

移动散射体下的 V2V 信道相关性和多普勒谱特性研究

梁晓林^① 赵雄文^{*①②③} 李亦天^①

^①(华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206)

^②(中国电波传播研究所电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室 青岛 266107)

^③(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 该文首次提出两种典型的移动散射体存在的车辆对车辆(V2V)的无线传播信道模型,一种是基于一次散射发射(SBT)和一次散射接收(SBR)的信道,另一种是基于两次散射(DB)的信道,并在这两种模型的基础上给出了同时包含一次散射发射,一次散射接收,两次散射和视距(LOS)分量的信道模型。在假设移动散射体的运动速度和方向都随机且运动速度较小和较大的散射体速度分别用指数分布和混合高斯分布来描述的情况下,给出了这些传播信道的复增益,通过计算得到了信道的自相关函数(ACF)和多普勒功率谱密度(PSD)。文中还将理论计算得到的多普勒谱与已有文献的测量结果进行了对比,两者符合得较好。

关键词: 车辆到车辆通信; 移动散射体; 自相关函数; 多普勒功率谱密度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)03-0613-06

DOI: 10.11999/JEIT160412

Impact of Moving Scatterers in Channel Correlations and Doppler Spectral Densities for Vehicle-to-vehicle Communications

LIANG Xiaolin^① ZHAO Xiongwen^{①②③} LI Yitian^①

^①(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

^②(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, China)

^③(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Two typical Vehicle-To-Vehicle (V2V) propagation channel models are proposed for the first time. One is that the channel is composed by Single-Bounce Transmit (SBT) and Single-Bounce Receive (SBR) components. The other is that the channel is composed by Double-Bounce (DB) components. Based on the two models, another model consisting of SBT, SBR, DB, and LOS components is proposed. It is assumed that the local scatterers move with random velocities in random directions and the velocity distributions of the moving scatterers with low and high speed are assumed to follow exponential and Gaussian Mixture (GM) distributions, respectively. The complex channel gains of the proposed V2V channel models are proposed, and the corresponding AutoCorrelation Function (ACF) and Doppler Power Spectral Density (PSD) are derived. The theoretical results are also compared with the available PSDs by measurements and good agreements are found between them.

Key words: Vehicle-To-Vehicle (V2V) communication; Moving scatterers; AutoCorrelation Function (ACF); Doppler Power Spectral Density (PSD)

1 引言

车辆与车辆(Vehicle to Vehicle, V2V)之间的通

信是第5代移动通信所关注的传输技术之一, V2V信道模型和特性研究对未来V2V通信系统的发展和标准化有重要意义。现在有很多不同的V2V信道模型,文献[1-3]提出了基于几何的V2V信道模型,其中双环模型^[1]是基于几何模型的典型代表,它给出了V2V信道的统计特征。文献[4]给出了测量得到的频率选择性V2V信道的多普勒谱。文献[5]开展了窄带V2V信道的测量和V2V信道特性研究。文献[6]开展了多输入多输出的V2V信道测量研究。固定端到车辆(F2V)和收发端都固定(F2F)的通信信道作为V2V信道的特殊情况在文献[7,8]中进行了研究。

收稿日期: 2016-04-26; 改回日期: 2016-09-06; 网络出版: 2016-11-14

*通信作者: 赵雄文 zhaowx@ncepu.edu.cn

基金项目: 中国电波传播研究所电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室(201400009), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2016D09), 国家自然科学基金(61372051)

Foundation Items: The Open Research Funds of National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation (201400009), The National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2016D09), The National Natural Science Foundation of China (61372051)

以上这些信道模型都假设散射体是固定的,然而移动散射体在实际环境中是客观存在的,例如由于风引起移动的植被,移动的行人和移动的车辆等。

目前,只有少量的文献[9-13]研究了当移动散射体存在时的信道特性问题。在无线通信中,多普勒效应会引起信号的频率扩展。通常多普勒效应由发射端或接收端的移动产生,但当收发端都固定而周围散射体移动时也会产生多普勒效应^[9]。在文献[9,10]中,分别给出了具有确定速度和确定方向的移动散射体对 F2F, F2V 信道的影响。除此之外,文献[11]给出了基于几何基础上的速度确定,移动方向随机变化的散射体对 V2V 信道的影响。文献[12,13]研究了当移动散射体的运动速度和方向都随机时对 V2V 信道的影响,但是只考虑了收发端之间一次散射的情况。然而在实际环境中,一次散射可能既发生在发射端附近也发生在接收端附近,也可能在收发端间经过二次散射。针对这两种情况,本文首次提出了两种新的移动散射体的运动速度和方向都随机的 V2V 信道模型。文中给出了这两种典型传播信道模型的信道复增益并通过计算得到了这两种信道模型的自相关函数(ACF)的解析式,对 ACF 做傅里叶变换则可以得到相应的多普勒功率谱密度(PSD)。文中基于 IEEE 802.11p 标准感兴趣频段开展了 PSD 模拟研究,同时也与毫米波 F2F 场景下的测试结果进行了比较研究。本文给出的 V2V 模型具有普遍性,可通过变换本文得到的 V2V 信道模型参数得到 F2F 和 F2V 模型,也可应用于毫米波信道多普勒谱的研究工作。

2 V2V 信道的自相关函数

本文首次提出了两种典型的当移动散射体存在时 V2V 的传播信道模型并通过计算得到相应的 ACF。信道模型 1 如图 1 所示,信号从发端(Tx)到收端(Rx)过程中经过 Tx 附近的移动散射体一次散射后直接到达 Rx 的分量,称之为一次散射发射(SBT)分量,经过 Rx 附近的移动散射体一次散射后直接到达 Rx 的分量,称之为一次散射接收(SBR)分量。信道模型 2 如图 2 所示,信号从 Tx 到 Rx 过程中经过两次移动散射体散射后到达 Rx,称之为二次散射(DB)分量。移动散射体的速度分布有多种^[9,12],通过文献[12]可知负指数分布能够很好地描述运动速度较小的散射体的速度分布,混合高斯(GM)分布能够很好地描述运动速度较大的散射体的速度分布。负指数分布和 GM 分布分别如式(1)和式(2)所示。

$$p_{v_s}(v_s) = \begin{cases} 1/v_0 \cdot \exp(-v_s/v_0), & v_s \geq 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

$$p_{v_s}(v_s) = \sum_{i=1}^I \omega_i N_i(v_s; m_{i v_s}, \sigma_{i v_s}^2) \quad (2)$$

2.1 一次散射发射和接收分量

如图 1 所示,假设发端 Tx 周围有 M 个有效的移动散射体,第 m 个有效散射体表示为 S_m , $m \in \{1, 2, \dots, M\}$,运动速度为 v_{S_m} ,运动方向为 $\alpha_v^{S_m}$ 。收端 Rx 周围有 N 个有效的移动散射体,第 n 个有效散射体表示为 S_n , $n \in \{1, 2, \dots, N\}$,运动速度为 v_{S_n} ,运动方向为 $\alpha_v^{S_n}$ 。Tx 和 Rx 在运动方向 α_v^T 和 α_v^R 确定的方向下,分别以 v_T 和 v_R 的速度运动,并且假设收发机都配备的是单个全向天线。鉴于高的路径损耗,本文只考虑发端和收端周围的有效散射体。信号在 Tx 到 Rx 传输过程中考虑 SBT 和 SBR 分量。SBT 分量从 Tx 到 Rx 过程中只在 Tx 附近散射体 S_m 经过一次散射,发射角(Angle of Departure, AoD)和相应的接收角(Angle of Arrival, AoA)分别为 α_m^T 和 α_m^R 。SBR 分量从 Tx 到 Rx 过程中只经过 Rx 附近散射体 S_n 一次散射, AoD 和相应的 AoA 分别为 α_n^T 和 α_n^R 。SBT 和 SBR 分量的复增益如式(3)和式(4)所示。

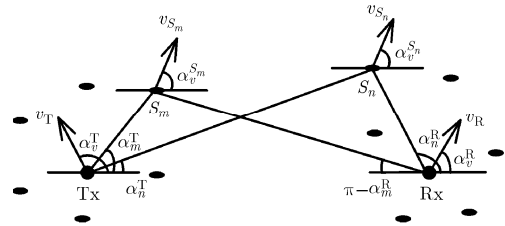


图 1 一次散射发射和一次散射接收几何信道模型

$$\mu^{\text{SBT}}(t) = \sum_{m=1}^M c_m \exp[j(2\pi f_m t + \theta_m)] \quad (3)$$

$$\mu^{\text{SBR}}(t) = \sum_{n=1}^N c_n \exp[j(2\pi f_n t + \theta_n)] \quad (4)$$

在式(3),式(4)中, c_m , c_n 分别代表着经过 Tx 附近第 m 个散射体 S_m 的散射和经过 Rx 附近第 n 个散射体 S_n 的散射所引起的衰减因子。 f_m , f_n 分别代表由于收发端和附近移动散射体的运动所引起的多普勒频移。随机变量 θ_m , θ_n 分别代表着第 m 和第 n 条路径的相位,并且假设它们均匀分布在 0 到 2π 之间。当散射体数趋于无穷时,运用中心极限定理可得到信道的复增益 $\mu^{\text{SBT}}(t)$ 和 $\mu^{\text{SBR}}(t)$ 是均值为零方差为 $2\sigma_0^2$ 的复高斯过程。多普勒频率 f_m 的计算方法如式(5)所示,将式(5)中的 m 替换为 n 可得到 f_n 。

$$f_m = k_0/2\pi \cdot \left[v_T \cos(\alpha_v^T - \alpha_m^T) - v_{S_m} \left(\cos(\alpha_m^T - \alpha_v^{S_m}) + \cos(\alpha_v^{S_m} - \alpha_m^R) \right) + v_R \cos(\alpha_v^R - \alpha_m^R) \right] \quad (5)$$

其中, $k_0 = 2\pi f_0/c_0$ 为自由空间的波数, f_0 为载波频率, c_0 为光在空气中的传播速度。

信道复增益的自相关函数可以通过定义 $r_{\mu\mu}(\tau) = E\{\mu^*(t)\mu(t+\tau)\}$ 计算得到。由文献[12]可以得到一次散射 V2V 信道的 ACF 的表达式如式(6)所示。本文假设一次散射发射分量和一次散射接收分量的 AoA 和 AoD 都在 0 到 2π 之间均匀分布, 并且假设

$$r_{\mu\mu}(\tau) = 2\sigma_0^2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{j\left[k_0 v_T \cos(\alpha_v^T - \alpha^T) - 2k_0 v_S \cos\left(\frac{\alpha^T - \alpha^R}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha^T + \alpha^R}{2} - \alpha_v^S\right) + k_0 v_R \cos(\alpha_v^R - \alpha^R)\right]\tau\right\} \cdot p_{\alpha_v^S}(\alpha_v^S) \cdot p_{\alpha^T, \alpha^R}(\alpha^T, \alpha^R) \cdot p_{v_S}(v_S) d\alpha_v^S d\alpha^R d\alpha^T dv_S \quad (6)$$

$$r_{\mu\mu}^{\text{SBT}}(\tau) = 2\sigma_0^2 \cdot \frac{1}{(2\pi)^2} \cdot \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{jk_0 v_T \cos(\alpha_v^T - \alpha_m^T)\tau\right\} \cdot J_0\left(2k_0 v_S \cos\left(\frac{\alpha_m^T - \alpha_m^R}{2}\right)\tau\right) \cdot \exp\left\{jk_0 v_R \cos(\alpha_v^R - \alpha_m^R)\tau\right\} \cdot p_{v_S}(v_S) d\alpha_m^R d\alpha_m^T dv_S \quad (7)$$

2.2 二次散射分量

如图2所示信号从Tx到Rx经过有效移动散射体 S_m 和 S_n 两次散射, 二次散射分量的AoD为 α_m^T , AoA为 α_n^R 。二次散射(DB)分量的信道复增益为

$$\mu^{\text{DB}}(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_{mn} \exp[j(2\pi f_{mn} t + \theta_{mn})] \quad (8)$$

其中, c_{mn} 为经过两次散射所引起的衰减因子。 f_{mn} 是由于收发端和散射体的运动所引起的多普勒频

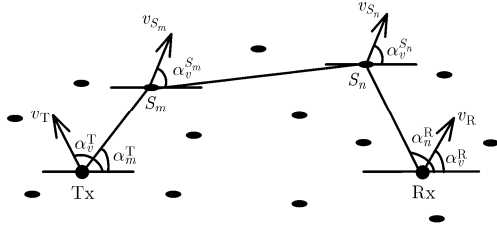


图2 二次散射几何信道模型

$$r_{\mu\mu}^{\text{DB}}(\tau) = 2\sigma_0^2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{j\left[k_0 v_T \cos(\alpha_v^T - \alpha^T) - k_0 v_{S_m} \cos(\alpha^T - \alpha_v^{S_m})\right]\tau\right\} \cdot p_{\alpha_v^{S_m}}(\alpha_v^{S_m}) \cdot p_{\alpha^T}(\alpha^T) \cdot p_{v_{S_m}}(v_{S_m}) d\alpha_v^{S_m} d\alpha^T dv_{S_m} \cdot \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{j\left[k_0 v_R \cos(\alpha_v^R - \alpha^R) - k_0 v_{S_n} \cos(\alpha_v^{S_n} - \alpha^R)\right]\tau\right\} \cdot p_{\alpha_v^{S_n}}(\alpha_v^{S_n}) \cdot p_{\alpha^R}(\alpha^R) \cdot p_{v_{S_n}}(v_{S_n}) d\alpha_v^{S_n} d\alpha^R dv_{S_n} \quad (10)$$

$$r_{\mu\mu}^{\text{DB}}(\tau) = 2\sigma_0^2 \int_0^\infty J_0(k_0 v_T \tau) \cdot J_0(k_0 v_{S_m} \tau) \cdot p_{v_{S_m}}(v_{S_m}) dv_{S_m} \cdot \int_0^\infty J_0(k_0 v_R \tau) \cdot J_0(k_0 v_{S_n} \tau) \cdot p_{v_{S_n}}(v_{S_n}) dv_{S_n} \quad (11)$$

2.3 包含一次散射、二次散射和视距分量的信道

视距分量即从发射端Tx到接收端Rx的直达信号, LOS分量的AoD约为0, AoA约为 π 。LOS分量的信道复增益为 $\mu^{\text{LOS}}(t) = e^{j2\pi f_{\text{LOS}} t}$, 由收发机运动引起的多普勒频率 f_{LOS} 的计算方法如式(12)所示。通过自相关函数的定义式计算得到 LOS 分量的 ACF 如式(13)所示。

$$f_{\text{LOS}} = k_0/2\pi \cdot (v_T \cos \alpha_v^T - v_R \cos \alpha_v^R) \quad (12)$$

散射体的运动方向 $\alpha_v^{S_m}$ 和 $\alpha_v^{S_n}$ 也均匀分布在 0 到 2π , 即 $p_{\alpha^T, \alpha^R}(\alpha^T, \alpha^R) = 1/2\pi$, $p_{\alpha_v^S}(\alpha_v^S) = 1/2\pi$, 将其代入式(6)中则可以得到一次散射发射分量的自相关函数 $r_{\mu\mu}^{\text{SBT}}(\tau)$ 如式(7)所示, 将式(7)中的 m 替换为 n 则可以得到一次散射接收分量的自相关函数 $r_{\mu\mu}^{\text{SBR}}(\tau)$ 。

$J_0(\cdot)$ 为零阶第 1 类贝塞尔函数。

移。随机变量 θ_{mn} 为二次散射路径的相位, 假设在 0 到 2π 之间均匀分布。当散射体数趋于无穷时, 运用中心极限定理可以得到信道复增益 $\mu^{\text{DB}}(t)$ 为均值为零方差为 $2\sigma_0^2$ 的复高斯过程。多普勒频率 f_{mn} 的计算方法如式(9)所示。

$$f_{mn} = k_0/(2\pi) \cdot [v_T \cos(\alpha_v^T - \alpha_m^T) - v_{S_m} \cos(\alpha_m^T - \alpha_v^{S_m}) - v_{S_n} \cos(\alpha_v^{S_n} - \alpha_n^R) + v_R \cos(\alpha_v^R - \alpha_n^R)] \quad (9)$$

二次散射分量的 ACF 的计算公式为 $r_{\mu\mu}^{\text{DB}}(\tau) = E\{\mu^{*\text{DB}}(t)\mu^{\text{DB}}(t+\tau)\}$, 将式(8)和式(9)代入通过计算得到二次散射分量的 ACF 如式(10)所示。当 AoD α_m^T , AoA α_n^R 和散射体 S_m, S_n 的运动角 $\alpha_v^{S_m}, \alpha_v^{S_n}$ 都假设在 0 到 2π 均匀分布时, 即 $p_{\alpha_v^{S_m}}(\alpha_v^{S_m}) = p_{\alpha_v^{S_n}}(\alpha_v^{S_n}) = p_{\alpha^T}(\alpha^T) = p_{\alpha^R}(\alpha^R) = 1/(2\pi)$, 则式(10)可以简化为式(11)。

$$r_{\mu\mu}^{\text{LOS}}(\tau) = \exp\left[jk_0/2\pi \cdot (v_T \cos \alpha_v^T - v_R \cos \alpha_v^R)\tau\right] \quad (13)$$

当信号从Tx到Rx的传输过程中同时包含 SBT, SBR, DB 和 LOS 分量时, 信道的复增益 $\mu(t)$ 为

$$\mu(t) = \sqrt{\frac{\eta_T}{K+1}} \mu^{\text{SBT}}(t) + \sqrt{\frac{\eta_R}{K+1}} \mu^{\text{SBR}}(t) + \sqrt{\frac{\eta_{\text{TR}}}{K+1}} \mu^{\text{DB}}(t) + \sqrt{\frac{K}{K+1}} \mu^{\text{LOS}}(t) \quad (14)$$

其中, K 为莱斯因子, η_T, η_R 和 η_{TR} 分别用来表征

SBT, SBR 和 DB 散射分量对信道总功率的贡献, 且它们满足 $\eta_T + \eta_R + \eta_{TR} = 1$ 。

由于 $\mu^{SBT}(t)$, $\mu^{SBR}(t)$ 和 $\mu^{DB}(t)$ 均为独立的零均值的复高斯过程, 则 $\mu(t)$ 的自相关函数 $r_{\mu\mu}(\tau)$ 为

$$r_{\mu\mu}(\tau) = \frac{\eta_T}{K+1} r_{\mu\mu}^{SBT}(\tau) + \frac{\eta_R}{K+1} r_{\mu\mu}^{SBR}(\tau) + \frac{\eta_{TR}}{K+1} r_{\mu\mu}^{DB}(\tau) + \frac{K}{K+1} r_{\mu\mu}^{LOS}(\tau) \quad (15)$$

3 数值结果

基于 IEEE 802.11p 标准, 在本文数值计算中载频为 $f_0 = 5.9$ GHz。我们选用负指数分布(exp)来描述运动速度较小的散射体的速度分布, 假设平均速度 $v_0 = 3.6$ km/h。选用双高斯混合分布(GM)来描述运动速度较大的散射体的速度分布, 即 $I = 2$, $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$, $m_{1v_s} = 10$ km/h, $m_{2v_s} = 30$ km/h, $\sigma_{1v_s} = \sigma_{2v_s} = 3.6$ km/h。Tx 和 Rx 的运动速度 $v_T = v_R = 10$ km/h, 运动角度分别为 $\alpha_v^T = \alpha_v^R = 0$ 。假设信号的功率 $2\sigma_0^2 = 1$ 。通过对第 2 节中得到的信道的自相关函数进行傅里叶变换可以得到相应的多普勒功率谱密度。为了研究不同的移动散射体对信道的影响, 我们比较分析了本文模型中分别存在一次散射收发分量、二次散射分量以及一、二次散射分量共存时的 ACF 与 PSD 并与文献[12]中只考虑 Tx 和 Rx 之间的一次散射分量的理论结果进行了比较研究。除此之外, 本文还与文献[12]和文献[14]中的测量结果进行了对比。

3.1 一次散射发射和接收 V2V 信道的 ACF 和 PSD

图 3 给出了一次散射发射和一次散射接收 V2V 信道的 ACF 并与只有固定散射体的情形作了对比。假设 SBT 分量的移动散射体速度较小服从负指数分布, 将此速度分布代入式(7)即可得到 SBT 分量的 ACF。假设 SBR 分量的移动散射体速度较大服从双高斯混合分布, 将速度分布代入即可得到 SBR 分量的 ACF。从图 3 可以看出当横轴时间差比较小时, 发端附近散射体速度很小时(SBT, exp)的 ACF 与只有固定散射体时的 ACF 非常接近, 收端附近散

射体速度很大时(SBR, GM)的 ACF 与只有固定散射体的 ACF 相差比较大。还可以看出对应于 SBT 和 SBR 分量的 ACF 介于 SBT 分量和 SBR 分量的 ACF 之间。在考虑一次散射收发分量时, 移动散射体的速度相对于收发端运动速度较小时, 其 ACF 接近固定散射体的自相关函数, 对同一时间差, 移动散射体的速度越大, 其 ACF 越小。

图 4 给出了相应的 PSD, 可以看出 SBT 分量的 PSD 和只有固定散射体的 PSD 比较接近, 还可以看出 SBR 分量的 PSD 与包含 SBT 和 SBR 的 PSD 更为接近, 因为 SBR 散射体速度相比收发机的运动速度要大, SBT 散射体速度相对于 SBR 散射体速度很小。因此, 当发端(收端)一次散射体运动速度相对于收发机或收端(发端)移动散射体的运动速度较小时, 其对多普勒的影响很小。

3.2 二次散射 V2V 信道的 ACF 和 PSD

图 5 给出了包含 DB 分量和只有固定散射体时 V2V 信道的 ACF。我们分析了两次散射的移动散射体的 3 种速度情况: (1) 两次散射的散射体的运动速度都很小, 假设均服从负指数分布(exp, exp); (2) 一次散射的散射体的运动速度很小, 另外一次散射的散射体运动速度很大, 假设散射体速度较小的速度服从负指数分布, 速度较大的服从双高斯混合分布(exp, GM); (3) 两次散射的散射体的运动速度都很大, 均服从双高斯混合分布(GM, GM)。将负指数速度分布和混合高斯速度分布代入式(11)即可得到这 3 种速度情况下包含 DB 分量的 V2V 信道的自相关函数。从图 5 可以看出当时间差较小时, 移动散射体的速度越大, ACF 越小。并且可以看出经过两次运动速度很小的散射体散射时与只有固定散射体的 V2V 信道的 ACF 的差距要比图 3 中只经过一次运动速度很小的散射体散射时与只有固定散射体的 V2V 信道的 ACF 的差距要大。

图 6 给出了相应的 DB 分量的 PSD。从图 6 可以看出散射体的移动速度越大, 多普勒功率谱密度扩展就越大, 顶端越平滑。还可以看出经过两次速度都

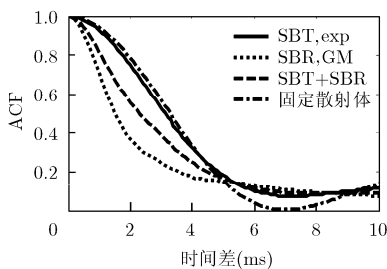


图 3 包含 SBT 和 SBR 分量的 V2V 信道的自相关函数

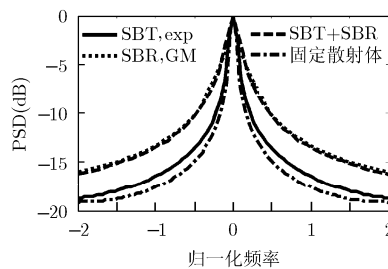


图 4 包含 SBT 和 SBR 分量的 V2V 信道的多普勒功率谱密度

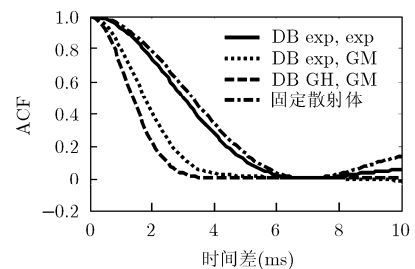


图 5 包含 DB 分量的 V2V 信道的自相关函数

很小的移动散射体散射时的PSD相比只有固定散射体的PSD差距也比较大，即经过两次运动速度很小的散射体散射时对二次散射分量的多普勒谱的影响是比较大的。

3.3 ACF 和 PSD 在 4 种不同传播情形下的对比

图7给出了在F2F($v_T = v_R = 0$)信道当移动散射体的速度服从均匀分布时4种传播情形的自相关函数以便于比较不同的移动散射体对信道的影响，4种传播情形分别为：(1)本文中提出的包含SBT和SBR分量的信道；(2)本文提出的包含DB分量的信道；(3)基于本文提出的信道模型，得到的包含SBT, SBR和DB分量的信道；(4)文献[12]中收发端之间只经过一次散射(SB)的信道。在比较中，SB散射体的平均速度为10 km/h；SBT散射体的平均速度为5 km/h，SBR散射体的平均速度为15 km/h；DB两个散射体的平均速度均为10 km/h。从图7可以看出文献[12]中只包含SB分量的ACF与本文提出的包含SBT和SBR分量信道的ACF相差不大，但都比只包含DB分量的ACF要大。还可以看出包含SBT, SBR和DB分量的信道的ACF和文献[12]中只包含SB分量的ACF不同但区别不大，所以一次散射对信道的ACF影响要更大。

图8给出了相应的多普勒功率谱密度PSD，可以看出文献[12]中只包含SB分量的PSD与本文的包含SBT和SBR分量的PSD非常接近，只有DB分量的PSD与之相比要大得多且顶部更为平滑。还可以看

出包含SBT, SBR和DB分量的PSD比文献[12]中只包含SB分量的PSD要大一些。

从而可以得出结论，在收发机之间只经过一次散射时，考虑SBT和SBR分量的ACF和PSD与只考虑SB分量的结果很接近。收发机之间经过二次散射时的ACF要比只经过一次散射的小，PSD要比只经过一次散射时大。在一次、二次散射都存在时，一次散射对信道的影响比较大，二次散射的作用较小但在信道分析中是不可以完全忽略的。

3.4 理论计算与测量结果的对比

图9给出了通过对式(15)进行傅里叶变换得到的V2V信道的PSD和文献[14]图6中城市环境下测量得到的PSD的对比。在文献[14]中只有收发端在运动，不存在其他移动散射体，所以在本文的理论计算中，移动散射体的速度都设置为0，其他参数采用与文献[14]相同的参数设置，即传输信号包含分量SBT, SBR, DB和LOS分量且功率比例因子为 $\eta_T = 0.1, \eta_R = 0.1, \eta_{TR} = 0.8$ ，莱斯因子 $K = 4$ ，载频 $f_0 = 5.2$ GHz。由图9可以看出，本文的理论计算值和文献[14]中的测量值比较接近。

图10给出了通过对式(15)进行傅里叶变换得到的F2F信道的PSD和文献[12]图10中在收发端固定且其周围存在移动散射体(行驶车辆)场景下测量的PSD的对比。在文献[12]中信号只包含一次散射分量，所以本文在理论计算中假设只包含SBT和SBR分量，功率比例因子设置为 $\eta_T = 0.5, \eta_R = 0.5$ ，

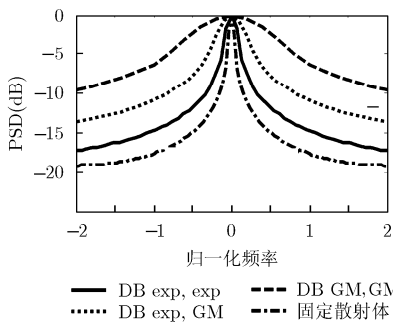


图6 包含DB分量的V2V信道的多普勒功率谱密度

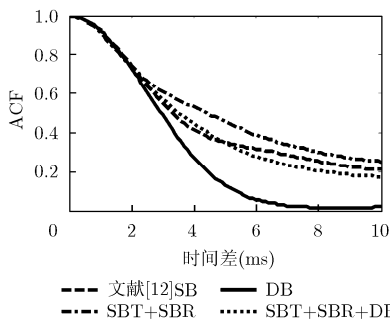


图7 速度为均匀分布时4种情形的自相关函数在F2F信道的对比

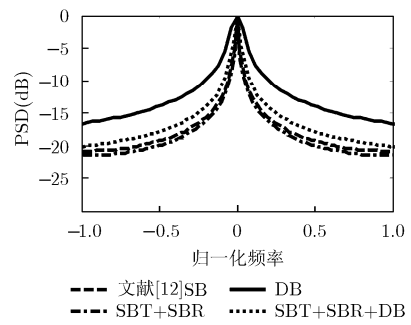


图8 速度为均匀分布时4种情形的多普勒功率谱密度在F2F信道的对比

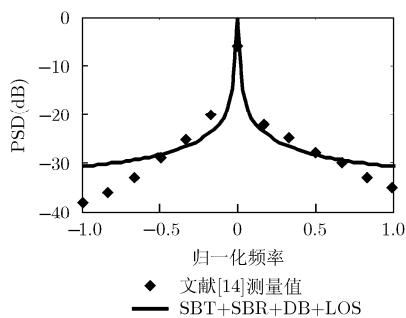


图9 理论计算和文献[14]测量得到的PSD在没有移动散射体的V2V信道的对比

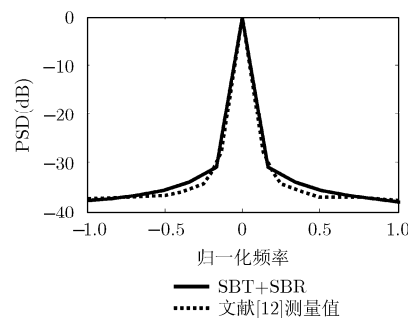


图10 理论计算和文献[12]测量得到的PSD在有移动散射体的F2F信道的对比

$\eta_{TR} = 0$, 莱斯因子 $K=0$ 。在比较中本文采用与文献[12]相同的参数设置, 即收发端运动速度 $v_T = v_R = 0$, 载频 $f_0 = 29.5$ GHz。从图 10 可以看出, 本文的理论计算值和文献[12]中的测量值非常接近。

4 结论

本文首次提出了在移动散射体的运动速度和方向都随机变化时车辆对车辆的两种无线信道传播模型, 一种是含一次散射发射和一次散射接收的信道模型, 另一种是包含二次散射的信道模型, 研究了这两种典型 V2V 信道模型的信道复增益, 并通过计算得到了这两种模型的自相关函数和多普勒功率谱密度。在这两种模型的基础上还给出了同时包含一次散射发射和接收, 二次散射和视距分量的传播模型。文中分别用指数分布和混合高斯分布来描述运动速度较小和较大的散射体速度。研究发现运动速度很小的散射体对一次散射的 V2V 信道的 ACF 和 PSD 影响很小, 但对二次散射的 V2V 信道的 ACF 和 PSD 影响比较大; 运动速度较大的散射体对一次和二次散射的 V2V 信道的的影响都很大。在收发端都固定的情况下, 比较了基于本文提出的一次散射发射, 一次散射接收和二次散射分量的信道模型和现有文献中只考虑收发端间一次散射的信道模型的 ACF 和 PSD, 对同一时间差和多普勒频移, 发现本文包含 SBT 和 SBR 分量信道的 ACF 和 PSD 和只考虑 SB 分量的结果很接近, 经过二次散射信道的 ACF 要比只经过一次散射的小, PSD 要比一次散射的大。对存在一次和二次散射的信道, 二次散射分量贡献相对要小, 但在信道的精确分析中是不可完全忽略的。除了理论分析, 本文还与已有文献中的测量值进行了对比, 结果符合得很好, 从而验证了本文提出模型的正确性。本文模型具有普遍性, 可应用到毫米波段信道多普勒谱研究。

参考文献

- [1] PÄTZOLD M, HOGSTAD B O, and YOUSSEF N. Modeling, analysis, and simulation of MIMO mobile-to-mobile fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(2): 510-520. doi: 10.1109/TWC.2008.05913.
 - [2] 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. doi: 10.1109/TWC.2015.2461679.
 - [3] AVAZOV N and 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. doi: 10.1109/TVT.2015.2415256.
 - [4] ACOSTA G, TOKUDA K, and INGRAM M. Measured joint Doppler-delay power profiles for vehicle-to-vehicle communications at 2.4 GHz[C]. *Proceedings of IEEE GLOBECOM Conference*, Dallas, TX, USA, 2004: 3813-3817. doi: 10.1109/GLOCOM.2004.1379082.
 - [5] CHENG L, HENTY B E, STANCIL D D, et al. Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 GHz Dedicated Short Range Communication (DSRC) frequency band[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(8): 1501-1516. doi: 10.1109/JSAC.2007.071002.
 - [6] ADHIKARI N, KUMAR A, and NOGHANIAN S. Multiple antenna channel measurements for car-to-car communication [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 674-677. doi: 10.1109/LAWP.2015.2468221.
 - [7] 赵雄文, 关利华, 梁晓林, 等. 端到端无线信道信号幅度和多普勒谱分布研究[J]. *电波科学学报*, 2015, 30(3): 583-588. doi: 10.13443/j.cjors.2014061602.
 - [8] ZHAO X, GUAN L, LIANG X, et al. Signal amplitude and Doppler spectrum distribution study for indoor device-to-device radio channels[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(3): 583-588. doi: 10.13443/j.cjors.2014061602.
 - [9] BORHANI A and PÄTZOLD M. A unified disk scattering model and its angle-of-departure and time-of-arrival statistics [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(2): 473-485. doi: 10.1109/TVT.2012.2227859.
 - [10] PHAM V H, TAIEB M H, CHOUINARD J Y, et al. On the double Doppler effect generated by scatterer motion[J]. *REV Journal on Electronics and Communications*, 2011, 1(1): 30-37.
 - [11] ROY S, HUYNH H T, and FORTIER P. Compound Doppler spread effects of subscriber motion and scatterer motion[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2003, 57(4): 237-246.
 - [12] ZAJIĆ A G. Impact of moving scatterers on vehicle-to-vehicle narrowband channel characteristics[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(7): 3094-3106. doi: 10.1109/TVT.2014.2299239.
 - [13] BORHANI A and PÄTZOLD M. Correlation and spectral properties of vehicle-to-vehicle channels in the presence of moving scatterers[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9): 4228-4239. doi: 10.1109/TVT.2013.2280674.
 - [14] LIANG X, ZHAO X, LI S, et al. A non-stationary geometry-based scattering model for street vehicle-to-vehicle wideband MIMO channels[C]. *IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Hong Kong, China, 2015: 2239-2243. doi: 10.1109/PIMRC.2015.7343670.
 - [15] ZAJIĆ A G and STÜBER G L. Three-dimensional modeling and simulation of wideband MIMO mobile-to-mobile channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(3): 1260-1274. doi: 10.1109/TWC.2009.070379.
- 梁晓林: 女, 1988年生, 博士生, 研究方向为 M2M MIMO 宽带无线信道模型和 MIMO 电力线信道及其传播特性。
 赵雄文: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域是 MIMO 无线通信信道建模和实验、无线通信系统、电力系统通信、电磁场理论及其应用、频谱管理和干扰协调技术等。
 李亦天: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为 M2M MIMO 无线信道建模及其与物理层算法的结合。