

# 微波链路降水测量技术及应用研究进展综述

刘西川, 高太长, 宋堃, 刘磊, 印敏

(国防科技大学 气象海洋学院, 南京 211101)

**摘要:** 在介绍微波链路测雨方法的原理、优势的基础上, 重点分析了国内外单频微波链路、双频微波链路和微波链路网反演降水的技术现状, 讨论了微波链路在天气雷达衰减订正、降雨场联合重构和暴雨监测预警的应用, 最后从测量精度、链路频率、测量要素、测量空间四个方面总结了微波链路大气探测技术的发展方向。

**关键词:** 微波链路; 衰减效应; 降水测量

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.003

**中图分类号:** P412.4      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)06-0013-08

## Research Progress and Application of Precipitation Measurement Techniques by Microwave Links

LIU Xi-chuan, GAO Tai-chang, SONG Kun, LIU Lei, YIN Min

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

**ABSTRACT:** Based on introduction of principles and advantages of microwave link rainfall measurement techniques, the technical status of precipitation inversion with single-frequency microwave links, dual-frequency microwave links and microwave links network at home and abroad was analyzed; and the application of microwave links in attenuation correction of weather radar, reconstruction of rainfall field, rainstorm monitoring and warning were discussed. And at last, the development direction of atmospheric sounding techniques with microwave links were summarized in aspects of measuring accuracy, link frequency, measuring element and measuring space.

**KEY WORDS:** microwave links; attenuation effect; precipitation measurement

实时准确的降雨测量对水文预报、农业生产、军事行动保障等活动都有着重要意义<sup>[1]</sup>。目前, 业务上常用的降雨测量手段主要有雨量计、天气雷达、测雨卫星等<sup>[2]</sup>。其中, 雨量计作为一种点测量方式, 虽然可以准确地测量地表降雨量, 但雨量计密度有限, 空间代表性差<sup>[1]</sup>; 天气雷达根据空中雨区的回波反演降雨, 无法准确地代表地表降雨量<sup>[3]</sup>; 测雨卫星受云体影响, 测量的结果也无法真实代表地表降雨量<sup>[4]</sup>。近年来, 国内外学者提出利用微波链路传播过程中的雨

致衰减反演地表降雨。商用微波链路目前在全世界范围内广泛分布, 与现有雨量计、天气雷达等专用测雨仪器相比, 其分布密度更加广泛, 能够在雨量计、天气雷达等无法架设的地方成为一种有效的降雨测量手段<sup>[5-7]</sup>。

微波在雨区的传播过程中, 微波传输能量会由于雨滴对微波的散射、吸收等效应而衰减损耗, 这种类型的微波衰减称之为微波雨致衰减, 简称微波雨衰。微波雨衰的大小既与微波的频率、偏振方式有关, 也

收稿日期: 2018-12-21; 修订日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475020, 41505135); 江苏省自然科学基金项目(BK20150708)

作者简介: 刘西川(1991—), 男, 河北清河人, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气探测。

通讯作者: 高太长(1958—), 男, 山西太原人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大气探测。

和雨滴形状、降雨类型、降雨强度等因素有关<sup>[8]</sup>。通过在微波链路发射端和接收端提取发射功率和接收功率,差分计算微波传播的总衰减,采取特定的雨衰提取算法即可得到微波雨衰,进而利用微波雨衰与雨强之间的关系反演得到路径雨强。微波链路测量降水的优点主要有:1)是微波链路的基站高度较低,链路传输贴近地表,直接作用于地表真实降水,反演结果代表性高;2)是微波链路分布广泛,特别是在城市等雨量计无法大量组网分布的地区,利用微波链路可以进行雨强的实时监控;3)是利用现有的微波通信链路开展降雨探测,无需额外研制、增加测量设备,测量成本低;4)是多频段微波链路还可以反演雨区的雨滴谱分布情况,探测雨区的微物理结构。目前,利用微波链路探测降雨逐渐成为国际上的研究热点,在国内外开展了广泛研究。

## 1 微波链路降水测量技术现状

### 1.1 单频微波链路测量路径平均雨强

对于某一个频率的微波链路,雨致衰减  $A$  与降雨强度  $R$  之间的关系一般服从式(1)<sup>[9]</sup>:

$$A = aR^b \quad (1)$$

式中:  $A$  为链路雨致衰减率, dB/km;  $R$  为路径平均降雨强度, mm/h;  $a$ 、 $b$  为雨衰幂律系数,其值与微波的频率、雨滴谱分布、温度、相对湿度等因素有关。国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)基于大量统计资料和数理统计方法计算了不同频率下的  $a$ 、 $b$  值,在通信领域广泛应用<sup>[10]</sup>。在已知雨衰关系的基础上,通过测量微波链路传输雨衰,就可反求得到路径平均降雨强度。由于不同类型的降水会带来不同的衰减,雨衰幂律系数  $a$ 、 $b$  往往呈现极为复杂的变化,因此,通过实测结果修正雨衰模型参数来提高反演精度,是单频微波链路反演降水的主要研究方向。

2005年开始, Minda 等<sup>[11]</sup>研究了微波雨衰与降雨强度之间的关系,对微波雨衰的提取方法进行了温度修正,开展了 50 GHz 频段的微波链路反演路径降雨的实测实验,实验反演结果与实际降雨值偏差在 15%以内,初步验证了微波测雨方法的实际应用价值。Messer<sup>[6]</sup>提出了利用蜂窝通信链路网反演降雨,分析了基于微波雨衰模型测雨方法的可行性,开展了基于 ITU 雨衰模型的微波链路雨强反演实验,雨强真实值与反演值的相关性达到了 0.8 以上。Thurai 等<sup>[12]</sup>基于实地雨滴谱分布优化微波雨衰参数,分析了链路偏振方式对微波雨致衰减的影响,并开展了基于 20 GHz 水平偏振与垂直偏振链路的微波雨衰测量仿真实验,其实验结果比 ITU 雨衰模型的反演结果更为精确。2013年开始,高太长等<sup>[13-16]</sup>在国内首次开展了微波链路降水测量技术研究,并开展了 15~20 GHz

频段微波链路反演降雨的测量实验,分别建立了支持向量机和非球形雨滴衰减模型的雨强反演模型,结果如图 1 所示<sup>[15]</sup>。此外,中国科学院大气物理研究所韩琰琰等研究了北京地区毫米波雨区传播特性<sup>[17]</sup>,基于此研究了雨强反演方法,并开展了实验验证<sup>[18]</sup>。成都信息工程大学的高清泉等<sup>[19]</sup>开展了 23、25、38 GHz 频段的微波链路反演降水实验,探讨了频段、分辨率等对降水反演效果的影响。

### 1.2 双(多)频/双偏振微波链路测量降水

当一条路径上存在两个不同频段或偏振方式的微波链路时,可以利用差分方式处理两条链路衰减,进而通过建立差分衰减与路径平均雨强的关系反演得到雨强<sup>[20]</sup>,具体公式为:

$$R = k(A_1 - A_2)^\alpha \quad (2)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$  为两条链路的微波雨衰, dB/km; 系数  $k$  和  $\alpha$  为幂律系数,一般通过实验和统计资料拟合得到。

Jameson<sup>[21]</sup>研究发现, 38 GHz 与 25 GHz 的差分衰减对雨滴谱分布、雨滴形状、雨滴温度的变化都不敏感, 9、25、38 GHz 三频差分衰减适用于降雨测量。Ruf 等<sup>[22]</sup>提出了利用 35 GHz 双偏振微波链路测量降水的方法,不仅可以减少水平偏振和垂直偏振的差分衰减来减小反演效果对仪器因素的敏感度,而且还降低了谱分布和温度变化对反演效果的影响。Rincon 等<sup>[23]</sup>研究了基于 8.35、8.45、25.35、38.025 GHz 的多频双偏振微波链路反演降水的方法,利用不同频率的衰减和偏振特性及其组合的差分衰减和差分相移来反演雨强。Hardaker 等<sup>[24]</sup>研究发现, 19.77 GHz 与 12.502 GHz 频段的差分衰减受雨滴形状和雨滴谱分布的影响较小,且与降雨强度呈现较好的线性关系。Holt 等<sup>[25]</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, 13.9 GHz/22.9 GHz 和 13.5 GHz/24.1 GHz 这两对频段反演结果具有较小的不确定度。基于上述结论, D' Amico<sup>[26]</sup>提出了利用 13.5 GHz 和 24.1 GHz 两个频率的差分衰减来提高雨强反演精度的方法,并研究了非降水因素对反演的影响及其消除方法。Upton 等<sup>[27]</sup>分别在英国西北的博尔顿地区使用 17.6 GHz/12.8 GHz、22.9 GHz/13.9 GHz 的两组双频微波链路实现了降雨观测,对降水反演效果进行了理论分析,与雨量计进行对比,其观测误差在 15%以内。

微波雨衰理论表明,雨致衰减与雨滴谱存在如下关系<sup>[8]</sup>:

$$A = 0.434 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} C_{\text{ext}}(D, f) \cdot N(D) dD \quad (3)$$

式中:  $D$  为雨滴等体积直径, mm;  $C_{\text{ext}}$  为雨滴消

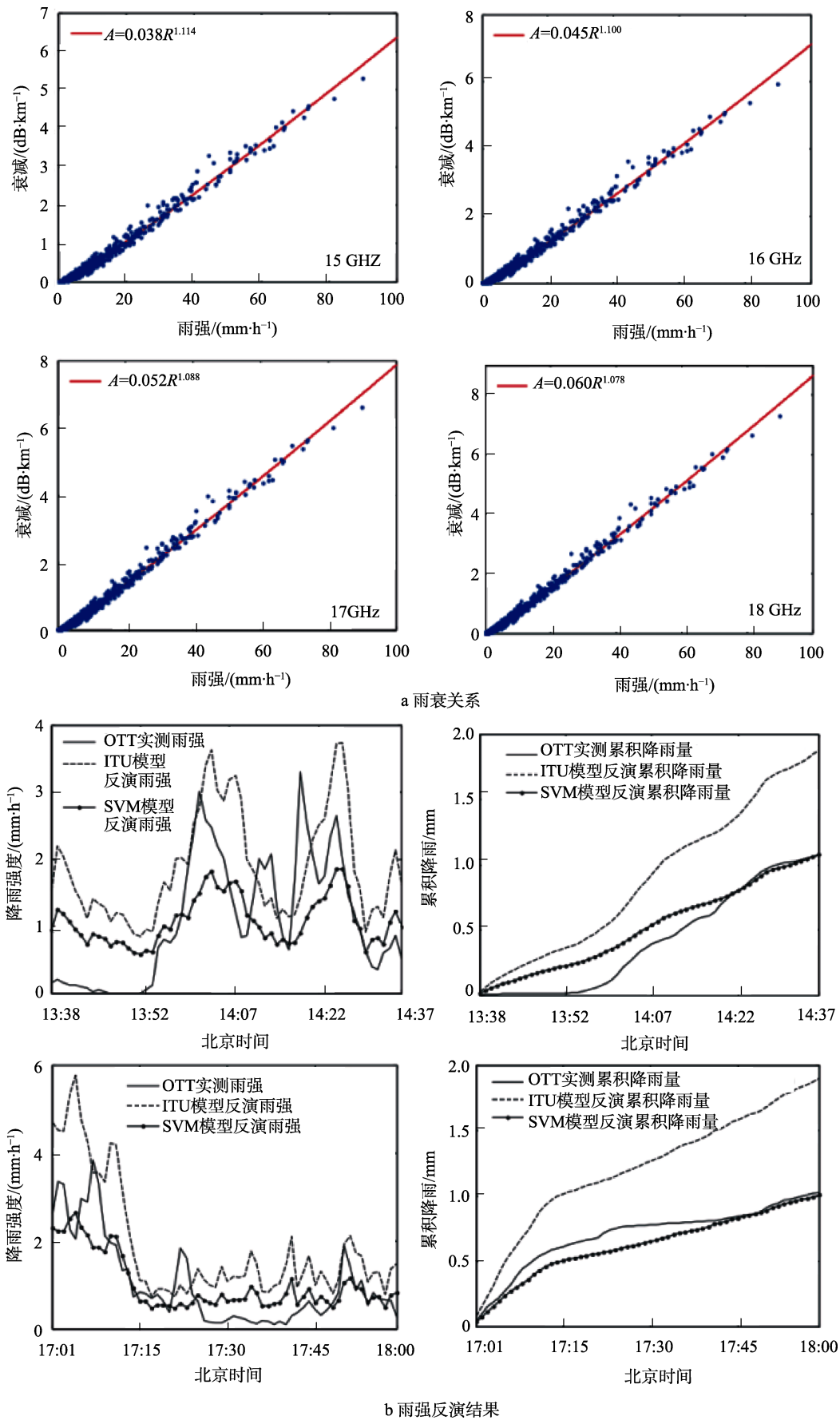


图 1 基于南京地区实测雨滴谱的雨衰关系及雨强反演结果

光截面,  $\text{mm}^2$ , 与粒子尺度  $D$ 、微波频率  $f$  和偏振状态有关;  $N(D)$  为雨滴谱分布,  $\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

$N(D)$  一般服从 Gamma 分布:

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (4)$$

式中:  $N_0$  和  $\mu$  分别为浓度和尺度参数;  $\lambda$  为形状因子。

当双频或 (和) 双偏振微波链路获取两个或两个以上衰减量时, 就可以反演出雨滴谱分布中的三个未知量。

基于上述原理, Berne 等<sup>[28]</sup>利用 26 GHz 的水平/垂直偏振微波通信链路, 在雨滴谱服从 Gamma 谱分布的假设下, 研究了计算沿链路的平均雨滴谱分布参

数的方法, 实验结果与 C 波段的天气雷达相比具有良好的一致性, 但在小雨的情况下, 该方法的计算结果存在较大的不确定性。Rincon 等<sup>[29]</sup>在研究雨滴谱分布、倾斜角和摆动等因素对 35 GHz 微波雨衰影响的基础上, 提出了根据双偏振参数反演谱分布参数  $\mu$  的方法。国内方面, 宋堃<sup>[30]</sup>提出了基于双频双偏振链路的 Gamma 谱分布三参数反演算法, 基于微波雨衰理论、非球形散射理论和最优化算法设计了雨滴谱反演流程, 如图 2a 所示。数值仿真结果如图 2b 所示, Gamma 谱分布函数中  $\lambda$ 、 $\mu$  和  $N_0$  的反演结果与初始值的相关性均在 0.76 以上, 其中雨滴数密度  $N_0$  反演结果的相关性达到 0.99, 从而验证了该方法的可行性和准确性。

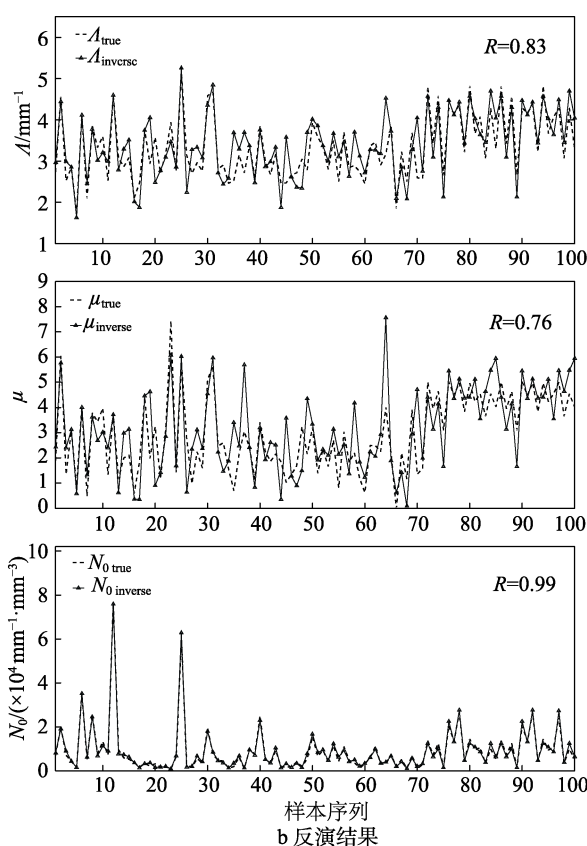
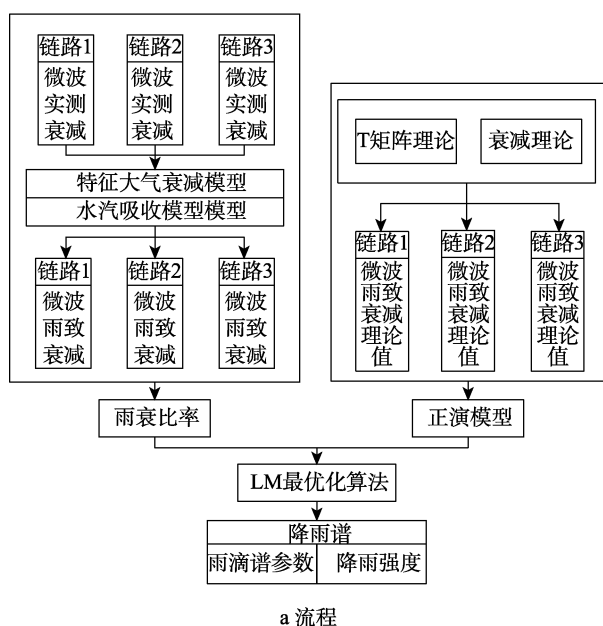


图 2 双频双偏振链路联合反演雨滴谱的流程及反演结果

### 1.3 基于微波链路网的降雨场反演

当区域内存在多个交叉的微波链路构成微波链路网时, 可以利用微波衰减场反演得到区域雨强分布。2008 年, Messer<sup>[31]</sup>在 ITU-R 微波雨衰模型的基础上提出了利用反距离加权法反演区域降雨强度的方法, 并在以色列利用 22 条微波链路开展了测量实验。在此基础上, Goldshtein<sup>[32]</sup>提出了微波雨衰信号的去噪方法, 按照降雨强度的大小对噪声进行量化处理, 并对反距离加权法进行了修正。2011 年, Overeem 等<sup>[33]</sup>提出了基于插值算法的降雨场反演方法, 并开展了约 2400 条微波链路组网实时反演荷兰全境雨强分

布的实验。2013 年, Zohidov<sup>[34]</sup>采用层析和迭代算法, 利用 256 条频率为 18 GHz/23 GHz/38 GHz 的链路网实现 1368  $\text{km}^2$  范围的区域雨强反演, 相关性达到 0.87。自 2015 年起, 瑞典气象局与爱立信通信公司合作, 利用商用微波链路的信号反演 1 min 分辨率的区域雨强, 与地面雨量计的相关性达到 0.8。国内方面, 姜世泰等<sup>[13]</sup>从层析原理出发, 提出了基于正则化算法和联合迭代法的区域降雨强度反演方法, 并通过数值仿真实验进行验证, 两种方法的区域降雨强度反演值与真值的相关性达到了 0.96, 验证了方法的准确性。

## 2 微波链路降水测量技术的应用

### 2.1 基于微波链路的天气雷达衰减订正

由于微波链路在近地面传播,覆盖区域较大,与天气雷达低仰角下扫描的对应性较好,因此天气雷达与微波链路之间可实现优势互补。对于短波长雷达,电磁波在雨区的强烈衰减会严重降低雷达回波,导致降水强度低估,因此往往需要进行衰减订正。微波链路可以准确获取特定频段的路径衰减,因此将微波链路应用于天气雷达的实时衰减订正,可以有效提高天气雷达衰减订正的效果,进而提高雷达定量估计降水的精度。

2005 年, Krämer 等<sup>[35]</sup>和 Rahimi 等<sup>[36]</sup>分别利用 17.5 GHz 和 10.5 GHz 的双频微波链路获取的衰减信

息,采用前向迭代算法和后向迭代算法对 X 波段雷达径向反射率因子进行了衰减订正。2008 年, Krämer 等<sup>[37]</sup>利用双频微波链路对 C 波段雷达进行了衰减订正,除了对沿微波链路路径上的衰减进行订正外,还可以实现其他径向上的基础订正。国内方面,薛杨<sup>[38]</sup>研究了基于前向迭代逐库订正算法的天气雷达衰减订正模型,并在南京地区开展了利用微波链路进行天气雷达衰减订正的个例研究。结果表明,订正后雷达定量估计降水的精度得到有效提高。在此基础上,薛杨提出了基于微波链路网的雷达区域衰减订正算法<sup>[39]</sup>,并通过数值仿真实验检验了算法的有效性,如图 3 所示。张鹏等<sup>[40]</sup>针对微波链路仅能够在沿径向上进行衰减订正的问题,提出了基于任意取向微波链路的雷达衰减订正算法,利用 X 波段雷达进行了衰减订正实验,订正后降雨效果有明显提升。

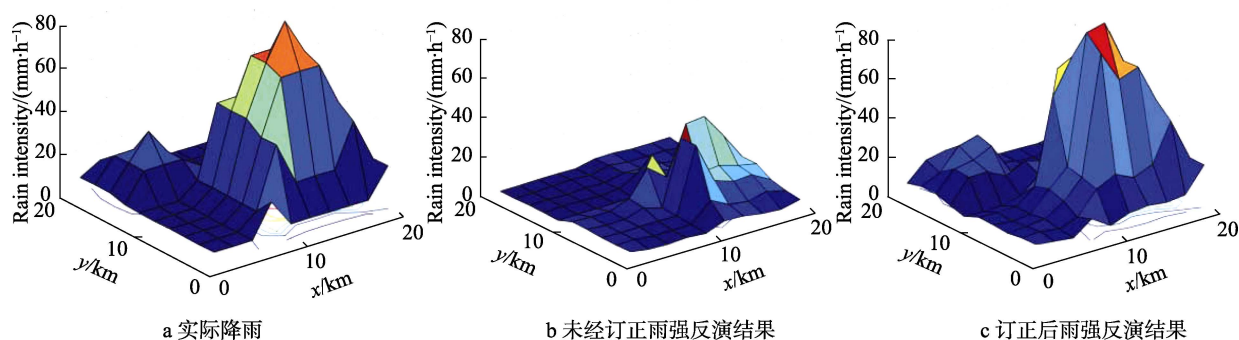


图 3 微波链路网进行雷达区域衰减订正后的雨强反演结果

### 2.2 微波链路联合雨量计、天气雷达重构降雨场

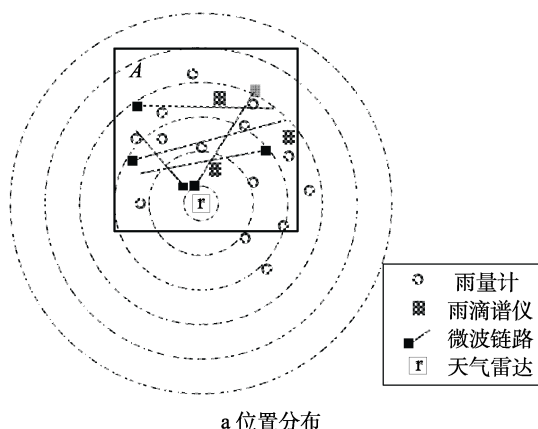
微波链路测雨技术逐渐引起广泛关注,在美洲、欧洲、亚洲和非洲等地已有广泛研究,并开始通入实际应用。基于现有的商用微波链路网,开展大尺度降雨观测是其最直接的应用。2008 年开始, Messer<sup>[31]</sup>、Overeem 等<sup>[33, 41-43]</sup>先后在荷兰、巴西等地利用商业微波链路监测降雨,结果显示,与雷达观测资料相比,微波链路获取的雨强资料更为精细,与雨量计测量结果的相关性更高。Cummings 等<sup>[44]</sup>利用 17.6 GHz 和 22.9 GHz 两条单频微波链路,采用平均校准方法对雷达降雨场进行了订正。2013 年, Bianchi 等<sup>[45]</sup>基于变分法和高斯-牛顿迭代法,将微波链路数据与雨量计数据和雷达数据进行同化,重构得到 Zurich 地区的二维降雨场,同化前后的区域雨强标准差由 1.44 mm/h 提高到 1.11 mm/h。Liberman<sup>[46]</sup>基于最优权重法,将微波链路数据与雨量计数据和雷达数据进行同化,重构得到以色列的二维降雨场,联合重构所得雨强相对偏差在 -6%,优于雷达单独观测值。国内方面,薛杨<sup>[47]</sup>在对微波链路、雨量计与天气雷达观测资料进行匹配的基础上,采用平均订正因子校准法研究了微波

链路-雨量计联合校准雷达估测降雨场的方法,并开展了微波链路联合雨量计、天气雷达重构降雨场实验。结果表明,与雷达原始估测的雨强相比,微波链路-雨量计联合校准后区域各网格雨强均明显增加,误差明显减小,实验结果如图 4 所示。

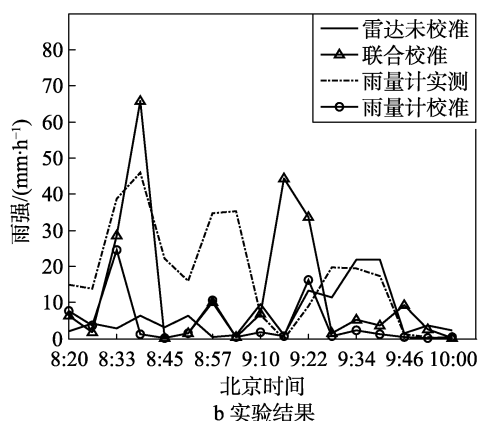
### 2.3 暴雨监测预警

由强降雨导致的山洪、泥石流、城市内涝等自然灾害危及人民生命财产安全,因此及时、准确的暴雨预警机制意义重大。雨量计、天气雷达等常规测雨设备在山地、城市等地形复杂区域无法广泛组网观测,会造成灾害预警不及时而带来重大损失。在这些地区存在广泛分布的微波链路,逐渐有研究开始将微波链路降雨观测技术引入灾害预警中。2012 年, Abrajano 等<sup>[48]</sup>提出利用微波链路建立暴雨监测网络,基于压缩感知原理和链路衰减信息对暴雨雨团位置进行定位,并开展了 26 GHz 微波链路网络监测暴雨的数值仿真。2013 年, David 等<sup>[49]</sup>提出了通过分析雨量计和微波链路得到的区域雨强来预测雨团移动方向的方法,并利用以色列南部沙漠地区 7 条 17~19 GHz 微波链路和雨量计开展暴雨预警实验研究。研究结果表明,与雨量计相比,微波链路测雨结果能够提前至少 40 min 预警暴雨来临。





a 位置分布



b 实验结果

图4 微波链路网络、雨量计与天气雷达等的位置分布及实验结果<sup>[47]</sup>

### 3 结语

微波链路测量降水作为非专业大气探测的典型代表,在空间分辨率、覆盖范围等方面可以成为专业大气探测手段的补充,是公共气象服务的一种有效手段。目前,微波链路降水测量技术尚处于研究阶段,为了推动其发展和成熟,应当从以下几个方面开展研究。

1) 当前,微波链路反演降水的精度还不能和雨量计等专业降水测量手段相比,但可以充分发挥其面测量这一优势,以色列、荷兰等国家的实践已经展示出了微波链路在实际应用中的潜力。下一步应重点研究微波链路与雨量计、天气雷达等专业大气探测手段的联合,进一步提高区域降水的测量精度,满足强降雨、城市内涝、泥石流等相关灾害监测和预警的需求。

2) 现有研究大部分利用 10~40 GHz 频段微波链路,对于 10 GHz 以下的分布范围更广的低频链路利用率较低。其原因在于低频链路雨衰量级较低,易被强噪声背景干扰,导致有效信号提取困难。应重点研究低频微波链路雨衰信号的提取和降水反演方法,进一步满足公共气象服务对实时、准确气象信息的要求。

3) 当前研究主要集中在基于链路衰减信息的降

雨测量,而实际上,水汽、雾、气溶胶等同样对链路有衰减作用,目前已有一些在这方面的研究,但都是处于探索阶段。应重点研究大气多种要素对微波链路传播的吸收、衰减和去极化等效应,在此基础上,深入挖掘微波链路测量潜力,拓展微波链路测量要素。

4) 微波链路涉及到通信、广播、电力、气象等多个行业,从海量微波链路信号中提取气象信息,不仅需要相关的气象理论基础,还需要信号处理、通信工程等交叉学科领域和大数据挖掘、深度学习等新兴手段。应推动多学科交叉、多部门合作,充分发挥微波链路大气探测的效益,提升公共气象服务水平。

### 参考文献:

- [1] 高太长. 降水测量技术现状与展望[J]. 气象水文装备, 2012, 23(6): 1-7.
- [2] 孙学金, 王晓蕾, 李浩, 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 452.
- [3] 梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 等. 偏振微波雷达探测大气研究进展及几个问题的考虑[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 541-548.
- [4] 吕达仁, 王普才, 邱金恒, 等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 552-566.
- [5] ATLAS D, ULBRICH C W. Path- and Area- Integrated Rainfall Measurement by Microwave Attenuation in the 1~3 cm Band[J]. Journal of Applied Meteorology, 1977, 16(11): 1322-1331.
- [6] MESSER H, ZINEVICH A, ALPERT P. Environmental Monitoring by Wireless Communication Networks[J]. Science, 2006, 312(5774): 713.
- [7] LEIJNSE H, UIJLENHOET R, STRICKER J N M. Hydrometeorological Application of a Microwave Link: 2. Precipitation[J]. Water Resources Research, 2007, 43(4): W04417.
- [8] 刘西川, 高太长, 秦健, 等. 降雨对微波传输特性的影响分析[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 2156-2162.
- [9] OLSEN R L, ROGERS D V, HODGE D B. The  $aR^b$  Relation in the Calculation of Rain Attenuation[J]. IEEE Trans Ant Prop, 1978, AP-26: 318-329.
- [10] ITU-R P 838-3-321. 2003, International Telecommunication Union Recommendation[S].
- [11] MINDA H, NAKAMURA K. High Temporal Resolution Path-average Rain Gauge with 50GHz Band Microwave[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(2): 165-179.
- [12] THURAI M, BRINGI V N, SHIMOMAI T. 20 GHz Specific Attenuation Calculations using Drop Size Distributions and Drop Shape Measurements from 2D Video Disdrometer Data in Different Rain Climates[C]// The 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing, Singapore, 2007.
- [13] 姜世泰, 高太长, 刘西川, 等. 基于微波链路的降雨场

- 反演方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(15): 154303.
- [14] 高太长, 宋堃, 刘西川, 等. 基于微波链路的路径雨强反演方法及实验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 174301.
- [15] 宋堃, 高太长, 刘西川, 等. 基于支持向量机的微波链路雨强反演方法[J]. 物理学报, 2015, 64(24): 244301.
- [16] 宋堃, 高太长, 刘西川, 等. 基于非球形雨衰模型的微波链路雨强反演方法[J]. 物理学报, 2017, 66(5): 154301.
- [17] HAN C. Millimeter-wave Propagation Measurements during Rainy Days in Beijing[C]// IEEE EMC/APEMC. Singapore, 2018.
- [18] HAN C, DUAN S, BI Y. Rain Rate Retrieval from Millimeter-wave Propagation Measurements in China[C]// 2nd URSI AT-RASC, 2018.
- [19] 高清泉, 韩璇琮, 肖天贵. 微波通信链路监测降水试验及可行性探究[J]. 成都信息工程大学学报, 2017, 33(2): 197-204.
- [20] RUF C S, AYDIN K, MATHUR S. Rain Rate Estimation from Attenuation Measurements Using a 35 GHz Dual Polarization Microwave Link[C]// International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 1994.
- [21] JAMESON A R. A Comparison of Microwave Techniques for Measuring Rainfall[J]. Journal of Applied Meteorology, 1991, 30(1): 32-54.
- [22] RUF C S, AYDIN K, MATHUR S, et al. 35 GHz Dual-Polarization Propagation Link for Rain-rate Estimation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1996, 13(4): 419-425.
- [23] RINCON R F, BIDWELL S W, JAMESON A R, et al. A Multi-Frequency, Dual-Polarization, Microwave Link For Rainfall Estimation[C]// International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 1996.
- [24] HARDAKER P J, HOLT A R, GODDARD J W F. Comparing Model and Measured Rainfall Rates Obtained from a Combination of Remotely Sensed and Insitu Observations[J]. Radio Science, 1997, 32: 1785-1796.
- [25] HOLT A R, KUZNETSOV G G, RAHIMI A R. Comparison of the Use of Dual-frequency and Single-frequency Attenuation for the Measurement of Path-averaged Rainfall Along a Microwave Link[J]. IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 2003, 150(5): 315.
- [26] D'AMICO M, PINOTTI M, CAPSONI C. The MANTISSA Project: First Results from the Italian Field Experiments[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2003.
- [27] UPTON G J G, HOLT A R, CUMMINGS R J, et al. Microwave Links: The Future for Urban Rainfall Measurement[J]. Atmospheric Research, 2005, 77(1): 300-312.
- [28] BERNE A, SCHLEISS M. Retrieval of the Rain Drop Size Distribution Using Telecommunication Dual-polarization Microwave Links[C]// 34th Conference on Radar Meteorology. 2009.
- [29] RINCON R F, LANG R H. Microwave Link Dual-wavelength Measurements of Path-average Attenuation for the Estimation of Drop Size Distributions and Rainfall[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(4): 760-770.
- [30] 宋堃. 微波链路衰减与偏振相结合的降雨谱反演方法研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2017.
- [31] MESSER H, GOLDSHTEIN O, RAYITSFELD A, et al. Recent Results of Rainfall Mapping from Cellular Network Measurements[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Las Vegas, NV, USA, 2008.
- [32] GOLDSHTEIN O, MESSER H, ZINEVICH A. Rain Rate Estimation Using Measurements from Commercial Telecommunications Links[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2009, 57(4): 1616-1625.
- [33] OVEREEM A, LEIJNSE H, UIJLENHOET R. Country-wide Rainfall Maps from Cellular Communication Networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(8): 2741-2745.
- [34] ZOHIDOV B, ANDRIEU H, SERVIÈRES M, et al. Retrieval of Rainfall Fields in Urban Areas Using Attenuation Measurements from Mobile Phone Networks: A Modeling Feasibility Study[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2016, 3(2): 1-30.
- [35] KRAMERA S, VERWORN H-R, REDDER A. Improvement of X-band Radar Rainfall Estimates Using a Microwave Link[J]. Atmospheric Research, 2005, 77: 278-299.
- [36] RAHIMI A R, HOLT A R, UPTON G J G. Attenuation Calibration of an X-band Weather Radar Using a Microwave Link[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006, 23(3): 395-405.
- [37] KRÄMER S, VERWORN H-R. Improved C-band Radar Data Processing for Real Time Control of Urban Drainage Systems[C]// 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- [38] 薛杨, 刘西川, 高太长, 等. 基于微波链路的雷达回波衰减订正个例分析[J]. 气象科技, 2017, 45(6): 787-794.
- [39] XUE Y, LIU X C, GAO T C, et al. Regional Attenuation Correction of Weather Radar Using a Distributed Microwave-Links Network[J]. Advances in Meteorology, 2017(3):1-8.
- [40] ZHANG P, LIU X, LI Z, et al. Attenuation Correction of Weather Radar Reflectivity with Arbitrary Oriented Microwave Link[J]. Advances in Meteorology, 2017(1):1-17.
- [41] OVEREEM A, LEIJNSE H, UIJLENHOET R. Two and a Half Years of Country-wide Rainfall Maps Using Radio Links from Commercial Cellular Telecommunication Networks[J]. Water Resources Research, 2016, 52(10): 8039-8065.
- [42] OVEREEM A, LEIJNSE H, UIJLENHOET R. Retrieval Algorithm for Rainfall Mapping from Microwave Links in a Cellular Communication Network[J]. Atmospheric

- Measurement Techniques, 2016, 9: 2425-2444.
- [43] GAONA M F R, OVEREEM A, RAUPACH T H, et al. Rainfall Retrieval with Commercial Microwave Links in São Paulo, Brazil[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11: 4465-4476.
- [44] CUMMINGS R J, UPTON G J G, HOLT A R, et al. Using Microwave Links to Adjust the Radar Rainfall Field[J]. Advances in Water Resources, 2009, 32: 1003-1010.
- [45] BIANCHI B, LEEUWEN P J V, HOGAN R J, et al. A Variational Approach to Retrieve Rain Rate by Combining Information from Rain Gauges, Radars, and Microwave Links[J]. Journal of Hyrometeorology, 2013, 14(11): 1897-1909.
- [46] LIBERMAN Y, SAMUELS R, ALPERT P, et al. New Algorithm for Integration between Wireless Microwave Sensor Network and Radar for Improved Rainfall Measurement and Mapping[J]. Atmos Meas Tech, 2014, 7: 3549-3563.
- [47] 薛杨. 基于微波链路的雷达衰减订正及降雨场重构技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2017.
- [48] ABRAJANO G D, OKADA M. Determining Rain Location Through Microwave Mesh Network Signal Attenuation[C]// Tencon 2012 IEEE Region 10 Conference. Philippines, 2012.
- [49] DAVID N, ALPERT P, MESSER H. The Potential of Cellular Network Infrastructures for Sudden Rainfall Monitoring in Dry Climate Regions[J]. Atmospheric Research, 2013, 131: 13-21.