

文章编号: 1672-8785(2012)10-0011-06

# 大气流场传输效应对探测系统性能的影响

方凌菊 刘鹏起 唐文娟 颜世荣

(哈尔滨工业大学远光光电仪器有限公司, 黑龙江哈尔滨 150078)

**摘要:** 分析了目标与背景的红外辐射特性, 建立了目标与背景辐射温差传递数学模型, 研究了大气对红外辐射传输的影响, 分别考察了水蒸气、二氧化碳的吸收和大气散射对红外辐射传输的影响; 计算了探测系统的主要性能评价参数: 调制传递函数、最小可分辨温差和视距, 并通过仿真得到了探测系统对目标所成的失真目标图像。研究结果表明, 大气流场传输效应会使得探测系统对目标的成像发生像模糊, 导致目标与背景之间的对比度下降。

**关键词:** 大气传输; 调制传递函数; 视距估算

**中图分类号:** TN216      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.10.003

## Influence of Atmospheric Transmission Effect on Characteristics of Detection System

FANG Ling-ju, LIU Peng-qi, TANG Wen-juan, YAN Shi-rong

(Yuanguang Photoelectric Apparatus Co. Ltd., Harbin Institute of Technology, Harbin 150078, China)

**Abstract:** The infrared radiation features of targets and background are analyzed. A mathematic model of radiant temperature difference transmission of a target and its background is established. The influence of atmosphere on infrared radiation transmission is studied. The influences of water vapor absorption, carbon dioxide absorption and atmospheric scattering on infrared radiation transmission are investigated respectively. The main performance evaluation parameters of a detection system, such as modulation transfer function, minimum resolvable temperature difference and visual range, are calculated. Through simulation, a distorted target image formed by the detection system is obtained. The research result shows that the atmospheric transmission effect can make the target image formed by the detection system to be blurred and cause the contrast between the target and the background to be decreased.

**Key words:** atmospheric transmission; MTF; visual range evaluation

## 0 引言

地球表面环绕着厚厚的大气层, 各种红外成像探测系统对大气层内或大气层外目标进行探测, 主要以大气作为辐射传输介质。在红外辐

射通过大气传输的过程中, 大气的吸收衰减和散射衰减对探测性能的影响最明显, 它们会导致目标信息衰减, 使目标图像边缘变得模糊<sup>[1]</sup>。因此评价探测系统性能时, 必须考虑大气流场对它的影响。

收稿日期: 2012-07-25

作者简介: 方凌菊(1966-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 主要研究方向为红外光学系统设计和测试。

E-mail: fanglingju@163.com

由于技术上的限制，采用实验方法分析大气流场传输效应对探测系统性能的影响的成本较高；而采用数值仿真方法，通过选择合理算法，可以较准确地分析大气流场传输效应对探测系统性能的影响。数值仿真方法不仅可以规避繁琐、艰苦的外场实验，而且可以为探测系统优化设计提供参考依据。本文采用数值仿真方法分析了大气流场传输效应对探测系统性能的影响，并获得了调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) 和视距等探测系统性能参数，最后通过仿真得到了大气流场传输效应影响下探测系统对目标所成的失真图像。

## 1 目标与背景的红外辐射特性

在计算目标与背景的温差时，采用模型化目标代替真实目标。模型化目标的面积大小与实际目标在观察方向的投影面积大小相等。目标温度通过用面积对整个信息区的温差加权平均得到<sup>[1]</sup>：

$$T_{target} = \sum_i A_i T_i / A \quad (1)$$

则目标与背景的温差为

$$\Delta T = T_{target} - T_b \quad (2)$$

### 1.1 目标与背景的温差传递

目标与背景的辐射在大气中传输时，损失的是能量，因此辐射传输是能量传递的过程。但是在探测系统的性能评价中，人们大多是以“温差”来定义的。

如图 1 所示<sup>[2-3]</sup>，大气流场被看成是一个系统，其输入和输出分别为：M，T 和 M'，T'：

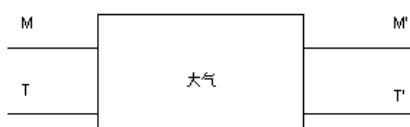


图 1 辐射温差传递示意图

根据普朗克辐射定律：

$$M(T) = \int \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{exp(c_2/\lambda T) - 1} d\lambda \quad (3)$$

经大气流场传输后的辐射出射度可以表示为

$$M'(T') = \tau M(T) \quad (4)$$

式中， $\tau$  为大气流场的透过率。

由式(4)可以得到：

$$\begin{aligned} & \int \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{exp(c_2/\lambda T') - 1} d\lambda \\ &= \tau \int \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{exp(c_2/\lambda T) - 1} d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

于是有：

$$\frac{1}{exp(c_2/\lambda T') - 1} = \tau \frac{1}{exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad (6)$$

当探测系统的工作波段为中波红外和长波红外波段以及目标与背景的温度范围在 220 ~ 320K 时， $c_2 \gg \lambda T$ ，式(6)可近似为

$$\frac{1}{exp(c_2/\lambda T')} = \tau \frac{1}{exp(c_2/\lambda T)} \quad (7)$$

式(7)可以转化为<sup>[4]</sup>

$$T' = \left( \frac{c_2}{c_2 - \lambda T \ln \tau} \right) T \quad (8)$$

式(8)表明：辐射经过大气传输衰减后，辐射能量变化导致温度变化，目标和背景的温差此时可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta T' &= T'_{target} - T'_b \\ &= \left( \frac{c_2}{c_2 - \lambda T_{target} \ln \tau} \right) T_{target} - \left( \frac{c_2}{c_2 - \lambda T_b \ln \tau} \right) T_b \end{aligned} \quad (9)$$

在小温差条件下，若用微分表示差分，上式可以化为<sup>[2-3]</sup>

$$\Delta T' = \left( \frac{c_2}{c_2 - \lambda T_{target} \ln \tau} \right)^2 \Delta T \quad (10)$$

### 1.2 大气对红外辐射传输的影响

红外辐射通过大气的衰减过程中，大气的吸收和散射效应对红外成像探测系统的影响最明显。

#### 1.2.1 大气吸收衰减

大气中的水蒸气、二氧化碳和臭氧主要对辐射起吸收的作用。因为臭氧主要存在于较高的大气层内, 而本文中的探测系统工作高度仅为海拔 10km, 所以只需分析水蒸气以及二氧化碳对红外辐射的吸收。利用可降水分可衡量大气中的水蒸气含量, 而利用等效海平面长度则可衡量大气中的二氧化碳含量。在 3~5μm 波段, 当可降水分在 200mm 以内时, 海平面上部分水蒸气含量对应的大气平均通过率数据, 可通过测量得到。对这些数据进行拟合, 可得出 3~5μm 大气窗口内水蒸气吸收率与可降水分 X 的关系<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned}\tau_{H_2O}^{3-5} = & 0.36848 \exp\left(-\frac{X}{10.34298}\right) \\ & + 0.56847 \exp\left(-\frac{X}{444.05955}\right)\end{aligned}\quad (11)$$

在可降水分小于 200mm 时, 按照公式(11)可以计算出不同可降水分对应的水蒸气透过率。同理, 可得出在 3~5μm 大气窗口内二氧化碳吸收透过率与海平面路程长度 L 之间的关系<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned}\tau_{CO_2}^{3-5} = & 0.09729 \exp\left(-\frac{L}{3.33798}\right) \\ & + 0.78144 \exp\left(-\frac{L}{897.34804}\right)\end{aligned}\quad (12)$$

根据公式(12)可计算出不同海平面路程长度对应的大气窗口二氧化碳透过率。由于影响吸收的大气分子密度、气压和温度均随海拔高度而变化, 所以当路径具有一定海拔高度或者路径为斜程时, 需要修正公式(12)。在海拔从 z<sub>1</sub>增至 z<sub>2</sub>, 路径为斜程长度 R, 天顶角为 θ 的情况下, 等效可降水分可以表示为<sup>[1]</sup>

$$X_e = X_e(z_1) \frac{1 - \exp[-(\beta + 0.05938)R \cos \theta]}{(\beta + 0.05938)R \cos \theta} \quad (13)$$

式中, X<sub>e</sub>(z<sub>1</sub>) = X<sub>0</sub>Rexp(-0.05938z<sub>1</sub>), X<sub>0</sub> 为海平面每千米高度大气中含有的水蒸气, β = 0.45/km。

二氧化碳吸收透过率的修正主要是高度修正, 经过高度修正的等效海平面路程长度为<sup>[1]</sup>

$$L_e = L_e(z_1) \frac{1 - \exp(-0.178R \cos \theta)}{0.178R \cos \theta} \quad (14)$$

式中, L<sub>e</sub>(z<sub>1</sub>) = Rexp(-0.178z<sub>1</sub>)。

### 1.2.2 大气散射衰减

大气中分子的散射和悬浮颗粒的散射也会使红外辐射传输发生衰减。参照气象学距离法<sup>[6]</sup>, 不同能见度条件下的大气散射透过率为

(1) 在高能见度条件下(能见距离 R<sub>v</sub> > 50km), 大气平均散射透过率为<sup>[6]</sup>

$$\tau_s^{\lambda_1-\lambda_2}(\lambda) = \exp\left[-\frac{R}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{3.91}{R_v} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^{1.6} d\lambda\right] \quad (15)$$

(2) 在中等能见度条件下(R<sub>v</sub> ~ 10km), 大气平均散射透过率为<sup>[6]</sup>

$$\tau_s^{\lambda_1-\lambda_2}(\lambda) = \exp\left[-\frac{R}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{3.91}{R_v} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^{1.3} d\lambda\right] \quad (16)$$

(3) 在低能见度条件下(R<sub>v</sub> < 6km), 大气平均散射透过率为<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned}\tau_s^{\lambda_1-\lambda_2}(\lambda) = & \exp\left[-\frac{R}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{3.91}{R_v} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^{0.585R_v^{1/2}} d\lambda\right]\end{aligned}\quad (17)$$

式中, R<sub>v</sub> 为能见距离; λ<sub>1</sub> 和 λ<sub>2</sub> 分别为红外成像探测系统响应波段的上下限。

大气吸收和散射产生的总透过率为

$$\tau(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda) \tau_{CO_2}(\lambda) \tau_s \quad (18)$$

如果大气条件(温度、湿度、能见距离和海拔高度等)已知, 只要给出天顶角 θ 和传输距离 R 就能得到不同大气窗口的透过率与传输距离 R 的关系。

## 2 探测系统主要性能参数

探测系统最主要的性能参数是 MTF、MRTD 和噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)。

### 2.1 MTF

MTF 可以衡量系统如实再现场景的程度。红外成像探测系统由一系列具有一定频率特性(空间的或时间的)的分系统组成, 只要逐个求出各分系统的 MTF, 其乘积就是整个系统的 MTF。探测系统的 MTF 主要由光学系统、探测器、电子线路和显示器的 MTF 决定<sup>[7]</sup>:

### (1) 光学系统的 MTF

如果光学系统是衍射限光学系统，且为圆形孔径，则<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} MTF_{o1} &= \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \left( \frac{f}{f_c} \right) - \left( \frac{f}{f_c} \right) \right. \\ &\quad \times \left. \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

式中， $f_c$  为光学系统的空间截止频率 (c/mard)，且  $f_c = D_0/\lambda$ ， $\lambda$  为平均工作波长。

在非衍射限光学系统中，其 MTF 为<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} MTF_{o2} &= \exp(-2\pi\sigma^2 f^2) \\ \sigma &= \frac{\rho}{\sqrt{2 \ln(\frac{1}{1-p})}} \end{aligned} \quad (20)$$

式中， $p$  是弥散圆半径为  $\rho$  的区域内光点的能量与光点总能量的百分比。

按照线性系统理论，上述两种因素线性无关，则光学系统的  $MTF_o$  为

$$MTF_o = MTF_{o1} \times MTF_{o2} \quad (21)$$

### (2) 探测器的 MTF

探测器水平方向的 MTF 为<sup>[1]</sup>

$$MTF_{dx} = \sin c(\pi\omega^{1/2} f_x) \quad (22)$$

式中， $\omega$  为瞬时视场； $f_x$  为水平方向的空间频率。

探测器垂直方向 MTF 由空间响应和空间抽样两部分组成，故传递函数为<sup>[1]</sup>

$$MTF_{dy} = \sin c(\pi\beta f_y) \sin c\frac{\pi f_y}{f_{Ny}} \quad (23)$$

式中， $\beta$  为垂直方向的瞬时视场平面角； $f_y$  为垂直方向的空间频率； $f_{Ny} = 1/(2\beta)$ 。

探测器时间滤波的 MTF 为<sup>[1]</sup>

$$MTF_{dt} = \frac{1}{[1 + (2f/f_0)^2]^{1/2}} \quad (24)$$

式中， $f_0$  为空间频率域的 3dB 频率 (c/mrad)，且  $f_0 = 1/\alpha$ 。

探测器总 MTF 为空间滤波和时间滤波所对应的 MTF 之积：

$$MTF_d = MTF_{ds} \times MTF_{dt} \quad (25)$$

### (3) 电子线路的调制传递函数

电子线路的 MTF 为<sup>[1]</sup>

$$MTF_e = [1 + (2\omega^{1/2} f)^2]^{-1/2} \quad (26)$$

### (4) 显示器的 MTF

显示器的 MTF 为<sup>[1]</sup>

$$MTF_m = \exp[-2\pi^2(0.25)^2(\alpha f)^2] \quad (27)$$

式中， $\alpha$  为水平方向瞬时视场的水平角。

因此，整个系统的 MTF 为

$$MTF = MTF_o \times MTF_d \times MTF_e \times MTF_m \quad (28)$$

探测系统的入瞳直径  $D_0$  为 50mm，系统焦距  $f'$  为 101mm，光学系统的透过率为 0.8，水平视场为 0.0628rad，垂直视场为 0.06228rad，像元长为 50μm，像元宽为 50μm，探测器的响应波段为 3.7μm~4.8μm，阵列规模为 128×128，帧频为 100Hz，根据公式 (19)~(28) 计算得到的探测系统的 MTF 如图 2 所示：随着空间频率的增加，探测系统的总 MTF 近似呈指数下降，当空间频率为 2c/mrad 时，系统的总 MTF 几乎降至 0。

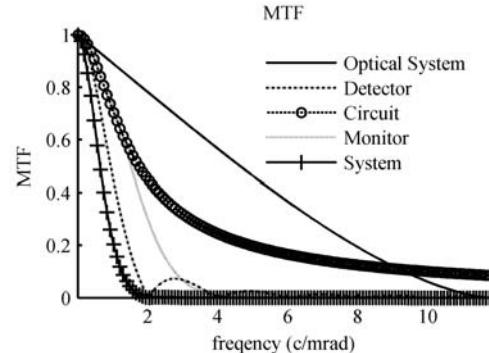
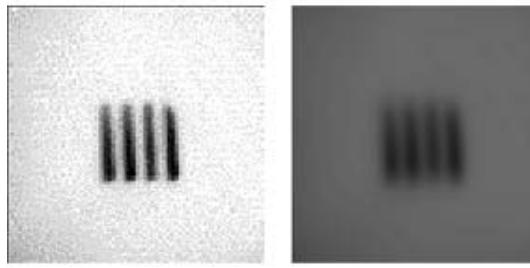


图 2 探测系统的 MTF

将目标图像的频谱与探测系统的 MTF 相乘得到探测系统所成失真目标图像的频谱，再经过逆傅里叶变换，考虑大气透过率和光学系统透过率对成像的影响，可以得到探测系统所成的失真目标图像。已知大气条件为：大气温度为 2 °C，相对湿度为 50%，斜程天顶角为 45°，能

见距离为 10km，海拔高度为 10km，传输距离为 10km (大气透过率约为 0.525)；采用四条靶作为目标图像，探测系统所成失真目标图像如图 3 所示：大气传输效应使探测系统成像发生了像模糊，且目标与背景之间对比度下降了。



(a) 输入目标图像 (b) 失真目标图像  
图 3 探测系统所成失真目标图像

## 2.2 NETD

单元和并扫情况下，探测系统的 NETD 为

$$NETD = \frac{4\sqrt{ab\Delta f_n}}{\alpha\beta D_0^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda)\tau_0(\lambda) \frac{\partial M_\lambda}{\partial T} d\lambda} \quad (29)$$

式中，a 和 b 分别为单个像元的长与宽； $D^*(\lambda)$  为比探测率； $\tau(\lambda)$  为光学系统的透过率； $\Delta f_n$  为噪声等效带宽。式 (29) 没有考虑串扫的影响，串扫可以使信噪比提高  $\sqrt{(n_s)}$  倍，修正后的 NETD 为

$$NETD = \frac{4F^2\sqrt{\Delta f_n}}{\sqrt{A_d n_s} \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda}{\partial T} d\lambda} \quad (30)$$

## 2.3 MRTD

MRTD 不仅是探测系统的重要设计依据，而且还可以作为标准，用来估计系统的视距，其计算模型为<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} & MRTD(f) \\ &= \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} SNR_{DT} f \frac{NETD}{MTF(f)} \left( \frac{\alpha\beta}{t_e f_p \Delta f_n \tau_d} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (31)$$

式中， $SNR_{DT}$  为阈值信噪比，根据经验取 2.25； $t_e$  为人眼积分时间，一般取 0.2s； $f_p$  为帧频； $\Delta f_n$  为噪声等效带宽。

根据式 (31) 和 2.1 节计算得到的探测系统的 MTF 和已知的探测系统 100mK 的 NETD，可计

算得到探测系统随空间频率变化的 MRTD。如图 4 所示，随着空间频率的增加，MRTD 近似呈指数增加，这表明，随着空间频率的增加，探测系统从背景中分辨目标的能力急剧下降。

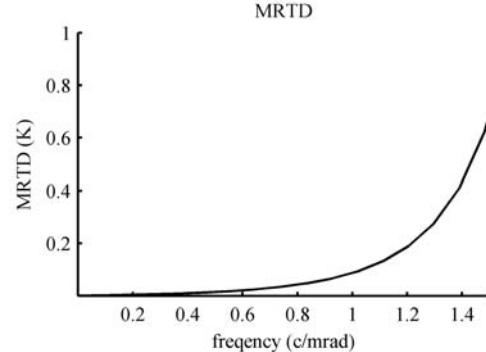


图 4 探测系统的 MRTD

## 3 探测系统视距的估算

探测系统的重要指标之一是在规定的气象条件下对特定目标进行观察、识别和认清时的作用距离(视距)，分别称为观察视距、识别视距和认清视距。视距是红外成像探测系统的主要战术指标，对系统的设计具有决定性作用<sup>[8-9]</sup>。在估算探测系统对扩展源目标的视距时，一般用 MRTD 法。现在比较常用的估算模型为<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta T' &= \Delta T \times \tau_a(R) \geq MRTD(f) \\ \frac{H}{2n_e R} &\geq \Delta\theta = \frac{1}{2f} \end{aligned} \quad (32)$$

上式的意义是：目标与背景的红外辐射温差经过大气衰减后，到达红外成像探测系统时要大于系统的 MRTD<sup>[1]</sup>；目标对系统的张角要大于系统的最小可分辨角度<sup>[1]</sup>。满足上面两个条件的最大距离即为红外成像探测系统能够探测(或者识别)目标的视距。

经过修正之后，扩展源目标的视距估算方程变为<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta T' &= \Delta T \left( \frac{c_2}{c_2 - \lambda T \ln \tau} \right)^2 \geq MRTD(f) \\ \frac{H}{2n_e R} &\geq \Delta\theta = \frac{1}{2f} \end{aligned} \quad (33)$$

根据 2.1 节提供的探测系统参数以及大气条件，站立的人和环境的固有表观温差为 8K，尺寸为 0.5m×1.5m。当探测概率分别为 0.1、0.3、

0.5、0.8、0.95时，可得到与发现、识别、认清3种观察等级相对应的视距估算结果。如表1所示，当探测概率为0.5时，探测系统对人的发现距离为2.57km，识别距离为0.67km，认清距离为0.34km。

表1 探测系统对人的视距的估算结果  
(单位: km)

探测概率	0.1	0.3	0.5	0.8	0.95
发现距离	5.45	3.48	2.57	1.70	1.26
识别距离	1.35	0.91	0.67	0.44	0.33
认清距离	0.69	0.46	0.34	0.23	0.17

## 4 结论

本文利用数值仿真方法分析了大气传输效应对探测系统性能的影响，获得了探测系统MTF、MRTD和视距等性能评价参数，并且模拟了探测系统对目标成失真像的过程。所取得的主要研究结果如下：

(1) 随着空间频率的增加，探测系统的MTF近似呈指数下降，MRTD近似呈指数上升，探测系统从背景中分辨目标的能力急剧下降；

(2) 大气传输效应会使探测系统对目标的成像产生像模糊，而且目标与背景之间的对比度会下降。

对于由大气流场传输效应引起的探测系统成像模糊，可利用自适应光学技术<sup>[10]</sup>、数字图

像恢复技术<sup>[11,12]</sup>以及两者相结合的方法实现进行补偿和校正，从而进一步提高探测系统的探测性能。

## 参考文献

- [1] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. **微光与红外成像技术** [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [2] 王娟. 红外成像探测系统的作用距离估算 [D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [3] 王坚. 红外热像仪在不同大气环境下作用距离的研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2008.
- [4] 陈立学. 辐射温差大气传递的简化模型 [J]. **应用光学**, 1996, 17(4): 39–41.
- [5] 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.
- [6] 彭德权, 周成平, 丁明跃. 海空背景长波红外大气透过率的仿真计算方法 [J]. **红外与激光工程**, 2001, 30(2): 112–117.
- [7] Datta P K, Nijhawan O P. Range Estimation of Thermal Imaging System from MRTD and MTF Measurement [J]. **OPTIK (Jena)**, 1994, 97(1): 1–3.
- [8] 毛京湘, 王忆峰. 利用NETD和探测器测试数据计算红外成像系统的噪声等效带宽 [J]. **红外**, 2009, 30(8): 41–43.
- [9] 张云翠, 刘龙, 杨轶, 等. 基于作用距离的红外成像系统光学参数确定 [J]. **红外**, 2009, 30(8): 18–20.
- [10] 周仁忠, 阎吉祥. **自适应光学理论** [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [11] 冈萨雷斯 R C, 伍兹 R E. **数字图像处理** [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [12] 尹球, 匡定波. 促进遥感发展的几点思考 [J]. **红外与毫米波学报**, 2007, 26(3): 225–231.