

印敏,高太长,刘西川,等.2015.微波链路测量降水研究综述.气象,41(12):1545-1553.

# 微波链路测量降水研究综述<sup>\*1</sup>

印 敏 高太长 刘西川 姜世泰 宋 堃 孙梯全 梁妙元

解放军理工大学气象海洋学院,南京 211101

**提 要:** 利用微波链路测量降水是降水测量的最新技术,具有作用于近地面大气、时空分辨率高等优势。文章总结了微波链路测量降水方法的发展现状和技术难点,结合微波通信的实际应用,分析了频段的选择依据、雨衰减量的精确测量和正演模型的精确建模需要考虑的因素,指出降水起始时间的准确识别和区域化反演算法是解决该方法实用化问题的关键技术,为利用微波链路测量降水的进一步研究提供了借鉴。

**关键词:** 微波链路, 降水测量, 雨衰模型, 降水反演

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.013

## Research on Microwave Link Measurement of Precipitation

YIN Min GAO Taichang LIU Xichuan JIANG Shitai SONG Kun SUN Tiquan LIANG Miaoyuan

Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

**Abstract:** Precipitation measurement of using microwave link is the latest technology of precipitation measurement. Microwave has direct effect on near surface atmosphere, so it has advantages of high spatial and temporal resolution. This paper summarizes the development status and technical difficulties of the precipitation measurement using the microwave link. Combined with the practical application of microwave communications, it analyzes the basis for frequency band selection, factors to be considered for signal attenuation measurement and detailed rain attenuation forward modeling. It also points out that accurate recognition of precipitation initiation time and area rainfall retrieval algorithms are two key technologies for its practical application. In a word, this paper provides a reference for further studies on the precipitation measurement method by microwave link.

**Key words:** microwave link, precipitation measurement, rain attenuation model, rainfall retrieval

## 引 言

降水现象反映了地球大气的动力、热力、水汽等多种错综复杂的物理过程,是对流层中最为活跃的天气现象之一(吕达仁等,2003)。降水的时空分布异常是引发自然灾害,影响自然环境、社会生活、农业生产、交通运输以及军事活动的重要因素(梁海河等,2005)。对降水现象的准确测量是气象、水文、环境等多个领域的研究重点,《国家综合防灾减灾规划

(2011—2015年)》中明确要求要加强气象、水文等自然灾害的监测能力建设。气象观测业务中单点降水强度和累积降水量已经由雨量筒、翻斗雨量计等仪器实现自动测量(高太长,2012);多普勒天气雷达已经成为获取区域降水分布、监测大范围天气的主要手段(傅云飞等,2011;陈洪滨等,2012),但是准确测量区域降水一直是降水测量的难点,尚未得到有效解决(徐晶等,2007)。其主要原因是降水本身是不断运动和变化的,存在复杂的空间和时间分布特征,传统的微波扫描方法测量的往往是云体或部分

\* 国家自然科学基金专项基金项目(41405024、41475020和41327003)和江苏省自然科学基金(BK20130070)共同资助  
2014年4月18日收稿; 2015年8月18日收修定稿  
第一作者:印敏,主要研究方向为通信技术在气象水文信息获取中的应用. Email:10290702@qq.com

降水体,回波与降落到地表的真实降水之间存在较大差别,从而造成准确测量较为困难。

近年来,随着无线电通讯和微波技术的发展,出现了一种利用微波通讯信号传播过程中的衰减、极化等信息来测量区域降水的新方法(Messer et al, 2006; Overeem et al, 2013)。微波主要是指频率从300 MHz至300 GHz的电磁波(包括分米波、厘米波、毫米波)(闻映红, 2013)。微波通讯信号在近地层大气中视距传播时会受到大气介质的影响而发生吸收、散射、去极化等效应,其中雨、雪等降水粒子对微波的影响尤为明显(杨瑞科等, 2000; Thurai et al, 2007; 刘西川等, 2010)。目前,这一研究主要在以色列、荷兰等少数国家展开(张称意等, 2006),国内近几年也进行了理论与实验研究(刘西川等, 2010; 2013; 姜世泰等, 2013; 王培章等, 2013)。

本文针对微波链路测量降水这一新的研究领域,首先介绍了微波链路测量降水的基本原理和国内外研究现状,然后分析了高频微波链路测量降水方法中的几个关键技术,分别是频率选择、雨衰信号测量、降水起始时间判别、正演模型、区域降水反演等。其中,频段选择的依据是具有A-R线性关系;雨衰信号测量和正演模型的精确建模是影响反演精度的关键,需要尽可能排除水汽衰减、闪烁效应、沾湿衰减、不同大气温湿度等因素的误差因素,尽可能建立含有地形、地物、雨滴谱特性等环境条件参数的精细化雨衰正演模型;另外,降水起始时间的准确识别和区域化反演算法是微波链路测量降水方法实用化的基础。

## 1 微波链路测量降水的主要原理

降雨对微波传输的影响可用雨衰模型描述。通信领域的研究人员为了实现对卫星通信系统和微波通信系统的优化设计,尽量减少发射功率,通过大量的雨衰雨强同步观测实验和理论完善工作,先后提出了Crane Global模型、Assis. Einloft Improved

模型、SAM模型、DAH模型、ITU-R模型等多个雨衰模型,分别适用于不同频段、不同体制的地地链路和地空链路。

目前,主要用ITU雨衰模型(ITU-R, 1994; 1996; 1999; 2005)进行微波链路降水测量。经测试表明,该模型对于最高不超过55 GHz频率的衰减预测有足够的精确度,降雨与衰减之间的关系如式(1)所示:

$$\gamma = k \cdot R^a \quad (1)$$

式中, $\gamma$ 为每单位距离造成的雨衰量(单位: $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ); $R$ 为降雨强度(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ); $k$ 、 $a$ 为指数律参数,其取值与频率、雨滴大小分布、雨滴温度和极化等因素有关。

对于不同的电磁波发射极化角度和路径斜角,利用相应的水平极化系数和垂直极化系数,可以通过下列等式计算出 $k$ 和 $\alpha$ :

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

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k \quad (3)$$

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

降雨对微波造成的雨衰量,其中系数 $k$ 和 $\alpha$ 的值,作为频率范围为1~1000 GHz的频率 $f$ (GHz)的函数,由下列等式确定:

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

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

式中, $f$ 为频率(单位:GHz), $k$ 为 $k_H$ 或 $k_V$ , $\alpha$ 为 $\alpha_H$ 或 $\alpha_V$ 。水平极化的系数 $k_H$ 的常数在表1中给出,而垂直极化的系数 $k_V$ 的常数在表2中给出。表3给出了水平极化的系数 $\alpha_H$ 的常数,而表4给出了垂直极化的系数 $\alpha_V$ 的常数。

表1  $k_H$  系数  
Table 1 Coefficient  $k_H$

| $j$ | $a_j$    | $b_j$    | $c_j$   | $m_k$    | $c_k$   |
|-----|----------|----------|---------|----------|---------|
| 1   | -5.33980 | -0.10008 | 1.13098 |          |         |
| 2   | -0.35351 | 1.26970  | 0.45400 |          |         |
| 3   | -0.23789 | 0.86036  | 0.15354 | -0.18961 | 0.71147 |
| 4   | -0.94158 | 0.64552  | 0.16817 |          |         |

表 2  $k_V$  系数  
Table 2 Coefficient  $k_V$

| $j$ | $a_j$    | $b_j$    | $c_j$   | $m_k$    | $c_k$   |
|-----|----------|----------|---------|----------|---------|
| 1   | -3.80595 | 0.56934  | 0.81061 |          |         |
| 2   | -3.44965 | -0.22911 | 0.51059 | -0.16398 | 0.63297 |
| 3   | -0.39902 | 0.73042  | 0.11899 |          |         |
| 4   | 0.50167  | 1.07319  | 0.27195 |          |         |

表 3  $\alpha_H$  系数  
Table 3 Coefficient  $\alpha_H$

| $j$ | $a_j$    | $b_j$    | $c_j$    | $m_a$   | $c_a$    |
|-----|----------|----------|----------|---------|----------|
| 1   | -0.14318 | 1.82442  | -0.55187 |         |          |
| 2   | 0.29591  | 0.77564  | 0.19822  |         |          |
| 3   | 0.32177  | 0.63773  | 0.13164  | 0.67849 | -1.95537 |
| 4   | -5.37610 | -0.96230 | 1.47828  |         |          |
| 5   | 16.1721  | -3.29980 | 3.43990  |         |          |

表 4  $\alpha_V$  系数  
Table 4 Coefficient  $\alpha_V$

| $j$ | $a_j$    | $b_j$    | $c_j$    | $m_a$     | $c_a$   |
|-----|----------|----------|----------|-----------|---------|
| 1   | -0.07771 | 2.33840  | -0.76284 |           |         |
| 2   | 0.56727  | 0.95545  | 0.54039  |           |         |
| 3   | -0.20238 | 1.14520  | 0.26809  | -0.053739 | 0.83433 |
| 4   | -48.2991 | 0.791669 | 0.116226 |           |         |
| 5   | 48.5833  | 0.791459 | 0.116479 |           |         |

在已测得雨衰量并已知通信频率和通信距离的情况下,根据式(1)可解方程得到降雨强度。降雨强度的计算精度与雨衰模型的精度、实际雨滴大小分布、实际温湿度等环境条件相关。

利用微波链路测量降水,微波链路作用于近地面大气,物理基础清晰,并且微波通信设施分布广泛,利用这些微波链路能显著提高降水资料的时空分辨率,具有独特的优势。发展微波链路测量降水新技术,对于提高区域降水测量水平,全面提升天气监测能力具有重要的促进作用。

## 2 微波链路测量降水的研究现状及分析

目前,这一研究主要在以色列、荷兰等少数国家展开(张称意等,2006)。国内方面,2010年解放军理工大学开始进行微波链路测量降水的研究(刘西川等,2010;2013;姜世泰等,2013;王培章等,2013)。微波链路测量降水的研究内容包括平均路径降水反演、区域降水反演、降水类型识别与其他气象要素监测、商用网络试验等,涉及的关键技术包括频率的选择、降水所致信号衰减的测量、降水起始时间判别、

正演模型的精细建模、二维降雨场反演算法等。

### 2.1 主要研究内容及进展

#### 2.1.1 平均路径降水反演

微波链路受降水粒子直接作用产生雨衰量,因此,路径降水的准确反演对于路径所在区域的降水反演估计有关键意义。此外,由于链路雨衰量变化可以直接反映链路上有无雨区覆盖,密集的微波链路将对雨区分布及雨区移动趋势更敏感。对于平均路径的降水反演,主要采用单频链路和双频/多频链路两种方法。

Rincon 等(1999;2001;2002)利用 25 GHz/38 GHz 的双频链路测量路径平均雨强、谱分布和累计降雨量。Holt 等(2003)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。Minda 等(2005)建立了用于测量路径平均降雨的 50 GHz 频段微波试验链路,通过解决温度修正、水汽修正和湿天线修正等问题,提高降雨强度测量的精度。Leijnse 等(2007a)研究了 27 GHz 微波链路

用于路径平均降水测量的合适性。

双频链路测量降水的基本思路是尽量消除式(1)所示平均路径雨强与链路衰减之间的非线性关系不利于降水估计的问题。对于单一频段  $f$ , 雨衰量  $\gamma$  与降雨强度  $R$  呈幂律关系, 参数  $k$  和  $\alpha$  的取值与频率、雨滴大小分布、雨滴温度、极化等因素有关。对于不同的降雨场景, 雨滴模型、雨滴温度等要素不同也未知, 直接由雨衰量和式(1)反演降雨强度, 将因为  $k$  和  $\alpha$  的不准确造成误差。但是, 两条或多条单频链路上的衰减差值与平均路径雨强的关系近似为线性关系。

利用双频/多频链路测量降水的基本原理就是在相同的发射端和相同的接收端同时架设两条或多条使用不同频段的平行微波链路, 覆盖同一降水区域。如两条链路的发射频段分别为  $f_1$  和  $f_2$ , 雨衰量分别为  $\gamma_{f_1}$  和  $\gamma_{f_2}$ , 则在同一降水区域, 降雨强度为  $R$  时, 有如下关系:

$$\gamma_{f_1} - \gamma_{f_2} = cR \quad (6)$$

式中  $c$  为一常数。图 1 所示为 12.8 GHz/17.6 GHz 双频链路在不同雨滴温度、雨滴形状、雨滴谱分布参数组合下的曲线。两条链路上的衰减差值与平均路径雨强的关系近似为线性关系, 可以用通过原点的直线表示。这条关系曲线的斜率不受雨滴尺寸分布、雨滴形状、雨滴温度的影响, 可以消除单频链路测量降水时, 雨滴模型等未知因素造成的误差影响。

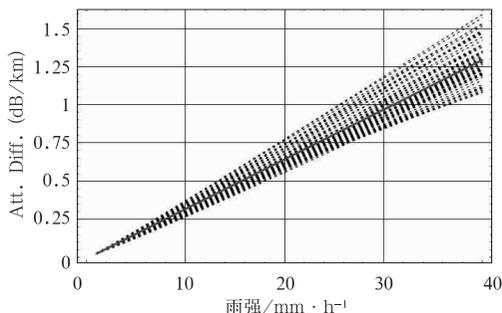


图 1 双频链路衰减差值与平均路径雨强的关系

Fig. 1 Dependence of dual-frequency microwave links attenuation difference on path-averaged rain rate

总体来讲, 选择特定频率的双频链路可以较好地解决非降水因素的消除问题, 但是使用的频段不同, 式(2)中的系数也不同, 目前尚没有专门的研究

结果揭示出所使用频段与该系数的规律关系。因此, 在利用已有微波通信系统的现实条件下, 依据其通信频段选择合适的单频链路更容易实现, 而针对双频链路方法的假设条件, 则需要通过实验尝试较为苛刻地选择频率, 选择出完全符合条件的双频链路有较大困难。

### 2.1.2 区域降水反演

区域降水信息对于防灾减灾、农业水利、作战保障等行业至关重要。利用多条微波链路, 可以实现区域降水的反演估计。图 2 为以色列海法和特拉维夫地区的微波通信网络拓扑结构以及降雨场的反演结果(高太长等, 2013)。

Giuli 等(1999)首次提出了层析的方法, 利用微波衰减测量值重建降雨场空间分布。层析的方法要求微波链路是预先定义好的正方形网格拓扑, 选定的频段具有线性的  $A-R$  (雨衰量-降雨强度) 关系。此后, 人们利用双频链路, 并结合雨量筒和天气雷达, 获得了降水的空间分布(Holt et al, 2000; Rahimi et al, 2003; 2006; Grum et al, 2005; Goldshtein et al, 2009)。

由于实际微波链路不可能符合理想正方形的拓扑假设, Zinevich 等(2008; 2009)针对商业微波网络的结构不规则、频率和极化不一致等特点, 建立了非线性层析模型, 提出了基于卡尔曼滤波的降水场动态重建技术。Goldshtein 等(2009)提出了适用于较为稀疏的商业微波通讯网络覆盖区域的降雨场重建技术。Overeem 等(2011)进行了利用单频商业微波网络反演城市地区降雨场的试验; 基于此 Bianchi 等(2011)提出了利用微波链路网络测量的降雨分布来检测故障雨量计的方案。Overeem 等(2013)首次进行了利用超过 2400 条链路的多频段蜂窝无线网络实时监测降雨的试验, 覆盖荷兰全境。

区域降水的反演是微波链路测量降水的重要内容, 不规则拓扑结构下的反演模型及算法仍是研究热点及难点之一。

### 2.1.3 降水类型识别与其他气象要素监测

微波链路对降雨、降雪的衰减影响不同, 气体吸收、雾、地理环境等因素也可能造成信号衰减, 与雨衰的表现形式相同。因此, 仅从信号衰减值正确区分降水及降水类型是个难点, 但这是推广应用微波链路测量降水方法的必要基础。在此基础上, 利用微波链路实现对雾、温湿度等其他气象要素的监测是潜在的应用方向。

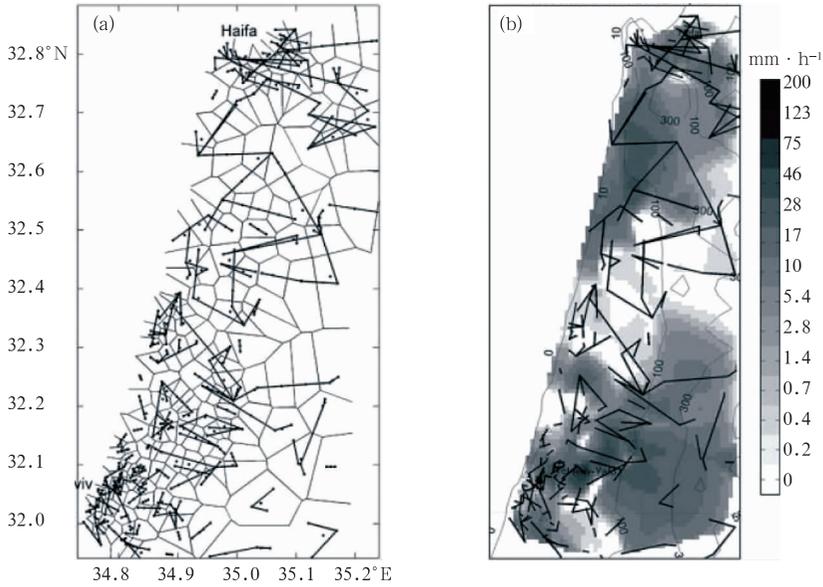


图 2 微波链路拓扑结构及二维降雨场反演结果

Fig. 2 Microwave links topology and reconstruction result of original rainfall field

目前,主要利用双频/多频链路的差分特性来区分不同类别的降水。Upton 等(2007)分别采用 12.8 GHz/17.6 GHz 和 10.5 GHz/17.5 GHz 两组双频微波链路对降水反演效果进行了理论分析和实测对比,提出可以根据两个频率衰减得到的降水的相关关系区分雨和雪。Ricon 等(1996)研究了基于 8.35、8.45、25.35 和 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、偏振特性,及组合的差分衰减、差分相移来计算雨强和含水量。

Cherkassky 等(2012)提出利用观测衰减量的幅度、周期、斜率等动态特性来区分降雨和雨夹雪,如图 3 所示。衰减的动态特性与导致衰减的因素密切相关,具有显著特征,是值得深入研究的方向之一。

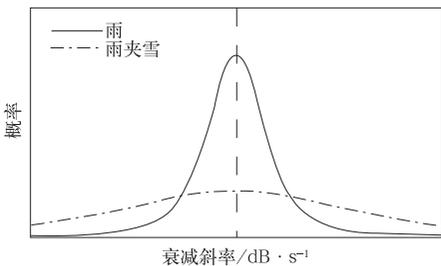


图 3 利用衰减的动态特性区分降雨和雨夹雪

Fig. 3 Precipitation classification by fading slope

在其他气象要素的监测方面,只进行了初步的探索。David 等(2009)提出用无线网络监测水

汽蒸发的想法,2012 年提出了用蜂窝网络进行雾的监测。

### 2.1.4 商用网络试验

利用微波链路测量降水的独特优势在于,可以充分利用广泛、密集分布的已有无线通信设施及微波链路,获得更高时空分辨率的降水分布。利用商用网络测量降水需要了解商用网络的工作频率、工作体制、覆盖区域等特点。在已有条件下,选择合适的单频或双频微波链路,提取工作参数,进行降水反演试验。还需要分析商用网络测量降水的误差因素及修正误差的方法。

2003 年以来, Krämer 等(2003)、Upton 等(2005)相继指出了利用单频链路进行城市降雨测量的发展潜力;Messer 等(2006)探讨了利用商业无线微波通讯网络建立降水监测网络的可行性;Leijnse (2007)和 Leijuse 等(2007a;2007b;2007c)建立了两条 38 GHz 的微波链路试验网络,验证了利用商用通讯微波链路测量降雨分布的可行性;Zinevich 等(2008)、Goldshtein 等(2009)提出了利用商用微波网络的接收信号电平,层析重建空间雨强分布的方法;Overeem 等(2011)利用单频商业微波网络,进行了反演城市地区降雨场的试验,基于此实验,Bianchi 等(2011)提出了利用微波链路网络测量的降雨分布来检测故障雨量计的方案;Overeem 等(2013)首次进行了利用超过 2400 条链路的多频段蜂窝无

线网络实时监测降雨的试验,覆盖荷兰全境。

目前这些研究均处于试验阶段,尚未进入实际业务化的成熟应用,主要原因是大部分商用微波设备的最小电平分辨率和信号采集时间分辨率较大,分别是 1 dB 和 15 min 一次,并且不能更改,致使测量误差较大。

## 2.2 关键技术及问题分析

### 2.2.1 频率的选择

目前,研究人员主要选择高频段链路进行试验研究,使用的频段包括 50 GHz (Minda et al, 2005) 和 27 GHz (Leijnse et al, 2007) 单频链路; 12.8 GHz/17.6 GHz 和 10.5 GHz/17.5 GHz 的双频链路 (Upton et al, 2007); 8.35 GHz/8.45 GHz/25.35 GHz/38.025 GHz 的多频链路 (Rincon et al, 1996)。

由于特性差异,不同频率的微波具有不同的降雨衰减系数(宋铮,2003),如图 4 所示。在相同降雨强度时,降雨衰减系数与微波频率呈现递增关系,即微波频率越高,降雨衰减越明显。高频段链路的雨衰减测量结果变化显著,易于测量;反之,频率过高也易因天气原因导致信号中断,这种脆弱性往往限制此类通信系统的推广应用,也致使可测量的最大降雨率范围减小。因此,为了充分利用更广泛的微波通信网络,不能一味追求频率越高越好,研究中低频微波链路测量降水的理论与技术对于大暴雨等强

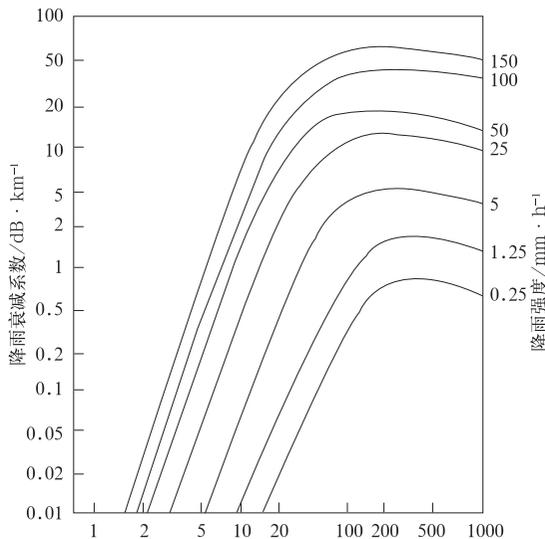


图 4 降雨衰减系数与频率的关系

Fig. 4 Relationship between specific precipitation attenuation (dB/km) and frequency

对流天气的监测也很有意义。另外,Leijnse 等 (2007a)指出,具有式(1)中 A-R 线性关系的频段最有利于平均路径雨强的估计,这也是频率选择的依据之一。

### 2.2.2 雨衰减量的测量

根据微波链路测量降水的基本原理,降雨强度的计算依赖于雨衰模型和雨衰减量,因此,雨衰减量的精确测量是影响反演精度的关键。然而,实际导致信号衰减的因素多种多样。天线暴露在室外,存在沾湿天线衰减 (Atlas et al, 1974; Minda et al, 2005),水汽衰减和闪烁效应也会导致晴空衰减的不确定性 (Holt et al, 2003; Rahimi et al, 2006; David et al, 2009)。目前,对于高频链路雨衰减量的确定,主要基于降雨初期和降雨时平均接收电平的差值。由于大气的温度、湿度不同,暴露在外天线引起的损耗也不同,导致雨衰减量的计算误差。如何有效排除这些误差十分关键。目前,水汽衰减、闪烁效应、沾湿衰减的排除主要采用经验法和双频/多频链路差分法。经验法通过实验测得水汽衰减、沾湿误差等数据,用于雨衰减的补偿校正。双频/多频链路差分法利用同一链路下不同频率衰减的相关性,通过差分方法剔除相同因素的影响。

Jameson (1991)发现,25 GHz/38 GHz 频段下 A-R 的线性度都比较好,两者的衰减差异对雨滴谱分布、雨滴形状、雨滴温度的变化都不敏感。Rincon 等 (1999)利用 25 GHz/38 GHz 的双频微波链路来测量路径平均雨强、谱分布和累计降雨量。Holt 等 (2003)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。

但正如前所述,双频/多频链路的特定使用要求难以满足,探索其他精确测量雨衰减量的方法仍十分必要。

### 2.2.3 降水起始时间判别

在反演降雨时,若将非降雨时段的衰减当作降雨时段的衰减会导致过高估计降雨强度,因此正确区分降雨时段与非降雨时段是提高降雨反演精度的必要基础。

Rahimi 等 (2003)利用 12.8 GHz/17.6 GHz 的双频微波链路,提出了适用于长期降雨观测的基于回归拟合的非降水因素修正方法和适用于短期降雨

观测的基于统计阈值的降雨起止时间判别修正方法。Upton 等(2005)分别用 13.9 和 22.9 GHz 的微波衰减来估计降雨强度,利用两个频率对应的降雨强度之比来判别雨的起止时间,并与雨量筒对比,证明了该算法的有效性。Kaufman(2010)分别采用移动窗口算法、基于随机森林的统计分类算法、基于高斯因子图的识别算法等设计了降水起止时间判别算法,研究表明制约判别准确率的最重要因素是微波链路的量化误差和衰减测量的时间分辨率。Rayitsfeld 等(2012)采用隐性马尔科夫模型,在初始参数估计时使用波氏重估(Baum-Welch Re-estimation)算法,对降水起止时间进行了判别,解决了单频链路情况下降雨起止时间的判别问题。

但是,多因素影响、环境动态变化条件下,降水起始时间的准确判别仍然是个难题,运用衰减的动态特性是可以尝试的解决思路。

#### 2.2.4 正演模型的精细建模

降雨测量正演模型即雨衰模型,是反演降雨的基础,其精确性直接影响反演精度。虽然已经提出了 Crane Global 模型、Assis. Einloft Improved 模型、SAM 模型、DAH 模型、ITU 模型等多个雨衰模型,但是这些模型大多基于降雨率概率分布的长期统计特性,仅适用于一般类型降水时卫星通讯和地面微波通讯雨衰电平的估计,在复杂类型降水条件下的应用效果变差(刘西川等,2013)。另外,这些模型是在地地、地空视距链路下获得的,仅考虑降水对直射传播电波的影响,而没有考虑降水对反射、绕射、散射电波的综合影响,不适用于仅有反射、绕射、散射电波的非视距场合。建立含有地形、地物、雨滴谱特性等环境条件参数的精细化雨衰正演模型,有助于提高反演计算精度。当然,这难度很大,需要电磁学的大量理论计算和试验拟合研究,这方面研究国内外均是空白。

#### 2.2.5 区域降雨场反演算法

区域降雨场反演是指在平均路径降雨反演的基础上,获得二维区域降雨分布的理论与方法。目前区域降雨场的反演主要有距离反比权重插值和层析两种方法。距离反比权重插值法适用于链路相对稀疏的微波链路网络覆盖区域,但是分辨率较低,反演精度较差。层析方法可以得到空间分辨率更高和更为准确的降雨场分布,但是对于没有链路穿的网格,反演效果较差。

层析方法的假设前提是将微波链路网络覆盖区

域划分成规则的正方形网格,而商用微波链路的拓扑结构不规则且无法改变,链路密度也分布不均。因此,研究不规则拓扑结构下的自适应反演模型及算法是将微波链路测量降水方法推向实用化的重要内容之一。

## 3 结 论

利用微波链路信息反演降水是降水测量领域的最新技术,具有作用于近地面大气、时空分辨率高、现有基础网络设施覆盖范围广等优势,该方法可以作为传统降水测量手段的有效补充,具有广阔的发展前景(高太长等,2013)。本文总结了微波链路测量降水方法的发展现状,分析了存在的问题,结合微波通信的实际应用,指出频段选择应尽量具有 A-R 线性关系,雨衰减量的测量应尽可能排除水汽衰减、闪烁效应、沾湿衰减、不同大气温湿度等因素的误差因素,正演模型的精确建模应尽可能建立含有地形、地物、雨滴谱特性等环境条件参数。另外,总结了降水起始时间准确识别和区域化反演算法的已有方法,为利用微波链路测量降水的进一步研究提供了借鉴。

## 参考文献

- 陈洪滨,李兆明,段树,等. 2012. 天气雷达网络的进展. 遥感技术与应用, 27(4):487-495.
- 傅云飞,刘鹏,林锦冰,等. 2011. 星载测雨雷达探测的中国南部雨季对流性暴雨频次分析. 暴雨灾害, 30(1):1-5.
- 高太长. 2012. 降水测量技术现状与展望. 气象水文装备, 23(6):1-7.
- 高太长,姜世泰,刘西川. 2013. 微波链路测量降水新方法及相关技术分析. 气象水文装备, 24(3):1-6.
- 姜世泰,高太长,刘西川,等. 2013. 基于微波链路的降雨场反演方法研究. 物理学报, 62(15):154-303.
- 梁海河,徐宝祥,刘黎平,等. 2005. 偏振微波雷达探测大气研究进展及几个问题的考虑. 地球科学进展, 20(5):541-548.
- 刘西川,高太长,秦健,等. 2010. 降雨对微波传输特性的影响分析. 物理学报, 59(3):2156-2162.
- 刘西川,刘磊,高太长,等. 2013. 不同类型降水对毫米波传播特性的影响研究. 红外与毫米波学报, 32(4):379-384.
- 吕达仁,王晋才,邱金恒,等. 2003. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 27(4):552-566.
- 宋铮. 2003. 天线与电波传播. 西安:西安电子科技大学出版社, 238.
- 王培章,印敏,邵蔚,等. 2013. 降雨对毫米波电波的衰减特性分析与测试. 2013 年全国天线论文集, 1045-1049.
- 闻映红. 2013. 电波传播理论. 北京:机械工业出版社.
- 徐晶,姚学祥. 2007. 流域面雨量估算技术综述. 气象, 33(7):15-21.

- 杨瑞科, 黄际英, 吕小红. 2000. 毫米波雨衰减与降雨去极化的辨识研究. *西安电子科技大学学报*, 27(4):487-490.
- 张称意, 陈德亮, 董文杰. 2006. 用手机网络信号监测天气状况. *生态学报*, 26(9):3156-3157.
- Atlas D, Ulbrich C. 1974. The physical basis for attenuation-rainfall relationships and the measurements of rainfall parameters by combined attenuation and radar methods. *Rech Atmos*, 8:275-298.
- Bianchi B, Rieckermann J, Berne A. 2011. Detection of faulty rain gauges using telecommunication microwave links, in International Conference on Urban Drainage, 12nd, Porto Alegre, Brazil, 11-16.
- Dani Cherkassky, Jonatan Ostronitzky, Hagit Messer. 2012. The use of linear feature projection for precipitation classification using measurements from commercial microwave links. *LVA/ICA'12 Proceedings of the 10th international conference on Latent Variable Analysis and Signal Separation*, 511-519.
- David N, Alpert P, Messer H. 2009. Technical Note: Novel method for water vapour monitoring using wireless communication networks measurements. *Atmos Chem Phys*, 9:2413-2418.
- David N, Alpert P, Messer H. 2012. Novel method for fog monitoring using cellular networks infrastructures. *Atmos Measur Tech Discuss*, 5:5725-5752.
- Giuli D, Facheris L, Tanelli S. 1999. Microwave tomographic inversion technique based on stochastic approach for rainfall fields monitoring. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 37(5):2536-2554.
- Goldshstein O, Messer H, Zinevich A. 2009. Rain rate estimation using measurements from commercial telecommunications links. *IEEE Trans Signal Process*, 57(4):1616-1625.
- Grum M, Kraemer S, Verworn H, et al. 2005. Combined use of point rain gauges, radar, microwave link and level measurements in urban hydrological modeling. *Atmos Res*, 77(1-4):313-321.
- Holt A R, Kuznetsov G G, Rahimi A R. 2003. Comparison of the use of dual-frequency and single-frequency attenuation for the measurement of path-averaged rainfall along a microwave link. *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, 150(5):315-320. doi:10.1049/ip-map:20030616.
- Holt A, Goddard J, Upton G I, et al. 2000. Measurement of rainfall by dual-wavelength microwave attenuation. *Electron Lett*, 36(25):2099-2101.
- ITU-R. 1994. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. International Telecommunication Union, Geneva, ITU-R P. 838.
- ITU-R. 1996. Propagation data and prediction methods required for the design of earthspace telecommunication systems. Radio wave propagation, Geneva, ITU-R P. 618.
- ITU-R. 1999. Draft revision to Recommendation. ITU-R study group 3 meeting, Geneva, ITU-R P. 618-5.
- ITU-R. 2005. An improved prediction method of rain attenuation for terrestrial light-of sight path. September, ITU-R P. 530-10.
- Jameson A R. 1991. A Comparison of Microwave Techniques for Measuring Rainfall. *Journal of Applied Meteorology*, 30(1):32-54. 10.1175/1520-0450(1991)030<0032:ACOMTF>2.0.CO;2.
- Krämer S, Verworn H, Redder A. 2003. Microwave links-a precipitation measurement method filling the gap between rain gauge and radar data. 6th Intl Workshop on Precipitation in Urban Areas.
- Leijnse H. 2007. Hydrometeorological application of microwave links: measurement of evaporation and precipitation. *Water Resour Res*, 43:W04417.
- Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J. 2007a. Hydrometeorological application of a microwave link; 2. Precipitation. *Water Resour Res*, 43:W04417.
- Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J N M. 2007b. Hydrometeorological application of a microwave link; 1. Evaporation. *Water Resources Research*, 43(4):W04416. doi:10.1029/2006WR004988.
- Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J N M. 2007c. Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks. *Water Res Res*, 43(3):W03201. doi:10.1029/2006WR005631.
- Messer H, Zinevich A, Alpert P. 2006. Environmental Monitoring by Wireless Communication Networks. *Science*, 312(5774):713. doi:10.1126/science.1120034.
- Minda H, Nakamura K. 2005. High temporal resolution path-averaged rain gauge with 50-GHz band microwave. *Atmos Oceanic Technol*, 22:165-179.
- Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R. 2011. Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks. *Water Res Res*, 47(12):W12505. 10.1029/2010WR010350.
- Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R. 2013. Countrywide rainfall maps from cellular communication networks. *P Nat Acad Sci*, 110(8):2741-2745. doi:10.1073/pnas.1217961110.
- Rahimi A, Holt A, Upton G. 2006. Attenuation calibration of an X-band weather radar using a microwave link. *Atmos Oceanic Technol*, 23(3):395-405.
- Rahimi A, Holt A, Upton G, et al. 2003. The use of dual-frequency microwave links for measuring path-averaged rainfall. *Geophys Res*, 108(D15,16).
- Rayitsfeld A, Samuels R, Zinevich A, et al. 2012. Comparison of two methodologies for long term rainfall monitoring using a commercial microwave communication system. *Atmos Res*, 104-105(0):119-127.
- Rincon R F, Lang R H. 2002. Microwave link dualwavelength measurements of path-average attenuation for the estimation of drop size distributions and rainfall. *Geo Remote Sen, IEEE Transactions on*, 40(4):760-770. doi:10.1109/TGRS.2002.1006324.

- Rincon R F, Lang R, Meneghini R, et al. 2001. Estimation of path-average rain drop size distribution using the NASA/TRMM microwave link // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International. 2001.
- Rincon R F, Lang R H, Thiele O. 1999. Rain estimation using the NASA/TRMM microwave link // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International. 1999.
- Rincon R F, Bidwell S W, Jameson A R, et al. 1996. A multi-frequency, dual-polarization, microwave link for rainfall estimation. Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future', International. 1: 402-404.
- Thurai M, Bringi V N, Shimomai T. 2007. 20 GHz Specific Attenuation Calculations using Drop Size Distributions and Drop Shape Measurements from 2D Video Disdrometer Data in Different Rain Climates. The 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing. 2007: Singapore.
- Upton G, Cummings R, Holt A. 2007. Identification of melting snow using data from dual-frequency microwave links. *Microw Antennas Propag*, 1(2):282-288.
- Upton G, Hold A, Cummings R, et al. 2005. Microwave links: the future of urban rainfall measurement. *Atmos Res*, 77(1-4): 300-312.
- Zinevich A, Alpert P, Messer H. 2008. Estimation of rainfall fields using commercial microwave communication networks of variable density. *Adv Water Res*, 31(11): 1470-1480.
- Zinevich A, Messer H, Alpert P. 2009. Frontal rainfall observation by a commercial microwave communication network. *J Appl Meteor Clim*, 48(7): 1317-1334.