

高值无线电干扰测量仪使用性能 扩展方法研究

黄卫华¹, 许海¹, 杨斌发², 袁海文², 周虎¹, 李金猛¹, 张祥东¹

(1. 中国人民解放军第5720厂, 安徽芜湖 340200;

2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要: 特高压线路区域内的无线电干扰测量具有时间长、范围大、测点多等特点, 针对现有测量模式设备投入成本高、利用率低、自动化程度低和操作繁琐的不足, 文章提出了一种扩展高值无线电干扰测量仪使用性能的思路和方法: 即利用 Zigbee 无线网络技术设计数据传输终端, 构建测量网络, 实现数据的无线传输; 使用 .Net 相关技术开发对应上位机软件, 实现测量控制、数据展示和存储过程自动化; 外场试验表明测量仪器性能扩展后, 使用更加灵活、可满足更为特殊的测试需求, 并且具有自动化程度高、可靠性好、稳定性高和设备利用率高的优点。

关键词: 特高压线路; 无线电干扰; 性能扩展; Zigbee; 无线网络

Research on the Use Performance Expansion Method of High Value Radio Interference Measuring Instrument

HUANG Weihua¹, XU Hai¹, YANG Binfa², YUAN Haiwen², ZHOU Hu¹,
LI Jinmeng¹, ZHANG Xiangdong¹

(1. Factory 5720 of PLA, Wuhu 340200, China;

2. School of Automatic Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The radio interference measurement in the area of UHV line has the characteristics of long time, large range and multiple measuring points, etc. Aiming at the shortcomings of the existing measuring equipment of high cost and cumbersome operation, the use performance of the high value radio interference measuring instrument is extended. Based on Zigbee wireless network technology, data transmission terminal was designed and measurement network was built. And then the wireless transmission of data was realized. With using .net and related technology, PC software was developed to achieve measurement control, display and storage of data. The field test shows that the measuring instrument after expansion has the advantages of high automation, good reliability and high stability.

Keywords: UHV line; radio interference; performance expansion; Zigbee; wireless network

0 引言

近年来, 通航技术、无人机技术发展迅速, 它们对数据链传输的无线信道要求很严格, 无线信道中的强干扰对其可靠性、安全性构成了很大的威胁; 另一方面, 我国社会经济发展迅速, 经济发达地区对能源的需求很旺盛, 但我国能源分布和使用在地理空间的不平衡矛盾, 促使国家依靠大力发展特高压输电技术来解决。然而, 特高压线路的快速建设, 又使无线电干扰成为工程施工、运营中要解决的一个新问题。在解决无线电干扰的工程试验研究和工程建设实践中, 需要进行大量的测试工作, 必须使用无线电干扰测量仪器。

对于无线电干扰测量仪器, 德国 R&S 公司(罗德与施瓦茨公司)一直雄踞技术前沿。它是欧洲最大的电子测量仪器生产厂商和专业无线通信、广播、信息技术安全领域的领导厂商, 以创新、精确和品质享誉世界。R&S 公司的产品不仅技术水平位居前列, 而且质量优异, 性能独特。公司还在研究、开发、生产和服务方面创建了全球通行的标准。其生产的无线电干扰测量仪器综合水平居于国内外领先地位, 最顶级无线电干扰测试仪器产品的价格极为昂贵, 单台价格就超过上千万元人民币。由于高端无线电干扰测量仪器技术难度大、门槛高, 国内外的研制生产厂家不多。这些仪器在检测点当地的使用性能非常优越, 在测量中只支持当地使用, 操作人员必须到现场记录数据, 或

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-06-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073013); 5720 厂与北航科技合作资助项目。

作者简介: 黄卫华(1973-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事维修技术方向的研究。

通讯作者: 袁海文(1968-), 男, 陕西宝鸡人, 工学博士, 教授, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

引用格式: 黄卫华, 许海, 杨斌发, 等. 高值无线电干扰测量仪使用性能扩展方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 296-302.

者通过红外串口连接到计算机上, 将数据在现场通过几个简单的命令导入到计算机中。

这种高价值高性能的测试仪器, 尽管在当地、单点单次测量使用的性能非常优越, 但在特高压线路区域内需要长时间大范围许多个测点进行测量时, 其使用性能的不便就显现出来了: 1) 每个测点离不开测量人员; 2) 更换测点的准备工作很繁琐; 3) 大量测量结果的记录、处理很困难, 需要人工介入, 工作量大; 4) 测量范围大, 测点多时, 需要的测量仪器数量多, 导致测试资源投入费用不可承受; 5) 需要对若干典型观测点同步测试的需求无法实现。

在这种背景下, 本文针对国家特高压基地购置的相应产品, 利用 Zigbee 无线网络技术研制了无线镜像通讯端口, 同时研制 28 V 锂电池移动供电电源代替原来的 110/220 V、50/60 Hz 仪器供电适配器, 可使该产品在测量范围内移动使用, 用较少数量的设备完成大范围地点的无线电干扰测量, 并支持不同测点之间的同步测量。

1 特高压线路无线电干扰产生原理及研究现状

1.1 无线电干扰产生原理

输电线路导线施加高压后, 在导线的表面会产生强电场, 由于导线表面的粗糙不平, 在一些毛刺处电场强度的数值会更大。当电场强度的数值足够大, 达到接近特定环境条件下的空气击穿电场强度时, 输电线路导线的表面电场会击穿线路附近的空气, 从而发生电晕放电现象, 并伴随着放电可听噪声和电晕辉光现象, 随着电压的持续升高, 可以在输电线路到线上形成此起彼伏而又连续不断的电晕放电过程^[1]。

这种持续的电晕放电现象, 是一种非常典型的电磁暂态过程, 它会产生频谱很宽的电磁波信号, 这些电磁波信号通过各种不同的途径, 以直接或者间接耦合的方式, 进入到各类接收设备的天线, 进而导致接收设备的信号接收能力急剧下降, 甚至淹没了有用的信号, 从而发生使无线接收设备通讯受阻的现象, 这就是特高压线路电晕引起的无线电干扰现象^[1]。

对于特高压直流线路电晕引起的无线电干扰现象的形成原理, 可以等效地采用图 1 所示的过程来解释。当电晕电流脉冲沿周围空间从如图所示的某点进入线路后, 它将从该点向两边流动, 这种向两边流动的瞬态脉冲电流必然在导线周围产生无线电干扰现象。可以设想, 在实际的线路中, 由于导线很长、注入点很多, 局部看注入点在某个时刻出现在那点具有随机性, 但总体看, 这样的注入点在线路整体上的分布, 在特定的条件下具有均匀性, 同一时刻不同位置注入点的许多脉冲注入电流叠加在一起, 综合形成了一种相对稳定但重复率很高的准“稳态”电流, 从而在直流特高压输电线路周围产生“稳态的”无线电干扰^[2]。

在电压等级相同时, 与正极导线相比, 特高压直流线

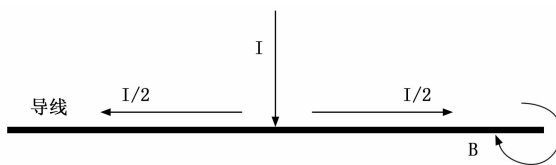


图 1 特高压直流线路无线电干扰形成示意图

路负极导线发生电晕放电时, 在整个输电线路导线的表面上, 放电点分布比较均匀, 不同放电点的电流脉冲幅值比较接近, 而且幅值较小, 因此, 负极导线产生的无线电干扰比较小一点^[3]。

在电压等级相同时, 与负极导线相比, 特高压直流线路正极导线发生电晕放电时, 在整个输电线路导线的表面上, 放电点分布很不均匀, 不同放电点的电流脉冲幅值差值很大, 而且有的点幅值很高, 因此, 正极导线产生的无线电干扰比较大。这样, 在双极输电线路中, 正极线路产生的无线电干扰一般比负极线路大 6 dB^[4]。

1.2 无线电干扰研究现状

由于无线电干扰会对信号接收产生一定影响, 因此必须对接收质量进行衡量, 信噪比是衡量接收质量的重要参数^[5]。

表 1 列出了美国特高压直流输电线路的无线电干扰限值 and 走廊宽度。将 ± 800 kV 直流输电线路的无线电干扰限值折算到极导线对地投影外 20 m 处, 约为 63 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$)^[5]。

表 1 美国能源部直流输电线路部分设计标准及参数

线路类型	直流		备注
	± 800 kV	$\pm 1\ 200$ kV	
无线电干扰/dB($\mu\text{V}/\text{m}$)	58	58	走廊边沿 线路走廊宽度/m
线路走廊宽度/m	88.4	122	

加拿大对不同电压等级的输电线路, 无线电干扰采用不同的限值: 对 600 kV 以上的输电线路, 距离边导线对地投影外 15 m、0.5 MHz 的无线电干扰限值为 63 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$)。折算到距离边导线对地投影外 20 m, 约为 61 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$)^[5]。

参考国内外限值, 并考虑直流输电线路无线电干扰的特点以及我国特高压直流输电线路经过高海拔地区的特殊性, 国网公司企业标准 Q/GDW 145—2006《 ± 800 kV 直流架空输电线路电磁环境控制值》中明确规定: 在特高压直流输电线路运行中, 正极导线对地投影外 20 m 处电晕产生的在 0.5 MHz 频点的无线电干扰强度 80% 值, 在一般地区不超过 58 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$), 但当海拔高度超过 1 000 m 时, 需按海拔高度每增加 300 m, 对此值用场强增加 1 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) 进行修正^[5]。这里 80% 指的是当置信度选为 80% 时, 在线路运行的 80% 时间内的含义^[5]。

2 无线电干扰测量仪性能扩展硬件设计

在特高压线路区域测量无线电干扰时, 实际使用过程

中存在布线麻烦、可移动性差和不能同步测量等缺点，因此本文通过 Zigbee 技术的应用，实现了仪器的无线网络控制与数据传输，借助于无线网络技术扩展了高性能无线电干扰测量仪器的使用性能。

2.1 无线电干扰测量仪器

本文选用了罗德与施瓦茨公司生产的手持式频谱分析仪 FSH3 来扩展其使用性能。FSH3 具有以下几个特性：1) 频率范围：100 kHz ~ 3 GHz，10 MHz ~ 18 GHz；2) 噪声电平 < -150 dBm/Hz（前置放大器打开）；3) 选配接收机模式用于 EMI 信号的精确扫描；4) 支持 TS-EMF 三轴全向天线进行场强测量；5) 支持定向天线进行无线电干扰分析；6) 支持功率探头进行精确的功率测量。

在天线方面，相较于常见的柱状天线而言，环形天线避免了柱状线端部的电晕放电影响测量结果，因此本文选择了环形天线进行测量。

2.2 为测量仪器扩展无线网络传输装置

由于 FSH3 在特高压线路无线电干扰测量使用中，单次测量数据传输量不大（不超过 50 bytes），测试区域范围不大（测点之间不超过 100 m），因此适合选用 Zigbee 技术进行无线数据传输。本文研制的无线传输装置组成如图 3 所示，其内部采用了 TI 最新一代 Zigbee 芯片 CC2530 实现了数据的无线传输。

CC2530 是真正支持 2.4 GHz 下的 IEEE802.15.4、Zigbee 和 RF4CE 标准实施工程应用的片上系统（SoC）解决方案^[6]，它能够以比较低廉的成本建立起来强大的无线网络拓节点。并且 CC2530 采用了 RF 收发器领先的技术和标准的增强型 8051CPU 技术，系统内配置可编程闪存 8 KB，还配有 RAM 和许多其它强大的功能。它具有不同的运行模式，尤其适应超低功耗系统，运行模式之间转换时间短，可进一步降低使用中的能耗^[7]。

本文采用的是 CC2530F256 片上系统。它具有 256 K 闪存，并采用了业界领先的黄金单元 Zigbee 协议栈技术（Z-Stack™），因此能为 Zigbee 技术的应用实现，提供一个强大和完整的解决方案^[8]。

数据接收端和发送端硬件连接如图 2 所示。图 2 中，在数据接收端用标准串口线连接即可，而在数据发送端，由于 FSH3 输出的是光信号，因此用一根光纤转串口线将信号转换为 RS232 电平信号，再用标准串口线进行连接。

数据传输终端的内部结构见图 3。

图 3 中，CC2530 实现数据处理和无线发送/接收，SP3232 实现 TTL 与 RS232 电平逻辑关系转换。整个终端设备可以通过电池供电，也可以通过外接电源供电。外部为标准 9 针 RS232 接口，实现了全串口功能，即除了 GND、TX 和 RX 与 SP3232 连接实现数据收发之外，还需要对 RTS 和 DTR 进行控制。DTR，即 Data Terminal Ready（数据终端准备好），在有效状态（ON）时，表明数据终端（对应本文中的 FSH3）可以使用；RTS，即 Re-

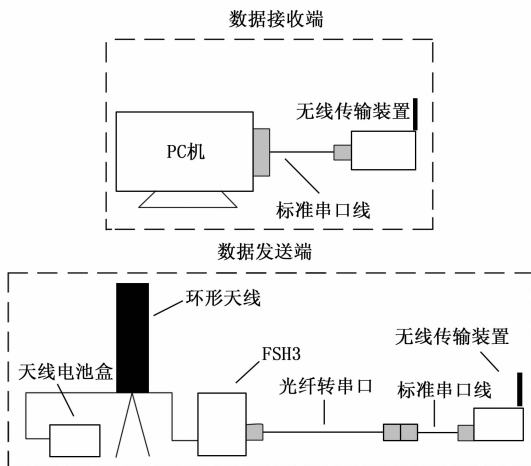


图 2 发送端和接收端硬件连接示意图

quest To Send（请求发送），用来表示数据终端请求 MODEM（对应本文中的数据传输模块）发送数据，即当终端准备要接收 MODEM 传来的数据时，使该信号有效（ON 状态），请求 MODEM 发送数据，它用来控制 MODEM 是否要进入发送状态。这两者的结合实现了设备之间的正常通信。图 3 中 RTS 和 DTR 都是和 Vcc 相连，当终端设备通电之后，管脚电平将一直保持为高，即一直保持信号有效状态（ON）。

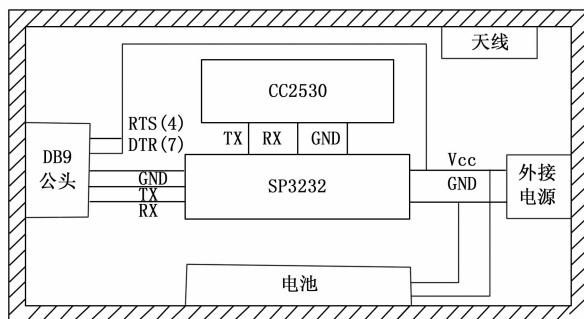


图 3 数据传输终端内部原理图

3 无线电干扰测量仪性能扩展软件设计

3.1 FSH3 控制指令

除了在 FSH3 面板按下按键进行测量外，FSH3 还支持当地接口命令操控，本文开发的软件中通过这个专用命令集，来完成 FSH3 的初始化、参数设置和数据采集等功能。

FSH3 控制指令分为三种：CMD、SET 和 GET。CMD 指令有两种：REMOTE 和 LOCAL，分别用于进入程控模式和离开程控模式。在程控模式下 FSH3 面板上的按键操作功能被停止。SET 指令负责设置 FSH3 各种测量参数。GET 指令负责从 FSH3 设备缓存中读取数据。图 4 为控制 FSH3 进行数据采集的一般流程。

由图 4 可知，首先必须让 FSH3 进入远程控制模式，否则之后的命令将无法识别；然后根据现场实际测量环境选

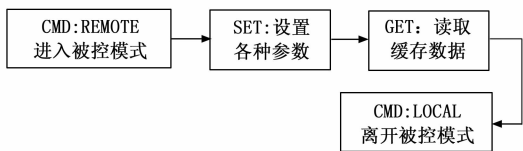


图 4 控制 FSH3 进行数据采集的一般流程

择合适的参数进行设置;接着发送 GET 指令获取缓存中需要的数据,最后离开远程控制模式返回本地控制模式。

3.2 软件功能架构

无线电干扰测量系统功能扩充后的上位机软件的功能迥迥如图 5 所示。

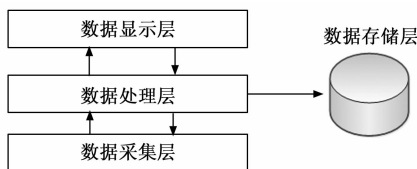


图 5 软件架构

由图 5 可以看出,软件共分为 4 层:

1) 数据采集层。接受底层串口数据,即原始数据。由于 .NET 构架中串口数据是以字节流的形式存在,因此必须每次从中提取有效数据帧,以供上层进行处理。

2) 数据处理层。软件架构中最重要的一层,与其它各层都有数据交互。主要功能包括:收到来自数据采集层的原始数据帧,将其转换为可读数据,同时发送用户的操作命令给数据采集层,通知设备进行数据的采集;将处理完的可读数据存储于数据库中,以供后续进行数据分析工作;将处理完的可读数据在人机交互界面上显示,让用户掌握实时动态变化。

3) 数据显示层。将采集到的数据进行显示,分为图形化显示和数字化显示两种。图形化显示主要以柱状图和折线图为主,绘制出输电线路下不同位置的无线电干扰在不同频率下的变化规律;数字化显示在显示数据的同时,也显示了测量系统当前状态。

4) 数据存储层。数据库中分为两种类型表格,一种是单个频率点下的历史数据,用户可以查看每一个历史数据对应的测量时间;另一种是多个频率点的数据汇总表,由于数据量较大,每个频率点上取其特征值用来表征无线电干扰在该频率点上的强度。

3.3 软件工作流程

软件实现过程的核心包括这样几个方面。首先通过镜像的思路将 FSH3 原来适用于当地的串口通讯指令,按照无线网络 Zigbee 的协议,进行封装,封装以后的指令就可以通过无线网络数据发送端发送出去,在无线网络中传输;其次,无线网络数据接收端在接收到相应的数据后,可以

从封装了的无线网络协议中析取出仪器设定的地址和指令信息,当地址相符时,将执行指令规定的功能。另外,在远端控制软件中,需要设置无线电干扰的测量模式、测量范围、测量频点、测量次数以及测量资源的选用等事关具体测量过程的一些关键内容。但对于这些内容,综合分析后可以划分到测量准备和进行测量两个过程中。无线电干扰测量系统上位机软件流程图具体如图 6 所示。

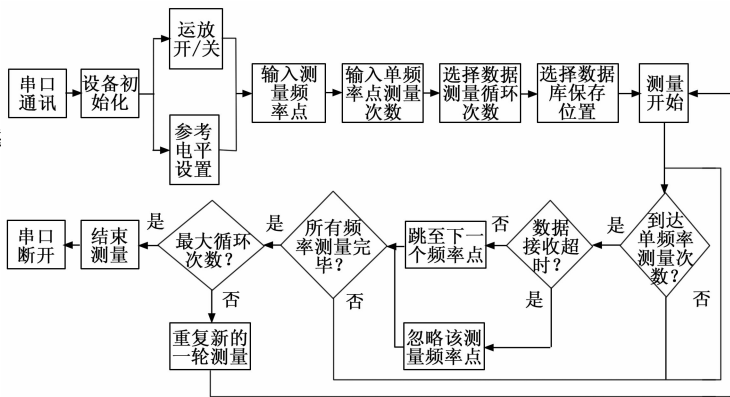


图 6 软件流程图

由图 6 可知,整个软件流程可分为以下两个阶段:

1) 测量准备工作。在串口通讯正常情况下,进行设备的初始化,即设置系统默认参数(用户无需更改),然后用户根据现场实际情况对运放和参考电平进行设置,从而确保数据的准确性。接着用户需要指定测量的频率序列(范围从 0.1~30 MHz)、单个频率点重复测量的次数和总体循环次数(由于无线电干扰在测量中会有跳动,因此采用多次测量取特征值的方式)。最后选择数据文件的保存路径,开始进行测量。

2) 开始进行测量。程序中采用顺序遍历频率序列的方式进行测量,对于每一个频率点都会进行固定次数的测量之后再跳到下一个频率点进行测量。若出现一直没有数据返回的现象(通常是由外界环境的干扰或设备本身存在问题引起的),用户可忽略该频率的测量。若所有的频率点都测量完毕,则根据之前设定的循环次数决定是否需要进行重复测量,直到所有的测量工作都结束。

3.4 软件操作界面

图 7 为无线电干扰测量系统上位机软件界面。

图 7 中表示出了无线电干扰测量仪功能扩展后所具备的主要功能。一个是上位机通过 Zigbee 无线网络可以在远端连接多个 FSH3 仪器,每个仪器的测量设置信息可以独立完成。另外可以通过无线网络得到各个测试仪器的状态,还可以通过无线网络的收发信息,完成以时间序列的形式显示各个仪器的实时测试结果。下面对软件操作界面主要操作功能进行介绍。

从图 7 可以看出,界面分为三个部分。第一部分为用户操作区,整个测量过程所涉及到的操作都包括在内,由

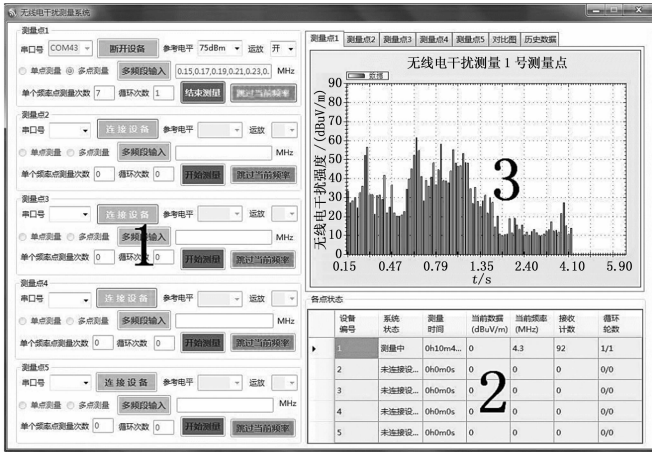


图 7 软件界面

图中可以看出，该软件最多支持 5 台 FSH3 同时进行数据采集；第二部分是状态和数据显示，用以显示各设备的测量进度和当前测量数据；第三部是图形显示，横坐标为所测量的各点频率，纵坐标为各点频率对应的无线电干扰强度，每一台 FSH3 都有对应的柱状图。

这个软件对于测量结果，也提供了较好地人机交互界面呈现形式。对于测量结果，除采用柱状图和表格表示不同测点、不同频率下的无线电干扰强度的测量结果外，还在图形显示区还提供了无线电干扰强度曲线的对比和历史数据查询的功能，这样既便于对测量结果进行直观感受，又有利于对测量结果的后续使用，具体内容如图 8 所示。

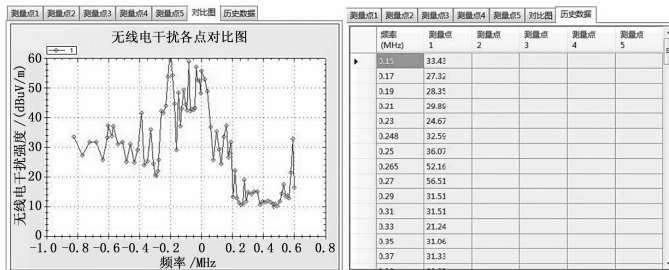


图 8 多曲线显示和列表显示

由于在实际试验中，需要对输电线路下不同位置的无线电干扰进行测量，从而掌握无线电干扰线下分布规律，因此在对比图中用户可以对相同测量频率下不同位置的测量值进行观察。同时右侧的列表会记录每一台 FSH3 在不同频率下的测量值以使用户进行数据查询。为了方便测量结果的后续使用，进一步对于测量结果按照测点位置、测量频点和测量时序进行组织汇总，用关系数据库的形式进行存储管理，后台数据库和输出的 EXCEL 统计表如图 9 所示（注意：此图仅是用于说明软件功能的示意图，无关具体的测量结果）。

特别要指出的是：在图 9 所示的数据呈现形式中，还对于实际测量过程中遇到的若干情况，根据实际需求，完

成了处理。例如，在图 9 左侧的数据库中，区域“1”为单频率点下的测量值，由于在实际试验中，测量值会有一些的波动，因此一般情况下每一个频率点测量 5-7 次然后取其特征值（如 50% 值）来代表该频率点下的无线电干扰水平；区域“2”为所有频率点下测量值（取特征值）的汇总（一台 FSH3 的数据）。右侧图为最终输出的 EXCEL 统计表，每一个 worksheet 代表一台 FSH3 的测量结果，其中包含了所有不同电压等级下不同频率点下的测量值（取特征值），这方便了用户进行后期数据分析工作。

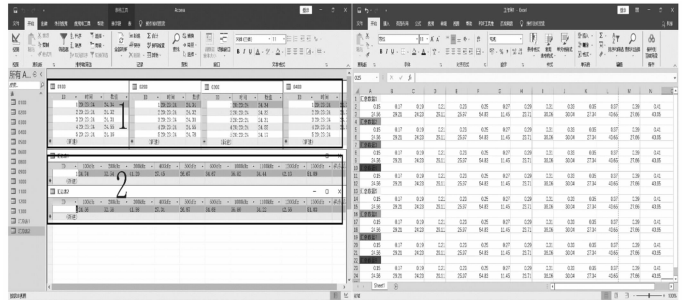


图 9 后台数据库和输出的 EXCEL 统计表

4 无线电干扰测量仪性能扩展后用于外场试验

为了测试性能扩展后的无线电干扰测量仪器在实际环境中的工作性能，在国家特高压试验基地进行了现场试验。取正负极导线中心线下地面处为横轴坐标原点，在向外延伸的 +3 m、0 m、-3 m 处放置一架天线。一般而言直流输电线路的无线电干扰最大值出现在环形天线平面与测量线路平行时^[9]，因此天线平行于输电线路放置，并通过外接电池进行供电，FSH3 与天线通过连接线相连。图 10、图 11 分别为现场布置示意图和现场实测图。

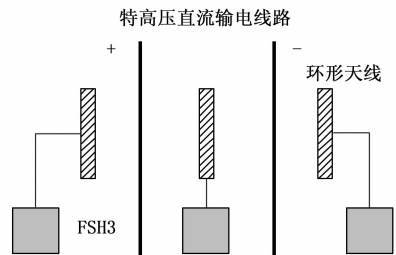


图 10 现场布置示意图



图 11 现场实测图

实际测试环境: 温度 17~23 ℃, 相对湿度 50%, 测试地点空旷且无其它遮挡物。

导线所加电压等级: ±220 kV、±300 kV。

测量频率: 0.15~0.99 MHz, 步长 0.01 MHz, 1~1.5 MHz, 步长 0.05 MHz。

实验结果: 本文以+3 m处测量结果为例, 以测试的各频率点为横坐标, 测量的无线电干扰强度为纵坐标, 绘制曲线图, 如图 11~14 所示。

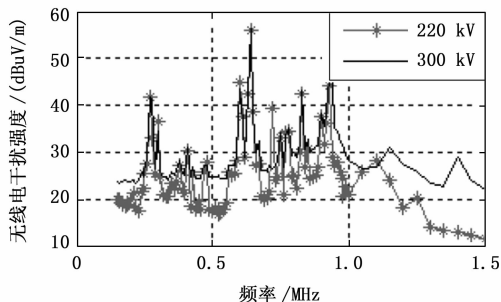


图 12 -3 m 处干扰强度曲线

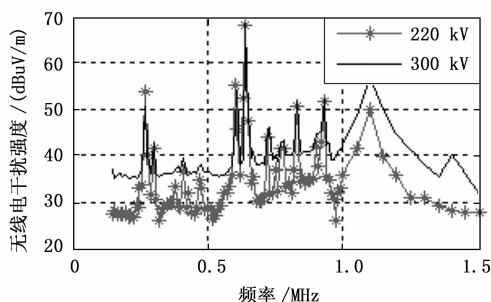


图 13 0 m 处干扰强度曲线

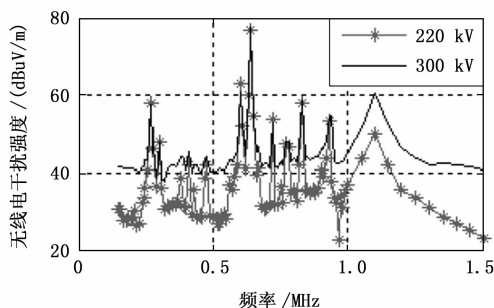


图 14 +3 m 处干扰强度曲线

由图 12~14 可以看出, 在输电线路下固定位置并且升压等级固定时, 无线电干扰强度随着频率的增加是呈现出驻波形状趋势并且逐渐减小的; 对比同一张图中不同升压等级下的曲线可知, 随着电压等级的升高, 无线电干扰强度也是在逐渐增大的, 以上两点都符合无线电干扰的特性。同时, 对比图 12~14 同一电压等级下的曲线, +3 m 处 (即正极线下) 干扰强度最大, 0 m 处次之, -3 m 处 (即

负极性线下) 干扰强度最小。由于直流输电线路的无线电干扰主要来源于正极性导线^[5], 因此越靠近正极性输电线路其值越大, 试验结果符合实际线路的规律。

5 结束语

本文介绍了无线电干扰测量仪器使用性能扩展的软硬件实现和设计过程, 硬件方面简要介绍了频谱分析仪 (FSH3) 的功能特点, 并着重介绍了基于 CC2530 的无线网络扩展传输终端的内部结构和各部分的连接方式; 软件方面着重基于 FSH3 控制指令, 介绍了为使用性能扩展开发的软件的架构、工作流程和操作界面。最后通过外场试验对扩展的功能涉及的软硬件进行了验证, 结果表明测量仪器使用性能扩展后, 具有使用更加灵活、可满足更为特殊的测试需求, 并且具有自动化程度高、可移动性好、可同步测量等特点。这一切都表明, 采用 Zigbee 技术扩展高价值高性能无线电干扰测量仪器, 用于输电线路下电磁环境试验测量的研究与分析, 是完全可行的。

通过采用 Zigbee 无线网络, 利用镜像的思想扩展仪器的当地通讯连接端口以后, 测试仪器就具备了在无线网络区域范围移动使用的能力, 这可以使得仪器的使用具有测量范围更大、测点部署更加灵活和自动化程度更高等优点。这个实现思路和技术方法具有普遍的使用和推广价值。本文的研究和实践也为完成其它一些高价值测量仪器使用性能的改进和扩展提供了可供借鉴的、有效的技术实现方法。

参考文献:

- [1] 邓 军, 肖 遥, 楚金伟, 等. ±800 kV 云广 UHVDC 输电线路无线电干扰测量与分析 [J]. 安全与电磁兼容, 2012 (2): 20-28.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 万保权, 邬 雄, 路 遥, 等. ±800 kV 云广 UHVDC 输电线路合成场强计算 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (9): 143-145.
- [4] CHARTIER V L, STEARNS R D, BURNS A L, et al. Electrical environment of the uprated pacific NW/SW intertie [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 4 (2): 1305-1318.
- [5] 刘振亚. 特高压直流输电工程电磁环境 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] 杨 黎, 杨琳芳, 吴宗泽, 等. 基于 ZigBee 技术的智能限电控制系统设计与实现 [J]. 测控技术, 2014 (7): 65-68.
- [7] 李 欢, 张建锋, 吕后勇, 等. 基于 ZigBee 的分布式灌溉控制系统设计 [J]. 测控技术, 2016 (8): 77-80.
- [8] 周华妹, 周华安, 李端峰, 等. 基于 ZigBee 的隧道照明智能控制系统研究与实现 [J]. 测控技术, 2019 (2): 69-74.
- [9] 国家环境保护总局第 18 号令. 电磁辐射环境保护管理办法 [Z]. 中国电力, 1995, 28 (1): 7-11.
- [10] 唐永学, 朱桂梅, 聂瑞千, 等. 基于 FPGA 和 PCIe 总线的电

子星模拟器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (4): 258 - 262.

[11] 王文倬, 郭 剑, 张 波, 等. 电晕笼中无线电干扰低电压侧测量结果的校准方法研究 [J]. 高电压技, 2015, 41 (3): 1042 - 1048.

[12] LIU Y, ZHOU L, LIU Y, et al. Analysis on the spectrum characteristic of corona current and its relationship with Radio Interference on UHVDC transmission line [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23 (6): 3336 - 3345.

[13] LIU L, YU Z, LI M, et al. Preliminary experimental study on the electromagnetic interference suppression measures of DC transmission line [C] // IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Beijing: 2020: 1 - 4.

[14] TIAN F, YU Z, ZENG R. Radio interference and audible noise of the UHVDC test line under high altitude condition [C] // Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore: 2012: 449 - 455.

[15] ANDERSEN A, DENNISON J R. Wireless antenna detection of electrostatic discharge events [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47 (8): 3867 - 3871.

[16] LIYANAGE S, WANG Y, DONG Y, et al. Sustainable, portable, and efficient electricity delivery (SPEED): design, control, and testing [J]. IEEE Access, 2020, 8: 73082 - 73095.

[17] QIN X. An FPGA-based hardware platform for the control of spin-based quantum systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 (4): 1127 - 1139.

[18] GIORDANO R, PERRELLA S, IZZO V, et al. Redundant configuration scrubbing of SRAM-based FPGAs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017, 64 (9): 2497 - 2504.

[19] BINDER A, FACHBERGER R. Wireless SAW temperature sensor system for high-speed high-voltage motors [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11 (4): 966 - 970.

[20] ZHAO L, MATSUO I B M, ZHOU Y, et al. Design of an industrial IoT-Based monitoring system for power substations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55 (6): 5666 - 5674.

[21] QIN Z, WU D, XIAO Z, et al. Modeling and analysis of data aggregation from convergecast in mobile sensor networks for industrial IoT [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14 (10): 4457 - 4467.

[22] WANG H, CHEN L, LI M, et al. Consensus-based clock synchronization in wireless sensor networks with truncated exponential delays [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 1425 - 1438.

 (上接第 255 页)

[2] 田 强. 基于 FPGA 的集成电路自动测试系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

[3] 严科慧. 集成电路测试系统的发展趋势 [J]. 电子制作, 2014 (14): 64 - 65.

[4] 李 丹. 中国集成电路测试设备市场概况及预测 [J]. 电子产品世界, 2019, 26 (10): 4 - 7.

[5] 于鲁波, 杜 雷. 集成电路测试领域的关键技术 [J]. 电子制作, 2019 (11): 58 - 59.

[6] 韦紫菱, 常 郝. 超大规模集成电路测试技术综述 [J]. 电子世界, 2019 (15): 122 - 123.

[7] 徐志君. 集成电路测试技术的应用 [J]. 电子测试, 2018 (9): 93 - 94.

[8] 陈 昆, 刘 丹. 集成电路测试技术研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4 (8): 12 - 14.

[9] 罗宏伟, 刘竞升, 余永涛, 等. 超大规模集成电路测试现状及关键技术 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39 (s2): 16 - 20.

[10] 殷 乐. 基于 ATE 的快速测试芯片时间参数的实践 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.

[11] 张继平, 于利红, 赵 昭, 等. 集成电路测试系统时间参数测试能力比对 [J]. 计量技术, 2017 (7): 24 - 27.

[12] 吴俊生. 模数转换器的测试研究 [D]. 沈阳: 辽宁大学, 2011.

[13] 周 力. 高精度 D/A 数据转换芯片测试方法的研究和改进 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.

[14] 黄 瑞, 赵春莲. 基于 PXI 的集成电路测试机的设计研究 [J]. 集成电路应用, 2017, 34 (8): 67 - 73.

[15] 尹 坤. PXIe 集成电路测试系统多通道同步技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

[16] 郑 宇, 方 岚, 李苏苏, 谢玉巧. 微处理器下的数字集成电路测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 27 - 31.

[17] 孙好婕, 赵利强, 郑惠泽, 等. 基于 Qt 的集成电路测试软件设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 150 - 153.

[18] 汪若虚, 黄从开, 戚瑞民. 基于 STIL 语言的大规模数字集成电路测试软件设计 [J]. 电子质量, 2014 (4): 69 - 79.

[19] 韩 东, 郭士瑞, 高 剑, 等. 基于自动测试系统的测试数据格式标准化研究 [J]. 2017, 40 (6): 47 - 52.

[20] 范志翔, 罗 岚, 陆生礼. 功能测试矢量的重排与测试时间的压缩 [J]. 现代电子技术, 2006 (5): 82 - 83.

[21] 张 亮. 基于向量分解的测试向量压缩方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.

[22] 章慧彬, 朱 江. 大规模集成电路测试程序开发技术及流程应用 [J]. 电子与封装, 2017, 17 (6): 10 - 15.

[23] 韩 森, 常艳昭, 苏 洋. 基于 V93000 的异步双端口静态存储器测试研究 [J]. 电子质量, 2020 (10): 38 - 43.

[24] 罗 晶, 杨士宁, 石雪梅. 存储器测试图形算法概述 [J]. 计算机与数字工程, 2019, 45 (4): 740 - 744.

[25] 王征宇, 何志伟, 章少云. 基于 J750EX 测试系统的 SDRAM 测试技术研究 [J]. 2014, 14 (8): 19 - 24.