

TRMM 卫星测雨雷达的数据处理及台风三维数据分析

商建^{①②} 杨汝良^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 研究星载测雨雷达的数据处理方法对于理解测雨雷达系统、开展数据应用以及研制星载气象雷达、开发反演算法等具有重要的意义。该文使用星载测雨雷达的真实数据计算了雷达反射率因子,以较小的计算量获得了准确的表面雷达截面积和路径积分衰减,并研究了降雨分类;得到了台风三维数据处理的图像结果。所得到的处理结果可为理解降水的内部结构与降水机制提供重要信息。

关键词: 星载测雨雷达; 三维数据处理; 反射率因子; 台风

中国分类号: TN959.4, P414.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2724-04

Data Processing and Typhoon 3D Data Analysis of TRMM Precipitation Radar

Shang Jian^{①②} Yang Ru-liang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Researching data processing of the spaceborne precipitation radar is very important in understanding this unique radar system and developing data application, and will help to design spaceborne weather radar and develop algorithms in the future. Radar reflectivity factor is retrieved using observation data; surface radar cross section and path integration attenuation are calculated with less computation. Rain type classification is also studied and the final results are presented. Typhoon data are processed and some pictures illustrating its 3D structure are given. These results can provide valuable information about internal structures as well as mechanism of precipitation.

Key words: Spaceborne precipitation radar; 3D data processing; Reflectivity factor; Typhoon

1 引言

热带降雨测量卫星TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)所携带的测雨雷达PR(Precipitation Radar)是世界上第一颗星载测雨雷达。PR可定量测量37°N与37°S之间的热带和亚热带地区的降雨,具有较高的径向分辨率,可以获得降水和潜热的三维结构信息。PR的数据资源可用来提高气候预报的精度,改进对全球大气循环的建模,加深对热带和亚热带地区降水特性的理解^[1]。

获取云雨的三维结构对于开展对降水结构和特性的研究有着很大的帮助。准确预测暴雨一直是气象预报所追求的目标,为此应精确了解暴雨的三维结构及分布形式。测雨雷达可以提供关于台风的三维结构数据。虽然近年来对台风预报的准确性在不断提高,但由于一直缺少热带海洋上详细的台风资料,缺乏准确的热带气旋定位及其强度的测量,对于台风的强度变化和路径预报在过去的20年中一直处于徘徊阶段。三维观测的测雨雷达可以提供大量的有关热带气旋的

资料,帮助观测人员与研究人员准确分析台风的三维结构,了解台风的发展历程、强度及范围,改善对台风的预报。

展开对星载测雨雷达反演算法的研究对于理解测雨雷达系统、开展数据应用以及进行数据处理具有重要的意义。本文在介绍测雨雷达的观测原理的基础上,根据真实数据计算了雷达反射率因子,求取了3种参考数据集,以较小的计算量得到了准确的表面截面积与路径积分衰减量,并给出了降雨类型的分类结果,可为分析降水的三维结构提供有用信息;给出了对台风数据进行三维处理的结果图像,可准确揭示台风的内部结构。

2 PR 观测原理与数据资料

星载测雨雷达的天线面向平台下方的大气,随着平台向前飞行,每隔一定时间向每个波束方向发射微波脉冲,发射脉冲的宽度为1.67 μs,以获得250m的距离分辨率。脉冲波经云雨和地表散射后返回雷达。测雨雷达每0.6s在垂直于航迹的方向上扫描一次,每次扫描在49个波束方向进行观测,测量得到云和大气降水的回波。雷达通过定量测量的接收功率反演雷达反射率因子及地球表面的散射截面积,获得降雨

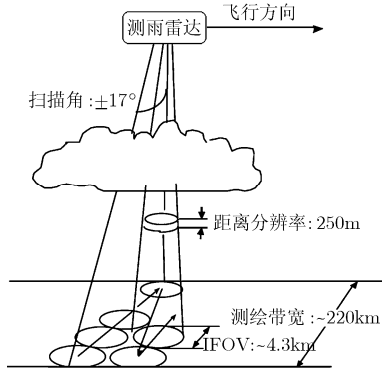


图1 PR观测原理图

的垂直分布, 提供三维结构信息。图1给出了测雨雷达的观测原理图^[2]。

TRMM 资料是由美国宇航局 Goddard 空间飞行中心数据分发中心 DAAC(Distributed Active Archive Center)提供的; 该资料以 HDF 格式存储。PR 的数据资料分为 3 级: 1B21 回波功率数据, 1C21 雷达反射率因子, 2A21 地表雷达截面积, 2A23 定性识别, 2A25 三维降水数据, 3A25 降雨参数月统计, 以及 3A26 月降雨量数据。本文使用的是测雨雷达的第 6 版 1B21 数据资料: 2004 年 9 月 15 日(UTC,下同) 测雨雷达观测到的飓风“Ivan(伊万)”数据(轨道号 38954), 2004 年 9 月 17 日的观测数据(轨道号 38994), 以及 2005 年 9 月 29 日“龙王”台风的观测数据(轨道号 44871)。

3 数据处理

3.1 雷达反射率因子计算

PR 的 1C21 算法^[2]将功率和噪声估计值转化为雷达反射率因子(Z 因子)。此算法不计由雨或其它大气气体造成的传播损耗, 故可应用体散射的雷达方程结合 PR 系统参数来计算反射率因子。在不考虑衰减及充塞程度并满足瑞利散射的条件(即 $\pi D/\lambda \leq 0.13$) 下, 雷达气象方程为^[3]

$$P_r = \frac{\pi^3}{2^{10} \ln 2} \frac{P_t G_t G_r c \tau \varphi_a \varphi_c}{\lambda^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \frac{Z}{r^2} \quad (1)$$

其中 D 是降水粒子直径, λ 是雷达波长, P_t 是雷达发射功率, G_t 是雷达发射天线的增益, G_r 是雷达接收天线的增益, c 是光速, τ 是雷达发射脉冲宽度, φ_a 是沿航向的波束宽度, φ_c 是垂直航向的波束宽度, m 是散射粒子的复折射指数, r 是散射粒子距雷达的距离, P_r 是雷达回波功率。式中第 1 项为常数项; 第 2 项是雷达本身的参数, 只要对雷达参数进行准确的标定, 此项可看作常数; 第 3 项是与降水目标物的相态有关的参数, 当相态确定后, 此参数就能确定。这样, 由雷达接收到的回波功率就可计算得到雷达反射率因子。

本文使用 2004 年 9 月 15 日飓风“Ivan”数据计算了雷达反射率因子。图 2 给出了雷达回波功率 P_r 和 Z 因子的剖面图, 二者单位分别为 dB 与 dBZ。其中图 2(a)和图 2(b)是

P_r 与 Z_m 因子垂直于卫星航向的剖面图; Z_m 是未经衰减订正的雷达反射率因子。从图中可以观测到飓风“Ivan”大范围的降雨区。图 2(c)和图 2(d)是 P_r 与 Z_m 因子沿卫星航向的剖面, 图 2(e)画出了 Z_m 的廓线, 其中距离库 1 是距雷达最近的单元, 距离库 80 左右表示表面回波。从中可以清楚地看到风眼区域、降雨的剖面结构、表面回波的位置以及镜像回波。这对于分析飓风的内部结构、降雨和潜热分布及提高降雨反演的准确性具有重要的意义。图 2(f)和图 2(g)是 P_r 和 Z_m 因子的水平截面图。图像清晰地显示出了飓风的水平结构: 风眼区、云墙区和外层区; 飓风中心比较晴朗, 飓风所造成的强降水主要分布在飓风眼壁附近区域, 距离飓风中心较远处的降水强度明显要小于中心附近的降水强度。

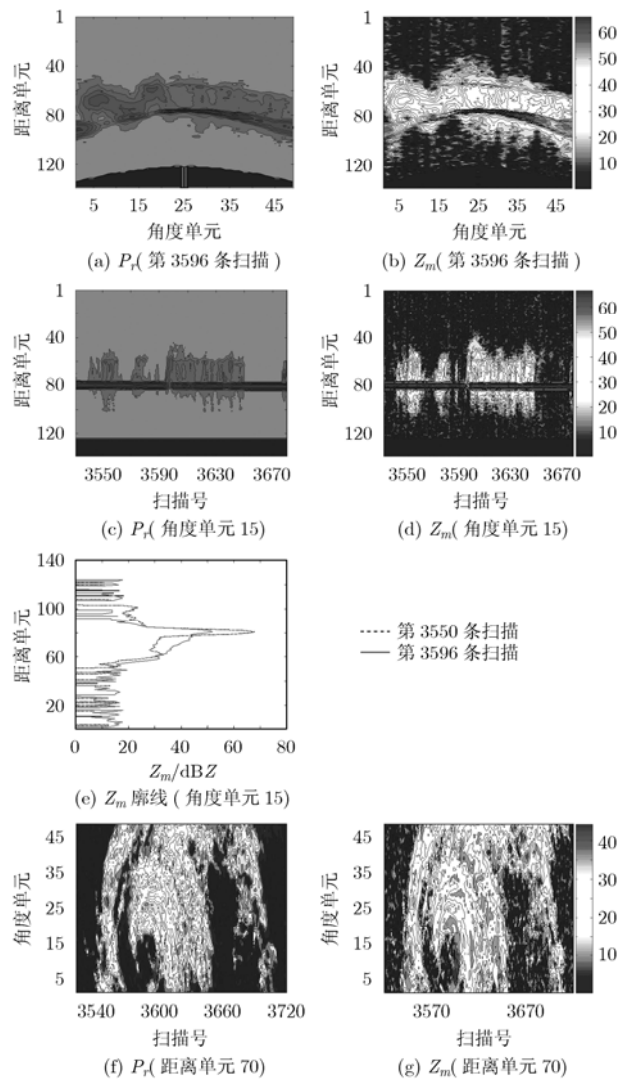


图 2 飓风 Ivan 的 3 种切面图

3.2 表面雷达截面积与 PIA 计算

计算地表的雷达截面积是计算降雨衰减的基础。PR 的 2A21 算法^[2]按照以下公式计算表面的归一化雷达截面积:

$$\left. \begin{aligned} P_{r \max} &= \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma^0 \cos \theta \cdot \varphi_a \theta_{BP}}{512 \ln 2 \pi^2 H^2} \\ \theta_{BP} &= (\varphi_c^{-2} + \theta_p^{-2})^{-1/2} \\ \theta_p &= \frac{c\tau}{2H\theta} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 θ 是入射角, H 是轨道高度, $P_{r \max}$ 是在某条扫描的某个角库上的雷达降雨回波功率的最大值, σ^0 是归一化雷达截面积。算法使用表面作为参考目标来估计路径积分衰减 (PIA)^[4]及其可靠性(reliabFactor):

$$\text{PIA} = \langle \sigma_{NR}^0 \rangle - \sigma_R^0 \quad (3)$$

$$\text{reliabFactor} = \frac{\text{PIA}}{\text{sd}[\sigma_{NR}^0]} \quad (4)$$

其中 σ_R^0 是降雨区域的雷达截面积, $\langle \sigma_{NR}^0 \rangle$ 是根据参考数据集得到的截面积均值, $\text{sd}[\sigma_{NR}^0]$ 表示对 σ_{NR}^0 求标准差。这里计算 PIA 是为订正降雨衰减做准备。算法中使用了 4 种雷达截面积参考数据: 沿航向空间平均, 时间平均, 全局平均和垂直航向混合参考^[5]。本文对原算法作了一些改变: 在计算时间参考数据集的过程中, 因原算法使用的数据量太大, 本文仅使用了过去 3 天的表面截面积数据来计算参考集, 并相应地调节了最小采样数值; 在计算了沿航向空间平均、时间平均和垂直航向混合参考数据集的基础上, 选取这 3 种参考估计中的最佳者作为表面参考数据计算了 PIA。图 3 给出了使用轨道 38994 数据计算表面雷达截面积的结果(左图)。在图 4 中画出了 PR 标准算法的结果。可以看出, 本文以较小的计算量得到了与 PR 标准数据相当的结果。图 3 中还画出了陆地与海洋的检测结果(右图), 其中黑、白、灰色区域分别代表海洋、陆地与海岸。从图中可以清晰地看出地表雷达截面积随海陆及入射角的变化而变化。

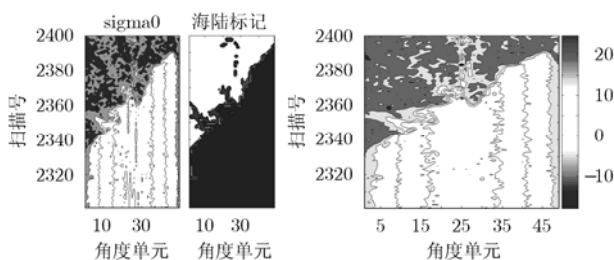


图3 地表的雷达截面积

图4 PR 标准数据的雷达截面积

然后使用 σ^0 参考值和降雨区的 σ^0 计算了路径衰减 PIA, 用于进一步处理雷达数据时进行衰减订正。图 5 画出了得到的路径衰减。

3.3 降雨类型分类

了解降雨类型对于观测与理解热带降雨的影响是非常重要的。PR 的 2A23 算法^[2]将降雨划分为 3 种类型: 层状、对流与其它。降雨分类使用了垂直剖面方法(V-method)和华盛顿大学的水平模式方法(H-method)^[6, 7]。本文对轨道 38994 数据实现了降雨类型分类, 图 6 给出了其中 50 条扫描的分

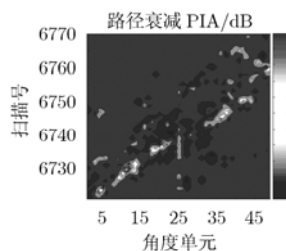


图5 路径衰减

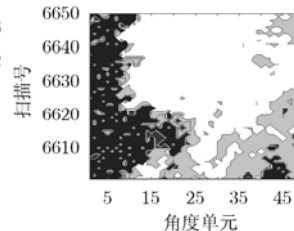


图6 降雨的分类结果

类结果。图中白色区域为层状类型, 浅灰色区域为对流类型, 深灰色区域为其它类型, 黑色区域为无雨区。

3.4 台风数据的三维处理

本文对 2005 年 9 月 29 日测雨雷达的“龙王”台风观测数据(轨道号 44871)进行了处理。计算得到降雨回波功率之后, 根据雷达气象方程求得雷达反射率因子, 然后利用 MATLAB 绘出台风的三维结构图, 见图 7。图中 x 轴为天线扫描方向的角度单元, y 轴为平台飞行方向的扫描数, z 轴表示高度。从图中可以看到中心有一相对晴朗的区域, 这就是风眼区, 周围是数条螺旋状的雨带。台风所造成的强降水主要分布在台风眼壁附近区域, 在距离台风中心距离较远处的降水强度明显要小于中心附近的降水。云和降水的分布具有明显的不对称性: 云和降水主要分布在台风中心以东区域, 在其以西区域只有较少降水和云分布。台风的立体结构图像可为了解台风的内部结构与发展情况提供大量富有价值的信息。因篇幅有限, 在此不再对台风结构及规律展开分析。

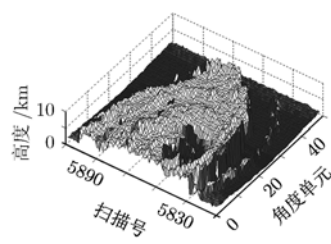


图7 龙王台风 Z 因子的三维结构图

4 结束语

本文利用星载测雨雷达的真实数据计算了雷达反射率因子, 得到了 3 种截面的 Z 因子图像, 揭示了降水事件的水平与垂直结构; 计算了 3 种参考数据集, 以较小的计算量获得了与 PR 标准产品相似的表面雷达截面积; 进一步计算了路径衰减值, 用于对云雨及大气的衰减进行订正; 实现了对降雨的分类, 帮助观测与理解热带降雨的影响; 最后对测雨雷达的三维台风数据进行了处理, 获得了台风的立体结构图像, 可为理解台风的内部结构、生长历史与发展情况提供丰富的信息。今后将展开对星载测雨雷达算法的进一步研究, 改进降水反演算法并推广三维数据在降水分析与监测中的

应用。

致谢 TRMM PR 资料由美国宇航局 Goddard 空间飞行中心数据分发中心(DAAC)提供, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 何会中, 崔哲虎, 程明虎, 等. TRMM 卫星及其数据产品应用. 气象科技, 2004, 32(1): 13-18.
He H Z, Cui Z H, and Cheng M H, *et al.*. TRMM satellite and application of its products. *Meteorological Science and Technology*, 2004, 32(1): 13-18.
- [2] TRMM Precipitation Radar Team, JAXA and NASA. Tropical rainfall measuring mission (TRMM) precipitation radar algorithm instruction manual for version 6. <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>, 2005, January.
- [3] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001: 70-81.
Zhang P C, Du B Y, and Dai T P. Radar Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 70-81.
- [4] Meneghini R, Kozu T, and Jones J A, *et al.*. Estimates of path attenuation for the TRMM radar. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'98), Seattle, USA, 1998, Vol.4: 1882-1884.
- [5] Meneghini R, Iguchi T, and Kozu T, *et al.*. Use of the surface reference technique for path attenuation estimates from the TRMM precipitation radar. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(12): 2053-2070.
- [6] Awaka J, Iguchi T, and Kumagai H, *et al.*. Rain type classification algorithm for TRMM precipitation radar. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'97), Singapore, 1997, Vol.4: 1633-1635.
- [7] Steiner M, Houze R A, and Yuter S E. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(9): 1978-2007.

商 建: 女, 1983 年生, 硕博连读研究生, 研究方向为气象雷达数据处理与系统设计.

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为机载、星载雷达系统与小卫星合成孔径雷达系统等.