



研究与开发

# 基于信道反转的 C-V2X 动态功率控制方案

翟捷萍<sup>1</sup>, 刘小兰<sup>1</sup>, 肖海林<sup>1,2</sup>

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

2. 湖北大学计算机与信息工程学院, 湖北 武汉 430062)

**摘要:** 蜂窝车用无线通信 (cellular vehicle-to-everything, C-V2X) 系统中, 基于 V2V (vehicle-to-vehicle) 车载通信采用复用蜂窝用户 (cellular user, CUE) 的频谱资源减轻基站负载实现部分近场 V2V 通信, 在提高系统传输速率的同时也产生了同频干扰的问题。针对该问题, 提出基于信道反转的动态功率控制方案, 在非截断区内对 V2V 用户 (V2V user, VUE) 进行信道反转功率控制, 补偿因发射功率有限造成的截断中断, 通过动态功率控制解决蜂窝用户和 V2V 用户间的同频干扰。在此基础上, 通过拉格朗日乘子法得到目标函数的最优对偶解, 利用二分法确定 CUE 和 VUE 的最优功率, 满足蜂窝用户传输速率要求的同时最大化 V2V 用户的总传输速率。数值仿真结果表明, 当 VUE 总中断概率为 0.866 时, 该方案使系统性能提升了 48%。

**关键词:** C-V2X; 车载通信; 信道反转; 功率控制

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2021030

## Dynamic power control scheme for C-V2X communication with channel inversion

ZHAI Jieping<sup>1</sup>, LIU Xiaolan<sup>1</sup>, XIAO Hailin<sup>1,2</sup>

1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

2. School of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China

**Abstract:** In cellular vehicle-to-everything (C-V2X) system, V2V (vehicle-to-vehicle)-based communication utilizes the spectrum resource of cellular users (CUE) to reduce the load of base stations, and thus realize partial near-field V2V communication. Although the V2V-based communication can improve the transmission rate of system, it causes co-frequency interference. To solve the problem, a dynamic power control scheme with channel inversion was proposed. In this scheme, channel inversion power control on V2V users (VUE) was performed to compensate the truncation interruption caused by limited transmission power in the non-truncated area, where the co-frequency interference between cellular users and V2V users was solved through dynamic power control. Furthermore, the optimal dual solution of objective function was obtained by Lagrange multiplier method and the optimal power allocation was

收稿日期: 2020-11-23; 修回日期: 2021-02-05

通信作者: 肖海林, xhl\_xiaohailin@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61872406, No.61472094); 浙江省重点研发计划项目 (No.2018C01059)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61872406, No.61472094), The Key Research and Development Project of Zhejiang Province of China (No. 2018C01059)



carried out for cellular users and V2V users by bisection method, which met the rate requirements of all cellular users. Finally, the total transmission rate of V2V users was maximized. Numerical simulation results were shown that when the total outage probability of V2V users was 0.866, the proposed scheme was promoted by 48%.

**Key words:** C-V2X, vehicle communication, channel inversion, power control

## 1 引言

随着城市智能交通系统的快速发展,车辆间通信需求逐渐增多<sup>[1-3]</sup>。在车辆自组织网络(vehicular Ad Hoc network)下车辆间通信对传输速率和可靠性的要求也随之提高<sup>[4-5]</sup>。与传统车辆自组织网络相比,V2V(vehicular-to-vehicular)作为无须经过基站转发近距离的自主通信,具有低时延、高速率的特点,而采用复用模式进行V2V通信,在减轻基站负担的同时,也大大提高了频谱资源的利用率。然而,在基于蜂窝车用无线(cellular vehicular-to-everything, C-V2X)通信系统中,V2V用户(V2V user, VUE)复用蜂窝用户(cellular user, CUE)信道资源进行V2V通信会随之产生相应的同频干扰问题<sup>[6-7]</sup>。

近年来,相关学者对复用模式下终端直通(device-to-device, D2D)通信的干扰问题展开相应研究<sup>[8-11]</sup>:

- 参考文献[8]分析了CUE及D2D用户(D2D user, DUE)的干扰问题和系统的遍历速率,但是只考虑了单个CUE及单个DUE;
- 参考文献[9]在基于蜂窝网络的V2V通信下,以最大化总速率和最小可达速率为目标进行信道选择与功率控制,以此实现系统的最佳性能;
- 参考文献[10]在混合D2D蜂窝网络中采用模拟退火算法,从资源分配与功率控制两方面来进一步增大系统总吞吐量,但CUE和DUE间的相互干扰并未详细考虑;
- 参考文献[11]提出一种联合功率及信道分配算法,在CUE的速率、DUE的中断概率及等待时间约束下最大化CUE和速率。

以上研究表明,无线通信网络中的同频干扰通过功率控制可以有效解决。

为进一步实现网络性能的优化,基于信道反转的研究也引起了广泛关注<sup>[12-13]</sup>:

- 参考文献[12]在蜂窝无线网络中,由单层拓展到多层,上行链路传输采用基于信道反转的功率控制,分析相应网络参数与性能;
- 参考文献[13]着眼于安全D2D传输设计,采用信道反转功率控制,推导出两跳传输情况下的安全中断概率表达式。

但参考文献[12-13]都只考虑拥有单一用户的无线通信网络。

综合以上考虑,本文在基于C-V2X通信系统中,针对CUE及VUE间的同频干扰,提出了基于信道反转的动态功率控制方案,利用信道反转补偿VUE在非截断区内因有限发射功率造成的截断中断,在满足所有CUE速率需求的情况下,通过拉格朗日乘子法及二分法确定CUE和VUE的最优功率,使VUE总传输速率最大化。数值仿真结果表明,本文所提方案与其他方案相比能够很好地使系统中VUE总传输速率最大化。

## 2 模型建立

### 2.1 模型描述

本文考虑车辆在拥堵的城市环境中。系统模型如图1所示,小区的半径为 $R$ ,小区中央位置含单个基站、 $M$ 个CUE用集合 $M = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 表示、 $N$ 个VUE用集合 $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 表示, $M \geq N$ 。基于C-V2X通信系统下可支持V2V通信的单个蜂窝小区,采用OFDMA(orthogonal frequency division multiple access)技术将小区内可被利用的频谱资源划分为 $M$ 个正交子信道。不

失一般性,假设第 $m$ 个CUE被分配到第 $m$ 个子信道,所以 $M$ 也表示子信道的集合。每个子信道可以被CUE和VUE所共享,CUE通过基站进行通信;所有VUE在基站的控制下通过复用CUE的上行链路资源通信。CUE和VUE的分布遵循泊松点过程,密度分别记为 $\lambda_c$ 和 $\lambda_v$ 。假设所有的信道服从瑞利衰落,基站实时获取全部信道的CSI(channel state information)。CUE与VUE拥有更高的优先级进行通信,因此第 $m$ 个CUE相应的传输速率要求不小于 $R_{m,c}^{\min}$ 。

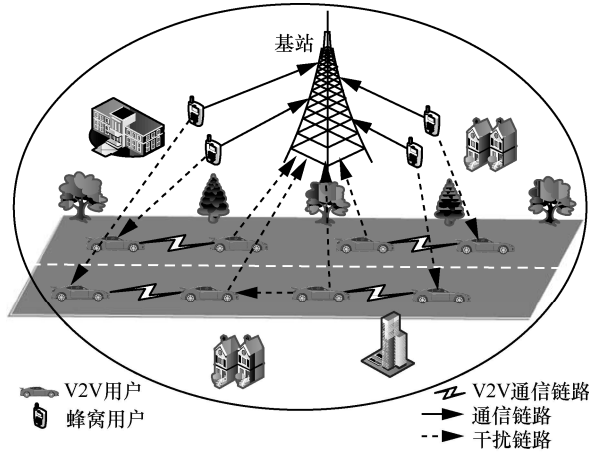


图1 系统模型

由于资源复用所引起的小区干扰模型如图2所示。从图2中可以看出,VUE复用CUE上行资源,产生的干扰主要是VUE发送端对基站的干扰、CUE对VUE接收端的干扰、复用同一CUE资源的其他VUE的干扰。

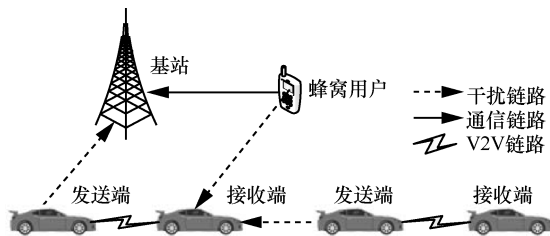


图2 小区内干扰模型

根据上述的分析,可以得到第 $m$ 个CUE在基站处的信干噪比(signal to interference and noise ratio, SINR):

$$\text{SINR}_c = \frac{P_m x_{m,c}^{-\alpha} |h_{m,c}|^2}{\sum_{n \in N} P_n x_{n,c}^{-\alpha} |h_{n,c}|^2 + N_0} \quad (1)$$

其中, $P_m$ 表示CUE的发射功率, $P_n$ 表示VUE的发射功率; $x_{m,c}$ 、 $x_{n,c}$ 分别表示第 $m$ 个CUE和第 $n$ 个VUE发送端到基站的距离; $h_{m,c}$ 、 $h_{n,c}$ 分别表示第 $m$ 个CUE和第 $n$ 个VUE发送端到基站的信道增益。另外, $\alpha$ 表示路径损耗指数; $N_0$ 表示子信道 $m$ 上的高斯白噪声功率。

若第 $n$ 个VUE对使用第 $m$ 个子信道,则第 $m$ 个CUE和其他使用此子信道的VUE发送端都会对第 $n$ 个VUE接收端产生干扰。那么,第 $n$ 个VUE接收端处的SINR表示为:

$$\text{SINR}_v = \frac{P_n x_{n,n}^{-\alpha} |h_{n,n}|^2}{P_m x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0} \quad (2)$$

其中, $x_{n,n}$ 表示第 $n$ 个VUE对发送端到接收端的距离; $x_{m,n}$ 、 $x_{n',n}$ 分别表示第 $m$ 个CUE和第 $n'$ 个VUE发送端到第 $n$ 个VUE接收端的距离; $h_{n,n}$ 表示第 $n$ 个VUE对发送端到接收端的信道增益; $h_{m,n}$ 和 $h_{n',n}$ 分别表示第 $m$ 个CUE和第 $n'$ 个VUE发送端到第 $n$ 个VUE接收端的信道增益。

## 2.2 中断分析

由于本文考虑VUE复用CUE上行资源进行通信,小区内用户通信会因此受到同频干扰,而中断概率是C-V2X通信系统中的一项重要性能指标。假设CUE和VUE的SINR门限值分别为 $\beta_c$ 、 $\beta_v$ ,相应的中断概率是CUE和VUE所接收到的SINR分别小于其所对应的门限值。

### 2.2.1 CUE中断概率

当CUE的通信服务质量(quality of service, QoS)被满足时,其中断概率可以表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^c &= E[P(\text{SINR}_c < \beta_c)] = \\ &= 1 - E[P(\text{SINR}_c \geq \beta_c)] = \\ &= 1 - \int_0^R P(\text{SINR}_c \geq \beta_c) f(x_{m,c}) dx_{m,c} \end{aligned} \quad (3)$$



其中,  $x_{m,e}$  相应的概率密度表达式为:

$$f(x_{m,e}) = \frac{2x_{m,e}}{R^2}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P\{\text{SINR}_c \geq \beta_c\} &= P\left\{\frac{P_m x_{m,e}^{-\alpha} |h_{m,e}|^2}{\sum_{n \in N} P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2 + N_0} \geq \beta_c\right\} = \\ P\left\{|h_{m,e}|^2 > \frac{\beta_c x_{m,e}^\alpha}{P_m} \left(\sum_{n \in N} P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2 + N_0\right)\right\} &= \\ \exp\left(-\frac{\beta_c x_{m,e}^\alpha N_0}{P_m}\right) L_{I_v}(s) \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $L_{I_v}(s)$  表示  $I_v$  的拉普拉斯变换。另外,

$$\begin{aligned} I_v &= \sum_{n=1}^N P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2, \quad s = \frac{\beta_c x_{m,e}^\alpha}{P_m}. \\ L_{I_v}(s) &= E\left[\exp\left(-s \sum_{n \in N} P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2\right)\right] = \\ E\left[\prod_n E\left[\exp\left(-s P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2\right)\right]\right] \end{aligned} \quad (6)$$

利用公式  $E\left[\prod_n f(x)\right] = \exp\left(-\lambda \int_{R^2} (1-f(x)) dx\right)$ ,

$$\begin{aligned} \int_{R^2} f(x) dx &= 2\pi \int_0^\infty x f(x) dx, \quad \text{式 (6) 可以写成:} \\ L_{I_v}(s) &= \exp\left(-\lambda_v \int_{R^2} \left(1 - E\left[\exp\left(-s P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2\right)\right]\right) d(x_{n,e})\right) = \\ \exp\left(-2\pi \lambda_v \int_0^\infty \left(1 - E\left[\exp\left(-s P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2\right)\right]\right) x_{n,e} d(x_{n,e})\right) \end{aligned} \quad (7)$$

对于瑞利信道而言,  $|h_{n,e}|^2 \rightarrow \exp(1)$ , 可以得到:

$$L_{I_v}(s) = \exp\left(-2\pi \lambda_v \int_0^\infty \left(\frac{s P_n x_{n,e}^{-\alpha+1}}{1 + s P_n x_{n,e}^{-\alpha}}\right) d(x_{n,e})\right) \quad (8)$$

利用参考文献[14]中公式 (9.1) 的定义, 可以得到:

$$L_{I_v}(s) = \exp\left[-\frac{2\pi \lambda_v}{\alpha} \left[\frac{\beta_c P_n}{P_m}\right]^{\frac{\alpha}{2}} B\left(1 - \frac{2}{\alpha}, \frac{2}{\alpha}\right) x_{n,e}^2\right] \quad (9)$$

其中,  $B(P, Q)$  表示  $\beta$  函数, 函数  $B\left(1 - \frac{2}{\alpha}, \frac{2}{\alpha}\right) =$

$\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) \Gamma\left(1 - \frac{2}{\alpha}\right)$ ,  $\Gamma(x)$  为 Gamma 函数, 定义为

$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$ 。将式 (4)、式 (5)、式 (9)

代入式 (3), 则 CUE 的中断概率表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^c &= 1 - \int_0^R \frac{2x_{m,e}}{R^2} \exp\left(-\frac{\beta_c x_{m,e}^\alpha N_0}{P_m}\right) \times \\ &\exp\left(-\frac{2\pi^2 \lambda_v x_{m,e}^2}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} \left(\frac{\beta_c P_n}{P_m}\right)^{\frac{2}{\alpha}}\right) dx_{m,e} \end{aligned} \quad (10)$$

## 2.2.2 VUE 中断概率

当 VUE 的 QoS 被满足时, 其中断概率可以表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^v &= E[P(\text{SINR}_v < \beta_v)] = \\ 1 - E[P(\text{SINR}_v \geq \beta_v)] &= \\ 1 - \int_0^{R_T} P(\text{SINR}_v \geq \beta_v) f(x_{n,n}) dx_{n,n} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $x_{n,n}$  相应的概率密度表达式为:

$$f(x_{n,n}) = 2x_{n,n} / R_T^2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P(\text{SINR}_v \geq \beta_v) &= \\ P\left\{\frac{P_n x_{n,n}^{-\alpha} |h_{n,n}|^2}{P_m x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0} \geq \beta_v\right\} &= \\ P\left\{|h_{n,n}|^2 > \frac{\beta_v x_{n,n}^\alpha}{P_n} \left(P_m x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0\right)\right\} &= \\ \exp\left(-\frac{\beta_v x_{n,n}^\alpha N_0}{P_n}\right) L_{I_c}(s') L_{I_v'}(s') \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $L_{I_c}(s')$  及  $L_{I_v'}(s')$  分别表示  $I_c$  及  $I_v'$  的拉普拉斯变换。  $I_c = P_m x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2$ ,  $I_v' = \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2$ ,

$s' = \frac{\beta_v x_{n,n}^\alpha}{P_n}$ 。已知  $|h_{m,n}|^2 \rightarrow \exp(1)$ ,

$$\begin{aligned} L_{I_c}(v') &= E\left[\exp\left(-v' P_m x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2\right)\right] = \\ E\left[\frac{1}{1 + v' P_m x_{m,n}^{-\alpha}}\right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$L_{I_v}(v') = \exp \left( -\frac{2\pi\lambda_v}{\alpha} \left[ \frac{\beta_v P_n}{P_n} \right]^{\frac{2}{\alpha}} B \left( 1 - \frac{2}{\alpha}, \frac{2}{\alpha} \right) x_{n,n}^2 \right) \quad (15)$$

将式(12)~式(15)代入式(11),可得 VUE 的中断概率表示为:

$$P_{\text{out}}^v = 1 - P(\text{SINR}_v \geq \beta_v) = 1 - \exp \left( -\frac{\beta_v x_{n,n}^\alpha N_0 x_{n,n}^\alpha}{P_n} - \frac{2\pi^2 \lambda_v x_{n,n}^2}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} \left( \frac{\beta_v P_m}{P_n} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \right) \times E \left[ \exp \left( \frac{\beta_v x_{n,n}^\alpha}{P_n} P_m x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 \right) \right] \quad (16)$$

考虑  $\alpha = 4$ , 并且忽略噪声  $N_0 = 0$  的这种特殊情况<sup>[15]</sup>, 并将一个近似值<sup>[16]</sup>  $E \left[ \left( 1 + \frac{\zeta}{x_{m,n}^\alpha} \right)^{-1} \right] \simeq \frac{1}{1 + \frac{\zeta^{2/\alpha}}{E[x_{m,n}]^2}}$  代入式(14)中。此时, CUE 和 VUE

的中断概率可以化简表示如下:

$$P_{\text{out}}^c = 1 - \frac{1 - \exp \left( -\frac{\pi^2 \lambda_v}{2} \left( \frac{\beta_c P_n}{P_m} \right)^{\frac{1}{2}} R^2 \right)}{\frac{\pi^2 \lambda_v}{2} \left( \frac{\beta_c P_n}{P_m} \right)^{\frac{1}{2}} R^2} \quad (17)$$

$$P_{\text{out}}^v = 1 - \exp \left( -\frac{\pi^2 \lambda_v x_{n,n}^2 \beta_v^{1/2}}{2} \right) \times \frac{1}{1 + \left( \frac{\beta_v P_m}{P_n} \right)^{1/2} \frac{x_{n,n}^2}{(128R_T / (45\pi))^2}} \quad (18)$$

对 VUE 采用基于信道反转的功率控制, 即  $P_n = \eta x_{n,n}^\alpha$ , 其中  $\eta$  是信道反转功率控制系数。将经过信道反转功率控制后的 VUE 发射功率代入式(18)中, 则 VUE 基于信道反转功率控制系数的中断概率可以表示为:

$$P_{\text{out}}^v = 1 - \exp \left( -\frac{\pi^2 \lambda_v x_{n,n}^2 \beta_v^{1/2}}{2} \right) \times$$

$$\frac{1}{1 + \left( \frac{\beta_v P_m}{\eta x_{n,n}^4} \right)^{1/2} \frac{x_{n,n}^2}{(128R_T / (45\pi))^2}} \quad (19)$$

## 2.3 问题形成

根据上述分析, 为提高系统性能, 实现 VUE 总传输速率最大化的目标, 在满足所有 CUE 速率需求前提下, 以及在最大发射功率和最小 SINR 约束下提出目标函数及约束条件表示如式(20):

$$\max \left\{ \sum_{n=0}^N B \log(1 + \text{SINR}_v) \right\} \quad (20)$$

$$C_1: \log(1 + \text{SINR}_c) \geq R_{m,c}^{\min}, \forall m \in M$$

$$C_2: 0 \leq P_n \leq P_{v\max}$$

$$C_3: 0 \leq P_m \leq P_{c\max}$$

其中,  $C_1$  保证了 CUE 的速率需求,  $R_{m,c}^{\min}$  表示 CUE 最小速率, 通常假设  $R_{m,c}^{\min} > 0$ ;  $C_2$ 、 $C_3$  分别表示每个 VUE 和每个 CUE 所消耗的功率不能超过各自的最大发射功率。

## 3 基于信道反转的功率控制方案

### 3.1 功率控制方案

为了解决 CUE 和 VUE 间的同频干扰问题, 对 VUE 进行动态的功率控制, 功率控制模型如图3所示, 保证区内用户的正常通信。本文考虑以 VUE 发送端为中心, 在其周围形成两个区域<sup>[17]</sup>——等强度边界及非截断区, 分成 (a)、(b)、(c) 3 种情况进行说明。

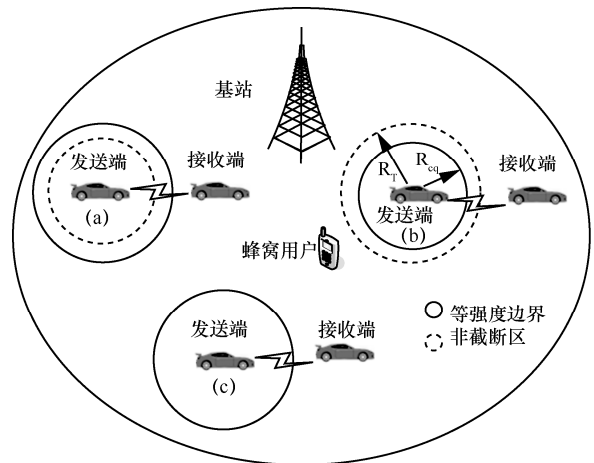


图3 功率控制模型



等强度边界在 VUE 发送端周围形成,在此区域内 VUE 信号强度占主导,区域外 CUE 信号强度占主导,而在边界处 VUE 和 CUE 的信号强度相等。

$$R_{eq} = \left( \frac{P_{vmax}}{P_m} \right)^{\frac{1}{\alpha}} x_{min} \quad (21)$$

其中,  $x_{min}$  表示 VUE 发送端与最近的 CUE 间的距离 (CUE 假设在原点)。

在非截断区内, VUE 因有限的功率导致 V2V 通信受到限制,无法通信。而超过非截断区的边界, VUE 就会因为有限的功率而被截断,所以在此区域内对 VUE 进行基于信道反转的功率控制,增大 VUE 发射功率,补偿 VUE 因发射功率有限而造成截断中断。此区域外, VUE 发送端由于功率不足无法反转路径损耗而不能进行 V2V 通信。

$$R_T = \left( \frac{P_n}{\eta_l} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (22)$$

其中,  $\eta_l$  是信道反转功率系数,  $\eta \geq \eta_l$ 。

上述两种区域分为以下 3 种情况分别对应图 3 中的 (a)、(b)、(c)。

#### (a) 等强度边界>非截断区

VUE 与 CUE 距离较远时,在两环的边界, VUE 的信号强度不会对 CUE 引起强烈的干扰,但由于距离较远,对 VUE 来说复用远距离的 CUE 并不是一个很好的选择,并且对 VUE 本身来说也没有足够的功率支持 V2V 通信。

#### (b) 等强度边界<非截断区

此种情况下,两区域的环空区 CUE 信号较弱,而非截断区所扩展到等强度边界外的区域 VUE 的信号将被浪费,因为它不会在 CUE 更强的信号干扰下进行 V2V 通信。

#### (c) 等强度边界=非截断区

在特定传输功率下的 VUE,距离 CUE 两个区域的边界重叠,这便产生了最有利于 VUE 通信的区域,在此区域内 VUE 有足够的通信信号强度,并且大于 CUE 信号强度。

如图 3 中场景 (c) 所示的,通过改变 VUE 功率和距离最近的 CUE 功率平衡这两个边界。这是根据 VUE 的等强度边界调整非截断区实现的,决定等强度边界的参数是 VUE 到最近的 CUE 间的距离以及 VUE 和 CUE 的传输功率。在计算等强度边界时,假设 VUE 最大允许发射功率  $P_{vmax}$ ,并将 CUE 的发射功率定为固定的,以分析 VUE 发射功率的最坏情况。而等强度边界仅仅成为关于距离 (VUE 与最近的 CUE 间的距离) 的函数;而 VUE 在非截断区域内的功率  $P_n$  是一个变量,当等强度边界和非截断区相等时,该变量会自行调整。根据所提出的功率控制方案,当 VUE 与最近的 CUE 之间的距离很小时, VUE 会降低其功率,从而减小与 CUE 间的相互干扰。

综上分析,所提出的功率控制使得等强度边界和非截断区相等。在此区域内, VUE 有足够的功率进行通信,并且信号强度大于 CUE 的信号强度,保证了此区域是对 VUE 通信最有利的区域。

经过动态功率控制后, VUE 的发射功率  $P_n$  又可以表示为:

$$P_n = \frac{P_{vmax} \beta_v}{P_m} x_{min}^{\alpha} \quad (23)$$

其中,  $x_{min}$  表示 VUE 与最近的 CUE 间的距离。

因此,功率优化方案下 VUE 的中断概率表示为:

$$P_{out}^v = 1 - \exp \left( - \frac{\pi^2 \lambda_v x_{n,n}^2 \beta_v^{1/2}}{2} \right) \times \frac{1}{1 + \left( \frac{P_m^2 x_{min}^{-\alpha}}{P_{vmax}} \right)^{1/2} \frac{x_{n,n}^2}{(128 R_T / (45\pi))^2}} \quad (24)$$

若 VUE 到最近的 CUE 间的距离超过  $R_T$ ,则发生截断中断。则 VUE 的截断中断概率表示为:

$$P_T^v = e^{-\lambda_v \pi R_T^2} = E_{x_{min}} \left[ e^{-\pi \lambda_v x_{min}^2 \left( \frac{P_{vmax}}{P_m} \right)^{2/\alpha}} \right] = \int_0^{\infty} e^{-\pi \lambda_v x_{min}^2 \left( \frac{P_{vmax}}{P_m} \right)^{2/\alpha}} 2\pi \lambda_v x_{min}^3 e^{-\pi \lambda_v x_{min}^2} dx_{min} \quad (25)$$

进一步化简可得:

$$P_T^v = \frac{\lambda_c}{\lambda_v \sqrt{\frac{P_{v\max}}{P_m}} + \lambda_c} \quad (26)$$

根据所提出的动态功率控制方案, VUE 与最近的 CUE 距离很小时, VUE 会降低其发射功率, 减少与 CUE 间的同频干扰, 以确保区域内用户的正常通信。同时, 为减轻基站的负载且提高频谱利用率, 本文考虑所有 VUE 复用 CUE 上行链路资源进行通信, 并对 VUE 总中断概率进行分析。

### 3.2 VUE 总中断概率分析

基于低密度的 C-V2X 通信系统, 截断中断发生时, VUE 并不总能找到相应的 CUE 信道进行复用。而在非截断区之外, VUE 没有足够的功率进行 V2V 通信, 会发生截断中断, 所以 VUE 需要在特定区域内找到可以复用的 CUE, 以此进行 V2V 通信。此时, VUE 复用距离最近的 CUE 信道, 进行 V2V 通信。VUE 复用 CUE 上行资源的复用模型如图 4 所示。

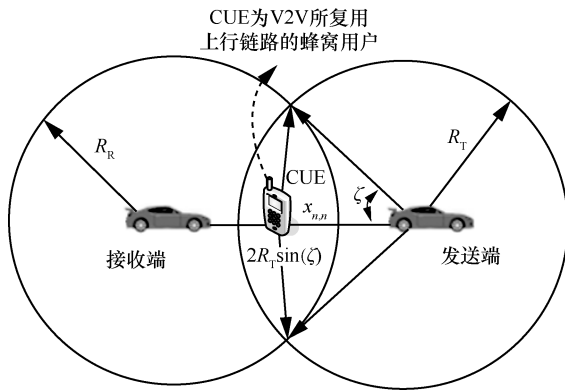


图4 VUE 复用 CUE 上行资源的复用模型

等强度边界和非截断区重叠区域的半径为  $R_T$ , VUE 接收端的区域半径为  $R_R$ ,  $R_T = R_R$ , 二者都依赖于 V2V 接收端的敏感度, 为了便于分析, 假设  $R_T = R_R$ 。图 4 中重叠区域的面积可以表示为:

$$S = 2 \left( \xi R_T^2 - \frac{1}{2} x_{n,n} \sin(\xi) \right) \quad (27)$$

其中,  $\xi = \cos^{-1} \left( \frac{x_{n,n}}{2R_T} \right)$  是以 VUE 发射端为原点到两个重叠区域交点夹角的  $\frac{1}{2}$ ,  $x_{n,n}$  是 VUE 对之间的距离。计算重叠区域的方法是以  $x_{n,n}$  为条件的重叠面积的积分,  $x_{n,n}$  在  $R_T$  和  $2R_T$  范围内均匀分布, 因为这是两个区域重叠的范围, 则可被确定复用的 CUE 在非截断区的概率为:

$$P_R = \frac{\frac{2}{R_T^2} \int_{R_T}^{2R_T} x_{n,n} S dx_{n,n}}{\pi R_T^2} \quad (28)$$

基于上述分析, 可知 VUE 总中断概率包括 SINR 中断概率和截断中断概率, VUE 的总中断概率表示为:

$$P_{\text{sum}}^v = P_{\text{out}}^v (1 - P_T^v) + P_T^v (P_R P_{\text{out}}^v + (1 - P_R) P_{\text{out}}^c) \quad (29)$$

### 3.3 基于拉格朗日及二分法的功率分配

为提高整体的系统性能, 在对小区内 CUE 和 VUE 进行动态功率控制的基础上, 利用拉格朗日乘法及二分法确定 CUE 和 VUE 的最佳发射功率, 以实现 VUE 总传输速率最大化的目标。针对所提的目标函数及约束条件, 目标函数中约束条件  $C_1$  可以转换成如式 (30) 所示形式:

$$\sum_{n \in N} P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2 + N_0 \leq I_{\text{th}}(P_m) \quad (30)$$

其中,  $I_{\text{th}}(P_m) = \frac{P_m x_{m,e}^{-\alpha} |h_{m,e}|^2}{2R_{m,c}^{\min} - 1} - N_0$ ,  $I_{\text{th}}(P_m)$  表示

CUE 可以容忍的最大干扰值。

确定 CUE 和 VUE 最佳发射功率的优化问题可以改写成:

$$\min - \sum_{n=0}^N B \ln(1 + \text{SINR}_v) \quad (31)$$

$$C_1: \sum_{n \in N} P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2 \leq I_{\text{th}}(P_m)$$

$$C_2: 0 \leq P_n \leq P_{\text{dmax}}$$

$$C_3: 0 \leq P_m \leq P_{\text{cmax}}$$



其中,  $C_1$  表示 VUE 通信时对 CUE 的干扰不能超过最大值。目标函数式 (31) 是凹函数, 但不等式约束条件是凸约束, 所以该问题是凸优化问题<sup>[18]</sup>。

上述问题的拉格朗日 (Lagrange) 函数为:

$$L = -\sum_{n=0}^N B \ln \left( 1 + \frac{P_n x_{n,n}^{-\alpha} |h_{n,n}|^2}{P_m^* x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0} \right) + \lambda [\sum_{n \in N} P_n x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2 - I_{th}(P_m)] + \psi(P_m - P_{cmax}) - \nu P_m + \omega(P_n - P_{vmax}) - \mu P_n \quad (32)$$

其中,  $\lambda$ 、 $\psi$ 、 $\nu$ 、 $\omega$ 、 $\mu$  为拉格朗日乘子。

$C_1 \sim C_3$  都是仿射的, 则目标函数的最优解满足 KKT 条件<sup>[19]</sup>, 那么  $P_m^*$  和  $P_n^*$  分别定义为第  $m$  个 CUE 和第  $n$  个 VUE 的最优功率。根据 KKT 条件, 可以相应得到以下各式。

由式 (28) 对  $P_n$  求导后, 可以得到:

$$-\frac{B}{\ln 2} \times \frac{1}{\frac{P_m^* x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0}{x_{n,n}^{-\alpha} |h_{n,n}|^2} + P_n^*} + \lambda^* [\sum_{n \in N} x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2] + \omega^* - \mu^* = 0, \forall n \quad (33)$$

由式 (30) 对  $P_m$  求导后, 可以得到:

$$\frac{B}{\ln 2} \times \left( \frac{x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2}{P_m^* x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0} - \frac{x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2}{P_m^* x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + P_n^* x_{n,n}^{-\alpha} |h_{n,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0} \right) + \lambda^* \left[ \frac{x_{m,e}^{-\alpha} |h_{m,e}|^2}{2R_{m,c}^{\min} - 1} - N_0 \right] + \psi^* - \nu^* = 0 \quad (34)$$

$$\lambda^* [\sum_{n \in N} P_n^* x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2 - I_{th}(P_m^*)] = 0 \quad (35)$$

$$\psi^*(P_m^* - P_{cmax}) = 0, \nu^* P_m^* = 0 \quad (36)$$

$$\omega^*(P_n^* - P_{vmax}) = 0, \mu^* P_n^* = 0, \forall n \quad (37)$$

$$\lambda^*, \psi^*, \nu^*, \omega^*, \mu^* \geq 0 \quad (38)$$

其中,  $\lambda^*$ 、 $\psi^*$ 、 $\nu^*$ 、 $\omega^*$ 、 $\mu^*$  是最优对偶解。

根据式 (32) ~ 式 (37), 可得  $P_n^*$  的闭式表

达式:

$$P_n^* = \left[ \frac{B}{\lambda^* [\sum_{n \in N} x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2] \cdot \ln 2} - \frac{P_m^* x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0}{x_{n,n}^{-\alpha} |h_{n,n}|^2} \right]_{0}^{P_{vmax}} \quad (39)$$

还可得  $\sum_{n \in N} P_n^* x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2 - I_{th}(P_m^*) = 0$ , 若该式

不取等号, 在相应速率需求的情况下, 系统中一部分 VUE 可以提高传输功率或相应信道的 CUE 降低传输功率增加 VUE 的和速率。同样可以得出  $P_m^*$  的闭式表达式:

$$P_m^* = \frac{\left[ \sum_{n \in N} P_n^* x_{n,e}^{-\alpha} |h_{n,e}|^2 + N_0 \right] \cdot (2R_{m,c}^{\min} - 1)}{x_{m,e}^{-\alpha} |h_{m,e}|^2} \quad (40)$$

由式 (39)、式 (40) 的相互关联性可知, 需要通过式 (33) ~ 式 (40) 得到  $\lambda^*$  后, 继而计算出  $P_n^*$  和  $P_m^*$ 。由第 2.1 节可知假设一般情况下  $R_{m,c}^{\min} > 0$ ,  $P_m$  必大于 0, 则式 (36) 中  $\nu^* = 0$ ; 若  $P_m^* < P_{cmax}$ , 则式 (36) 中的  $\psi^* = 0$ 。将  $\nu^* = 0$ 、 $\psi^* = 0$  代入式 (34) 中, 可以得到  $\lambda^*$  的表达式如下:

$$\lambda^* = \frac{B(2R_{m,c}^{\min} - 1)}{\ln 2 \cdot x_{m,e}^{-\alpha} |h_{m,e}|^2} \times \left( \frac{x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2}{P_m^* x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0} - \frac{x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2}{P_m^* x_{m,n}^{-\alpha} |h_{m,n}|^2 + P_n^* x_{n,n}^{-\alpha} |h_{n,n}|^2 + \sum_{n' \in N \setminus \{n\}} P_{n'} x_{n',n}^{-\alpha} |h_{n',n}|^2 + N_0} \right) \quad (41)$$

为了确保式 (32) 中的最优解, 采用二分法获得相应符合条件的功率数值。其中, 将  $p_{up}$ 、 $p_{down}$  设置为初始化 CUE 功率  $P_m$  的上限和下限,  $\delta$  为算法的精确度。算法的具体过程如下:

- (1) 输入  $p_{\text{up}} = P_{\text{cmax}}$ ,  $p_{\text{down}} = \frac{x_{m,c}^{-\alpha} |h_{m,c}|^2}{2R_{m,c}^{\text{min}} - 1}$ ,  $\delta$ ;
- (2) 设置  $P_m = \frac{p_{\text{up}} + p_{\text{down}}}{2}$ ;
- (3) 通过式 (39)、式 (40) 得出相应的  $P_n$ 、 $\lambda$ ;
- (4) 如果  $P_n = P_{\text{vmax}}$ , 则令  $\lambda = 0$ ;
- (5) 通过式 (41) 可得  $\lambda_1$ ;
- (6) 如果  $\lambda_1 > \lambda$ , 则令  $p_{\text{up}} = P_m$ ;
- (7) 否则令  $p_{\text{down}} = P_m$ ;
- (8) 判断  $p_{\text{up}} - p_{\text{down}} \geq \delta$  是否成立, 若成立, 则循环执行步骤 (2) ~ (8); 若不成立, 执行步骤 (9);
- (9) 输出  $P_n$ 、 $P_m$ 。

#### 4 数值分析

在本节中, 首先对 CUE 中断性能与 SINR 门限值的关系进行分析; 其次分析 VUE 总中断性能与 SINR 门限值间的关系; 紧接着在系统性能分析的基础上, 将本文所提方案与参考文献[20]和参考文献[21]的方案进行了对比, 分别对系统中不同用户的传输速率及 VUE 总传输速率进行相应分析。具体仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

| 参数名                 | 设定值           |
|---------------------|---------------|
| 小区半径 ( $R$ )        | 500 m         |
| 信道带宽 ( $B$ )        | 180 kHz       |
| CUE 的发射功率           | 30 dBm        |
| VUE 的发射功率           | 10 dBm        |
| 路径损耗指数 ( $\alpha$ ) | 4             |
| 高斯白噪声功率 ( $N_0$ )   | -174 dBm/Hz   |
| CUE 最小速率            | 10 bit/(s·Hz) |

##### (1) 中断概率

CUE 中断概率与 SINR 门限值的关系如图 5 所示, 反映的是 CUE 的中断性能与 SINR 门限值间的变化情况。随着 SINR 逐渐增大, CUE 的中断概率随之升高, 并且在不同的 VUE 密度下, 随

着 VUE 密度增大, CUE 的中断概率也逐渐升高。这是由于 VUE 密度越大时, VUE 与 CUE 间的同频干扰越大, CUE 的中断概率越高, 所以解决 CUE 与 VUE 间的同频干扰问题是很有必要的。

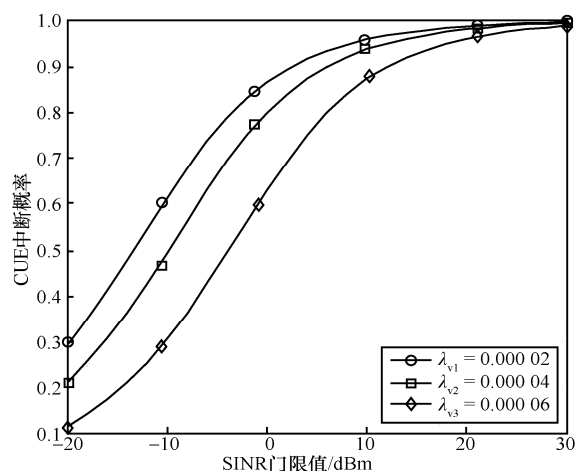


图 5 CUE 中断概率与 SINR 门限值的关系

本文中对 VUE 进行基于信道反转的功率控制是对 VUE 截断中断的补偿, VUE 总中断概率与 SINR 门限值间的关系曲线如图 6 所示, 通过分析信道反转功率控制系数与总中断性能间的关系验证本文所提出的基于信道反转的功率控制方案的有效性。

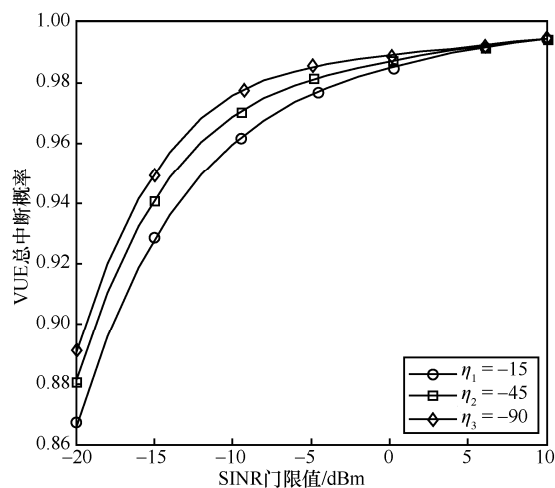


图 6 VUE 总中断概率与 SINR 门限值的关系曲线

基于信道反转功率控制的 VUE 随着其信道反转功率控制系数  $\eta$  增大时, VUE 总中断概率降低。在信道反转功率控制系数增大时, VUE



的 SINR 中断概率也会降低, 而 VUE 总中断概率包括 SINR 中断概率和截断中断概率, 在非截断区内对 VUE 进行基于信道反转的功率控制时, VUE 的发射功率增大, 对 VUE 因发射功率过低造成截断中断进行了补偿。因此随着信道反转功率控制系数  $\eta$  的增大, VUE 总中断概率随之降低。

## (2) 性能分析

不同用户的总传输速率如图 7 所示, 将本文所提方案与参考文献[20]、参考文献[21]对系统中所有用户的传输速率进行比较。结果表明, 本文所提方案在 VUE 和速率、CUE 和 VUE 总速率两方面均优于其他方案。参考文献[20]考虑和速率最大方案, 参考文献[21]考虑总速率最大方案, 而本文所提方案在满足所有 CUE 速率需求下对 CUE 和 VUE 确定了最优功率, 因此从图 7 中可以看出, 本文所提方案既实现 VUE 总速率最大目标, 也保证了 CUE 总速率处于较高水平。

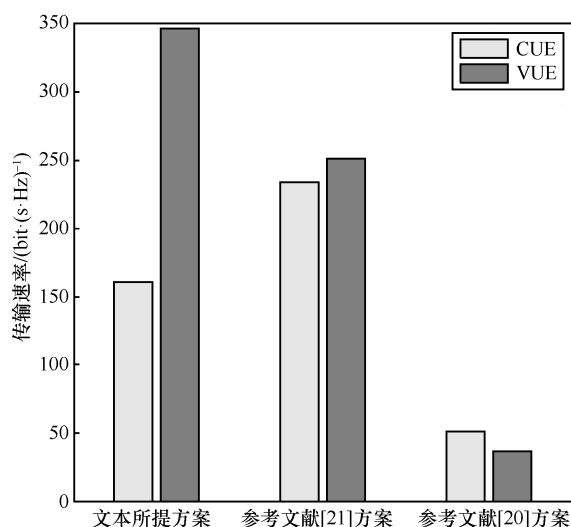


图 7 不同用户的总传输速率

VUE 总速率与 VUE 数量变化趋势如图 8 所示, 描绘了 VUE 对总和速率与 VUE 对数量变化的关系曲线评估功率分配的不同方案。从图 8 中可以看出, 随着 VUE 数量的增多, VUE 总速率单调递增, 本文所提的功率分配方案明显优于参考文献[20]、参考文献[21]所提方案。本文

所考虑的是多个 VUE 对复用同一 CUE 信道资源, 在动态功率控制的基础上, 通过拉格朗日乘子法得到目标函数的最优对偶解、利用二分法确定了 CUE 和 VUE 的最优功率, 实现了 VUE 总传输速率最大化。本文所提方案与参考文献[21]所提方案相比在 VUE 的数量为 50 时, 性能提升了 48%。

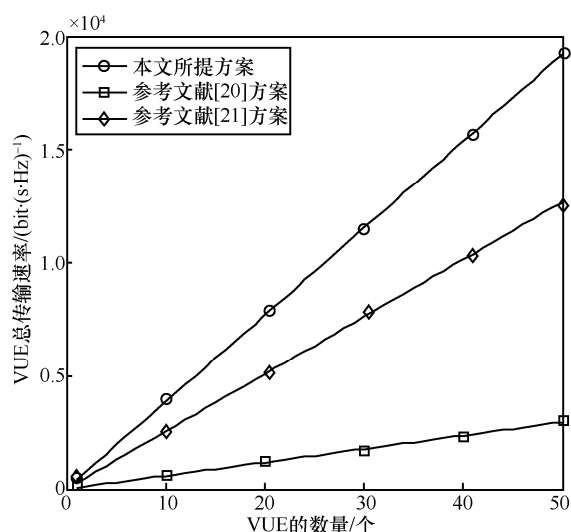


图 8 VUE 总传输速率与 VUE 数量变化趋势

## 5 结束语

本文针对基于 C-V2X 系统复用模式下 CUE 与 VUE 间的同频干扰问题, 提出了动态功率控制方案, 对 VUE 进行基于信道反转的功率控制, 补偿因发射功率有限造成的截断中断, 由动态功率控制解决 CUE 和 VUE 间的同频干扰。再通过拉格朗日乘子法得到目标函数的最优对偶解, 利用二分法确定了 CUE 和 VUE 的最优功率, 实现了 VUE 总传输速率最大化。数值仿真结果表明, 当 VUE 总中断概率为 0.866 时, 本文所提方案使系统性能提升了 48%。

## 参考文献:

- [1] HOU X S, LI Y, JIN D P, et al. Modeling the impact of mobility on the connectivity of vehicular networks in large-scale urban envi-

- ronments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2753-2758.
- [2] NABOULSI D, FIORE M. Characterizing the instantaneous connectivity of large-scale urban vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(5): 1272-1286.
- [3] 王君, 纪晓东, 张欣然, 等. 5G 蜂窝车联网组网性能研究[J]. 电信科学, 2020, 36(1): 49-57.
- WANG J, JI X D, ZHANG X R, et al. Performance evaluation of 5G cellular vehicle networks[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(1): 49-57.
- [4] LIANG L, LI G Y, XU W. Resource allocation for D2D-Enabled vehicular communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(7): 3186-3197.
- [5] CICALÒS, TRALLI V. QoS-aware admission control and resource allocation for D2D communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(8): 5256-5269.
- [6] LI X S, SHANKARAN R, ORGUN M A, et al. Resource allocation for underlay D2D communication with proportional fairness[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 6244-6258.
- [7] LIU X L, XIAO H L, CHRONOPOULOS A T. Joint mode selection and power control for interference management in D2D-Enabled heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 9707-9719.
- [8] NI Y Y, JIN S, XU W, et al. Beam forming and interference cancellation for D2D communication underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(2): 832-846.
- [9] REN Y, LIU F Q, LIU Z, et al. Power control in D2D-based vehicular communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5547-5562.
- [10] 余翔, 张海波, 杨路. 混合 D2D 蜂窝网络中基于模拟退火算法的资源调度策略[J]. 电信科学, 2017, 33(4): 71-77.
- YU X, ZHANG H B, YANG L. Resource scheduling strategy based on simulated annealing algorithm in hybrid D2D cellular networks[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(4): 71-77.
- [11] WANG Y L, CHEN M, HUANG N, et al. Joint power and channel allocation for D2D underlying cellular networks with rician fading[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(12): 2615-2618.
- [12] ELSAWY H, HOSSAIN E. On stochastic geometry modeling of cellular uplink transmission with truncated channel inversion power control[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4454-4469.
- [13] HU J S, YAN S H, ZHOU X Y, et al. Covert wireless communications with channel inversion power control in rayleigh fading[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 12135-12149.
- [14] JEFFREY A, ZWILLINGER D. Table of integrals, series, and products[M]. Cambridge: Academic Press, 2007.
- [15] SUN J, ZHANG Z Z, XIAO H L, et al. Uplink interference coordination management with power control for D2D underlying cellular networks: modeling, algorithms, and analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8582-8594.
- [16] LEE N, LIN X Q, ANDREWS J G, et al. Heath. power control for D2D underlaid cellular networks: modeling, algorithms, and analysis[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(1): 1-13.
- [17] SWAMI P, MISHRA MK, TRIVEDI A. Analysis of downlink power control and cooperation scheme for two-tier heterogeneous cellular network[J]. International Journal of Communication Systems, 2017, 30: e3282.
- [18] WANG M, GAO H, SU X, et al. Joint channel allocation, mode selection and power control in D2D-enabled femtocells[C]//2016 IEEE Military Communications Conference. [S.l.:s.n.], 2016: 454-459.
- [19] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [20] ABRARDO A, MORETTI M. Distributed power allocation for D2D communications underlying/overlying OFDMA cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1466-1479.
- [21] SALEEM U, JANGSHER S, QURESHI H K, et al. Joint subcarrier and power allocation in the energy-harvesting-aided D2D communication[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2608-2617.

## [作者简介]



翟捷萍 (1995—), 女, 桂林电子科技大学硕士生, 主要研究方向为车载通信。



刘小兰 (1995—), 女, 桂林电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信和协作通信。



肖海林 (1976—), 男, 湖北大学计算机与信息工程学院教授, 主要研究方向为车载无线通信、MIMO 无线通信、协作通信。