

基于支持向量机的微波链路雨强反演方法

宋堃 高太长 刘西川 印敏 薛杨

Method and experiment of rainfall intensity inversion using a microwave link based on support vector machine

Song Kun Gao Tai-Chang Liu Xi-Chuan Yin Min Xue Yang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 244301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.244301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于微波链路的路径雨强反演方法及实验研究

[Research on the method and experiment of path rainfall intensity inversion using a microwave link](#)

物理学报.2015, 64(17): 174301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174301>

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>

# 基于支持向量机的微波链路雨强反演方法\*

宋堃 高太长<sup>†</sup> 刘西川 印敏 薛杨

(解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

(2015年7月8日收到; 2015年8月5日收到修改稿)

为提高微波链路雨致衰减反演雨强精度, 在 Mie 散射理论、气体吸收衰减模型以及 Gamma 雨滴谱分布的基础上, 将支持向量机引入到微波链路测量降水中, 提出了基于支持向量机的微波链路雨强反演方法, 并开展了 15—20 GHz 频段的视距微波链路与地面雨滴谱仪的同步观测降雨实验. 实验结果表明, 基于支持向量机的微波链路雨强反演模型的反演雨强与实测雨强的相关系数全部高于 0.6, 最高达到 0.9674; 雨强的均方根误差最小值为 0.5780 mm/h, 累积降雨量的绝对最小误差仅为 0.0080 mm; 相对偏差大部分在 10% 以内, 最小偏差为 0.7425%. 实验结果验证了基于支持向量机的微波链路雨强反演方法的有效性、准确性和适用性, 对于进一步提高微波链路反演降雨精度、改善降水监测效果具有重要意义.

**关键词:** 微波雨衰, 微波链路, 链路雨强反演, 支持向量机

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.244301

## 1 引言

降水是十分重要的物理现象, 准确、及时地测量降水强度关系到人民生活、社会生产、部队保障和国家安全<sup>[1]</sup>. 目前气象观测业务中监测降水的手段主要有雨量计、天气雷达和气象卫星<sup>[2-4]</sup>. 利用雨量计进行雨强测量有较高的准确性, 然而其空间代表性较差, 难以监测降雨的精细分布; 天气雷达虽然能提供高时空分辨率的雨强数据, 但受到雷达扫描方式和  $Z-R$  关系不确定性的限制, 其反演结果与降落在地表的真实降雨存在一定差异; 气象卫星可以自上而下测量云顶或穿透云顶, 但是探测目标仍然不是地表真实降雨, 根据回波反演雨强分布的精度仍有待提高. 现阶段, 实时准确地测量地表降水仍然存在一定的难度.

近些年, 气象学者提出了利用广泛存在的微波通信信号传播的衰减信息反演地表降雨强度的方法, 并开展了大量的实验研究, 取得了一定的进展. 2006年, Messer等<sup>[5]</sup>提出利用微波通信链

路进行降雨的探测反演的设想, 并给出了基于雨强-微波衰减幂律关系的雨强反演模型. 2009年, Goldshtein等<sup>[6]</sup>试验了不同频段商用微波链路在降雨测量中的应用, 证明了多频段微波雨强反演的准确性. 2012年, Messer等<sup>[7]</sup>提出了利用商业微波通信网络进行雪、冰水混合物等其他相态降水探测反演的设想, 并提出了相关的反演模型. 2013年, David等<sup>[8]</sup>开展了不同时段微波链路测雨实验, 通过与实际降雨进行比对, 验证了微波链路测雨的准确性与可行性; 同时, Overeem等<sup>[9]</sup>利用超过2400条微波链路进行了多频段蜂窝无线网络实时监测降雨的试验, 并采用检索算法验证了基于微波链路进行区域雨强反演的可行性. 目前, 国内在此领域研究较少. 刘西川等<sup>[10,11]</sup>研究了降水粒子对不同波段微波传输特性的影响, 提高了复杂降水条件下微波传播衰减的评估精度, 并建立了考虑谱分布和温度的降水衰减模型; 2013年, 姜世泰等<sup>[12]</sup>研究了基于微波链路的降雨场反演方法, 并进行了仿真研究; 2015年, 印敏等<sup>[13]</sup>设计了视距微波通信链

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

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: 2009gaotc@gmail.com

路,并证明了利用微波链路进行精确空间尺度局部降雨实时测量的可行性;同年,高太长等<sup>[14]</sup>提出了基于实测雨滴谱的微波链路路径雨强反演算法,并通过15—20 GHz频段的微波链路测量实验验证了该方法的有效性.

目前,国内外对微波链路雨强反演模型普遍采用ITU-R(International Telecommunication Union)模型,该模型忽略了温度、气压等气象因素,是基于数据收集和通信原理建立起的经验模型<sup>[15]</sup>:

$$A = a \cdot R^b, \quad (1)$$

式中,  $A(\text{dB}/\text{km})$ 代表微波传输雨致衰减,  $R(\text{mm}/\text{h})$ 代表降雨强度. 利用(1)式可以反解得到降雨强度.

由于忽略了气象因素,ITU雨衰模型反演的雨强精度较低,不能满足实际要求. 为了进一步提高微波链路反演降水的精度,本文在Mie散射<sup>[16,17]</sup>和气体吸收衰减模型的基础上<sup>[18]</sup>,利用微波衰减特性和雨滴谱统计资料,提出基于支持向量机(support vector machine, SVM)的微波链路雨强反演方法. 15—20 GHz频段微波链路与地面降水观测仪器的同步对比观测试验验证了该方法的有效性和准确性.

## 2 基于SVM的微波链路雨强反演模型

### 2.1 微波链路雨强反演原理

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,其中,降水是主要影响因素. 微波雨致衰减主要取决于降雨强度、雨滴尺度分布等因素. 基于此,根据微波雨致衰减的大小可以反演实际降雨强度.

本文基于Mie散射理论和SVM理论,采用与我国大部分地区降雨形态更为相近的Gamma谱分布<sup>[19-21]</sup>,利用雨滴谱仪实测历史降雨数据,建立微波链路雨强反演模型. 同时通过测量微波链路接收端的接收电平,修正由于非降雨因素造成的微波传输衰减,计算得到微波链路雨致衰减 $A_{\text{rain}}$ . 通过反演模型和微波雨致衰减反演得到实际降雨强度. 具体反演流程如图1所示.

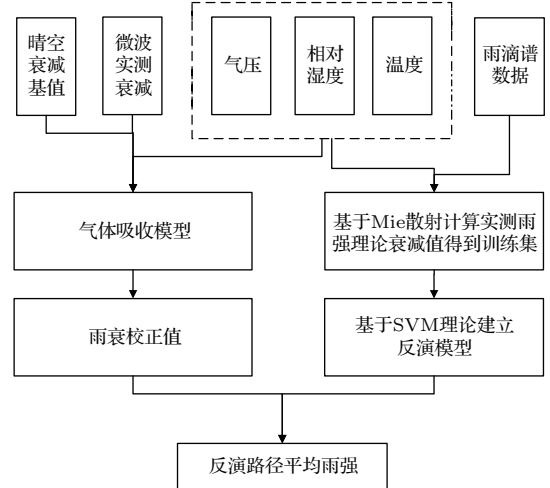


图1 雨衰反演流程图

Fig. 1. Flow chart of the rainfall inversion model.

### 2.2 微波链路实测雨致衰减值提取

微波传输衰减可用(2)式表示<sup>[22]</sup>:

$$A = 92.45 + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(D) + A_{\text{water}} + A_{\text{fog}} + A_{\text{O}_2} + A_{\text{air}} + A_{\text{rain}}, \quad (2)$$

式中,  $A$ 为微波传输总衰减,  $f$ 为微波频率(GHz),  $D$ 为微波传输距离(km),  $A_{\text{water}}$ 为水汽造成的衰减,  $A_{\text{fog}}$ 为雾或轻雾造成的衰减,  $A_{\text{O}_2}$ 为氧气造成的衰减,  $A_{\text{air}}$ 为其他气体吸收造成的衰减,  $A_{\text{rain}}$ 为降水造成的衰减. 其中,降雨造成的衰减是微波传输的主要衰减来源.

为提取微波雨致衰减,首先在晴空条件下测得微波链路路径传输衰减基值,设为 $A_{\text{Base}}^{\text{Dry}}$ ,并记录实测时的温度、压强及相对湿度等气象条件. 在降雨时,实测得到微波链路传输总衰减 $A_{\text{tot}}$ . 由于降雨现象发生时,大气中的温度、气压、湿度等条件和测量晴空基值时的条件存在差异,因此要进行温度、气压及湿度的修正,利用降雨前和降雨时测得的温度、气压、湿度数据变化结合大气气体吸收衰减模型进行修正,得到降雨过程中微波的衰减基准值 $A_{\text{Modi}}$ ,因此仅由降雨造成的衰减 $A_{\text{Rain}}$ 可由下式计算:

$$A_{\text{Rain}} = A_{\text{tot}} - A_{\text{Base}}^{\text{Dry}} - A_{\text{Modi}}. \quad (3)$$

具体的微波链路雨致衰减值提取和修正流程如图2所示.

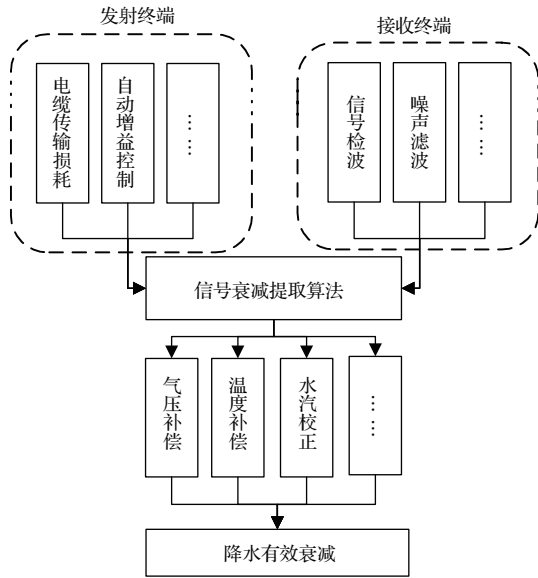


图2 雨致衰减提取与修正

Fig. 2. Extraction and modification of rain-induced attenuation.

### 2.3 SVM反演雨强

SVM是在统计学理论的Vapnik-Chervonenkis维理论和结构风险最小原理的基础上发展而来的一种有效的机器学习方法,是专门针对在小样本情况下求解最优解的算法,目前已被广泛应用于分类、模式识别及函数回归等领域.

#### 2.3.1 SVM训练样本集选取

首先,读取OTT雨滴谱仪实测的历史降雨数据 $R_M(\text{mm/h})$ .其次,基于Mie散射理论,采用Gamma谱分布,计算实测雨强的理论衰减,利用(4)式可得到微波在不同气象条件下的Mie散射衰减效率因子 $Q_{\text{ext}}$ :

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (4)$$

式中, $x$ 为尺度参数, $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$ ,其中 $r$ 为粒子半径, $\lambda$ 为微波波长; $a_n$ 和 $b_n$ 为Mie系数,代表粒子磁多极子和点多极子对于粒子消光性能的贡献.

因此,群雨滴衰减系数 $\gamma_{\text{ext}}$ 可由下式[23]得到:

$$\gamma_{\text{ext}}(1/\text{km}) = 0.25\pi \int_0^{\infty} D^2 Q_{\text{ext}}(D) N(D) dD, \quad (5)$$

式中, $D$ 为降雨粒子的等效直径; $N(D)$ 为Gamma雨滴谱分布,其函数具体形式与实际雨强 $R_M$ 有关.将(5)式乘以 $10 \log_{10} e \approx 4.343$ ,使 $1/\text{km}$ 转换

成 $\text{dB/km}$ 得到 $\gamma_{\text{ext}}(\text{dB/km})$ .通过(5)式及实际雨强值 $R_M$ ,计算出不同气象环境下基于实际降雨谱分布降雨对微波的理论衰减 $A_{(w,f)}$ , $w$ 表示气象条件, $f(\text{GHz})$ 表示微波链路频段.

本文将 $A_{(w,f)}$ 作为SVM模型的训练特征量 $x_i = [A_{(w,f)}]_i$ , $i$ 代表时间; $R_M$ 作为SVM模型的训练输出量 $y_i = [R_M]_i$ ,就此得到训练样本集 $T_i = [x, y]_i$ .根据降雨时的实际温度等气象条件选择不同的训练集进行模型训练,进而进行雨强反演.

#### 2.3.2 基于SVM微波链路的反演模型的建立

首先,定义一个线性回归函数:

$$f(x) = \omega^T \cdot \phi(x) + b, \quad (6)$$

$f(x)$ 实质上是一个线性分类器,对于非线性问题,利用非线性映射 $\phi(\cdot)$ 将样本数据映射到希尔伯特空间(Hilbert,  $H$ 空间)中进行非线性回归.其中, $\omega \in H$ 为与样本集有关的权向量,实数 $b$ 为阈值.

根据结构风险最小化原则,引入风险因子 $R$ :

$$\min R = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*), \quad (7)$$

约束条件为

$$\begin{cases} R_{M_i} - \omega^T \cdot \phi(A_{(w,f)_i}) - b \leq \varepsilon + \xi_i, \\ \omega^T \cdot \phi(A_{(w,f)_i}) + b - R_{M_i} \leq \varepsilon + \xi_i^*, \\ \xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0, \end{cases}$$

式中, $C$ 为惩罚因子, $\varepsilon$ 为引入的不敏感损失函数, $\xi_i$ 和 $\xi_i^*$ 为引入松弛变量, $R_{M_i}$ 为历史实测降雨数据, $A_{(w,f)_i}$ 为相对应的微波理论雨致衰减值.此时,问题转化为求解带有约束条件的风险因子极小化问题.为方便求解 $\omega$ 和 $b$ ,将约束问题转化为求解拉格朗日对偶问题:

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*) \\ & - \sum_{i=1}^m \alpha_i (\varepsilon + \xi_i - R_{M_i} + \omega^T \cdot \phi(A_{(w,f)_i}) + b) \\ & - \sum_{i=1}^m \alpha_i^* (\varepsilon + \xi_i^* + R_{M_i} - \omega^T \cdot \phi(A_{(w,f)_i}) - b) \\ & - \sum_{i=1}^m (\eta_i \cdot \xi_i - \eta_i^* \cdot \xi_i^*), \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*$ 为拉格朗日乘子.

求解 (7) 和 (8) 式可得:

$$\omega = \sum_{i=1}^m (\alpha_i R_{M_i} A_{(w,f)_i}), \quad \sum_{i=1}^m \alpha_i R_{M_i} = 0,$$

$$b = \omega A_{(w,f)_k} - R_{M_k}, \quad 1 \leq k \leq m. \quad (9)$$

需要说明的是, 拉格朗日乘子  $\alpha_i$  要由 SMO(sequential minimal optimization) 算法进行迭代优化, 给定一个初始值, 在迭代中寻找最优解; 阈值  $b$  则是选取某一个样本点进行计算, 其值亦随  $\alpha_i$  值的迭代更新而更新.

在 SVM 理论中, 非线性回归是将内积映射到高维特征空间, 因此, 为避免大样本产生维数灾难, 由核函数代替内积, 本文选用的核函数为高斯径向基函数 (RBF), 该核函数的灵活性和通用性较高:

$$K(A_{(w,f)_i}, A_{\text{Rain}}) = \exp\left(-g \cdot \|A_{(w,f)_i} - A_{\text{Rain}}\|^2\right), \quad (10)$$

式中,  $g$  为核参数,  $A_{\text{Rain}}$  为实测微波链路降雨衰减值. 因此, 结合其自身约束条件, 得到最终的回归函数:

$$R_{\text{Inverse}}(A_{\text{Rain}}) = \sum_{i=1}^m (\alpha_i R_{M_i}) \cdot K(A_{(w,f)_i}, A_{\text{Rain}}) + \sum_{i=1}^m (\alpha_i R_{M_i} A_{(w,f)_i}) A_{(w,f)_k} - R_{M_k}. \quad (11)$$

建立准确性高的基于 SVM 微波链路雨强反演模型需要确立惩罚因子  $C$  和核函数 RBF 的核参数  $g$ . 为寻求参数  $C$  和  $g$  的最优值, 本文选用粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 进行参数寻优 [24], 其步骤如下.

**步骤 1** 初始化. 设置学习因子及进化代数, 给定  $C$  和  $g$  的初始值.

**步骤 2** 适应度评价. 计算个体适应度值.

**步骤 3** 比较寻优. 计算新粒子群个体适应度值, 通过对比当前参数  $C$ ,  $g$  适应度及历史最优值, 更新参数  $C$  和  $g$ .

**步骤 4** 输出参数  $C$  和  $g$  最优值. 达到最大进化代数, 参数寻优结束, 输出  $C$ ,  $g$  值.

将参数  $C$  和  $g$  代入模型, 利用训练集  $T$  对模型 (11) 进行训练及检验, 得到基于 SVM 微波链路的最佳反演模型, 将实测微波链路降雨衰减值  $A_{\text{Rain}}$  代入 (11) 式得到反演雨强值  $R_{\text{Inverse}}$ .

### 3 微波链路测量实验与结果分析

为了检验 SVM 微波链路雨强反演方法的准确性, 本文开展了 15—20 GHz 频段的视距微波链路反演降水实验, 并与 OTT PARSIVEL 激光粒子谱仪进行同步对比观测. 微波链路长度为 6.57 km, 发射机采用 Anritsu MG3694B 信号发生器, 信号接收机采用 Agilent E4440A 频谱分析仪, 发射和接收天线均为定向天线, 信号传输采用屏蔽电缆, 以使微波信号避免外界干扰, 并实现信号无损接收. 微波发射机发射功率设置在 14 dBm, 接收机的采样时间间隔为 15 s, 分辨率为 0.01 dB. 微波链路实验为 2013 年 7 月 5 日 9: 00—18: 00 以及 2013 年 7 月 6 日 8: 00—16: 00, 在实验过程中, 分别出现了暴雨、大雨、中雨、小雨、毛毛雨.

ITU 雨衰模型采用的是经验幂律公式, 该模型基于 LP 谱分布, 其雨衰参数  $a$ ,  $b$  忽略一部分气象条件的变化. 表 1 给出了 15—20 GHz 频段范围内 ITU 雨衰模型对应的雨衰参数值  $a$ ,  $b$ . 根据该参数, 结合实验实测微波链路传输衰减值  $A_{\text{Rain}}$ , 就可反演得到基于 ITU 雨衰模型的降雨强度  $R_{\text{ITU}}$ , 但忽略了温度、气压等因素的影响, 对反演结果造成一定的影响.

基于 SVM 的微波链路雨衰反演模型在不同温度、气压、相对湿度的环境下, 采用与实际气象条件相对应的训练集, 训练出更符合实际降雨情况的反演模型, 将  $A_{\text{Rain}}$  输入 SVM 雨衰模型, 从而可反演得到更加真实的雨强  $R_{\text{SVM}}(\text{mm/h})$ .

表 1 ITU 模型  $a$ ,  $b$  系数  
Table 1.  $a$  and  $b$  in ITU model.

频率	15 GHz	16 GHz	17 GHz	18 GHz	19 GHz	20 GHz
$a$	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

图3和图4分别给出了2013年7月5日和7月6日ITU雨衰模型和SVM微波链路反演模型与OTT雨滴谱仪测量的降雨强度和累积降雨量的对比. 从实验结果可以看出, 两种模型反演的降雨强度与OTT雨滴谱仪观测的降雨强度之间均存在较好的相关性. 对于降雨强度, 与OTT雨滴谱仪的实测雨强相比, 基于ITU模型的反演雨强偏大, 而基于SVM模型的反演雨强与实测雨强更为接近. 对于累积降雨量, 基于ITU雨衰模型的反演结果显著偏大, 基于SVM的反演效果明显优于基于ITU雨衰模型的反演效果. 要

强调的是, 由于降雨在空间分布是极其不均匀的, OTT雨滴谱仪只能测量单点降雨, 而微波链路反演的是整条链路的平均雨强. 因此微波链路反演的路径平均雨强与OTT雨滴谱仪观测的降雨强度难以完全一致.

本文进一步定量分析了基于两种模型的微波链路反演的降雨数据, 采用雨强时序相关系数、雨强均方根误差、累计降雨强度绝对偏差和累计降雨相对偏差进行评估, 评估以OTT雨滴谱仪实测雨强数据为测量降雨真值. 评估结果列于表2.

表2 基于ITU模型和SVM模型微波链路降雨反演对比  
Table 2. Comparison of inversion results by microwave link based on ITU model and SVM model.

试验时间	OTT 测量 累积降 雨量/mm	微波链路反演累 积降雨量/mm		雨强时序 相关系数		雨强均方 误差/mm·h <sup>-1</sup>		累积降雨 绝对偏差/mm		累积降雨 相对偏差/%	
		ITU 模型	SVM 模型	ITU 模型	SVM 模型	ITU 模型	SVM 模型	ITU 模型	SVM 模型	ITU 模型	SVM 模型
2013.7.5 13: 38—14: 37	1.0722	1.8747	1.0807	0.6473	0.6507	1.0858	0.7420	0.8026	0.0080	74.8543	0.7425
2013.7.5 17: 01—18: 00	1.0252	1.8961	1.0069	0.8161	0.8274	1.1768	0.5780	0.8709	-0.0183	84.9474	1.784
2013.7.6 11: 30—12: 29	3.9257	6.7178	3.0758	0.8307	0.8335	4.0450	2.7234	2.7922	-0.8498	71.1270	21.6
2013.7.6 12: 32—13: 31	1.8214	4.3214	1.9516	0.9647	0.9674	3.6103	1.5481	2.5000	0.1302	137.2602	7.2

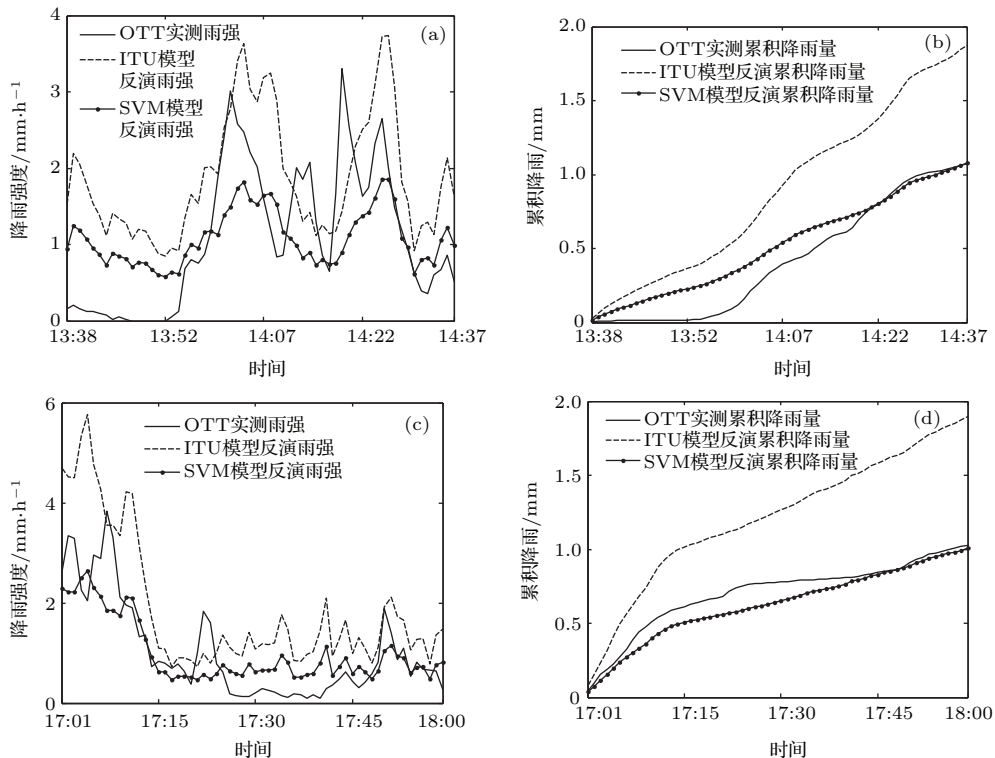


图3 ITU模型、SVM模型反演降雨结果(2013年7月5日)

Fig. 3. Inversion results of microwave link based on ITU model and SVM model (2013.07.05).

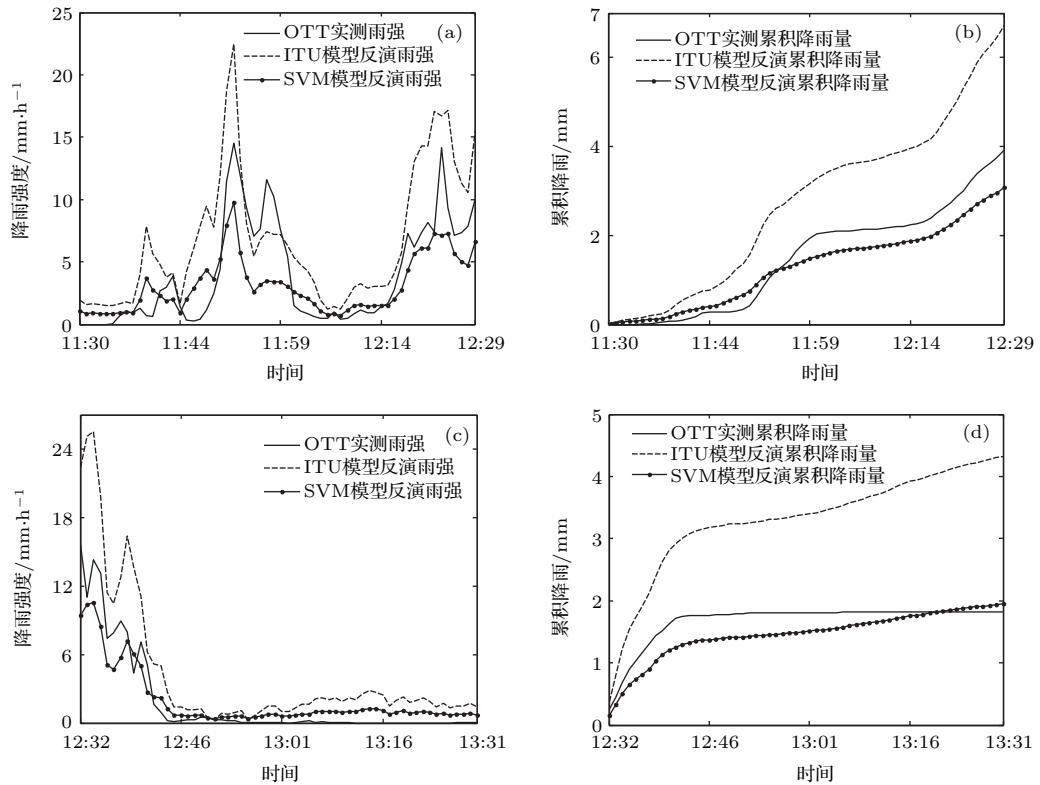


图4 ITU模型、SVM模型反演降雨结果(2013年7月6日)

Fig. 4. Inversion result of microwave link based on ITU model and SVM model (2013.07.06).

由表2可知,在反演时序雨强方面,基于ITU模型和本文提出的基于SVM模型的微波链路雨强反演结果与OTT雨滴谱仪的实测值均有着较好的相关性,相关系数都在0.6以上,其中基于ITU模型的反演雨强相关系数为0.6473—0.9647,而基于SVM模型的反演雨强相关系数为0.6507—0.9674,基于SVM模型反演的雨强相关性略优于基于ITU模型;对于链路反演雨强的均方根误差(RMSE),基于SVM模型的反演结果也要明显优于ITU模型,其最小值为0.5780。在反演累积降雨量方面,基于SVM模型的反演结果要明显优于ITU模型的反演结果,将基于两种模型的累积降雨量的反演结果与OTT雨滴谱仪的实测累积降雨量进行对比,基于SVM模型的反演结果要略低于实际测量值,基于ITU模型的反演结果要高出实测值很多,基于SVM模型的反演结果更加接近实际累积降雨量;从累积降雨的绝对误差来看,基于SVM模型的微波链路反演结果与实际观测值的偏差都在0.8 mm以内,最小偏差仅为0.0080 mm,优于基于ITU模型的反演结果;从相对偏差来看,基于SVM模型的累积降雨量反演结果相对偏差大部分在10%以内,最小相对偏差

仅为0.7425%,而ITU雨衰模型的最小相对偏差为71.1270%。

综上所述,本文提出的基于SVM的微波链路反演雨强模型的实际效果更优于基于ITU雨衰模型的反演效果。其原因是ITU雨衰模型只考虑了降雨对微波传输衰减这一主要因素,而忽略了气温、气压、空气湿度对微波传输衰减的影响。本文提出的基于SVM微波链路的反演模型则考虑了不同气象环境降雨对微波传输造成的衰减,反演精度大幅度提高。另外,本文模型是基于Gamma谱分布进行反演,与ITU模型的LP谱分布相比,更加适合于我国大部分地区。

#### 4 结 论

本文以Mie散射、特征大气对电磁波的衰减以及Gamma谱分布为物理基础,提出了基于SVM的微波链路雨强反演模型,并开展了15—20 GHz频段的视距微波链路与地面雨滴谱仪的同步观测降雨实验。实验结果表明,本文所提出的基于SVM的微波链路雨强反演模型的反演效果要优于ITU雨衰模型,反演雨强的相关系数全部高于0.6,

最高达到了0.9674, RMSE最小值为0.5780, 累积降雨量的绝对偏差在0.8 mm以内, 最小偏差仅为0.0080 mm, 相对误差大多低于10%. 同时, 基于SVM理论进行微波链路雨强反演模型建立, 通过机器学习进行模型训练, 虽然反演模型考虑了多种气象因素, 但其复杂程度并没有增加, 既降低了建模的难度, 又使模型更加符合实际情况. 试验结果验证了本文提出的基于SVM反演模型的准确性和可行性, 对于进一步提高微波链路反演降雨精度、改善降水监测效果具有重要意义.

### 参考文献

- [1] Gao T C 2012 *Meteorol. Hydrol. Eq.* **23** 1 (in Chinese) [高太长 2012 气象水文装备 **23** 1]
- [2] Lü D R, Wang P C, Qiu J H, Tao S Y 2003 *Chin. J. Atmos. Sci.* **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 *Adv. Earth Sci.* **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, Lü D R, Chen H B, Wang P C, Duan S, Zhang W X 2008 *Chin. J. Atmos. Sci.* **32** 867 (in Chinese) [郄秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 王普才, 段树, 章文星 2008 大气科学 **32** 867]
- [5] Messer H, Zinevich A, Alpert P 2006 *Science* **312** 713
- [6] Goldshtein O, Messer H, Zinevich A 2009 *IEEE Trans. Signal Proces.* **57** 1616
- [7] Messer H, Zinevich A, Alpert P 2012 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **15** 32
- [8] David N, Alpert P, Messer H 2013 *Atmos. Res.* **131** 13
- [9] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110** 2741
- [10] 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]
- [11] Liu X C, Gao T C, Liu L, Zhai D L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 199201 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 刘磊, 翟东力 2014 物理学报 **63** 199201]
- [12] 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]
- [13] Yin M, Jiang S T, Gao T C, Liu X C, Liang M Y, Ge S R, Cao C K 2015 *Meteorol. Sci. Technol.* **43** 1 (in Chinese) [印敏, 姜世泰, 高太长, 刘西川, 梁妙元, 戈书睿, 曹承堃 2015 气象科技 **43** 1]
- [14] 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, 姜世泰 2015 物理学报 **64** 174301]
- [15] International Telecommunication Union 2005 *Rec. ITU-R* p838-3
- [16] Zhao H G, Wen J H, Liu Y Z, Yu D L, Wang G, Wen X S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1305
- [17] Liu X C, Gao T C, Han X D 2010 *J. Meteorol. Sci.* **30** 42 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 韩小冬 2010 气象科学 **30** 42]
- [18] David N, Alpert P, Messer H 2009 *Atmos. Chem. Phys.* **9** 2413
- [19] Chen B J, Li Z H, Liu J C, Gong F J 1998 *Acta Meteorol. Sin.* **56** 123 (in Chinese) [陈宝君, 李子华, 刘吉成, 宫福久 1998 气象学报 **56** 123]
- [20] Yuan C, Fan L, Li Y B 2001 *J. Nanjing I. Meteorol.* **24** 250 (in Chinese) [袁成, 樊玲, 李亚滨 2001 南京气象学院学报 **24** 250]
- [21] Zheng J H, Chen B J 2007 *J. Meteorol. Sci.* **27** 17 (in Chinese) [郑娇恒, 陈宝君 2007 气象科学 **27** 17]
- [22] Freeman R 1991 *Telecommunications Transmission Handbook* (3rd Ed.) (Canda: John Wiley & Sons Inc.) p279
- [23] Liu X C, Gao T C, Liu L 2013 *Infrared Laser Eng.* **42** 167 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 刘磊 2013 红外与激光工程 **42** 167]
- [24] Liu H H, Liu Y H 2012 *Chin Phys. B* **21** 026102



# Method and experiment of rainfall intensity inversion using a microwave link based on support vector machine\*

Song Kun Gao Tai-Chang<sup>†</sup> Liu Xi-Chuan Yin Min Xue Yang

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

( Received 8 July 2015; revised manuscript received 5 August 2015 )

## Abstract

The precipitation is an important physical phenomenon. The real-time, accurate measurement of rainfall intensity has important significance in meteorological support, agriculture, weather forecasting, transportation industry and military mission. However, current methods, such as the rain gauge, the weather radar and meteorological satellite, are unable to meet the needs in all the areas above at present. The network of rain gauge is costly. Meanwhile, rain gauge has low spatial and temporal resolution. And the weather radar has a big deviation because of the ground clutter. Besides, the meteorological satellite is unable to measure the surface rainfall. Thus, a method of using the measurement of microwave rain-induced attenuation for rainfall estimation has been presented in meteorological field recently by meteorological experts and it has made some progress. The method based on microwave link has low cost because of using preexisting microwave device. There are also many preexisting microwave transmission networks, which can be used by rainfall field inversion in the future research. The method measures rainfall intensity more accurately because the propagation path of microwave is close to the surface. Many models for inverting rainfall intensity by rain-induced microwave attenuation have been put forward on account of the method advantages. The commonly used model for inversion of rain rate is given by International Telecommunication Union (ITU). However, the model presented by ITU ignores a number of meteorological factors such as temperature, humidity and air pressure, which to some degree reduces the accuracy of the rainfall inversion based on microwave link. Thus, based on the theory of support vector machine (SVM), an inversion method of the path rainfall intensity by using a microwave link is proposed. Starting from the theory of Mie scattering and the atmospheric gas absorption attenuation model, a model of rainfall intensity inversion of line-of-sight microwave links is proposed, which is based on support vector machine, the microwave rain attenuation characteristics and the Gamma drop-size distribution. One line-of-sight microwave link is designed and used to measure the microwave rain-induced attenuation and inverse rainfall. Compared with actual rainfall intensity measured by a disdrometer, inversion rainfall intensity shows a satisfactory result. The correlation coefficient of rain rate is inverted by microwave link based on SVM and that of disdrometer is higher than 0.6 mostly, and the maximum value is 0.9674; the minimum value of the root-mean-square error of the rain rate is 0.5780 mm/h; the minimum value of the error of accumulated rain amount is 0.0080 mm; the relative error of accumulated rain amount is less than 10% and its minimum value is 0.7425%. All these parameters above are superior to ITU's. Therefore, the inversion result demonstrates the validity, feasibility and accuracy of rainfall inversion model using a microwave link based on SVM. The model we present is of great significance for further improving the accuracy of inversion of rain rate based on microwave link and rainfall monitoring.

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

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.244301

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

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: 2009gaotc@gmail.com