

毫米波频率下冰晶粒子散射特性的研究

王金虎¹² 葛俊祥¹² 杨泽鑫¹ 魏鸣¹²

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 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044

摘要:基于有限元、矩量法以及离散偶极子近似理论对球形冰晶粒子的散射特性进行了研究,考虑到卷云中常见的粒子为六角棱柱以及六角平板,故利用基于有限元的 HFSS 软件以及基于矩量法的 FEKO 软件对其散射特性进行了计算,给出了具体尺寸下非球形冰晶粒子的后向散射值以及散射的方向图,得到的单个粒子的散射数据可作为气象工作者验证散射算法的参照。

关键词: FEKO, HFSS, 离散偶极子近似, 卷云, 94GHz

1 引言

大气高层的卷云(冰晶云)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的作用,但是在理解和预测全球气候系统变化的研究中,卷云的辐射仍然是一个尚不能精确确定的因子^{[1][2]}。

对云的探测方式有多种,常见的如卫星、天气雷达、激光雷达、云高仪、微波辐射计以及全天空成像仪。相比于这些仪器,毫米波雷达具有较高的灵敏度和分辨率,能够探测云的内部物理结构,连续地检测云的垂直剖面变化,因此更适合对卷云、海洋性边界层云以及中纬度气旋进行监测^[3]。

为了利用毫米波云雷达的回波特性评估冰云,必须对毫米波段云中冰粒子的散射特性进行理论计算。云中冰晶粒子并非为标准的球形粒子,形状大致分成六棱柱、中空六棱柱、板状、子弹花瓣状、聚合物、过冷水滴^[4]。在冰云辐射特性的数值研究中,这些方法的计算量大、计算时间长,所以在冰云辐射特性及参数化的研究中多采用等效球理论,但是利用等效球理论计算卷云中的非球形冰晶粒子必然存在着误差^[5]。目前对于非球形的粒子多采用数值的方法,如 FDTD^[6]、DDA^{[7][8]}、T 矩阵^[9]等,这些方法的优缺点可以参考相关的文献^[10]。但是这些数值方法的理论比较复杂,需要较强的数值计算能力和电磁场理论,因此利用一些商业软件如 XFDTD(基于时域有限差分)^[11]、HFSS(基于有限元)^[12]以及 FEKO(基于矩量法)^[13]对卷云冰晶粒子的散射特性进行研究不但简单方便,数据可靠,而且便于工程实践。

FEKO 是目前国内外比较流行的电磁场高频计算软件,其核心算法是矩量法(MOM)。对于金属的目标物,首先计算导体表面的面电流分布;对于介质体,首先计算其表面的等效面电流和等效的面磁流。求得这些参数之后就可以计算近场、远场、RCS、方向图等一些散射特性参量^[13]。HFSS 则是基于电磁场有限元(FEM)分析微波工程问题的三维电磁仿真软件^[12]。目前国内的陈德喜等人利用 FEKO 软件对正方形导体平板、理想导体二面角、带翼立方体、飞机模型进行了 RCS 的仿真研究^[14];李振等人利用 FEKO 对金属导体球以及介质涂覆金属导体球的 RCS 进行了仿真^[15]。但目前还没有相关的中文文献介绍如何利用 FEKO 软件以及 HFSS 软件对卷云冰晶粒子进行散射特性的计算。因此本文将在 94GHz 频率下利用这两类软件对卷

作者简介:王金虎(1987-),男,博士研究生,主要从事电磁散射、雷达系统研究,邮箱地址:goldtigerwang@nuist.edu.cn;葛俊祥(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事雷达系统、微波毫米波与天线技术、电磁散射与绕射理论的研究

资助项目:2011 年国家科技部公益性(气象)行业专项毫米波云雷达关键技术研究(GYHY201206038);
2013 年国家自然科学基金毫米波 MIMO 雷达云闪烁抑制及云内参数反演研究(61372066);
江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0500)
江苏省信息与通信工程优势学科

云中常见的六角棱柱以及六角平板粒子进行散射特性的研究,为气象工作者提出的粒子散射算法验证提供数据支持。

2 FEKO 以及 HFSS 的基本原理及其在散射中的应用

FEKO 的核心算法为矩量法^[13],其基本的原理可参考经典的著作^[16]。利用 FEKO 完成卷云冰晶粒子散射的计算流程如图 1 所示:

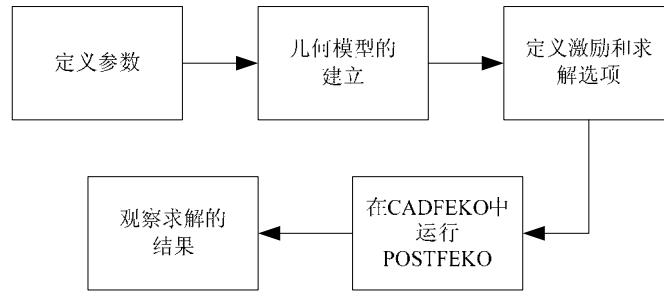


图 1 FEKO 软件计算冰晶粒子散射的流程框图

利用 HFSS 计算粒子的散射问题的流程一般如图 2 所示^[12]:

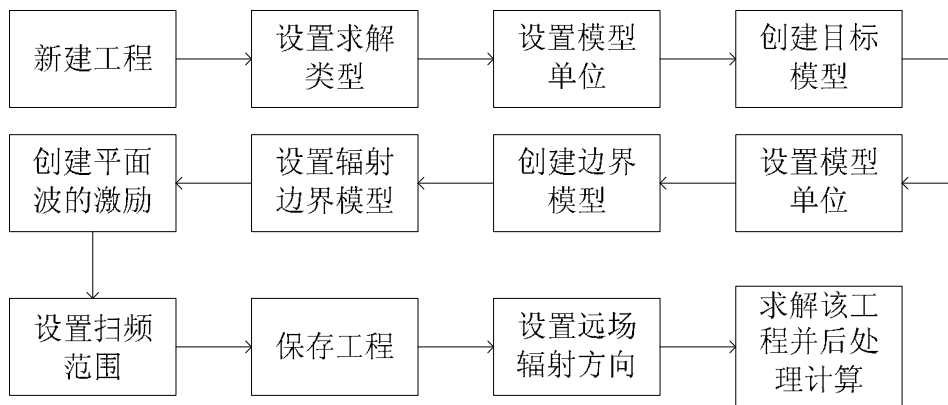


图 2 HFSS 软件仿真粒子的流程

为了验证流程的可靠性,我们首先利用 FEKO, HFSS 以及 DDA (离散偶极子近似) 计算了球形冰晶粒子 (94GHz 频率下粒子的复介电常数为 $3.1755+j0.0096$) 的后向散射特性,结果如表 1 所示:

表 1 HFSS 与 DDA 以及 FEKO 计算球形冰晶粒子后向散射截面结果的对比 (单位: dBm^2)

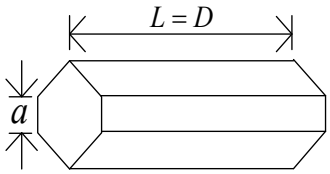
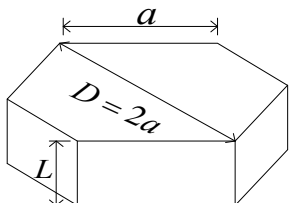
球的直径	1um	10um	30um	50um	75um
HFSS	-241.2244	-180.4788	-154.4270	-140.8022	-130.2816
DDA	-242.9961	-182.9963	-154.2137	-141.4113	-130.3600
FEKO	-239.0180	-179.0500	-154.3280	-142.9660	-131.1640
球的直径	100um	200um	300um	500um	1mm
HFSS	-122.6101	-104.9158	-94.4174	-81.2111	-64.7236
DDA	-122.8820	-104.8487	-94.3347	-81.2346	-66.3204
FEKO	-123.3410	-105.1080	-94.6139	-81.5103	-65.2931

从表 1 可以看出,对比 DDA 的计算结果, HFSS 软件以及 FEKO 软件能够很好地计算得到球形冰晶粒子的散射特性,这一结论为后面计算复杂的冰晶粒子提供了可靠的保证。

3 卷云冰晶粒子的基本模型及其计算的结果

冰晶粒子的形状和大小是多种多样的,随高度变化,它取决于温度、相对湿度以及在云中是否经历了碰撞与合并过程^[17],其中六角棱柱和六角平板是云中最常见的粒子形状^[18],具体的形状及其参数如表 2 所示:

表 2 六角棱柱以及六角平板的几何模型及对应的尺寸

几何形状	轴比关系
	$\begin{cases} a = 0.35L & (L < 100\mu\text{m}) \\ a = 3.48L^{0.5} & (L \geq 100\mu\text{m}) \end{cases} \quad (1)$
	$\begin{cases} L = 2a & (a \leq 2\mu\text{m}) \\ L = 2.4883a^{0.474} & (a \geq 5\mu\text{m}) \\ L = 2 + ((2.4883a^{0.474} - 2) / 4) \cdot (a - 1) & (2\mu\text{m} < a < 5\mu\text{m}) \end{cases} \quad (2)$

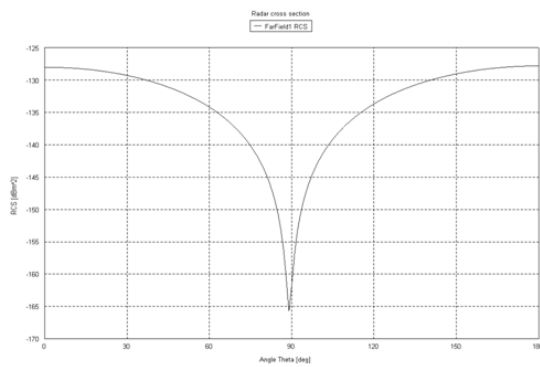
利用 FEKO 以及 HFSS 软件计算卷云中六角棱柱以及六角平板粒子 (94GHz 频率下粒子的复介电常数选取为 3.13-j0.011) 的后向散射结果如表 3 所示:

表 3 FEKO 以及 HFSS 计算六角棱柱以及六角平板冰晶粒子的后向散射截面 (RCS)

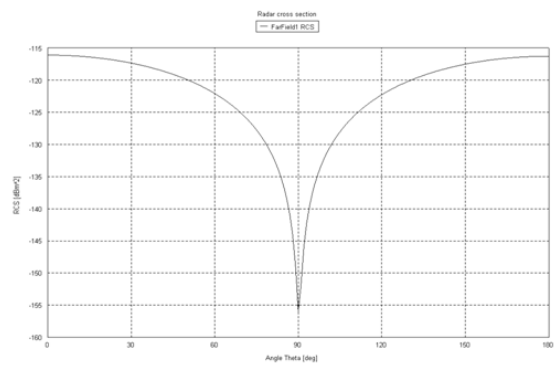
(单位: dBm^2)

六角棱柱冰晶粒子								
$D=L$ (μm)	1	10	100	200	400	600	800	1000
a (μm)	0.35	3.5	34.8	49.2146	69.6	85.2422	98.4293	110.0473
FEKO	-253.3650	-190.5170	-127.6880	-116.2850	-105.1840	-99.4863	-96.4369	-95.4785
HFSS	-247.4541	-187.3972	-127.4769	-115.4871	-103.7636	-98.1744	-94.8219	-94.5315
六角平板冰晶粒子								
L (μm)	1	5.3360	15.8933	22.0751	30.6613	37.1585	42.5872	47.3385
a (μm)	0.5	5	50	100	200	300	400	500
FEKO	-234.254	-185.725	-134.442	-119.121	-103.063	-94.3465	-88.1916	-83.2441
HFSS	-240.3069	-185.6276	-134.5186	-119.0562	-103.8493	-94.5507	-87.9361	-82.4970

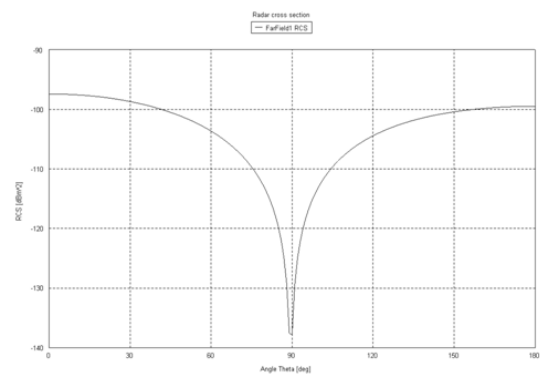
利用 FEKO 计算得到六角棱柱以及六角平板粒子的散射方向图，分别如图 3 和图 4 所示：



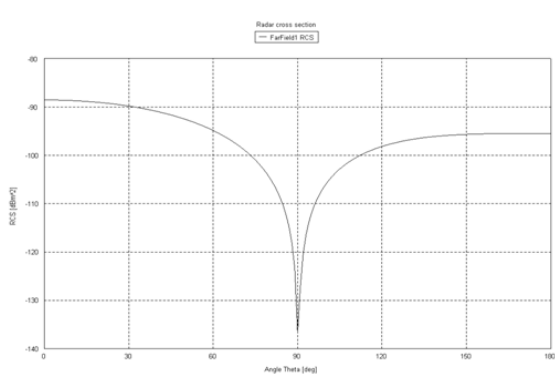
(a)六角棱柱 D=100um



(b)六角棱柱 D=200um

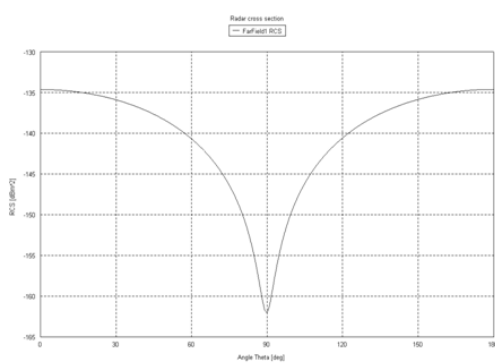


(c)六角棱柱 D=600um

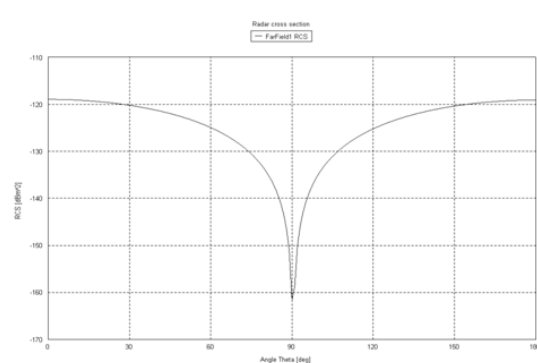


(d)六角棱柱 D=1000um

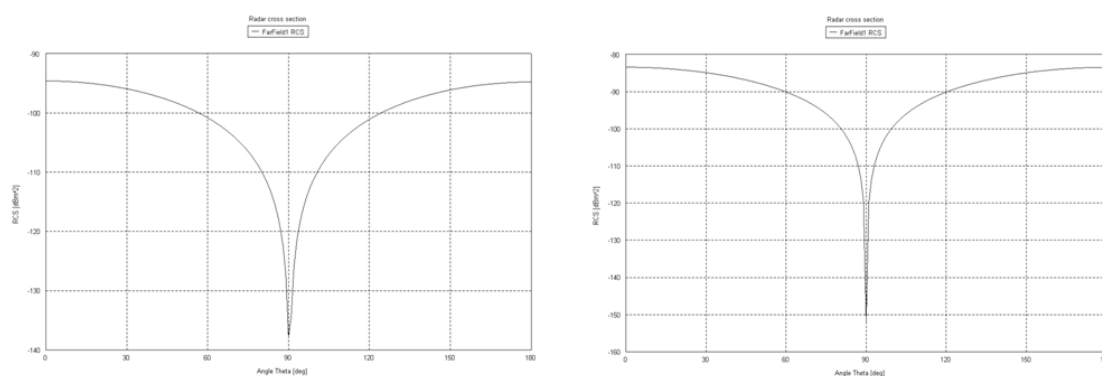
图 3 六角棱柱的散射方向图



(a)六角平板 D=100um



(b)六角平板 D=200um



(c) 六角平板 D=600um

(d) 六角平板 D=1000um

图4 六角平板的散射方向图

从图3以及图4中可以看出,随着粒子尺寸的增大,冰晶粒子(六角棱柱或者六角平板)的前向散射截面以及后向散射截面在增大,粒子散射最小处位于 90° 附近,这些特点使得我们在研究双基地雷达时接收天线的位置不应选择 90° 的散射方向,而应该选择前向位置或者后向位置(此时称为单基地雷达),根据粒子散射的方向图来判断接收天线的位置有利于我们更好地探测粒子,提高雷达抗干扰的能力。

4 展望

本文首先利用DDA, FEKO以及HFSS计算了球形冰晶粒子,之后利用FEKO以及HFSS计算了卷云中的六角棱柱以及六角平板的后向散射截面以及散射的方向图。但是需要注意的是实际中卷云的冰晶会在空气中运动,因此实际雷达探测时的散射截面应该是一个粒子旋转的平均结果。除此之外,国内对卷云冰晶粒子尤其是粒子群的实验探测研究较少,因此如何真实地模拟大气中云的冰晶粒子以及如何利用相关的测试仪器准确地测量冰晶粒子的散射特性将是一个极具挑战性的课题。南京信息工程大学电子与信息工程学院与中国气象局气象探测技术工程中心共建的“毫米波气象雷达系统重点实验室”配有毫米波雷达研究测试所需的各种实验装备,建有大型微波暗室(已升级为紧缩场)准3m法EMC电磁兼容实验室、电磁仿真实验室,除此之外还建有风洞实验室,如何利用微波暗室以及风洞实验室完成大气粒子的散射实验测量将是未来研究的一个重点方向。除此之外,南京信息工程大学葛俊祥教授的“雷达系统与卫星导航”团队依托国家科技部公益性(气象)行业专项课题研发的国内首部地基94GHz毫米波云雷达正处于紧张的调试阶段,未来将应用于对卷云冰晶粒子的实际探测中。

参考文献:

- [1] 张琳. 卷云的辐射传输与散射特性研究[D]. 硕士论文, 西安电子科技大学, 2010: 1-2.
- [2] Jinhu Wang, Junxiang Ge, Ming Wei et al. Influence of scattering properties due to complex refractive index of ice[C]. IEEE: Third international conference on information science and technology. March 23-25, 2013; Yangzhou, Jiangsu, China, 997-999
- [3] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(4): 383-391.
- [4] Gang Hong. Radar backscattering properties of nonspherical ice crystals at 94 GHz [J]. J. Geophys. Res, 2007, 112: 1-11.
- [5] 王金虎, 葛俊祥, 魏鸣等. 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(待刊)

- [6] Yang. P and K. N. Liou. Finite-difference time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space[J].J. Opt. Soc. Am. A, 1996a ,13 :2072-2085.
- [7] Draine, B.T., and P.J. Flatau. Discrete-dipole approximation for scattering calculation[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11:1491-1499.
- [8] Jin-Hu Wang, Jun-Xiang Ge and Ming Wei. Theoretical Study on Single-Scattering Properties of Ice Particles of Different Orientation at 94 GHz. Progress In Electromagnetics Research M[J], Vol.36, 39-46,2014
- [9] Mishchenko, M. I., L. D. Travis, and D. W. Mackowski. T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: A review[J]. J.Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer, 1996, 55: 535-575.
- [10] 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, 计算技术与自动化[J], 2013, 32(3): 128-131
- [11] 葛德彪 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法(第三版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011:1-448
- [12] 王金虎, 葛俊祥, 魏鸣, 毛宝婷等. 基于 HFSS 的卷云冰晶粒子后向散射特性分析[C]. 第 30 届中国气象年会, 2013
- [13] 阎照文. FEK05.4 电磁场分析技术与实例详解[M]. 中国水利水电出版社,2009:1-300.
- [14] 陈德喜, 颜俐, 王海婴. FEKO 软件 RCS 仿真应用[J].舰船电子工程., 2008,28(9):125-130
- [15] 李振, 察豪, 王月清, 周沫. 基于 FEKO 的球体电磁散射分析[J]. 舰船电子工程.,2008,28(10):191-193
- [16] R.F. Harrington. Field Computation by Moment methods[M]. McMillan, New York,1968
- [17] Gallagher, M. W., J. Whiteway, M. J. Flynn, P. J. Connolly et al. An overview of the microphysical structure of cirrus clouds observed during EMERALD-1[J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 2004,131:1143–1169.
- [18] Zhang Zhibo. Computation of the scattering properties of nonspherical ice crystals[D]. 57-78, Thesis of Degree of Master of Science, Texas A&M University, 2004.