

太赫兹波被动遥感卷云微物理参数的敏感性试验分析

李书磊 刘磊 高太长 黄威 胡帅

Sensitivity analysis of terahertz wave passive remote sensing of cirrus microphysical parameters

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 134102 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.134102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型大气窗口太赫兹波传输特性和信道分析

[Atmospheric window characteristic and channel capacity of THz wave propagation](#)

物理学报.2016, 65(13): 134101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134101>

基于单层反射超表面的宽带圆极化高增益天线设计

[Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on single-layer reflecting metasurface](#)

物理学报.2016, 65(10): 104101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104101>

一种新型宽频带低损耗小单元左手材料的设计与实现

[Design and analysis of a new type of wideband low-loss and small size left-handed materials](#)

物理学报.2016, 65(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094101>

单层超薄高效圆极化超表面透镜

[Ultra-thin single-layered high-efficiency focusing metasurface lens](#)

物理学报.2016, 65(7): 074101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074101>

一种基于石墨烯的超宽带吸波器

[An ultra-wideband absorber based on graphene](#)

物理学报.2016, 65(5): 054101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054101>

# 太赫兹波被动遥感卷云微物理参数的敏感性 试验分析\*

李书磊 刘磊<sup>†</sup> 高太长 黄威 胡帅

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2016年2月18日收到; 2016年4月22日收到修改稿)

太赫兹波长和典型卷云的冰晶粒子尺度处于同一量级, 其在遥感卷云微物理参数(粒子尺度和冰水路径)方面具有广阔的应用前景. 为了评估卷云微物理参数对太赫兹波传输特性的影响及其在太赫兹波段的敏感性, 基于大气辐射传输模式分别模拟计算了晴空和有云条件下大气层顶的太赫兹辐射光谱特征, 分析了这两种条件下辐射亮温差值的特点, 研究了卷云冰晶粒子形状、粒子尺度及冰水路径对太赫兹辐射传输特性的影响, 并定量计算了相关敏感系数. 结果表明: 卷云冰晶粒子形状、粒子尺度、冰水路径等对太赫兹波传输特性均有不同程度的影响, 卷云效应也因通道频率而异, 太赫兹波对卷云的粒子尺度和冰水路径有较高的敏感性, 是理论上被动遥感卷云微物理特性的最佳波段. 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意义.

**关键词:** 太赫兹辐射, 卷云, 微物理参数, 敏感性分析

**PACS:** 41.20.Jb, 92.60.N-, 92.60.Ta

**DOI:** 10.7498/aps.65.134102

## 1 引言

卷云主要由形状各异的冰晶粒子构成, 高度一般处于对流层上层, 水平分布范围从几公里到上千公里, 平均覆盖了地球上空的20%—50%<sup>[1]</sup>. 在全球气候变化研究中, 卷云在大气系统的辐射平衡中扮演着相当重要的角色, 对大气系统的辐射收支起调节和控制作用, 其辐射强迫效应是影响全球气候和辐射平衡最不确定的因子之一, 是目前全球气候变化研究中的一个亟需解决的热点问题<sup>[2]</sup>. 同时, 卷云微观参数的准确观测和反演对评估和刻画卷云物理过程在气候模式中的作用具有重要意义.

目前已存在众多卷云微物理参数的测量方法. 利用机载传感器现场测量的方法可以较为准确地获得卷云形状、含水量、谱分布等信息, 但由于代价昂贵且探测范围有限, 一般作为各种遥感手段的

验证方法. 卫星遥感卷云微物理参数的方法可以获得较大范围内卷云的水平分布和垂直结构, 研究人员开展了大量算法研究和改进工作. 然而从理论上来看, 可见光波段的反射辐射仅能对卷云上层部分粒子进行反演<sup>[3]</sup>; 卷云在红外波段的发射辐射较小而易受强背景噪声干扰, 且信号在中等冰晶含量时即逐渐饱和<sup>[4]</sup>; 星载激光雷达能量衰减严重, 难以穿透较厚云层, 且只对较小粒子敏感<sup>[5]</sup>; 毫米波测云雷达穿透力强, 但回波信号仅能表征大粒子的特性<sup>[6]</sup>. 卷云所处的位置、复杂的产生机制以及较小的光学厚度等特性都给其观测带来了很大的困难, 目前所使用的观测手段都会带来不小的观测误差, 而这些宏观、微物理特性上的观测误差很大程度上导致了卷云辐射强迫效应的不确定性<sup>[7]</sup>. 根据相关研究数据<sup>[8-10]</sup>, 典型冰云的粒子尺度主要分布在50—400  $\mu\text{m}$ , 目前使用的可见光、近红外、红外甚至毫米波段只对部分卷云粒子敏感, 而无法提供卷云

\* 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

冰晶粒子的全面信息<sup>[11,12]</sup>. 电磁波谱中的太赫兹 (THz) 波段与典型的卷云粒子尺度处于同一量级, 根据散射理论, 大部分卷云冰晶粒子散射作用最强的部分发生在 THz 波段<sup>[5]</sup>, 因此在测量卷云粒子微物理参数方面 THz 波占有优势, 是理论上遥感卷云微物理特性的最佳波段.

THz 波是指频率在 0.1—10 THz (波长 30 μm—3 mm) 范围内的电磁波, 该波段位于微波和红外波段之间, 是光子学与电子学、宏观理论向微观理论过渡的区域. 长期以来, 由于有效产生源和灵敏检测技术的限制, 对该波段的电磁辐射性质了解非常有限, 被称为电磁波谱中的 THz 空隙. 然而, THz 波在电磁波谱中所处的特殊位置使其在通信、成像、材料检测、雷达、天文学、空间应用、国土安全和医药科学等基础研究领域有重大的研究价值和广阔的应用前景<sup>[13–15]</sup>. 随着有效源和灵敏检测技术的发展, THz 技术在大气探测方面的应用研究迅速发展. 美国、欧洲等<sup>[16–20]</sup>相继提出了发展 THz 波遥感卷云微物理参数的计划, 如 GOMAS, CIWSIR, SIRICE, CloudIce 等. Evans 等<sup>[21]</sup>理论分析了亚毫米波段双通道方法反演卷云有效尺度和冰晶含量的可行性以及粒子形状和谱分布造成的反演误差. Mendrok 等<sup>[22]</sup>采用 SARTre 和 Moliere 辐射传输模型分析了球形冰晶粒子尺度和冰水路径对亚毫米波辐射的影响及其敏感性, 然而卷云冰晶粒子形状复杂, 采用球形粒子等效的方法误差较大.

本文基于 ARTS 辐射传输模式 (the atmospheric radiative transfer simulator, ARTS), 计算了 THz 波段卷云的辐射传输特性和云效应, 分析了球形、空心柱状、平板状、聚积物状、玫瑰花瓣状五种形状的冰晶粒子对大气层顶 THz 辐射光谱的影响, 并定量分析了 THz 波对卷云等体积球形粒子尺度 ( $Dv$ )、冰水路径 (IWP) 的敏感性, 为我国发展 THz 波被动遥感卷云微物理特性技术做了初步探索.

## 2 太赫兹辐射大气传输模型

THz 辐射大气辐射传输过程包括大气衰减、增强和散射等基本过程, 在不考虑偏振的情况下, 其标量辐射传输方程可表示为

$$-\mu \frac{dI(z, \mu, \phi)}{\beta^{\text{ext}} dz}$$

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

其中,  $z$  表示高度,  $\mu = \cos \theta$  为光学质量,  $\phi$  表示方位角,  $\beta^{\text{ext}}$  表示衰减系数,  $\omega(z) = \frac{\beta^{\text{sca}}(z, \nu)}{\beta^{\text{abs}}(z, \nu) + \beta^{\text{sca}}(z, \nu)}$  为单散射反照率,  $B$  表示普朗克函数,  $P(\Theta)$  表示相函数.

THz 辐射大气衰减主要为吸收和散射所造成的衰减, 其中吸收主要为大气气体分子的吸收衰减, 包括线谱吸收和连续吸收. 线谱吸收由光谱参数描述, 包括吸收谱线的中心频率、振幅强度和压致增宽系数等. 气体分子的光谱参数可以在已有的数据库如 JPL, HITRAN 等提取<sup>[23]</sup>. 本文光谱数据来自 HITRAN2012 数据库. 连续吸收也称作过剩吸收, 到目前为止, 还无法完全解决产生连续吸收的物理机制问题, 基于不同的假设, 提出了远翼吸收、碰撞诱导吸收以及双水分子吸收等解释, 仍然是一个有待解决的问题.

由于 THz 波长相对于空气分子要大得多, 所以在考虑散射问题时一般忽略 Rayleigh 散射的影响. 大气中造成 THz 波散射的粒子主要有气溶胶和水汽凝结物 (云、雨和雪等), 在计算散射衰减时, 一般考虑大气中各种水凝物在不同温度、不同粒子尺度和不同频率下的消光系数、散射系数、不对称因子和散射相函数等参数. 其中, 散射相函数表示散射能的角分布, 定义为

$$P(\Theta) = \frac{4\pi}{\sigma_s} \sigma(\theta, \phi).$$

不对称因子定义为相函数的一阶矩, 反映了散射在前后向的对称性, 或前向散射的相对强度. 定义为

$$g = \frac{\int \cos \theta P(\theta, \phi) d\Omega}{\int P(\theta, \phi) d\Omega}.$$

THz 辐射大气辐射传输模型采用 ARTS 模型. 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, 可用于处理地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. 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<sup>[24]</sup>. ARTS 与其他辐射传输模型相比最大的特点在于: 1) 对于云、气溶胶等粒子的散射问题的

处理. ARTS采用离散坐标迭代法处理一维粒子散射、蒙特卡罗方法处理三维粒子散射及多次散射问题, 另外, 可处理非球形、随机取向粒子的散射问题, 处理粒子散射问题的灵活性使ARTS的计算精度得以提高; 2) 矢量辐射传输方程的求解<sup>[25]</sup>中, ARTS通过计算Stokes矢量和相函数等描述辐射传输的极化状态, 进而解决矢量辐射传输的计算问题, 从而使得辐射传输模拟适用性增强; 3) 探测仪器辐射传输过程模拟, 在仪器设计和性能评估等方面有重要应用.

ARTS模式计算卷云的散射特性时需要单散射数据库作为输入文件, 本文采用Hong等<sup>[26]</sup>通过DDA(digital differential analyzer)算法计算的0.1—1 THz波段非球形粒子单散射特性库及Mie理论<sup>[27]</sup>计算的球形粒子散射特性, 模拟计算了球形、空心柱状、平板状、聚积物状、玫瑰花瓣状五种形状卷云冰晶粒子的敏感性.

### 3 晴空 THz 辐射传输特性

星载被动遥感是一种无源探测, 主要原理是利用云层下方大气发射 THz 辐射, 通过接收被卷云冰晶粒子散射的辐射, 反演其微物理特性. 因此, 晴空大气层顶 THz 辐射光谱是研究 THz 波遥感卷云的基础.

首先, 利用 ARTS 模拟了晴空时不同大气成分对 THz 辐射传输的影响. 本文采用逐线积分 (LBL) 方法计算气体线谱吸收. LBL 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. 图 1 分别为水汽、氧气、臭氧、氮气、二氧化碳五种单组分气体对 THz 辐射的衰减. 由计算结果可知, 臭氧、氮气、二氧化碳只在一定波段范围内存在多条吸收谱线, 且大多数吸收谱线的衰减小于 0.01 dB/km, 因此臭氧、氮气、二氧化碳分子对 THz 辐射吸收衰减较小. 氧气在 0—6 THz 频率范围的低频段存在较强的吸收谱线, 其吸收衰减较臭氧、氮气等分子要大很多. 水汽分子对 THz 辐射的吸收衰减最为严重, 其在整个 THz 波段内存在约 16000 条吸收谱线, 尤其是当频率在 1 THz 以上, 即使在窗口频段, 水汽的衰减也达到 100 dB/km 以上, 它是构成 THz 辐射大气传输衰减的主要部分. 在真实传输环境下, 大气中或多或少总是含有水汽, 且随着含水量的增加吸收衰减增大. 因此, 晴空 THz 辐射的衰减主要由大气中的水汽和氧气造成.

综合而言, 在低频段, 大气吸收峰主要位于 0.183, 0.325, 0.38, 0.45, 0.56, 0.62, 0.75, 0.92, 0.987 THz 附近; 大气窗口则主要位于 0.135, 0.23, 0.34, 0.41, 0.67, 0.87 THz 附近.

进一步地, 利用 ARTS 模拟计算了晴空大气层顶 THz 辐射光谱. 尽管地气系统向外辐射的能量分布在红外至微波这一极宽的区域, 但是大部分能量集中在波长 1 mm 以下的波段, 大约仅有 2% 的能量分布在 1 mm 以上波段, 因此, 利用 THz 波段的大气背景辐射遥感卷云具有很大优势; 大气廓

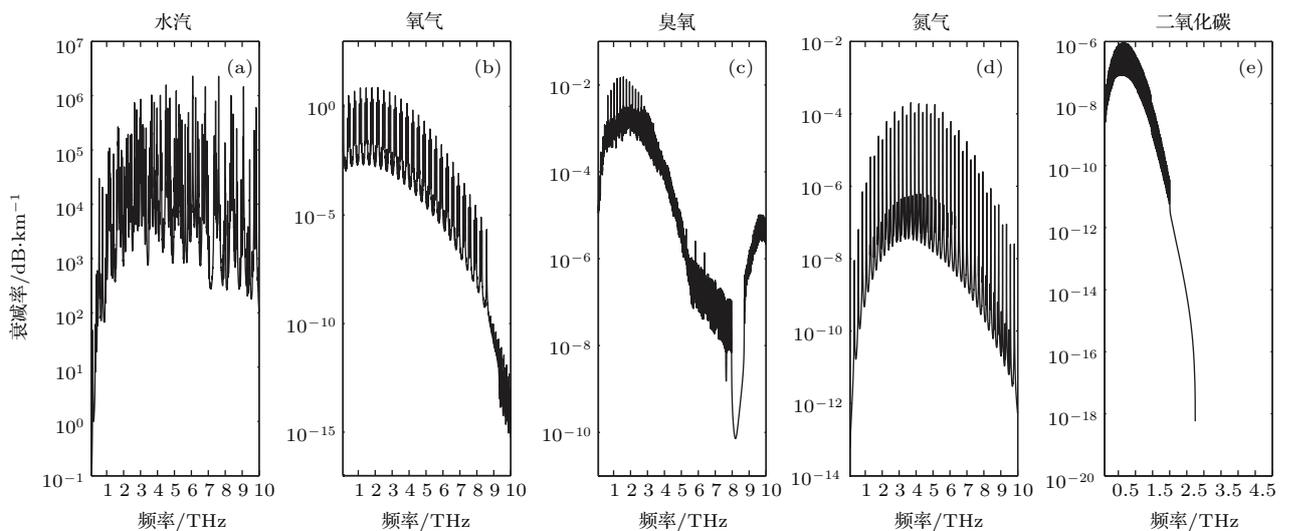


图 1 晴空海平面标准大气中 THz 辐射传输特性

Fig. 1. The propagation characteristics of THz radiation in the clear-sky standard atmosphere at sea level.

线为美国空军地球物理实验室 Fascode 模式所使用的大气廓线<sup>[28]</sup>. 结果如图 2 所示, 随着频率的增大, 大气背景辐射强度总体趋势降低. 在不同纬度, 晴空大气层顶 THz 辐射的光谱特征主要由水汽的吸收和发射表征, 随相对湿度的增大, 大气层顶总辐射强度增大. 由于大气中的其他粒子, 如水滴、灰尘粒子、冰晶粒子等粒子的散射都会使得大气光学厚度增加, 因此晴空条件下大气层顶测得的 THz 辐射值最大.

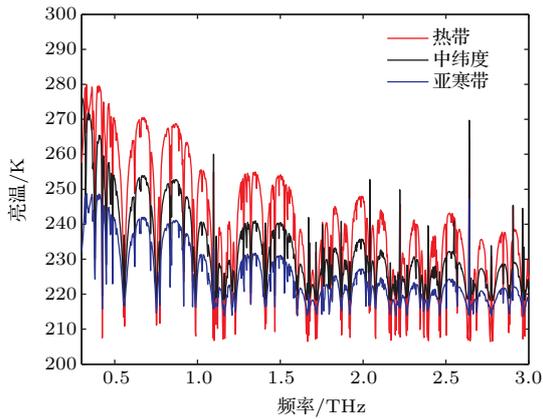


图 2 (网刊彩色) 晴空大气层顶的 THz 辐射光谱  
Fig. 2. (color online) The spectrum of THz radiation at the top of clear-sky atmosphere.

对比同频率的大气吸收系数发现, 在吸收峰附近, 大气层顶 THz 辐射的亮温值较低; 而在大气窗口附近, 则与之相反. 分析其原因, 在吸收峰附近, 尽管其辐射率也高, 但由于大气的不透明性, 底层大气发射的 THz 辐射主要被上层大气吸收, 因而大气层顶的 THz 辐射则主要来自于对流层上部温度较低部分大气发射的 THz 辐射. 在非吸收线的频段, 大气透过率较高, 大气层顶的 THz 辐射主要来自于对流层中、下层温度较高的部分发射的 THz 辐射.

#### 4 卷云微物理特性对太赫兹辐射光谱特征的影响

以上分析表明, 晴空大气层顶的 THz 辐射主要由水汽的吸收和发射表征. 在有云条件下, 卷云冰晶粒子将低层大气的上行辐射向各个方向散射, 星载探测仪接收冰晶前向散射的部分. 在大气背景辐射相同的情况下, 卷云散射辐射的多少主要由光学厚度、单散射反照率和散射相函数决定, 而卷云粒

子尺度和冰水路径等微物理性质是决定其散射特性的重要因素. 下面主要分析有效粒子尺度和冰水路径对大气层顶 THz 辐射的影响.

##### 4.1 描述卷云微物理特性的基本参数

表征卷云微物理特性的基本参数通常包括粒子形状、粒子尺度、谱分布以及冰水路径等. 卷云中冰晶粒子的形状是多种多样的, 主要取决于云体温度、相对湿度以及在生成过程中是否经历了碰并过程等. 在大量中纬度、热带卷云现场观测试验<sup>[29-31]</sup>中发现, 对大多数卷云而言, 在云顶附近, 空心柱状和平板状是最多的类型. 在温度高于  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 立体冰晶例如子弹花状冰晶是优势形状, 而温度低于  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 空心或实心柱状冰晶则比较盛行. 在这两个温度之间, 对流性卷云主要含有立体冰晶, 而稳定性卷云却主要由空心柱状冰晶组成. 而在卷云的底部, 不规则的子弹花瓣状和聚积物状冰晶较多, 这主要是由于垂直混合以及重力碰并的作用造成的<sup>[32]</sup>. 因此, 本文选取了聚积物状、空心柱状和平板状、玫瑰花瓣状四种主要形状进行分析.

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<sup>[33]</sup>. 本文选取改进的 Gamma 分布表征粒子的谱分布, 其形式为

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

其中,  $D$  表示粒子的尺度;  $N_0$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$  分别为浓度参数、形状因子和尺度参数. 单个非球形粒子尺度的表示方法主要有最大尺度、等质量球形粒子尺度、等体积球形粒子尺度、等截面积圆形直径等参数, 粒子群则主要通过有效粒子尺度表示. 本文中以等体积球形粒子尺度表示冰晶粒子尺度, 其计算方法为

$$Dv = \sqrt[3]{6V/\pi},$$

其中,  $V$  表示非球形粒子的体积. 基于大量观测试验, Yang 等<sup>[34]</sup>建立了不同参数化方案之间的拟合关系, 不同形状粒子的拟合参数主要依据文献提出的方案.

IWP 是表征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

$$IWP = \int_L IWC(z) dz.$$

### 4.2 卷云粒子尺度对大气层顶 THz 辐射的影响

假设 THz 辐射的接收装置类似于微波辐射计, 则需要 0.1—1 THz 之间选择几个探测卷云微物理特性的通道. 通道的选择主要基于不同频率时大

气层顶观测到的大气不透明度的相似性, 即在不同纬度时, 晴空大气的不透明度应该在同一水平, 这样排除了大气廓线和大气状态的不同造成的影响, 为此我们在分析热带、中纬度、亚寒带不同气候、不同大气廓线条件下的晴空 THz 辐射光谱的基础上选取 183, 325, 462, 664, 874 GHz 五个频率 (波长分别为 1639.3, 923.1, 649.4, 451.8, 343.2  $\mu\text{m}$ ) 通道具体分析大气层顶 THz 辐射对卷云微物理特性的敏感性.

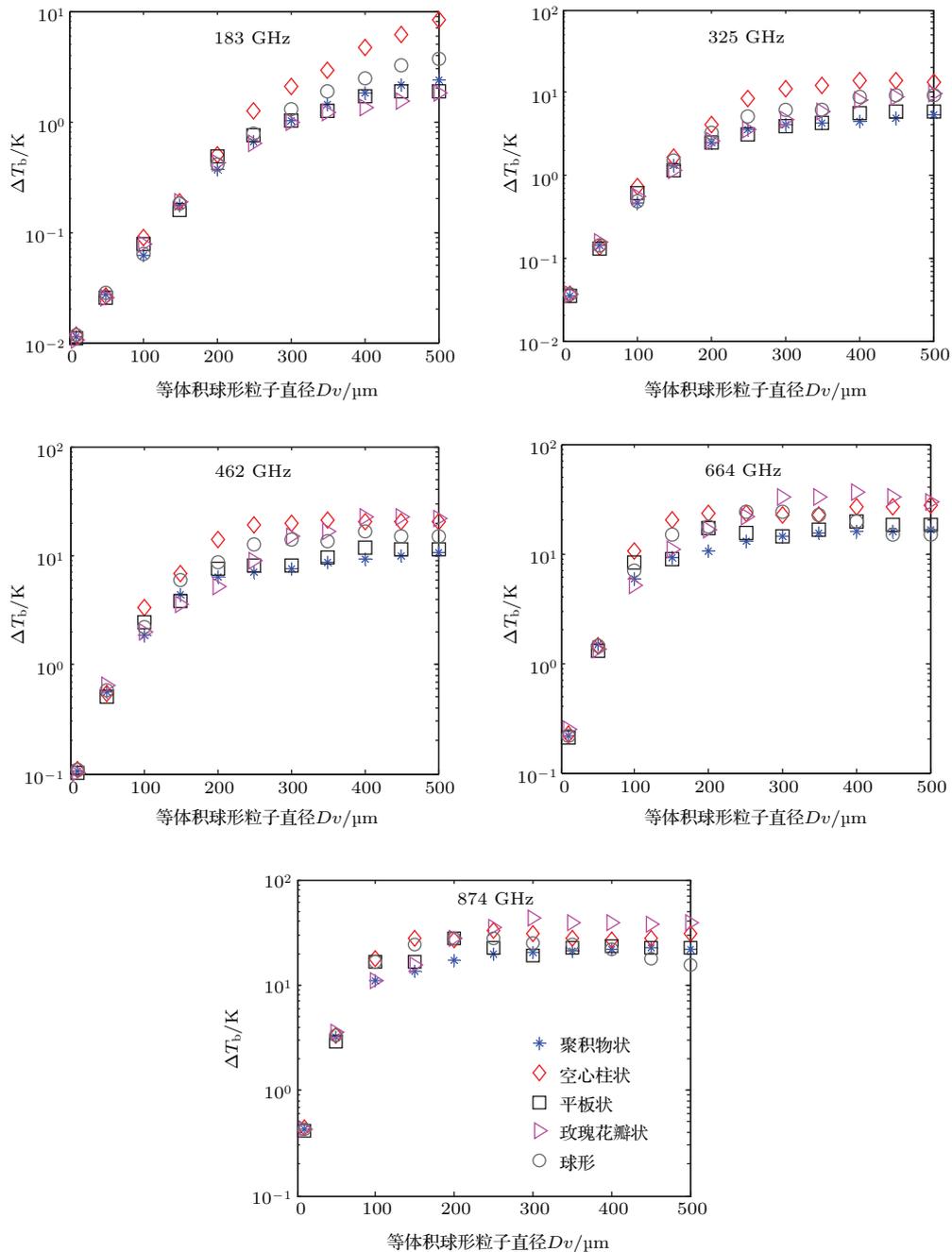


图3 (网刊彩色) 卷云冰晶粒子尺度对大气层顶 THz 辐射的影响

Fig. 3. (color online) The effects of cirrus ice particle size to THz radiation at the top of atmosphere.

图3为不同形状的卷云冰晶粒子的尺度对大气层顶THz辐射光谱的影响,其中,卷云高度设置为8—9 km,卷云冰水路径为50 g/m<sup>2</sup>.卷云冰晶粒子将大气背景的上行辐射向各个方向散射,虽然粒子群的多次散射使得前向散射与单次前向散射相比得以增强,但仍小于晴空大气背景的上行辐射.在低频通道(183 GHz通道),亮温差随粒子尺度的增大而增大,卷云效应呈增强趋势,且在粒子尺度小于200 μm时是近似线性变化关系;当通道频率增加到462 GHz时,在小粒子段,卷云效应随粒子尺度的增大而增强;对于大粒子,随着粒子尺度与波长接近,此时亮温差几乎保持不变,恒定的亮温差预示着此时的信号仅与IWP有关,因此应用此波段遥感IWP成为可能.而对于粒子形状的影响,

在小粒子段,亮温差值较小,形状因素的影响较小;随着粒子尺度增大,形状的影响作用增强.分析其原因,主要是在低频段波长比粒子尺度大得多,此时近似为Rayleigh散射,散射强度随粒子尺度增大而增强,而与粒子形状无关;同时参考文献[26],在小粒子段,粒子的单散射反照率较低,此时粒子吸收作用明显,而吸收作用主要与粒子的体积成比例,因此形状因素的影响较小;而随着通道频率升高和粒子尺度的增加,单散射反照率接近于1,此时粒子散射作用起主导作用,且散射主要为米散射,因此粒子形状因素的作用明显增加,同时,由于高频波段的辐射主要被冰晶粒子散射,吸收效应和发射效应较小,这就表明大气层顶THz辐射的卷云效应几乎与卷云温度无关.对于低频通道,空心柱状

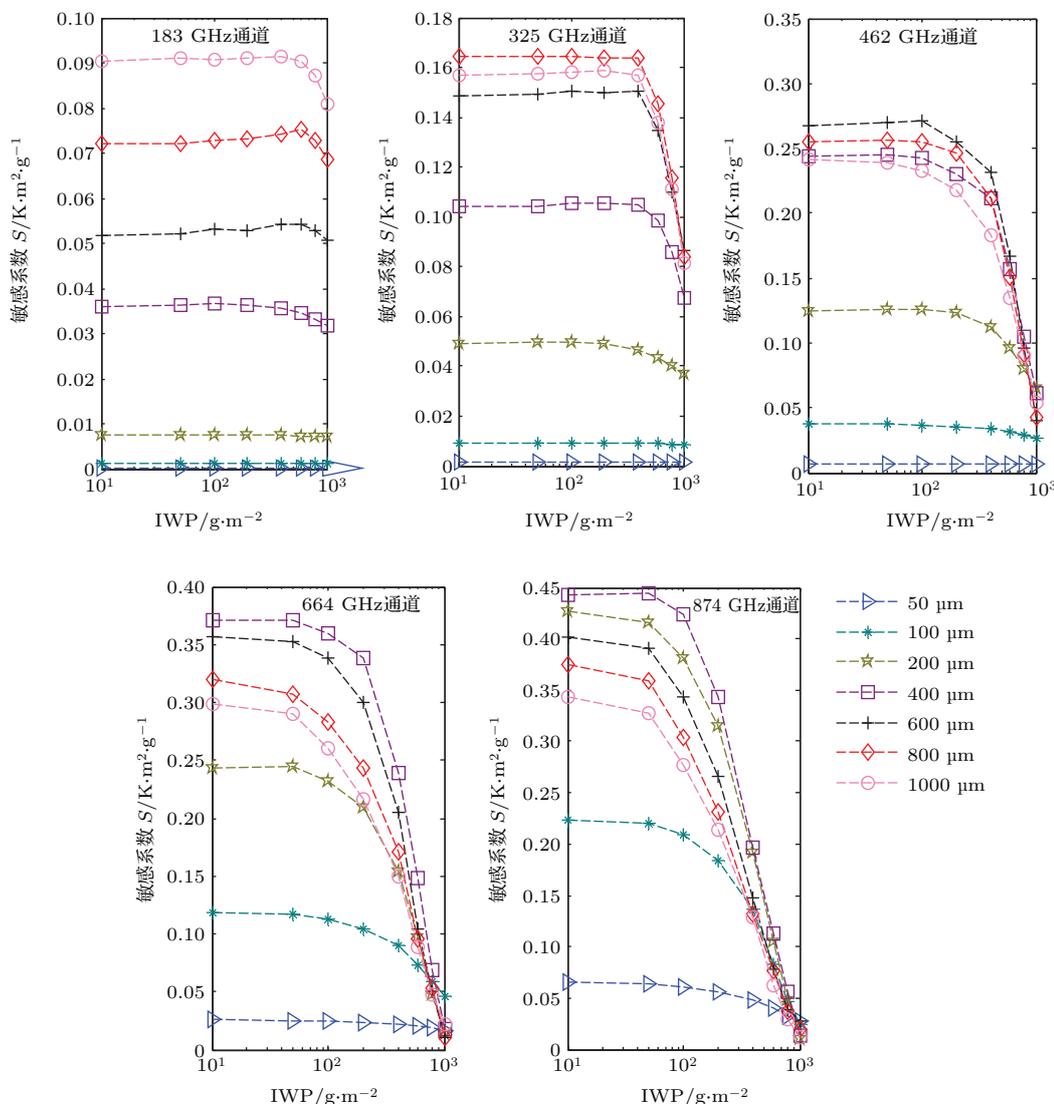


图4 (网刊彩色) 卷云冰晶有效粒子尺度的敏感性

Fig. 4. (color online) The sensitivity to cirrus clouds effective particle size.

粒子的亮温差明显大于其他形状的粒子,而在高频通道,玫瑰花瓣状的量温差较大,主要与粒子的单散射特性相关,其宏观表现同样符合文献[26]的计算结果.

以上分析主要是对大气层顶 THz 辐射的卷云效应做了定性描述,下面定量分析 THz 辐射对卷云粒子尺度的敏感性. THz 辐射对卷云粒子尺度的敏感性可通过大气层顶 THz 辐射光谱亮温随冰水路

径的变化程度来表示,定义卷云冰水路径敏感系数  $S_{IWP}$ , 即

$$S_{IWP} = |\Delta BT|/\Delta IWP,$$

式中,  $\Delta BT$  表示相邻两个冰水路径的 THz 辐射光谱的亮温差.  $S_{IWP}$  值越大,表示 THz 波对冰水路径的敏感性越大, THz 波对冰水路径的变化越灵敏;反之,则表示 THz 波对冰水路径的敏感性越小, THz 波对冰水路径的变化趋于饱和.

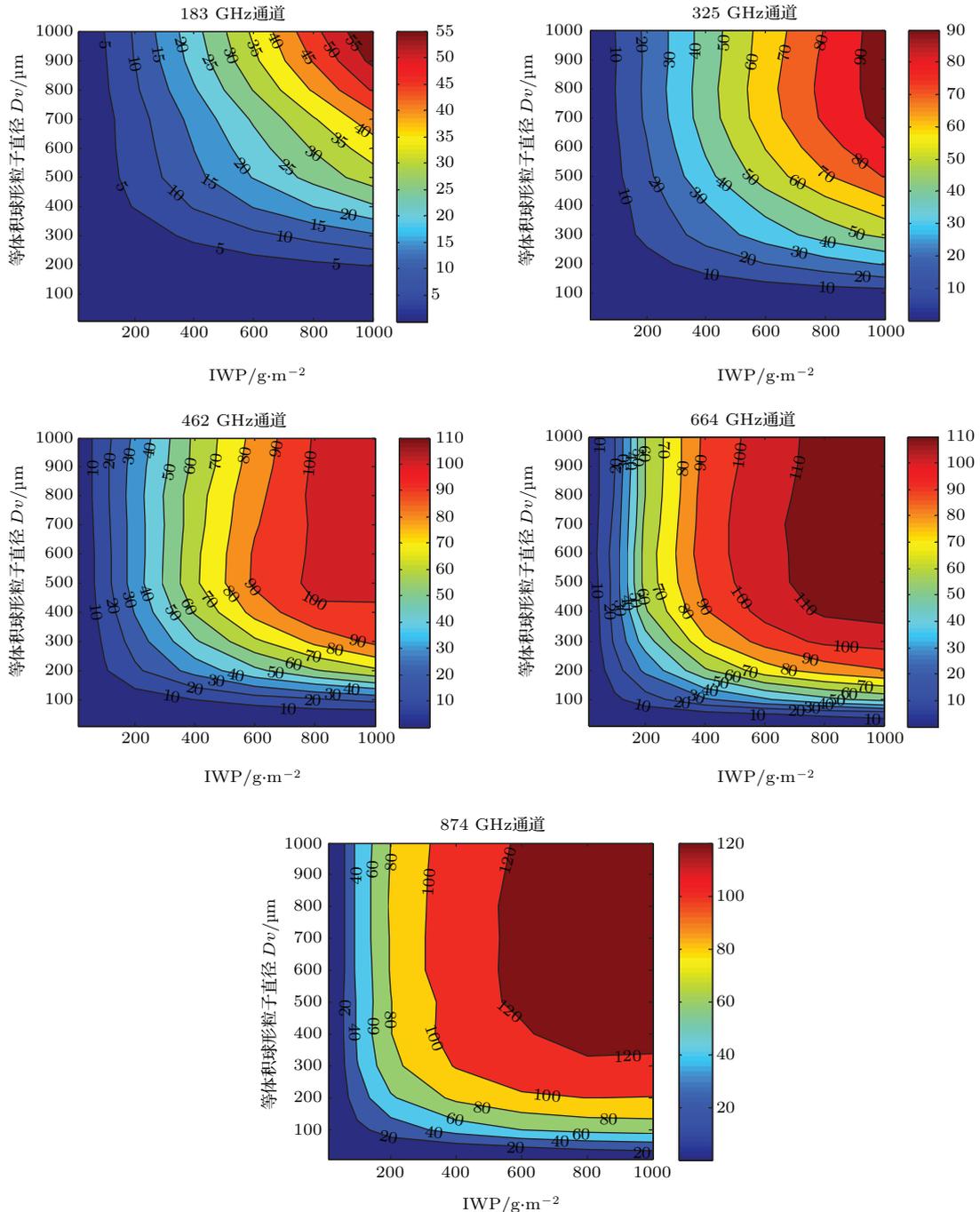


图5 (网刊彩色) 卷云冰水路径对大气层顶 THz 辐射的影响

Fig. 5. (color online) The effects of cirrus clouds ice water path to THz radiation at the top of atmosphere.

图4描述不同尺度的粒子在不同通道时敏感系数的变化情况, 粒子形状为空心柱状. 如图所示, 不同通道对不同尺度的冰晶粒子敏感性不同, 总体而言, 低频通道对大粒子比较敏感, 高频通道对小粒子比较敏感. 其中, 50  $\mu\text{m}$  的卷云粒子在大多数通道的敏感性都较低, 仅在874 GHz通道时敏感性较高, 因此, 探测此范围的粒子还需要更高频率的通道. THz频段可以探测尺度100  $\mu\text{m}$  以下的粒子的信息, THz观测可作为微波、红外观测方法的补充. 同一尺度的粒子在不同通道敏感系数有较大差异, 因此使用单一通道反演卷云微物理参数较为困难, 可使用多通道联合反演卷云微物理特性.

### 4.3 卷云冰水路径对大气层顶THz辐射的影响

卷云的冰水路径对大气层顶THz辐射光谱的影响如图5所示, 以空心柱状粒子为例进行说明. 等值线图色标表示晴空大气层顶亮温与卷云条件下大气层顶亮温的差值  $\Delta T_b$ . 将冰水路径的影响称为卷云的冰水路径效应, 即在小粒子段(直径小于200  $\mu\text{m}$ ), 所有通道都表现为随冰水路径的增大,  $\Delta T_b$  增大, 即卷云的冰水路径效应增强; 而在大粒子段(直径大于200  $\mu\text{m}$ ), 该效应因通道而异, 在低频通道, 随卷云冰水路径的增大,  $\Delta T_b$  增大, 卷云效应增强; 而在其余高频通道, 随卷云冰水路径的增大,  $\Delta T_b$  先随之增大, 而后近似不变, 即随着冰水路径的增大, 卷云效应趋近饱和. 这种效应主要由以下原因造成: 1) 卷云的存在使得大气透过率减小, 阻碍了低层大气发射的上行辐射, 而卷云在此波段几乎不吸收也不发射辐射; 2) 卷云上部高层大气气体分子稀薄且温度较低, 发射的THz辐射能量较低, 大气层顶THz辐射主要来自卷云的前向散射辐射; 3) 对于厚卷云而言, 由于其冰水路径较大, 冰晶粒子的多次散射将大气部分上行辐射散射向其他方向, 因此卫星接收到的辐射几乎不变. 与红外波段相比, THz方法探测卷云, 尤其是低频通道, 对卷云冰水路径的敏感性较高且仅对较高冰晶粒子含量饱和, 使得它能够反映整层卷云的辐射特征.

图6为THz波段卷云冰水路径的敏感系数示意图, 其中卷云冰晶的等体积球形粒子直径为100  $\mu\text{m}$ . 如图所示, 在薄卷云时, 敏感系数近似为常数, 这表明大气层顶的THz辐射光谱亮温与IWP近似为线性关系. 而且, 敏感性与通道频率

相关, 此时卷云冰晶粒子最敏感的通道频率为874 GHz, 敏感系数随频率的增大而增大; 线性关系的范围与通道频率呈负相关, 即随着频率的增大, 线性关系的区间减小. 当云层增厚, 即随着IWP的升高, 卷云冰水路径的敏感性下降, 逐渐趋于饱和, 且频率越大趋于饱和的程度越快.

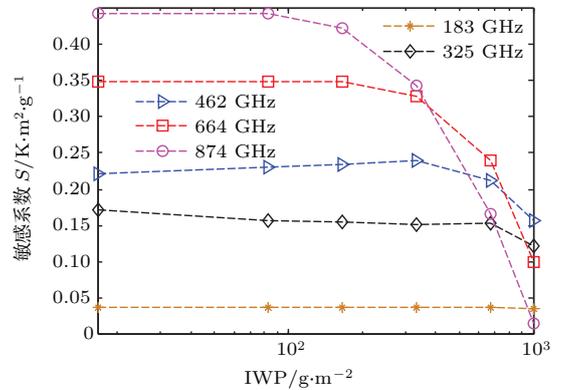


图6 (网刊彩色) THz波对卷云冰水路径的敏感系数  
Fig. 6. (color online) The sensitivity of THz radiation to cirrus clouds ice water path.

### 4.4 卷云微物理参数双通道查找表的建立

上述部分主要针对卷云的粒子尺度和冰水路径对大气层顶THz辐射光谱的影响进行了分析, 其在不同频率通道表现出相似的规律, 据此我们建立了卷云微物理参数的双通道查找表, 为卷云微物理参数的反演提供了思路. 图7为325和664 GHz双通道亮温差的查找表. 由图7可知, 在不考虑系统噪声等因素的前提下, 查找表法可对冰水路径为10—1000  $\text{g}/\text{m}^2$ 、粒子尺度100—1000  $\mu\text{m}$  区间的粒子进行有效反演.

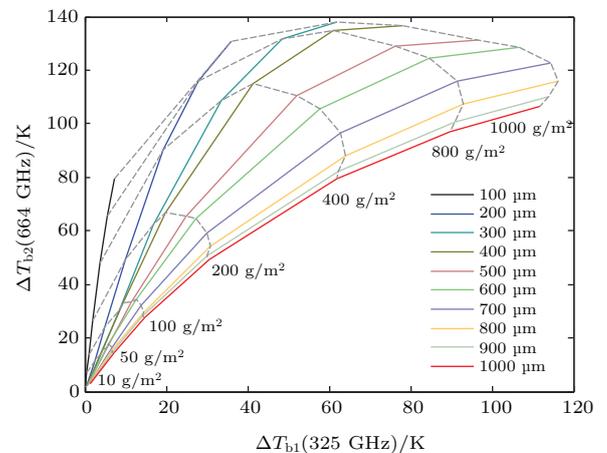


图7 (网刊彩色) 卷云微物理参数的双通道查找表  
Fig. 7. (color online) The two-channel lookup table of cirrus microphysical parameters.

## 5 结 论

通过对卷云冰晶粒子在 THz 波段散射特性的分析, 模拟计算了晴空和有云条件下大气层顶 THz 辐射光谱特征, 讨论分析了卷云冰晶粒子形状、粒子尺度及冰水路径对 THz 波传输特性的影响, 并通过敏感系数将其量化, 最后建立了卷云微物理参数的双通道查找表, 为反演提供了思路. 结果表明:

1) 卷云冰晶粒子形状、粒子尺度和冰水路径对太赫兹波传输特性均有不同程度的影响, 卷云效应也因通道频率而异, 在低频通道, 卷云效应随粒子尺度、冰水路径的增大而增强; 在高频通道, 卷云效应较为复杂, 因粒子尺度和冰水路径而异, 表现为先增强而后趋近饱和;

2) THz 波对卷云的粒子尺度和冰水路径有较好的敏感性, 与可见光、红外和微波波段相比, THz 波段的遥感仪器可以探测大部分卷云冰晶粒子, 提供卷云内部冰晶粒子的全面信息, 且有较好的灵敏性;

3) 当卷云为薄云时, 敏感系数近似为常数, 表明大气层顶的光谱亮温值与冰水路径几乎为线性关系, 且敏感系数随频率的增大而增大; 当云层增厚, 卷云冰水路径的敏感性下降, 逐渐趋于饱和, 且频率越大趋于饱和的程度越快; THz 波对卷云冰水路径的敏感性较高且仅对较高冰水路径饱和, 因此与可见光和红外波段相比, THz 波段能够探测整层卷云的垂直结构特征;

4) 双通道微物理参数查找表的建立表明, 该方法可对冰水路径 10—1000 g/m<sup>2</sup>、粒子尺度 100—1000 μm 区间的冰晶粒子进行有效、稳定的反演, 这也是下一步需要进行的工作.

上述分析证明了 THz 波在被动遥感探测卷云微物理特性方面的巨大应用潜力, 为 THz 波探测卷云技术的发展做了初步探索, 然而由于非球形粒子单散射特性库的限制, 本文并未研究 1 THz 以上频率通道的性质, 下一步工作考虑结合高频通道敏感性的分析发展稳定的查找表反演算法. 随着器件技术的发展, THz 波被动遥感探测卷云将成为探测卷云微物理参数的有效方法.

## 参考文献

- [1] Rossow W B, Schiffer R A 1991 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **72** 2
- [2] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, van der Linden P J, Hanson C E 2007 *Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (Cambridge: Cambridge University Press) pp214–223
- [3] King M D, Tsay S C, Platnick S E, Wang M, Liou K N 1997 *Tech. Rep.* ATBD-MOD-05
- [4] Xue L F, Wei H L, Rao R Z 2004 *Laser & Infrared* **34** 286(in Chinese) [薛立芳, 魏合理, 饶瑞中 2004 激光与红外 **34** 286]
- [5] Mendrok J, Wu D L, Stefan A B 2009 *Sensors, Systems and Next-generation Satellites XIII* Berlin, Germany, August 31 2009 p74740T-1
- [6] Austin R T, Heymsfield A J, Stephens G L 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D00A23
- [7] Stephens G L, Tsay S C, Stackhouse P W Jr 1990 *J. Atmosph. Sci.* **47** 1742
- [8] Larry M, Miloshevich, Andrew J H 1996 *J. Atmosph. Ocean. Technol.* **14** 753
- [9] Andrew J H, Aron B, Carl S 2004 *Am. Meteorol. Soc.* **61** 982
- [10] Jeffrey L S, Julie A H, Andrew J H 2004 *Am. Meteorol. Soc.* **43** 779
- [11] Sassen K, CHO B S 1992 *J. Appl. Meteor.* **31** 1275
- [12] Minnis P, Heck P W, Young D F 1993 *J. Atmosph. Sci.* **50** 1305
- [13] Yao J Q, Wang J L, Zhong K, Wang R, Xu D G, Ding X, Zhang F, Wang P 2010 *J. Optoelectr. Laser* **21** 1582 (in Chinese) [姚建铨, 汪静丽, 钟凯, 王然, 徐德刚, 丁欣, 张帆, 王鹏 2010 光电子·激光 **21** 1582]
- [14] Zhang R, Li H, Cao J C, Feng S L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4618 (in Chinese) [张戎, 黎华, 曹俊诚, 封松林 2009 物理学报 **58** 4618]
- [15] Tan Z Y, Chen Z, Han Y J, Zhang R, Li H, Guo X G, Cao J C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 098701 (in Chinese) [谭智勇, 陈镇, 韩英军, 张戎, 黎华, 郭旭光, 曹俊诚 2012 物理学报 **61** 098701]
- [16] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, McFarquhar G M 2002 *J. Geophys. Res.* **107** AAC2-1
- [17] Jimenez C, Buehler S A, Rydberg B, Eriksson P, Evans K F 2007 *Q. J. R. Meteorol.* **133** 129
- [18] Zhao H B, Zheng C, Zhang Y F, Liang B, Ou N M, Miao J G 2014 *Prog. Electromagn. Res. M* **35** 183
- [19] Evans K F, Wang J R, Racette P E, Heymsfield G, Li L H 2004 *J. Appl. Meteorol.* **44** 839
- [20] 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
- [21] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, Deeter M N 1998 *J. Appl. Meteorol.* **37** 184
- [22] Mendrok J, Baron P, Yasuko K 2008 *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII* Cardiff, United Kingdom, September 15, 2008 p710704
- [23] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, Barbe A, Benner D C 2013 *J. Quantit. Spectrosc. & Radiat. Transfer* **130** 4
- [24] Buehler S A, Eriksson P, Kuhna T 2005 *J. Quantitat. Spectrosc. Radiat. Transfer* **91** 65

- [25] Eriksson P, Buehler S A, Davis C P 2011 *J. Quantitat. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112** 1551
- [26] 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
- [27] Mätzler C 2002 *MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption* Institute of Applied Physics, University of Bern, June 2002
- [28] 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
- [29] Jeffrey L S, Dye J E, Bansemer A, Heymsfield A J, Grainger C A, Petersen W A, Cifelli R 2002 *J. Appl. Meteorol.* **41** 97
- [30] Yang P, Liou K N 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 4699
- [31] McFarquhar G M, Heymsfield A J 1997 *Am. Meteorol. Soc.* **54** 2187
- [32] Liou K N 2002 *An Introduction to Atmospheric Radiation* Second Edition (New York: Academic Press) pp170–176
- [33] Heymsfield A J, Miloshevich L M 2002 *Am. Meteorol. Soc.* **60** 937
- [34] Heymsfield A J, Aron B, Paul R F, Durden S L, Jeffrey L S, Dye J E, William H, Grainger C A 2002 *Am. Meteorol. Soc.* **59** 3457

# Sensitivity analysis of terahertz wave passive remote sensing of cirrus microphysical parameters\*

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

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

( Received 18 February 2016; revised manuscript received 22 April 2016 )

## Abstract

Cirrus clouds play an important role in the energy budget and the hydrological cycle of the atmosphere. It is still one of the largest uncertainties in the global climate change studies. This is mainly attributable to the measurement discrepancies of cirrus parameters, especially the microphysical parameters, which are constrained by the existing methods. With THz wavelengths on the order of the size of typical cirrus cloud particles and therefore being sensitive to cirrus clouds, THz region is expected to have a promising prospect concerning measuring cirrus microphysical parameters (ice water path and effective particle size). In order to evaluate the effects of cirrus microphysical parameters on THz transmission characteristics and the sensitivity of cirrus in THz region, the THz radiation spectra at the top of atmosphere in the clear sky and the cloudy situations are simulated and calculated based on the atmospheric radiative transfer simulator. The effects of cirrus particle shape, particle size and ice water path on THz transmission characteristics are obtained by analyzing the brightness temperature difference between the two situations, and the sensitivity parameters that quantitatively describe the effects. The results indicate that cirrus particle shape, particle size and ice water path have different effects on the THz wave propagation. The cirrus effect varies also with channel frequency. Overall, in the low frequency channels, cirrus effects are enhanced with the increases of particle size and ice water path; in the high frequency channels, cirrus effects are more complicated and vary with particle size and ice water path. The effects are first enhanced and then turned into saturation. The THz wave is sensitive to cirrus cloud ice water path and effective particle size, and THz wave may be the best waveband for remote sensing of cirrus microphysical parameters in theory. For thin clouds, the sensitivity parameters are approximately constant, indicating that the spectral brightness temperature at the top of the atmosphere almost shows linear relationship with ice water path, and the sensitivity parameters increase with frequency increasing. For thick clouds, the sensitivity of cirrus to ice water path decreases and gradually becomes saturated, and the higher the frequency, the more quickly it tends to saturation level. Compared with the microwave and infrared, THz wave can provide many detailed information about cirrus. The two-channel look-up table indicates that THz wave passive remote sensing of cirrus may be a stable and effective method. The results will be conducive to developing the technology of THz wave remote sensing of cirrus microphysical parameters. Moreover, it is also beneficial to improving the cirrus detection precision.

**Keywords:** terahertz radiation, cirrus clouds, microphysical parameters, sensitivity analysis

**PACS:** 41.20.Jb, 92.60.N-, 92.60.Ta

**DOI:** 10.7498/aps.65.134102

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

† Corresponding author. E-mail: liuleidl@gmail.com