文章编号:1001-9014(2020)06-0718-10

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2020. 06. 009

星载太赫兹双频云雷达对冰云探测能力研究

吴举秀[1], 杨 蕾[2*], 窦芳丽[3], 安大伟[3]

(1. 山东省气象局 大气探测技术保障中心,山东 济南 250031;
2. 青岛市气象局,山东 青岛 266003;
3. 国家气象卫星中心,北京 100081)

摘要:针对星载云雷达对冰云探测可行性分析的需求,分析了非球形冰晶对340 GHz电磁波的单散射特性,基于不同的体积散射模型,研究了非球形冰晶云的回波特性以及94\340 GHz云雷达双波长比,假定冰云垂直分布的情况下,探讨了星载94\340 GHz云雷达双波长比随高度的变化以及可以穿透的冰云厚度。相较于94 GHz及220 GHz,冰晶粒子对340 GHz电磁波的散射能力增强,但是同时云对其的衰减也大大增加,340 GHz的衰减系数约是94 GHz的5~130倍;340 GHz云雷达可以探测浅薄的含水量较小的冰云,基本可以探测云厚2 km、冰水含量在0. 000 1~0. 2 g/m^{3}的冰云。含水量较多的厚云由于衰减,造成电磁波穿透能力大大降低,在假定的冰水含量垂直分布下,当最大冰水含量为1 g/m^{3}时,可探测厚约5 km内云厚的40%以上;衰减也造成不同高度上相同滴谱的云有不同的双波长比,冰水含量的大小及垂直分布影响了双波长比的大小及电磁波探测云的厚度。衰减随着冰水含量增大而增大,高频云雷达电磁波衰减大,使得双波长比变大,从而使双波长比和谱的数浓度N_0有关,因此利用双波长比反演时,衰减订正非常重要。

关 键 词:星载94\340 GHz云雷达;双波长比;衰减系数;测云厚度

中图分类号:P412.25 **文献标识码**:A

The detection capability to ice clouds for space-borne terahertz dual-frequency radar

WU Ju-Xiu[1], YANG Lei[2*], DOU Fang-Li[3], AN Da-Wei[3]

(1. Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology, Weather Bureau of Shandong Province, Jinan 250031, China;
2. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China;
3. National Meteorological Satellite Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the requirement of feasibility analysis for ice cloud detection by space borne cloud radar, the single scattering characteristics of non-spherical ice crystals to 340 GHz electromagnetic wave were analyzed, then the echo characteristics of non-spherical ice crystal cloud and dual wavelength ratio (DWR) of 94\340 GHz cloud radars were studied based on different volume scattering models, while the variation of DWR with altitude and the thickness of ice clouds that can be penetrated were discussed assuming the vertical distribution of ice clouds. Compared with 94 GHz and 220 GHz, the scattering ability of ice particles to 340 GHz electromagnetic wave is enhanced, but at the same time, the attenuation by clouds is also greatly increased, and the attenuation coefficient of ice clouds to 340 GHz wave is about 5~130 times that to 94 GHz wave. The 340 GHz cloud radar can detect the shallow ice clouds with low ice water content (IWC), that is, ice cloud with thickness of 2 km and IWC of 0. 000 1~0. 2 g/m^3 can be detected basically, and the electromagnetic wave penetration ability is greatly reduced due to the attenuation of thick clouds with more water content, when the maximum IWC reaches 1 g/m^3 in the condition of the assumed vertical distribution of IWC, about more than 40% of cloud thickness for ice clouds within 5 km will be detected. Attenuation also results in different DWR for clouds with the same drop spectrum at different heights. The value and vertical distribution of IWC affect the value

收稿日期:2020- 01- 31,**修回日期**:2020- 09- 10 **Received date**:2020- 01- 31,**Revised date**:2020- 09- 10

基金项目:国防科工局民用航天预研项目,国家自然科学基金(41305031),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, National Natural Science Foundation of China (41305031), 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

*通讯作者(Corresponding author): E-mail:1021219117@qq. com

of DWR and the thickness of the clouds detected by electromagnetic wave. The attenuation increases with the increase of IWC and the electromagnetic wave attenuation of high frequency cloud radars is larger, that make the DWR larger, so the DWR is related to the number concentration of the spectrum. As a result, the attenuation correction is very important when using DWR retrieval.

Key words: 94\340 GHz space-borne cloud radars, dual wavelength reflectivity ratio, attenuation coefficient, detected cloud thickness

PACS:92. 60. Ta

引言

冰云在地球能量循环和水文循环中起着非常重要的作用,因此获取高时空分辨率的冰云参数对云的辐射传输模型完善、气候研究、数值天气预报等方面具有重大意义(Waliser *et al*, 2009)[1]。目前探测冰云的主要手段有地基激光测云雷达、星载微波辐射计、毫米波和亚毫米波临边探测仪、红外和可见光遥感成像仪及星载激光雷达等。激光雷达、红外和可见光遥感成像仪等波长较短,在云中的衰减大,不能穿透较厚的云层;星载微波辐射计、星载毫米波云雷达对较大冰晶比较敏感(Waliser *et al*, 2009;Liu *et al*, 2011)[1-2];太赫兹波长接近于冰晶粒子,对冰晶具有较高探测灵敏度(Evans and Stephens, 1995))[3]。冰云探测比较适合机载或星载,因为从地面探测会受到大气、云雨等衰减的影响,星载遥感手段则更适合长期探测。与采用被动遥感技术的星载仪器相比,星载云雷达采用主动遥感技术,可以探测云的精细结构及垂直剖面特征(Tanelli *et al*, 2009)[4]。

当一部雷达对冰粒子散射处在非瑞利散射区时,双频雷达观测可以用来估计冰云粒子特征尺寸,有助于提升云反演精确度。Matrosov等(1993)[5]提出利用双波长雷达的反射率因子比即双波长比(Dual Wavelength Reflectivity Ratios, DWR)反演冰云粒子大小;通过与地面实测降雪率对比发现(Matrosov *et al*, 2005)[6],雪花密度在0. 03~0. 04 g/cm^{3}时,X-Ka双波长比反演降雪率偏差只有25%,但是只用X波段雷达,反演偏差为4倍多,因为单波长反演关系无法体现不同降雪过程的微物理差异;Hogan等(2005)[7]研究表明利用含200 GHz以上频段双频雷达,云反演精确度会有提升。Liao等(2005)[8]利用X-Ka、X-S双频雷达双波长比结合飞机实测数据估计了雪的参数,发现谱的形状参数取值的准确性及较大衰减会影响反演粒子中值直径准确度,因此在利用X-Ka、X-S双频雷达双波长比估计雪花物理参数时首先订正了雨对电磁波的衰减。

国际上毫米波雷达已得到了迅速发展,美国自80年代后期开始在云物理和降水物理研究中应用94 GHz毫米波云雷达(Lhermitte, 1988)[9],2006年发射的CloudSat卫星搭载了第1颗对云层特征进行全球观测的94 GHz(W波段)云廓线雷达(Cloud Profiling Radar, CPR);国际上太赫兹雷达的研制起步也较早,1988年美国研制了215 GHz地基云雷达主要用来研究层状云和雾(Mead *et al*, 1989)[10]。国内W波段(频率在94 GHz左右)毫米波雷达的研制起步比较晚,2013年安徽四创电子有限公司研制成功机载W波段云雷达(Wu *et al*, 2014)[11],我国首部地基W波段多普勒双极化云雷达于2017年完成出厂验收(吴举秀等,2017)[12]。目前,中国国家气象卫星中心正准备规划一颗云观测卫星,搭载的主载荷是双频测云雷达,一部为W波段,用来探测所有云的三维结构,一部拟为高频的,主要用来探测冰云,初步论证为高频雷达频率为220 GHz(吴琼等,2018)[13]。北京航空航天大学已开展对220 GHz云雷达调试和试验。比220 GHz稍高频一点的太赫兹大气窗口是340 GHz左右,有关专家对340 GHz雷达也很感兴趣,北京理工大学吕昕团队正在研制94/340 GHz双频云雷达(洪伟等,2016)[14]。

云的散射特性是云雷达系统论证、设计以及实际应用的基础,云对W波段电磁波的散射特性已研究较多,目前对220 GHz或340 GHz的散射特性的研究较少,特别是冰云由多种形状的非球形冰晶组成,其散射特性更加复杂。之前作者已经做了关于非球形冰晶云94\220 GHz星载云雷达正演方面的一些工作(吴举秀等,2016;吴举秀等,2019)[15-16],探讨了非球形冰晶云的DWR与云内微物理参数的关系;Battaglia等(2014)[17]基于散射特性的模拟分析认为G波段(110~300 GHz)雷达在探测边界层云、卷云及中层冰云具有优势,并探讨了35\94、35\140、35\220双频雷达DWR与粒子平均直径的关系。但是很少有文献对340 GHz的散射特性以及94\340 GHz雷达双波长比与冰云参数的关系进行阐述以及

从星载角度探讨分析测冰云的可行性，有关专家很想知道冰晶云对340 GHz的散射特性是怎样的，对冰云探测能力如何。因此本文主要分析不同形状冰晶在340 GHz的单散射特性及基于不同体积散射模型的冰云散射特性，探讨94\340 GHz雷达双波长比与冰云滴谱参数、冰水含量的关系，对比分析94\220 GHz雷达双波长比及94\340 GHz雷达双波长比与粒子滴谱中值尺度的关系，最后探讨星载340 GHz云雷达可探测冰云厚度，以便为星载雷达的论证提供更多参考。

1 基本理论

球形冰晶的散射特性可以用米散射计算，非球形冰晶的散射特性受形状的影响不再适合米散射，通常的算法有：离散偶极子近似法（Discrete Dipole Approximation，DDA）、T矩阵法（T Matrix）、有限时域差分法（Finite-Difference Time Domain，FDTD）、改进的几何光学法（Improved Geometrical Optics Method，IGOM）和反常衍射理论（Anomalous Diffraction Theory，ADT）等。DDA算法的主要原理是用有限个离散的、相互作用的小偶极子的阵列来近似实际的粒子，从而对实际粒子散射的研究转化为对这些小立方体内的小偶极子散射的研究，DDA方法很适合用来研究非球形粒子的散射和吸收特性[18]。等效雷达反射率因子Z_e（单位：mm^6/m^3）及衰减系数k（单位：1/km）利用DDA算法计算结果可分别表示为：

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \int_0^{D_{max}} N(D)\,\mathrm{bscc}(D)\,\mathrm{d}D \quad , \quad (1)$$

$$k = \int_0^{D_{max}} N(D) Q_{ext}(D)\,\mathrm{d}D \quad , \quad (2)$$

其中，$N(D)$云滴谱，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，bscc(D)表示最大尺度为D的非球形粒子的后向散射截面，Q_{ext}是衰减截面，其中$K=(m^2-1)/(m^2+2)$，m是冰晶或者水的复折射指数。冰的复折射指数实部随波长不变，虚部随着波长减小稍微增加，因此冰的$|K|^2$基本随波长不变（Mätzler，2006；Warren and Brandt，2008）[19-20]。雷达气象方程中，一般使用水的$|K|^2$，水的复折射指数随着波长减小而减小，因此水的$|K|^2$随波长减小而变小，目前35 GHz及以上频段的$|K|^2$相差不大，一般在雷达方程中取0.93，CloudSat星载94 GHz雷达的$|K|^2$取0.75，240 GHz在0°C时的$|K|^2$为0.414（Lhermitte，2002）[21]，340 GHz的具体数值还没有见到详细文献，但根据文献Lhermitte（2002）[21]中$|K|^2$的曲线显示300 GHz在0°C时的$|K|^2$稍小于240 GHz的，340 GHz与300 GHz相差不大，因此340 GHz在0°C时的$|K|^2$应该也稍小于0.414，但是所有频段水的$|K|^2$都要远大于冰的，纯冰的$|K|^2$约为0.177。

云层的光学厚度τ_n表示为（Lhermitte，2002）[21]：

$$\tau_n = \exp\left(-2\sum_{i=1}^{n-1} k(i)\Delta R\right) \quad , \quad (3)$$

其中ΔR是距离库长度，$k(i)$是第i个距离库的衰减系数。根据衰减订正的逐库订正法（张培昌和王振会，2001）[22]，第n个距离库雷达实际测量得到的反射率因子Z_m（mm^6/m^3）和真实反射率因子Z_r（mm^6/m^3）（文中假设等于理论计算的结果Z_e）的关系为：

$$Z_m(n) = Z_r(n)\tau_n \exp(-k(n)\Delta R) \quad , \quad (4)$$

其中$k(n)$是第n个距离库的衰减系数。

假设冰晶谱$N(D)$取伽马分布，则谱的中值尺度D_m和粒子谱的形状参数μ具有如下关系（Heymsfield *et al*，2003）[23]：

$$N(D) = N_0 D^{\mu} \exp(-\beta D) \quad , \quad (5)$$

$$D_m = \frac{2.97+\mu}{\beta} \quad , \quad (6)$$

其中，N_0是滴谱的浓度，β为斜率，D为粒子最大尺度。

双波长雷达的反射率因子比DWR为低频与高频雷达回波强度（mm^6/m^3）的比值，回波强度单位为dBZ时有：

$$\mathrm{DWR} = Z_{低频} - Z_{高频} \quad . \quad (7)$$

可以看出，DWR和N_0无关，如果雷达气象方程中$|K|^2$取值一样，则DWR和$|K|^2$大小无关，当形状参数μ取值一定时，DWR和粒子谱中值尺度建立直接关系。Hogan等（2005）[7]认为造成Ka-W双频云雷达DWR误差的来源主要有3个：随机误差、温度廓线误差引起吸收廓线的误差以及非瑞利散射造成的误差。

2 非球形冰晶单散射特性

不同形状的冰晶粒子形状、形状代码、最大尺度范围及对应等效半径范围见表1。粒子具体形状用两个六角形之间的距离L及六角形对角顶点之间的距离d的比值定义。冰晶密度随着粒子增大而变小，将其等效为密度为0.916 g/m^{3}的球体所具有的半径为等效质量球半径。不同形状冰晶粒子的后向散射效率及衰减效率来自利用DDA算法获得的数据库（Liu，2008；Nowell *et al*，2013）[24-25]，频率

150 GHz以下,表中所有粒子,误差小于5%,随着频率增加及粒子增大,粒子尺度参数变大,则DDA计算的误差会有所增加[18]。

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

形状	形状代码	最大尺度范围D_{max}/mm)	等效质量球半径r_e/mm)
长柱状L/d=4	0	0. 121~4. 835	0. 025~1
短柱状L/d=2	1	0. 083~3. 304	0. 025~1
厚柱状L/d=1	2	0. 066~2. 532	0. 025~1
厚板状L/d=1/5	3	0. 081~3. 246	0. 025~1
薄板状(L/d=1/20	4	0. 127~5. 059	0. 025~1
瓣子弹花3	5	0. 05~10	0. 019~1. 086
瓣子弹花4	6	0. 05~10	0. 019~0. 984
瓣子弹花5	7	0. 05~10	0. 021~1. 058
瓣子弹花6	8	0. 05~10	0. 021~1. 123
星状雪花	9	0. 05~10	0. 025~0. 672
树枝状雪花	10	0. 075~12. 454	0. 033~0. 838

模拟计算后11种不同形状的冰晶对340 GHz电磁波的后向散射截面和衰减截面见图1。在等效半径小于0. 1 mm时,基本上冰晶粒子的后向散射是符合瑞利散射的,随着粒子增大,树枝状雪花后向散射最早出现震荡;当冰晶较大时,冰晶形状对后向散射及衰减影响较大,同样尺度大小情况下,厚柱状六角形冰晶与树枝状雪花相差最大。与220 GHz电磁波相比(吴举秀,等,2016)[15],340 GHz电磁波的后向散射截面要稍大一些,但是衰减截面要大很多。

3　体积散射

雷达的回波强度是雷达波束有效照射体积内所有粒子的后向散射,首先假设有效照射体积内所有粒子的形状是一样的,计算冰晶云的回波强度及衰减系数,然后再假设有效照射体积内的粒子形状多样,不同粒子具有不同的比例,再计算具体冰云散射模型下的云回波及衰减系数。计算时式(1)中$|K|^2$使用冰的0. 177,如果假设式(1)中$|K|^2$使用水的,两部都用0. 73,则以下计算的雷达反射率因子都应减小6. 3 dBZ;如果94 GHz雷达$|K|^2$用0. 73,340 GHz雷达$|K|^2$用0. 414,则以下计算的雷达反射率因子94 GHz的对应减小6. 3 dBZ,340 GHz的减小3. 7 dBZ。

3. 1　单形状冰晶云的体积散射及衰减系数

假设粒子为伽马分布,冰晶谱的体积中值尺度D_m在0. 1~1 mm之间取值,粒子数浓度N=0. 01 /cm^3,

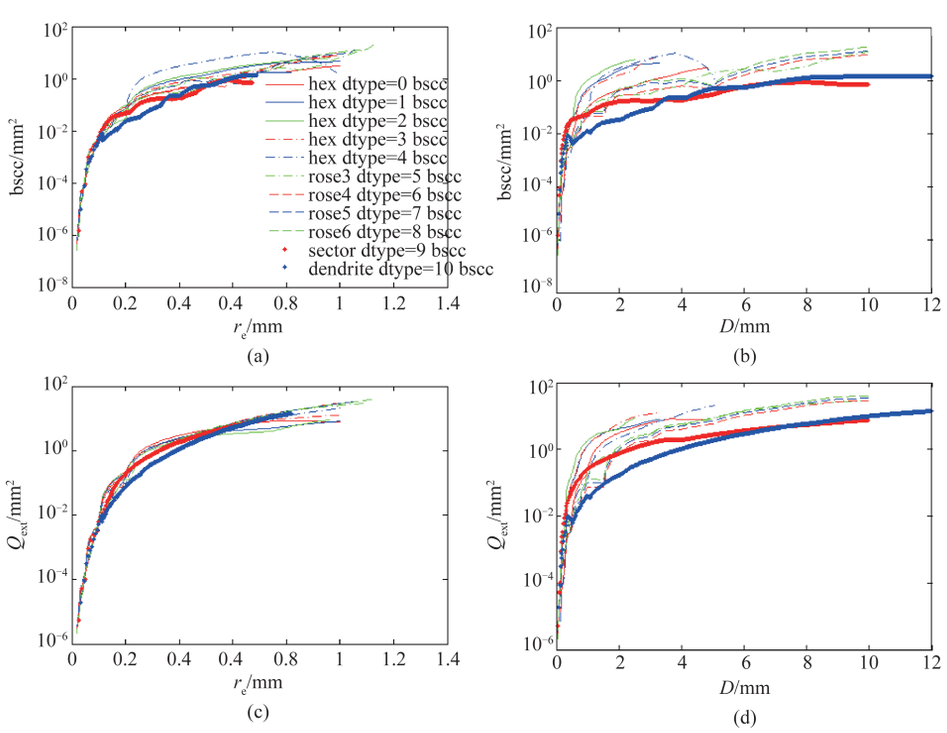


图1　非球形冰晶340 GHz(a, b)后向散射,(c, d)衰减截面

Fig.1　The backscattering(a, b) and attenuation cross sections(c, d) of non-spherical ice crystals to 340 GHz wave

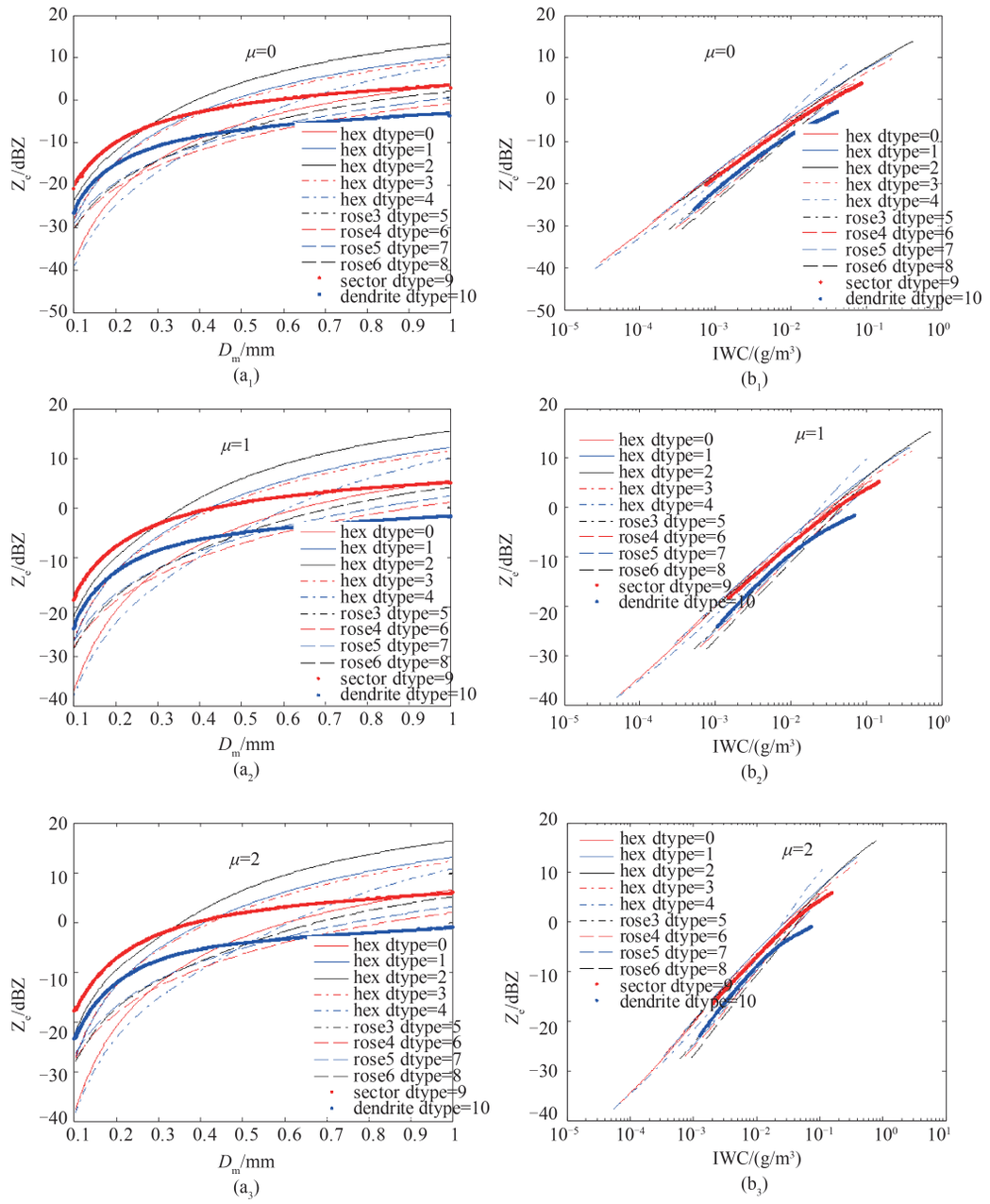


图2 冰晶云的雷达反射率因子Z_e随中值尺度D_m(a_1、a_2、a_3)及冰水含量IWC(b_1、b_2、b_3)的变化

Fig. 2 The change of the radar reflectivity factor (Z_e) of ice-crystal clouds with the median dimension (D_m) (a_1、a_2、a_3)and IWC (b_1、b_2、b_3)

当滴谱形状参数μ=0、1、2时,根据式(1)、(5)、(6)不同形状冰晶云的雷达反射率因子Z_e随中值尺度及冰水含量(Ice Water Content,IWC)的变化见图2。不同形状冰晶云的回波强度随D_m、IWC的变化特点与220、94 GHz基本一致(吴举秀等,2016)[15],随着D_m、IWC增加而增加;相同滴谱情况下,波长短的雷达回波强度稍低,基本上六角形冰晶具有较大的回波强度,雪花回波强度随着D_m增加变化较小。回波强度对谱的形状参数μ不敏感。

μ取0,粒子数浓度N=0.01/cm^3,根据式(2)不同形状冰晶云的衰减系数k见图3,k_{340}/k_{94}是指冰晶云在340 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,340 GHz的衰减系数约是94 GHz的5~130倍,340 GHz的衰减比220 GHz的衰减(吴举秀等,2016)[15]最大增加了约100

多倍。

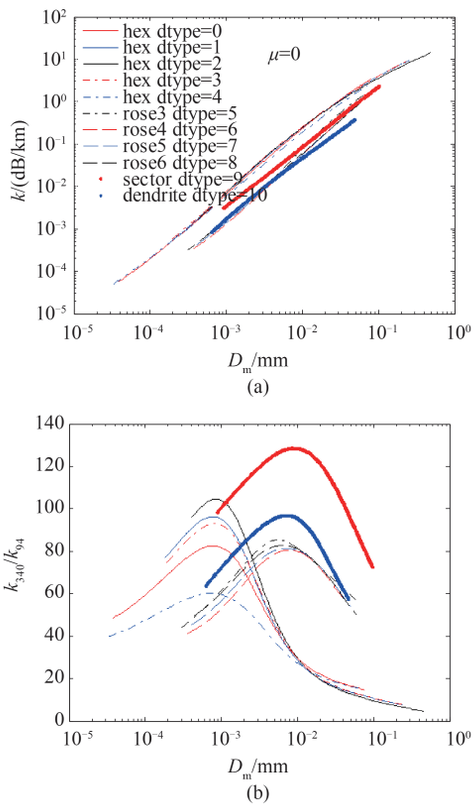


图3　(a)冰晶云的衰减系数,(b)两个频段衰减系数的比值

Fig.3　(a) The attenuation coefficient of ice-crystal cloudand, and (b) the ratio of attenuation coefficients of two frequency bands

3.2　基于Baum冰云散射模型的体积散射

实际上冰云中含有各种形状的冰晶,不同形状的冰晶具有不同的比例,Baum 等(2005)[26]通过分析机载及气球携带的粒子探测器探测结果,获得了适用于中纬度冰云的体积散射模型。利用此模型计算了冰云的回波强度,模型中的聚合物用5瓣子弹花代替、中空六棱柱用六棱柱代替,根据文献Fu(1996)[27]研究的六角形冰晶形状特征,六棱柱取长柱状,六角平板取厚板状。计算时温度取233.15 K,N取定值0.01/cm^3,D_m在0.1~1 mm范围内取值,μ分别取0、1、2。图4显示等效雷达反射率因子Z_e随IWC及D_m的变化,与220 GHz的Z_e(吴举秀等,2016)[15]具有相似的变化趋势,但是μ对Z_e的影响较小,约在2 dBZ内,IWC和Z_e也是基本呈指数关系。相比于220 GHz的Z_e(吴举秀等,2016)[15],由于米散射的原因,同样滴谱时340 GHz的Z_e要稍小,这种体积模型下,无法反应粒子形状。

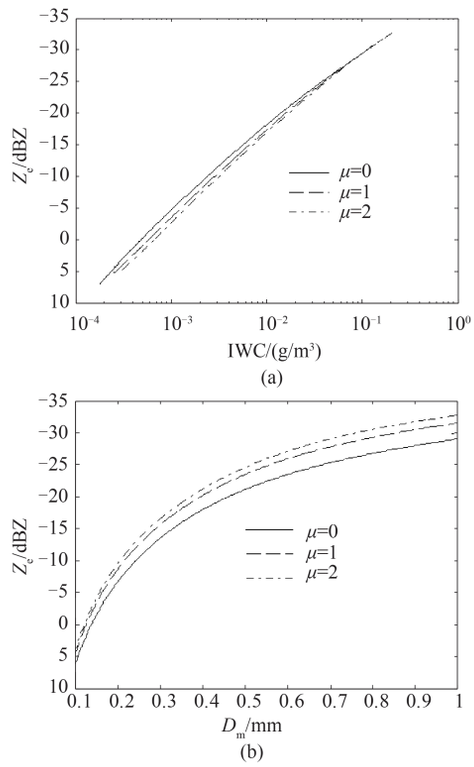


图4　等效雷达反射率因子随冰水含量及中值尺度的变化

Fig. 4　The change of the equivalent radar reflectivity factor (Z_e) with the ice water content (IWC) and D_m

3.3　94\340 GHz双波长比分析

根据定义,双波长比DWR和粒子浓度无关,当滴谱形状参数确定时,双波长比只与谱的中值尺度有关,因此有唯一确定DWR-D_m关系。

3.3.1　单形状冰晶云的双波长比

假设D_m在0.1~1 mm之间取值,当滴谱形状参数μ=0、1、2时,不同形状的冰晶云与D_m关系如图5所示。与94\220 GHz的相比(吴举秀等,2019)[16],94\340 GHz的DWR明显增大,但是变化趋势一致,基本上是雪花、子弹花及薄板状冰晶具有较小的DWR,其他六角形冰晶具有较大的DWR值,最大值可达16 dB。随着滴谱形状参数增加,IWC增加,但是对应DWR基本不变,在μ不变时,DWR随着IWC增加而增加,因此在没有考虑冰云对电磁波的衰减时,IWC对DWR的影响主要还是粒子的大小变化引起的。

3.3.2　基于baum冰云散射模型的双波长比

假设体积散射模型为baum等(2005)[26]的研究结果,则双波长比与中值尺度关系如图6(a)所示,利用matlab的拟合工具可以得到μ不同时DWR-D_m的高阶多项式(略)。假设冰晶总数密度为N=0.01/cm^{3}时,DWR与IWC关系如图6(b)所示。随

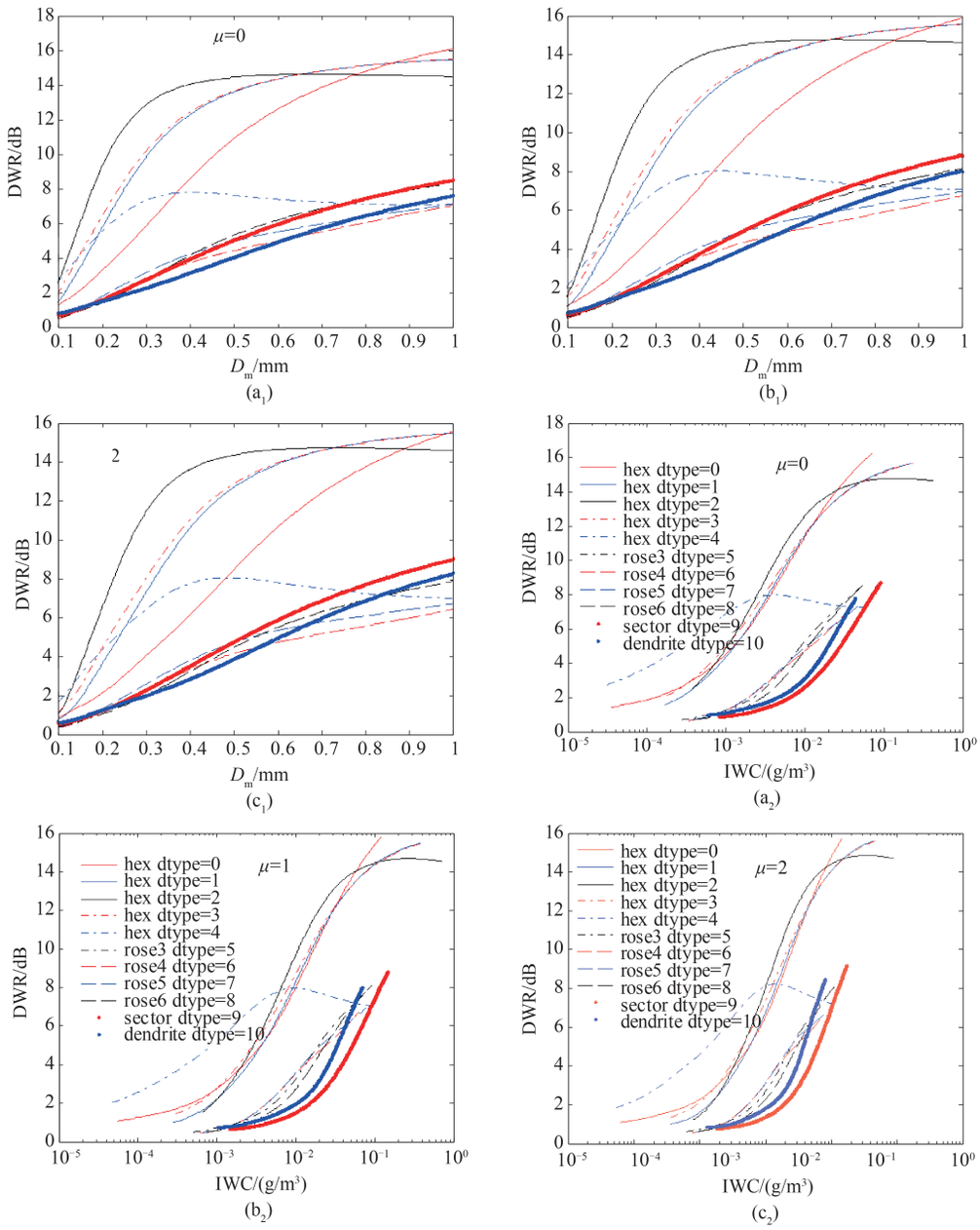


图5 单形状冰晶云的双波长比随D_m(a_1、b_1、c_1)和IWC(a_2、b_2、c_2)变化

Fig. 5 The changes of dual wavelength reflectivity ratio (DWR) with the D_m and IWC

着D_m增加,DWR增加,最大可达15 dB。

4 测云厚度分析

DWR和浓度无关,可以不考虑DWR-IWC关系,但是由于实际探测时冰云对电磁波的衰减影响了回波强度,因此影响了DWR,而IWC的大小会影响衰减的大小,因此IWC影响了DWR及电磁波探测云的厚度。根据Z_e,利用式子(3)、(4)可以模拟获得雷达探测到的回波强度。

假设云厚度为2 km, D_m在0.1~1 mm之间取值,μ=0、1、2时, N取定值0.01 /cm³,假设IWC廓线如图7(a)所示。衰减前后的雷达反射率因子及94/340 GHz雷达的DWR如图7(b)、(c)所示。CloudSat处于高度为705 km的太阳同步轨道,计划2021年发射的搭载94 GHz云雷达的EarthCARE系统将在位于高度443.8~450.8 km的太阳同步轨道飞行,极轨卫星距离地面较近,距离衰减小,假设94、340 GHz两部雷达也装载在极轨卫星上。CloudSat星载云廓线雷达在大气中可探测的最小雷达反射率因子为-26 dBZ,气象方程中$|K|^2$取0.75(Stephens *et al*, 2008)[28],假设94 GHz、340 GHz两部星载雷达

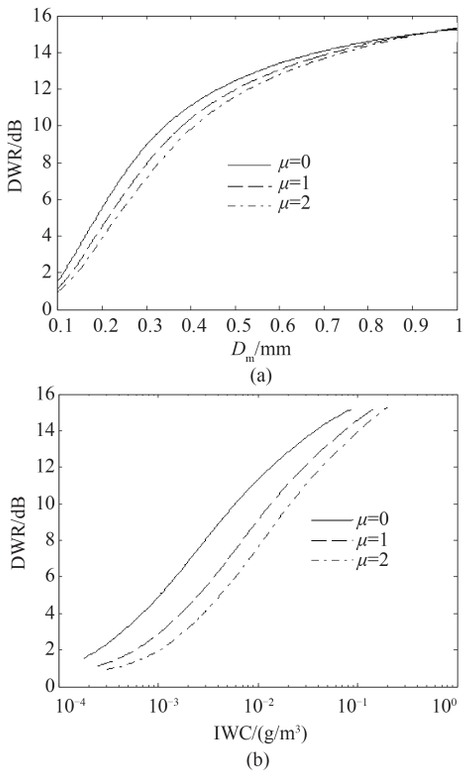


图6　基于具体模型的双波长比

Fig. 6　The DWR based on the Baum volume scattering model

的探测能力和CloudSat星载云廓线雷达相当,因为文中两个波段的云雷达$|K|^2$取0.177,因此两部雷达对冰云探测到的最小雷达反射率因子为-20 dBZ。可以看出,IWC在0.0001~0.2 g/m³之间,340 GHz雷达可穿透约1.8 km高度,探测到的云厚度为1.7 km,厚约0.1 km的云顶探测不到的原因是冰晶粒子太小后向散射能力差造成,0.2 km厚的云底探测不到主要原因是冰云对电磁波的衰减。取IWC在0.001~0.09 g/m³之间,此时云厚对应1.8 km,两部雷达可以探测到。因此由于衰减,即使相同滴谱的云在不同高度上DWR可能不一样。

分别假设云厚度为2 km、5 km,IWC取不同的范围,按照以上方法进行模拟计算分析,将结果也列在表2中。可以看出,云厚2 km、IWC在0.000 1~0.2 g/m³,可以探测90%的云厚度,随着IWC增加,穿透距离减小,当IWC最大值增加到1.114 g/m³时,近一半的云是探测不到的。云厚5 km、IWC小于0.2 g/m³约30%的云探测不到,随着IWC增加,穿透距离减小,当IWC最大值增加到1.114 g/m³时,只能探测到云40%的厚度;IWC在0.001 5~1 g/m³时,可探测云厚的41%,DWR最大可达46 dB,IWC最大探测到约0.7 g/m³。根据文献[16],220 GHz雷达可

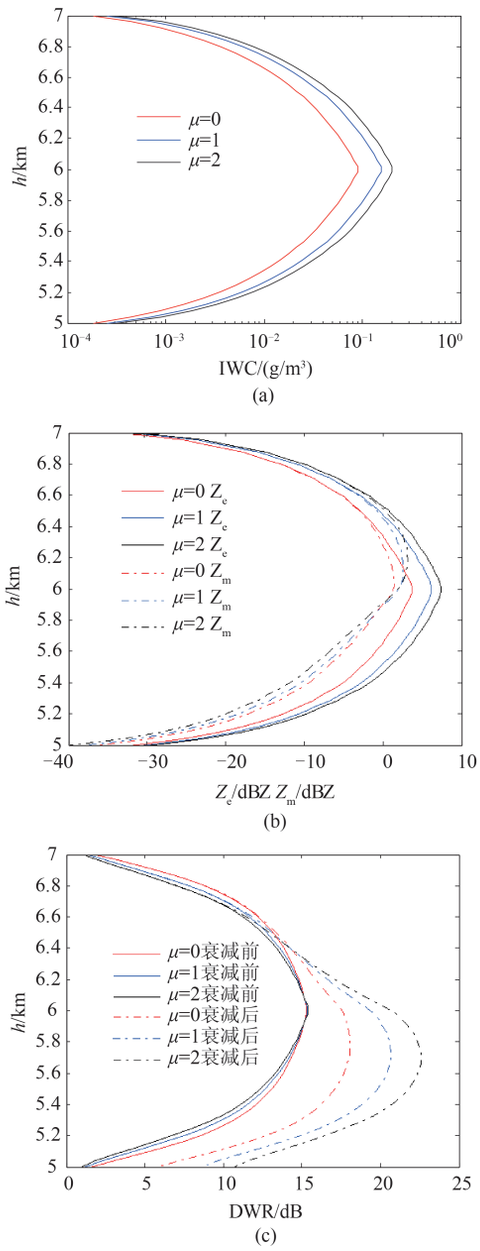


图7　云厚h=5~7 km(a)冰水含量的垂直廓线,(b)340 GHz云雷达等效雷达反射率因子及衰减后的雷达反射率因子,(c)DWR的垂直廓线

Fig. 7　h=5~7 km, (a) the vertical profiles of the water content, (b) the equivalent radar reflectivity factors and the radar reflectivity factor after attenuation from 340 cloud radar, and (c) the DWR

探测IWC为0.001~0.1 g/m³、厚2 km的冰云以及IWC在0.001~0.2 g/m³、厚5 km冰云云厚的94%,因此冰水含量小于0.1 g/m³时,340 GHz电磁波穿透云的能力稍弱于220 GHz的,随着IWC增大,340 GHz电磁波穿透云的能力下降很大。两部雷达可联合探测到的云区域及DWR的大小主要由高频340

GHz电磁波穿透云的能力决定，冰水含量越高，DWR越大。可以看出，较浅薄的冰云两部雷达都可以探测到，对于含水量稍多的冰云，可以用340 GHz云雷达探测上层较小的冰云粒子，用94 GHz云雷达探测中、下层冰晶粒子较大的部分，利用探测到的DWR可以进一步分析所测冰云的物理参数。

5 结论

利用模拟计算的结果分析了冰晶云对太赫兹波段中340 GHz电磁波的散射特性以及94\340 GHz双频云雷达探测DWR对粒子大小的敏感性，并基于假设的冰水含量廓线，探讨了星载双频雷达可探测冰云的厚度，为星载测冰云雷达的论证提供了更多参考，也为云雷达的研制调试提供了理论依据。

（1）冰晶粒子对340 GHz电磁波的后向散射截面大于对220 GHz电磁波的，340 GHz的衰减系数约是94 GHz的5~130倍，340 GHz的衰减比220 GHz的衰减最大增加了100多倍。

（2）体积散射及衰减和使用的冰云体积散射模型有关，不考虑衰减时，不同形状冰晶云回波强度随D_m、IWC的变化特点与220、94 GHz基本一致；与94\220 GHz的相比，94\340 GHz的DWR明显增大，但是变化趋势一致，基本上是雪花、子弹花及薄板状冰晶具有较小的DWR，其他六角形冰晶具有较大的DWR值。DWR和N_0无关，因此可以获得DWR和中值尺度的关系。

（3）340 GHz云雷达可以探测浅薄的含水量较小的冰云，厚的含水量较多的云由于衰减，造成电磁波穿透能力大大降低。厚度5 km以内的云，在冰水含量较小时（0.000 1~0.1 g/m^3），340 GHz电磁波穿透云的能力稍弱于220 GHz的，在冰水含量增大超过0.2 g/m^{3}时，测云厚度降低较大，DWR增加很大；当最大IWC达到1 g/m^{3}时，可探测到云厚的40%及以上。衰减也造成不同高度上相同滴谱的云有不同的DWR，94\340 GHz双频雷达可联合探测到的云区域及DWR的大小主要由340 GHz穿透云的能力决定，IWC的大小以及垂直分布情况则决定了电磁波的穿透能力。

（4）云对双波长衰减造成波长短的云雷达有效反射率因子降低的多，从而使得DWR较大，衰减和云的厚度及IWC大小及垂直分布有关，从而使DWR和谱的数浓度N_0有关，没有衰减时DWR是只和D_m有关的，因此实际上衰减增加了反演的不确定性。所以，对94\220 GHz、94\340 GHz的DWR进行反演时，要首先获得水凝物对220 GHz、340 GHz电磁波衰减订正的关系式，然后进行衰减订正，并尽可能减小订正的偏差，这对减小反演的不确定性具有很大意义。测云厚度是基于装载在极轨卫星上计算的，在相同雷达灵敏度下，如果是静止卫星则由于距离的衰减，云雷达探测能力大大下降。

（5）文中是基于给定的几个冰云体积散射模型做了340 GHz及94\340 GHz云雷达理探测冰云的正演理论模拟计算，实际上体积散射模型的不同会对模拟计算结果产生一定影响，DDA算法对大粒子的计算也会带来一定误差。衰减订正对云雷达反演云内微物理参数是非常重要的，目前还没有人进行这方面的工作，因此下一步将进行有关太赫兹雷达衰减订正的有关工作。

表2 可测云厚、DWR与IWC的关系

Table 2 The relationships between detection range by DWR, the IWC and thickness of clouds

云厚/km	IWC/(g/m^3)	可探测云厚(%、km)	DWR最大值/dB	可测IWC最大值/(g/m^3)
2	0.000 1~0.1	91%	1.82	17.5	0.1
2	0.000 1~0.2	90%	1.8	23	0.2
2	0.001~0.49	75%	1.5	35	0.49
2	0.001~0.856	60%	1.2	45	0.856
2	0.001 7~1.114	53%	1.06	48	1.023 3
5	0.000 1~0.1	80%	4.0	23.4	0.1
5	0.000 1~0.2	68%	3.4	35.6	0.2
5	0.001~-0.49	50%	2.5	45	0.49
5	0.001~-0.856	42%	2.1	43	0.6
5	0.0017~1.114	40%	2	45	0.7
5	0.0015~1	41%	2.05	46	0.69

References

[1] Waliser D E, Li J L F, Woods C P, *et al*. Cloud ice: A climate model challenge with signs and expectations of progress [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, **114**(D8):0-21.

[2] Liu R J, ZHang L, Wang H B, *et al*. Cirrus cloud measurement using lidar over semi-arid areas[J]. *Chinese Journal ofAtmospheric Sciences*, 2011, **35**(5):863-870.

[3] Evans K F, Stephens G L. Microwave radiative transfer through clouds composed of realistically shaped ice crystals. PartI: single scattering properties[J].*Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995,**52**(11):2041-2057.

[4] Tanelli S, Durden S L, Im E, *et al*. Next-generation spaceborne Cloud Profiling Radars [C]// Radar Conference. IEEE, 2009:1-4.

[5] Matrosov S Y. Possibilities of cirrus particle sizing from dual-frequency radar measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1993, **98**(D11):20675-20683.

[6] Matrosov S Y, Heymsfield A J, Wang Z. Dual-frequencyradar ratio of non-spherical atmospheric hydrometeors [J]. *Geophys. Res.Lett.*, 2005, **32**(13) : L13816, doi:10.1029/2005GL023210.

[7] Hogan R J, Gaussiat N, Illingworth A J. Stratocumulus liquid water content from dual wavelength radar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005,**22**(8):1207-1218.

[8] Liao L , Meneghini R , Iguchi T , *et al*. Use of dual-wavelength radar for snow parameter estimates[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2005, **22**(10) : 1494-1506.

[9] Lhermitte R M. Observation of rain at vertical incidence with a 94 GHz Doppler radar: an insight on Mie scattering [J]. *Geophys Res Lett*, 1988,**15**: 1125-1128.

[10] Mead J B, Mcintosh R E, Vandemark D, *et al*. Remote sensing of clouds and fog with a 1.4-mm radar[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1989, **6**(6):1090-1097.

[11] Wu J X, Wei M, Hang X, *et al*. 2014. 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.

[12] WU Ju-Xiu, WEI Ming, SU Tao,*et al*. Comparison of the echoes detected by W band and Ka band cloud radars[J]. *Journal of Marine Meteorology*(吴举秀,魏鸣,苏涛,等. 2017. *W*波段和*Ka*波段云雷达探测回波对比分析.**海洋气象学报**),2017, **37**(2):57-64.

[13] WU Qiong, Yang Mei-Lin, DOU Fang-Li, *et al*. Research on inversion algorithm of cloud microphysical parameters of space borne dual frequency Cloud Radar [J]. (Journal of meteorology(吴琼, 仰美霖, 窦芳丽,等. 星载双频云雷达的云微物理参数反演算法研究[J]. **气象学报**), 2018, **76** (1): 160-168.

[14] HONG Wei, YU Chao, CHEN Ji-Xin, *et al*. Millimeter wave and terahertz technology [J]. *Chinese Science: Information Science*(洪伟, 余超, 陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术. **中国科学:信息科学**), 2016, **46**(8):1086-1107.

[15] WU Ju-Xiu, DOU Fang-Li, AN Da-Wei, *et al*. Simulation of scattering characteristics of non-spherical ice crystals with 94/220 GHz millimeter-wavelength[J]. J. *Infrared Millim. Waves*(吴举秀,窦芳丽,安大伟,等.非球形冰晶在94/220 GHz毫米波的散射特性模拟计算. **红外与毫米波学报**), 2016, **35**(3):377-384.

[16] WU Ju-Xiu, DOU Fang-Li, AN Da-Wei, *et al*. Sensitivity of dual wavelength reflectivity ratio of 94 \ 220 GHz space-borne radars to the cloud parameters with non-spherical ice crystals[J]. *Acta Meteorologica Sinica*(吴举秀, 窦芳丽, 安大伟, 等. 94/220GHz星载雷达双波长比对非球形冰晶云参数敏感性分析. **气象学报**), 2019,**77**(3):529-540.

[17] Battaglia A, Westbrook C D, Kneifel S, *et al*. G band atmospheric radars: new frontiers in cloud physics[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7** (6) : 321-375.

[18] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for scatter-ing calculations[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994,**11**: 1491-1499.

[19] 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.

[20] Warren S, Brandt R E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation[J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: D14220, doi: 10.1029/2007JD009744.

[21] Lhermitte R M. Centimeter & millimeter wavelength radars in meteorology [M]. Lhermitte Publications, 2002: 238-496

[22] ZHANG Pei-Chang, WANG Zhen-Hui. A study on algorithm to make attenuation correction to radar observations of radar reflectivity factor (Ⅰ): theoretical analysis[J]. *The Plateau Weather*(张培昌,王振会.天气雷达回波衰减订正算法的研究(Ⅰ):理论分析. **高原气象**), 2001, **20** (1):1-5.

[23] 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**, 936-956.

[24] Liu G S. A database of microware single-scattering properties for nonspherical ice crystals[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, **89**(10): 1563-1570.

[25] Nowell H, Liu G, Honeyager R. Modeling the microwave single-scattering properties of aggregate snowflakes [J], *J. Geophys. Res. Atmos*, 2013, **118**: 7873-7885.

[26] 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.

[27] 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.

[28] Stephens G L, Vane D G, Tanelli S Im E, *et al*.. CloudSat mission: Performance and early science after the first year of operation[J]. *J. Geophys. Res*, 2008,**113**: D00A18.