

基于能效的NOMA蜂窝车联网动态资源分配算法

唐 伦 肖 娇* 赵国繁 杨友超 陈前斌

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

(重庆邮电大学移动通信技术重点实验室 重庆 400065)

摘 要: 在支持车与车直接通信(V2V)的非正交多址接入(NOMA)蜂窝网络场景下, 针对V2V用户与蜂窝用户的干扰以及NOMA准则下的功率分配问题, 该文提出一种基于能效的动态资源分配算法。该算法首先为了保证V2V用户的时延及可靠性同时满足蜂窝用户的速率需求, 联合考虑子信道调度、功率分配和拥塞控制, 建立了最大化系统能效的随机优化模型。其次, 利用李雅普诺夫随机优化方法, 通过控制可接入数据量保证队列稳定性以避免网络拥塞, 并根据实时网络负载状态动态地进行资源调度, 设计一种次优化子信道匹配算法获得用户调度方案, 进一步, 利用凸优化理论和拉格朗日对偶分解方法得到功率分配策略。最后, 仿真结果表明, 该文算法可以满足不同用户的服务质量(QoS)需求, 并在保证网络稳定性前提下提高系统能效。

关键词: 非正交多址接入; 蜂窝车联网; 资源分配; 李雅普诺夫优化

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)02-0526-08

DOI: [10.11999/JEIT190006](https://doi.org/10.11999/JEIT190006)

Energy Efficiency Based Dynamic Resource Allocation Algorithm for Cellular Vehicular Based on Non-Orthogonal Multiple Access

TANG Lun XIAO Jiao ZHAO Guofan YANG Youchao CHEN Qianbin

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of
Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of
Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) based cellular network with Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication, to mitigate the co-channel interference between V2V users and cellular users as well as the power allocation problem based on the NOMA principle, an energy efficiency dynamic resource allocation algorithm is proposed. Firstly, a stochastic optimization model is established to maximize the energy efficiency by considering subchannel scheduling, power allocation and congestion control, in order to guarantee the delay and reliability of V2V users while satisfying the rate of cellular users. Then, leveraging on the Lyapunov stochastic optimization method, the traffic queues can be stabilized by admitting as much traffic data as possible to avoid network congestion, and the radio resource can be allocated dynamically according to the real-time network traffic and thus a suboptimal subchannel matching algorithm is designed to obtain the user scheduling scheme. Furthermore, the power allocation policy is obtained by utilizing successive convex optimization theory and Lagrange dual decomposition method. Finally, the simulation results show that the proposed algorithm can improve the system energy efficiency and ensure the Quality of Service (QoS) requirements of different users and network stability.

Key words: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Cellular vehicular; Resource allocation; Lyapunov optimization

收稿日期: 2019-01-03; 改回日期: 2019-05-28; 网络出版: 2019-11-25

*通信作者: 肖 娇 Ir_xiao@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571073), 重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-M201800601)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571073), The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJZD-M201800601)

1 引言

蜂窝车联网通信(Cellular-Vehicle to everything, C-V2X), 利用现有蜂窝通信技术, 实现车与网络(Cellular-Vehicle to Network, C-V2N)以及车与车通信(Cellular-V2V, C-V2V), 不仅提高了交通效率, 更有潜力满足未来自动驾驶等超高可靠低时延需求^[1-3]。

通过引入非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术和车与车直接通信(Vehicle-to-Vehicle, V2V)技术, 可以满足车辆高速移动下通信的海量接入、高可靠和低时延需求。文献[4]研究了下行链路单输入单输出NOMA系统中的功率分配问题, 在满足最低用户率前提下最大化用户的总速率。文献[5]在连续干扰消除解码阶数约束下, 保证NOMA用户的最小速率要求的同时最大化V2V用户对的和速率, 但未考虑干扰及功率分配对能效的影响。文献[6]在OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)系统下, 提出一种基于可靠性的功率分配算法。文献[7]利用李雅普诺夫随机优化理论, 提出一种基于时延感知的功率分配方案。文献[8,9]考虑蜂窝用户和V2V用户之间的干扰而提出一种联合资源块分配和功率控制算法, 并保证V2V业务的时延和可靠性需求。该优化模型没有从长时间尺度下衡量网络长期的性能。在实际中, 数据到达量是随机和未知的, 当数据到达量超过网络允许接入数据量时容易造成网络拥塞。但是, 文献[10,11]的工作中均假定随机业务到达率在网络容量门限值以内。

综上所述, 前期研究主要在OFDMA系统下考虑V2V通信的资源分配问题, 限制了允许接入网络的蜂窝用户数。在支持V2V通信的NOMA蜂窝网络场景下, 大量工作集中在最大化频谱效率和吞吐

量, 未考虑在保证V2V用户时延及可靠性的同时最大化系统能效的资源分配问题。在实际中, 数据到达量超过网络容量的门限值容易造成网络拥塞, 而大多数研究未将拥塞控制结合到资源优化模型中。现有文献在支持V2V通信的NOMA场景下, 大多考虑建立静态的优化模型, 不能根据网络负载状态实时动态地进行资源调度。针对以上不足, 本文主要贡献如下:

首先, 在支持V2V通信的NOMA蜂窝网络场景下, 针对V2V用户与蜂窝用户之间的干扰以及NOMA准则下的功率分配问题, 建立联合子信道调度、功率分配和拥塞控制的随机优化模型, 在保证V2V用户时延、可靠性以及蜂窝用户速率需求的同时最大化系统能效。

其次, 利用李雅普诺夫随机优化方法, 根据当前网络的负载状态进行动态资源调度, 将随机优化模型转化并分解为单时隙求解的3个子问题, 通过控制可接入数据量保证队列稳定性以避免网络拥塞, 进一步设计一种次优化用户与子信道匹配算法得到子信道调度方案。

最后, 利用连续凸逼近理论将功率分配子问题转化为凸优化问题, 并采用拉格朗日对偶方法得到功率分配策略。仿真结果表明本文所提出的基于能效的动态资源调度算法能够满足不同用户QoS需求, 并在保证网络稳定性前提下提高系统能效。

2 系统场景与问题建模

本文场景如图1所示, 基站端缓存NOMA用户积压的数据包, NOMA用户接入蜂窝网承载娱乐、视频下载等业务, 需保证较高的传输速率; V2V通信承载时延敏感业务, 与邻近车辆交换安全驾驶相关信息, 需保证时延和可靠性。为了提高频谱利用率, V2V用户共享NOMA用户的频谱。

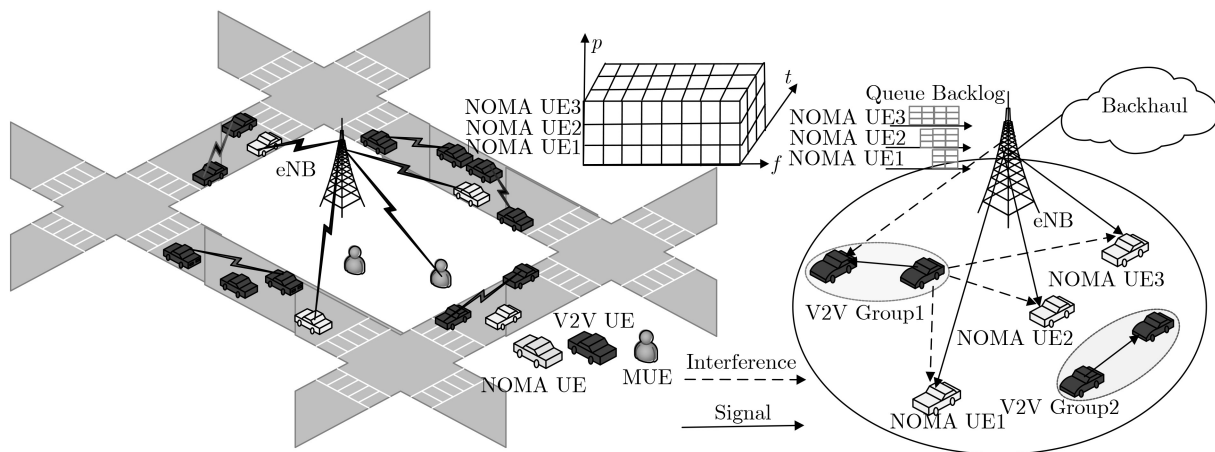


图1 密集城区场景下的车辆通信及干扰模型图

2.1 系统模型

2.1.1 无线通信模型

假设 $|h_1^n(t)| \leq |h_2^n(t)| \leq \dots \leq |h_M^n(t)|$, 于是, NOMA用户*i*接收的信干噪比(SINR)为

$$\text{SINR}_i^n(t) = \frac{p_i^n(t)|h_i^n(t)|^2}{|h_i^n(t)|^2 \sum_{t=i+1}^M p_t^n(t) + \sum_{k=1}^K \alpha_k^n(t)p_k^n(t)|h_{k,i}^n(t)|^2 + \sigma^2} \quad (1)$$

其中, $p_i^n(t)$ 和 $p_k^n(t)$ 分别表示在时隙*t* NOMA用户*i*和V2V用户*k*在子信道*n*上的传输功率, $h_i^n(t)$ 表示在时隙*t*基站端在子信道*n*上到NOMA用户*i*的信道增益, σ^2 表示高斯白噪声的方差。同样地, V2V用户

*k*接收的SINR为

$$\text{SINR}_k^n(t) = \frac{p_k^n(t)|h_k^n(t)|^2}{|h_{B,k}^n(t)|^2 \sum_{i=1}^M p_i^n(t) + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $h_{k,i}^n(t)$ 表示在时隙*t*子信道*n*上的V2V用户*k*到NOMA用户*i*的信道增益, $h_{B,k}^n(t)$ 为在时隙*t*基站端对V2V用户*k*的干扰信道增益。

V2V用户共享频谱引起的干扰将降低V2V用户的通信质量, 因此需要保证V2V通信的传输可靠性。误比特率(Bit Error Rate, BER)常作为衡量通信系统可靠性的主要指标, 对于给定的调制索引*l*, BER表达式为^[12]

$$\varepsilon_k^{\text{BER}}(t) = \begin{cases} \frac{-1.6 \times \frac{p_k^n(t)|h_k^n(t)|^2}{I_k(t) + \sigma^2}}{\lg(l)-1}, & \frac{p_k^n(t)|h_k^n(t)|^2}{I_k(t) + \sigma^2} \geq \chi_{\text{thr}} \\ 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $I_k(t) = |h_{B,k}^n(t)|^2 \sum_{i=1}^M p_i^n(t)$ 表示V2V用户*k*收到的共道干扰。

2.1.2 V2V用户时延模型

假设用户*k*的包到达过程独立同分布且服从到达率为 λ_k 的泊松分布, $N_k(x)$ 表示第*n*个包的大小且服从包平均大小为 $\bar{N}_k(x)$ 的指数分布, $Q_k(t)$ 为第*k*个V2V用户在时隙*t*缓存的包数。其中 $W_k(x)$ 为包在缓存中的等待被服务的时间, $\delta_k(x)$ 表示包的传输时间, 因此在V2V用户*k*缓存中的第*x*个包的时延为

$$D_k(x) = W_k(x) + \delta_k(x) \quad (4)$$

每个V2V用户的数据包需保证在有限时间内传输完毕, $d_{\max}$ 表示包传输的最大可容忍时延, δ 为最大违反概率, V2V通信的时延中断概率为

$$P\{D_k(x) > d_{\max}\} \leq \delta, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

2.1.3 NOMA用户队列模型

第*i*个NOMA用户在时隙*t*缓存的队列长度为 $Q_i(t)$, 假设 $A_i(t)$ 表示NOMA用户在时隙*t*业务随机到达量, 存在包到达峰值数量 $A_i^{\max}$ 满足 $A_i(t) \leq A_i^{\max}$ 。 $r_i(t)$ 为NOMA用户*i*在时隙*t*内传输的包数量, $\Gamma_i(t)$ 表示用户*i*允许接入的数据量。用户*i*的队列更新过程为

$$Q_i(t+1) = \max\{Q_i(t) - r_i(t), 0\} + \Gamma_i(t) \quad (6)$$

在实际中由于包到达量 $A_i(t)$ 是随机和未知的, 本文考虑通过控制接入网络的数据量并提高数据传输速率以避免网络拥塞, 于是允许接入网络的数据量不超过数据实际到达量^[13,14]

$$\Gamma_i(t) \leq A_i(t), \quad \forall i \quad (7)$$

2.1.4 问题建模

本文的研究目标是针对V2V用户与NOMA用户的共道干扰及NOMA准则内的功率分配问题, 构建以最大化系统能效为目标的优化问题, 并充分考虑V2V用户的时延及可靠性、NOMA用户的速率需求、队列稳定、接入数据量控制及功率控制等限制条件, 最后问题建模为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\{\Gamma_i\}, \{\alpha_i, \alpha_k\}, \{p_i, p_k\}} U_{\text{EE}}^{\text{opt}} = \frac{\bar{R}}{\bar{P}} \\ & \text{s.t. C1: } Q_i^- < \infty \\ & \text{C2: } P\{D_k(x) > \bar{d}_{\max}\} \leq \delta, \forall k, x \\ & \text{C3: } \varepsilon_k^{\text{BER}}(t) \leq \varepsilon_k^{\text{thr}}, \forall k \\ & \text{C4: } r_i^n(t) \geq R_c^{\text{thr}}, \forall i, n \\ & \text{C5: } \Gamma_i(t) \leq A_i(t), \forall i \\ & \text{C6: } \sum_{i=1}^I x_i^n(t) \leq M, x_i^n = \{0, 1\}, \forall n \\ & \text{C7: } \sum_{k=1}^K \alpha_k^n(t) \leq 1, \alpha_k^n \in \{0, 1\}, \forall n \\ & \text{C8: } \sum_{n=1}^N \alpha_k^n(t)p_k^n(t) \leq P_{\max}^D, \forall k \in K \\ & \text{C9: } \sum_{i=1}^M p_i^n(t) \leq P_{\max}^C, \forall n \in N \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, $\bar{R}$ 和 $\bar{P}$ 分别表示V2V用户和NOMA用户的平均速率和及平均功率和; C1保证了NOMA用户队列稳定性; C2表示V2V用户的时延中断概率约束;

C3表示V2V用户的可靠性约束；C4表示NOMA用户的最小速率需求；C5表示允许接入网络的数据量约束；C6表示每个子信道至多被NOMA用户复用 M 次；C7表示V2V用户至多共享NOMA用户的一个子信道；C8表示V2V用户最大功率约束；C9表示NOMA用户的功率约束。

2.2 优化问题转化

2.2.1 V2V用户时延约束转化

由于难以直接计算式(4)定义的时延或式(5)定义的时延中断概率，本文引用随机网络计算中的极大排队(max-plus queue)方法^[15]，将时延约束转化为传输速率约束。因此，对于V2V用户 k ，当 $Q_k(t) > 0$ ，其瞬时速率 $r_k^n(t)$ 应大于最小数据速率 $R_k^{\min}$ 以保证在式(4)中定义的最大可容忍时延

$$r_k^n(t) \begin{cases} \geq R_k^{\min}, & Q_k(t) > 0 \\ = 0, & Q_k(t) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中， $R_k^{\min} = -\frac{\bar{N}_k}{d_{\max}} \left[W_{-1} \left(\frac{\lambda_k d_{\max} \delta}{1 - e^{\lambda_k d_{\max} \delta}} \right) + \frac{\lambda_k d_{\max}}{e^{\lambda_k d_{\max} \delta} - 1} \right]$ ， $W_{-1}(x) : x \in [-e^{-1}, 0] \rightarrow [-\infty, -1]$ 为Lambert W 函数的低分支并满足 $z = W_{-1}(ze^z)$ 。

2.2.2 优化目标转化

基于以往的资源分配策略得到能效 U_{EE}^{opt} 在时隙 t 为已知量，引入参数 $U_{EE}^{\text{opt}}(t)$ ，设其初始值为0，将参数 $U_{EE}^{\text{opt}}(t)$ 代入，将分式转化为减式为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\Gamma_i, x_i, \alpha_k, p_i, p_k} \bar{R}(\Gamma_i, x_i, \alpha_k, p_i, p_k) \\ & - U_{EE}^{\text{opt}}(t) \bar{P}(\Gamma_i, x_i, \alpha_k, p_i, p_k) \\ & \text{s.t. } C1 \sim C9 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2.3 李雅普诺夫优化理论分析

为解决优化问题式(10)，本文使用李雅普诺夫偏移与加权代价函数和方法，在保持队列稳定性的同时，最小化时间平均代价函数。为了保证约束C2和C5，分别引入虚拟队列 $Q_k(t)$ 和 $H_i(t)$ 及辅助变量 $\gamma_i(t)$ ，且 $\gamma_i(t) \leq A_i^{\max}$ 为

$$Q_k(t+1) = \max\{Q_k(t) - r_k(t), 0\} + R_k^{\min} \quad (11)$$

$$H_i(t+1) = \max\{H_i(t) - \Gamma_i(t), 0\} + \gamma_i(t) \quad (12)$$

本文中 t 时隙系统的队列向量表示为 $\mathbf{Q}(t) = [Q_i(t), Q_k(t), H_i(t)]$ ，优化问题式(10)可以看作在保证队列稳定的同时最大化速率和最小化功率的时间平均^[15]，定义Lyapunov函数

$$L(\mathbf{Q}(t)) = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^I (Q_i(t))^2 + \sum_{k=1}^K (Q_k(t))^2 + \sum_{i=1}^I (H_i(t))^2 \right] \quad (13)$$

式(13)表征了网络拥塞程度，队列越长，用户传输数据需要等待的时间也越长。单时隙Lyapunov偏移定义为

$$\Delta L(t) = E[L(\mathbf{Q}(t+1)) - L(\mathbf{Q}(t))] \quad (14)$$

定义惩罚项为

$$p(t) = R(t) - U_{EE}^{\text{opt}}(t)P(t) \quad (15)$$

对于任意 $p_i, p_k, \alpha_i, \alpha_k, \Gamma_i$ ，以及任意队列状态 $Q_k(t), Q_i(t), H_i(t)$ ，优化问题式(10)可以转化为每一时隙最小化不等式右侧

$$\left. \begin{aligned} & \min_{\Gamma_i, x_i, \alpha_k, p_i, p_k} \varphi(t) = \sum_{k=1}^K (R_k^{\min} - r_k(t))Q_k(t) \\ & - \sum_{i=1}^I (H_i(t) - Q_i(t))\Gamma_i(t) \\ & + \sum_{i=1}^I (\gamma_i(t)H_i(t) - r_i(t)Q_i(t)) \\ & - \frac{1}{2} E \left[\sum_{k=1}^K R_k^{\min} r_k(t) + \sum_{i=1}^I \Gamma_i(t) r_i(t) \right] \\ & + V[U_{EE}^{\text{opt}}(t)P(t) - R(t)] \\ & \text{s.t. } C3, C4 \text{ 及 } C6, C9 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中， $V > 0$ ，为权衡偏移函数与代价函数的控制参数，对于任意的时隙 t ，存在常数 C 满足下界

$$C \geq \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K E[R_k^{\min 2} + r_k(t)^2] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I E[\Gamma_i(t)^2 + r_i(t)^2] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I E[\Gamma_i(t)^2 + \gamma_i(t)^2] \quad (17)$$

3 联合拥塞控制、子信道调度和功率分配方案

本文通过Lyapunov优化理论求解优化问题式(16)，本文分3步分别对拥塞控制、子信道和功率控制求解，整体资源分配算法如表1。

3.1 优化的拥塞控制

优化的拥塞控制策略可以通过最小化式(16)右边式子中的第2项 $-\sum_{i=1}^I (H_i(t) - Q_i(t))\Gamma_i(t)$ ，于是有

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\Gamma_i} (H_i(t) - Q_i(t))\Gamma_i(t) \\ & \text{s.t. } \Gamma_i(t) \leq A_i(t), \forall i \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

由于式(18)为一个线性问题，因此可以得到拥塞控制的优化解

$$\Gamma_i(t) = \begin{cases} A_i(t), & H_i(t) - Q_i(t) > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (19)$$

3.2 子信道匹配算法

在得到拥塞控制优化解后, 本文提出一种低复杂度的次优用户调度方案如表2所示。

3.3 联合功率优化算法

剩下功率分配问题, 由于 $R = \log_2(1+\varepsilon)$ 中常数1的存在, 导致剩余优化问题仍是非凸优化问题,

这里引用连续凸优化理论进行转化。对于任意 $a \geq 0$, $\log_2(1+a)$ 的下界可以表示为 $\log_2(1+a) \geq c \log_2 a + d$, 当 $a = a_0$, $c = \frac{a_0}{1+a_0}$ 及 $d = \log_2(1+a_0) - \frac{a_0}{1+a_0} \log_2 a_0$, 因此可以把问题松弛为式(20)的优化问题

表 1 基于能效的动态资源分配算法

- (1) 初始化控制参数 V , NOMA用户队列 $Q_i(0) = 0$ 、虚拟队列 $Q_k(0) = 0$ 、 $H_i(0) = 0$, $\Gamma_i(t)$, $R_k^{\min}$, $\forall k \in K, i \in I$;
- (2) 设置时隙长度 $T_{\max}$;
- (3) **For** $t = 0, 1, \dots, T_{\max} - 1$, **do**;
- (4) 观察该时隙每个NOMA用户的队列状态 $Q_i(t)$ 以及虚拟队列 $Q_k(t)$ 和 $H_i(t)$;
- (5) 计算辅助变量 $\gamma_i(t)$, 然后根据式(18)和式(19)得到拥塞控制优化解 Γ_i^* ;
- (6) 执行表2求解优化问题式(16)得到子信道调度策略 x_i^*, α_k^* ;
- (7) 执行表3求解问题式(21)得到优化的功率分配方案 $\{p_1^*, p_2^*, \dots, p_{M-1}^*\}$;
- (8) 根据下面公式分别更新下一时隙NOMA用户的队列状态 $Q_i(t+1)$, 虚拟队列状态 $Q_k(t+1)$ 和 $H_i(t+1)$;
 $Q_i(t+1) = \max\{Q_i(t) + \Gamma_i(t) - r_i(t), 0\}$, $\forall i$, $Q_k(t+1) = \max\{Q_k(t) + R_k^{\min} - r_k(t), 0\}$, $\forall k$;
 $H_i(t+1) = \max\{H_i(t) - \Gamma_i(t) + \gamma_i(t), 0\}$, $\forall i$;
- (9) $t = t + 1$;
- (10) **End**;
- (11) 输出优化拥塞控制策略、频谱和功率分配方案 $\Gamma_i^*, x_i^*, \alpha_k^*, p_i^*, p_k^*$ 。

表 2 联合次优化子信道匹配算法

- (1) 初始化 p_i, p_k , $Q_i(0) = 0$, $Q_k(0) = 0$, $H_i(0) = 0$, 初始化未分配子信道的NOMA和V2V用户集 $S_{\text{un}}^C, S_{\text{un}}^V$, 复用同一信道的用户集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_N\}$, $\psi_n = \emptyset$, 用户调度策略 $\mathbf{x} = \emptyset$, $\alpha = \emptyset$, 分别构造NOMA用户和V2V用户的信道增益矩阵, $\mathbf{H}_i \triangleq [h_{i,n}]_{I \times N}$, $\mathbf{H}_k \triangleq [h_{k,n}]_{K \times N}$;
- (2) **while** $S_{\text{un}}^C \neq \emptyset \& S_{\text{un}}^V \neq \emptyset$ **do**;
- (3) **for** $n = 1 : N$;
- (4) 从 $\mathbf{H}_i$ 中找到最大信道增益, 将子信道 n 调度给用户 i , 更新 $\mathbf{x}$, 并将矩阵中的第 i 行元素置0;
- (5) 更新 $U_n = U_n \cup u_n^i$ & $S_{\text{un}}^C = S_{\text{un}}^C \setminus u_n^i$;
- (6) **end for**;
- (7) **for** $n = 1 : N$;
- (8) **while** $N_{U_n} < M$ **do**;
- (9) 分别从信道矩阵 $\mathbf{H}_i$ 和 $\mathbf{H}_k$ 中找到最大信道增益 $|h_{i,n}|$ 和 $|h_{k,n}|$;
- (10) **if** $|h_{i,n}| > |h_{k,n}|$;
- (11) 将子信道 n 分配给用户 i , 更新 $U_n = U_n \cup u_i^n$;
- (12) **else**;
- (13) 将子信道 n 分配给用户 k , 更新 $U_n = U_n \cup u_k^n$;
- (14) **end if**;
- (15) **end while**;
- (16) **if** $N_{U_n} = M$;
- (17) 计算用户集 U_n 复用在子信道 n 上的 $\varphi(t)$, 并将结果保存于 ψ_n ;
- (18) 求解式(16)得到用户调度的解 x_i^n, α_k^n 以及被调度用户集 u_n^C, u_n^V , 更新未调度用户集 $S_{\text{un}}^C = S_{\text{un}}^C \setminus u_n^C$ & $S_{\text{un}}^V = S_{\text{un}}^V \setminus u_n^V$, 并将信道矩阵 $\mathbf{H}_i$ 中的第 i 行置0, 或将 $\mathbf{H}_k$ 中的第 k 行元素及第 n 列元素置0;
- (19) **end if**;
- (20) **end for**;
- (21) **end while**;
- (22) 输出用户调度策略 $\mathbf{x}, \alpha$ 。

$$\begin{aligned} \min_{p_i, p_k} \tilde{\varphi}(t) = & \sum_{k=1}^K (R_k^{\min} - \tilde{r}_k(t)) Q_k(t) \\ & + \sum_{i=1}^I (\gamma_i(t) H_i(t) - \tilde{r}_i(t) Q_i(t)) \\ & - \left[\sum_{k=1}^K R_k^{\min} \tilde{r}_k(t) + \sum_{i=1}^I \Gamma_i(t) \tilde{r}_i(t) \right] \\ & + V \left[U_{EE}^{\text{opt}}(t) \tilde{P}(t) - \tilde{R}(t) \right] \quad (20) \end{aligned}$$

这意味着需要最小化问题式(20)目标函数上界,

$$\begin{aligned} \text{其中, } \tilde{r}_k^n = c_k^n \left\{ \frac{1}{\ln 2} \times \left[\tilde{p}_k^n \ln |h_k^n|^2 - \ln \left(|h_{B,k}^n|^2 \sum_{i=1}^M e^{\tilde{p}_i^n} + \sigma^2 \right) \right] \right\} + d_k^n, \quad \tilde{r}_i^n = c_i^n \left\{ \frac{1}{\ln 2} \times \left[\tilde{p}_i^n \ln |h_i^n|^2 - \right. \right. \\ \left. \left. \ln \left(|h_i^n|^2 \sum_{t=i+1}^M e^{\tilde{p}_t^n} + \sum_{k=1}^K \alpha_k^n e^{\tilde{p}_k^n} |h_{k,i}^n|^2 + \sigma^2 \right) \right] \right\} + d_i^n. \end{aligned}$$

3.3.1 拉格朗日对偶分解方法

利用拉格朗日对偶法对问题式(20)进行求解, $v_k, \lambda_i, \mu_k, \eta_n$ 为非负的拉格朗日乘子, 定义凸优化问题为

$$\begin{aligned} L(\nu, \lambda, \mu, \eta, \Omega) \\ = \tilde{\varphi}(t) + \sum_{k=1}^K v_k \left[0.2 \times e^{-1.6 \times \frac{e^{\tilde{p}_k^n(t)} |h_k^n(t)|^2}{(\log(t)-1)(I_k + \sigma^2)}} - \varepsilon_k^{\text{thr}} \right] \\ + \sum_{k=1}^K \mu_k \left(\sum_{n=1}^N \alpha_k^n e^{\tilde{p}_k^n(t)} - P_{\max}^D \right) \\ + \sum_{n=1}^N \eta_n \left(\sum_{i=1}^I e^{\tilde{p}_i^n(t)} - P_{\max}^C \right) \\ - \sum_{i=1}^I \lambda_i \left[e^{\tilde{p}_i^n(t)} |h_i^n|^2 - (2^{R_c^{\text{thr}}} - 1) \right. \\ \left. \cdot \left(|h_i^n|^2 \sum_{t=i+1}^M e^{\tilde{p}_t^n(t)} + \sum_{k=1}^K \alpha_k^n e^{\tilde{p}_k^n(t)} + \sigma^2 \right) \right] \quad (21) \end{aligned}$$

拉格朗日对偶函数表示为

$$J(\nu, \lambda, \mu, \eta, \Omega) = \max_{\Omega^*} \{L(\nu, \lambda, \mu, \eta, \Omega)\} \quad (22)$$

因此, 其对应的对偶问题为

$$\begin{aligned} \min_{\nu, \lambda, \mu, \eta} \{J(\nu, \lambda, \mu, \eta, \Omega)\} \\ \text{s.t. } v \geq 0, \lambda \geq 0, \mu \geq 0, \eta \geq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

其中, $\Omega = \{p_i, p_k\}$, NOMA和V2V用户的功率分配方案可通过对 $J(\nu, \lambda, \mu, \eta, \Omega)$ 求偏导分别得到, 并更新拉格朗日乘子。因此, 迭代的功率优化如表3所示。

4 性能仿真与结果分析

本文将所提算法与在OFDMA系统中的资源调

度算法性能, 文献[16]的NOMA-EQ及NOMA-Exhaustive算法及文献[8]提出的SOLEN算法进行对比。本文参照3GPP TR36.885^[1]密集城区网络场景, 对车辆进行空间泊松撒点。为了观察NOMA用户在连续时间上的平均队列积压, 图2选取不同控制参数V对应的不同队列收敛情况, 用户的平均队列先增大, 然后逐渐趋于平稳。当参数V分别为50, 70和90时, 平均队长分别收敛于19, 40和61。这意味着本文所提基于Lyapunov优化的资源分配算法可以有效保持系统队列的稳定性及有效性。

图3描述了平均能效性能随控制参数V的变化情况, 其中NOMA用户的速率阈值为0.5 bps/Hz, 从图中可以看出, 对于相同的M, 随着控制参数V的增加, 平均能效逐渐增加并逐渐收敛于一个最大值, 同时对于相同的V, 同一信道的复用数越大, 平均能效也越大。这是因为每个用户可以匹配的信道数至少超过1个, 用户可以通过搜索尽可能找到最有利的信道, 随着M的增加, 选择信道的自由度也增加, 因此能效也越大。

图4描述了V2V用户的数据包时延在不同算法下随包到达率的变化情况, 通过将本文提出的算法与SOLEN算法进行比较可以看出, 本文算法的时延性能优于SOLEN方案, 随着每个V2V用户包到达率的增加, 由于有限的无线资源, 导致两种包时延方案性能降低。由于数据包到达率的增加导致部分数据包积压在缓存中, 因此SOLEN不能保证最大可容忍时延。因此, 为了保证数据包时延需求, 在进行无线资源管理方案设计时, 有必要考虑包的到达过程。

图5描述了平均能效性能随控制参数V的变化情况, 其中NOMA用户的速率阈值为0.5 bps/Hz, 在3种不同算法下, 随着控制参数V的增加, 平均能效均逐渐增加并逐渐趋于稳定收敛于一个最大值, 并且本文所提算法优于NOMA-EQ和OFDMA算法, 这是本文功率分配算法能动态地在每个时隙实现最优的功率分配并保证用户的频谱效率。对比OFDMA算法, NOMA系统下多个用户可以通过功率复用而共享相同子信道, 充分利用了频谱资源和功率资源, 因此OFDMA算法的性能最差。并且NOMA-EQ算法在RB之间平均分配功率, 而忽略了对应用户的实际需求, 造成功率资源的浪费, 因此导致平均能效比本文所提算法低。

图6考虑在不同的总传输功率下, 将本文所提出的算法与其他两种算法作比较, 由于用户数固定, 因此当总功率从20~38 dBm逐渐增大时, 平均能效逐渐降低, 这是因为传输功率的增长速度

表3 基于连续凸逼近和拉格朗日对偶的迭代功率优化算法

- (1) 初始化最大迭代次数 T_1 及最大允许误差 ξ_1 , 初始化 $[\tilde{p}_i(t), \tilde{p}_k(t)]^0$, 迭代次数索引 t ;
- (2) **while** $g \leq T_1$ **or** $||\tilde{\varphi}([\tilde{p}_i(t), \tilde{p}_k(t)]^g) - \tilde{\varphi}([\tilde{p}_i(t), \tilde{p}_k(t)]^{g-1})|| \leq \xi_1$ **do**;
- (3) 根据迭代得到的 $[\tilde{p}_i(t), \tilde{p}_k(t)]^g$ 和 $\tilde{r}_k^n$, $\tilde{r}_i^n$ 计算 c_k^n , d_k^n , c_i^n , d_i^n , 得到更新后的 c^g , d^g ;
- (4) 求解优化问题式(20), 更新当前最优解 $[\tilde{p}_i(t), \tilde{p}_k(t)]^{g+1}$ 并令 $g = g + 1$;
- (5) **end while**;
- (6) 输出连续凸逼近迭代后的优化解 $\tilde{P}(t) = [\tilde{p}_i(t), \tilde{p}_k(t)]^g$;
- (7) 初始化最大迭代次数 N_1 和 N_2 及收敛条件 Δ_1 和 Δ_2 , 初始化迭代索引 $m = 0, n = 0$, 初始化拉格朗日乘子 $\nu^0, \lambda^0, \mu^0, \eta^0$, $[\tilde{p}_i(t)_m, \tilde{p}_k(t)_m]^0 = [\tilde{p}_i(t)_n, \tilde{p}_k(t)_n]^0 = [\tilde{p}_i(t), \tilde{p}_k(t)]^g$;
- (8) 观察时隙 t 每个NOMA用户的队列状态 $Q_i(t)$ 和虚拟队列状态 $Q_k(t)$, $H_i(t)$;
- (9) **while** $m < N_1$ **or** $||\tilde{\varphi}([\tilde{p}_i(t)_m, \tilde{p}_k(t)_m]^{m+1}) - \tilde{\varphi}([\tilde{p}_i(t)_m, \tilde{p}_k(t)_m]^m)|| \geq \Delta_1$ **do**;
- (10) **while** $n < N_2$ **or** $||J^{n+1}(t) - J^n(t)|| \geq \Delta_2$ **do**;
- (11) 将 $\nu^m, \lambda^m, \mu^m, \eta^m$ 和 $[\tilde{p}_i(t)_n, \tilde{p}_k(t)_n]^n$ 分别代入表达式(21)求导;
- (12) 通过KKT条件和二分搜索法求得功率分配 $[\tilde{p}_i(t)_n, \tilde{p}_k(t)_n]^{n+1}$, 更新拉格朗日乘子;
- (13) $n = n + 1$;
- (14) **end while**;
- (15) $m = m + 1$;
- (16) **end while**;

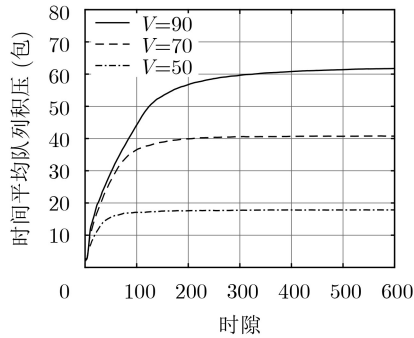


图2 连续时隙上的队列变化与控制参数V的关系

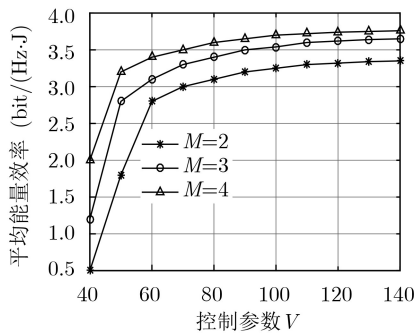


图3 平均能效与控制参数V的关系

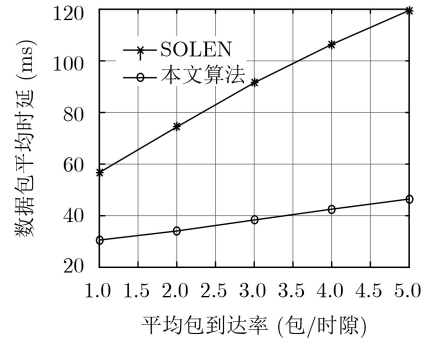


图4 V2V用户平均时延与包到达率的关系

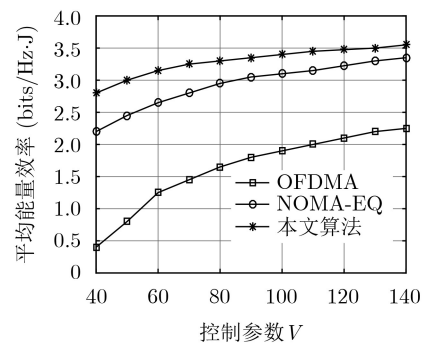


图5 平均能效与控制参数V的关系

快于速率的增加。另外，本文的基于NOMA系统的联合用户匹配和功率优化算法接近于穷举搜索算法尤其当传输功率较大时。同样地，本文算法优于NOMA-EQ算法，这是因为未对RB进行资源优化。

5 结束语

本文考虑在密集城区支持V2V通信的NOMA

蜂窝车联网覆盖场景下，充分利用功率域资源及V2V通信的低时延、低功耗等优势，针对V2V用户的低时延、高可靠以及NOMA用户的高速率需求，利用Lyapunov优化理论设计了一种基于能效的联合拥塞控制、子信道调度和功率控制算法，在保证用户的低时延、高可靠和高速率需求的同时最大化系统能效。最后，仿真结果表明，本文算法可

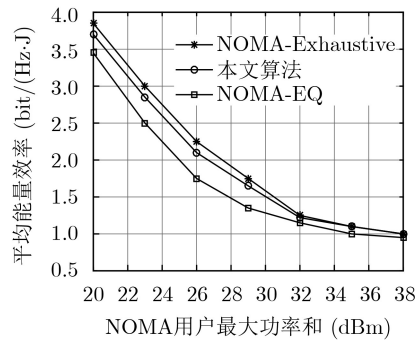


图6 平均能效与NOMA用户最大功率和的关系

以在保证用户不同QoS需求和系统稳定性的同时，有效提高系统能效。

参 考 文 献

- [1] 3GPP. Study on LTE-based V2X services 14.0.0[R]. 3GPP TR 36.885, 2016.
- [2] 3GPP. Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services 16.2.0[R]. 3GPP TR 22.886, 2017.
- [3] SAHIN T, KLUGEL M, ZHOU Chan, *et al.* Virtual cells for 5G V2X communications[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(1): 22–28. doi: [10.1109/MCOMSTD.2018.1700060](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2018.1700060).
- [4] YANG Zhaohui, XU Wei, PAN Cunhua, *et al.* On the optimality of power allocation for NOMA downlinks with individual QoS constraints[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(7): 1649–1652. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2689763](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2689763).
- [5] PAN Yijin, PAN Cunhua, YANG Zhaohui, *et al.* Resource allocation for D2D communications underlaying a NOMA-based cellular network[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(1): 130–133. doi: [10.1109/LWC.2017.2759114](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2759114).
- [6] LIANG Le, LI G Y, and XU Wei. Resource allocation for D2D-enabled vehicular communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(7): 3186–3197. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2699194](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2699194).
- [7] LIU Chenfeng and BENNIS M. Ultra-reliable and low-latency vehicular transmission: An extreme value theory approach[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(6): 1292–1295. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2828407](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2828407).
- [8] SUN Wanlu, STRÖM E, BRÄNNSTRÖM F, *et al.* Radio resource management for D2D-based V2V communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6636–6650. doi: [10.1109/TVT.2015.2479248](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2479248).
- [9] SUN Wanlu, STRÖM E, BRÄNNSTRÖM F, *et al.* D2D-based V2V communications with latency and reliability constraints[C]. 2014 IEEE Globecom Workshops, Austin, USA, 2014: 1414–1419. doi: [10.1109/GLOCOMW.2014.7063632](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2014.7063632).
- [10] PENG Mugen, YU Yuling, XIANG Hongyu, *et al.* Energy-efficient resource allocation optimization for multimedia heterogeneous cloud radio access networks[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2016, 18(5): 879–892. doi: [10.1109/TMM.2016.2535722](https://doi.org/10.1109/TMM.2016.2535722).
- [11] LAU V K N, ZHANG Fan, and CUI Ying. Low complexity delay-constrained beamforming for multi-user MIMO systems with imperfect CSIT[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(16): 4090–4099. doi: [10.1109/TSP.2013.2264058](https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2264058).
- [12] CHUNG S T and GOLDSMITH A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(9): 1561–1571. doi: [10.1109/26.950343](https://doi.org/10.1109/26.950343).
- [13] LI Jian, PENG Mugen, YU Yuling, *et al.* Energy-efficient joint congestion control and resource optimization in heterogeneous cloud radio access networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(12): 9873–9887. doi: [10.1109/TVT.2016.2531184](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2531184).
- [14] ZHAO Long and WANG Xiaodong. Round-trip energy efficiency of wireless energy powered massive MIMO system with latency constraint[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(1): 12–15. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2616858](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2616858).
- [15] KHAN Z, FAN Pingzhi, ABBAS F, *et al.* Two-level cluster based routing scheme for 5G V2X communication[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 16194–16205. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2892180](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892180).
- [16] ZHANG Yi, WANG Huiming, ZHENG Tongxing, *et al.* Energy-efficient transmission design in non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 2852–2857. doi: [10.1109/TVT.2016.2578949](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2578949).

唐 伦：男，1973年生，教授，博士生导师，主要研究方向为新一代无线通信网络、异构蜂窝网络等。

肖 娇：女，1995年生，硕士生，研究方向为蜂窝车联网下的资源调度算法。

赵国繁：女，1993年生，硕士生，研究方向为5G网络切片中的资源分配，可靠性。

杨友超：男，1993年生，硕士生，研究方向为网络虚拟化和切片资源分配。

陈前斌：男，1967年生，教授，博士生导师，主要研究方向为个人通信、多媒体信息处理与传输、下一代移动通信网络、异构蜂窝网络等。