

文章编号: 1674—8247(2024)04—0069—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.04.013

铁路隧道内无线通信天馈系统替代漏泄电缆的覆盖设计与试验研究

陈水庆 苏光德

(东南沿海铁路福建有限责任公司, 福州 350000)

摘 要:无线电波发射和接收末端设备主要有天线和漏泄电缆两种。目前我国铁路无线通信在隧道内信号覆盖采用隧道壁吊挂漏泄同轴电缆延伸覆盖设计方案,该方案不仅建设阶段建设成本高、施工难度大,而且后续漏泄同轴电缆更新改造成本及施工难度将比建设阶段投入更大。采用天馈系统替代漏泄电缆实现隧道内无线信号覆盖,不仅可以大幅减少铁路建设和后期更新改造费用,还有利于日常维护和故障快速处理。在高速铁路 CTCS-3 级列控线路上,可实现无线网络冗余保护覆盖,确保隧道内无线网络更加安全可靠。

关键词:铁路隧道;无线覆盖;设计优化

中图分类号:U285.2 文献标志码:A

Research on the Design and Experimental Scheme of Replacing Leakage Cable with Antenna Feedback System for Wireless Communication Network Coverage in Railway Tunnels

CHEN Shuiqing SU Guangde

(Southeast Coastal Railway Fujian Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: The transmission and reception terminals of radio waves primarily consist of two approaches: antennas and leaky cables. Currently, China's railway wireless communication within tunnels adopts a design scheme that involves hanging leaky coaxial cables along tunnel walls to extend signal coverage. However, this design not only incurs high construction costs and poses significant construction challenges during the initial stage, but also entails even greater costs and difficulties for subsequent upgrades and renovations of leaky coaxial cables compared to the initial construction phase. Replacing leaky cables with antenna-feeder systems for wireless signal coverage within tunnels can not only substantially reduce railway construction and later-stage upgrade expenses but also facilitate routine maintenance and rapid troubleshooting. In high-speed railway CTCS-3 train control lines, this approach enables redundant protection coverage for wireless networks, thereby ensuring a more secure and reliable wireless network within tunnels.

Key words: railway tunnel; wireless coverage; design optimization

目前,我国铁路线在隧道内无线通信都是在隧道壁上吊挂漏泄同轴电缆(以下简称“漏缆”)实现网络覆盖。铁路现使用的 450M 无线通信频点于 2012 年

使用到期已被国家收回,我国铁路系统已在规划制定 5G-R 高速宽带铁路专用数字移动通信技术运用标准,今后铁路无线通信系统建设和更新改造将采用新技

收稿日期:2024-02-01

作者简介:陈水庆(1971-),男,高级工程师。

引文格式:陈水庆,苏光德. 铁路隧道内无线通信天馈系统替代漏泄电缆的覆盖设计与试验研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4):69-75.

CHEN Shuiqing, SU Guangde. Research on the Design and Experimental Scheme of Replacing Leakage Cable with Antenna Feedback System for Wireless Communication Network Coverage in Railway Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4):69-75.

术标准。本文对铁路隧道内无线通信网络采用天馈线替代漏缆覆盖组网设计及试验方案进行研究,并提出设想和建议。

1 我国铁路无线通信组成运用描述

目前我国铁路专用无线通信为 450M(早期普速铁路)和 GSM-R(900M)两个无线通信制式。我国于 2000 年底将 900M 的数字移动通信 GSM-R 系统作为我国铁路专用无线通信的发展方向,系统引进和运用经历了研究与探索、技术决策、技术试验、标准制定、网络建设与运营 5 个阶段。该系统先后在大秦铁路、青藏铁路、胶济铁路成功试验运用后,开始在全路新建和改造铁路项目中设计运用^[1]。截至目前,我国铁路 GSM-R 系统已开通运用里程达到 4.5 万 km 以上。

1.1 GSM-R系统组成架构

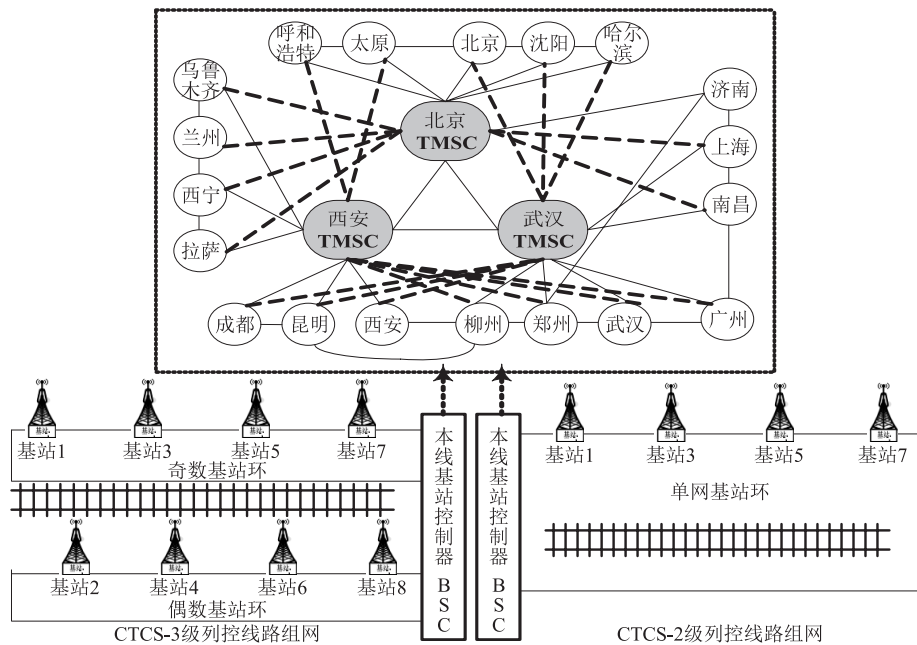


图 1 铁路 GSM-R 系统组网架构示意图

1.2 铁路隧道内无线通信覆盖组成架构及设计方案

目前铁路隧道内的无线网络采用无线中继信号放大设备(光纤直放站或其他无线信号放大设备)加漏缆连接组网方式将无线网络延伸至隧道内覆盖,隧道内无线信源取自隧道外基站,通过直放站近端机接入至隧道内直放站远端机^[3]。每座隧道内有铁路专网无线通信漏缆 1 条和电信运营商公众移动通信网络覆盖(以下简称“公网覆盖”)漏缆 2~3 条。铁路专网漏缆吊挂在隧道侧壁距轨面 4.5~4.8 m(公网漏缆 2.2~2.5 m)位置,每条漏缆按 1 m 间距在隧道壁上安装 1 套漏缆吊挂卡具(打孔固定)吊挂漏缆。设计方案如图 2 所示。

铁路 GSM-R 无线通信系统由核心网、交换网、基站子系统、业务与运营支撑子系统等组成。系统与有线调度通信相结合为铁路运输指挥提供语音通信、调度通信、列车控制数据传输、调度命令和无线车次号校核信息传送等业务。各铁路线路设置的无线通信基站子系统(BSC+BTS)接入所在铁路局的移动交换局(MSC)。按铁路运营速度和列控等级划分,铁路无线通信网络覆盖有两种组网方案:一是铁路线路列控系统是二级(CTCS-2)及以下的线路,GSM-R 基站子系统采用单网无线覆盖设计方案;二是铁路线路列控系统是三级(CTCS-3)及以上的线路,GSM-R 基站子系统采用单网交织冗余或同址双基站覆盖设计方案^[2]。铁路 GSM-R 系统组网架构如图 1 所示。

2 铁路隧道空间布局设计概况

对于普速铁路隧道,内燃机牵引高度 6 m、双线隧道宽 12.88 m(单线 4.88 m);电力机车牵引高度 6.55 m、双线隧道宽 12.88 m(单线 4.88 m)。有 GSM-R 系统的线路在隧道两侧(单线铁路只有一侧)每隔 1 km 或 1.5 m 交错设置通信设备洞室,为无线设备提供安装条件,其他普速铁路隧道内只设置避车洞^[4]。

对于高速或客运专线铁路隧道,采用动车或电力机车牵引,隧道高 8.78 m、宽 12.88 m。在隧道两侧每隔 1 km 或 1.5 km 交错设置通信设备洞室(两侧设备洞室交错间距为 500 m 或 750 m),为无线通信设备提

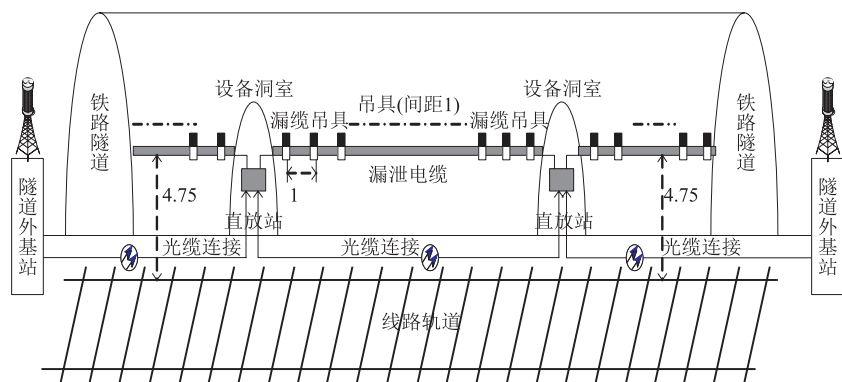


图 2 隧道内无线信号漏缆覆盖组网示意图(m)

供安装条件。

3 铁路隧道内采用天馈线替代漏缆无线覆盖方案

3.1 隧道内天馈线覆盖改造方案

已开通运营铁路:隧道内无线通信漏缆达到更新

改造年限,不再采用漏缆,而采用天馈线覆盖进行改造。由于既有铁路隧道内设备洞室位置已固定且设备已开通运用,更新改造只能在既有无线设备洞室两侧安装上下行隧道天馈线替代漏缆覆盖,隧道内无线设备布局 and 数量不作调整。隧道内天馈线替代漏缆覆盖方案如图 3 所示。

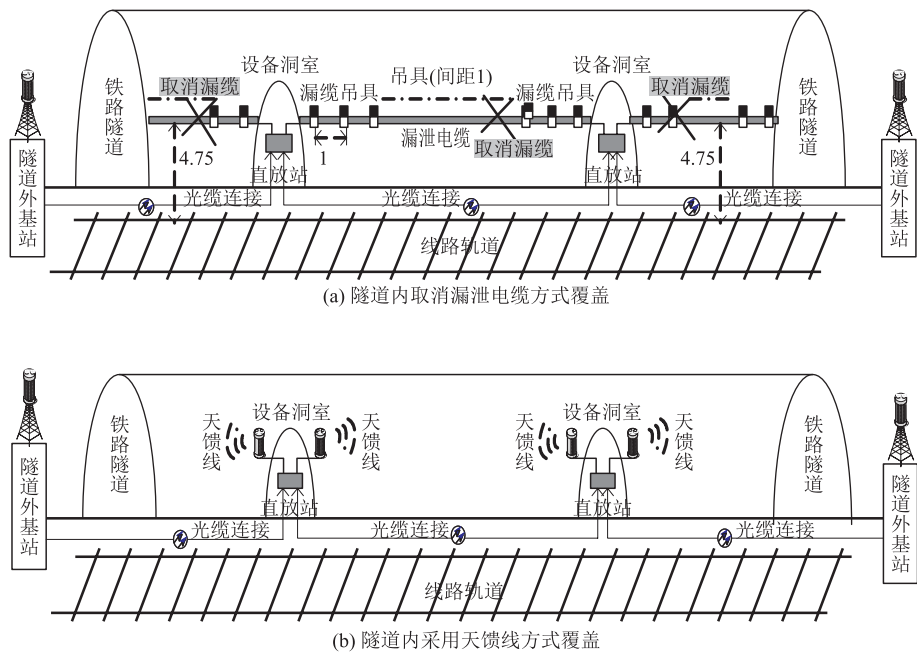


图 3 隧道内采用天馈线替代漏缆无线覆盖示意图(m)

新建铁路线路:对于新建铁路线路,可先根据无线设备功率、运用频率、天线增益及隧道空间场景等因素进行理论计算和仿真设计试验,确定隧道内天馈线覆盖所能达到的有效覆盖距离和设备配置组网方案^[5]。方案可选择长大隧道进行现场实际场景指标测试(试验验证方案见本文第 5 章),进一步验证隧道内采用天馈线覆盖所能达到的有效覆盖距离,为站前隧道工程设备洞室布局设计和无线设备配置提供准确

数据,减少站前工程通信设备洞室数量 and 建设费用。目前高速铁路隧道内通信设备洞室两侧按 1 km 或 1.5 km 固定交错间距配置。

3.2 隧道内天馈线无线覆盖组网方案

3.2.1 CTCS-2 级及以下线路隧道内无线覆盖组网方案

按照铁路无线设计规范,列控为 CTCS-2 级及以下的线路无线网络覆盖,采用单网覆盖即可满足铁路

运用要求。在隧道内一侧洞室按照有效覆盖距离设置无线直放站设备站址,在每个直放站设备洞室两侧各设置一副上下行定向天馈线。如果部分长大隧道中间区段弯曲度较大时,可缩短此区段的天馈线覆盖距离。组网覆盖布局方案如图 4 所示。

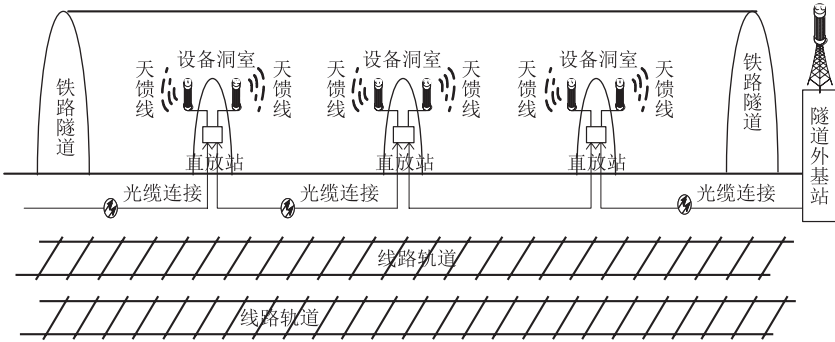


图 4 CTCS-2 级线路隧道内无线单网交织天馈线覆盖组网示意图

3.2.2 CTCS-3级及以上线路隧道内无线覆盖组网方案

按照铁路无线设计规范,列控为 CTCS-3 级及以上的线路无线网络覆盖,应采用单网交织覆盖或同址双网覆盖设计方案。隧道内采用天馈线覆盖,无线设备及天馈线需在隧道两侧洞室交错安装。

(1)隧道内采用单网交织覆盖方案

在隧道内两侧洞室按照有效覆盖距离,交错设置无线直放站设备站址,在每个直放站设备洞室两侧各

设置一副上下行定向天馈线,两侧设备洞室直放站设备和天馈分别接入隧道外的奇数基站环和偶数基站环,实现隧道内无线信号交织冗余覆盖,隧道内任何一侧或一处直放站设备或天馈损坏不影响隧道内无线信号覆盖运用。如采用漏缆覆盖,当一段漏缆损坏或故障,则该区段无线信号覆盖中断,从而影响无线通信正常运用,不能做到真正意义上的冗余保护覆盖。隧道内无线单网交织覆盖布局如图 5 所示。

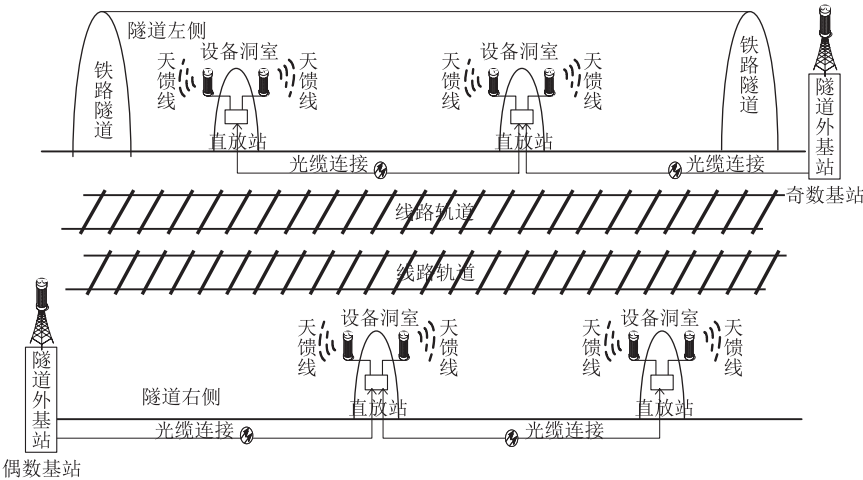


图 5 CTCS-3 级线路隧道内无线单网交织天馈线覆盖组网示意图

(2)隧道内采用同址双网覆盖方案

在隧道内两侧壁按照有效覆盖距离对称设置无线设备站址,在每个直放站设备洞室两侧设置各一副上下行定向天馈线,两侧设备洞室直放站设备和天馈分别接入隧道外同址双基站环,实现隧道内无线信号双网重叠冗余覆盖,隧道内任何一侧或一处直放站设备或天馈损坏不影响隧道内无线信号覆盖。

3.3 天馈线覆盖和漏缆覆盖建设对比

尽管隧道内采用天馈线和漏缆覆盖两种方式均

可满足铁路运输生产通信需求,但从建设、维护、更新改造费用等方面进行比对分析,采用天馈线覆盖具有较为明显的优势。

3.3.1 新建线路

针对 10 km 隧道,漏缆覆盖方案总造价约为 120 万元,单价约 12 万元/km,涵盖设备及建安工程费用。而采用天馈线方案,每 km 配置两副隧道专用天馈线(单幅覆盖 0.5 km),该专用天馈线约 2.5 万元/副(含固定支架及建安费),CTCS-2 级列控线路需 20 副

总计 50 万元, CTCS-3 级列控线路则需 40 副总计 100 万元。相较于漏缆方案, 天馈线方案在单网覆盖下可节省约 70 万元, 单网交织或同址双网覆盖则可节省约 20 万元。此外, 天馈线方案施工量较小, 且周期更短。

3.3.2 运营线路更新改造

通信设备设施到了使用年限须更新改造, 在运营铁路长大隧道内进行漏缆更新改造需要投入比工程建设阶段高出数倍的人工费和装备费。采用漏缆覆盖改造, 需在隧道壁上每隔 1 m 连续打孔安装漏缆吊具, 吊具安装好后吊挂漏缆, 相较于天馈线覆盖改造, 不仅施工周期长、施工费用高(比新建铁路高数倍), 且在既有铁路上施工安全风险较大。

3.3.3 运营维护

铁路隧道作为自然电磁屏蔽体, 能有效屏蔽外部电磁干扰和雷击破坏。天馈线覆盖在故障时便于携带设备快速更换, 维护简便。相较之下, 漏缆覆盖故障定位复杂, 更换难度大, 维护单位采用天馈线覆盖方式在故障识别与解决上更具优势, 维护管理更为高效。

4 隧道内天馈线无线覆盖技术问题

由于我国铁路隧道内无线网络广泛采用漏缆覆盖, 高速铁路隧道内采用天馈线覆盖暂未实际运用过。因此, 采用天馈线替代漏缆覆盖设计方案需在新建线路或运营线路进行覆盖指标测试和运用试验。试验验证需研究解决隧道天馈线三个方面的技术问题: 一是隧道内天馈线及其安装方案须经得起高速列车最高速度的活塞风压(天馈线及安装方式须在国家

风洞试验室做抗风压测试并合格); 二是天馈线技术性能需满足隧道内特殊运用环境(专用天馈线); 三是确定单幅天馈线在隧道内场景最大有效覆盖距离, 单幅天馈线最大覆盖距离是确保新建铁路隧道内两个设备洞室开设距离的重要依据。如洞室距离设置太近会造成建设费用增加, 如设备洞室距离设置太远无线信号覆盖可靠性得不到保证。

4.1 隧道内天馈线抗风压及性能特殊设计

由于隧道内运用环境特殊, 在隧道内安装的天馈线应具备抗风压、抗风、抗老化和防水、防尘、防腐蚀等性能^[6], 天馈线及外壳应采用透波性能良好的材料制作, 实现最小程度的无线信号衰减。同时安装的天馈线须充分考虑高速列车产生的活塞风压破坏影响。鉴于高速铁路隧道内大量的照明灯具、配电箱等设施安装在隧道壁上, 能满足隧道环境要求, 因此隧道天馈线安装可以参考隧道内照明灯具等其他设施安装方案并通过设计优化确保天馈线在隧道内的安全运用。

4.1.1 天馈线物理性能及固定方式

隧道天馈线的结构应有利于减小天线在隧道内的迎风面积, 宜采用圆柱或面状型贴壁天馈线并横向安装在设备洞室两端的隧道侧壁上。天馈线安装高度距离轨面 4.5 ~ 5 m, 天馈线最外边缘不应超过隧道设施规范限界(与隧道壁距离不应超过 15 cm)^[7]。天馈线底座与隧道侧壁采用化学锚栓加防松动螺栓安装固定(每座不小于 4 处)。天馈线安装座架应采用抗风压、抗腐蚀等级高的金属材质, 天馈线护罩应采用透波性能强且抗风压、抗腐蚀的非金属材料。天馈线架构及安装方式如图 6 所示。

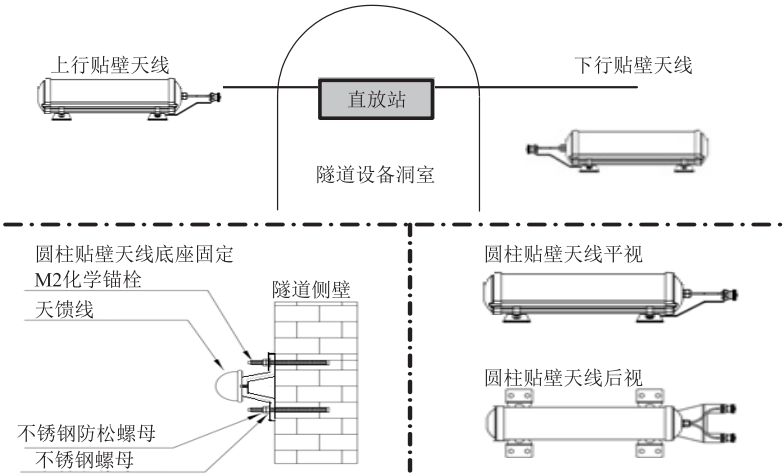


图 6 隧道内贴壁天馈线连接及固定安装示意图

4.1.2 天馈线主要技术性能要求

铁路隧道天线应具有将信源设备发射出来的导行电磁波,变换成在铁路隧道内自由空间中传播的电磁波,同时将接收到的电磁波转换成导行电磁波传送给信源设备的功能。不同无线通信运用频段对天馈线技术性能指标要求是不一致的。针对铁路 GSM-R 无线通信系统的隧道天馈线主要技术性能指标建议:隧道天线极化方式为双极化,端口输入阻抗应为 50 Ω,轴向交叉极化比不应小于 15 dB,增益不小于 11 dBi,天线的功率容量不应小于 200 W,端口处电压驻波比不应大于 1.5。因铁路隧道空间是均匀直线洞型状,建议铁路隧道内天馈线宜采用螺旋型天线。螺旋天线的优点:一是具有宽带特性,能够满足多种频段的应用需求;二是方向性较为突出,能够很好地控制信号的辐射方向和范围;三是极化多用性,螺旋天线可以以不同的极化方式工作,适用于不同的通信系统和工作需求;四是强抗干扰能力,能够抵御干扰信号对天线的影响;五是体积小巧,相较于其他常用的天线类型,螺旋天线体积和尺寸更小,便于布置和安装^[8]。

4.2 隧道内天馈线无线覆盖距离的计算

天馈线在隧道内最大有效覆盖距离是实现替代方案和减少建设费用的重要依据。由于隧道内是一个洞型场景,无线电波在隧道内传播距离将受隧道结构场景影响,无线电波发射和接收距离与设备功率、天馈线增益、运用频率及传播空间环境因素等相关,须先进行模型理论计算再到现场实际场景试验验证。根据无线电传播 Okumura-Hata 波导传播和菲涅尔区域无线电波椭球体传播模型原理,可从模型理论上计算出无线电波在隧道中传播区域最大距离^[9]。

(1) 近区采用菲涅尔区域无线电波椭球面传播距离计算公式为:

$$d_{NF} = \max(\frac{h^2}{\lambda}, \frac{w^2}{\lambda}) \tag{1}$$

式中: d_{NF} ——传播距离(m);
 h ——隧道空间高度(m);
 w ——隧道宽度(m);
 λ ——波长(m)。

覆盖距离与隧道的高或宽成正比,而与波长成反比。根据隧道空间构造数据和使用无线电波长可以计算出近区空间无线传播距离。

(2) 远区采用 Okumura-Hata 波导传播模型距计算公式为:

$$L_p = 69.55 + 26.16 \times \log F - 13.82 \times \log Hb - \alpha(Hm) + (44.9 - 6.55 \times \log Hb) \times \log d \tag{2}$$

式中: L_p ——准平滑地形电波传播损耗中值(dB);
 F ——载频工作频率(MHz);
 Hb ——基站天线有效高度(m);
 Hm ——移动台天线有效高度(m);
 d ——移动台与基站间距(km);
 $\alpha(Hm)$ ——移动台天线高度因子(当 $H = 1.5$ m 时, $\alpha(H) \approx 0$)。根据天线高度、使用频率可计算出远区空间无线传播距离。

将铁路隧道内空间结构、电磁波长、天线高度等数据带入计算式,按照目前铁路隧道内在用的无线设备及天馈线,在隧道内有效覆盖距离约为 436 m。如果调整无线设备功率、天馈线增益并采用专用螺纹天馈线,天馈线在隧道内覆盖距离将进一步提高。

(3) 隧道内设备洞室间距 1 km 线路方案

每个设备洞室均配置两副定向螺纹天馈线(上下行方向),两个设备洞室 1 km 空间范围利用两副天馈线面对面各覆盖 0.5 km 空间范围。如果现场测试各项技术指标还有较大的冗余度,则可考虑跨过一个设备洞室,将覆盖测试距离增加到 2 km 洞室间距,每副天馈线面对面各覆盖 1 km 空间范围。如果该测试范围距离无线运用指标能满足要求,则可进一步减少隧道内无线设备配置数量和建设费用。覆盖测试方案见图 7 所示。

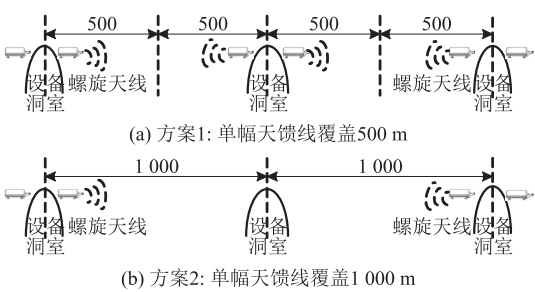


图 7 隧道内设备洞室间距 1 000 m 天馈线覆盖方案示意图(m)

(4) 隧道内设备洞室间距 1.5 km 线路方案

如单幅天馈线覆盖 1 km 距离的技术指标未满足运用要求,需在设备洞室间距 1.5 km 的隧道线路进行单幅天馈线 0.75 km 覆盖距离测试验证。在 1.5 km 间距的每个设备洞室配置两副定向螺纹天馈线(上下行方向),每副天馈线各覆盖 0.75 km 空间范围。如果测试指标能够满足运用要求,则不需要改变隧道内原无线设备位置布局(施工简单);如果不能满

足运用要求,针对已开通运营线路,则需将隧道内无线设备按左右两侧交错安装(施工复杂),无线设备覆盖距离减小到 0.75 km 范围,单幅天馈线覆盖距离为 0.375 km。对于新建线路,可根据有效覆盖距离确定隧道内通信设备洞室设置距离。覆盖测试方案如图 8 所示。

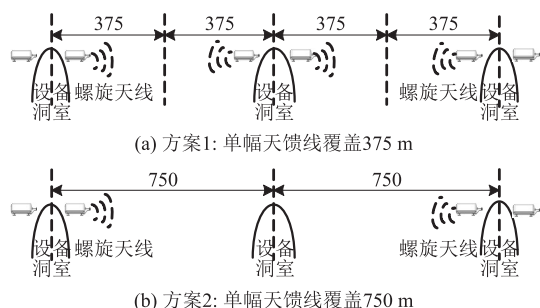


图8 隧道内设备洞室间距 1 500 m 天馈线覆盖方案示意图(m)

(5) 隧道内避车洞普速铁路方案(450M)

由于早期普速铁路隧道内只有避车洞没有专用设备洞室,避车洞密度较大且间距短,高速铁路或客运专线隧道内天馈线覆盖距离和方案可运用到普速铁路上进行设计,无需再进行测试试验。

5 隧道内天馈线覆盖现场测试验证

为确保理论设计满足铁路实际运用要求,须在现场实际场景对设计方案及覆盖技术运用质量指标进行测试验证。可选择一条在建高速铁路线路或开通运营高速铁路线路(行车密度适中)进行现场运用试验验证。测试试验可先选择在 CTCS-3 等级线路(GSM-R 无线通信是单网交织覆盖线路)进行测试验证,如 CTCS-3 等级线路隧道内无线通信天馈线覆盖测试验证指标满足运用要求,则 CTCS-2 等级铁路线路可不再进行测试验证。

5.1 测试和验证方案

5.1.1 天馈线设施安装

在隧道内无线设备洞室位置按照设计试验方案安装天馈线及连接电桥,电桥输出端分别接至天馈线和漏缆,天馈线安装在接近漏缆高度的隧道壁上(设备洞室口两端隧道壁上)。现场天馈线固定器件安装完成后须进行拉拔力测试。

5.1.2 测试验证方法

在新建铁路进入联调联试前,完成隧道内天馈线设备设施的安装,并确保静态下无线覆盖场强等基本指标测试合格。进入联调联试后,检测车首先检测采用漏缆的无线覆盖性能指标,漏缆覆盖检测过程要在

电桥上断开天馈线连接。在无线漏缆覆盖指标合格后断开电桥上漏缆连接,电桥上只连接天馈线。检测车在隧道内开始进行天馈线连接无线覆盖指标检测。隧道内天馈线覆盖检测先按理论计算最大间距进行测试,如天馈线最大覆盖距离指标测试能满足运用标准要求,则无需进行其他间距检测验证;如不能满足运用标准要求,则缩短天馈线覆盖间距进行检测验证,直至技术运用指标满足要求。测试过程须根据测试指标对基站、直放站发射和接收功率等参数进行调整优化。

鉴于已开通运营铁路隧道内已经是漏缆覆盖且在开通运用中,在隧道内安装好天馈线及电桥即可进行测试验证,测试验证方法同上。

5.2 测试内容及指标

5.2.1 场强覆盖测试

场强覆盖是衡量无线网络覆盖是否良好的基础指标。根据 TB 10088-2015《铁路数字移动通信系统(GSM-R)设计规范》规定,承载列控类数据业务的铁路线路场强覆盖标准为 95% 时间、地点概率条件下最小可用接收电平 P_{\min} 应高于 -92 dBm,其他铁路线路覆盖最小可用接收电平 P_{\min} 应高于 -98 dBm^[10]。

5.2.2 运用质量测试

运用质量测试包括网络服务质量、调度通信及其他运用业务测试,指标评定是按整条线路测试数据来综合评定。由于隧道内天馈线覆盖测试验证只是在一座 10 km 隧道内进行,在新建铁路可通过中国铁道科学研究院集团有限公司联调联试综合检测车进行检测获得对比数据;在开通运营线上可利用铁路局检测车进行业务运用指标测试,同时通过运营动车进行语音和数据业务实际运用验证。

5.2.3 天馈线间距测定

通过以上试验验证,如采用天馈线覆盖在技术指标及运用质量上达到或超越原漏缆覆盖的规范标准要求,则可确定隧道内天馈线覆盖的最大有效距离范围,可为设计单位提供准确设计依据和数据支持。

6 结束语

随着无线通信技术的不断的革新与应用,我国铁路已在研究、规划和试验 5G-R 铁路无线通信新技术,铁路无线通信系统即将进入全面升级改造阶段。本文对铁路隧道内无线通信网络采用天馈线替代漏缆覆盖方案进行理论探讨,并提出需进一步研究解决的问题。具体方案实施运用有待设计单位进行深入细

(下转第 110 页)

报手段,结合勘察成果和现场气体检测监测成果,预测高压封闭气体的赋存位置,贯彻“物钻结合,长短结合”的超前地质预报理念。

(3)对非煤系有毒有害气体隧道,有效通风是降低安全风险的重要手段。应加强管理,提高参建人员对非煤有毒有害气体的认识。针对风险段落按要求做好气体检测与监测,将高浓度气体集中引排至洞外,同时加强支护强度。

参考文献:

[1] 陈伟,杜宇本,蒋良文. 综合超前地质预报在玉磨铁路复杂地质隧道的运用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 42-48.
CHEN Wei, DU Yuben, JIANG Liangwen. Application of Comprehensive Advance Geological Prediction in Tunnels with Complex Geological Conditions of Yuxi-Mohan Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 42-48.

[2] 苏培东,廖军兆,王奇,等. 四川盆地龙泉山含油气构造浅层天然气对隧道工程危害研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1287-1293.
SU Peidong, LIAO Junzhao, WANG Qi, et al. Harm to Tunnel Engineering Due to Gas in Shallow Oil-gas Structures at Longquan Mountains [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1287-1293.

[3] 黄润秋,王贤能,唐胜传,等. 深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997(1): 51-69.

HUANG Runqiu, WANG Xianneng, TANG Shengchuan, et al. Study on the Main Geological Hazards of Deep-buried Long Tunnel Excavation [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997(1): 51-69.

[4] 闫光明. 炮台山隧道施工中的瓦斯治理[J]. 铁道建筑技术, 1995(4): 21-24.
YAN Guangming. Gas Treatment in Construction of Paotai Shan Tunnel [J]. Railway Construction Technology, 1995(4): 21-24.

[5] 闫光明. 应加强对非煤系地层中瓦斯的防治[J]. 铁道建筑技术, 1994(5): 44.
YAN Guangming. Strengthen Prevention of the Gas in Non-coal Strata [J]. Railway Construction Technology, 1994(5): 44.

[6] 卞国忠. 炮台山隧道天然气的地质条件[J]. 科学技术通讯, 1995(1): 1-4.
BIAN Guozhong. Geological Conditions of Gas in Paotai Shan Tunnel [J]. Communications of Science and Technology, 1995(1): 1-4.

[7] 陈浩栋. 大临铁路红豆山非煤系隧道有害气体成因机制与防治技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
CHEN Haodong. Study on Formation Mechanism and Prevention Technology of Harmful Gas in Hongdoushan Non-coal Tunnel of Dalin Railway [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.

[8] TB 10027-2022 铁路工程不良地质勘察规程[S].
TB 10027-2022 Specification for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering [S].

[9] Q/CR 9217-2015 铁路隧道超前地质预报技术规程[S].
Q/CR 9217-2015 Technical Specification for Geological Prediction in Advance of Railway Tunnel [S].

(上接第75页)

化研究和设计,有待设备制造商按照方案标准进行设备研发制造,有待于现场测试验证结果,有待铁路相关行业标准规划制定,并通过不断研究总结和创新,降低铁路建设、改造、维护成本。

参考文献:

[1] 钟章队. 铁路数字移动通信系统(GSM-R)无线网络规划与优化[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2012.
ZHONG Zhangdui. Wireless Network Planning and Optimization of Railway Digital Mobile Communication System (GSM-R) [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2012.

[2] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

[3] TB 10088-2015 铁路数字移动通信系统(GSM-R)设计规范[S].
TB 10088-2015 Code for Design of Railway Digital Mobile Communication System (GSM-R) [S].

[4] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnels [S].

[5] 丁珣. 高速铁路 GSM-R 网络直放站覆盖区段网络优化[J]. 高速铁路技术, 2016, 51(2): 29-35.

DING Xun, Network Optimization of GSM-R Network Repeater Coverage Section of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 51(2): 29-35

[6] TZJ 3001-2017 铁路基本建设工程设计概(预)算费用定额[S].
TZJ 3001-2017 Railway Capital Construction Project Design Estimate (Budget) Cost Quota [S].

[7] TG/01-2014 铁路技术管理规程[S].
TG/01-2014 Railway Technical Management Regulations [S].

[8] 成凌飞,张薇静,焦晓龙,等. 天线选型对隧道中电磁波传播的影响[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(9): 20-23.
CHENG Lingfei, ZHANG Weijing, JIAO Xiaolong, et al. Influence of Antenna Selection on Electromagnetic Wave Propagation in Tunnels [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(9): 20-23.

[9] 王惠生. 900 MHz 频段电波在山区隧道的覆盖特性和应用设计[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 94-98.
WANG Huisheng. Coverage Characteristics and Application Design of 900 MHz Frequency Band in Mountain Tunnels [J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 94-98.

[10] TB 10430-2014 铁路数字移动通信系统(GSM-R)工程检测规程[S].
TB 10430-2014 Specification for Engineering Test of Railway Digital Mobile Communication System (GSM-R) [S].