

文章编号: 2096-1618(2019)04-0323-10

# 利用地面双偏振雷达检验 GPM\_DPR 降水测量华北地区适用性初探

冯启祯<sup>1</sup>, 肖 辉<sup>2</sup>, 姚振东<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所 LACS, 北京 100000)

**摘要:**全球降水测量(GPM)计划核心观测卫星已于2014年7月发射升空,地面验证是验证卫星探测能力的必备工作。主要是利用北京顺义地区的双偏振X波段雷达,并结合地面雨滴谱仪观测,对GPM双频雷达数据进行地面验证。实验着重于GPM卫星数据和地面X波段双偏振雷达数据之间进行交叉对比,利用地面雷达产生的降水测量评估卫星降水测量。结果表明,卫星和地面雷达反射率因子有较好的一致性,但降水产品存在明显的差异,有待进一步分析研究。

**关键词:**雷达;降水测量;GPM

**中图分类号:**TN957.52<sup>+</sup>4

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2019.04.001

## 0 引言

地球上约有2/3的降水发生在热带,然而热带地区多为海洋,地面观测难以开展,为了提高对热带地区降水的认识,20世纪80年代中期,美国和日本着手合作研制热带降雨观测(TRMM),1997年11月27日,代号为TRMM的卫星通过H-2火箭送入预定轨道。该卫星原定计划是运行3年,为了延长TRMM卫星的寿命,日美于2001年对它实施了轨道提升,这使TRMM卫星稳定运行17年有余,于2015年6月16日回收<sup>[1-2]</sup>。TRMM卫星带来的成功,引起对星载雷达探测降雨的关注,研制并发射新一代的降水探测卫星势在必行,全球降雨观测(global precipitation measurement)应运而生,该计划的主卫星于2014年2月28日发射升空,其搭载了全球首部星载双频降水测量雷达(dual-frequency precipitation radar, DPR)和一个多频段微波成像仪(GPM microwave imager, GMI)。

DPR可以提供125 km和245 km宽度的三维降水结构,由一部Ka波段(35.5 GHz)测雨雷达和一部Ku波段(13.6 GHz)测雨雷达组成。与观测热带、亚热带地区降水的TRMM相比,GPM能够更加精确地捕捉微弱降水( $<0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )和固态降水<sup>[3-5]</sup>,这两种类型降水的观测对了解中高纬度地区和高原地区降水的分布和演变具有重要意义。另外,DPR的扫描方式分为Ka\_HS, Ka\_MS和Ku\_NS3种;Ku\_NS有49个扫描点,

每个扫描点的直径约为5 km,扫描带宽度为245 km;Ka\_MS称为匹配扫描,它的25个扫描点与Ku\_NS中心的25个扫描点相重合,扫描带宽度为120 km;Ka\_HS称为高精度探测模式,其主要用于探测小雨和雪,它的扫描波束与Ka\_MS相交错。Ka\_MS与Ku\_NS具有相同的距离分辨率(250 m),Ka\_HS的分辨率为500 m。DPR不仅可以通过这3种不同的探测模式来探测降水的差异,而且提供了更多的微物理测量信息,提供了更多可供天基-地基观测对比的参量,对全球降水的更准确和频繁的观测,对改善天气、气候和水文预报能力具有重要意义。

Chandrasekar et al.<sup>[4]</sup>对GPM捕捉到的80个洋面风暴系统的降水廓线类型和亮带信息进行了评估,结果发现DPR和KuPR探测的总体特征基本一致,但是DPR会更多地判定为层云降水,而KuPR则会更多地出现对流降水;同时将DPR探测结果与KFWS组网雷达的探测结果进行了对比,发现两种探测结果较为一致。Petkovic et al.<sup>[6]</sup>以2014年一次72 h的极端降水事件为例,研究了GPM被动微波降水反演算法GPROF2014的表现性能,同时定量评估了GPM被动微波反演和地面测量在极端降水测量中的差异,结果表明:在极端降水事件中,卫星反演和地面雷达观测结果比较一致,但是发现卫星反演的降水与地面雨量站点测量存在较大的偏差,在72 h内,两者分别低估了60%和50%;在非极端降水事件的探测中,相比于地面雨量站点,72 h内卫星反演低估了12%,地面雷达高估了30%。Chandrasekar et al.<sup>[7]</sup>利用在美国达拉斯-沃思堡部署的高分辨率双偏振地面雷达网络探测

收稿日期:2019-04-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFE0201900-02);国家自然科学基金资助项目(41575037);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB441403)

资料直接与 GPM 探测资料进行了比较,实验结果表明:如果以地面雷达测量值为真值,GPM 雷达在 Ku 波段的归一化标准误差为 5.5%,Ka 波段的误差为 8.2%。这证明:空基和地面雷达探测的雷达反射率一致性较好,但同时也发现,降水产品的一致性较差。

陈茜等<sup>[3]</sup>利用江苏地面雨量站数据对 DPR 3 种扫描产品在江苏地区的适用性进行研究,研究表明,4 个季节卫星反演降水普遍低于地面降水观测,其中,夏季卫星反演降水与地面观测降水匹配度较好;刘晓阳等<sup>[8]</sup>利用常州和泰州地区 CINRAD 雷达反射率数据对 DPR 在 2015 年 6 月 30 日的反射率产品进行了评估,结果显示在 DPR 雷达与常州、泰州 CINRAD 雷达同时覆盖的降雨区域,星地之间雷达反射率因子的平均值偏差分别为-1.2 dB和-1.6 dB,显示星地雷达也有较好的一致性;余坤伦等<sup>[9]</sup>利用青藏高原色林错流域 2014 年 4 月至 2015 年 3 月 5 个地面观测站点的降水资料,对 TRMM 和 GPM 降水产品进行了评估,通过实验得出 TRMM 降水产品高估了降水,GPM 降水产品相较于 TRMM 更高,但这两种产品对强降水的探测都有缺陷。

DPR 星载雷达对于降水的探测还存在一些问题,其对弱降水的探测要强于对强降水的探测能力,目前,在华北地区较少有相关的研究,为了开展星地雷达在华北地区的联合应用,需要确定地基雷达和星载雷达之间的差异程度,希望通过华北地区的地面数据来评估卫星数据在中国华北地区的探测效果,探讨雷达数据在华北地区的适用性,为今后的星地联合应用研究提供参考。

## 1 数据来源

星载雷达的数据使用 GPM\_2A\_Ku 和 GPM\_2A\_Ka 数据,该数据可以通过地球数据网站 (<https://urs.earthdata.nasa.gov/home>) 获取。DPR 双频降水测量雷达的详细参数参见表 1<sup>[2]</sup>。图 1<sup>[5]</sup>展示了卫星观测范围,DPR 的运行高度大约在离地407 km处,它是非太阳轨道的近极轨卫星,扫描轨道分布在70°N和70°S之间,一次完整的扫描需要约92.6 min,DPR 沿轨道做跨轨扇形扫描,它包含了两个频段(Ka 和 Ku),Ku\_NS 和 Ka\_MS 的径向距离分辨率为250 m,可得到 176 个径向距离库,Ku\_NS 每次扫描包含 49 个地面扫描点,Ka\_MS 每次扫描包含 25 个地面扫描点,每个扫描点地面分辨率为5 km×5 km,该产品中还包括时间和位置信息以及订正前后的反射率因子等研究必需信息。

表 1 DPR 雷达参数

参数	KuPR	KaPR
扫描宽度/km	245	120
径向分辨率/m	250	250/500
最大发射功率/W	1012.0	146.5
脉冲重复频率/Hz	4000~4500	4000~4500
脉冲宽度/ $\mu$ s	1.6( $\times 2$ )	1.6( $\times 2$ )(Ka_MS) 3.2( $\times 2$ )(Ka_HS)
水平分辨率/km	5	5
波束宽度/ $^{\circ}$	0.71	0.71
扫描角/ $^{\circ}$	轨道两侧 17 $^{\circ}$	轨道两侧 8.5 $^{\circ}$
波束数	49	49(25 根匹配波束, 24 根高精度波束)
最小可探测雨强/(mm/h)	0.5	0.2
反射波频率/GHz	13.6	35.5
测量精度/dBZ	$\pm 1$	$\pm 1$

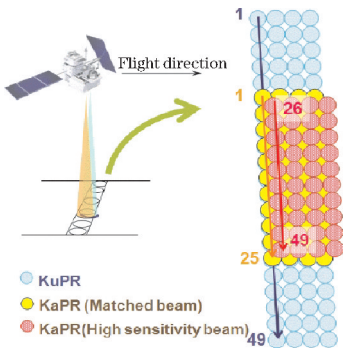


图 1 卫星探测范围

采用的地基双偏振多普勒雷达是中国科学院大气物理研究所云降水物理和强风暴实验室的车载 X 波段双偏振多普勒雷达(IAP-714XDP-A),观测地点在北京顺义水上乐园(40.18°N,116.68°E),观测时间为 2017 年 6-8 月,参与地面观测试验的设备还有放置在顺义气象局(40.13°N,116.62°E)的二维雨滴谱仪(2DVD),距离雷达约7.9 km,作为雷达降水反演验证仪器,两部仪器的相对位置如图 2 所示。

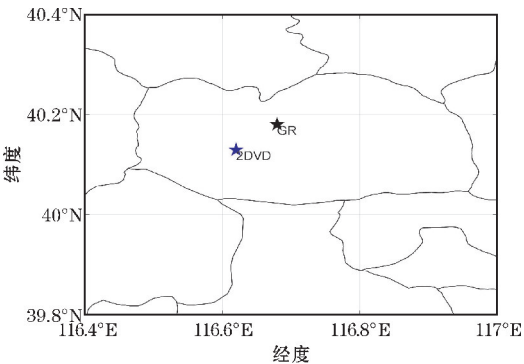


图 2 X 波段双偏振多普勒雷达(GR)和 2DVD 位于北京顺义的相对位置

选取的个例是 2017 年 7 月 6 日 14 时至 22 时在北京顺义地区的中尺度对流降水系统,是一次持续时间较长的混合型降水过程,地基 X 波段雷达对天气过程进行了持续观测,地基雷达观测模式选用 4°仰角的

PPI 扫描,扫描周期为40 s。卫星于北京时 2017 年 7 月 6 日 21 时 3 分至 21 时 7 分扫过地基雷达观测区域,仅将 Ku 雷达探测资料以及 Ka\_MS 探测资料作为评估对象,卫星数据列于表 2。

表 2 2017 年 7 月 6 日 21 时 DPR 与地基雷达数据汇总表

地基 X 雷达数据	地基 2DVD	扫描模式	DPR 雷达数据
201707062103070. 40P		Ku_NS	2A. GPM. Ku. V8-20180723. 20170706-S123002-E140237. 019056. V06A. HDF5
201707062105260. 40P	V17187_1. RRT	Ka_MS	2A. GPM. Ka. V8-20180723. 20170706-S123002-E140237. 019056. V06A. HDF5
201707062107450. 40P		Ka_HS	2A. GPM. Ka. V8-20180723. 20170706-S123002-E140237. 019056. V06A. HDF5

对比地基雷达和卫星雷达产品,从理论上讲很简单,但在实际的对比中发现仍然存在着一些问题,例如,数据时间和空间的匹配、波段的差异等。为了实现星载雷达数据与地面雷达数据的对比研究,首先要完成两种雷达数据在时间和空间上的匹配。

1.1 时间匹配

地面 X 波段双偏振雷达的单层扫描每 40 s 完成一次,覆盖半径为150 km,该雷达着重追踪强对流天气。卫星约每92.6 min完成一次对地球的极轨扫描观测<sup>[2]</sup>,通过卫星扫描的起始时间和扫描线数大致可以推断出卫星经过地基雷达上空的时间,从而实现卫星雷达数据和地基雷达数据的时间匹配。

通过卫星扫描的始终时间可以得到完成本次卫星扫描的时长,卫星探测数据被分于 25 个经纬度区域内,利用雷达位置的经纬度坐标判断雷达探测区域位于的经纬度区域,根据比例可以计算出卫星通过雷达上方的大致时间区间,针对文中个例,卫星扫描的始终时间为 UTC2017-07-06 12:30:02. 838 至 2017-07-06 14:02:38. 122,可以得到完成卫星扫描的时长约为 92.6 min,数据位于第 10 个经纬度区域,计算得出卫星通过雷达上方的时间区间为北京时 2017 年 7 月 6 日 21 时 03 分至 21 时 7 分,该区间为4 min,由于卫星通过雷达探测范围的时间极短,且天气系统的变化不大,故可使用此4 min内的地基雷达数据与卫星数据进行对比。

1.2 空间匹配

目前,地基雷达数据和卫星数据的匹配方法主要有两种,分别为网格匹配和几何匹配,网格匹配是将地基雷达数据和卫星数据格点化到同一个三维笛卡尔坐标系中,几何匹配则是引入等效照射体积的概念,通过平均重合体积中的数据得到等效反射率因子,从而进行数据对比。相比于网格匹配,几何匹配不使用插值,保证了数据的原始性<sup>[8]</sup>。

DPR 雷达数据的水平分辨率为5 km×5 km,垂直分辨率为125 m,地基 X 波段双偏振雷达数据的库长为150 m,一个卫星扫描点可横跨多条地基雷达径向,覆盖多个雷达径向库,雷达扫描半径为150 km,为降低衰减和地物杂波对实验结果的影响,选取 20 ~ 75 km 的雷达数据,雷达扫描波束传播距离雷达越远,其水平和垂直波束宽度越大,其覆盖范围越大。在75 km处,1°波束的垂直波束宽度可达1.3 km,可覆盖约 11 个卫星径向库,由于这种情况,采取网格匹配和几何匹配相结合的方法,即在水平方向,采取网格匹配的方法,而在垂直方向,采用几何匹配方法。结合两种方法来构建匹配空间,从而获取匹配样本。

分别通过计算匹配样本中 DPR 雷达和地基雷达反射率数据的平均反射率因子值,进而对 DPR 雷达数据进行评估。

2 X 波段雷达的衰减订正及雷达降水反演算法

2.1 X 波段雷达的衰减订正

相对于普通的多普勒天气雷达,双偏振雷达能提供更多的双偏振参量,这些参量在定量降水估测中起到重要的作用<sup>[10]</sup>。根据  $R(Z_H)$ ,  $R(Z_H, Z_{dr})$ ,  $R(K_{DP}, Z_{dr})$  和  $R(K_{DP})$ , 开发了如 JPOLE 算法<sup>[11-12]</sup>、CSU-ICE 算法<sup>[13]</sup>、CSU-HIDRO 算法<sup>[14]</sup> 等。经过实验论证,这些双偏振参量反演降水的方法都优于传统反射率因子  $Z$  和雨强之间的  $Z$ - $R$  关系法<sup>[15]</sup>。

近年来,根据外场观测的需要,考虑到 X 波段雷达的体积较小,便于移动,探测分辨率较 C 波段和 S 波段的高等优点而得到较广泛的应用<sup>[16]</sup>。然而,X 波段雷达有一个较为明显的问题,就是雷达信号在雨中的衰减问题一直影响着其探测精度<sup>[17-20]</sup>,因此,对 X 波段雷达信号的雨衰减订正成了目前 X 波段雷达数据应用需要解决的一个比较重要的问题。



最早的衰减订正是着重于 S 和 C 波段的,一般是通过降水量和  $Z-R$  经验公式对反射率进行调整,但是传统  $Z-R$  关系本身就存在很大的误差,所以订正效果并不是很理想<sup>[21]</sup>,无法满足定量降水测量的精度要求。双偏振雷达的应用,开始尝试通过  $K_{DP}$ (差分传播相移率)完成雨衰减订正<sup>[22-24]</sup>。

使用  $K_{DP}$  订正法对雷达数据进行订正。为保证  $K_{DP}$  的数据质量,利用滤波后的  $\varphi_{DP}$ ,根据  $K_{DP}$  的定义式(1)反演  $K_{DP}$ <sup>[25]</sup>:

$$K_{DP}(r) = 0.5 \times \frac{\varphi_{DP}(r_2) - \varphi_{DP}(r_1)}{(r_2 - r_1)} \quad (1)$$

由于雨滴并非规则的球形<sup>[26]</sup>,导致在水平和垂直方向的衰减率不同。定义  $A_H$  和  $A_V$  分别为水平和垂直偏振波在降水区中的衰减率,则差分衰减率  $A_{DP} = A_H - A_V$ 。Bringi 等<sup>[27]</sup>提出  $A_H$  和  $A_{DP}$  可由  $K_{DP}$  线性表示为:

$$A_H = a_1 \times K_{DP} \quad (2)$$

$$A_{DP} = a_2 \times K_{DP} \quad (3)$$

式中  $a_1$  和  $a_2$  为拟合经验系数。Matrosov et al.<sup>[22]</sup>通过外场实验,得到针对 X 波段的  $a_1$  和  $a_2$  值,  $a_1 = 0.22 \text{ dB/deg}$ ,  $a_2 = 0.033 \text{ dB/deg}$ 。  $a_1$  和  $a_2$  的取值同样参考 Matrosov et al.<sup>[22]</sup> 的实验结果。

由式(2)、(3),可以得到反射率因子和差分反射率因子的订正公式,即为:

$$Z_{Hc}(k) = Z_H(k) + 2 \times a_1 \times \Delta r \times \sum_{k=1}^n K_{DP}(k) \quad (4)$$

$$Z_{DRc}(k) = Z_{DR}(k) + 2 \times a_2 \times \Delta r \times \sum_{k=1}^n K_{DP}(k) \quad (5)$$

式中,  $Z_H(k)$  代表订正前的雷达反射率因子、 $Z_{Hc}(k)$  代表订正后的雷达反射率因子(单位为 dBZ)、 $Z_{DR}(k)$  代表订正前的差分反射率因子、 $Z_{DRc}(k)$  代表订正后的差分反射率因子、 $k$  代表库数、 $\Delta r$  代表库长(单位为 km)。

## 2.2 地基雷达反演降水算法

雷达定量降水估测是雷达气象学所研究的重要内容之一。利用雷达对降水进行估测,相对于地面雨量站,具有测量范围广,时空分辨率高等优势。由于地面雨量站分布较为稀疏,往往相隔几十公里,而对于一些发生在站间的强对流难以捕捉,这就会对降水测量造成很大的误差,雷达以其高时空分辨率的优势,可以探测到更多降水信息,并且其探测时间间隔较短,在较短的时间内可以对降水三维结构进行一次更新(如 IAP-714XDP-A 完成一次体积扫描需要 5~6 min)。正是基于这些优势以及双偏振雷达的发展,雷达定量降水估测成为近些年研究的热点,它对工农业生产,人工影响天气以及灾害预警有很大的帮助。

雷达定量降水估测的方法目前分为两大类,一类是通过双偏振参量建立物理模型,从而反演降水<sup>[28-32]</sup>;另一类则是通过大量的雷达反射率观测值和地面降水观测值拟合得到  $Z-R$  关系,从而反演降水。使用物理参量可以将固态降水和液态降水很好的区分,从而使用不同的估测方案,可有效地提高雷达估测降水的准确度。通常对双偏振雷达的 3 个测量参数  $Z_H, Z_{DR}, K_{DP}$  进行不同的组合,大致分为 4 类:  $R(Z_H), R(Z_H, Z_{DR}), R(K_{DP}), R(Z_{DR}, K_{DP})$ 。根据不同的组合,提出 JPOLE 算法、CSU-ICE 算法、CSU-HIDRO 算法。Cifelli et al.<sup>[36]</sup>将 JPOLE 算法、CSU-ICE 算法、CSU-HIDRO 算法与传统的  $R-Z$  方法进行了对比总结<sup>[11,13,33,34]</sup>。就偏差和误差来说,CSU-ICE 算法和 CSU-HIDRO 算法表现基本相同,而 JPOLE 算法的效果不如前两种方法,偏差较大,但与传统  $R-Z$  方法相比还是要好一些。物理参量估测降水的方法对于小时空尺度的降水个例较为准确,但是,对于较大时空尺度而言,统计的方法效果会更好。

利用胡志群等<sup>[35]</sup>提出的  $Z_H-K_{DP}-R$  综合估测方法,以及唐琪<sup>[15]</sup>提出的 CSU-HIDRO-X 算法对雷达降水进行反演,通过地面 2DVD 数据对反演效果做比较。 $Z_H-K_{DP}-R$  综合估测方法主要依托 Matrosov et al.<sup>[38-39]</sup> 外场实验得出的  $Z-R$  拟合公式和  $R-K_{DP}$  拟合公式,  $0.1 \text{ deg} \cdot \text{km}^{-1} < K_{DP} < 3 \text{ deg} \cdot \text{km}^{-1}$  部分已保证数据质量,由于  $K_{DP}$  对于小雨不敏感,选取  $K_{DP}$  的阈值为 0.6,对于  $K_{DP} < 0.6$  的部分采用  $Z-R$  关系对降水进行反演,对于  $K_{DP} \geq 0.6$  的部分采用  $R-K_{DP}$  关系对降水进行反演<sup>[36-37]</sup>。CSU-HIDRO 算法是针对 S 波段雷达反演降水提出的一种算法,唐琪对 X 波段  $Z_H, Z_{DR}, K_{DP}$  的阈值进行了敏感性分析,提出了适用于 X 波段偏振雷达的 CSU-HIDRO-X 降水反演方法,其算法流程如图 3 所示。现对这两种降水反演方法进行应用对比。

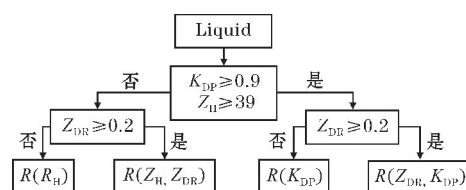


图3 CSU-HIDRO-X 算法流程图

## 3 反射率因子修正系数 $M$

由于地基雷达和星载雷达的波长存在差异,不能直接进行对比,为此,参考 Chandrasekar et al.<sup>[38]</sup> 的方法,通过  $T$  矩阵散射模拟来模拟 20 °C 下, Ku 波段和 X

波段随着纯水粒子大小变化而导致反射率因子的变化,反射率因子的计算公式为

$$Z_h = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 + 2}{m^2 - 1} \right|^2 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma_H(D) N(D) dD \quad (6)$$

其中, $Z_h$  代表雷达反射率因子 ( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ), $\lambda$  表示雷达发射电磁波波长 (mm)。式(6)中  $m$  为降水粒子的复折射指数, $\sigma_H$  为水平后向散射截面 ( $\text{mm}^2$ ),由  $T$  矩阵散射模拟得到。

根据式(6),可以得到 Ku 波段和 X 波段之间的反射率因子修正系数  $M$  的计算公式:

$$M = \frac{\frac{\lambda_x^4}{\pi^5} \left| \frac{m_x^2 + 2}{m_x^2 - 1} \right|^2 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma_{H_x}(D) N(D) dD}{\frac{\lambda_{ku}^4}{\pi^5} \left| \frac{m_{ku}^2 + 2}{m_{ku}^2 - 1} \right|^2 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma_{H_{ku}}(D) N(D) dD}$$
$$= \frac{\lambda_x^4 \left| \frac{m_x^2 + 2}{m_x^2 - 1} \right|^2 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma_{H_x}(D) N(D) dD}{\lambda_{ku}^4 \left| \frac{m_{ku}^2 + 2}{m_{ku}^2 - 1} \right|^2 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma_{H_{ku}}(D) N(D) dD} \quad (7)$$

对于降水,采用  $N(D)$  为  $1 \text{ mm}^{-1} \text{m}^{-3}$ ,即为单分散雨滴谱分布。在给定雷达波频率和雨滴的复折射指数情况下,根据式(7)可以得到地基雷达和星载雷达之间的修正系数。表 3 给出了 S、X、Ku 和 Ka 的频率,以及 20 ℃ 下复折射指数的取值<sup>[39]</sup>。图 4 展示了 S、X、Ku 和 Ka 波段的散射模拟结果。

表 3 4 个波段的模拟参数设置汇总表

波段	频率/GHz	波长/mm	复折射指数
S	3.0	100	8.743+0.641i
X	9.37	32.02	8.147+1.741i
Ku	13.6	22.06	7.626+2.224i
Ka	35.5	8.45	5.444+2.825i

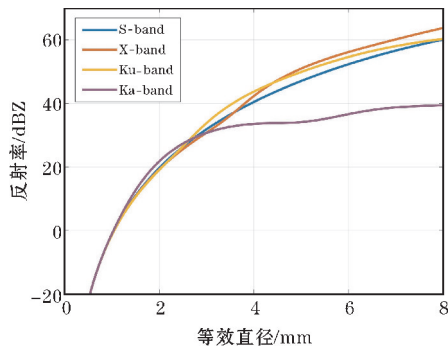
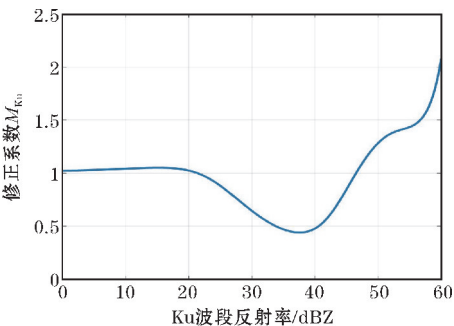


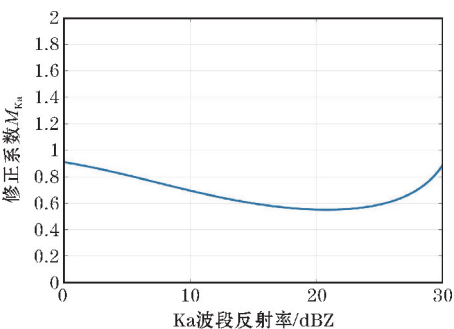
图 4 20 ℃ 环境下各频段反射率因子随粒径变化曲线

当温度不同时,各波段的复折射指数也不同<sup>[40]</sup>,仅计算了 20 ℃ 下的散射模拟结果,并计算得到图 5 中 Ku 和 Ka 波段相对于 X 波段的修正系数变化曲线,从图 5(a)不难看出,在 0 ~ 20 dBZ, Ku 和 X 的雷达反射率相近,20 ~ 45 dBZ, X 波段衰减较 Ku 波段严重,45 ~

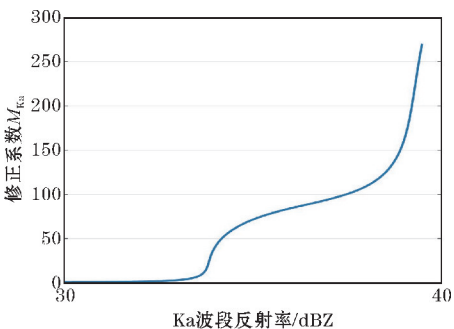
60 dBZ, Ku 波段衰减程度超过 X 波段;从图 5(b)、(c)可以看出,在 0 ~ 30 dBZ, X 波段衰减较 Ka 波段严重, Ka 波段从 33 dBZ 开始衰减程度很大。



(a) X 波段相对于 Ku 波段的修正系数变化曲线



(b) X 波段相对于 0 ~ 30 dBZ 的 Ka 波段的修正系数变化曲线



(c) X 波段相对于 30 ~ 40 dBZ 的 Ka 波段的修正系数变化曲线

图 5 修正系数变化曲线

4 基于 X 波段雷达的 GPM 地面验证

4.1 地面资料验证

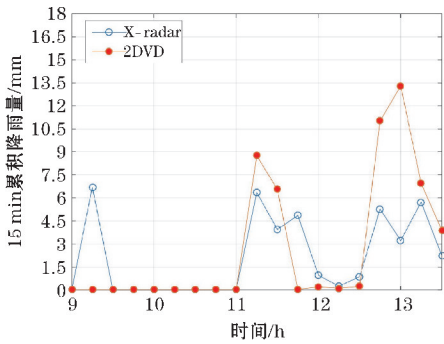
在对地面 X 波段雷达数据进行雨衰减订正之后,采用胡志群等提出的  $Z_H$ - $K_{DP}$ - $R$  综合估测方法,以及唐琪改进的 CSU-HIDRO 算法,针对地基 X 波段探测降水能力进行评估。通过相对标准误差(RSD)和平均偏差(AAD)对反演结果进行评价,这 3 个参数的计算公式如下:

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_z)^2}{n}} / \overline{X_z} \quad (8)$$

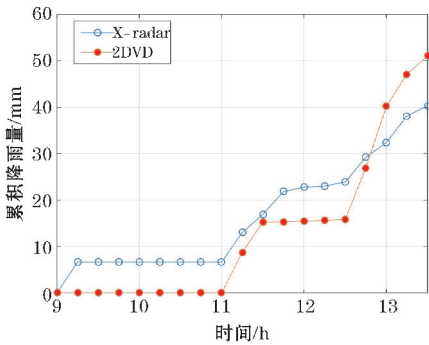
AAD=|Xi-Xz| (9)

式(8)和(9)中Xi代表测量值,Xz代表真实值,将2DVD观测降水值作为真值,将雷达反演降水作为测量值,对两种反演方法进行比较。

顺义气象局位于双偏振雷达西南方向约7.9 km处,距离雷达较近,雷达4°仰角探测空间距地面约500 m,通过提取双偏振雷达在顺义气象局位置的雷达反射率因子,利用ZH-KDP-R综合估测方法估测降水,得到图6中实验结果。图6(a)和图6(b)分别展示地基X波段雷达和位于顺义气象局的2DVD在2017年7月6日9时至13时每15 min累积降水量随时间的变化及其累积降水总量。由图4~6可以看到,地基X波段雷达反演和2DVD观测的15 min累积降水量最大误差接近10 mm,而且在11:15-11:30和13:15-13:30两个时段出现的降水过程地基X波段雷达反演结果与2DVD观测吻合较好,两者的相对标准偏差为88.88%,平均偏差为2.84 mm。图7是使用CSU-HIDRO-X算法估测得到的降水。从图7可以看出,地基X波段雷达反演和2DVD观测的15 min累积降水量整体一致性较好,最大误差不超过6 mm,通过计算得到,两者的相对标准偏差为54.72%,平均偏差为1.57 mm。



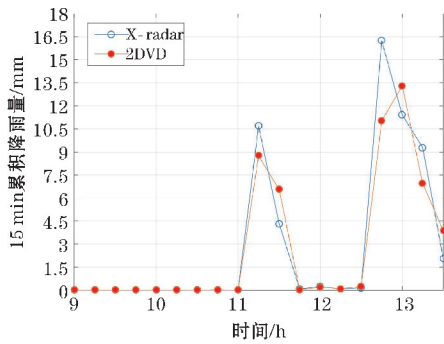
(a) 15 min 累积降水量



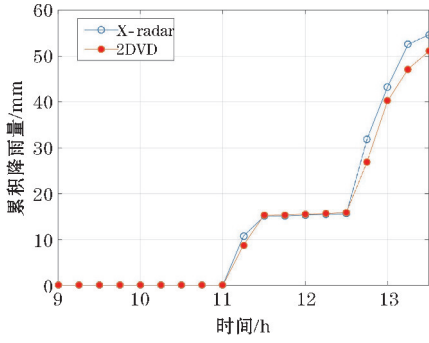
(b) 9:00-14:00 的累积降水总量

图6 利用ZH-KDP-R反演

2017年7月6日9:00-14:00降水情况



(a) 15 min 累积降水量



(b) 9:00-14:00 的累积降水总量

图7 利用CSU-HIDRO-X反演

2017年7月6日9:00-14:00降水情况

结合表4可以看出,ZH-KDP-R综合估测方法对9时和13时的降水情况反演产生了较大的误差,而CSU-HIDRO-X反演降水情况与雨量计记录数据较为一致,总体来看,CSU-HIDRO-X算法的估测效果要强于胡志群等ZH-KDP-R综合估测方法。

表4 2017年7月6日09时至13时顺义气象局雨量计累积降水量

时间段	累积降水量/mm
09~10时	0.0
10~11时	0.0
11~12时	8.9
12~13时	2.0
13~14时	30.4

4.2 GPM 星载雷达与地面雷达交叉验证

2017年7月6日14至22时在北京顺义地区的中尺度对流降水系统,是一次持续时间较长的混合型降水过程,地基X波段雷达对天气过程进行了持续观测,GPM卫星于21时5分左右经过该系统上空。图8(a)、(b)和(c)中分别展示了地基X波段订正后的雷达反射率因子,使用修正系数转换过的Ku波段星载雷达反射率因子以及Ka波段星载雷达匹配扫描模式下的反射率因子分布。对比图8(a)、(b)可以发现,地基雷达反射率因子在10~20 dBZ的点数要多于Ku星载雷达,这可能是由于Ku雷达探测精度导致



的,同时可以看到两图中反射率因子在 30 ~ 40 dBZ 的点分布情况较相似,Ku 雷达探测到的反射率因子强中心要强于地基雷达,这可能是由于观测角度不同所造成的,从图 8(d)中可以看出,散点在等值线两侧分布较均匀,相对标准误差约为 15.84%;对比图 8(a)和(c)可以发现,两图强中心对应较好,同样由于探测精度的问题,地基雷达反射率因子在 10 ~ 20 dBZ 的点数

要多于 Ka 星载雷达,两图中反射率因子在 30 ~ 40 dBZ 的点分布情况较为相似;从图 8(e)中可以看出,地基雷达反射率因子探测值小于30 dBZ时,同一位置的 Ka 星载雷达反射率因子略小于地基雷达,地基雷达反射率因子探测值大于30 dBZ时,同一位置的 Ka 星载雷达反射率因子略大于地基雷达,相对标准误差约为14.05%。

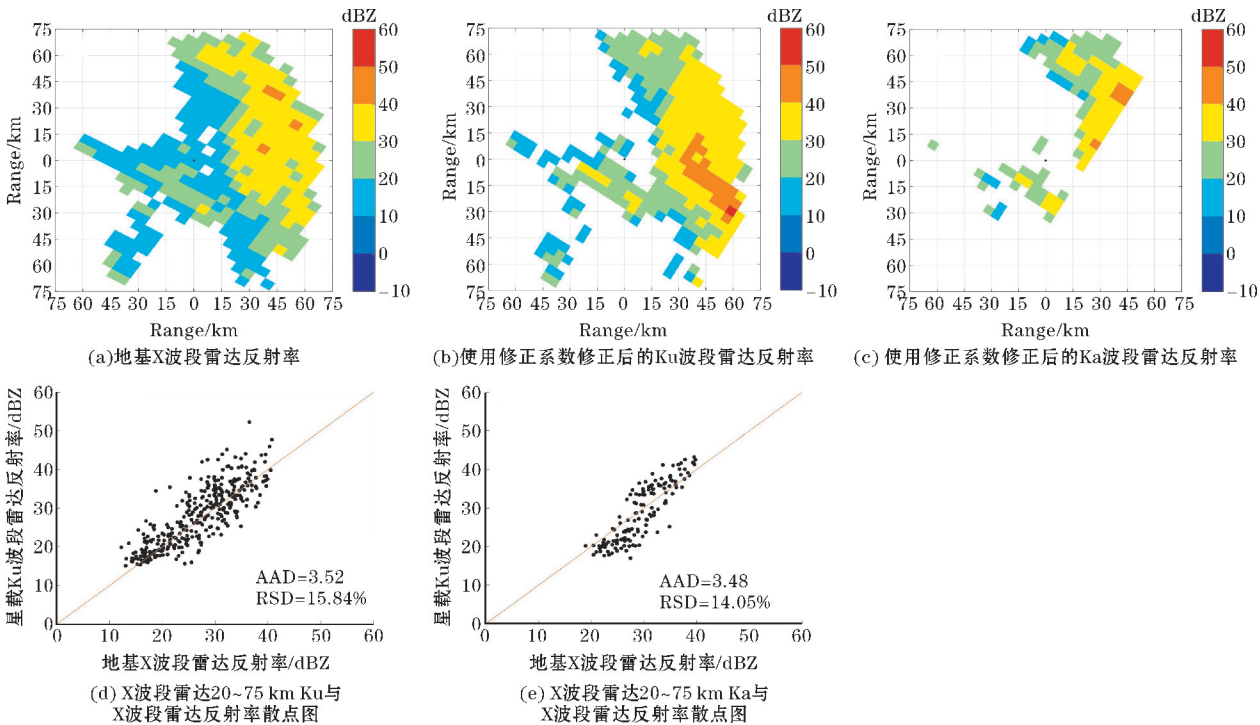


图8 2017年7月6日21时05分(北京时)的雷达反射率观测

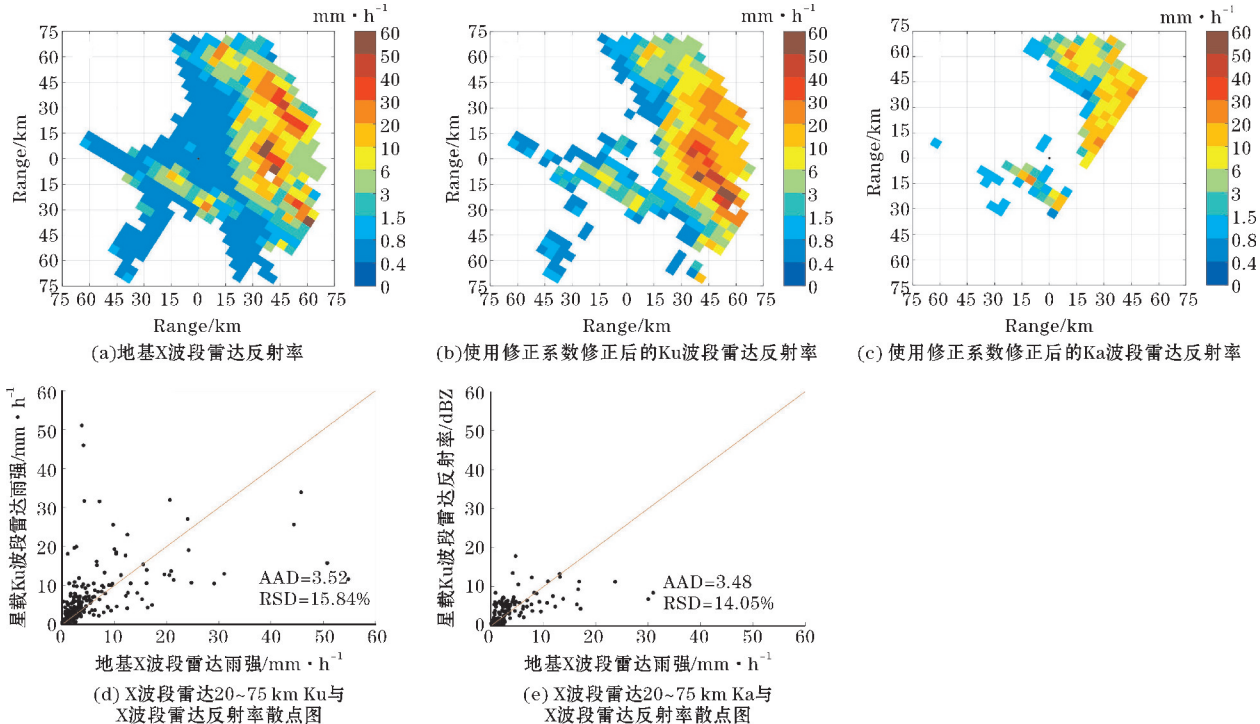


图9 2017年7月6日21时05分(北京时)的雷达降水反演情况

图9展示了雷达反演降水与卫星Ku波段降水产品的效果对比,对比图8(a)和图9(a),地面雷达反射率与降水估测的强弱分布具有很好的一致性。对比图8(b)和图9(b),星载Ku雷达反射率与降水估测的强弱分布情况相似;对比图9(a)和(b)可以直观地看到,降雨强度低于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的样本点,对应效果较好,高于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的样本点对应效果较差,这个结论也在图9(c)中得到证实。对比图9(c)与(a),Ku雷达反演得到的降雨强度要略强于地基雷达反演得到的雨强,同样可以看出,在降雨强度低于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的样本点,两部雷达的降水反演结果较为相近,高降雨强度样本点降雨强度距较大。

## 5 结束语

通过使用北京顺义地区的X波段双偏振雷达数据结合二维雨滴谱仪数据对GPM星载雷达数据在华北地区的适用情况进行实验。此外,还介绍了GPM空间雷达与X波段地基雷达之间的数据对比,并利用X雷达偏振数据反演降水对GPM双频星载雷达降水产品进行定量评估。

个例实验结果表明:若X波段双偏振雷达数据为真值,Ku波段GPM星载雷达反射率观测的相对标准误差约为15.84%,Ka波段约为14.05%,结果说明空间和地面雷达降雨产品之间的交叉比较是非常有希望的。在降水产品的定量评估中,雨强低于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的样本点,对应效果较好,高于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的样本点对应效果较差。这可能是大粒子受到气流的影响发生形变,加之观测角度的不同,造成探测误差,这仍需进一步分析。此外,文中存在不足,由于观测原因,获得的满足对比实验的个例较少,希望在今后的外场观测中获取更多个例,以得出更准确的结论。

## 参考文献:

- [1] 唐国强,龙笛,万玮,等.全球水遥感技术及其应用的综述与展望[J].中国科学:技术科学,2015,45(10):1013-1023.
- [2] Hou AY, Kakar R K, Neeck S, et al. The global precipitation measurement mission[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(5):701-722.
- [3] 陈茜,官莉. GPM 卫星反演降水产品在江苏地区的适用性[J]. 气象科技,2018,46(6):1103-1123.
- [4] Chandrasekar V, Le M. Evaluation of profile classification module of GPM-DPR algorithm after launch[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International. IEEE,2015:5174-5177.
- [5] Toshio Iguchi, Shinta Seto, Robert Meneghini, et al. GPM/DPR Level-2 Algorithm Theoretical Basis Document[J]. 2017.
- [6] Petkovic V, Kummerow C D. Performance of the GPM Passive Microwave Retrieval in the Balkan-Flood Event of 2014[J]. Journal of Hydrometeorology,2015,16(6):2501-2518.
- [7] Chandrasekar V, H Chen. Validation of NASA's Global Precipitation Measurement mission with a high-resolution ground radar network[J]. Ursi Asia-Pacific Radio Science Conference,2016:836-839.
- [8] 刘晓阳,李郝,何平,等. GPM/DPR 雷达与 CINRAD 雷达降水探测对比[J]. 应用气象学报,2018,29(6):667-679.
- [9] 余坤伦,张寅生,马宁,等. GPM 和 TRMM 遥感降水产品在青藏高原中部的适用性评估[J]. 干旱区研究,2018,35(6):1373-1381.
- [10] 刘黎平,钱永甫,王致君. 用双线偏振雷达研究云内粒子相态及尺度的空间分布[J]. 气象学报,1996(5):590-599.
- [11] Ryzhkov A, Zrnice D. Radar polarimetry at S, C and X bands comparative analysis and operational implications[C]. 32nd Conference on Radar Meteorology,2005.
- [12] Giangrande S E, Ryzhkov A V. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification[J]. Appl. Meteor. Climatol. 2008, 47:2445-2462.
- [13] Cifelli R. Coauthors. Evaluation of an operational polarimetric rainfall algorithm[C]. Preprints,31st Int. Conf. on Radar Meteor. Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc. 2003.
- [14] Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, et al. A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2011,28



- (3):352-364.
- [15] 唐琪. 雨滴谱变异性及衰减订正对 X 波段双偏振参量反演降雨的影响[D]. 北京:中国科学院大学(大气物理研究所),2015.
- [16] 李毅聪,胡沁,黄祖辉,等. X 波段移动雷达与 S 波段新一代天气雷达产品比对分析[J]. 江西科学,2018,36(3):511-516.
- [17] Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar. Correcting C-Band Radar Reflectivity and Differential Reflectivity Data for Rain Attenuation: A Self-Consistent Method With Constraints [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001,39:1906.
- [18] Park S G, V N Bringi V Chandrasekar, et al. Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X Band. Part I: Theoretical and Empirical Basis [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005,22:1621-1632.
- [19] Park S G, M Maki, K Iwanami, et al. Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X Band. Part II: Evaluation and Application [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005,22:1633-1655.
- [20] 何宇翔,吕达仁,肖辉,等. 段树. X 波段双线极化雷达反射率的衰减订正[J]. 大气科学, 2009,33(5):1027-1037.
- [21] Peter H. Hildebrand. Iterative Correction for Attenuation of 5 cm Radar in Rain [J]. Journal of Applied Meteorology, 1978,17:508-514.
- [22] Sergey Y Matrosov, Kurt A, et al. X-band polarimetric radar measurements of rainfall [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002,41(9):941-952.
- [23] 杜牧云,刘黎平,胡志群,等. 双线偏振雷达差分传播相移的质量控制[J]. 应用气象学报, 2012,23(6):710-720.
- [24] 崔爱璐. 基于差分传播相移的 Dual-Pol 雷达衰减订正方法研究[D]. 天津:中国民航大学, 2017.
- [25] 冯亮. 强风暴雨微物理特性的 X 波段双偏振雷达反演研究[D]. 北京:中国科学院大学(大气物理研究所),2018.
- [26] Lawrence D Carey, Steven A Rutledge, David A. Ahijevych. Correcting propagation effects in C-band polarimetric radar observations of tropical convection using differential propagation phase [J]. Journal of Applied Meteorology, 2000,39:1405-1433.
- [27] Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan Narayananaswamy, et al. An Examination of Propagation Effects in Rainfall on Radar Measurements at Microwave Frequencies [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology-J ATMOS OCEAN TECHNOL. 1990,7:829-840.
- [28] Zrnice D S, Ryzhkov A. Advantages of rain measurements using specific differential phase [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1996,13(2):454-464.
- [29] Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. Experiments in Rainfall Estimation with a Polarimetric Radar in a Subtropical Environment [J]. Journal of Applied Meteorology. 2002,41(6):674-685.
- [30] Chandrasekar V, Gorgucci E, Baldini L. Evaluation of polarimetric radar rainfall algorithms at X-band [J]. ERAD, 2002.
- [31] Matrosov, S Y. Evaluating polarimetric X-band radar rainfall estimators during HMT [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010,27(1):122-134.
- [32] Ryzhkov A, Diederich M, Zhang P, et al. Potential Utilization of Specific Attenuation for Rainfall Estimation, Mitigation of Partial Beam Blockage, and Radar Networking [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2014,31(3):599-619.
- [33] Giangrande S E, Ryzhkov A V. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification [J]. Appl. Meteor. Climatol. 2008,47:2445-2462.
- [34] Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, et al. A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2011,28(3):352-364.
- [35] 胡志群,刘黎平,楚荣忠,等. X 波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究[J]. 气象学报,2008,66(2):251-261.

[36] Matrosov, Kurt A Clark, Brooks E. Martner, Ali Tokey. X-band polarimetric radar measurementsof rainfall [ J ]. Journal of Applied Meteorology, 2002,41(9):941–952.

[37] Matrosov, Sergey Y, Kingsmill, et al. The utility of X-band polarimetric radar for quantitative estimates of rainfall parameters [ J ]. Journal of Hydrometeorology,2005,6(3):248–262.

[38] Chandrasekar V, Lim S, Gorgucci et al. Simulation of X-Band Rainfall Observations from S-Band Radar Data[ J ]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2006,23(9):1195–1205.

[39] Segelstein DJ. The complex refractive index of water[ J ]. 1981.

[40] Haynes J M, Luo Z, Marchand T. A Multipurpose Radar Simulation Package: QuickBeam[ J ]. Bulletin of The American Meteorological Society,2007.

Preliminary Study on Applicability of GPM\_DPR Precipitation Measurements in Northern China by Using Ground Dual Polarization Radar

FENG Qizhen<sup>1</sup>, XIAO Hui<sup>2</sup>, YAO Zhendong<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information and Technology, Chengdu 610225, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, LACS, Beijing 100000, China)

**Abstract:**The Global Precipitation Measurement (GPM) program core observation satellite was launched in July 2014. Ground verification is an essential task to verify satellite detection capabilities. This paper mainly uses dual-polarized X-band radar data, and combines the ground raindrop spectrometer to verify GPM dual-frequency radar data in Shunyi, Beijing. This experiment focuses on the cross-validation between GPM satellite data and ground-based radar data. The precipitation measurements generated by ground-based radar are used to evaluate satellite precipitation measurements. The results show that the satellite and ground-based radar reflectivity factors are in good consistency. However, there are obvious differences in precipitation products, which need further analysis.

**Keywords:** radar; precipitation measurement; GPM