

星载 Ku, Ka 和 W 三频雷达探测云雨三维结构模拟仿真

王雨¹, 韩涛¹, 郭静超², 江凯², 李锐^{1*}, 邵文程¹, 刘国胜¹

1. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026;

2. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 孔径阵列与空间探测重点实验室, 合肥 230088

* 联系人, E-mail: rli@ustc.edu.cn

2018-04-19 收稿, 2018-05-31 修回, 2018-06-01 接受, 2018-11-09 网络版发表

国家重点研发计划(2017YFC1501402)、国家自然科学基金(41675022, 41375030, 41375148)、中国电子科技集团公司项目(201362401020401)、国家自然科学基金重点项目(91337213)、国家自然科学基金委员会与贝尔蒙特论坛国际合作项目(41661144007)、中国科学院“百人计划”、安徽省“百人计划”和江苏省气候变化协同创新中心项目资助

摘要 对星载 Ku, Ka 和 W 波段微波雷达联合观测中纬度陆地气旋、热带台风和热带洋面气旋个例中云和降水的三维结构进行了模拟仿真. 首先利用 Weather Research and Forecasting(WRF)云模式模拟了个例中各种水凝物的时空分布, 并利用 Aqua 卫星 MODIS 观测结果直接检验了中纬度陆地气旋个例模拟结果; 然后将模拟结果作为输入, 利用星载雷达模拟器计算了相应的雷达回波反射率因子, 并利用 CloudsSat 卫星的 W 波段云雷达 CPR 实测信号对之进行了验证; 随后利用该模拟数据研究了不同粒子雷达回波反射率的特点. 最后假设 Ku, Ka 和 W 波段雷达的灵敏度分别为 15, 5 和 -35 dBZ, 定量研究了这 3 个波段在探测云顶高度、云底高度上的优缺点和误差大小. 模拟结果证实随着频率的增高, 水凝物粒子的雷达回波反射率因子减小. 非降水云水和云冰粒子回波明显弱于降水和降雪粒子, 一般很难被 Ku 和 Ka 波段星载雷达观测到. 研究发现 W 波段雷达对云顶的探测误差一般很小(不到 30 m), 而 Ku, Ka 雷达对云顶的探测误差可达数千米. 对云底探测而言, W 波段雷达可以有效穿透低层液态水含量低的天气系统, 但对强降水天气系统云底探测误差较大; Ka 波段雷达在台风眼壁云墙附近的强降水区也会出现较大探测误差; 而 Ku 波段雷达云底的探测误差都较小.

关键词 星载微波雷达, 雷达模拟器, Ku 波段, Ka 波段, W 波段, 云和降水

云和降水具有极其复杂的三维结构, 概括而言, 以下要素最为重要: 云的垂直分层结构、云的水平和垂直范围及位置、云中降水强度(降水率)、云的浓密程度(云水含量)、云中闪电频次、云中过冷水/固相水凝物含量等. 对云和降水三维结构进行观测, 不仅可以增强我们对云和降水内部微观参数(粒子谱分布和相态等)的深刻理解, 以改进模式中参数化方案^[1]; 也可通过数据同化, 提高数值模式的预报精度. 因此, 欲更好地理解、模拟和预报天气和气候过程, 必须准确、及时地获得云和降水内部的三维结构信息.

以往对云和降水的遥感观测多局限在可见光和

红外波段^[2~6], 但这些波段的波长较短, 无法穿透云层, 因而大多只能获得云的二维信息. 而地基微波雷达则能够实现对云的三维结构探测, 进一步星载云雨雷达的出现更使得这一探测方式从局地拓展到全球.

随着 1997 年 11 月热带降雨测量卫星 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)^[7,8] 的升空, 其所搭载的 Ku 波段(13.9 GHz)测雨雷达 PR(Precipitation Radar)^[9~12] 面世, 人类对降水云三维结构的探测踏入新纪元. 该雷达具有相对较长的波长, 可以有效穿透富含水凝物的热带降水云, 并且采用了跨轨扫描方

引用格式: 王雨, 韩涛, 郭静超, 等. 星载 Ku, Ka, W 三频雷达探测云雨三维结构模拟仿真. 科学通报, 2019, 64: 430–443

Wang Y, Han T, Guo J C, et al. Simulation of the capability of Ku, Ka and W tri-frequency satellite-borne radar measuring the three-dimensional structure of cloud and precipitation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 430–443, doi: 10.1360/N972018-00089

式,可有效探测约240 km的幅宽.但是该雷达的灵敏度较低,约为17 dBZ,故对0.4 mm/h以下的弱降水无法探测,也无法准确探测雨顶上方的云顶高度.因此,PR只能探测云体内部具有较大回波反射率的那一部分水凝物.

2006年4月云卫星CloudSat^[13]所搭载的测云雷达CPR(W波段,94.0 GHz)出现.该雷达采用相对较高的频率,旨在有效探测远小于降水粒子的云粒子^[14].其探测灵敏度为-30 dBZ,有效提高了雷达对云顶高度以及云侧边界的探测能力.但是,W波段雷达受到极强的大气衰减,导致其只能观测强对流云系的上部而无法探测下部;另外大气颗粒物的多次散射也是影响信号准确性的一大干扰因素.

2014年2月全球降水测量卫星GPM^[15-17]所搭载的人类第一台双频测雨雷达DPR出现.作为PR的继承者,它在Ku波段的基础上加入了Ka波段.与W波段相比,Ka波段雷达受大气衰减和多次散射的干扰较小,可以比较完整地探测中等强度降水云,以及通过在轨扫描方式观测到垂直于行进方向的大部分云体,从而有效地提高了云的观测效率,并有利于观测云体的三维结构及判别云体所处的风向,这对避免晴空湍流以及下风向冰雹具有重要意义.与Ku波段相比,Ka波段雷达也更有利于观测较小的降水粒子.所以通过双频联合,将在粒子粒径分布、相态判别等方面获得更好的探测能力.但是Ka波段雷达的敏感性较W波段雷达低,所以它主要观测的仍是降水粒子,这同样会漏测很多非降水云粒子,故不利于对云的三维边界的准确测定.

综上,目前已有的星载天气雷达可分为云雷达(CPR)和雨雷达(PR, DPR)两种,而兼顾云和降水观测的Ka, Ku和W三频组合云雨雷达在国际上还没有出现,技术资料也十分匮乏.同时,由于云和降水具有很强的地域特性,有限的他国研究结果也不能直接应用于我国的实际情况.有鉴于此,开展针对我国特定的气象气候条件下,天基Ka, Ku和W三频云雨雷达探测能力的先导性研究,具有很高的创新意义和实际应用价值.

本研究根据我国地域的特点,选择了3个个例作为研究对象:(1)东北边界和黄渤海地区的一次典型中尺度对流复合体天气系统(以下简称中纬度陆地气旋个例,其对流核心主要在陆地上);(2)中国东海岛链外的一个台风云系(以下简称热带台风个例);(3)

中国南海的一个热带气旋云系(以下简称热带洋面气旋个例).首先利用云模式模拟出云的三维结构,并利用卫星资料对模式模拟的水平和垂直结构分别进行检验;然后利用雷达模拟器仿真计算Ku, Ka和W三频率(13.8, 35.5和94.0 GHz)雷达从空中观测的雷达回波反射率,以产生三维云-降水-多频雷达信号数据库;随后,假设雷达的探测灵敏度在这3个频率上分别是15, 5和-35 dBZ,以此对该数据库进行分析,探讨不同频率雷达对云和降水三维宏观结构的观测能力.

1 数据与方法

1.1 云模式

本研究所使用的WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式系统是20世纪90年代后期由美国国家大气研究中心(National Atmospheric Research Center, NCAR)、美国国家大气海洋管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)、美国空军气象局(Air Force Weather Agency, AFWA)、美国海军研究实验室(Naval Research Laboratory, NRL)、Oklahoma大学和美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)等多家单位联合研发的新一代中尺度天气预报模式,具有可移植性强、易维护、参数化方案多、可数据同化等诸多优点,已被广泛应用于理想化模拟、基于真实背景场的模拟、数据三维同化和四维同化等天气和气候模拟研究中,是目前国际公认的最为先进的中小尺度大气模式.模式中考虑了对流积云参数化、云微物理过程参数化方案、长短波辐射方案、边界层参数化和陆面海洋层参数化等多种物理过程.本次实验采用的WRF模式动力内核版本是3.4.

网格设置上,本次实验采用了四重网格单向嵌套方案,从外到内,4层网格区域水平分辨率分别是54, 18, 6和2 km,垂直分55层,模式顶设置为50 hPa.因暖云降水多分布在6 km高度以下,本次模拟特意增加了大气低层的垂直分辨率.物理方案选择上,本次实验4层网格均采用了RRTM长波辐射^[18]、Dudhia短波辐射方案^[19]和YSU行星边界层方案^[20].模拟区域的最外层采用了Kain-Fritsch积云对流参数化方案^[21].

驱动模式模拟的初始场和边界场资料采用的是NCEP-FNL一天四时次的再分析资料,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,最内层区域模拟的积分步长为3 s,模拟结果逐小时输出.考虑到模式的“旋转加强”(spin-up)效应,模

式达到平衡需要6~10 h, 因此, 本文只对积分时间在13~48 h的模拟结果进行分析.

1.2 雷达模拟器

本研究开发的“中国科学技术大学天基等效雷达模拟器”: USTC Spaceborne Equivalent Radar Simulator(简称USERS)涵盖了目前国际上在轨飞行的云、雨雷达的3个频率, 即Ku(13.8 GHz), Ka(35.5 GHz)和W(94.0 GHz)波段星载雷达的回波信号. 该模拟器的主要设计方案简介如下.

雷达模拟器所采用的雷达基本方程为

$$Pr = C \frac{|K_w|^2}{R_0^2} Z_e \exp \left[-2 \int_0^{R_0} \beta_{\text{ext}}(h) dh \right], \quad (1)$$

其中, Pr 是雷达接收能, C 是雷达参数项, K_w 是与水复折射指数相关的量, R_0 是目标物与雷达之间的距离, $\beta_{\text{ext}}(h)$ 是在距离 h 处的消光系数, Z_e 是未消光等效雷达反射率因子(以下简称雷达反射率), 可表示为

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K_w|^2} \int_0^\infty n(D) \sigma(D) dD, \quad (2)$$

其中 D 是粒子尺寸, λ 是雷达波长(将雷达频率分别设定为13.8, 35.5和94.0 GHz), $\sigma(D)$ 是后向散射截面.

对于星载雷达而言, 其观测值 Z_{e0} 是消光后的雷达反射率因子, 即:

$$Z_{e0} = Z_e \exp \left[-2 \int_0^{R_0} \beta_{\text{ext}}(h) dh \right]. \quad (3)$$

USERS雷达模拟器可用于模拟的水凝物类型包括非降水云中的云水粒子和云冰粒子, 以及降水云中的雨滴、雪花及霰等. 在本文中, 假设所有水凝物(液相和冰相)均为球形; 相关水凝物的微波吸收、散射特性参数采用Mie理论进行计算^[22]. 非球形粒子假定对结果的影响将另文介绍.

1.3 卫星实测资料

本研究利用两种不同的卫星传感器实测资料, 对陆地气旋个例的模式模拟结果进行验证. 其中之一是美国水卫星Aqua所搭载的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectrometer, MODIS)的二级云产品, 包括云顶温度、云水垂直积分含量等云参数反演量, 水平分辨率为5 km^[23].

此外, 还利用美国云卫星CloudSat所搭载的W波段云廓线雷达CPR实测资料, 对雷达模拟器的W波段

模拟仿真结果进行验证. 该资料水平分辨率为5 km, 垂直分辨率为250 m^[24].

由于搭载双频测雨雷达的GPM卫星2014年才发射升空, 故本文并没有对Ku/Ka波段结果进行直接的验证. 但基于W波段的验证结果, 可假定Ku/Ka波段的模拟也是可行的, 本文研究结果也证明了这一假定是合理的.

2 结果

2.1 模式模拟结果与卫星实测结果的比较

2008年4月25日, 当地时间约下午1:05, 在中国东北与朝鲜半岛接壤地区及渤海湾、黄海地区, 有一个结构完整、典型的强对流中尺度气旋云系发生. 美国宇航局的A-Train系列卫星成功观测到该事件. 其中, 从Aqua卫星上搭载的MODIS观测仪可以发现, 该陆地气旋云系以高耸的深厚对流云为主, 云顶温度普遍在-30℃以下, 云水路径可以高达2000 g/m². 该个例曾被成功应用于气溶胶-云相互作用研究^[25]. 因此, 利用WRF云模式对该个例进行了模拟. 图1(a)~(d)显示了该个例卫星观测和云模式模拟的云水路径和云顶温度. 从图1(c), (d)可以看出, WRF非常准确地模拟出了该云系, 其水平位置、尺度、垂直积分云水含量、云顶温度等都与卫星观测非常一致.

利用WRF的模拟结果作为输入, 用USERS雷达模拟器模拟了该系统的雷达回波. 注意到该个例同时也被在轨飞行的CloudSat-CPR云雷达实际观测到一个剖面, 故我们也利用CPR实测结果对回波模拟结果进行检验. 根据CloudSat的飞行轨迹, 从所模拟的云中取出相应的W波段雷达回波垂直剖面, 图1(e), (f)分别给出了该剖面与CPR的实测结果. 值得说明的是, 由于初始条件(驱动大气变化的温压湿风等条件)的误差, 以及云模式本身的误差等, 模式模拟的云不可能100%再现实际的云, 包括其位置、形状和细致的结构; 再加上CloudSat-CPR仅有星下点观测, 这进一步增大了模拟结果与实测结果相比较的难度.

尽管有上述困难, 不难发现, 我们的模拟还是很好地抓住了云系的主要特征: CloudSat在(36.9°N, 122.4°E)和(40.4°N, 121.3°E)附近各观测到一片云体, 前者是深对流云出流部分所形成的冰云(图中Cloud-1云体), 后者是深对流云(图中Cloud-2云体). 模拟结果和CloudSat很接近, 也是在同样的位置观测到两个

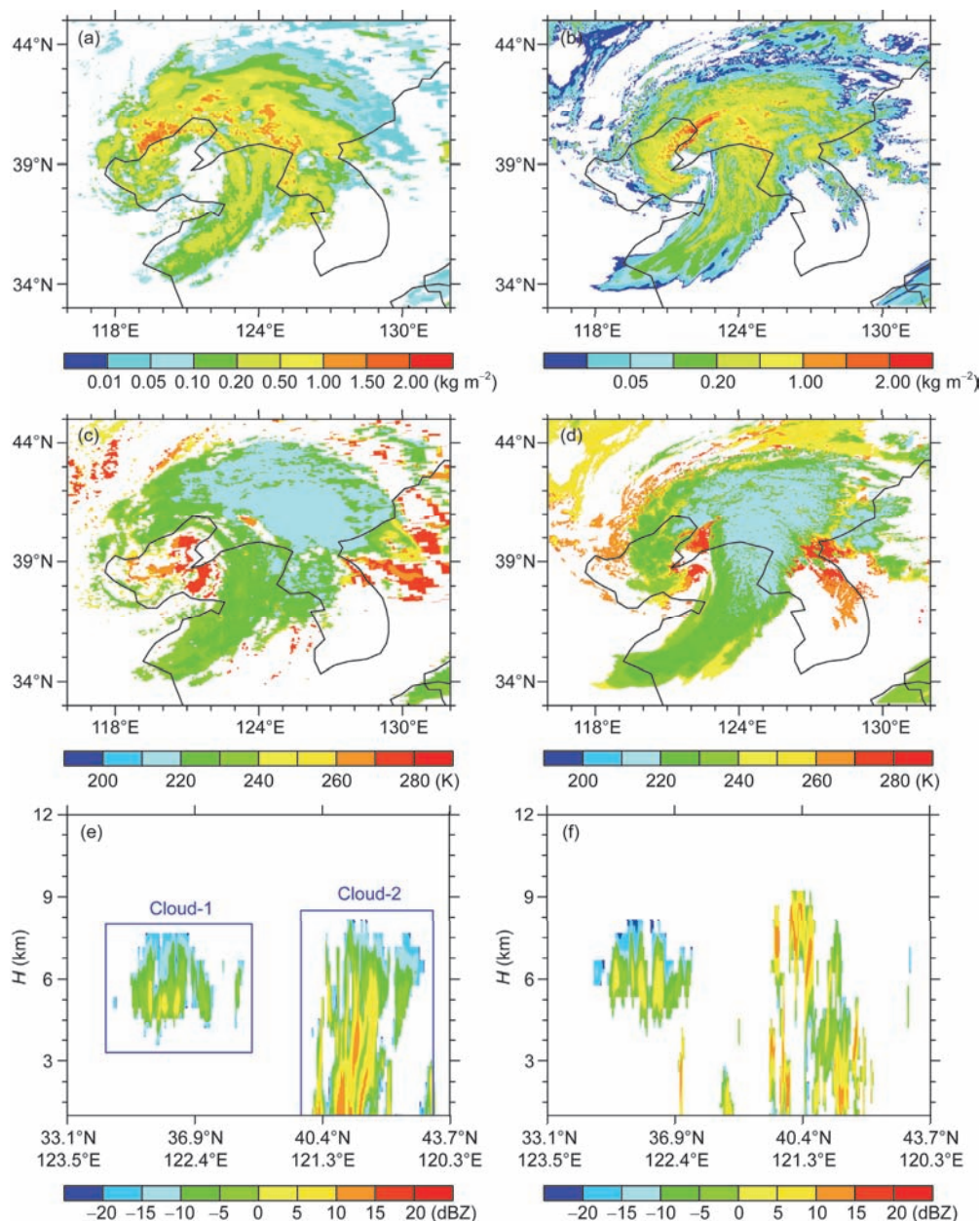


图 1 2008 年 4 月 25 日世界时 5 时 5 分卫星实测与模式模拟结果的对比图. (a) MODIS 观测的云水路径; (b) MODIS 观测的云顶温度; (c) WRF 云模式模拟的云水路径; (d) WRF 云模式模拟的云顶温度的水平分布; (e) CloudSat-CPR 所观测的 Z_e 垂直剖面与 (f) 相应的 USERS 计算结果

Figure 1 At 5:05 AM UTC on April 25, 2008: Horizontal distribution of (a) MODIS observed cloud water path, (b) MODIS observed cloud top temperature, (c) WRF-MOR model simulated cloud water path, (d) WRF-MOR model simulated cloud top temperature and vertical cross-section of Z_e from (e) CloudSat-CPR observations and from (f) USERS calculations

云体, 而且无论是形状, 还是回波的强度都大体近似.

综上所述, 本研究所做的云模拟较为真实、有效; 本研究所做的雷达模拟信号也比较好地再现了该云体在 W 波段的雷达反射率信号, 由此外推, 该模拟器也同样较好地模拟了 Ku, Ka 波段的雷达反射率信息. 因此, 接下来将基于以上模拟数据, 对三频雷达探测

云和降水三维结构的能力进行分析.

2.2 云和降水的水平和垂直结构及其雷达回波特征

(i) 中纬度陆地气旋个例. 根据 WRF 模拟, 在海拔 2 和 6 km 等高面上, 该中纬度陆地气旋个例中不

同类型水凝物的水平分布如图S1和S2所示. 该系统2 km高度层上的水凝物以雪粒子为主, 大部分地区雪粒子浓度可达 1 g/m^3 以上; 其次是降霰, 少数地区的浓度也可达 1 g/m^3 以上; 再次是云水粒子, 云水含量一般在 0.5 g/m^3 以下, 而云冰、雨水含量很少. 在6 km高度层上, 水凝物基本只剩下冰相的云冰、雪和降霰粒子. 总体而言, 这是一个冰相水凝物含量丰富的系统.

利用WRF的模拟结果作为输入, 用USERS所模拟的2, 6 km高度层多频雷达回波如图2所示. 可知, 在同一高度层上, 雷达回波反射率因子随频率的增大而减小; 对Ku和Ka波段而言, 低层的回波强度显著大于高层, 这主要是因为低层的水凝物浓度较高所致. 最强的雷达回波主要由雪和降霰粒子所贡献.

为展示该气旋的内部结构, 对该云系沿 40°N 做了一个垂直剖面如图3(a)~(f)所示, 分别给出总的水凝物粒子、云水、降雨、云冰、降雪和降霰的垂直结构. 注意到这是一个以冰相粒子为主的系统, 在海拔3 km以上, 除 118°E ~ 119°E 区域有少量过冷水存在于高空之外, 几乎全部是冰雪粒子; 而在海拔1.5~3 km之间, 则以冰水混合相共存的状态为主; 在海拔1.5 km以下, 绝大部分冰雪粒子已经融化, 以液态降水粒子为主.

USERS所模拟的不同频率雷达总体回波垂直剖

面如图3(g)~(i)所示. 可以看出, (1) 随着频率的增大, 波长减小, 等效雷达反射率 Z_e 的绝对值减小; (2) 在该剖面中, 高频的W波段雷达信号基本还可以穿透整个云体, 到达近地表, 所能观测的垂直深度与Ku, Ka波段大体相当, 这与我们普遍认为W波段雷达无法穿透深厚云系的观点有所不同. 通过后续对其他个例的对比分析, 发现这主要是由于该个例中液态水含量少、对高频微波信号的削弱较小的特点所致.

进一步地, 为了研究不同水凝物的雷达回波特征, 特别计算了3种频率下, 对应于各种水凝物的等效雷达回波反射率因子, 如图4所示. 首先, 对于液态的云水粒子和降雨粒子, 可注意到降雨粒子的回波远远大于云水粒子, 说明大粒子回波将占绝对的主导地位, 而粒径小的云水粒子回波几乎可以忽略. 对于Ku和Ka波段而言, 液态云粒子所产生的回波强度远远小于相应的雷达设计灵敏度(一般大于0 dBZ), 因此无法观测.

对于冰态粒子而言, 同样, 粒径较小的云冰粒子回波显著小于降雪和降霰粒子, 也不可能被Ku和Ka波段雷达所观测到. 降雪和降霰的回波强度比较接近. 不同频率之间, 降雪粒子所引起的回波强度差异最大、降霰粒子次之, 而对云冰粒子, 不同频率间几乎没有差异, 特别是W波段的云冰粒子回波似乎反而强于另外两个频率. 液态和冰态粒子相比, 云冰粒

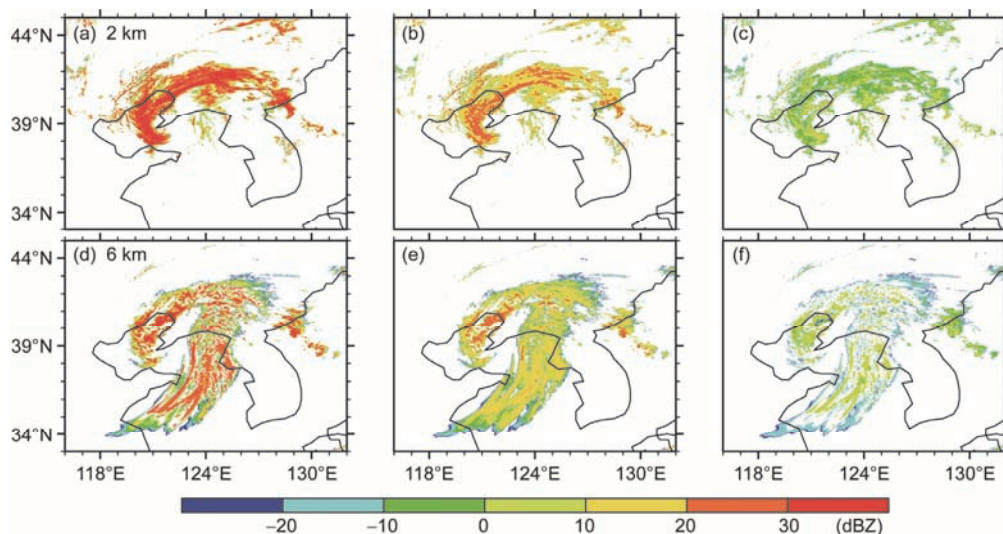


图2 USERS模拟的中纬度陆地气旋个例2 km(a~c)和6 km(d~f)高度层雷达反射率因子. (a, d) Ku波段(13.8 GHz); (b, e) Ka波段(35.5 GHz); (c, f) W波段(94.0 GHz)

Figure 2 Radar reflectivity factor of the mid-latitude cyclone case simulated by USERS at 2 km altitude (a~c) and 6 km altitude (d~f) at: (a, d) Ku-band (13.8 GHz), (b, e) Ka-band (35.5 GHz), (c, f) W-band (94.0 GHz)

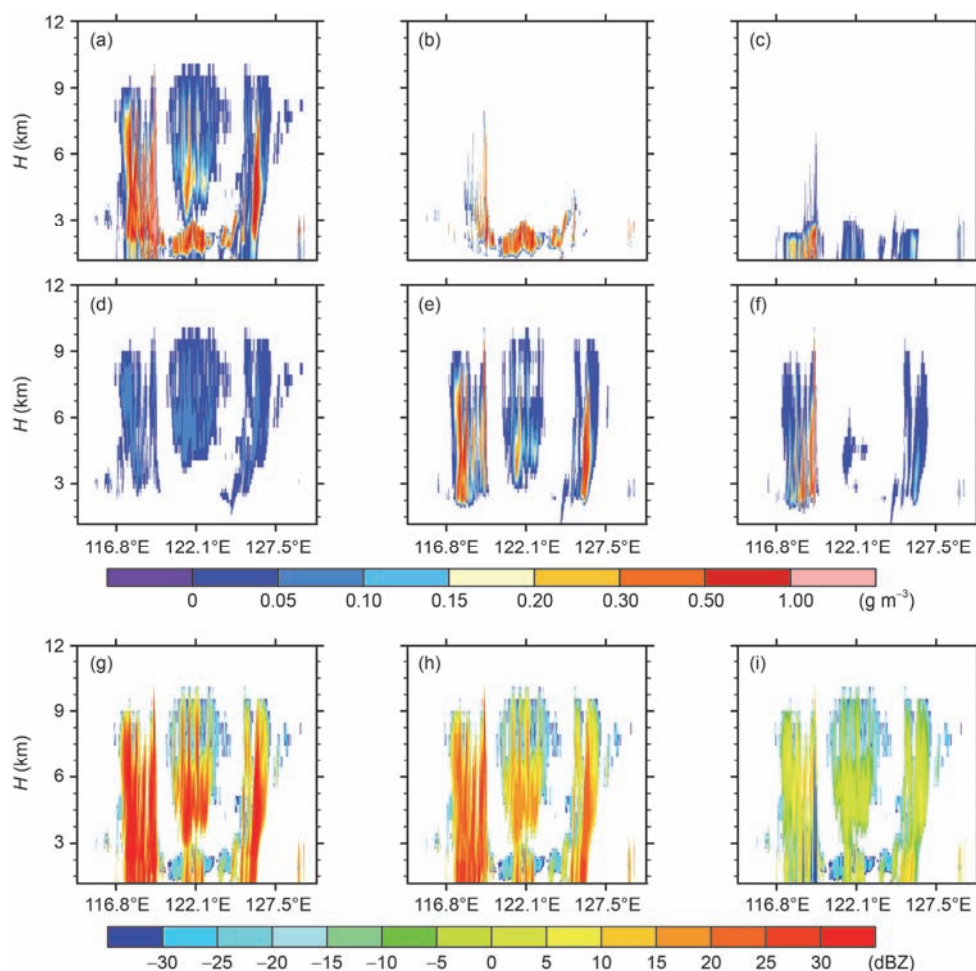


图3 WRF云模式模拟的中纬度陆地气旋各水凝物沿40°N的经度-高度垂直剖面。(a) 总体水凝物; (b) 云水粒子; (c) 雨水粒子; (d) 云冰粒子; (e) 雪粒子; (f) 降雹粒子含量以及USERS模拟的总体水凝物在(g) Ku波段; (h) Ka波段; (i) W波段的天基雷达等效反射率因子 Z_e

Figure 3 Longitude-height cross section of hydrometeor of the mid-latitude cyclone case simulated by WRF-MOR at 40°N for: (a) Total hydrometeors, (b) Cloud water, (c) rain, (d) cloud ice, (e) snow, (f) graupel; and Radar reflectivity factor simulated by USERS at (g) Ku-band, (h) Ka-band, (i) W-band

子的回波强于液态云水粒子;而降雪粒子回波和降雨粒子强度相当。

(ii) 热带台风个例分析. 为比较分析三频雷达在观测不同云系时的表现,挑选了2004年8月25日中国东海区域的一个发展成熟的台风Chaba个例进行研究.在海拔2 km高度层,台风个例中各种水凝物粒子的分布见图S3所示,相应的三频雷达回波模拟结果,如图5所示.与个例1不同,在2 km处,台风个例中完全没有冰相粒子的存在,代之的是非常强的降雨,降雨粒子的浓度在眼壁云墙附近最强,可达 1.5 g/m^3 .由图5(a)~(c)看出,Ku波段雷达回波在眼壁云墙附近可达35 dBZ以上,而Ka波段雷达回波在降雨最强的部分地区,已开始出现信号无法穿透的现象(回波弱

于5 dBZ);在强降雨区,从上而下传输的W波段雷达波基本都无法达到2 km高度层,出现大片 $Z_e < -35$ dBZ的区域,说明对于台风强降水云系,W波段,甚至Ka波段都无法有效观测近地表的降水云信号,但是Ku波段仍可以有效工作。

在海拔6 km高度(图5(d)~(f)),可以看到该台风云系内部存在大量冰相的云冰、降雪和降雹粒子(补充材料).此时,Ku波段和Ka波段基本上能对所有水凝物进行有效的观测,但是,W波段在眼壁云墙附近部分区域、海拔6 km处仍出现信号无法穿透的现象($Z_e < -35$ dBZ).这说明,W波段雷达对强台风云系内部结构的观测能力有很大的局限性。

沿23.6°N的水凝物垂直剖面(补充材料)和雷达回

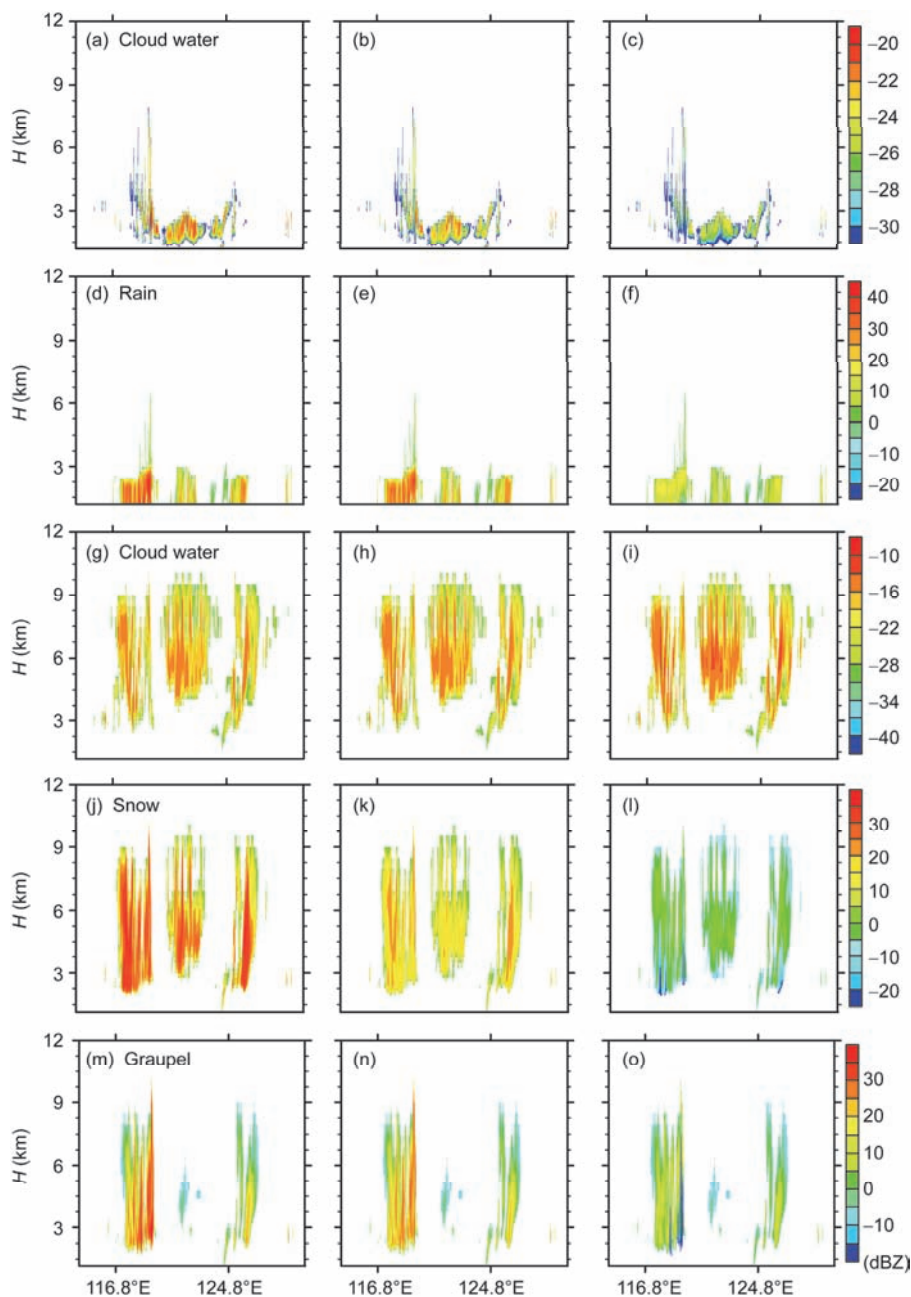


图4 USERS所模拟的三频率(自左至右)Ku波段、Ka波段和W波段地基雷达观测中纬度陆地气旋个例液态云水粒子(a~c)、降雨粒子(d~f)、云冰粒子(g~i)、降雪粒子(j~l)和降霰粒子(m~o)的等效反射率因子 Z_e

Figure 4 Longitude-height cross section of radar reflectivity factor of cloud water (a~c), rain (d~f), cloud ice (g~i), snow (j~l) and graupel (m~o) for the mid-latitude cyclone case simulated by USERS at Ku-band, Ka-band and W-band (left-to-right)

波垂直剖面(图5(g)~(i))显示,台风云系中强烈的上升气流把很多液态过冷水送到了高空,在该云系中,“液态水层”可高达7 km,远远大于中纬度陆地气旋个例.液态水粒子对雷达波的衰减远远大于冰粒子,这是Ka和W雷达信号难以穿透云系的主要原因.故考虑雷达波对云系的穿透能力,不仅仅取决于云系的几何

高度和厚度,还应主要考量其中的液态水层厚度.

(iii) 热带洋面气旋个例分析. 另外,还挑选了2010年6月20日中国南海区域的一个热带气旋进行研究.在海拔2 km高度层,WRF模拟的各种水凝物粒子(补充材料),以及USERS模拟器计算的天基多频雷达(Ku, Ka和W波段)回波模拟结果,如图6(a)~(c)所示.

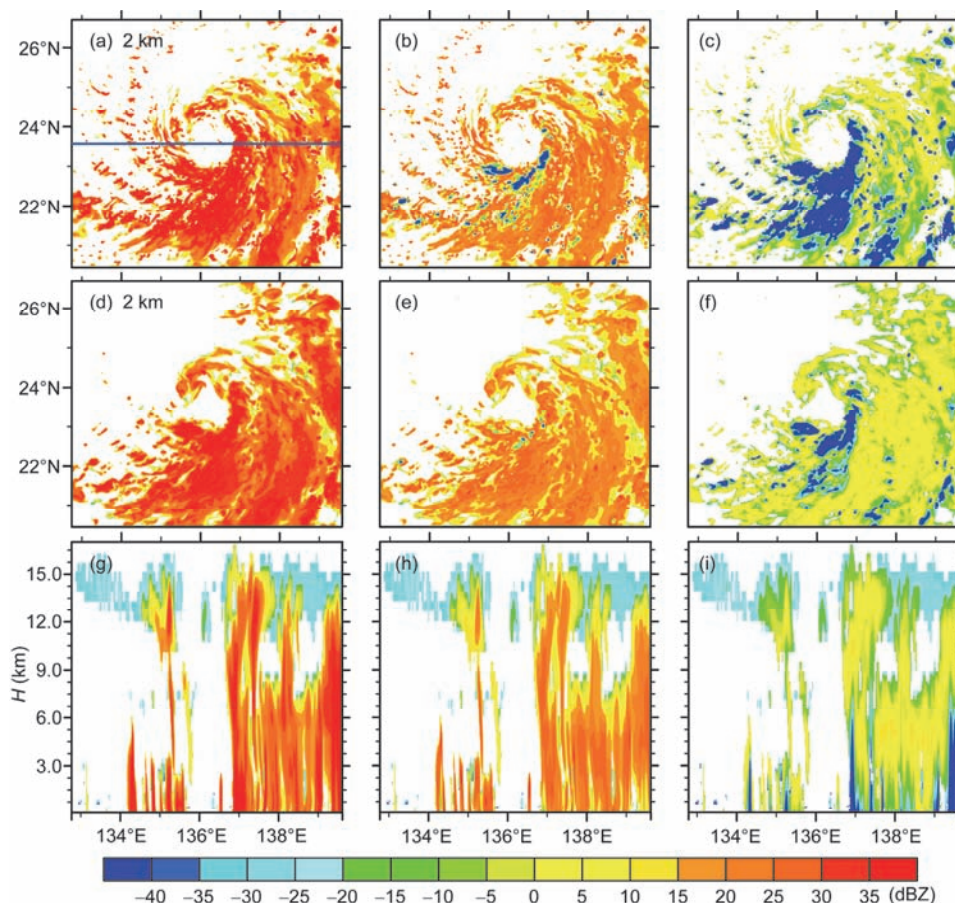


图5 USERS模拟的热带台风个例2 km(a~c)和6 km(d~f)高度层以及沿23.6°N的经度-高度垂直剖面(g~i)雷达反射率因子: (a, d, g) Ku波段(13.8 GHz); (b, e, h) Ka波段(35.5 GHz); (c, f, i) W波段(94.0 GHz)

Figure 5 Radar reflectivity factor of the tropical typhoon case simulated by USERS at 2 km height (a~c), 6 km (d~f) and the longitude-height cross section of Z_e at 23.6°N at: (a, d, g) Ku-band (13.8 GHz), (b, e, h) Ka-band (35.5 GHz), (c, f, i) W-band (94.0 GHz)

作为热带洋面气旋, 该云系的粒子相态类似于台风系统, 在2 km高度层上没有任何冰相粒子, 而存在有中等强度的降水, 导致W波段雷达信号普遍不可用 ($Z_e < -35$ dBZ); 在降水最强的区域, Ku波段雷达回波约为35 dBZ, 此时Ka波段雷达信号也出现无法穿透的情形. 在海拔6 km高度上(图6(d)~(f)), 水凝物以冰态为主, 液态水含量很少, 这区别于前述台风个例, 表明热带气旋内部的对流强度相对弱于台风, 只有较少的液水粒子可以垂直输送至6 km高度及以上层, 这使得在该高度上, 所有的像元的Ka波段雷达信号均可用, 且仅有少数像元的W波段雷达信号弱于-35 dBZ. 这说明, 对于热带气旋云系, 在海拔6 km左右可以基本实现三频联合观测. 从沿着14.9°N的垂直剖面(图6(g)~(i))看出, 热带气旋云系中, “水层的高度”约6 km, 略小于台风, 但是远大于前述陆地气旋.

在海拔6~7 km之间是冰水混合层, 在海拔7 km以上基本就是冰相粒子. 该系统发展得较高, 云顶高度也达到约16 km. 从相应三频雷达回波来看, 在海拔6 km以下, W波段雷达信号很难穿透, Ka雷达信号也出现一定程度的饱和. 而在海拔6 km以上, 基本3个频率的回波信号均在普遍的雷达设计探测灵敏度以上.

2.3 不同频率雷达对云宏观特征的探测准确性分析

卫星雷达的探测灵敏度总是有限的, 例如TRMM PR为17 dBZ, GPM DPR在Ku, Ka波段的灵敏度分别是12和5 dBZ. 那么, 对于不同的探测频率和设定的灵敏度条件下, 卫星雷达对云的三维宏观特征探测精度究竟如何? 这对于更好地理解雷达的探测结果很有参考意义. 因此, 分别针对云顶高度和云底高

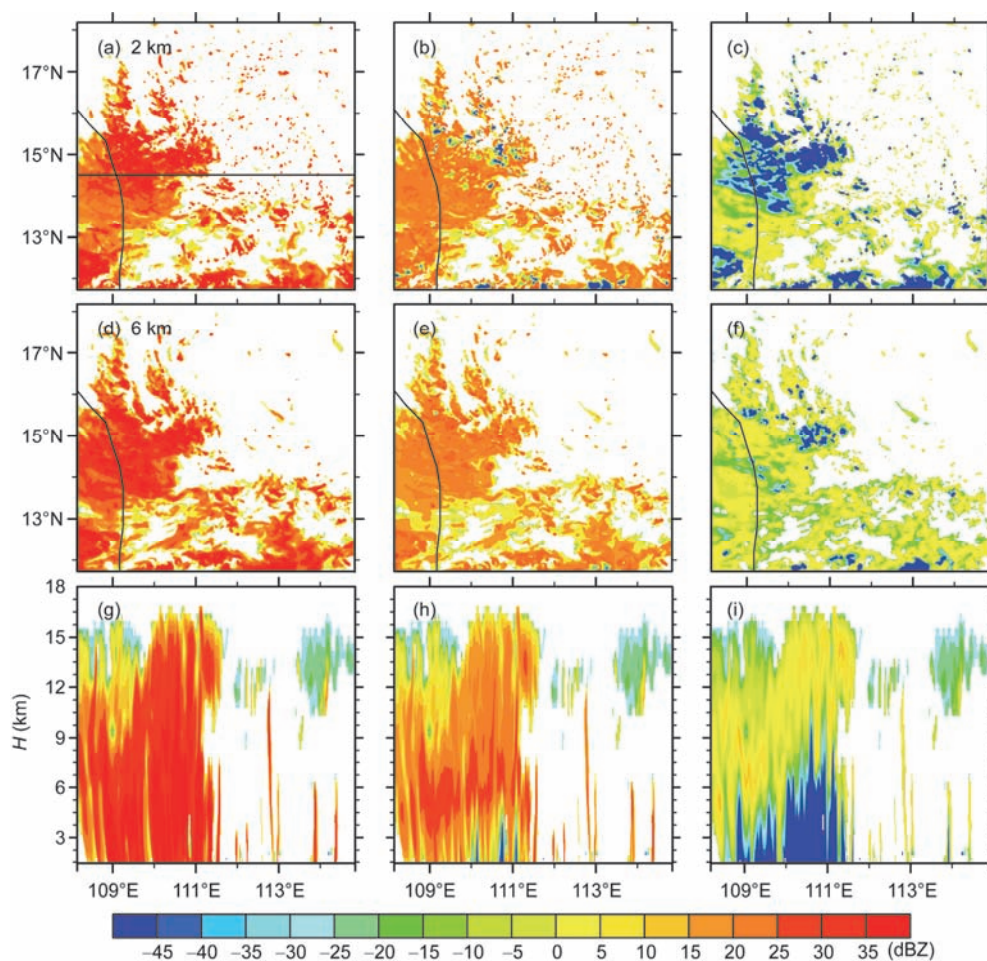


图6 USERS模拟的热带洋面气旋个例2 km(a~c)和6 km(d~f)高度层以及沿14.9°N的经度-高度垂直剖面(g~i)雷达反射率因子: (a, d, g) Ku波段(13.8 GHz); (b, e, h) Ka波段(35.5 GHz); (c, f, i) W波段(94.0 GHz)

Figure 6 Radar reflectivity factor of the tropical oceanic cyclone case simulated by USERS at 2 km height (a~c), 6 km (d~f) and the longitude-height cross section of Z_e at 14.9°N at: (a, d, g) Ku-band (13.8 GHz), (b, e, h) Ka-band (35.5 GHz), (c, f, i) W-band (94.0 GHz)

度,考察在指定探测灵敏度下各波段的探测精度。

定义所有云模式输出的水凝物累加后,以总体浓度 0.001 g/m^3 作为云的“真实边界”(云顶、云底)。假设卫星雷达的探测灵敏度在W, Ka, Ku波段分别为-35, 5和15 dBZ,定义雷达可探测到的相应云顶(云底)高度与实际边界的误差分别为云顶探测误差和云底探测误差。

(i) 中纬度陆地气旋个例。图7(a)~(c)显示,在中纬度陆地气旋个例中,W波段雷达的云顶探测误差最小,普遍小于300 m;特别是在云体边缘,W波段对薄的冰卷云的探测精度很高,误差不到30 m。说明在-35 dBZ灵敏度下,W波段可以很准确探测到细小冰粒子的回波信号。

对于频率较低的Ka和Ku波段雷达,可以发现它

们的云顶探测误差较大,特别是对云边缘的薄冰卷云,误差往往大于2000 m,而且经常漏测。反而在对流核心地区,由于云顶部分的水凝物粒子足够大,它们对云顶的探测也比较准确,误差可以在100 m以内。

对于该个例而言,图8(a)~(c)显示W波段雷达的云底探测误差很小,普遍小于50 m;只有在对流核心区,由于云中水凝物对W波段信号强烈的衰减作用,使得W波段探测不到云底,因此这些地区的云底探测误差急剧增大到500 m以上。整体而言,W波段对于该个例的云底探测误差较小,说明94 GHz信号被云体完全屏蔽的情形较少。必须指出,这仅是因为该云系统的液态水凝物较少、云层也相对较薄所造成的。而对于很厚、信号衰减快的云系,W波段雷达的云底探测误差可能会较大。对于频率较低的Ka和Ku

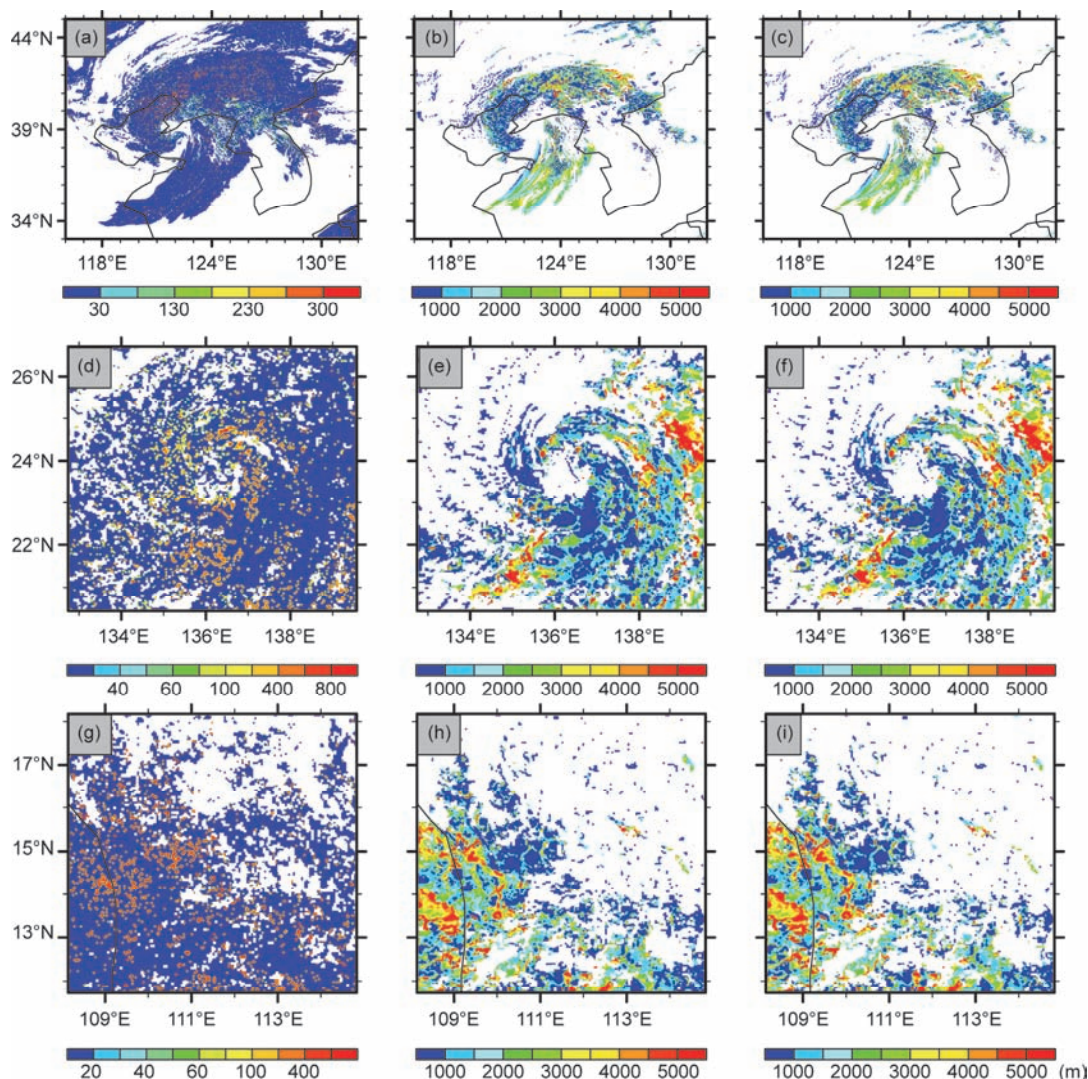


图7 USERS模拟的三频率(从左至右)W波段(灵敏度为-35 dBZ)、Ka波段(灵敏度为 5 dBZ)、Ku波段(灵敏度为 15 dBZ)雷达对中纬度陆地气旋(a~c)、热带台风(d~f)和热带洋面气旋(g~i)的云顶探测误差水平分布

Figure 7 Horizontal distribution of the detecting errors of cloud top for the mid-latitude cyclone case (a~c), the tropical typhoon case (d~f) and the tropical oceanic cyclone case (g~i) simulated by USERS at W-band (radar sensitivity: -35 dBZ), Ka-band (radar sensitivity: 5 dBZ) and Ku-band (radar sensitivity: 15 dBZ), respectively (left-to-right)

波段雷达,可以发现它们的云底探测误差普遍小于 300 m,明显地小于它们的云顶探测误差(10^3 m量级),在对流核心区,该误差显著小于W波段雷达的探测结果,这是由于它们的信号波长较长,对降雨和降雪粒子的穿透性较好所致.同时可以发现,Ka和Ku波段雷达对南部云团的云底探测误差大于北部云团.推测是由于南部云团较薄(参见图S1的垂直剖面),其云底部粒子较小,造成Ka和Ku波段雷达的漏测误差较大.

(ii) 热带台风个例分析. 相应地,三频雷达对

热带台风云顶、云底的探测误差见图7(d)~(f), 8(d)~(f)所示. 3个波段探测云顶的误差特点与前一个例基本相同,不再赘述.图8(d)~(f)显示, W波段雷达在台风眼北方地区的云底探测误差很小,基本小于 50 m;但是在台风眼南部地区,由于云中水凝物对W波段信号强烈的衰减作用,使得该波段雷达对云底的探测误差急剧增大到3000~4000 m以上,说明W波段雷达对台风云系下部区域失去探测能力.另一方面, Ku波段雷达对云底探测的误差最小,在绝大部分地区小于30 m,但是在台风出流区域的边缘,出现了一些

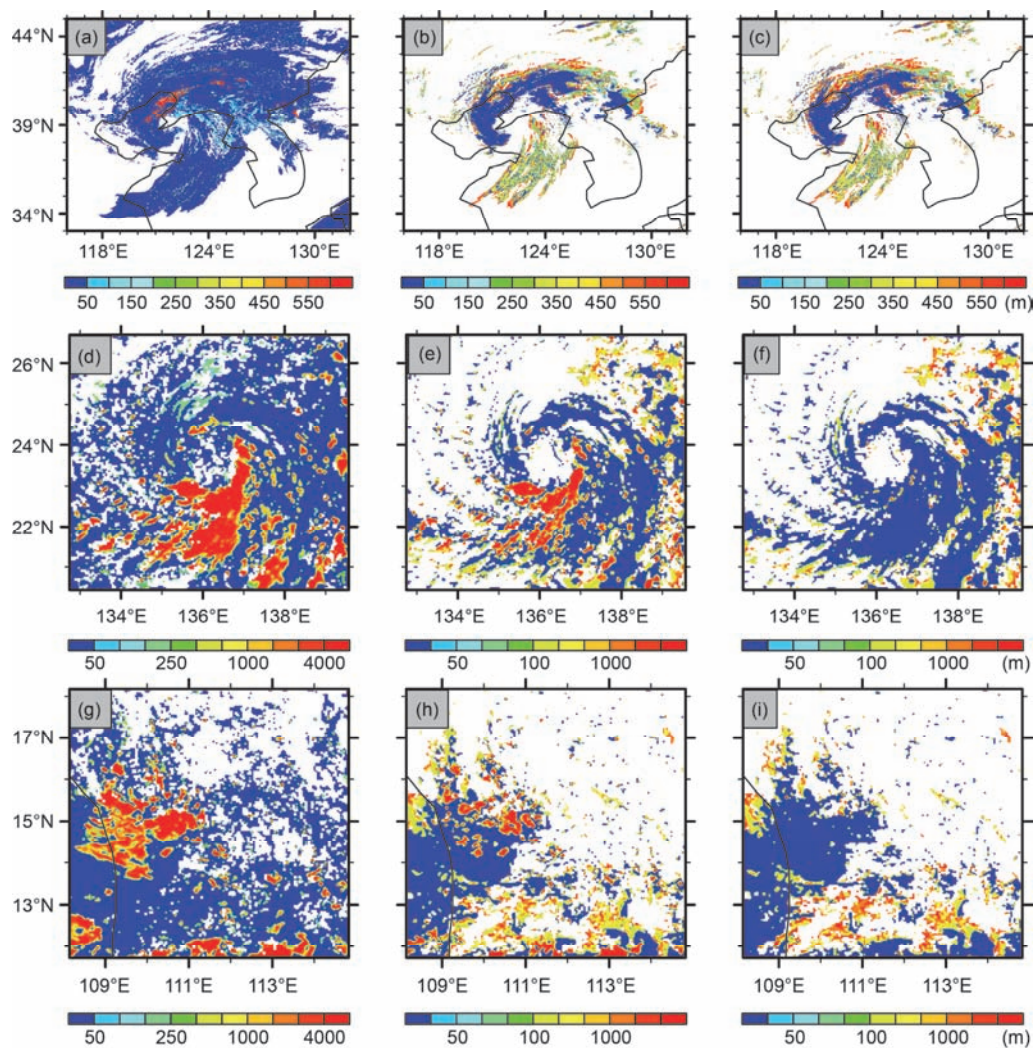


图8 USERS模拟的三频率(从左至右)W波段(灵敏度为-35 dBZ)、Ka波段(灵敏度为5 dBZ)、Ku波段(灵敏度为15 dBZ)雷达对中纬度陆地气旋(a~c)、热带台风(d~f)和热带洋面气旋(g~i)的云底探测误差水平分布

Figure 8 Horizontal distribution of the detecting errors of cloud bottom for the mid-latitude cyclone case (a~c), the tropical typhoon case (d~f) and the tropical oceanic cyclone case (g~i) simulated by USERS at W-band (radar sensitivity: -35 dBZ), Ka-band (radar sensitivity: 5 dBZ) and Ku-band (radar sensitivity: 15 dBZ), respectively (left-to-right)

漏测和误判, 因此误差较大. 而Ka波段雷达对台风云系的云底探测误差显著大于前一个个例, 这主要是因为该台风云系的水凝物含量巨大, 在主螺旋云带, 强烈的降水甚至导致Ku波段信号无法穿透云层, 对云底的探测误差也达到了3000 m. 从该结果可以看出, 基本上, 就云底探测而言, Ku波段可以胜任自然界大部分降水云团, Ka雷达则可以观测中等水凝物含量的云系, 而W波段却只能观测水凝物含量较少的云系.

(iii) 热带洋面气旋个例分析. 热带气旋个例的相应结果如图7(g)~(i), 8(g)~(i)所示. 该部分结果与

前两个例是一致的, 在此不再复述.

3 结论

本文利用WRF模式和自主研发的星载雷达模拟器对3个典型的中纬度陆地气旋云系、东海洋面台风云系和南海洋面热带气旋云系的云和降水三维结构及星载Ku, Ka和W波段雷达回波特征进行了模拟和仿真, 并在利用卫星观测对之进行验证的基础上, 开展了相应的分析研究, 并得出以下结论:

(1) WRF模式非常准确地模拟出了中纬度陆地气旋云系, 其云体的水平位置、垂直结构、尺度、垂直

积分云水含量、云顶温度等都与卫星观测非常一致。星载雷达模拟器的模拟结果与实际飞行的CloudSat的W波段云雷达观测结果吻合度很好,模拟结果真实可靠。

(2) 对相同的云体而言,随着频率的增大,波长减小,等效雷达反射率 Z_e 的绝对值减小。对于液态的云水粒子和降雨粒子,降雨粒子的回波远远大于云水粒子。对于Ku和Ka波段,液态云粒子所产生的回波强度远远小于相应的雷达设计灵敏度(一般大于0 dBZ),因此无法被观测到。对于冰态粒子,粒径较小的云冰粒子回波显著小于降雪和降霰粒子,同样也不能被Ku和Ka波段雷达所观测到。此外,降雪和降霰的回波强度比较接近。不同频率之间,降雪粒子所引起的回波强度差异最大、降霰粒子次之,对云冰粒子,不同频率之间几乎没有差异。液态和冰态粒子相比,云冰粒子的回波强于液态云水粒子;而降雪粒子的回波和降雨粒子回波强度相当。

(3) 当W, Ka和Ku波段星载雷达探测灵敏度分别为-35, 5和15 dBZ的假定条件下,W波段雷达的云顶探测误差最小,普遍小于300 m;特别是对云体边缘薄冰卷云的探测精度很高,误差不到30 m。对于频率较低的Ka和Ku波段雷达,它们的云顶探测误差较大,云边缘薄冰卷云误差可以在几千米以上。对云底探测而言,陆地气旋个例由于系统中液态水粒子较少,W波段的云底探测误差只有几百米,没有出现信号饱和现象。Ka和Ku波段在云底的探测误差一般小于300 m,明显小于其云顶探测误差。而对于台风和热带气旋个例,由于云中存在大量的液态水例子,对微波的削弱严重,导致W波段出现了很大云底探测误

差;在部分地区,Ka波段雷达探测能力也受到限制;但Ku波段却基本能探测所有云系。

概括而言,不同频率的微波雷达对不同粒子的观测能力不同,其中高频的W波段雷达有利于观测较小的非降水云粒子;较低频的Ku和Ka波段有利于观测较大的降水粒子。W波段和Ka波段雷达的穿透能力,不仅与云体的高度、厚度有关,更与云中液态水含量有关,即液态水含量越高,则云体下部的探测能力就越弱。目前国际上已存在的星载微波雷达包括测雨雷达,例如TRMM PR(Ku波段,已停止工作),GPM DPR(Ku和Ka波段),以及测云雷达CloudSat-CPR(W波段),但还没有同时包含测云测雨波段的多频星载雷达。国内外的相关机构已开始研发Ku, Ka和W多波段联合的星载雷达,例如Skofronick-Jackson等人^[26]于2013年在美国地球物理年会上首次公开了美国Cloud and Precipitation Process Mission (CaPPM)研究计划。该计划受美国NASA支持,基于Aerosol Cloud Ecosystem(ACE)中Ka和W双频段雷达的技术积累,旨在同时获取云和降水的反射率、多普勒及极化信息。2016年Spence等人^[27]完成了三频段共孔径反射面/反射阵列天线体制雷达的论证工作,并研制了机载飞行样机。但是,这种三频雷达对不同类型的云和降水的探测能力究竟可以达到什么程度?或者,为了达到具体的观测要求,相应的雷达参数,例如敏感性,应该达到什么精度?这些问题,需要从理论的角度进行预先研究,并给与回答。因此,本文对三波段雷达^[28]联合观测云与降水三维结构开展模拟仿真研究,结果具有实际应用和理论研究价值,对相关硬件开发具有一定的理论指导意义。

参考文献

- 1 Li R, Min Q L, Wu X Q, et al. Retrieving latent heating vertical structure from cloud and precipitation profiles—Part II: Deep convective and stratiform rain processes. *J Quant Spectrosc Ra*, 2013, 122: 47–63
- 2 Zhao C F, Liu L P, Wang Q Q, et al. MCCR-based characteristic properties of non-precipitating cloud liquid droplets at Naqu site over Tibetan Plateau in July 2014. *Atmos Res*, 2017, 190: 68–76
- 3 Zhao C F, Liu L P, Wang Q Q, et al. Toward understanding the properties of high Ice Clouds at the Naqu Site on the Tibetan Plateau using ground-based active remote sensing measurements obtained during a short period in July 2014. *J Appl Meteorol Clim*, 2016, 55: 2493–2507
- 4 Zhao C F, Wang Y Z, Wang Q Q, et al. A new cloud and aerosol layer detection method based on micropulse lidar measurements. *J Geophys Res-Atmos*, 2014, 119: 6788–6802
- 5 Garrett T J, Zhao C F. Ground-based remote sensing of thin clouds in the Arctic. *Atmos Meas Tech*, 2013, 6: 1227–1243
- 6 Zhao C F, Garrett T J. Ground-based remote sensing of precipitation in the Arctic. *J Geophys Res-Atmos*, 2008, 113: 1–10
- 7 Kummerow C, Barnes W. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J Atmos Ocean Tech*, 1998, 15: 809–817
- 8 Kummerow C. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *J Appl Meteorol*, 2000, 39: 1965–1982

- 9 Iguchi T, Kozi T, Meneghini R, et al. Rain profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *J Appl Meteorol*, 1997, 39: 2038–2052
- 10 Li R, Fu Y F, Zhao P. Characteristics of rainfall structure over the tropical Pacific during the later period of 1997/1998 El Niño derived from TRMM PR observations (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2005, 29: 225–235 [李锐, 傅云飞, 赵萍. 利用热带测雨卫星的测雨雷达资料对 1997/1998 年 El Niño 后期热带太平洋降水结构的研究. *大气科学*, 2005, 29: 225–235]
- 11 Li R, Min Q, Fu Y. 1997/98 El Niño-induced changes in rainfall vertical structure in the East Pacific. *J Clim*, 2011, 24: 6373–6391
- 12 Liu P, Wang Y, Feng S, et al. Climatological characteristics of overshooting convective precipitation in summer and winter over the tropical and subtropical regions (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2012, 36: 579–589 [刘鹏, 王雨, 冯沙, 等. 冬、夏季热带及副热带穿透性对流气候特征分析. *大气科学*, 2012, 36: 579–589]
- 13 Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. The Cloudsat mission and the A-Train. *Bull Am Meteorol Soc*, 2002, 83: 1771–1790
- 14 Wang Y, Liu G S, Seo E K, et al. Liquid water in snowing clouds: Implications for satellite remote sensing of snowfall. *Atmos Res*, 2013, 131: 60–72
- 15 Rose C R, Chandrasekar V. A GPM dual-frequency retrieval algorithm: DSD profile-optimization method. *J Atmos Ocean Tech*, 2005, 23: 1372–1383
- 16 Hou A Y, Kakar R K, Neece S, et al. The global precipitation measurement mission. *Bull Am Meteorol Soc*, 2014, 95: 701–722
- 17 Liao L, Meneghini R, Tokay A. Uncertainties of GPM DPR rain estimates caused by DSD parameterizations. *J Appl Meteorol Clim*, 2014, 53: 2524–2537
- 18 Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated—K model for the longwave. *J Geophys Res-Atmos*, 1997, 102: 16663–16682
- 19 Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 3077–3107
- 20 Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Weather Rev*, 2006, 134: 2318
- 21 Kain J S, Fritsch J M. Convective parameterization for Mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *Meteorol Mon*, 1993, 24: 165–170
- 22 Liu G S. A Database of microwave single-scattering properties for nonspherical ice particles. *Bull Am Meteorol Soc*, 2008, 89: 1563–1570
- 23 Menzel W P, Frey R A, Zhang H, et al. MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: Algorithm description and results. *J Appl Meteorol Clim*, 2008, 47: 1175–1198
- 24 Mace G. Level 2 GEOPROF product process description and interface control document algorithm version 5.3. NASA Jet Propulsion Laboratory, 2007
- 25 Li R, Dong X, Guo J C, et al. The implications of dust ice nuclei effect on cloud top temperature in a complex mesoscale convective system. *Sci Rep*, 2017, 7: 13826
- 26 Skofronick J G, Stephens G L, Vane D, et al. A cloud-precipitation mission concept for studying cloud and precipitation processes with application to climate models. AGU Fall Meeting, 2013. 1–15
- 27 Spence T, Cooley M, Stenger P, et al. Concept design of a multi-band shared aperture reflectarray/reflector antenna. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2016. 1–6
- 28 Sánchez-Barbettey M, Sadowy G, Tanelli S, et al. MASTR, the multi-application smallsat tri-band radar. *Earth Science Technology Forum*, 2017. 1–12

补充材料

- 图 S1 WRF 云模式模拟的中纬度陆地气旋个例 2 km 高度层
- 图 S2 WRF 云模式模拟的中纬度陆地气旋个例 6 km 高度层
- 图 S3 WRF 云模式模拟的热带台风个例 2 km 高度层
- 图 S4 WRF 云模式模拟的热带台风个例 6 km 高度层
- 图 S5 WRF 云模式模拟的热带台风个例中各水凝物沿 23.6°N 的经度-高度垂直剖面
- 图 S6 WRF 云模式模拟的热带洋面气旋个例 2 km 高度层
- 图 S7 WRF 云模式模拟的热带洋面气旋个例 6 km 高度层
- 图 S8 WRF 云模式模拟的热带洋面气旋个例中各水凝物沿 14.6°N 的经度-高度垂直剖面

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “星载 Ku, Ka 和 W 三频雷达探测云雨三维结构模拟仿真”

Simulation of the capability of Ku, Ka and W tri-frequency satellite-borne radar measuring the three-dimensional structure of cloud and precipitation

Yu Wang¹, Tao Han¹, Jingchao Guo², Kai Jiang², Rui Li^{1*}, Wencheng Shao¹ & Guosheng Liu¹

¹ School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

² Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Thirty-eighth Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Hefei 230088, China

* Corresponding author, E-mail: rli@ustc.edu.cn

The capability of satellite radar working at Ku, Ka and W bands measuring the three dimensional structure of cloud and precipitation was studied by model simulations for three typical weather cases including a mid-latitude cyclone over land (MCL), a tropical typhoon (TT), and a tropical cyclone over ocean (TCO). First, cloud resolving model of Weather Research and Forecasting (WRF) was utilized to simulate the distribution of all types of hydrometeors in these cases. The cloud water path and cloud top temperature from the MCL simulation were validated with real satellite observations from Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) on Aqua satellite. The WRF simulation correctly captured the main features of the storm including the spatial pattern, the geolocation, and the cloud top temperature, etc. Then, based on a satellite radar simulator developed by this study, the radar reflectivities at the Ku, Ka and W bands of those cases were calculated, and the radar reflectivity simulation of the MCL was also evaluated with real satellite measurements from W-band Cloud Profiling Radar (CPR) on CloudSat satellite. The vertical structure of radar reflectivity of the storm in the simulation was very close to the real measurements from CPR. Next, the characteristics of radar reflectivities at the three bands for different cloud and precipitation hydrometeors in the three cases were investigated. It was confirmed that the radar reflectivity factor decreases with the increasing frequencies (i.e. Ku, Ka and W bands). The radar echoes from non-precipitating hydrometers in both liquid and ice phase were much weaker than those from precipitating sized hydrometers, and normally cannot be detected by Ku and Ka band space-born radar. Regarding the capability of penetrating deep storm, the signal of W band radar can penetrate most clouds in the case of MCL and reach the surface very well. However, it started to be saturated from the height 6–9 km in areas with heavy liquid water content in the two cases of TT and TCO. The Ka band radar can detect the vertical distribution of hydrometeors in most areas of the three cases, but was saturated below 4–5 km in the eyewall area and the convection core areas of the cases of TT and TCO. The Ku band radar can penetrate all storms in this study. Moreover, the detecting errors of cloud top height and cloud bottom height for the three bands were quantified, assuming the detecting thresholds of Ku, Ka and W radars are 15, 5 and –35 dBZ. The results showed that W band radar had the smallest error (<30 m) of detecting cloud top height, while for Ku and Ka radars, the errors were as high as several thousand meters particularly in the area with thin clouds due to their misdetection of small particles. In the convection core area with large and dense hydrometeors at the top layers, the errors for Ku and Ka significantly decreased to less than 100 m. Regarding cloud bottom detection, the penetrability of all radars not only depends on cloud geometrical thickness, but also on liquid water content (LWC). In MCL with low LWC the detecting errors for cloud bottom height from W band radar were only a few hundred meters, while reaching several thousand meters for TT and TCO with high LWC. The detecting error for cloud bottom for Ka radar was generally low (less than 300 m) but also increased greatly in strong precipitation areas. For Ku radar, the detecting errors of cloud bottom height were small in all cases except small area near the eyewall for TT. The results of this study provided some unique information to improve the understanding of the detecting capability of tri-frequencies satellite borne cloud and precipitation radar, particularly the differences among different types of storms. And the results can be used as references for designing associated parameters in radar system development.

satellite radar, radar simulator, Ku band, Ka band, W band, cloud and precipitation

doi: 10.1360/N972018-00089