数据和资料,结合专家经验,定量给出导弹的性能评估结果。这种方法由于人为因素影响大,可信性不高,无法用于导弹的抗干扰性能评估中。

在工程实践中,还常常采用基于靶场“几发几中”模式的评估手段,该方法通过对定型阶段的靶试结果直接统计,给出导弹性能的评估结果。由于导弹的抗干扰性能受多种不可控随机因素的影响,只有进行大量重复试验才能通过统计方法揭示导弹的性能高低,并给出定量评估结果,但是导弹价格昂贵和研制时间的限制,已无法进行大量的靶场发射试验,这使传统评估方法也难于应用到红外空空导弹的抗干扰性能评估中去。

近年来,随着计算机技术和武器评估理论的快速发展,对导弹系统进行系统分析,然后进行数字仿真试验、半实物仿真试验和系留飞行试验,将获得的数据作为验前信息,结合靶场发射试验数据,应用一定的数学方法来评估导弹性能的方法受到了国内外的广泛关注<sup>[2-4]</sup>。

文中提出了一种导弹抗干扰性能评估方法,该方法将导弹定型阶段的数字仿真、半实物仿真和系留飞行试验结果作为验前信息,以弥补靶场发射试验样本量的不足,通过贝叶斯估计算法和二阶矩等效法,推导了空空导弹在整个攻击区内的综合抗干扰性能评估模型,为合理评估红外空空导弹的抗干扰性能提供了一种新的途径。

## 1 红外空空导弹抗干扰试验内容

数字仿真是在计算机平台上进行,在导弹数学模型完成 VV&A 情况下,数字仿真是获取导弹抗干扰性

收稿日期:2007-10-08

基金项目:国防预研基金资助项目(402070201)

作者简介:胡朝晖(1968-),男,河北霸县人,讲师,博士生,主要从事航空火控系统总体设计原理研究。

E-mail:huchaohui123@163.com

能结果完备样本的主要方式,它是最经济的试验方法,可对导弹抗干扰过程进行深入的研究,在性能评定、统计分析和试验结果复现等方面,数字仿真更具灵活性。

半实物仿真是在全数学仿真基础上用实物导引头、飞行控制子系统代替全数学仿真中相应的数学模型,并增加半实物仿真专用设备构成与全数学仿真方块图类似的大闭环回路。半实物仿真中所用的一些数学模型和仿真程序仍然与全数学仿真中所用的一样,以保证全数学仿真与半实物仿真数学模型和仿真程序的一致性。半实物仿真的优点是可以大量做试验,灵活设定抗干扰试验参数,能取得较大的样本,试验成本较高,研制周期长,试验组织也较复杂。

导弹抗干扰系留飞行试验是目前导弹武器靶场发射试验前一种重要的试验,它既考核了导弹的跟踪性能、抗干扰性能,又考核了导弹和载机的适应性性能,还考核了导弹在真实环境下对飞机振动的适应能力,系留飞行试验可以取得较大的样本。

靶场发射试验能够测试导弹在真实环境中的命中精度,能够对数字仿真、半实物仿真试验进行验证。靶场发射试验由于导弹和试验费用无法进行大量试验。

为了充分试验导弹的抗干扰性能,在红外空空导弹研发阶段将进行大量的抗干扰试验。为了便于试验和提高评估精度,将导弹抗干扰试验分成导引头抗干扰试验和控制系统抗干扰试验两部分,这两部分按串联组成整个系统,导引头抗干扰试验流程如图1<sup>[5]</sup>所示,导弹控制系统抗干扰试验流程如图2所示。

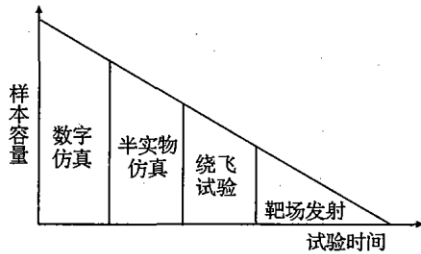


图1 导引头抗干扰试验流程  
Fig.1 Seeker IRCM test flow

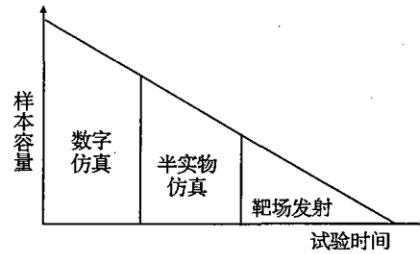


图2 导弹控制系统抗干扰试验流程  
Fig.2 G&C IRCM test flow

## 2 导弹抗干扰评估算法推导

通过抗干扰试验,能够得到大量的导引头以及控制系统抗干扰试验数据样本,贝叶斯方法可将验前信息和当前试验结果样本信息融合在一起计算后验分布,贝叶斯公式<sup>[6-7]</sup>为

$$h(\theta | x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta)h(\theta)}{\int_0^1 f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta)h(\theta)d(\theta)} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为总体  $X$  的分布参数;  $h(\theta)$  为验前分布密度参数;  $h(\theta | x_1, x_2, \dots, x_n)$  为  $\theta$  的后验分布;  $f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta)$  为以  $\theta$  为条件的条件分布。

### 2.1 导引头抗干扰概率评估模型

如图1所示,导引头抗干扰试验分为4级,其抗干扰试验结果服从贝努利分布。假设导引头抗干扰概率无信息先验分布服从 $[0,1]$ 均匀分布, $\theta$ 为导引头抗干扰概率, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为导引头抗干扰数字仿真数据,由式(1)可得  $\theta$  的后验分布为

$$h(\theta | x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\Gamma(n+2)}{\Gamma(\sum x_i + 1)\Gamma(n - \sum x_i + 1)} \theta^{\sum x_i} (1-\theta)^{n - \sum x_i} \quad (2)$$

由贝塔分布的定义可知,  $h(\theta | x_1, x_2, \dots, x_n)$  服从  $B(\sum_{i=1}^n x_i + 1, n - \sum_{i=1}^n x_i + 1)$ , 记为  $B(a, b)$ 。

则  $\theta$  的贝叶斯估计为

$$\hat{\theta} = E(\theta | x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i + 1}{n + 2} \quad (3)$$

进行下一级评估时,可明确知道导引头抗干扰概率分布为贝塔分布,再利用半实物仿真试验所得数据  $y_1, y_2, \dots, y_j$ , 继续采用贝叶斯方法推断导引头的抗干扰概率,得  $\theta$  的后验分布为

$$h(\theta | y_1, y_2, \dots, y_j) = \frac{\Gamma(a+b+n)}{\Gamma(a+\sum y_j)\Gamma(b+n-\sum y_j)} \theta^{a+\sum y_j-1} (1-\theta)^{b+n-\sum y_j-1} \quad (4)$$

由贝塔分布的定义知,  $h(\theta | y_1, y_2, \dots, y_j)$  仍然服从贝塔分布,且  $\theta$  的贝叶斯估计为

$$\hat{\theta} = E(\theta | x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i + 1}{n+j+2} \quad (5)$$

由以上推导可知,贝塔分布的贝叶斯估计仍为贝塔分布。则利用系留飞行抗干扰试验数据  $z_1, z_2, \dots, z_k$  和靶场发射试验数据  $r_1, r_2, \dots, r_l$  采用贝叶斯估计方法,可得导引头抗干扰概率  $\theta$  的贝叶斯估计为

$$P_1 = \hat{\theta} = E(\theta | x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n z_i + \sum_{i=1}^n r_i + 1}{n+j+k+l+2} \quad (6)$$

$\hat{\theta}$  服从  $B(a, b)$ ,  $a = \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n z_i + \sum_{i=1}^n r_i + 1$ ,  $b = n+j+k+l-a+2$ , 则  $\frac{b}{a} \frac{P_1}{a_1 - P_1} = F(2a, 2b)$ , 令:

$$P\{F \frac{\gamma}{2}(2a, 2b) \leq \frac{b}{a} \frac{P_1}{a_1 - P_1} \leq F1 - \frac{\gamma}{2}(2a, 2b)\} = 1 - \gamma \quad (7)$$

求解式(7)得导引头抗干扰概率的区间估计为

$$\left[ \begin{array}{cc} aF_{\frac{\gamma}{2}}(2a, 2b) & aF_{1-\frac{\gamma}{2}}(2a, 2b) \\ b + aF_{\frac{\gamma}{2}}(2a, 2b) & b + aF_{1-\frac{\gamma}{2}}(2a, 2b) \end{array} \right] \quad (8)$$

## 2.2 控制系统抗干扰概率评估模型

如图2所示,导弹控制系统抗干扰试验分为3级,其抗干扰试验数据——脱靶量服从瑞利分布。由于导弹抗干扰数字仿真得到的脱靶量  $r$  服从瑞利分布  $p(r/\sigma^2)$ , 即

$$p(r/\sigma^2) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & r > 0 \\ 0 & r \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\sigma^2$  是未知量,是脱靶量的均方,把  $\sigma^2$  看成随机变量,即  $\theta = \sigma^2$ , 则  $r_1, r_2, \dots, r_n$  对  $\theta$  的条件密度为

$$f(r_1, r_2, \dots, r_n | \theta) = \prod_{i=1}^n \frac{r_i}{\theta} e^{-\frac{r_i^2}{2\theta}} = \prod_{i=1}^n r_i \theta^{-n} e^{-\frac{1}{2\theta} \sum r_i^2} \quad (10)$$

用广义先验分布作为无信息先验分布函数,即

$$h(\theta) = 1/D \quad D \in \mathbf{R}^+ \quad (11)$$

式中,  $\theta = D = \sigma^2$ , 对于样本  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , 由贝叶斯公式(1)可以求出  $\theta$  的后验分布为

$$h(\theta | r_1, r_2, \dots, r_n) = \frac{(\sum r_i^2/2)^n}{\Gamma(n)} \theta^{-(n+1)} e^{-\frac{1}{2\theta} \sum r_i^2} \quad (12)$$

即  $\theta$  服从逆伽马分布  $g(\alpha, \beta)$ , 且  $\theta$  的贝叶斯估计为

$$\hat{\theta} = E(\theta | \mathbf{R}) = \frac{1}{n} \sum r_i^2 \quad (13)$$

利用半实物仿真数据,采用贝叶斯估计方法来进行下一级评估,可知先验分布为逆伽马分布,其中  $x_1, x_2, \dots, x_m$  是来自瑞利分布总体的导弹半实物仿真数据样本,贝叶斯估计的先验分布为

$$h(\theta) = \begin{cases} \frac{\alpha^\beta}{\Gamma(\beta)} \theta^{-(\beta+1)} e^{-\frac{\alpha}{\theta}} & \theta \geq 0 \\ 0 & \theta < 0 \end{cases} \quad (14)$$

由贝叶斯公式可以求出  $\theta$  的后验分布为

$$h(\theta | r_1, r_2, \dots, r_m) = \frac{(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m x_i^2 + \alpha)^{(m+\beta)}}{\Gamma(m+\beta)} \theta^{-(m+\beta+1)} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m x_i^2 + \alpha} \theta^{-1} \quad (15)$$

由定义知,  $h(\theta | r_1, r_2, \dots, r_m)$  仍服从逆伽马分布, 且  $\theta$  的贝叶斯估计为

$$\hat{\theta} = E(\theta | x) = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m x_i^2}{n+m} \quad (16)$$

由式(9) - 式(16) 推导可知, 逆伽马分布的贝叶斯估计仍为逆伽马分布, 利用来自瑞利分布总体的靶场发射试验数据样本  $z_1, z_2, \dots, z_j$ , 可再次估计  $\theta$  的值:

$$\hat{\theta} = E(\theta | z) = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m x_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^j z_i^2}{n+m+j} \quad (17)$$

$\theta$  服从  $g(\alpha, \beta)$ , 其中:

$$\alpha = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m x_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^j z_i^2, \beta = n+m+j$$

可以得到  $\theta$  估计的置信区间:

$$\left[ \frac{2\alpha}{\chi_{\gamma}^2(2\beta)}, \frac{2\alpha}{\chi_{1-\gamma}^2(2\beta)} \right] \quad (18)$$

当杀伤半径为  $R_0$  时得导弹的杀伤概率  $P_2$  为

$$P_2 = \int_0^{R_0} \frac{r}{\theta} e^{-\frac{r^2}{2\theta}} dr = 1 - e^{-\frac{R_0^2}{2\theta}} \quad (19)$$

### 2.3 导弹综合抗干扰概率评估模型

按照可靠性串联系统理论, 导弹的综合抗干扰概率为

$$P_{\Sigma} = P_1 P_2 \quad (20)$$

由于  $P_1$  和  $P_2$  的分布不同,  $P_{\Sigma}$  的精确置信区间难于计算, 可用贝叶斯近似限的方法求出导弹抗干扰性能近似分布。

设导弹综合抗干扰概率  $P_{\Sigma}$  近似服从贝塔分布, 利用贝塔分布与 F 分布之间的关系, 可给出由导引头抗干扰性能与导弹控制系统抗干扰性能组成的两单元串联系统的近似置信区间<sup>[8-10]</sup>。由式(16) 得

$$\theta = \sigma^2 = \frac{-R_0^2}{2\ln(1-P_2)} \sim g(\alpha, \beta) \quad (21)$$

则

$$P\{\theta < x\} = P\left\{x > \frac{-R^2}{2\ln(1-P_2)}\right\} = \int_{\frac{-R^2}{2\ln(1-P_2)}}^{+\infty} \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{-\alpha-1} e^{-\frac{\beta}{x}} dx \quad (22)$$

得导弹控制系统抗干扰概率的密度为

$$f(P_2) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \left(\frac{2}{R_0^2}\right)^\alpha [-(1-P_2)]^{-\alpha-1} (1-P_2) \frac{2\beta - R_0^2}{R_0^2} \quad (23)$$

由于:  $P_1$  属于  $B(a, b)$ ,  $P_2$  属于  $f(P_2)$ , 导引头抗干扰概率的一、二阶矩为

$$\begin{cases} EP_1 = \frac{a}{a+b} \\ EP_1^2 = \frac{a(a+b)}{(a+b)(a+b+1)} \end{cases} \quad (24)$$

得导弹控制系统抗干扰概率的一、二阶矩为

$$\begin{cases} EP_2 = 1 - \left(\frac{2\beta}{2\beta + R_0^2}\right)^\alpha \\ EP_2^2 = 1 - \left(\frac{2\beta}{2\beta + R_0^2}\right)^\alpha + \left(\frac{\beta}{\beta + R_0^2}\right)^\alpha \end{cases} \quad (25)$$

串联系统的一阶矩  $\mu$  和二阶距  $v$  为

$$\begin{cases} \mu = EP_1EP_2 \\ v = EP_1^2EP_2^2 \end{cases} \quad (26)$$

设由导引头和控制系统组成的串联系统抗干扰分布服从贝塔分布  $B(\alpha, \beta)$ , 用一阶矩为  $\mu$  和二阶距为  $v$  的系统来拟合串联系统:

$$\int_0^1 p^k f(p) dp = \int_0^1 p^k \tilde{f}(p) dp \quad k = 1, 2 \quad (27)$$

求解式(27), 得串联系统贝塔分布参数为

$$\begin{cases} a = \frac{\mu^2 - \mu v}{v - \mu^2} \\ b = \frac{(\mu - v)(1 - \mu)}{v - \mu^2} \end{cases} \quad (28)$$

参考式(8) 可得导弹抗干扰概率的近似区间估计为

$$\left[ \frac{aF_{\frac{\alpha}{2}}(2a, ab)}{b + aF_{\frac{\alpha}{2}}(2a, ab)}, \frac{aF_{1-\frac{\alpha}{2}}(2a, ab)}{b + aF_{1-\frac{\alpha}{2}}(2a, ab)} \right] \quad (29)$$

### 3 算例分析

导弹型号研制完成后, 对收集到的导引头抗干扰数字仿真、半实物仿真、系留飞行试验和靶场发射试验数据进行统计处理, 得到的导引头抗干扰试验统计结果见表1, 导弹控制系统抗干扰试验统计如表2所示。

表2中导弹靶场发射试验中的9枚导弹导引头全部实现了抗干扰, 则导引头抗干扰概率为1。

表1 导引头抗干扰试验统计数据

试验阶段	点估计	95%的置信区间
数字仿真	0.84	(0.81, 0.87)
半实物仿真	0.83	(0.81, 0.85)
绕飞试验	0.84	(0.82, 0.85)
靶场发射试验	1.00	

表2 干扰条件导弹控制系统命中概率统计值

试验阶段	脱靶量/m	置信区间	命中概率
数字仿真	9.81	(8.51, 11.11)	0.918
半实物仿真	9.89	(8.39, 11.39)	0.916
靶场发射试验	8.19	(6.49, 9.89)	0.950

#### 3.1 传统评估方法

传统评估方法基于靶场“几发几中”模式, 只利用靶场发射试验数据计算。表1中导引头靶场发射试验抗干扰概率为1, 而表2中控制系统靶场发射试验抗干扰概率为0.95, 则根据式(20)得导弹抗干扰概率为:  $P_{\Sigma} = 0.95$ 。

#### 3.2 本文评估方法

通过本文提出的估计算法, 计算出的导弹抗干扰概率如表3所示。

通过以上计算结果对比看出, 由于试验条件的局限性, 少量靶场发射试验结果难于得到可靠的评估结论, 要全面、可靠地评估导弹的抗干扰性能, 必须以仿真抗干扰试验为主, 结合少量的靶场抗干扰发射试验, 才能得到比较可靠的评估结果。

### 4 结论

本文推导的贝叶斯估计算法, 为红外空空导弹的抗干扰评估提供了一种较精确的算法, 它克服了传统统计方法的不足, 减小了靶场发射试验偶然性和随机性因素对评定结果的影响, 为红外空空导弹的定型鉴定提供了一种有利的工具。

表3 导弹抗干扰概率贝叶斯估计值

Tab. 3 Missile IRCM probability bayesian evaluation

统计阶段	抗干扰概率点估计	置信区间
导引头 $P_1$	0.81	(0.76, 0.84)
控制系统 $P_2$	0.94	(0.91, 0.96)
导弹 $P_{\Sigma}$	0.75	(0.62, 0.88)

## 参考文献:

- [ 1 ] 高卫,黄惠明,李军. 光电干扰结果评估方法[M]. 北京:国防工业出版社,2006.  
GAO Wei, HUANG Huiming, LI Jun. Evaluation Methods for Electro-optical Jamming Effectiveness[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [ 2 ] Marcus L. Skelley Integrated Test and Evaluation for the 21st Century[R]. AIAA-2004-6873, 2003.
- [ 3 ] Major Donald Paul Waters. Integrating Modeling and Simulation with Test and Evaluation Activities[R]. AIAA-2004-6873, 2004.
- [ 4 ] 徐廷学,顾钧元,高鸣,等. 无失效试验数据系统可靠性评估方法研究[J]. 海军航空工程学院学报,2008,23(1):95-97.  
XU Tingxue, GU Junyuan, GAO Ming, et al. Research on Reliability Estimation Method for Zero-failure Test Data[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautics University, 2008, 23(1):95-97. (in Chinese)
- [ 5 ] 吴志红,董敏周,王建华,等. 红外导引头抗人工干扰性能评估方法[J]. 系统仿真学报,2005,(3):764-767.  
WU Zhihong, DONG Minzhou, WANG Jianhua, et al. An Evaluation Method for IR-Counter-Countermeasures Performance of IR-Seeker[J]. Journal of System Simulation, 2005, (3):764-767. (in Chinese)
- [ 6 ] David T Rusk, Kuen Y, David D, et al. Ridgeway. Bayesian Updating of Damage Size Probabilities for Aircraft Structural Life-cycle Management[R]. AIAA-2001-1646, 2001.
- [ 7 ] Guikema Seth D. Elisabeth Patém. Bayes Analysis of Launch Vehicle Reliability[R]. AIAA Paper 2003-1175, 2003.
- [ 8 ] 周源泉,翁朝曦. 可靠性评定[M]. 北京:科学出版社,1990.  
ZHOU Yuanquan, WENG Chaoyi. Reliability Assessment[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [ 9 ] 蔡洪,张士峰,张金槐. Bayes 试验分析与评估[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2004.  
CAI Hong, ZHANG Shifeng, ZHANG Jinhui. Bayesian Test Analysis and Evaluation[M]. Changsha: National Science and Technology University Press, 2004. (in Chinese)
- [ 10 ] Irwin Miller, Marylees Miller, John E. Freund's Mathematical Statistics with Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

(编辑:田新华)

## An Evaluation Method of Infrared Missile Countermeasures Performance

HU Zhao-hui, YAN Jie

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'An, 710072, China)

**Abstract:** A new method is given in this paper in order to evaluate the air-to-air missile (AAM) infrared countermeasures (IRCM) performance, the method can be used in detecting IR missile in the assessment phase. By using this method, IRCM tests are analyzed and programmed first, then each missile IRCM test is decomposed into seeker IRCM test and guide & control (G&C) IRCM test in order to measure test data accurately. The resource categories of seeker IRCM test include digital simulation (DSM), hard-in-loop simulation (HTIL), installed systems (ITLS) test and launch test, the resource categories of G&C IRCM test include DSM, HTIL and launch test. By hierarchical Bayesian analysis method the seeker IRCM probability model and the G&C IRCM probability model are deduced, then by Second-moment-equivalent assessment of serial reliability the missile IRCM probability is got. In comparison with the traditional evaluation method, the method discussed in this paper is reliable and precise, and by using it the confidence interval of the AAM IRCM probability can be obtained.

**Key words:** air-to-air missile; infrared countermeasures; performance evaluation; hierarchical Bayesian evaluation; second-moment-equivalent assessment