DOI:10.11918/202104071

矩形隧道下存在车辆遮挡的 V2V 信道测量与分析

宋吉婷,王 威,孙郁哲,姜苏英,张 旭

(长安大学 信息工程学院,西安 710061)

摘 要: 车对车(V2V)通信是智能交通系统的重要组成部分。隧道是智能交通系统的一个重要应用场景。考虑到隧道壁反射、车辆衍射以及隧道附属设施布置密而复杂的问题,研究隧道场景下的 V2V 信道传播特性对于智能交通系统的设计与测试具有重要意义。本文利用宽带信道探测器对隧道环境下的 V2V 信道进行了测量。测量所使用的载波频率和带宽分别为 5.2 GHz和 120 MHz。根据不同的情况,将测量分为 3 种类型:可视距(LOS)、部分视距(OLOS)和不可视距(NLOS)。基于实际测量数据,建立不同场景的路径损耗模型和接收信号幅值衰落分布,进而分析信道衰落特性。结果表明,NLOS 场景下的路径损耗指数、阴影衰落均大于 LOS、OLOS 情况,LOS、OLOS 之间阴影衰落没有显著变化。LOS 和 OLOS 场景下接收信号的幅度衰落均服从莱斯分布,NLOS 场景下接收信号的幅度衰落服从瑞利分布;3 种场景下均方根延迟扩展都符合对数正态分布;NLOS 引起了更大的阴影衰落和时域弥散;随着距离的增大,K 因子逐渐减小,表明 K 因子对距离具有依赖性。

关键词: V2V;无线信道;隧道;车辆遮挡;大尺度分析;小尺度分析

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)05-0117-07

Measurement and analysis of V2V channel with vehicle obstruction in rectangular tunnels

SONG Jiting, WANG Wei, SUN Yuzhe, JIANG Suying, ZHANG Xu

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Vehicle-to-vehicle (V2V) communication is an important component of the intelligent transportation system (ITS), and tunnel is an essential application scenario of ITS. Considering the reflection of microwaves by tunnel walls, the diffraction by vehicles, and the dense and complex layout of the tunnel ancillary facilities, it is of great significance to investigate the propagation characteristics of V2V channel in tunnel scenarios. In this study, the V2V channel was measured by means of a broadband channel sounder in the tunnel environment. The carrier frequency and bandwidth were 5.2 GHz and 120 MHz respectively. Regarding to different situations, the measurement was divided into three types: line-of-sight (LOS), obstructed line-of-sight (OLOS), and non-line-of-sight (NLOS). Based on the measured data, the path loss models and received signal amplitude fading distributions were established for different scenarios, so as to analyze the channel fading characteristics. Results show that the path loss index and shadow fading in NLOS were larger than those in LOS and OLOS. There were no significant changes in shadow fading between LOS and OLOS. The amplitude fading of the received signal in both LOS and OLOS scenarios followed the Rice distribution, and that in the NLOS scenario followed the Rayleigh distribution. The root-mean-squared delay spread conformed to the log-normal distribution in all the three scenarios. The shadow fading and time-domain dispersion were larger in NLOS. The K factor decreased with increasing distance, indicating that the K factor is dependent on the distance.

Keywords: V2V; wireless channel; tunnel; vehicle obstruction; large-scale analysis; small-scale analysis

车联网是建设智慧城市、发展无人驾驶、智能交通的关键举措,通过实现“人-车-路-环境”的结合,最大化利用资源提高交通安全性。近年来,随着世界各国陆续开展的大规模基础设施建设,跨铁路与公路、矿山与水下海底隧道正处在蓬勃发展的阶段[1-2],隧道建设也成为交通基础设施建设的重要组成部分。与此同时,隧道场景下车辆对车辆(vehicle-to-vehicle,V2V)通信成为了智能交通系统(intelligent traffic system,ITS)的一个必不可少的组成部分,是隧道这一特殊场景中交通安全的重要保障。因此深入研究隧道场景下 V2V 信道特性对车联网无线通信技术的安全应用至关重要。

对比蜂窝网络,V2V 的高移动性使得无线信道具有较快的时变特性,因此信道不具有广义平稳性

收稿日期: 2021-04-16
基金项目: 国家自然科学基金(61871059)
作者简介: 宋吉婷(1997—),女,硕士研究生;
王 威(1981—),男,教授,博士生导师
通信作者: 王 威,wei.wang@chd.edu.cn

(wide-sense stationary, WSS)。影响 V2V 通信的因素包括场景、频段和天线的部署等;同时在不可视距(non-line-of-sight, NLOS)场景下,车辆作为遮挡物也是 V2V 通信中的一个重要影响因素。一般情况下信道研究针对可视距(line-of-sight, LOS)或 NLOS 场景展开,然而在高速公路及隧道中,收发两车以及周围车辆的相对位置都在不断变化。根据几何位置关系,还存在两车间介于 LOS 和 NLOS 之间的状态场景,即发射机车辆和接收机车辆之间的可视距 LOS 没有被其他车辆完全遮挡,而是存在部分遮挡,进而对电磁信道的影响与 LOS 和 NLOS 场景有所差别。考虑到部分视距(obstructed line-of-sight, OLOS)场景在现实中存在的概率较大,因此细分 OLOS 场景具有必要性和重要性,为实际中无线系统的开发提供了准确的仿真环境。

在过去的十几年中,大量的研究工作针对 V2V 信道展开。例如文献[3]总结了在城市、乡村、高速公路、郊区等场景下的信道模型;文献[4-8]研究了在城市公路环境下各种车型作为遮挡物的路径损耗模型。关于隧道内的信道研究划分为频段、隧道截面、大小尺度等多方面内容;文献[9-12]研究了不同频段下隧道截面为矩形的小尺度衰落特性;文献[13-14]研究了隧道截面为拱形隧道的大小尺度信道特性。然而,关于隧道内 V2V 信道的研究没有其他场景广泛和深入。由于隧道自身存在封闭狭长、弯道多、车辆环境复杂等多个特点,隧道内 V2V 信道特征相比于其他场景而言也具有一定差异,目前隧道内 V2V 信道的研究都是针对 LOS 或者 NLOS 场景,缺少对 LOS、OLOS、NLOS 这 3 种条件下信道特征的研究和归纳。

因此,本文针对上述问题展开研究,在 5.2 GHz 频段下进行了隧道环境信道测量。实验中选取了未遮挡、小型车辆遮挡和大卡车遮挡的数据,从而对隧道内 LOS、OLOS 和 NLOS 进行了大尺度和小尺度衰落特性的分析。

1 信道测量

1.1 测量环境

测量场景在德国慕尼黑郊区 A99 高速公路的 Aubing 隧道进行(见图 1)。隧道长 1 935 m,有单向 2 个标准宽度的车道和 1 个应急车道,隧道断面为矩形,是公路隧道所采用的主要断面形状之一。因此本文选用的矩形隧道测试路段具有典型性和代表性。

测试中使用奔驰 G 级越野车作为发射端搭载平台(见图 2(a));使用奔驰厢式货车作为接收端搭载平台(见图 2(b));所使用的传感器及天线均置于车顶。两车均记录了全球定位系统(global navigation satellite system, GNSS)坐标、激光雷达(light detection and ranging, LIDAR)和惯性导航系统(inertial measurement unit, IMU)的数据,通过组合导航方法对隧道内收发两车的位置进行估计。



图 1 隧道场景

Fig. 1 Tunnel scene



(a) 发射车 (b) 接收车

图 2 收发车辆

Fig. 2 Receiver and transmitter vehicles

1.2 测量设置

测试采用德国 MEDAV RUSK-DLR 宽带信道探测器进行单输入单输出(single input single output, SISO)无线信道测量。探测器利用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)信号对信道进行测量。在每个 OFDM 测量符号满足 WSS 的前提下,信道脉冲响应(channel impulse response, CIR)为 $h(t_k,\tau_n)$,其中测量时间 $t_k = k \times t_g$, $k = 1,2,\cdots$;测量周期 $t_g = 1.024$ ms;测量时延 $\tau_n = n \times \tau_\Delta, n = 0,1,\cdots,N-1$,子载波数 $N = 1\ 537$;时延分辨率 τ_Δ 由信号带宽 B 的倒数决定。

子载波下基带信号的符号周期 $T_p = 12.8$ μs 决定了每个 CIR 的最大时间长度。因此,信道探测器可以测量出多径最大绕行传播距离为 3.84 km。表 1列出了 5.2 GHz 信道探测系统参数。

1.3 场景描述

在测量过程中,由于环境中周围车辆的类型和数量都随时间发生变换,因此发射机和接收机之间存在 LOS、OLOS 和 NLOS 等多种情况;通过检查接收机、发射机车内的视频记录,可以区分 LOS、OLOS 和 NLOS。

表 1　5.2 GHz 信道测量参数

Tab. 1　Measurement parameters of 5.2 GHz channel

参数类型	参数取值
中心频率/GHz	5.2
测量类型	SISO
测量方式	OFDM
带宽 B/MHz	120
子载波数 N	1 537
发射功率/dBm	最大 37
信号周期/μs	12.8
测量间隔/ms	1.024
收发天线移动速度/($m \cdot s^{-1}$)	10 ~ 20
定位方式	GNSS,IMU,LIDAR

1)LOS 场景：收发两车之间视线不受阻碍。共选取 45 s 的数据作为 LOS 数据。图 3(a)为 LOS 场景下的两车速度变化，实线代表接收机的速度，其值在 15.5 ~ 18 m/s 之间；虚线代表发射机的速度，其值在 14 ~ 19 m/s 之间。

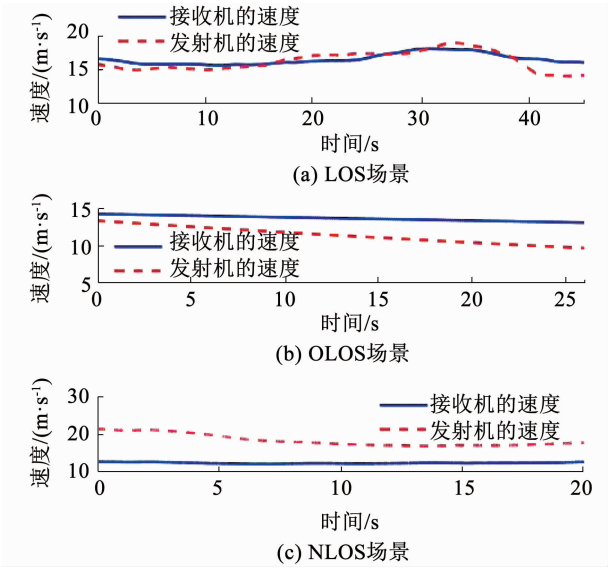


图 3　3 种场景下收发车辆的速度

Fig. 3　Speed of receiver and transmitter vehicles in three scenarios

2)OLOS 场景：收发两车之间有一辆高约为 1.685 m的赛飞利小型车见图 4(a)，该车未完全遮挡可视距；图 3(b)为 OLOS 场景下的速度变换，从图中可知发射机的速度一直小于接收机的速度，又因发射机一直位于接收机后方，所以在 OLOS 过程中两车的距离在不断增大。在隧道中选择 26 s 作为实验数据。

3)NLOS 场景：收发两车之间有一辆高约为 2.9 ~ 3 m 的大型货车和两辆小型车辆，大型货车的影响远大于小车，见图 4(b)。本文选取 20 s 实验数据作为 NLOS 数据。图 3(c)为 20 s 实验数据的速度变换，发射机的速度变换范围为 17 ~ 22 m/s，接收机的速度变换范围为 12 ~ 13 m/s，发射机的速度要远大于接收机的速度，所以此时两车的距离不断减小。



(a) OLOS场景　　(b) NLOS场景

图 4　实验场景

Fig. 4　Experimental scenes

上述 3 种场景的发射车辆始终在接收车辆的后方移动，两车之间距离在实时变化。本文以隧道内部存在遮挡车辆作为研究对象，分析隧道内有无遮挡车辆的信道传播特性。

2　无线信道特性分析

在 V2V 传播过程中，由于周围存在的树木、房屋、墙壁和其他车辆会形成反射、绕射、衍射，故采用时变信道脉冲响应来描述该信道。一般无线信道传播模型可分为大尺度和小尺度衰落，本文对大尺度的路径损耗和阴影衰落进行分析，对小尺度下的幅值衰落分布和均方根时延扩展进行分析。

2.1　大尺度分析

1)在 LOS 场景下，接收功率与距离的变化关系见图 5(a)。根据路径损耗的计算如下：

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10 \times n \times \lg d + X_\sigma \quad (1)$$

式中：n 为路径损耗指数；$P_L(d_0)$为参考距离处的截距值，$d_0 = 1$ m；X_σ 为阴影衰落，$X_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$。由上可得对数距离拟合的路径损耗和自由空间路径损耗见图 5(b)。

图 5(a)中加粗实线表示收发两车之间的距离，另一条实线表示接收功率；在这一过程，两车距离先增大再减小，接收功率也相应变化，范围在 -43 ~ -28 dBm之间；图 5(b)散点表示实际测量数据，实线、虚线分别反应了对数距离拟合的路径损耗以及自由空间下的路径损耗。可得在同等距离下，自由空间的路径损耗约比隧道内大 3 dB。此场景下利用最小二乘法[15]估计路径损耗指数 $n = 1.256\ 2$；利用最大似然估计[16]阴影衰落 $\sigma = 1.315\ 5$ dB。

2)同理，在 OLOS 场景下，其接收功率与距离的变化关系及路径损耗的拟合见图 6。在 OLOS 场景下，随着距离增大，接收功率变换范围在 -53 ~ -35 dBm

之间,其中路径损耗指数 $n=1.301\ 5$,阴影衰落的标准差 $\sigma=1.898$ dB。可得,在同等距离下,自由空间的损耗约比隧道内大 4 dB。

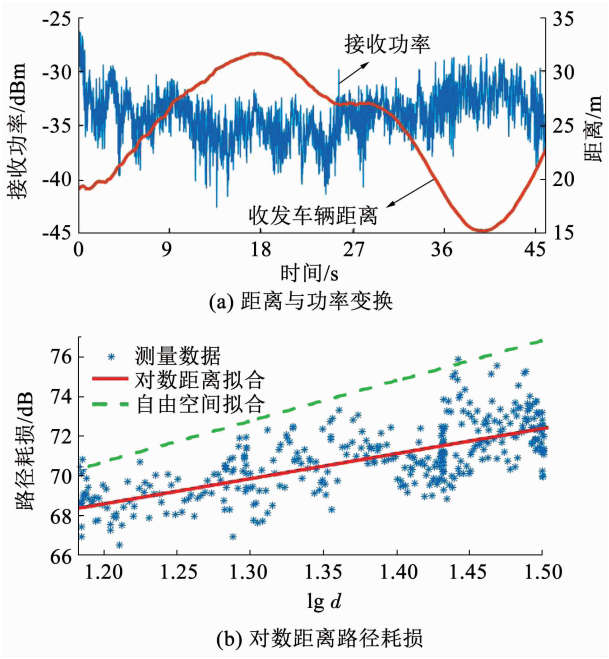


图 5 LOS 场景

Fig. 5 LOS scenario

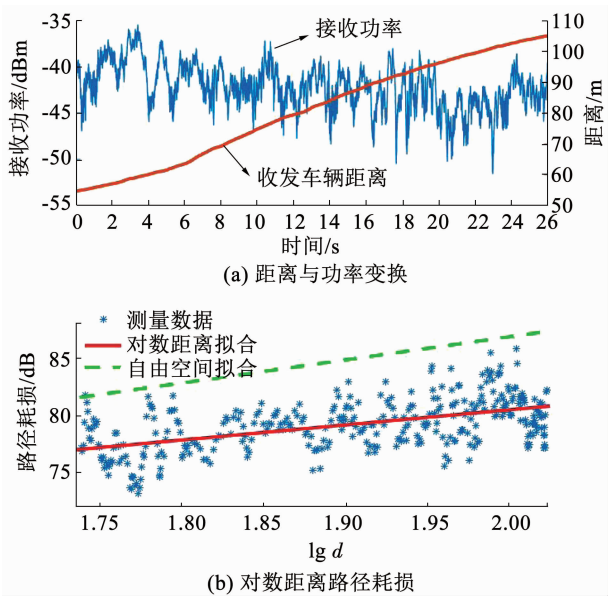


图 6 OLOS 场景

Fig. 6 OLOS scenario

3)在 NLOS 场景下,其接收功率与距离的变化关系及路径损耗的拟合见图 7。随着距离的减小,功率的变换范围在 $-63\sim-50$ dBm 之间,其中 NLOS 情况下路径损耗指数 $n=1.520\ 6$,阴影衰落的标准差为 $\sigma=2.208\ 9$ dB。

3 种场景下对比,NLOS 的路径损耗指数均大于 LOS、OLOS 场景;NLOS 阴影衰落的标准差比 LOS 场景下约大 1 dB,具体数值见表 2。图 8 是 3 种场景下的阴影衰落,从图中很明显地看出 LOS 的阴影衰落幅值比 OLOS、NLOS 要高,但是 NLOS 的阴影衰落范围比 LOS、OLOS 广;大卡车引起了更大的路径损耗和阴影衰落,但是在隧道里,由于存在波导效应,使得 3 种情况下的阴影衰落没有在自由空间中对比明显。

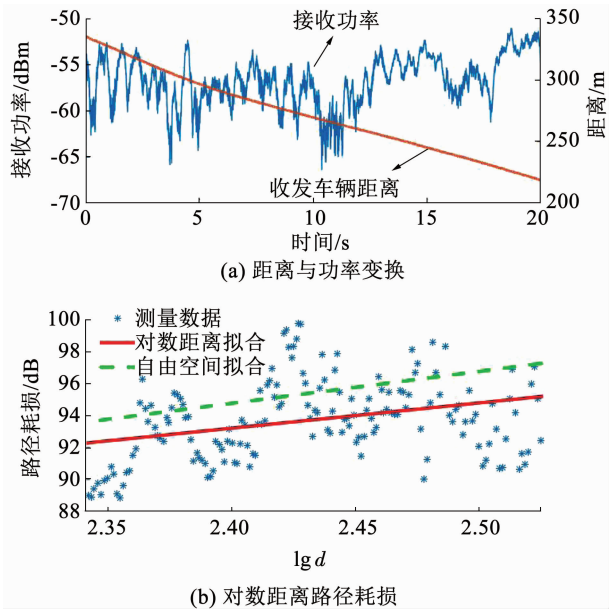


图 7 NLOS 场景

Fig. 7 NLOS scenario

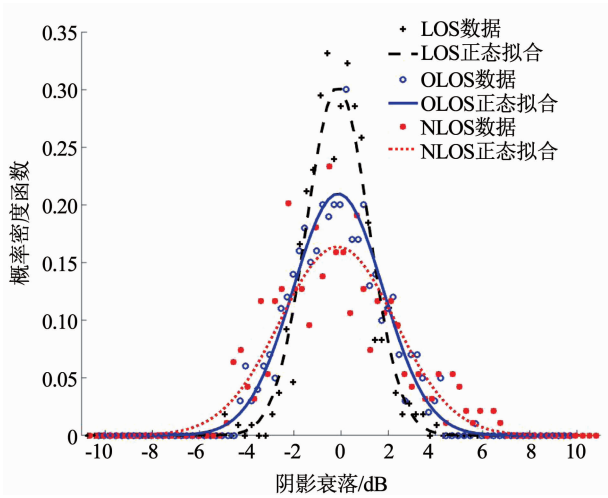


图 8 阴影衰落

Fig. 8 Shadow fading

表 2 模型参数

Tab. 2 Model parameters

场景	n	P_L/dB	σ/dB
LOS	1.265 2	53.404 8	1.315 5
OLOS	1.301 5	54.379 1	1.898 0
NLOS	1.520 6	56.361 5	2.208 9

2.2 小尺度分析

1)小尺度衰落分布拟合

研究调查显示,V2V 信道的小尺度衰落主要通

过正态、对数正态、瑞利、莱斯、威布尔和 Nakagami-m 等分布形式来描述，通过这些分布对数据进行拟合可以得到合理的拟合效果，其中 Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验统计量作为拟合优度指标[17]是描述分布的一种流行方法。检验统计量 ρ 计算为

$$\rho = \sup_x |F_x(x) - F(x)| \tag{2}$$

式中：$\sup_x$ 为上确界，$F_x(x)$ 为样本的累计分布函数，$F(x)$ 为样本服从理论分布的累计分布函数。

分析信道小尺度衰落特性前要去除大尺度效应，所以先对接收信号幅值进行归一化处理。本文根据收发车辆行驶速度和测量间隔，将分析小尺度的归一化窗口设置为 350 个连续测量样本。图 9 是对 3 种场景下归一化后的接收信号幅值进行的拟合，包括上文提到的多种分布。

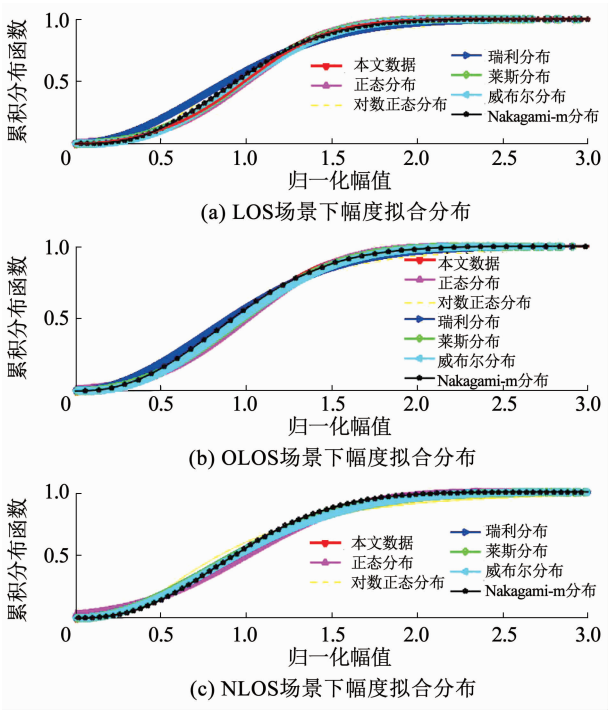


图 9　接收信号幅度拟合分布

Fig. 9　Received signal amplitude fitting distribution

图 9(a) 是对 LOS 场景接收信号幅值进行的分布拟合，LOS 场景下正态和莱斯分布具有很好的拟合效果，瑞利分布的拟合效果比较差。图 9(b) 是对 OLOS 场景接收信号幅值进行的分布拟合；OLOS 场景下莱斯和威布尔分布具有很好的拟合效果，对数正态分布的拟合效果比较差。图 9(c) 是对 NLOS 场景接收信号幅值进行的分布拟合；NLOS 场景下瑞利和 Nakagami-m 分布具有很好的拟合效果，对数正态分布的拟合效果比较差。拟合优度值见表 3，表中加粗数值表示最优的分布和次优的分布。

表 3　分布的拟合优度值

Tab. 3　Goodness-of-fit values of the distribution

分布	LOS	OLOS	NLOS
正态	**0.009 6**	0.021 2	0.039 3
对数正态	0.099 0	0.087 6	0.077 7
瑞利	0.110 6	0.085 1	**0.006 4**
莱斯	**0.016 4**	**0.012 5**	0.009 9
威布尔	0.027 5	**0.020 0**	0.010 2
Nakagami-m	0.041 9	0.030 2	**0.009 8**

2) 莱斯衰落分布

V2V 多径分量中包括直射波、反射波、绕射波、衍射波，其中占支配地位的是直射波，这种情况下接受信号包络服从莱斯分布。其中莱斯 K 因子是反映小尺度衰落特性的一种工具。莱斯分布的表达式为

$$f(x) = \frac{2(K+1)}{\Omega} \times e^{-K-\frac{(K+1)^2}{\Omega}} \times I_0\left(2\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}x}\right) \tag{3}$$

式中：x 为归一化功率振幅，I_0 为第一类的 0 阶修正贝塞尔函数，$\Omega = E\{x^2\}$，K 为莱斯因子。本文使用基于矩量的方法计算 K 因子[18]，其公式为

$$K = \frac{\sqrt{1-\gamma}}{1-\sqrt{1-\gamma}} \tag{4}$$

式中 $\gamma = V\{x^2\}/(E\{x^2\})^2$，$V$ 和 E 分别代表样本方差和期望估计量。

LOS、OLOS 和 NLOS 场景下的 K 因子随距离变化见图 10。图中圆圈、十字星、五角星分别对应于 LOS、OLOS、NLOS 场景下的 K 因子，实线是相应散点的拟合。LOS 场景下 K 因子均值为 10.882 3 dB；OLOS 场景下两车距离相对 LOS 场景下稍远，K 因子均值为 9.881 3 dB；NLOS 场景下两车距离较远，K 因子均值为 7.657 8 dB；具体结果见表 4。比较 3 个场景，随着发射器和接收器之间距离的增加，K 因子逐渐减小。

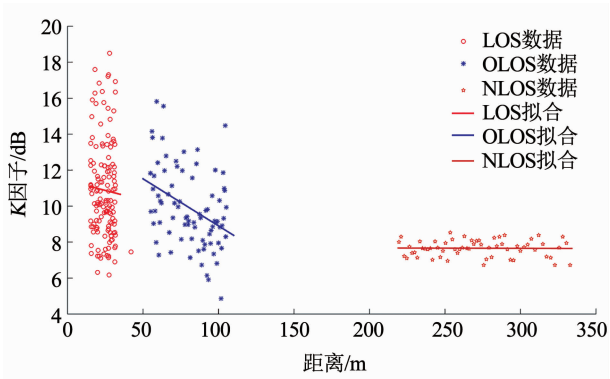


图 10　LOS、OLOS 和 NLOS 下 K 因子变化

Fig. 10　Variation of K factor under LOS, OLOS, and NLOS

3 个场景下隧道内基于距离变化的 K 因子模型可以定义为

$$\hat{K}=\begin{cases}-0.021\,9\cdot d+11.418\,4, & \text{in LOS}\\ -0.052\,3\cdot d+14.132\,3, & \text{in OLOS}\\ -0.000\,217\cdot d+7.716\,8, & \text{in NLOS}\end{cases} \tag{5}$$

式中：$\hat{K}$ 是线性预测 K 因子，d 是发射端与接收端的距离。

3）均方根时延扩展

由于传播环境的实时改变，多径到达时间不同，从而造成时域弥散。时域信道弥散可由均方根时延扩展（root-mean-squared delay spread，RMSDS）进行表征，其表达式为

$$\sigma_{\mathrm{R}}=\sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty}|h(\tau)|^2\tau^2\mathrm{d}T}{\int_{-\infty}^{\infty}|h(\tau)|^2\mathrm{d}T}-\left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty}|h(\tau)|^2\tau\mathrm{d}T}{\int_{-\infty}^{\infty}|h(\tau)|^2\mathrm{d}T}\right)^2} \tag{6}$$

根据式(6)计算每个信道脉冲响应 RMSDS 的累计分布函数见图 11，图中左箭头、右箭头和下箭头实线分别代表 LOS、OLOS、NLOS 的均方根时延扩展。

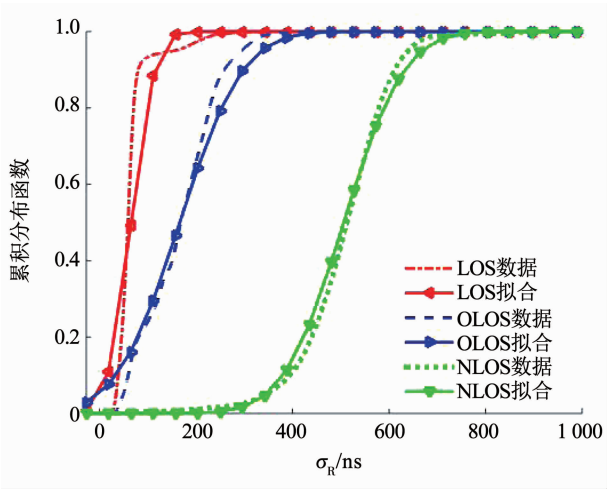


图 11 均方根时延扩展累积分布函数

Fig. 11 Cumulative distribution function of σ_{R}

由图 11 可知，OLOS 场景比 LOS 引起约 100 ns 的时域弥散，NLOS 场景比 OLOS 引起约 340 ns 的时域弥散。3 种场景下均方根时延扩展均值为 65.662 1 ns、166.076 7 ns 和 505.952 9 ns，结果见表 4。

表 4 K 因子均值和 σ_{R} 值

Tab. 4 K factor mean and σ_{R}

场景	K 因子均值/dB	σ_{R}/ns
LOS	10.882 3	65.662 1
OLOS	9.881 3	166.076 7
NLOS	7.657 8	505.952 9

3 结 论

本文研究了矩形隧道场景下存在车辆遮挡的 V2V 通信的大尺度衰落与小尺度衰落特征。基于实际测量数据，建立了 LOS、OLOS、NLOS 场景下的路径损耗模型；并分析了相应的小尺度衰落特征。对比 3 种场景，得出以下结论：

1）NLOS 场景下的路径损耗指数大于 LOS 和 OLOS 场景，但均小于自由空间的路径损耗指数，这是由于隧道内存在波导效应导致的。NLOS 场景下大卡车会引起 2 dB 的阴影衰落，而 OLOS 下的阴影衰落与 LOS 场景下的阴影衰落无明显差异，说明遮挡车辆的尺寸大小会影响阴影衰落的变化。

2）在小尺度分布拟合中，LOS 和 OLOS 场景下接收功率均服从莱斯分布；NLOS 场景下接收功率服从瑞利分布。同时随着距离的增大，K 因子逐渐减小，说明 K 因子对距离具有依赖性；车辆遮挡同样引起了更大的时域弥散。

参考文献

[1]郭陕云. 我国隧道及地下工程的历史机遇、发展困局及若干建议[J]. 隧道建设，2019，39(10)：1547
GUO Shanyun. Historic opportunity, development predicament and some suggestions for tunnel and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(10): 1547. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.10.001

[2]郑俊，丁振杰，吕庆，等. 新建隧道下穿运营公路引起的路面沉降控制基准[J]. 哈尔滨工业大学学报，2020，52(3)：51
ZHENG Jun, DING Zhenjie, LÜ Qing, et al. Control standard for settlement of pavement caused by a new tunnel passing underneath an existing highway[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(3): 51. DOI: 10.11918/201808092

[3]董朔朔，刘留，樊圆圆，等. 车联网信道特性综述[J]. 电波科学学报，2021，36(3)：19
DONG Shuoshuo, LIU Liu, FAN Yuanyuan, et al. Overview of the channel characteristics of V2X[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(3): 19. DOI: 10.12665/j.cjors.2020199

[4]YANG Mi, AI Bo, HE Ruisi, et al. Path loss analysis and modeling for vehicle-to-vehicle communications with vehicle obstructions[C]// 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP). Hangzhou: IEEE, 2018: 1. DOI: 10.1109/WCSP.2018.8555605

[5]RUI M, BOBAN M, STEENKISTE P, et al. Experimental study on the impact of vehicular obstructions in VANETs[C]//2010 IEEE Vehicular Networking Conference. Jersey: IEEE, 2011: 338. DOI: 10.1109/VNC.2010.5698233

[6]HE Ruisi, MOLISCH A F, TUFVESSON F, et al. Vehicle-to-Vehicle propagation models with large vehicle obstructions[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2237. DOI: 10.1109/TITS.2014.2311514

[7]VLASTARAS D, ABBAS T, NILSSON M, et al. Impact of a truck as an obstacle on vehicle-to-vehicle communications in rural and

highway scenarios[C]//2014 IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC 2014). Vancouver: IEEE, 2014: 1. DOI: 10.1109/WIVEC.2014.6953226]

[8] YANG Mi, AI Bo, HE Ruisi, et al. Measurements and cluster-based modeling of vehicle-to-vehicle channels with large vehicle obstructions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9): 5860. DOI: 10.1109/TWC.2020.2997808.

[9] ZHANG Xu, YANG Mi, WANG Wei, et al. Measurement and analysis of fading characteristics of V2V propagation channel at 5.9 GHz in tunnel[C]// International Conference on Internet of Things as a Service. Cham: Springer, 2019: 151. DOI: 10.1007/978-3-030-44751-9_14

[10] LOREDO S, DEL CASTILLO A, FERNANDEZ H, et al. Small-scale fading analysis of the vehicular-to-vehicular channel inside tunnels[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2017, 2017: 1. DOI: 10.1155/2017/1987437

[11] BERNADO L, ROMA A, PAIER A, et al. In tunnel vehicular radio channel characterization[C]// 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Budapest: IEEE, 2011: 1. DOI: 10.1109/ VETECS.2011.5956510

[12] JIANG Suying, ZHANG Xu, WANG Wei, et al. Measurement and diffuse multipath analysis of V2V propagation channel at 5.9 GHz in tunnel area[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen: IEEE, 2020: 1. DOI: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135886

[13] GUAN Ke, ZHONG Zhangdui, ALONSO J I, et al. Measurement of distributed antenna systems at 2.4 GHz in a realistic subway tunnel environment [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(2): 834. DOI: 10.1109/TVT.2011.2178623

[14] LI Jinxing, ZHAO Youping, ZHANG Jing, et al. Radio channel measurement and analysis at 2.4/5 GHz in subway tunnels[J]. China Communications, 2015, 12(1): 36. DOI: 10.1109/CC.2015.7084382

[15] GALLOWAY T. On the application of the method of least squares to the determination of the most probable errors of observation in a portion of the ordnance survey of england[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1843, 5(29): 262. DOI: 10.1093/mnras/5.29.262a

[16] PAPIC-BLAGOJEVIC N, LEPOJEVIC V, LONCAR S. Examination the performances of maximum likelihood method and bayesian approach in estimation sales level[J]. Facta Universitatis, 2015, 12(4): 323

[17] 王少石. 面向车联网通信的3.5 GHz 宽带无线信道测量与仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019
WANG Shaoshi. Measurement and simulation research of broadband wireless channel for vehicle communication at 3.5 GHz[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019

[18] GREENSTEIN L J, MICHELSON D G, ERCEG V. Moment-method estimation of the Ricean K-factor [J]. IEEE Communications Letters, 1999, 3(6): 175. DOI: 10.1109/4234.769521

（编辑　苗秀芝）

（下接第 130 页）

[14] LIU Jiangjiang, HOU Qibin, CHENG Mingming, et al. Improving convolutional networks with self-calibrated convolutions[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2020: 10096. DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.01011

[15] YANG Liping, TAO Lianjie, CHEN Xinxing, et al. Multi-scale semantic feature fusion and data augmentation for acoustic scene classification[J]. Applied Acoustics, 2020, 163: 107238. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107238

[16] SALAMON J, JACOBY C, BELLO J P. A dataset and taxonomy for urban sound research [C]//Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Multimedia. Orlando: Association for Computing Machinery, 2014: 1043. DOI: 10.1145/2647868.2655045

[17] PICZAK K J. ESC: Dataset for environmental sound classification [C]//Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Multimedia. New York: Association for Computing Machinery, 2015: 1015. DOI: 10.1145/2733373.2806390

（编辑　苗秀芝）