

不均匀性束内充塞效应对星载测雨雷达 反演算法的影响^{*}

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)

P. Amayenc

(Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires, France)

刘锦丽

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 星载雷达在地面的足印可达数公里, 强降雨团的特征尺度也仅为几公里, 加上波束内各部分对回波的贡献是非线性的, 研究不均匀性束内充塞效应 (Non Uniform Beam Filling, 或简称 NUBF) 对星载测雨雷达反演雨强算法的影响就显得非常重要。利用 TOGA/COARE 期间 Ku 波段机载雷达实测资料提供的不同的降雨结构进行不均匀性束内充塞效应的研究。

关键词: 不均匀性束内充塞效应 (NUBF); 雨强; 测雨雷达

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、环境科学的研究中也有非常重要的意义。但目前测站稀少的地区 (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, 卫星遥感提供了精确地测量全球降雨量的可能性, 运用雷达作为一种主动手段从空间测雨的想法在 70 年代中期就已被提出^[1,2]。和其他被动手段相比, 星载测雨雷达能直接提供沿高度变化的雨强分布。但由于星载雷达天线的尺度有限, 且雷达工作在受雨衰减的频率上, 对降雨量反演而言, 不均匀性束内充塞效应就成为一个很严重的问题。这种效应不是简单地造成降雨量在雷达波束内的平滑, 当雷达波全路径衰减比较重要时, 更会给降雨量反演带来很大的偏差。Zawadski^[3]曾研究在非衰减频率上不均匀性束内充塞效应; Testud 等^[4]利用一个降雨模型研究不均匀性束内充塞效应对不同反演算法的影响; 窦贤康等^[5]更进一步利用英国 RAL (Rutherford Appleton Laboratory) 实验室的 3 GHz 地基 Chilbolton 雷达实测资料模拟研究不均匀性束内充塞效应的影响。但由于他们的研究在雷达频率、雨团结构、扫描方式上和星载

测雨雷达的实际情况有所不同, 他们的结果只是不均匀性束内充塞效应对星载测雨雷达反演算法影响的某种近似。

为了支持星载测雨雷达的发展, 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^[6])。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。由于机载雷达和星载雷达在扫描方式上是非常相似的, 利用机载雷达实测资料提供的不同的降雨结构进行不均匀性束内充塞效应的研究, 从而更准确地对星载雷达测雨精度进行估计。

2 算法简介和不均匀性束内充塞模型

2.1 算法简介

下面简要说明 kZ 和 kZS 算法的基本原理。

雷达收到在有效距离为 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 $Z(r, \lambda)$, 同时考虑衰减效应, 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, λ 为波长。

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

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

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

如果 r_i 和 r_j 之间的积分路径衰减因子 (简称 PIA) 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, 全路径衰减因子可近似估计为

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

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

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

2.2 不均匀性束内充塞模型

为了简化计算, 计算仅在天底面内进行。对于给定的网格点 (i, k) , 其反射率的束内平均可按如图 1 所示进行计算。计算中我们考虑到下列因素:

(1) 天线在天底面内的特征可用一个高斯函数来表达。也就是说, 距离波束轴线为 r 的散射体元对回波总强度的贡献应受下面的权重因子的调节:

$$W = \exp[-4\ln 2(r/L)^2], \quad (12)$$

其中 L 为“足印”, 定义为在波束横截面上, 回波强度单程衰减 3dB 的宽度。在计算中, 旁瓣效应可以忽略。

(2) 我们只考虑以网格点 (i, k) 为中心, $1.5L$ 为半径范围内的网格点的贡献, 也就是说忽略低于 -27 dB 那些网格点对雷达回波强度的贡献, 见图 1。

那么, 已经过束内平均网格点 (i, k) 回波能量为

$$P(i, k) = \sum_{l=i-m}^{i+m} P(l, k) \left[\frac{W_G^2(l, k)}{P_w} \right], \quad (13)$$

其中, $m = 1.5L / \Delta x$, Δx 为雷达在 x 方向取样分辨率, P_w 为归一化因子, 表示为

$$P_w = \sum_{l=i-m}^{i+m} W_G^2(l, k). \quad (14)$$

(3) 由于雷达工作于受雨衰减的频段, (13) 式中的 $P(i, k)$ 应考虑衰减效应, 即

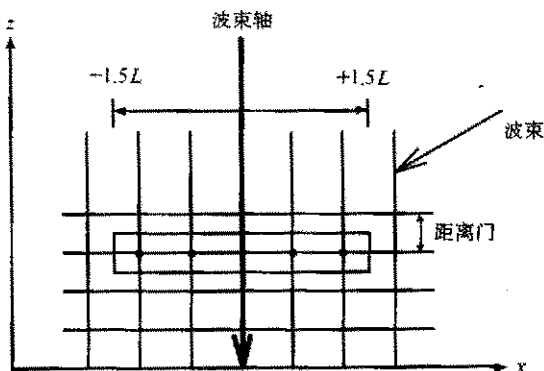


图 1 雷达束内不均匀性束内充塞模拟示意图

$P(i, k)$ 为雷达视反射率对应的回波能量。而雷达视反射率计算方法为: 在雷达束向上, 每个网格点的 PIA 因子可以由下式计算:

$$A_{ik} = \exp \left[-0.46 \left(\frac{1}{2} k_{ik} + \sum_{l=k+1}^{l=n_3} k_{il} \right) \Delta R \right], \quad (15)$$

其中, k 为比衰减因子。 $i \in \{1, 2, 3 \dots, n_1\}$, 以及 $k \in \{1, 2, 3 \dots, n_3\}$ 。

这样在标号为 (i, k) 网格点上的雷达视反射率为

$$Z_a(i, k) = Z(i, k) A_{ik}. \quad (16)$$

(4) 最后, 雷达的实际接受信号为

$$S = f C \overline{Z_a(i, k)} + (f' - 1) \bar{n}, \quad (17)$$

其中 C 是雷达常数, $\overline{Z_a}$ 是根据 (13) 式得到的经过束内平均的视反射率因子, $\bar{n}$ 是平均噪声功率, f 和 f' 这两个随机函数分别定义了信号和噪声的涨落。

f 和 f' 的概率分布相似, 并可表示为

$$P(f) = \frac{N_i^{N_i} f^{N_i-1} \exp(-N_i f)}{(N_i - 1)!}, \quad (18)$$

其中 N_i 为独立取样次数, 并且 $\bar{f} = \bar{f}' = 1$ 。

3 雷达扫描特性及数据选取

发展 ARMAR 雷达实际上是为 TRMM 星载测雨雷达作可行性预研究, 所以这两个雷达的频率和扫描方式都很接近 (雷达主要参数分别见表 1 和表 2)。ARMAR 雷达系统的扫描几何是: 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 2 描述了雷达的扫描几何。

我们选取了 9 个时间段 ARMAR 雷达取得的观测数据来进行研究, 它们分别是: 1993 年 1 月 18 日 3:32:41~3:40:20 (协调时世界, 下同)、1 月 19 日 4:11:49~4:19:28、2 月 6 日 16:31:07

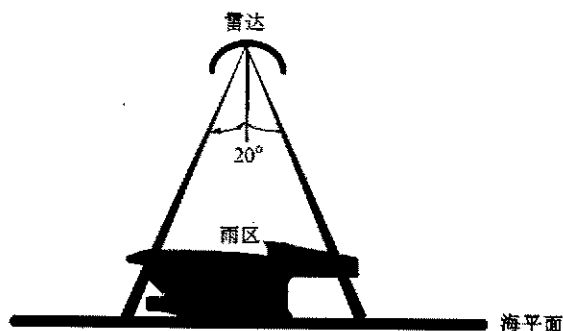


图 2 雷达在垂直于飞机飞行方向的平面内的扫描几何

~16:39:03, 16:53:16~17:0:47, 20:12:57~20:27:27, 2 月 20 日 21:42:03~21:46:57, 22:35:39~22:51:06, 2 月 22 日 21:44:18~21:52:08, 22:34:01~22:41:08, 按被观测的时间顺序我们称之为事件 1, 事件 2, ……事件 9。在这 9 个观测中既有雨强较强的对流型降雨, 也有雨强较弱的层状型降雨, 这样可以研究不同降水类型情况下算法的不均匀性束内充塞效应。

表 1 TRMM 测雨雷达参数

频率	13.796 GHz
水平观测幅度	~215 km
观测高度范围	地表至 15 km 以上
功率	250 W
可观测最小雨强(雨顶处)	0.7 mm/h
射程分辨率	250 m
地表面水平分辨率 (星下点位置)	4.3 km

表 2 ARMAR 雷达参数

频率	13.8 GHz
3dB 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
射程分辨率	60 m
地表面水平分辨率 (雷达高度为 12 km)	800 m

4 计算结果和讨论

由于机载雷达和星载雷达在扫描方式上非常相似, 因此利用机载雷达实测资料提供的不同的实际降雨结构进行不均匀性束内充塞效应的研究非常有价值。对于 ARMAR 雷达观测数据, 利用 kZS 算法可以得到空间降雨的结构, 这个结构在研究星载雷达降雨量反演过程中被当作一个标准参考场。从这个标准参考场出发, 按照在 2.2 中描述的不均匀性束内充塞模型, 可以模拟得到不同足印的星载雷达观测的视反射率结构, 在此基础上来进行星载雷达降雨量的反演, 并和机载雷达所得到的参考场进行比较, 从而研究不均匀性束内充塞效应对星载测雨雷达反演算法的影响。

要进行星载雷达所观测的视反射率结构的模拟和随后的星载测雨雷达降雨量反演, 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, $N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D)^{[7]}$)。反演中我们首先使用 Slack 等用 Mie 散射计算出来的关系^[8] (计算中, 他们按照文献[7]取 $N_0 = 0.8 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$):

$$\begin{cases} Z = 44500k^{1.4}, \\ k = 0.0314R^{1.14}, \\ Z = 345R^{1.6}. \end{cases} \quad (19)$$

根据方程 (19), 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 $k-R$ 的雨强计算公式为

$$R = e^{-k/k_0} (Z/345)^{1/1.6} + (1 - e^{-k/k_0}) (k/0.0314)^{1/1.14}, \quad (20)$$

其中, k_0 取为 1 dB/km。

图 3 显示在 1 km 高度上 (其他高度上也类似), 事件 1 中反演雨强随雷达足印的变化。首先, 由于不均匀性束内充塞效应, 参考场的快速变化部分, 如三峰结构, 在反演雨强中反映得已很不明显。其次, 我们还可以看出, 随着足印从 1.5 km 增大到 4 km, 反演得到的降雨区逐渐被展宽, 并伴随着雨强的极大值的逐步下降。例如足印

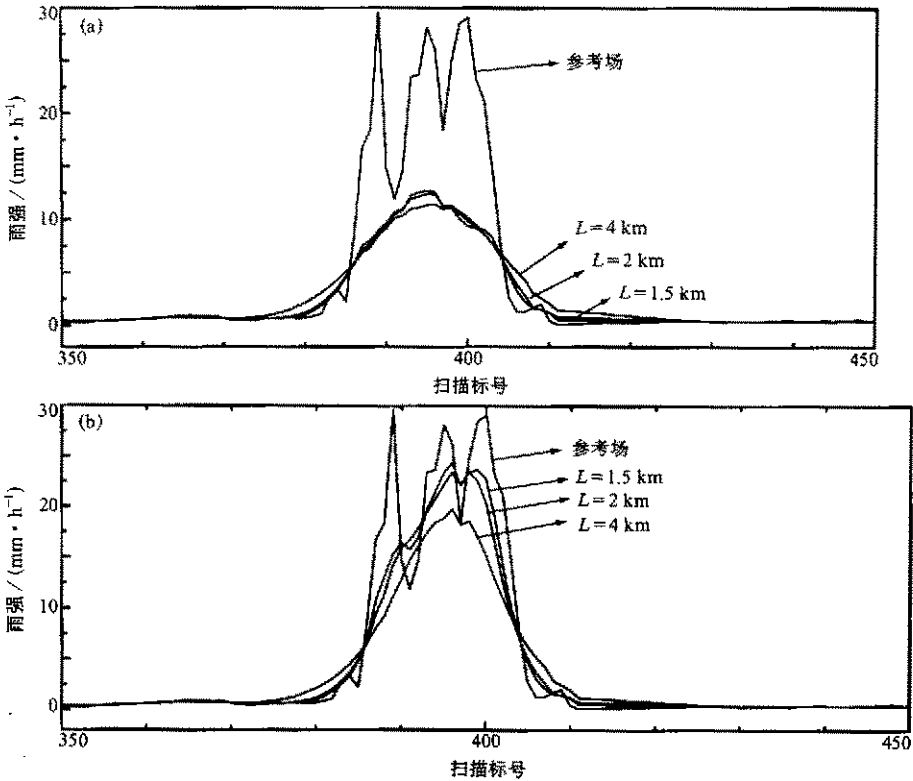


图3 1 km 高度上, 事件1 中反演雨强随雷达足印的变化
(a) kZ 算法; (b) kZS 算法

$L=1.5\text{ km}$ 时, kZS 算法反演得到的最大雨强为 28 mm/h ; 足印 $L=4\text{ km}$ 时, 反演得到的最大雨强则降为 20 mm/h 。原因是由于雷达有波束宽, 这样反演得到的雨量场一定是按雷达波束内能谱函数平均的场。我们进一步研究表明, 这种平均的程度取决于足印和雨团特征尺度比值的大小。例如, 事件3 中的对流降雨团比事件1 中的对流降雨团要窄, 在 1 km 高度上, 当足印 $L=1.5\text{ km}$ 时, 事件1 的雨强反演误差为 10% , 而事件3 的雨强反演误差则为 36% , 见图 4a; 当足印 $L=4\text{ km}$ 时, 两事件雨强反演误差均增大, 且两事件雨强反演误差的差值也增大, 见图 4b。可见不均匀性束内充塞效应对尺度小而强的降雨团的影响要比对尺度大的降雨团要重要。

为了更全面地了解不均匀性束内充塞效应的影响, 我们将所选的 9 个事件中的比较均匀的层状型降水和比较强的对流型降水分成两组。我们定义反演雨强小于某给定值的累积雨强 (用百分比) R_c 为

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^{N'} R_{re}(i)}{\sum_{i=1}^N R_{ref}(i)}, \tag{21}$$

N 为反演区域内所有的雷达射束数, N' 为反演雨强中小于该给定值的射束数, R_{re} 为反演雨强, R_{ref} 为参考场雨强。

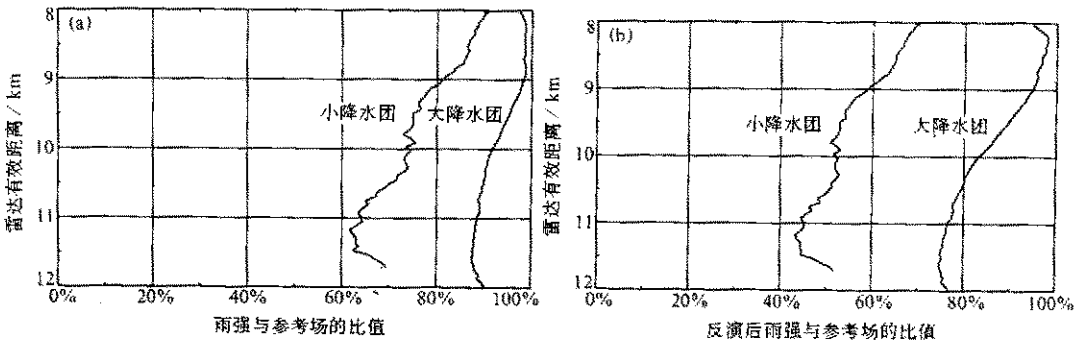


图 4 不均匀性束内充塞效应对事件 1 和事件 3 的影响 (kZS 算法)
(a) 雷达足印 = 1.5 km; (b) 雷达足印 = 4.0 km

根据 (21) 式, 我们分别计算在不同雷达足印下, 比较均匀的层状型降水和比较强的对流型降水累积雨强随雷达足印的变化。图 5 显示, 对于比较均匀的层状型降水, 反演的降雨总量随雷达足印的增加而逐渐变小, 但变化不大, 仅从 98% 下降到 96%, 且反演雨强的分布和参考场也相差不大。另外, 反演得到的最高雨强也相差不大, 这从不同雷达足印情况下 R_c 达到饱和时的雨强值相近可以看出。图 6 显示, 对于比较强的对流型降水, 反演的降雨总量随雷达足印的增加而逐渐变小, 变化幅度也不大, 从 80% 下降到 78%, 但反演雨强的分布和参考场却有较大差别, 表现为随着雷达足印的增加, 反演雨强位于较低雨强区的射束越来越多。另外, 反演得到的最高雨强也有较大差别, 雷达足印为 1.5 km 和 4 km 时 R_c 达到饱和的雨强值分别为 90 mm/h 和 50 mm/h。

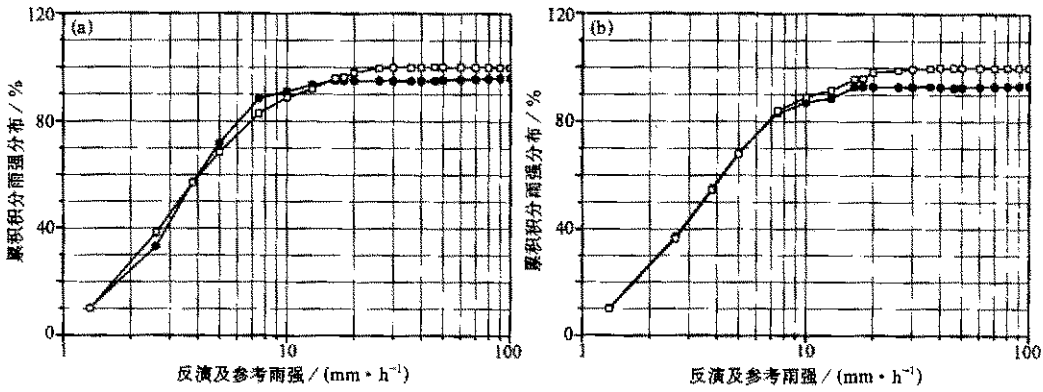


图 5 1 km 高度上, 9 个事件中层状型降水部分反演的累积雨强分布 (kZS 算法)
(a) 雷达足印 = 1.5 km; (b) 雷达足印 = 4.0 km
—●—反演雨强, —□—参考雨强

5 结论

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

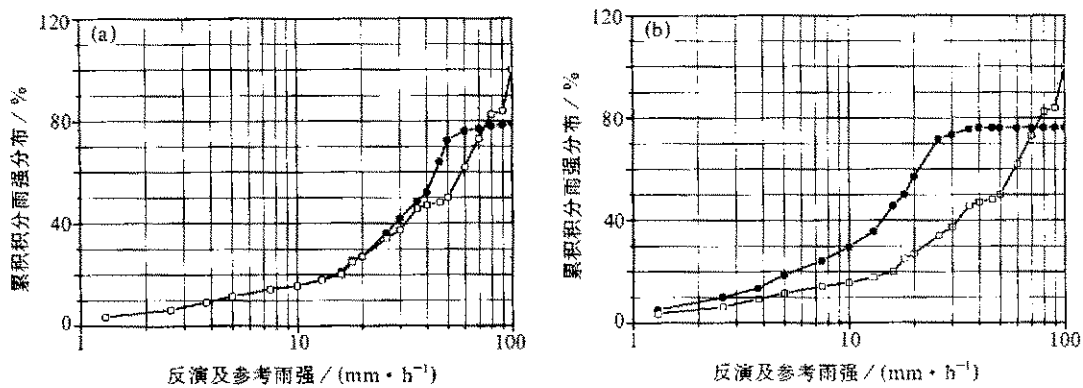


图 6 1 km 高度上, 9 个事件中对流型降水部分反演的累积雨强分布 (kZS 算法)

(a) 雷达足印=1.5 km; (b) 雷达足印=4.0 km

—●—反演雨强, —□—参考雨强

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。本文利用机载雷达实测资料提供的不同的降雨结构进行不均匀性束内充塞效应的研究表明: 不论 kZ 还是 kZS 算法, 不均匀性束内充塞效应都会使降雨量反演偏小, 而且不均匀性束内充塞效应对小而强的降雨云团影响更加明显。因此, 不均匀性束内充塞效应是星载测雨雷达设计中一个重要因素, 降低不均匀性束内充塞效应的最好办法就是尽可能地增大星载测雨雷达的地面分辨率。研究表明, 一般情况下, 当雷达的地面分辨率不低于 2 km 时, 不均匀性束内充塞效应就比较弱。

致谢: 法国国家科学研究中心 J. Testud 博士对本文提出过许多有益的意见。

参 考 文 献

- 1 Eckerman, J., Meteorological radar facility for the space shuttle, IEEE / National Telecommunication Conf., New Orleans, Louisiana, 1975, 37.6~37.16.
- 2 Okamoto, K., S. Miyazaki and T. Ishida, Remote sensing of precipitation by a satellite-borne microwave remote sensor, *Acta Astronautica*, 1979, 6, 1043~1060.
- 3 Zawadski, I. I., The loss of information due to finite sample volume in radar-measured reflectivity, *J. Appl. Meteor.*, 1973, 12, 683~687.
- 4 Testud, J., P. Amayenc and M. Marzoug, Rainfall rate retrieval from a spaceborne radar: comparison between single-frequency, dual-frequency, and dual beam techniques, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1992, 9, 599~623.
- 5 Amayenc, P., X. K. Dou et al., Impact of non-uniform beam filling on rain radar algorithms, Final report of ESA contract No. 10204 / 92 / NL / NB(SC), 1994, 390pp.
- 6 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.
- 7 Marshall, J. S., W. M. K. Palmer, The distribution of raindrops with size, *J. Meteor.*, 1948, 5, 165~166.
- 8 Testud, J., X. K. Dou, P. Amayenc, Implementation of retrieval algorithms for spaceborne radar, Final report of ESA contract No. 10146 / 92 / NL / GS, 1994, 349pp.

Impacts of Nonuniform Beam Filling on Spaceborne Rain Radar Algorithms

Dou Xiankang and Liu Wanshuan

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

P. Amayenc

(Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires, France)

Liu Jinli

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

Abstract The radars without beam width do not exist in the reality. The spaceborne radar has the following features: its flight height is several hundred kilometers, the size of antenna is difficult to be made large enough, so the footprint of the radar can reach several kilometers, e.g. TRMM radar with a footprint of about 4 km. But the characteristic dimension of real raincell is also about several kilometers. Moreover, the contributions of the element volumes within the total pulse volume to the mean echo are not linear, so it is very important to study the nonuniform beam filling effect on the rainfall rate retrieval. This paper is to study this effect on the different rain structures deduced from the airborne Ku band radar data gathered during a TOGA / COARE experiment.

Key words: nonuniform beam filling; rain rate; spaceborne; rain radar