

星载测雨雷达探测频段选择仿真研究^{* 1}

吴琼^{1,2} 杨虎² 卢乃锰²
WU Qiong^{1,2} YANG Hu² LU Naimeng²

1. 中国气象科学研究院,北京,100081
2. 国家卫星气象中心,北京,100081

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*
2. *National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China*

2009-07-16 收稿,2009-11-22 改回.

Wu Qiong, Yang Hu, Lu Naimeng. 2011. A simulation research on the wave bands selection of a satellite-borne rain measuring radar. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(2):344-351

Abstract Based on the three basic requirements which should be met by a satellite-borne rain-measuring radar, researches on the combination of the soundest wave bands for FY-3 a satellite-borne rain-measuring radar have been made. The profiles of hydrometers and gases output by the high-precision three-dimensional (3D) Goddard cumulus ensemble (GCE) model are used as the input of the Quickbeam radar simulation software. The detection nature for the five frequencies of 5, 10, 14, 35 and 94 GHz is discussed. To obtain a sufficient dynamic range in the near surface layer, it is necessary to select a lower frequency. Under the restrictions of the existing antenna hardware and the current technology level, 5 and 10 GHz are unpractical to be selected as the frequencies of the satellite-borne radar. The contrast analyses of the measured radar reflectivity factor and the effective reflectivity factor in three different typhoon areas show that there is an increasing attenuation with increasing high frequency. So, 94 GHz can't be used to detect rain. However, a high frequency has a better sensitivity to light rain and can make up the sensitivity deficiency of low frequency; so, a high frequency can be employed to detect light rain. Finally, according to the frequency allocations determined by the International Frequency Registration Board, the Ka and Ku bands should be chosen and 13.40–14.00 GHz in the Ku band and 35.50–35.60 GHz in the Ka band should be the soundest wave bands combination. The Ku band is valid for detecting heavy rain while the Ka band is valid for detecting light rain. The bands of Ku and Ka can be connected to improve the precision of precipitation retrieval.

Key words Satellite-borne rain-measuring radar, GCE model, Radar reflectivity factor, Quickbeam radar simulation software

摘要 在星载测雨雷达必须满足的3个基本条件的基础上,开展了风云三号(FY-3)星载测雨雷达最佳波段组合的研究。文中将高精度GCE(Goddard cumulus ensemble)模式中BOB飓风资料的大气廓线和水凝物廓线作为三维Quickbeam气象雷达模拟软件的输入,分别模拟了5、10、14、35和94 GHz 5个频点星载测雨雷达的探测性能。从近地面层获得较宽的降水动态范围的角度,雷达频点中必须要选择一个低频。在现有天线硬件条件以及科技水平的限制下,基本排除了5和10 GHz作为星载测雨雷达探测频点的可能性。14、35和94 GHz 3个频点模拟探测台风不同区域时的等效雷达反射率因子和测量的雷达反射率因子的对比结果表明,雷达频点越高,受衰减的影响就越严重,因此94 GHz频点不适合作为星载测雨雷达的探测频点。考虑到高频点对弱降水探测的敏感性比较高,能够弥补低频点在弱降水区域受到敏感性限制的缺点。因此,高频点可以用来探测弱降水。最后,综合星载测雨雷达的频率配置分析结果,确定使用位于13.40—14.00 GHz以及35.50—35.60 GHz的Ku和Ka波段作为FY-3号星载测雨雷达的主探测波段。Ku波段有利于探测强降水,Ka波段则有利于探测弱降水,两者结合形成的双频探测有利于提高降水反演的精度。

关键词 星载测雨雷达, GCE模型, 反射率因子, Quickbeam雷达模拟软件

* 资助课题:国家自然科学基金项目(40601061)和国防科工局项目“降水雷达天地一体化指标仿真”。
作者简介:吴琼,从事星载测雨雷达研究。E-mail: zidi_qiong@163.com

中图法分类号 P412.25

1 引言

降水的全球分布及微物理结构影响着全球气候与环境变化,降水体系在整个大气的能量传输中起着重要作用。在目前全球气候变化的大背景下,全球降水分布及垂直结构的遥感更是降水研究中的关键环节与薄弱环节。降水的时空变化很大,很难对其进行准确的监测和预报。卫星遥感能够覆盖广阔的海洋、沙漠和高山区域,在很大程度上克服了地面雨量计及地基雷达观测范围受到地理位置影响的缺点,成为能够观测全球降水分布的有效手段。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点,提高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、受背景辐射影响等的缺点,能够直接测量陆地和海洋上空的云和降水,提供降水、云及潜热等大量的相关资料。因此,星载测雨雷达是测量全球尺度降水的有效手段和重要的遥感器,也是目前唯一能够对降水的三维结构进行直接测量的星载遥感器。

1997年11月发射的TRMM卫星上搭载了世界上第一台星载测雨雷达PR(Kummerow, et al, 1998; Kawanishi, et al, 2000; Kozu, et al, 2001),它的工作频率是13.8 GHz,这也是TRMM中唯一一部能够直接测量降水垂直剖面分布的主动式遥感仪器。自从TRMM PR发射以来,已经取得了大量的资料,对其资料的研究成为近年来中国研究的热点之一(傅云飞等,2007;马占山等,2008)。为了得到精度更高的全球降水探测产品,美国和日本联合提出了TRMM的后继任务——GPM计划,目前已有多个国家和组织加入了该计划。降水的精确测量将由安装在GPM核心卫星上的双频降水雷达DPR获取。此外,为了支撑GPM以及未来大气科学研究,NASA还提出了第2代星载降水雷达PR-2的研究计划,它能够测量更多类型和更大范围的降水,并能提供更为全面和准确的降水信息,为新一代星载降水雷达的研制指出了发展方向。

中国是世界上少数几个受台风影响最为严重的国家之一,历史上曾多次遭遇严重的台风暴雨、大风等灾害,台风对中国影响的最重要方面是其所带来的降水。近几年中国的台风灾害呈现出强度大和灾害重的特点(Ren, et al, 2002; 程正泉等, 2005; 王咏

梅等,2008)。如果能够利用星载测雨雷达对台风进行监测,不仅可以提高台风运动路径的预报准确率,而且还可以延伸预报时效,对防灾减灾也具有非常重要的现实意义。因此,中国在第2代极轨风云系列卫星后续规划中计划装载测雨雷达遥感仪器。目前,中国还未较完整地开展对星载测雨雷达探测波段选取的研究工作。鉴于此,本文拟从星载测雨雷达探测目标特性出发,利用仿真模型模拟了不同频点下星载测雨雷达的探测能力,尝试为中国星载测雨雷达最佳探测波段组合的选取提供依据。

星载测雨雷达频点的选择必须要满足以下3个基本条件(Nakamura, et al, 1990):(1)在近地面层获得一个足够的降水动态范围;(2)在天线硬件条件的限制下,获得一个足够窄的波束宽度以满足空间分辨率的要求;(3)频率的配置要由国际频率登记委员会决定。

2 数据和方法

2.1 云模型介绍

对云雨大气降水雷达探测仿真来说,云模型对仿真结果影响很大。只有建立了精确的云物理模型,才能得到接近真实情况的散射粒子相态、粒子分布密度、粒子大小等关键参数的三维分布,这是进行降水雷达探测仿真计算的基础。目前,由NASA开发的GCE模型是精度最高、应用最广泛的云模型(Tao, et al, 1989, 1991; Yeh, et al, 1995)。在降水云的垂直结构中,融化层结构最为复杂,也最难以用模型模拟。GCE模型中融化层垂直分辨率为500 m,包括0℃层、冰雪混合层、降水层,基本能够真实描述降水的三维结构特性信息。本文利用GCE模型中飓风Bob资料输出的大气廓线以及云雨廓线(包括云水、雨、雪、霰和云冰5种水凝物粒子)作为仿真模型的输入进行后向散射回波模拟,研究不同频点探测台风降水能力的差异。

Bob飓风是1991年发生在孟加拉湾的第1个强热带风暴,编号为199102B。Bob于1991年4月22日在安达曼群岛西侧生成,24日演化为热带气旋,大范围的气旋式环流几乎覆盖了整个孟加拉湾。仅仅4 h后,升级为热带风暴。27日,Bob系统穿过副热带高压与印度高压之间的空隙并向北转向,在当天傍晚加强为二级飓风。28日,Bob移动速度加快并加强为三级飓风。29日进一步加强为四级飓

风,并于中午加强为5级飓风后于19时在吉大港以南55 km处登陆。Bob 飓风是该地区有史以来遭受的最严重的热带风暴之一,最大风速达到66.7 m/s,席卷了孟加拉湾沿海及其所有的岛屿。强大的 Bob 飓风,引发了孟加拉湾北部的海啸,伴随着的强风和暴雨,给当地人民生命财产造成了极大的破坏,共造成孟加拉国13.8万人丧生,直接经济损失达30多亿美元。

GCE 模型中对 Bob 飓风模拟的水平范围是158×158个格点,水平分辨率为1.33 km。垂直方向一共有28层,10 km以下垂直分辨率为0.5 km,从10 km以上到18 km垂直分辨率为1 km。模式输出值包括各层高度、温度、气压、相对湿度以及5种微物理量的含量。从模式输出的 Bob 飓风地面降水分布(图1)可以看出,降水的分布体现出了很明显的台风结构。

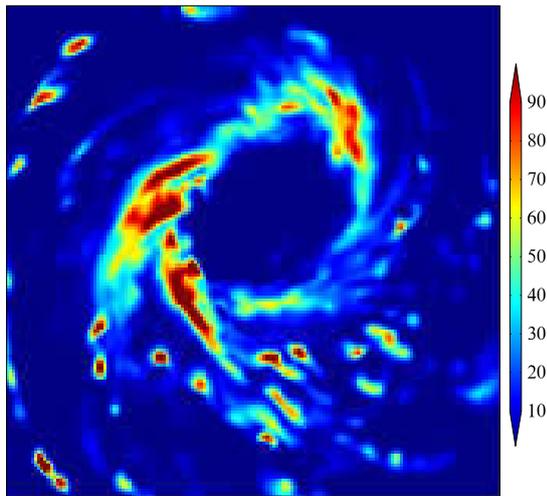


图1 Bob 飓风地面降水分布(单位:mm/h)
Fig.1 Rainfall distributing of Hurricane Bob in the surface (unit: mm/h)

云模型中水凝物粒子的分布对雷达回波模拟结果影响很大,因此,在开展模拟研究之前,有必要对 Bob 飓风模型中各种水凝物粒子的分布情况进行简单的介绍。云水粒子主要分布在6 km层以下;雨水粒子集中分布在3 km层以下,接近地面,雨水粒子含量增多;雪粒子集中分布在6 km层以上,并且雪粒子较多地分布在台风的外围区域;霰粒子主要分布在6 km层附近;云冰粒子则主要分布在10 km层以上。

2.2 测雨雷达仿真模型介绍

本文中所使用的测雨雷达仿真模型 Quickbeam

是一个气象雷达模拟模型(Haynes, et al, 2007),它主要由输入模块、计算模块和输出模块3部分组成,其计算流程见图2。

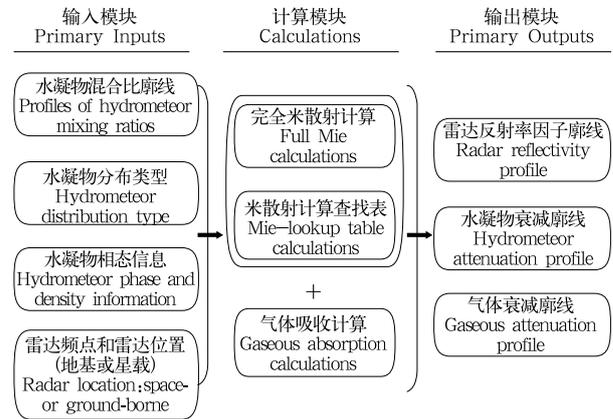


图2 Quickbeam 计算流程
Fig.2 Calculation flowchart of the Quickbeam

仿真模型的原理和星载测雨雷达实测的原理有所不同。在实际雷达测量中,主要是通过雷达方程,由接收功率求得雷达反射率因子。而雷达模拟软件则是运用云微物理和大气辐射原理直接求出雷达反射率因子。在瑞利散射条件下,雷达反射率因子可以表示为 $Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD$ 。由于瑞利散射的假设不一定适合每一种状况(Battan, 1973),因此当瑞利散射条件不成立的时候,Z值就不能与代表降水的实际滴谱分布情况相对应,故只能说是等效的Z值,以 Z_e 表示(张培昌等,2001)。在米散射情况下,需要先计算散射粒子对入射雷达波的双向反射率 $\eta = \int_0^{\infty} n(D)\sigma(D) dD$,再通过双向反射率和等效雷达反射率因子的关系 $\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 Z_e$ 求得 Z_e 值。

GCE 模型的输出量经过 Quickbeam 米散射计算模块以及大气吸收模块计算以后,在雷达模拟的输出量中输出包括每层的等效雷达反射率因子、瑞利散射的反射率因子、水凝物衰减、大气衰减以及测量的雷达反射率因子(等效雷达反射率因子考虑衰减以后的值),从仿真试验的输出量中,可以得到雷达等效反射率因子廓线,水凝物衰减廓线等。

3 频段选择模拟分析

3.1 频点选择依据

位于大气吸收线之间的大气窗口可以较好地用于探测降水或云(Meneghini, et al, 1990)。在微波

波段,天顶不透明度最小的两个大气窗口的中心频点分别位于水汽通道的 35 GHz 以及氧气通道的 94 GHz。据此,35 和 94 GHz 具有较好的降水探测能力。14 GHz 是 TRMM PR 的探测频点,模拟分析该频点对测雨雷达频点的选择具有重要的指导意义。此外,5 和 10 GHz 在地基雷达中比较常用。因此,本文确定了 5、10、14、35 和 94 GHz 5 个频点作为模拟频点。

3.2 不同频点探测近地面层降水的动态范围研究

在近地面层获得一个足够的降水动态范围是星载测雨雷达频点选择必须满足的要求之一。为了考察 5、10、14、35 和 94 GHz 5 个模拟频点探测近地面层降水动态范围的差异,文中给出了在不同频点下近地面层测量的雷达反射率因子和降水强度的关系图(图 3),模拟过程中将 0.5 km 层作为近地面层。

从图3可以看出,5 GHz情况下,测量的雷达反

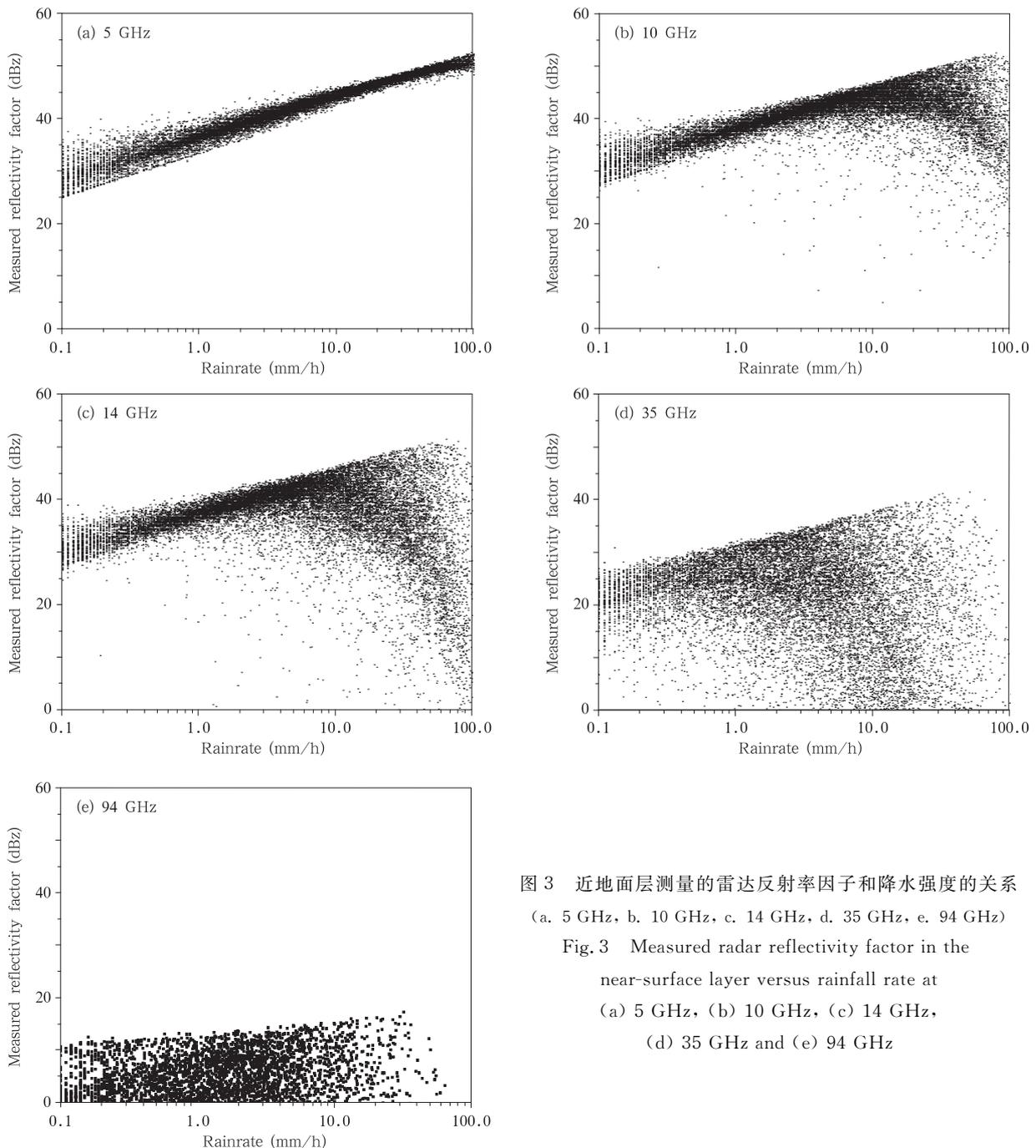


图 3 近地面层测量的雷达反射率因子和降水强度的关系

(a. 5 GHz, b. 10 GHz, c. 14 GHz, d. 35 GHz, e. 94 GHz)

Fig. 3 Measured radar reflectivity factor in the near-surface layer versus rainfall rate at (a) 5 GHz, (b) 10 GHz, (c) 14 GHz, (d) 35 GHz and (e) 94 GHz

射率因子随着降水强度的增加而变大,并且呈现出很好的相关性。10 GHz 情况下,当降水强度较小时,测得的雷达反射率因子与降水强度仍然呈现出较好的相关性,但当降水强度达到一定阈值(约为 20 mm/h)后,这种相关性变差,雷达反射率因子随降水强度的增加呈现离散现象。14 GHz 时,离散的情况较 10 GHz 时更严重,发生明显离散现象的降水强度的阈值也更小(约为 10 mm/h)。35 GHz 时,仅仅在 1 mm/h 以下的弱降水区域具有一定的相关性,而在 1 mm/h 以上的降水区域,离散现象则十分明显。到 94 GHz 时,即使在 1 mm/h 以下的降水区域也发生了非常明显的离散。

由此可见,雷达频点越高,测量的雷达反射率因子离散的情况就越明显,所能探测近地面层降水的动态范围就越窄。因此,在雷达设计中,考虑到需要获得一个较宽的降水动态范围,必须有一个雷达频点要选择较低的低频。

3.3 天线硬件条件分析

星载测雨雷达需满足的第 2 个条件是在天线硬件条件的限制下,获得一个较窄的波束宽度以满足空间分辨率的要求。根据天线口径尺寸、雷达频点和波束宽度三者的关系 $\beta = \frac{1}{Df}$ 可知,一个较大的天线口径尺寸才能满足低频雷达对空间分辨率的要求。但在星载测雨雷达的硬件条件中,天线口径尺寸不能太大。5 GHz 雷达频点虽然能较好的获取近地面层降水的动态范围,但是 5 GHz 雷达频点在天线硬件条件的限制下,远远不能满足空间分辨率的要求;10 GHz 虽然在地基雷达中应用比较普遍,3 m 的天线尺寸也能满足空间分辨率的要求,但 3 m 的天线太大不能安装在火箭发射器的整流罩内(Nakamura, et al, 1990; Fujita et al, 1997)。因此,在星载测雨雷达天线硬件条件的限制下,结合目前的科技水平以及预算的限制,雷达频点应该大于 10 GHz。

相比低频雷达而言,高频雷达对天线口径尺寸的要求比较小,但是随着雷达频点的增高,回波信号受到的衰减也增大。因此,在雷达频点选择中,还必须考虑衰减对雷达探测降水的影响。

3.4 不同频点对台风不同区域降水探测的模拟分析

后向散射的雷达回波受大气以及云中水凝物粒

子的影响会有一定程度的衰减,各个频点所受衰减的影响是雷达频点选择中需要考虑的一个重要因素。台风不同区域的云系结构不同,因此雷达对其探测的后向散射回波特异性各异。本文选择了一条过台风眼的廓线来重点研究 14、35 和 94 GHz 对台风眼区、云墙区以及螺旋雨带区 3 个区域的探测能力。图 4 是各区域内所选格点上的水凝物粒子分布图,对应的降水强度分别为 0、47.42 和 0.75 mm/h。

从图 4a 中可以看出,眼区的水凝物粒子含量相当少,1 km 以下最大的粒子含量只有 0.05 g/m^3 ,高层分布的雪粒子和云冰粒子的含量小于 0.01 g/m^3 ,在 2—12 km 的高度层上,水凝物粒子含量接近于 0,台风眼区水凝物粒子的分布状态和该区域一般是晴空或者卷云的情况相符合。云墙区的大部分粒子集中在 7 km 以下,并且以云水和雨粒子为主,近地面层最大的雨粒子含量达到 2.6 g/m^3 ,远大于眼区和螺旋雨带区,从云墙区整个水凝物的分布上可以看出该区域处于一个较强的对流系统中(图 4b)。外围螺旋雨带区虽然水凝物粒子含量较云墙区少,但是各个高度层都有粒子分布,而且中层的粒子含量比较丰富,从粒子分布上可以看出该区域具有较明显的层云结构(图 4c)。

随后,对比了 14、35 和 94 GHz 3 个模拟频点在台风云墙区以及螺旋雨带区的等效反射率因子和测量的反射率因子在不同高度层上的差异(图 5)。测量的反射率因子是等效反射率因子考虑大气衰减以及水凝物衰减后的值,因此,直接比较等效反射率因子和测量的反射率因子,相当于间接分析了衰减对雷达回波的影响。

对比台风眼区(图略)、云墙区以及螺旋雨带区测量的反射率因子和等效反射率因子廓线可以发现:雷达频点越高,测量的反射率因子和等效反射率因子廓线的分离就越大,雷达回波信号所受的衰减就越明显。台风眼区所受的衰减最小,即使在 94 GHz 的高频情况下,近地面层等效雷达反射率因子和测量的雷达反射率因子的差值也只有 3 dBz 左右。因此,使用高频或者低频雷达对台风眼区进行探测,结果没有明显的区别。云墙区所受的衰减最大,14 GHz 时两条廓线就出现明显的分离,94 GHz 时,近地面层等效雷达反射率因子和测量的雷达反

射率因子的差值超过 165 dBz,探测不到地表的信息。因此,对云墙区的探测,低频比高频具有明显的优势。螺旋雨带区的衰减情况介于眼区和云墙区,14 GHz 的低频信号在螺旋雨带区的衰减很小,35

GHz 情况下,虽然存在一定的衰减,但是衰减的幅度并不是很大。由此可见,就衰减而言,对螺旋雨带区的探测,虽然仍是低频较好,但低频相比高频并没有在云墙区时那样明显的优势。

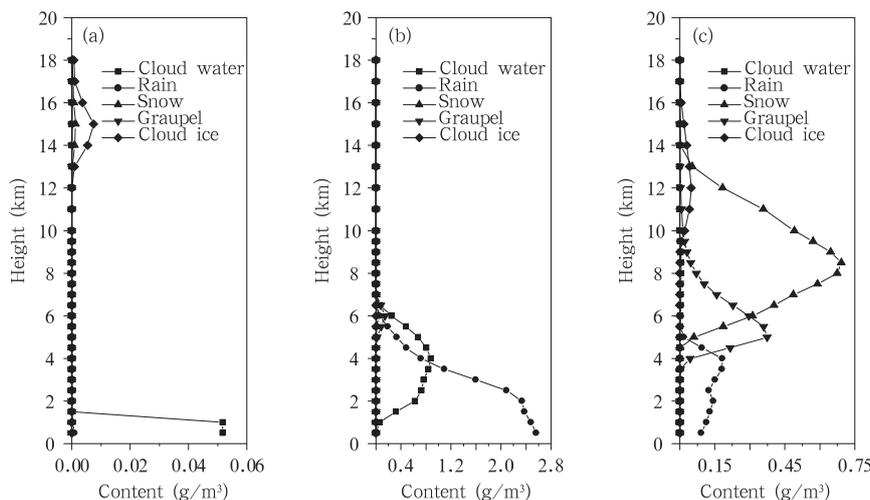


图4 水凝物粒子分布(a.眼区,b.云墙区,c.螺旋雨带区)

tribution of the hydrometers in (a) the eye zone, (b) the eye wall zone and (c) the rain band zone

综上所述,在只考虑衰减的影响下,由于高频雷达受衰减的影响比较严重,故选择低频雷达更为合适。但考虑到高频能获得降水粒子比较大的后向散射截面,敏感性要强于低频,能够弥补低频信号在弱降水区域受到敏感性限制的缺点(Short, 1998),因此,在对螺旋雨带区中的小雨进行探测时,选择高频比较合适。而对云墙区中暴雨的情况而言,因为高频在云墙区的衰减非常严重,因此不适合用于探测强降水,采用低频探测暴雨比较合适。

虽然上述结论是在台风降水系统中得出来的,但是也适用于一般性降水,即低频雷达探测强降水,高频雷达探测弱降水,两者结合形成双频,不仅能发挥他们各自在降水探测中的优势,而且两个雷达探测频点对大气中水凝物响应具有足够大的差异,也便于使用双频率反演算法,有利于提高降水反演的精度。除了选择 14 GHz 的低频外,还需要在 35 和 94 GHz 的高频中选择一个探测频点,鉴于 94 GHz 衰减过于严重,探测的回波信号很可能被噪声所掩盖,因此选择 35 GHz 比较合适。

3.5 星载测雨雷达频率配置要求分析

通过上述几节中对星载测雨雷达需要满足的降

水动态范围以及天线硬件条件等的分析可以得出, FY-3 号星载测雨雷达的最佳波段组合应该选择小于 14 GHz 的 Ku 波段以及 35 GHz 附近的 Ka 波段为宜。最后,还需要探讨星载测雨雷达需要满足的第 3 个条件,即频率配置要求。频率的配置要由国际频率登记委员会决定,该委员会的主要职责是按照无线电规则规定的程序,对各国使用的对地静止卫星轨道位置和指配给各种无线电台(站)的频率进行技术审查,防止无线电台(站)间的有害干扰,并登记入国际频率总表。表 1 是由国际电信联盟给出的用于星载气象雷达的可能频率带(Meneghini, et al, 1990)。

在轨使用上述频段内的星载雷达将受到国际电联的保护,否则很可能会受到干扰,影响使用效果。虽然可以递交申请要求使用上述的任何一个频带,但是值得说明的是 35.50—35.60 GHz 波段在很早以前就被批准可以用于星载测雨雷达。因此,结合上述的分析以及国际电信联盟的规定,可以确定使用位于 13.40—14.00 GHz 以及 35.50—35.60 GHz 的 Ku 和 Ka 波段作为中国 FY-3 号星载双频降水测量雷达的主探测波段。

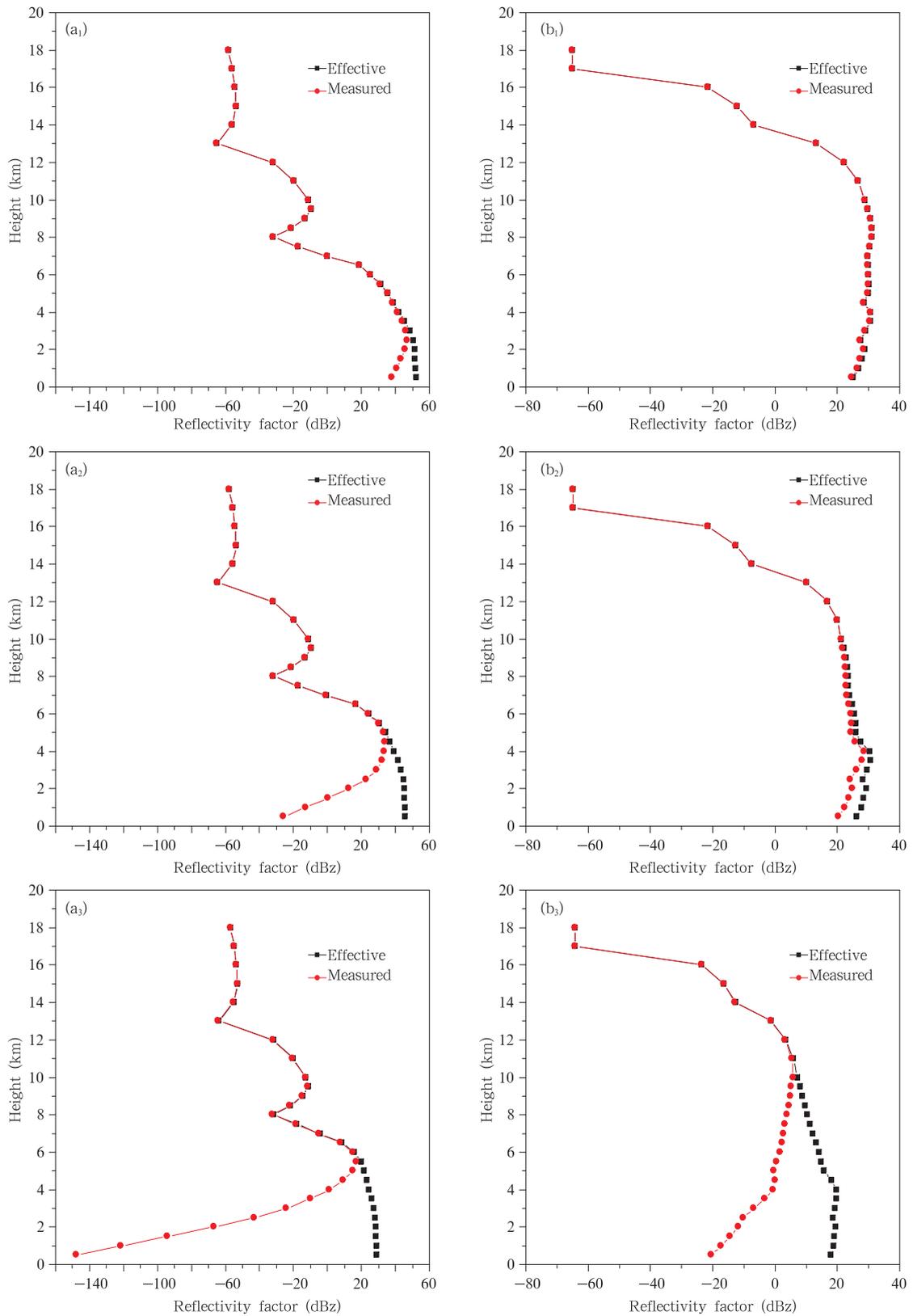


图5 云墙区(a)和螺旋雨带区(b)测量的雷达反射率因子和等效雷达反射率因子廓线,(1-3)分别对应14、35和94 GHz
 Fig. 5 Profiles of the measured and equivalent radar reflectivity factors in
 (a) the eye wall zone and (b) the rain band zone; (1-3) are for 14, 35 and 94 GHz, respectively

表 1 国际电信联盟给出的可以用于星载气象雷达的可能频率带(单位:GHz)

Table 1 The possible frequency bands for the satellite-borne weather radar as shown in the ITU radio regulations (unit: GHz)

Frequency bands	Frequency bands
1.215—1.300	14.40—14.47
1.525—1.535	14.50—15.35
3.100—3.300	17.20—17.30
5.250—5.350	24.05—24.15
8.025—8.400	31.00—31.30
8.400—8.500	31.80—32.00
8.550—8.650	32.00—32.30
9.500—9.800	34.20—35.20
9.975—10.025	35.50—35.60
13.400—14.000	65.00—66.00
14.000—14.250	78.00—79.00
14.250—14.300	

4 结 论

本文在星载测雨雷达需要满足的降水动态范围、天线硬件条件以及频率配置需求的基础上,开展了对星载测雨雷达最佳波段组合的模拟研究。将 GCE 模型中台风 Bob 资料输出的云雨和大气廓线数据作为三维气象雷达仿真模型 Quickbeam 的输入,分别模拟了 5、10、14、35 和 94 GHz 5 个频段星载测雨雷达的探测性能,研究结果表明:位于 13.40—14.00 GHz 以及 35.50—35.60 GHz 的 Ku 和 Ka 波段可以作为中国以观测台风降水为主要目的的 FY-3 号星载双频测雨雷达的主探测波段。

致 谢:感谢谷松岩研究员细致地审阅初稿并提出了很有意义的修改意见,感谢审稿专家的有益建议。

参考文献

程正泉,陈联寿,徐祥德等. 2005. 近十年中国台风暴雨研究进展. 气象, 31(12):1-9

傅云飞,刘栋,王雨等. 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征. 气象学报, 65(3):316-328

马占山,刘奇俊,秦琰琰等. 2008. 利用 TRMM 卫星资料对人工增雨云系模式云微观场预报能力的检验. 气象学报, 67(2):260-271

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, 24:233-238

张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2001. 雷达气象学. 北京:气象出版社, 499pp

Battan L J. 1973. Radar Observation of the Atmosphere. University of Chicago Press, 324pp

Fujita M, Satake M. 1997. Rainfall rate profiling with attenuating-frequency radar using nonlinear LMS technique under a constraint on path-integrated rainfall rate. Int J Remote Sens, 18(5): 1137-1147

Haynes J M, Marchand R T, Luo Z, et al. 2007. A multipurpose radar simulation package: QuickBeam. Bull Amer Meteor Soc, 88:1723-1727

Kawanishi T, Kuriowa H, Kojima M, et al. 2000. TRMM precipitation radar. Adv Space Res, 25:969-972

Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, et al. 2001. Development of precipitation Radar Onboard the TRMM satellite. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 39(1):102-116

Kummerow C, Barnes W, Kozu T. 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. J Atmos Oceanic Techn, 15(3): 809-817

Meneghini R, Kozu T. 1990. Spaceborne Weather Radar. Artech House, 199pp

Nakamura K, Okamoto K, Ihara T, et al. 1990. Conceptual design of rain radar for the tropical rainfall measuring mission. Int J Satell Commun, 8:257-268

Ren F, Gleason B, Easterling D. 2002. Typhoon impacts on China's precipitation during 1957—1996. Adv Atmos Sci, 19(5): 943-952

Short D A. 1998. Monthly rainfall comparison from the TRMM PR (3A25) and TMI (3A11) in the lower mid-latitudes of the winter hemisphere. Proc Symp. On the Precipitation Observation from Non-Synchronous Orbit. Nagoya, Japan, Nagoya University, 120-125

Tao W K, Simpson J. 1989. Modeling study of a tropical squall-type convective line. J Atmos Sci, 46: 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: 2699-2733

Yeh H Y M, N Prasad, R Meneghini, et al. 1995. Cloud model-based simulation of spaceborne radar observations. J Appl Meteor, 34:175-197