

高铁隧道无线通信系统中的信道测量与建模综述

刘玉¹, Ammar GHAZAL², 王承祥^{1,3*}, 葛晓虎⁴, 杨旸⁵, 张亚培¹

1. 山东省无线通信技术重点实验室, 山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100, 中国
2. Centre for Electronic and Communications Engineering, School of Engineering and Sustainable Development, De Montfort University, Leicester LE1 9BH, U.K.
3. Institute of Sensors, Signals and Systems, School of Engineering & Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, U.K.
4. 华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074, 中国
5. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感器网络与通信重点实验室, 上海 200050, 中国

* 通信作者. E-mail: cheng-xiang.wang@hw.ac.uk

收稿日期: 2017-05-05; 接受日期: 2017-06-22; 网络出版日期: 2017-10-16

国家自然科学基金(批准号: 61371110, 61210002)和信威通信技术有限公司合作项目(批准号: 11131701)资助

摘要 高铁的迅速发展为现有的高铁无线通信系统带来了一些新的挑战。一个准确描述隧道信道特性的信道模型, 对高铁通信系统的设计和评估意义重大。由于隧道狭长的空间、隧道本身的边界性以及产生的波导效应等, 高铁隧道中的信道特性不同于其他的高铁场景。此外, 隧道信道的一些特性目前还没有被充分地研究。因此, 考虑大尺度和小尺度衰落特性的准确的隧道信道模型是十分必要和重要的。本文全面地综述了已开展的隧道信道测量及采用不同方法建模的隧道信道模型, 讨论了未来高铁隧道信道测量及建模的一些研究方向。

关键词 第五代移动通信, 高铁, 隧道场景, 隧道信道测量, 隧道信道模型, 非平稳特性

1 引言

目前, 高铁已经经历了快速地发展, 并且高铁无线通信技术也被列为第五代移动通信的一个重要研究方向^[1~3]。随着高铁用户数目的增多, 大量的通信数据需要通过无线信道进行传输。因此, 通信容量大、可靠性高的高铁无线通信网络是用户所期待的。为了满足用户需求, 高铁无线通信系统需要克服一些由列车高速运行带来的挑战, 例如频繁的切换、较大的Doppler扩展以及快速穿越不同高铁场景等^[4~6]。目前, 使用最广泛的高铁通信系统是全球移动通信铁路系统(Global System for Mobile Communication Railway, GSM-R)^[6]。该系统可以用于列车的通信与控制。但是, 它不能满足日益增长的高速数据传输的需求。近年来, 基于长期演进的铁路系统(Long-Term Evolution-Railway, LTE-R),

引用格式: 刘玉, Ammar GHAZAL, 王承祥, 等. 高铁隧道无线通信系统中的信道测量与建模综述. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 1316–1333, doi: 10.1360/N112017-00089
Liu Y, Ghazal A, Wang C-X, et al. Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 1316–1333, doi: 10.1360/N112017-00089

被推荐用于取代 GSM-R. 两种通信系统均采用了传统的车内用户直接与外部基站进行通信的方式. 但是, 这种架构导致了信号穿越车厢时较高的穿透损耗、参差不齐的网络覆盖以及较高的掉话率^[6]. 为了克服上述问题, 考虑在未来的高铁通信系统中采用一种比较有潜力的移动中继技术 (Mobile Relay Station, MRS)^[7]. 通过采用 MRS, 传输信道可以被分为两部分: 外部基站和移动中继之间的室外信道部分, 以及移动中继和车厢内接收端之间的室内信道部分. 移动中继技术通过群组的整体切换来代替每个用户的个体切换. 该技术已经用于国际移动电信系统和 WINNER II 系统^[8].

高铁在运行过程中会遇到多种场景, 如开阔场景、路堑、高架桥、隧道以及车站场景^[4]. 作为一种典型的高铁场景, 隧道场景在整个高铁运输过程中占据了很大的比例, 并且吸引了越来越多学者的研究兴趣^[9]. 由于隧道环境独特的传播特性, 如狭长、有限的隧道空间、粗糙的内部墙壁等, 隧道场景中信号的传播特性在很大程度上不同于其他的高铁场景. 此外, 隧道长度几百米到几千米不等, 且形状各有不同, 如圆形、拱形或矩形等. 由于隧道的长度、尺寸、形状及产生的波导效应等均会对传播信道产生一定影响, 因此目前隧道场景的信道建模仍是一个极具挑战性的课题^[10]. 同其他高铁场景相比, 隧道内的无线信号会遇到更多的反射、衍射和散射等, 并且接收端的信号会由于高铁的高速移动而产生严重衰落. 目前主要有两种解决方案来提供隧道内的无线覆盖, 即泄露电缆和分布式天线系统 (Distributed Antenna System, DAS)^[11]. 泄露电缆不需要专门的规划就可以提供高质量的覆盖, 但其费用比较昂贵, 安装和维护都比较困难. 此外, 在限定空间中一旦发生不正常的切断, 泄露电缆将不可用^[9]. 因此, 为了实现高铁的环保、可持续发展, DAS 将取代泄露电缆成为隧道中无线覆盖的主流方式^[12]. 相比泄露电缆, DAS 可以提供的覆盖范围更广, 信道容量更高, 且后期维护相对简单. 上述诸多优点, 推动了隧道内 DAS 的应用, 并且进一步加速了隧道场景下信道建模工作的开展^[10].

为了更好地发展未来高铁隧道通信系统, 需要全面地理解高铁隧道特性并提出准确的信道模型. 目前已经开展了一些针对隧道的测量活动, 来研究信号传播环境的物理意义. 现有的测量活动主要侧重于大尺度衰落特性的研究, 其对网络配置和优化至关重要. 而小尺度衰落特性同样不容忽视, 其对系统设计和方案测试至关重要. 因此, 准确考虑大尺度和小尺度衰落特性的隧道信道模型是非常必要的. 基于不同的建模方法, 目前的隧道信道模型亦可以分为确定性和随机性两种. 确定性信道模型主要是基于几何光学特性^[13~16]、波导建模方法^[17~21]、射线追踪法和 Maxwell 数值方法^[22~24]. 随机信道模型可以分为几何随机信道模型和非几何随机信道模型^[25]. 本文将着重介绍国内外高铁隧道的信道测量与建模工作, 以及未来的研究方向等.

文章的主要结构如下. 第 2 节介绍了高铁隧道场景中的信道测量, 第 3 节描述了一些高铁隧道信道模型. 第 4 节介绍了未来高铁隧道信道测量与建模相关的一些研究方向. 最后, 对全文进行总结.

2 高铁隧道信道测量

由于高铁较高的运行速度和隧道空间的有限性, 在高铁隧道中准确地开展测量活动极具挑战性. 尽管有一些测量活动已经开展, 但仍然具有很大发展空间. 本节根据不同的载波频率、隧道参数、天线配置和信道特性等, 归纳列举了一些隧道信道测量活动^[10, 11, 17, 26~46], 如表 1 所示.

2.1 隧道测量设置

现有的高铁隧道信道测量, 主要侧重单输入单输出 (Single-input Single-output, SISO) 天线配置, 如文献 [10, 11, 30] 中所介绍的. 为了满足数据传输日益增长的需求, 多输入多输出 (Multiple-input

表 1 典型的隧道信道测量^{a)}
Table 1 Important tunnel channel measurements^{a)}

Ref.	Frequency	Scenario	Tunnel parameters	Antenna configuration	Channel statistics
[10]	2.4 GHz	Arched subway tunnel	wide tunnel: 9.8 m×6.2 m, narrow tunnel: 4.8 m×5.3 m	SISO	SF, PL, fast fading, LCF, AFD
[11]	900 MHz	Arched railway tunnel	height: 5.4 m, width: 10.7 m, length: 4000 m	SISO	PL
[31]	2.8~5 GHz	Semicircular railway tunnel	diameter: 8.6 m, height(max): 6.1 m, length: 3336 m	MIMO	PL, PDF, CDF
[32]	900 MHz	Arched subway tunnel	two-track tunnel: width: 8 m, length: 200 m, single-track tunnel: width: 5 m, length: 100 m	MIMO	CIR, correlation coefficient
[33]	2.1376 GHz	Subway tunnel	length: 34 km	MIMO	PDP, PL, K factor, delay spread
[36]	2.4 GHz, 5 GHz	Horse-shoe shaped subway tunnel	straight: 240 m, curve: 140 m	SISO	PL, rms delay spread, channel stationarity, channel capacity
[37]	465 MHz, 820 MHz	Arched underground railway	floor width: 5.8 m, height: 4 m, length: 980 m	SISO	PL
[38]	450 MHz~ 5 GHz	Arched railway tunnel	length: 3000 m	SISO	PL
[39]	884 MHz~ 2.45 GHz	Rectangular railway tunnel	width: 14.7 m, height: 6.15 m, length: 360 m	SISO	PL
[40]	2.49~4 GHz	Rectangular tunnel	wide tunnel: 2.4 m×3.1 m, narrow tunnel: 2.4 m×5.2 m	MIMO	PL, delay spread

a) PDF: probability density function; CDF: cumulative density function; LCR: level crossing rate; AFD: average fade duration; CIR: channel impulse responses; PDP: power delay profile; rms: root mean square.

Multiple-output, MIMO) 系统是不可或缺的, 并且文献 [31,32] 也已证明了使用 MIMO 技术来增加信道容量的可行性. 因此, 更多的使用 MIMO 系统的隧道信道测量工作是人们所期待的. 已开展的大多数测量活动是基于窄带 GSM-R 系统的. 其中, 典型的隧道测量活动是西班牙的新型高铁隧道测量^[11], 该测量频率设置为上行链路 876~880 MHz, 下行链路 921~925 MHz. 值得一提的是, 上述频率设置是基于欧洲标准, 该系统在中国和印度等地的频率是上行链路 885~889 MHz, 下行链路 930~934 MHz.

此次测量活动采用了 DAS 的覆盖方式。两个 GSM-R 基站分别被放置在隧道的入口和出口处，在两个基站之间，三个中继器通过光纤无线电来相互连接。此次测量活动还考虑了隧道传播中一些特殊情况的影响，如火车行驶在隧道弯道、火车由隧道外驶入隧道内及隧道内两车相遇等情况^[11]。基于对所开展测量活动的分析，模式方法被用于建模直隧道内的信号传播，射线追踪方法用于计算弯道处和隧道入口、出口处信号的额外衰减。当火车从隧道内向外行驶时，由于波阻抗改变及散射影响，信号会经历较大的衰落。此外，还测量了隧道内两车相遇的情况，即其中一辆车停在不同的位置，分别为靠近一处中继器和两处中继器之间时，另一辆车从旁边穿过以及两车相遇过程中由阻挡效应带来的信号阴影衰落^[11]。

针对上述各种情况，又分别采用单频和多频传输方案进行了相关测量与研究。单频配置中，所有的发送端均采用相同的发送频率，而多频配置则使用不同的发送频率。同多频发送相比，单频在信噪比和接收功率方面都有一定的改善。上述测量活动是基于 GSM-R 系统开展的窄带信道测量活动。考虑到窄带 GSM-R 主要用于车辆控制，而不是为车内乘客提供通信服务，并且该系统不能满足未来高铁系统中数据高速传输的需求。因此，其他一些宽带系统，如通用移动地面系统和 LTE 系统，被推荐用于取代 GSM-R 系统^[33]。在这些系统中，使用宽带信号来准确地分析信道特性。通过从信道冲击响应中提取参数，如簇时延、Doppler 频率扩展、莱斯 K 因子以及这些参数间的相关性，研究了簇间的一些特性。文献[34]介绍了在大山隧道中开展的基于 LTE 系统的信道测量活动，测量频率设置为 1.89 GHz，研究了信道的一些主要传输特性。文献[35]，根据第 4 代移动通信系统在高铁环境中的测量配置，开展了频率为 1 GHz 和 2.45 GHz 的测量活动，文中提供的详细的隧道信道信息，可以用于构建隧道通信系统中的宽带系统模型。

综上，考虑 MIMO 技术、具有较高的载波频率和带宽的宽带高铁隧道信道测量活动对未来高铁隧道通信系统的发展是至关重要的。

2.2 隧道内大尺度和小尺度衰落

为了更好地设计未来高铁隧道通信系统，全面地理解大尺度和小尺度信道特性是十分必要的。可靠的大尺度衰落信道模型，如路径损耗和阴影衰落，对于网络部署和优化意义重大。大多数现存的隧道测量活动主要侧重于大尺度衰落上。文献[33, 37~42]研究了隧道中的路径损耗模型。文献[43]比较了不同天线配置下的大尺度信道特性。文献[44]基于双线模型，分析了 Fresnel 区和路径损耗指数 n 的关系，证明了第一 Fresnel 区是影响路径损耗指数 n 的主要因素。文献[45]考虑进自由空间传播区和极远区，提出了四线路径损耗模型。上述结论可以用于指导隧道的测量活动和隧道中通信系统的物理层设计。

准确的小尺度衰落信道模型在无线通信系统分析和设计中扮演很重要的角色，如差错控制编码、交织和均衡算法^[9]。文献[31]介绍了半圆形隧道中开展的隧道信道测量活动，分析了相应的大尺度和小尺度衰落特性。对于小尺度衰落，测量数据幅度可以用莱斯分布来匹配，并且电场的相位可以用均匀分布来匹配。此外，还分析了莱斯 K 因子的影响。文献[10]介绍了在地铁隧道中开展的一次测量活动，计算并讨论了一些传播特性，如电平通过率和平均衰落深度。在未来的高铁隧道信道测量中，应侧重研究小尺度衰落相关的信道特性。

2.3 隧道内近场和远场区

无线信号在隧道中传输时，可以根据所谓的“断点”将隧道空间粗略地分为两个区域，即近场区

和远场区^[20, 46], 不同的传播区域需要不同的信道模型来描述。隧道信道的统计特性, 如路径损耗、阴影衰落和一些小尺度衰落特性, 在断点前后差别很大。文献 [10] 介绍了在地铁隧道中开展的频率为 2.4 GHz 的测量活动, 分析了断点处的信号传播特性及信号传播区域。

从模式理论的角度, 电磁波可以被分解为多个波导模式。例如, 一个矩形隧道信道可以被考虑为一个很大的矩形波导。根据不同的通信频率和截止频率, 可估计隧道内传播的模式。文献 [47] 中, 矩形隧道的截止频率表示为

$$f_T = \frac{1}{2\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (1)$$

其中, a 和 b 分别代表隧道的宽度与高度, m 和 n 分别表示水平及垂直方向的传播模式, μ_0 和 ϵ_0 分别代表传播空间的渗透率和介电常数。当通信频率大于截止频率时, 相应的信号可以在隧道内传播。在近场区, 电场中通常包含多种模式, 但是, 随着收发端距离的增加, 高阶模衰减迅速, 大部分的高阶模在断点之前消失。在远场区, 即断点后, 基模占主导。从统计性角度分析, 接收信号可以被看作直射成分和来自于隧道顶部、底部、侧面的所有漫反射成分的叠加^[10, 48]。在近场区, 接收信号可能包含较强的直射成分, 莱斯 K 因子相对较大, 而在远场区, 莱斯 K 因子很小, 并且甚至可以考虑为不包含直射路径的 Rayleigh 分布。

2.4 隧道内典型的传播区域

一般地, 传统高铁通信场景中直射路径所占的比重很大。在隧道中, 由于隧道场景的密闭性, 反射波可以极大程度地保留下来并占据接收信号的绝大部分。考虑到隧道内因反射导致的长时延特性, 针对不同区域开展了测量活动, 并分析了簇的时延特性。隧道内的传播区域大致可分为 3 种, 即直射区、非直射区与远直射区。当接收端距离发送端非常近时, 直射区出现。火车驶离发送端时, 直射区消失, 相应地, 非直射区出现。当火车距离发送端很远时, 远直射区出现。文献 [30] 基于上述 3 个区域开展了相关测量活动, 研究了三维频率相关函数及功率时延分布。功率时延分布在直射区可以很好地匹配指数分布。随着隧道内传输距离的增加, 直射径消失, 与此同时, 隧道中保留了大量的反射信号。这些反射会导致时延簇, 此时, 在非直射区服从广义极值分布, 在远直射区服从有界 Johnson 分布。隧道中的这种现象是比较独特的, 应该考虑其在未来高铁隧道通信系统设计中的应用^[48]。此外, 文献 [10] 表示当高铁从发送端经过时, 直射区之前会观察到近阴影区, 在这个极短的区域内, 收发端的直射区均被阻挡, 并且多径传输占主导。

2.5 隧道内无线信号传播的影响因素

同其他高铁场景相比, 隧道内电磁波传播将会遇到更多的反射、散射和衍射等。一些相关参数, 如隧道尺寸、隧道形状、隧道墙壁的电磁特性和表面粗糙程度、收发天线的位置和辐射形式等, 均会对隧道内无线信号的传播产生一定的影响^[39]。

隧道的横截面也会影响传播信号的衰减, 并且伴随信号频率的增加, 这种影响更为明显^[49]。真实的隧道会具有多种不同形状, 如圆形、矩形、拱形、半圆形、椭圆形等, 图 1 中列出了一些典型的隧道形状。并且文献 [50] 介绍了在不同形状地铁隧道中开展的测量活动, 描述了地铁隧道中的电磁波传播情况, 并证明: 隧道形状, 也就是隧道的横截面以及隧道的弯道, 均会对信号的传播产生一定影响。文献 [51, 52] 研究了矩形隧道截面对信号传播的影响, 文献 [53] 分析了不同形状隧道内信号的衰减情况。

隧道表面的粗糙程度及隧道墙壁的电磁特性, 也会影响隧道内无线信号的传输。文献 [54] 研究了表面粗糙程度的影响, 表明墙壁的粗糙程度会给无线信号造成额外的功率衰减。此外, 还考虑了电导

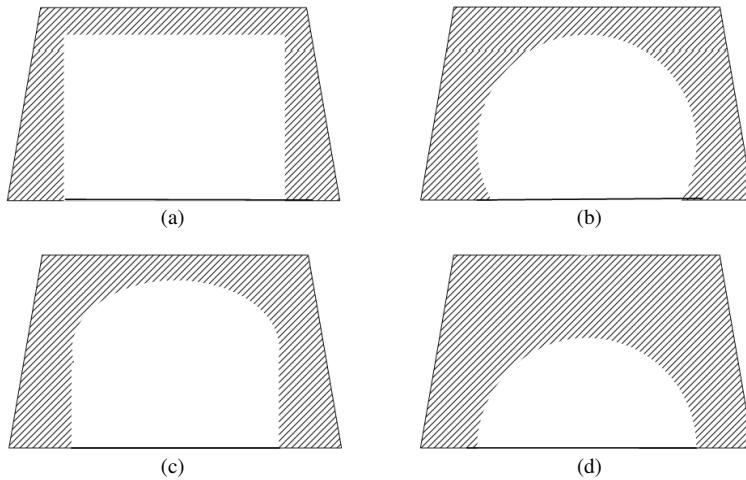


图1 典型的隧道横截面形状. (a) 矩形隧道, (b) 拱形隧道, (c) 马蹄形隧道, (d) 半圆形隧道

Figure 1 Typical shapes of cross sections for tunnels. (a) Rectangular tunnel; (b) arched tunnel; (c) horse-shoe shaped tunnel; (d) semicircular tunnel

率和介电常数的影响,结果表明介电常数的影响可以忽略不计,但电导率的影响则不能忽略^[55].除了上述参数,收发天线的位置、极化及辐射形式等也会对无线波的传播产生一定影响^[56,57].文献[58,59]均表明:优化的天线辐射形式和适当的天线位置都会减少无线信号传播过程中的衰减.文献[60]考虑了天线方向的影响,主要研究了在直射和非直射两种环境下,定向天线和全向天线对无线信号传播的影响.结果表明,在非直射中,全向天线可以提供更好的信号覆盖,而定向天线可以减少时间色散以便获得更高的信道容量.文献[61]研究了收发天线的极化特性的影响.在空的直隧道环境中,当隧道宽度大于高度时,收发天线水平极化时的均方根时延扩展远大于垂直极化时的情况.除此之外,电磁波在水平极化时的衰减要小于垂直极化.综上,由于高铁隧道内的无线信号传播受多种因素影响,因而更加准确、有效、全面的高铁隧道测量活动对于未来隧道建模的研究、设计及应用是相当必要的.

3 高铁隧道信道模型

文献[62~69]综述了一些高铁隧道信道模型.本节首先讨论一些可能的隧道场景的网络架构,然后根据不同的建模方法,列出一些不同类型的隧道信道模型.

3.1 隧道内网络架构

正如之前所提到的,隧道内采用两种方案来提供无线覆盖,即泄露电缆和DAS^[10].泄露电缆目前被广泛用于高铁隧道通信系统中,它可以提供很好的网络覆盖,并且不需要专门的规划.但是,它的安装费用比较昂贵且后期维护相当复杂,尤其是对于新建的中等或是很长的高铁隧道.相比之下,DAS更具吸引力.在DAS中,所有的天线元素按一定的间隔放置,并通过有线或光纤进行连接.相比泄露电缆方案,DAS可以在网络覆盖、容量方面提供较大的增益,通过不同位置处放置不同的天线元素来提供较大的空间分集抵抗衰落^[11],具有安装迅速、易于维护等优点.此外,传统的车内用户与外部基站直接通信的方式,带来了一系列的通信问题.因此,需要考虑采用移动中继技术.该技术通过在车表面安装移动中继来改善接收信号的通信质量,并且用来解决参差不齐的网络覆盖、减少信号的穿透损

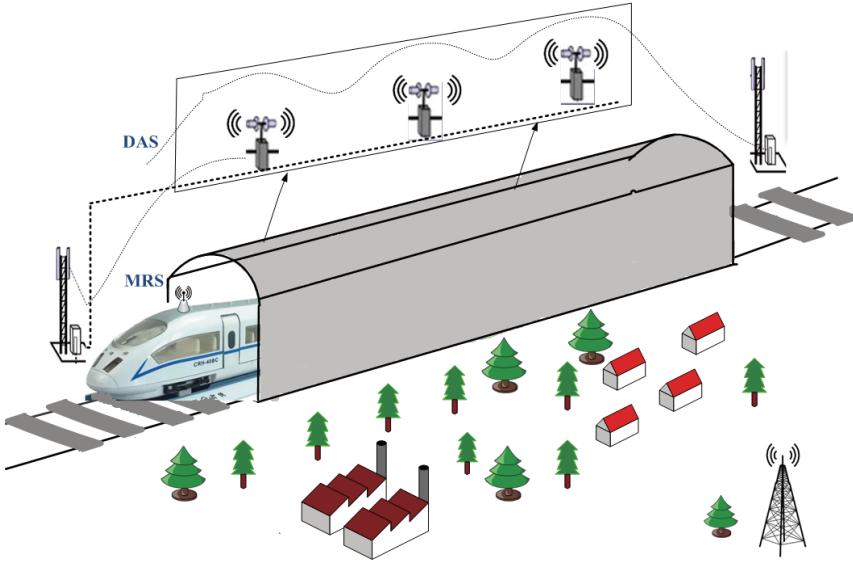


图 2 (网络版彩图) 高铁隧道场景的网络架构

Figure 2 (Color online) High speed train cellular architecture for tunnel scenario

耗等。此外, 相关研究表明 MIMO 技术可以用于提高隧道内传播信道的信道容量^[32, 70]。DAS、MRS 以及 MIMO 技术的相互结合, 如图 2 所示, 可以用于满足隧道内连续、高质量的通信需求。

3.2 高铁隧道模型的建模方法

根据不同的建模方法, 目前的隧道信道模型如表 2 所示^[71~84]。这些信道模型亦可分为确定性信道建模方法^[21, 23] 及随机信道建模方法^[63, 64, 74] 两大类。详细的隧道信道模型分类如图 3 所示。

3.2.1 射线追踪模型

射线追踪技术被广泛应用于预测有限空间中的无线电波传播。射线追踪模型可以用于预测接收端的路径损耗和隧道内的信号时延等^[56]。基于几何光学理论和一致性绕射理论, 隧道内接收信号可以视为一系列隧道墙壁反射和隧道边沿衍射的射线的叠加。不同相位的射线相加将会导致接收信号沿距离的功率变化, 并且可以进一步用来研究隧道内的信号传播预测。文献 [85] 提出了一种基于三维射线追踪方法构建高铁隧道信道模型的方案, 所提模型的复合信道冲击响应中包含了大量的信道信息, 诸如波导效应、一辆车以相反方向通过另一辆车时的 Doppler 频移和时延的影响等。

该建模方法中射线路径的追踪方法主要有以下几种: 镜像法、弹跳射线法及射线密度归一化。对于镜像法, 接收端的所有反射射线都可以看作是直接从虚拟光源发出的, 能通过发送端镜像对称的方法获得。文献 [56] 提出了基于镜像法的射线追踪模型, 用来预测隧道内信号传播的均方根时延拓展。对于弹跳射线法, 隧道内的发送端可以看作是一个源向隧道内任意方向辐射出大量射线。而在接收端限定一个球形接收区域, 只要发送端辐射出的射线落在该区域内, 就可以被成功接收。文献 [86] 提出了基于弹跳射线法的射线追踪方法, 用来计算隧道弯道处信号的额外损耗。对于射线密度归一化, 发送信号在隧道内可以经过很多条路径进行传播, 每一条传播路径可以假定包含很多条传播射线。其中射线的数目可以用射线密度来表示, 用总的射线数目来对每一条射线进行归一化。接收端的信号可以视为不同幅度、相位、密度的所有射线的叠加。文献 [87] 中, 使用了基于射线密度归一化的射线追踪

表 2 隧道信道模型^{a)}
Table 2 Important tunnel channel models^{a)}

Ref.	Channel model	Scenario	Channel characteristics	Antenna configuration
[76]	Ray-tracing model	Rectangular tunnel	The received power	SISO
[77]	Ray-tracing model	Rectangular subway tunnel	PSD, Doppler spread, Doppler shift	SISO
[56]	Multi-mode model	Rectangular road tunnel, subway tunnel	Field distribution, PDP	SISO
[78]	Multi-mode waveguide model	Rectangular underground mine, semicircular subway tunnel	Angular properties, correlation of array elements, PAS	MIMO
[79]	GO model	Rectangular underground mine	Large-scale fading, small-scale fading	SISO
[25]	FSMM	Rectangular subway tunnel	Number of states, distance interval, SNR	SISO
[80]	Propagation-graph theory based model	Arched tunnel	Channel coefficients, CIR in delay, antennas' correlation coefficient, channel capacity	MIMO
[81]	Physics-based deterministic UWB	Rectangular tunnel	Received power, rms delay spread, CIR, channel transfer function	SISO
[63]	GBSB model	Rectangular tunnel	Space-time correlation function, PDF of AoA, Rice factor	MIMO
[74]	WINNER model	Rectangular subway tunnel	PL, fast fading, delays, AoA, AoD	MIMO
[64]	GBSM	Semicircular tunnel	Time-variant transfer function, frequency correlation function, CCF, ACF	MIMO
[82]	Hybrid model	Rectangular tunnel	The received power	SISO

a) AoA: angle of arrival; AoD: angle of departure; rms: root mean square; PSD: power spectrum density; PAS: power azimuth spectrum; SNR: signal to noise; CCF: cross correlation function; ACF: autocorrelation function.

方法来计算任意形状隧道的路径损耗。对于基于几何光学理论的射线追踪方法，隧道空间内任一点的电磁场都可以看作是所有可能的传播路径射线的叠加。这些路径可以通过隧道墙壁、顶部及底部的镜像方法得到。因此，根据电磁波的反射定律，电磁场的计算方法为^[56]

$$E_x^{R_x} = E_x^{T_x} \sum_{p,q} \frac{e^{-jk r_{pq}}}{r_{pq}} S^p \cdot R^q, \quad (2)$$

其中， $E_x^{T_x}$ 和 $E_x^{R_x}$ 分别表示发送端、接收端的电磁场， r_{pq} 代表镜像点和接收端之间的距离， R^q 和 S^p 分别为隧道墙壁水平及垂直方向的 Fresnel 反射系数。该模型的计算复杂度比较高，并且模型中包括

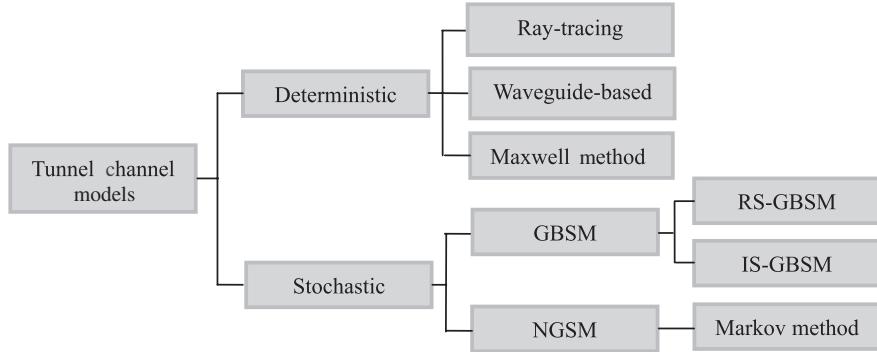


图 3 高铁隧道信道模型分类
Figure 3 Classification of HST tunnel channel models

了一些不合实际的近似, 因此, 一般用于定性的预测.

3.2.2 波导信道模型

考虑隧道的几何形状和隧道材料的电特性等, 无线波在隧道内传播可以被建模为类似在波导内的传播. 文献 [88] 中提出, 当载波频率高于几百 MHz 时, 隧道中将出现波导效应. 由于隧道独特的结构, 将会产生大量的反射和散射成分, 进而产生波导效应. 文献 [21] 提出了波导模型, 该模型考虑将隧道看作一个矩形波导, 采用模式论的方法来描述隧道内无线波的传播. 所谓模式, 又称为横模, 被用来描述波导截面内的场分布情况. 一般隧道内有两种传播模式, 即横向电模式和横向磁模式. 每种模式都对应一个截止频率, 当通信频率高于模式对应的截止频率时, 这些模式就会保留下. 此时, 隧道内的场分布可以看作是所有保留下来的模式的加权. 在近场区时, 电磁波可以看作包含大量的模式, 导致信号的衰落较快. 经过一定距离的传输, 高阶模式衰减迅速, 在远场区只有低阶模式占主导. 波导模型可以用来建模隧道中远场区的信号传输, 而不适用于建模近场区多模共存的情形. 因此, 波导模型应该与另一种可以建模多模情况的模型相结合, 形成一个完备的隧道信道模型.

随着通信频率的增加, 通信频率可能会高于大部分模式的截止频率. 此时, 隧道内会存在大量的模式. 在一个较长的隧道中, 当操作频率高于几 GHz 时, 近场区的距离会变长, 火车在近场区运行持续的时间将变长. 这就意味着随着通信频率的增加, 近场区的距离将变大. 此外, 当火车在隧道中运行时, 隧道本身也会对场分布产生一定的影响. 因此, 在较高通信频率下的多模传输和车身影响问题需要进一步的研究.

3.2.3 全波模型

全波模型采用有限差分技术^[23], 通过数值方法解 Maxwell 方程得到, 是目前使用较多的一种确定性信道建模方法. 该方法通过把 Maxwell 方程组分别在空域和时域上进行差分处理, 来交替计算出空间中的电磁场, 再通过时域上的更新来描述电磁场变化, 进而进行数值计算. 该方法可以直接模拟电磁场分布, 具有很高的精度.

除了广泛使用的有限差分方法, 解 Maxwell 方程的方法还有很多种, 如矩量法^[89]、有限元法^[90]、矢量抛物线方程法^[91]. 有限差分方法主要用于解偏微分方程, 由于考虑反射、散射和衍射等因素的影响, 可以用于研究复杂环境中电磁波的传播. 矩量法主要用于散射的情况, 解体积积分方程问题. 使用矩量法, 算子方程用矩阵形式表示, 电磁场可以通过求解矩阵得到. 有限元法常被用来寻找偏微分方

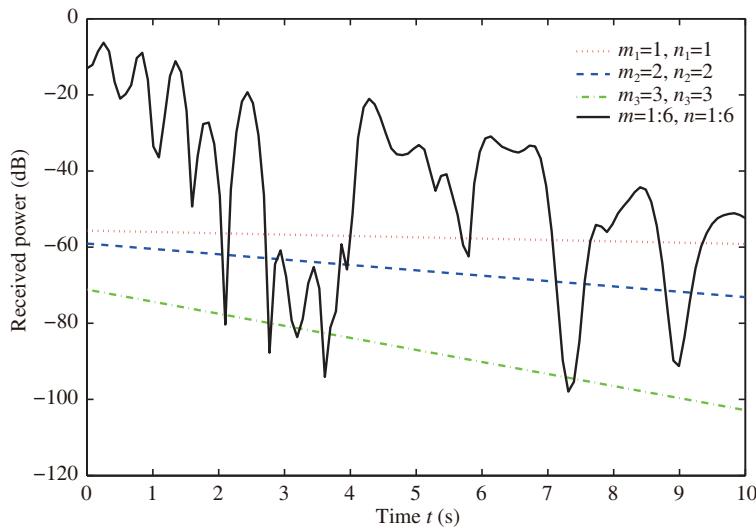


图4 (网络版彩图) 在多模隧道信道模型中单模和多模情况下接收功率的变化

Figure 4 (Color online) The received power for multi-mode and single-mode cases in a multi-mode tunnel channel model

程的近似解,它可以用来计算任意形状高铁隧道的电磁场分布,并且具有很高的计算复杂度^[90]. 矢量抛物线方程法可以用来计算直道和弯道处的电磁场分布,但基于该方法得到的隧道模型的计算复杂度相对较大^[9].

3.2.4 混合模型

目前有多种方法可用来建模隧道中的电波传播. 每种方法均有不同程度的优点和不足,为了充分实现优势互补,一些研究者已经开展了混合信道模型的研究. 文献[56]中采用几何光学模型和波导模型相结合的建模思路,研究了多模模型. 通过采用模式匹配方法,将几何光学模型中的射线叠加为不同模式密度下的模式相加,描述了近场区和远场区的电磁波传播,并且深入分析了隧道信道的一些特性. 基于该模型,文献[75]提出了一个与时间相关的多模模型,进而分析了时间自相关函数和功率谱密度等信道特性. 此外,还分析了多模和单模情况下的功率分布情况,如图4所示. 从图4中可以观察到最低阶模衰减最小,高阶模将经历更高的衰减,总的衰减是各个单模衰减情况的叠加. 文献[82]提出了将射线追踪与矢量抛物线方程法相结合的混合模型,通过使用矢量抛物线方程法,弥补了射线追踪法的限制性. 因此,鉴于单个模型不能很好地描述信道特性,未来建模中可以考虑两种模型相结合的建模思路,如射线追踪法和波导模型的结合、射线追踪法和全波模型的结合等.

3.2.5 几何随机信道模型

几何随机信道模型描述为发送端与接收端的散射体按照一定的概率分布随机分布在某种特定的几何形状上^[92]. 该类信道模型可包含规则形状的几何随机信道模型和不规则形状几何随机信道模型. 规则形状的几何随机信道模型假设所有散射体分布在规则的几何图形上,例如二维的单圆、双圆、椭圆及三维的单球、双球、椭圆柱等. 基于各种几何关系,推导出信道冲击响应,进而计算出相应的信道模型的统计特性^[93]. 文献[6]提出了一个非平稳的规则形状几何随机信道模型,用于高铁信道建模. 该模型是基于多个共焦的椭圆来描述,并考虑将所有的参数时变化处理. 基于该模型,推导得出一些小尺度统计特性,分析结果表明:角度的时变性将会影响统计特性的时变性. 文献[6,94]所提几何随

机信道模型被用来建模诸如开阔场景、高架桥及路堑等不同的高铁场景,但是不能直接用于建模隧道场景。由于隧道本身的特殊性会导致更多的反射及散射情况,在隧道中,散射体集中在隧道的顶部、底部和两侧墙壁,因此,隧道内散射体的几何分布不同于其他高铁场景。文献 [63] 提出了一个二维的基于几何特性的窄带单反射模型。该模型假设散射体分布在一个二维长方形上,其信道冲击响应表示为接收端的不同幅度、相位和时延的叠加。该模型相当简化,并不能很好地反应真实的隧道信道。结合实际情况,隧道信道建模时需要考虑俯仰角度的影响,来进行三维信道建模。文献 [64] 中,提出了一个三维几何随机信道模型,用于建模公路隧道^[95],并研究了一些重要的信道统计特性。但该几何随机信道模型是基于广义平稳的假设来开展建模工作的,对于高铁隧道建模并不适用^[96,97]。综上,考虑高铁接收端快速运行带来的非平稳特性的三维的隧道信道模型,是人们所期待的。

3.2.6 有限状态 Markov 模型

文献 [25] 提出了一个隧道信道有限状态 Markov 模型。该模型是基于实际的车辆控制通信系统的信道测量得到的,充分考虑了车辆的具体位置来进行准确的信道建模。收发端的距离被划分为很多小间隔,在每一个小间隔中应用有限状态 Markov 模型。为了捕捉隧道信道的特征,采用不同的接收信噪比来定义信道状态,继而用一个有限状态 Markov 模型来追踪状态变化进行建模。分析表明,状态数和距离间隔对模型的准确性均有一定影响。

4 高铁隧道信道测量与建模中未来的研究方向

本节主要讨论了未来高铁隧道信道测量与建模中的一些研究方向。这些研究方向对于开展未来的信道测量工作以及提出真实的隧道信道模型具有一定的指导意义。

4.1 高铁隧道信道统计特性

研究高铁隧道信道的统计特性对于理解和分析高铁隧道通信系统是至关重要的。表 1 总结了现有的信道测量活动中分析的一系列的信道特性。但是,大部分的信道特性研究侧重于大尺度分析。表 2 列出了一些隧道信道模型,但相应的理论分析较欠缺,它们不能很好地用于描述隧道内真实的传播环境。因此,开展高铁隧道信道模型统计特性的研究工作,对于未来高铁隧道通信系统的发展是十分必要的。

4.2 高铁隧道信的非平稳性

现有的高铁测量活动已经证明了高铁信道的平稳间隔只持续很短的时间^[98~100],这个发现同样适用于高铁隧道信道中。但是,现有的高铁隧道建模中很少考虑隧道信道的非平稳特性。因此,未来的研究中应着重考虑这一特征。

4.3 三维几何随机信道建模

现有的几何随机信道模型主要考虑了隧道两侧墙壁的影响,提出了二维的广义平稳假设条件下的信道模型^[63]。该模型中并未考虑俯仰角的影响,分析相对简化,不够准确。因此,更多的考虑隧道顶部、底部以及侧壁影响的三维非平稳宽带隧道信道模型是十分必要的。考虑俯仰角的影响,可以更加准确地模拟真实的隧道信道传播环境。结合 WINNER 模型和隧道独特的传播特性,高铁隧道环境可

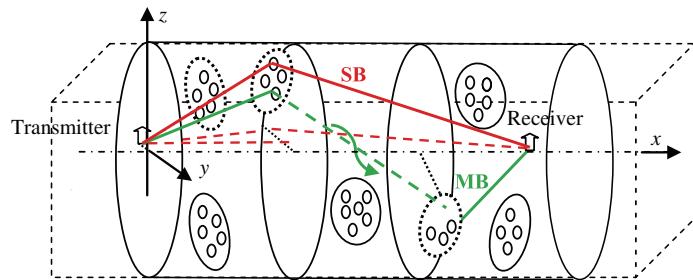


图 5 (网络版彩图) 三维的规则形状高铁隧道几何随机信道模型
Figure 5 (Color online) A 3D RS-GBSM for HST tunnel scenarios

以描述为一个三维的规则几何形状,如长方体或圆柱体^[101]. 图 5 中描述了一种基于几何特性的三维隧道信道模型,该模型是基于簇框架提出的,由直射、单次反射 (Single-bounced, SB) 和多次反射 (Multi-bounced, MB) 成分组成. 模型中假设簇随机分布在隧道内部. 根据到达角和离开角的几何关系,推导得到信道冲击响应,并进一步研究了信道的统计特性,如时间自相关、空间互相关以及功率谱密度等.

4.4 用于不同类型隧道的通用信道模型

在实际的高铁隧道中,存在多种类型的高铁隧道,如长方形、圆形以及拱形隧道. 不同形状的隧道会对信道特性产生一定的影响,并且会导致不同程度的信号衰减. 在长方形隧道中,主要由两面垂直的隧道墙壁和两个水平的部分组成. 在圆形隧道中,主要包含圆形墙壁部分和地面部分. 此外,拱形隧道主要包括两种情况,一种是有一个拱形顶和三面墙,另一种是包含一个拱形的墙和一个地面部分. 对于不同类型的高铁隧道,考虑构建不同的信道模型来描述或近似描述信号的传输空间. 在未来研究中,一个准确的、通用的、可以用来描述不同类型隧道信道环境的信道模型是人们所期待的.

4.5 系统性能

对于高铁隧道通信系统的设计和网络规划而言,系统性能的研究是十分必要的. 文献 [102] 通过分析误码率或信道容量,研究了使用 MIMO 技术来提高链路的可靠性. 此外,还提出了一些最佳接收分集方案,如选择组合和最大比合并. 文献 [103] 通过考虑诸如最大比合并和循环延迟分集的空间分集技术,来研究地铁隧道通信系统的误码率性能. 此外,文献 [104] 通过分析覆盖效率,评估了高铁隧道通信系统中 DAS 的应用. 在未来的研究中,将考虑一些新的技术,如大规模 MIMO, 用于高铁通信系统中来提升通信质量. 因此,将需要更加全面的高铁隧道通信系统的性能分析,研究信道模型对系统性能的影响.

5 结论

本文提供了一个全面的高铁隧道场景信道测量与建模相关的综述. 根据不同的载波频率、隧道参数、天线配置等,介绍了现有的一些隧道测量活动. 然后,根据不同的建模方法,分类归纳了一些现有的隧道信道模型,介绍了一些大尺度和小尺度衰落信道特性. 最后,提出了高铁隧道信道测量与建模的未来研究方向,用于构建未来第五代移动通信系统下的高铁隧道信道模型.

参考文献

- 1 IMT-2020 Promotion Group. 5G Visions and Requirements. White Paper. <http://www.imt-2020.cn/en/documents/listByQuery?currentPage=1&content=>
- 2 Wang C X, Haider F, Gao X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 122–130
- 3 Liu Y, Ghazal A, Wang C-X, et al. Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey. *Sci China Inf Sci*, 2017, 60: 101301
- 4 Ai B, He R, Zhong Z D, et al. Radio wave propagation scene partitioning for high-speed rails. *Int J Antenn Propag*, 2012, 2012: 1–7
- 5 Wang C-X, Wu S B, Bai L, et al. Recent advances and future challenges for massive MIMO channel measurements and models. *Sci China Inf Sci*, 2016, 59: 021301
- 6 Ghazal A, Wang C X, Ai B, et al. A non-stationary wideband MIMO channel model for high-mobility intelligent transportation systems. *IEEE Trans Intell Transport Syst*, 2015, 16: 885–897
- 7 Fokum D T, Frost V S. A survey on methods for broadband internet access on trains. *IEEE Commun Surv Tut*, 2010, 12: 171–185
- 8 Wang C X, Ghazal A, Ai B, et al. Channel measurements and models for high-speed train communication systems: a survey. *IEEE Commun Surv Tut*, 2016, 18: 974–987
- 9 Hrovat A, Kandus G, Javornic T. A survey of radio propagation modeling for tunnels. *IEEE Commun Surv Tuts*, 2014, 16: 658–669
- 10 Guan K, Zhong Z D, Alonso J I, et al. Measurement of distributed antenna system at 2.4 GHz in a realistic subway tunnel environment. *IEEE Trans Veh Technol*, 2012, 61: 834–837
- 11 Briso-Rodriguez C, Cruz J M, Alonso J I. Measurements and modeling of distributed antenna systems in railway tunnels. *IEEE Trans Veh Technol*, 2007, 56: 2870–2879
- 12 Guan K, Zhong Z D, Ai B. Statistic modeling for propagation in tunnels based on distributed antenna systems. In: Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium, Florida, 2013. 1920–1921
- 13 Mahmoud S F, Wait J R. Geometrical optical approach for electromagnetic wave propagation in rectangular mine tunnels. *Radio Sci*, 1974, 9: 1147–1158
- 14 Porrat D. Radio propagation in hallways and streets for UHF communications. Dissertation for Ph.D. Degree. California: Stanford University, 2002
- 15 Zhang J C, Tao C, Liu L, et al. A study on channel modeling in tunnel scenario based on propagation-graph theory. In: Proceedings of IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC'16-Spring), Nanjing, 2016. 1–5
- 16 Wang Y H, Zhang Y P, Kouyoumjian R G. Ray-optical prediction of radio-wave propagation characteristics in tunnel environments part 1: theory, part 2: analysis and measurements. *IEEE Trans Antenn Propag*, 1998, 46: 1328–1345
- 17 Forooshani A E, Noghanian S, Michelson D G. Characterization of angular spread in underground tunnels based on the multimode waveguide model. *IEEE Trans Commun*, 2014, 62: 4126–4133
- 18 Dudley D G. Wireless propagation in circular tunnels. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2005, 53: 435–441
- 19 Didascalou D, Maurer J, Wiesbeck W. Subway tunnel guided electromagnetic wave propagation at mobile communications frequencies. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2001, 49: 1590–1596
- 20 Zhang Y P, Hwang Y. Enhancement of rectangular tunnel waveguide model. In: Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference (APMC'97), Hong Kong, 1997. 197–200
- 21 Emslie A G, Lagace R L, Strong P F. Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels. *IEEE Trans Antenn Propag*, 1975, 23: 192–205
- 22 Rana M, Mohan A. Segmented-locally-one-dimensional-FDTD method for EM propagation inside large complex tunnel environments. *IEEE Trans Mag*, 2012, 48: 223–226
- 23 Taflove A, Hagness S C. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method. 3rd ed. Norwood: Artech House, 2005
- 24 Wang Y, Safavi-Naeini S, Chaudhuri S. A hybrid technique based on combining ray tracing and FDTD methods for site-specific modeling of indoor radio wave propagation. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2000, 48: 743–754

- 25 Wang H W, Yu F R, Zhu L, et al. Finite-state markov modeling for wireless channels in tunnel communication-based train control systems. *IEEE Trans Intell Transport Syst*, 2014, 15: 1083–1090
- 26 Aikio P, Gruber R, Vainikainen P. Wideband radio channel measurements for train tunnels. In: Proceedings of the 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, 1998. 460–464
- 27 Guan K, Ai B, Zhong Z D, et al. Measurements and analysis of large-scale fading characteristics in curved subway tunnels at 920 MHz, 2400 MHz, and 5705 MHz. *IEEE Trans Intell Transport Syst*, 2015, 16: 2393–2405
- 28 Zhang Y P. A novel model for propagation loss prediction in tunnels. *IEEE Trans Veh Technol*, 2003, 52: 1308–1314
- 29 Kim Y M, Jung M S, Chin Y O, et al. Analysis of radio-wave propagation characteristics in curved tunnel. *Electrom Eng Soc*, 2002, 13: 1017–1024
- 30 He R S, Zhong Z D, Briso C. Broadband channel long delay cluster measurements and analysis at 2.4 GHz in subway tunnels. In: Proceedings of IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC'11-Spring), Yokohama, 2011. 1–5
- 31 Pardo J M G, Lienard M, Nasr A, et al. Wideband analysis of large scale and small scale fading in tunnels. In: Proceedings of the 8th International Conference on ITS Telecommunications (ITST'08), Phuket, 2008. 270–273
- 32 Lienard M, Degauque P, Baudet J, et al. Investigation on MIMO channels in subway tunnels. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2003, 21: 332–339
- 33 Cai X, Yin X F, Cheng X, et al. An empirical random-cluster model for subway channels based on passive measurements in UMTS. *IEEE Trans Commun*, 2016, 64: 3563–3575
- 34 Jia Y L, Zhao M, Zhou W Y, et al. Measurement and statistical analysis of 1.89 GHz radio propagation in a realistic mountain tunnel. In: Proceedings of International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP'15), Nanjing, 2015. 1–5
- 35 Zhang L, Fernandez J R, Briso-Rodriguez C, et al. Broadband radio communications in subway stations and tunnels. In: Proceedings of the 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP'15), Lisbon, 2015. 1–5
- 36 Li J X, Zhao Y P, Zhang J, et al. Radio channel measurements and analysis at 2.4/5 GHz in subway tunnels. *China Commun*, 2015, 12: 36–45
- 37 Zhang Y P, Jiang Z R, Ng T S, et al. Measurements of the propagation of UHF radio waves on an underground railway train. *IEEE Trans Veh Technol*, 2000, 49: 1342–1347
- 38 Molina-Garcia-Pardo J M, Lienard M, Nasr A, et al. On the possibility of interpreting field variations and polarization in arched tunnels using a model for propagation in rectangular or circular tunnels. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2008, 56: 1206–1211
- 39 Kim Y M, Jung M, Lee B. Analysis of radio wave propagation characteristics in rectangular road tunnel at 800 MHz and 2.4 GHz. In: Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Columbus, 2003. 1016–1019
- 40 Bashir S. Effect of antenna position and polarization on UWB propagation channel in underground mines and tunnels. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2014, 62: 4771–4779
- 41 Ai B, Guan K, Zhong Z D, et al. Measurement and analysis of extra propagation loss of tunnel curve. *IEEE Trans Veh Tech*, 2016, 65: 1847–1858
- 42 Savic V, Ferrer-Coll J, Angskog P, et al. Measurement analysis and channel modeling for TOA-based ranging in tunnels. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2015, 14: 456–467
- 43 Li G K, Ai B, Guan K, et al. Path loss modeling and fading analysis for channels with various antenna setups in tunnels at 30 GHz band. In: Proceedings of the 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP'16), Davos, 2016. 1–5
- 44 He R S, Zhong Z D, Ai B, et al. Analysis of the relation between Fresnel zone and path loss exponent based on two-ray model. *IEEE Antenn Wirel Propag Lett*, 2012, 11: 208–211
- 45 Hrovat A, Kandus G, Javornik T. Four-slope channel model for path loss prediction in tunnels at 400 MHz. *IET MicroW Antenn Propag*, 2010, 4: 571–582
- 46 Guan K, Zhong Z D, Ai B, et al. Research of propagation characteristics of break point; near zone and far zone under operational subway condition. *Wirel Personal Commun*, 2013, 68: 489–505
- 47 Marcuvitz N. Waveguide Handbook. New York: Maraw-Hill, 1951
- 48 Kwon H, Kim Y, Lee B. Characteristics of radio propagation channels in tunnel environments: a statistical analysis.

- In: Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium, Sendai, 2004. 2995–2998
- 49 Molina-Garcia-Pardo J M, Lienard M, Degauque P. Propagation in tunnels: experimental investigations and channel modeling in a wide frequency band for MIMO applications. EURASIP J Wirel Commun Netw, 2009, 2009: 560–571
- 50 Didascalou D, Maurer J, Wiesbeck W. Subway tunnel guided electromagnetic wave propagation at mobile communications frequencies. IEEE Trans Antenn Propag, 2001, 49: 1590–1596
- 51 Cheng L, Zhang P. Influence of dimension change on radio wave propagation in rectangular tunnels. In: Proceedings of the 5th Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, 2009. 1–3
- 52 Wang S. Radio wave attenuation character in the confined environments of rectangular mine tunnel. Modern Appl Sci, 2010, 4: 65–70
- 53 Zhang C-S, Guo L-F. Research on propagation characteristics of electromagnetic wave in tunnels with arbitrary cross sections. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Future Computer and Communication, Wuhan, 2010. 22–25
- 54 Zhou C M, Jacksha R. Modeling and measurement of wireless channels for underground mines. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Puerto Rico, 2016. 1253–1254
- 55 Cheng L F, Zhang L L, Li J. Influence of mine tunnel wall humidity on electromagnetic waves propagation. Int J Antenn Propag, 2012, 2012: 1–5
- 56 Sun Z, Akyildiz I F. Channel modeling and analysis for wireless networks in underground mines and road tunnels. IEEE Trans Commun, 2010, 58: 1758–1768
- 57 Mariage P, Lienard M, Degauque P. Theoretical and experimental approach of the propagation of high frequency waves in road tunnels. IEEE Trans Antenn Propag, 1994, 42: 75–81
- 58 Huo Y, Xu Z, Zheng H D, et al. Effect of antenna on propagation characteristics of electromagnetic waves in tunnel environments. In: Proceedings of Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics, Shanghai, 2009. 268–271
- 59 Han X, Wang S, Fang T, et al. Propagation character of electromagnetic wave of the different transmitter position in mine tunnel. In: Proceedings of International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, Wuhan, 2009. 530–533
- 60 Rissafi Y, Talbi L, Ghaddar M. Experimental characterization of an UWB propagation channel in underground mines. IEEE Trans Antenn Propag, 2012, 60: 240–246
- 61 Kermani M H, Kamarei M. A ray-tracing method for predicting delay spread in tunnel environments. In: Proceedings of IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, Hyderabad, 2000. 538–542
- 62 Zhang Y P, Hong H J. Ray-optical modeling of simulcast radio propagation channels in tunnels. IEEE Trans Veh Technol, 2004, 53: 1800–1808
- 63 Zheng H D, Nie X Y. GBSB model for MIMO channel and its spacetime correlation analysis in tunnel. In: Proceedings of International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, Wuhan, 2009. 1–8
- 64 Avazov N, Patzold M. A novel wideband MIMO car-to-car channel model based on a geometrical semi-circular tunnel scattering model. IEEE Trans Veh Technol, 2016, 65: 1070–1082
- 65 Bernado L, Roma A, Paier A, et al. In-tunnel vehicular radio channel characterization. In: Proceedings of IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Budapest, 2011. 15–18
- 66 Wang H W, Yu F R, Zhu L, et al. Finite-state markov modeling of tunnel channels in communication-based train control systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications Budapest, 2013. 5047–5051
- 67 Yao S H, Wu X L. Modeling for MIMO wireless channels in mine tunnels. In: Proceedings of International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE), Wuhan, 2011. 520–523
- 68 Ye X K, Cai X S, Wang H W, et al. Tunnel and non-tunnel channel characterization for high-speed-train scenarios in LTE-A networks. In: Proceeding of IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, 2016. 1–5
- 69 Ranjany A, Misraz P, Dwivediz B, et al. Channel modeling of wireless communication in underground coal mines. In: Proceedings of the 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), Bangalore, 2016. 1–2
- 70 Molina-Garcia-Pardo J M, Lienard M, Stefanut P, et al. Modeling and understanding MIMO propagation in tunnels.

- J Commun, 2009, 4: 241–247
- 71 Minghua J. A modified method for predicting the radio propagation characteristics in tunnels. In: Proceedings of the 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), Wuhan, 2011. 1–4
- 72 Masson E, Combeau P, Berbineau M, et al. Radio wave propagation in arched cross section tunnels simulations and measurements. J Commun, 2009, 4: 276–283
- 73 Choudhury B, Jha R. A refined ray tracing approach for wireless communications inside underground mines and metrorail tunnels. In: Proceeding of IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC), Kolkata, 2011. 1–4
- 74 Hairoud S, Combeau P, Poussot Y. WINNER model for subway tunnel at 5.8 GHz. In: Proceedings of the 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Taipei, 2012. 743–747
- 75 Liu Y, Wang C X, Ghazal A, et al. A multi-mode waveguide tunnel channel model for high-speed train wireless communication systems. In: Proceedings of the 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, 2015. 1–5
- 76 Gentile C, Valoit F, Moayeri N. A retracing model for wireless propagation in tunnels with varying cross section. In: Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Anaheim, 2012. 5027–5032
- 77 Chen X, Pan Y T, Wu Y M, et al. Research on doppler spread of multipath channel in subwaytunnel. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communication Problem-Solving (ICCP), Beijing, 2014. 56–59
- 78 Forooshani A E, Noghanian S, Michelson D G. Characterization of angular spread in underground tunnels based on the multimode waveguide model. IEEE Trans Commun, 2014, 62: 4126–4133
- 79 Liu C G, Chen Q, Zhang E. A calculation model and characteristics analysis of radio wave propagation in rectangular shed tunnel. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), Xian, 2012. 535–539
- 80 Zhang J C, Tao C, Liu L, et al. A study on channel modeling in tunnel scenario based on propagation-graph theory. In: Proceedings of IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, 2016. 1–5
- 81 Zhou C M. Physics-based ultra-wideband channel modeling fortunnel/mining environments. In: Proceedings of IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), San Diego, 2015. 92–94
- 82 Zhang X, Sood N, Siu J K, et al. A hybrid ray-tracing/vector parabolic equation method for propagation modeling in train communication channels. IEEE Trans Antenn Propag, 2016, 64: 1840–1849
- 83 Ge X, Tu S, Han T, et al. Energy efficiency of small cell backhaul networks based on Gauss-Markov mobile models. IET Netw, 2015, 4: 158–167
- 84 Mao G, Anderson B D O. Graph theoretic models and tools for the analysis of dynamic wireless multihop networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, 2009. 1–6
- 85 Cichon D J, Zwick T, Wiesbeck W. Ray optical modeling of wireless communications in high-speed railway tunnels. In: Proceedings of IEEE 46th Vehicular Technology Conference on Mobile Technology for the Human Race, Atlanta, 1996. 546–550
- 86 Chen S H, Jeng S. K. SBR image approach for radio wave propagation in tunnels with and without traffic. IEEE Trans Veh Technol, 1996, 45: 570–578
- 87 Didascalou D, Schafer T, Weinmann F, et al. Ray-density normalization for ray-optical wave propagation modeling in arbitrarily shaped tunnels. IEEE Trans Antenn Propag, 2000, 48: 1316–1325
- 88 Dudley D, Mahmoud S, Lienard M, et al. On wireless communication in tunnels. In: Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Honolulu, 2007. 3305–3308
- 89 Gibson W C. The Method of Moments in Electromagnetics. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2008
- 90 Poitau G, Kouki A. Analysis of MIMO capacity in waveguide environments using practical antenna structures for selective mode excitation. In: Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Niagara, 2004. 349–352
- 91 Popov A V, Zhu N Y. Modeling radio wave propagation in tunnels with a vectorial parabolic equation. IEEE Trans Antenn Propag, 2000, 48: 1403–1412
- 92 Ghazal A, Wang C X, Haas H, et al. A non-stationary geometry-based stochastic model for MIMO high-speed train

- channels. In: Proceedings of the 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Taiwan, 2012. 7–11
- 93 Ghazal A, Yuan Y, Wang C X, et al. A non-stationary IMT-A MIMO channel model for high-mobility wireless communication systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2017, 16: 2057–2068
- 94 Ghazal A, Wang C X, Liu Y, et al. A generic non-stationary MIMO channel model for different high-speed train scenarios. In: Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Shenzhen, 2015. 1–6
- 95 Mao R, Mao G. Road traffic density estimation in vehicular networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, 2013. 4653–4658
- 96 Yuan Y, Wang C X, He Y, et al. 3D wideband non-stationary geometry-based stochastic models for non-isotropic MIMO vehicle-to-vehicle channels. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2015, 14: 6883–6895
- 97 Yuan Y, Wang C X, Cheng X, et al. Novel 3D geometry-based stochastic models for non-isotropic MIMO vehicle-to-vehicle channels. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2014, 13: 298–309
- 98 Chen B, Zhong Z, Ai B. Stationarity intervals of time-variant channel in high speed railway scenario. *J China Commun*, 2012, 9: 64–70
- 99 Wang C X, Cheng X, Laurenson D I. Vehicle-to-vehicle channel modeling and measurements: recent advances and future challenges. *IEEE Commun Mag*, 2009, 47: 96–103
- 100 Molisch A F, Tufvesson F, Karedal J, et al. A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels. *IEEE Wirel Commun Mag*, 2009, 16: 12–22
- 101 Liu Y, Wang C X, Lopez C, et al. 3D non-stationary wideband circular tunnel channel models for high-speed train wireless communication systems. *Sci China Inf Sci*, 2017, 60: 082304
- 102 Lienard M, Molina-Garcia-Pardo J M, Laly P, et al. Communication in tunnel: channel characteristics and performance of diversity schemes. In: Proceedings of the XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), Beijing, 2014. 1–4
- 103 Mouaki B A, Quenneville M. Performance evaluation of an L-band broadcast DAB/DMB system in simulated subway tunnel environment. In: Proceedings of the 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC-Fall'10), Ottawa, 2010. 1–6
- 104 Shuo T L, Zhao K, Wu H. Wireless communication for heavy haul railway tunnels based on distributed antenna systems. In: Proceedings of IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC'16-Springer), Nanjing, 2016. 1–5

Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey

Yu LIU¹, Ammar GHAZAL², Chengxiang WANG^{1,3*}, Xiaohu GE⁴, Yang YANG⁵ & Yapei ZHANG¹

1. *Shandong Provincial Key Lab of Wireless Communication Technologies, School of Information Science and Engineering (ISE), Shandong University, Jinan 250100, China;*
2. *Centre for Electronic and Communications Engineering, School of Engineering and Sustainable Development, De Montfort University, Leicester LE1 9BH, U.K.;*
3. *Institute of Sensors, Signals and Systems, School of Engineering & Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, U.K.;*
4. *Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;*
5. *Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology (SIMIT), Chinese Academy of Sciences (CAS), Shanghai 200050, China*

* Corresponding author. E-mail: cheng-xiang.wang@hw.ac.uk

Abstract The rapid development of high-speed trains (HSTs) has introduced new challenges for HST wireless communication systems. Realistic HST channel models play a critical role in designing and evaluating HST communication systems. Because of length limitations, the bounds of tunnels, and waveguide effects, the channel characteristics in tunnel scenarios are very different from those in other HST scenarios. Therefore, accurate tunnel channel models that consider both large-scale and small-scale fading characteristics are essential for HST communication systems. Furthermore, certain characteristics of tunnel channels have not been investigated sufficiently. This article provides a comprehensive review of measurement systems for tunnels and presents tunnel channel models using various modeling methods. Finally, the future directions for HST tunnel channel measurement and modeling are discussed.

Keywords 5G communication, high-speed train (HST), tunnel scenario, tunnel channel measurement, tunnel channel model, non-stationary statistical property



Yu LIU was born in 1988. She received her Ph.D. degree from Shandong University. She is currently a postdoctoral student at the School of Information Science and Engineering (ISE) of Shandong University, China. Her main research interests include non-stationary channel modeling, high-speed train wireless propagation characterization and modeling, and channel modeling for special scenarios.



Ammar GHAZAL was born in 1983. He received his Ph.D. degree from Heriot-Watt University, Edinburgh, U.K., in 2015. He is currently a lecturer for the Faculty of Technology at De Montfort University, Leicester, U.K. His main research interests include 5G communication systems, wireless propagation channel characterization and modeling, non-stationary MIMO channel models, and high mobility wireless propagation.



Cheng-Xiang WANG received his Ph.D. degree in wireless communications from Aalborg University, Denmark, in 2004. He has worked at Heriot-Watt University, Edinburgh, UK since 2005 and became a professor of wireless communications in 2011. His current research interests include wireless channel measurement/modelling and (B)5G wireless communication networks.



Xiaohu GE received his Ph.D. degree in communication and information engineering from the Huazhong University of Science and Technology (HUST), Wuhan, China, in 2003. He is currently a professor at the School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology (HUST). His research interests include mobile communications, traffic modeling in wireless networks, green communications, and interference modeling in wireless communications.