

星载双频测雨雷达航空校飞试验降水反演分析^{*1}

吴琼 杨虎 商建 郭杨 尹红刚 卢乃锰

WU Qiong YANG Hu SHANG Jian GUO Yang YIN Honggang LU Naimeng

国家卫星气象中心,北京,100081

National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

2011-01-24 收稿,2012-04-09 改回.

吴琼, 杨虎, 商建, 郭杨, 尹红刚, 卢乃锰. 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
Wu Qiong, Yang Hu, Shang Jian, Guo Yang, Yin Honggang, Lu Naimeng. 2013. Analysis of the rain retrieval from the results of the airborne dual frequencies precipitation radar field campaign. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(1): 159-166

Abstract The airborne dual frequencies (Ku and Ka band) precipitation radar field campaign was operated in Dongtai, Jiangsu Province during 6 September to 20 October 2010. Many valuable experimental data has been collected after this campaign. Based on the data, the rain detective ability of the airborne radar is analyzed. The comparison of radar reflectivity factor profile between the airborne radar and the Precipitation Radar (PR) on Tropical Precipitation Measure Mission (TRMM) shows the airborne radar has an ability to detect the vertical structure of rain, including the melting layer. In order to do the rain retrieval of the Ka band, the relationship between $k-Z_e$ and $R-Z_e$ was calculated firstly by using the Satellite Data Simulator Unit (SDSU), and then the measured radar reflectivity factor profile was corrected. The results show that the rain rate retrieved by the Ku band is almost the same as that of Ka.

Key words Spaceborne rain radar, Field campaign, Rain retrieval

摘要 2010年9月6日到10月20日,在江苏东台黄海附近进行了中国首次星载双频(Ku和Ka波段)测雨雷达的外场校飞试验,获得了宝贵的机载雷达数据。利用所探测的有效降水资料,对机载雷达的降水探测能力进行了性能分析。对比机载测雨雷达和同步星载测雨雷达(Precipitation Radar, PR)探测的反射率因子廓线可以发现,机载雷达反射率因子廓线在1.5—5 km高度的探测结果和PR较为一致,尤其是融化层一致性更好,表明机载雷达有探测降水垂直结构的能力。为了进行Ka波段机载雷达的降水反演,利用卫星数据模拟器(Satellite Data Simulator Unit, SDSU)计算了 $k-Z_e$ 和 $R-Z_e$ 关系的系数,并在此基础上进行了衰减订正以及雨强的反演。结果表明,Ku和Ka波段反演的雨强廓线基本一致,证实了反演系数的合理性。

关键词 测雨雷达, 外场校飞, 降水反演

中图分类号 P412.25

1 引言

星载测雨雷达作为主动微波遥感探测仪器,不仅能克服光学遥感器不能穿透大气云雨的缺陷,提升对降水重要特征探测的能力,还能克服被动微波遥感器不能提供降水垂直结构信息、受背景辐射影响等缺点。因此,星载测雨雷达已经成为测量全球

尺度降水的有效手段和重要的遥感仪器。发展以星载测雨雷达为主要载荷的测雨卫星在中国气候研究、气象预报预警和极端天气事件监测中具有非常重要的意义和紧迫性。主要体现在以下几个方面:星载测雨雷达可以得到全球降水三维精细结构信息,在很大程度上提高目前降水测量产品精度,为研究云和降水在全球水循环中的作用提供关键的研究

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项经费项目(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,主要从事星载降水雷达研究。E-mail: wuqiong@cma.gov.cn

数据;星载测雨雷达数据能够弥补海上台风监测数据的空白,提供高精度台风降水三维结构,降低台风路径预报误差;星载测雨雷达与被动微波观测相结合,可以极大降低目前被动微波降水反演中的误差;星载测雨雷达可以用于对地面气象雷达进行统一标定,改变地面气象雷达缺乏统一标定标准的现状,提高地面气象雷达的应用水平;测雨卫星作为核心观测卫星,还可对其他卫星有效载荷进行统一标定,并通过国际合作,以与全球测雨计划(Global Precipitation Measurement, GPM)卫星组网观测等方式提供全球高时效降水产品。

中国计划在风云三号 02 批卫星观测星座中的测雨星上搭载双频测雨雷达(吴琼等, 2011)。目前,该仪器的两个原理样机(Ka 频段和 Ku 频段)已经研制成功。2010 年 9 月 6 日—10 月 20 日,中国气象局国家卫星气象中心联合几家合作单位在江苏东台沿海地区开展了 Ka 和 Ku 波段双频机载雷达的外场校飞试验。除了机载雷达外,还选择了地基 12 通道微波辐射计、X 波段车载雷达和 GPS 定位仪等进行地面同步观测配合本次试验。由于所选试验区位于 32°N 附近,正好可以获取热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)上所携带的 Ku 波段测雨雷达(Precipitation Radar, PR)的观测数据,从而使得本次试验具备了星-机-地不同来源雷达数据同步比对的条件。

本文简单展示了机载双频雷达的测量结果,通过与同步星载雷达的比对初步分析了机载雷达探测降水的能力。此外,利用卫星数据模拟器(Satellite Data Simulator Unit, SDSU)(Masunaga, et al, 2010)计算了 Ka 和 Ku 波段的 $k-Z_e$ 和 $R-Z_e$ 关系的系数,并在此基础上进行了衰减订正以及雨强的反演。本次试验对中国未来星载测雨雷达的发展具有重要的意义。

2 试验简介

本次试验中,共飞行了 11 个有效架次,其中,外定标 7 次,海面同步观测 2 次,有效降水 2 次。探测降水的时间分别为 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,选择 10 月 11 日的数据进行雷达性能分析。此次数据共包括 2756 条扫描行,56 个距离库和 15 个角库。需要说明的是,分析过程中所涉及的雷达测量反射率

因子均已经过去噪处理。试验中所涉及的主要参数如表 1 所示。

表 1 机载 Ku/Ka 波段雷达的主要参数

Table 1 The major parameters of the airborne Ku/Ka band radar

参数	Ku PR	Ka PR
飞行高度	5 km	5 km
工作频率	13.6 GHz	35.5 GHz
观测幅宽	3.6 km	3.6 km
观测窗口	4 km—3 km	4 km—3 km
水平分辨率	240 m(机下点)	240 m(机下点)
垂直分辨率	250 m(机下点)	250 m(机下点)
独立样本数	≥ 64	≥ 64
天线增益	35 dB	35 dB
天线波束	$2.9^{\circ} \times 2.9^{\circ}$	$2.9^{\circ} \times 2.9^{\circ}$
扫描角	$\pm 20^{\circ}$	$\pm 20^{\circ}$
峰值功率	142 W	45 W
动态范围	≥ 70 dB	≥ 70 dB

3 测量结果

图 1 和 2 分别是机载雷达 Ka 和 Ku 波段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引起的。

PR 作为世界上第一部也是目前唯一一部星载测雨雷达(Kummerow, et al, 1998),为全球降水提供了大量的资料,探测能力毋庸置疑。因此,进行星-机的同步比对,是评判机载雷达性能的最直接方式。分析 10 月 11 日的 PR 和机载雷达数据后发现,机载雷达的观测时间是 08 时 52 分 58 秒—10 时 17 分 41 秒(北京时,下同),和机载雷达空间上最接近的 PR 观测时间是 08 时 09 分,时间和空间上不完全同步给星-机的对比带来了一定的困难。尽管如此,当地 10 月 11 日的降水是典型的层状降水,比较均匀,因此,通过比较两者的最大值廓线可以排除时空不完全匹配的问题,选取 PR 数据和机载雷达空间间隔在 100 km 以内的数据。图 3 是机载雷达机下点和 PR 星下点雷达反射率因子垂直廓线在每个高度层上的最大值廓线,可以看出, Ku 波段机载雷达测量的反射率因子大于 Ka 波段,这符合雷达气象学的基本原理。另外,在地表之上 2—4.1 km,机载 Ku 波段和 PR 探测的廓线比较接近;尤其是在 4 km 以上 0℃ 亮带,不仅亮带出现的高度一致,而且,雷达反射率因子的强度也非常一致。地表至

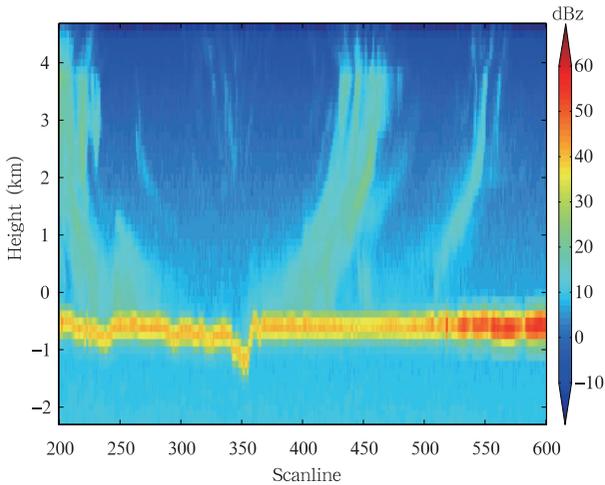


图 1 Ka 波段沿飞行方向机下点的剖面
Fig.1 Image from the Ka band along the flight direction (nadir)

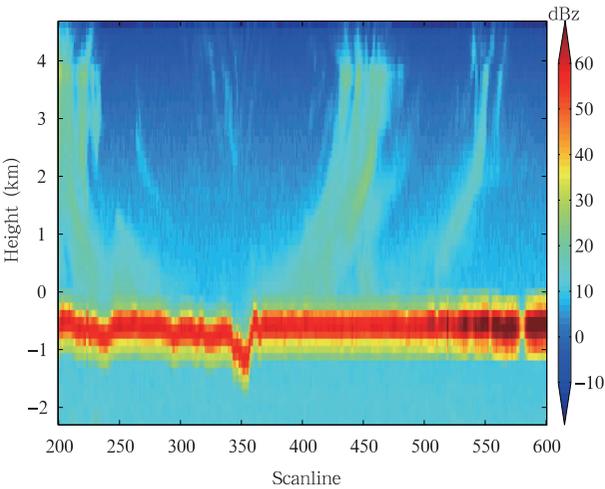


图 2 Ku 波段沿飞行方向机下点的剖面
Fig.2 Image from the Ku band along the flight direction (nadir)

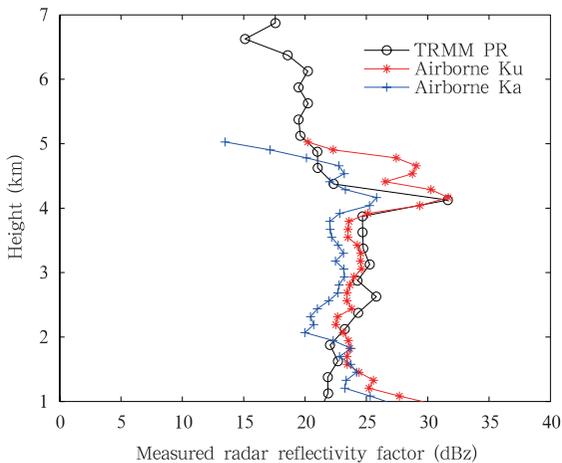


图 3 PR 和机载雷达测量的雷达反射率因子廓线
Fig.3 Radar reflectivity factor profiles plotted separately from the PR and the airborne radar

2 km高度,机载雷达受地物杂波影响较大,因此,机载雷达测量的雷达反射率因子较 PR 明显偏大。

当然,仅用 1 次资料就说明机载雷达的探测能力接近 PR 的水平是远远不够的。但是,机载雷达探测降水数据的不足限制了通过星-机对比来检验机载雷达的探测能力。不过,本文的主要目的并不是通过比较机载雷达和 PR 来分析机载雷达的探测能力,而是进行机载雷达反射率因子廓线的降水反演,为后续全面分析机载雷达的性能奠定基础。

4 降水反演分析

4.1 反演算法介绍

衰减订正作为反演雨强廓线的基础是数据处理与分析中非常重要的一个环节。自 PR 在轨以来,反演算法不断完善,目前,Ku 波段的降水反演算法已经日趋成熟,反演的精度也不断提高。

在 PR V6 版本的降水反演算法中,路径积分衰减(Path Integrated Attenuation, PIA)由 4 部分组成(Iguchi, et al, 2009)

$$PIA(r) = PIA_P(r) + PIA_{CLW}(r) + PIA_{WV}(r) + PIA_{O_2}(r) \quad (1)$$

其中, PIA_P 、 PIA_{CLW} 、 PIA_{WV} 和 PIA_{O_2} 分别代表降雨、云液态水、水汽和氧气引起的雷达回波衰减。在衰减订正过程中,先订正非降雨的衰减,再订正降雨的衰减,从而得到等效雷达反射率因子。等效雷达反射率因子 Z_e 和经过非降雨衰减订正后的雷达反射率因子 Z'_m 的关系可以表示为(Iguchi, et al, 2000)

$$Z'_m(r) = Z_e(r) \exp[-0.2 \ln 10 \int_0^r k(s) ds] \quad (2)$$

其中,雨衰系数 k 和等效雷达反射率因子 Z_e 满足 $k = \alpha Z_e^\beta$ 的关系,一般的 $k-Z_e$ 关系都是统计关系,无法准确代表实际降水过程中的雨滴谱分布,因此,需要调节 $k-Z_e$ 关系以得到接近于真实情况的雨滴谱分布,从而保证衰减订正和反演的准确性。在 PR 算法中,采用了 HB(Hitschfeld-Bordan)和表面参考技术(Surface Reference Technique,SRT)联合反演的方法获取最佳的 PIA_P 以调节雨滴谱分布。考虑到本次试验中,无法建立表面参考技术方法所需的后向散射截面数据库,因此,只采用了 HB 方法进行雨衰的订正。雨衰订正以后,可以用 $R-Z_e$ 关系反演

出雨强。

对非降雨的衰减而言,Ku波段的衰减一般较小,而Ka波段的衰减往往不可忽略,因此,Ka波段非降雨的衰减订正是保证Ka波段降水反演精度的首要条件。本文分别参考PR和Stepanenko对氧气、水汽和液态水的衰减估计计算了Ku和Ka波段非降雨的衰减(Matrosov, et al, 2004)。

从式(2)可以看出,直接影响雨衰订正的主要因素是 $k-Z_e$ 系数。PR的 $k-Z_e$ 系数是通过大量的地基雷达数据、同步的滴谱仪资料以及假设的雨滴谱分布模式来获取的(Kozu, et al, 2009)。但是,实际探测资料的不足给利用上述方法进行Ka波段 $k-Z_e$ 系数的统计带来了一定的困难。本文尝试利用卫星数据模拟器(SDSU)来模拟计算Ka波段的 $k-Z_e$ 系数。

4.2 $k-Z_e$ 和 $R-Z_e$ 系数计算

SDSU是一个卫星数据模拟器,可以用来模拟微波亮温、雷达反射率因子、PIA、可见光和近红外辐射以及热红外亮温(Masunaga,2010)。SDSU中使用的数据库来自于NASA开发的GCE(Goddard Cloud Ensemble Model)(Tao, et al, 1989, 1991)模拟的一次热带飑线过程,共4个瞬态。每个瞬态有 140×140 条廓线,垂直高度为18 km,分为28层,10 km以下0.5 km一层,10 km以上1 km一层,每条廓线包含有高度、气压、温度、水成物含量(云水、雨、雪、霰和雹)、降雨类型和地表雨强等参数。本文在使用过程中选用了第1个瞬态的数据。SDSU的一个显著优点在于其对融化层的复杂结构有较好的模拟,能够较真实描述降水的三维结构。挑选出所有雨强在0—5 mm/h的层状降水廓线,对其相应的雷达反射率因子廓线进行平均(图4)。从图4中可以看出,4.2 km附近存在明显的亮带,表明层状降水中的融化层结构得到了很好的模拟。

为了得到本次外场试验中可用的 $k-Z_e$ 和 $R-Z_e$ 系数,首先挑选出所有降水类型为层状降水的廓线(外场试验中探测的降水为层状降水),模拟输出等效雷达反射率因子 Z_e 、雨衰系数 k 以及雨强 R 。其次从雷达反射率因子以及雨强两个角度筛选出雷达反射率因子大于10 dBz、雨强大于0 mm/h的数据。然后根据温度和高度对垂直廓线进行分层,将廓线

分为0℃层、20℃层、0℃层上0.5 km一层、0℃层上1 km一层以及0℃层下0.5 km一层共5层。最后通过 $\lg Z_e$ 和 $\lg k$ 以及 $\lg Z_e$ 和 $\lg R$ 的线性拟合得到每层的 $k-Z_e$ 和 $R-Z_e$ 的关系系数,其他层上的系数则可以通过温度或高度插值计算。图5和6是Ka波段0℃层的拟合结果。

从图中可以看出,大部分离散点都集中在拟合直线两侧,拟合效果较好。为了保证Ka和Ku波段 $k-Z_e$ 和 $R-Z_e$ 系数来源的一致性,Ku波段的系数也用该方法得到。表2是不同层上Ka和Ku波段的系数。为了简化式(2)中的计算, β 统一为0℃层和20℃层 β 的平均值。

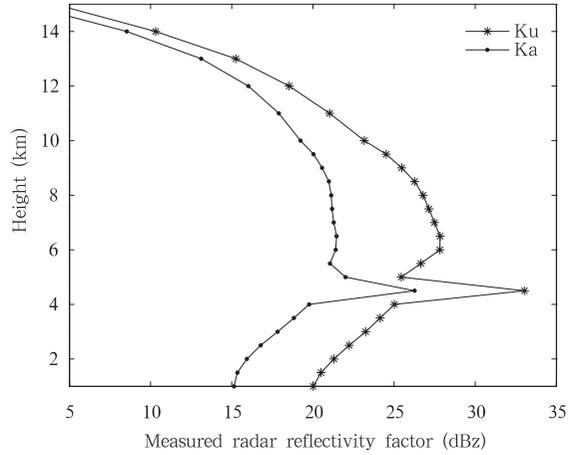


图4 层状降水雨强在0—5 mm/h所有反射率因子的平均廓线
Fig. 4 Average profiles of the measured radar reflectivity factors from 0 to 5 mm/h for the stratiform rain

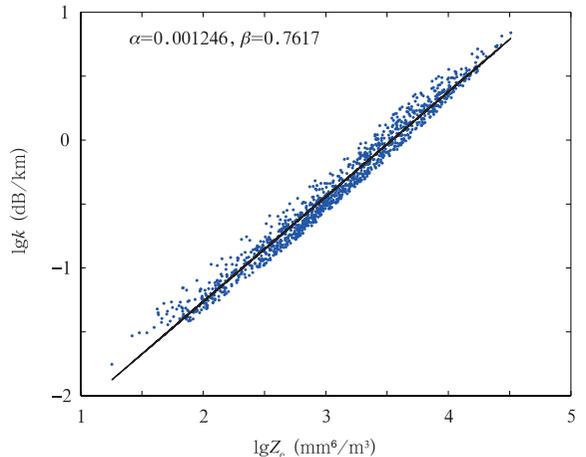


图5 在0℃层拟合的 $k-Z_e$ 关系
Fig. 5 $k-Z_e$ relationship fitted for the 0℃ layer

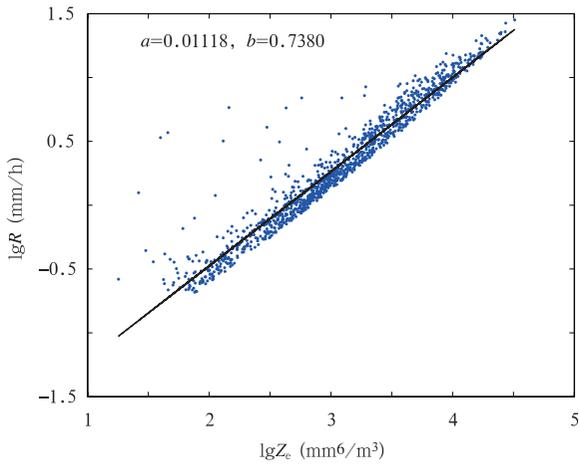


图 6 在 0°C 层拟合的 $R-Z_e$ 关系

Fig. 6 $R-Z_e$ relationship fitted for the 0°C layer

表 2 Ka 和 Ku 波段 $k = \alpha Z_e^\beta$ 以及 $R = a Z_e^b$ 系数

Table 2 The $k-Z_e$ and $R-Z_e$ parameters of the Ka band and the Ku band

参数		0°C 上 1 km	0°C 上 0.5 km	0°C 层	0°C 下 0.5 km	20°C
Ka	α	0.001978	0.004702	0.001246	0.004242	0.003770
	β	0.7617	0.7617	0.7617	0.7617	0.7617
	a	0.01305	0.03425	0.01118	0.03104	0.02899
	b	0.6793	0.6600	0.7380	0.6955	0.6926
Ku	α	0.0004726	0.0008140	0.0001590	0.0006630	0.0004240
	β	0.7348	0.7348	0.7348	0.7348	0.7348
	a	0.01956	0.04295	0.01254	0.04203	0.04464
	b	0.5336	0.5978	0.6531	0.6412	0.6338

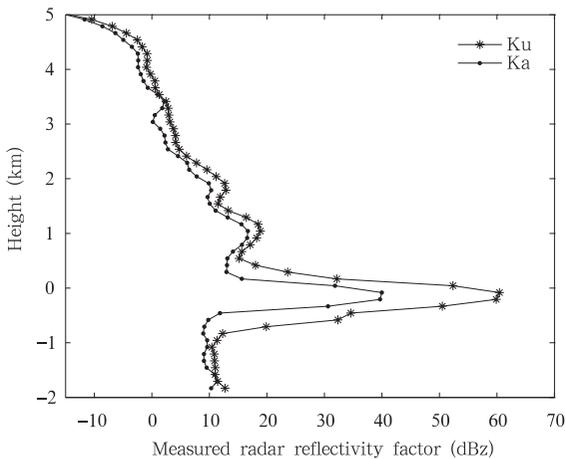


图 7 第 2000 条扫描行机下点的廓线

Fig. 7 Measured radar reflectivity factor profiles of the 2000th scan line in the nadir

4.3 反演结果

随机选取机载雷达第 2000 条扫描行机下点的廓线为例,进行衰减订正和降水反演,机载雷达测量的雷达反射率因子廓线如图 7 所示,因为考虑到地物杂波的影响,反演高度范围限制从地表以上第 5 个距离库到回波顶。

选择时间上同步观测的辐射计数据(郭杨等, 2012),包括地表气压、温度、相对湿度以及液态水廓线来进行 Ka 波段非降雨的衰减订正。非降雨衰减订正后,进一步利用表 2 中的系数进行雨衰订正,得到等效雷达反射率因子。Ku 和 Ka 波段等效雷达反射率因子 Z_e 和机载雷达测量的雷达反射率因子 Z_m 的廓线如图 8 所示。反演的雨强廓线如图 9 所示。

比较明显。Ku 波段的路径积分衰减为 0.29 dB, Ka 波段的路径积分衰减为 3.03 dB。SDSU 中输出的地面雨强在 0—1 mm/h 的层状降水对应的 Ku 波段路径积分衰减值为 0.25—1.98 dB, Ka 波段为 1.2—12.1 dB,机载数据的路径积分衰减值在模式计算的范围内,表明衰减订正结果合理。从反演的雨强曲线来看,两个波段反演的雨强在 3 km 以上基本重合,3 km 以下 Ka 波段的雨强比 Ku 波段略小,但是,最大的差异不超过 0.1 mm/h。实际上,辐射计探测的区域和机载雷达探测的区域存在空间上的不匹配,并且,辐射计在该时刻显示的降雨状态为无雨,因此,辐射计探测无雨区域内的相对湿度和液态水含量可能会比机载雷达探测弱降水区域内的偏少,从而导致 Ka 波段水汽和液态水的衰减订正不足,反演的雨强偏小。当然,SDSU 中的雨滴谱分布和实际降雨过程中雨滴谱分布的差异也是不可避免的一个误差因素。

对比图 8 和 9 中两个波段的衰减订正结果可以看出,Ku 波段的 Z_e 和 Z_m 廓线基本重合,衰减订正前后没有明显区别,而 Ka 波段衰减订正的效果则

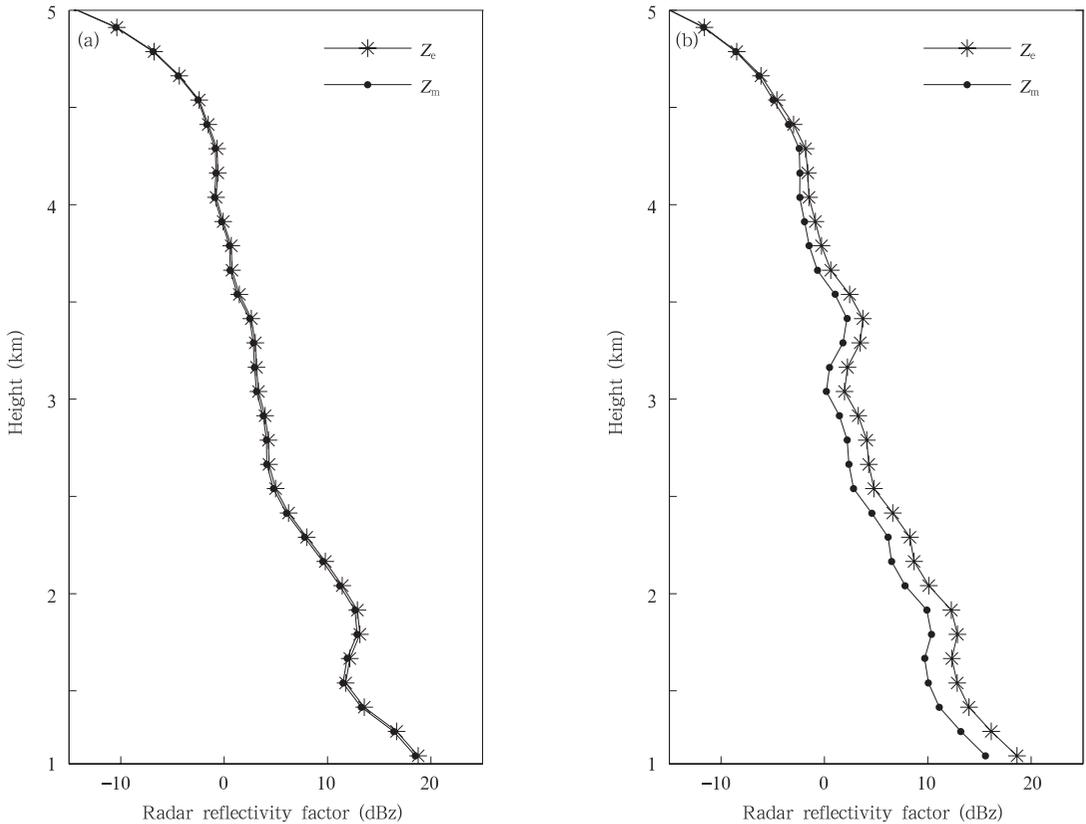


图 8 Ku(a)和 Ka(b)波段测量的雷达反射率因子(Z_m)和衰减订正后的等效雷达反射率因子(Z_c)廓线

Fig. 8 Attenuation correction results from the measured radar reflectivity factor (Z_m) to equivalent radar reflectivity factor (Z_c) of (a) the Ku band and (b) the Ka band

为了进一步验证机载雷达降水反演的结果,将机载雷达和 X 波段车载雷达反演的雨强进行了比较。车载 X 波段气象雷达的主要探测参数为降水系统的回波强度、径向速度和速度谱宽。雷达工作在 9.375 GHz,波束宽度 1.5° 。与机载测雨雷达进行机、地同步观测时采用体扫描方式,方位角范围为 $0\text{--}360^\circ$,俯仰角范围为 $0\text{--}38^\circ$,探测半径为 75 km,径向分辨率为 150 m。要进行精确的比较,必须先经过完整的时空匹配处理,图 10 是时空匹配后机载 Ku 波段和车载 X 波段雷达对同一观测区域的顺轨垂直切面(商建等,2012)。可以发现,两者探测的降水结构较为相似。

因为考虑到 X 波段的衰减比 Ku 波段更小,而 Ku 波段本身的衰减几乎可以忽略,因此,没有对 X 波段进行衰减订正,直接将测量的雷达反射率因子近似为等效雷达反射率因子,用 $R\text{--}Z_e$ 关系进行降水

反演,表 3 是 X 波段的 $R\text{--}Z_e$ 系数,同样利用 SDSU 计算。

X、Ku 和 Ka 三个波段反演雨强的最小值都接近于 0 mm/h,最大值分别为 6.0768、3.0862 和 3.4881 mm/h,均值分别为 0.6449、0.2899 和 0.2723 mm/h。一般来说,Ku 波段受衰减影响较小,降水反演的精度较高,因此,将 Ku 波段反演的雨强作为基准。Ka 波段的最大值和均值均与 Ku 波段相近,而 X 波段的最大值和均值则比 Ku 波段大。Ka 波段因为水汽和液态水衰减订正的不确定性,容易出现衰减订正不足或者过量订正的情况,从而导致 Ka 波段和 Ku 波段反演的雨强存在一定的偏差。匹配区域雷达反射率因子的统计显示(商建等,待刊),X 波段的雷达反射率因子平均比 Ku 波段偏大 2.84 dBz,尽管因为频点的差异,X 波段反射率因子应该比 Ku 波段偏大,但是,SDSU 的计算结

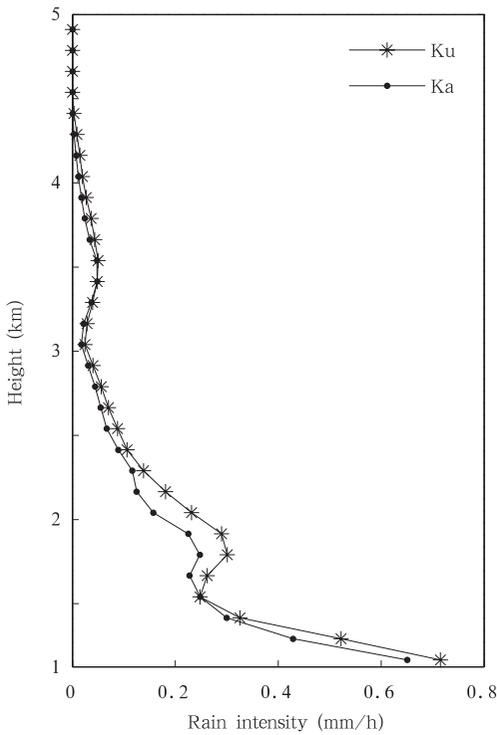


图 9 雨强反演结果

Fig. 9 Rain rates retrieved from the airborne radar data based on the different bands

果表明,对于 0—5 mm/h 的层状云降水, X 波段的雷达反射率因子平均只比 Ku 波段大 0.53 dBz。假设温度为 20℃,雨强为 3.08 mm/h(Ku 波段的最大值),Ku 波段对应的等效雷达反射率因子约为 29.01 dBz。假设 X 波段的反射率因子比 Ku 波段大 2.84 dBz,那么 X 波段反演的雨强能达到 5.40 mm/h,而如果 X 波段的反射率因子只比 Ku 波段大 0.53 dBz,X 波段反演的雨强则为 3.77 mm/h,和 Ku 波段反演的雨强更为接近。表明 X 波段的雨强较 Ku 波段偏大的原因基本上是由反射率因子的偏大所引起的。总的来说,因为雨强和雷达反射率因子存在 $R = aZ_e^b$ 的简单关系,并且,在本次降雨过程中 Ku 和 X 波段的衰减都较小,因此,机载 Ku 波段雷达和车载 X 波段雷达反演的雨强分布和其测量的雷达反射率因子的分布一致,两者能看到较为相似的降水结构,但是,在雨强的数值上还存在一些因为 X 波段反射率因子的偏大所带来的差异,这可能和雷达定标的不确定性、匹配过程中坐标系转换时的插值计算引入的误差以及机载和车载观测方式的不一致等因素有关(商建等,2012)。

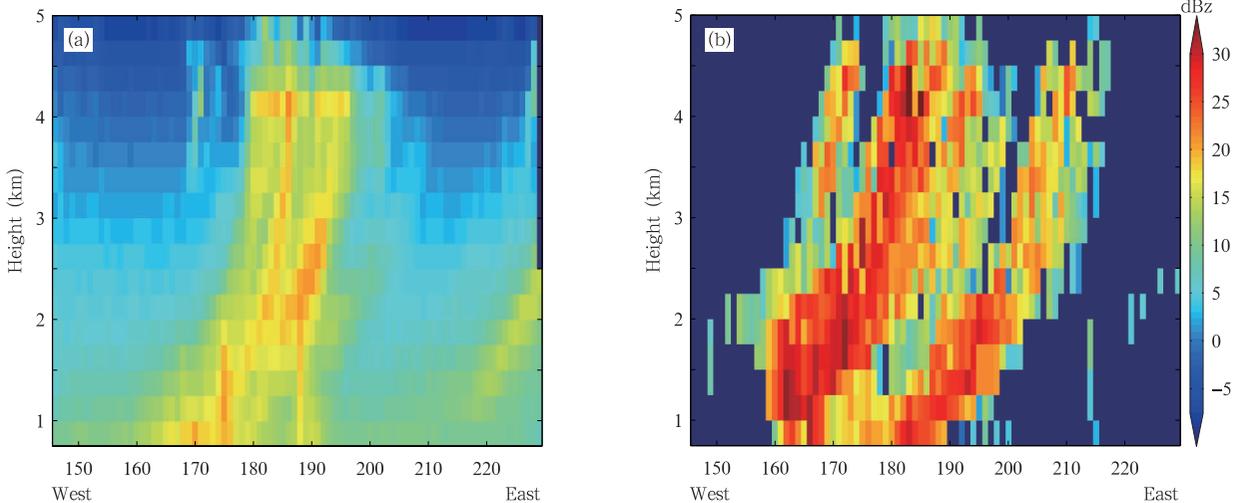


图 10 机载 Ku 波段(a)和车载 X 波段(b)雷达对同一观测区域的顺轨垂直剖面

Fig. 10 Along-track vertical sections detected by the Ku band and the X band for the same observational zone (a. airborne Ku band, b. vehicle borne X band)

表 3 X 波段 $R = aZ_e^b$ 系数

Table 3 The $R-Z_e$ parameters of the X band

参数	0℃上 1000 m	0℃上 500 m	0℃	0℃下 500 m	20℃
<i>a</i>	0.02073	0.04470	0.01169	0.04000	0.03892
<i>b</i>	0.5232	0.5973	0.6573	0.6617	0.6726

5 结 论

星载测雨雷达工程不仅是一项气象意义上的伟大工程,也是关系国计民生的大计,它的成功发射可以填补中国在主动式遥感领域的空白,增强中国应对自然灾害的能力,起到防灾、减灾的作用。

通过机载测雨雷达和同步星载测雨雷达反射率因子廓线的比对可以看出,机载雷达对降雨系统有一定的探测能力。降水反演的结果表明,Ku 和 Ka 波段反演的雨强廓线基本一致,表明利用 SDSU 计算的 $k-Z_0$ 和 $R-Z_0$ 系数合理。和车载 X 波段雷达的对比发现,机载雷达探测到的降雨区域的空间和强弱分布特征与车载雷达探测的相似。

尽管试验取得了成功,但是,在整个飞行过程中,由于天气、飞机本身及飞行空域受限等因素,只探测到了弱降水,并且,探测到的有效降水次数有限,在一定程度上限制了星-机-地的对比分析。此外,只采用了单频的降水反演方法,相比而言,双频的降水反演不仅有利于获取雨滴谱的参数信息,而且,可以提高降水反演的精度,这将是以后数据分析的方向。

参考文献

郭杨, 杨虎, 商建等. 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

- 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
- 吴琼, 杨虎, 卢乃锰. 2011. 星载测雨雷达探测频段选择仿真研究. 气象学报, 69(2): 233-238
- 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
- Kozu T, Ighchi T, Shimomai T, et al. 2009. Raindrop size distribution modeling from a statistical rain parameter relation and its application of the TRMM precipitation radar rain retrieval algorithm. J Appl Meteor Climatol, 48(4): 716-724
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. J Atmos Ocean Tech, 15(3): 809-817
- Masunaga H, Matsui T, Tao W K, et al. 2010. Satellite data simulator unit. Bull Amer Meteor Soc, 91(12): 1625-1632
- Masunaga H. 2010. Satellite Data Simulator Unit (SDSU) Ver. 2 User's Guide. 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
- Tao W K, Simpson J. 1989. Modeling study of a tropical squall-type convective line. J Atmos Sci, 46(2): 177-202
- Tao W K, Simpson J, Soong S T. 1991. Numerical simulation of a subtropical squall line over Taiwan Strait. Mon Wea Rev, 119(11): 2699-2733