

基于星地链路的垂直降雨场反演方法

咸明皓 刘西川 印敏 宋堃 高太长

Inversion of vertical rainfall field based on earth–space links

Xian Ming-Hao Liu Xi-Chuan Yin Min Song Kun Gao Tai-Chang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 024301 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191232

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191232>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于非球形雨衰模型的微波链路雨强反演方法

Method and experiment of path rainfall intensity inversion using a microwave link based on nonspherical rain–induced model
物理学报. 2017, 66(15): 154301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.154301>

存在干扰下的星地融合协作传输系统平均误符号率分析

Average symbol error rate for integrated satellite–terrestrial cooperative transmission with interference
物理学报. 2019, 68(12): 128401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190123>

基于L1范数的低场核磁共振T2谱稀疏反演方法

Sparse inversion method of T2 spectrum based on the L1 norm for low–field nuclear magnetic resonance
物理学报. 2017, 66(4): 047601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.047601>

200 km沙漠链路高精度光纤时频传递关键技术研究

Key technology of high–precision time frequency transfer via 200 km desert urban fiber link
物理学报. 2019, 68(6): 060602 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182000>

上行链路大气波前畸变对剪切光束成像技术的影响

Effect of uplink atmospheric wavefront distortion on image quality of sheared–beam imaging
物理学报. 2018, 67(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181144>

人工沿场不均匀体对短波垂直探测影响的理论分析

Theoretical analysis of effects on high frequency vertical sounding by artificial field–aligned irregularities
物理学报. 2017, 66(5): 059401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.059401>

基于星地链路的垂直降雨场反演方法*

咸明皓 刘西川[†] 印敏 宋堃 高太长

(国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2019年8月15日收到; 2019年11月2日收到修改稿)

在分析星地链路几何结构及传播模型的基础上, 研究基于联合代数重建技术的星地链路反演二维垂直降雨场的方法. 利用实测降雨资料构建3类降雨场, 并搭建3条17 GHz垂直极化星地链路进行数值仿真. 实验结果表明: 单星地链路无法实现二维垂直降雨场的重构, 反演场与真实场的相关系数分别为0.556, 0.504和0.364; 基于双星地链路的反演结果和真实场的相关系数均高于0.98, 平均偏差分别为0.122, 0.159和0.537 mm/h, 欧式距离均低于0.9 mm/h, 熵的相对误差均小于1.6%, 基本实现了二维垂直降雨场的反演; 三星地链路的应用进一步提升了反演精度, 相关系数接近于1, 能够精准重构降雨场. 实验结果验证了基于星地链路的垂直降雨场反演方法的可行性、准确性和有效性. 星地链路的架设和维护简单, 探测降雨范围广, 易于在高原、山区、海岛等传统地面观测资料缺失的地区使用, 可以作为已有降水测量手段的补充.

关键词: 星地链路, 垂直降雨场, 降雨衰减, 联合代数重建技术

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

DOI: 10.7498/aps.69.20191232

1 引言

高精度实时的区域降雨资料不仅是水资源管理和农业发展领域的重要信息, 同时也为城市内涝和自然灾害(滑坡、泥石流等)预警等提供关键指导作用. 在雨量计、天气雷达和气象卫星的基础上, 利用微波链路衰减测量降雨的新方法出现了, 因其具有精度高、成本低、易操作等特点, 吸引国内外学者开展了大量的实验研究. 目前, 近地面传播的视距微波链路^[1,2]在路径平均雨强和雨滴谱的反演^[3,4]、雷达的定标^[5]、区域降雨监测^[6]以及多源资料联合重构降雨场^[7]等方面, 展现出独特的优势, 成为常规大气探测手段的辅助和补充方法. 国内方面, 国防科技大学气象海洋学院在国内首先开展了微波链路测雨技术研究, 分析了微波链路测量降雨的可行性并开展了相关的实测研究^[8,9], 分别研究了基于微波链路的区域降雨反演方法^[10]和基于支持向

量机和考虑非球形雨滴的降雨反演方法^[11,12], 提高了方法的适应性和准确性.

除了近地面传播的视距微波链路以外, 地面还广泛覆盖了卫星和地面站之间传播的星地链路^[13]. 高频星地链路在大气中传播时同样会受到降水的衰减, 因此同样也可以用于降雨测量. 李黄^[14]首先提出利用Ku波段卫星通信雨衰进行降雨探测的设想, 并开展初步实验. Arslan等^[15]利用Ku波段地球同步轨道(GEO)广播卫星信号测量降雨, 其结果与雷达数据相比具有较高的一致性. Francois等^[16]搭建4条GEO卫星链路并联合四维变分同化的方法对近地面区域降雨进行反演, 证明星地链路探测区域降雨的可行性. Adirosi等^[17]使用雨量筒和激光雨滴谱仪对星地链路测雨结果进行定标, 提高了降雨探测的准确性.

现有研究大多针对GEO卫星, 卫星和地面站的位置相对固定, 仅能够探测路径平均降雨. 此外, 未来还将发射多个低轨(LEO)或中轨(MEO)的

* 国家自然科学基金(批准号: 41975030, 41505135)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liuxc2012@hotmail.com

宽带通信卫星星座^[13]. 与 GEO 卫星不同, 在 LEO 和 MEO 卫星与地面站通信过程中, 随着卫星的移动, 星地链路像 X 光扫描人体一样对降雨区进行“扫描”, 并且由于星地链路倾斜穿过整层降雨区域, 其衰减中还包含各个高度上的降雨信息. 利用计算机断层成像技术等方法就可以实现对二维垂直降雨场的重建. 因此可以成为一种测量降雨垂直分布的新方法. 星地链路在搭建后可自主运行, 实测数据可通过卫星回传, 并且卫星星座覆盖全球, 因此在高原、山区、海岛等传统地面观测资料缺失的地区使用具有独特优势. 本文在建立星地链路大气衰减定量模型的基础上, 提出并研究基于联合代数重建技术的星地链路反演二维垂直降雨场方法. 利用实测降雨资料开展仿真分析, 验证星地链路反演垂直降雨场的可行性和有效性, 为发展星地链路测雨新方法奠定技术基础.

2 星地链路衰减模型

2.1 星地链路几何结构

卫星从位置 A 移动到位置 C 时, 地球站持续接收信号过程如图 1 所示, 其中, O 代表地心, E 为卫星轨道正下方地球站位置, h 和 R 分别表示

轨道高度和地球平均半径, θ_0 表示能够接收到卫星信号时地球站最小仰角. 卫星的运行周期 T 为

$$T = \pi\sqrt{r^3/(GM_e)}, \quad (1)$$

其中, $r = h + R$, M_e 和 G 分别代表地球质量和万有引力常数. 在 $\triangle EOA$ 中由正弦定理可得

$$\alpha = \arccos \frac{R \cos \theta_0}{R + h} - \theta_0. \quad (2)$$

由 (1) 式、(2) 式可得地球站信号接收时间 T_r 为

$$T_r = \frac{\pi}{90} \left(\arccos \frac{R \cos \theta_0}{R + h} - \theta_0 \right) \sqrt{(R + h)^3 / (GM_e)}, \quad (3)$$

T_r 也代表星地链路对降雨区域的最大扫描时间.

假设卫星从位置 A 移动到位置 B 时地球站位于降雨区域内, 星地链路探测垂直降雨场的过程如图 2 所示, 图中 h_{rain} 表示雨区相对于地球站的垂直高度, L_r 和 L_o 分别代表星地链路在雨区内和雨区外的传播距离, L_o 远大于 L_r , 则星地链路的水平探测尺度 W 为

$$W = 2h_{\text{rain}}/\tan \theta_0. \quad (4)$$

当 $h_{\text{rain}} = 4.8 \text{ km}$, $\theta_0 = 5^\circ$ 时, W 约为 110 km, 可以看到单一地球站便能实现对 527 km² 垂直范围内的降雨场的监测.

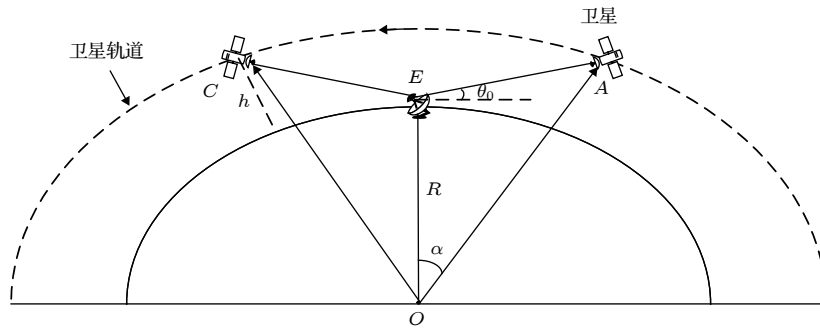


图 1 星地链路几何结构

Fig. 1. Geometry of earth-space link.

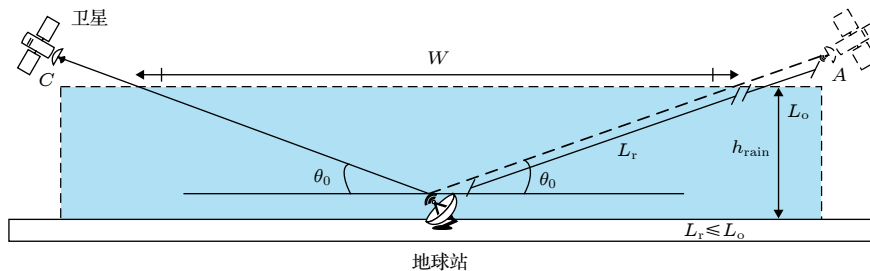


图 2 星地链路探测垂直降雨场

Fig. 2. The detection of vertical rainfall field with earth-space link.

2.2 星地链路信号衰减

在星地通信系统中, 地球站接收功率 P_r (dB) 可以表示为^[18]

$$P_r = \text{EIRP} + G_r - \text{LOSS}, \quad (5)$$

其中 EIRP 为等效全辐射功率, 单位为 dB; G_r 为地球站接收天线增益, 单位为 dB; LOSS 为星地链路传输衰减, 单位为 dB. 若卫星发射功率为 P_{tran} (dB), 卫星天线增益为 G_{tran} (dB) 则

$$\text{EIRP} = P_{\text{tran}} + G_{\text{tran}}. \quad (6)$$

星地链路传输衰减 LOSS 主要来源于自由空间衰减 A_f (dB) 和对流层衰减 A_{trop} (dB), 其中 A_{trop} 又包括闪烁衰减 A_s (dB)、气体衰减 A_{gas} (dB)、云致衰减 A_{cloud} (dB) 和降雨衰减 A_{rain} (dB):

$$\text{LOSS} = A_f + A_{\text{trop}}, \quad (7)$$

$$A_{\text{trop}} = A_s + A_{\text{gas}} + A_{\text{cloud}} + A_{\text{rain}}. \quad (8)$$

对于使用点波束天线的 LEO 卫星, 其等效全辐射功率 EIRP 恒定. 以 OneWeb 星座系统为例^[13], 其卫星轨道高度 $h = 1200$ km, 最小工作仰角 $\theta_0 = 30^\circ$, 根据 (3) 式可得地球站连续接收卫星信号时间 $T_r = 8$ min, 在此时间内可认为接收天线增益 G_r 为常数. 因此, 地球站天线的接收功率 P_r 可表示为

$$P_r = C - A_f - A_s - A_{\text{gas}} - A_{\text{cloud}} - A_{\text{rain}}. \quad (9)$$

其中, C 为增益常数.

自由空间衰减、闪烁衰减、气体衰减和云致衰减的计算可参考 ITU-R P.618 建议书^[18], 在南京地区接收 AsiaSat5 卫星 Ku 波段信号, 电磁波为垂直极化, 卫星轨道高度为 36000 km, 天线仰角为 43° , 统计高层云底高为 3.55 km, 云顶高为 4.77 km^[19], 则在 12—18 GHz 范围内, 星地链路上的自由空间衰减、闪烁衰减、整层大气衰减、云致衰减以及 10 mm/h 和 20 mm/h 雨强时的降雨衰减如图 3 所示. 整体而言, 气体衰减最小在 10^{-1} —1 dB 范围内, 闪烁衰减和云致衰减次之在 1 dB 左右, 降雨引起的衰减明显, 并且随着降雨强度和频率的增加而增加, 能够达到 10 dB 以上, 高于气体衰减、闪烁衰减及云致衰减而不会被其淹没. 虽然自由空间衰减超过 10^2 dB, 但由于其仅是电波频率和传播距离的函数^[18] 并且当电波频率偏移 200 MHz, 卫星轨道高度变化 1000 km 时自由空间衰减的相对变化量不足 0.2%, 因此在已知卫星

工作频率和轨道的条件下能够精确计算自由空间衰减, 可以将其从总衰减中剔除, 消除对降雨衰减测量的影响.

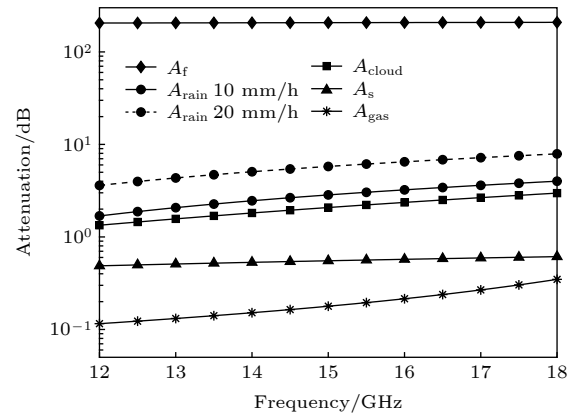


图 3 星地链路闪烁衰减、云致衰减、气体衰减、雨强为 10 mm/h 和 20 mm/h 的雨致衰减

Fig. 3. Scintillation attenuation, cloud attenuation, gas attenuation and rain attenuation with 10 mm/h and 20 mm/h rain rate in earth space link.

3 垂直降雨场反演方法

3.1 垂直降雨场反演模型

星地链路在某一条路径上的降雨总衰减为

$$A_{\text{rain}} = \int_{(x_0, h_0)}^{(x_r, h_r)} \gamma(x, h) \csc \theta dh, \quad (10)$$

其中 $\gamma(x, h)$ 为 (x, h) 处的降雨衰减系数, 单位为 dB/km, 表示卫星信号在降雨区域内每经过 1 km 将会产生 $\gamma(x, h)$ 的衰减; (x_0, h_0) 和 (x_r, h_r) 分别代表地球站位置和星地链路离开雨区的位置; θ 代表地球站天线仰角.

为实现垂直降雨场的反演, 首先将探测区域划分成大小相等的方形网格, 假设每个网格内衰减系数均匀, 降雨场网格化示意图如图 4 所示. 其中 l_i^k 表示链路在第 k 次探测即仰角为 θ_k 时在第 i 个网格内的长度, γ_i 表示第 i 个网格的衰减系数, 则星地链路第 k 次探测时的降雨衰减可表示为

$$A_{\text{rain}}^k = \gamma_6 l_6^k + \gamma_7 l_7^k + \gamma_8 l_8^k + \gamma_9 l_9^k. \quad (11)$$

将 (11) 式推广, 若降雨场被分隔成 $N = n \times n$ 个网格, 则第 k 次探测时星地链路的降雨衰减可表示为

$$A_{\text{rain}}^k = \sum_{i=1}^N \gamma_i l_i^k. \quad (12)$$

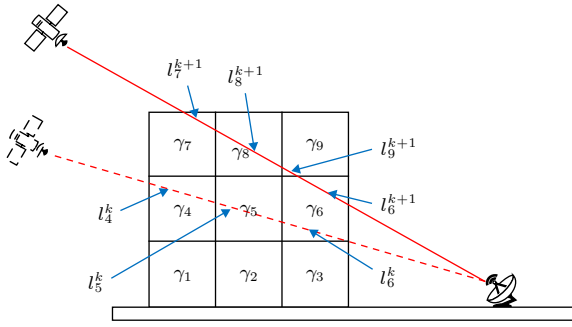


图 4 计算星地链路降雨衰减简图

Fig. 4. The sketch of calculation of earth-space link rain attenuation.

假设地球站接收一次卫星信号的时间间隔为 Δt , 则卫星过顶时, 星地链路每次探测的间隔角度 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = \frac{\pi(90 - \theta_0)}{45\Delta t} \left(\arccos \frac{R \cos \theta_0}{R + h} - \theta_0 \right) \times \sqrt{(R + h)^3 / (GM_e)}. \quad (13)$$

在星地链路探测垂直降雨场过程中, 由 ITU-R P.618 建议书 [18] 可以得到链路第 k 次探测时的自由空间衰减 A_f 、闪烁衰减 A_s 、气体衰减 A_{gas} 、云致衰减 A_{cloud} , 基于此剔除其在第 k 次探测时的实际接收功率 P_r^k 中的影响得到 P_k , 再由 (9) 式和 (12) 式可得

$$P_k = C - \sum_{i=1}^N \gamma_i l_i^k. \quad (14)$$

在一次完整的垂直降雨场反演过程中, 假设星地链路共进行 M 次探测, 垂直降雨场被划分成 N 个网格, 令 $q_k = -P_k$ 得到

$$\begin{bmatrix} l_1^1 & l_2^1 & \cdots & l_N^1 & -1 \\ l_1^2 & l_2^2 & \cdots & l_N^2 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_1^M & l_2^M & \cdots & l_N^M & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_N \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_M \end{bmatrix}, \quad (15)$$

即

$$L\gamma = q, \quad (16)$$

其中, γ 称为衰减系数向量.

雨衰系数 γ_R 与雨强 R 的关系满足幂律关系 [20]:

$$\gamma_R = \alpha R^\beta, \quad (17)$$

其中, 幂律系数 α 和 β 是信号频率、极化方式和链路仰角的函数, 具体计算方法可参考 ITU-R

P.838 建议书 [20]. 因此, 可以根据衰减系数 γ_R 得到对应的降雨强度, 即

$$R = (\gamma_R / \alpha)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (18)$$

由此垂直降雨场反演过程变成了求解线性方程组 (16) 式的问题.

由 ITU-R P.838-3 建议书 [20] 发现, 当星地链路频率为垂直极化 17 GHz (Ku 波段) 时, 幂律系数随仰角的变化很小 (图 5), α 和 β 均在 0.04 范围内变化, 两者的标准差 (standard deviation, STD) 和标准差系数 (coefficient of variation, CV) 分别为 0.0012, 1.74% 和 0.0136, 1.32%, 并且 β 接近于 1, 雨强和衰减系数近似呈线性关系. 因此, 本文在反演降雨强度时幂律系数选择为 $\bar{\alpha} = 0.063$, $\bar{\beta} = 1.033$, 这样一方面简化计算过程, 另一方面又能确保反演结果的准确性.

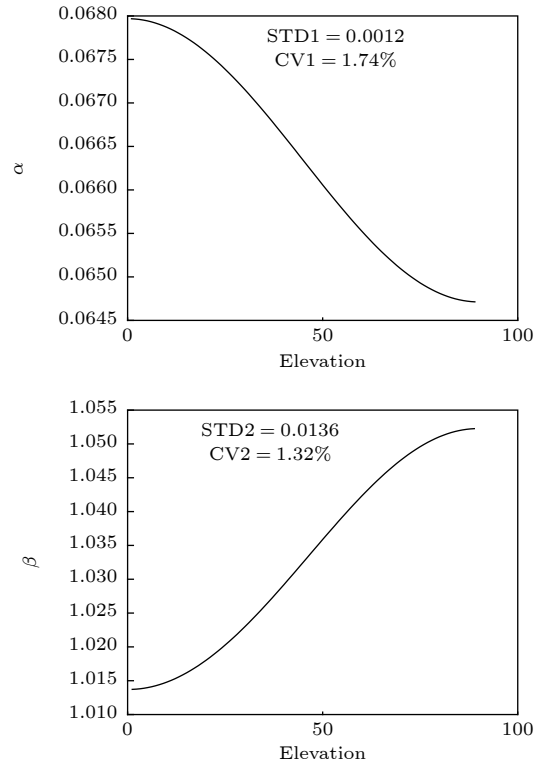


图 5 幂律系数随仰角的变化

Fig. 5. The change of power law coefficients with elevation.

3.2 基于联合代数重建技术 (SART) 的降雨场反演算法

SART 作为一种 CT 成像技术中巨型稀疏矩阵求解的经典算法, 能够有效地解决方程组超定或欠定问题 [21], 是 Kaczmarz [22] 的迭代重建技术 (algebraic reconstruction technique, ART) 的进

一步发展. SART 算法的优势在于每次迭代过程中所有的方程都被用于像素解的更新, 实现噪声的平滑处理, 比 ART 算法的稳定性更高 [21]. 基于 SART 算法, 垂直降水场衰减系数向量 γ 的迭代过程为 [23]

$$\gamma^{k+1} = \gamma^k + \lambda_k D_r^{-1} L^T D_c^{-1} (q - L\gamma^k), \quad (19)$$

其中, γ^k 代表第 k 次迭代后的衰减系数向量解; λ_k 为弛豫系数, 取值范围为 (0, 2); D_r 和 D_c 分别是与矩阵 L 的行向量和列向量有关的对角矩阵:

$$D_r = \text{diag} (\|l_i^r\|_1), \quad (20)$$

$$D_c = \text{diag} (\|l_j^c\|_1), \quad (21)$$

其中, l_i^r 和 l_j^c 分别代表矩阵 L 的第 i 个行向量和第 j 个列向量.

由于衰减系数取值为正数, 所以需在迭代过程中要加入非负约束. 定义投影函数 Φ 使得所有衰减系数投影到正象限:

$$[\Phi(\gamma)]_i = \begin{cases} \gamma_i, & \gamma_i \geq 0, \\ 0, & \gamma_i < 0, \end{cases} \quad (22)$$

其中, γ_i 代表向量 γ 的第 i 个元素. 引入投影函数 Φ 后向量 γ 的迭代过程变为

$$\gamma^{k+1} \leftarrow \Phi(\gamma^k + \lambda_k D_r^{-1} L^T D_c^{-1} (q - L\gamma^k)). \quad (23)$$

为评价反演效果, 采用欧氏距离 (Euclidean distance, δ) 和熵 (entropy, S) 两个指标, 欧式距离的高低表示反演场和真实场误差的大小, 两者的熵差距越小表示降雨强度的空间分布越接近 [24]:

$$\delta = \left[\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (R_{ij} - R'_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

$$S = \frac{-1}{\ln nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{R_{ij}}{F} \right) \ln \left(\frac{R_{ij}}{F} \right) \quad (25)$$

其中, n 为降雨场网格化后垂直方向网格数, m 为水平方向网格数, R_{ij} 和 R'_{ij} 分别表示 i 行 j 列网格内的反演降雨强度和真实降雨强度, F 为

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij}. \quad (26)$$

3.3 反演算法流程

反演算法流程图如图 6 所示, 具体的反演过程为

- 1) 设置最大迭代次数 K_{\max} 和误差阈值 ε ;
- 2) 初始化 γ^0 (很小的随机向量或零向量);
- 3) 由 (22) 式和 (23) 式计算矩阵 D_c, D_r ;
- 4) 由 (25) 式迭代求解衰减系数;
- 5) $k = k + 1$;
- 6) $\|\gamma^k\|_2 \leq \varepsilon$ 或 $k > K_{\max}$ 时停止迭代, 否则返回步骤 4);
- 7) 由 (18) 式计算降雨强度.

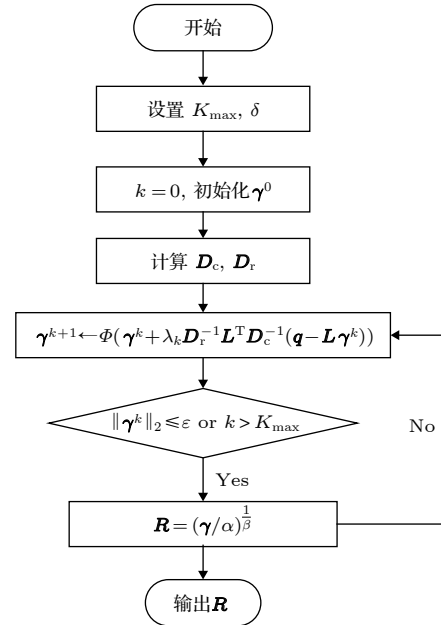


图 6 反演算法流程图

Fig. 6. The flow chart of vertical rainfall field inversion method.

4 数值模拟与结果分析

4.1 初始场参数设置

利用南京地区 2014 年 6 月 30 日、7 月 2 日和 10 月 28 日的微雨雷达 (micro rain radar, MRR) 实测资料, 将时间尺度转为水平距离尺度, 构建 3 类二维垂直降雨场 I, II 和 III, 如图 7 所示. 可以清楚地看到降雨垂直方向上分布的不均匀性. 其中, 降雨场 I 中 5 km 高度上出现 3 个强降雨中心, 并且在水平 5—10 km 范围上空出现连续性垂直降雨带, 最大降雨强度为 8 mm/h; 在降雨场 II 中 5 km 高度上出现 1 个强降雨中心, 最大降雨强度为 18 mm/h; 在降雨场 III 中 3—4 km 高度范围内出现连续性水平降雨区, 最大降雨强度为 40 mm/h.

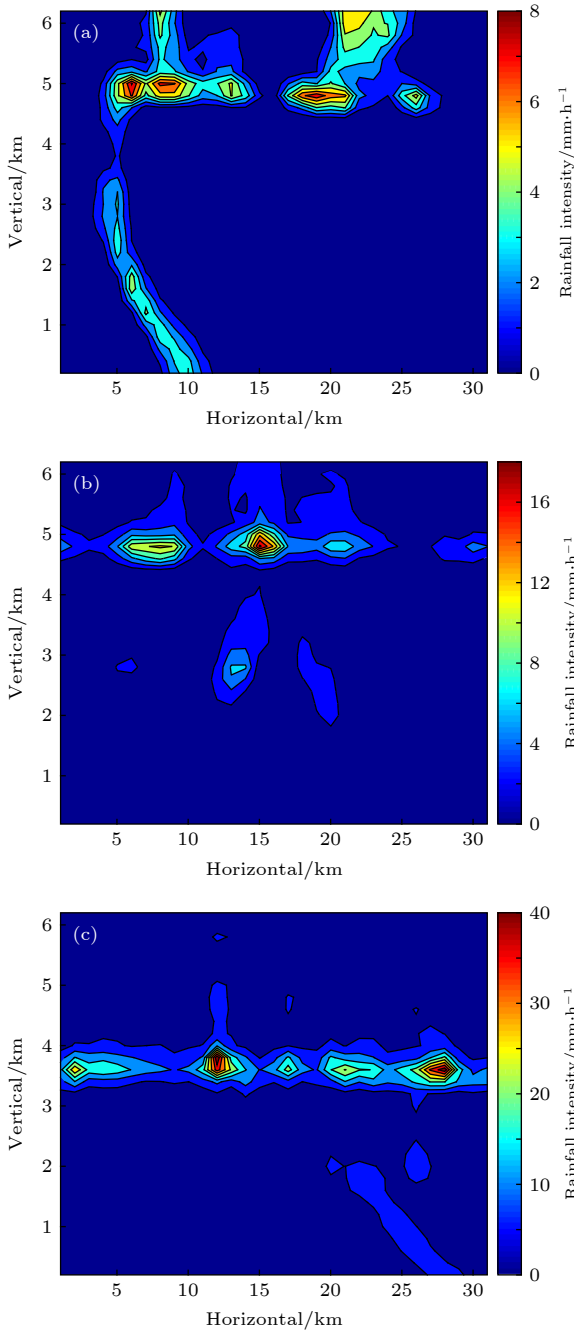


图 7 基于 MRR 实测资料构建的垂直降雨场 (a) 降雨场 I; (b) 降雨场 II; (c) 降雨场 III

Fig. 7. Vertical rainfall field derived from the data of MRR: (a) rainfall field I; (b) rainfall field II; (c) rainfall field III.

将上述垂直降雨场划分成 1 个 31×31 方形组成的网格, 其垂直分辨率为 200 m/格, 水平分辨率为 1 km/格, 并由位于 $(-10 \text{ km}, 0 \text{ km})$ 的地球站 1, $(64 \text{ km}, 0 \text{ km})$ 的地球站 2 和 $(15 \text{ km}, 0 \text{ km})$ 的地球站 3 进行探测, 如图 8 所示, 图中 θ_1 , θ_2 和 θ_3 分别表示 3 个地球站天线的仰角, $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ 和 $\Delta\theta_3$ 分别表示 3 个天线相邻两次探测的间隔仰角. 参考 Ku 工作波段 AsiaSat5 卫星的 EIRP = 56 dB,

直径为 1.5 m 抛物面接收天线增益 $G_r = 49 \text{ dB}$, 则增益常数 $C = 105 \text{ dB}$. 星地链路具体参数如表 1 所示.

在 MRR 实测资料的基础上开展仿真实验, 由 (17) 式得到每个网格内的衰减系数, 根据表 1 中星地链路参数得到探测过程中的降雨衰减并建立线性方程组 (15), 然后基于带有非负限制的 SART 反演算法对方程组求衰减系数解, 最后结合 (18) 式由衰减系数得到降雨强度, 从而重构垂直降雨场.

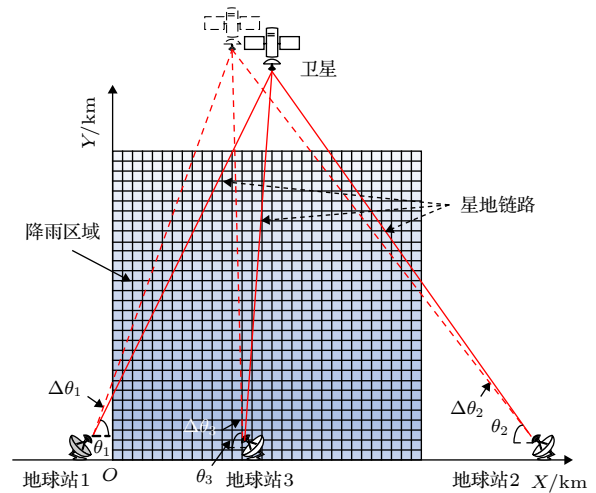


图 8 降雨场网格化和星地链路探测示意图

Fig. 8. Sketch of grid for rainfall field and detection of earth-space links.

表 1 星地链路参数

Table 1. Parameters of earth-space link.

| 地球站 | 频率/ GHz | 极化方式 | $\Delta\theta/(^\circ)$ | $\theta_{\text{Min}}/(^\circ)$ | C/dB |
|-----|---------|------|-------------------------|--------------------------------|---------------|
| 1 | 17 | 垂直 | 0.1 | 0.091 | 105 |
| 2 | 17 | 垂直 | 0.1 | 0.065 | 105 |
| 3 | 17 | 垂直 | 0.1 | 1.00 | 105 |

4.2 反演结果分析

首先, 用地球站 1 的探测数据来反演垂直降雨场, 结果如图 9(a)—(c) 所示. 可以看到, 反演场的降雨强度及其分布与真实场相比存在明显的差异. 其中, 降雨场 I, II 和 III 与其反演场的相关系数、平均偏差分别为 0.556, 0.630 mm/h; 0.504, 0.865 mm/h 和 0.364, 2.553 mm/h. 3 个反演场欧式距离和熵随迭代次数的变化如图 10(a)—(c) 和图 11(a)—(c) 所示. 从图 10(a)—(c) 可以看到, 虽然整个迭代过程的反演场逐渐趋向于真实场, 但经

过 500 次迭代后的欧式距离分别为 1.046, 1.429 和 4.103 mm/h, 与真实场的差距较大. 图 11(a)—(c) 中, 黑色虚线代表实际降雨场的熵, 在整个反演过程中反演场熵的变化并不明显, 表明反演效果随迭代次数未发生显著的变化, 500 次迭代后反演场熵和真实场熵的相对误差分别为 11.35%, 3.65% 和 3.25%. 改用地球站 2 或地球站 3 的探测数据后也出现了类似的情况. 之后又尝试减小 θ_{\min} 和 $\Delta\theta$ 以得到更多的探测数据, 但反演效果并没有明显的改善. 实验结果表明, 仅利用 1 个地球站难以实现垂直降雨场的反演. 这是因为在探测过程中出现了多条相邻星地链路经过同一组网格的现象, 导致方程组 (15) 的有效方程数量即矩阵 L 的秩减少, 即使设置 $\Delta\theta = 0.05^\circ$ 使矩阵 L 的维度达到 1441×962 , 但有效方程的数量也仅为 572, 同时由于降雨场网格数量庞大, 使得 SART 算法在迭

代过程中易趋向局部最优解.

基于第 1 次的实验结果, 本文联合两个地球站 1 和地球站 2 对降雨场进行探测, 反演结果示于图 9(d)—(f). 可知, 垂直降雨场的整体反演效果较好, 能够清楚地看到降雨场 I 中 5 km 高度上的 3 个强降雨中心和连续性垂直降雨带, 降雨场 II 中 5 km 上的 1 个强降雨中心和降雨场 III 中的连续性水平降雨区, 并且准确得到每个降雨场的最大降雨强度. 但是反演场 I 中连续性垂直降雨带内部的降雨分布、反演场 II 中 3 km 高度上的降雨中心以及反演场 III 中 3 km 高度以下的弱降水中心仍与真实场存在偏差. 其中降雨场 I, II, III 与其反演场相关系数、平均偏差分别为 0.980, 0.122 mm/h; 0.989, 0.159 mm/h 和 0.982, 0.537 mm/h. 欧式距离和熵的变化情况如图 10(d)—(f) 和图 11(d)—(f) 所示, 经过 500 次迭代后 3 个反演场的欧式距离、

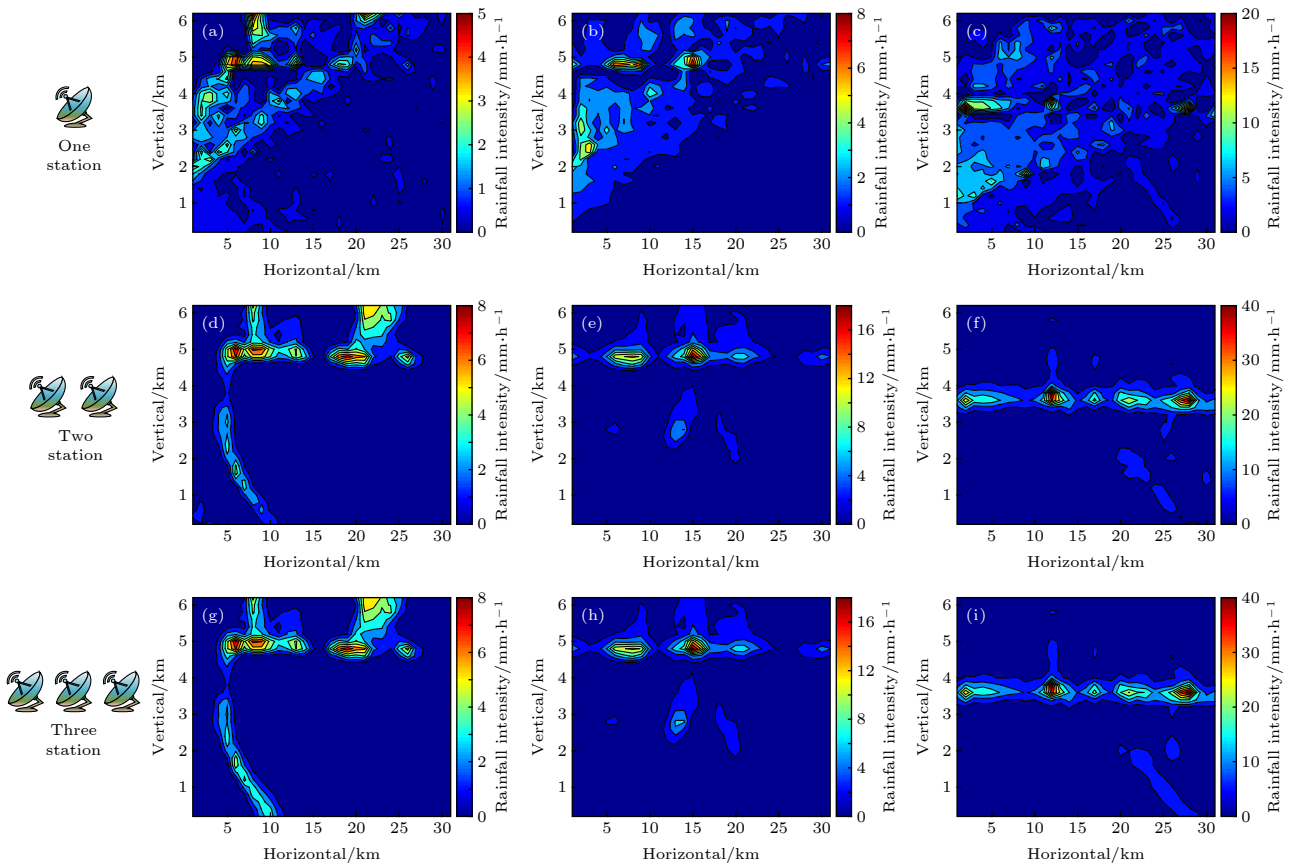


图 9 垂直降雨场反演效果图 (a) 单地球站反演降雨场 I; (b) 单地球站反演降雨场 II; (c) 单地球站反演降雨场 III; (d) 双地球站反演降雨场 I; (e) 双地球站反演降雨场 II; (f) 双地球站反演降雨场 III; (g) 三地球站反演降雨场 I; (h) 三地球站反演降雨场 II; (i) 三地球站反演降雨场 III

Fig. 9. Inversed vertical rainfall field: (a) Inversed field I with one earth station; (b) inversed field II with one earth station; (c) inversed field III with one earth station; (d) inversed field I with two earth stations; (e) inversed field II with two earth stations; (f) inversed field III with two earth stations; (g) inversed field I with three earth stations; (h) inversed field II with three earth stations; (i) inversed field III with three earth stations.

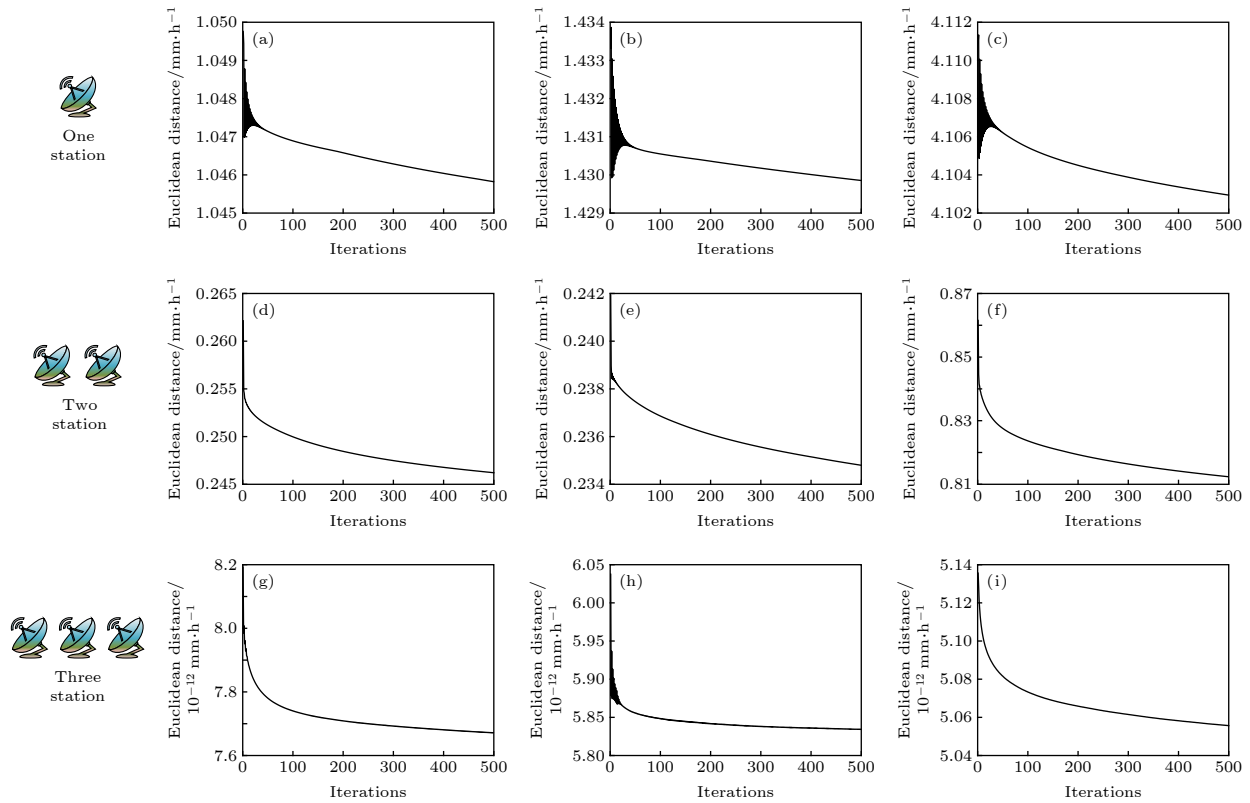


图 10 欧氏距离随迭代次数的变化情况 (a) 单地球站反演降雨场 I; (b) 单地球站反演降雨场 II; (c) 单地球站反演降雨场 III; (d) 双地球站反演降雨场 I; (e) 双地球站反演降雨场 II; (f) 双地球站反演降雨场 III; (g) 三地球站反演降雨场 I; (h) 三地球站反演降雨场 II; (i) 三地球站反演降雨场 III

Fig. 10. The change of Euclidean distance with iterations: (a) Inversed field I with one earth station; (b) inversed field II with one earth station; (c) inversed field III with one earth station; (d) inversed field I with two earth stations; (e) inversed field II with two earth stations; (f) inversed field III with two earth stations; (g) inversed field I with three earth stations; (h) inversed field II with three earth stations; (i) inversed field III with three earth stations.

熵的相对误差分别为 0.246 mm/h、1.53%、0.235 mm/h、0.061% 和 0.812 mm/h、0.23%。虽然实验结果与真实场仍存在部分微小偏差, 但两个地球站已基本实现基于星地链路的垂直降雨场反演。与单地球站相比, 在本次实验中从两个不同的位置对降雨场进行探测, 使有效方程的数量增加到 944 个接近与降雨场的网格数量, SART 算法在迭代过程中能够更加准确地趋向全局最优解。

在前两次实验的基础上, 本文联合 3 个地球站对降雨场进行探测, 反演结果如图 9(g)–(i) 所示, 与基于双地球站的反演结果相比, 前者存在的偏差在本次实验结果中均已消失, 反演场更加接近于真实场, 其中降雨场 I, II, III 与其反演场的相关系数接近 1, 平均偏差分别为 4.22×10^{-12} 、 2.65×10^{-12} 和 3.64×10^{-12} mm/h。从图 10(g)–(i) 可以看到欧式距离均小于 0.01 mm/h, 图 11(g)–(i) 中反演场熵的相对误差均在 0.01% 以下。实验结果表明, 基于 3 个地球站已实现垂直降雨场的准确反演。同

时, 在本次实验中, 有效方程的数量为 961, 与降雨场网格数量相同, 在反演过程中 SART 算法能精准地找到全局最优解。

5 结 论

在建立星地链路大气衰减定量模型的基础上, 研究了基于联合代数重建技术的星地链路重构垂直降雨场方法。利用实测降雨资料开展数值仿真, 实现二维垂直降雨场的反演。星地链路测雨新方法的应用, 将加深了解降雨的内部结构及其发展过程, 为天气预报和自然灾害预警等提供新的技术支持。同时, 该方法也可应用于山区、海岛等人迹罕至的地区, 作为传统地面观测手段的补充。在未来, 随着宽带卫星星座的部署, 地球站的架设成本将持续降低, 有利于星地链路测雨方法的大范围推广。因此该方法有着广阔的应用前景和价值。

1) 对于非降雨因素引起的衰减, 气体衰减最

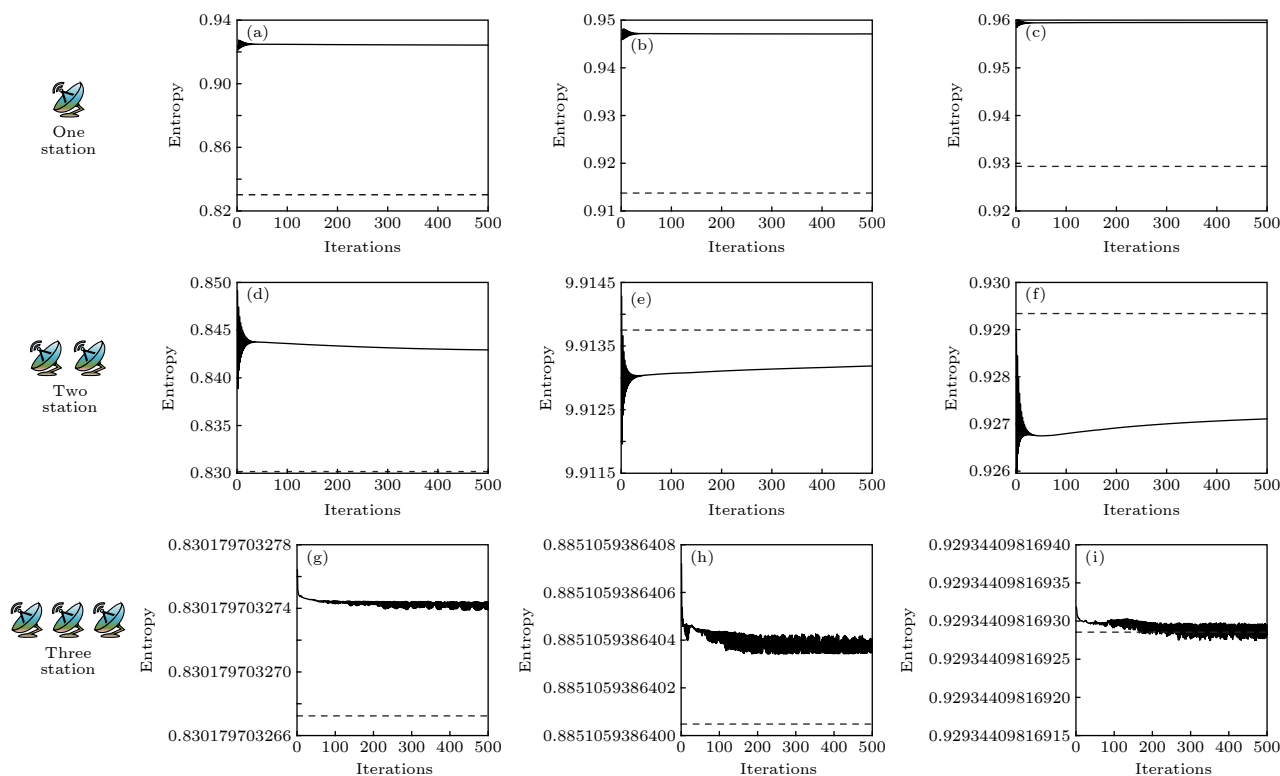


图 11 欧氏距离随迭代次数的变化情况 (a) 单地球站反演降雨场 I; (b) 单地球站反演降雨场 II; (c) 单地球站反演降雨场 III; (d) 双地球站反演降雨场 I; (e) 双地球站反演降雨场 II; (f) 双地球站反演降雨场 III; (g) 三地球站反演降雨场 I; (h) 三地球站反演降雨场 II; (i) 三地球站反演降雨场 III

Fig. 11. The change of entropy with iterations: (a) inversed field I with one earth station; (b) inversed field II with one earth station; (c) inversed field III with one earth station; (d) inversed field I with two earth stations; (e) inversed field II with two earth stations; (f) inversed field III with two earth stations; (g) inversed field I with three earth stations; (h) inversed field II with three earth stations; (i) inversed field III with three earth stations.

小在 10^{-1} —1 dB 范围内, 闪烁衰减和云致衰减次之在 1 dB 左右, 明显小于降雨衰减而不会将其淹没. 自由空间衰减最严重为 10^2 dB 高于其他衰减的 1—3 个数量级, 但由于其仅是电波频率和传播距离的函数, 并且当电波频率变化为 200 MHz, 卫星轨道变化为 1000 km 时自由空间衰减的相对变化量不足 0.2%, 因此在已知卫星工作频率和轨道的条件下可以对自由空间衰减进行精确计算, 将其从总衰减中剔除从而降低对降雨衰减测量的影响.

2) 在卫星信号频率为 17 GHz, 极化方式为垂直极化的条件下, 仅利用 1 个地球站难以实现对垂直降雨场的反演, 3 个反演场与真实场之间的相关系数分别为 0.556, 0.504 和 0.364, 平均偏差分别为 0.630, 0.865 和 2.522 mm/h. 这是因为在探测过程中出现了多条相邻星地链路经过同一组网格的现象, 导致方程组的有效方程数量即矩阵 L 的秩减少, 同时由于降雨场网格数量庞大, 使得

SART 算法在迭代过程中易趋向局部最优解.

3) 地球站数量增加到两个的情况下, 反演效果得到显著提升, 此时反演结果与真实降雨场间的相关系数分别为 0.980, 0.989 和 0.982, 平均偏差分别为 0.122, 0.159 和 0.537 mm/h, 基本实现了基于星地链路的垂直降雨场反演; 当地球站数量上升到 3 个时, 反演结果更加精确, 此时相关系数均接近 1, 真实降雨场被准确反演.

通过开展数值仿真实验证明了基于星地链路的二维垂直降雨场反演方法的可行性, 下一步在利用实际链路探测降雨时, 还需在以下方面做进一步研究: 1) 考虑实际链路的信号噪声, 选用合适的信号去噪方法确保降雨衰减信息的真实有效; 2) 根据实际链路的密度和结构, 选择合适的降雨场网格格距以提升反演效果.

参考文献

[1] Giuli D, Toccafondi A, Gentili G B, Freni A 1991 *J. Appl.*

- Meteoro* **30** 1323
- [2] Messer H, Zinevich A, Alpert P 2006 *Science* **312** 713
- [3] Rahimi A 2003 *J Geophys Res* **108** 8
- [4] Rafael F, Roger H 2002 *IEEE T Geosci Remote* **40** 760
- [5] Rahimi A, Holt A, Upton G, Krämer S, Redder A, Verworn H-R 2006 *B Am Meteorol Soc* **23** 395
- [6] Fencel M, Rieckermann J, Schleiss M, Stransky D, Bares V 2013 *Water Sci Technol* **68** 1810
- [7] Fencel M, Dohnal M, Rieckermann J, Bareš V 2017 *Hydrol Earth Syst Sc* **21** 617
- [8] Gao T C 2013 *Meteorol. Hydrol* **24** 1 (in Chinese) [高太长 2013 气象水文装备 **24** 1]
- [9] Gao T C, Song K, Liu X C, Yin M, Liu L, Jiang S T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 174301 (in Chinese) [高太长, 宋堃, 刘西川, 印敏, 刘磊, 姜世太 2015 物理学报 **64** 174301]
- [10] Jiang S T, Gao T C, Liu X C, Liu L, Liu Z T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154303 (in Chinese) [姜世太, 高太长, 刘西川, 刘磊, 刘志田 2013 物理学报 **62** 154303]
- [11] Song K, Gao T C, Liu X C, Yin M, Xue Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 244301 (in Chinese) [宋堃, 高太长, 刘西川, 印敏, 薛杨 2015 物理学报 **64** 244301]
- [12] Song K, Gao T C, Liu X C, Yin M, Xue Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 154301 (in Chinese) [宋堃, 高太长, 刘西川, 印敏, 薛杨 2017 物理学报 **66** 154301]
- [13] Xiao Y W, Sun C H, Zhao W S 2018 *Space Int.* **11** 24 (in Chinese) [肖永伟, 孙晨华, 赵伟松 2018 国际太空 **11** 24]
- [14] Li H 2006 *Journal of J Remote Sens.* **10** 568 (in Chinese) [李黄 2006 遥感学报 **10** 568]
- [15] Arslan C H, Aydin K, Urbina J, Dyrud L P 2014 *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Quebec City, July 13–18, 2014 p4111
- [16] François M, Laurent B, Cécile M 2015 *J Atmos Ocean Tech* **32** 1709
- [17] Adirosi E, Facheris L 2018 *2 nd URSI Atlantic Radio Science Meeting*, Meloneras, 28 May–1 June, 2018 p1
- [18] International Telecommunication Union 2017 *Rec. ITU-R* p618–13
- [19] Zong R 2013 *Ph.D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology) (in Chinese) (in Chinese) [宗蓉 2013 博士学位论文 (南京: 南京信息工程大学)]
- [20] International Telecommunication Union 2005 *Rec. ITU-R* p838-3
- [21] Yang F Q, Zhang D H, Huang K D, Wang K, Xu Z 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 058701 (in Chinese) [杨富强, 张定华, 黄魁东, 王鹏, 徐哲 2014 物理学报 **63** 058701]
- [22] Kaczmarz S 1993 *Int J Control* **57** 1269
- [23] Hansen, Christian P, Hansen S, Maria 2012 *J Comput Appl Math* **236** 2167
- [24] Andersen A H, Kak A C 1984 *Ultrasonic Imaging* **6** 81

Inversion of vertical rainfall field based on earth-space links^{*}

Xian Ming-Hao Liu Xi-Chuan[†] Yin Min Song Kun Gao Tai-Chang

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 15 August 2019; revised manuscript received 2 November 2019)

Abstract

The accurate measurement of rain intensity and its distribution in vertical direction can not only help to understand the process of rainfall development, but also play an important role in human life such as agriculture, weather forecasting, water resources management, and natural disaster warning. According to the analysis of the geometric structure of earth-space link and propagation model of electromagnetic wave in atmosphere, in this paper we propose a method to reconstruct two-dimensional(2D) vertical rainfall field by using earth-space links. Firstly, the measured data of micro rain radar (MRR) from Nanjing are used to generate three real vertical rainfall fields which are marked as I, II and III respectively. Secondly, based on the analysis of the earth-space link's geometry and the effect of signal attenuation from other factors such as scintillation, atmosphere gas and cloud, the vertical rainfall field inversion model is established. According to the power-law relationship between rain intensity and rain attenuation, which is given by International Telecommunication Union (ITU), the simultaneous algebraic reconstruction technique (SART) is used to inverse the vertical rainfall field. Then, one earth station which can receive a 17 GHz signal from satellite is employed to detect the vertical rainfall field. However, the simulation results show that it is difficult for one earth station to achieve the inversion of rainfall field, and that the correlation coefficients between rainfall fields and inversed fields are 0.556, 0.504 and 0.364 respectively. Based on the result, two earth stations are jointly used. In this simulation, the result shows that after 500 iterations the correlation coefficients all increase above 0.98, and the average biases between rainfall field I, II, III and their inversed fields are 0.122, 0.159 and 0.537 mm/h, respectively. Meanwhile, the Euclidean distances decrease to 0.246, 0.235 and 0.812 mm/h, and the relative errors of entropy are both less than 2%. It can be seen from the inversion fields that the vertical distribution of rain rate is close to that of the real field, which suggests that the method proposed in this paper can basically achieve the inversion of vertical rainfall field by using earth-space links. In addition, with the combined detection of three earth stations the accuracy of the inversion results is significantly improved. The correlation coefficients are all close to 1 and the mean deviations are all on the order of 10^{-12} mm/h, indicating that the 2D vertical rainfall fields are accurately reconstructed. In the near future, the satellite constellation system will be globally deployed, which can promote the applications of our method in areas, such as plateaus, mountains and islands, where there exist no traditional observation data, serving as a supplement to existing precipitation measurements.

Keywords: earth-space link, vertical precipitation field, rain attenuation, simultaneous algebraic reconstruction technique

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

DOI: 10.7498/aps.69.20191232

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41975030, 41505135).

[†] Corresponding author. E-mail: liuxc2012@hotmail.com