

文章编号:1671-1637(2026)04-0259-17

智能交通场景无线通信信道特性与建模研究综述

李昌振^{1,2}, 罗素素¹, 张子健¹, 余发勇³, 曾旭明^{*4}, 陈伟³

(1. 武汉理工大学信息工程学院, 湖北武汉 430070; 2. 武汉理工大学宽带无线通信与传感器网络湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070; 3. 武汉理工大学自动化学院, 湖北武汉 430070; 4. 武汉理工大学航运学院, 湖北武汉 430063)

摘要:为推动移动通信技术进一步赋能智能交通系统建设,从无线信道测量、信道特性、信道模型3个方面,梳理了国内外多种交通场景的通信信道研究现状;针对不同交通系统的应用与技术需求,分别对公路交通、轨道交通、水路交通、低空等场景的相关信道测量与建模结果进行了总结。在信道测量方面,从通信环境对电波传播影响机理的角度,阐述了典型测量场景的选取原则,总结了常见的影响电波传播的因素;在信道特性方面,分析了环境因素对信道特性的影响,归纳和整理了不同交通场景下典型信道特性;在信道模型方面,介绍了不同交通场景信道模型构建方法,总结了所建立的可靠信道模型。结果表明:公路交通场景中,无线信道特性受周围环境,如道路两侧建筑、车辆等影响明显,由于动态场景丰富,电波传播在视距/非视距之间频繁切换,由此产生的多径效应、多普勒效应明显,对低时延、高可靠通信提出迫切需求;轨道交通场景中,重点分析高架桥、路堑、车站、隧道等环境下信道特性与模型,指出实现列车运行全过程(包括列车、周围环境)高度信息化的通信技术需求迫切;水路交通场景中,主要分析海洋环境和内河环境下的信道特性与模型,分析海洋通信受海浪运动、海面蒸发波导等特殊因素导致的信道时变非平稳性,从而揭示内河通信场景多变、干扰动态、传播多样、水陆混合的多维度复杂因素对无线电波传播的影响机理;低空场景中,阐述通信信道在复杂城市环境和低空动态空域中的飞控、图传数据可靠传输的需求。研究有助于深入理解不同交通场景无线信道特性,为现代综合智能交通系统提供更可靠、高效的通信技术支持。

关键词:智能交通系统;信道测量与建模;综述;无线信道;信道特性;可靠通信链路

中图分类号:U495 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.077

Review of wireless communication channel characteristics and modeling research for intelligent transportation scenarios

LI Chang-zhen^{1,2}, LUO Su-su¹, ZHANG Zi-jian¹, YU Fa-yong³, ZENG Xu-ming^{*4}, CHEN Wei³

(1. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 4. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: To promote mobile communication technologies to further empower the construction of

出版历程:2025-05-05 收稿,2025-08-27 修回,2025-09-26 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52102399,52401425);国家重点研发计划(2023YFB2603800);湖北省重点研发专项项目(2023BAB052)

作者简介:李昌振(1991-),男,山东济宁人,副教授,工学博士,E-mail: changzhen.li@whut.edu.cn。

*通信作者:曾旭明(1989-),男,湖南邵东人,副教授,工学博士,E-mail: zengxuming@whut.edu.cn。

引用格式:李昌振,罗素素,张子健,等.智能交通场景无线通信信道特性与建模研究综述[J].交通运输工程学报,2026,26(4):259-275.

Citation: LI Chang-zhen, LUO Su-su, ZHANG Zi-jian, et al. Review of wireless communication channel characteristics and modeling research for intelligent transportation scenarios[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 259-275.

intelligent transportation systems, the research status of communication channels in various transportation scenarios in China and abroad was reviewed from three aspects: wireless channel measurement, channel characteristics, and channel modeling. According to the application and technical requirements of different transportation systems, the relevant channel measurement and models results for road transportation, rail transportation, waterway transportation, and low-altitude scenarios were summarized respectively. In terms of channel measurement, the selection principles of typical measurement scenarios were elucidated from the perspective of the influence mechanism of communication environments on radio wave propagation; the common factors affecting radio wave propagation were summarized. In terms of channel characteristics, the influence of environmental factors on channel characteristics was analyzed, and the typical channel characteristics under different transportation scenarios were summarized and sorted out. In terms of channel models, the construction methods of channel models for different transportation scenarios were introduced, and the established reliable channel models were summarized. The results indicate that in the road transportation scenario, the wireless channel characteristics are significantly affected by the surrounding environments, such as buildings and vehicles on both sides of the road. Due to the rich dynamic scenarios, radio wave propagation frequently switches between line-of-sight and non-line-of-sight, and the resulting multipath effect and Doppler effect are obvious, which puts forward an urgent demand for low-latency and high-reliability communications; in the rail transportation scenario, the channel characteristics and models in environments such as viaducts, cuttings, stations, and tunnels are emphatically analyzed, pointing out that there is an urgent need for communication technologies to realize the highly informatized whole process of train operation (including trains and surrounding environments); in the waterway transportation scenario, the channel characteristics and models under marine and inland river environments are mainly analyzed; the time-varying non-stationarity of the channel caused by special factors such as ocean wave movement and sea surface evaporation duct in marine communications is analyzed, and the influence mechanism of multidimensional complex factors such as changeable scenarios, dynamic interference, diverse propagation, and land-water mixture on radio wave propagation in inland river communications is revealed; in the low-altitude scenario, the demands for reliable transmission of flight control and image transmission data of communication channels in complex urban environments and low-altitude dynamic airspaces are expounded. The research is helpful to deeply understand the wireless channel characteristics of different transportation scenarios and provides more reliable and efficient communication technology support for modern integrated intelligent transportation systems.

Keywords: intelligent transportation system; channel measurement and modeling; review; wireless channel; channel characteristic; reliable communication link

Publication history: Received 2025-05-05; Received in revised form 2025-08-27; Accepted 2025-09-26

Funding: National Natural Science Foundation of China (52102399, 52401425); National Key R&D Program of China (2023YFB2603800); Key Research and Development Program of Hubei Province (2023BAB052)

* **Corresponding author:** ZENG Xu-ming, associate professor, PhD, E-mail: zengxvming@whut.edu.cn.

0 引 言

大力发展智慧交通,推进数据资源赋能交通发展,构建泛在先进的交通信息基础设施,是《交通强

国建设纲要》提出的重点任务。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》进一步提出,实现第五代移动通信(5G)、物联网、大数据、云计算、人工智能等技术与交通运输深度融合,推动交通运输领域技术

装备更加先进。稳步推进5G等网络通信设施的覆盖,提升交通运输领域信息传输的覆盖度、实时性和可靠性,构建设施设备信息交互网络。

从无线通信的角度看,在先进的交通信息基础设施建设中,高通量、高速率、高可靠、低时延、多连接的通信网络担负着感知、控制、计算、决策等数据传输、互联与共享的重要任务,可以赋能交通,是智能交通系统建设的重要保障技术之一^[1-2]。

车载通信技术可实现车辆与环境、设备、车、云等信息的传输共享,支持大量感知数据的快速融合,以满足各交通实体对时延、吞吐量和可靠性的差异化需求,从而大幅提高道路交通效率和驾驶安全水平。随着道路智能交通系统的深入发展,车载无线通信技术已应用到交通安全、车辆碰撞预警等方面^[3]。同时,对计算、控制、决策信息分发提供可靠传输通道,提升了车联网“泛在感知”能力^[4]。以数字设施为基础,信息技术为手段,智能交通为主线,通过无线通信技术和其他现代技术的融合赋能,高效、可靠地适应高动态的道路交通复杂环境^[5]。

轨道交通通信系统为列车关键任务提供高可靠性的网络服务,是保障列车安全和高效运行的基础。随着智能轨道交通建设的推进,要实现列车运行全过程(包括列车、周围环境)的高度信息化,除列车控制、监控、语音、运维等基本信息传输以外,视频、感知、图像等多种融合数据的传输也需要可靠的通信链路^[6]。从GSM-R、LTE-R到5G-R,再到异构智能车载网络,无线通信技术在满足智能轨道交通低时延、高速率、高可靠传输的需求中逐步发展^[7-8]。

将蓬勃发展的陆上移动通信技术应用到海洋场景中,开展海洋通信网络及系统的研究设计,获取、传输、解析海洋信息,是人类将现代通信技术应用到认识海洋、开发海洋和经略海洋中的重要途径和技术手段。与陆地不同,海洋通信受地理水文环境影响,海浪运动、海面蒸发波导等特殊因素加剧信道时变非平稳性^[9]。揭示此类影响造成的海洋环境电波传播机理,建立可靠的通信链路,才可以更好地利用现代无线通信技术为智慧海洋、智慧港口、智慧码头等建设提供“全天时、全天候、全海域”信息服务支撑^[10]。

“岸基驾控为主,船端值守为辅”的新一代航运系统对于通信的需求体现在2个方面:①在船岸、船船之间实现位置、速度、航行计划、状态等基本信息以及感知、计算、决策、控制等融合信息的快速、可靠传输;②船内监控、视频、各系统之间交

互信息的共享交换,以及室内通信业务。目前,船舶与外界的通信网络包括卫星通信、无线局域网、Wi-Fi、LTE/4G、5G和有线通信等多种形式。随着综合承载业务需求提升,对数据传输速度、带宽、时延等要求越来越高,需推广新一代移动通信技术构建船岸实时通信,满足高通量、高速率、高可靠、低时延、多连接的智能航运通信需求^[11]。然而,内河通信环境场景多变、干扰动态、传播多样、水陆混合的多维度因素对电波传播的影响机理复杂、信道模型单一,无法满足信道特性的多维度准确表征^[12]。

低空经济方兴未艾。作为低空经济发展的重要基础,低空智能网可以支撑低空典型应用场景安全高效运行,是实现低空空域泛在感知、广域互联和智能管服应用的重要基础技术之一^[13]。在复杂城市环境和低空动态空域,需要实时、可靠的通信链路实现低时延、高速率、广覆盖、高可靠的飞控、图传数据传输。

为满足上述不同形式交通系统智能化、信息化建设需求,建设高通量、高速率、高可靠、低时延、多连接的智能交通场景通信网络,亟需对作为网络系统设计、网络优化、性能评估基础的无线信道特性和信道模型展开深入研究。本文对智能交通场景无线信道测量、信道特性与信道模型方面的进展进行了全面概述,侧重于公路交通、轨道交通、水路交通(海洋、内河)、低空等场景通信信道,并展示了相关测量与建模结果。同时,指出了智能交通场景无线信道研究方面的未来挑战和潜在技术。

1 典型交通场景通信特点

(1)公路交通场景:公路交通场景中,车载天线高度一般与车辆高度相当。电磁波传播过程受车辆高速移动、道路两侧建筑、植被及相邻车辆影响,导致信号在视距(Line of Sight, LoS)与非视距(Non Line of Sight, NLoS)状态间频繁切换,信道状态呈现高度时变性;动、静态反散射体引入大量多径分量,信号通过直射、反射、散射等多路径叠加传播,多径现象明显;同时,车辆高速运动导致多普勒频移,加剧信号解调复杂度。

(2)轨道交通场景:轨道交通场景中列车高速移动,在引发剧烈多普勒频移的同时,周围环境(如桥梁、山体等)遮挡同样会导致信号在LoS与NLoS状态间切换,环境中的反散射体造成丰富的多径效应,车站、桥梁、路堑、高架桥、隧道等不同结构对电波传

播造成的影响不同,这些都会影响通信信号传输。因此,为保证列车行驶安全,在轨道交通通信中对链路稳定性提出了较高要求。

(3)内河场景:内河场景水陆混合等特点显著,导致水上、陆上反散射体多维度复杂因素对无线电波传播造成影响,水面、河道两侧建筑、桥梁、船舶等引发反射、散射、衍射等,导致信号快衰落与时延扩展;同时,水面波动形成遮挡与散射加剧了电波传播的复杂性和时变性。

(4)海洋场景:海洋通信环境除了存在内河环境特点外,长距离传播导致的地球曲率衍射、海面蒸发波导导致的超视距传播也是造成电波传播复杂的重要因素。

(5)低空场景:低空无人机场景的通信一般由地面面向空中建立通信系统,无线电波在地面与低空环境中传播,受地面建筑、树木遮挡影响显著,存在高度相关信道特性。

图 1 简述了典型交通场景中的常见通信网络,由于不同交通形式所处的通信环境各异,无线电波传播存在不同的机制,导致无线信道特性存在较大差异。表 1 总结了不同交通场景无线通信的典型特点以及主要影响因素。在典型交通环境中通信特点各异,影响电波传播的因素不同,在各场景中电波传播机制也不尽相同。面向不同交通形式及其通信场景,需要对电波传播、信道特性等开展针对性的测量、分析和建模研究。

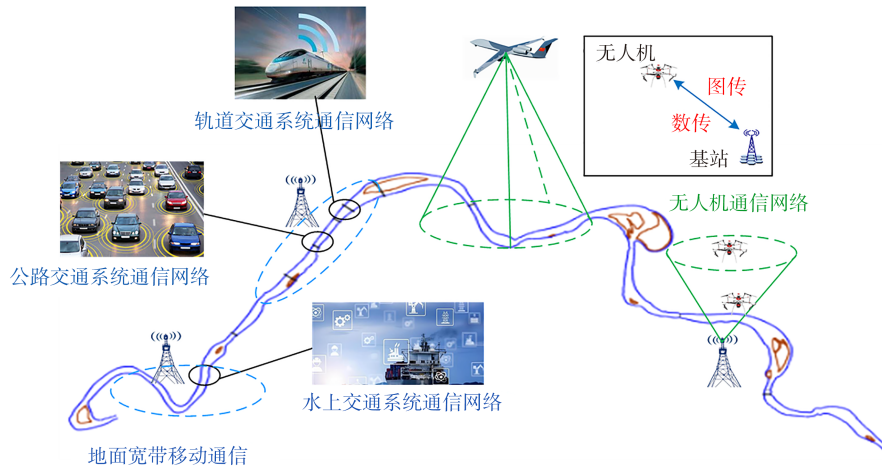


图 1 典型交通场景通信网络

Fig. 1 Communication networks in typical traffic scenarios

表 1 不同交通场景无线通信特点

Table 1 Wireless communication characteristics of different transportation scenarios

通信场景	通信特点	典型反散射体	主要传播机制
公路交通场景	受车辆高速移动、道路两侧建筑、植被及相邻车辆影响;信号视距与非视距传播切换频繁,信道状态高度时变;多径现象明显,多普勒频移加剧信号解调复杂度	建筑物、树木、车辆、路边基础设施、道路结构	直射、反射、散射、衍射、透射
轨道交通场景	列车高速移动,多普勒频移严重;信号视距与非视距传播切换频繁,信道状态高度时变;车站、桥梁、路堑、高架桥、隧道等不同结构对电波传播影响明显	建筑物、树木、路边基础设施、道路结构	直射、反射、散射、透射、衍射
内河场景	水陆混合,水陆反散射体多维度影响电波传播;水面、河道两侧建筑、桥梁、船舶等导致反射、散射、衍射等现象明显;水面波动加剧电波传播的复杂性和时变性	水面、建筑物、桥梁、船舶	直射、反射、散射、衍射、透射
海洋场景	近海存在水陆混合影响;水面、船舶等导致反射、散射、衍射现象;水面波动、大气波导等加剧电波传播的复杂性和时变性	水面、船舶	直射、反射、散射、衍射
低空场景	由地面面向空中建立通信系统,无线电波在地面与低空环境中传播;受地面建筑、树木遮挡影响显著,存在高度相关信道特性	建筑物、树木	直射、反射、散射、衍射、透射

2 面向智能交通场景的无线信道测量与信道特性

2.1 公路交通车载无线信道

交叉路口是公路交通中最常见的道路结构之一。由于结构复杂和遮挡频繁,信道特性呈现出明显的非平稳性。在视距传播区域,信号传输功率集中、时延小;而在非视距传播区域,均方根时延扩展(Root Mean Square Delay Spread, RMS DS)和均方根多普勒扩展均显著增加,且密集的多径分量在总能量中占比较高^[14]。动态散射体会造成时延扩展增加超过200 ns,多普勒扩展增加超过100 Hz^[15]。建筑密度和道路结构会导致车载信道的频率相关性、角度扩展(Angular Spread, AS)和频谱效率产生明

显差异,测量结果表明道路较宽和建筑密度较低的区域中RMS DS较小,而高密度建筑区域反射路径增多使得角度扩展和时延扩展显著上升^[16]。

市内高架桥是现代城市建设中为缓解交通拥堵所设计的重要道路结构。在城市高架桥隔音壁等特殊结构作用下,车载无线信道特性会受到不同的影响。文献[17]、[18]研究表明由于隔音壁对车载无线信号的遮挡,信道小尺度衰落特性服从Weibull分布和Nakagami-m分布,严重时会导致深衰落现象发生。图2为城市高架桥场景车载信道的接收功率和小尺度衰落变化曲线。由于隔音壁的影响,信道特性在视距和非视距传播区域之间发生瞬间变化,产生较大波动,这对该场景下车载无线通信网络的稳定性提出了较高要求。

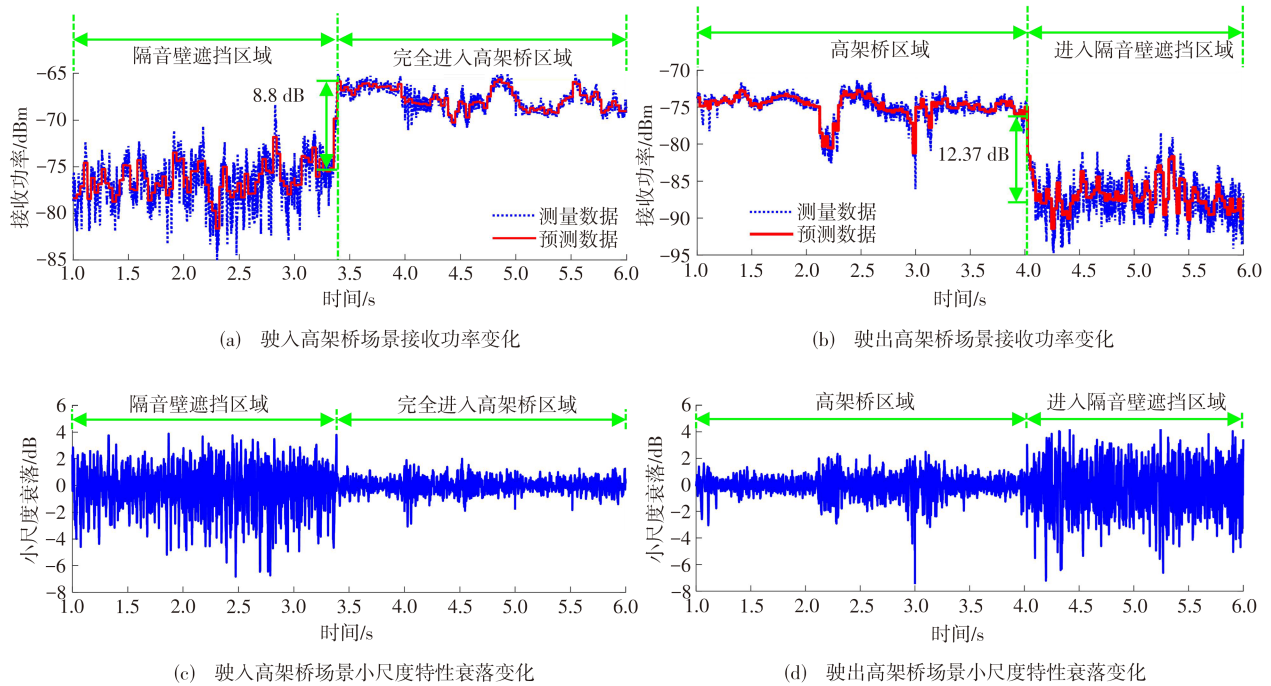


图2 城市高架桥场景信道特性

Fig. 2 Channel characteristics for urban viaduct scenarios

在高速公路和快速路环境下,车辆高速运动导致多普勒效应显著,对向行驶场景更加剧烈,表征信道小尺度衰落分布的莱斯K因子会因反射效应增强而降低^[19]。窄波束车-基础设施(Vehicle to Infrastructure, V2I)通信则表现出显著的时空色散特性,波束宽度影响路径损耗、RMS DS和AS,并改变信道的空间扩展范围,NLoS情况下频率和空间域的色散加剧^[20]。不同道路类型的复杂结构、遮挡等导致莱斯K因子降低、RMS DS增大^[20]。在主干道与支路对比中,较大的交通流量产生更多的多径分量^[21]。

在一些典型的跨河城市中,桥梁是常见的道路结构。由于桥梁遮挡及丰富的多径来源,接收信号的传播损耗在NLoS条件下显著增加,研究表明最大额外传播损耗可达23 dB,信道的衰落深度也明显高于没有桥梁的场景^[22]。同时,不同桥梁结构也会导致电波传播特性差异,如普通板桥场景的莱斯K因子高于悬索桥场景,反映出其信号传播的直射径成分更强,而悬索桥场景信道特性表现出更强的多径效应^[23]。图3为悬索桥和板桥场景下均方根时延扩展的不同变化情况。

隧道作为封闭传播环境,信号的高阶反射和散

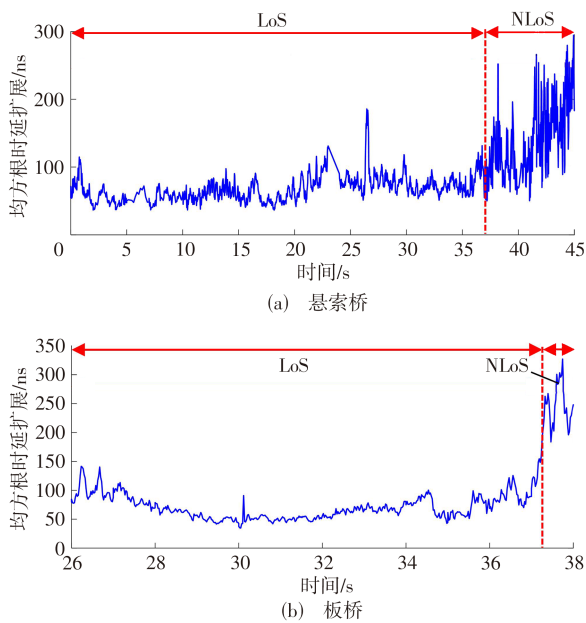


图3 不同桥梁场景下均方根时延扩展

Fig. 3 Root mean square delay spread in different bridge scenarios

射会导致信道存在明显的多径效应和非平稳性。文献[24]对隧道、高架桥场景下的V2V信道特性进行了测量,对比结果表明:隧道场景信道平均平稳距离13.5 m,多径分量最多36个,均方根时延扩展最大139.2 ns;方位角和俯仰角标准差分别为 18.3° 和 22.4° ,说明信号在隧道内具有更大的角度离散性。文献[25]研究进一步表明:矩形隧道的几何尺寸直接影响空间、时间和频率的相关性,隧道宽度会降低信道的相干时间与带宽;而在半圆形隧道中,LoS场景下RMS DS低于10 ns,NLoS场景可达30 ns^[26]。

此外,在建筑密度较小、高度较低、交通流量较小的农村地区,通过对车载通信及其信道特性的测量和分析发现,天线高度每增加20 m,平均路径损耗可减少4~6 dB^[27]。

综上所述,在公路交通场景中,车载无线信道特性主要受路边建筑、道路结构、车辆密度等影响,信道表现出显著的空间、时间和频率差异性。不同场景的信道测量结果表明,典型信道特性(如时延扩展、多普勒扩展、接收功率与路径损耗等)受上述因素影响明显,这对车载无线通信网络设计与优化所关注的低时延、高可靠提出了更高要求。

2.2 轨道交通车载无线信道

轨道交通中,桥、隧均为常见场景。桥梁场景按遮蔽情况可分为无遮蔽高架桥和遮蔽高架桥。前者以视距传播为主,路径损耗较低,时延和角度扩展均较小;后者因周围反散射体增多导致多径增强,路径损耗加大^[28-29]。

隧道作为封闭空间,其电波传播和信道特性更为复杂。信号传播受边界反射强烈影响,路径损耗大、多径效应显著、时延扩展明显^[30-33]。列车高速运行加剧多普勒扩展,导致信道时频相关性迅速下降^[30,32,34],实测小尺度衰落标准差可达7.5 dB,多普勒频移最大达4.8 kHz^[35],严重影响相干带宽与信号稳定性。特别是隧道入口区域,信号经历从LoS到NLoS的快速过渡,功率骤降可达7.0 dB^[30]。此外,隧道场景信道特性呈现明显的频率依赖性和空间约束特征,文献[31]、[36]研究发现高频段(如5.8 GHz)在直线路段路径损耗指数较低(1.71),但在弯曲隧道中会增至1.92~3.11;阴影衰落标准差为1.11~3.69 dB,自相关距离随频率升高而缩短,表明高频信号更易失相关。同时,频段升高及隧道结构变化也是影响信道特性的重要因素,如毫米波段下多径衰落服从对数正态分布,隧道的楔体结构则有助于增强信道的空间分集能力^[37]。

列车在经过城市环境时,由于道路两侧建筑密集造成严重多径效应,角度和时延扩展均较大,路径损耗指数约为2.1^[32,38-39];相比之下,郊区和乡村较为开阔,以视距传播为主,多径效应较弱,路径损耗指数降至1.75~1.80^[28,32,38,40]。

车站环境结构复杂,存在大量金属、玻璃等反射面,信号传播受遮挡与散射影响,多径分量丰富;大量研究表明,其典型时延扩展为2~3 μ s,路径损耗指数略高于开阔区域,但低于隧道场景^[28,39-41]。列车内部信号传播受封闭空间和金属材质制约,特别是在高频段(如60、300 GHz)下多径效应和频率扩展尤为突出^[42-43]。此外,为应对高频、高移动性环境带来的挑战,智能反射表面成为关键新技术,在增强毫米波信号质量、缓解多普勒效应方面展现出广阔前景^[44-47]。

表2为不同场景下轨道通信的信道特性。从通信频段角度看,当频段上升到毫米波频段时,隧道、车站等复杂环境中信号传播易受严重衰减和散射影响,路径损耗指数达到20以上,频率增加或者进入非视距传播,该数值会进一步增大,可靠通信面临更大挑战^[39,41,48]。

2.3 水路交通场景无线信道

2.3.1 内河无线信道

内河通信受场景多变性、干扰动态性、传播多样性、水陆混合性等复杂因素影响,其无线信道呈现出与陆地信道不同的衰落特性。

基于5.9 GHz实地测量,文献[49]分析了桥梁、

表2 轨道场景无线信道特性

文献	频段/ GHz	路径损耗	场景
[28]	1.89	路径损耗指数为1.75	郊区
		路径损耗指数为2.10	车站
		路径损耗指数为2.02	有遮蔽高架桥
[31]	1.8	路径损耗指数为2.83	拱形地铁隧道
	5.8	路径损耗指数为2.55	
[38]	31.625	3 dB	隧道
[40]	1.89	对数增长56~64 dB	火车站
	5.90	58.89 dB	丘陵地带
		62.12 dB	火车站
[41]	37	隧道路径损耗指数为1.63	高速铁路隧道
		火车站场景线性增长,从50 dB到65 dB	火车站
[42]	60	路径损耗指数:LoS区域20.05,NLoS区域32.64	高速列车车厢内
	300	路径损耗指数:LoS区域28.20,NLoS区域40.55	高速列车车厢内

建筑物对内河无线信道特性的影响,发现桥梁下非视距区域的信号衰减严重、多径效应增强,导致接收功率下降、RMS DS增加,明显不同于无桥梁遮挡的开阔水域。对内陆湖泊桥梁环境中的信道特性进行分析,同样发现桥梁结构显著影响功率时延分布(Power Delay Profile, PDP)与多普勒特性,尤其在LoS/NLoS过渡区域表现出剧烈波动^[50]。通过对不同环境(桥梁、建筑物、郊区、大型船舶)中信道特性进行统计分析发现,桥梁区域莱斯K因子较高,多径分量更丰富,且信道特性具有较强的自相关性^[51]。文献[52]基于陆地到船舶通信测量,验证了信道小尺度衰落特性在LoS和NLoS场景下分别服从莱斯分布、瑞利分布的结论。文献[53]、[54]基于5.2 GHz频段港口场景信道测量结果,揭示了天线高度对莱斯K因子和多径效应的显著影响,通过双径传播模型分析了LoS和NLoS场景下路径损耗与阴影衰落的统计特性,结果表明阴影衰落标准差稳定在4.2~4.4 dB,去相关距离约为18~19 m。

内河水域复杂环境导致无线通信在LoS和NLoS状态间切换,针对信号传播特性的显著差异进行分析发现,传统信道模型对内河电波传播特性的预测误差较大,需引入更精细的几何建模^[55]。因此,文献[56]基于在长江水域开展的测量数据,针对内河通信环境中岸基建筑、桥梁、水陆混合因素对信道特性的影响,系统分析了桥梁、建筑物引起的衍射效应。结果表明:桥梁、建筑所引起的衍射损耗分别约为18 dB和25 dB。

随着现代航运系统对数据量、传输速率、时延等需求的日渐提升,毫米波技术也将会用于内河通信。文献[57]分析了28 GHz频段下,水面反射与建筑散射对信号传播的复合作用,发现NLoS情况下路径损耗显著增加,所建模型预测误差低至1.15 dB。

图4为基于高性能射线追踪平台对内河场景下电波传播特性的仿真,可以看出:在城市水域环境中,岸边建筑、桥梁、水面等会对电波传播形成丰富的反射、散射效应。面向智慧航运等智能化、信息化建设需求,高通量、低时延、高速率的无线通信系统设计与部署应考虑内河通信环境的现实影响因素,从而构建安全稳定的内河航运通信专用网络。

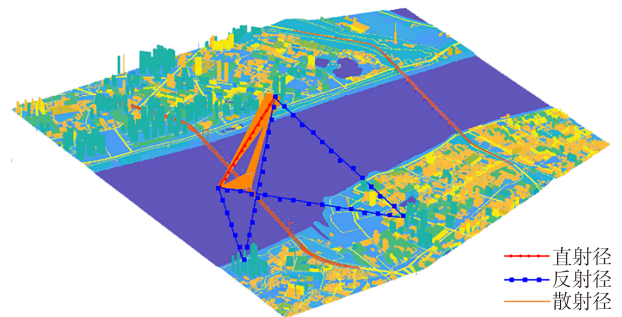


图4 内河场景无线信道特性仿真

Fig. 4 Simulation of wireless channel characteristics in inland river scenarios

2.3.2 海洋无线信道

随着海洋开发与利用的不断深入,海上通信技术在航运、军事、海洋监测、能源开发等领域扮演着越来越关键的角色。海洋无线通信明显区别于陆地环境的通信,多数研究认为,海洋信道的复杂性主要来自海面反射、大气折射、蒸发波导、地球曲率以及水面起伏等多种因素的影响^[58-63]。

在海洋场景短距离视距传播中,自由空间损耗(Free Space Loss, FSL)和双径模型可较好估算信号强度^[58-59]。随着传播距离的增加,海面存在的大气蒸发波导能捕捉电波并形成低损耗传播,产生增强信号传播(Enhanced Signal Strength, ESS)现象^[58-61],导致实际传输路径损耗与预测结果的误差增大^[58,61,64]。

除了路径损耗,信道小尺度衰落特性在海洋传播环境中也呈现出独特性。实测研究表明:存在稳定直射路径时,莱斯K因子通常较高^[65-66],如北海5.2 GHz频段测得第一抽头K因子均值达22 dB^[65];但在多径增强或遮挡情况下,如船只遮挡、反射体结构复杂时,莱斯K因子迅速降低^[67-69]。此外,海面剧烈波动导致RMS DS显著增加,小尺度衰落特性呈现

动态变化^[70-71],如在黄海海域信道测量中,潮汐高峰期间的 RMS DS 增大至平时的 1.5 倍^[71]。不同频段的对比也反应了高频信号对环境变化更敏感,如受船舶升沉运动影响,2.4 GHz 频段的信号能量波动达 16 dB,而 700 MHz 频段时仅为 9 dB^[72]。

考虑到传播环境对信道特性的影响,近岸海域受地形、桥梁结构等干扰,多径分布更加复杂,表现出较强的 NLoS 分量^[59,68];而在深海远距离场景中,则以低角度蒸发波导传播和地球曲率衍射为主^[60,62-63]。在码头和港口环境中,由于金属集装箱、基础设施的存在,阴影衰落与多径增强尤为明显^[73]。实测研究还表明,随传播距离变化,小尺度衰落特性呈现不同的分布类型演化:短距离(0.4~9.0 km)常服从 Weibull

分布,长距离(9.0~45.0 km)则表现出典型的莱斯或双径弥散功率分布(Two-wave with Diffuse Power, TWDP)特征^[71]。此外,海洋信道的空间相关性随距离增加迅速下降,超过 24 km 时几乎趋于 0^[71]。

表 3 为海洋环境下无线信道特性,可以看出: NLoS 区域信号传输路径损耗相较于 LoS 传播区域增加 5~10 dB,且随着频段变高、距离增大,损耗也会变大。海上船舶运动、蒸发波导等也会对信道特性造成影响。因此,为了满足海洋通信需求,无论是近海水域考虑岸基通信网络,还是深远海采用卫星通信或者通过中继形式增强通信,都要考虑洋面、波导、地球曲率等环境因素影响,选择合适的频段与带宽构建通信网络。

表 3 海洋无线信道特性

Table 3 Characteristics of ocean wireless channels

文献	频段/GHz	路径损耗	场景
[58]	5	10~25 dB(<2 km), 30~35 dB(>3 km)	海面 LoS 传播
[63]	2	LoS: 10~20 dB (1~3 km), 20~30 dB (3~10 km), >40 dB (>10 km) NLoS: 20~25 dB (1~3 km), 30~35 dB (3~10 km), >40 dB (>10 km)	开放海洋环境
[64]	0.85	路径损耗指数: 3.780 (1~7 km), 1.385 (>7 km)	南海海域
	3.40	路径损耗指数: 1.030 0 (1~3 km), -1.787 5 (3~5 km), 1.967 5 (>5 km)	
[66]	8	112.44 dB(1 km), 132.44 dB(10 km)	南海海域(蒸发波导)
[67]	5	NLoS: 22~25 dB (1~3 km), 30~35 dB (3~5 km), >40 dB (>5 km)	大型货船遮挡效应下,信号传播受阻
[72]	0.7	轮船上下晃动: 0~10 dB (1 km), 0~1 dB (5 km), 0~0.01 dB (10 km) 轮船左右晃动: 0~0.5 dB (1 km), 0~0.01 dB (5 km), 0~0.003 dB (10 km) 轮船前后晃动: 0~0.5 dB (1 km), 0~0.01 dB (5 km), 0~0.000 2 dB (10 km)	船舶影响场景
	2.4	轮船上下晃动: 0~10 dB (1 km), 0~8 dB (5 km), 0~1.5 dB (10 km) 轮船左右晃动: 0~0.5 dB (1 km), 0~0.1 dB (5 km), 0~0.05 dB (10 km) 轮船前后晃动: 0~0.5 dB (1 km), 0~0.15 dB (5 km), 0~0.02 dB (10 km)	
[74]	2.075	35 dB	陆基船舶通信
[75]	1~2	LoS: 28~32 dB (1~3 km), 33~40 dB (3~5 km), >50 dB (>5 km) NLoS: 20~30 dB (1~3 km), 30~40 dB (3~5 km), >50 dB (>5 km)	海上卫星通信 (考虑海面反射、船舶运动)
[76]	5	LoS: 28~32 dB (<1 km), 33~40 dB (1~3 km), >50 dB (>3 km) NLoS: 30~40 dB (1~3 km), 40~50 dB (3~10 km), >55 dB (>10 km)	无人机到船舶
[77]	5.8	30~35 dB (<7 km), 50~55 dB (>7 km)	海港场景(海面和船只影响)

2.4 低空场景无线信道

低空通信场景下的信道特性因频率、环境和飞行高度的变化而呈现出显著的多样性与非平稳性。已有研究围绕城市、校园、郊区、工业园区和丘陵等多种典型环境,对无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)与地面或车载终端之间的 A2G/A2V 链路进行了系统测量。研究表明:在 2.4 GHz 与 5.9 GHz 频段的 LoS 条件下,路径损耗接近自由空间模型预测值;而在因建筑物、树木等障碍物遮挡环境中,路径损耗明显上升^[78-79];在高频段损耗尤其明显,如在 24 GHz 频段测得 NLoS 区域路径损耗超

过 90 dB^[80]。此外,飞行高度对路径损耗影响也很明显,随着高度上升,视距通信增强,路径损耗减小^[81-82]。

针对多径效应对于低空场景无线信道特性的影响,通过信道测量结果与分析发现,在城市与工业园区环境中,因反射面丰富、多径效应明显,信号传播具有较大的 RMS DS,如在工业园区中测得的最大时延扩展为 4 μs ^[83],而在城市道路 NLoS 情况下的时延扩展高达 12 μs ^[82]。相较而言,乡村与湖泊等开阔区域 RMS DS 普遍较小,如湖区仅为 16.05 ns^[84]。

莱斯 K 因子作为衡量直射径与其他多径分量功

率比的重要参数,也受到环境和高度的影响。相关测量发现,UAV 高度从 50 m 上升至 100 m 时,莱斯 K 因子由 10 dB 增加到 18 dB^[82];而在受远程反射影响的环境中,莱斯 K 因子可减小至 6.93 dB,信道的多径效应增强^[84]。

表 4 为基于信道测量的低空场景无线传输路径

损耗结果。Sub-6 GHz 频段下信号传播路径损耗指数在 0.10~3.58 变化,频段增高、NLoS 传播等会导致路径损耗指数增大。同时,飞行高度增加也会导致路径损耗指数的增大。因此,在低空环境的无线通信设计、规划与部署中,应考虑不同场景以及无人机飞行高度等因素对信道特性的影响。

表 4 低空场景无线信道特性

Table 4 Channel characteristics of low-altitude scenarios

文献	频段 / GHz	路径损耗	场景
[78]	2.4	路径损耗指数:LoS 区域 2.20~2.86,NLoS 区域 2.87~3.79	校园及周边
	5.9	路径损耗指数:LoS 区域 2.26~3.58,NLoS 区域 2.91~3.50	城市道路 A2V
[81]	1	路径损耗指数为 LoS 区域 0.102,NLoS 区域 1.190	校园及周边
	4	路径损耗指数:LoS 区域 0.250,NLoS 区域 2.075	城市道路 A2G
[82]	3.5	路径损耗指数:LoS 区域 2.077	校园及周边城市道路 A2G
[85]	2.5	高度 15 m 时 80 dB,高度 50 m 时 84 dB	郊区环境 A2G
[86]	2.585	路径损耗指数(水平飞行):20 m 时 0.170 9,40 m 时 -0.072 1,60 m 时 -0.124 7 路径损耗指数(垂直飞行):20 m 时 0.141 9,30 m 时 0.066 5,40 m 时 0.194 3	丘陵地貌 A2G

3 面向智能交通场景的无线信道模型

3.1 公路交通场景无线信道模型

针对公路交通场景中复杂多变的电波传播特性,研究者提出了多种模型以提高对信道特性的刻画精度和泛化能力。在城市人行天桥场景中,为描述桥体遮挡对车载通信带来的额外传播损耗,将自由空间传播的 UMi 模型与绕射理论结合形成“UMi+Deygout”模型,但该模型在遮挡强烈时预测误差较大。为此,文献[22]进一步提出了单路桥模型,综合考虑自由空间损耗和天桥结构遮挡等因素,使预测误差大幅降低,平均绝对误差和均方根误差均在 5 dB 以内。此外,基于板桥和悬索桥的实测数据,采用双峰高斯混合分布对莱斯 K 因子、时延扩展和多普勒扩展等统计特性建模,有效描述信道特性在 2 类桥梁场景传播条件下的差异^[23]。基于在桥梁场景的实际信道测量活动,针对 LoS 和 NLoS 的车载无线信道建立了均方根时延扩展的统计模型,见图 5。

交叉路口由于遮挡频繁、场景变化快,其建模难度较大。基于实际测量结果,通过构建适用于 LoS 和 NLoS 区域的双斜率路径损耗模型,能够准确表征遮挡物对路径损耗的影响^[14]。在此基础上,引入地理信息,通过几何建模与实测校准构建多节点遮挡信道模型,并将大型车辆(如巴士、货车等)作为动态遮挡体建模,从而提升模型对真实交通环境下信道特性的拟合能力^[15]。文献[16]提出了一种多路径 MIMO 信道模型,结合交通密度、建筑密度等因素,

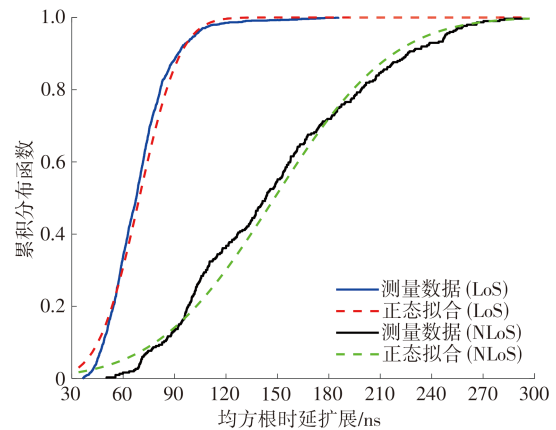


图 5 桥梁场景均方根时延扩展统计模型

Fig. 5 Statistical model of RMS DS in bridge scenarios

对路径损耗、频率选择性衰落和时变性进行建模,模型所生成的合成信道数据与实测结果高度吻合。

高速公路场景中,信道模型需同时考虑车辆高速移动、距离变化以及多径成分聚类特性。文献[87]提出的几何随机混合模型将多径分量分为视距簇、移动簇、静态簇、双簇和密集多径分量,并基于联合最大似然估计方法提取模型参数,实现了对复杂簇结构的动态刻画。

在农村与郊区场景中,信道建模则更强调地形、植被和结构稀疏对传播路径的影响。可以结合射线追踪(Ray Tracing, RT)与统计建模的方法,对不同地理地貌(如平原、丘陵、有植被区)下的路径损耗和多径特性进行建模^[88]。

在建模方法方面,文献[20]、[89]提出了一种窄波束信道建模方法,通过构建基于簇行为的动态模型,引入簇寿命、时空位置变化等非平稳特征参数,

刻画波束切换过程中信道特性随时间和空间的演化过程,通过分析簇的生灭过程,构建基于马尔可夫链的状态转移模型,用于模拟多径成分的动态变化,进一步增强模型在动态交通环境下的适应性。

图 6 为基于在桥梁场景的信道测量结果所构建的分簇模型。模型中对直射径以及地面、道路护栏、桥墩、客车等造成的多径进行了分簇提取,较好地表征了所在桥梁环境车载信道的时延特性。

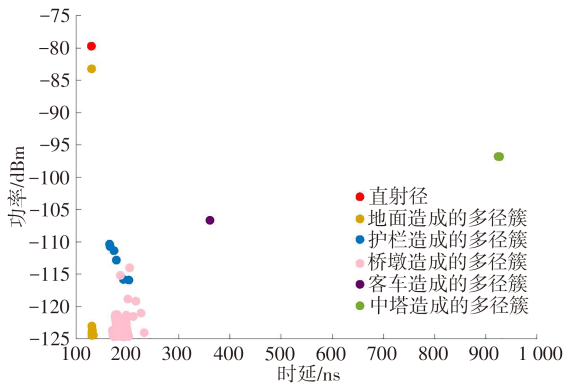


图 6 桥梁场景信道分簇结果

Fig. 6 Results of channels cluster in bridge scenarios

3.2 轨道交通场景无线信道模型

三维几何随机信道模型^[30,34,90]和基于射线追踪的信道模型^[30,90-91]能够有效模拟视距、反射、多径等多种传播机制的信道特性。

针对高速移动条件下的非平稳信道特性,文献[35]提出了三维非平稳宽带几何随机模型,结合分布式天线系统与移动中继站架构,有效建模了LoS、单次与多次反射分量,验证了该模型在表征信道非平稳性方面的高适应性与准确性。

面向铁路隧道环境下毫米波频段无线信道,采用RT仿真与实测数据相结合的方法进行建模,仿真误差通常可以控制在2 dB以内^[41,48,90]。文献[37]还通过统一绕射理论与RT方法结合,构建了适用于毫米波MIMO系统的信道模型,精准刻画了不规则隧道对信道容量与衰落特性的影响。

为提升路径损耗建模的准确性,部分研究将近距离模型与断点距离模型相结合,考虑阴影衰落、多普勒扩展等因素,在隧道、地铁、桥梁等封闭或半封闭场景中取得了良好效果^[31,39,41,45]。在此基础上,文献[31]、[36]还通过最小二乘拟合与Nakagami分布分析等方法,构建了集路径损耗、阴影衰落与小尺度衰落参数于一体的复合模型,揭示了地铁隧道信道的频率依赖性。

此外,为准确表征车站、城市区域等复杂环境中

的多径衰落与角度扩展等信道特性,研究者还对抽头延时线模型^[40,91]、基于长短期记忆网络的场景识别方法^[28],以及混合RT和统计建模方法^[90,92]进行了研究,实现了对多路径传播和信道统计特性的有效表征。针对高速运动导致的多普勒频移与信号衰落问题,已有文献提出了基于双可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)优化^[46-47]、RIS反射单元设计^[44-45]以及数据辅助多普勒补偿方法^[90,93]等。

3.3 水路交通场景无线信道模型

3.3.1 内河无线信道模型

文献[51]通过引入三维高斯混合分布(Triple Gaussian Mixture Distribution, TGMD)模型,对莱斯K因子、RMS DS和RMS多普勒扩展进行了高精度拟合,如图7所示,结果表明该模型能够有效描述内河场景典型通信环境下信道统计特性。文献[49]基于射线追踪技术建立了较为精细的传播模型,通过与实测数据对比,准确描述了桥梁遮挡和水面散射对多径效应的增强作用。文献[53]利用莱斯衰落模型分析了频率选择性和天线高度对信道统计量的影响。文献[52]则采用统计性信道建模方法,区分了LoS与NLoS场景下不同衰落程度,提升了陆地到船舶通信链路性能评估的准确性。

针对内河流经城市环境的信道建模情况,文献[57]通过引入频率相关校正因子与修正单Debye反射模型,提出了一种适用于水面与城市建筑共同影响的路径损耗模型,在复杂NLoS条件下显著降低了预测误差。文献[55]面向港口环境提出半确定性路径损耗模型,结合三维几何建模与统计方法,有效描述了LoS/NLoS过渡区域的路径损耗,且优于传统经验模型。文献[54]则基于双径几何模型对港口环境中的路径损耗与阴影衰落进行了表征,显著提升了船到陆地通信链路性能的可预测性。

在确定性建模方面,文献[56]综合多种典型影响因素,通过融合Okumura-Hata模型与几何建模方法,准确计算了内河环境中桥梁、建筑物对电波传播造成的衍射损耗;对在水域和陆地共同影响下的混合场景无线信道特性进行了分析;构建了针对城市内河场景的水陆混合信道模型,为城市内河无线通信网络规划提供了重要参考。图8为内河路径损耗模型构建过程,其中: α 、 β 分别为路径损耗模型中的截距和斜率; D 为收发机之间的距离; λ 为波长; R_{rough} 为有效反射系数; S_c 为阴影系数; D_{veff} 为发散系数; $L_{e,\text{diff}}$ 为地表衍射损耗; D_{diff}

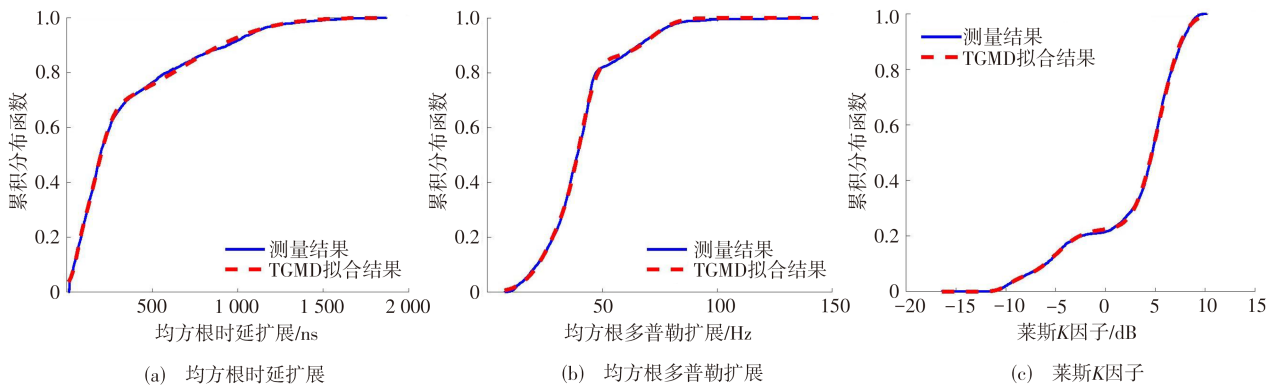


图 7 内河场景信道 TGMD 模型

Fig. 7 TGMD model for inland river channel

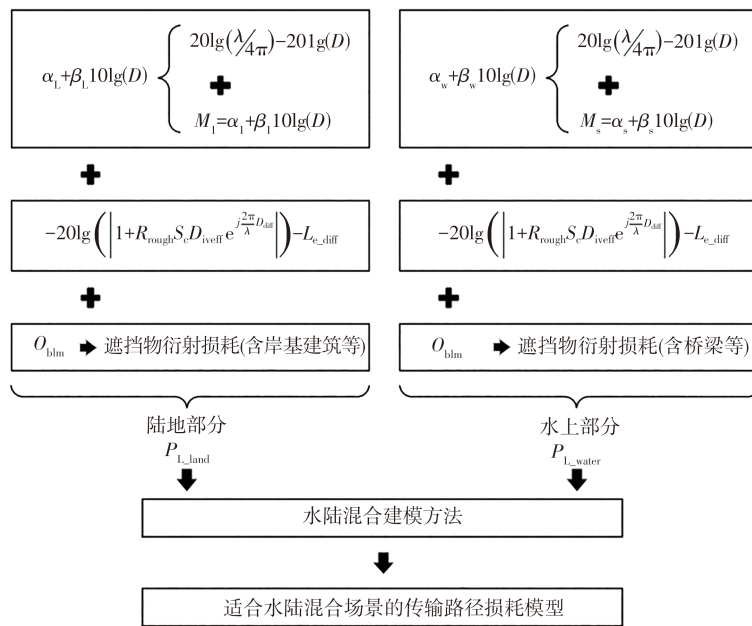


图 8 内河路径损耗模型构建过程

Fig. 8 Construction process of inland river path loss model

为 LoS 直射路径长度与反射路径长度的距离差; O_{blm} 为遮挡物衍射损耗; P_L 为路径损耗; M_L 和 M_w 均为环境修正因子。

3.3.2 海洋无线信道模型

针对海洋场景信道的路径损耗,通过引入蒸发波导效应,并结合反射路径修正,对三射线模型进行改进,有效扩展了模型在超视距场景下的适用性^[61]。圆形地球损耗模型综合考虑地球曲率、海面粗糙度、阴影遮挡等影响,准确表征海洋信道特性^[62-63]。基于抛物线方程及最小二乘优化所建立的路径损耗模型,在 5.8 GHz 以上频段均方误差显著低于传统方法^[60,94]。

针对洋面波动对信道特性造成的影响,研究提出潮汐因子修正的时变两径模型,通过引入海洋水位变化对传播路径的调制机制,增强模型的时变适

应性^[70-71]。此外,考虑船舶自身运动引起的天线姿态变化,通过引入三维方向图调整因子,对升沉、俯仰、横摇造成的方向增益波动进行建模,有效表征近岸与远海不同场景下信道随时间变化的特性^[72,74]。

面向未来高频段、大带宽海洋宽带通信需求, RIS 与空中智能反射面等新兴技术将被引入海洋信道建模研究中。结合无人机或高空平台,实现更加灵活的三维部署与反射路径重构^[95-96],以解决海洋环境远距离通信问题。

3.4 低空场景无线信道模型

文献[78]、[79]、[97]系统比较了自由空间、对数距离模型、3GPP、WINNER II、ITU-R 等典型路径损耗模型的拟合效果,结果显示对数距离模型在多种频段和城市、半城市环境中的拟合精度普遍较高,均方误差最低,特别适用于 UAV 与地面或车载节点之

间的链路建模。在考虑飞行高度因素的模型中,文献[80]、[81]通过最小二乘拟合,提出了与飞行高度相关的路径损耗指数模型。文献[86]则结合地形特性和飞行轨迹,在丘陵场景中建立了路径损耗与高度和水平距离相关的数学关系,揭示了山区环境中路径损耗与地形起伏、飞行方向之间的非线性关系。

为准确反映阴影衰落的空间相关性,多项研究基于实测数据构建了自相关模型。传统单指数模型虽简洁,但在非平稳环境中的拟合效果有限。因此,文献[78]、[80]提出“双指数衰减正弦模型”,能够更准确地模拟阴影衰落在LoS与NLoS条件下随距离变化的自相关性,适用于城市道路及郊区等复杂环境。文献[78]~[80]分别验证了莱斯、Weibull和Log-logistic分布在2.4、5.9 GHz和频段下的适用性,并通过实测数据与常见统计分布模型之间的最小二乘拟合及其均方误差确定了最优分布类型,表

明了不同统计模型的使用取决于具体频段与环境类型,为后续多径衰落仿真提供了有效参数基础。

多径传播特性建模方面,文献[82]、[83]、[85]通过分析功率时延分布、时延扩展与显著多径分量数量,构建了时延结构模型。对于非平稳信道建模,文献[98]、[99]提出基于几何的非平稳三维信道模型,引入局部静止簇与移动簇概念,结合马尔可夫过程刻画簇的生灭,表征UAV移动状态下的动态信道特性。此外,为应对毫米波频段路径损耗和频率扩展较大的问题,文献[100]引入RIS,并建立RIS辅助信道模型,仿真结果表明:在最佳反射相位配置下,RIS可提供约5 dB的能量补偿,显著提升高频通信可靠性。

基于以上分析,表5总结了公路、轨道、内河、海洋、低空等交通场景下主要测量特性、建模方法等,并对其优缺点进行简要分析。

表5 不同交通场景主要信道特性与建模方法

Table 5 Main measurement channel characteristics and modeling methods for different traffic scenarios

交通场景	主要测量特性	建模方法	优缺点
公路交通	时延、传输速率、多普勒频移等为主,考虑信道建模还需要提取接收功率、路径损耗等特性	时延扩展、多普勒扩展及传输速率以统计模型为主;路径损耗以经验模型为主;道路结构规则场景,可以建立几何模型(确定性模型)	易于测量采集丰富数据;经验模型和规则道路场景所建立的确定性模型泛化性较差,统计性模型准确性较差;多径丰富,多普勒效应明显
轨道交通	信号强度、时延、接收功率、切换成功率等为主	信号强度、时延、切换成功率等以统计模型为主;接收功率以经验性模型和确定性模型为主	高架桥、车站、路堑等规则结构场景可以建立几何模型(确定性建模);涉及场景多变,模型泛化性较差
内河场景	传输速率、路径损耗、覆盖范围、时延扩展为主	传输速率、时延扩展以统计模型为主;路径损耗以经验模型和确定性模型为主	桥梁/岸边建筑衍射、水面反射、地球曲率等可以建立几何模型(确定性建模);涉及场景多变,模型泛化性较差
海洋场景	传输速率、路径损耗、覆盖范围、时延扩展为主	传输速率、时延扩展以统计模型为主;路径损耗以经验模型和确定性模型为主	与陆上通信不同,测量有一定难度;洋面反射、波动、大气波导等对建模精度影响大
低空场景	接收功率、时延扩展、覆盖范围等	时延扩展及特性相关性以统计模型为主;接收功率以经验模型为主	信道特性与高度相关,测量有一定难度;空中以视距传播为主,建模简单;地面反散射体不同,模型泛化性差

4 结 语

4.1 结 论

(1)全面论述了面向智能交通场景的无线信道测量、信道特性与信道建模的最新进展,包括公路、轨道、内河、海洋、低空等不同形式交通场景信道,并展示了基于相关场景的无线信道测量所提取的信道特性和建模结果。

(2)通过分析面向不同交通场景的信道测量与建模研究成果,全面梳理了智能交通场景无线信道特性及其影响因素。公路场景信道特性受车辆高速

移动、道路两侧建筑及相邻车辆影响,信道呈现时变性,多径效应明显;轨道交通场景由于列车高速移动引发剧烈多径效应、多普勒频移;内河场景水陆混合等特点显著,多维度复杂因素对信道特性影响明显;海洋场景信道由长距离传播导致的地球曲率衍射、海面蒸发波导形成的超视距传播是导致信道特性复杂的主要因素;低空场景信道特性受地面建筑、树木遮挡影响显著,同时存在与飞行高度相关的特性。

4.2 展 望

(1)面向未来智能交通中多源数据感知、融合、传输、计算、决策等数据量的日渐提升,智能网联具

有大带宽、低时延、高速率、高可靠的需求,因此需要基于新频段(如毫米波、太赫兹等)设计与部署通信网络。

(2)面向不同交通场景和应用,开展多场景、多频段信道测量活动,采集精确信道数据,进行信道参数的提取和分析,深入研究不同交通环境下的信道特性是未来优化智能交通系统通信网络、赋能智慧交通建设的重要基础。

(3)在多场景、多频段的信道测量中,采集到的信道数据量急剧增加,会使得传统数据处理和分析方法面临挑战,人工智能技术将会成为数据分析、信道特性提取与信道模型构建的新手段。

(4)面向不同交通形式和场景,通信环境(如不同场景材料电磁参数、传播机制等)、信道特性和信道模型之间所存在的非线性映射关系十分复杂,通过信道测量与高精度仿真技术(如射线追踪等),采用“虚(重构孪生)实(典型场景测量)”结合的方法孪生电磁环境,揭示环境因素和信道特性之间的耦合机理,实现信道模型的有效泛化迁移,将会成为智能交通可靠通信网络规划的一个重要方向。

(5)面向智能交通复杂环境与不同应用,通过建立通信环境数据库、基于信道测量与特性提取的信道特性数据库、基于测量与几何相结合的信道模型库,构建交通通信数据大模型,将为现代智能交通系统建设提供真实、高效、可靠的数据支撑。

参考文献:

Reference:

- [1] 周一青,王露,原进宏,等. 基于感通算融合的导轨式自动驾驶系统—无线虚拟导轨[J]. 中国科学(信息科学), 2023, 53(6):1050-1077.
ZHOU Yi-qing, WANG Lu, YUAN Jin-hong, et al. Autonomous driving with virtual rail—a wireless tracked and controlled self-driving vehicle system based on the integration of communication, sensing, and computing[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2023, 53(6): 1050-1077.
- [2] LIU J H, ZHOU Y Q, LIU L. Communication delay-aware cooperative adaptive cruise control with dynamic network topologies - a convergence of communication and control[J]. *Digital Communications and Networks*, 2025, 11 (1): 191-199.
- [3] 赵睿,李云,胡宏宇,等. 基于V2I通信的交叉口车辆碰撞预警方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(4): 1019-1029.
ZHAO Rui, LI Yun, HU Hong-yu, et al. Vehicle collision warning method at intersection based on V2I communication [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology* Edition, 2023, 53(4): 1019-1029.
- [4] 于刊,李东,张奇勋,等. 车联网泛在感知,潜在通信,融合计算,内生安全综述:最新进展与未来方向[J]. 通信学报, 2024, 45(11):223-243.
YU Kan, LI Dong, ZHANG Qi-xun, et al. Survey of ubiquitous sensing, potential communication, integrated computing, and inherent security for internet of vehicles: Latest developments and future directions [J]. *Journal on Communications*, 2024, 45(11): 223-243.
- [5] 杨晓光,胡仕星月,张梦雅. 智能高速公路交通应用技术发展综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10):142-164.
YANG Xiao-guang, HU Shi-xing-yue, ZHANG Meng-ya. Development of intelligent motorway traffic application technologies: A review [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(10): 142-164.
- [6] 董平,尹晨洋,张宇阳,等. 轨道交通中异构智融车载网络发展综述[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(2):41-58.
DONG Ping, YIN Chen-yang, ZHANG Yu-yang, et al. Review on development of heterogeneous smart cooperative vehicular networks in rail transit [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(2): 41-58.
- [7] 余祖俊,唐涛,李开成,等. 智慧高速铁路运行控制系统发展趋势综述[J]. 铁道学报, 2024, 46(1):1-12.
YU Zu-jun, TANG Tao, LI Kai-cheng, et al. Overview of development trends of intelligent high-speed rail train control systems [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2024, 46 (1): 1-12.
- [8] 蒋育康,郭爱煌,艾渤,等. 城市轨道交通隧道环境下大规模MIMO信道建模[J]. 铁道学报, 2018, 40(11):84-90.
JIANG Yu-kang, GUO Ai-huang, AI Bo, et al. Massive MIMO channel modeling for tunnel of urban rail transit [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(11): 84-90.
- [9] 江浩,石旺旗,朱秋明,等. 面向6G可重构智能超表面使能的近场海洋通信信道建模与信号传播机理研究[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(12):4383-4390.
JIANG Hao, SHI Wang-qi, ZHU Qiu-ming, et al. Research on channel modeling and characteristics analysis for RIS-enabled near-field marine communications towards 6G [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46 (12): 4383-4390.
- [10] 段瑞洋,王景璟,杜军,等. 面向“三全”信息覆盖的新型海洋信息网络[J]. 通信学报, 2019, 40(4):10-20.
DUAN Rui-yang, WANG Jing-jing, DU Jun, et al. New marine information network for realizing all-coverage over sea [J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(4): 10-20.
- [11] 马勇,王雯琦,严新平. 面向新一代航运系统的船舶智能航行技术研究进展[J]. 中国科学:技术科学, 2023, 53(11): 1795-1806.
MA Yong, WANG Wen-qi, YAN Xin-ping. Research progress of vessel intelligent navigation technology for the new generation of waterborne transportation system [J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2023, 53(11): 1795-1806.

- [12] 李昌振,陈伟,王觉,等.面向智能内河航运通信的无线信道测量与典型信道特征[J].*交通运输工程学报*,2022,22(4):322-333.
LI Chang-zhen, CHEN Wei, WANG Jue, et al. Wireless channel measurement and typical channel characteristics for intelligent inland navigation communications [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(4): 322-333.
- [13] 张学军,刘法旺,张祖耀,等.低空智能网联体系[J].*北京航空航天大学学报*,2025,51(6):1793-1815.
ZHANG Xue-jun, LIU Fa-wang, ZHANG Zu-yao, et al. Overview of the low-altitude intelligent networked system [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, 51(6): 1793-1815.
- [14] YANG M, AI B, HE R S, et al. Dynamic V2V channel measurement and modeling at street intersection scenarios [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(5): 4417-4432.
- [15] ZELENBABA S, RAINER B, HOFER M, et al. Multi-node vehicular wireless channels: measurements, large vehicle modeling, and hardware-in-the-loop evaluation [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 112439-112453.
- [16] ZHAO D Y, HUANG C, WANG C X, et al. Channel characterization and modeling for wireless MIMO communication systems in intersection scenarios [C]//*IEEE. 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. New York: IEEE, 2024: 1-5.
- [17] LI C Z, CHEN W, YU J Y, et al. V2V radio channel properties at urban intersection and ramp on urban viaduct at 5.9 GHz [J]. *IET Communications*, 2018, 12(17): 2198-2205.
- [18] LI C Z, YANG K, YU J Y, et al. V2V radio channel performance based on measurements in ramp scenarios at 5.9 GHz [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 7503-7514.
- [19] KIM C S, KIM H J, CHOI S W, et al. Propagation characteristics of various highway V2V environment at 5.9 GHz band [C]//*IEEE. 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. New York: IEEE, 2022: 2026-2030.
- [20] ZHOU T, LI C Y, ZHANG W L, et al. Narrowband channel measurements and characterization in vehicle-to-infrastructure scenarios for 5G-V2X communications [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(9): 16074-16086.
- [21] ZHAO D Y, HUANG C, WANG C X, et al. Scenario classification and channel modeling for MIMO communications in suburban road scenarios [C]//*IEEE. 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. New York: IEEE, 2024: 1-5.
- [22] YAN D, GUAN K, HE D P, et al. Blockage effects of road bridge on mmWave channels for intelligent autonomous vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(3): 2908-2919.
- [23] YU J Y, CHEN W, LI F, et al. Measurement-based V2V radio channel analysis and modelling for bridge scenarios at 5.9 GHz [J]. *IET Communications*, 2020, 14(3): 376-386.
- [24] YANG M, AI B, HE R S, et al. Non-stationary vehicular channel characterization in complicated scenarios [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 8387-8400.
- [25] AVAZOV N, RIAZUL ISLAM S M R, PARK D, et al. Statistical characterization of a 3-D propagation model for V2V channels in rectangular tunnels [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2392-2395.
- [26] AVAZOV N, PÄTZOLD M. A novel wideband MIMO car-to-car channel model based on a geometrical semi-circular tunnel scattering model [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(3): 1070-1082.
- [27] SABA N, MELA L, SHEIKH M U, et al. Rural macrocell path loss measurements for 5G fixed wireless access at 26 GHz [C]//*IEEE. 2021 IEEE 4th 5G World Forum (5GWF)*. New York: IEEE, 2021: 328-333.
- [28] ZHOU T, ZHANG H T, AI B, et al. Weighted score fusion based LSTM model for high-speed railway propagation scenario identification [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 23668-23679.
- [29] ZHOU T, TAO C, SALOUS S, et al. Channel sounding for high-speed railway communication systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(10): 70-77.
- [30] WANG H L, LIN S Y, DING J W, et al. Geometry-based channel modeling for tunnel entrance scenarios of mountain railway [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(3): 2620-2630.
- [31] ZHANG X J, HE R S, YANG M, et al. Measurements and modeling of large-scale channel characteristics in subway tunnels at 1.8 and 5.8 GHz [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(3): 561-565.
- [32] WEN T, XIE G, CAO Y, et al. A DNN-based channel model for network planning in train control systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(3): 2392-2399.
- [33] BERBINEAU M, BEHAEGEL R, GARCIA-LOYGORRI J M, et al. Channel models for performance evaluation of wireless systems in railway environments [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 45903-45918.
- [34] SKIRIBOU C, ELBAHHAR F, ELASSALI R. DMRS-based channel estimation for railway communications in tunnel environments [J]. *Vehicular Communications*, 2021, 29: 100340.
- [35] LIU Y, WANG C X, LOPEZ C F, et al. 3D non-stationary wideband tunnel channel models for 5G high-speed train wireless communications [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(1): 259-272.
- [36] ZHANG X J, HE R S, YANG M, et al. Narrowband channel measurements and statistical characterization in subway tunnels at 1.8 and 5.8 GHz [J]. *IEEE Transactions on Vehicular*

- Technology, 2024, 73(7): 10228-10240.
- [37] GHADDAR M, MOLINA-GARCÍA-PARDO J M, MABROUK I, et al. UTD-based ray-tracing MIMO channel modeling for the next-generation communications within underground tunnels[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(6): 5235-5245.
- [38] HE D P, AI B, GUAN K, et al. Channel measurement, simulation, and analysis for high-speed railway communications in 5G millimeter-wave band[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(10): 3144-3158.
- [39] HE R, ZHONG Z D, AI B, et al. A standardized path loss model for the GSM-railway based high-speed railway communication systems[C]//IEEE. 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). New York: IEEE, 2014: 1-5.
- [40] ZHOU T, TAO C, SALOUS S, et al. Measurements and analysis of short-term fading behavior in high-speed railway communication networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 101-112.
- [41] YU D Z, YUE G R, WEI N, et al. Empirical study on directional millimeter-wave propagation in railway communications between train and trackside[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(12): 2931-2945.
- [42] GUAN K, PENG B L, HE D P, et al. Channel sounding and ray tracing for intrawagon scenario at mmWave and sub-mmWave bands [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(2): 1007-1019.
- [43] YAO Z Y, XIONG L, MIAO H Y. Ray-tracing based millimeter-wave channel characteristics in subway carriage [C]//IEEE. 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). New York: IEEE, 2020: 681-686.
- [44] CHEN C, NIU Y, AI B, et al. Joint design of phase shift and transceiver beamforming for intelligent reflecting surface assisted millimeter-wave high-speed railway communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(5): 6253-6267.
- [45] LI P P, NIU Y, WU H, et al. RIS-assisted high-speed railway integrated sensing and communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(12): 15681-15692.
- [46] LIU B J, LI D. Double RISs aided predictable high-speed railway communications with Doppler effect mitigation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(22): 37394-37398.
- [47] LIU C Z, HE R S, NIU Y, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted high-speed train communications: Coverage performance analysis and placement optimization [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(3): 3750-3766.
- [48] MIAO H Y, XIONG L. Channel characteristics of subway station based on ray-tracing at 5G mmWave band[C]//IEEE. 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). New York: IEEE, 2020: 687-692.
- [49] GONG G J, XU B, LI W H, et al. Channel measurement based on ray tracing calibration and analysis for inland river environment[C]//IEEE. 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). New York: IEEE, 2024: 545-550.
- [50] LI C Z, YU J Y, CHEN W, et al. Measurements and analysis of vehicular radio channels in the inland lake bridge area [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, 13(9): 1394-1401.
- [51] LI C Z, YU J Y, CHEN W, et al. Shadowing correlation and a novel statistical model for inland river radio channel [C]//IEEE. ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). New York: IEEE, 2019: 1-6.
- [52] LEE J H, CHOI J S, LEE J Y, et al. Experimental results of a land-to-ship propagation channel using a wideband channel sounding system at 2.4 GHz [C]//IEEE. 2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). New York: IEEE, 2018: 243-248.
- [53] WANG W, RAULEFS R, JOST T. Fading characteristics of ship-to-land propagation channel at 5.2 GHz [C]//IEEE. OCEANS 2016. New York: IEEE, 2016: 1-7.
- [54] WANG W, JOST T, RAULEFS R. Large scale characteristics of ship-to-land propagation at 5.2 GHz in harbor environment [C]//IEEE. 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall). New York: IEEE, 2015: 1-5.
- [55] WANG W, JOST T, RAULEFS R. A semi-deterministic path loss model for in-harbor LoS and NLoS environment [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 7399-7404.
- [56] YU J Y, CHEN W, YANG K, et al. Path loss channel model for inland river radio propagation at 1.4 GHz [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 2017(1): 5853724.
- [57] LIAO X, LI X, WANG Y, et al. Path loss modeling in urban water-land environments at 28 GHz: Considering water surface reflection and building diffraction [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(4): 744-748.
- [58] LEE Y H, DONG F, MENG Y S. Near sea-surface mobile radio wave propagation at 5 GHz: Measurements and modeling [J]. *Radio Engineering*, 2014, 23(3): 824-830.
- [59] SANTOS CRUZ V S, ASSIS F, SCHNITMAN L. Simulation of the effects of evaporation ducts on maritime wireless communication [J]. *Wireless Networks*, 2021, 27(7): 4677-4691.
- [60] ZHANG H Z, ZHOU T, XU T H, et al. Statistical modeling of evaporation duct channel for maritime broadband communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular*

- Technology, 2022, 71(10): 10228-10240.
- [61] WANG Y Z, ZHOU T, FENG W, et al. When maritime wireless communications meet evaporation ducts: A three-ray path loss modeling perspective[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(2): 470-474.
- [62] YANG K, MOLISCH A F, EKMAN T, et al. A deterministic round earth loss model for open-sea radio propagation[C]//IEEE. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). New York: IEEE, 2013: 1-5.
- [63] YANG K, EKMAN T, RÖSTE T, et al. A quasi-deterministic path loss propagation model for the open sea environment[C]//IEEE. 2011 The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). New York: IEEE, 2011: 1-5.
- [64] ZHANG H Z, ZHOU T, XU T H, et al. Field measurement and channel modeling around wailingding island for maritime wireless communication [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(6): 1934-1938.
- [65] WANG W, RAULEFS R, JOST T. Fading characteristics of maritime propagation channel for beyond geometrical horizon communications in C-band[J]. CEAS Space Journal, 2019, 11(1): 95-104.
- [66] ZHANG Q, WANG S W, SHI Y, et al. Measurements and analysis of maritime wireless channel at 8 GHz in the South China Sea region [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(3): 2674-2681.
- [67] LEE Y H, DONG F, MENG Y S. Stand-off distances for non-line-of-sight maritime mobile applications in 5 GHz band [J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2013, 54: 321-336.
- [68] LI C Z, YU J Y, CHEN W, et al. Measurement - based wireless channel analysis and modelling for shipping environments[J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2020, 14(8): 812-820.
- [69] REYES-GUERRERO J C. Experimental broadband channel characterization in a sea port environment at 5.8 GHz [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3): 509-514.
- [70] 魏 特,王文浩,陈 军,等. 环境信息辅助的海上无线信道测量与建模[J]. 清华大学学报:自然科学版,2021,61(9): 1002-1007.
WEI Te, WANG Wen-hao, CHEN Jun, et al. Environmental information-aided maritime wireless channel measurement and modelling[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2021, 61(9): 1002-1007.
- [71] YANG K, MOLISCH A F, EKMAN T, et al. A round earth loss model and small-scale channel properties for open-sea radio propagation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(9): 8449-8460.
- [72] HUANG F, BAI Y, DU W. Maritime radio propagation with the effects of ship motions [J]. Journal of Communications, 2015, 10(5): 345-351.
- [73] FERREIRA M M, AMBROZIAK S J, CARDOSO F D, et al. Fading modeling in maritime container terminal environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9087-9096.
- [74] 徐贝柠,杨 堃,鄢社锋,等. 陆基海洋通信船舶绕射损耗模型研究[J]. 无线电通信技术,2024,50(5):868-875.
XU Bei-ning, YANG Kun, YAN She-feng, et al. Study on diffraction loss model of land-based marine communication ship[J]. Radio Communications Technology, 2024, 50(5): 868-875.
- [75] PÉREZ-FONTÁN F, PASTORIZA-SANTOS V, MACHADO F, et al. A narrowband mobile satellite maritime propagation channel model at L-band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 4758-4767.
- [76] LIU Y, WANG C X, CHANG H T, et al. A novel non-stationary 6G UAV channel model for maritime communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2992-3005.
- [77] REYES-GUERRERO J C, MARISCAL L A. 5.8 GHz propagation of low-height wireless links in sea port scenario [J]. Electronics Letters, 2014, 50(9): 710-712.
- [78] LYU Y, WANG W, SUN Y Z, et al. Measurement-based fading characteristics analysis and modeling of UAV to vehicles channel[J]. Vehicular Communications, 2024, 45: 100707.
- [79] COLPAERT A, CUI Z Z, VINOGRADOV E, et al. 3D non-stationary channel measurement and analysis for MaMIMO-UAV communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(5): 6061-6072.
- [80] CUI Z Z, BRISO-RODRÍGUEZ C, GUAN K, et al. Multi-frequency air-to-ground channel measurements and analysis for UAV communication systems [J]. IEEE Access, 2020, 8: 110565-110574.
- [81] CUI Z Z, BRISO-RODRÍGUEZ C, GUAN K, et al. Measurement-based modeling and analysis of UAV air-ground channels at 1 and 4 GHz [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(9): 1804-1808.
- [82] MAO K, ZHU Q M, QIU Y H, et al. A UAV-aided real-time channel sounder for highly dynamic nonstationary A2G scenarios [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2023, 72: 6504515.
- [83] CAI X S, IZYDORCZYK T, RODRÍGUEZ-PIÑEIRO J, et al. Empirical low-altitude air-to-ground spatial channel characterization for cellular networks connectivity [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2975-2991.
- [84] CUI Z Z, BRISO-RODRÍGUEZ C, GUAN K, et al. Wideband air-to-ground channel characterization for multiple propagation environments [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(9): 1634-1638.
- [85] RODRÍGUEZ-PIÑEIRO J, DOMÍNGUEZ-BOLAÑO T, CAI X S, et al. Air-to-ground channel characterization for low-height UAVs in realistic network deployments [J]. IEEE

- Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(2): 992-1006.
- [86] YU C Y, LIU Y, CHANG H T, et al. AG channel measurements and characteristics analysis in hilly scenarios for 6G UAV communications[J]. China Communications, 2022, 19(11): 32-46.
- [87] HUANG C, WANG R, WANG C X, et al. A geometry-based stochastic model for truck communication channels in freeway scenarios[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(8): 5572-5586.
- [88] GÜL A C, AKINCI M N, DOĞU S. Millimeter-wave channel modeling in rural areas [C]//IEEE. 2023 10th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). New York: IEEE, 2023: 1-4.
- [89] ZHOU T, FENG T Y, ZHANG W L, et al. A cluster-based dynamic narrow-beam channel model for vehicle-to-infrastructure communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(11): 15858-15871.
- [90] ZHOU T, YANG Y, LIU L, et al. A dynamic 3-D wideband GBSM for cooperative massive MIMO channels in intelligent high-speed railway communication systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(4): 2237-2250.
- [91] QIU H, GARCÍA-LOYGORRI J M, GUAN K, et al. Emulation of radio technologies for railways: A tapped-delay-line channel model for tunnels[J]. IEEE Access, 2020, 9: 1512-1523.
- [92] GUAN K, MORENO J, AI B, et al. 5G channel models for railway use cases at mmWave band and the path towards terahertz[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2021, 13(3): 146-155.
- [93] GONG Z J, LI C, JIANG F, et al. Data-aided Doppler compensation for high-speed railway communications over mmWave bands [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(1): 520-534.
- [94] WANG H, DU W C. Research on maritime radio wave multipath propagation based on stochastic ray method [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 5178136.
- [95] MA Z F, AI B, HE R S, et al. Modeling and analysis of MIMO multipath channels with aerial intelligent reflecting surface[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(10): 3027-3040.
- [96] SUN Y Z, WANG C X, HUANG J, et al. A 3D non-stationary channel model for 6G wireless systems employing intelligent reflecting surfaces with practical phase shifts [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(2): 496-510.
- [97] KHAWAJA W, OZDEMIR O, ERDEN F, et al. Ultra-wideband air-to-ground propagation channel characterization in an open area[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2020, 56(6): 4533-4555.
- [98] MA Z F, AI B, HE R S, et al. A non-stationary geometry-based MIMO channel model for millimeter-wave UAV networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2960-2974.
- [99] BAI L, HUANG Z W, ZHANG X, et al. A non-stationary 3D model for 6G massive MIMO mmWave UAV channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(6): 4325-4339.
- [100] XIONG B P, ZHANG Z C, JIANG H, et al. A 3D non-stationary MIMO channel model for reconfigurable intelligent surface auxiliary UAV-to-ground mmWave communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(7): 5658-5672.