

基于热点区域场景的传感器网络拓扑控制算法

刘林峰¹, 刘 业²

(1. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003;
2. 中国科学技术大学 苏州研究院, 江苏 苏州 215123)

摘 要:无线传感器网络具有应用多样性特点,文中基于热点区域场景研究其拓扑控制问题。建立了无线传感器网络拓扑控制通用模型,进行了形式化描述和定义,分析了面向热点区域场景的拓扑控制目标 and 需求,提出了一种融合功率控制技术和分簇控制技术的混合式拓扑控制近似算法 HTCA。HTCA 能区分热点区域与非热点区域,在热点区域形成树结构并进行适当的剪接,而在非热点区域形成簇结构,该混合式拓扑结构能有效地降低全局能耗。仿真实验结果表明,HTCA 能获得较优的拓扑结构,有效地延长了基于热点区域场景的无线传感器网络生命周期。

关键词:无线传感器网络; 拓扑控制; 混合式算法; 热点区域事件场景

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)10-0008-04

A Topology Control Algorithm Based on Hotspot Scene in Sensor Networks

LIU Lin-feng¹, LIU Ye²

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)

Abstract: The application multiplicity is an important characteristic of wireless sensor networks. The topology control problem in hotspot scenes is studied by this paper. The topology control common model is constructed firstly, and the model is described and defined formally. The objective and requirement of topology control in hotspot scenes are analyzed, and a hybrid topology algorithm HTCA including power control and cluster control technologies is proposed. Hotspot scenes or non-hotspot scenes can be distinguished by HTCA. The tree-structure and proper cut & engraftation are used to form topology in hotspot area, and the cluster-structure is used to form topology in non-hotspot area. The total energy consumption can be reduced by the hybrid structure. The simulation experiments suggest the HTCA can obtain well-constructed topology, which prolonged wireless sensor network lifetime in hotspot scenes effectively.

Key words: wireless sensor networks; topology control; hybrid algorithm; hotspot event scenario

0 引言

无线传感器网络^[1,2] (Wireless Sensor Network, WSN)最重要目标^[3]即降低网络运行的能量消耗,延长网络的生命周期^[4]。拓扑控制技术是 WSN 中研究热点之一, WSN 拓扑控制机制可分为节点功率控制方

式^[5~7]和分簇控制方式^[8~10]两类。WSN 具有应用多样性,即不同应用场景对 WSN 协议的需求迥异,因此分簇控制算法的设计必须结合特定的应用场景。从兴趣事件发生的敏感程度对 WSN 的应用场景进行分类,归纳为如下 3 类场景:

(1) 兴趣事件发生概率较低的应用场景,对应于观察兴趣区域中偶然事件的应用,如建筑物状态监控等;

(2) 对兴趣数据采集频率较高的应用场景,用于采集对兴趣区域变化非常敏感的应用数据,一般属于事件实时性要求极高的应用,例如医疗护理、军事战争等应用;

(3) 局部区域的事件发生概率较高,该区域中数据采集和转发任务繁重,形成“热点区域”,如广阔区域(海洋等)监测应用。

收稿日期: 2010-02-01; 修回日期: 2010-05-05

基金项目:国家自然科学基金(60903181, 60573141, 60773041, 40801149); 江苏省自然科学基金(BK2008451); 国家高科技 863 项目(2006AA01Z219, 2007AA701201, 2008AA701202); 江苏省博士后基金(0801019C); 中国博士后科学基金(20090451240); 江苏省高校自然科学基金项目(09KJB520009); 南京邮电大学引进人才科研启动基金(NY208073)

作者简介:刘林峰(1981-),男,博士,讲师,CCF 会员,研究方向为无线传感器网络。

在不同类型的应用场景下,环境参数的差异对WSN生命期所造成的影响是不一致的,因此对拓扑控制方式选择及算法研究必须结合特定部署场景的环境特征。面向低概率事件场景的拓扑控制算法研究^[11]已有相应研究成果。文K将针对热点区域场景研究合理的拓扑控制算法。

1 建模及分析

首先建立一个WSN通用拓扑控制模型,该模型中节点功率控制方式可以视作分簇控制方式的一种特例,即节点功率控制是当HP(簇头所占总节点数比例)取值为1时分簇控制方式的特殊情况,不妨以分簇结构为通用模型进行形式化描述。抽象WSN拓扑为一个二维平面内的无向图 $G(V, E)$,其中 V, E 分别表示节点、链接的集合, $E \subseteq V \times V$, $|V| = N$, $|E| = M$ 。对于任意节点 $i \in V$,当前节点能量记作 $e(i)$,获取兴趣数据并向汇聚节点转发的速率为 $v(i)$,节点使用最大发射功率时能覆盖半径为 r_{\max} 的圆面区域,该区域称为节点 i 的邻接域,记作 $G_i(V_i, E_i)$,必有 $V_i \subseteq V, E_i \subseteq E$,记 $|V_i| = N_i, |E_i| = M_i$ 。若 $(i, j) \in E$,则必有 $(j, i) \in E$,其中 $i, j \in V, (i, j)$ 的距离记作 $d(i, j)$;在分簇机制下, $G(V, E)$ 被划分为 K 个簇 C_1, C_2, \dots, C_K ,簇 C_u 的簇头记作 c_u 。此外,定义几种属性函数,设 X 为布尔逻辑数集合, R 为正实数集合, R' 为非负实数集合, $\forall i, j \in V$,定义网络连通函数 $\text{connectivity}(G): G(V, E) \rightarrow X$;定义相邻节点 i 和 j 的能量消耗函数 $w_{ij}: V \times V \rightarrow R', w_{ij} = \omega d(i, j)^\theta (2 \leq \theta \leq 6)$;定义节点入度值函数 $\text{degree}_{\text{in}}(i): V \rightarrow R$ 。为便于模型的分析 and 描述,给出如下的定义:

定义1. 热点区域 S_{hot} 。两节点 i 和 j ,若有 $i \in S_{\text{hot}}, j \in G - S_{\text{hot}}$,则 $v_i > v_j$ 。

定义2. 簇的域内可达性。若簇 C_u 内, $\forall i \in V_i, d(i, c_u) \leq r_{\max}$,则称簇 C_i 具有簇内连通性。

定义3. 簇头的互通性。 $\forall u, u' \leq K, c_u$ 与 $c_{u'}$ 间存在一条形如 $(c_u, c_l, \dots, c_l', c_{u'})$ 的通路。

由于热点区域中传感器节点需要持续获取和转发兴趣数据,因此难以进入休眠状态,并且该区域内兴趣数据量大,节点承载着极重的传输压力,易成为网络生命期延续的瓶颈。该区域内节点无法进入休眠状态,使得它们不适宜通过分簇控制方式进行拓扑管理。为节省网络能耗,当侦听能耗明显高于传输能耗时采用较大的簇规模,而当传输能耗明显高于侦听能耗时应采用较小的簇规模。定义1表明热点区域中兴趣数据获取量很大,此时传输能耗将远大于侦听能耗,簇规模应趋近于最小,即热点区域的拓扑退化为 $HP = 1$ 的功率

控制方式。所以,基于热点区域事件场景的拓扑控制算法应采用一种热点区域采用功率控制方式、其余区域采用分簇方式的混合式控制算法。综上分析,热点区域的能耗状况将会制约网络全局的生命期,文中将通过延长热点区域生命期来达到WSN生命期延长的目的。而热点区域外节点(特别是簇头)将通过定期更换的方式避免其能耗过度,因此下述分析中不会过多涉及热点区域外节点的能耗情况。从模型描述可知,当 S_{hot} 内节点不互相承担转发任务,而是直接转交数据给 S_{hot} 外节点时,WSN生命期趋向于理想值为 $\min\{e/v(i) \mid \forall i \in S_{\text{hot}}\}$ 。然而,在实际部署中仅当热点区域范围很小时可能出现该理想生命期值。据WSN生命期定义,热区生命期的延长目标可以表示为公式(1)。

$$\text{Maximize } \{\min \{\text{Lifetime}(i) \mid \forall i \in S_{\text{hot}}\}\} \quad (1)$$

式(1)表示使得热区节点的最小生命期最大化,其中 $\text{Lifetime}(i)$ 表示节点 i 的生命期。如图1所示,若热点区域内某节点 i 的入度为 n ,即有 n 个热区节点需要 i 节点承担转发任务,节点 i 的下跳转发节点 j 可为热区节点或相邻簇头,则若维持当前状态,节点 i 的生命期 $\text{Lifetime}(i)$ 表达如公式(2)。

$$\text{Lifetime}(i) = \frac{e(i)}{\bar{\omega}(v(i) + \sum_{k=1}^n v(u_k))d(i, j)^\theta} \quad (2)$$

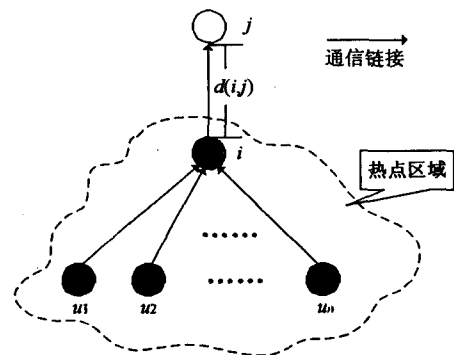


图1 节点生命期分析示意图

式(2)中, $v(i) + \sum_{k=1}^n v(u_k)$ 表示包括节点 i 自身采集数据在内的总数据流量转发需求。结合公式(1)和(2)进行分析,为延长热区生命期,热区节点在功率控制中必须要考虑以下两项因素:① 缩短单跳链接长度,有利于数据转发的能耗降低;② 减小热区节点的入度,可以降低总数据流量,缓解转发任务。由此,在形成拓扑过程中热区节点偏向选择距离较近、入度较小的下跳对端进行链接。值得说明的是,因热区外簇头的角色定期更换,不必考虑其生命期对WSN生命期的影响,因此不妨设置 $\text{degree}_{\text{in}}(j) = 0 (\forall j \in G - S_{\text{hot}})$ 。

2 算法设计及分析

文中提出一种基于热点区域事件场景的拓扑控制算法 HTCA(Hotspot Topology Control Algorithm),该算法能够区分热点区域和非热点区域,HTCA 的具体执行步骤如下:

步骤 1. 所有节点以最大功率广播一个包含自身 ID 号和位置的 Node_msg 报文,节点收到邻居节点的报文时将该邻居置入 Neighbor Information 域内。

步骤 2. 根据兴趣数据流量识别热点区域,标识热点区域节点避免它们在簇生成过程中成为簇头。

步骤 3. 使用 PCA 算法^[11]形成簇 C_1, C_2, \dots, C_K ,把热区节点从各簇中分离出来,并终止休眠状态。

步骤 4. 直接收到簇头报文的热区节点(第 0 层热区节点,记作 $Set(0)$),选择与其距离最近的簇头进行链接,修改链接标记,随后广播 Link_msg 报文通知其他热区节点。

步骤 5. 节点收到第 $k-1$ 层节点发送的 Link_msg 后,成为第 k 层热区节点,记作 $Set(k)$,选择最近的第 $k-1$ 层节点进行链接,修改链接标记,随后广播 Link_msg 报文通知其他热区节点。

步骤 6. 重复步骤 5 直至所有热区节点的链接标记域中都有其他热区节点。

由于不同热区节点采集到的兴趣数据流量未必相同,且一般具有易变性,所以文中用根节点需要承担的转发节点个数来表示其负载压力,记为 $P(\text{root})$ 。

$$P(\text{root}) = \sum_{i \in \text{children}(\text{root})} \text{degree}_{\text{in}}(i) + \text{degree}_{\text{in}}(\text{root}) + 1 \quad (3)$$

式(3)说明 $P(\text{root})$ 由子孙节点的入度、根节点入度和根节点自身负载 3 部分组成。 $P(\text{root})$ 值与该根节点生命期密切相关,若不同树的根节点的负载压力分布不均,就极有可能造成负载过重的根节点过早死亡,因而必须在根节点负载之间进行均衡,这就需要在不同树之间进行分支的剪接,具体方法如步骤 7 描述。

步骤 7. 首先第 0 层节点(根节点)根据负载压力大小进行排序,由负载压力自高向低顺序根节点按照广度优先遍历其子孙。不妨记当前遍历的树为 T ,根为 root ,当遍历到某子孙 child 时判断是否符合以下 3 个条件:① child 存在潜在链接,且链接的对端属于另一棵根为 root' 的树 T' ;② T' 尚未遍历,以 child 为根的子树嫁接到 T' 后满足不等式(4);③ $P(\text{child}) > \zeta$ 。 ζ 为预设值,设置该阈值可以避免为均衡负载而过度破坏原有较优链接。若 child 存在多条符合以上条件的潜在链接,则选择最短潜在链接进行剪接。

$$P(\text{root}) - P(\text{child}) \geq P(\text{root}') + P(\text{child}) \quad (4)$$

步骤 8. 树 T 被遍历剪接后,更新所有相关树的负载压力并重新排序,依照步骤 7 对剩余的未遍历树进行遍历。

步骤 9. 间隔 adjust_time ,重复执行步骤 3-8,直至 WSN 内出现节点剩余能量为 0。

3 仿真实验

通过改变多种模型参数观察对 WSN 生命期的影响,并将 HTCA 与 LMST^[12]、GAF 算法进行比较。实验环境如下: N 个节点散布于 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的正方形事件区域,随机选择 1 个汇聚节点,随机选择方形区域作为热点区域,热区节点以速率 v (服从正态分布 $v \sim N(\mu, \sigma^2)$) 匀速获知数据并发往汇聚节点,程序以时间间隔 adjust_time 重新确定拓扑,实验中不考虑节点移动性和报文传输延时,并且忽略节点接收报文及处理器的能耗。当 WSN 中出现某节点能量为 0 则终止本次仿真,实验的主要参数如表 1 所示。

表 1 实验参数表

参数	描述	取值
r_{\max}	节点最大功率覆盖半径	15m
ω	单位费用函数的参数	$2 \times 10^{-5} \text{J/kB} \cdot \text{m}^3$
e	节点初始能量	20 J
θ	能耗指数	3
adjust_time	调整拓扑的时间间隔	10 s
listen_cost	节点侦听能耗	0.05J/s
L	热点区域边长	10m
N	节点数	600
μ	正态分布的位置参数	8 kbps
σ	正态分布的尺度参数	1
ζ	树分支的剪接阈值	3

3.1 实验一

热点区域面积与场景类型密切相关,并且直接影响 WSN 生命期,本实验通过不断改变 L 值,观察热点区域大小对生命期产生的影响,生命期变化曲线如图 2 所示。

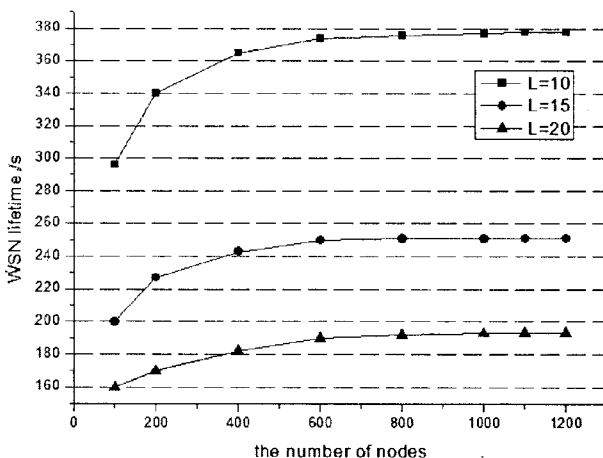


图 2 热点区域面积对 WSN 生命期的影响

首先,从图 2 可以看到 $L = 10$ 的曲线要远高于其他两条曲线,该现象表明当 L 增长即热点区域面积变大时,WSN 生命期会随之缩短,这是因为热点区域事件场景中 WSN 生命期主要取决于热点区域节点的能耗状况,当热点区域扩大则意味该区域的数据转发负载增大,从而造成 WSN 生命期的降低。其次,随着网络节点数量的增长(从 100 逐渐增至 1200),3 条曲线都体现出生命期延长的趋势, $L = 10$ 曲线的最高处达 377.2s,该现象是由两方面原因造成的:①当节点分布更为密集时单跳邻居间链接相对变短,数据传输更为节能;② HTCA 算法在拓扑生成过程中具有更宽广的解空间,能够形成更为合理的拓扑结构。此外,从图 2 中还能发现每条曲线的增幅随着节点数增大时都呈现趋于平缓的态势,这是由于当算法的解空间充分饱和之后,节点分布密集使得热点区域中节点数增多,从而热点区域的数据采集量也相应增长,在此影响下生命期增幅趋于缓和。

3.2 实验二

本实验观察单位时间侦听能耗对生命期的影响,当 `listen_cost` 分别取值 0.05, 0.10 和 0.15 时,3 条曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出尽管 `listen_cost` 差异明显,但 3 条曲线非常接近,最大差值仅为 7.3s,表明侦听能耗对 WSN 生命期影响非常微弱,该实验结果也印证了面向热点区域场景的 WSN 生命主要取决于采取功率控制方式的热区能耗状况。

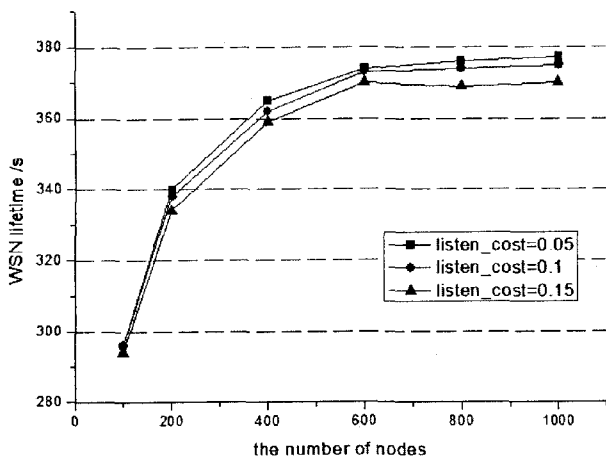


图 3 参数 `listen_cost` 对生命期的影响

3.3 实验三

HTCA 是一种混合式的拓扑控制算法,本实验将 HTCA 与功率控制算法 LMST、分簇方式控制算法 GAF 作性能比较,以验证 HTCA 在热点区域事件场景下的适用性,不同算法获得的生命期曲线如图 4 所示。图 4 表明 HTCA 算法明显优于 LMST 和 GAF 算法,因为 HTCA 针对热点区域场景区分了热点区域和非

热点区域,并分别采用了功率控制方式和分簇控制方式,有效地实现了对 WSN 拓扑的混合式管理。LMST 在非热点区域形成生成树结构,不能降低非热点区域的能耗,而 GAF 算法在热点区域使用分簇结构,使得热点区域的簇头承担过高负载压力,也不利于生命期的增长。

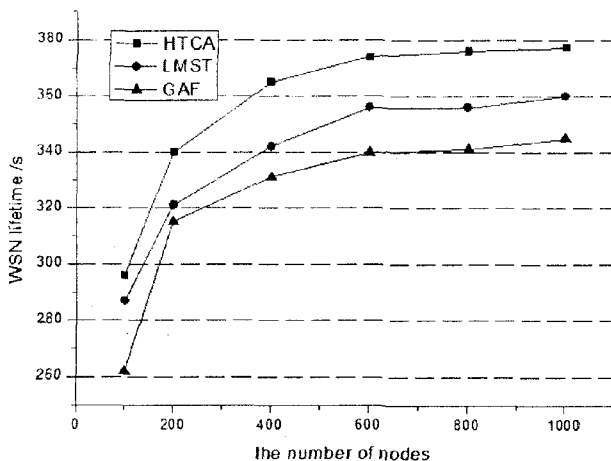


图 4 HTCA、LMST 和 GAF 算法比较

4 结束语

基于热定区域场景的无线传感器网络,深入研究了其拓扑控制问题,首先建立了可以演化为功率控制模型的通用 WSN 分簇控制模型,并基于热点区域事件场景分析了拓扑控制的目标和需求,设计了一种适合该场景的混合式拓扑控制算法 HTCA。实验结果表明,HTCA 算法能获得较优的拓扑结构,有效地延长 WSN 的生命期。HTCA 为数据的高效传输、均衡地消耗 WSN 的能量提供了良好的支撑基础,并最终能延长网络的生命期,对具有代表性的基于热点区域场景的无线传感器网络拓扑控制研究具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor network: A survey[J]. Computer Networks, 2002, 38 (4): 393 - 422.
- [2] Elson J, Estrin D. Sensor networks: A bridge to the physical world[M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2004: 3 - 20.
- [3] Sun L M, Li J Z, Chen Y, et al. Wireless sensor networks [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2005: 3 - 20.
- [4] Chang J H, Tassiulas L. Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks[C]// In: Proc of 37th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello, IL: [s. n.], 1999.

(下转第 158 页)

IETF 最新的标准 RFC5506, 对 SRTP 的安全问题做的补充性描述, SRTP 对于首次发送的两个报文没有做明确的处理^[17], SRTP 的安全方案有待进一步改进。

文中对 SRTP 协议的密钥推导、加密/解密、身份验证等安全机制进行了抽象的提取和概括, 并进行模块化的设计和实现, 这样彼此之间只要通过接口调用就可以协调工作, 在一定程度上提高了效率, 从而对实时性要求特别高的视频流传输来说减少了延时, 提高了会话效果。

参考文献:

- [1] Doraswamy N, Harkins D. IPSec: The new security standard for the internet, intranets, and virtual private networks[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
- [2] Kent S, Seo K. Security architecture for the internet protocol [S]. Internet Engineering Task Force, RFC 4301, 2005.
- [3] Kent S. IP Encapsulating Security Payload (ESP) [S]. Internet Engineering Task Force, RFC 4303, 2005.
- [4] Baugher M, McGrew D, Naslund M, et al. SRTP: The Secure Real Time Transport Protocol [S]. RFC 3711. IETF, 2004.
- [5] Chen Shuhui, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. A Compound Video Encryption Algorithm Based on Hyperchaos [C]// Innovative Computing Information and Control, 2008. ICICIC '08. 3rd International Conference. [s.l.]: [s.n.], 2008.
- [6] 张 萌, 王繁珍, 刘忠信, 等. 基于 Baker 映射的视频流加密算法 [D]. 天津: 南开大学, 2006.
- [7] 袁 春, 钟玉琢, 杨士强, 等. 基于视频对象模板的可扩展压缩视频流加密算法 [D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [8] 赵全习, 胡文志, 郑连清, 等. 一种流加密方案的设计与分析 [D]. 西安: 空军工程大学, 2007.
- [9] Tosun Ali Saman, Feng Wu - chi. Efficient Multi - layer Coding and Encryption of MPEG Video Streams [M]. [s.l.]: IEEE, 2000.
- [10] Fukase M, Takeda H, Tenma R, et al. Development of a Multimedia Stream Cipher Engine [M]. [s.l.]: IEEE, 2006.
- [11] 朱孙斌, 陈惠芳, 赵问道, 等. 安全的实时传输协议 SRTP 的研究与实现 [M]. 北京: 中国学术期刊出版社, 2004: 30 - 33.
- [12] Ooi H - S. High - speed stream ciphe [C]// Advanced Information Networking and Applications. 18th International Conference. [s.l.]: [s.n.], 2004: 39 - 42.
- [13] 王 一, 陈 凯, 喻 靓. RTP 流插入攻击及安全机制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [14] Schulzrinne H, Casner S, Frederick R, et al. RTP: A Transport Protocol for Real - time Applications [S]. RFC 3550. IETF, 2003.
- [15] Baugher M, Weis B, Hardjono T, et al. The Group Domain of Interpretation [S]. RFC 3547. IETF, 2003.
- [16] Krawczyk H, Bellare M. HMAC: Keyed Hashing for Message Authentication [S]. RFC 2104. IETF, 1997.
- [17] Johansson I, Westerlund M. Support for Reduced - Size Real - Time Transport Control Protocol (RTCP) [S]. RFC 5506. IETF, 2009.

(上接第 11 页)

- [5] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, et al. Power Control in ad - hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol [C]// In: Proc of European wireless Conf. Italy: [s.n.], 2002: 156 - 162.
- [6] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, et al. Distributed algorithm for transmission power control in wireless sensor networks [C]// In: Proc of IEEE WCNC 2003. New Orleans: IEEE press, 2003.
- [7] Blough D, Leoncini M, Resta G, et al. The k - neighbors protocol for symmetric topology control in ad hoc networks [C]// In: Proc of ACM MobiHoc 03. Annapolis, MD: ACM press, 2003: 141 - 152.
- [8] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography - informed energy conservation for ad hoc routing [C]// In: Proc of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking. Rome, Italy: ACM press, 2001: 70 - 84.
- [9] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application - specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [10] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management [EB/OL]. 2001 - 05. <http://athos.rutgers.edu/dataman/papers/TopDisc.pdf>.
- [11] Liu L F, Jin S. A Clustering Control Algorithm of Wireless Sensor Networks in Low Probability Event Scenario [J]. Journal of computer research and development, 2008, 45(10): 1662 - 1668.
- [12] Li N, Hou J C, Sha L. Design and analysis of an MST - based topology control algorithm [C]// In: Proc of Twenty - Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFORCOM 2003). San Francisco, CA: IEEE press, 2003: 1702 - 1712.