

临近空间对地探测目标与背景红外特性研究

杨佳佳¹, 周方方², 崔立山³, 周纪¹

(1. 电子科技大学资源与环境学院, 四川 成都 611731;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 3. 中国人民解放军 93307 部队, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 红外辐射特性是红外探测系统进行目标识别的主要依据。基于辐射传输原理, 面向临近空间对地探测目标与背景的红外特性进行研究。利用全球大气廓线反映全球大气状况先验知识, 设计了一套临近空间对地探测红外特性研究的辐射传输仿真方案。利用 MODTRAN 模型进行仿真, 量化临近空间对地探测目标与背景的红外特性差异, 分析传感器最优透过率波段以及红外辐射特性的影响因素。结果表明, 大气透过率以及目标与背景的红外辐射差异随着临近空间传感器高度的增加而减小, 且与大气状况密切相关; 得出了传感器在 3~14 μm 范围内的最优透过率波段; 季节、大气能见度与传感器观测角度对目标与背景的亮温差异造成的影响不可忽略。

关键词: 临近空间; 红外辐射特性; 目标与背景; 大气透过率; 对地探测

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2021)07-0670-09

Infrared Characteristics of Ground Targets and Background Observed from Near Space

YANG Jiajia¹, ZHOU Fangfang², CUI Lishan³, ZHOU Ji¹

(1. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang471009, China; 3. Unit 93307 of PLA, Shenyang 110000, China)

Abstract: Infrared radiation characteristics are the basis for target recognition in infrared detection systems. Based on the principle of radiation transmission, the infrared characteristics of the target and background in near space were studied. Using the global atmospheric profile to reflect the prior knowledge of the global atmospheric conditions, a set of radiation transmission simulation schemes were designed to study the infrared characteristics of ground targets detected from near space. The MODTRAN model was used for the simulations. The difference between the ground target and background detected in near space was quantified, and we analyzed the optimal transmission band of the sensor as well as the influencing factors of infrared radiation characteristics. The results show that the atmospheric transmittance and infrared radiation difference between the target and background decrease with an increase in the height of sensor and are closely related to the atmospheric conditions. The optimal transmission of the sensor in the range of 3-14 μm was obtained; however, the influence of the season, atmospheric visibility, and sensor view zenith angle on the brightness temperature difference between the target and the background cannot be ignored.

Keywords: near space, infrared radiation characteristics, target and background, atmospheric transmittance, ground detection

0 引言

目标与背景的红外辐射特性对红外探测系统的目标识别具有重要影响。研究地面目标的红外辐射特

性时, 需要考虑的影响因素有: 地面背景的复杂性、大气状况变化、目标与周围复杂背景的辐射特性与二者间的差异^[1]。同时, 目标与背景的红外辐射特性差异在很大程度上影响着红外隐身与红外制导系统的

收稿日期: 2020-07-17; 修订日期: 2020-08-05.

作者简介: 杨佳佳 (1995-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向为热红外遥感。E-mail: yangjiajia0606@163.com。

通信作者: 周纪 (1983-), 男, 四川南充人, 教授, 主要研究方向为热红外遥感。E-mail: jzhou233@uestc.edu.cn。

基金项目: 航空科学基金 (20170180002)。

精度^[2]。临近空间是指介于航空与航天之间,包括大气平流层、中间层和部分热层区域的空域^[3]。根据国际航空联合会(The Fédération Aéronautique Internationale, FAI)的定义,临近空间的高度范围确定在23~100 km,我国将其定义为20~100 km^[4]。由于大气的影

响,普通航空器与卫星均无法在该空域运行,临近空间飞行器因其持续时间长、分辨率和高效快速等优势,能够提高对目标的监视与探测能力^[5]。现有的临近空间红外辐射特性研究中,大多数是地基、空基或临近空间平台对临近空间目标的探测,或是基于反临近空间武器来研究临近空间导弹的红外辐射特性^[6]。相比卫星对地探测目标红外辐射分析,临近空间对地探测目标红外辐射特性的研究相对匮乏。目标与背景的红外辐射差异与对比特性是进行目标识别与跟踪的主要依据,其中,大气状况的影响不可忽略,因此开展不同大气条件下的红外辐射特性研究,对于提高红外探测系统的性能具有重要意义^[7]。Niu等

于2019年通过研究临近空间中高超音速飞行器在不同攻角下的红外辐射特性,发现攻角的变化对红外辐射影响很大^[8]。张芳等于2017年对不同地域大气对红外辐射的影响进行研究,分析不同地域、不同波段以及有无气溶胶影响下的目标与背景对比度^[9]。但是,针对临近空间对地探测目标与背景红外辐射特性还需要深入研究。

1 数据与方法

1.1 热红外辐射传输原理

临近空间热红外传感器对地探测时,其接收到的能量包括:大气上行辐射、地物自身热辐射经大气被吸收和散射后到达传感器的部分及大气下行辐射经地表反射后通过大气到达传感器的部分,可用以下辐射传输方程表示^[10]:

$$L_{\lambda} = B(\lambda, T_s)\varepsilon_{\lambda}\tau_{\lambda} + L_{0\lambda}^{\uparrow} + (1 - \varepsilon_{\lambda})\tau_{\lambda}L_{0\lambda}^{\downarrow} \quad (1)$$

式中: λ 为波长; T_s 为地表温度; L_{λ} 为传感器所接收到的光谱辐亮度, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-2}$; $B(\lambda, T_s)$ 为温度为 T_s 时的黑体光谱辐亮度; ε_{λ} 为地表发射率; τ_{λ} 为地

面与传感器之间的大气透过率; $L_{0\lambda}^{\uparrow}$ 、 $L_{0\lambda}^{\downarrow}$ 分别为大气上行辐射和大气下行辐射。

根据 Planck 方程,可将 L_{λ} 转换为对应的亮温 T_b :

$$T_b = \frac{hc}{\lambda k \ln\{2hc^2 / (L_{\lambda}\lambda^5) + 1\}} \quad (2)$$

式中: h 为 Planck 常数($6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$); k 为玻尔兹曼常数($1.3806 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$); c 为光速($2.998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。本文基于亮温 T_b 分析目标与背景的红外辐射特性。

1.2 全球大气廓线数据与辐射传输模型

大气状况对临近空间对地探测目标与背景的红外特性具有重要的影响。在对地探测领域,大气状况一般可用大气廓线定量表征。大气廓线是指大气中风向、风速、温度和湿度等气象要素垂直分布的曲线。主要参数包括:地理位置信息、地面海拔高度以及各分层气压、大气温湿度和臭氧等相关参数。大气廓线是辐射传输仿真的重要输入参数,研究大气辐射传输过程、仿真和分析不同大气状况下的目标与背景红外特性等均需要具有良好代表性的大气廓线数据。因此,筛选具有代表性的大气廓线样本构建先验知识库有利于分析典型情况下目标的红外辐射特性。目前国际上常用的大气样本库有多个版本,如法国动力气象实验室建立的大气廓线数据库 TIGR (Thermodynamic Initial Guess Retrieval Database)^[11]、大气红外探测仪(atmospheric infrared sounder, AIRS)的 AIRX2SUP 产品^[12]等。

本文采用美国威斯康星大学发布的 SeeBor V5.0 数据集,SeeBor 数据集或其子集已广泛应用于卫星对地探测红外辐射传输仿真领域,由其生成的仿真数据集对全球范围内的大气状况具有良好的代表性,得到的结果具备高可信度。例如,美国宇航局发布的 MODIS 等多种卫星遥感产品大多基于其生成的仿真数据集。由于 SeeBor V5.0 数据集中存在部分冗余廓线,且开展辐射传输仿真需要大量的计算机资源。因此,在对廓线相似性、参数分布、季节等综合考虑的基础上,从中筛选出全球范围内的 549 条大气廓线形成全球大气状况先验知识库。其中,大气水汽含量(Column Water Vapor, CWV)的范围分布为 0.014~7.939 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,近地表气温(T_a)的分布范围为 225.25~331.92 K。这 549 条大气廓线能够较好地反映全球可能出现的大气状况,已成功应用于研发全球 NOAA AVHRR、Terra/Aqua MODIS 和 Sentinel-3 SLSTR 红外地表温度产品^[12]。

利用学术界广泛使用的 MODTRAN 模型(第 5

版)进行仿真。MODTRAN 由美国空军研究实验室(US Air Force Research Laboratory, AFRL)与光谱科技公司联合研制,在各个领域应用广泛。MODTRAN 模型在计算大气参数时充分考虑了水蒸气、二氧化碳、臭氧等物质对红外辐射的衰减作用,以及大气温湿度、海拔高度、能见度、观测路径以及传播距离等因素造成的影响^[14]。利用 MODTRAN 模型结合大气廓线进行对地探测红外辐射仿真在卫星红外领域应用广泛,相关技术已趋于成熟。目前,随着多种临近空间飞行器试验成功并投入使用,发挥大气辐射传输方面积累的优势,尽快对临近空间对地探测红外辐射特性开展相关研究,将是临近空间领域的一个重要研究方向。

1.3 仿真方案设计

辐射传输仿真针对每条大气廓线进行,本文的红外辐射仿真流程如图1所示。仿真方案的设计应尽可能多地考虑所有可能出现的情况,同时也需要考虑仿真的速度与消耗的计算机资源。针对临近空间传感器不同高度、不同地表温度范围、不同目标与背景等多变量进行仿真。其中包括单点仿真与图像仿真,单点仿真针对目标或背景为全像元的情况,仿真目标或背景的红外辐射特征;全图像仿真采用“天宫一号”高光谱数据,利用其空间分辨率为10 m的热红外波段影像作为背景场,反映复杂环境下目标与背景的红外辐射特性。据此,本文设计如下仿真方案:

1) 通过设定不同的地表温度(T_s)与近地表气温(T_a)的差值($T_s - T_a$)来表征不同的地表热状况。设置 $T_s - T_a$ 范围为 $-16 \sim 20$ K,步长为 4 K,即将地表温度设置为 $T_a - 16$ K、 $T_a - 12$ K、 $T_a - 8$ K、 $T_a - 4$ K、

T_a 、 $T_a + 4$ K、 $T_a + 8$ K、 $T_a + 12$ K、 $T_a + 16$ K、 $T_a + 20$ K,共计 10 个地表温度。

2) 目标与背景的发射率采用美国 The Johns Hopkins University (JHU) 光谱库作为依据,选取金属(汽车)、混凝土建筑物、土壤和草地 4 种典型地物,其发射率取值分别为 0.624、0.930、0.949 和 0.984。

3) 传感器高度设置为 20~100 km 变化,步长为 5 km,共设置 17 个高度。

4) 大气能见度设置为 5~30 km 变化,步长为 5 km,共设置 6 个能见度。

2 仿真结果与分析

2.1 大气透过率变化

通过全球大气状况先验知识库仿真得到全球范围内多变量影响下的大气透过率。大气透过率是研究红外辐射传输过程的重要因子,大气透过率受到海拔高度、天顶角、路径长度、波数间隔、大气水汽等的影响,造成在不同条件下大气透过率的变化^{[15]~[16]}。

由于仿真时考虑了不同地气温差、不同目标、不同背景、不同高度与不同能见度下的情形,在分析时选取某种情形下的仿真结果进行说明(传感器探测高度 20 km,能见度 23 km),虽然不同情形下得出的值的大小会产生略微的差异,但总体趋势是不变的,且得出的结果具有普适性规律。图2展示了仿真获得的全球大气透过率随波长的变化情况,由 549 条大气廓线统计的规律反映出在 $3.5 \sim 4 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 和 $10.5 \sim 11 \mu\text{m}$ 范围内的大气透过率较高,大气透过率值在热红外波段($8 \sim 14 \mu\text{m}$)的变化较为显著。

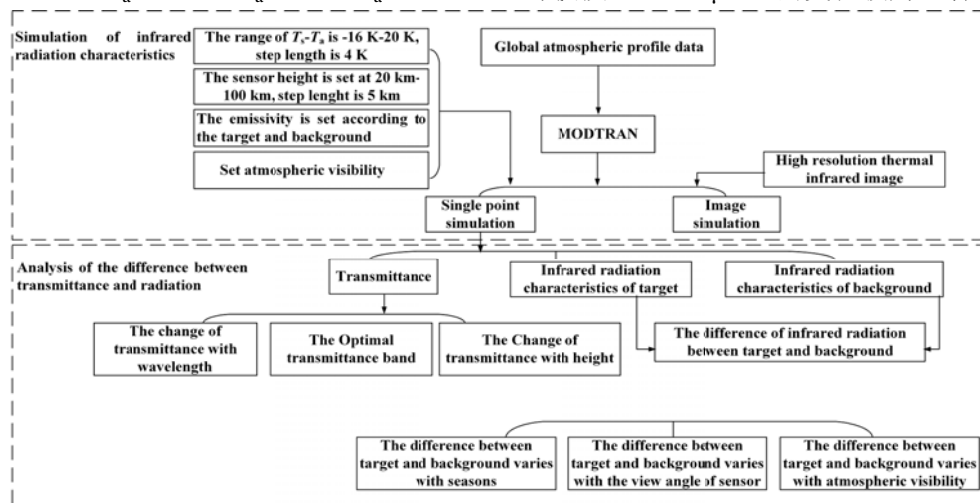


图1 红外辐射仿真流程图

Fig.1 Flowchart of infrared radiation simulation

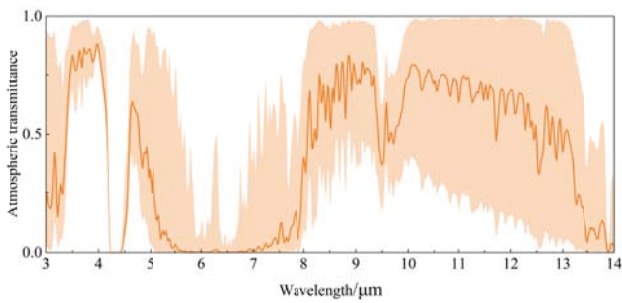
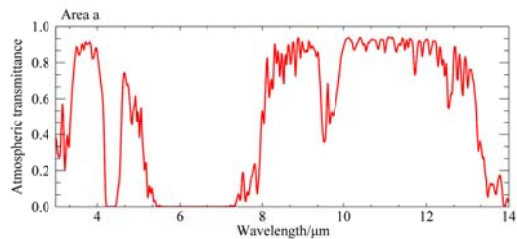


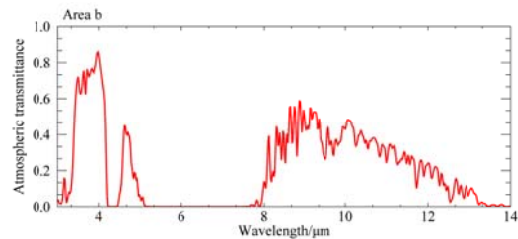
图2 全球大气透过率随波长的变化(注:中间的实线代表549条廓线仿真的大气透过率均值,阴影范围代表透过率最大-最小值范围)

Fig.2 Variation of the global atmospheric transmittance with wavelength (Note: The solid line in the middle represents the atmospheric transmittance average of 549 profile simulations, and the shaded range represents the maximum and minimum transmittance ranges)

基于全球仿真结果的分析,分别选取了中国周边两个典型地区的仿真结果进行详细分析,包括太平洋西部地区(记为地区a)和印度洋附近地区(记为地区b)。其中,前者的经纬度范围为 $30^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $130^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$,后者的经纬度范围为: $8^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$,



(a) 地区a大气透过率随波长的变化

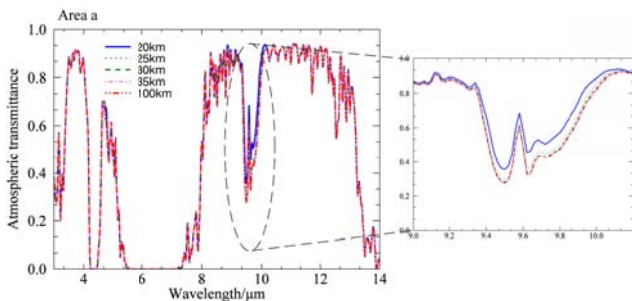


(b) 地区b大气透过率随波长的变化

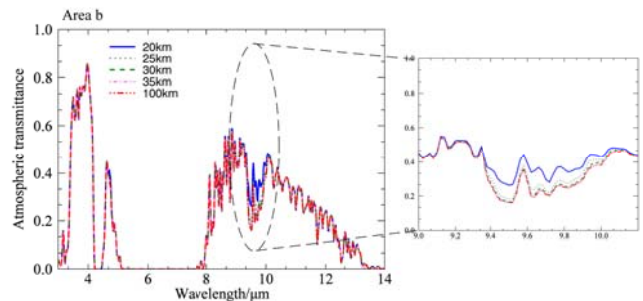
(a) Variation of atmospheric transmittance with wavelength in area a (b) Variation of atmospheric transmittance with wavelength in area b

图3 大气透过率随波长的变化

Fig.3 Variation of atmospheric transmittance with wavelength



(a) 地区a大气透过率随高度的变化



(b) 地区b大气透过率随高度的变化

(a) Variation of atmospheric transmittance with altitude in area a (b) Variation of atmospheric transmittance with altitude in area b

图4 大气透过率随高度的变化

Fig.4 Variation of atmospheric transmittance with different altitudes

2.1.2 最优透过率波段分析

以建立的全球大气状况先验知识库仿真得到的

$68^{\circ}\text{E}\sim 97^{\circ}\text{E}$ 。以下是基于这两个典型地区的分析。

2.1.1 大气透过率随波长和高度的变化

选取位于地区a的CWV和 T_a 较低的冬季廓线(月份:1月;CWV: $0.88\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$)与位于地区b的CWV和 T_a 较高的夏季廓线(月份:7月;CWV: $6.29\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$)的单点仿真结果进行展示(传感器探测高度20km,能见度23km)。图3展示了两个地区不同大气状况下大气透过率随波长的变化情况,从图中可以看出冬季大气窗口明显比夏季的宽,大气透过率要高。大气透过率受大气温湿状况影响显著,水汽对大气传输的影响很大,有研究表明水汽体积混合比值20%的变化可引起大气透过率15%的变化^[17],这一现象在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 区间范围内表现尤为明显。

通过仿真不同高度处传感器的观测情况,分析随着传感器高度的增加大气透过率随波长的变化情况,如图4所示。图4表明,随着传感器的高度增加,大气透过率在 $9\sim 10.5\mu\text{m}$ 范围内波动相对剧烈,且随着传感器高度的增加,大气透过率降低,在40km之后,传感器高度的变化不再引起大气透过率的明显变化,这是由于高度增加到一定值后,大气相对稀薄,对大气透过率的影响趋于稳定。

结果作为样本库,分析 $3\sim 14\mu\text{m}$ 的最优透过率波段。计算每条廓线在各波长处的大气透过率平均值,来表

征大气透过率的总体变化趋势；为对比，给出 549 条廓线中在各波长处透过率最小的廓线对应仿真结果（记为最小值）。如图 5 所示，平均值与最小值两条曲线的趋势总体一致，由于大气廓线中存在水汽含量较高的廓线，造成在 8~14 μm 范围内大气透过率较低。在 3~5 μm 范围内，最优透过率波段出现在 3.5~4 μm；在 8~14 μm 范围内，最优透过率波段出现在 8~9.5 μm、10.5~11 μm。

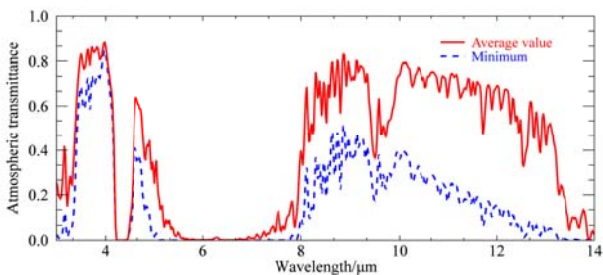


图 5 最优透过率波段

Fig.5 The optimal transmittance band

549 条大气廓线按不同大气水汽含量区间划分，分析不同大气水汽含量下 3~5 μm 和 8~14 μm 波段范围内的高透过率值 τ_{max} 与最优透过率波长值 λ_{centre} 。由表 1 可知：在低水汽含量地区大气透过率值要高于高水汽地区；随着大气水汽含量的增加，大气透过率减小，热红外波段（8~14 μm）的透过率值变化尤为显著；最优透过率波长值随大气水汽含量的增加趋于稳定。传感器的探测波段可以基于研究区的大气状况，根据表中给出的 λ_{centre} 与所需的波段宽度进行设置。

表 1 不同大气水汽含量下最优透过率波段

Table 1 The optimal atmospheric transmission band under different atmospheric water vapor content

CWVC (g·cm ⁻²)	3~5 μm		8~14 μm		Sample size
	τ_{max}	λ_{centre}	τ_{max}	λ_{centre}	
<1	0.94	3.72	0.97	11.1	129
1-2	0.90	3.72	0.91	8.86	121
2-3	0.88	3.98	0.86	8.86	88
3-4	0.88	3.98	0.79	8.86	60
4-5	0.87	3.98	0.72	8.86	47
5-6	0.86	3.98	0.64	8.86	92
6-7.94	0.86	3.98	0.59	8.86	12

2.2 目标与背景的红外辐射特性

2.2.1 单点仿真结果

目标与背景的红外辐射差异是探测和识别目标的基础。本文对两种不同目标与两种不同背景进行仿真。分析不同组合情景下的亮温差异，组合情形分别有：建筑物与草地、建筑物与土壤、金属目标与草地、

金属目标与土壤。结果如图 6 所示（此时仿真方案中设置的地表温度与气温的差值为：金属 8 K；建筑 4 K；草地 4 K；土壤 4 K）。

图 6 表明，对于同一目标而言，背景的变化造成亮温差的变化在 0.3~1.1 K 之间；对于同一背景而言，目标的变化造成的亮温差变化在 1.7~8.2 K 之间，这表明背景的变化对亮温差影响较小，亮温差主要取决于目标的辐射特性。大气状况相对干冷的情况下目标与背景的亮温差异更大，如当目标与背景为金属与草地时，亮温差可达 9.9 K（虽然选取不同地表温度与气温的差值下的仿真结果会改变亮温差的大小，但不会影响得出的变化规律）。不同背景（草地与土壤）相比，当背景为草地时，目标与背景的亮温差异较大；不同目标（金属与建筑）相比，当目标为金属时，目标与背景的亮温差异更大。随着传感器高度的增加，目标与背景的亮温差逐渐较小，当高度增加到 40 km 后趋于稳定。其原因可能是由于随着高度的增加，大气越来越稀薄，造成对亮温的影响逐渐变小直至稳定。

2.2.2 图像仿真结果

图 7 展示了当传感器位于 20 km、25 km、30 km、35 km、40 km 和 100 km 处的图像仿真结果。仿真结果为亮温影像，模拟的亮温分布情况与实际情况基本吻合。标准差能反映一个数据集的离散程度，通过计算不同高度下图像的标准差能够反映出传感器探测高度对地物辐射的影响。计算得出各高度下的标准差分别为 2.44、2.43、2.42、2.41、2.41、2.41，当传感器的高度增加到 40 km 之后，影像的标准差保持稳定，这一点与前面单点仿真得到的结果一致。标准差从大到小变化意味着，传感器高度增高，大气效应增大，削弱了传感器接收到的地物自身热辐射。

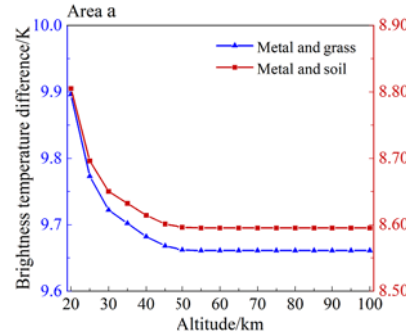
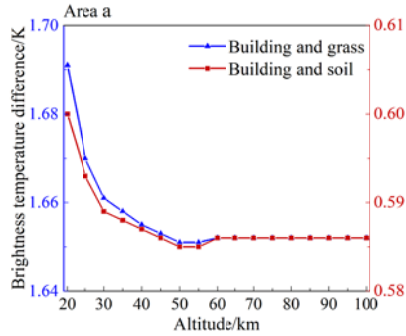
2.3 影响因素分析

2.3.1 目标与背景的红外辐射特性差异随季节的变化

季节的变化体现在气温与大气水汽的变化，水汽与气温直接作用于辐射传输过程，影响传感器接收到的亮温。大气吸收红外辐射的主要因素是水汽，它主要集中在 2~3 km 以下的大气层内，总含量可以在 0%~2% 之间变化^[18]。对前述的地区 a 和地区 b 分别选择两条不同季节的大气廓线，分析目标与背景的亮温差随季节的变化情况，廓线筛选原则上要求的 CWV 和 T_a 差异较大，基于此挑选的地区 a 的廓线月份为 1 月和 8 月，地区 b 的廓线月份为 4 月和 7 月。图 8 展示了 4 种目标与背景的亮温差在地区 a 和地区 b 不同季节的变化情况。

图8表明, 目标与背景的亮温差异与所处地区、大气水汽含量、气温等因素密切相关, 同一目标与背景的亮温差在同一地区不同季节下变化可达6.8K。同时, 目标与背景的亮温差还与它们自身属性相关, 当

二者的发射率相差较大时(如金属与草地), 亮温差较大; 当二者发射率较为接近时(如建筑物与土壤), 即使在大气状况差异很大的情况下, 目标与背景的亮温差变化也不明显。

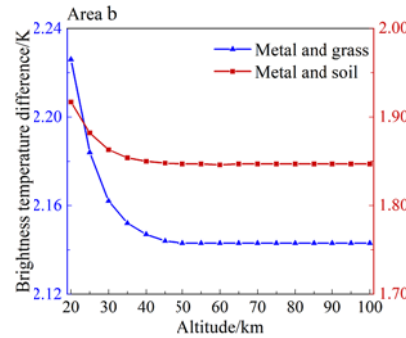
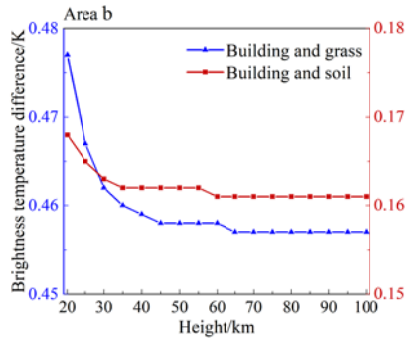


(a) 地区 a 建筑物与不同背景的亮温差随高度的变化

(b) 地区 a 金属与不同背景的亮温差随高度的变化

(a) Variation of brightness temperature difference between building and different background with altitude in area a

(b) Variation of brightness temperature difference between metal and different background with altitude in area a



(c) 地区 b 建筑物与不同背景的亮温差随高度的变化

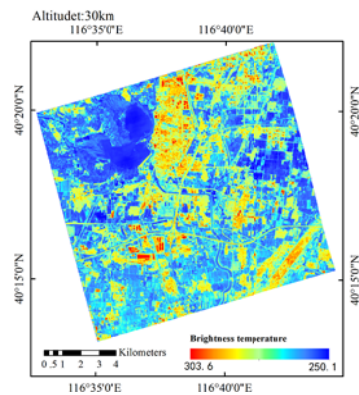
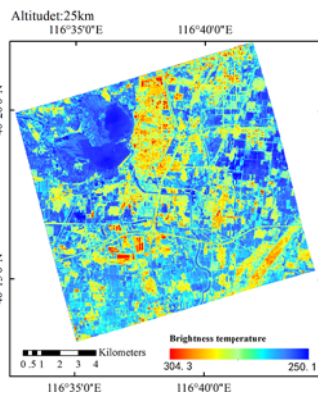
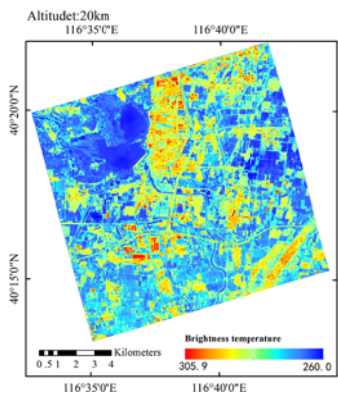
(d) 地区 b 金属与不同背景的亮温差随高度的变化

(c) Variation of brightness temperature difference between building and different background with altitude in area b

(d) Variation of brightness temperature difference between metal and different background with altitude in area b

图6 不同目标与背景组合下亮温随高度的变化

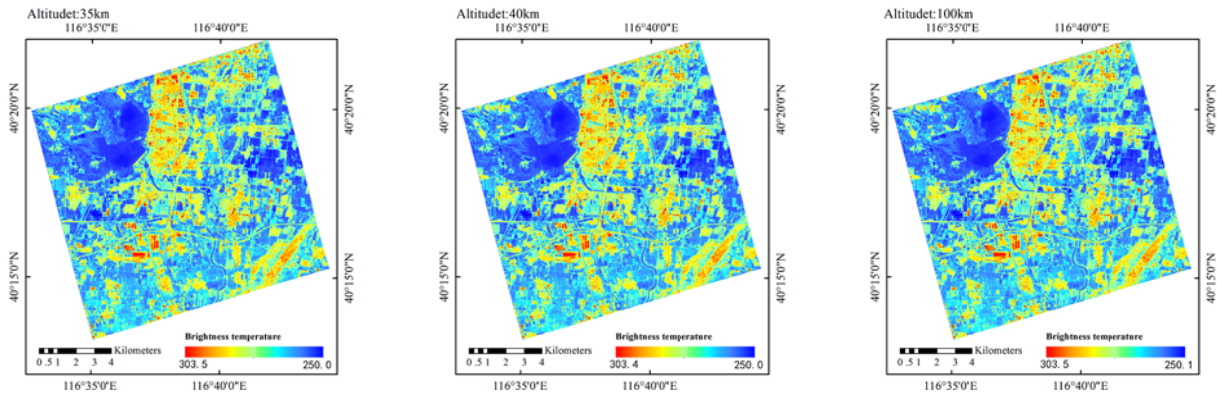
Fig.6 Brightness temperature changes for different combinations of target and background with altitude



(a) 传感器位于 20 km 时的图像仿真结果
(a) The simulated brightness temperature image observed by the sensor at 20 km

(b) 传感器位于 25 km 时的图像仿真结果
(b) The simulated brightness temperature image observed by the sensor at 25 km

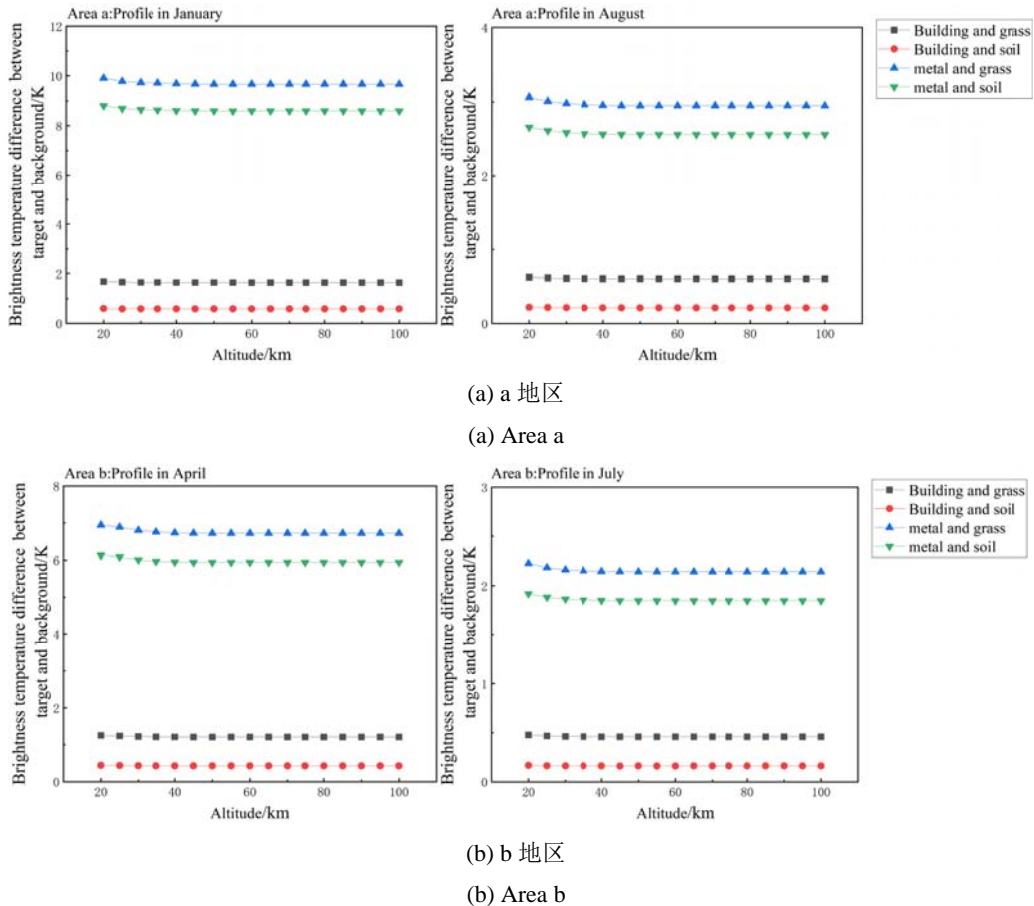
(c) 传感器位于 30 km 时的图像仿真结果
(c) The simulated brightness temperature image observed by the sensor at 30 km



(d) 传感器位于 35 km 时的图像仿真结果 (e) 传感器位于 40 km 时的图像仿真结果 (f) 传感器位于 100 km 时的图像仿真结果
(d) The simulated brightness temperature image observed by the sensor at 35 km (e) The simulated brightness temperature image observed by the sensor at 40 km (f) The simulated brightness temperature image observed by the sensor at 100 km

图 7 传感器位于不同高度时的图像仿真结果

Fig.7 The simulated brightness temperature image observed by the sensor at different altitudes



(a) a 地区

(a) Area a

(b) b 地区

(b) Area b

图 8 不同目标与背景的亮温差在不同地区不同季节下的变化情况

Fig.8 Variations of the brightness temperature difference for different combinations of target and background in different regions and seasons

同一地区不同季节下，目标与背景的亮温差异随季节变化明显，大气状况干冷的季节下，目标与背景的亮温差异更大，原因可能是干冷季节下，大气中水汽含量与微粒较少，传感器接收到的亮温大部分取决

于物体自身的辐射特性；而湿热环境下，大气中的水汽含量与微粒增加，大气吸收与散射效应增大，削弱了传感器接收到的地物自身辐射，造成目标与背景的亮温差异减小。这表明目标与背景亮温差受大气中水

蒸气含量的影响很大。

2.3.2 目标与背景的红外辐射特性差异随大气能见度的变化

大气能见度是反映大气透明度的一个重要指标,是表征光学性质的常用要素。大气能见度的高低取决于大气中雾、霾、云、降水量以及大气颗粒物粒径大小等,是影响临近空间飞行器对地探测目标与背景红外辐射的重要气象因子。利用 MODTRAN 模型仿真大气能见度从 5~30 km 变化的情况,以地区 a 的 1 月份廓线为例,仿真不同目标与背景组合情形下亮温差随大气能见度的变化。图 9 表明,目标与背景的亮温差异随着大气能见度的增大而增大,大气能见度增加到 10km 之后变化幅度显著减小。这表明,在大气能见度高于 10km 时,获得的临近空间对地探测目标与背景的仿真结果结果是有效且准确的。

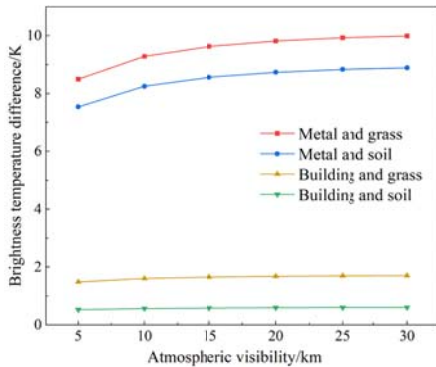


图 9 目标与背景亮温差随大气能见度的变化

Fig.9 Variations of the brightness temperature difference for four combinations of target and background with different atmospheric visibilities

2.3.3 目标与背景的红外辐射特性差异随传感器观测角度的变化

目标与背景的亮温差不仅与大气状况有关,还受到传感器观测角度的影响。本文模拟了传感器角度从垂直观测(0°)~75°变化观测,以 5°为步长。图 10 展示了位于地区 a 的 1 月份廓线在白天时金属目标与草地背景的亮温差随传感器观测角度的变化情况。图 10 表明,目标与背景的亮温差随着角度的增加而减小。传感器观测角度在 0°~40°间变化时,目标与背景的亮温差变化较小,当角度增加到约 40°后,亮温差变化逐渐加剧,继续增大传感器的观测角度至 70°时,传感器角度 5°的变化会引起目标与背景亮温差约 0.7 K 的变化。这是因为传感器角度的变化导致视场角增大,观测到的目标信息受到周围地物辐射的影响,降低了目标自身的辐射信息。

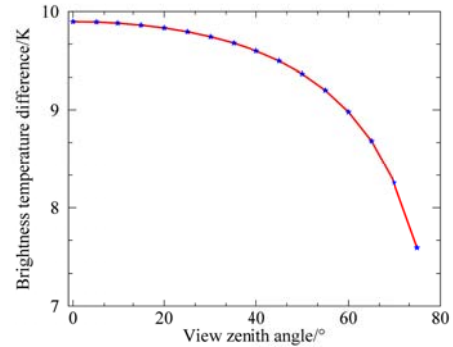


图 10 目标与背景亮温差随传感器观测角度的变化

Fig.10 Variation of the brightness temperature difference between target and background with different view zenith angles

3 结论

针对临近空间对地探测红外辐射特性研究相对匮乏的问题,基于全球大气状况先验知识库,实现了临近空间多变量影响下目标与背景红外辐射仿真,量化了目标与背景的红外辐射差异、传感器最优透过率波段及影响因素。结果表明,干冷大气下的大气透过率高于湿热大气,且随着传感器高度增加,在 9~10.5 μm 波段范围内大气透过率明显下降;目标与背景的亮温差随着传感器高度的增加逐渐较小,直至不变,在干冷大气状况下二者差异更大。

在 3~14 μm 区间内,最优透过率波段出现在 3.5~4 μm 、8~9.5 μm 、10.5~11 μm 处。分析得出影响临近空间目标与背景红外辐射特性的 3 个因素:①季节因素:同一地区不同季节下,目标与背景的亮温差随季节变化明显,干冷大气状况的季节下,目标与背景的亮温差比湿热大气下更大,同一目标与背景在同地区不同季节下,亮温差变化可达 6.8 K。②大气能见度:目标与背景的亮温差随大气能见度增加而增大,大气能见度由 5 km 增加到 10 km,目标与背景的亮温差增加可达 0.79 K,大气能见度增加到 10 km 后亮温差变化幅度显著减小。③传感器观测角度,目标与背景的亮温差随观测角度增加而减小,传感器的观测角度增大到 70°时,传感器角度 5°的变化会引起目标与背景亮温差约 0.7 K 的变化。需要说明的是,上述红外辐射差异与地物类型、发射率及温度有关。

利用构建的先验知识库与仿真方案可得出多变量影响下临近空间对地探测目标与背景的红外辐射特性,进而为临近空间红外制导系统的目标识别和抗干扰提供理论和数据支持。进行临近空间对地探测红外辐射特性等方面的应用研究,能为临近空间领域的

探索与临近空间传感器的研究和发展提供新的思路。
致谢

感谢中国科学院空间应用工程与技术中心为本研究提供天宫一号高光谱成像仪数据产品；感谢美国威斯康星大学提供的 SeeBor V5.0 数据集。

参考文献：

- [1] 韩玉阁, 宣益民. 目标与背景的红外辐射特性研究及应用[J]. 红外技术, 2002, 24(4): 18-21.
HAN Yuge, XUAN Yimin. The Study and Application of the IR Feature of Target and Background[J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(4): 18-21.
- [2] 李俊山, 陈霞, 李建华. 不同地面背景下目标与背景红外辐射对比特性[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 424-428.
LI Junshan, CHEN Xia, LI Jianhua. Infrared radiation characteristics contrast between target and background on different grounds[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 424-428.
- [3] 张海林, 周林, 马骁, 等. 临近空间飞行器发展现状及军事应用研究[J]. 飞航导弹, 2014(7): 3-7.
ZHANG Hailin, ZHOU Lin, MA Xiao, et al. Development Status and Military Application Research of Spacecraft Near Spacecraft[J]. *Flying Missile*, 2014(7): 3-7.
- [4] 张国华. 临近空间目标探测分析[J]. 现代雷达, 2011, 33(6): 13-15.
ZHANG Guohua. Analysis of Near Space Target Detection[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(6): 13-15.
- [5] 郭岗, 申卯兴. 临近空间军事应用现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2012(2): 20-25.
GUO Gang, SHEN Maoxing. Current Status and Development Trend of Military Applications in Near Space[J]. *Flying Missile*, 2012(2): 20-25.
- [6] 张海林, 周林, 左文博, 等. 临近空间高超声速导弹红外特性研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(1): 41-44.
ZHANG Hailin, ZHOU Lin, ZUO Wenbo. Study on infrared radiation feature of near space hypersonic missile[J]. *Laser and Infrared*, 2015, 45(1): 41-44.
- [7] 齐琳琳, 吉微, 白洁, 等. 大气对红外制导波段透过特性的影响分析[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(1): 61-65.
QI Linlin, JI Wei, BAI Jie, et al. Analysis of Influence of Atmosphere on the Infrared Transmittance[J]. *Command Control and Simulation*, 2014, 36(1): 61-65.
- [8] NIU Qinglin, YUAN Zhichao, CHEN Biao, et al. Infrared radiation characteristics of a hypersonic vehicle under time-varying angles of attack[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(4): 861-874.
- [9] 张芳, 齐琳琳, 吉微, 等. 不同地域大气对中远红外辐射传输的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 33-41.
ZHANG Fang, QI Linlin, JI Wei, et al. Influence of Atmosphere in Different Areas on Middle-Far Infrared Radiation Transmission[J]. *Journal of Optics*, 2017, 37(4): 33-41.
- [10] Otte C, Stoll M. Effect of atmospheric absorption and surface emissivity on the determination of land surface temperature from infrared satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(10): 2025-2037.
- [11] Chedin A, Scott N A, Wahiche C, et al. The Improved Initialization Inversion Method: A High Resolution Physical Method for Temperature Retrievals from Satellites of the TIROS-N Series[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1985, 24(2): 128-143.
- [12] Olsen E T, Fishbein E, Granger S, et al. *AIRS/AMSU/HSB version 5 data release user guide*[M]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2007.
- [13] YANG J, ZHOU J, Göttsche F M, et al. Investigation and validation of algorithms for estimating land surface temperature from Sentinel-3 SLSTR data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo Information*, 2020, 91:102136.
- [14] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN 5: a reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering options: update[C]//*Proc of SPIE*, 2005, 5806: 662-667.
- [15] 贾光亮, 宋雨宸. 基于 MODTRAN 的红外大气透过率计算方法研究[J]. 电子世界, 2018(1): 71-72.
JIA Guangliang, SONG Yuchen. Study on the calculation method of infrared atmospheric transmittance based on MODTRAN[J]. *Electronic World*, 2018(1): 71-72.
- [16] 王文慧, 王高, 张猛. 红外辐射大气透过率影响因素的研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 309-312.
WANG Wenhui, WANG Gao, ZHANG Meng. Study on influence factors of atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Laser and Infrared*, 2017, 47(3): 309-312.
- [17] 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]. 海洋技术学报, 2006, 25(2): 78-83.
DONG Renjie, LI Tongji, CHEN Qinglian, et al. Methods for Calculation of Atmospheric Transmittance and Radiance in Thermal Infrared Band[J]. *Journal of Marine Technology*, 2006, 25(2): 78-83.
- [18] 王春雷, 李晓俊, 杨日杰. 大气辐射传输对红外探测的影响分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(3): 257-260.
WANG Chunlei, LI Xiaojun, YANG Rijie. Analysis of the influence of atmospheric radiation transmission on infrared submarine exploration[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2008, 23(3): 257-260.