

立体雷达方法在星载测雨雷达上的应用*

窦贤康

(中国科学技术大学, 合肥, 230026)

J. Testud

(Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires, CNRS, 78140 Velizy, France)

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。立体雷达方法利用雷达从两个不同角度对雨团的观测来进行衰减效应的订正并实现整个观察区域的雷达反射率因子和比衰减因子场的反演。通过数值实验研究了星载特性的引入造成的不均匀性束内填充效应对立体雷达方法的影响。

关键词: 立体雷达方法, 星载测雨雷达, 雨强。

1 引 言

1990年法国国家通讯科学研究中心(CNET)的地球与行星际环境研究中心(CRPE)决定与美国国家大气科学研究中心(NCAR)合作发展一种被称为ASTRAIA/ELDORA的机载双束多普勒雷达系统^[1]。由于机载雷达的天线不能做得太大(比如在该计划中天线尺寸为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$), 如果想获得一个较好的束向分辨率的话, 就不得不使用X波段的频率, 而该波段的电磁波穿过雨区时会受到衰减。为了校正衰减效应, Testud和Amayenc提出了立体雷达方法。立体雷达方法就是利用雷达从两个不同角度对雨团的观测来实现整个观察区域的反射率因子和比衰减因子场的反演。Testud和Amayenc将立体雷达方法应用于数值试验^[2], 他们发现在存在回波涨落噪声的情况下, 立体雷达方法也能给出令人满意的反射率因子和比衰减因子场的反演。Kabeche等又将此方法应用于CaPE实验中所获取的机载多普勒雷达实测资料^[3], 他们的结果和地基C波段雷达获得的反射率结构相比相关性很好。

但使用地基雷达甚至机载雷达只能获得局部地区的降雨估计, 只有运用卫星手段从空间观测才能提供一个地球全面的观测取样。波束宽为零的雷达现实中是不存在的, 并且

* 初稿时间: 1998年1月9日; 修改稿时间: 1998年4月27日。

资助课题: 国家自然科学基金(49705058)和中国科学院院长基金资助。

星载雷达高度远比机载雷达要高,星载雷达天线尺寸在现代技术条件下也不能做得比机载雷达天线更大,这样星载雷达在地表面的足印可达数公里。而强降雨团的特征尺寸也仅为几公里,再加上波束内各部分对回波的贡献是非线性的,因此研究不均匀性束内填充效应对立体雷达方法反演精度的影响就很重要。

2 立体雷达方法简介

立体雷达方法需要两个雷达,且这两个雷达分别以相同的入射角指向前和指向后(在卫星的轨道方向),其几何位形如图1。

这样,对于同时被两个雷达观测到的空间中任意一点,在相应的两个观测方向上,视反射因子(Z_1 和 Z_2)和反射因子(Z)之间的关系,写成 dBz 形式:

$$Z_1 = Z - 2 \int_0^{r_1} k(r, \lambda) dr \quad (1)$$

$$Z_2 = Z - 2 \int_0^{r_2} k(r, \lambda) dr \quad (2)$$

其中, $k(r, \lambda)$ 为比衰减因子, r_1 为沿着前向波束的雷达探测有效距离, r_2 为沿着后向波束的雷达探测有效距离。

将以上两式分别对 r_1, r_2 求导:

$$\frac{dZ_1}{dr_1} = \frac{dZ}{dr_1} - 2k \quad (3)$$

$$\frac{dZ_2}{dr_2} = \frac{dZ}{dr_2} - 2k \quad (4)$$

考虑到对 r_1, r_2 的微分和对 x, y 的偏微分的关系为:

$$\frac{d}{dr_1} = \cos \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_1 \frac{\partial}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dr_2} = \cos \alpha_2 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} \quad (6)$$

可推出:

$$\frac{dZ_1}{dr_1} = \left[\cos \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_1 \frac{\partial}{\partial y} \right] Z - 2k \quad (7)$$

$$\frac{dZ_2}{dr_2} = \left[\cos \alpha_2 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} \right] Z - 2k \quad (8)$$

消去未知数 k , 可得:

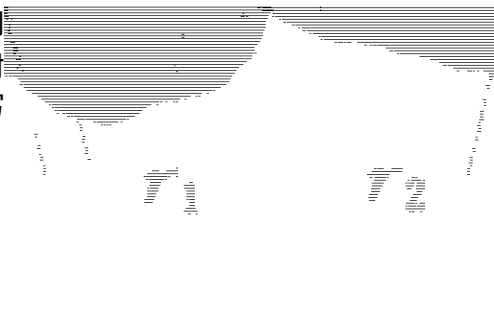


图1 包含卫星轨道平面内雷达到射束几何
(点A 被前向和后向雷达在两个不同时刻观测到)

$$\left[(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \frac{\partial}{\partial x} + (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \frac{\partial}{\partial y} \right] Z = \frac{dZ_1}{dr_1} - \frac{dZ_2}{dr_2} \quad (9)$$

上述方程可简写成:

$$A \frac{\partial Z}{\partial x} + B \frac{\partial Z}{\partial y} = M \quad (10)$$

其中, $A = \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2$, $B = \sin \alpha_1 - \sin \alpha_2$, $M = \frac{dZ_1}{dr_1} - \frac{dZ_2}{dr_2}$ 。

这样, Z 的估计可以通过使下列函数最小化获得:

$$F = \iint_D (A \frac{\partial Z}{\partial x} + B \frac{\partial Z}{\partial y} - M)^2 dx dy + \mu \iint_D L(z) dx dy + p \iint_E (Z - Z_c) dx dy \quad (11)$$

方程(11)中第一项表示在 M 确定的 D 域内(即 D 域是由同时存在两个不同方向观测梯度值的点构成的区域), 应用最小二乘法来拟合反射率因子。第二项中 $L(z)$ 是 D 域内的滤波因子。由于雨滴之间相对位置的随机变化等因素, 对同一区域中的雨滴, 不同时刻受到的回波信号是不同的, 从而形成涨落噪声。因子 $L(z)$ 有助于减弱涨落噪声的影响。

$L(Z)$ 的一般表达式为:

$$L(Z) = A^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial x^2} \right)^2 + B^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial y^2} \right)^2 + (A^2 + B^2) \left(\frac{\partial Z}{\partial x \partial y} \right)^2 + 2AB \frac{\partial Z}{\partial x \partial y} \left(\frac{\partial Z}{\partial x^2} + \frac{\partial Z}{\partial y^2} \right)$$

A 和 B 的选择决定在 X 方向和 Y 方向的滤波程度比。

第三项为边界条件。 E 域的定义为在该域中, 雷达的两束沿路径衰减积分 ($PIA_1 = \exp[-0.46 \int_0^{r_1} k(Z_1) dr_1]$, $PIA_2 = \exp[-0.46 \int_0^{r_2} k(Z_2) dr_2]$) 中至少一个可以忽略。对于一个雨团, 只要反演区域取的足够大, 总能找这样的区域。另外, $Z_c = \max(Z_1, Z_2)$ 。 μ 为滤波控制参数, 由 $\lambda_c = 2\pi\mu^{0.5}$ 给出, λ_c 为滤波截止波长; 参数 p 则起到平衡第一和第三项的作用, 一般取为 10。

由上述步骤得到反射率因子后, 比衰减因子可由式(7), (8)得:

$$k_1 = \frac{1}{2} \left[\cos \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_1 \frac{\partial}{\partial y} \right] (Z - Z_1) \quad (12)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \left[\cos \alpha_2 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} \right] (Z - Z_2) \quad (13)$$

为了提高精确度, 保证这两种参数估计的一致性, 采用变分法使下列函数最小化

$$G = \frac{1}{2} \iint_D [(k - k_1)^2 + (k - k_2)^2] dx dy + \mu_1 \iint_D L_2(k) dx dy + q \iint_E k^2 dx dy \quad (14)$$

其中 $L_2(k) = \left(\frac{\partial k}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial k}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial y^2} \right)^2$, μ_1 为滤波控制参数, 由 $\lambda_c = 2\pi\mu_1^{0.5}$ 给出, λ_c 为滤波截止波长; 参数 q 则起到平衡第一和第三项的作用, 在文中取为 10。

从上述数学推导可以看出, 立体雷达方法的优点在于: 它无需作任何关于雨滴谱的假设, 就能得到比衰减因子 k 。

3 星载雷达情况下立体雷达方法的模拟验证

3.1 雷达的特性

模拟中选择的雷达频率为24 GHz。雷达束的入射角分别为 $\pm 20^\circ$ 。雷达的足印(L)定义为,当雷射手束指向天底时,在波束横截面上,回波强度单程衰减3 dB的宽度。模拟中取其为0至2 km,这里面隐含着卫星的高度为500 km。约定, $L = 0$ 是指不考虑不均匀性束内填充效应。

首先来研究探测的阈值问题。雷达的微处理器出来的接受信号为:

$$S = fCZ_a + (f - 1)\bar{n} \quad (15)$$

其中 C 是雷达常数, Z_a 是视反射率因子, \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:

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

其中 N_i 为独立取样次数,并且 $f = f = 1$ 。

对于一个给定的接受信号,信噪比为0 dB的视反射率表示为:

$$Z_{ao, dB} = \frac{\bar{n}}{C} \quad (16)$$

可探测信号的阈值在模拟中将确定反演中 D 域的大小。

3.2 雨团模型

采取理论上的轴对称三维降雨模型:

$$R(x, y, z) = R_{\max} g(\rho) f(h) \quad (17)$$

$\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$:表示离雨团中心轴的距离。

R_{\max} :雨团中心轴上的最大雨强。 $g(\rho)$ 为雨强在水平面内的变化曲线。对于 $g(\rho)$,本研究中采用的是高斯模型^[4]

$$g(\rho) = \exp[-4 \ln 2 (\rho/D)^2] \quad (18)$$

其中, D :雨团直径,模拟中取为4 km。

$f(h)$ 为雨强在垂直面内的变化。雷达观测表明S或C波段的反射率在地表面和零温度面(在热带为4~5 km)之间基本上是常数,在此高度以上则以每公里5 dBz的速度递减。在此观测基础上,取反射率的模型为:

$$Z = Z_{\max} - \{pz + [p^2(z - z_0)^2 + 4A]^{1/2} - [(pz_0)^2 + 4A]^{1/2}\}/2 \quad (19)$$

其中, z 为高度; Z_{\max} 为雨团中心轴处的最大雨强; z_0 为零温度面高度; p 为在零温度面高度以上雷达反射率的衰减速度; A 定义了地表面和零温度面之间的反射率差。在模拟中参数分别取: $z_0 = 4$ km, $p = 5$ dBkm⁻¹, $A = 9$ dB²。这样,雷达反射率因子随高度的变化如图2。

从这个 Z 模型出发,用标准的Marshall-Palmer关系 $Z = 200R^{1.6}$ (Z 单位为mm⁶m⁻³,

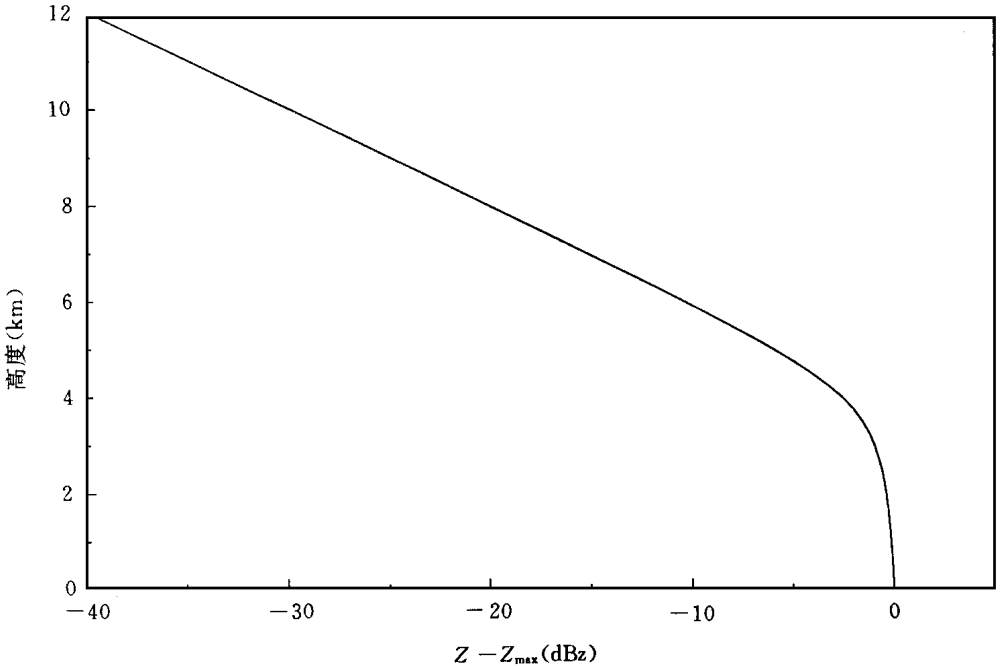


图2 雷达反射率随高度的变化

R 单位为 mm h^{-1}), 可以得到中心轴线上雨强的模型为:

$$R = (10^{Z/10}/200)^{1/1.6} \quad (Z \text{ 为 dBz}) \quad (20)$$

或者写为:

$$R = R_{\max} f(z)$$

其中, $R_{\max} = (10^{Z_{\max}/10}/200)^{1/1.6}$ 。

$$f(z) = 10^{B/16} \quad (21)$$

其中, $B = \frac{1}{2} \{ pz + [p^2(z - z_0)^2 + 4A]^{1/2} - [(pz_0)^2 + 4A]^{1/2} \}$ 。

再考虑到水平面内的变化, 见式(15), 雨团模型即可建立, 模拟中取中心轴处的最大雨强 R_{\max} 为 20 mm h^{-1} 。

3.3 模拟结果

在模拟中, 由于立体雷达方法需要两个倾斜角度的观测, 在靠近海平面区域的降雨回波就可能包含海平面自身的散射。该区域回波的构成不外乎3种情况, 如图3所示。

第一种情况, 网格点位于无雨区, 并与海平面相交, 回波信号可表示为:

$$P_1 = S_0 \sigma^0$$

第二种情况, 网格点位于雨区, 并与海平面相交, 回波信号可表示为:

$$P_2 = V_2 \frac{\pi^5}{\lambda^4} K_w^2 Z + S_2 \sigma^0$$

第三种情况, 网格点位于雨区, 且不与海平面相交, 回波信号可表示为:

$$P_3 = V_0 \frac{\pi^5}{\lambda^4} K_w^2 Z$$

其中, $V_0 = \Delta X \Delta Y \Delta R$, $S_0 = \frac{\Delta X \Delta Y}{\cos \theta}$ 分别为网格点的体积以及与海平面相交形成的最大面积, ΔX , ΔY 分别为网格点在 X 方向、 Y 方向上的尺度, ΔR 为射程方向上的分辨率。 V_2 为雨实际占据的网格点体积, S_2 为网格点与海平面相交形成的面积; σ_0 为海平面后向散射系数, K_w 为雷达功率的模, λ 为雷达波长, Z 为反射率因子。

模拟中, 取沿束向的分辨率 $\Delta R = 250$ m, 网格点横向尺度 $\Delta x = \Delta y = 300$ m。从雨强的模型出发, 利用 $Z-R$ 和 $k-R$ 关系, 可以得到沿雷达束的每个网格点上 Z 和 k 数据。在雷达束向上, 每个网格点的 PIA 因子可以由下式计算:

$$\text{PIA}_{ijk} = \exp \left[-0.46 \left(\frac{1}{2} k_{ijk} + \sum_{l=k+1}^{l=n_3} k_{ijl} \right) \Delta R \right] \quad (22)$$

其中, k 量纲为 dBkm^{-1} , ΔR 量纲为 km 。 $i \in \{1, 2, 3, \dots, n_1\}$, $j \in \{1, 2, 3, \dots, n_2\}$ 以及 $k \in \{1, 2, 3, \dots, n_3\}$ 是沿 X, Y, Z 轴尺度为 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 的网格点标号。

这样在标号为 (i, j, k) 网格点上的雷达视反射率为:

$$Z_{aijk} = Z_{ijk} \text{PIA}_{ijk} \quad (23)$$

至此, 已经模拟出一个星载测雨雷达的视反射率场。

利用立体雷达方法, 根据式(11)和式(14)由星载测雨雷达的视反射率场可以得到反演区域的反射率因子和比衰减因子。而雨强一般由 $k-R$ 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, 使用一种在 k 值小时优先 $Z-R$, 在 k 值大时优先 $k-R$ 的雨强计算公式:

$$R = e^{-k/k_0} (Z/567)^{1/1.6} + (1 - e^{-k/k_0}) (K/0.124)^{1/1.14} \quad (24)$$

其中, k_0 取为 1 dB/km 。

利用式(24), 得到雨强的分布如图4所示, 图上所显示的是在卫星轨道方向上, 在给定的高度上反演得到的雨强和模型的比较。从图上可以看出, 当雷达足印 $L = 0 \text{ km}$ 时, 反演的雨强和模型符合得很好, 相对误差在3%以内。

但星载雷达具有一定的波束宽, 再加上波束内各部分对回波的贡献是非线性的, 因此不均匀性束内填充效应对立体雷达方法反演精度就会有较大影响。在模拟中, 雷达的波束在地面的足印分别取为 1 km 和 2 km , 反演结果见图5。

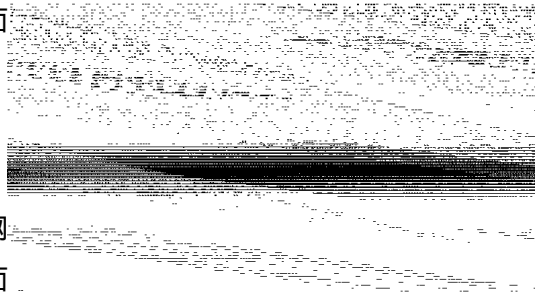


图3 计算海平面对雷达回波贡献示意图
(图中 θ 角为雷达波束和海平面法线之间夹角)

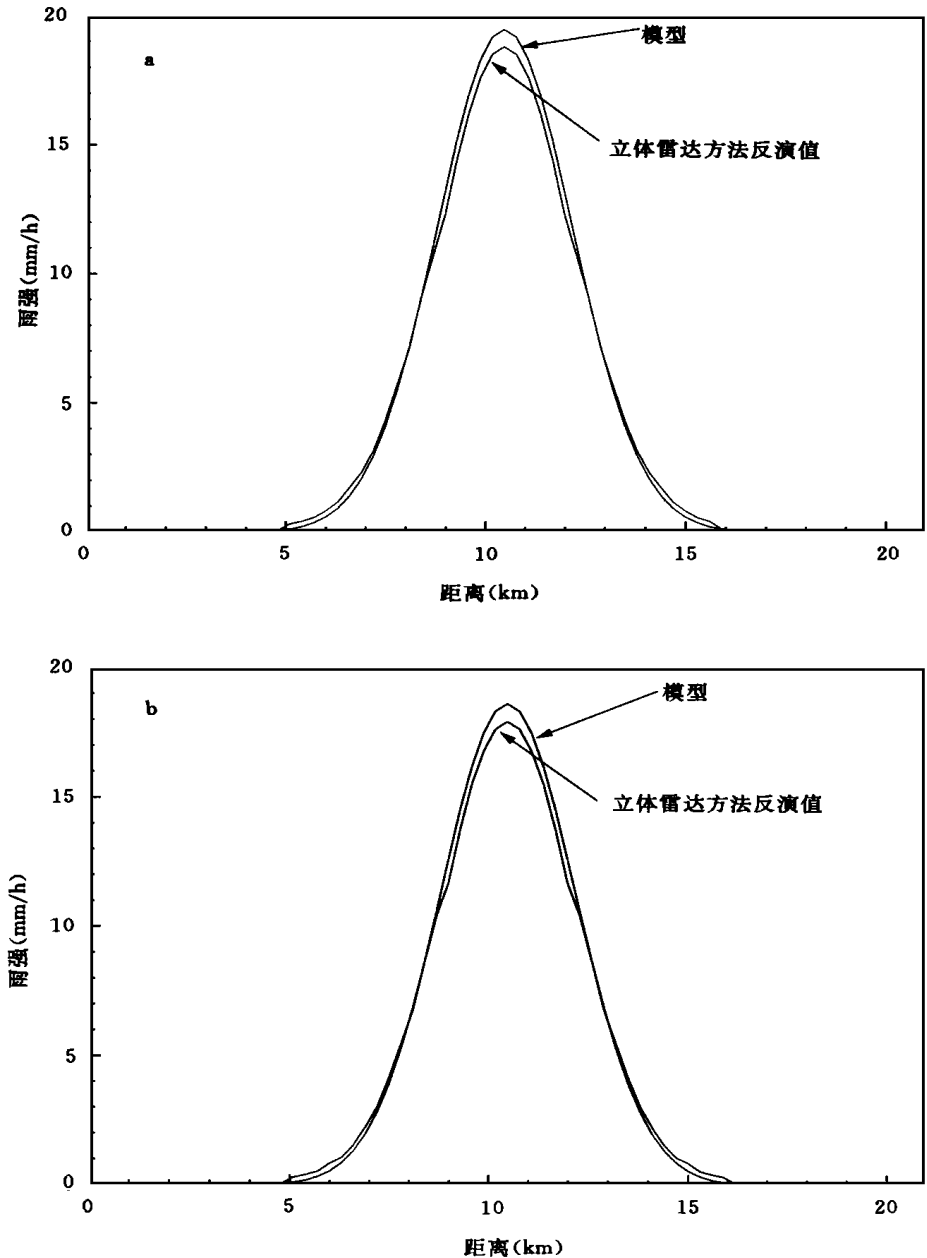


图4 雷达的足印 $L = 0$ km 时雨强的反演结果与模型的比较

(a. 1 km 高度上; b. 2 km 高度上)

可以看出, 随着足印的增大, 反演得到的降雨区被展宽, 并伴随着雨强的极大值的下降。例如足印 $L = 2$ km 时, 反演得到的最大雨强仅为 16 mm/h, 而对应的模型值为 20 mm/h。原因是由于雷达波束宽具有一定的宽度, 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, 平均的程度取决于足印的大小。另外, 不均匀性束内填充效应还

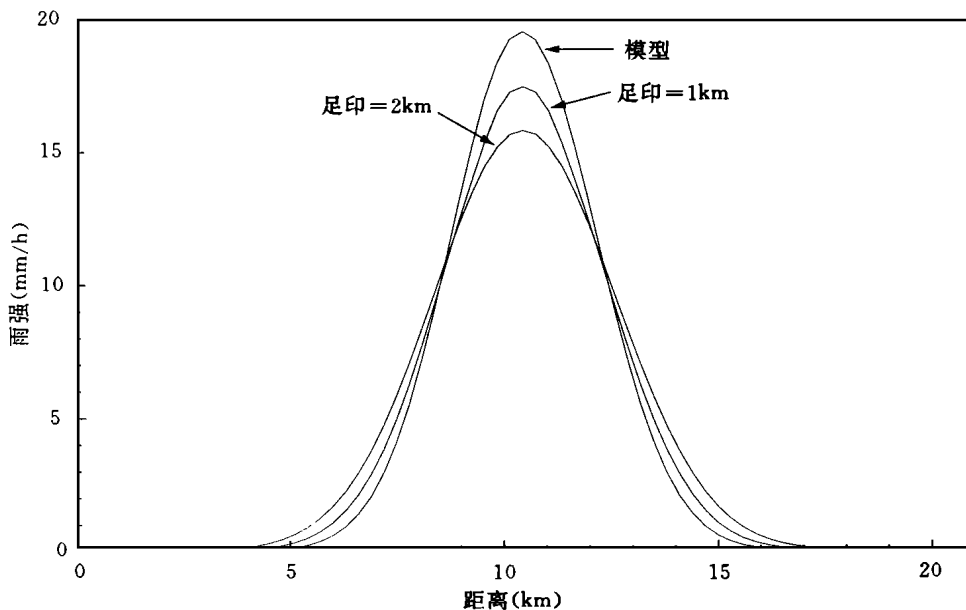


图5 1 km 高度上, 雷达的足印 $L = 1 \text{ km}$, $L = 2 \text{ km}$ 时雨强的反演结果

影响了立体雷达方法中边界条件即 E 域内反射率的值, 这是因为边界区域的回波包含了内区较强回波的信息。这样, 边界条件的改变会造成反演出现误差, 具体表现为边界处反演得到的雨强比实际值要大。当然, 误差的大小取决于足印的尺度。

此外, 立体雷达方法需要雷达进行倾斜的观测, 由于雷达有波束宽, 这样在一定的高度内(此高度的大小取决于足印的大小), 海平面强的回波就会淹没雨的回波信号, 从而造成反演在底部出现“盲区”。

4 结 论

立体雷达方法的优点在于它在反演中不象其它单束雷达反演方法(如 kZS, kZ 算法)需要预先假定 $k-Z$ 关系^[5], 这样就避免了由于使用 $k-Z$ 经验公式所带来的误差。另外, 立体雷达方法也不需要地表面后向散射系数的定标, 所以可以在全球区域内使用, 而不仅仅局限于表面后向散射系数易于模型化的海平面上空。另外, 由于立体雷达方法使用的是视反射率的梯度, 雷达的绝对定标误差对反演就不会有影响。

立体雷达方法也有其局限性, 由于立体雷达方法要求有精确的反射率沿径向的梯度, 这样雷达在同一方向上作独立取样的次数就不能太少(一般应大于 $60^{[6]}$), 否则此梯度误差接近甚至超过所要寻求的比衰减因子, 反演就会出现很大误差。另外, 由于立体雷达方法要求雷达作一定倾斜角的观测, 故反演区底部有盲层存在。

致谢: 作者与法国国家研究中心 CETP 实验室的 Amayenc 博士进行过有益的讨论。

参考文献

- 1 Dou X K, Scialom G, Lemaitre Y. Doppler radar and mesoscale meteorology. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1996, 122 (part B): 1231– 1261
- 2 Testud J, Amayenc P. Stereoradar meteorology: a promising technique for observation of precipitation from a mobile platform. *J Atmos Ocean Technol*, 1989, 6: 89– 108
- 3 Kabeche A, Testud J. Stereoradar meteorology: A unified approach to process data from airborne or ground-based meteorological radars. *J Atmos Ocean Technol*, 1995, 12: 783– 795
- 4 Goldhirsh J, Walsh E J. Rain measurements from space using a modified Seasat-type radar altimeter. *IEEE Trans Anten and Prop*, 1982, AP-30(4): 726– 733
- 5 Testud J, Amayenc P, Dou X K, Tani T. Tests of rain profiling algorithms for a spaceborne radar using rain cell models and real data precipitation fields. *J Atmos Oceanic Technol*, 1996, 13: 426– 453
- 6 窦贤康, Testud J, Amayenc P. 星载雷达降雨量反演算法的模拟验证. *科学通报*, 1997, 42(3): 292 ~ 295

THE APPLICATION OF STEREO RADAR ANALYSIS TO THE SPACEBORNE RAIN RADAR

Dou Xiankang

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

J. Testud

(*Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires, CNRS, 78140 Velizy, France*)

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 point rainfall rate measurements. Due to the technical constraints, the radars satisfying the above requirements work at the attenuated frequency. The stereoradar analysis is conceived as a procedure to correct the reflectivity field for attenuation by using the apparent reflectivities observed along the radars's two viewing angles and to retrieve the specific attenuation coefficient field. This paper is to study by simulation the influence of non uniform beam filling effect due to the implementation of the spaceborne means on the stereoradar analysis.

Key words: Stereoradar analysis, Spaceborne rain radar, Rain rate.