

能量高效的无线传感器网络分簇路由算法研究*

林元乖

(琼州学院 电子信息工程学院, 海南 三亚 572022)

摘 要: 针对 LEACH 算法中簇首分布不均及簇首与基站一跳通信能耗大的问题,提出了一种基于能量高效的无线传感器网络分簇路由算法。首先,基于节点接收信号强度与自身剩余能量的乘积及网络连通度选取簇首,计算簇首间的合理距离,使网络均匀分簇;其次,基于跳数及簇首当前剩余能量构造簇间优化路由树;然后用 OMNeT++ 对该算法进行仿真对比分析。仿真结果表明,与 LEACH 等分簇路由算法相比,采用该算法,簇首分布更均匀,提高了簇的负载平衡程度,使节点的能量更为高效,延长了网络的生命周期。

关键词: 无线传感器网络; LEACH; 分簇路由; 节能; 负载平衡

中图分类号: TP393; TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)04-1529-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.091

Clustering routing algorithm based on energy efficient wireless sensor network

LIN Yuan-guai

(School of Electronic Information Engineering, Qiongzhou University, Sanya Hainan 572022, China)

Abstract: In order to solve LEACH algorithm for the uneven distribution of cluster heads and cluster heads and base stations hop communication energy consumption problem, this paper proposed a clustering routing algorithm based on energy efficient wireless sensor network. First, the node received signal strength based on its residual energy and network connectivity of the product and selected the first cluster, calculated a reasonable distance between the first cluster, the network uniform clustering. Secondly, based on the first hop and the current residual energy of cluster structured optimization between the clusters routing tree. Then used the OMNeT++ simulation of the comparative analysis algorithm. Simulation results show that clustering routing algorithm with LEACH decile compared to the use of the proposed algorithm, a more even distribution of the first cluster, the cluster load balancing to improve the degree of the nodes is more energy efficient to extend the network life cycle.

Key words: wireless sensor networks(WSN); LEACH; cluster routing; energy-efficient; load balancing

0 引言

无线传感器网络(WSN)是由大量具有无线通信与计算能力的微小传感器节点构成的能根据环境自主完成指定任务的自组织网络系统。节点的能量都由能量有限的电池来供电。所以无线传感器网络中需要尽可能节省节点的能量以延长网络的生命周期。WSN 应用的范围比较广泛,节点功能差异也很大,其适合的路由协议也因具体应用的不同而不同,并没有一种能适合于任何应用的路由协议。因此,WSN 领域出现了多种不同的路由协议,典型的有 Gossiping^[1,2]、SPIN(sensor protocols for information via negotiation)^[3]、DD(directed diffusion)^[4]等平面路由和 LEACH^[5,6]、PEGASIS^[7]、TEEN^[8]等分层路由。绝大部分平面路由协议以及部分分层路由协议的节能性都不是很好,甚至有些路由浪费了大量的节点能量,如 Flooding、Gossiping 等,节能性不好导致网络的生命周期不能尽可能地延长。因此,设计能量高效、能耗少、能量均衡的路由协议是无线传感器网络领域的一个重要研究内容。

针对典型分簇路由 LEACH 的缺点,本文提出了一种基于能量高效的无线传感器网络分簇路由算法。它确保了网络的

最优簇首数目以及簇首在网络中分布更为均匀,节省了网络每轮都进行簇重构的开销。簇内节点在每周期的非首轮通过构造簇内路由树的方式向簇首传送数据,减少了较远节点直接与簇首单跳通信的能耗。簇首间通过构造优化路由树,选取一个根簇首与基站直接通信,其他簇首在各自最优的路径上以多跳的方式将数据传输给基站,节省了簇首的能量消耗。每轮簇首的更换使得网络中节点的能量水平保持均衡。该协议既减少了节点的能耗,使得节点能量利用高效,又保持了整个网络的能量均衡,不会出现某个节点由于能量耗尽而过早死亡的现象。因此,它使得网络的寿命得到了更进一步的延长。

1 网络模型

1.1 具体的网络模型

假设传感器节点随机散布在一个正方形区域内,基站唯一且固定在该区域外的某个位置;所有传感器节点都由能量有限的电池供电,并且在部署之后位置保持固定不变;所有节点都具有相同的结构以及数据融合的功能,且每个节点在网络中只有一个唯一的 ID 号;节点的无线发射功率可以调控,即节点可根据距离的远近来调整发射功率的大小;节点能以单跳或多跳

收稿日期: 2011-07-28; 修回日期: 2011-09-01 基金项目: 海南省自然科学基金资助项目(609008); 三亚市院校地科技合作项目(2010YD29)

作者简介: 林元乖(1972-),女,海南乐东人,副教授,硕士,主要研究方向为数据通信与计算机网络、无线传感器网络、信息技术应用(lyg_top@163.com)。

的方式与基站进行通信,并且链路是对称的。

1.2 模型中网络连通度的定义

WSN 拓扑结构用 $G=(V,E)$ 来表示,其中 V 为传感器节点的集合, E 为网络中链路的集合, G 为传感器节点集合与链路集合构成的拓扑结构图。设 r 为网络中节点的最大通信半径,对给定节点 $a,b \in G(V)$, $L(a,b)$ 或 $L(b,a)$ 表示节点 a,b 之间的无线传输链路。当节点 a,b 是邻居节点时, $|L(a,b)| \leq r$,否则 $|L(a,b)| > r$ 。 $R(b,a)$ 表示节点 a,b 之间的传输对应关系,称之为节点 a,b 之间的相关度。当节点 a,b 为邻居节点,也即 $|L(a,b)| \leq r$ 时,其相关度值 $|R(b,a)| = 1$ 。当节点 a,b 的 $|L(a,b)| > r$ 时,表示节点 a,b 之间的通信需要经过 $s-1$ 个中间节点的转发才能相互到达,则其相关度值 $|R(b,a)| = s$ 。网络连通度(s_0)是指节点的邻居节点(也即节点相关度值 $|R(b,a)| = 1$)的数目。

2 算法描述

2.1 最优簇首数量的确定

无线传感器网络的最大特点之一是节点资源受限,节省能量是设计路由的首要因素。网络中簇首数量的多少会影响到网络的能量消耗。因此,可根据使网络的能量消耗达到最小的原则来求得网络最优的簇首个数^[9]。设 N 为网络的节点数, K 为网络中簇的个数, E_{elec} 为发射电路(接收电路)每发送(接收)1 bit 信息的能量消耗, d_{toCH} 为簇内成员节点到簇首节点的距离, d_{toBS} 为簇首节点到基站(BS)的距离, ε_{fs} 为自由空间模型下功率放大的能耗参数, ε_{mp} 为多路径衰减模型下功率放大的能耗参数, E_{DF} 为融合单位数据信息所消耗的能量, I 为数据包的大小,即数据包的二进制位数。

1) 簇首在一轮中的能量消耗为

$$E_{\text{CH}} = (N/K - 1)E_{\text{elec}}I + (N/K)E_{\text{DF}}I + (E_{\text{elec}}I + \varepsilon_{\text{mp}}IE[d_{\text{toBS}}^4])$$

2) 簇内单个成员在一轮中所消耗的能量为

$$E_{\text{nonCH}} = E_{\text{elec}}I + \varepsilon_{\text{fs}}IE[d_{\text{toCH}}^2]$$

3) 整个网络在一轮中总的能量消耗为

$$E_{\text{total}} \approx 2NE_{\text{elec}}I + NE_{\text{DF}}I + IN\varepsilon_{\text{fs}}A^2/2K\pi + K\varepsilon_{\text{mp}}L_{\text{BS}}^4I$$

其中: A^2 为传感器节点布撒的正方形区域面积; L_{BS} 为一常量,表示基站到网络的正方形区域中心的距离。

对 E_{total} 求 K 的导数并使之为零,求得最优 K 值使 E_{total} 最小, K 的最优取值为

$$K_{\text{Opt}} = \sqrt{N\varepsilon_{\text{fs}}A^2/2\pi\varepsilon_{\text{mp}}L_{\text{BS}}^4} = \sqrt{N/2\pi} \sqrt{\varepsilon_{\text{fs}}/\varepsilon_{\text{mp}}}A/L_{\text{BS}}^2$$

从以上公式可以看出,网络的最优簇首数目只与网络节点数 N 、正方形区域边长 A ,及基站到该区域中心的距离 L_{BS} 有关(ε_{fs} 、 ε_{mp} 为常量,不影响 K_{Opt} 值的大小)。 K_{Opt} 的计算由基站完成,并且每 20 轮(即一个周期)重新计算一次。这是因为在通信过程中,网络中会不断有节点因为能量耗尽而死亡。

求得网络的最优簇首个数之后,为了使分簇能覆盖整个节点区域,要求簇的平均半径 $R \geq R_0$, $R_0 = \sqrt{A^2/K_{\text{Opt}}\pi}$ 。设相邻簇首之间的距离为 D ,理论上,当 $D \approx 2R_0$,分簇能覆盖整个节点区域。在实际过程中,可以设定 D 值在 $2R_0$ 的某个邻域内,本文算法中的 D 值取为

$$D \in [2R_0(1-\mu), 2R_0(1+\mu)] \quad (1)$$

其中, μ 的取值为 $\mu \in (0, 0.5)$ 。

2.2 每个周期的首轮成簇

每个周期的首轮成簇阶段,由基站根据上个周期快结束时簇首发送的簇内成员情况,重新计算出网络的最优簇首数目,然后广播“竞选簇首”消息。网络中的节点根据接收信号强度与自身剩余能量的乘积 M 以及网络连通度决定是否参加竞选,参加竞选的节点向基站发送“参与竞选簇首”消息,成为候选簇首节点。未参与竞争的节点进入睡眠状态以节省节点能量。在候选簇首的集合中,令 $\forall$ 候选簇首 H_i 按照预先设定的半径 R 广播消息,此簇便分布在以 H_i 为圆心、 R 为半径的圆形区域内,即只有在 H_i 的通信半径范围内的节点才能成为该簇的成员节点。在竞选网络簇首的过程中,如果候选簇首 H_i 获胜,便向周围广播自己“成为簇首”的消息,在该簇首通信半径范围内的其他候选簇首接收到来自 H_i 的“成为簇首”消息后,则放弃候选簇首的身份,退出竞争,恢复成普通的节点。这样便保证了每个簇的簇首唯一性,并且能使整个网络的簇首分布比较均匀。该算法要求相邻簇首之间的距离满足式(1),因此,如上所述,假如 H_i 成为簇首,则它的相邻簇首节点必然分布在以 H_i 为圆心、 D 为半径的环形区域,如此下去直至最后,将产生所有的簇首节点,并且各簇首节点之间的距离合理,簇首的分布更加均匀,能使整个网络达到均匀分簇的目的,如图 1 所示。每周首轮成簇之后,在本周期期间,网络中簇的数量以及分布区域都保持不变,直至下个周期的到来才重新分簇,这样能节省每轮都进行簇重构的开销。设网络的 L 轮运行时间为一个周期, L 的值可以设置。在本文的算法中, L 的取值为 20,即网络每运行 20 轮便为一个周期。

每周首轮均匀成簇的具体算法流程如下:

a) 基站计算得出网络的最优簇首数目,并广播“竞选簇首”消息,网络中的节点根据接收信号强度与自身剩余能量的乘积 M 及网络连通度决定是否参加簇首的竞选, M 值大于阈值 M_0 的节点向基站发送“参与竞选簇首”的消息,产生 m 个候选簇首。

b) 基站接收到 m 个候选簇首的消息后,选择 M 值最大的候选簇首成为第一个簇首,并向其发送“任命簇首”消息,其余 $K_{\text{Opt}} - 1$ 个簇首则根据相邻簇首间距离 D 的限制从候选簇首中产生。

c) 簇首产生后,以半径 R 向周围节点广播“邀请加入簇”消息。

d) 若非簇首节点只收到一个簇首的邀请信息,则向该簇首发送“请求加入簇”消息;若非簇首节点收到两个或多个簇首的邀请信息,则优先加入网络连通度较低的簇首所在的簇(平衡各簇的成员数量以均衡网络中簇的负载和各簇首的能量消耗),并向该簇首发送“请求加入簇”消息。

e) 簇首收到非簇首节点的“请求加入簇”消息后,向其发送“允许加入”消息,并保存该成员节点的各种信息。

f) 非簇首节点收到“允许加入”消息后,表示加入簇成功,成为簇成员节点。

g) 簇首给各簇内成员节点分配 TDMA 时隙。

h) 整个网络进入稳定数据传输阶段。

在每周首轮的数据传输阶段,由于各成员与簇首的距离均

较短,故簇内成员将数据直接发送给簇首。

2.3 每个周期非首轮簇首的选择

在每周的首轮快结束时,首轮簇首根据簇内成员节点的剩余能量选择下一轮簇首。如果有最大剩余能量相同的成员,则选择离首轮簇首最近的节点成为下一轮簇首,首轮簇首恢复成簇内成员节点。下一轮簇首确定后,构造簇内路由树,使离簇首较远的节点以多跳方式传送数据,节省能量。由于每周首轮均匀成簇时,所有成员节点在首轮簇首的通信范围内。因此,当簇首更换为簇的边缘节点时,其他成员最多经过两跳可到达簇首,如图2(b)所示。在本周期接下来的其他轮中选择簇首及构造路由树的方法与上述相同。具体的算法流程如下所述:

- 当网络的上一轮快结束时,簇内成员将自身的信息发送给上一轮簇首,上一轮簇首选择簇内剩余能量最大的节点为下一轮簇首,并将自己及簇内成员的信息转交给下一轮簇首,然后恢复成簇内成员节点。
- 新簇首向簇内成员广播“新簇首”消息,消息包含到新簇首的跳数(初始为0)及其ID号与当前剩余能量。
- 簇内成员收到新簇首的消息后将跳数加1并保存消息,然后将消息中的ID号及剩余能量值改为自身ID及能量值,继续转发该消息,如此直至遍历所有簇内节点。
- 簇首给簇内成员分配TDMA时隙,网络进入数据传输阶段。

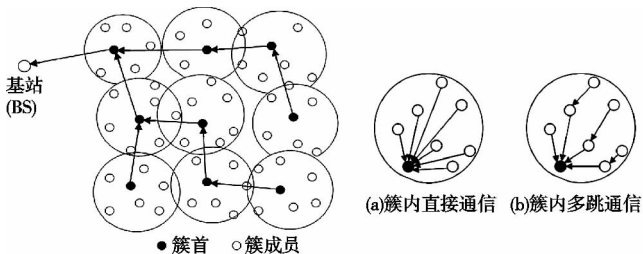


图1 本文算法协议的均匀分簇图 图2 两种簇内通信方式的比较

2.4 簇间优化路由树的构造

每轮簇首选定及成簇以后,基站向簇首节点发送“竞选根簇首”消息,非簇首节点忽略此消息;簇首节点接收到该消息后向基站发送自己的信息,包括节点的ID号以及自身当前的剩余能量;基站根据接收到各簇首信号的强度与该簇首剩余能量乘积 M 的大小,选择 M 值最大的簇首为根簇首节点,并发送“任命根簇首”消息;各簇首根据接收到的消息中的节点ID号确定自己是否为根簇首。

根簇首确定后便向自己周围的相邻簇首广播消息,消息包含到根簇首的跳数(初始跳数为0)、根簇首的ID号及其当前剩余能量。接收到该消息的簇首将消息中的跳数加1并保存,然后将消息中的父节点ID号与剩余能量值修改为节点自身的ID号与剩余能量值,向其相邻簇首转发此消息。接收到此消息的相邻簇首按照上述相同的方法继续转发,直至遍历所有簇首。如果某个簇首接收到两个相邻簇首发送的消息,则比较当前接收的消息与已保存消息中跳数的大小。此时有三种情况:

- 若当前跳数小于原来的跳数,则保存当前接收的消息,删除原来的消息;
- 两者跳数相等,则比较当前消息与原来消息中剩余能量的大小,如果当前剩余能量值大于原来的剩余能量,则保存当前消息,删除原来的消息,否则丢弃当前消息;
- 当前跳数大于原来的跳数,则丢弃当前消息。

图3表示了一个簇

间优化路由树的具体构造过程,其中,节点1为根簇首。

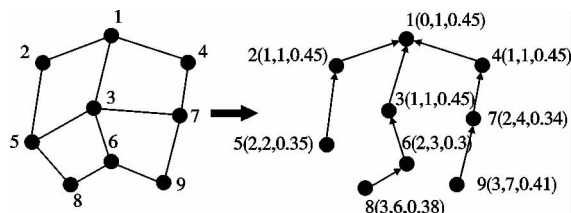


图3 簇间优化路由树的构造算法

2.5 数据传输阶段

簇内离簇首较远的节点将采集数据发送给其上一跳节点,路由树上的转发节点接收下一跳节点的数据,将自身采集的数据与之融合,再发送给簇首。

簇首融合成员与自身的数据之后,按照2.4节算法构造的簇间优化路由树进行数据的转发,最后将数据传送到根簇首,根簇首与基站直接通信,将数据发送给基站。簇间路由只进行数据转发,不进行数据融合。

3 仿真实验与对比分析

本文采用OMNeT++对提出的协议算法进行仿真,并与LEACH协议的仿真结果进行对比、分析。仿真的网络环境参数如表1所示。所有传感器节点在布撒之后均不移动,当节点的剩余能量值小于零时表示该节点死亡。

表1 仿真时的网络环境参数表

仿真参数	参数值
节点分布区域范围/m ²	100 × 100
节点总数/个	100
节点的初始能量/J	0.5
数据包长度/Byte	200
$E_{elec}/nJ/bit$	50
$\epsilon_{mp}/pJ/bit/m^4$	0.0013
$\epsilon_{fs}/pJ/bit/m^2$	10
$E_{DF}/nJ/bit/message$	5

3.1 对比分析的性能指标

1) 网络的生命周期 从网络第一个节点死亡时间、全部节点死亡时间以及网络死亡节点百分比随运行时间变化的情况三个方面对比分析本文算法与LEACH的性能。

2) 网络的总剩余能量 从全网总剩余能量随时间的变化对比两种协议的节能性。

3) 负载平衡因子 WSN的分簇路由协议中,每个簇的负载平衡程度是衡量协议性能的重要指标之一。簇的负载平衡程度用负载平衡因子(load balancing factor, LBF)来衡量,其计算式如下:

$$LBF = \frac{CH_num}{\sum_{i=1}^{CH_num} (x_i - \bar{x})^2}$$

其中:CH_num为簇首的数量; x_i 为第 i 个簇包含的成员数; $\bar{x}$ 为本轮簇的平均成员数量。LBF的值越大表明簇的负载越平衡。

3.2 仿真结果及分析

图4为本文算法与LEACH协议的网络第一个节点死亡时间和全部节点死亡时间的仿真结果对比。图中EUCR为本文算法简称。图5给出了两种算法在相同死亡节点百分比下,网

络运行时间的对比情况。

从图4可以看出,本文算法协议的网络生命周期明显比LEACH协议的长。在本文算法协议下,网络第一个节点死亡的时间为952轮,全部节点死亡时间为2900轮,而LEACH协议对应的这两个时间分别为706和1625轮。从图5中,可更清楚、详细地看出本文算法协议对网络生命周期的延长作用,在同样的死亡节点百分比下,本文协议网络的运行时间长于LEACH算法。这些证明了该协议能够延长网络的寿命,主要是因为该算法节省了节点能量,均衡了网络的能量消耗,使得网络能量均匀分布且被高效利用,从而延长了节点及整个网络的存活时间。

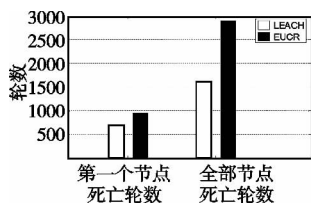


图4 两种协议第一个及最后一个节点死亡时间的对比

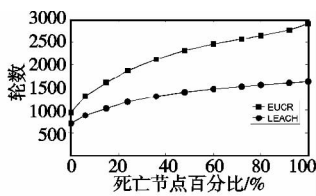


图5 两种协议网络生存时间的对比

图6为两种算法全网总剩余能量的对比。在网络运行时间为1000轮时,本文协议的全网总剩余能量约为42J,而LEACH协议的约为27.5J。LEACH算法的网络剩余能量随时间变化的下降速度比本文协议的下降速度快,其主要原因是:LEACH协议的簇首分布不均且簇的成员数量不平衡,导致部分节点的能量消耗过快而影响了整个网络的能量水平。本文协议对网络进行了均匀分簇以及能耗均衡,从而改善了这一问题。

图7对比了两种算法簇的负载平衡程度。由于网络随着运行时间的推移,会不断有节点死亡,簇首数量也会随之变化,因此,图7是在相同的网络初始簇首数量(即相同的初始簇首比例)情况下对两种协议进行对比。从图7中可以看出,本文协议的LBF值为0.1左右,且随着时间的变化基本上保持水平状态。这是因为本文协议通过计算网络的最优簇首数量,使得簇首比例一直保持在较好的水平,且对网络的均匀分簇使得每个簇的成员数量基本一致,从而较好地平衡了各个簇的负载水平。相比之下,LEACH协议的LBF值就小得多,仅为0.03左右,且随着时间的推移其值有减小的趋势,其主要原因为随着节点的不断死亡,LEACH算法的簇首分布以及簇的规模会更不均匀,从而使得簇的负载平衡程度下降。本文还与国外其他LEACH等的改进算法^[10-13]进行了对比,本文算法在算法复杂度和节能效果方面都有一定优势,限于篇幅,本文不再赘述。

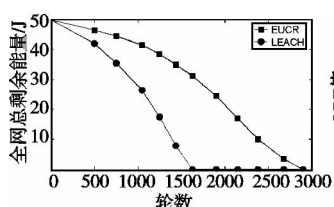


图6 两种协议网络总的剩余能量对比

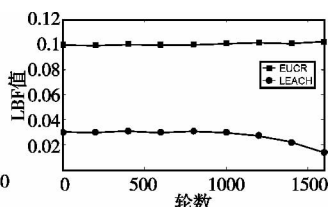


图7 两种协议簇的负载平衡程度的对比

4 结束语

针对典型分簇路由协议的不足,本文提出的算法能够有效

地节省能量、均衡负载及网络的能量分布,延长网络的生命周期。虽然节能是WSN要考虑的重要因素之一,但由于WSN的广泛应用,对其要求也越来越多,如服务质量、安全性等。因此,仅实现无线传感器网络的节能以及生命周期的延长并不能满足现在社会对其日益增长的需求。本文未提及WSN的服务质量,因此,在本文研究的基础上,接下来将在服务质量这方面进行研究工作。

参考文献:

- [1] HEDETNIEMI S M, HEDETNIEMI S H, LIESTMAN A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks [J]. *Networks*, 1988, 18(4): 319-349.
- [2] HAAS Z J, HALPERN J Y, LI L. Gossip-based Ad hoc routing [C]//Proc of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Communications Society, 2002:1707-1716.
- [3] HEINZELMAN W R, KULIK J, BALAKRISHNAN H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks [C]//Proc of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 1999:174-185.
- [4] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks [C]//Proc of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2000:56-67.
- [5] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proc of the 33rd IEEE Hawaii International Conference on System Sciences. Washington DC: IEEE Computer Society, 2000: 175-187.
- [6] WANG A, HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A. Energy-scalable protocols for battery-operated microSensor networks [J]//*Signal Processing System*, 1999, 29(3): 223-237.
- [7] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems [C]//Proc of the IEEE Aerospace Conference. 2002:1125-1130.
- [8] MANJESHWAR A, AGRAWAL D. TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks [C]//Proc of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing. New York: ACM Press, 2001: 304-309.
- [9] 何延杰, 李腊元, 邢明彦. WSN中一种能量均衡的分簇路由协议的设计 [J]. *传感技术学报*, 2009, 22(10): 1510-1514.
- [10] RACHKIDY E, GUITTON N, MISSION A. Routing protocol for anycast communications in a wireless sensor network [C]//Proc of the 9th International Networking Conference. 2010: 291-302.
- [11] GAGARIN A, HUSSAIN S, YANG L T. Distributed hierarchical search for balanced energy consumption routing spanning trees in wireless sensor networks [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2010, 70(9): 975-982.
- [12] KIM J, LEE S. Spanning tree based topology configuration for multiple-sink wireless sensor networks [C]//Proc of the 1st International Conference on Ubiquitous and Future Networks. 2009:122-125.
- [13] KIM J. Minimizing delay and maximizing lifetime for wireless sensor networks with anycast [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(2): 515-528.