

文章编号: 2096-1618(2018)02-0197-08

微波通信链路监测降水试验及可行性探究

高清泉¹, 韩琰琰², 肖天贵¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要:随着世界第四代通信网络的广泛覆盖, 第五代无线通信技术已经开始研究。毫米波无线电频段将是 5G 通信网络研究的重要环节。利用微波信号传播的衰减信息来监测、反演降水作为传统方式的补充, 从而提高传统降雨观测的准确度。从国际电联建议书 (ITU-R) 模型出发, 基于微波雨衰特性和雨滴谱统计资料建立了微波链路降雨有效衰减的模型和视距微波链路的降雨反演模型。设计并搭建不同频段视距模拟微波链路测雨实验系统, 利用降雨反演模型反演了路径平均降雨强度, 并与雨滴谱仪数据进行了同步对比。观测结果表明, 不同频段微波在不同降雨强度下, 微波信号衰减显著。当降雨强度在 0 ~ 12 mm/时, 25 GHz 频段微波链路降雨反演雨强相关系数约为 0.7, 偏差 2.0 mm; 当降雨强度在 0 ~ 14 mm/h 时, 23 GHz 频段微波降雨衰减明显, 微波链路反演降雨强度相关系数在约为 0.6, 偏差 3.0 mm; 当降雨强度在 0 ~ 11 mm/h 时, 38 GHz 频段微波反演雨强相关系数约为 0.6, 偏差 4.0 mm; 当降雨强度大于 50 mm/h, 反演偏差较大。此外, 试图分析实验中偏差的原因, 为下一次实验探索奠定基础。通过比较微波链路和雨滴光谱仪测得的雨强值, 揭示这种降雨监测方法的准确性和可靠性。

关键词:大气科学; 大气物理学与大气环境; 降雨测量; 毫米波信号; 微波链路; 微波雨衰

中图分类号: P412.13

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.02.015

0 引言

在地球近地层大气中存在许多物理过程, 其中降水反映了动力、热力、水汽等气象要素, 局地性和不连续性是降水的重要特点, 这是对流层中最为活跃的天气现象之一^[1]。降水是影响人类的重要气象因素, 如农业生产、自然环境、社会生活、交通运输和军事行动。因此对于降水的实时监测具有至关重要的意义。降水的时空分布异常会造成各种自然灾害, 如泥石流、山体滑坡等洪涝灾害^[2]。

目前, 气象观测业务中, 单点仪器已经实现自动测量, 如雨量筒、翻斗雨量计等^[3], 准确实时测量区域降水是降水测量的难点^[4]。在城市山区等区域, 由于地形、建筑等影响存在极为复杂的时空变化, 导致雨量计分布不均, 另一方面, 受费用和人工等限制, 即使相对密集的地区, 如城市, 仍不能准确的检测降水的时空变化, 而且对小雨和大雨的测量效果较差; 雷达已经成为主要进行中大型降水分析与估算的传统方法^[5], 天气雷达虽然具有估计大范围降雨场的能力, 并且可以提供时间分辨率更高的数据, 但是天气雷达是利用云层含水量来反演计算出降雨, 其测量对象及反演计算结果并不是传统的观测降雨, 并且天气雷达在高仰角下只能测量部分云体, 在低仰角下容易受地物回波影响, 测量效果有限^[6-8]。

气象卫星自上而下测量云顶、穿透云顶, 同理与降落到地面的真实值有很大的区别, 难以根据回波反演准确的降水分布, 从而造成准确测量较为困难^[9]。

大气中的微波将受到大气介质的影响, 发生吸收、衰减、散射、极化等影响, 包括雨、雪等气象现象在微波上的影响尤为显著^[10], 在通信领域, 会尽可能地减小大气介质对微波的影响完成传输, 然而在气象领域, 利用微波衰减不仅可以得到区域降水分布, 而且与传统测量相比, 反演精度更高^[8]。

气象专家提出利用微波信号传播的衰减信息来反演降水^[11]。中国张称意等^[12]发现微波信号的衰减强度受地面雨滴的大小和分布影响, 通过微波返回信号的衰减可以获得地面降水的强度, 并发现通过信号衰减测量的降雨量非常接近常规降雨测量仪器的观测值, 准确度明显高于雷达观测值, 良好地弥补了传统降雨测量工具的不足。刘西川等^[13-14]在归一化雨滴谱分析法等理论的基础上, 对降雨强度、入射频率和温度等因素分析研究了微波传输特性的影响。高太长等^[15]重点分析了频段选取、降雨起止时间判别、反演建模等关键技术, 促进了微波链路反演降水在中国的研究与发展, 既是传统降水测量手段的有效补充, 也推动了测量雾、水汽、气溶胶等其他大气要素的研究。

国外对微波链路测量降水的研究更早、技术更成熟。RF Rincon 等^[16]在 2.3 km 的微波链路上, 首先利用 25 GHz 和 38 GHz 的微波衰减测量来估计雨滴大小

分布、降雨率和降雨量。Minda 等^[17]进行了50 GHz频段微波试验链路测量路径平均降雨的实验,研究校正了温度、沾湿天线等因素对微波信号影响,进一步促进了该研究的发展。

Minda 等前期有关实验主要是把微波链路监测降水作为传统方式的补充,从而提高降雨观测的准确度。Zinevich 等^[18]基于近地面降雨量映射、无线网络在空间中的网络几何形状不规则性、频率和极化的链路分布不均匀造成雨引起的衰减的测量不准确。Zinevich 等^[19]发现商业微波网络具有结构不规则、频率和极化不一致等特点,并提出基于卡尔曼滤波的降水场动态重建理论,可以并入来自其他来源的数据,完成在数据缺失值域内完成插值,从而提高预测的准确性,例如雨量计和雷达等。同年,Goldshtein 等^[20]利用现有商业通信网络,选择15 km×15 km的区域内22个微波链路,并且以约20 GHz的载波频率工作,降雨场估计与附近的雨量测量站和天气雷达数据进行比较,显示良好的一致性。Bianchi 等^[21-24]利用微波链路测量的降雨分布完成检测传统测量工具的校准,如雨量计。

Messer 等发现微波链路测量不限于降雨的测量,如固体颗粒、雾、雪、雨夹雪和冰雹均可以通过微波检测。微波网络测量水汽与常规方法非常接近。2015年,David 等^[25-26]相继开始探究利用微波链路检测雾的能力,认为雾预测是一个复杂的过程,并强烈依赖于物理模型参数化,当无线蜂窝网络基础设施在较高频段工作时,其用于雾监测的可能性更加可靠,并可以实现潜在地实时雾预测。

总体而言,这些理论及试验研究均未进入实际业务化的成熟应用。但是微波链路测量降水已获得国内外相关领域的关注,未来利用广泛存在5 G通信网络可以实现大范围的降水观测,实现与传统降水测量工具的相互提高与结合,对未来降水的实时监测具有至关重要的意义。

1 基本原理

在近地面大气中,由于大气介质的影响,微波信号会在传播路径中发生吸收,衰减,散射和偏振。最显著的影响是雨雪等气象现象,称为雨衰。在理想的空间里,无线电波不受阻碍,不会产生反射,折射,散射和吸收。然而,由于辐射能量的扩散,无线电波通过路径传播后,能量仍然会衰减。根据相关电磁场理论教材资料^[27-29]可知,如果全向天线的辐射功率为 P_t (单位:W),则有效电场强度 E_0 (单位:V/m)为

$$E_0 = \sqrt{\frac{30P_t}{d}} \quad (1)$$

磁场强度有效值 H_0 (单位:A/m)为

$$H_0 = \frac{\sqrt{30P_t}}{120\pi d} \quad (2)$$

电波功率密度 S (单位:W/m²)为

$$S = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad (3)$$

方向性天线(增益: G_t)取代全向同性天线用天线,则

$$E_0 = \sqrt{\frac{30P_t G_t}{d}} \quad (4)$$

$$H_0 = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{120\pi d} \quad (5)$$

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (6)$$

若该点的电波功率密度 S ,接收天线的有效面积为 A_R ,则接收天线获取电波功率 P_R

$$P_R = SA_R \quad (7)$$

A_R 与接受天线增益 G_R 满足:

$$A_R = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \quad (8)$$

$\frac{\lambda^2}{4\pi}$ 为各向同性天线的有效面积,(6)~(8)可得

$$P_R = P_t G_t G_R \left(\frac{\lambda^2}{4\pi d} \right)^2 \quad (9)$$

当 $G_R = G_t = 1$ 时,接收天线上的功率可表示为

$$P_R = P_t \left(\frac{\lambda^2}{4\pi d} \right)^2 \quad (10)$$

因此,传播损耗为 L_{fs}

$$L_{fs} = \frac{P_t}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (11)$$

以dB计,得

$$L_{fs} = 10 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \lg \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (12)$$

或

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (13)$$

式中, d 的单位为km, f 的单位以MHz计。

降雨对微波传输会产生显著的影响,可以用雨衰模型描述。在大气中,电磁波的总传输衰减可以表示为:

$$A = 32.45 + 20 \lg d + 20 \lg f + a + b + c + d + e \quad (14)$$

式中, A 为微波传输的总衰减, a 为水汽引起的衰减, b 为雾或者轻雾引起的衰减, 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 SO₂,NO₂,N₂O 等)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是水汽和氧气。

氧气、水汽和其他气体的吸收会造成损失,各种大气现象也会导致微波信号的传输产生显著损耗,如雨、雪、雾。雨衰预测模型作为本文的反演理论基础,是基于 Laws-Parsons 雨滴谱模型所建立起来的,通过 ITU 雨衰模型^[30-33]研究发现,中国所在中高纬度地区的各频段,对最高不超过55 GHz频率的衰减具较高的准确度。ITU 模型认为雨强 R (mm/h) 与雨衰 γ (dB) 呈现幂率关系如所示。

$$\gamma_R = kR^\alpha$$

(15)

式中 γ 为每单位距离造成的雨衰量 (dB/km), R 为降雨强度 (mm/h); k 、 α 为频率依从系数,与电磁波的工作频率、极化方式、雨滴大小分布等因素有关。 k 和 α 可以利用相应的水平极化系数和垂直极化系数,计算得出:

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

(16)

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

(17)

式中, θ 是接收电线仰角, τ 是接受点电波的极化角(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 α 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:

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

(18)

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_i \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_i}{c_i} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha$$

(19)

式中 f 为频率(单位:GHz), k 为 k_H 或 k_V , α 为 α_H 或 α_V 。水平极化系数(k_H),垂直极化系数(k_V),水平极化系数(α_H),垂直极化系数(α_V)见表 1~4。

表 1 k_H 系数

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33981	-0.1007	1.13097	-0.18961	0.71146
2	-0.35352	1.26971	0.45401	-0.18961	0.71146
3	-0.23788	0.86035	0.15353	-0.18961	0.71146
4	-0.94157	0.64552	0.16816	-0.18961	0.71146

表 2 k_V 系数

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80594	0.56933	0.81060	-0.16397	0.63296
2	-3.44966	-0.22912	0.51058	-0.16397	0.63296
3	-0.39901	0.73041	0.11898	-0.16397	0.63296
4	0.50166	1.07318	0.27196	-0.16397	0.63296

表 3 α_H 系数

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14317	1.82445	-0.55189	0.67849	-1.95537
2	0.29592	0.77564	0.19826	0.67849	-1.95537
3	0.32176	0.63772	0.13163	0.67849	-1.95537
4	-5.37611	-0.96231	1.47827	0.67849	-1.95537
5	16.1720	-3.29981	3.43991	0.67849	-1.95537

表 4 α_V 系数

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07773	2.33841	-0.76283	0.053738	0.83434
2	0.56726	0.95544	0.54038	0.053738	0.83434
3	-0.20237	1.14521	-0.2680	0.053738	0.83434
4	-48.2992	0.791666	0.116227	0.053738	0.83434
5	48.5834	0.791458	0.116478	0.053738	0.83434

参考微波雨衰预测模型计算,若获得实验链路雨衰值 γ_R ,通过以下幂率关系式计算出路径降水强度 R :

$$R = \sqrt[b]{\gamma_R / a}$$

(20)

2 试验及数据分析

2.1 方案设计

2.1.1 链路设计

试验链路的设计及布设必须把微波信号的可测性、降水强度等因素考虑在内。如果微波链路变长,雨衰值相对变强,更有利于测量,但是受雨胞尺寸的限制等,导致微波链路变长后,造成反演误差增大;相反,微波链路太短又带来微波链路上雨衰值太小、不易测量等问题,实验方案如图 1 所示。

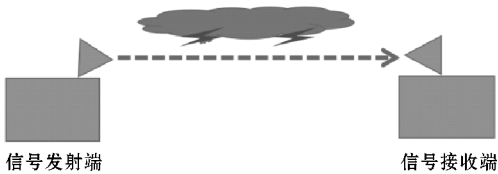


图 1 试验方案设计

2.1.2 设备选择

工作主要在中国科学院大气物理研究所的中层大气和全球环境探测重点实验室支持下进行。实验室已经拥有一套可用于"利用毫米波信号链路来监测降水"的仪器设备,如图 2 所示。

(1)毫米波频段的信号源,可以用于生成稳定的高达40 GHz的信号;(2)毫米波频段的频谱仪,可以用于测量高达40 GHz的信号;(3)雨滴谱仪用于长期测量大气气象要素,包括温度、湿度、气压、风速进行测量。



图2 实验设备

设备参数设置如表5、表6所示。

表5 信号接收端参数

N9030A 信号分析仪	参数
频率范围	3 Hz ~ 40 GHz
精度	±0.19 dBm
带宽	10/25/40/140 MHz
中心频率	25 GHz
接收频率	±70 dBm
温度	5 ℃ ~ 50 ℃
湿度	5% ~ 95%
海拔	3000/4500 m

表6 信号发射端参数

安立 MG369XB 信号源	参数
频率范围	2 Hz ~ 40 GHz
中心频率	25 GHz/23 GHz/38 GHz
发射功率	0 dBm/7 dBm
温度	0 ℃ ~ 50 ℃
湿度	5% ~ 95%
海拔	4600 m

2.1.3 频率选择

利用不同的降雨强度会造成不同频段微波信号衰减的特性,搭建了23 GHz、25 GHz、38 GHz频段视距链路。因为第四代通信网络在世界范围内已经完成覆盖,各国也相继进行第五代无线通信技术研究。研究表明,毫米波无线电频谱将是未来的5 G通信网络重要组成部分,具有通信的良好发展前景。选取该频段微波调研一种新的未来高密度5 G通信网络,将采用的毫米波信号在大气中传播的实验来测量降雨和水汽等天气状况的方法的可行性,为未来商用链路进行降雨测量提供基础。试验搭建参数如表7所示。

表7 试验搭建

仿真参数	数值
路径长度	0.080 km/0.7 km
载波频率	25 GHz/23 GHz/38 GHz
带宽	1 GHz
传输功率	0 dBm/7 dB
传输天线增益	23 dBi
接收天线增益	23 dBi
喇叭天线衰减功率	1 m(-1.24 dBm)/3 m(-4.95 dBm)

2.2 实验结果分析

2.2.1 晴朗天气

晴天环境下,记录2016年9月5日和10月1日00:00:00-23:59:59期间试验链路上各个时刻的温度,湿度等气象要素及信号变化,见图3、图4。从中可以看出,在晴天背景下,温度和湿度对信号没有产生明显的影响。

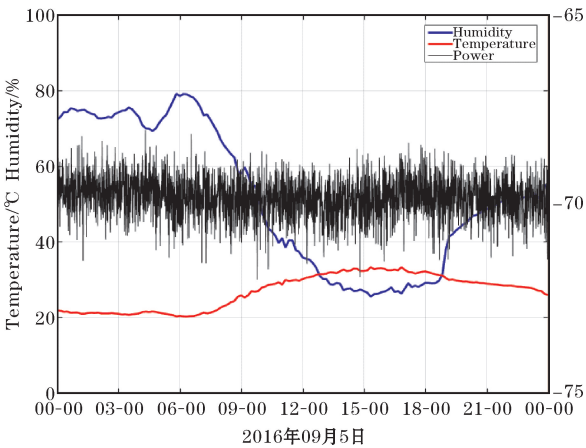


图3 2016年9月5日温度、湿度及信号变化趋势图

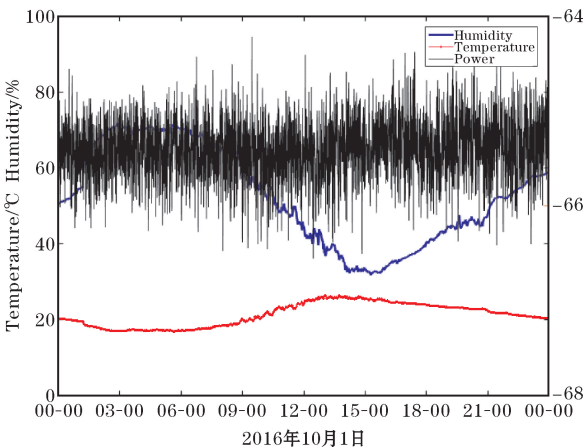


图4 2016年10月1日温度、湿度及信号变化趋势图

2.2.2 降雨天气

降雨环境下,试验记录2016年10月6日、2017年6月22日、2017年6月23日和2017年10月9日降雨期间试验链路上微波信号衰减变化。选取降雨前信号的均值作为微波信号衰减计算反演的参考值,可以极大地减小降雨前与降雨时因气象要素差异造成的误差,如湿度。试验中,信号接收的采样频率为每30 s/次。从传统观测数据可知,整个试验过程中包含了不用强度的降雨过程,见图5~8。

由4个降雨过程的微波信号观测结果表明,试验研究所选频段的微波信号,在不同的降雨强度下,微波信号衰减强弱不同。接收信号较高时,雨强较弱;接收

信号较低时,雨强较大。

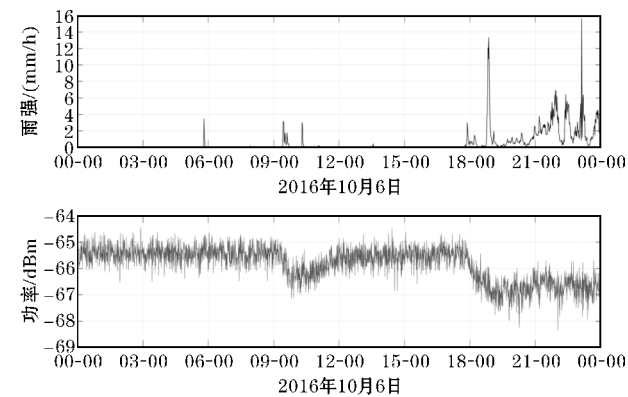


图5 2016年10月6日不同降雨强度25 GHz
频段微波链路信号变化趋势

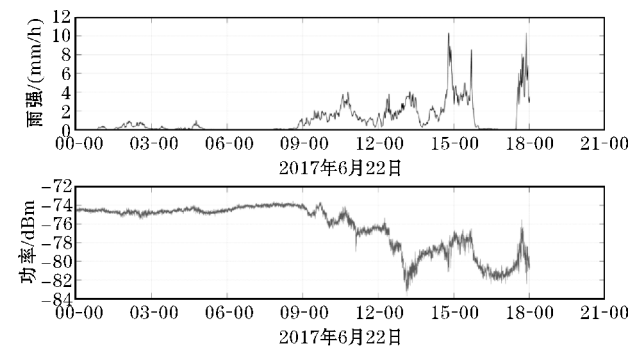


图6 2016年6月22日不同降雨强度23 GHz
频段微波链路信号变化趋势

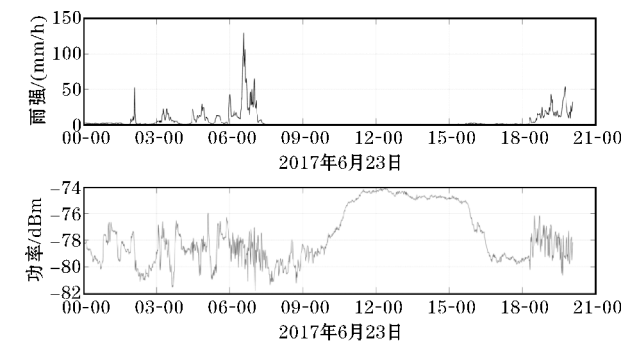


图7 2017年6月23日不同降雨强度23 GHz
频段微波链路信号变化趋势

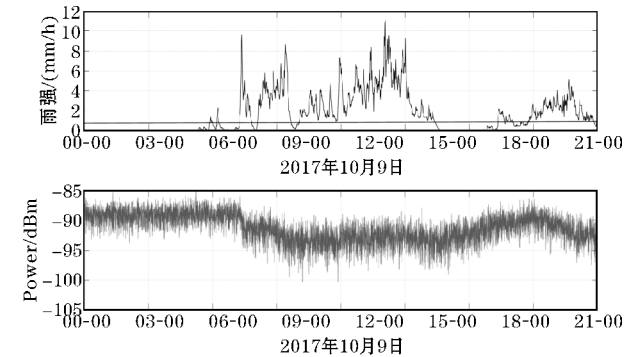


图8 2017年10月9日不同降雨强度38 GHz
频段微波链路信号变化趋势

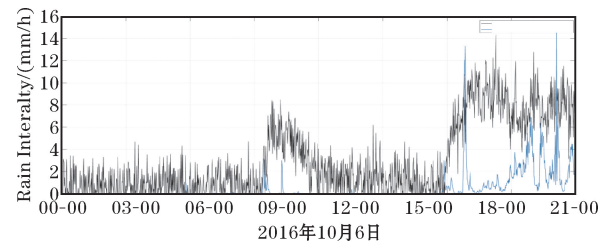


图9 2016年10月6日微波链路1 min 反演
雨强与雨滴谱仪测量雨强值对比图

以图9为例可以发现:雨滴谱仪测量雨强在0~13 mm/h变化时,反演雨强值在0~15 mm/h变化。二者相比可以发现,最大雨强误差在4 mm/h,降雨较大时,两反演雨强值更接近于实测值;反演雨强值与雨滴谱测量雨强误差可达2 mm/h,误差较大,但是,二者趋势具有良好的相关性,说明信号接收的采样频率为每30 s/次,可以跟上降水的变化率,较好地保证了测量方法的准确性。

由图9可知,对30 s/次接收的链路数据做1 min/次滑动平均处理后,虽然微波衰减可与降雨强度趋势有较好的相关性,但是反演雨强与雨滴谱仪测量雨强偏差较大,因此,根据Schleiss等^[34]推荐的方法,对链路数据分别做15 min/10 min/5 min滑动平均处理,可以有效地减小反演误差,提高反演雨强的准确性。

对数据做不同时间分辨率的滑动平均处理,分别计算反演不同时间分辨率下雨强与雨滴谱仪雨强的对比图,见图10~12。

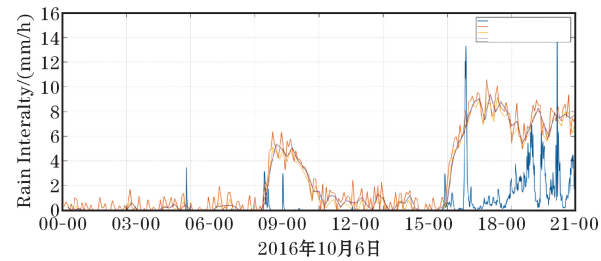


图10 2016年10月6日25 GHz不同时间分辨率下
反演雨强与雨滴谱仪雨强对比

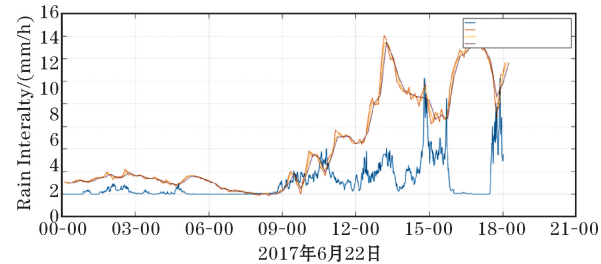


图11 2017年6月22日23 GHz不同时间分辨率下
反演雨强与雨滴谱仪雨强对比

由图10可以得到,选择2016年10月06日25 GHz频段数据每15 min处理后反演雨强更接近雨滴谱仪雨强,其次是10 min,最差的5 min。进而对不同

时间分辨率链路反演雨强与雨滴谱仪雨强做相关性检验,可以发现二者的相关性为0.7左右,具有较好的相关性。在降雨较大的,计算雨强与观测雨强的趋势和强度有较高的相关性。每15min数据的反演的效果更接近雨滴谱仪数据,效果最好。然而,当降雨较小时,计算雨强的趋势和强度相关性降低。

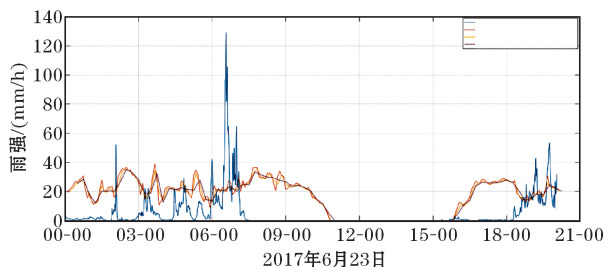


图12 2017年6月23日23 GHz不同时间分辨率下
反演雨强与雨滴谱仪雨强对比

由图11、图12可以发现,三种不同分辨率的反演雨强结果在趋势和数值上比较相似,虽然反演雨强存在时间上的延迟,但是雨滴谱仪测量雨强的趋势与反演雨强趋势大致相同,但是由图11可以得知,雨滴谱仪测量雨强在0~12 mm/h时,链路反演雨强在1~14 mm/h,存在最小为1 mm/h,最大偏差在2 mm/h,其中15 min数据的反演数据最好,更接近于传统测量雨滴谱仪测量雨强,降雨强度反演系数达到0.6。图12反演强度相关系数较差,当降雨强度较小时,链路反演雨强与雨滴谱仪雨强就有较好的相关性;当瞬时降雨强度增大时,链路反演降雨强度存在较大偏差,主要是因为试验链路路径较短或者微波信号变化较慢,未捕捉到降雨信息。在未来的研究中,将进一步增加链路长度或者增大信号采集频率,降低试验误差,增加链路反演降雨的强度。

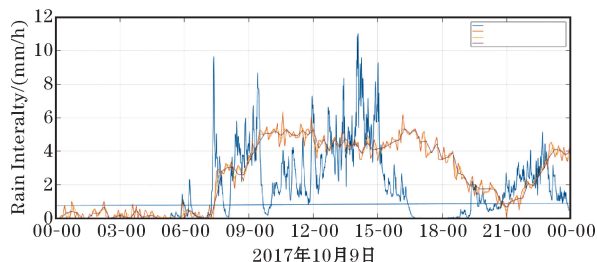


图13 2017年10月9日38 GHz不同时间分辨率下
反演雨强与雨滴谱仪雨强对比

图13可以得知,雨滴谱仪测量雨强与链路反演雨强在变化趋势上就有较好的相关性,降雨强度误差最大在4 mm/h,不同时间分辨率的反演雨强具有较好的拟合关系。然而可以发现存在雨滴谱仪测量雨强未检测到降雨的情况下,依然具有链路反演雨强,且随时间降雨强度逐渐减小。可能是因为在降雨后0.5~1 h,空气中存在较多的小水滴,在降雨结束后,随着小水滴的蒸发变少逐渐造成的,因而造成反演强度偏差。

3 结论与讨论

在近地面层,微波信号与大气接触并发生相互作用,不仅可以检测降雨、降雪外,而且可测量雾、霾、水汽等气象要素。利用不同环境(陆地、海洋等)大气中存在许多微波链路进行理论研究,对人民的生产、生活有重要的意义。

在微波链路测量降水基本模型的基础上,分别建立了25 GHz/23 GHz/38 GHz频段模拟微波链路反演降水实验。研究发现:在不同的降雨强度下,两种频段完全可以完成测量实验,证明了试验研究的可行性,其次,试验采取30 s/次的采集频率可以跟踪不同降雨的变化,与雨滴谱仪测量雨强趋势具有较好的负相关。

虽然30 s/次的采集频率可以跟踪降雨的变化,但是由微波链路反演雨强的结果可知,反演雨强与雨滴谱仪雨强对比存在偏差,最大值可达到4 mm/h,反演雨强效果较差;但是借鉴Schleiss等的反演方法,对采集的数据做不同时间分辨率的滑动平均处理,可以较好地减小雨衰模型的反演偏差。反演雨强结果表明,不同频段微波在不同降雨强度下,当降雨强度在0~12 mm/h时,25 GHz频段微波链路降雨反演雨强相关系数约为0.7,偏差在2.0 mm;当降雨强度在0~14 mm/h时,23 GHz频段微波降雨衰减明显,微波链路反演降雨强度相关系数在约为0.6,偏差在3.0 mm;当降雨强度在0~11 mm/h时,38 GHz频段微波反演雨强相关系数约为0.6,偏差在4.0 mm;当降雨强度大于50 mm/h,反演偏差较大。15 min/次滑动平均的数据处理后,反演雨强的效果最好,10 min/次反演雨强次之,第三是5 min/次的反演雨强,效果较差。当降雨的瞬时强度突然增大时,微波信号检测降雨的能力较差。但是,总体来说,微波链路反演模型得到的降雨强度相关系数大多高于0.6,可以对1 min/次的反演雨强结果进行优化处理,进一步提好了微波雨衰模型的反演准确度。

在模型计算及后期实验的搭建中,依然发现有多问题需要解决。首先考虑雨衰模型的精度,这是计算的基础,不同的雨衰模型是建立在不同的雨滴谱之上的,目前主要有JD(Joss-Dropspectrum),MP(Marshall-Palmer),LP(Laws-Parsons)等。采用了国际电联(ITU)建议书(ITU-R P. 838.2)中给出的推荐雨衰预测模型,该模型基于Laws-Parsons雨滴谱模型建立,未考虑在不同地区、不同降雨雨滴谱对模型的影响。因为雨滴谱对于不同的地域、不同的降雨类型和大气层状态的不同而变化^[35]。

其次是微波链路路径长度与实验的敏感度和精确度息息相关。如果微波链路变长,雨衰值相对变强,更有利于测量,但是受雨胞尺寸的限制等,导致微波链路变长后,造成反演误差增大;相反,微波链路太短又带

来微波链路上雨衰值太小、不易测量等问题。本试验设计为模拟微波链路,实验链路相对雨滴谱模型采用链路路径较短,捕捉不同降雨强度的能力较差,降雨分辨率较低。因此,微波链路搭建长度的选择还需要后期进一步试验研究。

第三,需综合考虑微波链路路径上温度、湿度及大气对微波信号的衰减。相对于降雨来说,温度、湿度以及大气对微波信号的衰减较小。因此在理想的情况下,没有考虑较小甚至消除以上因素的影响,与实际不符,存在反演偏差的原因之一,所得出的结论并不完全满足实际运用的需求。

最后,考虑实验搭建过程中可能存在的系统误差是非常必要的。一方面,微波信号发射端与接收端设备的稳定性以及天线的沾湿衰减是造成系统误差的主要原因,需要在以后的研究中进一步完善与提高;另一方面,由于为保护设备安全及地理位置等因素的影响,雨滴谱仪安放位置在链路路径附近,未完全放置于实验链路路径之上,当降雨强度及降雨范围较小时,并不能完全捕捉到降雨,也是造成系统误差的原因之一。

参考文献:

- [1] 吕达仁,王普才,邱金桓,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.
- [2] 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.
- [3] 高太长,刘西川,刘磊,等. 降水测量仪器现状及展望[C]. 度气象水文海洋仪器学术交流会. 2012.
- [4] 印敏,高太长,刘西川,等. 微波链路测量降水研究综述[J]. 气象,2015,41(12):1545-1553.
- [5] 陈洪滨,李兆明,段树,等. 天气雷达网络的进展[J]. 遥感技术与应用,2012,27(4):487-495.
- [6] Sorooshian S, Aghakouchak A, Arkin P, et al. Advanced Concepts on Remote Sensing of Precipitation at Multiple Scales[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(10):1353-1357.
- [7] Sorooshian S, Aghakouchak A, Arkin P, et al. Advancing the Remote Sensing of Precipitation[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(10):1271-1272.
- [8] 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):154303-8.
- [9] Schönhuber M, Lammer G, Randeu W L, et al. Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] Liu Xi xuan, Gao Tai chang, Qin Jian, et al. Effect of rainfall on microwave transmission characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3):2156-2162.
- [11] Messer H, Zinevich A, Alpert P. Environmental monitoring by wireless[J]. Science, 2006, 312(5774):713-713.
- [12] 张称意,陈德亮,董文杰. 用手机网络信号监测天气状况[J]. 生态学报,2006,26(9):3156-3157.
- [13] 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.
- [14] 刘西川,刘磊,高太长,等. 不同类型降水对毫米波传播特性的影响研究[J]. 红外与毫米波学报,2013,32(4).
- [15] 高太长,姜世泰,刘西川,等. 微波链路测量降水新方法 & 关键技术分析[C]. 中国气象学会年会. 2013.
- [16] Rincon RF, 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 & Remote Sensing, 2002, 40(4):760-770.
- [17] Minda H. High Temporal Resolution Path-Average Rain Gauge with 50 GHz Band Microwave[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2005, 22(22):165-179.
- [18] Zinevich A, Alpert P, Messer H. Estimation of rainfall fields using commercial microwave communication networks of variable density[J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(11):1470-1480.
- [19] Zinevich A, Messer H, Alpert P. Frontal Rainfall Observation by a Commercial Microwave Communication Network[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2009, 48(7):1317-1334.
- [20] Goldshtein O, Messer H, Zinevich A. Rain Rate Estimation Using Measurements From Commercial Telecommunications Links[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4):1616-1625.
- [21] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R. Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks[J]. Water Resources Research, 2011, 47(12).
- [22] 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):2741-5.
- [23] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R. Retrieval al-

- gorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication network[J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2015, 8(8): 8191–8230.
- [24] Bianchi B, Rieckermann J, Berne A. Detection of faulty rain gauges using telecommunication microwave links International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 2011. 11–16.
- [25] David N, Alpert P, Messer H. Technical Note: Novel method for water vapor monitoring using wireless communication networks measurements[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2008, 9(7): 2413–2418.
- [26] David N, Alpert P, Messer H. Humidity Measurements using Commercial Microwave Links[M]. Advanced Trends in Wireless Communications. 2011.
- [27] 蔡跃明. 现代移动通信[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [28] Rappaport T S, Heath R W, Daniels R C, et al. Millimeter Wave Wireless Communications[J]. 2015.
- [29] 莫利斯田斌, 帖翊, 任光亮. 无线通信: Wireless communications[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [30] Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods[J]. ITU-R Recommendations.
- [31] Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems[J]. ITU-R Recommendations. 1996.
- [32] Draft revision to Recommendation. ITU-R. ITU-R study group 3 meeting. 1999.
- [33] An improved prediction method of rain attenuation for terrestrial light-of sight path[J]. ITU-R. 2005.
- [34] Schleiss M, Berne A. Identification of Dry and Rainy Periods Using Telecommunication Microwave Links[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2010, 7(3): 611–615.
- [35] 陈宝君, 宫福久. 三类降水云雨滴谱分布模式[J]. 气象学报, 1998, 56(4): 506–512.

Feasibility Study of Microwave Communication Link for Rainfall Monitoring Purposes

GAO Qing-quan¹, HAN Cong-cheng², XIAO Tian-gui¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Engineering, Chengdu 610225, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: With the widespread coverage of the fourth generation of communication networks in the world, the fifth generation of wireless communication technologies has been studied. Millimeter wave radio frequency band will be an important part of the research of 5 G communication network. Using attenuation information transmitted by microwave signals to monitor and retrieve precipitation as a supplement to traditional methods, the accuracy of traditional rainfall observations can be improved. Based on the ITU-R model, a model of effective attenuation of microwave link rainfall and a model of rainfall inversion of line-of-sight microwave link are established based on the statistics of rain attenuation and rain drop. We design and set up the experimental system of line-of-sight analog microwave link rain measurement with different frequency bands. The mean rainfall intensity of the microwave path is retrieved by the rainfall inversion model, then it is compared with the data of the rain drop spectrometer. The results show that microwave signals attenuate significantly under different rainfall intensities in different frequency bands. When the rainfall intensity is between 0–12 mm/h, the correlation coefficient of rainfall intensity in the 25 GHz frequency band is about 0.7 and the deviation is 2.0 mm. When the rainfall intensity is between 0–14 mm/h, the microwave rainfall decays obviously in the frequency range of 23 GHz. The correlation coefficient of the rainfall intensity of the link inversion is about 0.6 and the deviation is 3.0 mm. When the rainfall intensity is 0–11 mm/h, the correlation coefficient of the rain intensity at 38 GHz is about 0.6, and the deviation is 4.0 mm. When the rainfall intensity is larger than 50 mm/h, rainfall intensity deviation is larger. Furthermore, we have tried to analyze the cause of the deviation in the experiment, and it will lay the foundation for the next experiment. By comparing the rain intensity value measured by our microwave link and a raindrop spectrometer, the accuracy and reliability of this rainfall monitoring method will be revealed.

Keywords: atmospheric science; atmospheric physics and atmospheric environment; rainfall measurement; millimeter wave signal; microwave link; microwave rain decay.