# 基于光谱等分法估算复杂大气条件下红外 成像系统的MRTD 和作用距离

# 孙文芳 吴 平 张立帅

(南京航空航天大学理学院, 江苏南京 211100)

摘 要: 大气透过率是影响红外成像系统作用距离的重要因素。在大气传输过程中, 红 外辐射会受到大气分子的选择性吸收、散射以及复杂气象条件等的影响, 这使得大气 透过率成了一个复杂参量。用光谱等分法计算了大气透过率。首先利用 MODTRAN 软 件计算一定距离时各谱线的大气透过率并建立数据库, 然后按一定间隔等分光谱区域 并调用数据库计算出各微小光谱区域内的大气透过率, 最后将其代入模型用以计算红 外系统的作用距离。与利用常数或者平均大气透过率的计算方法相比, 该方法提高了 计算结果的准确度。计算并分析了探测高度、湿度以及雾霾等复杂气象条件对红外成 像系统 MRTD 和作用距离的影响。

关键词: 红外热成像系统; MRTD; 大气透过率; MODTRAN; 作用距离

中图分类号:TN216 文献标志码:A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.01.005

## Estimation of MRTD and Operating Distance of Infrared Imaging System under Complex Atmospheric Condition Based on Spectral Bisection Method

#### SUN Wen-fang, WU Ping, ZHANG Li-shuai

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

Abstract: Atmospheric transmittance is an important factor affecting the operating distance of an infrared imaging system. In the process of atmospheric transmission, the infrared radiation may be affected by the selective absorption of atmospheric molecules, scattering and complicated weather conditions. This makes the atmospheric transmittance become a complex parameter. A spectral bisection method is used to calculate the atmospheric transmittance. Firstly, the MODTRAN software is used to calculate the atmospheric transmittance of each spectral line at a certain distance and establish a database. Then, the spectral region is divided at a certain interval and the atmospheric transmittance in each mini spectral region is calculated by calling the database. Finally, the calculated result is put into the model to calculate the operating distance of the infrared system. Compared with the calculation method which uses constant or average atmospheric transmittance, the calculation accuracy of the proposed method is improved. The effects of detecting height, humidity and fog on MRTD and operating distance of an infrared imaging system are calculated and analyzed.

**Key words:** infrared imaging system; MRTD; atmospheric transmittance; MODTRAN; operating distance

收稿日期: 2014-12-08

**作者简介:**孙文芳(1988-),女,河南新乡人,硕士研究生,主要从事红外系统性能评估及仿真方面的研究。 E-mail: fangwensun@163.com

### 0 引言

随着红外成像系统在军事和民用领域中的 应用的日益广泛, 使系统具有优良的性能已 成为设计研制热成像系统的目标。热成像系 统的静态性能主要包括调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD), 最小可分辨温差 (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) 和最小可探测温差 (minimum detectable temperature difference, MDTD) 等 参量<sup>[1]</sup>。MTF 成功地体现了红外成像系统的空 间频率特性; NETD 被广泛用于描述系统的灵敏 度和反映噪声的大小; MRTD 将探测器的灵敏 度、MTF、光学 MTF 和电子学 MTF 等参数结合 起来,作为热成像系统的重要指标,对系统的选 用和设计起着决定性作用<sup>[2]</sup>。作为红外系统的 关键指标之一, 红外系统的作用距离是其自身 参数、目标特性和大气环境等诸多因素的函数 [3]。由于受大气分子的选择性吸收、气溶胶的散 射以及复杂气象条件(雾、霾、云、雨)等因素的 影响,系统作用距离的估算较为困难。在大气透 过率的处理上,人们一般都采用常量、拟合函数 或者忽略大气衰减的方法<sup>[4-6]</sup>,但这种方法的计 算结果有较大偏差。本文通过研究 MRTD 的数 学模型,在充分考虑大气透过率的情况下,利用 光谱等分法编程计算系统的作用距离,并对复 杂大气条件下系统的作用距离进行估算分析。

# 1 基于 MRTD 的红外热成像系统性 能评价模型

在热成像系统中,MRTD 是综合评价红外 系统空间分辨力和温度分辨率的重要参量。它 的定义为将具有不同空间频率的四条带靶目标 图案(高宽比为 7:1)放置于均匀的背景中后使 背景与目标的温差从零逐渐变大到刚好能被 观察者分辨出时的温差值(50%的概率)。这种 背景与目标之间的温差就称为此空间频率下的 MRTD。MRTD 的一般模型为<sup>[1]</sup>

$$\operatorname{MRTD}\left(f\right) = \frac{\pi^{2}}{4\sqrt{14}} \operatorname{SNR}_{\mathrm{DT}} f \frac{\operatorname{NETD}}{\operatorname{MTF}\left(f\right)} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \beta}{t_{e} f_{p} \Delta f \tau_{d}}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(1)

式中, SNR<sub>DT</sub> 为阈值显示信噪比; f 为空间频 率; MTF(f) 为系统的总的传递函数;  $\alpha$ 、 $\beta$  分 别为瞬时视场的水平张角和垂直张角;  $f_p$  为帧 频;  $t_e$  为人眼的积分时间,眼睛对景物观察时, 需要一定的积分时间才能完成观察过程,这个 积分时间约为 0.2~0.3 s;  $\Delta f$  为等效噪声带宽;  $\tau_d$ 为扫描驻留时间。

为简单起见,对于红外成像系统的 MTF(f), 只考虑探测器的 MTF<sub>d</sub>、光学系统的 MTF<sub>o</sub>和电 子处理系统的 MTF<sub>e</sub><sup>[7]</sup>,系统的 MTF(f) 应是各 个子系统的 MTF 的乘积。

$$\mathrm{MTF}_{o} = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos\left(\frac{f}{f_{c}}\right) - \left(\frac{f}{f_{c}}\right) \left[1 - \left(\frac{f}{f_{c}}\right)^{2}\right]^{1/2}\right\}$$
(2)

$$MTF_d = \frac{\sin\left(\pi \cdot w^{1/2} \cdot f\right)}{\pi \cdot w^{1/2} \cdot f}$$
(3)

$$\mathrm{MTF}_{e} = \left[1 + \left(2 \cdot w^{1/2} \cdot f\right)^{2}\right]^{-1/2} \tag{4}$$

式中, w 为单元探测器所对应的瞬时视场角; fc 为光学系统的空间截止频率。则系统的 MTF (f) 为

$$MTF(f) = MTF_o \cdot MTF_d \cdot MTF_e$$
(5)

根据热像仪的基本性能参数,利用上述公式可以计算出热像仪的 NETD 和 MRTD,并进行视距的估算。

利用上述 MRTD 理论模型, 针对典型扫描型 红外热成像系统进行仿真。所用 Catherine-GP 红 外热像仪的探测器为 SOFRADIR 公司产的 288×4 元 HgCdTe 探测器, 性能参数见表 1。根据上述 理论和表 1 中的参数, 用 VC++ 编程计算得出 NETD=77.44 mK(T=300 K), 与产品介绍书上所 列的数值 NETD=80 mK 符合较好。在 50% 的探 测概率下, 人眼视觉系统的阈值信噪比为 2.8, 仿真结果如图 1 所示, 与参考文献 [8] 中的实验 结果相比具有很好的一致性。

表1 Catherine-GP 型热像仪的性能参数

光学扫描系统		探测器 (HgCdTe)	
F 数	1.7	探测元长度 (µm)	28
通光孔径 (mm)	125.0	探测元宽度 (µm)	25
平均透射比	0.80	探测器元数	$288 \times 4$
帧频 (f/sec)	25.0	峰值响应波长 (µm)	8.4
扫描效率	0.8	峰值 $D^*(cm \cdot Hz^{1/2}W^{-1})$	$2.3e{+}11$
水平视场宽/窄 (rad)	0.15708/0.0524	工作波段	$8.0 \sim 13.0$
垂直视场宽/窄 (rad)	0.11781/0.0393		



### 2 红外热成像系统视距的估算

#### 2.1 视距估算模型

人眼通过热成像系统观察目标的基本条件 是:空间频率为 f 的目标与背景的实际等效温 差经过大气衰减到达热成像系统后仍大于或者 等于系统对应该频率的 MRTD, 同时目标对系统 的张角应该大于或者等于观察等级所要求的最 小视角, 即<sup>[1]</sup>:

$$\Delta T = \Delta T_e \cdot \tau_a \left( \lambda, R \right) \ge \text{MRTD} \left( f \right) \tag{6}$$

$$\frac{H}{N_e R} \ge \Delta \theta = \frac{1}{2f} \tag{7}$$

式中,  $\Delta T$  为经大气衰减后目标与背景的视在温差;  $\Delta T_e$  为目标与背景的实际等效温差;  $\tau_a(\lambda, R)$  为红外辐射传输 R km 后的大气透过率; H 为目标高度;  $N_e$  为不同观察等级要求时的目标等效条带数。

由于红外成像系统的静态性能参量是在理 论分析或实验室条件下得到的,当对实际目标 进行观察时,环境条件和目标特性不满足标准 条件,此时须对 MRTD 进行有关修正,修正后 的 MRTD 为

$$\operatorname{MRTD}\left(f\right) = \frac{\pi^{2}}{4\sqrt{2\varepsilon}} \frac{\operatorname{SNR}}{\operatorname{SNR}_{\mathrm{th}}} f \frac{\operatorname{NETD}}{\operatorname{MTF}\left(f\right)} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \beta}{t_{e} f_{p} \Delta f \tau_{d}}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(8)

式中,  $\varepsilon$  为实际目标等效条带图案的高宽比; SNR 为探测概率为 P 时的视觉阈值信噪比; SNR<sub>th</sub> 是 探测概率为 50% 时的视觉阈值信噪比。

#### 2.2 大气透过率 $\tau(\lambda, R)$

由于大气分子的选择性吸收、气溶胶的散 射和复杂气象条件(雾、霾、云、雨)等因素,大 气透过率 τ(λ, R)成为与波长和距离有关的一个 复杂参量,难以用函数准确地表达,通常用常量 或拟合函数代替,但这会与实际情况有较大误 差。图 2 是 8 μm~12 μm 波段内的大气透过率曲 线,由图可知,不同大气条件如不同大气能见度 对大气透过率有较大影响。

利用光谱间隔等分法<sup>[9]</sup> 计算大气透过率  $\tau(\lambda, R)$ 。利用 MODTRAN 软件计算出一定大气 条件下不同预设距离时各谱线的大气透过率, 并建立数据库。设波长范围为 $\lambda_a \sim \lambda_b$ 。因 MOD-TRAN 软件中分子吸收计算光谱间隔为 1 cm<sup>-1</sup>, 所以将 $\lambda_a \sim \lambda_b$  以  $\Delta \lambda = \lambda_{i+1} - \lambda_i = 0.02 \mu m$  的光 谱间隔等分,其中  $i=1, 2, 3...n, n = (\lambda_a - \lambda_b)/\Delta \lambda$ 为 $\lambda_a \sim \lambda_b$  被分割的光谱间隔数。对  $\Delta \lambda_i$  内的透 过率求平均,得到该光谱间隔内某一距离时的 平均大气透过率为

$$\tau_{\Delta\lambda_i} = \frac{1}{j} \sum_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} \tau_\lambda \tag{9}$$

式中, j 为 MODTRAN 计算出的  $\lambda_i \sim \lambda_{i+1}$  的光谱 条带数,通过编程可实现直接读入;  $\tau_{\lambda}$  为 MOD-TRAN 计算出的  $\lambda_i \sim \lambda_{i+1}$  区间内各光谱条带所 对应的大气透过率。



图 2 不同消光系数下波长为 8 μm~12 μm 的 大气透过率

#### 2.3 视距的预测与分析

在中纬度夏天的大气条件下,当探测概率 分别为40%和80%时,以Catherine-GP型号的 热像仪为例 (参数见表1),对尺寸为12.5m×4.8 m的飞机进行探测观察,估算其在不同探测高 度时可识别的最小可分辨温差及作用距离,如 图 3 所示,其中背景温度为300 K,目标与背景 固有表观温差为10°C。

从图 3 中可以看出, 探测概率和探测高度对 红外成像系统的 MRTD 和作用距离都有一定影 响, 具体表现为: 热成像系统的 MRTD 和视距都 随探测高度的升高而增加, 逐渐趋于平缓, 高探 测概率与低探测概率条件相比, 系统的 MRTD 较高, 视距较短。这是由于水蒸气会随气层高度 而变化, 低空时空气中的水蒸气含量较大, 因而 对红外辐射的吸收、散射较大; 高空时水蒸气含 量较少且变化很小, 对红外辐射的吸收、散射作 用也较弱。



图 3 探测概率分别为 80% 和 40%, 不同探测 高度下系统对飞机可识别的 MRTD 和对应的 作用距离

雾霾对红外辐射的传输也有较大的影响,图 4 为不同能见度下红外成像系统可识别目标坦 克的 MRTD 和作用距离变化图。其中所用热像 仪为 Catherine-GP 型号的热像仪 (参数见表 1), 环境温度为 280 K,大气压强为 81.42 kPa,坦克 目标的面积为 2.3×2.7(m×m),目标与背景固有 表观温差为 10 °C,探测概率为 80%。从图 4 可 以看出,随着消光系数的增加,红外成像系统的 MRTD 和视距骤降,可见雾霾对红外辐射的吸 收和散射作用很强,对红外辐射的传输有很大 影响。



对坦克目标可识别的 MRTD 和作用距离

图 5 为水平探测路径下探测概率为 80% 时, 利用 Catherine-GP 型热像仪 (参数见表 1) 在不 同空气湿度条件下对目标坦克可识别的 MRTD 和作用距离变化图。其中背景温度为 303 K。可 以看出,随着空气湿度的增加,系统的 MRTD 和 作用距离都明显减小。这主要是由于湿度较高 时空气中的水蒸气对红外辐射的吸收、散射作 用较大。



图 5 探测概率为 80% 时不同空气湿度条件下 系统对目标坦克可识别的 MRTD 和作用距离

### 3 结论

利用 MRTD 的一般模型编程计算了 Catherine-GP 红外热像仪的最小可分辨温差,计 算结果与他人的实验结果一致。根据此模型和 约翰逊准则,在充分考虑大气透过率的前提下, 采用光谱等分法估算了复杂大气条件下可识别 目标的 MRTD 和作用距离,并对计算结果进行 了分析。探测高度对红外系统的作用距离有明

(上接第15页)

本系统除了用于水泥回转窑测温之外,还 可用于塑料行业的挤压和压膜检测、玻璃加工 与液面宽度检测以及冶金行业的钢板、钢坯或 钢锭热轧检测。本系统因具有高性价比而蕴含 着巨大的商业价值和商业潜力,可以打破外国 的技术垄断。作为国产自主研发的产品,今后 可以针对更加细致的场景设计出有针对性的设 备,并可以提供该类系统国外产品的维护服务 等,为广大用户节省资金,满足现在市场上用户 的主要诉求,为红外在线扫描测温系统的市场 普及提供一个新的思路和理念。我们希望通过 显影响,其中4km高度以下影响更为明显。湿度和可见雾霾对红外系统的作用距离影响较大, 消光系数对红外辐射的传输影响较大。

#### 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 京理工大学出版社, 1995: 229-242.
- [2] 李旭东, 艾克聪, 张安峰. 红外成像系统 MRTD 数 学模型的研究 [J].**应用光学**, 2004,**25**(6): 38-42.
- [3] Portnoy A D, Pitsianis N P, Sun X,et al. Multichannel Sampling Schemes for Optical Imaging Systems[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): B76–B85.
- [4] Buskila K,Towito S, Shmuel E,et al. Atmospheric Modulation Transfer Function in the Infrared[J]. Applied Optics, 2004,43(2): 471–482.
- [5] 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.
- [6] 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): 942-944.
- [7] Ratches A J. Vollmerhausen H R. Ronald G D. Target Acquisition Performance Modeling of Infrared Imaging Systems: Past, Present, and Future[J]. Journal of IEEE Sensors, Invited paper to the Inaugural Edition, 2001,1(1): 158–174.
- [8] 王晓蕊,张建奇,冯卓祥,等.采样红外成像仿真及 最小可分辨温差预测方法研究[J].红外与毫米波报, 2004,23(6): 436-440.
- [9] 贾全涛, 吴平, 马鹤. 利用光谱等分法对红外系统 作用距离的计算 [J].**红外与激光工程**, 2012,41(10): 2600-2603.

我们的努力,有更多人关注相应的技术开发,使 该技术尽快实现市场化。

#### 参考文献

- [1] 刘强. 基于红外测温的水泥回转窑状态监测系统研究 [D]. 上海交通大学,2012.
- [2] 韩欣. 红外测温仪在电气系统故障诊断中的研究 [J].**学习方法报**(教研版), 2011, **26**(10):1-2.
- [3] 王琦.(研制恒温控制器) 新型 PID 恒温控制器的研制[D].哈尔滨工业大学, 2006.
- [4] 李正熙, 张永忠, 孙德辉, 等. 新型回转窑筒体温度红 外扫描计算机监测系统研究 [J].**有色冶金设计与研 究**, 2003, **24**(增刊):69-70.
- [5] 徐雷,徐扬. ASP.NET MVC 4 Web **编程**[M]. 华中科 技大学出版社, 2013 年 6 月第 1 版.

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

INFRARED (MONTHLY)/VOL.36, NO.1, JAN 2015