

ICS 编号

CCS 编号

团体标准

T/CHES XXX—20XX

高频微波局地降水监测设备

High frequency microwave local precipitation monitoring
equipment

（征求意见稿）

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国水利学会 发布

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 高频微波 High frequency microwave	1
3.2 雨衰 Rain Attenuation	2
3.3 微波链路 Microwave Link	2
3.4 干湿期判别 Identification of Dry and Wet Period	2
3.5 基础衰减 Base Attenuation	2
3.6 极化方式 Polarization Mode	2
4 目标、原则和要求	2
4.1 设备组成	2
4.2 标准化原则	3
5 设备设施	3
5.1 降水监测原理	3
5.2 设备设施分类	3
5.3 设备设施组成	3
5.4 仪器设备技术指标	4
5.5 配套设施技术要求	5
5.6 仪器设备属性信息	5
6 设备的安装与布设	7
6.1 设备安装	7
6.2 设备布设要求	7
6.3 运行与维护	7
7 降水强度计算与分析	8
7.1 监测数据格式要求	8
7.2 计算与分析要求	8
7.3 微波衰减	8
7.4 干湿期判别	9
7.5 基础衰减修正	10
7.6 降水强度计算	11
7.7 参数校正	12

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件共分为 7 章，主要技术内容包括设备设施、设备的安装与布设、降水强度计算与分析等。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送至中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条 16 号，邮编 100053），以便今后修订时参考。

本文件主编单位：河海大学。

本文件参编单位：长江水利委员会水文局、黄河水利委员会水文局、水利部南京水利水文自动化研究所、江西省水文监测中心、山东省水文中心、中国长江电力股份有限公司、中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院、江苏亨通河海科技有限公司、北京金水信息技术有限公司、中水北方勘测设计研究有限责任公司、中电科普天科技股份有限公司、北京慧图科技（集团）股份有限公司

本文件主要起草人：杨涛、冯仲恺、郭凯、师鹏飞、谢彪、周波、赵昕、张家军、叶繁、高军、尧俊辉、王钦钊、高伟、衣学军、鲍正风、周保红、曹辉、刘帅、张玉松、戴会超、惠二青、王超、赵可玉、周扬、肖凤林、谢津平、吴正桥、贾文利、石安危、张金龙、曾国雄、唐宗仁

引 言

高时空分辨率、准确、实时的降水监测，对城市防洪、灾害预警和水资源管理都具有重大意义。高频微波局地降水监测设备，是利用无线电磁波在传输过程中，由途经的降水事件所造成的能量衰减反演链路沿程平均降水强度的技术，能够捕捉复杂地形区域的局地降水信息。

目前，国内利用高频微波局地降水监测设备来测量降水的技术已初步成熟，通过部分区域的试点应用，验证了该技术的可行性和降水测量准确性。该方法具有时空分辨率高、空间代表性好、覆盖范围广、维护成本低等优点，可以作为雨量计、天气雷达等常规降水测量手段的补充。

在本文件起草之前，国内尚无该技术相关标准规范，为使本技术得到更广泛、更有效的应用，由中国水利学会提出，并组织各相关单位制定本标准。

本标准高频微波局地降水监测设备的生产、安装、布设、使用提供参考依据，用于局地降水强度的监测。

高频微波局地降水监测设备

1 范围

本文件规定了高频微波局地降水监测设备的组成、安装、使用与维护要求，包括微波降水监测原理，仪器设备的选型、安装与布设，降水强度计算与分析等相关要求。

本文件适用于频段处于 15~50GHz 的微波设备，针对海拔高度在 0~4000 米之间的降水事件的监测，可应用于水文、气象、交通、应急、农业、保险等领域的实时降水监测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 19677-2005 水文仪器术语及符号

GB/T 18185-2014 水文仪器可靠性技术要求

GB/T 14617.3-2012 陆地移动业务和固定业务传播特性 第 3 部分：
视距微波接力通信系统传播特性

SL 21-2015 降水量监测规范

3 术语和定义

3.1 高频微波 High frequency microwave

频率超过 15GHz 的电磁波。

3.2 雨衰 Rain Attenuation

电磁波在传播过程中，由降雨、降雪等引起的吸收和散射造成的能量衰减。

3.3 微波链路 Microwave Link

发射、接收微波信号的装置之间的电磁波传播路径。

3.4 干湿期判别 Identification of Dry and Wet Period

判断微波传播路径是否发生降水事件。

3.5 基础衰减 Base Attenuation

微波路径传播以及环境中长期存在的因素带来的能量衰减，变幅相对较小、且长期存在。

3.6 极化方式 Polarization Mode

电磁波的电场强度始终在垂直于传播方向的平面内取向，以地球表面为参照物，电场强度垂直于地球表面的为垂直极化（V），电场强度平行于地球表面的为水平极化（H）。

4 目标、原则和要求

4.1 设备组成

高频微波局地降水监测设备包括下列部分：

4.1.1 集成微波信号的发射、接收、采集、计算、分析等功能的高频微波降水监测仪器及配套设施。

4.1.2 为实现降水监测而采用的微波链路布设方式与原则。

4.1.3 利用雨衰反演降水强度的算法。

4.2 标准化原则

高频微波局地降水监测设备应满足：

4.2.1 在进行仪器集成时，应尽可能采用标准件或通用件。电路集成时，应尽量减少元器件数量和品种，并采用可靠的装配工艺。在选用新器件时，应重点评估其可靠性指标。

4.2.2 在进行雨强计算分析时，应尽可能选取物理意义明确的参数和算法，应尽量减少算法中的参数数量。

5 设备设施

5.1 降水监测原理

微波信号在空气中传输时，与大气中的降水物体（如雨滴、雪、冰粒等）发生碰撞，在多次反射和散射后使传输信号强度逐渐减小，即微波信号的衰减程度与降水物体的形状、大小、分布等因素有关系。

5.2 设备设施分类

5.2.1 根据极化方式分类

主要包括垂直极化和水平极化。

垂直极化：辐射方向与地面垂直，也就是微波信号的电场分量沿着垂直方向振动。

水平极化：辐射方向与地面平行，也就是微波信号的电场分量沿着水平方向振动。

5.2.2 根据信号发射和接收方式分类

主要包括单发单收和双发双收，都属于点对点传播。单发单收是指一个天线只负责发射微波信号，另一个天线只负责接收微波信号；双发双收是指一个天线在发射微波信号的同时也能接收另一个天线的微波信号。

5.3 设备设施组成

5.3.1 高频微波降水监测仪器主要部件包括微波天线、采集存储单元、

数据回传单元、低噪声高灵敏度高频微波物联网感知芯片等。

5.3.2 高频微波降水监测设备主要包括微波发射装置、微波接收装置、降水计算分析系统等。

5.3.3 高频微波降水监测配套设施主要包括设备安置设施、供电系统、应急通信系统等。

5.4 仪器设备技术指标

仪器设备总体技术指标应至少满足表 1 要求。

表 1 仪器设备总体技术指标

技术指标		精度或范围
工作环境	大气压力 (kPa)	32~106
	温度 (°C)	-40~85
	湿度 (%，RH)	10~100
	链路长度 (m)	200~5000
	采样频次 (s)	≤60
天线	支持频段 (GHz)	15~50
	极化方式	垂直极化、水平极化
微波发射装置	最大发射功率 (dBm)	+35
	最小发射功率 (dBm)	0
	步进值 (dB)	1
	精度 (dB)	±2
微波接收装置	接收灵敏度 (dBm)	-86
	接收分辨率 (dB)	0.1
降水计算分析系统	测量范围 (mm)	≥0
	误差 (%)	±5.0
	分辨力 (mm)	0.5
	降水识别准确率 (%)	≥90

5.5 配套设施技术要求

5.5.1 高频微波降水监测仪器设备的架设安装，需确保发射、接收装置之间无遮挡，不易受外部环境影响而发生偏移、摔落、损坏等。

5.5.2 高频微波降水监测仪器应配套有稳定的供电系统。

5.5.3 高频微波降水监测仪器应采用移动通信或 GNSS 传输数据的，应配置有效的人工观测、比测手段，且宜具备与其他自动化系统、局域网或广域网连接的接口。

5.5.4 高频微波降水监测仪器宜配备有应急卫星通信功能。

5.5.5 高频微波降水监测仪器应具有可靠的抗干扰能力以及防人为破坏的措施。

5.5.6 高频微波降水监测仪器设备运输包装应符合科学、牢固、经济、美观的要求。

5.6 仪器设备属性信息

仪器设备属性信息至少包括以下部分，属性名称、英文符号、单位如表 2 所示。

表 2 仪器数据内容

属性名称	英文符号	单位（内容）
链路名称	Link_ID	/
链路长度	Length_km	km
发射端 ID	TX_ID	/
发射端经度	TX_Longitude	/
发射端纬度	TX_Latitude	/
发射端高度	TX_Height_m	m
发射端天线半径	TX_Diameter_m	m
接收端 ID	RX_ID	/
接收端经度	RX_Longitude	/
接收端纬度	RX_Latitude	/
接收端高度	RX_Height_m	m
接收端天线半径	RX_Diameter_m	m
频率	Frequency_mhz	MHz
极化方式	Polarization	如 H、V
采样频次	Sample_Type_s	s
省	Province	如江苏省
市	City	如南京市
县	County	如鼓楼区

6 设备的安装与布设

6.1 设备安装

6.1.1 安装前应进行校正、定标和测试，安装完成后应进行系统测试，正常时方能投入运行。仪器设备安装、测试过程应进行详细记录。

6.1.2 微波链路的发射、接收装置距离地表高度宜在 10m 以上，有条件的可架设在建筑物顶端或已有铁塔资源上。

6.2 设备布设要求

6.2.1 设备布设应尽可能的考虑安全、稳定、易于维护、升级和改造等内容。

6.2.2 微波链路的发射、接收装置应处于一条无遮挡的直线上。

6.2.3 多条微波链路组网运行时，应使用不同的发射频率以避免信号相互干扰。

6.3 运行与维护

6.3.1 设备运行期间，应定期检查发射装置、接收装置、降水计算分析系统、供电设施、架设设施等微波链路设施设备的完好性和适用性，及时修复存在的问题。每年度检查维护次数应不低于 2 次。

6.3.2 监测数据应通过加密和认证的方式进行传输、处理与分析，防止数据被恶意攻击和非法访问。

7 降水强度计算与分析

7.1 监测数据格式要求

微波信号数据至少包括以下部分，数据名称、英文符号、单位如表 3 所示。

表 3 微波信号数据内容

数据名称	英文符号	单位（内容）
链路名称	Link_ID	/
接收时间	Time	如 2022.03.26 16:12:33
发射端信号强度	Tsl_dB	dB
接收端信号强度	Rsl_dB	dB

7.2 计算与分析要求

- 7.1.1 单条链路计算的降水强度误差应控制在±5%以内。
- 7.1.2 反演的降水强度分辨力应达到 0.5mm。
- 7.1.3 反演的降水强度时间分辨率应小于 1min。
- 7.1.4 微波反演出准确预报结果耗时应小于 10min。

7.3 微波衰减

微波信号在传播过程中发生的能量衰减按照下式计算：

$$A = (TSL - RSL)/d \tag{1}$$

式中：

- A**：微波链路的总衰减率，单位为分贝每千米（dB/km）；
- TSL**：微波链路发射端信号强度，单位为分贝（dB）；
- RSL**：微波链路接收端信号强度，单位为分贝（dB）；

d:微波链路的长度，单位为千米（km）。

7.4 干湿期判别

分析微波信号随时间衰减的规律特征，判断处于湿期（降水）或干期（未降水）。以滑动标准差方法为例：

对于一个无线微波衰减序列**A(t)**：

$$A(t) = A_B(t) + A_R(t) \quad (2)$$

式中：

A(t)：微波链路在 t 时刻的总衰减率，单位为分贝每千米（dB/km）；

A_B(t) = a_B(t) + ε_B(t)：微波链路在 t 时刻的基础衰减率，单位为分贝每千米（dB/km）；

A_R(t) = a_R(t) + ε_R(t)：微波链路在 t 时刻的雨衰减率，单位为分贝每千米（dB/km）。

对于**A_B(t)**和**A_R(t)**，存在：

$$\sigma_B^2(t) = \text{Var}[A_B(t)] \quad (3)$$

$$\sigma_R^2(t) = \text{Var}[A_R(t)] \quad (4)$$

此时误差**ε_B(t)**，**ε_R(t)**满足均值、方差为 0。

因此, **A(t)**的方差：

$$\text{Var}[A(t)] = \sigma_B^2(t) + \sigma_R^2(t) \quad (5)$$

对于一个滑动窗口**W_t = [t - w, t]**而言，

$$\overline{A_{W_t}} = \frac{1}{N_W} \sum_{k \in W_t} A(k) \quad (6)$$

$$S_{W_t}^2 = \frac{1}{N_W} \sum_{k \in W_t} (A(k) - \overline{A_{W_t}})^2 \quad (7)$$

式中：

N_w : 窗口期内数据的数目;

$\overline{A_{w_t}}$: 窗口内总微波衰减率的均值;

S_{w_t} : 窗口内的标准差。

当未发生降水时, 微波衰减数据的标准差一般取决于无线微波的固有特征, 例如微波发射频率、微波链路长度、微波链路极化方式等, 通常会保持在一个相对来说比较固定且比较小的范围之内。降水期间, 水汽会对无线微波在大气中的传输信号造成比较明显的扰动, 从而使得无线微波衰减率的标准差明显增大。

综上, 干湿期判别可表示为:

$$\text{判别规则: } \begin{cases} \text{降水} & \text{若 } S_{w_t} > \sigma_0 \\ \text{未降水} & \text{若 } S_{w_t} \leq \sigma_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:

σ_0 : 标准差阈值, 其取值由 24 小时干期衰减数据确定。

7.5 基础衰减修正

对于一场降水, 若时间间隔 τ 足够大, 可以认为 t 时刻降水 $r(t)$ 与 $t - \tau$ 时刻 $r(t - \tau)$ 互不相关。

定义 $\{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$ 是一个 n 维随机序列, $Z = \min(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ 。

基于以上定义, 可以得到:

对于给定任意 $\Delta \in \mathbb{R}$, 定义 $\{A_t\} = x_t + \Delta$, 于是有:

$$\min(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \Delta \quad (9)$$

其条件为:

$$(1) \ Z \text{ 的期望值 } E[Z] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0;$$

(2) Z 的方差 $\text{Var}(Z) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$ 。

因此, 当降水时长足够长, 有足够长系列的微波衰减数据时, 可以采用滑动窗口最小值的方法, 确定基础衰减 $A_B(t)$, 从而根据式 (1) 得到降水衰减 $A_R(t)$ 。

7.6 降水强度计算

由国际电信联盟 (ITU) 推荐的雨衰减律模型, 该模型是基于数据统计和通信原理建立起的经验模型, 其形式为:

$$A_R(t) = kR(t)^\alpha \quad (10)$$

式中:

R : 微波链路在 t 时刻的降水强度, 单位为毫米每小时 (mm/h)。

k 和 α 是与微波频率以及极化方式相关的频率依从系数, 对于不同的微波频率及极化方式, 其计算方式如下:

$$k_H = \begin{cases} 3.8794 \times 10^{-5} f^{2.7474 - 1.794 \ln f + 1.1805 \ln^2 f - 0.2022 \ln^3 f} & 15 < f \leq 20 (\text{GHz}) \\ \frac{8.2522 \times 10^{-5} f^2}{1 - 0.015 \ln f + 6.2033 \times 10^{-5} f^2} & 20 < f \leq 50 (\text{GHz}) \end{cases} \quad (11)$$

$$k_V = \begin{cases} 3.5807 \times 10^{-5} f^{2.6034 - 1.6171 \ln f + 1.094 \ln^2 f - 0.1877 \ln^3 f} & 15 < f \leq 20 (\text{GHz}) \\ \frac{7.193 \times 10^{-5} f^2}{1 - 0.1865 \ln f + 5.9357 \times 10^{-5} f^2} & 20 < f \leq 50 (\text{GHz}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_H = \begin{cases} \frac{0.9437 + (1.0564 \ln f - 1.9256)^2}{0.7181 + (1.1141 \ln f - 2.094)^2} & 15 < f \leq 20 (\text{GHz}) \\ 0.6828 + \frac{0.5018}{1 + 2.0946 \times 10^{-4} f^{2.2862}} & 20 < f \leq 50 (\text{GHz}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\alpha_V = \begin{cases} \frac{0.9048 + (1.0246 \ln f - 1.9462)^2}{0.6972 + (1.1073 \ln f - 2.1584)^2} & 15 < f \leq 20 (\text{GHz}) \\ 0.6833 + \frac{0.4494}{1 + 1.87 \times 10^{-4} f^{2.2808}} & 20 < f \leq 50 (\text{GHz}) \end{cases} \quad (14)$$

式中:

k_H 和 α_H 为水平极化下的频率依从系数, k_V 和 α_V 为垂直极化下的频率依

从系数，给出相关参考值如表 4 所示。

表 4 水平和垂直极化方式下的 k 和 α 取值建议

频率 (GHz)	k_H	k_V	α_V	α_H
15	0.0367	0.0355	1.128	1.128
20	0.075	0.0691	1.065	1.065
23	0.128	0.128	0.963	1.021
25	0.124	0.113	1.030	1.030
30	0.187	0.167	1.000	1.000
35	0.263	0.233	0.963	0.963
38	0.400	0.384	0.855	0.881
40	0.350	0.310	0.929	0.929
45	0.442	0.393	0.897	0.897
50	0.536	0.479	0.868	0.868

7.7 参数校正

有条件的情况下，利用微波链路附近有其它类型准确降水数据，使用参数率定的方法对相应的 k 和 α 值进行定期校正更新。