

5G 隧道环境非平稳宽带双散射簇 V2V 信道建模^{*}

周文轩¹, 周杰^{1,2}, 常代娜¹, 陈珍¹

(1. 南京信息工程大学, 电子与信息工程学院, 南京 210044; 2. 日本国立新潟大学工学部电气电子工学科, 新潟 950-2181)

摘要: 针对 5G 隧道 V2V 通信环境, 提出了一种通用的 3D 非平稳宽带双散射簇信道模型。在该模型中, 接收信号为视距(line-of-sight, LOS)传播的分量和通过双散射簇模型传播即非视距(non-line-of-sight, NLOS)传播的分量和。为了研究散射簇的非平稳特性, 引入生灭过程算法来模拟散射簇在阵列和时间轴上的出现和消失过程。通过推导空间互相关函数、时间空间自相关函数和多普勒功率谱密度等相关统计特性, 研究了散射簇的非平稳特性对 MIMO 信道的影响。数值仿真结果与先验结果较匹配, 表明该模型能够较好地描述实际 5G 隧道环境下的 V2V 通信。

关键词: 双散射簇信道模型; 5G 隧道 V2V 通信环境; 生灭过程; 非平稳特性

中图分类号: TN929.5 **doi:** 10.19734/j.issn.1001-3695.2019.11.0684

3d non-stationary wideband twin-cluster channel model for 5g tunnel communication environments

Zhou Wenxuan¹, Zhou Jie^{1,2}, Chang Daina¹, Chen Zhen¹

(1. Department of Communications, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan)

Abstract: This paper proposed a general 3D non-stationary wideband two-cluster channel model for 5G V2V tunnel communication environments. In the proposed model, the received signal consists of a sum of the components with line-of-sight (LoS) propagations and the components via the two-cluster model, i. e., non-line-of-sight (NLoS) propagations. This paper introduced a birth-death algorithm to model the appearance and disappearance of clusters on both the array and time axes to investigate the non-stationary properties of clusters. The impacts of the non-stationary properties of clusters on the multiple-input and multiple-output (MIMO) channels are investigated via statistical properties, including spatial cross-correlation functions (CCF), temporal spatial auto-correlation functions (ACF), and Doppler power spectrum densities (PSD). Numerical results of the proposed propagation properties fit the simulation results and prior measured results very well, which demonstrate that the proposed 3D model is able to describe the real 5G V2V communications in tunnel environments.

Key words: two-cluster channel model; 5g V2V tunnel communication environments; birth-death process; non-stationary properties.

0 引言

近年来, 为了发展无线智能交通系统^[1, 2], 深入研究 5G 车对车(V2V)散射环境下信号传播的统计特性引起了人们的广泛关注。在 5G V2V 通信系统中采用多输入多输出(MIMO)技术被认为是非常有益的, 因为它们能够满足 5G 无线网络^[3, 4]中日益增长的车辆通信流量需求。因此, 对 MIMO V2V 信道的统计传播特性有一个基本的了解在理论和实践方面至关重要^[5]。

在无线 MIMO 通信环境中, 来自发射端的信号在到达接收端^[6]之前先经过路边环境中的散射体; 因此, 文献[7]采用莱斯衰落信道来表征 5G V2V 通信的传播特性。数值研究表明, 基于几何的随机信道建模解的计算复杂度极低且精确度很高。因此, 研究人员更倾向于引入几何模型来研究 5G 通信场景中 V2V 信道的统计传播特性。目前已有各种几何信道模型被引入来描述无线通信场景中干扰对象的分布区域。因此, 可以根据发射端、接收端和干扰对象之间的特定几何关系, 推导出不同场景下的传播路径长度和角度参数。文献[8]提出了多次反射的散射模型来研究 V2V 信道的统计特性, 该模型采用椭圆模型来描述移动无线电通信环境中散射体的分

布区域。文献[9]中通过双环参考模型研究了 M2M 信道的时变统计特性, 该模型假设运动方向和速度是固定的。文献[10]的测量表明, 当从发射端到接收端的信号传播是 2D 模型时, 对无线通信系统性能的评估是不准确的。因此, 采用 3D 信道模型非常重要, 它包含方位角和仰角参数, 以研究信道的统计传播特性^[11]。文献[12]提出了一个 3D MIMO 信道模型以模拟空中发射端和地面接收端之间的通信场景, 该模型假设高空发射端和地面接收端位于 3D 倾斜椭球模型的焦点上。文献[13]中建立了椭圆柱散射模型对街道环境 V2V 通信信道传播特性进行了研究。此外, 文献[14]中还提出了一个用于 5G 高速列车无线通信的 3D 大规模 MIMO 信道模型, 通过研究散射簇的演化对信道在空间域、时域以及频率的非平稳特性进行建模。

在 5G V2V 信道中, 发射端、接收端以及散射体之间的几何分布是不同的, 如长方形、U 形、椭圆形、圆形和半圆形。由于许多道路需要经过隧道, 因此隧道环境中 V2V 信道的建模对于 5G 通信系统的发展具有重要意义。文献[15]中提出了车辆交通隧道的理论信道模型, 该模型表明车辆的数量、大小和位置、隧道的大小和车辆交通荷载对隧道信道的传播特性有影响。文献[16]中提出了一种用于隧道场景中

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2020-03-26 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771248)

作者简介: 周文轩(1994-), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信理论, 信道建模等(zwxuan999@163.com); 周杰(1964-), 男, 四川泸州人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为移动通信理论、无线传感网和无线接入网等; 常代娜(1995-), 女, 江盐城人, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信建模理论与技术等; 陈珍(1994-), 女, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信建模, 无线传感网等。

V2V 通信的三维宽带 MIMO 信道模型, 引入了各种共焦半椭圆模型来研究不同延迟下 V2V 信道的统计特性。在文献[17]中, 作者提出了一种用于车对车通信的宽带 MIMO 散射信道模型, 该模型假设在半圆形隧道壁上随机分布着无限数量的散射体。文献[18]中提出了采用分布式天线系统的高速列车隧道通信环境的三维非平稳理论几何模型。

在高速移动的通信场景中, 由于发送端和接收端不是静态的, 信道统计特性会随着移动时间的变化而变化^[19]。因此, 引入非平稳信道模型来研究其传播特性非常重要, 包括散射簇的时变数量, 功率, 传播延迟, 角度参数^[20]。在文献[21,22]中分别提出了一个 3D 宽带双散射簇信道模型和 2D 多共焦椭圆信道模型大规模 MIMO 通信场景, 研究了生灭过程算法, 并对散射簇的非平稳特性例如散射簇在阵列和时间轴上的出现和消失进行了建模。在文献[8]中通过平均功率演化以及散射簇内信号传播方式的更新, 改进了文献[21]中的算法, 为 5G 通信提供了统一的框架。

本文提出了一种适用于 5G 隧道环境下 V2V 通信的通用三维非平稳宽带双散射簇信道模型。研究了该模型在 5G 隧道 V2V 衰落信道中, 移动发射端(MT)和移动接收端(MR)以不同移动方向运动时刻的统计传播特性的分析和仿真结果。推导并深入研究了空间互相关函数(CCF)、时间自相关函数(ACF)和多普勒功率谱密度(PSD)等重要的统计信道传播特性。通过比较分析和仿真结果在不同移动时刻的统计传播特性, 验证了该模型的有效性, 证明了通过改变角度和模型变量, 该模型可以适用于不同的 5G V2V 通信场景。同时, 引入了生灭过程算法对散射簇在阵列和时间轴上的出现和消失建模, 使得信道模型在本质上是非平稳的。

1 系统信道模型

本节首先讨论信道模型的复信道冲激响应(CIR)。然后, 引入生灭过程算法对信道的非平稳特性建模。

1.1 复信道冲激响应

图 1 给出了一个用于隧道环境中 V2V 通信的宽带 MIMO 系统。对于双散射簇信道模型, 本文将在 MT 侧第一次反射的散射簇定义为 $Cluster_T$; 将在 MR 处最后一次反射的簇定义为 $Cluster_R$ 。其中, $Cluster_T$ 和 $Cluster_R$ 之间的传播路径被抽象为一个虚拟链路^[21]。所提出的几何模型是长度为 D 的隧道内的散射环境。假设隧道横截面是长轴为 a , 短轴为 b 的半椭圆。发射机 MT 和接收机 MR 分别为配有包含 M_T 和 M_R 个子天线的均匀线性阵列, 内部子天线之间的距离可以分别用 δ_T 和 δ_R 表示。MT 和 MR 天线阵列在 xy 平面上与 x 轴正方向形成的夹角分别为 ψ_T 和 ψ_R 。MT 和 MR 天线阵列的中心点位置分别由坐标点 (x_T, y_T, z_T) 和 (x_R, y_R, z_R) 确定。假设散射簇 $Cluster_T$ 内存在 N_1 个有效散射体, 第 n_1 ($n_1=1,2,\dots,N_1$) 个散射体定义为 $s^{(n_1)}$; 散射簇 $Cluster_R$ 内存在 N_2 个有效散射体, 第 n_2 ($n_2=1,2,\dots,N_2$) 个散射体定义为 $s^{(n_2)}$ 。 $Cluster_T$ 内的散射体 $s^{(n_1)}$ 和 $Cluster_R$ 内的散射体 $s^{(n_2)}$ 分别由坐标点 $(x_{n_1}, y_{n_1}, \frac{b}{a}\sqrt{a^2 - y_{n_1}^2})$ 和 $(x_{n_2}, y_{n_2}, \frac{b}{a}\sqrt{a^2 - y_{n_2}^2})$ 给出, 其中 $x_{n_1}, y_{n_1}, x_{n_2}$ 和 y_{n_2} 都是随机变量。

MT 的第 p ($p=1,2,\dots,M_T$) 个天线元素与 MR 的第 q ($q=1,2,\dots,M_R$) 个天线元素之间的复 CIR 可以表示为

$$h_{pq}(t, \tau) = h_{pq}^{LoS}(t) \delta(\tau - \tau^{LoS}) + h_{pq}^{NLoS}(t) \delta(\tau - \tau^{NLoS}) \quad (1)$$

其中 τ^{LoS} 表示从 MT 天线阵列中心点到 MR 天线阵列中心点的 LoS 分量的传播延迟, τ^{NLoS} 表示从 MT 天线阵列中心点到 MR 天线阵列中心点通过双散射簇模型传播的 NLoS 分量的平均传播延迟。

在式(1)中, LoS 传播分量的复 CIR 可以表示为

$$h_{pq}^{LoS}(t) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} e^{j(\varphi_0 - 2\pi f_c \xi_{pq}(t)/c)} \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} y_T \cos(\alpha_T^{LoS}(t) - \gamma_T) \cos \beta_T^{LoS}(t)} \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} y_R \cos(\alpha_R^{LoS}(t) - \gamma_R) \cos \beta_R^{LoS}(t)} \quad (2)$$

其中, φ_0 表示 LoS 分量的初始相位, 假设它为独立的随机变量且服从从 $-\pi$ 到 π 的均匀分布, 即 $\varphi_0 \sim [-\pi, \pi]$ 。上式中 κ 为莱斯因子, λ 为波长。 $\alpha_T^{LoS}(t)$ 和 $\alpha_R^{LoS}(t)$ 分别为 LoS 传播分量的时变平均发射方位角(AAoD)和到达方位角(AAoA); $\beta_T^{LoS}(t)$ 和 $\beta_R^{LoS}(t)$ 分别为 LoS 传播分量的时变平均发射仰角(EAoD)和到达仰角(EAoA)。然而, 当信号通过双散射簇模型从 MT 传播到 MR, 即通过 NLoS 传播时, 复 CIR 可以表示为^[23]:

$$h_{pq}^{NLoS}(t) = \sqrt{\frac{1}{\kappa+1}} \lim_{N_1 \rightarrow \infty} \lim_{N_2 \rightarrow \infty} \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \frac{1}{\sqrt{N_1 N_2}} \times e^{j(\varphi_{n_1} - 2\pi f_c \xi_{pq,n_1,n_2}(t)/c)} \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} y_T \cos(\alpha_T^{(n_1)}(t) - \gamma_T) \cos \beta_T^{(n_1)}(t)} \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} y_R \cos(\alpha_R^{(n_2)}(t) - \gamma_R) \cos \beta_R^{(n_2)}(t)} \quad (3)$$

其中, φ_{n_i} 表示 NLoS 分量的初始相位, 同样假设它是服从从 $-\pi$ 到 π 均匀分布的随机变量, 即 $\varphi_{n_i} \sim [-\pi, \pi]$ 。 $\alpha_T^{(n_1)}$ 和 $\beta_T^{(n_1)}$ 分别表示从 MT 发射到 $Cluster_T$ 上的散射体 $s^{(n_1)}$ 的传播路径的时变平均 AAoD 和 EAoD; 而 $\alpha_R^{(n_2)}$ 和 $\beta_R^{(n_2)}$ 分别表示经 $Cluster_R$ 上的散射体 $s^{(n_2)}$ 反射到 MR 的时变平均 AAoA 和 EAoA。

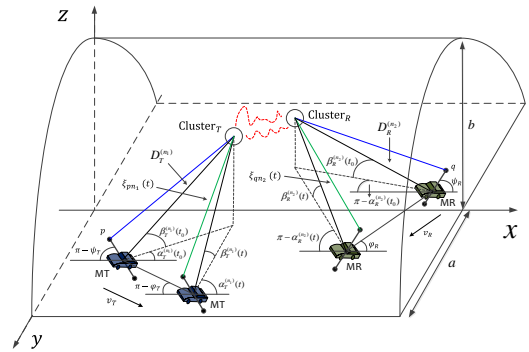


图 1 5G 隧道 V2V 通信场景 3D 宽带双簇信道模型

Fig. 1 3D wideband two-cluster channel model for 5G V2V tunnel communication scenarios

此外, $\xi_{pq,n_1,n_2}(t)$ 表示从 MT 天线阵列上第 p 个子天线经 $Cluster_T$ 上的散射体 $s^{(n_1)}$ 到 $Cluster_R$

上的散射体 $s^{(n_2)}$ 再反射到 MR 天线阵列上第 q 个子天线的传播距离, 可以表示为

$$\xi_{pq,n_1,n_2}(t) = \xi_{pn_1}(t) + \xi_{qn_2}(t) + c \tau_{n_1,n_2} \quad (4)$$

$Cluster_T$ 和 $Cluster_R$ 之间的传播空间抽象为一个虚拟链路, 假设它服从指数分布。 ξ_{pn_1} 是 MT 天线阵列上第 p 个子天线到 $Cluster_T$ 上散射体 $s^{(n_1)}$ 的传播距离; ξ_{qn_2} 是 $Cluster_R$ 上散射体 $s^{(n_2)}$ 到 MR 天线阵列上第 q 个子天线的传播距离, 分别表示为

$$\xi_{pn_1} = \xi_{T,n_1} - \frac{M_T - 2p + 1}{2} \delta_T \times \cos \beta_T^{(n_1)} \cos(\alpha_T^{(n_1)} - \psi_T) \quad (5)$$

$$\xi_{qn_2} = \xi_{R,n_2} - \frac{M_R - 2q + 1}{2} \delta_R \times \cos \beta_R^{(n_2)} \cos(\alpha_R^{(n_2)} - \psi_R) \quad (6)$$

其中, ξ_{T,n_1} 表示 MT 天线阵列中心点到的 $Cluster_T$ 上散射体 $s^{(n_1)}$ 的距离; ξ_{R,n_2} 表示 MR 天线阵列中心点到的 $Cluster_R$ 上散射体 $s^{(n_2)}$ 的距离。 ξ_{T,n_1} 和 ξ_{R,n_2} 的闭式表达式可以表示为

$$\xi_{T,n_1} = [(x_{n_1} - x_T)^2 + (y_{n_1} - y_T)^2 + (\frac{b}{a}\sqrt{a^2 - y_{n_1}^2} - z_T)^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$\xi_{R,n_2} = [(x_{n_2} - x_R)^2 + (y_{n_2} - y_R)^2 + (\frac{b}{a}\sqrt{a^2 - y_{n_2}^2} - z_R)^2]^{1/2} \quad (8)$$

已有文献[24]推导了时变角度参数来描述的无线 V2V 信道的非平稳特性。此处分别定义 $\alpha_T^{(n)}(t_0), \beta_T^{(n)}(t_0), \alpha_R^{(n)}(t_0)$ 和 $\beta_R^{(n)}(t_0)$ 为初始时刻 ($t=t_0$) 的 AAoD, EAoD, AAoA, 和 EAoA。然后, 可以推导出时变 $\alpha_T^{(n)}(t)$ 和 $\beta_T^{(n)}(t)$, 如本页最上方的式(9)和(10)所示。同时, 也可以用类似的方法推导出时变 $\alpha_R^{(n)}(t)$ 和 $\beta_R^{(n)}(t)$ 的闭式表达式。

$$\alpha_T^{(n)}(t) = \arctan \frac{D_T^{(n)} \sin \alpha_T^{(n)}(t_0) \cos \beta_T^{(n)}(t_0) - v_T t \sin \phi_T}{D_T^{(n)} \cos \alpha_T^{(n)}(t_0) \cos \beta_T^{(n)}(t_0) - v_T t \cos \phi_T} \quad (9)$$

$$\beta_T^{(n)}(t) = \arccot \left\{ \frac{1}{D_T^{(n)} \sin \beta_T^{(n)}(t_0)} \times \sqrt{\left(D_T^{(n)} \sin \alpha_T^{(n)}(t_0) \cos \beta_T^{(n)}(t_0) - v_T t \sin \phi_T \right)^2 + \left(D_T^{(n)} \sin \alpha_T^{(n)}(t_0) \cos \beta_T^{(n)}(t_0) - v_T t \cos \phi_T \right)^2} \right\} \quad (10)$$

此外, $Cluster_T$ 和 $Cluster_R$ 的有效散射体数量接近无限, 离散 AAoD $\alpha_T^{(n)}$, EAoD $\beta_T^{(n)}$, AAoA $\alpha_R^{(n)}$ 和 EAoA $\beta_R^{(n)}$ 可以分别用连续随机变量 $\alpha_T^{(1)}, \beta_T^{(1)}, \alpha_R^{(2)}$ 和 $\beta_R^{(2)}$ 表示。假设 MT 和 MR 的方位角和仰角服从冯·米赛斯分布[25], 并且它们相互独立。因此, 相应簇的到达的 PDF 可以表示为

$$f(\alpha_{T/R}^{(i)}, \beta_{T/R}^{(i)}) = \frac{1}{4\pi^2 I_0(k_1) I_0(k_2)} \times e^{k_1 \cos(\alpha_{T/R}^{(i)} - \alpha_{T/R}^{(0)})} \times e^{k_2 \cos(\beta_{T/R}^{(i)} - \beta_{T/R}^{(0)})} \quad (11)$$

$i=1,2$

其中, $\alpha_{T/R}^{(0)}$ 和 $\beta_{T/R}^{(0)}$ 分别为方位角 $\alpha_{T/R}^{(i)}$ 和仰角 $\beta_{T/R}^{(i)}$ 的平均值。 $I_0(\cdot)$ 是零阶第一类修正贝塞尔函数。此外, k_1, k_2 ($k_1, k_2 \geq 0$) 是散射簇控制相对由 $\alpha_{T/R}^{(i)}$ 和 $\beta_{T/R}^{(i)}$ 定义的平均方向的分布宽度的实值参数。

1.2 非平稳特性

为了描述所提出的 V2V 信道在隧道环境中的非平稳特性, 本节引入了生灭过程算法对散射簇在阵列和时间轴上的出现和消失过程进行建模[21]。本文提出的 5G 隧道 V2V 通信系统的阵列-时间散射簇演化可表示如下。

假设在初始瞬时时间 t 的初始散射簇分别为 $C_{T,1} = \{c_{T,x} : x=1,2,\dots,N\}$ 和 $C_{R,1} = \{c_{R,x} : x=1,2,\dots,N\}$, 其中 N 表示散射簇的初始数量, $c_{T,x}$ 和 $c_{R,x}$ 分别表示 $Cluster_T$ 和 $Cluster_R$ 。在初始瞬时时间 t , 根据在阵列轴上的生灭过程演化, 集合 $C_{T,1}$ 和 $C_{R,1}$ 中的散射簇递归生成在发射端和接收端的剩余天线的簇集合, 可以表示为

$$C_{T,p-1}(t) \xrightarrow{E} C_{T,p}(t) \quad (p=2,3,\dots,M_T) \quad (12)$$

$$C_{R,q-1}(t) \xrightarrow{E} C_{R,q}(t) \quad (q=2,3,\dots,M_R) \quad (13)$$

其中, \xrightarrow{E} 表示簇在阵列和时间轴上的演化。 $C_{T,p}(t)$ 和 $C_{R,q}(t)$ 是每个天线基于在阵列和时间轴上的生灭过程生成的散射簇集。此外, 散射簇在发射端和接收端的阵列轴上的簇集合内部的生存概率分别建模为指数函数 $P_{T,survival}$ 和 $P_{R,survival}$, 可由如下表达式给出:

$$P_{T,survival} = e^{-\lambda_G \frac{\delta_T}{D_c}} \quad (14)$$

$$P_{R,survival} = e^{-\lambda_R \frac{\delta_R}{D_c}} \quad (15)$$

其中, λ_G 和 λ_R 分别表示簇的生成率和重组率, D_c 是阵列轴上与场景相关的元素。根据生灭过程算法, 可以计算出阵列轴上新生成的散射簇 $N_{T,new}$ 和 $N_{R,new}$ 的平均数量为

$$\mathbb{E}[N_{T,new}] = \frac{\lambda_G}{\lambda_R} (1 - e^{-\frac{\delta_T}{D_c}}) \quad (16)$$

$$\mathbb{E}[N_{R,new}] = \frac{\lambda_G}{\lambda_R} (1 - e^{-\frac{\delta_R}{D_c}}) \quad (17)$$

其中, $\mathbb{E}(\cdot)$ 表示期望。在间隔时间 Δt 后, 散射簇的生存概率 $P_{survival}(\Delta t)$ 可以表示为

$$P_{survival}(\Delta t) = e^{-\lambda_R \frac{P_F(\Delta v_T + \Delta v_R)\Delta t}{D_c}} \quad (18)$$

其中, P_F 表示散射簇运动的百分比, Δv_T 和 Δv_R 分别为 MT 和

MR 的平均相对运动速度。根据平均泊松分布, 在瞬时时间 $t + \Delta t$ 时刻生成的散射簇的随机数量可以表示为

$$\mathbb{E}[N_{new}(t+\Delta t)] = \frac{\lambda_G}{\lambda_R} (1 - P_{survival}(\Delta t)) \quad (19)$$

由式(12)~(19)可以看出, 在时间演化过程后, 可以将所有散射簇划分为幸存的散射簇和新生成的散射簇。

2 模型的统计特性

本节将推导出所提出的信道模型的统计传播特性。式(2)和(3)中的复 CIR 可以描述通过 LoS 传播分量以及通过双簇模型传播的 NLoS 分量的物理性质。因此, 本文提出的隧道 V2V 信道模型的空间 CCF 可以表示为[26]:

$$\rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}(t, \delta_T, \delta_R, \Delta t) = \mathbb{E}[h_{pq}(t)h_{p'q'}^*(t+\Delta t)] \quad (20)$$

其中 * 表示复共轭运算。假设 LoS 和 NLoS 传播分量相互独立。因此, 所提出的模型中传播分量的空间 CCF 可以表示为

$$\begin{aligned} & \rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}(t, \delta_T, \delta_R, \Delta t) = \\ & \rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}^{LoS}(t, \delta_T, \delta_R, \Delta t) + \\ & \rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}^{NLoS}(t, \delta_T, \delta_R, \Delta t) \end{aligned} \quad (21)$$

将(2)式代入(21)式, 可以计算出信道 LoS 传播的空间 CCF 为

$$\begin{aligned} \rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}^{LoS}(t, \delta_T, \delta_R, \Delta t) = & \frac{K}{K+1} \times e^{j2\pi f_c(\xi_{p'q'}(t+\Delta t) - \xi_{pq}(t))} / c \times \\ & e^{j\frac{2\pi}{\lambda} v_T \Delta t \cos(\alpha_T^{(1)}(t) - \gamma_T) \cos \beta_T^{(1)}(t)} \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} v_R \Delta t \cos(\alpha_R^{(2)}(t) - \gamma_R) \cos \beta_R^{(2)}(t)} \end{aligned} \quad (22)$$

在通过双散射簇模型传播的 NLoS 分量中, 当散射簇从 $h_{pq}(t)$ 演化到 $h_{p'q'}(t)$ 时, 生存概率为 $e^{-\lambda_R \frac{|p-p|\delta_T + |q-q|\delta_R}{D_c}}$ 。因此, 将(3)式代入(21)式, 则 NLoS 传播分量的空间 CCF 可表示为

$$\begin{aligned} & \rho_{h_{pq}, h_{p'q'}}^{NLoS}(t, \delta_T, \delta_R, \Delta t) \\ & = \frac{1}{(K+1)N_T N_R} \\ & \times \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{j2\pi \frac{\xi_{p'q'}(t) - \xi_{pq}(t) - \Delta t}{\lambda}} \\ & \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} v_T \Delta t \cos(\alpha_T^{(1)} - \gamma_T) \cos \beta_T^{(1)}} \\ & \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} v_R \Delta t \cos(\alpha_R^{(2)} - \gamma_R) \cos \beta_R^{(2)}} \\ & \times e^{-\lambda_R \frac{|p-p|\delta_T + |q-q|\delta_R}{D_c}} f(\alpha_T^{(1)}, \beta_T^{(1)}) d(\alpha_T^{(1)}, \beta_T^{(1)}) \\ & \times f(\alpha_R^{(2)}, \beta_R^{(2)}) d(\alpha_R^{(2)}, \beta_R^{(2)}) \end{aligned} \quad (23)$$

将式(11)代入式(23), 可得到两类 NLoS 传播分量的空间 CCF 的闭式表达式。此外, 需要注意的是, 当令 $\delta_T = 0$ 且 $\delta_R = 0$ 时, 可以得到该模型传播路径的时间 ACF 的表达式。

3 数值结果与讨论

本节将研究该信道模型的统计传播特性, 包括空间 CCF 和时间 ACF。假设该隧道模型的参数为: $(x_T, y_T, z_T) = (20\text{m}, 2\text{m}, 1\text{m})$, $(x_R, y_R, z_R) = (40\text{m}, 2\text{m}, 1\text{m})$, $a = 6\text{m}$, $b = 4.5\text{m}$, $M_T = M_R = 32$, $N_T = N_R = 40$, $f_c = 5.9\text{GHz}$, $K = 1$, $v_T = 10\text{m/s}$, $v_R = 20\text{m/s}$, $\gamma_T = \gamma_R = \pi/4$, $\psi_T = \psi_R = \pi/4$, $\gamma_R = \pi/3$, $\lambda = 0.15\text{m}$, $\lambda_R = 4\text{m}$, $D_c = 30\text{m}$ 。

如图 2 所示, 通过将 Δt 设为 0, 可以得到三维双散射簇信道模型的空间 CCF 的绝对值。它随着接收端和发射端归一化天线间距的增大, 空间 CCF 的绝对值呈现减小的趋势。当发射端天线间距增大时, 空间 CCF 的绝对值平稳下降。同时, 随着接收端天线间距的增大, 也会出现波动。这些波动是由于接收机的运动引起的非平稳特性造成的。

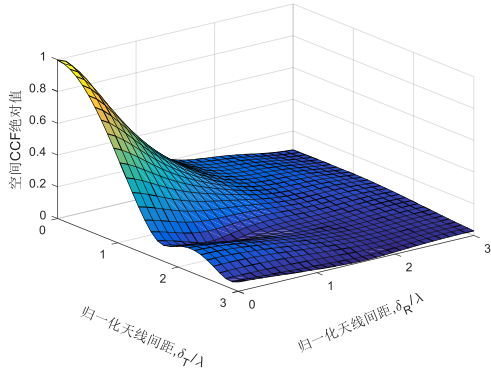


图 2 隧道 V2V 信道模型与天线间距的关系

Fig. 2 The relationship between the V2V tunnel channel model and antenna spacing

图 3 显示了在不同时刻, 不同 k_1 和 k_2 值对应的空间 CCF。从图中可以看出, 当 MT 和 MR 的运动时间 t 从 0 秒增加到 10 秒时, 空间相关性缓慢增加。需要注意的是, 参数 k_1 和 k_2 控制了冯·米赛斯分布的宽度, 并且影响了 AAoD/EAoD 和 AAoA/EAoA 的取值, 信道模型的角度参数也会影响 NLoS 传播分量, 进而影响统计传播特性的分布。从图中可以注意到, 在各向同性的情况下, 即 $k_1=k_2=5$, 当天线间距为 0 时, 空间相关性为 1。然而, 当 $k_1=k_2=0$ 且天线间距为 0 时, 空间相关性不等于 1。此外, 还可观察到所提出的空间 CCF 的仿真结果与理论结果在不同时间点上是一致的, 这验证了上述推导和仿真的正确性。

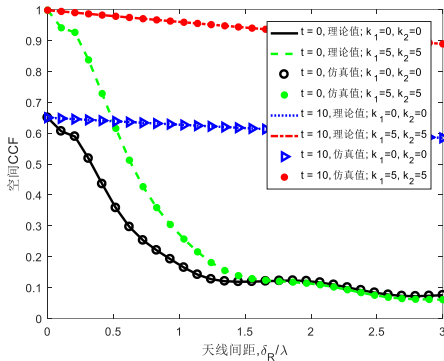


图 3 隧道 V2V 信道模型在不同时刻下不同 k_1 和 k_2 值对应的空间 CCF 理论与仿真结果

Fig. 3 Analytical and simulation results of the spatial ccfs of the V2V tunnel channel model for different k_1 and k_2 at different time instants

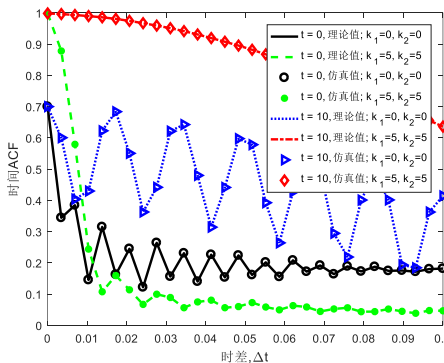


图 4 隧道 V2V 信道模型在不同时刻下不同 k_1 和 k_2 值对应的的时间 ACF 的理论与仿真结果

Fig. 4 Analytical and simulation results of the temporal acfs of the V2V tunnel channel model for different k_1 and k_2 at different time instants

如第三节所述, 在(23)式中令 $p=p'$, $q=q'$ 且 $\delta_r=\delta_R=0$

则可以推导出该隧道 V2V 信道模型的时间 ACF。图 4 研究了在不同瞬时时间 t , 不同 k_1 和 k_2 对应的的时间 ACF 的理论和仿真结果。可以看出, 该模型的时间 ACF 随着运动时间 t 从 0s 到 10s 变化呈现出不同的形式, 这与图 3 中空间 CCF 的结果分布相似。此外, 还可以注意到当参数 k_1 和 k_2 从 0 到 5 变化时, 时间相关性缓慢增加。时间相关性仿真结果与理论结果之间良好匹配, 验证了上述分析的正确性。

图 5 给出了考虑以及不考虑 LoS 传播分量时不同时刻时间 ACF 的仿真分析结果。可以看出, 时间相关性随着时间 t 从 0s 到 10s 增加而增加。此外, 当不考虑 LoS 分量时, 时间相关性比莱斯信道要低得多。

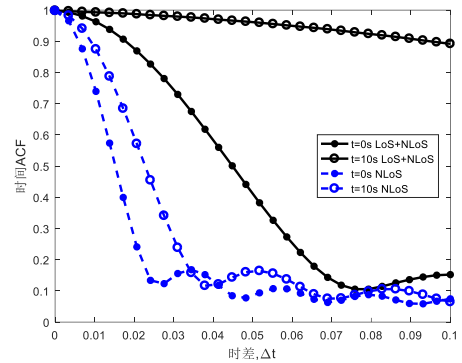


图 5 隧道 V2V 信道模型在不同时刻下有/无 LoS 分量时的时间 ACF 分析结果

Fig. 5 Analytical results of the temporal acfs of the V2V tunnel channel model with/without the los component at different time instants

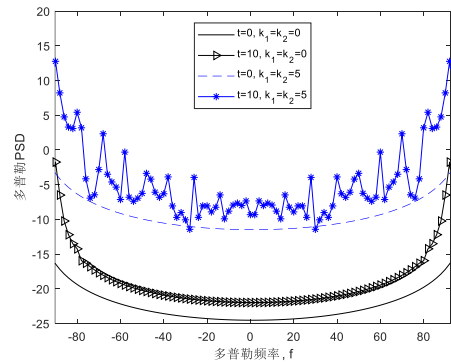


图 6 隧道 V2V 信道模型在不同时刻下不同 k_1 和 k_2 值对应的的多普勒 PSD 分析结果。

Fig. 6 Analytical results of the Doppler psds of the proposed V2V tunnel channel model for different k_1 and k_2 at different time instants

图 6 显示了在不同时刻, 不同 k_1 和 k_2 值对应的的多普勒 PSD 仿真结果。可以看出, 提出的多普勒谱的分布曲线随时间 t 漂移, 这是由 MT 和 MR 的运动引起的。从图中可以观察到, 当时间 t 从 0s 到 10s 变化时, 多普勒 PSD 略有增加。此外, 还可以注意到当参数 k_1 和 k_2 从 0 到 5 增加时, 所提出的隧道 V2V 信道模型的多普勒 PSD 也相应的增加。

4 结束语

本文为 5G 隧道环境下的 V2V 通信提供了一个通用的三维非平稳宽带双散射簇信道模型。在该模型中, 通过引入生死过程算法对散射簇在阵列和时间轴上的出现和消失过程进行建模。在考虑生死过程算法的基础上, 推导并研究了空间 CCF 和时间 ACF 的闭式表达式。仿真分析结果表明, 该信道模型的空间 CCF 随运动时间 t 的变化呈现出不同的曲线特性。该模型由于 MT 和 MR 运动而引起的多普勒 PSD 的分布曲线也随着运动时间 t 而偏移。传播特性的仿真结果与理论结果一致, 证明该模型能够正确描述 5G 隧道环境中的 V2V 通信。

参考文献:

- [1] 周杰, 陈珍, 薛玉洁. 隧道环境的统计物理信道特征参数提取与计算 [J]. 华中科技大学学报, 2019, 47 (7): 1-7. (Zhou Jie, Chen Zhen, Xue Yujie. Extraction and calculation of statistical physical channel characteristic parameters in tunnel environment [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2019, 47 (7): 1-5.)
- [2] Zhang Ning, Yang Peng, Ren Jyu, *et al.* Synergy of big data and 5G wireless networks: Opportunities, approaches, and challenges [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25 (1): 12-18.
- [3] Tian Mengqian, Zhang Jianing, Zhao Yyu, *et al.* Switch and inverter based hybrid precoding algorithm for mmwave massive MIMO system: Analysis on sum-rate and energy-efficiency [J]. IEEE Access, 2019, 7: 49448-49455.
- [4] 陈珍, 周杰, 李豪杰. 宽带 MIMO 车载通信系统的信道建模 [J]. 解放军理工大学学报, 2018. (Chen Zhen, Zhou Jie, Li Haojie. Channel modeling for wideband MIMO vehicle communication system [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2018.)
- [5] Jiang Hao, Zhang Zaichen, Dang Jian, *et al.* A novel 3-D massive MIMO channel model for vehicle-to-vehicle communication environments [J]. IEEE TransCommunications, 2018, 66 (1): 79-90.
- [6] Jiang Hao, Zhang Zaichen, Dang Jian, *et al.* Analysis of geometric multibounced virtual scattering channel model for dense urban street environments [J]. IEEE Trans. Vehicular. Technology, 2017, 66 (3): 1903-1912.
- [7] Beaulieu N C, Xie Jiandong. A novel fading model for channels with multiple dominant specular components [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4 (1): 54-57.
- [8] Wu Shangbin, Wang Chengxiang, Aggoune E-H M, *et al.* A general 3-D non-stationary 5G wireless channel model [J]. IEEE Trans on Communications, 2018, 66 (7): 3065-3078.
- [9] He Ruisi, Ai Bo, Stüber G L, *et al.* Mobility model-based nonstationary mobile-to-mobile channel modeling [J]. IEEE Trans on Communications, 2018, 17 (7): 4388-4400.
- [10] Zhang Jianhua, Pan Chun, Pei Feng, *et al.* Three-dimensional fading channel models: A survey of elevation angle research [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52 (6): 218-226.
- [11] Yyu Yawei, Zhang Jianhua, Smith P J, *et al.* Theoretical analysis of 3-D channel spatial correlation and capacity [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 22 (2): 420-423.
- [12] Jiang Hao, Zhang Zaichen, Gui Guan. Three-dimensional non-stationary wideband geometry-based UAV channel model for A2G communication environments [J]. IEEE Access, 2019, 7: 26116-26122.
- [13] 何怡刚, 许越, 李冰, 等. 街道环境 V2V 通信信道建模与容量分析 [J]. 计算机应用研究, 2019, 36 (10): 3072-3075. (He Yigang, Xyu Yue, Li Bing, *et al.* Street environment V2V communication channel modeling and capacity analysis [J]. Application Research of Computers, 2019, 36 (10): 3072-3075.)
- [14] Liu Yyu, Wang Chengxiang, Huang Jie, *et al.* Novel 3-D nonstationary mmWave massive MIMO channel models for 5G high-speed train wireless communications [J]. IEEE Trans. Vehicular. Technology, 2019, 68 (3): 2077-2086.
- [15] Sun Zhi, Akyildiz I F. A mode-based approach for channel modeling in underground tunnels under the impact of vehicular traffic flow [J]. IEEE Trans on Wireless Communications. 2011, 10 (10): 3222-3231.
- [16] Jiang Hao, Zhang Zaichen, Wu Liang, *et al.* A 3-D non-stationary wideband geometry-based channel model for MIMO vehicle-to-vehicle communications in tunnel environments [J]. IEEE Trans. Vehicular. Technology, 2019, 68 (7): 6257-6271.
- [17] Avazov N, Pätzold M. A novel wideband MIMO car-to-car channel model based on a geometrical semi-circular tunnel scattering model [J]. IEEE Trans. Vehicular. Technology, 2016, 65 (3): 1070-1082.
- [18] Liu Yyu, Wang Chengxiang, Lopez C F, *et al.* 3D non-stationary wideband tunnel channel models for 5G high-speed train wireless communications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019: 1-14.
- [19] Al-Hourani A, Gomez K. Modeling cellular-to-UAV path-LoSs for suburban environments. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7 (1): 82-85.
- [20] Chang Hengtai, Bian Ji, Wang Chengxiang, *et al.* A 3D non-stationary wideband GBSM for low-altitude UAV-to-ground V2V MIMO channels [J]. IEEE Access, 2019, 7: 70719-70732.
- [21] Wu Shangbin, Wang Chengxiang, Aggoune E-H M, *et al.* A nonstationary 3-D wideband twin-cluster model for 5G massive MIMO channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32 (6): 1207-1218.
- [22] Wu Shangbin, Wang Chengxiang, Haas H, *et al.* A non-stationary wideband channel model for massive MIMO communication systems [J]. IEEE Trans on Wireless Communications. 2015, 14 (3): 1434-1446.
- [23] Jiang Hao, Zhang Zaichen, Gui Guan. A novel estimated wideband geometry-based vehicle-to-vehicle channel model using an AoD and AoA estimation algorithm [J]. IEEE Access, 2019, 7: 35124-35131.
- [24] Yuan Yi, Wang Chengxiang, He Yejun, *et al.* 3D wideband non-stationary geometry-based stochastic models for nonisotropic MIMO vehicle-to-vehicle channels [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2015, 14 (12): 6883-6895.
- [25] A. Abdi, J. A. Barger, M. Kaveh. A parametric model for the distribution of the angle of arrival and the associated correlation function and power spectrum at the mobile station [J]. IEEE Trans. Vehicular. Technology, 2002, 51 (3): 425-434.
- [26] Jiang Hao, Zhang Zaichen, Wu Liang, *et al.* A non-stationary geometry-based scattering vehicle-to-vehicle MIMO channel model [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22 (7): 1510-1513.