

文章编号:2095-6134(2015)01-063-07

微波遥感定量反演研究中大气参数的估算模型^{*}

周芳成¹, 宋小宁^{1†}, 李召良², 马建威³

(1 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 2 中国农科院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;
3 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)
(2014 年 2 月 25 日收稿; 2014 年 3 月 14 日收修改稿)

Zhou F C, Song X N, Li Z L, et al. Estimation model of the atmospheric parameters in the research of quantitative microwave remote sensing[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015,32(1):63-69.

摘 要 被动微波遥感对地表参数的反演研究中通常会忽略大气的影响. 在定量遥感精度要求较高的情况下, 建立大气参数的定量估算模型以剔除大气影响, 对于提高反演精度具有积极作用. 本文基于辐射传输模型, 总结出大气向上和向下亮温及大气透过率这 3 个大气参数均与大气可降水量密切相关. 利用 MonoRTM 模型和全球 946 条大气廓线建立晴空条件下大气亮温和大气透过率与大气可降水量之间的函数关系, 发现大气亮温与大气可降水量呈正相关, 大气透过率与大气可降水量呈负相关. 本文利用中国张掖地区探空数据集对大气参数估算模型进行验证. 模拟结果与通过 MonoRTM 模拟的结果基本一致, 表明本模型具有较高的可靠性. 通过本模型可定量计算大气对被动微波遥感的影响, 提高微波遥感定量反演的精度.

关键词 微波遥感; 大气亮温; 大气透过率; 大气可降水量

中图分类号: P407.7 文献标志码: A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2015.01.011

Estimation model of the atmospheric parameters in the research of quantitative microwave remote sensing

ZHOU Fangcheng¹, SONG Xiaoning¹, LI Zhaoliang², MA Jianwei³
(1 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China;
3 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract Usually, atmospheric effects on microwave remote sensing are ignored because of the penetration of microwave. However, for quantitative inversion in which high precision inversion is required, atmospheric effects should be taken into account. Based on the radiative transfer model, three atmospheric parameters, upwelling and downwelling atmospheric brightness temperature and atmospheric transmissivity, were proved to be much influenced by precipitable water vapor. The MonoRTM and 946 global atmospheric profiles were used to simulate these atmospheric parameters. Then we got regression models for PWV (precipitable water vapor) and atmospheric brightness temperatures and for PWV and atmospheric transmissivity, respectively. Finally, Zhangye

^{*} 国家自然科学基金(41231170)和中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-15)资助
[†] 通信作者, E-mail: songxn@ucas.ac.cn

radiosonde data sets were used to validate the models, and verification results showed that the estimation models had high credibility.

Key words microwave remote sensing; atmospheric brightness temperature; atmospheric transmissivity; precipitable water vapor

微波遥感相较于可见光和红外遥感,由于波长远远大于大气气体分子,大气对其散射作用较小,因此微波遥感受云的影响较弱,可以全天候使用。但是大气对于电磁波的衰减,除散射外还有吸收作用,对微波的吸收作用主要来自于大气中的氧气和水汽^[1]。大气的吸收作用对微波传输有多大影响?微波遥感的大气影响是否可被忽略?准确回答这些问题对于提高微波遥感定量反演精度具有重要意义。为此学者们通过大气辐射传输模型进行模拟计算得出结论:王振占^[2]利用 MPM (millimeter-wave propagation model) 93^[3]和 2 324 条 2 年内全球海洋无雨(液水含量 $L \leq 0.2$ mm)大气和表面再分析数据,进行大气参数的计算,发现即使在 L 波段(中心频率约为 1.4 GHz),无雨时微波信号经过大气大概有 0.65% ~ 0.85% 的衰减;贾媛媛^[4]以 MORTAN 模型的大气参数设置为基础,模拟晴空条件下大气对 AMSR-E 各个频率 2 种极化下亮温的影响,发现即使穿透性最好的 6.9 GHz 垂直极化大气影响也达到 4 K 左右。这种程度的误差是否需要考虑呢?以地表温度反演为例,热红外反演已经取得较高的精度,在某些情况下可以优于 1 K^[5-13],而被动微波反演还具有很大的提升空间^[14-15]。因此,考虑大气影响对于提升微波反演精度是十分必要的。

然而,在被动微波对地表参数遥感反演的实际应用中,大气影响经常是一个被忽视的量。依然以地表温度反演为例,在当前常用的一些反演方法中,利用单通道进行统计回归依据的就是忽略大气影响后,辐射计亮温与地表温度之间近似成线性关系^[15-17];多通道回归算法虽然考虑到不同的通道或者极化组合能减少大气的影响^[18-20],但是其物理机制模糊,对于反演精度的提高仍存在瓶颈。在某些基于物理模型的反演算法中,虽然考虑了大气影响,但是由于大气参数的较难获得而进行了简化处理:Pulliainen 等^[21]将大气看作是已知平均值和标准差的一种自由参数或者 Gaussian 随机变量,Xiang 和 Smith^[22]将大气的温湿度廓线数据作为输入。这些简化处理方法要么

会引入较大的随机误差,要么由于数据的难获取而不能满足快速建模的需要,均不能适应微波遥感未来发展预期的快速、准确反演地表参数的目标。鉴于此,本文试图建立一个简单的大气参数估算模型,定量计算大气对微波信号的影响,从而为基于辐射传输模型的微波遥感反演算法提供支持。本文首先从机理上探究了大气向上和向下亮温、大气透过率等 3 个大气参数与大气可降水量的关系,借助 MonoRTM 大气辐射传输模型和全球 946 条晴空大气廓线建立大气参数数据库,构建考虑大气可降水量的大气参数估算模型,并结合张掖地区实测探空数据对本文发展的模型进行检验。

1 理论基础

不考虑空基微波辐射计的仪器误差,其接收到的辐射信号受目标地物发射辐射、大气影响、宇宙背景辐射等多种因素影响。欲精确反演目标地物参数,必须从辐射计亮温信号中将其他影响去除。本文以低植被区的辐射传输模型^[1]为例:

$$T_B = T_{UP} + \gamma_\theta e_s T_S + (1 - e_s) \gamma_\theta [T_{DN} + T_{sky} \gamma_\theta], \quad (1)$$

其中, T_B 指频率为 f (GHz) 的辐射计亮温值, K; T_S 指地表温度, K; T_{DN} 和 T_{UP} 分别是大气向下和向上亮温, K; T_{sky} 是宇宙辐射亮温, 通常设定为 2.73 K; γ_θ 指角度为 θ 的大气透过率, 无量纲; e_s 指地表发射率, 无量纲。

由式(1)可知,被动微波遥感对地表参数定量反演中,大气影响主要体现在 γ_θ 、 T_{DN} 和 T_{UP} 3 个参数,本文假设 $T_{UP} \approx T_{DN}$ 。下面对大气参数的主要影响因素进行分析。

1.1 大气透过率的影响因素

在 0 ~ 300 GHz 的微波波谱区,大气中主要的吸收物质为氧气和水汽,水汽又可细分为气态水和液态水。一般认为大气的相对湿度 < 85% 即为无云的晴空,液态水浓度可赋值为 0 g/m³^[23],换句话说,晴空条件下,对微波吸收的水汽指的是气态水。一个重要的参数是大气不透明度 τ_θ ,它是沿天顶角

θ 的某一路径上全部大气层的光学厚度(积分衰减)^[1]. 当 $\theta < 70^\circ$ 时,地面分层的大气可用一平面层大气近似,并且可以忽略折射效应. 因此,

$$\tau_\theta = \int_0^\infty k_e(z) \sec\theta dz, \tag{2}$$

式中, $k_e(z)$ 是地面上高度为 z 处的消光系数. 晴空条件下,大气可看作一无散射媒质,这时 k_e 等于气体的吸收系数 k_g ,包括氧气的吸收系数 k_{O_2} 和气态水的吸收系数 k_{vap} ,

$$\begin{aligned} \tau_\theta &= \sec\theta \left[\int_0^\infty k_{O_2}(z) dz + \int_0^\infty k_{vap}(z) dz \right] \\ &= \tau_{O_2} + \tau_{vap}, \end{aligned} \tag{3}$$

其中 τ_{O_2} 和 τ_{vap} 分别可认为是氧气和气态水对大气不透明度的贡献.

全部大气损耗因子 L_θ 定义为 $L_\theta = e^{\tau_\theta}$,损耗因子的倒数即为大气透过率 γ_θ :

$$\gamma_\theta = L_\theta^{-1} = e^{-\tau_\theta} = e^{-(\tau_{O_2} + \tau_{vap})}, \tag{4}$$

在一般大气情况下,氧气的总量比较稳定, τ_{O_2} 可近似看作是常数. 因此,微波的大气透过率主要与 τ_{vap} ,即气态水吸收系数有关. 气态水吸收系数正比于水蒸气密度^[1],水蒸气密度正比于大气可降水量(precipitable water vapor, PWV). 由此可知,晴空条件下,微波的大气透过率主要受大气可降水量影响,且应为负相关.

1.2 大气亮温的影响因素

地面和卫星之间整个大气路径的向上发射辐射,其视在温度用 T_{UP} 表示;在地面上观察到的大气向下的视在温度,用 T_{DN} 表示. 假设大气是半无限的,

$$T_{UP} = \sec\theta \int_0^\infty k_e(z) T(z) e^{-\int_z^\infty k_e(z) \sec\theta dz} dz, \tag{5}$$

$$T_{DN} = \sec\theta \int_0^\infty k_e(z) T(z) e^{-\int_0^z k_e(z) \sec\theta dz} dz, \tag{6}$$

其中, $T(z)$ 代表大气各层分子动力学温度.

由式(5)和式(6)可知,大气亮温主要受大气消光系数(根据前文假设在此即为大气吸收系数)廓线、大气温度廓线以及入射角的影响. 由于入射角属于辐射计参数,在本文中不予讨论. 在微波的吸收通道大气亮温较大,而在大气窗口大气亮温较小,因此可知大气的发射能力是与其吸收能力相联系的,由于吸收能力主要受水蒸气密度影响^[1],亦即发射亮温能力主要受 PWV 影响,应为正相关.

2 模型构建及验证

综合上文分析, γ_θ 、 T_{DN} 和 T_{UP} 都与 PWV 密切相关,使得建立一个考虑 PWV 的大气参数估算模型成为可能. 本文选取 TIGR(thermodynamic initial guess retrieval)2002 的 946 条晴空大气廓线数据,输入到 MonoRTM(monochromatic radiative transfer model)大气辐射传输模型,模拟出 6.925、10.65、18.7、23.8 和 36.5 频率的大气亮温、大气透过率和 PWV 等 3 个参数,建立大气参数数据库,对理论推导的结论进行验证并且构建了大气参数估算模型.

2.1 MonoRTM 介绍

MonoRTM 是一款特别适合于微波、毫米波的辐射传输模型,也可应用于激光传播的研究,适合于模拟所有电磁波谱区的大气分子吸收以及微波波段的液态水吸收,液态水吸收模块采用经典的 Liebe 模型,MODM(monochromatic optical depth model)模块用于计算分子光学厚度.

MonoRTM 有 10 个输入文件(表 1),用来计算 7 种不同情况下的亮温度值(表 2),根据实际情况选择文件并修改原文件中的廓线信息,并在 LINUX 系统中运行得出大气参数^[24].

表 1 MonoRTM 辐射传输模型的输入文件

Table 1 Input files for MonoRTM

| 文件号 | 文件名 | 文件作用 |
|-----|--|------------------------------------|
| 1 | MONORTM.IN_IATMO_dn | TAPE7-style 下行辐射计算的基本信息 |
| 2 | MONORTM.IN_IATMI_lidar_up | TAPE7-style 上行辐射计算的基本信息 |
| 3 | MONORTM.IN_MDL_ATM_dn | 美国标准大气的下行辐射计算的基本信息 |
| 4 | MONORTM.IN_MDL_ATM_up | 美国标准大气的上行辐射计算的基本信息 |
| 5 | MONORTM.IN_NOSCALE_IATMI_dn | 用户自定义大气信息 |
| 6 | MONORTM.IN_SCALE_IATMI_MODELO_HMOLI_dn | 用户自定义大气信息(scaled H ₂ O) |
| 7 | MONORTM_PROF.IN_liquid_cloud | 分层大气参数信息(温湿压、高度、液态水) |
| 8 | MONORTM_PROF.IN_say | 分层大气的参数信息(温、湿、压、高度) |
| 9 | Spectral_lines.dat.O_80 | 光谱数据文件 |
| 10 | Spectral_lines.dat.6300_6700 | 光谱数据文件(激光雷达) |

表 2 计算亮温度的 7 种不同情况
Table 2 Severn cases in the calculation
of the brightness temperature

| 案例 | 辐射方式 | 大气状况 | 输入文件 |
|--------|------|--|-------|
| case 1 | 下行辐射 | 美国标准大气 | 3,9 |
| case 2 | 上行辐射 | 美国标准大气 | 4,9 |
| case 3 | 下行辐射 | 用户自定义大气 | 5,9 |
| case 4 | 下行辐射 | TAPE7-style | 1,8,9 |
| case 5 | 下行辐射 | TAPE7-style(含有 100 g/m ² 液态水) | 1,7,9 |
| case 6 | 下行辐射 | 用户自定义大气(scaled H ₂ O) | 6,9 |
| case 7 | 上行辐射 | 用户自定义大气(激光雷达) | 2,10 |

2.2 大气廓线介绍

本研究利用全球 TIGR2002 大气廓线数据完成大气辐射传输模拟. TIGR 数据包含全球不同地区不同季节的探空资料,TIGR2002 共有 2 311 条大气廓线,水汽含量 0.1 ~ 8 g/cm²,地表气温 231 ~ 315 K. 每条廓线包括压强、温度、湿度和臭氧廓线、每条廓线的经纬度和时间. 本文选取每层相对湿度都小于 85% 的廓线作为晴空廓线进行模拟,共计 946 条.

2.3 大气参数估算模型构建

本文以 MonoRTM 中 case 3 作为基础计算亮温,在输入文件 5 中根据 946 条实测大气廓线数据修改通道数、通道波数、分层大气参数(海拔、

湿度、温度、压强等). 由于大气密度随高度按指数下降,30 km 高度处的密度只有海平面处数值的 1.5%^[1],因此本文只将 30 km 以内的大气廓线数据作为输入. 在模型输出结果中选取频率、亮温、大气透过率、PWV 等 4 个参数构建大气参数数据库,并分别建立不同频率下 PWV 与大气向下亮温和大气透过率的函数关系. 可以发现,图 1 和图 2 的大气透过率与 PWV 的线性关系并不好,数值比较接近,区分度不够. 另外,由于 6.925 GHz 和 10.65 GHz 受微波低频段无线电干扰(radio frequency interference, RFI)较严重^[25],在某些应用中常避免使用,因此本文也不予考虑. 图 3—图 5 表明理论分析中的结论是正确的:大气亮温与 PWV 呈正相关, RMSE (root mean square error)均 < 1 K,决定系数 $R^2 > 0.97$;大气透过率与 PWV 呈负相关, RMSE < 0.004, $R^2 > 0.95$. 从决定系数 R^2 可知大气亮温与大气透过率的变化基本只依赖 PWV 的变化,因此建立这 2 个参数与 PWV 的定量估算模型是可行的. 其中,23.8 GHz 下线性关系最好,其次是 18.7 GHz,最后是 36.5 GHz,同样的结论也适用于 3 个频率的大气透过率与 PWV 线性函数.

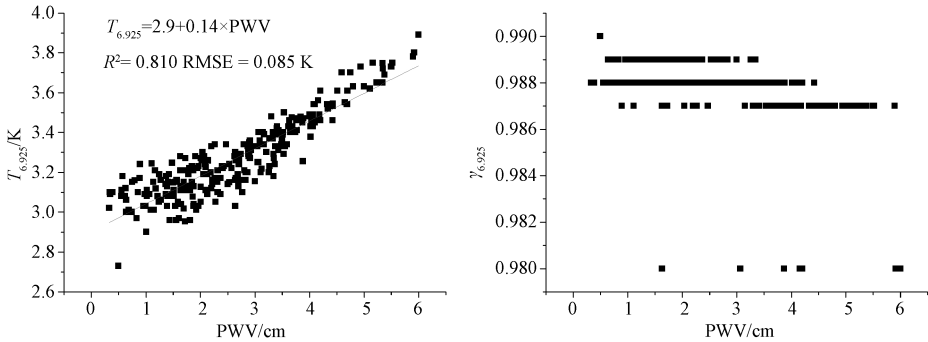


图 1 PWV 与 6.925 GHz 大气亮温和大气透过率的关系
Fig. 1 Relationships between PWV and 6.925 GHz atmospheric brightness temperature and between PWV and atmospheric transmission

由此,本文建立了在晴空条件下,只考虑大气吸收作用的依赖 PWV 的不同频率大气亮温和大气透过率的估算模型:

18.7 GHz:

$$T_{18.7} = 3.98 + 4.48 \times \text{PWV}, \quad (7)$$
$$\gamma_{18.7} = 0.98 - 0.015 \times \text{PWV}; \quad (8)$$

23.8 GHz:

$$T_{23.8} = 6.63 + 13.06 \times \text{PWV}, \quad (9)$$
$$\gamma_{23.8} = 0.97 - 0.0044 \times \text{PWV}; \quad (10)$$

36.5 GHz:

$$T_{36.5} = 11.3 + 4.75 \times \text{PWV}, \quad (11)$$
$$\gamma_{36.5} = 0.958 - 0.016 \times \text{PWV}; \quad (12)$$

其中, T_α 为频率为 α GHz 的大气亮温, K; γ_α 为频率为 α GHz 的大气透过率; PWV 为大气可降水

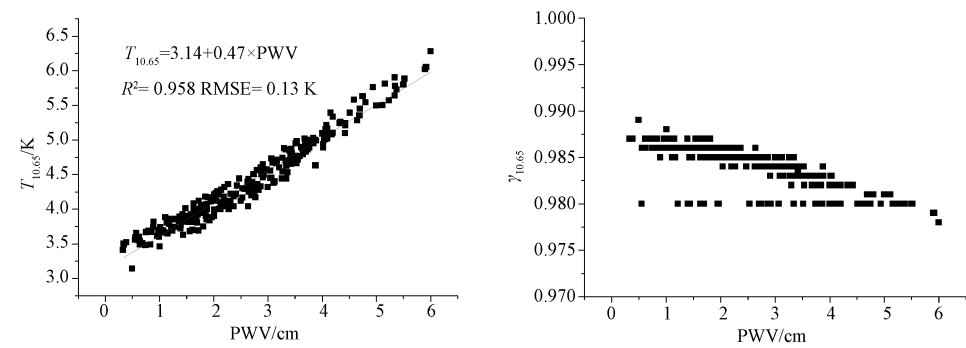


图 2 PWV 与 10. 65 GHz 大气亮温和大气透过率的关系

Fig. 2 Relationships between PWV and 10. 65 GHz atmospheric brightness temperature and between PWV and atmospheric transmission

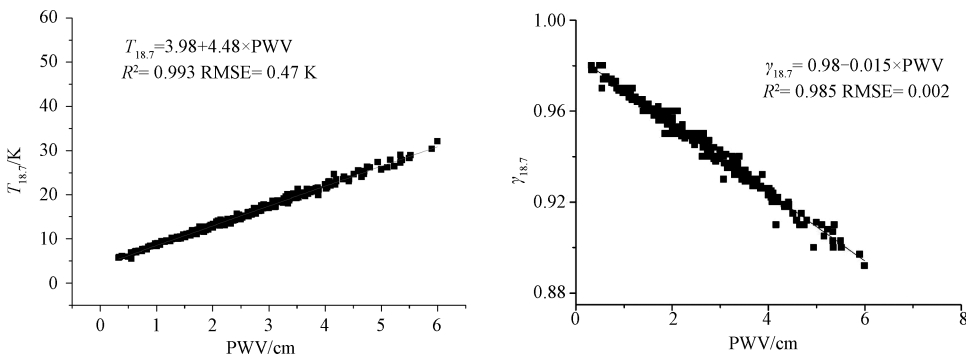


图 3 PWV 与 18. 7 GHz 大气亮温和大气透过率的关系

Fig. 3 Relationships between PWV and 18. 7 GHz atmospheric brightness temperature and between PWV and atmospheric transmission

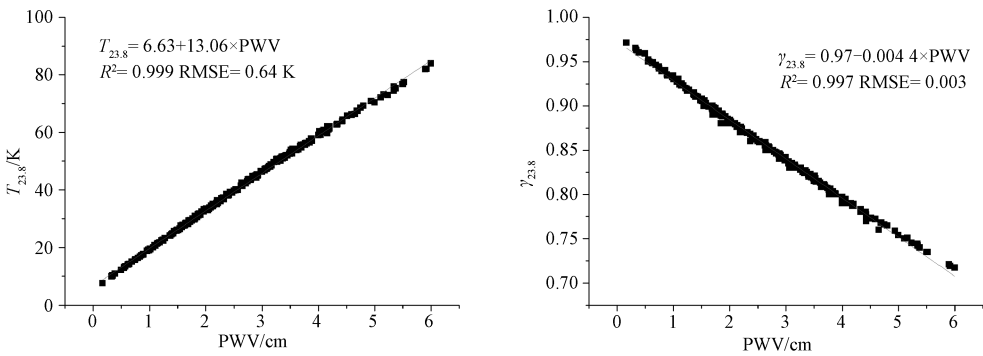


图 4 PWV 与 23. 8 GHz 大气亮温和大气透过率的关系

Fig. 4 Relationships between PWV and 23. 8 GHz atmospheric brightness temperature and between PWV and atmospheric transmission

量, cm.

2. 4 本地数据验证

为检验本文所建立的大气参数估算模型的精度及其在中国地区的适用性,选取张掖国家气候观测台 11 个观测日的探空观测数据集作为本地数据,首先输入到 MonoRTM 中模拟出大气亮温、大气透过率和 PWV 作为真值,将 PWV 代入本文

发展的简化的大气参数估算模型中计算出大气亮温和大气透过率作为模拟值,与 MonoRTM 模拟值相比得出精度. 由表 3 可知,大气亮温估算模型中,各频率的 R^2 较为接近,均达到 0.86 以上,以 36.5 GHz 为最优, RMSE 也最小;而 23.8 GHz 的 RMSE 最大,达到 2.65 K;在大气透过率估算模型中,23.8 GHz 的 R^2 最大,但是 RMSE 也最大,这

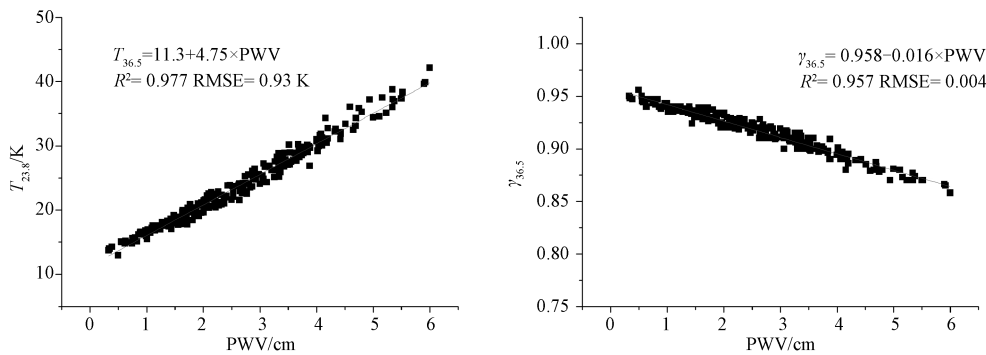


图 5 PWV 与 36.5 GHz 大气亮温和大气透过率的关系

Fig. 5 Relationships between PWV and 36.5 GHz atmospheric brightness temperature and between PWV and atmospheric transmission

表 3 大气参数估算模型精度评价

Table 3 Accuracy assessment for the estimation model of atmospheric parameters

| | 频率/GHz | R ² | RMSE |
|-------|--------|----------------|----------|
| 大气亮温 | 18. 7 | 0. 86 | 0. 79 K |
| | 23. 8 | 0. 87 | 2. 65 K |
| | 36. 5 | 0. 88 | 0. 77 K |
| 大气透过率 | 18. 7 | 0. 73 | 0. 004 4 |
| | 23. 8 | 0. 82 | 0. 012 |
| | 36. 5 | 0. 7 | 0. 005 |

3 结论与讨论

在被动微波遥感对地表参数的定量反演研究中,考虑大气影响对于提升反演精度具有积极作用. 在晴空条件下,可以只考虑大气的吸收作用. 在此情况下,基于低植被区的辐射传输模型提取出 3 个大气参数,分别是大气向上和向下亮温与大气透过率,通过理论推导发现都与 PWV 具有很好的相关性. 本文通过 MonoRTM 模型和全球 946 条晴空大气廓线数据模拟大气参数并建立大气参数数据库,利用统计回归的方法构建只依赖 PWV 的大气参数估算模型,其中大气亮温与 PWV 呈正相关, RMSE < 1 K, R² > 0. 97; 大气透过率与 PWV 呈负相关, RMSE < 0. 004, R² > 0. 95; 同时本文还发现随 PWV 增大,在大气吸收通道大气亮温可达到 80 K,在大气窗口区也可达到 40 K 左右,进一步说明微波遥感反演研究中考虑大气

影响是十分必要的. 本文使用张掖国家气候观象台 11 个观测日的探空观测数据对本文发展的大气参数估算模型进行验证,发现本模型在张掖地区取得了较高的精度,产生的误差可能是数据本身误差,也可能是中国大气条件的特殊性,在后期模型的优化中需要更加注意.

本文通过理论推导和实际数据检验,证明微波遥感在晴空条件下大气参数与 PWV 的高相关性,由此建立依赖 PWV 的大气参数估算模型,使得可以在已知 PWV 的情况下定量求出大气亮温与大气透过率等参数,在辐射传输模型中相当于减少了未知数的个数,对于提高基于辐射传输模型的地表参数反演的精度起到积极作用. 目前,基于近红外数据的 PWV 产品已经可以获得,但是基于被动微波遥感的仍然欠缺. 将近红外与被动微波相结合,联合本文发展模型,通过每日 PWV 产品即可获得每日被动微波遥感大气参数产品,对于今后被动微波遥感定量反演的研究与发展必将具有极大的推动作用.

对 ARA (<http://ara.abct.lmd.polytechnique.fr/>) 提供 TIGR2002 大气廓线数据,大气环境研究中心 (http://rtweb.aer.com/monortm_frame.html) 提供 MonoRTM 模型,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部数据中心提供张掖国家气候观象台探空观测数据集表示感谢.

参考文献

[1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing I: fundamentals and radiometry [M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1981.

[2] 王振占. L-波段雷达大气影响的微波辐射计修正方法[C]

- //中国电子学会微波分会. 2007 年全国微波毫米波会议论文集(下册). 宁波:电子工业出版社, 2007; 1 732-1 734.
- [3] Liebe H J, Hufford G A, Cotton M G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1 000 GHz[C] // AGARD, Atmospheric Propagation Effects Through Natural and Man-Made Obscurants for Visible to MM-Wave Radiation 11 p (See N94-30495 08-32). 1993; 3. 1-3. 10.
- [4] 贾媛媛. 被动微波遥感数据反演地表温度算法研究[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2007.
- [5] 徐希孺,柳钦火,陈家宜. 遥感陆面温度[J]. 北京大学学报:自然科学版,1998,34(2): 248-253.
- [6] Becker F, Li Z L. Temperature independent spectral indices in thermal infrared bands [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 32(1): 17-33.
- [7] Caselles V, Coll C, Vator E. Land surface temperature determination in the whole HAPEX-Sahel area from AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(5):1 009-1 027.
- [8] Kerr Y H, Lagouarde J P, Inberon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(2): 197-209.
- [9] McMillin L M. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurement with different absorption[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(36): 5 113-5 117.
- [10] Gillespie A, Rokugawa S, Maatsunaga T, et al. Temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection (ASTER) image[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1 113-11 126.
- [11] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature measurement from space [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 892-905.
- [12] Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Validation of the land-surface temperature products retrieved from terra moderate resolution imaging spectroradiometer data [J]. Remote Sensing of Environment. 2002, 83(1): 163-180.
- [13] Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Quality assessment validation of the MODIS global land surface temperature [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1): 261-274.
- [14] 贾媛媛,李召良. 被动微波遥感数据反演地表温度研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(3): 96-105.
- [15] 刘曾林,唐伯惠,李召良. AMSR-E 微波数据反演裸地地表温度算法研究[J]. 科技导报, 2009, 27(4): 25.
- [16] 毛克彪,施建成,李召良,等. 一个针对被动微波 AMSR-E 数据反演地表温度的物理统计算法[J]. 中国科学 D 辑, 2006, 36(12): 1 170-1 176.
- [17] Holmes T R H, De Jeu R A M, Owe M, et al. Land surface temperature from Ka band (37 GHz) passive microwave observations [J]. Journal of geophysical research, 2009, 114(D4).
- [18] McFarland M, Miller R, Neale C. Land surface temperature derived from the SSM/I passive microwave brightness temperatures [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 839-845.
- [19] Njoku E G. Surface temperature estimation over land using satellite microwave radiometry[C] // Choadhury B, Kerr Y, Njoku E, et al. Passive microwave remote sensing of land-atmosphere interactions. Utrecht, The Netherlands' VSP, 1995; 509-530.
- [20] Njoku E, Li L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6 to 18 GHz [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1999, 37(1): 79-93.
- [21] Pulliainen J T, Grandell J, Hallikainen M T. Retrieval of surface temperature in boreal forest zone from SSM/I data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1 188-1 200.
- [22] Xiang X, Smith E A. Feasibility of simultaneous surface temperature-emissivity retrieval using SSM/I measurements from HAPEX-Sahel[J]. Journal of Hydrology, 1997, 188-189: 330-360.
- [23] 顾震潮. 云雾降水物理基础[M]. 北京:科学出版社, 1980.
- [24] 黄兴友,张曦,冷亮,等. 基于 MonoRTM 模型的微波辐射计反演方法研究[J]. 气象科学, 2013, 33(2): 138-145.
- [25] 吴莹. 微波地表发射率的卫星遥感反演和模式模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2012.