



一种基于中继的车辆编队功率优化算法

胡杰文¹, 马征¹, 刘刚^{1*}, 范平志¹, 唐优华²

1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 611756

2. 西南交通大学交通运输与物流学院, 成都 611756

* 通信作者. E-mail: gangliu@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-05-01; 接受日期: 2021-06-08; 网络出版日期: 2022-07-14

国家自然科学基金 (批准号: 61731017, 61971359) 和四川省科技计划项目 (批准号: 2019YJ0248) 资助

摘要 车辆编队作为蜂窝车联网 (cellular-vehicle-to-everything, C-V2X) 的高级应用之一, 可以有效地提高出行效率. 处于编队内的车辆需要实时共享速度、前进方向和意图 (制动、加速度等) 等信息, 并且位于队头的车辆需负责整个编队的管理并传递控制消息. 但是在高密度场景下, 当多个编队的队头被分配到同一子信道上同时传输时, 多个编队之间会存在干扰, 如果队头车辆以传统的固定功率方式进行广播, 广播功率过大会导致对其他队列造成的干扰过大, 广播功率过小则会影响队列内成员的接收质量, 因此需要合适的功率分配方案以满足高密度场景下的通信需求. 本文在满足时延、接收信噪比要求的前提下以最小化总功率消耗为目标, 提出了一种基于中继的多队列协作功率优化方案, 该方案通过在编队内选取合适的中继车辆以减少每跳广播所需要的功率, 从而减少对其他编队的干扰并且降低总功率消耗. 仿真结果表明, 所提出的方案相比传统方案能够容纳更多的编队成员, 并且在满足性能要求的前提下大幅降低总功率消耗.

关键词 C-V2X, 车辆编队, 广播功率, 中继, 功率优化

1 引言

车辆作为人们出行的首选工具之一, 其数量随着人们生活水平的提高而快速增长, 交通安全以及城市道路的拥堵成为社会备受关注的问题之一. 为了解决以上问题, 3GPP (The Third Generation Partnership Project) 于 2017 年正式发布了包含蜂窝车联网 (cellular-vehicle-to-everything, C-V2X) 技术的 Release14 版本^[1], V2X 技术可以实现车与人 (V2P)、车与车 (V2V)、车与路 (V2I), 以及车与网络 (V2N) 之间的通信^[2~5], 把车与周围环境协调起来, 大幅提升了交通效率, 降低了事故的发生率.

随着 5G 的到来, 3GPP 于 2018 年发布了 R15 版本, C-V2X 也从 LTE (long term evolution) 演进成增强型 LTE-V2X (LTE-eV2X), 相比 R14 版本添加了高阶调制、发送分集、载波聚合等功能^[6].

引用格式: 胡杰文, 马征, 刘刚, 等. 一种基于中继的车辆编队功率优化算法. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 1317–1332, doi: 10.1360/SSI-2021-0082
Hu J W, Ma Z, Liu G, et al. A relay-based power optimization algorithm for platooning (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 1317–1332, doi: 10.1360/SSI-2021-0082

2020 年发布的 R16 版本是 NR (new radio)-V2X 的演进, NR-V2X 主要面向更高级的 V2X 应用, 需提供更低时延、更加可靠的信息传输服务 [7].

车辆编队作为高级 V2X 应用之一, 它将多辆车编成一队, 队成员之间共享状态信息, 例如速度、前进方向和意图 (制动、加速度等), 使多辆车像火车一样行驶在道路上. 通过使用车辆编队, 可以缩短车辆之间的跟车距离, 降低风阻从而减少总体油耗, 并减少道路拥堵. 当车辆以编队的方式在道路上行驶时, 每一队的队头车辆负责整个队的管理, 队头应实时更新队列成员报告的交通数据, 并报告给路边设施 (RSU), 同样队头也可从 RSU 获取 V2V 通信范围以外的交通、道路信息. 若得知前方有事故时, 队头需向队列内车辆发送信息使其更改路线 [8].

NR-V2X 的调度方式有两类, 第 1 类是由基站对资源进行集中式调度的 Mode 1, 这种方式可以大幅减少资源碰撞, 但是当处于高密度车联网环境下时, 由于同一区域内可使用的子信道数目有限, 可能会出现当前区域当前时隙需要传输信息的车辆数目大于总子信道数目的情况, 此时部分车辆可能被延迟调度从而不满足车联网的低时延要求; 若采用其他功率分配方案调度多辆车在同一子信道上同时传输, 则可能因不当的功率分配方案造成过大干扰. 第 2 类是基于感知的分布式自主预约模式的 Mode 2, 车辆在发送消息前会实时感知周围子信道的使用情况, 如果感知到一个子信道上的参考信号接收功率 (RSRP) 小于给定的阈值时, 则该子信道被纳为备选子信道, 最后从所有备选子信道中挑选质量最好的子信道进行发送. 当处于高密度车联网环境下时, 该模式可能出现备选子信道数少于总子信道数的 20% 的情况, 此时需将阈值增大 3 dB 重新进行感知、选择 [9,10]. 在该机制下同样会出现多辆车在同一传输时隙选用同一子信道进行传输的情况, 车辆编队亦是如此. 高密度场景下, 当多组编队车辆的队头在同一时隙需要向编队内成员广播仅编队内部成员需要的消息时, 如果被分配到同一子信道进行传输, 则队头应以怎样的方式, 多大的功率进行消息的下发才能尽量的减少对其他队列的干扰, 这是一个值得研究的问题.

在目前已有的关于车辆编队的研究当中, 文献 [11] 研究了基站子信道的分配以及功率控制对各队列带来的影响, 提出了两步式的队列形成和资源分配方案, 第 1 步为基站将子信道分配给每个队列, 第 2 步再将队头车辆的子信道分配给队列内成员, 设计了一种基于动态规划的最大化编队大小以及最小化功率的子信道分配和功率控制算法. 文献 [12] 为了解决基站上计算高负载的问题, 设计了一种激励机制来激励高速公路上的车辆形成编队并共享计算资源, 再基于边缘计算的思想, 以最大化车辆计算资源利用率的方式联合优化了编队和基站的任务卸载决策、通信和计算资源分配. 文献 [13] 提出一种基于跟踪误差的调度准则, 并通过二分图匹配获得无线资源分配方案, 然后通过梯度下降的方法来调整车辆的控制参数以使跟踪误差最小. 文献 [14] 研究了周期性队列控制和通信的联合系统, 以减少位置误差并提高队列的安全性. 通过加入中继并采用频分复用的方式来扩大队头的信息传播距离并提升频谱利用率.

现有研究主要集中在编队的形成以及非拥塞情况下如何分配资源以达到更高的资源利用效率, 而在拥塞情况时, 现有模式下由于编队所能容纳车辆的数量较少, 并不能体现车辆编队在缓解交通堵塞上的优势. 本文主要关注在拥塞情况下多队用户在同一时隙被分配了同一子信道进行传输时, 如何传输才能使其获得更高的能量效率, 并使队列所能容纳的车辆数增多. 针对上述场景, 本文以最小化总功率消耗为目标, 提出了一种基于中继的多队列协作功率优化方案. 由于该优化问题既不是凸的也不是凹的, 所以不能直接求得问题的最优解. 但是可以将优化问题转化为两步进行, 首先队头车辆根据自身队列的长度, 接收信噪比阈值以及时延要求以最小化总功率为目标综合选出队列内中继车辆的位置, 第 2 步再根据从第 1 步中得到的中继节点位置, 在满足接收信噪比与接收时延要求的情况下以最小化总功率消耗来进行功率优化. 最后仿真结果表明, 在加入了提出的优化方案后, 单队所能容纳车

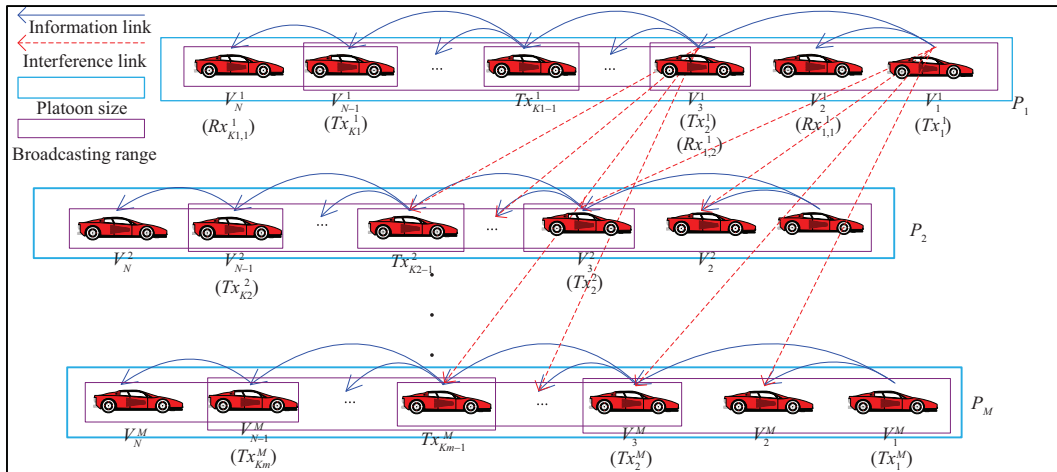


图 1 (网络版彩图) 系统模型
 Figure 1 (Color online) System model.

辆的数目相比传统的队头以固定功率广播的方式有较大的提升, 并且能更大程度地减少能耗及缓解道路拥塞. 此外, 在加入中继节点后, 队头能以更小的功率进行广播, 在减少能量消耗的同时, 也减少了对其他队列的干扰, 加大了系统总体的通信容量, 并使处于队尾的接收车辆在满足时延要求的情况下相比传统方式能够得到更高的接收信噪比, 该方案适用于对可靠性、时延敏感的车联网环境.

本文内容安排如下: 第 2 部分介绍系统模型; 第 3 部分对优化问题进行建模并求解优化问题; 第 4 部分对优化方案进行仿真对比; 最后一部分进行总结.

2 系统模型

2.1 通信场景

考虑处于极度拥塞的通信场景, 如图 1¹⁾所示, 若此时子信道已经不够分配, 并已有 M 队的队头车辆在同一时隙选用到同一子信道进行传输, 且传输的消息仅本队的成员感兴趣, 则 M 队编队之间互相存在干扰. 用 V_i^m 表示第 m 队的第 i 辆车, 其中 $1 \leq m \leq M, 1 \leq i \leq N_m, N_m$ 为第 m 队的总车辆数. 与传统的队头广播方式不同, 本方案在队列形成时, 由每队的队头车辆根据自身所处队列的状况, 基于路径损耗模型先挑选出队内的中继车辆, 并在与外界周期性共享状态信息时, 将本队的中继车辆信息 (数量以及位置) 也夹带其中一并共享. 当有信息需要传输时, RSU 再结合收集到的各队信息, 将分配在同一子信道上同时进行传输的 M 队车以最小化总功率为目标进行集中功率优化, 并将优化后的结果夹带在与各队头的信息交互中返回给各队头, 各队头再以优化后的功率在指定的子信道上进行广播, 并在广播的信息中包含本队内各中继点的优化功率, 中继点在接收到该信息后, 等待下一个时隙再将该信息在相同的子信道上进行转发.

2.2 通信性能分析

该模式等价于将整个队列又分成了多个子队, 每个中继车辆充当每个子队的队头, 将从前一个中继车辆接收的消息转发给子队内的用户, 每个子队的最后一辆车又是下一个子队的队头. 用 T_k^m 表示

1) 为了简洁, 在图 1 中仅画出了 P_1 部分子队的队头对其他队列的干扰链路.

第 m 队中第 k 辆发射车辆, 其中 $1 \leq k \leq K_m$, K_m 表示第 m 队中总的发射车辆数, $k = 1$ 时表示第 m 队的队头车辆. 假设每个子队中包含 L_k^m 辆接收车辆, 则有 $\sum_{k=1}^{K_m} L_k^m = N_m - 1$. 用 $R_{k,l}^m$ 表示第 m 队中第 k 个子队中的第 l 辆接收车辆, 其中 $1 \leq l \leq L_k^m$, 用 $\beta_{T_k^m}^j$ 表示第 m 队中的第 k 辆发射车辆在第 j 个时隙是否有消息传输, 其中

$$\beta_{T_k^m}^j = \begin{cases} 1, & \text{如果 } T_k^m \text{ 在第 } j \text{ 个时隙有信息传输,} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

假设模型中 m 队车的队头都在第 1 个时隙在同一子信道上开始传输信息, 即 $j = 1$ 时, $\beta_{T_1^m}^1 = 1$, 其中 $1 \leq m \leq M$.

在该过程中存在有队内信息传递的信息链路 $T_k^m \rightarrow R_{k,l}^m$ 以及来自其他队的干扰链路 $T_{k'}^{m'} \rightarrow R_{k,l}^m$, 用 $h_{k,l}^m$ 表示第 m 队中第 k 辆发射车辆到其所属子队中第 l 辆接收车辆 $R_{k,l}^m$ 的信道增益, $h_{k',k,l}^{m',m}$ 表示第 m' 队的第 k' 辆发射车辆到 $R_{k,l}^m$ 的干扰链路的信道增益. 若 T_k^m 在第 j 个时隙发送消息, 则其所属子队的第 l 辆接收车辆 $R_{k,l}^m$ 接收到的消息可以表示为

$$y_{k,l}^m = h_{k,l}^m \cdot x_m \cdot \sqrt{P_k^m} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{k'=1}^{K_{m'}} \beta_{T_{k'}^{m'}}^j \cdot h_{k',k,l}^{m',m} \cdot x_{m'} \cdot \sqrt{P_{k'}^{m'}} + n_{k,l}^m, \quad (2)$$

其中 x_m 表示第 m 队发送的消息, 其均值为 1, P_k^m 为发射车辆 T_k^m 的发射功率, $n_{k,l}^m$ 为 $R_{k,l}^m$ 上均值为 0 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声. 式 (2) 右边的第 1 项为有用信息, 第 2 项为来自其他队列的干扰信息, 第 3 项为噪声. $R_{k,l}^m$ 在第 j 时隙的信干噪比 (SINR) 可以表示为

$$\Gamma_{k,l}^m = \frac{|h_{k,l}^m|^2 \cdot P_k^m}{\sigma^2 + \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{k'=1}^{K_{m'}} \beta_{T_{k'}^{m'}}^j \cdot |h_{k',k,l}^{m',m}|^2 \cdot P_{k'}^{m'}}, \quad (3)$$

则其接收速率 $C_{k,l}^m$ 可以表示为

$$C_{k,l}^m = B \times \log_2(1 + \Gamma_{k,l}^m), \quad (4)$$

其中 B 为子信道的带宽.

队内的最大时延为队头广播消息后经多个中继点转发到达队尾车辆所需的时间, 最大时延 t 可以表示为

$$t = \sum_{k=1}^{K_m-1} \left\lceil \frac{P_{L_m}}{C_{k,L_k^m}^m \cdot t_{\text{slot}}} \right\rceil \cdot t_{\text{slot}} + \frac{P_{L_m}}{C_{K_m, L_{K_m}^m}^m}, \quad (5)$$

其中 P_{L_m} 为产生第 m 队产生的包长度, 在 3GPP 标准 [8] 中提到密集场景下产生的包的长度一般为 50~1200 字节, $C_{k,L_k^m}^m$ 为第 m 队的第 k 个子队中最后一辆车的接收速率, t_{slot} 代表一个时隙的长度, 它与子载波间隔 (SCS) 相关, 当 SCS 为 15 kHz 时, 对应的 $t_{\text{slot}} = 1 \text{ ms}$ [15]. $C_{K_m, L_{K_m}^m}^m$ 表示第 m 队的最后一个子队的最后一辆车的接收速率, $\lceil \cdot \rceil$ 代表向上取整. 式 (5) 中的第 1 项意为所有中继车辆在接收到来自上一中继点的消息后, 需等该时隙过完, 待下一个时隙到来时再将信息转发出去, 这样只需要一个子信道就可以供编队内所有发送车辆使用. 第 2 项为队尾车辆接收到来自最后一个中继点消息的所需时延, 由于不需要再一次转发, 所以该项取实际时延, 不需要向上取整.

3 优化问题建模与求解

3.1 优化问题建模

为了追求更高的能量效率,以最小化总功率消耗为目标,同时所有车辆需满足给定的接收信噪比要求与时延要求,以保证接收信息的准确性与及时性.优化问题 **P1** 建模如下:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P1} : \min_{K, P} \quad & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} P_k^m \\
 \text{s.t. C1: } \quad & 0 < P_k^m \leq P_{\max}, \quad 1 \leq m \leq M, \quad 1 \leq k \leq K_m; \\
 \text{C2: } \quad & t \leq \tau_{\text{th}}; \\
 \text{C3: } \quad & \beta_{T_k^m}^j \cdot \Gamma_{k,l}^m \geq \beta_{T_k^m}^j \cdot \Gamma_{\text{th}}, \quad 1 \leq m \leq M, \quad 1 \leq k \leq K_m, \quad 1 \leq l \leq L_k^m; \\
 \text{C4: } \quad & 1 \leq K_m \leq N_m - 1; \\
 \text{C5: } \quad & \sum_{k=1}^{K_m} L_k^m = N_m - 1.
 \end{aligned}$$

条件 C1 限制了所有发射车辆的发射功率,使其大于 0 且不大于给定的发射功率最大值 P_{\max} ; 条件 C2 为对最大时延 t 的限制,即队尾车辆的接收时延需小于给定时延阈值 τ_{th} ; 条件 C3 为所有接收车辆的接收 SINR 需大于给定的阈值 Γ_{th} 以保证信息的成功接收, $\beta_{T_k^m}^j = 0$ 时表示 T_k^m 在 j 时隙不传输消息; 条件 C4 是对单队中发射车辆数(队头 + 中继)的限制. 发射车辆数目最少为 1, 即无中继车辆, 仅队头发送消息, 最大为 $N_m - 1$, 对应除队尾车辆外, 所有车辆都对消息进行转发; 条件 C5 对各中继点的位置进行限制, 每个中继点负责的子队中接收车辆数 L_k^m 之和应等于该队的所有接收车辆数 $N_m - 1$.

3.2 优化问题求解

优化问题 **P1** 的可变因素包含中继点的个数、位置, 以及各个发射车辆的发射功率. 对于高移动性的车辆编队场景来说, 这些因素都与时刻变化的通信环境相关, 要从中确定最优的中继点数量、位置, 以及各中继点最优的传输功率是一件非常困难且复杂度极高的事情. 并且处于实际考虑, 设备商更倾向于有一套低复杂度更易于实现的算法, 可以大大的减少计算负载, 节约计算资源. 综上所述可以将 **P1** 转为两步优化, 第 1 步为分布式队内中继点数量以及位置的确定, 每队的队头根据自身队列的状况在队列成立时就确定好中继点的数量与位置. 第 2 步为集中式的功率优化, 由 RSU 基于收集的各队头发送的队状态信息(位置、速度、方向、加速度、中继点数目及位置)进行集中式功率优化, 并在各队消息发送前将优化结果返还给各队. 通过上述两步可以得到一个在当前环境不一定是最优的但确实是实用的优化结果. 此外, 将中继点的确定转移到队头来做决策不仅大大降低了运算的复杂度, 同时也减轻了 RSU 处的计算负载.

3.2.1 基于单队的分布式中继点选择方案

车联网的高移动性导致通信环境的复杂多变, 编队车辆的干扰源也时刻在变, 并且不同的中继点对外界造成的干扰也不同, 因此, 基于多队中继点选择需要 RSU 时刻监测周围的通信环境, 造成资源浪费的同时也大大提高了计算复杂度. 将中继选择下放至队头处进行, 在编队一形成时就将编队内的中继点确定下来, 在有信息需要发送时提前将中继点信息报告给 RSU. 基于单队的分布式中继选择方

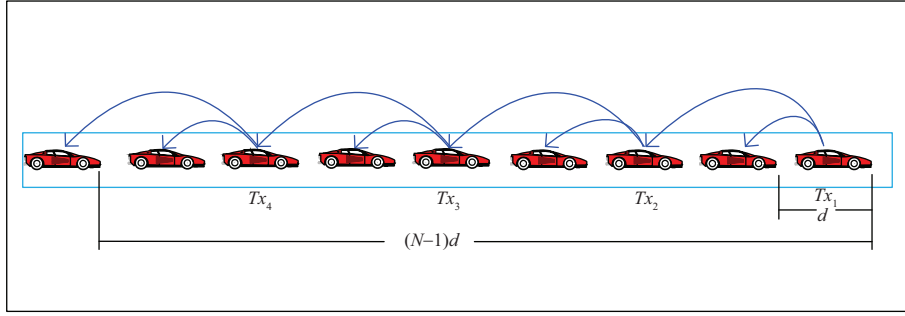


图 2 (网络版彩图) 分布式中继选择方案

Figure 2 (Color online) Distributed relay selection scheme.

案如图 2 所示, 假设一队共有 N 辆车, 队内每辆车之间的距离相等且都为 d , 则队头车辆到队尾车辆的距离长为 $(N - 1)d$, 考虑 3GPP 标准 [6] 中高速场景下的阴影衰落模型:

$$PL(\text{dB}) = 32.4 + 20 \log_{10}(D) + 20 \log_{10}(f_c) + \chi_\alpha, \quad (6)$$

其中 D 是发送端与接收端的距离, f_c 为载波频率, χ_α 为阴影衰落服从均值为 0, 方差为 α^2 的对数正态分布 [16]. 显然当距离 D 增大一倍时, 路径损耗增大 6 dB, 也即功率损耗增加 4 倍.

假设传输距离 d 需要的最小传输功率为 P , 则传输 $2d$ 的距离需要 $4P$ 的功率, 类推可得传输 $n \times d$ 的距离则需要 $n^2 \times P$ 的功率. 假设存在 K_m 个中继点, 每跳距离分别为 d_1, d_2, \dots, d_{K_m} , 即每个子队的长度分别为 d_1, d_2, \dots, d_{K_m} , 则总功率消耗约为 $P_{\text{sum}} = (d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_{K_m}^2)P$. 以最小化总功率为目标, 满足每段传输距离 $d_k > 0$, 所有传输距离之和为队列长等约束建立优化问题 **P2**:

$$\begin{aligned} \mathbf{P2} : \min \quad & (d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_{K_m}^2)P \\ \text{s.t.} \quad & d_1 > 0; \\ & d_2 > 0; \\ & \vdots \\ & d_{K_m} > 0; \\ & d_1 + d_2 + \dots + d_{K_m} = (N - 1)d, \end{aligned}$$

得到拉格朗日方程为

$$\begin{aligned} L(d_1, d_2, \dots, d_{K_m}, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{K_m}, \mu_1) \\ = (d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_{K_m}^2)P + \lambda_1(-d_1) + \lambda_2(-d_2) + \dots + \lambda_{K_m}(-d_{K_m}) \\ + \mu_1(d_1 + d_2 + \dots + d_{K_m} - (N - 1)d), \end{aligned} \quad (7)$$

对应的 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial d_1} = 2d_1P - \lambda_1 + \mu_1 = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial d_2} = 2d_2P - \lambda_2 + \mu_1 = 0, \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial d_{K_m}} = 2d_{K_m}P - \lambda_{K_m} + \mu_1 = 0, \\ -\lambda_1 d_1 = 0, \\ -\lambda_2 d_2 = 0, \\ \vdots \\ -\lambda_{K_m} d_{K_m} = 0, \\ \lambda_1 \geq 0, \\ \lambda_2 \geq 0, \\ \vdots \\ \lambda_{K_m} \geq 0, \\ d_1 + d_2 + \dots + d_{K_m} - (N-1)d = 0, \\ \mu_1 \neq 0, \end{array} \right.$$

不难得到 $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{K_m} = 0$, 再将其代入上述条件可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial d_1} = 2d_1P - \lambda_1 + \mu_1 = 2d_1P + \mu_1 = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial d_2} = 2d_2P - \lambda_2 + \mu_1 = 2d_2P + \mu_1 = 0, \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial d_{K_m}} = 2d_{K_m}P - \lambda_{K_m} + \mu_1 = 2d_{K_m}P + \mu_1 = 0, \end{array} \right.$$

可以解得 $d_1 = d_2 = \dots = d_{K_m}$, 再将其代入等式约束 $d_1 + d_2 + \dots + d_{K_m} - (N-1)d = 0$ 可得

$$d_1 = d_2 = \dots = d_{K_m} = \frac{(N-1)d}{K_m}, \tag{8}$$

即每段传输距离相等, 由此可以得到推论 1.

推论1 编队中的中继车辆数一定时, 当每个中继车辆间的距离相等时, 所需的最小发射功率之和最小.

由式 (8) 可知所需的最小发射功率之和为

$$P_{\text{sum}} = (d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_{K_m}^2)P = K_m \cdot \left(\frac{(N-1)d}{K_m} \right)^2 P = \frac{(N-1)^2 d^2 P}{K_m}. \tag{9}$$

由式 (9) 可见最小总发射功率是关于发射车辆数 K_m 的减函数, 由此可以得到推论 2.

推论2 编队中中继点的数目越多, 满足接收信噪比要求所需的总传输功率就越少.

根据推论 1 与 2, 在确定中继点时, 应在满足时延与接收信噪比阈值的情况下令中继点的个数尽可能多, 并且每个中继点之间的间隔尽可能相等.

首先需确定中继点的个数, 假设所有中继点在接收消息后, 需等待下一个时隙的到来再将消息进行转发, 那么中继点越多, 将会导致编队最后一辆车接收到信息的时延越大. 为了满足所有车能成功接收到消息, 需接收车辆的接收速率 $C_{k,l}^m \geq C_{th}$, 其中 $C_{th} = B \times \log_2(1 + \Gamma_{th})$, 即满足 **P1** 的条件 C3, 并且式 (5) 表示的最大时延 t 需小于给定的时延阈值 τ_{th} :

$$t = \sum_{k=1}^{K_m-1} \left[\frac{P_{L_m}}{C_{k,L_k}^m \cdot t_{slot}} \right] \cdot t_{slot} + \frac{P_{L_m}}{C_{K_m,L_{K_m}}^m} \leq \tau_{th}, \quad (10)$$

由于发送信息的大小是随机产生的, 为了使不同包大小的情况都能满足时延与信噪比的要求, 信息取最大包大小 $P_{L_{max}}$, 速率取能满足要求的最小速率 C_{th} , 可得最大化的最大时延 t_{max} . t_{max} 也要小于 τ_{th} , 式 (10) 可以转化为

$$t_{max} = \sum_{k=1}^{K_m-1} \left[\frac{P_{L_{max}}}{C_{th} \cdot t_{slot}} \right] \cdot t_{slot} + \frac{P_{L_{max}}}{C_{th}} = (K_m - 1) \left[\frac{P_{L_{max}}}{C_{th} \cdot t_{slot}} \right] \cdot t_{slot} + \frac{P_{L_{max}}}{C_{th}} \leq \tau_{th}, \quad (11)$$

求解可得

$$K_m \leq \frac{\tau_{th} - \frac{P_{L_{max}}}{C_{th}}}{\left[\frac{P_{L_{max}}}{C_{th} \cdot t_{slot}} \right] \cdot t_{slot}} + 1, \quad (12)$$

结合 **P1** 中的条件 C4 可得能容忍的最多发射车辆数 K_m 为

$$K_m = \min \left[\left\lceil \frac{\tau_{th} - \frac{P_{L_{max}}}{C_{th}}}{\left[\frac{P_{L_{max}}}{C_{th} \cdot t_{slot}} \right] \cdot t_{slot}} + 1 \right\rceil, N_m - 1 \right], \quad (13)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整.

在确定好发射车辆数 K_m 后, 根据推论 1 可知当 $d_1 = d_2 = \dots = d_{K_m} = \frac{(N-1)d}{K_m}$ 时, 所需总发射功率最小. 但是车辆的发射天线处于编队中 d 的整数倍位置, 而 $\frac{(N-1)d}{K_m}$ 不一定总是整数, 即最佳中继点位置不一定刚好在发射天线所在处, 从而需要取整, 并使每个子队的长度尽可能相等. 考虑算法 1 以最小方差的方式进行距离分配.

Algorithm 1 Minimum variance distance allocation algorithm for relay selection

Input: Number of sub-platoon K_m , length of platoon $(N-1)d$.

Output: Length of sub-platoon d_1, d_2, \dots, d_{K_m} .

```

1:  $d_1 \leftarrow 0, d_2 \leftarrow 0, \dots, d_{K_m} \leftarrow 0, D_r \leftarrow (N-1)d, i \leftarrow 1;$ 
2: while  $D_r \geq d \cdot K_m$  do
3:    $d_1 \leftarrow d_1 + d, d_2 \leftarrow d_2 + d, \dots, d_{K_m} \leftarrow d_{K_m} + d;$ 
4:    $D_r \leftarrow D_r - d \cdot K_m;$ 
5: end while
6: while  $i \leq \frac{D_r}{d}$  do
7:    $d_i \leftarrow d_i + d;$ 
8:    $i \leftarrow i + 1;$ 
9: end while
    
```

经过算法 1 之后, 将得到 $\frac{D_r}{d}$ 段长为 $\lceil \frac{(N-1)}{K_m} \rceil d$ 的子队以及 $K_m - \frac{D_r}{d}$ 段长为 $\lfloor \frac{(N-1)}{K_m} \rfloor d$ 的子队, 并且满足所有子队的长度之和等于队列长:

$$\frac{D_r}{d} \cdot \left\lceil \frac{(N-1)}{K_m} \right\rceil d + \left(K_m - \frac{D_r}{d} \right) \left\lfloor \frac{(N-1)}{K_m} \right\rfloor d = (N-1)d. \quad (14)$$

由于分配到同一子信道进行传输的各队车辆通常前后相隔较远, 因此队头及队尾处进行信息传输时会对其他队造成更大的干扰, 所以队头以及队尾车辆采用较低的发射功率较为合理. 将较长 (长度为 $\lceil \frac{(N-1)}{K_m} \rceil d$) 的子队置于队列中部, 较短 (长度为 $\lfloor \frac{(N-1)}{K_m} \rfloor d$) 的子队置于队列两端会获得更好的性能, 以队列总长度 $7d$, 子队数 $K_m = 3$ 为例, 分配为 $(2d, 3d, 2d)$ 比 $(3d, 2d, 2d)$ 或者 $(2d, 2d, 3d)$ 对其他队列造成的干扰更小.

如遇某中继不可用或负载过大时, 先将中继位置前移或者后移距离 d 以寻找替代中继, 如果替代中继依旧不可用则继续执行前移或者后移, 直到找到可用的替代中继. 如果在移动到上一个或者下一个中继前未找到可用替代中继, 则删除该中继点, 令发射车辆数 $K_m = K_m - 1$, 最后更新中继位置.

3.2.2 基于中继选择的功率优化方案

在确定中继点的个数与位置之后, 优化问题 **P1** 可以转换为

$$\begin{aligned} \mathbf{P3}: \min_P \quad & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} P_k^m \\ \text{s.t. C1: } \quad & 0 < P_k^m \leq P_{\max}, \quad 1 \leq m \leq M, \quad 1 \leq k \leq K_m; \\ \text{C2: } \quad & t \leq \tau_{\text{th}}; \\ \text{C3: } \quad & \beta_{T_k^m}^j \cdot \Gamma_{k,l}^m \geq \beta_{T_k^m}^j \cdot \Gamma_{\text{th}}, \quad 1 \leq m \leq M, \quad 1 \leq k \leq K_m, \quad 1 \leq l \leq L_k^m. \end{aligned}$$

在利用式 (11) 确定中继点个数时采用了可能产生的最大时延 t_{\max} , 并使其小于给定的时延阈值 τ_{th} , 而实际时延 t 应满足 $t \leq t_{\max} \leq \tau_{\text{th}}$, 因此优化问题 **P3** 中的条件 C2 恒成立. 对于 C3, 当 $\beta_{T_k^m}^j = 0$ 时, C3 恒成立, 表示在 j 时隙 T_k^m 无信息传输, 其子队内用户无需满足接收 SINR 的限制, 因此只需考虑当 $\beta_{T_k^m}^j = 1$ 的情况, 再将式 (3) 代入 **P3**, 优化问题转化为

$$\begin{aligned} \mathbf{P4}: \min_P \quad & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} P_k^m \\ \text{s.t. C1: } \quad & 0 < P_k^m \leq P_{\max}, \quad 1 \leq m \leq M, \quad 1 \leq k \leq K_m; \\ \text{C2: } \quad & \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{k'=1}^{K_{m'}} \beta_{T_{k'}^{m'}}^j \cdot |h_{k',k,l}^{m',m}|^2 \cdot P_{k'}^{m'} \cdot \Gamma_{\text{th}} + \Gamma_{\text{th}} \cdot \sigma^2 - |h_{k,l}^m|^2 \cdot P_k^m \leq 0, \\ & (1 \leq m \leq M, 1 \leq k \leq K_m, 1 \leq l \leq L_k^m). \end{aligned}$$

对于 **P4** 的条件 C2 来说, $\beta_{T_{k'}^{m'}}^j = 0$ 时表示 $T_{k'}^{m'}$ 在 j 时隙无信息传输, 即来自 $T_{k'}^{m'}$ 的干扰为 0, 要得出最优解的难点在于确定条件 C2 中的干扰来自哪些发射车辆, 即 $\beta_{T_{k'}^{m'}}^j$ 的值在 j 时隙是否为 1. $\beta_{T_{k'}^{m'}}^j$ 的值与上一个中继节点 $T_{k'}^{m'}_{j-1}$ 的传输时隙以及两节点之间的传输时延相关. 对于第 1 次传输而言, 所有队列的队头车辆都在第 1 个时隙进行传输, 因此有 $\beta_{T_{k'}^{m'}}^1 = 1$, 即对于所有接收车辆来说, 干扰都来自其他队列的队头. 针对传输时隙索引 $j = 1$, **P4** 可以转化为线性问题 **P5** 来得出该时隙下同时传输

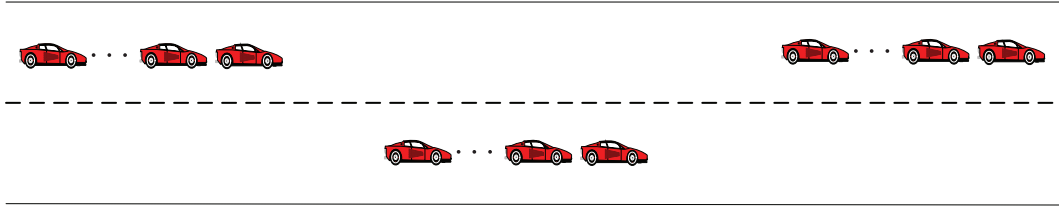


图 3 (网络版彩图) 仿真场景
Figure 3 (Color online) Simulation scenario.

的所有发射车辆的最优传输功率.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P5} : \min_P \quad & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} P_k^m, \quad \left(\beta_{T_{k'}}^j = 1 \right) \\
 \text{s.t. C1} : \quad & 0 < P_k^m \leq P_{\max}, \quad 1 \leq m \leq M, \quad 1 \leq k \leq K_m, \quad \beta_{T_{x_k}}^j = 1; \\
 \text{C2} : \quad & \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{k'=1}^{K_{m'}} |h_{k', k, l}^{m', m}|^2 \cdot P_{k'}^{m'} \cdot \Gamma_{\text{th}} + \Gamma_{\text{th}} \cdot \sigma^2 - |h_{k, l}^m|^2 \cdot P_k^m \leq 0, \\
 & (1 \leq m \leq M, 1 \leq k \leq K_m, 1 \leq l \leq L_k^m).
 \end{aligned}$$

通过 **P5** 解出 $j = 1$ 时各队头的最优传输功率后, 根据式 (3) 和 (4) 计算出下一中继点的接收速率 R_{k, L_k}^m , 再根据式 $\lceil \frac{P_{L_k}^m}{R_{k, L_k}^m \cdot t_{\text{slot}}} \rceil \cdot t_{\text{slot}}$ 计算出下一中继点的传输时隙 j' . 然后按时隙进行搜索, 将在同一时隙进行传输的发射车辆放在一起求解优化问题 **P5**, 并重复以上步骤, 直至所有队列的最后一个中继点转发完消息. 这样就将优化问题 **P4** 转化为了一系列的线性问题 **P5** 进行求解, 从而得出所有发射车辆的最优传输功率.

整个算法分为两个部分, 第 1 部分为中继选择, 第 2 部分为功率优化, 下面对该算法的复杂度进行简要评估. 对中继选择算法而言, 算法 1 需要执行 M 次, 每次最多进行 $\lceil \frac{N-1}{K_m} \rceil$ 次循环, 每次循环的运算次数与 K_m 成正比, 因此其复杂度为 $O(MN)$. 第 2 部分功率优化问题 **P5** 为线性规划问题, 目前暂不能给出解决一个线性规划问题所需要的算术运算的确切次数, 但对于给定求解精度, 可以给出采用内点法时所需要的算术运算次数的严格上界^[17], 最坏的情况下, **P5** 最多执行 K_m 次, 每次的求解复杂度为正比于 ML_k^m (L_k^m 为第 m 个编队中第 k 个发射车辆所在子编队包含的车辆数), 其复杂度为 $O(ML_k^m K_m)$. 整个算法的总复杂度为 $O(M(N + L_k^m K_m))$, 其为多项式时间复杂度.

4 仿真分析

本节采用 Matlab 进行仿真, 为了验证提出的优化方案的性能, 我们在同样的条件下加入传统的队头固定功率广播的方式进行比较, 分析对比了不同队列长下不同信噪比阈值以及不同时延阈值对各方案的性能带来的影响.

4.1 仿真参数设置

如图 3 所示, 仿真场景为高速公路上有 M 队编队在同一时刻被分配到同一子信道上进行传输的场景, 为了方便, 假设每队的车辆数 N 相同, 并且每辆车都可正常通信. 被分配到同一子信道的不同编队之间通常相隔较远, 因此仿真中不同编队之间的间距设为约 500 m, 车速设为 100 km/h, 每队的

表 1 仿真参数设置

Table 1 Parameters setting for simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of platoons M	4	Number of vehicles per platoons N	4~20
Fading factor α	3	Center frequency	5.9 GHz
Subchannel bandwidth	1 MHz	Noise power spectrum density	-114 dBm/Hz
Package length P_L	50~1200 Byte	Maximum broadcasting power of vehicles P_{\max}	23 dBm
Subcarrier spacing	15 kHz	Slot	1 ms
Latency threshold τ_{th}	10~100 ms	SINR threshold	0, 3, 6 dB

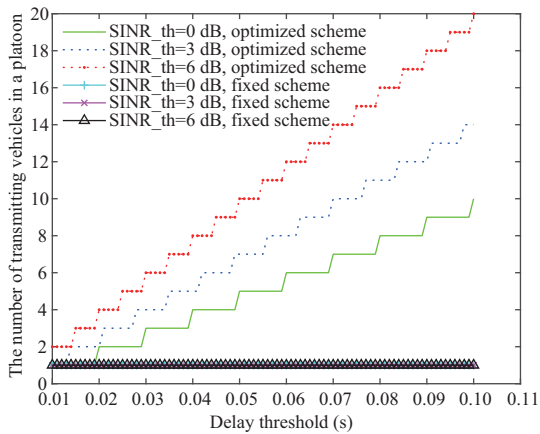


图 4 (网络版彩图) 不同 SINR 阈值下发射车辆数与时延阈值的关系

Figure 4 (Color online) The relationship between the number of transmitting vehicles and the delay threshold under different SINR thresholds.

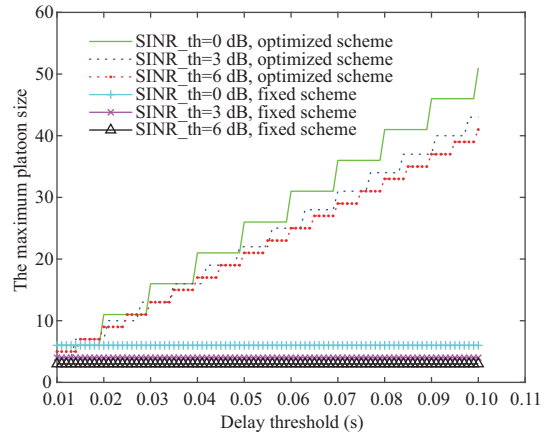


图 5 (网络版彩图) 不同 SINR 阈值下最大队列容量与时延阈值的关系

Figure 5 (Color online) The relationship between the maximum platoon size and the delay threshold under different SINR thresholds.

车辆数为 N , 队列内每辆车的间隔 d 约为 5 m, 传统方案队头将以 23 dBm 的功率进行广播. 其他参数如表 1 所示.

4.2 仿真结果分析

当单队车辆数 $N = 20$ 时, 图 4 为不同接收 SINR 阈值下单队的发射车辆 (队头 + 中继) 与时延阈值的关系, 传统方案仅有队头一辆发射车辆, 因此无论接收 SINR 阈值与时延阈值为多少, 值始终为 1. 而本文所提方案中, 发射车辆数与队长、接收 SINR 阈值和时延阈值相关, 由式 (13) 可知, 最多可容忍的发射车辆数随着 SINR 阈值的增大而增大, 也随着时延阈值的增大而增大, 且不大于队列长减 1. SINR 的阈值越大意味着每一跳传输的时间越短, 时延阈值越大则能允许更多的跳数.

图 5 给出了本文方案与传统方案分别在接收 SINR 阈值为 0, 3, 6 dB 时的最大队列容量 (满足时延, 接收 SINR 要求的单队最多可容纳的车辆数) 与时延阈值的关系. 显然, 传统的固定功率广播方式的最大队列容量很低, 在接收 SINR 阈值为 0, 3, 6 dB 时的最大队列容量分别为 6, 4 和 3 辆, 并且与时延阈值无关, 这是因为当采用固定功率进行广播时, 多个队列之间的干扰较大, 主要限制最大队列容量的因素为给定的接收 SINR 阈值. 而反观所提出的功率优化方案, 其最大队列容量随着时延阈值

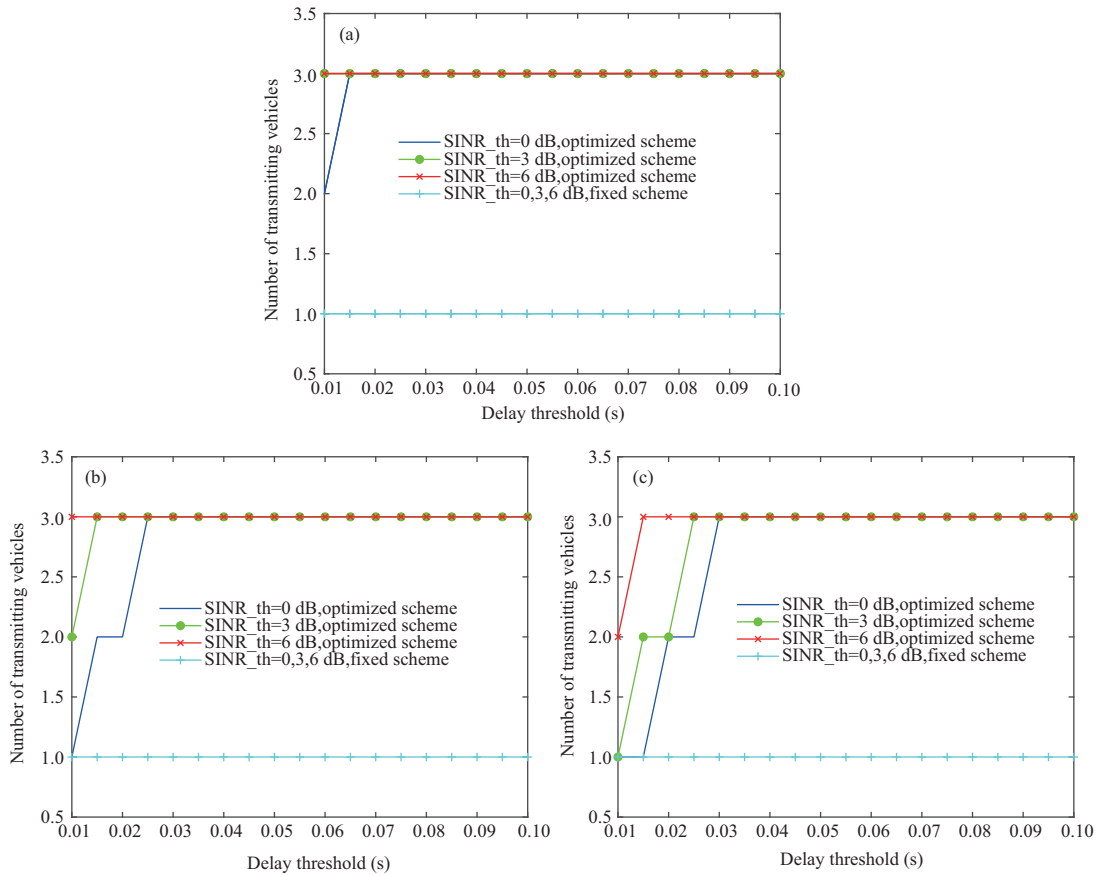


图 6 (网络版彩图) 不同包长范围与不同 SINR 阈值下发射车辆数 (队头 + 中继) 与时延阈值的关系

Figure 6 (Color online) The relationship between the number of transmitting vehicles and the delay threshold under different packet length ranges and different SINR thresholds. (a) Packet length (50~400 Byte); (b) packet length (400~800 Byte); (c) packet length (800~1200 Byte).

的放松逐步增加, 并且给定的接收 SINR 阈值越低, 其增加的幅度越大. 这是由于所提出的方案中引入了中继, 使得单跳传输转为多跳传输, 增加了传输范围, 降低了每跳的传输功率, 从而减少了对于其他队列的干扰. 所以决定最大队列容量的因素不仅有给定的接收 SINR 阈值, 还包括时延阈值. 时延阈值越大, 则可选择的中继点数目越多, 信息的可靠传输距离也就越远. 一般车辆编队场景会考虑道路实际情况, 编队长度过长会影响交通, 太短又不能将编队的优势发挥出来, 通常编队的长度为 5~20 辆车, 显然当队列长大于 6 时, 传统固定功率广播方式已经不能满足通信需求, 而所提出的方案仍能满足编队的通信需求.

在队列较长时, 本文提出的方案始终优于传统方案, 接下来对比队列较短时两方案的性能. 当单队车辆数 $N = 4$ 时, 图 6 为不同包长范围与不同 SINR 阈值下发射车辆 (队头 + 中继) 与时延阈值的关系, 传统模式下无中继节点, 所有情况下发射车辆始终为 1, 而本文所提方案在包长为 50~400 字节时, SINR 阈值为 3 和 6 dB 的发送车辆数始终为 3, 即 $N - 1$, 而 0 dB 的发送车辆数随着时延阈值的增加从 2 变成 3. 在包长为 400~800 字节时, SINR 阈值为 6 dB 的发送车辆数始终为 3, 0 与 3 dB 的发送车辆数随着时延阈值的增加分别从 1 和 2 变成 3. 包长为 800~1200 字节时, 其发送车辆数随着时延阈值的宽松而逐渐增大, 但是不大于 3. 由此可以得出, 所设计方案的单队发送车辆数不仅随着时

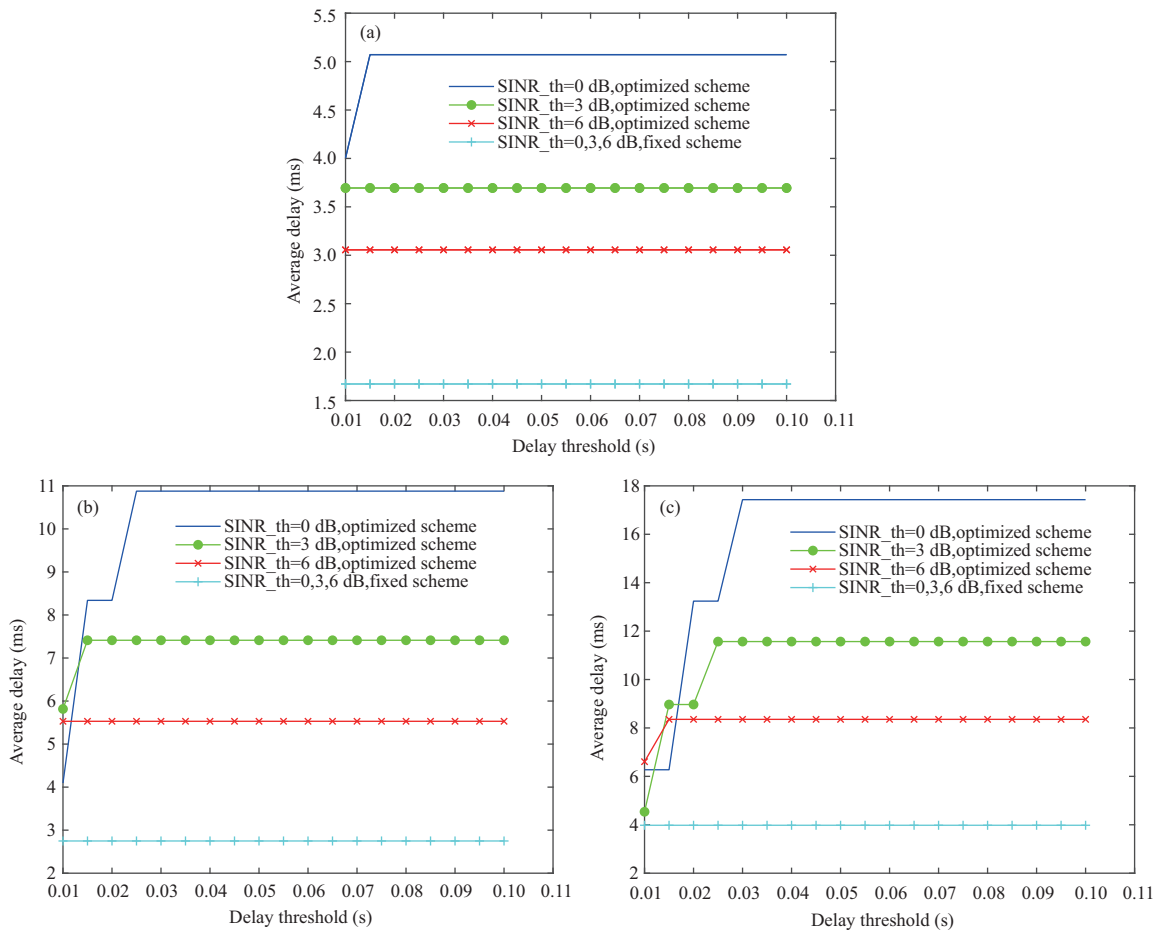


图 7 (网络版彩图) 不同包长范围与不同 SINR 阈值下实际平均时延与时延阈值的关系

Figure 7 (Color online) The relationship between the average delay and the delay threshold under different packet length ranges and different SINR thresholds. (a) Packet length (50~400 Byte); (b) packet length (400~800 Byte); (c) packet length (800~1200 Byte).

延阈值和接收 SINR 阈值的增大而增大, 并且与包的大小有关, 包越长单跳所需的时间越长, 在受到时延阈值的约束下, 单队发送车辆数与包的大小成反比。

实际平均时延的计算方式为每一队的所有用户的实际时延求期望, 图 7 为不同包长范围与不同 SINR 阈值下实际平均时延与时延阈值的关系, 在所有情况下传统的固定功率广播方式带来的实际时延都要小于本文提出的方案, 这是因为在传统模式下, 队头都以一个固定的较大的功率进行广播, 使得信息传输速率变快从而只带来较小的时延, 但是却浪费了大量的能量, 而本文提出的方案, 虽然在队列较短的情况下时延性能不及传统方案, 但是带来的时延却是在时延阈值允许的范围内的, 并且在队列较长时也能满足时延要求. 与图 6 结合可以看出, 所提方案中每一次时延的提升都与发送车辆数的提升相关, 这是因为所设计的方案在高密度场景下为了节省本就不够的频域资源而选择时分传输, 即每一个中继节点需等待接收完来自上一个中继节点转发的消息后, 再在下一个时隙在相同的子信道上进行转发, 每多一个中继节点就会增加一次转发时延。

图 8 为不同包长范围与不同 SINR 阈值下总发射功率消耗与时延阈值的关系, 总功率消耗的计算方式为所有发射车辆的发射功率之和. 如图所示, 固定功率广播方案的总功率为 4 队编队的队头发射

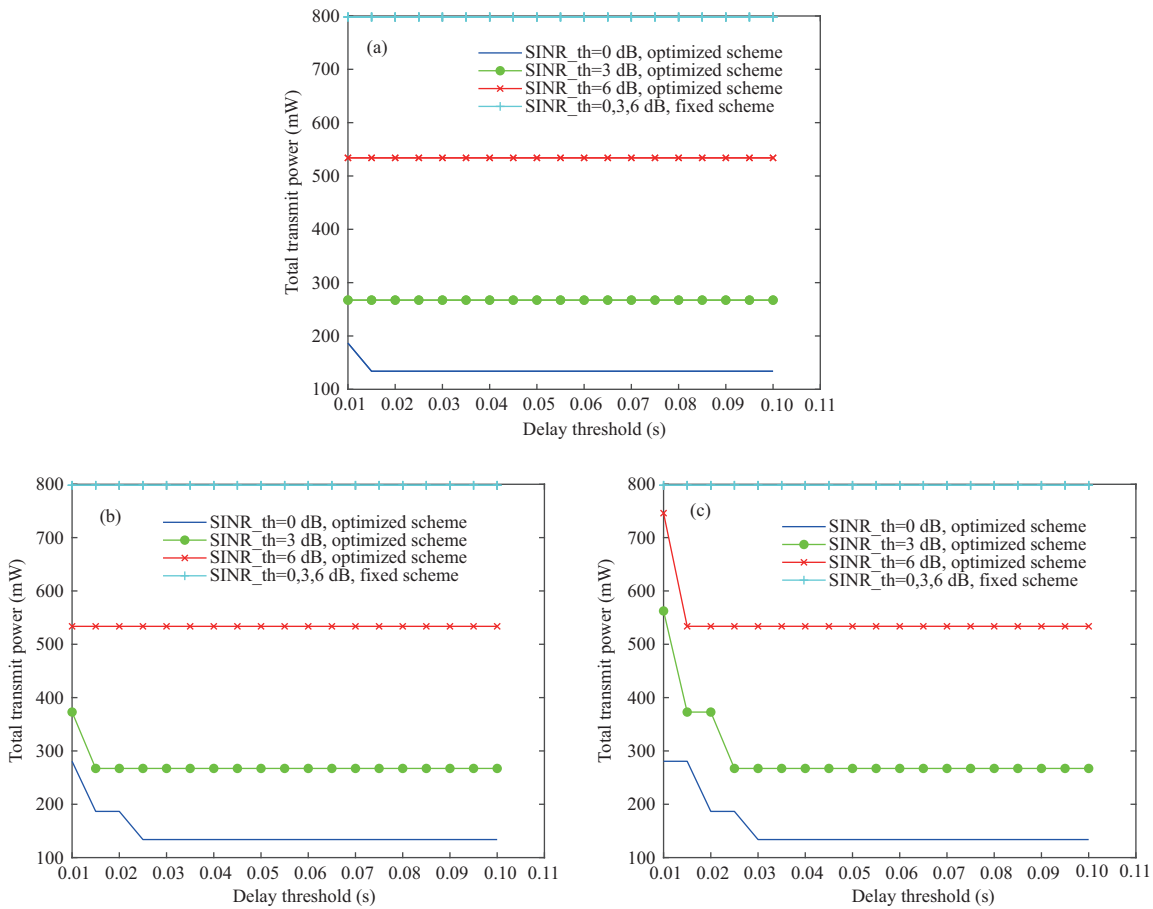


图 8 (网络版彩图) 不同包长范围与不同 SINR 阈值下总发射功率与时延阈值的关系

Figure 8 (Color online) The relationship between the total transmit power and the delay threshold under different packet length ranges and different SINR thresholds. (a) Packet length (50~400 Byte); (b) packet length (400~800 Byte); (c) packet length (800~1200 Byte).

功率之和 800 mW, 显然在各种情况下都大于所提出的优化方案. 对于优化方案而言, 接收 SINR 阈值越大, 所需的总功率越大, 与图 6 结合可以看出, 随着时延阈值的增加, 发射车辆数目变多的同时总功率消耗也随之下降, 这是由于跳数增多后, 虽然会增加一个发射点的功率, 但是由于每一跳的距离缩小, 所有发射点的发射功率随之减少的量之和会大于增加一个发射点所需要的功率, 因此总功率消耗也随之减少. 总而言之, 本文所提方案是在满足时延阈值, 接收 SINR 阈值的前提下加入中继, 通过牺牲一定时延换来较小的功率消耗.

5 结论

高密度场景下的车联网通信一直是 C-V2X 的难点之一. 本文针对高密度车辆编队场景, 以最小化总功率消耗为目标, 提出了一种基于中继的功率优化方案, 由于直接从优化问题中得到最优的中继点选择以及功率分配方案较为困难, 因此将优化问题转为中继点确定与功率优化两步进行. 队头车辆先基于路径损耗模型, 根据给定的时延阈值以及自身所处编队的实际情况以最小化总功率消耗为目标综合选出队列内中继车辆的位置, 再基于所选中继进行功率优化. 仿真结果验证了所提算法的性能, 相

比传统的固定功率广播方式,在加入中继后,队头能以更小的功率进行广播,减少能量消耗的同时也可减小干扰范围.中继还加大了传输距离,使得队尾车辆相比传统方式能够获得更高的接收质量.此外,所提方案相比传统方式的最大队列容量更大,在未来的高密度车辆编队场景中更为适用.

参考文献

- 1 3GPP. Technical specification group radio access network. TR 36.855 V14.0.0. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.855
- 2 Chen S Z, Hu J L, Shi Y, et al. Vehicle-to-everything (V2X) services supported by LTE-based systems and 5G. *IEEE Comm Stand Mag*, 2017, 1: 70–76
- 3 Chen S Z, Hu J L, Shi Y, et al. LTE-V: a TD-LTE-based V2X solution for future vehicular network. *IEEE Int Thing J*, 2016, 3: 997–1005
- 4 Molina-Masegosa R, Gozalvez J. LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications: a new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications. *IEEE Veh Technol Mag*, 2017, 12: 30–39
- 5 Chen S Z, Hu J L, Shi Y, et al. A vision of C-V2X: technologies, field testing, and challenges with Chinese development. *IEEE Int Things J*, 2020, 7: 3872–3881
- 6 3GPP. Study on evaluation methodology of new vehicle-to-everything (V2X) use cases for LTE and NR. TR 37.885 V15.3.0. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.885
- 7 3GPP. Study on NR vehicle-to-everything (V2X). TR 38.885 V16.0.0. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.885
- 8 3GPP. Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services. TR 22.886 V16.2.0. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.886
- 9 Lien S Y, Deng D J, Lin C C, et al. 3GPP NR sidelink transmissions toward 5G V2X. *IEEE Access*, 2020, 8: 35368–35382
- 10 Naik G, Choudhury B, Park J M. IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: evolution of radio access technologies for V2X communications. *IEEE Access*, 2019, 7: 70169–70184
- 11 Wang P F, Di B Y, Zhang H L, et al. Platoon cooperation in cellular V2X networks for 5G and beyond. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2019, 18: 3919–3932
- 12 Yang C, Lou W, Liu Y, et al. Resource allocation for edge computing-based vehicle platoon on freeway: a contract-optimization approach. *IEEE Trans Veh Technol*, 2020, 69: 15988–16000
- 13 Mei J, Zheng K, Zhao L, et al. Joint radio resource allocation and control for vehicle platooning in LTE-V2V network. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67: 12218–12230
- 14 Hong C H, Shan H G, Song M Y, et al. A joint design of platoon communication and control based on LTE-V2V. *IEEE Trans Veh Technol*, 2020, 69: 15893–15907
- 15 3GPP. Physical channels and modulation. TR 38.211 V16.3.0. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211
- 16 3GPP. Study on 3D channel model for LTE. TR 36.873 V12.7.0. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.873
- 17 Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004

A relay-based power optimization algorithm for platooning

Jiewen HU¹, Zheng MA¹, Gang LIU^{1*}, Pingzhi FAN¹ & Youhua TANG²

1. *School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;*

2. *School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China*

* Corresponding author. E-mail: gangliu@home.swjtu.edu.cn

Abstract As one of the advanced applications of C-V2X (cellular vehicle to everything), the platoon can effectively improve travel efficiency. Vehicles in the platoon must exchange information in real-time, and the platoon head needs to take a managerial role. However, in a high-density scenario, when platoon heads are assigned the same sub-channel for transmission, there will be interference between multiple platoons. If platoon heads use the traditional method of broadcast with fixed power, excessive power will cause interference to other platoons, and insufficient power will affect the communication quality in the platoon. As a result, an appropriate power allocation scheme is required. In this paper, a relay-based multi-platoon cooperative power optimization scheme is proposed to minimize total power consumption while meeting the requirements of delay and receiving signal-to-noise ratio. This scheme reduces the broadcast power required for each hop by selecting appropriate relay vehicles in the platoon, thereby reducing interference to other platoons and total power consumption. The simulation results show that the proposed scheme allows more platoon members than the traditional scheme while significantly lowering the total power consumption.

Keywords C-V2X, platoon, broadcast power, relay, power optimization