

上海轨道交通某线的车地无线通信故障分析

吴磊

(上海地铁维护保障有限公司车辆分公司, 200030, 上海//第一作者, 助理工程师)

摘要 对上海某轨道交通线路车地无线通信故障频发问题的历史日志数据进行统计分析后发现,车速、复杂环境和基站位置都会对通信产生影响,进而引起信噪比恶化,引发车地无线通信故障。从降低干扰源、加装信号放大模块及保护敏感源等 3 个方面,阐述了解决车地无线通信故障频发问题的措施及其可行性。从某线路的试用效果来看,在射频前端电路加装滤波器能显著降低车地无线通信的故障率。

关键词 城市轨道交通;车地通信;故障分析

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.049

Analysis of Train-Wayside Wireless Communication Failure of Certain Shanghai Rail Transit Line

WU Lei

Abstract After analyzing the history log data of train-wayside wireless communication failure frequent occurrence problem of certain Shanghai Metro line, it is found that vehicle speed, complex environment and base station location are all potentially influencing the communication, deteriorating signal-to-noise ratio and causing train-wayside communication failure. From three aspects of reducing interference source, installing signal amplification module and protecting sensitive source, measures and its feasibility of solving train-wayside failure frequent occurrence are expounded. The results of test implementation of certain line show that installing wave filter on RF front-end circuit can significantly lower train-wayside wireless communication failure rate.

Key words urban rail transit; train-wayside communication; failure analysis

Author's address Rolling Stock Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200030, Shanghai, China

上海轨道交通全面部署智能化运维系统后,各系统对通信质量的要求越来越高;但个别线路的车地无线通信系统经常断线,给列车维护保障带来不便。本文对某典型地铁线路(以下称为“某线”)的

车地无线通信故障进行分析,找出故障原因。

上海轨道交通信号系统采用 CBTC(基于通信的列车控制)技术。某线通信采用 FHSS(跳频)技术,其工作频段为 2.4 GHz 的 ISM(Industrial Scientific Medical Band)频段^[1]。由于任何用户都可使用该频段,故该频段的电磁环境复杂,其通信易受干扰。因此,在实际使用中,经常出现列车通信异常。经过观察发现,通信设备失效隐藏较深,多数表现为“假死”,即设备报警指示灯显示正常,但其实已出现通信异常。这给维护工作带来很大的困难。如能提早发现故障,实现及时维修,则可大大降低故障频次,提高维护效率,降低维护成本。

1 故障数据统计

本文主要基于 2017 年 7 月、9 月及 11 月某线车地无线通信系统的 1 727 万份日志数据,来统计其故障,用于分析车地无线通信设备发生故障的原因。将整理的数据可视化,绘制车地无线通信时间状态曲线图。部分截图如图 1 所示。

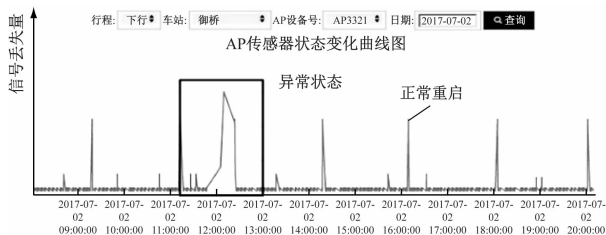


图1 车地无线通信状态变化曲线截图

由图 1 可见:在大多数的正常情况下,车地无线设备 AP(无线接入点)通信处于“平稳心跳”状态,有节奏地保持着接口重启和热重启,以维持通信系统的正常运行;在极少数的情况下,AP 设备发生“心律不稳”,处于异常状态,严重的甚至会出现死机情况。车地无线通信时间状态曲线可直观地反映每个车站车地无线通信传感器的状态信息,并且能长时间记录车地无线通信的信号状态。这是车

地无线通信状态跟踪、追溯的良好途径。

通过统计各站点的 AP 设备重启次数,能迅速找出易发生车地无线通信故障的车站,还能快速定位重启次数异常的车地无线通 AP 设备。为让数据更直观,可绘制具体某站的 AP 重启次数统计饼状图,如图 2 所示。图 2 中,AP2101 重启次数远高于其他设备,说明该设备存在告警状况的可能性极大。

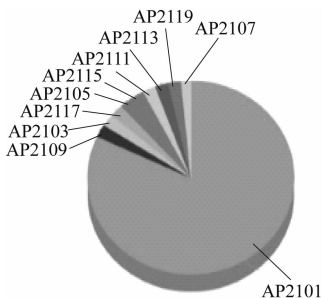


图 2 某站点各车地 AP 设备重启次数统计图

2 故障原因分析

一般情况下,造成通信质量下降的主要原因是信噪比(SNR)恶化。SNR 恶化通常由噪底抬升或目标信号过低造成。

结合某线的实地情况进行分析发现,造成某线 SNR 下降的原因为:① 列车的高速行驶对车地无线通信信号强度造成影响。② 复杂的通信环境使信号衰落加快,造成接收器接收功率过低,致使目标信号过低。③ 由于信号基站太靠近车站,导致通信系统工作频段内的干扰噪声较大,从而使噪底抬升。

2.1 车速对信号强度的影响

当列车高速行驶时,车载 AP 设备和车站的 AP 设备距离会迅速缩短。由于存在多普勒效应,当无线电波向车站车地无线通信设备靠近时,其频率会变高;当无线电波远离车站车地无线通信设备时,其频率会变低。多普勒效应公式为^[2]:

f_{接} = (v \pm v_0)f/(v \pm v_s) \tag{1}

式中:

- f_{接}——接收点频率;
- f——发射频率;
- v——电磁波在介质中行进速度;
- v_0——接收点移动速度;
- v_s——发射源移动速度。

由式(1)可知,列车运行速度越高,车站车地无线通信发射的频率与列车接收频率偏差越大。当频率偏差严重时,会导致通信传输数据帧丢失。

CBTC 系统的车地无线通信信息以帧为单位进行传输,故若数据帧丢失则会造成信息重传甚至通信中断^[3],对列车运行安全造成很大影响。已知某线列车最高运行速度可达 110 km/h,则 v_0 为 110 km/h, v 值为 3 \times 10^8 m/s, v_s 值为 0。因为车速相对于电磁波传播速度可以忽略不计,所以频率偏差不会影响到数据帧丢失,车速对通信影响可以忽略不计。

2.2 复杂环境对信号强度的影响

根据 Fresnel 区理论,信号强度衰败不是线性降低^[4]。某线车站内的 2 部 AP 设备一般相距 180 m 左右。根据接收器接收信号强度公式^[5],距 1 部 AP 设备 180 m 处的另 1 部 AP 设备信号接收强度为 -55 dBm。根据 802.11 协议标注和设备指标要求,接收信号强度应大于 -80 dBm^[6]。可见,信号强度符合标准,且留有较大余量。用 WirelessInsite 软件对某车站进行建模仿真,得到车站车地无线通信设备的信号强度仿真结果如图 3 所示。

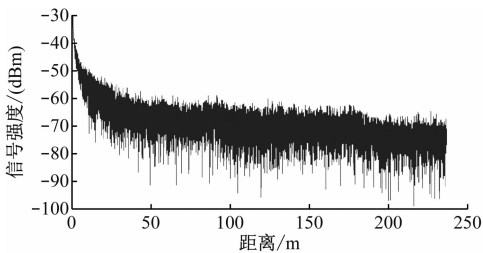


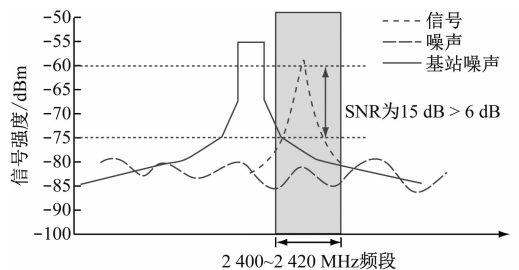
图 3 车站车地无线通信设备的信号强度分布仿真结果

由图 3 可知:车站内的车地无线通信信号分布趋势符合 Fresnel 分布;信号强度波动强烈,说明信号不稳定;在一些区域,信号强度已经低于 -80 dBm。如信号强度较低处周围有基站或工业信号影响,则极易形成通信干扰,造成失帧和数据丢包。

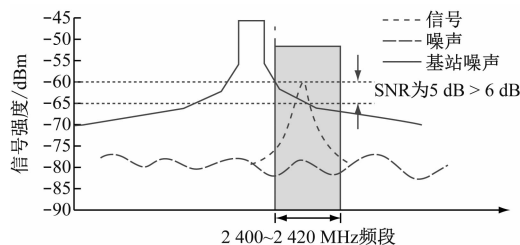
2.3 基站位置对通信的影响

噪底抬升原理图如图 4 所示。在正常情况下,基站信号维持正常值,其落入地铁通信系统工作频段内的干扰信号噪声信号功率较低。此时,地铁通信系统的信噪比良好,可进行正常通信,如图 4 a)所示。当基站增大发射信号功率或者基站和车站车地无线通信设备距离接近时,地铁通信系统工作频段内的干扰噪声信号功率增大,造成噪底抬升, SNR 恶化,使地铁通信发生异常甚至中断,如图 4b)所示。

例如,某线莘庄段沿线邻近数个通信基站。在该段,落入地铁通信频段内的信号功率偏高,车地无线通信设备的目标信号时常被基站信号湮没,进



a) 正常情况



b) 基站发射功率增大

图4 信噪比示意图

而发生通信延时及车地无线通信设备重启等通信故障,给列车运行带来安全隐患。

3 解决措施

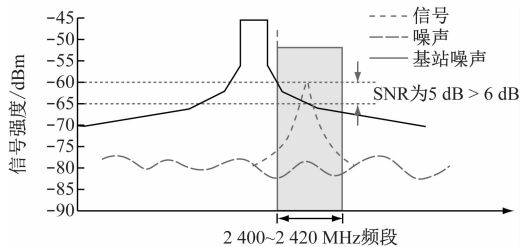
针对故障发生的原因,本文从降低干扰源干扰、加装信号放大模块及保护敏感源^[7]等3方面采取解决措施。

3.1 降低干扰源干扰

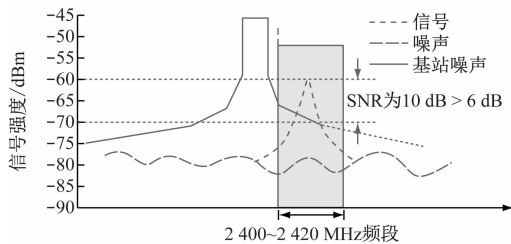
在降低干扰源干扰方面,可在基站侧加装滤波器,即将带通滤波器串联加装在射频前端电路中。此时,加装的滤波器会与原有带通滤波器叠加,使带外抑制更强,矩形系数更大,进而有效降低基站发射机非线性产生的、落入到ISM频段内的干扰信号。在基站侧加装不同的滤波器后,信号原理图如图5所示。

由图5a)可见,当采用滤波器1时,在2400~2420MHz频段,AP设备接收到的地铁控制信号SNR为5dB<6dB,无法解调。由图5b)可见,当采用了边沿更为陡峭的滤波器2时,在2400~2420MHz频段AP设备接收到的地铁控制信号SNR为10dB>6dB,可以正常解调。

由此可见,在基站侧加装滤波器可有效地缓解基站对地铁车地无线通信干扰的问题,无需对车载设备与沿线固定设备进行改造。但是该措施的实施也有较大困难:一方面,带内插损小、带外抑制大的滤波器在市场上几乎没有成品,需要特殊定制,



a) 采用滤波器1时



b) 采用滤波器2时

图5 加装不同滤波器信号原理图

且其指标越好,价格就越高;另一方面,在基站侧加装滤波器需要与电信运营商沟通交涉,其极有可能会影响到基站的性能,电信运营商很难同意。

3.2 加装信号放大模块

在车载AP设备与轨旁AP设备的天线与信号处理电路之间加装1个发射信号方法模块,其电路示意图见图6。在AP设备前端加装信号放大模块,可提升发射机发射信号的功率,进而使SNR提升。加装信号放大模块后的信号强度如图7所示。

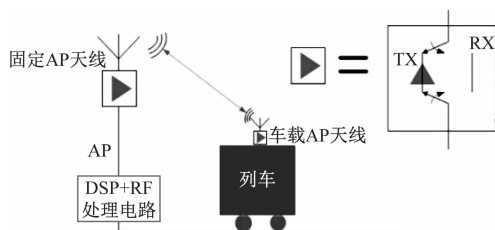


图6 信号放大模块电路图

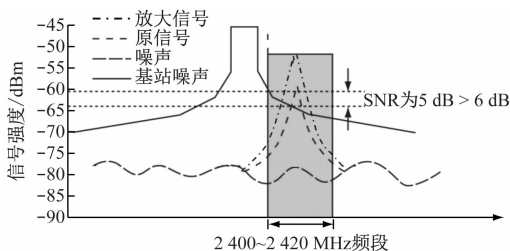


图7 加装信号放大模块后的信号强度

图7中,阴影内峰状点划线为发射机加装信号放大模块,阴影内峰状虚线是为发射机未加装信号放大模块。由图7可以看到:未加装信号放大模块

时,AP 设备收到的信号 SNR 为 $5\text{ dB} < 6\text{ dB}$,无法解调;加装信号放大模块后,AP 设备收到的信号 SNR 为 $15\text{ dB} > 6\text{ dB}$,可以正常解调。

采用加装信号放大模块的措施可有效提升接收机所收到信号的信噪比,进而增强了 AP 设备的抗干扰能力。但该措施还可能会使车地无线通信自身的信号过强,进而导致接收机接受到的信号大于接收机的最大输入电平,产生阻塞。信号放大模块需小心设计,既要能放大信号,又要不至于阻塞接收机。如果采取该措施,则每列列车都需要加装信号放大模块,易受干扰路段的轨旁 AP 备上也都要加装信号放大模块,数量较多,需和车地无线通信设备供应商交涉。此外,增强的车地无线通信信号还可能会对移动通信系统产生干扰,需谨慎选择。

3.3 保护敏感源

保护敏感源措施:在射频前端电路中,在车载 AP 设备与轨 AP 设备的天线与信号处理电路之间,加装 1 个带宽为 ISM 频段的带通滤波器。该措施电路如图 8 所示。在射频前端电路加装滤波器可有效提高射频前端电路对通信频段外强干扰信号的抗干扰能力,可对 ISM 频段外的信号加以抑制。加装滤波器后,从基站发出的大功率移动通信信号在进入地铁接收机前端时信号功率会减小,进而使射频接收机前端产生饱和和失真的概率减小。由于这种方案不会影响现有的其他通信系统,也无需与其他单位交涉,所以可行性较高。

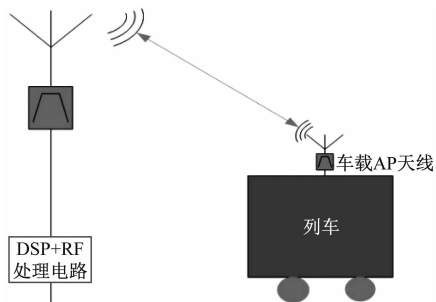


图 8 车地无线通信设备前端加装滤波器

在射频前端电路加装滤波器的措施已在某线进行试用。图 9 为加装滤波器前后的 AP 设备故障日志数据统计,其中 7 月份为未加装滤波器时,9 月份和 11 月份为已加装滤波器时。试用结果显示,在

射频前端电路加装滤波器后,AP 设备的异常情况明显大幅减少,证明该措施对降低车地无线通信异常干扰有显著效果,能显著降低故障率。

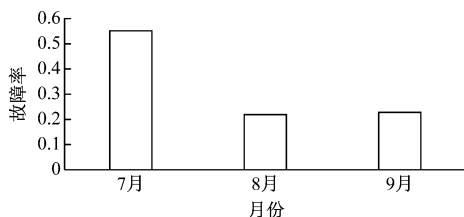


图 9 不同月份 AP 设备异常对比图

4 结语

车地无线通信设备故障隐藏得较深,往往车地无线通信已经停止工作,故障灯都不跳红,给维保工作带来不便。本文将车地无线通信通信生成的日志整理归纳,将故障数据提取,找出故障信息以及易发生故障的车站以及各车站车地无线通信故障比例;再从车速对信号强度影响、复杂环境对通信影响,以及基站密集度和基站距离太近对车地无线通信影响三方面分析产生故障的原因;最后从降低干扰源、加装信号放大模块、保护敏感源三个方面提出解决措施,且一些措施已在某线上得到应用,这对其他车站通信故障分析解决有参考意义。

参考文献

- [1] 卢晓宇. 基于 802.11FHSS 标准的无线 CBTC 系统高速漫游研究及测试[J]. 城市轨道交通研究, 2014(增刊 2):34.
- [2] 范平志, 周维曦. 高移动无线通信抗多普勒效应技术研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3):405.
- [3] 魏赞, 鲁怀伟, 何朝晖. 基于 802.11 协议的 CBTC 系统数据通信子系统的探讨[J]. 铁道学报, 2013(4):51.
- [4] ZHANG Y P, ZHANG W M, ZHENG G Y, et al. Mixed model for predicting propagation loss in tunnels[J]. Chinese Journal of Electronics, 2001, 29(9): 1283.
- [5] 李晋, 付嵩. CBTC 无线传输方式性能分析及现场测试[J]. 现代城市轨道交通, 2011(3):8.
- [6] 张志刚. 基于 WLAN 的列车控制系统中轨旁车地通信快速切换方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2011.
- [7] GAST M S. 802.11 无线网络权威指南[M]. 南京:东南大学出版社, 2007.

(收稿日期:2019-08-10)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

服务热线 021-51030704