

# GNSS-R 陆面遥感为重要补充的 土壤水分监测体系设计<sup>①</sup>

张 强<sup>1</sup>, 李莲芳<sup>2</sup>, 杨世琦<sup>3</sup>, 范 莉<sup>3</sup>, 何泽能<sup>3</sup>

1. 重庆市气象局, 重庆 401147; 2. 重庆市勘测院, 重庆 401147;

3. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

**摘要:** 介绍了 GNSS-R 陆面遥感的原理和发展现状, 在重庆市土壤水分监测现状分析基础上, 设计了一种面向用户需求的土壤水分综合监测体系. 在方案设计中, 对人工测墒、地面气象站、自动土壤水分监测、卫星遥感干旱监测、GNSS-R 陆面遥感等 5 种监测手段进行了时间分辨率、空间分辨率、观测代表性的对比分析, 说明将 GNSS-R 陆面遥感作为重要补充进行综合土壤水分监测体系设计是可行的、有益的. 研究表明, GNSS-R 路面遥感的应用可进一步提高重庆市土壤水分监测体系时空分辨率, 填补自动土壤水分观测和卫星遥感在时间分辨率、空间分辨率之间的衔接空白, 拓展 GNSS 连续跟踪站网新应用. 与雷达估测降水、卫星重力、陆面资料同化结合, 可为长江上游水资源动态监测提供支撑.

**关键词:** 重庆; GNSS-R; 土壤水分; 陆面遥感; 卫星测高

**中图分类号:** P237; S152.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2019)03-0114-06

三峡成库后, 按 175 m 的蓄水高程计算, 水库容量达 393 亿  $m^3$ . 三峡水库汇集了 180 万  $km^2$  长江流域中 100 万  $km^2$  的上游来水, 超 85% 的库区面积位于重庆. 按照三峡水库后续建设规划, 除工程设计之初的防洪、发电、航运三大主要功能以外, 三峡水库地处战略腹地, 已成为我国最重要的淡水资源库、长江流域的重要生态屏障.

同时, 重庆也是气象干旱的高发地区, 春旱、夏旱、伏旱、秋旱、冬旱均有发生, 伏旱发生频率高<sup>[1]</sup>, 在重庆西部及沿江河谷地区发生频率超过 60%, 与大春作物生长发育期重叠明显, 在高温和干旱的共同作用下, 对重庆大部分地区的水稻灌浆都有明显影响, 同时也是重庆市森林火灾发生的主要影响因素.

为此, 开展连续的、高采样率、空天地一体化、多手段的土壤水分监测, 既是气象为农服务及生态气象建设的基本需求, 更是结合面雨量分析、卫星重力监测、卫星测高、陆面资料同化等技术开展三峡库区及长江上游流域的水资源动态变化监测的基础保障. 而目前兴起的 GNSS-R 陆面遥感, 在土壤水分监测方面, 由其可填补自动土壤水分观测和卫星遥感在时间分辨率、空间分辨率之间的衔接空白, 加之具有布设机动灵活、高时间分辨率、数据代表性及与地面观测数据高相关性等特点, 已日渐显现其观测优势<sup>[2]</sup>.

## 1 GNSS-R 陆面遥感

目前土壤水分测量主要有两种方式, 一种是称重法的人工土壤水分观测, 即通过人工取土—烘干—测质量, 计算出单位质量中的水分相对含量, 即比湿. 另一种, 近年来投入业务化运行的自动土壤水分观测

① 收稿日期: 2017-11-13

基金项目: 重庆市社会民生科技创新专项项目(cstc2017shmsA120007).

作者简介: 张 强(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事 GNSS 气象学、气象观测站网优化研究.

通信作者: 李莲芳, 高级工程师.

站,采用土壤湿度计直接测量,通过对土壤发射电信号的方法来测量土壤介电常数,并利用经验公式计算土壤湿度.因其为直接测量,其结果仅代表有限测量范围内的土壤水分,对设站的代表性要求很高,在地形、地貌复杂区域其代表性显著降低.

最近几年,国际和国内利用 GNSS-R(Global Navigation Satellite System Reflection)测量土壤湿度的新技术逐渐走向成熟.中国科学院武汉物理与数学研究所、武汉大学等单位开展合作,在我国较早开展了这项理论和试验研究工作.他们在岸基的 GNSS-R 研究工作基础上,开发了土壤湿度观测设备和数据反演软件等,并进行了一些初步试验.初步研究表明,GNSS-R 试验结果与土壤湿度计直接测量数据相当符合<sup>[3]</sup>.

### 1.1 GNSS-R 反演土壤水分原理

#### 1) 逻辑原理

在 GNSS/MET 气象学上,通过 GNSS 测量中的电离层延迟、对流层延迟反算电离层电子浓度、大气可降水含量逻辑一致,GNSS-R 逻辑上也是一种逆向思维,即在布设一台天顶方向的右旋天线接收 GNSS 直射信号的同时,向下布设一台接收反射信号的左旋天线,将 GNSS 测量中反射信号相对直射信号的强度变化进行计算,得出地面反射系数,并根据反射系数与介电常数的关系模型,得到某一个观测历元反射点的介电常数后,最终反演出土壤湿度.

反射系数的求解,除与地物介电常数相关外,也与开展陆面遥感的 GNSS-R 接收天线高度、GNSS 卫星高度角、卫星空间位置有关,在接收天线高度一定的情况下,随着卫星空间位置、高度角的变化,其菲涅尔反射区的反射点也是反射区范围内的一簇,而非某一固定点,形成类似雷达的观测方式,比较自动土壤水分观测而言扩大了测量范围.

#### 2) 几何原理

信号传播过程中,遇到障碍物会发生反射和散射,按照菲涅尔反射区概念,设定每一个特定的时间延迟上,以镜面反射点为反射信号源射线原点,并以同一时间延迟的信号传播路径组成的系列椭圆为平面基准,按照上一节的 GNSS-R 测量原理,可以将 GNSS-R 的基本简化几何模型描绘如图 1 所示<sup>[4-5]</sup>.

进行 GNSS-R 陆面遥感实际观测时,就可以把测定镜面反射点的土壤水分,转换为经镜面反射点后受土壤介电常数调制的反射信号与直射信号的相对变化问题.在此步骤之前需要准确地计算出镜面反射点的空间坐标、直射信号也就是右旋天线的空间坐标,以及数据卫星仰角等相关参数.其数据流程基本逻辑如下:

① 从 GPS 软件接收机中获取直射信号功率和反射信号的功率,通过信号处理和空间坐标解算求得功率反射率.② 通过反射率求出垂直分量的反射系数.③ 通过反射系数求解介电常数.④ 选择模型反演得到土壤湿度.

#### 3) 土壤水分反演原理

依照上节原理,接收的反射波信号是被土壤介电常数调制的,它包含了土壤的介质特性信息.为了估计土壤湿度,首先计算反射波与直射波功率比值表示如下:

$$BI(t) = \frac{p_R(t) \times f_R(\theta, \varphi)}{p_D(t) \times f_R(\theta, \varphi)} \quad (1)$$

式中:  $p_R(t)$ ,  $p_D(t)$  分别为反射和直射波的功率;  $f_R(\theta, \varphi)$  为由于天线方向性引起的非线性值.计算  $RI(t)$  之前,对观测功率数据进行滤波和统计平均值,消除随机噪声后得到反射系数如下:

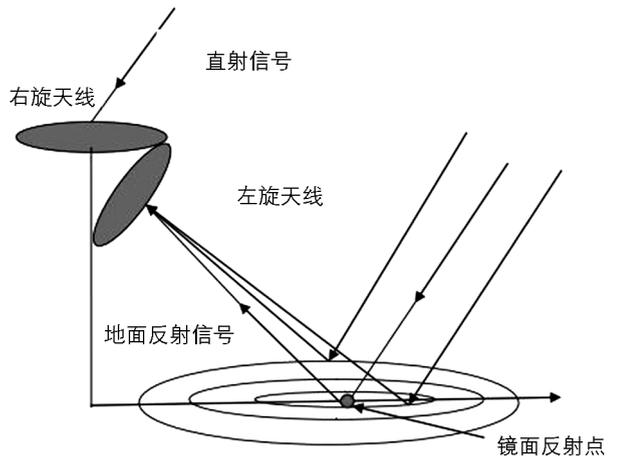


图 1 GNSS-R 测量原理简化几何模型

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |BI(t)|} \quad (2)$$

GPS 发射的信号是一个右旋极化信号, 存在垂直和水平入射面的分量. 对于高仰角反射信号, 例如仰角大于  $60^\circ$ , 垂直极化分量起主要作用. 采用垂直极化分量代替反射信号引起计算土壤湿度误差在 5% 以内, 随仰角增加, 误差减少. 因此, 土壤介电常数可以写为如下公式<sup>[3]</sup>:

$$\epsilon_{\text{soil}} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4\sin^2\gamma \cos^2\gamma \left(\frac{1-R}{1+R}\right)^2}}{2\sin^2\gamma \left(\frac{1-R}{1+R}\right)^2} \quad (3)$$

上式中的  $R$ ,  $\gamma$  值可以从实验数据中得到. 从接收机输出的直射波和反射波数据可以计算  $R$  值. 从定位数据中可以得到角度  $\gamma$ . 从(3)式可以计算得到土壤的介电常数. 土壤是由沙粒粘土、水和其他有机物质组成的. 不同土壤中沙粒和粘土比例差别可能很大. 因此, 从测的土壤介电常数计算土壤湿度时, 应该考虑不同土壤成份构成. 对于  $L$  波段电波测量得到的土壤介电常数的实部和虚部有以下经验公式<sup>[3]</sup>:

$$\epsilon' = 2.862 - 0.012S + 0.001C + (3.803 + 0.462S - 0.341C)m_v + (119.006 - 0.500S + 0.633C)m_v^2 \quad (4)$$

$$\epsilon'' = 0.356 - 0.003S - 0.008C + (5.507 + 0.044S - 0.002C)m_v + (17.753 - 0.313S + 0.206C)m_v^2 \quad (5)$$

式中:  $S$  为土壤中沙的比例;  $C$  为粘土的比例;  $m_v$  为土壤体积分含水量. 如果知道土壤中的  $S$  和  $C$ , 通过解方程即可由  $\epsilon'$  得到  $m_v$ . 从而得到土壤湿度.

## 1.2 GNSS-R 陆面遥感业务化进展

中国科学院物理与数学研究所、武汉大学、中国地质大学、北京大学均已开展了 GNSS-R 陆面遥感研究, 并开展了与土壤湿度计测量的对比试验. 从对比试验看, 在地形粗糙度不大的裸露沙土试验中, GNSS-R 陆面遥感反演结果非常接近实测值, 可以非常敏感地捕捉到土壤湿度的动态变化. 武汉大学、中国科学院物理与数学研究所、中国地质大学还开发了较为成熟的 GNSS-R 陆面遥感业务软件, 具有一定的业务应用推广价值.

同时, GNSS-R 陆面遥感作为一种非合作目标的、间接的土壤水分监测技术, 以目前大概 100 颗左右的 GNSS 导航卫星看, 具有信息源广泛、布设机动灵活的设站优势, 与现有的自动土壤水分观测、卫星遥感产品对比具有极高的互补性和对比验证价值, 仍值得推广应用.

## 2 重庆市土壤水分监测现状

### 2.1 土壤水分监测现状

目前重庆市的土壤水分监测资料主要来源于以下 3 种:

1) 人工观测资料: 主要包括分布于全市 34 个区县的 179 个人工土壤墒情观测点, 每个人工土壤墒情观测点逢每月 3 日、8 日、13 日、18 日、23 日、28 日观测 1 次, 每月观测 6 次, 时间序列目前已累积有 13 年.

2) 地面自动观测资料: 主要包括 35 个国家级地面观测站, 49 个自动土壤水分观测站, 随着资料分析能力和 GNSS-R 陆面遥感技术应用能力的提升, 有望开展对 1 924 个区域自动气象站和经改造后的 27 个 GNSS/MET 资料的分析.

3) 卫星遥感资料: 主要依托的 FY-3 等卫星直收资料及遥感产品, 也开展了 MODIS 等遥感产品干旱监测应用.

对人工土壤水分观测、地面降水资料、自动土壤水分观测、卫星遥感资料、GNSS-R 分别进行空间分辨率、时间分辨率、获取方式、主要优缺点进行分析, 整理汇总如表 1 所示.

表 1 各类土壤水分及干旱监测分析资料时空分辨率及获取方式汇总

资料种类		空间分辨率	时间分辨率	获取方式	主要优缺点
人工土壤水分观测		22 km	5 d	实时获取	土壤水分的直接测量, 时空分辨率低.
地面降水资料		6.5 km	1 min, 1 hr	实时获取	非土壤水分的直接测量, 可用于面雨量、径流分析, 时空分辨率高.
自动土壤水分观测		41 km	5 min	实时获取	直接测量多层土壤水分, 但代表性较差, 仅为测量点的直接测量结果, 布设成本低, 空间分辨率可进一步提高.
卫星遥感资料	MODIS	1 km	12 hr	接收站实时获取	即将到使用年限.
	FY-3/VIRR	1 km	12 hr	接收站实时获取	可直收, 时间分辨率提高不大.
	FY-3/MERSI	1 km	12 hr	接收站实时获取	可直收, 时间分辨率提高不大.
GNSS-R		55 km	1 s	实时获取	高时间分辨率, 成本适中, 布设机动灵活, 测量值为测量点周围一定范围的平均反演值, 有一定代表性, 能与地面资料、卫星遥感资料做到良好补充.

## 2.2 干旱研究现状及面临的新需求

对于重庆市土壤水分监测及干旱研究, 目前已有一些专家、学者利用人工土壤墒情资料、降水资料、自动土壤水分、卫星遥感资料和气候分析方法对重庆市土壤水分、干旱时空分布规律和形成原因进行了探讨(表 2). 高阳华等<sup>[6]</sup>使用地面气象资料对重庆市干旱进行了分类与指标建立. 李泽明等<sup>[7]</sup>采用地面站逐日资料和气候分析方法, 对重庆市两次典型的干旱发生进行了背景分析. 孙德亮等<sup>[1]</sup>利用 SPI 指数对重庆市干旱进行了时空分析. 杨世琦等<sup>[8]</sup>利用卫星遥感监测对 2006 年重庆特大干旱进行了监测分析, 为我市较早利用卫星遥感资料与地面观测数据结合方法组建干旱及土壤水分研究团队奠定基础.

表 2 重庆市土壤水分及干旱研究方向汇总

论文时间及题目	资料	方法	主要结果
2003, 重庆市干旱的分类与指标 <sup>[6]</sup>	历史资料、地面资料	统计及诊断分析	建立起了重庆市气象干旱的分类与指标.
2014, 重庆 2011 年和 2006 年夏季严重干旱及环流特征的对比分析 <sup>[7]</sup>	地面资料	统计分析、气候分析	开展了观测资料与气候分析方法结合的研究.
2016, 基于 SPI 指数的近 50 年重庆地区干旱时空分布特征 <sup>[1]</sup>	地面资料	SPI 指数分析	通过 SPI 指数分析, 得出了长时间序列的重庆市干旱时空分布.
2010, 2006 年重庆特大干旱期间的遥感监测应用研究 <sup>[8]</sup>	土壤水分资料、卫星遥感资料	遥感资料反演、遥感与地面资料对比分析	较早利用卫星遥感资料反演与地面资料的综合分析研究, 尤其是土壤水分观测资料的应用, 建立起了动态的土壤水分与干旱发展相关性研究.

对比重庆市干旱研究的发展趋势, 可以看出基本是与重庆市地面气象观测站网、土壤水分观测站网及卫星遥感技术的发展脉络相一致的. 虽然有多位研究人员利用气象资料、遥感资料等资料和遥感反演、统计诊断、气候分析等方法揭示了重庆市土壤墒情, 干旱特性、分布和主要变化规律. 但是由于资料、方法的不同, 从建设长江上游重要生态屏障、为农服务及水资源调度的新需求出发, 一些新的挑战还需要解决, 主要如下:

1) 气象观测资料时间长、连续性好,但非土壤水分的直接观测值,需进一步结合直接观测值进行数据分析。

2) 利用卫星遥感资料,并结合土壤水分资料开展的干旱研究,虽空间分辨率上已获得较大提高,但受限于资料获取和卫星重访周期,动态的、更高时间分辨率的土壤水分变化还未建立,以GNSS-R为代表的陆面遥感可对现有观测体系形成有益补充。

3) 由于资料和研究方法的侧重不同,还未建立起多源数据分析、验证、对比的土壤水分及干旱监测,数据偏向于结果论,面向水资源调度,以综合分析土壤水分、降水估测、面雨量分析、卫星测高、卫星重力监测等而生成的中间产品未建立,数据应用扩展性还要加强。

### 3 面前需求的土壤水分综合监测体系设计

如前文所述,结合重庆市建设长江上游重要生态屏障、为农服务、长江上游水资源动态等需求,以GNSS-R为重要补充,结合卫星重力测量、卫星测高等技术,借助陆面资料同化、气象水文耦合模型研究等技术,提出了水资源动态变化监测为中间产品,面向上述服务需求的土壤水分综合监测体系设计(图2)。

其中,卫星测高和卫星重力测量目前作为发展中的新技术,在反演较大区域的水资源季节变化中有不错的效果,对构建水资源的季节、年度变化背景场效果显著,其相关论述见参考文献[9—10]。

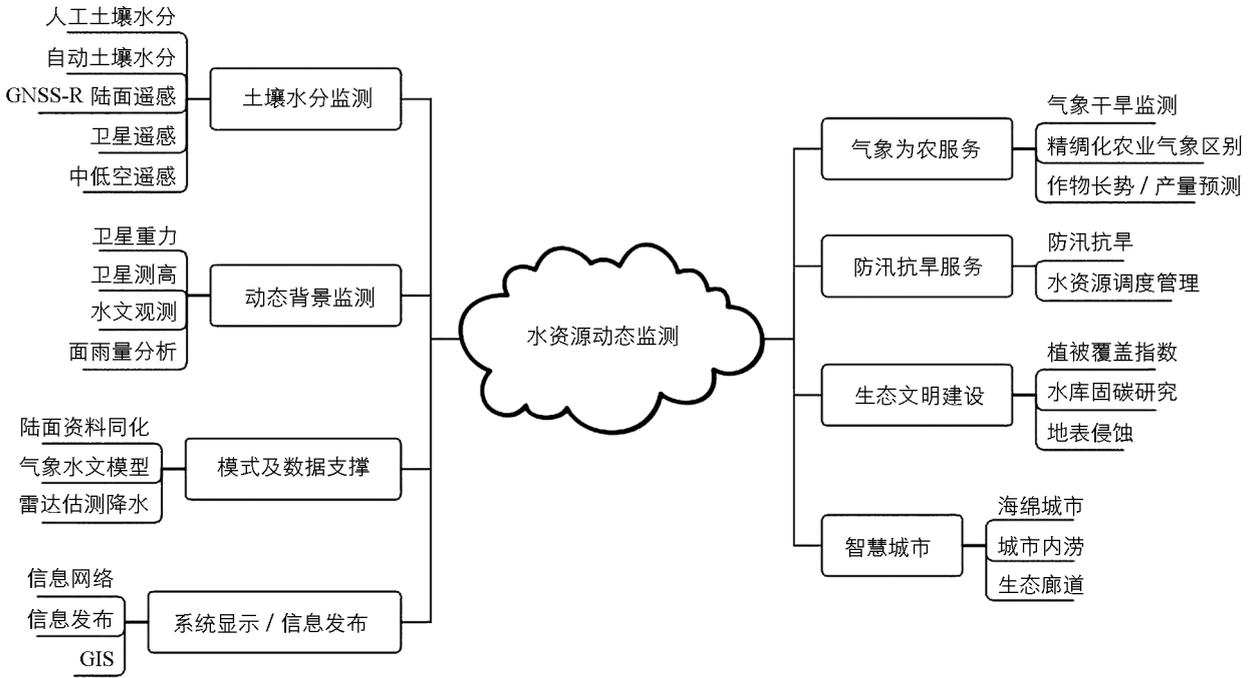


图2 面向需求的多源数据水资源动态监测体系设计

以GNSS-R陆面遥感作为重要补充,开展面向需求的土壤水分综合监测体系设计,可取得以下4个方面的新进展:

- 1) 将27个GNSS连续跟踪站纳入综合土壤水分监测体系,可进一步提高站网密度。
- 2) GNSS-R陆面遥感可填补自动土壤水分观测和卫星遥感在时间分辨率、空间分辨率之间的衔接空白。
- 3) 开展GNSS-R陆面遥感可进一步拓展现有GNSS连续跟踪站网的新应用,促进对星载GNSS-R数据处理认识。
- 4) 通过综合监测体系建设,并结合雷达估测降水、面雨量分析、卫星重力测量、卫星测高、陆面资料同化、气象水文耦合模型研究等技术,促进多部门数据共享,可为最终实现长江上游水资源动态监测提供基础支撑。

## 参考文献:

- [1] 孙德亮, 吴建峰, 李威, 等. 基于 SPI 指数的近 50 年重庆地区干旱时空分布特征 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 197-203.
- [2] 李黄, 夏青, 尹聪, 等. 我国 GNSS-R 遥感技术的研究现状与未来发展趋势 [J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 389-399.
- [3] 严颂华, 龚健雅, 张训械, 等. GNSS-R 测量地表土壤湿度的地基实验 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2735-2744.
- [4] 刘成. GNSS-R 应用于测量表层土壤湿度及软件设计 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [5] 张训械, 严颂华. 利用 GNSS-R 反射信号估计土壤湿度 [J]. 全球定位系统, 2009, 34(3): 1-6.
- [6] 高阳华, 冉荣生, 唐云辉, 等. 重庆市干旱的分类与指标 [J]. 贵州气象, 2001, 25(6): 16-18.
- [7] 李泽明, 陈皎, 董新宁. 重庆 2011 年和 2006 年夏季严重干旱及环流特征的对比分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(8): 113-122.
- [8] 杨世琦, 易佳, 罗孳孳, 等. 2006 年重庆特大干旱期间的遥感监测应用研究 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(23): 325-330.
- [9] 徐羽, 吴艳飞, 徐刚, 等. 基于相对湿润指数的重庆市气象干旱时空分布特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 96-103.
- [10] 孙佳龙, 郭金运, 常晓涛, 等. 利用卫星测高和重力的巴尔喀什湖水位变化监测 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 401-406.

## The Design of a Soil Moisture Observation System with GNSS-R Land Remote Sensing as a Major Supplement

ZHANG Qiang<sup>1</sup>, LI Lian-fang<sup>2</sup>, YANG Shi-qi<sup>3</sup>,  
FAN Li<sup>3</sup>, HE Ze-neng<sup>3</sup>

1. Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147, China;

2. Chongqing Survey Institute, Chongqing 401147, China;

3. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China

**Abstract:** In this paper, the principle of GNSS-R land remote sensing and its current development are described. Based on an analysis of the current situation of soil moisture monitoring in Chongqing, a customer demand-oriented comprehensive soil moisture monitoring system is designed. In the project design, based on a comparison of the temporal resolution, spatial resolution and representativeness among manual soil moisture measurement, surface meteorological station, automatic soil moisture monitoring, satellite remote sensing soil moisture monitoring and the proposed GNSS-R land remote sensing, the feasibility and desirableness of designing a comprehensive soil moisture monitoring system with GNSS-R land remote sensing as an important supplement are proved. It is significantly increase the soil moisture monitoring network density, fill the gap between automatic soil moisture stations and satellite remote sensing in temporal and spatial resolution, and also expand the new application of the GNSS-CORS network. Combined with the radar-estimated precipitation, satellite gravity and land data assimilation. This comprehensive soil moisture monitoring system may provide a powerful support for the dynamic water resource monitoring of the Yangtze River.

**Key words:** Chongqing; Global Navigation Satellite System Reflectometry; soil moisture; land remote sensing; satellite altimetry

