

基于单片机及 FPGA 的电力载波通信 异常信号监测系统设计

张伟

(西安航空职业技术学院 人工智能学院, 西安 710089)

摘要: 为了保证电力载波通信网络的运行安全, 以单片机及 FPGA 为硬件支持, 设计基于单片机及 FPGA 的电力载波通信异常信号监测系统; 根据电力载波通信网络的异常原因, 设置异常信号特征作为判据; 在建立的电力载波通信网络模型下, 利用装设的信号采集设备、单片机以及 FPGA 元件, 采集并处理电力载波通信信号; 通过实时通信信号的特征提取与匹配, 判定当前信号的异常状态, 计算得出通信异常信号量和信号异常类型, 最终以可视化的形式输出电力载波通信异常信号的监测结果; 通过系统测试得出结论: 与传统通信异常信号监测系统对比, 优化设计系统的通信异常信号量的监测误差降低了 1.37 dBm, 且通信异常信号类型的误检率为 14%。

关键词: 单片机; 现场可编程门阵列; 电力载波通信; 通信异常; 通信信号监测

Design of Power Carrier Communication Abnormal Signal Monitoring System Based on MCU and FPGA

ZHANG Wei

(School of Artificial Intelligence, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to ensure the safety of power carrier communication network, and it is supported by micro-controller and FPGA as the hardware, a power carrier communication abnormal signal monitoring system based on single chip microcomputer and FPGA is designed. According to the abnormal cause of power carrier communication network, the abnormal signal characteristics are set as the criterion. Under the established power carrier communication network model, the signal acquisition equipment, microcontroller unit (MCU) and FPGA components are installed to collect and process the power carrier communication signals. Through feature extraction and matching of real-time communication signal, the abnormal state of the current signal is determined, and the abnormal signal semaphore and type of signal are calculated. Finally, the monitoring results of abnormal signal in the power carrier communication are output in a visual form. Through the system test, it is concluded that compared with traditional communication abnormal signal monitoring systems, the monitoring error of the communication abnormal signal quantity in the optimized design system is reduced by 1.37 dBm, and the error detection rate of communication abnormal signal type is 14%.

Keywords: micro-controller; FPGA; power carrier communication; abnormal communication; communication signal monitoring

0 引言

电力载波是一种特殊的电力系统通讯手段, 它是利用已有的电力系统的线路作为通讯线路, 利用载波的形式实现对通讯信号的高速传送。与其它通讯方法相比, 电力载波通讯无需再安装网络装置, 不仅能够降低硬件设备的布设成本, 同时也能降低通信网络与电力系统之间的干扰程度^[1]。在实际的电力载波通信过程中, 不同通信信号耦合方式导致电力载波通信信号产生不同的损失, 且配电变压器对电力载波通信信号存在阻隔作用, 因此导致电力载波通信环境中产生异常信号, 影响电力系统通信的安全性与稳定性。

为了保证电力载波通信网络的无中断可靠运行, 设计并开发了电力载波通信异常信号监测系统。通信信号是指

通信设备接收的包含通信内容的信号, 而通信异常信号也就是由于通信设备故障、通信队列异常以及通信信道拥塞等原因, 导致通信内容缺失或错误的信号, 最终影响通信终端接收信号的完整度和准确度。通过对通信异常信号的监测, 判断当前电力载波通信网络的运行状态, 为通信网络的维护与管理提供有价值的的数据。

现阶段应用较为频繁的通信异常信号监测系统主要应用了大数据挖掘技术、扩展粒子滤波算法。文献 [2] 提出基于大数据挖掘技术的通信异常信号监测系统。该系统主要是对通信环境中的信号数据进行挖掘, 获取完整的信号样本信息, 通过挖掘信号与标准通信信号的比对, 确定当前通信信号是否异常。该方法主要针对的是普通的有线光纤作为介质的通信网络, 将其应用到电力载波通信环境中

收稿日期:2023-01-06; 修回日期:2023-03-07。

作者简介:张伟(1990-),男,硕士研究生,讲师。

引用格式:张伟. 基于单片机及 FPGA 的电力载波通信异常信号监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 8-13, 20.

存在明显的监测误差大的问题。文献 [3] 提出基于扩展粒子滤波算法的通信异常信号监测系统。其工作原理是利用扩展粒子滤波算法对实时通信信号进行处理与特征分析,从信号特征的角度判断当前信号是否存在异常。该方法的异常信号量的监测误差较低,但通信异常信号类型的误检率较高。文献 [4] 提出基于波束成形与滤波调制的电力载波通信异常信号辨识方法,研究电力载波通信信号的滤波与探测,分析信号的时域与频域特性,研究基于时域反馈波束合成的电力载波通信系统频域分解与脉搏展宽调控,提取通信异常信号特征,完成通信异常信号识别。该方法对通信异常信号类型的误检率较低,但对电力载波通信异常信号监测的误差较高。

针对上述方法存在的问题,引入单片机和 FPGA 设备。单片机是一种集成了中央处理器、随机存储器和只读存储器的芯片。FPGA 则是一种可编程门阵列,它可以克服可编程门数受限的缺陷,解决了自定义电路的缺陷。将单片机、FPGA 设备及其运行程序应用到电力载波通信异常信号监测系统的优化设计工作中,以期能够提高系统的异常信号监测功能。

1 电力载波通信异常信号监测系统硬件设计

由于优化设计的电力载波通信异常信号监测系统以单片机和 FPGA 设备作为主要运行设备,因此采用硬件与软件相结合的方式优化设计。系统硬件包括改装通信信号采集设备、单片机及 FPGA 元件。系统硬件模块设计如下。

1.1 改装通信信号采集设备

通信信号采集设备的主要功能是将电力载波通信网络环境中的信号通过 AD 采样转换为数字信号,将采样得到的信号存储在系统存储器中,并传输给单片机和 FPGA 元件。在传统信号采集设备的基础上,加设一个可编程时钟芯片和时钟缓冲芯片,并将信号采集设备与 FPGA 元件相连,FPGA 元件为通信信号的采集工作提供大量的可调用的 IP 核和功能定制模块。改装后的通信信号采集设备的结构框架如图 1 所示。

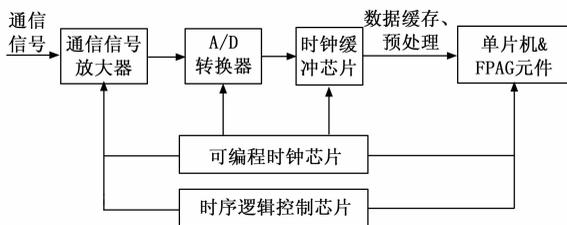


图 1 通信信号采集设备结构框图

在采集数据时,利用加设的可编程时钟芯片控制通信信号的采样频率以及连续采集时间参数,要充分发挥 A/D 转换器的全范围分辨率,必须采用程控放大器对弱信号进行放大^[5]。其中,通信信号的频带范围 300~3 400 Hz,A/D 转换器的工作频率为 1 000 Hz。对 A/D 转换后的数据要

通过时钟缓冲芯片进行缓存、预处理,要求在系统中添加缓存器和预处理模块,以保证数据的连续性。在通过总线输出之前,利用接口电路对处理信号进行电平调节。

1.2 单片机的选择

在优化设计的电力载波通信异常信号监测系统中,单片机的作用是处理实时通信信号,为信号提供充足的存储空间,并能够综合考虑系统中硬件设备之间的适配性以及元件的运行需求。AT89C52 型号的单片机内部结构如图 2 所示。

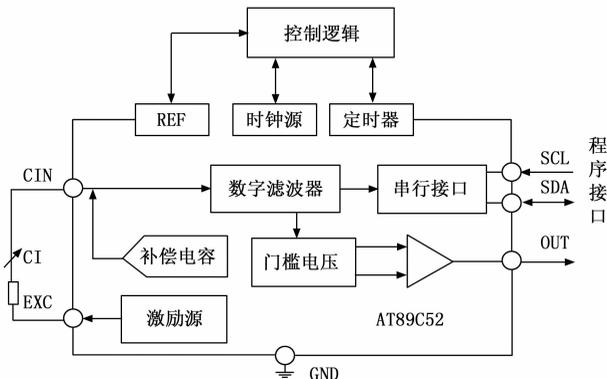


图 2 AT89C52 型单片机内部结构

选用的 AT89C52 型单片机是一种性能优良的集成电路芯片,它采用了静态时钟方式,可以大大降低功率消耗。芯片包括 8 k 位可重复写入 Flash ROM 内存,256 位 RAM,以 AT89C52 型 MCU 为核心,将管脚调整到 32 个,其中 24 个管脚连接到外部双向输入/输出端,其它管脚连接中断口和全双工串行通信口,从而确保了 MCU 器件的在线编程功能^[6]。AT89C52 型单片机采用工业标准的 C51 内核,能够实现主 IC 内部寄存器、数据 RAM 及外部接口等功能部件的初始化,并且能够实现与主板 CPU 的通信,适用于电力载波通信异常信号监测现场环境应用。

1.3 FPGA 元件的选择

FPGA 元件的作用是实现对通信异常信号监测功能的编程与驱动^[7]。选择 Spartan-3 E 系列的 FPGA 元件,其内部结构如图 3 所示。

FPGA 器件包括三大模块:可配置逻辑模块、输入输出模块、连线模块,FPGA 采用了可编程门阵列的一般结构,但 FPGA 中数据流的长连 0、长连 1 等不利于时钟的提取和识别^[8],因此在多通道信号光纤传输系统中,采用 8B/10B 的编码模式来降低其对长连 1 的干扰。为了达到单根光纤传送 2 位脉冲信号、16 位数字信号、4 个模拟信号、1 个 CAN 总线信号,在软件上采用并行变换的方法^[9]。

1.4 单片机及 FPGA 元件的连接

通过对串行/解串器的调试,可以看出串行/解串器的输入和输出出现了位移,并且位移具有随机性。针对此问题,在程序设计中增加了位移检测,以 1 秒为间隔,连续传输 3 个时钟周期。对发送的数字信号进行相应的调节,从而消除由于位移引起的错误传送^[10]。将选择的单片机和

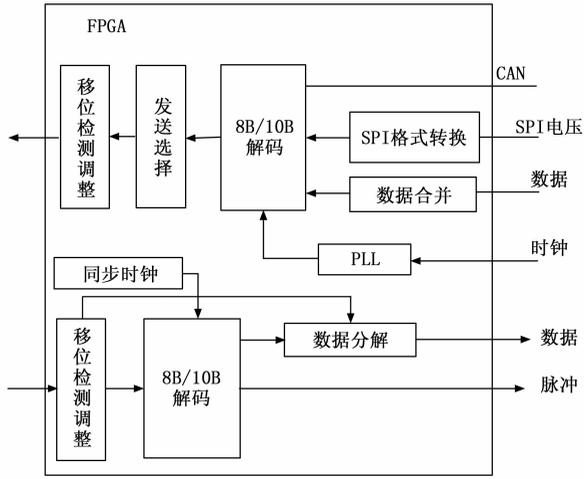


图 3 Spartan-3 E 系列 FPGA 元件内部结构图

FPGA 元件通过数模转换电路、电源电路连接在一起，具体的连接电路如图 4 所示。

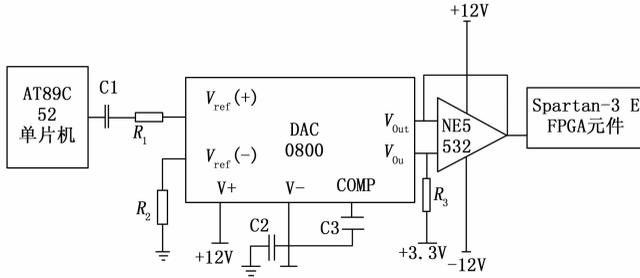


图 4 单片机与 FPGA 元件连接电路图

单片机经连接电路输入到 FPGA 元件中的电压可以表示为：

$$U_{out} = \frac{z_i \times U_{ref}}{256} \quad (1)$$

式中， U_{out} 和 U_{ref} 分别为电路输出的模拟电压值和转换电路的参考电压， z_i 为输入的数字数据^[11]。为了保证单片机和 FPGA 元件处理通信信号的质量，需要在设备前端添加一个滤波电路，滤波电路的工作频率设置为：

$$f_{wave} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{wave} C_{wave}}} \quad (2)$$

式中， L_{wave} 和 C_{wave} 分别为回路中的电感值和电容值^[12]。将选择的单片机与 FPGA 元件安装在建立的电力载波通信网络模型中，实现硬件设备的装设。

2 电力载波通信异常信号监测系统软件设计

2.1 设置电力载波通信信号异常判据

电力载波通信网络的异常原因可以分为硬件异常和软件异常两个部分，其中硬件异常原因包括：服务器故障、配电变压器阻隔、电力设备故障、设备或线路接触不良等。在硬件设备异常状况下，电力载波通信信号存在无法传输或信号强度减弱的情况，实际通信信号与配电变压器阻隔

强度之间的关系可以表示为：

$$\lambda_{signal} = \lambda_0 \cdot \kappa_{transformer} \quad (3)$$

式中，变量 λ_0 为电力载波通信网络发送端发出的信号强度， $\kappa_{transformer}$ 为配电变压器的阻隔强度，该参数的取值与变压器的工作参数有关，而公式 (3) 的计算结果 λ_{signal} 为通信网络接收端实际接收的信号强度^[13]。电力载波通信网络软件异常的原因具体包括：通信信道阻塞、通信环境噪声干扰、兼容性问题等。当电力载波通信网络出现软件异常时，接收到的通信信号存在强度不稳定、信号部分缺失等现象，可将软件异常下通信信号的强度特征表示为：

$$\tau_\lambda = \frac{\bar{\lambda}}{\sum_{t=0}^T \lambda_t - \lambda_{t-1}} \quad (4)$$

式中， λ_t 和 λ_{t-1} 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻的接收信号， T 为通信信号传输周期， $\bar{\lambda}$ 为通信终端接收信号的强度平均值^[14]。按照上述方式对软件异常条件下，电力载波通信信号的特征进行量化标记，以此作为判定当前通信信号状态的比对标准。

2.2 建立电力载波通信网络模型

电力载波通信是由发送端的调制解调器对发送端的信息进行调制，然后由发送端的耦合器将该高频信号与电源线路进行传输，由接收端的调制解调器对该信号进行解耦，并将其还原为原始数据，并将其传送至诸如电脑等终端装置^[15]。电力载波通信网络的拓扑结构如图 5 所示。

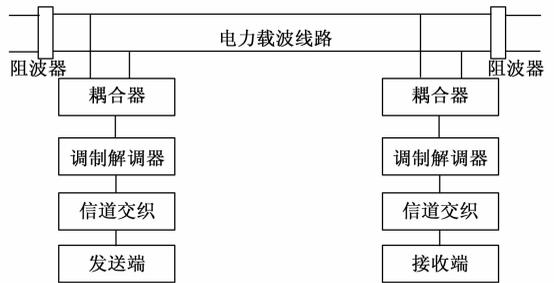


图 5 电力载波通信网络拓扑结构图

电力线中传输的是主要频率的电流，为了使原始的数据信号能够适应电力线的传输，必须满足线路的信号特征，并具备很好的抗干扰能力，发射端的调制解调器会产生高频载波，对信息源传送的信息进行调制，然后利用耦合器要传送的信号与电力线相连。该耦合器的功能是将电力线路中的工频交流电隔离开来，使得载波信号能够在电路上顺畅的传递，同时不能将工频的电流输出出去^[16]。由于多径效应，电力载波通信信道的频率响应函数可以通过多条传输路径的叠加表示，如式 (5) 所示：

$$Y = \sum_{i=1}^N \vartheta_{weighting} c(f, l_i) e^{-j2\pi ft} \quad (5)$$

式中， $\vartheta_{weighting}$ 为通信路径的加权系数， $c(f, l_i)$ 为信道衰减，其中参量 f 和 l_i 分别对应的是信号频率和电力线路长度， c 为衰减， t 为通信信道上的延时^[17]。在电力载波通信网络执行通信任务的过程中，定义发送的通信信号为 $g(n)$ ，信道

的冲击响应为 $s(n)$, 对于多径电力载波通信信道的冲击响应可以量化表示为:

$$s(n) = \sum_{i=1}^L s_i(n)c(n-t) \quad (6)$$

式中, $s_i(n)$ 为路径的复增益。信道噪声干扰会影响信号传输过程中的准确性, 使接收端接收到的信号与发送端发出的信号出现偏差, 从而影响异常信号监测准确性。在考虑信道噪声干扰的情况下, 经过信道的信号到达接收端的表达式为:

$$y(n) = g(n) \otimes s(n) + h_n(n) \quad (7)$$

式中, $h_n(n)$ 为电力载波通信信道的加性噪声。按照上述方式, 在考虑电力设备、电线长度等因素的情况下, 对多个通信信道进行整合与叠加, 完成电力载波通信网络模型的建立。

2.3 检测电力载波通信信号异常状态

利用改装的通信信号采集设备、单片机及 FPGA 元件, 对电力载波通信信号进行实时采集^[18]。设置通信信号的采集频率为 0.5 s/次, 利用空间波束调制技术实现了电力载波通信信号的采集与载波控制, 利用状态估算和参数估算技术对功率载波通信进行调制, 并在有限的状态空间内对功率载波通信中的异常信号的系统传递函数为:

$$q(t) = \frac{Ft\varphi - B}{e^{\psi(t)}} \quad (8)$$

式中, F 和 B 分别为电力载波通信负荷和频谱分布带宽, φ 为信号的传递幅值, $\psi(t)$ 为载波通信的分阶自适应扩展频谱。考虑电力载波通信信号传递规律, 将连续通信信号的采集结果, 记为 $x(t)$, 通信信号可以量化表示为:

$$x(t) = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t + x_0 \quad (9)$$

式中, α 和 β 为可估计参数, x_0 为电力载波通信网络环境中发送端的发送信号。可估计参数参数的取值是采用最大似然估计方法, 根据采集的电力载波通信信号数据集, 使用概率模型构建以较高概率产生观察数据的系统发生树, 求解使其可能性最大的值。

为了降低不同通信信道采集信号之间的差异, 经过区间缩放和归一化两个步骤, 对初始采集的电力载波通信信号进行预处理。区间缩放法是通过分析边界值的分析, 将其压缩到 $[0, 1]$ 区域内。区间缩放处理过程可以表示为:

$$x_q = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (10)$$

式中, $\max(x)$ 和 $\min(x)$ 分别表示的是最大值和最小值的求解函数。通信信号的归一化处理是用来处理单个样本的各种特征属性值, 以便在点乘操作或与其它核函数的相似度时, 具有一个统一的准则, 电力载波通信信号的归一化处理结果如下:

$$x_g = \frac{x}{\sqrt{\sum_i x_i^2}} \quad (11)$$

将实时采集的电力载波通信信号代入到式 (10) 中, 得出满足质量要求的电力载波通信信号。

在单片机环境中, 以实时采集的电力载波通信信号为处理对象, 对其瞬时幅度、瞬时频率、瞬时相位、异常信号空间谱特征量等方面, 提取通信信号特征。电力载波通信信号的特征提取过程如图 6 所示。

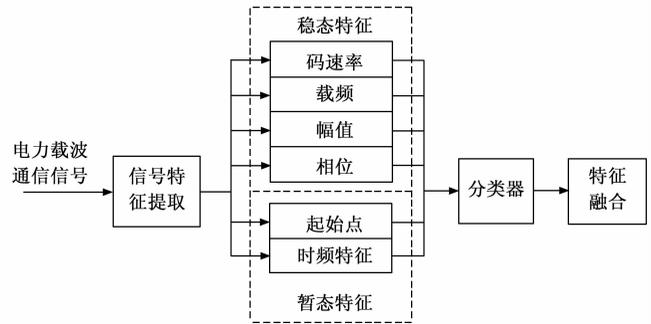


图 6 电力载波通信信号提取流程图

图 6 中的分类器选用的是最邻近距离分类器, 分类器输出的瞬时频率中心非线性成分绝对值的标准偏差为:

$$\epsilon_{af} = \sqrt{\frac{1}{M_x} \left[\sum f_x^2(i) \right] - \left[\frac{1}{M_x} \sum |f_x(i)| \right]^2} \quad (12)$$

式中, $f_x(i)$ 为电力载波通信信号的频率值, M_x 为信号的采集量^[19]。同理可以得出信号幅值和相位特征的提取结果如下:

$$\begin{cases} A_x = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \\ \varphi_x = \arctan \frac{\beta}{\alpha} \end{cases} \quad (13)$$

将可估计参数的具体取值代入到式 (12) 中, 即可得出信号幅值特征 A_x 以及相位特征 φ_x 的提取结果。电力载波通信信号异常谱分布特征的提取结果如下:

$$\gamma = x(t) \sum_{i=1}^n \delta_i + \omega T \quad (14)$$

式中, 变量 δ_i 为高斯匹配效应, ω 和 T 对应的是通信信号的角频率和波动周期。最终对提取的电力载波通信信号特征进行高斯融合处理, 得到综合特征为:

$$\tau_{com} = E[k(t)^4] - 3E[k(t)^2] \quad (15)$$

式中, $k(t)$ 为提取的通信信号特征, $E()$ 为特征融合函数。最终将提取的信号特征与设置的异常信号标准特征进行匹配, 匹配过程可以表示为:

$$r(\tau_{com}, \tau_{set}) = \sqrt{\tau_{com}^2 + \tau_{set}^2} \quad (16)$$

式中, τ_{com} 和 τ_{set} 分别对应的是提取的综合信号特征和设置的异常信号标准特征^[20]。若公式 (15) 的计算结果高于阈值 r_0 , 则判定当前电力载波通信信号为异常信号, 否则认为通信信号为正常信号。

2.4 实现电力载波通信异常信号监测

设置电力载波通信网络中的异常信号量和信号异常类型作为系统的监测参数, 通过对判定为异常状态通信信号的统计, 得出任意时刻异常信号量的监测结果为:

$$W_{abnormal} = \sum_{i=1}^{n_{abnormal}} x_{abnormal,i} \quad (17)$$

式中, x_{abnormal} 为通信信道 i 中的异常信号量, n_{channel} 为电力载波通信网络中的信道数量。在电力载波通信信号异常类型的监测过程中, 主要利用公式 (16) 的特征匹配方式, 将设置的异常信号标准特征按照提取的综合信号特征进一步分成多个类型, 求解提取的综合信号特征 τ_{com} , 并将不同异常类型的标准特征赋值给 τ_{set} , 选择特征匹配度最高的异常类型, 作为当前电力载波通信信号的异常类型。最终将上述电力载波通信异常信号的监测结果以可视化的形式输出, 完成系统的异常信号监测功能。

综上所述, 可得电力载波通信异常信号监测工作流程及实现方案如下:

1) 分别计算实际通信信号与配电变压器阻隔强度及软件异常下通信信号的强度特征, 作为电力载波通信信号异常判据。

2) 构建电力载波通信网络模型, 采集实时通信信号, 对其进行特征提取与匹配, 计算得出通信异常信号量和信号异常类型。

3) 判定当前信号的异常状态, 选择特征匹配度最高的异常类型, 输出电力载波通信异常信号的监测结果。

4) 在 C++ 软件上对电力载波通信异常信号监测的软件流程进行编程, 实现软件程序的运行。

3 系统测试

完成电力载波通信异常信号监测系统的优化设计工作后, 结合系统的软件程序运行原理以及 FPGA 控制逻辑设计, 对系统的整体功能进行测试, 以检验优化设计的电力载波通信异常信号监测系统是否符合应用标准。

3.1 系统及实验对象设置

由于优化设计的电力载波通信异常信号监测系统添加了单片机设备和 FPGA 元件, 在系统测试实验前, 需要将相关的硬件设备安装到实验环境中, 并对其运行参数进行设置。利用单片机与 FPGA 元件上的引脚与接口, 实现电力载波通信异常信号监测硬件系统中所有设备的连接, 并将其接入到供电电路中, 完成硬件设备的布设。在此基础上, 闭合电源开关, 观测各个硬件设备的运行状态, 并对部分运行故障的元件作替换处理。

选择某市的配电网作为系统的电力载波通信网络监测对象, 该配电网以电线作为通信介质, 根据配电网电压可以将电力载波通信网络分成 3 个部分, 分别为 10 kV 的电力载波通信网络、110 kV 的电力载波通信网络以及 220 kV 的电力载波通信网络, 三段通信网络的传输长度分别为 15 km、26 km 和 18 km。设置电力载波通信网络中的通信节点为用电端、发电端以及配电器等。用电端和发电端的数量分别为 50 个和 6 个, 网络中设置配电器数量为 8 个。在正常运行状态下, 通信网络的电力载波数为 1 024, 子载波间隔为 10。

3.2 安装电力载波通信网络加扰器

为了实现电力载波通信网络中异常信号的设置与控

制, 在电力载波通信网络环境中安装加扰器, 加扰器的工作原理可以表示为:

$$\xi(x) = x^{10} + x^3 + 1 \quad (18)$$

式中, x 为通信信道信号, 在 FPGA 中, 通常采用的是反馈移位寄存器来实现加扰器。通过公式 (18) 对该加扰器进行硬件设计。将加扰器的初值设置为全一, 在新的一位数据被输入时, 该扰动代码的移位寄存器向左移动一位, 同时将 x^{10} 和 x^3 异或, 结果再与输入数据异或, 即可得到输出数据。

3.3 生成电力载波通信异常信号样本

除了加扰器外, 采用电力设备破坏、接线调整等方式将电力载波通信网络调整至异常状态, 并根据通信网络中各个设备的工作参数确定通信异常信号的生成量和波动规律。图 7 为通信线路异常产生的电力载波通信异常信号样本。

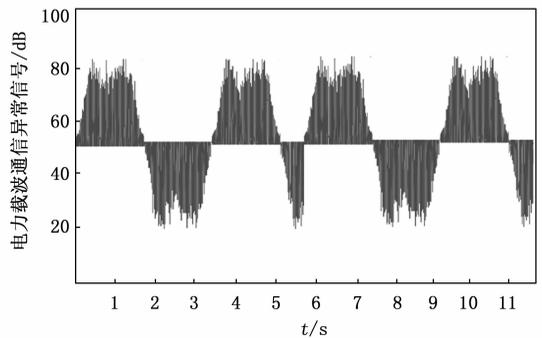


图 7 电力载波通信异常信号波形图

按照上述方式可以得出其他通信异常条件下生成的异常信号, 并统计异常信号的生成量作为判断系统异常信号量监测精度的测试标准。

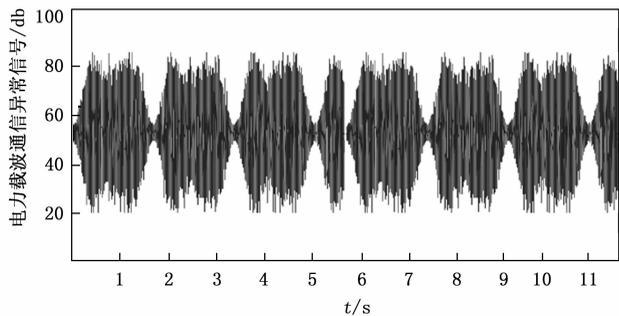
3.4 系统监测功能测试过程与结果分析

在搭建好的硬件系统环境下, 利用 FPGA 元件和编程工具完成电力载波通信异常信号监测软件系统的开发, 并将其导入到选择的电力载波通信网络对象中。启动电力载波通信网络, 并执行相应的通信任务, 通过对实时通信信号的采集与分析, 得出不同异常场景下的通信异常信号监测结果, 如图 8 所示。

此次系统测试实验中, 为了体现出优化设计的基于单片机及 FPGA 的电力载波通信异常信号监测系统在监测性能方面的优势, 设置传统的基于大数据挖掘技术的通信异常信号监测系统和基于扩展粒子滤波算法的通信异常信号监测系统作为实验的两个对比系统, 在相同的实验环境中实现对比系统的开发, 并输出通信异常信号的可视化监测结果。系统测试实验中设置异常信号量监测误差和信号异常类型误测率作为系统功能的量化测试指标, 其中异常信号量监测误差的数值结果如下:

$$\epsilon_{\text{Semaphore}} = |W_{\text{abnormal}} - W_{\text{generate}}| \quad (19)$$

式中, W_{abnormal} 为系统输出的通信异常信号量监测结果, 可通过公式 (17) 计算得出, 变量 W_{generate} 为通信异常信号量



通信异常信号量：873.8dBm
通信信号异常类型：通信线路异常

图 8 电力载波通信异常信号监测系统输出界面

的实际值，可通过生成异常信号量的统计，确定该变量的具体取值。计算得出异常信号检测误差越小，证明对应系统的异常信号监测功能越优。通过相关数据的统计，得出系统异常信号量监测误差的测试对比结果，如表 1 所示。

表 1 系统通信异常信号量监测误差测试数据表

异常信号测点编号	通信异常信号量的实际值/dBm	基于大数据挖掘技术的通信异常信号监测系统输出的信号异常信号量/dBm	基于扩展粒子滤波算法的通信异常信号监测系统输出的信号异常信号量/dBm	基于单片机及FPGA的电力载波通信异常信号监测系统输出的信号异常信号量/dBm
01	874.0	872.4	872.2	873.8
02	656.0	654.6	654.4	655.6
03	283.0	281.2	281.7	282.4
04	717.0	715.3	715.1	716.9
05	542.0	540.1	540.3	541.3
06	169.0	166.8	167.5	168.7
07	187.0	185.5	185.3	186.5
08	302.0	300.1	300.2	301.6
09	433.0	430.3	430.8	432.4
10	452.0	450.7	452.0	451.5
11	523.0	520.1	521.1	522.8
12	481.0	479.2	479.2	480.8
13	398.0	396.5	397.4	397.9
14	517.0	514.9	515.7	516.4
15	562.0	561.0	560.3	561.7

将表 1 中的数据代入到式 (19) 中，计算得出两个对比系统的平均异常信号量监测误差为 1.82 dBm 和 1.52 dBm，而优化设计的基于单片机及 FPGA 的电力载波通信异常信号监测系统的平均异常信号量监测误差为 0.38 dBm。由此可见，所设计系统对通信异常信号量的监测误差较小。

信号异常类型误测率的测试结果可以表示为：

$$\eta_{err} = \left(1 - \frac{N_{correct}}{N_{signal}}\right) \times 100\% \quad (20)$$

式中，变量 $N_{correct}$ 为异常类型监测正确的信号数量， N_{signal} 为电力载波通信环境中实时产生的信号总量。最终计算得出

异常类型误测率越低，证明对应系统的异常信号监测功能越好。通过数据统计与式 (20) 的计算，得出系统异常信号类型误检率的测试对比结果，如图 9 所示。

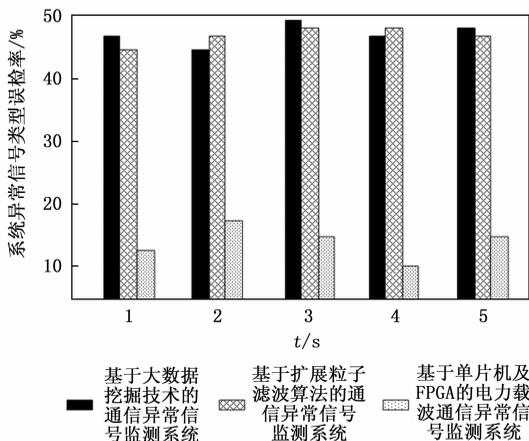


图 9 系统异常信号类型误检率测试对比结果

从图 9 中可以直观地看出，与两个传统监测方法相比，优化设计系统得出的异常信号类型误检率更低，在时间为 5 s 时，系统异常信号类型误检率为 14%，由此证明优化设计系统监测功能更加完善，对异常信号类型的检测准确率更好。

4 结束语

通信异常信号是电力载波通信网络运行状态的反映指标，通信异常信号的监测对于通信网络的维护具有重要意义。鉴于系统的设计需求以及相关硬件设备的工作原理，选择合适的单片机和 FPGA 元件作为监测系统的硬件支持，从系统测试结果中可以看出，优化设计的异常信号监测系统能够在电力载波通信环境中正常运行，并得出精度较高的监测结果，保证了信号监测的可靠性，具有较高的应用价值。

参考文献：

- [1] 张 磊, 吴 颖, 杨建常. 基于大数据挖掘的电力通信信号异常数据提取方法 [J]. 科技通报, 2022, 38 (6): 35-38.
- [2] 林统喜, 钟福龙. 基于大数据分析的异常通信信号智能检测系统设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21 (12): 35-38.
- [3] 刘高辉, 刘 军. 基于扩展粒子滤波算法的单载波通信信号载波跟踪方法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2021, 38 (12): 61-68.
- [4] 刘亚驹, 张斌荣. 电力机器人载波通信异常信号自动识别控制系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2021 (2): 179-181.
- [5] 邹风华, 王 柱, 钱秋妃, 等. 基于 FPGA 的虚拟放射源系统 [J]. 电子技术应用, 2020, 46 (9): 102-105.
- [6] 赵利刚, 黄冠标, 翟鹤峰, 等. 基于 FPGA 的有源配电网实时仿真器高速网络通讯接口设计 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32 (5): 86-92.

(下转第 20 页)