

双基地多普勒雷达探测小椭球粒子群的 雷达气象方程

杨通晓¹, 刘春云²

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044; 2. 乌鲁木齐市气象局, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:以椭球粒子的电磁波散射理论(Gans 理论)为基础, 考虑粒子群旋转轴一致铅直取向情况下, 深入研究散射体对雷达波的侧向散射特性, 推导出发射水平偏振波与垂直偏振波时的双基地雷达气象方程, 并重新定义相应的雷达反射率因子、侧向反射率-后向反射率之比及差分反射率因子等雷达探测参数的表示式, 为进一步研究和应用双基地多普勒天气雷达提供理论依据。

关键词:双基地雷达; 雷达气象方程; 雷达探测参数

中图分类号: TN958

文献标识码: B

文章编号: 1002-0799(2009)05-0007-04

Meteorological Equations for Bistatic Doppler Radar Detected Rotating Spheroid Particles

YANG Tong-xiao¹, LIU Chun-yun²

(1. Atmosphere-physics College, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Urumuqi Meteorological Bureau, Urumqi 830002, China)

Abstract: Based on the theory of electromagnetic scattering for small rotating spheroid particles (Gans theory), considering the case of coincidence vertical orientations of particles rotating axes, we investigated deeply on the lateral scattering characteristics of objectives to radar wave and inferred the radar meteorological equations of radar-emitted horizontal and vertical polarized wave. Also it was redefined that the related radar reflectivity factor, bistatic-to-backscattering reflectivity ratios and differential reflectivity. The results provide a theoretical base for further research and application of bistatic Doppler weather radar.

Key words: Bistatic radar; radar meteorological equation; radar measurements

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, 在科学研究与业务使用上都有广泛的用途。目前国外对此系统作了大量研究, 1993 年 NCAR 研制了第一部较为实用的双基地天气雷达网^[1], 并进行了外场试

验。De Elia 等利用这个系统作了几年的研究, 于 2000 年对他所获得的成果及前面几十年所有的双(多)基地天气雷达系统研究成果作了概括性的总结。日本也在进行双基地天气雷达的应用研究^[2]。因此为了进一步研究和应用双基地多普勒天气雷达, 就有必要对散射体对雷达波的侧向散射特性作仔细的研究。张培昌等研究了小旋转椭球粒子群的微波散射和衰减特性, 推导了仅发射水平偏振波时小旋

收稿日期: 2009-01-15

作者简介: 杨通晓(1983-), 女, 硕士研究生, 从事天气雷达研究工作。

E-mail: yangxiaoxiao1105@hotmail.com

转椭球雨滴群的雷达气象方程^[3]。莫月琴等^[4]推导出了双基地雷达气象方程,但只适用于球形粒子群。因而如何建立适用于双基地的雷达气象方程,具有理论意义和应用价值。

本文以 Gans 理论^[5]为基础,推导出适用于小旋转椭球粒子群的双基地雷达气象方程,Howard 和 Gerogiokas 建立的雨滴倾角统计模型^[6]指出,在近地面以上降水粒子所产生的较大倾斜角为 0.6° ,这里假设降水粒子旋转轴作一致铅直取向。

1 双基地雷达气象方程基本理论

在双基地雷达系统中(图1),目标粒子散射坐标系为 $O-XYZ$ 。主动雷达坐标为 $O_t-X_tY_tZ_t$, Y_t 为入射电磁波传播方向, X_t 为水平电磁波矢量振动方向, Z_t 为垂直电磁波矢量振动方向, α_t, e_t 分别表示主动雷达相对于目标粒子方位角和仰角, R_t 表示主动雷达目标粒子的距离。被动雷达坐标为 $O_r-X_rY_rZ_r$, 简单起见,假设两雷达在同一水平面上, α_r, e_r 分别表示被动雷达相对于目标粒子方位角和仰角, R_r 表示被动雷达目标粒子的距离。

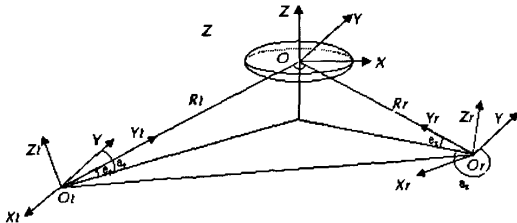


图1 旋转椭球粒子散射坐标示意图

由主动雷达发射的电磁波经目标粒子散射后由被动雷达接受的电磁波可描述为:

$$[E^s] = \frac{k_0^2}{R} e^{-jkR} [A_2][g][A_1][E^i] \quad (1)$$

其中, E^i, E^s 分别为入射、散射电场。

$[A_1]$ 为从主动雷达坐标系 $O_t-X_tY_tZ_t$ 到目标粒子坐标系 $O-XYZ$ 的坐标转换矩阵,表示为:

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos e_1 \sin\alpha_1 & -\sin e_1 \sin\alpha_1 \\ -\sin\alpha_1 & \cos e_1 \cos\alpha_1 & -\sin e_1 \cos\alpha_1 \\ 0 & \sin e_1 & \cos e_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[A_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_2 & -\sin\alpha_2 & 0 \\ \cos e_2 \sin\alpha_2 & \cos e_2 \cos\alpha_2 & \sin e_2 \\ -\sin e_2 \sin\alpha_2 & -\sin e_2 \cos\alpha_2 & \cos e_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$[A_2]$ 等式右侧右半部分为从目标粒子坐标系 $O-XYZ$ 到被动雷达坐标系 $O_r-X_rY_rZ_r$ 的坐标转换矩阵。左半部分矩阵是用于取出被动雷达能接受到

的分量,即水平和垂直分量。

在雷达入射波作用下,扁旋转椭球粒子在 X 、 Y 、 Z 三个轴方向上因受到极化形成感生振荡电偶极矩。 $g_{x,y,z}$ 是粒子在对应轴方向上的极化系数,极化系数矩阵表示为:

$$[g] = \begin{bmatrix} g_x & 0 & 0 \\ 0 & g_y & 0 \\ 0 & 0 & g_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$g_x = g_y = \frac{abc}{3} \frac{\epsilon - 1}{1 + (\epsilon - 1)n(a)}$$

$$g_z = \frac{abc}{3} \frac{\epsilon - 1}{1 + (\epsilon - 1)n(c)}$$

分别是旋转椭球粒子在旋转轴方向及相等轴方向上的极化系数。

将式(2)~(4)代入(1)得被动雷达接收到的水平和垂直散射电场强度:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{hh}^s \\ E_{vv}^s \end{bmatrix} &= \frac{e^{-jkR}}{R} \begin{bmatrix} k_0^2 g_x (\cos\alpha_1 \cos\alpha_2 + \sin\alpha_1 \sin\alpha_2) E_{hh}^i \\ k_0^2 [g_x \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 (\sin\alpha_1 \sin\alpha_2 + \cos\alpha_1 \cos\alpha_2) + g_y \cos e_1 \cos e_2] E_{vv}^i \end{bmatrix} \\ &= \frac{e^{-jkR}}{R} \begin{bmatrix} S_{hh} E_{hh}^i \\ S_{vv} E_{vv}^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 E_{hh}^i, E_{vv}^i 分别为水平发射水平接收和垂直发射垂直接收的散射电场强度。 S_{hh}, S_{vv} 为相对应的后向散射的幅度。

2 发射水平偏振波时双基地雷达气象方程

由雷达截面 σ 的定义可知:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{S^s}{S^i} = 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \quad (6)$$

由式(5)(6)可知发射水平波和接收水平波时的雷达截面 σ_{hh}

$$\sigma_{hh} = 4\pi |S_{hh}|^2 = 4\pi k_0^4 |g_x (\cos\alpha_1 \cos\alpha_2 + \sin\alpha_1 \sin\alpha_2)|^2 \quad (7)$$

双基地雷达有效照射体积^[7]为

$$V = \frac{V_m}{\cos^2(\beta/2)} \quad (8)$$

V_m 为单基地雷达有效照射体积, β 为双基地角,它是以目标粒子为顶点,主动雷达、被动雷达与目标粒子连线之间的夹角。

假设主站发射的雷达波束具有高斯型的方向图,类似于单基地雷达方程,接收机子站雷达方程为^[8]:

$$P_{hh} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} V \int_0^\infty \sigma_{hh} N(De) dDe \quad (9)$$

主动雷达的发射功率为 P_t , 发射天线的增益为 G_t , 接收天线的增益为 G_r , 发射基地至目标的距离为 R_t , 目标至接收基地的距离为 R_r , 式中 P_{hh} 为双基地被动雷达接收的回波功率, De 是与椭球同体积的球

体直径,称作椭球的等效直径, $N(De)$ 是雨滴数随 De 的分布。

将式(7)代入得:

$$P_{hh} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \theta \phi h}{1024 \ln(2) \pi^2 R_r^2 \cos^2(\beta/2)} \int_0^\infty \sigma_{hh} N(De) dDe \quad (10)$$

为了符合常用雷达气象方程的一致性引入雷达常数 $C^{[9]}$,并将式(8)代入式(10)得接收的水平功率为:

$$\begin{aligned} P_{hh} &= \frac{C}{R_r^2} \frac{G_r}{G_t} \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2+2}{m^2-1} \right|^2 \frac{1}{\cos^2(\beta/2)} \int_0^\infty \sigma_{hh} N(De) dDe \\ &= \frac{C}{R_r^2} \frac{G_r}{G_t} \left| \frac{m^2+2}{m^2-1} \right|^2 \frac{64}{\cos^2(\beta/2)} \cdot \\ &\quad \int_0^\infty |g_x(\cos a_1 \cos a_2 + \sin a_1 \sin a_2)|^2 N(De) dDe \end{aligned} \quad (11)$$

据式(11)可以定义新的雷达反射率因子 Z_{hh} 为:

$$\begin{aligned} Z_{hh} &= \frac{G_r}{G_t} \left| \frac{m^2+2}{m^2-1} \right|^2 \frac{64}{\cos^2(\beta/2)} \cdot \\ &\quad \int_0^\infty |g_x(\cos a_1 \cos a_2 + \sin a_1 \sin a_2)|^2 N(De) dDe \end{aligned} \quad (12)$$

3 发射垂直偏振波时双基地雷达气象方程

据雷达截面 σ 的定义由式(5),(6)可知发射垂直偏振波和接收垂直偏正波时的雷达截面 σ_w 表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_w &= 4\pi |S_w|^2 \\ &= 4\pi k_0^4 |g_x[\sin e_1 \sin e_2 (\sin a_1 \sin a_2 + \cos a_1 \cos a_2)] \\ &\quad + g_z \cos e_1 \cos e_2|^2 \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13)代入(9)得接收的垂直功率为:

$$P_w = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \theta \phi h}{1024 \ln(2) \pi^2 R_r^2 \cos^2(\beta/2)} \int_0^\infty \sigma_w N(De) dDe \quad (14)$$

同样为了符合常用雷达气象方程的一致性引入雷达常数 C 得:

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{C}{R_r^2} \frac{G_r}{G_t} \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2+2}{m^2-1} \right|^2 \frac{1}{\cos^2(\beta/2)} \int_0^\infty \sigma_w N(De) dDe \\ &= \frac{C}{R_r^2} \frac{G_r}{G_t} \left| \frac{m^2+2}{m^2-1} \right|^2 \frac{64}{\cos^2(\beta/2)} \end{aligned}$$

$$\int_0^\infty |g_x[\sin e_1 \sin e_2 (\sin a_1 \sin a_2 + \cos a_1 \cos a_2)] + g_z \cos e_1 \cos e_2|^2 N(De) dDe \quad (15)$$

据(15)式可以定义新的雷达反射率因子 Z_w 为:

$$Z_w = \frac{G_r}{G_t} \left| \frac{m^2+2}{m^2-1} \right|^2 \frac{64}{\cos^2(\beta/2)} \cdot$$

$$\int_0^\infty |g_x[\sin e_1 \sin e_2 (\sin a_1 \sin a_2 + \cos a_1 \cos a_2)] + g_z \cos e_1 \cos e_2|^2 N(De) dDe \quad (16)$$

4 双基地雷达探测参数

双/多基接收站系统可以获得比单部双线偏振雷达更多的参数,例如水平偏振和垂直偏振情况下的侧向反射率-后向反射率之比 BBR_h 和 BBR_v 等,它不仅能反演风场、估测降水、识别冰雹等,还能获得有关降水粒子状态、相态、尺度等更多信息^[10]。

当发射水平偏振波时椭球粒子群的侧向反射率-后向反射率之 BBR_h 表示为:

$$\begin{aligned} BBR_h &= \frac{\langle \sigma_{hh} \rangle}{\langle \sigma_w(180^\circ) \rangle} \\ &= \frac{\int_0^\infty |g_x(\cos a_1 \cos a_2 + \sin a_1 \sin a_2)|^2 N(De) dDe}{\int_0^\infty |g_x(\cos^2 a_1 + \sin^2 a_1)|^2 N(De) dDe} \end{aligned} \quad (17)$$

当发射垂直偏振波时椭球粒子群的侧向反射率-后向反射率之 BBR_h 表示为:

$$\begin{aligned} BBR_v &= \frac{\langle \sigma_w \rangle}{\langle \sigma_w(180^\circ) \rangle} \\ &= \frac{\int_0^\infty |g_x[\sin e_1 \sin e_2 (\sin a_1 \sin a_2 + \cos a_1 \cos a_2)] + g_z \cos e_1 \cos e_2|^2 N(De) dDe}{\int_0^\infty |g_x[\sin^2 e_1 (\sin^2 a_1 + \cos^2 a_1)] + g_z \cos^2 e_1|^2 N(De) dDe} \end{aligned} \quad (18)$$

上式 $\sigma_{hh} < 180^\circ$ 、 $\sigma_w < 180^\circ$ 分别表示水平发射水平接收的雷达后向散射截面和垂直发射垂直接收的雷达后向散射截面。

椭球粒子群在双基地雷达探测时的差分反射率 Z_{DR} 可表示为:

$$Z_{DR} = \frac{\langle \sigma_{hh} \rangle}{\langle \sigma_w \rangle}$$

$$= \frac{\int_0^{\pi} |g_r (\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2)|^2 N(De) dDe}{\int_0^{\pi} |g_r [\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 + \cos \alpha_1 \cos \alpha_2)] + g_r \cos \alpha_1 \cos \alpha_2|^2 N(De) dDe} \quad (19)$$

5 结论

以旋转椭球粒子散射的 Gans 理论为基础,在粒子群旋转轴一致铅直取向情况下,推导出了发射水平偏振波与垂直偏振波时的双基地雷达气象方程,并重新定义了相应的雷达反射率因子、侧向反射率-后向反射率之比及差分反射率因子的表示式,为进一步研究和应用双基地多普勒天气雷达,正确处理双基地多普勒天气雷达观测资料,提高双基地天气雷达对降水观察能力等提供理论依据。

参考文献:

- [1] Wurman J, Heckman S, Boccippio D. A bistatic multiple-Doppler radar network[J]. J Appl Meteor, 1993(32):1802-1814.
- [2] Wurman J, Randall M, Burghart C. Bistatic radar networks [C]. 30th International Conference on Radar Meteorology.

2001:130-133.

- [3] 张培昌,刘传才.旋转椭球雨滴群的雷达气象方程及测雨订正[J].南京气象学报,1998,21(3):307-312.
- [4] 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.
- [5] 朗道 Л.Д., E.M. 栗弗席兹著,周奇译.连续煤质电动力学上册[M].北京:人民教育出版社,1963.
- [6] Howard J, Gerogiakas M. A statistical raindrop canting angle model [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982,30:141-147.
- [7] Satoh S, Wurman J. Accuracy of wind fields observed by a bistatic Doppler radar network [J]. J Atmos Oceanic Tech, 2003,20:1077-1091.
- [8] Shinsuke Satoh, Joshua Wurman. Accuracy of wind fields observed by a bistatic Doppler radar network[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003(20):1077-1091.
- [9] 张培昌,戴铁丕,杜秉玉.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2001:88.
- [10] Aydin K, Park S H, Walsh T M. Bistatic dual-polarization scattering from rain and hail at S-and C-band frequencies [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1998(15):1110-1121.

科技信息

铁路大风监测预警预报系统 自动气象站建成并验收

由乌鲁木齐铁路局科学技术所和新疆防雷减灾中心、新疆气象科技服务中心合作的“新疆铁路大风监测短时预警预报系统”中的多要素自动气象站项目,于2009年9月12日完成并顺利通过验收,现已投入业务使用。这些自动气象站的建立,使铁路大风监测预警预报系统的监测能力得到明显提高。

通过本项目的实施,铁路运行指挥部门可以更加合理地制定停轮和放行的风速标准,提前采取有效措施,进一步提高风季运输的安全保障和运输能力,推动大风天气行车指挥水平的提高,带来显著的经济和社会效益。

(潘 红)