

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902572

基于多簇的几何随机信道建模与仿真^{*}

李 兵^{1,2} 张晓艺¹ 曾文波¹ 韩 睿¹ 何怡刚¹

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009;
2. 可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室 合肥 230009)

摘 要:随着智能交通系统(ITS)的不断发展,车载通信作为其关键技术日益受到关注。无线信道作为车载通信的传播途径,其特性分析十分重要。针对移动轿车经过基站时的信号传播模型进行研究,在散射簇的理论基础上建立了适用于大规模多输入多输出(MIMO)信道的窄带单环模型。通过设置符合实际场景的散射簇参数来模拟和分析信道,模型会更加符合实际信道特征,比经典单环模型有更好的评估效果。在仿真模型中,主要研究了信道的时间自相关函数(ACF)、空间互相关函数和频率互相关函数(FCF)等特性。同时,对不同的散射簇场景进行了对比分析,证明本模型更强的实用性。

关键词:车载通信;几何随机;散射簇;信道模型;相关函数

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Modeling and simulation of geometric random channel based on multi-cluster

Li Bing^{1,2} Zhang Xiaoyi¹ Zeng Wenbo¹ Han Rui¹ He Yigang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: With the continuous development of intelligent transportation systems (ITS), vehicular communication, as its vital technology, has received increasing attention. As the propagation channel of vehicular communication, the characteristic analysis of wireless channel is fundamental. This paper studies the signal propagation model of a mobile car passing through a base station. Based on the theory of scattering clusters, a narrowband single-loop model suitable for large-scale multiple-input multiple-output (MIMO) channels is established. By setting the scattering cluster parameters that match the actual scene to simulate and analyze the channel, the model will be more in line with the characteristics of the actual channel and have a better evaluation effect than the classic single-loop model. In the simulation model, the time autocorrelation function (ACF), spatial cross-correlation function and frequency cross-correlation function (FCF) of the channel are mainly studied. At the same time, a comparative analysis of different scattering cluster scenes proves that the model is more practical.

Keywords: vehicle communication; geometric random; scattering cluster; channel model; correlation function

0 引 言

车载通信系统是智能交通系统(ITS)的重要组成部分,其通过车辆与车辆、车辆与道路基础设施之间的信息互联互通,可减少交通负荷和环境污染、保证交通安全、

提高运输效率^[1]。无线信道作为车载通信系统通信发生的媒介之一,其特性直接影响系统性能。实际应用场景中,周围环境及周边车辆的干扰使得传播信道中远近端反散射体数目也随之增加,信道中多径结构的分布特性发生改变^[2-3]。因此,采用合理的方法准确地刻画其无线传播信道尤为重要。

收稿日期: 2019-09-06 Received Date: 2019-09-06

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51777050)、国家重大科学仪器设备开发项目(2016YFF0102200)、装备预先研究重点基金(41402040301)、湖南省自然科学基金面上项目(2017JJ2080,2018JJ5029)资助

$$h_{kl}^{LOS}(t) = \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j(2\pi f_R^{LOS} t - \frac{2\pi}{\lambda} D_{kl})} \quad (1)$$

其中:

$$f_R^{LOS} = f_{\max} \cos(\alpha_{LOS}^R - \alpha_v) \quad (2)$$

$$D_{kl} = D - (M_T - 2l + 1) \frac{\delta_T}{2} \cos\beta_T + (M_R - 2k + 1) \cdot \frac{\delta_R}{2} \cos\beta_R \quad (3)$$

式中:莱斯因子 K 是视距分量与散射分量比值,即 $K = E\{|h_{kl}^{LOS}(t)|^2 / |h_{kl}^{NLOS}(t)|^2\}$, f_R^{LOS} 是视距分量引起的接收器接收信号的多普勒频移, α_n^R 是视距分量的 AOA, λ 是载波波长, D_{kl} 是第 l 根发射天线与第 k 根接收天线之间的距离,可见视距分量是一个确定过程。

散射分量是随机过程,表达式为:

$$h_{kl}^{NLOS}(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{(K+1)N}} \sum_{n=1}^N a_{ln} b_{kn} e^{j(2\pi f_R^{NLOS} t + \theta_n)} \quad (4)$$

其中:

$$a_{ln} = e^{j\pi(M_T - 2l + 1) \frac{\delta_T}{\lambda} (\cos\beta_T + \alpha_{\max}^T \sin\beta_T \sin\alpha_n^R)} \quad (5)$$

$$b_{kn} = e^{j\pi(M_R - 2k + 1) \frac{\delta_R}{\lambda} \cos(\alpha_n^R - \beta_R)} \quad (6)$$

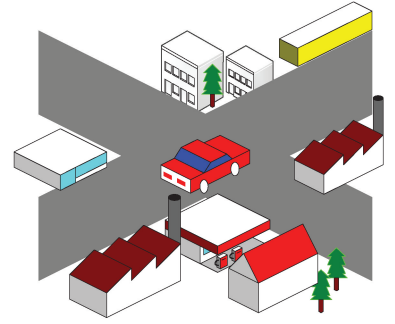
$$f_R = f_{\max} \cos(\alpha_n^R - \alpha_v) \quad (7)$$

式中: $a_{\max}^T$ 表示从信号发射端看到的最大 AOD, $\alpha_{\max}^T = \arctan(R/D)$, θ_n 是独立同分布的随机变量,每一个都服从 $(0, 2\pi)$ 上的均匀分布, f_R 是散射分量引起的接收器接收信号的多普勒频移, $f_{\max} = f_c(v/c)$, f_c 是载波频率, v 是接收机的移动速度, c 是光速。

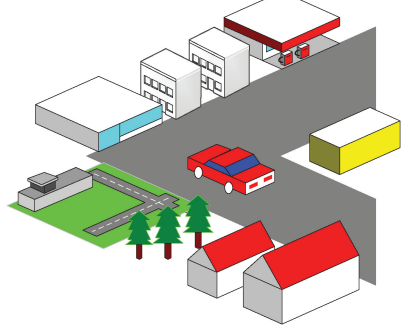
2 基于散射簇的模型扩展

在实际场景中,汽车周围散射体在各个角度分布不一致。图 3(a) 所示为十字路口场景,该场景下设置簇的数量为 4 个,根据轿车所在位置可以确定散射簇角度和分布角度,第 1 个簇的角度在 $\pi/6 \sim \pi/3$, 第 2 个簇的角度在 $2\pi/3 \sim 5\pi/6$, 以此类推。图 3(b) 中,汽车行驶过拐角时,可设置为两个簇,簇的分布角度为 $\pi/6 \sim 4\pi/3$, $5\pi/3 \sim 11\pi/6$, 路面范围无散射体分布。图 3(c) 所示为直路场景,分簇数量为两个,且角度对称,其中一个簇的角度为 $\pi/6 \sim 5\pi/6$ 。图 3(c) 中,可以根据路边散射体的疏密程度对散射体做进一步划分,如把一栋房屋看成一个散射体等。由此可见,本文提出的基于散射簇的信道模型可以根据场景需要改变簇的分布,使其与实景吻合,较文献[16]所提的均匀单环模型具有更强的实用性。

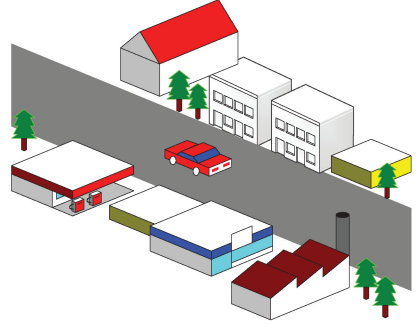
假设作为接收器的移动轿车周围散射体圆环上有多散簇分布,假设共有 C 个簇,且簇的长度有限,簇 C 的 AOD 表示为 $\alpha_{n,c}^T$, AOA 表示为 $\alpha_{n,c}^R$, 存在区域为



(a) 十字路口场景
(a) Crossroads scene



(b) 拐角场景
(b) Corner scene



(c) 直路场景
(c) Straight scene

图 3 散射簇的实际场景模拟

Fig. 3 Scene simulation of scattering clusters

$[a_{\min,c}^R, a_{\max,c}^R]$, 所有的 $a_{n,c}^R$ 都有相同的概率密度函数。在基于散射簇的大规模天线 MIMO 信道模型中,信道增益表示为 $z_{kl}(t)$, 由视距分量和散射簇分量组成

$$z_{kl}(t) = h_{kl}^{LOS}(t) + \sum_{c=1}^C \omega_c h_{kl,c}^{NLOS}(t) \quad (8)$$

其中, ω_c 代表权重因子,即代表第 c 个簇占据的比重,为了使 $z_{kl}(t)$ 的均值功率归一化为一个单位,对加权因子施加边界条件 $\sum_{c=1}^C \omega_c^2 = 1$ 。

2.1 空时相关函数

由于视距分量不影响散射簇的分布和数量,两个亚信道之间空间和时间上的相关性的一个度量是 3D 空间-时间 CCF, 则多簇 MIMO 信道模型的 3D 空间-时间

CCF $\rho_{kl,k'l'}(\delta_T, \delta_R, \tau)$ 为:

$$\rho_{kl,k'l'}(\delta_T, \delta_R, \tau) = E\{z_{kl}(t) \cdot z_{k'l'}^*(t + \tau)\} = \rho_{kl,k'l'}^{LOS}(\delta_T, \delta_R, \tau) + \sum_{c=1}^c \omega_c^2 \rho_{kl,k'l',c}^{NLOS}(\delta_T, \delta_R, \tau) \quad (9)$$

式中: $(\cdot)^*$ 表示共轭, $E\{\cdot\}$ 表示求期望。视距分量的相关函数 $\rho_{kl,k'l'}^{LOS}(\delta_T, \delta_R, \tau)$ 具体计算如下:

$$\rho_{kl,k'l'}^{LOS}(\delta_T, \delta_R, \tau) = E\{h_{kl}^{LOS}(t) * [(t + \tau)]^*\} = \frac{K}{K+1} c_{ll'}^{LOS}(\delta_T) d_{kk'}^{LOS}(\delta_R) e^{-j2\pi f_R^{LOS} \tau} \quad (10)$$

其中:

$$c_{ll'}^{LOS}(\delta_T) = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(l-l')\delta_T \cos \beta_T} \quad (11)$$

$$d_{kk'}^{LOS}(\delta_R) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(k-k')\delta_R \cos \beta_R} \quad (12)$$

多普勒频移 f_R^{LOS} 由式(2)可以得到。基于散射簇分量的相关函数 $\rho_{kl,k'l',c}^{NLOS}(\delta_T, \delta_R, \tau)$ 的计算如下:

$$\rho_{kl,k'l',c}^{NLOS}(\delta_T, \delta_R, \tau) = E\{h_{kl,c}^{NLOS}(t) * [h_{k'l',c}^{NLOS}(t + \tau)]^*\} \cdot \frac{1}{K+1} \int_{\alpha_{\min,c}^R}^{\alpha_{\max,c}^R} \alpha_{ll'}^R(\delta_T, \alpha_{n,c}^R) b_{kk'}^R(\delta_R, \alpha_{n,c}^R) e^{-j2\pi f_R^T \tau} P_{\alpha_{n,c}^R}(\alpha_c^R) d\alpha_{n,c}^R \quad (13)$$

其中:

$$\alpha_{ll'}^R(\delta_T, \alpha_{n,c}^R) = e^{-j2\pi(l-l')\frac{\delta_T}{\lambda}(\cos \beta_T + \alpha_{\max}^T \sin \beta_T \sin \alpha_{n,c}^R)} \quad (14)$$

$$b_{kk'}^R(\delta_R, \alpha_{n,c}^R) = e^{-j2\pi(k-k')\frac{\delta_R}{\lambda} \cos(\alpha_{n,c}^R - \beta_R)} \quad (15)$$

$$f_R = f_{\max} \cos(\alpha_{n,c}^R - \alpha_v) \quad (16)$$

由上述信道增益函数可得到时间自相关函数(ACF),表示为 $r_{kl}(\tau) = E\{z_{kl}(t) z_{kl}^*(t + \tau)\}$ 。在空间-时间相关函数中,设置发射器和接收器的天线元件单元间间距 δ_T, δ_R 均为0,则可以得到时间自相关函数:

$$r_{kl}(\tau) = \rho_{kl,k'l'}(0, 0, \tau) = \rho_{kl,k'l'}^{LOS}(0, 0, \tau) + \sum_{c=1}^c \omega_c^2 \rho_{kl,k'l',c}^{NLOS}(0, 0, \tau) = \frac{K}{K+1} e^{-j2\pi f_R^{LOS} \tau} + \frac{1}{K+1} \sum_{c=1}^c \omega_c^2 \int_{\alpha_{\min,c}^R}^{\alpha_{\max,c}^R} e^{-j2\pi f_R^T \tau} P_{\alpha_{n,c}^R}(\alpha_{n,c}^R) d\alpha_{n,c}^R \quad (17)$$

2D 空间 CCF 为 $\rho_{kl,k'l'}(\delta_T, \delta_R) = E\{z_{kl}(t) z_{k'l'}^*(t)\}$, 将 τ 设置为0, 则可从3D 空间-时间相关函数得到2D 空间 CCF, 即:

$$\rho_{kl,k'l'}(\delta_T, \delta_R) = \rho_{kl,k'l'}(\delta_T, \delta_R, 0) = \rho_{kl,k'l'}^{LOS}(\delta_T, \delta_R, 0) + \sum_{c=1}^c \omega_c^2 \rho_{kl,k'l',c}^{NLOS}(\delta_T, \delta_R, 0) = \frac{K}{K+1} c_{ll'}^{LOS}(\delta_T) d_{kk'}^{LOS}(\delta_R) + \frac{1}{K+1} \sum_{c=1}^c \omega_c^2 \int_{\alpha_{\min,c}^R}^{\alpha_{\max,c}^R} \alpha_{ll'}^R(\delta_T, \alpha_{n,c}^R) b_{kk'}^R(\delta_R, \alpha_{n,c}^R) P_{\alpha_{n,c}^R}(\alpha_{n,c}^R) d\alpha_{n,c}^R \quad (18)$$

频率互相关函数 FCF 可以表示为:

$$f_{kl}(v) = \frac{K}{K+1} e^{(-j2\pi \tau_{kl}^{LOS} v)} + \frac{1}{K+1} \sum_{c=1}^c \omega_c^2 \int_{\alpha_{\min,c}^R}^{\alpha_{\max,c}^R} e^{-j2\pi \tau_{kl}^P v} P_{\alpha_{n,c}^R}(\alpha_{n,c}^R) d\alpha_{n,c}^R \quad (19)$$

其中, τ_{kl}^{LOS} 为 LOS 分量的传输时延, 且 $\tau_{kl}^{LOS} = D_{kl}/c$, $\tau_{kl} = (D_{ln}^T + D_{nk}^R)/c$, D_{ln}^T 是从发射器天线阵元的第 l 根天线 A_l^T 到散射体 S_n 的路径长度, 且 $D_{ln}^T \approx D + R \cos(\alpha_{n,c}^R) - (M_T - 2l + 1) \frac{\delta_T}{2} [\cos(\beta_T) + \alpha_{\max}^T \sin(\beta_T) \sin(\alpha_{n,c}^R)]$, D_{nk}^R 是从散射体 S_n 到接收器天线阵元的第 k 根天线 A_k^R 的路径长度, 且 $D_{nk}^R = R - (M_R - 2k + 1) \frac{\delta_R}{2} \cos(\alpha_{n,c}^R - \beta_R)$ 。

3 数值分析与仿真

限于篇幅, 本文主要讨论对 2×2 MIMO 信道模型, 即研究信道 11 与信道 22 的相关性。设 $k = l = 1, k' = l' = 2$ 。信号载波频率 $f_c = 5.9$ GHz, 设收发器天线元件间隔 $\delta_R = \delta_T = 0.5\lambda = 0.025$ m。模型应用场景参数设置如下: 散射圆环半径 $R = 20$ m, 收发端间距离 $D = 300$ m, 发射和接收天线倾角 $\beta_T = \beta_R = \pi/4$, 接收端轿车的运动方向 $\alpha_v = 0$, 最大多普勒频移 $f_{\max} = 200$ Hz, 莱斯因子 $K = 1$ 。假设传播环境中包含多个散射簇, 对于每个散射簇, 假设 AOA α_c^R 区间 $[\alpha_{\min,c}^R, \alpha_{\max,c}^R]$ 上均匀分布, 即 $P_{\alpha_c^R}(\alpha_c^R) = \frac{1}{\Delta\alpha_c^R}$, 其中 $\Delta\alpha_c^R = |\alpha_{\max,c}^R - \alpha_{\min,c}^R|$ 。

3.1 时间自相关函数

十字路口场景中, 汽车周围散射体分为四个散射簇, 单个簇分布区域大约为 $\pi/6$, 散射物体在其所在区域均匀分布, 权重因子 $\omega_c^2 (c = 1, \dots, 4) = 0.25$ 。文献[16]的单环模型与本文中改进后的基于簇的模型的时间 ACF 比较如图 4(a) 所示。

由图 4(a) 可见, 本文模型与文献[16]模型变化趋势基本一致。当时间延迟 $\tau = 0$ 时, 时间自相关函数最大等于 1; 随着时延逐渐增大, 时间自相关函数开始快速衰落。且起始处 ACF 图像振荡严重, 最终曲线在一个稳定值附近波动。此外, 由于文献[16]假设散射体均匀分布在圆环, 则模型得到的时间相关函数呈现出规律振荡, 而本文提出模型可以根据场景不同做出调整以符合实际需求, 则时间相关函数的变化可以呈现多样性。

不包含 LOS 分量的自相关函数曲线如图 4(b) 所示, 其与图 4(a) 曲线变化趋势相同, 但不含 LOS 分量的自相关函数的衰落要更快, 最终同样会稳定在一个范围内, 而该稳定区域接近 0, 即 LOS 分量对该信道影响很大。

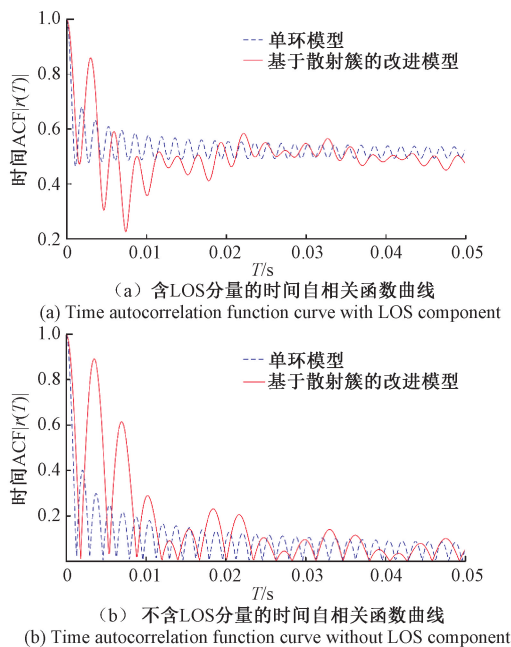


图4 十字路口场景的时间自相关函数曲线

Fig. 4 Time autocorrelation function curve of crossing scene

3.2 空间互相关函数

参考模型得到的2D空间CCF如图5所示。由图5可以看到,基站处的天线间距 δ_r 对信道容量影响更大。由于移动端周围存在大量散射体,导致此处的空间相关性弱化,移动端的的天线间距 δ_R 对信道容量影响很小。图5(a)是参考模型的空间互相关函数分布曲面图,图5(b)是不考虑LOS分量时局部散射体的空间互相关函数曲面。由图5可以知道,收发端天线元件间的间隔 $\delta_r = \delta_R = 0$ 时,互相关系数最大为1,当天线元件间的间隔 δ_r, δ_R 渐渐增大时,空间互相关系数开始衰减,并最终稳定在一个范围。图5(a)中含有LOS分量的互相关系数,其最终在一定的稳定值上下波动,图5(b)不含LOS分量的互相关系数,其最终衰减为0。即在视距传输过程中,天线阵元间的有着比较强的相关性。

3.3 频率互相关函数

参考模型得到的频率互相关函数如图6所示,可见,当 $v = 0$ 时,频率互相关系数最大为1,当频率 f 渐渐增大时,频率互相关函数开始衰减,并最终在一定值范围上下波动。由图6可见,不含LOS分量时的频率互相关函数较含LOS分量时衰减速度更快,即LOS分量对相关系数影响较大。

3.4 不同散射簇分布的相关系数对比

当道路上的车辆变得稀疏或者密集时,相当于移动轿车所处圆环处的散射物体分布发生变化。建筑物分布密集程度对散射簇的分布亦存在同样影响。此时

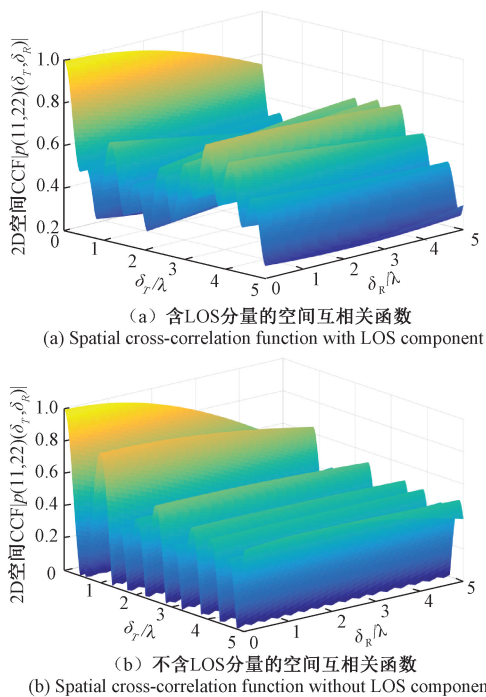


图5 十字路口场景的空间互相关函数

Fig. 5 Spatial cross-correlation function of crossing scene

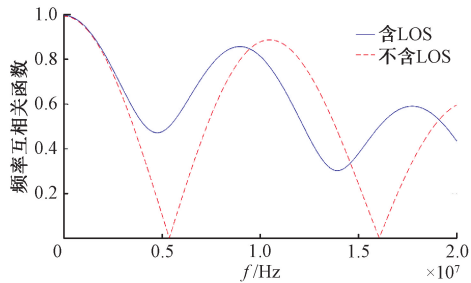


图6 十字路口的频率互相关函数曲线

Fig. 6 Frequency correlation function curve of crossing scene

可调整散射簇分布,使其符合场景特征。十字路口场景与拐角场景、直路场景的对比如图7所示。图7中散射簇1曲线为十字路口模型的时间自相关函数曲线,散射簇2曲线为拐角路口场景的时间自相关函数曲线,散射簇3曲线为直路场景下ACF曲线。由图7可见,散射簇不管分布如何,其最终衰落趋势类似,ACF从系数为1开始衰减到一个稳定的区域。但分布不同会使得稳定之前的曲线波形变化幅度大小不同,时延不同时,变化趋势不完全一致,尤其衰落开始时,区别较为明显。图8、9所示为散射簇2和散射簇3的空间互相关函数曲面,其衰落总体趋势一致,但天线间隔不同时衰落幅度快慢变化不一致。

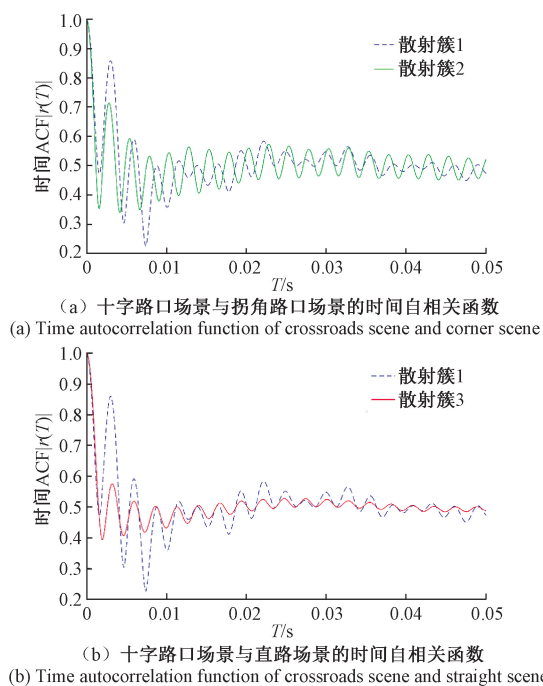


图7 不同散射簇场景的时间自相关函数对比

Fig. 7 Time autocorrelation function comparison of different scattered cluster scenes

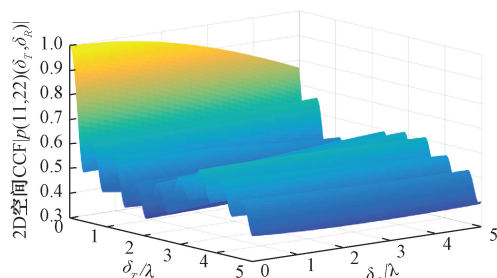


图8 拐角路口场景的空间互相关函数

Fig. 8 Spatial cross-correlation function of corner crossing scene

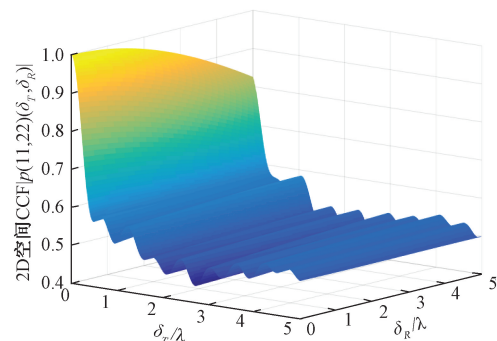


图9 直路场景的空间互相关函数

Fig. 9 Spatial cross-correlation function of straight-path scene

4 结论

本文根据汽车通过信号发射基站时的应用场景特征,在单环模型中引入了散射簇概念,提出了基于多簇的几何随机信道模型。根据所提模型分析了十字路口场景下视距和非视距环境散射簇模型时间 ACF、空间互相关函数和 FCF,其中,LOS 分量对相关系数影响较大。最后比较了十字路口场景与拐角场景、直路场景时不同散射簇的时间自相关函数和空间互相关函数,确定不同应用场景下簇的参数分布范围和特征,以便于在不同的实际场景中,根据需要调整簇的参数,使其更符合实际环境特征。散射簇的提出,为高速路信息通讯提供了扩展性思路。下一步将根据实际需要扩充理论模型,做出更为复杂合理的信道通信模型。

参考文献

- [1] 戴海明. 车载通信系统物理层及 MAC 层协议的研究与改进 [D]. 北京:北京邮电大学, 2018.
DAI H M. Research and improvement of physical layer and MAC layer protocols of vehicle communication system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [2] KARAGIANNIS G, ALTINTASAI O, EKICI E, et al. Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions [J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2011, 13(4): 584-616.
- [3] 朱伟娜,周杰,蔡世清. 移动通信宏小区信道模型的信道估计研究 [J]. 计算机科学, 2016, 43(10): 87-92.
ZHU W N, ZHOU J, CAI SH Q. Research on channel estimation of macro cell channel model in mobile communication [J]. Computer Science, 2016, 43(10): 87-92.
- [4] LI Y, AI B, CHENG X, et al. A TDL based non-WSSUS vehicle-to-vehicle channel model [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013(1): 1-8.
- [5] KAREDAL J, TUFVESSON F, ABBAS T, et al. Radio channel measurements at street intersections for vehicle-to-vehicle safety applications [C]. Vehicular Technology Conference, IEEE, 2010: 1-5.
- [6] PAIER A, KAREDAL J, CZINK N, et al. First results from car-to-car and car-to-infrastructure radio channel measurements at 5.2 GHz [C]. IEEE PIMRC, 2007: 1-5.
- [7] 李兵,赵峰,曾文波,等. 前车干扰对 ETC 系统传播损耗的影响 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 133-139.

- LI B, ZHAO F, ZENG W B, et al. Interference of the front vehicle in the propagation loss of ETC system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(4): 133-139.
- [8] RENAUDIN O, KOLMONEN V M, VAINIKAINEN P, et al. Non-stationary narrowband MIMO inter-vehicle channel characterization in the 5 GHz Band [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 2007-2015.
- [9] PÄTZOLD M, HOGSTAD B O, YOUSSEF N. Modeling analysis and simulation of MIMO mobile-to-mobile fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(2): 510-520.
- [10] YUAN Y, CHENG X, WANG C, et al. 3D wideband non-stationary geometry-based stochastic models for non-isotropic MIMO vehicle-to-vehicle channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(12): 6883-6895.
- [11] 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.
- [12] AVAZOV N, PÄTZOLD M. A geometric street scattering channel model for car-to-car communication systems [C]. International Conference on Advanced Technologies for Communications, IEEE Computer Society, 2011: 224-230.
- [13] AVAZOV N, PÄTZOLD M. Design of wideband MIMO car-to-car channel models based on the geometrical street scattering model [J]. Modeling and Simulation in Engineering, 2012, 2012(6): 1202-1209.
- [14] 吴旭翌. 基于散射簇的信道建模及多径成簇算法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- WU X ZH. Research on channel modeling and multipath clustering algorithm based on scattering clusters [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [15] WU S B, WANG C X, AGGOUNE E H M, et al. A non-stationary 3-D wideband twin-cluster model for 5G massive MIMO channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1207-1218.
- [16] 范文兵, 赵龙贺. 单环模型下三维多极化天线 MIMO 信道建模[J]. 电视技术, 2013, 37(23): 179-182.
- FAN W B, ZHAO L H. Modeling of 3D multi-polarized antenna MIMO channel in single loop model [J]. TV Technology, 2013, 37(23): 179-182.
- [17] 吴海龙. 大规模 MIMO 信道建模及传播特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- WU H L. Research on modeling and propagation characteristics of massive MIMO channel [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [18] 华为技术有限公司. LTE-Advanced 关键技术及标准进展[J]. 电信网技术, 2010(5): 32-38.
- Huawei Technologies Co. Ltd, Key technologies and standards of LTE-Advanced [J]. Telecommunications Network Technology, 2010(5): 32-38.
- [19] 范佳兴, 李兵, 何怡刚, 等. ETC 系统信道传播损耗评估方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1164-1171.
- FAN J X, LI B, HE Y G, et al. Evaluation method for propagation loss of ETC system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1164-1170.
- [20] 张勇, 陈凯, 周跃华, 等. 高速公路 ETC 车道防邻道及跟车干扰研究[J]. 交通节能与环保, 2012, 4(14): 68-73.
- ZHANG Y, CHEN K, ZHOU Y H, et al. Study on the prevention of adjacent road and following interference in ETC lane of Expressway [J]. Traffic Energy Saving and Environmental Protection, 2012, 4(14): 68-73.

作者简介



李兵, 1995 年于重庆获得学士学位, 2006 年于湖南大学获得硕士学位, 2011 年于湖南大学获得博士学位, 2011 年 7 月, 湖南大学电气与信息工程学院博士后研究员、访问学者, 2013 年加入合肥大学电气与自动化工程学院, 主要研究方向包括智能交通系统、射频识别技术、无线传感器网络和信号处理。

E-mail: libinghnu@163.com

Li Bing received the B. Sc. degree from Chongqing Science & Technology University in 1995, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Hunan University in 2006 and 2011, respectively. He was a postdoctoral researcher and visiting scholar with the College of Electrical and Information Engineering of Hunan University from July 2011, and joined the School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University from 2013. His main research interests include intelligent transportation system, radio frequency identification technology, wireless sensor networks and signal processing.



张晓艺, 2017 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为无线通信。

E-mail: 1785674331@qq.com

Zhang Xiaoyi received the B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2017. Now she is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. Her main research interests is wireless communication.