

# 城市轨道交通车地无线通信系统性能评估平台的研究与实现

廖志斌<sup>1,2</sup>, 王海<sup>3</sup>, 龙广钱<sup>3</sup>, 陈启新<sup>3</sup>

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081;

3. 广州地铁集团有限公司, 广州 510330)

**摘要:** 为了评估城市轨道交通车地无线通信系统的性能, 通过分析城市轨道交通无线环境特点, 利用半实物仿真, 模拟无线传输信道, 结合干扰信号源模拟不同的干扰环境, 设计实现了一个城市轨道交通车地无线通信系统性能评估平台; 通过该平台, 可对车地无线通信系统处于不同干扰场景或者不同切换频率的场景下进行性能评估; 同时, 该系统能够直接应用于基于 CBTC 的城市轨道交通线路, 评估其车地无线通信系统的性能。

**关键词:** 车地无线通信; 性能评估; CBTC

## Research and Implementation of Performance Evaluation Platform for Urban Rail Transit Vehicle Ground Wireless Communication System

Liao Zhibin<sup>1,2</sup>, Wang Hai<sup>3</sup>, Long Guangqian<sup>3</sup>, Chen Qixin<sup>3</sup>

(1. Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081, China;

2. China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081, China;

3. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510330, China))

**Abstract:** In order to evaluate the performance of the train-ground wireless communication system of urban rail transit, this paper analyzed the characteristics of urban rail transit wireless environment, using hardware-in-the-loop combining with interference signal source to simulate different interference environment. Therefore, an evaluation platform with interference scenarios or different handover frequency for evaluating the performance of the train-ground wireless communication system is designed and implemented. At the same time, the system can be directly applied to CBTC based urban rail transit train-ground wireless communication system to evaluate the performance.

**Keywords:** train-ground wireless communication; performance evaluation; CBTC (communication based train control system)

## 0 引言

目前基于无线通信的列车控制系统 (CBTC) 是城市轨道交通信号系统的主要制式, 它利用双向高速的车地无线通信技术传递信号控制信息, 以此实现移动闭塞<sup>[1-2]</sup>。连续的通信是列车运行的基本要求, 车地无线通信系统的性能是 CBTC 系统的重要能力之一。因此, 车地无线通信系统的性能评估是一个具有重要意义的研究问题。

目前, 地铁民用通信和 CBTC 专网通信共同存在于城市轨道交通建设中<sup>[3-5]</sup>。不少研究表明<sup>[6-7]</sup> LTE 与 WLAN 频段相邻, 会造成 WLAN 的阻塞干扰。岳开栋<sup>[8]</sup>研究表明多网多载波合路后, 其无源器件因信源设备不断叠加, 功率容量要求更高, 系统内部和系统之间也将产生干扰。这些

干扰都会对车地无线通信系统的性能产生重大影响。

除了干扰这些外部环境因素, 无线通信系统中设备本身的特点和性能参数也对车地无线通信系统的性能产生影响。

车地无线通信系统中列车接入单元通过轨旁线性覆盖的无线信号接入到无线网络, 其中无线通信的覆盖由按照线性部署的无线接入点产生。列车接入单元在运行过程中不断连接运行前方的无线接入点, 产生高频次的切换, 并且, 无线接入点的设备类型和传输介质也影响着列车无线通信单元在不同无线环境下的切换算法和切换参数<sup>[9]</sup>。以上问题均对车地无线通信系统的性能起到重大的影响。如何能在实验室进行真实有效, 并且兼顾所有切换场景以及干扰环境的性能评估成为一个具有重要意义的研究问题。

通过分析城市轨道交通无线环境特点, 利用半实物仿真, 模拟无线传输信道, 结合干扰信号源模拟不同的干扰环境, 设计实现了一个城市轨道交通车地无线通信性能的平台。该评估平台兼顾无线接入终端的不同切换场景

收稿日期: 2020-02-11; 修回日期: 2020-04-02。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201202)。

作者简介: 廖志斌(1990-), 男, 湖南株洲人, 硕士, 助理研究员, 主要从事轨道交通通信、信号技术方向的研究。

和干扰场景,对车地无线通信系统做出量化分析,较好地评估了车地无线通信在不同干扰场景和不同移动速度场景下的性能。

### 1 平台搭建

平台通过对 CBTC 无线通信系统在信号干扰和切换环境下的网络通信性能表现,对其车地无线通信系统的性能提供评估手段。平台搭建如图 1 所示,包括中心控制台作为交互控制平台,控制整个平台的运行;信号发生器、信道仿真单元、车载模拟单元、地面模拟单元均受中心控制台控制;列车接入单元自动完成对无线通信网络接入。

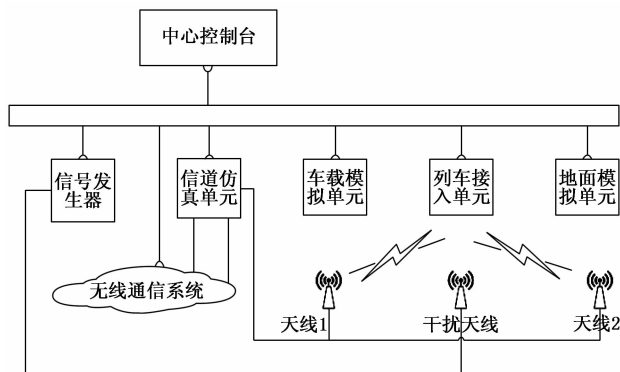


图 1 城市轨道交通车地无线通信系统性能评估平台

其中,信号发生器按照无线通信中对干扰信号的测试需求,模拟不同的干扰。信道仿真单元将无线通信系统的信号经过控制整合,以时间为单位输出不同强度信号,模拟列车行进过程中信号强度变化。列车模拟单元模拟车载设备,将测试数据经由有线网络,通过列车接入单元,通过无线通信系统到地面模拟单元,模拟 CBTC 数据从车载到地面的传输过程。地到车经过反向路径回到车载模拟单元,完成统计分析。

### 2 信道模型

城市轨道交通的信道模型是一个线性覆盖模型,利用无线信号在空间的路径损耗和多径衰落的公式可对矩形隧道损耗衰落信道进行仿真<sup>[10]</sup>。当前轨道交通中无线网络的建设以天线和漏泄同轴电缆为主。根据城市轨道交通 CBTC 无线通信系统的铺设方式,采用既有的信号衰减模型和实际测试的信号强度数据,利用工程经验得到当前经典传输模型中的参数。根据该参数形成无线通信网络的线性模型,构建信道切换场景,模拟列车运行过程中多个无线接入点的无线信号强度变化过程。

#### 2.1 定向天线传输方式建模

定向天线无线信号的终端接收信号强度预算公式如下:

$$Pr = Pt + Gt - Lp + Gr - Lc$$

其中:  $Pr$  为终端设备接收功率,  $Pt$  为无线基站发射功率,  $Gt$  为无线基站天线增益;  $Lp$  为路径损耗;  $Gr$  为终端

设备天线增益;  $Lc$  为综合损耗。

$$Lp = 20Lg\left(\frac{4\pi}{c}\right) + 20Lg(f(\text{Hz})) + 20Lg(d(m))$$

其中:  $c$  为光速,  $3 \times 10^8$  m/s,  $f$  (Hz) 为传输频率,  $d$  (m) 为传输距离。定向天线模式下,覆盖区域的场景和相应覆盖如图 2 所示。定向天线覆盖的测量值和理论值对比如图 3 所示。

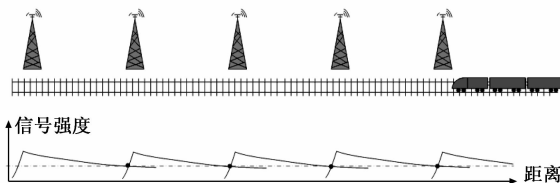


图 2 定向天线信号强度示意图

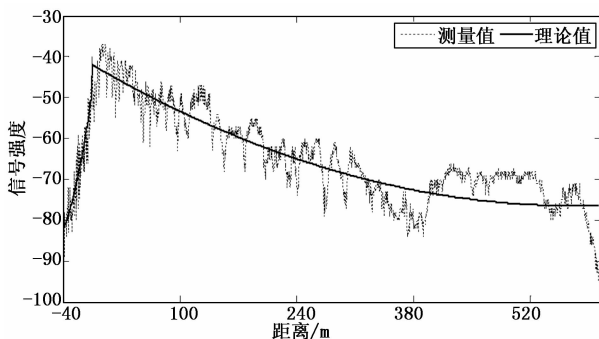


图 3 定向天线信号强度实际测试图

#### 2.2 漏泄同轴电缆传输方式建模

漏泄同轴电缆无线信号的终端接收信号强度预算公式如下:

$$Pr = Pt - Lp + Gr - LRF - Ls$$

其中:  $Pr$  为终端设备接收功率;  $Pt$  为无线基站发射功率;  $Lp$  为漏泄同轴电缆路径损耗;  $Gr$  为终端设备天线增益;  $LRF$  为射频分路设备损耗;  $Ls$  为终端设备接收电缆损耗。

漏泄同轴电缆传播路径损耗公式如下:

$$Lp = Lc + L1$$

$Lc$  为耦合损耗;  $L1$  为每百米传输损耗。漏泄电缆模式下,覆盖区域的场景和相应覆盖示意图 4 所示。

实际中城市轨道交通中采用漏泄电缆覆盖模式的测量值和理论值对比如图 5 所示。

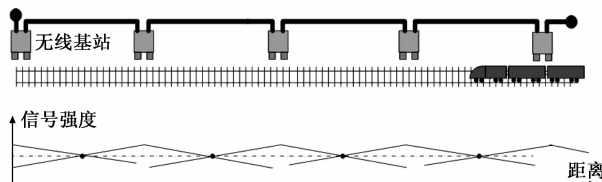


图 4 漏泄同轴电缆信号强度示意图

基于上述理论值与测试值,为信号强度值的波动进行

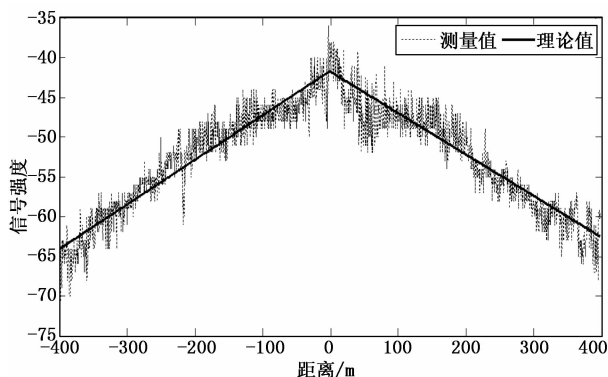


图 5 漏泄同轴电缆信号强度实际测试图

建模设计软件, 利用信道仿真单元根据实际场景选择信道衰落算法控制信号源动态衰减。模拟接入单元将根据接收到的信号源信号发生切换, 模拟出列车在不同的速度下的无线切换。

### 2.3 干扰信号模拟

干扰一般分为同频干扰和邻频干扰。同频干扰指通信网络内部的两个以上信号源, 同时处于同频发射状态时所产生的对工作在該频率上的接收设备的干扰。邻频干扰是指相邻频段信号的边频分量落入接收机工作频段的通带内而造成的干扰。邻频干扰需要模拟出实际轨道交通中可能存在的不同种类的信号, 包括 GSM, CDMA, LTE 等。

城市轨道交通的 WIFI 系统使用 2.4 GHz 频段, 该频段属于开放频段, 智能手机等设备均可工作在该频段, 因此干扰源多。比如, 城市轨道交通的 LTE-M 系统使用 1 785~1 805 MHz 频段, 紧邻运营商频段。在新建轨道交通线路中, 一般会与民用通信同时部署开通, 不可避免地会产生干扰。

根据现有移动、联通、电信等运营商的通信制式和 WIFI 制式, 利用信号发生器作为干扰源, 验证这些干扰下车载终端传输质量和传输速率的变化, 具有重要的现实意义。

## 3 软件设计

软件系统包含 6 个部分, 中心控制台、地面模拟单元、信道仿真单元、干扰信号模拟单元、列车接入单元和车载模拟单元。其中, 中心控制台实现对地面模拟单元、信道仿真单元、干扰信号模拟单元和车载模拟单元的控制; 列车接入单元无需中心控制台进行控制, 可自动完成入网切换和传输数据; 地面模拟单元为 CBTC 数据测试提供数据回传功能; 信道仿真单元控制信道仿真单元按照信号衰落模型输出不同步的两个周期信号, 模拟列车在实际线路运行时收到的无线信号; 干扰信号模拟单元根据测试方案, 进行同频干扰、邻频干扰信号的产生; 车载仿真单元和地面仿真单元经过无线网络进行数据通信, 统计丢包、时延和切换性能。具体结构如图 6 所示。

仿真的 CBTC 数据流向如图 6 所示, 车载模拟单元通

过有线接口将 CBTC 数据发送至列车接入单元, 列车接入单元将数据通过无线信道将数据发送给地面模拟单元, 经过处理后, CBTC 数据按照相反方向回到车载模拟单元进行统计和分析。

统计分析过程利用滑动窗用来解决实时平均时延的计算问题, 该方法有利于将计算时间分散到每次增加数据过程当中, 避免造成数据堆积和计算时间长的问题。实时时延计算方法如下, 定义为接收到的数据个数,  $D_c$  为当前时延,  $D_p$  为滑动窗最开始的数据的时延,  $m$  为滑动窗长度。  $D_{avg}$  为平均时延  $D_{avg-m}$  为滑动窗长度的最近时延。

$$D_{avg} = \frac{N-1}{N} * D_{avg} + \frac{1}{N} * D_c$$

$$D_{avg-m} = \begin{cases} D_{avg} & \text{if}(m > N) \\ D_{avg-m} + (D_c - D_p) \frac{1}{m} & \text{if}(m \leq N) \end{cases}$$

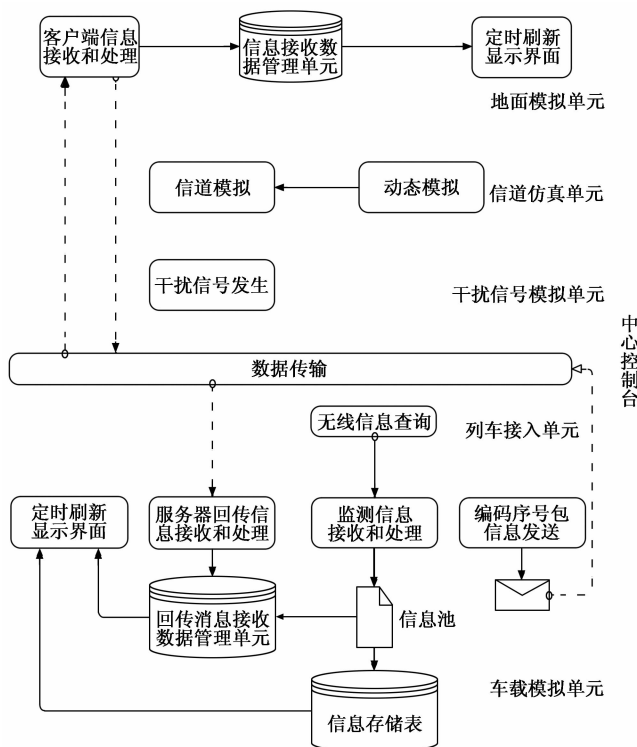


图 6 软件架构图

丢包统计方法为在车载模拟单元端, 每个数据包均带有数据包序列号, 利用数据包的序列的连续性, 判断数据是否发生丢失。

各个仿真单元的实现说明如下:

#### 1) 地面模拟单元:

(1) 客户端信息接收处理: 接收带有编码序列的测试数据包信息, 并对数据进行回传。

(2) 消息接收数据管理单元: 进行数据的接收存储和显示管理。

(3) 定时刷新显示界面: 根据数据管理单元的管理指针获取未显示信息并显示到界面。

2) 信道仿真单元:

(1) 信道模拟: 根据信道模型, 计算并控制通过该信道的无线信号的发射强度, 满足实际线路中的覆盖模型。

(2) 动态模拟: 为了能够模拟列车在不同速度情况下的通信性能, 结合无线接入点/小区覆盖距离计算周期时间和信道模型之间的相位差, 形成交叉覆盖的无线覆盖场景模型。

3) 干扰信号模拟单元:

干扰信号发生: 根据频点、频宽和发射强度控制信号发生器模拟该干扰信号。

4) 列车接入单元:

(1) 无线信息查询: 查询模拟接入单元的无线信号强度、无线接入点 MAC 地址/小区号的信息和位置信息等, 周期性发送给车载模拟单元。

(2) 数据传输: 接收车载模拟单元的数据并传递给地面模拟单元; 接收地面模拟单元的数据传递给车载模拟单元。

5) 车载模拟单元:

(1) 定时刷新显示界面: 采用定时刷新的方法, 将多个数据处理进行周期型处理。降低界面刷新频率, 降低界面线程工作强度, 确保程序的可靠性。

(2) 服务器回传信息接收和处理: 用于接收服务器回传的信息, 并将数据进行缓存, 是测试结果的分析数据源。

(3) 监测信息接收和处理: 用于接收车载模拟单元发送的自定义详细, 此自定义消息为可变消息结构, 可包含设备的信号强度信息和关联的无线接入点的 MAC 地址/小区号。当该系统应用于实际线路测试时, 还将增加位置信息, 进行故障点定位。

(4) 编码序号报信息发送: 该模块为测试数据的生成模块, 每个数据包包含有 4 个保存序号的字节, 序号将按照间隔为 1 的升序方法编写; 同时在该数据中根据 CBTC 系统列车数据的传输格式, 构造并模拟 CBTC 数据, 使测试能够应用于实际线路的测试。

(5) 信息池: 用于缓冲由无线网口接收到的数据, 利用两个缓冲区接收同一个端口的数据, 将接收和处理进行分离, 提高效率。

(6) 信息存储表: 用于实时显示模拟接入单元的信号强度、无线接入点 MAC 地址/小区号的信息和位置信息等, 用于分析信号强度和切换; 在实际线路测试时将提供位置信息。

(7) 回传数据接收管理单元: 利用回传的数据包, 对实时丢包率、总丢包率、实时平均时延、总平均时延及最大中断时间等指标进行计算。

### 4 实验结果与分析

测试示例通信系统使用 IEEE802.11 标准的 WLAN 技术, 工作频段为 2.4 GHz, 两个 AP 均工作于 1 信道, 采用

漏泄同轴电缆模式, 模拟场景参考图 4。

测试时, 无线 AP 的信号首先接入无线信道仿真单元, 然后通过合路器接入到同一根馈线中, 馈线终端放置天线。列车接入模拟单元的天线与馈线终端的天线相隔约 2 米, 可忽略该空间损耗。参数如表 1 所示。

表 1 无线信道的参数

| 参数名称     | 取值      |
|----------|---------|
| $P_t$    | 20 dBm  |
| $L_c$    | 66 dB   |
| $L_1$    | 5.6 dB  |
| $G_r$    | 5 dB    |
| $L_{RF}$ | 5.4 dB  |
| $L_s$    | 0.6 dB  |
| $L_c$    | 6.54 dB |

无线 AP 的信号强度通过信道仿真单元周期性设置衰减量模拟漏泄同轴电缆的百米损耗  $L_1$ , 两个 AP 设备的信号通道的信号强度相差半个周期。

选择 AP 的仿真间隔为 400 m, 列车行进速度为 70 km/h, 那么信道仿真单元对信道衰减的控制周期为 21 s。

测试统一采用 100 ms 为周期每次 500 byte 的速率进行测试, 测试方向为双向测试。其中两个属于同一 SSID 下的 AP 经过信道仿真单元发射无线信号。两个 AP 被列车接入单元接收到的信号强度均约为 -53 dB。

为了探究信号干扰对该通信场景的影响, 分别进行了无干扰、同频干扰和邻频干扰测试。

同频率干扰的频点为 2 412 MHz, 干扰频宽为 22 MHz, 干扰源的发射强度为 20 dBm, 此时列车接入单元接收到该干扰的强度为 -90 dB。

邻频干扰的频点为 2 350 MHz, 干扰频宽为 20 MHz, 干扰源的发射强度为 20 dBm, 模拟移动公司的 TDD-LTE (E) 2325~2370 M 频段信号。

其中, 干扰源均采用全向天线发射信号, WLAN 的有效信号由平板天线发射, 列车接入单元利用单向天线进行信号接收。

表 2 干扰测试结果

| 测试内容  | 丢包率/% | 最大中断时间 | 最大时延/ms | 平均时延/ms |
|-------|-------|--------|---------|---------|
| 无干扰情况 | 1.8   | 200 ms | 39      | 10.01   |
| 同频干扰  | 24.56 | 17.7 s | 497     | 11.71   |
| 邻频干扰  | 5.42  | 400 ms | 340     | 11.30   |

测试统计结果如表 2 所示。其中时延是指双程传输时延。最大中断时间为列车接入单元连续接收到的两个数据包时间差的最大值。通过测试结果可以看到, 干扰对平均时延的影响比较小, 但是对最大时延具有很大的影响。同频

(下转第 265 页)