

文章编号: 2095-4980(2019)02-0189-06

太赫兹云雷达的外场试验结果及反演算法

丁霞^{1,2}, 何静^{1,2}, 王平^{1,2}, 王海涛^{1,2}

(1.上海无线电设备研究所, 上海 200090; 2.上海目标识别与环境感知工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 利用太赫兹云雷达的外场观测数据, 分析了观测时间段内的雷达回波特征; 基于最优估计理论, 研究太赫兹云雷达的液态云微物理参数反演算法, 反演得到液态云的微物理参数, 包括有效粒子半径、液态水含量、粒子数浓度和分布宽度参数。外场观测数据用例属于低云, 云层结构较稳定, 云类为层云或层积云, 云底和云顶回波较弱。反演结果与相关文献中的云微物理参数统计值基本相符, 在回波强度较大的区域有效粒子半径较大, 液态水含量较高, 云中粒子数浓度呈现随高度增加逐渐减小的趋势。

关键词: 太赫兹云雷达; 最优估计; 反演; 云微物理参数

中图分类号: TN959

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0189

Experimental results and cloud microphysical parameters retrieval of THz-band cloud profiling radar

DING Xia^{1,2}, HE Jing^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, WANG Haitao^{1,2}

(1.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China;

2.Shanghai Engineering Research Center of Target Identification and Environment Perception, Shanghai 200090, China)

Abstract: The characteristics of THz-band cloud profiling radar experimental results are analyzed. Based on the optimal estimation theory, the characteristic of liquid cloud microphysical parameters, including effective radius, liquid water content, number density and distribution width parameter are retrieved. The observed cases are strat or stratocumulus, which belong to low cloud and have stable cloud structure, with relatively weak radar reflectivity at cloud bottom and top. The retrieval results are basically consistent with the statistical values of cloud microphysical parameters in the relevant literature. The effective radius is larger in the region with larger radar reflectivity, and the liquid water content is higher. The number density shows a trend of decreasing with height.

Keywords: THz-band cloud profiling radar; optimal estimation theory; retrieval; cloud microphysical parameters

云是大气环境的重要组成部分,对地球—大气系统的辐射收支平衡和水汽循环有重要调节作用。云粒子大小、云水含量、粒子数浓度等参数是研究云物理特征的重要微物理参量,对气候研究、精细化天气过程分析、人工影响天气等方面具有重要影响^[1-2]。

目前,毫米波云雷达及其反演计算是获取云物理参数的主要方法。云雷达原始观测数据主要是雷达回波强度,根据回波强度可反演得到云的微物理参量。Atlas^[3],Sauvageot^[4],Kropfli 和 Kelly^[5],Fox 和 Illingworth(1997)^[6]等学者结合 35 GHz 云雷达实测数据和飞机穿云实测云滴谱参数,得到雷达反射率与粒子有效半径、液水含量(Liquid Water Content, LWC)之间存在指数关系。国内许多科学家也应用经验公式开展了毫米波云雷达的反演研究^[7-8]。经验反演的优点在于计算简单,但算法适用性和扩展性较差。星载毫米波雷达 CloudSat CPR(Cloud Profile Radar)首次实现全球范围内云物理特征的全天候和全方位观测,满足云物理研究、气象保障的需求^[9-10]。Austin 和 Stephens^[11]基于 Rodgers^[12-13]提出的最优估计理论,开发了一种应用于 CloudSat CPR 的业务化反演算法,适用于全球云微物理参量的反演。该理论已成功用于毫米波频段的云微物理参数反演研究^[12-14],但受观测数据所限,目前少有文献对太赫兹频段的云微物理参数反演开展研究。

收稿日期: 2018-10-24; 修回日期: 2018-12-22

与毫米波雷达相比,太赫兹云雷达的探测频率更高,其波长与微小云粒子更为接近,灵敏度更高,可实现云体三维结构的高精确度测量^[17-19]。上海无线电设备研究所已成功自主研发了一台地基太赫兹云雷达,可实时获取观测点上空的云剖面信息^[20]。文中给出了太赫兹云雷达的观测数据的初步分析,基于最优估计理论反演获取云微物理参数,研究成果对太赫兹云雷达的气象应用开发、云微物理性质与分布特征研究具有一定的参考意义。

1 太赫兹云雷达外场观测数据

2017 年 7 月~11 月,太赫兹云雷达首次在上海(121.33°E,31.16°N)进行外场试验,检验雷达系统的探测能力和性能。根据探测结果研究云的宏微观特性,开展云微物理参数的反演算法研究,并形成产品用于不同云系的微物理结构特征、演变过程、动力和微物理过程的相互作用分析。本次试验采用垂直向上的观测方式进行低云观测,系统最小探测雷达反射率因子为-21 dBZ@1 km,距离分辨力为 20.5 m,时间分辨力为 0.4 s,太赫兹云雷达的原始观测数据为各个距离库上的雷达反射率因子。数据选取的基本条件是保证回波数据的连续性和完整性,选取 2 组观测数据进行反演研究。

1) 第 1 组数据的观测时间为 2017 年 11 月 21 日下午 17:05。图 1 为太赫兹观测的雷达反射率因子剖面。观测时可看到天空云层较均匀。由图 1 可知,云层结构稳定,主要分布在 600~1 000 m 之间,雷达反射率因子的平均值为-13.75 dBZ,云顶和云底回波强度较弱,云内回波较强,可达到-6.70 dBZ 左右。基于云层位置和回波强度,由各类云的统计特征可知^[22],所测云属于低云,云类为层云或层积云。

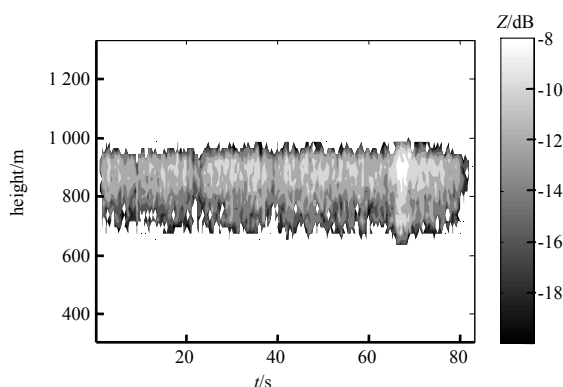


Fig.1 Radar reflectivity of THz cloud profiling radar on 21 November 2017(Case 1)

图 1 2017 年 11 月 21 日的太赫兹云雷达观测数据(第 1 组)

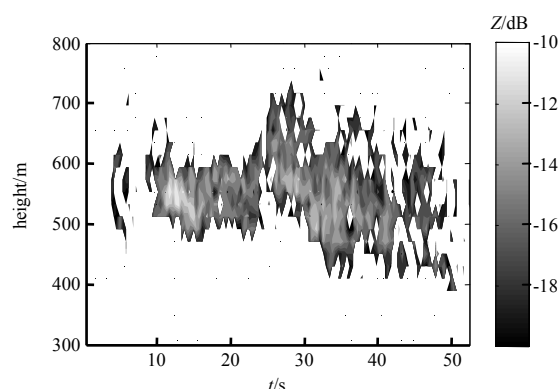


Fig.2 Radar reflectivity of THz cloud profiling radar on 11 October 2017(Case 2)

图 2 2017 年 10 月 11 日的太赫兹云雷达观测数据(第 2 组)

2) 第 2 组数据的观测时间为 2017 年 10 月 11 日下午 17:54。如图 2 所示,观测点上方的天空存在薄厚不一的云层,观测前有弱降雨,云层主要分布在 400~700 m 之间,雷达反射率因子的平均值为-17.98 dBZ,最小回波强度为-19.96 dBZ,云内回波较强。基于云层位置和回波强度,所测云同样属于低云,云类为层云或层积云。

2 基于最优估计理论的液态云反演算法

2.1 前向物理模型

对数正态分布和伽马分布常用于表征液态云的粒子谱分布,两者都可以很好地模拟大气中云粒子的尺度分布情况,本文采用对数正态分布进行云微物理参数的反演研究^[9]。

$$N(r) = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\log} r} \exp \left[\frac{-\ln^2(r/r_g)}{2\sigma_{\log}^2} \right] \quad (1)$$

$$\ln r_g = \overline{\ln r}, \quad \sigma_{\log} = \ln \sigma_g, \quad \sigma_g^2 = (\overline{\ln r} - \ln r_g)^2 \quad (2)$$

式中: N_T 为云粒子数密度; r 为云粒子半径; r_g 为几何平均半径; $\sigma_{\log}$ 为分布宽度参数,为无量纲变量; σ_g 为几何标准差;横线表示求算术平均值。

不考虑降雨的情况下,计算 220 GHz 频段 Mie 散射界面与 Ray 散射截面的比值可知,液云粒子尺度足够小时(直径 $D < 260 \mu\text{m}$),可满足瑞利散射条件,根据云中液态水含量(LWC)、有效半径(r_e)和雷达反射率因子(Z)的定

义, 推导得^[9,12]:

$$LWC = \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_w N(r) dr = \frac{4}{3} \pi N_T \rho_w r_g^3 \exp\left(\frac{9}{2} \sigma_{\log}^2\right) \quad (3)$$

$$r_e = \frac{\int_0^\infty N(r) r^3 dr}{\int_0^\infty N(r) r^2 dr} = r_g \exp\left(\frac{5}{2} \sigma_{\log}^2\right) \quad (4)$$

$$Z = 64 \int_0^\infty N(r) r^6 dr = 64 N_T r_g^6 \exp(18 \sigma_{\log}^2) \quad (5)$$

式中 ρ_w 为水密度。考虑云雷达接收给定距离云粒子散射能量时, 所经路径上的双向衰减, 得到经衰减订正后的雷达反射率因子。根据上述推导计算各距离库的雷达反射率因子, 下标 FM 表示前向物理模式计算值, m 表示复折射指数, 采用 Ray^[21]总结的方法对 m 进行计算。

$$Z_{FM}(z_i) = 10 \log \left\{ 64 N_{Ti} r_{gi}^6 \exp(18 \sigma_{\log i}^2) \exp \left[\frac{-16 \pi^2 N_{Ti}}{\lambda} K \exp\left(\frac{9}{2} \sigma_{\log i}^2\right) \Delta z \sum_{j=i+1}^n r_{gj}^3 \right] \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

$$Z_{FM}(z_n) = 10 \log \left[64 N_{Tn} r_{gn}^6 \exp(18 \sigma_{\log n}^2) \right] \quad (7)$$

$$K = (m^2 - 1) / (m^2 + 2) \quad (8)$$

2.2 最优估计算法描述

测量向量 $\mathbf{y}$ 为雷达反射率因子, 未知的状态向量 $\mathbf{x}$ 包括云粒子数密度、几何平均半径和分布宽度参数, 即待反演参数。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} r_g(z_1) \\ \vdots \\ r_g(z_n) \\ N_T(z_1) \\ \vdots \\ N_T(z_n) \\ \sigma_{\log}(z_1) \\ \vdots \\ \sigma_{\log}(z_n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} Z_{dB}(z_1) \\ \vdots \\ Z_{dB}(z_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $Z_{dB}(z_i)$ 、 $r_g(z_i)$ 、 $N_T(z_i)$ 和 $\sigma_{\log}(z_i)$ 分别为雷达反射率因子、几何平均半径、云粒子数密度和分布宽度参数在距离库 z_i 处的值; n 为廓线内的云距离库数; z_1 和 z_n 分别为雷达廓线中云底和云顶的距离库。

通过前向物理模式 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 建立两者之间的关系, 如式(10)所示, ε_y 表示测量误差。

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \varepsilon_y \quad (10)$$

前向物理模式可表示为:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} Z_{FM}(z_1) \\ \vdots \\ Z_{FM}(z_n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

对于每条观测廓线, 待反演变量(状态向量)为每个距离库内的 3 个云物理参数, 已知测量向量仅有对应距离库内的雷达反射率因子, 需要借助先验数据对反演进行约束, 保证迭代收敛以及反演结果的可靠性。反演算法在代价函数取得最小值时求得最优解, 代价函数表示状态向量和先验数据差分以及已知测量向量和前向模型值差分的加权之和。

$$D = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a) + [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_y^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})] \quad (12)$$

式中: $\mathbf{x}_a$ 为先验数据, $\mathbf{S}_a$ 为协方差矩阵; $\mathbf{S}_y$ 为系统误差协方差矩阵。通过连续最小化代价函数, 可得到状态向量的迭代解。

$$\hat{\mathbf{x}}^{i+1} = (\mathbf{S}_a^{-1} + L^T \mathbf{S}_y^{-1} L)^{-1} \times \left\{ \mathbf{S}_a^{-1} \mathbf{x}_a + L^T \mathbf{S}_y^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}^i) + L^i \hat{\mathbf{x}}^i] \right\} \quad (13)$$

$$\mathbf{L} = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (14)$$

式中：上标 i 和 $i+1$ 为迭代次数； $\mathbf{L}$ 为前向物理模式对状态向量的灵敏度。迭代的收敛条件为：

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{S}_x^{-1} \Delta \hat{\mathbf{x}} < 0.01n \quad (15)$$

$$\mathbf{S}_x = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{L}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{L})^{-1} \quad (16)$$

式中 $\mathbf{S}_x$ 为迭代状态向量的误差协方差矩阵，表示 3 个待反演物理量的方差以及各参量之间的协方差。根据误差传递理论，可以计算出反演的液态云微物理参数的标准差和误差。

3 反演结果分析

在进行液态云粒子反演时，采用文献[23]统计的云微物理参数测量数据集来设置先验数据 $x_a(r_{ga}, N_{Ta}, \sigma_{loga})^{[9]}$ ，其中， r_{ga} 、 N_{Ta} 和 σ_{loga} 为几何平均半径、云粒子数密度和分布宽度的先验值，分别为 $6.55 \mu\text{m}$ 、 74 cm^{-3} 和 0.38 。图 3 为利用太赫兹雷达的第 1 组观测数据反演得到的液态云微物理参数，有效粒子半径的反演结果符合一般情况下晴天积云的云滴尺度 ($3 \sim 33 \mu\text{m}$)，其平均值为 $13.38 \mu\text{m}$ ，在回波强度较大的区域有效粒子半径较大；云中液态水含量在 $0.2 \sim 0.7 \text{ g/m}^3$ 之间，在云层中部雷达回波较强的区域，液态水含量较高；云中粒子数浓度呈现随高度增加逐渐变大的趋势，粒子数浓度平均值为 79.60 cm^{-3} ；分布宽度参数与陆地云层的统计值分布宽度参数值 0.38 ± 0.14 相符。

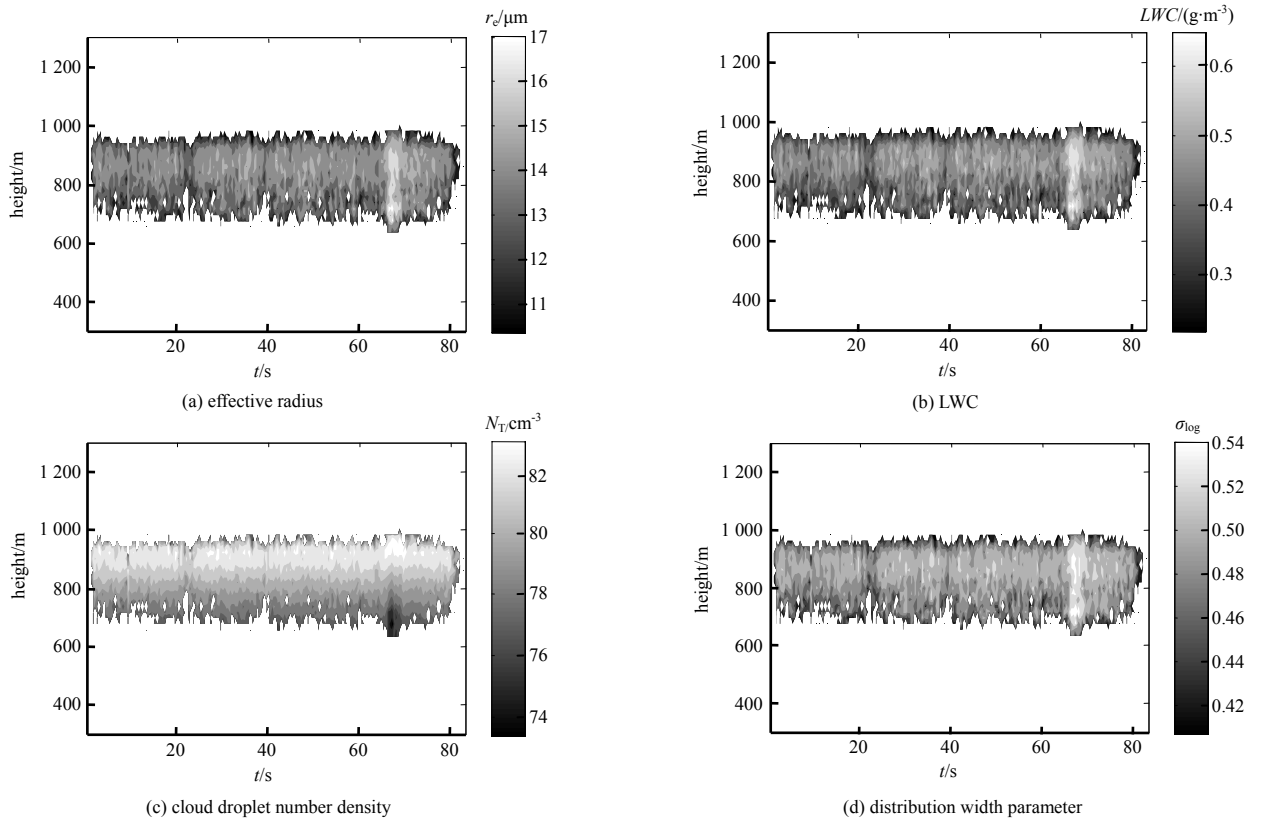


Fig.3 Retrieved cloud microphysical parameters in case 1

图 3 第 1 组数据的反演结果

图 4 为利用太赫兹雷达的第 2 组观测数据得到的反演结果，两者属于同一云类，与图 3 的结果相近。图 4(a) 中有效粒子半径平均值为 $12.34 \mu\text{m}$ ，图 4(b) 中云中液态水含量主要集中在 $0.2 \sim 0.6 \text{ g/m}^3$ 之间，在云层中部雷达回波较强的区域，有效粒子半径较大，液态水含量较高，图 4(c) 中同样可以看到云中粒子数浓度呈现随高度增加而逐渐增加的趋势，图 4(d) 为分布宽度的反演值，其分布范围同样与 Miles^[23] 的统计值基本相符。

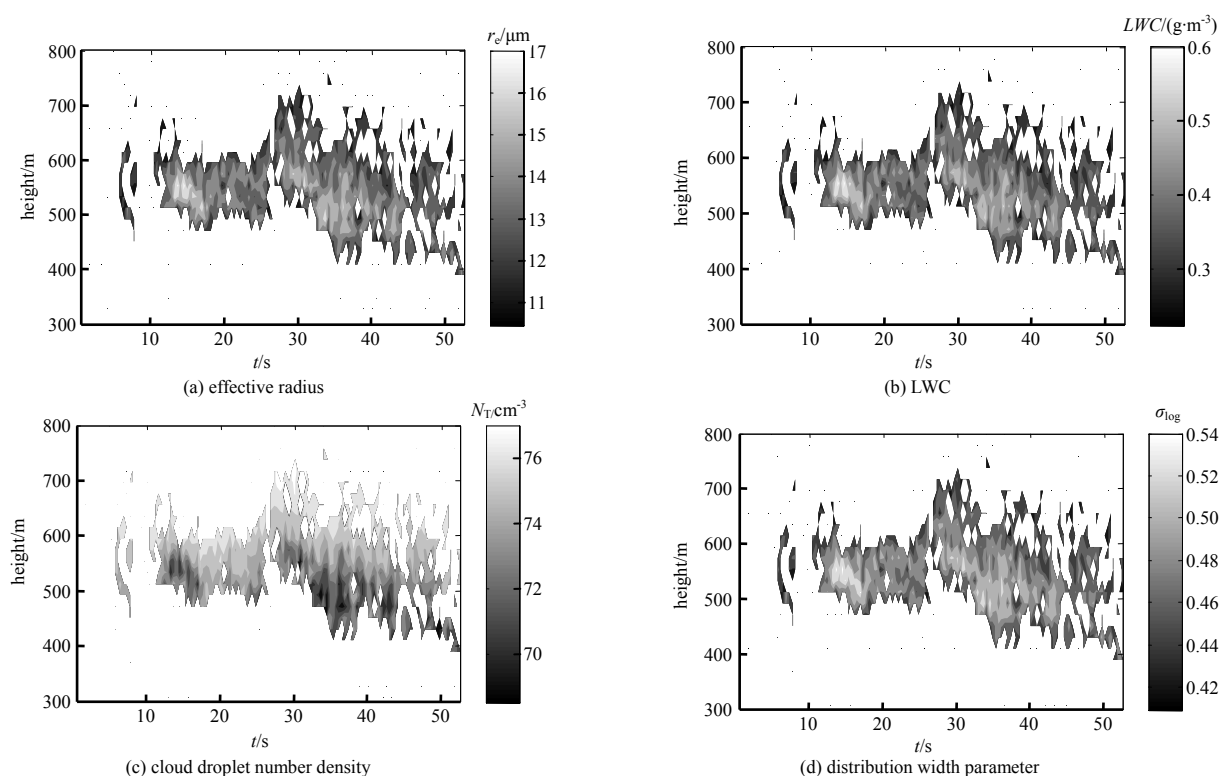


Fig.4 Retrieved cloud microphysical parameters in case 2

图4 第2组数据的反演结果

4 结论

基于最优估计理论,研究太赫兹云雷达的液态云微物理参数反演算法。利用自主研发的太赫兹云雷达的观测数据,分析了观测时间段内的雷达回波特征,反演得到液态云的微物理参数,包括有效粒子半径、液态水含量、粒子数浓度和分布宽度参数,主要得到以下结论:

1) 本次反演用例属于低云,云层结构较稳定,云类为层云或层积云。第1组数据的云层主要分布在600~1 000 m之间,雷达反射率因子的平均值为-13.75 dBZ;第2组数据的云层主要分布在400~700 m之间,雷达反射率因子的平均值为-17.98 dBZ,云内回波较强,云底和云顶回波较弱。

2) 反演结果与相关文献中的云微物理参数统计值基本相符。在回波强度较大的区域有效粒子半径较大,液态水含量较高,云中粒子数浓度呈现随高度增加逐渐增加的趋势。

由于太赫兹云雷达探测研究刚起步,探测数据积累少,后期将逐步进行太赫兹云雷达与毫米波云雷达联合探测、机载太赫兹云雷达探测等试验,反演算法的研究也会同步深入。

参考文献:

- [1] STEPHENS G L, KUMMEROW C D. The remote sensing of clouds and precipitation from space: a review[J]. Journal of the Atmospheric Science, 2007, 64(11): 3742-3765.
- [2] SODEN B J, VECCHI G A. The vertical distribution of cloud feedback in coupled ocean-atmosphere models[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(12): L12704-1-L12704-6.
- [3] ATLAS D. The estimation of cloud parameters by radar[J]. Journal of the Atmospheric Science, 1954, 11(4): 309-317.
- [4] SAUVAGEOT H, OMAR J. Radar reflectivity of cumulus clouds[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1987, 4(2): 264-272.
- [5] KROPFLI R A, KELLY R D. Meteorological research applications of millimeter-wave radar[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1996, 59(1): 105-121.
- [6] FOX N I, ILLINGWORTH A J. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar[J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36(5): 485-492.
- [7] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生, 等. 毫米波测云雷达(HMBQ)的系统定标和探测能力研究[J]. 应用气象学报, 2011, 69(2):

- 352–362. (ZHONG Lingzhi, LIU Liping, GE Runsheng, et al. A study of the calibration of the new generation of millimeter wavelength cloud radar and its detection capability[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 69(2):352–362.)
- [8] 樊雅文, 黄兴友, 李锋. 毫米波雷达测云个例研究[J]. *大气科学学报*, 2013, 36(5):554–559. (FAN Yawen, HUANG Xingyou, LI Feng. A case study on cloud measurement with a 35 GHz millimeter wave cloud radar[J]. *Transactions of Atmospheric Science*, 2013, 36(5):554–559.)
- [9] 张华, 杨冰韵, 彭杰, 等. 东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究[J]. *大气科学*, 2015, 39(2):235–248. (ZHANG Hua, YANG Bingyun, PENG Jie, et al. The characteristics of cloud microphysical properties in East Asia with the CloudSat dataset[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(2):235–248.)
- [10] STEPHENS G L. CloudSat mission: performance and early science after the first year of operation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D00A18):D00A18-1–D00A18-18.
- [11] AUSTIN R T, STEPHENS G L. Retrieval of stratus cloud microphysical parameters using millimeter-wave radar and visible optical depth in preparation for CloudSat: 1. Algorithm formulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D22): 28233–28242.
- [12] RODGERS C D. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation[J]. *Reviews of Geophys and Space Physics*, 1976, 14(4):609–624.
- [13] RODGERS C D. Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1990, 95(D5):5587–5595.
- [14] 韩丁, 严卫, 蔡丹, 等. 基于最优估计理论、联合星载主被动传感器资料的液态云微物理特性反演研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(14):526–542. (HAN Ding, YAN Wei, CAI Dan, et al. Retrieval of liquid cloud microphysical properties from spaceborne active and passive sensor data based on optimal estimation theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14):526–542.)
- [15] DENG M, MACE G G, WANG Z, et al. Tropical composition, cloud and climate coupling experiment validation for cirrus cloud profiling retrieval using CloudSat radar and CALIPSO lidar[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D10):1–18.
- [16] DELANOE J, HOGAN R J. A variational scheme for retrieving ice cloud properties from combined radar, lidar, and infrared radiometer[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D7):1–21.
- [17] JAMES B M, ROBERT E M. A 225 GHz polarimetric radar[J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1990, 38(9):1252–1258.
- [18] BATTAGLIA A, WESTBROOK C D, KNEIFEL S, et al. G-band atmospheric radars new frontiers in cloud physics[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussion*, 2014, 7(1):321–375.
- [19] 边明明, 王世涛, 胡伟东, 等. 星载太赫兹雷达测云散射特性及辐射源分析[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(5): 712–717. (BIAN Mingming, WANG Shitao, HU Weidong, et al. Radiation source and scattering characteristics analysis of spaceborne terahertz cloud radar[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(5):712–717.)
- [20] 王平, 王海涛. 星载太赫兹主动云雷达探讨[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2017, 15(5):733–739. (WANG Ping, WANG Haitao. Discussion of spaceborne terahertz active cloud profiling radar[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(5):733–739.)
- [21] RAY P S. Broadband complex refractive indices of ice and water[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(4):1836–1844.
- [22] WANG Z, SASSEN K. Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(10):1665–1682.
- [23] MILES N L, VERLINDE J, CLOTHIAUX E E. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 57(2):295–311.

作者简介:



丁霞(1985–), 女, 湖北省仙桃市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹云雷达主动探测、云雷达数据处理、云微物理参数反演、中高层大气重力波数值模拟. email: miragedx@sina.com.

王海涛(1978–), 男, 山东省烟台市人, 研究员, 主要研究方向为雷达和通信设备系统仿真、信号处理.

何静(1982–), 男, 陕西省宝鸡市人, 高级工程师, 主要从事雷达系统方案设计、系统仿真与测试方面的研究工作.

王平(1988–), 男, 安徽省界首市人, 工程师, 主要开展太赫兹雷达系统方案设计、系统测试、系统仿真、云雷达信号处理和准光设计方面的研究工作.