

被动微波遥感大气校正

王永前^{1,2}, 冯文兰¹, 施建成², 邱玉宝², 刘志红¹

(1. 成都信息工程学院 资源环境学院, 四川 成都 610225;

2. 遥感科学国家重点实验室 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要:以星载微波辐射计 AMSR-E 的频段设置和亮温数据为参考,利用一年的大气廓线数据,对与过境时间相匹配的 AMSR-E 亮温数据进行了大气校正,并通过计算校正前后的微波植被指数(MVI)分析了大气校正的有效性;最后选择一天的 AMSR-E 亮温数据,利用现有的大气参数产品进行大气校正.校正过程中,以求取地表发射率为中间过程.结果显示,能够实现全天时全天候条件下的星载微波辐射计数据的大气校正,算法成功有效,有潜力进行推广.

关键词:被动微波遥感;辐射传输模型;大气校正

中图分类号:TP722.6 **文献标识码:**A

Atmospheric influences and its correction in passive microwave remote sensing

WANG Yong-Qian^{1,2}, FENG Wen-Lan¹, SHI Jian-Cheng², QIU Yu-Bao², LIU Zhi-Hong¹

(1. College of Environmental and Resource Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Atmosphere profiles obtained from atmosphere radiation measurement (ARM) were used to correct the AMSR-E data of the same time and site. Comparison between MVIs computed by the brightness temperatures before and after atmosphere correction proved the reasonability of the atmosphere correction. Atmosphere correction was applied to the AMSR-E data for a selected day with atmosphere data obtained from MODIS and MLS. The results showed the algorithm developed in this paper was reliable.

Key words: passive microwave remote sensing, radiative transfer model, atmosphere correction

PACS: 07.07.Df

引言

和可见光/近红外以及热红外遥感相比,由于微波的波长较长,因而微波和大气的相互作用更具有物理意义,所以在全球能量和水循环的研究中,微波遥感能够提供更加可靠合理的反演各种地球系统参数的手段.到目前为止,已有近 30 年的全球尺度上卫星微波辐射计数据能够被利用.但是大气(尤其是有云存在的天气)和地表辐射信息的复杂的相互作用使得地表信息很难被提取出来^[1-2]. 本文主要

针对这个问题开展研究,即如何对星载微波辐射计的大气影响进行校正.由于陆地表面地表发射率比较高,大气对微波辐射的影响受地表辐射信息的屏蔽,因而以往的研究更多的是忽略大气作用.但是近来,越来越多的研究开始关注微波遥感中陆地表面参数反演时大气的影响.在土壤水分的反演中,Matthias 等针对 1997 年美国南部大平原水文实验讨论了植被和大气对土壤水分反演的影响问题^[3]. Fuhrhop 等应用 Liebe 模型(1989)和微波毫米波辐射传输模型 MWMOD^[4]研究大气对地表发射率反演的

收稿日期:2012-12-10,修回日期:2013-09-16

基金项目:国家自然科学基金(41101314,40930530,40901175)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41101314,40930530,40901175)

作者简介(Biography):王永前(1985-),男,江苏盐城人,博士,副教授,主要从事被动微波遥感大气参数和地表参数反演研究.

E-mail: wyqq@cuit.edu.cn

Received date: 2012-12-10, **revised date:** 2013-09-16

影响. Wang YQ 等^[5]在地表发射率反演时,利用 MODIS 提供的大气廓线反演结果尝试了微波辐射计数据的大气校正研究. 因为雪水当量的反演要用到 18.7GHz 以上的频率相对较高的频段,而且积雪覆盖地区的地表发射率较低,因此大气的影响在雪水当量的反演中不可忽视. Pulliainen 等^[6]以及 Chang 等^[7]都关注到了大气影响在机载微波辐射计以及星载卫星观测方面的差异,把大气部分做了参数化的考虑,并一直使用^[8].

本文的目的是基于辐射传输方程,发展对微波辐射计全天候全天时大气校正的算法,为微波辐射计数据的更广泛应用提供支持. 本文试图发展出不依赖于辅助数据的全球尺度上的星载微波辐射计大气校正算法.

1 研究数据的选取和预处理

研究采用的星载微波辐射计遥感数据来自于高级微波扫描辐射计(AMSR-E). AMSR-E 是一种被动式微波遥感仪^[9]. AMSR-E 入射角为 55° , 刈宽为 1445 km, 其频率为 6.9 GHz、10.7 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz 和 89 GHz, 每个频率均有 V 和 H 两个通道. NASA 提供了和 AMSR-E 数据相关的各种产品,本文中模拟和大气校正的是 L2A 级亮温数据. L2A 产品包括各个波段的全球轨道空间重采样亮温产品以及辅助数据. 由于不同频率的数据分辨率不同,因此在本文中所有的轨道产品数据使用算术平均方法投影到 EASE-GRID(空间分辨率约为 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$)^[10].

大气廓线数据来自于美国大气辐射测量计划(ARM)中的一个项目. 该项目每六个小时施放探空气球对美国南部大平原的某几个点进行时间序列的大气廓线探测^[11]. 大气输入数据是由 MODIS 提供的产品 MYD07_L2,该产品能够提供大气温度、湿度和压力的廓线数据. 地表温度数据也采用 MODIS 提供的产品 MYD11_L2. 因为 MODIS 和 AMSR-E 同时搭载于 Aqua 卫星上,因此由这两种仪器获得的数据在时间和空间上具有一致性,避免了使用过程中可能出现的数据匹配误差.

在有云天气条件下,主要利用的是搭载于 Aura 卫星上的微波临边探测器 MLS(Microwave Limb Sounder)提供的大气廓线数据. MLS 是 EOS Aura 卫星的重要探测器之一,主要用于测量地球大气临边的微波热辐射. MLS 资料可用于反演冰的相对湿度、云含水量、云含冰量、重力势高度和温度. MLS

观测资料的垂直分辨率是 3 km 左右,图 1 给出了 MLS 对温度廓线和云冰廓线的测量结果. 图中给出了两个变量在五个压力层上的全球平均分布. Aura 卫星飞行的过境时间落后于 Aqua 大概 15 min 左右,因此 AMSR-E 和 MLS 数据的时空匹配的精度也相对较高^[12].

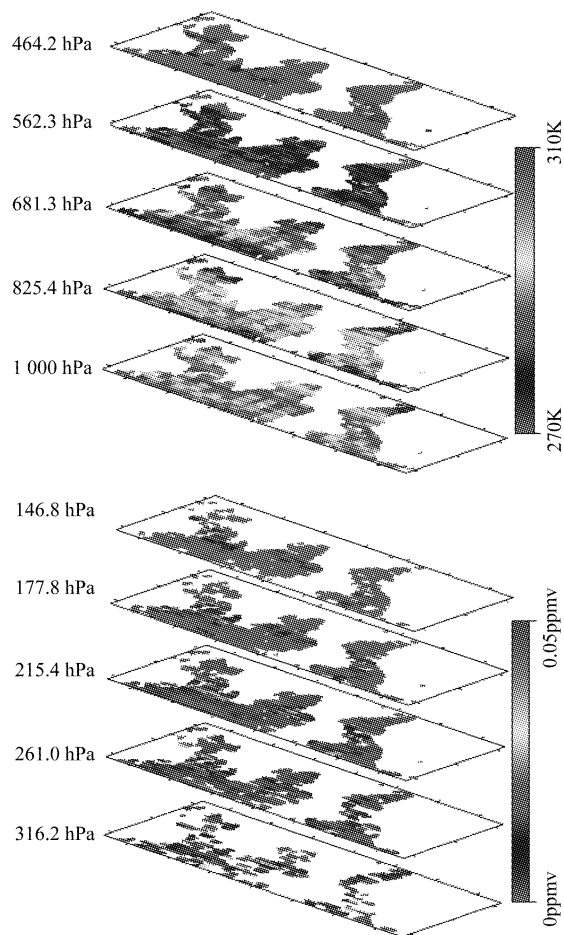


图 1 MLS 对温度廓线和冰云廓线的测量结果
Fig. 1 Temperature and ice cloud measured by MLS

对晴空和云雨天气的区分是利用 MODIS MYD35_L2 云掩膜产品区分出晴空天气以后,利用 AMSR-E L2A 的降雨数据区分雨区.

2 研究方法

辐射传输是描述电磁辐射强度经介质发生散射,发射和吸收过程的重要理论. 在本文的应用中,假定局域大气是平面平行的,因此只允许辐射强度和大气参数(温度和气体分布廓线)在垂直方向(即高度和气压)上变化,这种假定在物理意义上是适当的. 此时,测量与分层平面垂直的线性距离比较方便.

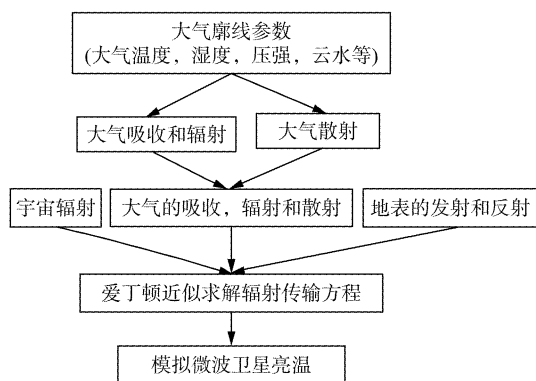


图2 一维微波亮温模拟器结构

Fig. 2 Structure of the passive microwave one dimensional simulator

所使用的辐射传输模型主要是应用了 Olson 和 Kummerow 等开发的被动微波一维大气辐射模拟器^[13-14], 结构如图 2 所示. 该模拟器的通用性和灵活性较强, 适用于晴空、云天和降雨等多种大气条件. 它能非常方便的对仪器参数和大气参数进行修改, 从而模拟出不同微波辐射计在不同观测角和不同边界条件下的亮温. 其中的边界条件可以采用不同的地表模型, 从而可以建立非常完整的空-地一体的微波辐射模拟系统.

3 大气校正研究

3.1 单点大气校正

利用 ARM 在点 $(36.68^{\circ}, -97.47^{\circ})$ 2007 年全年的探空大气廓线数据进行局部大气校正研究. 校正的对象为微波植被指数^[15]. Shi Jiancheng 等提出的微波植被指数中所包含的信息不仅仅包含植被信息, 同时还包含了大气信息. 因此, 如果要利用微波植被指数获得可靠的植被信息, 对其进行大气校正很有必要.

图 3 给出了点 $(36.68^{\circ}, -97.47^{\circ})$ 2007 年全年的 $(6.9 \text{ GHz}, 10.7 \text{ GHz})$ 和 $(10.7 \text{ GHz}, 18.7 \text{ GHz})$ 大气校正前后的微波植被指数时间序列图. 为了观察的更清楚和便于比较, 将全年的数据作了五天平均的处理, 并且在图中给出了五天内微波植被指数的方差. 图 4 给出的结果和图 3 相同, 不过平均的时间尺度不是五天, 而是一个月. 从图中可以得到如下的结论:

(1) 相对而言, 高频 $(10.7 \text{ GHz}, 18.7 \text{ GHz})$ 微波植被指数的大气校正尤为必要, 一年中大气的平均影响达到了 14.86%. 而低频 $(6.9 \text{ GHz}, 10.7 \text{ GHz})$ 微波植被指数的大气影响平均只有 1.35%. 因此大

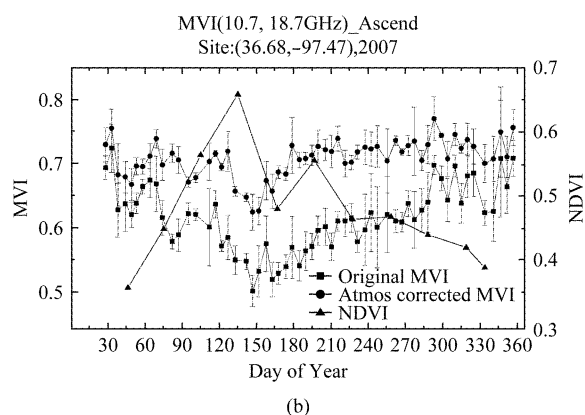
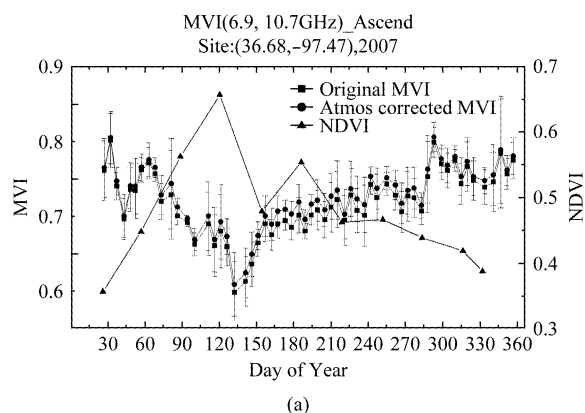
图3 点 $(36.68^{\circ}, -97.47^{\circ})$ 的微波植被指数五天平均大气校正前后时间序列对比图 (a) 低频微波植被指数, (b) 高频微波植被指数

Fig. 3 Comparison between MVIs before and after atmosphere correction for five day average (a) lower frequency MVI, (b) higher frequency MVI

于 10.7 GHz 的波段, 大气影响不可忽视.

(2) 对于 $(10.7 \text{ GHz}, 18.7 \text{ GHz})$ 的高频微波植被指数而言, 大气校正后的波动明显要比未经大气校正前的要小. 图 3 (b) 和图 4 (b) 中, 经过大气校正后的微波植被指数的方差条明显短于校正以前. 这说明, 未经大气校正的微波植被指数所含的信息不仅来自于植被, 大气的因素造成了其在时间序列上的剧烈波动. 但是在图 4 (b) 中, 需要说明是在五月份经过大气校正以后的方差条反而比校正以前的要长, 这和前面的分析刚好相反. 出现这种现象的原因是因为五月份植被的生长速度比较快, 在经过大气校正以后, 微波植被指数反而能更准确地反映植被的生长信息. 图中同时也给出了 NDVI 的变化曲线, 可以看出, 五月份刚好是该研究区域植被指数值最大的时候.

3.2 全球尺度的大气校正研究

选择 AMSR-E 的 2007 年 8 月 1 日的全球覆盖数据进行校正研究. 通过 AMSR-E 提供的降雨数据

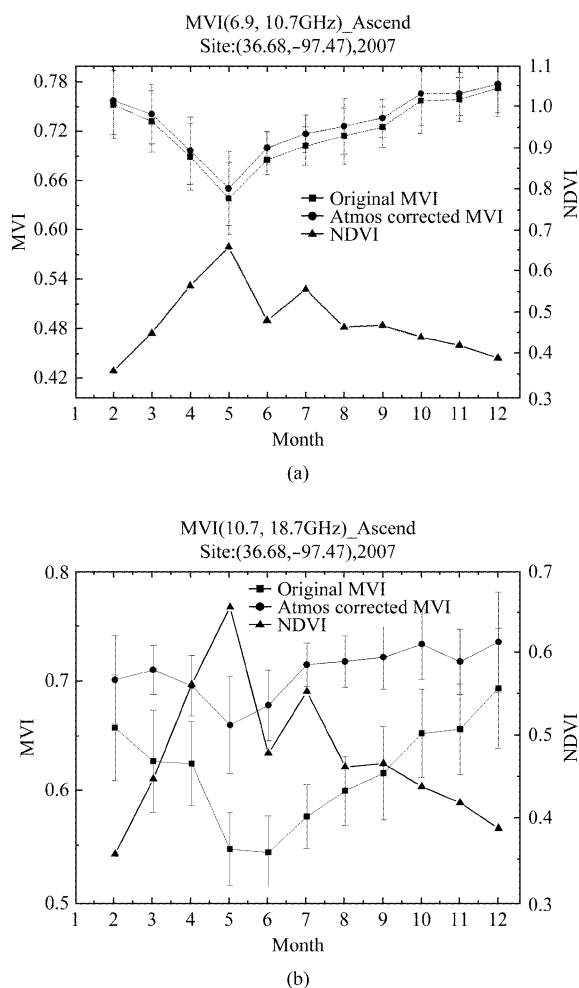


图4 点(36.68°, -97.47°)的微波植被指数月平均大气校正前后时间序列对比图 (a)低频微波植被指数, (b)高频微波植被指数
Fig. 4 Comparison between MVIs before and after atmosphere correction for one month average (a) lower frequency MVI, (b) higher frequency MVI

和MODIS提供的云覆盖数据,表1给出了2007年8月1日全球晴空,云雨覆盖统计结果.从表1可以看到,无论是升轨还是降轨,全球陆地上空被云雨覆盖的区域都超过了一半,因此只用MODIS数据进行大气校正是不可能实现的,所以利用微波辐射信息得到的大气廓线数据在云覆盖区域才会具有更高的可靠性.本文尝试在晴空区域利用MODIS大气数据产品、在云覆盖区域利用MLS大气产品在全球尺度上对AMSR-E亮温进行大气校正研究.

表1 2007年8月1日全球晴空,云雨覆盖情况分类统计
Table 1 Statistics for cloud and rain coverage of whole global at August 1, 2007

	晴空/(%)	云/(%)	雨/(%)
升轨	47.348 0	46.028 3	6.623 7
降轨	48.255 3	46.780 5	4.964 2

地表温度数据的精度也会对大气校正造成较大的影响.在晴空条件下,本文利用的地表温度数据是MODIS提供的MYD11_L2地表温度数据,该产品的验证精度能够达到1 K左右^[16-17].至于有云条件下的地表温度数据,则使用T. R. H. Holmes等2009年提出来的关系式进行反演^[18],该反演方法能够达到的验证精度为4.5 K:

$$T_s = 1.11T_{B,37V} - 15.2 \quad \text{for } T_{B,37V} > 259.8 \quad (1)$$

为了测试地表温度的精度对地表发射率的影响,利用模拟器进行了模拟.在模拟中,真实的地表温度和地表发射率先设为300 K和0.9,然后变化地表温度对地表发射率进行反演.图5和图6分别给出了晴空条件下和有云条件下的敏感性变化图.从图中可以看出,对于低频的6.9 GHz和10.7 GHz,甚至18.7 GHz,地表发射率受温度精度的影响不是很大.即使温度误差达到了5 K,而且云中液态水达到接近饱和的0.08 cm,地表发射率的误差也能控制在0.02以内.晴空条件下,只有23.8 GHz和89 GHz的地表发射率对水汽和地表温度的变化比较敏感,即使这样,只要地表温度的精度能够达到4 K,发射率的变化也不是很明显.图6中对于频率为89 GHz的情况下,当云中液态水为0.08 cm时,模拟地表发射率的反演值出现了大于1.0,出现这种现象的原因有两点,首先是模拟器的输入数据有问题.因为模拟器的大气输入廓线数据,包括湿度、压强、温度以及云中液态水,这些变量之间有联系.本文在进行模拟的时候,对云中液态水进行变化的时候,湿度、压强、温度并没有相应的进行变化,所以使得模拟器的廓线输入数据存在着误差;其次,89 GHz的频段由于波长相对较短,对散射比较敏感.当云中液态水为0.08 cm时,云层中的水滴极易对89 GHz频段的电磁波造成散射,而本文的模拟器采用的是平面平行假设,对散射的建模有误差.鉴于以上两点,对于89 GHz频段的模拟出现了地表发射率大于1.0的情况,但是整体上并不影响本次模拟所要说明的问题.

有云条件下,23.8 GHz以上波段的地表发射率计算会受到云和地表温度的影响,并且这种影响很明显.尤其是89 GHz,在有云状态下,即使地表温度1 K的误差,都会引起发射率发生不可忽略的变化.比较而言,23.8 GHz和36.5 GHz的变化没有那么明显,但是地表温度的误差也必须控制在4 K以内.

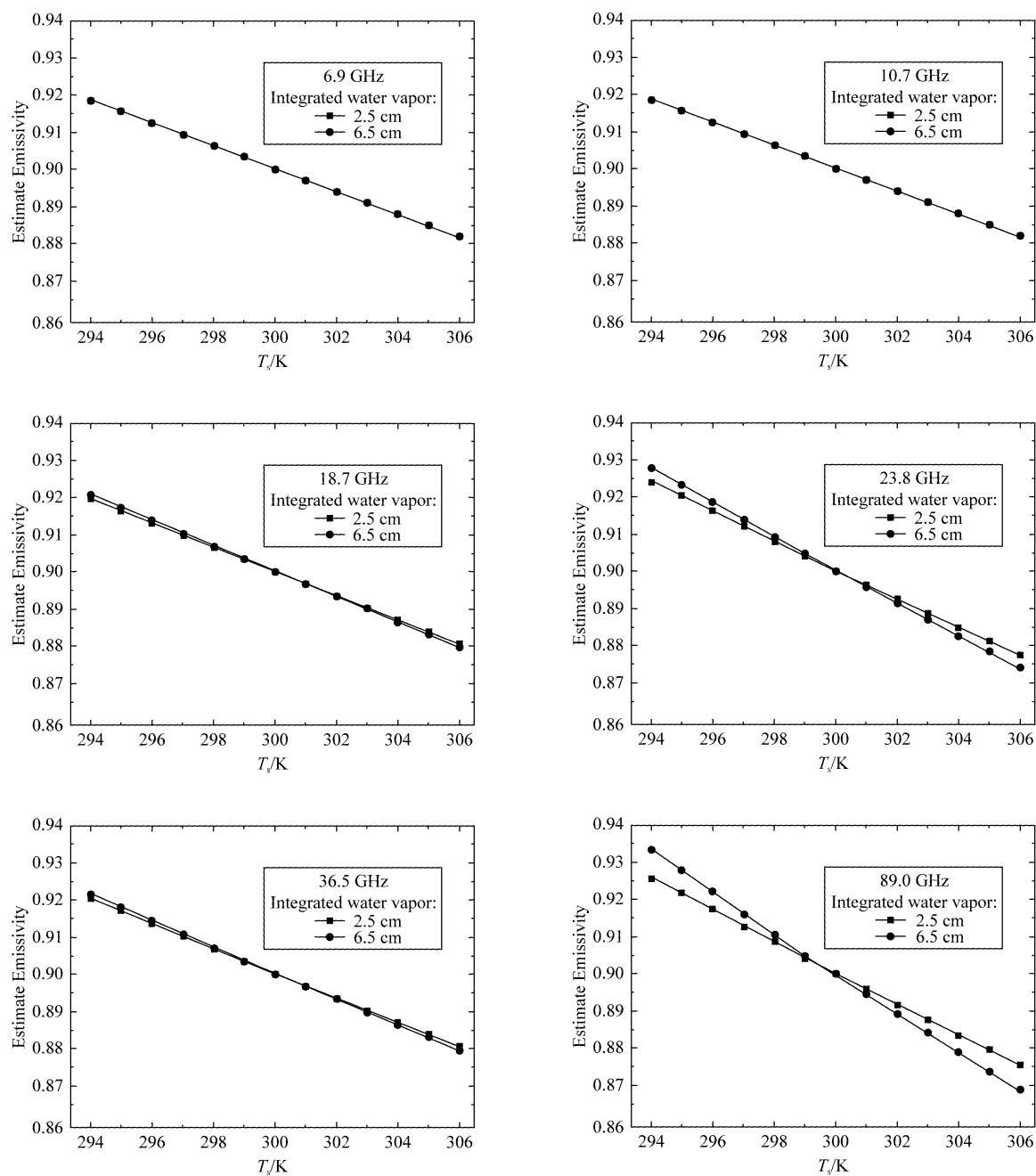


图5 地表发射率的反演对地表温度变化的敏感性(晴空条件下)

Fig. 5 Sensitivity of surface temperature to the retrieval of surface emissivity (Clear sky)

综上所述,在晴空条件下,MODIS 的地表温度数据的精度完全可以满足地表发射率的反演精度要求。而在有云条件下的情况比较复杂,利用36.5 GHz 的亮温得到的地表温度有可能会引起地表发射率反演的误差,尤其对于高频,这种误差更为明显。

本文计算了 AMSR-E 六个波段的全球瞬时地表发射率(未给出图),每个波段分别计算了升轨和降

轨,水平和垂直极化。计算结果和预期的结果基本相符。但是 89 GHz 的计算结果相对较差,这是因为 89 GHz 波长相对较短,对散射比较敏感。然而无论是 MLS 提供的产品还是 MODIS 提供的产品都不能很好的反演具有散射性质的大气参数,因此随着频率的提高,计算结果的误差也随之增大。

在所有波段中,垂直极化的发射率都大于水平

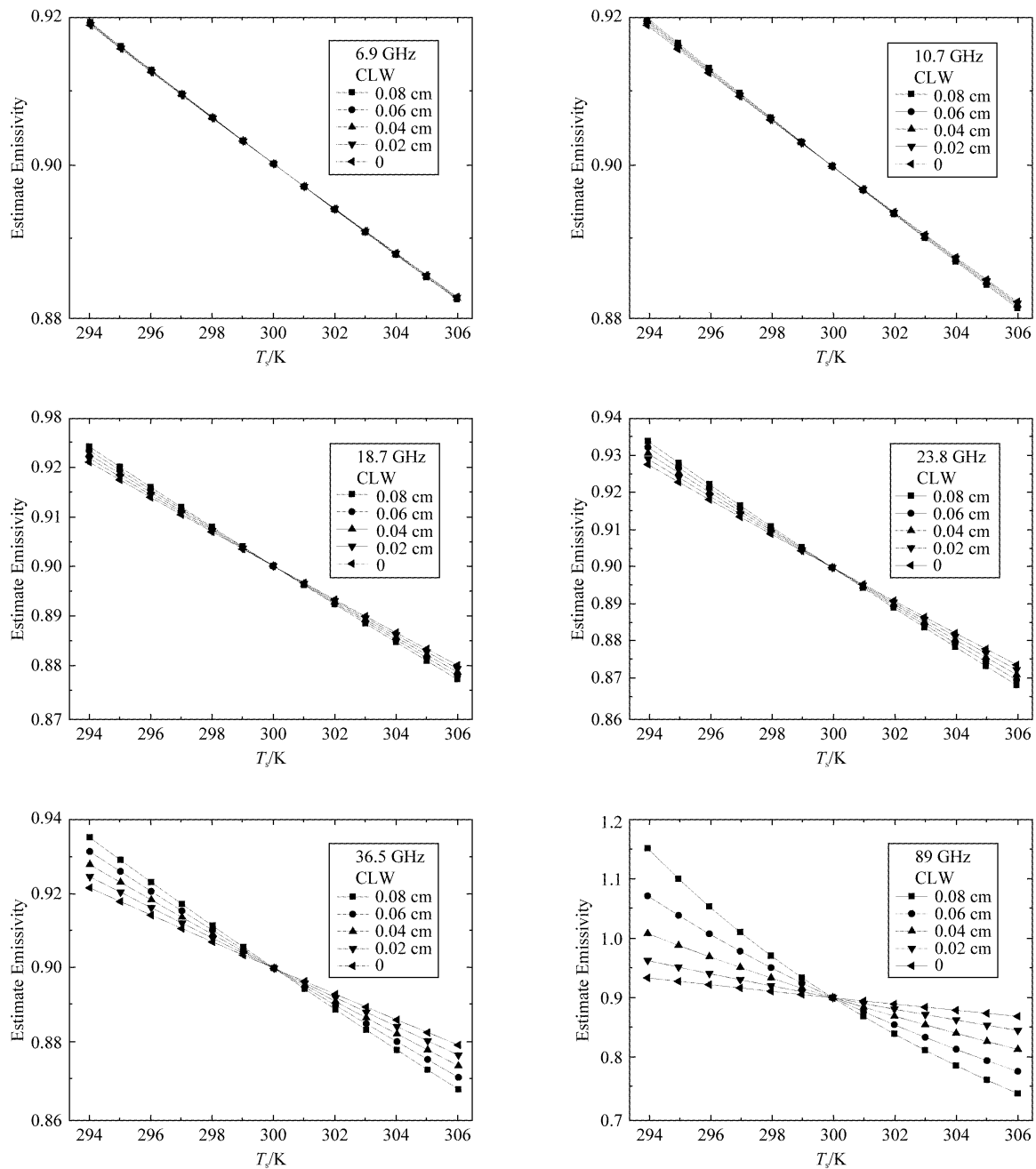


图6 地表发射率的反演对地表温度变化的敏感性(有云条件下)
Fig. 6 Sensitivity of surface temperature to the retrieval of surface emissivity (Cloudy)

极化的发射率,这和理论模型的模拟结果是一致的^[19]. 青藏高原在两种极化下都出现了低发射率的情况,撒哈拉沙漠、澳大利亚中部等沙漠地区也出现了相同的现象,这归结于沙漠地区表面电磁波信息散射作用的影响. 另外,在植被覆盖度比较大的地区地表发射率比较大,如赤道附近的雨林地区,这归结于植被对地表发射率的贡献. 一般水体(湖泊,河流)呈现低发射率,主要的河流(南美的亚马逊

河,中国的长江等)及其相关的湿地地区以及支流都显示了同样的发射率特征. 内陆一些低发射率地区的出现也可能与这些象元被小的湖泊或者湿地占据了部分或者大部分有关. 另外通过升轨和降轨的发射率的对比发现,降轨的发射率(对应于当地时间的晚上时间)一般情况下高于升轨的发射率(对应于当地时间的白天),特别是在沙漠、干旱或者半沙漠地区,这和沙漠地区昼夜温度变化幅度大有关.

表 2 地表发射率统计值

Table 2 Statistics of surface emissivity retrieval results

Frequency	Minimum		Maximum		Mean		>1.0(%)	
	Ascend	Descend	Ascend	Descend	Ascend	Descend	Ascend	Descend
6.9 V	0.562 9	0.577 2	1.397 8	1.349 3	0.926 0	0.948 1	3.65	4.45
6.9 H	0.247 1	0.293 2	1.207 2	1.570 7	1.313 5	0.855 6	0.883 4	1.85
10.7 V	0.556 4	0.568 9	1.570 7	1.509 0	0.920 5	0.958 3	7.68	8.71
10.7 H	0.226 3	0.267 3	1.292 5	1.487 8	0.857 3	0.890 9	3.83	4.23
18.7 V	0.437 7	0.535 7	1.833 4	1.786 1	0.922 4	0.952 9	9.75	10.03
18.7 H	0.202 7	0.110 9	1.778 1	1.691 4	0.864 6	0.908 8	7.46	8.46
23.8 V	0.086 27	0.514 7	1.681 0	1.716 0	0.897 0	0.931 0	12.68	13.81
23.8 H	0.481 1	0.391 8	1.548 3	1.675 1	0.824 8	0.874 6	10.93	11.78
36.5 V	0.267 9	0.621 9	1.598 8	1.797 5	0.915 2	0.932 8	14.65	16.72
36.5 H	0.540 1	0.422 0	1.485 6	1.698 7	0.846 9	0.872 4	12.55	13.53
89 V	0.678 6	0.681 7	1.952 6	1.782 5	0.910 8	0.958 0	22.35	23.25
89 H	0.530 4	0.542 6	1.892 4	1.687 2	0.870 8	0.921 6	18.71	21.27

表 2 给出了地表发射率计算结果的统计特征. 表中分别给出了升轨和降轨各个波段地表发射率的最大值、最小值、平均值以及异常值的比例. 从统计结果来看, 得到的结论和计算结果是一致的. 陆地表面发射率一般都比较高, 多在 0.9 左右. 垂直极化的地表发射率大于水平极化的地表发射率, 降轨的地表发射率大于升轨的地表发射率. 有一部分的地表发射率值出现了异常, 且随着频率的增加, 异常值的比例也出现了上升现象. 出现这种情形可以解释为, 因为地表发射率的反演考虑了大气的影响, 包括了晴空和有云条件下的大气状况. 晴空条件下, 大气状况相对稳定, 地表温度反演精度较高, 发射率的异常会随着波段的升高而降低. Yubao Qiu (2008) 认为低频波段波长较长, 具备更深的穿透能力 (导致了微波辐射温度并不能简单的认为等于地表温度), 并且对于地表土壤水分具有更高的敏感性^[20]. 在本文中出现了与之相反的结论. 归结其原因, 从图 6 有云条件下地表温度的反演精度对地表发射率反演影响分析来看, 随着频率的升高, 地表温度对发射率结果的反演误差也越大. 在有云条件下, 采用的地表温度数据精度相对较低. 此外, 随着频率的升高, 散射作用也会随之增强. 而本文的辐射传输算法中, 并没有考虑云中散射成分的影响. 上述两点原因导致了随着频率的升高, 地表发射率异常值的比例也随之升高.

计算了地表发射率, 便可以利用其结果计算出卫星亮温中的大气影响. 这里对大气影响的分析并没有像对地表发射率的分析那样给出如表 2 的统计结果. 这是因为大气影响与大气性质、地表性质都有

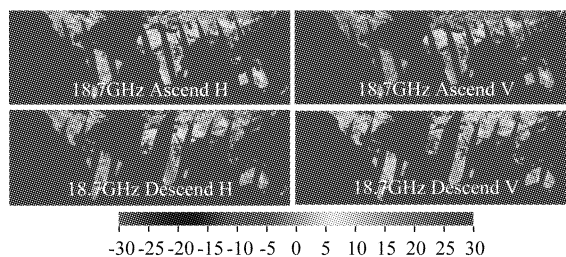


图 7 AMSR-E 的 10.7GHz 波段的全球大气影响(升/降轨, H/V 极化)

Fig. 7 Atmosphere influences on AMSR-E 10.7 GHz (Ascending and Descending, H and V polarization)

关, 其取值范围比较大, 所以只是从图中进行直观分析. 由于篇幅关系, 本文中图 7 给出了 AMSR-E 的 10.7 GHz 的大气影响分布图. 从图中可以看出, 随着频率的上升, 大气影响越来越明显. 结合其他波段的大气影响结果, 我们发现, 6.9 GHz 和 10.7 GHz 的大气影响, 不管是水平极化还是垂直极化都在 5 K 以内. 18.7 GHz 的大气影响非常明显, 和 10.7 GHz 相比增大了许多. 尤其是地表发射率比较低的区域, 大气的信息在卫星亮温中影响也随着频率的上升更加明显. 但是 18.7 GHz 的大气影响一般都在 15 K 以内. 频率在 23.8 GHz 以上的三个波段, 因为它们对大气的敏感性增强, 所以大气的影响也越发明显, 所表现出来的性质也更加复杂.

由于 23.8 GHz 比 36.5 GHz 对大气水汽更为敏感, 所以从图中的大气影响来看, 23.8 GHz 的大气影响也是大于 36.5 GHz 的大气影响. 从统计的云覆盖情况来看, 欧亚大陆的北部以及赤道地区多是云雨覆盖区域, 因此在该区域的大部分, 因为吸收和散射的缘故, 大气影响都是呈负值. 在地表发射率较低、天气情况较好的非洲北部、澳大利亚北部区域, 大气的辐射导致大气的影响是正值.

89 GHz 地表发射率的计算对地表温度误差非常敏感, 导致最后计算结果的可靠性也随之降低. 表 2 给出了地表发射率反演值的统计结果, 结果显示 89 GHz 的地表发射率反演结果大于 1.0 的异常值的比例占到了 20%, 可以推断, 即使反演值处于小于 1.0 的范围内, 准确度也不高. 因而这里不对 89 GHz 的大气影响作详细分析. 但是可以发现, 在有云覆盖地区, 89 GHz 的大气影响以散射为主, 导致大气的影响为负值. 而且因为大气的影响比较复杂, 缺失的值也较多.

综上所述, 对于全球大气影响的个例分析, 和前文的模拟结果相比, 发现本文所采用的输入数据以

及校正算法是有效的. 虽然在高频波段, 由于地表温度数据存在的不确定性, 导致最后计算的地表发射率和大气影响存在不稳定性, 但是随着地表温度数据精度的提高, 这一问题便可以得到很好的解决.

4 结论

以一年的大气廓线数据, 对过境时间相匹配的 AMSR-E 亮温数据进行了大气校正, 并通过计算校正前后的微波植被指数(MVI)分析了大气校正的有效性. 因为考虑到探空实测数据的区域局限性, 为了发展能够业务化的算法, 选择一天的 AMSR-E 亮温数据, 利用现有的卫星大气参数产品进行大气校正, 通过分析可以发现算法切实可行.

文章虽然取得了一些有意义的结果, 但是仍然有很多问题值得继续研究和探讨. 首先, 算法中采用的地表温度数据, 晴空条件下为 MODIS 提供的温度产品数据, 有云条件下采用的是 AMSR-E 的 36.5 GHz 反演的结果, 精度不能满足高频波段的大气校正, 因而如何获得准确的有云条件下的地表温度数据是需要努力的方向; 其次, 本文最后只是对某一天的微波辐射计亮温进行了大气校正, 而一天的大气状况的代表性有限, 因而本文算法是否适合任意条件下的大气校正, 比如说降雨(通过前文的模拟发现, 降雨条件下的大气校正更为复杂), 尚需要进一步探讨.

REFERENCES

- [1] Aschbacher J. *Land surface studies and atmospheric effects by satellite microwave radiometry* [M]. PhD dissertation, University of Innsbruck, 1989.
- [2] Wang Y Q. *The study of algorithms for retrieving atmospheric parameters by passive microwave remote sensing and atmospheric correction for passive microwave remote sensing* [M]. PhD dissertation, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [3] Matthias D, Wooda E F, Thomas J. Vegetative and atmospheric corrections for the soil moisture retrieval from passive microwave remote sensing data: Results from the southern great plains hydrology experiment 1997 [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2001, **2**(2): 181-192.
- [4] Fuhrhop R, Grenfell TC, Heygster G, et al. A combined radiative transfer model for sea ice, Open ocean, and atmosphere [J]. *Radio Science*, 1998, **33**(2): 303-316.
- [5] Wang Y Q, Shi J C, Liu Z H, et al. Retrieval algorithm for microwave surface emissivities based on multi-source, remote-sensing data: An assessment on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science China Earth Science*, 2013, **56**(1): 93-101.
- [6] Pulliainen J, Karna J, Hallikainen M. Development of geophysical retrieval algorithms for the MIMR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**(1): 268-277.
- [7] Chang A, Foster J, Hall D, et al. Snow parameters derived from microwave measurements during the BOREAS winter field campaign [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D24): 29663-29671.
- [8] Pulliainen J, Hallikainen M. Retrieval of regional snow water equivalent from space-borne passive microwave observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **75**(1): 76-85.
- [9] Mao K, Shi J, Qin Z, et al. Introduction of passive microwave-AMSR-E and their research and application fields [J]. *Remote Sensing Information*, 2005, **3**: 63-65.
- [10] Brodzik M, Knowles K. EASE-Grid: a versatile set of equal-area projections and grids [J]. *Discrete Global Grids*, 2002, **5**:110-125.
- [11] Stokes G M, Schwartz S E. The atmospheric radiation measurement (ARM) program: Programmatic background and design of the cloud and radiation test bed [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1994, **75**(7): 1201-1221.
- [12] Waters J W, Froidevaux L, Harwood R S, et al. The Earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the Aura satellite [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006, **44**(5):1075-1092.
- [13] Kummerow C, Olson W S, Giglio L. A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(5):1213-1232.
- [14] Olson W S, Bauer P, Viltard N F, et al. A melting-layer model for passive/active microwave remote sensing applications. Part I: Model formulation and comparison with observations [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, **40**(7):1145-1163.
- [15] Shi J C, Jackson T, Tao J, et al. Microwave vegetation indices for short vegetation covers from satellite passive microwave sensor AMSR-E [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 4285-4300.
- [16] Wan Z, Zhang Y, Zhang Q, 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.
- [17] Wan Z, Zhang Y, Zhang Q, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(1):261-274.
- [18] Holmes T R, De Jeu R, Owe M, et al. Land surface temperature from Ka band (37 GHz) passive microwave observations [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2009, **114**(D4): D04113.
- [19] Chen K, Wu T, Tsang T, et al. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(1): 90-101.
- [20] Qiu Y B. *Atmosphere influence analysis and its correction in passive microwave remote sensing over land* [M]. PhD dissertation, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2008.