

基于频移键控信号的车地无线通信 质量检测方法研究^{*}

曹振丰¹ 陆鑫源² 杨明来^{1**}

(1. 上海应用技术大学轨道交通学院, 201418, 上海;

2. 上海轨道交通维护保障有限公司通号分公司, 200002, 上海//第一作者, 助理实验师)

摘要 车地通信系统的通信质量直接影响线路的正常运行。提出了基于频移键控信号的车地通信质量定量检测方法,通过对频移键控信号的解析运算,对比分析电压幅值、波形失真及误码率等参数,判定轨旁车地通信的通信质量。上海轨道交通2号线的实测结果表明:该检测方法能检测在连续发送模式下的列车精准停车定位单向通信质量,并对故障点进行告警,实现了车地通信质量技术指标的定量分析,提高了故障处理的准确性和检测效率。

关键词 城市轨道交通;车地通信;移频键控;信号检测

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.031

Research on Quality Detection Method of Wireless Train-Wayside Communication Based on FSK Signal

CAO Zhenfeng, LU Xinyuan, YANG Minglai

Abstract The communication quality of TWC (train-wayside communication) system directly affects the normal operation of lines. A quantitative detection method of TWC based on FSK signal is proposed. Through analyzing and calculating FSK signal, comparing and analyzing the parameters of voltage amplitude, waveform distortion and symbol error rate, the communication quality of wayside TWC system is estimated. The field test results of Shanghai Rail Transit Line 2 show that the method can detect one-way communication quality of trains at precise stop positioning in CTM (continuous transmission mode) and warn fault points, which helps to realize the quantitative analysis of TWC quality technical indicators, improving detection efficiency and fault treatment accuracy.

Key words urban rail transit; TWC (train-wayside communication); FSK (frequency shift keying); signal detection

First-author's address Faculty of Railway Transporta-

tion, Shanghai Institute of Technology, 201418, Shanghai, China

在ATC(列车自动控制)系统中,TWC(车地通信)系统是实现轨旁ATC设备与车载ATC子系统之间数据信息传输的非安全通信子系统,分为车载TWC子系统和轨旁TWC子系统^[1]。TWC系统是中央控制中心、轨旁设备和列车的数据信息传输及交换系统,能协助列车在ATO(列车自动运行)程序下定位停车,并有调整中央时刻表的功能。TWC系统的通信质量对相关线路的正常运营有极大影响。

上海轨道交通2号线(以下简为“2号线”)的地铁维保单位的相关统计数据显示,与TWC系统有关的故障占2号线所有信号系统故障的25%左右,且TWC系统的主要故障是轨旁环线与车载天线间的通信失效。目前,TWC系统主要采用随机检测、定期检测和故障报修等方法,通过查看通信指示灯和使用万用表测量耦合单元的阻抗、容抗和感抗等来判定通信质量。

本文采用解析处理TWC系统轨旁环线FSK(频移键控)信号的方法,通过检测FSK信号的通信质量参数信息,实现了TWC系统通信质量的量化判定,能使维修人员根据告警信息有针对性地检修TWC轨旁设备。

1 TWC系统工作原理

2号线的TWC系统由美国US&S(联合道岔与信号)公司开发,是基于数字轨道电路的地铁信号系统TWC子系统,属于信号专用系统^[2]。其采用感应环线的通信方式,如图1所示。在2号线轨旁

^{*} 上海申通地铁集团有限公司项目(JS-KY12R014-1)

^{**} 通信作者

TWC 设备和列车之间,通过轨旁 TWC 环线与车载天线间的电磁感应来传输 FSK 模拟信号数据。

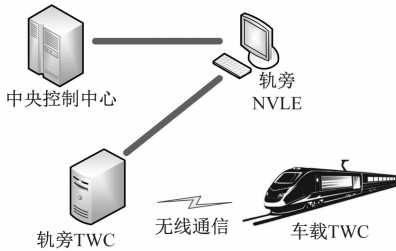


图1 2号线 TWC 系统示意图

在 TWC 系统实际运行中,列车行车密度较大,会导致周围电磁环境及气温发生变化,使轨旁 FSK 信号收发设备的电感值及电容值发生漂移,进而导致 FSK 通信中 LC (电感-电容) 谐振电路的中心频率发生偏移,严重影响数据传输质量,从而发生列车晚点、停车定位不准确,甚至信号系统故障等问题^[3]。对于数据包的丢失率较高及波形失真等情况尚缺少判定依据,相应的故障诊断及设备维护困难。

FSK 模拟信号利用载波频率传输数据,其载波频率为 54 kHz 和 64 kHz。列车与环线通过电磁感应产生互感电动势,其幅值同信号频率,以及线圈的面积、匝数、感应距离相关。互感系数 M 为:

$$M = \frac{\Psi}{I} = \mu n_1 n_2 l s = \frac{\mu N_1 N_2 S}{l} \quad (1)$$

式中:

- Ψ ——磁链;
- I ——线圈电流;
- μ ——磁导率;
- n_1, n_2 ——分别为线圈 1 和线圈 2 的密度;
- l ——感应距离;
- S ——线圈横截面积;
- N_1, N_2 ——分别为线圈 1 和线圈 2 的匝数。

根据式(1)分析可知,当 N_1, N_2 和 S 增大、 l 缩短时, M 增大,故感应电动势也将增大。

按地铁限界要求,线圈尺寸及空间位置受限。故有:

$$\Psi_{n1} = M_{n1} I_1 \quad (2)$$

$$\Psi_{n2} = M_{n2} I_2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = - \frac{d\Psi_{n1}}{dt} \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = - \frac{d\Psi_{n2}}{dt} \quad (5)$$

$$M_{n1} = M_{n2} = M \quad (6)$$

式中:

Ψ_{n1} ——线圈 1 所激发的磁场通过线圈 2 的磁链;

Ψ_{n2} ——线圈 2 所激发的磁场通过线圈 1 的磁链;

ε_1 ——线圈 1 电流变化在线圈 2 中产生的互感电动势;

ε_2 ——线圈 2 电流变化在线圈 1 中产生的互感电动势。

由式(4)、式(5)及式(6)得出:在 2 个具有互感的线圈中,若线圈中的电流变化率相同,则会在另一线圈中产生相等的感应电动势。从这一理论可知,车地通信间发送的 FSK 信号电压幅值大,其接收端感应到的信号电压幅值也相应较大。

轨旁环线发出的 FSK 信号电压幅值为 20 ~ 100 V,而车载天线信号电压幅值为 0.1 ~ 1.8 V,动态变化范围较大,且存在轨道电路的信号干扰。基于谐振原理的 LC 谐振电路,可在谐振点实现增大电压及电流幅值,从而达到频率信号的最佳耦合接收。

2 FSK 信号的解调分析

TWC 环线与列车天线间传输的是 FSK 信号。对于已调制的 FSK 信号,有:

$$S_{\text{FSK}}(t) = \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n g(t - nT_s) \right] \cos(\omega_1 t + \theta_{1n}) + \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \bar{D}_n g(t - nT_s) \right] \cos(\omega_2 t + \theta_{2n}) \quad (7)$$

概率为 P , 对应于 $\cos(\omega_1 t + \theta_{1n})$ 时,

$$S_{\text{FSK}}(t) = 1 \quad (8)$$

概率为 $(1 - P)$, 对应于 $\cos(\omega_2 t + \theta_{2n})$ 时,

$$S_{\text{FSK}}(t) = 0 \quad (9)$$

式中:

D_n ——二进制序列;

\bar{D}_n ——二进制序列反码;

$g(t)$ ——脉宽为 T_s 的矩形脉冲;

T_s ——抽样周期;

ω_1, ω_2 ——不同载波的载频;

θ_{1n}, θ_{2n} ——频率为 f_1, f_2 载波的初始相位。

FSK 信号解调常用的方法有相干解调法和非相干解调法。包络检波法(非相干解调法)不需要

在接收端载入相干信号,且解调电路相对简单^[4],其原理如图 2 所示。FSK 信号分别经过 2 个带通滤波器滤波后,得到频率为 f_1 和 f_2 高频载波。由包络检波器提取频率为 f_1 和 f_2 的高频载波包络线,传输至抽样判决器。比较抽样时刻的载波 f_1 和 f_2 的包络检波器的输出值 ν_1 、 ν_2 :当 $\nu_1 > \nu_2$ 时,抽样判决器判定输出频率为 f_1 的载波;当 $\nu_1 < \nu_2$ 时,判定输出频率为 f_2 的载波^[5]。

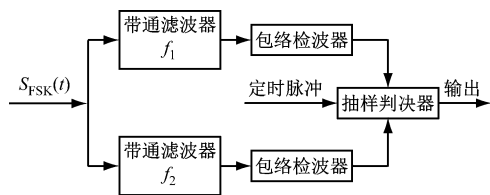


图 2 包络检波法原理图

此外,解调 FSK 信号还需要较为复杂的硬件解调电路。解调电路的电感值、电容值易受气温和电磁环境的变化而发生漂移,从而影响信号的解调质量。本文采用基于 FFT(快速傅里叶变换)的数字解调器来简化信号的解调过程^[6]。该数字解调器工作原理如图 3 所示。

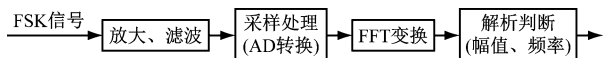


图 3 基于 FFT 的数字解调器原理图

3 TWC 系统的通信质量检测系统

基于 FSK 信号工作原理和技术参数,结合 TWC 系统的“现场检修”这一特殊性需求,本文提出通过检测 FSK 信号质量来定量分析 TWC 系统通信质量的检测系统(以下简为“TWC 检测系统”)。该检测系统主要包括耦合天线、数据处理模块及手持式检测仪等。由耦合天线接收轨旁环线发出的 FSK 信号,由数据处理模块对信号进行采样、解析、处理并存储,采用蓝牙技术将数据发送至地铁维保人员的检测仪^[7],现场实时呈现 TWC 系统的工作状态。TWC 检测系统的工作原理如图 4 所示。

3.1 硬件构成

TWC 检测系统的硬件主要是数据处理模块,由数据采集模块(数据采集板)、嵌入式 MCU(微控制单元)和数据存储(Flash 存储)模块组成,分别完成数据采集、解析处理和数据存储。首先,由数据采集板对 FSK 信号进行采样,以及放大、滤波等处理运算;然后,将处理运算结果传输给嵌入式 MCU 进

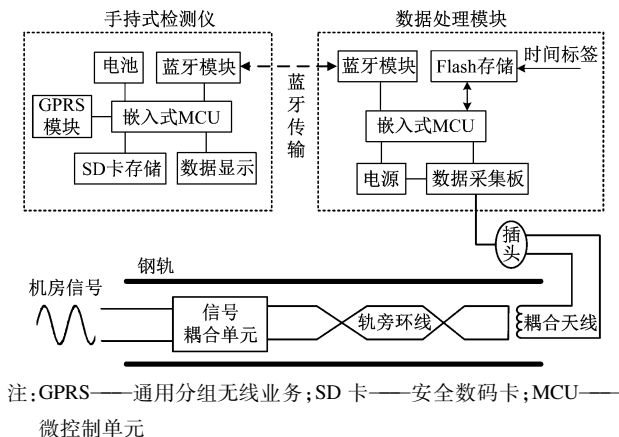


图 4 TWC 检测系统工作原理图

行解析;最后,MCU 将解析后频率及幅值等数据加上时间标签,存储至 Flash 模块中。

3.1.1 数据采集模块

图 5 为该数据采集模块设计框图。FSK 信号通过 LC 滤波电路滤除大量的谐波后,通过整形电路进行信号整形处理,并由 MCU 进行 A/D(模数转换),采用 FFT 来解析 FSK 信号^[8],得到 FSK 信号的最高频率 f_H (64 kHz)、最低频率 f_L (54 kHz)、信号电压幅值等数据。相关数据打包后通过异步传输标准接口 RS-232 传送到 Flash 模块存储。

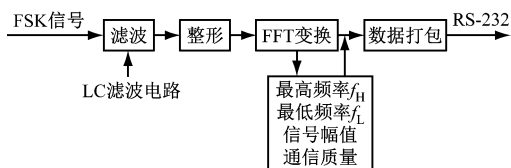


图 5 数据采集模块设计框图

由于 TWC 系统的信号发送端电压为 110 V,远大于 A/D 采样端支持的电压(1.6 V),故采用信号分压处理方式,先使用比例小的变压器来隔离信号,再通过数据采集板来获取变压器副边输出的信号。

3.1.2 数据存储模块

图 6 为数据存储模块设计框图。MCU 对数据采集板采集的数据进行过滤处理^[9]。处理后的数据信息加上采用 GSM(全球移动通信)的 SIM900A 模块获取的时间标签^[10],存储到 Flash 模块中。

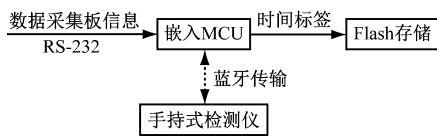


图 6 数据存储模块设计框图

当数据采集板发送来的信号电压幅值数据小于 100 mV 时,不进行存储操作。如 Flash 模块超过 5 s 未接收到采集模块发送的 FSK 信号数据,则判定此时列车已经驶出轨旁环线的感应范围。Flash 模块按照时间信息将检测的信号电压幅值、通信成功率等数据进行存储操作。该模块采用 ST 公司(意法半导体公司)的 STM32F103RET6 微控制器来实现数据的过滤处理,采用 HC-05 蓝牙模块来实现与手持式检测仪的数据交换^[11]。

3.2 软件构成

3.2.1 采集模块软件

图 7 为数据采集模块的设计流程图。该模块采用快速傅里叶变换对 FSK 信号进行解调,获取载波频率 f_H (64 kHz)、 f_L (54 kHz),并发送相应频率的幅值。根据检测数据判定通信质量,并发送该时刻的通信状态。当发送时间为 1 s(数据包的发送间隔为 500 ms)时,打包发送检测数据信息。

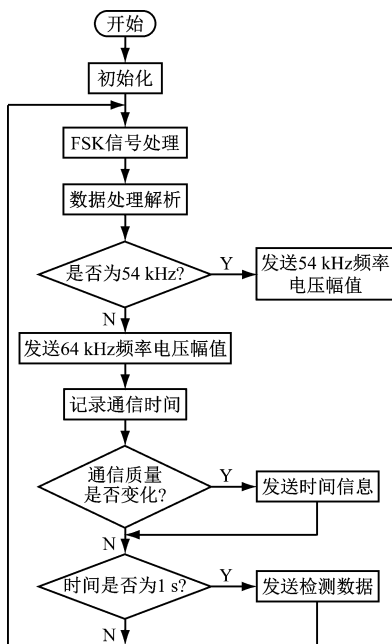
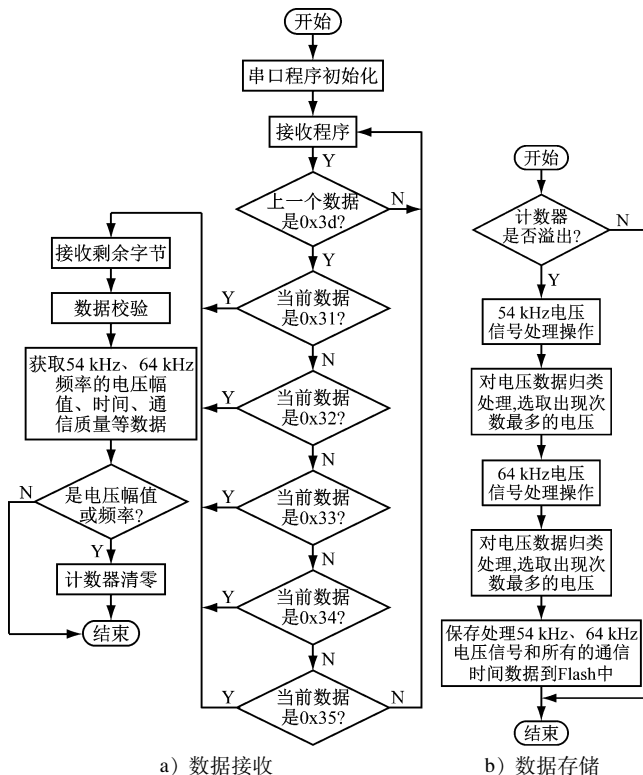


图 7 数据采集模块处理流程图

3.2.2 存储模块软件设计

图 8 为存储模块处理流程图。该模块先判定当前数据是否为目标数据,提取频率为 54 kHz、64 kHz 目标信号的电压幅值和通信时间,并初步判定通信质量;在完成数据接收后,分别对频率为 54 kHz、64 kHz 的信号进行归类处理;最后,将处理后的电压幅值及当前通信成功率等数据加上车站编号、上下行标志和时间标签,即时存储到 Flash 中。



a) 数据接收

b) 数据存储

图 8 数据存储模块处理流程图

4 TWC 检测系统的测试与分析

在试验场地的轨旁 TWC 环线对 TWC 检测系统进行可行性测试后,在 2 号线试车场 TWC 环线采用 TWC 检测系统分别对通信数据和信号的采集及处理等功能进行实测。

4.1 信号通信数据分析

轨旁信号机房发送端分别在正常通信状态和异常通信状态发送频率为 54 kHz、64 kHz 的信号,分别获取两种状态下的信号的通信数据。对正常通信状态(见表 1 及表 2)和异常通信状态(见表 3 及表 4)情况下的通信数据分析可知:

1) 在正常通信状态下,轨旁 TWC 环线与列车的通信和断开时间约为 0.130 s、0.445 s;在异常通信状态下,频率为 54 kHz、64 kHz 的信号电压幅值约为 0,且轨旁 TWC 环线与列车的通信时间间隔超过 1.000 s;

2) 在正常通信状态下,频率为 54 kHz、64 kHz 的目标信号电压幅值出现数量最多的分别为 1 050 mV 和 1 000 mV。两者电压幅值偏差为 5%,满足地铁公司的信号电压幅值偏差 0~7% 的要求。

4.2 系统测试与分析

将自制耦合天线与数据处理模块连接,放置在轨旁 TWC 环线预定位置进行样机实测,如图 9 所

表 1 正常通信状态下的信号电压幅值数据信息(部分)

信号电压幅值/mV	在频率为 54 kHz 信号中的出现数量/次	在频率为 64 kHz 信号中的出现数量/次
400	10	11
500	8	19
600	5	19
700	19	42
800	26	68
850	46	64
900	83	105
950	81	119
1 000	99	126
1 050	106	117
1 100	94	92
1 150	68	56
1 200	45	47
1 300	16	30
1 400	8	19

表 2 正常通信状态下的通信状态数据信息(部分)

通信状态	持续时间/ms	通信状态	持续时间/ms
通信	130	通信	135
断开	441	断开	443
通信	128	通信	125
断开	448	断开	445
通信	127	通信	132
断开	443	断开	455
通信	128	通信	134
断开	442		



a) 数据处理模块 b) TWC 检测系统 c) 耦合天线

图 9 TWC 检测系统的样机及轨旁环线实景图

示。列车驶进 TWC 环线末端,停靠在预定位置来模拟列车进站状态。在模拟列车进站的同时开启检测系统,手持式检测仪通过蓝牙接收测试的车地通信成功率、信号幅值等,通信成功率符合现场实际情况,手持终端显示现场通信成功率分别为 79% ,88% ,99% ,与机房实际通信成功率(80% ,

90% ,100%)基本相符。

表 3 异常通信状态下的信号电压幅值数据信息(部分)

信号电压幅值/mV	在频率为 54 kHz 信号中的出现数量/次	在频率为 64 kHz 信号中的出现数量/次
400	0	0
500	2	0
600	0	0
700	2	0
800	0	4
850	0	0
900	1	6
950	0	0
1 000	0	0
1 050	0	0
1 100	0	0
1 150	0	0
1 200	0	0
1 300	0	0
1 400	0	0

表 4 异常通信状态下的通信状态数据信息(部分)

通信状态	持续时间/ms	通信状态	持续时间/ms
通信	1 096	通信	1 088
断开	262	断开	261
通信	1 095	通信	1 706
断开	130	断开	261
通信	1 705	通信	2 325
断开	135	断开	262
通信	1 096	通信	477
断开	132		

5 结语

试车线的轨旁 TWC 环线实测结果表明,基于 FSK 信号的 TWC 检测系统能准确判定 TWC 系统的实时通信质量,说明本文提出的检测方法可行、有效。TWC 检测系统能为 2 号线 TWC 系统维护提供有力保障,还能为 TWC 设备实施状态修提供技术手段,提高调试效率,减少调试时间和次数。TWC 检测系统能发现并处理潜在故障,其对已有故障的分析可缩短故障分析和定位的时间,提高 TWC 系统的维保效率。

(下转第 155 页)

使用 IxChariot 软件进行测试。测试结果(见图9)为:在仅有普通 5G 用户共享 5G 基站所提供的带宽时,CBTC 系统的业务上行速率稳定在 80 Mbit/s 左右;当中国电信通过多 5G 终端抢占 5G 基站所使用的带宽时,极端压力情况下,CBTC 系统的业务上行速率下降到最低 30 Mbit/s,与 GBR(保证比特速率)业务配置的 30 Mbit/s 保证速率一致。测试结果表明,启用 5G 切片功能并为 CBTC 系统业务设置了保证带宽后,当发生众多 5G 终端抢占 5G 带宽的极端情况时,中国电信的 5G 基站仍然可以为 CBTC 系统业务保障提供 30 Mbit/s 的带宽,以确保极端压力情况下的列车正常运营。

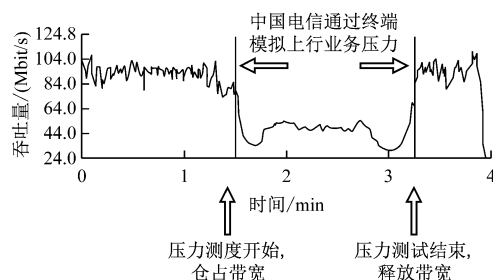


图9 5G切片功能对CBTC系统的业务带宽保障功能测试结果

5) 验证列车基于 5G 通道的 ATO 模式下的运行情况。测试结果(见图 10)为:当列车使用 5G 网络建立车地通信后,ATS 界面显示列车以 65 km/h

(上接第 149 页)

TWC 检测系统嵌入了 GPRS 模块,亦可通过 GPRS 传输方式将 TWC 检测数据传送至后台监测系统^[12-13],从而实现联网监测以及告警、预警,并发出相应的声、光报警等信号,便于管理人员对站点的设施进行调整。此外,TWC 检测系统能保存并备份 TWC 系统通信质量数据,以便相关人员进行查询和追溯。

参考文献

- [1] 余辉. 上海地铁 2 号线车地通信系统分析[J]. 铁道通信信号,2004(4): 30.
- [2] 梁鉴如,张莉萍,马子彦,等. 上海轨道交通 2 号线车地通信信号的检测[J]. 城市轨道交通研究,2013(8): 97.
- [3] 周庭梁,周雄军,张立鹏. 城市轨道交通车载信号设备状态的自适应采集研究[J]. 城市轨道交通研究,2010(11): 43.
- [4] 王烟青,袁仕继,张英杰,等. 2FSK 信号非相干检测法解调抗干扰性能仿真分析[J]. 舰船电子工程,2012(7): 85.

的速度在 ATO 模式下正常运行。

4 结语

基于中国电信 5G 通信网络的 CBTC 系统传输现场测试,自 2020 年 11 月开始至 2021 年 1 月结束,共持续 2 个多月。在上海轨道交通 5 号线高架线路区段进行了 4 种不同场景的测试,测试结果表明:在城市轨道交通高架区段,使用 5G 来替代 2.4 GHz Wi-Fi 以及 1.8 GHz LTE-M 网络,5G 带宽、端到端时延、漫游切换等方面的技术指标高于 CBTC 系统对数据通信系统无线子系统的技术要求,在技术性能上,5G 可以用于 CBTC 系统的业务承载。而使用 5G 切片功能,可以确保在极端压力下优先保证 CBTC 业务的传输,进一步提高了 CBTC 系统业务传输的高可靠性。

下一阶段,将会对隧道场景下 5G 承载 CBTC 业务以及基于 5G 的网络安全等场景做更为深入的研究、分析和测试;将结合第一阶段的测试结果,最终确认 5G 承载 CBTC 业务的方案架构。

参考文献

- [1] 上海申通地铁集团有限公司技术中心. 5G 技术应用深化研究与示范任务书[R]. 上海:上海申通地铁集团有限公司技术中心,2020.
- [2] 井敏英. 2FSK 通信系统信道仿真分析[J]. 实验室研究与探索,2013(11): 82.
- [3] 吴志敏,黄红兵,肖大光. 基于 DFT 的 FSK 数字化解调算法研究[J]. 通信技术,2008(4): 36.
- [4] 张慧颖,田东生. 基于蓝牙技术的实验室环境监测系统设计[J]. 实验室研究与探索,2018(8): 290.
- [5] 李飒,李如强,黄凯. 车载 FSK 信号载频和调制频率的实时检测方法[J]. 机械与电子,2009(7): 59.
- [6] 郝雯,沈金鑫,梅成. 基于 STM32 单片机的存储式数据采集系统设计[J]. 电子设计工程,2013(17): 80.
- [7] 霍涛,贾振堂. 基于 STM32 和 SIM900A 的无线通信模块设计与实现[J]. 电子设计工程,2014(17): 106.
- [8] 闫文婷. 基于蓝牙技术的数据传输的研究与实现[D]. 南京:南京理工大学,2004.
- [9] 李志. 基于无线通信网络的车地数据传输策略优化与实现[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [10] 李春. 城市轨道交通基于通信的列车控制系统车地无线通信优化方案[J]. 城市轨道交通研究,2011(9): 103.

(收稿日期:2019-07-12)