

非球形冰晶在 94/220 GHz 毫米波的散射特性模拟计算

吴举秀¹, 窦芳丽², 安大伟², 陈庆亮¹, 黄磊¹, 涂爱琴¹

(1. 山东省气象局大气探测技术保障中心, 山东 济南 250031;

2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 针对 94/220 GHz 双频雷达的数据处理, 分析了不同形状冰晶对这两个波段的单散射特性及衰减特性, 探讨了单形状冰晶及具体冰晶模型的回波特性, 结果表明: 1) 当冰晶较大时, 冰晶的后向散射及衰减对冰晶形状较敏感, 相同最大尺度下, 六角形冰晶后向散射及衰减最大、子弹花次之、雪花最小; 2) 单形状冰晶云的雷达反射率因子对冰晶形状、冰水含量、滴谱的中值尺度较敏感, 同样滴谱条件下, 220 GHz 的衰减系数约是 94 GHz 的 5~25 倍; 3) 具体冰晶模型的雷达反射率因子随粒子浓度、冰水含量、中值尺度增加而增加, 对粒子谱的形状参数敏感性较低。

关键词: 非球形冰晶; 94/220 GHz 云雷达; 散射特性; 冰晶谱参数

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A

Simulation of scattering characteristics of non-spherical ice crystals with 94/220 GHz millimeter-wavelength

WU Ju-Xiu¹, DOU Fang-Li², AN Da-Wei², CHEN Qing-Liang¹, HUANG Lei¹, TU Ai-Qin¹

(1. Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology, Weather Bureau of ShanDong Province, Jinan 250031, China;

2. National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: To process the data from 94/220 GHz dual-band radar, the single scattering and attenuation characteristics of ice crystals with different shapes by the two bands were analyzed. The echo characteristics of ice clouds based on single shape ice crystals or a refined model were discussed. The backscatter and attenuation of the larger particles are sensitive to the particle shape. They are the largest for hexagonal ice crystals, greater for bullet, and the least for snow. The radar reflectivity factor (Z_e) of ice clouds based on single shape ice crystals are sensitive to the shapes of ice crystals, ice water content and the median dimension of particles size distribution (PSD). The attenuation coefficient of 220 GHz wave is about 5-25 times than that of 94 GHz at the same PSD. Z_e of the refined model increases with the particle concentration, ice water content, and median dimension. It is less sensitive to the shape parameters of the PSD.

Key words: non-spherical ice particles, 94/220 GHz cloud radars, scattering characteristics, parameters of ice particles size distribution

PACS: 96.60.Nv

引言

云的宏微观特性在人工影响天气、飞机安全飞

行保障、数值天气预报模式、气候预测等方面具有重要的作用。在瑞利散射条件下, 粒子的后向散射能力和波长的 4 次方成反比, 因此一些厘米波雷达探测

收稿日期: 2015-08-05, 修回日期: 2015-09-29

Received date: 2015-08-05, revised date: 2015-09-29

基金项目: 国防科工局民用航天预研项目(太赫兹测云成像技术研究); 国家自然科学基金(41305031); 科技部公益性行业专项(GYHY201206038, GYHY201306040, GYHY201406033); 山东省气象局面上课题(2015sdqxm13); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

Foundation items: Civilian space advance program of the State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense (Terahertz cloud imaging measurement technology research); NSFC (41305031); Public service sectors (agriculture) science and technology project GYHY201206038, GYHY201306040, GYHY201406033; The General Program of Shandong province meteorological bureau (2015sdqxm13); Jiangsu university advantage disciplines construction engineering projects (PAPD)

作者简介 (Biography): 吴举秀 (1974-), 女, 山东省人, 博士, 主要从事雷达气象学研究. E-mail: gurunmin@163.com

不到的云体,而毫米波雷达可以探测到.大气在毫米波段存在 35、94、140、220 GHz 四个频率窗区(对应波长 8.6、3.2、2.14、1.36 mm),波长越短,大气衰减越强,粒子的后向散射能力越大,在获得同样回波功率的情况下,天线可以做的更小,因此 3.2、2.14 和 1.36 mm 雷达适合作为机载或星载设备进行云的观测.目前,35、94 GHz 毫米波雷达已成为探测非降水云及弱降水云的有效工具^[1-2].自上个世纪 80 年代开始,美国、英国、德国、日本等已先后发展了 94 GHz 毫米波雷达^[3-5],2006 年发射的 CloudSat 是第一个搭载 94 GHz 云廓线雷达的卫星^[6],我国安徽 38 所在 2013 年首次研制成功一台机载 94 GHz 云雷达^[7].太赫兹雷达的研制国际上较少,美国马萨诸塞大学在 1988 年研制了一部 215 GHz 的雷达,由于衰减较大,主要用来研究层状云和雾^[8].An Dawei^[9]探讨了 220 GHz 雷达系统及信号衰减,Battaglia 等^[10]探讨了 G 波段(110-330GHz)雷达研究云物理的可行性.

目前,我国准备发展星载 94/220 GHz 的双频测云雷达,用于探测云的三维结构,同时借助双频探测提高云中粒子尺度反演精度.星载雷达从云顶向下探测,首先探测到冰云,冰云微物理参数与 220 GHz 太赫兹波回波特性关系如何,很少有文献探讨.因此,为研究这两个频段的回波机制以及双频雷达探测冰云的有效性,特别是太赫兹雷达探测冰云的回波特性及可行性,有必要详细分析这两个波段的散射特性.通常球形粒子的散射特性用瑞利散射或米散射计算,但冰云中冰晶粒子是非球形的,而且最大尺度可达几毫米,其散射特性用瑞利散射或米散射计算是不合适的. Matrosov 等^[11]、Hogan 等^[12]认为用毫米波测量毫米量级的非球形粒子时,将冰晶粒子作为米散射球对待,将低估其雷达反射率因子. Leinonen 等^[13]通过分析 13.4 GHz、35.6 GHz 和 94 GHz 机载雷达的测量数据,发现当冰晶大小和雷达波长在同一数量级时,将冰晶看作椭球,无法真实反映粒子的后向散射及衰减.目前非球形粒子散射特性常用的计算方法有^[14]: DDA(离散偶极子近似法)、FDTD(有限时域差分法)、T 矩阵法、IGOM(改进的几何光学法)和 ADT(反常衍射理论)等.其中 FDTD、DDA 适用于任意形状及材质的粒子. Kim 等^[15]用 DDA 研究了五种形状雪晶在 94 GHz、183 GHz、340 GHz 处的单散射特性.

可以看出,非球形会影响粒子的散射特性和衰减特性,而且要反演云内冰晶大小及形状等特性,也

需要对各种形状冰晶的散射特性展开分析.国内外很少有文献就非球形冰晶云对 94、220 GHz 这两个波段的散射特性展开对比分析和探讨.因此,针对我国星载雷达发展的需要,本文主要模拟分析 94、220 GHz 这两个波段对非球形冰晶的后向散射特性及衰减特性,基于不同冰云模型探讨冰云的回波特性与谱参数及冰水含量的关系.双波长比与冰云微物理参数的关系及雷达可探测高度将另文分析.

1 基本理论

计算回波特性要用到冰晶谱,根据实测统计^[16],中纬度冰云粒子谱 $N(D)$ 及谱的中值尺度 D_m 可表示如下:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\beta D) \quad , \quad (1)$$

$$D_m = \frac{2.97 + \mu}{\beta} \quad , \quad (2)$$

其中, N_0 是滴谱的浓度, β 为斜率, D 为粒子最大尺度, μ 是冰晶谱的形状参数.

单位体积内的粒子总数 N 是粒子谱的积分,根据粒子谱公式(1)及 N 进行计算可得到滴谱浓度 N_0 ,利用粒子的等效半径及其对应的密度和粒子谱分布可以获得冰水含量 IWC.

直径远小于雷达波长的小球形冰晶,其雷达回波强度 Z 用瑞利散射计算^[17]:

$$Z = \int_0^{D_{\max}} N(D) D^6 dD \quad , \quad (3)$$

其中, D_{\max} 是最大粒子的直径, D 为粒子直径.

大球形及非球形冰晶粒子,其等效雷达反射率因子 Z_e 表示为:

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^4 |K_i|^2} \int_0^{D_{\max}} N(D) \text{bscc}(D) dD \quad , \quad (4)$$

其中, λ 是雷达波长, D_{\max} 是粒子最大尺度的最大值, D 为粒子最大尺度(如为球形粒子,则 D 表示直径), $\text{bscc}(D)$ 表示最大尺度为 D 的大球形或非球形粒子的后向散射截面, $K_i = (m^2 - 1)/(m_i^2 + 2)$, m_i 是冰晶的复折射指数.冰的复折射指数实部随波长不变,虚部变化很小.波长分别为 3.2 mm、1.36 mm 时,文中冰的复折射指数分别取 $1.7831 + 0.002i$ 、 $1.7831 + 0.005i$ ^[18].

由于云雨的衰减,要对回波强度进行衰减订正,衰减系数定义为^[19]:

$$k = \int_0^{D_{\max}} N(D) Q_{\text{ext}}(D) dD \quad , \quad (5)$$

衰减系数 k 的单位为 $1/\text{km}$, $N(D)$ 是冰晶谱, Q_{ext} 是衰减截面,包括吸收截面和散射截面.

利用公式(3)、(4)、(5)可以计算 Z 、 Z_e 、 k , 由于后向散射截面及衰减截面是离散的, 所以在计算积分时使用数值积分的方法, 间隔 0.01 mm.

文中粒子的后向散射截面及衰减截面利用离散偶极子近似法 (DDA) 计算, DDA 的主要原理是用有限个离散的、相互作用的小偶极子阵列来近似实际粒子, 因此对实际粒子散射特性的研究就转化为对这些小偶极子散射特性的研究. DDA 方法很适合用于研究非球形粒子的散射特性和吸收特性^[20].

2 球形冰晶对 94、220 GHz 毫米波的散射特性

因为很少有文献同时计算 94、220 GHz 这两个波段的散射特性, 特别是 220 GHz 的, 所以首先模拟计算了球形冰晶的后向散射截面及衰减截面, 以便为非球形冰晶的分析提供参考. 计算方法利用 DDA 法, 结果如图 1 所示. 在粒子较小时 (对于后向散射, $r < 3$ mm; 对于衰减, $r < 0.8$ mm) 高频波的后向散射及衰减更强; 对于大的冰球粒子 (如冰雹), 高频波的后向散射及衰减有时反而变小.

根据 DDA 法计算的结果, 在 $r > 0.01$ mm 时, 220 GHz、94 GHz 毫米波的衰减都已超过瑞利散射很多, 说明此时散射已较强; 当 r 分别 < 0.2 mm、 0.5 mm 时, 对应 220 GHz、94 GHz 毫米波的后向散射基本上符合瑞利散射, 当粒子继续增大时, 后向散射出现震荡, 94 GHz 毫米波的这一结论与 Lhermitte^[19] 的是一致的. 在瑞利散射条件下, 220 GHz 毫米波的后向散射截面约是 94 GHz 毫米波的 30 倍, 但随着粒子增大, 两者之间的差异随震荡变化, 当 $r > 3$ mm 时, 220 GHz 毫米波后向散射反而小于 94 GHz 的. 在 $r < 0.8$ mm 范围内, 220 GHz 毫米波的衰减大于 94 GHz 的, 并且随着粒子增大, 差异增大; $r > 0.8$ mm 时, 两者的差异随着震荡变小, 有时基本一样.

3 非球形冰晶对 94、220 GHz 毫米波的散射特性

冰云中非球形冰晶形状多样, 不同形状的冰晶散射特性也不同, 使用数据库^[21-22] 中的数据来研究不同形状冰晶粒子的后向散射截面及衰减截面, 这些数据利用 DDA 算法获得. 表 1 为数据库中给出的冰晶粒子形状、形状代码 dtype、最大尺度范围及对应等效半径范围. 表中 L 指六角形冰晶的长度, 即两个六角形之间的距离, d 指六角形冰晶的宽度, 即六角形对角顶点之间的距离. 不同形状的粒子密度随着粒子大小是变化的, 等效质量球半径指将粒子

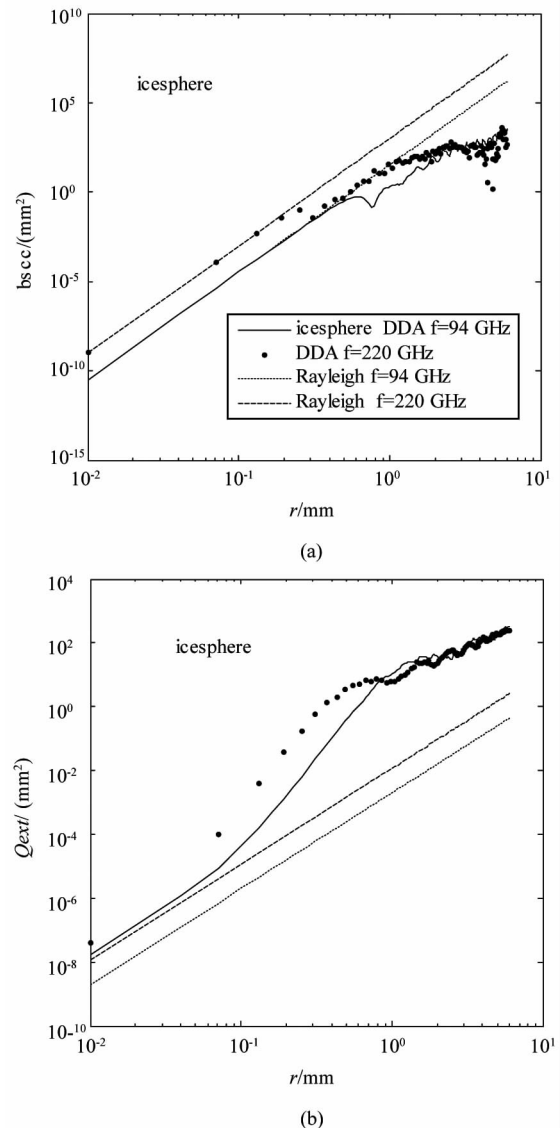


图 1 球形冰晶对 94、220 GHz 毫米波的后向散射截面 (a) 及衰减截面 (b)

Fig. 1 The backscattering (a) and attenuation cross sections (b) of spherical ice crystals with 94 and 220 GHz millimeter waves

等效为密度为 0.916 g/m^3 的球体所具有的半径. 最大尺度范围是粒子的最大尺寸变化范围.

3.1 非球形冰晶单散射特性分析

主要利用 DDA 方法计算得到的冰晶和雪晶的微波单散射数据库, 分析不同形状冰晶在不同温度、粒子尺寸条件下, 对这两个波段的单散射衰减截面和后向散射截面. 因为数据库中的聚合物没有 220 GHz 的, 所以对于 220 GHz 毫米波, 只分析表 1 中前 11 种形状, 粒子为随机取向.

3.1.1 非球形冰晶后向散射截面和衰减截面随冰晶大小的变化

表 1 冰晶粒子形状、形状代码、最大尺度范围及对应等效半径范围

Table 1 The shapes, shape code, the largest scale and the corresponding equivalent radius of ice crystal particles

Shape(形状)	dtype (形状代码)	D_{max} (最大尺度范围,mm)	r_e (等效质量球半径,mm)
Long column(L/d=4,长柱状)	0	0.121~4.835	0.025~1
Short column(L/d=2,短柱状)	1	0.083~3.304	0.025~1
Block column(L/d=1,厚柱状)	2	0.066~2.532	0.025~1
Thick plate(L/d=1/5,厚板状)	3	0.081~3.246	0.025~1
Thin plate(L/d=1/20,薄板状)	4	0.127~5.059	0.025~1
3-bullet-rossette(3瓣子弹花)	5	0.05~10	0.019~1.086
4-bullet-rossette(4瓣子弹花)	6	0.05~10	0.019~0.984
5-bullet-rossette(5瓣子弹花)	7	0.05~10	0.021~1.058
6-bullet-rossette(6瓣子弹花)	8	0.05~10	0.021~1.123
Sector snowflake(星状雪花)	9	0.05~10	0.025~0.672
Dendrite snowflake(树枝状雪花)	10	0.075~12.454	0.033~0.838
Aggregate1(聚合物1)	11	0.2~8.788	0.066~1.2
Aggregate2(聚合物2)	12	0.2~11.862	0.066~1.336
Aggregate3(聚合物3)	13	0.2~12.584	0.066~1.124

取温度 263.15 K,利用数据库^[21-22]中的数据获得不同形状冰晶的后向散射截面 b_{sc} 及衰减截面 Q_{ext} 见图 2($f=94$ GHz)、图 3($f=220$ GHz). 可以看出,在等效半径一样时,除了树枝状雪花(Dendrite, dtype=10),在 $0.2\text{ mm} < r_e < 0.8\text{ mm}$ 范围内的后向散射及衰减与其他形状差别大一点(超过 10 倍),其他形状冰晶的后向散射及衰减差别较小(最大差距约 10 倍左右).但在最大尺度 D 相同时,粒子较大则不同形状冰晶的后向散射及衰减差别增大(最大差距超过 100 倍).基本上,对小粒子($f=94$ GHz, $r_e < 0.2\text{ mm}$; $f=220$ GHz, $r_e < 0.1\text{ mm}$),后向散射及衰减对形状不敏感;对大粒子, ($f=94$ GHz, $r_e > 0.2\text{ mm}$; $f=220$ GHz, $r_e > 0.1\text{ mm}$)后向散射及衰减对形状较敏感.图 2a 中的聚合物 dtype=13,有时一个等效半径值对应两个后向散射截面或衰减截面,这是因为不同 D 的粒子由于密度的变化,其对应的等效半径有可能是一样的.在 $D < 12\text{ mm}$ 范围内,220 GHz 毫米波的后向散射截面和衰减截面基本上比 94 GHz 毫米波的大许多.在粒子较大时,与其他形状相比,雪花具有较小的后向散射和衰减.

3.1.2 温度对后向散射和衰减的影响

假设粒子最大尺度为 1 mm,不同形状冰晶在不同温度的后向散射截面及衰减截面见图 4(只给出了 $f=220$ GHz 的, $f=94$ GHz 的结论相同).可以看出,同一形状的粒子,后向散射截面及衰减截面对温度不敏感,基本随温度不变.很明显,在相同尺度下,

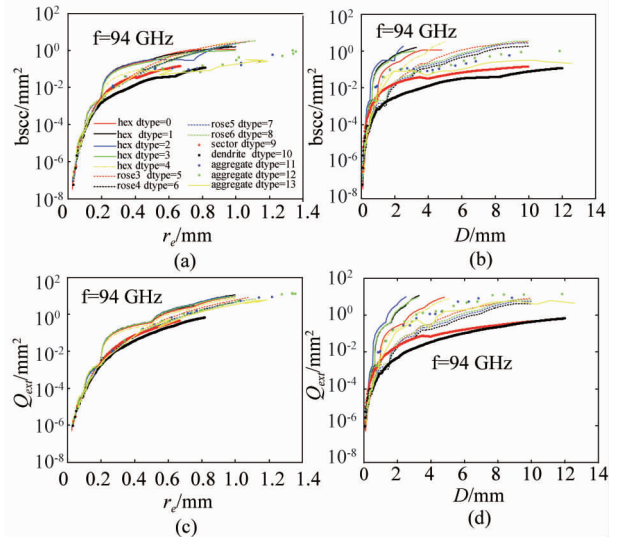


图 2 非球形冰晶对 94 GHz 毫米波的后向散射截面(a、b)和衰减截面(c、d)

Fig. 2 The backscattering(a, b) and attenuation cross sections(c, d) of non-spherical ice crystals with 94 GHz millimeter wave

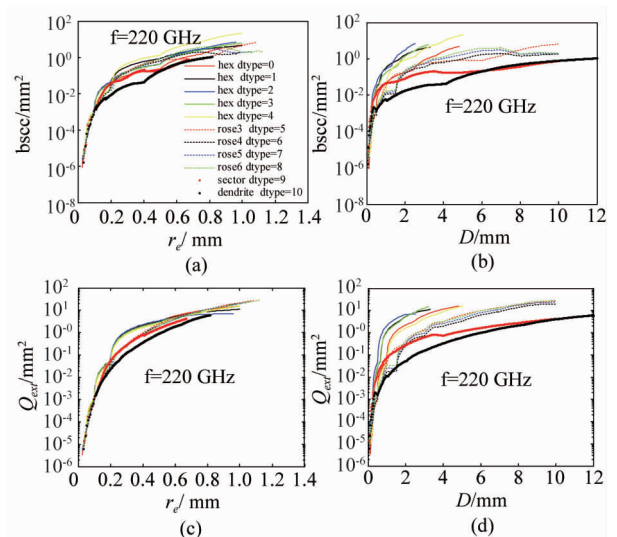


图 3 非球形冰晶对 220 GHz 毫米波的后向散射截面(a、b)和衰减截面(c、d)

Fig. 3 The backscattering(a, b) and attenuation cross sections(c, d) of non-spherical ice crystals with 220 GHz millimeter wave

后向散射截面及衰减截面对形状较敏感(后向散射截面最大相差约 50 倍,衰减最大相差约 200 倍),六角形冰晶与雪花相差最大.形状 dtype=1(短柱状六角形冰晶)与形状 dtype=2(厚柱状六角形冰晶)相比具有较大的后向散射截面和较小的衰减.

3.2 单形状冰晶云后向散射回波特性及衰减系数

因为温度对后向散射和衰减基本无影响,因此雷达反射率因子及衰减系数对温度不敏感.假设单

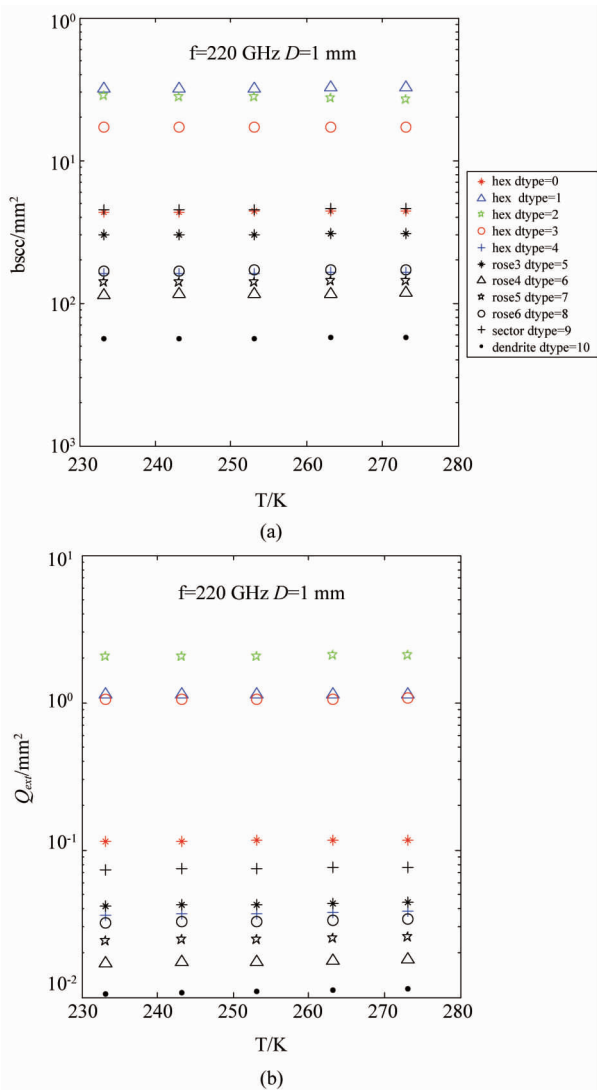


图4 温度对后向散射(a)和衰减(b)的影响
 Fig.4 The influence of temperature on the backscattering (a) and attenuation(b)

层冰云中只有一种形状的冰晶,取温度 $T = 233.15$ K,计算不同滴谱分布、冰水含量、粒子尺度条件下的雷达反射率因子及衰减系数.计算中,粒子总数 N 分别取不同值,中值尺度 D_m 在一定范围内取值,根据 N 及 D_m 得到对应的滴谱,计算得到对应的 IWC、 Z_e, μ 分别取 0、1、2.

3.2.1 随冰水含量及谱参数的变化

D_m 在 $0.1 \sim 1$ mm 之间取值, $N = 0.01/\text{cm}^3$, 当 $\mu = 0, 1, 2$ 时,不同形状冰晶云的雷达反射率因子随中值尺度的变化见图5.同样滴谱条件下,94 GHz 的比 220 GHz 的大,主要因为非瑞利散射的影响. D_m 越大说明谱中含有越多的较大粒子,粒子的 Z_e 随 D_m 增加而增加,在 D_m 较小时增加较快,较大时增

加缓慢.不同形状的存在差异,差异大小和冰晶具体形状、大小有关, D_m 较小时差异较小, D_m 较大时差异增大.在 $D_m = 1$ mm 时,两种频率的最大差异出现在树枝状雪花 (dtype = 10) 和厚柱状冰晶 (dtype = 2) 之间,分别约为 25 dBZ ($f = 94$ GHz) 和 18 dBZ ($f = 220$ GHz).相比形状的影响, μ 对 Z_e 的影响较小,在 $D_m = 1$ mm 时,对厚柱状冰晶 (dtype = 2), $\mu = 0$ 与 $\mu = 2$ 时相差约 3 dBZ.

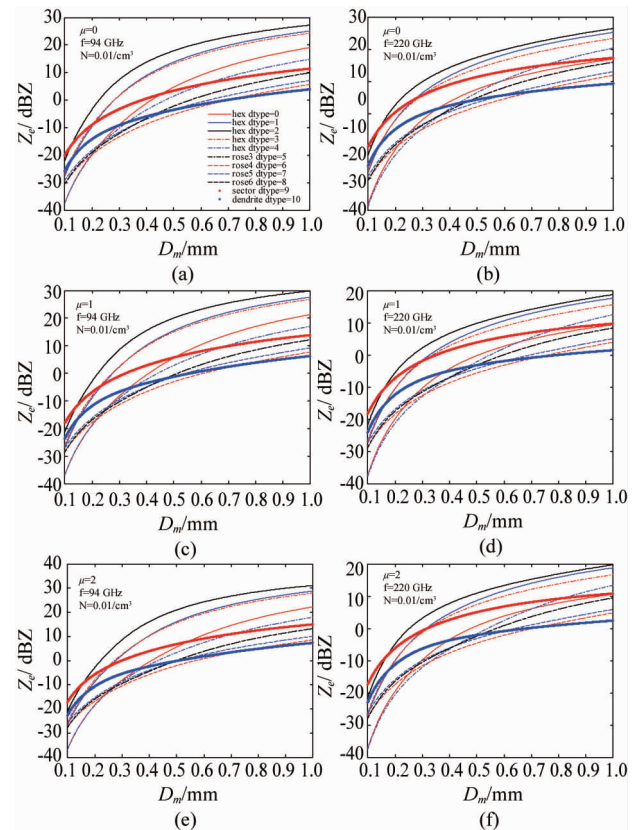


图5 不同形状冰晶的等效雷达反射率因子随中值尺度 D_m 的变化 (a) $\mu = 0, f = 94$ GHz; (b) $\mu = 0, f = 220$ GHz; (c) $\mu = 1, f = 94$ GHz; (d) $\mu = 1, f = 220$ GHz; (e) $\mu = 2, f = 94$ GHz; (f) $\mu = 2, f = 220$ GHz
 Fig.5 The change of the equivalent radar reflectivity factor (Z_e) of ice crystals with the median dimension (D_m) (a) $\mu = 0, f = 94$ GHz; (b) $\mu = 0, f = 220$ GHz; (c) $\mu = 1, f = 94$ GHz; (d) $\mu = 1, f = 220$ GHz; (e) $\mu = 2, f = 94$ GHz; (f) $\mu = 2, f = 220$ GHz

D_m 在 $0.1 \sim 1$ mm 之间取值, $N = 0.01/\text{cm}^3$, 当 $\mu = 0, 1, 2$ 时,不同形状冰晶云的 Z_e 随冰水含量的变化见图6.同样滴谱的条件下,不同形状的冰晶云含水量是不一样的. Z_e 随冰水含量增加而增加,基本上是指数关系.可以看出, μ 增大时,冰水含量也增大,可使 Z_e 随之增大.在相同 IWC 时,六角形冰晶云具有较大的 Z_e ,所有六角形冰晶云的 Z_e 基本一致,只

含有子弹花冰晶的云及只含有雪花的冰云两者的 Z_e 差别较小。

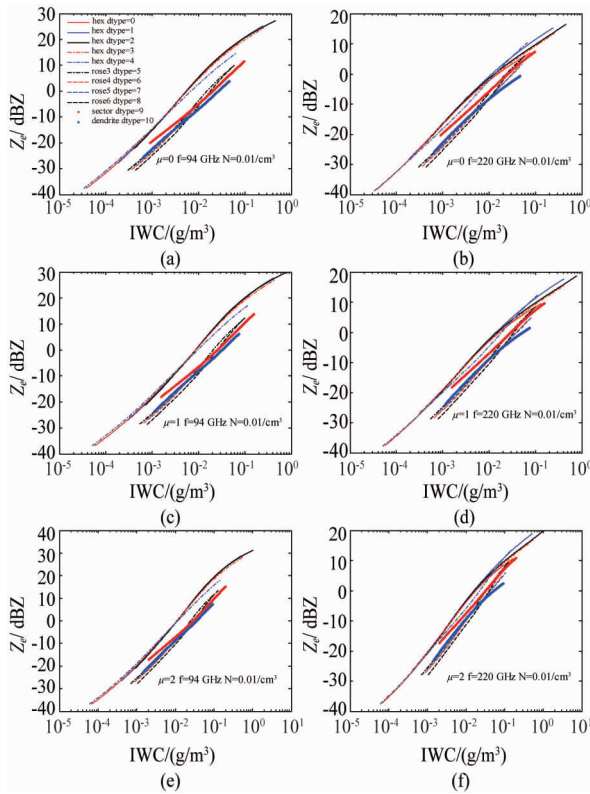


图 6 不同形状冰晶的等效雷达反射率因子随冰水含量 (IWC) 的变化 (a) $\mu = 0, f = 94$ GHz; (b) $\mu = 0, f = 220$ GHz; (c) $\mu = 1, f = 94$ GHz; (d) $\mu = 1, f = 220$ GHz; (e) $\mu = 2, f = 94$ GHz; (f) $\mu = 2, f = 220$ GHz

Fig. 6 The change of the equivalent radar reflectivity factor (Z_e) of ice crystals with different shapes with the ice water content (IWC) (a) $\mu = 0, f = 94$ GHz; (b) $\mu = 0, f = 220$ GHz; (c) $\mu = 1, f = 94$ GHz; (d) $\mu = 1, f = 220$ GHz; (e) $\mu = 2, f = 94$ GHz; (f) $\mu = 2, f = 220$ GHz

3.2.2 单形状冰云的衰减系数

不同形状冰晶云的衰减系数 k 见图 7, μ 分别取 0、2, k_{220}/k_{94} 是指冰晶云在 220 GHz、94 GHz 时衰减系数的比值. 随 IWC 增加衰减系数 k 增加, 同样 IWC 下, 雪花及子弹花冰云的较小, 六角形冰晶云的较大. 几种六角形冰晶的衰减系数基本一致, 雪花和子弹花冰云的也具有较小差异. 同样滴谱条件下, 220 GHz 的衰减系数约是 94 GHz 的 5~25 倍, 这与 Battaglia 等^[10] 的结论相符合. μ 影响 IWC 的范围, 从而影响 k 的范围, μ 增加, IWC 增加, k 增加, k_{220}/k_{94} 稍有增加.

根据图 6、7 的 (a~d) 还可以看出, 曲线基本上分为两组, 一组是六角形冰晶, 一组是子弹花和雪花, 两组间差异约为 10 倍左右, 而同组间差异则很

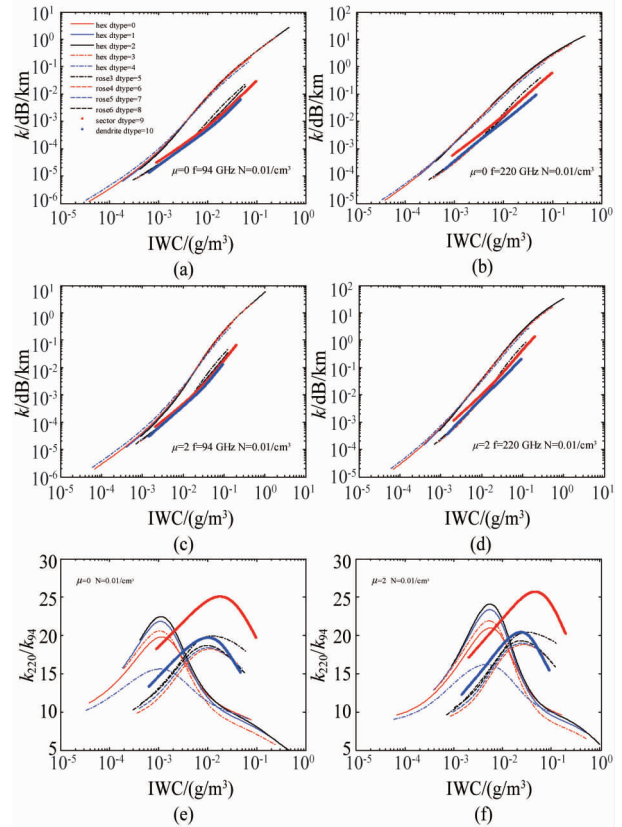


图 7 不同形状冰晶的衰减系数 (a) $\mu = 0, f = 94$ GHz, (b) $\mu = 0, f = 220$ GHz, (c) $\mu = 2, f = 94$ GHz, (d) $\mu = 2, f = 220$ GHz, (e) $\mu = 0, k_{220}/k_{94}$, (f) $\mu = 2, k_{220}/k_{94}$

Fig. 7 The attenuation coefficient of ice crystals with different shapes (a) $\mu = 0, f = 94$ GHz, (b) $\mu = 0, f = 220$ GHz, (c) $\mu = 2, f = 94$ GHz, (d) $\mu = 2, f = 220$ GHz, (e) $\mu = 0, k_{220}/k_{94}$, (f) $\mu = 2, k_{220}/k_{94}$

小, 对于 94 GHz 来讲, 这个特征更明显. 这意味着对于 IWC 反演来讲, 粒子可以近似看做两大类.

3.3 具体冰云模型的后向散射回波模拟

冰云的模型非常复杂, 使得冰云反演具有不确定性, 目前很少有文献考虑不同形状冰晶组成冰云的散射特性. 文中基于 Baum^[23] 给出的具体冰云模型, 计算冰云的散射特性. Baum^[23] 冰云模型的粒子组成为: $D < 60 \mu\text{m}$, 100% 滴晶; $60 < D < 1\ 000 \mu\text{m}$, 15% 子弹花, 50% 六棱柱, 35% 六角平板; $1\ 000 < D < 2\ 000 \mu\text{m}$, 45% 中空六棱柱, 45% 六棱柱, 10% 聚合物; $D > 2\ 000 \mu\text{m}$, 97% 子弹花, 3% 聚合物.

假设六角形冰晶粒子的长度 L 和宽度 H 具有如下关系^[24]:

$$\frac{H}{L} = \begin{cases} 1.00 & 0 < L \leq 30 \mu\text{m} \\ 0.8 & 30 < L \leq 80 \mu\text{m} \\ 0.5 & 80 < L \leq 200 \mu\text{m} \\ 0.34 & 200 < L \leq 500 \mu\text{m} \\ 0.22 & L \leq 500 \mu\text{m} \end{cases} \quad (6)$$

对于板状冰晶 L 是指六角形对角顶点之间的距离, H 是指两个六角形之间的距离, 对于柱状冰晶则反之. 220 GHz 粒子库中没有聚合物、中空六棱柱, 因此用 5 瓣子弹花代替聚合物、六棱柱代替中空六棱柱. 为利用数据库中数据, 六角形的长度 L 和宽度 H 取和式中相近的比值, 即: 六棱柱, 取 $dtype = 0, H/L = 0.25$; 六角平板, 取 $dtype = 3, H/L = 0.2$; 取 5 瓣子弹花 $dtype = 7$. 模型中滴晶为准球形, 因此其散射特性用瑞利散射计算. 温度取 233.15 K, N 分别取定值 $0.01、0.1/\text{cm}^3$, μ 分别取 $0、1、2$.

图 8 显示等效雷达反射率因子 Z_e 随 IWC 的变化. 随 IWC 增加, Z_e 增加, N 影响 IWC, 从而影响 Z_e 的范围, μ 对 Z_e 的影响约在 5 dBZ 内, 随着 IWC 增加, μ 对 Z_e 的影响减小. IWC 和 Z_e 基本呈指数关系. 由于米散射的原因, 同样滴谱时, 94 GHz 的 Z_e 要大于 220 GHz 的 Z_e .

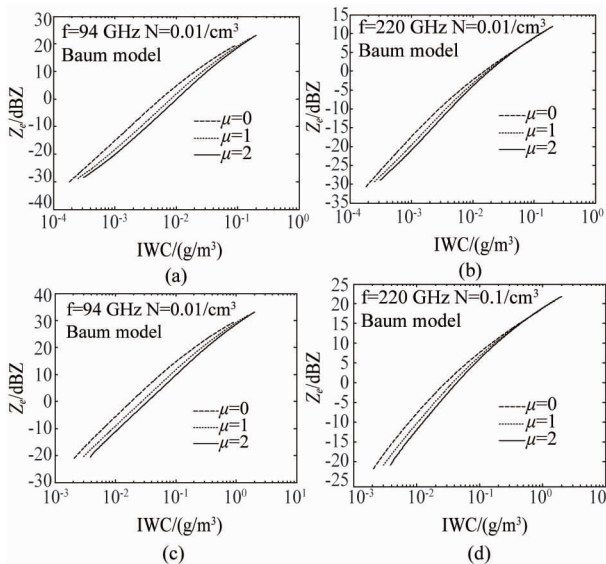


图 8 等效雷达反射率因子随 IWC 的变化 (a) $f = 94$ GHz, $N = 0.01/\text{cm}^3$, (b) $f = 220$ GHz, $N = 0.01/\text{cm}^3$, (c) $f = 94$ GHz, $N = 0.1/\text{cm}^3$, (d) $f = 220$ GHz, $N = 0.1/\text{cm}^3$
Fig. 8 The change of the equivalent radar reflectivity factor (Z_e) of ice clouds based on a refined model with the ice water content (IWC) (a) $f = 94$ GHz, $N = 0.01/\text{cm}^3$, (b) $f = 220$ GHz, $N = 0.01/\text{cm}^3$, (c) $f = 94$ GHz, $N = 0.1/\text{cm}^3$, (d) $f = 220$ GHz, $N = 0.1/\text{cm}^3$

图 9 为等效雷达反射率因子随 D_m 的变化. Z_e 随 D_m 增加, 随着 D_m 增加, μ 对 Z_e 的影响增加, 在 $D_m = 1$ mm 时达到最大, 但小于 5 dBZ. 总个数 N 增加, 在相同的 D_m 下, Z_e 增加. 可以看出, 由各种形状不同比例粒子组合的冰云, 个体的散射特征基本上消失了.

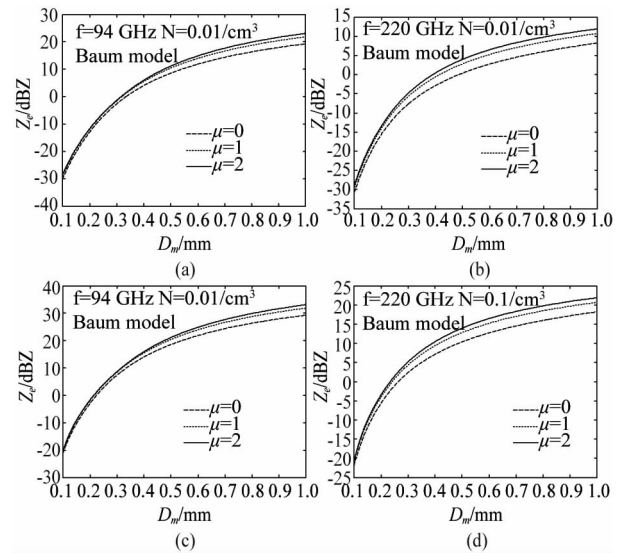


图 9 等效雷达反射率因子随 D_m 的变化 (a) $f = 94$ GHz, $N = 0.01/\text{cm}^3$, (b) $f = 220$ GHz, $N = 0.01/\text{cm}^3$, (c) $f = 94$ GHz, $N = 0.1/\text{cm}^3$, (d) $f = 220$ GHz, $N = 0.1/\text{cm}^3$

Fig. 9 The change of the equivalent radar reflectivity factor (Z_e) of ice clouds based on a refined model with D_m (a) $f = 94$ GHz, $N = 0.01/\text{cm}^3$, (b) $f = 220$ GHz, $N = 0.01/\text{cm}^3$, (c) $f = 94$ GHz, $N = 0.1/\text{cm}^3$, (d) $f = 220$ GHz, $N = 0.1/\text{cm}^3$

4 总结

主要分析了不同形状冰晶对 94、220 GHz 毫米波的后向散射和衰减特性, 探讨了不同形状的冰晶云及基于具体冰云模型的冰晶云的回波特性.

(1) 冰晶后向散射截面及衰减截面和冰晶形状、大小有关, 当冰晶较小时, 对冰晶的形状不敏感, 当冰晶较大时, 对冰晶的形状较敏感; 在米散射区, 最大尺度相同时, 基本上是六角形冰晶的后向散射及衰减最大、子弹花次之、雪花最小. 在冰晶最大尺度小于 1.2 cm 范围内, 220 GHz 与 94 GHz 毫米波相比, 具有较大的后向散射截面和衰减截面.

(2) 单形状冰晶云的雷达反射率因子对冰晶形状、云内冰水含量、谱的中值尺度等参数较敏感, 对冰晶谱的形状参数不敏感. 几种六角形冰晶云的衰减系数基本一致, 雪花和子弹花冰晶的也具有较小差异. 同样滴谱条件下, 220 GHz 的衰减系数约是 94 GHz 的 5-25 倍.

(3) 具体冰云模型的雷达反射率因子随粒子浓度、冰水含量、粒子中值尺度的增加而增加, 对粒子谱的形状敏感性较低. 由于米散射的原因, 同样滴谱时, 94 GHz 的 Z_e 要大于 220 GHz 的.

(4) 冰云模型的不同会影响回波强度及散射特

征,降水性冰云和非降水性冰云冰晶谱也差别很大,本文只探讨了冰云对冰晶谱参数的敏感性情况,可以取大量粒子谱利用统计回归的方法,获得雷达反射率因子和冰水含量及衰减系数的关系式.在计算中假设粒子为随机取向,实际上粒子的取向和空气动力条件有关,取向对粒子的散射和衰减会有一定影响.雷达气象方程中的介电因子通常取水的,而不是冰的,因此经过订正计算可得雷达应测的雷达反射率因子.衰减会使雷达测到的回波强度降低、探测云的距离缩短,考虑衰减后的双频雷达探测高度及双波长比与粒子属性的关系将另文介绍.

References

- [1] Kropfli R A, Coauthors. Cloud physics studies with 8mm wavelength radar[J]. *Atmos Res*, 1995, **35**: 299-313.
- [2] Stokes G M, Schwartz S E. The atmospheric radiation measurement (ARM) program; programmatic background and design of the cloud and radiation test bed[J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1994, **75**(7): 1201-1221.
- [3] Lhermitte R M. 94 GHz doppler radar for cloud observations [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1987, **4**: 36-48.
- [4] Hogan R J, Illingworth A J, Sauvageot H. Measuring crystal size in cirrus using 35 and 94 GHz radars[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, **17**(1): 27-37.
- [5] Danne. Relationships between doppler spectral moments within large-scale cirro-and altostratus cloud fields observed by a ground-based 95 GHz cloud radar[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38**: 175-189.
- [6] Zhong L Z, Liu L P, Ge R S. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad. *Advances in Earth Science* (仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 2009. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望. *地球科学进展*), 2009, **24**(4): 383-391.
- [7] Wu J X, Wei M, Hang X, et al. The first observed cloud echoes and microphysical parameter retrievals by China's 94-GHz cloud radar [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, **28**(3): 430-443.
- [8] James. Remote sensing of clouds and fog with a 1.4 mm radar [J], *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 1989, **6**: 1090-1097.
- [9] An Dawei, Jian Shang, Qiong Wu, et al. Remote sensing of clouds and evaluation with a 220GHz radar [C], Proc. SPIE 9259, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation, 2014: 9259.
- [10] Battaglia A, Westbrook C D, Kneifel S, et al. G band atmospheric radars: new frontiers in cloud physics Atmos [J]. *Meas. Tech*, 2014, **7**: 1527-1546.
- [11] Matrosov S Y, Heymsfield A J. Estimating ice content and extinction in precipitating cloud systems from CloudSat radar measurements [J]. *J Geophys Res*, 2008: **113**: D8.
- [12] Hogan R, Tian L, Brown P C, et al. Radar scattering from ice aggregates using the horizontally aligned oblate spheroid approximation [J]. *J Appl Met Climatol*, 2012, **51**(3): 655-671.
- [13] Leinonen J, Kneifel S, Moisseev D, et al. Evidence of nonspherical behavior in millimeter-wavelength radar observations of snowfall [J]. *J Geophys Res*, 2012, **117**(10): D18205.
- [14] Wu J X, Wei M, Zhou J. 2013. Relationship between extinction coefficient and radar reflectivity factor of nonspherical ice crystals [J], *Journal of Remote Sensing*, **17**(6): 1377-1394.
- [15] Kim M J, Weinman J A, Sun W. Geoscience and remote sensing symposium [C]. IGARSS 04 Proceedings, IEEE International, 2004, **5**: 3555-3558.
- [16] Heymsfield, A J, Miloshevich L M., Parameterizations for the cross-sectional area and extinction of cirrus and stratiform ice cloud particles [J]. *J. Atmos. Sci*, **2003**, **60**(7): 936-956.
- [17] Zhang P C, Du B Y, Dai T P. *Radar Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press (张培昌, 戴铁丕, 杜秉玉. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社), 2002: 10-84.
- [18] Mätzler C. Microwave Dielectric Properties of Ice, I: Thermal Microwave Radiation-Applications for Remote Sensing [M]. Stevenage: *Institution of Engineering and Technology*, 2006: 455-462.
- [19] Lhermitte R M. Centimeter&millimeter Wavelength Radars in Meteorology [M]. *Lhermitte Publications*, 2002: 187-496.
- [20] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for scattering calculations. *Optical Society of America*, 1994, **11**: 1491-1499.
- [21] Liu G S. A database of microwave single-scattering Properties for nonspherical ice crystals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, **89**(10): 1563-1570.
- [22] Nowell H, Liu G, Honeyager R. Modeling the microwave single-scattering properties of aggregate snowflakes [J], *J Geophys Res Atmos*, 2013, **118**: 7873-7885.
- [23] Baum B A, Heymsfield A J, Yang P, et al. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds, Part I: Microphysical data and models [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, **44**(12): 1885-1895.
- [24] Fu, Q. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models [J]. *Journal of climate*, 1996, **9**(9): 2058-2082.