巡航导弹红外辐射及大气衰减计算模型

毛 峡 董旭阳 刁伟鹤

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对巡航导弹3个主要辐射源:蒙皮、尾喷管及羽流进行了深入分析,建立了巡航导弹红外辐射计算模型. 此外,在红外辐射的大气传输理论基础上,综合考虑高度、倾斜及气象条件等各种因素,分析了大气衰减对红外辐射的影响,建立了大气透过率的理论模型与计算方法. 最后,以某型号巡航导弹为例,利用此模型计算了3～5μm和8～12μm两个波段的红外辐射强度、大气光谱透过率和平均透过率,以及经过大气衰减后的红外辐射强度,并对计算结果进行了分析. 结果表明,这是一种计算巡航导弹红外辐射的简单方法.

关 键 词: 巡航导弹; 红外辐射; 大气衰减; 计算模型

中图分类号: TN 219

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)08-0952-04

Calculation model of infrared radiation of cruise missile and atmospheric attenuation

Mao Xia Dong Xuyang Diao Weihe

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Three primary radiant points of the cruise missile, i.e. fuselage, hot spot and plume were analyzed, and an infrared radiation calculation model of cruise missile was established. Secondly, synthetically considering various factors such as height, slope and weather conditions, the influence of atmospheric attenuation was analyzed based on the theory of atmospheric transmission of the infrared radiation, and an theoretic model and calculation method of the atmospheric transmittance were established. Finally, take a certain cruise missile for example, the infrared radiation in 3～5μm and 8～12μm were computed based on the computing model. The atmospheric spectral transmittance and average transmittance and the infrared radiation attenuated were also calculated. An analysis of the results was also given. The results indicate that this is a simple method to calculate the infrared radiation of the cruice missile.

Key words: cruise missile; infrared radiation; atmospheric attenuation; calculation model

巡航导弹是指其主弹道或主飞行航迹处于巡航状态,即用气动升力支撑其重力,靠发动机推动力克服前进阻力,以近乎恒速等高状态飞行的导弹[1]. 巡航导弹具有体积小、雷达散射及红外辐射特性不明显、巡航高度低、成像背景复杂以及利用地形隐蔽飞行等特点,使其成为实施远程纵深精确打击的重要力量. 因此,反巡航导弹问题也越来越受到各国重视,成为加强防空的重大课题. 防御巡航导弹的关键是远距离探测和跟踪. 由于巡航导弹通常采用雷达隐身技术,使得雷达探测具有一定的困难. 而红外探测采用被动探测工作方式,具有一些雷达所不具备的特殊优势:无源探测、对目标依赖性小、温度灵敏度高及高分辨率成像等,利用目标红外辐射特征进行探测、跟踪是一种拦截巡航导弹可行的方法. 目前,世界上许多国家的反导探测预警技术正从雷达探测向红外探测或多传感器融合探测方向发展. 因此,研究巡航导弹红外辐射特征,利用红外探测系统对目标进行探测跟踪,对于拦截巡航导弹具有重要的现实意义. 此外,红外辐射在大气中传输时会发生衰减,

收稿日期: 2007-07-12

作者简介: 毛 峡 (1952 -) 女,浙江义乌人,教授, moukyou@buaa.edu.cn.

红外系统探测到的红外辐射是经大气衰减后的辐射.所以,不考虑大气衰减影响的方法具有一定的局限性[1-3].本文综合考虑了各种因素,分析了巡航导弹红外辐射特征和大气红外传输特性,建立了巡航导弹红外辐射计算模型和大气透过率的计算方法,并给出了计算结果,具有一定的工程应用价值.

1　红外辐射计算模型

巡航导弹的红外辐射主要由 3部分组成[4]:蒙皮红外辐射、尾喷管红外辐射和羽流红外辐射.总辐射是上述 3部分在观察方向上的线性叠加.

1.1　蒙皮红外辐射

根据气动加热理论,蒙皮的温度可采用下式计算:

$$T_s = T_0 (1 + 0.164V^2) \tag{1}$$

其中, T_s 为目标蒙皮驻点温度; T_0 为周围大气的温度; V 为目标飞行的速度.

根据普朗克定律,黑体辐射的光谱分布可表示为

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \tag{2}$$

其中, $M(\lambda, T)$ 为黑体辐射的光谱辐射出射度; C_1 和 C_2 分别为第一、第二辐射常数.

由于黑体是朗伯辐射源[5],它是一种均匀漫射的物体,光谱辐射亮度与其观察方向无关.蒙皮一般被认为是具有一定发射率的灰体,因此有

$$L_s(\lambda, T) = \frac{\varepsilon M(\lambda, T)}{\pi} \tag{3}$$

式中, $L_s(\lambda, T)$ 为光谱辐射亮度; ε 为蒙皮的发射率.再由关系式:

$$I_s = L_s A_s \tag{4}$$

可以得到蒙皮的光谱辐射强度,其中 A_s 为蒙皮在观察方向上的投影面积.

巡航导弹的蒙皮通常假设成一个圆柱体[4],忽略侧翼等部分的影响,如图 1所示.

由图 1可得,不同视角时蒙皮的投影面积为

$$A_s = \begin{cases} \pi R^2 \cos\theta + 2RL\sin\theta & \theta \le 90° \\ 2RL\sin\theta + (\pi R^2 - \pi R_{hs}^2)\,|\cos\theta| & 90° < \theta \le 180° \end{cases} \tag{5}$$

其中, R 为弹体半径; L 为弹体长度; R_{hs} 为尾喷管半径; θ 为视角,迎头探测时为 0°.

1.2　尾喷管红外辐射

与蒙皮相同,尾喷管通常也被视为一个灰体辐射源,同样可以根据普朗克定理计算出其辐射强度 I_{hs}.巡航导弹的结构使得尾喷管辐射只能从后半球区域观察到.不同视角时,尾喷管的投影面积为

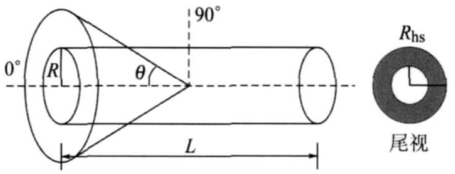


图 1　巡航导弹蒙皮模型

$$A_{hs} = \begin{cases} 0 & \theta \le 90° \\ \pi R_{hs}^2\,|\cos\theta| & 90° < \theta \le 180° \end{cases} \tag{6}$$

1.3　羽流红外辐射

羽流辐射主要由尾焰产生,其简化计算模型可按照图 2所示形状来考虑[3].

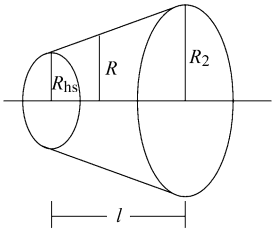


图 2　羽流简化计算模型

长度 l 约为 0.7m, R_{hs} 为尾喷管半径, R_2 为扩散后的尾焰半径,约为 R_{hs} 的 4倍, R 为弹体半径.不同视角时,羽流的投影面积为

$$A = \begin{cases} \pi(R_2^2 - R^2)\cos\theta + \dfrac{5}{2}R_{hs}\,l\sin\theta & \theta \le 90° \\ \dfrac{5}{2}R_{hs}\,l\sin\theta + \pi R_2^2\,|\cos\theta| - \dfrac{5}{2|\cos\theta|}R_{hs}\sin\theta\,|\cos\theta| & 90° < \theta \le \theta_0 \\ \pi R_2^2\,|\cos\theta| & \theta_0 < \theta \le 180° \end{cases} \tag{7}$$

式中 θ_0 的值为 $\dfrac{180}{\pi}\left(1 - \arctan\dfrac{3R_{hs}}{l}\right)°$.

羽流温度与尾喷管的温度有关,其计算公式为

$$T_{pl} = T_{hs}(P_{pl}/P_{hs})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \tag{8}$$

其中, T_{pl} 为羽流的温度; T_{hs} 为尾喷管的气体温度; P_{pl} 为羽流的气体压力; P_{hs} 为尾喷管内的气体压力; γ 为气体的定压热容量和定容热容量之比.

羽流是一种选择性辐射体,主要成分是 CO_2 和 H_2O.羽流红外主要集中在中红外波段,并且在 2.7μm和 4.3μm处产生两个峰值,这是因为 CO_2 和 H_2O 此处的发射率比较高.计算羽流辐射强度

I_{p1}时将羽流在这两个波长附近视为灰体.

以上分析了蒙皮、尾喷管和羽流3部分红外辐射,总辐射可由3部分辐射叠加得到. 波段λ_1～λ_2内的红外辐射可由以下积分得到:

$$I_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (I_s + I_{hs} + I_{p1})\,d\lambda \tag{9}$$

2 大气透过率

红外系统探测到的是经过大气衰减后的目标辐射强度. 因此,需要研究大气衰减对红外辐射的影响. 红外辐射的大气衰减主要与以下3种因素有关[6-7]: ①大气气体分子的吸收; ②大气中分子、气溶胶、微粒的散射; ③气象条件(雨、雪)的衰减. 设$\tau_1(\lambda)$, $\tau_2(\lambda)$和$\tau_3(\lambda)$分别为吸收、散射和因气象衰减制约的大气光谱透过率,则大气总光谱透过率为

$$\tau(\lambda) = \tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda) \tag{10}$$

2.1 大气的吸收

低层大气中的主要吸收气体是水蒸气和CO_2气体. 其中CO_2的含量相对稳定,由CO_2造成的辐射衰减可认为与气象条件无关,采用等效传输距离来表示;水蒸气的含量随海拔高度和气象条件的变化比较明显,在低层大气中含量较高,利用可降水分来表示. 综合吸收透过率可表示为

$$\tau_1(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda)\tau_{CO_2}(\lambda) \tag{11}$$

水蒸气的吸收采用可降水分ω表示:

$$\omega = \omega_0 D H_r \tag{12}$$

式中,ω_0表示在一定温度下,空气相对湿度为100%时每千米(海平面水平路程)大气中可降水分,已知温度时,可通过查表得到[8]; D为水平传输距离; H_r为相对湿度. 根据文献[8]提供的光谱透过率表可以得到海平面不同水蒸气含量对应的大气平均透过率,还可以利用插值法或外推法求出表中未列出的数据.

考虑高度修正,分为水平传输和倾斜传输两种情况[7]. 对于水蒸气,水平传输时

$$\omega_e = \omega_0 D H_r e^{-\alpha H} \tag{13}$$

倾斜传输时

$$\omega_e = \omega_0 H_r \frac{e^{-\alpha H_2} - e^{-\alpha H_1}}{\alpha \cos\gamma} \tag{14}$$

其中,ω_e为修正后的可降水分; α为常数; H为水平传输高度; H_1为探测系统高度; H_2为目标高度; γ为天顶角.

对于CO_2气体,水平传输时

$$D_e = D e^{-\beta H} \tag{15}$$

倾斜传输时

$$D_e = \frac{e^{-\beta H_2} - e^{-\beta H_1}}{\beta \cos\gamma} \tag{16}$$

其中,D_e为修正后的等效距离; β为常数.

2.2 大气的散射

分子和微粒的散射可用米氏理论来解释. 若分子或微粒的尺寸小于波长,则是遵守瑞利选择散射;对于尺寸比波长大的微粒可看作非选择散射. 大气的散射衰减采用气象能见度来描述[6]:

$$\tau_2(\lambda) = \exp\left(\frac{-3.91}{D_v}\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q D\right) \tag{17}$$

式中,D_v为气象能见度; λ_0为探测气象能见度时所用波长,取0.61μm; q取1.3(中等能见度).

2.3 气象条件的衰减

有关云和雾的衰减已经包含在大气散射部分,因此主要考虑雨和雪的影响. 因雨、雪的尺寸通常比红外辐射波长大很多,所以根据米氏理论,这样的粒子产生非选择散射:

$$\tau_3(\lambda) = \exp[-D(0.66J_1^{0.66} + J_2^{0.7})] \tag{18}$$

式中, J_1, J_2分别为降雨强度和降雪强度.

最后,根据式(9)、式(10)即可得到大气衰减后的巡航导弹红外辐射强度:

$$I_a = \tau(\lambda)(I_s + I_{hs} + I_{p1}) \tag{19}$$

3 计算结果

利用以上模型,以某型巡航导弹为例,根据式(2)～式(7)、式(9)计算了各组成部分及总的红外辐射,如图3和图4所示.

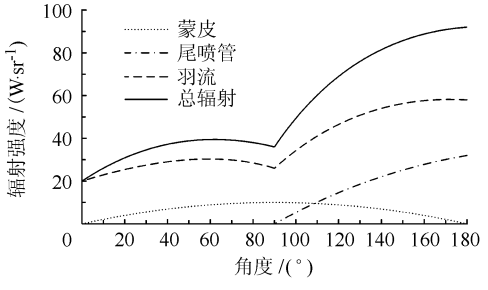


图3 巡航导弹3～5μm波段红外辐射

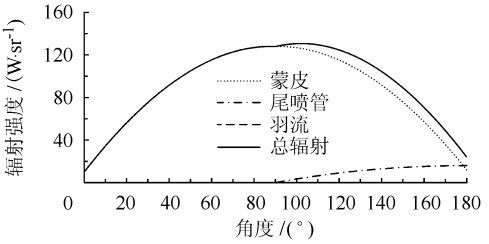


图4 巡航导弹8～12μm波段红外辐射

由图3、图4可以看出,对于3～5μm波段,红外辐射主要由羽流产生,尾喷管辐射只能从后方观察到;对于8～12μm波段,羽流基本不产生

辐射,蒙皮辐射成为主要因素.因此,在前向和侧面探测时,可以利用双波段;后向探测可主要利用3～5μm波段的尾喷管和羽流辐射.此外,本文模型的计算结果与文献[1,3-4]结论相符;且可计算全视角范围的红外辐射强度,具有一定的普遍性.

以下根据对大气红外衰减的分析,根据式(10)、式(11)、式(17)、式(18)分别对大气的光谱透过率和平均透过率进行计算,并给出经过大气衰减后的红外辐射强度.

首先考虑大气吸收和散射的影响,分水平传输和倾斜传输两种情况进行计算.

1) 水平传输.温度为 25 ℃,相对湿度为60%,水平传输高度为海平面,传输距离为 5 km,气象能见度为10 km.

2) 倾斜传输.温度为 20 ℃,相对湿度为50%,探测系统高度为 5 km,气象能见度为10 km,天顶角为 π/3.

图 5给出了上述两种情况下 3～5μm波段的光谱透过率.通过计算得到 3～5μm波段平均透过率分别为 30.14%和 36.67%.图 6给出了上述两种情况下 8～12μm的光谱透过率.同样得到8～12 μm 波段平均透过率分别为 32.10%和56.76%.

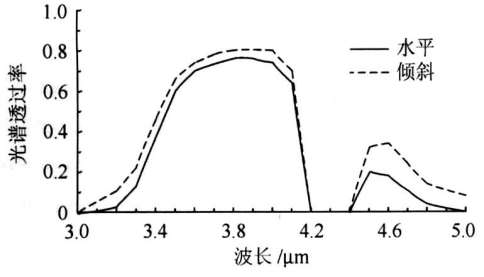


图 5　3～5μm 波段大气光谱透过率

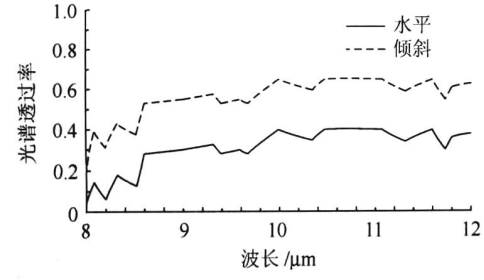


图 6　8～12μm 波段大气光谱透过率

再考虑降雨、降雪对大气衰减的影响:传输距离为 5 km,降雨强度为 5mm/h(无降雪)以及降雪强度为 1.0mm/h(无降雨).两种情况下的大气光谱透过率分别为 7.1467 ×10^{-5}和 7.6812 ×10^{-15}.由此可知,雨、雪对红外辐射的衰减很严重.这与参考文献[8]中大气传输的理论一致.

根据以上分析大气吸收和散射衰减的两种情况(不考虑降雨及降雪),由公式(19)分别计算了经大气衰减后的巡航导弹红外辐射强度,并与衰减前红外辐射强度进行了比较,见图 7和图 8.

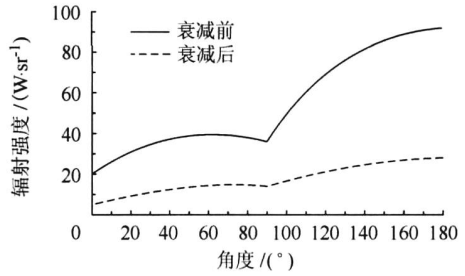


图 7　巡航导弹 3～5μm波段衰减前后的红外辐射

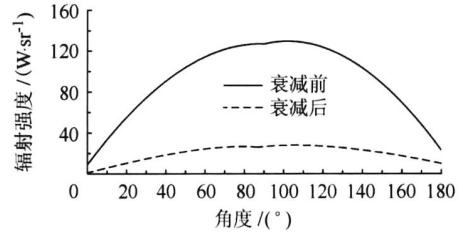


图 8　巡航导弹 8～12μm波段衰减前后的红外辐射

4　结束语

本文详细分析了巡航导弹的红外辐射特征,建立了巡航导弹红外辐射计算模型,提供了一种计算巡航导弹红外辐射的简单方法.此外,分析了大气红外辐射衰减的主要因素,利用本文的理论模型和计算方法,仅需查阅相关的基本数据表,就可以计算出多种情况下的大气透过率.还可以利用本文模型和计算方法设计巡航导弹红外辐射特征计算软件,以便于工程应用.

参考文献 (References)

[1] 费锦东,王牛福,马毅飞.红外成像技术用于反巡航导弹的途径探讨[J].航天电子对抗,1999(4):1-5
Fei Jingdong, Wang Niufu, Ma Yifei. Discussion on ways to resist cruise missile used infrared imaging technology [J]. Aerospace Electronic Warfare, 1999(4):1-5 (in Chinese)

[2] 方有培.巡航导弹红外特征及对其探测技术研究[J].飞航导弹,2000(3):42-48
Fang Youpei. Research on infrared radiation of cruise missile and detecting technology[J]. Winged Missiles Journal, 2000(3):42-48 (in Chinese)

[3] 白渭雄,吴法文.巡航导弹的红外辐射特征研究[J].空军工程大学学报(自然科学版),2003,4(6):26-29
Bai Weixiong, Wu Fawen. The study of the infrared radiation characteristics of the cruise missile[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2003, 4(6):26-29 (in Chinese)

(下转第 980页)

4.5 浮动车系统性能评估

本文统计了北京市某浮动车实时交通路况信息处理系统(该系统拥有 8 000辆浮动车)在应用浮动车行驶模式判断模型后,系统准确性的变化趋势. 2007年 1～6月份的统计数据表明,在进行浮动车行驶模式分析及干扰数据剔除后,系统的准确率有 5% ～7%的提升,对比效果见图 3.

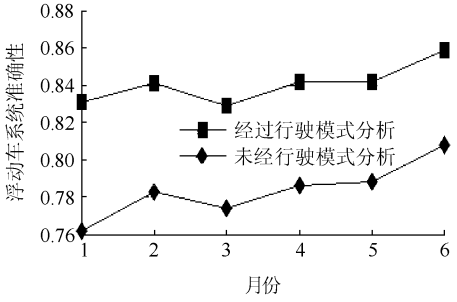


图 3 系统准确性提升结果

5 结束语

本文分析了浮动车行驶模式对于交通信息处理准确性及处理效率的影响,设计并实现了一个基于 SVM分类器的浮动车行驶模式判断模型,同时提出了一种基于模糊策略的特征评价和选择方法,取得了良好的实验效果. 浮动车系统运行情况表明:采用本文提出的模型对浮动车行驶模式进行分析并剔除干扰数据后,整个系统的准确性及处理效率有了显著提升.

参考文献 (References)

[1] Wu D D, Zhu T Y, Lü W F, et al. A heuristic map-matching algorithm by using vector-based recognition [C]// Proc of the International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology (ICCGI'07). Piscataway: IEEE, 2007: 18 - 24

[2] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995: 138 - 141

[3] Langley P. Selection of relevant features in machine learning [C]// Proc AAAI Fall Symposium on Relevance. New Orleans: AAAI Press, 1994: 140 - 144

[4] Lee H M, Chen C M, Chen J M, et al. An efficient fuzzy classifier with feature selection based on fuzzy entropy [J]. IEEE Trans on Systems Man Cybernet, Part B, 2001, 31(3): 426 - 432

[5] Uncu O, Turksen I B. Two step feature selection: approximate functional dependency approach using membership values[C]// Proceedings 2004 IEEE International Conference on Fuzzy System. Piscataway: IEEE, 2004: 1643 - 1648

[6] Connon R L, Dave J V, Bezdek J C. Efficient implementation of the fuzzy c-means clustering algorithms[J]. IEEE Trans on Patten Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(2): 248 - 255

[7] Han J W, Kamber M. Data mining concepts and techniques [M]. Los Altos: Morgan Kaufmann, 2001: 132 - 136

(责任编辑:吴 琼)

(上接第 955页)

[4] Michael R W. Infrared signature generation of airborne targets [C]//Proceedings of SPIE, Characterization, Propagation and Backgrounds III. Orlando, USA: SPIE, 1967: 114 - 122

[5] 张建奇,方小平. 红外物理 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004: 53 - 54
Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 53 - 54 (in Chinese)

[6] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究 [J]. 光学 精密工程, 1998, 6(4): 35 - 43
Wu Hanping. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere[J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(4): 35 - 43 (in Chinese)

[7] 王迪,李承芳,熊飞. 大气红外辐射传输的简便算法与MODTRAN的比较 [J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 293 - 298
Wang Di, Li Chengfang, Xiong Fei. The method of calculate the transmittance of infrared radiation through atmosphere and compared with MODTRAN [J]. Optical Technology, 2006, 32(Supplement): 293 - 298 (in Chinese)

[8] Richard D Hudson. Infrared system engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1969

(责任编辑:娄 嘉)