

基于滴谱分布的机载雷达波束 匹配情况研究^{*1}

吴琼¹ 商建¹ 仰美霖² 杨虎¹
WU Qiong¹ SHANG Jian¹ YANG Meilin² YANG Hu¹

1. 国家卫星气象中心,北京,100081

2. 北京市气象局大气探测技术保障中心,北京,100089

1. *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2. *Support Center for Atmospheric Observing Technology, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China*

2012-09-14 收稿,2012-12-13 改回.

吴琼,商建,仰美霖,杨虎. 2013. 基于滴谱分布的机载雷达波束匹配情况研究. 气象学报, 71(3): 547-554

Wu Qiong, Shang Jian, Yang Meilin, Yang Hu. 2013. Study of the beams match of airborne radar based on the drop size distribution. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(3): 547-554

Abstract Taking the observed valid rain data in the airborne dual-frequency rain radar filed campaign on 2010 October 11 the drop size parameters is estimated by using the ratio of Ku band rain attenuation coefficient and effective radar reflectivity factor. Based on it, the effective radar reflectivity factor of Ka band is computed simulatively and compared with the effective radar reflectivity factor detected on the airborne Ka band after attenuation correction. As a result, the simulated and observed Ka band radar reflectivity factor profile is almost coincident with each other and the correlation coefficient is above 0.95. What's more, the detected object is the same for the dual-frequency radar and the difference of measured radar reflectivity factor between Ka and Ku is caused by the difference of radar frequency, suggesting a good beams match situation. In addition, the estimated drop size parameters by single frequency relied on the precision of attenuation correction. Fortunately, the rain detected by the airborne radar is weak, and the attenuation correction of Ku band is reasonable and the drop size parameters are reliable. But, it is noticed that the drop size parameters estimation with a high precision still needs the dual-frequency rain retrieval method.

Key words Airborne dual-frequency rain radar, Drop size distribution, Mie scatter

摘要 基于机载双频测雨雷达外场校飞试验中获取的有效降水测量数据,利用 Ku 波段的雨衰系数和等效雷达反射率因子的比值估算了雨滴谱分布参数。在此基础上,通过米散射模拟计算了 Ka 波段在该滴谱分布下的等效雷达反射率因子,并和机载 Ka 波段衰减订正后的等效雷达反射率因子进行了比对。结果表明:两者的廓线基本重合,相关系数超过 0.95,两部雷达探测的目标物一致,测量的雷达反射率因子的差异主要是由雷达频率的不同所引起的后向散射以及衰减的不同所造成的,波束匹配精度较高。此外,单频滴谱参数的估计依赖于单频衰减订正的精度。机载雷达外场试验中探测的都是弱降水,Ku 波段衰减订正不会存在太大的误差,估计的滴谱较为可靠。必须指出的是,精确的参数估计仍然要借助双频雷达的反演方法。

关键词 机载双频降水雷达,滴谱分布,米散射

中图法分类号 P412.25

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201006050)、中国科学院数字地球重点实验室开放基金项目(2011LDE001)、国家自然科学基金项目(41201360)。

作者简介:吴琼,主要从事星载测雨雷达研究。E-mail:zidi_qiong@163.com

1 引言

从 20 世纪 40 年代开始, 雷达就被用于天气观测。经过 70 多年的发展, 现代天气雷达网已经成为气象综合观测系统中的一个重要组成部分, 多普勒效应以及多极化技术不仅能测量径向风和速度谱, 还可以区分水成物粒子的类型, 为天气预报尤其是短期和临近预报以及气象灾害预警提供不可或缺的资料(张培昌等, 2010; 陈洪滨等, 2012)。目前, 中国有超过 200 部新一代天气雷达组成的基本监测网络, 在陆地上形成了较为完整的降水观测系统。但是, 地基雷达探测距离受限, 往往对海洋上的台风降水观测不足。中国是世界上遭受台风降水及其引发的次生灾害较严重的国家(王咏梅等, 2008), 发展星载测雨雷达已经成为提高中国防灾减灾能力的关键手段之一。星载测雨雷达可以测量降水的三维结构, 提高降水反演的精度, 改进台风路径预报的准确性, 它是测量大尺度降水的有效手段和重要的遥感器。目前, 1997 年发射升空的热带测雨卫星(TRMM)上搭载的测雨雷达(PR)(Kummerow, et al, 1998; Kawanishi, et al, 2000; Kozu, et al, 2001)是唯一在轨运行的主动降水探测仪器。为了以更高的精度来观测全球降水, 携带双频雷达(DPR)的全球降水测量(GPM)核心卫星计划于 2014 年发射。近年来, 对测雨雷达获取的降水数据的应用以及瞄准未来双频雷达的双频降水反演算法研究已经成为降水测量领域的热点内容之一(傅云飞等, 2008, 2012; Ighchi, et al, 2010; 刘鹏等, 2010)。中国在星载测雨雷达方面也进行了大量的研究, 做了很多技术上的储备(吴琼等, 2009), 并于 2010 年成功研制出了 Ku 和 Ka 波段雷达的原理样机。为了对雷达的降水探测能力进行检验, 中国国家卫星气象中心联合多家单位于 2010 年 10 月在江苏进行了机载 Ku 和 Ka 波段双频雷达的外场校飞试验(商建等, 2012), 获取了一批有价值的雷达降水测量数据, 为中国开展外定标以及降水反演算法等相关研究提供了重要的基础资料。

双频降水测量相比单频的优点在于可以获取降水的滴谱分布参数信息(DSD)(Mardiana, et al, 2004), 从而提高降水估计的精度, 改善降水测量的

灵敏度和准确度。通过双频反演获取机载雷达测量的降雨率是分析机载测雨雷达探测能力的重要环节。但是, 双频测量的两部雷达之间可能出现波束不匹配, 这会给反演结果带来一定程度的误差。因此, 分析雷达之间的波束匹配情况是进行双频反演的前提。一般情况下, 通过天线方向图可以定量了解两部雷达的匹配角度差, 但就反演而言, 若直接知道匹配角度差所引起的雷达反射率因子的差别, 更易于对反演精度做出准确的评价。在波束匹配较差的情况下, 雷达观测的目标物可能存在明显差异, 得到的雷达反射率因子反映的不是对同一目标物的探测结果, 反之, 在波束匹配较好的情况下, 雷达反射率因子应该只存在由雷达频率的不同所引起的后向散射和衰减的差异, 观测的是同一滴谱。鉴于此, 本文引用机载双频测雨雷达外场校飞试验中的数据首先通过机载 Ku 波段单频的反演结果估算滴谱参数, 然后比较由该滴谱模拟计算得到的 Ka 波段等效雷达反射率因子和机载 Ka 波段衰减订正后的等效雷达反射率因子, 进而分析两部雷达的波束匹配情况。

2 机载单频滴谱分布参数估计

Γ 分布的滴谱参数表示为(Meneghini, et al, 1990)

$$N(D, r) = N_0 D^\mu \exp[-\Lambda(r)D] \quad (1)$$

其中, $\Lambda(r) = (3.67 + \mu)/D_0(r)$ 。未知参数包括系数 N_0 、中体积直径 D_0 以及 μ 。 N_0 和 D_0 会随距离发生改变, 但一般认为 μ 为常数, 不随距离发生变化。通过式(1), 波长为 λ 的雷达在距离为 r 处的等效雷达反射率因子(Z_e)可以表示为滴谱分布参数、后向散射截面(σ_b)以及介电常数(K)的函数

$$Z_e = N_0(r) I_b(D_0(r)) \quad (2)$$

$$I_b(D_0(r)) = C_z(\lambda) \int_D \sigma_b(\lambda, D) D^\mu \exp[-\Lambda(D)D] dD \quad (3)$$

这里, $C_z(\lambda) = 10^6 \lambda^4 / (\pi^5 |K|^2)$, $K = (m^2 - 1)/(m^2 + 2)$, m 是复折射指数。受到降雨衰减后的雷达反射率因子 Z_m 和 Z_e 的关系为

$$Z_m(r) = Z_e(r) \exp[-q \int_0^r k(s) ds] \quad (4)$$

在式(4)中, $q = 0.2 \ln 10$, k 是雨衰系数。类似于式

(2)中的 Z_e, k 可以表示为滴谱分布参数和消光截面 σ_t 的函数

$$k(r) = N_0(r)I_t(D_0(r)) \quad (5)$$

$$I_t(D_0(r)) = C_k \int_D \sigma_t(\lambda, D) D^\mu \exp[-\Lambda(D)D] dD \quad (6)$$

在式(6)中, $C_k = \lg e$ 。由式(2)和(5)可知, k 和 Z_e 的比值中只包含未知参数 D_0

$$g(D_0(r)) = \frac{k(r)}{Z_e(r)} = \frac{I_t(D_0(r))}{I_b(D_0(r))} \quad (7)$$

式(7)表明,当每个距离库的 k 和 Z_e 均为已知量时,能够推导出相应距离库上的 D_0 值。在此基础上,利用式(2)或式(5)就能计算另一未知参数 N_0 ,从而获取完整的滴谱分布参数信息。

由此可见,为了进行机载单频滴谱分布的反演,必须先进行衰减订正,得到等效雷达反射率因子 Z_e 。机载雷达的衰减订正参照降水雷达的算法进行。路径积分衰减(PIA,记为 $A(r)$)由以下4部分组成(Iguchi, et al, 2009)

$$A(r) = A_p(r) + A_{CLW}(r) + A_{WV}(r) + A_{O_2}(r) \quad (8)$$

其中, A_p, A_{CLW}, A_{WV} 和 A_{O_2} 分别代表雨、云液态水、水汽和氧气引起的衰减。在衰减订正过程中,先订正非降雨的衰减,经过非降雨衰减订正后的雷达反射率因子 Z_m 和等效雷达反射率因子 Z_e 的关系如式(4)所示,其中,雨衰系数 k 和 Z_e 满足关系: $k = \alpha Z_e^\beta$ 。将其带入式(4)得到等效雷达反射率因子的解为(Iguchi, et al, 2000)

$$Z_e(r) = \frac{Z_m(r)}{[1 - q\beta \int_0^r \alpha(s) Z_m^\beta(s) ds]^{1/\beta}} \quad (9)$$

在式(9)中, $k-Z_e$ 关系只是一个统计关系,无法准确地代表实际降水过程中的滴谱分布情况。因此,需要对 $k-Z_e$ 关系进行修正,使其与真实降水的滴谱分布相符,从而保证衰减订正的准确性。结合 HB (Hitschfeld-Bordan) 和表面参考技术(SRT)调节后的等效雷达反射率因子表示为

$$Z_e(r) = \frac{Z_m(r)}{[1 - \varepsilon q\beta \int_0^r \alpha(s) Z_m^\beta(s) ds]^{1/\beta}} \quad (10)$$

其中, ε 为调节因子,经过调节后的雨衰系数则表示

为 $k = \varepsilon \alpha Z_e^\beta$ 。

综上所述,由于粒子谱中包含多个变量,因此,依靠机载单频雷达的测量结果无法直接估计滴谱分布参数。然而,对测得的雷达反射率因子进行衰减订正使得对滴谱分布参数的估计成为可能,但反演的滴谱分布参数的精度受到衰减订正精度的制约。

3 机载雷达波束匹配结果分析

机载校飞的两部雷达工作频率分别为 13.6 GHz 与 35.5 GHz,波束宽度为 2.9° ,扫描角度范围是 $\pm 20^\circ$,脉冲宽度为 $1.67 \mu s$,距离分辨率为 250 m,机下点水平分辨率约为 240 m,两部雷达的最小可检测降雨量分别为 0.25 和 0.10 mm/h。本次试验共飞行 11 个有效架次,其中,有两个架次观测到了有效降水,这为验证雷达的各项功能与性能指标、掌握雷达外定标与降水反演算法等研究提供了宝贵的数据。探测有效降水的时间分别为 2010 年 9 月 22 日和 10 月 11 日。鉴于 9 月 22 日只是部分数据有效,因此,本文选择 10 月 11 日的数据来进行机载雷达的波束匹配分析。此次数据共包括 2756 条扫描行,56 个距离库和 15 个角库。图 1 分别给出机载 Ka 和 Ku 波段雷达第 2000—2500 条扫描行沿飞行方向机下点的剖面,地表清晰可见,地表之上能看出较明显的降水信息。地表处的弯曲则是由于飞机姿态和飞行高度的不稳定所引起的。

为了配合机载试验,校飞过程中配备了一些同步观测仪器,主要包括车载 X 波段气象雷达和地基 12 通道微波辐射计(郭杨等,2012)。车载 X 波段气象雷达主要用来进行机地比对,以分析机载雷达的探测能力,而微波辐射计则用来测量一些大气的基本要素,为计算机载雷达的路径积分衰减提供重要信息。本文中,利用微波辐射计探测的气压、温度、相对湿度以及液态水廓线对 Ka 波段非降雨部分的衰减进行了订正。其中,氧气、水汽和液态水对 Ka 波段雷达的双程路径衰减(Matrosov, et al, 2004)分别表示为

$$A_{O_2} = (P_0/1013)^2 (293/T_0)^2 [(5.36 \times 10^{-2}h) - (3.66 \times 10^{-3}h^2) + (9.95 \times 10^{-5}h^3)] \quad (11)$$

$$A_{WV} \approx 0.013 W_{VA} (P_0/1013) (293/T_0)^{1.5} [1 - \exp(-0.42h)] \quad (12)$$

$$A_{CLW} = 1.27W_{LP}(h)[1.0 + (293 - T) \times 0.03] \quad (13)$$

其中, P_0 和 T_0 是地表的气压和温度, h 是距离地表

的高度, W_{VA} 是水汽含量, W_{LP} 是液态水含量的单程路径积分, T 是云顶温度。计算过程中, 假设云顶温度为 0°C , 其他参数则来自于辐射计的测量结果。

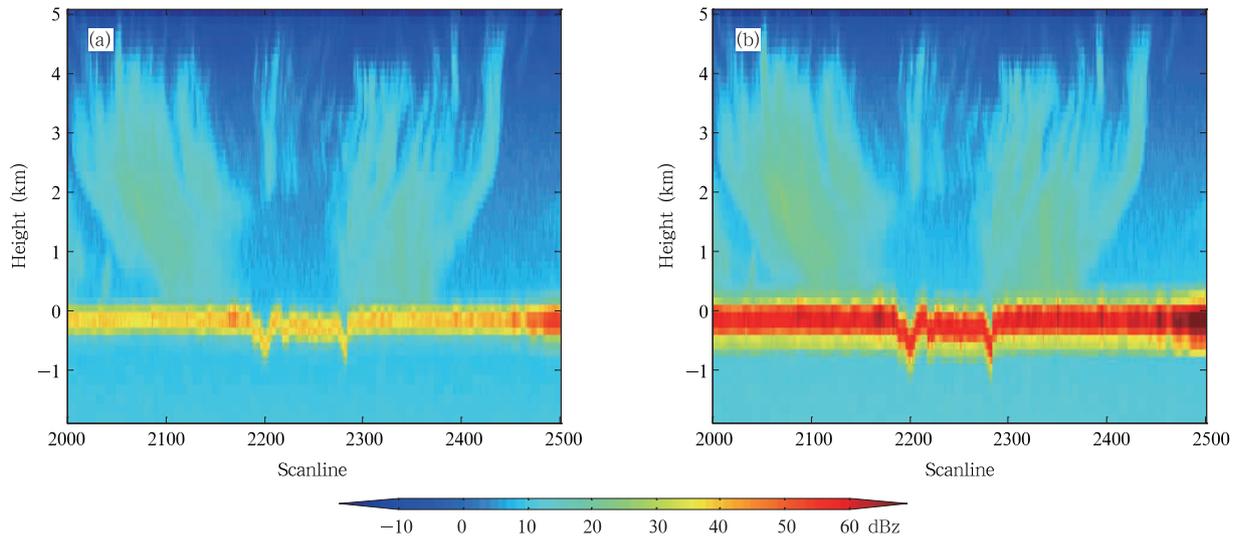


图1 Ka(a)和Ku(b)波段沿飞行方向机下点的剖面

Fig. 1 Vertical cross sections of Ka (a) and Ku (b) bands along the flight direction (nadir)

就雨衰的订正而言, 一般都需要联合 HB 和表面参考技术方法。但是, 仅通过机载雷达的测量数据, 无法建立表面参考技术所需的有雨和无雨情况下地表后向散射截面的参考数据集。不过, 机载雷达探测的都是弱降水, 在这种情况下, 考虑表面参考技术可能比不考虑的误差更大 (Iguchi, et al, 2000)。因此, 本文对机载雷达的雨衰订正仅采用了 HB 方法。因为不再对 $k-Z_e$ 关系进行调节, 该关系的初值就显得十分重要。为此, 吴琼等 (2013) 利用卫星数据模拟器 (SDSU) (Masunaga, et al, 2010) 计算得到的等效雷达反射率因子和雨衰系数拟合了层状云弱降水情况下的 $k-Z_e$ 关系。

从原理上来讲, 利用机载雷达任何一个频率的雨衰系数和等效雷达反射率因子的比值都可以估算滴谱分布参数, 但是因为 Ku 波段的衰减较小, 衰减订正的精度较高, 因此, 文中选用了机载 Ku 波段的数据来估算滴谱分布参数。此外, 考虑到地物杂波的影响以及融化层和固态层滴谱分布的复杂性 (Thurai, et al, 2001), 只对地表 1.125 km 以上的液

态层进行了滴谱分布参数计算。基本步骤是: 对每个距离库, 假设 D_0 值的变化范围为 0.0025—1.0 cm, 步长为 0.005 cm, 根据式 (7), 先利用米散射计算出相应的 $I_r(D_0)/I_b(D_0)$ (假设式 (1) 中的常数 μ 为 3), 并和机载 Ku 波段的 k/Z_e 进行比较, 其中, 雨衰系数 k 采用 $k = \alpha Z_e^2$ 来计算。当两者最为接近时, 认为这个时候的 D_0 值就是最佳估计的 D_0 值。为了提高效率, 节省计算时间, 本文利用 2001—2020 共 20 条扫描行的数据拟合了 k/Z_e 和 D_0 的函数关系, 拟合过程中忽略了温度的影响 (Kubota, et al, 2011)。经过 6 阶拟合后的 k/Z_e 和 D_0 关系曲线由图 2 给出。

在上述基础上, 随机选取机载雷达的一些廓线进行了滴谱分布参数的估计并进行了两个波段雷达的波束匹配情况分析。选取的雷达反射率因子廓线如图 3a—3d 所示, 分别对应第 2000 条扫描行机下点 (第 7 个角库)、第 2010 条扫描行第 1 个角库、第 2015 条扫描行第 10 个角度以及第 2020 条扫描行第 15 个角库。根据 Ku 波段衰减订正后的结果估

计的 D_0 廓线则如图 4 所示。

图 4 中 D_0 廓线的形状和图 3 中 Ku 波段测量的雷达反射率因子廓线的形状相似,主要是因为 D_0 的估算依赖于 Ku 波段的等效雷达反射率因子,而在弱降水情况下,Ku 波段所受的衰减较小,衰减订正后的等效雷达反射率因子和受到衰减的雷达反射率因子差别不大。估算出 D_0 后,进一步利用式(5)计算出另一个未知参数 N_0 ,继而通过米散射模拟计算了在该滴谱分布下 Ka 波段的等效雷达反射率因子。图 5 给出米散射模拟计算的 Ka 波段等效雷达反射率因子廓线和机载 Ka 波段衰减订正后的等效雷达反射率因子廓线。

表 1 给出了图 5 中 4 组廓线数据的一些统计特征,包括最大值、最小值、均值、均方根误差以及相关系数。

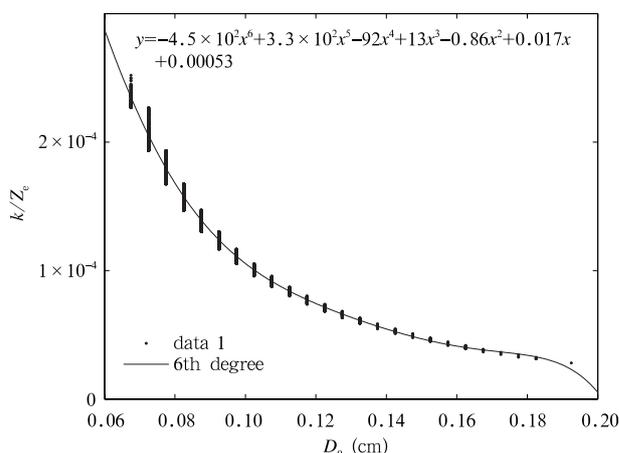


图 2 拟合的 k/Z_e 和 D_0 的函数关系
(y 代表 k/Z_e , x 代表 D_0)

Fig. 2 k/Z_e - D_0 relation derived from the fitting (y is for k/Z_e and x is for D_0)

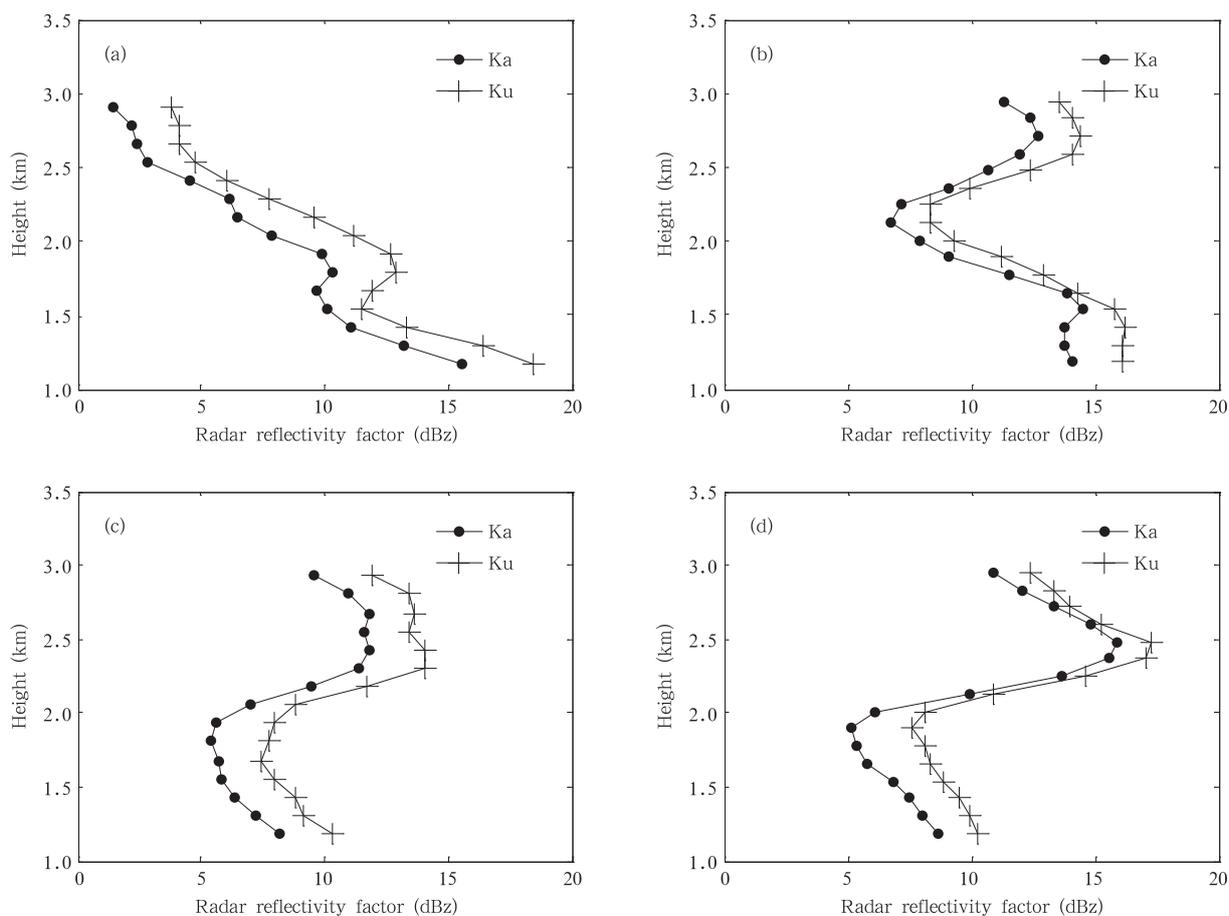
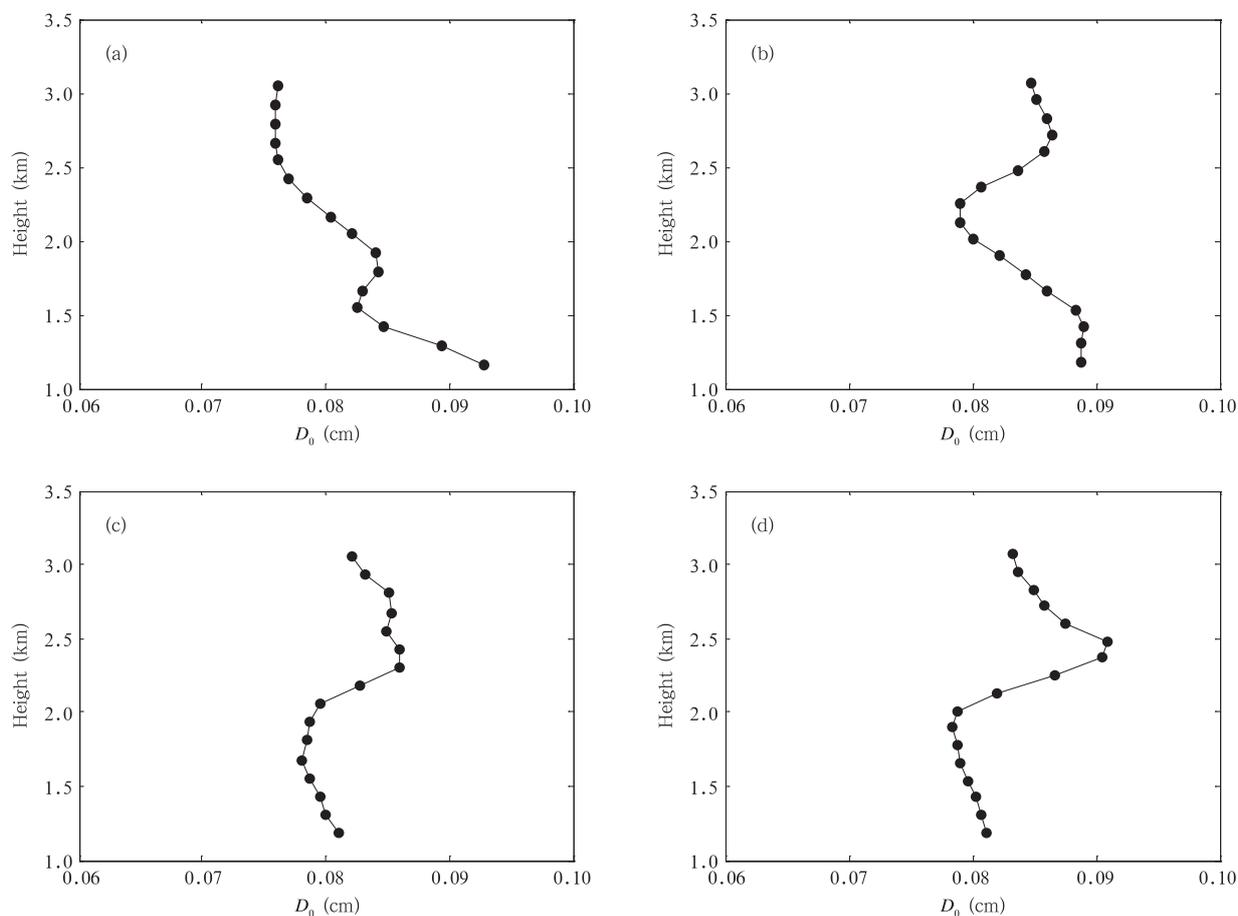


图 3 机载实际观测的 Ka 和 Ku 波段雷达反射率因子廓线

(a. 第 2000 条扫描行, b. 第 2010 条扫描行, c. 第 2015 条扫描行, d. 第 2020 条扫描行)

Fig. 3 Ka and Ku band measured radar reflectivity factor profiles by the airborne radar

(a. 2000th scan line, b. 2010th scan line, c. 2015th scan line, d. 2020th scan line)

图 4 经 Ku 波段衰减订正后的结果估计的中体积直径 D_0 廓线

(a. 第 2000 条扫描行, b. 第 2010 条扫描行, c. 第 2015 条扫描行, d. 第 2020 条扫描行)

Fig. 4 Profiles of the middle volume diameter D_0 as estimated based on the data after attenuation correction

(a. 2000th scan line, b. 2010th scan line, c. 2015th scan line, d. 2020th scan line)

表 1 模拟值和测量值的指标对比

Table 1 The maximum, minimum, average, root mean square difference and correction coefficient comparison between the simulated and measured

	第 2000 条扫描行		第 2010 条扫描行		第 2015 条扫描行		第 2020 条扫描行	
	模拟值	测量值	模拟值	测量值	模拟值	测量值	模拟值	测量值
最大值	19.3032	18.6074	17.0633	17.4157	14.8910	13.8697	18.1005	18.0198
最小值	3.7938	1.9334	9.0415	9.0416	8.1139	7.9545	8.3111	7.7594
均值	12.6755	11.9692	14.4216	14.4057	12.1191	11.4168	13.5486	13.6999
均方根误差	0.9991		0.7711		0.7486		0.5091	
相关系数	0.9907		0.9583		0.9843		0.9892	

通过图 5 和表 1 可以看出,模拟的 Ka 波段雷达反射率因子廓线和经过衰减订正后的机载 Ka 波段雷达反射率因子廓线基本重合,相关系数超过 0.95。廓线之间略微存在一些差异,可能是由几方面原因引起的,主要包括拟合 k/Z_0 和 D_0 关系时没有考虑温度的影响,辐射计和机载雷达观测时在时

空上的不完全匹配所导致的 Ka 波段液态水衰减订正的偏差,以及计算误差等。总的来说,两部雷达观测的目标物一致,图 3 中两个波段雷达反射率因子的差异主要是由雷达频率不同所引起的后向散射和衰减的不同造成的,机载 Ka 和 Ku 波段雷达波束匹配精度较高。需要说明的是,通过机载 Ku 波段的

雨衰系数和等效雷达反射率因子的比值估算的滴谱分布参数依赖于衰减订正的精度,不过机载雷达探

测的降雨较小,衰减订正不会存在很大的误差,估算的滴谱分布参数较为可靠。

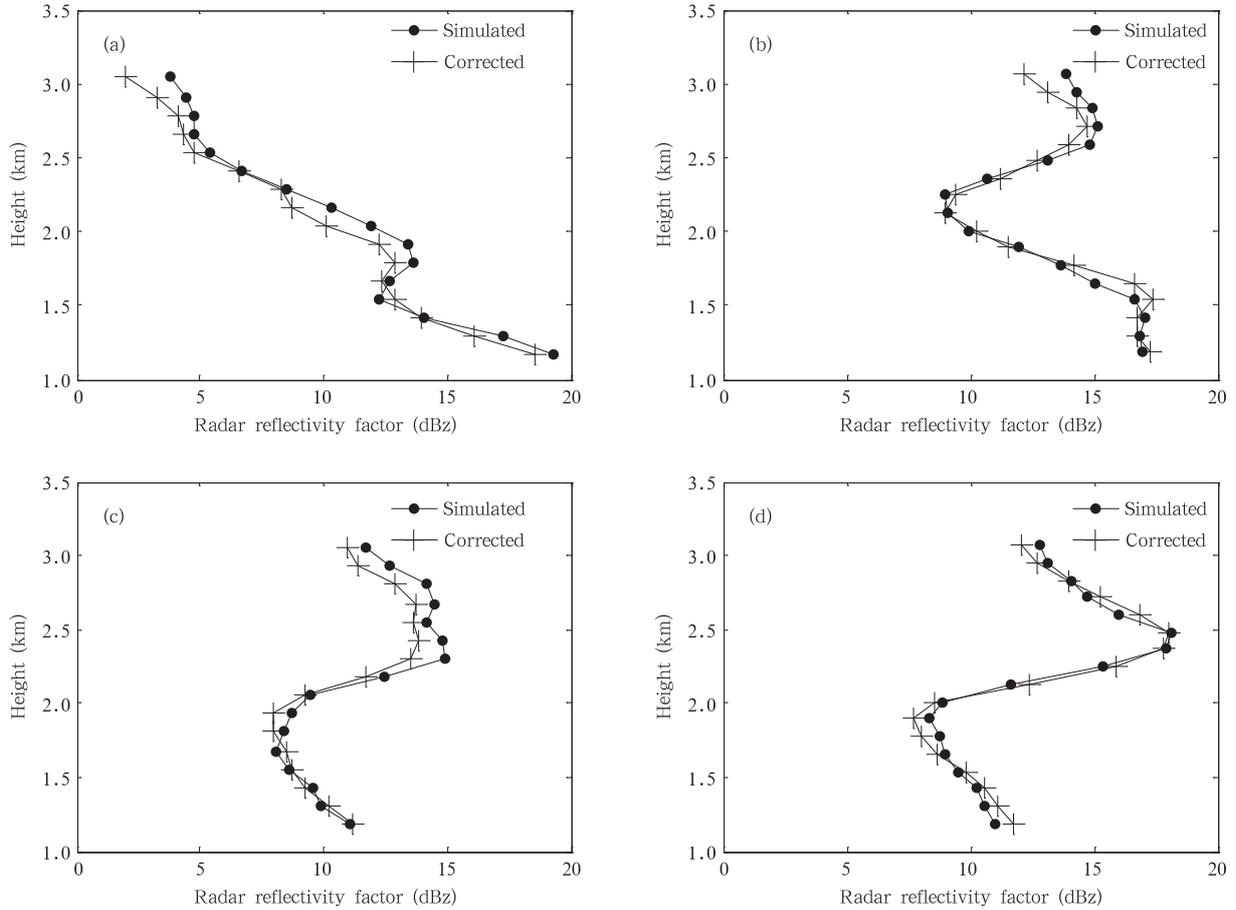


图 5 模拟的 Ka 波段等效雷达反射率因子廓线和机载 Ka 波段衰减订正后的雷达反射率因子廓线 (a. 第 2000 条扫描行, b. 第 2010 条扫描行, c. 第 2015 条扫描行, d. 第 2020 条扫描行)

Fig.5 Simulated Ka band effective radar reflectivity factor profiles and airborne Ka band effective radar reflectivity factor profiles after attenuation correction (a. 2000th scan line, b. 2010th scan line, c. 2015th scan line, d. 2020th scan line)

4 结 论

在云降水的微物理规律研究中,滴谱是一个重要参量。对降水反演而言,获取准确的滴谱信息有利于提高降水估计的精度。在外场校飞试验中,双频测量反演的滴谱分布参数和降雨率可以用来评价机载雷达的降水探测能力,但是双频反演的精度往往受到反演算法、雷达系统误差、波束匹配和定标等因素的影响。本文的主要目的是研究两部机载雷达的波束匹配情况,为后续分析降雨率的反演精度奠定基础。

文中基于机载双频测雨雷达外场校飞试验中获取的有效降水测量数据,利用机载 Ku 波段的雨衰系数和衰减订正后的等效雷达反射率因子只是中体积直径的简单函数的思路估算了滴谱分布参数,进而通过米散射模拟计算了在该滴谱下 Ka 波段的等效雷达反射率因子,并和机载 Ka 波段衰减订正后的等效雷达反射率因子廓线进行对比,同时,统计分析了最大值、最小值、均值、均方根误差以及相关系数。结果表明:两者的反射率因子廓线基本重合,相关系数超过 0.95,两部雷达的探测目标基本一致,雷达反射率因子的差异主要是由雷达频率不同所引

起的后向散射以及衰减的不同所造成的,波束匹配精度较高。从原理上来讲,利用任何一个频率测量的雷达反射率因子都可以估算滴谱参数,但是滴谱参数的精度依赖于衰减订正的精度。由于频率的差异,Ka波段所受的衰减比Ku波段偏大,虽然通过地基仪器的同步测量数据和单频降水反演算法可以对Ka波段的衰减进行一定的订正,但是由于时空不完全同步等因素,会给订正精度带来一定的误差。相比而言,Ku波段在外场试验弱降水情况下的衰减很小,订正的精度也较高,所以,选择Ku波段来估计粒子谱参数更为合理。当然,对于滴谱参数的精确估计还需要借助双频的反演方法。此外,因为机载雷达的波束匹配精度较高,不会对双频反演结果带来较大的误差,后续在分析引起降雨率反演误差的主要因素时可以重点分析雷达系统误差以及反演算法等。

参考文献

- 陈洪滨,李光明,段树等. 2012. 天气雷达网络的进展. 遥感技术与应用, 27(4): 487-495
- 傅云飞,张爱民,刘勇等. 2008. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析. 气象学报, 66(5): 730-746
- 傅云飞,曹爱琴,李天奕等. 2012. 星载测雨雷达探测的夏季亚洲对流与层云降水雨顶高度气候特征. 气象学报, 70(3): 436-451
- 郭杨,商建,杨虎,吴琼. 2012. 星载降水雷达机载校飞试验: 地基多通道微波辐射计估算雷达路径积分衰减. 气象学报, 70(4): 887-891
- 刘鹏,傅云飞,冯沙等. 2010. 中国南方地基雨量计观测与星载测雨雷达探测降水的比较分析. 气象学报, 68(6): 822-835
- 商建,杨虎,尹红刚等. 2012. 中国星载降水测量雷达首次校飞试验: 雷达性能指标分析. 遥感学报, 16(3): 441-447
- 王咏梅,任福民,李维京等. 2008. 中国台风降水的气候特征. 热带气象学报, 24(3): 233-238
- 吴琼,杨虎,卢乃锰. 2009. 星载测雨雷达探测频段选择仿真研究. 气象学报, 69(2): 344-351
- 吴琼,杨虎,商建等. 2013. 星载双频测雨雷达航空校飞试验降水反演分析. 气象学报, 71(1): 159-166
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2001. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 272-481
- Ighchi T, Kozu T, Meneghini R, et al. 2000. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. J Appl Meteor, 39(12): 2038-2052
- Iguchi T, Kozu T, Kwiatkowski J, et al. 2009. Uncertainties in the rain profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. J Meteor Soc Japan, 87: 1-30
- Ighchi T, Seto S, Meneghini R, et al. 2010. GPM/DPR Level-2 Algorithm Theoretical Basis Document. 1-72
- Kawanishi T, Kuriowa H, Kojima M, et al. 2000. TRMM precipitation radar. Adv Space Res, 25(5): 969-972
- Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, et al. 2001. Development of precipitation radar onboard the TRMM satellite. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 39(1): 102-116
- Kubota T, Yoshida N, Shimizu S, et al. 2011. Development of synthetic GPM/DPR data using KaPR sampling experiment of the TRMM/PR//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vancouver, BC: IEEE, 3421-3424
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. J Atmos Ocean Technol, 15(3): 809-817
- Mardiana R, Iguchi T, Takahashi N. 2004. A Dual-frequency rain profiling method without the use of a surface reference technique. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 42(10): 2214-2225
- Masunaga H. 2010. Satellite Data Simulator Unit (SDSU) ver. 2 User's Guide. Nagoya: Nagoya University
- Matrosov S Y, Taneil U, Duane A H. 2004. Evaluation of radar reflectivity-based estimates of water content in stratiform marine clouds. J Appl Meteor Climatol, 43(3): 405-419
- Meneghini R, Kozu T. 1990. Spaceborne Weather Radar. London: Artech House, 132-138
- Thurai M, Kumagai H, Kozu T, et al. 2001. Effects of incorporating a brightband model in a downward-looking radar rainfall retrieval algorithm. J Atmos Ocean Technol, 18(1): 18-25