

机载预警雷达牵引模式的 IRST 探测效能分析

彭 芳, 吴 军, 龙文彪, 向建军

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 机载预警雷达牵引红外搜索跟踪系统(IRST)探测是同平台多传感器协同的一种重要工作模式。为定量评估该模式对 IRST 探测效能的影响,以 IRST 探测概率作为评估指标,建立多个瞬时视场下的成功牵引概率数学模型,计算在不同雷达工作模式下满足一定成功牵引概率的 IRST 搜索视场范围,推导 IRST 的探测概率与作用距离、脉冲积累之间的关系式。仿真结果表明,在保证成功牵引概率为 0.99 的前提下,雷达在高精度测量模式下的牵引效果最佳,使 IRST 的搜索区域缩小为原来的 1/180,时间节约效率为 99.4%,加快了对目标的截获过程。节余的时间可用于对目标进行脉冲积累,当积累 2 个脉冲时,在其最大作用距离处所对应的探测概率由无积累时的 0.5 提升到 0.985 3,从而显著提升其探测效能。

关键词 红外搜索跟踪系统;雷达工作模式;成功牵引概率;脉冲积累;探测概率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.008

中图分类号 TN219 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0041-06

An Analysis of Detective Efficiency of IRST Sensor Based on the Pattern Towed by Airborne Early Warning Radar

PENG Fang, WU Jun, LONG Wenbiao, XIANG Jianjun

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Airborne early warning radar towing infrared search and tracking system for detection is a kind of important working mode of multi-sensors coordination on the same platform. In order to try to find out about the quantitatively evaluative patterns influence on the IRST's detective efficiency, taking the detecting probability of the IRST as an evaluation criteria, this paper establishes a mathematic model of the successful towing probability under condition of multi-instantaneous field of views, calculates the view zones searched to meet the needs of a certain successful towing probability under condition of the different radar working modes, and then derives the relationship formulas among the detection probabilities, the operating distances, and the pulse accumulations. Under the premise of ensuring that the successful towing probability is 0.99, the radar in high precision measurement mode can acquire the best towing effect to make the search area of IRST reduce to 1/180 of the original, the time saving efficiency is 99.4%, and the process of target capture accelerates. The saved time can use to accumulate pulses, the detective probability corresponding to the maximum action distance increases from 0.5 to 0.985 3 when the accumulated number of pulses reaches two pulses, thus significantly improving the detective efficiency of IRST.

收稿日期:2015-11-14

基金项目:航空科学基金(20145596025);国家大学生创新训练项目(201490052013)

作者简介:彭 芳(1973-),女,讲师,博士,主要从事雷达信号处理与预警探测技术研究.E-mail:wuboy0210@163.com

引用格式:彭芳,吴军,龙文彪,等.机载预警雷达牵引模式的 IRST 探测效能分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(6):41-46. PENG Fang, WU Jun, LONG Wenbiao, et al. An Analysis of Detective Efficiency of IRST Sensor Based on the Pattern Towed by Airborne Early Warning Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 41-46.

Key words:IRST; radar working mode; successful towing probability; pulse accumulate; detective probability

现代预警机集成了雷达、IRST、ESM、IFF 等多个传感器,是空中作战体系的信息中枢。为免受反辐射武器的攻击,提高载机和雷达的生存能力,尽可能少用雷达已成为重要作战原则,在该原则下如何充分发挥雷达与 IRST 的互补性,满足不同作战环境需求,提升综合探测能力,是近年来的研究热点^[1]。通常无电磁干扰时雷达的作用距离要远大于 IRST,此时雷达先对目标进行搜索与跟踪,当目标接近 IRST 的探测区域,雷达利用当前测量信息牵引 IRST 探测。这种有源牵引无源探测模式的作战价值在于:一是利用了红外的测角精度高,对目标红外辐射特征识别能力强和抗干扰能力好等特点,可以对目标进行方位和俯仰上的高精度跟踪,实现对目标特性的准确识别^[2-4];二是牵引成功后,雷达即可转入静默或间歇开机方式工作,以跟踪精度为要求,解决雷达辐射控制问题,实现对雷达资源的动态管理,提高其应对电子干扰与摧毁的能力。

当前对异类传感器信息融合的研究主要集中在数据配准与关联、航迹跟踪算法^[5-9]、IRST 对雷达牵引探测模式的效能分析^[10-12]等方面,针对预警雷达牵引探测模式对 IRST 探测效能的影响研究较少。文献^[13]研究了复合制导中同平台的主动雷达对红外导引头的引导,仅推导了方位上雷达对红外的成功引导概率;文献^{[14]~[15]}中探讨了一种红外警戒系统的效果评价方法,分析了红外探测概率、虚警率与信噪比之间的关系;文献^[16]针对虚警率的特定搜索任务推导出周视搜索系统的作用距离计算公式,得出系统信噪比、驻留时间与作用距离的关系。在雷达对 IRST 实施牵引期间,由于目标的运动、雷达的不同工作模式,以及对应的测量精度不同等因素的影响,使得 IRST 用瞬时视场截获目标的概率很低,对雷达工作模式、成功牵引概率和 IRST 搜索视场大小的关系,以及牵引模式对 IRST 探测效能的影响需进行系统分析。

机载 IRST 系统的核心性能指标为探测概率、虚警率和作用距离。为定量分析机载预警雷达牵引探测模式对 IRST 探测效能的影响,以探测概率为评估指标,建立成功牵引概率数学模型,计算满足一定成功牵引概率的 IRST 搜索视场,并考虑雷达不同工作模式对搜索视场大小的影响,对 IRST 的探测概率与作用距离和脉冲积累数的关系进行建模,探讨雷达牵引探测模式对 IRST 的搜索视场、脉冲积累和探测概率的影响。

1 雷达牵引 IRST 探测成功概率模型

IRST 系统虽能测量目标的方位角和俯仰角,并实现角度上的跟踪,但是无法测距,因此雷达只需给出目标的方位角和俯仰角信息,牵引红外迅速截获目标,以便后续的认识和角度跟踪。在该模式下,为了搜索并截获目标,通常雷达有较大的视域,而 IRST 视域相对较小,图 1 给出了雷达对 IRST 的牵引示意图。

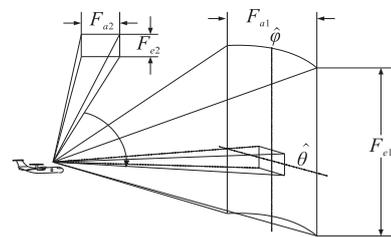


图 1 预警雷达对 IRST 的牵引示意图

Fig.1 Sketch map of early warning radar towing IRST

图 1 中 F_{a1} 和 F_{e1} 分别为雷达的方位和俯仰搜索范围, F_{a2} 和 F_{e2} 分别为 IRST 的瞬时视场方位角和俯仰角。以载机为原点,设目标在极坐标下的位置为 (R, φ, θ) , φ 和 θ 分别表示雷达测量时刻目标方位角和俯仰角的真实值。 $\hat{\varphi}$ 和 $\hat{\theta}$ 分别为该时刻方位角和俯仰角测量值,对应的误差标准差分别为 σ_{1R} 和 σ_{2R} ,即有 $\hat{\varphi} \sim N(\varphi, \sigma_{1R}^2)$, $\hat{\theta} \sim N(\theta, \sigma_{2R}^2)$ 。雷达将 $\hat{\varphi}$ 和 $\hat{\theta}$ 值指示给 IRST,IRST 视域中心迅速对准雷达视域中心,且瞬时视场转向雷达搜索范围。

由于目标的运动状态未知,在雷达完成牵引后,目标运动到某处空间位置,令 φ_1, θ_1 分别为此时目标的真实方位角和俯仰角。设事件 Q_φ 表示牵引完成后 φ_1 在 IRST 的瞬时视场方位角内,该事件发生的概率记为 $P_{IR}(Q_\varphi)$ 。事件 Q_θ 表示牵引完成后 θ_1 在 IRST 瞬时视场俯仰角内,该事件发生的概率记为 $P_{IR}(Q_\theta)$ 。事件 Q 表示牵引完成后 φ_1 和 θ_1 分别在 IRST 的瞬时视场方位角与俯仰角内,则雷达对 IRST 的成功牵引概率 P_{tow} 为:

$$P_{tow} = P_{IR}(Q) = P_{IR}(Q_\varphi)P_{IR}(Q_\theta) = P_{IR}\left\{-\frac{F_{a2}}{2} \leq \varphi_1 - \hat{\varphi} \leq \frac{F_{a2}}{2}\right\} P_{IR}\left\{-\frac{F_{e2}}{2} \leq \theta_1 - \hat{\theta} \leq \frac{F_{e2}}{2}\right\} \quad (1)$$

假定在雷达对 IRST 牵引期间,空中目标运动所致的最大方位角偏差为 S_{ma} , φ_1 是在 $[\varphi - S_{ma}, \varphi + S_{ma}]$ 均匀分布的随机变量;最大俯仰角偏差为 S_{me} , θ_1 是在 $[\theta - S_{me}, \theta + S_{me}]$ 均匀分布的随机变

量。 $\Phi(x)$ 为标准正态分布的累积概率分布函数:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (2)$$

在上述条件下,一次成功牵引的概率为^[11]:

$$P_s = \left(\frac{1}{S_{ma}} \int_0^{S_{ma}} P_a(y_1) dy_1 \right) \left(\frac{1}{S_{me}} \int_0^{S_{me}} P_e(y_2) dy_2 \right) \quad (3)$$

式中: $y_1 = \varphi_1 - \varphi$; $y_2 = \theta_1 - \theta$ 。

$$P_a(y_1) = \Phi\left(\frac{F_{a2} + 2y_1}{2\sigma_{1R}}\right) + \Phi\left(\frac{F_{a2} - 2y_1}{2\sigma_{1R}}\right) - 1 \quad (4)$$

$$P_e(y_2) = \Phi\left(\frac{F_{e2} + 2y_2}{2\sigma_{2R}}\right) + \Phi\left(\frac{F_{e2} - 2y_2}{2\sigma_{2R}}\right) - 1 \quad (5)$$

由式(3)至式(5)可求取一次成功牵引概率。

目标通常位于IRST视域中心周围,一次牵引下载获目标概率难以保证,此时IRST采取搜索策略如固定一个方位角,在俯仰方向上以一个瞬时视场为步进,展开小范围搜索,然后在方位上增加一个瞬时视场,在俯仰上重新搜索,以此类推,直至截获目标。当方位上包含 m 个瞬时视场,且每个方位角的俯仰有 n 个瞬时视场,此时成功牵引概率为:

$$P_{\text{tow}} = P_{\text{IR}} \left\{ -\frac{mF_{a2}}{2} \leq \varphi_1 - \hat{\varphi} \leq \frac{mF_{a2}}{2} \right\} \times P_{\text{IR}} \left\{ -\frac{nF_{e2}}{2} \leq \theta_1 - \hat{\theta} \leq \frac{nF_{e2}}{2} \right\} \quad (6)$$

下面进行数学推导:

$$P_{\text{IR}} \left\{ -\frac{mF_{a2}}{2} \leq \varphi_1 - \hat{\varphi} \leq \frac{mF_{a2}}{2} \right\} = E \left\{ P_{\text{IR}} \left\{ \varphi_1 - \frac{mF_{a2}}{2} \leq \hat{\varphi} \leq \varphi_1 + \frac{mF_{a2}}{2} \middle| \varphi_1 \right\} \right\} = E \left\{ \Phi \left(\frac{\varphi_1 - \varphi + \frac{mF_{a2}}{2}}{\sigma_{1R}} \right) - \Phi \left(\frac{\varphi_1 - \varphi - \frac{mF_{a2}}{2}}{\sigma_{1R}} \right) \right\} = \int_{\varphi - S_{ma}}^{\varphi + S_{ma}} \left\{ \Phi \left(\frac{\varphi_1 - \varphi + \frac{mF_{a2}}{2}}{\sigma_{1R}} \right) - \Phi \left(\frac{\varphi_1 - \varphi - \frac{mF_{a2}}{2}}{\sigma_{1R}} \right) \right\} \frac{1}{2S_{ma}} d\varphi_1$$

利用 $\Phi(x) + \Phi(-x) = 1$ 化简得:

$$P_{\text{IR}}(Q_\varphi) = \frac{1}{2S_{ma}} \int_{-S_{ma}}^{S_{ma}} P_a(y_1) dy = \frac{1}{S_{ma}} \int_0^{S_{ma}} P_a(y_1) dy$$

式中:

$$P_a(y_1) = \Phi\left(\frac{mF_{a2} + 2y_1}{2\sigma_{1R}}\right) + \Phi\left(\frac{mF_{a2} - 2y_1}{2\sigma_{1R}}\right) - 1 \quad (7)$$

同理,可得到 $P_e(y_2)$ 为:

$$P_e(y_2) = \Phi\left(\frac{nF_{e2} + 2y_2}{2\sigma_{2R}}\right) + \Phi\left(\frac{nF_{e2} - 2y_2}{2\sigma_{2R}}\right) - 1 \quad (8)$$

式(3)、(7)和式(8)建立了 P_{tow} 与 S_{ma} 、 S_{me} 、 F_{a2} 、 F_{e2} 、 σ_{1R} 和 σ_{2R} 之间的关系。设置仿真场景和相关参数,利用上述模型就可计算满足一定成功牵引概率的红外搜索视场大小和节余的时间资源。

2 预警雷达对空探测的典型工作模式

P_{tow} 大小除了与被牵引的红外传感器的视域范围、目标的机动性有关外,还取决于雷达在方位和俯仰上测角精度,而测角精度与雷达工作模式又紧密相关的,说明对雷达资源调度管理会影响一定搜索视场下红外截获目标的概率,或是一定成功牵引概率条件下红外搜索视场的大小。预警雷达对空探测时,在维持发射机平均功率不变的前提下,根据不同的工作环境和目标分布情况对时间、空间和能量资源进行自适应管理,以达到资源的最佳利用。

2.1 正常搜索模式

该方式是在整个搜索扇区内对空中目标进行搜索和跟踪,搜索扇区为全方位或部分区域。由于没有在监视空域中是否存在目标的先验知识,雷达只能按一定的数据率、信号重复周期和搜索时间在整个观察空域内进行自主搜索。当初次发现新目标后,雷达将安排一个特殊波束对目标进行检验,验证后雷达便启动新的跟踪或根据目标距离的远近来判断是否牵引红外来探测。

2.2 增程搜索模式

该模式与上一模式区别仅在每个波束位置处,雷达将照射目标较长时间,从而获得比常规方式更远的作用距离,并保持与正常搜索模式下相同的参数测量精度,但搜索数据率有所下降。因此当对同一距离上的同一目标进行探测时,其测角精度优于第1种模式。

2.3 高精度测量模式

该模式是针对处于全跟踪的目标。雷达连续发射多帧信号,每一帧的波束指向在方位和俯仰上错开一个小的间隔,以实现距离、方位角和俯仰角更精确的测量,同样搜索数据率也会明显下降。

3 牵引模式对IRST探测概率的影响

3.1 IRST的探测概率与作用距离的关系

为提高对小目标的远距离探测能力,IRST系统同时需要具有高探测概率和低虚警概率,才能达到探测目标的准确度和识别的正确度。根据实际装备的技战术条件对IRST系统的要求,其检测性能由探测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 来描述^[17]。要从噪声中检测出信号,需要将噪声脉冲与门限电平 T 比较, T 的选择常采用奈曼-皮尔逊准则,即在一定 P_{fa} 下使 P_d 达最大。噪声的概率分布函数为:

$$P(v) = \frac{v}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{v}{\sigma}\right)^2\right] \quad (9)$$

式中: v 为检波器输出的噪声电压幅值; σ 为噪声均方差。 v 超过 T 的概率即为虚警概率。

$$P_{fa} = P(T \leq v < \infty) = \int_T^\infty \frac{v}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{v^2}{2\sigma^2}\right] dv = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{T}{\sigma}\right)^2\right] \quad (10)$$

式(10)表明: 如果确定了 P_{fa} 的值, 就可算出 T 值, 此时 $\frac{T}{\sigma}$ 即为由 P_{fa} 确定的最小信噪比。

在信号和噪声同时进入检测系统的情况下, 当信噪比较大时, 其概率分布近似为高斯分布。将该式在 $T \sim +\infty$ 范围内积分, 可得出 P_d 为:

$$P_d = \Phi\left(\frac{a - T}{\sigma}\right) \quad (11)$$

式中: a 为信号幅值; $\Phi(x)$ 见式(2)。此式反应了 P_d 与信噪比 a/σ 之间的关系。

IRST 的实际使用效果与它接收的目标红外辐射能量密切相关, 其最大作用距离表达式为^[16]:

$$R_{\max} = g(\bar{\chi}) = \left[\frac{D_{\max}^* LA_t A_0 k \delta}{(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} \cdot \bar{\chi}} \right]^{1/2} \quad (12)$$

式中: $\bar{\chi}$ 为单个脉冲采样的信噪比, 瞬时视场每扫过目标一次就产生一个脉冲, 其他参数含义见参考文献[16]。

式(12)可知 R_{\max} 与信噪比有关, 而 P_d 也与信噪比有关, 故可通过信噪比建立 P_d 与 R_{\max} 关系。用式(10)将式(11)进行变量代换, 得:

$$P_d = f(\bar{\chi}) = \Phi\left(\frac{a - T}{\sigma}\right) = \Phi\left(\bar{\chi} - \sqrt{-2\ln P_{fa}}\right) \quad (13)$$

式(12)可写成:

$$\bar{\chi} = \frac{M}{R_{\max}^2}, \quad \forall M = \frac{D_{\max}^* LA_t A_0 k \delta}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \quad (14)$$

把 $\bar{\chi}$ 、 R_{\max} 视为随机变量, 可得到接收单个脉冲信号时红外的探测概率与作用距离的关系式:

$$P_d = f(R_{\max}) = \Phi\left(\frac{M}{R_{\max}^2} - \sqrt{-2\ln P_{fa}}\right) \quad (15)$$

3.2 信号脉冲积累与IRST探测概率的关系

在一定的虚警概率下提高探测概率可用信号积累方法。当积累 N 个信号脉冲时, 积分后信号幅值将增加 N 倍, 但噪声是随机的, 对一个函数受 N 个随机量影响时, 其综合影响将是各个随机量的方差叠加。当 N 个随机量的噪声标准差相同时, 噪声在积累 N 个脉冲后的均方差只增加 \sqrt{N} 倍, 故信噪比可增加 \sqrt{N} 倍, 信噪比的增加可使探测概率得到相应地提高。放脉冲积累后的 P_d 为:

$$P_d = f(R_{\max}) = \Phi\left(\frac{M \sqrt{N}}{R_{\max}^2} - \sqrt{-2\ln P_{fa}}\right) \quad (16)$$

式(16)反映了脉冲积累下, P_d 与 R_{\max} 之间泊关系。

4 算例分析与验证

4.1 仿真参数设置

典型场景下的仿真参数设置如下: 设预警机的安全作用距离为 100 km。IRST 的瞬时视场方位角 $F_{a2} = 2^\circ$, 瞬时视场俯仰角 $F_{e2} = 10^\circ$, 当 $P_d = 0.5$, $P_{fa} = 10^{-6}$ 时, 对高空尾后目标的最大探测距离 $R_{\max} = 250$ km, 设IRST常规搜索区域为方位 360° , 俯仰 $\pm 30^\circ$, 整个搜索帧时间为 15 s。由空中目标机动所引起的 $S_{ma} = 1.5^\circ$, $S_{me} = 1.5^\circ$ 。预警雷达在不同工作模式下的参数测量精度见表 1。

表 1 雷达在不同工作模式下的参数测量精度

Tab.1 Measurement accuracy of radar parameters in different working modes

工作模式	$\sigma_{1R}/(^{\circ})$	$\sigma_{2R}/(^{\circ})$
正常搜索模式	1.0	5.0
增程搜索模式	0.8	4.0
高精度测量模式	0.5	2.5

4.2 牵引条件下搜索范围与搜索时间的计算

红外的搜索视场是指在搜索一帧的时间内, 红外视场所能覆盖的空域范围, 通常用方位角和俯仰角来表示。搜索视场通常由系统使用的总体要求给定, 它等于光轴的扫描范围与红外瞬时视场之和。当红外在无牵引下独立工作时, 在全向搜索条件下需要一定的时间。当雷达给红外提供目标指示, 牵引红外在特定区域搜索目标, 在满足一定的 P_{tow} 时, 其搜索时间的长短与搜索范围的大小紧密相关。计算流程如下: 首先红外的视域中心对准雷达的视域中心, 红外在雷达指示中心周围总的搜索视场数为 $m \times n$, 根据式(3)、式(7)和式(8), 计算雷达工作在不同模式下, 不同的 (m, n) 组合所对应的成功牵引概率。为简便分析, 假设相邻两行的瞬时视场无重叠, 计算结果见表 2。

由表 2 可知, 在典型仿真场景下, 雷达在某种工作模式下实施牵引, IRST 搜索视场不同, 对应的成功牵引概率也不同, 且雷达在不同工作模式下的成功牵引概率也不相同。设定成功牵引概率满足 0.99 以上的指标要求, 依据表 2 的数据对不同雷达工作模式下 IRST 的搜索视场范围进行统计, 计算牵引模式下所需的搜索时间, 见表 3。

表 2 不同的雷达工作模式以及红外搜索视场下所对应的成功牵引概率

Tab.2 Successful towing probability under different radar working mode and infrared search field

工作模式	m					
	1	2	3	4	5	6
1 正常搜索模式	0.362 2	0.510 0	0.534 5	0.536 1	0.536 1	0.536 1
1 增程搜索模式	0.451 6	0.572 0	0.580 3	0.580 4	0.580 4	0.580 4
1 高精度测量模式	0.601 4	0.638 8	0.638 9	0.638 9	0.638 9	0.638 9
2 正常搜索模式	0.586 4	0.825 8	0.865 5	0.868 1	0.868 2	0.868 2
2 增程搜索模式	0.710 9	0.900 4	0.913 4	0.913 6	0.913 6	0.913 6
2 高精度测量模式	0.915 2	0.972 1	0.972 2	0.972 2	0.972 2	0.972 2
3 正常搜索模式	0.662 3	0.932 7	0.977 4	0.980 4	0.980 5	0.980 5
3 增程搜索模式	0.773 2	0.979 3	0.993 5	0.993 7	0.993 7	0.993 7
3 高精度测量模式	0.941 2	0.999 7	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9
4 正常搜索模式	0.674 6	0.940 0	0.995 6	0.998 6	0.998 7	0.998 7
4 增程搜索模式	0.778 0	0.985 4	0.999 6	0.999 9	0.999 9	0.999 9
4 高精度测量模式	0.941 3	0.999 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
5 正常搜索模式	0.675 5	0.951 2	0.996 9	0.999 9	1.000 0	1.000 0
5 增程搜索模式	0.778 1	0.985 5	0.999 8	1.000 0	1.000 0	1.000 0
5 高精度测量模式	0.941 3	0.999 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

表 3 不同雷达工作模式下IRST的搜索视场与搜索时间

Tab.3 Search field and search time of IRST under different radar working mode

工作模式	视场个数 (m × n)	搜索时间/s
	搜索范围(°×°)	
正常搜索	3×4 (6°×40°)	0.168
增程搜索	3×3 (6°×30°)	0.126
高精度测量	2×3 (4°×30°)	0.084

由于IRST的俯仰瞬时视场大于方位瞬时视场,且雷达俯仰测角精度远低于方位测角精度,因此雷达在某一工作模式下实施牵引时,IRST在俯仰上的搜索视场范围要远大于方位上的。对雷达在3种不同工作模式下的牵引效果进行比较,在IRST的搜索视场范围和搜索时间指标上,雷达的高精度测量模式要优于另2种模式,它在正常搜索、增程和高精度测量模式下所对应的IRST截获目标的时间节约效率分别为98.9%、99.2%、99.4%。节约的大量时间资源用来实现对多目标的搜索和跟踪,也可根据当前作战任务进行灵活合理的配置和资源管理,如对接收目标信号能量进行管理,利用脉冲积累来提高对重要目标的探测概率。

4.3 脉冲积累对红外探测概率的影响分析

IRST的探测概率、信噪比及虚警率之间的关系见图2。

当信噪比一定,IRST的探测概率随虚警率呈非线性单调递增的趋势;当 $P_{fa} = 10^{-6}$ 时,信噪比 a/σ 为4 dB时 $P_d = 0.018 1$,8 dB时 $P_d = 0.853 8$,可知信噪比的增加能显著提高探测概率。

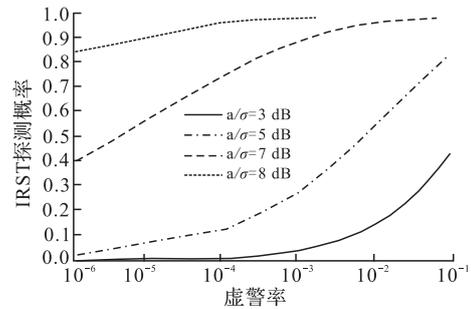


图 2 IRST系统的探测概率、信噪比与虚警率的关系

Fig.2 Relationship between detection probability, SNR and false alarm rate of IRST

IRST对高空尾后的探测概率与作用距离、脉冲积累的关系见图3。

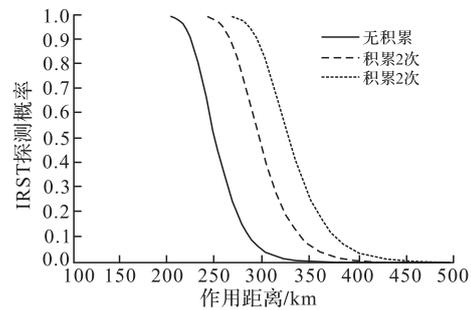


图 3 IRST探测概率与脉冲积累的关系(尾后目标)

Fig.3 Relationship between IRST's detection probability and pulse accumulation (the tail target)

由图3可见,IRST探测概率与作用距离的关系曲线分为3个区间,无脉冲积累时的:作用距离在100~189.5 km区间 P_d 为1;在189.5~447.5 km区间, P_d 随作用距离的增加而呈非线性下降;当作用距离在447.5 km之外,探测概率变为0。计算得

$M_1 = 3.2853 \times 10^5$, 无积累时对 250 km 处目标的探测概率为 0.5, 当积累 2 个脉冲时, 在该距离处的探测概率为 0.9853, 积累 3 个脉冲时探测概率为 0.9999。由此可见, IRST 在预警雷达的牵引下截获目标将节省大量的时间资源, 只要进行 2 至 3 次脉冲积累, 就可显著提高 IRST 系统对同一距离上同一目标的探测概率。

5 结论

预警雷达的工作模式影响 IRST 的搜索视场范围、搜索时间和成功牵引概率, 其中高精度测量模式对 IRST 的牵引效果更好。因此当目标被雷达截获后, 雷达可工作于该模式对 IRST 实施牵引探测, 可保证较高的牵引成功概率。其次, 在该协同探测模式中, IRST 在保证达到 0.99 以上成功牵引概率的前提下, 搜索范围显著缩小, 对目标的测量定位时间由全向搜索下的 15 s 缩短为 0.168 s, 提升了它的反应时间和快速定位能力, 当 IRST 进行角度跟踪时, 雷达则可保持静默或间歇开机, 后续辐射开机时间可用目标预测协方差的大小来进行控制, 由于雷达辐射时间的缩短, 减小其受敌电磁干扰的几率, 提高雷达及预警机的生存能力。同时该模式下 IRST 在同一距离上对同一目标的探测概率能够得到提升, 因为与常规探测模式相比, IRST 有更多的时间资源进行能量管理, 如采用脉冲积累方式来增大信噪比, 以获得较优的探测性能。

参考文献(References):

- [1] 吴巍, 王国宏, 柳毅, 等. 机载雷达、红外、电子支援措施协同跟踪与管理[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(7): 1517-1522.
WU Wei, WANG Guohong, LIU Yi, et al. Airborne Radar /IRST /ESM Synergistic Tracking and Management [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(7): 1517-1522. (in Chinese)
- [2] CHTISTER Wigren. A Generic IRST Detection Performance Model [J]. SPIE, 2000, 4030: 206-217.
- [3] DIANI M, ACITO N, CORSINI G.. Airborne Threat Detection in Navy IRST Systems [J]. Vision, Image and Signal Processing, IEE Proc-vis. Image Signal Process, 2005, 152(1): 45-51.
- [4] ACITO N, CORSINI G, Diani M. Detection Performance Loss Due To Jitter in Navy IRST Systems [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 326-338.
- [5] GEE L A, ABIDI M A. Multisensor Fusion for Decision-based Control Cues [J]. SPIE, 2000, 4052: 249-257.
- [6] LI A P, JING Z L, HU S Q. UKF-based Multi-Sensor Passive Tracking with Active Assistance [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, 17(2): 245-250.
- [7] KALANDROS M, PAO L Y. Covariance Control for Multisensory Systems [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1138-1157.
- [8] NAIDU V P S. Evaluation of Acceleration and Jerk Models in Radar and IRST Data Fusion for Tracking Evasive Maneuvering Target [C] // 46th AIAA Aerospace sciences Meeting and Exhibit. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2008: 1-18.
- [9] 徐强, 王海晏, 杨海燕, 等. 激光数据链路 with IRST 信息融合方法研究 [J]. 应用光学, 2013, 34(2): 349-354.
XU Qiang, WANG Haiyan, YANG Haiyan, et al. Information Fusion Method Between Airborne Laser Data Link and IRST System [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(2): 349-354. (in Chinese)
- [10] 彭芳, 吴军, 向建军, 等. IRST 牵引机载预警雷达的探测效能评估与仿真 [J]. 现代雷达, 2016, 38(1): 1-5.
PENG Fang, WU Jun, XIANG Jianjun, et al. Evaluation and Simulation of Detection Efficiency based on Using IRST Sensor Towing the Airborne Early Warning Radar [J]. Modern Radar, 2016, 38(1): 1-5. (in Chinese)
- [11] 王国宏, 何友, 毛士艺. IRST 对 3D 雷达引导性能分析 [J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1737-1740.
WANG Guohong, HE You, MAO Shiyi. Performance Analysis of Using an IRST Sensor Cueing a 3D Radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1737-1740. (in Chinese)
- [12] 张华睿, 杨宏文, 郁文贤, 等. 多目标情况下 IRST 和雷达的指示交接问题 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1101-1106.
ZHANG Huarui, YANG Hongwen, YU Wenxian, et al. The Handoff Method of IRST and Radar Under Multi-Target Scenario [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(5): 1101-1106. (in Chinese)
- [13] 孙殿星, 王学伟, 周晓东, 等. 雷达/红外复合制导系统雷达对红外引导评估 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30(4): 33-37.
SUN Dianxing, WANG Xuewei, ZHOU Xiaodong, et al. Valuation of Using a Radar Cueing an IR Sensor in a Radar IR Multi-Guidance System [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(4): 33-37. (in Chinese)
- [14] 杨百剑, 万欣. 新一代机载红外搜索跟踪系统技术发展分析 [J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 961-964.
YANG Baijian, WAN Xin. New Generation of IRST Technology in Plane Development [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 961-964. (in Chinese)
- [15] 张继勇, 叶宗民. 舰载红外警戒探测系统效果评价方法综述 [J]. 红外, 2012, 33(3): 9-12.
ZHANG Jiyong, YE Zongmin. Evaluation Method of Effectiveness of Shipborne Infrared Alert Detection System [J]. Infrared, 2012, 33(3): 9-12. (in Chinese)
- [16] 贾庆莲, 乔彦峰, 邓文渊. 周视搜索系统对点目标的作用距离分析 [J]. 光学学报, 2009, 29(4): 937-942.
JIA Qinglian, QIAO Yanfeng, DENG Wenyuan. Analysis for Point-Target Detection Range of Panoramic Searching System [J]. ACTA OPTICA SINICA, 2009, 29(4): 937-942. (in Chinese)
- [17] 王领, 于雷, 寇添, 等. 机载红外搜索跟踪系统探测性能评测标定 [J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5): 192-198.
WANG Ling, YU Lei, KOU Tian, et al. Evaluation and Calibration of Operational Capability to Airborne IRST System [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5): 192-198. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)