

张旭, 姜苏英, 杨汭, 等. 两种隧道场景下车对车无线信道衰落特性的测量与分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 443-452. DOI: [10.12265/j.cjors.2020218](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020218)

ZHANG X, JIANG S Y, YANG M, et al. Measurement and analysis of fading characteristics of V2V propagation channel in two tunnels[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(3): 443-452. (in Chinese) DOI: [10.12265/j.cjors.2020218](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020218)

两种隧道场景下车对车无线信道衰落特性的 测量与分析

张旭¹ 姜苏英¹ 杨汭² 王威¹ 何睿斯² 侯俊¹ 刘鑫一¹

(1. 长安大学, 西安 710064; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘 要 针对车-车 (vehicle to vehicle, V2V) 通信系统对无线电信道衰落特性和模型的需求, 分别在两种隧道场景中 5.9 GHz 和 5.2 GHz 频段下进行了 V2V 无线电信道测量活动, 并对隧道外、隧道内和两者之间的连接部分场景进行了小尺度衰落特性分析. 基于近距离 (close-in, CI) 对数模型和 ABG (α - β - γ) 模型建立了基于距离的接收功率模型, 对两种场景隧道内外的接收功率进行了评估和比较, 路径损耗指数分别为 1.83 和 1.9, 结果表明参考距离为 1 m 的 CI 对数模型具有更高的拟合度. 此外, 将测量数据幅度的衰落分布与五种典型的理论衰落分布进行比较分析, 发现其特征更接近于具有最小拟合优度值的莱斯分布, 且隧道内的莱斯 K 因子小于隧道外. 同时, 给出了隧道内和隧道外之间连接处基于距离的莱斯 K 因子模型, 发现连接处的 K 因子与距离无关, 而隧道内的 K 因子随距离增大而减小.

关键词 车-车 (V2V); 传播信道; 隧道; 衰落分布; K 因子

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2021)03-0443-10

DOI [10.12265/j.cjors.2020218](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020218)

Measurement and analysis of fading characteristics of V2V propagation channel in two tunnels

ZHANG Xu¹ JIANG Suying¹ YANG Mi² WANG Wei¹ HE Ruisi² HOU Jun¹ LIU Xinyi¹

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract In order to fulfill the requirement of vehicle-to-vehicle communication system for wireless channel fading characteristics and corresponding models, vehicle to vehicle (V2V) wireless channel measurement activities are carried out at the frequency bands of 5.9 GHz and 5.2 GHz in two kinds of tunnel scenes. And small-scale fading characteristics are analyzed for outside the tunnel, inside the tunnel and their junction part. Based on the close-in (CI) log-distance model and ABG (α - β - γ) model, the distance dependent received power models are established. The received power inside and outside the tunnel in the two scenarios are evaluated and compared, and the path loss index is 1.83 and 1.9, respectively. The results show that the CI model with a reference distance of 1 m has higher fitting degree. In addition, the fading distribution of measured data amplitude is compared with five typical theoretical fading distributions, and it is found that its characteristic is closer to the Rice distribution with the minimum goodness of fit value, and the Rice K -factor in the tunnel is smaller than that outside the tunnel. Further, distance-based K -factor models for the tunnel and the junction part are presented. We find that the K -factor at the conjunction area are independent of

收稿日期: 2020-09-23

资助项目: 长安大学研究生科研创新实践项目 (300103703012); 国家自然科学基金 (61871059)

联系人: 王威 E-mail: wei.wang@chd.edu.cn

the distance, while the K -factor inside the tunnel decreases with the increase of the distance.

Keywords vehicle to vehicle(V2V); propagation channel; tunnel; fading characteristics; K -factor

引言

物联网 (internet of things, IOT) 是一个由互联网通过信息传感设备实现现实世界人、机、物等各类要素在任何时间、任何地点互联的巨大网络^[1], 其在城市智能交通系统中的车联网 (internet of vehicle, IOV) 技术就是 5G 的一个具体应用. 随着移动通信技术在交通领域里被广泛使用, 智能交通得到了蓬勃发展. IOV 技术将无线通信和传感检测技术相结合, 收集和交互车辆、道路、环境信息, 通过车到一切 (vehicle to everything, V2X) 的链路, 实现交通管理控制、车辆控制和动态信息服务的智能综合网络^[2-3], 从而使交通系统的安全性、便捷性和可靠性都得到很大的提升, 并为未来无人驾驶系统提供了广阔的发展空间和技术支持. 因此, 无线通信技术是支撑智能交通系统发展的一个关键技术.

V2X 主要分为三类: 车-车 (vehicle to vehicle, V2V)、车-基础设施 (vehicle to infrastructure, V2I)、车-行人 (vehicle to pedestrian, V2P), 通过相互通信构成车载自组网络 (vehicle ad hoc networks, VANETs). V2V 通信不需要固定基站, 而是两个移动车辆从一端到另一端的直接无线通信. 在智能交通系统中, V2V 通信起着重要的作用, 是无人驾驶、自主预测汽车防撞等应用的关键技术支撑.

为了更好地发展 V2V 通信系统, 对于 V2V 无线传播信道的准确描述和建模是尤为重要的^[4-5]. 它是推动通信标准的建立、促进相关设备的制造以及测试无线通信算法的重要一环, 这些都需要通过实际的 V2V 信道测量活动来对其无线信道进行分析和建模.

近年来, 针对典型环境 (如农村、郊区、城市和公路) 进行了许多 V2V 无线信道的测量活动和信道建模研究工作^[6-8]. 其他特殊环境如地下停车场和隧道等也略有研究, 但是针对隧道内和隧道连接处的小尺度衰落研究还不够深入. 文献 [9] 针对隧道内 5.9 GHz V2V 传播信道小尺度衰落进行了统计分析, 结果表明, 测量数据的统计特征符合莱斯分布, 隧道外莱斯 K 因子的平均值高于隧道内的值. 此外, 对隧道内尤其是隧道连接处的其他衰落特性如瑞利分布、威布尔分布的研究是有必要的.

本文针对隧道环境下 5.9 GHz 和 5.2 GHz 频段的信道进行了测量, 并以测量数据为基础, 对隧道内外及其连接部分的接收功率和小尺度衰落特性进行了分析. 我们将接收信号幅度的统计特性与五种典型的理论衰落分布进行了比较, 发现接收信号的小尺度衰落特性符合具有最小拟合优度值的莱斯分布. 此外, 计算并分析了莱斯 K 因子, 结果显示隧道内 K 因子与收发距离有相关性.

1 测量系统

1.1 测量设备

为了研究隧道无线电信道特征, 分别针对两个不同的隧道环境进行了信道测量.

第一次信道测量活动使用的是北京交通大学 (Beijing Jiaotong University, BJTU) 信道探测仪, 该探测仪依赖基于软件无线电系统的射频收发仪器——PXI 模块化平台^[10], 包括矢量信号发射模块与接收模块、时钟模块、电源模块、数据存储、发射天线/接收天线等模块. 在发射机一端, 机箱 NI PXIe-1082 和矢量信号发射机 NI PXIe-5673 用于发射中心频率 f_c 为 5.9 GHz 的正交频分复用 (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) 信号. 测量中采用单输入单输出 (single-input single-output, SISO) 模式, 通过安装在车辆顶部的单个发射天线发送信号. 接收机由机箱 NI PXIe-1082 和矢量信号接收机 NI PXIe-5663 组成. 信道探测仪的软件平台采用基于实验室虚拟仪器工程工作台 LabVIEW 的编程环境, 可以有效地对信道测量仪器的硬件设备进行编程和控制. 通过适当的软件参数设置, 可以提取接收机采集的数据并进行处理、存储和实时显示. 表 1 列出了 5.9 GHz 下信道探测系统的参数设置.

表 1 5.9 GHz 信道测量系统参数
Tab. 1 5.9 GHz measurement parameters

参数	取值
中心频率 f_c /GHz	5.9
测量类型	SISO
带宽 B /MHz	30
副载波数 N	513
发射功率/dBm	最大34
信号周期/ μ s	17.1
信号间隔 t_g /ms	~ 1
收发天线速度/(km·h ⁻¹)	~ 40

第二次信道测量采用的是 MEDAV RUSK-DLR 宽带信道探测器,发射机发送一个中心频率 f_c 为 5.2 GHz 的 OFDM 信号.信道冲击响应 (channel impulse response, CIR) $h(t_k, \tau_n)$ 每隔 t_g 时间被测量一次,其中: $t_k = k \cdot t_g$ 为测量时间点, $k = 1, 2, \dots$ 表示第几次测量; $\tau_n = n \cdot \tau_d, n = 0, \dots, N-1$, 载波数 $N=1\ 537$; τ_d 为时延分辨率.信号带宽 $B=120$ MHz, 对应时域 CIR 的 $\tau_d = 1/B$.发射信号的周期 $T_p=12.8\ \mu\text{s}$ 决定了最大能够测量出的多径,等效于相对直射路径的绕行最远传播距离为 3.84 km.这一最大距离能够保证在隧道场景下不发生码间干扰,最大传播时延能够被有效地测量.表 2 列出了 5.2 GHz 信道探测参数.

表 2 5.2 GHz 信道测量系统参数
Tab. 2 5.2 GHz measurement parameters

参数	取值
中心频率 f_c/GHz	5.2
测量类型	SISO
带宽 B/MHz	120
副载波数 N	1 537
发射功率/dBm	最大37
信号周期/ μs	12.8
信号间隔 t_g/ms	1.024
收发天线速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	~ 55

在测量过程中,接收机使用与发射天线相同的天线,收发天线均安装在车辆的车顶,如图 1 所示.其中左侧的车辆搭载发射机,右侧的车辆搭载接收机.



图 1 用于测量的车辆:左侧车辆搭载发射机,右侧车辆搭载接收机

Fig. 1 Vehicles used for measurement: the left carries the transmitter and the right carries the receiver

为了保持发射机和接收机的同步,收发两端均采用了铷原子钟来提供稳定的频率标准.为了控制

频率标准随时间发生的偏移,从 GPS 获得的时间信息被用来驯服铷原子钟.为了给信道测量仪器提供电源,我们采用大功率逆变器将车载电池的 12 V 直流电源转换为 220 V 交流电源.为了防止电源中断和电流不稳定,逆变器和信道探测器之间使用了不间断电源.

1.2 测量场景

测量场景一:西安市区南郊的一条双车道矩形隧道(图 2(a)).测量过程中两辆车的行驶速度约为 40 km/h,发射车辆在接收车辆的后方向同行驶.测量从进入隧道前的十字路口开始,在测量过程中,发射机和接收机之间总是存在可视距 (line-of-sight, LoS),所测得的接收功率如图 3(a) 所示.从图 3(a) 可见,接收功率在 -55 dBm 和 -30 dBm 之间变化.在开始的时候,接收到的功率变化不大,是因为这两辆车都在等待交通信号灯从红色变为绿色.随着发射和接收天线距离的增加,两辆汽车向隧道行驶时,接收功率有了很大的下降.隧道外接收信号的衰落深度小于隧道内.



(a) 场景一
(a) Scene 1



(b) 场景二
(b) Scene 2

图 2 两种测量场景

Fig. 2 Two measuring scenes

测量场景二:德国慕尼黑郊区 Aubing 的 A96 高速公路三车道矩形隧道(图 2(b)).两辆车的行驶速度范围为 20~55 km/h,发射车辆在接收车辆的后方向同行驶.测量从进入隧道前的十字路口开始,在测量活动中,发射机和接收机之间存在 LoS 和少量的不可视距 (non-line-of-sight, NLoS) 的情况,所测得的接收功率如图 3(b) 所示.从图 3(b) 可以看出,接收功

率在-70 dBm 和-50 dBm 之间变化. 在开始时接收机已经驶过十字路口向隧道方向行驶, 发射机正从十字路口向隧道方向公路拐弯, 两车距离逐渐增大, 此时有来自前方的大型车辆驶过, 两车进入 NLoS 状态, 功率变化剧烈. 在接收机进入隧道后, 发射机行驶在进入隧道的公路上, 两车处于隧道连接处的状态, 在此过程中有大量的汽车位于收发车辆之间, 随着发射和接收天线距离的减小, 接收功率在经历短暂的骤增骤减后, 整体上逐渐增大. 当两辆车都进入隧道后, 其衰落深度大于隧道外.

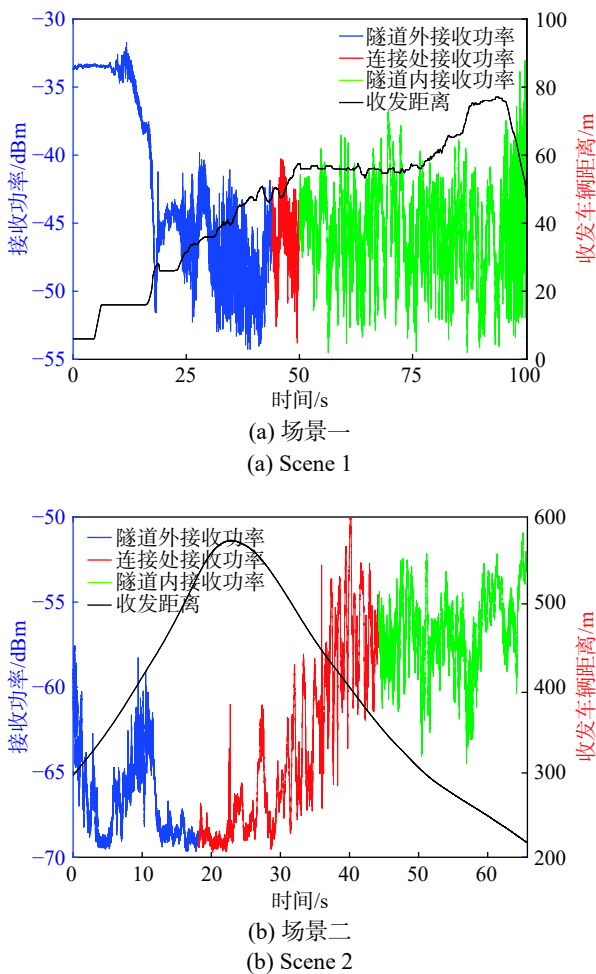


图3 两种场景中的收发车辆距离及功率变化

Fig. 3 Distance between two vehicles and received power in two scenes

因此, 本文以两段结构相似, 但大小有差异的隧道作为研究对象, 分析隧道内与隧道连接处的信道传播特性差异.

2 无线信道特性分析

在 V2V 无线信道的传播环境当中, 周围的许多

障碍物如车身、墙壁等会形成反射、绕射以及散射等现象, 使得电波信号沿多条路径传播后到达接收端. 多径传播信号的幅度、延迟、方向角都可能不相同^[11]. 不同的多径分量在接收端叠加起来产生多径效应, 导致小尺度衰落. 本节首先基于测量数据对几种路径损耗模型进行验证比较.

2.1 路径损耗模型

路径损耗是一个重要的信道参数, 可以用来描述传播信道的大尺度效应^[12]. 常见的路径损耗模型包括自由空间传播模型、近距离 (close-in, CI) 对数传播模型^[13-14] 和 ABG(α - β - γ) 路径损耗模型^[15]. 在本文中, 基于实际测量场景的数据, 用发射功率减去一些常见的路径损耗模型得到接收功率模型, 用来描述传播信道的大尺度效应.

自由空间损耗模型是无线电波在理想的自由空间中传播, 即不存在任何反射、绕射、散射、遮挡等现象的一种理想的传播环境. 在这里被用来作为一个基础的参考模型. 其接收信号强度 P_R 可以表示为

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (1)$$

式中: P_T 为发射信号功率; G_R 、 G_T 分别为收、发天线增益; d 为收发机距离. 进一步推导可得接收功率为

$$P_R = P_T - 10 \lg \frac{(4\pi f_c)^2}{G_T G_R c^2} - 20 \lg d. \quad (2)$$

CI 对数模型可以表示为

$$P_L^{CI} = P_L(d_0) + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma. \quad (3)$$

式中: d_0 为参考距离; n 为路径损耗因子, 可通过最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE) 来计算; X_σ 为阴影效应, 服从高斯分布, 均值通常取值为 0. $n=1$ 时可以理解为一个平面上的导波, $n=2$ 等效于自由空间路径损耗, $n=4$ 对应天线高度较低导致第一菲涅尔区受阻的情况^[16].

与 CI 对数模型相比, ABG 模型支持不同频率, 表达式为^[17]

$$P_L^{ABG} = 10\alpha \lg \left(\frac{d}{1 \text{ m}} \right) + \beta + 10\gamma \lg \left(\frac{f}{1 \text{ GHz}} \right) + X_\sigma. \quad (4)$$

式中: α 和 γ 分别表示路径损耗对距离和频率的依赖关系; β 为路径损耗的优化补偿值; X_σ 为一个零均值、标准差为 σ 的高斯随机变量. 采用 MMSE 来计算各个参数.

当在单一频率下使用时, ABG 模型可等效为现有的 3GPP 浮动截距模型, 该模型有三个参数, 其中 γ 参数设置为 0 或 2^[18-19].

图 4(a)、4(b) 分别给出了两种场景中基于自由空间模型、CI 对数模型和 ABG 模型得到的与收发车辆距离相关的所有测量数据接收功率散点图. 模型的拟合参数是全部基于隧道内的接收功率得到的.

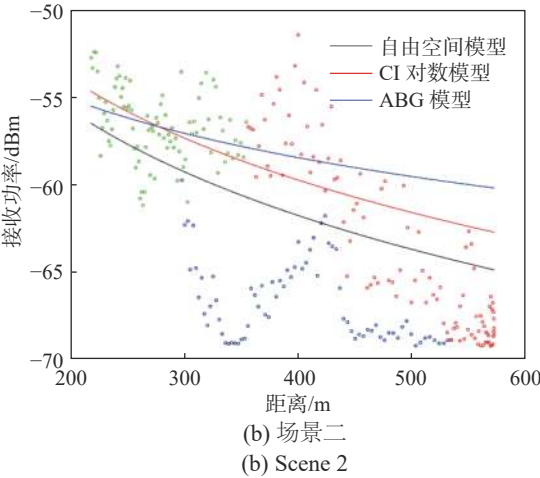
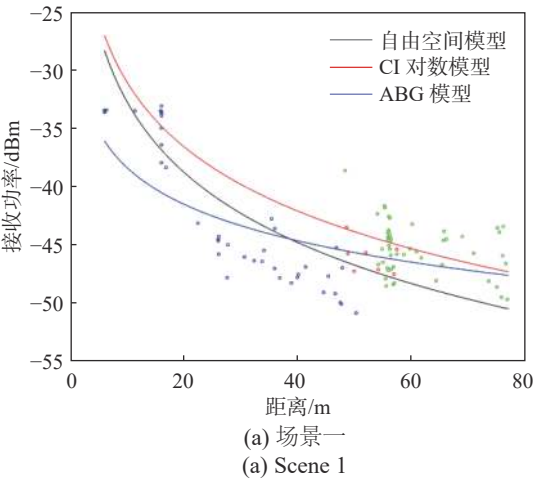


图 4 两种场景中三种模型和测量数据的接收功率
Fig. 4 Three models and measured data received power in two scenes

从图 4 可以看到: 随着距离的增加接收功率逐渐减小, 即路径损耗随距离增加而增加; 路径损耗指数越小, 接收功率随距离变化的幅度越小. 从表 3 也可以看到, 场景一和场景二中的 CI 对数模型的损耗因子 n 分别为 1.83 和 1.9, 均低于自由空间中的路径损耗指数 ($n=2$), 这一结果与以前的研究是一致的^[20-21]. 这是因为相对于自由空间, 隧道环境中两侧和上下的墙体有丰富的反射径, 而这些多径分量在隧道环境中结构的叠加增强了接收点的信号接收

功率. 将隧道内测量数据与拟合数据比较, 在场景一中, CI 对数模型的 MMSE 为 7.14, 小于 ABG 模型的 8.55; 在场景二中, CI 对数模型的 MMSE 为 4.28, 小于 ABG 模型的 4.34. 从这些分析可以得出结论: 参考距离 d_0 为 1 m 时, CI 对数模型在 5.9 GHz 和 5.2 GHz 频率的隧道场景下具有更好的准确性, 表明路径损耗最好采用 CI 对数模型来建模.

表 3 损耗模型的参数

Tab. 3 Parameters of path loss models				
场景	CI	ABG		
	n	α	β	γ
场景一	1.83	1.04	46.53	2
场景二	1.90	1.12	51.94	2

2.2 小尺度衰落分布拟合

为了分析隧道内的信道小尺度衰落特征, 首先对接收信号强度进行归一化处理, 以减少大尺度衰落效应, 即距离相关的路径损耗. 类似于文献 [22-25], 使用滑动平均法, 利用滑动窗口将大尺度衰落滤除. 在滑动窗口长度内, 信道被认为是平稳的, 即大尺度衰落参数保持不变. 本文根据收发车辆行驶速度和测量间隔, 将测量一的窗口长度设置为 200 个连续测量的 CIR 快照, 测量二的窗口长度设置为 300 个, 以测量一为例得到的隧道内归一化接收功率大小如图 5 所示.

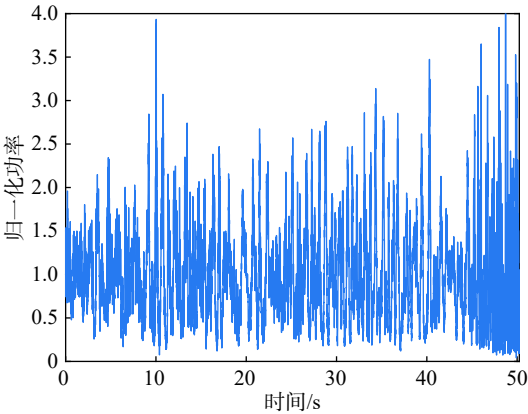
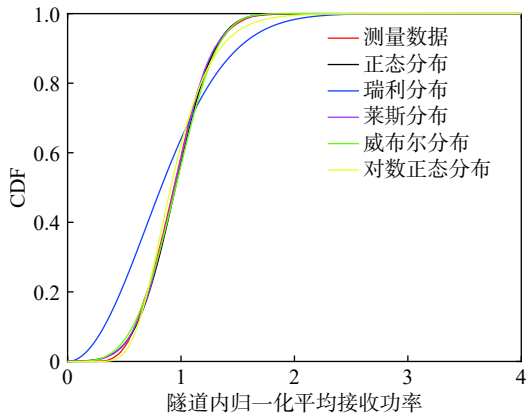


图 5 隧道内归一化接收功率
Fig. 5 Normalized magnitude of the received signal inside tunnel

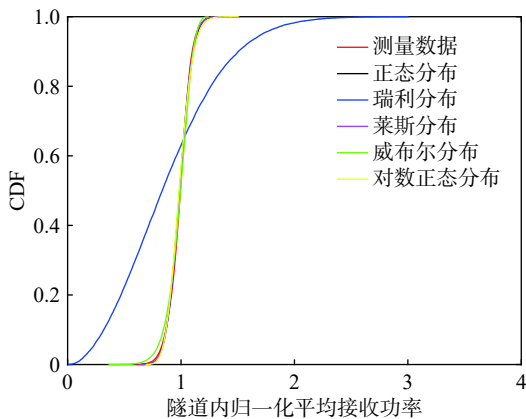
测量场景一中, 从 50 s 开始, 两辆车均驶入隧道中. 在描述 V2V 通信信道小尺度衰落的统计特征时, 莱斯分布和瑞利分布被经常采用. 另外莱斯分布和威布尔分布已在文章 [22] 中被使用, 当威布尔分布的形状参数 $k=2$ 时等同于瑞利分布, 当形状参数大于 2, 威布尔分布更接近于莱斯分布. 因此, 图 6(a) 中

分别将测量数据幅值统计结果和五种典型理论分布(正态分布、瑞利分布、莱斯分布、威布尔分布和对数正态分布)的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)曲线进行对比。

同样的,对于场景二,从44 s开始两辆车均驶入隧道中,经归一化处理后的测量数据幅值与典型理论分布的CDF拟合曲线如图6(b)所示。



(a) 场景一
(a) Scene 1



(b) 场景二
(b) Scene 2

图6 两种场景的CDF拟合分布曲线对比

Fig. 6 CDF fitting distribution curve comparison of two scenes

KS(Kolmogorov-Smirnov)检验统计量 ρ 作为拟合优度指标^[23-25]是描述分布特征的一种主要方法,表达式如下:

$$\rho = \sup_x |F_x(x) - F(x)|. \quad (5)$$

式中: $\sup_x$ 为上限函数; $F_x(x)$ 和 $F(x)$ 分别为 x 的经验理论和理论CDF.我们通过统计检验方法分别计算了不同分布的经验和理论CDF之间的 ρ 值,其值越低,代表该分布的理论经验CDF越相近.表4列出了两

种场景中隧道内不同理论分布的拟合优度值指标 ρ .可以看出,每个场景中的正态分布、莱斯分布和威布尔分布的 ρ 值非常接近,但莱斯分布的值最小.考虑到测量时收发车辆距离一般较短,且测量时存在LoS路径,考虑使用莱斯分布来近似隧道内的信道小尺度衰落特征是合理的。

表4 两种场景不同理论分布的拟合优度值

Tab. 4 Goodness of fit values of considered distributions

分布	场景一	场景二
正态	0.026 9	0.035 0
瑞利	0.204 9	0.429 7
莱斯	0.021 5	0.031 8
威布尔	0.031 3	0.041 5
对数正态	0.051 8	0.058 3

2.3 莱斯K因子

莱斯分布表达式为

$$f(x) = \frac{2(K+1)}{\Omega} e^{-K - \frac{(K+1)^2}{\Omega} x^2} \times I_0 \left(2 \sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}} x \right). \quad (6)$$

式中: K 是莱斯 K 因子,即主路径分量与多径分量的功率比; $\Omega = E\{x^2\}$; I_0 是第一类的0阶修正贝塞尔函数; x 代表归一化功率振幅. K 因子表达式为

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2}. \quad (7)$$

式中: A 表示主分量的峰值振幅; σ 是多径分量振幅的均方根值.本文中采用矩量法来计算 K 因子^[25],具体计算公式为:

$$K = \frac{\sqrt{1-\gamma}}{1-\sqrt{1-\gamma}}, \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{\text{Var}\{x^2\}}{(E\{x^2\})^2}. \quad (9)$$

式中, Var 和 E 分别代表样本方差和期望估计量.通常认为样本方差和期望估计值的窗口长度必须不超过消除大尺度衰落的窗口长度,因此场景一和场景二分别采用大约180个和250个样本大小的窗口长度来计算 K 因子。

对于场景一,图7(a)给出了隧道内外和连接处的基于测量数据估计得到的 K 因子值.结合图3(a)可以看到:在开始部分,两辆车都是稳定的,距离约6 m,衰落深度是微弱的,LoS情况下的 K 因子较大;当两辆车开始移动直到收发机之间的距离增加到约56 m时, K 因子逐渐降低并达到最低点.另外,在隧

道连接处, K 因子也呈现下降的趋势. 在隧道内, 由于存在直接的 LoS 分量, 所以 K 因子值相对较大. K 因子的变化可能是由于隧道内环境的变化, 例如移动的汽车, 导致多径分量的功率变化. 由图 7(a) 还可以看出, 当两辆车都在隧道内移动时, K 因子均匀下降, 而此时发射机和接收机之间的距离略有增加. 因此, 得到的 K 因子与发射机和接收机之间距离具有轻微的相关性, 特别是当距离增加时, K 因子减小. 图 8(a) 为场景一隧道内外和隧道连接处的 K 因子随距离变化的情况. 在隧道内, 随着距离的增加 K 因子逐渐减小. 其 K 因子的均值和标准差分别为 7.7 和 4.3.

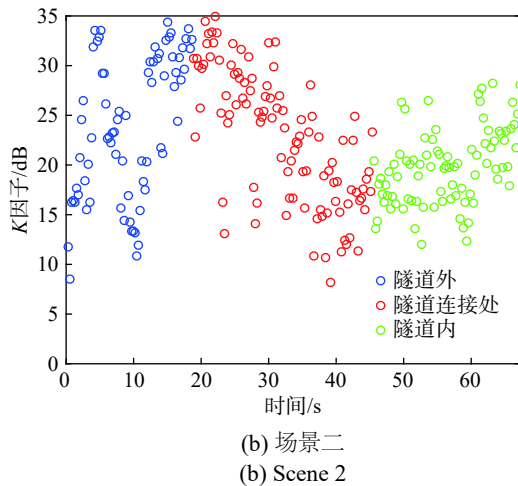
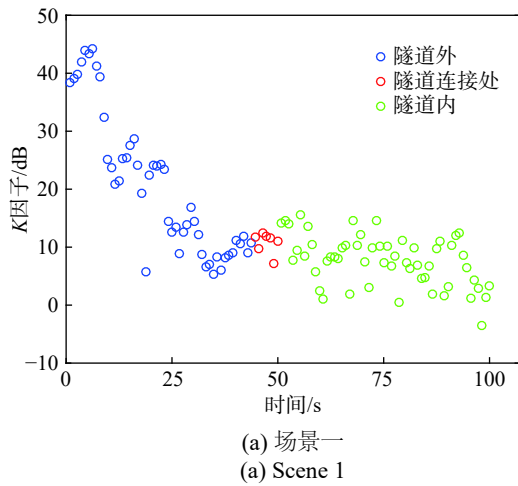


图7 两种场景 K 因子随时间的变化情况

Fig. 7 Variation of the K -factor in two scenes

对于场景二, 图 7(b) 给出了隧道内外和连接处随时间变化的 K 因子值. 在隧道外, 收发车辆的距离逐渐增大, 蓝色散点图对应的 K 因子变化剧烈, 可能与行驶过程中多辆高大车辆和地形的遮挡有关, 此时 K 因子的变化与距离没有相关性. 而在隧道连接

处, 接收机已进入隧道, 发射机在隧道外, 此时两辆车的相对距离减小, K 因子呈下降趋势. 可以看到隧道连接处 K 因子随着距离的增大而增大, 不同于场景一, 两种场景呈现相反的表现. 这可能与隧道内接收机接收的多径分量逐渐增加有关, 具体在 2.4 节中分析. 当两辆车都在隧道内移动时, K 因子均匀上升. 在隧道内, 发射机和接收机的距离是逐渐减小的, 因此可以看到 K 因子和收发机的距离也具有相关性. 图 8(b) 给出了场景二隧道内和隧道连接处的 K 因子随距离变化的情况. 在隧道内, 随着距离的增加 K 因子逐渐减小. 其隧道内 K 因子的均值和标准差分别为 19.4 和 3.88.

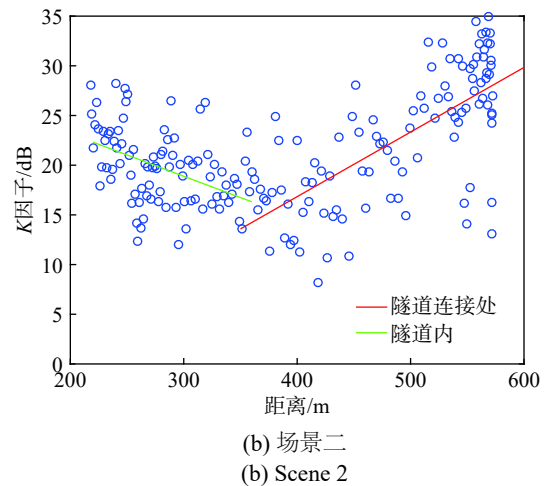
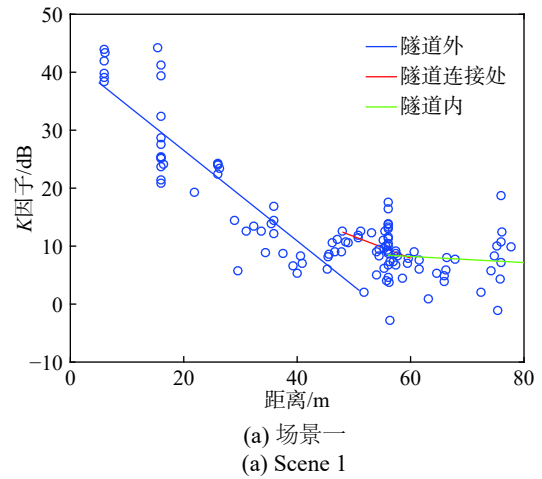


图8 两种场景下基于距离的 K 因子模型

Fig. 8 K -factor model based on distance in two scenes

使用最小二乘法拟合, 两种场景中隧道内的基于距离变化的 K 因子模型可以被定义为

$$\hat{K} = \begin{cases} -0.0527d + 11.3795, & \text{场景一隧道内} \\ -0.0507d + 33.7587, & \text{场景二隧道内} \end{cases}$$

式中: $\hat{K}$ 是线性预测 K 因子; d 是收发机的距离.

2.4 平均功率时延分布

本节针对两种场景中隧道连接处的信道特征作进一步分析,考虑信道功率时延谱.功率时延谱能够很好地描述不同多径分量在不同时延上的功率特征,隧道连接处的平均功率时延谱如图9所示,可以看出一直存在一条明显的直射径,在图中显示为明亮的红色.随着接收机在隧道中行驶时间越长,可以观测到多条平行且弱于直射径的反射径逐渐增强,以及其他一些功率较弱的多径分量以“簇”的形式出现,结合测量场景的周围环境进行分析,这些多径分量是由于周围过往的车辆和隧道壁造成的.而在两种场景中隧道连接处 K 因子基于距离呈现相反的情况, K 因子随接收机进入时间增长逐渐减小,与距离无依赖关系,很可能是由于多径的增多和增强造成的.

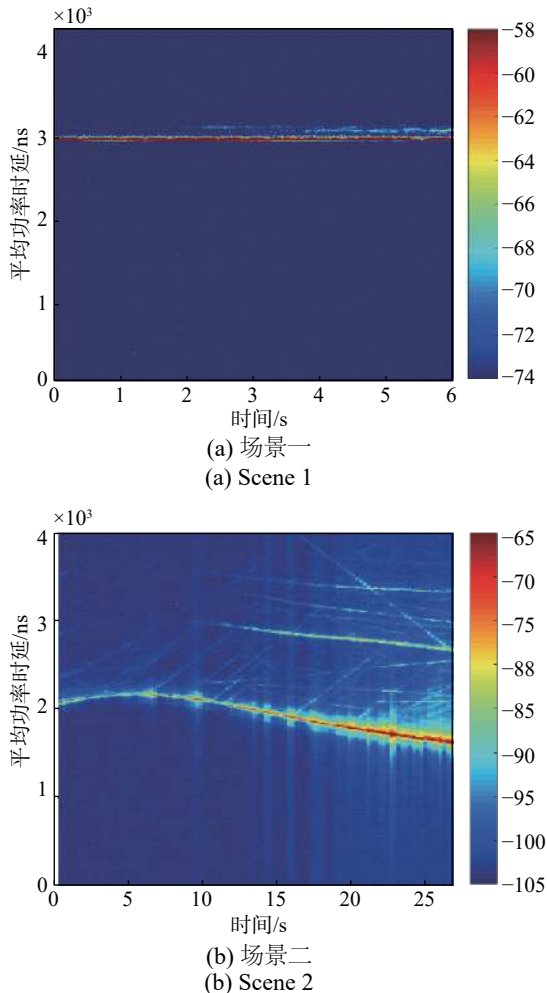


图9 两种场景平均功率时延分布

Fig. 9 Average power delay distribution in two scenes

3 结论

隧道是智能交通系统一个安全要求高的场景.本文在 5.9 GHz 频段 30 MHz 带宽以及 5.2 GHz

120 MHz 带宽条件下分别进行了两次信道测量活动,研究了隧道环境中 V2V 信道路径损耗和小尺度衰落特征.首先,5.9 GHz 和 5.2 GHz 两次测量结果均显示,参考距离为 1 m 的 CI 对数模型具有相对较高的适用性,其损耗指数分别为 1.83 和 1.9,小于自由空间中的损耗指数.这意味着随着传播距离的增加,无线电波在隧道中的衰减速度要小于在自由空间中的衰减速度.其次,由于存在 LoS 路径,接收到的信号经历莱斯衰落.场景一中隧道内的 K 因子的均值和标准差分别为 7.7 和 4.3,场景二中隧道内的 K 因子均值和标准差分别为 19.4 和 3.88.此外,在隧道连接处, K 因子与距离没有很强的相关,而在隧道内 K 因子具有一定的距离相关性.本文提出了隧道内基于距离的 K 因子模型,当收发机距离增加时, K 因子减小.另外,根据两种场景下隧道衰落特征,针对不同隧道场景开展更多的测量活动和衰落建模,可以更好地了解在恶劣环境下车辆运动、遮挡等情况对无线信道传播特性的影响.

致谢:感谢德国宇航中心的 Stephan Sand 博士, Paul Unterhuber, Ibrahim Rashdan, Fabian De Ponte Mueller 博士, Benjamin Siebler, Dina Bousdar Ahmed 博士, Martin Schmidhammer 和 Thomas Jost 博士对信道测量的协助.

参考文献

- [1] MUNTJIR M, RAHUL M, ALHUMYANI H A. An analysis of internet of things (IoT): novel architectures, modern applications, security aspects and future scope with latest case studies[J]. Building services engineering research and technology, 2017, 6(6): 422-448.
- [2] CONTRERAS J, ZEADALLY S, GUERRERO-IBANEZ J A. Internet of vehicles: architecture, protocols, and security[J]. IEEE Internet of things, 2017.
- [3] DE PONTE MUELLER F. Survey on ranging sensors and cooperative techniques for relative positioning of vehicles[J]. Sensors, 2017, 17(2): 271.
- [4] ZHAO X W, ABDO A, XU C, et al. Dimension reduction of channel correlation matrix using CUR- decomposition techniques for 3-D massive antenna system[J]. IEEE access, 2018(6): 3031-3039.
- [5] ZHAO X W, LIANGX L, LI S, et al. Two-cylinder and multi-ring GBSSM for realizing and modeling of vehicle-to-vehicle wideband MIMO channels[J]. IEEE transac-

- tions on intelligent transportation systems, 2016, 17(10): 2787-2799.
- [6] CHENG L, HENTY B E, STANCIL D D, et al. Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 GHz dedicated short range communication (DSRC) frequency band[J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2007, 25(8): 1501-1516.
- [7] SEN I, MATOLAK D W. Vehicle-vehicle channel models for the 5-GHz band[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2008, 9(2): 235-245.
- [8] FERNANDEZ H, RUBIO L, RODRIGO-PENARROCHA V M, et al. Path loss characterization for vehicular communications at 700 MHz and 5.9 GHz under LOS and NLOS conditions[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2014, 13: 931-934.
- [9] SUSANA L, ADRIAN D C, HERMAN F, et al. Small-scale fading analysis of the vehicular-to-vehicular channel inside tunnels[J]. *Wireless communications and mobile computing*, 2017(8).
- [10] YANG M, AI B, HE R S, et al. A cluster-based three-dimensional channel model for vehicle-to-vehicle communications[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2019, 68(6): 5208-5220.
- [11] ZHAO X W, DU F, GENG S Y, et al. Playback of 5G and beyond measured MIMO channels by an ANN-based modeling and simulation framework[J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2020, 38(9): 1945-1954.
- [12] AZHARI M E, NEDIL M, MABROUK I B, et al. Path loss effect on off-body channel capacity of a MIMO system using patch antennas inside a mine[C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). Fajardo, Puerto Rico, 2016: 1697-1698.
- [13] International Telecommunication Union Radio Communication Sector (ITU-R). Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-advanced report ITU-R M. M. 2135-1[R], 2009.
- [14] DONLAN B M, MCKINSTRY D R, BUEHRE R M. The UWB indoor channel: large and small scale modeling[J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2006, 5(10): 2863-2873.
- [15] MACCARTNEY G R Jr., RAPPAPORT T S, SUN S, et al. Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks[J]. *IEEE access*, 2015, 3: 2388-2424.
- [16] KIVINEN J, ZHAO X W, VAINIKAINEN P. Empirical characterization of wideband indoor radio channel at 5.3 GHz[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2001, 49(8): 1192-1203.
- [17] SUN S, RAPPAPORT T S, THOMAS T A, et al. Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5G wireless communications[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2016, 65(5): 2843-2860.
- [18] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G R Jr., SAMIMI M K, et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. *IEEE transactions on communications*, 2015, 63(9): 3029-3056.
- [19] MACCARTNEY G R, ZHANG J H, NIE S, et al. Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells[C]// IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Atlanta, 2013: 3948-3953.
- [20] LI S, LIU Y, LIN L, et al. Measurement, simulation and modeling in the tunnel channel with human bodies at 6 GHz for 5G wireless communication system[C]// The 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou, 2018: 1-4.
- [21] LI J, ZHAO Y, ZHANG J, et al. Radio channel measurement and characterization for wireless communications in tunnels[C]// The IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Shanghai, 2014: 554-559.
- [22] BERNADO L, ZEMEN T, TUFVESSON F, et al. Time and frequency-varying K -factor of non-stationary vehicular channels for safety relevant scenarios[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2015, 16(2): 1007-1017.
- [23] HE R, ZHONG Z, AI B, et al. Short-term fading behavior in high-speed railway cutting scenario: measurements, analysis, and statistical models[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2013, 61(4): 2209-2222.
- [24] 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, 611(1): 95-104.
- [25] GREENSTEIN L J, MICHELSON D G, ERCEG V. Moment-method estimation of the Ricean K -factor[J]. *IEEE communications letters*, 1999, 3(6): 175-176.

作者简介

张旭 (1994—), 男, 山东人, 长安大学信息工程学院硕士研究生, 研究方向为无线电信道分析与建模.

姜苏英 (1990—), 女, 陕西人, 长安大学信息工程学院博士研究生, 研究方向为智能交通场景无线信道建模与分析.

杨汭 (1992—), 男, 北京人, 现于北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室攻读博士学位, 研究方向为非平稳环境下的电波传播与信道建模.

王威 (1981—), 男, 湖北人, 长安大学信息工程学院教授, 主要研究方向为无线信道建模与定位导航技术.

何睿斯 (1987—), 男, 湖北人, 北京交通大学教授, 主要研究方向为无线信道建模与 5G/6G 通信技术.

侯俊 (1985—), 男, 长安大学信息工程学院副教授, 主要研究方向为车联网无线通信传输.

刘鑫一 (1986—), 男, 陕西人, 长安大学副教授, 主要研究方向为车联网、网络选择等.

(上接第 442 页)

作者简介



卞希嘉 (1996—), 女, 江苏人, 硕士研究生, 研究方向为 SAGE 算法与毫米波大规模 MIMO 无线信道传播特性研究.

朱古月 (1997—), 男, 安徽人, 博士研究生, 研究方向为射线追踪方法.

闫亚欣 (1997—), 女, 山东人, 硕士研究生, 研究方向为基于神经网络的毫米波典型频段的信道特性研究.

任安雯 (1996—), 女, 江苏人, 硕士研究生, 研究方向为基于支持向量机的室内毫米波无线信道传播特性研究.

孙冀 (1993—), 女, 山东人, 博士研究生, 研究方向为基于机器学习算法对无线信道建模研究.