

三维空间非平稳车载几何信道模型的研究分析

江浩,张在琛,党建,吴亮

(东南大学移动通信国家重点实验室,江苏南京 210096)

摘要: 本文提出一种新型的三维空间非平稳车载几何信道模型. 我们采用圆柱体描述发射端(Mobile Transmitter, MT)以及接收端(Mobile receiver, MR)附近运动的车辆,而采用椭圆柱描述路边静止的建筑物. 由于发射端和接收端的相对运动而使得本文提出的模型呈现时变非平稳几何特性. 针对提出的三维空间信道模型,作者深入研究其统计特性,比如时域相关特性以及多普勒功率谱分布. 仿真结果和过去研究结果进行比较,进而验证本文提出的信道模型能够很好地描述车载无线通信环境.

关键词: 三维空间信道模型; 车载通信; 时域相关特性; 多普勒功率谱

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)05-1265-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.037

Analysis of 3D Geometry-Based Models for Non-Stationary Vehicle-to-Vehicle Channels

JIANG Hao, ZHANG Zai-chen, DANG Jian, WU Liang

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: This paper presents a novel three-dimension (3D) non-wide-sense stationary (non-WSS) geometry-based channel model for vehicle-to-vehicle (V2V) communication environments. We introduce the two-cylinder model to describe the moving vehicles and elliptic-cylinder models to depict the stationary roadside scenarios. The relative movement between the mobile transmitter (MT) and mobile receiver (MR) results in the time-varying geometric statistics that make our channel model non-stationary. Furthermore, the proposed channel statistics, i. e., the time-varying space correlation functions (CFs) and Doppler power spectral density (PSD) are studied for different relative moving time instants. The results show that the proposed 3D non-WSS channel model is practical for characterizing real V2V channels.

Key words: 3D channel model; vehicle-to-vehicle; space correlation functions; Doppler power spectral density

1 引言

近年来,伴随着第五代移动通信技术(Fifth generation, 5G)的不断发展,车载通信已经逐步成为非常热门的研究课题^[1]. 为了能够有效地分析设计车载无线通信系统,研究分析发射端(Mobile transmitter, MT)以及接收端(Mobile receiver, MR)之间的传输特性显得非常必要^[2,3]. 在文献[4]中, Akki 和 Haber 首次提出采用几何信道模型描述车载移动通信环境. X. Cheng^[5]采用双环几何模型来描述 MT 和 MR 附近运动的车辆,而采用同心椭圆模型描述路边静止的建筑物. 另外,文献[6]和[7]分别提出三维空间几何信道模型以描述室外宏小区以及室内微小区移动通信环境. 然而,上述提出的信道模型大都基于平稳特性的假设,也就是假设信道模型的统计特性是非时变的. M. Boban^[8]指出,统计信道的平稳假设只

是适用于传统的信道模型. 因此,这就需要我们对于非平稳统计信道模型进行分析. 在文献[9]和[10]中,研究人员分别提出非平稳几何信道模型来描述 T 字型路口以及十字路口的移动通信环境. 近期, S. B. Wu^[11]提出一种非平稳多天线的(Multiple-input multiple-output, MIMO)莱斯信道模型去描述车载通信场景. 另外, Y. Yuan^[12]提出一种三维空间多天线车载信道模型,但是只局限在两个特殊的运动方向:相向运动和相反运动.

结合上述研究现状,本文提出一种新型的三维空间非平稳几何信道模型. 通过调整信道的参数,本文提出的模型可以有效地描述多种移动通信环境,比如说宏小区和微小区通信环境. 另外,本文深入分析所提出的信道模型的时变统计特性,比如说时变时域相关特性,时变频域相关特性,以及由于 MT 和 MR 相对运

收稿日期: 2017-04-13; 修回日期: 2017-07-14; 责任编辑: 郭游

基金项目: 东南大学优秀博士学位论文培育基金(No. YBJJ1655); 江苏省创新工程(No. KYLX16_0224); 国家自然科学基金(No. 61571105, No. 61601119, No. 61501109); 江苏省自然科学基金(No. BK20140646)

动而引起的多普勒偏移.

2 本文提出的信道模型

本文提出一种三维空间非平稳车载几何信道模型,其中发射端与接收端分别设置有天线数为 M_T 和 M_R 的线性多天线阵列,详见图 1. 假设 MT 和 MR 之间的距离为 $D = 2f$, 其中 $2f$ 表示椭圆两个焦点之间的距离. 在本文提出的三维空间信道模型中,采用圆柱体描述 MT 以及 MR 附近的建筑物,而圆柱的半径分别表示为 R_t 和 R_r . 我们定义 Ant_p^T 为发射端第 p 个 ($p = 1, 2, \dots, M_T$) 天线阵元,而 Ant_q^R 则表示接收端第 q 个 ($q = 1, 2, \dots, M_R$) 天线阵元. MT 以及 MR 两端天线阵元之间的间距分别表示为 δ_T 和 δ_R . 发射端的天线阵列在水平方向以及竖直方向上的偏转角度分别可以表示为 ψ_T 和 θ_T ; 同理,接收端天线的偏转角度分别表示为 ψ_R 和 θ_R . 考虑到在本文提出的车载通信环境中,MT 和 MR 处于同时运动的状态,因此可以将其等效为 MT 相对静止而 MR 相对运动的状态. 此时假设 MR 在水平面上的运动夹角为 γ_R , 而运动速度则是 v_R . 除此之外,假设共有 N_1 个有效散射体位于 MT 附近的圆柱表面上,而第 n_1 个 ($n_1 = 1, 2, \dots, N_1$) 散射体可以表示为 $s^{(n_1)}$. 同时,假设共有 N_2 个有效散射体位于 MR 附近的圆柱表面上,而第 n_2 个 ($n_2 = 1, 2, \dots, N_2$) 散射体则可以表示为 $s^{(n_2)}$. 另外假设共有 N_3 个有效散射体在椭圆柱上,而第 n_3 个 ($n_3 = 1, 2, \dots, N_3$) 散射体则可以表示为 $s^{(n_3)}$. MT 在水平面上的夹角为 $\alpha_T^{(n_1)}$, 在竖直平面上的夹角为 $\beta_T^{(n_1)}$; 同理,MR 在水平面以及竖直平面上的夹角分别可以表示为 $\alpha_R^{(n_1)}$ 和 $\beta_R^{(n_1)}$. 由图 1 可知,接收端的信号可以理解成是直达路径 (line-of-sight, LoS), 单次反射 (single bounced, SB) 以及两次反射 (double bounced, DB) 情况下各方向信号的叠加. 因此,本文提出的信道模型的冲激响应可以整理为:

$$h_{pq}(t) = h_{pq}^{LoS}(t) + \sum_{i=1}^3 h_{pq}^{SB_i}(t) + h_{pq}^{DB}(t) \quad (1)$$

其中:

$$\xi_{pq}(t) \approx \sqrt{(D - \delta_T \cos \theta_T \cos \psi_T)^2 + (v_R t)^2 - 2(D - \delta_T \cos \theta_T \cos \psi_T) v_R t \cos(\alpha_R^{LoS} - \gamma_R)} \quad (5)$$

$$\xi_{pn_1}(t) \approx R_t \sec \beta_T^{(n_1)} - \delta_T [\sin \beta_T^{(n_1)} \sin \theta_T + \cos \beta_T^{(n_1)} \cos \theta_T \cos(\psi_T - \alpha_T^{(n_1)})] \quad (6)$$

$$\xi_{pn_2}(t) \approx \xi_{n_2} - \frac{\delta_T}{\xi_{n_2}} [R_r \tan \beta_R^{(n_2)} \sin \theta_T + Q_{pn_2} \cos \theta_T \cos(\psi_T - \alpha_T^{(n_2)})] \quad (7)$$

$$\xi_{qn_1}(t) \approx \xi_{n_1} - \frac{\delta_R}{\xi_{n_1}} [R_t \tan \beta_T^{(n_1)} \sin \theta_R + Q_{qn_1} \cos \theta_R \cos(\psi_R - \alpha_R^{(n_1)})] \quad (8)$$

$$\xi_{qn_2}(t) \approx R_r \sec \beta_R^{(n_2)} - \delta_R [\sin \beta_R^{(n_2)} \sin \theta_R + \cos \beta_R^{(n_2)} \cos \theta_R \cos(\psi_R - \alpha_R^{(n_2)})] \quad (9)$$

$$\xi_{pn_3}(t) \approx \xi_T^{(n_3)} - \frac{\delta_T}{\xi_T^{(n_3)}} [\xi_R^{(n_3)} \sin \theta_T + Q_{pn_3} \cos \theta_T \cos(\psi_T - \alpha_T^{(n_3)})] \quad (10)$$

$$\xi_{qn_3}(t) \approx \xi_R^{(n_3)} - \delta_R [\sin \beta_R^{(n_3)} \sin \theta_R + \cos \beta_R^{(n_3)} \cos \theta_R \cos(\psi_R - \alpha_R^{(n_3)})] \quad (11)$$

$$h_{pq}^{LoS}(t) \approx \sqrt{\frac{\Omega}{\Omega + 1}} \times e^{-j2\pi f_c \xi_{pq}/c + j2\pi f_{max} t \cos(\alpha_R^{LoS} - \gamma_R) \cos \beta_R^{LoS}} \quad (2)$$

$$h_{pq}^{SB_i}(t) \approx \sqrt{\frac{\eta_{SB_i}}{\Omega + 1}} \times \lim_{N_i \rightarrow \infty} \sum_{n_i=1}^{N_i} \frac{1}{\sqrt{N_i}} \times e^{-j2\pi f_c [\xi_{pn_i} + \xi_{qn_i}]/c + j2\pi f_{max} t \cos(\alpha_R^{(n_i)} - \gamma_R) \cos \beta_R^{(n_i)}} \quad (3)$$

$$h_{pq}^{DB}(t) \approx \sqrt{\frac{\eta_{DB}}{\Omega + 1}} \times \lim_{N_1, N_2 \rightarrow \infty} \sum_{n_1, n_2=1}^{N_1, N_2} \frac{1}{\sqrt{N_1 N_2}} \times e^{-j2\pi f_c [\xi_{pn_1} + \xi_{n_1 n_2} + \xi_{qn_2}]/c + j2\pi f_{max} t \cos(\alpha_R^{(n_2)} - \gamma_R) \cos \beta_R^{(n_2)}} \quad (4)$$

其中 Ω 表示莱斯因子, 参数 η_{SB_i} 和 η_{DB} 则表示单次反射以及两次反射情况下的发射功率.

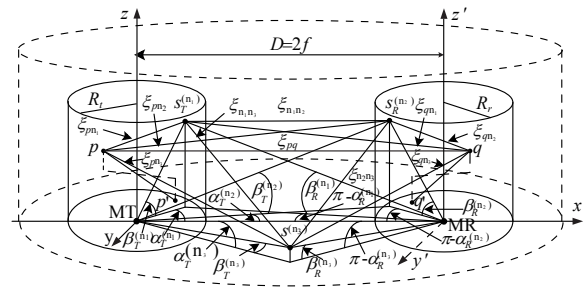


图 1 本文提出的三维空间非平稳车载几何信道模型

图 2 描述的是本文提出的三维空间信道模型在水平面上的几何属性以及移动特性. 在此信道模型中,我们发现几何路径长度伴随着 MT 和 MR 的相对运动而呈现出时变特性. 因此,时变几何路径在时间 t 下的长度可以近似表示为^[12]

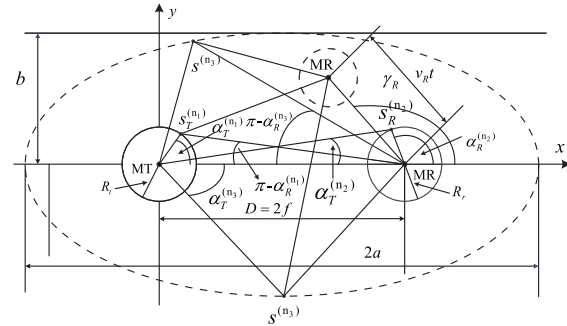


图 2 本文提出的信道模型的几何路径长度以及几何角度

$$\xi_{n_1 n_2}(t) \approx \sqrt{D^2 + (v_R t)^2 - 2Dv_R t \cos(\alpha_R^{LoS} - \gamma_R)} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \xi_{n_2} &= \sqrt{Q_{pn_2}^2 + R_r^2 \tan^2 \beta_R^{(n_2)}}, \quad Q_{pn_2} = \\ &= \sqrt{(D + R_r \cos \alpha_R^{(n_2)})^2 + v_R^2 t^2 + 2(D + R_r \cos \alpha_R^{(n_2)})v_R t \cos \gamma_R}, \\ \xi_{n_1} &= \sqrt{Q_{qn_1}^2 + R_t^2 \tan^2 \beta_T^{(n_1)}}, \quad Q_{qn_1} = \\ &= \sqrt{D^2 + v_R^2 t^2 + 2Dv_R t \cos \gamma_R - R_t \cos \alpha_T^{(n_1)}}, \quad \xi_T^{(n_3)} = Q_{pn_3} \\ &= \sec \beta_T^{(n_3)}, \quad Q_{pn_3} = (a^2 + f^2 + 2af \cos \alpha_T^{(n_3)}) / (a + f \cos \alpha_T^{(n_3)}), \\ \xi_R^{(n_3)} &= \sqrt{Q_{qn_3}^2 + (\xi_T^{(n_3)})^2 \tan^2 \beta_T^{(n_3)}}, \quad W_{qn_3} = 2a - Q_{pn_3}, \text{ 以及} \\ Q_{qn_3} &= \sqrt{W_{qn_3}^2 + v_R^2 t^2 + 2W_{qn_3} v_R t \cos(\alpha_R^{(n_3)} - \gamma_R)}. \end{aligned}$$

为了能够进一步研究本文提出的信道模型的统计特性,引入 von Mises 概率密度分布描述散射体分布,可以简单表示为:

$$f(\alpha_R^{(n_i)}, \beta_R^{(n_i)}) = \frac{k \cos(\alpha_R^{(n_i)})}{4\pi \sinh k} \times \exp(k \sin \beta_0 \times \sin \beta_R^{(n_i)} + k \cos \beta_0 \cos \beta_R^{(n_i)} \cos(\alpha_R^{(n_i)} - \alpha_0)) \quad (13)$$

其中 $\alpha_R^{(n_i)}, \beta_R^{(n_i)} \in [-\pi, \pi]$ 分别为水平方位角度和垂直方位角度. $\alpha_0 \in [-\pi, \pi], \beta_0 \in [-\pi, \pi]$ 为 $\alpha_R^{(n_i)}$ 和 $\beta_R^{(n_i)}$ 的均值.

3 统计性能的研究分析

结合上述提出的信道模型的几何特性,冲激响应 $h_{pq}(t)$ 和 $h_{p'q'}(t)$ 的时域相关特性函数可以表示为:

$$\rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}(t, \tau) = E \left[\frac{h_{pq}(t) \cdot h_{p'q'}^*(t + \tau)}{|h_{pq}(t)| |h_{p'q'}^*(t + \tau)|} \right] \quad (14)$$

由于在此信道模型中,直达路径,单次反射以及两次反射路径彼此之间相互独立,因此,当传输路径为直达路径 LoS,时域互相关函数可以表示为:

$$\rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}^{LoS}(t, \tau) = K e^{j2\pi A^{LoS} + j2\pi f_{max} \tau \cos(\alpha_R^{LoS} - \gamma_R)} \quad (15)$$

其中 $A^{LoS} = \sqrt{(B^{LoS})^2 + v_R^2 t^2 - 2B^{LoS} v_R t \cos(\alpha_R^{LoS} - \gamma_R)}$ 以及 $B^{LoS} = 2\delta_T \cos \theta_T \cos \psi_T$.

如果传输路径经过单次反射,那么时域互相关函数则可以表示为:

$$\begin{aligned} \rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}^{SB_i}(t, \tau) &= \eta_{SB_i} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j2\pi [\frac{1}{\lambda} A^{(SB_i)} + B^{(SB_i)}]} \\ &\times f(\alpha_R^{(n_i)}, \beta_R^{(n_i)}) d\alpha_R^{(n_i)} d\beta_R^{(n_i)} \quad (16) \end{aligned}$$

其中 $A^{(SB_1)} = \delta_T [\sin \beta_T^{(n_1)} \sin \theta_T + \cos \beta_T^{(n_1)} \cos \theta_T \cos(\psi_T - \alpha_T^{(n_1)})] + \delta_R / \xi_{n_1} [R_t \tan \beta_T^{(n_1)} \sin \theta_R + Q_{qn_1} \cos \theta_R \cos(\psi_R - \alpha_R^{(n_1)})]$, $A^{(SB_2)} = \delta_T / \xi_{n_2} [R_r \tan \beta_R^{(n_2)} \sin \theta_T + Q_{qn_2} \cos \theta_T \cos(\psi_T - \alpha_T^{(n_2)})] + \delta_R [\sin \beta_R^{(n_2)} \sin \theta_R + \cos \beta_R^{(n_2)} \cos \theta_R \cos(\psi_R - \alpha_R^{(n_2)})]$, $A^{(SB_3)} = \delta_T / \xi_T^{(n_3)} [\xi_R^{(n_3)} \sin \theta_T + Q_{pn_3} \cos \theta_T \cos(\psi_T - \alpha_T^{(n_3)})] + \delta_R [\sin \beta_T^{(n_3)} \sin \theta_R + \cos \beta_T^{(n_3)} \cos \theta_R \cos(\psi_R - \alpha_R^{(n_3)})]$, $B^{(SB_1)} = f_{max} \tau \cos(\alpha_R^{(n_1)} - \gamma_R) \cos \beta_R^{(n_1)}$, $B^{(SB_2)} = f_{max} \tau \cos(\alpha_R^{(n_2)} - \gamma_R) \cos \beta_R^{(n_2)}$, 以及 $B^{(SB_3)} = f_{max} \tau \cos(\alpha_R^{(n_3)} - \gamma_R) \cos \beta_R^{(n_3)}$.

如果传输路径经过两次反射,那么时域互相关函数则可以表示为:

$$\begin{aligned} \rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}^{DB}(t, \tau) &= \eta_{DB} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j2\pi [\frac{1}{\lambda} A^{(DB)} + B^{(DB)}]} \\ &\times f(\alpha_R^{(n_2)}, \beta_R^{(n_2)}) d\alpha_R^{(n_2)} d\beta_R^{(n_2)} \quad (17) \end{aligned}$$

其中 $A^{(DB)} = \delta_T [\sin \beta_T^{(n_1)} \sin \theta_T + \cos \beta_T^{(n_1)} \cos \theta_T \cos(\psi_T - \alpha_T^{(n_1)})] + \delta_R [\sin \beta_R^{(n_2)} \sin \theta_R + \cos \beta_R^{(n_2)} \cos \theta_R \cos(\psi_R - \alpha_R^{(n_2)})]$ 和 $B^{(DB)} = f_{max} \tau \cos(\alpha_R^{(n_2)} - \gamma_R) \cos \beta_R^{(n_2)}$.

我们可以发现如果提出的信道模型基于平稳状态的假设,那么也就意味着其统计特性不随时间 t 发生改变,那么此信道模型也就趋于传统的信道模型.

4 仿真结果与分析

图 3 描述本文提出的信道模型的时域相关特性随相对运动方向的变化.从图中可以发现,当天线阵元的间距逐步增大时,时域相关特性的值也会逐步减小^[11].当信道处于平稳状态时($t=0$),时域相关特性并不受 MT 和 MR 的相对运动方向的影响.然而如果该信道模型为非平稳状态时,那么当 MR 朝着 MT 运动($\varphi_v = \pi/3$)的时候,时域相关特性的值便大于 MR 背离 MT 运动($\varphi_v = 2\pi/3$)的情况.从图中还可以发现,当发射端与接收端附近运动车辆的区域半径增大时,时域相关特性的值会适当的减小.上述仿真结果与文献[12]的实验数据相吻合,进而表明上述关于本文信道模型的时域相关特性的研究符合理论依据.

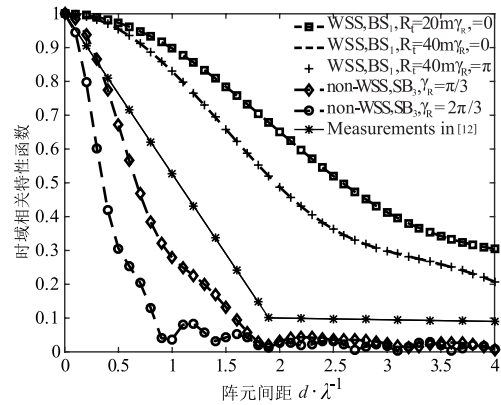


图 3 不同的相对运动方向对于时域相关特性的影响 ($a=100\text{m}$, $b=80\text{m}$, $D=160\text{m}$, $R_t=R_r=40\text{m}$, $f_c=5.4\text{GHz}$, 以及 $\psi_T=\theta_T=\psi_R=\theta_R=\pi/3$)

图 4 描述本文提出的信道模型的多普勒功率谱分布随相对运动方向的变化.从图中可以发现,当 MR 垂直于直达路径 LoS 运动于传统的车载信道模型^[2]中时($\gamma_R = \pi/2$),多普勒功率谱分布会伴随着频率零点($|f'|=0$)左右对称.然而,在本文提出的非平稳几何信道模型中,多普勒功率谱则是往频率零点的左边偏移.此时可以得出结论,多普勒功率谱分布伴随着相对运动时间 t 的增加而逐步朝着左端偏移.除此之外,当 MR

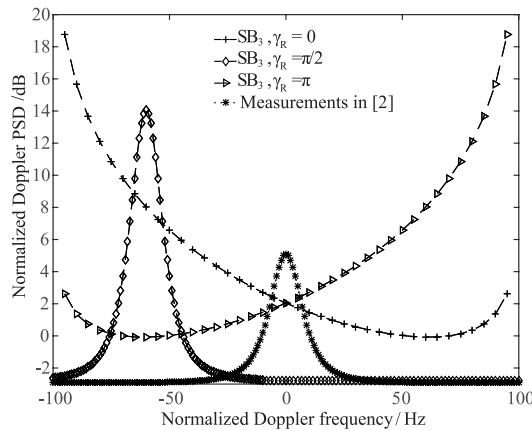


图4 不同的相对运动方向对于多普勒功率谱分布的影响
($a=100\text{m}$, $b=80\text{m}$, $D=160\text{m}$, $R_t=R_r=40\text{m}$, $f_c=5.4\text{GHz}$,
 $f_{\max}=100\text{Hz}$, 以及 $\psi_T=\theta_T=\psi_R=\theta_R=\pi/3$)

朝着 MT 的方向运动时,多普勒功率谱分布则逐步朝着频率的正方向偏移。上述仿真结果与文献[12]的结果相吻合,进而验证了上述多普勒功率谱分布的正确性。

5 总结

本文提出一种三维空间车载几何信道模型。研究分析 MT 和 MR 附近运动的车辆以及路边的建筑物对于该信道模型的统计特性的影响。仿真结果表明,当 MT 和 MR 处于不同的相对运动时间内,本文所提出的信道模型呈现出不同的统计特性。通过改变参数,本文提出的信道模型可以有效地描述室外宏小区以及室内微小区等各种移动通信环境。结合本文的仿真结果,我们可以发现时域相关特性以及功率谱分布在很大程度上受到信道参数以及移动属性的影响。最后,本文的仿真结果和过去测量数据以及经典结果相吻合,进而验证了本文仿真结果的正确性。

参考文献

- [1] DOCOMO 5G White Paper:5G radio access:requirements, concept and technologies [OL]. https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_white_Paper.pdf,2014.
- [2] Avazov N, Patzold M. A geometric street scattering channel model for car-to-car communication systems[J]. IEEE International Conf. on Advanced Technol. for Commun., Da Nang, Vietnam,2011(2-4):224-230.
- [3] Jiang H,Zhang Z C,Dang J,L Wu. Analysis of geometric multi-bounced virtual scattering channel model for dense urban street environments[J]. IEEE Trans on Veh Technol,1-1,2016,(99):1-1.
- [4] Akki A S,Haber F. A statistical model for mobile-to-mobile land communication channel [J]. IEEE Trans Veh Technol,1986,35(1):2-10.
- [5] Cheng X,Wang C X,Laurenson D I. An adaptive geometry-based stochastic model for non-isotropic MIMO mobile-to-mobile channels [J]. IEEE Trans on Wireless Commun.,2009,8(9):4824-483.
- [6] Riaz M,Khan N M,Nawaz S J. A generalized 3-D scattering channel model for spatiotemporal statistics in mobile-to-mobile communication environment [J]. IEEE Trans Veh Technol,2015,64(10):4399-4410.
- [7] Zhou J,Jiang H,Kikuchi H. Generalised three-dimensional scattering channel model and its effects on compact multiple-input and multiple-output antenna receiving systems [J]. IET Commun,2015,9(18):2177-2187.
- [8] Boban M,Vinhoza T T V,Ferreira M. Impact of vehicles as obstacles in vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Journal of Selected Areas in Commun,2011,29(1):15-28.
- [9] Chelli A,Patzold M. A non-stationary MIMO vehicle-to-vehicle channel model based on the geometrical T-junction model [A]. Wireless Commun. and Signal Processing (WCSP) [C]. Nanjing,China,2009.1-5.
- [10] Chelli A,Patzold M. A non-stationary MIMO vehicle-to-vehicle channel model derived from the geometrical street model [A]. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Fall) [C]. San Francisco,CA,USA,2011.1-6.
- [11] Wu S B,Wang C X,Haas H. A non-stationary wideband channel model for massive MIMO communication systems [J]. IEEE Trans on Wireless Commun,2015,14(3):1434-1446.
- [12] Yuan Y,Wang C X,He Y J. 3D wideband non-stationary geometry-based stochastic models for non-isotropic MIMO vehicle-to-vehicle channels[J]. IEEE Trans on Wireless Commun,2015,14(12):6883-6895.

作者简介



江浩 男,江苏南京人,本科硕士毕业于南京信息工程大学。现在东南大学信息科学与工程学院移动通信国家重点实验室攻读博士学位。主要研究方向为车载无线信道建模,第五代移动通信技术等。

张在琛(通讯作者) 男,1975年1月出生于南京,东南大学教授,博士生导师,入选教育部新世纪优秀人才支持计划和江苏省六大人才高峰计划,IEEE高级会员,中国电子学会高级会员,中国电子学会青年科学家俱乐部理事,中国通信学会青年工作委员会委员。1996年和1999年,在东南大学无线电工程系分别获得学士学位和硕士学位,2002年在香港大学电机电子工程学系获得博士学位。2002年11月至2004年9月,在东南大学信息科学与工程学院从事博士后研究,2004年起,历任副研究员、硕士生导师、研究员、教授和博士生导师。发表论文150余篇,申请国家发明专利20余项,牵头完成国家科技重大专项课题1项、国家863计划课题3项、国家自然科学基金项目1项。目前主要研究方向为光无线通信、量子通信和第五代移动通信系统。

E-mail: zezhang@seu.edu.cn