

用于星载太赫兹波被动遥感卷云参数的 通道辐射特性及反演影响因素研究

李书磊¹, 刘磊^{2*}, 高太长², 石立华¹, 邱实¹, 胡帅²

(1. 陆军工程大学 电磁环境效应与光电工程国家级重点实验室, 江苏 南京 210007;

2. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要:太赫兹波是理论上遥感卷云微物理参数的最佳波段,但星载太赫兹波被动遥感的结果易受到非卷云因素(地表反射率、大气廓线、中低层水云等)的影响.利用辐射传输模式分别模拟计算了地表反射率、大气廓线、中低层水云对大气层顶太赫兹辐射光谱的影响,并基于多重查找表法定量分析了这些因素的变化所造成的反演误差.结果表明:地表反射率对太赫兹辐射光谱的影响主要集中在 300 GHz 以下,对反演所选取的波段没有影响;实际大气廓线中水汽廓线和温度廓线的改变对反演结果产生影响,当温度廓线的变化在 ± 2 K 范围以内,或水汽廓线变化 $\pm 20\%$ 时,对于粒子尺度大于 $50 \mu\text{m}$ 、冰水路径大于 10 g/m^2 的卷云,反演误差均保持在 $\pm 20\%$ 以内;低云(云底高小于 2 km)对所选通道的辐射没有影响,中云所产生的误差随着光学厚度和云底高度的增加而增大.

关键词:卷云;反演误差;多重查找表法;大气廓线

中图分类号:P407.1 **文献标识码:**A

Radiation characteristics of the selected channels for cirrus remote sensing in terahertz waveband and the influence factors for the retrieval method

LI Shu-Lei¹, LIU Lei^{2*}, GAO Tai-Chang², SHI Li-Hua¹, QIU Shi¹, HU Shuai²

(1. National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-optical Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China;

2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: Terahertz is expected to be the best waveband for remote sensing of cirrus. However, the retrieval results of satellite terahertz passive remote sensing are susceptible to different atmospheric conditions. The terahertz radiation was simulated under the clear sky and the cloudy situations, based on the atmospheric radiative transfer simulator. The influences of the surface reflectivity, atmospheric profiles and the middle-low level water clouds to terahertz radiation were analyzed. The retrieval errors caused by these factors were calculated based on the multiple lookup-tables method. The results indicate that the influence caused by changing the surface reflectivity mainly range below 300 GHz, and there is no influence on the selected channels. Among the atmospheric profiles, only changing water vapor profiles and temperature profiles have effects on the retrieval results. When the temperature profile changes are between ± 2 K, or the water vapor profile changes are between $\pm 20\%$, for cirrus whose particle size is above $50 \mu\text{m}$ and ice water path is above 10 g/m^2 , the retrieval errors stay below $\pm 20\%$. For low-level water clouds (cloud base height below 2 km), the effects on retrieval errors can be ignored. The retrieval errors caused by middle-level water clouds increase with the increases of the cloud base height and cloud optical depth.

收稿日期:2017-06-08,修回日期:2017-08-16

Received date: 2017-08-08, revised date: 2017-08-16

基金项目:国家自然科学基金(41575024)资助的课题

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41575024)

作者简介(Biography): 李书磊(1991-),男,河北沧州人,博士研究生,主要研究领域为大气辐射与大气遥感. E-mail: lishulei91@gmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: liuleidll@gmail.com

Key words: cirrus, retrieval errors, multiple lookup-tables method, atmospheric profiles

PACS: 41. 20. Jb, 43. 28. We, 92. 60. N-

引言

太赫兹波(0.1 ~ 10 THz)位于微波和红外波段之间,其波长与典型卷云粒子尺度处于同一量级,是理论上遥感卷云微物理参数的最佳波段^[1]. 自20世纪90年代以来,利用太赫兹波遥感卷云微物理参数技术受到研究人员的广泛关注,先后试验了机载太赫兹波遥感卷云的仪器 FIRSC、CoSSIR、ISMAR 等,并提出了神经网络、基于贝叶斯理论的 Monte Carlo 积分法等反演方法^[2-3].

与红外和可见光遥感不同,星载太赫兹波被动遥感卷云主要是利用云层下方大气作为辐射源,通过接收卷云冰晶粒子散射的太赫兹辐射,反演其微物理特性. 因此,地气系统状态的变化将对太赫兹波反演卷云微物理参数的结果产生影响. Liebe 等^[4]基于 MPM 模型模拟分析了 1 THz 以下大气辐射传输的衰减和延迟,同时考虑了悬浮水滴(如云、雾等)的作用. 但是对于散射问题过于简单的处理、忽略微量气体的吸收光谱等问题使得其计算误差较大. Evans 等^[5]模拟分析了亚毫米波段冰云微物理参数对大气层顶出射辐射的影响,表明该波段对冰水路径的敏感性随着频率的增加而增大,并且粒子形状是影响亮温差随冰水路径变化情况的主要因素. Gasiewski 等^[6]理论分析了近地表水汽含量等因素对大气层顶辐射光谱的影响,当大气透过率分别为 75% 和 55% 时,340 GHz 和 410 GHz 通道的亮温差约为 5 ~ 6 K. 而对于 90 GHz 通道,地表水汽含量产生的影响可忽略不计. Evans 等^[7]针对 FIRSC 机载太赫兹卷云遥感仪器的试验数据,建立了基于非线性统计方法的反演模型,并利用微扰动的模拟数据分析了反演模型参数(粒子形状、地表温度、湿度廓线、液态云等)的变化所造成的反演误差,其结果表明上述参数的变化均对反演结果产生不同程度的影响. Rydberg 等^[8]针对 Odin-SMR 建立了基于非高斯概率分布的贝叶斯反演模型,引入 CloudSat 数据作为先验信息,克服了传统均匀云层的假设造成的影响,并表明湿度廓线影响反演结果的准确性.

在之前的研究中^[9-10],我们利用 183、325、462、664、874 GHz 五个通道,详细讨论了卷云粒子尺度和冰水路径的通道敏感性,然后通过通道亮温差、亮温差斜率等五维参数量化卷云微物理参数对太赫兹

辐射光谱的影响,并依此建立了基于多重查找表的星载太赫兹波被动反演卷云微物理参数的方法,具体反演流程如图 1 所示. 其中,在形成实际查找参数集时(图 1 虚线框内所示),利用 ECMWF 或 NCEP 的预报廓线及地表参数作为输入量计算晴空辐射值,而实际条件下的大气廓线或地表参数与预报值的差值必然造成一定的反演误差,如何评估这些因素对于反演结果的影响是评价反演方法有效性的重要手段,同时也可作为仪器参数的重要参考依据. 另外,不同的反演算法也有不同程度的适用范围,因此在利用太赫兹波被动遥感卷云微物理参数的同时必须充分考虑大气状态的变化对反演结果的影响.

基于上述考虑,在多重查找表反演卷云微物理特性方法的基础上,针对地表反射率、大气廓线、中低层水云等影响因素,分别分析了上述因素对大气层顶太赫兹辐射光谱的影响,并定量计算了其对粒子尺度、冰水路径反演造成的误差,进行了反演算法的适用性分析.

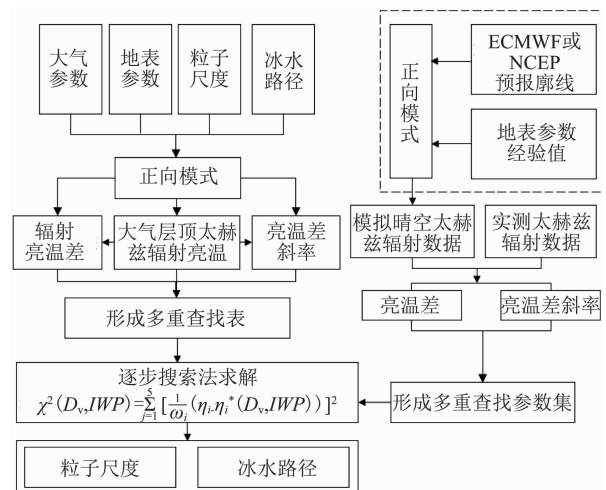


图 1 多重查找表反演方法流程图

Fig. 1 The flow chart of the multiple lookup-tables retrieval method

1 多重查找表反演卷云微物理参数的模型

多重查找表反演卷云微物理参数方法的具体流程如图 1 所示. 该流程主要包括三个过程,即多重查找表的建立、实际查找参数集的形成以及最优解的求解. 多重查找表的建立主要基于不同通道亮温差、亮温差斜率等特征参数,并进行插值和归一化等优

化过程,最大限度的利用通道信息,减小反演精度的通道依赖性. 具体而言,特征参数分别为 462 GHz 通道和 183 GHz 通道的亮温差(记为 $\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$)、874 GHz 通道和 664 GHz 通道的亮温差(记为 $\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$)、183 GHz、325 GHz、462 GHz 三个通道亮温差的拟合系数 TSlope-a1 和 TSlope-b1 及 325 GHz、664 GHz、874 GHz 三个通道亮温差的拟合系数 TSlope-a2. 而实际查找参数集的形成过程则利用 ECMWF 或 NCEP 的预报廓线及地表参数作为输入量计算晴空辐射值,与实测数据形成五维查找参数,并利用逐步搜索法遍历优化的查找表,使得下式最小,即为最优解:

$$\chi^2(D_e, IWP) = \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{\omega_i} (\eta_i - \eta_i^*(D_e, IWP)) \right]^2, \quad (1)$$

其中, η_i 表示上述实测的 5 个查找参数, $\eta_i^*(D_e, IWP)$ 表示查找表中的查找参数; $\frac{1}{\omega_i}$ 为权重,衡量遍历过程中每个参数的贡献,与每个参数的误差有关. 一般而言,误差越大的参数所占权重越小;反之,则权重越大. 此处通过统计学方法确定各参数的 ω_i 分别为 1、1、1、2、2.

正向模型采用 ARTS(the Atmospheric Radiative Transfer Simulator)辐射传输模拟器. ARTS 是一个高度模块化、可扩展性强、普遍适用的辐射传输计算仿真模型,可用于地气系统内微波波段至热红外波段内辐射传输的模拟和计算. ARTS 具有较高的光谱分辨率和计算效率,在处理辐射传输问题上具有很大灵活性和通用性,已成功应用于 MLS、SMR 及 SMILES 等亚毫米波及毫米波段临边探测的辐射传输模拟^[11].

2 地表反射率的影响

地表反射率是指地表反射辐射通量与入射辐射通量的比值,反映了地表对辐射的吸收能力,决定着地球表面与大气之间辐射能量的分配过程. 地表反射率的大小取决于地面的性质、状态及下垫面的特征. 一般来说,深色土壤的反射率比浅色土壤小,潮湿土壤的反射率比干燥土壤小,粗糙表面的反射率比平滑表面小,陆地表面的平均反射率为 10 ~ 35%,波浪起伏的水面的反射率平均为 7 ~ 10% 左右^[12].

图 2 为不同地表反射率对晴空大气层顶太赫兹辐射光谱的影响,纵坐标表示不同地表反射率

情况下大气层顶辐射值与地表反射率为 0 时的辐射亮温值的差,图中灰色区域表示反演所选取通道的位置. 可见,地表反射率对于晴空大气层顶太赫兹辐射值的影响主要集中在 300 GHz 以下的毫米波波段,而反演通道对地表反射率的变化不敏感. 因此,在实际反演过程中可以不考虑地表反射率对于反演结果的影响. 这也是太赫兹波被动遥感与微波被动遥感相比的一个优势所在. 实际上,地表特性还包括地面温度,而由于大气对太赫兹辐射的强吸收作用所引起的不透明性,阻碍了地面发射和反射的太赫兹辐射的进一步传输,因此地表特性(地表温度、地表反射率等)的变化不会引起大气层顶太赫兹辐射光谱的变化,进而不会对反演结果产生影响.

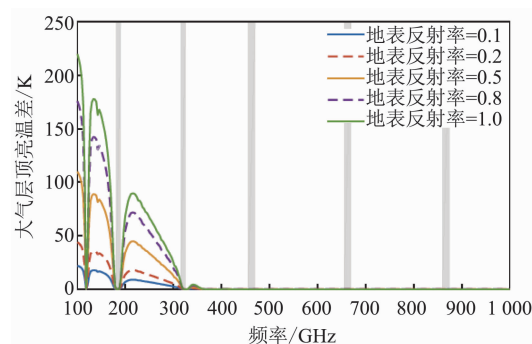


图 2 不同地表反射率对大气层顶太赫兹辐射光谱的影响(灰色区域为反演所选取通道的位置)

Fig. 2 The effects of different surface reflectivity on terahertz radiation at the top of the atmosphere (the grey area denotes the location of the retrieval channels)

3 大气廓线的影响

在太赫兹波段,大气中有许多吸收和发射体. 晴空大气对太赫兹辐射的影响主要来自于水汽、氧气等气体分子,其中水汽是主要的影响因素,其在整个太赫兹波段内存在约 16 000 条吸收谱线,对太赫兹辐射存在严重衰减,而根据基尔霍夫定律,其发射太赫兹辐射的能力同样较强. 氧气、氮气等气体分子的大气衰减率相对较低,影响能力相对较弱,并且这两种气体属于准定常气体,其在大气中的含量相对稳定,因此在实际反演过程中不考虑氧气、氮气的变化对于反演结果的影响. 臭氧、甲烷等微量气体成分在太赫兹波段存在特征吸收谱线,因此其对于太赫兹辐射光谱特定波段同样存在影响.

图 3 为利用 ARTS 辐射传输模拟器计算的大气廓线对晴空大气层顶太赫兹辐射的影响,主要

以 FASCOD 标准廓线库 5 种不同类型大气廓线进行计算. 其中, 图 3 (a-b) 分别为温湿廓线的影响, 分别利用五种大气类型的温湿廓线计算得到. 图 3 (c-g) 分别为 O₃、CO₂、N₂O、HCl、CH₄ 等微量气体廓线的影响, 其纵坐标表示 5 种大气类型中该种微量气体廓线的计算结果与该种气体成分含量为 0 时大气层顶辐射亮温的差值. 图中的灰色区域表示反演所选取通道的位置. 由图可得, 温湿廓线对大气层顶太赫兹辐射光谱的影响较大. 并且, 随着水汽含量的增加, 亮温值逐渐减小, 这是因为大气的透明度阻碍了低层水汽的发射, 且水汽含量越大, 大气的透明度越高. 水汽吸收线附近的太赫兹辐射主要来自于大气上层温度较低部分大气发射的辐射; 而在非吸收线的频段, 大气层顶的太赫兹辐射主要来自于大气中、下层温度较高的部分发射的太赫兹辐射. 在所选反演波段, 5 种湿度廓线计算结果的最大差值分别为 14.80、14.22、12.15、12.41、12.20 K. 而随着温度的升高, 亮温值逐渐增大, 这主要是因为温度升高使得气体的发射能力增强. 在所选反演波段, 五种温度廓线计算结果的最大差值分别为 24.16、23.24、26.55、26.91、26.99 K. 而对于 O₃、CO₂、N₂O、HCl、CH₄ 等微量气体廓线, 其对大气层顶太赫兹辐射光谱的影响较小, 并且仅在特定波段对太赫兹辐射存在影响, 对于反演所选取的波段影响较小, 在反演时可以忽略. 综上所述, 在进行大气廓线的变化对反演结果的影响分析时, 主要考虑温湿廓线的影响. 进一步分别计算了五种大气廓线类型的温度和水汽廓线情况下, 反演特征值的变化, 如表 1、表 2 所示. 由表可得, 反演特征值的变化范围小于反演通道亮温值的变化, 表明反演通道的组合在一定程度上可以减小大气参数的不确定性问题.

表 1 五种大气廓线类型的温度廓线对反演特征值的影响
Table 1 Influence on retrieval eigenvalues of temperature profiles of five atmospheric profiles

反演特征值	大气廓线类型				
	Midlatitude-winter	Midlatitude-summer	Tropical	Subarctic-winter	Subarctic-summer
$\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$	15.88 K	17.05 K	20.23 K	9.31 K	12.91 K
$\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$	12.05 K	15.46 K	16.35 K	8.62 K	9.32 K
TSlope-a1	2.25	3.07	4.11	2.32	3.17
TSlope-b1	8.04	7.25	12.26	4.35	5.26
TSlope-a2	1.78	3.55	2.29	1.82	2.64

然后, 基于多重查找表反演算法定量计算了温湿廓线的改变对卷云微物理参数反演结果的影

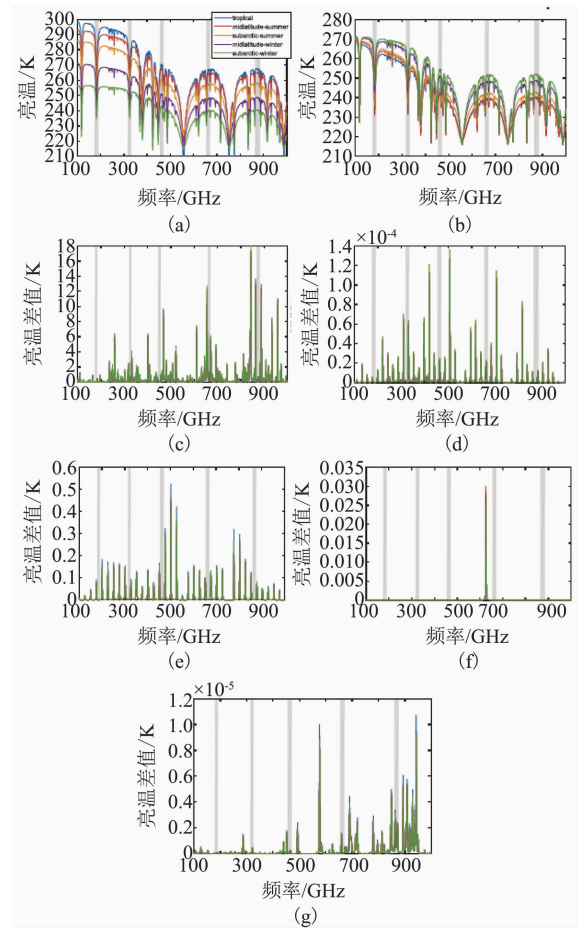


图 3 大气廓线对大气层顶太赫兹辐射的影响 (a) 温度廓线的影响; (b) 水汽廓线的影响; (c) O₃ 廓线的影响; (d) CO₂ 廓线的影响; (e) N₂O 廓线的影响; (f) HCl 廓线的影响; (g) CH₄ 廓线的影响

Fig. 3 The effects of different atmospheric profiles on terahertz radiation at the top of the atmosphere: (a) effects of temperature profiles, (b) effects of water vapor profiles, (c) effects of O₃ profiles, (d) effects of CO₂ profiles, (e) effects of N₂O profiles, (f) effects of HCl profiles, (g) effects of CH₄ profiles

表 2 五种大气廓线类型的水汽廓线对反演特征值的影响
Table 2 Influence on retrieval eigenvalues of water vapor profiles of five atmospheric profiles

反演特征值	大气廓线类型				
	Midlatitude-winter	Midlatitude-summer	Tropical	Subarctic-winter	Subarctic-summer
$\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$	10.33 K	10.92 K	15.65 K	8.71 K	10.13 K
$\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$	9.55 K	10.21 K	10.93 K	7.24 K	8.66 K
TSlope-a1	2.88	3.12	5.35	3.86	4.03
TSlope-b1	7.55	10.54	10.84	6.73	7.62
TSlope-a2	1.21	4.36	1.89	2.25	1.51

响, 结果如表 3 ~ 表 5 所示, 大气廓线类型选择中纬度冬季廓线. 其中, 反演误差表示真实值与反

演结果的绝对偏差,每一组误差的第一个值表示粒子尺度的反演误差,第二个值表示冰水路径的反演误差.表中第一行表示冰水路径的真实值,第一列表示粒子尺度的真实值.可见,对于在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内变化的温度廓线,冰水路径的反演误差与粒子尺度有关,即当粒子尺度小于 $50\ \mu\text{m}$ 时,除冰水路径为 $10\ \text{g}/\text{m}^2$ 外,冰水路径的反演误差均较大,最大达到了 79% ;而当粒子尺度大于 $50\ \mu\text{m}$ 时,冰水路径的反演误差较小,反演精度较高.这主要是由查找表方法造成的,较小粒子尺度位于查找表的边缘,查找表的分辨能力较差,反演误差较大.而粒子尺度的反演误差则与粒子尺度和冰水路径相关,即当粒子尺度大于 $50\ \mu\text{m}$ 、冰水路径大于 $10\ \text{g}/\text{m}^2$ 时的反演误差较小,此时误差在 $8\ \mu\text{m}$ 以内;而对于粒子尺度小于 $50\ \mu\text{m}$ 、或冰水路径小于 $10\ \text{g}/\text{m}^2$ 时,粒子尺度的反演误差较大,最大达到了 338% ,此时无法进行有效反演.而当温度廓线在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 范围内变化时以及湿度廓线在 $\pm 20\%$ 范围内变化时,其反演误差的分布情况与温度廓线在 $\pm 1^\circ$ 范围内变化时的误差分布情况类似,但随着温度廓线变化范围的增加,误差相应增大.当湿度廓线在 $\pm 20\%$ 范围内变化时,冰水路径的最大反演误差为 78.8% ,而粒子尺度的反演误差在冰水路径小于 $10\ \text{g}/\text{m}^2$ 时均较大,最大达到 223% .

表 3 温度廓线在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围变化时的反演误差

Table 3 The retrieval errors while temperature profiles changing between $\pm 1^\circ\text{C}$

粒子尺度 / μm	冰水路径 /(g/m^2)				
	10	50	100	200	500
50	0,2	169,22	39,76	33,155	32,395
100	215,0	8,2	5,3	2,2	1,1
200	114,4	5,1	3,1	1,2	1,4
500	185,3	2,1	1,1	0,1	0,1

注:反演误差为真实值与反演结果的绝对偏差,其中每组数据的第一个值表示粒子尺度的反演误差,第二个值表示冰水路径的反演误差.

表 4 温度廓线在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 范围变化时的反演误差

Table 4 The retrieval errors while temperature profiles changing between $\pm 2^\circ\text{C}$

粒子尺度 / μm	冰水路径 /(g/m^2)				
	10	50	100	200	500
50	268,0	267,40	265,85	41,152	35,392
100	215,3	23,9	9,4	5,3	2,5
200	128,5	9,2	5,2	3,3	2,7
500	181,4	3,2	1,1	1,2	1,2

表 5 湿度廓线在 $\pm 20\%$ 范围变化时的反演误差

Table 5 The retrieval errors while water vapor profiles changing between $\pm 20\%$

粒子尺度 / μm	冰水路径 /(g/m^2)				
	10	50	100	200	500
50	70,0	61,38	51,75	45,152	38,394
100	223,2	17,12	11,4	6,3	2,6
200	124,4	9,3	5,3	2,6	2,10
500	178,4	2,2	1,3	1,4	0,0

4 中、低层水云的影响

根据云粒子的相态,可以将云分为水云、冰云和混合云等.云的光学特性除与粒子形状、粒子尺度和密度等因素相关外,其吸收和散射能力通常与粒子的复折射指数相关,其中复折射指数的虚部通过控制吸收能力,进而影响云的辐射特性.在反演所选波段水的复折射指数的虚部远远大于冰的复折射指数的虚部(约为几百倍).因此在所选波段水云的吸收作用要强于冰云的吸收作用,并且随着频率的增加,水云的吸收能力逐渐减弱.实际上,在该波段冰的复折射指数的虚部仅为 10^{-2} 量级,因此一般不考虑冰云的吸收作用.根据相关研究资料,水云粒子半径一般在几微米至十几微米的量级,在所选波段水云粒子的尺度因子较小,因此相比较冰云粒子而言,水云粒子的散射作用相对较弱.

利用 ARTS 辐射传输模拟器计算了在反演波段,不同高度、不同光学厚度的水云对大气层顶太赫兹辐射的影响,具体如图 4 所示,其中粒子半径为 $15\ \mu\text{m}$,大气廓线设置为中纬度冬季廓线.图中纵坐标亮温差表示中、低层水云存在时大气层顶辐射亮温与晴空辐射亮温的差.由图可见,对同一通道而言,随着光学厚度的增加,亮温差增大,这是因为随着光学厚度增加,大气的不透明度增加,影响了太赫兹辐射的传输.对于所选通道而言,低云(云底高小于 $2\ \text{km}$)对大气层顶太赫兹辐射光谱几乎没有影响,其与晴空的亮温差近似为 0 .主要因为大气对太赫兹辐射的强烈吸收,导致太赫兹辐射光谱对低层大气和低云的吸收和发射不敏感.而随着云低高度的增加,亮温差也逐渐增大.对低频通道($183\ \text{GHz}$ 、 $325\ \text{GHz}$ 通道,水汽吸收谱线附近)而言,受水汽廓线的影响,云底高度在 $2\sim 4\ \text{km}$ 的中层水云对太赫兹辐射光谱的影响很小,在实际计算时可以忽略.随着云底高度的增加,亮温差略微增大,但即使对于光学厚度为 20 的厚云层,亮温差也保持在 $2\ \text{k}$ 范围以内.对于高频通道而言(462 、 664 、 $874\ \text{GHz}$ 通道),由于其位于大气窗区附近,大气吸收作用减弱、散射作

用的增强,中云对太赫兹辐射光谱的影响增大.对云底高度在 2~4 km 的中层水云,对太赫兹辐射光谱产生影响保持在 4 K 范围以内;而云底高度在 4~6 km 的中层水云,其产生的影响则保持在 10 K 范围以内.

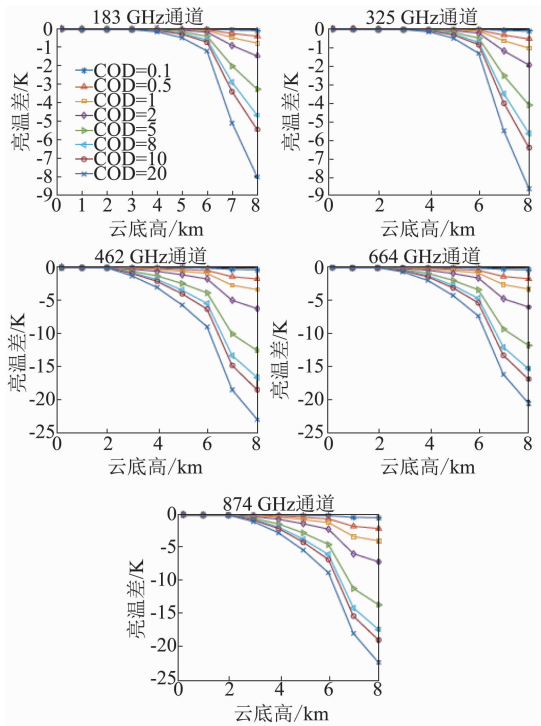


图 4 中、低层水云对大气层顶太赫兹辐射光谱的影响
Fig. 4 The effects of middle-low level water clouds on terahertz radiation at the top of the atmosphere

进一步地,定量计算了中低层水云对于多重查找表反演卷云微物理参数时反演结果的影响,具体如表 6~表 8 所示,大气廓线类型选择中纬度冬季廓线,云底高设置为 4 km、6 km.表中,反演误差表示真实值与反演结果的绝对偏差,每一组误差的第一个值表示粒子尺度的反演误差,第二个值表示冰水路径的反演误差.表中第一行表示冰水路径的真实值,第一列表示粒子尺度的真实值.由图可得,对于光学厚度为 1 的水云,其对于粒子尺度在 50 μm 以下卷云造成的反演误差较大,粒子尺度的误差最大为 160%,冰水路径的误差最大为 150%.而对于粒子尺度在 50 μm 以上的卷云造成的误差较小,粒子尺度和冰水路径的反演误差均保持在 30% 以内.而当光学厚度增大为 10 之后,反演误差相对增大.对于粒子尺度在 50 μm 的卷云粒子,其粒子尺度的反演误差较大,最大达到 586%.冰水路径的反演误差在粒子尺度 50 μm 或冰水路径为 10 g/m^2

较大,最大为 200%.对比表 4 和表 6,随着云底高度的增加,反演误差相对增大.

表 6 光学厚度为 1 的水云所造成的反演误差(云底高为 4 km)

Table 6 The retrieval errors of water clouds that cloud optical depth is 1 (the cloud base height is 4 km)

粒子尺度 / μm	冰水路径 /(g/m^2)				
	10	50	100	200	500
50	0,5	80,40	67,84	52,169	47,428
100	29,2	11,0	6,1	3,2	1,1
200	5,3	3,2	1,2	1,2	1,2
500	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0

表 7 光学厚度为 10 的水云所造成的反演误差(云底高为 4 km)

Table 7 The retrieval errors of water clouds that cloud optical depth is 10 (the cloud base height is 4 km)

粒子尺度 / μm	冰水路径 /(g/m^2)				
	10	50	100	200	500
50	214,8	293,26	282,74	96,156	79,426
100	239,15	17,6	15,3	18,6	9,13
200	41,16	12,10	12,9	6,9	4,1
500	136,20	1,13	0,12	0,14	0,0

表 8 光学厚度为 1 的水云所造成的反演误差(云底高为 6 km)

Table 8 The retrieval errors of water clouds that cloud optical depth is 1 (the cloud base height is 6 km)

粒子尺度 / μm	冰水路径 /(g/m^2)				
	10	50	100	200	500
50	207,6	86,39	76,84	63,169	51,425
100	36,4	17,0	9,1	5,3	2,5
200	13,4	3,4	2,3	1,3	1,0
500	1,5	1,7	0,6	0,4	0,0

5 结论

针对多重查找表反演卷云微物理参数的方法,系统的分析了地表反射率、大气廓线、中低层水云等因素对大气层顶太赫兹辐射的影响,并定量计算了上述因素的变化所造成的反演误差.结果表明:

(1) 地表特性对大气层顶太赫兹辐射光谱的影响主要集中在 300 GHz 以下的频段,对反演所选通道没有影响,因此对反演结果也不会产生影响.

(2) 大气廓线中对所选通道的亮温值产生影响的主要为水汽廓线和温度廓线,其他气体廓线影响较小,可以忽略.并且,随着温度、湿度廓线误差的增大,造成的反演误差随之增大.当温度廓线的变化在 ± 2 K 范围以内,或水汽廓线变化 $\pm 20\%$ 时,对于粒子尺度大于 50 μm 、冰水路径大于 10 g/m^2 的卷云,

(下转第 71 页)

- [11] LI Xue-Shi, Sun Guang-Cai, Xu Gang, *et al.* A new method of downward-looking 3D-SAR based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, (李学仕, 孙光才, 徐刚, 等. 基于压缩感知的下视三维 SAR 成像新方法. *电子与信息学报*), 2012, **34**(5): 1017 - 1023.
- [12] LIU Xiang-Yang, WANG Jing, NIU De-Zhi, *et al.* The method on echo sparse sampling and three-dimensional imaging for forward-looking array SAR[J]. *ACTA Electronica Sinica*, (刘向阳, 王静, 牛德智, 等. 前视阵列 SAR 回波稀疏采样及其三维成像方法. *电子学报*), 2017, **45**(1): 74 - 82.
- [13] LIU Xiang-Yang, YANG Jun-Gang, MENG Jin, *et al.* Sparse three-dimensional imaging based on Hough transform for forward-looking array SAR in low SNR[J]. *Journal of Radars*, (刘向阳, 杨君刚, 孟进, 等. 低信噪比下基于 Hough 变换的前视阵列 SAR 稀疏三维成像. *雷达学报*), 2017, **6**(3): 316 - 323.
- [14] LI Wen-Chen, LU Hong-Tao, SONG Sheng-Li, *et al.* Outfield experimentation and evaluation techniques of SAR image quality[J]. *Radar Science and Technology*, (李文臣, 陆洪涛, 宋胜利, 等. SAR 图像质量外场试验与评估技术. *雷达科学与技术*), 2012, **10**(6): 613 - 617, 623.
- [15] CHEN Qi, YANG Ru-Liang. Research of Chirp Scaling Imaging Algorithm for Airborne Forward-Looking SAR[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, (陈琦, 杨汝良. 机载前视合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法研究. *电子与信息学报*), 2008, **30**(1): 228 - 232.

(上接第 65 页)

反演误差均保持在 $\pm 20\%$ 以内。

(3) 云底高度在 2 km 以下的低层水云对大气层顶太赫兹辐射光谱没有影响, 中层水云的影响对太赫兹辐射的影响较大。并且, 随着光学厚度的增加、云底高度的增大, 对亮温值的影响增大。而其对于反演结果的影响, 同样随着光学的增加、云底高度的增加而增大。云底高为 4 km 以下、光学厚度在 10 以内的中云, 对于粒子尺度大于 $50 \mu\text{m}$ 、冰水路径大于 10 g/m^2 的卷云, 反演误差均保持在 $\pm 25\%$ 以内。

上述工作主要对多重查找表反演过程中地表和大气因素的影响进行了分析, 并定量计算了算法的反演误差。然而, 在实际反演过程中还需要考虑模式误差以及仪器测量误差等因素对反演结果的影响。如何正确评估这些因素对反演结果的影响, 并设计合适的传感器组合方式和观测方式以减少大气参数和模式在反演中的参与度, 是下一步研究的主要工作。

References

- [1] Mendrok J, Baron P, Yasuko K. Studying the potential of Terahertz radiation for deriving ice cloud microphysical information[C]. *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII*, 2008: p710704.
- [2] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, *et al.* Submillimeter-wave cloud ice radiometer: simulations of retrieval algorithm performance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D3): 4028.
- [3] Evans K F, Wang J R, Racette P E, *et al.* Ice cloud retrievals and analysis with the Compact Scanning Submillimeter Imaging Radiometer and the Cloud Radar System during CRYSTAL-FACE [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, **44**: 839 - 859.
- [4] Liebe H J. MPM—An atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1989, **10**(6): 631 - 650.
- [5] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, *et al.* Modeling of submillimeter passive remote sensing of cirrus clouds[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**: 184 - 205.
- [6] Gasiewski A J. Numerical sensitivity analysis of passive EHF and SMMW channels to tropospheric water vapor, clouds, and precipitation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(5): 859 - 870.
- [7] Evans K F, Evans A H, Nolt I G, *et al.* The prospect for remotensing of cirrus clouds with a submillimeter-wave spectrometer[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38**: 514 - 525.
- [8] Rydberg B, Eriksson P, Buehler S A, *et al.* Non-Gaussian Bayesian retrieval of tropical upper tropospheric cloud ice and water vapor from Odin-SMR measurements[J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2009, **2**: 621 - 637.
- [9] LI Shu-lei, LIU Lei, GAO Tai-chang, *et al.* Sensitivity analysis of terahertz wave passive remote sensing of cirrus microphysical parameters[J]. *Acta. Phys. Sin.* (李书磊, 刘磊, 高太长, 等. 太赫兹波被动遥感卷云微物理参数的敏感性试验分析. *物理学报*) 2016, **65**: 134102.
- [10] LI Shu-lei, LIU Lei, GAO Tai-chang, *et al.* Retrieval method of cirrus microphysical parameters at terahertz wave based on multiple lookup tables[J]. *Acta. Phys. Sin.*, (李书磊, 刘磊, 高太长, 等. 基于多重查找表的太赫兹波段卷云微物理参数的反演方法. *物理学报*) 2017, **66**: 054102.
- [11] Buehler S A, Eriksson P, Kuhn T, *et al.* ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, **91**(1): 65 - 93.
- [12] GU Jun-xi. Dictionary of Atmospheric Science[M]. (大气科学辞典, 顾钧禧). Beijing: China Meteorological Press, 1994: 117.