


```

29:     Y[j]=0; X[i]=1; S+=δ; xe-=1; xf+ =1;
30:     end if
31:   end if
32: end if
33: else
34:   选取的 Traffic 包已经在待发送序列,重新选择一个不在待发送序列的包 j
35:   if 随机选取的数据包为 Traffic 包 then
36:     δ=Bf×((deadlinei-t)-(deadlinej-t));
37:     if (δ≤0) then
38:       X[j]=1; X[i]=0; S+=δ;
39:     else if e-δT>random then
40:       X[j]=1; X[i]=0; S+=δ;
41:     end if
42:   else
43:     δ=Be-(deadlinei-t)×Bf;
44:     if (δ≤0) then
45:       Y[j]=1; X[i]=0; S+=δ; xe+ =1; xf- =1;
46:     else if e-δT>random then
47:       Y[j]=1; X[i]=0; S+=δ; xe+ =1; xf- =1;
48:     end if
49:   end if
50: end if
51: else
    若随机选择的数据包 i 为 Environment 包,则过程与 Traffic 包类似.
52:   end if
53: end for
54: T=T×α
55: end while
56: output: xf, xe, S.

```

4 VAENT 中混合流调度与路径选择的联合优化

Traffic 包和 Environment 包为 VAENT 中两种典型的数据包。Traffic 包属强实时数据,其实时性必须得以保障。数据包的有效调度能够确保数据被正确发送,路径选择则可以提高数据发送的成功率。对混合流调度与路径选择进行联合优化,VANET 的数据传输成功率将大为提高,Traffic 包和 Environment 包的 QoS 需求得以保障。

4.1 问题描述

面向 VANET 的混合流调度策略有效地解决了 VANET 中优先级不同的数据流共存时的资源与速率分配问题,满足了两种数据流的传输需求,提高了数据流的传输效率。Traffic 包和 Environment 包为不同优先级的数据,Traffic 包所携带的信息主要包括车辆的实时位置信息、行驶速度以及方向等,而 Environment 包携带的信息为 CO₂、PM2.5 值等环境参数。Traffic 包属强实时数据,为了确保信息的时效性,Traffic 包应尽快被发送到云计算中心。为了将 Traffic 数据包快速传输到云计算中心,路径选择尤为必要。同时,弱实时数据流的传输可靠性也能随之提高。

由于具有节点高速移动、节点密度过高、无线链路寿命短等特点,VANET 的传输控制协议更具有挑战性

和独创性.如车辆同向行驶时,车辆节点间的链路相对稳定,网络拓扑也相对稳定;但车辆相向而行时,无线链路转瞬即逝,网络拓扑变化快.因此,静态路由选择不适于 VANET,需为 VANET 设计动态自适应的路由选择算法.并且应结合车辆节点的行驶方向、车速和道路信息,对链路进行预测,为车辆节点选择最佳下一跳.

4.2 模型建立

在指定时间内, V_A 需将待发送序列中的 Traffic 包和 Environment 包传输到云计算中心, V_A 到云计算中心有多条可选路径,每一条候选路径由若干链路组成.

- 若数据流 k 通过了路径 j ,即 $L_k^j = 1$;
- 若链路 l 属于该路径,即 $h_k^{jl} = 1$.

而且 Traffic 数据流和 Environment 数据流可能分享同一条传输链路.因此,链路 l 的带宽应满足:

$$\sum_{k \in F} \sum_{j \in P_k} x_k \times a_k \times L_k^j \times h_k^{jl} \leq B, \forall l \in L \quad (19)$$

其中,

- F 代表 Traffic 和 Environment 两条数据流的集合;
- j 代表任一条数据流的任一候选路径;
- P_k 代表 Traffic 或 Environment 数据流的所有候选路径集合;
- L 表示该车载自组网中所有链路的集合;
- x_k 即 x_f 或者 x_e , a_k 即 a_f 或者 a_e .

将 L_k^j 作为约束变量,则 L_k^j 满足:

$$L_k^j \in \{0,1\}, \sum_{j \in P_k} L_k^j = 1, \forall k \in \{f, e\}, j \in P_k \quad (20)$$

其中 f 代表的是 Traffic 数据流, e 代表的是 Environment 数据流, P_k 表示 k 数据流的所有候选路径.假如任一条数据流选择了路径 j ,则简记为 $L_k^j = 1$; 如果恰好链路 l 在被选择的路径 j 上,则记为 $h_k^{jl} = 1$, 链路容量记为 c_l .

综上, V_MFSPS 数学模型如下:

$$\max S = \sum_{i=0}^{x_f} (\text{deadline}_i - t)^+ \times \beta_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times \beta_e \times L_e^j \times h_e^{jl} - c \times [\min\{A_e, Q_e\} + \min\{A_f, Q_f\}] - \left. \begin{aligned} & \gamma_f \times (A_f + \text{Sou}_f - Q_f)^+ - \gamma_e \times (A_e + \text{Sou}_e - Q_e)^+ \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k \in K} \sum_{j \in P_k} x_k \times a_k \times L_k^j \times h_k^{jl} \leq B \leq c_l \quad (22)$$

$$0 \leq x_f \leq Q_f \text{ 且为整数} \quad (23)$$

$$0 \leq x_e \leq Q_e \text{ 且为整数} \quad (24)$$

$$L_k^j \in \{0,1\}, \sum_{j \in P_k} L_k^j = 1, \forall k \in \{x_f, x_e\}, j \in P_k \quad (25)$$

其中,公式(21)为目标函数,公式(22)为带宽约束,公式(23)和(24)为决策变量约束,公式(25)为路径约束.相较于 V_MFS,对混合流调度与路径选择采取联合优化的模型 V_MFSPS 可大幅提高数据流的传输效率.目标车辆 V_A 采集到的 Traffic 包数目表示为 A_f , Environment 包数目表示为 A_e , Traffic 包的缓冲区大小表示为 Q_f , Environment 包的缓冲区大小表示为 Q_e 以及代价因子 c , 惩罚因子 γ_f 和 γ_e 已知. S 代表链路的总收益.结合路径选择, V_MFSPS 模型可转换为

$$\max S = \sum_{i=0}^{x_f} (\text{deadline}_i - t)^+ \times \beta_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times \beta_e \times L_e^j \times h_e^{jl} + \zeta \quad (26)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k \in K} \sum_{j \in P_k} x_k \times a_k \times L_k^j \times h_k^{jl} \leq B \leq c_l \quad (27)$$

$$0 \leq x_f \leq Q_f \text{ 且为整数} \quad (28)$$

$$0 \leq x_e \leq Q_e \text{ 且为整数} \quad (29)$$

$$L_k^j \in \{0,1\}, \sum_{j \in P_k} L_k^j = 1, \forall k \in \{f, e\}, j \in P_k \quad (30)$$

其中, $\zeta = -c \times [\min\{A_f, Q_f\} + \min\{A_e, Q_e\}] - \gamma_f \times (A_f + Sou_f - Q_f)^+ - \gamma_e \times (A_e + Sou_e - Q_e)^+$.

4.3 理论分析

V_MFSPS 有 4 个约束条件, ζ 为已知常数, 要使目标函数值 S 取最大值, 只需讨论除 ζ 之外的部分. 于是, 对最大化目标函数的问题进行转换, 得到公式(26).

对于公式(26), 令 $\sum_{i=0}^{x_f} (deadline_i - t)^+$ 的平均值为 w_f , 那么公式(26)就转换为

$$S = w_f \times x_f \times \beta_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times \beta_e \times L_e^j \times h_e^{jl} + \zeta \quad (31)$$

为了获得 S 的最大值, 对公式(31)进行放松处理, 于是可得:

$$S = w_f \times x_f \times \beta_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times \beta_e \times L_e^j \times h_e^{jl} \quad (32)$$

设每条链路容量为 $c_l (B \leq c_l)$, β_f 表示 Traffic 包的单位基准价值, $w_f \times \beta_f$ 实质仍代表 β_f , 令 $w_f \times \beta_f = \beta_f$, 公式(32)可转换为

$$S = x_f \times \beta_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times \beta_e \times L_e^j \times h_e^{jl} \quad (33)$$

对于 Traffic 和 Environment 数据包来说, 数据包容量越大, 说明其携带的信息量越大, 因此价值也越大. Traffic 数据包的单位价值 β_f 与 a_f 成正比, a_f 越大, β_f 也将会越大; 同理, β_e 与 a_e 也成正比, 即

$$\beta_f = \mu \times a_f, \quad \beta_e = \mu \times a_e \quad (34)$$

由此可得:

$$S = x_f \times \mu \times a_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times \mu \times a_e \times L_e^j \times h_e^{jl} = \mu (x_f \times a_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times a_e \times L_e^j \times h_e^{jl}) \quad (35)$$

结合约束条件公式(22), 可得:

$$S = x_f \times \mu \times a_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times \mu \times a_e \times L_e^j \times h_e^{jl} = \mu (x_f \times a_f \times L_f^j \times h_f^{jl} + x_e \times a_e \times L_e^j \times h_e^{jl}) \leq \mu \times c_l \quad (36)$$

求解的目标是使 S 达到最优值, 即 $\max_{l \in L} S = \mu \times c_l$. S 与 c_l 成正比, c_l 越大, S 就越大. 因此, 在混合流调度与路径选择的联合优化策略中, 最佳策略是为 Traffic 数据流和 Environment 数据流选取链路容量最大的链路所组成的路径.

4.4 PS&TESA算法设计

加入路径选择后, 决策变量变成 3 个, 分别为目标车辆应发送的 Traffic 包的数目、Environment 包的数目以及链路的选择. x_f 与 x_e 的取值为整数, 对于任意链路来说, 只有选或不选, 故取值为 0 或 1. 在模型 V_MFSPS 中, 3 个决策变量的取值都为整数, 对应的 PS&TESA 算法也属整数规划问题, 也是一个 NP-hard 问题^[24].

将路径选择因素作为决策变量, 链路容量越大, 则目标函数值 S 越大. 当目标车辆发送这两类数据流时, 从目标车辆可用的所有链路中选择链路容量最大的一条作为数据流的当前路径, 并对已选择过的路径进行标记. 当目标车辆移动时, 根据前述规则动态进行链路选取, 直到到达目的地, 即云计算中心.

此启发式算法命名为 PS&TESA 算法. 算法伪代码如算法 2 所示.

算法 2. 面向 VANET 的混合流调度与路径选择联合优化的数据传输策略.

- 1: 利用算法 1 来选择目标车辆发送 Traffic 和 Environment 包的数量
- 2: $tmp=0; path=0;$
- 3: **for** 对于任意一条数据流 i **do**
- 4: **for** 对于任意一条范围内的链路 l **do**
- 5: **if** $\max(C_l) > tmp$ **then**
- 6: $path += l;$
- 7: **end if**
- 8: 移动到链路 $path;$
- 9: **end for**

10: end for

11: 重复上述过程直到数据到达接收中心;

12: 选择 $path$ 作为最终路径, $L_t^{path} = 1$

5 实验结果与性能分析

为了满足 VANET 中两种不同优先级的混合数据流的传输需求,同时最大化目标车辆的收益,本文提出了 TESA 与 PS&TESA 算法.仿真实验结果可证实该算法的有效性.

5.1 VANET中混合流调度与路径选择的联合优化策略性能分析

基于传输时延,评价本文所提出的算法的性能.仿真实验验证在不同的问题规模下,本文所提出的 PS&TESA 算法在时延方面具有明显优势.

本文采用 OMNET++平台仿真各移动车辆节点数据通信情况,最后采用 MATLAB 仿真对算法进行性能分析.仿真环境设置为一条双向通行的城市道路,车辆在两条车道上均匀分布,车间距为 20m,RSU 在道路两侧随机分布,在道路尽头设置云计算中心.道路两侧均匀分布 10 辆车,车辆在时间段 t 内接收 Traffic 和 Environment 数据包的数目分别设置为 50、100、150 和 300.设 Traffic 数据包长度为 5KB,Environment 数据包长度为 3KB.

基于 Traffic 数据包的传输时延,对未进行路径选择的 TESA 算法与加入路径选择后的 PS&TESA 算法进行比较,仿真结果如图 3 所示. A_f 、 Q_f 、 A_e 、 Q_e 分别取值为(50,50,40,40)、(100,100,80,80)、(150,150,130,130)、(300,300,270,270),图 3 给出了实验结果.每个问题规模分别进行 100 次仿真求平均.实验仅统计 Traffic 数据流的传输时延,取最后一个 Traffic 包传输完成的时间为整条数据流的传输时延.由图 3 可知,PS&TESA 的 Traffic 传输时延明显低于 TESA.即使规模增加,传输时延依然呈现出相同的规律,相对于 TESA,PS&TESA 的 Traffic 传输时延显著提高.原因在于,与路径选择联合优化的优势显而易见,PS&TESA 将从所有可用路径中选择链路容量最大的路径.链路容量越大,丢包率越低,重传次数减少,传输时延减少.PS&TESA 对于强实时数据尤为有效,能够保证 Traffic 数据包的传输时延.

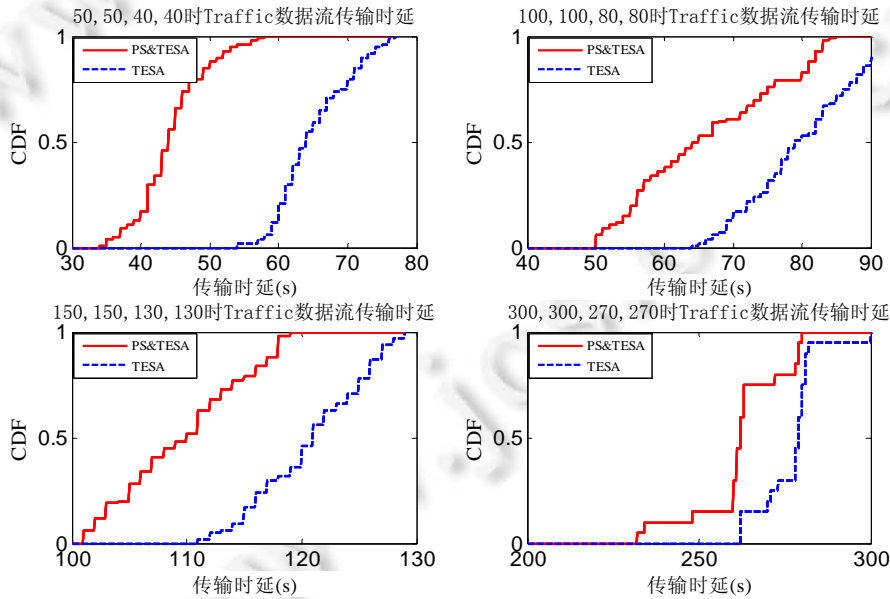


Fig.3 Comparison of transmission delay between PS&TESA and TESA in different scales

图 3 不同规模下 PS&TESA 与 TESA 的传输时延对比

5.2 PS&TESA与DSRC算法的性能比较

基于传输时延,结合不同类型数据包的速率和缓存区占用比,对 PS&TESA 与 DSRC 算法进行比较.仿真实验结果表明,相对于 DSRC 算法优先发送强实时数据流,本文提出的 PS&TESA 有效地提高了弱实时数据流的发送速率,并降低了缓存区占用比.由于路径优化的关系,PS&TESA 算法的时延与 DSRC 算法相比并无明显差距.由图 4 可知,PS&TESA 算法不仅能够有效地减小 Traffic 包的传输时延,而且能够提高弱实时数据流的发送速率,降低弱实时数据流缓存占用比.

由图 4(a)可知,不同的数据包产生速率下,DSRC 算法优先发送强实时数据流,导致弱实时数据流“饿死”.而 PS&TESA 算法有效地提高了弱实时数据流的发送速率.图 4(b)表明,本文所提出的算法不仅提高了弱实时数据流的发送速率,而且未对强实时数据流产生任何不良影响,与优先发送强实时数据流的 DSRC 算法相比,两者的传输时延近似.图 4(c)给出了不同的数据包产生速率时两类数据流占用缓存空间的情况,由图 4(c)可知,PS&TESA 算法有效地降低了弱实时数据流的缓存占用比例,降低了缓冲区超负荷溢出概率.

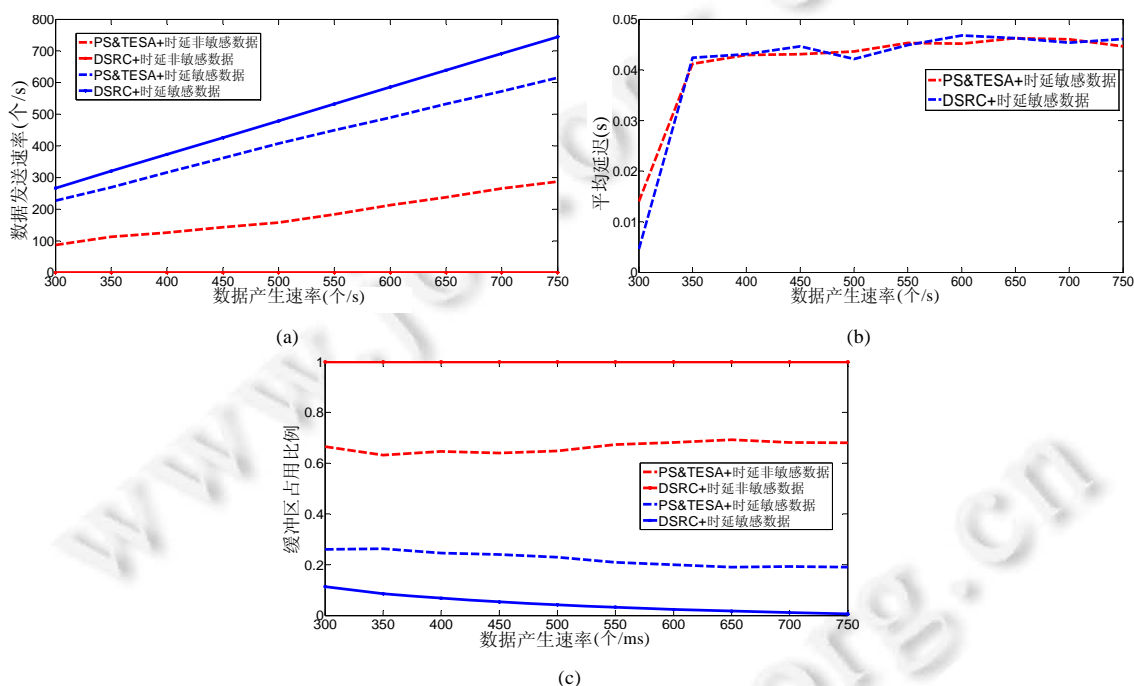


Fig.4 Performance comparison of PS&TESA and TESA under different packet generating rates

图 4 不同数据包产生速率下 PS&TESA 与 TESA 性能对比

6 总结与展望

车载自组网具有广阔的应用前景,可在道路上建立一个自组织、结构开放的车辆实时通信网络,实现交通预警、车辆的自动化驾驶、提升驾驶舒适度与实时路况查询.VANET 中强实时数据与弱实时数据共存,数据动态产生且不可预期.同时,VANET 通信带宽受限,面临无线信道质量不稳定、网络拓扑瞬息万变、无线链路寿命短、带宽受限、通信负载量大等多重挑战.本文提出了 VANET 中混合流调度与路径选择联合优化的数据传输策略,以满足强实时数据流对传输时延的需求,同时提高弱实时数据流的传输可靠性.仿真实验与性能分析结果表明,本文提出的联合优化策略 PS&TESA 不仅能够减小强实时数据流的时延,而且能够提高弱实时数据流的发送速率,降低弱实时数据流的缓存占用比.

References:

- [1] Yang X, *et al.* A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning. In: Proc. of the 1st Annual Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MOBIQUITOUS 2004). IEEE, 2004. 114–123.
- [2] Yin JJ, *et al.* Performance evaluation of safety applications over DSRC vehicular ad hoc networks. In: Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks. ACM Press, 2004. 1–9.
- [3] Xu Q, *et al.* Vehicle-to-vehicle safety messaging in DSRC. In: Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks. ACM Press, 2004. 19–28.
- [4] Halstead MH. Elements of Software Science (Operating and Programming Systems Series). New York: Elsevier Science Inc., 1977.
- [5] Lu R, Lin X, Zhu H, *et al.* SPARK: A new VANET-based smart parking scheme for large parking lots. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2009. 1413–1421.
- [6] Liu B, Khorashadi B, Ghosal D, *et al.* Assessing the VANET's local information storage capability under different traffic mobility. In: Proc. of the 2010 IEEE INFOCOM. IEEE, 2010. 1–5.
- [7] Yang X, Liu J, Zhao F, *et al.* A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning. In: Proc. of the Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems. DBLP, 2004. 114–123.
- [8] Fonseca A, Vazão T. Applicability of position-based routing for VANET in highways and urban environment. Journal of Network & Computer Applications, 2013,36(3):961–973.
- [9] Hu S, Liu H, Su L, *et al.* Towards automatic phone-to-phone communication for vehicular networking applications. In: Proc. of the 2014 IEEE INFOCOM. IEEE, 2014. 1752–1760.
- [10] Zhang L, Yu B, Pan J. GeoMob: A mobility-aware geocast scheme in metropolitans via taxicabs and buses. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2014). IEEE, 2014. 1279–1287.
- [11] Baldessari R, Zhang W, Festag A, *et al.* A MANET-centric solution for the application of NEMO in VANET using geographic routing. In: Proc. of the Int'l Conf. on Testbeds & Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities. DBLP, 2008. Article No.12.
- [12] Wahab OA, Otrok H, Mourad A. VANET QoS-OLSR: QoS-based clustering protocol for vehicular ad hoc networks. Computer Communications, 2013,36(13):1422–1435.
- [13] Hafeez KA, Zhao L, Ma B, *et al.* Performance analysis and enhancement of the DSRC for VANET's safety applications. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2013,62(7):3069–3083.
- [14] Chen L, Chen K, Bai W, *et al.* Scheduling mix-flows in commodity datacenters with karuna. In: Proc. of the Conf. on ACM SIGCOMM 2016. ACM Press, 2016. 174–187.
- [15] Ioannou A, Katevenis MGH. Pipelined heap (priority queue) management for advanced scheduling in high-speed networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2007,15(2):450–461.
- [16] Hammon DKL, Hippner H. Crowdsourcing. Business & Information Systems Engineering, 2012,4(3):163–166.
- [17] Abernethy JD, Frongillo RM. A Collaborative mechanism for crowdsourcing prediction problems. In: Proc. of the Neural Information Processing Systems Conf. 2011. 2600–2608.
- [18] Chen L, Li B, Li B. Barrier-aware max-min fair bandwidth sharing and path selection in datacenter networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Cloud Engineering. IEEE, 2016. 151–160.
- [19] Aarts E, Korst J. Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing. Chichester: John Wiley, 1989.
- [20] Laarhoven PJM, Aarts EHL. Simulated Annealing: Theory and Applications. Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [21] Press WH, Flannery BP, Teukolsky SA, *et al.* Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- [22] Bertsimas D, Tsitsiklis J. Simulated annealing. Statistical Science, 1993,8(1):10–15.
- [23] Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. ACM Press, 2000. 243–254.
- [24] Madhusudan BS, Wadhai VM. Study of the effect of velocity on end-to-end delay for V2V communication in ITs. Int'l Journal of Next-Generation Networks, 2013,4(4):19–26.

- [25] Wang SY, Chou CL. NCTUns tool for wireless vehicular communication network researches. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2009,17(7):1211-1226.
- [26] Bertsimas D, Tsitsiklis J. Simulated annealing. *Statistical Science*, 1993,8(1):10-15.



强敏(1991-),女,陕西扶风人,硕士,主要研究领域为无线网络,数据传输,拥塞控制,网络经济学.



徐丹(1988-),女,博士生,CCF 学生会会员,主要研究领域为物联网数据传输.



陈晓江(1973-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无源感知与传输,物联网与普适计算.



汤战勇(1979-),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为无线网络,物联网安全,软件安全.



尹小燕(1978-),女,博士,副教授,博士生导师,CCF 专业会员,主要研究领域为无线网络,物联网数据传输,拥塞控制,网络经济学.



房鼎益(1959-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络与信息安全,数字内容与计算机软件安全保护,无线网络与物联网,移动计算与分布计算系统.



贾茹昭(1994-),女,硕士生,主要研究领域为无线网络,数据传输,拥塞控制.