

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.017

被动雷达/红外复合制导抗干扰性能分析

张晓瑜^{1,2}, 欧阳中辉¹, 杨玉彬², 刘智², 董琪¹

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 新疆军区指挥自动化站, 乌鲁木齐 830042)

摘要: 针对传统的评价方式没有考虑在有干扰时性能变化的情况, 建立了复合制导系统在有干扰和无干扰情况下的检测率与虚警率的模型。以被动雷达/红外复合制导对目标检测基本原理与流程为基础, 利用似然比准则计算双模寻的系统的理论检测阈值, 实现了复合制导抗干扰能力的定量评价, 并通过计算机仿真验证该模型的适用性。仿真结果表明: 与单模制导相比较, 复合制导较单一制导体制具有很强的优势。

关键词: 双模制导; 检测率; 虚警率; 抗干扰能力

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Anti-Jamming Effectiveness Analysis of Passive Radar/IR Compound Guidance

Zhang Xiaoyu^{1,2}, Ouyang Zhonghui¹, Yang Yubin², Liu Zhi², Dong Qi¹

(1. Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Command Automation Station, Xinjiang Military Region, Urumqi 830042, China)

Abstract: In view of the problems of traditional evaluation without jamming, target detection probability and false probability mathematics model of dual-model compound seeker are founded on jamming and no jamming period. Use object detection principle and process of passive radar/ infrared compound guidance as base, and adopt likelihood ratio principle to calculate the liminal value of dual-model compound seeker, realize quantificational evaluation of the anti-jamming ability, the applicability of which is validated by computer simulations. Simulation results show that dual-model compound guidance method has great advantages over single model guidance method alone.

Key words: dual-model guidance; detection probability; false probability; anti-jamming ability

0 引言

双模复合寻的舰空导弹制导系统是在超低空掠海飞行的主动寻的反舰导弹和隐身技术的威胁下发展起来的、新型的精密复合制导技术^[1]。被动雷达/红外双模复合导引头的引入带来了多方面的性能提升: 一是提高了导引头的发现概率和截获概率; 二是大大增强了导引头的抗干扰能力; 三是既扩大了导弹的拦截区域又使导弹具有发射后不管的特点, 可以提高整个武器系统的作战效能。目前, 对多模复合制导抗干扰能力的定量评价受到了普遍关注, 但是大部分文献^[2-4]都没有考虑在有干扰时目标的检测性能变化。因此, 笔者在分析双模导引头未受干扰时的目标检测能力基础上, 建立了在有干扰时双模复合导引头的检测性能模型, 从而定量地评价双模复合导引头在有无干扰时的检测性能。

1 被动雷达/红外复合寻的检测原理及流程

利用被动雷达与红外点源 2 个不同的探测、跟踪系统组合成双模复合导引头, 较好地综合利用雷

达和红外各自探测、跟踪目标的特点, 提高导引头探测目标和精确跟踪目标的能力, 特别是在末端寻的距离达到红外的探测距离范围时, 可以应用雷达提供的交班转换信号和雷达探测跟踪系统的相关测量参数, 如弹/目相对运动速度等, 简化红外点源系统进行背景抑制, 完成目标检测的算法模型, 并容易地截获到目标, 提高检测概率^[3]。

双模寻的探测目标的基本流程为: 目标首先被双模寻的系统被动雷达子系统截获并跟踪, 同时被动雷达子系统给出随动同步信号, 使得红外子系统的光轴与微波天线轴在空间处于相同的方向上, 微波天线的跟踪误差精度确保目标位于红外系统的瞬时视场内。这样, 随着弹目相对距离不断减小, 还未达到红外探测距离内时, 红外系统可以减少空间分割处理和空间搜索的处理过程, 直接根据微波天线所指的方向, 实时探测目标区域的红外信号。当弹目相对距离进入红外探测距离内, 在背景信号模型的基础上, 用阈值检测方法提取目标信号, 给出所需的视线角误差信号, 导引头稳定跟踪目标。当

收稿日期: 2011-10-10; 修回日期: 2011-11-21

作者简介: 张晓瑜(1983—), 男, 河南人, 研究生, 从事军用仿真技术研究。

目标与背景信噪比满足一定条件后，导引头可以准确地捕获目标红外信号，交班过程结束，导弹转入红外比例导引飞行阶段，直至与目标交会。

如果由于某种原因导引头始终未能截获目标红外信号，则导弹将一直按照微波比例飞行直至与目标交会。在目标不具备微波辐射时，采用全程红外制导方式。

2 双模复合导引头无干扰时的检测性能

被动雷达探测跟踪系统与红外探测跟踪系统组装在同一个导引头中，2 个探测系统既可独立工作又有信号联系。与单模探测系统不同，双模系统接收目标信号既可能有雷达信号又可能有红外信号。设目标的雷达信号为 $y_r(t) = s_r(t) + n_r(t)$ ， $s_r(t)$ 为目标雷达信号， $n_r(t)$ 为雷达信号噪声；目标的红外信号为 $y_{ir}(t) = s_{ir}(t) + n_{ir}(t)$ ， $s_{ir}(t)$ 为目标的红外信号， $n_{ir}(t)$ 为背景红外信号噪声。

被动雷达/红外双模系统对目标的探测二元假设检测表述为：

1) H_1 ： $H_1 = H(r)_1 \cup H(ir)_1$ (即目标存在，或有红外信号或有雷达信号)；

2) H_0 ： $H_0 = H(r)_0 \cap H(ir)_0$ (即目标不存在，既无红外信号也无雷达信号)。

根据统计检测观点，由于信号叠加有噪声，因而门限检测后总输出是一个随机量。在输出端根据输出振幅是否超过门限来判断有无目标存在，则双模导引头的检测可能出现以下 4 种状态^[5]：

1) H_1 假设成立，双模导引头系统检测出信号，则正确检测，它的概率称为检测率 P_d ；

2) H_1 假设成立，双模导引头系统未能检测出信号，则漏检，它的概率称为漏检率 P_{la} ；

3) H_0 假设成立，双模导引头系统却检测出信号，则虚警，它的概率成为虚警率 P_{fa} ；

4) H_0 假设成立，双模导引头确实没有检测出信号，则正确不检测，它的概率称为正确不检测率 P_{an} 。

导引头的信号检测性能由其检测率 P_d 和虚警率 P_{fa} 来描述， P_d 越大，说明发现目标的可能性越大，与此同时希望 P_{fa} 的值不能超过允许值。

2.1 双模寻的系统理论检测阈值的求取

由于目标的雷达信号与红外信号是互相独立

的，所以有

$$P(H_1) = P(H(r)_1) + P(H(ir)_1) - P(H(r)_1 \cap H(ir)_1) \tag{1}$$

$$P(H_0) = P(H(r)_0 \cap H(ir)_0) = (1 - P(H(r)_1))(1 - P(H(ir)_1)) \tag{2}$$

根据信号统计二元检测原理，确定似然比

$$\Lambda(y) = \frac{p(y|H_1)}{p(y|H_0)} \tag{3}$$

式中， $p(y|H_1)$ 、 $p(y|H_0)$ 分别为 H_1 和 H_0 的概率密度函数或称似然函数。

则

$$\begin{cases} \frac{P(H_1)}{P(H_0)} \Lambda(y) \geq 1 & \text{假设 } H_1 \text{ 成立，即目标存在} \\ \frac{P(H_1)}{P(H_0)} \Lambda(y) < 1 & \text{假设 } H_0 \text{ 成立，即目标不存在} \end{cases} \tag{4}$$

似然比检测系统的示意图如图 1。

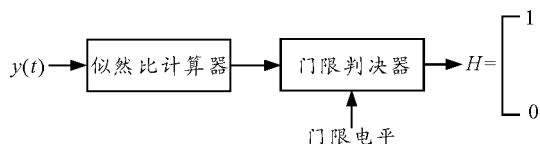


图 1 似然比检测系统示意图

信号经过接收机后，相当于经过窄带滤波器。令目标雷达信号 $s_r(t) = u_r \cos(\omega_1 t + \theta_1)$ ，红外信号 $s_{ir}(t) = u_{ir} \cos(\omega_2 t + \theta_2)$ ，则目标雷达和红外输出信号的概率密度分别为

$$p(y_r | H_1) = \frac{y_r}{\xi_r^2} \exp\left(-\frac{y_r^2 + u_r^2}{2\xi_r^2}\right) I_0\left(\frac{y_r u_r}{\xi_r^2}\right) \tag{5}$$

$$p(y_{ir} | H_1) = \frac{y_{ir}}{\xi_{ir}^2} \exp\left(-\frac{y_{ir}^2 + u_{ir}^2}{2\xi_{ir}^2}\right) I_0\left(\frac{y_{ir} u_{ir}}{\xi_{ir}^2}\right) \tag{6}$$

式中： u_r ， u_{ir} ， ξ_r ， ξ_{ir} 分别为雷达和红外信号的信号幅值和噪声标准方差，2 种噪声均假设为白噪声； $I_0(x)$ 是零阶贝塞尔函数。

无目标时 ($u_r = u_{ir} = 0$)，输出噪声信号的概率密度为

$$p(y_r | H_0) = \frac{y_r}{\xi_r^2} \exp\left(-\frac{y_r^2}{2\xi_r^2}\right) \tag{7}$$

$$p(y_{ir} | H_0) = \frac{y_{ir}}{\xi_{ir}^2} \exp\left(-\frac{y_{ir}^2}{2\xi_{ir}^2}\right) \tag{8}$$

利用式 (4) 可以得出被动雷达^[6]和红外点源理论探测阈值为

$$u_{i0} = \frac{\xi_r^2}{u_r} I_0^{-1} \left[\frac{P(H_0)}{P(H_1)} \exp\left(\frac{u_r^2}{2\xi_r^2}\right) \right] \quad (9)$$

$$u_{ir0} = \frac{\xi_{ir}^2}{u_{ir}} I_0^{-1} \left[\frac{P(H_0)}{P(H_1)} \exp\left(\frac{u_{ir}^2}{2\xi_{ir}^2}\right) \right] \quad (10)$$

2.2 双模导引头的检测率与虚警率

根据公式 (5) 和式 (6) 可知, 双模导引头信号通过接收机后输出信号的概率密度是

$$p(y_r, y_{ir} | H_1) = \frac{y_r}{\xi_r^2} \exp\left(-\frac{y_r^2 + u_r^2}{2\xi_r^2}\right) I_0\left(\frac{y_r u_r}{\xi_r^2}\right) + \frac{y_{ir}}{\xi_{ir}^2} \exp\left(-\frac{y_{ir}^2 + u_{ir}^2}{2\xi_{ir}^2}\right) I_0\left(\frac{y_{ir} u_{ir}}{\xi_{ir}^2}\right) - \frac{y_r y_{ir}}{\xi_r^2 \xi_{ir}^2} \exp\left(-\left[\frac{y_r^2 + u_r^2}{2\xi_r^2} + \frac{y_{ir}^2 + u_{ir}^2}{2\xi_{ir}^2}\right]\right) \times I_0\left(\frac{y_r u_r}{\xi_r^2}\right) I_0\left(\frac{y_{ir} u_{ir}}{\xi_{ir}^2}\right) \quad (11)$$

则检测率 P_d 为^[7]

$$P_d = \int_{u_{i0}}^{\infty} \int_{u_{ir0}}^{\infty} p(y_r, y_{ir} | H_1) dy_r dy_{ir} = P_{dr}(1 - P_{dir}) + P_{dir}(1 - P_{dr}) + P_{dr} P_{dir} \quad (12)$$

式中:

$$P_{dr} = \int_{u_{i0}}^{\infty} p(y_r | H_1) dy_r = Q\left(\frac{u_r}{\xi_r}, \frac{u_{i0}}{\xi_r}\right) \quad (13)$$

$$P_{dir} = \int_{u_{ir0}}^{\infty} p(y_{ir} | H_1) dy_{ir} = Q\left(\frac{u_{ir}}{\xi_{ir}}, \frac{u_{ir0}}{\xi_{ir}}\right) \quad (14)$$

式中 $Q(\alpha, \beta)$ 为 Marcum-Q 函数。

同样, 由式 (7) 和式 (8) 可知, 双模导引头噪声信号通过接收机后输出噪声信号的概率密度是

$$p(y_r, y_{ir} | H_0) = \frac{y_r}{\xi_r^2} \exp\left(-\frac{y_r^2}{2\xi_r^2}\right) + \frac{y_{ir}}{\xi_{ir}^2} \exp\left(-\frac{y_{ir}^2}{2\xi_{ir}^2}\right) - \frac{y_r y_{ir}}{\xi_r^2 \xi_{ir}^2} \exp\left(-\left[\frac{y_r^2}{2\xi_r^2} + \frac{y_{ir}^2}{2\xi_{ir}^2}\right]\right) \quad (15)$$

则虚警率为 P_{fa} 为

$$P_{fa} = \int_{u_{i0}}^{\infty} \int_{u_{ir0}}^{\infty} p(y_r, y_{ir} | H_0) dy_r dy_{ir} = P_{far}(1 - P_{fair}) + P_{fair}(1 - P_{far}) + P_{far} P_{fair} \quad (16)$$

式中

$$P_{far} = \int_{u_{i0}}^{\infty} p(y_r | H_0) = \exp\left(-\frac{u_{i0}^2}{2\xi_r^2}\right) \quad (17)$$

$$P_{fair} = \int_{u_{ir0}}^{\infty} p(y_{ir} | H_0) = \exp\left(-\frac{u_{ir0}^2}{2\xi_{ir}^2}\right) \quad (18)$$

2.3 双模导引头联合检测性能仿真

为了简化运算, 假设雷达和红外系统的信噪比 $u_r/\xi_r = u_{ir}/\xi_{ir} = S/N$ 。图 2 给出了同一虚警率下, 单模和双模检测率与信噪比之间的关系, 参数设置: $S/N = [1:0.5:10]$, $u_{i0}/\xi_r = 2.5$, $u_{ir0}/\xi_{ir} = 3.5$, 对应的虚警率 $P_{fa} = 0.05$ 。

仿真结果如图 2 所示, 在同一虚警率水平下, 信噪比相同时, 就系统检测率而言, 被动雷达/红外复合制导系统的探测能力要优于单模系统的探测能力, 且均随信噪比的增加而提高。

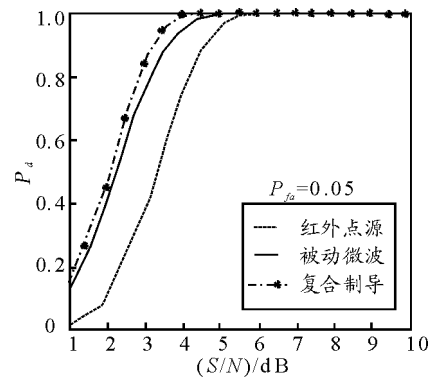


图 2 单模检测率及双模联合检测率与 S/N 的关系

3 双模复合导引头有干扰时的检测性能

3.1 双模导引头潜在增益

利用复合寻的制导技术, 双模导引头的检测性能得到较大的提高。在系统 P_{fa} 一定的条件下, 设双模复合导引头要达到某一检测率 P_d 时输入端所要求的信噪比为 S_1 ; 单模导引头在此条件下要求的信噪比为 S_2 。定义双模复合导引头信号检测的潜在增益为 $\Delta(S/N)(\text{dB}) = S_1(\text{dB}) - S_2(\text{dB})$ ^[1], 它是局部虚警率及信噪比的函数。被动雷达/红外双模复合导引头的潜在增益如图 3 所示。在信噪比为 10 dB 时, 其潜在增益达 3.7 dB。因此, 复合寻的制导系统具有较强的对付隐身目标的能力。

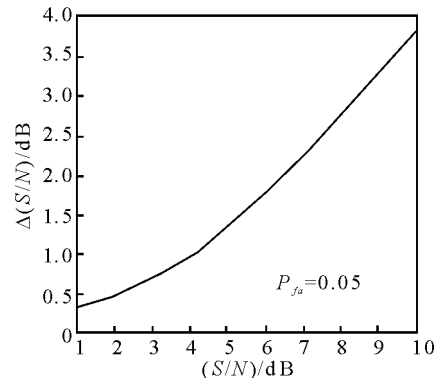


图 3 双模导引头的潜在增益

3.2 传播衰减条件下双模导引头检测性能

在海面比较复杂的气象环境下，目标的信号大气衰减将大大增加，从而引起导引头检测性能下降。但双模复合寻的制导系统在恶劣天气环境下检测性能与单模制导系统相比有较大的提高。图 4 给出了双模系统在大气衰减或有其他干扰时的检测性能。其中曲线 1 为正常条件下系统性能曲线；曲线 2 为在其中一传感器输入端信噪比降低 1 dB 时的性能曲线；曲线 3 为单传感器导引头在信噪比降低 1 dB 时的性能曲线。由图 4 可知，双模系统具有较强的全天候作战性能和抗干扰性能。

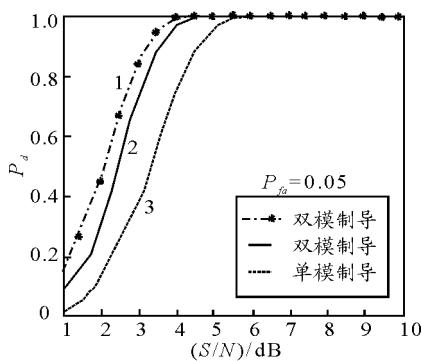


图 4 双模导引头信噪比降低 1 dB 时性能曲线

3.3 假目标情况下双模导引头检测性能

被动微波/红外双模复合寻的系统中各传感器分别探测目标不同的电磁频谱特性，2 个探测系统既可独立工作又有信号联系。在导引头搜索探测某区域时，敌方在 i 频段释放假目标的概率为 P_{ji} 。双模复合寻的系统中传感器 i 检测到假目标的概率为 P_{di}^j ，则其不受干扰而能正确发现目标的概率为

$$P_i = P_d^i(1 - P_{ji}) + P_d^i(1 - P_{di}^j)P_{ji} = P_d^i(1 - P_{di}^j \cdot P_{ji}) \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (12) 可得双模复合导引头在有假目标存在情况下的检测率。设 $P_{j1} = P_{j2} = 0.1$ ， $P_{d1}^1 = P_{d2}^2 = 0.5$ ，双模系统能正确发现目标的概率如图 5 所示。其中曲线 1 和曲线 2 分别为双模系统在

$P_{j1} = 0$ 和 $P_{j1} = 0.1$ 时的检测性能曲线；曲线 3 分别为单传感器导引头在 $P_{j1} = 0.1$ 时的检测特性。由图 5 可以看出，双模制导系统不受干扰而能正确发现目标的可能性较大，特别是在信噪比大的情况下。

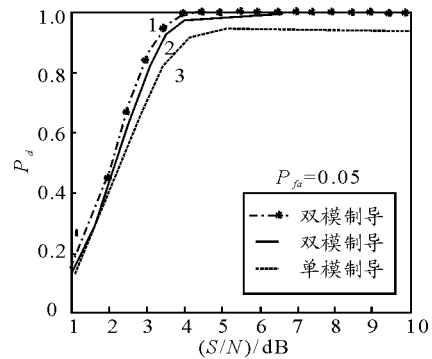


图 5 双模系统在假目标干扰存在时的检测率

4 结束语

在无干扰和有干扰 2 种情况下，笔者对被动雷达/红外复合制导的目标探测性能分别进行了建模，实现了对复合制导目标探测能力全面客观的定量评价。从对该模型的仿真结果可以看出：仿真结果与复合制导具有一定的抗干扰能力的原理分析结果一致。该计算分析方法对定量分析其它各种复合制导的技术优势具有一定的参考价值。

参考文献：

- [1] 刘隆. 多模复合寻的制导技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 45-50.
- [2] 陈玉茹, 胡以华, 芮健. 雷达/红外综合探测系统的抗干扰性能分析[J]. 红外技术, 2006, 28(8): 481-484.
- [3] 汪朝群. 雷达/红外成像双模导引头的联合探测概率研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 221-225.
- [4] 张彦梅. 磁与激光复合系统探测性能分析[J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 524-527.
- [5] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 224-230.
- [6] 封志方, 刘瞞. 随队干扰情况下雷达压制距离的仿真[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(9): 32.
- [7] 张彦梅. 对坦克顶甲的复合探测技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(4): 349-351.