

基于 HFSS 的卷云冰晶粒子后向散射特性分析

王金虎¹² 葛俊祥¹ 魏鸣² 毛宝婷¹ 王军¹

(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

利用 HFSS 软件对卷云 6 种形状冰晶粒子建模仿真得到后向散射截面, 为了验证 HFSS 软件设置冰晶粒子材料属性的正确性, 利用 DDA 软件计算球形冰晶粒子的后向散射截面, 结果表明, 94GHz 频率下 HFSS 计算球形冰晶粒子的后向散射截面与 DDA 计算的后向散射截面结果相比最大相对误差不超过 1.38%, 故利用 HFSS 软件计算卷云中六角棱柱、六角平板、中空六棱柱、子弹花环、聚合物以及过冷水滴的后向散射截面的结果是可信的, 其仿真计算的流程和方法为气象粒子散射计算的工程应用提供便利。

关键词: HFSS (High Frequency Structure Simulator); 有限元; 卷云冰晶粒子; RCS (雷达后向散射截面); DDA (离散偶极子近似)

1 引言

大气高层卷云的分布具有全球性, 水平范围从几公里到上千公里, 平均覆盖地球上空的 20%-30%, 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, 对地球大气系统的辐射收支有着重要的调节和控制作用。卷云的辐射特性在国际上是一个热门的课题, 它的辐射特性对大气探测、气候遥感等领域有着重要的研究意义^[1]。

目前对云的探测手段主要有卫星遥感、天气雷达、激光雷达、云量测量仪以及高空气球等。卫星遥感探测间隔时间长, 空间分辨率低; 天气雷达对浅薄云不敏感; 激光测云雷达、云量测量仪以及气球只能探测空间某一点的云信息。因此, 常规的探测云手段虽然可以获取云信息, 但是时间分辨率和空间分辨率都较低, 不能探测云内部结构, 难以准确反映时刻变化的云参数信息^[2]。作为新型的云探测工具, 毫米波测云雷达具有很高的灵敏度和分辨率, 可以探测云的内部结构, 弥补了常规云探测的不足。

为了利用毫米波测云雷达的回波特性评估冰云, 必须对毫米波波段云中冰粒子的散射特性进行理论计算, 由于卷云中的粒子并非为简单的球形, 因此不能使用 Mie 公式, 而需要利用数值计算的方法来计算粒子的散射特性, 如 FDTD^[3]、DDA^[4]、T 矩阵^[5]等。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)^[6]、HFSS (基于有限元)^[7]、以及 FEKO(基于矩量法)^[8]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。

综观国内文献, 李振等人^[9]利用 FEKO 软件的 EditFEKO 对金属导体球以及介质涂敷金属

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)

江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0500)

江苏省传感网与现代气象装备优势学科

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, 邮箱地址: jxge@nuist.edu.cn

导体球的 RCS(后向散射截面),贾云峰等人^[10]利用 FEKO 软件研究了金属球以及黄铜带的 RCS,其计算的结果与精确解完全一致。陈德喜等人^[11]利用 FEKO 软件对平板、二面角等目标物进行了 RCS 计算,认为该软件能够方便快捷的解决目标 RCS 的计算问题。张可儿等人^[12]利用美国 REMCOM 公式开发的商用全波三维电磁仿真软件 XFDTD 软件对超宽带恒阻抗 TEM 喇叭天线进行建模并计算了天线指定点处的电磁场信息。然而目前还没有相关的中文文献资料介绍 HFSS 软件对气象粒子如卷云冰晶粒子的散射特性计算与分析,因此本文讨论 HFSS 在粒子散射计算中的可行性,并将其应用于卷云中复杂粒子的散射计算。

2 HFSS 软件简介及其在散射计算中的应用

HFSS 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。HFSS 以其无与伦比的仿真精度和可靠性、快捷的仿真速度、方便易用的操作界面、稳定成熟的自适应网格剖分技术,已经被广泛应用于航空、航天、电子、半导体、计算机、通信等领域^[7]。

利用 HFSS 计算粒子的散射问题的流程一般如图 1 所示:

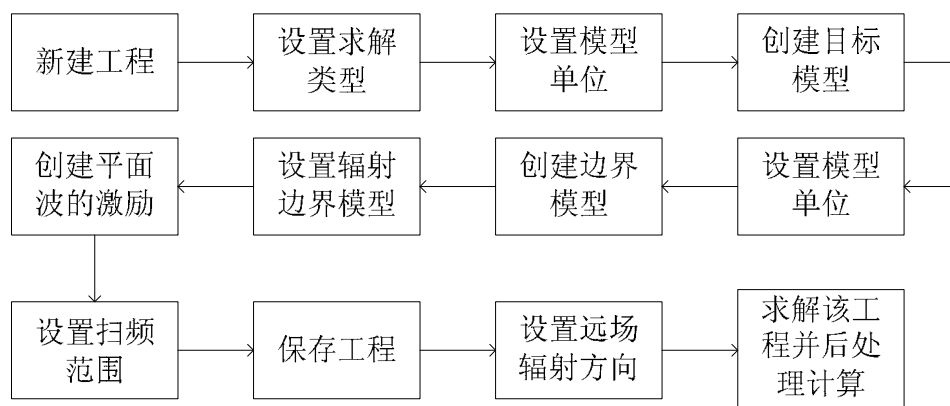
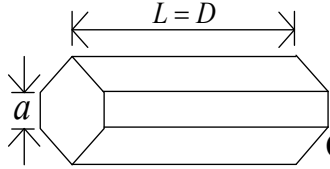
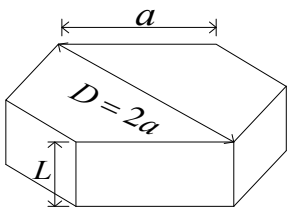
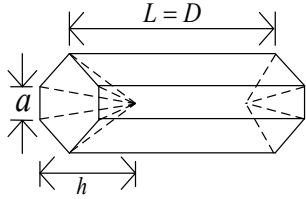
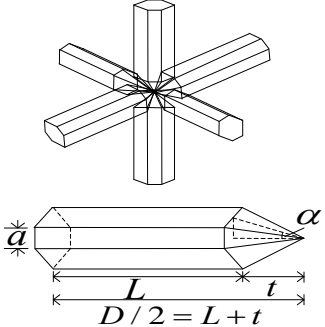
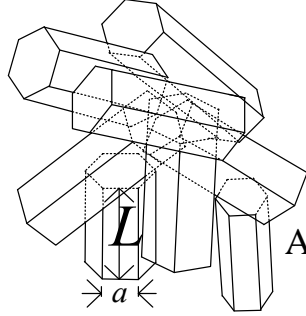


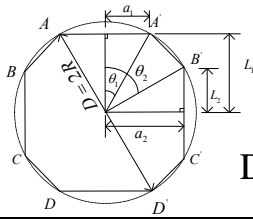
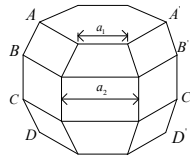
图 1 HFSS 软件仿真粒子的流程

3 卷云冰晶粒子的分类

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^[13],中纬度卷云冰晶粒子的典型尺度变化范围为 10um~4000um^[14],Hong gang 在研究 94GHz 频率下非球形冰晶粒子的散射特性时将冰晶云的粒子分成了 6 种形状,包括六角棱柱、六角平板、中空六棱柱、子弹花环、聚合物以及过冷水滴,粒子的尺度范围为 2~5500um^{[15][16]},具体形状以及参数如表 1 所示:

表 1 卷云冰晶粒子的六种常见形状及其参数

| 几何形状 | 轴比关系 |
|--|--|
|  <p style="text-align: right;">Column</p> | $\begin{cases} a = 0.35L & (L < 100\mu\text{m}) \\ a = 3.48L^{0.5} & (L \geq 100\mu\text{m}) \end{cases} \quad (1)$ |
|  <p style="text-align: right;">Plate</p> | $\begin{cases} L = 2a & (a \leq 2\mu\text{m}) \\ L = 2.4883a^{0.474} & (a \geq 5\mu\text{m}) \\ L = 2 + ((2.4883a^{0.474} - 2) / 4) \cdot (a - 1) & (2\mu\text{m} < a < 5\mu\text{m}) \end{cases} \quad (2)$ |
|  <p style="text-align: right;">Hollow</p> | $\begin{cases} a = 0.35L & (L < 100\mu\text{m}) \\ a = 3.48L^{0.5} & (L \geq 100\mu\text{m}) \\ h = 0.25L \end{cases} \quad (3)$ |
|  <p style="text-align: right;">6-branch Bullet Rosette</p> | $\begin{cases} a = 1.552L^{0.63} \\ t = \frac{\sqrt{3}a}{2 \tan \alpha} \quad \alpha = 28^\circ \end{cases} \quad (4)$ |
|  <p style="text-align: right;">Aggregate</p> | $\begin{aligned} a_1 &= 0.291L_1 & a_2 &= 0.323L_2 \\ a_3 &= 0.359L_3 & a_4 &= 0.381L_4 \\ a_5 &= 0.368L_5 & a_6 &= 0.352L_6 \\ a_7 &= 0.333L_7 & a_8 &= 0.312L_8 \end{aligned} \quad (5)$ $D = 7.297L_{\min}$ |



Droxtal

$$D = 2R$$

$$a_1 = R \sin \theta_1 \quad a_2 = R \sin \theta_2$$

$$L_1 = R \cos \theta_1 \quad L_2 = R \cos \theta_2 \quad (6)$$

$$\theta_1 = 32.35^\circ \quad \theta_2 = 71.81^\circ$$

4 HFSS 对卷云冰晶粒子的计算

4.1 HFSS 软件与 DDA 对于球形冰晶粒子散射的结果对比

由于 HFSS 软件中没有卷云冰晶粒子的材料，因此需要添加粒子材料的属性，本文计算卷云冰晶粒子时选取的复折射指数为 $m = 1.782 + 0.00270i^{[17]}$ ，理论计算后可知在 HFSS 软件中应该添加冰晶材料的参数应该为：相对介电常数为 3.1755，介质损耗角为 $\tan \delta = 0.003$ 。利用 HFSS 以及 DDA 计算了球形冰晶粒子直径为 $1\mu m$, $10\mu m$, $30\mu m$, $50\mu m$, $75\mu m$, $100\mu m$, $200\mu m$, $300\mu m$, $500\mu m$ 以及 1mm 时的后向散射截面，如表 2 所示：

表 2 HFSS 与 DDA 计算球形冰晶粒子后向散射截面的对比 (单位: dBm^2)

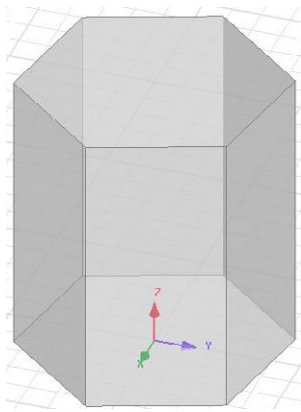
| 球的直径 | 1um | 10um | 30um | 50um | 75um |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| HFSS | -241.2244 | -180.4788 | -154.4270 | -140.8022 | -130.2816 |
| *DDA | -242.9961 | -182.9963 | -154.2137 | -141.4113 | -130.360 |
| 球的直径 | 100um | 200um | 300um | 500um | 1mm |
| HFSS | -122.6101 | -104.9158 | -94.4174 | -81.2111 | -64.7236 |
| *DDA | -122.882 | -104.8487 | -94.3347 | -81.2346 | -66.3204 |

*注：DDA 的原理具体可参考文献[18-21]

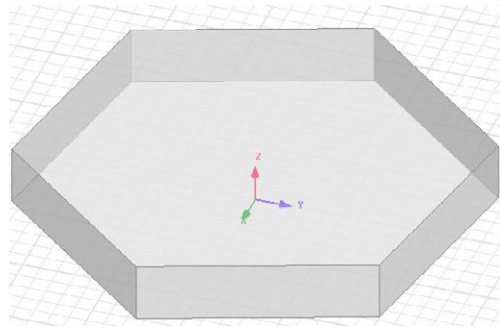
从表 2 中可以看出使用 HFSS 软件计算卷云中球形冰晶粒子 (当粒子的尺寸远远小于入射波长时，粒子可近似认为球形) 后向散射截面的值与 DDA 方法计算的结果最大相对误差不超过 1.38%，因此可以认为 HFSS 软件计算的卷云冰晶粒子是可靠的。

4.2 HFSS 软件计算卷云中常用的六种冰晶粒子

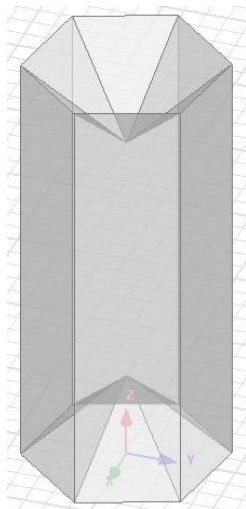
在 HFSS 界面中按照表 1 所给的粒子形状依次画出实心六角柱体、六角平板、空心六角柱体、六支子弹花环、聚合物、过冷水滴，如图 2 所示：



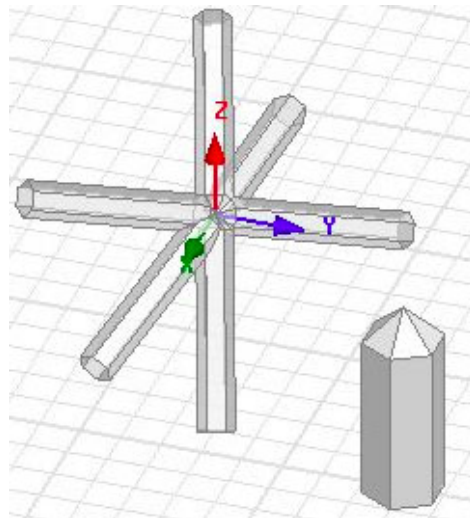
(a) HFSS 中的六角柱体冰晶模型



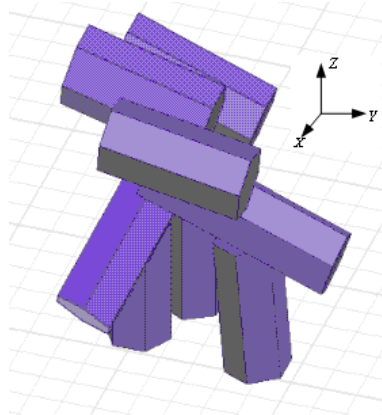
(b) HFSS 中的板状冰晶模型



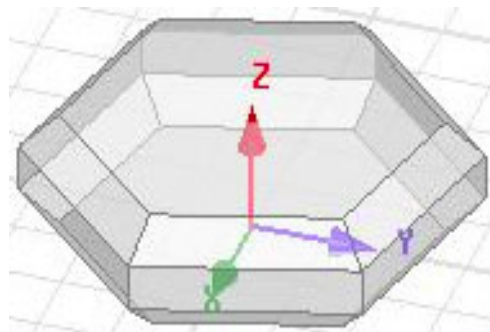
(c) HFSS 中的空心六角柱体冰晶模型



(d) HFSS 中的六支子弹花环冰晶模型



(e) HFSS 中的聚合物冰晶模型



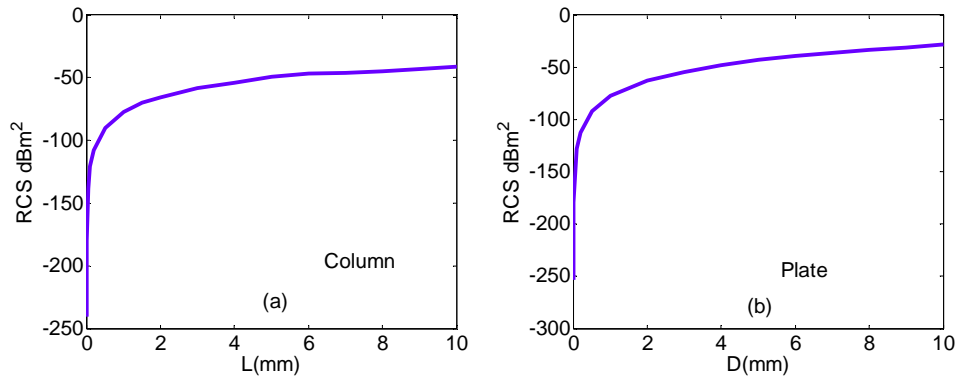
(f) HFSS 中的过冷水滴冰晶模型

图2 卷云中常用的六种冰晶粒子的 HFSS 模型

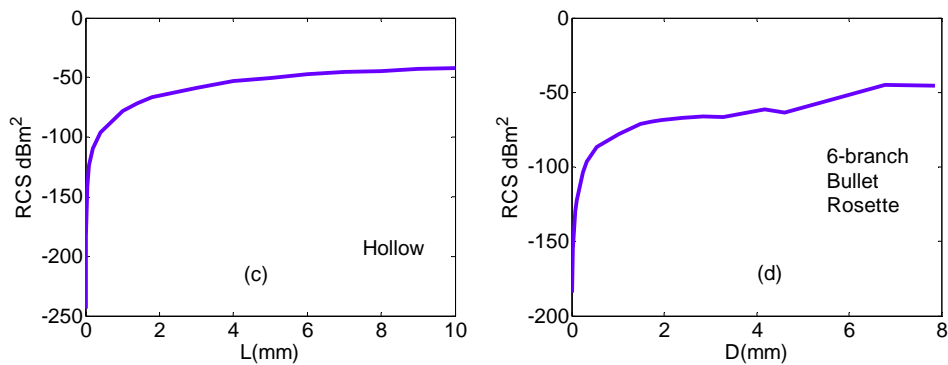
按照表 1 所给的粒子的轴比关系公式，依次画出六角柱体冰晶模型、板状冰晶模型、空心六角柱体冰晶模型、六支子弹花环冰晶模型、聚合物冰晶模型、过冷水滴冰晶模型，在计算冰晶粒子后向散射截面时，入射平面电磁波的频率为 94GHz，除了六角柱体冰晶模型的电场的极化方向为 Z，入射方向为 X 外，对于板状冰晶模型、空心六角柱体冰晶模型、六支子弹花环冰晶模型、聚合物冰晶模型、过冷水滴冰晶模型的电场极化方向 X，入射方向为 Z，X，

Y, Z 的坐标方向定义如图 2 所示。

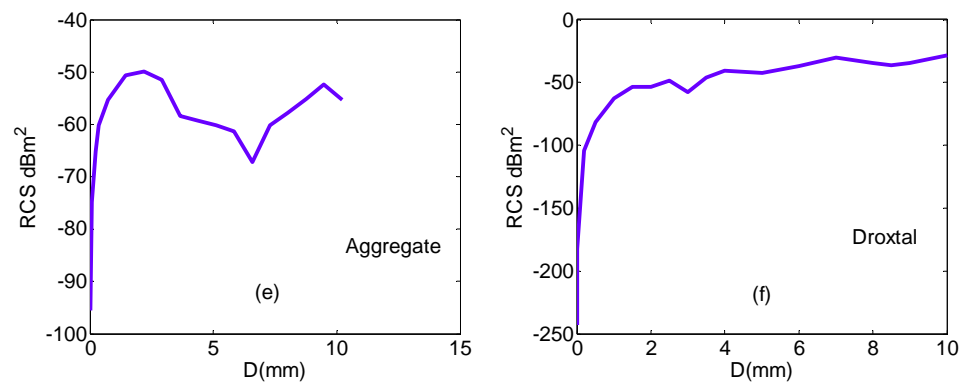
按照图 1 所示仿真粒子的流程计算 94GHz 平面波照射下固定取向的六种粒子后向散射截面，利用 matlab 依次绘制出六角形柱状冰晶粒子的最大尺寸 L 与后向散射截面的关系、六角形板状冰晶粒子的最大尺寸 D 与后向散射截面的关系、空心六角柱体冰晶粒子的最大尺寸 L 与后向散射截面的关系、六支子弹花环冰晶粒子的最大尺寸 D 与后向散射截面的关系、聚合物冰晶粒子的最大尺寸 D 与后向散射截面的关系以及过冷水滴冰晶粒子的最大尺寸 D 与后向散射截面的关系，如图 3 所示：



(a) 六角柱体后向散射截面与粒子最大尺寸 L 之间的关系 (b) 六角平板后向散射截面与粒子最大尺寸 D 之间的关系



(c) 空心六角柱体后向散射截面与粒子最大尺寸 L 之间的关系 (d) 六支子弹花环后向散射截面与粒子最大尺寸 D 之间的关系



(e) 聚合物后向散射截面与粒子最大尺寸 D 之间的关系 (f) 过冷水滴后向散射截面与粒子最大尺寸 D 之间的关系

图 3 六角冰晶粒子最大尺寸与后向散射截面的关系

5 结论与展望

综合以上分析,对比 DDA 的计算结果可知 HFSS 软件计算卷云冰晶粒子后向散射截面是较准确的,根据图(1)的计算流程,在 HFSS 中按照表 1 的公式(1),(2),(3),(4),(5),(6)将卷云中的六角棱柱、六角平板、中空六棱柱、子弹花环、聚合物以及过冷水滴进行模型的建立与仿真计算,得到卷云冰晶粒子与后向散射截面之间的关系曲线,为 94GHz 毫米波雷达探测卷云冰晶提供理论的参考依据。需要注意的是实际中的卷云冰晶粒子应该是三维旋转的,因此对每个卷云冰晶粒子进行三维旋转求其平均值后的后向散射截面更符合实际情况,而且卷云应该是各种粒子形状的组合分布,计算时应该考虑粒子谱的情况,这些在 HFSS 软件中是能够实现的。本文主要工作是验证 HFSS 在卷云冰晶粒子后向散射截面计算中的优势和准确性,并给出简单的计算流程,为雷达实际反演云冰晶粒子提供一定的理论参考依据,对于气象中云粒子群的研究、云中冰水混合物的研究、云粒子 3 维空间旋转等更加符合实际情况的研究将在后续文章中体现出来。

参考文献:

- [1]张琳.卷云的辐射传输与散射特性研究[D].硕士学位论文,西安电子科技大学,2010:1-2.
- [2]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.
- [3]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.
- [4]Draine, B.T., and P.J. Flatau. Discrete-dipole approximation for scattering calculation[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11:1491-1499.
- [5]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.
- [6]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
- [7]谢拥军,刘莹,李磊等. HFSS 原理与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2009:1-411.
- [8]阎照文. FEKO5.4 电磁场分析技术与实例详解. 中国水利水电出版社,2009:1-300.
- [9]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.
- [10]贾云峰. FEKO 在雷达散射截面计算中的应用[J]. 中国制造业信息化. 2008(02):59-61.
- [11]陈德喜,颜俐,王海婴. FEKO 软件的 RCS 仿真应用[J]. 舰船电子工程. 2008(09): 125-129.
- [12]张可儿,胡红. FDTD 结合 XFDTD 研究 TEM 喇叭天线[J]. 甘肃科技. 2011,27(6):17-19.
- [13]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.
- [14]Anthony J. Baran. A review of the light scattering properties of cirrus[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2009:1239-1260.
- [15]Gang Hong. Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies[J]. Journal of Geophysical research, 2007, 112: D11208:1-11.
- [16]Gang Hong. Radar backscattering properties of nonspherical ice crystals at 94 GHz[J]. Journal of Geophysical

Research,2007,112:D22203:1-11.

[17]Evans, K.F., and G.L. Stephens.Microwave radiative transfer through clouds composed of realistically shaped ice crystals. Part I: Single scattering properties[J]. J. Atmos. Sci., 1995,52: 2041-2057.

[18]Draine,B.T., The Discrete-Dipole Approximation and Its Application to Interstellar Graphite Grains, Astrophysical J., 1988,333:848-872.

[19]Liu,G.(2004), Approximation of single scattering properties of ice and snow particles for high microwave frequencies, J. Atmos. Sci.,61:2441-2456.

[20]Kim,M.-J.(2006),Single scattering parameters of randomly oriented snow particles at microwave frequencies,J.Geophys. Res.,111,D14201,doi:10.1029/2005JD006892.

[21]GUOSHENG LIU. Approximation of Single Scattering Properties of Ice and Snow Particles for High Microwave Frequencies[J]. J. Atmos. Sci., 2004,61:2441–2456.