

一种适用于战术通信环境的车对车信道模型

林鑫^① 刘爱军^{*①} 梁小虎^{①②} 韩晨^③

^①(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)

^②(东南大学信息科学与工程学院 南京 210018)

^③(国防科技大学第六十三研究所 南京 210007)

摘要: 在战术通信环境下, 机动车载平台间的无线信道特性更加复杂。传统移动信道模型没有考虑战术场景下的特殊因素对车对车信道的影响, 所以此类模型不能应用于战术车载通信系统的设计和优化。为解决传统移动信道模型的局限性, 该文提出一种适用于战术通信环境的车对车(Tactical-Vehicle-to-Vehicle, T-V2V)信道模型。该模型充分考虑了实际战术场景中两个车载平台间相互运动、方向性天线的对准问题以及地形地貌等因素对车对车信道的影响, 并基于电平通过率(Lever Crossing Rate, LCR)和平均衰落持续时间(Average Duration of Fading, ADF)指标对所提模型进行统计分析。仿真结果表明, 所提模型更加贴合战术通信实际情况, 能够更为准确地反映出战术通信环境下的车对车信道的变化特性。最后, 该文对影响T-V2V信道模型的相关因素进行了仿真分析, 所得结果对战术车载通信系统的物理层设计具有重要参考价值。

关键词: 战术通信; 车对车信道; 方向性天线; 战术地形; 信道衰落特性统计

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)03-1023-09

DOI: 10.11999/JEIT211587

A Vehicle-to-Vehicle Channel Model for Tactical Communication Environments

LIN Xin^① LIU Aijun^① LIANG Xiaohu^{①②} HAN Chen^③

^①(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

^②(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

^③(The 63th Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In the tactical communication environments, the characteristics of the wireless channel between mobile vehicle platforms become more complicated. The impact of the special tactical factors is not taken into account in the traditional mobile channel models. Therefore, these models are difficult to be applied directly to the design and optimization of vehicular systems in the tactical scenarios. In order to address the limitation of traditional mobile channel models, a Tactical Vehicle-to-Vehicle (T-V2V) channel model is proposed for the tactical communication environments, which considers jointly the influences of the mutual movement between two vehicle platforms, the alignment problem of directional antennas and the tactical terrain. Then, the proposed model is statistically analyzed based on the index of the Lever Crossing Rate (LCR) and the Average Duration of Fading (ADF). The simulation results show that the proposed model is more suitable for the actual situation and reflects the changing characteristics of V2V channel more accurately in the tactical environments. Finally, the relevant factors of the proposed model are analyzed and the conclusions can provide important guiding significance for the physical layer design in tactical communication environments.

Key words: Tactical communication; Vehicle-to-vehicle channel; Directional antennas; Tactical terrain; Channel fading characteristics statistics

收稿日期: 2021-12-28; 改回日期: 2022-05-28; 网络出版: 2022-06-15

*通信作者: 刘爱军 liuaj.cn@163.com

基金项目: 江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20192002), 国家重点研发计划项目(2018YFB1801103), 国防科技大学科研计划项目(ZK22-08)

Foundation Items: The Natural Science Foundation on Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu Province (BK20192002), The National Key Research and Development Program of China (2018YFB1801103), The Research Program of National University of Defense Technology (ZK22-08)

1 引言

各种履带轮式装甲或轻型车载平台(以下统一称为车载平台)通过信息网络互连一体,协同遂行作战任务是信息化条件下陆战场作战的主要表现形式之一。车载平台间无线通信网络的可靠性对战争胜负具有重要影响。在实际作战或演习中,车载平台间的无线通信的可靠性面临严峻挑战。尤其在山地和丘陵地区,车载平台的通信性能大幅下降,通信中断概率远超平原地区。该问题既同自然环境有关,同时也反映出现有的工作对战术环境下无线信道的特性掌握不够,通信系统设计的针对性不强。在战术环境下,两个移动终端在相互移动时受到恶劣地形地貌的影响,其收发链路的的中断概率急剧升高。这是造成当前战术车载平台通信性能不佳的重要原因之一。但是,目前战术通信体制设计时所依托的信道模型仍是传统移动信道模型,这类信道模型难以准确地反映出机动车载平台间的无线信道传输特性,因此传统的移动信道模型不再适用于战术场景下的车对车(Vehicle-to-Vehicle, V2V)信道。为更有效地分析和设计战术车载平台间的通信系统,建立一个适用于战术通信环境的V2V信道模型至关重要。

近年来,随着移动通信和车联网的蓬勃发展与应用,移动车载信道的建模成为了人们研究的热点问题之一。其中,固定基站与移动终端之间的(Fix-to-Mobile, F2M)蜂窝无线信道和移动终端之间的(Mobile-to-Mobile, M2M)信道已经得到了广泛研究^[1-4]。在F2M场景中,固定基站的 antenna 架高,移动终端与基站之间的信号传输受到遮蔽的影响相对较小。根据是否存在视距分量,F2M信道一般采用经典的Rice信道或Rayleigh信道进行建模^[5,6]。而在M2M场景中,收发双方的 antenna 高度较低,一般在1到2.5 m左右,这会导致移动终端周围的障碍物对于信号的遮蔽更加严重,信道衰落特性更加明显。此外,由于移动终端的快速运动,信道状态的平稳时间相对较短,因此信道的非平稳特性也更为突出^[7-11]。因此M2M信道相比于F2M信道,其信道动态特征和衰落特性更为明显,目前常用的方法是采用级联的Rayleigh信道模型对其进行建模^[12]。

不同于上述两种场景,在本文所研究的战术通信环境下的车对车(Tactical-Vehicle-to-Vehicle, T-V2V)场景中,复杂的电磁环境导致信号强度较弱,车载平台一般配置高增益的方向性天线来提高发送端天线的辐射功率,以满足高速率和长距离的战术通信需求。但是在T-V2V场景下会产生方向性天线对准问题。在恶劣的战术地形下,收发方向性

天线会随着崎岖的地形起伏,导致天线波束无法对准,这会给信号传输造成严重的损耗。另外,机动车载平台的相互运动也会导致多径分量的数量和强度频繁发生动态变化。而在现有的移动信道模型研究中,没有考虑这些T-V2V场景下的特殊问题,无法反映该场景下V2V信道的真实情况。因此,本文重点研究战术条件下机动车载平台间无线信道的建模问题,主要的研究工作和创新点总结如下:

(1)在传统移动信道模型的基础上,充分考虑方向性天线对准问题、复杂战术地形环境以及车载平台相互运动对车对车信道特性的影响,提出一种T-V2V信道模型,该模型能够更好地反映出战术通信环境下V2V信道的传输特性,为战术通信体制的设计提供参考依据。

(2)基于电平通过率(Lever Crossing Rate, LCR)和平均衰落持续时间(Average Duration of Fading, ADF)等系统设计指标,本文对所提的T-V2V信道模型的电平衰落特性进行统计分析,并与现有的移动信道模型进行对比。最后,本文对影响所提模型的相关因素进行仿真分析,结果表明所提模型更贴合战术实际场景,更能体现出战术环境下V2V通信信道的传输特性。

本文结构安排如下。第1节介绍传统移动信道模型,并阐述了战术通信环境下的V2V信道同传统移动信道的区别。第2节提出一种适用于战术通信环境的V2V信道模型,并对影响所提信道模型性能的关键因素进行分析。第3节给出信道电平相关的统计结果。第4节得出最终结论。

2 T-V2V信道模型

本节基于点对点通信系统来研究T-V2V信道模型。目前常见的信道模型可分为基于几何确定性信道模型(Geometry-Based Deterministic Model, GBDM)、非几何的统计模型(Non-Geometrical Stochastic Model, NGSM)、基于几何的统计模型(Geometry-Based Stochastic Model, GBSM)^[13-16]。GBDM采用3D射线追踪的方法对特定的传输环境进行信道测量,所得模型不具有一般性,且在散射环境快速变化的移动场景中具有较高的复杂度。相比于NGSM中随机确定信道物理参数的方法,GBSM考虑了信道的几何特征,在兼顾准确性的同时,也可适应多种通信场景^[17]。

综合考虑复杂度和准确度,本文采用GBSM模型对T-V2V信道进行建模。如图1所示,假设发射平台(Tx)和接收平台(Rx)周围的有效散射体分布在两个半环上^[18]。3维射线追踪的测量结果表明,车

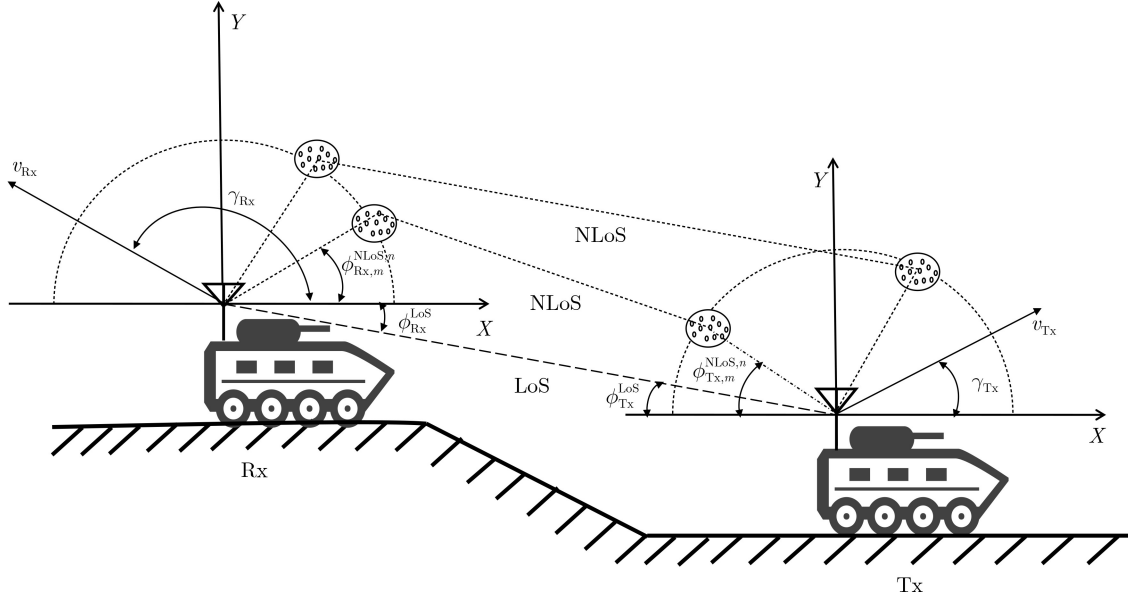


图1 战术车载平台点对点通信系统

载平台移动过程中复杂散射环境导致Tx和Rx之间存在直射、反射、绕射、透射以及散射等多条信号传播路径。因此接收信号为视距(Line of Sight, LoS)信号与非视距(Non-Line of Sight, NLoS)信号的叠加信号, T-V2V信道冲激响应可表示为

$$h(t, \tau) = h^{\text{LoS}}(t)\delta(\tau - \tau^{\text{LoS}}) + \sum_{n=1}^{N-1} h_n^{\text{NLoS}}(t)\delta(\tau - \tau_n^{\text{NLoS}}) \quad (1)$$

其中, N 为路径总数量, $h^{\text{LoS}}(t)$, τ^{LoS} 分别表示LoS分量的信道复系数和时延; $h_n^{\text{NLoS}}(t)$, τ_n^{NLoS} 分别表示第 n 条NLoS路径的信道复系数和时延。 $h^{\text{LoS}}(t)$ 和 $h_n^{\text{NLoS}}(t)$ 进一步表示为式(2)和式(3)。

$$h^{\text{LoS}}(t) = \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j\phi^{\text{LoS}}} \cdot e^{j[2\pi f_{D,Tx}^{\text{LoS}} \cos(\phi_{Tx}^{\text{LoS}} - \gamma_{Tx})t + 2\pi f_{D,Rx}^{\text{LoS}} \cos(\phi_{Rx}^{\text{LoS}} - \gamma_{Rx})t]} \quad (2)$$

$$h_n^{\text{NLoS}}(t) = \sqrt{\frac{1}{K+1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{N-1}} \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M e^{j\phi_m^{\text{NLoS},n}} \cdot e^{j[2\pi f_{D,Tx}^{\text{NLoS},n} \cos(\phi_{Tx,m}^{\text{NLoS},n} - \gamma_{Tx})t + 2\pi f_{D,Rx}^{\text{NLoS},n} \cos(\phi_{Rx,m}^{\text{NLoS},n} - \gamma_{Rx})t]} \quad (3)$$

其中, K 为莱斯因子, ϕ^{LoS} , $f_{D,Tx}^{\text{LoS}}$, $f_{D,Rx}^{\text{LoS}}$, ϕ_{Tx}^{LoS} , ϕ_{Rx}^{LoS} 分别表示LoS分量的随机初始相位、Tx运动引起的最大多普勒频移、Rx运动引起的最大多普勒频移、随机离开角(Angle of Departure, AoD)、随机到达角(Angle of Arrival, AoA)。 M 表示Tx和Rx之间经过周围的散射体传播的有效路径数量, $f_{D,Tx}^{\text{NLoS},n}$, $f_{D,Rx}^{\text{NLoS},n}$ 分别表示第 n 条NLoS路径分量中Tx运动引起的最大多普勒频移和Rx运动引起的最大多普勒频移。 $\phi_m^{\text{NLoS},n}$, $\phi_{Tx,m}^{\text{NLoS},n}$, $\phi_{Rx,m}^{\text{NLoS},n}$ 分别表示第

n 条NLoS路径分量中第 m 条散射路径的随机初始相位, AOD, AOA。 γ_{Tx} 和 v_{Tx} 表示Tx的运动方向角度和速度, γ_{Rx} 和 v_{Rx} 表示Rx运动方向角度和速度。信道冲激响应经过傅里叶变换后可得出T-V2V信道的时变传输函数, 其表达式为

$$H(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \\ = h^{\text{LoS}}(t) e^{-j2\pi f \tau^{\text{LoS}}} + \sum_{n=1}^{N-1} h_n^{\text{NLoS}}(t) e^{-j2\pi f \tau_n^{\text{NLoS}}} \quad (4)$$

在战术场景中, 车载平台的快速移动导致多径分量的数量和强度频繁发生变化。例如, 当Tx和Rx周围存在有效散射体时, 收发双方之间可能存在可达链路。但是当车载平台离开该区域时, 有效散射体消失, 该多径分量也会随之消失。同时, 由于车载天线高度较低, 当收发车载平台之间存在较大的障碍物(例如山地或树林)时, 信号的传播会受到遮蔽物影响, 导致多径链路分量消失或减弱^[19]。因此, 本文采用生灭过程建模多径分量状态的变化情况, 通过状态转移矩阵(State Transition Matrix, STM)和平稳状态矩阵(Steady State Matrix, SSM)描述“birth”和“death”两状态的持续和转移^[20]。STM和SSM可分别表示为

$$\text{STM} = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{SSM} = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, “0”代表链路消失, “1”代表链路存在;

P_{ij} 代表从状态*i*转移到状态*j*的概率,那么经过*T*次转移后,链路的生灭状态概率可由式(7)计算得到。

$$\begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \end{pmatrix} = \mathbf{SSM}_T = \mathbf{SSM}_0 \prod_{t=1}^T \mathbf{STM}(t) \quad (7)$$

因此,本文在T-V2V模型中引入时变分量 $z(t)$ 来表示车载平台的移动和障碍物遮蔽引起多径链路状态的变化^[20],则信道时变传输函数可重新表

述为式(8),其中 $z^{\text{LoS}}(t)$ 和 $z_n^{\text{NLoS}}(t)$ 分别表示LoS路径和第*n*条NLoS路径的时变链路状态。

$$H(t, f) = z^{\text{LoS}}(t) h^{\text{LoS}}(t) e^{-j2\pi f \tau^{\text{LoS}}} + \sum_{n=1}^{N-1} z_n^{\text{NLoS}}(t) h_n^{\text{NLoS}}(t) e^{-j2\pi f \tau_n^{\text{NLoS}}} \quad (8)$$

为满足速率和通信距离需求,方向性天线在战术通信系统中得到广泛使用。在图2(a)中,当Rx以

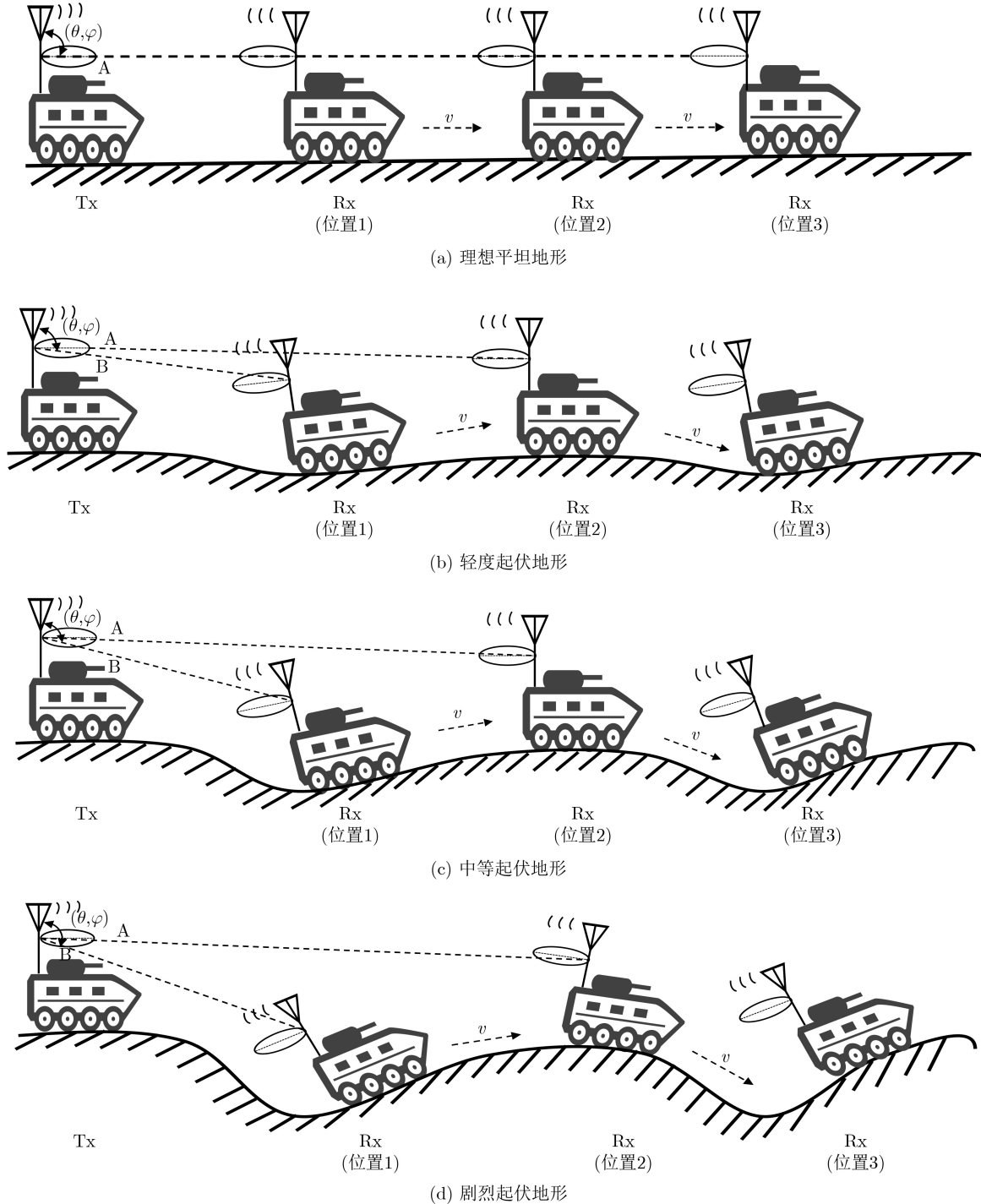


图2 不同地形下车载平台收发天线对准角度示意图

速度 v 在理想的平坦地形移动时, 收发天线波束最大增益方向可实现对准, 通信方向上的天线增益最大, 接收方可获得最大的信号功率, LOS分量在各个位置保持不变; 然而在起伏的战术地形中, 如图2(b), 图2(c), 图2(d)所示, 方向性天线波束最大增益方向会随着地形起伏而发生变化, 收发天线波束最大增益方向无法始终保持在同一方向上, 天线增益发生损耗, 导致LoS链路功率降低。由于LoS路径分量在信道电平中发挥主导作用, LOS分量越弱, 信道电平越低, 信道出现深衰落的机会越大, 以至于无法达到接收机信噪比的灵敏度要求, 进一步增大了通信链路的中断概率^[21]。图2中A点为天线波束最大增益点, B点为偏移点, 假设天线类型为对称阵子天线, 其几何结构连同电流分布关于 z 轴旋转对称, 方向函数 $f(\theta, \psi)$ 是极轴角 θ 的一元函数, 与方位角 ψ 无关, 即 $f(\theta, \psi) = f(\theta)$ ^[22], 表达式记为式(9)。进一步推导可以得到其归一化方向函数 $F(\theta, \psi)$, 如式(10)所示。

$$f(\theta, \psi) = f(\theta) = \frac{\cos\left(k\frac{L}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kL}{2}\right)}{\sin\theta} \quad (9)$$

$$F(\theta, \psi) = \frac{f(\theta, \psi)}{f_{\max}} \quad (10)$$

其中, L 和 k 分别表示天线长度和波数, f_{\max} 为方向函数 $f(\theta, \psi)$ 模的最大值。根据天线方向系数的通用计算公式, A点天线方向系数 D_A 可表示为式(11), 则偏移点B点的天线增益 G_B 可通过式(12)计算得到。

$$D_A = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} d\psi \int_0^\pi |F(\theta, \psi)|^2 \sin\theta d\theta} \quad (11)$$

$$G_B = D_B = D_A |F(\theta, \psi)|^2 \quad (12)$$

因此, 本文引入 $G(\theta, \psi)$ 表示车载平台在战术地形条件下的天线功率增益, 其中 $\{\theta, \psi\}$ 表示天线主波束方向^[23], 需要注意的是, 天线波束方向在车载平台运动过程中随着地形起伏变化, 因此 $G(\theta, \psi)$ 是与时间相关的变量, 为了表达方便, 在表达式中将时间 t 省略。最终完整的T-V2V信道模型表示为

$$\begin{aligned} H(t, f) = & \sqrt{G(\theta_{\text{Tx}}^{\text{LoS}}, \psi_{\text{Tx}}^{\text{LoS}}) G(\theta_{\text{Rx}}^{\text{LoS}}, \psi_{\text{Rx}}^{\text{LoS}})} \\ & z^{\text{LoS}}(t) h^{\text{LoS}}(t) e^{-j2\pi f \tau^{\text{LoS}}} \\ & + \sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{G(\theta_{\text{Tx},n}^{\text{NLoS}}, \psi_{\text{Tx},n}^{\text{NLoS}}) G(\theta_{\text{Rx},n}^{\text{NLoS}}, \psi_{\text{Rx},n}^{\text{NLoS}})} \\ & \cdot z_n^{\text{NLoS}}(t) h_n^{\text{NLoS}}(t) e^{-j2\pi f \tau_n^{\text{NLoS}}} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $G(\theta_{\text{Tx}}^{\text{LoS}}, \psi_{\text{Tx}}^{\text{LoS}})$ 和 $G(\theta_{\text{Rx}}^{\text{LoS}}, \psi_{\text{Rx}}^{\text{LoS}})$ 分别表示LoS路

径分量的收发天线增益, $G(\theta_{\text{Tx},n}^{\text{NLoS}}, \psi_{\text{Tx},n}^{\text{NLoS}})$ 和 $G(\theta_{\text{Rx},n}^{\text{NLoS}}, \psi_{\text{Rx},n}^{\text{NLoS}})$ 分别表示第 n 条NLoS路径的收发天线增益。

3 T-V2V信道电平衰落特性统计分析

为评估所提T-V2V信道的性能, 本节对其电平衰落特性指标进行统计分析, 并将之与传统移动信道模型进行比较。在仿真实验中, 本文将路径总数设置为12条(其中1条为LoS路径, 其余均为NLoS路径); 多径分量的幅值服从瑞利分布; 多径时延差参照IEEE 802.11p标准中的VTV Urban Canyon (VTV-UC)场景进行设定; 对称振子天线类型为半波振子天线, 其最大波束角为78°; 随机初始相位服从均匀分布 $U[-\pi, \pi]$; AOA和AOD均服从均匀分布 $U[0, \pi]$ 。信道增益电平是信道的重要参数之一, 其决定接收端的功率和场强的大小, 直接体现了信道传输质量的高低^[21]。本节从信道增益电平出发, 分析电平衰落相关统计指标LCR与ADF。假设当信道电平低于阈值电平 r 时, 即认为信道发生深度衰落, 通信链路中断。中断概率 p_{out} 为信道电平低于参考阈值电平 r 时的概率, 其计算表达式可由累积分布函数给出:

$$p_{\text{out}}(r) = \int_0^r p(r) dr \quad (14)$$

其中, $p(r)$ 为信道幅值概率密度函数。本文重点关注单位时间内电平自下而上通过阈值电平 r 的平均次数 $E[N(r)]$, 即LCR, 其物理意义为单位时间内通信链路中断的次数。LCR的数学表达式可表示为

$$\text{LCR}(r) = \int_0^{+\infty} \dot{r} f_{r, \dot{r}}(r, \dot{r}) d\dot{r} \quad (15)$$

其中, $\dot{r}(t) = dr(t)/dt$ 表示在 t 时刻电平 $r(t)$ 对时间的导数, $f_{r, \dot{r}}(r, \dot{r})$ 是 r 与 \dot{r} 的联合概率密度函数。根据LCR的计算结果可进一步得到ADF, 其能够反映出信道电平处于深度衰落的持续时间。ADF可由式(16)计算得到:

$$\text{ADF}(r) = \frac{p_{\text{out}}(r)}{\text{LCR}(r)} \quad (16)$$

图3给出了传统移动信道模型(F2M和M2M)的信道幅值数据及其导数的近似概率密度分布。 $r(t)$ 与 $\dot{r}(t)$ 序列均近似服从正态分布。另外, 根据数值仿真结果, 这两个序列相关系数约等于0。根据文献[24]中的相关定理, 两个服从正态分布的序列, 若两者相关系数为0, 则可推导出两个序列独立。因此, $r(t)$ 与 $\dot{r}(t)$ 两个序列独立, 其联合概率密度可表示为 $r(t)$ 与 $\dot{r}(t)$ 的概率密度乘积:

$$f_{r,\dot{r}}(r, \dot{r}) = f_r(r)f_{\dot{r}}(\dot{r}) \quad (17)$$

因此, 单位时间内发生深度衰落平均次数为

$$E[N(r)] = \int_0^{+\infty} \dot{r} f_{r,\dot{r}}(r, \dot{r}) d\dot{r} = \int_0^{+\infty} \frac{\dot{r}}{2\pi\sigma_r\sigma_{\dot{r}}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(r-u_r)^2}{\sigma_r^2} + \frac{(\dot{r}-u_{\dot{r}})^2}{\sigma_{\dot{r}}^2}\right)\right) d\dot{r} \quad (18)$$

其中, u_r , σ_r , $u_{\dot{r}}$, $\sigma_{\dot{r}}$ 分别表示 $r(t)$ 和 $\dot{r}(t)$ 的均值和方差。特别地, 当 $u_r = u_{\dot{r}} = 0$ 时, 可得到传统移动信道模型的LCR闭式解:

$$\text{LCR}(r) = \frac{\sigma_{\dot{r}}}{2\pi\sigma_r} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (19)$$

但是根据图4中的仿真结果, 可以发现T-V2V信道模型的电平幅值 $r(t)$ 及其导数 $\dot{r}(t)$ 分布与正态分布的差距较大, 因此缺乏求解联合概率密度函数的数学手段, 难以得到LCR的闭式表达式, 故只能通过仿真进行求解。

图5给出了不同地形情况下各个时刻通信方向上天线增益的对比结果。由图可知, 通信方向上的天线增益在理想平坦地形中无明显变化, 但是起伏的地形对天线增益有较大影响, 并且随着地形起伏

程度的增加, 天线增益衰减逐渐增大, 说明在恶劣战术地形下, 方向性天线的增益存在较大的起伏, 这将对信号的传输造成不利的影响。在实际战术环境下, 由于方向性天线和恶劣的战术地形条件影响, V2V信道传输条件进一步恶化, 衰落特性更加明显, 相应的数据包丢包率和重传概率也会急剧升高。图6(a)与(b)给出T-V2V信道模型与传统移动信道模型的LCR和ADF指标对比。由图可知, 对于LCR和ADF指标, T-V2V信道模型均大于传统移动信道模型, 说明T-V2V信道模型在单位时间内通信中断次数明显增多, 且每次通信中断的平均持续时间也显著增大, 所得结果与战术车载平台在实际运用中出现的情况一致, 说明T-V2V信道模型能更好地表征战术场景下的V2V信道的实际情况, 因此所提模型更适用于对战术通信环境下的V2V信道。

图7(a)和图7(b)分析了莱斯因子的变化对于所提T-V2V信道模型的影响。莱斯因子越大, LoS路径分量相对于NLoS路径分量比值越大。由图可知, 随着莱斯因子增大, T-V2V信道模型的LCR和ADF指标均呈现出上升趋势, 说明当LoS路径分量权重较大时, T-V2V信道衰落特性更为明显。另外, 当地形起伏较为剧烈时, LCR和ADF增大的幅值更为显著。这是因为T-V2V信道模型中考虑了

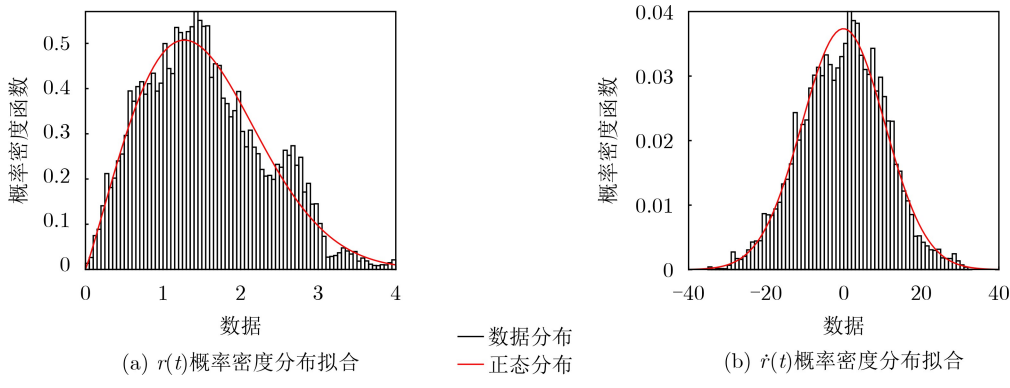


图3 传统移动信道模型数据概率密度分布拟合结果

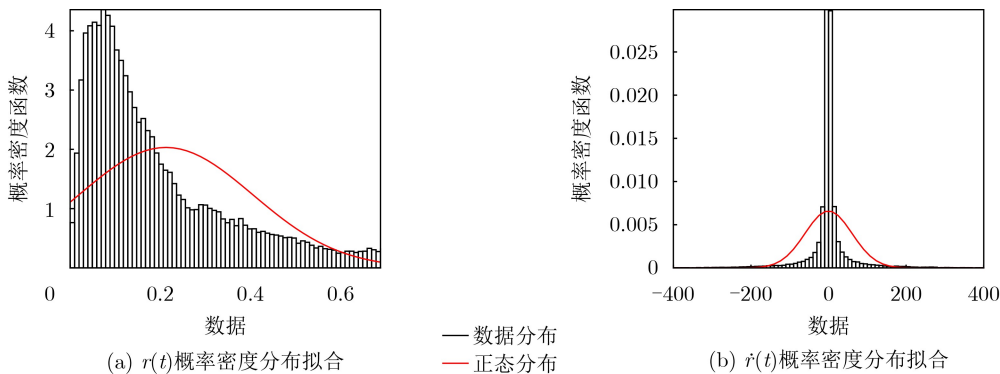


图4 T-V2V信道模型数据概率密度分布拟合结果

方向性天线波束在战术地形中的偏移, 恶劣的战术

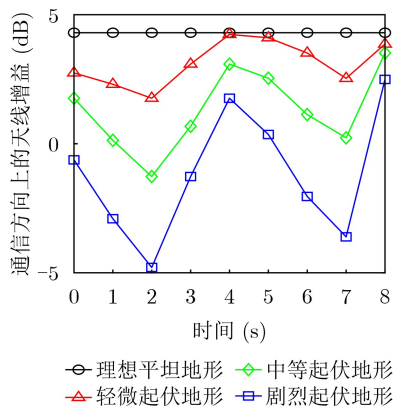


图5 不同地形中车载平台通信方向上天线的增益对比

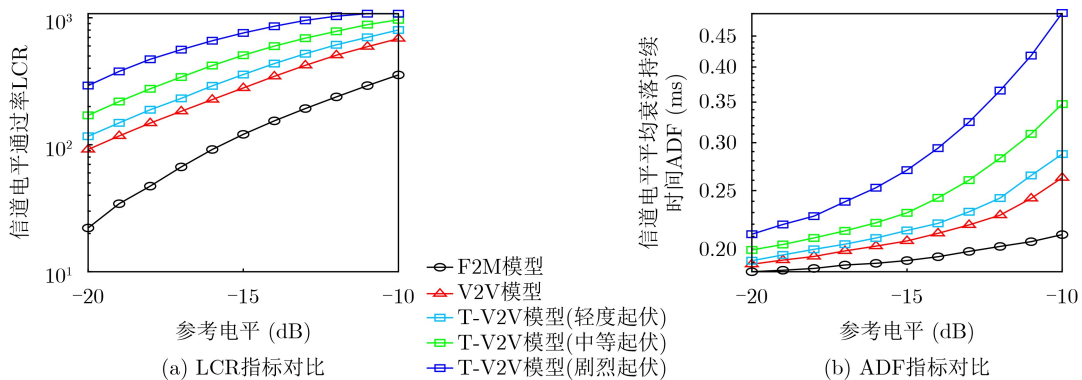


图6 T-V2V模型与传统移动信道模型LCR与ADF指标对比

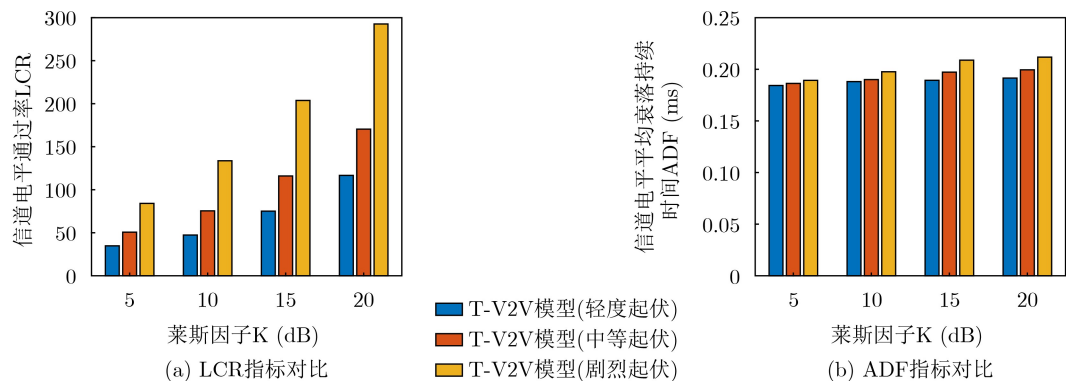


图7 不同的莱斯因子对应的LCR指标与ADF指标

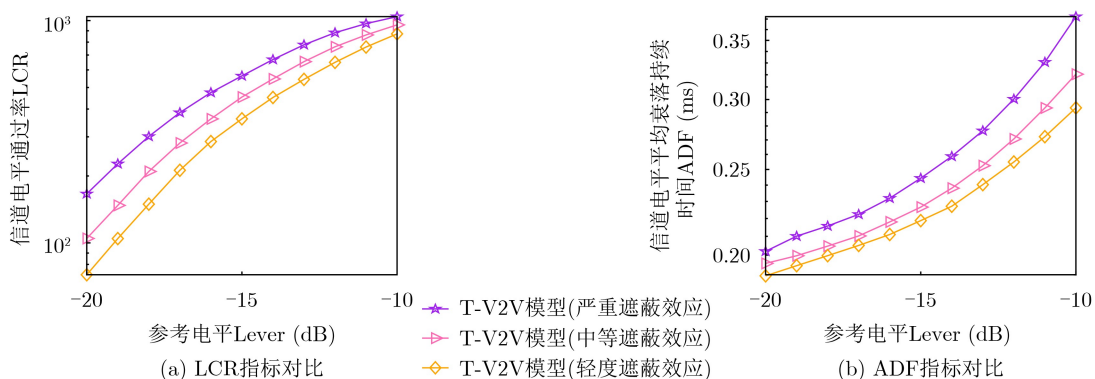


图8 不同强度遮蔽效应下的LCR指标与ADF指标

地形对LoS分量的影响较大, 造成LoS路径较大的功率损耗, 且地形起伏越大, 所对应损耗越大, 导致发生深度衰落的概率进一步增大。因此可以得出结论, 在复杂的战术地形下, 莱斯因子越大, 信道的衰落特性越明显, 发生通信中断概率越大, 并且中断持续时间越长。

图8(a)和图8(b)给出遮蔽效应对T-V2V信道模型的信号传输的影响。在战术车载平台移动过程中, 周围复杂的障碍物会对电磁波信号的传输产生遮蔽效应, 从而导致路径消失或者功率强度减弱。由图8可知, 当遮蔽效应较为严重时, 多径分量消失或减弱的概率增大, 信道电平降低, 导致LCR和ADF指标增大, 信道的衰落特性更加明显。这说

明在战术场景中由于车载平台的快速移动和收发天线高度的降低,导致信号传输受到的遮蔽效应更加严重,通信中断概率增大,这与现实中的战术通信情况相符。在后续的研究中,作者将依据上述结果对战术V2V通信的可靠性传输方案进行设计,从而提高战术通信系统的整体性能。

4 结束语

本文在传统移动信道模型的基础上,充分考虑战场地形、天线对准问题、车载平台相互运动等因素对战术车载信道的影响,提出了一个适用于战术通信环境的V2V信道模型,使其能较好地表征战术机动车载平台在通信过程中信号的传输状况。通过衰落统计特性对比,战术条件下V2V信道电平具有更高的电平通过率以及更长的平均衰落持续时间。这说明在战术场景中,V2V信道传输性能更为恶劣,信号传输成功率更低,这些统计指标将为后续系统设计中信道编码、信道交织等底层传输技术提供重要参考。另外,虽然所提模型考虑的因素均有相应文献作为理论支撑,但是由于目前尚不具备进行信道测量的条件,无法获得实测数据。在后续的工作中,作者将进行相关的实测试验来进一步提高模型的准确性。

参 考 文 献

- [1] ZHAN Yuting, ZHANG Weile, and DENG Hao. Sparsity-aware direct equalization of time-varying channels for V2V communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(2): 387–391. doi: [10.1109/LWC.2020.3032595](#).
- [2] ZAJIĆ A G. Impact of Moving scatterers on vehicle-to-vehicle narrow-band channel characteristics[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(7): 3094–3106. doi: [10.1109/TVT.2014.2299239](#).
- [3] 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): 5860–5874. doi: [10.1109/TWC.2020.2997808](#).
- [4] LI Wei, HU Xiaoya, GAO Jie, *et al.* Measurements and analysis of propagation channels in vehicle-to-infrastructure scenarios[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 3550–3561. doi: [10.1109/TVT.2020.2972150](#).
- [5] SUN Shu, RAPPAPORT T S, SHAFI M, *et al.* Propagation models and performance evaluation for 5G millimeter-wave bands[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(9): 8422–8439. doi: [10.1109/TVT.2018.2848208](#).
- [6] SHAFI M, ZHANG Jianhua, TATARIA H, *et al.* Microwave vs. Millimeter-wave propagation channels: Key differences and impact on 5G cellular systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(12): 14–20. doi: [10.1109/MCOM.2018.1800255](#).
- [7] BAI Lu, HUANG Ziwei, DU Haohua, *et al.* A 3-D non-stationary wideband V2V GBSM with UPAs for massive MIMO wireless communication systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(24): 17622–17638. doi: [10.1109/JIOT.2021.3081816](#).
- [8] WU Shangbin, WANG Chengxiang, AGGOUNE M H M, *et al.* A general 3-D non-stationary 5G wireless channel model[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(7): 3065–3078. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2779128](#).
- [9] 梁晓林, 赵雄文, 李亦天. 移动散射体下的V2V信道相关性和多普勒谱特性研究[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(3): 613–618. doi: [10.11999/JEIT160412](#).
LIANG Xiaolin, ZHAO Xiongwen, and LI Yitian. Impact of moving scatterers in channel correlations and doppler spectral densities for vehicle-to-vehicle communications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(3): 613–618. doi: [10.11999/JEIT160412](#).
- [10] YANG Mi, AI Bo, HE Ruisi, *et al.* Non-stationary vehicular channel characterization in complicated scenarios[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 8387–8400. doi: [10.1109/TVT.2021.3096973](#).
- [11] WALTER M, SHUTIN D, SCHMIDHAMMER M, *et al.* Geometric analysis of the doppler frequency for general non-stationary 3D mobile-to-mobile channels based on prolate spheroidal coordinates[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 10419–10434. doi: [10.1109/TVT.2020.3011408](#).
- [12] ALGHORANI Y, CHEKKOURI A S, CHEKIRE D A, *et al.* Improved S-AF and S-DF relaying schemes using machine learning based power allocation over cascaded rayleigh fading channels[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(12): 7508–7520. doi: [10.1109/TITS.2020.3003820](#).
- [13] WANG Jun, WANG Chengxiang, HUANG Jia, *et al.* A novel 3D non-stationary GBSM for 6G THz ultra-massive MIMO wireless systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(12): 12312–12324. doi: [10.1109/TVT.2021.3117239](#).
- [14] ZHOU Tao, YANG Yi, LIU Liu, *et al.* A dynamic 3-D wideband GBSM for cooperative massive MIMO channels in intelligent high-speed railway communication systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(4): 2237–2250. doi: [10.1109/TWC.2020.3040392](#).
- [15] ZHOU Tao, TAO Cheng, SALOUS S, *et al.* Geometry-based multi-link channel modeling for high-speed train communication networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(3): 1229–1238.

- doi: [10.1109/TITS.2019.2905036](https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2905036).
- [16] RAKESH R T and VITERBO E. Channel modeling for wireless communications using ambit processes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(12): 8396–8409. doi: [10.1109/TWC.2020.3022589](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3022589).
- [17] 程翔, 张荣庆, 陈晨. 5G车联网技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 18–21.
- [18] AKKI A S and HABER F. A statistical model of mobile-to-mobile land communication channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1986, 35(1): 2–7. doi: [10.1109/TVT.1986.24062](https://doi.org/10.1109/TVT.1986.24062).
- [19] SEN I and MATOLAK D W. Vehicle-vehicle channel models for the 5-GHz band[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(2): 235–245. doi: [10.1109/TITS.2008.922881](https://doi.org/10.1109/TITS.2008.922881).
- [20] LI Cuiran, LIU Ling, and XIE Jianli. Finite-state Markov wireless channel modeling for railway tunnel environments[J]. *China Communications*, 2020, 17(2): 30–39. doi: [10.23919/JCC.2020.02.003](https://doi.org/10.23919/JCC.2020.02.003).
- [21] MOLISCH A F, 田斌, 帖翊, 任光亮, 等译. 无线通信[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2020: 57–81.
MOLISCH A F, TIAN Bin, TIE Yi, REN Guangliang, *et al.* translation. *Wireless Communications*[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020: 57–81.
- [22] 卢春兰, 杨涛, 余同彬, 等. 电波与光波传输技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 134–191.
LU Chunlan, YANG Tao, YU Tongbin, *et al.* *Electromagnetic Wave and Optical Wave Transmission Technology*[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013: 134–191.
- [23] YANG Haibing, HERBEN M H A J, AKKERMANS I J A G, *et al.* Impact analysis of directional antennas and multiantenna beamformers on radio transmission[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1695–1707. doi: [10.1109/TVT.2007.907308](https://doi.org/10.1109/TVT.2007.907308).
- [24] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 73–74.
- 林 鑫: 男, 博士生, 研究方向为战术通信、车联网技术等.
刘爱军: 男, 教授, 研究方向为卫星通信、战术通信、信号处理、空间异构网络、信道编码和信息论等.
梁小虎: 男, 讲师, 研究方向为卫星通信、超奈奎斯特传输技术等.
韩 晨: 男, 工程师, 研究方向为卫星通信、通信抗干扰技术等.
- 责任编辑: 陈 倩