

一种适用于无线传感器网络的拓扑控制算法

赵学健 庄毅 欧阳健

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要 无线传感器网络拓扑控制算法对于延长网络的生存时间、减小通信干扰、提高路由协议和 MAC 协议的效率等具有重要的意义。在分析 XTC(eXemplary Topology Control)算法的基础上,提出一种改进的基于局部网络信息的分布式拓扑控制算法 M-XTC(Modified-XTC)。改进算法保持了 XTC 算法简单、实用,不需要节点位置信息,适用于普通节点、异构网络和三维空间等优点,并且更有利于延长网络的生存时间,具有更好的实时性和鲁棒性。

关键词 传感器网络,拓扑控制,功率控制,OMNET++

Improved Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks

ZHAO Xue-jian ZHUANG Yi OUYANG Jian

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Topology control algorithms for wireless sensor networks are significant for prolonging the network lifetime, reducing radio interference, increasing the efficiency of routing protocols and MAC protocols, among other things. Based on the analysis of the XTC (eXemplary Topology Control) algorithm, this paper proposed a modified local distributed topology algorithm M-XTC (Modified-XTC). The modified algorithm maintains the advantages such as simple, practical, available without node position information, applicable for nodes without special instruments, heterogeneous networks, three-dimensional space networks as the XTC algorithm does. Moreover, it is also more conducive to prolong the network lifetime, and has much more real-time and robustness.

Keywords Wireless sensor network, Topology control, Power adjustment, OMNET++

1 引言

无线传感器网络有着广阔的应用前景,它在国家安全、环境监测、交通管理、空间探索等领域具有重大的应用价值,因此引起了军界、工业界和学术界的高度关注。无线传感器网络向科技工作者提出了大量的研究课题,包含节点定位、拓扑控制、路由协议、MAC 协议、时间同步、网络安全等。拓扑控制是其中的一个基本问题,是许多其他课题研究的基础。所谓拓扑控制就是在保证网络连通质量和覆盖质量的前提下,一般以延长网络的生命期为主要目标,兼顾通信干扰、网络延迟、负载均衡、简单性、可靠性、可扩展性等其他性能,形成一个优化的网络拓扑结构^[1]。

无线传感器网络一般具有规模大、自组织、随机部署、环境复杂、节点资源有限、网络拓扑经常变化的特点。这些特点决定了拓扑控制在无线传感器网络的研究中具有十分重要的作用:首先,拓扑控制能够保证网络的覆盖质量和连通质量;其次,拓扑控制能够降低通信干扰,提高 MAC(media access control)协议的效率,为数据融合和路由协议提供良好的拓扑基础;再次,拓扑控制能够提高网络的可靠性、可扩展性等其它性能。因此,对无线传感器网络拓扑控制的研究具有十分重要的意义,是亟待研究的重要课题之一。

2 研究背景

近年来,以加州大学为代表的一批高校在无线传感器网络拓扑控制研究方面已经取得了初步的研究成果,形成了功率控制和睡眠调度两个主流研究方向^[1]。功率控制是指为每个传感器节点选择合适的发射功率;睡眠调度是指控制传感器节点在工作状态和睡眠状态之间转换。典型的功率控制算法主要有:伊利诺斯大学 Narayanaswamy 等人提出并实现的一种简单的将功率控制与路由协议相结合的拓扑算法 COM-POW^[2];柏林工业大学 Kubisch 等人提出基于节点度的功率控制算法 LMA 和 LMN^[3]等;微软亚洲研究院 Wattenhofer 和康奈尔大学 Li 等人提出一种能够保证网络连通性的基于方向的功率控制算法 CBCT^[4];伊利诺斯大学 Li 和 Hou 提出的 DRNG 和 SLMST^[5]即两个具有代表性的基于邻近图理论的功率控制算法。典型的睡眠调度算法主要有:麻省理工学院 Heinzelman 等人提出的一直被广泛引用的 LEACH 算法^[6];鲁杰斯大学 Deb 等人提出的一种基于图论中最小支配集问题的 TopDisc 算法^[7];普渡大学的 Younis 和 Fahmy 提出的一种迭代的分簇算法 HEED^[8]。

上述功率控制算法都对传感器网络做了一些特定的假设,或者假设所有节点具有 GPS 定位功能,能确切知道自身

到稿日期:2008-12-24 返修日期:2009-03-19 本文受航空基金项目(05F2037),国防基础研究基金项目(Q07 2006C002-1)资助。

赵学健 男,博士研究生,研究方向为分布式算法、无线传感器网络,E-mail:zhaoxuejian@nuaa.edu.cn;庄毅 女,博士生导师,研究方向为分布式算法、网络安全等;欧阳健 男,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络。

位置信息,或者假设网络布置环境为理想的欧式平面,没有任何障碍物,或者对传感器节点提出了较高的要求,比如节点需要配备有向天线等。微软亚洲研究院的 Wattenhofer 等人提出的 XTC^[9]算法对传感器节点没有太高的要求,对部署环境也没有过强的假设,提供了一个简单实用的研究方向。本文在分析 XTC 算法的基础上,对 XTC 算法进行了改进,提出了一种基于局部网络信息的分布式拓扑控制算法 M-XTC (Modified-XTC),该算法保持了 XTC 算法简单、实用,不需要节点位置信息,适用于普通节点、异构网络和三维空间等优点,并且更有利于延长网络的生存时间,具有更好的实时性和鲁棒性。

3 XTC 算法分析

XTC 算法^[9]为了追求单个节点的功率最小化,只选择了保证网络连通性的最小邻居节点集合,而没有考虑节点间传送数据的实际能量消耗情况、数据传输的延迟情况以及节点因外部环境或者能量耗尽失效后网络的鲁棒性。

拓扑控制一般以延长网络的生命周期为主要目标,因此本文以节点传送单位数据消耗的能量 E 作为评价链路质量的标准。XTC 算法的基本思想是用接收信号的强度来反映链路质量。本文为说明方便起见,假设网络环境为欧式平面,因此节点发送单位数据消耗的能量可由公式 $E=kd^n$ (节点启动无线收发电路所消耗的能量很小,不作考虑)计算,其中 k 为常数,参数 n 满足关系 $2 \leq n < 4$ (本文中取 $n=2$)。

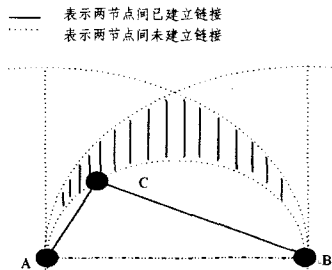


图1 XTC 算法的分析示意图

如图1所示,节点 C 在以 AB 为直径的圆弧上,由圆的性质可知角 $\beta = \pi/2$,即 $\triangle ABC$ 为直角三角形,由勾股定理可知节点 A 直接发送单位数据到节点 B 消耗的能量 E_1 和通过节点 C 进行中转消耗的能量 E_2 是相同的;当节点 C 位于以 AB 为直径的圆弧之外时,通过节点 C 进行中转消耗的能量 E_2 大于直接发送消耗的能量 E_1 ;当节点 C 位于以 uv 为直径的圆弧之内时,通过节点 p 进行中转消耗的能量 E_2 小于直接发送消耗的能量 E_1 。然而,根据 XTC 算法,当 $|AC| < |AB|$ 且 $|BC| < |AB|$,即节点 C 位于以节点 A, B 为圆心 $|AB|$ 为半径的圆的交界区域时,节点 A, B 之间的数据传输都是通过节点 C 进行转发的。当节点 C 位于图1所示阴影区域中时,根据 XTC 算法节点 A 通过节点 C 传送单位数据到节点 B 消耗的能量为 $E_2 = k|AC|^2 + k|BC|^2$;此时如果节点 A, B 之间存在链路,传送单位数据消耗的能量为 $E_1 = k|AB|^2$ 。显然, XTC 算法通过阴影区域的中继节点转发数据比两个节点之间直接传送数据要消耗更多的能量。其次,无线传感器网络中数据包的时间延迟主要是在节点接收、处理以及发送数据的过程中产生的延迟,因此网络的时间延迟和传输路径的跳数是成正比的。XTC 算法中节点 A 通过阴影区域中的节点

转发数据到节点 B 不仅多消耗节点能量而且增大了时间延迟。另外, XTC 算法中当阴影区域存在节点时,节点 A, B 之间不能直接通信,因此如果阴影区域中的节点发生故障或者能量耗尽时,节点 A 与节点 B 将不再连通,从而可能影响整个网络的连通性。

4 M-XTC 算法及性质

针对上述分析,为了使 XTC 算法具有更好的能效效率、实时性和鲁棒性,本文提出一种基于局部网络信息的分布式拓扑控制算法 M-XTC (Modified-XTC)。该拓扑控制算法分为如下3个阶段:

(1) 邻居排序:节点 u 对其所有的邻居节点计算一个反映链路质量的偏序 $<_u$ 。在 $<_u$ 中,如果节点 w 在节点 v 的前面,记作 $w <_u v$,则说明节点 u 与 w 之间的链路质量比节点 u 与 v 之间的链路质量好。所谓的链路质量可以指链路的通信代价、通信延迟等。

(2) 信息交换:节点 u 向其邻居广播自己的偏序 $<_u$,同时接收邻居节点建立的 $<$ 。

(3) 链路选择:节点 u 按链路质量递增的顺序遍历 $<_u$,对于 u 的邻居节点 v ,如果在 $<_u$ 中存在节点 w 满足条件: $w <_u v, w <_v u$,并且使得不等式 $cost(u, w) + cost(w, v) < cost(u, v)$ ($cost(u, v)$ 表示节点 u 传送单位数据到节点 v 的能量消耗)成立,则节点 u 和节点 v 之间不存在链路;否则在节点 u 和节点 v 之间建立一条链路。

M-XTC 算法的伪代码如下:

```

For each node  $u$ :
1: Establish order  $<_u$  over  $u$ 's neighbors in  $G$ 
2: Broadcast  $<_u$  to each neighbor in  $G$ ; receive orders from all neighbors
3: Select topology control neighbors:
4:  $N_u := \{\}; \tilde{N}_u := \{\}$ ;
5: While ( $<_u$  contains unprocessed neighbors) {
6:  $v :=$  best unprocessed neighbor in  $<_u$ 
7: if ( $\exists w \in N_u \cup \tilde{N}_u, w <_v u \wedge cost(u, w) + cost(w, v) \leq cost(u, v)$ )
8:  $\tilde{N}_u = \tilde{N}_u \cup \{v\}$ 
9: else
10:  $N_u = N_u \cup \{v\}$ 
}

```

上述代码段中 $G=(V, E)$ 表示无线传感器网络的原始拓扑结构,所有节点执行 M-XTC 算法后,得到新的拓扑结构,记为 $G_{M-XTC}=(V, E_{M-XTC})$,其中 V 表示所有节点的集合, E_{M-XTC} 表示所有节点之间链接的集合,即 $E_{M-XTC} = \{(u, v) | \exists u, v \in N_u\}$ 。M-XTC 算法中每个节点只需要和其邻居节点进行两次信息交换便可达到稳定拓扑状态,具有简单、高速、低能耗的特点,并且满足对称性、连通性以及平面性等性质。下面分别给出对称性、连通性以及平面性的证明。

定理1(对称性) M-XTC 算法得到的拓扑图 G_{M-XTC} 是对称的,即当且仅当节点 v 在节点 u 的邻居节点集 N_u 中时,节点 u 才在节点 v 的邻居节点集 N_v 。

证明: 首先证明充分性,利用反证法进行证明。假设 1: $v \in N_u$; 假设 2: $u \in \tilde{N}_v$ 。由假设 2, 根据 M-XTC 算法可知存在节点 w 满足条件: $w <_v u, w <_u v$, 并且 $cost(u, w) + cost(w, v) <$

$cost(u, v)$ 。由该条件,根据 M-XTC 算法,有结论: $v \in \tilde{N}_u$,这与假设 1 矛盾,充分性得证。必要性同理可证。

定理 2(连通性) 假设原始拓扑结构图 G 为欧氏图, G_{M-XTC} 中两个节点之间连通的充要条件是这两个节点在图 G 中是连通的,也就是说 G_{M-XTC} 是连通图的充要条件是 G 是连通图。

证明:因为 G_{M-XTC} 是 G 的子图,所以如果 G 本身不连通 G_{M-XTC} 一定不连通,所以必要性是显然的,不再赘述,下面对充分性进行证明。假设 1: G 是连通图的前提下 G_{M-XTC} 不连通,即在 G_{M-XTC} 中至少有一对节点之间是不连通的。假设 2: 节点 u 和节点 v 就是 $cost$ 值最小的一对不连通节点,因为原始拓扑结构图 G 为欧氏图,即 $cost(u, v) = k|u, v|^2$,所以节点 u 和节点 v 也是 $|u, v|$ 最小的一对不连通节点。因此在图 G 中,节点 u 和节点 v 是通过边 (u, v) 直接相连的,否则如果在节点 u 和节点 v 之间的路径上还存在其它节点,与假设 2 矛盾。由假设知 $v \in \tilde{N}_u$,即存在节点 w 满足 $w \in N_u \cup \tilde{N}_u$,且使得 $w <_v u, cost(u, w) + cost(w, v) < cost(u, v)$,可知节点 u 和节点 w 必定是相连接的,否则与假设 2 矛盾。同理,节点 v 和节点 w 之间也必定是相连接的。这样,节点 u 和节点 v 便通过节点 w 连接,与假设 2 矛盾。定理 2 得证。

定理 3(平面性) 假设原始拓扑结构图 G 为 UDG(Unit Disk Graph)图, G_{M-XTC} 中不含有两条相交的边,即具有平面性。

证明:利用反证法证明,假设 G_{M-XTC} 中有两条边 (u, v) 和 (w, x) 相交,则在矩形 $uvwx$ 中至少有一个角大于等于 $\pi/2$,不妨设顶点为 u 的角 $\angle wux \geq \pi/2$,则有 $|uw| < |wx|, |ux| < |wx|$ 并且 $cost(u, w) + cost(w, x) \leq cost(w, x)$,根据 M-XTC 算法有 $x \in \tilde{N}_w$,与假设边 (w, x) 在图 G_{M-XTC} 中矛盾。定理 3 得证。

5 实验分析

本文使用仿真工具 OMNET++ 实现了 XTC 算法和 M-XTC 算法,并对实验结果及算法性能进行了分析。将 100 个节点随机布置在 $800m \times 500m$ 的矩形区域中,原始拓扑结构图 G 为 UDG(Unit Disk Graph)图,由 XTC 算法得到的拓扑结构图为 G_{XTC} ,由 M-XTC 算法得到的拓扑结构图为 G_{M-XTC} ,如图 2 所示。

仿真实验中设 100 个节点的编号(Node ID)为 0 至 99,将 0 号节点作为汇聚节点,图 3 描述了 3 种拓扑情况下 1 至 99 号节点到汇聚节点的最小能耗情况,最小能耗指节点发射功率为能够到达下一跳节点的最小发射功率时,所有路径中能耗最小的路径的能耗。图中红色区域表示在原始拓扑结构下,各节点发送单位字节数据到汇聚节点的最小能耗;绿色曲线表示在由 XTC 算法得到拓扑结构 G_{XTC} 下,各节点发送单位字节数据到汇聚节点的最小能耗;蓝色曲线表示在由 M-XTC 算法得到拓扑结构 G_{M-XTC} 下,各节点发送单位字节数据到汇聚节点的最小情况。由图 3 可以看出, G_{M-XTC} 中各节点到汇聚节点的最小能耗与原始拓扑 G 中的最小能耗完全一致,而 G_{XTC} 中各节点到汇聚节点的最小能耗略大于原始拓扑 G 中的最小能耗,例如 40 号节点 G_{M-XTC} 下最小能耗为 0.05681J,而 G_{XTC} 下最小能耗为 0.060486J。由此可见, M-XTC 算法更有利于设计能耗高效的路由策略,提高节点的

耗效率,延长网络的生命周期。

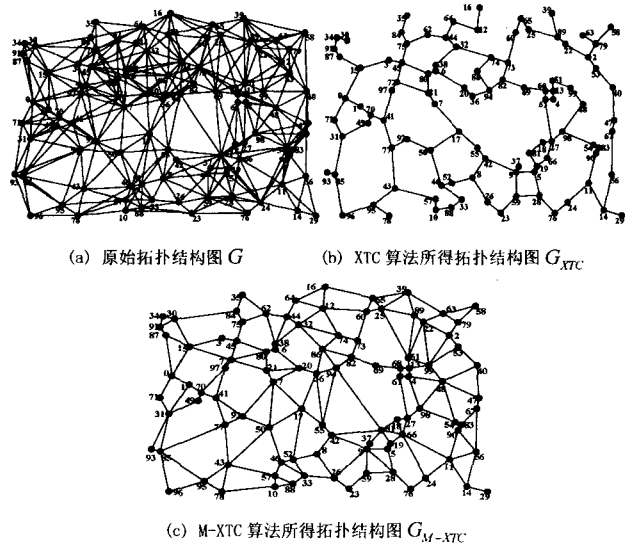


图 2 拓扑结构图

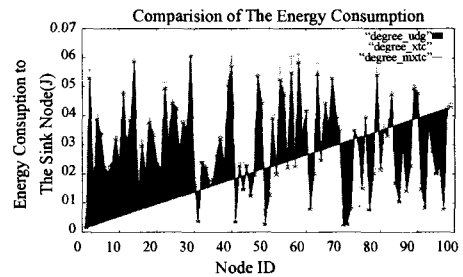


图 3 节点到汇聚节点能耗分析

3 种拓扑情况下 1 至 99 号节点到汇聚节点的最小跳数如图 4 所示。原始拓扑 G , XTC 算法所得拓扑 G_{XTC} 以及 M-XTC 算法所得拓扑 G_{M-XTC} 中节点到汇聚节点的平均最小跳数分别为 3.58, 9.03 和 6.86。因为无线传感器网络的时间延迟主要是在节点接收、处理以及发送数据的过程中产生,所以其与传输路径的跳数是成正比的,也就是说网络拓扑 G_{M-XTC} 的时间延迟要小于拓扑 G_{XTC} 的网络延迟,具有更好的实时性。

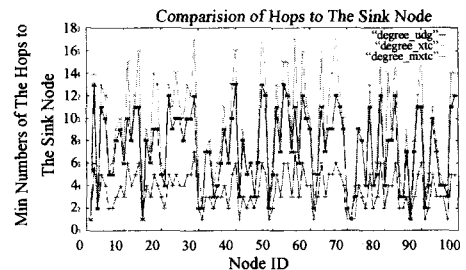


图 4 节点到汇聚节点最小跳数分析

图 5 给出了 3 种拓扑情况下节点度的分布状况。原始拓扑 G , XTC 算法所得拓扑 G_{XTC} 以及 M-XTC 算法所得拓扑 G_{M-XTC} 中节点的平均度分别为 13.45, 2.35 和 3.69。拓扑 G_{XTC} 具有最小的节点平均度,这固然可以降低通信干扰,提高 MAC 协议的效率,但是随着网络的运行,节点由于能量耗尽或者外部原因而无法正常工作时,网络的连通性很难保障。如图 6 所示,当网络中 13 个节点失效时, G_{M-XTC} 保持连通,但

(下转第 46 页)

结束语 本文针对结构化 P2P 网络提出了一种增强型负载均衡算法 ELB_P2P, 根据该算法, 节点的承载能力与其占有 ID 空间的大小成正比, 并且 ID 地址连续分配, 从而减少了算法的复杂性, 负载转移时考虑了节点之间的延迟并引入流量控制机制, 提高了系统负载均衡性能。仿真实验表明该算法具有负载均衡速度快, 负载均衡开销小, 系统稳定性高, 负载不平衡度低等优点。

参考文献

[1] Giakkoupis G, Hadzilacos V. A scheme for load balancing in heterogeneous distributed hash tables[C]//Proc. PODC. July 2005
 [2] Karger D, Ruhl M. Simple Efficient Load Balancing Algorithms for Peer-to-Peer Systems[C]//Proc. SPAA. 2004
 [3] Godfrey P B, Stoica I. Heterogeneity and load balance in distributed hash tables[C]//Proc. IEEE INFOCOM. 2005
 [4] Ratnasamy S, Francis P. A scalable content addressable network [C]//SIGCOMM 2001. San Diego, CA, USA, 2001
 [5] Stoica I, Morris R. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service

for internet applications[C]//SIGCOMM 2001. San Diego, CA USA, 2001

[6] 姚磊, 戴冠中, 等. 基于局部网络信息的 P2P 系统负载均衡算法[J]. 计算机应用, 2007(05): 1080-1083
 [7] 李振宇, 谢高岗. 基于 DHT 的 P2P 系统的负载均衡算法[J]. 计算机研究与发展, 2006(09): 1579-1585
 [8] 张三峰, 吴国新. P2P 网络非对称 DHT 方法及负载均衡技术研究[J]. 通信学报, 2007(09): 60-67
 [9] Rao A, Lakshminarayanan K, Surana S, et al. Load Balancing in Structured P2P Systems[C]//Proc. IPTPS, Feb. 2003
 [10] Godfrey P B, Lakshminarayanan K, et al. Load balancing in dynamic structured P2P systems[C]//Proc. IEEE INFOCOM. 2004
 [11] Bawam G P. Distributed balanced tables, not making a hash of it all[R]. Stanford University, Database Group, 2003
 [12] Zhu Y, Hu Y. Efficient proximity-aware load balancing for DHT-based P2P systems [J]. IEEE Trans on parallel and distributed systems, 2005(04)

(上接第 31 页)

是 G_{XTC} 被分割为两个连通子图; 当网络中 26 个节点失效时 G_{M-XTC} 被分割为 3 个连通子图, 而 G_{XTC} 却被分成 11 个连通子图。由图 5、图 6 可以看出, 拓扑 G_{M-XTC} 在保证 MAC 协议效率的前提下, 相比 G_{XTC} 来说具有更好的连通性和鲁棒性。

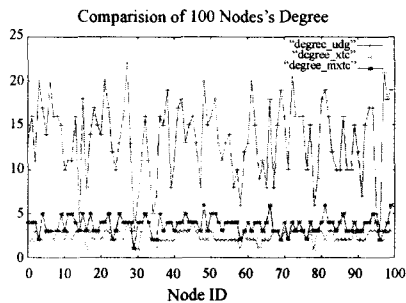


图 5 节点度分析

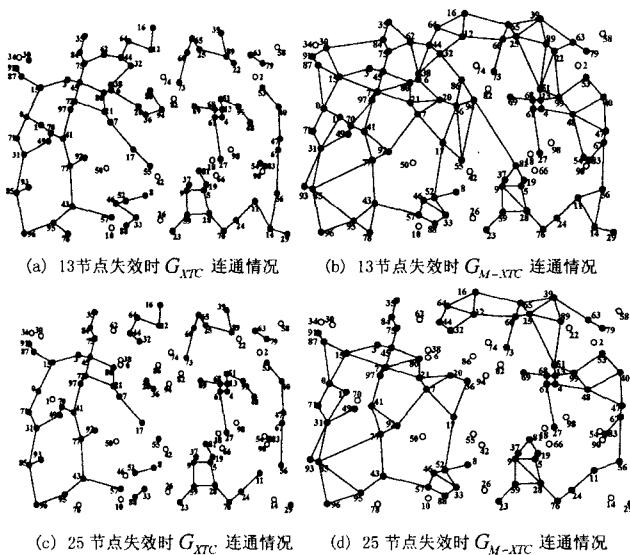


图 6 拓扑连通性鲁棒性分析示意图

结束语 本文对无线传感器网络拓扑控制的相关算法进行了介绍, 在分析 XTC 算法的基础上, 提出了一种基于局部

网络信息的分布式拓扑控制算法 M-XTC, 该算法保持了 XTC 算法简单、实用, 不需要节点位置信息, 适用于普通节点、异构网络和三维空间等优点, 并且经过仿真验证, 该算法更有利于延长网络的生存时间, 具有更好的实时性和鲁棒性。

参考文献

[1] Poduri S, Patten S, Krishnamachari B, et al. A unifying framework for tunable topology control in sensor networks [R]. CRES-05-004. University of Southern California, 2005; 1-15
 [2] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas RS, et al. Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol[C]//Proc. of the European Wireless Conf. Florence, 2002; 156-162
 [3] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks[C]//Yanikomeroglu H, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). New York; IEEE Press, 2003; 16-20
 [4] Li L, Halpern JY, Bahl P, et al. A cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2005, 13(1): 147-159
 [5] Li N, Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks; Problems and solutions[C]//Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). New York; IEEE Press, 2004; 232-243
 [6] Heinzelman WR, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Nunamaker J, Sprague R, eds. Proc. of the Hawaiian Int'l Conf. on System Science (HICSS). Washington; IEEE Press, 2000; 3005-3014
 [7] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management[R]. DCS-TR-441. Rutgers University, 2001
 [8] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669