



上盖动车所无线对讲系统优化与数模兼容中继设计

王伟力

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 上盖动车所采用多密度结构柱的环境下, 无线对讲人员只能近距离通话, 无法在设施区内大范围移动的同时进行无线对讲。针对上盖动车所无线对讲系统的需求, 优化了现有首个上盖动车所设备, 首次在铁路通信中提出了数字/模拟兼容的无线对讲系统中继方案, 同时实现了系统自激干扰消除, 创新设计了一套适用于铁路动车所的系统设备, 使该系统满足超大范围内全区域人员对讲机直接通话的需求。通过现场测试验证了该套系统的设计水平和应用效果, 在满足业务需求的情况下, 系统误码率降低到1%以下。为类似环境如客货运车站、物流园区、港口等场景下的无线通信系统设计提供了参考。

关键词: 上盖动车所; 同频无线中继; 无线对讲通信; 测试方法

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025119

Optimization of the wireless intercom system for overhead covered depots for electric trains and design of digital-analog compatible relays

WANG Weili

China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China

Abstract: In environments where the overhead covered depots for electric trains employs multi-density structural columns, wireless intercom personnel can only communicate at close range, making it impossible to conduct wireless intercom while moving within a large area of the facility. In response to the requirements of the wireless intercom system for overhead covered depots for electric trains, the existing equipment of first-ever Depot for Electric Trains was optimized, proposing for the first time in railway communications a relay solution for a digital/analog compatible wireless intercom system. Simultaneously, self-excited interference elimination was realized and a set of system equipment suitable for railway depots for electric trains was innovated, enabling the system to meet the demand for di-

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2025-02-22

通信作者: 王伟力, 005202@crfsdi.com

基金项目: 国铁集团科技研究开发计划项目 (No.N2023G054); 中国铁路上海局集团有限公司科研项目 (No.2023200); 中铁第四勘察设计院集团有限公司科研项目 (No.2022K122)

Foundation Items: The China Railway Corporation Scientific Research and Development Plan (No.N2023G054), The Scientific Research Project of China Railway Shanghai Group Co., Ltd. (No.2023200), The Scientific Research Project of China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. (No.2022K122)

rect intercom communication among personnel across the entire ultra-large area. Field tests verify the design level and application effectiveness of this system, reducing the system's bit error rate to below 1% while satisfying business needs. This provides references for the design of wireless communication systems in similar environments, such as passenger and freight train stations, logistics parks, ports, and other scenarios.

Key words: overhead covered depot for electric train, co-frequency radio relay, wireless intercom communication, testing methodology

0 引言

动车所，又叫铁路动车组检修站，专门针对动车组列车进行检查、测试、维修和养护等作业。近年来，全国范围内审批新建多个动车所都采取上盖的建设方式。上盖动车所内部如图1所示，上盖动车所支撑结构柱对其中的无线系统场强覆盖有着极大的屏蔽影响，会导致动车所内形成部分弱场或盲区，极大地增加了该环境下铁路各无线系统的设计难度。



图1 上盖动车所内部

近年来，我国在无线通信对讲技术方面取得了显著进展。例如，我国自主研发的铁路数字无线列调系统，该系统采用分布式架构，支持语音和数据同时传输，提高了无线频率资源利用率和列车调度通信的实时性、准确性。在国外，特别是日本东北、上越新干线也完成了无线列调数字化改造工程，改造旨在提升列车运输效率、保障行车安全。

尽管已经在无线通信对讲技术方面取得了显著发展成果，我国巨大的铁路里程基数使得铁路

专用无线对讲通信系统的全面数字化需要一定的时间，加上随着全球首个采用支撑结构柱为架构建立的上盖动车所的正式投入使用，后续新一批上盖动车所的陆续建设，使得在该特殊环境下的无线通信对讲技术面临着巨大的挑战与考验。

1 现状分析

1.1 大功率模拟中继设备在大范围覆盖使用上存在问题

上盖动车所涉及模拟无线对讲系统的大范围覆盖，在这种业务需求下，涉及两套及以上中继设备才能完成覆盖时就会出现自激现象。由于模拟电台中继设备是双工设备，会将接收到的信号再次放大后发射出去，当同一个场景中A天线发出的信号被B天线接收到后，经增益又从B天线发射后回到A天线处，由此循环进行增益产生自激现象。另外，当同一个场景中A天线同时接收到来自B天线和C天线（或手持台）发出的信号时，接收到的同频信号同样也会产生干扰，影响接收信号质量，因此大功率模拟中继设备不适合在大范围覆盖场景下设置多套。

1.2 无线对讲系统覆盖范围测试

为避免自激干扰等现象，首个上盖动车所内仅设置了既有无线对讲大功率模拟中继设备一套。本次测试仅对当前动车所内模拟信号覆盖情况进行测试，无线对讲信号覆盖强度测试结果如图2所示，上盖动车所环境中的模拟中继设备覆盖范围实验测试数据见表1。从测试结果可以看出，天馈系统在其本股道内进行信号覆盖，传播至300 m时，信号衰减已超过40 dB。

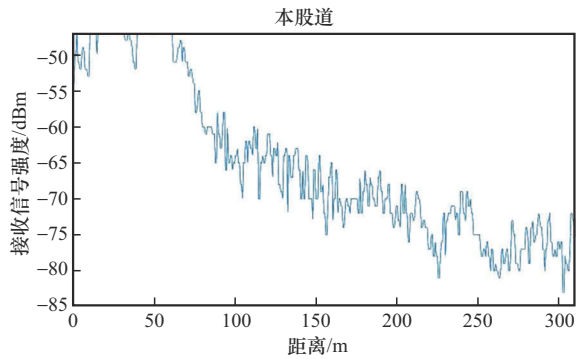


图2 无线对讲信号覆盖强度测试结果

表1 上盖动车所环境中的模拟中继设备覆盖范围实验测试数据

测试场景/m	50	100	150	200	250	300
本股道/dBm	-28	-62	-65	-66	-72	-75
信纳比/dBm	36	33	29	27	25	24

由于相邻股道、间隔股道、间隔6排股道及间隔8排股道上的测试均能接收到声音,说明场强值良好,但音效嘈杂、断续,从信纳比可看出通话质量不高。

1.3 需兼容外来车辆司机和机械师的模拟对讲机设备

依设计惯例,常规动车所搭建一套数字无线对讲系统,即可解决动车所内本地人员的对讲问题,市面上绝大多数对讲机厂商都有成熟的解决方案及产品。

但是,由于动车所内对讲设备需要兼容外来车辆司机和机械师的模拟对讲机设备,此业务需求还包含调度台和司机、司机和随车机械师、司机和地面工作人员以及随车机械师和地面工作人员之间的通话。由于随车机械师及地面工作人员可能出现在动车所存车场和检修库中的任何地方,对动车所内进行模拟无线对讲信号增强覆盖的需求是整个场区的全覆盖。

2 关键技术

2.1 同频中继设备干扰消除技术

为解决动车所既有模拟无线对讲系统同频干

扰及信号自激的问题,对中继放大信号回波抑制技术及相关设备方案进行了研究。

复杂地理环境下的同频中继自激效应强度计算模型如下:

$$P(r, \theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{8\pi\eta_0} \left| \sum_{i=1}^{N_{\text{rays}}} E_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \sqrt{G(\theta_i, \varphi_i)} \right|^2 \quad (1)$$

其中, $G(\theta_i, \varphi_i)$ 是无线信号接收天线的增益, λ 是接收信号波长, η_0 是真空的特性阻抗, θ_i 和 φ_i 是无线信号波束 i 的俯仰角和方位角, E_i 是无线信号波束 i 的场强。

无线信号接收天线处的场强 E_i 计算模型如下:

$$E_i(\theta_i, \varphi_i) = \begin{bmatrix} E_{\theta_i}(O_s) \\ E_{\varphi_i}(O_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\theta_i} \\ T_{\varphi_i} \end{bmatrix} \cdot \sqrt{\frac{\eta_0 P_r G_M}{2\pi}} \begin{bmatrix} E_{\theta_i}(\theta_s, \varphi_s) \\ E_{\varphi_i}(\theta_s, \varphi_s) \end{bmatrix} \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (2)$$

其中, P_r 是发射天线的发射功率, G_M 是发射天线的增益, r 是发射天线到接收天线之间的距离, $E_{\theta_i}(\theta_s, \varphi_s)$ 和 $E_{\varphi_i}(\theta_s, \varphi_s)$ 是发射天线归一化天线图的水平和垂直极化分量, T_{θ_i} 和 T_{φ_i} 则是同频信号传播过程中水平和垂直极化分量的损耗(包括路径损耗)。

从式(2)中可以看出,多束同频信号同时抵达接收天线处时,会产生信号的相互叠加,而由于信号在发射端的初始相位不完全相同,不同信号在叠加过程中相互干涉,造成了同频中继干扰。

在本文无线对讲同频中继系统的前端同频中继设备中,数字通道部分通过时分双工(time-division duplex, TDD)的方式完成数字对讲信号的上下行业务。同频中继设备根据接收信号在逻辑上自动完成系统同步,抗干扰控制示意图如图3所示,当同频中继设备发射空闲时,其数字信号处理单元关断功率放大器(power amplifier, PA)放大电路,并在时间域上将信号发射和接收

以时隙方式进行分离，即可消除 PA 无信号时的底噪干扰和自激干扰。

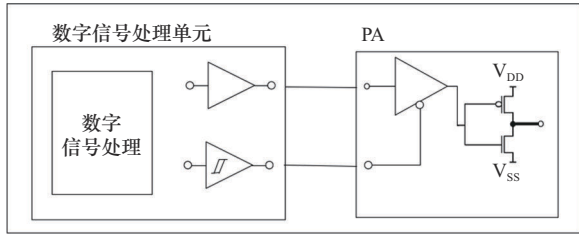


图3 抗干扰控制示意图

在本文无线对讲同频中继系统的前端同频中继设备中，模拟通道部分则需在同频中继设备控制单元中添加主动控制协议，并通过协议规定距离发射手持终端最近的天线为接收天线，其他天线为发射天线，当模拟站端设备接收到上行信号后，同频中继设备主动控制接收到信号的天线只收不发，而其他天线只发不收，以此最小化干扰源数量，同时通过在同频中继设备中利用集成算法对接收天线的接收信号进行比对处理，采用自适应滤波逻辑滤除自身已发射过的信号，人为增加干扰信号的传播损耗，从而实现同频中继的自激消除。其中自适应滤波逻辑如图4所示，接收的模拟对讲信号 $X(k)$ 包含移动终端发送的信号和同频中继设备自身发送的延时信号 $d(k)$ ，同频中继设备中继工作时缓存发送信号 $y(k)$ ，并通过与信号 $d(k)$ 进行比较产生信号 $e(k)$ ，信号 $e(k)$ 经过自适应算法后，更新滤波器 $W(k)$ 的参数，通过抑制回波信号实现防自激效果。

计算时域回波信号为：

$$e(t) = \sum_i [A_i \cdot g(t - \tau_i) \cdot \cos(2\pi f_i t + \phi_i)] \quad (3)$$

其中， $e(t)$ 为在时间 t 的时域回波信号， A_i 为回波信号中第 i 个分量的幅度， $g(t - \tau_i)$ 为时域响应函数， τ_i 为回波信号中第 i 个分量的时延， f_i 为回波信号中第 i 个分量的频率， ϕ_i 为回波信号中第 i 个分量的相位。

所述时域响应函数 $g(t - \tau_i)$ 为：

$$g(t - \tau_i) = A_i \cdot \sin(2\pi f_i(t - \tau_i) + \phi_i) \cdot e^{-\beta_i(t - \tau_i)^2} \quad (4)$$

其中， β_i 为回波信号中第 i 个分量的衰减因子。

计算频域回波信号为：

$$E(f) = \sum_i (A_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \cdot e^{j\phi_i}) \quad (5)$$

其中， $E(f)$ 为频率为 f 时的频域回波信号， A_i 为回波信号中第 i 个分量的幅度， j 为虚数单位，用于复数运算， τ_i 为回波信号中第 i 个分量的时延， ϕ_i 为回波信号中第 i 个分量的相位。

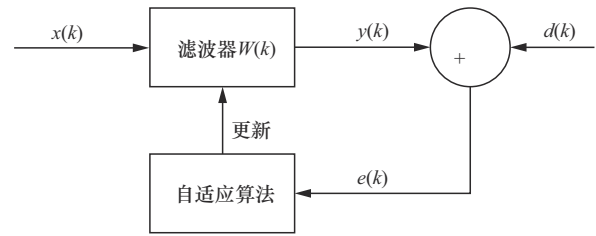


图4 自适应滤波逻辑

2.2 兼容数字及模拟终端设备

基于上述原理，本文提出了一套实时兼容数字信号和模拟信号的同频对讲中继设备。该设备集成了射频合路器、数字/模拟对讲频道隔离器、射频反向抵消器、低噪放、数字中频板以及射频放大器等核心组件，为高效稳定的无线对讲中继提供了设备基础。系统设备信号流向如图5所示。

该系统设备中，无线对讲信号经由天馈系统接收，经过射频合路器后，分别传输到数字/模拟对讲频道隔离器，由于数字/模拟对讲频道所用的无线频段不同，该隔离器实质上是一个频率选择性环形隔离器。经隔离器后，信号经射频保护器、射频反向抵消器、低噪放后抵达数字中频板，该数字中频板是一块具有数字信号处理能力的现场可编程门阵列（field-programmable gate array, FPGA）。经由数字中频板进行信号处理后，输出的信号分为两部分：一部分反向回到射频反向抵消器中，通过调整时延和将信号相位反向，以抵消重复接收的信号，以免接收到的信号被循环放大，通过自适应滤波逻辑，减少无线信号自

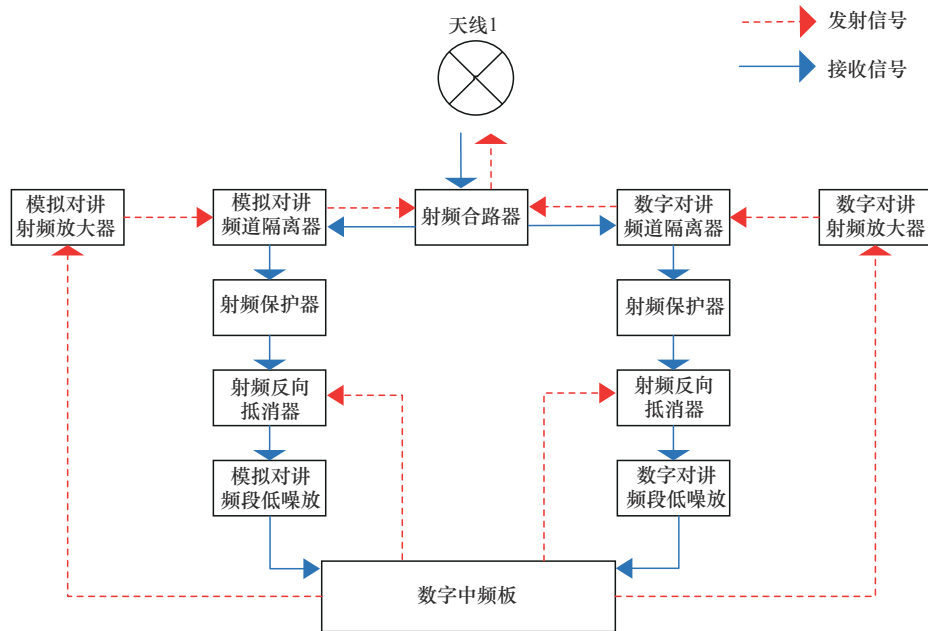


图5 系统设备信号流向

激效应对系统带来的影响；另一部分信号为输出信号，经由射频放大器对信号进行放大后，传输通过隔离器和射频合路器，到达天馈系统输出中继放大信号。

3 新系统设备功能及技术条件

3.1 新系统设备功能

发射机电实现功能见表2，与原系统设备相比，不仅将数字、模拟独立的系统融合成了一套设备，并且该系统有效提供了无同频干扰的射频中继信号进行覆盖。

3.2 新系统设备技术条件

新系统设备主要由数字对讲频道单元及模拟对讲频道单元组成。发射机及接收机电性能指标

(数字)见表3，发射机及接收机电性能指标(模拟)见表4。数字、模拟对讲频道单元技术指标不低于表3和表4的要求。

4 系统设备应用效果

4.1 系统设备现场性能测试

为验证研发的新系统设备在大范围覆盖使用上是否克服了自激干扰的问题，本次测试分别在首个上盖动车所的六线检查库、调度值班室内及存车场内3处地点，设置了3台系统设备，设备间最短直线距离为50 m左右，最远直线距离为3 km左右。

测试中利用既有数字无线对讲机和模拟无线对讲机分别进行了全场内近距离、远距离的通信

表2 发射机电实现功能

数字模式下主要功能	模拟模式下主要功能
各信道同时独立通话，不同频率互不影响	各信道同时独立通话，不同频率互不影响
点对多点语音通信业务，调度台或数字移动终端与同一组数字移动终端可进行组呼，不影响其他组的通信	点对多点语音通信业务，调度台与同一频率的模拟移动终端可进行组呼，不影响其他频率的通信
系统应具备信号覆盖区域范围内多中继台同步进行同频中继放大的功能，为移动数字对讲设备提供无同频干扰的同频中继信号覆盖	系统应具备信号覆盖区域范围内多中继台同步进行同频中继放大的功能，为移动模拟对讲设备提供无同频干扰的射频中继信号覆盖

表 3 发射机及接收机电性能指标(数字)

发射机电性能指标 (数字)				接收机电性能指标 (数字)				
序号	项目		指标要求	序号	项目		指标要求	
1	最大标称发射功率		≤25 W	1	灵敏度	正常条件	≤-117 dBm@BER 5×10 ⁻²	
2	功率变化容限	正常条件	±1.5 dB	2	高电平信号输入状态下	极限条件	≤-111 dBm@BER 5×10 ⁻²	
		极限条件	+2/-3 dB			接收机的误码率	≤1×10 ⁻⁴	
3	载波频率误差	正常条件	200 MHz≤f<500 MHz	3	共信道抑制		≥-12 dB	
		极限条件	200 MHz≤f<500 MHz			4	邻道选择性	≥60 dB
4	调制邻道功率		±12.5 kHz	≤-60 dB	5	杂散响应抗扰性		≥70 dB
5	瞬态切换邻道功率 (仅适用于 TDMA 类设备)		±12.5 kHz	≤-50 dB	6	互调响应抗扰性		≥65 dB
6	关时隙功率 (仅适用于 TDMA 类设备)			≤-57 dB	7	阻塞		≥84 dB
7	发射机杂散发射	天线端口	9 kHz≤f<1 GHz	≤-36 dBm	8	接收机杂散发射	9 kHz≤f<1 GHz	≤-57 dBm
			1 GHz≤f≤12.75 GHz	≤-30 dBm			1 GHz≤f≤12.75 GHz	≤-47 dBm

表 4 发射机及接收机电性能指标(模拟)

发射机电性能指标 (模拟)			接收机电性能指标 (模拟)		
序号	项目	指标要求	序号	项目	指标要求
1	载波频率误差	≤5×10 ⁻⁶	1	参考灵敏度 (双工) /μV	不低于参考灵敏度 3 dB
2	载波额定功率/W	≤25(5~25 W 可调)	2	共信道抑制/dB	≥-8
3	杂散射频分量/dBm	≤-36(9 kHz~1 GHz)	3	阻塞/dB	≥90
		≤-30(1 GHz~4 GHz)			≥90
4	邻道功率 (比值) /dB	≤-70	4	邻道选择性/dB	≥75
5	调制限制/kHz	≤5	5	杂散响应抗扰性/dB	≥70
					≥75
			6	互调抗扰性/dB	≥75
					≥65

呼叫。结果显示, 装备中继设备前, 数字无线对讲机和模拟无线对讲机普遍通信距离在 1 km 左右, 信号受动车所内车辆遮挡干扰严重, 声音嘈杂、断续; 装备中继设备后, 系统在两个不同工作频段下均表现出良好的语音通信效果 (误码率小于 1%), 证明该系统在不同间距中、设置多台设备的情况下, 克服了大功率模拟中继设备在上

盖动车所场景下覆盖质量不佳的问题, 同时具备兼容数字与模拟无线对讲中继的功能。

4.2 系统设备无线覆盖效果

根据本文系统的现场功能测试结果可以看出, 采用数字信号处理技术消除了模拟同频中继干扰, 新研发系统可以通过设置多套设备解决上盖动车所大范围覆盖问题, 从而实现了整体系统

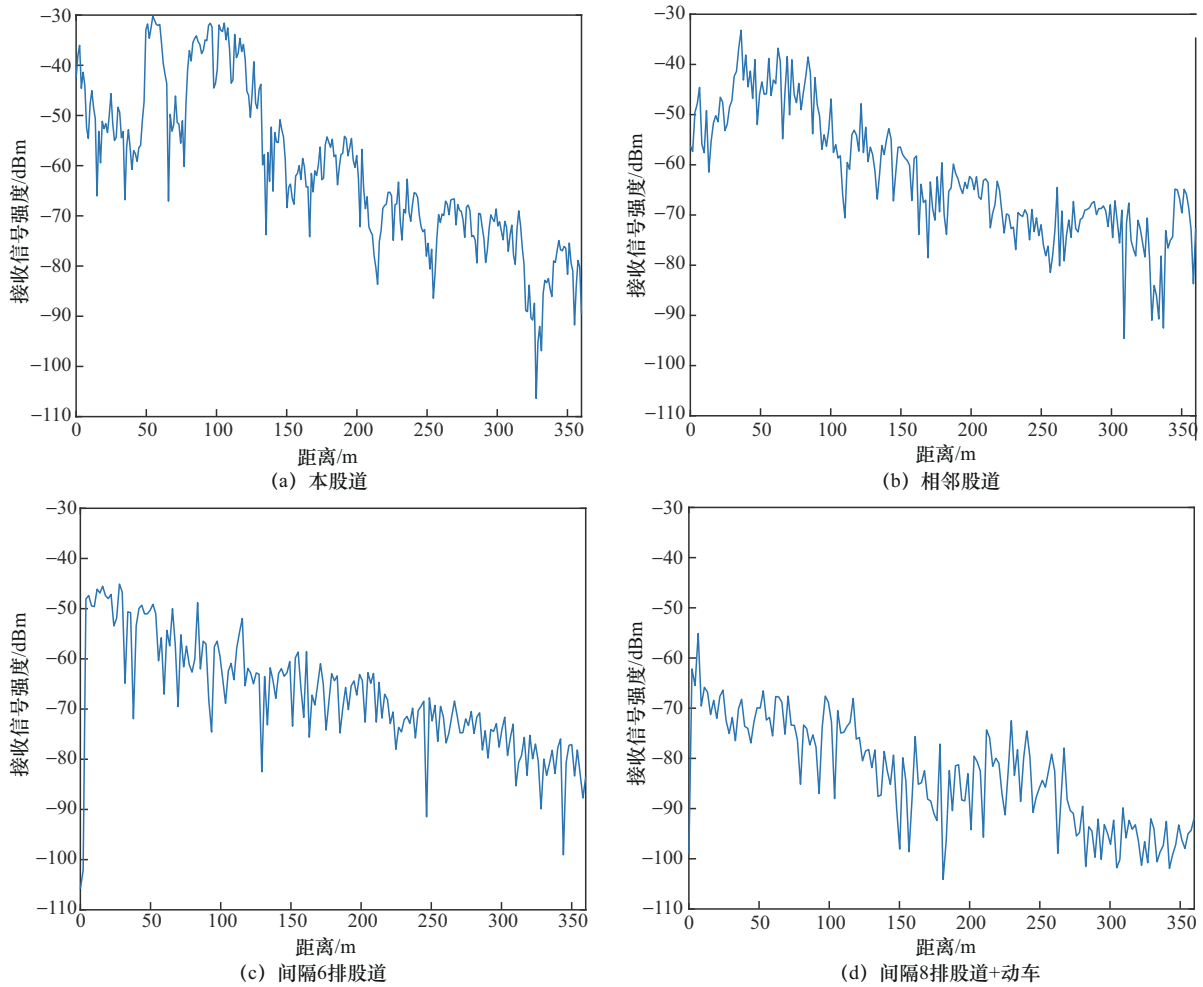


图7 无线对讲信号覆盖测试结果

下。系统设备的点位布设间距控制范围可参考上述值。

(4) 动车遮挡是影响接收信号强度的关键因素。当间隔6排股道的接收信号波形与相邻股道接收波形比较时，可见下降缓慢；但当间隔8排股道+停车动车遮挡后，下降了近10 dBm。

5 结束语

本文以首个上盖动车所的通信无线对讲系统为例，通过深入研究和实地测试，提出了一套优化的中继方案，并成功验证了其在动车所内的应用效果。

经过现场试验验证，得出以下结论。

首先，优化后的无线对讲系统在覆盖范围和通信质量上均取得了显著提升，无论是在数字对讲还是模拟对讲模式下，都能实现超大范围的稳定通信。

其次，该优化方案不仅解决了首个上盖动车所的实际问题，还为客运站、货运站、物流园区、港口等类似环境下的无线通信系统设计提供了技术积累和参考，有助于推动全国站场无线通信的相关技术创新和发展。

最后，通过本文研究的实施，为城市建设和铁路运维的无线通信提供了更加可靠和高效的解决方案，有助于提升工作效率和通信质量，为未来的无线通信系统设计提供了有益的借鉴和



启示。

未来,随着无线通信技术的不断进步和应用场景的不断拓展,将继续探索和研究更加先进、高效的通信解决方案,为城市建设和铁路运维提供更加完善的通信保障。

参考文献:

- [1] 李津汉. 基于射线跟踪技术的上盖物业动车所无线覆盖预测研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(9): 33-40.
LI J H. Wireless coverage prediction for EMU depot with superstructures based on ray tracing technology[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(9): 33-40.
- [2] 田川. 一种适用于铁路专用线的数字无线列调系统[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15(2): 24-28.
TIAN C. Radio train dispatching communication system for special railway lines[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(2): 24-28.
- [3] 李子嘉. 不同场景下的动车运用所检查库设计研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(25): 133-136.
LI Z J. Research on the design of motor vehicle application inspection library in different scenes[J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(25): 133-136.
- [4] 中国铁路总公司. 中国铁路总公司关于调整铁路专用无线通信业务和频率有关工作的通知[Z]. 2014.
China Railway Corporation. Notice of China railway corporation on the adjustment of railway dedicated wireless communication service and frequency[Z]. 2014.
- [5] 王英慧, 秦平. 地面400 MHz数字通信中继系统研究[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(12): 68-72, 78.
WANG Y H, QIN P. Research on ground 400 MHz digital communication relay system[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(12): 68-72, 78.
- [6] 吴宇, 白晓楠, 赵国斌. 铁路车载400MHz数字同频对讲中继设备及测试[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(1): 46-50, 54.
WU Y, BAI X N, ZHAO G B. Railway onboard 400 MHz digital same frequency intercom repeater equipment and its testing[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(1): 46-50, 54.
- [7] 路建华, 王玲, 任小英. 大秦铁路无线通信用频应用研究[J]. 数字通信世界, 2024(3): 127-129.
LU J H, WANG L, REN X Y. Research on the application of wireless communication frequency in Daqin Railway[J]. Digital Communication World, 2024(3): 127-129.
- [8] 蔡耀广, 余勇, 曹小冬, 等. 屏蔽环境对讲通信覆盖范围拓展应用研究[J]. 电波科学学报, 2017, 32(4): 467-473.
CAI Y G, YU Y, CAO X D, et al. Expanding coverage of talk-back com communication in shielding environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017, 32(4): 467-473.
- [9] 杨永东. 铁路编组站450MHz无线列调系统存在的问题及对策[J]. 铁道通信信号, 2013, 49(8): 60-62.
YANG Y D. Problem and improvement of 450MHz wireless communication system in marshalling yard[J]. Railway Signalling & Communication, 2013, 49(8): 60-62.
- [10] LI J H, LIU L H, GUAN K. Narrow-band radio propagation prediction based on a highly accurate three-dimensional railway environment model[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022: 3341316.
- [11] 王雪, 李津汉, 路晓彤, 等. 铁路动车运用所上盖物业无线系统优化分析[J]. 长江信息通信, 2024, 37(11): 172-174.
WANG X, LI J H, LU X T, et al. Optimization analysis of wireless system of EMU depot with superstructures[J]. Changjiang Information & Communications, 2024, 37(11): 172-174.
- [12] 刘柳, 刘田, 李洋, 等. 相控阵组网测控同频中继射频自干扰抑制技术[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(1): 307-315.
LIU L, LIU T, LI Y, et al. Radio frequency self-interference suppression technology for phased array networking tracking telemetry and command relay with co-frequency[J]. Systems Engineering and Electronics, 2025, 47(1): 307-315.
- [13] XIE C S, WEI W B, ZHU Y J, et al. Wear reduction damage mitigation and operational reliability analysis of rotary tiller knives based on the self-excited vibration theory[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 109991.
- [14] LIU H, WU W S, ZHANG D Y. Feasibility study of high-efficiency self-excited vibration cutting for roughing Inconel 718[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 1429-1451.
- [15] LIU Y, DENG Y J, ZHANG H D, et al. Study on the evolution law of the vortical structure inside of oscillation chamber of self-excited oscillation pulsed supercritical carbon dioxide jet (SEOP SC-CO₂ jet) and its influence on pulsed characteristics[J]. Energy, 2025, 314: 134252.

[作者简介]



王伟力(1988-),女,中铁第四勘察设计院集团有限公司高级工程师,主要研究方向为铁路通信。