

无线传感器网络中多 sink 节点优化部署方法

刘 强,毛玉明,冷甦鹏,李龙江,庄奕群

(电子科技大学 通信与信息工程学院,成都 611731)

(liuqiang@uestc.edu.cn)

摘 要:大规模无线传感器网络(WSN)环境下,当网络结构采用单一的 sink 节点时,容易造成 sink 节点周围的普通传感节点因为转发大量其他节点的数据,迅速消耗掉自身能量而使网络失效。为了延长网络寿命,需要降低传感节点到 sink 节点的跳数,而采用多 sink 结构是一个有效的方法。为此,需要考虑一定规模的网络中,应该布置多少 sink 节点,才能使得网络寿命最大化的同时网络成本最低。基于栅格网络结构,提出了多 sink 节点下的网络寿命模型和网络成本模型,并采用一种新颖的方法计算最大网络寿命成本比(RLC),推导出了保证网络寿命最大化的同时网络成本最低的 sink 节点个数的表达式。理论结果表明,该值与网络规模、关键节点数、节点收发功率以及普通节点和 sink 节点的成本等参数有关。最后通过仿真实验证明了该结论的正确性。

关键词:无线传感器网络;多 sink 节点;网络寿命;网络成本;能量模型

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Optimal deployment of multiple sink nodes in wireless sensor networks

LIU Qiang, MAO Yu-ming, LENG Su-peng, LI Long-jiang, ZHUANG Yi-qun

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: In a large-scale Wireless Sensor Network (WSN), the nodes closer to the single sink node use up their energy more quickly than others because of relaying more packets so that the network is invalid rapidly. In order to elongate the network lifetime, it is required to deduce the hops from sensor node to sink node. An efficient method is to deploy multiple sink nodes instead of single one. Therefore, it needs to be considered that how many sink nodes should be deployed on minimizing network cost and maximizing network lifetime. A network lifetime model and a cost model were proposed in WSN with multiple sink nodes and a new method was presented to determine the optimal number of sink nodes by computing the Ratio of Lifetime to Cost (RLC). The theoretical studies show that the number of sink nodes is related to the cost of sensor nodes and sink nodes, the network scale, the number of critical sensor nodes and the transmission power of sensor node. The simulation results prove the theoretical conclusion.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); multiple sink node; network lifetime; network cost; energy model

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的应用已经越来越普及,但仍然有很多问题需要解决。在大规模无线传感器网络环境下,当网络中采用单一 sink 节点时,由于普通传感节点距离 sink 较远,会通过多跳方式将传感信息送给 sink 节点, sink 周围节点不得不转发大量普通节点的数据,消耗大量能量,因此这些节点会最先消耗完能量而死亡。当 sink 节点周围的普通节点都死亡,其他节点就无法将数据送到 sink 节点上去,导致网络失效。为了延长网络寿命,需要减少普通节点到 sink 节点的跳数,在网络中布置多个 sink 节点,是一种有效的方法。然而与普通传感器节点的小功耗、低成本不同, sink 节点因为要进行复杂的数据处理,通常是高能耗、造价昂贵的节点。因此在网络中布置这些 sink 节点存在成本问题。网络会呈现这样的特性:当向网络中增加少量 sink 节点时,能有效降低普通节点到 sink 的平均跳数,网络寿命会有很大提高;当放置更多的 sink 节点时,对网络平均跳

数的降低效果越来越小,网络寿命的增长也越来越缓慢。当 sink 节点数增加到一定数目时,所有节点到 sink 节点的跳数均为一跳时,再增加 sink 节点个数,网络寿命则不再增加。而随着 sink 个数的增加,网络成本会大幅增加。因此应该存在一个最佳的 sink 节点数目,使得网络寿命和网络成本之间有一个平衡的最优效果。

本文采用网络寿命与网络成本的比值——网络寿命成本比(Ratio of Lifetime to Cost, RLC)来衡量这个效果。换句话说,应该存在一个确定的 sink 节点数目 n , 使得网络寿命与网络成本的比值最大。为方便研究,本文采用栅格网络结构,并在 sink 节点均匀分布的前提下进行研究。

本文介绍了目前关于多 sink 节点布置策略相关研究工作情况,给出了多 sink 传感器网络寿命和成本的数学模型;基于这个数学模型,推导出满足最大化 RLC 的 sink 节点数 n 的表达式。针对理论分析的场景,在 NS2 中进行了仿真,仿真的结果和分析验证了理论分析的正确性。

收稿日期:2011-03-25;修回日期:2011-05-20。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX03006-001);中兴通讯产学研合作论坛对外合作项目(2009ZTF01001-020.2)。

作者简介:刘强(1972-),男,江苏泗阳人,讲师,硕士,主要研究方向:无线传感器网络;毛玉明(1956-),男,四川邛崃人,教授,博士生导师,主要研究方向:宽带通信网、网络体系结构与协议分析;冷甦鹏(1973-),男,四川攀枝花人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:自组织网络、无线传感器网络;李龙江(1976-),男,河南三门峡人,副教授,博士,主要研究方向:数据通信、计算机网络;庄奕群(1989-),男,福建福州人,硕士研究生,主要方向:网络性能分析、网络协议分析。

1 相关研究工作

无线传感器网络节点部署的研究很多,主要分为普通传感节点的部署和异构节点的部署。普通传感节点的部署通常考虑网络覆盖度和连通性^[1-3]。异构节点的部署通常指簇头节点或中继节点的部署,这些节点相对于普通节点具有更大的能量、更强的数据处理能力。部署策略主要考虑能耗或网络寿命问题^[4-6]。多 sink 节点的部署可以看做是异构节点的部署问题,但和簇头节点不一样的是, sink 节点本身具有持续电源供电或者可以方便地更换电池,因此通常不考虑 sink 节点本身的能量消耗问题。

大部分多 sink 节点部署的研究考虑的是 sink 节点的位置对网络寿命的影响。文献[7]研究了在栅格结构下的多 sink 节点的部署策略,提出 GEP-MSN 算法,在特定应用下能延长网络寿命,缩短响应时间。文献[8]则提出两种算法,一种是基于全局信息对 sink 节点布置的 global 算法,另一种是仅基于邻节点信息的 1hop 算法,都在一定程度上延长了网络寿命。文献[9-10]则研究了具有移动特性的 sink 节点根据能量消耗和分布情况动态移动自己的位置,从而达到延长网络寿命的目的。文献[11]在假定传感器节点距离 sink 节点只有一跳距离的简单结构下,提出了一种启发式算法 DCHD,性能优于一般的贪婪算法。

因为所研究问题最终都与网络寿命有关,所以以上文献中都建立了相应的网络能耗模型。绝大部分模型都是根据文献[12]中的能耗模型建立的。在文献[12]中,给出了普通节点和异构节点通用能量消耗模型,适用于绝大多数网络环境。文献[13]基于文献[12]的能量模型,首先给出了分簇传感器网络中能耗最小的网络寿命约束模型为簇头节点与周围一跳节点同时死亡的约束条件。在此约束条件下,该文通过一系列推导得出在随机分布和栅格分布两种网络中簇头节点的密度 λ_1 近似等于 $\sqrt{\lambda_0}$, λ_0 为普通节点密度。文献[14]在文献[13]的基础上,进一步研究了传感器网络的感知/发射半径的变化与网络最大寿命之间的关系。

上述多 sink 部署策略基本上都是从 sink 节点位置部署的角度来考虑对网络能耗的影响。文献[13-14]也仅仅研究了分簇网络中的簇头节点数量的变化对网络寿命的影响,而专门针对 sink 节点个数对网络能耗的研究目前还不多。

2 网络寿命模型

为了讨论问题方便,本文所研究的网络结构为栅格结构。本文将网络中的节点分为三种: sink 节点、关键节点和普通节点。 sink 节点是传感信息的最终目的地,多个 sink 节点均匀地分布在网络中。 sink 节点周围的一跳节点称为关键节点,所有发向 sink 节点的数据信息都需要通过关键节点来转发。如图1所示(黑色实心圆表示 sink 节点)。图中用虚线连接起来的节点为关键节点。 sink 节点增多,关键节点的个数也相应增多。普通节点为距 sink 一跳以外的其他传感节点,它们只能通过多跳的方式将数据发给 sink 节点。

显然,网络的寿命取决于关键节点的寿命。若这些关键节点全部死亡,其他传感节点的信息就无法传到 sink 节点(只要有一个关键节点存活,数据就可以传到 sink 节点),则网络寿命结束。因此,可以给出如下定义:

定义 网络的寿命为从网络启动到最后一个关键节点死亡所持续的时间,用 L 表示。

各个关键节点的死亡时间是不一样的,但在现实当中第

一个关键节点与最后一个关键节点死亡的时间相差不会太大。因为当有关键节点先死亡后,它所担负转发的节点会由剩余的存活关键节点承担,因此剩余关键节点的负担增加,会加速它们的死亡。为避免关键节点之间死亡时间不一致给分析带来的复杂性,可以假设关键节点均匀分担所有普通节点的转发任务,所有关键节点消耗均等的能量,最终同时死亡。

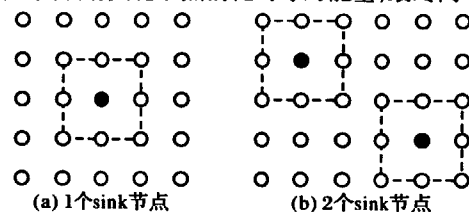


图1 具有1个和2个 sink 节点的传感网络

在研究问题之前,不妨先做如下假设:1)网络结构为栅格结构;2)多个 sink 节点在网络中均匀分布,关键节点无重合;3)所有关键节点死亡时间一致。

所使用的变量定义如下: P 代表关键节点的寿命; ε_t 表示传感节点发送一个数据包所消耗的能量; ε_r 表示传感节点接收一个数据包所消耗的能量; N 表示传感网内普通节点的总数量; N_c 表示每个 sink 节点相邻的关键节点的个数; n 表示 sink 节点的个数。

本文借鉴了文献[12-13]中的能量模型。该模型中关键节点转发一个数据包所消耗的能量为 $\varepsilon_t + \varepsilon_r$ 。当网络中只有一个 sink 节点时(如图1(a)所示),所有节点的数据都通过关键节点转发至 sink。由于关键节点均匀分担所有普通节点的转发任务,因此每个关键节点需要转发 $(N - N_c)/N_c$ 个节点的数据。则在一次数据采集过程中,每个关键节点消耗的能量为

$$P = \varepsilon_t + \frac{N - N_c}{N_c}(\varepsilon_t + \varepsilon_r); N - N_c \geq 0 \text{ 或 } N \geq N_c \quad (1)$$

文献[13]给出的这个能量模型只考虑节点发送和转发数据的情况,而在实际网络中,传感节点有很大一部分能耗是空闲监听信道所消耗掉的能耗。空闲监听有几种情况:1)自己有数据要发,需要监听信道;2)判断是否有数据包来,也需要监听信道;3)发生冲突后,也需要不断监听信道。因此式(1)需要进行修正。假设节点在发第一个包和发第二个包之间空闲监听信道所消耗的能量为 ε_i ,则式(1)可以修正为

$$P = \varepsilon_t + \frac{N - N_c}{N_c}(\varepsilon_t + \varepsilon_r) + \varepsilon_i; N - N_c \geq 0 \text{ 或 } N \geq N_c \quad (2)$$

进一步扩展,当网络中存在 n 个 sink 节点时,在 sink 节点均匀分布,且不存在关键节点重合的情况下,可以看成 n 个 sink 节点均匀分担所有节点的流量。因此有

$$P = \varepsilon_t + \frac{N/n - N_c}{N_c}(\varepsilon_t + \varepsilon_r) + \varepsilon_i; N/n - N_c \geq 0 \text{ 或 } N \geq n \cdot N_c \quad (3)$$

若关键节点的初始能量为 E_i ,则关键节点的寿命表示如下:

$$L = \frac{E_i}{P} = \frac{E_i}{\varepsilon_t + \frac{N/n - N_c}{N_c}(\varepsilon_t + \varepsilon_r) + \varepsilon_i}; N/n - N_c \geq 0 \text{ 或 } N \geq n \cdot N_c \quad (4)$$

本文采用节点发送数据的轮次表示寿命。可以看出,随着 sink 节点数的增加,关键节点的寿命增加,网络的寿命也相应增加。当 sink 节点数继续增加,使得网络内任何一个普通传感

节点到 sink 的跳数都为1跳,即 $N/n - N_c = 0$ 时,再增加 sink 节点对网络寿命没有影响。

3 网络代价函数

网络代价函数由网络成本决定。网络的成本包含普通节点和 sink 节点的成本。若普通节点个数为 N ,成本为 C_{node} , sink 节点的个数为 n ,成本为 C_{sink} ,则网络代价函数 C 可以表示为:

$$C = N \cdot C_{\text{node}} + n \cdot C_{\text{sink}} \quad (5)$$

对于规模固定的无线传感网, $N \cdot C_{\text{node}}$ 是固定的, $n \cdot C_{\text{sink}}$ 的值随着 sink 节点的个数 n 的变化而变化,在网络中增加越多的 sink 节点,则网络的成本也随之会有所增加。

4 最优化的 sink 节点数

根据前面的分析方法,我们需要根据最优的寿命成本比(RLC)来决定最优的 sink 节点数。因此首先要求出 L/C 的值。由式(4)和(5)可得

$$L/C = E_i \cdot \left\{ \left[\varepsilon_i + \frac{N/n - N_c}{N_c} (\varepsilon_t + \varepsilon_r) + \varepsilon_i \right] (N \cdot C_{\text{node}} + n \cdot C_{\text{sink}}) \right\}^{-1} = E_i \cdot \{ [\varepsilon_i + (N/nN_c - 1)(\varepsilon_t + \varepsilon_r) + \varepsilon_i] (N \cdot C_{\text{node}} + n \cdot C_{\text{sink}}) \}^{-1} \quad (6)$$

式(6)就是 RLC 的表达式。该式可以看做是关于 sink 节点数 n 的函数。图2显示了不同网络代价下的 RLC 曲线。相应的参数如下: $N = 81$, $N_c = 8$, $\varepsilon_t = 0.02 \text{ J}$, $\varepsilon_r = 0.02 \text{ J}$, $\varepsilon_i = 0.5 \text{ J}$ 。实际应用中,发送能耗略大于接收能耗,但都在一个数量级上,差别不大,此处收发能耗设为相等不影响结果的正确性。图中 CR 表示 sink 节点的成本与普通节点成本的比值,即 $CR = C_{\text{sink}}/C_{\text{node}}$ 。可以看到,该曲线是一个关于 n 的凸函数,因此一定存在最大值 RLC 所对应的 n 值,该值即为最佳的 sink 节点个数。随着 CR 的增加,RLC 值变小,最大值 n 也向左移变小,说明网络成本增加时,网络中部署的 sink 节点应减少。式(6)对 n 求导,有

$$\frac{d(L/C)}{dn} = \frac{-E_i}{M^2} \cdot \frac{dM}{dn} \quad (7)$$

其中 $M = [\varepsilon_i + (N/nN_c - 1)(\varepsilon_t + \varepsilon_r) + \varepsilon_i] (N \cdot C_{\text{node}} + n \cdot C_{\text{sink}})$ 。令式(7)等于0,则有 $\frac{dM}{dn} = 0$,而

$$\frac{dM}{dn} = (\varepsilon_i - \varepsilon_r) C_{\text{sink}} - \frac{N^2 C_{\text{node}}}{n^2 N_c} (\varepsilon_t + \varepsilon_r) \quad (8)$$

若式(8) = 0,即 $(\varepsilon_i - \varepsilon_r) C_{\text{sink}} = \frac{N^2 C_{\text{node}}}{n^2 N_c} (\varepsilon_t + \varepsilon_r)$,解得

$$n = N \sqrt{\frac{C_{\text{node}}}{C_{\text{sink}}} \cdot \frac{\varepsilon_t + \varepsilon_r}{N_c (\varepsilon_i - \varepsilon_r)}} \quad (9)$$

令 $A = N \sqrt{\frac{\varepsilon_t + \varepsilon_r}{N_c (\varepsilon_i - \varepsilon_r)}}$,可以看出,当网络规模确定、传感节点发射功率确定且 N_c 保持不变的情况下, A 为一个定值。此时 n 值与 \sqrt{CR} 成正比。相关参数与图2相同,则 n 值与 CR 之间的关系如图3所示。图中显示了三种不同网络规模下 n 值的变化规律。可以看出,随着 CR 的增加,最佳的 sink 节点个数减小。说明 sink 节点的成本越高,在网络中布设的 sink 节点个数应该越少。同时,随着网络规模的增加, n 值也随之增加,也就是说,网络越大,需要布设越多的 sink 节点,这也符合实际的情况。

式(9)还说明当网络规模、普通传感节点与 sink 节点的

成本以及节点发送功率确定时, sink 节点的个数 n 与 sink 节点周围关键节点数 (N_c) 的平方根成正比。即 sink 节点发射功率越大, n 值越小。

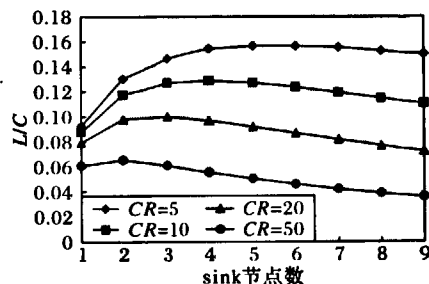


图2 给定参数值的 RLC 曲线

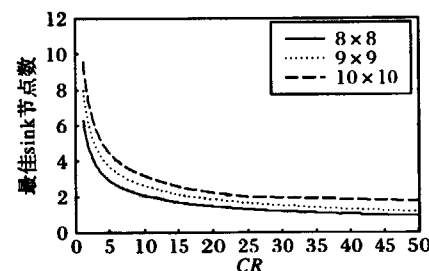


图3 最优 sink 节点数 n 与 CR 的关系曲线

5 仿真结果

为验证上述理论推导的正确性,本文在 NS2 环境下进行了仿真。仿真场景采用 9×9 规模的栅格网络,其中 sink 节点数由1变化到9。这是因为当 sink 节点数达到9时,网络中传感节点到 sink 节点的跳数均为1,此时再增加 sink 节点不会影响网络寿命,因此 sink 个数的最大值为9。为了保证 sink 节点在栅格网络中均匀分布,并且关键节点之间没有重合, sink 节点的布局如图4所示(黑色实心圆表示 sink 节点)。各个参数的取值为: $N = 81$, $N_c = 8$, $E_i = 100 \text{ J}$, $\varepsilon_t = 0.02 \text{ J}$, $\varepsilon_r = 0.02 \text{ J}$, $\varepsilon_i = 0.5 \text{ J}$ 。同时假设普通传感节点的成本为10, sink 节点的成本分别取50、100、200和500,即对应的 CR 分别为5、10、20、50。在网络规模和传感节点发射功率确定的情况下,相应仿真结果如表1和图5所示。

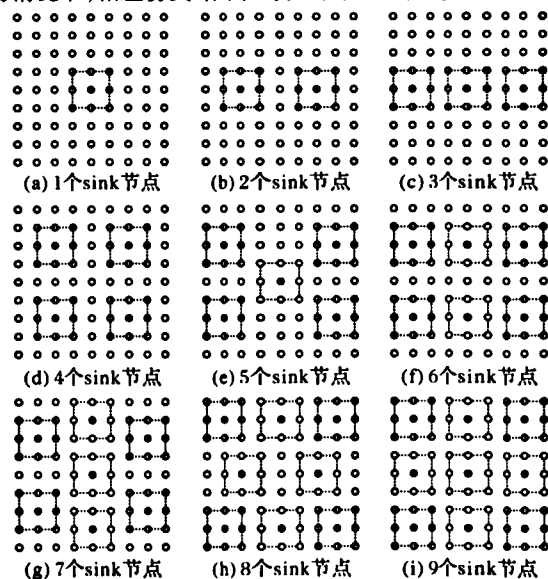


图4 仿真场景设计

根据表1的结果,可以计算出相应的 RLC 值。图5中虚线表示理论值,实线为仿真值。可以看出,随着 sink 节点数的增加,RLC 曲线呈现先上升后下降的趋势,因此一定有一个

最大值RLC存在。而随着CR的增加,网络的总成本增加,因此RLC曲线会降低。同时,CR的增加,造成RLC曲线的最高点左移,说明sink节点的成本越高,最佳的sink节点数应该减少。仿真数据与理论值比较接近,整个曲线比理论值略低,但不影响最佳sink值的判定。从图中可以看出,对应CR为5、10、20、50时的最佳sink节点个数分别为5、4、3、2。仿真结果比理论值低的原因是因为在实际仿真过程中,节点的能耗还有一些其他因素的影响,比如某个关键节点发送数据,相邻关键节点会接收到,也会消耗一部分能量。因此实际的关键节点的能耗还要大些,因此网络寿命比理论值要小,造成RLC的值比理论值小。图6中虚线表示仿真的最佳sink节点数 n 值,实线为理论数据,即图3中对应的 9×9 曲线。仿真结果是分别对应CR=5、10、20、50时的最佳sink节点个数。可以看出,由于采样点有限,仿真曲线为折线,因此部分折线与理论曲线不完全重合,但从采样点的结果来看,与理论值非常接近,因此可以推断出其平滑曲线与理论结果也会非常接近。另外,仿真结果虽然很接近理论值,但都比理论值略高。其原因是在实际仿真场景中,还存在一些其他消耗能量的因素,如串扰、冲突等。因此需要比理论上更多的sink节点来减少这样的能耗。同时,由于理论计算出来的最佳sink个数不一定是整数,而实际仿真获得的sink节点都是整数,进位取整也会造成结果稍高。

表1 平均网络寿命仿真结果

sink 节点数	平均网络 寿命(轮数)	sink 节点数	平均网络 寿命(轮数)
1	75.4	6	166.8
2	112.6	7	169.0
3	138.6	8	171.8
4	152.0	9	176.0
5	160.6		

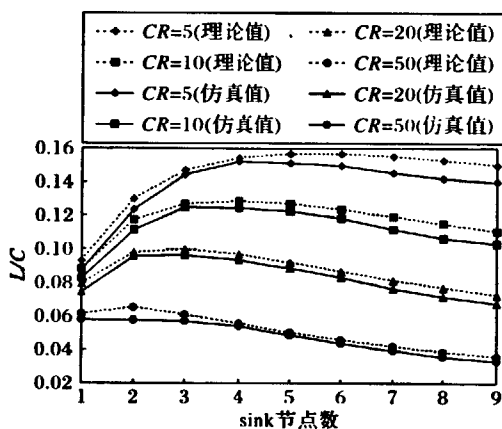


图5 RLC的仿真结果与理论值比较

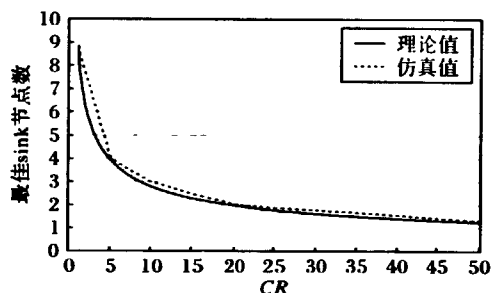


图6 最优sink节点数的仿真结果与理论值比较

6 结语

本文从无线传感器网络中关键节点的角度建立了网络寿

命模型,并提出一个新颖的确定最优sink节点个数的方法。该方法通过求解网络寿命成本比RLC的最大值,确定最佳sink节点个数,从而在延长网络寿命的同时使网络成本最小。仿真结果进一步证明了理论分析的正确性。

下一步将研究随机分布的无线传感器网络下的sink节点个数与网络寿命、成本之间的关系。

参考文献:

- [1] WANG QUANHONG, XU KENAN, TAKAHARA G, *et al.* Device placement for heterogeneous wireless sensor networks: minimum cost with lifetime constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(7): 2444-2453.
- [2] MEGUERDICHIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M. Coverage problems in wireless Ad-Hoc sensor networks[C]// INFOCOM 2001: Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington, DC: IEEE Computer and Communications Societies, 2001, 3: 1380-1387.
- [3] BAI X, KUMAR S, XUAN D, *et al.* Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity[C]// ACM MobiHoc: Proceedings of the 17th International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2006: 131-142.
- [4] XU KENAN, HASANEIN H, TAKAHARA G, *et al.* Relay node deployment strategies in heterogeneous wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(2): 145-159.
- [5] WANG QUANHONG, TAKAHARA G, HASANEIN H, *et al.* On relay node placement and locally optimal traffic allocation in heterogeneous wireless sensor networks[C]// LCN'05: Proceedings of the IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 656-664.
- [6] STANISLAVA S, HEINZELMAN W B. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering[C]// IPDPS'05: Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 236-240.
- [7] DAI SHUCHENG, TANG CHANGJIE, QIAO SHAOJIE, *et al.* Optimal multiple sink nodes deployment in wireless sensor networks based on gene expression programming[C]// 2010 Second International Conference on Communication Software and Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 355-359.
- [8] VINCZE Z, VIDA R, VIDÁCS A. Deploying multiple sinks in multi-hop wireless sensor networks[C]// IEEE International Conference on Pervasive Services. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 55-63.
- [9] GU YI, WU QISHI, CAI XIAOSHAN, *et al.* On efficient deployment of high end sensors in large scale heterogeneous WSNs[C]// MASS'09: IEEE 6th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 912-917.
- [10] FRIEDMANN L, BOUKHATEM L. Efficient multi-sink relocation in wireless sensor network[C]// ICNS'07: Third International Conference on Networking and Services. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 90.
- [11] PATEL M, CHANDRASEKARAN R, VENKATESAN S. Energy efficient sensor, relay and base station placements for coverage, connectivity and routing[C]// IPCCC 2005: 24th IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 581-586.
- [12] FOSS S G, ZUYEV S A. On a Voronoi aggregative process related to a bivariate Poisson process[J]. Advances in Applied Probability, 1996, 28(4): 965-981.
- [13] MHATRE V, CATHERINE R, DANIEL K, *et al.* A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(1): 4-15.
- [14] 杨文国, 郭田德, 赵彤. 异构监测传感器网络寿命最大化模型及其求解[J]. 计算机学报, 2007, 30(4): 532-538.