

15~23 GHz微波链路雨衰的敏感参量分析

刘西川^{*①} 邹明忠^② 张旭光^③

^①(国防科技大学气象海洋学院 南京 211101)

^②(江阴市河道管理处 江阴 214431)

^③(解放军32203部队 华阴 714200)

摘要: 为了提高微波链路雨衰特征的描述精度, 拓展微波链路信号的可用参数, 该文利用部署于江苏江阴地区的15 GHz, 18 GHz和23 GHz微波链路和雨量计开展同步对比观测, 拟合得到3种频段的微波链路雨衰关系。提取并分析了接收信号电平的平均值、中位数、25%分位数、75%分位数、标准差、极大值和极小值等13个特征量与晴雨时刻、降雨强度之间的关系, 得出结论: 微波链路的信号变化和降雨强度的变化存在明显的负相关关系。实际拟合的雨衰关系与ITU-R的经验雨衰关系具有较好的一致性, 但是在不同频段上均有差异; 所有13个参量在有雨时刻和无雨时刻均存在一定概率的重叠, 这是造成晴雨区分困难的主要原因; 频率越高, 信号变化受降雨的影响越显著, 越有利于微波链路反演降雨。所得出的结论为提高微波链路测雨方法中的晴雨区分、参考值确定以及雨强反演的精度提供重要依据。

关键词: 微波链路; 降雨; 雨衰关系; 特征量

中图分类号: TP722.6; P407.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)07-2007-07

DOI: 10.11999/JEIT200180

Analysis of Sensitive Parameters of 15~23 GHz Microwave Link Induced by Rain Attenuation

LIU Xichuan^① ZOU Mingzhong^② ZHANG Xuguang^③

^①(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

^②(Jiangyin River Management Office, Jiangyin 214431, China)

^③(PLA 32203 Unit, Huayin 714200, China)

Abstract: To improve the description accuracy of the characteristics of microwave link induced by rain attenuation and expand the available parameters of microwave link signals, the 15 GHz, 18 GHz and 23 GHz microwave links and rain gauges deployed in Jiangyin area of Jiangsu Province are used to carry out synchronous comparative observation, and the rain attenuation relationship at three frequency bands are fitted. The relationship between the 13 features of the received signal level (including the average, median, 25% quantile, 75% quantile, standard deviation, maximum, minimum, etc.) and the rain/no-rain period and rainfall intensity is extracted and analyzed. The conclusions are as follows. There is an obvious negative correlation between the signal of microwave link and the rainfall intensity. There is a general good consistency between the fitted rain attenuation relationship and the ITU-R empirical rain attenuation relationship, but there are certain differences in different frequencies; All 13 parameters have a certain probability of overlap in the rain period and no-rain period, which is the main reason why it is difficult to distinguish between rain and no-rain; The higher is the frequency, the more significant is the impact of rainfall on the signal change, the more conducive to the microwave link inversion of rainfall. The results provide an important basis for improving the discrimination of rain and no-rain, and determination of reference value and inversion of rain intensity.

Key words: Microwave link; Rainfall; Rain attenuation relationship; Features

收稿日期: 2020-03-20; 改回日期: 2020-10-14; 网络出版: 2020-12-11

*通信作者: 刘西川 liuxc2012@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(41975030, 41505135, 41475020), 江苏水利科技项目(2019050)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41975030, 41505135, 41475020), Jiangsu Water Resource Science and Technology Project (2019050)

1 引言

降水是影响自然环境、社会生活、农业生产、交通运输以及军事行动的重要气象因素,是气象、水文和环境领域的关注重点之一^[1]。气象水文建模、气候研究、城市规划以及洪涝预警等领域对可靠、高精度、高时空覆盖和分辨率的降水类型与强度监测提出了越来越高的需求。但是现有降水测量手段中,雨量筒、翻斗雨量计等只能测量单点降水强度和累积降水量,无法区分降水类型;雨滴谱仪可以测量降水强度,区分降水类型,但是站点分布较少,空间代表性差;天气雷达可以测量大范围的降水分布,但是其定量估计降水的精度受到高仰角条件下只能测量部分降水体和低仰角条件下易受地物回波影响等因素的限制^[2]。测雨卫星只能自上而下穿透云顶来测量降水,与降落到地表的实际降水存在较大差别,反演降水的精度和时空分辨率有限。实时准确测量区域降水强度一直是降水监测预警的难点,仍然有待解决^[3]。

微波主被动遥感是获取大范围气象海洋目标信息的有效手段^[4]。近年来出现了微波链路测雨新方法^[5],利用微波信号受到雨、雪等粒子的衰减,根据衰减与雨强的关系反演得到微波链路传播区域内的降水分布,具有测量精度高、覆盖范围广、时空分辨率高等优点^[6]。该方法可以作为现有天气雷达和测雨卫星的一种有效补充手段,对于提高灾害性降水的准确监测和预警能力等具有重要意义,在未来具有广阔的发展空间。不同波段电磁波的雨致衰减特征受到降水粒子的相态、形状、温度和谱分布等多种因素影响^[7],导致雨衰关系不稳定,进一步导致微波链路反演降雨的精度受限^[8]。在通信领域,为了解决微波链路的抗雨衰问题,国内外开展了广泛的研究^[9-11],相继开展了视距链路雨衰预报模型建模^[12]、雨滴谱对雨衰的适用性分析^[13]等工作。但是现有工作均是从长期资料统计角度出发,得出了雨强和衰减的经验关系。而实际上,降雨对微波的衰减不仅体现在接收信号电平的相对变化,

而且还隐藏在信号的时域、频域变化中,目前这些信息尚未得到充分利用。

为了进一步提升微波链路测雨的效果,本文统计分析了部署于江苏江阴地区15 GHz, 18 GHz和23 GHz微波链路的衰减特征,与雨量计同步观测资料对比,拟合得到了3种频段的微波链路雨衰关系。进一步,提取并分析了接收信号电平的平均值、中位数、25%分位数、75%分位数、标准差、极大值和极小值等13个特征量与晴雨时刻、降雨强度之间的关系,为提高微波链路测雨方法中的晴雨区分、参考值确定以及雨强反演的精度提供重要依据。

2 仪器与数据

本文利用的微波数据来自江苏省江阴市的3条高频微波链路,发射机和接收机分辨力为0.1 dB,时间采样率为1次/min。微波链路采用水平偏振,频率分别为15 GHz, 18 GHz和23 GHz,链路的长度分别为0.94 km, 2.29 km和1.22 km。为了同步对比微波链路信号衰减与降雨的相关关系,在每条链路的发射端分别放置了1个翻斗式雨量计,雨量计的测量分辨力为0.5 mm,时间分辨率为5 min。外场实验的时间为2019年3月~4月和7月~9月。根据雨量计的输出结果,选取日降雨时间持续2 h以上的降雨过程,排除设备的工作异常记录和不连续记录后,得到有效降雨共计14 d,总有效数据为4032 min,其中实际降雨时间为1240 min,最大雨强度为84 mm/h,累积降雨量为189.5 mm。为了便于与雨量计输出的降雨强度进行比较,首先将微波链路的信号接收电平(RSL)数据进行5 min平均,得到3条微波链路的接收信号电平和降雨强度的变化情况,如图1所示。

由于3个雨量计的位置不同,实测的降雨强度稍有不同,但总体来看,微波链路的信号变化和降雨强度的变化存在明显的负相关关系,即微波链路的信号接收电平随着降雨强度的增大而下降,随着降雨强度的减小而上升。但是可以发现,在某些时

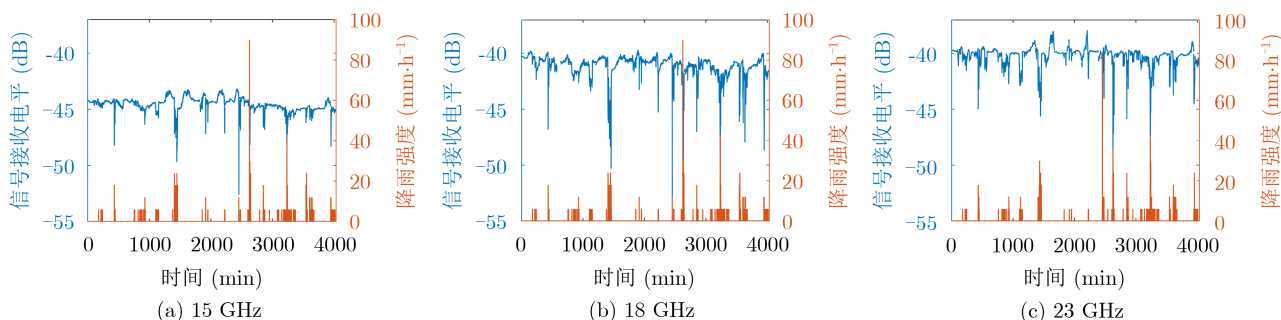


图1 15 GHz, 18 GHz, 23 GHz微波链路的接收信号电平和降雨强度的时序变化

间段内, 当雨量计输出降雨强度为0 mm/h时, 微波链路的信号接收电平仍然有一定的波动。主要原因可能有两个方面: 一是翻斗式雨量计的分辨率为6 mm/h, 难以对雨强小于6 mm/h的小雨或者微弱降雨进行实时准确监测, 从而导致一定的漏测; 二是微波链路除了受到降雨影响以外, 还可能会受到水汽吸收、湿天线衰减、接收机噪声波动等非降雨因素的影响, 导致在非降雨期间也存在一定的信号变化。

3 基于实测资料的微波雨衰关系

在电波传播研究和工程领域, 微波雨衰关系是进行电波传播评估的基础, 目前已有多种模型得到广泛应用, 如ITU-R模型^[14]、Crane模型、MPM模型等^[15]。这些模型大多基于数值计算或长期资料的统计总结, 适用于一般降雨的特征概括, 难以定量准确描述实际的具体降雨过程。从而给利用微波雨衰关系定量反演降雨带来误差。为了提高微波雨衰关系的描述精度, 本节利用微波链路接收信号电平和降雨强度的5 min平均资料对微波雨衰关系进行拟合, 并分析不同频段的微波雨衰特征。

考虑微波链路的衰减同时受到降雨和非降雨多种因素的影响, 为了剔除非降雨因素的影响, 得到降雨对微波衰减的影响特征, 对微波链路的接收信号电平处理如下: (1)确定微波链路的晴空基准衰减, 以雨量计输出结果为依据, 分别绘制有雨和无雨时刻接收信号电平的概率密度分布曲线, 根据两个曲线的交点确定晴空阈值, 如图2(a), 2(b),

2(c)所示; (2)将晴空阈值与微波链路的接收信号电平相减, 得到雨致衰减; (3)对雨致衰减和雨强进行指数拟合, 得到拟合曲线, 并与ITU-R的经验关系曲线^[10]进行对比, 如图2(d), 2(e), 2(f)所示。

以图2(a)为例说明微波链路晴空衰减阈值的确定。15 GHz微波链路在有雨时刻的概率密度分布(实线)峰值为-45.7 dB, 在无雨时刻的概率密度分布(虚线)峰值为-44.5 dB, 二者交点为-45.15 dB。尽管在-45.15 dB线左侧和右侧均有一定数量的有雨和无雨记录, 为了避免引入无雨时刻的测量误差, 选取中间交点, 即-45.15 dB作为晴雨区分阈值。依此类推, 确定18 GHz和23 GHz微波链路的晴雨区分阈值为-42.18 dB和-41.07 dB。要说明的是, 图2(b)中18 GHz微波链路的有雨时刻概率密度分布曲线在最右侧(-40.3 dB左右), 图2(c)中23 GHz微波链路的有雨时刻概率密度分布曲线在最右侧(-40.04 dB左右)均有明显的截断, 分析接收信号电平可知, 该处分别是18 GHz和23 GHz的信号最大值, 因此曲线在此结束。

图2(d)为15 GHz微波雨衰关系, ITU-R的经验关系为 $0.0448R^{1.1233}$, 基于实测资料拟合得出的雨衰关系为 $A=0.0573R^{1.0887}$, 两个参数在95%置信度的置信区间分别为 $[0.0283 \ 0.1163]$ 和 $[0.7582 \ 1.4193]$ 。实际拟合的雨衰关系比ITU-R的经验关系整体偏高, 在100 mm/h处偏高达到9.1%。图2(e)为18 GHz微波雨衰关系, ITU-R的经验关系为 $0.0708R^{1.0818}$, 基于实测资料拟合得出的雨衰关系为 $A=0.012R^{1.7001}$, 两个参数在95%置信度的置信

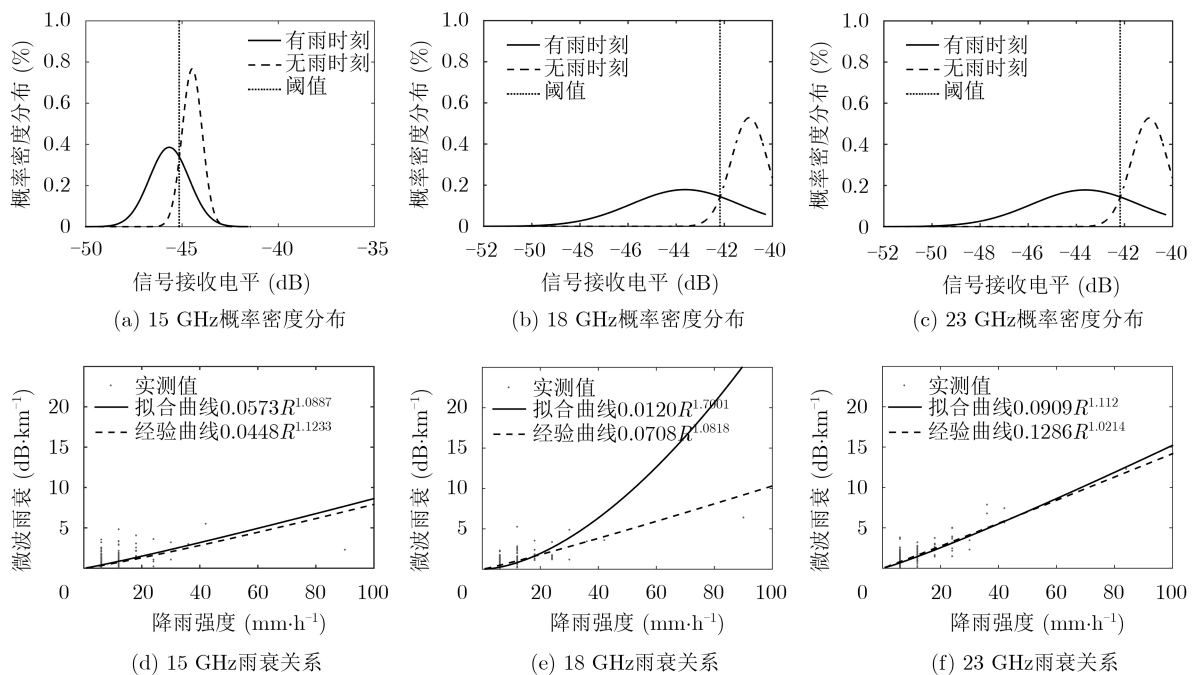


图2 微波链路的概率密度分布及雨衰关系

区间分别为[0.0024 0.0598]和[0.9525 2.4477]。拟合关系和经验关系的差异最大,拟合关系在雨强18 mm/h以下低于经验关系,在雨强18 mm/h以上显著高于经验关系。图2(f)为23 GHz的微波雨衰关系,ITU-R的经验关系为 $0.1286R^{1.0214}$,基于实测资料拟合得出的雨衰关系为 $A=0.0909R^{1.112}$,两个参数在95%置信度的置信区间分别为[0.0526 0.1573]和[0.8583 1.3656]。拟合关系和经验关系的一致性最高,拟合关系在雨强45 mm/h以下低于经验关系,在雨强45 mm/h以上高于经验关系。

整体来看,15 GHz、18 GHz和23 GHz 3个频段的雨衰关系均服从指数关系,且与ITU-R的经验关系具有较好的一致性,ITU-R经验关系的参数均在实际拟合关系95%置信度的置信区间之内。所得出的结果可以为微波链路信号反演雨强提供实地资料优化的雨衰关系。但要指出的是,雨强和衰减之间仍然存在较大的离散度,主要原因在于两方面:一是翻斗式雨量计测量雨强的分辨力较低,低于6 mm/h的雨强变化,可能会有延迟和低估等现象;二是微波链路本身存在湿天线衰减等非雨致因素,这也是导致图1中有个别时刻降雨强度不大,但衰减却非常明显的原因。另外,18 GHz微波链路的雨衰关系与经验关系偏差较大,原因可能是18 GHz链路距离最长,达到2.29 km。链路测量的路径与雨量计测量的单点在空间上的一致性较低,从而导致仅利用单点雨量计的结果进行晴雨区分和阈值确定等流程中均存在一定的偏差。

4 微波雨衰敏感特征量分析

考虑到实际降雨在不同时间、不同空间均有十分复杂的变化,微波信号的时序变化中也蕴含了丰富的降雨细节信息。本节从1次/min采集的原始信号数据出发,分析微波信号在一定时段的集中分布趋势、离散程度、频域分布特征,并与晴雨时刻、降雨强度进行相关性分析,确定各参量与降雨的相关程度。在微波链路输出的1分钟原始信号的基础上,分别计算了中位数、25%分位数、75%分位数、极大值、极小值、众数、方差、标准差、斜率、偏度、峰度和信息熵^[16]共12个特征量,对应的公式见表1。

选取对降雨较为敏感的23 GHz微波链路信号,绘制12个特征量在无雨和有雨时刻下的直方图,并分别进行正态拟合,得到拟合曲线,如图3所示。无雨时刻的样本为3674个,有雨时刻的样本为252个,因此无雨时刻的特征量数目远高于有雨时刻的特征量数目。前6个特征量:中位数、25%分位数、75%分位数、极大值、极小值和众数的趋势总体一致,与图2(c)中23 GHz信号概率密度分布的特征类似。在无雨时刻,6个特征量的直方图峰值在-39.8~-39.9 dB之间,正态拟合曲线的峰值在-40 dB附近;对于有雨时刻,6个特征量的直方图峰值在-43.3~-40.2 dB之间,正态拟合曲线基本一致,峰值在-42 dB附近;有雨时刻和无雨时刻同样有一定概率的重叠,在这些重叠区域,是区分晴雨的难点所在。

表1 微波信号特征量

序号	特征量	公式	序号	特征量	公式
1	中位数	$m_{0.5} = X_{(N+1)/2}$	7	方差	$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$
2	25%分位数	$m_{0.25} = X_{(N+1)/4}$	8	标准差	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$
3	75%分位数	$m_{0.75} = X_{(3N+1)/4}$	9	斜率	$Sl = \frac{(\sum t_i^2)(\sum X_i) - (\sum t_i)(\sum t_i X_i)}{N(\sum t_i^2) - (\sum t_i)^2}$
4	极大值	$X_{\max} = \max(X_1 X_2 \dots X_N)$	10	偏度	$Sk = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2\right)^{3/2}}$
5	极小值	$X_{\min} = \min(X_1 X_2 \dots X_N)$	11	峰度	$Ku = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2\right)^2}$
6	众数	$X_{mo} = L + \frac{f_b}{f_a + f_b} \cdot i$	12	信息熵	$HU = -\sum_{i=1}^N P(X_i) \log_2 P(X_i)$

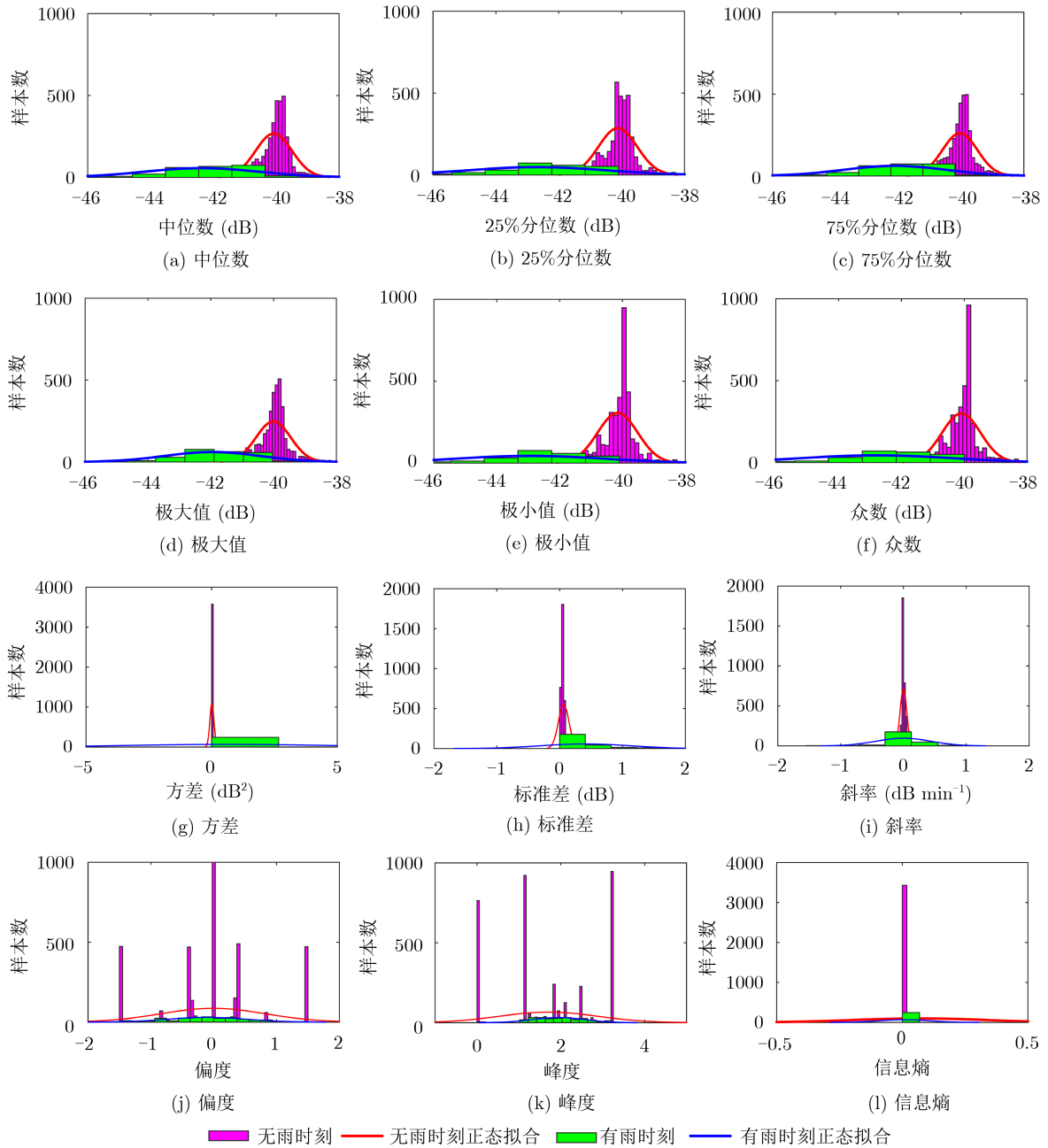


图 3 23 GHz微波链路在无雨和有雨时刻的信号直方图及正态拟合曲线

对于后6个特征量，直方图分布特征有明显不同：(1)对于方差、标准差和斜率，无雨时刻的峰值位于0附近，说明无雨时刻的信号没有太大的变化和离散，而有雨时刻的方差和标准差均大于0，说明有雨期间信号变化发生了明显的离散，有雨时刻的斜率介于 $-0.29 \sim 0.12$ dB/min之间，其中负斜率的样本偏多，说明有雨期间短周期内信号会倾向于发生负的变化，即信号强度减弱；(2)无雨时刻的偏度峰值为0，但在 $-1.5 \sim 1.5$ 之间均有较大数量的分布，而有雨时刻的偏度变化较为缓慢，集中在 $-1 \sim 1$ 之间，说明有雨时刻的信号分布较为集中；

(3)无雨时刻的峰度在 $0 \sim 3.25$ 之间均有分布，有雨时刻的偏度在 $1 \sim 3$ 之间呈现正态分布趋势，说明有雨时刻的信号概率分布较为平缓；(4)无雨时刻的信息熵峰值在 $0 \sim 0.02$ 之间，有雨时刻的信息熵在 $0 \sim 0.06$ 之间，说明有雨时刻信号比无雨时刻的信号包含了更为丰富的信息。但是要强调的是，后6个特征量的分布，在无雨时刻和有雨时刻仍然有一定概率重叠，相比于信号强度的时域分布，频域分布规律更为复杂，更为非线性。

通过上述分析发现，不同的特征量之间存在着不同的分布特征，相互之间有的参量重合度较

高,有的差别较大,在实际应用这些特征量进行降雨反演时,如果全部应用可能会引入信息冗余,给处理带来困难。因此,为了明确各特征量的有效性和可用性,进一步分析在有雨时刻,包括平均值在内共13个特征量之间的相关性,以23 GHz微波链路为例进行分析,如图4所示。由图可知,平均值、中位数、25%分位数、75%分位数、极大值、极小值和众数之间存在明显的正相关关系,标准差和方差之间存在正相关关系;方差、标准差、斜率、偏度和峰度之间存在较弱的负相关关系,相关程度不大;信息熵与大部分特征量没有相关关系,说明信息熵的变化与信号的时域或频域变化没有关系。

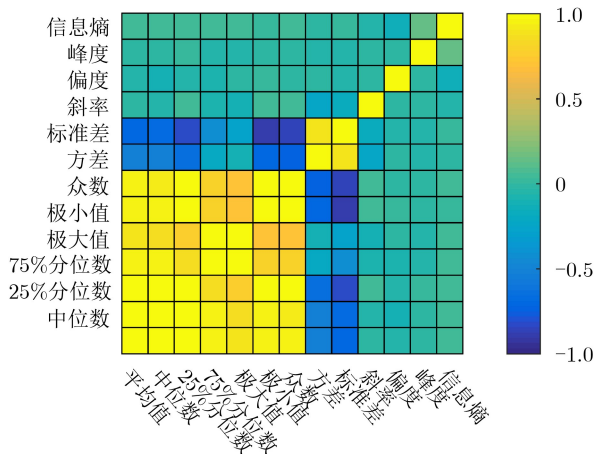


图4 23 GHz微波链路信号13个特征量间的相关系数

各特征量不仅在晴雨期间有所不同,在不同的降雨强度条件下也可能有不同的特征。因此,为了进一步明确各特征量与雨强之间的关系,分别分析15 GHz, 18 GHz和23 GHz 3个频段条件下13个特征量和雨强的相关关系,如表2所示。由表2可知,第1~7个特征量均为信号强度时域参量,与降雨强度均为负相关关系,相关系数随着频率的提高而变大。这说明频率越高,信号变化受降雨的影响越显著,越有利于微波链路反演降雨。较低频段具有较低的相关系数,可能原因是信号受到其他非降雨因素的干扰,要利用这些频段进行降雨反演时,需要重点考虑非降雨因素的剔除。方差、标准差和雨强之间存在较强的正相关关系,说明雨强越大,降雨影响信号的变化越离散。斜率、偏度、峰度、信息熵和雨强之间存在很弱的正相关关系,说明由于雨强的增大,会导致信号变化率增大、信号概率密度分布变化以及信息含量增大。

表2 微波链路信号特征量与雨强的相关系数

序号	特征量	与雨强的相关系数(%)		
		15 GHz	18 GHz	23 GHz
1	平均值	-42.84	-69.52	-82.36
2	中位数	-41.83	-70.58	-81.58
3	25%分位数	-44.24	-70.14	-81.52
4	75%分位数	-38.38	-60.76	-77.61
5	极大值	-34.52	-52.82	-75.38
6	极小值	-46.37	-70.48	-77.50
7	众数	-44.35	-70.78	-77.08
8	方差	31.58	46.66	27.40
9	标准差	39.88	58.46	43.86
10	斜率	12.68	41.41	10.62
11	偏度	2.99	3.35	8.37
12	峰度	5.52	0.66	0.75
13	信息熵	9.14	3.43	4.23

5 结论

本文开展了15 GHz, 18 GHz和23 GHz微波链路和雨量计的同步对比观测,统计了3个频段的雨致信号衰减特征,定量分析了微波链路信号雨衰与晴雨时刻、降雨强度之间的相关关系,为拓展微波链路信号的可用参数,进一步提升微波链路测雨性能提供基本参考。具体结论如下:

(1)微波链路的信号变化和降雨强度的变化存在明显的负相关关系。在确定晴雨时刻区分阈值的基础上,拟合得到了3个频段的雨衰关系: $A=0.0573R^{1.0887}$, $A=0.012R^{1.7001}$ 和 $A=0.0909R^{1.112}$ 。总体上,实际拟合的雨衰关系与ITU-R的经验雨衰关系具有较好的一致性,但是在不同频段上均有差异。因此在实际利用微波链路反演降雨时,应当基于本地降雨特征对雨衰关系进行改进和优化。

(2)通过直方图和正态拟合曲线分析发现,中位数、25%分位数、75%分位数、极大值、极小值和众数6个时域特征量在有雨和无雨时刻的分布趋势总体一致,方差、标准差、斜率、偏度、峰度和信息熵6个频域特征量的分布趋势较为复杂,更为非线性。所有参量在有雨时刻和无雨时刻均存在一定概率的重叠,这是造成晴雨区分困难的主要原因。

(3)信号强度的时域参量与降雨强度的相关系数随着频率的提高而变大,说明频率越高,信号变化受降雨的影响越显著,越有利于微波链路反演降雨。相比而言,低频段容易受到其他非降雨因素的干扰,给微波链路测雨带来误差。随着雨强的增大,信号变化越离散,也会带来信号变化率增大、

信号概率密度分布变化以及信息含量增大, 这些为微波链路揭示降雨信息带来更多的可能。

参 考 文 献

- [1] 孙学金, 王晓蕾, 李浩, 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 452.
SUN Xuejin, WANG Xiaolei, LI Hao, *et al.* Atmospheric Sounding[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 452.
- [2] 李海, 任嘉伟, 尚金雷. 一种基于模糊神经网络-模糊C均值聚类的双偏振气象雷达降水粒子分类方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 809-815. doi: [10.11999/JEIT180529](https://doi.org/10.11999/JEIT180529).
LI Hai, REN Jiawei, and SHANG Jinlei. Hydrometeor classification method in dual-polarization weather radar based on fuzzy neural network-fuzzy C-means[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 809-815. doi: [10.11999/JEIT180529](https://doi.org/10.11999/JEIT180529).
- [3] 刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 1217-1226. doi: [10.11867/j.issn.1001-8166.2013.11.1217](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2013.11.1217).
LIU Xichuan, GAO Taichang, LIU Lei, *et al.* Advances in microphysical features and measurement techniques of raindrops[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(11): 1217-1226. doi: [10.11867/j.issn.1001-8166.2013.11.1217](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2013.11.1217).
- [4] 卢海梁, 王志强, 高超, 等. 基于被动干涉微波亮温图像的海面目标探测算法研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 563-572. doi: [10.11999/JEIT190256](https://doi.org/10.11999/JEIT190256).
LU Hailiang, WANG Zhiqiang, GAO Chao, *et al.* Research on the detection algorithm for sea surface targets based on passive interferometric microwave images[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 563-572. doi: [10.11999/JEIT190256](https://doi.org/10.11999/JEIT190256).
- [5] MESSER H, ZINEVICH A, and ALPERT P. Environmental monitoring by wireless communication networks[J]. *Science*, 2006, 312(5774): 713. doi: [10.1126/science.1120034](https://doi.org/10.1126/science.1120034).
- [6] 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. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.013](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.013).
YIN Min, GAO Taichang, LIU Xichuan, *et al.* Research on microwave link measurement of precipitation[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(12): 1545-1553. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.013](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.013).
- [7] 刘西川, 宋堃, 高太长, 等. 复杂大气条件对微波传播衰减的影响研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(1): 181-188. doi: [10.11999/JEIT170253](https://doi.org/10.11999/JEIT170253).
LIU Xichuan, SONG Kun, GAO Taichang, *et al.* Research on the effect of complex atmospheric condition on microwave propagation attenuation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(1): 181-188. doi: [10.11999/JEIT170253](https://doi.org/10.11999/JEIT170253).
- [8] CHWALA C and KUNSTMANN H. Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges[J]. *WIREs Water*, 2019, 6(2): e1337. doi: [10.1002/wat2.1337](https://doi.org/10.1002/wat2.1337).
- [9] 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. doi: [10.7498/aps.59.2156](https://doi.org/10.7498/aps.59.2156).
LIU Xichuan, GAO Taichang, QIN Jian, *et al.* Effects analysis of rainfall on microwave transmission characteristics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 2156-2162. doi: [10.7498/aps.59.2156](https://doi.org/10.7498/aps.59.2156).
- [10] ITU. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods[R]. ITU-R P. 838-3, 2005.
- [11] SHARMA P K, SHARMA D, and SINGH R K. Development of propagation model by considering different climatic conditions[J]. *MAGNT Research Report*, 2014, 2(6): 389-401.
- [12] 赵振维, 卢昌胜, 林乐科. 基于雨胞分布的视距链路雨衰减预报模型[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 627-631. doi: [10.13443/j.cjors.2009.04.014](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2009.04.014).
ZHAO Zhenwei, LU Changsheng, and LIN Leke. Prediction model of rain attenuation based on the EXCELL rain cell model for the terrestrial line-of-sight systems[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(4): 627-631. doi: [10.13443/j.cjors.2009.04.014](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2009.04.014).
- [13] 宋博, 王红星, 刘敏, 等. 雨滴谱模型对雨衰减计算的适用性分析[J]. 激光与红外, 2012, 42(3): 310-313. doi: [10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.015).
SONG Bo, WANG Hongxing, LIU Min, *et al.* Raindrop size distribution model for applicability analysis of rain attenuation[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(3): 310-313. doi: [10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.015).
- [14] ITU. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems[R]. ITU-R P. 618-1, 1996.
- [15] 杨瑞科. 对流层地-空路径电磁(光)波传播的若干问题研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2003: 1-150.
YANG Ruike. Research on several electromagnetic (optical) wave propagation problems on Earth-space path in troposphere atmosphere[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2003: 1-150.
- [16] 申弢, 黄树红, 韩守木, 等. 旋转机械振动信号的信息熵特征[J]. 机械工程学报, 2001, 37(6): 94-98. doi: [10.3321/j.issn:0577-6686.2001.06.021](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6686.2001.06.021).
SHEN Tao, HUANG Shuhong, HAN Shoumu, *et al.* Extracting information entropy features for rotating machinery vibration signals[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(6): 94-98. doi: [10.3321/j.issn:0577-6686.2001.06.021](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6686.2001.06.021).
- 刘西川: 男, 1985年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为大气探测。
邹明忠: 男, 1974年生, 高级工程师, 研究方向为水文监测与保障。
张旭光: 男, 1980年生, 工程师, 研究方向为大气探测与保障。