

多信道车载网络带宽调制算法

彭鑫, 李仁发, 刘樛骄

(湖南大学 计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对固定带宽车载网络频谱利用率低的问题, 将半定规划法应用于多信道车载自组网带宽调制问题中, 提出了一种车载自组网信道带宽调制算法。该算法首先在有频谱竞争的网络中测量相邻车辆间的距离, 以确定网络冲突图; 然后通过半定规划松弛来协调频谱的争用, 最后以此为基础根据链路负载采用比例压缩策略求得频谱调制方案。仿真分析表明, 该算法适用于多信道车载自组网, 在动态拓扑环境下表现出较好的性能。

关键词: 车载自组网; 带宽调制; 半定规划

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)11-0123-07

Channel width adaptation algorithm in multi-channel vehicular networks

PENG Xin, LI Ren-fa, LIU Liang-jiao

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the low utilization of spectrum resource in vehicular networks, an algorithm base on semidefinite programming was presented, which could be utilized to channel width adaptation of multi-channel vehicular networks. Firstly, the algorithm need to measure the distance with the surrounding vehicles to compute conflict graph. And then the semidefinite programming relaxation was employed to coordinate the competition of spectrum resource. Finally, the ultimate channel width adaptation was computed based on the initial channel assignment and compression process. Simulation results demonstrated that the new algorithm not only can promote network throughput, but also perform well on extremely dynamic topology.

Key words: vehicular ad hoc networks; channel width adaptation; semidefinite programming

1 引言

随着现代交通网的迅速发展和人们对驾驶体验的不断追求, 智慧交通(smart transportation)开始受到越来越多的重视。车载自组网作为智慧交通系统的重要基础引起了学术界和工业界的极大兴趣。

车载自组网是由道路上的车辆和布设在特定

位置的路边单元(RSU)所组成的开放式移动自组网(MANET)^[1]。它具有部署方便、成本低廉、组网灵活和结构开放等特点, 可以实现事故预警、辅助驾驶、交通信息发布、车间通信和 Internet 接入等服务, 有着广阔的应用前景。包括车载自组网在内, 传统的无线自组网所有节点使用相同信道。文献[2]指出, 随着跳数的增加和节点密度的增大, 无线自组网的性能迅速衰减。这是因为单信道网络

收稿日期: 2010-07-02; 修回日期: 2010-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903019); 湖南省科技计划基金资助项目(2010GK3051)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60903019); Science and Technology Planning Project of Hunan Province (2010GK3051)

节点间存在着信道竞争,另一方面隐藏终端和暴露终端问题造成频谱利用率低下,在拓扑高度动态化的车载自组网中这种影响尤为严重,所以单信道车载自组网难以满足通信服务的需要。在这种情况下文献[3]提出将多信道技术用于无线自组网,只要进行合理的信道带宽分配就可以在很大程度上避免信道竞争与冲突,大幅提升网络吞吐量。因此信道带宽调制是多信道无线自组网的热点研究问题,但是之前的研究主要面向单跳无线网络和静态无线自组网,网络拓扑在信道调制过程中没有任何变化,而车载自组网拓扑变化频繁、通信窗口狭窄,所以之前的信道带宽调制技术无法应用于车载自组网。

本文提出一种基于半定规划的多信道车载自组网带宽调制算法。提出的方案考虑了拓扑变化问题,通过计算网络距离矩阵来得到网络冲突图,然后采用半定规划来协调用户间的频谱竞争,最后根据链路负载对初始分配进行比例压缩求得最终信道带宽调制方案。提出的算法可以有效处理多信道车载自组网带宽调制问题。最后通过仿真实验对算法进行了分析。

2 相关研究

通常的频谱管理方式将可用频谱分为多个固定带宽的信道。从 2007 年开始 IEEE 802.11^[4]允许节点在不同的频谱区域分别使用 5MHz、10MHz、20MHz 不同的信道带宽。作为 4G 候选标准之一的 WiMAX^[5]同样允许节点使用不同的信道带宽。车载自组网标准 IEEE 802.11p^[6]采用 DSRC 的频谱分配方案,使用位于 5.9GHz 的 75MHz 带宽信道,并对信道进行划分,分别用于安全相关通信和其他应用服务。但上述标准都是基于频谱的静态分割,即所有信道的中心频率和带宽都是事先确定好的。近年来,越来越多的工作开始关注动态信道带宽调制技术。IEEE 802.11n^[7]标准首次采用信道绑定技术,允许节点在 5GHz U-NII 频段内将相邻的 2 个 20MHz 信道绑定为更宽的 40MHz 信道。随着宽带无线接入技术的发展,人们开始意识到在开放频谱环境下,由于频谱白区具有不同带宽,信道带宽调制将是今后无线自组网所具有的基本功能。率先研究带宽调制问题的是 Chandra 和 Bahl 等^[8,9],他们通过修改驱动 802.11 器件射频前端电路频率合成器的时钟

频率,得到了不同的信道带宽。他们指出对于存在信道争用的网络,以频分复用的方式使用信道比基于竞争的方式具有更高的效率。这是由于频分复用接入方式消除了网络中潜在的冲突与竞争,通过带宽调制为不同的链路分配互不干扰的窄信道提升了整个网络的容量。在文献[8]的基础上, Moscibroda 和 Chandra 等人研究了 802.11 网络负载均衡问题^[10],他们将信道带宽调制建模为装箱问题,并且提出了基于线性规划和装箱策略的信道带宽调制算法。Tang 和 Misra 等^[11]在多跳认知无线网络背景下提出新的多信道冲突图 MCCG,并且分别在协议干扰模型和物理干扰模型条件下,采用最大-最小公平原则来最大化网络吞吐量。文献[8~11]的研究主要面向单跳无线网络,并不适合于多跳无线网络。Li 和 Zhang^[12]研究了 802.11 多信道无线 mesh 网环境下的信道带宽调制问题,将带宽调制、逻辑拓扑控制和路由问题联合建模为 0-1 规划,并提出了启发式算法。Feng 和 Yang^[13]将频谱捷变网络信道带宽调制分解为信道分配和链路层调度问题。建立了频谱分配的数学规划模型,并提出基于偶分解的分布式带宽分配和时间窗的链路层调度策略。Raman 和 Caesar^[14]提出一种采用接入和拥塞控制的多信道自组网 QoS 策略,并且在 ETT(expected transmission time)基础之上提出了新的路由指标 QOSAR (QoS-based ad hoc routing metric)。但是,上述算法都是用于静态无线网络,没有考虑拓扑的动态变化对频谱竞争的影响,无法用于车载网络环境。

3 算法模型

3.1 车载网络冲突图的构建

无线传输的空间特性导致干扰范围内车辆间的同信道干扰。文献[15]提出 3 种无线干扰模型,分别是 PCA(primary conflict avoidance)、RCA (receiver conflict avoidance)和 TR-CA (transmitter-receiver conflict avoidance),其中,TR-CA 同时考虑发送端和接收端的干扰,是更为严格的模型。如果车辆通信半径为 r ,载波监听范围为 $2r$,则距离小于等于 r 的车辆可以正常通信,距离小于等于 $2r$ 的车辆可产生同道干扰。TR-CA 干扰模型如图 1 所示。车辆 i 、 j 间的链路活动会对处于 Σ 范围内所有车辆的通信造成影响。基于以上考虑,本文采用 TR-CA 干扰模型来建立网络冲突图。

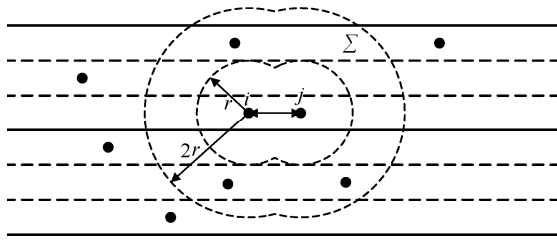


图 1 TR-CA 干扰模型

由于车载网络拓扑结构是动态变化的，本文通过分析网络距离矩阵的变化来反映链路之间的潜在冲突。假设 $G(V, E)$ 表示存在频谱竞争的车载网络，其中 V 表示网络节点(车辆)集合， $|V|=n$ ； E 表示通信链路集合， $|E|=m$ 。 $X_{n,2}$ 表示车辆空间分布的坐标矩阵， n 表示车辆数， 2 表示空间维度，本文只考虑二维空间的情形。 $D=[d_{ij}^2]_{n \times n}$ 表示车辆 i 和 j 在空间 $X_{n,2}$ 中对应点的距离矩阵，其中

$$d_{ij}(X) = \left[\sum_{t=1}^2 (x_{it} - x_{jt})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

每台车辆测得与邻居车辆间的距离，得到稀疏的网络平方距离矩阵 $\hat{D} = [\hat{d}_{ij}]_{n \times n}$ 。

$$\hat{d}_{ij} = \begin{cases} d_{ij}^2 & , d_{ij} \leq r \\ \eta & , d_{ij} > r \end{cases} \quad (2)$$

其中， r 表示车辆通信半径， η 表示车辆 i 和 j 不相邻，无法直接测得车辆间距。传统方法根据网络的连通性，采用网络节点间的最短路径长度来近似车辆间的欧氏距离，求出 η 。但是采用最短路径测距会引入较大的近似误差，往往导致最短路径法测得的距离 $d'_{ij} \geq d_{ij}$ ，即测量距离大于实际距离。这很可能造成 2 台车辆已经进入干扰范围，而在算法上却认为 2 台车辆未发生相互干扰。所以本文采用奇异值分解(SVD)通过稀疏矩阵 \hat{D} 来重构距离矩阵 D 。奇异值分解^[16]是指对矩阵 $A \in R^{m \times n}(r > 0)$ ，存在 m 阶正交阵 U 和 n 阶正交阵 V ，使得 $U^T A V = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p) = \Sigma$ ，即

$$A = U \Sigma V^T \quad (3)$$

其中， $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p$ ， $p = \min\{m, n\}$ 。 $\sigma_i (i=1, 2, \dots, p)$ 称为 A 的奇异值，当 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1} = \sigma_{r+2} = \dots = \sigma_p = 0$ 时， $r = \text{rank}(A)$ 。若 $m \geq n$ ， $\text{rank}(A) = r \geq k$ ， $(m, n, r, k \in N)$ ，令 $\Sigma_k = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k)$ ，则

$$A_k = U \begin{bmatrix} \Sigma_k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T = \sum_{i=1}^k \sigma_i u_i v_i^T \quad (4)$$

$\text{rank}(A_k) = \text{rank}(\Sigma_k) = k$ ，则称 A_k 为矩阵 A 的秩 k 重构，实际上是矩阵 A 在秩 k 空间上的投影。

通过上述分析可知，采用奇异值分解来重构距离矩阵 D ，必须选取合适的 k 值。如果 k 取值过大，增加了不必要的计算量甚至可能引入误差；取值过小会造成高维信息的丢失降低了重构精度。由于

$$d_{ij}^2 = \sum_{t=1}^2 (x_{it} - x_{jt})^2 = \sum_{t=1}^2 (x_{it}^2 + x_{jt}^2 - 2x_{it}x_{jt})$$

所以，对于矩阵 D ，

$$D = l e^T + e l^T - 2 X X^T$$

其中， $l = \left(\sum_{t=1}^2 x_{1t}^2, \sum_{t=1}^2 x_{2t}^2, \dots, \sum_{t=1}^2 x_{nt}^2 \right)^T$ ， $e = (1, 1, \dots, 1)^T$ ，

X 为坐标矩阵。 $l e^T$ 和 $e l^T$ 的秩为 1， $X X^T$ 的秩为 2，可知 $\text{rank}(D) \leq 4$ 。所以取 $k=4$ ，对矩阵 D 进行 4 秩重构。

$$D \approx \hat{D}_4 = \sum_{i=1}^4 \sigma_i u_i v_i^T \quad (5)$$

车辆以时间 τ 为间隔，连续进行 2 次上述过程，得到 2 个重构的距离矩阵 D_1 和 D_2 。假设车辆干扰半径为 $2r$ (r 为通信半径)。对于车辆 i 和 j ，如果 $d_{ij} \leq 2r$ 则会产生同频干扰。考虑到拓扑的动态变化，如果 $2r \leq d_{ij} \leq 3r$ ，并且 2 辆车正在靠近则构成潜在干扰。以此为基础建立算法 1 (车载网络冲突目的建立)。

Input: \hat{D}^1 ; $t=0$ 时刻测得的稀疏距离矩阵

\hat{D}^2 ; $t=\tau$ 时刻测得的稀疏距离矩阵

Output: $G'(V', E')$; 网络冲突图

1) $D^1 \approx \hat{D}_4^1 = \sum_{i=1}^4 \sigma_i u_i v_i^T$;

2) $D^2 \approx \hat{D}_4^2 = \sum_{i=1}^4 \sigma_i u_i v_i^T$;

3) For $i=1:n$

4) For $j=1:n$

5) If $2r \leq d_{ij}^1 \leq 3r$ then $F_i^1 \leftarrow \{j\}$;

6) If $d_{ij}^2 \leq 2r$ then $E_i^1 \leftarrow \{j\}$;

7) If $2r \leq d_{ij}^2 \leq 3r$ Then $F_i^2 \leftarrow \{j\}$;

8) $F_i = F_i^1 \cap F_i^2$, $E_i^2 = \{l | d_{il}^1 \geq d_{il}^2, \forall l \in F_i\}$;

9) $I_i = E_i^1 \cup E_i^2$;

10) End For

11) End For

- 12) $V' = \{v_{ij} | <i, j> \in E\}$;
- 13) $E' = \{<v_{ij}, v_{kl}> | k \in I_i \cup I_j \text{ 或 } l \in I_i \cup I_j\}$ 。

3.2 带宽调制的半定规划模型

网络冲突图中的节点对应于网络的一条通信链路，即一个频谱用户，图中的边表示链路间的干扰关系。假设有冲突图 $G^l(L, E^l)$ ， $|L|=h$ 表示网络中有 h 条通信链路， y_l 为链路 l 上的负载，可用频谱资源为 B 。

首先考虑频谱的静态分割。假设对于链路集合 $L = \{l_i | 1 \leq i \leq h\}$ 有频谱分配映射：

$$f(l_i) = (SL_j, SU_j), \quad i \in [1, h], \quad j \in [1, |B|] \quad (6)$$

不难理解，频谱映射 f 必须满足下列条件：

- 1) $\bigcup_{i=1}^h f(l_i) = B$;
- 2) 对任意 $i, j \in [1, |B|]$ 且 $i \neq j$ 有 $(SL_i, SU_i) \cap (SL_j, SU_j) = \emptyset$;
- 3) 对网络中任意链路 $l_i, l_j \in L$ ，并且 $<l_i, l_j> \in E^l$ 有 $f(l_i) \cap f(l_j) = \emptyset$;
- 4) 对网络中任意链路 $l_i, l_j, l_k \in L$ 且 $i \neq j \neq k$ ，如果 $f(l_i) = f(l_j)$ ， $f(l_j) = f(l_k)$ 则 $f(l_i) = f(l_k)$ 。

根据冲突图 $G^l(L, E^l)$ 建立矩阵 $M_{|L| \times |L|}$ 。

$$m_{ij} = \begin{cases} \lambda - 1, & i = j \\ -1, & <i, j> \in E^l \\ \alpha_{ij}, & <i, j> \notin E^l \end{cases} \quad (7)$$

其中， $\alpha_{ij} \in \{-1, \lambda - 1\}$ ， $\lambda \in \mathbb{Z}^+$ 。现根据频谱映射来确定 α_{ij} ，并分析矩阵 M 所满足的特性。

定理 1 对于频谱映射 $f(l_i) = (SL_j, SU_j)$ 和矩阵 M 。如果 $f(l_i) = f(l_j)$ ，则 $\alpha_{ij} = \lambda - 1$ ；否则 $\alpha_{ij} = -1$ 。那么当 $\lambda \geq |B|$ 时，矩阵 M 是半正定的。

证明 略。

由定理 1 可建立半定规划模型：

$$\begin{aligned} & \min \max(m_{ij}) \\ & \text{s.t. } M \geq 0 \\ & m_{ij} = -1 \quad <i, j> \in E^l \\ & -1 \leq m_{ij} \leq \lambda - 1 \quad <i, j> \notin E^l \\ & m_{ii} = \lambda - 1 \end{aligned} \quad (8)$$

在使用内点法求解模型(8)时，难以严格保证矩阵 M 的元素 $m_{ij} \in \{\lambda - 1, -1\}$ ，往往出现 $m_{ij} \rightarrow \lambda - 1$ 或

$m_{ij} \rightarrow -1$ 的情况。所以本文采用迭代法，依次求解 M 中元素的方法来处理该问题，频谱分配模型的建立算法如下。

Input: $G^l(L, E^l)$ ；由算法 1 建立

Output: $G'(V', E') = G^k(L^k, E^k)$ ；

$\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_\lambda\}$ ；

1) If $E^l = \emptyset$ Then $f(l_i) = B, i \in [1, h]$;

2) If $\forall l_i, l_j \in L, <l_i, l_j> \in E^l$ Then

3) $f(l_i) = (SL_j, SU_j), i \in [1, h], j \in [1, |B|], h = |B|$;

4) 令 $k=0, t=0, \Omega_0 = \emptyset, G^0(L^0, E^0) = G^l(L, E^l)$;

5) Do {

6) 用内点法解 $G^k(L^k, E^k)$ 的模型(8)，得 M^k ,

$\lambda^k = \max(m_{ij}^k) + 1$;

7)

$m_{a,b}^k = \max\{m_{i,j}^k | 1 \leq i, j \leq n_k, i \neq j, n_k = \dim(M^k)\}$;

8) $k = k + 1$;

9) If $a, b \notin \bigcup_{t=1}^k \Omega_t$ Then

10) $t = t + 1$;

11) $L^k = L^{k-1} \setminus \{l_a, l_b\} \cup \{\Omega_t\}$;

12) $E^k = \{<l_1, l_2> \in E^{k-1} | l_1, l_2 \notin \{l_a, l_b\}\} \cup$

$\{<l_1, l_{\Omega_k}> | l_1 \notin \{l_a, l_b\}, \exists <l_1, l_x> \in E^{k-1}, l_x \in \{l_a, l_b\}\}$

13) Else If $\exists \Omega_\mu \in \{a, b\}, 1 \leq \mu \leq t$

14) Then $\Omega_\mu \leftarrow \{a, b\}$;

15) End If

16) End If }

17) While $\{ |L^k| = \lambda^0 \}$;

18) $\lambda = \lambda^0$ 。

3.3 信道带宽调制

确定了各条链路的频谱冲突模型后，便可以根据网络可用频谱资源和链路的负载对各链路带宽进行调制，确定最终的频谱分配方案。由于网络负载不均衡，为了尽量保证频谱利用率，各频谱用户之间采用比例公平原则进行带宽调制。

假设网络中每条链路都可以获知其负载 $y(l)$ ，求出上一节中每个等价类的总负载，然后按负载的多少确定所需频谱资源。频谱调制算法如下。

Input: $G'(V', E')$ ；算法 2 的频谱冲突模型

$y(l_i), l_i \in L$ ；所有链路的负载

$\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{|B|}\}$ ；

Output:

- 1) For $k=1:\lambda$
- 2) $Y_{\Omega_k} = \sum_{l \in \Omega_k} y(l)$;
- 3) End For
- 4) $Y = \sum_k Y_{\Omega_k}$;
- 5) $f(\Omega_0) = (0, 0)$, $f(\Omega_k) = (SL_k, SU_k)$;
- 6) For $k=1:\lambda$
- 7) $f(\Omega_k) = (SU_{k-1}, SU_{k-1} + (Y_{\Omega_k}/Y)B)$;
- 8) End For

3.4 算法复杂度分析

假设网络中有 n 台车辆，网络平均连通度为 c 。算法 1 中，测距需要 $O(cn)$ ；奇异值分解需要 $O(2n^3)$ ；确定干扰链路需要 $O(n^2)$ ；最后确定冲突图需要 $O(cn/2+c^2)$ ；所以算法 1 复杂度为 $O(2n^3)$ 。算法 2 中，内点法求解(8)需要 $O(n+LI^3)$ ，因此算法 2 的复杂度为 $O\{(n+LI)^3(n-\lambda)\}$ 。算法 3 的复杂度为 $O\{(\lambda+1)|\Omega|\}$ 。

4 仿真分析

为了对算法进行验证，本文模拟双向 6 车道交通环境。道路模型如图 2 所示，路段长 3km，每车道宽度为 3.5m。仿真区域内随机分布 300 台车辆，车道 3、4 的行驶速度为 60km/h，其余车道行驶速度为 50km/h，车辆循环进入仿真区域。图 2 右侧部署 2 个路边单元作为网关节点。随机选择部分车辆向网关发起 UDP 数据流。在建立路由的同时完成带宽调制(本文不考虑路由问题和 MAC 协议对算法的影响)。

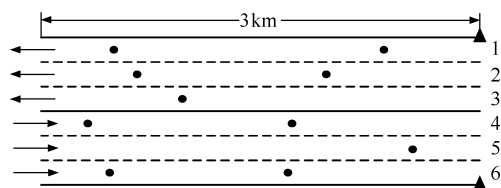


图 2 场景示意

假设可用频谱为 80MHz，每 1MHz 频谱可以传送 1.2Mbit/s 的数据^[17]。将本文带宽调制方案与固定带宽分配方式进行了对比。固定带宽分配采用了 16×5MHz、8×10MHz、4×20MHz 分配方案。选择 30 台车辆向网关发起数据流，每个会话的发送数据率在[4,10]Mbit/s 中随机选择。设置 $\tau=0.1s$ ，通信半径 $r=100m$ 。图 3 给出了 5 次实验的吞吐量对比结果。

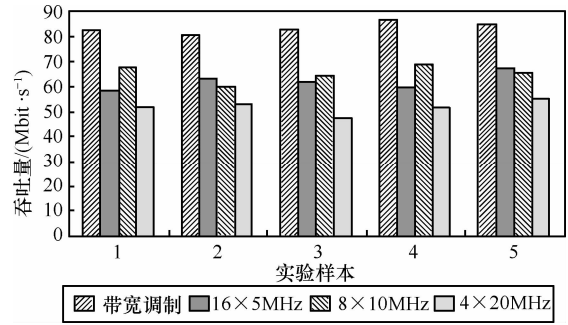
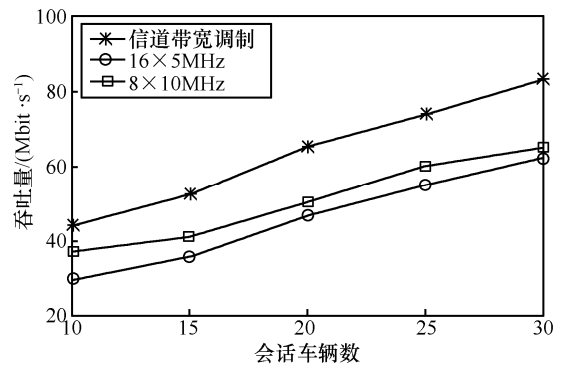


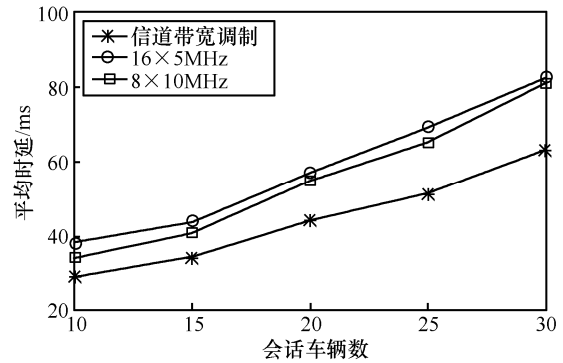
图 3 5 次实验网络吞吐率的比较

从图中可以看出 4×20MHz 分配方案的吞吐率最低，这是由于网络通信窗口狭窄，拓扑变化快，4×20MHz 不能提供充足的可用频谱，导致频谱利用率低下，使得网络中存在较多的频谱争用，降低了网络吞吐率。由于本文的带宽调制方案具有更高的频谱利用率，相比于固定带宽分配可以有效提高网络吞吐率。

接下来，改变会话车辆的数目，比较了算法在不同网络负载条件下的性能，结果如图 4 所示，从图中可以看出在较低网络负载环境下，本文信道带宽调制方案和固定频谱分配方案相比优势不大，但是当负载逐渐增加时，采用信道带宽调制可以明显提升网络吞



(a) 网络吞吐率对比

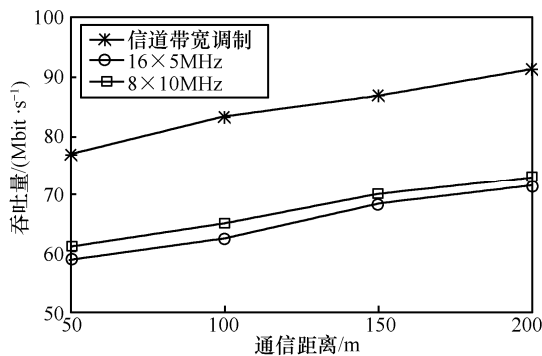


(b) 平均时延对比

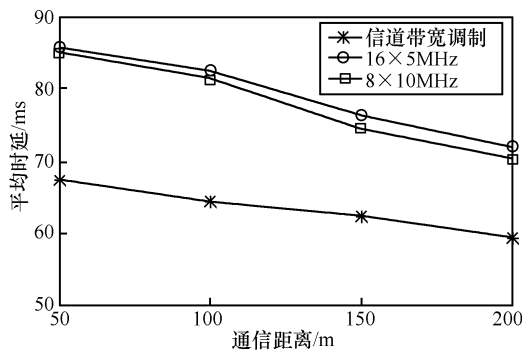
图 4 不同网络负载条件下的比较

吐率。这是因为当负载增加时, 频谱竞争也会加剧, 采用固定频谱分配模式无法适应链路负载的变化, 造成频谱利用率低, 而本文的信道带宽调制技术在分配频谱资源时考虑了链路负载因素, 提高了频谱效率。此外, 当网络负载较低时, $8 \times 20\text{MHz}$ 比 $16 \times 5\text{MHz}$ 有更好的性能, 但是随着负载的提高, 2 种分配模式没有明显差别。这是因为在低负载条件下, 频谱竞争较少, 采用更大的带宽可以提高网络性能; 随着负载的增加, 较小的带宽可以缓解频谱竞争。

接下来, 改变车辆通信半径, 对算法进行了评估, 结果如图 5 所示, 从图中可以看出在车辆通信半径较低时, 会话的跳数较大, 需要更多的频谱资源来避免冲突, 因而网络吞吐量较低。随着半径的增大会话跳数减少, 在一定程度上缓解了频谱竞争, 网络性能也相应提高。



(a) 网络吞吐量对比



(b) 平均时延对比

图 5 不同通信距离条件下的比较

5 结束语

针对传统车载网络采用固定信道模式所造成的频谱利用率低、网络吞吐量不足的问题, 将信道带宽调制技术应用于车载网络, 提出了基于半定规划的车载网络信道带宽调制算法。提出的算法与传

统的单跳和多跳无线网络带宽调制技术不同, 考虑了车网的拓扑变化问题, 尽量降低拓扑改变带来的影响, 并且根据各频谱用户的负载情况通过半定规划和比例压缩策略完成信道的调制。实验分析表明, 与固定带宽分配相比本文算法有效提升了车载网络的吞吐量。

参考文献:

- [1] BLUM J, ESKANDARIAN A, HOFFMAN L. Challenges of inter-vehicle ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(4): 347-351.
- [2] GUPTA P, KUMAR P. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404.
- [3] BAHL P, ADYA A, PADHYE J, et al. Reconsidering wireless systems with multiple radios[J]. Computer Communications Review, 2004, 34(5): 39-46.
- [4] IEEE 802.11-2007: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. 2007.
- [5] IEEE 802.16-2004: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems[S]. 2004.
- [6] IEEE 802.11p/D2.01: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications: Wireless Access in Vehicular Environments[S]. 2007.
- [7] IEEE 802.11n: Next Generation Wireless LAN Technology. Broadcom white paper[EB/OL]. http://www.broadcom.com/collateral/wp/802_11n-WP100-R.pdf, 2006.
- [8] CHANDRA R, MAHAJAN R, MOSCIBRODA T, et al. A case for adapting channel width in wireless networks[A]. Proc of ACM SIGCOMM[C]. USA, 2008. 135-146.
- [9] BAHL P, CHANDRA R, MOSCIBRODA T, et al. White space networking with Wi-Fi like connectivity[J]. Computer Communication Review, 2009(39): 27-38.
- [10] MOSCIBRODA T, CHANDRA R, WU Y, et al. Load aware spectrum distribution in wireless LANs[A]. Proc of IEEE ICNP. USA[C]. 2008. 137-146.
- [11] TANG J, MISRA S, XUE G, et al. Joint spectrum allocating and scheduling for fair spectrum sharing in cognitive radio wireless networks[J]. Computer Networks, 2008, 52: 2148-2158.

- [12] LI L, ZHANG C. Optimal channel width adaptation, logical topology design, and routing in wireless mesh networks[EB/OL]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, <http://www.hindawi.com/journals/wcn/2009/940584.html>.2009.
- [13] FENG Z, YANG Y. Two phase spectrum sharing for frequency-agile radio networks[A]. Proc of IEEE ICC Germany[C]. 2009. 1-6.
- [14] RAMAN V, CAESAR M. A practical approach for providing QoS in multi-channel ad hoc networks using spectrum width adaptation[A]. Proc of IEEE GLOBECOM[C]. USA, 2009.1-6.
- [15] KODIALAM M, NANDAGOPAI T. The effect of interference on the capacity of multi-hop wireless networks[A]. IEEE Symposium on Information Theory[C]. USA, 2004.470-471.
- [16] GOLUB G H, VAN C F, 袁亚湘译.矩阵计算[M]. 北京:科学出版社,2004.
GOLUB G H, VAN C F. Matrix Computation[M]. YUAN Y X. Beijing: Science Press, 2004.
- [17] PROAKIS J. Digital Communications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.

作者简介:



彭鑫 (1981-), 男, 湖南岳阳人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络、车载自组网。



李仁发 (1957-), 湖南郴州人, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为嵌入式系统和 CPS。



刘樑骄 (1984-), 男, 湖南邵阳人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络、车载自组网。

(上接第 122 页)

- [4] BHARGHAVAN V, DEMERS A, SHENKER S, *et al.* MACAW: a media access protocol for wireless LANs[A]. Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, SIGCOMM[C]. Seattle, Washington, 1994. 212-225.
- [5] REED J, RAPPAPORT T. An overview of the challenges and progress in meeting the E2911 requirement for location service[J]. IEEE Communication Magazine, 1998, 36(4): 30-37.
- [6] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transaction Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [7] THOMAS N J, CRUICKSHARK D M, LAURENSEN D I. Calculation of mobile location using scatterer information[J]. Electronic Letters, 2001, 37(9): 1193-1194.
- [8] LIU X, ZHANG C, HU J. Adaptive weights weighted centroid localization algorithm for wireless sensor networks[A]. The 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM '08,Dalian[C]. 2008. 1-4.
- [9] FORGHANI Y. A new weighted centroid localization algorithm in

wireless sensor networks[A]. The 11th International Conference on Computer and Information Technology, ICCIT 2008[C]. Khulna, 2008.89-93.

作者简介:



汪一鸣 (1956-), 女, 江苏苏州人, 苏州大学教授、博士生导师, 主要研究方向为多媒体通信和无线通信、通信信号处理、宽带无线通信技术、信源信道联合编码等。



周刘蕾 (1982-), 女, 江苏南通人, 苏州大学讲师, 主要研究方向为通信信号处理、认知无线电技术。