

无线传感器网络贪婪转发策略中的路由空洞问题

田乐 谢东亮 任彪 张雷 程时端

(北京邮电大学网络与交换国家重点实验室宽带网研究中心 北京 100876)

摘要: 贪婪转发策略是无线传感器网络中基于地理位置的路由算法中非常重要的一种,但是该算法会遭遇到路由空洞问题。该文从理论上分析了路由空洞在规则部署和随机部署情况下的存在概率,并得出了随机部署情况下随机建立的路径会遭遇到路由空洞的概率。通过分析可以得出,当网络中节点的平均邻居数大于 10 时,利用带有退避改进方法的贪婪转发策略足以满足无线传感器网络的需要。

关键词: 无线传感器网络; 贪婪转发; 路由空洞; 退避

中图分类号: TP393.02

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2996-05

Routing Void Problem of Greedy Forwarding Strategy in Wireless Sensor Networks

Tian Le Xie Dong-liang Ren Biao Zhang Lei Cheng Shi-duan

(Broadband Network Research Center, State Key Lab of Networking and Switching, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Greedy Forwarding (GF) is an important routing strategy among those routing protocols based on location information in Wireless Sensor Networks (WSN). But there is routing void problem while using greedy forwarding. This paper deduces the probability of a node to be a routing void node theoretically within deterministic deployment and random deployment WSNs, and get the probability of encountering the routing void node while setting up a path randomly. From the analysis the conclusion can be come that when the average number of neighbors is greater than 10, the modified GF algorithm with backoff method is good enough to meet the requirement of WSN applications.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Greedy Forwarding (GF); Routing Void; Backoff method

1 引言

在无线传感器网络中,由于应用的需要,节点大部分情况下可以通过定位算法^[1-4]得到自己的物理位置。因此,基于地理位置的路由策略在无线传感器网络中得到了大量的研究,而其中贪婪转发(Greedy Forwarding, GF)算法更是由于它的简单性和高效率而获得了人们的重视。GF算法中每个节点都知道自己的邻居节点的位置信息,当有数据包需要该节点转发时,它从所有的邻居中选取一个距离目标节点,或者sink最近的节点,然后把数据包转发给它。这个过程将一直持续下去,直到数据包最后到达sink为止。

由于 GF 算法只需要节点维护邻居节点的位置信息(这可以通过节点之间周期性相互交换 HELLO 信息包来实现),不需要节点维护庞大复杂的路由信息,同时节点选路时,也不需要做一些复杂的路由查询,因此这种算法简单易行,十分适合应用于节点的运算能力和存储能力都十分有限,并且因为节点周期性休眠而造成网络拓扑变化剧烈的传感器网

络领域。但是,这种算法也有一个缺点,那就是在数据包的转发过程中会遭遇到路由空洞节点的问题。所谓路由空洞节点指那些所有的邻居距离 sink 的距离都比自己远的节点。此时,该节点将找不到合适的下一跳节点转发数据,路由建立过程将被中断。

为了避免GF算法中的路由空洞问题,人们提出了很多种改进的算法^[5-9],这些算法可以称为面路由协议,即网络中的节点根据连通情况建立一个平面连通图,可以是一个 RNG图^[10]或GG图^[11],当数据包到达路由空洞时,该节点根据右手法则,沿着包容该空洞地区的一个平面图的圆周转发分组,直到到达目的地或者可以重新开始执行GF算法。该算法可以保证每次都能成功建立一条到达sink的路径,但是由于需要计算和存储平面图信息,该算法比较复杂。

与前人的工作不同的是,本文没有试图提出一种新的路由空洞避免机制。本文尝试解决两个以前人们没有注意到的问题:(1)在一个随机部署的网络中,到底存在多少个路由空洞节点,(2)路由空洞节点对传感器网络的性能到底有多大的影响。本文首先分析在一个网格状部署的网络中,存在路由空洞问题的概率为零,然后分析了在一个随机部署的网络中,路由空洞问题出现的概率,和路由空洞问题对网络采用

2006-05-16 收到, 2006-10-16 改回

CGNI 项目,北京市重点学科项目,国家自然科学基金和新世纪优秀人才计划基金资助课题

GF 算法的影响。通过推导发现, 在一个平均邻居数大于 10 的网络中, 路由空洞对网络的影响是很小的, 带有退避改进的 GF 算法成功建立一跳通向 sink 的路径大于 95%, 而这对大多数无线传感器网络的应用来说已经足够了。

2 相关工作

基于位置的路由算法需要节点定位算法的支持^[1-4], 节点的定位在无线网络中是一个很重要的研究课题。为每个节点配备 GPS 接收器是一种最简单的方法, 但是这样会增加节点的成本, 并且 GPS 信号容易收到天气和地形的影响。在大部分的定位算法中, 只有锚节点配备有 GPS 信号接收器, 其余节点根据自己与锚节点之间的相对位置计算出自己的物理位置, 相对位置信息可以根据 TOA, TDOA, RSSI 和超声波等手段获得。

面路由协议^[5-9]是一种专门为了解决路由空洞问题而提出的 GF 路由协议, GPSR^[5]是其中的代表。为了解决路由空洞, GPSR 算法需要根据邻居信息计算出一个平面连接图, 如 RNG 图或 GG 图等, 当数据包到达路由空洞节点时, 该节点根据右手法则选取平面上最靠近该节点和 sink 的连线的路径, 然后通过这条路径把数据包转发出去, 重复这种步骤直到数据包到达 sink 或可以重新运行 GF 算法的节点为止。这种算法虽然可以保证找到一条数据源节点和 sink 之间的路径, 但是算法比较复杂, 对节点的运算能力和存贮能力要求较高。

Xing 等^[12]证明了当节点的通信半径和感知半径之比大于 2, 并且整个区域被节点完全感知的时候, GF 算法可以保证在任意的源节点和 sink 之间建立一条转发路径, 并且作者提出了一种新的贪婪算法, 以减少每条路径的平均跳数。本文考虑更一般的部署情况, 并且得出类似的结论。

3 系统模型

本节将分别讨论在网格状部署的网络, 和随机部署的网络中, 存在路由空洞节点的概率, 以及按照 GF 算法建立路径时, 遭遇到路由空洞节点的概率。首先定义节点的邻居集和路由空洞问题。

定义 1 设节点的传输半径为 R , 则节点的邻居集指那些在二维平面上与节点的距离小于 R 的所有节点的集合。

对节点 O 来说, 如果用 $Nr(O)$ 表示节点 O 的邻居集, 则
$$Nr(O) = \{v \mid \text{distance}(v, O) < R\}$$

定义 2 GF 算法中的路由空洞节点, 指那些位于转发路径上的节点, 它的所有邻居集中的节点与 sink 的距离, 都大于该节点本身与 sink 的距离, 从而造成数据包因为找不到下一跳节点而无法转发。如图 1 所示, 节点 O 是路由空洞, 当且仅当:

$$\text{distance}(v, \text{sink}) > \text{distance}(O, \text{sink}), \quad v \in Nr(O)$$

3.1 网格状网络

首先考虑规则的网格状网络拓扑模型。先考虑如图 2

所示的一个最简单的网络拓扑, 在该拓扑中, 每个节点具有四个邻居。本文将证明, 在该拓扑中不存在路由空洞问题。

定理 1 在图 2 所示网格状拓扑中, 不存在 GF 算法中的路由空洞节点问题。

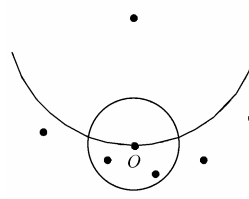


图 1 一个路由空洞节点

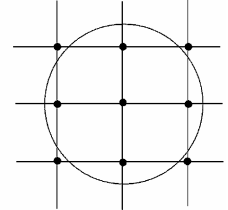


图 2 网格状拓扑

证明 如图 3 所示, O 为网络中任一节点, D 为 sink 节点, O 的覆盖半径为 R , 以 D 为圆心, 以 OD 之间的距离 l 为半径的圆与节点 O 的覆盖范围相交与 AB 两点, 和直线 OD 相交于 X 点。如果节点 O 是路由空洞节点, 那么在扇型区域 $OBXA$ 中必须没有任何邻居节点。由于 $\angle BOA = 2\arccos(R/2l)$, 并且 $l > R$, 所以 $\angle BOA$ 永远大于 $2\pi/3$ 才有可能造成节点 O 是路由空洞节点。但是在图 3 所示的拓扑中, 两个相邻的邻居节点与节点 O 之间的夹角为 $\pi/2$, 这样将永远不可能出现扇型区域 $OBXA$ 不存在邻居节点的情况, 所以节点 O 不可能是路由空洞, 命题得证。

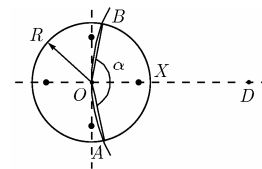


图 3 节点 O 在风格状拓扑中的邻居

推论 1 在规则部署的二维网络拓扑中, 每个节点最少需要有三个邻居节点才可以避免路由空洞问题。

3.2 随机部署的网络拓扑

随机部署的网络拓扑将更为复杂, 为了简便起见, 假设节点的部署服从均匀分布, 其他类型的分布也可以采用相似的分析方法。假设节点的覆盖半径为 R , 每个节点平均有 \hat{N} 个邻居。首先, 本文推断一个节点成为路由空洞的概率。

定理 2 具有 \hat{N} 个邻居的节点成为路由空洞的概率为

$$p_r = \left(\left(\frac{\pi R^2}{2} - R^2 \arcsin \frac{R}{2l} + 2l^2 \arcsin \frac{R}{2l} - \frac{1}{4} r \sqrt{2l^2 - R^2} \right) / \pi R^2 \right)^{\hat{N}} \approx \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R}{2l} \right)^{\hat{N}} \quad (1)$$

其中 R 为节点 O 的覆盖半径, l 为节点 O 和 sink 之间的距离。

证明 如图 4 所示, 如果 O 为路由空洞, 那么它的所有

居都位于区域 $BXAO$ 内, 区域 $BXAO$ 的面积为 $\frac{\pi r^2}{2} - r^2 \arcsin \frac{r}{2l} + 2l^2 \arcsin \frac{r}{2l} - \frac{1}{4} r \sqrt{2l^2 - r^2}$, 因此一个节点位

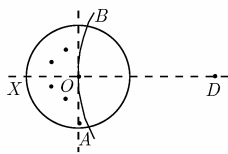


图 4 节点 O 为一个路由空洞时的邻居分布

于区域 $BXAO$ 的概率为 $\left(\left(\frac{\pi r^2}{2} - r^2 \arcsin \frac{r}{2l} + 2l^2 \arcsin \frac{r}{2l} - \frac{1}{4} r \sqrt{2l^2 - r^2} \right) / \pi R^2 \right)^{\hat{N}}$, 而所有 \hat{N} 个邻居都位于区域 $BXAO$ 的概率为

$$p_r = \left(\left(\frac{\pi R^2}{2} - R^2 \arcsin \frac{R}{2l} + 2l^2 \arcsin \frac{R}{2l} - \frac{1}{4} r \sqrt{2l^2 - R^2} \right) / \pi R^2 \right)^{\hat{N}} \approx \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R}{2l} \right)^{\hat{N}}$$

推论 2 具有 \hat{N} 个邻居的节点 O 成为路由空洞的概率的上下限为 $(1/3)^{\hat{N}} < P_r < (1/2)^{\hat{N}}$

证明 由式(1)得知, 当节点 O 与 sink 之间的距离 l 趋于 R 时, 这时将得到节点 O 成为路由空洞的概率的最小值 $(1/3)^{\hat{N}}$, l 趋于无穷大时, 得到概率的最大值 $(1/2)^{\hat{N}}$, 命题得证。

由式(1)可以看出, 一个节点成为路由空洞的概率是它的邻居数和距 sink 的距离的函数, 当节点部署在一个无穷大的区域时, 它成为一个路由空洞的概率为 $(1/2)^{\hat{N}}$ 。下面, 本文将考虑如果节点部署在一个矩形区域内时的概率分布情况。

定理 3 在一个 $a \times b$ ($a > b$) 的矩形区域内, 节点按照均匀分布的方式随机部署, 那么任一节点 O 成为路由空洞的概率为

$$p_r \approx \int \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R}{2l} \right)^{\hat{N}} f(l) dl \quad (2)$$

其中

$$f(l) = \begin{cases} \frac{4l}{a^2 b^2} \left(\frac{\pi}{2} ab - al - bl + \frac{1}{2} l^2 \right), & 0 \leq l < b \\ \frac{4l}{a^2 b^2} \left(ab \arcsin \frac{b}{l} - al + a \sqrt{l^2 - b^2} - \frac{1}{2} b^2 \right), & b \leq l < a \\ \frac{4l}{a^2 b^2} \left(ab \arcsin \frac{a}{l} + a \sqrt{l^2 - b^2} - \frac{1}{2} b^2 - ab \cos \frac{a}{l} + b \sqrt{l^2 - a^2} - \frac{1}{2} a^2 - \frac{1}{2} l^2 \right), & a \leq l < \sqrt{a^2 + b^2} \end{cases}$$

为节点与 sink 之间的距离 l 的分布函数。

证明 文献[13]得出了在一个矩形区域内一个随机游走的点游走距离的分布函数 $f(l)$, 这个函数同样可以认为是矩形区域内两个随机选择的点之间的距离的分布函数。因此根据函数 $f(l)$, 再根据条件概率分布公式, 我们可以得出式(2),

命题得证。

由式(2)可以看出, 节点成为路由空洞的概率随着邻居数 \hat{N} 的增大而减小, 同时也随着部署区域的增大而减小。图 5 是我们根据仿真得到的概率曲线图。图中节点的通信半径为 30m, 节点部署在一个 $500 \times 500 m^2$ 的区域内, 节点的平均邻居数从 7 增加到 20。图 6 中节点的通信半径仍为 30m, 节点的平均邻居数为 10, 节点的部署区域为正方形, 边长从 100m 增加到 1000m。可以看出, 概率随网络的规模变大而逐步变大, 但是增大的趋势并不明显, 随平均邻居数的增加而减小, 并且减小剧烈。总体来说, 节点成为路由空洞节点的概率是非常小的。

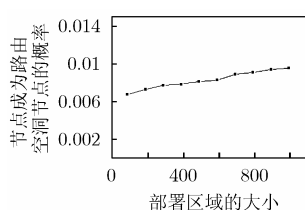


图 5 概率随网络规模的变化图

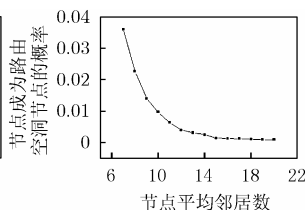


图 6 概率随平均邻居数的变化

定理 4 一条随机选择的两点间依据 GF 算法建立的路径会遭遇到路由空洞的概率为

$$p_{\text{path}} = (1 - p_r)^{\hat{H}} \quad (3)$$

其中 $\hat{H} = \left| \frac{(2\hat{N} + 1) \int lf(l)dl}{2\hat{N}R} \right|$ 为路径的平均跳数。

证明 如图 7 所示, 节点 O 有 \hat{N} 个邻居, 其中离 O 最远的邻居的距离为 r 的概率为 $\hat{N} \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \frac{2\pi r dr}{\pi R^2}$, 所以节点 O 的最远邻居和自己之间的距离的均值 $\hat{d} = \hat{N} \int_0^R \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \frac{2\pi r dr}{\pi R^2} =$

$\frac{2\hat{N}R}{2\hat{N} + 1}$, 这样, 一条路径平均经过的节点数为

$\hat{H} = \left| \frac{(2\hat{N} + 1) \int lf(l)dl}{2\hat{N}R} \right|$, 其中 $\int lf(l)dl$ 表示从源节点到 sink

建立一条路径的平均长度, 因此可以成功建立这么一条不会遭遇到路由空洞的路径的概率为 $p_{\text{path}} = (1 - p_r)^{\hat{H}}$ 。

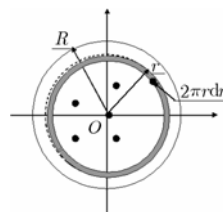


图 7 节点 O 的最远邻居

图 8 是用仿真得到的在一个正方形区域内任意两点间用

GF 算法成功建立一条路径的概率, 其中平均节点密度从 7 增加到 20, 部署区域的边长分别为 100m 到 500m, 从中可以看出, 可以成功建立一条路径的概率随着部署区域的扩大而降低, 但是当节点密度大于 12 时, 可以成功建立路径的概率大于 90%。

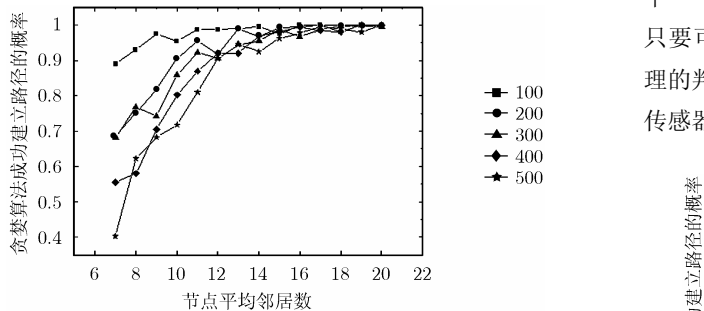


图 8 GF 算法中路径遭遇路由空洞的概率

4 GF 算法的退避改进

为了增加网络利用 GF 算法成功建立路径的概率, 同时不增加算法的运算复杂度和存储复杂度, 本文对 GF 算法做了一些简单的改进。改进算法的基本思想是把路由空洞节点从它的邻居节点的邻居集里删除, 这样将不会再有数据包被转发到路由空洞节点。

数据包的包头包括源节点网络地址和物理地址, 目标节点网络地址和物理地址, 以及本节点是否为路由空洞节点的标志位。标志位用于向父节点和邻居节点通知自己的状态。

改进算法的规则如下:

(1)首先, 网络中的节点通过交换 HELLO 信息包获得所有的邻居信息, 并把它们存贮在基本邻居信息表里, 这一步是所有 GF 算法的基础。

(2)当中间节点收到父节点转发过来的数据包时, 它首先检查自己是否有目的节点为这个 sink 的专有邻居信息表, 如果没有, 节点把基本邻居信息表做一个拷贝, 作为这个 sink 的专有邻居信息表。然后, 该节点从 sink 的专有邻居信息表里取一个距离 sink 最近的邻居节点, 把数据包转发给它。

(3)如果该节点找不到合适的下一跳节点, 那么它就是一个路由空洞。此时该节点简单地把数据包回送给自己的父节点, 同时, 用捎带的方式通知父节点自己是位于通向该 sink 的路径上的空洞节点。父节点在收到回送回来的数据包后, 把该子节点从这个 sink 的专有邻居集里删除, 然后从专有邻居集里选取另外一个下一跳节点。如果删除掉该子节点后, 父节点也变成了一个路由空洞节点, 那么它将继续执行退避的步骤。

(4)路由空洞节点的邻居监听到它回送数据包的捎带信息后, 同时将该节点从自己的该 sink 的专有邻居集里删除。这样, 当有其他的指向该 sink 的数据流经过空洞节点的邻居时, 数据包将不会被转发到这个空洞节点。

(5)如果源节点本身是一个位于指向该 sink 的路径上的空洞节点, 那么它随机的从自己对应该 sink 的专有邻居集中

选取一个邻居作为下一跳节点, 并把数据包转发给它。

图 9 是利用改进的 GF 算法仿真得出的路径成功建立概率。从中可以看出, 该改进算法在节点密度大于 10 时路径的建立成功率可以达到 95%以上, 大于 12 时基本在 100%左右。我们认为, 在以监视检测等应用为主的无线传感器网络中^[14-16], 并不需要 sink 可以成功获得节点的每一个数据包, 只要可以得到一定百分比的源数据就足够最终用户做出合理的判断了, 所以, 这个简单的改进算法完全足以满足无线传感器网络的需要, 并且保持了 GF 算法的简单性和鲁棒性。

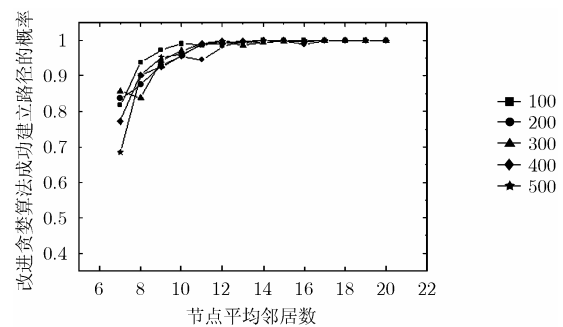


图 9 改进的 GF 算法中路径遭遇路由空洞的概率

5 结束语

路由空洞问题是基于地理位置的贪婪转发算法中的一个难题, 人们为解决这个问题提出了许多种改进策略。本文从理论上分析了路由空洞在一个随机部署的网络中的存在概率, 和数据包在转发过程中会遭遇到路由空洞的几率。我们发现路由空洞问题在一个平均邻居数大于 12 的网络中对路由的影响微乎其微, 而在一个平均邻居数大于 10 的网络中, 稍做改进, 增加了退避功能的贪婪转发算法就完全可以满足无线传感器网络的需求。

参考文献

- [1] Ward A, Jones A, and Hopper A. A new location technique for the active office. *IEEE Personal Communications*, 1997, 4(5): 42-47.
- [2] Savvides A, Han Chih-Chieh, and Strivastava M B. Dynamic fine-grained localization in ad hoc networks of sensors. In *Proceedings of the Seventh ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ROME, Italy, 2001: 166-179.
- [3] Bulusu N, Heidemann J, and Estrin D. Gps-less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2000, 7(5): 28-34.
- [4] Priyantha N B, Chakraborty A, and Balakrishnan H. The cricket location-support system. In *Proceedings of the ACM Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, MA, 2000: 32-43.

- [5] Karp B and Kung H T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless networks. In Proceedings of the Sixth ACM Annual International Conference on Computing and Networking, Boston, MA, 2000: 243-254.
- [6] Bose P, Morin P, and Stojmenovic I, *et al.* Routing with guaranteed delivery in Ad hoc wireless networks. In Proceedings of Discrete Algorithms and Methods for Mobility, Seattle, 1999: 48-55.
- [7] Datta S, Stojmenovic I, and Wu J. Internal node and shortcut based routing with guaranteed delivery in wireless networks. In Proc. of IEEE International Conference on Distributed Computing and Systems Workshops, Phoenix, AR, 2001: 461-466.
- [8] Kuhn F, Wattenhofer R, and Zollinger A. Worst-case optimal and average-case efficient geometric Ad-Hoc routing. In Proceedings of the Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Annapolis, Maryland, 2003: 267-278.
- [9] Kuhn F, Wattenhofer R, and Zhang Y, *et al.* Geometric Ad hoc routing: of theory and practice. In Proceedings of the 22nd ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, Boston, 2003: 63-72.
- [10] Toussaint G. The relative neighborhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition*, 1980, 12(4): 261-268.
- [11] Gabriel K and Sokal R. A new statistical approach to geographic variation analysis. *Systematic Zoology*, 1969, 18: 259-278.
- [12] Xing Guoliang, Lu Chenyang, and Pless R, *et al.* On greedy geographic routing algorithms in sensing covered networks. In Proceedings of the Tenth ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Tokyo, Japan, 2004: 31-42.
- [13] Bettstetter C, Hartenstein H, and Perez-Costa X. Stochastic properties of the random waypoint mobility model: epoch length, direction distribution, and cell change Rate. In Proceedings of the Fifth ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Atlanta, GA, 2002: 7-14.
- [14] Mainwaring A, Polastre J, and Szewczyk R, *et al.* Wireless sensor networks for habitat monitoring. In Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, GA, 2002: 88-97.
- [15] Szewczyk R, Mainwaring A, and Polastre J, *et al.* An analysis of a large scale habitat monitoring application. In Proceedings of the Third ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, MD, 2004: 214-226.
- [16] Tolle G, Turner N, and Tu K, *et al.* A macroscope in the redwoods. In Proc. of the Fourth ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, San Diego, CA, 2005: 51-63.
- 田 乐: 男, 1974 年生, 博士生, 研究领域为无线传感器网络。
- 谢东亮: 男, 1974 年生, 副教授, 主要研究领域为移动互联网服务质量控制工程、无线分组网络性能。
- 任 彪: 男, 1976 年生, 博士, 主要研究领域为无线通信网络。
- 张 雷: 男, 1971 年生, 副教授, 主要研究领域为光网络、宽带网路、无线传感器网络。
- 程时端: 女, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为 IP 网络服务质量、移动互联网性能分析、无线网络新技术、新一代互联网服务理论。