

# 基于微波链路的降雨场反演方法研究

姜世泰 高太长<sup>†</sup> 刘西川 刘磊 刘志田

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2013年3月5日收到; 2013年4月10日收到修改稿)

本文基于微波雨衰的幂律关系, 研究了使用微波链路反演降雨场的方法, 采用层析技术建立了降雨场反演模型. 并利用 SIRT 算法与正则化算法实现对降雨场层析反演模型的求解. 数值模拟结果表明, 该模型与反演算法能够较为准确地重建降雨场强度与空间分布特征, 能够提供高时空分辨率的二维降雨强度分布. 因此, 利用微波衰减数据进行降雨探测可以作为常规的雨量计与天气雷达观测手段的有效补充.

**关键词:** 微波雨衰, 微波链路, 降雨场重建, 层析反演**PACS:** 43.28.We, 92.60.jf, 92.60.Ta**DOI:** 10.7498/aps.62.154303

## 1 引言

降雨的实时监测在气象水文研究与政府预警决策中有着至关重要的意义. 如 2012 年北京 7·21 特大暴雨, 全市平均降雨量 164 mm, 给人民生命财产带来巨大损失. 目前观测降雨最普遍的方法是使用雨量计和天气雷达网络. 雨量计是一种较为准确的地面单点降雨观测手段, 但雨量计在降雨强度大的情况下会产生较大误差. 并且由于设置较为稀疏, 尤其对于城市地区的降水监测和内涝预警, 雨量计的空间分辨率较低, 不能够满足现有需求. 而天气雷达虽然可以在大范围连续的区域估计降雨场, 能够提供高时间分辨率的数据, 但它是通过反演云水含量得到降雨信息, 其探测目标与反演的结果均不是降落到地表面的真实降雨. 并且天气雷达在高仰角条件下只能测量到部分降水体或云体, 在低仰角条件下易受地物回波影响, 因此在城市和山区的测量效果有限<sup>[1,2]</sup>.

微波信号在近地层大气中传播时会受到大气介质的影响而发生吸收、衰减、散射、极化以及传播路径的弯曲等, 其中雨、雪等降水粒子对微波的影响尤为明显<sup>[3]</sup>, 这一影响在通讯领域是需要尽量避免并消除的. 而在气象中, 根据降水粒子对微波传播路径上的衰减、极化等特征不仅可以反演

得到高时空分辨率的区域降水分布, 而且微波基于近地层传播这一测量机理具有电磁波直接与降水粒子相互作用的优点, 其反演精度更高, 这与 GPS 在气象中应用的思想是一致的. 研究表明<sup>[4,5]</sup>, 波长 1 cm 左右的微波, 其雨致衰减与降雨强度呈近乎线性的关系. 基于此 Atlas 等<sup>[6]</sup>提出了利用 1—3 cm 的微波衰减来测量路径和区域雨强的方法. 2000 年开始 Minda 和 Nakamura<sup>[7]</sup>建立了用于测量路径平均降雨的 50 GHz 频段微波链路, 证明了相对传统雨量计该方法可以提供高时间分辨率的降雨测量, 具有相当的优势. Hardaker 等<sup>[8]</sup>发现一对特定频率的微波衰减差值受雨滴形状和雨滴谱分布影响较小, 因此与降雨强度呈现较好的线性关系. 基于此 Holt 等<sup>[9]</sup>通过理论计算和实验证明了双频微波链路相对单频链路降水反演误差更小, 并验证了在未知雨滴形状、雨滴谱分布和温度的情况下, 22.9/13.9 GHz 和 24.1/13.5 GHz 这两对频段反演结果具有较小的不确定度. 基于 Holt 等的研究, Upton 等<sup>[10]</sup>在英国西北的博尔顿地区使用 22.9/13.9 GHz 的双频微波链路实现了降雨观测, 并指出微波链路将成为一种未来城市降雨观测手段. Messer 等<sup>[11]</sup>利用微波网络覆盖区域的微波衰减数据, 探讨了利用微波网络监测城市区域二维降雨分布的可行性. Zinevich 等<sup>[12]</sup>使用无线微波通信网络数据, 提出了一种适用于稠密的城市的可变尺度网格的降水

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: 2009gaotc@gmail.com

反演技术,证明了利用微波通信网络进行大范围降雨测量的潜力.

在利用微波网络反演二维降雨场方面,反演模型的构建以及不适定问题的求解仍然没有解决.而目前国内还没有使用微波衰减信息进行降雨反演的相关研究.本文研究了利用微波网络进行区域降水反演的方法,构建了降雨场层析反演的模型,并利用了联合迭代重建技术(simultaneous iterative reconstruction technique, SIRT)与正则化算法解决层析反演模型中不适定反问题的求解.

## 2 微波雨衰模型

微波在大气中传播时会受到大气中的气体、降水、气溶胶等因素的影响而发生吸收、衰减、散射等现象.电磁波在大气中的总传输衰减可用以下的形式表示<sup>[13]</sup>:

$$A = 92.45 + 20 \cdot \log_{10}(f_{\text{GHz}}) + 20 \cdot \log_{10}(D_{\text{km}}) + a + b + c + d + e, \quad (1)$$

式中,  $A$  为微波传输的总衰减,  $a$  为水汽引起的衰减,  $b$  为雾或轻雾引起的衰减,  $c$  为氧气引起的衰减,  $d$  为其他气体吸收引起的衰减,  $e$  为降水引起的衰减.由于大气中的其他气体(例如  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , 和  $\text{N}_2\text{O}$ )浓度十分低,因此大气中的气体成分对微波最主要的吸收源还是水汽和氧气<sup>[14]</sup>.

除氧气、水汽和其他气体的吸收造成的损失外,各种大气现象,如雨、雪、雾都会导致微波信号的传输损耗.降雨造成的损失是无线微波传输的主要衰减来源,微波雨致衰减取决于降雨强度、雨滴的尺度分布等因素. Olsen 等<sup>[15]</sup>把 Mie 系数进行级数展开,在负指数雨滴尺寸分布模型下,通过拟合得到了雨致衰减(dB/km)与降雨率(mm/h)的幂律关系(Power Law Relation):  $A = aR^b$ . 其中  $R$  为降雨率,常数  $a$  和  $b$  为回归系数,与频率、极化、温度和雨滴尺度分布的有关.基于 Olsen 的研究,在大量计算与试验数据的基础上得到了众多的雨衰预报模式: ITU-R 模式、Lin 模式、Stutzman-Dishman 模式、Fedi 模式等等.本文采用 ITU-R P.838-3 建议书中所提出的计算降雨衰减的模型,该模型基于 Laws-Parsons 雨滴谱模型所建立,微波雨衰可由以下的幂律关系来计算<sup>[16]</sup>:

$$\gamma_R = kR^\alpha, \quad (2)$$

其中  $R$  为降雨强度(mm/h);  $\gamma_R$  为在雨强为  $R$ (mm/h)时,降雨对微波造成的衰减(dB/km)其中系数  $k$  和  $\alpha$  的值,作为频率范围为 1 至 1000 GHz 的频率  $f$  (GHz) 的函数,由下列等式确定:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k, \quad (3)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha, \quad (4)$$

其中  $f$  为频率(GHz),  $k$  为  $k_H$  或  $k_V$ ,  $\alpha$  为  $\alpha_H$  或  $\alpha_V$ . 对于线极化和圆极化,可以通过下列等式计算出  $k$  和  $\alpha$ :

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2, \quad (5)$$

$$a = [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V) \times \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k, \quad (6)$$

其中  $\theta$  是路径斜角,  $\tau$  是相对水平位置的极化斜角(对于圆极化,  $\tau = 45^\circ$ ).

图 1 为根据上述雨衰经验模型,在理想的垂直极化微波链路传播中(路径斜角  $\theta = 0^\circ$ , 极化斜角  $\tau = 90^\circ$ ). 计算出的相应频率和极化方式的雨致衰减.可以看出在较低频段,微波衰减较弱,随着频率的增大降雨对微波的衰减也增强.

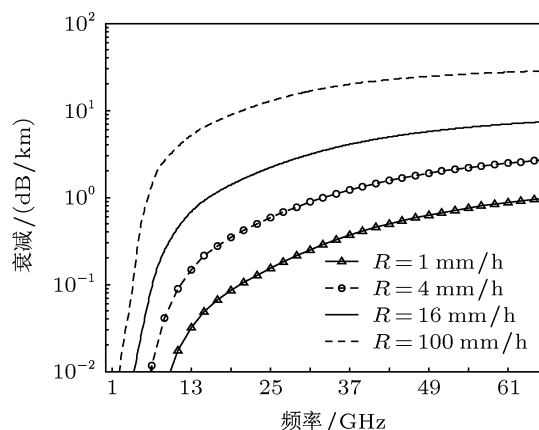


图 1 垂直极化情况下微波雨致衰减

## 3 降雨反演模型

### 3.1 路径平均降雨率反演模型

由于微波通信不需要固体介质,当两点间直线距离内无障碍时就可以使用微波传送信号.并且利

用微波进行通信具有容量大、质量好并可传至很远的距离等优势,因此是一种广泛应用的重要通信手段.发射机与接收机之间即构成一条点对点微波通信链路.

对于地面固定点对点视距微波链路,已知发射端的发射功率,通过测量接收端的接收信号电平(received signal level, RSL),计算得到整个微波链路的总衰减  $A_{tot}$ . 根据(2)式的幂率关系,平均衰减  $\bar{\gamma}$  可由链路测量到的总衰减  $A_{tot}$ (对(2)式沿链路路径积分)除以链路长度  $L$  得到

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{L} \int_0^L \gamma(R(r)) dr = \frac{1}{L} A_{tot}. \quad (7)$$

平均降雨率  $\hat{R}$  可由(2)式的幂律关系估计,  $\hat{R} = c\bar{\gamma}^d$ . 由于真实的雨滴形状和谱分布是未知的,上述的反演过程会导致误差. 而关于 Olympus Satellite 传播数据的研究<sup>[8]</sup>发现如果使用双频链路,可以减小其对雨滴谱分布(drop size distribution, DSD)的变化的敏感性. 降雨率  $\hat{R}$  可由两个频率的差值  $\Delta\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_1 - \bar{\gamma}_2$  估计,其中  $\bar{\gamma}_1$  为较高频率链路测量的衰减. 在选定特定的一对频率时,可以让  $\hat{R}$  与  $\Delta\bar{\gamma}$  满足近乎线性的关系,与幂律关系相比,可以大大降低反演误差.

### 3.2 二维降雨场反演模型

由于单一的微波链路只能得到沿链路的平均降雨强度,在实际需求中监测区域的二维降雨场的分布特征具有更高的应用价值.微波链路网络覆盖区域,有多条微波链路穿过雨强未知的降雨区并发生衰减,链路接收端检测衰减后的功率,并利用微波衰减值反演降雨场二维分布,这与CT层析成像原理类似<sup>[17,18]</sup>.因此可以通过对该区域网格化,应用如下的层析技术计算出降雨二维场分布<sup>[19]</sup>.图2所示的为一个假定区域的降雨强度层析问题示意图.该区域被划成大小相等的正方形网格  $C_j(j=1, \dots, M)$ .在实际问题中,需要考虑地理条件、无线通信链路衰减、链路密度等可用性信息,将监测区域合理地划分为适当尺度、形状的网络.图示中以一条微波链路为例,T点为发射终端,R点为接收终端,构成了一个单一的微波链路  $L_i$ .该链路处于网格  $C_9$  内的部分  $l_{i9}$ ,网格  $C_{10}$  内的部分为  $l_{i10}$ ,网格  $C_7$  内的部分  $l_{i7}$  和网格  $C_8$  内的部分  $l_{i8}$ .链路的总长度为  $d_i$ .

根据降雨衰减的幂律关系(2),整条链路的雨致衰减可与链路长度、链路平均降雨率、雨衰幂

律参数建立以下关系:

$$A_i = a_i R_i^{b_i} d_i, \quad (8)$$

$A_i$  为第  $i$  条微波链路的传播总衰减.  $R_i$  为第  $i$  条链路观测到的平均降雨率.  $d_i$  为链路  $L_i$  的长度.  $i=1 \dots N$  (对于  $N$  条无线微波链路).  $a_i, b_i$  第  $i$  条链路雨衰转换常数.

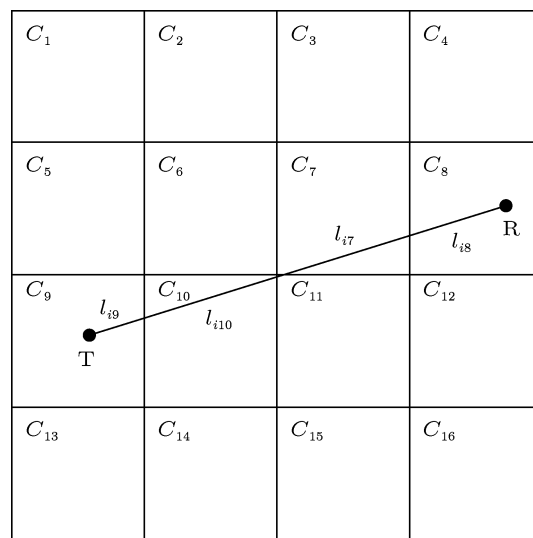


图2 层析原理示意图

由(8)式可以求得每条链路的平均降雨率:

$$R_i = \left( \frac{A_i}{a_i d_i} \right)^{1/b_i}. \quad (9)$$

微波链路的总衰减还可以表示为链路  $L_i$  在各网格内衰减的总和:

$$A_i = \sum_{j=1}^M A'_{ij} = \sum_{j=1}^M [a_i (r_j)^{b_i} l_{ij}]. \quad (10)$$

由(8),(10)式联立:

$$\sum_{j=1}^M [(r_j)^{b_i} l_{ij}] = R_i^{b_i} d_i. \quad (11)$$

$r_j$  为网格  $C_j$  待反演的降雨率(假设同一网格内降雨率处处一致且为  $r_j$ ).  $l_{ij}$  为链路  $L_i$  处于网格  $C_j$  中部分的长度.  $A'_{ij}$  为链路  $L_i$  位于网格  $C_j$  中的部分产生的衰减.该层析模型需要求解的方程组如下形式:

$$\begin{aligned} & l_{11}r_1^{b_1} + l_{12}r_2^{b_1} + \dots + l_{1j}r_j^{b_1} + \dots + l_{1M}r_M^{b_1} \\ & = R_1^{b_1} d_1, \\ & l_{21}r_1^{b_2} + l_{22}r_2^{b_2} + \dots + l_{2j}r_j^{b_2} + \dots + l_{2M}r_M^{b_2} \\ & = R_2^{b_2} d_2, \\ & \vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & l_{i1}r_1^{b_i} + l_{i2}r_2^{b_i} + \dots + l_{ij}r_j^{b_i} + \dots + l_{iM}r_M^{b_i} \\
 & = R_i^{b_i} d_i, \\
 & \vdots \\
 & l_{N1}r_1^{b_N} + l_{N2}r_2^{b_N} + \dots + l_{ij}r_j^{b_N} + \dots + l_{NM}r_M^{b_N} \\
 & = R_N^{b_N} d_N. \tag{12}
 \end{aligned}$$

在  $b_i \neq 1$  的情况下, 这个方程组是非线性的, 通常情况下无法求解, 因此可利用线性化的方法将非线性方程组转化为易于求解的线性方程组.

采用泰勒展开的方法, 取方程 (11) 中非线性部分  $(r_j)^{b_i}$  迭代项  $t$  在  $(t-1)$  附近泰勒级数展开的前两项:

$$\begin{aligned}
 r_j(t)^{b_i} & \approx r_j(t-1)^{b_i} \\
 & + b_i r_j(t-1)^{b_i-1} [r_j(t) - r_j(t-1)], \tag{13}
 \end{aligned}$$

其中  $r_j(t)$  是  $t$  的一次迭代中网格  $j$  内的降雨估计,  $r_j(t-1)$  是迭代  $t-1$  的估计.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^M b_i r_j(t-1)^{b_i-1} l_{ij} r_j(t) \\
 & = R_i^{b_i} d_i - \sum_{j=1}^M [r_j(t-1)^{b_i} l_{ij} - b_i r_j(t-1)^{b_i} l_{ij}]. \tag{14}
 \end{aligned}$$

令

$$b_i r_j(t-1)^{b_i-1} l_{ij} = p_{ij}(t), \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 & R_i^{b_i} d_i - \sum_{j=1}^M [r_j(t-1)^{b_i} l_{ij} - b_i r_j(t-1)^{b_i} l_{ij}] \\
 & = q_i(t). \tag{16}
 \end{aligned}$$

(14) 式可改写为

$$\sum_{j=1}^M \hat{p}_{ij}(t) r_j(t) = q_i(t). \tag{17}$$

写成矩阵的形式为

$$\hat{P}(t) \cdot r(t) = Q(t). \tag{18}$$

经线性化处理, 可通过迭代方法将非线性方程的求解问题简化为线性方程组的求解.

由于微波链路分布相对于覆盖区域是稀疏的, 未知参量的个数通常远大于得到的方程数量, 并且雨衰模型通常情况下是非线性的. 因此利用微波链路的衰减信息进行二维降雨场的层析反演问题是一个不适定的非线性反问题. 在线性化处理, 可以利用迭代方案对降雨场进行求解, 在每一步的迭代中处理线性方程组的求解问题, 本文分别采用 SIRT 与正则化的方案进行求解.

### 3.3 迭代算法流程

具体的迭代过程如下:

1) 初始化:

a.  $t = 0$

b. 给出向量  $r(0)$  的初始值 (例如生成很小的随机值或都取 0.001).

2)  $t = t + 1$ .

3) 使用 (15), (16) 式, 计算  $\hat{P}(t), Q(t)$ .

4) 由方程 (17) 例如使用 SIRT 反演方案或 Tikhonov 正则化方案 (具体见 3.4, 3.5), 估计  $r(t)$ .

5)  $\|r(t) - r(t-1)\| < \varepsilon$  或当  $t > T$  时, 停止迭代, 其中  $\varepsilon, T$  是预定义的阈值.

6) 返回到步骤 2).

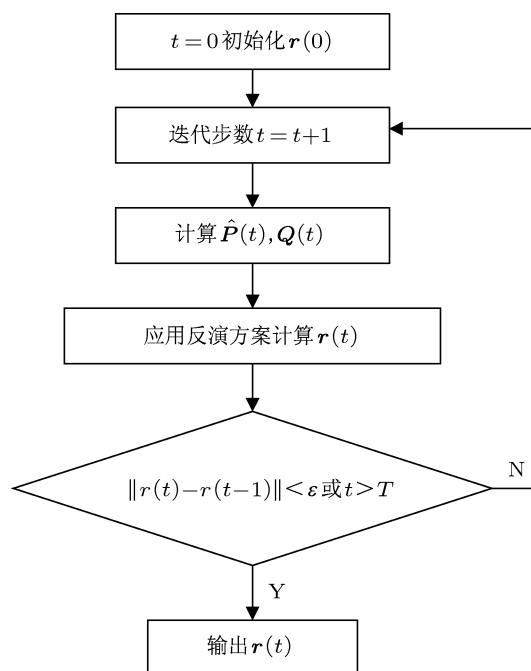


图 3 迭代算法流程图

### 3.4 联合迭代重建技术 (SIRT) 反演算法

在迭代流程中求解方程 (17), 其关键在于求解大型稀疏线性方程. 在 CT 成像中, 联合迭代重建技术常用于解决求解大型稀疏矩阵, 由 Gilbert 首先提出. 由于 SIRT 算法的收敛性较好, 无论方程组超定或者是欠定都可以使用该方法求解, 因此在层析反演的实际应用中常采用该方法. 对于本文所研究的降雨场反演问题, 其迭代公式可以写为

$$r_j(t) = r_j(t-1) + \frac{1}{M}$$

$$\times \sum_{i=1}^N \frac{\left( q_i(t) - \sum_{k=1}^M \hat{p}_{ik}(t) r_k(t-1) \right) \cdot \hat{p}_{ij}(t)}{\sum_{k=1}^M \hat{p}_{ik}(t)^2}. \quad (19)$$

### 3.5 正则化反演算法

对于 (18) 式中的系数矩阵  $\hat{P}_{N \times M}(t)$ , 在  $M \gg N$  的情况下, 通常无法求得精确解. 采用最小二乘原则, 即使得

$$J[\mathbf{r}(t)] = \|\mathbf{Q}(t) - \hat{P}(t) \cdot \mathbf{r}(t)\|^2 = \min! \quad (20)$$

由于病态的系数矩阵, 常常会导致解的不稳定. 此处采用 Tikhonov 正则化思想 [20,21], 引入正则化项

$$J[\mathbf{r}(t)] = \|\mathbf{Q}(t) - \hat{P}(t) \cdot \mathbf{r}(t)\|^2 + \lambda \|\mathbf{r}(t)\|^2 = \min! \quad (21)$$

其中  $\lambda$  为大于 0 的正则化参数, 正则解为

$$\mathbf{r}_{\text{reg}}(t) = (\lambda \mathbf{I} + \hat{P}(t)^T \hat{P}(t))^{-1} \hat{P}(t)^T \mathbf{Q}(t). \quad (22)$$

本文中的正则化参数的选取由广义交叉检验 (GVC) 准则给出.

## 4 仿真与数值模拟

为验证反演算法的有效性, 对上述方法进行模拟实验. 如图 4 所示, 设计  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  的二维仿真区域, 其中均匀地分布着 34 条微波链路, 微波网络的密度为  $0.34/\text{km}^2$ . 点状标识为微波发射终端, 五角星状标识为微波接收终端, 相邻发射/接收终端之间间隔为  $1 \text{ km}$ . 微波发射频率为  $18 \text{ GHz}$ , 极化方式为垂直极化. 仿真区域被划分为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的正方形网格. 图 5 所示的为降雨初始场, 其特征为具有两个较为明显的降雨峰值中心.

为评价反演效果, 采用相关系数、均方根误差、绝对积分误差三个指标:

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^M (r_j^a - \bar{r}^a)(r_j' - \bar{r}')}{\sqrt{\sum_{j=1}^M (r_j^a - \bar{r}^a)^2 \sum_{j=1}^M (r_j' - \bar{r}')^2}}, \quad (23)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j (r_j' - r_j^a)^2}, \quad (24)$$

$$\text{Bias} = \sum_j (r_j' - r_j^a), \quad (25)$$

其中  $r_j^a$  为初始降雨场网格点上的降雨强度,  $\bar{r}^a$  为初始降雨场的平均降雨强度,  $r_j'$  为反演降雨场网格点上的降雨强度,  $\bar{r}'$  为反演降雨场的平均降雨强度.

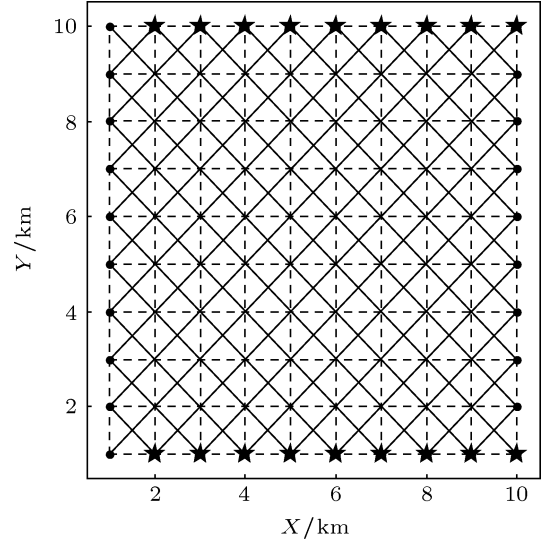


图 4 仿真区域微波链路拓扑结构

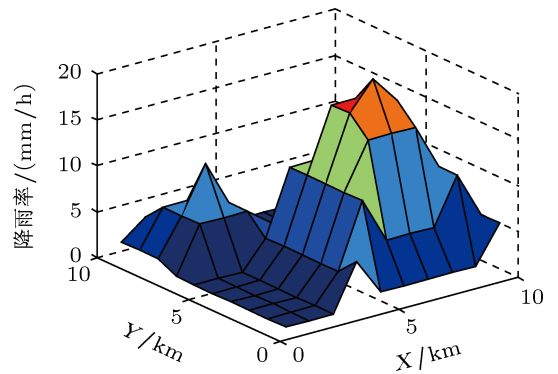


图 5 仿真区域降雨强度初始场

图 6 所示的为降雨场反演结果. 迭代算法中采用 SIRT 方案其反演结果与初始场的相关系数为  $0.9644$ , 均方根误差为  $1.4773 \text{ mm/h}$ , 绝对积分误差为  $-0.3600 \text{ mm/h}$ . 采用正则化方案反演结果与初始场的相关系数为  $0.9618$ , 均方根误差为  $1.5363 \text{ mm/h}$ . 绝对积分误差为  $0.8712 \text{ mm/h}$ . 由反演结果来看, 上述的两种算法重建的降雨场与初始降雨场有着较高的一致性, 降雨峰值区域的位置与形势等基本特征和分布结构与初始场相符合, 体现了反演模型对初始降雨场有较好的重建效果. 该模型能够很好反演峰值中心的位置, 但在降雨强度上略有减弱. 究其原因在于求解反问题时, 由于该不适定问题的信息量受条件制约, 因此不能够完全反演出初始场的全部精细特征.

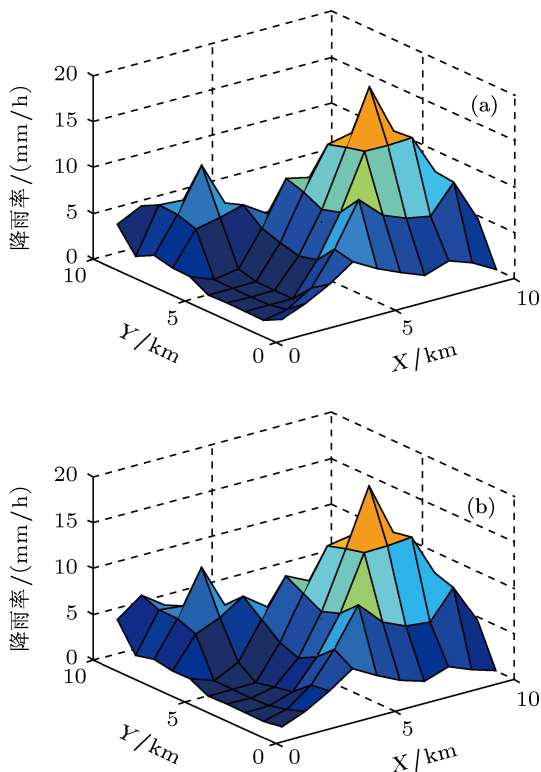


图6 层析反演结果 (a)SIRT 方案反演结果; (b) 正则化方案反演结果

为验证微波网络密度对反演结果的影响, 由原均匀分布的网络剔除东南 - 西北走向的 8 条微波链路, 如图 7 所示, 微波链路由 34 条减少为 26 条, 微波网络密度减少为  $0.26/\text{km}^2$ , 微波发射频率为 18 GHz. 采用图 5 所示的初始场, 反演结果如图 8 所示. 采用 SIRT 方案其反演结果与初始场的相关系数为 0.8562, 均方根误差为 2.7297 mm/h, 绝对积分误差为  $-6.1961 \text{ mm/h}$ . 该模型仍然能够在一定程度上反演出初始降雨场的降雨强度分布结构与特征, 能够体现初始降雨场的峰值区域, 但相关系数下降了 11.2%. 可以看出对于相对稀疏的微波网络, 由于信息量的进一步减少其反演结果要比稠密的微波网络差.

由于不同微波发射频率下雨衰模型中的参数  $k, \alpha$  不同, 系数  $k$  在层析模型中可以消去, 而  $\alpha$  表示模型的非线性程度. 为检验频率对反演结果的影响, 选取不同的频率进行相应的数值实验. 仿真结果如表 1 所示, 在不同微波发射频率下, 反演的效果存在较大差异. 由于在 3.2 中采用线性化的处理方案, 对于采用的 ITU 微波雨衰模型中当频率处于 2—3 GHz 与 20 GHz 左右时, 幂律关系中的指数参数  $\alpha$  接近 1 (如图 9 所示), 因此对于仿真实验中 3 GHz, 18 GHz, 23 GHz 这三个波段, 近乎线性的雨

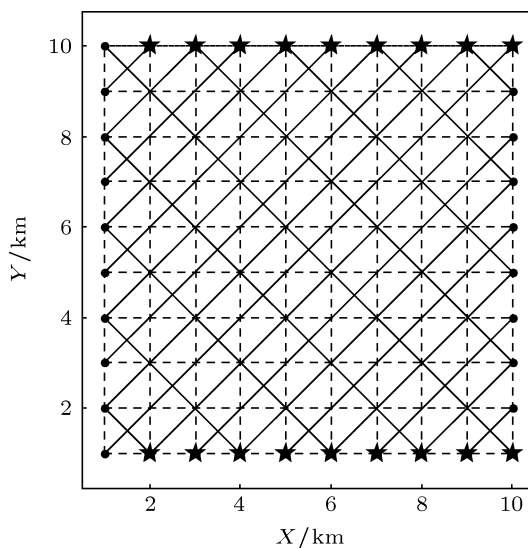


图7 仿真区域微波链路拓扑结构

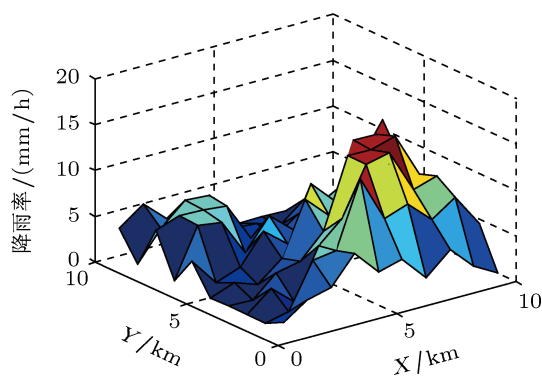


图8 SIRT 算法反演结果

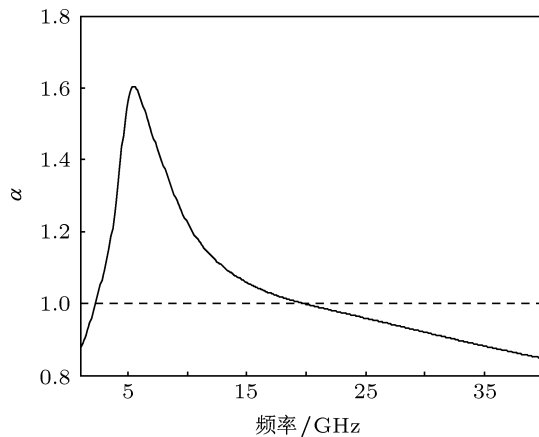


图9 ITU 模型垂直极化情况下参数  $\alpha$  取值随频率变化

衰模型可以得到较为理想的反演效果. 而对于非线性程度较高的如 6 GHz 的波段, 由于线性化方案带

来的误差会大大影响反演精度与降雨场重建效果. 对于非线性程度介于两者之间的频段如仿真实验中的 10 GHz, 38 GHz, 降雨场的反演效果也介于两

者之间. 对于 SIRT 与正则化的反演算法而言, 在仿真实验中可以看出, 两者效果较为接近, SIRT 的方案略好于正则化方案.

表 1 不同微波发射频率反演结果对比

频率	相关系数		均方根误差/(mm/h)		绝对积分误差/(mm/h)	
	SIRT 方案	正则化方案	SIRT 方案	正则化方案	SIRT 方案	正则化方案
3	0.9639	0.9690	1.9815	1.8251	-53.4440	-55.2174
6	0.9298	0.9139	3.9832	4.0017	-174.0357	-206.6098
10	0.9559	0.9670	2.8589	2.6082	-115.8857	-118.9535
18	0.9644	0.9618	1.4773	1.5363	-0.3600	0.8712
23	0.9642	0.9546	1.4174	1.6009	37.1004	40.1663
38	0.9546	0.9299	3.0382	2.9295	180.1476	181.6057

## 5 结论

本文基于微波衰减的幂律关系, 研究了使用微波链路衰减信息重建二维降雨场的反演模型. 并利用 SIRT 算法与正则化算法实现对降雨场层析模型的反演求解. 通过仿真实验进行了数值模拟, 在微波网络的密度为  $0.34/\text{km}^2$ , 微波发射频率为 18 GHz, 极化方式为垂直极化的条件下, 反演结果与真实降雨场相关系数为 0.9644, 均方根误差为 1.4773 mm/h, 绝对积分误差为  $-0.3600$  mm/h. 降雨场层析模型能够较为准确地反演降雨场的基本强度信息与结构分布特征. 在现实应用中, 可以在被监测区域搭建微波发射-接收衰减测量系统用以反演降雨场, 或者利用现存的手机通讯系统、微波中继通信系统等拥有微波发射与接收终端并能够监测微波衰减的系统. 因此该方法有着广阔的应用前景. 具体结论如下:

1. 频率对本文提出的降雨场层析反演模型有一定影响, 选取雨衰幂律关系近乎线性的微波波段可以有利于提高反演精度, 如仿真实验采用的雨衰

模型中垂直极化情况下 3 GHz 或 20 GHz, 但实际应用中由于 3 GHz 降雨对微波的衰减效应较为微弱, 接收终端的造成导致的测量误差可能会对反演效果产生更大影响, 因此使用较高的频段更为合理.

2. 微波网络的密度与分布特征对反演结果有着一定程度的影响, 在微波网络密度为  $0.34/\text{km}^2$  的情况下能够得到较好的反演效果, 而网络密度下降为  $0.26/\text{km}^2$  的情况下, 反演结果与真实降雨场之间的相关系数为 0.8562, 均方根误差为 2.7297 mm/h, 绝对积分误差为  $-6.1961$  mm/h. 反演效果存在一定程度的下降. 因此较高的微波网络密度能够取得较好的反演效果.

3. 由于本文在处理层析问题采用线性化的处理方法, 在雨衰模型呈非线性的波段会带来一定程度的反演误差. 因此接下来需要研究将求解不适定的非线性反问题的方法应用在降雨场的重建中. 为适应实际的微波网络密度、拓扑结构以提高反演精度, 根据微波网络的密度与分布特征, 选取适当的网格格距, 使其与微波网络结构相适应, 需要进一步的研究.

[1] Sorooshian S, Aghakouchak A, Arkin P, Eylander J, Foufoula-Georgiou E, Harmon R, Hendrickx J M H, Imam B, Gowski R K, Skahill B, Skofronick-Jackson G 2011 *B. Am. Meteorol. Soc.* **92** 1353  
 [2] Sorooshian S, Aghakouchak A, Arkin P, Eylander J, Foufoula-Georgiou E, Harmon R, Hendrickx J M H, Imam B, Gowski R K, Skahill B, Skofronick-Jackson G 2011 *B. Am. Meteorol. Soc.* **92** 1271  
 [3] Liu X C, Gao T C, Qin J, Liu L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2156 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 秦健, 刘磊 2010 物理学报 **59** 2156]

[4] Ryde J 1947 *Meteorological factors in radio wave propagation* London, Britain, April 8, 1946, p169  
 [5] Wexler R, Atlas D 1963 *J. Appl. Meteorol.* **2** 276  
 [6] Atlas D, Ulbrich C W 1977 *J. Appl. Meteorol.* **16** 1322  
 [7] Minda H, Nakamura K 2005 *J. Atmos. Oceanic Technol.* **22** 165  
 [8] Hardaker P J, Holt A R, Goddard J W F 1997 *Radio Sci.* **32** 1785  
 [9] Holt A R, Kuznetsov G G, Rahimi A R 2003 *IEE Proc. -Microw. Antennas Propag.* **150** 315

- [10] Upton G J G, Holt A R, Cummings R J, Rahimi A R, Goddard J W F 2005 *Atmos. Res.* **77** 300
- [11] Messer H, Zinevich A, Alpert P 2006 *Science* **312** 713
- [12] Zinevich A, Alpert P, Messer H 2008 *Adv. Water Resource.* **31** 1470
- [13] Freeman R 1991 *Telecommunications Transmission Handbook* (3rd Edn.) (Canada: John Wiley & Sons Inc.) p494
- [14] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K 1981 *Microwave Remote Sensing* (Vol. 1) (Norwood, MA: Artech House) p279
- [15] Olsen R, Rogers D V, Hodge D B 1978 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **26** 318
- [16] International Telecommunication Union 2005 Rec. p838-3-321
- [17] Zhang K, Zhu P P, Huang W X, Yuan Q X, Liu L, Yuan B, Wang J Y, Shu H, Chen B, Liu Y J, Li E R, Liu X S, Wu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3410 (in Chinese) [张凯, 朱佩平, 黄万霞, 袁清习, 刘力, 袁斌, 王嵩越, 舒航, 陈博, 刘宜晋, 李恩荣, 刘小松, 吴自玉 2008 物理学报 **57** 3410]
- [18] Zhou W J, Hu W T, Guo L, Xu Q S, Yu Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8499 (in Chinese) [周文静, 胡文涛, 郭路, 徐强胜, 于瀛洁 2010 物理学报 **59** 8499]
- [19] Messer-Yaron H, Alpert P, Zinevich A, Goldshtein O Patent 20090160700 [2009-06-25]
- [20] Zhong J, Huang S X, Du H D, Zhang L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 034301
- [21] Zhong J, Huang S X, Fei J F, Du H D, Zhang L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 064301

# Investigation of the inversion of rainfall field based on microwave links

Jiang Shi-Tai Gao Tai-Chang<sup>†</sup> Liu Xi-Chuan Liu Lei Liu Zhi-Tian

(*Institute of Meteorology and oceanography, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China*)

(Received 5 March 2013; revised manuscript received 10 April 2013)

## Abstract

The accurate measurements of rainfall distribution with high spatial and temporal resolution have important implications in meteorology, hydrology, agriculture, environmental policies, flood warning and weather forecasting. Based on the rain-induced power-law attenuation equation, a method is presented to reconstruct the rainfall field using rain-induced attenuation data from microwave links, and a tomographic model is formulated. Simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT) algorithm and regularization method are employed in the tomographic model separately. The simulated result shows that the tomographic model and iterative algorithms are able to reconstruct the intensity and features of original rainfall field preferably. The distribution of rain rate with high spatial and temporal resolution is also available. Therefore, rain estimation exploiting microwave attenuation measurement data is a useful complement to traditional rain gauge and radar derived estimations.

**Keywords:** rain-induced microwave attenuation measurements, microwave links, rainfall field reconstruction, tomography

**PACS:** 43.28.We, 92.60.jf, 92.60.Ta

**DOI:** 10.7498/aps.62.154303

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: 2009gaotc@gmail.com