

DOI: 10.14182/J.cnki.1001-2443.2016.01.008

冰晶中空气及多次散射效应对雷达探测的影响

杨泽鑫¹, 王金虎^{1,2}, 葛俊祥^{1,2}, 魏鸣²

(1. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象局 大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044)

摘 要: 雷达反射率因子受云中冰晶粒子空气含量以及多次散射效应的影响. 首先利用 Debye 理论计算不同空气含量下冰晶粒子的等效介电常数, 之后利用基于矩量法的 FEKO 软件计算了不同空气含量下的 RCS. 结果表明: 后向散射能量会随空气含量的增大而减小. 针对云中粒子多次散射对雷达探测的影响, 首先利用 FEKO 软件研究六种相同的非球形粒子的 RCS 随间距的变化关系, 结果表明: 最小互散射值均大于不考虑多次散射效应时的 RCS; 为了研究粒子的空间位置对散射截面的影响, 利用 HFSS 软件研究了两个球形粒子的散射情况, 结果表明: RCS 增大或减小与粒子间相对位置有关; 最后利用 FEKO 软件计算了多个非球形粒子组成的粒子群时的互散射问题对雷达后向散射截面的影响, 结果表明: 多次散射效应的 RCS 结果小于不考虑互散射的结果, 因此多次散射增大或者减少后向散射的能量主要取决于各个粒子散射回波的相位.

关键词: 毫米波雷达; 冰晶粒子; 散射特性; 矩量法; HFSS

中国分类号: TN011.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2443(2016)01-0037-07

卷云在地球表面的分布具有全球性. 一方面卷云反射或散射太阳的短波辐射, 另一方面卷云吸收地表和大气发射的长波辐射, 因此它在调节大气的能量收支平衡方面起到了关键作用. 另外, 卷云也是调节气候的非常重要的因素, 主要是由于它们在大气能量分配、辐射传输, 尤其是水循环系统中有不可忽视的作用, 所以在地球-大气系统中, 卷云是研究气候的很重要的一个因素, 是气象业务与气象学科研究的中心问题之一^[1,2]. 由于卷云的成分多以微小冰晶形态出现, 所以为了利用毫米波云雷达的回波特性评估卷云, 则必须首先对毫米波波段下云中冰晶粒子的散射特性进行理论计算^[3,4].

目前有关卷云粒子散射特性的研究多以单个不含空气的简单粒子为研究对象, 通过计算简单粒子的散射特性来研究卷云单次散射特性, 但是根据 Tape、Labonnote、Knap 等的研究, 云中的冰晶在碰撞和合并的过程中, 会将一部分空气封存在内, 因此卷云中的冰晶并不是纯冰构成, 而是含有一定量的空气气泡^[5]. 除此之外, 由于云中冰晶为粒子群分布, 云中粒子之间电磁场的相互作用必须加以考虑, 所以利用毫米波雷达反演云的宏微观物理参数时必须考虑粒子的空气含量以及粒子间的互散射效应的影响.

本文利用基于矩量法的 FEKO 软件以及基于有限元的 HFSS 软件对卷云中六种非球形冰晶粒子(六角棱柱、中空六角棱柱、六角平板、子弹花状、聚合物、过冷水滴)进行了散射的研究, 在计算空气含量对非球形冰晶粒子散射特性的影响中首先利用 Debye 公式计算含空气冰晶粒子的等效介电常数, 利用 FEKO 软件完成了不同空气含量冰晶粒子散射对 94GHz 毫米波雷达探测的影响, 发现粒子尺寸越大, 散射越强, 空气含量越大, 散射越弱; 之后利用该软件进一步分析了云粒子的多次散射问题, 为了形象地说明粒子的回波相位对多次散射的影响, 利用 HFSS 软件完成了两个球形粒子不同摆放位置下对散射结果的影响, 分析结果表明粒子间的互散射特性不仅和粒子间的距离有关, 也和粒子间的相对位置有关系.

收稿日期: 2015-05-15

基金项目: 国家科技部公益性(气象)行业专项(GYHY201206038); 国家自然科学基金(61372066)和江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0500).

作者简介: 杨泽鑫(1989-), 男, 山西翼城人, 硕士研究生; 葛俊祥(1960-), 男, 江苏南京人, 南京信息工程大学教授、博士生导师、博士, 主要从事雷达系统、微波毫米波与天线技术等的研究.

引用格式: 杨泽鑫, 王金虎, 等. 冰晶中空气及多次散射效应对雷达探测的影响[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2016, 39(1): 37-43.

1 理论基础

1.1 矩量法的基本原理

矩量法是计算电磁学中最为常用的方法之一,是内域积分形式的加权余量法的总称.矩量法的基本思想是:先选定基函数对未知函数进行近似展开,代入算子方程,再选取适当的权函数,使在加权平均的意义下方程的余量等于零,由此将连续的算子方程转换为代数方程.原则上,矩量法可用于求解微分方程和积分方程,但用于微分方程时所得到的代数方程组的系数矩阵往往是病态的,故在电磁场问题中主要用于求解积分方程^[6].

1.2 等效复介电常数的计算

现实中云中的冰晶在碰撞合并过程中会掺杂一定的空气^[7],因此我们假设冰与空气均匀混合,其混合后的冰晶粒子等效介电常数采用 Debye 关系式,定义因子

$$K_{ice} = \frac{\epsilon_{ice} - 1}{\epsilon_{ice} + 2} = 0.4152 - j0.0113 \tag{1}$$

其中冰的复介电常数为 $3.13 - j0.011$ ^[8],
故掺杂空气后的冰晶粒子的等效复介电常数为:

$$\epsilon_{eq} \approx \frac{1 + 2fK_{ice}}{1 - fK_{ice}} \tag{2}$$

其中 f 为冰晶介质的体积占混合物总体积的比例.

2 卷云冰晶粒子散射特性的计算

由于冰晶粒子中空气含量非均匀地分布于冰晶粒子体内,故在建模时为了计算方便,首先应用 Debye 理论求得不同空气含量下冰晶粒子的等效复介电常数,即根据公式(1-2)得到表1所示的结果:

卷云中,冰晶形状有 80 多种^[9],目前广泛使用的形状主要是聚合物,过冷水滴,中空六角棱柱,六角棱柱,六角平板和六只子弹花状,其具体的参数定义见参考文献^[10].粒子形状如图1所示.

表1 冰晶中空气含量与等效复介电常数对应表

Table.1 Ice crystals in the air content correspond to the equivalent complex permittivity

空气在冰晶粒子中的体积比	等效复介电常数
0	3.13 - 0.011j
10%	2.79 - 0.0092j
30%	2.2292 - 0.0054j
50%	1.7860 - 0.0054j

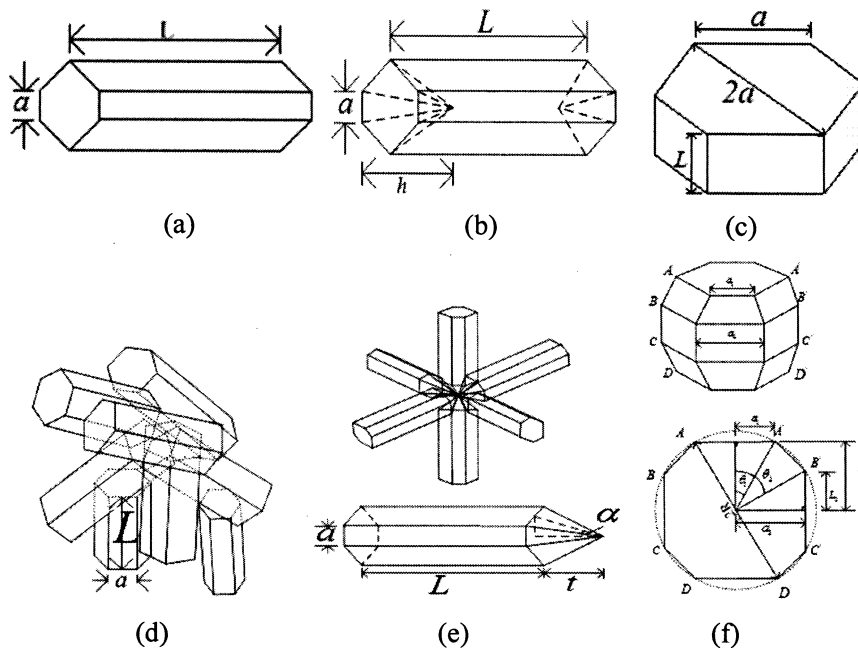


图1 粒子形状示意图

Fig.1 Particle shape schematic

利用矩量法计算了 94GHz 毫米波频率情况下,不同空气含量下冰晶粒子最大尺寸与散射特性之间的关系,如图 2 所示。

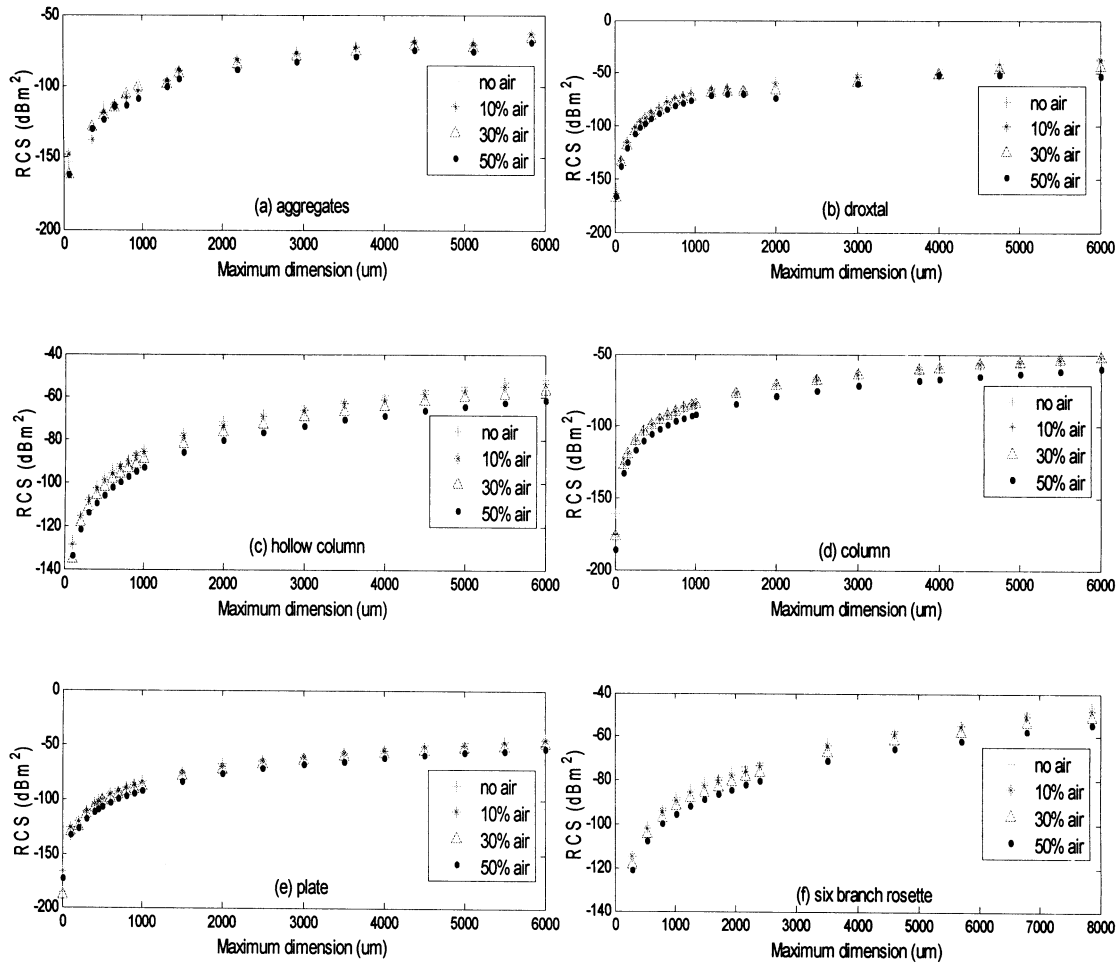


图 2 冰晶粒子散射特性随尺寸与空气含量的变化

Fig. 2 Scattering properties of ice particles varies with the size and the air content

图 2 表明随冰晶粒子最大尺寸的逐渐增大,不同空气含量下聚合物,过冷水滴,中空六角棱柱,六角棱柱,六角平板,六只子弹花状冰晶粒子的 RCS 也在增大,且 RCS 在尺寸小于 2000μm 时增大速度要远大于粒子尺寸大于 2000μm 时的情况;而在相同尺寸下,空气含量越大,RCS 反而越小。

3 考虑多次散射时不含空气的卷云粒子散射特性

雷达探测卷云粒子时,卷云内部的粒子自身除了受入射电磁波辐射影响以外,还会受到临近粒子散射的影响,从而产生多次散射,因此研究卷云粒子群中多次散射特性对于精确反演云的微观物理参数具有重要的意义。

3.1 两个形状相同的非球形粒子多次散射的散射特性

对两个相同形状的非球形粒子进行多次散射特性研究,粒子形状选取如图 1 所示,具体粒子尺寸如下:

六角棱柱: $L = 3000\mu\text{m}$, $a = 3.48L^{0.5} = 6.0275\mu\text{m}$; 中空六角棱柱: $L = 3000\mu\text{m}$, $a = 3.48L^{0.5} = 190.6075\mu\text{m}$; 六角平板: $L = 2.4883a^{0.474} = 79.6838\mu\text{m}$, $a = 1500\mu\text{m}$, $2a = 3000\mu\text{m}$; 聚合物: $a_1 = 232.8\mu\text{m}$, $a_2 = 259.046\mu\text{m}$, $a_3 = 288.277\mu\text{m}$, $a_4 = 306.324\mu\text{m}$, $a_5 = 296.24\mu\text{m}$, $a_6 = 283.712\mu\text{m}$, $a_7 = 268.731\mu\text{m}$, $a_8 = 252.096\mu\text{m}$, $L_1 = 800\mu\text{m}$, $L_2 = 802\mu\text{m}$, $L_3 = 803\mu\text{m}$, $L_4 = 804\mu\text{m}$, $L_5 = 805\mu\text{m}$, $L_6 = 806\mu\text{m}$, $L_7 = 807\mu\text{m}$, $L_8 = 808\mu\text{m}$; 子弹花状: $L = 1750\mu\text{m}$, $a = 1.552L^{0.63} = 171.3980\mu\text{m}$, $\alpha = 28^\circ$, $t = \frac{\sqrt{3}a}{2\tan\alpha} = 279.1656\mu\text{m}$; 过冷水滴: $\theta_1 = 32.35^\circ$, $\theta_2 = 71.81^\circ$, $R = 425\mu\text{m}$, $a_1 = R\sin\theta_1 = 227.413\mu\text{m}$, $a_2 = R\sin\theta_2 = 403.761\mu\text{m}$, $L_1 = R\cos\theta_1 = 359.0380\mu\text{m}$, $L_2 = R\cos\theta_2 = 132.6719\mu\text{m}$ 。

粒子摆放模型与电磁波的传播方向如图3所示.

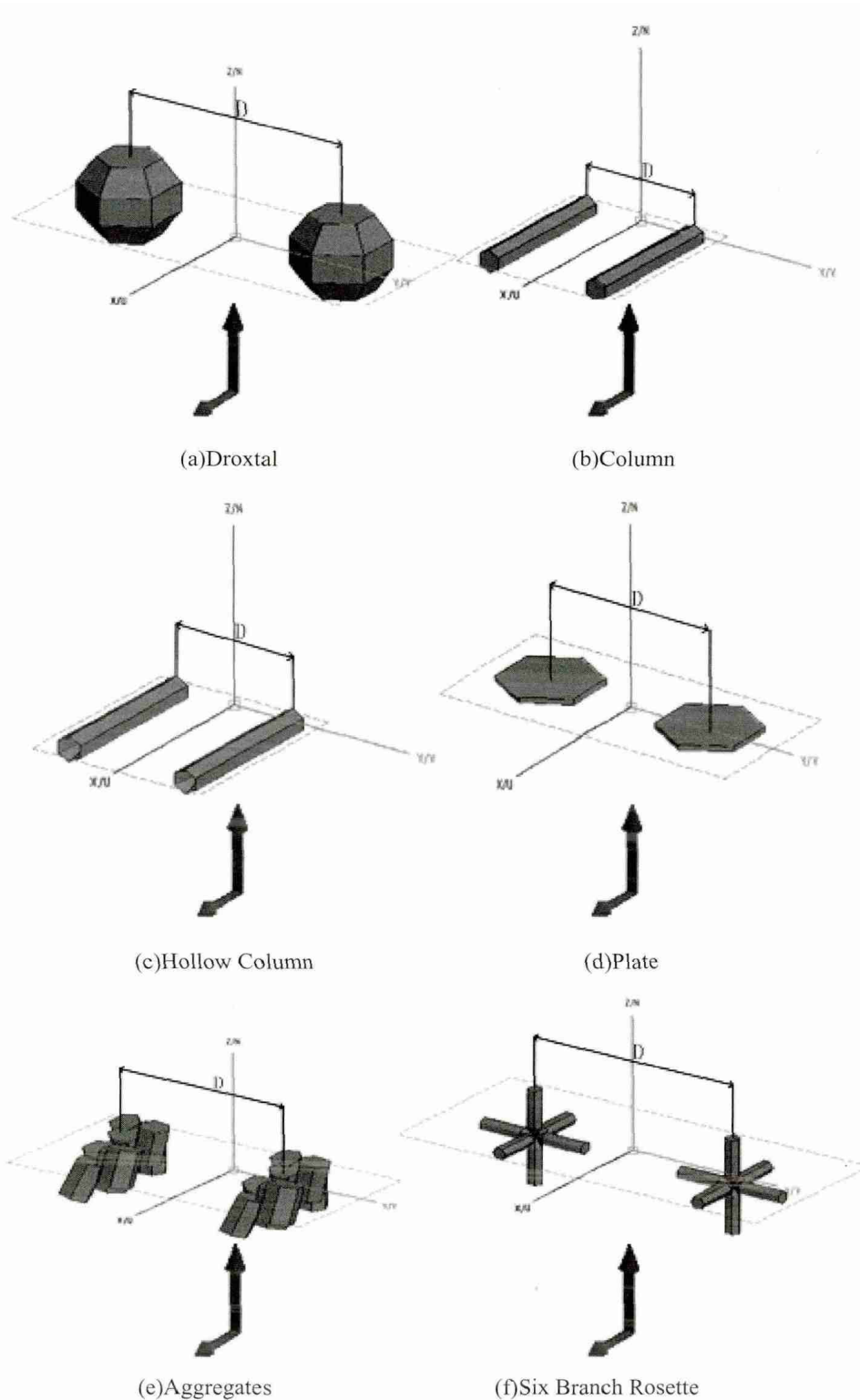


图3 相同粒子的互散射特性计算模型

Fig. 3 Calculation model of mutual scattering characteristics of the same particle

图3中红色箭头表示电场方向,沿 x 轴正方向;蓝色箭头表示电磁场的传播方向,沿 z 轴正方向; D 表示两个粒子中心点之间的距离.图3(a)-(c)的两个粒子间距离 D 均分别为1,2,3,4,5mm;图3(d)的两个粒子间距离 D 分别为3,4,5,6,7mm;图3(e)的两个粒子间距离 D 分别为2,3,4,5,6mm;图3(f)的两个粒子间距离 D 分别为5,6,7,8,9mm.此时不同距离下RCS结果如图4所示.

图4中横坐标表示两个相同粒子间中心点之间的距离,蓝色直线表示不考虑多次散射效应时,两个相同

粒子的 RCS 简单叠加结果,其结果分别为 -68.1254dBm^2 , -60.2980dBm^2 , -61.7270dBm^2 , -56.8952dBm^2 , -59.2511dBm^2 , -56.9491dBm^2 , 可以发现在考虑粒子间的互散射时,两个粒子的 RCS 比两个粒子的 RCS 的简单叠加结果要大。

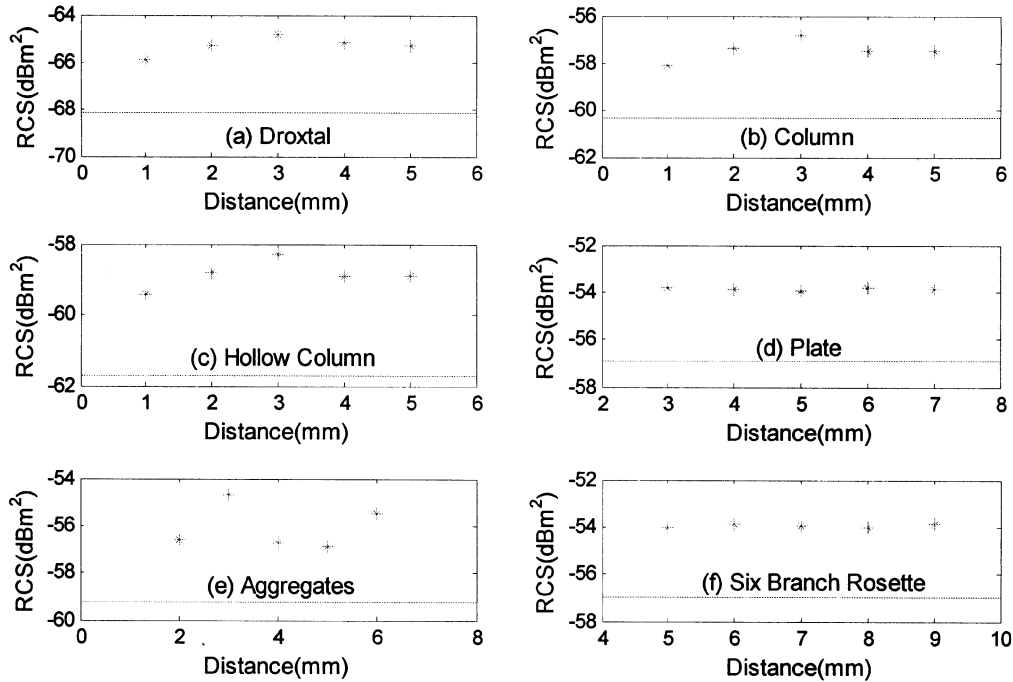


图 4 相同粒子的互散射特性随粒子间距离的变化

Fig. 4 Mutual scattering properties with changes in the distance between the same particles

其中,过冷水滴,六角棱柱,中空六角棱柱,六角平板,聚合物分别在 $D = 3\text{mm}$ 处达到最大值,分别为 -64.7946dBm^2 , -56.8315dBm^2 , -58.3062dBm^2 , -53.80656dBm^2 , -54.7015dBm^2 , 和不考虑多次散射效应时的相对差为 115.58%, 122.16%, 119.79%, 98.04%, 185.10%, 子弹花状在 $D = 6$ 处达到最大值 -53.8696 和不考虑多次散射效应时的相对差为 97.97%。过冷水滴,六角棱柱,中空六角棱柱在 $D = 1\text{mm}$ 处达到最小值,分别为 -65.8812dBm^2 , -58.0650dBm^2 , -59.4206dBm^2 和不考虑多次散射效应时的相对差为 67.53%, 67.24%, 70.09%, 六角平板,聚合物分别在 $D = 5\text{mm}$ 处达到最小值,分别为 -53.9272dBm^2 , -56.8937dBm^2 和不考虑多次散射效应时的相对差为 98.04%, 72.14%, 子弹花状在 $D = 8\text{mm}$ 处达到最小值 -53.9830dBm^2 和不考虑多次散射效应时的相对差为 97.97%。

为了研究粒子间互散射与粒子间相位的关系,建立两个半径 $R = 0.5\text{mm}$ 的球粒子模型,球心间距为 5mm , 排放方式如图 5 中 (a1), (b1), (c1) 所示。

利用 HFSS 软件对图 5 中 (a1), (b1), (c1) 三种模型计算得到的辐射方向图如图 5 (a2), (b2), (c2) 所示,三种粒子模型的后向散射截面分别 -59.7496dBm^2 , -74.5160dBm^2 , -59.8629dBm^2 。图中可以直观显示出不同位置下的辐射差异,而在不考虑互散射的情况下,两个冰晶粒子简单叠加的 RCS 值为 -62.4188dBm^2 。表明粒子间的互散射不仅与粒子间的距离有关,也和粒子间的相位有必然联系,即排列位置不同,散射结果也各不相同。

3.2 多个不同粒子多次散射时的粒子群的散射特性

为了进一步研究粒子间互散射的影响,我们建立两组粒子群,使其沿 y 轴方向排列,模型如图 6 所示。

图 6 中蓝色箭头和红色箭头分别表示电磁波入射方向和电场的极化方向,两组粒子群中心点之间的间距为 20mm ,每组粒子群中的相邻两个粒子间的距离为 3mm 。粒子选取最大尺寸参数为 $850\mu\text{m}$ 的过冷水滴, $3000\mu\text{m}$ 的六角棱柱, $3000\mu\text{m}$ 的中空六角棱柱, $3000\mu\text{m}$ 的六角平板, $5837.6\mu\text{m}$ 的聚合物, $4058.3\mu\text{m}$ 的六只子弹花状进行建模。利用 FEKO 软件计算得到两层粒子的 RCS 为 -63.1152dBm^2 ; 如果不考虑互散射时粒子群的 RCS 简单叠加结果为 -51.5424dBm^2 , 该结果远大于考虑互散射时的结果。

图 4 中两个粒子间的互散射使后向散射能量增大,而图 6 模型中粒子间的互散射情况却使后向散射能

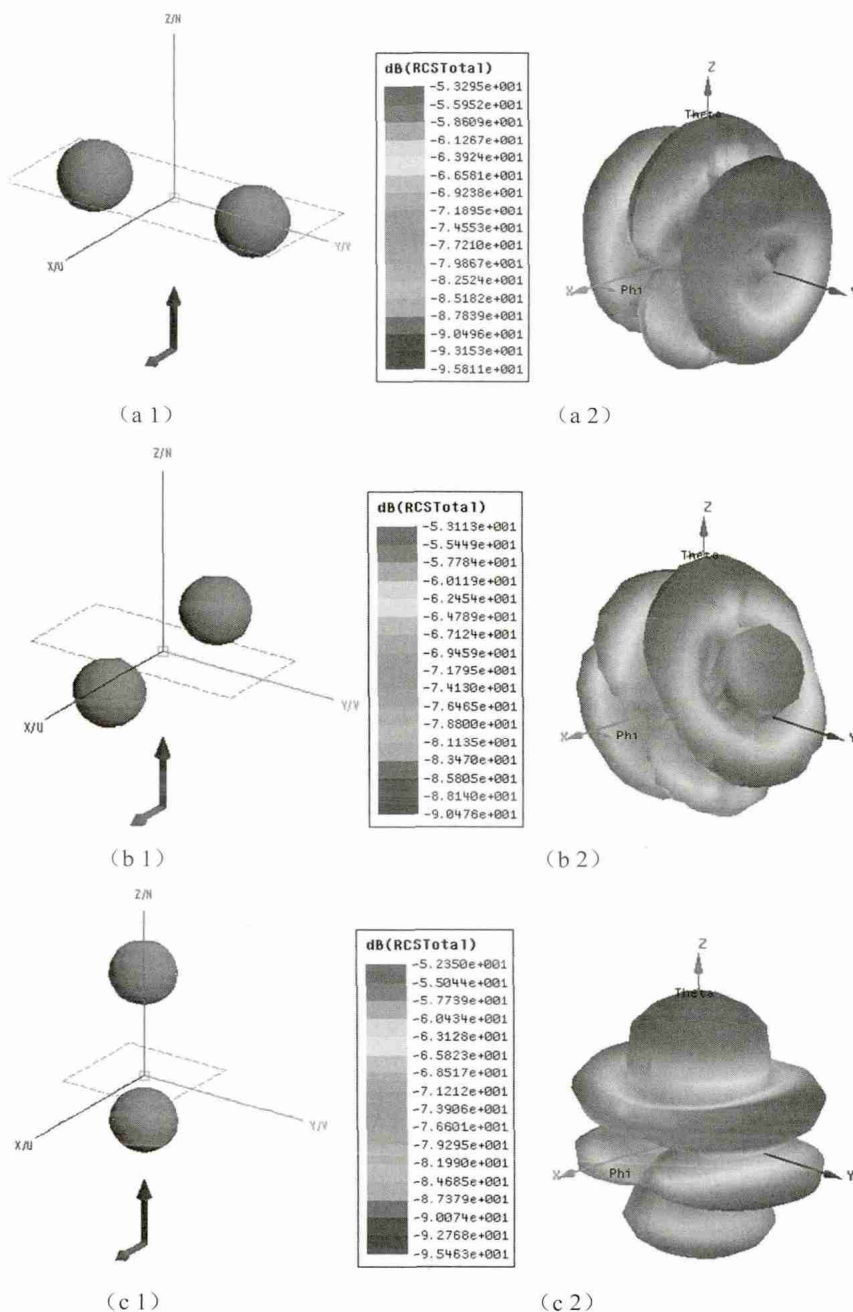


图5 冰晶球的互散射模型及其方向

Fig.5 Model and antenna pattern of ice crystal balls

量减小,这也使得我们在考虑浓密粒子群后向散射特性时必须考虑互散射的相位影响.

4 结论

本文基于 FKEO 软件以及 HFSS 软件研究了卷云粒子的不同空气含量以及互散射特性对粒子后向散射截面的影响.结果表明:(1)相同形状粒子,尺寸越大,散射能量越大;相同形状,相同大小粒子中空气含量越大,散射能量反而越小.(2)在多次散射情况下,粒子的散射能量会随粒子间的距离以及两者与电磁场的相位关系的变化而变化,距离和相位的不同将导致散射能量的大小不同,其不仅可以增大散射能量,亦有可能使后向散射能量减小.

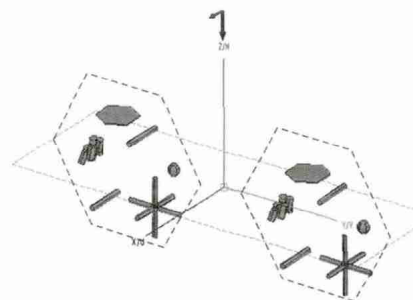


图6 两个粒子群互散射特性计算模型

Fig.6 Model of two particle swarms' mutual scattering characteristics

参考文献:

- [1] 仲凌志. 毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [2] Jin - Hu Wang , Jun - Xiang Ge and Ming Wei. Theoretical Study on Single - Scattering Properties of Ice Particles of Different Orientation at 94GHz[J]. Progress In Electromagnetics Research M ,36:39 -46. [Jin-hu Wang , Jun-xiang Ge , Ming Wei. The Influence of Aspect Ratio and Orientation to Scattering Properties of Ellipsoid Ice Particles , TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering [J]. 2014 ,12(11) : 7543 -7548.
- [3] 王金虎,葛俊祥,魏鸣,顾松山. 卷云冰晶粒子散射特性的理论计算与实验测量研究进展[J]. 计算技术与自动化, 2013, 32(3): 128 -131.
- [4] 王金虎,葛俊祥,魏鸣,刘俊,祝潇. 等效球理论计算冰晶粒子毫米波散射的误差分析[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5): 40 -44.
- [5] 祝潇,王友保. 冰晶中空气和过冷水滴对毫米波雷达反演卷云冰水含量的影响[J]. 科学技术与工程通信技术, 2014, (2): 20 -25.
- [6] 张乙奔,韩一平. 三维目标电磁散射特性的矩量法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [7] MAGANO C , LEE C V. Meteorological classification of natural snow crystals[J]. Fac Sei ,Hokkaido University ,1966 (7) : 321 -362.
- [8] Gang Hong. Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies. Journal of Geophysical research [J]. 2007 (112) : 11208.
- [9] 王金虎,葛俊祥,杨泽鑫,魏鸣. 毫米波频率下冰晶粒子散射特性的研究[C]. 第31届中国气象年会, 2014.
- [10] Jinhu Wang , Junxiang Ge , Ming Wei. 2013 IEEE: Third international conference on information science and technology [J]. Yangzhou Jiangsu China March 2013: 997 -999.

Effects of Air in Crystals and the Multiple Scattering's Influence on Radar Detection

YANG Ze-xin¹ , WANG Jin-hu^{1,2} , GE Jun-xiang^{1,2} , WEI Ming²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing , Nuist , Nanjing , Nanjing 210044 ,China; 2. Key laboratoty for Atmospheric Physics ang Environment , CMA , Nanjiang 210044 , China)

Abstract: The Radar reflectivity factors of ice particles are affected by the air content of and the multiple scattering effects. Firstly , the equivalent complex dielectric constants of ice particles which contained air respectively based on Debye Theory were calculated , then radar reflectivity factors of above particles were computed using the FEKO which based on method of moments , the results showed that: Backscattering energy of ice particle decreases with the increase of air content. In order to consider the multiple scattering effect during radar detection , the relationships between scattering cross sections and distances of two identical non-spherical particles model using the FEKO , the results show: the minimum mutual scattering values than RCS which do not consider multiple scattering effects; To further investigate the influence of RCS on different spatial position of the particles. Study on the RCS of spherical particles using the HFSS. The results showed that: The RCS increases or decreases? with the particle relative position between the relevant; Finally , the mutual scattering property of ensembles of non-spherical particles was calculated using the FEKO , the results showed: RCS computed by multiple scattering effects is larger than that of no any multiple scattering effect , the enhancement or reduction of backscattering energy depends on the echo phases of various particles.

Key words: millimeter-wave radar; ice particle; scattering property; Mom; HFSS