

基于 Zoom—FFT 技术的铁路移频信号检测系统设计

李永岩

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 甘肃勘察院, 兰州 730030)

摘要: 为精准检测轨道移频信号的特征参数值, 实现列车通信数据的实时稳定传输, 设计基于 Zoom—FFT 技术的铁路移频信号检测系统; 以 AD 转换电路作为核心电子输出装置, 借助 DSP 移频芯片、信号传感单元对于列车通信数据的聚拢调节作用, 在 LCD 屏幕内生成即时性铁路移频信号显示文件, 再联合微处理接收元件, 实现对信号特征参量的精准获取, 完成检测系统的硬件结构设计; 在此基础上根据信号数据的瞬时输出频率, 确定标准的模态移频函数, 完成基于 Zoom—FFT 技术的铁路移频信号频率分析; 设置数据采集、移频滤波、WIFI 通信三类程序型算法, 建立信号数据库与核心检测主机间的物理连接, 实现系统检测软件及应用主程序建立, 结合以上所有软、硬件执行结构, 完成基于 Zoom—FFT 技术的铁路移频信号检测系统设计; 对比实验结果显示, 应用新型检测系统后, 低频、高频轨道移频信号的检测精度均出现明显提升, 解决了原有检测系统支持下, 列车通信数据实时传输稳定性较差的问题。

关键词: Zoom—FFT 技术; 铁路移频信号; 检测系统; 转换电路; 信号显示器; 瞬时输出; 模态函数; 检测主程序

Design of Railway Frequency Shift Signal Detection System Based on Zoom—FFT Technology

Li Yongyan

(Gansu Survey Institute, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: In order to accurately detect the characteristic parameter values of the track frequency shift signal and realize the real-time and stable transmission of train communication data, a railway frequency shift signal detection system based on Zoom—FFT technology is designed. Using the AD conversion circuit as the core electronic output device, with the aid of the DSP frequency shift chip and the signal sensing unit for the adjustment of the train communication data, an instantaneous railway frequency shift signal display file is generated in the LCD screen, and then the micro-processing receiving element is combined. To achieve accurate acquisition of signal characteristic parameters, complete the hardware structure design of the detection system. On this basis, according to the instantaneous output frequency of the signal data, the standard modal frequency shift function is determined, and the frequency analysis of the railway frequency shift signal based on the Zoom—FFT technology is completed. Set three types of procedural algorithms: data acquisition, frequency shift filtering, and WIFI communication, establish the physical connection between the signal database and the core detection host, realize the establishment of the system detection software and application main program, and combine all the above software and hardware execution structures to complete the Zoom—based—Design of FFT technology railway frequency shift signal detection system. The comparison experiment results show that after applying the new detection system, the detection accuracy of low-frequency and high-frequency track frequency-shifted signals has been significantly improved, which solves the problem of poor stability of real-time transmission of train communication data supported by the original detection system.

Keywords: Zoom—FFT technology; railway frequency shift signal; detection system; switching circuit; signal display; instantaneous output; modal function; detection of main program

0 引言

在轨道移频信号检测方法方面, 传统 MATLAB 系统主要采取时域法处理手段, 包含多周期同步测量、数据周期测定、脉冲数计数等多种实施方案。在固定时间周期内, 可同时确定信号脉冲个数与待测脉冲频率, 并建立二者之间的模态通用函数。在实际测量过程中, 信号移频精度始

终与信号脉冲数量保持反比关系, 但却可与检测阈值时间建立正比干扰模型, 当铁路输入信号量不断变大时, 所检测出的特征参数量数值也随之增大^[1-2]。这种方法依靠轨道移频信号内部时钟参量与外部频率基数作比的方式, 降低特征参数值实际检测误差, 从而实现对列车通信数据的实时稳定传输。但此方法在低频、高频轨道信号并存的情况

收稿日期: 2020-05-27; 修回日期: 2020-06-22。

作者简介: 李永岩(1990-), 男, 甘肃会宁人, 工程师, 主要从事铁路控制测量、高铁轨道精调、智能机器人测量、航空测量、测量监控方向的研究。

引用格式: 李永岩. 基于 Zoom—FFT 技术的铁路移频信号检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 29-33.

下, 所获移频信息的特征参数值始终不能达到理想化水平。

基于上述问题, 引入 Zoom-FFT 技术手段, 设计新型铁路移频信号检测系统。所谓 Zoom-FFT 技术也叫选带快速傅立叶变换或细化的快速傅立叶变换, 可针对固定节点处的信号参量实施局部细化放大处理, 从而使高、低频轨道移频信号获取不同的频段分辨率。与传统 MATLAB 系统相比, 新型系统借助 WIFI 通信、移频滤波等多种软件主程序, 连接各级硬件执行结构, 再通过计算瞬时信号输出频率的方式, 建立必要的模式移频函数, 实现对铁路移频信号频率的分析与处理。在 Zoom-FFT 技术的支持下, 新型系统能够在多次检测过程中得出更为精准的轨道移频信号特征参数值, 缓解列车通信数据在实时稳定传输方面所受的限制。

1 铁路移频信号检测系统的硬件结构设计

铁路移频信号检测系统的硬件执行环境包含 AD 转换电路、DSP 移频芯片、信号传感单元等多个设备元件, 具体搭建方法如下。

1.1 AD 转换电路

AD 转换电路是铁路移频信号检测系统中的核心电子输出装置, 负责 DSP 芯片、LCD 显示器等硬件结构之间的电量促导, 可在完整保留低频、高频轨道信号移频形式的同时, 将电流、电压及其它电子应用指标一并从信号输入端运送至信号输出端。VEE 信号捕获器与铁路移频电子信号输入端相连, 只针对既定频段内的信号参量实施筛选处理, 左侧与一移频处理器相接, 在长导线传输作用下, 直接实施对上级捕获信号的反调处理, 同时将各类汇总指标参量反馈至 DIGTTAL 元件之中。DIGTTAL 元件在功能上等同于一个 A/D 电路转换器, 负载于铁路移频电子信号输入端左侧, 同时承载多个检测电阻 R 两端的移频电压, 可根据信号特征参量的实际数值水平, 协调低频、高频电量间的检测度量关系, 具备较强的数据信号统筹能力^[3]。移频互感端口同属于 AD 转换电路下侧, 在 INH 信号采集设备的作用下, 使检测电阻 R 内部的传输电流逐渐趋于统一, 当互感输出端累积的移频信号量达到既定数值水平后, POL、CLK、DC、GND 端口同时开启与下级硬件设备间的应用连接, 从而实现对铁路移频信号数据的检测传输。

1.2 DSP 移频芯片

DSP 移频芯片与其它硬件检测设备不同, 在 AD 转换电路的作用下, 该原件具备独立的算法编程能力, 可在不借助软件主程序的情况下, 直接实施对铁路移频信号数据的应用与调度, 从而使得列车通信数据的实时传输稳定性大大提升^[4]。Jtag 接口、SPI 接口、Boot 接口同位于 DSP 移频芯片左下部, 可按照数据信息的实际调度需求, 建立与其它设备元件间的应用连接。在信号复位按钮保持正向偏转的情况下, Ecan 接口长期空余, AD 转换电路直接作用于开关设备, 并以此维持电源接口内铁路移频信号的连续接入状态。移频测试电位器位于 DSP 芯片上部, 具有独特的哈佛结构, 在分流铁路移频信号时, 要么访问数据,

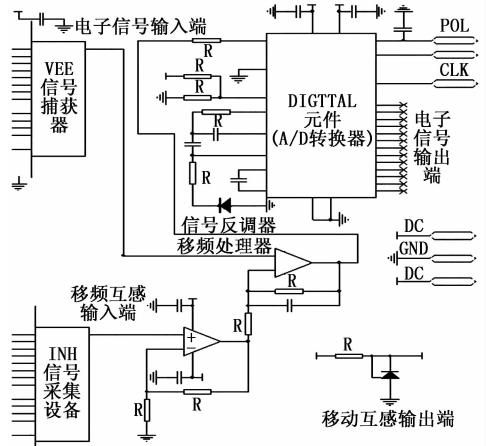


图 1 AD 转换电路结构图

要么访问程序, 最大程度上保持了输入信号特征参数值的检测精准性, 使得系统实时检测效率得到了提高^[5]。串口组织辅助 EEPROM 设备执行移频信号的取址与译码, 在一个系统检测周期内, 具备多次与信号传感单元连接的机会, 是 DSP 移频芯片内的核心应用设备。

1.3 信号传感单元

铁路移频信号检测系统的传感单元设备具备一阶差分、一阶滤波、一阶单转三类基本连接形式, 分别对对应待检轨道信号的不同输出状态。

1) 一阶差分传感: 一阶差分传感可实现由高频输入信号到高频输出信号的平级转换, 在 R_0 信号电阻的作用下, 铁路移频信号始终保持较强的横向传输能力, 在按照 R_1 、 R_2 电阻间的实际阻值比例, 分配暂存于系统内的信号数据参量, 再联合 DSP 移频芯片, 实现信息结构体的实时显示^[6]。

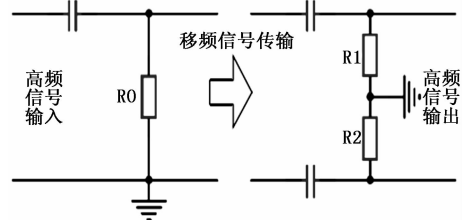


图 2 信号传感单元结构图 (一阶差分形式)

2) 一阶滤波传感: 一阶滤波传感可实现由低频输入信号到低频输出信号的平级转换, R_1 、 R_2 电阻同时具备感知铁路移频信号的能力, 但由于下级传感单元中只包含一个 R_3 电阻设备, 故该原件的阻值计算量应等于 R_1 、 R_2 阻值之和。

3) 一阶单转传感: 一阶单转传感可实现由高频输入信号到低频输出信号的越级转换, 信号源经过 R_0 电阻的移频调试后, 直接进入 R_3 电阻中, 再分多次传输至 LCD 信号显示器及微处理接收元件中, 从而为数据采集、移频滤波、WIFI 通信三类软件主程序提供必要依存条件。

1.4 LCD 信号显示器

LCD 信号显示器在核心板件上设置 TPS73HD318 型应

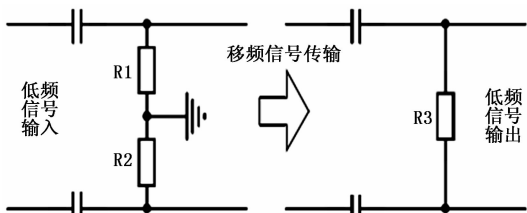


图 3 信号传感单元结构图（一阶滤波形式）

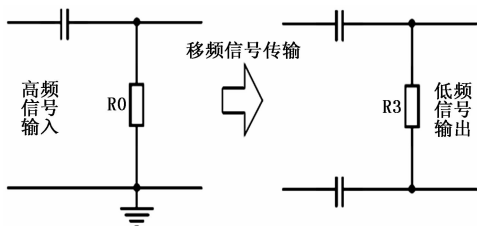


图 4 信号传感单元结构图（一阶单转形式）

用设备，为突出铁路移频信号的协调统一性，元件结构外平均分布 28 个功能不同的连接惯脚，一方面可大大增加显示器主体与下级微处理接收元件间的连接紧密性，另一方面也可根据轨道移频信号的特征参数实值，生成即时性数据显示文件，从而满足列车通信数据间的稳定性传输关系。TPS73HD318 应用设备左侧连接惯脚上、下两端各预留两个空白传输位置，而中间剩余的 12 个连接惯脚则保持兼性连接关系，在经过多次转承处理后，直接与移频信号的反馈终端组织相连。第 28 号惯脚接入系统 LCD 移频信号输入端，可通过同步获取信号数据与应用电子的方式，实现对轨道移频信号特征参数值的精准检测^[7-8]。整个显示器单元中分别设置 3 个屏状设备元件，同一信号输入形势下，位于同侧的显示器不能同时亮起、但可同时熄灭，这也是新型检测系统能够暂存移频信号特征参数值指标的主要原因。

直属于 LCD 信号显示器，负责维持铁路移频信号的检测输入形式，不具备独立的并行处理能力。C6523 芯片与信号传感单元设备同级，具备多阶连接形式同时转换的能力，可同时调度位于下部元件结构中的节点端口^[10]。显示接入端节点是铁路移频信号输入微处理接收元件的物理通道，4 个接口组织必须时刻保持相同的连通或闭合形式，以保证列车通信数据的实时稳定传输。

2 检测软件及应用主程序

2.1 基于 Zoom-FFT 技术的铁路移频信号频率分析

在各项硬件基础结构的支持下，分别计算与铁路信号参量相关的瞬时输出频率与模态移频函数，完成基于 Zoom-FFT 技术的信息检测频率分析。

2.1.1 瞬时输出频率

瞬时输出频率描述了铁路移频信号在既定节点处的输出基本量，在整个时域检测空间内，始终保持相对平稳的简谐波变动形式，能为检测系统微处理接收元件提供信息连接所必需的频段波动量。从全局性角度来看，铁路移频信号并不等同于非平稳信号参量，在 Zoom-FFT 技术手段的支持下，系统检测节点中数据信息的瞬时变化形式完全满足快速傅立叶变换规律，且单个信号参量对于移频传输数据的承载极限条件，始终不会超过 LCD 显示器所具备的平均信号容纳数值^[11]。简单来说，铁路移频信号的瞬时输出频率既满足快速傅立叶变换法则，也受到系统差分检测滤波作用的直接影响。在系统微处理接收元件的平均输出检测功率保持为 $\bar{\omega}$ 的情况下，移频信号瞬时输出频率只受到系统移频处理节点单位检测时长 $|t|$ 的直接作用影响。随系统微处理接收元件所承载移频信号总量的增加，与处理节点所匹配的单位检测时长也逐渐增大，直至能完全适应系统高频输入信号与低频输出信号间的实际转换关系，实现对轨道移频信号特征参数值的精准检测。联立物理量 $\bar{\omega}$ 、 $|t|$ ，可将铁路移频信号的瞬时输出频率表示为：

$$p = \frac{1}{\lambda} \bar{\omega} \cdot y \int_{e_0}^{i_1} \frac{\chi q^2}{e \cdot |t|} dq \quad (1)$$

式中， λ 代表基于 Zoom-FFT 技术的移频信号检测处理权限， y 代表系统差分检测滤波作用系数， i_0 代表铁路移频信号的最小输出基本量数值， i_1 代表铁路移频信号的最大输出基本量数值， χ 代表传输信号数据的既定移频系数， q 代表单位时间内的移频信号检测总量， e 代表移频传输数据的额定承载极限条件。

2.1.2 模态移频函数

在 Zoom-FFT 变换规律的支持下，模态移频函数可直观表述铁路信号瞬时输出频率在固定内享检测状态下的单一频率成分，可在为单分量信号赋予被检实值参量的同时，区分数据信息主体中的必要与非必要传输成分，从而实现列车通信数据的实时稳定传输^[12-13]。基于上述定义，模态移频函数内的铁路信号输入数据虽具备一定的波动能力，但却始终不会产生模态混叠的变动形式。设 β_1 代表铁路移频信号的极值点输入个数， β_2 代表铁路移频信号的过零点输

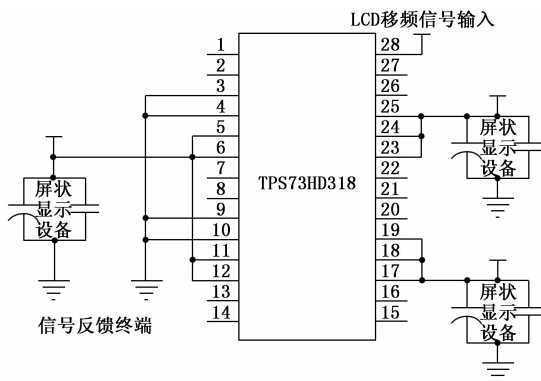


图 5 LCD 信号显示器结构图

1.5 微处理接收元件

移频信号检测系统的微处理接收元件由上、下部单元结构共同组成，其中上部结构中包含 C6748、TMS320C6748、C6523 三类应用芯片，下部结构中则包含 4 个完全相同的信号数据显示接入端节点。C6748 芯片负责铁路移频信号数据的提取与调用，属于与 DSP 芯片同级的递归处理元件，可有效统计系统空余节点内信号数据的实际数量级水平，再截取部分信号参量传输至下级设备元件中^[9]。TMS320C6748 芯片

入个数, 联立式 (1), 可将信号检测系统的模态移频函数定义为:

$$F = \sum_{e_0}^{e_1} \frac{1}{p} \cdot \frac{\xi \cdot (u_1^2 + u_2^2)}{u^2} d\bar{u} \quad (2)$$

其中, e_0 代表铁路移频信号的低数量级输入权限, e_1 代表铁路移频信号的高数量级输入权限, ξ 代表固定模态移频指标, u_1 代表与输入极值点相关的信息检测指征, u_2 代表与输入过零点相关的信息检测指征, \bar{u} 代表两类信息检测指征的平均参数值。

2.2 检测软件及应用主程序

联合铁路移频信号频率分析原则, 按照信号数据采集、信号移频滤波、WIFI 通信的主程序设计流程, 完成新型信号检测系统的软件应用环境搭建。

2.2.1 信号数据采集程序

信号数据采集程序作用于信号传感单元与 DSP 移频芯片间的信息应用连接, 在检测系统外部晶振频率保持为 24 MHz 的情况下, 该项执行程序可将信号寄存器调节为 Ox—O1C11100 的执行状态, 再借助外部模态移频函数, 更改已寄存的铁路移频信号参量, 通常情况下, 以倍频数等于 19 最为适宜, 此时与 AD 转换电路相连检测处理器的信号主频数可达 $24 \times 19 = 456$ MHz^[14]。在 LCD 显示接口与 DSP 移频接口保持并列连接的情况下, 信号数据采集程序只允许宽度为 16 位的信号数据参量同列通过, 直至最大寻址空间达到 512 Mbit, 才完全释放已存储的信号参量指标。具体的程序引脚与信号数据采集对应关系如表 1 所示。

表 1 信号数据采集程序编码原理

铁路移频信号定义	程序引脚名称	程序说明
EMIFA DO—EMIFA D15	Ox— O1C	数据线
EMIFA—A 13/GPI05	Ox— O1C11100	启动检测信号
EMIFA—A 12/GPI05[12]	AD—LCD	移频复位信号
EMIFA—CSn2	LCD—DSP	读信号和片选
EMIFA—A1 1/GPIO5	AD	忙信号
FRS—TDATA/GPIO5	DSP	移频识别信号

2.2.2 信号移频滤波算法

信号移频滤波算法只为滤除 LCD 显示器中的非必要数据参量, 可联合信号数据采集程序, 定义检测系统内的信息传输频率条件。一个完整的移频滤波算法应当具有相同数量级水平的极值点和过零点个数, 且在系统检测周期内, 显示器输入信号数据的调频与调幅都应与标准正弦形式完全一致。在任意时刻, 铁路移频信号的局部极大值点数量都不得高于过零点数量, 而局部极小值点数量却必须低于极值点的数量平均值, 即移频信号的上行、下行传输形式基本保持局部对称状态^[15-16]。在编写过程中, 移频滤波节点不得占用过量的信号频段区间, 且必须时刻与 Zoom—FFT 模态函数保持相同的应用变化趋势。

2.2.3 WIFI 通信程序

WIFI 通信程序是具备数据初始化能力的信号回传指

令, 仅作用于与微处理接收元件相连的数据输入节点, 支持 Zoom—FFT 检测指令与移频应用指令的同步传输, 在系统中起到原设置返回的作用^[17]。无论指令是否成功执行, 在 WIFI 通信程序的作用下, 微处理接收元件都会收到一连串的信号数据字符, 对于其它系统硬件执行结构来说, 可通过识别返回信息中剩余字符数组的方式, 判断已传输指令是否执行成功, 若指令成功执行, 则自动执行下一条指令; 若指令未能成功执行, 则重复执行上一条指令, 直至最终判断结果为“是”。至此, 完成各项软、硬件执行结构的搭建, 在 Zoom—FFT 技术原理的支持下, 实现新型铁路移频信号检测系统的顺利应用。

3 实验结果与分析

为验证基于 Zoom—FFT 技术铁路移频信号检测系统的实际应用价值, 设计如下对比实验。在列车行驶路段中, 每隔等长距离设置一个移频信号发生装置, 选取三台等长且型号相同的列车作为实验对象, 在车头位置安装相同的信号接收器, 如图 6 所示, 其中实验组 ArbStudio 主机搭载新型信号检测系统, 对照组 (a) ArbStudio 主机搭载传统 MATLAB 系统, 对照组 (b) 主机不搭载任何检测系统。

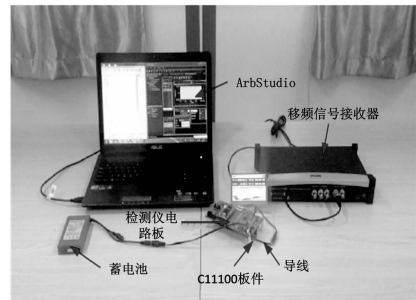


图 6 列车内部信号接收器

低频、高频轨道移频信号检测精度均能反映列车通信数据的实时传输稳定性, 通常情况下, 检测所得精度数值越大, 列车的实时传输稳定性也就越强, 反之则越弱。

3 组不同的高频轨道移频信号检测精度数值结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 图 1 (2) 的数值波动性最小, 检测精度极大值达到 70%; 图 1 (3) 的极小值水平最低, 达到 38%, 二者间差值为 32%。单看对照组 (a) 的数值结果, 图 1 (1) 的极大值水平最高、而极小值水平最低, 前者达到 42%、后者达到 2%, 二者间差值为 40%。单看对照组 (b) 的数值结果, 图 1 (2) 的极大值水平最高, 达到 32%; 图 1 (1) 的极小值水平最低, 达到 2.5%, 二者差值为 29.5%。综上可知, 应用基于 Zoom—FFT 技术铁路移频信号检测系统, 可有效提升高频轨道移频信号的检测精度数值, 实现对列车通信数据的实时稳定传输。

表 2 反映了实验组、对照组 (a)、对照组 (b) 低频轨道移频信号检测精度的实际数值结果。

表 2 反映了 3 组不同的低频轨道移频信号检测精度数值结果。单看实验组数值结果, 第 3 组的极大值水平最高, 达

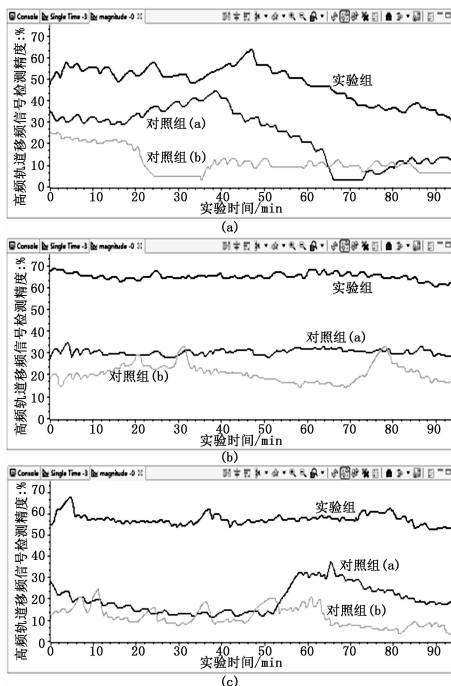


图 7 高频轨道移频信号检测精度

表 2 低频轨道移频信号检测精度

实验时间/min	实验组低频轨道移频信号检测精度/(%)			对照组(a)低频轨道移频信号检测精度/(%)			对照组(b)低频轨道移频信号检测精度/(%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
10	25	28	27	13	14	15	7	6	8
20	24	28	28	14	13	16	6	6	6
30	26	28	29	15	12	16	7	5	4
40	25	29	26	16	13	15	7	6	5
50	26	28	30	15	14	16	5	6	4
60	27	27	31	14	14	15	6	6	7
70	24	27	27	13	15	14	5	5	6
80	23	28	25	15	13	14	4	4	5
90	25	27	25	14	13	13	5	5	4

到 31%；第 1 组的极小值水平最低，达到 23%，二者间差值为 8%。单看对照组 (a) 的数值结果，第 3 组、第 1 组的极大值水平最高，达到 16%；第 2 组的极小值水平最低，达到 12%，二者间差值为 4%。单看对照组 (b) 的数值结果，第 3 组的极大值水平最高，达到 8%；第 1 组、第 2 组、第 3 组内记录结果都包含极小值 4%，二者差值为 4%。综上所述，应用基于 Zoom-FFT 技术铁路移频信号检测系统，也可有效提升低频轨道移频信号的检测精度数值，促进列车通信数据实现稳定的实时传输。

4 结束语

与传统 MATLAB 系统相比，基于 Zoom-FFT 技术的铁路移频信号检测系统利用 AD 转换电路，实现 DSP 芯片与信号传感单元的实时对应连接，又在数据采集、移频滤波等多个软件主程序的作用下，计算得出准确的信号数据瞬时输出频率。从实用性角度来看，低频、高频轨道移频

信号检测精度均出现不同程度的提升，可在精准获取信号参量特征参数值的同时，实现对列车通信数据的实时稳定传输，具备较强的应用推广价值。

参考文献：

- [1] 夏越, 陈颖, 宋炎侃, 等. 基于自适应移频分析法的 Voltage-Behind-Reactance 异步电机多时间尺度暂态建模与仿真 [J]. 电网技术, 2018, 16 (12): 3872-3879.
- [2] 凌云飞, 陈长兴, 牛德智, 等. 双势阱 Duffing-van der Pol 振子微弱信号检测统计量构造 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 13 (10): 2178-2183.
- [3] 方红伟, 宋如楠, 姜茹, 等. 振荡浮子式波浪能转换装置的全电气化模拟研究 [J]. 电工技术学报, 2019, 17 (14): 3059-3065.
- [4] 傅贵武, 王宇华. 基于 TI C2000 系列 DSP 的无刷直流电机无位置传感器驱动控制系统设计 [J]. 电机与控制应用, 2019, 11 (7): 82-88.
- [5] 李津, 罗昕颖, 扈啸, 等. 基于 TI 6678 多核 DSP 的 OpenCV 并行优化 [J]. 计算机工程与科学, 2018, 40 (5): 780-786.
- [6] 梁俊斌, 周翔, 马方强, 等. 移动低占空比传感网中基于多信标消息的低时延邻居发现算法 [J]. 通信学报, 2019, 12 (8): 178-188.
- [7] 段良飞, 王光华, 钱福丽, 等. 顶发射白光 OLED 微型显示器的蓝光掺杂特性研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 15 (8): 2630-2633.
- [8] 周峰, 郑良广, 倪大成. 一种基于 DLP 技术的列车司控系统抬头显示装置 [J]. 电子设计工程, 2018, 26 (21): 165-169.
- [9] 周芳芳, 毛索颖, 黄跃文. 基于双微处理器的传感器自动采集装置设计与实现 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (6): 157-160.
- [10] 石波, 王云鹏, 李太恒. 基准站观测数据加密方法及其在差分 GNSS 后处理中的应用 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43 (5): 651-657.
- [11] 孙丽敬, 盛万兴, 吴鸣, 等. 基于模糊 C 均值聚类的分布式电源集群并网逆变器输出功率置信区间估计方法 [J]. 电网技术, 2019, 12 (5): 1495-1503.
- [12] 何宇翔, 王彤, 张丽君. 一种基于频率响应函数的刚体惯性参数改进识别方法 [J]. 振动与冲击, 2019, 38 (21): 236-241.
- [13] 胡宝新, 李小文, 朱重光, 等. 大倾角光学遥感中大气点扩散函数的近似模型 [J]. 中国图象图形学报, 2018, 1 (1): 19-29.
- [14] 张健, 唐静, 邱名, 等. 叶轮机械全环非定常大规模并行模拟程序设计 [J]. 空气动力学学报, 2019, 16 (4): 546-554.
- [15] 崔立鲁, 宋哲, 邹正波, 等. 重力卫星时变重力场系数误差 Fan 滤波算法分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 23 (15): 46-51.
- [16] 孙清峰, 蔡昌盛, 崔先强, 等. 一种顾及有色噪声的四星座 GNSS 动态导航滤波算法 [J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39 (6): 625-628.
- [17] 李志强, 何华兵, 刘旭. 基于异系统生产线改造的通信控制技术研究与应 [J]. 制造技术与机床, 2019, 19 (7): 151-154.