

一种适用于无线传感器网络的高效节能广播机制

赵瑞琴¹, 刘增基², 文爱军²

(1. 西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072;
2. 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对无线传感器网络结点体积小、内存与计算能力小、靠电池供电、结点密度高以及网络规模大的特点, 提出了高效广播协议 (EBP, Effective Broadcast Protocol). 通过对广播过程中一个结点转播之后其邻域内其它结点的转播, 即引发新转播的讨论, 完成了对最佳引发新转播的分析. EBP 广播协议以此为依据选择转播结点, 不需要任何邻结点信息就可以高效完成广播, 算法的控制开销和存储开销大大降低. EBP 广播机制简单有效, 在无线传感器网络中具有良好的扩展性.

关键词: 无线, 传感器网络, 广播, 转播

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 11-2457-06

An Efficient Energy-Saving Broadcast Mechanism for Wireless Sensor Networks

ZHAO Rui-qin¹, LIU Zeng-ji², WEN Ai-jun²

(1. College of Marine, Northwestern Polytechnical University; Xi'an, Shaanxi 710072, China;
2. State Key Lab of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Wireless sensor network is featured by small node size and memory, low computing capability, battery supplied energy, high node density and huge network scale. In view of the above features of wireless sensor network, an effective broadcast protocol (EBP) is presented in this paper. In the discussion on the induced rebroadcast of a node's rebroadcast, the optimized induced rebroadcast are analyzed. In EBP, optimized rebroadcast nodes are selected based on the above analysis results and each node need not any neighbor information to complete a broadcast efficiently. Thus, the control and memory overheads are reduced greatly. The simple and effective EBP algorithm performs well in wireless sensor network.

Key words: wireless; sensor network; broadcast; rebroadcast

1 引言

当前先进的无线通信和微电子技术促进了无线传感器网络 (WSN, Wireless Sensor Networks) 的发展. WSN 中的结点具有体积小、成本低的特点, 它们可以完成物理量感知、信号处理以及结点间的通信, 最终将得到的数据传给网络中的其他结点. WSN 可以应用在大量的民用和军用场景下, 如目标跟踪、安全、环境监视以及系统控制等领域. 在结点能耗受限的无线传感器网络中, 节能的思想需贯穿于各层协议和算法的设计中. 在无线传感器网络中, 广播是一种必要而又频繁的行为. 一些无线传感器网络的典型应用, 如紧急情况报告、结点将自

己测得的数据与其它结点共享、以及快速在全网中寻找一条或多条到达某一目的结点的路由等, 均需要通过广播来实现. 因此设计一个适用于无线传感器网络的广播算法就成为近年来的一个研究热点.

最简单广播算法就是泛洪^[1], 所有节点在第一次收到某一广播分组后, 都将再次广播 (rebroadcast, 以下简称转播) 该分组, 这种算法简单并能保证广播的覆盖率, 但会带来严重的广播风暴^[2], 集中表现为过大的转播冗余, 以及严重的资源竞争和冲突. 为了减小转播冗余和尽量避免广播风暴, 研究人员提出了各种改进算法^[2,3], 这些算法仅考虑了广播本身, 而没有考虑节点能耗受限的特点. 现已提出的节能广播算法^[4~8]大都是

收稿日期: 2008-07-26; 修回日期: 2009-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90104012, No. 10674110); 综全业务网国家重点实验室开放课题 (No. ISN7-03)

中心式控制的,需要在每个节点处获取网络拓扑信息.另外一些算法^[5~8]通过在每个节点处维持全网拓扑信息,来计算一个最小能耗广播树,以此达到减小广播中能量消耗的目的.这种要在每个节点获取全网拓扑的中心控制算法,会给无线传感器网络带来严重的开销,为此人们提出了分布式的广播算法^[9~11].这些算法大都需要在每个节点处维持所有两跳或两跳以上的拓扑或位置信息^[9,10].有效延长网络寿命的广播机制^[12]依赖一跳邻节点的信息来完成全网广播.文献[13]提出了一种分布式的节能广播算法——传感器网络广播算法(BPS, Broadcast Protocol for Sensor Networks),为了尽量减小转播冗余, BPS 算法尽量增加一跳距离,这样一次转播就可以覆盖更多的节点.该算法利用节点的位置信息完成高效的广播,在确定节点的转播效率时仅考虑了新增覆盖面积的因素,该算法适用于节点密度均匀的网络中,对于网络中各处节点密度不一致的情形,其转播效率的估计是不准确的.

考虑到 WSN 自身的特点, WSN 中广播算法应遵循以下设计原则:

(1) 扩展性,扩展性对于大规模高密度网络是一项非常重要的指标,广播算法的性能不能随网络规模或节点密度的增加而恶化.

(2) 节能,算法的节能设计考虑对于一个 WSN 来讲是很必要的.对于广播算法来讲,节能就是要尽可能的减小发送次数.

(3) 存储复杂性,传感器节点的内存一般都比较小,为此一个算法对节点存储量的要求应尽量的小.

(4) 计算复杂度,传感器节点的计算能力比较弱,为此我们希望算法应尽可能的简单.

本文依据上述设计原则为 WSN 提出了一种高效的广播算法(EBP, Efficient Broadcast Protocol),该算法基于自适应的位置策略,大大减小了广播中的冗余转播和通信开销.

2 一次转播引发新转播的分析

首先给出广播过程中的一些符号定义:

S : 在网络中触发广播的结点;

r : 一个结点覆盖范围的半径;

P_S : 结点 S 向网络中广播的分组,称为广播分组;

$U(i)$: 结点 i 的上一跳转播结点,该结点对广播分组 P_S 进行转播后,其邻结点 i 收到了该广播分组;

n : 引发新转播次数.是指结点对 P_S 进行转播之后,因收到来自该结点的 P_S 后再次对其进行转播的邻结点的个数;

$I_j(i)$: 引发新转播结点.是指在结点 i 对 P_S 进行转

播的条件下,因收到来自该结点的 P_S 后再次对其进行转播的一个邻结点,其中 $j = 1, 2, 3, \dots, n$.

$R(i)$: 邻域广播覆盖区域.是指结点 i 、其上一跳转播结点及其所有引发新转播结点的覆盖区域的并集.

对于任意转播结点 i ,从保证广播可靠性与覆盖率的意义上讲,希望尽量多的结点对广播分组进行转播,引发新转播次数 n 就会比较大,如传统泛洪广播机制中 n 值取为最大;而从减小转播冗余的角度上讲,一个结点的转播应引发尽量少的新转播,即 n 应尽量的小.

当取 $n = 1$ 时,如图 1 所示,结点 i 对广播分组 P_S 进行转发之后,除了结点 i 的上一跳转播结点 $U(i)$,仅有一个邻结点 $I_1(i)$ 对 P_S 进行了转播.可以看到,这时 $R(i)$ 的不平衡将导致低的广播可达率(Reachability),不能保证将广播分组散布给网络中所有结点.

当取 $n = 2$ 时,通过合理选取这 n 个引发新转播结点的位置^[14],可以获得平衡的邻域广播覆盖区域.按照如图 2 或图 3 所示的方式选择引发新转播结点的位置,可以看到结点 i 的邻域广播覆盖区域 $R(i)$ 是平衡的,如果网络中所有转播结点都按照这样的方式选择其引发新转播结点可以保证广播算法的可达率.

从广播效率角度上讲,希望以尽量少的转播结点去覆盖全网所有结点,因此相邻转播结点的覆盖区域之间的交叠区域应被最小化.不论 n 如何取值,邻域广播覆盖区域 $R(i)$ 面积不大于结点 i 的两跳邻域的面积 $4r^2$. n 越大, $I_1(i), I_2(i), \dots, I_n(i)$ 以及 $U(i)$ 各结点的覆盖区域的交叠面积越大,从而广播效率也就越低.图 2 和图 3 分别给出了 $n = 2$ 和 $n = 3$ 时的情形,可以看到 $n = 3$ 时被重复转播覆盖的交叠区域的面积大于 $n = 2$ 时的情形.综合考虑广播可达率和广播效率, $n = 2$ 是最佳选择.

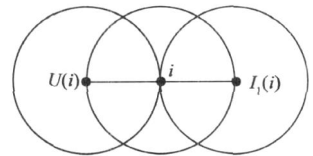


图1 每个转播结点选择一个邻结点作为新的转播结点($n=1$)

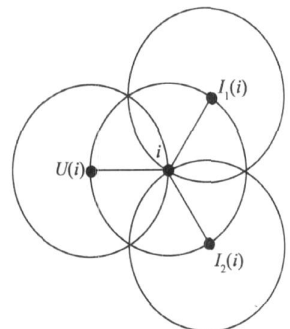


图2 每个转播结点选择两个邻结点作为新的转播结点($n=2$)

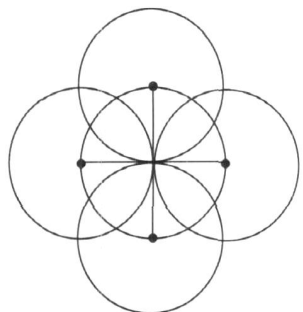


图3 每个转播结点选择三个邻结点作为新的转播结点($n=3$)

3 邻域内结点到达邻域边界的距离

一般而言,WSN 中结点在平面上是随机散布的,我们假设结点在平面上的散布服从结点密度为 λ 的泊松分布, λ 为单位面积上的结点数. 面积为 S 的区域上有 k 个结点的概率可以表示为:

$$p_k(S) = \frac{(\lambda S)^k e^{-\lambda S}}{k!}, k=0,1,2, \dots \quad (1)$$

对于如图 4 所示的一个结点 A 的覆盖范围,令 X 为该覆盖范围内所有结点到达覆盖范围边界任意位置 p 的最小距离,令 C_x 是结点 A 的覆盖区域与以 p 为中心 x 为半径的区域的交叠部分的面积,则 $p_0(C_x)$ 为在该交叠区域内没有结点的概率. 可以得到:

$$P(X > x) = 1 - p_0(C_x), \quad 0 \leq x < r \quad (2)$$

由于在结点 A 的覆盖范围内,结点 A 到任意边界位置的距离等于 r , 所有:

$$P(X > x) = 1, \quad x \geq r \quad (3)$$

又由结点到某一确定位置的距离不小于 0, 可以得到 X 的分布函数:

$$F(X) = P(X \leq x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1 - p_0(C_x), & 0 \leq x < r \\ 1, & x \geq r \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)可得:

$$p_0(C_x) = e^{-\lambda C_x} \quad (5)$$

进而:

$$F(X) = P(X \leq x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1 - e^{-\lambda C_x}, & 0 \leq x < r \\ 1, & x \geq r \end{cases} \quad (6)$$

由上式可以计算覆盖范围内所有结点到达覆盖范围边界任意位置 p 的最小距离的均值为:

$$\begin{aligned} E(X) &= \int_0^r x dF(X) \\ &= \int_0^r x d(1 - e^{-\lambda C_x}) = \int_0^r x (\lambda C_x) e^{-\lambda C_x} dx \end{aligned} \quad (7)$$

由图 4 可得:

$$\begin{aligned} C_x &= 2 \int_0^x u \cos^{-1} \left(\frac{u}{2r} \right) du \\ &= 2 \left[\frac{u^2}{2} - \frac{(2r)^2}{4} \right] \cos^{-1} \left(\frac{u}{2r} \right) - \frac{u}{2} \sqrt{(2r)^2 - u^2} \Big|_0^x \end{aligned}$$

即,

$$C_x = \left(x^2 - 2r^2 \right) \cos^{-1} \left(\frac{x}{2r} \right) - \frac{x}{2} \sqrt{4r^2 - x^2} + r^2 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)有:

$$E(X) = \int_0^r 2 \left(x^2 - 2r^2 \right) \cos^{-1} \left(\frac{x}{2r} \right) - \frac{x}{2} \sqrt{4r^2 - x^2} + r^2 \lambda e^{-\lambda C_x} dx \quad (9)$$

可以看到, $E(X)$ 是结点密度 λ 与结点覆盖范围半径 r 的函数. 用 $f(\lambda, r)$ 表示一个结点的覆盖范围内结点距离边界上任意位置的平均最小距离, 则有:

$$f(\lambda, r) = E(X) \quad (10)$$

4 EBP 算法

EBP 算法基于图 2 所示的广播策略, 广播结点 S 按照如图 5 所示方式选择三个邻结点作为转播结点; 而普通转播结点 i 按照图 2 的方式仅选择两个邻结点作 $I_1(i)$ 和 $I_2(i)$ 为其引发新转播结点. 按照上述策略为每个广播或转播结点选择下一跳转播结点, 则广播分组会沿着如图 5 给出的正六边形的边在网络中散布. 可以看到在这种广播策略中, 源结点位于相互邻接正六边形的一个顶点, 理想情况下位于六边形顶点的结点最适合充当转播结点(顶点位置就是最佳位置), 广播分组沿着正六边形的边进行传递直到覆盖网络中所有的结点.

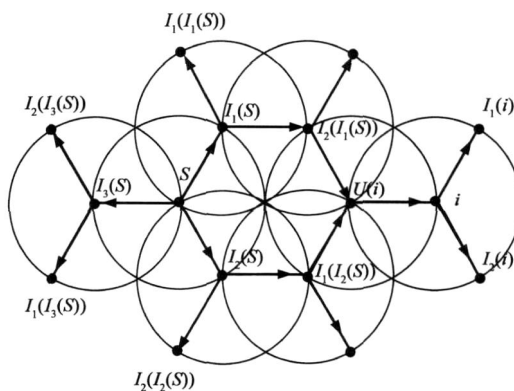


图5 理想情况下EBP算法中广播分组的散布

4.1 限制转播结点的范围

为了减小不必要的转播, EBP 算法限制准转播结点的范围. 对于一个转播结点 i , 每个邻结点计算其到结点 i 邻域的两个最佳位置的最小距离, 当距离最佳位置的最小距离大于门限 l_T , 本地结点将放弃对广播分组的转播. l_T 定义了转播结点距离最佳位置的最大距离, l_T 越大转播冗余越大, l_T 越小转播冗余越小. l_T 的取值取决于周围结点的密度, l_T 越大 l_T 就越小, 反之亦然. 由第 3 小节的分析可得一个结点的覆盖范围内结点距离边界上任意位置的平均最小距离 $f(\lambda, r)$, 考虑到最佳位置均处在覆盖区域的边界上, 为此 $f(\lambda, r)$ 为一个

结点的覆盖范围内所有结点距离最佳位置的平均最小距离. 为此:

$$l_T = a \cdot f(\cdot, r) \quad (11)$$

考虑到 $r \times r$ 的区域内平均仅有一个结点时, l_T 应为最大值 r 才能保证广播的可达率, 为此 l_T 可由下式确定:

$$l_T = \frac{r}{f(1/r^2, r)} \cdot f(\cdot, r) \quad (12)$$

4.2 算法描述

每个结点 i 仅需知道自己位置, 就可以完成 EBP 广播. 广播分组的头部包含两个域 S_1 和 S_2 , 结点在转播该分组时, 将上一跳结点位置填入 S_1 , 将其位置填入 S_2 . 源结点发起广播时, 仅在 S_2 中写入其位置信息.

令:

$l(j)$: 某转播结点邻域内, 结点 j 到最佳位置的最小距离;

$e(j)$: 结点 j 的剩余电能;

E : 每个结点的初始最大电能;

E_T : 电能门限, 当结点电能低于该门限时, 结点的电能就接近耗尽了;

广播触发结点 S 向网络中广播分组 P_S , 任意结点 j ($V - f(S)$) 在收到广播分组后按以下步骤执行:

(1) 收到广播分组 P_S 后, 判断 P_S 是否为一个新分组. 若是, 则执行第(2)步. 如果该结点已经收到过该分组, 检查结点 j 是否对 P_S 转播过, 如果是, 放弃对 P_S 的转播并执行第(7)步. 若结点 j 已放弃对 P_S 的转播, 执行第(7)步.

(2) 检查该结点的剩余电能, 如果 $e(j) < E_T$, 放弃对 P_S 的转播, 执行第(7)步.

(3) 依据 P_S 中 S_2 域及本结点的位置, 计算其到上一跳转播结点的距离 $d(j)$, 距离很近的两个结点的转播会带来很低的转播效率, 定义 d_T 为相邻转播结点之间的距离门限. 若 $d(j) < d_T$, 结点 j 放弃对 P_S 的转播, 执行第(7)步.

(4) 计算结点 j 到最佳位置的最小距离 $l(j)$. 如果 $l(j) > l_T$, 放弃对 P_S 的转播, 执行第(7)步.

(5) 按照式(13)进行自延时.

$$D(j) = D_m \left[\frac{l(j)}{r} + \frac{I \cdot E - e(j) \cdot I}{E - E_T} \right] \quad (13)$$

其中 D_m 是最大延时, I 与 r 是两个大于零小于 1 的参数, 且 I 与 r 的和等于 1.

(6) $D(j)$ 超时, 结点 j 将上一跳转播结点及其位置填入 P_S 的 S_1 和 S_2 域, 将广播分组 P_S 转播给其所有邻结点.

(7) 算法结束.

式(13)给出的延时计算式基于最佳位置转播和平衡能耗的思想, 在选择转播结点时将结点距离最佳位

置的最小距离以及结点的剩余电能综合考虑. 避免了那些位于最佳位置或距离最佳位置较近的结点频繁的进行转播, 导致这些结点很快就会因电能耗尽而死亡的现象. 这种设计兼顾了广播效率和网络寿命. 另外 EBP 算法中设置的多个门限值进一步的限制了冗余转播, 保证了广播效率. EBP 算法中每个结点仅需知道自己位置, 就可以完成 EBP 广播, 结点不需要向其他算法那样维持 k 跳邻结点的信息, 这将大大减小广播的开销降低算法对结点存储能力的要求, 这在结点成本和体积均很小的无线传感器网络中是很有意义的.

5 EBP 广播算法性能分析

利用 OPNET 仿真软件对本文提出的 EBP 广播算法进行仿真分析, 将 EBP 算法与其它算法进行比较. 仿真过程中, 媒质访问控制(MAC)层采用 IEEE 802.11 协议, 网络中的结点被随机的放置在平面上, 每个数据分组的大小为 1024 bits, 数据源采用泊松源, 分组的平均到达间隔为 0.5s. 每个节点的覆盖半径 r 为 250m, 最大转播时延取为 140ms. α 、 d_T 和 l_T 的选择请参阅文献[14]. 鉴于篇幅限制, 这里仅给出了 α 、 d_T 以及 E_T 分别取为 0.9、0.1、0.36 r 和 $E/50$ 时的仿真数据.

5.1 仿真中采用的性能指标

转播率(rebroadcast ratio, R): 网络中实际对广播分组进行了转发的结点数与网络中结点总数的比值.

可达率(reachability, RE): 是网络中接收到广播分组的节点数与网络中所有节点的数目的比值.

最大端到端时延(maximum end-to-end delay, MED): 是从广播分组由广播触发节点发送出去至网络中所有其它节点收到该分组的时间间隔.

网络寿命(life-time, LT): 指从网络初始化开始到网络中第一个节点因能量耗尽而死亡的时间间隔. 这里网络寿命用 round 来表示, 将一个分组广播至全网的时间间隔为 1 个 round, 网络寿命就是第一个结点死亡所在的 round.

5.2 仿真结果与分析

固定仿真区域为 750m × 750m, 分别将 45, 90, 180, 450, 720 等不同数目的结点随机地散布在仿真区域上. 图 6 和图 7 给出了不同场景下 EBP, BPS 以及泛洪(SF, Simple Flooding)三种广播算法转播率和最大端到端时延的对比图.

可以看出在各种不同的环境下, SF 的转播率最高, 而 EBP 的转播率最低, 且随结点密度的增加 EBP 算法的转播率在减小, 这保证了该算法在高密度网络的良好性能. 仿真中我们对简单泛洪 SF 机制进行了一定的修改, 当结点第一次收到广播分组时, 结点进行一个最大为 0.14s 的随机延时, 延时结束后再将广播分组转播

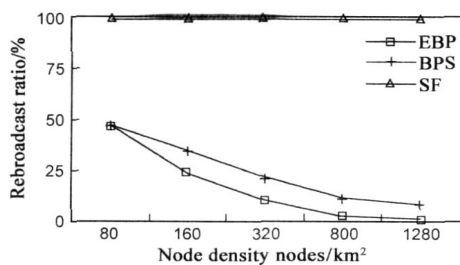


图6 转播率对比

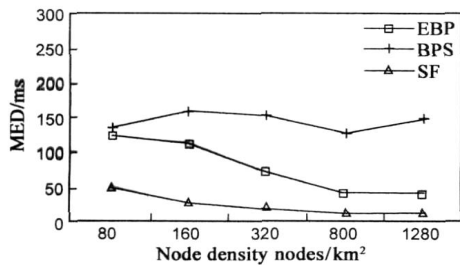


图7 最大端到端时延对比

出去. 这种策略减小了传统泛洪机制中存在的冲突问题,能在一定程度上缓解广播风暴问题.如图7所示,EBP算法具有比BPS算法更小的最大端到端时延,SF具有最小的最大端到端时延.对于可达率,由图8可得在结点密度从80nodes/km²到1280nodes/km²变化的过程中,EBP、BPS、SF三种广播算法均获得大于0.99的平均可达率.综上所述,与其它两种算法比较,EBP算法大大减少了一次广播中的转播次数,减小了广播开销,尤其是在大规模网络中,结点密度越大,EBP算法节省的转播就越多,其性能也越好,EBP适用于大规模高密度的无线网络场景.

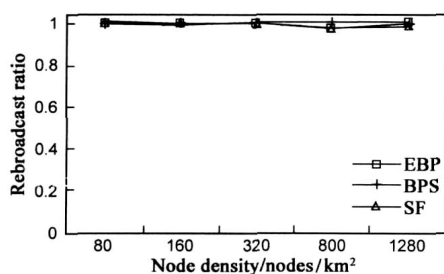


图8 可达率对比

在网络初始化结束时,网络中每个结点具有相同的最大初始化能量(电能),结点每发送一个分组或收到一个分组其剩余电能就减少一部分,当结点的电能消耗完时,该结点就“死亡”了.一般而言结点发送分组消耗的电能远远大于接收相同大小的分组所消耗的电能.为了延长网络寿命,广播过程中应尽量减少转播的次数.仿真中我们将每个结点初始电能设为1焦耳(J),结点的电量消耗模型采用文献[15]给出的模型.图9给出EBP、BPS以及SF三种算法在广播中的寿命,单位为rounds.可以看到EBP具有最大的网络寿命,SF广播过

程中结点“死亡”现象出现的最早.

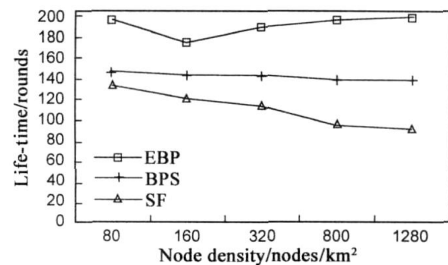


图9 网络寿命对比

6 结束语

本文首先对无线传感器网络广播中结点的转播行为进行了分析,一个结点转播之后其邻域内其它结点的转播,即引发新转播进行了讨论,基于对引发新转播的次数的分析得出了最佳新转播次数为二的结论.接着,本文分析了一个结点的邻域内所有结点到达邻域边界的平均最小距离的解析式.然后,基于对一次转播引发转播的分析得到的结论,提出了一种适用于无线传感器网络的低开销的广播算法EBP,利用上述得到的邻域内结点距离邻域边界的平均最小距离去限制转播冗余.EBP算法不需要任何邻结点信息,算法的控制开销和存储开销大大降低.最后通过仿真证明EBP在无线传感器网络中具有很好的性能,尤其是在大规模、高结点密度的网络环境下.

参考文献:

- [1] Bertsekas D, Gallager R. Data Network. [M] USA: Prentice - Hall, 1992. 368 - 370.
- [2] Ni S Y, Tseng Y C, Chen Y S, et al. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network [A]. The 5th ACM/ IEEE Conf. on Mobile Computing and Networking Proceedings [C]. Seattle: IEEE, 1999. 151 - 162.
- [3] 盛敏, 李建东, 史琰. 应用于 Ad Hoc 网络中的密度自适应广播策略. 电子学报[J], 2004, 32(7): 1191 - 1194.
Sheng M, Li J D, Shi Y. Degree adaptive flooding broadcast strategy for ad hoc network[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(7): 1191 - 1194. (in Chinese)
- [4] HONG YW, Scaglione A. Energy-efficient broadcasting with cooperative transmissions in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(10): 2844 - 2855.
- [5] Wieselthier J E, Nguyen G D, Ephremides A. On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks[J]. IEEE Conference on Computer Communications Proceedings [C]. New Jersey: IEEE, 2000. 585 - 594.
- [6] Galgaj M, Hubaux J P, Enz C. Minimum-energy broadcast in all-wireless networks: NP-completeness and distribution issues

- [A]. International Conference on Mobile Computing and Networking Proceedings[C], Atlanta:ACM, 2002. 172 - 182.
- [7] Liang W. Constructing minimum-energy broadcast trees in wireless ad hoc networks [A]. International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing Proceedings[C]. Atlanta:ACM, 2002. 112 - 122.
- [8] Li D, Jia X, Liu H. Energy efficient broadcast routing in ad hoc wireless networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(2): 144 - 151.
- [9] Agarwal M, Cho J H, Gao L, et al. Energy efficient broadcast in wireless ad hoc networks with hitchhiking [A]. IEEE Conference on Computer Communications Proceedings [C]. New Jersey:IEEE, 2004. 2096 - 2107.
- [10] Song W Z, Li X Y, Wang W Z. Localized topology control for unicast and broadcast in wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(4): 321 - 334.
- [11] Zhao R q, Wen A J, Liu Z J, Yue P. Maximum life-time localized broadcast routing in MANET [A]. IFIP NPC Proceedings [C]. Heidelberg:Springer Berlin, 2007, 193 - 202.
- [12] 赵瑞琴, 刘增基, 文爱军. 有效延长无线传感器网络寿命的分布式广播算法 [J]. 高技术通讯, 2008, 18(5): 469 - 474.
- Zhao R q, Liu Z J, Wen A J. Maximum life-time distributed broadcast protocol in wireless sensor networks [J]. High Technology Letters, 2008, 18(5): 469 - 474. (in Chinese)
- [13] Duresi A, Paruchuri V K, Iyengar S S, et al. Optimized broadcast protocol for sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2005, 54(8): 1013 - 1024.

[14] 赵瑞琴. 无线多跳网络若干问题研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学研究生院. 2008: 53 - 56.

[15] S Doshi, T X Brown. Minimum energy routing schemes for a wireless ad hoc network [A]. IEEE INFOCOM Proceedings [C]. New York:IEEE, 2002.

作者简介:



赵瑞琴 女, 1981 年生, 山西运城人, 博士, 西北工业大学航海学院讲师, 研究方向为无线传感器网络、无线移动自组织网、水下组网技术等。
E-mail: rqiinzhao@gmail.com



刘增基 男, 1937 年生, 浙江丽水人, 教授, 西安电子科技大学博士生导师, ISN 国家重点实验室学术委员会主任, 研究方向为通信网。

文爱军 男, 1968 年生, 教授, 西安电子科技大学, ISN 国家重点实验室, 研究方向为通信网和宽带通信。