

基于毫米波段链路的降雨监测算法研究

魏运芳¹, 刘士彬¹, 孙月¹, 吴非¹, 曹满²

(1. 吉林省气象探测保障中心(吉林省气象仪器计量检定站), 吉林 长春 130062;

2. 吉林省突发事件预警信息发布中心, 吉林 长春 130062)

摘要: 研究的目的是通过探索一种基于毫米波段链路的方法来提高对降雨的实时监测精度。研究主要通过引入湿天线效应的校正和雨滴分布尺寸的考虑, 来优化对雨致衰减的评估以及降雨强度的反演。结果显示, 相比未修正湿天线效应的数据, 其相关系数提高了约15%~20%; 同时, 小于0.4 mm/h的均方根误差表明实验提出的方法与实际测量结果具有良好的一致性。研究的结果表明, 基于毫米波段的链路, 同时考虑湿天线效应和雨滴分布尺寸, 是一种潜力巨大、准确度高的降雨监测方法。

关键词: 毫米波段链路; 降雨监测; 信号衰减; 气象监测

中图分类号: TP18 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)09-0111-05

Research on Rainfall Monitoring Algorithm Based on Millimeter Band Link

WEI Yunfang¹, LIU Shibin¹, SUN Yue¹, WU Fei¹, CAO Man²

(1. Jilin Province Meteorological Detection Support Center (Jilin Province Meteorological Instrument Calibration and Testing Station), Changchun 130062, China;

2. Jilin Province Emergency Warning Information Release Center, Changchun 130062, China)

Abstract: The purpose of this study is to improve the real-time monitoring accuracy of rainfall by exploring a method based on millimeter wave band links. The research mainly optimizes the evaluation of rain induced attenuation and the inversion of rainfall intensity by introducing the correction of wet antenna effect and considering the size of raindrop distribution. The results show that compared to the data without correcting for the wet antenna effect, the correlation coefficient increased by about 15%~20%; Meanwhile, a root mean square error of less than 0.4 mm/h indicates good consistency between the proposed method and actual measurement results. The research results indicate that a link based on millimeter wave band, taking into account both wet antenna effect and raindrop distribution size, is a potential and highly accurate rainfall monitoring method.

Keywords: millimeter band link; rainfall monitoring; signal attenuation; meteorological monitoring

0 引言

随着无线通信技术的快速发展, 毫米波频段已成为现代通信技术中不可或缺的一部分。它不仅因其高频特性成为5G通信技术的核心频段, 还展示了在精确气象监测领域的巨大潜力, 尤其是在降雨监测算法研究中显示出独特优势^[1-2]。电磁信号的传播会受到大气中各种因素的影响, 其中雨滴对信号的衰减作用尤为显著^[3]。Shahfahad等为了分析德里大都市的降雨趋势和模式, 采用降雨区划方法与先进的统计技术。模糊的C-手段和K-均值聚类技术用于识别同类降雨区域, 创新趋势分析和Mann-Kendall检验家族用于降雨趋势分析。结果显示, 德里降雨量呈增加趋势, 但增长率较低, 可用于减轻城市洪水和解决水资源问题^[4]。安豪等为了提升北斗信号数据的应用价值, 提出利用北斗信号的极化相移对海面降

雨情况进行监测研究。作者从极化相移的定义出发, 建立了极化相移与降雨强度之间的数学模型。结果显示, 北斗信号极化相移对降雨数据信息的变化较为敏感, 可以有效实现降雨监测^[5]。Lemma E为了评估气候灾害组红外降水与台站在埃塞俄比亚气象干旱监测中的适用性, 提出利用不同时空尺度的连续和即时数据进行卫星降雨量估算。结果显示, 气候灾害组红外降水与台站降雨产品在埃塞俄比亚选定的河流域具有较好的性能, 可用于气象干旱监测。通过使用有效干旱指数和标准化降水指数进行干旱估计, 该方法有望为该地区提供更准确的气象干旱监测服务^[6]。敏捷等为了评价全球降水观测计划降水产品IMERG在中国大陆的极端降水探测能力, 与前任热带降水观测计划产品TMPA进行对比。提出了使用5种极端降水指标进行评估。结果显示, IMERG在大部分指标上表现优于TMPA, 但在特定地区和高强度降水水中存在低估, 均可对降雨情况进行有效观测^[7]。综上所述

*基金项目: 吉林省气象局技术发展专项(202108)

收稿日期: 2024-06-11

述,现有降雨监测算法大多无法对降雨强度情况进行实时监测,且监测设备布置成本较高。针对当前降雨监测中,无法判断降雨强度的问题,研究基于毫米波段,提出了一种新型的降雨监测算法。研究提出的降雨监测算法,不仅结合实时环境参数,对动态衰减基线进行调整,还针对湿天线效应,提出了一种校正方法,用于优化毫米波链路数据。

1 基于71/81 GHz毫米波段链路的降雨监测算法

1.1 基于毫米波链路的降雨强度反演

降雨监测技术可以反映地区降雨水平,评估是否存在洪涝灾害。为了精确反演降雨的实际情况,不仅需要确定每个降雨事件的实际降水强度,还要识别出与之相关的信号衰减指数^[8]。在降雨事件中,雨滴的尺寸分布是影响降雨强度测量的关键因素。E波段的毫米波在大气传输的应用中显示出对小雨滴有着较高的散射效率,使得E波段于检测降雨中较小雨滴的作用更显著。E波段毫米波对雨滴尺寸的细微变化敏感,可以为精确反演降雨信息提供更多的细节。检测雨滴尺寸分布对E波段毫米波信号衰减的关键影响,可以帮助气象研究人员预测降雨的性质,并为及时应对极端天气事件提供重要的依据,根据降雨雨滴尺寸分布数据,雨滴密度分布 $N(D_i)$ 可由式(1)进行计算。

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{20} \frac{N_{ij}}{V_j \times S \times B \times \Delta D_i} \quad (1)$$

式中, N 表示雨滴数量; D 表示雨滴直径; i 表示雨滴直径等级; ΔD_i 表示相邻雨滴直径等级的间隔; V 表示雨滴速度; j 表示雨滴速度等级; S 表示雨滴光谱仪的采样面积; B 表示雨滴光谱仪的采样时间。再以式(2)即可计算降雨强度。

$$R^{DSD} = 6\pi \times 10^{-4} \sum_{i=1}^{22} \sum_{j=1}^{22} V_j \times D_i^3 \times N(D_i) \Delta D_i \quad (2)$$

式中, R^{DSD} 表示降雨强度。雨滴尺寸分布也可以表达比衰减 γ_r^{DSD} ,如式(3)所示。

$$\gamma_r^{DSD} = 4.343 \times 10^3 \int_D C_{ext}(D, f) N(D) dD \quad (3)$$

式中, $C_{ext}(D, f)$ 表示雨滴直径为 D 的Mie消光截面。考虑雨滴分布尺寸后,雨致衰减可以式(4)计算。

$$A_r^{DSD} = \gamma_r^{DSD} l = k^{DSD} R^{DSD} \alpha^{DSD} l \quad (4)$$

式中, A_r^{DSD} 表示雨致衰减; l 表示链路传输距离。当下雨时,雨滴会落在天线或反射器的表面,还有可能在设备上积聚并形成水层。这个水层相当于在天线或者反射器上添加了一层额外的介质层。由于水对于毫米波有相当高的吸收率,这就意味着传输或者接收的信号在通过这层水膜的过程中会遭受损失,从而造成信号衰减^[9]。这种由

于下雨而导致设备湿润,带来的额外的信号衰减,就被称为湿天线效应。湿天线效应在毫米波链路监测中是一项需要重点关注的因素,因为它可能会对监测结果造成显著影响。在链路测量中,衰减值和湿天线效应导致的衰减之间,存在指数关系,如式(5)所示。

$$A_{wa} = C(1 - \exp(-dA_r)) \quad (5)$$

式中, A_{wa} 表示湿天线效应导致的衰减; C 与 d 表示参数。在考虑了湿天线效应后,路径降雨强度,可以通过幂律关系式进行计算,如式(6)所示。

$$R = \alpha \sqrt{\frac{A_r - A_{wa}}{k \times l}} \quad (6)$$

式中, k 和 α 表示频率顺从系数。充分考虑各种影响因素后,研究设计的降雨监测流程如下:首先,收集链路信息,并选取没有缺失值的降雨事件,区分干燥期与潮湿期。其次,确定衰减基线,进行湿天线系数拟合并去除湿天线衰减。最后,计算雨致衰减并反演降雨强度,具体流程如图1所示。

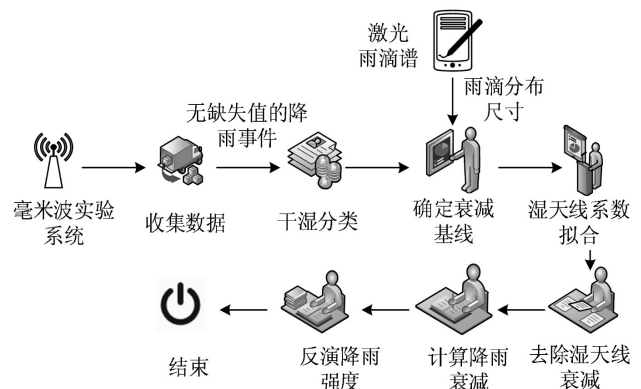


图1 毫米波链路降雨监测流程

1.2 毫米波段信号衰减分析

毫米波以其波长短、可利用的频段宽阔以及较强的抗信号干扰能力强的特点,在诸多领域具有重要作用^[10-11]。

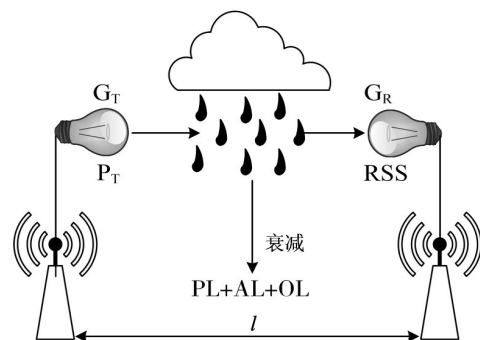


图2 毫米波信号传输链路

在地面附近的大气层中,毫米波信号在传递过程中会受到多种因素的影响^[12]。分子级别上的吸收,对特定频段内的毫米波有着明显的吸收作用,这一现象在雨、雾

等天气条件下尤为显著。同时,大气中的悬浮颗粒物如尘埃、烟雾等也会对信号的传输造成干扰。这些复杂的交互作用不仅增加了毫米波系统中的噪声,还限制了毫米波在某些环境下的应用能力。分析毫米波的传播特性,理解和量化这些干扰因素的影响,根据不同的环境特性与分子吸收特性,计算毫米波传输链路的衰减基线。为了分析实时环境对毫米波链路传输的影响,研究搭建了一个毫米波传输链路,如图2所示。

如图2所示,研究搭建的毫米波信号传输链路由左右两部分组成,左侧部分为毫米波发射端,右侧为毫米波接收端。发射端与接收端均由下方信号发生器及上方信号增益天线组成。 G_T 表示发射天线增益量, G_R 表示接收端天线增益量, P_T 表示信号发射功率, RSS 表示接收信号强度, PL 、 AL 及 OL 分别表示自由空间损耗、空气损耗及其他因素损耗, l 表示信号传输距离。在不同的天气条件下,传输毫米波信号会碰到各种各样的挑战和干扰。下雨天中雨滴对毫米波信号的衰减效应非常显著,这被称为雨致衰减。雨滴可以吸收和散射毫米波,进而降低信号的传输质量。毫米波不仅会受到降雨天气的干扰衰减,在干燥的天气状况下,毫米波也会受到大气成分的干扰。随着频率的提高,氧气及水汽对毫米波的吸收能力会增强,导致信号的衰减程度更高。通过对比毫米波链路信号,在传输过程中的衰减,即可计算空气中的水汽分布情况,从而实现降雨强度的监测。在降雨天气下,雨致衰减与平均降雨强度具有幂律关系,如式(7)所示。

$$A_r = \gamma_r^{TU-R} l = kR^\alpha l \quad (7)$$

式中, A_r 表示降雨引起的整体信号衰减; γ_r^{TU-R} 表示降雨引起的比衰减。毫米波在大气中的衰减,主要由各类气体吸收导致,气体导致的衰减可通过复折射率概念进行评估,如式(8)所示。

$$\gamma = \gamma_v + \gamma_o = 0.1820 f N''(p, T, \rho, f) \quad (8)$$

式中, γ_v 表示由水汽引起的比衰减; γ_o 表示由干燥空气引起的比衰减; $N''(p, T, \rho, f)$ 是大气压强 p 、温度 T 、频率 f 及水汽密度的函数 ρ 。利用毫米波段链路,对降雨情况进行监测时,需要分离雨致衰减,分离雨致衰减就需要确定干燥期与潮湿期,对降雨衰减与其他衰减进行区分。若假设监测期内,链路随时间变化的总衰减可表示为式(9)。

$$A_r(t) = A_b(t) + A_r(t) \quad (9)$$

式中, $A_r(t)$ 表示链路总衰减; $A_b(t)$ 表示衰减基线; $A_r(t)$ 表示雨致衰减。实验通过设置一个监测时间窗口,捕捉该窗口期内,所有的毫米波动态变化,再设置一个阈值 σ_0 ,若窗口内,链路测量数据大于阈值,则可认为该时期为潮湿期,反之则视为干燥期。分离出的干燥期即可用于 $A_b(t)$ 的确定。在无线通信链路中,如果遭遇到降雨干扰,通信

系统通常会采取一种自适应调制方案来尝试补偿信号强度的波动。导致系统的接收信号强度在雨前和雨后并不一致。因此,在分析链路的信号衰减时,为了得到更精确的信号衰减基线,研究在实验中采用了一种基于移动窗口标准差的算法。这种算法能够更准确地确定基线值,以便在降雨时正确评估信号衰减程度,为信号质量预测提供更可靠优化措施。研究以该地区降雨前几个不同的干燥时期作为样本,对数据进行分析,确定阈值 σ_0 ,从而确定衰减基线。

2 基于毫米波段链路的降雨监测算法实验分析

2.1 实验设备及数据

实验采用毫米波为E段毫米波,无线电收发器为E波段无线电收发器,见图3,实验使用的雨滴光谱仪为CLIMA激光降水监测仪,CLIMA激光降水监测仪的数据分辨率为1 min。实验系统参数详见表1。



图3 E波段无线电收发器

表1 系统详细参数

参数名称	71 GHz/81 GHz
天线尺寸	0.70 m
天线极化方式	垂直
链路预算	196 dB
带宽	250 MHz
发射功率	+7 dBm
调制	正交相移键控
吞吐量	1 Gbps 全双工
量化分辨率	0.1 dB
发射天线增益	50 dBi
接收天线增益	50 dBi
链路距离	3 km

2.2 降雨监测效果分析

为了验证在降雨监测中加入湿天线校正及雨滴分布尺寸后,对雨致衰减的影响,实验比较了直接测量的雨致衰减、使用雨滴分布尺寸计算的雨致衰减,对雨滴光谱仪测量数据的拟合效果,结果如图4所示。

图4中可以看到,忽略湿天线效应导致的衰减因素时,具体的衰减值存在较大偏差。在湿润的环境条件下,不仅衰减值通常高于干燥条件,而且在忽略湿天线效应的情况下计算的结果也高于实际情况,导致实验对降雨强度的估算存在一些误差。在校正了湿天线效应的情况

下,利用链路数据估算的雨致衰减,不仅呈现出更佳的拟合效果,而且结果与实际的测量数据更为接近。确定湿天线效应对雨致衰减的影响后,研究比较了不同时期,实验计算的反演降雨强度,与实际测量降雨强度的相关性,结果如图5所示。

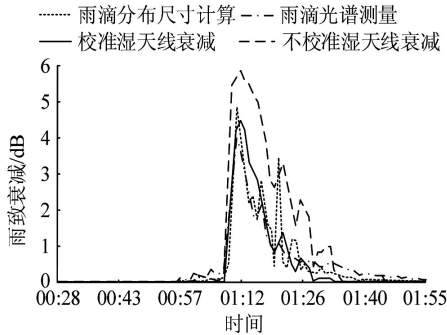
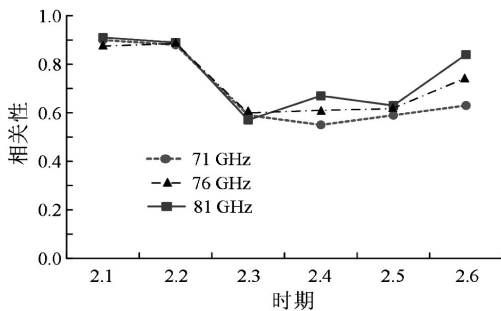
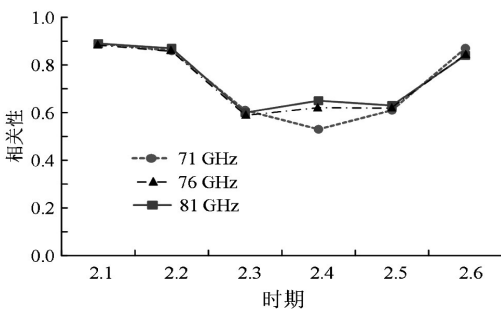


图4 雨致衰减的拟合效果分析



(a) 反演降雨强度与雨滴光谱仪测量数据通信相关系数

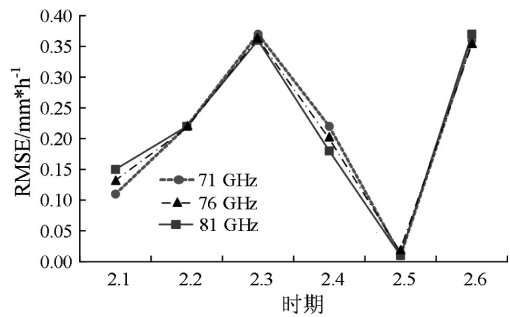


(b) 反演降雨强度与雨滴分布尺寸计算数据的相关系数

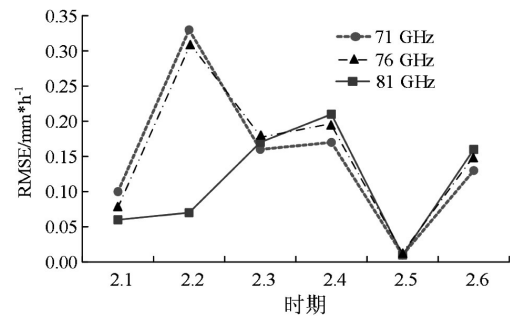
图5 反演降雨强度与实际测量结果的相关性分析

图5(a)为反演降雨强度与雨滴光谱仪测量数据的相关系数,可以看到,随着降雨事件的发生,无论是71 GHz毫米波,还是81 GHz毫米波,与雨滴光谱仪的相关系数均在下降。降雨期结束后,两种毫米波的相关性均在缓慢恢复,71 GHz毫米波的恢复速度较慢,81 GHz毫米波的恢复速度更快,降雨期结束后,81 GHz毫米波的相关性恢复至0.8以上。图5(b)为反演降雨强度与雨滴分布尺寸计算数据的相关系数,可以看到,仅在2月4日,71 GHz的相关性较差,其余时期,两种毫米波的相关性最低为0.60。研究提出的降雨监测方法与实际测量结果的相关性均保持在0.5以上。实验还比较了两种毫米波监测数据的均方根误差(root mean square error, RMSE),结果如

图6所示。



(a) 反演降雨强度与雨滴光谱仪测量数据的RMSE



(b) 反演降雨强度与雨滴分布尺寸计算数据的相关系数RMSE

图6 反演降雨强度与实际测量结果的RMSE分析

图6(a)为反演降雨强度与雨滴光谱仪测量数据的RMSE,可以看到,2月3日及2月6日时,毫米波反演降雨强度与雨滴光谱仪测量的RMSE值最高,此时,71 GHz毫米波的RMSE值为0.37 mm/h,81 GHz毫米波的RMSE值为0.36 mm/h。在2月5日时,两种毫米波的RMSE值均降至最低,此时两种毫米波的RMSE值均为0.01 mm/h。图6(b)为反演降雨强度与雨滴分布尺寸计算数据的RMSE,可以看到,在2月2日,71 GHz毫米波的RMSE值取到最大值0.33 mm/h,在2月5日,71 GHz毫米波的RMSE值取到最小值0.01 mm/h。在2月4日,81 GHz毫米波的RMSE取到最大值0.21 mm/h,在2月5日,81 GHz毫米波的RMSE取到最小值0.01 mm/h。两种毫米波的监测数据与实测数据的RMSE值均不超过0.4 mm/h。

3 结束语

实验的目的是通过改进的算法,提高基于毫米波段链路的降雨监测精度。通过系统地利用湿天线效应的校正和雨滴分布尺寸的分析,设计了一种新的降雨监测方法。研究结果表明,这种新的方法在复杂的天气情况下表现出了良好的稳定性和精度。湿天线效应校正后的毫米波链路数据与实际测量数据的相关性最高可达0.80,相关性最低为0.60,与实际测量结果的均方根误差也未超过

(下转第133页)