

引用格式: Liu Yuli, He Jieying, Liu Huguang, *et al.* Radiative Transfer Simulations for Millimeter/Submillimeter-wave Ice Cloud Imager[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(3): 763-770. [刘玉立, 何杰颖, 刘和光, 等. 毫米波/亚毫米波冰云探测辐射计模型仿真[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(3): 763-770.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.3.0763

毫米波/亚毫米波冰云探测辐射计模型仿真

刘玉立^{1,2}, 何杰颖¹, 刘和光¹, 董晓龙¹

(1. 中国科学院国家空间中心微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 冰云对全球气候的显著影响, 使得利用毫米波/亚毫米波辐射计探测冰云分布持续受到关注。为从辐射计亮温测量值中反演出冰云粒子参数, 完善的辐射传输正演模型起到非常关键的作用。针对即将发射的冰云成像仪毫米波/亚毫米波星载辐射计, 建立起了包含粒子散射在内的完整的辐射传输模型。传输模型读取大气廓线及云层粒子微观参数, 仿真计算得到辐射计各通道的辐射亮温。给出了辐射传输模型的详细配置, 并分析了不同通道对云层粒子的敏感性。结果表明: 冰云成像仪各通道对冰云粒子、雪粒子均有很强的敏感性, 但只有低频率通道能探测到水云粒子、雨粒子的变化。辐射计通道中, 不同的中心频率对冰晶粒子敏感度不同, 从而可使辐射计探测不同高度、不同特性的粒子。对于同一中心频率, 不同频偏对应不同的大气透明度, 使得辐射计可进一步探测到不同高度的云层信息。仿真工作将会为后续的毫米波/亚毫米波辐射计设计、反演算法研究等打下良好的基础。

关键词: 冰云遥感; 毫米波/亚毫米波辐射计; 辐射传输模型

中图分类号: P407.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)03-0763-08

1 引 言

冰云在全球范围的广泛存在及其对气候的显著影响, 使得对冰云的遥感探测持续受到关注^[1-2]。冰云对地球能量收支的影响主要体现在两个方面。首先, 冰云的温度很低, 因此与晴空相比产生的红外辐射很小, 同时可限制能量向外传输从而使得低层大气变暖; 其次, 冰云层可以反射太阳辐射从而降低大气温度。综合来看, 冰云层对大气温度起到升温还是降温作用主要取决于冰云层的光学厚度。同时冰云层的高度、冰水含量分布、冰云粒子尺寸等均会影响能量辐射收支, 并对天气系统产生重要的影响^[3]。

大气环流模型中对冰云建模的准确性对于预

测气候变化尤为重要^[4-5]。精确建模需要已知冰云层的全球观测信息。由于冰云层海拔很高, 在全球范围对其微观特性进行现场测量非常困难, 而利用卫星平台进行冰云遥感可达到全球覆盖性。对冰云层的遥感观测主要包括可见光、红外等光学探测仪器, 毫米波、激光主动雷达探测仪器及毫米波/亚毫米波辐射计探测仪器等。对于光学遥感, 光波波长一般小于 20 μm , 云层穿透能力较差, 只能获得薄云层或云顶小尺寸冰晶参数信息。对于激光雷达, 一般采用 532 μm 和 1 064 μm 等频点, 波长较短, 也只能探测到 50 μm 以下的冰云粒子, 且很难穿透较厚的云层。同时, 主动遥感设备受到发射功率等的限制, 很难提供高分辨率、宽刈幅的云层信息。

收稿日期: 2017-12-17; 修订日期: 2022-05-21

基金项目: 中国科协青年人才托举工程项目(2015QNRC001)。

作者简介: 刘玉立(1989—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事亚毫米波冰云探测模型及反演算法研究。E-mail: liuyuli13@mailsucas.ac.cn

通讯作者: 刘和光(1959—), 男, 北京人, 研究员, 博士生导师, 主要从事陆基、航空和航天微波遥感器的系统设计和研制工作。

E-mail: liuheguang@mirslab.cn

与可见光及红外技术相比,微波遥感在冰云探测上存在诸多优势^[6]。由于冰云粒子与毫米波/亚毫米波波长相近,两者之间的相互作用非常明显。冰云粒子散射低层大气及地表的辐射,从而使得辐射计接收到的亮温度相较晴空时有较大的衰减。此衰减量与冰云的冰水含量基本呈线性关系,故可从测量亮温度中较精确的反演出冰云参数。毫米波/亚毫米波辐射计的探测频率覆盖了微波和红外设备间的频率间隔,可弥补 50~500 μm 尺寸的冰云粒子探测间隙,能极大促进人们对冰云粒子探测的准确性。

利用毫米波/亚毫米波辐射计探测冰云全球分布具有非常大的潜力,但仍面临巨大的技术挑战。为了从辐射计测得的亮温中反演出冰云微观参数,其关键技术主要包括两个方面:一是建立正演辐射传输模型模拟特定大气廓线下的亮温,二是构建反演算法从亮温中反演出冰云参数。利用星载毫米波/亚毫米波辐射计进行探测冰云粒子的设想由 Evans 等^[7]首次提出。Buehler 等^[8]通过数值模拟探讨了毫米波波段被动遥感方式在冰云探测中的优势。Gong 等^[9]利用 CoSSIR 辐射计中的 640 GHz 通道的测量数据探索了冰云粒子的形状、取向及散射特性。李书磊等^[10]建立了查找表法对冰水路径进行反演,同时评估了冰云微物理参数对太赫兹辐射传输特性的影响。高太长等^[11]综述了国内外 THz 频段的大气观测仪器的研究现状并对比了各仪器关键指标参数,随后探讨了冰云探测仪器的发展趋势及发展前景。刘磊等^[12]讨论了毫米波冰云辐射计的国内外研究现状及进展,并对太赫兹遥感技术给出总结和展望。

完整且准确的辐射传输正演模型对于冰云粒子参数的敏感性研究、辐射计仪器预先设计以及反演算法研究等方面均具有重要的意义。辐射计通道频率一般选取不同气体的吸收线为中心频率,从而减小地表及低层大气对亮温的影响,同时设置多个边频带从而获得不同高度的冰云层信息。为了选取毫米波辐射计的工作频率、极化方式等参数,需要依据正演模型来验证不同通道的特性。因此,研究基于最新的平台建立了包含粒子散射计算的完整的辐射传输正演模型。同时介绍了正演模型所选用的卫星平台及输入大气数据,给出了辐射传输模型的具体参数配置,分析了仿真结果并探讨了辐射计亮温对云层粒子的敏感性,从而为后续的冰

云参数反演提供仿真支持。

2 卫星平台及大气廓线数据

2.1 卫星平台

在正演模型中,选用欧空局即将发射的冰云成像仪 Ice Cloud Imager(ICI)卫星^[13]作为仿真目标。ICI 是一颗圆锥形扫描的辐射计,同时也是全球首颗星载的毫米波/亚毫米波气象观测辐射计。ICI 将在 2020~2040 年对全球大气提供持续的观测。ICI 的主要任务是对冰云粒子参数的遥感探测,同时它还具有水汽的观测能力。ICI 有 13 个双边带通道(包括两个双极化通道),覆盖 183 GHz 至 664 GHz 的频率范围。大部分的通道频率均以水汽吸收线为中心。所有的通道均提供垂直极化测量信息,同时两个窗口通道还可提供水平极化测量信息。ICI 可提供地表约 16 km 的水平分辨率。详细的 ICI 通道信息如表 1 所示。

表 1 Ice Cloud Imager 通道信息

Table 1 Channel characteristics of Ice Cloud Imager

通道频率/GHz	噪声/K	极化	频率特性
183.31 \pm 7.0	0.7	V	水汽吸收线
183.31 \pm 3.4	0.7	V	水汽吸收线
183.31 \pm 2.0	0.7	V	水汽吸收线
243.20 \pm 2.5	0.6	V+H	窗口通道
325.15 \pm 9.5	1.1	V	水汽吸收线
325.15 \pm 3.5	1.2	V	水汽吸收线
325.15 \pm 1.5	1.4	V	水汽吸收线
448.00 \pm 7.2	1.3	V	水汽吸收线
448.00 \pm 3.0	1.5	V	水汽吸收线
448.00 \pm 1.4	1.9	V	水汽吸收线
664.00 \pm 4.2	1.5	V+H	窗口通道

2.2 大气廓线数据

在本文的仿真中,大气廓线及云粒子微物理数据由全球环境多尺度 Global Environmental Multi-scale(GEM)模型仿真得到。GEM 是由加拿大环境部为满足业务天气预报开发的综合预测和数据同化系统。GEM 的水平分辨率可被设置为 10 km、2.5 km、1 km 及 0.25 km。对应于 10 km 水平分辨率,大气被分为 79 层;对于其他分辨率,大气被分为 57 层。本文的仿真使用高分辨率模式(0.25 km),仿真场景为 A-train 卫星在 2014 年 12 月 7 日的一条卫星轨迹。该轨迹北起格陵兰岛,经过加拿大的东部,终止于加勒比海。轨迹总长为 6 200 km。GEM 仿真的主要输出结果如表 2 所示。

表2 GEM仿真输出主要参数

Table 2 Core variables in the GEM simulation outputs

类别	变量	维度
大气	温度	3维(57层)
	湿度	
	压强	
	风速	
云 (包括冰云、雪、水云、雨)	粒子含量	3维(57层)
	粒子尺寸	
	粒子数量	
地表	温度、压强、高度	2维
	水面/陆地比	
其他	经度、纬度	3维
	高度分布	2维

3 正演模型

本文使用 Atmospheric Radiative Transfer Simulator (ARTS) 软件进行大气辐射传输模拟^[14]。ARTS可求解包含粒子散射在内的完整的矢量辐射传输方程:

$$\frac{dI(\vec{n}, \nu)}{ds} = -\langle K(\vec{n}, \nu, T) \rangle I(\vec{n}, \nu) + \langle \alpha(\vec{n}, \nu, T) \rangle B(\nu, T) + \int_{4\pi} d\vec{n}' \langle Z(\vec{n}, \vec{n}', \nu, T) \rangle I(\vec{n}', \nu) \quad (1)$$

其中: I 为 Stokes 参量; K 为消光系数, 描述了辐射在传输过程中的衰减情况; α 为吸收系数, B 为在温度 T 下的辐射能量, 其乘积项表示了在传输过程中由于气体的辐射而增加的能量; Z 为散射系数, 描述了辐射与大气粒子的散射作用。由于毫米波/亚毫米波与冰云粒子的相互作用主要是通过散射, ARTS 对散射问题的处理能力显得尤为重要。

ARTS 采用了模块化的编程方式。ARTS 将大气参数的不同模型封装成了命令, 通过脚本文件调用不同的命令可建立所需的正演模型。在本实验的正演模型中, 吸收气体包含了氧气、氮气、臭氧和水汽, 它们的吸收系数通过线谱加连续谱的方式计算得到。对于线谱模型, 所需谱线数据通过 HITRAN^[15] 数据库得到。对于连续谱部分, 采用 MT_CKD^[16] 模型来处理。

在 ARTS 中, 粒子群的散射系数是通过单个粒子的散射特性及粒子群的尺寸分布函数来共同确定的。在本文的正演模型中, 散射粒子包含了冰云粒子、雪粒子、水云粒子和雨粒子。其中冰云粒子、水云粒子和雨粒子均被假设为球形, 它们的单粒子散射特性通过 Mie 理论计算得到。Meiold-Mautner 等^[17] 研究表明球形假设可很好地描述这些粒子

的散射特性。对于雪粒子, Kulie 等^[18] 研究表明球形假设存在很大的局限性, 因此研究使用了由离散偶极子近似 (DDA) 算法计算得到的 HONG-DDA^[19] 数据库。

对于散射粒子的尺寸分布, 采用了一阶描述方法来处理。一阶方法表示在描述离散网格内某一类型散射粒子的尺寸分布时, 只使用网格内该类型散射粒子的冰水含量这一参数, 而不使用散射粒子的总数量信息。对于雨粒子的尺寸分布, 采用 Marshall-Palmer^[20] 提出的函数来描述。对于冰云粒子和水云粒子, 采用修正的 gamma 函数分布^[21] 来描述它们的尺寸分布:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D^\gamma) \quad (2)$$

其中: D 为球形粒子的直径; 参数 μ 的值为 2; 参数 γ 的值为 1。对于冰云粒子和水云粒子, 参数 Λ 的值分别为 2.05×10^5 和 2.13×10^5 。对于雪粒子, 采用 Field 等^[22] 提出的尺寸分布公式。雪粒子的质量与尺寸的关系可表示为:

$$m(D) = \alpha \left(\frac{D}{D_0} \right)^\beta \quad (3)$$

其中: D 为雪粒子的最大直径; α 和 β 为表示雪粒子形状的参数, 分别取为 $\alpha = 65.4 \text{ kg}$, $\beta = 3$ 。

4 仿真结果

研究截取了 GEM 大气仿真廓线的一部分, 将其输入如上配置 ARTS 中, 仿真得到了 ICI 辐射计所有通道的辐射亮温。

图 1 所示为所选区域的 GEM 云层粒子分布情况。其中图 1(a) 为冰云粒子和雪粒子的水含量分布, 图 1(b) 为水云粒子和雨粒子的水含量分布。冰云粒子与雪粒子具有相似的特性, 它们与毫米波/亚毫米波的相互作用主要是通过散射, 两者的主要区别在于尺寸大小及密度的不同。水云粒子与雨粒子散射作用较弱, 其主要通过吸收及发射作用影响辐射能量传输。图中显示冰云粒子和雪粒子由于所处温度较低, 主要分布在高云层处, 而水云粒子和雨粒子则分布在较低云层处。同时, 所选区域中冰晶粒子的水含量大多集中在 1 g/m^3 , 最高含量可达 10 g/m^3 。该云层分布条件可以很好地满足正演模型的要求, 以便于探索 ICI 辐射计不同通道对不同云粒子分布的敏感性。

图 2 所示为 ICI 毫米波/亚毫米波辐射计的仿真结果, 依次包含窗口通道、183 GHz 通道、325 GHz 通道及 448 GHz 通道。总体来看, 各个通道亮温度

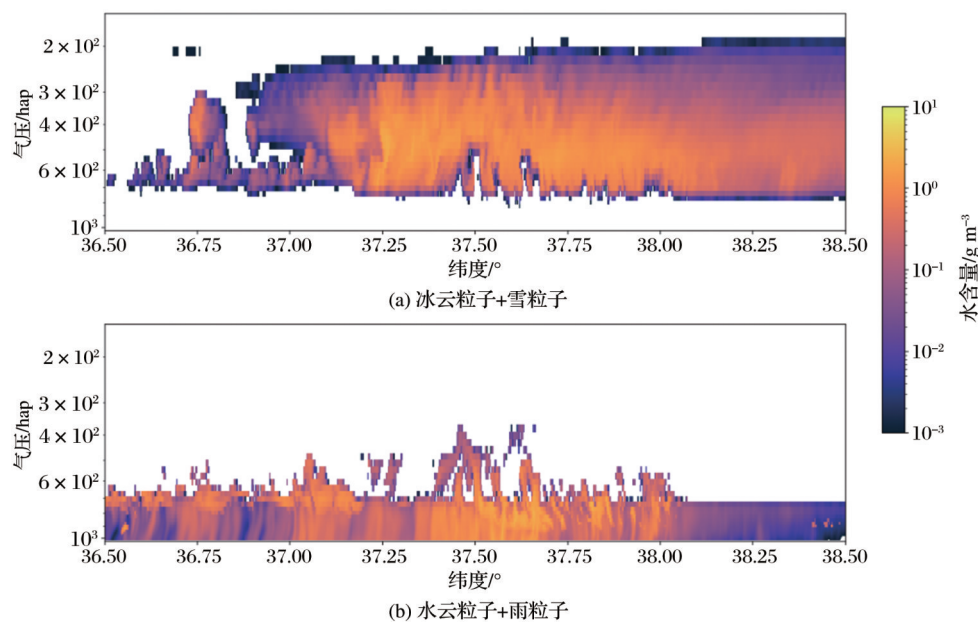


图 1 所选仿真区域中云层粒子的分布情况

Fig.1 Cloud particle distribution in the selected zone

随冰云粒子、雪粒子的变化非常明显,但对水云粒子及雨粒子的变化敏感程度较低。考虑到 ICI 的主要任务是探测冰晶粒子,这一现象是符合预期的。

图 2(a)所示为窗口通道,包括 243 GHz 通道及 664 GHz 通道的仿真结果。两通道中心频率差异较大,对比结果可展示出由中心频率引起的探测差异。与低频率通道相比,高频率通道在晴空(不包含云层粒子)时亮温较低,且在含有冰云粒子的区域中亮温衰减较小。这是由于高频率通道的大气透明度相对较低,从而不能探测到较暖的低层大气情况。其中 243 GHz 通道在晴空条件下时亮温为 260 K 左右,在遇到较厚云层时其最低可达 100 K。640 GHz 通道一般处在 120 K~230 K 范围内。图 2(b)~图 2(d)所示为 ICI 在不同大气气体吸收通道、不同频偏下的仿真结果。对于同一中心频率,不同频偏表示了频率上与气体吸收线频率的差异,从而使得不同的频偏对应不同的大气透明度。如图 2(b)所示,频偏为 7.0 GHz 的通道在晴空时亮温度较高,相较频偏为 2.0 GHz 的通道高出 10 K 左右,同时在冰云区域,其亮温度衰减也较大。这是因为频偏大的通道意味着其频率离气体吸收线较远,因此大气透明度相对较高,能探测到更低层的大气情况。仿真结果显示 325 GHz 通道在有云场景下会比 183 GHz 通道有更加明显的亮温衰减,最大值可达 150 K。对于 448 GHz 通道,亮温的衰减会明显小于 183 GHz 和 325 GHz 通道,其最大衰减在 100 K 左右。但由

于其波长较短穿透性较差,使得其对小尺寸粒子及上层冰云层的变化更加敏感。仿真结果显示不同频率的通道有着不同的敏感性,从而使得测量数据可以更全面地探测云层粒子信息,从而提高测量精度。

为了进一步验证模型的准确性并为后续探索辐射计和雷达的联合反演提供仿真支持^[23-24],利用同样配置的 ARTS 模型,仿真了 94 GHz 毫米波雷达的探测效果。雷达被放置于相同的轨道高度,探测角度为 180°雷达电磁波由发射机发射后,ARTS 仿真由云粒子反射回来的能量。能量由雷达反射率表示,其单位为 dBz。图 3 所示为毫米波雷达的仿真结果。总体而言,雷达很好地捕捉到了完整的云层粒子垂直分布信息,从而与被动辐射计遥感之间体现了很强的互补性。除了对上层冰云粒子敏感外,毫米波雷达体现出较强的穿透性,对低云层的液态云粒子的变化也相对敏感。同时,在 37°至 38°纬度范围内可观察到,当顶层云层较厚时,雷达信号还是不能穿透云层从而完整的探测到低云层的分布信息,体现出了 94 GHz 微波雷达的局限性。雷达接收机的敏感度通常不会小于 -30 dBz,因此对于小尺寸的云粒子以及冰水含量较低的场景没有很好的探测效果。在该测试场景下,雷达仿真值最高可达 20 dBz。与图 1 对比可观察到,雷达信号的强弱与云粒子冰水含量的空间分布有很好的吻合。同时可发现,雷达仿真值与对数坐标下的云层冰水含量近乎成线性关系。当大气气压在 600 hPa 左右

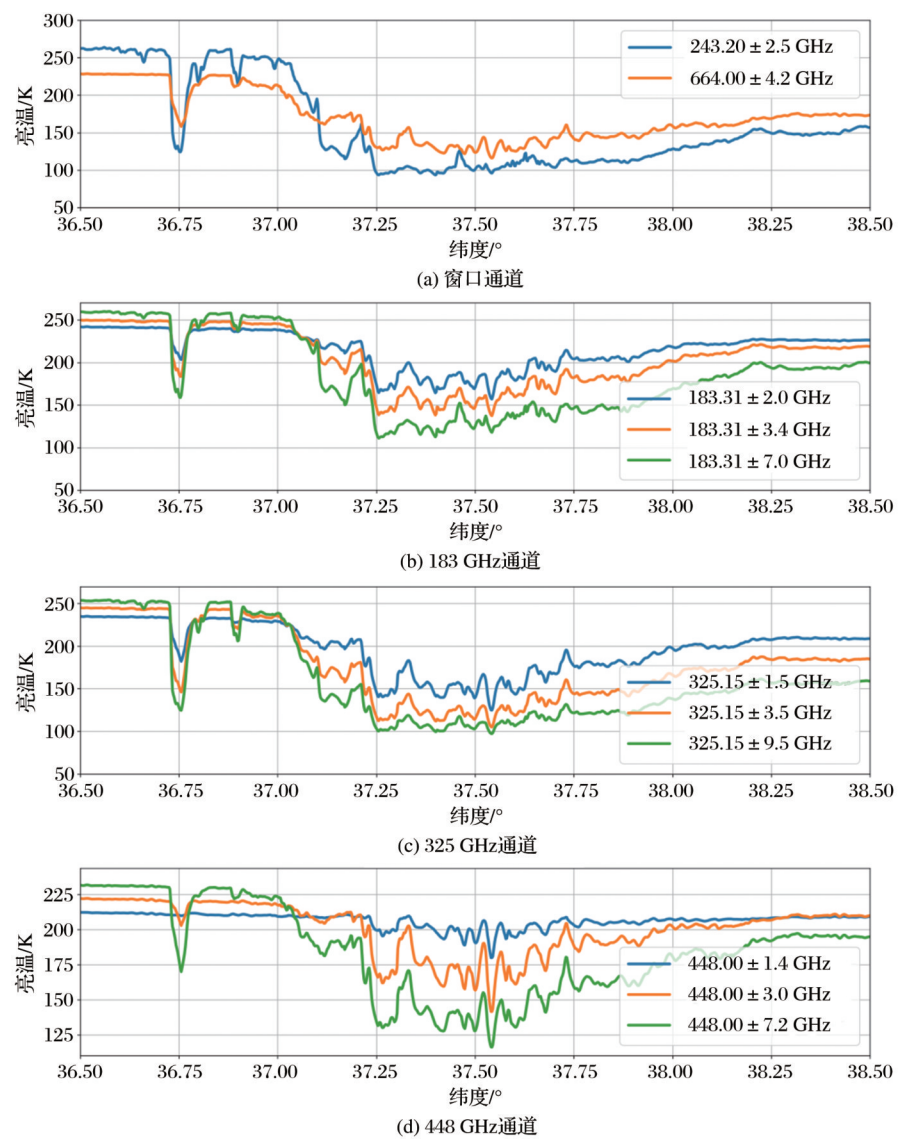


图 2 ICI 辐射计所有通道仿真结果

Fig.2 Brightness temperature simulation results for each ICI channel

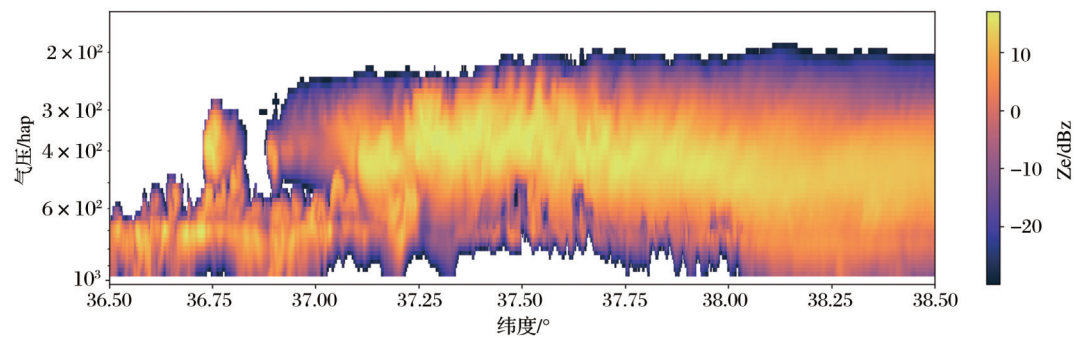


图 3 94 GHz 雷达仿真结果

Fig.3 94 GHz radar simulation results

时,雷达仿真结果显示出了明显的融化层边界。融化层边界是 0℃等温线的标志,对于水凝体分类、云粒子微观参数的反演等方面具有重要作用。雷达仿真更加清晰地反映了冰云和水云粒子与电磁波

的相互作用,同时为后续辐射计和雷达的联合反演打下基础。

亚毫米波辐射计的探测对象为高云层的冰云粒子,因此接收信号应尽可能地减小低层液态云粒

子及地面的影响。为定量探讨液态云粒子对辐射亮温的影响,将同一仿真区域中的水云粒子和雨粒子置为0,并仿真新的大气场景的辐射亮温。图4所示为正常大气场景与无液态粒子场景下的辐射亮温差异。该对比可清晰地显示出液态粒子对各通道亮温的影响。如图4所示,液态粒子对低频率通道有较大影响,但几乎不能影响高频率通道的亮温。对液态粒子最敏感的通道为243 GHz大气窗口通道,图中显示亮温最大变化可达30 K。大气窗

口通道不位于水汽等气体的吸收线附近,因此大气吸收作用较弱。同为窗口通道,液态粒子对640 GHz几乎没有影响,反映出大气对高频电磁波强烈的衰减作用。对于同一中心探测频率,频偏大的通道对液态水粒子更敏感,如通道 183 ± 7 GHz和通道 323 ± 9.5 GHz。同样地,这是由于高频偏距离气体吸收线较远,对应的大气透明度较高,从而对低层大气更敏感。仿真结果还显示低层液态云粒子的存在会使得辐射计接收到的能量升高。这是因为

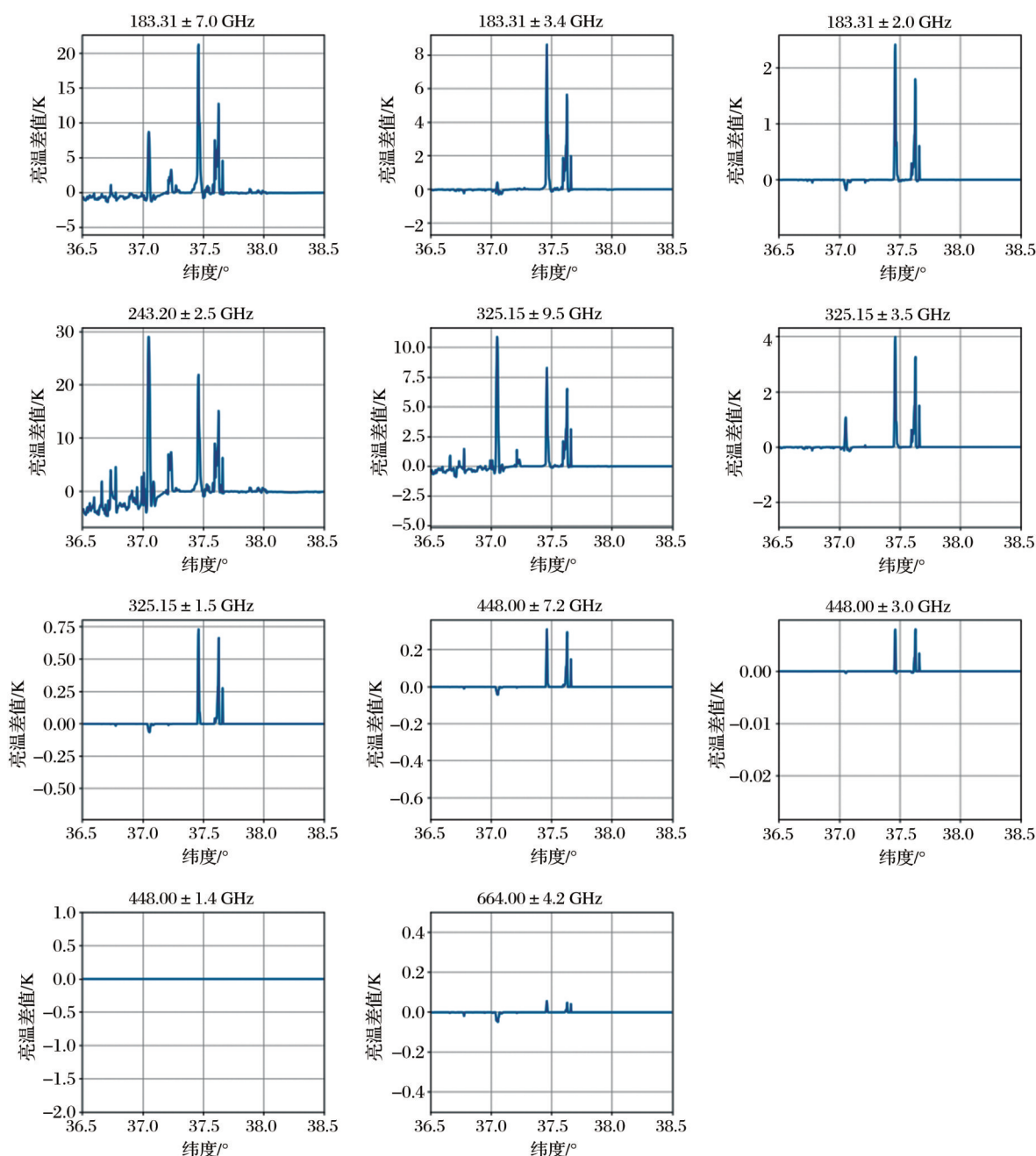


图4 在正常大气场景下和在无液态云粒子大气场景下,ICI辐射计不同通道的仿真亮温差异

Fig.4 Difference in brightness temperatures of ICI channels between simulations with unchanged atmosphere situations and simulations with liquid cloud setting to zero

低层云粒子通常温度较高,其自身的辐射能量大于对入射能量的散射及吸收作用,因此对能量辐射传输起到增强作用。对比图2还可以发现,各个通道的辐射能量衰减几乎全部由冰云粒子、雪粒子等冰晶粒子的散射作用引起。不同频率的电磁波在云层中的穿透效果主要由两方面决定:一是上层冰云层的散射和吸收作用,二是大气中水汽等气体的吸收作用。两者相互作用使得不同频率通道对不同高度冰云层的敏感程度不同,从而可以获得更加完整的冰云层垂直分布信息。结合图1可知,即使在晴空条件下,448 GHz和664 GHz等高频率通道仍然不会对低云层液态云粒子敏感。类似的结论可推广至地面,即高频通道几乎不会受到地面不同发射率的影响。由于低层大气及地面的复杂情形对冰云探测的干扰,避免其影响会对后续的冰云参数反演起到积极作用,该仿真结果从侧面进一步验证了冰云辐射计对冰云探测的有效性。

5 结 语

利用毫米波/亚毫米波辐射计反演冰云微物理参数正受到越来越多的关注,而其中辐射传输正演模型的建立对于辐射计仪器预先设计以及反演算法的构建等方面具有重要意义。本文针对ICI毫米波/亚毫米波星载辐射计,基于ARTS软件平台建立起了完整的辐射传输正演模型。使用GEM仿真得到的大气及云粒子微观数据作为正演模型的输入,仿真得到了ICI辐射计所有通道的辐射亮温。详细介绍了ARTS正演模型的相关配置,并就仿真结果讨论了ICI不同通道对云层粒子的敏感性。仿真结果表明:

(1)ICI通道对冰云粒子、雪粒子等散射粒子具有很强的敏感性,而只有低频率通道能探测到水云粒子、雨粒子等液态粒子的变化。

(2)不同的中心频率对冰晶粒子呈现出不同的敏感度,从而使得辐射计可探测到不同高度、不同特性的粒子;对于同一中心频率的通道,不同频偏对应不同的大气透明度,从而可进一步探测到不同高度的云层信息。

(3)虽然对小尺寸的冰云粒子的敏感性较低,94 GHz雷达能很大程度上捕捉到完整的冰云粒子的垂直分布信息。而且该频段具有较强的穿透性,对低层的水云粒子的分布也有很强的敏感性。

本文中搭建的ARTS辐射传输模型为后续的

研究打下良好的基础。接下来的工作将主要从以下4个方面进行。首先,由于不同形状的冰云粒子对辐射计仿真结果有着非常大的影响,更多的粒子数据库将会被采用从而更加完善地验证不同通道对冰云形状的敏感性。其次,不同取向的冰云粒子数据库会被采用来仿真冰云辐射计的极化通道,从而进一步探索粒子的散射特性及其对极化通道的影响。再次,在完善的正演模型基础上建立反演算法,从实际观测数据中反演出冰云参数并探索其科学应用。最后,由于毫米波辐射计与其他遥感器如雷达等有着很强的互补性,构建辐射计与其他遥感器的联合反演以进一步提高冰云参数的整体测量精度。

参考文献(References):

- [1] Su H, Jiang J H, Neelin J D, *et al.* Tightening of tropical ascent and high clouds key to precipitation change in a warmer climate[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-9.
- [2] Berry E, Mace G G. Cloud properties and radiative effects of the Asian summer monsoon derived from A-Train data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(15): 9492-9508.
- [3] Liu Y, Mace G G. Synthesizing the vertical structure of tropical cirrus by combining CloudSat radar reflectivity with in situ microphysical measurements using Bayesian Monte Carlo Integration[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(18): 2019JD031882.
- [4] Bony S, Stevens B, Frierson D M, *et al.* Clouds, circulation and climate sensitivity[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(4): 261-268.
- [5] Jiang J H, Yue Q, Su H, *et al.* Simulation of remote sensing of clouds and humidity from space using a combined platform of radar and multifrequency microwave radiometers[J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(7): 1234-1243.
- [6] Geer A J, Baordo F. Improved scattering radiative transfer for frozen hydrometeors at microwave frequencies[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(6): 1839-1860.
- [7] Evans K F, Stephens G L. Microwave radiative transfer through clouds composed of realistically shaped ice crystals. Part II. Remote sensing of ice clouds[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 52(11): 2058-2072.
- [8] Buehler S A, Carlos J K, Evans K F, *et al.* A concept for a satellite mission to measure cloud ice water path, ice particle size, and cloud altitude[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(S2): 109-128.
- [9] Gong J, Wu D L. Microphysical properties of frozen particles inferred from Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI) polarimetric measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(4): 2741-2757.
- [10] Li Shulei, Liu Lei, Gao Taichang, *et al.* Retrieval method of cirrus microphysical parameters at terahertz wave based on multiple lookup tables[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(5): 044101. DOI:10.7498/APS.66.054102. [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[J]. *物理学报*, 2017, 66(5): 044101. DOI:10.7498/APS.66.054102.]
- [11] Gao Taichang, Li Shulei, Liu Lei, *et al.* Development study

- of THz instruments for atmospheric sounding[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 425002–0425002(12). DOI: 10.3788/IRLA201645.0425002. DOI: 10.3788/IRLA201645.0425002.[高太长,李书磊,刘磊,等.THz波大气探测仪器发展现状研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 425002–0425002(12). DOI:10.3788/IRLA201645.0425002.]
- [12] Liu Lei, Weng Chensi, Li Shulei, *et al.* Review of Terahertz passive remote sensing of ice clouds[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(12): 1211–1221.[刘磊,翁陈思,李书磊,等.太赫兹波被动遥感冰云研究现状及进展[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(12): 1211–1221.]
- [13] Liu Y, Buehler S A, Brath M, *et al.* Ensemble optimization retrieval algorithm of hydrometeor profiles for the ice cloud imager submillimeter-wave radiometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(9): 4594–4612.
- [14] Eriksson P, Buehler S A, Davis C P, *et al.* ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, version 2[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(10): 1551–1558.
- [15] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, *et al.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4–50.
- [16] Mlawer E J, Payne V H, Moncet J L, *et al.* Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 370(1968): 2520–2556.
- [17] Meirald-Mautner I, Prigent C, Defer E, *et al.* Radiative transfer simulations using mesoscale cloud model outputs: Comparisons with passive microwave and infrared satellite observations for midlatitudes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(5): 1550–1568.
- [18] Kulie M S, Bennartz R, Greenwald T J, *et al.* Uncertainties in microwave properties of frozen precipitation: Implications for remote sensing and data assimilation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 67(11): 3471–3487.
- [19] Hong G, Yang P, Baum B A, *et al.* Scattering database in the millimeter and submillimeter wave range of 100~1 000 GHz for nonspherical ice particles[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D6): 1–15.
- [20] Kobayashi S, Oguchi T, Tanelli S, *et al.* Backscattering enhancement on spheroid-shaped hydrometeors: Considerations in water and ice particles of uniform size and Marshall-Palmer distributed rains[J]. *Radio Science*, 2007, 42(2): 1–16.
- [21] Gomes O, Combes C, Dussauchoy A. Parameter estimation of the generalized gamma distribution[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, 79(4): 955–963.
- [22] Field P R, Heymsfield A J, Bansemer A. Snow size distribution parameterization for midlatitude and tropical ice clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(12): 4346–4365.
- [23] Liu Y, Mace G G. Assessing synergistic radar and radiometer capability in retrieving ice cloud microphysics based on hybrid Bayesian algorithms[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(4): 927–944.
- [24] Liu Y, Mace G G, Posselt D J. Assessing synergistic radar and radiometer retrievals of ice cloud microphysics for the Atmosphere Observing System(AOS) architecture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1–14.

Radiative Transfer Simulations for Millimeter/Submillimeter-wave Ice Cloud Imager

Liu Yuli^{1,2}, He Jieying¹, Liu Heguang¹, Dong Xiaolong¹

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. National Space Science Center, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ice clouds remote sensing is in an ongoing focus as ice clouds play an important role in atmospheric energy budgets due to their reflection of sunlight and their entrapment of infrared radiation. Submillimeter-wave radiometry is an important technique in detecting ice clouds because of its distinctive advantage over other remote sensors. Developing a complete radiative transfer model that links the ice cloud parameters and the brightness temperature observations is of critical importance. The paper builds up a forward model that rigorously handles the ice particle scattering based on the Atmospheric Radiative Transfer Simulator (ARTS), and we conduct the simulations on a cloud cross section for the upcoming Ice Cloud Imager (ICI). The results indicate that the ICI channels possess high sensitivity to the ice cloud microphysics, and only the low-frequency channels are sensitive to the liquid clouds. For the double sidebands with the same center frequency, the large frequency-offset channels show higher brightness temperature values in clear sky conditions, and they have larger BT depressions when encountering thick ice cloud layers. The forward model allows us to develop retrieval algorithms upon it in the future.

Key words: Ice cloud remote sensing; (Sub)millimeter-wave radiometer; Radiative transfer model