

# 低占空比传感网中分布式的环状 流水线工作调度研究

蒋 婵<sup>1,2</sup>, 李陶深<sup>1,2</sup>, 梁俊斌<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510641; 2. 广西大学计算机与电子信息学院广西多媒体通信与网络技术重点实验室, 广西南宁 530004)

**摘 要:** 低占空比传感网中节点的长时间睡眠会导致数据查询延迟的增加. 如何调度节点唤醒时间从而最小化延迟, 是一个难解的组合优化问题. 提出一个分布式的环状流水线调度算法, 不用长时间等待即可进行数据传输. 分析表明, 算法可获得较低的延迟和更长的网络生命周期.

**关键词:** 低占空比传感网; 分布式算法; 环状流水线工作调度; 数据查询

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2018)07-1732-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.027

## Distributed Circular Pipeline Work Scheduling in Low-Duty-Cycle Wireless Sensor Networks

JIANG Chan<sup>1,2</sup>, LI Tao-shen<sup>1,2</sup>, LIANG Jun-bin<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China;  
2. Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, School of Computer and Electronics Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

**Abstract:** Long sleeping time of nodes in a low-duty-cycle sensor network will increase data enquiry latency. How to schedule wakeup time of different nodes in the network to minimize the latency is a combinatorial optimization problem. A distributed circular pipeline scheduling algorithm is proposed, by which enquiry data can be transmitted without long wait. Analyses show that the algorithm achieves not only lower latency, but also longer network lifetime.

**Key words:** low-duty-cycle sensor networks; distributed algorithm; circular pipeline work scheduling; data enquiry

### 1 引言

低占空比传感网 (Low-Duty-Cycle Sensor Networks, LDC-SN)<sup>[1]</sup> 是近年出现的一种新型无线传感器网络, 主要用于执行长期的监测和跟踪任务. 在 LDC-SN 中, 节点采用低占空比的机制, 即: 节点将自己的工作时间划分为多个长度固定的周期, 每个周期  $T$  由  $m$  个时间单元  $t_j (j=1, 2, \dots, m)$  组成, 而节点只在其中 1 个时间单元中醒来进行工作, 其余时间均处于睡眠状态. 所谓低占空比, 就是指节点醒来的时间在整个周期  $T$  中所占的比例小于或等于 10%, 即:  $1/m \leq 0.1$ . 低占空比机制使节点在大部分时间处于睡眠状态, 避免了网络中非常耗

能的空闲侦听 (idle listening) 操作, 能够大大延长节点的工作时间.

但是, 大量节点的睡眠会导致网络连通性的下降, 使得节点之间数据的传输延迟增加. 以图 1 为例, 存在 3 个节点 A, B, C, 假设它们的周期为  $T=10$ , 节点 A, B, C 的唤醒时刻分别是 1, 5, 8, 分别用  $t_1, t_5, t_8$  表示. 如果节点 A 需要通过节点 B 传输一个数据包给节点 C, 则节点 A 在  $t_1$  接收到数据后只能重新睡眠并等待, 只有当节点 B 在  $t_5$  唤醒后, 才能把数据包发送给它, 等待时间为 4 个时间单元; 同样的情形, 也发生在节点 B 传输数据包给节点 C 的过程, B 传输数据到 C 需要等待 3 个时间单元. 由图 1(a) 我们可以看到, 正向数据传输 A→B

收稿日期: 2017-05-09; 修回日期: 2017-11-06; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61562005, No. 61363067); 广西自然科学基金 (No. 2015GXNSFAA139286); 2015 年广西高校科学技术研究项目 (No. KY2015YB486)

→C 的总时间延迟是 7 个时间单元,而反向数据传输 C→B→A 则需要耗费 13 个时间单元,双程数据传输需要花费的总时间是 20 个时间单元.注意,每跳延迟的计算方法为正向传输是: $t_{i+1} - t_i$ ,反向传输是则为  $t_i - t_{i+1} + T$ .

为了减少数据传输延迟,有部分工作提出采用流水线调度<sup>[2,3]</sup>的方式重新组织数据传输的过程.所谓流水线调度,就是将数据传输路径上的节点按接收数据的先后次序排列,并按这个次序重新分配节点唤醒的时刻为  $\{t_1, t_2, t_3, \dots\}$ ,使得这些节点依次醒来,数据传输无须额外的等待.这种调度类似于工厂流水线作业中,一个任务完成后马上又进行下一个任务的流程,因此而得名.再以上例作为说明:流水线调度可以使节点 A 在  $t_1$  醒来,节点 B 在时刻  $t_2$  醒来,节点 C 在  $t_3$  醒来,这样 A 在  $t_1$  接收到数据后,就能在  $t_2$  发送给 B,而 B 可以在  $t_3$  发送给 C.这样,正向数据传输 A→B→C 的延迟可以减少到 2 个时间单元,如图 1(b)所示.

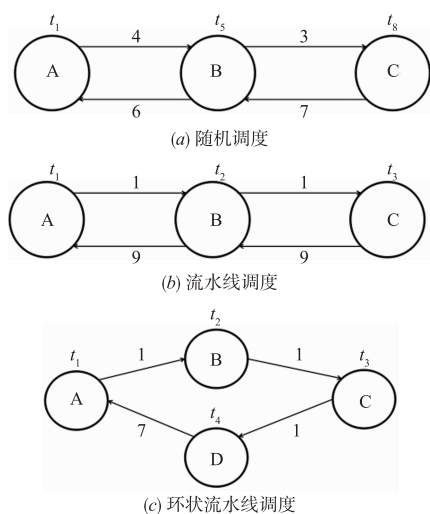


图1 节点唤醒/睡眠调度示意图

但是,以上的流水线调度主要考虑单向的数据发送,并不适合双向的数据查询(如:节点 A 向节点 C 查询其状态,而节点 C 在收到查询请求后,将状态信息返回节点 A).在上例中:虽然正向数据传输 A→B→C 可以在 2 个时间单元内完成,但是当查询结果返回时,反向数据传输 C→B→A 则需要耗费 18 个时间单元.整个双程查询需要花费的总时间为 20 个时间单元,这与节点没有被调度前的结果是一样的.

为了解决这个问题,最近有工作提出了环状流水线调度,通过寻找一条环状短路径来进行双向的数据查询.如:形成 A→B→C→D→A 的环,A 在  $t_1$  醒来,B 在  $t_2$  醒来,C 在  $t_3$  醒来,D 在  $t_4$  醒来,这样整个数据查询可以在 10 个时间单元就能完成,如图 1(c)所示.

但是,寻找包含指定的 2 个节点(查询的发起点和目标点)的最短环状路径,是一个组合优化问题,并不容易

解决.已有的工作主要采用集中式算法来求解,要求网络中有 1 个节点负责收集整个网络的拓扑信息来进行计算,容易导致单点失效(即:该节点失效则导致整个网络失效),可扩展性不强.此外,已有的工作没有考虑环状路径上节点的能量水平,容易导致低能量的节点在数据查询过程中耗尽能量死亡而导致路径断裂.

在本文,我们提出一个分布式的环状流水线调度算法 DCPS(Distributed Circular Pipeline Scheduling),节点仅需与自己的邻居进行信息交互就能完成调度.算法能使能量水平高且距离指定节点距离近的节点陆续加入路径,最后在网络中形成一条由能量水平较高的节点组成的环状短路径,进而按次序分配路径上节点的唤醒时刻,获得尽可能小的数据查询延迟.该路径上的节点可承担更多次的的数据查询任务,不容易耗尽能量而死亡.理论分析和仿真实验均表明,该算法具有较低的延迟,并且能够获得较长的网络生命周期,这里网络生命周期指网络中第一个节点耗尽能量死亡的时间.

## 2 相关工作

目前,已经有部分工作对 LDC-SN 中流水线调度进行研究.根据它们针对单向数据发送还是双向数据查询,我们将它们分为 2 类:线性流水线调度和环状流水线调度.

### 2.1 线性流水线调度

LDC-SN 中流水线调度的研究起源于面向整个网络的睡眠调度<sup>[4]</sup>.睡眠调度的主要目标是在保证网络覆盖率的前提下,尽量使更多节点能够睡眠,从而延长网络生命周期.但是,睡眠调度没有考虑 2 个节点间的传输延迟最小化.

RMAC<sup>[5]</sup>考虑到了 2 点间数据传输的最小延迟问题,提出了一个利用跨层路由信息的流水线调度方案.P-MAC<sup>[6]</sup>无需额外路由信息的支持,把网络中的所有节点按距离 Sink 的大小分成多个等级,距离越远的节点等级越高,也越早醒来.

SDSF<sup>[7]</sup>,RMPS<sup>[3]</sup>和 OPS<sup>[2]</sup>考虑了不可靠通信对数据传输延迟的影响,节点优先传输数据给链路质量高的接收节点.

GCKN<sup>[8]</sup>考虑节点移动对 LDC-SN 的影响,提出了针对地理路由的流水线调度算法.DC-MAC<sup>[9]</sup>是专门针对线型传感器网络的流水线调度算法.所谓线型传感器网络,就是网络拓扑呈现出线性形状的网络,比如:部署在火车、输油管道、高速公路等线型场所上的网络.

MobiBone<sup>[10]</sup>针对利用移动 Sink 采集数据的静态无线传感器网络,设计了一个自适应的调度算法来使得静态网络中的节点可以调整自己的唤醒时刻,从而快速地把数据传送到移动 Sink 即将经过的停留点.当移动 Sink

到达停留点时,不必等待就能采集到网络中静态节点的数据.

## 2.2 环状流水线调度

CP<sup>[11]</sup>是第一个针对双向查询进行优化的方案,属于集中式算法,可扩展性不强.为了实现分布式的环状流水线调度,PDC<sup>[12]</sup>通过节点间的同步,将网络中的节点按它们到查询发起点的距离分为多个层次.但是,它并没有考虑如何构造路径上节点不重复的简单环状路径,最后的调度结果很难获得较低的延迟.

为了获得较低的延迟,ADC<sup>[13]</sup>采用了一种动态的流水线调度方案,节点可以在每个工作周期中醒来多次,根据数据传输的需要进行数据中继.但是,这样的设置在LDC-SN中很难实现,因为LDC-SN规定在每个工作周期中节点只能醒来一次.

ADCC<sup>[14]</sup>则从保存节点能量的角度来调度节点的占空比.节点可以根据自己的能量水平,分布式地调整自己的睡眠和唤醒的时刻.

## 3 系统模型

假设有网络中有 $n$ 个节点,它们随机散布在一个 $M * M$ 的正方形区域.节点的通信半径为 $r$ ,网络保持连通.如果2个节点 $v_i$ 和 $v_j$ 之间的欧氏距离小于或等于 $r$ ,则他们之间存在一条通信边 $(v_i, v_j)$ .所有节点组成的网络可以映射为一个无向图 $G(V, E)$ ,其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为节点的集合, $E$ 为节点间通信边的集合.为了简化算法的设计,假设网络中节点的密度足以保证任意两个节点间存在不相交的环状路径<sup>[15]</sup>.对于稀疏的网络,我们的算法可以通过考虑特例的情况来满足实现的需要.

节点以周期 $T$ 循环工作, $T$ 由 $m$ 个时间单元 $\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 构成.节点只能在其中1个时间单元中唤醒(称为规定唤醒时间),而在其他时间则进入睡眠状态.网络中的节点采取异步工作模式,不需要严格的全局同步,但是它们可以与自己的邻居取得局部同步.每个节点均可以知道邻居节点唤醒的时间,并可以在邻居节点唤醒时同时醒来传送数据给邻居.但是,每个节点只能在自己的规定唤醒时间内接收数据包.

## 4 算法设计

### 4.1 基本思想

首先,以查询的发起点 $v_s$ 为中心,将网络中的节点分为若干层次,距离 $v_s$ 越近的节点层次越小,反之亦然.然后,利用节点的层次关系,建立 $v_s$ 到目标点 $v_e$ 再返回 $v_s$ 的尽可能短环状查询路径.在建立路径过程中,总是挑选能量水平最高且未在路径上的节点加入路径,形成简单环状路径.最后,以 $v_s$ 为起点对该路径上的节点进行流水线调度.

### 4.2 算法设计

算法采用完全分布式的实现,通过节点间的连续异步协作来完成.但是,为了更清晰地描述我们的算法,我们将其分为3个步骤(网络分层、环状路径构建和流水线调度),分别进行描述.

#### 4.2.1 网络分层

在这一步骤中,将以查询的发起点 $v_s$ 为中心,将网络中的节点分为若干层次.通过这些层次,每个节点可以知道自己到 $v_s$ 的最小距离.算法首先初始化一些节点参数.其中, $v_i$ .wakeup = 0表明节点当前没有决定自己的唤醒时刻; $v_i$ .level =  $\infty$ 表明节点当前没有决定自己的层次.当一个查询需要发起时,源节点 $v_s$ 将自己的层次 $L_s$ 设为0,然后广播一个查询消息Query( $v_s, L_s, v_e$ ).当任意节点 $v_i$ 接收到一个消息Query( $v_j, L_j, v_e$ )时,它们将判断自己的层次是否大于 $L_j + 1$ .如果是,则说明 $v_i$ 通过 $v_j$ 能以更少跳数到达 $v_s$ ,因此 $v_i$ 将自己的层次 $L_i$ 设为 $L_j + 1$ ,然后再广播一个新的消息Query( $v_i, L_i, v_e$ ).此过程一直持续,直至所有节点获知自己的层次.

#### 4.2.2 环状路径构建

在这一步骤中,查询的目标点 $v_e$ 将发起一个过程,构建2条通向 $v_s$ 的不相交且尽可能短的路径.在构建过程中,能量水平高的节点,将优先被考虑加入路径.

查询的目标节点 $v_e$ 首先在自己邻居中选择2个层次更小且能量最高的节点 $v_m$ 和 $v_n$ .由于 $v_e$ 只需要接收前驱节点发送来的数据量较小的查询信息,而要发送数据量较大的查询结果给自己的后继节点,因此它将能量最高的 $v_m$ 作为后继,而能量次之的 $v_n$ 作为前驱.接着, $v_e$ 广播一个消息inpath( $v_i, v_i$ .Successor,  $v_i$ .Predecessor)通知 $v_m$ 和 $v_n$ .当任意节点 $v_i$ 收到一个inpath( $v_j, v_x, v_y$ )消息,首先筛选出层次比 $v_j$ 还要低的邻居集合 $Q$ ,作为候选的前驱或后继. $v_i$ 将 $Q$ 中的节点按能量水平高低以降序排列.如果 $v_j, v_x, v_y$ 是 $v_i$ 的邻居但不是 $v_s$ ,且 $Q$ 内的节点数量 $|Q|$ 大于1个,则把 $v_j, v_x$ 或 $v_y$ 从 $Q$ 中删除.这样可以尽可能保证 $v_i$ 随后不要选择已经在路径上的节点作为它的前驱或后继,减少环状路径上的节点重复率.如果 $|Q| = 1$ 则无法删除,这是因为删除 $Q$ 中唯一的节点,将导致 $v_i$ 没有任何前驱或后继节点可以选择.

如果 $v_i = v_x$ ,说明 $v_i$ 是 $v_j$ 的后继节点,则 $v_i$ 继续选择层次更低且能量最高的邻居作为后继.如果 $v_i$ 是路径上的重复节点,则它可能会有2个后继:一个是往层次更低的方向传输的后继,一个是往层次更高的方向传输的后继.因此,需要把这2个后继都记录下来.选择完成后,继续广播inpath消息.如果 $v_i = v_y$ ,说明 $v_i$ 是 $v_j$ 的前驱, $v_j$ 是 $v_i$ 的后继. $v_i$ 首先等待 $\Delta$ 秒,目的是不跟另一路选择后继的节点冲突.然后, $v_i$ 选择当前层

次更低且能量最高的邻居作为前驱. 选择完成后, 继续广播 inpath 消息. 这一过程一直持续, 直至最后  $v_s$  被加入路径.

#### 4.2.3 流水线调度

在上面步骤中, 环状路径上的每个节点均记录了自己的后继. 因此, 从  $v_s$  开始, 逐个连续分配唤醒的时刻. 环状路径构建完毕后,  $v_s$  将自己的唤醒时间设为 1, 然后广播一个消息  $\text{duty cycle}(v_s, \text{Successor}, v_s, \text{wakeup})$  通知自己的后继节点. 如果一个任意的节点  $v_i$  接收到前驱发来的  $\text{duty cycle}(v_i, v_i, \text{wakeup})$  消息, 则判断自己是否已经设置了唤醒时刻. 如果是, 则说明自己是路径上一个重复节点, 不再设置新的唤醒时刻. 如果否, 则设自己唤醒的时刻为  $v_i, \text{wakeup} = (v_i, \text{wakeup} + 1) \bmod T$ . 然后, 继续广播一个消息  $\text{duty cycle}(v_i, \text{Successor}, v_i, \text{wakeup})$  通知自己的后继节点. 这一过程一直持续, 直至最后  $v_s$  接收到  $\text{duty cycle}(v_s, v_j, \text{wakeup})$  消息. 这说明整个路径上的节点均分配了唤醒时刻, 算法结束.

## 5 仿真实验

选择典型的线性流水线调度算法 RMPS、OPS 和环状流水线调度算法 CP、PDC、ADCC 来与我们的算法进行对比.

### 5.1 查询延迟

我们分别在  $n = 100, 200, 300, 400$  和  $500$  的节点规模中测试算法的延迟性能, 结果如图 2 所示.

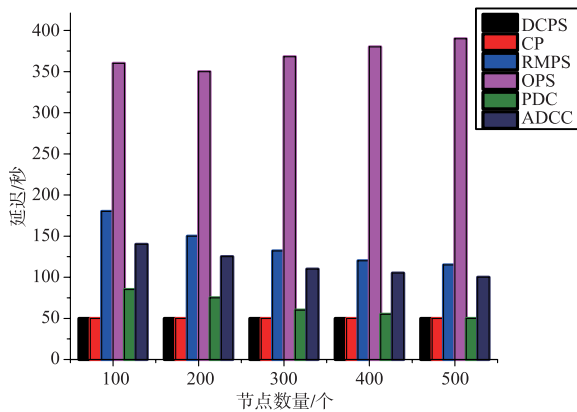


图2 查询延迟

从图 2 可以看到, DCPS 获得了较小的延迟. 这是因为它构造出了简单环状查询路径, 再通过流水线调度就能获得优化的结果.

### 5.2 网络生命周期

我们分别在  $n = 100, 200, 300, 400$  和  $500$  的网络中测试算法的网络生命周期, 结果如图 3 所示.

从图 3 可以看到, DCPS 获得了比其他算法更高的网络生命周期. 这是因为, DCPS 在构建查询路径时, 优先挑选能量水平高的节点加入, 因此路径上的节点能

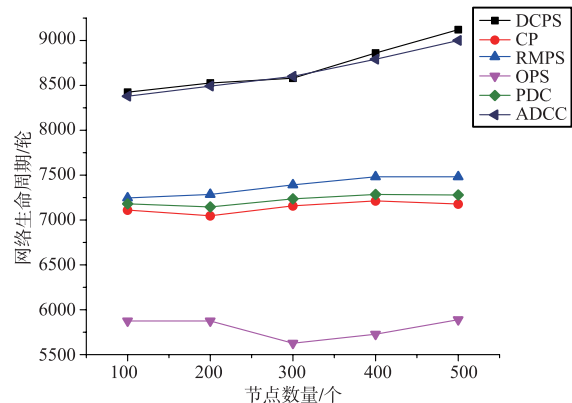


图3 网络生命周期

承担更多次的查询.

## 6 总结

在本文, 针对低占空比传感网, 研究如何降低双向数据查询的延迟. 提出了一个分布式的环状流水线调度算法, 能够选择能量水平较高的节点组成一条长度尽可能短的查询路径, 然后对路径上的节点进行流水线调度. 分析表明, 算法不仅能快速完成数据查询, 而且具有较长的网络生命周期.

### 参考文献

- [1] 郭黎利, 高飞, 孙志国. 无线传感器网络中基于多比特量化的极大似然分布式估计方法. 电子学报, 2016, 44(11): 2773-2779.  
GUO Li-li, GAO Fei, SUN Zhi-guo. Multi-level quantization scheme for distributed maximum likelihood estimation in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(11): 2773-2779. (in Chinese)
- [2] Peng Guo, Nirvana Meratnia, Paul J M Havinga, Hongbo Jiang, Kui Zhang. OPS: Opportunistic pipeline scheduling in long-strip wireless sensor networks with unreliable links [J]. Wireless Networks, 2015, 21(5): 1669-1682.
- [3] Yongle Cao, Shuo Guo, Tian He. Robust multi-pipeline scheduling in low-duty-cycle wireless sensor networks [A]. 31st IEEE International Conference on Computer Communications [C]. Piscataway: IEEE Press, 2012. 361-369.
- [4] Qing Cao, Tarek Abdelzaher, Tian He, John Stankovic. Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection [A]. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks [C]. New York: ACM Press, 2005. 20-27.
- [5] Shu Du, Amit Kumar Saha, David B Johnson. RMAC: A routing-enhanced duty-cycle MAC protocol for wireless sensor networks [A]. 26th IEEE International Conference

- on Computer Communications [ C ]. Piscataway: IEEE Press, 2007. 1478 – 1486.
- [6] Fei Tong, Wan Tang, Rong Xie, Lei Shu, et al. P-MAC: A cross-layer duty cycle MAC protocol towards pipelining for wireless sensor networks [ A ]. 2011 IEEE International Conference on Communications [ C ]. Piscataway: IEEE Press, 2011. 1 – 5.
- [7] Yu Gu, Tian He. Dynamic switching-based data forwarding for low-duty-cycle wireless sensor networks [ J ]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10 ( 12 ): 1741 – 1754.
- [8] Chunsheng Zhu, Laurence T Yang, et al. Sleep scheduling for geographic routing in duty-cycled mobile sensor networks [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 ( 11 ): 6346 – 6355.
- [9] Fei Tong, Lei Zheng, Maryam Ahmadi, Mingming Ni, Jianping Pan. Modeling and analyzing duty-cycling pipelined-scheduling MAC for linear sensor networks [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65 ( 4 ): 2608 – 2620.
- [10] Kui Zhang, Eyuel D Ayele, Nirvana Meratnia, Paul J M Havinga, Peng Guo, Youxin Wu. MobiBone: An energy-efficient and adaptive network protocol to support short rendezvous between static and mobile wireless sensor nodes [ A ]. 2017 International Conference on Computing, Networking and Communications [ C ]. Piscataway: IEEE Press, 2017. 1 – 7.
- [11] Jia Li, Song Min Kim, Tian He. Circular pipelining: Minimizing round-trip delay in low-duty-cycle wireless networks [ A ]. 2014 IEEE 22nd International Conference on Network Protocols [ C ]. Piscataway: IEEE Press, 2014. 421 – 432.
- [12] Fei Tong, Ruonan Zhang, Jianping Pan. One handshake can achieve more: An energy-efficient, practical pipelined data collection for duty-cycled sensor networks [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16 ( 9 ): 3308 – 3322.
- [13] Fei Tong, Jianping Pan. ADC: An adaptive data collection protocol with free addressing and dynamic duty-cycling for sensor networks [ J ]. Mobile Networks and Applications, 2017, 12 ( 4 ): 1 – 12.
- [14] Zhuangbin Chen, Anfeng Li, Zhetao Li, Young-june Choi, Jie Li. Distributed duty cycle control for delay improvement in wireless sensor networks [ J ]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2017, 10 ( 3 ): 559 – 578.
- [15] Long Cheng, Yu Gu, Tian He, Jianwei Niu. Dynamic switching-based reliable flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks [ A ]. 32nd IEEE International Conference on Computer Communications [ C ]. Piscataway: IEEE Press, 2013. 1393 – 1401.

#### 作者简介



蒋 婵 女, 1980 年生于广西合浦. 博士研究生, 研究方向为无线传感器网络.  
E-mail: jiangchan@gxu.edu.cn



李陶深 男, 1957 年生于广西南宁. 博士, 教授, 研究方向为分布式系统、无线网络.