

多宿点无线传感器网络时分多址时隙优化分配算法

李海平, 毛剑琳*, 张 斌, 陈 波

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 65000)

(*通信作者电子邮箱 km_mjl@yahoo.com.cn)

摘 要:针对单宿点无线传感器网络的时延大、容易出现传输瓶颈等问题,提出了多宿点无线传感器网络模型以及该模型的基于遗传算法(GA)的时分多址(TDMA)时隙分配算法。该算法根据宿点的数量以及位置将整个传感器网络划分成多个小传感器网络,并采用遗传算法对时隙分配结果进行优化。仿真结果表明,基于遗传算法的多宿点无线传感器网络 TDMA 时隙分配算法得到的时隙分配结果在时隙分配帧长度、数据包平均时延以及节点平均能耗方面均要优于图着色算法。

关键词:无线传感器网络;传输瓶颈;遗传算法;时分多址;着色算法

中图分类号: TP393.02; TN926 **文献标志码:** A

TDMA scheduling algorithm for multi-sink wireless sensor networks

LI Hai-ping, MAO Jian-lin*, ZHANG Bin, CHEN Bo

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 65000, China)

Abstract: Concerning the high packet delay and frequent transmission bottleneck in Wireless Sensor Network (WSN) with one-sink node, a multi-sink wireless sensor network model and its Time Division Multiple Access (TDMA) scheduling algorithm based on Genetic Algorithm (GA) were proposed. The algorithm divided the whole sensor network into some small sensor networks according to the number and position of the sink nodes, and adopted GA to optimize the slot allocation result. The simulation results show that, the TDMA time slot allocation method based on genetic algorithm is better in the length of time slot allocation frame, the average of packet delay and the average energy consumption than that of graph coloring algorithm.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); transmission bottleneck; Genetic Algorithm (GA); Time Division Multiple Access (TDMA); Coloring Algorithm (CA)

0 引言

无线传感器网络已经广泛应用于各类监控系统中,比如交通、地震以及火情检测等^[1]。这类网络由很多具有传感器、信号处理器和无线通信能力的传感器节点组成,但这类节点提供的能量有限,所以节点必须快速地将数据传输到数据汇聚节点。由于传感器节点由电池供电,媒介访问层协议的好坏决定了节点工作寿命的长短。

无线传感器网络中媒介访问层协议不仅适用于竞争访问机制,同时也适用于时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)。前者由于传感器节点在传输碰撞和空闲侦听过程中消耗很多能量,导致能耗较大;而后者由于传感器节点在自己时隙未到时一直处于休眠状态,而且避免了传输碰撞,所以 TDMA 协议的能量利用率理论上要竞争访问机制高。

TDMA 时隙调度模型可描述如下:有一批由传感器节点产生的数据包需经路由节点发送至基站。其中一个数据包经多跳传输到达基站的过程称为一个任务。在一个任务中,每一跳的传输称为一个子任务,一个子任务对应一个执行节点,并占用一个时隙。TDMA 的调度问题就是为这些子任务分配时隙,使得所有的执行节点在不发生信道冲突的情况下,完成这批数据包的传输任务,并使得时隙分配帧的长度最小。目

前单宿点无线传感器网络的 TDMA 时隙分配算法有两种,一种为基于图着色算法(Coloring Algorithm, CA)的 TDMA 时隙分配,一种为基于优化算法的 TDMA 时隙分配。文献[2]利用图着色算法解决时隙分配问题,并在算法中添加了时隙分配帧的长度最小化优化算子和吞吐量最大化优化算子。文献[3-4]也使用了图着色算法来实现时隙分配,在文献[3]中,作者利用启发式算法分别对图的顶点着色和图的边着色结果进行优化,使之达到较好的时隙分配方案。在文献[5]中,作者在实现 TDMA 时隙分配的基础上,采用启发式算法对网络平均时延和节点平均能耗做了多目标优化。在文献[6]中,作者提出了一种基于 TDMA 的动态分布式时隙分配算法,该算法根据两跳范围内的邻居节点信息动态分配时隙,以降低网络能耗。文献[7]采用分布式与集中式相结合的方式,引入簇头来动态调节簇内节点时隙更新频率和顺序,以降低时隙划分的能量和时间。尽管单宿点无线传感器网络 TDMA 时隙分配算法在能量利用率方面要优于竞争机制,但网络时延仍旧会比较大,网络吞吐量也较低,并且由于传输瓶颈可能会出现网络瘫痪的情形^[8]。

针对单宿点无线传感器网络 TDMA 时隙分配的不足,提出多宿点无线传感器网络模型,并采用遗传算法对该网络模型的 TDMA 时隙分配帧的性能指标做单目标优化。该算法

收稿日期:2011-08-15;修回日期:2011-09-22。

基金项目:云南省应用基础研究基金资助项目(2009ZC050M);云南省教育厅科学研究基金资助项目(08Y0093)。

作者简介:李海平(1985-),男,湖南郴州人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络时隙分配优化;毛剑琳(1976-),女,广西桂林人,副教授,主要研究方向:无线传感器网络、网络控制系统;张斌(1987-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络覆盖率优化控制;陈波(1989-),女,湖南湘潭人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络控制系统。

根据网络拓扑图和节点产生数据包数量的情况给各子任务分配时隙。各传感器节点选取离自身最近的宿点作为汇聚节点,并将产生的数据包根据时隙分配结果经路由节点传输至宿点。

尽管解决多宿点无线传感器网络的 TDMA 时隙分配问题借助了单宿点无线传感器网络的 TDMA 分配原理,但是相对于单宿点无线传感器网络的 TDMA 时隙分配问题,多宿点无线传感器网络的干扰不仅来源于同一宿点的传感器节点,还来源于其他宿点的传感器节点,以至于在解决多宿点网络的 TDMA 时隙分配时不能等同于单宿点的 TDMA 时隙分配问题。

1 多宿点无线传感器网络模型

在本文中,假设网络包含了多个宿点和若干数量的传感器节点,每个传感器节点都仅有一个传感数据包发送到宿点;同时假设数据传输链路为双向。

1.1 网络模型

无线传感器网络拓扑图可以用一个图 $G = (V, E)$ 表示^[9]。 V 表示包括宿点在内的网络节点, $N = |V|$ 表示图 G 中节点数目;无向边 $E \in V \times V$ 表示网络数据包传输链路。各个传感器节点都存在一个发送到宿点的数据包。与单宿点无线传感器网络时隙分配不同的是,多宿点无线传感器网络中的干扰不仅来源于同一宿点内的两跳范围内的传感器节点,而且还来源于其他宿点内的两跳范围内的传感器节点。

1.2 多宿点的确定

由于网络中存在多个宿点,为了将每个传感器节点的数据包高效地传输到宿点,各传感器节点采用就近原则选择自己的宿点。本文引入距离矩阵 $d(u, v)$ 表示传感器节点 u 与宿点 v 的距离,如下所示:

$$d(u, v) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

其中:传感器节点 u 的坐标为 (x_1, y_1) , 宿点 v 的坐标为 (x_2, y_2) 。

通过式(1)计算出各个传感器节点到各宿点的距离,各传感器节点选择距离该节点最近的宿点作为汇聚节点。

1.3 邻接矩阵的建立

为便于给各传感器节点建立路由表,本文引入邻接矩阵,用于表示网络中节点与节点的链路连通情况。邻接矩阵定义如下:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} < r \text{ 且 } i \neq j \\ \infty, & d_{ij} \geq r \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中 r 为传感器节点的通信半径。

1.4 干扰矩阵的建立

在式(2)的基础上,引入干扰矩阵 C, C_{ij} 表示传感器节点 i 和 j 的干扰情况。干扰矩阵定义如下:

$$C_{ij} = \begin{cases} 1, & A_{ik} + A_{kj} \leq 2 \text{ 且 } i \neq j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中 k 为网络中任意一传感节点。通过干扰矩阵 C , 如果满足 $C_{ij} = 1$, 则节点 i 和 j 互为干扰节点,那么两节点不能分配在同一个时隙。

2 基于遗传算法的 TDMA 时隙分配优化

2.1 TDMA 时隙优化问题描述

由于 TDMA 时隙调度最终结果是使得所有的执行节点在不发生信道冲突的情况下,完成这批数据包的传输任务,并使时隙分配帧的时隙数最小,可以采用启发式算法对目标函

数进行最优化求解。分别将时隙分配帧的时隙数、数据包的平均时延以及传感器节点的平均能耗作为优化目标,目标函数如下所示:

$$f_1 = \text{length}(\text{frame}) \quad (4)$$

$$f_2 = \text{Average}(\text{delay}) \quad (5)$$

$$f_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{i^{\text{tx}}} (t_i^{\text{tx}} + t_i^{\text{rx}}) + P_{i^{\text{rx}}} (t_i^{\text{tx}} + t_i^{\text{rx}}) \quad (6)$$

其中: f_1 是时隙分配帧的时隙数, f_2 是这批任务的平均时延, f_3 是传感器节点的平均能耗; N 是节点的数目;根据文献[5], $P_{i^{\text{tx}}}$ 和 $P_{i^{\text{rx}}}$ 分别表示节点的发送功率和接收功率; t_i^{tx} 和 t_i^{rx} 分别表示节点 i 在发送/接收状态与睡眠状态之间的切换时间的总和; t_i^{tx} 和 t_i^{rx} 则分别是节点 i 完成这批任务所需要的总的发送时间和总的接收时间。

2.2 基于遗传算法的 TDMA 时隙分配优化

2.2.1 染色体编码

利用遗传算法求解 TDMA 时隙分配首先要解决如何将个体表现成问题的解,并且使两者之间形成一一对应的关系。只有这样才能把个体的搜索空间限定在问题的解空间内^[13],并通过在此空间内进行最优解的搜索来达到问题的求解目的。

根据 TDMA 时隙分配问题的描述,将一个传感数据包从产生到路由节点再到宿点的过程称为一个任务,而到达宿点的中间过程称为该任务的子过程。那么标记一个子任务就可以表示为(任务编号,跳数),其中,任务编号指该子任务隶属于哪个任务,跳数指这个子任务在该任务中执行的第几跳。例如,任务1是1号节点向宿点发送数据,所经过的节点依次为1→2→5→6→AP,此任务的任务编号为1,经过4跳到达宿点,那么子任务分别可表示为:(1,1)(1,2)(1,3)(1,4)。因此,定义总任务号的第几次出现表示在执行此任务的第几跳,例如,给一个序列1123213,第一位的“1”表示1号任务的第一跳,第二位“1”表示1号任务的第2跳,第3位的“2”表示2号任务的第一跳等。

图1给出了一个网络拓扑,根据以上编码方式,用一个任务号序列来描述该网络,此序列必定由4个“1”、4个“2”、4个“3”、3个“4”、2个“5”、2个“6”、1个“7”、2个“8”来表示。

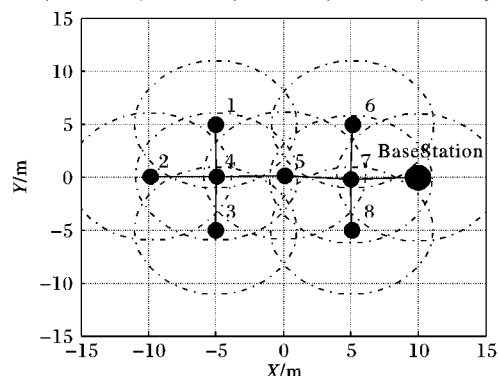


图1 单宿点网络拓扑

2.2.2 基于遗传算法时隙分配算法描述

根据染色体编码,可以随机生成一个个体,根据这个个体中的任务序列,依次对子任务所对应的执行节点进行时隙分配,在不冲突的情况下,将可并行执行的执行节点安排在同一时隙,最终可以得到一个可行的时隙分配解。

基于遗传算法的无线传感器网络 TDMA 时隙分配算法描述如下:

```

初始化种群大小 Size, 最大迭代次数 G, 当前迭代次数 g, 种群 P,
全局最优值 Pgbest 以及全局最优个体 Pbest
While (g <= G)
    for i = 1 to Size

```

```

对当前个体进行时隙分配
求解时隙分配帧分配的时隙数  $f_1$ 
end
对  $f_1$  进行排序
if  $g == 1$ 
    给  $P_{gbest}$  和  $P_{best}$  赋值
else
    更新  $P_{gbest}$  和  $P_{best}$ 
end
交叉操作
不可行解处理
最优个体  $P_{best}$  保留
}

```

为保证种群中的个体多样性,并避免一些优秀的基因过早淘汰,算法描述中的交叉操作采用了依据概率进行单点交叉。

2.3 不可行解的处理

由于个体是由子任务的任务编号组成,所以在网络拓扑固定的情况下,个体中的各个任务编号的数目是不变的,但是由于在交叉操作中,经过单点交叉后,会导致某些任务编号的数目增加或减少,导致无效个体的产生^[14]。通过对交叉后的个体中的各任务编号进行统计,并与有效解中各任务编号的数量进行对比,如果交叉后个体中某任务编号的数量增多了,此时,必定会有某任务编号的数量减少,则将任务编号数量增多的任务编号用任务编号数量减少的任务编号替换。例如:某网络的有效个体的编码为:11223333455,交叉后的不可行个体的编码为:11223334455,此时不可行个体中任务编号3的数量要少一位,而任务编号4的数量要多一位,则随机将任务编号4修改成3,此时个体为有效个体。

3 仿真结果及分析

在 Matlab 7.0 环境下对无线传感器网络的 TDMA 时隙分配进行优化仿真。各传感器发送功率为 $81 \mu\text{W}$,接收功率为 $180 \mu\text{W}$,发送/接收与睡眠状态的切换时间为 $470 \mu\text{s}$ 。路由算法采用 Warshall-Floyd 算法^[15]。

针对宿点位置固定和宿点位置随机分布两种情况,利用遗传算法分别对网络时隙分配帧的长度、传感器节点的平均能耗以及数据包的平均时延进行优化。

为进行比较研究,本文将图着色算法(CA)应用于多宿点无线传感器网络 TDMA 时隙分配问题。

3.1 多宿点固定分布的仿真设置

传感器节点分布于区域范围为 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$,网络中选用4个宿点,分别固定于4个小传感器区域的顶角,网络中各传感器节点通信半径为 12 m ,如图2所示。

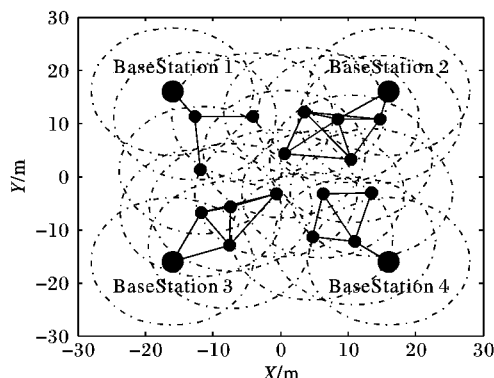


图2 多宿点固定分布网络拓扑

3.2 多宿点随机分布的仿真设置

考虑到宿点的位置对网络路由以及时隙分配的影响,采

用随机分布的方式确定宿点的位置。仿真前设置如下:传感器节点分布于区域为 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$,传感器节点通信半径为 12 m ,网络选用4个宿点,宿点随机分布在4个小传感器内,仿真过程仍采用 Warshall-Floyd 路由算法。

3.3 时隙分配帧的长度

分别利用图着色算法(CA)和遗传算法(GA)对多宿点无线传感器网络进行 TDMA 时隙分配优化仿真,结果如图3所示。

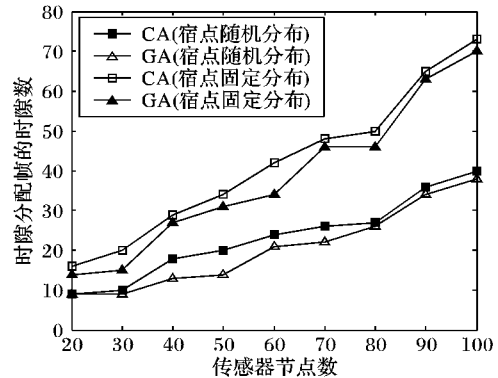


图3 传感器节点数对时隙分配帧长度的影响

由图3中可以看出,随着网络中传感器节点的数量增大,着色算法和遗传算法得出的时隙分配帧长度均在不断增大,同时利用遗传算法对时隙帧长度优化的结果均要差于着色算法优化的结果。尽管遗传算法优化的结果始终要优于着色算法,但是两者差距不是很明显,并且在宿点随机分布下的网络拓扑中,与宿点固定分布下的网络拓扑相比,各宿点要邻近各传感器区域的中心,以至于需要较少的子任务数就能完成该任务的传输。因此,在图3中,宿点随机分布下的时隙分配帧长度要优于宿点固定分布下的时隙分配帧长度。

3.4 节点平均能耗

根据能耗公式,通过对各传感器能耗的计算,求解出网络中传感器节点的平均能耗。图4给出了遗传算法对网络中传感器节点的平均能耗的优化仿真结果。

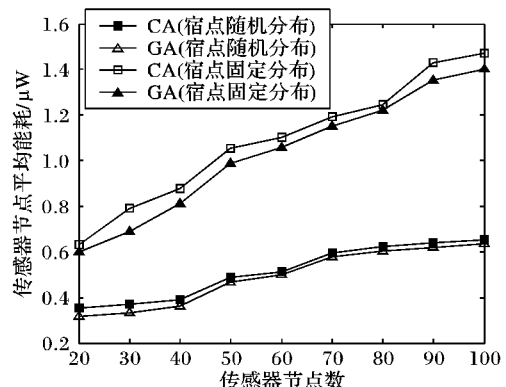


图4 传感器节点数对传感器节点平均能耗的影响

在图4的传感器节点平均能耗图中,把传感器节点的平均能耗作为目标函数,并且利用遗传算法进行优化,随着网络的不断增大,优化结果均要优于着色算法。由式(6)可知,在网络总任务量相同的情况下,网络的平均能耗取决于各传感器节点发送/接收状态与休眠状态切换的总时间。因此,采用遗传算法对网络时隙分配进行单目标优化时,能得到较节能的分配方案。

3.5 数据包平均时延

通过计算各个传感器节点数据包从发送到接收所消耗的时隙个数,求出数据包的平均时延,图5分别给出了图着色算

法和遗传算法的时隙分配结果的数据包平均时延变化情况。

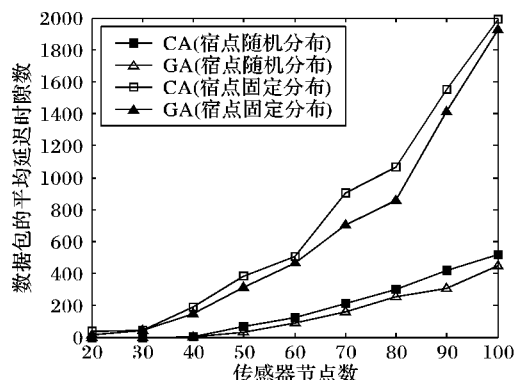


图5 传感器节点数对数据包平均时延的影响

在一些服务质量高的网络中,往往要求数据传输的时延要尽可能的短。因此,数据包平均时延的好坏决定了该网络的应用范围。由式(5)可知,数据包平均时延的大小取决于时隙分配方案中数据包总时延。不同的分配方案,求得的时延不同。采用着色算法对网络进行时隙分配时,由于该算法并未考虑时延,所以分配结果中的时延指标具有不确定性。但当采用遗传算法对时隙分配方案的数据包平均时延进行优化时,均能得到较着色算法较好的时延指标。图5中,在宿点固定分布的情形下,当网络中传感器节点增加到100个时,采用着色算法得到的平均时延达到2000个时隙,而采用遗传算法优化的结果为1930个时隙。在宿点随机分布的情形下,当网络中传感器节点增加到100个时,采用着色算法得到的平均时延达到522个时隙,而采用遗传算法优化的结果为444个时隙。

4 结语

针对单宿点无线传感器网络的时延大、容易出现传输瓶颈等问题,提出多宿点无线传感器网络模型和基于该网络模型的TDMA分配算法。与着色算法相比,无论是宿点位置固定的情形还是宿点随机分布的情形,基于遗传算法的多宿点无线传感器网络的TDMA时隙分配算法均能得到具有更优网络性能的分配方案。此外,当网络中的传感器节点固定时,随着宿点位置的改变,网络时隙分配方案也将随之改变。因此,接下来的工作中将努力研究在网络规模一定的情况下,如

何优化网络拓扑,使得时隙分配方案具有更优的网络性能。

参考文献:

- [1] ERGEN S C, VARAIYA P. TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(4): 985-997.
- [2] YEO J, LEE H, KIM S. An efficient broadcast scheduling algorithm for TDMA Ad Hoc networks[J]. *Computers & Operations Research*, 2002, 29(13): 1793-1806.
- [3] ERGEN S C, VARAIYA P. PEDAMACS: Power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(7): 920-930.
- [4] ZHANG XIZHENG, WANG YAONAN. New mixed broadcast scheduling approach using neural networks and graph coloring in wireless sensor network[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(1): 185-191.
- [5] YE WEI, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]// *INFOCOM 2002: Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. Washington, DC: IEEE Computer and Communications Societies, 2002, 3: 1567-1576.
- [6] 毛剑琳, 吴智铭. 无线传感器网络 TDMA 调度的能量-时延 Pareto 优化[J]. *控制与决策*, 2007, 22(9): 967-971.
- [7] 刘明, 黄小燕, 刘锐, 等. 无线传感器网络节点实时流量负载的时隙调度算法[J]. *计算机应用与软件*, 2009, 26(10): 50-52.
- [8] 陈剑, 贾杰, 闻英友, 等. 基于 TDMA 方式 WMN 中一种链路调度的制研究[J]. *控制与决策*, 2007, 25(9): 1349-1353.
- [9] 康凯, 郭伟, 刘仁婷. 一种 TDMA 无线多跳网中新的传输调度算法[J]. *电子科技大学学报*, 2007, 36(2): 173-175.
- [10] 吴明娟, 刘海涛, 李磊, 等. 改进型 WSN 分布式 TDMA 调度协议[J]. *计算机工程*, 2010, 36(17): 13-16.
- [11] 王庆华, 屈玉贵, 等. 多输入多输出的异构无线传感器网络时分多址调度算法[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(11): 1402-1407.
- [12] 韩成, 吴援明. 多跳无线网络中基于空分 TDMA 的时隙分配策略[J]. *通信技术*, 2010, 43(3): 90-95.
- [13] 谢茂涛. 无线传感器网络中一种动态节能的 MAC 协议[J]. *通信技术*, 2008, 41(6): 14-16.
- [14] 王陆江, 张伟, 张敬忠. 基于 TDMA 的无线传感器网络时隙分配算法[J]. *计算机工程与设计*, 2008, 29(7): 1706-1708.
- [15] 郭鹏, 舒乐, 朱光喜. 无线传感器网络初始化时隙分配算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2009, 30(4): 652-656.

(上接第 362 页)

- [7] JING T, ILLYA S, KURT R. Spatial aware geographic forwarding for mobile Ad Hoc networks [EB/OL]. [2011-03-04]. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2002/1160/pdf/TR-2002-01.pdf>.
- [8] ZHAO JING, CAO GUOHONG. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular Ad Hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1910-1922.
- [9] JEONG J, GUO S, GU Y, et al. TBD: Trajectory-based data forwarding for light-traffic vehicular networks [C]// *ICDCS'09: 29th International Conference on Distributed Computing Systems*. Piscataway: IEEE, 2009: 231-238.
- [10] SKORDYLIS A, TRIGONI N. Delay-bounded routing in vehicular Ad Hoc networks [C]// *MobiHoc'08: Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM, 2008: 341-350.
- [11] ZHANG YANG, ZHAO JING, CAO GUOHONG. On scheduling vehicle-roadside data access [C]// *VANET'07: Proceedings of the*

4th ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks. New York: ACM, 2007: 9-18.

- [12] DING YONG, CHEN WANG, LI XIAO. A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks [C]// *VANET'07: Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York: ACM, 2007: 59-68.
- [13] NANDAN A, DAS S, PAU G, et al. Cooperative downloading in vehicular Ad Hoc wireless networks [C]// *WONS'05: The 2nd Annual Conference on Wireless On-demand Network System and Services*. Piscataway: IEEE, 2005: 32-41.
- [14] EKMAN F, KERÄNEN A, KARVO J, et al. Working day movement model [C]// *MobilityModels'08: Proceeding of the 1st ACM SIGMOBILE Workshop on Mobility Models*. New York: ACM, 2008: 33-40.
- [15] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation [C]// *SIMUTools'09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*. Brussels: ICST, 2009: 55.