文章编号:1674-7070(2014)03-0249-08

杨通晓[1,2]　王振会[2,3]　王蕙莹[2]　张培昌[3]　胡方超[3]

双基地偏振雷达探测时小旋转椭球雨滴的侧向散射特性

摘要

从旋转椭球粒子散射理论出发,给出单个小旋转椭球雨滴在入射不同偏振波时的散射函数,并对其在不同仰角情况的数学图形和物理意义做了讨论,为推导基于椭球雨滴群的双基地偏振雷达方程、研究椭球雨滴群对双基地线偏振雷达探测能力的影响、处理和分析双基地偏振雷达资料,提供了理论依据.

关键词

双基地雷达;双线偏振雷达;小旋转椭球雨滴;侧向散射

中图分类号 P415.2

文献标志码 A

收稿日期 2012-05-12

资助项目 国家自然科学基金(40875016);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060300002)

作者简介

杨通晓,女,硕士,工程师,研究方向为大气探测与大气遥感.ytx1105@qq.com

王振会(通信作者),男,教授,博士生导师,主要研究方向为大气探测与大气遥感.eiap@nuist.edu.cn

1 上海市气象科学研究所,上海,200030

2 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京,210044

3 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044

0 引言

双基地多普勒天气雷达系统可以直接而廉价测得三维矢量风场,并可获得较精细的云结构,国内外已做了广泛的科学研究与业务应用的探索工作.1993 年,NCAR 研制了第一部较实用的双基地天气雷达网[1],并进行了外场试验.deElia 等[2]于 2001 年对所有的双(多)基地天气雷达系统研究成果作了概括性的总结.

为了进一步研究和应用双基地多普勒天气雷达,有必要就散射体对雷达波的侧向散射特性作仔细的研究.莫月琴等[3]推导出了小圆球形粒子群双基地雷达气象方程,并对双基地雷达探测能力进行了分析.实际大气中的降水粒子通常是非球形的.实验研究指出,当等效半径大于 140 μm,下落雨滴一般呈扁球形[4].自然界中冰粒的形状较为复杂,呈球形、椭球形、锥形等[5].据 Mackin[6],在英格兰东南部的一次强风暴中约有 60%~70%的冰雹呈扁椭球形,只有百分之几是球形.因而非球形雨滴和冰雹对电磁波的散射在气象科学中具有重要的研究价值.

Barber 等[7]针对不同形状、不同相态降水粒子散射特性的计算研究,为雷达观测结果提供了更符合实际的解释和分析依据.Atlas 等[8]计算了小旋转椭球粒子的散射和衰减.Vandehulst[9]给出了小椭球粒子散射的表示式.Asano 等[10-12]用分离变量法推导出计算均匀旋转椭球散射公式,并较详细讨论了匀质椭球粒子的散射特性.张培昌等[13]也独立推导出计算两层分层均匀旋转椭球粒子散射的公式,很好地解决了非均匀旋转椭球状粒子的散射理论和数值计算问题,并对扁椭球形状冰水混合粒子散射和椭球状粒子群的雷达反射率和衰减系数做了一定的研究.

目前较为流行的非球形粒子散射的数值计算方法有 *T*-矩阵法和离散偶极子近似算法(DDA).Aydin 等[14]运用 *T*-矩阵法计算了各种形状、相态的冰相粒子的散射特性.刘黎平等[15]用 *T*-矩阵法研究了不同相态的冰雹的散射与衰减特性.Atlas 等[16]和 Allan 等[17]实验研究了椭球形的粒子的散射特性.王庆安[18]等进行了单个扁椭形雨滴和冰粒的后向散射实验.许小永等[19-20]用实验资料检验了 DDA 算法.

本文结合双基地雷达探测需求,推导分析单个小旋转椭球粒子

的散射函数,并讨论其散射能量的空间分布特性,为建立适用于双基地雷达探测椭球雨滴群的雷达气象方程、研究椭球雨滴群旋转轴取向对双基地线偏振雷达探测能力的影响、处理和分析双基地偏振雷达资料,提供理论基础.

1 双基地偏振雷达散射电场表达式

Howard 等[21]建立的雨滴倾角统计模型指出,在近地面以上降水粒子旋转轴很接近一致铅直取向,倾斜角较大时也仅为 0.6°左右.本文以此认为降水粒子旋转轴作铅直取向.定义目标粒子散射坐标系为 $O'\xi\eta\zeta$,如图 1,旋转轴 ζ 铅直向上,ξ 和 η 2 轴为相等轴,取 ξ 轴指东、η 轴指北.

在双基地雷达系统中(图 1),主动雷达坐标系为 $O_tX_tY_tZ_t$,Y_t 为入射电磁波传播方向,X_t 为水平轴,也是水平偏振电磁波的电场矢量振动方向,Z_t 为垂直偏振电磁波的电场矢量振动方向,R_t 表示主动雷达到目标粒子的距离,a_t、e_t 分别表示主动雷达观测目标粒子得到的方位角和仰角.辅站坐标系为 $O_rX_rY_rZ_r$,X_r 为水平轴,Y_r 指向粒子,简单起见,假设 2 雷达在同一水平面上,R_r 表示被动雷到达目标粒子的距离,a_r、e_r 分别表示辅站观测目标粒子得到的方位角和仰角,粒子的散射方向可以借助于 e_r 和 a_r 来确定.注意在目标粒子的仰角 e_t、e_r 不为 0 时,Z_t、Z_r 不指向天顶方向.

由主动雷达发射的电磁波经目标粒子散射后,辅站接收的电磁波[22]可描述为

$$[E^s]=\frac{e^{-jk_0Rr}}{R_r}[\boldsymbol{T}_r][\boldsymbol{S}][\boldsymbol{T}_t][E^i], \tag{1}$$

其中 E^i、E^s 分别为入射、散射电场,R_r 为接收雷达到目标物的距离,$[\boldsymbol{S}]$为椭球粒子的散射矩阵,$[\boldsymbol{T}_t]$为发射电磁波从主动雷达到目标粒子这一路径 R_t 上的传播转换矩阵,$[\boldsymbol{T}_r]$为散射电磁波从目标粒子到辅站这一路径 R_r 上的传播转换矩阵.由于双基地偏振雷达的接收雷达与发射雷达分开,从而 $R_t\neq R_r$,$[\boldsymbol{T}_t]\neq[\boldsymbol{T}_r]$.传播转换矩阵$[\boldsymbol{T}_t]$、$[\boldsymbol{T}_r]$,表示电磁波传播路径中由于云和降水粒子群的存在所造成的差分衰减、差分相移和退偏振现象.忽略传播路径上的传播效应,即令传播转换矩阵$[\boldsymbol{T}_t]$、$[\boldsymbol{T}_r]$为单位矩阵.

根据单基地偏振雷达散射电场表达式[23],可进一步推导出式(1)中各项的表达式.

双基地偏振雷达探测时单个椭球粒子的散射矩阵:

$$[\boldsymbol{S}]=k_0^2\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}[\boldsymbol{P}]=k_0^2\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&1\end{bmatrix}\boldsymbol{D}_r\begin{bmatrix}g_\xi&0&0\\0&g_\eta&0\\0&0&g_\zeta\end{bmatrix}\boldsymbol{D}_t, \tag{2}$$

式中,k_0 为雷达波波数($k_0=2\pi/\lambda$,λ 为波长),g_ξ、g_η、g_ζ 为椭球粒子的极化系数,是由椭球粒子在其 3 个轴向上的长度和介质特性决定的[23-24],对于旋转椭球粒子,$g_\xi=g_\eta>g_\zeta$.粒子散射电磁波的能力与入射波的波长、偏振情况,粒子的化学成分、物理性质、大小、形状、取向以及它的电学特性有关.$\boldsymbol{D}_t$ 和 $\boldsymbol{D}_r$ 分别为粒子坐标系相对于发射天线和接收天线坐标系的旋转矩阵,表达式如下:

$$[\boldsymbol{D}_t]=\begin{bmatrix}\cos a_t&\cos e_t\sin a_t&-\sin e_t\sin a_t\\-\sin a_t&\cos e_t\cos a_t&-\sin e_t\cos a_t\\0&\sin e_t&\cos e_t\end{bmatrix}, \tag{3}$$

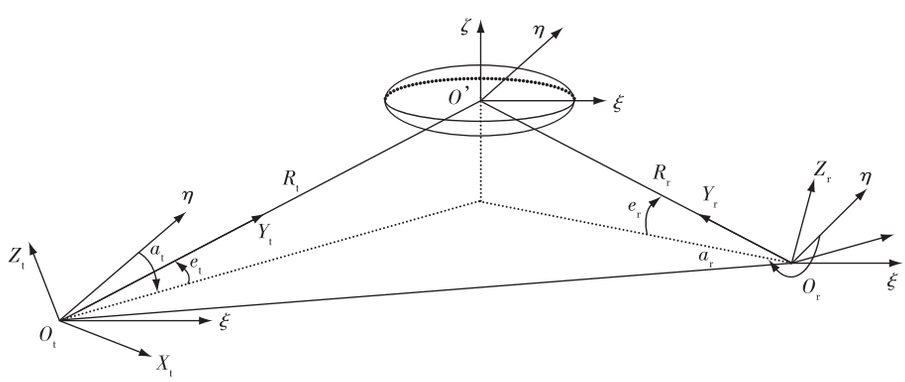


图 1 双基地雷达系统中旋转椭球粒子散射坐标示意

Fig. 1 Sketch of coordinates for scattering by a spheroid particle detected by a bistatic radar system

$$[\boldsymbol{D}_r]=\begin{bmatrix}\cos a_r & -\sin a_r & 0\\ \cos e_r\sin a_r & \cos e_r\cos a_r & \sin e_r\\ -\sin e_r\sin a_r & -\sin e_r\cos a_r & \cos e_r\end{bmatrix},\quad(4)$$

将式(2)—(4)代入式(1)得辅站接收到的水平和垂直偏振散射电场强度:

$$\begin{bmatrix}E_h^s\\0\\E_v^s\end{bmatrix}=\frac{e^{-jk_0R_r}\times k_0^2}{R_r}\cdot\begin{bmatrix}g_\xi\cos(a_t-a_r) & g_\xi\cos e_t\sin(a_t-a_r) & g_\xi\sin e_t\sin(a_r-a_t)\\ 0 & 0 & 0\\ g_\xi\sin e_r\sin(a_t-a_r) & -g_\xi\cos e_t\sin e_r\sin(a_t+a_r)+g_\zeta\sin e_t\cos e_r & g_\xi\sin e_t\sin e_r\cos(a_t-a_r)+g_\zeta\cos e_t\cos e_r\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}E_h^i\\0\\E_v^i\end{bmatrix},\quad(5)$$

式(5)中略去0分量,可简化表述为

$$\begin{bmatrix}E_{hh}^s & E_{hv}^s\\ E_{vh}^s & E_{vv}^s\end{bmatrix}=\frac{e^{-jk_0R_r}}{R_r}\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{hh}E_h^i & \boldsymbol{S}_{hv}E_v^i\\ \boldsymbol{S}_{vh}E_h^i & \boldsymbol{S}_{vv}E_v^i\end{bmatrix}.\quad(6)$$

式(6)中包含 E_{hh}^s、E_{hv}^s、E_{vh}^s 和 E_{vv}^s 4个分量,其中 E_{hh}^s 为发射水平偏振波、接收水平偏振波的散射电场强度;E_{hv}^s 为发射垂直偏振波、接收水平偏振波的散射电场强度;E_{vh}^s 为发射水平偏振波、接收垂直偏振波的散射电场强度;E_{vv}^s 为发射垂直偏振波、接收垂直偏振波的散射电场强度.若将 E_{hh}^s、E_{hv}^s 2个分量求和,则代表的是接收水平偏振波的散射电场强度,即式(5)中的 E_h^s 分量;若将 E_{vh}^s、E_{vv}^s 2个分量求和,则代表的是接收垂直偏振波的散射电场强度,即式(5)中的 E_v^s 分量;若将 E_{hh}^s、E_{vh}^s 2个分量求和,则代表的是发射水平偏振波的散射电场强度;若将 E_{hv}^s、E_{vv}^s 2个分量求和,则代表的是发射垂直偏振波的散射电场强度.称 $\boldsymbol{S}_{hh}$,$\boldsymbol{S}_{hv}$,$\boldsymbol{S}_{vh}$,$\boldsymbol{S}_{vv}$ 为椭球粒子散射矩阵.

2 单个椭球粒子的散射函数

单基地雷达探测是基于目标粒子对入射电磁波的后向散射,而双多基地雷达探测则是基于目标粒子的侧向散射,因此对双基地雷达的研究必须分析粒子的侧向散射能力.对于单个椭球粒子,记 F_i 为入射波在粒子处的能流密度,F_s 为在距离粒子 R_r 处的散射波能流密度,则用散射函数描述粒子散射能量分布的方向性,表示为

$$\beta=\frac{F_s}{F_i}R_r^2,\quad(7)$$

其中

$$F_s=\frac{c}{8\pi}|E^s|^2,\quad F_i=\frac{c}{8\pi}|E^i|^2.\quad(8)$$

由式(7—10)可得单个椭球粒子对不同偏振的平面波的散射方向性函数:

$$\beta_{jk}=\frac{|E_{jk}^s|^2}{|E_k^i|^2}R_r^2=|S_{jk}|^2,\quad j,k=h,v,\quad(9)$$

式(9)中 S_{jk} 来自式(6).利用式(5)和(6),可得到式(9)中各分量的具体表达式为

$$\begin{bmatrix}\beta_{hh} & \beta_{hv}\\ \beta_{vh} & \beta_{vv}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}|S_{hh}|^2 & |S_{hv}|^2\\ |S_{vh}|^2 & |S_{vv}|^2\end{bmatrix}=k_0^4\begin{bmatrix}|g_\xi\cos(a_t-a_r)|^2 & |g_\xi\sin e_t\sin(a_r-a_t)|^2\\ |g_\xi\sin e_r\sin(a_t-a_r)|^2 & \left|g_\xi\sin e_t\sin e_r\cos(a_t-a_r)+g_\zeta\cos e_t\cos e_r\right|^2\end{bmatrix}.\quad(10)$$

所谓"后向散射",就是式(10)中 $e_r=e_t$、$a_r=a_t$ 的情况,在此特殊情况下,有

$$\begin{cases}\beta_{hh}=k_0^4|g_\xi|^2,\\ \beta_{vh}=\beta_{hv}=0,\\ \beta_{vv}=k_0^4|g_\xi\sin^2e_t+g_\zeta\cos^2e_t|^2.\end{cases}\quad(11)$$

可见,对于"后向散射",β_{hh}、β_{vh}、β_{hv} 都与方向无关,仅 β_{vv} 与仰角 e_t 有关.由于 $g_\xi>g_\zeta$,故 β_{vv} 随 e_t 增大而增大,从 $e_t=0$ 时 $\beta_{vv}=k_0^4|g_\zeta|^2$ 到 $e_t=90°$ 时 $\beta_{vv}=k_0^4|g_\xi|^2$,这是因为:当 $e_t=w$ 时,粒子在入射波极化方向上的尺度最小,随着雷达发射天线仰角 e_t 增大,粒子在入射波极化方向上的尺度也变大.

对于任意方向上的散射,式(10)可以写为

$$\beta_{hh}=k_0^4|g_\xi|^2\cos^2(a_t-a_r),\quad(12)$$

$$\beta_{vh}=k_0^4|g_\xi|^2\sin^2e_r\sin^2(a_t-a_r),\quad(13)$$

$$\beta_{hv}=k_0^4|g_\xi|^2\sin^2e_t\sin^2(a_r-a_t),\quad(14)$$

$$\begin{aligned}\beta_{vv}=k_0^4\{&|g_\xi|^2\sin^2e_t\sin^2e_r\cos^2(a_t-a_r)+|g_\zeta|^2\cos^2e_t\cos^2e_r+\\&2|g_\xi||g_\zeta|\cos e_t\cos e_r\sin e_t\sin e_r\cos(a_t-a_r)\}=\\&k_0^4\{|g_\xi|^2\sin^2e_t\sin^2e_r\cos^2(a_t-a_r)+\\&|g_\zeta|^2\cos^2e_t\cos^2e_r+\\&\frac{1}{2}|g_\xi||g_\zeta|\sin(2e_t)\sin(2e_r)\cos(a_t-a_r)\}.\end{aligned}\quad(15)$$

本文取主动雷达方位角 $a_t=\pi/2$,入射波波长为 $\lambda=10$ cm,一般大雨滴小于6 mm,大体在1~2 mm,为使数值模拟更具代表性,本文取粒子等效直径 $d_0=0.2$ cm,粒子轴比为0.894,旋转轴向上的椭球粒子散射的方向性特征如下:

1) 入射波为水平偏振波时,由式(12)和(13),散射的方向性特征与入射波仰角 e_t 无关;由式

(12),散射波的水平偏振分量β_{hh}与散射波接收仰角e_r无关,与入射波和散射波方位差(a_t-a_r)的余弦平方成正比;由式(13),在$\sin e_r\sin(a_t-a_r)\neq 0$方向上的散射波出现退偏振波.

e_t为任意值时入射波为水平偏振波情况下的散射函数如图2所示.图2中,$\beta_h=\beta_{hh}+\beta_{vh}$,表示粒子散射的总能量分布特征.

由图2可见,当发射水平偏振波时,雷达发射仰角的变化对水平偏振波的散射特性无影响,因为粒子在入射波极化方向上的尺度相等.

图2a是发射水平偏振波时粒子的散射函数β_{hh},表示不同方向上可以接收散射波的水平偏振强度.在X-Y平面上,前向和后向散射最大;相对主站天线指向的方位角散射系数分布如图2d所示,即在Y-Z平面上,各个方向散射相同,且为最大值,表1给出沿主站天线指向,方位角顺时针旋转时β_{hh}列表数据,清晰地反映散射系数随角度的变化;在X-Z平面上,Z轴及其反向延长线方向为最大,平面其余处为0.三维空间中的散射函数几何图形分布以X-Y、Y-Z和X-Z平面呈对称分布.

图2b是发射水平偏振波时粒子的散射函数β_{vh},表示不同方向上可以接收散射波的垂直偏振强度.在X-Y平面上为0;相对主站天线指向的方位角散射系数分布图2e所示,即在Y-Z平面内处处为0,β_{vh}数值如表1所示;在X-Z平面上Z轴及其反向延长线方向最大,越趋向X轴,值越小.三维空间中的散射函数几何图形分布以X-Y、Y-Z和X-Z平面呈对称分布.

图2c是发射水平偏振波时粒子的散射函数β_h,表示不同方向上可以接收散射波的水平与垂直偏振总强度.在X-Y平面上与β_{hh}相同,前向和后向散射最大,靠近X轴方向逐渐减小;相对主站天线指向的方位角散射系数分布如图2f所示,即在Y-Z平面上与β_{hh}相同,各个方向散射相同,且为最大值,β_h数值如表1所示;在X-Z平面上的散射特性与X-Y平面上的散射特性完全相同.三维空间中的散射函数几何图形以X轴即入射波偏振方向为对称轴,呈轴对称分布.

2)入射波为垂直偏振波时,散射的方向性特征与入射波仰角e_t密切相关(式(14)和(15)).在$e_t=w$时,

$$\beta_{hv}=0, \tag{16}$$

$$\beta_{vv}=k_0^4|g_\zeta|^2\cos^2 e_r, \tag{17}$$

$e_t=0$时的β_{vv}、β_{hv}、β_v(其中$\beta_v=\beta_{vv}+\beta_{hv}$)如图3a—3c所示.注意一般地,$g_\zeta<g_\xi$,故图3a的最大幅度比较小.

$e_t\neq 0$时,

$$\beta_{hv}=k_0^4|g_\xi|^2\sin^2(e_t)\sin^2(a_r-a_t), \tag{18}$$

$$\beta_{vv}=k_0^4\{|g_\xi|^2\sin^2 e_t\sin^2 e_r\cos^2(a_t-a_r)+|g_\zeta|^2\cos^2 e_t\cos^2 e_r+$$

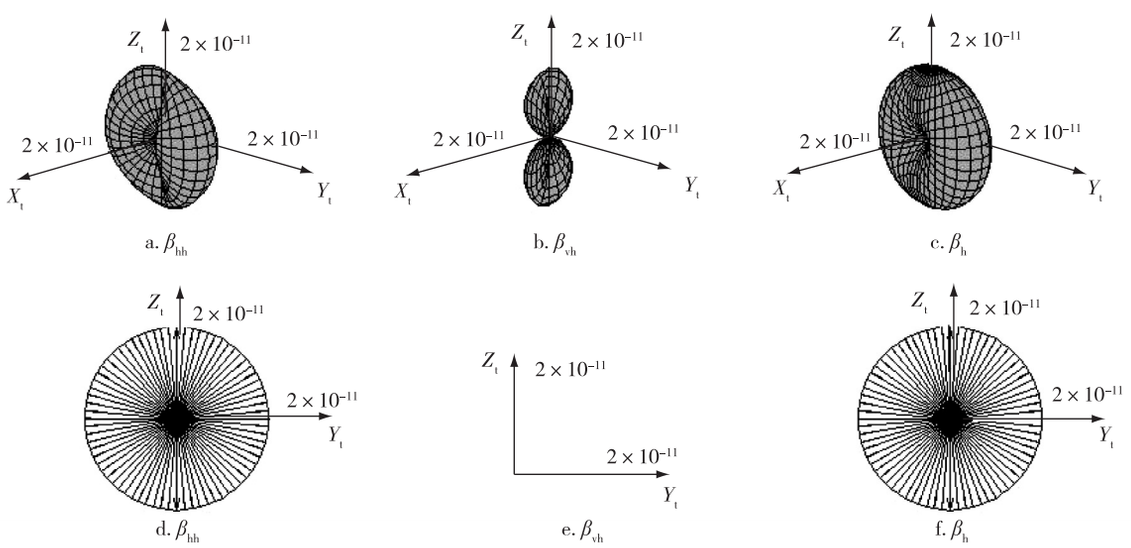


图2 入射波为水平偏振波情况下的散射函数β_{hh}、β_{vh}和β_h

(a—c表示发射天线仰角为任意值时的分布;d—f表示发射天线仰角为任意值时主站指向垂直剖面)

Fig. 2 Scattering functions β_{hh}, β_{vh} and β_h for h-polarized waves incident at any elevation and corresponding vertical profile along the main station point

$$\frac{1}{2}|g_{\xi}||g_{\zeta}|\sin(2e_{\mathrm{t}})\sin(2e_{\mathrm{r}})\cos(a_{\mathrm{t}}-a_{\mathrm{r}})\}. \quad (19)$$

$e_{\mathrm{t}}=20°$ 时,β_{vv}、β_{hv}、β_{v} 如图 3d—3f 所示.β_{hv} 图形和 β_{hh} 相似,但最大幅度小一个因子 $\sin^2(e_{\mathrm{t}})$ 且方位旋转 90°.β_{vv} 图形较复杂.

由图 3a—3c 和图 3d—3f 比较可知,当发射垂直偏振波时,雷达发射天线仰角会影响粒子对垂直偏振波的散射特性.当雷达发射天线仰角改变时,粒子在入射波极化方向即垂直方向上的尺度也发生改变,导致散射函数发生变化.同样也是因为:当 $e_{\mathrm{t}}=0°$ 时,粒子在入射波极化方向上的尺度最小,随着雷达发射天线仰角 e_{t} 增大,粒子在入射波极化方向上的尺度也变大,反映在图 3 中表现为散射函数数值变大.

图 2、3 中坐标数值为入射波长为 10 cm 时的坐标参考尺度,将入射波为水平偏振波情况下的散射函数幅度与入射波为垂直偏振波情况下作比较,发现入射波为水平偏振波情况下的散射函数幅度更大.

图 3a 是当仰角 $e_{\mathrm{t}}=0°$、发射垂直偏振波时的散射函数 β_{vv},表示不同方向上可接收散射波的垂直偏振强度.在 X-Y 平面上,各个方向散射相同,且为最大值.相对主站天线指向的方位角散射系数分布如图 3c_1,即在 Y-Z 平面上,前向和后向散射最大,靠近 Z 轴方向渐小,表 1 给出沿主站天线指向,方位角顺时针旋转时 β_{vv} 列表数据,清晰地反映散射系数随角度的变化;在 X-Z 平面上的散射特性与 Y-Z 平面上

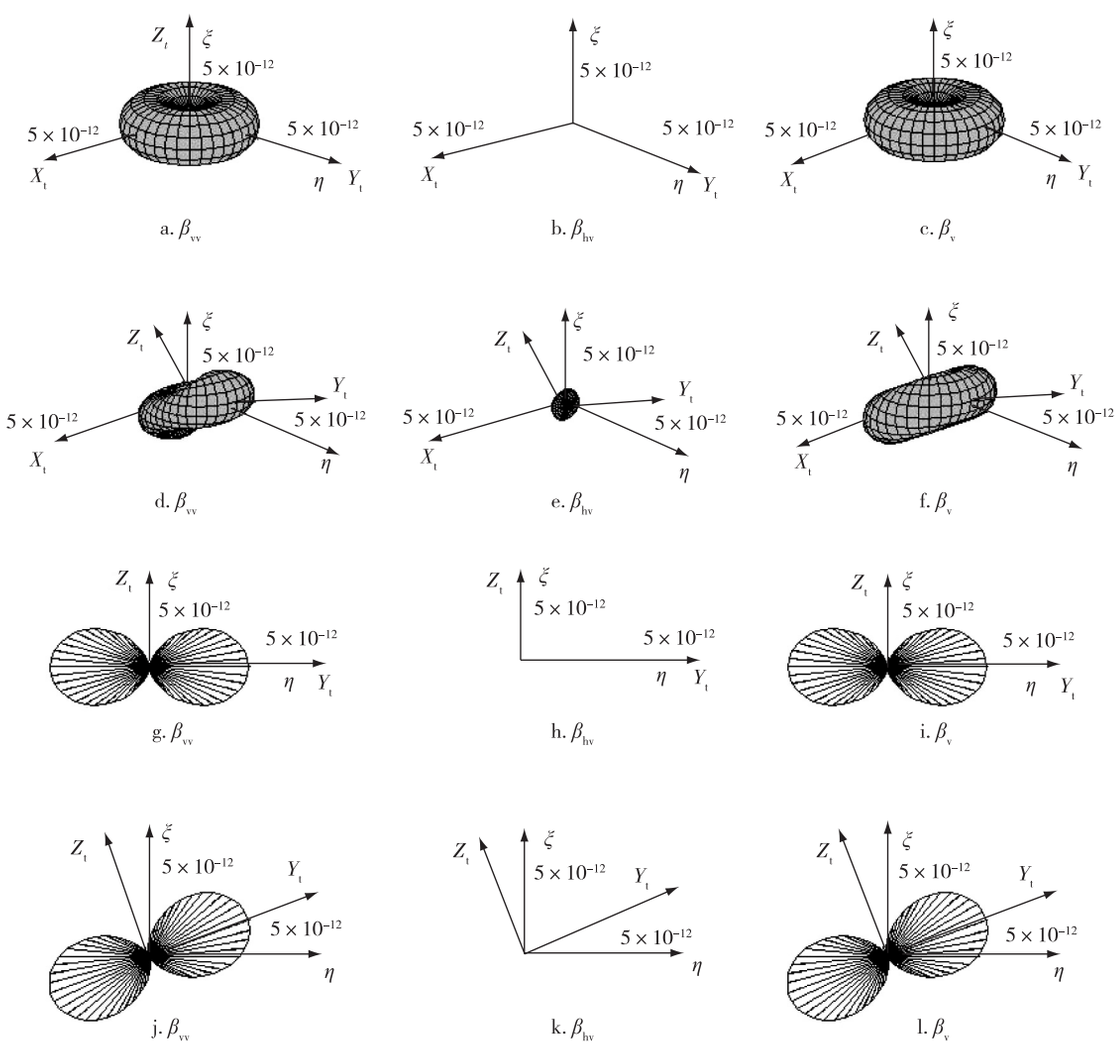


图 3　入射波为垂直偏振波情况下的散射函数 β_{vv}、β_{hv} 和 β_{v}(a—c:发射天线仰角 $e_{\mathrm{t}}=0°$ 时的三维图;d—f:发射天线仰角 $e_{\mathrm{t}}=20°$ 时的三维图;g—i:$e_{\mathrm{t}}=0°$ 时,主站指向垂直剖面;j—l:$e_{\mathrm{t}}=20°$ 时,主站指向垂直剖面)

Fig. 3　Scattering functions β_{vv}, β_{hv} and β_{v} for v-polarized waves incident at elevation of $e_{\mathrm{t}}=0°$ (upper panel) and 20° (lower panel) and corresponding vertical profile along the main station point

表 1　主站指向垂直剖面散射函数 $\boldsymbol{\beta_{jk}(j,k=h,v)}$

Table 1　Scattering functions $\beta_{jk}(j,k=h,v)$ at vertical profile along the main station point　　$\times 10^{12}$

方位角/(°)	水平入射波			垂直入射液					
	e_t 任意			$e_t=0°$			$e_t=20°$		
	β_{hh}	β_{hv}	β_h	β_{vv}	β_{hv}	β_v	β_{vv}	β_{hv}	β_v
0	10.16	0	10.16	7.85	0	7.85	8.11	0	8.11
10	10.16	0	10.16	7.61	0	7.61	7.74	0	7.74
20	10.16	0	10.16	6.93	0	6.93	6.93	0	6.93
30	10.16	0	10.16	5.89	0	5.89	5.78	0	5.78
40	10.16	0	10.16	4.61	0	4.61	4.42	0	4.42
50	10.16	0	10.16	3.24	0	3.24	3.01	0	3.01
60	10.16	0	10.16	1.96	0	1.96	1.73	0	1.73
70	10.16	0	10.16	0.92	0	0.92	0.73	0	0.73
80	10.16	0	10.16	0.24	0	0.24	0.14	0	0.14
90	10.16	0	10.16	0	0	0	0.02	0	0.02
100	10.16	0	10.16	0.24	0	0.24	0.38	0	0.38
110	10.16	0	10.16	0.92	0	0.92	1.19	0	1.19
120	10.16	0	10.16	1.96	0	1.96	2.34	0	2.34
130	10.16	0	10.16	3.24	0	3.24	3.71	0	3.71
140	10.16	0	10.16	4.61	0	4.61	5.11	0	5.11
150	10.16	0	10.16	5.89	0	5.89	6.39	0	6.39
160	10.16	0	10.16	6.93	0	6.93	7.39	0	7.39
170	10.16	0	10.16	7.61	0	7.61	7.98	0	7.98
180	10.16	0	10.16	7.85	0	7.85	8.11	0	8.11
190	10.16	0	10.16	7.61	0	7.61	7.74	0	7.74
200	10.16	0	10.16	6.93	0	6.93	6.93	0	6.93
210	10.16	0	10.16	5.89	0	5.89	5.78	0	5.78
220	10.16	0	10.16	4.61	0	4.61	4.42	0	4.42
230	10.16	0	10.16	3.24	0	3.24	3.01	0	3.01
240	10.16	0	10.16	1.96	0	1.96	1.73	0	1.73
250	10.16	0	10.16	0.92	0	0.92	0.73	0	0.73
260	10.16	0	10.16	0.24	0	0.24	0.41	0	0.41
270	10.16	0	10.16	0	0	0	0.02	0	0.01
280	10.16	0	10.16	0.24	0	0.24	0.38	0	0.38
290	10.16	0	10.16	0.92	0	0.92	1.19	0	1.19
300	10.16	0	10.16	1.96	0	1.96	2.34	0	2.34
310	10.16	0	10.16	3.24	0	3.24	3.71	0	3.71
320	10.16	0	10.16	4.61	0	4.61	5.11	0	5.11
330	10.16	0	10.16	5.89	0	5.89	6.39	0	6.39
340	10.16	0	10.16	6.93	0	6.93	7.39	0	7.39
350	10.16	0	10.16	7.61	0	7.61	7.98	0	7.98
360	10.16	0	10.16	7.85	0	7.85	8.11	0	8.11

的散射特性相同.三维空间中的散射函数几何图形以 Z 轴即入射波偏振方向为对称轴,呈轴对称分布.

图 3b 是当仰角 $e_t=0°$,发射垂直偏振波时的散射函数 β_{hv},表示不同方向上可接收散射波的水平偏振波强度.β_{hv} 总是为 0.

图 3c 是当仰角 $e_t=0°$,发射垂直偏振波时的散射函数 β_v,表示不同方向上可接收散射波的垂直与水平偏振波之和的强度.由于 β_{hv} 为 0,β_v 的分布特征

与β_{vv}完全相同,相对主站天线指向的方位角散射系数分布图 3i 同图 3g,β_v 数值表 1 所示,三维空间中的图形以 Z 轴为对称轴,呈轴对称分布.

图 3d 是当仰角 $e_t=20°$时,发射垂直偏振波时的散射函数β_{vv},表示不同方向上可接收散射波的垂直偏振分量强度.散射几何图形较 $e_t=0°$时有明显改变,整体存在反对称关系,散射的最大值位于 Y-Z 平面上如图 3j 所示,由 η 轴与 Y 轴的夹角 e_t 和粒子轴比共同决定.在轴比取 0.65 时,最大值出现在与 η 轴夹角 22.5°和 202.5°的位置,相对主站天线指向的方位角β_{vv}数据如表 1 所示.

图 3e 是当仰角 $e_t=20°$时,发射垂直偏振波时的散射函数β_{hv},表示不同方向上可接收散射波的水平偏振分量强度.在 X-Y 平面上,前向和后向散射为 0,侧向散射中沿 X 轴方向处达到最大值;相对主站天线指向的方位角散射系数分布如图 3k 所示,即在 Y-Z 平面处处为 0,β_{hv}数值如表 1 所示.在 X-Z 平面上,各方向散射相同,且为最大值.三维空间中的散射函数几何图形分布以 X-Y、Y-Z 和 X-Z 平面呈对称分布.

图 3f 是当仰角 $e_t=20°$时,发射垂直偏振波时的散射函数β_v,表示不同方向上可接收散射波的垂直和水平偏振总强度.由于 β_v 的几何图形是图 3d 和 3e 之和,故出现与β_{vv}相同的倾斜特征,此时的散射最大值由 η 轴与 Y 轴的夹角 e_t 和粒子轴比共同决定.在轴比取 0.35 时,在 X-Y 平面上,最大值出现在 X 轴及其反向延长线方向;相对主站天线指向的方位角散射系数分布如图 3l 所示,即在 Y-Z 平面上,最大值出现在与 η 轴夹角 22.5°和 202.5°的位置,β_v 数值如表 1 所示;在 X-Z 平面上,最大值出现在 X 轴及其反向延长线方向.三维空间中的散射函数 β_v 为轴对称图形,对称轴为 Z 轴绕 X 轴逆时针偏转 2.5°位置,与其垂直的对称面即为 X-Y 平面绕 X 轴逆时针偏转 2.5°的平面.

3 结论

通过对双基地雷达散射函数的推导,计算模拟了单个椭球粒子的散射函数,得出在不同入射偏振波时的散射函数空间分布特征.

对于旋转轴向上的单个椭球水滴而言,由于粒子在入射波极化方向上的尺度与发射天线仰角无关,雷达发射仰角的变化对水平偏振波的散射特性无影响,而在入射垂直偏振波情况下散射特性随雷达发射仰角有明显变化,当雷达发射仰角为 0°时,前向和后项的散射最强,当雷达发射仰角不为 0°时,散射最大值并非出现在电磁波发射方向,而与其存在一定的角度,这一角度的大小由粒子尺度和雷达发射仰角共同决定

根据不同偏振波的散射特性来说,水平偏振波更适合高空探测,而垂直偏振波更适合低空探测,在用双基地偏振雷达探测时,利用粒子的散射特性,考虑探测目标物所处位置,选用不同的偏振方式,来取得可靠的探测效果.

参考文献

References

[1] Wurman J,Heckman S,Boccippio D.A bistatic multiple-Doppler radar network[J].J Appl Meteor,1993,32(12):1802-1814

[2] deElia R,Zawadzki I.Optimal layout of a bistatic radar network[J].Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2001,18(7):1184-1194

[3] 莫月琴,刘黎平,徐宝祥,等.双基地多普勒天气雷达探测能力分析[J].气象学报,2005,63(6):994-1005
MO Yueqin,LIU Liping,XU Baoxiang,et al.Detecting capability analysis on a bistatic Doppler radar network[J].Acta Meteorologica Sinica,2005,63(6):994-1005

[4] Pruppacher H R,Beard K V.A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air[J].Quarterly Journal of Royal Meteorological Society,1970,96(408):247-256

[5] Mason B J.云物理学[M].2 版.中国科学院大气物理研究所译.北京:科学出版社,1979:343-345
Mason B J.The physics of clouds[M].2nd Ed.Translated by Institute of Atmospheric Physics,Chinese Academy of Sciences.Beijing:Science Press,1979:343-345

[6] Macklin W C.Heat transfer from hailstones[J].Quarterly Journal of Royal Meteorological Society,1963,89(381):360-369

[7] Barber P,Yeh C.Scattering of electromagnetic waves by arbitrarily shaped dielectric bodies[J].Applied Optics,1975,14(12):2864-2872

[8] Atlas D,Kerker M,Hitschfeld W.Scattering and attenuation by non-spherical atmospheric paritcles[J].Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics,1953,3(2):108-119

[9] Vandehulst H C.Light scattering by small particles[M].New York:Dover Publications,1957:470-490

[10] Asano S,Yamamoto G.Light scattering by a spheroidal particle[J].Applied Optics,1975,14(1):29-49

[11] Asano S.Light scattering properties of spheroidal particles[J].Applied Optics,1979,18(5):712-723

[12] Asano S,Sato M.Light scattering by randomly oriented spheroidal particles[J].Applied Optics,1980,19(6):962-974

[13] 张培昌,王宝瑞,嵇驿民.椭球状降水粒子群微波散射

特性的理论计算[J].南京气象学院学报,1990,13(2):158-166
ZHANG Peichang,WANG Baorui,JI Yimin.Theoretical calculation of the microwave properties of spheroidal precipitous particle group[J].Journal of Nanjing Institute of Meteorology,1990,13(2):158-166

[14] Aydin K,Seliga T A,Bringi V N.Differential radar scattering properties of model hail and mixed-phase hydrometeors[J].Radio Science,1984,19(1):58-66

[15] 刘黎平,徐宝祥.不同相态的模式雹块对5.6 cm 雷达波散射及衰减特性的研究[J].高原气象,1991,10(1):26-33
LIU Liping,XU Baoxiang.A study of scattering and attenuati properties of model hail with different phase at 5.6cm wavelength[J].Plateau Meteorology,1991,10(1):26-33

[16] Atlas D,Wexler R.Backscatter by oblate ice spheroids[J].Journal of the Atmospheric Sciences,1963,20(1):48-61

[17] Allan L E,McCormick G C.Measurements of the backscatter matrix of dielectric bodies[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1980,28(2):166-169

[18] 王庆安,刘黎平,巢增明,等.扁椭球形雨滴和冰粒后向散射实验与理论研究[J].大气科学,1996,20(6):735-744
WANG Qing'an,LIU Liping,CHAO Zengming,et al.An experimental and theoretical study of electromagnetic backscattering from the axially-symmetric oblate water and ice ellipsoids[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1996,20(6):735-744

[19] 许小永,王振会,王庆安,等.利用实验资料检验扁椭球形雨滴和冰粒后向散射DDA算法[J].高原气象,2002,21(1):31-36
XU Xiaoyong,WANG Zhenhui,WANG Qing'an,et al.Assessment of DDA for computing the backscattering by oblate spheroidal particles with experimental data[J].Plateau Meteorology,2002,21(1):31-36

[20] 许小永,王振会,王庆安,等.球锥扁椭球冰粒后向散射实验与DDA计算研究[J].南京气象学院学报,2002,25(3):101-107
XU Xiaoyong,WANG Zhenhui,WANG Qing'an,et al.Lab observation and DDA computation on the backscattering features of sphere-cone-oblate ice particles[J].Journal of Nanjing Institute of Meteorology,2002,25(3):101-107

[21] Howard J,Gerogiokas M.A statistical raindrop canting angle model[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1982,30(1):141-147

[22] Bringi V N,Chandrasekar V.Polarimetric doppler weather radar:Principles and applications[M].Cambridge:Cambridge University Press,2001:176-178

[23] 杨通晓,王振会,张培昌,等.椭球雨滴群旋转轴取向对双线偏振多普勒雷达参量影响的计算分析[J].高原气象,2009,28(5):997-1005
YANG Tongxiao,WANG Zhenhui,ZHANG Peichang,et al.Effects of axial orientations of rotating spheroidal raindrops on polarimetric measurements of dual-polarization radar[J].Plateau Meteorology,2009,28(5):997-1005

[24] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2001:78
ZHANG Peichang,DU Bingyu,DAI Tiepi.Radar meteorology[M].Beijing:China Meteorological Press,2001:78

Study on scattering features of a small rotating spheroidal raindrop for a bistatic polarization radar detecting system

YANG Tongxiao[1,2] WANG Zhenhui [2,3] WANG Huiying[2] ZHANG Peichang[3] HU Fangchao[3]

1 Shanghai Institute of Meteorological Science,Shanghai 200030

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education,
Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

3 School of Atmospheric Physics,Nanjing University of Information Science & Technology 210044

Abstract In this paper,based on the theory of electromagnetic scattering,the expressions for scattering features of a small spheroidal particle incident by polarized waves from a bistatic polarization radar system have been established and the physical concept and distribution patterns at different incident angles have been discussed.The results provide a theoretical basis for inference of spheroidal raindrop-based bistatic polarization radar detecting equations, as well as the study on the impact of spheroidal raindrop on the detection capability of bistatic polarization radar, and even the data processing and analysis of bistatic polarization radar detecting system.

Key words bistatic radar;dual linear polarization radar;small rotating spheroidal raindrop;scattering features