

基于红外多通道特征匹配的航空器高度估计方法研究

杨利峰^{1,2,3}, 陈卓³, 陈凡胜⁴, 王建宇^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京市遥感信息研究所, 北京 100011;

4. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083)

摘要: 大型航空器的高度信息在航空安全和空域资源管理等方面有重要意义, 目前仅依靠被动遥感手段难以获取大型航空器高度信息。通过结合大气特性反演和高灵敏度红外探测技术, 天基遥感平台可实现对目标热辐射信息的精确测量, 具备对航空器特征信息定量化观测的潜力。提出了一种基于红外多通道特征匹配的大型航空器估计方法。第一步, 基于大型航空器目标热红外辐射特性, 结合大气辐射传输模型建立热红外谱段的航空器辐射特性观测模型; 第二步, 基于观测模型得到不同大气条件下不同高度、飞行状态下的航空器光谱仿真数据库; 第三步, 提取遥感图像中的目标光谱信息, 利用光谱角匹配法开展飞行高度估计; 最后, 利用仿真数据和SDGSAT-1在轨数据进行验证和分析。结果表明, 对于巡航高度的大型航空器可实现千米量级的估计精度。该方法为被动式天基手段开展航空器高度估计提供了新思路, 具有重要的参考意义。

关键词: 热红外遥感; 高度估计; 光谱曲线匹配; 大型航空器

中图分类号: O432.1

文献标识码: A

The research on aircraft altitude estimate method based on multispectral feature matching in thermal infrared

YANG Li-Feng^{1,2,3}, CHEN Zhuo³, CHEN Fan-Sheng⁴, WANG Jian-Yu^{1*}

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Remote Sensing Information Research Institute, Beijing 100011, China;

4. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The acquisition of aircraft altitude information is crucial for aviation safety and traffic control applications. Currently, it is difficult to obtain the altitude information of aircraft only through passive remote sensing methods. By combining atmospheric parameters retrieval and high-sensitivity infrared detection technology, space-borne remote sensing platforms can achieve accurate measurement of target thermal radiation information and have the potential for quantitative observation of aircraft characteristic information. A method for estimating the altitude of airborne targets based on infrared multi-channel feature matching is proposed in this paper. Firstly, a thermal infrared radiation characteristic observation model of aircraft is established, which is based on the thermal infrared radiation characteristics of large aircraft and atmospheric radiative transfer models. Secondly, based on the observation model, a spectral database of aircraft at different altitudes and flight states under different atmospheric conditions can be obtained by simulating. Thirdly, target spectral information can be extracted from remote sensing images and the altitude information can be estimated with spectral angle matching (SAM). Finally, verification and analysis were completed using simulation data and SDGSAT-1 in-orbit data. The results indicate that the proposed method can achieve kilometer-level estimation accuracy for aircraft at cruising altitude. This method provides a new solution for estimating the altitude of aircraft and has important application potential.

Key words: thermal infrared remote sensing, altitude estimate, spectral curve matching, large aircraft

收稿日期: 2024-05-07, 修回日期: 2024-06-11

Received date: 2024-05-07, revised date: 2024-06-11

作者简介 (Biography): 杨利峰 (1983-), 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 主要研究领域为航天遥感应用. E-mail: lifengyang@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

引言

飞机、飞艇及其他大型航空器的高度信息在民航、气象、环境监测、国土安全等领域都有着重要意义。特别是在航空安全和空域资源管理方面,航空交通管制系统高度依赖于飞机的位置、高度等信息进行管控空域内航空器的飞行行为调度,以确保同一空域的不同航空器处于正确的高度和位置,从而避免空中碰撞等事故的发生。而在国土安全方面,准确的航空器高度信息有助于研判进入领空内未知航空器目标的型号、行为及意图,为指挥员进行作战决策提供参考。而目前航空交通管制系统中通过二次雷达获取到的高度信息来自机载应答机,即高度信息由机上传感器获取,当机上应答机等通信设备异常时,存在严重的安全隐患。因此,开展不依赖机上传感器的航空器高度信息估计技术研究具有十分重要的意义。

目前常见的航空器高度信息估计方法大部分是雷达探测技术的拓展应用。早在1998年,Papazoglou等人^[1]针对超视距雷达提出了基于多个连续驻留电磁匹配场处理的飞机高度估计方法,基于延迟多普勒多径回波中复驻留到驻留形状变化的高度依赖性实现了优于5000英尺的估计精度,并利用高空飞机的雷达高度数据进行了验证。Zhang等人^[2]考虑了超视距雷达中电离层运动对目标高度估计的影响,在静止和时变电离层条件下分别进行目标参数估计,显著降低复杂性的同时提高了目标参数和电离层速度的分辨率和估计精度,对20 000 m飞行高度目标的高度估计精度达到了7.22%。Zhao等人^[3]提出了一种随传播衰减变化的双基地高频地波雷达高度估计模型,利用双基地T/R站和R站接收的信号回波差异进行高度信息求解。但基于雷达探测的航空器高度估计技术,其可探测范围受雷达功率、地球曲率和地形的限制,且随着近年来飞行器雷达隐身技术的发展,实现有效高度信息获取的难度进一步增大。

近年来,基于红外遥感手段的天基目标探测技术逐渐受到研究者的关注。热红外遥感主要探测目标自身的热辐射信息,具有隐蔽性强、全天时条件适应、不受光照条件限制等特点^[4-6]。与雷达、无线电等飞机探测手段相比,热红外遥感属于被动探测手段,在未知目标的发现与搜索救援中更具优

势。随着热红外遥感技术的飞速发展,卫星上使用的红外传感器已逐步具备高灵敏度和较高的空间分辨率,具备一定航空器特征信息定量化观测的潜力^[7]。Zhao等人^[8,9]利用了Landsat-8卫星陆地成像仪短波红外波段反射率产品随海拔高度的变化特征,提出了一种基于阈值分割的飞行飞机检测模型。Li等人^[10,11]基于SDGSAT-1热红外三通道成像仪数据,提出了一种基于概率霍夫变换及YOLO的深度神经网络模型,实现了大幅宽遥感影像中潜在飞行目标的有效检测。

同时在气象遥感领域,研究人员基于云层的红外观测数据开展了云顶高度信息的反演。Schreiner等人^[12]利用云取得温度廓线,通过普朗克函数将卫星接收辐射的等效黑体温度作为云顶温度进而转换成云顶高度。但单红外通道法将云层简化为黑体,没有考虑云的透过率以及云顶大气减弱对精度的影响,仅适用于较高的不透明云层。张岩^[13]基于758~778 nm的氧气A带吸收特性,利用氧气A带的云顶辐射与云顶以上氧气光学厚度的对应关系进行云顶高度的求解。Shenk等人^[14]提出了一种双通道云顶高度计算方法,通过云层对太阳光的反射辐射估计云的覆盖率,利用覆盖率和红外通道测量值得到云的红外辐射和大气廓线数据,结合MORTRAN模型实现了云顶高度的估计。Hamada等人^[15]利用11 μm 左右红外分裂窗通道,基于GMS-5数据与船载雷达数据建立查找表,通过核回归方法实现了云顶高度的反演。对于云顶高度信息的反演,如何提升大气廓线数据和云顶亮温的准确性是提升其精度的关键,目前主流方法的精度都在千米级范围。但考虑航空器与云的辐射特性存在较大的差异性,大型航空器在天基探测视角下可被简化几何尺寸更小的无特征峰灰体,基于特征谱段的云顶高度反演算法对于航空器适应性较差。

综上考虑,提出了一种基于红外多通道特征匹配的航空器飞行高度估计方法,该方法主要基于航空器在不同高度条件下的大气辐射传输特性差异。第一步,基于大型航空器目标热红外辐射特性,结合大气辐射传输模型建立热红外谱段的航空器辐射特性观测模型。第二步,基于观测模型得到不同大气条件下不同高度、飞行状态下的航空器光谱仿真数据库。第三步,提取遥感图像中的目标光谱信

息,利用光谱角匹配法开展飞行高度估计。最后,利用仿真数据和SDGSAT-1在轨数据进行了验证和分析。结果表明,基于红外多通道特征匹配的航空器高度估计结果平均精度可达千米量级,最优精度可达0.33 km,具备一定实际应用的潜力。

1 天基红外航空器高度估计原理

1.1 天基红外探测模型

天基红外探测是基于天基平台搭载的红外遥感器获取遥感影像并从中提取到感兴趣的目标信息,如图1所示,基于天基红外探测手段获取的信息是目标辐射、太阳辐射与大气、背景之间耦合作用的结果,除体现目标本身特征外,还受光照条件、大气路径辐射、大气透过率及遥感器响应特性等因素影响^[16]。在热红外谱段,物体对太阳的反射辐射较弱,遥感器接收到的目标大气顶层(top of atmosphere, TOA)辐亮度主要来源于物体自身热辐射和大气路径辐射,可以表征为,

$$L_{TOA}(\lambda) = L_{Tar}(\lambda) \cdot \tau_{atm} + L_{path}(\lambda) \quad (1)$$

其中, $L_{Tar}(\lambda)$ 是目标辐亮度, τ_{atm} 是大气透过率, $L_{path}(\lambda)$ 是大气路径辐射。

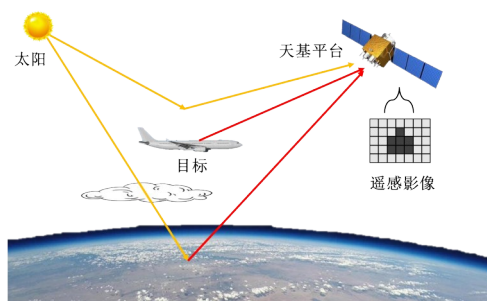


图1 航空器大气顶层辐亮度

Fig. 1 Radiance of aircraft at TOA

1.2 空中目标红外辐射特性

航空器的红外辐射信号主要来自机身蒙皮的自身辐射、散射辐射、发动机高温部件及尾喷焰热辐射等^[17]。对于B-737、A320等为代表的大型航空器,天基观测角度下飞机机翼会对尾焰和尾喷管产生遮挡,因此天基平台能探测到的航空器辐射信号主要来自蒙皮的自身辐射和散射的环境辐射。而对于8~14 μm 的热红外谱段,其散射辐射进一步减弱,此时的航空器可以被等效为朗伯灰体,其自身辐射主要受到机身温度和发射率的影响,光谱辐亮度可以表征为

$$L_{Tar}(\lambda) = \frac{2\varepsilon hc^2}{\lambda^2 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_s}} - 1 \right)} \quad (2)$$

其中, ε 为目标蒙皮发射率,大型航空器机身蒙皮多采用铝粉和酚醛树脂的混合涂层,一般在0.8~0.95左右^[18]; h 为普朗克常数,取 $6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s; c 为光速,取 3×10^8 m/s; λ 为波长; k 为玻尔兹曼常数,取 1.380649×10^{-23} J/K; T_s 为航空器表面温度,由飞行速度、大气环境温度和空气流场共同决定^[19],可以表征为,

$$T_s = T_0 \left(1 + \beta \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) v^2 \right) \quad (3)$$

其中, T_0 为大气环境温度; β 为温度恢复系数; γ 为大气流场的热容比,通常取1.3; v 是目标飞行速度。

如图2(a)表示了大气环境温度为220~280 K时机身温度随速度的变化。图2(b)表示了不同温度机身的辐亮度。

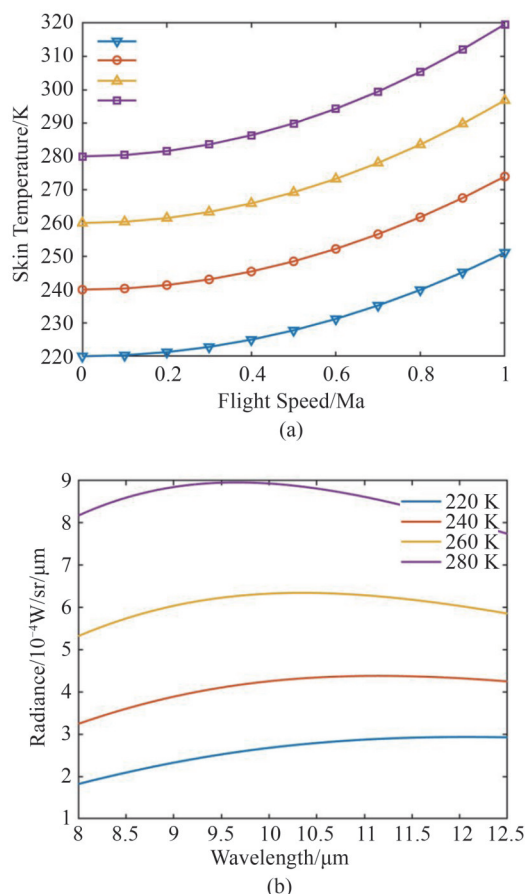


图2 不同环境温度下机身蒙皮辐射特性:(a)不同速度下的机身温度;(b)机身辐亮度

Fig. 2 Radiation characteristics of aircraft skin under different environmental temperature conditions: (a) skin temperature at different speeds; (b) irradiance of aircraft skin

1.3 基于热红外谱段辐射传输特性的航空器高度估计

从公式(1)可以发现,大气对于航空器红外特性的影响不可忽略,且根据大气热力学原理,不同组分、浓度、温度的大气对于辐射的传输衰减作用也不同。根据国际民航机构制定的RVSM空域管理标准,民用航空器通常运行在15 km以下高度。0~15 km在中低高度层属于对流层范围,其大气温度、大气密度整体表现为随高度下降的趋势,且受大气环流作用影响随纬度、季节、昼夜的不同而变化。如图3所示为基于MODTRAN模型得到不同高度的大气透过率和路径辐射。

结合公式(1)~(3)建立航空器红外观测模型,选择输入变量如表1所示,构建不同输入参数的航

空器辐亮度仿真数据库。如图4所示为不同高度条件的航空器归一化TOA辐亮度输出结果,可以看出,不同高度航空器的辐亮度曲线具有明显差异,可基于此特性开展航空器高度信息估计工作。

表1 仿真模型输入参数

Table 1 The parameters of aerial target detection model

变量	数值
波长范围	8~14 μm
光谱分辨率	100 nm
背景环境温度	280 ~300 K
地理位置	高纬度、中纬度、低纬度
季节	夏季、冬季
昼夜	昼间、夜间
目标飞行高度	0~12 km
目标飞行速度	0~1 Ma
目标蒙皮发射率	0.8~0.95

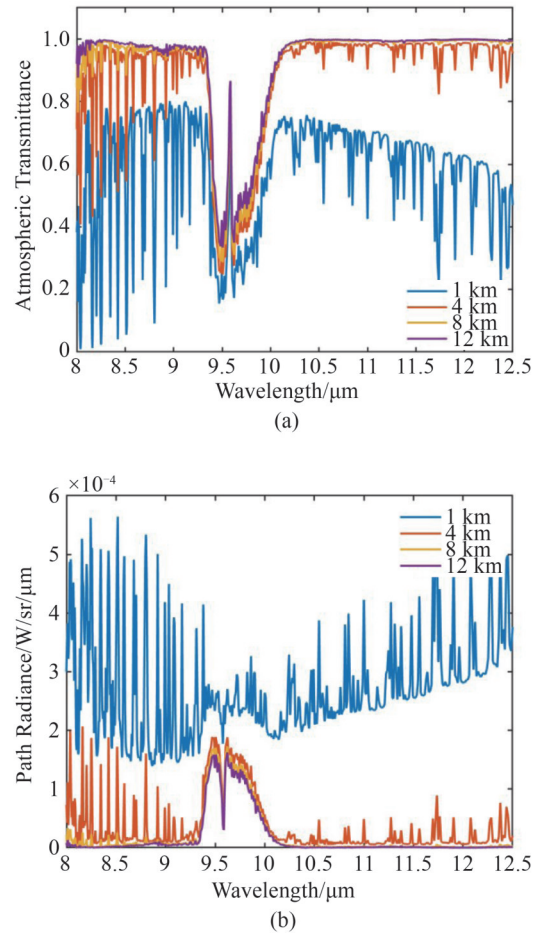


图3 基于MODTRAN模型的大气辐射特性:(a)不同高度大气透过率;(b)不同高度大气路径辐射

Fig. 3 Atmospheric radiation characteristics based on MODTRAN model: (a) atmosphere transmittance at different altitudes; (b) atmosphere path radiance at different altitudes

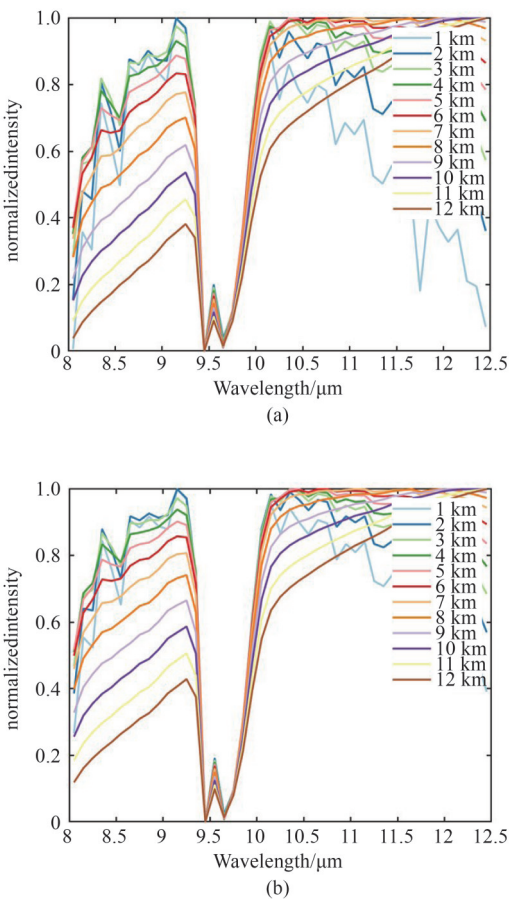


图4 不同高度航空器的TOA光谱曲线(光谱分辨率100 nm):(a)中纬度夏天;(b)热带

Fig. 4 TOA spectral curves of aircraft at different altitudes (spectral resolution of 100nm): (a) mid-latitude summer; (b) tropical

航空器高度信息估计流程如图 5 所示,从多通道遥感数据中提取目标光谱曲线,并进行辐射校正和归一化处理,与建立的航空器辐亮度仿真数据库进行匹配,利用光谱角(spectral angle mapper, SAM)算法计算目标在轨光谱曲线与仿真数据的相似程度,通过查表法得到光谱角最小的仿真数据所对应的目标飞行高度即为高度估计值。

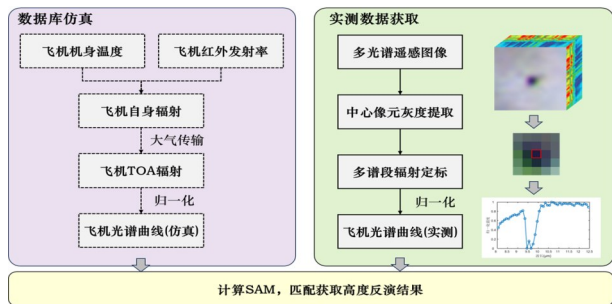


图5 高度估计方法流程图

Fig. 5 Flow chart of altitude estimate method

2 实验分析与讨论

2.1 仿真实验分析

设置仿真实验条件为背景环境温度 290 K、中纬度、夏季、白天,测试数据采用背景与目标特性耦合的天基观测模型^[20]仿真得到不同高度条件的航空器 TOA 辐亮度曲线,并添加 5% 随机高斯分布杂波信号^[21]。结果如图 6 所示,从光谱角匹配结果来看,当控制其他变量时,基于红外多通道特征匹配的高度估计方法得到了较好的输出结果。

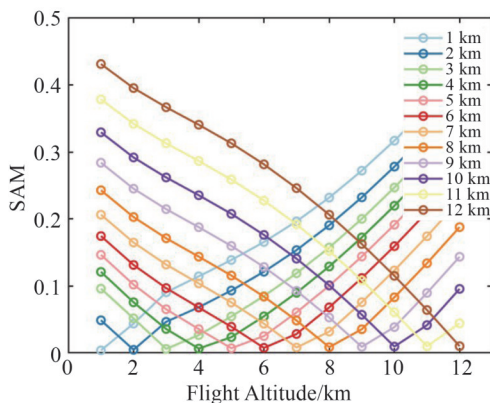


图6 1 km 至 12 km 高度匹配结果

Fig. 6 Matching results of 1 km to 12 km height

同时分析其他影响因素对匹配结果的影响,改变各种影响因素进行 8 km 飞行高度的仿真实验,输

入条件如表 2 所示。高度估计结果如图 7 所示,仿真数据的误差在 1 km 以内。

表 2 仿真目标数据参数

Table 2 Parameters of the simulation target

	背景环境温度	机身发射率	飞行速度	杂波比例	大气模型
Test1	295 K	0.9	0.95 Ma	0	中纬度夏季
Test2	290 K	0.9	0.8 Ma	0	中纬度夏季
Test3	290 K	0.95	0.95 Ma	0	中纬度夏季
Test4	298 K	0.95	0.8 Ma	0	中纬度夏季
Test5	290 K	0.9	0.95 Ma	5%	中纬度夏季
Test6	290 K	0.9	0.95 Ma	0	中纬度冬季

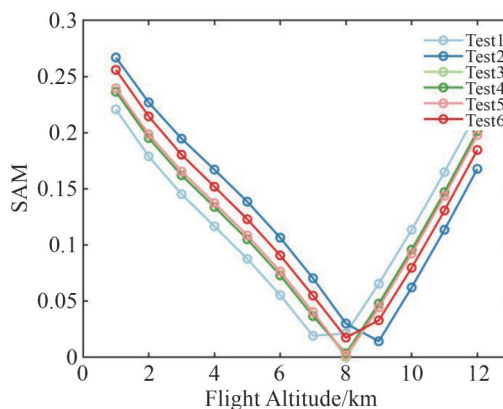


图7 不同条件下 8 km 高度的估计结果

Fig. 7 Estimate results of aircraft at 8 km altitude under different test cases

整体而言,该方法对飞行状态、大气环境的变化表现出了较好的适应性。除上述影响因素外,红外发射率在谱段范围内的变化、飞机飞行角度、云层干扰等因素也会对高度的反演结果产生影响。在未来的研究中,可以考虑引入更多影响因素进行分析,提升高度估计的精确度和鲁棒性。

2.2 在轨数据验证分析

为进一步验证方法的性能,采用 SDGSAT-1 卫星三谱段热红外成像仪在轨遥感数据进行了精度评估,将输入谱段设置为热红外成像仪三个光谱通道,分别为 8~10.5 μm 、10.3~11.3 μm 、11.5~12.5 μm 。将从真实遥感数据中提取到的飞机辐亮度与三通道数据仿真结果进行匹配,预测目标高度。民用航空器对应高度信息为 Flight Radar24 网站查询到的 ADS-B 数据,如图 8 所示,可以看到热红外假彩色图像中与背景呈现负对比度的机身和深色的凝结尾迹。

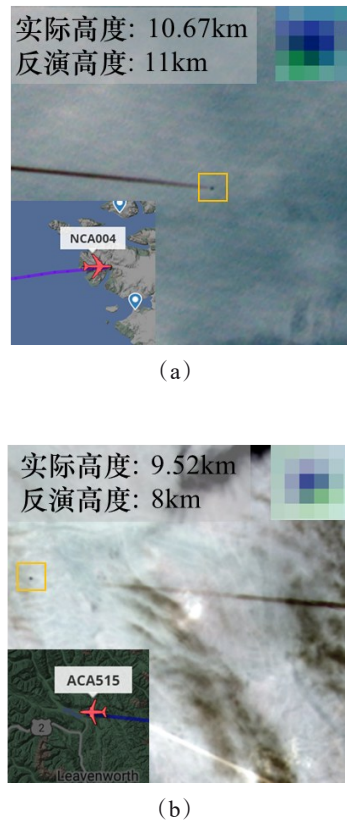


图8 SDGSAT-1 卫星热红外飞机影像

Fig. 8 Thermal infrared aircraft images of SDGSAT-1

高度估计结果与实测高度如表3所示,基于红外多通道特征匹配的航空器高度测量模型的估计结果与真实高度相比平均精度可达千米级别,与国内外主流云层高度测量精度量级相当。

表3 实际高度与基于光谱曲线匹配的模型估计高度结果对比

Table 3 Comparison between the actual altitude of target and the altitude estimate results of the proposed method

	估计高度/km	ADS-B 高度/km	相对偏差/km
Target 1	11	10.67	0.33
Target 2	8	9.52	1.52
Target 3	10	10.97	0.97
Target 4	9	8.37	0.63
Target 5	9	10.06	1.06
Target 6	7	8.59	1.59

3 结论

鉴于由水滴或冰晶组成的云的粒子在 $11\ \mu\text{m}$ 波段和 $12\ \mu\text{m}$ 波段的散射和辐射特性存在差异,且温

度差异和尺寸远大于热红外探测器在空间和温度尺度上的测量灵敏度,目前已有大量的对云顶高度反演的研究,其高度反演精度为千米级。相比于气象云,翼展 $30\sim 70\ \text{m}$ 的航空器目标在应用天基手段探测时,机身在长波红外谱段常常被认为是固定发射率的不透明灰体,没有明显特征峰,并且在热红外图像中,机身通常呈现负对比度(即目标信号比背景信号小),这意味着在天基遥感中,进行航空器目标高度估计面临着极大的挑战。为了应对上述问题,首次针对热红外多谱段数据,充分利用了不同高度航空器的大气传输特性差异,并结合光谱角匹配,提出了一种创新的飞行目标高度估计模型。第一步,建立了热红外航空器辐射特性模型,并结合大气传输模型,获得了不同高度和飞行状态下航空器的大气顶层辐亮度曲线。第二步,构建了在不同大气模型下 $100\ \text{nm}$ 光谱精度的航空器光谱数据库。第三步,提取了目标光谱曲线,并结合光谱角相似度与数据库进行匹配,从而估计目标高度,并详细分析了飞行状态对高度测量的影响。最后,结合热红外实测数据,广泛评估和验证了提出的仿真模型的性能。实验结果表明,论文提出的模型在高度估计方面具有出色的性能。并利用天基在轨遥感数据 SDGSAT-1 三通道热像仪数据进行验证,与真实民航数据相比,基于红外多通道特征匹配的高度估计模型平均精度可达千米级别,与国内外领先的云层高度测量精度相当,最优结果误差仅为 $0.33\ \text{km}$,显示出潜在的实际应用价值。这一研究拓展了天基航空器探测的红外遥感解决方案,为遥感领域提供了有价值的研究新思路。

References

- [1] Papazoglou M, Krolik J L. Multi-dwell matched-field altitude estimation for over-the-horizon radar [C]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998, 4: 2533-2536.
- [2] Zhang Y D, Ahmed A, Himed B. Target altitude estimation in over-the-horizon radar [J]. IEEE Access, 2022, 10: 11260-11273.
- [3] Zhao K, Yu C, Zhou G, et al. Simultaneous altitude and RCS estimation with propagation attenuation in bistatic HF-SWR [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 4: 1-8.
- [4] Yongtan L. Target detection and tracking with a high frequency ground wave over-the-horizon radar [C]. Proceedings of International Radar Conference, IEEE, 1996: 29-33.
- [5] Chen Z, Schwartz M J, Bhartia P K, et al. Mesospheric and upper stratospheric temperatures from OMPS-LP [J].

- Earth and Space Science, 2023, 10(5): e2022EA002763.
- [6] Piontek D, Bugliaro L, Müller R, et al. Multi-channel spectral band adjustment factors for thermal infrared measurements of geostationary passive imagers [J]. Remote Sensing, 2023, 15(5): 1247.
- [7] Hu Z, Zhu M, Wang Q, et al. SDGSAT-1 TIS prelaunch radiometric calibration and performance [J]. Remote Sensing, 2022, 14(18): 4543.
- [8] Zhao F, Xia L, Kylling A, et al. Detection flying aircraft from Landsat 8 OLI data [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2018, 141(8): 176–184.
- [9] Zhao F, Xia L, Kylling A. Mapping global flying aircraft activities using Landsat 8 and cloud computing [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2022, 184: 19–30.
- [10] Li L, Zhou X, Hu Z, et al. On-orbit monitoring flying aircraft day and night based on SDGSAT-1 thermal infrared dataset [J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 298: 113840.
- [11] Li L, Jiang L, Zhang J, et al. A complete YOLO-based ship detection method for thermal infrared remote sensing images under complex backgrounds [J]. Remote Sensing, 2022, 14(7): 1534.
- [12] Schreiner A J, Schmit T J, Menzel W P. Observations and trends of clouds based on GOES sounder data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2001, 106 (D17): 20349–20363.
- [13] Zhang Y. Research on inversion of cloud and aerosol parameters by oxygen A absorption band [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
张岩. 氧气A吸收带反演云、气溶胶参数研究[D]. 中国科学院大学, 2011.
- [14] Shenk W E, Curran R J. A multi-spectral method for estimating cirrus cloud top heights [J]. J. appl. Meteor., 1973, 12(7): 1213–1216.
- [15] Hamada A, Nishi N, Iwasaki S, et al. Cloud type and top height estimation for tropical upper-tropospheric clouds using GMS-5 split-window measurements combined with cloud radar measurements [J]. Sola, 2008, 4(1): 57–60.
- [16] Hu Jian-Ming, Qiao Kai, Zhi Xi-Yang, et al. Influence of complex environment on the detectability of weak and small aerial target under space-based observation mode [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2019, 38(3): 351–357.
胡建明, 乔凯, 智喜洋, 等. 天基观测条件下复杂环境对空中弱小目标可探测性的影响 [J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(3): 351–357.
- [17] Mao Hong-Xia, Liu Zhong-Ling, Tian Yan. Infrared radiation and target recognition [M]. Science Press, 2022, 94–95.
毛宏霞, 刘忠领, 田岩. 红外辐射与目标识别[M]. 科学出版社, 2022, 94–95.
- [18] Ma Jun, Wen Mao-Xing, Zhou Feng. Skin radiation measurement method of high altitude aircraft based on long wave infrared light [J]. Infrared Technology, 2021, 43 (3): 284–291.
马骏, 温茂星, 周峰. 基于长波红外的高空飞机蒙皮辐射测量方法研究 [J]. 红外技术, 2021, 43 (3): 284–291.
- [19] Zhou X, Ni X, Zhang J, et al. A novel detection performance modular evaluation metric of space-based infrared system [J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54 (5): 274.
- [20] Li J, Zhao H, Gu X, et al. Analysis of space-based observed infrared characteristics of aircraft in the air [J]. Remote Sensing, 2023, 15(2): 535.
- [21] Yu S, Ni X, Li X, et al. Real-time dynamic optimized band detection method for hypersonic glide vehicle [J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 121: 104020.