

无线传感器网络的拓扑控制机制^{*}

杨 贺 张树东 孙利民

(中国科学院软件研究所多媒体和网络研究中心 北京 100080)

摘 要 传感器网络节点是低功耗低价格微型嵌入式设备,其能量供应和无线通信带宽十分受限。无线传感器网络的拓扑控制用来控制能量高效的合理网络结构的形成,对通信机制、数据融合和时间同步等有重要影响,是无线传感器网络底层关键支撑技术之一。本文从节点功率控制、层次型拓扑形成和网内协同启发机制三个方面,详细介绍和分析了已有典型的拓扑控制算法,并对拓扑控制的研究热点和发展趋势做了总结。

关键词 无线传感器网络,拓扑控制,功率控制,层次拓扑,启发机制

Topology Control Mechanisms in Wireless Sensor Networks

YANG He ZHANG Shu-Dong SUN Li-Min

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The node in sensor network is an embedded device with low-cost and low-price. Its energy supply and wireless communication bandwidth are very limited. The topology control mechanisms can help the formation of the energy-efficient network structure. It also has a major impact on mechanism for communication, data integration and time synchronization. Because of which mentioned above, the topology control is one of the key technologies in sensor network. In this paper, three main catalogs will be discussed, they are node's power control, cluster topology control and the self-configuring and trigger mechanism between nodes. The typical detailed overview and analysis of algorithms have been focused in the discussion; the present hot spots and the future trends on the research of topology control are summarized also.

Keywords Wireless sensor networks, Topology control, Hierarchical clustering, Power control, Self-configuring

1 引言

在无线传感器网络中,传感器节点是体积很小的微型嵌入式设备,采用能量有限的电池供电,它的计算能力和通信能力十分有限,所以节省节点能量,延长网络的生存时间是目前的研究热点。其中,一个重要的基础性研究方向是网络拓扑控制的研究^[1],它为路由协议、MAC协议、数据融合、时间同步和目标定位等很多方面奠定了基础。目前,在网络协议分层中没有明确的层次对应拓扑控制机制,但大多数的拓扑控制算法是部署于介质访问控制层(MAC)和路由层(ROUTING)之间,它为路由层提供足够的路由更新信息,路由表的变化也反作用于拓扑控制机制,MAC层可以提供给拓扑控制算法邻居发现等消息,如图1所示^[2]。

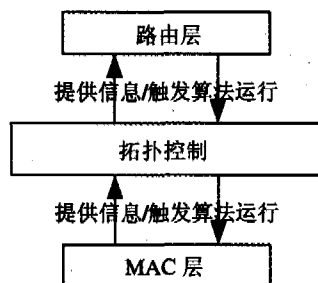


图1 拓扑控制与网络分层关系示意图

传感器网络拓扑控制主要研究的问题是通过调节节点发

射功率和骨干网节点选择,减少节点间冗余的通信链路,形成一个多跳的数据转发网络,使其有利于某一特定应用。目前,无线传感器网络的拓扑控制可以按照网络中节点发射功率是否一致分为两类,即全网节点按统一功率发射(Homogeneous)和节点以一定标准分别调整发射功率(Non-Homogeneous)^[2]。对于第一类,拓扑问题简化为寻找一个合适的节点发射功率,来保证全网的连通性和覆盖度;对于第二类,按照节点可获得信息和节点间的组织方式又可以细化出多种拓扑机制,例如,基于节点邻居数调节发射功率,基于节点的地理位置调节功率,基于节点间的相互位置关系调节发射功率等。

传感器网络拓扑控制还可以按照研究方向进行分类,通过分析近年来拓扑控制领域的代表性算法,可以归纳出3个研究热点,即节点功率控制、层次型拓扑控制以及网内节点协同启发机制。节点功率控制机制调节网络中每个节点的发射功率,目的是在保证全网连通性的情况下,均衡节点一跳距离的邻居数目;层次型拓扑控制是选择网络中的一些节点成为骨干节点,构架起包转发的骨干网络,其他非骨干网节点接受骨干节点管辖;网内节点协同启发机制是节点按照周边通讯环境的变化,进行自主控制以及和邻居节点进行交互的机制。本文将以此种分类方式为线索组织全文。

2 节点功率控制

在无线传感器网络中,节点通过动态调整发射功率,在保证网络拓扑结构是连通、双向连通或者多连通的基础上,使得

^{*} 本研究得到国家自然科学基金项目(No. 60434030 和 No. 60373049)资助。杨 贺 硕士研究生,主要研究方向为计算机网络;张树东 博士后,主要研究方向是宽带接入和无线通信;孙利民 博士,研究员,主要研究方向为无线传感器网络。

网络中节点的能量消耗最小,延长整个网络的生存时间。当传感器节点部署在二维或三维空间中时,传感器网络的功率控制是一个 NP 难的问题^[3]。因此,一般的解决方案都是寻找近似解。

2.1 节点统一功率分配算法

节点统一功率分配算法是一种比较简单的功率控制算法,是在所有传感器节点上使用一个保证网络连通的最小发送功率。比如 Narayanaswamy 等人提出的 COMPOW 功率控制方案^[4]。在 COMPOW 算法中,每个节点维护多张路由表,分别对应于不同的发射功率级别,节点间同级别的路由表交换控制消息。通过对比不同路由表中的表项,节点可以决定确保最多节点连通的最小的通用功率级别,然后统一用该功率发射。但这种功率分配方法的最大缺点是,如果节点的散布不均匀,那么全网通用的通信功率可能会很大。所以这种算法必须结合层次型拓扑控制机制一起使用,如 CLUSTERPOW 算法^[5]。

2.2 基于节点度的算法

一个节点的度数是指所有距离该节点一跳的邻居节点的数目。基于节点度的算法一般动态调节节点的发射功率,使得节点的度数处于一个合理的区间。本地平均算法 LMN (Local Mean Algorithm) 和本地邻居平均算法 LMA (Local Mean Of Neighbors Algorithm)^[6] 是两种周期性动态调整节点发射功率的算法。它们之间的区别在于计算节点度的策略不同。在 LMN 算法中,节点定期检测邻居数量,并根据邻居数量来调节发射功率;而在 LMA 算法中节点是将该节点邻居的邻居数求平均值作为自己的邻居数。

这类算法利用少量的局部信息达到了一定程度的优化效果,它们不需要很强的时钟同步,但是算法中还存在一些明显的不足,例如,需要进一步研究合理的邻居判断条件,对从邻居节点得到的信息是否需要根据信号的强弱给予不同的权重等。

2.3 基于邻近图的算法

在基于邻近图的算法中,所有节点以最大功率发射时形成的拓扑图为图 G , 定义为 $G=(V, E)$ 的形式, V 代表图中顶点的集合, E 代表图中边的集合, E 中的元素可以表示为 (u, v) , 其中 $u, v \in V$, 按照一定的规则 Q , 求出该图的邻近图 G' , 最后 G' 中每个节点以自己所邻接的最远通信节点来确定发射功率。经典的邻近图模型有 RNG (Relative Neighborhood Graph)、GG (Gabriel Graph)、YG (Yao Graph) 以及 MST (Minimum Spanning Tree) 等^[7]。

DRNG (Directed Relative Neighborhood Graph) 算法和 DLSS (Directed Local Spanning Subgraph) 算法^[8] 是两种以邻近图的观点考虑无线传感器网络拓扑问题的算法, 它们针对节点发射功率不一致问题提出了拓扑解决方案。

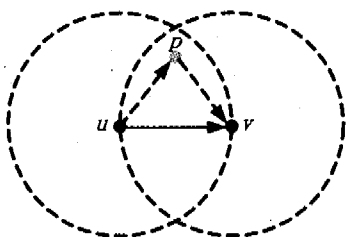


图2 DRNG 算法示意图

在 DRNG 算法中给出了确定邻居节点的标准。如图 2

所示, d 表示距离, w 表示权重, R 表示节点发射半径, 假设节点 u, v 满足条件 $d(u, v) \leq R_u$, 且不存在另一节点 p 同时满足 $w(u, p) < w(u, v)$, $w(p, v) < w(u, v)$ 且 $d(p, v) \leq R_p$ 时, 节点 v 则被选为节点 u 的邻居节点。

在 DLSS 算法中, 假设已知节点 u , 最大发射半径为 R , 它的可到达邻居子图 G^R , 将 u 到所有可达邻居节点的边以权重 $w(u, v)$ 为标准按升序排列; 依次取出这些边, 直到 u 与所有可达邻居节点直接相连或通过其它节点相连; 最后, 与 u 直接相连的节点构成 u 的邻居集合。从图论的观点看, DLSS 算法等价于在 G^R 基础上进行本地最小生成树的计算。

经过执行 DRNG 或 DLSS 算法后, 节点确定了自己的邻居集合, 然后将发射半径调整为到最远邻居节点的距离。这类算法以原始的网络拓扑是双向连通为前提, 保证优化后的拓扑也是双向连通的。

另外, Rodoplu 等提出了一种基于 Enclosure 图的功率分配算法 R&M^[9], 该算法中每个节点 u 周围确定一个称作 Enclosure 的区域, 在 Enclosure 区域中的节点称为 u 的真正邻居。L. Li 等基于 YG 提出了 CBTC 算法^[10], 每个节点独立调节发射功率, 以保证在每 α 角度内有一个邻居节点。

3 层次型拓扑控制

在无线传感器网络中, 考虑依据一定的选举机制选择某些节点作为骨干节点, 周边节点归属于骨干节点管理, 再由骨干节点负责构建一个连通的网络, 这类算法将整个网络划分为相连的区域, 又称为分簇算法, 骨干网节点是簇头节点, 普通节点是簇内节点。层次型的拓扑控制算法通常采用周期性选择簇头节点的做法使网络中的节点能量消耗均衡。

层次型的拓扑结构具有很多优点, 例如, 由簇头节点担负数据融合的任务, 减少了数据通信量; 层次型的拓扑结构有利于分布式算法的应用, 适合大规模部署的网络; 大部分非骨干节点在相当长的时间内关闭通信模块, 所以显著地延长整个网络的生存时间等。

3.1 LEACH 算法

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 算法^[11] 是一种自适应的分簇拓扑算法, 它的执行过程是周期性的, 每轮循环分为簇的建立阶段和稳定的数据通信阶段。在簇的建立阶段, 相邻节点动态地形成簇, 随机产生簇头; 在数据通信阶段, 簇内节点把数据发给簇头, 簇头进行数据融合并把结果发送给汇聚节点。

LEACH 中簇头选举算法如下: 节点产生一个 $0 \sim 1$ 的随机数, 如果这个数小于阈值 $T(n)$, 则发布自己成为簇头的公告消息; 在一轮循环中, 如果节点已经当选过簇头, 则把 $T(n)$ 设置为 0, 这样该节点不会再次当选簇头; 对于未当选过簇头的节点, 则将以 $T(n)$ 的概率当选; 随着当选过簇头的节点数目增加, 剩余节点当选簇头的阈值 $T(n)$ 随之增大, 节点产生小于 $T(n)$ 的随机数的概率随之增大, 所以节点当选簇头的概率增大, $T(n)$ 用公式 1 表示。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * [r \cdot \text{mod}(1/P)]} & n \in G \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P 是簇头在所有节点中所占的百分比, r 是选举轮数, $r \cdot \text{mod}(1/P)$ 代表这一轮循环中当选过簇头的节点个数, G 是这一轮循环中未当选过簇头的节点集合。

Bandyopadhyay 等人基于 LEACH 算法提出了一种 k -

Clustering 的随机分簇算法^[12]。这种算法和 LEACH 的区别在于,一个节点发出的簇头竞争消息不但发送给自己的邻居节点,而且还会被转发给离该节点 k 跳的其他节点,这样可以形成更大的簇。

3.2 HEED 算法

有学者针对 LEACH 算法中节点规模小,簇头选举没考虑节点的地理位置等不完善的地方,提出了改进算法 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering)^[13],它有效地改善了 LEACH 算法簇头可能分布不均匀的问题。以簇内平均可达能量 (AMRP, the Average Minimum Reachability Power) 作为衡量簇内通信成本的标准,节点用不同的初始概率发送竞争消息,节点的初始化概率 CH_{prob} 根据公式 2 确定:

$$CH_{prob} = \max(C_{prob} + E_{resident} / E_{max}, P_{min}) \quad (2)$$

其中 C_{prob} 和 P_{min} 是整个网络统一的参量,它们影响到算法的收敛速度。簇头竞选成功后,其它节点根据在竞争阶段收集到的信息选择加入哪个簇。HEED 算法在簇头选择标准以及簇头竞争机制上与 LEACH 算法不同,成簇的速度有一定的改进,特别是考虑到成簇后簇内的通信开销,把节点剩余能量作为一个参量引入算法中,使得选择的簇头更适合担当数据转发的任务,形成的网络拓扑更趋合理,全网的能量消耗更均匀。

3.3 TopDisc 算法

TopDisc (Topology Discovery) 算法^[14] 借鉴了图论中的思想,是基于最小支配集问题^[15] 的经典算法,它利用颜色来描述节点状态,解决骨干网拓扑结构的形成问题,其算法的核心思想包括两个要点:(1) 利用颜色标记理论找到簇头节点;(2) 利用与传输距离成反比的延时,使得一个黑色节点(即簇头节点)覆盖更大的区域。

在 TopDisc 算法中,节点可以处于三种状态,分别用白、黑和灰三种颜色表示。白色节点代表未被发现的节点;黑色节点代表成为簇头的节点;灰色节点代表簇内结点。所有节点被初始化为白色,由一个初始节点发起 TopDisc 算法,算法执行完毕后所有节点都将被标记为黑色或者灰色。图 3 所示的例子为算法执行完毕后网络拓扑结构的局部拓扑图,可以看到两个黑色簇头节点通过一个灰色簇内节点进行通信,保证了簇与簇之间的连通。

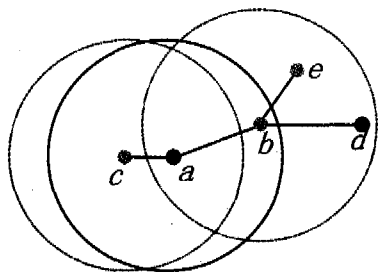


图 3 TopDisc 算法示意图

TopDisc 算法很好地继承了图论中的经典思想,它使节点在密集部署的无线传感器网络中快速地形成分簇结构,并在簇头之间建立树型关系。但是由这种算法构建成的层次型网络灵活性不强,重复执行算法收敛速度慢,开销过大,算法中也没有考虑到节点的剩余能量。

4 网内节点协同启发机制

无线传感器网络通常是面向应用的事件驱动的网络,骨

干网节点在没有检测到事件时不用一直保持在活动状态,所以有学者提出了网内节点协同启发机制,用来保证节点在有事件发生时能够及时自动醒来并唤醒邻居节点,形成数据转发的拓扑结构。无线通信模块的长时间关闭进一步地节省了节点的能量开销。

4.1 STEM 算法

STEM (Sparse Topology and Energy Management) 算法^[16] 是一种低占空比的节点唤醒机制。该算法采用双信道,即监听信道和数据通讯信道。具体地讲,STEM 算法又分为 STEM-B (STEM-BEACON) 算法和 STEM-T (STEM-TONE) 算法。

在 STEM-B 算法中,当一个节点想给另外一个节点发送数据时,它作为主动节点先发送一串唤醒包。目标节点在收到唤醒包后,发送应答信号并自动进入数据接收状态。主动节点接收到应答信号后,进入数据发送阶段。

在 STEM-T 算法中,节点周期性地进入侦听阶段,探测是否有邻居节点要发送数据;当一个节点想与某个邻居节点进行通信时,它就发送一连串的唤醒包,发送唤醒包的时间长度必须大于侦听的时间间隔,可以确保邻居节点能够收到唤醒包,紧接着节点就直接发送数据包。可见 STEM-T 比 STEM-B 更简单实用。

STEM 算法适用于类似环境监测或者突发事件监测等应用,经实验证明,节点的唤醒速度可以满足应用的需要。但是在 STEM 算法中,节点的睡眠周期、部署密度以及网络的传输延迟之间有着密切的关系,要针对具体的应用要求进行调整。

4.2 ASCENT 算法

ASCENT (Adaptive Self-Configuring sEmsor Networks Topologies) 算法^[17] 着重于均衡网络中骨干节点的数量,并保证数据通路的畅通。当节点在接收数据时发现丢包严重时,就向数据源方向的邻居节点发出求助消息;节点探测到周围的通信节点丢包率很高或者收到邻居节点发出的帮助请求时,它主动由休眠状态变为活动状态,帮助邻居节点转发数据包。

运行 ASCENT 算法的网络包括触发、建立和稳定三个主要阶段。触发阶段如图 4(a),在汇聚节点与数据源节点不能正常通信时,汇聚节点向它的邻居节点发出求助信息;建立阶段如图 4(b),当节点收到邻居节点的求助消息时,通过一定的算法决定自己是否成为活动节点,如果成为活动节点,就向邻居节点发送通告消息,同时这个消息是邻居节点判断自身是否成为活动节点的因素之一;稳定阶段如图 4(c),数据源节点和汇聚节点间的通信恢复正常,网络中活动节点个数保持稳定,从而达到稳定状态。

ASCENT 算法使得网络可以随具体应用要求而动态地改变拓扑结构,并且节点只根据本地的信息进行计算,不依赖于无线通信模型、节点的地理分布和路由协议等。但 ASCENT 算法只是提出了网络中局部优化的一种机制,还需要对更大规模的节点分布进行改进,并加入负载均衡技术等。

总结 目前,无线传感器网络拓扑控制的研究有了一定的发展,研究人员从 Ad Hoc 网络借鉴了大量经验,并针对无线传感器网络自身的特点提出了侧重点不同的拓扑控制算法。但目前大多数算法停留在理论研究阶段或者只做过少量节点的模拟,没有充分考虑到实际应用时的诸多困难,有待进

(下转第 87 页)

图 2 中 a) 和 b) 所示为分别固定预测范围聚集查询时间窗口 $qTlen = 50$ 及查询空间窗口 $qRlen = 1000$ 时, TPR*-tree 与 aTPR-tree 回答查询所需要的磁盘 I/O 代价。从中可以看出, 基于 aTPR-tree 索引的 EPRA 查询算法具有很好的查询性能。这是由于 TPR*-tree 中间节点并未包含移动对象聚集信息, 回答 PRA 查询必须访问查询空间窗口内的所有叶节点, aTPR-tree 中间节点包含了移动对象聚集信息, 因此可以节省一部分节点访问代价。而且 EPRA 查询算法采用更精确的搜索剪枝准则, 因而具有很好的查询性能。

总结 本文针对移动对象预测范围聚集查询问题, 提出了一种面向移动对象预测范围聚集查询索引 (aggregate TPR-tree, aTPR-tree) 以减少预测范围聚集查询所访问的节点。aTPR 树索引增加了一个建于移动对象标识上的哈希辅助索引结构, 并利用自底向上的更新算法, 具有很好的更新性能和并发性。基于 aTPR 树索引的 EPRA 查询算法大大减少了查询所需要访问的磁盘节点, 且支持多种预测范围聚集查

询, 具有良好的查询性能。

参考文献

- Lo'pez I F V, Snodgrass R T. Spatiotemporal Aggregate Computation: A Survey. In: IEEE TKDE, 2005(2): 271~286
- Saltenis S, Jensen C S, et al. Indexing the Positions of Continuously Moving Objects. In: Proc. of the SIGMOD, 2000
- Tao Y, Papadias D, Sun J. The TPR*-Tree: An Optimized Spatio-Temporal Access Method for Predictive Queries. In: VLDB, 2003, 790~801
- Prabhakar S, Xia Y, Kalashnikov D V, et al. Query Indexing and Velocity Constrained Indexing: Scalable Techniques for Continuous Queries on Moving Objects. IEEE Transactions on Computers, 2002
- Tao Yufei, Papadias D, Zhai Jian, et al. Venn Sampling: A Novel Prediction Technique for Moving Objects. In: Proc. ICDE, 2005
- Tao Yufei, Sun Jimeng, Papadias D. Selectivity Estimation for Predictive Spatio-Temporal Queries. In: Proc. ICDE, 2003
- Sun Jimeng, Papadias D, Tao Y, et al. Querying about the Past, the Present, and the Future in Spatio-Temporal Databases. In: VLDB, 2004

(上接第 38 页)

一步研究的问题包括: (1) 通信链路质量的评价机制和邻居节点的选择策略; (2) 拓扑结构的自适应性; (3) 新颖的网络拓扑控制机制; (4) 结合数据收集和移动目标跟踪这两种应用热点, 研究面向具体应用的拓扑控制方案。

综上所述, 无线传感器网络拓扑控制研究的发展趋势是以实际应用为背景, 多种机制相互融合, 强调网络拓扑控制的自适应性和鲁棒性, 在保证网络的连通性和覆盖度^[18]的前提下, 提高网络的通信效率, 最大限度地节省能量, 延长整个网络的生存时间。

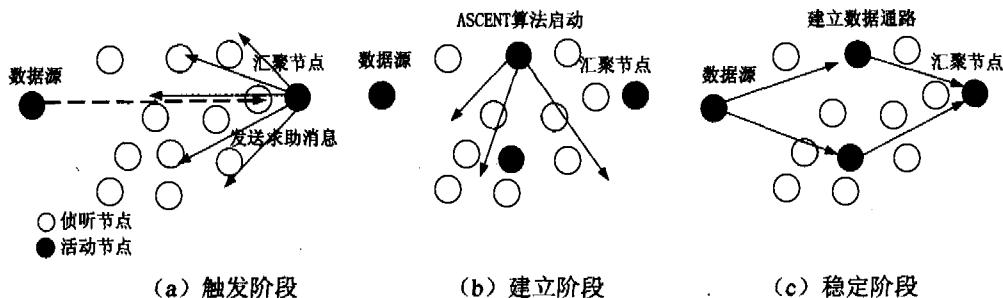


图 4 ASCENT 算法示意图

参考文献

- Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. A Survey on Sensor Networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 4: 102~114
- Santi P. Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks. ACM Comp Surveys, 2005, 37(2): 164~194
- Amis A, Prakash R, Vuong T, et al. MaxMin D-Cluster Formation in Wireless Ad Hoc Networks. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), Mar. 1999
- Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, et al. Power Control in Ad-Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol. In: Proceedings of the European Wireless Conference, Florence, Italy, 2002. 156~162
- Kawadia V, Kumar P R. Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks. INFOCOM 2003, San Francisco, March 30 - April 3, 2003
- Kubisch M, Karl H, Wolisz A, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. IEEE WCNC 2003, New Orleans, Louisiana, March 2003
- Jaromczyk J W, Toussaint G T. Relative neighborhood graphs and their relatives. In: Proc. IEEE, 1992, 80: 1502~1517
- Li N, Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: Problems and solutions. INFOCOM, 2004
- Rodoplu V V, Meng T H. Minimum Energy Mobile Wireless Networks. IEEE J Selected Areas in Communications, August 1999, 17(8): 1333~1344
- Li L, Halpern J Y, Bahl P, et al. Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks. In: Proc. ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC), Newport, RI, USA, Aug. 2001. 264~273
- Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, October 2002, 1(4): 660~670
- Bandyopadhyay S, Coyle E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE INFOCOM'03, April 2003
- Younis O, Fahmy S. Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach. In: Proceedings of IEEE INFOCOM, March 2004
- Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A Topology Discovery Algorithm for Sensor Networks with Applications to Network Management. [DCS Technical Report]. DCS-TR-441. Rutgers University, May 2001
- Bao L, Garcia-Luna-Aceves J J. Topology Management in Ad Hoc Networks. In: Proc. MobiHoc, 2003. 129~140
- Schurgers C, Tsiatsis V, Ganeriwal S, et al. Topology management for sensor networks: exploiting latency and density. Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Lausanne, Switzerland, June 09-11, 2002
- Cerpa A, Estrin D. ASCENT: Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies. In: Proceedings of IEEE INFOCOM, New York, NY, June 2002
- Wang X, Xing G, Zhang Y, et al. Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks. In: The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys03), Los Angeles, CA, USA, November 2003