

基于海空模型的红外热成像系统成像影响分析

邵 龙, 白廷柱, 郑海晶, 张 硕, 陈 莹

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 基于海空红外图像提出了海空大气模型, 分析并研究了大气环境对红外热成像系统成像的对比传递函数。以红外热成像系统为例, 对海空大气模型中斜程路径的大气对比传递函数进行了计算, 分析了观测距离、大气密度、目标海拔高度、大气程辐射、路径天顶角对大气对比传递函数的影响。实验结果表明, 大气传输路径的观测距离、大气密度、大气程辐射、天顶角与大气对比传递函数成反比。该结果可以用于预估实际应用时大气对红外热成像系统的影响, 为提高红外热成像系统的成像性能提供基础。

关键词 成像系统; 红外成像; 海空大气模型; 大气对比传递函数; 斜程路径; 成像性能

中图分类号 TN215 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111104

Imaging Analysis of Infrared Thermal Imaging System Based on Sea-Sky Model

Shao Long, Bai Tingzhu, Zheng Haijing, Zhang Shuo, Chen Ying

School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The sea-sky atmospheric model is proposed based on the sea-sky infrared image, and the contrast transfer function of the atmospheric environment on the imaging of infrared thermal imaging system is analyzed. Taking the infrared thermal imaging system as an example, the atmospheric contrast transfer function of the slant path in the sea-sky atmospheric model is calculated. The effects of the observation distance, atmospheric density, target altitude, atmospheric path radiation, and path zenith angle on atmospheric contrast transfer function are analyzed. The experimental results show that the observation distance, atmospheric density, atmospheric path radiation, and zenith angle of the atmospheric transmission path are inversely proportional to the atmospheric contrast transfer function. The results can be used to estimate the atmospheric impact during the practical application of the infrared thermal imaging system, and provide the basis for improving the imaging performance of the infrared thermal imaging system.

Key words imaging systems; infrared imaging; sea-sky atmospheric model; atmospheric contrast transfer function; slant path; imaging performance

OCIS codes 110.3080; 110.3000; 010.1300

1 引 言

海空背景下目标的定位、识别等研究一直以来都是相关应用的核心内容^[1], 但红外热成像系统在对海空目标进行探测时受大气环境的影响较大^[2], 因此有必要分析大气因素对红外热成像系统成像性能的影响。

近年来, 较多研究者以实验或理论计算的方式来研究大气因素对光电成像系统成像性能的影响。例如, Kopeika^[3]分析了大气湍流、气溶胶对特定空间频率下图像质量的影响效果; Li 等^[4]分析了鬼影成像的图像质量受部分相干光传播距离的影响; Nairat 等^[5]研究了大气扰动和光束截断对激光成像系统成像性能的影响。陈海龙等^[6]研究了外部杂散光对气象卫星中微光成像仪的影响; 张逸新等^[7]分析了大气湍流尺度对大

收稿日期: 2017-06-19; **收到修改稿日期:** 2017-07-03

作者简介: 邵 龙(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事红外成像系统性能评价方面的研究。E-mail: shaolong@bit.edu.cn

导师简介: 白廷柱(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事红外、紫外、微光探测成像等方面的研究。

E-mail: tzhbai@bit.edu.cn(通信联系人)

气成像系统分辨率的影响。虽然对红外热成像系统成像性能影响因素的分析方法有很多,但缺少一个完整的、系统的定量评价体系。迄今为止,专门建立海空大气几何模型来分析影响红外热成像系统成像性能因素的研究尚未见报道。

大气因素对成像性能的影响可用大气对比传递函数的概念来描述。本文通过建立海空大气几何模型,详细分析了大气因素对大气对比传递函数的影响,如大气密度、大气程辐射^[6]、观测距离、目标海拔高度、路径天顶角等。相关工作可以优化红外热成像系统的应用方案,为红外热成像系统性能预测提供基础。

2 海空大气模型

红外热成像系统在对海面或者天空目标进行观测时,热成像系统与观测目标的距离较远,实时海况下大气环境对红外热成像系统成像的影响作用较大。从海边拍摄的长波海空红外图像如图 1 所示,海空大气模型如图 2 所示。



图 1 海空红外图像

Fig. 1 Sea-sky infrared image

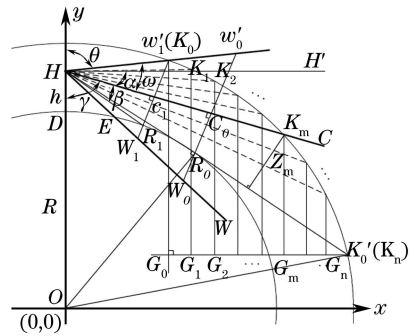


图 2 海空大气模型

Fig. 2 Sea-sky atmospheric model

图 2 所示的海空大气模型由图 1 中的海空背景成像过程演变而来。图 2 中,地球球心位于 O 点,红外热成像系统置于 H 点,它的垂直视场角为 $\angle W'_1 H W_1$, $H C$ 为垂直视场的角平分线,在红外热成像系统对远处海空目标成像的过程中,理想的最远海天线位于图中 R_0 处。由于实时海况的影响,大气环境对红外辐射有衰减作用,故真实的海天线必然会更靠近观测点,图 2 中由于实时海况大气的影响,真实海天线移到 R_1 处。 $W'_1 W_1$ 与红外热成像系统垂直视场角平分线垂直,其反映的是红外图像从顶部到底部的景物分布情况, $W'_1 R_1$ 对应于图 1 中的天空部分, $R_1 W_1$ 对应于图 1 中的海面部分。由于图 1 中,从图像顶部(对应于图 2 中 K_0 点)到海天线处(对应于图 2 中 K'_0 点),天空背景离红外热像仪的距离越来越远,进入到大气传输路径的大气程辐射越来越大,故从图像顶部到海天线处的亮度越来越大,在海天线处亮度达到最大。

实时海况大气的影响最终反映到海空红外图像中,如果能提取出海空红外图像中包含的信息,例如海天线到红外热成像系统的真实距离、目标离红外热成像系统观测点的距离以及目标离海平面的海拔高度,就可以反推出大气对红外辐射的影响作用,从而可以进一步分析大气因素对红外热成像系统成像质量的影响效果。图 2 中虚线区域反映的是图 1 中天空区域,在图 1 中天空区域的某一垂直高度范围内出现的目标(如飞机)会位于图 2 中弧线 $K_0 K'_0$ 上,为了简化分析过程,仅对弧线 $K_0 K'_0$ 上出现的目标进行分析。

3 基于海空大气模型的大气对比传递函数分析

3.1 大气对比传递函数

对于红外热成像系统,通常用传递函数来表征其成像能力,反映成像系统对辐射能量的分辨能力^[9]。为了分析大气因素对红外热成像系统成像性能的影响效果,利用大气对比传递函数来描述大气对目标对比度的衰减程度。大气对比传递函数定义为零视距时目标和背景的对比度经大气传输后传递给光电探测器,探测器像面上目标与背景的对比度与零视距时目标背景对比度之比。描述大气对比传递函数的公式为^[10]

$$C_R = C_0 \cdot T, \quad (1)$$

式中 C_R 为探测器像面上目标背景表观对比度, C_0 为零视距时目标背景对比度, T 为大气对比传递函数。 T

与目标和探测器之间的大气状态以及探测器本身的性能参数有关。

大气对比传递函数值越大表示零视距时目标背景对比度 C_0 。经大气传输后在探测器像面的目标背景对比度值 C_R 越大, 红外热成像系统成像质量越好。在红外热成像系统成像过程中, 大气的散射、吸收和扰动是主要的影响因素, 故大气对红外热成像系统成像的对比传递函数 T 主要由大气散射和吸收造成的对比传递函数 T_{att} 和大气扰动造成的对比传递函数 T_{tur} 两个部分组成。

3.1.1 大气散射和吸收的对比传递函数

大气散射和吸收引起的对比传递函数 T_{att} 受大气向上通路亮度、大气能见度、温湿度、观测距离以及地物照度等影响, 可以表示为^[11]

$$T_{att} = \{1 + K [\exp(\sigma L) - 1]\}^{-1}, \quad (2)$$

式中 K 表示天空背景亮度比, 对于阴暗天空 $K \approx 1/\rho$, 对于晴朗天空 $K \approx 0.2/\rho$, ρ 是景物的反射率; σ 表示大气平均衰减系数; L 表示观测距离。

大气平均衰减系数 σ 可由文献[12]和[13]推出:

$$\sigma = \left[\delta_1(\lambda) \cdot \frac{r_2 \cdot f_2}{6.76} + \delta_{\text{CO}_2}(\lambda) + \frac{3.91}{V_m} \cdot \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q + \delta_r + \delta_s \right] \cdot \frac{\exp(-k/nd \cdot z_m) - \exp(-k/d \cdot z_m)}{n \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{k}{nd} \cdot z_m\right)\right]}, \quad (3)$$

式中 $\delta_1(\lambda)$ 为特定条件下的水蒸气吸收系数, r_2 为大气环境的相对湿度, f_2 为特定温度下的水蒸气质量, $\delta_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 为海平面水平路径的光谱吸收系数, V_m 为大气能见度, λ 为光线波长, δ_r 、 δ_s 为由降雨、降雪引起的衰减因子, q 为散射的经验常数, d 为地表附近的标高(一般取 8500 m), k 为常数(对水蒸气是 0.5, 对二氧化碳是 1.5), n 为进行斜程路径修正时斜程路径等分的份数, z_m 为目标相对于海平面的海拔高度。(3)式中第一项是海平面水平路径的大气衰减因子, 第二项是斜程路径修正因子。

3.1.2 大气扰动的对比传递函数

大气影响红外热成像系统成像性能的另一面是大气扰动。大气扰动会降低红外热成像系统成像的分辨力, 大气扰动引起的对比传递函数可以表示为^[11]

$$T_{tur} = \exp(-5.8\pi^2 \cdot \nu^{\frac{5}{3}} \cdot f^{\frac{5}{3}} \cdot \lambda^{-\frac{1}{2}} \cdot L \cdot C_n^2), \quad (4)$$

式中 ν 表示光学系统焦平面空间频率, f 表示红外热成像系统镜头焦距, C_n^2 表示大气折射率结构常数, C_n^2 随观测高度 h 的变化而变化, 其变化规律可近似为

$$C_n^2 = 4 \times 10^{-14} \times h^{-\frac{2}{3}} \exp\left(\frac{K}{2500}\right). \quad (5)$$

综合考虑大气吸收、散射和扰动的影响, 大气对红外热成像系统成像的对比传递函数 T 可表示为

$$T = [1 + K (\exp(\sigma L) - 1)]^{-1} \times \exp(-5.8\pi^2 \cdot \nu^{5/3} \cdot f^{5/3} \cdot \lambda^{-1/2} \cdot L \cdot C_n^2). \quad (6)$$

3.2 基于海空模型的大气对比传递函数

图 2 中, 以地心 O 为原点, 以天顶方向为 y 轴, 建立 xOy 直角坐标系, h 为红外热成像系统的观测高度, R 为地球半径, 2ω 和 γ 分别为红外热成像系统的垂直视场角和俯仰角, θ 为斜程路径的入射光线路径天顶角, HK'_0 表示海平面水平路径。

虚线区域中每条虚线代表一条观测斜程路径, 将 $K_0K'_0$ 之间的横轴距离进行 n 等分, 等分点分别为 $G_0, G_1, G_2, \dots, G_m, \dots, G_n$, 这些点分别对应于弧线 $K_0K'_0$ 上的点为 $K_0, K_1, K_2, \dots, K_m, \dots, K_n$, 过点 $K_0, K_1, K_2, \dots, K_m, \dots, K_n$ 分别作 HK'_0 的垂线, 每条垂线的距离设为 $z_0, z_1, z_2, \dots, z_m, \dots, z_n$ (即目标离开海平面的海拔高度)。海天红外图像中天空区域的每条观测斜程路径分别为 $HK_0, HK_1, HK_2, \dots, HK_m, \dots, HK_n$, 在计算分析中, 只需要对一般项 HK_m 进行分析即可。

由图 2 海空大气模型中的几何关系可得, 对于一般项 HK_m (第 m 项), 其斜程路径距离、目标相对于海平面的海拔高度、入射光线的路径天顶角可以分别表示为

$$L_m = f(r, \omega, \gamma, R, h, m, n), \quad (7)$$

$$z_m = f(r, \omega, \gamma, R, h, m, n), \quad (8)$$

$$\theta_m = f(r, \omega, \gamma, R, h, m, n), \quad (9)$$

式中 r 表示红外海空图像中图像底部至天线处某一垂直方向的像素数,可由对海空红外图像进行图像处理求得。(7)~(9)式所得的结果是关于 L_m 、 Z_m 、 θ_m 的 3 组数据,每组数据包含 $n+1$ 个结果。对于一般项的斜程路径 HK_m ,其平均大气密度值可由以下方法求得:将斜程路径 HK_m 进行 s 等分,假设每一份的大气密度是定值,分别为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_t, \dots, \rho_s$,其对应的垂直高度分别为

$$p_1 = \frac{z_m}{s}, p_2 = \frac{2 \cdot z_m}{s}, \dots, p_t = \frac{t \cdot z_m}{s}, \dots, p_s = \frac{s \cdot z_m}{s}. \quad (10)$$

整个斜程路径 HK_m 的平均大气密度值设为

$$\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_s}{s}, \quad (11)$$

在等温模式下, p_t 高度下的大气密度值 ρ_t 为^[10]

$$\rho_t = \rho_0 \cdot \exp\left[-\frac{g}{RT}(p_t - p_0)\right], \quad (12)$$

式中 ρ_0 为海平面($p_0=0$)处的大气密度值,为 1.225 kg/m^3 ,气体常数 $R=287.06 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,重力加速度 $g=9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $T=T_0=283.15 \text{ K}$ 。故有

$$\rho_t = 1.225 \cdot \exp[-1.2057 \times 10^{-4} p_t]. \quad (13)$$

故斜程路径 HK_m 的平均大气密度值为

$$\rho_m = \frac{1.225}{s} \cdot \frac{\exp\left(-1.2057 \times 10^{-4} \cdot \frac{z_m}{s}\right) \cdot [1 - \exp(-1.2057 \times 10^{-4} \cdot z_m)]}{1 - \exp\left(-1.2057 \times 10^{-4} \cdot \frac{z_m}{s}\right)}. \quad (14)$$

将求得的斜程路径距离值 L_m 和目标相对于海平面的海拔高度值 z_m 代入(3)式和(6)式可得基于海空模型的大气对比传递函数:

$$T_m = [1 + K(\exp[\sigma(z_m) \cdot L_m] - 1)]^{-1} \times \exp(-5.8\pi^2 \cdot \nu^{5/3} \cdot f^{5/3} \cdot \lambda^{-1/2} \cdot L_m \cdot C_n^2), \quad (15)$$

式中 L_m 和 Z_m 是某一大气条件下,处于特定拍摄位置的红外热成像系统的各个观测斜程路径的距离值和海拔高度值。

4 结果与讨论

4.1 实验条件

为了对以上分析过程进行验证,于秋冬时节在青岛市海边进行了相关实验。实验所采用的红外热成像系统为 FILR 公司的 Tau2-640 机芯配上 Bop 公司的 4 倍调焦镜头。红外热成像系统实验环境参数:垂直方向像元数 $a=512$,垂直方向半视场角 $\omega=2.6^\circ$,焦平面空间频率 $\nu=33333.33 \text{ m}^{-1}$,镜头焦距 $f=80 \text{ mm}$,光线波长 $\lambda=10.5 \text{ }\mu\text{m}$,实验的大气温度 5°C ,相对湿度 $r_2=25\%$,大气能见度 $V_m=16000 \text{ m}$,降雨量 $J_r=0 \text{ mm/h}$,降雪量 $J_s=0 \text{ mm/h}$,景物反射率 $\rho=0.48$,红外热成像系统的俯仰角 $\gamma=90^\circ$,观测高度 $h=10 \text{ m}$,地球半径 $R=6371000 \text{ m}$ 。红外热成像系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 红外热成像系统参数

Table 1 Parameters of infrared thermal imaging system

Parameter of Tau2-640		Parameter of 4× focus lens	
Working band / μm	7.5-13.5	Focal length /mm	80
Number of pixels	640×512	F number	1.4
Noise-equivalent temperature difference /mK	<50(25 $^\circ\text{C}$)	Field of view /[($^\circ$)×($^\circ$)]	7.0×5.2

4.2 大气因素对大气对比传递函数的影响

由于红外热成像系统输出的是 14 位 raw 数据,但 14 位 raw 数据无法直观地显示出来,故利用

MATLAB 软件编程来显示 14 位 raw 数据。图 3 是将 14 位 raw 数据通过 MATLAB 程序显示得到的可见光图像(仅用于客观显示),但在整个实验的计算及分析过程中使用的仍是 14 位 raw 数据,这样对实验结果不会造成高低位数据转化的影响。



图 3 海空红外图像

Fig. 3 Sea-sky infrared image

图 3 中,目标出现在海天线处,背景是天空,通过对图 3 进行图像处理,得到海天线处的像素索引值 $r=200$ (从图像底部到海天线处某一垂直方向的像素数)。将由图像处理得到的海天线处像素索引值 r 代入(7)~(9)式,可得到各个斜程路径的斜程路径距离、目标相对于海平面的海拔高度、入射光线的路径天顶角。取图 2 中 $K_0K'_0$ 之间的横轴距离等份份数 $n=20$,则一般项 $m \in [1,20]$,在计算斜程路径的平均大气密度时,取斜程路径 HK_m 等分的份数为 $s=1000$,可得到大气各参量及大气对比传递函数的计算结果如表 2 所示。

表 2 大气参量及对比传递函数计算结果

Table 2 Atmospheric parameters and calculation results of atmospheric contrast transfer function

m	L_m / m	$\theta_m / (^\circ)$	z_m / m	$M_m / (\text{w} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\rho_m / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	T_m
0	9186	87.4000	434.9719	0.005234851	1.1935	0.6237
1	13004	88.1930	433.0936	0.005235223	1.1936	0.5137
2	16823	88.6338	430.9239	0.005235888	1.1937	0.4237
3	20643	88.9178	426.4629	0.005237041	1.1940	0.3500
4	24463	89.1185	419.7103	0.005237611	1.1945	0.2898
5	28284	89.2696	410.6664	0.005239686	1.1951	0.2404
6	32104	89.3888	399.3310	0.005241488	1.1959	0.2000
7	35925	89.4864	385.7041	0.005243298	1.1969	0.1669
8	39745	89.5684	369.7857	0.005245012	1.1981	0.1397
9	43566	89.6391	351.5758	0.005246453	1.1994	0.1174
10	47387	89.7012	331.0743	0.005247754	1.2008	0.0992
11	51207	89.7566	308.2813	0.005249004	1.2025	0.0843
12	55028	89.8067	283.1966	0.005249911	1.2043	0.0721
13	58849	89.8525	255.8203	0.005250872	1.2063	0.0621
14	62670	89.8948	226.1524	0.005251839	1.2084	0.0541
15	66491	89.9342	194.1927	0.005252484	1.2108	0.0477
16	70312	89.9712	159.9412	0.005253333	1.2133	0.0428
17	74132	90.0062	123.3979	0.005253421	1.2159	0.0393
18	77953	90.0394	84.5628	0.005253513	1.2188	0.0372
19	81774	90.0711	43.4357	0.005258672	1.2218	0.0368
20	85595	90.1015	0.0167	0.005261830	1.2250	0.0359

表 2 中 M_m 表示斜程路径 HK_m 的大气程辐射值,在已知斜程路径距离、路径天顶角和目标海拔高度的情况下,斜程路径的大气程辐射值 M_m 可由软件 MODTRAN^[14] 求得。

为了验证所提出的基于海空模型的大气对比传递函数的正确性,在多种条件下对本文方法的计算结果与实测数据进行比较。从(1)式出发,使用 4.1 节中的红外热成像系统对海天背景下的目标进行拍摄。为了验证本文方法计算结果的合理性,实验(以下都称为验证实验)时选取的实验条件尽量与 4.1 节中的大气条

件接近,并依据表 2 数据设置了不同拍摄条件,即不同路径距离、不同路径天顶角、不同海拔高度。在多种条件下得到多幅海空红外图像,对这些图像进行处理可得探测器像面的目标背景对比度 C_R ,零视距时目标背景对比度 C_0 。可根据空中目标(飞机)的辐射特性^[15]和环境温度求得。最终按照原理(1)式得到真实的大气对比传递函数值。验证实验的条件为大气温度 $7.2\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 29% ,大气能见度 $V_m = 15300\text{ m}$,降雨量和降雪量都为 0 mm/h ,低空范围内空中目标(飞机)的平均温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$,验证实验的结果如表 3 所示。

表 3 不同条件下的大气对比传递函数结果

Table 3 Results of the atmospheric contrast transfer function under various conditions

m_1	L_{m_1}/m	$\theta_{m_1}/(^{\circ})$	z_{m_1}/m	C_R	C_0	T_{m_1}
1	10000	88.6000	420.0000	0.2021	0.3729	0.5421
2	15000	88.9000	410.0000	0.1471	0.3729	0.3944
3	20000	89.2000	400.0000	0.1235	0.3729	0.3312
4	25000	89.5000	390.0000	0.0974	0.3729	0.2613
5	30000	89.8000	380.0000	0.0863	0.3729	0.2314

由于实验条件的限制,验证实验只采集了 5 组实验数据,将表 2 和表 3 中编号为 1~5 的数据进行作图对比,大气对比传递函数的对比曲线以及本文方法与实测数据的相对误差绝对值曲线如图 4 所示。

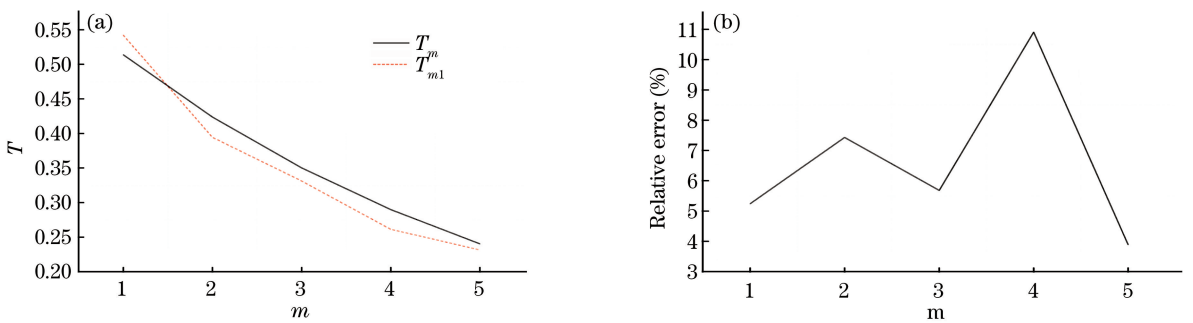


图 4 本文方法和实测数据对比。(a)大气对比传递函数结果;(b)相对误差曲线

Fig. 4 Comparison of the proposed method and measured data.

(a) Atmospheric contrast transfer function results; (b) relative error curve

设置表 3 中 5 组数据的斜程路径距离、路径天顶角和目标海拔高度与表 2 接近,这样可使结果对比分析更准确。图 4(a)表示本文方法和实测数据在 5 种条件下的大气对比传递函数值对比,其相对误差的绝对值如图 4(b)所示,最大相对误差不超过 11% ,因此本文方法在一定研究范围内是有效可信的。

文献[16]提出的大气对比传递函数计算公式为

$$T_c = \left[1 + \frac{L_v(\infty)}{L_b(0)} \frac{1 - \tau(L)}{\tau(L)} \right]^{-1} = \left[1 + K \frac{1 - \tau(L)}{\tau(L)} \right]^{-1}, \quad (16)$$

式中 L_v 指的是无穷远处气柱亮度, L_b 指的是零视距时背景的表观亮度, K 为地平天空亮度与背景亮度之比, $\tau(L)$ 是距离为 L 时的大气透射率。由(16)式可知,文献[16]的方法只考虑了景物反射率和观测距离对大气对比传递函数的影响,忽略了探测器本身性能参数以及大气的其他参数的影响作用。而本文方法不仅考虑了探测器性能参数的影响,同时还结合大气各参数的影响作用对大气对比传递函数进行了全面的分析,即从大气传输和探测器参数两方面来共同确定大气对比传递函数,所得结果更具可靠性。

表 2 中给出了斜程路径距离值、入射光线路径天顶角值、目标离海平面的海拔高度值、斜程路径大气程辐射值、斜程路径平均大气密度值以及斜程路径大气对比传递函数值等数据,通过上文的分析以及表 2 的数据可知,在对一定距离的目标进行观测时,影响大气对比传递函数的因素有:

- 1) 红外热成像系统的拍摄位置状态,包括观测高度 h 、红外热成像系统俯仰角 γ 。
- 2) 红外热成像系统的自身性能参数,包括红外热成像系统垂直方向视角 2ω 、焦平面空间频率 ν 、镜头焦距 f 、光线波长 λ 。
- 3) 实时大气条件,包括大气温度、相对湿度 r_2 、大气能见度 V_m 、景物反射率 ρ 、降雨和降雪强度。

4) 观测目标时的斜程路径距离 L_m 、观测目标的海拔高度 z_m 、入射光线路径天顶角 θ_m 、斜程路径的大气程辐射值 M_m 以及斜程路径的平均大气密度值 ρ_m 。

4.2.1 斜程路径距离对大气对比传递函数的影响

将入射光线的路径天顶角设置为 45° ，目标海拔高度设置为 100 m，其余参数设置如第 4.1 节所示。经过模拟计算，大气对比度传递函数与斜程路径距离的关系如图 5 所示。其中，横轴表示斜程路径距离值，纵轴表示大气对比传递函数值。斜程路径距离与大气对比传递函数成反比，这是因为距离的增加导致大气散射、吸收的作用增强，从而导致大气传输过程中对比传递函数值减小。

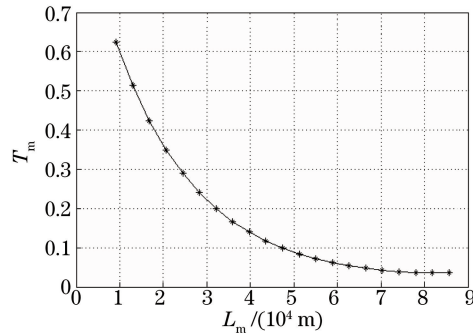


图 5 斜程路径距离与大气对比传递函数的关系

Fig. 5 Relationship between slant path distance and the atmospheric contrast transfer function

在实验中，只改变观测路径的距离值，其余参数与 4.1 节相同，由此所得的海空红外图像如图 6 所示。可以看出，随着观测距离的增大，大气对比传递函数值下降，图像的对比度越来越低，成像质量变差。

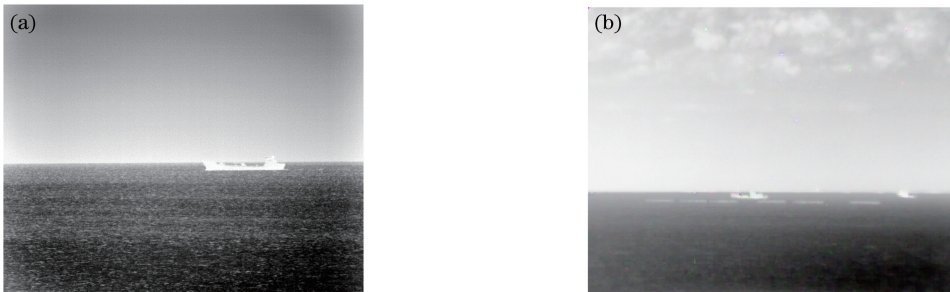


图 6 不同观测距离下的海空红外图像。(a) 3 km; (b) 6 km

Fig. 6 Sea-sky infrared images with different observation distances. (a) 3 km; (b) 6 km

4.2.2 海拔高度和大气密度对大气对比传递函数的影响

在模拟计算中，将斜程路径的距离设置为 5 km，入射光线的路径天顶角设置为 45° 。大气对比度传递函数与目标海拔高度和大气密度之间的关系如图 7 所示。从图 7(a) 和 (b) 可以看出，目标海拔高度与大气对

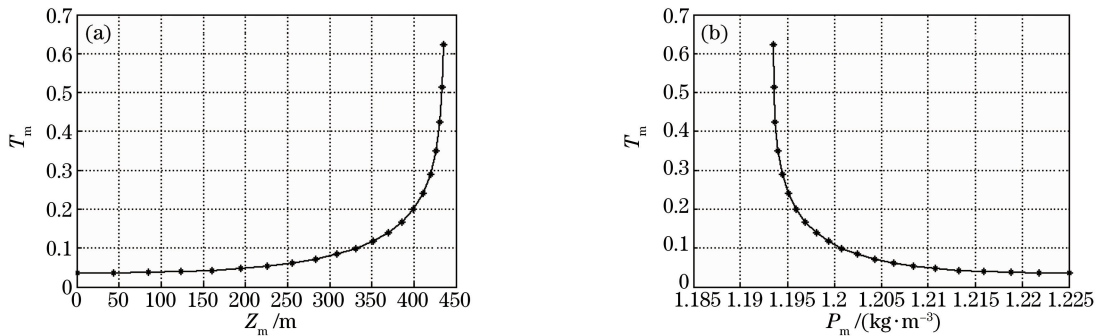


图 7 (a) 海拔高度与大气对比传递函数的关系; (b) 大气密度与大气对比传递函数的关系

Fig. 7 (a) Relationship between altitude and atmospheric contrast transfer function;

(b) relationship between atmospheric density and atmospheric contrast transfer function

比传递函数成正比,大气密度与大气对比传递函数成反比。这是因为随着高度的增加,大气密度降低,大气折射的影响减弱,故大气对比传递函数增大。

4.2.3 大气程辐射对大气对比传递函数的影响

入射光线的路径天顶角设置为 45° ,大气程辐射值随着斜程路径距离的增加而增加。大气对比传递函数与大气程辐射之间的关系如图 8 所示。其中,横轴表示大气程辐射值,纵轴表示大气对比传递函数值。随着大气程辐射值的增加,大气对比传递函数值减小。这是因为由杂散光的散射和吸收引起的辐射能量进入观测路径,由此得到的观测路径的大气程辐射将降低光电系统的检测灵敏度。特别是在远距离探测中,进入观测路径的大气程辐射更多,导致红外热成像系统成像质量下降。

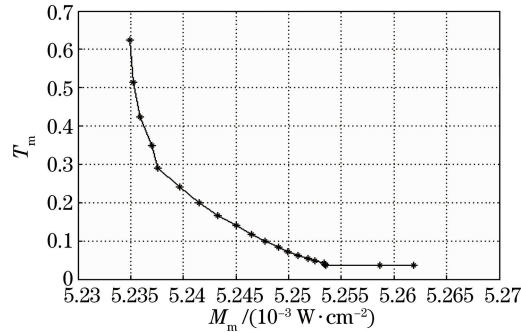


图 8 大气程辐射与大气对比传递函数的关系

Fig. 8 Relationship between atmospheric path radiation and atmospheric contrast transfer function

4.2.4 入射光线路径天顶角对大气对比传递函数的影响

斜程路径的距离设置为 5 km,目标海拔高度设置为 100 m。大气对比传递函数与路径天顶角之间的关系如图 9 所示。其中,横轴表示入射光线路径天顶角,纵轴表示大气对比传递函数。可以看出,路径天顶角与大气对比传递函数成反比。只改变入射光线的路径天顶角,其余的参数与 4.1 节相同,实验拍摄的海空红外图像如图 10 所示。

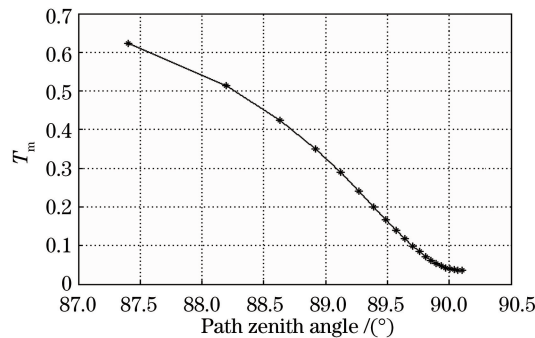


图 9 路径天顶角与大气对比传递函数的关系

Fig. 9 Relationship between the path zenith angle of and the atmospheric contrast transfer function

因为斜程路径的入射光线天顶角与高度角互为余角,图 10(a)中,入射光线路径高度角为 15° ,此时环境中水汽及雾霾较重,大气散射作用较明显,大气对比传递函数值较低,因此红外热成像系统获取的图像亮度以及目标与背景之间的对比度低,图像分辨率较低。图 10(b)中,当入射光线的路径高度角接近 45° 时,大气对比传递函数值比图 10(a)的高,图像的对比度和分辨率高于图 10(a)。

4.2.5 波长对大气对比传递函数的影响

将斜程路径的距离设置为 5 km,目标海拔高度设置为 100 m,入射光线的路径天顶角设置为 45° 。在 $7.5 \sim 13.5 \mu\text{m}$ 的波长范围内,大气对比传递函数与波长之间的关系如图 11 所示。其中,横轴表示光线波长,纵轴表示大气对比传递函数。可以看出,在一定波段范围内,波长与大气对比传递函数成正比。

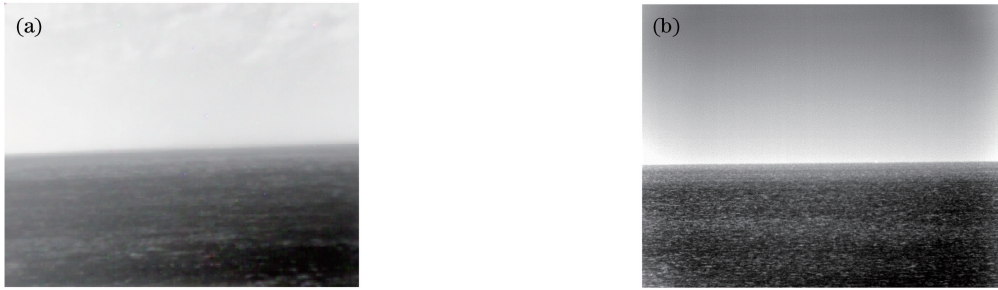


图 10 不同路径天顶角下的海空红外图像。(a) 75°; (b) 45°

Fig. 10 Sea-sky infrared images with different path zenith angles. (a) 75°; (b) 45°

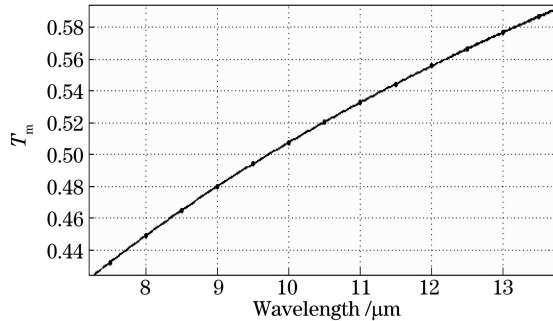


图 11 波长与大气对比传递函数的关系

Fig. 11 Relationship between wavelength and atmospheric contrast transfer function

5 结 论

建立了海空大气模型,并推导了可以描述红外热成像系统成像性能的大气对比传递函数,基于实测数据对文中提出的大气对比传递函数模型进行了有效性验证,并且定量分析了影响大气对比传递函数的各种因素:

1) 观测斜程路径距离越大,大气对比传递函数值越小,大气散射、吸收的作用增强,传输路径的辐射衰减越厉害。

2) 目标离海平面的高度越大,大气密度越低,大气折射的影响越弱,故大气对比传递函数值越大。

3) 大气程辐射会削弱光电系统对目标的探测灵敏度,大气程辐射值的增加会导致大气对比传递函数值的降低,进而使红外热成像系统成像的质量变差。

4) 斜程路径的天顶角较大时,环境中水汽及雾霾较重,大气散射作用较明显,大气对比传递函数值较小,会造成图像的对比度下降,分辨率降低。

5) 在一定波段范围内,光线波长越大,大气对比传递函数值越大。

以上分析可用于预估实际应用时大气对红外热成像系统的影响,为提高成像系统的成像性能提供基础。

参 考 文 献

- [1] Yuan Zhiwei, Huang Shucai, Xiong Zhigang, *et al.* Application of tail flame characteristic spectrum in trajectory target recognition of active section[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0230001.
苑智玮, 黄树彩, 熊志刚, 等. 尾焰特征光谱在主动段弹道目标识别中的应用[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0230001.
- [2] Gorin B A, Blosser R C, Sweet J. New method to optimize atmospheric correction for hyperspectral thermal imaging [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(9): 2088-2097.
- [3] Kopeika N S. Imaging through the atmosphere for airborne reconnaissance[J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(11): 132-139.
- [4] Li C, Wang T, Pu J, *et al.* Ghost imaging with partially coherent light radiation through turbulent atmosphere[J].

- Applied Physics B: Lasers and Optics, 2010, 99(3): 599-604.
- [5] Nairat M, Voelz D G. Performance characteristics of a scanning laser imaging system through atmospheric turbulence [J]. Optical Engineering, 2012, 51(10): 101708.
- [6] Chen Hailong, Chen Lin, Hu Xiuqing, *et al.* Effects of external stray light on low-light imager in Fengyun-3 day/night orbit meteorological satellite [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050101.
陈海龙, 陈林, 胡秀清, 等. 外部杂散光对风云三号晨昏轨道气象卫星中微光成像仪的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050101.
- [7] Zhang Yixin, Sun Yin. Effect of turbulence scale on the resolution of atmospheric imaging system [J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(7): 655-659.
张逸新, 孙寅. 湍流尺度对大气成像系统分辨率的影响 [J]. 中国激光, 2000, 27(7): 655-659.
- [8] Dong Renjie, Li Tongji, Chen Qinglian, *et al.* Methods for calculation of atmospheric transmittance and radiance in thermal infrared band [J]. Ocean Technology, 2006, 25(2): 78-83.
董仁杰, 李铜基, 陈清莲, 等. 热红外波段大气透过率和程辐射的估算方法 [J]. 海洋技术, 2006, 25(2): 78-83.
- [9] Li Jin, Xing Fei, Wang Chong. High precision on-orbit assessment of MTF for space CCD camera [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211003.
李进, 邢飞, 王翀. 空间 CCD 相机高精度在轨调制传递函数估算 [J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211003.
- [10] Bai Tingzhu. Photoelectric imaging technology and system [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2016.
白廷柱. 光电成像技术与系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [11] Dong Bin, Nie Pin. Analysis of atmospheric environment on the image quality of aerial camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S1): 99-102.
董斌, 聂品. 大气环境对航空相机成像质量影响分析 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 99-102.
- [12] Zhou Guohui, Liu Xiangwei, Xu Jiwei. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation [J]. Infrared Technology, 2008, 30(6): 331-334.
周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型 [J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331-334.
- [13] Lu Yuan. Simple method to calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation on slanting route [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(z2): 423-426.
路远. 斜程红外辐射大气透射率的简易计算 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(z2): 423-426.
- [14] Fu Bingshan, Chen Weimin, Ma Li. The computations of solar direct and diffuse radiations over China by using MODTRAN 3 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2001, 24(1): 51-58.
傅炳珊, 陈渭民, 马丽. 利用 MODTRAN 3 计算我国太阳直接辐射和散射辐射 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(1): 51-58.
- [15] Ma Pengzhen. Prediction of aircraft surface temperatures based on the onboard and outboard coupling [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
马鹏真. 基于内外环境耦合的客机表面温度的预测 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [16] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Principle and technology of photoelectric imaging [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.