# 复杂环境下机载光电系统探测概率包线研究

寇 添 王海晏 吴学铭 王 芳

空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安710038

**摘要** 针对机载光电系统理论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,分析得到了目标 反射背景辐射的空间分布函数,并给出了具体量化方法,进而研究了目标本征辐射特性,建立了水平和俯仰面内的 辐射强度包线模型;之后考虑各种作战因素,给出了机载光电系统角水平和角俯仰探测能力包线计算方程式;最后 提出探测概率包线概念,得到了机载光电系统作用距离与探测概率关系,并定量分析了机载光电系统探测包线的 概率特性。仿真结果表明,探测包线随目标速度、方位、俯仰的变化而实时变化;当满足一定的虚警概率和信噪比 要求时,探测概率包线具有最佳探测点,这为充分发挥机载光电系统探测性能提供了理论参考。 关键词 探测器;红外辐射;探测能力;作用距离;概率包线 中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201636.0304002

# Detection Probability Envelope of Airborne Photoelectric System in Complex Condition

Kou Tian Wang Haiyan Wu Xueming Wang Fang

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

**Abstract** Aiming at the big difference between theoretical and battlefield detection ability of airborne photoelectric system and the inadequacy of operation ability, the spatial distribution function of target reflective background radiation is obtained and the quantitative method is given. The target original radiation is studied and the models of level and pitch radiation intensity envelope are built. Considering the various operational factors, the equations of detection ability in level and pitching angle are given. The concept of detection probability envelope is put forward, and the relationship between operating range and detection probability is obtained and the envelope probability characteristic of airborne photoelectric system is analyzed quantitatively. The simulation results show that detection envelope changes with the change of target speed, azimuth and pitching angle. When meeting the demands of false alarm probability and signal noise ratio, the detection probability envelope has optimum detection point, which provides theoretical reference for developing the detection performance of airborne photoelectric system. **Key words** detectors; infrared radiation; detection ability; operating range; probability envelope **OCIS codes** 040.3060; 040.1880; 350.4600

1 引 言

机载光电系统是随着各类威胁逐渐发展起来的被动红外探测系统,其抗干扰能力强、测量精度高、隐身 性强等优势是传统微波系统无法比拟的。作为机载光电系统的综合性能指标,作用距离大小决定着留给防 御方进行防御反击时间的长短,作用距离越大,防御方就越有足够的时间对抗敌方光电武器,降低敌方光电 武器的毁伤效率,提高己方目标、设施、阵地的存活概率。目前,机载光电系统面临的问题是实际与理论探 测能力之间存在差异,这种差异在很大程度上阻碍了机载光电系统的战术使用,并限制了机载红外探测设

收稿日期: 2015-7-22; 收到修改稿日期: 2015-8-24

**基金项目**:国家自然科学基金(61172083)

作者简介: 寇 添(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电探测与光电系统作战试验与评估等方面的研究。

E-mail: shanxiakkt@163.com

导师简介:王海晏(1968—),男,博士,副教授,主要从事光电技术原理及应用等方面的研究。E-mail: whh\_shx@sohu.com

备的长足发展[1-3]。

大多数文献对光电探测系统静态性能进行了理论估算<sup>[4-7]</sup>,尽管探测模型考虑了复杂背景环境的影响, 但针对的都是瞬时视场下红外目标的定点单次探测,并没有体现机载光电系统对一片空域来袭目标的监视 和预警能力。对于作战环境来说,需要考虑实时性和动态性,需要在静态模型上进行全空域、多角度的扩展 研究,形成机载光电系统一定空域的作战能力。

本文基于已有的理论研究成果,在充分考虑影响机载光电系统的基本因素之外,结合机载光电武器作 战需要,在作战环境下对机载光电系统的作战能力进行了深入分析,得出了机载光电系统的最佳工作点以 及作用距离概率包线,这为模拟战场环境和在实验室进行试验提供了一定的理论支撑。

## 2 目标辐射强度空间分布

目标辐射强度包括目标本征辐射强度和反射背景辐射强度两部分,现有文献在分析目标辐射特性时, 往往忽视了反射辐射<sup>[8-10]</sup>。虽然反射辐射强度总体上弱于目标本征辐射,但在目标特定方位上,这种反射辐 射对光电系统作用距离有着较大贡献。

#### 2.1 目标反射背景辐射强度空间分布

目标反射背景辐射主要来源于太阳、大气、地面热辐射以及大气和地面的二次反射辐射,特定方位上, 目标对背景辐射的反射强度不可忽视,尤其在晴天,目标反射太阳的辐射最为强烈。实际情况中,目标反射 背景辐射强度空间分布与背景辐射波长和亮度、太阳高低角、目标机航向、目标蒙皮反射率等密切相关。建 立目标反射背景辐射空间分布如图1所示,图中(Oxyz)表示以目标中心为原点的直角坐标系,β表示太阳高 低角,α表示方位角。



图1 目标反射背景辐射空间分布

Fig.1 Spatial distribution of target reflective background radiation

由于目标反射背景辐射较为复杂,需要分解分析,即从 XOY 水平面和 YOZ 俯仰面进行分析。在 XOY 水平面内,目标反射背景辐射主要受天空背景和太阳辐射的影响。假若目标机迎着太阳飞行,即太阳高低 角 $\beta \in (0, \pi/2)$ 。于是得到 XOY 水平面内目标反射背景辐射强度空间分布为

$$F_{\rm ref}(\alpha, I_{\rm side}) = \begin{cases} \rho_{\rm t}(\lambda) \begin{bmatrix} E_{\rm sun}(\lambda)A_{\rm head} \sin\beta |\cos\alpha| + L_{\rm sky}(\lambda) \times \\ (A_{\rm head} \cos\alpha + A_{\rm side} |\sin\alpha|) \end{bmatrix}, & 0 \le \alpha < \pi/2 \\ \text{or } 3\pi/2 \le \alpha < 2\pi \\ \rho_{\rm t}(\lambda) \begin{bmatrix} E_{\rm sun}(\lambda)A_{\rm head} \sin\beta |\cos\alpha| + L_{\rm sky}(\lambda) \times \\ (A_{\rm side} |\sin\alpha| + A_{\rm tail} |\cos\alpha|) \end{bmatrix}, & \pi/2 \le \alpha < 3\pi/2 \end{cases}, \tag{1}$$

式中  $\rho_{l}(\lambda)$  表示目标蒙皮反射率,  $E_{sun}(\lambda)$  表示太阳辐射照度,  $L_{sky}(\lambda)$  表示天空背景辐射亮度,  $\alpha$  表示 XOY 面 内平面角,目标前向为起点,逆时针方向为正。 $A_{head}$ ,  $A_{side}$ 和  $A_{tail}$ 分别表示目标迎头投影面积,侧面投影面积 和尾后投影面积。

在 YOZ 俯仰平面内,由于目标上下表面反射辐射源的辐射强度都不同,因此需要分开讨论。在目标上表面,目标反射背景辐射主要受天空背景和太阳辐射的影响,下表面则受地面辐射以及大气和地面的二次辐射影响。在目标上表面,根据光反射和朗伯源辐射余弦定律,可以得到目标反射背景辐射强度空间分布为

$$F_{\rm ref}(\theta, I_{\rm on}) = \begin{cases} \rho_{\iota}(\lambda) \begin{bmatrix} E_{\rm sun}(\lambda)A_{\rm on}\left(\sin|\theta - \beta| + \rho_{s}(\lambda)\cos|\theta - \beta|\right) + \\ L_{\rm sky}(\lambda)(A_{\rm head}\cos\theta + A_{\rm on}\sin\theta)a \end{bmatrix}, & 0 \le \theta < \pi/2 \\ \rho_{\iota}(\lambda) \begin{bmatrix} E_{\rm sun}(\lambda)A_{\rm on}\sin|\theta - \beta| + \\ L_{\rm sky}(\lambda)(A_{\rm on}\sin\theta + A_{\rm tail}|\cos\theta|) \end{bmatrix}, & \pi/2 \le \theta < \pi \end{cases}$$

$$(2)$$

式中 $\rho_{a}(\lambda)$ 表示大气散射系数,  $A_{an}$ 表示目标上表面投影面积,  $\theta$ 表示 YOZ 面内平面角, 目标前向为起点, 逆时针方向为正。在目标下表面, 目标反射背景辐射强度空间分布为

$$F_{\rm ref}(\theta, I_{\rm below}) = \begin{cases} \rho_{\rm t}(\lambda) \begin{cases} E_{\rm sun}(\lambda) \rho_{\rm a}(\lambda) \left\{ A_{\rm tail} \left| \sin\left[\theta - \left(\frac{\pi}{2} + \beta\right)\right] \right| + A_{\rm below} \left| \sin \theta \right| + \right\} \\ L_{\rm sky}(\lambda) A_{\rm tail} \left| \cos \theta \right| + \tau_{\rm e}(\lambda, h) A_{\rm below} L_{\rm earth}(\lambda) \left| \sin \theta \right| \right\}, & \pi \le \theta < 3\pi/2 \end{cases}, \qquad (3)$$

$$\rho_{\rm t}(\lambda) \begin{cases} E_{\rm sun}(\lambda) \rho_{\rm a}(\lambda) \left\{ A_{\rm below} \left| \sin \theta \right| + A_{\rm head} \left| \cos\left[\theta - (2\pi - \beta)\right] \right| + \right\} \right\} \\ \tau_{\rm e}(\lambda, h) L_{\rm earth}(\lambda) A_{\rm below} \sin \theta + L_{\rm sky}(\lambda) A_{\rm head} \left| \cos \theta \right| \end{cases}, & 3\pi/2 \le \theta < 2\pi$$

式中 $\tau_e(\lambda, h) = \exp[-\bar{\mu}(\lambda) \cdot h]$ 表示地面辐射到目标高度间的平均透过率, $\bar{\mu}(\lambda)$ 表示平均衰减系数。 2.2 目标本征辐射强度空间分布

目标本征辐射强度来源于目标蒙皮、尾喷口和尾焰,当目标在不同大气层中高速飞行时,目标蒙皮由于 气动加热现象而导致蒙皮温度上升,对于超音速目标来说,这种温升效果更加明显。在大气同温层中,气动 加热引起目标蒙皮的温度场分布较为复杂,可利用工程简化算法计算目标不同部位的温度<sup>111</sup>:

$$\begin{cases} T_{\text{head}} = T_0 \left[ 1 + r \left( \frac{\gamma - 1}{2} \right) (V_1 / V_0)^2 \right] \\ T_{\text{side}} = 216.7 \left[ 1 + 0.164 (V_1 / V_0)^2 \right] , \\ T_{\text{tail}} = T_a \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} \end{cases}$$
(4)

式中 $T_{head}$ 、 $T_{side}$ 和 $T_{tail}$ 分别表示目标迎头驻点、侧面蒙皮和尾后方温度, $T_0$ 为周围大气温度; $V_0$ 和 $V_1$ 分别表示实地音速和目标速度; $\gamma$ 为质量热熔比,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 $p_1/p_0 = 0.5$ 。

由普朗克定律计算目标辐射出射度  $M(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\left[\exp(c_2/\lambda T) - 1\right]} d\lambda$ ,式中  $c_1 = 3.7415 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$ 为第一

辐射常数,  $c_2$  = 1.4388×10<sup>-2</sup>m·K 为第二辐射常数;  $\lambda$  表示辐射波段。在目标 XOY 水平面内,目标本征辐射强度空间分布包线为

$$F_{\rm rad}(\alpha, I_{\rm level}) = \begin{cases} \varepsilon_{\rm t}(\lambda) \left( \frac{M_{\rm head}}{\pi} A_{\rm head} \cos \alpha + \frac{M_{\rm side}}{\pi} A_{\rm side} |\sin \alpha| \right), & 0 \le \alpha < \frac{\pi}{2} \text{ or } \frac{3\pi}{2} \le \alpha < 2\pi \\ \varepsilon_{\rm t}(\lambda) \frac{M_{\rm side}}{\pi} A_{\rm side} |\sin \alpha| + \varepsilon_{\rm a}(\lambda) \frac{M_{\rm tail}}{\pi} A_{\rm tail} |\cos \alpha|, & \frac{\pi}{2} \le \alpha < \frac{3\pi}{2} \end{cases} , \tag{5}$$

式中 $\varepsilon_{I}(\lambda)$ 和 $\varepsilon_{a}(\lambda)$ 分别表示目标蒙皮和尾焰气体发射率, $M_{head}$ 、 $M_{side}$ 和 $M_{tail}$ 分别表示目标迎头驻点、蒙皮和 尾喷辐射出射度。则在目标 YOZ 俯仰平面内,目标本征辐射强度空间分布包线为

$$F_{\rm rad}(\theta, I_{\rm pitch}) = \begin{cases} \varepsilon_{\iota}(\lambda) \left( \frac{M_{\rm head}}{\pi} A_{\rm head} \cos \theta + \frac{M_{\rm on}}{\pi} A_{\rm on} |\sin \theta| \right), & 0 \le \theta < \frac{\pi}{2} \text{ or } \frac{3\pi}{2} \le \theta < 2\pi \\ \varepsilon_{\iota}(\lambda) \frac{M_{\rm on}}{\pi} A_{\rm on} |\sin \theta| + \varepsilon_{\rm a}(\lambda) \frac{M_{\rm tail}}{\pi} A_{\rm tail} |\cos \theta|, & \frac{\pi}{2} \le \theta < \frac{3\pi}{2} \end{cases}, \tag{6}$$

式中 M. 表示目标上表面辐射出射度, A. 表示目标辐射投影面积。

3 探测概率包线分析

虽然环境背景辐射给红外探测系统带来一定的干扰,但反映机载光电系统实际作战能力的主要还是取

决于空战态势,它对光电系统作战能力影响较大。空战态势包含了相对距离、速度、高度和高度差、方位俯仰角等信息。为全面描述和定量分析不同空战态势中机载光电系统的探测能力,提出探测概率包线概念,即先从角水平和角俯仰去分析机载光电系统的探测能力,然后综合作战环境和探测概率特性给出机载光电系统具有一定概率的作用距离包线。

#### 3.1 角水平探测能力包线

在 XOY 面内,水平探测包线决定于环境背景辐射、目标辐射特性、探测器性能和敌我占位。环境背景 辐射影响了探测器噪声水平,它会使红外成像系统信噪比降低,影响目标探测概率;相对距离决定了红外传 输衰减的程度和探测器的最小可探测辐射功率;目标速度主要影响目标蒙皮辐射强度,随着超声速目标的 出现,大大提升了光电系统作用距离和目标探测概率;目标方位俯仰则决定了光电系统是水平还是俯仰探 测或者迎头还是尾追探测,不同情况探测能力不同。由于载机与目标机处于同一大气层,因此大气衰减系 数 μ(λ)可认为是一定值。

若背景辐射强度为 *I*<sub>*b*</sub>(λ),以作用距离标识机载光电系统的探测能力,则根据作用距离方程式<sup>112</sup>,可推导 出探测能力包线可以表示为

$$R_{\text{level}}(\alpha) = \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k \cdot \left[ F_{\text{ref}}(\alpha, I_{\text{side}}) + F_{\text{rad}}(\alpha, I_{\text{side}}) - I_{\text{b}}(\lambda) \right] \frac{\delta \tau_0 \tau(\lambda, R) A_0 D^*}{\left( v_s / V_n \right) \cdot \left( A_d / \Delta f \right)^{1/2}} \cdot d\lambda \right\}^{1/2},$$
(7)

式中  $I_{h}(\lambda)$  为背景辐射强度,  $\delta$  为信号衰减因子,  $\tau_{0}$  为光学系统透过率,  $\tau(\lambda, R)$  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,  $k = \sigma_{1}^{2}/\sigma^{2}$ ,  $\sigma_{1}^{2}$  为目标尺寸对探测器面张角的方差值,  $\sigma^{2}$  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,  $\Delta f$  为测量电路的频带宽。

#### 3.2 角俯仰探测能力包线

角俯仰探测是指在 YOZ 平面内的探测,此平面内,机载光电系统遇到最为有意义的是远距斜程探测,这种情况下的探测能力包线除了受上述因素影响外,还受到大气透过率、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。

当目标与载机处于不同大气层高度时,大气温度不同,引起的背景辐射也不同,大气温度 T<sub>0</sub> 随高度 h 的 变化<sup>13</sup>分别为

$$\begin{cases} T_1 = (288.2 - 0.0065h) \text{ K}; & 0 < h \le 11000 \text{ m} \\ T_1 = (288.2 - 0.0065h) \text{ K}; & 0 < h \le 11000 \text{ m} \\ T_2 = 216.7 \text{ K}, & 11000 \text{ m} < h \le 20000 \text{ m} \\ T_3 = 216.7 \text{ K} + 0.001(h - 20000) \text{ K}, & 20000 \text{ m} < h \le 32000 \text{ m} \end{cases}$$
(8)

根据大气层温度 T 可得到目标新的目标辐射出射度,从而使目标辐射在空间上重新分布。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<sub>x</sub>可等效换算为近地水平距离:

$$L(R_x) = \frac{\exp(-0.313H_1) - \exp(-0.313H_2)}{0.313\sin\beta} \quad , \tag{9}$$

式中 $H_1$ 和 $H_2$ 分别是载机与目标的大气层高度,  $\beta$ 是目标相对于载机的俯仰角。因此,大气透过率  $\tau(\lambda, R_x) = \exp[-\mu_0(\lambda) \cdot L(R_x)], \mu_0(\lambda)$ 为近地大气衰减系数。此时,机载光电系统俯仰探测包线为

$$R_{\text{pitch}}(\theta) = \begin{cases} \left\{ \int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{2}} k \cdot \left[ F_{\text{ref}}(\theta, I_{\text{on}}) + F_{\text{rad}}(\theta, I_{\text{on}}) - I_{\text{b}}(\lambda) \right] \frac{\delta \tau_{0} \tau(\lambda, R) A_{0} D^{*}}{\left( v_{s}/V_{n} \right) \cdot \left( A_{d}/\Delta f \right)^{1/2}} \cdot d\lambda \end{cases}^{1/2} \\ \left\{ \int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{2}} \left[ k \cdot F_{\text{ref}}(\theta, I_{\text{below}}) + F_{\text{rad}}(\theta, I_{\text{below}}) - I_{\text{b}}(\lambda) \right] \frac{\delta \tau_{0} \tau(\lambda, R) A_{0} D^{*}}{\left( v_{s}/V_{n} \right) \cdot \left( A_{d}/\Delta f \right)^{1/2}} \cdot d\lambda \end{cases} \right\}^{1/2} . \tag{10}$$

#### 3.3 复杂环境下探测概率包线分析

复杂作战环境下,机载光电系统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。上述内容都是基于一次目标探测分析,而实际机载光电系统在 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,机载光电系统探测目标信噪比越高,探测概率越高,相应的虚警概率就低。信噪比 S<sub>NR</sub>可 由上述机载光电系统探测能力包线公式推导得出:

$$S_{\rm NR} = \frac{\left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k \left[ F_{\rm ref}(\theta, I) + F_{\rm rad}(\theta, I) - I_b(\lambda) \right] \cdot \tau(\lambda, R) \cdot d\lambda \right\} \cdot \left( A_0 \tau_0 D^* \right) \cdot \delta}{\sqrt{\left( A_d \Delta f \right)} \cdot R^2} , \qquad (11)$$

探测概率 P<sub>a</sub>、虚警概率 P<sub>f</sub>和 SNR 三个参数中任意两个可唯一确定第三个,这一关系可近似为<sup>[14]</sup>

$$P_{\rm d} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\left(\frac{1}{2} + S_{\rm NR}(R)\right)^{1/2} - \ln^{1/2}\left(\frac{1}{P_{\rm f}}\right)\right] , \qquad (12)$$

式中 erf(x) 为误差函数。实际上,(12)式反映了机载光电系统作用距离与探测概率之间的对应关系。图 2反映了信噪比、虚警概率和探测概率之间的关系。



图2 信噪比、虚警概率和探测概率之间的关系

Fig.2 Relationship among  $S_{\text{NR}}$ , false alarm and detection probability

## 4 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,计算出此飞机各个视图的面积  $A_{head} = 9.32 \text{ m}^2$ ,  $A_{side} = 33.25 \text{ m}^2$ ,  $A_{tail} = 7.86 \text{ m}^2$ ,  $A_{on} = A_{helow} = 106.28 \text{ m}^2$ ; 实地音速  $V_0 = 340 \text{ m/s}$ ; 尾焰废气温度  $T_0 = 875 \text{ K}$ ,角水平 探测时  $H_1 \approx H_2 = 8 \text{ km}$ ;角俯仰探测时  $H_1 = 8 \text{ km}$  和  $H_2 = 10 \text{ km}$ ;探测目标红外波段为 3~5 µm。

图 3 和图 4 反映了目标反射背景辐射在水平面和俯仰面内的分布情况。从图 3 可以看出,目标反射背景 辐射强度较大于后向情况,这是因为目标机迎着太阳飞行,目标前向直接反射太阳辐射,而尾后方仅是反射 天空背景辐射以及大气二次反射太阳辐射,明显弱于前向直接反射。当太阳高低角为 90°,60°和 45°时,则 在前向方位 α = 90°,60°,45°处以及与之对称的 α = 270°,300°,135°处,目标反射背景辐射最为强烈。





Fig.3 Level envelope of target reflecting radiation

Fig.4 Pitch envelope of target reflecting radiation

从图4可以看出,目标俯仰平面内的反射背景辐射强度分布并不规则,上表面反射背景辐射强度明显大 于下表面情况,这与实际情况十分相符,因为上表面直接反射太阳辐射,而下表面仅反射地面辐射以及地面 二次反射太阳辐射。同样当太阳高低角为 90°,60°和 45°时,则在上方 θ=90°,120°,135°处,目标反射背景 辐射最为强烈,这也遵循了光线反射定律。

图 5 是目标在水平面内的本征辐射强度包线,图中前向辐射强度弱于后向情况,主要因为后向有尾焰和 尾喷口高辐射体的作用,且在偏离正前方和正后方 α=45°,160°,200°,315° 附近出现最大辐射值,这也说明 了载机在迎头和尾追探测时,需要在侧前方或者侧后方一定角度进行探测。图5还反映了目标辐射强度随 着速度的增大而增大,且速度越大,增幅越快。图6是目标俯仰平面内本征辐射强度包线,辐射强最大位置 偏离目标正前或正后方的 $\theta$ =45°,150°,210°,315°附近。

图7是光电系统角水平探测能力包线,从图中看出,水平探测能力包线基本呈现对称分布,目在目标机



Fig.5 Level envelope of target radiation

300 图6 目标角俯仰辐射包线

30

0

330

Fig.6 Pitch envelope of target radiation

后方探测距离较大。随着目标机速度的增大,探测包线范围扩大,并且速度越高,包线扩大越快。图8是光 电系统角俯仰探测能力包线,从图中可以发现,俯仰探测能力包线并不是对称分布,在太阳辐射的影响下, 光电系统在目标尾后上方探测能力较大于尾后下方位置,探测距离相差 3~4 km,这个差值在空战过程中对 载机的探测反应能力存在一定的影响。

上述都是部分因素的仿真结果,当大气能见距  $R_v = 20 \, \text{km}$ ,综合考虑探测概率以及复杂环境等因素,且





要求 虚警概率值 P<sub>4</sub>=10<sup>-4</sup> 时,则得到如图9和图10的探测概率包线,从图中可以看出,随着作用距离包线范 围的增大,光电系统的探测概率逐渐降低。在满足作战探测概率前提下,每条概率包线上都可求得最大作







Fig.10 Pitch detection probability envelope

0304002-6

用距离位置点,此位置点即为机载光电系统最佳探测点,因此,机载光电系统在探测过程中,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 11 是不同概率下的作用距离包络面,它以目标战机为中心,结合水平和俯仰包线构成作用距离空间 包络面。这个包络面表明,目标空间位置一旦确定,即可知目标是否可探测到。从图 15(a)中可以得到最佳 探测点的方位俯仰角为 (α,θ)=(0.94,0.86) 和 (α,θ)=(1.05,1.16),图 15(b)中最佳探测点的方位俯仰角为 (α,θ)=(1.02,0.89) 和 (α,θ)=(1.02,1.12),即目标尾后方相对于机体对称的两点。因此,机载英特尔快速存储技 术(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 11 不同探测概率下作用距离包络面 Fig.11 Enveloping surface of operating range in different probabilities

# 5 结 论

为了客观反映实际复杂环境下机载光电系统探测能力,深入分析了目标反射背景辐射和目标本征辐射 特性,并给出了具体计算方法;在此基础上,构建了机载光电系统角水平和角俯仰探测能力包线模型;综合 复杂环境和探测概率特性,给出了探测概率与作用距离、虚警概率、信噪比之间的关系。经过仿真分析,可 以发现,探测能力包线随着目标速度、相对方位角、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点。所得仿真实验结果都是基于晴朗天气下获得的, 若要增加探测包线模型的普适性,还需要进一步扩展环境条件。

#### 参考文献

- 1 M Scheuer. FLIR/IRST of the european fighter aircraft[J]. SPIE, 2002, 4714: 1–10.
- 2 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.
  - 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): 1047-1051.
- 3 Z Schneider. ELTA's IRST defense and self-protection system[J]. SPIE, 2007, 6542: 654232.
- 4 Diao Weihe, Mao Xia, Chang Le, *et al.*. Operating distance eval-uation method for infrared imaging system under complicated backgrounds [J]. Electronics Letters, 2009, 45(25): 1309–1310.
- 5 Li Li, Qiu Su, Jin Weiqi, *et al.*. Operating distance model of near-infrared range gated imaging system based on minimum resolvable contrast[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3481-3486.

李 力, 裘 溯, 金伟其, 等. 基于最小可分辨对比度的近红外距离选通成像系统作用距离模型[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3481-3486.

6 Zhang Ying, Niu Yanxiong, Yang Lu, *et al.*. Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111004.

张 颖,牛燕雄,杨 露,等.星载光电成像系统探测能力分析与研究[J].光学学报,2014,34(1):0111004.

- 7 B Eier K, Gemperlein H. Simulation of infrared detection range at fog conditions for enhanced vision systems in civilaviation[J]. Aerospace Science and Technology, 2004, 8(1): 63-71.
- 8 Zhou Jinwei, Li Jicheng, Shi Zhiguang, *et al.*. Research of infrared detectability of hypersonic vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (5): 0544001.

周金伟,李吉成,石志广,等.高超声速飞行器红外可探测性能研究[J].光学学报,2015,35(5):0544001.

9 Yang Lu, Niu Yanxiong, Lv Jianming, *et al.*. Influence of attitude variation on the detection ability of satellite photoelectric imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1223002.

杨 露,牛燕雄,吕建明,等.姿态变化对星载光电成像系统探测能力的影响[J].光学学报,2014,34(12):1223002.

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): 1429–1434.

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):1429-1434.

11 Yuan Yihui, Zhang Junju, Chen Zuolong, et al.. Simulation study on temperature and infrared radiation characteristics of flying projectile [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(8): 1090–1094.

袁轶慧,张俊举,陈佐龙,等.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 Jia Qinglian, Qiao Yanfeng, Deng Wenyuan. Analysis for point-target detection range of panoramic searching system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 937-943.

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): 937-943.

13 Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, *et al.*. Calculation and image simulation of aircraft infrared radiation characteristic[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(11): 1310-1318.

李建勋, 童中翔, 王超哲, 等. 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.

14 Zhang Guangjun. Photoelectric Test Technipue and System[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics press, 2010: 295-296.

张广军.光电测试技术与系统[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010:295-296.

栏目编辑:刘丰瑞