



实时电磁环境监测系统设计与实现

刘奇^{1,2*}, 杜清清^{1,3}, 王玥^{1,2}, 董晓玉^{1,2}, 马凌^{1,2}, 王娜^{1,2}, 蔡明辉^{1,2}, 苏晓明^{1,2}

1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;
2. 新疆微波技术重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: liuqi@xao.ac.cn

收稿日期: 2023-07-06; 接受日期: 2023-09-12; 网络出版日期: 2023-12-25

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203503)、国家自然科学基金(编号: 11973077, 12003061)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(编号: 2021D01E07)资助项目

摘要 随着数字技术的发展, 瞬态信号对射电天文观测的影响越来越大, 围绕瞬态信号测量需求, 开展实时电磁环境监测技术与工程应用极其必要. 首先, 本文依托射电天文台址实际测量需求, 给出了电磁环境监测系统硬件构架设计方案. 其次, 依据信号分析仪参数配置与测量时间、测量不确定度的关系, 给出了实时电磁环境监测测量时间配置方法; 并采用数据压缩、多线程并行处理、环形缓存区设计等技术方法实现高速数据传输, 提高了测量系统的可靠性. 最后, 开发了系统测量软件及基于Web的频谱监视软件, 实现电磁环境实时测量与监视, 应用于QTT (QiTai Radio Telescope)台址, 为台址瞬态信号特征分析与干扰缓解策略的制定提供数据支撑.

关键词 射电望远镜, 电磁环境, 实时监测, 软件

PACS: 07.05.Kf, 95.55.Jz, 95.45.+i

1 引言

大型射电望远镜具有极高的系统灵敏度及观测带宽, 如新疆天文台奇台110 m射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)的频率范围为150 MHz至115 GHz^[1,2], 对来自宇宙的微弱信号极为敏感, 极易受到其他业务的干扰^[3]. 随着空间无线电技术、高频电子技术及高速数字处理技术的发展和运用, 台址内外各类无线电通信野外及人为干扰源大多采用数字的方式进行传输, 采用跳频、捷变频、突发脉冲等信号传输形式, 通

信设备的复杂程度大大增加^[4], 台址电磁环境日趋复杂, 电磁干扰对天文观测的影响越来越大^[5].

SKA (Square Kilometer Array)国际工程小组于2003年制定了SKA选址RFI (Radio Frequency Interference)测试协议^[6], 该电磁环境测试方法在国际射电望远镜选址中得到较多应用, 如澳大利亚ASKAP和南非SKA^[7,8]、荷兰WAST和LOFAR^[9,10]、印度尼西亚^[11]、中国FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope)、QTT、中阿40 m射电望远镜^[12-14]等. 上述电波环境测试方法对于射电天文台站前期选址及电磁

引用格式: 刘奇, 杜清清, 王玥, 等. 实时电磁环境监测系统设计与实现. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 219512

Liu Q, Du Q Q, Wang Y, et al. Design and implementation of a real-time electromagnetic environment monitoring system (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219512, doi: [10.1360/SSPMA-2023-0229](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0229)

云台控制器、光交换机等组成, 其中云台控制器控制天线云台转动, 定向天线接收到的信号经过信号分析仪进行处理, 通过光纤连接至数据处理及存储设备. 数据处理及存储设备主要为高性能计算机, 通过向云台控制器发送相应指令同时控制信号分析仪进行测试与获取数据, 实现不同带宽、不同方向、不同极化状态下的自动化电磁环境监测.

3 实时监测技术问题分析与实现

3.1 技术问题描述

为满足瞬态干扰信号测量要求, 实时电磁环境测量需采用快速扫频模式, 信号分析仪不做积分, 而是在一段时间内多次快速扫描并捕获数据, 以便迅速捕捉干扰信号, 将每次扫描的频谱数据保存并进行统计处理, 分析电磁干扰随时间的变化. 因此, 实现电磁环境实时监测需解决的主要问题如下.

(1) 目前商用信号分析仪多用于常规测试, 较少用于实时测量. 实时电磁环境监测需解决信号分析仪关键参数配置与测量时间、测量精度之间的关系, 进而提高数据的时间分辨率与准确性.

(2) 实时电磁环境测量需解决仪器控制、高速数据传输、数据处理及存储等并行控制技术, 需研究多线程并行处理技术, 实现高速数据传输与数据处理.

(3) 需在上述技术基础上, 研究基于Web的数据处理及发布技术, 开发基于Web的实时频谱监视界面, 提高电磁环境的监测效率.

3.2 测量时间规划

实时电磁环境测量需要信号分析仪在保持较快扫描速度的同时具有较低的测量不确定度, 信号分析仪的响应时间和测量数据精度是实现实时RFI检测的两个重要性能. 但是由于信号分析仪受硬件条件限制, 其

扫描时间与实际测量时间相差较大, 且扫描速度太快时, 信号分析仪的分辨带宽滤波器不能充分响应, 会导致信号幅度和频率显示值发生偏差. 因此, 信号分析仪不同测量参数配置会对测试结果产生较大的影响, 需通过测试信号分析仪在不同测量参数下的实际测量时间和测量不确定度, 分析得出信号分析仪的最佳参数配置.

合理设置信号分析仪分辨率带宽、视频滤波器带宽、扫描点数与扫描时间等参数, 提高信号分析仪扫描速度和测试精度, 从而有效提高瞬态信号检测能力. 文献[18]采用实测与理论相结合, 研究了不同品牌及型号信号分析仪的关键参数设置对实际测量时间和测量不确定度的影响, 给出了信号分析仪100 MHz–2 GHz, 2–5 GHz, 5–13 GHz三个频段的参数配置方法, 见表1, 其中 RBW为中频分辨率带宽、VBW为视频分辨率带宽、Points为单屏带宽内的扫描点数、ST为设置的时间、AST为信号分析仪的实际执行时间、Un为测量不确定度. 文献[17]采用标准噪声源, 计算分析了电磁环境监测系统的测量不确定度为1.49 dB (100 MHz–7 GHz), 考虑到实时电磁环境测量信号分析仪额外的测量不确定度, 即测量系统容的总不确定度为1.521 dB.

为科学合理地规划实时电磁环境测量时间, 提高测量数据的精度和可靠性, 依据表1信号分析仪关键参数配置方法, 不同频段的实际测量时间计算如下.

(1) 0.1–2 GHz频段: 单屏测量带宽为10000 (Points) $\times$ 30 kHz (RBW) = 300 MHz, 总测量时间为(2–0.1) GHz/300 MHz $\times$ 70 ms (AST) $\approx$ 444 ms.

(2) 2–5 GHz频段: 单屏测量带宽为15000 (Points) $\times$ 100 kHz (RBW) = 1.5 GHz, 总测量时间为(5–2) GHz/1.5 GHz $\times$ 59 ms=118 ms.

(3) 5–13 GHz频段: 单屏测量带宽为25000 (Points) $\times$ 300 kHz (RBW) = 7.5 GHz, 总测量时间为(13–5) GHz/7.5 GHz $\times$ 59 ms $\approx$ 63 ms.

表 1 信号分析仪不同频段关键参数配置^[18]

Table 1 Configuration of key parameters of the signal analyzers in different frequency bands

FREQ (GHz)	RBW (kHz)	VBW (kHz)	Points	ST (ms)	AST (ms)	Un (dB)
0.1–2	30	300	10001	1	70	0.001
2–5	100	300	15001	20	59	0.031
5–13	300	1000	25001	26	51	0.015

依据上述计算的信号分析仪不同频段的实际测量时间, 确定单个方向全频段的总测量时间为10 min, 100 MHz–2 GHz的测量时间为5 min, 2–5 GHz的测量时间为3 min, 5–13 GHz的测量时间为2 min. 每个方向测试前需按照文献[9]的方法进行校准, 计算系统增益与系统噪声系数, 其中, 系统增益用于校准测量数据, 系统噪声系数用于验证系统性能可靠性. 每个方向测量完成后, 依照实际的测量频点数, 统计出不同频段的每个频点的最大值和平均值, 用于进一步的频谱分析.

此外, 考虑到天线转动、系统性能参数测量、数据处理及存储的时间消耗, 每个方向的实际测试时间约12 min. 每轮测试包括6个测试方向, 覆盖360°, 测量时间约72 min, 水平极化测量1轮, 垂直极化测量1轮, 以此重复进行, 通过实时测量分析电磁干扰随时间的变化.

3.3 高速数据流技术问题分析

(1) 数据压缩

以罗德与施瓦茨公司信号分析仪为例, 从信号分析仪读取的数据类型为double型十进制数据, 每个采样点的数据大小为18 B, 单屏测试带宽内频谱数据量与扫描点数成正比. 实时电磁环境测量需要信号分析仪进行多次快速扫描, 因此会产生大量测量数据, 容易导致计算机内存超出负荷, 并且, 若保存所有原始测量数据至本地磁盘, 会占用大量存储空间. 为了减小数据量, 提高数据传输、存储及数据处理效率, 有必要对测量数据进行压缩, 仅保存测量数据的小数点后两位, 即满足实际数据精度需求, 具体方法如下: 首先, 信号分析仪执行单次扫描完成后, 读取十进制信号分析仪数据, 将读取的数据乘以100. 其次, 定义short型变量, 对读取的数据进行取整(整数必须在short型变量范围内), 再存入内存缓冲区或存储至本地磁盘. 最后, 数据处理时将取整后的数据除以100, 即可得到精度为小数点后两位的测量数据.

从信号分析仪读取的每个采样点的数据大小为18 B, 则单次扫描的数据量为

$$S_{\text{data}} = 18 \times C_{\text{points}}, \quad (1)$$

其中, C_{points} 为单次扫描的扫描点数. short型变量为16位, 占2个字节, 则数据压缩后单次扫描的数据量为

$$S'_{\text{data}} = 2 \times C_{\text{points}}. \quad (2)$$

数据压缩后的数据量约为压缩前的十分之一, 可大大减小存储空间, 提高数据处理的效率.

(2) 多线程并行处理

实时电磁环境测量要求信号分析仪具有较快的扫描速度, 每次扫描产生的频谱数据需传输至计算机进行数据压缩与处理, 采用多线程并行处理可有效提高数据传输及数据处理效率, 并保证测量频谱的时间分辨率. 此外, 测量线程与数据处理线程并行处理, 提高测量与数据处理效率和程序兼容性. 应用于QTT台址的电磁环境监测系统多线程并行处理流程如图3所示, 测量线程控制天线云台转动, 同时控制信号分析仪进行测试与读取数据, 从信号分析仪读取的测量数据经过数据压缩后, 在CPU开辟缓存空间, 满足测量数据的缓存需求, 等待该频段所有测量完成后, 进入数据处理线程进行数据统计与处理, 进而将测量数据保存或实时发布.

(3) 环形缓冲区设计与优化

环形缓冲区是一个头尾相连、先进先出的缓冲区结构, 建立环形缓冲区进行数据传输与处理, 能够提高数据访问及处理速度, 缓解数据量带来的内存压力. 但是, 环形缓冲区需要不断读取读指针和写指针的位置, 在一定程度上会降低程序运行效率. 实时电磁环境监测时测量过程占用时间较长, 而测量数据的处理过程占用时间较短, 有必要依据此特点对环形缓冲区结构进行优化, 可减少因频繁读取指针位置带来的内存消耗.

图4给出了环形缓冲区设计流程图, 首先在内存中开辟两个大小为200 MB的缓冲区域, 每个缓冲区设置一个标志位, 初始状态为0. 每个频段测量开始时, 分别读取两个缓冲区的标志位, 若为0, 则将测量数据不断

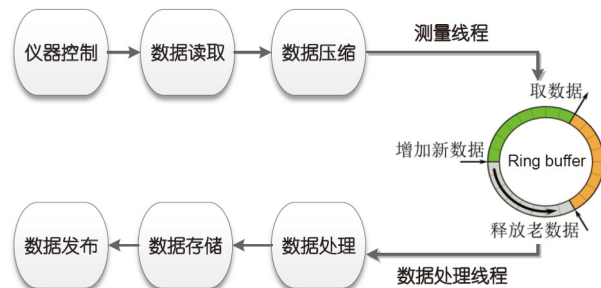


图3 多线程并行处理流程图

Figure 3 Multi-threaded parallel processing flowchart.

存入该缓冲区, 当该频段测量完成后, 将缓冲区的标志位设为1, 再继续进行下一个频段的测量. 在测量线程工作的同时, 数据处理线程不断读取两个缓冲区的标志位, 若为1, 则读取该缓冲区的数据进行处理, 处理完成后将数据保存并将该缓冲区的标志位重设为0. 两个缓冲区交替使用形成一个环形缓冲结构, 即可满足测量需求, 且具有良好的可扩展性.

(4) 数据处理与存储

实时电磁环境监测数据处理考虑采用统计分析方法, 数据处理线程读取缓冲区的数据后实时统计频谱序列的最大值与平均值, 并将测量数据与统计结果实时发布, 实现干扰信号的实时检测与分析.

此外, 为提高数据处理效率, 方便后期的数据检索、调用与数据处理, 需针对监测数据特点对数据存储结构及数据文件命名方式进行设计, 数据存储结构设计如图5所示. 测试数据文件夹的命名方式为测试

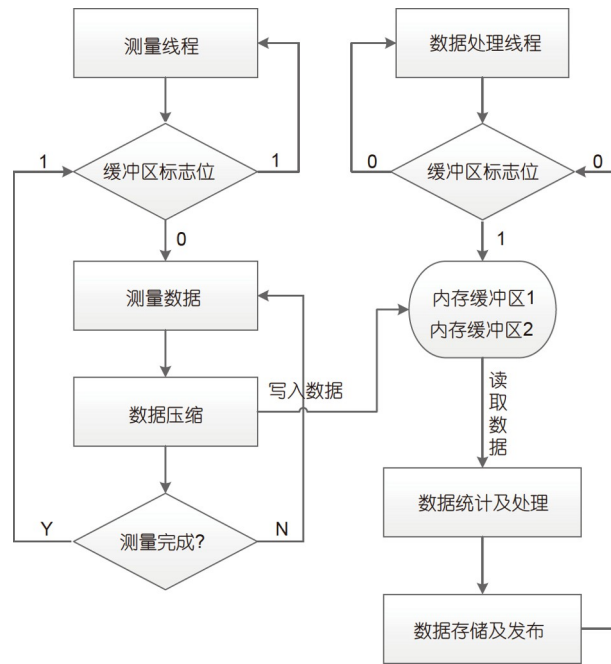


图 4 环形缓冲区设计流程图

Figure 4 Circular buffer design flowchart.

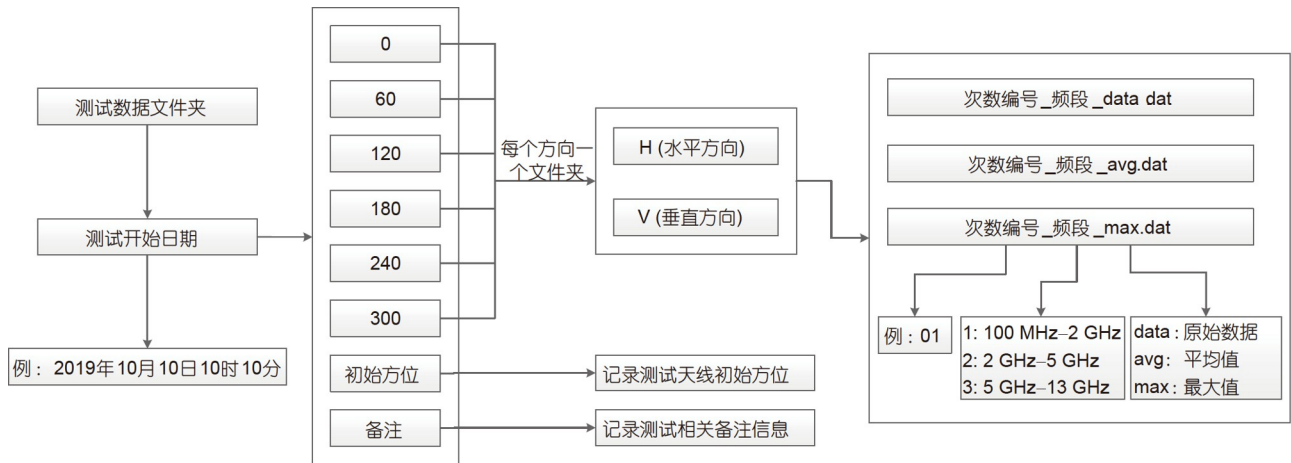


图 5 数据存储结构图

Figure 5 Data storage structure diagram.

开始日期, 每个测试数据文件夹包括两级子文件夹, 分别为不同测试方向与不同极化方式, 初始方位与备注用于记录测试相关信息, 不同频段测试的频谱数据与统计结果存入对应的测试方向与极化方式文件夹下, 频谱序列的命名方式为次数编号_频段_data/avg/max, data为信号分析仪在该频段进行多次快速扫描产生的所有原始数据, avg为该频段所有频谱数据的平均值, max为该频段所有频谱数据的最大值。

4 测量与监测软件开发与实现

(1) 测量软件开发

实时电磁环境监测软件的开发基于Microsoft Visual Studio 2013开发环境, 采用C++编程语言. 软件功能主要包括设备调试、系统校准、自动化测量及电磁干扰测量等. 设备调试主要用于查看设备连接状态, 便于进行系统安装调试及系统维护等; 系统校准主要用于测量系统增益与系统噪声系数, 提高硬件系统可靠性, 保证测量数据精度; 自动化测量功能主要用于不同方向与不同极化状态下的一键自动化测量, 包括天线云台控制、频谱测量及数据存储等, 实现实时电磁环境监测; 电磁干扰测量功能主要用于某一指定方向水平与垂直极化状态下的单次测量, 实现特定区域电磁干扰的实时测量. 软件设计框图如图6, 信号分析仪和天线云台通过网络连接, 软件设计主要包括测试信息录入、设备连接调试、系统校准、仪器设置、自动

化测量、电磁干扰测量等。

软件设计流程如图7, 测试信息包括测试人员、测试地点、测试名称、天线初始方位及备注信息等, 主要用于记录关键信息及数据文件的命名, 便于数据检索与提取. 开始测量前, 可通过设备调试区, 发送相应命令, 查看设备是否连接正常, 能否正常通信. 系统校准基于Y因子法对校准数据进行处理, 获得系统噪声与系统增益. 可根据不同测量需求选择自动化测量或电磁干扰测量, 自动化测量为6个方向覆盖360°水平极化与垂直极化交替重复性测量, 电磁干扰测量为某一方向水平极化与垂直极化单次测量. 通过控制天线云台转动, 同时控制信号分析仪在不同频段进行多次快速扫描并读取频谱数据, 每次扫描产生的测量数据经过数据压缩后存入内存缓冲区, 再通过数据处理线程进行统计与处理, 最后在软件界面显示频谱序列统计结果并将原始数据与统计结果进行存储。

(2) 监测软件开发

采用本地应用程序实现电磁环境监测数据的可视化具有一定的局限性, 远端无法实时查看监测频谱信息. 为了使监测数据更加直观, 便于查看、管理与维护, 频谱实时监视考虑采用Web实现.

基于Web的监测软件设计流程如图8所示, 测量数据经过数据压缩及处理后存储至本地计算机, 同时将测量数据实时同步至服务器. 服务器端利用定时函数定时刷新网页, 网页刷新后发送http请求, 后台实时监控数据库, 若数据库更新, 则读取更新的测量数据, 通

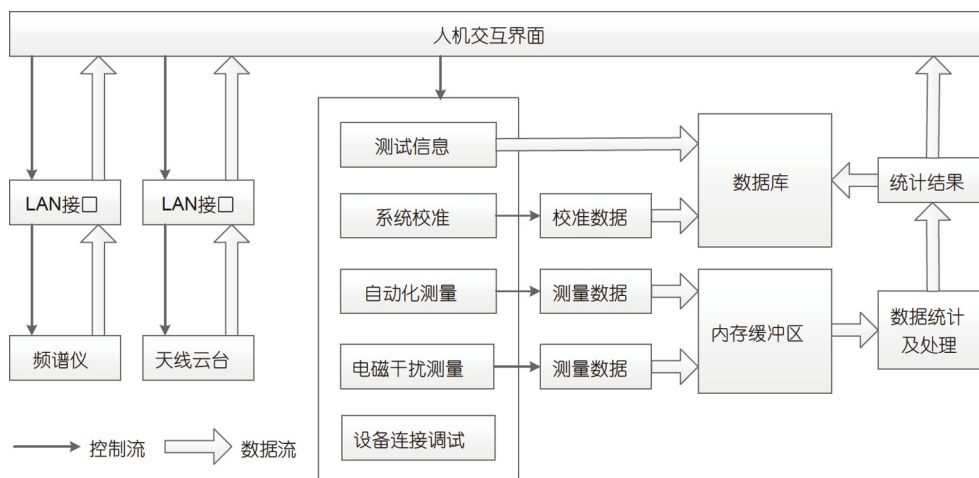


图 6 软件设计框图

Figure 6 Software design block diagram.

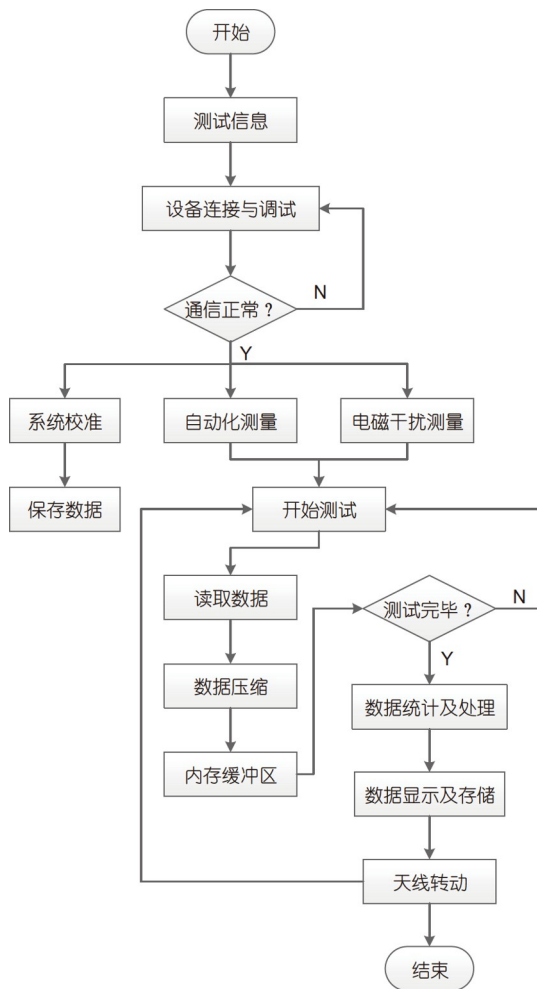


图 7 软件设计流程图

Figure 7 Software design flowchart.

过响应函数返回http响应及html文件, 浏览器解析响应数据后进行成图显示. 网页前端使用html+css+js和Echarts图表库构建; 服务器及后台选用Django进行测试, 业务逻辑在python在Django框架下编写. 这是由于Django结构清晰, 除了配置文件, 只需要完成模型、视图及模板的开发, 同时Django内置admin, 后台管理很方便; 此外, Echarts具有丰富的可视化类型, 支持多种数据格式, 并且可以跨平台使用.

按照上述方法, 将电磁环境监测数据实时同步至本地服务器实现监测频谱的实时可视化. 监视界面如图9, 频谱图实时显示当前时间的监测频谱、测量方位、极化等信息; 瀑布图显示在该测量方位与极化方式下不同时间段的监测频谱, 用于查看和分析电磁干扰随时间的变化.

5 结论

本文围绕大型射电望远镜台址瞬态信号监测需求, 开展了基于商用信号分析仪的实时电磁环境监测系统设计, 重点解决了信号分析仪参数配置、测量控制与高速数据处理技术问题, 并开发基于Web实时监视界面, 应用于QTT台址. 未来的相关技术研究工作考虑如下.

(1) 考虑射电天文技术的发展及实时电磁环境的测量需求, 目前商用信号分析仪的实时带宽较窄, 测量能力有限, 故围绕高时间分辨率、宽带瞬态信号检

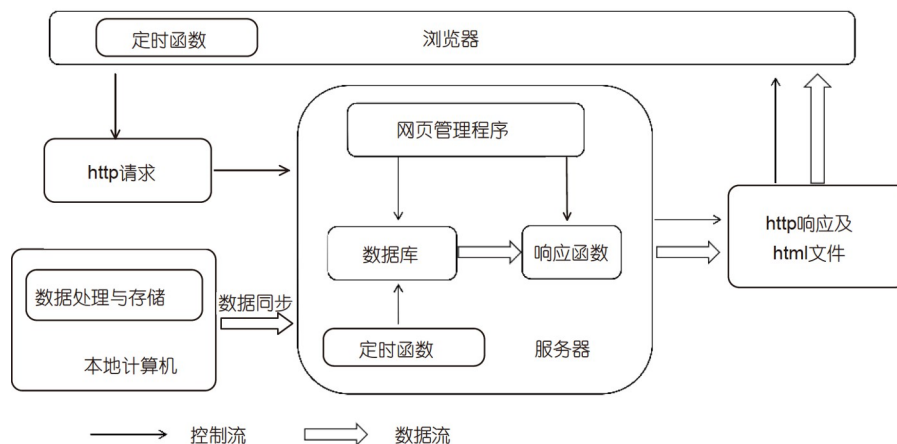


图 8 基于Web的监测软件设计流程

Figure 8 Web-based monitoring software design process.

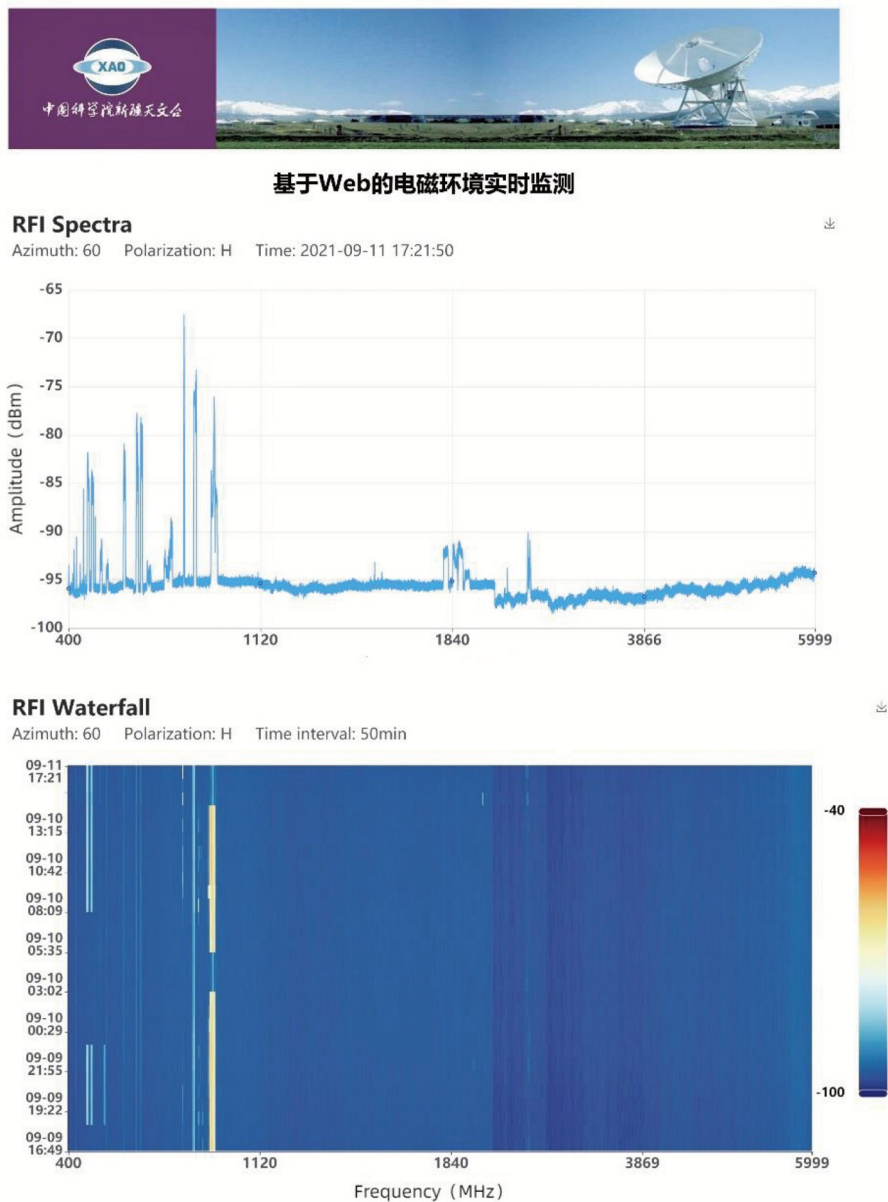


图 9 基于Web的实时电磁环境监视界面

Figure 9 Web-based interface for real-time electromagnetic environment monitoring.

测, 需采用数字技术, 开发满足要求的数字频谱仪。

(2) 对实时性要求更高的测量场景, 需研究更快捷

高效的数据传输方法及Web开发技术, 以满足实时电磁环境监测数据发布需求。

参考文献

- 1 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110米射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 783–794]
- 2 Wang N, Xu Q, Ma J, et al. The Qitai radio telescope. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 289512

- 3 Wang Y, Liu Q, Liu Y, et al. Development and realization of the software for automatic RFI monitoring system (in Chinese). *Astron Res Tech*, 2020, 17: 522–530 [王玥, 刘奇, 刘晔, 等. 自动化电磁环境监测系统软件开发与实现. *天文研究与技术*, 2020, 17: 522–530]
- 4 Porko J G. Radio Frequency Interference in Radio Astronomy. Dissertation for Master's Degree. Espoo: Aalto University, 2011
- 5 Yuan L, Liu Q, Sun Z W, et al. Detection and identification for electromagnetic interference of equipment area on-site (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2017, 32: 650–656 [袁力, 刘奇, 孙正文, 等. 现场环境下设备区域电磁干扰检测与识别方法. *电波科学学报*, 2017, 32: 650–656]
- 6 Ambrosini R, Beresford R, Boonstra A J, et al. RFI Measurement Protocol for Candidate SKA Sites. Technical Report. Working Group on RFI Measurements. 2003
- 7 Millenaar R P. SSSM System Design Considerations. Technical Report. Netherlands Institute for Radio Astronomy. 2005
- 8 Manners P J. Measurements the RFI Environment of the South African SKA Site. Dissertation for Master's Degree. Eastern Cape: Rhodes University, 2007
- 9 Offringa A R, de Bruyn A G, Zaroubi S, et al. The LOFAR radio environment. *Astron Astrophys*, 2013, 549: A11
- 10 Van der Marel H, Donker P. RFI Measurements at the WSRT. Technical Report. RFI Mitigation Workshop, Groningen. 2010
- 11 Hidayat T, Munir A, Dermawan B, et al. Radio frequency interference measurements in Indonesia. *Exp Astron*, 2014, 37: 85–108
- 12 Peng B, Sun J M, Zhang H Y, et al. RFI test observations at a candidate SKA site in China. *Exp Astron*, 2004, 17: 423–430
- 13 Li J B, Peng B, Liu D L. Site spectrum monitoring of electromagnetic environment for large radio telescope (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2015, 30: 378–382 [李建斌, 彭勃, 刘东亮. 大型射电望远镜电磁环境频谱监测. *电波科学学报*, 2015, 30: 378–382]
- 14 Zhao W P, Li J B, Li J Z, et al. Site testing and RFI measurements for China-Argentina radio telescope (in Chinese). *Prog Astron*, 2014, 32: 395–408 [赵卫普, 李建斌, 李金增, 等. 中阿40 m射电望远镜选址与电磁环境监测. *天文学进展*, 2014, 32: 395–408]
- 15 Yue L Z, Dong L, Wang M. A self-calibrating and automatic spectrum electromagnetic environment monitoring system (in Chinese). *Astron Res Tech*, 2017, 14: 392–400 [乐林株, 董亮, 汪敏. 带自定义的自动电磁环境频谱监测系统. *天文研究与技术*, 2017, 14: 392–400]
- 16 Liu Q, Wang N, Wang Y, et al. A quasi-real-time method for radio environment measurement of radio astronomical observatory (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2017, 32: 718–724 [刘奇, 王娜, 王玥, 等. 射电天文台站准实时电波环境测量方法. *电波科学学报*, 2017, 32: 718–724]
- 17 Liu Q, Wang Y, Liu Y, et al. Automatic radio environment measurement system for QTT site (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 099512 [刘奇, 王玥, 刘晔, 等. QTT台址自动化电波环境监测系统. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49: 099512]
- 18 Wang Y, Liu Q. Parameter configuration and data accuracy analysis for real-time RFI detection. *Ursi Radio Sci Lett*, 2020, 2: 1–5

Design and implementation of a real-time electromagnetic environment monitoring system

LIU Qi^{1,2*}, DU QingQing^{1,3}, WANG Yue^{1,2}, DONG XiaoYu^{1,2}, MA Ling^{1,2}, WANG Na^{1,2},
CAI MingHui^{1,2} & SU XiaoMing^{1,2}

¹ *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;*

² *Xinjiang Key Laboratory of Microwave Technology, Urumqi 830011, China;*

³ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Corresponding author (email: liuqi@xao.ac.cn)*

With the advancement of digital technology, the influence of transient signals on radio astronomy observation is growing, and it is imperative to conduct real-time electromagnetic environment monitoring technology research and engineering applications that require the measurement of transient signals. First, in this paper, the hardware architecture design scheme of the electromagnetic environment monitoring system is presented based on the actual measurement of the radio astronomy station. Second, a real-time electromagnetic environment monitoring measurement time configuration method is proposed based on the relationship between signal analyzer parameter configuration, measurement time, and measurement uncertainty. The technical methods of data compression, multithread parallel processing, and ring buffer design are adopted to achieve high-data data transmission, thus improving the reliability of the measurement system. Finally, the system measurement software and web-based spectrum monitoring software are developed to allow real-time electromagnetic environment measurement and monitoring. These were applied to QTT (QiTai Radio Telescope) sites and provided data support for analyzing transient signal characteristics and interference mitigation strategies.

radio telescope, electromagnetic environment, real-time monitoring, software

PACS: 07.05.Kf, 95.55.Jz, 95.45.+i

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0229](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0229)