

机载IRST系统最佳工作点及探测概率包线研究

王 领, 于 雷, 寇 添, 王海晏

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 针对机载IRST系统理论探测与实际探测能力之间的较大差异及其作战能力发挥不充分等问题, 首先分析了机载IRST最佳工作点与作战需求和探测能力之间的关系, 然后考虑了目标机相对载机进入角、方位角、俯仰角和环境背景辐射等作战因素, 建立了机载IRST角水平和角俯仰探测能力模型, 最后综合作战环境和探测概率特性提出探测概率包线概念, 建立了机载IRST作用距离探测概率包线模型, 并定量分析了不同空战态势中机载IRST的探测能力及其概率。从仿真结果可以看出, 当满足一定的虚警概率和信噪比要求时, 探测概率包线的分布特性具有最佳探测点, 这为引导战机扭转战场态势, 充分发挥机载IRST作战效能提供了理论参考, 也为模拟真实战场环境和在实验室进行试验提供了一定的理论支撑。

关键词: 最佳工作点; 红外辐射; 探测距离; 概率包线

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0504006

Research on optimum operating point and detection probability envelope of airborneIRST system

Wang Ling, Yu Lei, Kou Tian, Wang Haiyan

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

Abstract: According to the difference between theory detection and battlefield detection ability of airborneIRST system, the relation between airborneIRST and operational requirement or detection ability was analyzed firstly. Secondly, considering the operational factors as relative entering angle, azimuth angle, pitch angle, environmental background radiation and so on, the models of detection ability in level and pitching angle on airborneIRST were built. Finally, the concept of detection probability envelope was put forward based on operational environment and the character of detection probability, and the model of detection probability envelope on operating range and the ability of airborneIRST and its probability were analyzed quantitatively in different battlefield situations. It can be seen from the results of simulation that when meeting the demands of false alarm probability and SNR, the detection probability envelope has optimum detection point, which provides theoretical reference for guiding aircraft to change the situation and develop the operational effectiveness of airborneIRST. Meanwhile, it also provides theoretical support for simulating real battlefield environment and test in lab.

Key words: optimum operating point; infrared radiation; detection range; probability envelope

收稿日期: 2015-09-05; 修订日期: 2015-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(61172083)

作者简介: 王领(1987-), 男, 博士生, 主要从事光电探测与光电系统作战试验与评估方面的研究。Email: wangling0413@163.com

导师简介: 于雷(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事机载光电武器技术应用方面的研究。Email: whh_shx@sohu.com

0 引言

目前, 机载红外搜索跟踪(Infrared Search and Track,IRST) 系统面临的问题一是实际探测能力与理论探测能力有很大差异, 尤其在作战环境下, 差异表现地更加明显, 这种差异在很大程度上限制了机载红外探测设备的长足发展^[1-3]。另一个问题是没有充分发挥 IRST 系统的作战效能, 体现在如何利用 IRST 系统的工作特性布排战术, 如何对战时环境下 IRST 系统进行能力评估等等, 这些问题大大阻碍了机载光电武器的战术使用。

作用距离作为 IRST 系统综合性能指标, 目前国内外已经有大量参考文献[4-7]对其进行了深入研究。付强等人基于图像目标信噪比检测判据给出了综合各种噪声条件下针对红外点目标的作用距离计算方程^[8]。张己化等人考虑了探测天域的亮度、光路系统、探测器本身性能的因素, 引入了目标成像像元数, 给出了系统探测能力的理论公式^[9]。毛峡等人分析了探测概率与信噪比、作用距离的关系, 推导出了复杂背景下红外点目标探测概率的估算方法^[10]。文中基于已有的研究理论成果, 在充分考虑影响机载 IRST 性能的基本因素之外, 结合机载光电武器作战需要, 在作战环境下对机载 IRST 的作战能力进行了深入分析, 得出了机载 IRST 的最佳工作点以及作用距离概率包线。

1 最佳工作点分析

所谓最佳工作点就是在满足探测条件下, 机载 IRST 能以不低于一定的作战需求概率发现目标的最佳工作开启点。对于机载 IRST 来说, 过早开启机载 IRST 浪费搜索时间, 过晚开启, 则可能会错失探测时机, 贻误战机。

实际战况下, 机载 IRST 会遇到迎头和尾追探测敌机目标的情况, 且尾追探测概率较迎头大, 表现在作用距离上即更远。建立机载 IRST 探测目标示意图如图 1 所示。图中 R_{opt} 为迎头探测时机载 IRST 最佳工作开启点, R_{opt}' 为尾追探测时最佳工作开启点, 且 $R_{opt}' > R_{opt}$; φ 为 IRST 方位搜索视场半角, θ 为 IRST 探测器视场半角; A 为迎头攻击区, B 为尾追攻击区。当目标从 A 区域以不同进入角与载机接近时, 机载

IRST 对目标会形成一个迎头探测距离包线, 同样, 尾追也会形成一个探测距离概率包线, 综合同一探测距离下探测到目标的概率, 形成探测概率包线。探测概率包线是由于目标与载机不同空间态势造成的, 由于目标较载机相对进入角、方位角、俯仰角不同, 则相对载机的投影面积、斜程透过率、辐射强度等都不同, 都会影响探测概率, 因此 IRST 系统最佳工作开启点与其探测概率包线密切相关, 且随着空战态势和实时探测能力变化而变化。

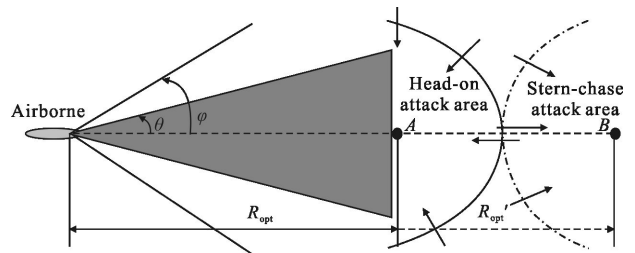


图 1 机载 IRST 探测目标态势示意图

Fig.1 Diagram of IRST detecting target

2 探测概率包线分析

2.1 角水平探测能力

角水平探测就是与载机同高度的大气层内机载 IRST 对目标的探测, 这种情况下由于大气透过率基本没有变化, 影响探测的主要是目标与载机的相对进入角 q 和目标速度 V_t 。现有很多作用距离模型把目标看做点源或是恒定的辐射源进行研究, 忽略了目标实际辐射特性。首先建立载机与目标的相对坐标系, 规定目标相对于载机转角 ϕ 的方向, 如图 2 所

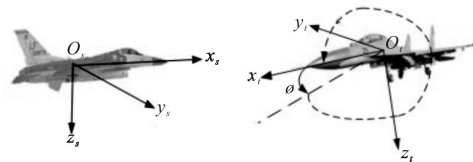


图 2 载机与目标坐标系

Fig.2 Coordinate system of airborne and target

示, (x_s, y_s, z_s) 表示载机坐标, (x_t, y_t, z_t) 表示敌机坐标, 角水平探测即指载机坐标系的 $x_s O_s z_s$ 平面内。 ϕ 在态势中则为进入角, 转角 ϕ 不同, 目标相对于载机的辐射强度不同。再以目标为中心描述载机与目标的角水平探测示意图如图 3 所示, 机载 IRST 以不同的进

入角探测目标,则就形成一个角水平探测能力包线。

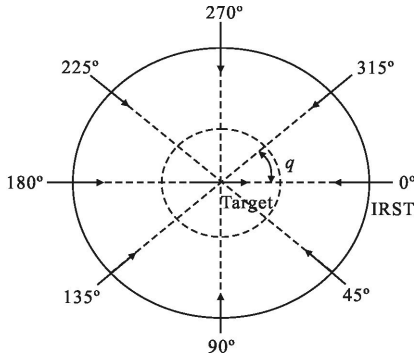


图 3 以目标为中心的角水平探测示意

Fig.3 Diagram of angle level detection with the target as center

通常,在大气同温层中目标的快速运动会由于附面层中层流的气动加热而引起目标蒙皮以及迎头驻点温度上升^[1],即:

$$\begin{cases} T_{yt}=T_0\left[1+r\left(\frac{\gamma-1}{2}\right)(V/V_0)^2\right] \\ T_{ce}=216.7[1+0.164(V/V_0)^2] \\ T_{wz}=T_a[p_1/p_0]^{(\gamma-1)/\gamma} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_0 为音速; T_0 为周围大气温度; γ 为质量热容比,一般 $\gamma=1.4$; r 为恢复系数,层流 $r=0.82$,紊流 $r=0.87$; T_a 为尾喷口涡轮后边热电偶读出的废气温度; p_1/p_0 表示静压比,一般 $p_1/p_0=0.5$ 。再由描述光谱辐射分布的普朗克公式得到目标辐射出射度为:

$$M_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (2)$$

式中: $c_1=3.7418 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$ 为第一辐射常量, $c_2=1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常量; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 表示辐射波段。因此,目标相对于机载红外探测器的迎头和尾追辐射强度分别为:

$$\begin{cases} I_{yt} = \varepsilon \left[\frac{M_{yt}}{\pi} S_{yt} \cos q + \frac{M_{ce}}{\pi} S_{ce} \cos \left(\frac{\pi}{2} - q \right) \right] \\ I_{wz} = \varepsilon \left[\frac{M_{wz}}{\pi} S_{wz} \cos(q - \pi) + \frac{M_{ce}}{\pi} S_{ce} \cos \left(\frac{3\pi}{2} - q \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{yt} 和 I_{wz} 分别为迎头和尾追时辐射强度; S_{yt} 、 S_{ce} 和 S_{wz} 分别为目标迎头、侧面和尾喷口的投影面积; ε 为目标蒙皮发射率。以探测距离标识机载IRST的探测能力,得到角水平探测能力为:

$$\begin{cases} R_{yt} = \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (kI_{yt} - I_b) \frac{\delta\tau_0\tau_a A_0 D^*}{(v_s/V_n) \cdot (A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} \cdot d\lambda \right]^{1/2} \\ R_{wz} = \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (kI_{wz} - I_b) \frac{\delta\tau_0\tau_a A_0 D^*}{(v_s/V_n) \cdot (A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} \cdot d\lambda \right]^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_{yt} 和 R_{wz} 为迎头和尾追作用距离; I_b 为背景辐射强度; δ 为信号衰减因子; τ_0 为光学系统透过率; τ_a 为大气透过率; A_0 为入瞳面积; D^* 为比探测率; k 为弥散系数, $k=\sigma_t^2/\sigma^2$, σ_t^2 为目标尺寸对探测器面张角的方差值; σ^2 为实际像点弥散斑对系统张角的最大方差值; v_s/V_n 表示系统信噪比SNR; A_d 为探测器光敏面积; Δf 为测量电路的频带宽。

2.2 角俯仰探测能力

角俯仰探测是指在载机坐标系 $x_s O_{zs}$ 平面内的探测,此平面内,机载IRST常遇到的是远距斜程探测,这在实战中也最为有意义,这种情况下的探测距离主要受大气透过率、背景温度辐射、高度差等因素的影响,它们都会随着空战态势的变化而变化。在斜程探测过程中,高度差对大气透过率的影响不可忽略。目标与载机之间斜程 R_x 可等效换算为近地水平距离:

$$L(R_x) = \frac{\exp(-0.313H_1) - \exp(-0.313H_2)}{0.313 \sin \beta} \quad (5)$$

式中: H_1 和 H_2 分别为载机与目标的大气层高度; β 为目标相对于载机的俯仰角。因此,大气透过率 $\tau(R_x) = \exp[-\mu_0 \cdot L(R_x)]$, μ_0 为近地大气衰减系数。此时,目标相对于机载红外探测器的迎头和尾追辐射强度分别为:

$$\begin{cases} I_{yt}' = \varepsilon \left[\frac{M_{yt}}{\pi} S_{yt} \cos \beta + \frac{M_{ce}}{\pi} S_{\beta} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right] \\ I_{wz}' = \varepsilon \left[\frac{M_{wz}}{\pi} S_{wz} \cos \beta + \frac{M_{ce}}{\pi} S_{\beta} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: S_{β} 表示目标俯视投影面积。把大气看作是灰体辐射,则根据斯特藩-玻耳兹曼定律得大气背景辐射强度 $I_b' = \sigma T^4 \cdot S_b/\pi$, $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 为斯特藩-玻耳兹曼常数, S_b 表示目标所在空域相对于探测器视场面积。则机载IRST角俯仰探测能力为:

$$\begin{cases} R_{yt}' = \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (kI_{yt}' - I_b') \frac{\delta\tau_0\tau_a A_0 D^*}{(v_s/V_n) \cdot (A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} \cdot d\lambda \right]^{1/2} \\ R_{wz}' = \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (kI_{wz}' - I_b') \frac{\delta\tau_0\tau_a A_0 D^*}{(v_s/V_n) \cdot (A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} \cdot d\lambda \right]^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 作战环境下探测概率包线分析

由文中提出的探测概率包线的定义可知,此概率包线需要综合以上单因素的影响。作战环境下,机载IRST除了受空域背景亮度、大气透过率、探测器

内部暗电流、光学系统噪声以及信号衰减等大气和系统本身因素的影响外,还受到载机与目标相对距离和速度、相对进入角、相对高度差、相对方位角和俯仰角等等因素的影响。建立基本战场态势如图 4 所示。

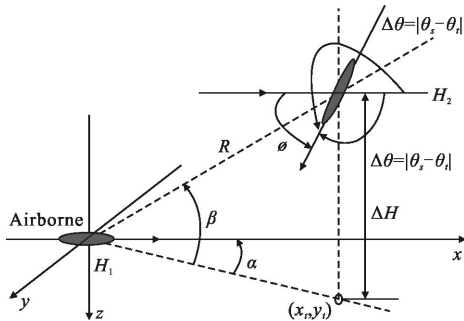


图 4 基本战场态势示意图

Fig.4 Diagram of basic battlefield situation

图中 α 表示目标相对于载机的方位角,转角 ϕ 相当于进入角 q ,这里用它方便建模计算;为了反映作战环境,引入 θ_s 和 $\theta_t \in [0^\circ, 360^\circ]$,它们分别为载机与敌机的航向角,它们与转角有紧密联系,实际战场中,这两个参数是可测已知的,且 $\Delta\theta \in [0^\circ, 360^\circ]$, $\Delta\theta$ 的取值可能是图中两种情况,以目标的投影在载机坐标系第一象限为例进行分析,即 $x_t > 0, y_t > 0$ 。当迎头探测,即 $\pi/2 \leq \Delta\theta \leq \pi$ 且 $\phi = \pi - |\Delta\theta|$ 时,目标相对于载机的辐射强度为:

$$I_{yt}^1 = \varepsilon \left[\frac{M_{yt}}{\pi} S_{yt} \cos(\pi - |\Delta\theta|) + \frac{M_{yt}}{\pi} S_{ce} \cos\left(|\Delta\theta| - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{M_{ce}}{\pi} S_{\beta} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \right] \cos\alpha \quad (8)$$

当 $\pi < \Delta\theta < 3\pi/2$ 且 $\phi = \pi - (2\pi - |\Delta\theta|)$ 时,目标相对于载机的辐射强度为:

$$I_{yt}^1 = \varepsilon \left[\frac{M_{yt}}{\pi} S_{yt} \cos(|\Delta\theta| - \pi) + \frac{M_{yt}}{\pi} S_{ce} \cos\left(\frac{3\pi}{2} - |\Delta\theta|\right) + \frac{M_{ce}}{\pi} S_{\beta} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \right] \cos\alpha \quad (9)$$

同理可得到其他方位、俯仰位置的迎头和尾追辐射强度 I_{vt}^n 和 I_{wt}^n ,然后带入公式(7)得到综合因素下探测能力包线 R_{vt}^n 和 R_{wt}^n 。

上述内容都是基于一次搜索探测分析,而实际机载IRST在连续搜索探测中,每一次探测结果都存在概率,这也说明了红外探测系统最大作用距离是具有概率特性的,它不是必然结果。这种概率特性是由大气背景辐射不确定性、系统噪声干扰、目标搜索

概率、信号检测概率造成的。一般来说,机载IRST探测目标信噪比越高,探测概率越高,相应的虚警概率就低。探测概率 P_d 、虚警概率 P_f 和 SNR 之间存在如公式(10)近似关系,式中 $\text{erf}(x)$ 为误差函数。

$$P_d = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf} \left[\left(\frac{1}{2} + \text{SNR}(R) \right)^{1/2} - \ln^{1/2} \left(\frac{1}{P_f} \right) \right] \quad (10)$$

实际上,公式(10)反映了机载IRST作用距离与探测概率之间的对应关系。对公式(10)求导后可以发现,存在一个作用距离 R 对应着最大的探测概率 $[P_d]_{\max}$,这就很好地验证了机载IRST存在最佳工作开启点 R_{opt} 。表明最佳开启工作点是存在的,当探测距离越小,信噪比越高,探测概率理论值固然越高,但实际中,目标距离越近,机载IRST随着目标的快速移动,目标极易逃出探测器视场,不容易跟踪锁定,况且信噪比越高,这对系统性能的要求也越高。当考虑到所有情况下的最佳工作开启点 R_{opt} ,就得到了最佳开启点探测概率包线;同样,考虑所有情况下对应概率的最大作用距离 R_{\max} ,就得到最大作用距离探测概率包线。

3 探测概率包线计算

根据上述数学模型进行实验仿真,目标为某型战斗机,按照其尺寸比例模型,计算出此飞机各个视图的面积:迎头方向 $S_{yt}=9.25 \text{ m}^2$,侧向 $S_{ce}=33.08 \text{ m}^2$, $S_{\beta}=106.12 \text{ m}^2$;假定目标机飞行速度 $V_t=408 \text{ m/s}$,音速 $V_0=308 \text{ m/s}$;目标机喷口处尾焰平均半径 $R_{wc}=0.51 \text{ m}$,尾焰废气温度 $T_0=875 \text{ K}$,根据参考文献[12]的工程简化计算方法对目标机三个方向辐射功率进行估算。

角水平探测时,设定 $H_1=H_2=8 \text{ km}$;角俯仰探测时,设定 $H_1=8 \text{ km}$ 和 $H_2=10 \text{ km}$;所模拟的为采用光机扫描的某机载IRST,探测器为波段 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 制冷型 InSb 探测器,参数如表 1 所示,探测器 τ_s 为积分时间, Δf 为噪声等效带宽, A_0 为光学孔径的有效面积, A_d 为探测器面积, D_s^* 为探测器探测率, δ 为信号衰减因子。

表 1 红外探测器参数

Tab.1 Parameters of infrared detector

τ_s/ms	$\Delta f/\text{Hz}$	A_0/m^2	A_d/m^2	$D_s^*/\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	δ
0.9	103	0.0154	2.25×10^{-8}	2.0×10^{11}	0.9

当不考虑目标机相对于载机的方位角,仅考虑

进入角对探测能力的影响时,以目标机为中心的角水平探测能力包线仿真结果如图 5 所示。图中 0 表示载机与目标相对飞行,相对进入角为 0°,即迎头探测,而 180 则表示机载IRST对目标进行尾追探测。从图 5 中可看出,角水平探测能力包线并不是一般研究的椭圆形,而是随着相对进入角的不同而时刻变化。迎头探测时,进入角为 0°并不是最佳探测,而是在±20°左右;同样,尾追探测时,180°也并不是最佳探测位置,而是在±170°左右;侧面探测效果最不好,一是因为蒙皮温度较迎头驻点和尾喷口温度较低,再者是目标机横向速度相对较快,即距离变化快,容易逃脱机载IRST探测视场范围。从图 5 中还可以看出,当考虑探测概率因素时,得到最大探测概率包线如图所示,图中最大探测概率包线较之最大作用距离包线小,这也说明了机载IRST最佳工作开启点应该选择在最大探测概率包线上。

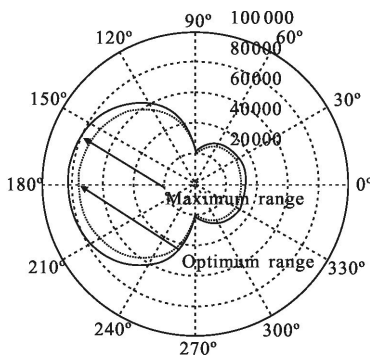


图 5 以目标为中心的角水平探测包线

Fig.5 Envelope of target-oriented detection in level angle

图 6 反映的是以载机为中心对目标的角水平迎头探测,此时不考虑进入角的影响,图中的 0 表示目标机相对于载机的方位角为 0°,仅表示目标在载机

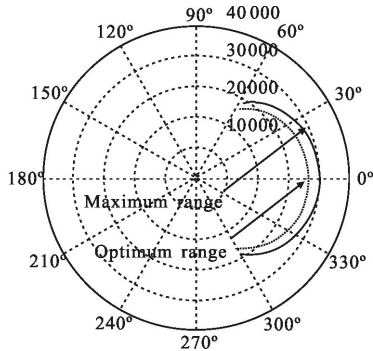


图 6 以载机为中心的角水平探测包线

Fig.6 Envelope of airborne-oriented detection in level angle

正前方,图中部分探测能力包线是由实际机载IRST的方位视场角±60°决定的,图中同样给出了机载IRST最大作用距离包线和最大探测概率包线,它们都随着方位角偏离0°而大致呈现余弦规律减小。

当角俯仰探测不考虑进入角的影响时,给出以载机为中心的角俯仰迎头和尾追探测能力包线仿真结果如图 7 和图 8 所示。图中的角度表示俯仰角β,β∈(0,90°)为仰角,β∈(270°,360°)即为俯角,总体来看,尾追探测距离较迎头探测远,基本都呈现一致的变化趋势。从图中看出,在 0°附近探测效果最好,随着仰角的增大,机载IRST探测距离逐渐减小,且变化较慢,同样,随着俯角的增大,机载IRST探测距离也呈现减小的趋势,但是到达一定的俯角后,探测距离减小较快。这是因为载机下方大气层平均透过率较上方大气层透过率小,而且下视探测更容易受到地面背景辐射的干扰,因此仰角探测距离变化较慢,而俯角探测距离变化较快,俯角越大越明显。

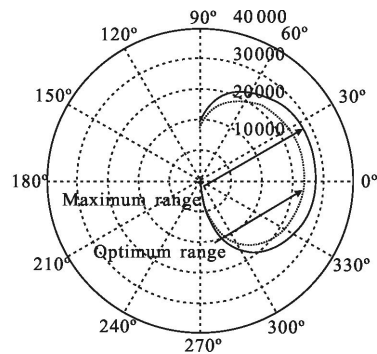


图 7 以载机为中心的角俯仰迎头探测包线

Fig.7 Envelope of airborne-oriented head-on detection in pitching angle

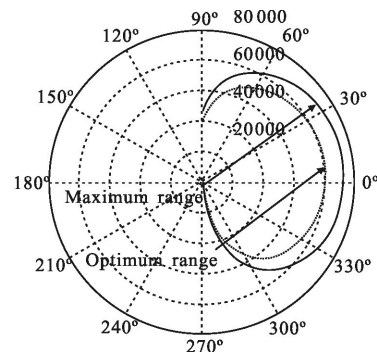


图 8 以载机为中心的角俯仰尾追探测包线

Fig.8 Envelope of airborne-oriented tail-on detection in pitching angle

当考虑进入角、方位角、俯仰角和探测概率因素,且要求虚警概率值 $P_f=10^{-4}$ 时,得到如图 9~12 的最佳探测概率包面仿真结果,所有结果的作用距离

角水平最佳探测概率包面,图 11 和图 12 是以载机为中心的角俯仰最佳探测概率包面,实际上,这已经得到了各种情况的探测概率包面,每种概率曲面可求得最佳探测点,因此,机载IRST在探测过程中,应该尽量往此最佳探测点附近飞行,以期得到最佳探测效果。

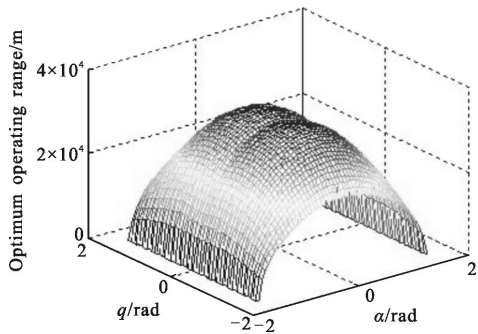


图 9 以载机为中心的角水平迎头概率包面

Fig.9 Enveloping surface of airborne-oriented head-on detection in level angle

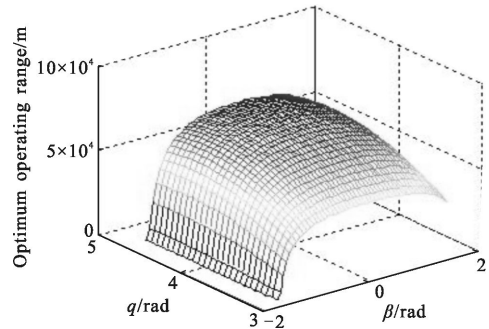


图 12 以载机为中心的角俯仰尾追探测包面

Fig.12 Enveloping surface of airborne-oriented tail-on detection in pitching angle

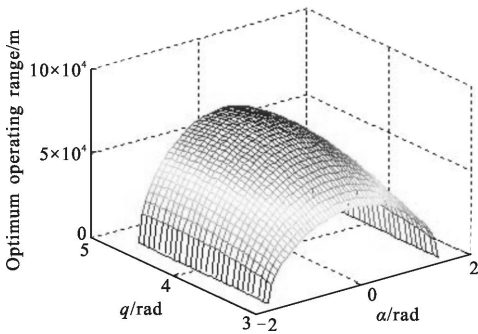


图 10 以载机为中心的角水平尾追概率包面

Fig.10 Enveloping surface of airborne-oriented tail-on detection in level angle

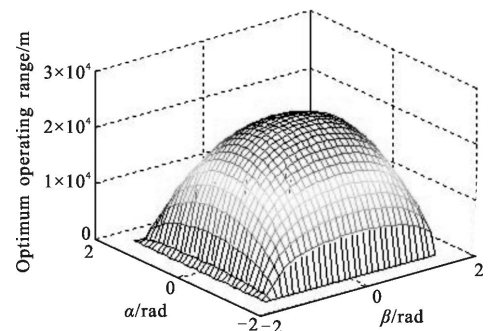


图 13 以载机为中心的迎头探测概率包面

Fig.13 Probability enveloping surface of airborne-oriented head-on detection

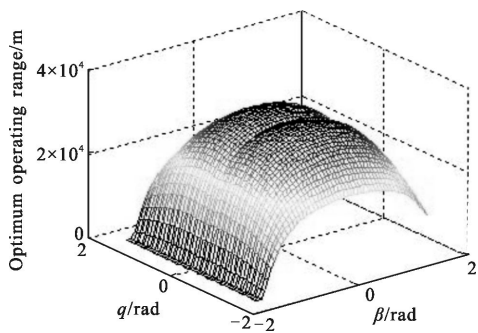


图 11 以载机为中心的角俯仰迎头探测包面

Fig.11 Enveloping surface of airborne-oriented head-on detection in pitching angle

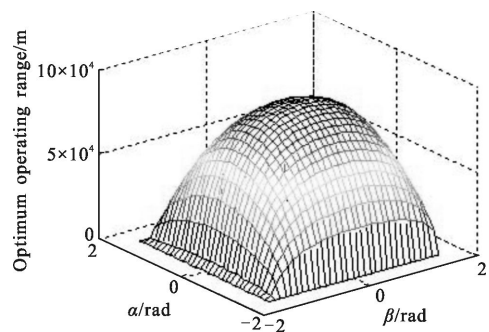


图 14 以载机为中心的尾追探测概率包面

Fig.14 Probability enveloping surface of airborne-oriented tail-on detection

包线的探测概率 $P_d=0.92$,这是由虚警概率、探测概率和信噪比之间的关系计算而得,这个探测概率已经满足作战需求。图 9 和图 10 都是以载机为中心的

反映了不同方位、俯仰之下机载IRST的最佳探测概率距离,从图中可以看出,当目标位于载机正前方且处于小角度俯仰范围内变化时,机载IRST具有最佳探测效果,这为机载IRST的战术运用提供了引导。

4 结论

通过深入分析作战环境下机载IRST系统探测能力,文中构建了机载IRST角水平和角俯仰探测能力包线模型,在此基础上结合作战环境和探测概率特性建立了作用距离探测概率包线模型。经过仿真分析,可以发现,探测能力包线随着相对进入角、方位角、俯仰角、背景辐射和系统性能的变化而呈现不同的变化规律,基本符合实际情况,同时给出了最佳的探测方位。目前,大多数文献对红外探测模型是建立在静态条件下的,未能充分考虑作战环境的影响,因此所得探测结果往往与实际相差较大,影响了机载IRST作战能力的论证和评估以及进一步发展。根据文中的研究结果,不但可以选择机载IRST最佳工作开启点,还可以对机载IRST的作战使用和战术布排提供参考意义。

参考文献:

- [1] Scheuer M. FLIR/IRST of the European fighter aircraft[C]// SPIE, 2002, 4714: 1-10.
- [2] Schneider Z. ELTA's IRST defense and self-protection system[C]//SPIE, 2007, 6542: 654232.
- [3] Lu Jun, Lv Tongguang. Application and development of optoelectronic detection technology in fire control system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1047-1052. (in Chinese)
陆君, 吕彤光. 光电探测技术在火控系统中的应用及发展[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1047-1052.
- [4] Diao Weihe, Mao Xia, Chang Le, et al. Operating distance evaluation method for infrared imaging system under complicated backgrounds [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(25): 1309-1310.
- [5] Gao Sifeng, Wu Ping, He Manli. Estimation on the operating range of infrared system under complex atmosphere condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 941-945. (in Chinese)
高思峰, 吴平, 何曼丽. 复杂大气条件下红外系统作用距离的估算[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 941-945.
- [6] Wu Hanping, Yi Xinjian. Operating distance equation and its e-equivalent test for infrared search system with full orientation [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waver*, 2003, 24(12): 2059-206.
- [7] B Eier K, Gemperlein H. Simulation of infrared detection range at fog conditions for enhanced vision systems in civil aviation [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2004(8): 63-71.
- [8] Fu Qiang, Shi Guangwei, Zhang Xin. Modeling and evaluation of infrared point-target operating range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 1991-1997. (in Chinese)
付强, 史广维, 张新. 红外点目标作用距离数学建模与评估[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 1991-1997.
- [9] Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1178-1183. (in Chinese)
张己化, 姚东升, 谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1178-1183.
- [10] Mao Xia, Chang Le, Diao Weihe. Estimation for detection probability of infrared point target under complex backgrounds [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(11): 1429-1435. (in Chinese)
毛峡, 常乐, 刁伟鹤. 复杂背景下红外点目标探测概率估算[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1429-1435.
- [11] Yuan Yihui, Zhang Junju, Chen Zuolong. Simulation study on temperature and infrared radiation characteristics offlying projectile[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(8): 1090-1094. (in Chinese)
袁轶慧, 张俊举, 陈佐龙. 飞行弹丸表面温度与红外辐射特性仿真研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(8): 1090-1094.
- [12] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe. Calculation and image simulation of aircraft infrared radiation characteristic [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(11): 1310-1318. (in Chinese)
李建勋, 童中翔, 王超哲. 飞机目标红外特性计算与图像仿真[J]. 兵工学报, 2012, 33(11): 1310-1318.