

用机载雷达资料反演雨空间结构*

窦贤康 刘万栓

(中国科学技术大学地球和空间科学系 合肥 230026)

刘锦丽

(中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

摘 要 机载雷达可以方便地跟踪观测对象,并且可以观测有些地基雷达较难观测的区域(如海洋),因此近年来在大气遥感领域得到越来越广泛的应用。由于应用的需要,机载雷达使用的一般为 X 波段或 Ku 波段的频率,而该波段的电磁波穿过雨区时会受到衰减,需寻找算法进行订正。对于单束单频雷达, kZ 和 kZS 算法具有很好的应用前景。将 kZ、kZS 应用到在西太平洋进行的国际大型科学考察实验 TOGA/COARE 中 1993 年 1 月和 2 月间取得的机载雷达(和星载雷达频率相近)实测数据进行雨空间分布的研究。

关键词 雨强,机载雷达,反演算法

1 引 言

精确地测量全球降雨量不仅是安排工农业生产、进行气象灾害预报、减灾防灾等各项工作的实际需要,同时在大气科学、海洋科学、环境科学的研究中,降雨量也是非常重要的物理量。目前在测站稀少的地区(特别是海洋上)很难获得精确的降雨量测量。随着卫星技术在气象上的应用,卫星遥感被认为是最有效甚至是唯一的测量全球降雨的途径,因此运用雷达作为一种主动手段从空间测雨的想法在 70 年代中期就已提出^[1,2]。和其它被动手段相比,星载测雨雷达能提供直接的沿高度变化的降雨资料。为了支持发展将来的星载测雨雷达,美国国家航天航空局的喷气推进实验室(JPL)研究了 Airborne Rain-Mapping Radar (简称 ARMAR 雷达^[3])。ARMAR 雷达被用于 1992 年 11 月至 1993 年 2 月在西太平洋进行的国际大型科学考察实验,其首要任务是测量降雨的三维结构。TOGA/COARE 实验中该雷达取得了大量高质量的数据,这为检验已经模拟验证的 kZ 和 kZS 反演算法和进行试验区降雨空间分布的研究提供了良好的机会。

降雨量大小和雷达所接收到的反射率因子统计

上有一定的函数关系。只要我们获得准确的回波,原则上我们就可以得到降雨量估算。但是由于 ARMAR 机载雷达工作在 14GHz 区域(星载雷达的频率可能更高),电磁波随着降雨量强弱就会有程度不同的衰减,因此必须找到算法去修正这些由衰减所导致的误差。对于单束单频雷达, kZ 和 kZS 算法具有很好的应用前景。

2 算法简介

下面简要说明 kZ 和 kZS 算法的基本原理。

雷达收到的有效距离为 r 处的散射元的平均回波能量 $\overline{P(r, \lambda)}$, 正比于雷达的反射率因子 $Z(r, \lambda)$, 同时考虑衰减效应,可表示为:

$$\overline{P(r, \lambda)} = (C_\lambda / r^2) Z(r, \lambda) \exp \left[-0.46 \int_0^r k(s, \lambda) ds \right] \quad (1)$$

其中, C_λ 为雷达常数, k 为比衰减因子, λ 为波长。

如果假定下垫面的后向散射在有雨和无雨 2 种情况下的散射性质基本上没有变化,雷达收到的表面 r_s 处的平均回波能量 $\overline{P_s(r_s, \lambda)}$ 为:

$$\overline{P_s(r_s, \lambda)} = (C_{s\lambda} / r_s^2) \sigma^0(\lambda) \exp \left[-0.46 \int_0^{r_s} k(s, \lambda) ds \right] \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号:49705058)和中国科学院院长基金资助。

收稿日期:1998-03-10; 收到修改稿日期:1998-05-14

$C_{s\lambda}$ 为表面处的 C_λ ; $\sigma^0(\lambda)$ 为无雨情况下下垫面的后向散射系数。

如果 r_i 和 r_j 之间的双路径衰减因子的定义为:

$$A(r_i, r_j) \equiv \exp\left[-0.46 \int_{r_i}^{r_j} k(s, \lambda) ds\right] \quad (3)$$

那么,雷达的视反射率和表面的视后向散射系数可表为:

$$Z_{am}(r, \lambda) = Z(r, \lambda)A(r) = \overline{P(r, \lambda)} r^2 / C_\lambda \quad (4)$$

$$\sigma_m^0(\lambda) = \sigma^0(\lambda)A(r_s) = \overline{P_s(r_s, \lambda)} r_s^2 / C_{s\lambda} \quad (5)$$

我们忽略有雨时下垫面散射性质的变化,则积分路径衰减(path-integrated attenuation 或 PIA)因子可近似估计为:

$$PIA \approx A_{tm} = \sigma_m^0(\lambda) / \sigma^0(\lambda) \quad (6)$$

具体来讲, $\sigma^0(\lambda)$ 可以从模型库或者由无雨区的表面回波测量获得。这样, $A_{tm}(\lambda)$ 就可利用雨底表面回波强度来估计。

假定反射率 Z 和比衰减因子 k 之间关系可以表示为指数形式:

$$Z = \alpha k^\beta \quad (7)$$

这样由方程(4),比衰减因子可表为:

$$k(r) = [Z_{am}(r) / (A(r_0, r)A(r_0) \alpha)]^{1/\beta} \quad (8)$$

方程(4)还可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial r} (A^{1/\beta}(r_0, r)) = -\gamma [Z_{am}(r) / (A(r_0) \alpha)]^{1/\beta} \quad (9)$$

其中, $\gamma=0.46/\beta$, r_0 为云顶的雷达有效距离。

kZ 方法:对方程(9)在区间 $[r_0, r]$ 积分,再利用方程(8),则比衰减因子可计算为:

$$k(r) = \gamma^{-1} Z_{am}^{1/\beta}(r) / [\gamma^{-1} (A(r_0) \alpha)^{1/\beta} - S(r_0, r)] \quad (10)$$

其中, $S(r_1, r_2) = \int_{r_1}^{r_2} Z_{am}^{1/\beta}(s) ds$

kZS 方法:对方程(9),在区间 $[r, r_s]$ 积分,再利用方程(8),则比衰减因子可计算为:

$$k(r) = \gamma^{-1} Z_{am}^{1/\beta}(r) / [\gamma^{-1} (A_m \alpha)^{1/\beta} + S(r, r_s)] \quad (11)$$

$$A(r_0, r_s) = [1 - \alpha^{-1/\beta} \gamma S(r_0, r_s)]^\beta \quad (12)$$

同时考虑到雷达定标误差(δC)、积分路径衰减因子估计误差(δA_t)以及 α 的误差 $\delta \alpha$,那上述两式变为:

$$k(r) = \gamma^{-1} Z_{am}^{1/\beta}(r) / [\gamma^{-1} (A_{tm} \delta A_t \alpha)^{1/\beta} + S(r, r_s)] \quad (13)$$

$$A(r_0, r_s) = [1 - (\alpha \delta \alpha)^{-1/\beta} \gamma S(r_0, r_s)]^\beta \quad (14)$$

其中, $f = \delta \alpha \delta C$ 。

由(14)式可知, $A(r_0, r_s)$ 可以由视反射率来进行估计。 α 是雨滴谱的函数,只要 α 的取值和雨滴谱的实际分布近似对应,在雷达的定标误差 δC 可以忽略的情况下,那由(12)式算出的 $A(r_0, r_s)$ 就应和(6)式估计的 $A_{tm}(\lambda)$ 相近。反过来说,我们可以通过最小化函数(利用最小二乘法):

$$J_{\min} = \sum_{i=1}^N [A_i^{1/\beta}(r_0, r_s) - A_{tm,i}^{1/\beta}]^2 \quad (15)$$

来获得 $f\alpha$ (也就是 $\alpha \delta \alpha$)的估计(这里初始值 α 可由经验公式给出):

$$f\alpha = \left[\gamma \sum_{i=1}^N S_i^2(r_0, r_s) \left/ \sum_{i=1}^N (1 - A_{tm,i}^{1/\beta}) S_i(r_0, r_s) \right. \right]^\beta \quad (16)$$

由此可见,kZS 算法中,我们可以应用(16)式来进行雨滴谱参数的订正。这样,比起雨滴谱参数用经验公式,可对雨强进行精度更高的反演。后面数据分析和处理中我们会讨论这一问题。

3 数据选取

ARMAR 雷达(主要参数见表 1)系统的扫描几何是:在垂直于飞机飞行方向的平面内,雷达波束从(天底面)左偏角为 20° 每隔 1° 扫描至(天底面)右偏角为 20° 处,然后波束在迅速返回左边进行第二次扫描。这样飞机的运动加上雷达波束的旋转就可以完成对一个体积的取样。图 1 描述了雷达的扫描几何。

表 1 ARMAR 雷达参数

Table 1 ARMAR radar parameters

频率	13.8GHz
3dB 波束宽度	3.8°
脉冲重复频率	1-8kHz
最大功率	200W
天线增益	34dB
射程分辨率	60m
地表面水平分辨率(雷达高度为 12km)	800m

我们选取了 1993-01-18 4:43:46 到 5:09:50UTC 时间段 ARMAR 雷达取得的数据进行研究。在此时间段,雷达基本上是在天底面两侧对称扫描,共进行了约 450 次扫描。在扫描标号为 240-425 区域,海平面以上,雷达收到的回波信号很弱(最大值不超过

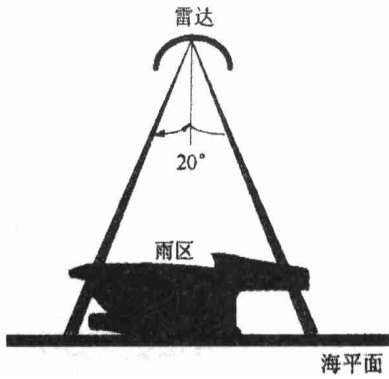


图1 雷达在垂直于飞机飞行方向的平面内的扫描几何

Fig. 1 Scanning geometry of the radar in the plane perpendicular to the aircraft movement

20dB), 衰减效应不明显, 此平流型降水区域的 PIA 因子非常小(图2)。而在扫描标号为 200—225 区域, 雷达收到的回波信号非常强(最大值达 45dB 以上), 在此对流型降水区域, 海平面处的雷达回波能量存在比较明显的下冲, 这是因为随着回波信号的增强, 衰减效应越来越明显, 此区域的 PIA 因子最大已达 24dB(图2)。我们选取此数据的原因在于: 在此期间即有衰减效应比较强的区域, 也有衰减效应比较弱的区域, 这样可以检验算法对不同降水类型的适应性。计算结果将显示如果不进行衰减效应的校正, 直接利用视反射率因子进行的雨强反演就会出现较大误差。

4 计算结果和讨论

kZ 和 kZS 反演中, 我们还需要知道反射率 Z 和比衰减因子 k 之间函数关系, 这里假定 Z 和 k 之间关系可以表示为指数形式: $Z = \alpha k^\beta$ 。其中 α 依赖雨滴谱参数中的 N_0 估计(这里假定了雨滴谱参数 $N(D)$ 可以表示为指数形式^[4], $N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D)$)。反演中我们首先使用 Slack 等用 Mie 散射计算出来的关系^[5](计算中, 他们按照文献[4]取 $N_0 = 0.8 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$):

$$\begin{cases} Z = 44500 k^{1.4} \\ k = 0.0314 R^{1.14} \\ Z = 345 R^{1.6} \end{cases} \quad (17)$$

可以看出: 当降雨较强时, 雷达波受到雨的衰减很大。如果用测量的视反射率直接计算 PIA , 得

到的值比用晴空条件下后向散射系数和雨区后向散射系数之差得到的接近真实值的 PIA 值要小得多(图2)。例如, 描标号 210 附近, 在星下平面内, 由后向散射系数之差得到的 PIA 为 24dB 时, 而由视反射率直接计算的 PIA 仅为 3dB(如图2中的 $Z-k$ 曲线), 可见校正衰减效应的必要性。 kZ 算法虽然可以校正衰减效应(得到的 PIA 值约为 5dB), 但和比较接近真实值的 PIA 值还存在较大误差。而应用 kZS 算法, 得到 PIA 约为 19dB, 已比较接近由后向散射系数得到的 24dB。应用 kZ 和 kZS 算法, 我们分别计算了天底面以及倾角为 6° 剖面内沿飞机飞行方向的雨强分布(图3)。图3中的雨强为波束方向的雨强平均值(从海平面到 4km 高度)。从雨强的分布图上看, 由于反演是在衰减比较强的区域进行的, kZ 算法虽然对衰减效应有一定程度的校正(当然在平流降水区域, 效果要好得多^[6]), 但 kZS 算法得出的雨强分布才更加可信, 这是因为应用 kZS 算法计算的 PIA , 已接近由后向散射系统得到的 PIA 。另外, 天底面和倾角为 6° 剖面内沿飞机飞行方向的雨强分布的相似性, 显示算法可以在存在一定倾角的情况下取得令人满意的结果。这是因为当倾角小于 10° 时, 后向散射系数 σ^0 的标准偏差比后向散射系数 σ^0 本身要小得多¹⁾, 这样 kZS 算法中的约束因子 PIA 的估计误差比较小, 从而能实现在一定倾角范围内精度较高的反演。

如果我们应用诸如(17)式的经验公式, 这样公式中隐含的雨滴谱参数 N_0 和实际的雨滴谱参数 N_0 不尽相同, 方程(17)中 $Z-k$, $k-R$ 和 $Z-R$ 关系均会相应出现误差, 从而导致降雨量的反演产生相应误差。如果海平面的散射性质在有雨和无雨时的差别以及雷达的定标误差可以忽略, 依据方程(16), 利用研究区域所取得数据求出 α 的修正因子 $f=0.3681$ (这里的 α 取的是(17)式中的假想值 44500), 我们就可以达到消除利用经验公式(17)可能带来的误差。具体作法是:

如果雨滴谱分布可以表示为指数形式, $Z-R$ 和 $k-R$ 关系可以表示为:

$$\begin{cases} Z = a' N_0^{(1-b)} R^b \\ k = c' N_0^{(1-d)} R^d \end{cases} \quad (18)$$

那么, 如果 α 修正为 $f\alpha$, 也就是对 N_0 进行修正, 关系式(17)变为:

1) 窦贤康, 刘万栓, 刘锦丽. 机载雷达定量测雨中的衰减效应的订正研究. 大气科学, (投稿)

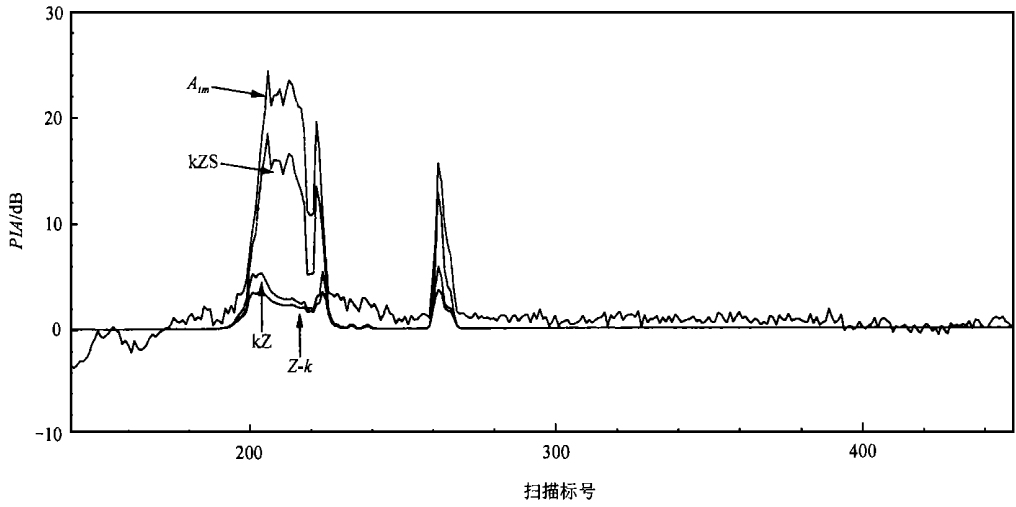


图 2 沿飞机飞行方向的 PIA 变化曲线

Fig. 2 The variation of PIA along the aircraft flight direction

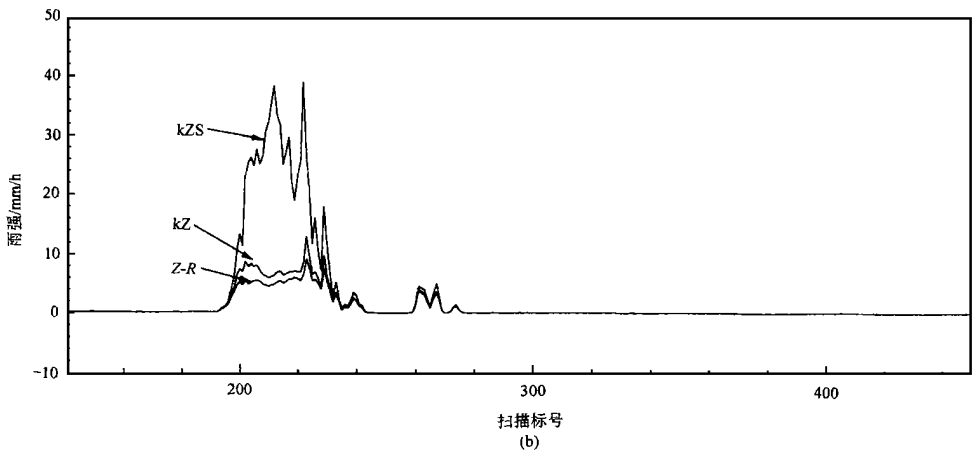
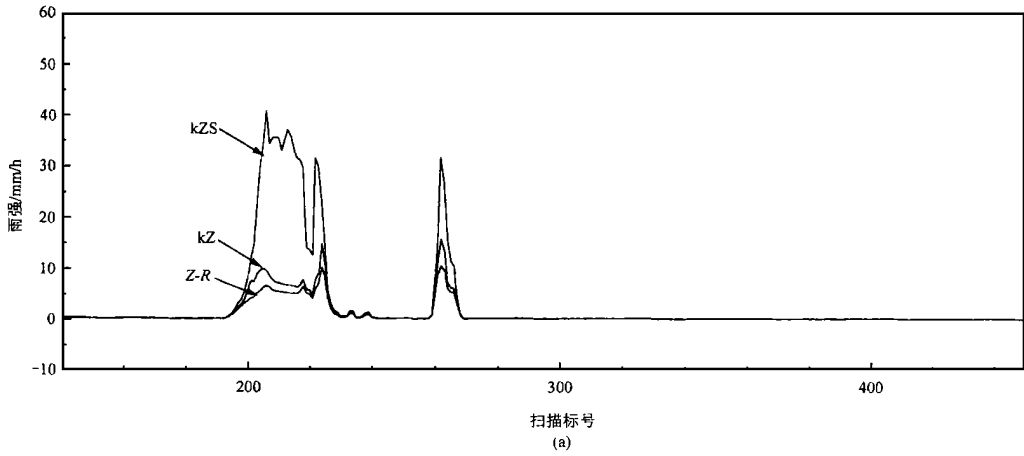


图 3 沿飞机飞行方向的雨强变化曲线

(a) 天底面内 (b) 偏离天底面 6° 剖面内

Fig. 3 The variation of rainrate along the aircraft flight direction

$$\begin{cases} Z = 16382k^{1.4} \\ k = 0.02213R^{1.14} \\ Z = 77.1R^{1.6} \end{cases} \quad (19)$$

根据修正后的公式(19),重新计算的雨强分布图4,最大雨强可达60mm/h以上。值得指出的是这种修正也存在误差。根据式(15),修正误差主要来

源于 $A_m(\lambda)$ 的估计误差,这因为,海平面的散射性质在有雨和无雨时存在差别。但即使使用式(19)有误差存在,也比直接借用 $Z-R$ 和 $k-R$ 经验公式计算雨强要合理。而且随着海平面散射性质模型的不断优化,修正后的雨强计算公式(19)的误差就会更小。

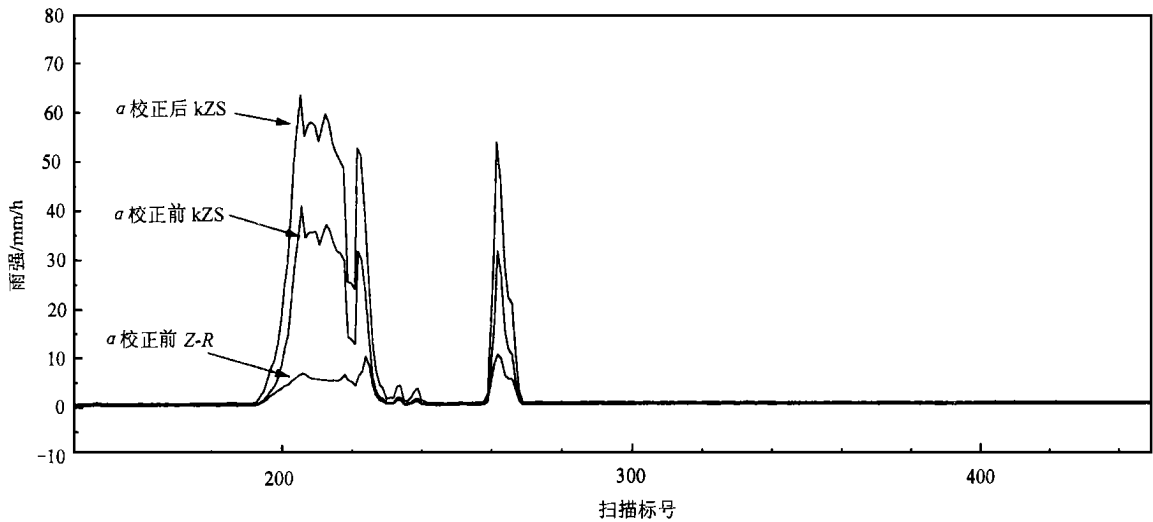


图4 天底面内经过雨滴谱参数修正前后沿飞机飞行方向的雨强变化曲线(kZS算法)

Fig. 4 Comparison of the mean rainrates along the aircraft movement deduced with and without the correction for the parameter of the drop size distribution (kZS algorithm only)

5 结论

机载雷达资料的研究表明:对于弱降雨,kZ和kZS两种算法均能对衰减效应进行令人满意的校正。对于中等以上雨强,由于雨对雷达波有较大的衰减,必须应用算法进行衰减效应的订正,否则雨强的估计会出现较大的偏差。kZ算法虽能起到校正衰减效应的目的,但订正的效果不够理想。kZS算法利用了海平面回波在无雨和有雨情况下的差别作为衰减总量近似这一约束条件,因此在一个较大的范围内对衰减效应的订正效果明显。但kZ算法比起kZS算法的一个最大优点是,它不需要表面后向散射截面的模型,因此可以在地表面后向散射截面较难模型化的区域使用(如陆地),而不仅仅局限于海洋区域。

另外,我们还尝试了由雷达实测资料进行雨滴谱参数的订正。这样比起直接应用经验公式进行降雨量反演(反演的精度可以得到改善。

致谢

法国国家科学研究中心 Amayenc 和 Testud 博士对本文提出过许多有益的意见,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- 1 Eckeman J. Meteorological radar facility for the space shuttle. *IEEE/National Telecommunication Conf.*, 1975, **37**: 6-16.
- 2 Okamoto K., Miyazaki S., Ishida T. Remote sensing of precipitation by a satellite-borne microwave remote sensor. *Acta Astronautica*, 1979, **6**: 1043-1060.
- 3 Durden S. L., IM E., Li F. K., et al. ARMAR: An airborne Rain-Mapping Radar. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1994, **11**(3): 727-737.
- 4 Marshall J. S., Palmer W. M. K. The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 1948, **5**: 165-166.
- 5 Testud J., Dou X. K., P. Amayenc. Impletation of retrieval algorithms for spaceborne radar. Final report of ESA contract n° 10146/92/NL/GS. 1994.
- 6 Dou X. K., J. Testud, P. Amayenc. The study of the spaceborne rain radar rainfall rate retrieval algorithms by simulations. *Chinese Sci. Bull.*, 1997, **42**(3): 292-295. (In Chinese) [窦贤康, J. Testud, P. Amayenc. 机载测雨雷达降雨量反演算法及模拟验证. 科学通报, 1997, **42**(3): 292-295.]

作者简介

窦贤康,男,1966年生,1987年毕业于中国科学技术大学,1990年获巴黎第七大学硕士学位,1993年获巴黎第七大学博士学位,1993年至1995年在法国国家科学研究中心作博

士后。现任中国科学技术大学地球和空间科学系副主任,副教授。主要从事利用机载多普勒雷达进行大气运动学和动力学研究和利用星载测雨雷达进行大气中雨空间分布的研究。在国内外刊物上发表论文十余篇。

The Study of the Rain Structure from Airborne Doppler Radar Data Obtained during the TOGA/COARE Experiment

DOU Xian-Kang LIU Wan-Shuan

(*University of Science and Technology of China, Hefei, 230026*)

LIU Jin-Li

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029*)

Abstract The airborne radars can easily follow the observed phenomena and allow to scan meteorological systems in places where ground-based radars are not easy to operate and they are progressively used in meteorological studies. Due to the requirements of the applications, airborne radars use an X-band or Ku band frequency. However, the electromagnetic wave on the frequency is attenuated through rain, thus algorithms should be studied to correct for the attenuation effect. For the single beam-single frequency rain radar, kZ and kZS algorithms demonstrate a promising interest for application. This paper applies kZ and kZS algorithms to the airborne data gathered in January and February 1993 during the TOGA/COARE experiments and studies the rain structure.

Key words Rain rate, Rain radar, Algorithm