

文章编号: 1671-0444(2018)05-0772-07

基于 D2D 的车联网 MCRR 算法

王 靓, 郁进明

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要: 基于 D2D(device-to-device)技术的车联网通过复用小区资源的方式直接通信,可扩大系统容量,提升频谱利用率,但对原蜂窝系统产生了干扰。通过对蜂窝链路同频干扰进行深入的分析与研究,建立了蜂窝-D2D_V 混合模型,并提出蜂窝链路总速率最大的资源复用算法(maximum cellular rate resource reuse algorithm, MCRR),在增加虚拟 D2D_V 链路的基础上借助改进的匈牙利算法寻找总速率的最优分配。仿真结果表明,MCRR 在保证 D2D_V 通信质量的同时,提高了蜂窝系统和混合系统的通信速率。

关键词: D2D_V 通信; MCRR 算法; 干扰控制; 总速率最优分配

中图分类号: TN 92

文献标志码: A

Maximum Cellular Rate Resource Reuse Algorithm Based on VANETs Applying D2D

WANG Liang, YU Jinming

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The vehicular ad-hoc network (VANET) applying device-to-device technique communicates directly by reusing cellular resource, which improves the network throughput and enhances spectral efficiency, but brings interference to the cell. Based on deep analysis of frequency reusing interference, a cellular-D2D_V hybrid model was established, and the maximum cellular rate resource reuse algorithm (MCRR) was proposed. Virtual D2D_V links were proposed and Hungarian algorithm was used to search the total rate of optimal reuse. Simulation results show that MCRR improves the communication rate of cellular and hybrid system while ensures the D2D_V communication rate.

Key words: D2D_V communication; MCRR algorithm; interference control; total rate optimal allocation

近年来,随着汽车数量的快速增多,交通拥堵、行车安全等问题引发人们的广泛关注^[1], V2V (vehicle-to-vehicle) 通信也成为人们研究的重点。V2V 通信具有低时延和高可靠性的特点^[2],目前普遍认为 D2D_V 通信(将 D2D 技术运用到 V2V 通信)可以满足上述要求。D2D(device-to-device)技术是指通信网络中临近的设备不经过基站直接交换信

息^[3],从而减轻基站负载,提高系统容量。

在 underlay 模式(复用小区蜂窝频谱资源)下, D2D_V 通信提高了频谱的利用率,但对原蜂窝系统产生了干扰。国内外众多学者对 D2D_V 通信做了大量研究,通过资源分配和功率控制^[4]减小引入 D2D_V 对原蜂窝造成的干扰。文献^[5]提出基于动态规划的资源分配和基于贪心算法的资源分配以减

收稿日期: 2017-03-22

作者简介: 王 靓(1992—),女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为无线信道与无线资源管理, E-mail: dhuwl0615@163.com

郁进明(联系人),男,副教授, E-mail: yjinming@dhu.edu.cn

小蜂窝无线资源的消耗,两种算法分别从最优分配和低复杂度的角度来解决资源分配问题。文献[6]提出基于地理位置的资源分配算法,分别研究复用单用户和多用户条件下,最大化 D2D_V 系统速率的算法。文献[7]根据用户相对速度判断 D2D 对(D2D 收、发两端组成一个 D2D 对)是否可以接入,研究用户低速移动对系统性能的影响。文献[8]将资源不共享的车辆分为同一个簇,形成多个动态簇,从而有效减少通信时延。文献[9]提出基于运动一致性的车辆分簇算法,增加 D2D 通信的持续时间。

本文以蜂窝链路总速率最大化为目标,研究 D2D_V 链路和蜂窝链路资源复用算法。首先估算所有蜂窝链路被复用后的速率矩阵,将最大化蜂窝链路总速率转化为对复用因子的 0~1 不平衡指派问题。本文提出的虚拟 D2D_V 链路的概念将不平衡指派问题转化为平衡指派问题,并将速率矩阵进行变形从而转化为求解最小化问题。最后利用匈牙利算法^[10]进行最优解的求解。

1 系统模型

1.1 系统及信道模型

系统模型如图 1 所示,小区半径为 R , 基站 eNB 位于小区的圆心。小区内有一条无交叉无弯道的公路,eNB 与公路的垂直距离为 D ,公路长度为 $2L$, $L = \sqrt{R^2 - D^2}$ 。

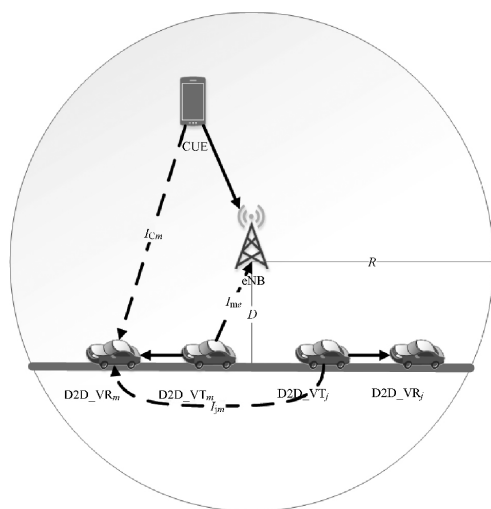


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

小区采用正交频分复用技术,蜂窝链路之间互相没有干扰。D2D_V 通信采用 underlay 方式复用 CUE 使用的资源,以提高频谱利用率。小区内有 N 个 CUE 的随机分布,组成集合 $C = \{CUE_1, CUE_2,$

$\dots, CUE_N\}$ 。公路上有 $M(M \leq N)$ 对等待通信的 D2D_V 对,组成集合 $V = \{VUE_1, VUE_2, \dots, VUE_M\}$,用 $D2D_VT_i$ 和 $D2D_VR_i$ 分别代表第 i 对 D2D_V 对的发射端和接收端,D2D_V 对在公路上随机分布且 D2D_V 链路的平均链路距离为 40 m。假设所有车辆的行驶方向一致。

根据文献[11-12],在 V2V 链路中小尺度信道衰落难以测量,且将这些信息反馈到 eNB 将浪费大量资源,因此仅以路径损耗表示信道增益。模型以二维坐标描述 CUEs、VUEs 和 eNB,其中,eNB 坐标为 $(0, 0)$,CUEs 坐标为 (x_c, y_c) , $x_c^2 + y_c^2 \leq R^2$,VUEs 的坐标为 (x_v, y_v) , $x_v \in [-L, L]$, $y_v = -D$ 。

$$P_i(d_{12}) = (\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2})^{-\alpha_i} \quad (1)$$

式中: $P_i(d_{12})$ 表示两终端间的路径损耗; (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 分别表示链路两终端坐标; α_i 表示路径损耗指数, $i \in \{1, 2, 3, 4\}$,根据发射、接收端的不同, α_i 取不同的值。路径损耗指数参数如表 1。

表 1 路径损耗指数参数

Table 1 Path loss index parameters

参数	含义	数值
α_1	蜂窝链路信号	3
α_2	CUE 对 D2D_VR 的干扰	4
α_3	D2D_VT 对 eNB 的干扰	3
α_4	D2D_V 链路信号	3.5

1.2 干扰分析

如图 1 所示的 D2D_V 链路复用 CUE 的上行蜂窝资源存在 3 种干扰(如图 1 中虚线所示)。一种是 CUE 对 D2D_VR_m 的干扰 I_{Cm} , 为

$$I_{Cm} = P_C P_2(d_{Cm}) \quad (2)$$

式中: P_C 为蜂窝链路 CUE 的发射功率,根据式(1)、(2),可知 CUE 和 D2D_VR 之间的距离越远,路径损耗越小,干扰越小。

另一种是 D2D_VT_m 对 eNB 的干扰 I_{me} 为

$$I_{me} = P_V P_3(d_{me}) \quad (3)$$

式中: P_V 为 D2D_V 链路 D2D_VT 的发射功率。此时应将链路质量好、抗干扰能力强的蜂窝用户资源分配给 D2D_V 链路。

若 D2D_V_m、D2D_V_j ($j \neq m$) 链路复用同一个 CUE 的蜂窝资源,则会产生同频干扰 I_{jm} 为

$$I_{jm} = P_V P_4(d_{jm}) \quad (4)$$

假设 eNB 为所有 D2D_V 链路分配同一个 CUE 的蜂窝资源, 则 D2D_V 链路的信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, 下文用 S 表示) 为

$$S_{Vm} = \frac{P_V P_4(d_{nm})}{I_{Cm} + \sum_{j=1, j \neq m}^M I_{jm} + N_0} \quad (5)$$

式中: N_0 为噪声功率。假设所有链路的噪声功率相同, $P_V P_4(d_{nm})$ 为第 m 对 D2D_V 链路间的信道增益。被复用的蜂窝链路的信干噪比为

$$S_C = \frac{P_C P_1(d_{C_e})}{\sum_{m=1}^M I_{me} + N_0} \quad (6)$$

式中: $P_C P_1(d_{C_e})$ 为蜂窝用户和基站间的信道增益。系统总速率和 D2D_V 链路可达到的最小速率分别为

$$C_{\text{all}} = \sum_{m=1}^M \log_2(1 + S_{Vm}) + C_C \quad (7)$$

$$C_{\min} = \min_{m \in \{1, 2, \dots, M\}} (\log_2(1 + S_{Vm})) \quad (8)$$

式中: 式(7)的右边第一项为 D2D_V 系统的总速率; C_C 为蜂窝链路系统总速率, 包括被复用和未被复用蜂窝链路。

2 资源复用算法

2.1 单蜂窝资源复用算法

随机单蜂窝资源复用算法 (single-cellular random resource reuse algorithm, SRRA) 的基本思想是完全不考虑蜂窝链路和 D2D_V 链路的干扰, eNB 随机选择一个 CUE, 所有 D2D_V 链路共同复用该蜂窝资源。

文献[13]提出了一种基于地理位置的资源复用算法 (geographic-based resource reuse algorithm, GRA), 增加约束 $S_C \geq \beta_0$ 代入式(2)和(6), 可得

$$I_{Cm} \geq \frac{P_2(d_{C_m})}{P_1(d_{C_e})} \beta_0 \left(\sum_{m=1}^M I_{me} + N_0 \right) \quad (9)$$

式中: β_0 为保证蜂窝链路正常通信的信干噪比阈值。根据式(9), CUE 的选择只对 $\frac{P_2(d_{C_m})}{P_1(d_{C_e})}$ 产生影响,

令归一化干扰 $\hat{I}_{Cm} = \frac{P_2(d_{C_m})}{P_1(d_{C_e})}$, 目标函数归一化干扰总和为 $\sum_{m=1}^M \hat{I}_{Cm}$ 。GRA 选择合适的单一 CUE, 使得归一化干扰总和最小。仿真取 $M=20, R=500, D=$

200, 归一化干扰总和如图 2 所示。由图 2 可知, 越靠近 eNB 的蜂窝对 D2D_V 链路造成的归一化干扰总和越小; 反之, 在道路 ($y=-D$) 附近的归一化干扰总和最大。

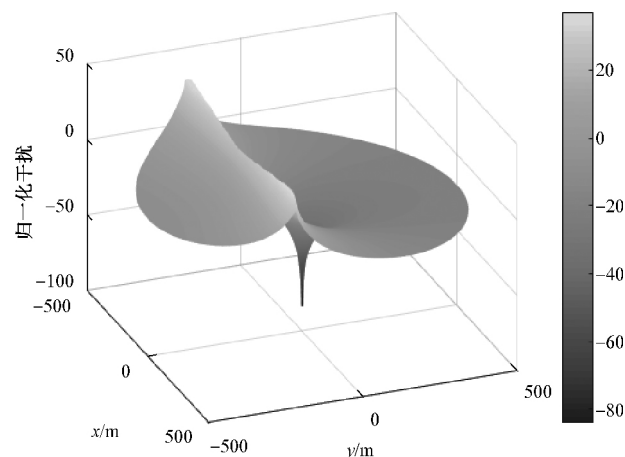


图 2 由 CUE 引起的归一化干扰总和

Fig. 2 Normalized sum interference caused by CUE

2.2 多蜂窝资源复用算法

在 2.1 节所述算法中, 由于所有 D2D_V 链路复用同一个 CUE 的蜂窝资源, D2D_V 链路间会产生同频干扰, 大大降低了 D2D_V 通信的性能, 同时也对被复用的 CUE 产生了极大的干扰。因此为了提高 D2D_V 系统的性能, 减小 CUE 所受干扰, 本节对所提出的资源复用算法做出了以下限制:

- (1) 每条 D2D_V 链路最多复用一个 CUE 的蜂窝资源;
- (2) 每条蜂窝链路资源最多只能被一条 D2D_V 链路复用。

基于以上限制, D2D_V 链路间不再存在干扰, 且被复用的蜂窝链路也只会受到一条 D2D_V 链路的干扰。因此, 式(5)、(6)更新为

$$S_{Vm} = \frac{P_V P_4(d_{nm})}{\sum_{n=1}^N \chi_{m,n} I_{C_n m} + N_0} \quad (10)$$

$$S_{C_n} = \frac{P_C P_1(d_{C_n e})}{\sum_{m=1}^M \chi_{m,n} I_{me} + N_0} \quad (11)$$

式(10)和(11)分别代表 D2D_V_m 链路复用 CUE_n 的蜂窝资源时 D2D_V 链路和蜂窝链路的信干噪比, 引入复用因子 $\chi_{m,n}$ 来描述复用情况。 $\chi_{m,n}$ 组成 $M \times N$ 的矩阵 $\Phi_{m,n}$, $\chi_{m,n} \in \{0, 1\}$, $\chi_{m,n} = 1$ 表示 D2D_V_m 复用 CUE_n 的蜂窝资源, $\chi_{m,n} = 0$ 表示 D2D_V_m 不复用 CUE_n 的蜂窝资源。

文献[14]提出了一种算法,即使得蜂窝用户与 D2D 用户间的干扰最小(minimum interference resource reuse algorithm, MIRA)。将该算法运用到 D2D_V 中,其基本思想是:eNB 预估所有 D2D_V 链路的信道增益并排序,优先为信道质量好的 D2D_V 链路分配对其干扰最小的资源,即距离该 D2D_V 链路接收端最远的 CUE,然后为信道质量次优的 D2D_V 链路分配对其干扰最小的资源,若该 CUE 已被复用,则选择干扰次小的,遍历所有 D2D_V 链路求得矩阵 $\Phi_{m,n}$ 。此算法只考虑了对 D2D_V 链路造成的干扰最小化,无法保证蜂窝链路的通信质量。

本文基于上述研究,提出了基于蜂窝链路总速率最大的资源复用算法(MCRR),并提出虚拟 D2D_V 链路的概念,同时改进传统的匈牙利算法求得矩阵 $\Phi_{m,n}$ 的最优解。该算法的基本思想是:遍历蜂窝链路若被不同的 D2D_V 链路复用所有的速率,组成 $M \times N$ 蜂窝速率矩阵 $C_{m,n}$ ($m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$),根据式(12),将最大化蜂窝链路总速率的目标转化为对 $\Phi_{m,n}$ 进行最优 0~1 指派的问题。

$$\begin{aligned} \text{maximize } C_C &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M C_{m,n} \cdot \chi_{m,n} \\ \text{s. t. } \sum_{m=1}^M \chi_{m,n} &= 1, n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{n=1}^N \chi_{m,n} &= 1, m = 1, 2, \dots, M \\ \chi_{m,n} &= 0, 1, m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (12)$$

传统的匈牙利算法一般用来求解平衡的指派问题,例如指派 h 名工作人员完成 h 个不同的工作,使得总工作时间最少。用传统的匈牙利算法解决资源复用问题存在以下两个问题:

(1) 在 MCRR 中,D2D_V 链路数和蜂窝链路数不等,因此这是一个不平衡指派问题,本文提出的虚拟 D2D_V 链路的概念,使不平衡指派问题转化为平衡指派问题。在系统中增加 $N - M$ 条虚拟 D2D_V 链路,编号为 $M+1, M+2, \dots, N-M$,矩阵 $C_{m,n}$ 转化为 $N \times N$ 的方阵。虚拟 D2D_V 链路实际并不存在,不会对蜂窝系统、D2D_V 系统产生任何影响。被虚拟 D2D_V 链路复用的蜂窝链路速率为

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{P_{c_n} P_1 (d_{c_n}^{-\alpha})}{N_0} \right) \quad (13)$$

矩阵 $C_{m,n}$ 中新增加的 $N - M$ 行用该数值填满。遍历蜂窝部分代码如下:

for $n = 1:N$

for $m = 1:M$

$CAP(m, n) = \log_2(1 + cg_C(n)/(N_0 + Ime(m)))$; % $cg_C(n)$ 为 CUE n 的信道增益,

% $Ime(m)$ 为 D2D_V T_m 对 eNB 的干扰

end

end

for $i = 1:N - M$

$CAP(M + i, :) = \log_2(1 + cg_C./N_0)$; % 虚拟 D2D_V 链路

end

(2) 匈牙利算法一般用来求解最小化问题,本文将 $C_{m,n}$ 转化为

$$C'_{m,n} = \max(C_{m,n}) - C_{m,n} \quad (14)$$

对 $C'_{m,n}$ 进行行、列变换得到 N 个独立零元素,即使 C_C 最大的最优解,最优解中被虚拟链路复用的蜂窝实际上不被任何 D2D_V 链路复用。

MCRR 流程图如图 3 所示。

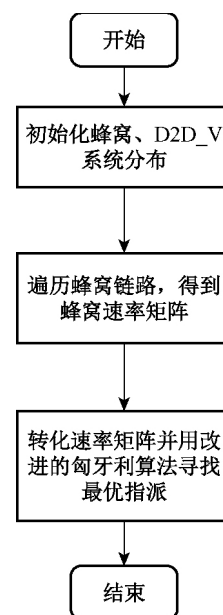


图 3 MCRR 流程图

Fig. 3 Flow chart of MCRR

3 仿真与分析

利用 Matlab 完成资源复用算法的仿真,仿真模型采用第 1 节所建立的模型,仿真参数如表 2 所示。50 个 CUEs 在小区内均匀分布,10 对等待通信的 D2D_V 对在道路上均匀分布,D2D_V 对间的平均距离为 40 m, D2D_V 链路复用蜂窝上行资源。仿真进行 3 000 次随机模拟,每次模拟持续 10 s,车辆用户位置每更新一次,将重新按照预定算法分配复用资源。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation Parameters

参数	数值
小区半径 R/m	500
噪声功率 N_0/MW	10^{-7}
蜂窝发射功率 P_C/dBm	20
D2D_V 发射功率 P_V/dBm	17
车辆密度 $(\text{辆} \cdot \text{m}^{-1})$	0.025
车辆速度 $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	50

3.1 资源复用算法对系统性能的影响

本节仿真比较 SRRA、GRA、MIRA、MCRRA 和 RRA(random resource reuse algorithm)^[15] 5 种资源复用算法对系统性能的影响,其中 RRA 与 MIRA 类似,但不考虑干扰、随机为 D2D_V 链路分配复用资源。系统性能由 D2D_V 链路总速率、蜂窝链路总速率、D2D_V 链路最小速率和系统总速率评估。5 种算法下系统性能如图 4 所示。

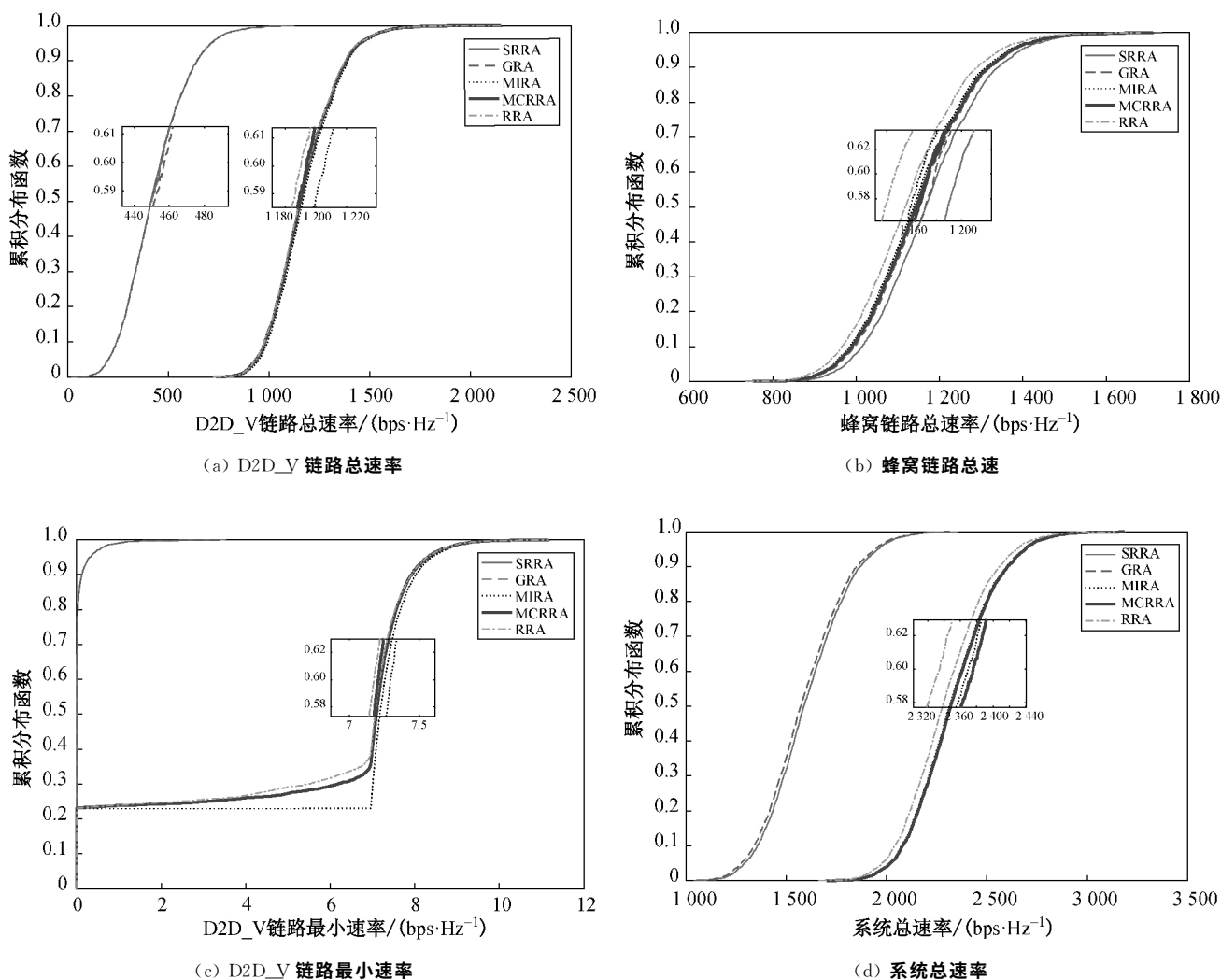


图4 5种算法下系统性能比较

Fig. 4 Comparison of system performance under five algorithms

5 种算法下评估系统性能的 4 种速率大小如表 3 所示。比较图 4(a)、(c)、(d) 可以看出, MIRA、MCRRA 和 RRA 的速率明显大于 SRRA 和 GRA。这是因为 SRRA 和 GRA 所有的 D2D_V 链路复用同一个蜂窝, D2D_V 链路之间互相干扰, 造成 D2D_V 系统性能非常差。而图 4(b) 中 SRRA 和 GRA 的蜂窝速率略大于 MIRA、MCRRA 和 RRA, 因为整个蜂窝系统只有一个蜂窝链路受到了 D2D_V 链路

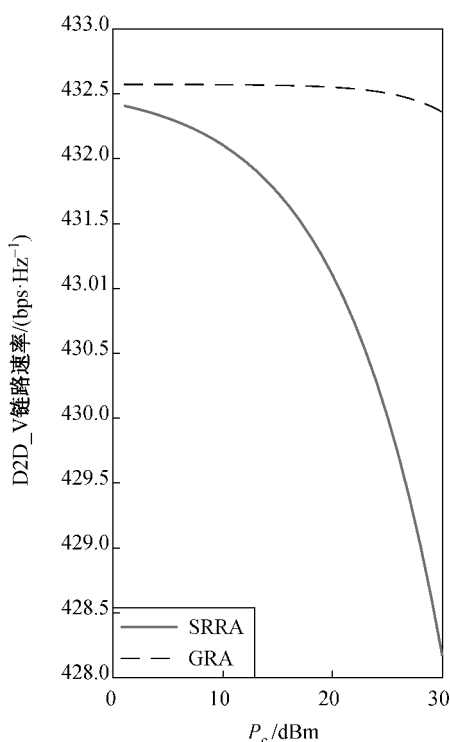
的影响。SRRA 和 GRA 选择不同的复用 CUE, 影响式(5)中的 I_{Cm} , D2D_V 链路间的同频干扰 I_{jm} 较大, 因此在仿真中 SRRA 和 GRA 性能差异不大。比较图 4 和表 3 中 MIRA、MCRRA 和 RRA 的性能, 可以看出本文所提出的 MCRRA 综合性能比较优秀。由于 MIRA 以最大化 D2D_V 链路的速率为目标, 所以 D2D_V 系统中 MCRRA 的性能略差于 MIRA。而在蜂窝链路速率和系统总速率方面,

MCRRA 的性能都要优于 MIRA 和 RRA。

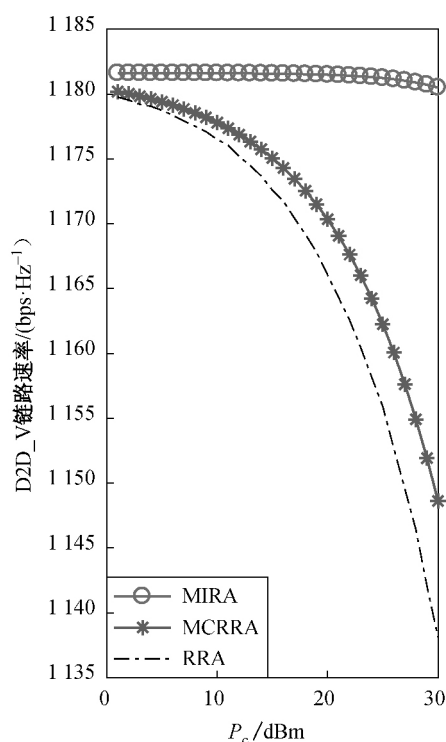
表 3 系统性能比较

Table 3 Comparison of system performance

系统性能	算法影响
D2D_V 链路总速率	MIRA>MCRRA>RRA>GRA≈SRRA
蜂窝链路总速率	SRRA>GRA>MCRRA>MIRA>RRA
D2D_V 链路最小速率	MIRA>MCRRA>RRA>GRA≈SRRA
系统总速率	MCRRA>MIRA>RRA>SRRA>GRA



(a) SRRA 和 GRA



(b) MIRA、MCRRA 和 RRA

图 5 P_c 对 D2D_V 链路速率的影响

Fig. 5 Influence of P_c on D2D_V's sum rate

3.3 车辆密度对蜂窝系统的影响

车辆密度对蜂窝系统的影响如图 6 所示,CUEs 位置固定,进行 3 000 次随机模拟。随着车辆密度的增大,D2D_V 链路对蜂窝系统干扰增大,蜂窝链路速率减小。SRRA 和 GRA 蜂窝速率的下降速度较小,由于只选择一个复用蜂窝,车辆密度对蜂窝总体干扰较小。MIRA、MCRRA 和 RRA 为多蜂窝资源复用算法,蜂窝链路速率随着车辆密度的增大几乎呈直线下降。因为随着 D2D_V 链路数量的增加,受干扰的蜂窝链路数量也相应增加,但从图 6 可

3.2 P_c 对 D2D_V 系统的影响

5 种算法下 P_c 对 D2D_V 系统速率的影响如图 5 所示,D2D_V 链路速率与图 4(a)基本吻合。由图 5 可知,随着 P_c 的增大,CUE 对 D2D_VR 的干扰增加,D2D_V 链路的速率减小。在 SRRA 和 GRA 中 D2D_V 链路受到的干扰 $I = I_{Cm} + I_{jm} + N_0$,其中 I_{jm} 占主导地位, P_c 增大,总干扰 I 缓慢增大,造成 D2D_V 链路的总速率缓慢下降。MIRA 以最大化 D2D_V 链路的速率为目标,因此 P_c 对链路速率的影响也较小。在本文所提 MCRRA 下, P_c 对 D2D_V 链路速率的影响较大,若将 MCRRA 与功率控制结合,可以保证 D2D_V 链路的通信质量。

以看出,本文所提 MCRRA 受车辆密度影响小于 MIRA 和 RRA。

4 结 语

在车联网 V2V 通信中引入 D2D 技术,并以 underlay 模式工作,有利于提高频谱利用率,扩大系统容量。但由于 D2D_V 链路复用小区资源对原蜂窝网络造成了干扰,为控制这一干扰对蜂窝系统的影响,提出了最大化蜂窝链路速率的资源复用算法。仿真结果表明,该算法可以同时兼顾蜂窝系统和

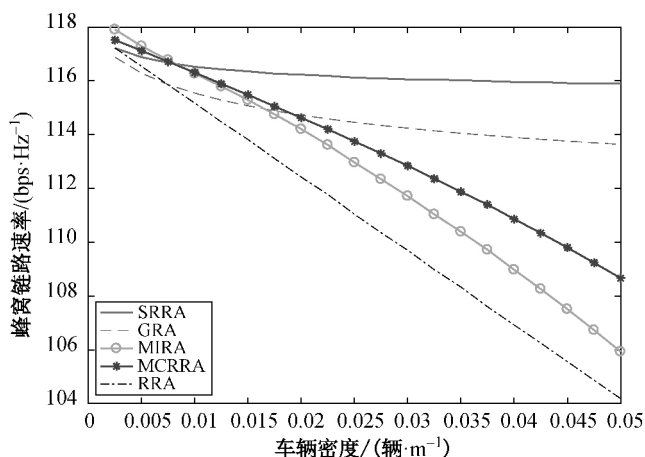


图6 车辆密度对蜂窝系统速率的影响

Fig. 6 Influence of density on cell's sum rate

D2D_V系统的通信质量,在最大化蜂窝链路速率的同时,也一定程度上保证了D2D_V系统的通信速率,且与已有算法相比,蜂窝和D2D_V混合系统的总速率最大。本文仅考虑了资源复用算法,在今后的工作中将继续学习功率控制、D2D中继等,进一步研究蜂窝系统和D2D_V系统间的干扰控制问题。

参 考 文 献

- [1] 王良民,刘晓龙,李春晓,等. 5G车联网展望[J]. 网络与信息安全学报, 2016, 2(6): 1-12.
- [2] SUN W, YUAN D, STROM E G, et al. Resource sharing and power allocation for D2D-based safety-critical V2X communications[C]//IEEE International Conference on Communication Workshop, IEEE, 2015: 2399-2405.
- [3] IMT-ADVANCED 推进组, 3GPP 项目组. IMT-Advanced D2D (Device-to-Device)技术白皮书 (Version 1. 9. 1 Draft). <https://wenku.baidu.com/view/2831a2b4b8f67c1cfbd6b832.html>
- [4] 钱志鸿,王雪. 面向5G通信网的D2D技术综述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 1-14.
- [5] XING W, WANG N, WANG C, et al. Resource allocation schemes for D2D communication used in VANETs [C]// Vehicular Technology Conference, IEEE, 2014: 1-6.
- [6] 苏超. LTE中D2D通信资源分配算法研究[D]. 成都: 西南交通大学信息科学与技术学院, 2013.
- [7] 林伟阳. LTE-A下的D2D通信移动性能优化研究[D]. 北京: 北京邮电大学网络教育学院, 2015.
- [8] SUN W, YUAN D, STRÖM E G, et al. Cluster-based radio resource management for D2D-supported safety-critical V2X communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2756-2769.
- [9] 彭军,马东,刘凯阳,等. 基于LTE D2D技术的车联网通信架构与数据分发策略研究[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 62-70.
- [10] 常庭懋,韩中庚. 用“匈牙利算法”求解一类最优化问题[J]. 信息工程大学学报, 2004, 5(1): 60-62.
- [11] CHENG X, YANG L, SHEN X. D2D for intelligent transportation systems: A feasibility study [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2015, 16(4): 1784-1793.
- [12] SUN W, STROM E G, BRANNSTROM F, et al. D2D-based V2V communications with latency and reliability constraints [C]//GLOBECOM Workshops, IEEE, 2015: 1414-1419.
- [13] REN Y, WANG C, LIU D, et al. Applying LTE-D2D to support V2V communication using local geographic knowledge [C]//Vehicular Technology Conference, IEEE, 2015: 1-5.
- [14] 韩涛. LTE终端直通通信系统的资源复用与干扰协调[D]. 杭州: 浙江大学信息与电子工程学院, 2013.
- [15] SUN H, SHENG M, WANG X, et al. Resource allocation for maximizing the device-to-device communications underlying LTE-Advanced networks [C]//IEEE/CIC International Conference on Communications in China-Workshops. IEEE, 2013: 60-64.

(责任编辑: 杜 佳)