

文章编号: 2095-4980(2025)12-1278-11

水汽对地铁应急物联网毫米波信道的影响

李 帅¹, 王梦阳^{*2a,2b}, 弓子悦³, 官 科^{2a,2b}

(1.北京市地铁运营有限公司 机电分公司, 北京 100044; 2.北京交通大学 a.先进轨道交通自主运行全国重点实验室;
b.电子信息工程学院, 北京 100044; 3.北京乾径科技有限公司, 北京 100076)

摘 要: 当前, 亚 6 GHz 频段凭借覆盖范围广、传播稳定性强等优势, 仍是物联网(IoT)应用的主流频段选择。但随着海量数据传输需求的急剧增长, 毫米波频段以其超大带宽特性, 正逐渐成为未来物联网传输的重要发展方向。当地铁发生火灾时, 喷淋系统激活所形成的高密度水汽环境会引发毫米波信号的复杂衰减, 显著增加信道分析的难度。本文聚焦该应急场景, 系统研究水汽因素对地铁物联网毫米波信道特性的影响。通过在地铁站台场景中分别对亚 6 GHz 频段(3~5 GHz)与毫米波频段(24~26 GHz)开展射线追踪仿真, 提取路径损耗、阴影衰落、莱斯 K 因子、均方根时延扩展和角度扩展等关键参数, 重点分析这些参数在水汽影响下的变化规律。结果表明, 水汽环境对毫米波信号造成显著附加衰减, 尤其在毫米波频段, 路径损耗较亚 6 GHz 平均增大约 12~18 dB, 莱斯 K 因子下降明显, 多径分量分布更加分散。基于上述分析, 本文提出了适用于水汽干扰场景的信道建模方法与通信优化策略, 为地铁应急物联网系统中的毫米波通信设计提供理论依据与技术参考。

关键词: 射线追踪; 毫米波; 水汽衰减; 应急通信; 信道建模

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025290

Impact of water vapor on the millimeter-wave channel of metro emergency IoT

LI Shuai¹, WANG Mengyang^{*2a,2b}, GONG Ziyue³, GUAN Ke^{2a,2b}

(1.Electromechanical Branch, Beijing Subway Operation Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2a.State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation; 2b.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3.Beijing MetaRadio Technology Co., Ltd., Beijing 100076, China)

Abstract: Currently, the sub-6 GHz band remains the mainstream frequency choice for Internet of Things(IoT) applications due to its advantages in wide coverage and stable propagation. However, with the explosive growth of massive data transmission demands, the millimeter-wave (mmWave) band is emerging as a crucial development direction for future IoT communication, owing to its ultra-large bandwidth characteristics. During subway fires, the high-density water vapor environment generated by activated sprinkler systems causes complex attenuation of mmWave signals, significantly increasing the difficulty of channel analysis. This paper focuses on this emergency scenario to systematically investigate the impact of water vapor on mmWave channel characteristics in subway IoT systems. Through ray-tracing simulations conducted in a subway station environment, both the sub-6 GHz band (3~5 GHz) and the mmWave band(24~26 GHz) are examined. Key parameters including path loss, shadow fading, Rician K -factor, Root Mean Square(RMS) delay spread, and angular spread are extracted, with particular emphasis on analyzing their variation patterns under water vapor influence. The results

收稿日期: 2025-09-19; 修回日期: 2025-10-25

基金项目: 北京地铁自有信息化改造科研项目(2024000501000012)

*通信作者: 王梦阳 email:wangmengyang@bjtu.edu.cn

引用格式: 李帅,王梦阳,弓子悦,等. 水汽对地铁应急物联网毫米波信道的影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(12):1278-1288. DOI: 10.11805/TKYDA2025290.

Citation format:LI Shuai,WANG Mengyang,GONG Ziyue,et al. Impact of water vapor on the millimeter-wave channel of metro emergency IoT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(12):1278-1288. DOI:10.11805/TKYDA2025290.

demonstrate that the water vapor environment introduces significant additional attenuation to mmWave signals. Specifically, in the mmWave band, the path loss increases by approximately 12~18 dB on average compared to the sub-6 GHz band, the Rician K -factor decreases notably, and multipath components become more dispersed. Based on these findings, this paper proposes a channel modeling methodology and communication optimization strategies suitable for water-vapor-interference scenarios, providing theoretical foundations and technical references for mmWave communication design in subway emergency IoT systems.

Keywords: ray tracing; millimeter wave; water vapor attenuation; emergency communication; channel modeling

2023年,交通运输部发布《数字交通“十四五”发展规划》,提出应加快构建以智能感知、泛在互联与智慧服务为核心的数字交通体系,推动城市地铁等轨道交通向全感知、全互联、全智能方向演进^[1]。同年,住房和城乡建设部联合工业和信息化部印发《关于确定智慧城市基础设施与智能网联汽车协同发展第一批试点城市的通知》,明确轨道交通作为智慧城市交通主动脉,应充分融合物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术,实现基础设施的智能化运维^[2]。在当前物联网应用中,亚6 GHz频段因其覆盖广、传播稳而成为主流,但随着高清摄像头、激光雷达等设备产生的360°视频流与3D点云等海量数据对带宽与传输速率的要求不断提高,毫米波频段凭借30~300 GHz的超大带宽优势,正逐渐成为物联网传输的重要发展方向。作为智慧地铁的核心支撑技术,物联网毫米波链路依托该频段实现海量数据的超低时延汇聚,已成为室内物联网的关键解决方案。但在地铁火灾场景中,喷淋系统启动所形成的高密度水汽环境会对毫米波信号造成显著的复合衰减效应,导致信道特性变化复杂,难以准确建模。2024年,交通运输部印发《城市轨道交通运营突发事件应急演练管理办法》,进一步强调需通过常态化应急演练提升火灾等极端场景下的通信保障能力^[3]。因此,亟需系统地研究水汽因素对毫米波信道的影响机理,以支撑精准、可靠的应急通信系统设计^[4]。

应急场景具有突发性强、危害性高的特点,其通信保障面临极大考验。当地铁发生火灾时,喷淋系统启动并产生大量粒径分布广泛的水粒子,粒径范围从微米级的细微液滴到毫米级的大颗粒水滴^[5-6]。这些水介质悬浮或沉降于空气中,形成复杂的水汽混合传播环境,对毫米波频段(30~300 GHz)信号产生强烈的散射与吸收效应,导致通信信号出现严重衰减。此外,喷淋强度、通风条件等因素的实时变化,进一步导致信道传输特性呈现动态波动,进一步增加了水汽环境下毫米波信道特性分析的难度^[7]。本文引入“水汽因子”来表征水蒸气与液态水共同引起的综合衰减效应,该参数是影响信道性能的关键因素。

通过对现有文献的梳理发现,当前针对地铁应急场景下水汽复合衰减效应的研究仍存在明显不足:一方面,多数研究仅关注特定粒径或单一形态的水粒子在开阔地面或普通城市环境中的影响^[8],而当地铁发生火灾等紧急情况时,喷淋系统会产生粒径分布广泛的水粒子,悬浮或沉降于空气中形成复杂的水汽混合传播环境,此类环境中的信道传播特性尚未得到充分探讨与系统化量化;且现有研究多聚焦于单一频段的信道特性分析,未能充分对比亚6 GHz与毫米波在多粒径水粒子作用下的传输差异,难以通过参照频段凸显毫米波的信道特殊性,无法为物联网毫米波信道设计提供针对性支撑。另一方面,尽管射线追踪技术在信道预测方面具有高精度度与灵活性,能够准确获取多径信道的特性参数,并在室内外复杂场景中经过验证^[9],但现有射线追踪模型普遍未考虑水汽动态变化所带来的衰减机制。在地铁火灾应急场景中,不同粒径水粒子共同引起的复合衰减效应,将对直射、反射和散射路径产生非线性时变影响,导致路径损耗、均方根时延扩展、莱斯 K 因子等关键信道参数发生显著波动^[10-11]。为此,本文基于我国自主研发的射线追踪云平台CloudRT^[12],将水汽复合衰减效应动态耦合至射线追踪模型,通过构建地铁车站场景模型并开展射线追踪仿真,实现对应急情况下毫米波物联网链路性能的更精准预测,为通信系统的可靠性设计及水汽因素衰减补偿机制提供理论依据;同时,通过对地铁典型环境进行高精度三维建模与动态仿真,分别对亚6 GHz频段、毫米波频段开展独立仿真并进行对比分析,以亚6 GHz频段的信道特性为参照,精准提取并分析毫米波频段在水汽因素影响下的信道特性,最终实现了对应急环境下物联网毫米波链路性能的精准预测与可靠性评估。

本文通过构建融合复合水汽因素衰减机制的地铁场景射线追踪模型,系统量化了多粒径水粒子共存环境对毫米波信道特性的影响。研究成果可为智慧地铁在应急工况中的物联网毫米波信道设计、性能优化以及水汽因素衰减机制的深入研究提供理论信道模型支撑与数据基础。

1 水汽因素引起的衰减

在地铁应急场景中，水汽环境因素是影响毫米波信道性能的关键物理因素之一，其主要来源于喷水灭火系统喷释的大量液态水介质。喷水系统产生粒径分布广泛的水粒子，包括大尺寸水滴和细微水雾，两者共同作用于毫米波频段信号，引发显著的传播衰减。该衰减机制以散射和吸收为主，并随粒子浓度、粒径分布及信号频率的改变表现出复杂的非线性特性。

1.1 大粒径水滴引起的衰减

火灾发生时，喷淋系统一旦启动，将产生大量粒径较大的水滴。这些水滴在空间中悬浮和下落，对电磁波传播造成显著影响，其引起的信号衰减机制与自然降雨中的“雨衰”物理过程高度相似。具体而言，水滴对毫米波信号产生散射与吸收作用，造成能量损失和信号衰落，该过程可借助国际电信联盟推荐的 ITU-R P.838-3 建议书进行建模分析^[13]。该模型广泛用于估算降雨衰减，综合考虑了降雨强度、极化方式和频率等参数，其衰减系数可表示为：

$$\gamma_{\text{Rain}} = kR^\alpha \quad (1)$$

式中： γ_{Rain} 为降雨特定衰减量； R 为降雨率；参数 k 和 α 根据频率 f (GHz) 的变化确定：

$$\lg k = \sum_{j=1}^4 \left\{ a_j \exp \left[- \left(\frac{\lg f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right\} + m_k \lg f + c_k \quad (2)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 \left\{ a_j \exp \left[- \left(\frac{\lg f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right\} + m_\alpha \lg f + c_\alpha \quad (3)$$

式中：参数 a 、 b 、 c 和 m 的具体含义见文献[14]。根据极化方式，参数 k 和 α 分别确定为 k_V 、 α_V 与 k_H 、 α_H ，其中 V 表示垂直极化， H 表示水平极化，计算值会相应变化。

对于特定距离的总衰减，取决于发射天线和接收天线之间的有效路径长度：

$$A_{\text{Rain}} = \gamma_{\text{Rain}} d_{\text{eff}} \quad (4)$$

式中 d_{eff} 为有效路径长度，是通过将实际路径长度乘以一个距离系数获得的。

ITU-R P.530 建议书中引入了一个距离系数，用于考虑 ITU-R P.838 建议书中均匀分布假设所无法涵盖的空间降雨率变化：

$$r = \frac{1}{0.477d^{0.633} R_{0.01}^{0.073\alpha} f^{0.123} - 10.579 [1 - \exp(-0.024d)]} \quad (5)$$

喷淋强度是指单位时间内喷淋系统喷出的水量，单位通常为毫米每小时(mm/h)。本文将喷淋强度近似认为是降雨强度。

1.2 小粒径水雾引起的衰减

喷淋系统在灭火过程中还会形成大量小粒径水雾，这些气溶胶状水滴长时间悬浮于空气中，对电磁波传播构成持续影响。其信号衰减机制与自然界中“雾衰”物理过程较为相似，主要表现为对毫米波频段信号的吸收和散射效应。由于水雾粒径分布与浓度随环境动态变化，其衰减特性可通过适用于雾衰减的理论模型进行估算^[15]，如 ITU-R P.840 建议书中提供的基于液态水含量和频率的衰减计算方法。瑞利近似法是描述雾所引起的特定衰减的有效方法，可广泛用于预测雾和云引起的传播损耗^[16]，具体衰减系数可表示为：

$$\gamma_{\text{Fog}}(f, T) = K_1(f, T) M \quad (6)$$

式中： γ_{Fog} 为雾的特定衰减量； M 为液态水的密度； T 为液态水的温度， $K_1(f, T)$ 为液态水的特定衰减系数：

$$K_1(f, T) = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \quad (7)$$

式中：

$$\eta = \frac{2+\varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (8)$$

式中 ε' 和 ε'' 分别为水的复介电常数，可按式(9)~(10)计算：

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + (f/f_p)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + (f/f_s)^2} + \varepsilon_2 \quad (9)$$

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p^2 [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{f_s^2 [1 + (f/f_s)^2]} \quad (10)$$

式中: f_p 为主弛豫频率; f_s 为次弛豫频率:

$$f_p = 20.20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \quad (11)$$

$$f_s = 39.8f_p \quad (12)$$

$$\theta = \frac{300}{T} \quad (13)$$

$$\varepsilon_0 = 77.66 + 103.3(\theta - 1) \quad (14)$$

$$\varepsilon_1 = 0.0671\varepsilon_0 \quad (15)$$

$$\varepsilon_2 = 3.52 \quad (16)$$

最后, 可根据每条射线的传播距离(以千米为单位)来计算因雾气而产生的衰减量:

$$A_{\text{Fog}} = \gamma_{\text{Fog}}(f, T)d \quad (17)$$

液态水含量是指单位体积空气中液态水的质量, 单位通常为克每立方米(g/m^3)。本文中液态水含量用于描述喷淋系统启动后空气中悬浮水滴的总质量。

2 基于射线追踪的水汽因素衰减引入

2.1 传播机理

本研究采用了由北京交通大学先进轨道自主运行国家重点实验室开发的高性能实时仿真平台。在水汽因素对毫米波信道信号的影响中, 其传播过程主要受直射、反射与散射这几种主导传播机制的作用。在射线追踪仿真中采用了自由空间损耗、菲涅尔反射以及方向性散射相关模型^[8-9], 具体作用机制如表 1 所示。

表 1 传播机制
Table 1 Propagation mechanism

propagation mechanism	geometry calculation	electric field calculation
Line of Sight(LoS)	free space LOS	Friis equation
reflection	Snell's law with image-based method	Fresnel equation
scattering	directive scattering	scattering coefficient

2.2 添加水汽因素引起的衰减的处理步骤

水汽因素引发的衰减主要聚焦于信号功率的衰减^[17]。假定每条射线穿越水汽因素后, 其电场在 $(-n, n)$ 区间内呈高斯随机相位分布, 得到第 m 条射线多径因水汽因素导致的衰减(A)表达式:

$$A = A_{\text{Rain}, m} + A_{\text{Fog}, m} \quad (18)$$

第 m 条射线多径在未考虑水汽因素所致衰减情况下的功率, 能够依据射线追踪仿真结果计算得出:

$$P_m = 20 \lg |E_m e^{j\varphi_m}| \quad (19)$$

式中: E_m 和 φ_m 分别为相应的电场振幅和相位。因水汽因素而衰减后的电场矢量为:

$$\vec{E}_{A, m} = E_{A, m} e^{j(\varphi_m + \varphi_0^m)} = 10^{P_{A, m}/20} e^{j(\varphi_m + \varphi_0^m)} = 10^{(P_m - A_m)/20} e^{j(\varphi_m + \varphi_0^m)} \quad (20)$$

式中: $P_{A, m}$ 为第 m 条射线经水汽因素衰减作用后的接收功率值; φ_0^m 为第 m 条射线的随机相位, 服从 $(-\pi, \pi)$ 区间上的高斯分布。经过水汽衰减后, 接收信号的功率为:

$$P_A = \left| \sum_m \vec{E}_{A, m} \right|^2 \quad (21)$$

3 基于射线追踪的水汽因素下地铁场景仿真

3.1 天线模型

根据地铁场景物联网毫米波信道仿真需求，本次配置采用3~40 GHz频段双锥形全向天线，极化方式为垂直极化。基于天线厂商提供的水平面与垂直面辐射增益参数，通过三维空间插值算法进行重构，建立符合地铁场景物联网毫米波信道射线追踪仿真兼容性要求的天线辐射模型。天线三维模型如图1所示。

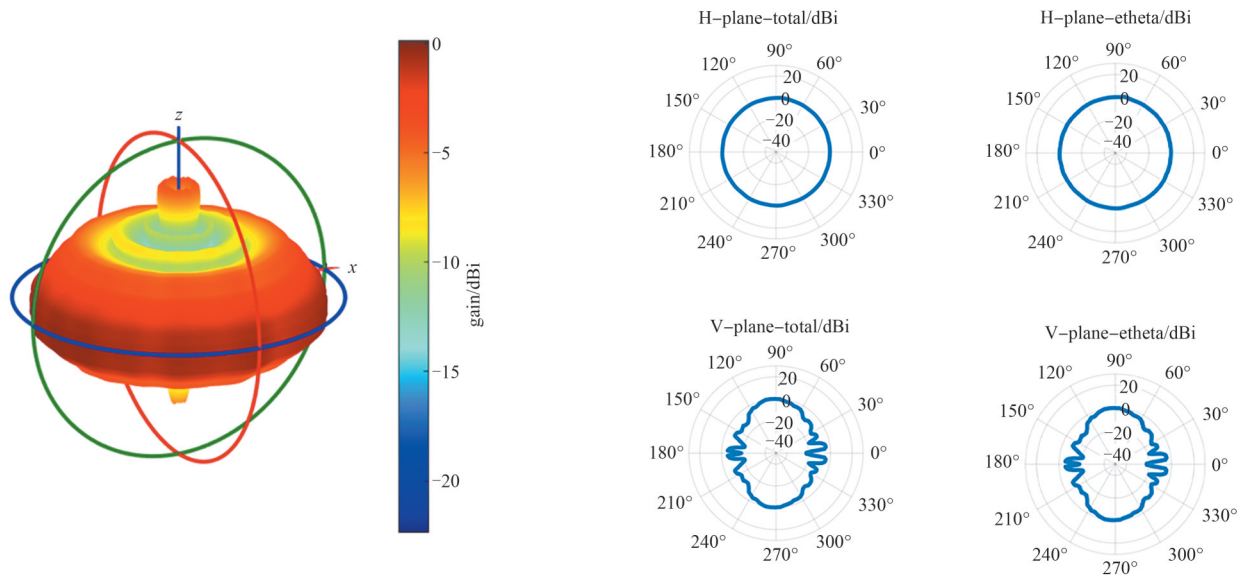


Fig.1 Three-dimensional model of the antenna
图1 天线三维模型

3.2 场景模型

在射线追踪仿真中，构建具有显著传播特性的场景模型是确保信道特性准确描述的关键前提。本文选取东四地铁站作为仿真场景，研究团队于该站点开展了系统性实地测量工作，并基于实测数据采用SketchUp软件重建了该地铁车站的三维场景模型。为最大限度还原真实环境特征，模型精确刻画了柱体、电梯、楼梯及车门等典型建筑元素。具体而言，选取了北京东四地铁站场景中39 m×14 m范围内的区域作为仿真区域，该区域内包含6根立柱(为便于研究，简化为方形立柱)、电梯以及多个站台门。图2为东四地铁站场景的实测图片，图3则展示了基于SketchUp工具构建的地铁车站三维场景模型。通过几何参数化实现高精度度模型建立，为后续开展无线信道多径效应分析及传播特性预测提供了高精度度数字化基础。



Fig.2 Measured scene at Dongsidi metro station
图2 东四地铁站实测场景

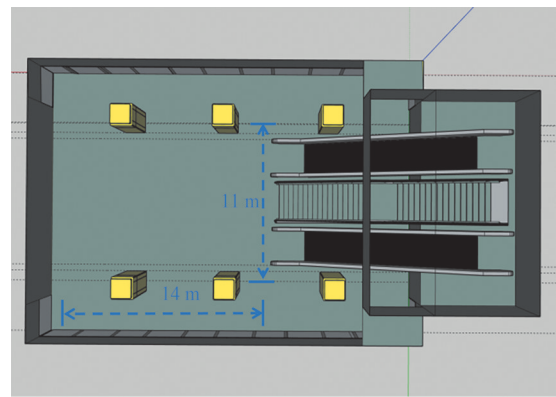


Fig.3 Three-dimensional scene model of the metro station
图3 地铁车站三维场景模型

场景中的所有结构体均根据其典型几何形状和材质进行了必要的简化和建模。表2总结了场景中所涉及的所有材料类型。表3和表4分别给出了这些材料在不同频段下的电磁参数，该场景中相关材料的电磁参数已进行了

测量与校准。其中, ϵ_r' 为材料的相对介电常数的实部, $\tan \delta$ 为损耗角正切, S 与 α 分别为方向性散射模型的散射系数与表面粗糙度^[18]。

3.3 仿真配置

本文采用的射线追踪仿真模块, 是一种可精确计算电磁波传播特性的确定性方法。为精准匹配东四地铁站的实际场景特征, 研究针对地铁环境下物联网毫米波信道(覆盖亚 6 GHz 与毫米波频段)的仿真参数开展了场景化配置, 具体参数如表 5 所示。

表 2 车站场景三维模型中典型结构体的材料

Table2 Materials of typical structures in the 3D model of the station scene

scene structure	material
column	granite
elevator	metal
staircase	granite, metal
floor,wall	concrete
car door	quartz glass,metal

表 3 毫米波频段所涉及材料的电磁参数

Table3 Electromagnetic parameters of the materials involved in the millimeter wave frequency band

material(24~26 GHz)	ϵ_r'	$\tan \delta$	S	α
granite	3.004 5	0.282 8	0.002 2	15.374 7
metal	1.000 0	10^7	0.002 6	17.769 1
concrete	5.474 5	0.002 1	0.001 1	109.000 0
quartz glass	1.053 8	23.921 1	0.002 5	5.510 6

表 4 亚 6 GHz 频段所涉及材料的电磁参数

Table4 Electromagnetic parameters of the materials involved in the sub-6 GHz frequency band

material(3~5 GHz)	ϵ_r'	$\tan \delta$	S	α
granite	3.55	1.930 0	0.000 1	0.01
metal	1.00	10^7	0.230 0	2.00
concrete	7.90	0.082 2	0.100 0	5.00
quartz glass	1.00	0.200 0	0.340 0	3.00

表 5 地铁物联网毫米波信道仿真参数

Table5 Simulation parameters of metro IoT millimeter wave backhaul channel

parameter	value
frequency band/GHz	3~5,24~26
bandwidth/GHz	2
propagation mechanism	direct,1-order reflection,1-order scattering
spray intensity/(mm·h ⁻¹)	600
liquid water content/(g·m ⁻³)	0.8
antenna gain/dBi	4

本研究将仿真频率分别设定于 3~5 GHz(亚 6 GHz 频段)与 24~26 GHz(毫米波频段), 旨在通过双频段设置, 对比分析水汽对不同频段信道传播特性的影响差异; 收发天线均采用垂直极化方式, 增益统一为 4 dBi, 确保天线特性与地铁空间内的信号传播需求适配。同时, 结合地铁内设备部署的典型高度, 将收发天线架设高度均固定为 1.5 m, 二者间距设定为 8 m, 贴合柱子、电梯等反/散射体的实际通信距离。具体仿真操作时, 固定发射天线的位置为沿 x 轴正方向, 以 0.5 m 为间隔依次放置接收天线, 并据此开展仿真工作。基于该布局开展的仿真测试, 可客观反映不同空间位置下的信道特性, 相关仿真流程如图 4 所示。

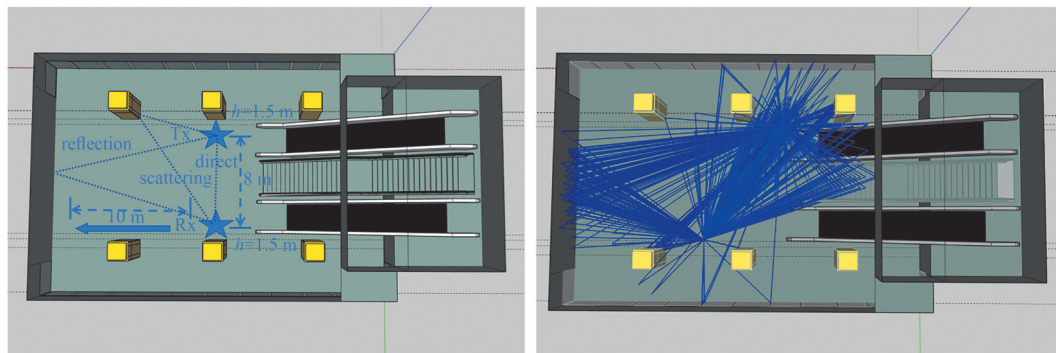


Fig.4 3D modeling of subway scenes and multi-path visualization renderings

图 4 地铁场景三维建模及多径可视化效果图

4 水汽因素下地铁场景信道特征分析

基于大量的实时仿真结果, 萃取得到以下关键的信道参数, 包括路径损耗、阴影衰落、莱斯 K 因子、均方根延迟扩展以及 4 个角度扩展(即到达角方位角扩展(Azimuth Spread of Arrival, ASA)、出发角方位角扩展(Azimuth Spread of Departure, ASD)、到达角俯仰角扩展(Elevation Spread of Arrival, ESA)和出发角俯仰角扩展(Elevation Spread of Departure, ESD)), 如表 6 所示。所有这些信道参数都采用均值为 μ 、标准差为 σ 的正态分布进行拟合。研究中对对比了不同频段下水汽因素对信道特性的影响规律^[19], 重点系统分析了水汽因素作用于信道的内在机制规律。

表 6 不同频段下水汽因素影响下的信道参数

Table 6 Channel parameters affected by water Vapor Factors(VF) in different frequency bands

case	ray tracing without attenuation by Vapor Factors(VF) (24~26 GHz)	ray tracing with attenuation by Vapor Factors(VF) (24~26 GHz)	ray tracing without attenuation by Vapor Factors(VF) (3~5 GHz)	ray tracing with attenuation by Vapor Factors(VF) (3~5 GHz)
<i>A</i>	17.23	44.03	-0.98	-1.853
<i>B</i>	72.36	103.20	70.62	71.54
σ_{PL}/dB	5.12	3.29	3.95	3.95
μ_{KF}/dB	1.58	9.88	1.42	1.46
σ_{KF}/dB	8.22	8.77	5.45	5.40
μ_{DS}/ns	23.65	3.00	18.41	18.23
σ_{DS}/ns	5.84	0.58	5.13	5.05
$\mu_{ASA}/(^{\circ})$	53.61	12.25	47.21	46.93
$\sigma_{ASA}/(^{\circ})$	5.28	8.89	15.12	15.23
$\mu_{ASD}/(^{\circ})$	32.80	13.86	21.25	21.72
$\sigma_{ASD}/(^{\circ})$	17.68	5.48	8.42	8.33
$\mu_{ESA}/(^{\circ})$	6.54	6.34	10.77	10.77
$\sigma_{ESA}/(^{\circ})$	2.23	2.37	2.85	2.86
$\mu_{ESD}/(^{\circ})$	18.92	8.11	13.37	13.35
$\sigma_{ESD}/(^{\circ})$	7.18	3.14	3.99	3.99

4.1 路径损耗

路径损耗指的是电磁波于空间传播时,受扩散、吸收以及反射等多种因素影响而造成信号功率出现衰减的情况。本文中,路径损耗借助“*a-b*”模型进行拟合,具体为:

$$L_p = a \lg d + b + X_{\sigma} \quad (22)$$

式中: d 为收发器之间的距离; a 和 b 分别对应斜率与截距; X_{σ} 为阴影衰落,是一个服从均值为0、标准差为 σ_L 的高斯分布变量。

从图5可见,毫米波频段受水汽因素的衰减影响更为显著,且在水汽作用下,随着发射(Transmit, Tx)天线与接收(Receive, Rx)天线之间距离的增大,自由空间路径损耗(Free-Space Path Loss, FSPL)呈现出明显的上升趋势。因此,为保障地铁站场景下无线链路的稳定连接,在物联网毫米波信道通信系统设计中,推荐采用超高增益定向天线^[20]。这类天线既能针对性补偿毫米波因距离与水汽因素产生的双重衰减,又能适配地铁站狭长封闭的空间特性,避免全向天线能量向非通信方向辐射造成的无效损耗,从而有效提升能量利用效率^[21]。

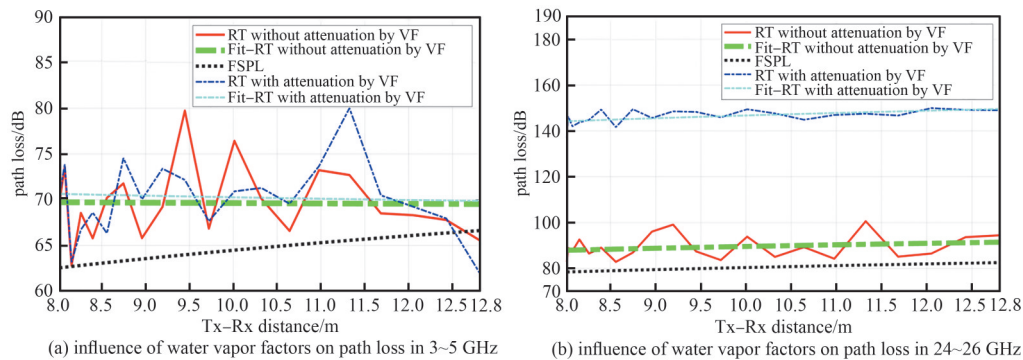


Fig.5 The influence of water vapor factors on path loss under different frequency bands

图 5 不同频段下水汽因素对路径损耗的影响

4.2 莱斯 K 因子

莱斯 K 因子定义为最强射线的功率与其余射线功率值总和的比值:

$$K = 10 \lg \frac{|E_1 e^{j\varphi_1}|^2}{\left| \sum_{m=1}^N E_m e^{j\varphi_m} - E_1 e^{j\varphi_1} \right|^2} \quad (23)$$

式中: K 为莱斯 K 因子; E_m 和 φ_m 分别为第 m 条射线的电场振幅和相位; N 为射线的数量; E_1 和 φ_1 为最强射线的

电场矢量。

不同频段下水汽因素对莱斯 K 因子的影响及拟合结果如图 6 所示, 图中 CDF 为累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF), Fit-RT 为拟合根时延(Fitted Root Time, Fit-RT)。其中毫米波频段在水汽因素作用下的莱斯 K 因子增长较亚 6 GHz 频段下更为显著。不考虑水汽因素时, 射线追踪仿真结果显示莱斯 K 因子平均值为 1.58 dB, 表明存在大量由车站候车区光滑玻璃等设施反射、散射形成的多径成分; 引入水汽因素后, 莱斯 K 因子平均值增至 9.88 dB。这是因为视距场景中, 反射和散射多径传播距离更长, 受水汽因素衰减更显著, 而直射径衰减较小, 导致其功率优势凸显。仿真结果验证了这一结论, 且莱斯 K 因子提升意味着多径干扰减弱, 可采用如低阶线性均衡简化多径处理, 减少硬件资源占用, 以适配智能电梯等物联网终端的低功耗、低时延需求^[22]。

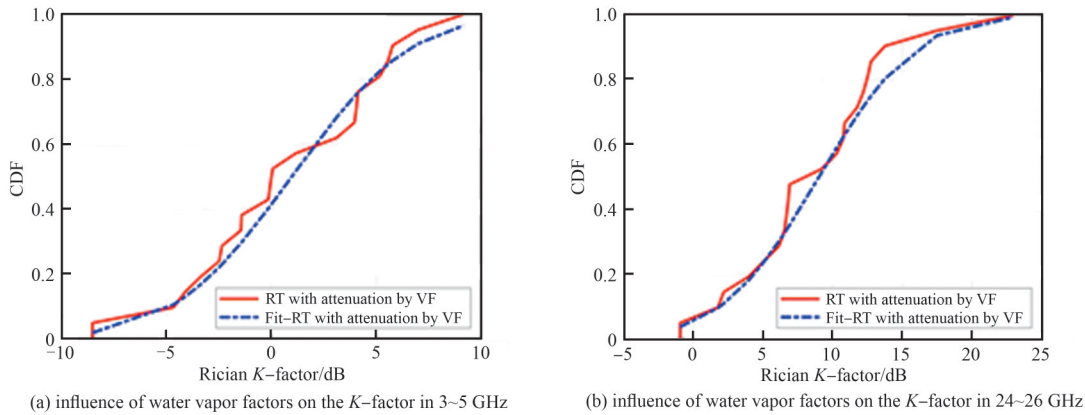


图 6 不同频段下水汽因素对莱斯 K 因子值的影响及拟合结果

4.3 均方根时延扩展

均方根时延扩展是根据功率时延分布的二阶中心矩的平方根计算得出:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N \tau_m^2 P_m}{\sum_{m=1}^N P_m} - \left(\frac{\sum_{m=1}^N \tau_m P_m}{\sum_{m=1}^N P_m} \right)^2} \quad (24)$$

式中: σ_{τ} 为均方根时延扩展; P_m 和 τ_m 分别为第 m 条射线的功率和时延。

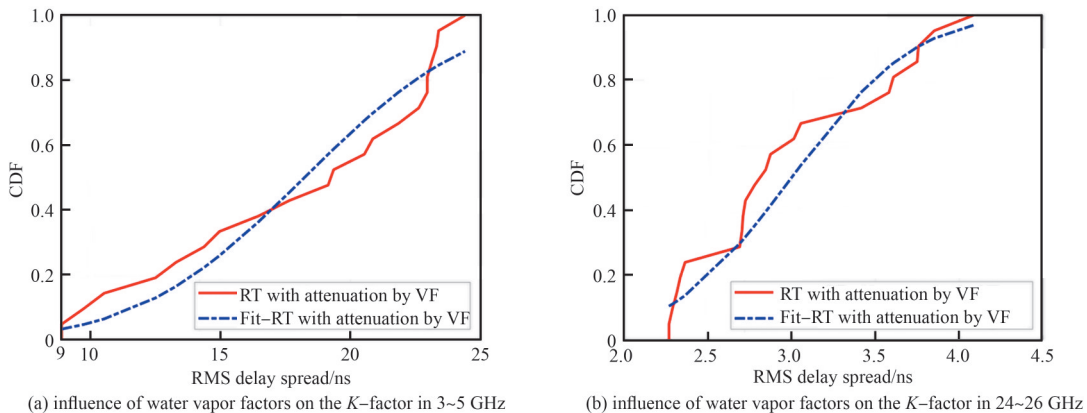


图 7 不同频段下水汽因素对均方根时延扩展的影响及拟合结果

如图 7 所示, 毫米波频段下, 水汽因素对于均方根时延扩展的减小更加显著。具体而言, 不考虑水汽因素时, 均方根时延扩展平均值为 23.65 ns; 而水汽因素作用下, 该值降至 3.00 ns。其核心机理是水汽对信号的衰减具有路径依赖性: 多径信号传播路径更长且曲折, 暴露于水汽环境的时间更久, 衰减更显著; 而直射信号路径短, 受水汽因素影响较小。因此, 水汽环境中反散射信号强度大幅降低, 部分原本影响时延扩展的多径信号会

因强度低于检测阈值而不再作用。水汽环境下信道均方根时延扩展平均值降低, 会导致码间串扰显著减弱, 这为通信系统采用高码率奠定了基础, 无需因常规场景的高时延扩展风险限制码率提升; 同时, 受水汽因素衰减的影响, 原本可能干扰码率设计的远距离弱多径信号因强度不足不再参与信道传播, 无需为这类无效多径预留抗干扰码率冗余, 有效避免了频谱资源浪费^[23-24]。

4.4 角度扩展

角度扩展表征了三维场景中收发机各条射线的到达角和出发角的分布情况。每条射线由水平面上的方位角和垂直面上的俯仰角描述其特征。因此, 可得到 4 个角度扩展值, 即 ASA、ESA、ASD 和 ESD:

$$\sigma_{AS} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N (\theta_{m,\mu})^2 P_m}{\sum_{m=1}^N P_m}} \quad (25)$$

式中: σ_{AS} 为角度扩展; $\theta_{m,\mu}$ 为第 m 条射线的角度 θ_m 与功率加权平均角度 μ_θ 之间的差值, 其表达式为:

$$\theta_{m,\mu} = \text{mod}(\theta_m - \mu_\theta + \pi, 2\pi) - \pi \quad (26)$$

式中: θ_m 为第 m 条射线的到达角(Angle of Arrival, AoA)/出发角(Angle of Departure, AoD)/到达俯仰角(Elevation of Arrival, EoA)/出发俯仰角(Elevation of Departure, EoD); μ_θ 的表达式为:

$$\mu_\theta = \frac{\sum_{m=1}^N \theta_m P_m}{\sum_{m=1}^N P_m} \quad (27)$$

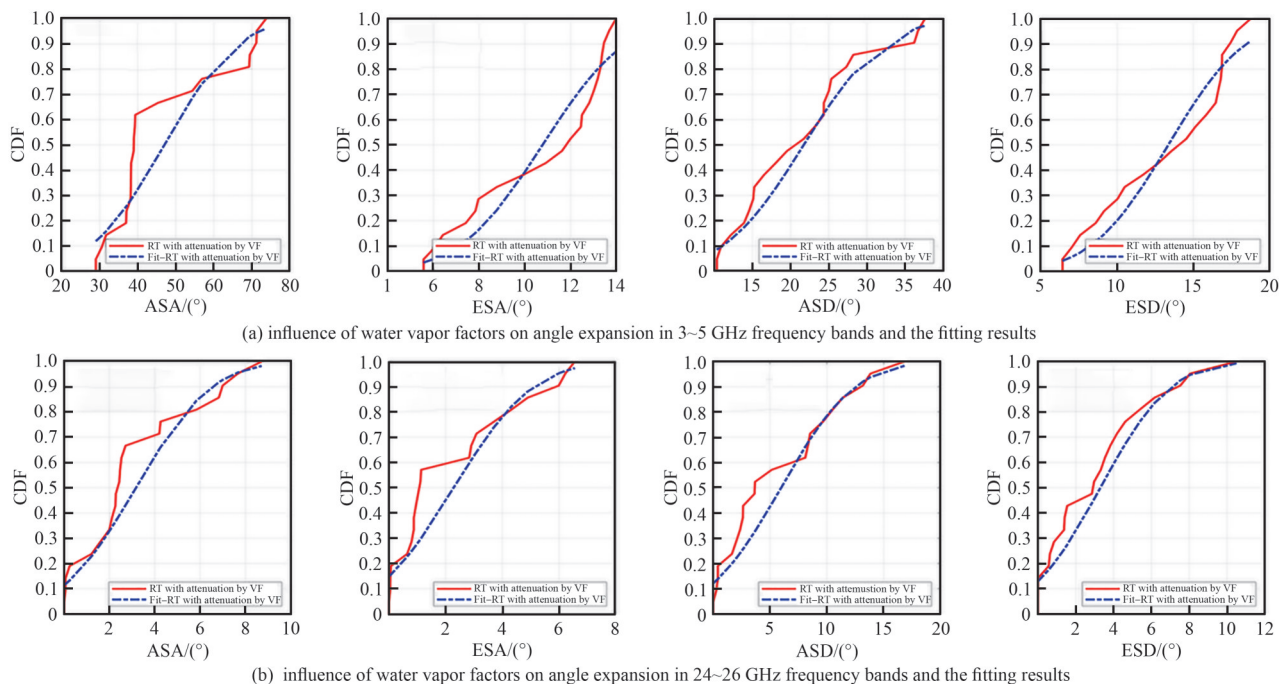


Fig.8 Influence of water vapor factors on angle expansion under different frequency bands and the fitting results

图 8 不同频段下水汽因素对角度扩展的影响及拟合结果

由表 4 数据可知, ESA 与 ESD 远小于 ASA 与 ASD, 这本质上反映了信道多径信号的传播路径特性。从空间传播机理看, 俯仰角维度(垂直方向)的信号传播受场景垂直空间结构限制: 对于车站环境, 垂直方向仅存在地面、站台顶棚等少量反射/散射体, 且顶棚高度固定, 结构规整, 仅能形成有限的垂直方向多径; 而方位角维度(水平方向)存在大量反射/散射体(如车站两侧柱子、玻璃等), 这些物体的不规则分布与多样材质特性, 为水平方向多径信号生成提供充足条件, 最终导致 ASA 与 ASD 远大于 ESA 与 ESD。如图 8 所示, 在水汽因素作用下, 多径信号受水汽因素衰减影响强度减弱, 信道整体角度扩展呈现下降趋势。其中, ASA 与 ESA 的平均值下降幅度显著大于 ASD 与 ESD, 这是因为水平面的多径信号传播路径更长, 穿越水汽环境时间更长, 受水汽因素衰减

的作用更突出。鉴于水平方向多径信号的主导地位, 基站天线的方位角覆盖设计应重点关注宽角度覆盖能力, 建议采用水平半功率波束宽度更大的天线^[25], 以有效接收不同水平方向的多径信号, 提升信号接收的多样性和稳定性; 同时, 可通过方位角维度的波束赋形技术, 抑制干扰方向的多径信号, 降低信道干扰^[26]。

5 结论

本文聚焦地铁火灾应急场景, 深入研究了水汽因素对物联网毫米波信道特性的影响, 系统探讨并定量剖析了水汽引发的衰减效应。通过在地铁站台场景下, 于亚 6 GHz 和毫米波频段开展射线追踪仿真, 获取了添加水汽因素衰减后的毫米波信道响应数据, 并据此提取分析了路径损耗、阴影衰落等关键信道特性参数, 揭示了水汽环境对毫米波信道传播特性的复杂影响机制。仿真结果显示, 引入水汽因素衰减效应后, 莱斯 K 因子增大了 8.3 dB, 均方根时延扩展减小了 20.65 ns, 角度扩展 ASA、ESA、ASD、ESD 分别减小了 41.36°, 18.94°, 0.2° 和 10.81°, 这是反射和散射路径因传播距离长而在水汽环境中衰减更显著所致。本研究独特之处在于量化多粒径水粒子共存环境对毫米波信道特性的具体影响, 成果不仅为应急情况下地铁物联网系统设计提供了理论信道模型支撑, 还给出了采用超高增益定向天线、部署动态波束赋形策略、使用高码率传输方案等通信系统设计建议, 为优化毫米波回传链路性能及深入研究水汽因素衰减机制积累了技术经验。未来, 可进一步拓展研究场景, 探索更多复杂环境下水汽因素对毫米波信道的影响, 为应急通信系统设计提供更全面、精准的理论依据。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 数字交通“十四五”发展规划[EB/OL]. (2021-10-25) [2025-11-10]. http://www.qhztzx.com/bigdata/detail_506.html. (Ministry of transport of the people's republic of china. Development plan for digital transportation during the 14th five year plan[EB/OL]. (2021-10-25) [2025-11-10]. http://www.qhztzx.com/bigdata/detail_506.html.)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国工业和信息化部. 《关于确定智慧城市基础设施与智能网联汽车协同发展第一批试点城市的通知》(建城函[2021]51号)[EB/OL]. (2021-04-28) [2025-09-19]. <https://www.waizi.org.cn/law/112431.html>. (Ministry of housing and urban rural development of the People's Republic of China, Ministry of Industry and Information Technology. Notice on determining the first batch of pilot cities for collaborative development of smart city infrastructure and intelligent connected vehicles[EB/OL]. (2021-04-28) [2025-09-19]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/tzgg/202105/t20210508_31989.html.)
- [3] 王宁,高朋. 基于物联网的城市轨道交通环境监测系统研究[J]. 探索科学, 2021(6):1-4. (WANG Ning,GAO Peng. Research on the urban rail transit environmental monitoring system based on the internet of things[J]. Explore Science, 2021(6):1-4.) DOI: 10.1227/j.issn.2095-588X.2021.06.005.
- [4] 李毅,邓懿,万擎,等. 城市轨道交通智能环境监测预警技术开发及应用实践[J]. 城市轨道交通, 2023(6):35-37. (LI Yi,DENG Yi,WAN Qing,et al. Development and application practice of intelligent environmental monitoring and early warning technology for urban rail transit[J]. Urban Rail Transit, 2023(6):35-37.)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 自动喷水灭火系统设计规范:GB50084-2017[S]. 北京:中国计划出版社, 2017. (Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of sprinkler systems:GB50084-2017[S]. Beijing:China Planing Press, 2017.)
- [6] 疏学明,郑魁,袁宏永,等. 火灾标准火烟雾颗粒测量及粒径尺度分布函数研究[J]. 中国工程科学, 2005,7(8):51-55. (SHU Xueming,ZHENG Kui,YUAN Hongyong,et al. Study on particle size and its distribution function of standard fire smoke[J]. Engineering Science, 2005,7(8):51-55.) DOI:10.3969/j.issn.1009-1742.2005.08.010.
- [7] RAKSHIT G,MAITRA A. Effect of vertical downdraft on rain attenuation modeling over an earth-space path[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022,21(5):1042-1045. DOI:10.1109/LAWP.2022.3157035.
- [8] HE Daping,GUAN Ke,YAN Dong,et al. Physics and AI-based digital twin of multi-spectrum propagation characteristics for communication and sensing in 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023,41(11):3461-3473. DOI:10.1109/JSAC.2023.3310108.
- [9] HE Daping,AI Bo,GUAN Ke,et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019,21(1):10-27. DOI:10.1109/COMST.2018.2865724.
- [10] MATONDO S B,OWOLAWI P A. Impact of rain attenuation on short-range frequency operations in 5G networks[C]// 2024 the 25th International Microwave and Radar Conference(MIKON). Wroclaw, Poland: IEEE, 2024: 80-85. DOI: 10.23919/MIKON

- 60251.2024.10633993.
- [11] LAI Zhengrong, YI Haofan, GUAN Ke, et al. Impact of meteorological attenuation on channel characterization at 300 GHz[J]. *Electronics*, 2020,9(7):1115. DOI:10.3390/electronics9071115.
- [12] 官科,张美文,何丹萍,等. 无线信道数字孪生关键技术现状及展望[J]. *电波科学学报*, 2025,40(5):789-799. (GUAN Ke, ZHANG Meiwen, HE Danping, et al. The current situation and prospects of the critical digital twin technology for wireless channels[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2025,40(5):789-799.) DOI:10.12265/j.cjors.2024178.
- [13] ITU. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods[M/OL]. [2025-09-19]. 2005:833-838. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en>.
- [14] ITU. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems:ITU-R P.530-17[R]. Geneva:ITU, 2022:518-530.
- [15] ITU. Attenuation due to clouds and fogs[M/OL]. [2025-09-19]. 2019:840-848. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.840/en>.
- [16] SILES G A, HEREDIA M, HARRIAGUE R. Cloud detection models and their effect on the calculation of cloud attenuation: assessment at Ka- and Q-band at 4 065 meters of altitude[C]// 2020 the 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen, Denmark:IEEE, 2020:1-5. DOI:10.23919/EuCAP48036.2020.9135558.
- [17] 马蕾. 基于射线跟踪的毫米波车联网信道仿真与分析[D]. 北京:北京交通大学, 2021. (MA Lei. Simulation and analysis of millimeter wave vehicle networking channel based on ray tracing[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2021.)
- [18] GUO Lantu, GUAN Ke, LIU Ting, et al. Obtaining electromagnetic properties of multi-type media in realistic environments:state-of-the-art and prospects[J]. *China Communications*, 2025,22(1):25-40. DOI:10.23919/JCC.fa.2024-0056.202501.
- [19] 张蕊,张利军,李磊,等. MIMO对流层散射信道建模研究[J]. *电波科学学报*, 2023,38(4):673-678. (ZHANG Rui, ZHANG Lijun, LI Lei, et al. Study on MIMO tropospheric scatter channel modeling[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2023,38(4):673-678.) DOI:10.12265/j.cjors.2023050.
- [20] 徐冠军,樊海潮,宋朝晖,等. 典型月面环境下 500 MHz 与 23 GHz 频率通信信道特性研究[J]. *电波科学学报*, 2025,40(5):912-922. (XU Guanjun, FAN Haichao, SONG Zhaohui, et al. Channel characteristics for typical lunar surface environment communication at 500 MHz and 23 GHz[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2025,40(5):912-922.) DOI:10.12265/j.cjors.2024159.
- [21] 王子昂,桑健,李潇,等. 室内热点场景多频段 RIS 辅助 MIMO 通信信道测量与建模[J]. *中兴通讯技术*, 2024,30(3):43-51. (WANG Zi'ang, SANG Jian, LI Xiao, et al. Channel modeling and measurement for RIS-assisted MIMO communication in InH scenario[J]. *ZTE Technology Journal*, 2024,30(3):43-51.) DOI:10.12142/ZTETJ.202403008.
- [22] HUANG Rui, LI Huilin, ZHANG Yongmin. Efficient bandwidth allocation and computation configuration in industrial IoT[J]. *ZTE Communications*, 2023,21(1):55-63. DOI:10.12142/ZTECOM.202301007.
- [23] 王勤民,赵津津,董丽元,等. 一种低信噪比条件下的码元速率估计算法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2024,22(11):1283-1288. (WANG Qinmin, ZHAO Jinjin, DONG Liyuan, et al. A symbol rate estimation algorithm under low signal-to-noise ratio[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2024,22(11):1283-1288.) DOI:10.11805/TKYDA2023073.
- [24] 黄东海,亢中苗,吴赞红. 电力物联网中时延能耗均衡的 MEC 资源调度策略[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2024,22(9):944-951. (HUANG Donghai, KANG Zhongmiao, WU Zanhong. MEC resource scheduling strategy for delay and energy consumption balancing in Power Internet of Things[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2024,22(9):944-951.) DOI:10.11805/TKYDA2024023.
- [25] 徐少毅,吕剑书. 物联网中基于重传的无人机覆盖效率最大化[J]. *北京交通大学学报*, 2023,47(2):58-66. (XU Shaoyi, LYU Jianshu. Maximizing UAV coverage efficiency based on retransmission in the internet of things[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2023,47(2):58-66.) DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20220133.
- [26] 马铂琳,甄姬娜,张昶,等. RIS 辅助高铁毫米波无线通信多普勒频移补偿技术[J]. *北京交通大学学报*, 2025,49(3):147-156. (MA Bolin, ZHEN Jina, ZHANG Chang, et al. Doppler shift compensation techniques for RIS-assisted millimeter-wave wireless communications in high-speed railways[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2025,49(3):147-156.) DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20240066.

作者简介:

李 帅(1986-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为物联网技术 .email:lishuai6799@bjsubway.com.

弓子悦(2000-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

王梦阳(2002-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

官 科(1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁环境数字孪生.