

文章编号:1000-582X(2007)06-0030-05

事件驱动型无线传感器网络生存期分析

汪泉弟¹,孔卫¹,李彬²,张占龙¹,杨永明¹

(1. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆400030;
2. 国家客车质量监督检验中心,重庆401122)

摘要:事件驱动型传感器网络在侵扰监测、地震活动监测、动物运动跟踪以及大型设备的状态监测等领域有着巨大的应用前景,但由于其数据传输率不可预知,由此带来的不确定性增大了研究工作的难度。从网络结构与优化冗余节点分布的角度,提出延长事件驱动型传感器网络生存期的能量管理策略。将监测区域的无线传感网络划分成基于正六边形网格的分层结构网络,各层网格内的冗余节点数按最优分布条件由内层向外层依次递减。仿真计算了不同层数和不同 ρ 值的网络生存周期,并与传感器节点相同但按泊松分布和均匀分布的网络进行了比较,结果表明本文的方法有效的延长了网络的生存期。

关键词:无线传感器网络;生存期;事件驱动;冗余节点;正六边形网格
中图分类号:TP391

文献标志码:A

根据传感器网络采集和发送数据的方式,可将其分为两类^[1]:时间驱动型传感器网络和事件驱动型传感器网络。在时间驱动型传感器网络中,传感器周期性的采集并发送数据给汇聚节点,数据的采集和发送按预先设定的时间表进行,因此,数据传输率通常是固定的。在事件驱动型传感器网络中,只有当节点探测到目标事件后,才会以较高的速率采集和发送重要的数据到汇聚节点,而通常情况下只需周期性的产生少量日常数据。所以,在事件驱动型传感器网络中,数据的采集和发送通常是不可预测的。后一类传感器网络在某些领域有着巨大的应用前景^[2-3],如侵扰监测、地震活动监测、动物运动跟踪等。

由于传感器网络的生存期受到节点能量的约束,因此能量有效性始终是无线传感器网络研究的重点。与时间驱动型相比,事件驱动型传感器网络因其数据传输率不可预知,由此带来的不确定性增大了研究工作的难度。尽管如此,针对事件驱动型网络提高能量效率的研究工作仍然是有成效的,例如:Y. Wang, H. Wu等提出一种基于剩余能量的通信量分裂(RETS)方法^[1],在该方法中,传感器节点通过邻居节

点向汇聚节点转发数据时,按邻居节点剩余能量分发通信量,从而有效分配传感器节点间的能量消耗。S. R. Gandham, M. Dawande等在文献[4]中提出了一种通过周期性的移动汇聚节点位置使网络的能量效率达到最优的方法。该方法用整数线性规划(ILP)模型获得汇聚节点的最优位置,汇聚节点周期性的移动到这些最优位置上工作,从而有效的延长了网络生存期。Z. Vincze, D. Vass Vincze等在文献[4]的基础上,提出了两种汇聚节点移动策略^[5]:一种是使网络整体的能量消耗最优化,另一种是使通信量最大的传感器节点能量消耗最小化。汇聚节点首先对当前出现的事件进行评估,以便选择使用哪一种移动策略,从而使传输与事件相关的数据时能量消耗最小。Jamieson K, Balakrishnan H等从MAC协议入手^[6],提出了针对事件驱动型传感器网络的基于竞争的Sift MAC协议,该协议可以很好的减少网络延迟,提高网络的能量效率。

笔者从网络结构及合理分布冗余节点的角度探讨了事件驱动型传感器网络的能量管理问题,提出的方法适用于静态网络。在接下来的第1部分介绍了网络结构的划分方法及网络的工作过程,第2部分从理论

收稿日期:2007-01-22。

基金项目:重庆市自然科学基金计划项目(CSTC,2007BA3001)。

作者简介:汪泉弟(1954-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事传感器网络技术,电磁兼容研究(Tel)023-65106977;
(E-mail) wangquandi@yahoo.com.cn。

上探讨了为延长网络生存期的冗余节点分布方式,在第3部分中,仿真计算了冗余节点最优分布状态下的网络的生存期,并与其它方法进行了比较。

1 网络结构

为了满足网络自组织性,可扩展性,以及在监测区域的覆盖要求,无线传感器网络通常允许节点具有一定的冗余。本文按文献[7-8]提出的方法将监测区域的传感器网络划分为若干个相同的正六边形网格,汇聚节点位于监测区域的中心网格,传感器节点分布在围绕中心网格的其它网格中,节点分布好后,不再移动。由于传感器节点可能分布在网络的任何位置,所以网格外接圆半径 r 与传感器节点的探测半径 R_s 之间的关系应满足 $r \leq \frac{R_s}{2}$ 。同时,还要保证传感器节点能够与它的邻居网格内的节点通信,所以网格外接圆半径 r 与传感器节点的通信半径 R_c 之间的关系应满足 $r \leq \frac{R_c}{\sqrt{13}}$ [7],如图1所示。上述两个条件决定了正六边形网格的划分原则,因此有

$$r \leq \min(R_c / \sqrt{13}, R_s / 2)。 \quad (1)$$

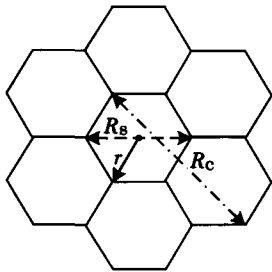


图1 正六边形网格

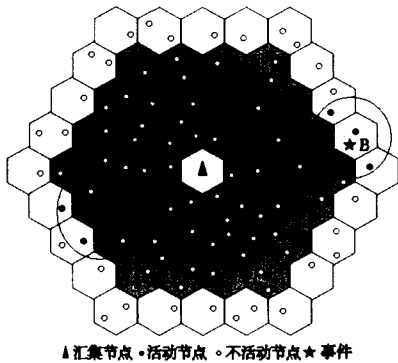


图2 基于正六边形网格的4层网络结构

图2给出了一个基于正六边形网格的4层网络结构图,图中使用不同灰度表示网络的不同层数。汇聚节点位于网络的中心网格,紧邻中心网格的6个网格是网络的第1层,第1层外围的12个网格为网络的第2层,以此类推。网络的每1层包含 $6k$ (k 为层数) 个网格,这样便形成了基于正六边形网格的分层结构网络[9]。

在事件驱动型传感器网络中,为满足覆盖要求,网络工作时,每个网格内至少有一个节点处于工作状态,其余节点则处于休眠状态,当处于工作状态的节点能量快要耗尽时,唤醒一个休眠状态的节点接替其工作。没有事件发生时,节点采集、发送和接收网络中的日常数据,信息量小,数据传输率低,可认为节点在此时为不活动节点。当监测区域内有突发事件出现时,出现事件的局部地区的相关节点将采集到的大量数据以高数据传输率通过内层节点转发给汇聚节点。如图2所示,监测区域内出现了2个事件,分别用五角星标示,A,B两区网格中黑色小圆点表示需要大量发送和接收监测数据的活动节点。

2 事件驱动型网络的生存期

2.1 假设条件

在分析过程中,忽略节点采集、发送和接收网络中日常数据所消耗的能量以及节点在休眠状态下或唤醒休眠节点所消耗的能量。

假设节点的初始能量均为 C ,有突发事件出现时,节点采集一次数据所消耗的能量为 E_m ,接收和发送一个数据包所消耗的能量分别为 E_r 和 E_s ,设网络总层数为 N ,每个网格内只有一个节点工作,并且同层网格中的节点为其外层节点转发数据的概率相同。

以图2中A区有突发事件出现为例,该事件位于网络的第3层,此时网络中所有节点(4层网络共60个)都采集数据,但只有10个节点为活动节点,参与了与事件相关数据的发送和接收。在10个活动节点中,第4层的2个节点只发送采集到的数据,其它8个节点既要接收数据也要发送或转发数据,所以,一个工作周期网络消耗的能量 E_A 为

2 事件驱动型网络的生存期

2.1 假设条件

在分析过程中,忽略节点采集、发送和接收网络中日常数据所消耗的能量以及节点在休眠状态下或唤醒休眠节点所消耗的能量。

假设节点的初始能量均为 C ,有突发事件出现时,节点采集一次数据所消耗的能量为 E_m ,接收和发送一个数据包所消耗的能量分别为 E_r 和 E_s ,设网络总层数为 N ,每个网格内只有一个节点工作,并且同层网格中的节点为其外层节点转发数据的概率相同。

以图2中A区有突发事件出现为例,该事件位于网络的第3层,此时网络中所有节点(4层网络共60个)都采集数据,但只有10个节点为活动节点,参与了与事件相关数据的发送和接收。在10个活动节点中,第4层的2个节点只发送采集到的数据,其它8个节点既要接收数据也要发送或转发数据,所以,一个工作周期网络消耗的能量 E_A 为

$$E_A = 2E_s + 8(E_s + E_r) + 60E_m = 60E_m + 10E_s + 8E_r。 \quad (2)$$

如果网络中有多个事件同时出现,可用式(3)表示网络在一个周期内消耗的能量

$$E = \sum_{k=1}^N (6k) E_m + bE_s + cE_r, \quad (3)$$

其中, b, c 分别为参与事件相关数据转发和接收的节点数。

对于数据经多跳传输到汇聚节点的分层结构网络,距汇聚节点越近,节点能量消耗越大,因此笔者按文献[8]的方式分布冗余节点,以便使网络生存期得到有效延长。

2.2 冗余节点分布与网络生存期

冗余节点是指:在满足传感器网络覆盖监测区的前提下,相对于网络正常工作所需要的最少节点而多出的节点。对于基于正六边形网格的分层结构网络来说,每个正六边形网格内多于1个节点的其它节点都是冗余节点,冗余节点的相互接替工作可以保证该网格始终与网络连通。

事件驱动型网络生存期可以用网络工作周期数来表示。网络工作一个周期是指突发事件出现后,节点采集并向汇聚节点发送完成一次数据的过程。

如果突发事件分布于整个监测区域,这时网络工作一个周期第 k 层网格内节点消耗的平均能量为^[8]

$$E_k = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^N i - \sum_{i=1}^k i \right) (E_s + E_r) + E_s + E_m; \quad k = 1, \dots, N. \quad (4)$$

式(4)中,右边第1项表示第 k 层节点转发外层节点数据包所消耗的能量,其余两项之和表示第 k 层节点本身采集并发送数据所消耗的能量。

突发事件分布于整个网络的可能性极小,通常情况下突发事件只出现在监测区域的一个或几个小范围内,因此,一个工作周期中只有极小部分节点参与数据的接收和转发。为了简化分析,假设突发事件以概率 ρ 出现在网络的任意局部区域,事件出现后所有节点均快速采集数据,但只有部分节点才参与数据的接收和转发,将这部分节点占节点总数的比例也设为 ρ ,这时网络工作一个周期第 k 层网格内节点消耗的能量为

$$E_k = \rho \cdot \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^N i - \sum_{i=1}^k i \right) (E_s + E_r) + \rho \cdot E_s + E_m; \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

式(5)中括号内的第1项为第 k 层网格内活动节点接收和转发外层节点数据所消耗的能量,第2项为活动节点发送自己采集的数据所消耗的能量。由于节点在突发事件出现后成为活动节点的概率为 ρ ,因此在式(5)中表现为第 k 层网格内节点在接收和发送(或转发)数据时消耗的能量为式(4)的 ρ 倍,这样,网络第 k 层的平均工作周期 T_k 为

$$T_k = (6k \cdot C) / (6k \cdot E_k) = C / E_k; \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

式(6)说明第 k 层的平均工作周期 T_k 等于该层网格内节点的工作周期,网络的生存期取决于网络中各层网格与中心网络的连通性,由式(5)、(6)可知,离汇聚节点越近,节点(或网格)平均生存期越短,当第1层节点能量耗尽时,网络中的其它层与中心网格不再连通,网络的生存期也就结束了。所以网络的平均生存期 T 取决于第1层网格的生存期,即

$$T = T_1 = C / \left[\rho \cdot \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^N i - 1 \right) \cdot (E_s + E_r) + \rho \cdot E_s + E_m \right]. \quad (7)$$

为了使内层网格的生存期与外层网格的相同,可以通过增加内层网格的冗余节点数来达到,每层网格冗余节点数的多少由参考层的生存期决定,当网络的生存期与参考层第 n ($1 \leq n \leq N$) 层相同时,各层网格内分配的冗余节点数按下式进行^[8]

$$Q = (Q_1 \quad Q_2 \quad \dots \quad Q_N)^T = RP = \left(\sum_{k=1}^N (\lceil R_{1k} \rceil \cdot 6k) \sum_{k=1}^N \cdot (\lceil R_{2k} \rceil \cdot 6k) \dots \sum_{k=1}^N (\lceil R_{Nk} \rceil \cdot 6k) \right)^T. \quad (8)$$

式(8)中, P 是网络满足覆盖要求时网格层最小节点数向量,即 $P = (6 \quad 6 \times 2 \dots 6N)$ 。 R 是1至 N 层网格的冗余节点数相对于原网格内最小节点数的倍数矩阵,元素的具体形式为:

$$R_{nk} = \begin{cases} \lceil T_n / T_k \rceil - 1; & k = 1, 2, \dots, n-1, \\ 0; & n \leq k \leq N, \end{cases} \quad (9)$$

式(9)表明当网络生存期与第 n 层的相等时,第 k 层网格的冗余节点数与该层网格内最小节点数的倍数为 $\lceil T_n / T_k \rceil$,符号 $\lceil \cdot \rceil$ 表示倍数取上限整数值。

网格网络中的冗余节点数常常并不恰好等于网络与第 n 层网格生存期相等时所需要的冗余节点数 Q_n ,因此,在对前 k ($< n$) 层按式(8)分配完冗余节点后,如果还有剩余,则剩余的节点按密度函数 $f(k)$ 进行再分配, $f(k)$ 为

$$f(k) = P'_k / \sum_{i=1}^n P'_i; \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

其中

$$P'_k = (R_{nk} + 1) \cdot 6k; \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

密度函数 $f(k)$ 将剩余的冗余节点再次按由内层向外层递减的规律进行分布。式(8)、(9)和(10)构成了事件驱动型无线传感器网络的最优分布条件。

3 仿真试验

3.1 仿真环境

本文采用文献[10]提出的收发模型。传感器节点每接收一个数据包所消耗的能量为

$$E_r = k \cdot E_{elec}, \quad (12)$$

其中, k 为数据包长度, E_{elec} 为电路的功耗。

节点每发送一个数据包到下一个转发节点需要的能量 E_s 为

$$E_s = k \cdot (E_{elec} + \epsilon_{amp} \cdot d^2), \quad (13)$$

其中, d 为发射距离, ϵ_{amp} 为功放系数。

并设

$$E_m = 0.1 E_r, \quad (14)$$

在仿真实验中,设节点的初始能量 $C = 0.5 \text{ J}$, $k = 1\ 000 \text{ bit}$, $d = 20 \text{ m}$, $\epsilon_{\text{amp}} = 150 \text{ pJ/bit/m}^2$, $E_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ/bit}$, 根据式(12)、(13)和(14)分别得 $E_s = 110 \text{ }\mu\text{J}$, $E_r = 50 \text{ }\mu\text{J}$ 和 $E_m = 5 \text{ }\mu\text{J}$ 。网络的生存期定义为:当网络中还有存活节点的网格数小于85%时,网络工作的周期数。

仿真实验的网络分层结构包括3层、5层和7层3种情况,本文仿真计算了具有不同冗余节点数的网络的生存期,表1给出了网络生存期与第 n 层网格生存期相等时,网络中传感器节点总数(M)和前 n 层所需要的传感器节点数(M'),由式(7)、(8)和(9)可知,网络中传感器节点的数量与设定的能量消耗模型有关。

为了比较冗余节点最优分布方法对网络生存期的延长效果,本文也对冗余节点按均匀分布和泊松分布的网络进行了仿真。为排除偶然因素,网络的生存期取100次仿真实验的平均值。

表1 事件驱动型传感器网络节点数

n	1	2	3	4	5	6	7
	M/M'	M/M'	M/M'	M/M'	M/M'	M/M'	M/M'
3层	36/6	48/30	96/96				
5层	90/6	102/30	120/66	186/156	408/408		
7层	168/6	180/30	198/66	240/132	312/234	468/426	1 038/1 038

3.2 仿真结果

仿真结果如图3-6所示,从图3-5中可以看出,随着冗余节点数的增加,3种分布条件下的网络工作周期数都相应的增加了。这是因为增加冗余节点后,根据本文定义的网络结构,每个网格内的节点数增加了,相应地这些网格的能量也就增加了,网格的寿命得到了延长,从而网络的寿命也因此得到延长,这说明增加冗余节点可以在一定程度上延长网络的寿命。

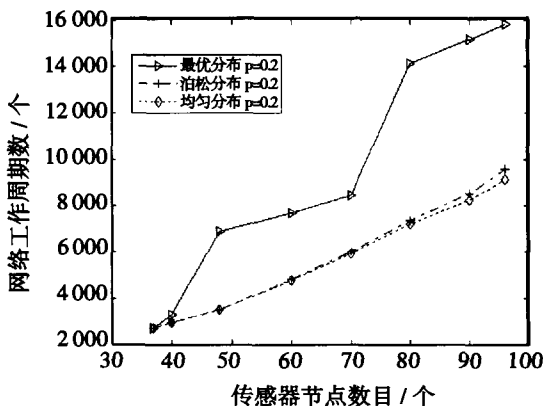


图3 具有3层网络的网络

在同样的节点数下,以最优分布条件分布冗余节点时对网络工作周期数的延长效果最好,泊松分布次之,均匀分布对网络工作周期数的延长效果最差。因

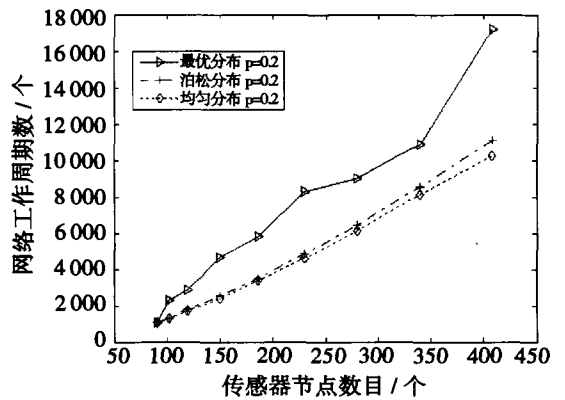


图4 具有5层网络的网络

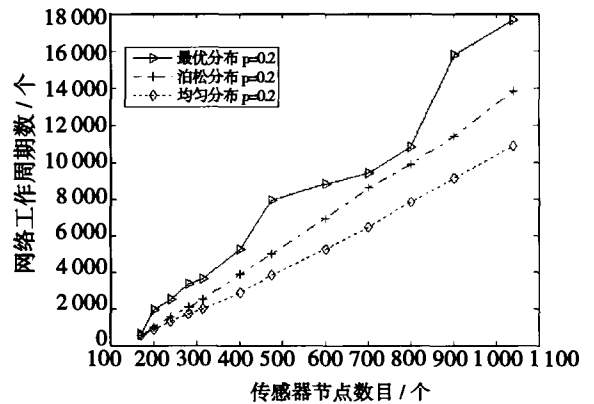


图5 具有7层网络的网络

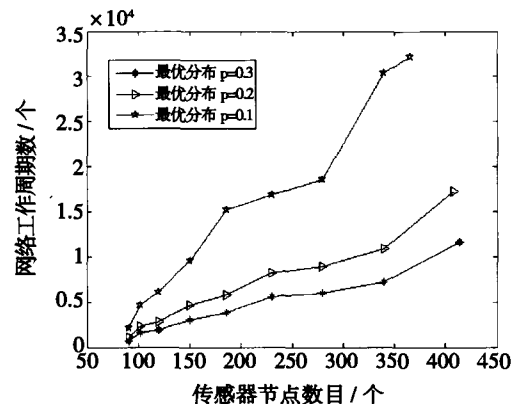


图6 5层网络的网络 $\rho = (0.1, 0.2, 0.3)$

为在一个工作周期中,网格消耗的能量由内层向外层是递减的,所以冗余节点的分布也应由内层向外层递减。最优分布条件是一种近似精确定位的节点递减分布,所以它的效果最好。泊松分布采用经验参数后也可以达到一定程度的节点由内层向外层递减,所以它的寿命周期明显优于均匀分布的情况。均匀分布条件下,节点在整个监测区域内是随机均匀分布的,节点分布在每个网格中的机会相同,不能满足由内层向外层递减的要求,所以它产生的效果最差。

对5层结构的网络在不同 ρ 值时的生存期也进行了仿真,网络的生存期随 ρ 值的增加而相应减少,

如图6所示。

4 结论

从网络结构和优化冗余节点分布的角度,探讨事件驱动型传感器网络的能量管理是有意义的。在某些环境中,例如在大型设备运行状态的监测中,当传感器失效或电池能量耗尽后,常常不能够将设备停下来更换传感器或电池。因此,在监测区域布置传感器网络时,可增加网络中的冗余节点数并对其分布进行优化,将有效延长网络的生存期。

本文讨论了在突发事件出现后,外层网格节点通过相邻内层网格节点将数据转发给汇集节点的过程。为进一步延长网络的生存期,当相邻内层网格节点的能量耗尽时,可将同层网格节点作为数据转发的下一个节点,具体实现方法可参考文献[9]。

参考文献:

- [1] WANG Y, WU H Y, NELAVELLI R, et al. Balance-based energy-efficient communication protocols for wireless sensor networks[C]//The 26th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'06), Lisbon, Portugal, 2006.
- [2] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [3] 石军锋,钟先信,陈帅,等. 无线传感器网络结构及特点分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2005,28(2):16-19.
- [4] GANDHAM S R, DAWANDE M, PRAKASH R, et al. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations [C]. IEEE GLOBECOM 2003, 377-381.
- [5] VINCZE Z, VASS D, VIDA R, et al, Adaptive Sink Mobility in Event - driven Multi-hop Wireless Sensor Networks [C]//1st Int Conf on Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks (InterSense 2006), Nice, France, 30 - 31 May, 2006.
- [6] JAMIESON K, BALAKRISHNAN H, TAY Y C. Sift: A MAC protocol for event-driven wireless sensor networks[R]. MIT Laboratory for Computer Science, Tech. Rep. 894, May 2003.
- [7] WANG X and BERGER T. Topology control, resources allocation and routing in wireless sensor networks[C]//Proc. of 12th IEEE /ACM MASCOTS 2004, Volendam, The Netherlands, Oct. 2004:391-399.
- [8] LI BIN, WANG QUAN DI, YANG YONG MING et al. Optimal Distribution of Redundant Sensor Nodes for Wireless Sensor Networks[C]//4th International IEEE Conference on Industrial Informatics, INDIN'06, Singapore, 2006:16-18.
- [9] 汪泉弟,李彬,刘青松. 无线传感器网络能量多路径路由研究[J]. 信息与控制,2006,35(2):129-34.
- [10] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. Proc of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00), 2000: 3005-3014.

Lifetime of Event-driven Wireless Sensor Networks

WANG Quan-di¹, KONG Wei¹, LI Bin², ZHANG Zhan-long¹, YANG Yong-ming¹

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology,

Ministry of Education, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. National Coach Quality Supervision and Inspection Center, Chongqing 401122, China)

Abstract: A Event-driven wireless sensor networks have a wide range of applications, such as intrusion detection, seismic activity monitoring, animal movement tracking and large equipment state inspection, etc. Since data acquisition and transmission in the event-driven sensor networks is usually unpredictable, it is more difficult to study on the networks. In this paper, we propose an energy management scheme based on network architecture and optimal distribution of redundant sensor nodes, aiming at prolonging the lifetime of the event-driven wireless sensor networks. We divide the monitoring area into layered network architecture based on regular hexagonal cells (RHCs). The number of redundant sensor nodes with optimal distribution decreased from inner layers to outer layers. Simulation analysis is conducted on the network lifetime with different layers and different ρ , and is compared with uniform distribution and Poisson distribution with the same number of sensor nodes. The numerical results show that our scheme can prolong network lifetime effectively.

Key words: wireless sensor network; lifetime; event-driven; redundant sensor node; regular hexagonal cell