

晴空背景下地基红外告警系统作用距离

方义强, 樊祥, 程正东, 朱斌, 张发强, 施展

(脉冲功率激光技术国家重点实验室 合肥电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 作用距离是红外告警系统的重要参数指标, 其大小由告警系统、目标和背景等的特点决定。对晴空背景下红外告警系统的作用距离进行了研究, 充分考虑了大气传输和大气辐射的特点, 建立了作用距离的理论计算模型, 结合计算模型和典型数据, 针对面目标和点目标两种情况, 计算了不同目标高度和不同目标高度角时大气对作用距离的影响。结果表明: 在目标飞行高度一定时, 只有当目标高度角大于一定角度时目标才可能被探测, 该角度随目标的飞行高度增大而减小。

关键词: 大气红外辐射; 作用距离; 辐射亮度; 大气透过率; 红外告警

中图分类号: TN215 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)07-1654-06

Operating range of ground-based IR alarm system in clear sky

Fang Yiqiang, Fan Xiang, Cheng Zhengdong, Zhu Bin, Hang Faqiang, Shi Zhan

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronical Engineering Institute of Hefei, Hefei 230037, China)

Abstract: The operating range is an important parameter of the IR alarm system, and its value is decided by the characteristics of the alarm system, the target and the background. A research was done specially on the operating range of ground-based IR alarm system in clear sky. The traits of the transmission and radiation of the atmosphere were fully considered, and then the theoretic calculating model of the operating range was established. Combining the model and typical data, and considering the two situation of cover target and spot target, the effects of the atmosphere on the operating range were calculated for different target altitude and high angle. The results show that the target can be detected only when the target's high angle is larger than a certain value if the altitude of the target is fixed, and this angle decreases as the target attitude increases.

Key words: atmosphere infrared radiation; operating range; radiance; atmosphere transmittance; infrared alarm

收稿日期: 2013-01-15; 修订日期: 2013-01-31

基金项目: 安徽省青年基金(1308085QF122)

作者简介: 方义强(1986-), 男, 博士生, 主要从事红外小目标检测方面的研究。Email: 490982172@qq.com

导师简介: 樊祥(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电对抗方面的研究工作。Email: FanxiangLXL@163.com

0 引言

作用距离是红外告警系统的重要参数指标,其大小由告警系统、目标和背景等特点决定。地基红外告警系统的作用对象主要为空中来袭目标,关于系统对空中目标的作用距离,很多文献都进行了较深入的研究。刁伟鹤,毛峡等针对背景的多样性对不同背景下的作用距离进行了讨论^[1],高思峰等对红外系统作用距离估算中的大气传输问题进行了研究^[2]。贾庆莲等^[3]深入分析了周视系统对点目标的作用距离,从靶面照度、靶面对比度和探测概率等角度对作用距离进行了推导,定量得到了目标辐射强度、大气消光系数、系统焦距等和作用距离的关系。对于空中目标,大气对目标探测的影响是不可忽略的,大气对目标探测的影响不仅表现在对目标辐射传输的衰减上,而且表现在大气自身的辐射上。魏合理,徐英莹等^[4-5]对天空大气背景红外辐射的计算和测量进行了研究,并指出大气的背景辐射与大气透过率、天顶角等有关。

显然,红外系统的作用距离不仅和大气透过率的特点有关,而且和大气的辐射特点有关。现有的很多文献虽然考虑了大气传输和大气透过率的影响,但是在计算时并没有将二者的特点结合起来^[6]。因此文中根据大气辐射传输的特点,对晴空背景下的地基红外告警系统的作用距离进行了研究,主要对计算模型的建立、大气透过率的计算、目标与背景的辐射差等问题进行了探讨,在讨论过程中,根据大气辐射传输的特点,目标的作用距离通过目标高度和目标高度角两者来进行讨论。

1 红外系统作用距离模型的建立

图 1 为红外系统探测空中目标示意图,图中 R

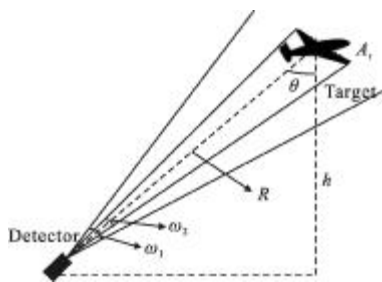


图 1 红外系统探测空中目标示意图

Fig.1 Sketch map of detecting air target by IR system

为目标与探测器的距离, ω_1 为探测器视场角, A_t 为目标在探测方向上的投影面积, ω_2 为目标对探测器的张角, θ 为目标高度角, $h=R\cos\theta$ 为目标高度,则 $h=R\cos\theta$ 。

假设 $L_t(\lambda, \theta)$ 为目标在波长 λ 处的光谱辐射亮度, $L_b(\lambda, \theta, R)$ 为背景的光谱辐射亮度。根据立体角投影定理可得系统接收面的目标辐射照度为:

$$E_t(\lambda, \theta, R) = L_t(\lambda, \theta) \cdot \tau(\lambda, \theta, R) \cdot \frac{A_t}{R^2} + E_r(\lambda, \theta, R) \quad (1)$$

式中: $\tau(\lambda, \theta, R)$ 为距离 R 上的大气透过率; $E_r(\lambda, \theta, R)$ 为目标与探测器间的路径辐射在系统接收面的照度。接收面接收的背景辐射照度为:

$$E_b(\lambda, \theta, R) = L_b(\lambda, \theta, R) \cdot \tau(\lambda, \theta, R) \cdot \pi \left(\frac{\omega_1}{2} \right)^2 + E_r(\lambda, \theta, R) \quad (2)$$

那么由两个辐射照度,可以计算得到目标与背景的背景辐射照度差 $\Delta E(\lambda, \theta, R)$:

$$\Delta E(\lambda, \theta, R) = [L_t(\lambda, \theta) \cdot A_t/R^2 - L_b(\lambda, \theta, R) \cdot \pi(\omega_1/2)^2] \cdot \tau(\lambda, \theta, R) \quad (3)$$

公式(3)涉及的变量较多,但是如果已知探测器光学系统光谱透过率 $\tau_0(\lambda)$ 和孔径参数 $f_{\text{数}}$,则焦平面上目标像元的光谱辐射照度为:

$$E'(\lambda, \theta, R) = \frac{\pi \tau(\lambda, \theta, R) \tau_0(\lambda)}{4} \cdot L_t(\lambda, \theta) \cdot \frac{1}{f_{\text{数}}^2} + E_r(\lambda, \theta, R) \cdot \frac{A_0}{A_d} \quad (4)$$

式中: A_0 为系统接收面面积; A_d 为焦平面面积。同样的方法可以得到背景在焦平面的光谱辐射照度。在不考虑弥散的情况下,目标与背景在焦平面阵列上的辐射照度差为:

$$\Delta E'(\lambda, \theta, R) = \frac{\pi \tau(\lambda, \theta, R) \tau_0(\lambda)}{4f_{\text{数}}^2} \cdot [L_t(\lambda, \theta) - L_b(\lambda, \theta, R)] \quad (5)$$

从公式(5)可以看到,系统的探测距离除了和系统本身性能有关外,还与目标、背景的背景辐射亮度和大气透过率有关。需要说明的是,当目标在焦平面上的成像面积过小时,即目标为点目标时,则需要考虑弥散的影响,此时公式(5)修正为:

$$\Delta E'(\lambda, \theta, R) = \frac{\pi \tau(\lambda, \theta, R) \tau_0(\lambda)}{4f_{\text{数}}^2} \cdot \left[L_t(\lambda, \theta) \cdot \frac{A_e}{A_f} - L_b(\lambda, \theta, R) \right] \quad (6)$$

式中: A_e 为根据光学几何成像计算得到的目标成像面积; A_f 为目标的实际成像面积。

为了使公式(5)更直观,将 $\Delta E'(\lambda, \theta, R)$ 表示为下面的形式:

$$\Delta E'(\lambda, \theta, R) = \frac{\pi}{4} \cdot f_1(\lambda) \cdot f_2(\lambda, \theta, R) \quad (7)$$

式中: $f_1(\lambda) \frac{\tau_0(\lambda)}{f_{\text{数}}}$ 为系统的影响; $f_2(\lambda, \theta, \mathbf{R}) = \tau_{\mathbf{R}}(\lambda, \theta, \mathbf{R}) \cdot [L_t(\lambda, \theta) - L_b(\lambda, \theta, \mathbf{R})]$ 或者 $f_2(\lambda, \theta, \mathbf{R}) = \tau_{\mathbf{R}}(\lambda, \theta, \mathbf{R}) \cdot [L_t(\lambda, \theta) \cdot \frac{A_e}{A_f} - L_b(\lambda, \theta, \mathbf{R})]$ 为目标、背景、大气等的影响。由 $\Delta E'(\lambda, \theta, \mathbf{R})$ 可以得到目标像元和背景像元产生的信号电压 V_s 为:

$$V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta E'(\lambda, \theta, \mathbf{R}) \cdot A_n \cdot \mathbf{R}(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

式中: $\mathbf{R}(\lambda)$ 为探测器的光谱响应度。信噪比可以表示为^[7]:

$$\text{SNR} = \frac{V_s}{V_n} = \frac{1}{V_n} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta E'(\lambda, \theta, \mathbf{R}) \cdot A_n \frac{D^*(\lambda) \cdot V_n}{(\Delta f \cdot A_d)^{1/2}} d\lambda = \frac{A_n}{(\Delta f \cdot A_d)^{1/2}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta E'(\lambda, \theta, \mathbf{R}) \cdot D^*(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

用 D^* 表示光谱探测度 $D^*(\lambda)$ 在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的平均值, 因此:

$$\Delta E'(\theta, \mathbf{R}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta E'(\lambda, \theta, \mathbf{R}) d\lambda = \text{SNR} \cdot \frac{(\Delta f \cdot A_d)^{1/2}}{A_n \cdot D^*} \quad (10)$$

式中: Δf 为系统电路的等效噪声带宽; A_n 为探测元的面积。

根据公式(10)就可计算系统的作用距离及其与其他参数的关系。等式右边是与探测器有关的量, 为已知的, 而在 $\Delta E'(\lambda, \theta, \mathbf{R})$ 中, $f_1(\lambda)$ 是由探测系统决定的, 也为已知量, 因此要求解系统的作用距离, 主要是对 $f_2(\lambda, \theta, \mathbf{R})$ 进行确定, 一般目标的辐射相对比较容易确定, 许多文献都对其进行了研究^[8], 需要进行讨论的主要是大气透过率和背景辐射。

2 大气透过率分析

大气透过率由大气的特点决定, 由于大气温度、密度、压强等的分布都随高度变化, 因此需要通过对大气进行分层来计算距离 \mathbf{R} 上的大气透过率。假设将整个大气层分为 N 层, 目标位于第 N_0 层, 如图 2

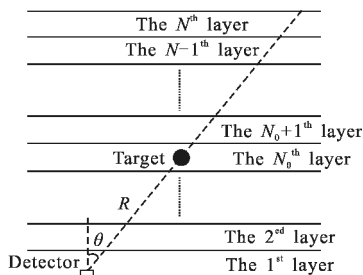


图 2 大气分层和目标示意图
Fig.2 Sketch map of layer and target

所示。那么可以求得从目标处到探测器的大气透过率 $\tau(\lambda, \theta, \mathbf{R})$ 为^[9]:

$$\tau(\lambda, \theta, \mathbf{R}) = \prod_{i=1}^{N_0} \tau_i(\lambda, \theta) \quad (11)$$

式中: $\tau_i(\lambda, \theta)$ 为第 i 层大气的光谱方向透过率。对每一层大气作朗伯体处理可以进一步得到:

$$\tau(\lambda, \theta, \mathbf{R}) = \prod_{i=1}^{N_0} [\tau_i(\lambda)]^{\cos\theta} \quad (12)$$

在通过公式(12)计算透过率的过程中, 由于大气条件随高度、时间和地域等都有较大的差别, 纯理论上的计算仍然非常复杂。计算时, 在获得实测大气压强、大气粒子等分布前提下, 通过一些简化的吸收、散射模型来计算大气透过率。在缺乏上述数据的情况下则可以通过一些典型的大气数据来代替, 或者直接通过一些比较公认的大气红外辐射传输计算软件来近似计算, 如 Lowtran、Modtran、Fascode 等。

3 目标红外辐射分析

地基红外告警系统的主要探测对象是空中来袭目标, 由于相对位置的关系, 目标发动机口的强辐射将在很大程度上被目标自身所遮挡, 且现代的飞机、导弹等空中目标对这些强辐射的部位都做了隐身设计, 因此通过对空中目标蒙皮来实现对目标的探测具有重要的意义, 而蒙皮的红外辐射主要集中在大气窗口的 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段。

目标蒙皮辐射与蒙皮温度和表面发射率有关, 而蒙皮温度又与目标飞行马赫数有关。空气动力加热的蒙皮绝对温度的经验公式为^[10]:

$$T_M = T_0 \cdot [1 + 0.17 \cdot M^2] \quad (13)$$

式中: T_M 为蒙皮的绝对温度; T_0 为目标所在高度处的大气绝对温度; M 为目标飞行马赫数, 蒙皮辐射一般认为是具有一定发射率 ϵ_M 的朗伯体辐射, 那么目标辐射亮度可以表示为 $L_t(\lambda, \theta) = L_t(\lambda)$ 。

4 晴空背景辐射分析

在文中的晴空条件下, 不考虑云的辐射, 因为云的辐射具有很大的随机性, 甚至会对目标形成遮挡, 使得探测不到目标。对于太阳, 其可以近似为 $T = 5770 \text{ K}$ 的黑体, 太阳的平均半径约为 $r_{\text{日}} = 6.338 \times 10^5 \text{ km}$, 太阳与地球的平均距离约为 $r_{\text{日-地}} = 1.49985 \times 10^8 \text{ km}$ 。那

么根据普朗克公式可以计算得到太阳在 8~14 μm 波段到达地球大气层外的辐射照度为:

$$E = \left(\frac{r_{\text{日-地}}}{r_{\text{日-日}}} \right)^2 \int_{8 \mu\text{m}}^{14 \mu\text{m}} M_{\lambda\text{B}}(5770 \text{ K}) d\lambda \approx 0.28 \text{ W/m}^2 \quad (14)$$

可以看到,即使没有经过大气层的衰减,太阳在 8~14 μm 波段到达地球的辐射照度也很小。因此,在 8~14 μm 波段可不考虑太阳的辐射影响,且在实际操作中系统是禁止直接对准太阳的。

R 距离 θ 方向上大气背景辐射由 R 距离到无穷远的大气引起,用 $L_{R-\infty}(\lambda, \theta, R)$ 来表示。根据图 2 可得 $L_{R-\infty}(\lambda, \theta, R)$ 为:

$$L_{R-\infty}(\lambda, \theta, R) = \sum_{n=N_0}^N L_n(\lambda, \theta) \prod_{i=N_0}^{n-1} \tau_i(\lambda, \theta) = \sum_{n=N_0}^N L_n(\lambda, \theta) \prod_{i=N_0}^{n-1} [\tau_i(\lambda)]^{\cos\theta} \quad (15)$$

式中: $L_n(\lambda, \theta)$ 为第 n 层大气的光谱辐射亮度。

5 作用距离的计算及结果分析

根据公式(5),文中首先针对面目标,对探测器接收的辐射照度差等量进行了数值计算。令公式(15)中的 $R=0$,则可计算得到总的天空背景在探测器处的辐射亮度随目标高度角的变化曲线,如图 3 所示,从图中可以看到天空的辐射亮度随高度角的增大而增大,高度角 0° 方向的天空辐射亮度为 22.6 W/(m²·sr), 90° 方向的天空辐射亮度为 55.4 W/(m²·sr)。对比与目标的辐射亮度可知,天空的辐射亮度将对目标的探测产生较大的影响,而且高度角越大天空辐射的影响越大。

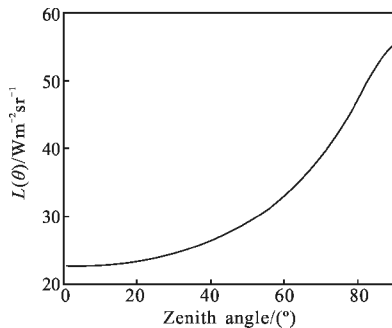


图 3 天空辐射亮度随目标高度角的变化

Fig.3 Change of sky radiance with altitude angle of target

图 4 为目标高度 $h=20 \text{ km}$, 目标高度角 $\theta=60^\circ$ 时,目标处到探测器的大气光谱透过率 $\tau(\lambda, \theta, R)$,对

于假设温度为 310 K,发射率为 0.9 的目标,可以求得 8~14 μm 的平均透过率为 0.31。图 5 为目标高度为 20 km 时,目标处到探测器的 8~14 μm 波段平均透过率随目标高度角的变化曲线。图 6 为目标高度角为 60° 时,大气在 8~14 μm 波段的平均透过率随目标高度的变化曲线。

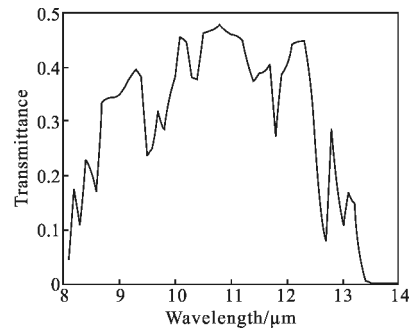


图 4 大气光谱透过率

Fig.4 Spectral transmittance of atmosphere

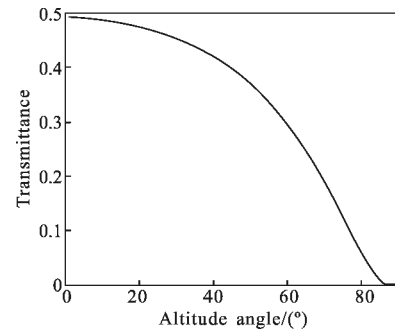


图 5 透过率随高度角的变化

Fig.5 Change of transmittance with altitude angle

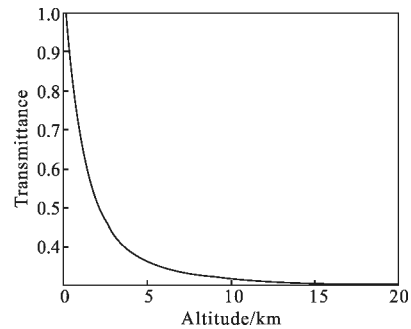


图 6 透过率随高度的变化

Fig.6 Change of transmittance by altitude

8~14 μm 波段范围内,目标辐射亮度与背景辐射亮度差 $\Delta L(\theta, R) = L_t(\theta) - L_b(\theta, R)$ 随目标高度角的变化曲线如图 7 所示,图中曲线从下到上分别对应目标高度 20 km、10 km、5 km、1 km,由曲线并结合公式(5)可以较为直观地得到背景辐射对目标探测的影

响,整体而言,随目标高度角的增大而减小,在大的目标高度角度(约 80°以上)上变化更明显,这种变化随着目标高度的增加而减弱。在高度变化上,随着目标高度的增大而减小,减小的幅度也随高度的增加而减小。因为高度越高,空气越稀薄,那么大气辐射就会减小,而且在 20 km 的高度以内,大气的温度随高度降低,这也会导致大气辐射的减小,同时,根据公式(13)可以得到目标的蒙皮温度也会减小,从而目标的辐射减小。虽然大气辐射和蒙皮的辐射都会随高度的增加而减小,显然大气辐射减小的速度要快于目标辐射减小的速度,这就导致了图中对应于 5 km 和 1 km 目标高度的两条曲线的相交。

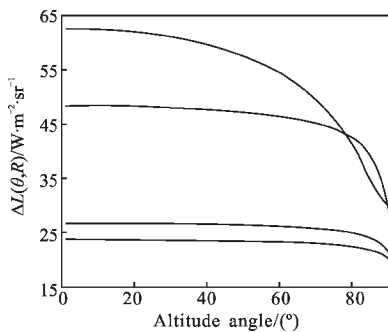


图 7 $\Delta L(\theta, R)$ 随高度角的变化
Fig.7 Change of $\Delta L(\theta, R)$ by altitude angle

结合大气的光谱透过率则可以得到 $f_2(\lambda, \theta, R)$ 的波段量 $f_2(\theta, R)$ 随目标高度角的变化曲线,如图 8 所示,图中曲线从下到上分别对应目标高度为 20 km、10 km、5 km、1 km,和 $\Delta L(\theta, R)$ 相同的是 $f_2(\theta, R)$ 的值随着角度的增大而减小,不同的是在不同的目标高度上 $f_2(\theta, R)$ 随角度的变化比较均匀。同样, $f_2(\theta, R)$ 的值随着目标高度的增大而减小,减小的幅度随高度的增加而减小。

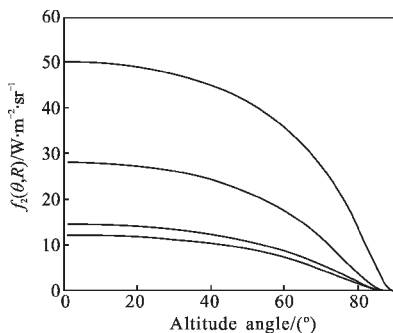
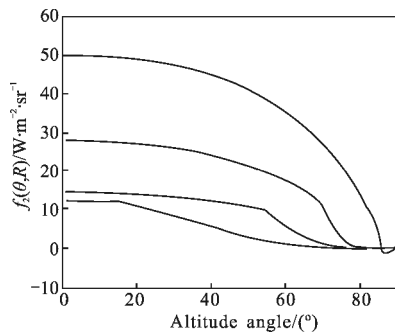


图 8 $f_2(\theta, R)$ 随高度角的变化
Fig.8 Change of $f_2(\theta, R)$ by altitude angle

设红外探测系统参数为:光学系统有效接收口径 $D_0=120\text{ mm}$, 焦距 $f=220\text{ mm}$, 光学系统 8~14 μm 平均透过率为 $\tau_0=0.9$, 探测器像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$, 像元数为 128×128 , 探测器 8~14 μm 波段平均光谱探测度 $D^*=5\times 10^{10}\text{ Hz}^{1/2}\cdot\text{cm}\cdot\text{W}^{-1}$, 系统噪声等效带宽 $\Delta f=100\text{ Hz}$, 信噪比 SNR 取 5。

根据以上参数通过公式(9)可以计算得到需要的最小 $\Delta E_{\min}'(\lambda, \theta, R)=0.43\text{ W/m}^2$, 进一步可以求得 $f_2(\theta, R)=1.68\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。结合图 8 的 $f_2(\theta, R)$ 曲线可以看到,在大气背景下,只有在大目标高度角度时,目标才会不可探测。对应于目标高度为 20 km、10 km、5 km、1 km 可以求得该临界角度为 $87.3^\circ, 82.9^\circ, 80.4^\circ, 79.5^\circ$, 将目标高度折算为距离 R 为 157.4 km, 79.8 km, 42.2 km, 12.5 km。该计算结果具有一定的实际指导意义,如:如果来袭目标的飞行高度为 5 km, 那么只有当其相对红外探测系统的目标高度顶角小于 82.9° , 即距离 42.2 km 时,才可能被系统探测到。

上面的计算和分析都是针对面目标的情况进行的计算,但是在实际过程中的一些空中目标,比如导弹、小型飞机甚至是大型飞机,其表面积在探测方向的投影面积较小,使得目标表现为点目标,此时根据公式(6)可知,在点目标的情况下计算得到的临界角度将会减小,即相应的探测距离也会减小。假设平行地面飞行的某型飞机在探测方向的投影面积可以表示为 $161\cos\theta+14\sin\theta\text{ m}^2$, 并假设由于弥散作用,目标的成像面积不小于 9 个像素,那么依照前面的分析过程可以计算得到这种情况下的 $f_2(\theta, R)$ 曲线图 9 所示。相比于面目标的情况,点目标时的 $f_2(\theta, R)$ 曲线随目标高度的变化明显,同样从曲线中可以得到对应于目标高度为 20 km、10 km、5 km、1 km 可以求得该临界角度为 $56.8^\circ, 68.7^\circ, 77.1^\circ, 85.5^\circ$, 将目标高度折算为距离 R 为 36.5 km, 27.5 km, 22.4 km, 12.7 km。可见,目标飞行高度越高,该临界角就越大,对应的作用距离越大。对图中曲线做两点说明:(1) 曲线中的拐点显示了目标由面目标转为点目标的位置,文中计算时近似认为当目标成像面积大于 9 个像素时为面目标,而小于 9 个像素时为点目标,但是实际上曲线在这个拐点位置应该更为光滑;(2) 在大的目标高度角时, $f_2(\theta, R)$ 的值出现了负值,表明目标在这些位置时在探测器上形成的照度小于背景照度,目标信号被背景所淹没。

图 9 $f_2(\theta, R)$ 随高度角的变化Fig.9 Change of $f_2(\theta, R)$ with altitude angle

6 结论

通过前述诸节的理论分析和计算可以得到,大气的辐射和传输都会对红外系统的作用距离产生较大的影响,这些影响与目标的高度角和目标的飞行高度密切相关,因此文中对作用距离通过目标的高度和高度角来表征,在目标飞行高度一定时,只有当目标高度角大于一定角度时目标才可能被探测,该角度随目标的飞行高度增大而减小。另外,文中的计算只采用了一种大气条件,而天空背景对系统作用距离具有较大影响,因此,研究不同大气条件对系统作用距离的影响是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Diao Weihe, Mao Xia, Liang Xiaogeng. Method for estimating operating distance of IR imaging system under complex backgrounds [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(8): 1022-1026. (in Chinese)
刁伟鹤, 毛峡, 梁晓庚. 复杂背景红外成像系统作用距离估算方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(8): 1022-1026.
- [2] Gao Sifeng, Wu Ping, He Manli, et al. Estimation on the operating range of infrared system under complex atmosphere condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 941-944. (in Chinese)
高思峰, 吴平, 何曼丽, 等. 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): 941-944.
- [3] Jia Qinglian, Qiao Yanfeng, Deng Wenyuan, et al. Analysis for point-target detection range of panoramic searching system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 937-943. (in Chinese)
贾庆莲, 乔彦峰, 邓文渊, 等. 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.
- [4] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming, et al. Ground-based measurements of infrared atmospheric background spectral radiances [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 284-290. (in Chinese)
魏合理, 陈秀红, 戴聪明, 等. 地基大气背景红外光谱辐射特性测量 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 284-290.
- [5] Xu Yingying, Jin Weiqi, Ma Wenwen, et al. Measurement of night sky spectral radiation and analysis of spectral denoising [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6): 1456-1459. (in Chinese)
徐英莹, 金伟其, 马文文, 等. 夜晚天空光谱辐射测量研究及光谱去噪分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1456-1459.
- [6] Zhang Bin, Zhang Zhenduo, Zhang Shumei. Evaluation of the operating range for ground-based infrared imaging tracking system [C]//SPIE, 2011, 8193: 81930.
- [7] Yang Yihe, Yue Min, Zhou Weizhen. *Infrared System* [M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 145-147. (in Chinese)
杨宜禾, 岳敏, 周维真. *红外系统* [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 1995: 145-147.
- [8] Wang Mingming, Hao Yingming, Zhu Feng, et al. IR radiation and real time simulation of air targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (8): 1979-1984. (in Chinese)
王明明, 郝颖明, 朱枫, 等. 空中目标红外辐射特性计算与实时仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 1979-1984.
- [9] Kang Dayong, Cheng Bin, Gao Junguang. Differentiation algorithm method of ground-air infrared detection range [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2009, 24 (1): 29-32. (in Chinese)
康大勇, 成斌, 高俊光. 地空红外探测距离推算方法探讨 [J]. *光电技术应用*, 2009, 24(1): 29-32.
- [10] Mao Xia, Hu Haiyong, Huang Kang, et al. Calculation method for airplane IR radiation and atmospheric transmittance [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(10): 1228-1231. (in Chinese)
毛峡, 胡海勇, 黄康, 等. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(10): 1228-1231.