

无云情况下L波段微波辐射计快速大气校正方法

杜延磊 马文韬 杨晓峰 刘桂红 于暘 李紫薇

A rapid atmospheric correction model for L-band microwave radiometer under the cloudless condition

Du Yan-Lei Ma Wen-Tao Yang Xiao-Feng Liu Gui-Hong Yu Yang Li Zi-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 079501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.079501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.079501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪定标系统中铝漫反射板实验测量研究

Experimental measurement of aluminium diffuser applied to calibration system of space-borne differential optical absorption spectrometer

物理学报.2013, 62(24): 249301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.249301>

应用一维变分法反演GPS掩星大气温湿廓线

1DVAR retrieval method for GPS radio occultation measurements of atmospheric temperature and humidity profiles

物理学报.2013, 62(15): 159301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.159301>

基于振动拉曼散射的差分水Ring效应系数卷积计算模型

A convolution algorithm of differential coefficients of liquid water based on vibrational Raman scattering

物理学报.2013, 62(10): 109301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.109301>

基于改进的单差法计算GPS掩星附加相位

GPS occultation excess phase computed utilizing the updated single difference technique

物理学报.2012, 61(14): 149301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.149301>

基于组合混沌遗传算法的认知无线电资源分配

Cognitive radio resource allocation based on combined chaotic genetic algorithm

物理学报.2011, 60(7): 079501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.079501>

无云情况下L波段微波辐射计快速大气校正方法*

杜延磊¹⁾²⁾ 马文韬^{1)†} 杨晓峰¹⁾ 刘桂红¹⁾ 于暘¹⁾ 李紫薇¹⁾

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

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年9月22日收到; 2014年10月29日收到修改稿)

利用数值天气预报模式输出的大气温湿廓线数据与大气辐射传输模型计算了无云情况下全球海面大气在L波段的上行、下行辐射亮温及透射率, 建立三个参数与大气水汽含量及海表气压的回归关系模型——辐射-水汽模型, 利用该模型可快速计算大气辐射参数, 对L波段微波辐射计进行大气校正. 为了验证模型的实用性和可靠性, 利用SSM/I卫星水汽含量数据和数值模式地表气压数据通过模型计算大气辐射参数, 并与Aquarius卫星实测L波段微波辐射数据进行对比分析. 结果表明: 模型计算的辐射亮温比卫星观测数据偏低约0.335 K, 但改正系统性偏差后的均方根误差仅0.086 K, 且模型计算的大气透射率与卫星观测数据基本一致, 说明利用该模型对L波段微波辐射计进行大气校正具有较高的可靠性, 相比于传统利用大气辐射传输模型进行大气校正, 该模型更为简单快速, 输入参数更易获取, 更适于工程应用.

关键词: L波段, 微波辐射计, 大气辐射传输, 大气校正

PACS: 95.85.Bh, 92.60.Vb, 93.85.Pq, 96.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.64.079501

1 引言

微波辐射计通过测量地球表面向外辐射的微波信号, 可以获得多类型的地球物理参量的时空分布信息系统参数, 其中, L波段微波辐射计在海水盐度、土壤水分含量以及海面风场等参量的定量反演中有着广泛的应用^[1-7]. 虽然, L波段微波的波长较长, 大气对L波段微波信号的影响较小. 但是, 随着微波遥感定量反演精度的提高, 大气对微波辐射信号的影响已经不能被简单地忽略, 针对微波辐射计的大气校正方法逐步得到重视. Liebe等将微波波段大气吸收系数的计算模型化, 建立了MPM89, MPM93和PWR98等一系列的大气吸收系数计算模型, 奠定了基于物理模型的微波辐射计大气校正方法的理论基础^[8-12]. Fuhrhop等利用MPM89模型和微波毫米波辐射传输模型MW-MOD研究了大气对地表发射率反演的影响^[13]. Yueh等利用MPM93模型及大气辐射传输模型定

量分析了大气主要成分对L波段微波辐射计反演海水盐度的影响^[2]. Skou基于独立的大气吸收模式, 分析了不同大气物理参量对大气辐射亮温的影响, 并给出它们之间的相关关系^[3]. 上述研究均为基于物理模型的微波辐射计大气校正. Wang等在地表发射率反演中, 利用MODIS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, 发现在雪水当量的反演中不可忽视大气的影响^[14]. 此外, 王永前等利用一年的大气廓线数据, 对AMSR-E载荷的亮温数据进行了大气校正, 获得了较好的结果^[15].

目前, 对于一些典型L波段微波辐射计的大气校正, 大多采用基于大气物理模型的大气校正方法^[16-20]. 例如, Aquarius卫星虽然具备了23.8 GHz和36 GHz等可用于大气校正辐射通道, 但是对L波段(1.4 GHz)盐度探测通道的大气校正还是基于美国国家环境预报中心(NCEP)发布的大气温湿廓线模式数据, 通过MPM93, PWR98及大气

* 国家自然科学基金(批准号: 41371355)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mawentao@ouc.edu.cn

辐射传输模型计算出大气辐射参数, 从而进行L波段微波辐射计的大气校正. 由于同平台不同微波通道获取的数据在空间和时间上的一致性, 本文试图基于大气物理模型和回归统计方法, 建立一种利用多通道遥感观测数据的L波段微波辐射大气校正算法, 降低大气校正对近实时大气廓线数据的依赖, 并提高大气校正的处理速度.

2 参数计算方法

2.1 大气辐射参数的计算

根据微波辐射传输方程, 微波辐射计的观测亮温可表示为^[21-23]

$$T(\theta, h) = te_s T_s + T_{up}(\theta, h) + \rho t T_{dw} + \rho t^2(T_{gal} + T_{cos} + T_{sun}), \quad (1)$$

式中, $T(\theta, h)$ 为微波辐射计测得的亮温; T_s 为海表的实际温度; T_{up} , T_{dw} 分别为大气上行、下行辐射亮温; ρ 为海面菲涅耳反射率; t 为大气透射率; T_{gal} , T_{cos} , T_{sun} 分别为银河系噪声、宇宙黑体辐射、太阳辐射等宇宙背景辐射的等效亮温.

由(1)式可以看出大气对微波辐射传输的影响主要包括三个部分: 大气对地表辐射能量的吸收衰减, 大气自身上行辐射能量中进入传感器以及大气自身下行辐射能量被地表反射后进入传感器的部分.

通过求解辐射传输方程可知大气自身上行辐射亮温的计算公式为^[9,24]

$$T_{up}(\lambda) = \int_z^{z_H} T_z k_{az}(\lambda) t_z(\lambda) dz, \quad (2)$$

式中, $T_{up}(\lambda)$ 为高度 z 到大气顶 z_H 的大气上行辐射亮温; T_z 为高度 z 的气温; $k_{az}(\lambda)$ 为高度 z 的大气吸收系数; $t_z(\lambda)$ 为高度 z 到大气顶 z_H 的大气透射率.

由(2)式可知, 若要计算大气上行辐射亮温, 需要在大气垂直剖面内进行积分, 并获得不同位势高度的相关大气物理参数. 本文所使用的大气廓线数据为NCEP模式输出数据. NCEP大气温湿廓线为等压面数据, 为了提高数据分辨率和便于积分运算, 本文对等压面数据进行线性内插处理, 将17层等压面数据插值为1km垂直分辨率的31层等高度面数据.

根据Liebe等给出的大气辐射传输模型, 对于分层的大气廓线数据, 大气上行辐射的计算公式为^[9]

$$T_{up}(\lambda) = 0.2303 \sum_i T_i k_{ai}(\lambda) t_i(\lambda), \quad (3)$$

式中, T_i 为第 i 层的气温; $k_{ai}(\lambda)$ 为第 i 层的大气吸收系数; $t_i(\lambda)$ 为第 i 层到大气层顶的大气透射率, 具体由下式计算:

$$t_i = 10^{-0.1\tau_i \sec\alpha}, \quad (4)$$

式中, α 为传感器观测角; τ_i 为第 i 层到大气层顶的光学厚度, 可由相邻两层间大气吸收系数均值积分获得. 结合Liebe等给出的大气吸收系数与复折射率虚部的关系式有^[9]

$$\tau_i = \sum_z^{z_H} k_{ai} = 0.1820f \sum_z^{z_H} N''_{i_mid}, \quad (5)$$

式中, $N''_{i_mid} = (N''_i + N''_{i+1})/2$ 为第 i 和 $i+1$ 层间的大气复折射率虚部均值. 由(4)式可得大气的透射率为 t_1 .

大气的下行辐射根据(3)式得

$$T_{down}(\lambda) = 0.2303 \sum_i T_i k_{ai}(\lambda) \left(\frac{t_1}{t_i(\lambda)} \right). \quad (6)$$

2.2 大气水汽含量的计算

无云情况下大气对L波段微波辐射传输影响的主要成分是水汽, 为了分析水汽与大气辐射参数的关系, 本文根据Liebe给出的水汽密度计算模式, 利用插值的NCEP温湿廓线数据计算每一层大气水汽含量^[9].

大气的相对湿度表示为

$$q = E/E_s, \quad (7)$$

式中, E 为水汽压; E_s 为饱和水汽压, 可由下式计算:

$$E_s = 2.408 \times 10^{11} \theta^5 \exp(-22.644\theta), \quad (8)$$

式中, θ 为倒数温度, 表示为

$$\theta = 300/(T + 273.15), \quad (9)$$

式中, T 为实际的大气物理温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$. 由(7)式可以得到水汽压 E 为

$$E = (q/100) \cdot E_s, \quad (10)$$

最终, 水汽密度可以表示为

$$\rho_v = 0.7223 \times E \times \theta, \quad (11)$$

由(11)式, 利用大气温湿廓线数据计算得到每层大气的水汽密度, 然后对其在垂直剖面内进行积分得到大气柱总水汽含量.

3 辐射-水汽关系模型

3.1 数据处理

根据插值处理后的NCEP温湿廓线数据, 利用Liebe等给出的MPM93模型计算不同分层大气的复折射率虚部, 由此通过前文所述的大气辐射参数计算方法, 我们计算了2013年每月15日无云情况下全球海面大气在L波段的上行、下行辐射亮温及透射率, 其中, 为了便于模型的验证, 将观测角 α 设为与Aquarius卫星第二波段相一致的 38.46° . 同样, 根据前文所述的海面大气水汽含量计算方法, 计算2013年每月15日全球海面大气的总水汽含量.

图1给出了2013年4月15日全球海面无云大气条件下的L波段上行、下行辐射亮温和透射率以及全球海面大气的总水汽含量等参数分布图. 由图1(a), (b), (c)可以发现, 海面无云大气的上行、下行辐射亮温基本相同, 且在全球范围内有明显的纬度变化特征, 具体表现为赤道地区低、两极地区高, 而全球海面无云大气的透射率在空间的变化特征与辐射亮温相反. 由图1(d)可以看出海面大气的总水汽含量在全球分布表现为赤道地区高、两极地区低的纬度变化特征, 这与大气辐射亮温的空间变化趋势相反, 而与透射率的变化趋势相一致, 因此可以发现海面大气水汽含量与辐射亮温呈负相关, 与透射率呈正相关.

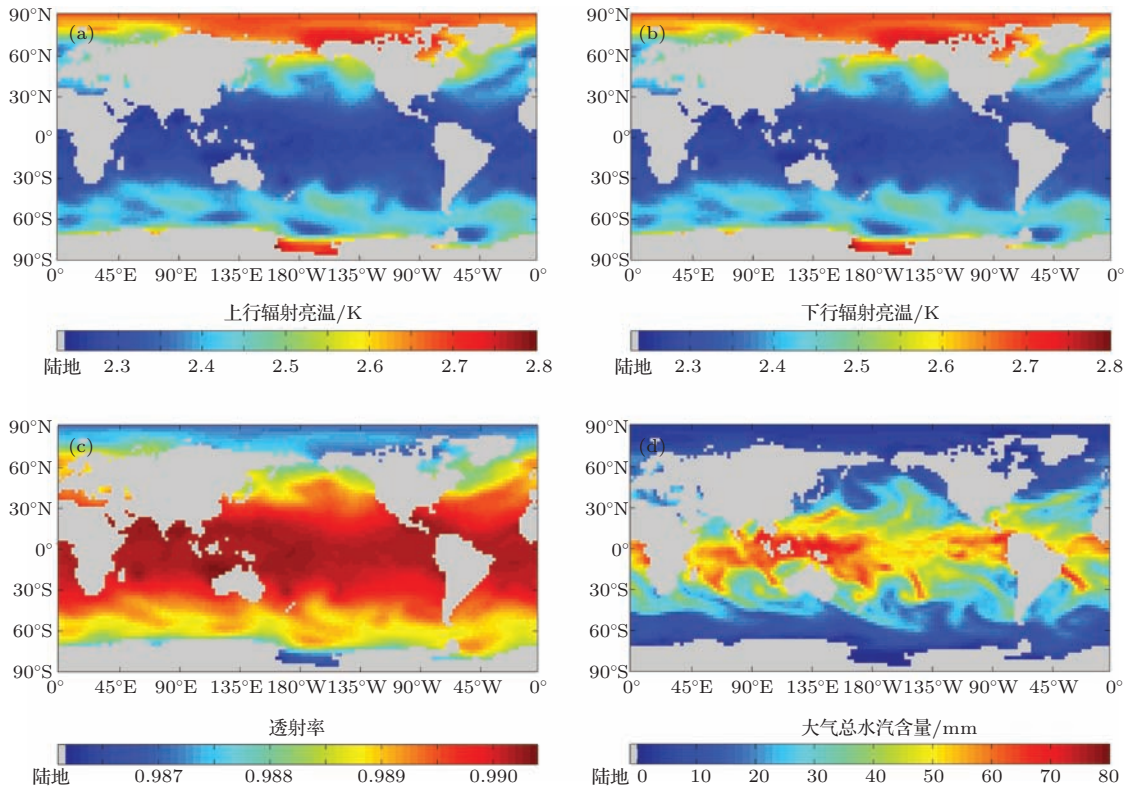


图1 利用NCEP数据计算获得的2013年4月15日全球海面无云大气的辐射参数和水汽含量 (a), (b), (c)分别为大气上行、下行辐射亮温及透射率; (d)为大气总水汽含量

3.2 回归模型建立

由前文分析可知大气的上行、下行辐射亮温及透射率与大气的温度、压强及相对湿度三个物理量有关, 大气的总水汽含量可由大气的气温和相对湿度计算而得, 因此, 大气的辐射参数与大气的总水汽含量及气压有关. 而气压在大气垂直剖面内可由

下式表示^[3]:

$$P(z) = P_0 \exp(-z/7.7\text{km})[\text{mbar}] \quad (12)$$

式中, $P(z)$ 为高度 z 的气压; P_0 为地球表面气压($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$).

根据(12)式, 不同高度的气压可由地表气压表示. 由此可以看出, 海面无云大气的辐射参数与大气总水汽含量及地表气压这两个非大气廓线物理参数相关.

为了分析大气辐射参数与大气总水汽含量及地表气压这两个物理参数的关系, 本文采用数值回归分析的方法分析它们之间的关系. 根据Skou的分析可知, 大气的辐射亮温与地表气压成线性正相关^[3], 因此本文将NCEP提供的地表气压数据在985—1040 mbar区间内等分为985—990 mbar, 990—995 mbar, 995—1000 mbar, 1000—1005 mbar, 1005—1010 mbar, 1010—1015 mbar, 1015—1020 mbar, 1020—1025 mbar, 1025—1030 mbar, 1030—1035 mbar等10个子区间, 分析在每个子区间气压下的海面大气辐射亮温及透射率与大气水汽含量的关系.

模拟实验结果发现, 海面大气的辐射亮温与大气总水汽含量之间存在指数相关关系, 因此, 本文利用下式对大气辐射亮温与大气总水汽含量进行拟合

$$T = a \times \exp(-b \times \rho) + c, \quad (13)$$

式中, T 为海面大气的辐射亮温; ρ 为大气总水汽含量. 对 a, b, c 三个系数在各个气压区间的取值利用4次多项式与地表气压进行拟合, 即

$$a = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4, \quad (14)$$

$$b = b_0 + b_1P + b_2P^2 + b_3P^3 + b_4P^4, \quad (15)$$

$$c = c_0 + c_1P + c_2P^2 + c_3P^3 + c_4P^4, \quad (16)$$

式中, $(a, b, c)_i (i = 0, 1, 2, 3, 4)$ 为拟合系数; P 为地表气压. 由(13)—(16)式就建立了海面无云大气辐射参数与大气水汽含量及地表气压的关系模型, 由于该模型主要反映了大气辐射参数与大气总水汽含量之间的相关关系, 我们称其为辐射-水汽关系模型, 简称R-V模型.

3.2.1 上行辐射亮温模型的系数

由(13)式拟合得2013年每月15日全球海面无云大气的上行辐射亮温与大气总水汽含量在10个

地表气压区间的关系曲线, 图2所示为地表气压在1010—1015 mbar区间内大气上行辐射亮温与大气总水汽含量的关系曲线. 表1给出了各个地表气压区间拟合大气上行辐射亮温与总水汽含量的关系曲线系数及决定系数 R^2 .

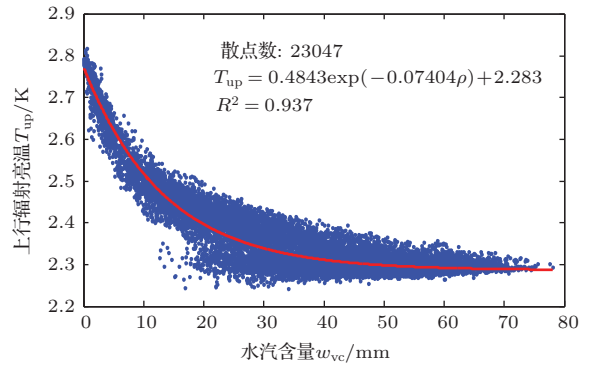


图2 地表气压在1010—1015 mbar区间内大气上行辐射亮温与大气总水汽含量的关系曲线

表1 各气压区间拟合关系曲线系数及决定系数 R^2

表面气压区间/mbar	a	b	c	R^2
985—99	0.3332	0.1230	2.316	0.8624
990—995	0.3552	0.1118	2.318	0.9049
995—1000	0.3937	0.09515	2.307	0.9390
1000—1005	0.4232	0.07055	2.272	0.9138
1005—1010	0.4482	0.06233	2.263	0.9437
1010—1015	0.4843	0.07404	2.283	0.9371
1015—1020	0.4713	0.08403	2.319	0.9126
1020—1025	0.4676	0.1017	2.360	0.9327
1025—1030	0.4556	0.1141	2.399	0.9328
1030—1035	0.4591	0.1155	2.425	0.9394

通过(14)—(16)式, 利用地表气压数据对 a_i, b_i, c_i 三个系数在各个气压区间的取值进行拟合(结果见表2).

表2 利用4次多项式对上行辐射亮温模型系数 a, b, c 拟合的多项式系数

名称	0	1	2	$3(\times 10^{-3})$	$4(\times 10^{-7})$	R^2
a	303967.081	-1203.418	1.786	1.178	2.914	0.9895
b	-265942.381	1055.508	-1.571	1.039	2.575	0.9828
c	-526704.632	2087.041	-3.101	2.047	5.068	0.9929

3.2.2 下行辐射亮温模型的系数

由NCEP数据计算的海面大气上行辐射亮温与下行辐射亮温最大相差不超过0.05 K, 因此, 利

用(13)式—(16)式所述模型对大气下行辐射亮温与大气水汽含量及地表气压建立回归模型, 模型系数见表3.

表3 下行辐射亮温模型系数拟合结果

名称	0	1	2	$3(\times 10^{-3})$	$4(\times 10^{-7})$	R^2
a	304509.867	-1205.559	1.790	1.180	2.919	0.9895
b	-266563.849	1057.969	-1.574	1.041	2.581	0.9828
c	-531239.193	2105.075	-3.128	2.065	5.112	0.9929

表4 透射率模型系数拟合结果

名称	0	1	2	$3(\times 10^{-5})$	$4(\times 10^{-8})$	R^2
a	-2409.242	9.546	-0.014	0.936	-0.232	0.9937
b	-202716.932	805.024	-1.199	79.309	-19.680	0.9882
c	3342.350	-13.242	0.020	-1.299	0.322	0.9863

3.2.3 透射率模型的系数

由图1(a)和(c)可以看出,海面大气辐射亮温与透射率呈负相关.如图3所示为2013年1月—3月的全球海面大气上行辐射亮温和大气透射率线性拟合,由图可见海面大气的辐射亮温与透射率呈线性负相关.因此,利用(13)式—(16)式所述模型对大气透射率与大气水汽含量及地表气压建立回归模型,模型参数如表4所示.

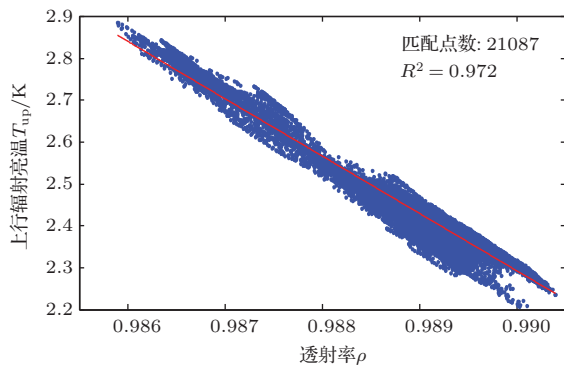


图3 2013年每月15日全球海面大气上行辐射亮温对大气透射率线性拟合

4 验证与分析

为了验证提出的R-V模型用于L波段微波辐射计大气校正的有效性,本文利用Aquarius卫星搭载的L波段微波辐射计实测数据以及NASA提供的同步大气辐射参数数据对模型模拟结果进行了对比验证.对于模型计算所需的输入数据,本文选取SSM/I星载微波辐射计获取的全球海面大气水汽含量数据以及NCEP地表气压数据参与计算.由于模型是基于2013年每月15日的辐射和物理参数建立的,为了验证模型在全年不同时间的适用性,我们选取2013年不同季节的4天进行验证,即

四季的节气日:3月21日,6月22日,9月23日和12月22日.

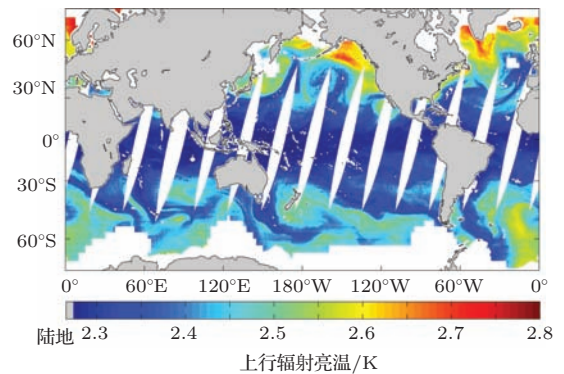


图4 利用2013年3月21日SSM/I升轨水汽数据通过模型计算的全球海面大气上行辐射亮温(图中白色表示数据缺失的地方)

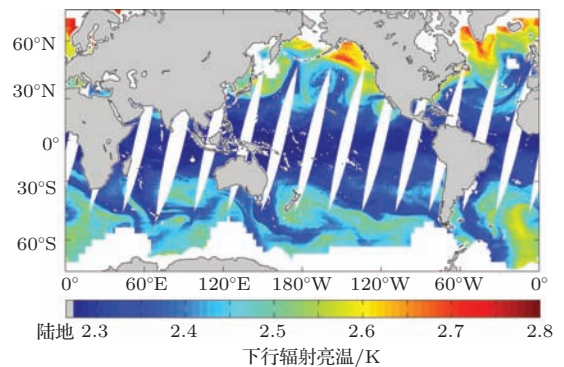


图5 利用2013年3月21日SSM/I升轨水汽数据通过模型计算的全球海面大气下行辐射亮温(图中白色表示数据缺失的地方)

对所选取4天的SSM/I数据进行辐射定标和叠加处理,对NCEP数据与SSM/I数据进行匹配和重采样,将预处理后的SSM/I数据和NCEP数据代入模型计算获得2013年3月21日,6月22日,9月23日和12月22日这四天的海面大气上行、下行辐

射亮温及大气透射率. 图4至图6给出了模型计算的2013年3月21日全球海面无云大气的上行、下行辐射亮温及透射率.

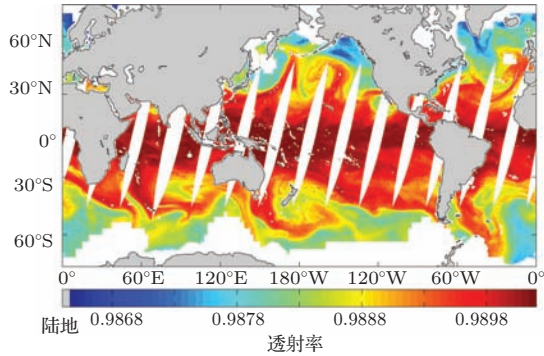


图6 利用2013年3月21日SSM/I升轨水汽数据通过模型计算的全球海面无云大气在L波段的透射率(图中白色表示数据缺失的地方)

4.1 各辐射参数的精度分析

将模型计算的全球海面无云大气的辐射参数与Aquarius卫星数据集中给出的大气辐射参数进行对比, 结果如表5所示. 由表5可见, 由于模型未考虑云的影响, 模型计算的大气辐射亮温比Aquarius的数据系统地偏低约0.335 K, 在改正系统偏差后, 二者的均方根误差约为0.086 K. 而模型计算的大气透射率与Aquarius给出的透射率相差较小.

4.2 大气层顶亮温的精度分析

进一步将模型计算的和Aquarius数据给出的大气辐射参数分别代入(1)式所描述的大气辐射传输方程, 计算得到大气层顶高度(TOA)的亮温,

并与Aquarius卫星实测亮温数据进行对比. 方程中其他参数如海表温度以及宇宙背景辐射等皆采用Aquarius数据集中提供的相关参数, 海表亮温为数据中提供的利用地球物理模式函数计算的结果, 海表亮温模型的输入为辅助的再分析温度场、HYCOM模式盐度场和NCEP风场数据, 其精度约为0.14 K [25]. 表6给出了由两组大气辐射参数计算的TOA亮温在实验所选4天的均值与Aquarius卫星实测数据对比结果. 图7为2013年6月22日由模型计算的水平和垂直极化条件下天顶亮温与Aquarius实测天顶亮温的对比结果.

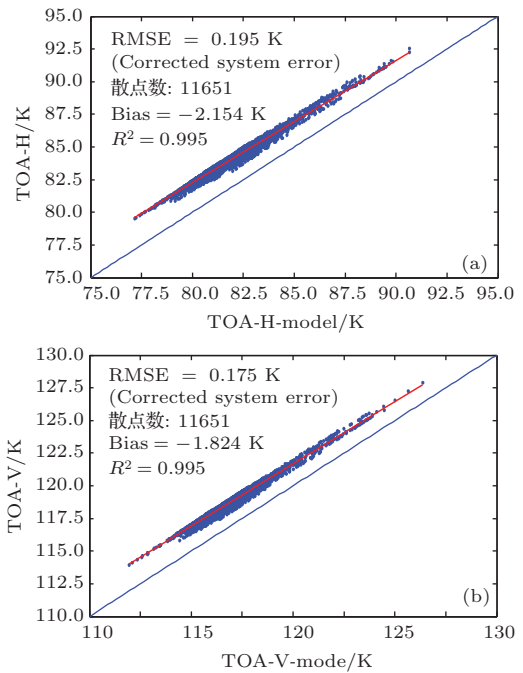


图7 模型计算TOA亮温与Aquarius卫星实测TOA亮温的对比 (a), (b) 分别代表水平极化和垂直极化

表5 模型计算的辐射参数与Aquarius资料数据对比结果

日期	上行辐射亮温		下行辐射亮温		透射率	
	偏差/K	均方根误差*/K	偏差/K	均方根误差*/K	偏差/10 ⁻⁴	均方根误差/10 ⁻⁴
3.21	0.333	0.065	0.330	0.066	3.252	5.470
6.22	0.338	0.099	0.336	0.099	2.948	7.370
9.23	0.340	0.107	0.338	0.107	2.747	7.888
12.22	0.331	0.072	0.329	0.072	3.573	5.800
平均	0.336	0.086	0.333	0.086	3.130	6.632

*注: 改正系统偏差后的均方根误差.

表6 模型TOA亮温和Aquarius实测数据的对比结果

极化方式	偏差/K			均方根误差(去除系统偏差)/K		
	Aquarius	模型	互差	Aquarius	模型	互差
H	-1.524	-2.117	0.593	0.237	0.269	0.032
V	-1.228	-1.792	0.564	0.215	0.244	0.029

5 结论与讨论

从表 5 中可以看出, 利用本文提出的 R-V 模型计算得到的无云大气 L 波段的辐射亮温比 Aquarius 卫星观测值偏低约 0.335 K, 由于本文模型未考虑大气中云(液态水)的影响, 因此计算的结果出现系统性地偏低是合理的, 在改正系统偏差之后, 模型计算结果与 Aquarius 数据之间的均方根误差仅为 0.086 K, 说明模型计算的结果具有较好的稳定性和可靠性. 而对于大气的透射率, 模型计算的结果与 Aquarius 数据相比, 偏差和均方根误差分别为 0.0313% 和 0.06632%, 说明本文模型计算的大气透射率较为准确.

另外, 从表 6 和图 7 可以看出, 将本文模型计算的大气辐射参数与 Aquarius 数据给出的大气辐射参数分别代入大气辐射传输方程计算出 TOA 亮温, 并将其与 Aquarius 卫星实测亮温进行对比, 结果表明二者计算的 TOA 亮温与实测数据相比都有一定的系统偏差, 在水平极化下分别为 -1.524 K 和 -2.117 K, 在垂直极化下为 -1.228 K 和 -1.792 K. 这一系统偏差应该是辐射传输模型计算的 TOA 亮温与经电离层改正后的 TOA 高度 Aquarius 亮温之间的固有偏差, 可以通过传感器定标进行改正. 二者的互差在水平和垂直极化条件下分别为 0.593 K 和 0.564 K, 这一系统偏差主要源于未考虑液水的影响以及大气辐射传输模型的误差. 在进行系统误差订正后, TOA 亮温与实测亮温的均方根误差较为相近, 均方根误差的互差在水平和垂直极化条件下分别为 0.032 K 和 0.029 K, 说明本文模型在使用较少辅助数据的情况下, 仍然保持了较好的稳定性和可靠性.

综上所述, 利用本文的模型对 L 波段微波辐射计进行大气校正具有实用性和可靠性, 摆脱了传统微波辐射计大气校正对近实时大气廓线数据的依赖, 而仅需要输入大气总水汽含量和地表气压数据即可进行大气校正, 更为简单和快捷. 对于诸如 Aquarius 卫星搭载的 L 波段辐射计的大气校正, 由于星上搭载了与 L 波段辐射计具有较好时空一致性的辅助辐射计, 可以利用星上搭载的辅助辐射计数据, 采用本文的模型进行大气校正.

然而, 本文模型尚未考虑大气中云的影响, 后续将结合大气中液水含量数据进一步分析大气辐射参数与之存在的相关关系, 优化本文模型, 有望进一步提高大气校正的精度.

参考文献

- [1] Bettenhausen M H, Smith C K, Bevilacqua R M, Wang N Y, Gaiser P W, Cox S K 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44** 597
- [2] Yueh S H, West R, Wilson W J, Li F K, Njoku E G, Rahmat-Samii Y 2001 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **39** 1049
- [3] Skou N, Hoffman-Bang D 2005 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **43** 2210
- [4] Camps A, Font J, Mercè V, Gabarro C, Corbella I, Duffo N, Torres F, Blanch S, Aguasca A, Villarino R, Enrique L, Miranda J J, Arenas J J, Julia A, Etcheto J, Caselles V, Weill A, Boutin J, Contardo S, Niclós R, Rivas R, Reising S C, Wursteisen P, Berger M, Martín-Neira M 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **42** 804
- [5] Wentz F J, Spencer R W 1998 *J. Atmos. Sci.* **55** 1613
- [6] Meissner T, Wentz F J 2009 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **47** 3065
- [7] Hariharan T A, Pandey P C 1983 *Proc. Indian Acad. Sci.* **6** 233
- [8] Liebe H J 1989 *Int. J. Infrared and Millimeter Waves* **10** 631
- [9] Liebe H J, Hufford G A, Cotton M G 1993 *AGARD 52nd Specialists Meeting of the Electromagnetic Wave Propagation Panel* Palma De Mallorca, Spain, May 17-21 1993 p3.1
- [10] Rosenkranz P W 1998 *Radio sci.* **33** 919
- [11] Liebe H J 1985 *Radio Sci.* **20** 1069
- [12] Liebe H J, Rosenkranz P W, Hufford G A 1992 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **48** 629
- [13] Fuhrhop R, Grenfell T C, Heygster G, Johnsen K P, Schlüssel P, Schrader M, Simmer C 1998 *Radio Sci.* **33** 303
- [14] Wang Y Q, Shi J C, Liu Z H, Peng Y J, Liu W J 2013 *itScience China Earth Sciences* **56** 93
- [15] Wang Y Q, Feng W L, Shi J C, Qiu Y B, Liu Z H 2014 *J. Infrared Millim. Waves* **33** 192 (in Chinese) [王永前, 冯文兰, 施建成, 邱玉宝, 刘志红 2014 红外与毫米波学报 **33** 192]
- [16] Shi J K, Lu W, Yan W, Ai W H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 078402 (in Chinese) [施健康, 陆文, 严卫, 艾未华 2013 物理学报 **62** 078402]
- [17] Zhou X, Yang X F, Li Z W, Yu Y, Ma S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 149202 (in Chinese) [周旋, 杨晓峰, 李紫薇, 于暘, 马胜 2012 物理学报 **61** 149202]
- [18] Yan W, Lu W, Shi J K, Ren J Q, Wang R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 099401 (in Chinese) [严卫, 陆文, 施健康, 任建奇, 王蕊 2011 物理学报 **60** 099401]
- [19] Zu X Y, Zhou J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 019501
- [20] Liu Y, Peng Q Z, Shao H Z, Peng Q H, Wang L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 078406 (in Chinese) [刘允, 彭启琮, 邵怀宗, 彭启航, 王玲 2013 物理学报 **62** 078406]
- [21] Stewart R H 1985 *Methods of Satellite Oceanography* (Berkeley: University of California Press) p360
- [22] Liu Y G 2009 *Satellite Oceanography* (Beijing: Higher Education Press) pp201-221 (in Chinese) [刘玉光 2009 卫星海洋学(北京: 高等教育出版社) 第 201—221 页]

- [23] Wang Z Z 2005 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王振占 2005 博士学位论文 (北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心)]
- [24] Seelye M (translated by Jiang X W) 2008 *An Introduction to Ocean Remote Sensing* (Beijing: Ocean Press) pp86–99 (in Chinese) [西利 M 著 (蒋兴伟译) 2008 海洋遥感导论 (北京: 海洋出版社) 第 86—99 页]
- [25] Yueh S H, Tang W Q, Fore A G, Neumann G, Hayashi A, Freedman A, Chaubell J, Lagerloef G S E 2013 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **51** 4619

A rapid atmospheric correction model for L-band microwave radiometer under the cloudless condition*

Du Yan-Lei¹⁾²⁾ Ma Wen-Tao^{1)†} Yang Xiao-Feng¹⁾ Liu Gui-Hong¹⁾
Yu Yang¹⁾ Li Zi-Wei¹⁾

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

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 22 September 2014; revised manuscript received 29 October 2014)

Abstract

Atmospheric correction is very important to the accurate retrieval of geophysical parameters from spaceborne L-band radiometers. In this paper, the L-band upwelling and downwelling radiation brightness temperature and transmittance above sea surface are calculated using the atmospheric radiation transfer model based on NCEP temperature and humidity profile data. A regression model, i.e., radiation-vapor model, is established to describe the relationship between the three atmospheric radiation parameters and the atmospheric water vapor content as well as the sea surface pressure. Using this model, the atmospheric radiation parameters can be calculated and used to correct the atmospheric effects in L-band microwave radiometer observation. In order to test the proposed model, the atmospheric radiation parameters are calculated by this model and compared with the SSM/I water vapor content data and the NCEP surface pressure data. Finally, the model outputs are compared with the Aquarius satellite data. Results indicate that the radiation brightness temperature calculated by the proposed model is lower than the Aquarius data about 0.335 K and the root-mean-square error between them is about 0.086 K after correcting the systematic errors. The atmospheric transmittance calculated by the proposed model agrees well with the Aquarius data. Besides, the proposed model uses fewer input data and is faster and more stable than other existing models.

Keywords: L-band, microwave radiometer, atmospheric radiation transfer, atmospheric correction

PACS: 95.85.Bh, 92.60.Vb, 93.85.Pq, 96.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.64.079501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41371355).

† Corresponding author. E-mail: mawentao@ouc.edu.cn