

## 一种基于收集树协议的工业无线传感器网络动态路由机制

赵阿群\* 刘昌阳

(北京交通大学计算机与信息技术学院 北京 100044)

**摘要:** 无线 HART(Highway Addressable Remote Transducer)是当前工业无线传感器网络中应用最为广泛的协议, 但无线 HART 没有提供动态路由机制以满足对工业无线网络应用至关重要的稳定性和鲁棒性。该文在无线 HART 协议基础上, 提出一个基于收集树协议的可应用于工业无线传感器网络的动态路由机制。它占用时分多址(TDMA)超帧中的前几个时间片来产生和维护网络拓扑。通过仿真实验从 3 个方面对该动态路由机制进行了评估: 拓扑生成时间, 链路质量及网络拓扑的稳定性。仿真和评估结果表明该动态路由机制可以在基于 TDMA 的工业无线传感器网络中应用。

**关键词:** 无线传感器网络; 动态路由机制; 收集树协议

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2012)09-2194-06

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2012.00075

## A Dynamic Routing Mechanism Based on Collection Tree Protocol in Industrial Wireless Sensor Networks

Zhao A-qun Liu Chang-yang

(School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Wireless Highway Addressable Remote Transducer (HART) is the most widely applied standard to industrial wireless sensor networks nowadays. However, it does not provide any dynamic routing mechanism, which is important for the reliability and robustness of the industrial wireless network applications. In this paper, a collection tree protocol based dynamic routing mechanism is proposed for industrial wireless sensor networks in the base of wireless HART protocol. This mechanism generates and maintains the network topology through occupying several time slots in the Time Division Multiple Address (TDMA) super frame. The dynamic routing mechanism is evaluated through several simulation experiments in three aspects: time for generating the topology, link quality and stability of network. The simulation and evaluation results show that this mechanism can act as a dynamic routing mechanism for the TDMA-based industrial wireless sensor networks.

**Key words:** Wireless sensor networks; Dynamic routing mechanism; Collection Tree Protocol (CTP)

### 1 引言

近年来, 随着无线传感器网络<sup>[1,2]</sup>的快速发展, 无线设备被越来越广泛地部署在工业环境中以提高工业流程的效率, 相应的无线网络标准和协议也相继出现。当前在工业无线传感器网络中应用最为广泛的是无线 HART(Highway Addressable Remote Transducer)协议<sup>[3,4]</sup>。无线 HART 协议是一个基于 HART 协议的变种, 它可以为工业自动化产业中的无线设备之间提供简单, 可靠和安全的通信。但是无线 HART 没有提供明确的动态路由策略以保证对

工业无线网络应用至关重要的稳定性和鲁棒性。在无线 HART 采用的图形路由机制(graph routing)中, 每个节点只有两个固定的父节点。如果该节点与这两个父节点之间的通信都被阻断将意味着该节点被彻底与其所属的网络断开。

本文在无线 HART 协议基础上, 通过对收集树协议(Collection Tree Protocol, CTP)<sup>[5,6]</sup>的评估和改进提出可以在工业无线传感器网络中使用的动态路由机制。论文从 3 个方面对提出的动态路由机制进行评估: 拓扑生成时间, 链路质量和网络拓扑稳定性。通过这 3 个方面的评估验证了所提动态路由机制的合理性。

### 2 相关协议和算法

#### 2.1 无线 HART

无线传感器网络是由一定数量自主的无线传感

2012-01-20 收到, 2012-05-16 改回

国家 973 计划项目(2007CB307101), 中央高校基本科研业务费专项资金(2012JBM025)和教育部重点实验室开放研究基金(K93-9-2010-08)资助课题

\*通信作者: 赵阿群 aqzhao@bjtu.edu.cn

器节点以自组织方式组成的多跳网络。其目的是通过网络中的无线传感器节点及其之间的自主通信来感知,采集和处理所覆盖区域的一种或多种检测对象的监测信息并通过汇聚节点将结果发送给用户。

无线 HART 是第 1 个开放的可互操作的无线传感器网络通信标准。该标准在物理层使用兼容运行在 2.4 GHz 的 ISM(Industrial Scientific Medical)频段上的无线电 IEEE 802.15.4 标准。在数据链路层采用信道跳频和时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)等技术。在无线 HART 的数据链路层中,时间被分割成一个个的时间片(time slot),一定数量的时间片组成一个超帧(super frame)。为了避免节点之间的通信冲突,通过 TDMA 技术,每个连接被安排在一个固定的时间片中,只有在该时间片内该连接才被允许通信。

## 2.2 收集树协议

收集树协议是 WSN 中为低速流量而设计的基于树的协议。网络中的一些节点可以将自己宣布为该树形网络的根节点。网络中的其他节点以一个路由梯度(routing gradient)为依据向根节点产生路由。

收集树协议使用一个称为 ETX(EXpected Transmissions)的值作为路由梯度<sup>[7]</sup>。根节点的 ETX 值为 0,其他节点的 ETX 值是其父节点的 ETX 值与该节点与其父节点之间的链路的 ETX 值之和。节点总会在众多可能的父节点中选择能使其 ETX 值最小的作为其父节点。

每个使用收集树协议的节点维护一张大小为 10 的邻居表。节点周期性的广播包含其自身路由信息的信标包(beacon packets)来完成路由工作。如果节点发现它的父节点堵塞了或者发现了一个更优的父节点,该节点会放弃现有父节点并在它所维护的邻居表中选择最优邻居作为其新的父节点。在收集树协议中使用一个称为 ETX\_Threshold 的参数作为选择最优邻居时的 ETX 值的阈值。当某个邻居与该节点之间的链路 ETX 值大于 ETX\_Threshold 时,该邻居是绝对不会被选为最优邻居的。

## 2.3 Trickle 算法

Trickle 算法是无线传感器网络中用于数据传播和信息更新的自适应算法<sup>[8]</sup>。其目标是信息的传播越快越好但信息的维护代价越小越好。Trickle 算法的基本机制是在一个固定的时间段内,如果一个节点没有“听见”其他节点传播和它自身相同的信息,该节点将周期性地传播其自身信息<sup>[9,10]</sup>。Trickle 算法可以控制发包频率来减少网络中的数据包的量,而不像泛洪那样使整个网络都充满数据包。

具体地,Trickle 算法中每个节点维护一个计数器  $c$ ,一个阈值  $k$  和一个在  $[0, \tau]$  范围内的时间点  $t$ 。当节点收到一个包含的信息与其自身相同的包时,它将  $c$  加一。到了时间点  $t$ ,只有当计数器  $c$  小于阈值  $k$ ,它才会发送自身的信息。当时间段  $\tau$  结束, $c$  被重置为 0, $t$  被设置成  $[0, \tau]$  之间的新的随机时间点。

收集树协议中采用的 Trickle 算法中的参数  $\tau$  在  $[\tau L, \tau H]$  范围内取值。如果一个节点在一个时间段内没有听到新的信息,它会将  $\tau$  值增值直到  $\tau H$  为止。

## 3 动态路由机制

对于工业无线传感器网络而言网络的可靠性和鲁棒性是至关重要的,而动态路由协议是保证无线传感器网络可靠性和鲁棒性的关键要素。但是当前广泛使用的无线传感器网络路由协议,如无线 HART 中的图形路由协议并未提供动态路由机制。本文在现有无线 HART 协议基础上,改进帧传输格式,提出两种机制作为提供给工业无线传感器网络的备选动态路由方案。

本文改进帧传输格式的主要思路是通过占用 TDMA 超帧中的前一个或几个时间片并将这些时间片的时间作为一个 CSMA(Carrier Sense Multiple Access)阶段来产生和维护网络拓扑。在 TDMA 中插入一个 CSMA 阶段的原因在于需要节点在 CSMA 阶段完成一些在 TDMA 阶段不能完成的工作。在 TDMA 阶段,所有的事情都已固定安排好,每个节点都知道它的父节点是谁,哪个时间片被分配给哪条链路。然而,当网络中存在未知数量的节点时,需要一个分布式的竞争阶段来完成 TDMA 所不能完成的时间同步和拓扑生成等工作。

拓扑的生成和维护是通过在 CSMA 阶段广播信标包来完成的。在 TDMA 阶段,节点停止广播信标包并开始发送数据包。因此 CSMA 阶段需要的时间越短越好,同时在此阶段生成的拓扑的链路质量要足够好。

如果使用收集树协议能够在足够短的时间内生成一个足够好的拓扑,那么可以采用如图 1 所示的动态路由机制,即只需要在每个 TDMA 超帧内将开始的几个时间片分配给 CSMA 阶段用以生成和维护拓扑。

如果收集树协议不能在足够短的时间内生成一个足够好的网络拓扑,那么就需要在第 1 个 TDMA 超帧开始前加入一个建立阶段(set-up period)用以生成拓扑并传播链路安排信息。在以后的每个

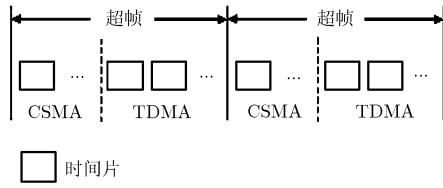


图 1 不带建立阶段的动态路由机制

TDMA 超帧中, 前几个时间片都被分配给 CSMA 阶段用以维护网络拓扑。该机制基于以下的假设: 在建立阶段生成的网络拓扑相对稳定, 即节点不会频繁的更换它们的父节点。图 2 所示是带建立阶段的动态路由机制。

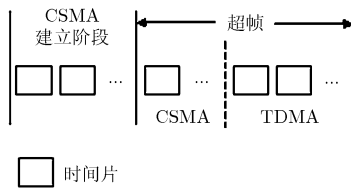


图 2 带建立阶段的动态路由机制

#### 4 仿真和评估

在本节中使用仿真工具 TOSSIM<sup>[11,12]</sup>对基于收集树协议的动态路由机制进行仿真; 仿真完成后从多个方面对其进行评估; 根据评估结果, 从论文提出的两个可能的动态路由机制中选取更优者作为工业无线传感器网络的动态路由策略。

TOSSIM 是为 TinyOS 传感器网络<sup>[13,14]</sup>开发的离散事件模拟工具, 它在仿真环境下提供了一个从现实世界演化而来的信号传播模型和噪音模型。TinyOS 是第 1 个面向无线传感器设计的开源操作系统, 它的出现使得在仿真中建立无线传感器网络更加简单和方便。本文仿真中所采用的拓扑是一个 100 个节点以  $10 \times 10$  的分布方式均匀分布生成的正方形, 拓扑中的噪音模型为斯坦福大学 Meyer 实验室提供的噪音记录 meyer 短噪音<sup>[15]</sup>。仿真结果被写入到一个文件中, 然后使用 MATLAB 对输出数据进行处理并利用其作图功能使结果更加直观。

对基于收集树协议的动态路由机制的评估主要基于以下 3 个方面: 拓扑生成时间  $T$ , 拓扑的链路质量  $Q$  和拓扑的稳定性  $S$ 。

经分析发现收集树协议中采用的 Trickle 算法中的  $\tau L$  参数会影响到拓扑生成时间, 而参数 ETX\_Threshold 则会对拓扑生成时间和链路质量都产生影响。即

$$T = f(\tau L, \text{ETX\_Threshold}) \quad (1)$$

$$Q = g(\text{ETX\_Threshold}) \quad (2)$$

通过改变  $\tau L$  和 ETX\_Threshold 这两个参数的值从而在拓扑生成时间和拓扑的链路质量之间找到一个平衡点。

拓扑的稳定性则决定了本文提出的带有建立阶段的机制是否可行。如果在拓扑生成后有太多节点频繁地改变它们的父节点, 那么在每个 TDMA 超帧中就需要分配较多的时间给 CSMA 阶段使其完成网络拓扑的维护工作。在这种情况下, 本文提出的带有建立阶段的机制将不适合作为工业无线传感器网络中的动态路由机制。

#### 4.1 拓扑生成时间

首先要对节点加入网络和网络拓扑的生成给出定义。定义当一个节点第 1 次找到其父节点, 该节点就已经加入到网络中。当网络中所有节点都找到它们的父节点, 整个网络拓扑就已经生成。

拓扑生成时间主要受 Trickle 算法中  $\tau L$  参数的影响。在原始收集树协议中, 参数  $\tau L$  被设定为一个相对较大的值。其原因是在原始收集树协议中信标包和数据包是同时竞争发送的, 为了保证数据包的传输成功率, 收集树协议不得不降低信标包的发送速率来减小发生冲突的概率并节省带宽。然而在动态路由机制中, 收集树被应用的 CSMA 阶段只传输信标包, 所以不存在与数据包发生冲突的可能。在这种情况下希望信标包能被较频繁地发送以快速生成网络拓扑。所以将参数  $\tau L$  的值不断减小来观察收集树协议可能生成拓扑的最短时间。

本节包含两个仿真实验, 实验 1 旨在找到能够使收集树协议在最短时间内生成拓扑的参数  $\tau L$ , 即在式(1)中固定参数 ETX\_Threshold 的情况下, 找出使  $T$  最小的参数  $\tau L$  的最佳取值。实验 2 在实验 1 的基础上, 将  $\tau L$  设为定值并在兼顾链路质量的前提下找到生成拓扑所需的合理时间, 即在式(1)中参数  $\tau L$  取最佳值的情况下, 找出保证  $T$  合理的参数 ETX\_Threshold 的取值范围。

实验 1 中, 将参数 ETX\_Threshold 设为定值, 并且取  $\tau L$  值分别为 128 ms, 64 ms, 32 ms, 16 ms, 8 ms 和 4 ms。对每个值重复进行 100 次实验。实验结果如图 3 所示。

图 3 中,  $X$  轴表示  $\tau L$  的值,  $Y$  轴表示在 100 次实验中 95% 的实验生成拓扑所需的时间。很明显, 在参数  $\tau L$  取值 16 ms 时, 收集树协议可以最快地生成拓扑。当参数  $\tau L$  很大时, 生成拓扑时间长的原因很明显, 信标包传输间隔过久导致路由信息无法快速更新, 所以所有节点要花费更多时间才能加入到网络中生成完整拓扑。当  $\tau L$  过小时, 在特定时间段

内网络中的节点发送了太多的信标包，会导致太多的冲突产生从而降低了信标包的发送成功率，这种情况下节点之间不能有效的互相通信也将延长拓扑生成时间。

通过改变参数  $ETX\_Threshold$  的取值重复相同实验，结果表明参数  $ETX\_Threshold$  取不同值时，可导致生成拓扑的最短时间发生变化，但最快生成拓扑的条件不变，仍是参数  $\tau L$  取值为 16 ms。

在本实验中，得到的生成拓扑的最短时间为 385 ms。但这是将参数  $ETX\_Threshold$  设定为很大值的结果，这样会导致链路质量过差，即便生成拓扑节点之间也不能进行有效的通信，所以接下来将在考虑链路质量的前提下考察拓扑生成时间。

实验 2 中，根据实验 1 的结果将参数  $\tau L$  的值设为 16 ms，参数  $ETX\_Threshold$  的取值分别为 50, 40, 30 和 20。对每个  $ETX\_Threshold$  值重复进行 100 次实验。

参数  $ETX\_Threshold$  的值能够影响拓扑生成时间的原因是当一个节点第 1 次选择其父节点时，参数  $ETX\_Threshold$  是节点选择最优邻居的限制条件。所以  $ETX\_Threshold$  值较大时可能会使节点在第 1 次选择父节点时更加容易，也就能更快地加入到网络中，但是相应的链路质量就会降低。

图 4 所示为当参数  $ETX\_Threshold$  值为 50 时的 100 次实验结果。X 轴表示生成拓扑需要的时间，Y 轴表示一个百分比，即在这 100 次实验中有多少次实验可在 X 轴所限时间内生成拓扑。

从图 4 中可以看出，当  $ETX\_Threshold$  的值为 50 时，在 95% 的情况下，收集树协议能在 1176 ms 内生成拓扑。

对于  $ETX\_Threshold$  值为 40, 30 和 20 的实验，采用相同的方法，实验结果如表 1 所示。

从以上实验结果可以得到如下结论：在参数  $ETX\_Threshold$  值为 20 和 30 的时候，收集树协议拓扑生成时间过长不能应用在工业无线传感器网络中。当  $ETX\_Threshold$  值为 40 和 50 时拓扑生成

表 1 不同  $ETX\_Threshold$  值时的拓扑生成时间

ETX_Threshold 值	拓扑生成时间(ms)
50	$1.176 \times 10^3$
40	$1.529 \times 10^3$
30	$1.638 \times 10^4$
20	$2.8 \times 10^5$

时间是可以接受的，所以接下来的实验中仅对这两个参数取值进行进一步实验分析。

### 4.2 链路质量

在相关工作中已经提及收集树协议使用  $ETX$  值作为路由梯度来评估链路质量。 $ETX$  较为抽象，它与数据包投递率(Packet Deliver Ratio, PDR)有关。目前尚无文献描述  $ETX$  与 PDR 之间的确切关系。本文设计一种方法，根据 PDR 计算  $ETX$  值，基本思路是通过多次使用一个称为指数加全移动平均(Exponential Weighted Moving Average, EWMA)的公式<sup>[16]</sup>以 PDR 值作为基本参数计算得到  $ETX$  值，具体过程如下：

当两个节点之间的总传输包数达到一个固定窗口大小时，利用总传输包数目  $data\_total$  和成功接收包数目  $data\_success$  更新  $ETX$  的测量值(用  $M\_ETX$  表示)，如式(3)所示：

$$M\_ETX_i = (data\_total_i / data\_success_i - 1) \times 10 \tag{3}$$

为了减少链路质量的抖动，采用 EWMA 方法计算  $ETX$  的估计值(用  $E\_ETX$  表示)，如式(4)所示：

$$E\_ETX_i = \alpha \times E\_ETX_{i-1} + (1 - \alpha) \times M\_ETX_i \tag{4}$$

在收集树协议的实现中，将  $\alpha$  的值取为 90%，新的链路质量估计值将代替原来的链路质量估计值，并作为节点选择父节点的依据。

在本实验中，参数  $\tau L$  的值设为定值 16 ms，比较当参数  $ETX\_Threshold$  取值为 50 和 40 时的链路质量。

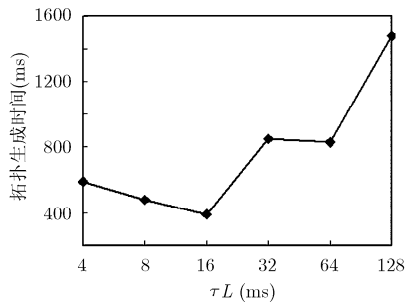


图 3 拓扑生成时间

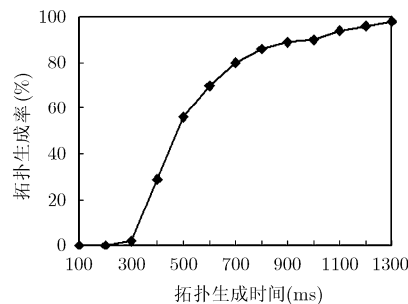


图 4 拓扑生成时间分布

图5所示为当ETX\_Threshold值为50和40时,拓扑中100个节点的链路质量。X轴表示节点的ETX值,Y轴表示节点的百分比,即ETX值小于或等于对应X轴的ETX值的节点个数占总节点数的百分比。

从图5中可以观察到,当ETX\_Threshold值为40时的链路质量比其值为50时好。但表1结果显示当ETX\_Threshold值为40时的拓扑生成时间比其值为50时长353ms。这个时间差是可接受的,考虑到链路质量,选取40作为参数ETX\_Threshold的值。

然而,问题出现了,即便拓扑生成时间为1529ms,这个时间对于一个超帧来说也过长了,因此不能使用无建立阶段的机制作为工业无线传感器网络的动态路由机制。剩下的唯一选择就是带有建立阶段的机制。但是该机制基于一个假设,即在建立阶段生成的拓扑相对稳定,也就是说拓扑一旦生成节点不会频繁地更换其父节点。接下来将对拓扑的稳定性进行仿真实验。

#### 4.3 网络拓扑稳定性

通过上文的仿真,已经得到参数 $\tau_L$ 和ETX\_Threshold的合理值。在本实验中,将 $\tau_L$ 值设定为16ms,ETX\_Threshold值设定为40,对拓扑的稳定性进行测试。运行仿真实验90s,记录在此时间内拓扑生成后节点改变父节点的行为,结果如图6所示。

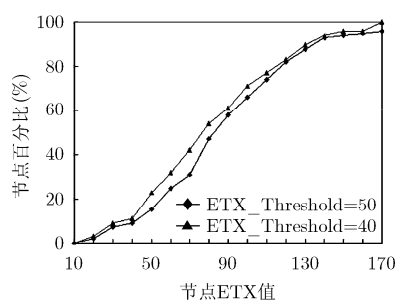


图5 节点ETX值分布

从图6中可以观察到在拓扑生成后的初始阶段,节点会较频繁地更换父节点,但是随着时间推移,整个网络趋于稳定。初始阶段父节点频繁更换是因为节点在不停地发现新的更优链路,当节点找到足够好的路径后整个网络就趋于稳定了。进一步分析,即便是在生成拓扑后的初始阶段,在1000ms内也仅有20次父节点变更,对于一个100节点的网络来说,这个数值相当之小。

通过上述分析,可知带有建立阶段的动态路由机制所依赖的假设成立,即在建立阶段生成的拓扑相对稳定。因此该机制可以作为工业无线传感器网络的动态路由机制。

## 5 结束语

本文在无线HART协议基础上,提出了一个基于收集树协议的可应用于基于TDMA的工业无线传感器网络的动态路由机制。通过仿真实验从3个方面对该动态路由机制进行了评估:拓扑生成时间,链路质量及网络拓扑的稳定性。仿真和评估结果表明该动态路由机制可以在基于TDMA的工业无线传感器网络中应用。

本文通过仿真实验给出了动态路由机制建立阶段所需的时间,但是每个TDMA超帧中应分配给CSMA阶段的时间并没有给出。希望在未来的工作中针对这一问题设计相关实验以便为超帧中CSMA阶段的时间分配做出指导。

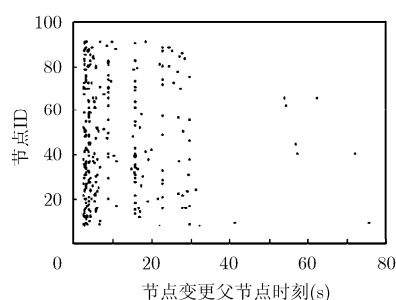


图6 父节点变更的分布图

## 参考文献

- [1] Dargie W and Poellabauer C. Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2010: 168-183, 191-192.
- [2] Wikipedia. Wireless sensor network. [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_sensor\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network), June 2011.
- [3] Chen D, Nixon M, and Mok A. WirelessHART: Real-Time Mesh Network for Industrial Automation[M]. New York: Springer Publishing Company, 2010.
- [4] HART Communication Foundation. WirelessHART specification. <http://www.hartcomm2.org>, 2007.
- [5] Gnawali O, Fonseca R, Jamieson K, et al. Collection tree protocol[C]. Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York, Nov. 4-6, 2009: 1-14.
- [6] Fonseca R, Gnawali O, Jamieson K, et al. TEP 123: the collection tree protocol. <http://www.tinyos.net//tinyos-2.x/doc/txt/tep123.txt>, Dec 2007.
- [7] Draves R, Padhye J, and Zill B. Comparison of routing

- metrics for static multi-hop wireless networks[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM, Portland, August 2004: 133-144.
- [8] Levis P. Trickle algorithm corrections[J]. *Communications of the ACM*, 2009, 52(2): 8-9.
- [9] Blywis B, Günes M, Juraschek F, *et al.* Gossip routing in wireless mesh networks[C]. 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Istanbul, 2010: 1572-1577.
- [10] Oztas B and Alagoz F. A modified gossip algorithm for clustered Ad hoc networks[C]. 2011 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, Chennai, 2011: 1-4.
- [11] Levis P, Lee N, Welsh M, *et al.* TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications[C]. Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, 2003: 126-137.
- [12] Stevens C, Lyons C, Hendrych R, *et al.* Simulating mobility in WSNs: bridging the gap between ns-2 and TOSSIM 2.x[C]. 13th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, Singapore, 2009: 247-250.
- [13] TinyOS. TinyOS Documentation Wiki. [http://docs.tinyos.net/index.php/Main\\_Page](http://docs.tinyos.net/index.php/Main_Page), June 2010.
- [14] Iyengar S, Parameshwaran N, Phoha V, *et al.* Fundamentals of Sensor Network Programming: Applications and Technology [M]. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011: 92-97.
- [15] Zuniga M. Building a network topology for TOSSIM. <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tutorial/usc-topologies.html>, June 2011.
- [16] Wikipedia. Moving average. [http://en.wikipedia.org/wiki/Moving\\_average#Exponential\\_moving\\_average](http://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average#Exponential_moving_average), May 2011.
- 赵阿群：男，1974年生，副教授，研究方向为计算机网络。
- 刘昌阳：男，1984年生，研究生，研究方向为无线传感器网络。