

基于微波链路的路径雨强反演方法及实验研究

高太长 宋堃 刘西川 印敏 刘磊 姜世泰

Research on the method and experiment of path rainfall intensity inversion using a microwave link

Gao Tai-Chang Song Kun Liu Xi-Chuan Yin Min Liu Lei Jiang Shi-Tai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 174301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.174301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于粒子成像测速技术的降雪微物理特性研究

Research on microphysical property of snowfall based on particle imaging velocimetry technology

物理学报.2014, 63(19): 199201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.199201>

基于粒子成像测速技术的雨滴微物理特性研究

Research on microphysical property of raindrops based on particle imaging velocimetry technology

物理学报.2014, 63(2): 029203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.029203>

近海台风对中国东部夏季降水的贡献

Contribution of typhoon over coastal waters to summer rainfall in eastern China

物理学报.2013, 62(18): 189201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.189201>

基于微波链路的降雨场反演方法研究

Investigation of the inversion of rainfall field based on microwave links

物理学报.2013, 62(15): 154303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.154303>

# 基于微波链路的路径雨强反演方法及实验研究\*

高太长<sup>1)</sup> 宋堃<sup>1)</sup> 刘西川<sup>1)†</sup> 印敏<sup>1)</sup> 刘磊<sup>1)</sup> 姜世泰<sup>2)</sup>

1)(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

2)(解放军 93721 部队, 朔州 038301)

(2015 年 1 月 26 日收到; 2015 年 3 月 24 日收到修改稿)

从大气气体吸收衰减模型出发, 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修正模型和视距微波链路的路径雨强反演模型. 设计并搭建一条视距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, 并与雨滴谱仪进行了同步对比. 观测结果表明, 视距微波链路降雨反演模型的反演雨强与雨滴谱仪测量结果的相关系数大多高于 0.6, 最高可达 0.9647; 累积降雨量的绝对误差大多在 0.5 mm 以内, 最小偏差仅有 0.0827 mm; 相对偏差大部分在 15% 以内, 最小相对误差为 3.3415%. 实验结果验证了微波链路反演降雨的有效性和准确性.

**关键词:** 微波雨衰, 微波链路, 链路雨强反演

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.174301

## 1 引言

降水现象是影响农业生产、自然环境、社会生活、交通运输以及军事行动的重要气象因素<sup>[1]</sup>, 因此对于降水的实时监测具有至关重要的意义. 目前气象观测业务中有雨量计、天气雷达和气象卫星等多种降水监测手段<sup>[2-4]</sup>, 但是雨量计的观测站点设置比较稀疏, 空间代表性较差; 天气雷达在高仰角条件下只能测量到部分降水或云体, 在低仰角条件下易受地物回波影响, 定量估计降水的精度较低; 气象卫星只能自上而下测量云顶或穿透云顶, 与降落到地表附近的实际降水之间存在较大差别, 难以根据回波反演准确的降水分布. 而且由于降水存在极为复杂的时空变化<sup>[5]</sup>, 目前对降水的实时准确测量仍然存在不足.

近年来气象领域的专家提出了利用微波通讯信号传播的衰减信息来反演降水的设想<sup>[6,7]</sup>. 微波信号在降雨介质中传播时会出现散射吸收、衰减、去极化等效应<sup>[8-10]</sup>, 根据这些效应, 通过一定的

反演方法就可以得到微波覆盖区域内的降水强度分布. Atlas 等<sup>[11]</sup>首先提出了利用波长 1—3 cm 的微波衰减反演路径平均降雨强度和区域雨强分布的设想, 并选择 1 cm 波段对雨强反演算法进行了模拟研究. 2000 年开始 Minda 等<sup>[12]</sup>建立了用于测量路径平均降雨的 50 GHz 频段微波链路, 通过解决温度修正、水汽修正和湿天线修正等问题, 提高了雨强反演的精度. Zinevich 等<sup>[13,14]</sup>在建立非线性层析模型的基础上, 研究了基于卡曼滤波的动态降水场重建技术. Goldshtein 等<sup>[15]</sup>提出了适用于稀疏分布的商业微波链路网络的降雨场重建技术. Krämer<sup>[16]</sup>, Goldshtein<sup>[17]</sup>, Overeem<sup>[18,19]</sup>等先后探索了不同频段商业微波链路在降雨测量中的应用, 但是目前国内在该领域研究较少, 刘西川等<sup>[10,20,21]</sup>研究了不同类型降水对不同波段电磁波传播的影响, 姜世泰等<sup>[22]</sup>研究了基于微波链路的路径雨强反演方法, 进行了仿真试验, 但是并未开展实地测量.

为了进一步研究基于微波链路的路径雨强反演方法, 本文在现有气体吸收衰减模型的基础上, 基于

\* 国家自然科学基金(批准号: 41475020, 41405024, 41327003)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuxc2012@hotmail.com

微波雨衰特性和雨滴谱统计资料建立视距微波链路的降雨反演模型; 并开展 15—20 GHz 的微波链路测量实验, 利用降雨反演模型反演路径平均降雨强度, 通过与地面观测资料的比对验证了该模型的有效性和准确性.

## 2 视距微波链路降雨反演模型

实际大气中温度、气压、水汽、降水等多个因素均对微波衰减存在一定的影响, 这直接影响了利用微波链路反演降雨的精度. 因此首先利用现有大气气体吸收衰减模型分析气压、温度、水汽等因素对不同频率微波的影响, 基于此研究微波链路的降雨有效衰减修正算法以及降雨反演算法.

### 2.1 大气气体吸收衰减模型

电磁波在大气中的特征衰减主要由干燥空气和水汽造成. 在一定的压力、温度和湿度条件下, 采用累加氧气和水汽各自谐振线的方法, 可以准确计算电磁波在大气中的特征衰减. 根据 ITU-R P.676-9 提出的计算模型<sup>[23]</sup>, 特征大气的衰减 $\gamma$ 为

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820fN''(f) \text{ (dB/km)}, \quad (1)$$

其中,  $\gamma_o$ (dB/km) 是干燥空气条件下的特征衰减,  $\gamma_w$ (dB/km) 是在一定水汽密度条件下的特征衰减,  $f$ (GHz) 是电磁波频率,  $N''(f)$  是该频率对应的复折射率虚部.

图 1 为气压为 1013 hPa 时干燥空气对微波的衰减随温度和微波频率的变化情况. 由图中可以看出, 干燥空气对微波的衰减随着频率的增加呈上升趋势, 在频率高于 40 GHz 时上升较快; 对于相同频率的微波, 干燥空气对微波的衰减随着温度的增加呈下降趋势, 但温度的变化对微波衰减的变化影响较小.

图 2 为温度为 15 °C 时干燥空气对微波的衰减随气压和微波频率的变化情况. 由图中可以看出, 干燥空气对微波的衰减随着气压的增加呈上升趋势, 在小于 40 GHz 的微波频段, 气压的变化对微波衰减的变化影响非常微弱; 对高于 40 GHz 的微波频段, 气压变化对微波衰减有一定影响, 但不如微波频率增加对衰减影响的显著.

图 3 为气压 1013 hPa、温度 15 °C 条件下微波衰减随相对湿度和频率的变化. 由图中可以看出,

水汽对微波的衰减随着频率的增加呈上升趋势, 在 22 GHz 左右的频段范围内衰减出现一个峰值, 这是因为水汽在 22.235 GHz 存在较强的吸收带. 对于相同频率的微波, 其衰减随相对湿度的增加呈较为明显的上升趋势. 由此可知, 空气中水汽密度变化对微波衰减有较强的影响.

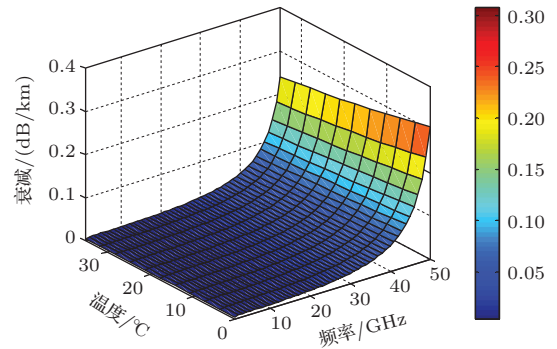


图 1 (网刊彩色) 干燥空气对微波衰减 (气压 1013 hPa)  
Fig. 1. (color online) Microwave attenuation of dry air(1013 hPa).

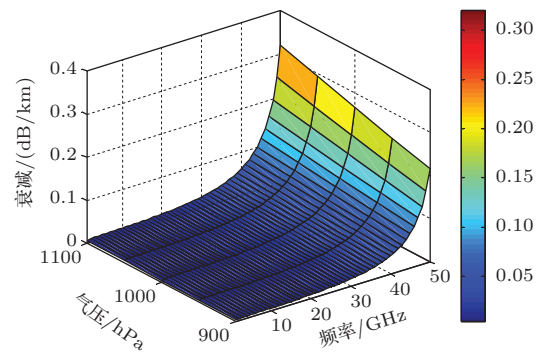


图 2 (网刊彩色) 干燥空气对微波衰减 (温度 15 °C)  
Fig. 2. (color online) Microwave attenuation of dry air (15 °C).

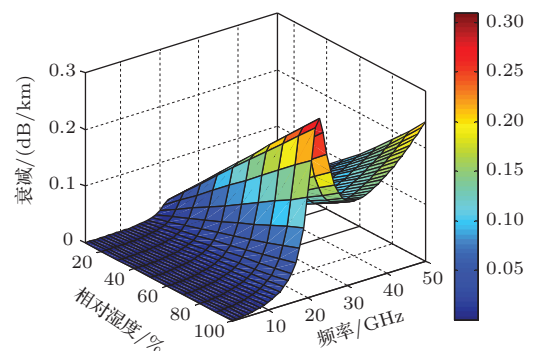


图 3 (网刊彩色) 不同相对湿度水汽对微波衰减 (温度 15 °C、气压 1013 hPa)  
Fig. 3. (color online) Microwave attenuation of different relative humidity and water vapor (15 °C, 1013 hPa).

图4和图5分别为温度15 °C、相对湿度80%时微波衰减随气压和微波频率的变化和气压1013 hPa、水汽密度3.8 g/m<sup>3</sup>时微波衰减随温度和微波频率的变化. 由图可知, 水汽对微波的衰减随频率的增加呈上升趋势, 由于水汽吸收带的影响, 衰减在频率22.235 GHz上出现一个峰值, 而气压、温度的变化对微波衰减的影响比较弱.

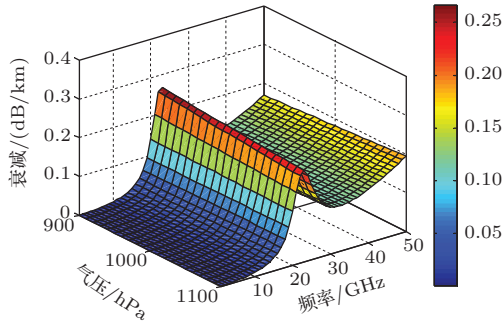


图4 (网刊彩色) 不同水汽对微波衰减(温度15 °C, 相对湿度80%)

Fig. 4. (color online) Microwave attenuation of water vapor (15 °C, relative humidity 80%).

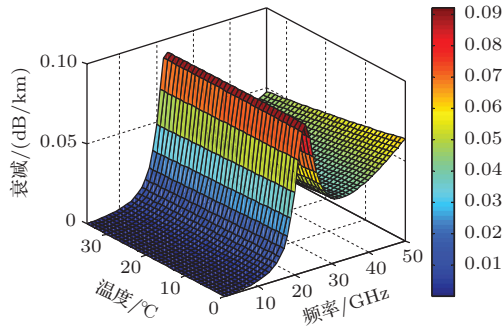


图5 (网刊彩色) 水汽空气对微波衰减(气压1013 hPa, 水汽密度3.8 g/m<sup>3</sup>)

Fig. 5. (color online) microwave attenuation of water vapor (1013 hPa, water vapor of density 3.8 g/m<sup>3</sup>).

由上述讨论可知, 在1—50 GHz频段, 大气对微波的衰减随着频率的增加呈上升趋势; 当频率低于40 GHz时, 大气温度和气压对微波衰减的影响均较小, 但湿度对微波衰减有较大影响; 水汽在22.235 GHz频段上存在较强的吸收带, 因此在这一频率附近, 水汽对微波衰减影响较为明显. 因此在利用微波链路测量降水时, 应选择低于40 GHz的频段, 避开22 GHz左右的吸收带, 并且需要校正空气湿度对微波衰减的影响.

## 2.2 微波链路降雨有效衰减修正

图6为气压1013 hPa, 温度15 °C条件下降雨和水汽对微波的衰减. 由图可知, 相比降雨对微波

造成的衰减, 水汽对微波造成的衰减与降雨强度为1 mm/h情况时对微波造成的衰减处在同一量级, 当空气湿度达到100%时, 其衰减量级与降雨强度5 mm/h左右时的衰减相当, 空气湿度的变化可能会对微波链路降雨反演造成0—5 mm/h的误差, 因此必须考虑空气中湿度变化对微波衰减的影响, 并进行必要的修正.

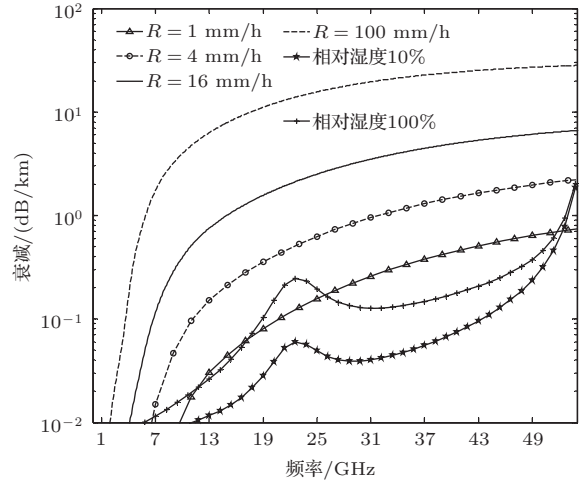


图6 大气对微波衰减(气压1013 hPa, 温度15 °C)

Fig. 6. Microwave attenuation of the atmosphere (1013 hPa, 15 °C).

在晴天条件下可以测得微波链路在传播径路上的基础衰减, 在此处设其为晴天时的基准值  $A_{Base}^{Dry}$ . 当出现降雨时, 测量得到路径上的总衰减  $A_{tot}$ , 其中包括了大气造成的衰减和降雨造成的衰减, 利用降雨对微波造成的衰减值和微波雨衰关系就可以反演雨强. 同时, 利用降雨发生时测得的气温、气压和湿度数据, 结合上述的大气气体吸收衰减模型就可以得到降雨过程中微波衰减的基准值  $A_{Base}^{Wet}$ , 由此可以计算得到降雨造成的衰减  $A_{Rain}$  为

$$A_{Rain} = A_{tot} - A_{Base}^{Wet}. \quad (2)$$

在计算微波衰减基准值时采用了差分的方法, 因此可以消除仪器测量产生的一部分系统误差. 此外, 在本文的实验中, 微波发射和接收终端都设置在室内, 因此可以不考虑天线沾湿误差的影响.

## 2.3 视距微波链路降雨反演算法

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>[24]</sup>:

$$A = 92.45 + 20 \cdot \log_{10}(f_{\text{GHz}}) + 20 \cdot \log_{10}(D_{\text{km}}) + a + b + c + d + e, \quad (3)$$

其中,  $A$  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.

在视距微波通信中, 发射机与接收机之间构成了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), 修正仪器因素 (天线电缆损耗等) 和大气中气体对微波的传输损耗后, 可计算得到整个微波链路由降雨导致的总衰减  $A_{\text{Rain}}$ . 设  $\gamma(\cdot)$  为电磁波雨衰模型算子,  $R(r)$  为降雨率沿传播路径的变化函数, 降雨导致的整条链路平均衰减  $\bar{A}$  可由链路测量到的总衰减  $A_{\text{Rain}}$  (对  $\gamma(R(r))$  沿链路路径积分) 除以链路长度  $L$  得到

$$\bar{A} = \frac{1}{L} \int_0^L \gamma(R(r)) \, dr = \frac{1}{L} A_{\text{Rain}}. \quad (4)$$

电磁波雨衰模型算子可由电磁波雨致衰减的幂率关系得到

$$A = aR^b, \quad (5)$$

其中  $R$  为降雨率,  $a, b$  为雨衰转换常数, 由微波链路的频率、极化和大气温度、雨滴谱分布结构等因素决定.

设  $\gamma^{-1}(\cdot)$  为电磁波雨衰模型算子的逆算子, 因此沿电磁波传播路径的平均降雨强度  $\hat{R}$  可由电磁波路径平均衰减  $\bar{A}$  来计算:

$$\hat{R} = \gamma^{-1}(\bar{A}). \quad (6)$$

### 3 视距微波链路测量实验及结果分析

为了检验微波链路降雨反演模型, 本文设计并搭建了点对点视距微波链路. 微波链路位于南京地区, 整条微波链路的长度为 6572 m, 微波发射机采用 Anritsu MG3694B 型信号发生器, 接收机采用 Agilent E4440A 型频谱分析仪, 微波发射和接收均采用定向天线, 信号采用屏蔽电缆传输, 保证微波信号不受干扰及无损接收. 链路频段采用 15—20 GHz, 将微波发射功率设置在 14 dBm, 接收端的采样间隔为 15 s, 分辨率为 0.01 dB. 同时在微波发射端和链路中间区域设置 OTT PARSIVEL 激光粒

子谱仪和自动气象站, 用来采集降雨强度、雨滴谱分布、气温、气压、湿度等信息.

本次实验时间段为 2013 年 7 月 5 日 9:00—18:00 及 7 月 6 日 8:00—16:00, 实验区域介于南京市江宁区 and 玄武区之间, 整个实验覆盖了从暴雨、大雨、中雨、小雨到毛毛雨的全部过程. 下面利用该实测降水数据进行雨衰关系拟合和降雨强度反演.

图 7 为利用 Mie 散射理论计算南京地区实测雨滴谱对应的微波衰减 (温度为 15 °C, 频率为 15 GHz). 采用 (5) 式的雨衰幂率关系函数形式对计算结果进行非线性拟合, 得到了具有实际气候雨滴谱特征的雨衰关系. 拟合结果中参数  $a$  为 0.0872, 参数  $b$  为 1.1126, 由此得到 15 GHz, 15 °C 条件下的雨衰幂率关系

$$A = 0.0872R^{1.1126}. \quad (7)$$

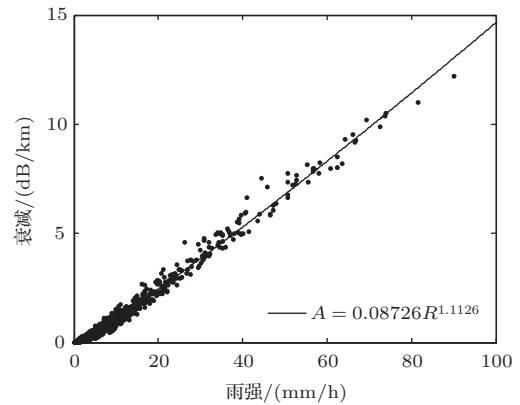


图 7 15 GHz 微波雨衰关系拟合结果

Fig. 7. Fitting result of rainattenuation relationship at 15 GHz.

参数  $a, b$  与微波的频率、气温、雨滴谱参数有关, 之前的分析表明, 温度对参数  $a, b$  的影响较小, 而雨滴谱和微波频率对  $a, b$  的影响较大. 不同频率的雨衰关系对雨滴谱变化敏感程度不同, 参数  $b$  表征了微波雨致衰减与雨滴谱分布的相关性, 越接近于 1 表示该频段下的微波对雨滴谱分布的变化越不敏感. 由上述分析可知, 15 GHz 频段的雨衰关系受雨滴谱分布变化存在一定影响, 但其  $b$  值较为接近 1, 因此对雨滴谱变化敏感性度不高.

表 3 和表 4 分别给出了 15—20 GHz 频率范围内, 微波在不同温度条件下雨衰幂率关系的参数  $a, b$  值. 由表可知, 同一频率时雨衰模型参数  $a, b$  随温度的变化比较小, 20 GHz 频率的雨衰模型具有较好的线性程度.

表3 不同温度下各频率对应幂律关系中  $a$  系数

Table 3.  $a$  in power-law relationship for different temperature and frequency.

频率/GHz	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
15	0.0765	0.0795	0.0825	0.0851	0.0872	0.0887
16	0.0896	0.0934	0.0973	0.1009	0.1041	0.1066
17	0.1035	0.1081	0.1129	0.1175	0.1216	0.1252
18	0.1184	0.1236	0.1292	0.1346	0.1398	0.1443
19	0.1343	0.1401	0.1462	0.1525	0.1584	0.1639
20	0.1513	0.1574	0.1641	0.1710	0.1777	0.1839

表4 不同温度下各频率对应幂律关系中  $b$  系数

Table 4.  $b$  in power-law relationship for different temperature and frequency.

频率/GHz	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
15	1.111	1.111	1.111	1.111	1.113	1.115
16	1.104	1.102	1.100	1.098	1.098	1.098
17	1.098	1.094	1.091	1.088	1.086	1.085
18	1.093	1.088	1.083	1.079	1.076	1.073
19	1.088	1.083	1.077	1.072	1.068	1.064
20	1.084	1.078	1.071	1.066	1.061	1.056

表5 ITU 模型  $a, b$  系数

Table 5.  $a$  and  $b$  in ITU model.

频率/GHz	15	16	17	18	19	20
$a$	0.0448	0.0528	0.0615	0.0708	0.0808	0.0916
$b$	1.1233	1.1086	1.0949	1.0818	1.0691	1.0568

表5给出了15—20 GHz频率范围内ITU模型对应的参数 $a, b$ 值。ITU模型中雨衰参数与温度无关,而且ITU模型基于LP谱分布,因此 $a, b$ 的值跟本文利用实际谱计算出的雨衰参数存在一定差异。

图8为2013年7月5日微波链路与OTT雨滴谱仪测量的降雨强度和累积降雨量。从实验结果来看,微波链路反演的降雨强度和OTT雨滴谱仪观测的降雨强度显示了较好的相关性;微波链路反演的累积降雨量和OTT雨滴谱仪的测量结果比较接近,但微波链路总的累积降雨量要比OTT观测值偏小。

图9为2013年7月6日微波链路的测量结果。由图可知,微波链路反演的降雨强度和OTT雨滴谱仪观测的降雨强度显示了非常好的相关性;微波

链路反演的累积降雨量和OTT雨滴谱仪的测量结果较为接近,在大部分情况下微波链路反演的累积降雨量比OTT观测值略小。

总结上述的观测结果,微波链路反演的降雨强度和OTT雨滴谱仪观测的降雨强度存在很好的相关性。微波链路反演的路径平均降雨强度与OTT雨滴谱仪观测的单点降雨强度并不完全一致,其主要原因是降雨的空间分布并不均匀,雨滴谱仪只能测量单点的降雨信息,而微波链路的总衰减是整条微波传播路径上降雨对微波链路的整体衰减效应,因而其反演出的降雨强度代表了整条微波链路路径上的平均降雨强度。此外,由于不同雨强和谱分布条件下的微波雨衰特征不同,这直接影响了(5)式中 $a$ 和 $b$ 的取值,未来将进一步研究不同降水条件下的反演模型及其参数修正。

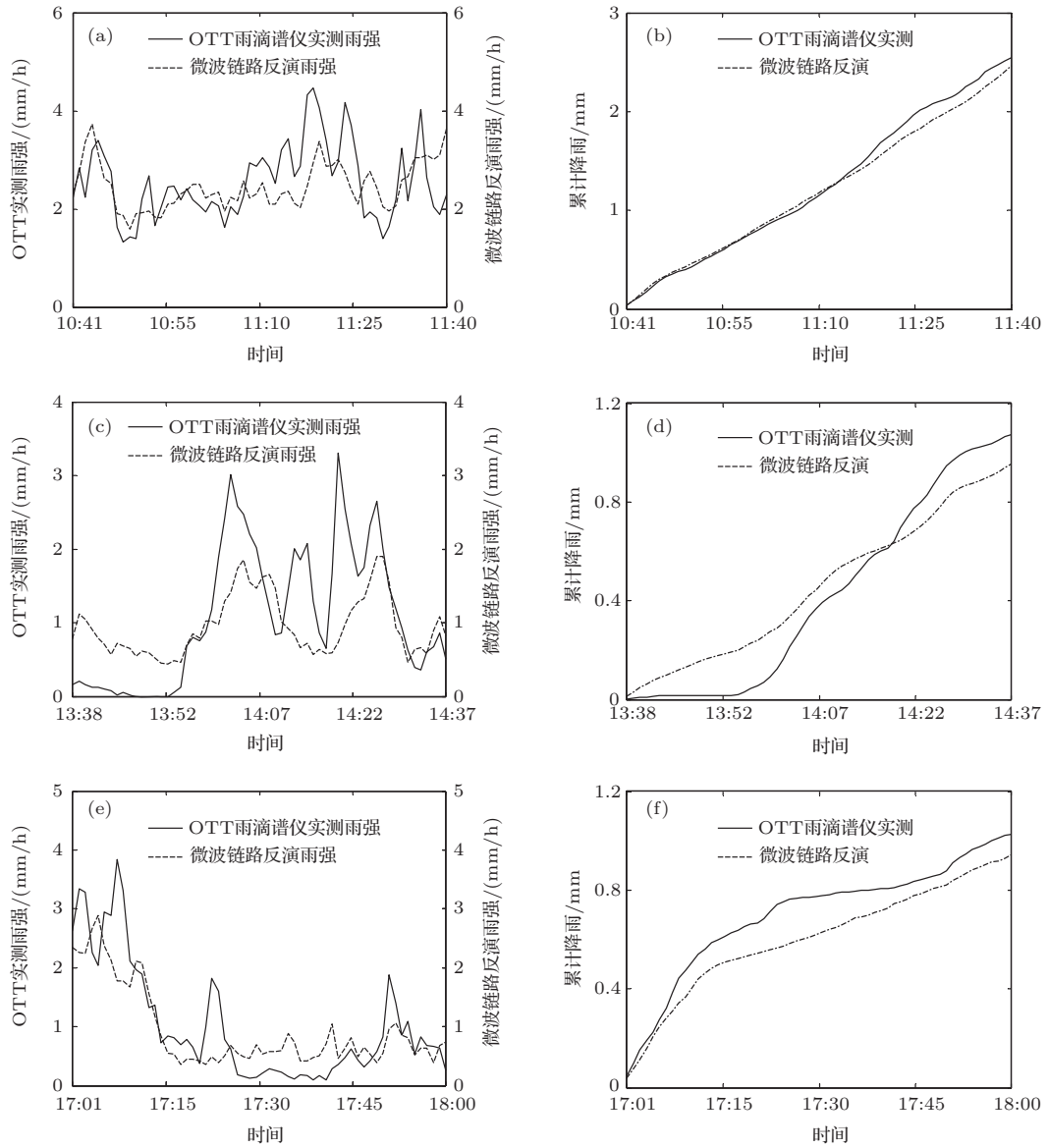


图8 微波链路反演降雨结果 (2013年7月5日)

Fig. 8. Inversion result of microwave link (2013.07.05).

为了定量分析微波链路的观测数据, 采用降雨强度时序的相关系数 $\rho$ 、累积降雨强度绝对偏差Bias和累积降雨强度相对偏差Bias<sub>R</sub>进行评估:

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^M (r_j^{\text{OTT}} - \bar{r}^{\text{OTT}}) \times (r_j^{\text{Microwave}} - \bar{r}^{\text{Microwave}})}{\left[ \sum_{j=1}^M (r_j^{\text{OTT}} - \bar{r}^{\text{OTT}})^2 \times \sum_{j=1}^M (r_j^{\text{Microwave}} - \bar{r}^{\text{Microwave}})^2 \right]^{-1/2}}, \quad (8)$$

$$\text{Bias} = \sum_j^M (r_j^{\text{Microwave}} - r_j^{\text{OTT}}), \quad (9)$$

$$\text{Bias}_R = \left| \frac{\sum_j^M (r_j^{\text{Microwave}} - r_j^{\text{OTT}})}{\sum_j^M (r_j^{\text{OTT}})} \right| \times 100\%. \quad (10)$$

本文同时采用了ITU雨衰模型提供的参数对微波链路测量的衰减进行了降雨强度的反演, 并与本文所采用的模型进行比对, 具体结果如表6所示.

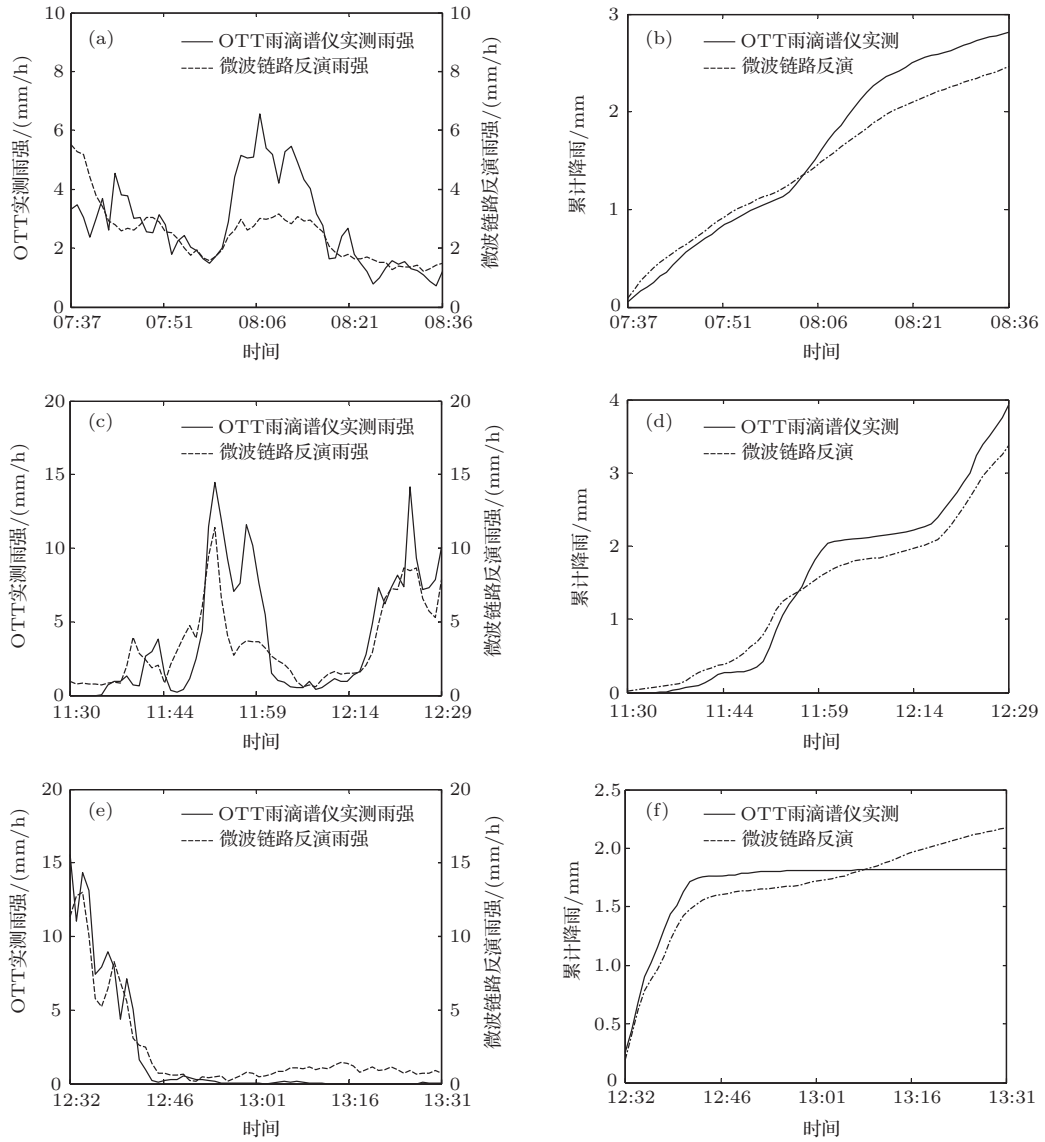


图9 微波链路反演降雨结果 (2013年7月6日)

Fig. 9. Inversion result of microwave link (2013.07.06).

表6 微波链路降雨反演结果对比

Table 6. Comparison of inversion result by microwave link.

测量时间	OTT 测量累积 降雨量/mm	微波链路反演 累积降雨量/mm		相关系数		绝对偏差/mm		相对偏差/%	
		ITU 模型	本文 模型	ITU 模型	本文 模型	ITU 模型	本文 模型	ITU 模型	本文 模型
2013.7.5 10:41—11:40	2.5463	4.9130	2.4612	0.4663	0.4663	2.3667	-0.0851	92.9449	3.3415
2013.7.5 13:38—14:37	1.0722	1.8747	0.9542	0.6473	0.6473	0.8026	-0.1180	74.8543	11.0067
2013.7.5 17:01—18:00	1.0252	1.8961	0.9425	0.8161	0.8161	0.8709	-0.0827	84.9474	8.0623
2013.7.6 07:37—08:36	2.8118	4.7575	2.4610	0.5732	0.5732	1.9457	-0.3508	69.1972	12.4777
2013.7.6 11:30—12:29	3.9257	6.7178	3.3773	0.8307	0.8307	2.7922	-0.5483	71.1270	13.9673
2013.7.6 12:32—13:31	1.8214	4.3214	2.1762	0.9647	0.9647	2.5000	0.3548	137.2602	19.4800

由表可知, ITU模型和本文提出模型的反演结果均与实测值有较好的相关性, 相关系数基本位于0.6以上, 最高相关系数可达0.9647; ITU模型反演结果要高于OTT实测值, 而本文模型反演结果要比OTT测量值略低. 从绝对误差来看, 本文模型反演结果与OTT观测值的偏差基本都在0.5 mm以内, 最小偏差仅为0.0827 mm; 从相对偏差来看, 本文模型反演结果与OTT观测值相对偏差基本在15%以内, 最小相对误差为3.3415%. 而ITU模型的反演结果与OTT实测值的偏差较大, 其原因是ITU模型是基于LP谱分布模型拟合得到的, 仅适用于较为稳定的层状云降雨, 与本次降水的雨滴谱特征存在一定差异, 因此其反演结果不如本文基于实际谱资料的反演模型的结果准确.

## 4 结 论

本文从特征大气对电磁波的吸收衰减模型出发, 提出了微波链路降雨有效衰减的修正模型, 基于实测雨滴谱分布资料得到了雨衰幂律关系的参数, 最终建立了视距微波链路的降雨反演模型. 同时搭建了视距微波链路降雨反演实验系统, 对南京地区一次较强的降雨过程进行了测量实验. 实验结果表明, 与雨滴谱仪测量结果相比, 本文所提出的微波链路降雨反演模型得到的降雨强度相关系数大多高于0.6, 最高相关系数可达0.9647; 累积降雨量的绝对误差大多在0.5 mm以内, 最小偏差仅有0.0827 mm; 相对偏差大部分在15%以内, 最小相对误差为3.3415%. 而采用ITU雨衰模型的反演结果偏差要显著高于本文所提出模型的反演结果. 实验结果验证了本文所提出的微波链路降雨反演模型的可行性和准确性.

## 参考文献

- [1] Gao T C 2012 *Meteorological and Hydrological Equipments* **23** 1 (in Chinese) [高太长 2012 气象水文装备 **23** 1]
- [2] Lv D R, Wang J C, Qiu J H, Tao S Y 2003 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **27** 552 (in Chinese) [吕达仁, 王普才, 邱金恒, 陶诗言 2003 大气科学 **27** 552]

- [3] Liang H H, Xu B X, Liu L P, Ge R S 2005 *Advances in Earth Science* **20** 541 (in Chinese) [梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 葛润生 2005 地球科学进展 **20** 541]
- [4] Qie X S, Lv D R, Chen H B, Wang P C, Duan S, Zhang W X 2008 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **32** 867 (in Chinese) [鄒秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 王普才, 段树, 章文星 2008 大气科学 **32** 867]
- [5] Michaelides S 2008 *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation, and Prediction* (Berlin, Springer)
- [6] Messer H, Zinevich A, Alpert P 2006 *Science* **312** 713
- [7] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R 2013 *Proceedings of the National Academy of Sciences* **110** 2741
- [8] Thurai M, Bringi V N, Shimomai T 2007 *The 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing* Singapore, December 10–13, 2007 p1
- [9] Yang R K, Huang J Y, Lv X H 2000 *Journal of Xidian University* **27** 487 (in Chinese) [杨瑞科, 黄际英, 吕小红 2000 西安电子科技大学学报 **27** 487]
- [10] 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]
- [11] Atlas D, Ulbrich C W 1977 *J. Appl. Meteorol.* **16** 1322
- [12] Minda H, Nakamura K 2005 *J. Atmos. Oceanic Technol.* **22** 165
- [13] Zinevich A, Alpert P, Messer H 2008 *Advances in Water Resources* **31** 1470
- [14] Zinevich A, Messer H, Alpert P 2009 *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **48** 1317
- [15] Goldshtein O, Messer H, Zinevich A 2009 *IEEE Transactions on Signal Processing* **57** 1616
- [16] Krämer S, Verworn H, Redder A 2003 *6th Intl. Workshop on Precipitation in Urban Areas* 1
- [17] Goldshtein O, Messer H Z, Zinevich A 2009 *IEEE Trans. Signal Process* **57** 1616
- [18] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R 2011 *Water Resources Research* **47** W12505
- [19] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R 2013 *Proceedings of the National Academy of Sciences* 1
- [20] Liu X C, Liu L, Gao T C, Ren J P 2013 *J. Infrared Millim. Waves* **32** 379 (in Chinese) [刘西川, 刘磊, 高太长, 任景鹏 2013 红外与毫米波学报 **32** 379]
- [21] Liu X C, Gao T C, Liu L, Yang S C 2013 *Progress in Geophysics* **28** 71 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 刘磊, 杨树臣 2013 地球物理学进展 **28** 71]
- [22] Jiang S T, Gao T C, Liu X C, Liu L, Liu Z T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154303 (in Chinese) [姜世泰, 高太长, 刘西川, 刘磊, 刘志田 2013 物理学报 **62** 154303]
- [23] International Telecommunication Union 2013 Rec. p676-9
- [24] Freeman R 1991 *Telecommunications Transmission Handbook* (3rd Edn.) (Canada: John Wiley & Sons Inc.) p279

# Research on the method and experiment of path rainfall intensity inversion using a microwave link\*

Gao Tai-Chang<sup>1)</sup> Song Kun<sup>1)</sup> Liu Xi-Chuan<sup>1)†</sup> Yin Min<sup>1)</sup> Liu Lei<sup>1)</sup> Jiang Shi-Tai<sup>2)</sup>

1) (College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

2) (Unit No. 93721 of PLA, Shuozhou 038301, China)

( Received 26 January 2015; revised manuscript received 24 March 2015 )

## Abstract

Accurate measurement of rainfall with high spatial and temporal resolution have important significance in meteorology, hydrology, agriculture, environment, flood warning and weather forecasting, etc. Based on the rain-induced power-law attenuation, an inversion method of the path rainfall intensity is proposed by using a microwave link. Starting from the atmospheric gas absorption attenuation model, a correction model of rainfall effective attenuation and a rainfall inversion model for line-of-sight microwave links are proposed, based on the microwave rain attenuation characteristics and raindrop size distribution statistics. A line-of-sight microwave link is designed and used to measure the rainfall, and the path average rain rate is inverted by means of rainfall inversion model, which is compared with a disdrometer. Results show that the correlation coefficient of rain rate inverted by microwave link with that of disdrometer is higher than 0.6 mostly, and the maximum value is 0.9647; the error of the accumulated rain amount is less than 0.5 mm, and the minimum value is 0.0827 mm; the relative error of the accumulated rain amount is less than 15%, the minimum value is 3.3415%. Experiments confirm the feasibility and accuracy of rainfall inversion obtained using a microwave link.

**Keywords:** rain-induced microwave attenuation measurements, microwave link, inversion of rain rate

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

**DOI:** [10.7498/aps.64.174301](https://doi.org/10.7498/aps.64.174301)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41475020, 41405024, 41327003).

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