

机载雷达定量测雨中衰减效应的订正研究^{*}

窦贤康 刘万桂

(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 星载测雨雷达的应用, 必须满足一些主要条件: 高的空间分辨率、宽阔的覆盖范围、大的动态降雨测量范围以及精确的点测量等。由于技术条件的限制, 满足这些条件的雷达工作在被雨衰减的频率段, 因此必须修正由于衰减所导致的误差。对于单波束单频雷达, kZS (衰减系数-雷达反射因子-海表反射率) 算法在一个较大的雨强范围内对衰减效应的订正效果较好。本文将 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, 取得了和模拟研究预期相吻合的结果。

关键词 雨强 测雨雷达 反演算法

1 引言

降雨体系在整个大气的能量传输中起着很重要的作用, 它在相当程度上引起了全球热量和湿度的重新分布。因此全球降雨量的测量将推动大气海洋耦合的研究, 帮助我们理解潜热在大尺度大气环流中的作用, 提高我们对暴雨系统的动力学及形态学的理解。除了这些科学的意义外, 它还可以给农业、水资源管理、水灾预报带来许多实际的效益。

无论地面还是海面观测, 都由于其自身的各种局限性, 而无法象运用卫星手段从太空观测一样能提供一个地球全面的观测取样。在不同的测量手段中, 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。和其他的星载传感器 (红外、微波辐射计、激光雷达等) 相比, 微波测雨雷达有其独特的特征: 它能得到降雨体系沿高度分布。

降雨量大小和雷达所接收到的反射率因子, 统计上讲有一定的函数关系。只要获得准确的回波, 原则上就可以得出降雨量估算, 但是由于雷达工作在 14 GHz 区域 (TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission, 日、美合作), 电磁波随着降雨量强弱有程度不同的衰减, 再加上回波涨落的不确定性。因此必须找到算法去修正这些由衰减所导致的误差。对于单波束单频雷达, 应用 SRT (surface reference technique) 的 kZS 算法在一个较大的雨强范围内对衰减效应的订正效果较好。

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

1997-12-22 收到, 1998-01-24 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 49705058

(JPL) 研究了 Airborne Rain-Mapping Radar (简称 ARMAR 雷达^[1])。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各种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。

2 算法简介

kZS 是一种稳定性非常好的算法, 能在一个较大的雨强范围内对衰减效应进行较好的订正。下面简要说明此算法的基本原理。

雷达收到在有效距离为 r 处的散射体元的平均回波能量 $\overline{P}(r, \lambda)$, 正比于雷达的反射率因子 $Z(r, \lambda)$, 并存在衰减效应, 可表为

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

其中, C_{λ} 为雷达常数, k 为比衰减因子。

如果假定后向散射在有雨和无雨两种情况下的散射性质基本上没有变化, 雷达收到的海平面 r_s 处的平均回波能量 $\overline{P}_s(r_s, \lambda)$ 为

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

$C_{s\lambda}$ 为海平面处的 C_{λ} ; $\sigma^0(\lambda)$ 为无雨情况下后向散射系数。

如果 r_i 和 r_j 之间的双路径衰减因子的定义为

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

那么, 雷达的视反射率因子和表面的视后向散射系数可表为

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

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

这样, 全路径衰减 (path-integrated attenuation 或 PIA) 因子可近似估计为

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

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

假定反射率因子 Z 和比衰减因子 k 之间关系可以表示为指数形式, 则

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

同时考虑到雷达定标误差 (δC)、双路径衰减因子估计误差 (δA_i) 以及 α 的误差 $\delta \alpha$, 可以推出比衰减因子为

$$k(r) = \gamma^{-1} Z_{am}^{1/\beta}(r) / [\gamma^{-1} (A_{im} \delta A_i \alpha \delta \alpha \delta C)^{1/\beta} + S(r, r_s)], \quad (8)$$

$$A(r_0, r_s) = [1 - (\alpha f)^{-1/\beta} \gamma S(r_0, r_s)]^\beta, \tag{9}$$

其中, $\gamma = 0.46/\beta$, $f = \delta\alpha\delta C$, $S(r_1, r_2) = \int_{r_1}^{r_2} Z_{am}^{1/\beta}(s)ds$, r_0 为云顶高。

由 (9) 式知, $A(r_0, r_s)$ 可以由视反射率因子来进行估计。 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 (9) 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, 可以通过最小化函数 (利用最小二乘法), 得

$$J_{\min} = \sum_{i=1}^N [A_i^{1/\beta}(r_0, r_s) - A_{tm,i}^{1/\beta}]^2. \tag{10}$$

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):

$$fx = [\gamma \sum_{i=1}^N S_i^2(r_0, r_s) / \sum_{i=1}^N (1 - A_{tm,i}^{1/\beta}) S_i(r_0, r_s)]^\beta. \tag{11}$$

这样, 比起雨滴谱参数用经验公式, 对雨量的反演精度要高。后面会专门讨论这一问题。

3 数据分析

我们选取了 1993 年 2 月 6 日 16:53:16 到 17:00:47UTC 时间段 ARMAR 雷达 (雷达主要参数见表 1) 取得的数据来进行研究。其原因在于, 在此期间雷达回波存在较强的沿路径衰减效应。图 1 是天底面 (此面包含飞机飞行轨迹) 内的视反射率因子的结构图, 视反射率因子最大处 (也就是离飞机距离约 12 km 处) 为海平面的位置。同时可以看出: 混合降水系统的强对流降水部分位于扫描标号 10 附近, 其上升气流升至约 7 km 处 (从反射率 25 dBZ 的外廓线的位置可以看出), 层状降水区的亮带高度约为 5 km。

表 1 ARMAR 雷达参数

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

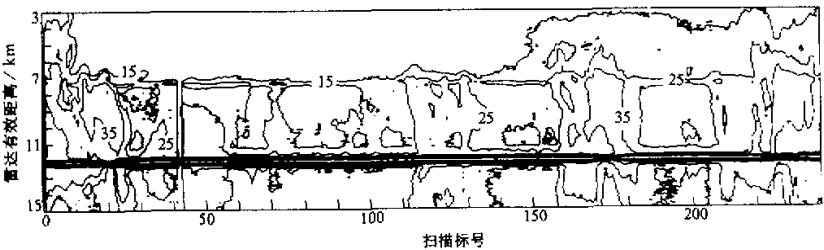


图 1 天底面内视反射率因子的结构图 (其中雷达有效距离的零点为飞机所在位置)

图 2 是天底面内沿飞行方向的海平面回波强度。可以看出: 扫描标号为 30~150 区域, 由于雨强较小, 雷达收到的回波信号很弱, 因此衰减效应不明显, 这也可以看出海平面的雷达回波强度基本上没有变化。而扫描标号为 10~25 区域, 雷达收到的回波信号已比较强, 在此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。算法的作用就是校正这种效应。

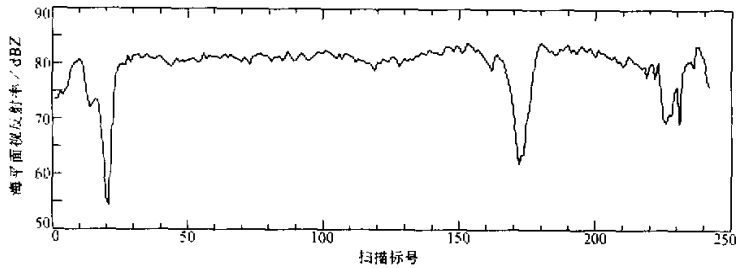


图 2 天底面内沿飞行方向的海平面回波强度

4 计算结果和讨论

kZS 算法利用波束雨区全路径衰减 PIA 作为约束条件, 这样可以很大程度上消除雷达定标的误差。如果忽略海平面的散射性质在有雨和无雨时的差别 (即使在这种情况下, 我们做过误差分析, 对中等以上雨强, kZS 方法比起其他不利用海平面回波信号的方法稳定且误差要小得多, 更何况随着和地面测量数据的不断比较, 会建立一个较好的海平面的后向散射系数模型), PIA 则可由雷达收到的海平面在无雨区和雨区回波的能量之比得到。因此, 需要首先进行海平面表面无雨区 (或者说晴空条件下) 后向散射系数的定标。这里使用的晴空的定义是: 亮温低于 145 K 及最大雷达反射率小于 15 dBZ^[2]。具体做法是: 对于每一个给定角度的后向散射系数的定标, 与它相邻不超过 1 度的所有雷达束都被考虑进去用来求该角度后向散射系数的平均值。当雷达束偏离天底面时, 由于雷达波束宽的存在, 这样海平面将被不止一个雷达距离门探测到。海平面反射的总能量应通过对所有与海平面相交的雷达距离门回波能量进行积分来求得。按照上述方法, 天底面两侧的后向散射系数随角度的变化均被求出 (见图 3)。由于机载特性的引入, 雷达波束的方位角可能出现误差, 天底面两侧的后向散射系数的对称性也从侧面证明了各种角度订正的正确性。另外, 我们将后向散射系数随角度的变化的实验曲线和相同风速下的理论曲线^[3]比较, 发现它们非常接近 (见图 4)。这样影响 kZS 算法反演精度的一个重要的参数就可以较准确地模型化了。

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, $N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D)$)^[4]。反演中首先使用 Slack 等用 Mie 散射计算出来的关系^[5] (计算中, 取文献[4] $N_0 = 0.8 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$):

$$\begin{cases} Z = 44500k^{1.4}, \\ k = 0.0314R^{1.14}, \\ Z = 345R^{1.6}. \end{cases} \tag{12}$$

根据方程 (12)，雨强一般由 $k-R$ 关系求得，因为利用 $Z-R$ 关系受雷达绝对定标因素影响等。但对于 k 值很小的区域， $\delta k/k$ 的相对误差较大，因此相应的雨强估计误差很大，作为折中，我们使用一种在小 k 时优先 $Z-R$ ，在大 k 时优先 $k-R$ 的雨强计算公式，得

$$R = e^{-k/k_0} (Z/345)^{1/1.6} + (1 - e^{-k/k_0}) (k/0.0314)^{1/1.14}, \tag{13}$$

其中， k_0 取为 1 dB/km。

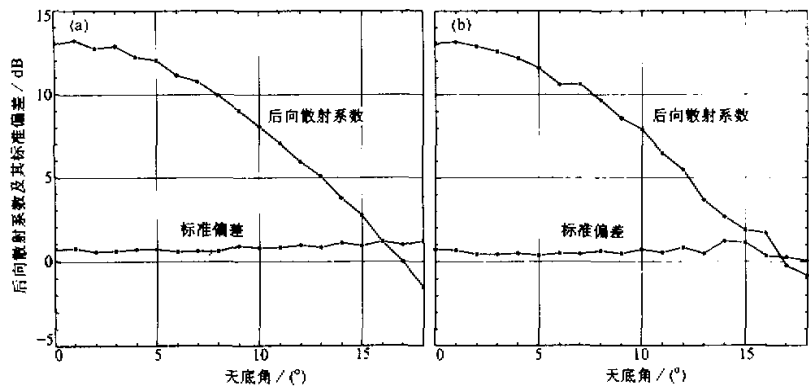


图 3 后向散射系数 σ^0 及其标准偏差随偏角的变化曲线
(a) 天底面左侧；(b) 天底面右侧

当降雨较强时，如果应用测量的视反射率直接计算 PIA，由于存在衰减效应，得到的 PIA 值和利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比较接近真实值的 PIA 值相比要小得多。图 5a 中，对于扫描标号为 20，在天底面内，由后向散射系数之差得到的 PIA 为 28 dB 时，而由视反射率直接计算的 PIA 仅为 2.5 dB（图 5a 中的 $Z-k$ 曲线），可见校正衰减效应的必要性。应用 kZS 算法，得到比衰减因子的沿波束方向廓线，用此廓线计算的 PIA 为 20 dB，已接近由后向散射系数得到的 28 dB。在获得衰减效应得到校正的 Z 和 k 剖面

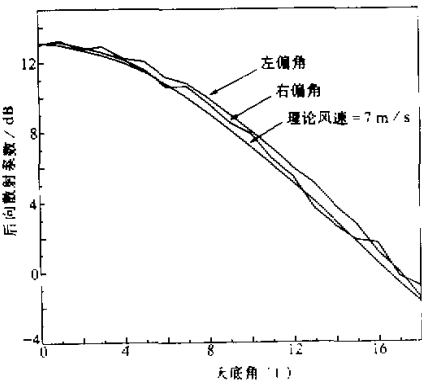


图 4 后向散射系数 σ^0 随偏角的变化实测值和理论值在相同风速下的比较

后, 依据方程 (13) 可以计算出雨强的分布, 见图 5b。从雨强 (海平面上 4 km 内) 的分布图上看, 在弱衰减区域, kZS 算法得出的雨强和直接由视反射率根据 $Z-R$ 关系得出的雨强相近; 而在衰减比较强的区域, 直接由视反射率根据 $Z-R$ 关系得出的雨强在靠近海平面的区域出现“雨量洞”, 这显然是源于衰减效应。而 kZS 算法得出的雨强分布已和对流降雨区的降雨结构相吻合。

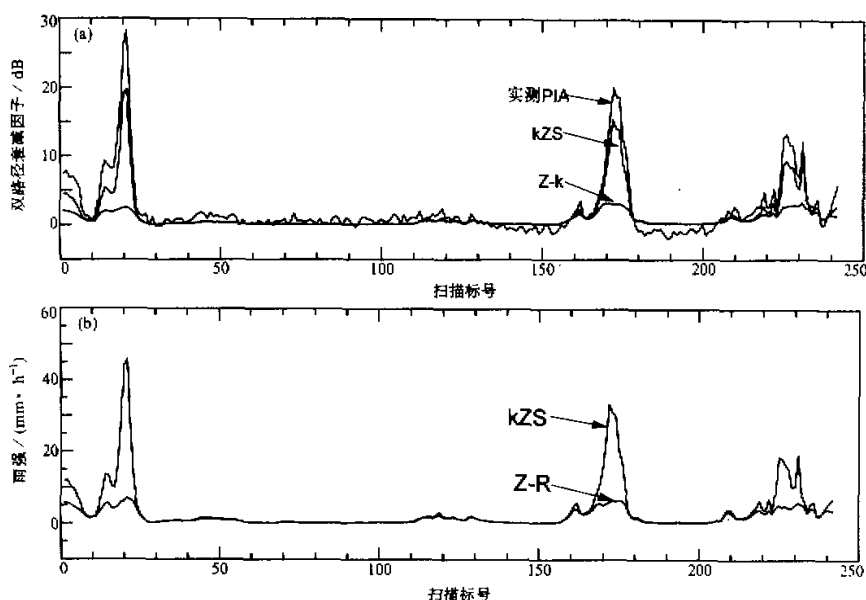


图 5 (a) 天底面内 PIA 沿飞机飞行方向的变化曲线
(b) 天底面内雨强沿飞机飞行方向的变化曲线

如果雨滴谱参数中的 N_0 估计有误差, 方程 (12) 中 $Z-k$ 、 $k-R$ 和 $Z-R$ 关系均会出现误差, 也就是说降雨量的反演会产生相应误差。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 (11), 利用研究区域所取得数据求出 α 的修正因子 $f=0.4221$, 这里的 α 取的是 (12) 式中的假想值 44500。

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^[6]

$$\begin{cases} Z = a' N_0^{(1-b)} R^b, \\ k = c' N_0^{(1-d)} R^d. \end{cases} \quad (14)$$

那么, 如果 α 修正为 $f\alpha$, 也就是对 N_0 进行修正, 关系式 (12) 变为

$$\begin{cases} Z = 18784 k^{1.4}, \\ k = 0.0232 R^{1.14}, \\ Z = 95 R^{1.6}. \end{cases} \quad (15)$$

这样, 相应的雨强计算公式变为

$$R = e^{-k/k_0} (Z/95)^{1/1.6} + (1 - e^{-k/k_0}) (k/0.0232)^{1/1.4} \quad (16)$$

修正后的 α 值和由现场科学考察船上雨滴谱仪实测数据得到的 α 估计很相近^[7], 雨强反演误差的大小则由利用 (13) 式的近 100% 降到利用 (16) 式的 20% 左右。可见此修正方法的可行性。

根据修正后的雨强计算公式 (16), 重新计算的雨强分布见图 6, 最大雨强可达 60 mm/h 以上。在这里值得指出的是这种修正也存在误差。根据式 (10), 修正误差主要来源于 $A_{tm}(\lambda)$ 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 (16) 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模型的不断优化, 修正后的雨强计算公式 (16) 的误差就会更小。

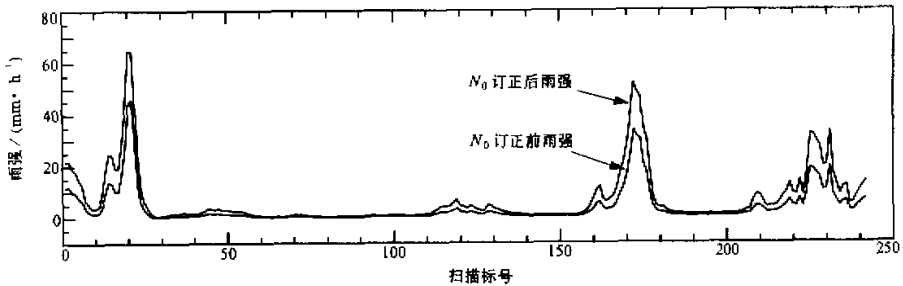


图 6 天底面内经过雨滴谱参数修正前后沿飞机飞行方向的雨强变化曲线

5 结论

机载雷达资料的研究表明衰减效应可以得到较好的订正, 而且我们还研究了由雷达实测资料进行雨滴谱的估计订正以及对降雨量反演的影响。但要算法应用去处理星载雷达资料, 我们还需进行进一步的研究。这是因为, 虽然研究中的机载雷达频率和 TRMM 计划中的雷达频率很相近, 但由于星载雷达的高度通常为几百公里, 远远大于机载雷达的高度, 同时星载雷达的天线的尺寸又不能做得很大, 这样, 具有一定波束宽度的雷达波束在地面的星下点足印可达数公里, 再加上波束内对回波的贡献是不均匀的甚至是非线性的, 因此继续研究不均匀性束内充塞对星载雷达衰减效应订正影响就显得非常重要^[8]。

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。

参 考 文 献

- 1 Durden, S. L., IM E., Li F. K. et al., 1994, ARMAR: An airborne rain-mapping radar, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 11(3), 727~737.

- 2 Tani, T., P. Amayenc and M. Ali-Mehenni, 1995, Radar return from the ocean surface and path-integrated attenuation at 13.8 GHz as derived from ARMAR data in TOGA / COARE, in: *The preprint of the 27th International Conference on Radar Meteorology*, 694~696.
- 3 Sobieski, P., 1994, Review of scattering phenomena, algorithms and implementation, Final Report of ESA, Contract No. 10146 / 92 / NL / GS, 219pp.
- 4 Marshall, J. S., W. M. K. Palmer, 1948, The distribution of raindrops with size, *J. Meteor.*, **5**, 165~166.
- 5 Testud, J., X. K. Dou, P. Amayenc, 1994, Impletation of retrieval algorithms for spaceborne radar, Final report of ESA contract No. 10146 / 92 / NL / GS, 349pp.
- 6 Ulbrich, C. W., 1983, Natural variation in the analytical form of the raindrop size distribution, *J. Clim. Appl. Meteor.*, **22**, 1764~1775.
- 7 Ebert, E. E. and M. J. Manton, 1995, Results of the 3rd algorithm intercomparison project of the global precipitation climatology project, Draft Report to the World Climate Research Programme, 38pp.
- 8 袁贤康, J. Testud, P. Amayenc, 1997, 星载测雨雷达降雨量反演算法及模拟验证, *科学通报*, **42**(3), 292~295.

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

Dou Xiankang and Liu Wanshuan

(Department of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Liu Jinli

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

Abstract The application of spaceborne rain radar should satisfy some main requirements: high spatial resolution, wide coverage, large dynamic range for rainrate measurements and accurate rainfall rate measurements. Due to the technical constraints, the radars satisfying the above requirements work at the attenuated frequency, thus the algorithms should be studied to correct for the attenuation effect. For the single beam and single frequency rain radar, kZS algorithms works well for a quite large dynamic range of rainrate. This paper applies kZS algorithms to the airborne data gathered on January and February 1993 during the TOGA / COARE experiments and studies the rain structure. The results show the consistence with the simulation studies.

Key words rain rate rain radar algorithm