

文章编号:1007-5321(2021)02-0124-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-251

城市环境下基于几何随机模型的车对车信道建模

毛景民, 韦再雪, 邢冰倩, 刘凯桢, 赵 屹

(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 城市环境中的通信信道会受到各种障碍物的干扰,交叉路口场景下的散射体往往不是单一均匀分布的. 对此,提出了一种适用于交叉路口的 Y 形随机模型. 基于最大时延限定的椭球范围,建立了道路上车辆散射体和道路旁边楼房散射体的几何随机模型. 在此模型中,假设道路两侧的静态散射体在楼房区域呈指数分布,移动散射体在车道区域均匀分布. 为了贴近真实环境,采用离散马尔可夫过程模拟散射体的时变特性. 推导并仿真了不同分支夹角场景下的到达角、时延功率谱、时间自相关函数、空间互相关函数、多普勒功率谱密度并进行了对比分析. 分析结果表明,基于几何的随机信道模型具有通用性,可通过调整信道参数,用于各种城市环境中的通信场景建模.

关 键 词: 城市街道; Y 型模型; 几何随机模型; 信道特征

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

In Urban Environment Vehicle-to-Vehicle Channel Modeling Based on Geometric Random Model

MAO Jing-min, WEI Zai-xue, XING Bing-qian, LIU Kai-zhen, ZHAO Yi

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In complex and changeable urban environment, the communication channel is interfered by various obstacles. The model of the vehicle-to-vehicle channel in the intersection scene is built. In this scene, the scatterers are not uniformly distributed. A Y-shaped random model suitable for intersections is proposed. Based on the ellipsoid range limited by the maximum time delay, the geometric random model is established for the vehicle scatterer on the road and the building scatterers beside the road. In this model, the static scatterers on both sides of the road is assumed to be exponentially distributed in the building area, and the moving scatterers are uniformly distributed in the lane area. In order to get close to the real environment, the discrete Markov process is used to simulate the time-varying characteristics of the scatterers. The arrival angle, the delay power spectrum, the time autocorrelation function, the space cross-correlation function, and the Doppler power spectrum density are deduced and simulated. In addition, the random channel model based on geometry has enough generality and can be used to model communication scenes in various urban environments by adjusting channel parameters.

Key words: urban street; Y-shaped scattering model; geometric random model; channel characteristics

随着社会经济的发展,在城市环境中车对车通信的应用越来越广泛. 因为车对车通信具有易部

署、安全性好和灵活度高的特点,被广泛地应用在协同驾驶、事故预警、车辆 Ad hoc 网络、智能车联网等

收稿日期: 2020-11-22

作者简介: 毛景民(1996—), 男, 硕士生.

通信作者: 韦再雪(1976—), 女, 讲师, E-mail: zaixuew@bupt.edu.cn.

方面。目前已经在一些试点地区开展了无人驾驶出租车的业务,无人驾驶出租车以其高效、安全、低成本和全新的体验,正在不断给传统行业带来颠覆性冲击。在密集的城市环境中,车辆通信容易受到地形和散射源的影响,有必要对车对车的通信信道进行研究,以提高系统的性能。

针对车对车的通信信道模型,Ameen 等^[1]对车联网通信进行了总体介绍;Li 等^[2]建立了通用的车对车信道模型,分析了不同车道上车流量的密度对信道的影响;Askar 等^[3]提出了二维十字型的街道模型;Zhao 等^[4]也给出了二维 T 型的街道模型;Chang 等^[5]给出了一个椭圆模型,其中发射端和接收端位于椭圆的焦点处,在椭圆上任意一点到两焦点的距离之和为定值,所以经过同一椭圆上的任意一个散射体的单次反射的信道时延相同;Liang 等^[6]将模型应用在车对车的通信信道;为了验证模型的正确性,Cheng 等^[7]给出了实测数据;地面的倾斜度也会影响车对车的通信,Cui 等^[8]给出了山地模型;楼房对信道的影响也不可忽略,所以 Wang 等^[9-10]考虑了楼房散射体的情况,提出了通用的街道模型;Zhang 等^[11]考虑了楼房散射体中不同散射体分布的特点。目前,鲜有针对城市交叉路口场景的车对车通信信道模型进行深入研究。在通用街道模型中仅考虑单一的障碍物,散射体往往是均匀分布的,虽然简单,但并不能准确描述复杂的街道场景,所以笔者提出了一个适用于普通街道场景下车对车通信信道模型,并结合了椭圆模型和 Y 型街道模型的特点,根据街道模型散射体的种类、分布特点及相对运动时的影响进行设计,能够更加贴合真实街道场景下车对车的通信信道。

为了更好地模拟交叉路口,不再让散射服从单一的均匀分布,将文献[6]中的椭圆模型推广到三维,并基于文献[4]中的 T 型街道模型进行扩展,建立了一种考虑最大时延限制的通用 Y 型街道模型,用于描述交叉路口的街道模型。在此基础上,根据环境中对散射构成影响与否建立了基于马尔可夫过程的散射体生灭模型,并针对不同类型的散射体分别设置不同的参数。具体而言,设计了街道散射体和车辆散射体 2 种模型,以逼近实际的传播环境。基于所构建的几何模型,推导和仿真了模型的到达角、时延功率谱、时间自相关函数、空间互相关函数、多普勒功率谱密度,并对仿真结果进行了对比分析。

1 Y 型车对车几何模型

1.1 信道模型建立

所设计的车对车的通信系统如图 1(a)所示。发射端(Tx)的天线阵元数为 n_t ,位于交叉路口的子路口,而接收端(Rx)安装在交叉路口的主路口,天线阵元数为 n_r 。为了简化计算,采用 2×2 UAV-MIMO(unmanned aerial vehicle multiple-input multiple-output)信道,即假设 $n_t = n_r = 2$ 。模型以收发机为焦点构建椭球结构,椭球范围由发射端和接

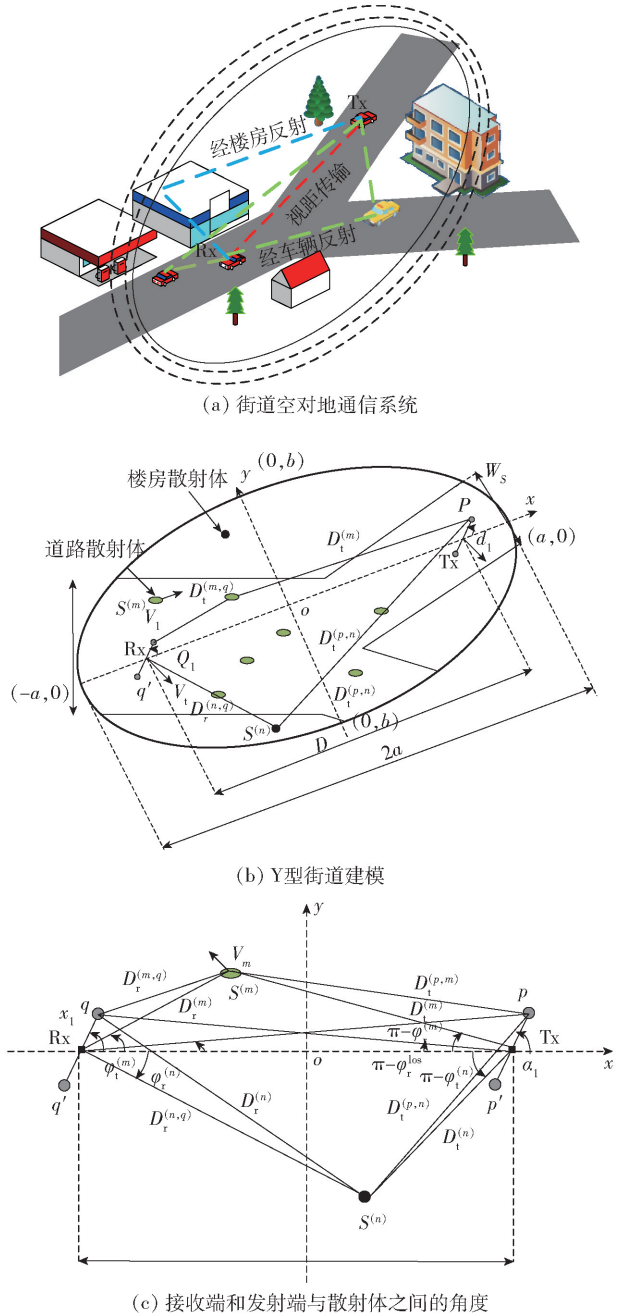


图 1 Y 型车对车的几何模型

收端间信号传播允许的最大时延限定. 在街道模型中,地平面上的散射可以分为2部分:一是道路上移动的车辆产生的散射;另一个是建筑物、树木产生的散射. 已知树木的平均高度大于道路上的移动物,此时的散射体分布可抽象为图2. 接收端和发射端分别在椭圆的焦点处,椭圆表面代表恒定的时延,此时长轴和短轴分别表示为 a 和 b . 假设发射端和接收端的车辆以恒定速度 v_t 和 v_r 移动,水平速度方向分别用 γ_t 和 γ_r 表示,发射和接收端速度矢量的表达式分别为

$$\mathbf{v}_t = v_t [\cos \gamma_t \quad \sin \gamma_t \quad 0]$$

$$\mathbf{v}_r = v_r [\cos \gamma_r \quad \sin \gamma_r \quad 0]$$

街道主流口的宽度为 W_d ,子路口的宽度为 W_s .

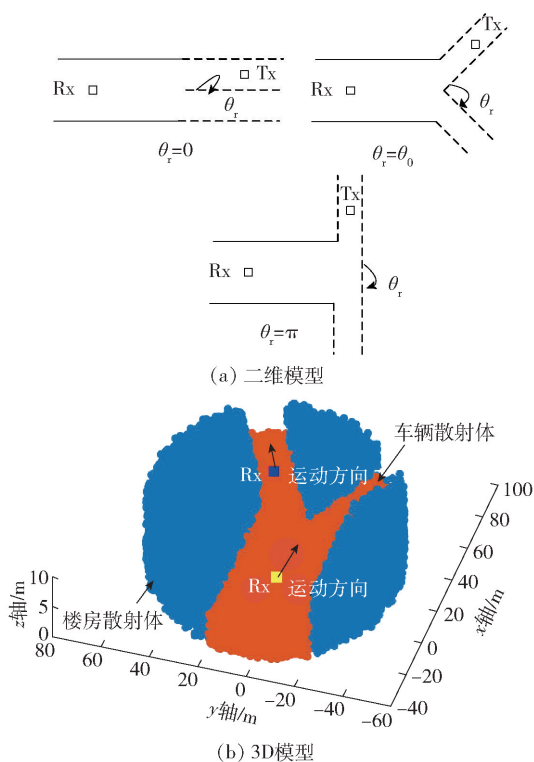


图2 Y型街道模型变形

接收端和发射端与散射体之间夹角的几何关系如图1(c)所示. $\varphi_t^{(n)}$ 和 $\varphi_r^{(n)}$ 分别为楼房散射体反射分量的到达角和离开角. $\varphi_t^{(m)}$ 和 $\varphi_r^{(m)}$ 分别为车辆散射体反射分量的到达角和离开角. α_t 和 α_r 分别表示发射天线阵和接收天线阵的倾斜角. 发射端和接收端处的天线尺寸分别为 δ_t 和 δ_r . 楼房散射体的平均高度一般高于车辆散射体的平均高度,并且服从指数分布,存在于楼房区域,随着时延的增大,散射体的数量呈指数递减. 车辆散射体均匀分布在道路区域,移动散射体的速度符合双峰高斯混合模

型. 车辆散射体的运动方向角度可以用 γ_m 表示,速度矢量表示为

$$\mathbf{v}_m = v_m [\cos \gamma_m \quad \sin \gamma_m \quad 0]$$

1.2 新型Y型模型

提出了一种适用于交叉路口的Y形随机模型, Y型街道是基于文献[3]中十字型和文献[4]中T型模型扩展得到的. 图2(a)所示的 θ_r 为Y型街道中2个子路口的夹角,当 $\theta_r = 0$ 时,Y型街道变为水平街道;当 $\theta_r = \pi$ 时,Y型街道变为T型街道. 通过以上例子说明,通过改变 θ_r ,Y型街道能变为一般的街道模型. 通过Matlab绘制出Y型街道的3D模型,模型的结构包括发射端、接收端、楼房散射体和车辆散射体,如图2(b)所示. 当 $\theta_r = 0$ 时,模型中的散射体关于水平街道轴对称分布. 当 $\theta_r \neq 0$ 时,因为发射端位于子路口,接收端位于主流口,构建的椭圆是倾斜的,椭圆范围包含的散射体不再对称.

1.3 生灭过程

接收端和发射端的移动性会导致散射体在按航空通信坐标系构建的最大时延限定的椭球范围内运动. 为了描述这种模型移动的特征,引入离散马尔可夫过程对接收端运动时的非平稳过程进行描述,马尔可夫过程用来评估时刻 $t \sim t + \Delta t$ 的信道变化. $t \sim t + \Delta t$ 时刻的信道变化总量为

$$\delta_p(t, \Delta t) = \delta_r(t, \Delta t) + \delta_t(t, \Delta t) \quad (1)$$

$\delta_t(t, \Delta t)$ 和 $\delta_r(t, \Delta t)$ 分别为由发射端和接收端移动产生的变化,能够通过式(2)(3)简化得到.

$$\delta_t(t, \Delta t) = v_t(t) \Delta t \quad (2)$$

$$\delta_r(t, \Delta t) = v_r(t) \Delta t \quad (3)$$

由离散马尔可夫过程的特性可知,当时刻为 t 时,新生成的簇和现存的簇只与前一时刻 $t - \Delta t$ 有关. 用簇生成速率(λ_g)和簇的死亡速率(λ_r)来描述马尔可夫过程,初始散射体簇的数量和整个过程中所期望的散射数量为

$$E[L(t)] = \frac{\lambda_g}{\lambda_r} \quad (4)$$

其中 $L(t)$ 为时变簇的数量.

从 $t \sim t + \Delta t$ 时刻,簇依旧存活概率可表示为

$$P_{\text{sur}}(\Delta t) = e^{-\lambda_r \frac{\delta(t, \Delta t)}{D_c}} \quad (5)$$

其中相关系数 D_c 取决于不同的场景. 在 $t \sim t + \Delta t$ 时间段内,马尔可夫新生成簇的期望为

$$E[L_{\text{new}}(\Delta t)] = \frac{\lambda_g}{\lambda_r} (1 - e^{-\lambda_r \frac{\delta(t, \Delta t)}{D_c}}) \quad (6)$$

对于新簇的生成过程,首先用 $\tau_l = \tau_{\text{los}}(t) + \tilde{\tau}_l$

定义时延, 其中 $\hat{\tau}_l$ 为生成簇的附加时延, 服从指数分布, 如

$$\hat{\tau}_l = -r_\tau \delta \ln u_l \quad (7)$$

其中: r_τ, δ 分别表示时延的标量和时延的尺度, u_l 服从均匀分布(0,1). 视距径的时变时延为

$$\tau_{\text{los}}(t) = D_{\text{los}}(t)/c \quad (8)$$

$$D_{\text{los}}(t) = \| \mathbf{L}_t(t) - \mathbf{L}_r(t) \| \quad (9)$$

其中: $\mathbf{L}_t(t), \mathbf{L}_r(t)$ 分别为无人机和地面接收端的位置, 有

$$\mathbf{L}_t(t) = \mathbf{L}_t(t - \Delta t) + \mathbf{v}_t \Delta t - \mathbf{v}_r \Delta t \quad (10)$$

$$\mathbf{L}_r(t) = \mathbf{L}_r(t - \Delta t) \quad (11)$$

生成初始散射簇的数量为 $E[L(t)]$, 随着时间的变化, 在每个时间段(Δt) 开始, 死亡的散射簇被从冲激响应中移除, 新生成的簇被添加到冲激响应中, 依旧存活的簇参数将在 Δt 时间段内发生变化.

2 信道特征参数

多普勒频移 f^n 由接收端和发射端移动产生, f^m 由接收端和发射端移动和移动散射体产生, 它们可以表示为

$$f^n(t) = f_c/c [V_t(\cos(\alpha_t^{(n)} - \alpha_t) \cos \beta_l \cos \beta_l^{(n)} + \sin \beta_l \sin \beta_l^{(n)}) + V_r(\cos(\alpha_r^{(n)} - \alpha_r) \cos \beta_r \cos \beta_r^{(n)} + \sin \beta_r \sin \beta_r^{(n)})] \quad (12)$$

$$f^m(t) = f_c/c [V_t(\cos(\alpha_t^{(m)} - \alpha_t) \cos \beta_l \cos \beta_l^{(m)} + \sin \beta_l \sin \beta_l^{(m)}) - V_m[\cos(\varphi_t^{(m)} - \alpha_m) \cos \beta_m \cos \varepsilon_t^{(m)} + \sin \beta_m \sin \varepsilon_t^{(m)} + \cos(\varphi_r^{(m)} - \alpha_m) \cos \beta_m \cos \varepsilon_r^{(m)} + \sin \beta_m \sin \varepsilon_r^{(m)}] + V_r[\cos(\alpha_r^{(m)} - \alpha_r) \cos \beta_r \cos \beta_r^{(m)} + \sin \beta_r \sin \beta_r^{(m)}]] \quad (13)$$

接收端的天线 p 和发射端的天线 q 之间的 MI-MO 衰落信道的复信道冲激响应(CIR, channel impulse response)可以表示为

$$h_{pq}(t, \tau) = \sum_{l=1}^{L(t)} \sqrt{P_l(t)} h_{l,pq}(t) \delta(\tau - \tau_l)$$

其中: $P_l(t)$ 为第 l^{th} 抽头的时变功率, $h_{l,pq}(t)$ 为第 l^{th} 抽头的复系数, τ_l 为第 l^{th} 抽头的时延. 在上述 CIR 表达式中, CIR 是由几个不同传播时延和功率的抽头叠加而成, 并且同一抽头中的信道分量具有相同的时延. 对于视距冲激响应, 楼房散射体冲激响应和车辆冲激响应为

$$h_{pq}^{\text{los}}(t, \tau) = \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j2\pi f_{\text{los}}(t) - j\frac{2\pi}{\lambda} D(p,q)(t)} \delta(\tau - \tau_{\text{los}}) \quad (14)$$

$$h_{pq}^M(t, \tau) = \sqrt{\frac{\eta^M}{K+1}} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \times \sum_{n=1}^N e^{j2\pi f^M(t) - j\frac{2\pi}{\lambda} (D\{p,m\}(t) + D\{m,q\}(t)) + j\theta^n} \delta(\tau - \tau_{pq}^n) \quad (15)$$

$$h_{pq}^S(t, \tau) = \sqrt{\frac{\eta^S}{K+1}} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \times \sum_{n=1}^N e^{j2\pi f^S(t) - j\frac{2\pi}{\lambda} (D\{p,n\}(t) + D\{n,q\}(t)) + j\theta^n} \delta(\tau - \tau_{pq}^n) \quad (16)$$

其中 K 为莱斯衰落中的 K 因子. 根据能量守恒准则, η^M 和 η^S 满足 $\eta^S + \eta^M = 1$. $h_{pq}^{\text{los}}(t, \tau)$ 是因为视距产生的信道冲激响应, $h_{pq}^M(t, \tau)$ 和 $h_{pq}^S(t, \tau)$ 分别为车辆和楼房散射体产生的信道冲激响应. 符号定义如表 1 所示.

表 1 符号定义

符号	含义
$v_{v/r}$	发射端/接收端的运动速度
$D_r^{(n,q)}$	接收端天线 q 到散射体 n 的距离
$D_t^{(p,n)}$	发射端天线 p 到散射体 n 的距离
$\alpha_t^{\text{los}}(\beta_t^{\text{los}})$	视距信道离开角的水平角(仰视角)
$\alpha_r^{\text{los}}(\beta_r^{\text{los}})$	视距信道到达角的水平角(仰视角)
$\alpha_t^{(n)}(\beta_t^{(n)})$	散射径离开角的水平角(仰视角)
$\alpha_r^{(n)}(\beta_r^{(n)})$	散射径到达角的水平角(仰视角)
f_c	信道的载波频率
u	发射端和接收端之间的信道数量

通过信道的冲激响应可以得到功率时延谱, 有

$$p(\Delta t) = E_t \left\{ \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u |h(i, t, \Delta t)|^2 \right\} \quad (17)$$

时间间隔为 Δt , 空时自相关函数为

$$\rho_{h_{l_1,pq} h_{l_2,p'q'}}(t, \Delta t) = E[h_{l_1,pq}(t) h_{l_2,p'q'}^*(t - \Delta t)]$$

其中 $(\cdot)^*$ 是复共轭运算. 由于相关特性完全由每个抽头的相关特性决定, 并且假设不同簇之间不存在相关性. 视距抽头的空时自相关函数可以写成

$$\rho_{h_{l_1,pq} h_{l_1,p'q'}}(t, \Delta t) = e^{-jk_0(D(p,q) - D(p',q'))} e^{j2\pi f_{\text{los}} \Delta t} \quad (18)$$

其他抽头由不同散射体产生, 可写成

$$\begin{aligned} \rho_{h_{l_2,pq} h_{l_2,p'q'}}(t, \Delta t) = & \int_0^{2\pi} \int_{\beta_u - \beta_m}^{\beta_u + \beta_m} e^{-jk_0(D\{p,m\} + D\{m,q\} - D\{p',m\} - D\{m,q'\})} e^{j2\pi f^m \Delta t} \times \\ & f(\alpha_r^m) f(\beta_r^m) d\alpha_r^m d\beta_r^m \\ & \rho_{h_{l_3,pq} h_{l_3,p'q'}}(t, \Delta t) = \end{aligned} \quad (19)$$

$$\int_0^{2\pi} \int_{\beta_u - \beta_m}^{\beta_u + \beta_m} e^{-jk_0(D\{p,n\} + D\{q,n\} - D\{p',n\} - D\{q',n\})} e^{j2\pi f_n} \times f(\alpha_r^n) f(\beta_r^n) d\alpha_r^n d\beta_r^n \quad (20)$$

该信道模型的多普勒时延谱密度可以通过对时间间隔空时自相关函数经过傅里叶变换计算得到,而总的多普勒功率谱密度可以通过将每个抽头的多普勒功率谱密度相加得到

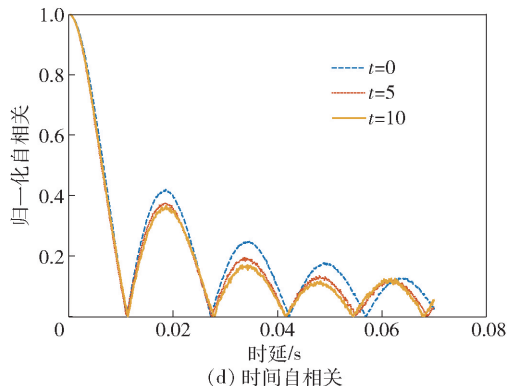
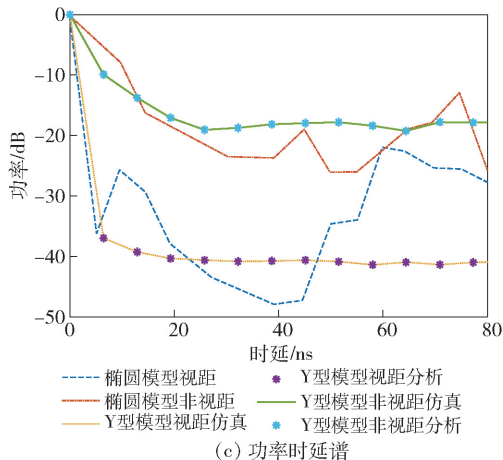
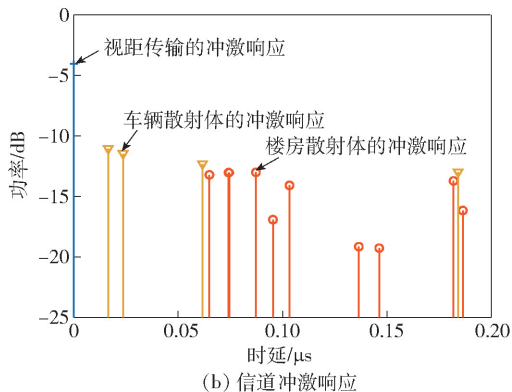
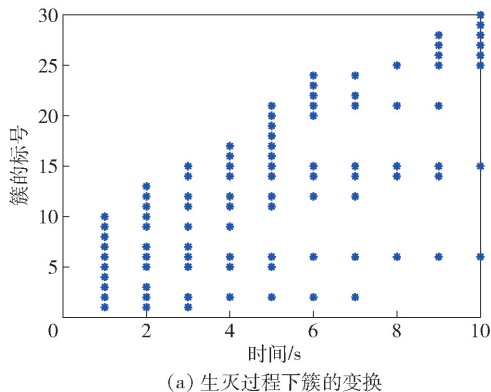
$$S_{h_{pq}h_{p'q'}}(f_D) = \sum_{l=1}^L P_l(t) F\{\rho_{h_{l,pq}h_{l,p'q'}}(\tau)\} \quad (21)$$

其中 f_D 为多普勒频移, $P_l(t)$ 为时变 l^{th} 抽头功率, 每个抽头的多普勒 PSD 可计算为

$$S_{h_{pq}h_{p'q'}}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{h_{l,pq}h_{l,p'q'}}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (22)$$

3 仿真结果和分析

在仿真中,假定一个车对车通信场景的参数如下 $f_c = 2.5$ GHz, $\delta_t = \delta_r = \lambda$, $\alpha_t = \alpha_r = \pi/2$, $\gamma_r = 0$, $\gamma_t = \pi/4$, $W_s = 20$ m, $W_d = 20$ m, $\theta_r = \pi/4$, $v_t = 15$ m/s, $v_r = 15$ m/s. 发射端和接收端最初的位置为 $x_t(t_0) = 60$ m, $y_t(t_0) = 20$ m, $x_r(t_0) = 0$, $y_r(t_0) = 0$. 双峰高斯模型的参数为 $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.5$,



$m_{1v_s} = 4$ m/s, $m_{2v_s} = 8$ m/s, $\delta_{1v_s} = \delta_{2v_s} = 2$. 在视距场景中, 设置莱斯因子 K 均值和方差分别为 $\mu_k = 14.6$ dB 和 $\delta_k = 8$ dB.

3.1 生灭过程仿真

图 3(a) 所示为马尔可夫过程下簇的变换, 此时取 $L(t_0) = 10$, $\lambda_g = 0.8$, $\lambda_r = 0.08$, $D_c = 10$, $v_t = 15$ m/s, $v_r = 5$ m/s. 从图中可以观察到, 现存的簇会死亡, 同时也会有新的簇生成, 整个过程期望的簇数为 10 个.

从发射端到接收端的 3 种冲激响应包括视距冲激响应、车辆散射体的冲激响应和楼房散射冲激响应, 如图 3(b) 所示. 可以看出, 车辆散射体的冲激响应分布在整个时延区域, 楼房散射体位于时延 60 ns 之后的区域, 同时, 车辆散射体的冲激响应大多处于较低的时延区域, 楼房散射体处于较高的时延区域. 由于道路呈 Y 型, 有较少的车辆冲激响应位于时延较大处.

椭圆模型和 Y 型模型的功率时延谱的比较如图 3(c) 所示. 视距情况下功率时延谱曲线的动态波动大于非视距的情况, 椭圆模型和 Y 型模型有相似波动, 但是 Y 型模型下降的趋势缓慢. 图 3(d) 所

图3 生灭过程仿真结果

示为不同时刻下自相关的趋势. 可见,在加入马尔可夫过程的场景下,经过的时间越长,旁瓣越小,主瓣有收窄的趋势.

3.2 Y 型模型的仿真

在对 Y 型模型的仿真中,通过改变 θ_r 的值实现对几种不同街道模型的比较. 用 $\theta_r = 0$ 表示水平道

路,用 $\theta_r = \pi/2$ 代表 Y 型道路,而用 $\theta_r = \pi$ 代表 T 型路段.

图 4(a) 所示分别为水平、Y 型和 T 型路段场景下的空间互相关函数,随着 θ_r 增大,互相关曲线呈现主瓣宽度渐渐减小,旁瓣却渐渐增大的趋势. 3 种模型的主瓣宽度记录如表 2 所示.

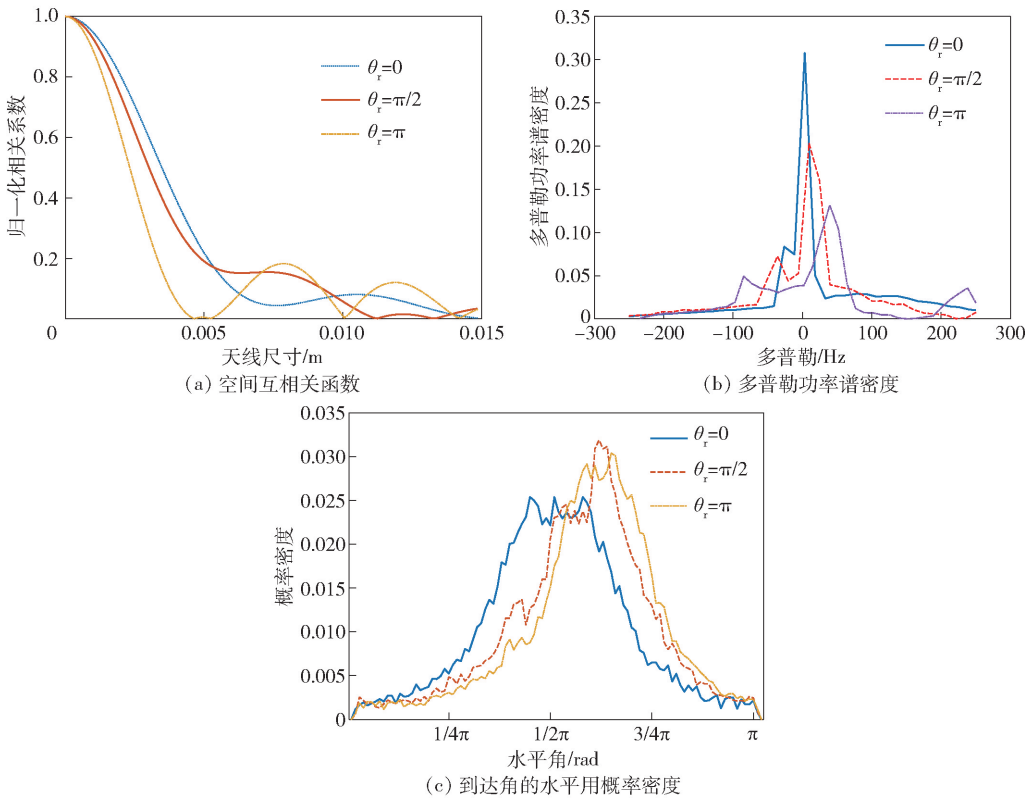


图 4 Y 型模型仿真

表 2 不同模型空间互相关的天线尺寸

模型	天线尺寸/cm
水平	5.0
Y	1.1
T	1.5

图 4(b) 所示为 3 种场景下多普勒功率谱密度. 由于 Y 型街道的影响,多普勒功率谱密度并不对称. 随着角度的增大,多普勒功率谱密度谱向正半轴增加. 随着 θ_r 的增加,模型出现的次高峰增大,这是由于 Y 型路口存在子路口所导致的. 3 种模型的多普勒功率谱密度主峰记录如表 3 所示.

图 4(c) 所示为到达角的水平角概率密度. 在水平街道上,到达角近似以 $\pi/2$ 轴对称,随着 θ_r 的增大,角度逐渐向大于 $\pi/2$ 一侧增加,这是因为子路口对散射体分布的影响越来越大.

表 3 不同模型下多普勒功率谱密度主峰

模型	多普勒/Hz
水平	0
Y	25
T	50

4 结束语

提出了一种适用于交叉路口的 Y 型随机模型. 基于最大时延限定的椭球范围,对道路上的车辆散射体和道路旁边的楼房散射体建立了几何随机模型. 结合马尔可夫过程,推导分析了车对车信道的到达角、时延功率谱、时间自相关函数、空间互相关函数等信道特征. 此外,所提出的基于几何的随机信道模型具有足够的通用性,适用于各种车对车通

信场景的建模. 下一步工作将研究在不同坡度地面上运动的信道参数.

参考文献:

- [1] Ameen H A. A deep review and analysis of data exchange in vehicle-to-vehicle communications systems: coherent taxonomy, challenges, motivations, recommendations, substantial analysis and future directions[J]. IEEE Access, 2019, 7: 158349-158378.
- [2] Li Y, Cheng X, Zhang N. Deterministic and stochastic simulators for non-isotropic V2V-MIMO wideband channels[J]. China Communications, 2018, 15(7): 18-29.
- [3] Askar R, Sarmadi M M, Undi F, et al. Time dispersion parameters of outdoor cross-polar self-interference radio channels in sub-8 GHz bands[C]//2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Dublin: [s. n.], 2020: 1-6.
- [4] Zhao R, Liu Q, Hu Q, et al. Lyapunov-based crowd stability analysis for asymmetric pedestrian merging layout at T-shaped street junction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 6: 1-10.
- [5] Chang H, Bian J, Wang C, et al. A 3D non-stationary wideband GBSM for low-altitude UAV-to-ground V2V MIMO channels [J]. IEEE Access, 2019, 7: 70719-70732.
- [6] Liang X, Zhao X, Li S, et al. A non-stationary geometry-based scattering model for street vehicle-to-vehicle wideband MIMO channels[C]//2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Hong Kong: IEEE, 2015: 2239-2243.
- [7] Cheng L, Stancil D D, Bai F. A roadside scattering model for the vehicle-to-vehicle communication channel[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 449-459.
- [8] Cui Z, Guan K, He D, et al. Propagation modeling for UAV air-to-ground channel over the simple mountain terrain[C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Shanghai: IEEE, 2019: 1-6.
- [9] Wang M, Ma N, Chen J, et al. A novel geometry-based MIMO channel model for vehicle-to-vehicle communication systems[C]//2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu: IEEE, 2019: 762-767.
- [10] Jiang H, Ying W, Zhou J, et al. A 3D wideband two-cluster channel model for massive MIMO vehicle-to-vehicle communications in semi-ellipsoid environments[J]. IEEE Access, 2020, 8: 23594-23600.
- [11] Zhang X, Liu J, Gu F, et al. An extended 3-D ellipsoid model for characterization of UAV air-to-air channel[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai: IEEE, 2019: 1-6.