

〈制导与对抗〉

雷达/红外复合导引头抗干扰指标体系研究

李 学, 王学伟

(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 雷达/红外复合导引头抗干扰能力评估对精确制导武器的发展具有重大推动作用。通过分析复合导引头的工作原理, 抗干扰效能评估准则以及指标体系构建原则, 系统构建了雷达/红外复合导引头抗干扰指标体系, 并对指标因子进行了建模分析。

关键词: 雷达/红外; 复合导引; 抗干扰能力; 指标体系

中图分类号: TN97 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)03-0258-05

Research of Radar/IR Composite Seeker Anti-jamming Index System

LI Xue, WANG Xue-wei

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The development of precision-guided weapons is promoted by Radar/IR composite seeker anti-jamming capability assessment. The working principle of composite seeker, anti-jamming effectiveness evaluation criteria and construction principles of indicators are analyzed. Radar/IR composite seeker anti-jamming index system is established and analyzed by modeling.

Key words: radar/IR, composite guide, anti-jamming capability, index system

0 引言

随着制导技术的飞速发展, 雷达/红外复合制导导弹以其特有的抗干扰能力, 越来越受到国内外重视, 国内多型雷达/红外复合制导导引头已进入靶场试验阶段。由于靶场试验耗费巨大, 更多的采用半实物仿真对导引头性能进行全面的测试, 抗干扰能力是描述导引头性能的重要指标, 王涛^[1]等提出了导弹抗干扰能力多维度评估方法, 庞艳静^[2]提出了基于层次分析法的导弹抗干扰能力评估方法, 这些方法未能形成一个指标体系。复合导引头抗干扰指标体系构建是评估导引头抗干扰效能的难点和重点, 抗干扰指标的选取直接影响评估结果的可信度^[3]。目前, 雷达/红外复合导引头抗干扰指标体系的研究在国内外可查阅文献中鲜有涉及, 但其中针对雷达导引头抗干扰指标体系的研究较多。本论文通过分析雷达/红外复合导引头工作原理以及抗干扰效能评估准则, 在参考雷达抗干扰指标体系的基础上, 系统的构建了雷达/红外复合导引头的抗干扰指标体系, 并对指标因子的正确性、应用

范围进行了分析。

1 工作原理

雷达/红外复合导引头工作模式可以分为 4 个模块: 正常跟踪模块、干扰检测模块、决策模块、抗干扰跟踪模块^[4-5]。工作模式转换如图 1 所示。

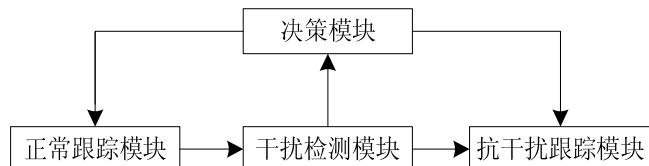


图 1 雷达/红外复合导引头工作模式

Fig.1 Work mode of Radar/IR composite seeker

复合导引头在正常跟踪模块工作时, 导引头通过不断获取的稳定目标信息, 对目标进行跟踪^[6]。干扰检测模块通过对正常跟踪时记录的目标辐射能量以及量测角度的变化判断是否出现假目标。干扰检测模块的信息进入决策模块, 决策模块根据设定的阈值判断进入正常跟踪模块或抗干扰跟踪模块。抗干扰跟

踪模块工作时, 系统根据干扰的不同采取不同的抗干扰措施实现对目标的跟踪。

2 评估准则

选择正确的效能评估准则, 是进行复合导引头抗干扰效能评估的基础。评估准则选择得是否合适, 将直接关系到效能评估的科学性与合理性。因此, 在研究雷达/红外复合导引头抗干扰效能评估中, 必须科学合理地选择有效的评估准则^[7-8]。

在进行抗干扰效能评估时, 主要有以下几个评估准则:

- 1) 信息准则;
- 2) 效率准则(战术应用准则);
- 3) 功率准则;
- 4) 时间准则。

信息准则利用导引头受噪声干扰后损失的信息衡量干扰效果, 不确定性大, 不方便使用。而效率准则、功率准则、时间准则分别通过导引头完成本事使命能力、有无干扰时系统信干比、排除干扰正常跟踪的反应时间来衡量干扰效果, 直观有效。在实际运用中, 单独运用一种评估准则选取复合导引头抗干扰效能评估指标, 往往不能较全面地反映复合导引头的抗干扰性能。本文针对各评估指标的特点, 在选取抗干扰效能评估指标时, 综合运用了效率准则、功率准则、时间准则。

3 构建原则

雷达/红外复合导引头抗干扰效能评估由于其指标众多, 并且各个指标属性不一, 因此它属于多指标综合评价的范畴。多指标综合评价是将反映研究对象不同属性的多个指标的信息联合起来, 得到一个综合指标, 由此来反映被评价对象的整体情况, 指标选择是进行多指标综合评价的首要工作, 它的主要任务是构建一个能够完整反映研究对象总体属性的指标体系^[9]。要使评估结果可信, 必须要建立起科学、合理的指标体系。在建立指标体系的过程中一般要遵循以下几个原则:

- 1) 完备性原则;
- 2) 客观性原则;
- 3) 系统性原则: ①相关性问题, ②层次性问题, ③整体性问题, ④综合性问题;
- 4) 可测性原则;
- 5) 突出性原则;
- 6) 可比性原则;
- 7) 定性与定量相结合的原则。

上述各项原则之间并不是毫无关系的。在建立雷达/红外复合导引头抗干扰指标体系的时候, 首先要根据系统性的原则来分析, 在此基础上才能选取科学合理的评估指标来保证指标体系的完备性。当然在评估过程中, 只有坚持定性与定量指标相结合的原则才能进行, 最后上述所有原则的最终目的是实现雷达/红外复合导引头抗干扰效能的评估, 从而体现了建立指标体系的目的性原则。

4 体系构建

体系构建过程中, 指标因子的选取是构建的重点也是难点, 根据评估准则就可以基于构建原则来选取效能评估指标。现有的雷达抗干扰指标数量较多, 如雷达抗干扰改善因子、抗干扰有效因子、烧穿距离、自卫距离、干扰压制系数、抗干扰品质因素等, 以上因子模型无法有效评估复合导引头抗干扰性能。本文在分析了复合制导导引头工作原理、抗干扰机理以及指标构建的原则后, 通过参考已有的雷达抗干扰指标体系, 构建了复合导引头的抗干扰指标体系。基于雷达和红外传感器的固有属性, 提出了抗干扰基本因子; 基于复合导引头对抗两类欺骗干扰的能力, 提出了抗欺骗干扰改善因子; 基于复合导引头融合算法和作战效能, 提出了权重系数改善因子; 基于复合导引头识别排除人为干扰的能力, 提出了模块跳转时间因子和反应距离因子; 参考雷达抗干扰指标体系修改了抗干扰改善因子。指标体系构建过程系统的考虑了导引头自身性能、发现干扰排除干扰的能力、毁伤目标概率的因素, 比较客观地反应了导引头排除干扰打击目标的过程, 指标因子在定性分析基础上能够定量计算, 并且可以对比不同条件下的抗干扰效能。

初步建立的效能评估指标体系如图2所示。

5 效能评估支撑模型

5.1 抗干扰基本因子

基本抗干扰因子是复合导引头的基本性能参数决定的抗干扰能力, 其表达式定义为:

$$e_1 = \frac{P_t G_t}{B_s \cdot T_0 \cdot \Delta V \cdot \sigma} \cdot \frac{\tau_m}{MRT \cdot MDT \cdot NEDT} \quad (1)$$

式中: P_t 为雷达功率; B_s 为信号带宽; T_0 为信号照射时间; G_t 为天线增益; σ 为雷达所能探测到的最小目标有效反射面积; ΔV 为雷达分辨体积单元; τ_m 为实时大气透过率; MRT 为最小可辨温差; MDT 为最小可探温差; NEDT 为噪声等效温差。

红外成像系统参数具体定义计算可以参照文献[10]。设理想天气条件下的己方所拥有的最先进复合

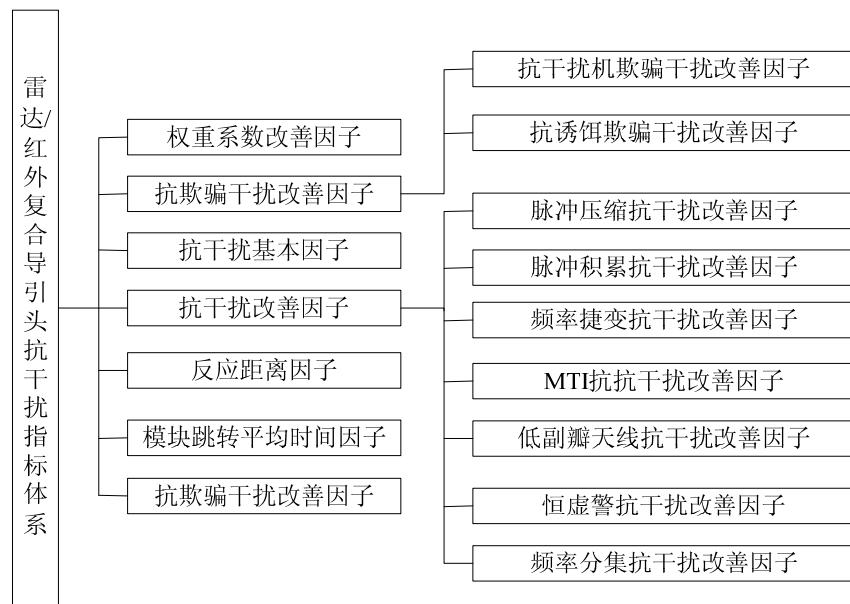


图2 雷达/红外复合导引头抗干扰指标体系

导引头的基本抗干扰因子数值为 η , 则归一化后的基本因子为:

$$e_1' = e_1 / \eta \quad (2)$$

雷达因子部分可衡量雷达发现目标能力, 雷达功率越大, 天线增益越大其探测到微弱目标的能力越强, 对抗遮蔽类干扰的能力越强; 红外因子部分反映了红外探测器发现目标能力, 大气透过率越高, MRT、MDT、NEDT 越小说明红外传感器探测目标能力越强, 对抗遮蔽隐身类干扰能力越好。这一因子综合分析了雷达和红外传感器的工作原理, 在一定程度上反映了复合导引头发现目标和对抗遮蔽、伪装、隐身等干扰的能力。

5.2 抗欺骗干扰因子

复合导引头抗干扰机欺骗电子干扰模型如图3所示, 结合概率准则和效率准则可定义复合导引头抗干扰机欺骗性干扰概率因子为:

$$e_2 = 1 - P_{j_1} \cdot P_{j_2} \cdot P_{j_3} \cdot (1 - P_{r_1}) \cdot (1 - P_{r_2}) \cdot (1 - P_{r_3}) \cdot (1 - P_i) \quad (3)$$

式中: P_{j_1} 为干扰机侦察系统截获雷达信号的概率; P_{j_2} 为干扰机对所获得雷达信号各个参量进行识别的概率; P_{j_3} 为干扰机模拟雷达信号相似程度的概率; P_{r_1} 为雷达系统空域处理系统识别假目标的概率; P_{r_2} 为雷达系统时域识别假目标的概率; P_{r_3} 为雷达系统抗欺骗性干扰措施有效概率; P_i 为红外系统识别假目标概率。

得到 e_2 后, 就可以判断复合导引头抗干扰效果的好坏。可是要通过该公式求得 e_2 , 有些概率值需要通过仿真用统计的方法确定。导引头抵抗诱饵欺骗干

Fig.2 Jamming index system of Radar/IR seeker

扰模型如图4所示, 饵弹信号经过导引头前端进入识别系统时, 雷达系统和红外成像系统会分别对其进行甄别, 在这里我们假设两个系统任何一个系统可以分辨它是假目标时, 复合导引头就可以认定它是虚假信号。仿照上面模型可建立详细模型, 但限于篇幅我们在这里简化了模型。复合导引头抗诱饵欺骗因子定义为下式:

$$e_3 = 1 - P_1 P_2 P_3 \quad (4)$$

式中: P_1 为雷达系统发现并误判概率; P_2 为红外成像系统发现并误判概率; P_3 为融合后仍误判概率。

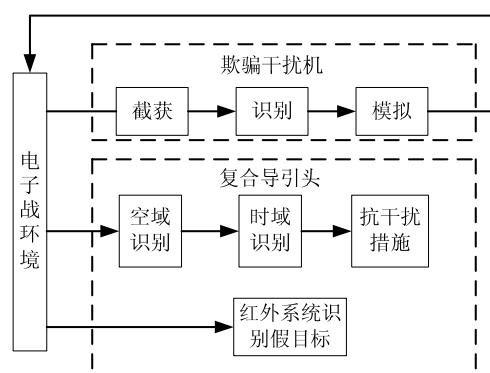


Fig.3 Electronic jamming mode of anti-jammer spoofing

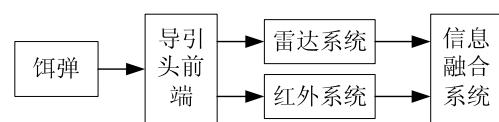


Fig.4 Model of anti-bait spoofing

这一因子可用仿真实验统计得到3个概率, 进行

N次蒙特卡洛实验分别得到3个概率的乘积, 最终得到抗欺骗干扰的数值。其运用需要经过仿真实验或靶场试验的分析, 通过结果评估复合导引头对抗不同欺骗干扰的能力, 最终可建立一个对抗欺骗干扰的统计库, 对评估作战能力具有指导意义。

5.3 权重系数改善因子。

这一因子是基于概率准则提出的, 在不同目标环境中, 复合导引头的融合算法的权重系数定义为雷达导引系统系数 α , 红外导引系统 β , 有:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (5)$$

这一系数分别为在复合导引头工作中是时刻变化的, 参考文献[11]中仿真实验9特征量分析法测试复合导引头在采取抗干扰措施前后的目标识别率的改变来衡量这一因子。假设未采取抗干扰措施时识别率为 ω_1 , 采取抗干扰措施后识别率为 ω_2 , 定权重系数改善因子 e_1 , 则:

$$e_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1 + 1} \quad (6)$$

这一因子可以用来衡量复合导引头融合算法的优劣。复合导引头跟踪的目标发射红外诱饵时, 红外导引头将跟踪目标和干扰的质心轨迹, 雷达和红外测量的角度出现的误差逐步增大, 超过阈值后, 导引头进入抗干扰跟踪模式, 采取雷达跟踪。这一跳变过程中, 如果导引头融合算法不能保持导引头偏离在一定范围内, 雷达导引头视角范围内可能丢失目标。文献[5]中采取的融合算法具有自适应调整性, 能够保证进入雷达跟踪时不丢失目标。在对抗定向干扰和欺骗干扰时可使用这因子。

5.4 基于效率准则提出的导引头反应距离因子

设复合导引头发现目标距离为 R , 进入抗干扰跟踪模块工作时, 与目标距离为 R_f 我们定义导引头自卫距离比例因子为:

$$e_2 = \exp\left(-\frac{R - R_f}{R}\right) \quad (7)$$

5.5 基于时间准则提出的模块跳转平均时间因子

自干扰出现到导引头进入抗干扰跟踪平均时间为 τ , 自干扰出现到导弹击中目标时间为 T , 定模块跳转平均时间因子:

$$e_3 = \exp(-\tau/T) \quad (8)$$

导引头排除虚假信息进而跟踪真实目标的速度综合反应了其抗干扰的能力, 这一过程可用导引头工作时间、飞行距离来衡量。反应时间越短, 飞行距离越小说明导引头对抗干扰能力越强。飞行时间过长或飞行距离越远偏离目标的角度和距离就会增大, 丢失目标的概率增大, 所以距离因子和时间因子指标能够

衡量复合导引头抗干扰能力。这一指标考虑了导引头角度跟踪原理, 其适合于范围较广, 在仿真实验和靶场试验中这一指标对衡量导引头性能具有重要指导意义。

5.6 基于功率准则提出的抗干扰改善因子

抗干扰改善因子是最早由 Johnston S L^[12]提出, 这一指标是衡量雷达抗干扰能力的重要指标。对于复合导引头其仍有较重要意义, 复合模式的导引头获得了两种单一模式导引头的优点, 并且可以弥补互相缺点。复合导引头的消耗的能量主要在于雷达系统, 假设雷达平均功率占系统平均功率的比率为 K , 根据雷达EIF定义可以得到修正后的改善因子 EIF 为:

$$EIF = \frac{(S/KJ)_k}{(S/KJ)_0} \quad (9)$$

式中: $(S/KJ)_0$ 为未采取抗干扰措施时信干比; $(S/KJ)_k$ 为采取抗干扰措施后的信干比。

从文献[13]中, 可以看出这一指标的通用性和可信性, 对于二级的抗干扰改善因子不进行讨论。

导引头抗干扰评估指标还有很多, 如文献[5]、[14]中提出的雷达观察扇区损失度改善因子, 平均虚假航迹改善因子, 目标起始航迹平均时间改善因子、系统平均透漏航迹数改善因子等等。本文提出了6种指标, 并分析了指标的使用范围。其中权重系数改善因子、抗欺骗干扰因子、抗干扰改善因子、抗干扰基本因子4种因子的数值均是越大越好, 而导引头反应距离因子和模块跳转平均时间因子则是越小越好。

6 实例分析

导引头技术为自有最先进水平, 条件1: 大气透过率为0.95, 发射5枚面源红外诱饵, 条件2: 大气透过率为0.95, 相隔10 s分别发射5枚红外诱饵, 条件3: 大气透过率0.85, 发射5枚红外诱饵。3种条件第1次发射干扰弹(相对辐射强度为目标3倍)时, 导弹速度350 km/h, 目标50 km/h距离目标10 km, 雷达与红外量测角度阈值设定为3°, 超过阈值导引头认定干扰, 导弹与目标在同一水平线。评估导引头在3种条件下的效能。

解: 根据本文建立的指标因子模型, 选取指标1、3、4、5、6进行评估, 采用专家打分法评估各指标的权重, 结果如表1所示(相对重要性表示行指标相对列指标的重要程度, 采用1~7档, 1表示同等、3相对重要、5较重要、7绝对重要, 2、4、6表示中间重要程度):

综合考虑各方因素, 导引头在正常跟踪时发现目标概率0.95, 采取干扰措施后提升为0.98, 跳转时间

表1 指标权重打分表

Table 1 Scoring table of index weights

相对重要性	e_1	e_3	e_4	e_5	e_6
e_1	1	3/5	3	3/2	3/2
e_3	5/3	1	5	5/2	5/2
e_4	1/3	1/5	1	1/2	1/2
e_5	2/3	2/5	2	1	1
e_6	2/3	2/5	2	1	1
权重	$w_1=0.250$	$w_2=0.385$	$w_3=0.077$	$w_4=0.154$	$w_5=0.154$

计算: 采用简化模型计算, 弹目距离 10000 m 量测质心超过 3°, 能量质心下降距离:

$$h_1 = 1000 \times \sin(3 \times \frac{\pi}{180}), h = \frac{h_1}{3} + h_1,$$

$$t = (2h/g)^{1/2} \approx 12.3 \text{ s}, S = v_{\text{弹目}} \times t \approx 1025 \text{ m}$$

根据 $E = w_1 \cdot e_1 + w_2 \cdot e_3 + w_3 \cdot e_4 + w_4 \cdot e_5 + w_5 \cdot e_6$, 可计算得到 3 种条件抗干扰效能:

条件 1: 因子 $e_1=0.95, e_3=0.93, e_4=0.5, e_5=0.9, e_6=0.9, E_1=0.9113$;

条件 2: 因子 $e_1=0.95, e_3=0.86, e_4=0.5, e_5=0.82, e_6=0.81, E_2=0.8581$;

条件 3: 因子 $e_1=0.85, e_3=0.93, e_4=0.5, e_5=0.9, e_6=0.9, E_3=0.8862$ 。

由结果可知, 复合导引头对红外诱饵干扰效果非常好, 随着诱饵数目增多, 大气透过率降低, 导引头抗干扰效能会略有下降。

7 结束语

本论文通过分析雷达/红外复合导引头工作原理, 抗干扰效能评估准则以及指标体系构建原则, 系统构建了雷达/红外复合导引头的抗干扰效能评估指标体系, 并对指标因子建模分析, 最后以实例验证。在国内外可查文献中对雷达/红外复合导引头指标体系的描述非常少, 因此本论文构建的指标因子需要大量的仿真实验来验证。

参考文献:

- [1] 王涛, 王祥. 红外导弹抗干扰能力多维度评估方法[J]. 红外技术, 2014, 36(7): 573-576.

- [2] 庞艳静. 基于层次分析法的某红外导弹的抗干扰性能评估[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 234-237.
- [3] 陈永, 时银水, 朱岩. 复杂电磁环境下雷达抗干扰效能评估理论探讨[J]. 国防科技, 2008, 29(1): 52-56.
- [4] 曾宪伟, 方洋旺, 王洪强, 等. 雷达/红外双模导引头抗红外诱饵干扰[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1055-1059.
- [5] 沈同云, 丁建江, 任明秋, 等. 雷达抗干扰性能评估指标体系构建与约简[J]. 现代雷达, 2013, 35(11): 88-91.
- [6] Roecker J A, McGillem C D. Comparison of Two-sensor Tracking Methods Based on State Vector of Fusion and Measurement Fusion[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(4): 447-449.
- [7] 沈丹璐, 常文革. 反舰导弹末制导段抗干扰性能评估方法探讨[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(1): 15-21.
- [8] 杜海文, 孟领坡, 马洪斌. 防空导弹制导雷达末制导雷达抗干扰能力评估[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(5): 54-58.
- [9] 宫萍, 王志安, 杨海涛, 等. 空间信息系统信息对抗能力评估指标体系初探[J]. 兵工自动化, 2007, 26(8): 102-103.
- [10] 安成斌, 张熙宁, 陈盈, 等. 红外成像系统作用距离计算[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 717-719.
- [11] 艾薇. 雷达红外复合目标识别技术研究[J]. 现代电子技术, 2010, 17(328): 7-9.
- [12] Johnston S L. ECCM improvement factor(EIF)[J]. *Electronic Warfare Magazine*, 1974, 6(3): 60-63.
- [13] 黄高明, 刘勤, 苏国庆, 等. 雷达遮盖性干扰效果评估度量方法研究[J]. 现代雷达, 2005, 27(8): 10-13.
- [14] 刘晓东, 唐斌, 杜东平, 等. 一种雷达抗干扰效能评估指标体系的建构方法[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(4): 493-496.