

FY-3D 卫星 MERSI-II 热红外通道劈窗仿真计算简化方法

吴文菲^{1,2}, 李正强^{2,3}, 姚 前^{2,3}, 周士凯^{2,4}, 许 华², 陈震霆⁵, 江启峰⁶

(1. 西华大学 能源与动力工程学院 流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039;

2. 中国科学院空天信息创新研究院 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 南京工业大学 测绘科学与技术学院, 江苏 南京 211816;

5. 昆明学院 信息工程学院, 云南 昆明 650214;

6. 西华大学 航空航天学院 流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039)

摘要: 劈窗算法广泛应用于多种卫星载荷的地表温度反演。在拟合劈窗算法系数时, 大量的数据迭代模拟往往非常耗时、效率低下。因此, 开发一种高效率的劈窗仿真计算简化方法具有重要意义。本文首先利用 MODTRAN 模拟分析背景参数的变化对总辐亮度的影响, 然后在 FY-3D MERSI-II 两个相邻的热红外通道下, 对关键参数与总辐亮度的关系进行模拟分析, 并探究关键参数耦合情形下总辐亮度的变化规律。通过仿真结果可知, 在 MERSI-II 热红外通道下, 地表温度的变化对总辐亮度的影响大于地表发射率; 大气水汽含量对总辐亮度的影响程度随着地表发射率和地表温度的增大而增大, 而地表发射率和地表温度对总辐亮度的影响程度随着大气水汽含量的增大而减小; 在确定劈窗算法系数时, 可以通过缩小大气水汽含量的取值范围来减少仿真次数, 从而提高仿真效率。当地表温度在 300~320 K 时, 大气水汽含量的取值范围为 0.5~5.5 g/cm²; 当地表温度在 270~300 K 时, 大气水汽含量的取值范围缩小为 0.5~4.0 g/cm²。节省的仿真次数占总次数的比例为 18.23%, 仿真时间缩短了 26 min。简化前后方案的劈窗系数拟合和绝对差值计算结果表明, 简化方案对拟合结果的影响较小。

关键词: 热红外; MODTRAN; 仿真计算; 劈窗算法

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2025)04-0410-11

Simplified Calculation Method of FY-3D Satellite MERSI-II Thermal Infrared Channel Split-Window Simulation

WU Wenfei^{1,2}, LI Zhengqiang^{2,3}, YAO Qian^{2,3}, ZHOU Shikai^{2,4}, XU Hua², CHEN Zhenting⁵, JIANG Qifeng⁶

(1. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

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

4. College of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

5. School of Information Engineering, Kunming University, Kunming 650214, China; 6. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery of Ministry of Education, School of Aeronautics and Astronautics, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The split-window algorithm has been widely applied for surface temperature inversion of various satellite payloads. The iterative simulation of large datasets during the fitting of split-window algorithm coefficients is often time-consuming and inefficient. Therefore, it is important to develop a highly efficient simplification method for split-window simulation computations. MODTRAN was to simulate and analyze the impact of variations in background parameters on total radiance. Subsequently, we performed a simulation analysis of the relationship between key parameters and total radiance under two adjacent thermal infrared channels of FY-3D MERSI-II, exploring the variation patterns of total radiance under different coupling scenarios of these key parameters. Simulation results reveal that under the MERSI-II

收稿日期: 2024-09-03; 修订日期: 2024-10-14.

作者简介: 吴文菲 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事红外定量遥感方面的研究。E-mail: wuwenfei2024@163.com。

通信作者: 李正强 (1977-), 男, 研究员, 博士, 主要从事大气遥感、环境遥感方面的研究。E-mail: lizg@radi.ac.cn。

thermal infrared channels, changes in land surface temperature have a greater impact on total radiance than surface emissivity. The effect of the atmospheric water vapor content concentration on the total radiance increases with an increase in both the land surface emissivity and land surface temperature, whereas the influence of the land surface emissivity and land surface temperature on the total radiance decreases as the atmospheric water vapor content concentration increases. When determining the coefficients for the split-window algorithm, narrowing the range of the atmospheric water vapor content concentration can reduce the number of simulations required, thereby enhancing the efficiency. For land surface temperatures ranging from 300 to 320 K, the atmospheric water vapor content concentration should be within 0.5 to 5.5 g/cm²; for temperatures ranging from 270 to 300 K, this range narrows to 0.5 to 4.0 g/cm². The saved simulation runs account for 18.23% of the total number of runs, which reduces the simulation time by 26 min. A comparison of the split-window coefficient fitting and absolute difference calculation results before and after simplification shows that the simplified scheme has minimal impact on the fitting outcomes.

Key words: thermal infrared, MODTRAN, simulation calculation, split-window algorithm

0 引言

地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 是反映地表与大气相互作用过程的关键因子, 也是描述地表能量平衡与水平衡的重要参数^[1]。它被广泛应用于气候变化^[2]、干旱监测^[3]、城市热岛效应^[4]和地质勘探^[5]等研究领域。遥感技术是环境监测的重要手段, 它具有成本低、效率高和覆盖范围广等优点。在遥感领域中, 激光雷达和热红外是两种不同的技术途径。近年来, 激光雷达凭借其主动发射、实时性强、测量精度高以及时空分辨率高等特点得到了快速发展。郭圆新等人基于直接散射光谱的激光雷达, 通过直接测量能量维度和光谱维度多特征信息进行多环境要素的高精度反演^[6]; 张璐等人在星载激光雷达探测二氧化碳及精度验证方面开展了相关研究, 得出主动比被动探测精度更高、时空覆盖更广而且可以昼夜不间断观测等结论^[7]。由此可见, 激光雷达主要用于大气和海洋环境要素的探测。而热红外遥感主要针对地表温度的反演, 它不会破坏地表热力学状态, 并且相较于传统的地面测量方法, 它还具有空间连续性、覆盖面广、精度高和可重复测量等优点^[8]。因此, 热红外遥感是获取区域和全球尺度地表温度的主要手段^[9], 也是获取重要空间信息和高时空分辨率地表温度的一种新途径。

随着热红外遥感的发展, 学者们提出了很多地表温度反演的方法, 例如单通道算法^[10]、劈窗 (Split-Window, SW) 算法^[11]、温度和发射率分离方法^[12]等。其中, 劈窗算法基于两个相邻热红外通道水汽吸收的差异获取地表温度, 并且不需要实时大气廓线。1975年, McMillin 最早提出劈窗算法, 用于 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 卫星的两个相邻热红外通道反演海表温度^[13]。在劈窗

算法成功应用于海表温度反演后, 学者们开始将其扩展到地表温度的反演。Price 在 1984 年最早将劈窗算法用于地表温度反演^[14]。1987 年, Becker 从理论上论证了利用劈窗算法求解地面气温的可能性, 并给出了对地表温度反演的影响因素^[15]。这些影响因素是劈窗算法的关键参数, 也是仿真计算的主要变量。2008 年, Tang 基于通用劈窗算法, 对观测天顶角 (View Zenith Angle, VZA)、大气水汽含量 (Water Vapor Content, WVC)、地表温度和地表发射率 (Land Surface Emissivity, LSE) 进行仿真, 得到算法系数, 用于 FY-2C 的地表温度反演^[16]。2015 年, Chen 等人提出了一种基于 Landsat 8 反演地表温度的劈窗算法, 通过协方差-方差比法得到大气水汽含量子区间, 再根据这些子区间确定算法系数, 这种算法精度优于 1.0 K^[17]。2021 年, 程元良等人分别对大气水汽含量、地表温度和地表发射率进行仿真计算, 确定算法系数, 用于 FY-3D 数据的地表温度反演^[18]。

由此可见, 在劈窗算法反演地表温度的相关研究中, 学者们在获取劈窗算法系数时, 会对背景参数进行大量的数据模拟。本研究在热红外谱段上, 通过 MODTRAN 模拟分析大气参数和地表参数对总辐亮度的影响, 并在 FY-3D MERSI-II 的热红外通道下 (中心波长分别为 10.8 μm 和 12.0 μm 的 24 和 25 通道), 模拟分析劈窗算法关键参数对总辐亮度的影响, 并对关键参数耦合情况下的总辐亮度变化进行研究, 提出了一种劈窗仿真计算简化方法, 并对简化前后的方案进行对比分析。

1 研究原理与内容

1.1 热红外辐射传输原理

搭载热红外传感器的卫星接收到大气层顶辐射亮度的过程如图 1 所示。在热红外中, 测量的大气

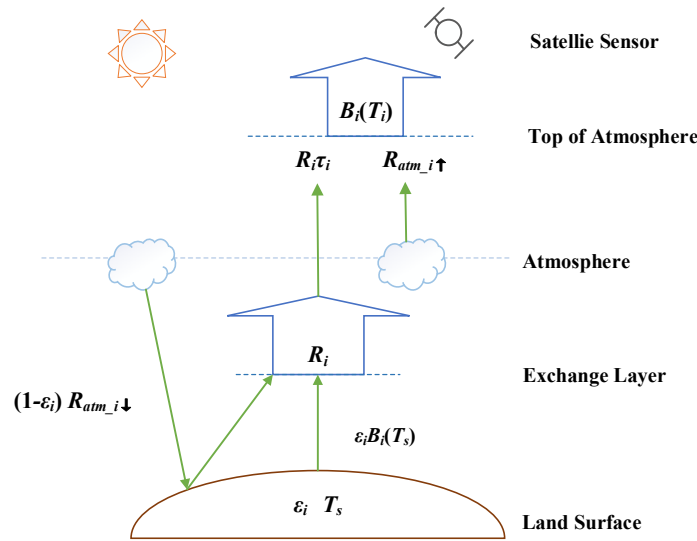


图1 热红外大气辐射传输过程示意图^[19]

Fig. 1 Illustration of atmospheric radioactive transfer process in the thermal infrared spectrum^[19]

层顶辐射亮度包括大气上行热辐射、经地表反射和大气作用的大气下行热辐射以及经过大气作用的地表发射辐射。

基于热力学平衡下的无云大气，根据辐射传输理论，卫星传感器在热红外波段所接收到的大气层顶辐射亮度 $B_i(T_i)$ 表达式为：

$$B_i(T_i) = R_i \tau_i + R_{atm_i \uparrow} \quad (1)$$

式中： B 表示普朗克黑体辐射定律； T_i 表示 i 通道的亮度温度； $R_i \tau_i$ 为 i 通道经过大气作用后的离地辐射，其中 τ_i 为 i 通道的大气透射率； $R_{atm_i \uparrow}$ 为 i 通道的大气上行热辐射。其中，离地辐射由地表自身的发射辐射和地表反射的大气下行热辐射共同表征，则 $B_i(T_i)$ 可以写成：

$$B_i(T_i) = [\epsilon_i B_i(T_s) + (1 - \epsilon_i) R_{atm_i \downarrow}] + R_{atm_i \uparrow} \quad (2)$$

式中： T_s 是物体表面温度， $B_i(T_s)$ 表示地表温度为 T_s （单位为 K）时的黑体辐射亮度； ϵ_i 为 i 通道的地表发射率； $R_{atm_i \downarrow}$ 为 i 通道的大气下行热辐射。

1.2 劈窗算法原理

Wan^[20]等人改进的通用劈窗算法表达式如下：

$$\begin{cases} LST = a_0 + \left(a_1 + a_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + a_3 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{T_i + T_j}{2} + \\ \quad \left(a_4 + a_5 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + a_6 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{T_i - T_j}{2} + a_7 (T_i - T_j) \\ \epsilon = \frac{\epsilon_i + \epsilon_j}{2} \\ \Delta \epsilon = \epsilon_i - \epsilon_j \end{cases} \quad (3)$$

式中： T_i 与 T_j 分别是 i 通道与 j 通道的大气层顶亮温； ϵ_i 和 ϵ_j 是两个通道的地表发射率； ϵ 是两个通道的地表发射率均值； $\Delta \epsilon$ 是两个通道的地表发射率差值； $a_0 \sim a_7$ 表示算法系数。式(3)中的未知参数有大气层顶亮温、地表发射率和劈窗系数，其中劈窗系数的求解式为：

$$a_k = f_k(g_i, g_j, \epsilon_i, \epsilon_j, WVC, VZA) \quad (4)$$

式中： a_k ($k=0 \sim 7$) 为劈窗系数； g_i 和 g_j 为通道响应函数。从式(4)可看出， a_k 主要依赖于观测天顶角、大气水汽含量和地表发射率。

劈窗算法反演地表温度时，最关键一步是拟合劈窗系数。首先，通过大气廓线数据库筛选出晴空无云的大气廓线，并根据筛选的大气廓线获取大气底层温度 T_0 和大气水汽含量的取值范围。然后，通过 T_0 的取值范围和温度阈值，确定地表温度的取值范围。接着，利用地物波谱库数据，通过卷积公式计算得到地表发射率。将观测天顶角、通道响应函数和大气廓线数据输入 MODTRAN，得到大气量 (τ_i 、 $R_{atm_i \uparrow}$ 、 $R_{atm_i \downarrow}$)。之后，根据式(2)计算通道辐亮度，再通过普朗克函数逆变换得到通道亮温。由此，通过大量的仿真计算，构建出不同参数与对应通道亮温的数据库。最后，通过式(3)，利用最小二乘法拟合出劈窗系数。

1.3 研究内容

本文使用的数据源为 MODTRAN 5.2 输出的仿真数据，采用的方法为控制变量法。在热红外谱段上，对背景参数与总辐亮度的关系进行模拟分析；在 FY-3D MERSI-II 的热红外通道下，仿真分析劈窗算法的关键参数对总辐亮度的影响。主要过程如下：

①在对背景参数的影响进行模拟时，首先根据常见大气和地表状态对 MODTRAN 预设一组具有代表性的输入值。然后，将需要分析的背景参数作为单一变量，在一定范围内从小到大均匀地改变其数值，而其他参数均根据预设值进行设置。接着，在热红外谱段上，模拟该参数在不同观测天顶角下的总辐亮度，以分析参数变化对总辐亮度的影响；

②为进一步定量描述该参数变化对总辐亮度影响的差异，需要分析总辐亮度的相对变化百分比，将其记作 γ （见下式）。首先，选取该参数取值范围内的最小值所对应的总辐亮度作为基准值，再分别计算该参数其他数值所对应的总辐亮度与基准值的相对变化百分比^[21]。

$$\gamma = \frac{R_i - R_0}{R_0} \times 100\%$$

(5)

式中： R_i 为参数在某一数值的总辐亮度； R_0 为选取的基准值。

③在 FY-3D MERSI-II 的热红外通道下，分别对劈窗算法关键参数单变量和耦合情况下的总辐亮度变化进行仿真分析，从中得到劈窗仿真计算简化的方法，并将简化前后的方案进行对比分析。

2 热红外背景参数影响分析

该部分将大气参数和地表参数对总辐亮度的影响进行模拟分析。其中大气参数包括大气水汽含量和大气廓线，地表参数包括地表温度和地表发射率。根据常见的地表和大气状态预设 MODTRAN 的输入值，具体参数设置如表 1 所示。后文未提及的背景

参数设置默认与表 1 的设置保持一致。

2.1 大气参数影响分析

1) 大气水汽含量的影响

大气水汽含量参数设置为： $0.5 \sim 5.5 \text{ g/cm}^2$ ，步长 0.5 g/cm^2 ，共 11 组，每组分别在上述 13 组观测天顶角下进行仿真，后文的背景参数在仿真时亦如此。图 2(a)展示了在观测天顶角为 10° 时，大气水汽含量变化对总辐亮度影响的仿真结果。从图中可以看出，随着大气水汽含量的增大，总辐亮度越小，这是水汽的吸收作用导致的。总辐亮度在 $750 \sim 975 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1075 \sim 1250 \text{ cm}^{-1}$ 区间内“震荡”变化。从图 2(b)可以看出，在整个热红外谱段上，相对变化百分比的绝对值随着大气水汽含量的增大而增大。尤其是在 $750 \sim 950 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1075 \sim 1250 \text{ cm}^{-1}$ 区间上，变化更加显著，还伴随着剧烈波动，则将该区间视为大气水汽含量的敏感区间。从仿真结果可知，相对变化百分比的绝对值最大可达 33% 左右（大气水汽含量为 5.5 g/cm^2 时）。综上所述，大气水汽含量对总辐亮度有巨大的影响。

2) 大气廓线的影响

在 MODTRAN 中分别取 6 种标准大气廓线进行模拟，包括热带大气（tropical atmosphere）、中纬度夏季大气（mid-latitude summer）、中纬度冬季大气（mid-latitude winter）、亚北极区夏季大气（sub-arctic summer）、亚北极区冬季大气（sub-arctic winter）和 1976 年美国标准大气（1976 US standard atmosphere），简称分别为 TA、MLS、MLW、SAS、SAW 和 US。

表 1 辐射传输计算的参数设置

Table 1 Parameter settings for radioactive transfer calculation

Parameters	Setting
View zenith angle/(°)	0–60, interval 5
Atmospheric profile	Mid-Latitude Summer (45 North Latitude)
Water vapor content/(g/cm ²)	2.5
O ₃ column concentrations/(g/cm ²)	0.0005
CO ₂ mixture ratio/ppmv	420
Surface temperature/K	300
Surface emissivity	0.98
Wavenumber range/(cm ⁻¹)	714–1250
Digital elevation model/km	0.002
Sensor altitude/km	700

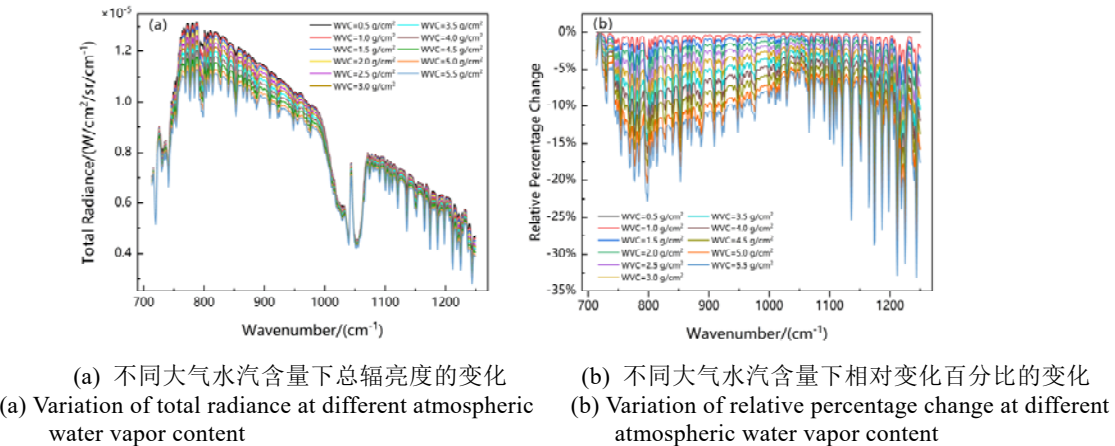


图 2 不同大气水汽含量下的总辐亮度和相对变化百分比

Fig. 2 The total radiance and the relative percentage change at different atmospheric water vapor content

在大气水汽含量的敏感区间中，随机选取 4 个波数：828 cm⁻¹、855 cm⁻¹、909 cm⁻¹ 和 1216 cm⁻¹，分析大气廓线对总辐亮度的影响，如图 3 所示。从图中可以看出，在同一波数下，不同大气廓线的总辐亮度具有显著的差别，冬季的相对变化百分比和总辐亮度明显高于夏季。在不同波数下，相对变化百分比与总辐亮度的变化趋势相同，最小值对应的大气廓线均为 SAS，最大值对应的大气廓线均为 SAW，并且每个波数的相对变化百分比峰值均达到了 9% 左右。

2.2 地表参数影响分析

1) 地表温度的影响

将地表温度参数设置为：285~305 K，步长 5 K，共 5 组。图 4(a)展示了在观测天顶角为 10°时，不同地

表温度对总辐亮度影响的仿真结果。从图中可以看出，总辐亮度随着地表温度的升高而增大，特别是在 800~1000 cm⁻¹ 和 1075~1200 cm⁻¹ 区间上，不同地表温度对总辐亮度的影响更加显著。在图 4(b)中，相对变化百分比“震荡”变化，在 800~1000 cm⁻¹ 和 1100~1250 cm⁻¹ 区间内变化较大。当地表温度在 1000 cm⁻¹ 附近时，相对变化百分比最高可达 30% 左右（地表温度为 305 K 时）；在 1200 cm⁻¹ 附近，相对变化百分比最高可接近 40%（地表温度为 305 K 时）。从图中可以看出，随着地表温度的升高，相对变化百分比越大。综上所述，地表温度对总辐亮度具有显著的影响。

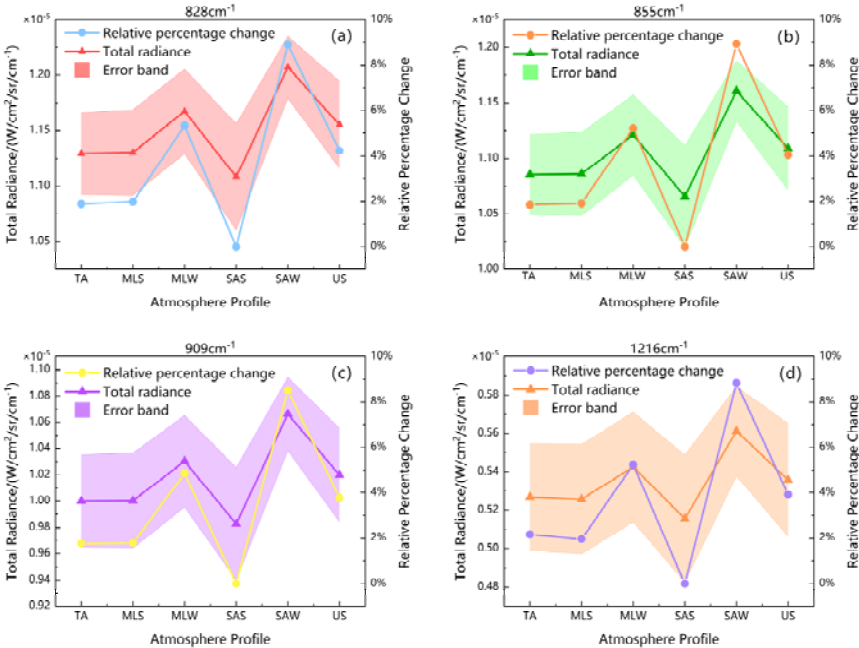


图 3 不同大气廓线下总辐亮度与相对变化百分比的双 y 轴图：(a)、(b)、(c)和(d)分别表示 828、855、909 和 1216 cm⁻¹ 处总辐亮度与相对变化百分比随不同大气廓线的变化

Fig. 3 Dual y-axis plots of total radiance and relative percentage change under different atmospheric profiles: (a), (b), (c) and (d) respectively represent the changes of total radiance and relative percentage change at 828, 855, 909, and 1216 cm⁻¹ with different atmospheric profiles

2) 地表发射率的影响

将地表发射率参数设置为: 0.70~0.95, 步长 0.05, 共 5 组。图 5(a)展示了在观测天顶角为 10° 时, 不同地表发射率对总辐亮度影响的仿真结果。从图中可看出, 在 $800\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 和 $1075\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 区间上, 地表发射率的变化对总辐亮度的影响更加显著。并且, 总辐亮度随着地表发射率的增大而增大。在图 5(b)中, 不同地表发射率下的相对变化百分比变化呈现“双拱形”特征, 并且随着地表发射率的增大, 相对变化百分比也在逐渐增大。尤其是在 $800\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 和 $1070\sim 1250\text{ cm}^{-1}$ 区间上这种变化更加显著, 并存在较大的波动, 则将该区间视为地表发射率的敏感区间。地表发射率在前一段敏感区间内, 相对变化百分比峰值接近于 20% (地表发射率为 0.95 时); 在后一段敏感区间内的 1125 cm^{-1} 附近, 相对变化百分比最高可达 22.5% 左右 (地表发射率为 0.95 时)。综上所述, 地表发射率对总辐亮度的影响很大。

3 卫星热红外通道总辐亮度模拟分析

由前文可知, 劈窗算法的关键参数是大气水汽含量、地表温度和地表发射率。在 FY-3D MERSI-II 的 24 和 25 通道下, 分别对关键参数单变量和耦合情况下的总辐亮度变化进行研究。

3.1 背景参数单变量分析

1) 大气水汽含量对总辐亮度的影响

在 MERSI-II 热红外通道下, 对大气水汽含量与总辐亮度的关系进行仿真分析。其中, 每个散点代表 13 组观测天顶角计算得到的均值, 误差越大, 离散程度越高, 总辐亮度就越容易受到观测天顶角变化产生的影响。图 6 展现出大气水汽含量与总辐亮度呈二次拟合的关系, 斜率的绝对值随着大气水汽含量的增大而增大。

2) 地表温度对总辐亮度的影响

在 MERSI-II 热红外通道下, 对地表温度与总辐亮度的关系进行仿真分析。图 7 展现出地表温度与总辐亮度呈二次拟合的关系, 并且斜率随着地表温度的增大而增大, 但是变化程度较小。

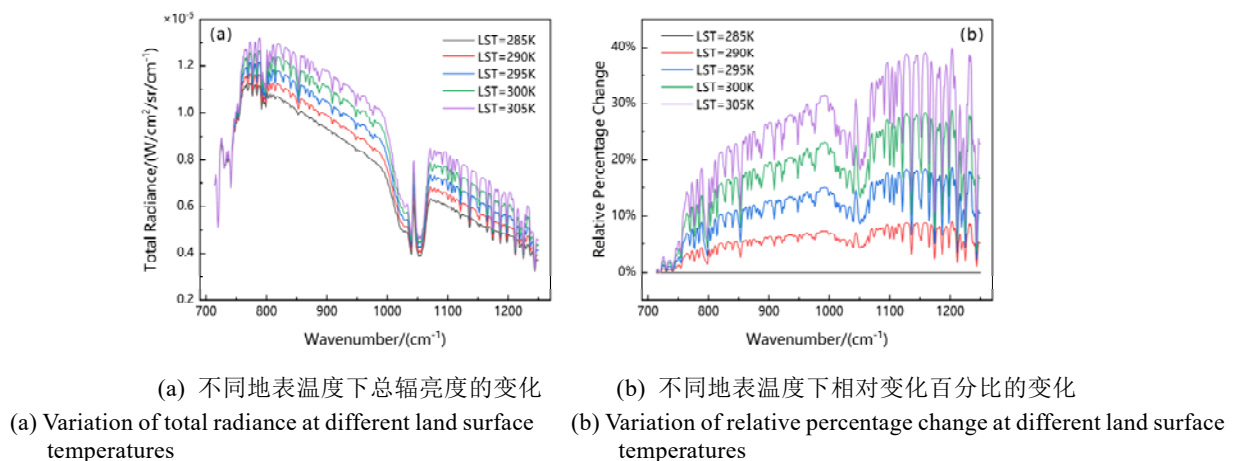


图 4 不同地表温度下的总辐亮度和相对变化百分比

Fig.4 The total radiance and the relative percentage change at different land surface temperature

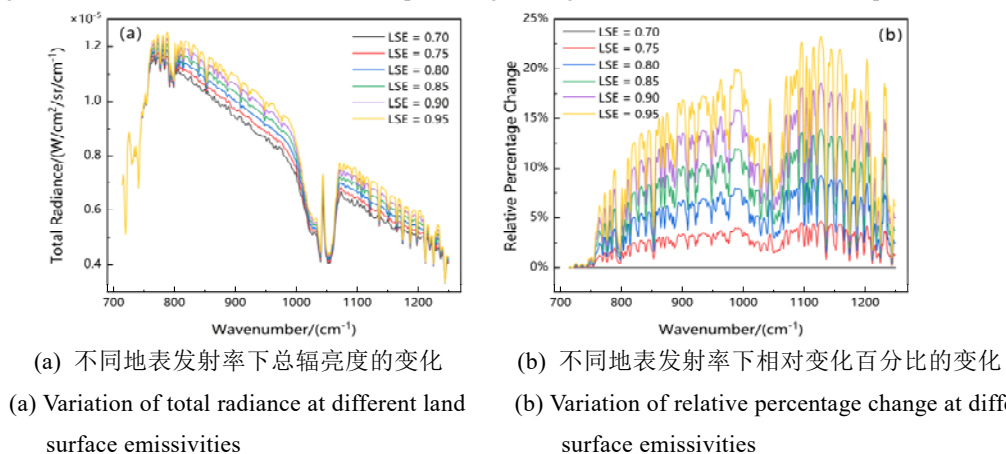
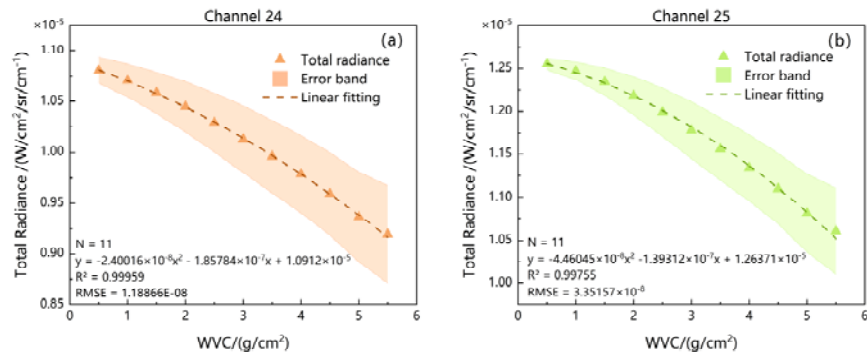


图 5 不同地表发射率的总辐亮度和相对变化百分比

Fig. 5 The total radiance and the relative percentage change at different land surface emissivities



(a) 通道 24 处的拟合结果
(a) The fitting result on channel 24
(b) 通道 25 处的拟合结果
(b) The fitting result on channel 25
图 6 在 MERSI-II 热红外通道下大气水汽含量与总辐亮度的关系

Fig. 6 Relationship between atmospheric water vapor content and total radiance on the MERSI-II thermal infrared channel

3) 地表发射率对总辐亮度的影响

在 MERSI-II 热红外通道下,对地表发射率与总辐亮度的关系进行仿真分析。从图 8 中可以看出,地表发射率与总辐亮度的关系高度线性化,不同的地表发射率对总辐亮度的影响程度基本相同。25 通道的误差变化幅度大于 24 通道,说明在 25 通道下,总辐亮度更容易受到观测天顶角的影响。

3.2 背景参数耦合分析

1) 地表温度与地表发射率的耦合分析

在 MERSI-II 热红外通道下,模拟地表发射率和地表温度耦合时总辐亮度的变化情况。其中,地表温度取值范围为 270~320 K,步长为 0.5 K;地表发射率取值为 0.90~1.00,步长为 0.001。仿真结果如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,24 和 25 通道的仿真结果基本一致。随着地表发射率的增大,总辐亮度有微弱的增大。不同地表温度对总辐亮度的影响较大,并且总辐亮度随着地表温度的增大而增大。无论地表发射率如何变化,不同地表温度对总辐亮度的影响程度基本相同。

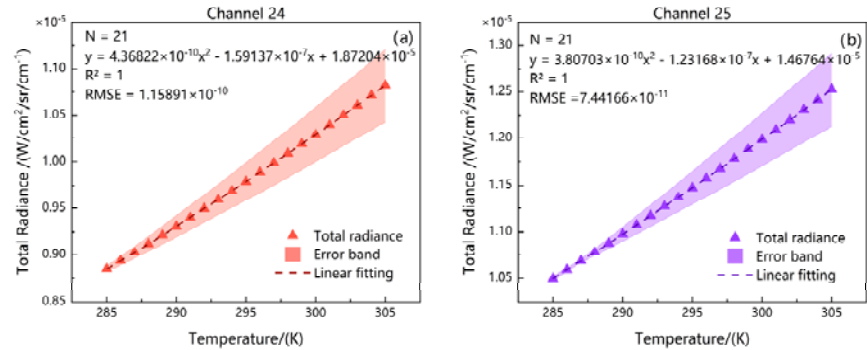
2) 大气水汽含量与地表发射率的耦合分析

在 MERSI-II 热红外通道下,模拟大气水汽含量和地表发射率耦合时总辐亮度的变化情况。其中,大气水汽含量取值范围为 0.5~5.5 g/cm²,步长为 0.05 g/cm²;地表发射率取值为 0.90~1.00,步长为 0.001。仿真结果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,24 和 25 通道的仿真结果基本一致。总辐亮度随着大气水汽含量的增大而减小,随着地表发射率的增大而增大。大气水汽含量对总辐亮度的影响程度随着地表发射率的增大而增大,而地表发射率对总辐亮度的影响程度随着大气水汽含量的增大而减小,当大气水汽含量大于 4.0 g/cm² 时,地表发射率的变化对总辐亮度的影响微乎其微。

3) 大气水汽含量与地表温度的耦合分析

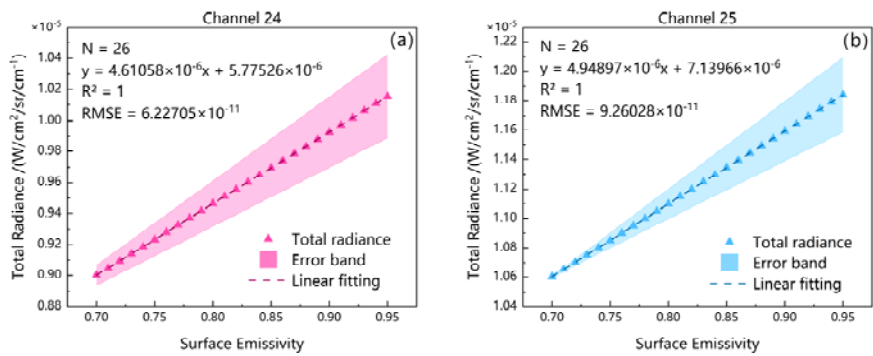
在 MERSI-II 热红外通道下,模拟大气水汽含量和地表温度耦合时总辐亮度的变化情况。其中,大气水汽含量取值范围为 0.5~5.5 g/cm²,步长为 0.05 g/cm²;地表温度取值范围为 270~320 K,步长为 0.5 K。仿真结果如图 11 所示。



(a) 通道 24 处的拟合结果
(a) The fitting result on channel 24
(b) 通道 25 处的拟合结果
(b) The fitting result on channel 25

图 7 在 MERSI-II 热红外通道下地表温度与总辐亮度的关系

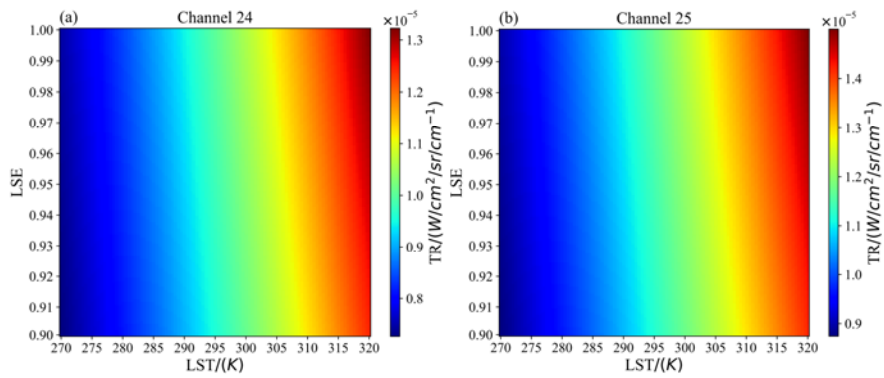
Fig. 7 Relationship between land surface temperature and total radiance on the MERSI-II thermal infrared channel



(a) 通道 24 处的拟合结果
(b) 通道 25 处的拟合结果
(a) The fitting result on channel 24
(b) The fitting result on channel 25

图 8 在 MERSI-II 热红外通道下地表发射率与总辐亮度的关系

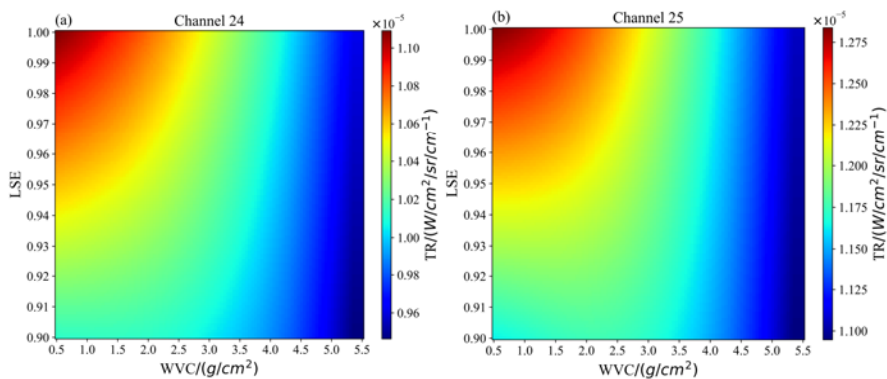
Fig. 8 Relationship between land surface emissivity and total radiance on the MERSI-II. thermal infrared channel



(a) 通道 24 处的总辐亮度热力图
(b) 通道 25 处的总辐亮度热力图
(a) The heatmap of total radiance at channel 24
(b) The heatmap of total radiance at channel 25

图 9 地表温度与地表发射率耦合作用下的总辐亮度热力图

Fig. 9 The heatmaps of total radiance under coupling of land surface temperature and land surface emissivity



(a) 通道 24 处的总辐亮度热力图
(b) 通道 25 处的总辐亮度热力图
(a) The heatmap of total radiance at channel 24
(b) The heatmap of total radiance at channel 25

图 10 大气水汽含量与地表发射率耦合作用下的总辐亮度热力图

Fig. 10 The heatmaps of total radiance under coupling of atmospheric water vapor content and land surface emissivity

从图 11 中可以看出，24 和 25 通道的仿真结果基本一致。大气水汽含量对总辐亮度的影响程度随着地表温度的增大而增大，而地表温度对总辐亮度的影响程度随着大气水汽含量的增大而减小，当地表温度低于 300 K 时，大气水汽含量的变化对总辐亮度的影响程度显著降低。

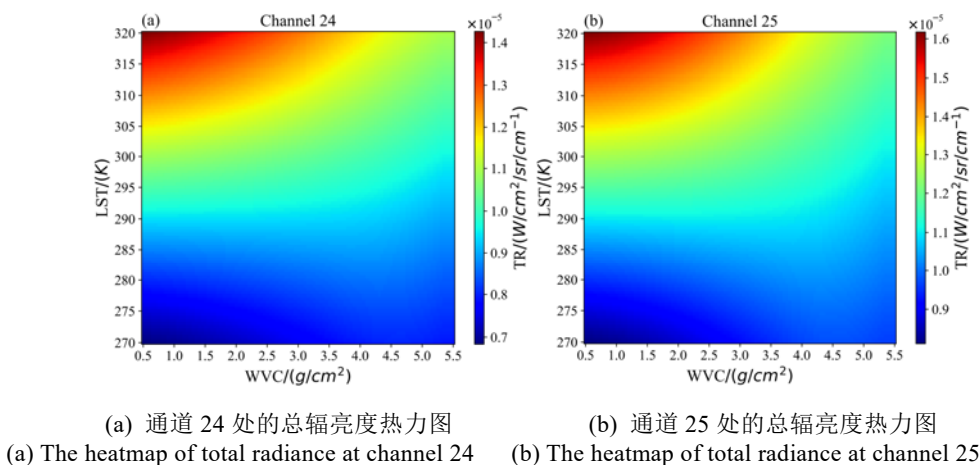


图 11 大气水汽含量与地表温度耦合作用下的总辐亮度热力图

Fig. 11 The heatmaps of total radiance under coupling of atmospheric water vapor content and land surface emissivity

根据图 10 和图 11 的仿真结果,应考虑在不同地表温度下,设置不同的大气水汽含量取值范围。当地表温度为 300~320 K 时,大气水汽含量的取值范围为 0.5~5.5 g/cm²;当地表温度为 270~300 K 时,大气水汽含量的取值范围缩小为 0.5~4.0 g/cm²,由此尽可能减少仿真次数,提高仿真效率。

4 方案对比分析

4.1 仿真效率分析

根据前文的分析,将简化前的参数设置命名为方案 1,在此基础上,提出了简化后的参数设置方案 2。减少的仿真计算部分为地表温度:270~300 K,步长 0.5 K;大气水汽含量:4.0~5.5 g/cm²,步长 0.05 g/cm²。节省的仿真次数占总次数的比例为 18.23%。

为计算简化方案的时间,通过 Python 驱动 MODTRAN,分别对方案 1 和方案 2 进行仿真,得到地表温度与大气水汽含量耦合情况下的总辐亮度。用时分别为 143 min 和 117 min,仿真时间缩短了 26 min。参数设置简化前后对比如表 2 所示。

4.2 结果影响分析

本文分别用简化前后的方案拟合劈窗系数,并计算两者的绝对差值,从而分析简化方案对结果的影响。首先通过 UCSB 光谱库与 MERSI-II 热红外通道响应

函数卷积,计算得到 24 通道(波数范围 817~1085 cm⁻¹)发射率的范围为 0.84~0.99,25 通道(波数范围 739~959 cm⁻¹)的发射率为 0.89~0.99。由前文可知,方案 2 的简化在于地表温度为 270~300 K 时,从 0.5~5.5 g/cm² 缩小到 0.5~4.0 g/cm²。

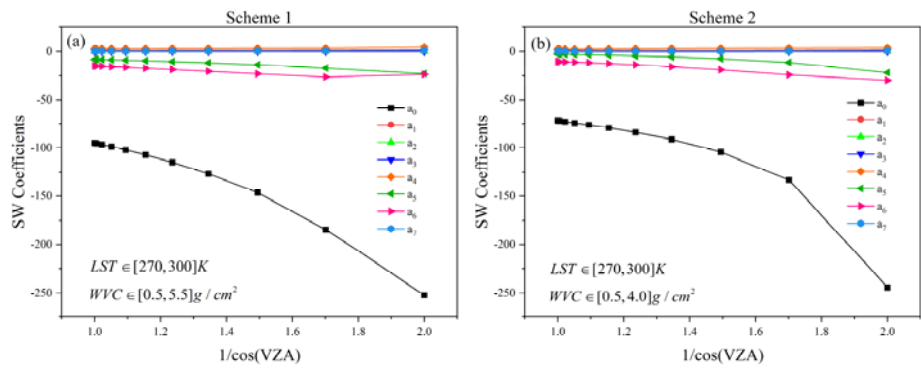
将模拟得到的通道辐亮度通过普朗克函数逆变换得到通道亮温。然后将地表温度、通道亮温及其通道发射率代入式(3),拟合得到劈窗系数。方案 1 和方案 2 得到的非线性劈窗算法系数随观测天顶角正割值的变化如图 12 所示。

从图中可以看出,观测天顶角正割值小于 1.70 时,两方案的劈窗系数 $a_0 \sim a_7$ 变化趋势基本一致。观测天顶角正割值大于 1.70 时,方案 1 的 a_6 出现向上偏离的趋势,而方案 2 的 a_0 变化幅度最大,整体大于方案 1 的 a_0 。总体而言,简化方案对劈窗系数的拟合结果影响较小,各系数变化幅度和趋势大致相同。

为进一步分析简化方案对劈窗系数拟合结果的影响,计算得到两个方案劈窗系数的绝对差值随观测天顶角正割值的变化情况,如表 3 所示。可以看出, a_0 的绝对差值相对较大,其他劈窗系数的绝对差值较小。综上所述,简化方案的劈窗系数变化不大,对拟合结果的影响较小。

表 2 方案 1 和方案 2 之间的对比

Table 2 Comparison between scheme 1 and scheme 2				
		Scheme 1		Scheme 2
Parameter setting	LST/K	270-320	270-300	300-320
	WVC/(g/cm ²)	0.5-5.5	0.5-4.0	0.5-5.5
Simulation times		10201		8341
Simulation time/min		143		117



(a) 方案 1 的拟合结果 (b) 方案 2 的拟合结果
(a) The fitting result of Scheme 1 (b) The fitting result of Scheme 2

图 12 非线性劈窗算法系数随观测天顶角正割值的变化

Fig. 12 Coefficients of non-liner split-window algorithm vary with the secant of observation zenith angle

表 3 方案 1 和方案 2 的劈窗系数的绝对差值

Table 3 Absolute difference of split-window coefficients between Scheme 1 and Scheme 2								
1/cos(VZA)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
1.00	22.9737	0.0794	0.0206	0.0227	0.4905	5.3143	4.4661	0.1420
1.01	23.1131	0.0799	0.0205	0.0230	0.4863	5.3274	4.4914	0.1428
1.02	23.5530	0.0814	0.0203	0.0240	0.4729	5.3657	4.5633	0.1449
1.05	24.3528	0.0842	0.0198	0.0259	0.4482	5.4336	4.6724	0.1483
1.09	25.6365	0.0886	0.0190	0.0286	0.4082	5.5332	4.7987	0.1529
1.15	27.6089	0.0954	0.0179	0.0327	0.3468	5.6699	4.9094	0.1583
1.24	30.6300	0.1059	0.0162	0.0383	0.2551	5.8456	4.9474	0.1638
1.35	35.2774	0.1221	0.0135	0.0459	0.1240	6.0530	4.8112	0.1683
1.49	42.3907	0.1471	0.0089	0.0552	0.0471	6.2305	4.2545	0.1689
1.70	51.3369	0.1788	0.0008	0.0627	0.1793	5.9706	2.3816	0.1567
2.00	7.9926	0.0265	0.0069	0.0292	0.6625	1.0401	6.2706	0.0934

劈窗系数拟合用于实际反演地表温度时，为使反演结果更加精确，通常会将大气水汽含量和地表温度等参数分成几个含有重叠范围的连续子区进行模拟，最终得到不同条件下的劈窗系数查找表。本文为比较简化方案对劈窗系数拟合结果的影响，是在参数取值范围未分组的情况下进行的模拟，因此简化前后方案的劈窗系数拟合结果存在上述的差异。

5 结论

本文通过对背景参数详尽的仿真分析，提出了一种用于 FY-3D MERSI-II 热红外通道的劈窗仿真简化计算方法。在热红外谱段上，通过 MODTRAN 5.2 模拟分析了大气参数和地表参数对总辐亮度的影响。然后在 FY-3D MERSI-II 的热红外通道下，将大气水汽含量、地表温度和地表发射率对总辐亮度的影响进行了仿真分析，并对大气水汽含量、地表温度和地表发射率两两耦合情况下的总辐亮度变化进

行了研究，提出了一种劈窗仿真计算简化方法，并从仿真效率和结果影响两方面对简化前后的方案进行了对比分析。本文为优化劈窗算法参数设置提供了支撑，提高了仿真效率。结论如下：

①在 FY-3D MERSI-II 的 24 和 25 通道下，大气水汽含量与总辐亮度呈二次拟合的关系，非线性程度高；地表温度与总辐亮度呈二次拟合的关系，但非线性程度较低；地表发射率与总辐亮度的关系呈高度线性化。

②在 FY-3D MERSI-II 的 24 和 25 通道下，地表温度的变化对总辐亮度的影响大于地表发射率；大气水汽含量对总辐亮度的影响程度随着地表发射率的增大而增大，而地表发射率对总辐亮度的影响程度随着大气水汽含量的增大而减小；大气水汽含量对总辐亮度的影响程度随着地表温度的增大而增大，而地表温度对总辐亮度的影响程度随着大气水汽含量的增大而减小。

③在确定劈窗算法系数时,可以通过在仿真过程中缩小大气水汽含量的取值范围以节省仿真时间。当地表温度为 $300\sim 320\text{ K}$ 时,大气水汽含量的取值范围为 $0.5\sim 5.5\text{ g/cm}^2$;当地表温度为 $270\sim 300\text{ K}$ 时,大气水汽含量的取值范围缩小为 $0.5\sim 4.0\text{ g/cm}^2$ 。节省的仿真次数在总次数中的占比为 18.23% ,仿真时间缩短了 26 min 。

④分别对简化前后方案拟合劈窗系数,并计算其绝对差值。结果表明,简化方案对劈窗系数拟合结果的影响较小。

参考文献:

- [1] Martha C. Anderson, Richard G. Allen, Anthony Morse, et al. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **122**: 50-65.
- [2] SUN Liang, CHEN Zhongxin, GAO Feng, et al. Reconstructing daily clear-sky land surface temperature for cloudy regions from MODIS data [J]. *Computers & Geosciences*, 2017, **105**: 10-20.
- [3] LI Ziyang, HAN Yang, HAO Tianyi. Assessing the consistency of remotely sensed multiple drought indices for monitoring drought phenomena in continental China [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **58**(8): 5490-5502.
- [4] Yuhei Yamamoto, Hirohiko Ishikawa. Influence of urban spatial configuration and sea breeze on land surface temperature on summer clear-sky days [J]. *Urban Climate*, 2020, **31**: 1-10.
- [5] 崔庆岗, 吴树明, 殷显阳, 等. 卫星热红外遥感技术在东平县地热资源调查中的应用[J]. *化工矿产地质*, 2023, **45**(2): 180-187.
- [6] 郭圆新, 梁琨, 徐杨睿, 等. 基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法[J]. *光电工程*, 2024, **51**(3): 52-76.
- [7] GUO Yuanxin, LIANG Kun, XU Yangrui, et al. Multiple environmental elements laser remote sensing method based on direct scattering spectrum[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, **51**(3): 52-76.
- [8] 张璐, 张兴赢, 曹西凤, 等. 大气环境监测卫星星载激光雷达二氧化碳遥感反演方法及精度验证[J]. *上海航天(中英文)*, 2023, **40**(3): 30-36.
- [9] ZHANG Lu, ZHANG Xingying, CAO Xifeng, et al. Inversion method for XCO₂ remote sensing by spaceborne lidar onboard atmospheric environmental monitoring satellite and its accuracy validation[J]. *Aerospace Shanghai(Chinese & English)*, 2023, **40**(3): 30-36.
- [10] YE Xin, REN Huazhong, ZHU Jinshun, et al. Land surface temperature retrieval based on thermal infrared channel decomposed split-window algorithm [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, **15**: 4971-4979.
- [11] LI Zhaoliang, WU Hua, WANG Ning, et al. Land surface emissivity retrieval from satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34**(9-10): 3084-3127.
- [12] Jordi Cristóbal, Juan C Jiménez-Muñoz, Anupma Prakash, et al. An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the landsat-8 thermal band[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(3): 431.
- [13] ZHAO Junli, TANG Bohui, OUYANG Sima. A nonlinear split-window algorithm for retrieving land surface temperatures from Fengyun-4B thermal infrared data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, **62**: 1-12.
- [14] MA Chenyang, QIAN Yonggang, LI Kun, et al. Temperature and emissivity retrieval from hyperspectral thermal infrared data using dictionary-based sparse representation for emissivity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 1-16.
- [15] Larry M. McMillin. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**(36): 5113-5117.
- [16] John C Price. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high resolution radiometer[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1984, **89**(D5): 7231-7237.
- [17] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**(10): 1509-1522.
- [18] TANG Bohui, BI Yuyun, LI Zhaoliang, et al. Generalized split-window algorithm for estimate of land surface temperature from Chinese Geostationary FengYun Meteorological Satellite (FY-2C) data [J]. *Sensors*, 2008, **8**(2): 933-951.
- [19] CHEN Du, REN Huazhong, QIN Qiming, et al. A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 Data [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(1): 647-665.
- [20] 程元良, 吴骅, 李召良, 等. FY-3D MERSI-II地表温度遥感反演与验证[J]. *遥感学报*, 2021, **25**(8): 1792-1807.
- [21] CHENG Yuanliang, WU Hua, LI Zhaoliang, et al. Retrieval and validation of the land surface temperature from FY-3D MERSI-II[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25**(8): 1792-1807.
- [22] 姚前, 李正强, 樊程, 等. 中红外大气强吸收波段地气杂波全球空间分布研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, **44**(11): 1-17.
- [23] YAO Qian, LI Zhengqiang, FAN Cheng, et al. Study on global spatial distribution of surface-atmosphere clutter in mid-infrared atmospheric strong absorption band[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, **44**(11): 1-17.
- [24] WAN Zhengming. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 36-45.
- [25] 姚前, 许华, 樊程, 等. 一种应用于卫星中红外遥感的辐射传输简化计算方案[J]. *红外与毫米波学报*, 2024, **43**(3): 377-392.
- [26] YAO Qian, XU Hua, FAN Cheng, et al. A simplified parameterization scheme of mid-infrared radiative transfer for satellite remote sensing[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, **43**(3): 377-392.