**文章编号:** 1672-8785(2013)03-0026-06

# 基于 MODTRAN 的红外系统对巡航 导弹探测距离的估算

## 马 鹤 吴 平 孙文芳

(南京航空航天大学理学院, 江苏南京 211100)

**摘 要:**基于最小可分辨对比度准则,研究了在考虑背景环境下机载红外成像系统对 目标最大探测距离的计算方法。分析了红外目标在 3~5µm 与 8~12µm 两个波段上的红 外辐射特征和背景辐射、大气透过率等因素对探测距离的影响,给出了探测距离的推 导公式。最后用 MODTRAN 软件对大气透过率进行了模拟计算,得到了波数间隔为 1 cm<sup>-1</sup> 的光谱大气透过率数据。计算了各微小波长区间内辐射到探测器上的辐照度。考 虑到大气透过率与距离的关系,取消了传统算法中用常数或者拟合函数来代替大气透 过率的方法。以巡航导弹为例,对红外系统探测距离进行了数值计算。仿真结果表明, 该计算方法具有可行性。

关键词:最小可分辨对比度; MODTRAN; 大气透过率; 作用距离

中图分类号: TN216 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.03.06

## Estimation of Operating Range of Infrared System to Cruise Missile Based on MODTRAN

#### MA He, WU Ping, SUN Wen-fang

(College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: According to the minimum resolvable contrast criterion, the method for calculating the maximum detection range of an airborne infrared imaging system to a target in a background environment is studied. The infrared radiation characteristics of the infrared target in two wavebands of 3 to 5  $\mu$ m and 8 to 14  $\mu$ m and the influence of background radiation and atmospheric transmittance etc on the detection range are analyzed. The derivative formula of the detection range is given. Finally, the atmospheric transmittance is simulated with the MODTRAN. The atmospheric spectral transmission data with a wave number interval of 1 cm<sup>-1</sup> is obtained. The irradiance on the detector in each mini wavelength region is calculated. By taking the relationship between the atmospheric transmittance and the distance, the replacement of atmospheric transmittance by constant or fitting function in the traditional algorithm is canceled. Taking the cruise missile as an example, the detection range of an infrared system is calculated numerically. The simulation result shows that this calculation method is feasible.

Key words: minimum resolvable contrast; MODTRAN; atmosphere transmittance; operating range

E-mail:engqiaoyebo\_ziyou@163.com

收稿日期: 2013-01-12

**基金项目:**江苏省电磁波先进调控技术重点实验室开放基金(2011ESE002)

作者简介:马鹤(1987-),女,河北石家庄人,硕士,主要从事大气辐射传输模型研究。

近年来,由于探测器性能的不断提高,大多数红外探测系统已经是对比度限制的系统<sup>[1,2]</sup>。 探测距离作为红外成像系统的关键战术指标之一,是其本身性能、目标特性、大气环境等多项 因素的函数<sup>[3,4]</sup>。由于红外辐射在传输过程中受 大气环境的影响很大,且难以用准确的数学式 表达,已成为红外系统作用距离评估的难点。 目前处理大气透过率基本采用常数或某一条件 下的拟合函数代替的方法<sup>[5-8]</sup>,计算结果有较 大的误差。本文建立了基于对比度的空基红外成 像系统对巡航导弹作用距离的模型。重点对大 气透过率部分进行改进,用 MODTRAN 软件计 算出光谱大气透过率数据,同时采用逐次逼近法 对作用距离方程求解,计算出作用距离。

## 1 基于对比度的作用距离计算 [9]

温度为 T 的物体, 在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段的辐射亮 度为

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda^2} \frac{\varepsilon}{\pi} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{exp(c_2/\lambda T) - 1} d\lambda \tag{1}$$

式中 c<sub>1</sub>、 c<sub>2</sub>为第一、第二辐射常数, *ε*为物体的发射率。物体的红外辐射在大气中传输了距离 R 时到达红外探测器上的辐照度为

$$E = \frac{A_0}{R^2} \tau_0 A_\perp \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, R) L(\lambda) d\lambda$$
 (2)

式中 $A_0$ 为光学系统的入瞳孔径, $\tau_0$ 为光学系统的透过率, $A_\perp$ 为物体在探测方向的有效投影面积。

假设目标的辐射亮度为  $L_t$ ,目标与探测器 之间的大气产生的路径辐射亮度为 L(R),无限 远处的大气背景辐射亮度为  $L_b(\infty)$ 。在光学系 统焦平面上,目标所在瞬时视场内总的辐照度  $E_t$ 由以下三部分组成<sup>[10]</sup>:

(1)来自目标并经大气衰减后的红外辐射, 辐射照度为

$$E_1 = \frac{A_0}{R^2} \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, R) L_t(\lambda) A_{t\perp} d\lambda \qquad (3)$$

(2) 来自目标所张立体角内路径辐射形成的 辐照度为

$$E_2 = \frac{A_0}{R^2} \tau_0 A_{t\perp} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(R) d\lambda \tag{4}$$

在红外辐射长距离传输过程中,假设传输 路径亮度变化十分缓慢,则有<sup>[11]</sup>

$$L_b(R) = L_b(\infty)(1 - \tau_a(\lambda, R))$$
(5)

则 (4) 式变为

$$E_2 = \frac{A_0}{R^2} \tau_0 A_{t\perp} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\infty) (1 - \tau(\lambda, R)) d\lambda \qquad (6)$$

(3) 目标所张立体角外的大气背景形成的辐 照度为

$$E_3 = \frac{A_0}{R^2} \tau_0 (A_s - A_{t\perp}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\infty) d\lambda \qquad (7)$$

式中  $A_s = R^2 \omega^2$  为瞬时视场所对应的视场 面积,  $\omega$  为瞬时视场大小。则

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 \tag{8}$$

与此同时,探测器相邻瞬时视场内接收到 的大气背景产生的辐照度为

$$E_b = \frac{A_0}{R^2} \tau_0 A_s \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\infty) d\lambda \tag{9}$$

当使用机载红外探测系统对巡航导弹进行 探测时,对应的飞行背景为地面背景,可以将其 粗略地考虑为一个温度为 300 K 的黑体辐射。

由式(3)~(9)可得表观对比度

$$C_R = \frac{E_t - E_b}{E_b}$$
$$= \frac{A_{t\perp}}{R^2 \omega^2} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, R) [L_t(\lambda) - L_b(\infty)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b(\infty) d\lambda}$$
(10)

式中 C<sub>R</sub>的大小反应了探测器灵敏度的高低, 一般取值为 0.02~0.1。

http://journal.sitp.ac.cn/hw

## **2** 大气透过率 τ(λ, R)

由于大气分子的选择性吸收、大气分子和 气溶胶的散射、气象条件和海拔等因素,大气透 过率  $\tau(\lambda, R)$  是一个与波长和距离有关的复杂参 量,用函数难以准确地表示出来,所以对式 (10) 进行积分运算存在很大困难。常用的方法是将  $\tau(\lambda, R)$ 用常量或拟合函数代入计算,但这样的 计算与实际情况有较大误差。



图 1(a) 不同天顶角时 3~5µm 大气透过率曲线



图 1(b) 不同天顶角时 8~12µm 大气透过率曲线

图 1 是利用大气传输计算软件 MODTRAN 对同一海拔高度相同大气条件下不同天顶角在 相同距离时的大气透过率随波长变化的曲线。 由图可知,大气透过率随大气条件、海拔高度、 天顶角及作用距离等因素的变化而变化,基本 无规律可言。

为了使计算结果更加精确,本文先计算了 3~5μm 与 8~12μm 波段范围小波长区间内(波数 间隔取为 1cm<sup>-1</sup>)辐射到探测器上的辐照度,用 对小波长区间求和的方法代替式 (10) 中的积分 运算。利用 MODTRAN 软件计算出在一定的大 气条件下和固定海拔高度时,不同距离不同天顶 角时某波长范围  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  内的一系列波长  $\lambda_i$  对 应的光谱大气透过率数据  $\tau_{\lambda_i}$ ,由光谱透过率数 据计算光谱间隔  $\Delta \lambda_i$  内到达系统入瞳上的辐照 度。由式 (2) 可知,目标在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波长范围内到 达系统入瞳上的总辐照度为

$$E = \frac{A_0}{R^2} \tau_0 \sum_{i=1}^n \tau_{\lambda_i}(\lambda_i, R) L_t(\lambda_i) A_{t\perp} \triangle \lambda_i$$
(11)

式中 n 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波长范围内被分割的份数。 n 越大,  $\Delta \lambda_i$  越小, 计算就越精确。

## 3 巡航导弹作用距离的计算与结果

## 3.1 巡航导弹的红外辐射特征

巡航导弹的红外辐射主要由蒙皮红外辐射、尾喷管红外辐射和羽流红外辐射三部分组成。由式(1)可得巡航导弹各部分的光谱辐射亮度。

蒙皮通常被视为发射率为 ε<sub>1</sub>=0.8 的圆柱 体。根据气动加热理论,蒙皮的温度为<sup>[12]</sup>

$$T_1 = T_b (1 + 0.164M^2) \tag{12}$$

式中 T<sub>b</sub> 为周围大气的温度; M 为导弹飞行的马赫数。

尾喷口通常被视为发射率为 ε<sub>2</sub>=0.8 的辐射 源。巡航导弹的自身结构使得其尾喷口只能从 后半球区域才能观察到。

羽流可以简化为发射率为 ε<sub>3</sub>=0.5 的椎体模 型<sup>[12]</sup>。它是一种选择性辐射体,其红外辐射主 要集中在 2.4~3.1μm 和 4.3~4.55μm 两个波段内 <sup>[13-14]</sup>。羽流温度与尾喷口的温度有关,计算公 式为

$$T_3 = T_2 (P_3/P_2)^{\frac{v-1}{v}} \tag{13}$$

式中 $T_2$ 为尾喷口处的气体温度,  $P_2$ 为尾喷口 内气体压力;  $P_3$ 为羽流的气体压力; v为气体 的比热比, 取v = 1.3。对于涡轮风扇发动机, 取  $P_3/P_2 = 0.4$ ,则 $T_3 = 0.82T_2$ 。

3.2 作用距离的求解

探测巡航导弹的示意图如图 2 所示。当巡航 导弹和机载红外成像系统以一定高度巡航时, R=Hsinθ, θ为导弹蒙皮轴线与观察方向的夹



图 3 作用距离求解流程图

角。由式 (10) 可以看出, 当目标和背景辐射强度 一定及探测器对比度已知时, 作用距离是大气 透过率 τ<sub>a</sub> 的函数, 而大气透过率 τ<sub>a</sub> 又是 R、 λ 的函数。本文采用逐步逼近法对作用距离 R进 行计算。设定初始距离为 R<sub>0</sub>, 利用式 (3) 计算作 用距离 R<sub>i</sub>。当初始距离与计算距离值在误差范 围之外时改变初始距离再次计算,直至设定距 离与计算距离在误差范围内时结束计算,此时  $R_i$ 即为红外系统的作用距离。其求解流程图见 图 3,其中 e 为求解精度,d 为步长。本文结合 巡航导弹与探测器相对位置的实际情况,采用 改变 $\theta$ 的方法计算  $R(\theta)$ 。当计算距离值  $R(\theta)$ 与 设定距离  $R(\theta_0)$ 之差在误差范围之内时, $\theta$ 所对 应的 R 即为红外系统的作用距离。

#### 3.3 结果与讨论

大气条件设为中纬度夏天(北纬 45 度, 7 月)大气模式,倾斜路径,气溶胶光谱性质为乡 村气溶胶模式,无云雨天气。在 2 种不同的气象 视距下(VIS=5 km, VIS=23 km),对探测高度 为 5 km 至 9 km 的不同天顶角下的倾斜路径的 透过率进行计算,得到光谱透过率数据,并将其 保存到数据库中以备最后在计算作用距离时进 行调用。

以战斧 4 巡航导弹为例,其参数选择见表 1。假设巡航导弹飞行马赫数为 0.7,尾喷口平 均温度为 760 K。蒙皮和尾焰的温度由式 (12)、 (13)可得到。取导弹飞行高度为 150,环境温度 为 300 K。对于 3~5µm 和 8~12µm 波段,计算得 到的导弹主要红外辐射源的红外辐射参数见表 2。

假设红外系统的瞬时视场为 0.5 mrad, *C<sub>R</sub>* 取 0.05,环境温度为 300 K。采用本文所建立的 作用距离模型对相应条件下的光谱大气透过率 数据进行调用,利用逐步逼近法,最后计算出了 红外探测系统对巡航导弹的作用距离,结果见表 3、表 4。

表1 战斧4巡航导弹的参数

	参数
巡航高度	150 m
巡航飞行马赫数	0.7
弹长 /m	5.56(无助推): 6.42(有助推)
弾径 /m	0.527
尾喷口面积 /m <sup>2</sup>	0.02056

波段 /μm	辐射亮度	蒙皮	尾喷口	尾焰
$3 \sim 5$	$W/Sr \cdot m^2$	3.367014	1574.209	318.1675
8~12	$W/Sr{\cdot}m^2$	44.32611	713.5899	264.1858

表 2 不同波段时战斧导弹的红外辐射亮度

表3 3~5µm 波段不同海拔高度的作用距离计算结果

探测宣审	探测距离 /km					
环侧同皮		视距 5 km			视距 23km	
	蒙皮	尾喷口	尾焰	蒙皮	尾喷口	尾焰
$5.0 \mathrm{km}$	7.006	12.134	15.880	7.230	12.849	16.996
$5.5 \mathrm{~km}$	7.294	12.659	16.570	7.513	13.313	17.673
$6.0 \mathrm{km}$	7.555	13.160	17.225	7.766	13.812	18.316
$6.5 \mathrm{~km}$	7.817	13.596	17.849	8.026	14.228	18.927
$7.0 \mathrm{km}$	8.059	14.052	18.446	8.261	14.681	19.511
$7.5 \mathrm{~km}$	8.285	14.449	19.018	8.492	15.118	20.071
$8.0 \mathrm{km}$	8.409	14.869	19.569	8.708	15.479	20.610
$8.5 \mathrm{~km}$	8.768	15.237	20.099	8.941	15.882	21.216

#### 表4 8~12µm 波段不同海拔高度的作用距离计算结果

探测宣审	探测距离 /km					
沭侧回反	视距 5 km			视距 23km		
	蒙皮	尾喷口	尾焰	蒙皮	尾喷口	尾焰
$5.0 \mathrm{~km}$	5.001	4.556	7.018	5.119	4.630	7.231
$5.5 \mathrm{~km}$	5.300	4.890	7.316	5.392	4.966	7.527
$6.0 \mathrm{km}$	5.563	5.154	7.600	5.655	5.230	7.788
$6.5 \mathrm{~km}$	5.827	5.418	7.854	5.918	5.494	8.054
$7.0 \mathrm{km}$	6.091	5.684	8.101	6.182	5.754	8.295
$7.5 \mathrm{~km}$	6.355	5.948	8.339	6.446	6.023	8.542
$8.0 \mathrm{km}$	6.620	6.213	8.572	6.719	6.298	8.757
$8.5 \mathrm{~km}$	6.884	6.478	8.809	6.975	6.553	8.981

由表2、表3、表4可以得出以下结论:

(1) 气象视距越大,大气透过率也越大,红 外探测系统的作用距离就越远。

(2)处于不同海拔高度的红外探测系统在相同大气条件下对同一目标的探测距离不同。红外探测器所处的海拔越高,红外探测系统的作用距离就越远。

(3)目标不同部分的辐射特性不同。低温的 蒙皮的红外辐射主要集中在 8~12µm 波段。高温 的尾喷口和尾焰的红外辐射主要集中在 3~5μm 波段。在 3~5μm 波段内,各不同部位的作用距离 从大到小依次为尾焰、尾喷口和蒙皮。在 8~12μm 波段内,各不同部位的作用距离从大到小依次是 尾焰、蒙皮、尾喷口。

### 参考文献

 Sadot D,Kopeika N S.Imaging through the Atmosphere: Practical Instrumentation-based Theory and Verification of Aerosol Modulation Transfer Function[J]. J. Opt. Soc. A, 1993, 10(1):172–179.

- [2] Kopeika N S. a System Engineering Approach to Imaging [M]. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 1998, PM38: 331–356.
- [3] A. D. Portnoy, N. P. Pitsianis, X. Sun , , and D. J. Brady, Multichannel Sampling Schemes for Optical Imaging Systems[J]. Appl. Opt. 2008,47(10): B76–B85.
- [4] BEIER 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(1): 63–71.
- [5] K. Buskila, S. Towito, E. Shmuel, R. Levi, N. Kopeika, K. Krapels, R. G. Driggers, R. H. Vollmerhausen, and C. E. Halford, Atmospheric Modulation Transfer Function in the Infrared, [J]. Appl. Opt. 2004, 43(2): 471–482.
- [6] 王娟,杨春平,吴健. 热成像系统性能参数 MRTD 的编程计算 [J].光学与光电技术,2003, 1(5):56-58.
- [7] 陈秀红,魏合理,徐青山.红外大气透过率的计算 模式 [J].**红外与激光工程**,2011,**40**(5):812-816.

(上接第25页)

热激励的一维传导模型理论,结合对数温度的 二阶微分峰值时刻与深度平方成正比的关系,对 试件的厚度进行了软件编程自动计算。由理论分 析可知, PSDT 法不需选择参考区域,可降低因 参考区选择失误带来的误差。通过 VC 软件编程 实现了文件数据的提取和计算。数据处理时,结 合不锈钢热传导快的特点,对采集的数据先进 行归一化,再采用最小二乘法拟合降温曲线。以 对数温度的二阶微分峰值作为特征时间,求得 6 个缺陷点的缺陷深度。实验结果表明,用 PSDT 法和 VC 软件实现试件深度自动测量,计算结果 比较准确,获得的深度分布图直观,可应用于工 业化的自动测量。

#### 参考文献

 Zhi Zeng.Depth Prediction of Non-air Interface Defect Using Pulsed Thermography[J]. NDT and E International, 2012,48:39–45.

- [8] 高思峰,吴平,何曼丽,王晓,张明.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.
- [9] 王莹莹,张永顺,何苹.基于对比度的红外探测系统对巡航导弹作用距离分析 [J].光电与控制,2011,18(5):19-22.
- [10] 王刚,禹秉熙.基于对比度的空中红外点目标探测距 离估算方法 [J.光学精密工程,2002,10(3):276-280.
- [11] Accetta J S, Shumaker D L. Infrared and Electro-Optical System Handbook [M]. Second Edition. Bellingham, Washington, USA:Infrared Information Analysis Center, 1993, 7:470-475.
- [12] 王江安,马治国.海空复杂背景下弱点目标红外辐射特征研究 [J].激光与红外,2003,33(1):48-50.
- [13] 毛峡, 董旭阳, 刁伟鹤. 巡航导弹红外辐射及 大气衰减计算模型 [J].北京航空航天大学学 报,2008,34(8):952–955.
- [14] 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,2003, 4(6):26-28.
- [2] C.I.Castanedo,X.Maldague.Defect Depth Retrieval form Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with Phase[D].University of Laval, 2005.
- [3] 曾 智,陶 宁,冯立春,张存林.采用缺陷宽深 比系数定量研究缺陷尺寸对缺陷深度测量的影响 [J].**中国激光**,2011,38:S108005.
- [4] Sun J. G.. Analysis of Pulsed Thermography Methods for Defect Depth Prediction [J]. J. Heat Transfer, 2006, 128(4):332–338.
- [5] Zhi Zeng et al.Specified Value Based Defect Depth Prediction Using Pulsed Thermography[J].Journal of Applied Physics, 2012,112(2):023112.
- [6] Sun J.G. Method of Determining Defect Depth Using Thermal Imaging [P].US, 2003,6542849.
- [7] 霍燕, 张存林. 碳纤维复合材料内部缺陷深度的定量红外检测 [J].**物理学报**,2012,61(14):144204.
- [8] 张小川. 红外热播无损检测技术中缺陷尺寸的测定 [D]. 首都师范大学, 2006.
- [9] 先明乐,徐振高,杨小林.红外热波检测复合 材料时缺陷深度的自动测量 [J].NDT 无损检 测,2009,31(6):460-463.