云对空中目标红外探测的影响

方义强[1,2],陈 卫[2],孙晓军[1,2],马东辉[2],程正东[2],张发强[1,2]

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

摘 要: 云是造成空中目标探测和识别困难的重要因素。从目标和云的红外辐射出发,分析了云影响目标红外探测的问题。首先根据目标和云的 4 种位置关系,建立了不同情况下探测器接收到的目标和云背景辐射差的计算模型,然后对模型中参数的计算进行了讨论,最后根据模型进行了实例的仿真计算和分析。计算结果表明:在 8~14 μm 波段上,目标与背景的辐射差在 9 μm 波长、50°方向角附近的值比较大,而在波长较长、方向角角度较大的部分值较小。该结论可以为红外探测系统的设计提供依据。

关键词: 目标探测; 云; 红外辐射; 辐射差

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2034-05

Effects of cloud on air target IR detection

Fang Yiqiang[1,2], Chen Wei[2], Sun Xiaojun[1,2], Ma Donghui[2], Cheng Zhengdong[2], Zhang Faqiang[1,2]

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

Abstract: Cloud is an important factor for the difficulty in air target detection and recognition. Based on the IR radiation of target and cloud, the effects of cloud on the target IR detection were analyzed. Firstly, according to the 4 different position relationships of target and cloud, the models for calculating the radiation difference of target and cloud that received by the detector were established, and then the calculations of the parameters in the model were discussed. Lastly, the simulation calculation was done as an example based on the model, and the results were analyzed. The results show that: in the band of 8-14 μm, the radiation difference of target and cloud has bigger value near the wavelength of 9 μm and direction angle of 50°, and smaller value appears at the longer wavelength and larger direction angle. The conclusion can provide the basis for the design of IR detection system.

Key words: target detection; cloud; IR radiation; radiation difference

收稿日期: 2014-11-28; **修订日期:** 2014-12-22

基金项目: 电子工程学院博士生创新基金;国家自然科学基金(61307025,61271376);安徽省自然科学基金(1308085QF122,1208085MF114)

作者简介: 方义强(1986-),男,博士生,主要从事红外目标探测方面的研究工作。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: FangxiangLXL@163.com

0 引 言

红外探测是空中来袭目标预警的一种重要方式，但是天空中云的存在会对目标的探测、识别、跟踪等造成困难。现有文献在分析云的存在对目标探测的影响时，主要是认为云的存在会使红外探测系统获取的红外图像变得复杂，从而使目标处于复杂背景中，影响系统对目标信号的提取[1-2]，这种观点是根据探测系统已经获取的图像来进行研究的。然而在实际的探测中，云的存在将会影响目标的红外成像，如云对目标的遮挡，这样可能直接导致目标不可探测。但是现有文献对这方面的研究甚少，参考文献[3] 结合 MODTRAN 软件研究了云在可见光到近红外波段对目标和背景对比度的影响，其采用的分析模型为平面平行云的假定和无云视线概率模型。文中从目标和云的红外辐射出发，考虑目标和云不同的位置关系，对云影响目标探测的问题进行了研究。

1 模型的建立

如图 1 所示，云层和目标的相对位置可以分为以下几种：(1)目标在云层前面；(2)目标在云层后面；(3)目标在云层中间；(4)目标和云层互不交叠。图中 τ_c、τ_{tc}、τ_{td}、τ_{cd} 分别为云的透过率、目标和云之间的大气透过率、目标和探测器之间的大气透过率、云和探测器之间的大气透过率，这几个量均为和波长 λ、方向角 θ 相关的量，为了使后续的表达式简洁，这里没有将波长和方向角表示出来。h_t、h_c 分别为目标和云底高度。下面对几种情况进行讨论，除非特别声明，以下讨论中所涉及的光度量均为光谱量。可以看到

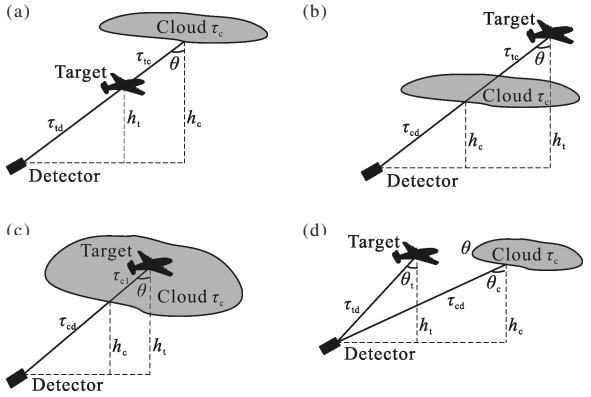

图 1 云和目标的位置关系

Fig.1 Location relationship of cloud and target

在 4 种情况下，探测器探测到的云的辐射照度可以统一表示为：

$$E_c(\theta_c)=\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}[\tau_{cd}L_c(\theta_c)+L_{rcd}(\theta_c)+\tau_{cd}\tau_c L_{rcb}(\theta_c)] \tag{1}$$

式中：θ_c 为云的方向角，在前面 3 种情况下，目标周围的云和目标具有相同的方向角 θ；L_c 为云的辐射亮度；L_{rcb} 为云后的大气辐射亮度；τ_0 为探测器光学系统的光谱透过率，一般光学系统透过率很高，可以认为其与波长无关；$f_{\#}$ 为探测器光学系统的 f 数。

由图 1 可知，目标在探测器上的辐射照度跟目标和云的位置有关：

(1)目标在云层前面的情况如图 1(a)所示，可得探测器像元探测到目标的辐射照度如公式(2)所示。

$$E_{t1}(\theta)=\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}[\tau_{td}L_t(\theta)+L_{rtd}(\theta)] \tag{2}$$

式中：$L_t(\theta)$为目标辐射亮度；$L_{rtd}(\theta)$为目标到探测器之间大气路径辐射亮度。

(2)目标在云层后面的情况如图 1(b)所示，则目标在探测器上产生的辐射照度如公式(3)所示。

$$E_{t2}(\theta)=\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}[\tau_{tc}\tau_c\tau_{cd}L_t(\theta)+\tau_{cd}L_c(\theta)+L_{rcd}(\theta)+\tau_c\tau_{cd}L_{rtc}(\theta)] \tag{3}$$

式中：$L_{rtc}(\theta)$为目标到云层之间的大气辐射亮度。

(3)目标在云中的情况如图 1(c)所示，则目标在探测器上产生的辐射照度如公式(4)所示。

$$E_{t3}(\theta)=\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}[\tau_{cl}\tau_{cd}L_t(\theta)+\tau_{cd}L_{cl}(\theta)+L_{rcd}(\theta)] \tag{4}$$

式中：$L_{cl}(\theta)$ 为目标和探测器之间云的辐射亮度，τ_{cl} 为该部分云的透过率。

(4)目标和云互不交叠的情况如图 1(d)所示，此时目标和云不在同一视线上，将目标方向角表示为 θ_t，则得到目标在探测器上产生的辐射照度如公式(5)所示。

$$E_{t4}(\theta_t)=\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}[\tau_{td}L_t(\theta_t)+L_{rtd}(\theta_t)] \tag{5}$$

对于目标的红外探测而言，需要得到目标和背景的辐射照度差，那么根据以上的目标和云在探测器上的照度可以得到各种情况下两者的辐射照度差分别为：

$$\Delta E_1(\theta)=E_{t1}(\theta)-E_c(\theta)=\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}[\tau_{td}L_t(\theta)+\tau_{cd}L_c(\theta)+$$

$$L_{rtd}(\theta)-L_{rcd}(\theta)-\tau_{cd}\tau_c L_{rcb}(\theta)] \tag{6}$$

$$\Delta E_2(\theta)=E_{t2}(\theta)-E_c(\theta)=\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}[\tau_{tc}\tau_c\tau_{cd}L_t(\theta)+\tau_c\tau_{cd}L_{rtc}(\theta)-\tau_{cd}\tau_c L_{rcb}(\theta)] \tag{7}$$

$$\Delta E_3(\theta)=E_{t3}(\theta)-E_c(\theta)=\frac{\pi\tau_0\tau_{cd}}{4f_{\#}^2}[\tau_{c1}L_t(\theta)+L_{c1}(\theta)-L_c(\theta)-\tau_c L_{rcb}(\theta)] \tag{8}$$

对于第 4 种情况，目标和云不在同一视线上，目标的实际背景不是云而是大气背景，此时云对目标探测的影响主要体现在对系统信号处理造成的影响上，因此在这里不讨论这种情况下的辐射照度差。以上的等式中主要包含探测器参数，目标、云和大气的辐射亮度，大气和云的透过率等参数。这些参数的得到都比较困难，许多文献都对这些参数的计算进行了一定的研究。

2 模型参数的讨论

2.1 大气辐射和透过率的计算

大气辐射以及大气的透过率可以通过现有的比较公认的大气辐射计算软件进行计算，如 LOWTRAN、MODTRAN、FASCODE 等软件。但是由于前述的等式中涉及到不同距离、不同高度、不同方向等的大气辐射和大气透过率，通过这些软件进行计算的时候需要不断的输入各种参数来得到相应的结果，而这些软件的内部一般来说对用户是不可见的，因此这样会给问题的讨论带来很大的麻烦，工作量巨大。另一种方法是参考这些软件的计算模型，建立自己的大气辐射和透过率的计算方法，这样虽然可能在前期的建模上花费较大，精度上达不到前面提到的软件，但是会给后期的研究带来方便。大气辐射模型可以通过采用分层的方法来建立，作者在前期工作中已经对模型的建立以及相应的数值计算进行了较详细的论述[4]。

2.2 目标辐射亮度的计算

对于中远距离的目标探测而言，目标距离探测器较远，此时目标在探测器上表现为点目标，因此可以不用考虑目标的细节信息，而假设目标为具有一定发射率 ε_m 的灰体。目标在 8~14 μm 波段的辐射主要是蒙皮产生的，空气动力加热的蒙皮绝对温度的经验公式[5]为：

$$T_m=T_0[1+0.17\cdot M^2] \tag{9}$$

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。当蒙皮的温度确定后就可以根据普朗克辐射公式对目标的辐射亮度进行计算。

$$L_t=\frac{c_1\varepsilon_m}{\pi\lambda^5}\cdot\frac{1}{e^{c_2/(\lambda T_m)}-1} \tag{10}$$

式中：c_1、c_2 为常数，$c_1=3.74\times10^8$ (W·μm^4/m^2)，$c_2=1.44\times10^4$ (K·μm)，得到的光谱辐射亮度单位为 W/(m^2·sr·μm)。

2.3 云辐射和透过率的计算

对于云在远红外波段的辐射和透过率，现有的文献研究较少，主要通过灰体或黑体假设来计算，但是这样的假设过于简单，不能反映云真实的辐射传输特性，也无法研究前述的云层对目标探测的影响。同样作者在前期工作中对云的表观辐射亮度进行了比较详细的计算[6]，其理论基础为 Mie 散射理论，因为在 8~14 μm 波段云有较强的 Mie 散射。以积云为例，根据 Mie 散射理论可以得到积云的散射系数 σ_s、吸收系数 σ_α 和消光系数 σ_s，如图 2 所示。

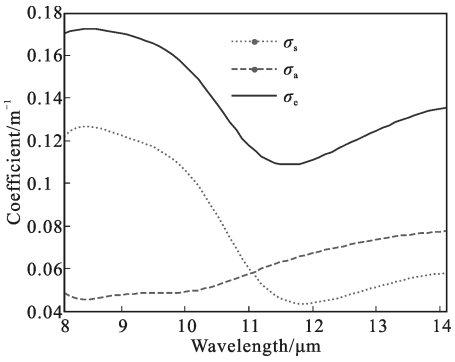

图 2 σ_s、σ_α、σ_e 与波长的关系曲线

Fig.2 Curves of relation between σ_s, σ_α, σ_e and wavelength

厚度为 l 的云的透过率可以表示为：

$$\tau_c(l)=\exp(-\sigma_e l) \tag{11}$$

云在 8~14 μm 波段的辐射主要由自身辐射和对自身辐射的散射组成，通过文献[6]的模型可以将云的辐射亮度表示为：

$$L_t(\theta)=[\varepsilon_d(\theta)+\varepsilon_s(\theta)]L_b(T_0)=\varepsilon_t(\theta)L_b(T_0) \tag{12}$$

式中：$\varepsilon_d(\theta)$、$\varepsilon_s(\theta)$分别对应于直射和散射分量。那么根据模型和前面的 Mie 散射系数计算结果可以计算得到 $\varepsilon_d(\theta)$、$\varepsilon_s(\theta)$和 $\varepsilon_t(\theta)$，其在 0°方向的光谱量如图 3

所示，这样就可以计算云的辐射特性。

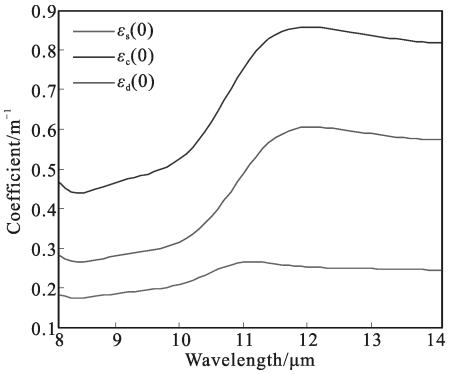

图 3 $\varepsilon_d(0)$、$\varepsilon_s(0)$、$\varepsilon_t(0)$与波长的关系曲线

Fig.3 Curves of relation between $\varepsilon_d(0)$, $\varepsilon_s(0)$, $\varepsilon_t(0)$ and wavelength

3 计算与分析

仍以积云为例来分析云层对目标探测的影响。从前面的计算可以看到在 8~14 μm 波段积云的消光系数均在 0.1 m^{-1} 以上，这说明该波段辐射在经过20 m 左右的云层后就会被衰减 90%以上，而实际中的云层厚度一般都在 100 m 以上，积云很容易对该波段的红外辐射达到几乎全部的遮挡，即对于积云 τ_c、τ_{cl} 为 0，因此可以认为在第 2、3 种情况下的目标是探测不到的，对于第 4 种情况，因为目标和云背景不在同一视线上，云不会对目标信号的探测造成太大的影响，主要是影响系统信号处理，而容易成为虚警源。因此这里主要对第 1 种情况进行讨论。

假设目标为飞行高度 h_t=500 m、飞行速度为 0.9M、发射率为 0.9 的朗伯体，积云高度为 h_c=1 000 m，云厚度足够厚使得其透过率为 τ_c=0，环境采用中纬度夏季大气模式，能见度良好。令：

$$S(\theta)=\tau_{td}L_t(\theta)-\tau_{cd}L_c(\theta)+L_{rtd}(\theta)-L_{rcd}(\theta)-\tau_{cd}\tau_c L_{rcb}(\theta) \tag{13}$$

则 $S(\theta)$表示探测器光学系统接收的目标和云的辐射亮度差，单位为 W/(m^2·Sr·μm)，可以将 $\Delta E_1(\theta)$ 表示为如下的形式：

$$\Delta E_1(\theta)=\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}\cdot S(\theta) \tag{14}$$

式中的$\frac{\pi\tau_0}{4f_{\#}^2}$由探测系统的光学系统决定，而 $S(\theta)$ 则由目标、云、大气决定。代入数据到计算模型，可以计算得到 $S(\theta)$的分布特征如图 4~图 6 所示。

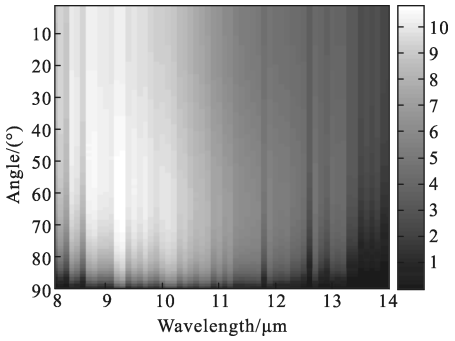

图 4 $S(\theta)$随波长和角度的变化

Fig.4 Change of $S(\theta)$ with wavelength and angle

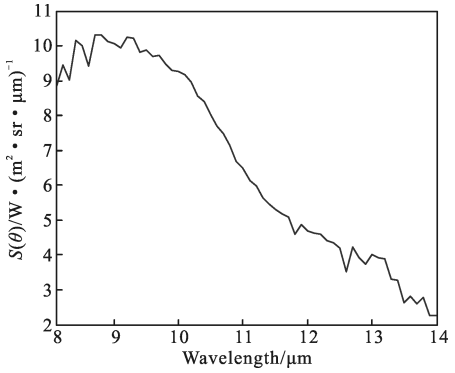

图 5 $S(\theta)$ 在 0°方向的光谱分布特征

Fig.5 Spectral characteristic of $S(\theta)$ in 0° direction

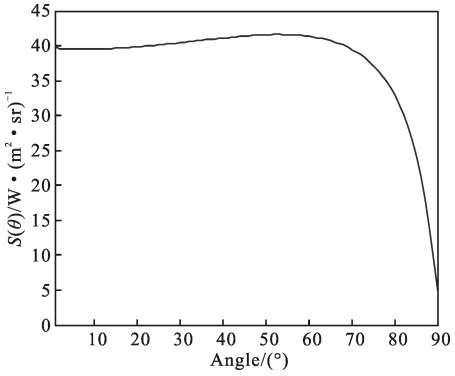

图 6 $S(\theta)$在 8~14 μm 的波段量随角度的变化

Fig.6 Change of $S(\theta)$ with angle in band 8−14 μm

图 4 直观地表示了 $S(\theta)$随波长和方向角的变化，从图中可以看到 $S(\theta)$的值在 9 μm 波长、50°方向角附近比较大，而在波长较长、方向角角度较大的部分值较小。具体的变化趋势可以从图 5、图 6 得到。

从图 5 中可以看到，S (θ) 在大约 8~11 μm 波段的值明显较大，而在剩下的波段上值明显较小。因为 $S(\theta)$是表征到达探测器镜头处的辐射，对于实际的

探测系统，其光学系统的透过率和探测器的响应率均为波长的函数，因此要获得高的信噪比，探测系统的透过率、响应率和波长的关系应与图 10 所示的 $S(\theta)$ 和波长的变化曲线一致，即系统在 8~11 μm 波段内要有高的光谱透过率和高的光谱响应率。当然这是从理论上来讲，实际上，在现阶段对于高的光谱透过率是容易做到的，但是对于探测器光谱响应率的选择比较困难[7]。

而从 $S(\theta)$ 在 8~14 μm 的波段量随方向角的变化曲线可见，其值随方向角的增大而先缓慢增大，到达一个极大值后迅速减小，极大值约在 53°左右。说明在 53°方向角上将获得最大的信噪比，且在小于该角度的方向角上，目标和云的信噪比都将保持在较高的值上，而大于该角度时，目标和云的信噪比将迅速下降。

4 结 论

云的存在将对空中目标的探测产生影响，文中从目标和云的位置关系出发，研究了 8~14 μm 波段云对目标探测的影响。主要对目标在云层前面的情况进行了计算和讨论，得到的结果为：目标自身辐射、大气衰减和大气路径辐射、云的辐射等共同决定了探测系统接收到的目标和背景辐射差，该辐射差是波长和方向角的复杂函数。总体而言，辐射差的值在 9 μm 波长、50°方向角附近比较大，而在波长较长、方向角角度较大的部分值较小。在细节上，以 0°方向角为例，辐射差的值在 8~11 μm 波段上较大，这为探测系统的设计提供了一定的指导，即探测器在此波段应具有高的光谱透过率和光谱响应率；将 8~14 μm 波段的辐射差的值积分可以得到该波段上的波段量，从结果可以看到，波段量随着方向角的增大而先缓慢增大，在 53°左右达到极大值后随角度的继续增大而迅速减小。

参考文献：

[1] Dong Weike, Zhang Jianqi, Yang Dingding, et al. Homogeneous background prediction algorithm for detection of point target [J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2011, 54: 70-74.

[2] Bae Tae-Wuk , Zhang Fei, Kweon In-So. Edge directional 2D LMS filter for infrared small target detection[J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2012(55): 137-145.

[3] Wang Yi, Fan Wei, Chen Xiuhong, et al. Effect of the cloud on the target-background contrast [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2005, 34(3): 281-286. (in Chinese)
王毅, 范伟, 陈秀红, 等. 云的光学特性对目标-背景对比度的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(3): 281-286.

[4] Fang Yiqiang, Fan Xiang, Cheng Zhengdong, et al. Modeling and calculating the infrared radiance of sky [J]. ***Laser & Infrared***, 2013, 42(8): 896-902. (in Chinese)
方义强, 樊祥, 程正东, 等. 天空大气背景红外辐射建模与计算[J]. 激光与红外, 2013, 42(8): 896-902.

[5] Fang Yiqiang, Fan Xiang, Zhu Bin, et al. Numerical calculation of apparent IR radiation of cloud [J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2014(67): 84-90.

[6] 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.

[7] Joseph J Talghader, Anand S Gawarikar, Ryan P Shea. Spectral selectivity in infrared thermal detection [J]. ***Light: Science & Applications***, 2012, 1: 1-11.