

基于多维场景分析的轨道交通隧道天线传播损耗模型研究^{*}

赵依凡¹ 邹劲柏¹ 赵正连² 胥智鹏³ 周 青¹

(1. 上海应用技术大学轨道交通学院, 201418, 上海; 2. 通号通信信息集团上海有限公司, 200071, 上海;
3. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海)

摘 要 [目的] 作为轨道交通无线通信的典型环境之一, 隧道内无线电波信号强度的精确预测一直受到广泛关注和研究。随着无线通信的频率越来越高, 以天线进行隧道内无线辐射的应用越来越广泛。为解决现有隧道内无线电波传播损耗模型复杂、验证及应用难度较大的问题, 整理了先前研究者的实地测量结果, 对轨道交通隧道空闲场景下天线辐射的无线电波信号传播损耗特点进行研究。[方法] 对隧道天线传播损耗相关研究所采用的模型以及参数进行了分析, 通过将频率以及信号传播的远近场距离进行分段分析, 采用矩阵求解最小二乘法, 对包含多维参数(频率、信号传播距离以及隧道截面积)的实测数据进行拟合, 并修正。提出轨道交通隧道空闲场景下天线辐射的无线电波信号传播损耗模型。[结果及结论] 验证结果表明, 所得模型能够在误差范围内对传播损耗进行预测, 具有一定的应用价值, 有助于设计隧道无线通信系统, 能为轨道交通隧道内通信系统天线覆盖方案设计提供参考。

关键词 轨道交通; 无线通信; 隧道; 天线; 传播损耗

中图分类号 U442.55

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.027

Research on Antenna Propagation Loss Model in Rail Transit Tunnel based on Multi-dimensional Scenario Analysis

ZHAO Yifan¹, ZOU Jinbai¹, ZHAO Zhenglian², XU Zhipeng³, ZHOU Qing¹

(1. School of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, 201418, Shanghai, China; 2. CRSC Communication & Information Corporation Shanghai Co., Ltd., 200071, Shanghai, China; 3. Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

Abstract [Objective] As tunnel is one of the typical environments for rail transit wireless communication, the accurate prediction of radio wave signal strength in tunnels has always attracted wide attention and study. With the increasing frequen-

cy of wireless communication, the application of wireless radiation in tunnels using antenna is becoming more and more widespread. To solve the problems such as the complexity of the existing radio wave propagation loss model in tunnels and the challenges for the model's validation and application, the on-site measurement results of previous researchers are sorted out, and the characteristics of radio wave signal propagation loss radiated by antenna in the scenario of vacant rail transit tunnels are studied. [Method] The models and parameters used in the related research on tunnel antenna propagation loss are analyzed. By segmentally analyzing the frequency and the distances of signal propagation in the near and far fields, the measured data containing multi-dimensional parameters (frequency, signal propagation distance, and tunnel cross-sectional area) are fitted and corrected with the matrix-based least squares method. A radio wave signal propagation loss model of antenna radiation in the scenario of vacant rail transit tunnels is proposed. [Result & Conclusion] The verification results show that the above model can predict the propagation loss within the error range and has certain application value in that it is helpful to tunnel wireless communication system design, and can provide reference for the design of antenna coverage schemes of communication systems in rail transit tunnels.

Key words rail transit; wireless communication; tunnel; antenna; propagation loss

作为轨道交通的重要环境之一, 隧道环境是一个半封闭的空间, 适用于隧道环境的无线电波传播损耗模型在隧道信号覆盖方案的规划中起重要作用^[1]。多年来, 业内许多专家学者针对隧道内电波传播进行了深入研究, 积累了大量珍贵的测试数据。文献[2]利用数值法及解析法研究了电波在不同截面隧道中的传播特性, 研究结果表明了隧道截面积与传播损耗成反比关系; 文献[3]根据隧道中

^{*} 上海市“一带一路”中老铁路工程国际联合实验室基金项目(21210750300); 轨道交通智能运维关键技术研究项目(20090503100)

电波传播距离的不同,在现场测量的基础上提出了四段传播损耗模型。

隧道无线覆盖主要有天线和漏缆两种。目前主要采用后者进行无线覆盖,但天线覆盖成本低、维护检测方便,近年来 5G Massive MIMO(大规模多人多出)天线技术不断发展,因此利用天线设计隧道场景下通信系统的覆盖方案逐渐受到重视^[4]。

本文采用统计方法对隧道内信号的实测数据展开研究,并基于此对轨道交通隧道空闲环境下天线辐射的不同频率无线电波信号(以下简称“天线信号”)传播损耗模型展开研究,进而得出隧道内天线信号传播损耗模型,为轨道交通隧道内通信系统天线覆盖方案提供参考。

1 模型构建

无线电波在隧道内的传播特性与在自由空间中不同,其传播损耗随频率的增加而减少^[5]。而对于内部环境复杂,电气设备较多的隧道,当无线电波信号的频率增加到一定程度时,其波长对应缩短,信号的穿透能力增强,但其绕射能力大幅减弱,最终呈现出传播损耗随频率的增加而增加的特性。

根据菲涅尔传播理论,隧道中近、远场的分界点距发射天线的距离可由式(1)计算得到^[6]:

$$d_{BP} = \max\left(\frac{h^2}{\lambda}, \frac{w^2}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中:

d_{BP} ——隧道中近、远场分界点距发射天线的距离,单位 m,其中下标 BP 意为分界点;

$$\begin{cases} \mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ 10\lg d_1 & 10\lg d_2 & \cdots & 10\lg d_n & \cdots & 10\lg d_N \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n & \cdots & x_N \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{L}_a = [L_1 \quad L_2 \quad \cdots \quad L_n \quad \cdots \quad L_N]^T \end{cases}$$

式中:

\mathbf{A}_a ——距离矩阵;

\mathbf{L}_a ——传播损耗矩阵。

设系数矩阵 $\mathbf{B}_a = [\alpha \quad \beta]^T$,则由最小二乘法可得正规方程组:

$$\mathbf{A}_a^T \mathbf{A}_a \cdot \mathbf{B}_a = \mathbf{A}_a^T \mathbf{L}_a \quad (4)$$

对式(4)求解可得系数矩阵:

$$\mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{L} - \bar{x}\bar{\beta} \\ \frac{n \sum_{n=1}^N x_n l_n - \sum_{n=1}^N x_n \sum_{n=1}^N l_n}{n \sum_{n=1}^N x_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N x_n \right)^2} \end{bmatrix}$$

h ——隧道高度,单位 m;

w ——隧道宽度,单位 m;

λ ——信号的波长,单位 m。

为使拟合所得的隧道传播损耗模型更好地符合实际场景,从而为实际工程提供有意义的参考,本文按远、近场两种情况对传播损耗模型进行分类并分别拟合。

1.1 一维参数无线电波传播损耗模型构建

国内外学者针对不同的信号频段、传播距离以及不同规格的公路或铁路隧道,提出了不同的隧道传播损耗模型。对于单空闲隧道单频率,即一维参数无线电波传播损耗模型,本文采用计算无线电波传播较常用的经典传播损耗模型,模型中的传播损耗与距离的关系以传播损耗因子来表示。传播损耗模型表达式为:

$$L_n(d_n) = \alpha + 10\beta \lg d_n + X \quad (2)$$

式中:

$L_n(d_n)$ ——以 d_n 为变量的传播损耗函数, $n = 1, 2, \dots, N$, 单位 dB;

d_n ——测点距发射天线的距离,单位 m;

α ——传播损耗曲线的截距,单位 dB;

β ——距离损耗因子;

X ——标准差为 σ 的零均值高斯分布随机变量,单位 dB。

α, β 及 X 均由式(2)经最小二乘法线性拟合得出。设 $x_n = 10\lg d_n$,则式(2)可简化表示为:

$$L_n = \alpha + \beta x_n + X \quad (3)$$

距离 \mathbf{A}_a 与传播损耗 \mathbf{L}_a 可由矩阵表示为:

式中:

\bar{x} —— $x_1 \sim x_N$ 的平均值;

\bar{L} —— $L_1 \sim L_N$ 的平均值。

1.2 三维参数无线电波传播损耗模型构建

与仅能计算特定隧道内特定频率的一维参数无线电波传播损耗模型相比,本文考虑到无线电波频率以及文献[2]所提隧道截面积同样会影响无线电波在隧道中的传输,因此根据无线电波频率、传播距离及其对应隧道截面积提出适用于多隧道多频率的三维参数无线电波传播损耗模型 $L'_n(d_n)$:

$$L'_n(d_n) = \alpha + 10\beta \lg d_n + 10\gamma \lg f_n + 10\zeta \lg s_n + X \quad (5)$$

式中:

f_n ——无线电波频率,单位 MHz;

s_n ——隧道截面积,单位 m^2 ;

γ ——频率损耗因子;

ζ ——面积损耗因子。

$$\begin{cases} \mathbf{A}_b = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ 10\lg d_1 & 10\lg d_2 & \cdots & 10\lg d_n & \cdots & 10\lg d_N \\ 10\lg f_1 & 10\lg f_2 & \cdots & 10\lg f_n & \cdots & 10\lg f_N \\ 10\lg s_1 & 10\lg s_2 & \cdots & 10\lg s_n & \cdots & 10\lg s_N \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{L}'_b = [L'_1 \ L'_2 \ \cdots \ L'_n \ \cdots \ L'_N]^T \end{cases} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n & \cdots & x_N \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n & \cdots & y_N \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n & \cdots & z_N \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (7)$$

设系数矩阵 $\mathbf{B}_b = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \zeta]^T$, 则同样可由正规方程组即式(4)对系数矩阵进行求解。

2 拟合结果及模型验证

本文首先对隧道中无线电波信号频率与传播损耗的关系进行了验证,根据法国-西班牙 somport 公路隧道^[7](433 MHz、868 MHz、1 800 MHz、2 400 MHz)、法国中南部高原地区某公路隧道^[8](450 MHz、510 MHz、900 MHz、2 100 MHz)、日本某公路隧道^[9](813 MHz、1 450 MHz)、北京八复线铁路隧道(866 MHz)、中国高铁某隧道(931 MHz)、宁德高铁隧道(954.02 MHz)以及英法铁路某隧道^[10](2 000 MHz)等不同规格的铁路、公路隧道,共计 14 个频率测得的传播损耗实际数据,按照距发射天线距离 d_n 为 600 m、1 000 m、2 000 m 等 3 种情况拟合,结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出,相同距离条件下频率在 1 600 ~ 1 800 MHz 左右的信号传播损耗相对较低,为使最终拟合结果能够更加符合具体的隧道环境,本文取 1 800 MHz 作为频率分界点,结合近、远场分界点,分别展开传播损耗模型的拟合。

2.1 一维参数的模型拟合及验证

本文首先对单个隧道内特定频率的无线电波

α 、 β 、 γ 、 ζ 及 X 均由式(5)经最小二乘法线性拟合得出。

设 $x_n = 10\lg d_n$, $y_n = 10\lg f_n$, $z_n = 10\lg s_n$, 数据有 N 组,则式(5)可简化表示为:

$$L'_n = \alpha + \beta x_n + \gamma y_n + \zeta z_n + X \quad (6)$$

距离、频率、隧道面积与传播损耗数据可由矩阵表示为:

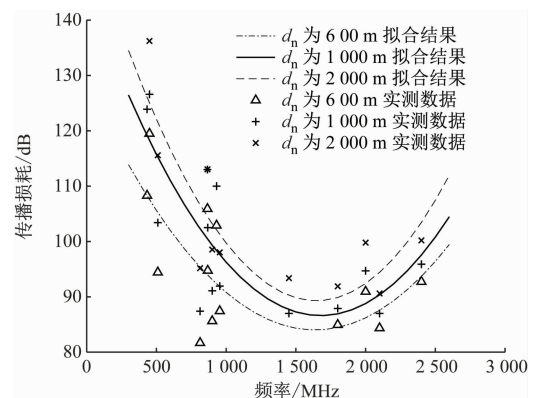


图1 案例隧道内天线信号频率特性曲线

Fig. 1 Frequency characteristic curve of antenna signal in the case tunnel

信号进行拟合,选取了法国中南部高原地区某公路隧道 450 MHz 信号、法国-西班牙 somport 公路隧道 2 400 MHz 信号远场传播损耗测试数据,以及法国 Roux 隧道 2 400 MHz 信号近场传播损耗的测试数据^[11],按照式(2)对其进行拟合并结合其他同频率实测数据对拟合结果进行了对比分析,同时以决定系数 R^2 作为拟合结果的评价指标。

拟合所得传播损耗模型参数如表 1 所示,其中远场传播损耗模型拟合结果与实测数据的对比如图 2 所示;近场传播损耗模型拟合结果与实测数据

表 1 一维参数无线电波传播损耗模型参数

Tab. 1 Parameters of 1-dimentional parameter radio wave propagation loss model

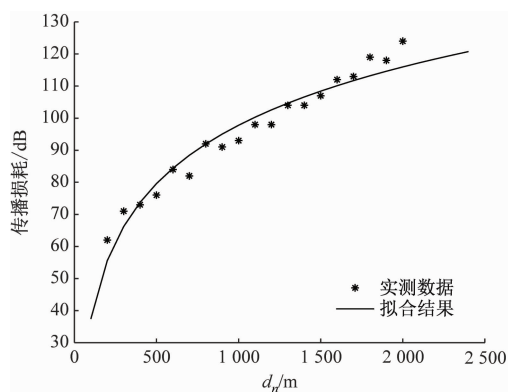
场景	频率/MHz	α	β	σ	R^2
1 800 MHz 以下远场信号	450	-83.410	6.04	4.26	0.95
1 800 MHz 以上近场信号	2 400	6.495	2.39	9.01	0.38
1 800 MHz 以上远场信号	2 400	50.910	1.29	7.85	0.23

注: σ 为总体标准差。

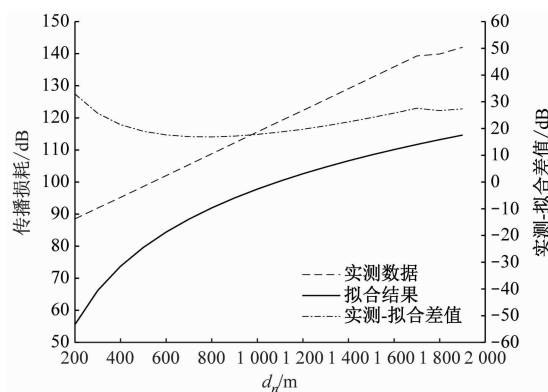
的对比如图 3 所示。

表 1、图 2 及图 3 验证了信号的阴影衰落与频率成正相关,高频信号的传播损耗测量值离散性较

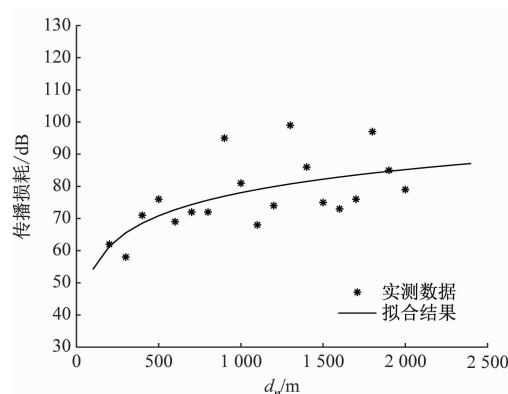
大。因此在拟合时需尽可能多地选取阴影衰落较大的测量数据,以保证拟合所得的传播损耗模型能够较好地满足实际场景中的信号覆盖。



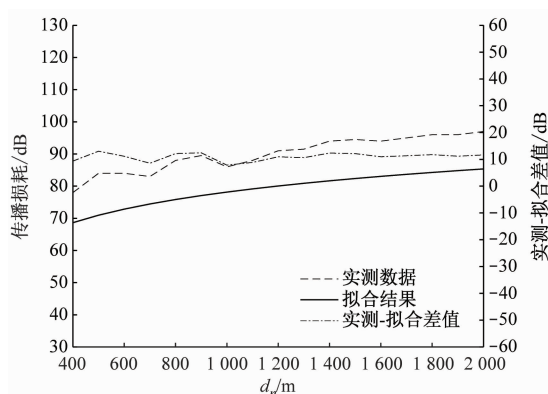
a) 450 MHz 信号实测值与拟合值对比



b) 450 MHz 拟合结果与其他同频率实测数据对比



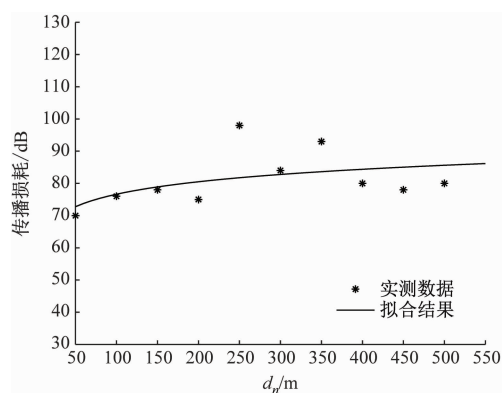
c) 2400 MHz 信号实测值与拟合值对比



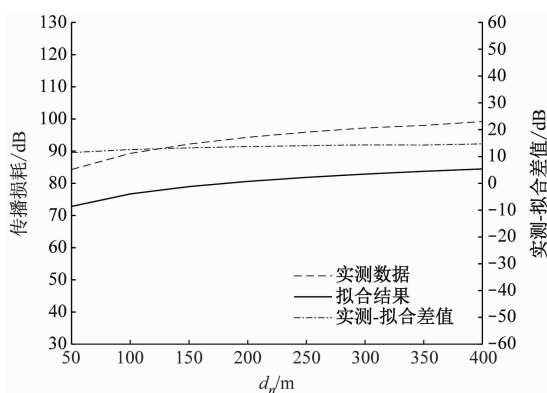
d) 2400 MHz 拟合结果与其他同频率实测数据对比

图 2 一维参数无线电波远场传播损耗模型拟合结果

Fig. 2 Fitting results of 1-dimensional parameter radio wave far-field propagation loss model



a) 2400 MHz 信号实测值与拟合值对比



b) 2400 MHz 拟合结果与其他同频率实测数据对比

图 3 一维参数无线电波近场传播损耗模型拟合结果

Fig. 3 Fitting results of 1-dimensional parameter radio wave near-field propagation loss model

图 2、图 3 表明,拟合所得传播损耗模型能够较好地应用于特定隧道以及特定频率,但对于同频率

其他隧道则误差较大。为得出误差更小、适用性更强的传播损耗模型,有必要根据不同隧道和电波信

号频率的特点增加拟合参数。

2.2 三维参数的模型拟合及验证

本文选取 400 ~ 1 800 MHz 共 10 个频率数据,根据式(5)对 1 800 MHz 以下远场隧道天线传播损耗模型进行拟合,拟合所得模型如式(8)所示。

$$L'_n = 193.9 + 33.41 \lg d_n - 46.21 \lg f_n - 37.31 \lg s_n \quad (8)$$

同样,本文取 2 400 ~ 5 800 MHz 共 8 个频率数

据以及 1 800 ~ 5 200 MHz 共 4 个频率数据,分别对 1 800 MHz 以上近场及远场模型进行拟合,拟合所得模型分别如式(9)、式(10)所示,拟合所得传播损耗模型参数如表 2 所示。

$$L'_n = 71.9 + 14.91 \lg d_n + 15.81 \lg f_n - 44.11 \lg s_n \quad (9)$$

$$L'_n = -57.2 + 14.11 \lg d_n + 34.41 \lg f_n - 5.01 \lg s_n \quad (10)$$

表 2 三维参数无线电波传播损耗模型参数

Tab. 2 Parameters of 3-D parameter radio wave propagation loss model

场景	α	β	γ	ζ	σ	R^2
1 800 MHz 以下远场信号	193.86	3.34	-4.62	-3.73	6.88	0.76
1 800 MHz 以上近场信号	71.91	1.49	1.58	-4.41	4.71	0.65
1 800 MHz 以上远场信号	-57.19	1.41	3.44	-0.50	2.86	0.85

分别将北京八复线 866 MHz、法国 Massif 隧道 2 800 MHz 及英法铁路隧道 2 400 MHz 数据代入式(8)、式(9)、式(10)中进行验证。由于这 3 组数据对应隧道皆为圆形隧道,因此根据文献[12]加入传播距离修正参数,将式(8)、式(9)、式(10)中的 d_n

改为 $d_n + 0.51$,结果如图 4 所示。

图 4 中实测数据与拟合结果的最大差值依次为 -11.13 dB、5 dB 和 -7.95 dB,均在 $\pm 2\sigma$ 的误差范围内,因此可认为拟合所得三种模型满足 95% 准确率,能够较好地满足实际场景下的信号覆盖。

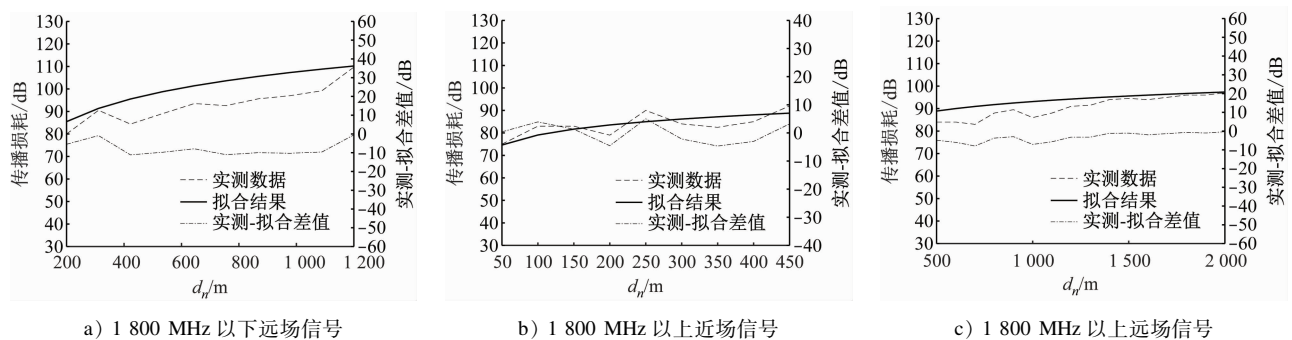


图 4 三维参数无线电波传播损耗模型拟合结果及验证

Fig. 4 Fitting results and verification of 3-D parameter radio wave propagation loss model

3 结语

本文对轨道交通隧道环境下天线信号的传播损耗模型展开了研究,将空闲隧道中的天线传播模型按频率及传播距离进行分类分析。结合距离参数采用矩阵求解最小二乘法对单孔空闲隧道单频率的一维参数无线电波传播损耗模型进行拟合,结果显示本文所用拟合方法能很好地满足实际场景,但所得模型只适用于特定隧道和特定频率。

为得出适用性更强,同时不失精确性的传播损耗模型,增加频率和隧道截面积两项参数,对多孔空闲隧道多频率的三维参数无线电波传播损耗模型进行拟合,最终分别提出三种不同情况对应的传

播损耗模型。经验证,三种模型均能在可接受的误差范围内对隧道内无线电波信号的传播损耗进行预测,能为实际工程规划提供参考。

参考文献

- [1] GAN M, XU Z, SHIVALDOVA V, et al. A ray tracing algorithm for intelligent transport systems in tunnels [C] // 2014 IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC 2014). New York: IEEE, 2014: 1.
- [2] 魏占永, 孙继平, 陆俭国. 隧道横截面对电磁波传播特性的影响[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(6): 620.
WEI Zhanyong, SUN Jiping, LU Jianguo. Effects of cross sections of tunnel on propagation characteristics of electromagnetic waves[J]. Journal of University of Electronic Science and Tech-

- nology of China, 2003, 32(6): 620.
- [3] HROVAT A, KANDUS G, JAVORNIK T. Four-slope channel model for path loss prediction in tunnels at 400 MHz[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2010, 4(5): 571.
- [4] 曹阳阳, 高松涛, 于一鸣, 等. 地铁隧道5G网络覆盖创新方案研究[C]//5G网络创新研讨会(2022)论文集. 北京: 中国电子科技集团公司第七研究所移动通信杂志社, 2022: 190.
- CAO Yangyang, GAO Songtao, YU Yiming, et al. Research on innovative scheme for 5G network coverage in metro tunnels[C]//2022 5G Network Innovation Seminar. Beijing: Mobile Communications Magazine Office of the 7th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, 2022: 190.
- [5] 武桦, 贾怀义. 空圆隧道中高频电磁波传播特性[C]//2005'中国通信学会无线及移动通信委员会学术年会论文集. 北京: 北京交通大学, 2005: 477.
- WU Hua, JIA Huaiyi. Propagation characteristics of high-frequency electromagnetic waves in empty circular tunnels[C]//2005 the Annual Academic Conference of the Wireless and Mobile Communication Committee of the China Institute of Communications. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005: 477.
- [6] 张跃平, 张文梅, 郑国莘, 等. 预测隧道中传播损耗的混合模型[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1283.
- ZHANG Yueping, ZHANG Wenmei, ZHENG Guoxin, et al. A hybrid model for propagation loss prediction in tunnels[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1283.
- [7] RIZZO C, LERA F, VILLARROEL J L. 3-D fading structure analysis in straight tunnels toward communication, localization, and navigation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(9): 6123.
- [8] MAHMOUD S F. Wireless transmission in tunnels with non-circular cross section[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(2): 613.
- [9] FUJIMORI K, ARAI H. Propagation characteristics in tunnels including base station antenna[J]. Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications), 2001, 84(4): 1.
- [10] DUDLEY D G, LIENARD M, MAHMOUD S F, et al. Wireless propagation in tunnels[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(2): 11.
- [11] MASSON E, COMBEAU P, COCHERIL Y, et al. Radio wave propagation in arch-shaped tunnels: measurements and simulations by asymptotic methods[J]. Comptes Rendus Physique, 2010, 11(1): 44.
- [12] 刘玲. 高速铁路隧道环境下无线信道建模与优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- LIU Ling. Wireless channel modeling and optimization for high-speed railway tunnel environments[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- 收稿日期:2023-09-11 修回日期:2023-11-12 出版日期:2025-01-10
Received:2023-09-11 Revised:2023-11-12 Published:2025-01-10
· 第一作者:赵依凡,硕士研究生,zyf90198@163.com
通信作者:邹劲柏,教授,Zoujb@sit.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

2024 年 11 月份城市轨道交通运营数据速报

2024 年 11 月,31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团共有 54 个城市开通运营城市轨道交通线路 313 条,运营里程 10 522.1 km,实际开行列车 340 万列次,完成客运量 27.1 亿人次,进站量 16.2 亿人次。11 月份,客运量环比减少 0.6 亿人次,降低 2.2%,同比增加 1.3 亿人次,增长 5.2%。11 月份全国总运营里程的平均客运强度为 0.860 万人次/(km·d),环比增长 0.8%,同比增长 1.9%。

其中,43 个城市开通运营地铁、轻轨线路 255 条,运营里程 9 054.1 km,完成客运量 26.2 亿人次,进站量 15.5 亿人次;16 个城市开通运营单轨、磁浮、市域快速轨道交通线路 25 条,运营里程 970.7 km,完成客运量 8 365 万人次,进站量 5 656 万人次;18 个城市开通运营有轨电车、自动导向轨道线路 33 条,运营里程 497.3 km,完成客运量 1 072 万人次,进站量 1 016 万人次。

11 月新增运营里程 66.8 km,新增运营区段 6 个,分别为上海地铁 17 号线西延伸线、广州地铁 3 号线东延段、郑州地铁 6 号线一期东北段、济南地铁 3 号线二期、哈尔滨地铁 3 号线二期西北环道里段、苏州有轨电车 2 号线延伸线。

(来源:交通运输部官网)