

簇头预测分布式层次路由协议

汤强 唐晓颖 汪秉文

(华中科技大学控制科学与工程系 武汉 430074)

摘要 提出了簇头预测分布式层次路由协议 CP-DCRP。在网络初始化阶段,基站计算均匀分布的簇头节点,并广播簇头信息。每隔特定轮数,簇头节点执行一次簇头预测机制,预测下一个特定轮数中每轮的簇头节点,并将簇头信息在全网广播。分析了特定轮数对网络平均每轮节点能耗的影响,同时对特定轮数的最优性以及簇头预测机制计算的时间复杂度进行了分析。实验结果显示,与 Leach 协议相比,CP-DCRP 协议提高了网络节点能耗均衡性能,延长了网络生命时间。

关键词 簇头预测机制,能耗均衡,特定轮数,CP-DCRP,Leach

Cluster-head Predication Distributed Clustering Routing Protocol

TANG Qiang TANG Xiao-ying WANG Bing-wen

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The cluster-head predication distributed clustering routing protocol (CP-DCRP) was proposed. In the initial stage, BS computes the cluster heads by using the uniform distributed positions, and broadcasts the cluster heads information in the network. After specific-rounds, the cluster heads of the next specific-rounds are computed by the cluster heads, which are the last cluster heads of the last round of the specific-rounds. The cluster heads of the next specific-rounds are computed by executing the cluster-head predication mechanism. All of the computed cluster heads information is broadcasted by the last cluster heads in the network. The effect of the specific-rounds on the average energy consumption per round of the network was analyzed, and the optimality of the specific-rounds as well as the time complexity of implementing the cluster-head predication mechanism was analyzed, the optimum cluster head number was also analyzed. The simulation results show that compared with Leach, CP-DCRP improves the energy consumption balance property of the network and prolongs the network lifetime.

Keywords Cluster-head predication mechanism, Energy consumption balance, Specific-rounds, CP-DCRP, Leach

1 引言

Leach^[1]协议是无线传感器网络中典型的层次型路由协议,簇头节点选举采用概率模型,非簇头节点选择距离自己最近的簇头节点加入到簇网络中。Leach 协议中,在能量均衡上采用簇头轮询机制随机选取簇头节点^[2]。目前,已经有很多研究工作对层次型路由算法进行了研究。文献[3]提出了基于节点剩余能量的簇头选举机制。文献[4]提出了将基于睡眠机制的分布式 MAC 协议应用于 Leach。文献[5]提出了 SPEAR 协议,该协议基于节点的能量以及空间分布采用自适应的方法来选取簇头节点。文献[6]提出了基于树的分簇路由协议 TREEPSI。文献[7]提出了一种基于簇的合作式多人多出的方案,该方案改善了信道传输特性,并应用到 Leach 协议中。文献[8]提出了以数据为中心的协议 EAD,构造一个基于根的广播树,叶节点发送数据,非叶节点融合数据。文献[9]提出了一个混合式多跳传输协议 HIT,该协议在簇头之间以及簇内部都采用多跳传输。文献[10]提出了基于近似最

小生成树的 PEDAP 算法。

本文采用簇头预测机制,通过预测特定轮数的簇头节点,来达到提高网络能耗均衡性能,延长网络生命时间的目的。

2 CP-DCRP 算法

本节先介绍网络的假设条件以及簇头预测机制,然后介绍算法原理。

2.1 准备工作

2.1.1 假设条件

- 1) 网络中所有节点都知道自己的位置信息,同时节点存储了所有其它节点的位置信息,节点不可移动。
- 2) 基站 BS 和普通节点能将信息广播到全网络。
- 3) 根据文献[1],发送数据和接收数据的能量模型分别为:

$$E_{tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{dec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{dec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{rx}(l) = lE_{dec} \quad (2)$$

到稿日期:2009-03-31 返修日期:2009-06-10 本文受国家自然科学基金项目:无线传感器网络面向消息的中间件系统研究(60773190),应用于桥梁结构健康监测中的无线传感器网络关键技术研究(60802002)资助。

汤强(1982-),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络等,E-mail: tangqianghust@yahoo.cn;唐晓颖(1988-),女,本科生,主要研究方向为无线传感器网络等;汪秉文(1946-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能控制与机器人技术、计算机集成控制与网络技术等。

2.1.2 簇头预测机制

令执行预测机制的簇头为 CH_0 , 令 L 为特定轮数值, 令集合 $R_0 = \{r_1, r_2, \dots\}$ 表示网络运行时为 L 的整数倍的轮数的集合。当 $r \in R_0$ 时, 簇头节点 CH_0 进行一次簇头预测。令 $S_{LCH} = \{CH_i | 0 \leq i \leq L\}$ 为预测的 L 个簇头的集合, 在预测开始阶段 $S_{LCH} = \{CH_0\}$ 。令普通节点数目为 n' , 令普通节点集合为 $S_N = \{N_i | 1 \leq i \leq n'\}$, 令 $EN = \Phi$ 为预测剩余能量的集合。算法流程如下。

步骤 1 取出一个普通节点 $N_i \in S_N$, 节点的初始能量记为 E_i 。

步骤 2 从 S_{LCH} 取出一个簇头节点 $N_{CH-m} (1 \leq m \leq k)$ 。

步骤 3 预测 N_i 在 N_{CH-m} 担任簇头时节点的能耗 E_{c-i} , 计算节点的剩余能量 $E_{m-i} = E_i - E_{c-i}$, 同时令 $E_i = E_{m-i}$ 。

步骤 4 检查集合 S_{LCH} 中的所有簇头节点是否都已经遍历, 如果是, 则将节点 N_i 的剩余能量 E_i 放入到集合 EN 中, 进入步骤 5。否则回到步骤 2, 继续执行, 直到 S_{LCH} 中所有簇头节点遍历完毕。

步骤 5 检查集合 S_N 中的所有节点是否都遍历完毕, 如果是, 则进入步骤 6, 否则回到步骤 1, 继续遍历集合 S_N 中的节点。

步骤 6 从集合 EN 中找出预测的最大剩余能量 E_{max} , 并将对应的节点 N_{max} 作为一个新的预测的簇头节点加入到集合 S_{LCH} , $S_{LCH} = S_{LCH} \cup \{N_{max}\}$, 同时将节点 N_{max} 从集合 S_N 中删除, 并清空集合 EN 。 $S_N = S_N \setminus \{N_{max}\}$, $EN = \Phi$ 。

步骤 7 计算 S_{LCH} 的大小 $k = size(S_{LCH})$, 判断 k 是否等于 $L+1$, 如果是, 则停止预测, 并将簇头 CH_0 从集合 S_{LCH} 中删除, $S_{LCH} = S_{LCH} \setminus \{CH_0\}$, 否则回到步骤 1 继续执行簇头预测过程。

最后 S_{LCH} 中存放了预测的 L 个簇头节点, 每个预测的簇头节点将按照在集合 S_{LCH} 中存放的顺序, 依次担任簇头节点这个角色, 每个预测的簇头节点都只担任一轮簇头。

令网络数据包长度为 D , 网络控制包长度为 C 。节点 N_i 在 N_{CH-m} 担任簇头节点时的能耗预测公式为:

$$E_{c-i} = \begin{cases} DE_{dec} + D\epsilon_{fs}d_{i-m}^2 + CE_{dec} + C\epsilon_{fs}d_{i-m}^2 & d_{i-m} < d_0 \\ DE_{dec} + D\epsilon_{mp}d_{i-m}^4 + CE_{dec} + C\epsilon_{mp}d_{i-m}^4 & d_{i-m} \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, d_{i-m} 表示节点 N_i 与簇头节点 N_{CH-m} 的通信距离。根据文献[1], d_0 为功率衰减因子的通信距离阈值。

2.2 算法描述

CP-DCRP 算法分为 4 个阶段: 网络初始化阶段、簇建立阶段、数据传输阶段、簇头节点预测阶段。其中簇头节点预测阶段只有在满足条件的时候才执行。

2.2.1 网络初始化阶段

BS 随机生成 k 个簇头, 它们均匀分布在网络中, 将 k 个簇头节点进行广播。

2.2.2 簇建立阶段

簇建立阶段根据当前轮数 r 的不同而进行不同的操作。

当 $r=0$ 时, 节点 N_i 接收到 BS 广播的消息, 判断自己是否是簇头节点。

当 $r>0$ 时, 节点 N_i 根据簇头节点广播的预测簇头节点集合 S_{LCH-i} , ($1 \leq i \leq k$) 以及当前的轮数来判断自己是否是簇头节点。

如果 N_i 发现自己是簇头, N_i 将在一个时间 T 内等待非簇头节点向自己发送加入请求消息 $JoinMsg$ 。当 $r=0$ 时, 节

点 N_i 则是初始簇头节点, 此时将记录下自己簇的成员节点, 并放入集合 $S_{mitCH-members} = \{N_{mit-1}, N_{mit-2}, \dots, N_{mit-n}\}$ 中保存。

如果 N_i 发现自己不是簇头, N_i 就根据其它簇头节点的位置选择距离最小的簇头发送 $JoinMsg$ 。某个簇头节点 CH_i 收到了非簇头节点 N_n 发送过来的 $JoinMsg$ 后, 则马上回复一个 ACK 消息给 N_n 。当 N_n 收到了 ACK 以后, 就代表该节点已经加入这个簇中。

2.2.3 数据传输阶段

非簇头节点 N_n 向自己的簇头节点 CH_i 发送数据包 $packetData_n$, 其中包含了 N_n 发送完这个数据包以后的剩余能量 E_n 。当 CH_i 接收完来自本簇的所有数据包以后, 就将这些簇内节点的剩余能量提取出来, 然后将本簇内部的数据包融合以后直接传输给基站 BS。

2.2.4 簇头节点预测阶段

如果当前轮数 r 对 L 的取余满足 $\text{mod}(r, L) = 0$, 并且簇内成员节点的个数要大于 L , 那么簇头节点 CH_i 预测接下来 L 轮的簇头节点, 并将簇头节点集合 S_{LCH-i} , ($1 \leq i \leq k$), 在全网进行广播。同时, 非簇头节点 N_n 以及所有其它簇头节点接收预测簇头集合 S_{LCH-i} , ($1 \leq i \leq k$)。

如果簇内成员节点的个数小于等于 L , 那么簇头节点向全网络广播一个 $restart$ 消息。网络中的节点收到消息后, 则等待所有的初始簇头节点广播的簇头预测消息。初始簇头节点收到 $restart$ 消息后, 则计算 L 个预测簇头节点, 然后将这些预测的簇头广播出去。

3 网络性能分析

在网络性能分析中, 首先分析 L 对于网络最优簇头数目的影响, 然后分析 L 对网络平均每轮能耗的影响。同时对簇头预测机制的计算时间复杂度进行分析。

3.1 簇头 k 的最优性

根据文献[1], 最优簇头的分析是建立在普通节点和簇头节点传输数据包的能耗上。CP-DCRP 协议与 Leach 协议在网络数据包传输方式以及网络拓扑结构上是一样的, 而 L 只对控制包的能耗有影响, 对数据包的能耗没有影响, 因此最优簇头计算的数学模型与 Leach 协议相同。最优簇头个数计算公式为:

$$k_{opt} = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \frac{M}{d_{toBS}^2} \quad (4)$$

其中, d_{toBS} 表示簇头到基站 BS 的距离。

3.2 L 的最优性

假设网络节点均匀分布在一个 $M \times M$ 的区域中, 节点个数为 N , 簇头个数为 k 。簇头均匀分布在网络中。下面分析单轮整个网络中所有节点的能耗, 网络控制包为 $JoinMsg$, $restart$, ACK , 以及广播的簇头预测消息。

簇头的数据包能耗为接收成员节点数据的能耗与发送数据给 BS 的能耗:

$$E_{CH}^D = E_{RecData-mem} \left(\frac{N}{k} - 1 \right) + E_{SendData-BS} \quad (5)$$

非簇头节点只有发送数据包的能耗:

$$E_{non-CH}^D = E_{SendData-CH} \quad (6)$$

当 $\text{mod}(r, L) = 0$ 时, 簇头节点需要广播预测簇头消息, 并接收来自其它簇头节点的簇头预测消息, 同时需要接收来自簇成员节点发送过来的加入消息, 以及对簇成员节点发送加入确认消息。非簇头节点需要接收所有簇头节点广播的簇

头预测消息,同时需要向簇头发送加入消息,并接收来自簇头的加入确认消息。

簇头节点的控制包能耗为:

$$E_{CH}^{C-L} = E_{JoinCluster} \left(\frac{N}{k} - 1 \right) + E_{BroadCH} + (k-1)E_{RecBroadCH} \quad (7)$$

非簇头节点的控制包能耗为:

$$E_{non-CH}^{C-L} = E_{JoinCluster} + kE_{RecBroadCH} \quad (8)$$

当 $\text{mod}(r, L) \neq 0$ 时,所有簇头节点只需要接收来自簇成员节点的加入消息,同时向成员节点发送加入确认消息。非簇头节点向簇头节点发送加入控制消息,同时接收来自簇头的加入确认消息。

簇头节点的控制包能耗为:

$$E_{CH}^C = E_{JoinCluster} \left(\frac{N}{k} - 1 \right) \quad (9)$$

非簇头节点的控制包能耗为:

$$E_{non-CH}^C = E_{JoinCluster} \quad (10)$$

可得网络每个 L 轮的总体能耗为:

$$E_L = L[E_{CH}^D + E_{non-CH}^D] + (L-1)[E_{CH}^C + E_{non-CH}^C] + E_{CH}^{C-L} + E_{non-CH}^{C-L} \quad (11)$$

网络每轮平均的能耗为:

$$E = [E_{CH}^D + E_{non-CH}^D] + \left(1 - \frac{1}{L}\right) [E_{CH}^C + E_{non-CH}^C] + \frac{E_{CH}^{C-L} + E_{non-CH}^{C-L}}{L} \quad (12)$$

令 $\frac{dE}{dL} = 0$ 可得:

$$E_{CH}^C + E_{non-CH}^C = E_{CH}^{C-L} + E_{non-CH}^{C-L} \quad (13)$$

根据式(7)~式(10)可知,上式不成立,从而 L 无实数解。随着 L 的不断增大,网络广播的控制包数量将不断减少,从而会使得网络每轮的平均能耗更加减少,因此不会存在一个最优的 L 使得网络的能耗最小。

3.3 预测机制时间复杂度

设一个簇的节点数为 n ,包括簇头节点在内,则普通节点数为 $n-1$ 。假设需要预测 L 个簇头节点,那么根据簇头预测机制,在计算第 k 个簇头节点时,集合 S_{LCH} 中的簇头节点数目为 k ,非簇头节点数目为 $n-k$ 。令遍历的节点个数表示时间复杂度,则需要遍历的节点个数为:

$$\text{time}_k = k(n-k) \quad 1 \leq k \leq L \quad (14)$$

整个预测过程的时间复杂度为:

$$\text{time} = \sum_{k=1}^L \text{time}_k = \sum_{k=1}^L k(n-k) \quad (15)$$

可得:

$$\text{time} = \frac{L(L+1)(3n-2L-1)}{6} \quad (16)$$

由于 $1 \leq L \leq n$,则时间复杂度最小为 $O(n)$,最大为 $O(n^3)$ 。

4 仿真分析

仿真实验中先仿真 L 取不同值时的最优簇头,然后对不同 L 取值的网络每轮平均能耗进行仿真,结合 Leach 协议比较网络的生命时间以及网络的能量均衡性能。网络生命时间定义为第一个节点死亡时的时间。网络面积大小为 $100 \times$

100,网络节点个数为 200,基站位于 $(50, 175)$ 。仿真能量参数以及数据包和控制包参数如表 1 所列。

表 1 协议仿真能量和数据包参数设置

参数名称	参数值
E_0	0.5J
E_{elec}	50e-009J/bit
E_{fs}	10e-012J/bit/m ²
E_{mp}	1.184e-018J/bit/m ⁴
EDA	5e-009J/bit/signal
C	200bits
D	4000bits

4.1 簇头 k 的最优性仿真

令 L 的取值分别为 1, 2, 3, 4。根据式(4)可得最优簇头的范围是 $(1.4939, 8.7969)$,簇头数目从 2 逐渐增加到 10,步长为 1。仿真结果如图 1 所示。

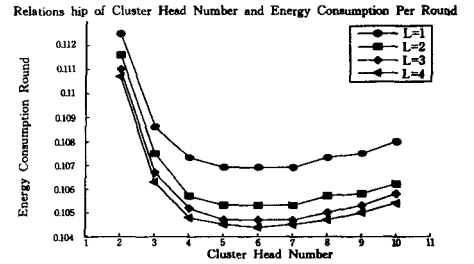


图 1 最优簇头数目仿真结果

从图 1 可以发现,当 L 变化时,最优簇头数目基本上保持在点 5, 6, 7 上,同时每轮的平均能耗随着 L 的增加呈现下降的趋势。这是因为 L 越大,控制包的消耗越小,因此每轮的能耗逐渐下降。因此, L 的变化不会影响最优簇头的数目,与理论分析相符合。

4.2 L 最优性仿真

令网络簇头数目分别为 2, 3, 4, 5。 L 从 1 逐渐增加到 10,步长为 1。 L 与每轮平均能耗的关系如图 2 所示。

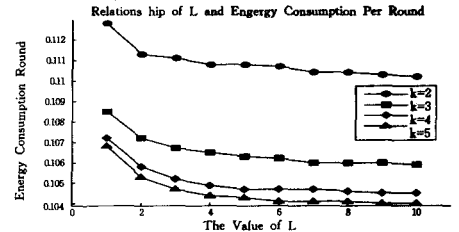


图 2 L 与每轮平均能耗的关系

从图 2 可以发现,当簇头 k 的数目固定时,如果 L 增加,则网络每轮平均的能耗呈现逐渐减小的趋势。同时当 k 的取值向最优簇头数目靠近时,网络每轮的平均能耗也呈现出逐渐减小的趋势。

4.3 网络生命时间

为了比较 CP-DCRP 协议的簇头预测机制,提出一个基于 L 轮的当前剩余能量簇头筛选协议 TMP-L,该协议是在 $\text{mod}(r, L) = 0$ 时根据当前簇内成员节点的剩余能量,从簇成员节点中选出 L 个剩余能量最大的节点作为接下来 L 轮的簇头节点,其它机制与 CP-DCRP 协议相同。

令网络簇头数目从 2 逐渐增加到 12,步长为 1, L 的取值为 3。仿真协议为 CP-DCRP 和 Leach。仿真结果如图 3 所示。

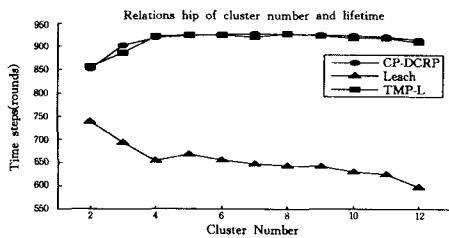


图3 网络生命时间仿真

从图3可以发现,CP-DCRP的网络生命时间要比Leach协议高出大约50%,最高可达到70%到80%左右。同时TMP-L协议的网络生命时间基本上处于CP-DCRP协议的相同位置或者下面一点,说明TMP-L只根据当前剩余能量来选取 L 个簇头的机制没有CP-DCRP的基于预期剩余能量的预测机制优越。但是两者的网络生命时间几乎相当,都要远远高于Leach,这说明两者的能耗均衡性能相当,都要远远好于Leach。

4.4 节点能耗均衡性分析

定义网络节点能耗负载因子为第一个节点死亡时节点的剩余能量 $E_{residual}$ 与初始能量 E_{init} 的比值:

$$load = \frac{E_{residual}}{E_{init}} \quad (17)$$

网络节点平均能耗负载因子为:

$$load_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N load_i}{N} \quad (18)$$

其中, N 表示网络节点数目。

网络能耗均衡性可以用节点能耗负载因子的标准方差表示:

$$EBalanced = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (load_i - load_{ave})^2}{N}} \quad (19)$$

网络仿真环境与4.3节中的一样。下面仿真Leach协议和CP-DCRP协议网络的能耗均衡性能。为了显示方便,结果采用对数坐标。仿真结果如图4所示。

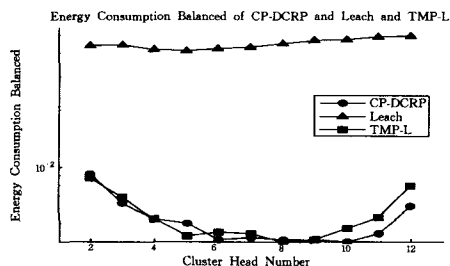


图4 网络能耗均衡性能仿真结果

图4显示随着簇头数目的不断增加,Leach协议网络的能耗均衡因子不断增加,节点之间的能耗越来越不均衡;CP-DCRP与TMP-L协议的能耗均衡因子都非常小,并且十分接

近,这是因为两种协议都是基于节点最大剩余能量的。Leach协议的能耗均衡因子是CP-DCRP和TMP-L的10倍以上,CP-DCRP和TMP-L要比Leach具有更好的能耗均衡性能。

结束语 CP-DCRP协议基于节点的预期剩余能量,来预测接下来 L 轮的簇头节点。该协议具有很好的能耗均衡性能,最优簇头不受 L 的影响,同时当 L 增大时,网络平均每轮的能耗呈现下降的趋势。仿真结果显示CP-DCRP要比Leach具有更好的能耗均衡性能,网络生命时间大大延长。

参考文献

- [1] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [2] 汪祥莉, 李腊元, 王文波. 无线传感器网络中的路由协议研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(7): 50-60
- [3] Jang Ki Young, Kim Kyung Tae, Youn Hee Yong. An Energy Efficient Routing Scheme for Wireless Sensor Networks[C]// International Conference on Computational Science and its Applications. Aug. 2007: 399-404
- [4] Yang Haiming, Sikdar B. Optimal Cluster Head Selection in the Leach Architecture[C]// IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference. April 2007: 93-100
- [5] Bhuvaneshwari P T V, Vaidehi V, Shanmugavel S. SPEAR: Sensor Protocol for Energy Aware Routing in Wireless Sensor Network[C]// Third International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks. Dec. 2007: 74-78
- [6] Satapathy S S, Sarma N. TREEPSI: Tree based Energy Efficient Protocol for Sensor Information[C]// IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. 2006: 1-4
- [7] Yuan Yong, Chen PMin, Kwon Taekyoung. A novel cluster-based cooperative MIMO scheme for multi-hop wireless sensor networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2006, 2006(2): 1-9
- [8] Boukerche P, Cheng Xuzhen, Linus Joseph. A performance evaluation of a novel energy-aware data-centric routing algorithm in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2005, 11(5): 619-635
- [9] Culpepper B J, Dung L, Melody Moh Design and Analysis Hybrid Indirect Transmissions (HIT) for Data Gathering in Wireless Micro-sensor Networks[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(1): 61-83
- [10] Tan Huseyin Ozgur, Korpeoglu I. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks[J]. ACM SIGMOD Record, 2003, 32(4)

(上接第55页)

- [3] Islam S, Hamid A, et al. Preserving Identity Privacy in Wireless Mesh Networks[C]// Proceedings of International Conference on Information Networking. 2008
- [4] 阮星华, 徐敬东, 于博洋. VANET 中位置路由协议的安全和隐私保护[J]. 计算机工程, 2008, 34(14): 166-170
- [5] Zhang Y, Liu W, Luo W. Anonymous Communication in Mobile

Ad Hoc Networks[C]// Proceedings of INFOCOM. 2005

- [6] Sun J, Zhang C, Fang Y. A Security Architecture Achieving Anonymity and Traceability in Wireless Mesh Networks[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM. 2008: 1687-1695
- [7] 方旭明, 马忠峰. 无线 mesh 网络的跨层设计理论与关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(6): 711-718
- [8] Raya M, Hubaux J P. The Security of Vehicular Ad Hoc Networks[C]// Proceedings of SASN. 2005