

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

李书磊 刘磊 高太长 胡帅 黄威

Retrieval method of cirrus microphysical parameters at terahertz wave based on multiple lookup tables

Li Shu-Lei Liu Lei Gao Tai-Chang Hu Shuai Huang Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 054102 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.054102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光栅结构的远场时间反演亚波长源成像

Far-field time reversal subwavelength imaging of sources based on grating structure

物理学报.2017, 66(4): 044101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044101>

插值小波尺度法探地雷达数值模拟及四阶 Runge Kutta 辅助微分方程吸收边界条件

Ground penetrating radar numerical simulation with interpolating wavelet scales method and research on fourth-order Runge-Kutta auxiliary differential equation perfectly matched layer

物理学报.2016, 65(23): 234102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234102>

大地土壤表面与浅埋多目标宽带复合电磁散射研究

Wide-band composite electromagnetic scattering from the earth soil surface and multiple targets shallowly buried

物理学报.2016, 65(20): 204101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204101>

基于反演场扩散消除的时间反演多目标成像技术

Time reversal multi-target imaging technique based on eliminating the diffusion of the time reversal field

物理学报.2016, 65(20): 204102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204102>

基于胶囊内窥镜的胃部肿瘤检测方法

A method of detecting stomach tumour based on capsule endoscopy

物理学报.2016, 65(19): 194101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194101>

# 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\*

李书磊 刘磊<sup>†</sup> 高太长 胡帅 黄威

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2016年8月5日收到; 2016年11月30日收到修改稿)

太赫兹波长和典型卷云冰晶粒子尺度处于同一量级, 是理论上遥感卷云微物理参数(粒子尺度和冰水路径)的最佳波段. 结合 183, 325, 462, 664, 874 GHz 通道的辐射传输特性, 通过通道亮温差、亮温差斜率等五个参数量化粒子尺度和冰水路径对太赫兹辐射光谱的影响, 基于加权最小二乘法建立了多重查找表反演卷云微物理参数的方法, 并通过模拟数据序列进行了理论反演误差分析. 结果表明: 多重查找表反演方法可实现粒子尺度 50—500  $\mu\text{m}$  和冰水路径 10—500  $\text{g}/\text{m}^2$  范围内卷云微物理参数稳定、有效的反演. 与只采用亮温差特征或亮温差斜率特征相比, 粒子尺度的反演误差分别降低了 68.78% 和 60.28%, 冰水路径的反演误差则分别降低了 78.17% 和 49.01%. 对反演结果进行不确定度分析表明, 粒子尺度和冰水路径的不确定度与粒子尺度和冰水路径的大小相关, 冰水路径的不确定度分布在 0—15  $\text{g}/\text{m}^2$  范围内, 粒子尺度的不确定度分布在 0—20  $\mu\text{m}$  范围内. 研究结果对于进一步发展太赫兹波被动遥感卷云技术、提高卷云参数的反演精度具有重要借鉴意义.

**关键词:** 太赫兹波, 粒子尺度, 冰水路径, 多重查找表法

**PACS:** 41.20.Jb, 43.28.We, 92.60.N-

**DOI:** 10.7498/aps.66.054102

## 1 引言

卷云对于地气系统间的辐射收支平衡具有重要的调节作用<sup>[1]</sup>, 其微物理性质及其在不同时空尺度上的变化对于全球气候及各种尺度天气系统的影响不容忽视<sup>[2]</sup>. 随着当前气候模式时空分辨率的提高, 卷云微物理参数准确探测的需求更加迫切<sup>[3]</sup>. 太赫兹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特性的最佳波段, 为克服可见光、红外、毫米波段反演卷云参数的不足提供了可能, 因此太赫兹波遥感卷云技术一直是研究人员关注的热点<sup>[4-6]</sup>.

随着有效产生源和灵敏检测等技术的突破, 太赫兹波遥感卷云技术也获得了极大发展. 20世纪90年代开始, 美国先后试验了机载太赫兹冰云

遥感仪器 FIRSC (Far InfraRed Sensor for Cirrus), SWCIR (Sub-millimeter Wave Cloud Ice Radiometer), CoSSIR (Compact Scanning Submillimeter-wave Imaging Radiometer), ISMAR (International Submillimetre wave Airborne Radiometer) 等, 验证了 THz 波遥感冰云微物理特性技术的可行性及优势<sup>[7-9]</sup>. 进一步地, 美国、欧洲等相继提出了发展星载太赫兹仪器遥感卷云微物理参数的计划<sup>[10-13]</sup>, 如 GOMAS (Geostationary Observatory for Microwave Atmospheric Sounding), CloudIce, SIRICE (Submillimeter-wave and InfraRed Ice Cloud Experiment), ICI (Ice Cloud Imager), IceCube 等, 其中 ICI 由 ESA 和 Met Office 于 2008 年提出, 其探测频段为 118, 243, 325, 448, 664, 874 GHz, 预计将于 2022 年发射运行. IceCube 是由 NASA 于 2013 年提出的极轨卫星探测项目, 探

\* 国家自然科学基金(批准号: 41575024)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: liuleidll@gmail.com

测通道为874 GHz,目前正在研制.在反演方法方面,Evans等<sup>[14,15]</sup>提出基于贝叶斯理论的双通道反演方法,规避通道的相关性给反演带来的不稳定性问题.这种方法简便易行,然而过分依赖先验信息的假定,以及亮温差值与冰水路径的线性关系的假设.Jiménez等<sup>[16,17]</sup>建立了神经网络反演冰云微物理特性的方法,通过大量样本训练,调整权重函数,建立输入与输出的非线性关系.此方法淡化了辐射传输的物理机理,逻辑思路清晰,但反演结果的准确性取决于训练数据库的精细程度.Evans等<sup>[18-20]</sup>针对CoSSIR仪器的探测数据建立了基于贝叶斯理论的Monte Carlo积分法,从概率统计的观点出发,将观测数据和模型参数都看作随机变量,以多维概率密度的形式描述模型参数的先验信息,以模型的均值、方差和后验概率分布来评价和预测反演结果,并通过Monte Carlo积分解决反演过程中的不稳定性问题,其反演精度同样依赖于反演数据库中的数据信息量.

与红外和可见光遥感不同,天基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.对于被动遥感而言,卷云粒子的敏感性是合理选择反演通道及查找参数的关键.在之前的研究中<sup>[21]</sup>,我们详细探讨了卷云粒子尺度和冰水路径的通道敏感性.通过计算卷云非球形冰晶粒子对大气层顶太赫兹辐射光谱的影响及敏感系数,选取了对卷云粒子尺度、冰水路径较为敏感的(183 ± 1) GHz, (325 ± 2) GHz, (462 ± 5) GHz, (664 ± 7) GHz, (874 ± 8.5) GHz五个通道进行了分析研究,并初步建立了双通道查找表作为一种反演卷云微物理特性的方法.然而,单查找法反演误差较大,并且对于粒子尺度、冰水路径较小的情况不能进行有效反演.

在此背景下,本文通过计算通道亮温差、亮温差斜率等参数量化卷云微物理参数对太赫兹辐射光谱的影响,建立了基于多重查找表的太赫兹波段卷云特性的反演方法,通过模拟数据验证该方法的有效性,并进行了理论误差分析.

## 2 查找表的建立方案

### 2.1 正向模式简介

太赫兹辐射大气传输过程包括大气衰减、发射等基本过程,其中大气衰减主要由气体分子吸收和

粒子散射造成.在平面分层大气条件下,其基本物理过程可通过辐射传输方程描述<sup>[22]</sup>:

$$-\mu \frac{dI(z, \mu, \phi)}{\beta^{\text{ext}} dz} = I(z, \mu, \phi) - (1 - \omega(z))B[T(z)] - \frac{\omega(z)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{-1}^1 d\mu' P(\Theta) I(z, \mu', \phi'), \quad (1)$$

式中,  $z$  表示高度,  $\mu = \cos \theta$  表示光学质量,  $\phi$  表示方位角,  $B$  表示普朗克函数,  $\beta^{\text{ext}}$  表示衰减系数,  $\omega(z) = \frac{\beta^{\text{sca}}(z, \nu)}{\beta^{\text{abs}}(z, \nu) + \beta^{\text{sca}}(z, \nu)}$  表示单散射反照率,  $P(\Theta)$  为相函数, 表示散射能的角度分布.

辐射传输模型采用ARTS (the Atmospheric Radiative Transfer Simulator) 辐射传输模拟器进行求解, 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软件包,可用于处理天气系统内从微波至热红外波段范围内辐射传输的模拟和计算<sup>[23-25]</sup>.对于气体分子的吸收,采用逐线积分方法.逐线积分目前为止被认为是最精确的波数积分方法,也是处理大气非均匀路径、吸收带重叠等大气辐射传输问题的最精确方法,所需的光谱参数均取自HITRAN2012数据库.模型输入参数大气温度、相对湿度、压强、微量气体成分廓线来自于美国FASCOD标准廓线数据库<sup>[26]</sup>.

对于卷云冰晶粒子的散射,采用离散坐标迭代法进行计算,将天顶角积分以有限求和公式代替,将辐射传输方程转化为一阶微分线型方程组,再根据对应的边界条件求解.卷云由形状各异的冰晶粒子构成,本文以空心柱状粒子为例进行说明.其中,非球形粒子以其形状不规则、空间取向的复杂性等导致其散射性质计算较为困难,研究人员提出了多种近似解决方案,本文采用DDA (discrete-dipole approximation) 方法<sup>[27]</sup>计算非球形粒子的单散射特性(散射截面、散射相矩阵等).粒子尺度定义为等体积球形粒子直径( $D_v$ ),其计算方法为

$$D_v = \sqrt[3]{6V/\pi}, \quad (2)$$

其中,  $V$  表示粒子体积.冰水路径(IWP)是表征卷云中冰晶含量的物理参数,是影响卷云光学厚度的重要因素,进而直接影响卷云散射THz辐射的强度.其定义为

$$\text{IWP} = \int_L \text{IWC}(z) dz. \quad (3)$$

卷云冰晶粒子的尺度范围从几微米到上千微米,通常用谱分布表示单位体积中冰晶粒子的个数

随尺度的变化, 中外学者提出了众多尺度谱函数及拟合关系. 本文选取改进的 Gamma 分布表征粒子的谱分布, 其形式为

$$n(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D}. \quad (4)$$

### 2.2 查找参数选择及查找表的计算

在查找表的建立过程中, 为了更为直接地反映卷云冰晶粒子尺度、冰水路径与通道亮温差之间的关系, 开展了典型波段亮温差值、亮温差斜率与卷云粒子尺度、冰水路径的定量查找关系研究, 并确定可用的反演关系.

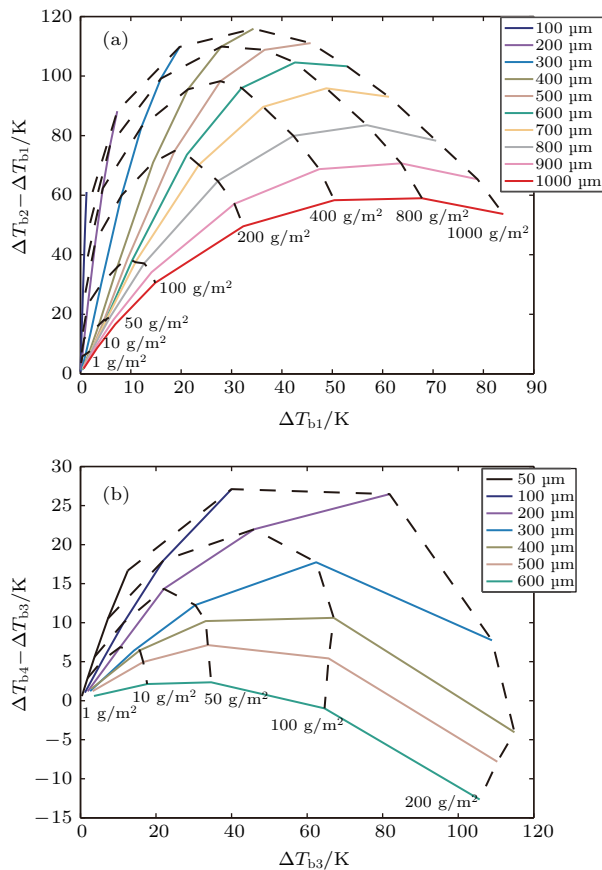


图1 (网刊彩色) 通道亮温差与卷云粒子尺度和冰水路径的查找表 (a) 462与183 GHz通道; (b) 874与664 GHz通道

Fig. 1. (color online) The lookup table of brightness temperature difference to cirrus particle size and ice water path: (a) 462 and 183 GHz channels; (b) 874 and 664 GHz channels.

选取183 GHz通道(通道亮温差记为 $\Delta T_{b1}$ , 表示该通道在有云条件下大气层顶的亮温值和相同大气廓线条件下晴空大气层顶亮温值的差, 下同.)和462 GHz通道(该通道亮温差记为 $\Delta T_{b2}$ ), 664 GHz通道(该通道亮温差记为 $\Delta T_{b3}$ )

和874 GHz通道(该通道亮温差记为 $\Delta T_{b4}$ ), 然后分别计算在不同粒子尺度和冰水路径情况下,  $\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$ 与 $\Delta T_{b1}$ ,  $\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$ 与 $\Delta T_{b3}$ 的对应关系, 结果如图1所示. 其中, 卷云的高度设置为9—10 km, 大气廓线选择中纬度冬季廓线, 地表温度为0 °C. 由图可见, 两种查找关系均呈“扇形”结构, 且随着粒子尺度的增大,  $\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$ ,  $\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$ 呈先增大后减小的趋势. 表明当粒子尺度较小时, 高频通道比低频通道敏感; 而随着粒子尺度增大, 低频通道的敏感性增强,  $\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$ ,  $\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$ 开始减小, 此时称为“拐点”. 同时也意味着当粒子尺度增大, 高频通道更易于饱和, 则此时亮温差主要取决于冰水路径, 并且随着冰水路径的增大, 拐点的位置向小粒子端移动. 图1(a)与图1(b)对比发现,  $\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$ 与 $\Delta T_{b1}$ 查找关系可以对粒子尺度100—1000 μm、冰水路径10—1000 g/m<sup>2</sup>进行有效反演, 然而当冰水路径小于10 g/m<sup>2</sup>时, 查找表的分辨率较差, 此时反演误差较大; 而对于 $\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$ 与 $\Delta T_{b3}$ , 其通道频率较高, 其查找关系可对冰水路径10 g/m<sup>2</sup>以下、粒子尺度50—100 μm的情况分辨率较高, 对于较小粒子、较小冰水路径的反演精度较高.

根据文献[21]的分析, 不同通道亮温差的斜率随着卷云冰晶粒子尺度和冰水路径的变化而变化. 分别选取183, 325, 462 GHz三个通道进行拟合, 得到拟合系数TSlope-a<sub>1</sub>和TSlope-b<sub>1</sub>; 对325, 664, 874 GHz三个通道进行拟合, 得到拟合系数TSlope-a<sub>2</sub>和TSlope-b<sub>2</sub>. 具体拟合公式为:

$$\Delta T_b(D_v, IWP, \nu) = k_1(D_v, IWP) \cdot \nu + k_2(D_v, IWP), \quad (5)$$

式中,  $\nu$ 表示波数,  $k_1$ 为TSlope-a<sub>1</sub>和TSlope-a<sub>2</sub>;  $k_2$ 为TSlope-b<sub>1</sub>和TSlope-b<sub>2</sub>. 经过筛选, TSlope-a<sub>1</sub>与TSlope-b<sub>1</sub>组合、TSlope-a<sub>1</sub>与TSlope-a<sub>2</sub>组合适合于卷云微物理参数的反演, 如图2所示. TSlope-a<sub>1</sub>, TSlope-b<sub>1</sub>, TSlope-a<sub>1</sub>三个参数随着粒子尺度的增大均表现为先增大后减小, 所不同的是, 在小粒子段, TSlope-a<sub>1</sub>和TSlope-b<sub>1</sub>随冰水路径的增大而增大; 当粒子尺度增大时则表现为先增大后减小. 而TSlope-a<sub>2</sub>则在所有粒子尺度均表现为随冰水路径的增大先增大后减小. 这同样是由高频通道比低频通道更易于饱和所导致. 与亮温差的查找关系类似, 在不考虑其他条件造成亮温差斜率变化的情况下, 斜率的查找关系对于较小冰水路径的分辨



力较差, 准确性降低, 理论上基于亮温差斜率的查找反演效果与基于亮温差的查找反演效果相当.

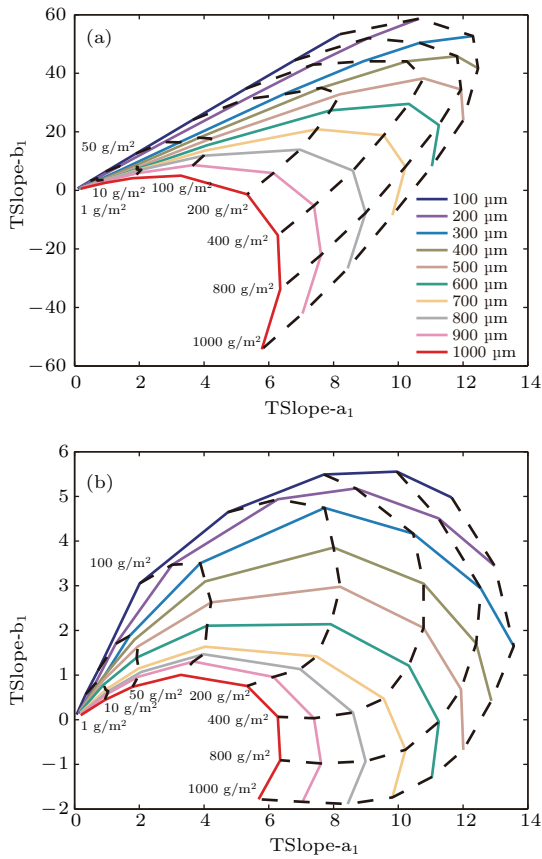


图2 (网刊彩色) 亮温差斜率与卷云粒子尺度和冰水路径的查找表

Fig. 2. (color online) The lookup table of brightness temperature difference slope to cirrus particle size and ice water path.

### 3 多重查找表反演方法及反演结果的比较分析

在上述理论分析的基础上, 针对单查找法反演误差较大的不足, 建立了多重查找表反演卷云微物理参数的方法, 该方法主要包括了查找表的优化以及查找算法的实现等内容. 其中, 查找表的优化主

要包括插值和归一化等过程. 根据大量现场观测和卫星观测数据统计<sup>[28-31]</sup>, 对上述查找表进行优化插值, 粒子尺度取50—500 μm, 间隔1 μm; 冰水路径取10—500 g/m<sup>2</sup>, 间隔1 g/m<sup>2</sup>, 以增加查找表的数据密度, 提高反演精度. 另外, 为了在计算中统一量纲, 将所有的查找参数归一化, 因此下述查找参数均为归一化查找参数.

实际利用多重查找表反演卷云微物理参数时, 需要首先计算得到  $\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$ ,  $\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$ , TSlope-a<sub>1</sub>, TSlope-b<sub>1</sub>, TSlope-a<sub>2</sub>, 形成五维查找参数. 计算这些参数时, 除了需要实际测量的各通道的亮温值之外, 还需要通过模式计算得到晴空条件下的各通道亮温值. 其中, 计算晴空亮温所需的大气廓线可以参考目前比较成熟的方法<sup>[32,33]</sup>, 一种是利用待反演区域的ECMWF或NCEP预报廓线, 并且将有云区域进行插值替代; 另外一种方法是选取反演区域周围较近的晴空ECMWF或NCEP的预报廓线. 得到上述五维查找参数后, 可以利用逐步搜索法遍历优化的查找表, 使得下式最小:

$$\chi^2(D_v, IWP) = \sum_{i=1}^5 \left[ \frac{1}{\omega_i} (\eta_i - \eta_i^*(D_v, IWP)) \right]^2, \quad (6)$$

其中,  $\eta_i$  表示上述实测的五个查找参数,  $\eta_i^*(D_v, IWP)$  表示事先模拟的五个查找参数;  $1/\omega_i$  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所占的权重. 在假定各参数权重均为1的前提下, 依次微扰动各查找参数, 并通过一个模拟通道亮温序列进行反演, 以反演结果的误差均值代表各查找参数误差, 将误差最小的参数权重设为1, 其余参数的权重依比例确定, 并为了简约起见四舍五入为整数. 依此方法确定  $\omega_i$  的各参数扰动误差及所对应的  $\omega_i$  如表1所列.

表1 各查找参数扰动误差及其所对应的  $\omega_i$  值  
Table 1. The perturbation errors of the lookup parameters and the values of  $\omega_i$ .

	查找参数				
	$\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$	$\Delta T_{b4} - \Delta T_{b3}$	TSlope-a <sub>1</sub>	TSlope-b <sub>1</sub>	TSlope-a <sub>2</sub>
扰动误差	5.43	4.74	4.91	9.65	11.24
$\omega_i$	1	1	1	2	2

需要注意的是,上述加权最小方差方法查找最优粒子尺度和冰水路径时可能会出现“假点”问题,即同时出现两个最优点,此时无法断定哪个才是真正的解.在这种情况下,取最优点的平均值作为此时的最优解.

为了验证反演算法的有效性,利用模拟数据序列对反演结果进行分析.首先分别产生粒子尺度和冰水路径序列,然后通过正向辐射传输模式计算每个粒子尺度和冰水路径对对应的各通道亮温,并在每个通道加入均值为0.5 K,标准差为0.1 K的随机测量误差,以代表仪器噪声、定标误差、大气廓线测量误差、辐射传输模式计算误差等可能误差来源造成的总的测量误差.同时选择 $\Delta T_{b2} - \Delta T_{b1}$ 和 $\Delta T_{b1}$ 的查找表(称为亮温差法),TSlope-a<sub>1</sub>和TSlope-b<sub>1</sub>查找表(称为斜率法)与多

重查找表法反演结果进行对比分析,并采用均方根误差(RMSE)、相关系数( $\rho$ )定量评价反演效果.其中,均方根误差用以表示反演结果和模拟数据之间离散程度,相关系数则用以反映反演结果和模拟数据之间的相关关系.其表达式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (n_i - n'_i)^2}, \quad (7)$$

$$\rho = \frac{\sum_i^N (n_i - \bar{n})(n'_i - \bar{n}')}{\sqrt{\sum_i^N (n_i - \bar{n})^2 \sum_i^N (n'_i - \bar{n}')^2}}, \quad (8)$$

式中, $n_i$ 表示粒子尺度和冰水路径的模拟序列, $n'_i$ 表示粒子尺度和冰水路径的反演结果, $\bar{n}$ 表示模拟序列的平均值, $\bar{n}'$ 表示反演结果的平均值.

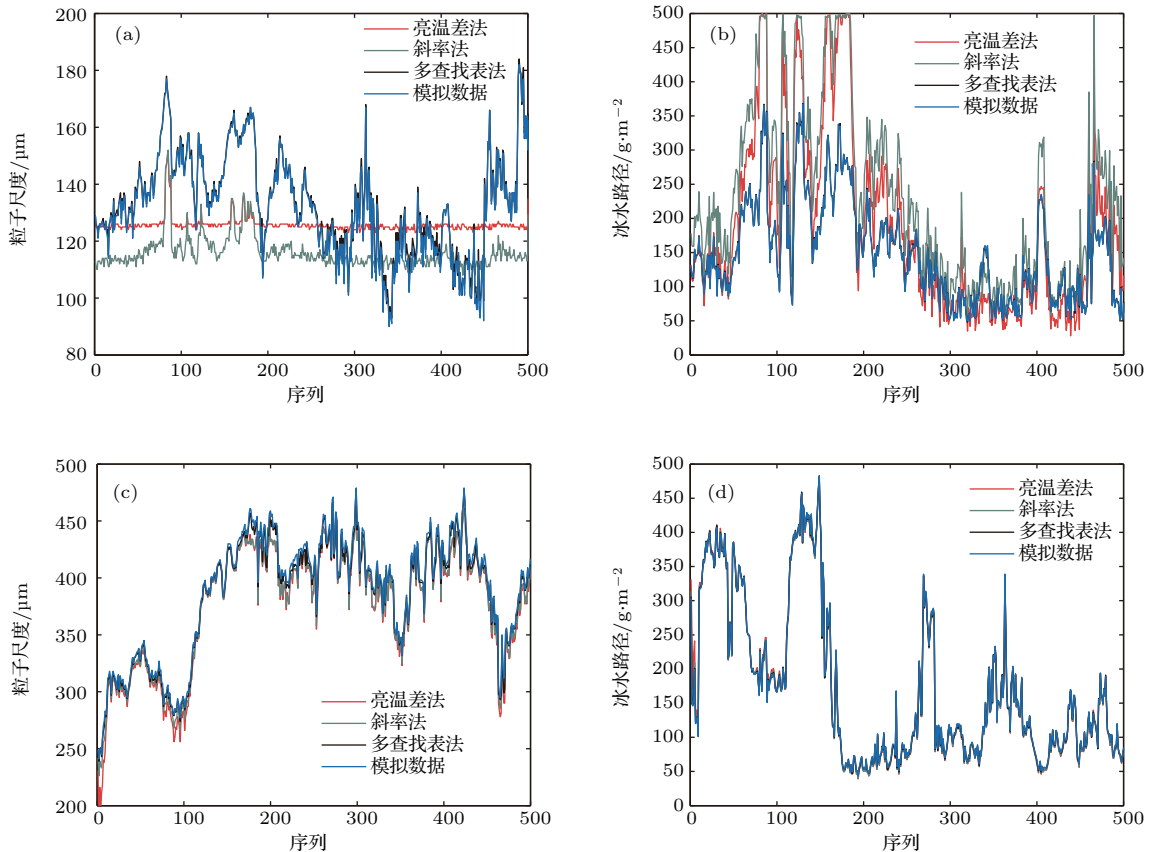


图3 (网刊彩色) 三种方法的反演结果比较曲线 (a) 小粒子段粒子尺度反演结果; (b) 小粒子段冰水路径反演结果; (c) 大粒子段粒子尺度反演结果; (d) 大粒子段冰水路径反演结果

Fig. 3. (color online) Comparison of the retrieval results of the three methods: (a) Retrieval results of particle size in small particle size region; (b) retrieval results of ice water path in small particle size region; (c) retrieval results of particle size in large particle size region; (d) retrieval results of ice water path in large particle size region.

图3为分别利用多重查找表法、亮温差法和斜率法对模拟数据进行反演的结果,图3(a)和图3(b)为粒子尺度50—200 μm的小粒子段的结果,图3(c)和图3(d)为粒子尺度200—500 μm的大粒子段的结果.表2为相对应的粒子尺度和冰水路径的反演均方根误差和相关系数.可见,在粒子尺度50—500 μm范围内,多重查找表法的反演结果与模拟数据一致性较高,粒子尺度的相关系数分别为99.72%和99.89%,冰水路径的相关系数均为99.98%.对于亮温差法和斜率法而言,当粒子尺度小于200 μm时,反演结果与模拟数据的一致性较差,均方根误差相对较大,此时认为这两种方法不

能进行有效反演;而当粒子尺度大于200 μm时,两种方法均可实现有效反演,粒子尺度的相关系数分别为99.23%和99.54%,冰水路径的相关系数分别为99.82%和99.92%,斜率法的相关性略高,其原因在于斜率法的通道信息量多于亮温差法.此时,三种方法粒子尺度的均方根误差分别为3.94, 12.62, 9.92 μm,多重查找表法与亮温差法相比误差降低了68.78%,与斜率法相比则降低了60.28%;冰水路径的均方根误差分别为1.55, 7.10, 3.04 g/m<sup>2</sup>,多重查找表法与亮温差法相比误差降低了78.17%,与斜率法相比则降低了49.01%.

表2 粒子尺度和冰水路径的均方根误差及相关系数对比

Table 2. Evaluation of root mean square error and correlation coefficient of particle size and ice water path.

	粒子尺度/μm				冰水路径/g·m <sup>-2</sup>			
	50—200 μm 粒子段		200—500 μm 粒子段		50—200 μm 粒子段		200—500 μm 粒子段	
	RMSE	ρ	RMSE	ρ	RMSE	ρ	RMSE	ρ
多重查找表法	1.78	0.9972	3.94	0.9989	1.32	0.9998	1.55	0.9998
亮温差法	19.35	0.6428	12.62	0.9923	76.10	0.8228	7.10	0.9982
斜率法	22.06	0.7691	9.92	0.9954	102.04	0.7864	3.04	0.9992

#### 4 反演不确定度分析与讨论

不确定度是定量表征反演结果质量的参数,不确定度越小,表示反演结果与真值越接近,质量越高;反之,则反演结果的质量越低.为了计算粒子尺度和冰水路径的反演不确定度,根据误差传递公式<sup>[34]</sup>:

$$\Delta\chi^2(D_v, IWP) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \left[ \frac{\partial\chi^2(D_v, IWP)}{\partial\eta_i} \Delta\eta_i \right]^2}, \quad (9)$$

式中,  $\Delta\eta_i$  表示测量不确定度,  $\frac{\partial\chi^2(D_v, IWP)}{\partial\eta_i}$  为(6)式函数  $\chi^2$  对各个变量  $\eta_i$  的偏导数,其表达式为

$$\frac{\partial\chi^2(D_v, IWP)}{\partial\eta_i} = \frac{2}{\omega_i}(\eta_i - \eta_i^*). \quad (10)$$

测量不确定度 ( $\pm\Delta\chi^2$ ) 引起  $\chi^2$  的变化导致反演的粒子尺度和冰水路径在一定范围内变化,反演不确定度 ( $\Delta D_v$  和  $\Delta IWP$ ) 可通过使  $\chi^2 \pm \Delta\chi^2$  最小

获得,即

$$\Delta D_v = \frac{1}{2} |D_{v\chi^2 - \Delta\chi^2} - D_{v\chi^2 + \Delta\chi^2}|, \quad (11)$$

$$\Delta IWP = \frac{1}{2} |IWP_{\chi^2 - \Delta\chi^2} - IWP_{\chi^2 + \Delta\chi^2}|. \quad (12)$$

图4为利用多重查找表算法对模拟数据进行反演的不确定度分析,粒子尺度主要集中在50—200 μm的小粒子段,通道的随机测量误差均值为0.5 K,标准差为0.1 K.由图可见,冰水路径的反演不确定度较为稳定,主要集中在0—10 g/m<sup>2</sup>范围,其均值为4.15 g/m<sup>2</sup>.此时不确定度主要与冰水路径的大小相关,表现为随冰水路径增大,不确定度增大;反之,则减小.分析其原因,粒子尺度较小时,随着冰水路径接近饱和,查找表分辨力降低,此时反演不确定度增大.粒子尺度的反演不确定度主要与粒子尺度的大小相关,即粒子尺度较大时,反演不确定度较小,主要集中在0—5 μm范围以内,其均值为3.28 μm;而随着粒子尺度的减小,反演不确定度增大,集中在5—20 μm范围内,均值达到了8.52 μm.这主要是由查找表的“扇形”形状决定的,随着粒子尺度的增大,查找的分辨力增强,反演结果的质量增强,反演不确定度随之减小.

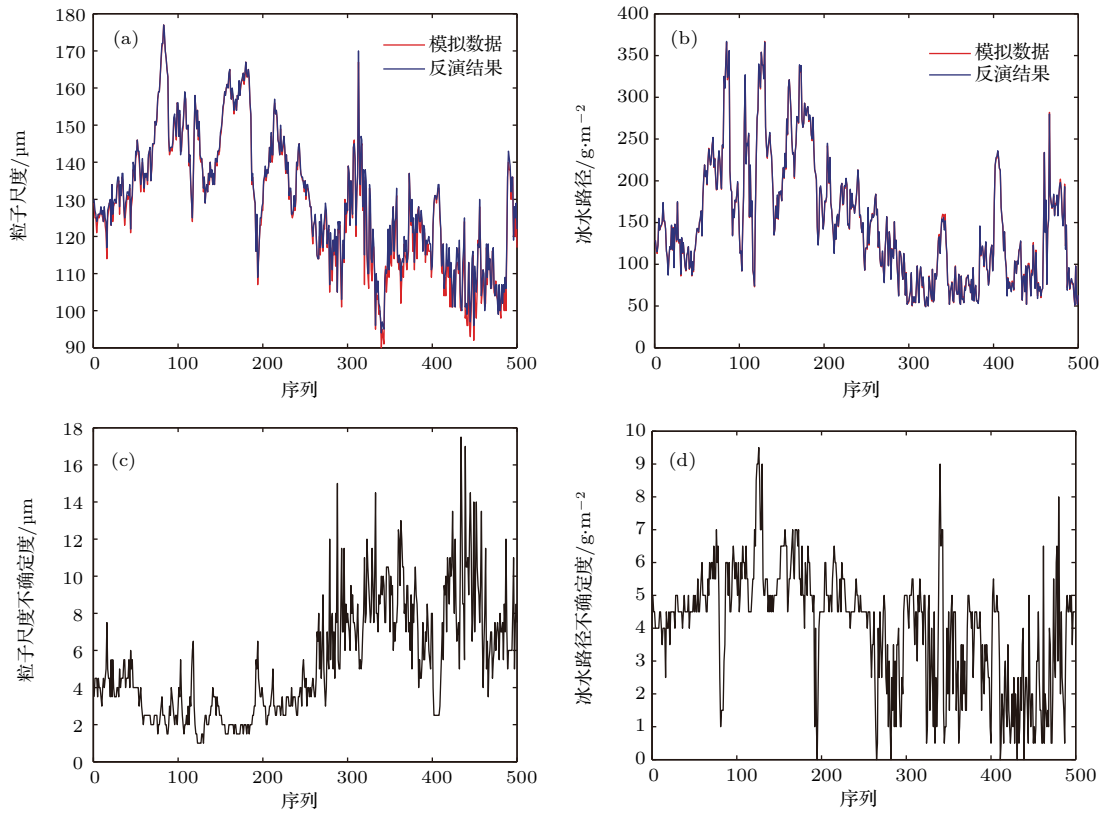


图4 (网刊彩色) 小粒子段反演结果及对应的不确定度

Fig. 4. (color online) The retrieval results and uncertainty of small particle size range.

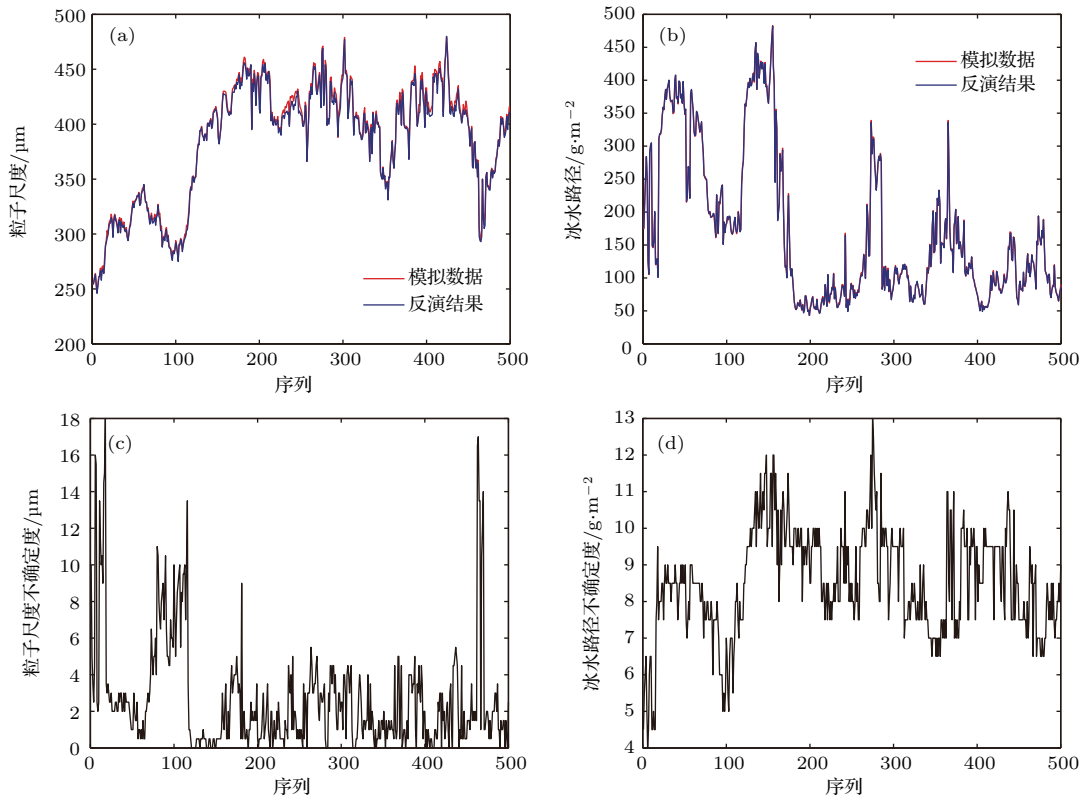


图5 (网刊彩色) 大粒子段反演结果及对应的不确定度

Fig. 5. (color online) The retrieval results and uncertainty of small particle size range.



图5为粒子尺度主要集中在200—500  $\mu\text{m}$ 的大粒子段的反演不确定度分析. 由图可知, 在大粒子段, 冰水路径的反演不确定度主要与粒子尺度相关, 总体表现为正相关趋势, 这主要是因为在在大粒子段, 随粒子尺度的增大, 各通道逐渐趋于饱和, 冰水路径的变化梯度增大, 反演不确定度随之增大, 主要集中在6—12  $\text{g}/\text{m}^2$  范围内, 均值为8.23  $\text{g}/\text{m}^2$ ; 而粒子尺度的反演不确定度主要与粒子尺度呈负相关趋势, 即当粒子尺度大于300  $\mu\text{m}$  时, 反演不确定度较小, 主要集中在0—5  $\mu\text{m}$  范围以内, 均值为2.15  $\mu\text{m}$ ; 对于粒子尺度小于300  $\mu\text{m}$  的情况, 反演不确定度增大, 达到5—15  $\mu\text{m}$  范围, 均值为8.56  $\mu\text{m}$ .

## 5 结 论

本文基于183, 325, 462, 664, 874 GHz 通道的辐射特性, 通过亮温差和亮温差斜率等五个归一化的查找参数量化粒子尺度和冰水路径对太赫兹辐射光谱的影响, 建立了太赫兹波段多重查找表反演卷云微物理参数的方法, 利用模拟数据验证了该方法的可行性, 并根据误差传递理论计算了参数的反演不确定度, 为开展天基太赫兹仪器被动遥感卷云粒子尺度和冰水路径的反演方法研究提供了新的思路.

模拟数据序列的反演结果表明, 基于多重查找表的反演结果与模拟数据序列具有较好的一致性, 意味着该方法可实现粒子尺度50—500  $\mu\text{m}$  和冰水路径10—500  $\text{g}/\text{m}^2$  范围内卷云微物理参数的稳定、有效反演. 而亮温差法和斜率法只能对尺度大于200  $\mu\text{m}$  的粒子进行有效反演, 且此时多重查找表法与亮温差法和斜率法相比, 粒子尺度的反演误差分别降低了68.78%和60.28%, 冰水路径的反演误差则分别降低了78.17%和49.01%.

反演不确定度的分析表明, 粒子尺度和冰水路径的反演不确定度与粒子尺度和冰水路径的大小相关. 冰水路径的不确定度在小粒子段随冰水路径的增大而增大, 而在大粒子段则随粒子尺度的增大而增大, 主要分布在0—15  $\text{g}/\text{m}^2$  范围内; 粒子尺度的不确定度则随着粒子尺度的增大而减小, 主要集中在0—20  $\mu\text{m}$ .

上述结论表明多重查找表法在太赫兹波被动遥感卷云微物理特性方面的优势. 但需要指出的是, 本文仅限于方法性的讨论, 在实际应用时需要进一步考虑地表反照率、大气廓线、以及中、低层水

云等因素不同程度的影响, 这些影响因素的定量评估和反演结果的订正是下一步研究的主要工作.

## 参考文献

- [1] Rossow W B, Schiffer R A 1991 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **72** 2
- [2] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P 2007 *Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (Cambridge: Cambridge University Press) pp214–223
- [3] Heymsfield A J 2003 *J. Atmos. Sci.* **60** 2592
- [4] Davis C P, Evans K F, Buehler S A, Wu D L, Pumphrey H C 2006 *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **6** 12701
- [5] Mendrok J, Baron P, Yasuko K 2008 *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII* Cardiff, United Kingdom, September 15, 2008 p710704
- [6] Mendrok J, Wu D L, Stefan A B 2009 *Sensors, Systems and Next-generation Satellites XIII* Berlin, Germany, August 31, 2009 p74740T-1
- [7] Vanek M D, Nolt I G, Tappan N D, Peter A R, Gannaway F C, Hamilton P A, Lee C, Davis J E, Predko S 2001 *Appl. Opt.* **40** 2169
- [8] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, Mcfarquhar G 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 4028
- [9] Miao J, Johnsen K P, Buehler S A, Kokhanovsky A 2003 *Atmos. Chem. Phys.* **3** 39
- [10] Buehler S A, Jiménez C, Evans K F, Eriksson P, Rydberg B, Heymsfield A J, Stubenrauch C J, Lohmann U, Emde C, John V O, Sreerekha T R, Davis C P 2007 *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **133** 109
- [11] Zhao H B, Zheng C, Zhang Y F, Liang B, Ou N M, Miao J G 2014 *Prog. Electromagn. Res. M* **35** 183
- [12] Buehler S A, Defer E, Evans K F, Eliasson S, Mendrok J, Eriksson P, Lee C, Jimenez C, Prigent C, Crewell S, Kasai Y, Bennartz R, Gasiewski A J 2012 *Atmos. Meas. Tech.* **5** 1529
- [13] Moyna B, Lee C, Charlton J, Rule I, King R, Oldfield M, Kangas V 2010 *Twenty-First International Symposium on Space Terahertz Technology* Oxford, UK, March 23, 2010 185
- [14] Evans K F, Stephens G L 1995 *J. Atmos. Sci.* **52** 2058
- [15] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, Deeter M N 1998 *J. Appl. Meteor.* **37** 184
- [16] Jiménez C, Eriksson P, Murtagh D 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 4791
- [17] Jiménez C, Buehler S A, Rydberg B, Eriksson P, Evans K F 2007 *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **133** 129
- [18] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, McFarquhar G M 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 4028
- [19] Evans K F, Wang J R, Racette P E, Heymsfield G, Li L H 2004 *J. Appl. Meteorol.* **44** 839
- [20] Evans K F, Wang J R, Starr D O, Heymsfield G, Li L H, Tian L, Lawson R P, Heymsfield A J, Bansemer A 2012 *Atmos. Meas. Tech.* **5** 2277
- [21] Li S L, Liu L, Gao T C, Huang W, Hu S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 134102 (in Chinese) [李书磊, 刘磊, 高太长, 黄威, 胡帅 2016 物理学报 **65** 134102]

- [22] Liou K N (translated by Guo C L, Zhou S J) 2004 *An Introduction to Atmospheric Radiation* (2nd Ed.) (Beijing: China Meteorology Press) pp170–176 (in Chinese) [廖国男著 (郭彩丽, 周诗健 译) 2004 大气辐射导论 (北京: 气象出版社) 第170—176页]
- [23] Buehler S A, Eriksson P, Kuhna T 2005 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **91** 65
- [24] Eriksson P, Buehler S A, Davis C P 2011 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112** 1551
- [25] Emde C, Buehler S A, Davis C, Eriksson P, Sreerekha T R, Teichmann C 2004 *J. Geophys. Res.* **109** D24207
- [26] Anderson G P, Clough S A, Kneizys F X 1986 *AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km)* (Hanscom Massachusetts: Optical Physics Division, Air Force Geophysics Laboratory) pp21–35
- [27] Hong G, Yang P, Baum B A, Heymsfield A J, Weng F Z, Liu Q H, Heygster G, Buehler S A 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D06201
- [28] Andrew J H, Aron B, Carl S 2004 *Am. Meteorol. Soc.* **61** 982
- [29] Jeffrey L S, Julie A H, Andrew J H 2004 *Am. Meteorol. Soc.* **43** 779
- [30] Baum B A, Heymsfield A J, Yang P, Bedka S T 2005 *J. Appl. Meteorol.* **44** 1885
- [31] Sheng P X, Mao J T, Li J G, Ge Z M, Zhang A C, Sang J G, Pan N X, Zhang H S 2013 *Atmospheric Physics* (2nd Ed.) (Beijing: Peking University Press) pp304–305 (in Chinese) [盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 葛正谟, 张霁琛, 桑建国, 潘乃先, 张宏升 2013 大气物理学第二版 (北京: 北京大学出版社) 第304—305页]
- [32] Henken C, Lindstrot R, Preusker R, Fischer J 2014 *Atmos. Meas. Tech.* **7** 3873
- [33] Arnold C P 2009 *Cloud Property Retrievals Using ATSR-2* Transfer of Status Report Trinity Term pp27–28
- [34] Bevington P R, Robinson D K 2002 *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences* (3rd Ed.) (New York: McGraw-Hill Education) pp36–46

# Retrieval method of cirrus microphysical parameters at terahertz wave based on multiple lookup tables\*

Li Shu-Lei Liu Lei<sup>†</sup> Gao Tai-Chang Hu Shuai Huang Wei

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

( Received 5 August 2016; revised manuscript received 30 November 2016 )

## Abstract

Cirrus is an important regulator for the flow of radiant energy in the earth-atmosphere system through the processes of scattering and absorption of radiation. In order to satisfy the urgent requirement for accurate retrieval of cirrus microphysical properties, terahertz wave is expected to be the best waveband for inverting cirrus particle size and ice water path, with terahertz wavelengths on the order of the size of typical cirrus particles. There is an urgent need for establishing stable and accurate inversion method. A new retrieval method for particle size and ice water path is developed based on multiple lookup tables for spaceborne measurements of brightness temperature spectrum of 183 GHz, 325 GHz, 462 GHz, 664 GHz, and 874 GHz channels. Five parameters are derived to quantify the effects of particle size and ice water path on terahertz radiation spectrum due to the scattering of ice clouds, manifested by brightness temperature difference, brightness temperature difference slope, etc. To retrieve cirrus microphysical parameters, a weighted least square fit that matches the modeled parameters is used. The analysis of retrieval errors are conducted by a simulated data series and the results are compared with those retrieved by the other two methods, i. e., difference method and slope method. The results retrieved by the multiple lookup table method are much closer to the simulated data series than those from the other two methods. It is indicated that the method introduced here is a stable and valid method of inverting particles between 50 and 500  $\mu\text{m}$  and ice water path between 10 and 500  $\text{g}/\text{m}^2$ . Compared with the errors from the difference-featured method and slope-featured method, the retrieval errors are reduced by 68.78% and 60.28% for particle size, 78.17% and 49.01% for ice water path. The analyses of retrieval uncertainties show that, in general, uncertainties of particle size and ice water path vary with particle size and ice water path. The ice water path uncertainties mainly spread in a range of 0–15  $\text{g}/\text{m}^2$ . The particle size uncertainties fluctuate within a range of 0–20  $\mu\text{m}$ . In other words, for small particle size range, the uncertainties are 0–5  $\mu\text{m}$  for thick clouds and 5–20  $\mu\text{m}$  for thin clouds. However, for large particle size range, the uncertainties are 0–5  $\mu\text{m}$  for particles larger than 300  $\mu\text{m}$  and 5–15  $\mu\text{m}$  for those smaller than 300  $\mu\text{m}$ . The results will be helpful for further developing the terahertz wave remote sensing of cirrus microphysical parameter technology. Moreover, it is also an important reference to the improvement of cirrus retrieval accuracy.

**Keywords:** terahertz wave, particle size, ice water path, multiple lookup table method

**PACS:** 41.20.Jb, 43.28.We, 92.60.N-

**DOI:** 10.7498/aps.66.054102

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41575024).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: liuleidl@gmail.com