

基于冗余节点休眠和分阶段唤醒策略的传感器网络三维覆盖控制方法

蒋鹏 陈峰

(杭州电子科技大学信息与控制研究所 杭州 310018)

摘要: 该文针对无线传感器网络中节点能量有限且密集布点时存在大量冗余节点的情况,提出了基于冗余节点休眠和分阶段唤醒策略的无线传感器网络3维覆盖控制方法。在3维待监测区域中随机配置大量传感器节点,达到高密度分布,使冗余节点处于休眠状态,等待活跃节点能量耗尽之后,分阶段唤醒休眠节点,直至整个传感器网络中所有节点的能量都耗尽为止。仿真结果表明,该方法提高了传感器网络的网络性能,且对相同的传感器节点数,分阶段唤醒策略优于不分阶段的唤醒策略,先使冗余节点休眠之后再唤醒方法的网络性能高于直接唤醒方法的网络性能。

关键词: 无线传感器网络; 三维覆盖; 冗余节点休眠; 分阶段唤醒

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2807-06

3D Coverage Scheme Based on Hibernation of Redundant Nodes and Phased Waking-up Strategy for Wireless Sensor Networks

Jiang Peng Chen Feng

(Institute of Information and Control, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: For wireless sensor networks, the energy of sensor node is very limited, and there are a lot of redundant nodes when it is densely deployed. Therefore, a 3D coverage scheme based on hibernation of redundant nodes and phased waking-up strategy for wireless sensor networks is proposed. A large number of sensor nodes are randomly deployed in the monitoring region and the redundant nodes can hibernate. The hibernated nodes will be waken up in phases after the on-duty nodes are exhausted. The process of hibernating/waking-up lasts until all of the nodes in the entire sensor network are exhausted. The simulation results show that this method improves the network performance. Besides, with the same number of nodes deployed in the 3D monitoring region, the phased waking-up strategy outperforms the none-phased waking-up strategy, and waking up the nodes after hibernation achieves higher network performance than the method of directly waking up in turn.

Key words: Wireless sensor networks; Three-dimensional coverage; Hibernation of redundant node; Phased waking-up

1 引言

无线传感器网络(WSNs)是由大量低成本、低功耗的具有传感、计算与通信能力的微小传感器节点构成的自治网络系统,是能根据环境自主完成各种监测任务的智能系统,其在军事、汽车电子、工业控制、环境监测、医疗卫生、智能家居等领域有很好的应用前景,尤其在无人值守或恶劣环境下的事件监测和目标跟踪中显示了很大的优势^[1-4]。

无线传感器网络通常采用高密度布撒,存在着大量的冗余节点。一方面,这种覆盖冗余直接导致采集、传输数据的冗余,从而造成不必要的能量消

耗。另一方面,通过对节点的活动进行精心调度,减少网络中工作节点的数量并使得冗余节点交替工作,可以减轻网络覆盖冗余,降低系统能量消耗,从而延长网络生存时间。对节点调度的一个基本要求是:当前活动的工作节点能够使得网络维持一定的覆盖质量,这可以归结为对节能覆盖问题的研究。节能覆盖主要分为两类。第1类是在保障初始网络覆盖(即在节点部署完成后,所有节点均处于活跃状态时,整个网络达到的覆盖度)的情况下,若一个传感器节点的感知范围被其它活跃节点的感知范围所覆盖时,该节点可以处于休眠状态^[5-8]。但这类方法中未考虑整个网络的生命周期,即未涉及到对处于休眠状态的节点如何处理。第2类方法从网络生命周期出发,且在节点部署之后就执行统一的活跃/休眠状态决策^[9-11]。但以上两类方法均难以达到较

2008-12-01 收到, 2009-05-18 改回

国家自然科学基金(60604024), 浙江省科技厅科技计划重点项目(2008C23097), 浙江省教育厅科研计划项目(20060246)和浙江省高校青年教师资助计划项目(ZX060221)资助课题

高的网络性能,为此,本文提出在使冗余节点休眠基础上的分阶段唤醒策略(Phased Waking up Strategy based on Sleep-scheduling, WSS):在休眠策略基础上结合分阶段的唤醒策略,弥补了上述第1类方法中的缺点;先使冗余节点休眠再唤醒的策略,相对于第2类方法(即节点部署完成后,不使网络中的冗余节点处于休眠状态,而是直接对所有节点执行活跃/休眠状态决策),延长了整个网络的生命周期;对唤醒策略实行“分阶段”,有效地提高了网络性能。

本文第2节,分析了覆盖控制方法中使用的传感器感知模型。第3节,详述了WSS的原理和实现步骤。由于WSS考虑了对休眠节点的唤醒策略,比上述第1类方法的优势较明显,为了与第2类方法进行量化比较,在第4节中,通过仿真对WSS和不分阶段的随机唤醒策略(None-phased Random Waking-up Strategy, NRWS,属于第2类方法中的一种)的网络性能进行了分析和比较;另外,为了说明在唤醒休眠节点过程中对时间进行分阶段的必要性,对分阶段随机唤醒策略(Phased Random Waking-up Strategy, PRWS,即节点部署完成后,不使网络中的冗余节点处于休眠状态,而是直接对所有节点分阶段地执行随机唤醒策略)和NRWS进行了比较,仿真结果表明WSS的网络性能高于PRWS,而PRWS的网络性能又高于NRWS。第5节,对全文进行了总结。

2 传感器感知模型

考虑单个节点能量有限且易受攻击,无线传感器网络的节点应高密度分布,利用冗余提高监测数据的正确性和系统运行的可靠性。这种大范围WSNs应用的一个重要问题就是密度控制,即在维持覆盖的基础上控制活跃传感器节点的集合。大部分传感器感知模型基于布尔感知模型(Boolean Sensing Model, BSM)^[6,10],即只有当目标在传感器节点的感知范围内时,才能被该传感器节点所监测到。大部分无线信号和声学传感器的感知能力会随着与监测源之间距离的增加而衰减,但BSM不能反映这一衰减过程。为此,文献[12-15]建立了各种传感器感知能力衰减模型,更符合环境监测系统中信号传播的特点。本文采用文献[12]中的衰减感知模型,简述如下。

用网格对3维待监测区域进行划分,连续的网格点之间的距离由传感器节点配置所要求达到的精确度确定。传感器节点 s 对任意网格点 p 的感知强度(Sensing Intensity, SI)为

$$SI(s, p) = \begin{cases} 1/[1 + \alpha d(s, p)]^\beta, & d(s, p) \leq R_c \\ 0, & d(s, p) > R_c \end{cases} \quad (1)$$

其中, α 和 β 是与传感器节点硬件相关的参数,反映了传感器的物理性质。若传感器节点和网格点之间的距离超过了有效感知距离 R_c , 则可忽略传感器节点在该网格点的感知正确性。传感器节点在 R_c 处对应的感知强度 SI_{eff} 为有效感知强度阈值, 传感器节点的有效感知范围是以 R_c 为半径的球体。只有当某目标处的感知强度超过另一阈值 SI_{sen} 时, 该目标才能被监测到, 即该目标被传感器网络所覆盖。传感器感知模型为覆盖控制算法的一个输入, 不影响算法的执行, 可根据实际的应用环境和监测要求选择相应的传感器感知模型。

3 WSS 描述

传感器网络中, 发送、接收和侦听等过程的功耗相差不大, 只有彻底关闭无线收发电路, 才具有较好的节能效果。通过节点调度, 让节点交替地处于活跃和休眠状态的交替活跃模式是节能的有效方法。当前的一种较为经济适用的方法是节点随机休眠, 大量的节点随机地处于交替活跃模式, 其会使网络的连通性无法保证, 成为部分连接的网络^[16]。本文提出了基于冗余节点休眠和分阶段唤醒策略的覆盖控制方法, 其主要考虑以下两个方面: 节点随机部署后, 假设所有节点都处于活跃状态, 则在确保初始网络覆盖的前提下, 哪些节点可以处于休眠状态? 处于活跃状态的节点的能量耗尽之后, 如何唤醒休眠的节点, 才能既保证达到初始网络覆盖, 又延长网络的生命周期?

3.1 相关定义

(1) 网格点的合作感知强度(Cooperative Sensing Intensity, CSI) 若网格点 p 位于多个传感器节点的公共感知区域, 则该网格点的合作感知强度 $CSI(p)$ 为这些传感器节点在点 p 的感知强度之和:

$$CSI(p) = \sum_{i=1}^m SI(s_i, p) = \sum_{i=1}^m 1/[1 + \alpha d(s_i, p)]^\beta \quad (2)$$

其中, m 是在网格点 p 的有效范围内的传感器节点数目。

(2) 感知贡献(Sensing Contribution, SC) 传感器节点 s 对任意网格点 p_i 的感知贡献定义为 $SC(s, p_i)$:

$$SC(s, p_i) = SI(s, p_i) / CSI(p_i) = SI(s, p_i) / \sum_j SI(j, p_i) \quad (3)$$

则传感器节点 s 对整个网络的感知贡献为

$$\begin{aligned} SC(s) &= \sum_i SC(s, p_i) = \sum_i (SI(s, p_i) / CSI(p_i)) \\ &= \sum_i (SI(s, p_i) / \sum_j SI(j, p_i)) \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 决定参数(Decision Parameter, DP) 若传感器节点 s 关闭, 在其有效感知范围内的所有网格点的 CSI 都大于 SI_{sen} , 则 $DP(s)=1$, 即传感器节点 s 可处于休眠状态, 否则 $DP(s)=0$ 。DP(s) 为决定传感器节点 s 是否为冗余节点的一个参数。

(4) 网络覆盖(Network Coverage, NC) 被覆盖的网格点数 GN_c 与 3 维待监测空间中总的网格点数 GN_w 的比值:

$$NC = GN_c / GN_w \quad (5)$$

(5) 网络寿命(Network Lifetime, NL) 网络寿命指传感器网络有效执行覆盖任务的时间, 从节点经部署后投入运行开始, 至每个传感器节点的能量都耗尽为止。

(6) 网络性能(Network Performance, NP) 网络性能是评价覆盖控制算法优劣的综合指标, 其为网络覆盖与网络寿命的乘积。在实行活跃/休眠决策过程中, 每一阶段中的网络覆盖和网络寿命均不同, 假设整个网络寿命能够维持 M 个阶段, 则网络性能为

$$NP = \sum_{i=1}^M NC(i) \times NL(i) \quad (6)$$

3.2 冗余节点休眠策略(Sleeping Schedule for Redundant Sensors, SSRS)

文献[12]给出了一个局部的冗余节点休眠算法, 基于某节点的邻居节点状态及其覆盖情况判断该节点是否为冗余节点, 在判断前必须等待一段时间, 以防止出现两个节点同时休眠而影响网络覆盖的情况。本文这一部分提出的全局的冗余节点休眠策略, 对于某一传感器节点, 由其它所有节点的状态来决定其是活跃还是休眠, 不会出现两个节点同时休眠的情况。

节点随机部署后, 假设所有传感器节点都处于活跃状态, 则在确保达到初始网络覆盖的前提下, 按照传感器节点的感知贡献的大小, 使得网络中的冗余节点处于休眠状态。

(1) 按照传感器感知模型计算每个网格点的合作感知强度, 并由此得到初始网络覆盖。由于传感器节点部署的随机性, 网络可能在初始部署时没有达到完全覆盖(监测区域中的每个网格点都被传感器网络所覆盖, 即网络覆盖为100%), 则在随后的冗余节点休眠策略中是以保证该初始网络覆盖为前提的。可以通过增加部署的传感器节点数提高初始网络覆盖。

(2) 对所有网格点 p_i , 根据当前活跃的传感器节点, 在 R_c 范围之内更新 $CSI(p_i)$, 据此判断每个传感器节点的决定参数DP, 并计算其感知贡献。

(3) 对于网络中DP=1的传感器节点, 选取其中感知贡献最小的节点, 使其处于休眠状态, 将其感知强度设为0, 更新网络覆盖。每次循环选取一个传感器节点实施休眠, 直到网络中没有DP=1的传感器节点为止。

3.3 分阶段唤醒策略(Phased Waking-up Strategy, PWS)

由3.2节可知, 部署大量传感器节点后存在较多的冗余节点, 则在活跃节点的能量耗尽之后, 有必要唤醒处于休眠状态的传感器节点, 以维持较高的网络性能。PWS是针对在第3.2节中处于休眠状态的传感器节点的。

循环唤醒传感器节点, 使得整个网络达到初始网络覆盖, 利用唤醒的节点维持网络覆盖, 直至其能量耗尽, 然后继续唤醒仍处于休眠状态的传感器节点, 直到所有节点处于活跃状态且耗尽能量为止。这种不分阶段的随机唤醒策略(NRWS)在前期能达到较高的网络覆盖, 但后期随着可被唤醒的传感器节点数量的减少, 网络覆盖也迅速下降, 网络能量分配不均匀, 最终导致网络性能不高。由此本文提出以下的分阶段唤醒策略(PWS)。

不失一般性, 设网络中单个完整的传感器节点的寿命均为 T (T 是指节点正常工作下的平均寿命, 不包括休眠时间), 将其分为相等的 N 个阶段, 每个阶段的维持时间为 T/N , 在各阶段中, 执行传感器节点的休眠/唤醒策略。PWS通过细化时间段, 将传感器节点执行休眠/唤醒状态切换的周期由 T 缩短为 T/N , 均衡了能量消耗, 旨在提高网络性能。PWS步骤如下:

(1) 对每个休眠的传感器节点, 将其寿命 T 分为 N 个阶段。定义一个能量向量 \mathbf{E} , 其元素代表每个节点的剩余能量, 并初始化为 $\mathbf{E}[N, \dots, N]$, 即每个传感器节点的剩余能量初始化为 N 。

(2) 在每个时间阶段 T/N 中, 循环唤醒传感器节点 i , 每次循环中随机选取一个传感器节点, 使其处于活跃状态, 并保证其对网络覆盖有贡献且在这一阶段中没有被重复置为活跃状态, 能量向量中对应于该节点的元素 $\mathbf{E}(i)$ 减1, 更新网络覆盖。循环终止条件是达到初始网络覆盖, 或者是节点均处于活跃状态。

(3) 按照(2)重复下一阶段, 直到能量向量为全零向量为止, 即所有节点的能量都耗尽。

3.4 WSS 算法流程图

冗余节点休眠基础上的分阶段唤醒策略(WSS)结合了冗余节点休眠策略(SSRS)和分阶段唤醒策略(PWS), 其流程图见图1。WSS的基本思想就是将传

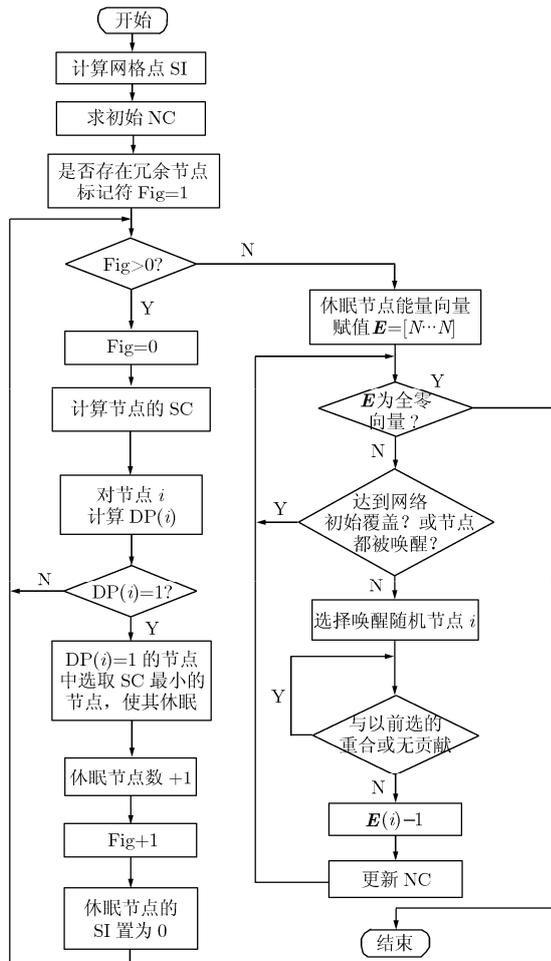


图1 WSS算法流程图

传感器网络中的冗余节点执行休眠，利用现有的活跃节点维持网络运行时间 T ，然后将休眠的节点分阶段进行唤醒，直到所有节点的能量都耗尽为止。若在3维空间中放置 N 个传感器节点，则WSS的计算复杂度为 $O(N^3)$ ，不会对传感器节点造成较大的计算负担。

4 仿真算例

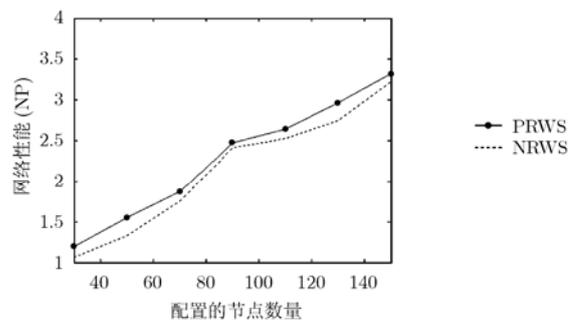
将3维待监测区域划分为 $30 \times 30 \times 30$ 的网格，设网络中单个传感器节点的寿命为 T ，共部署 K 个传感器节点，传感器感知模型中取 $\alpha=0.1$ ， $\beta=4$ ， $SI_{sen}=0.2^{[8]}$ 。

节点在进行活跃/休眠切换过程中均是处于带电状态，需要在节点间进行大量数据通信，但这个时间相对于传感器节点的寿命而言是很短的。通常传感器节点的收发器所处的状态分为发送、接收、空闲和休眠4种，Stemm等人在文献[17]中认为，自组网节点在发送、接收和空闲时，能量消耗比率为1.4:1.05:1。传感器节点在空闲状态也具有较高的功耗，几乎与接收模式相同。因此，为方便计算，暂

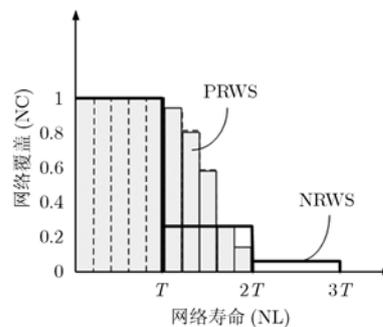
不考虑状态变换比空闲状态多余的能耗。

4.1 PRWS和NRWS的比较

为分析有无必要采用“分阶段”唤醒策略，比较了分阶段随机唤醒策略(PRWS，其方法与PWS相同，前者针对的是分布于监测区域中的所有传感器节点，后者针对冗余节点休眠策略后的休眠节点，单个传感器节点寿命 T 分为5个阶段)与不分阶段随机唤醒策略(NRWS)。这里均不涉及SSRS阶段，令初始部署在3维空间中的传感器节点全部处于休眠状态，分别利用PRWS和NRWS进行唤醒。由图2(a)可知，随着传感器节点数量的增加，PRWS和NRWS的网络性能也随之提高，针对相同的传感器节点数，PRWS的网络性能高于NRWS。在3维空间中部署50个传感器节点，PRWS和NRWS的网络寿命与网络覆盖的变化，见图2(b)所示。图中PRWS的网络性能为阴影部分的面积，NRWS的网络性能为黑线与坐标轴所包围的面积。在 T 时间后，NRWS的网络覆盖从100%下降到25.9%，在第3个 T 时间内，网络覆盖只能达到7.4%，这样的网络是不健全的，后期过低的网络覆盖基本上不能完成覆盖任务。而PRWS的网络覆盖下降比较平缓，维持较高网络覆盖的时间也比较长。虽然PRWS在 $2T$ 时间后，其网络覆盖降为0，但很明显，阴影部分的面积大于黑线所包围的面积，即PRWS的整体网络性能优于NRWS。NRWS的网络覆盖在后期下降很快，因为处于休眠状态的节点越来越少，即可供唤醒的节点越来越少，



(a) PRWS 与 NRWS 的网络性能随传感器节点数增加的变化趋势



(b) $K=50$ 时，PRWS 与 NRWS 的网络覆盖随时间的变化趋势

图2 PWS与NRWS的网络性能比较

而前期网络覆盖较高时, 活跃节点中不可避免地存在冗余节点。PRWS将传感器节点的寿命阶段化, 减缓了网络覆盖的下降趋势。

4.2 WSS和PRWS的比较

为分析有无必要在上述PWS之前结合冗余节点休眠策略, 比较了基于冗余节点休眠的分阶段唤醒方法(WSS)与不基于冗余节点休眠的分阶段唤醒方法(PRWS)的网络性能, 两者的区别是WSS先将冗余节点置为休眠状态, 利用选择的活跃节点维持时间 T 之后(单个传感器节点的寿命为 T , 即等待活跃节点能量耗尽之后), 再对网络中剩余的休眠节点实行分阶段唤醒策略; 而PRWS是令所有部署节点均处于休眠状态, 直接对其实行分阶段唤醒策略, 两者都将单个传感器节点的寿命 T 划分为5个阶段。从图3(d)中可见WSS和PRWS的网络性能随着传感器节点数的增加而提高, 在相同的传感器节点数下, WSS的网络性能优于PRWS。图3(a)、3(b)和3(c)分别比较了在不同传感器节点数下, WSS和PRWS的网络覆盖随时间的变化趋势。网络性能为图中网络覆盖曲线与坐标轴所围成的面积, 图3(a)中, WSS($K=50$)的网络性能最大, PRWS($K=50$)次之, 然后是WSS($K=30$), PRWS($K=30$)的NP最小。在图3(b)中, WSS($K=90$)的网络性能甚至高于PRWS($K=110$)的网络性能, 即WSS使用90个传感器节点就能达到比PRWS使用110个节点还要高的网络性能。图3(c)中针对130和150个传感器节点数, 也可得到了类似结果。

分阶段唤醒中, 将单个传感器节点的寿命 T 划分为 N 个阶段, 图4(a)中分析了 N 与网络性能的关系(其中 $K=130$)。 N 越大, 即将单个传感器节点的寿命划分为越多的阶段, 能量分布越均匀, 网络性能越高。但划分的阶段数越多, 意味着对传感器节点执行活跃/休眠的状态变换越频繁, 本文中没有考虑这一状态变换的额外能耗。图4(b)中列出了 $N=5$ 和 $N=7$ 时的网络覆盖随时间的变化趋势, 在网络的大部分生存时间中, 均维持了较高的网络覆盖, 且将单个传感器节点的寿命划分为7个相等阶段时的网络性能比划分为5个阶段时的网络性能要高。

5 结束语

本文针对传感器网络中节点能量有限且密集布点时存在大量冗余节点的特点, 提出了基于冗余节点休眠和分阶段唤醒策略的传感器网络3维覆盖控制方法。该覆盖控制方法分为两步。(1)使冗余节点处于休眠状态: 根据传感器节点对网络覆盖的贡献大小, 使冗余节点逐一处于休眠状态; (2)分阶段唤醒休眠节点: 活跃节点能量耗尽之后, 对在第(1)步中的休眠节点实行分阶段唤醒策略。将单个传感器节点的寿命 T 划分为相等的 N 个阶段, 在每一阶段中, 独立地执行随机唤醒策略, 且保持活跃/休眠状态达 T/N 的时间。仿真结果表明, 分阶段唤醒比不分阶段唤醒策略的网络性能要好, 且先使冗余节点休眠的网络性能高于直接实行唤醒策略的网络性能。同时也分析了将单个传感器节点寿命所划分的

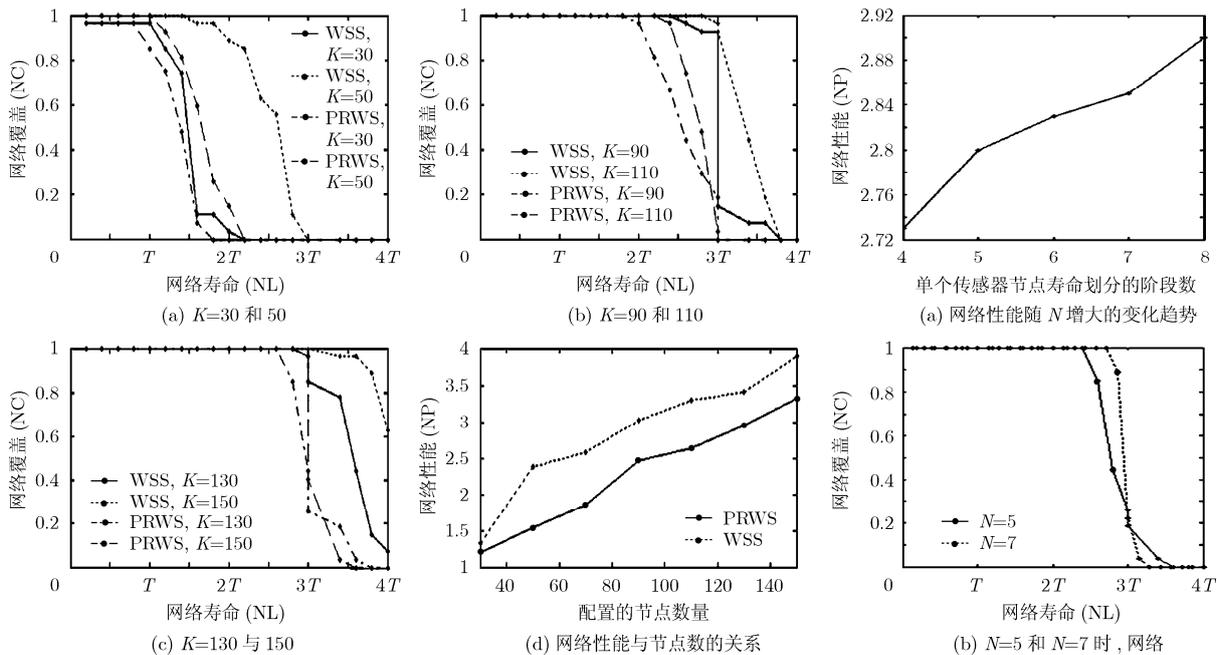


图 3 WSS 和 PRWS 的网络覆盖随时间的变化趋势

图 4 单个传感器寿命所划分的阶段数与网络性能的关系

阶段数与网络性能的关系, 仿真结果表明, 划分的阶段数越多, 网络性能越高, 但也会增加节点执行活跃/休眠状态变换的能耗和数据传输开销, 如何选择合适的划分阶段数 N , 是下一阶段要研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 任彦, 张思东, 张宏科. 无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 422-433.
Ren Y, Zhang S D, and Zhang H K. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks [J]. *Journal of Software*, 2006, 17(3): 422-433.
 - [2] 林南, 刘薇. 无线传感器网络休眠调度问题分析[J]. 闽江学院学报. 2008, 29(2): 72-76.
Lin Nan and Liu Wei. Research and simulation of sleeping schedule algorithm of wireless sensor networks [J]. *Journal of MinJiang University*, 2008, 29(2): 72-76.
 - [3] 刘丽萍, 王智, 孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1752-1757.
Liu L P, Wang Z, and Sun Y X. Survey on coverage in wireless sensor networks deployment [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1752-1757.
 - [4] 蒋鹏. 基于无线传感器网络的湿地水环境远程实时监测系统关键技术研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(1): 183-186.
Jiang P. Survey on key technology of WSN-based wetland water quality remote real-time monitoring system[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(1): 183-186.
 - [5] 唐勇, 周明天. 无线传感器网络中最小化能量广播算法[J]. 通信学报, 2007, 28(4): 80-86.
Tang Y and Zhou M T. Minimum energy broadcasting algorithm in wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2007, 28(4): 80-86.
 - [6] Tian D and Georganas N D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor network[C]. Proc. 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), Atlanta, Georgia, USA, September, 2002: 32-41.
 - [7] Wang X, Xing G, Zhang Y, Lu C, Pless R, and Gill C. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks[C]. Proc. 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03), Los Angeles, CA, USA, November 2003: 28-39.
 - [8] 杨白薇, 于宏毅, 李宏. 基于协作的无线传感器网络休眠调度算法[J]. 计算机应用研究. 2008, 25(3): 677-680.
Yang B W, Yu H Y, and Li H. Coverage-preserving density control algorithm based on cooperation in wireless sensor network [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(3): 677-680.
 - [9] 屈玉贵, 蔺智挺, 赵保华. 无线传感器网络的 WPCS 覆盖策略[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 767-770.
Qu Y G, Lin Z T, and Zhao B H. WPCS coverage strategy for wireless sensor network [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(4): 767-770.
 - [10] Zhang H H and Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks [J]. *International Journal of Wireless Ad hoc and Sensor Networks*, 2005, (1): 89-124.
 - [11] Kumar S, Lai T H, and Balogh J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network[C]. 10th ACM MobiCom, Philadelphia, PA, 2004: 144-158.
 - [12] Yang Bai wei, Yu Hong yi, Li Hong, and Hou Hui feng. A coverage-preserving density control algorithm based-on cooperation in wireless sensor networks. *Wireless Communication [C]. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, September 2006: 1-4.
 - [13] Dhillon S S, Chakrabarty K, and Iyengar S S. Sensor placement for grid coverage under imprecise detections. Proc. of International Conference on Information Fusion[C]. Orlando, FL, USA, 2002: 1581-1587.
 - [14] Ma J S, Theiler J, and Perk S. Accurate online support vector regression [J]. *Neural Computation*, 2003, 15 (11): 2683-2703.
 - [15] 藏传治, 于海斌, 梁纬, 白洁音. 无线传感器网络覆盖问题中的目标优化运行模型[J]. 控制与决策, 2006, (10): 1119-1123.
Zang C Z, Yu H B, Liang W, and Bai J Y. Optimal moving path in the sensor network coverage problem [J]. *Control and Decision*, 2006, (10): 1119-1123.
 - [16] 张天乐, 李忠诚, 殷昭印. 交替活跃的部分连接网络休眠调度策略研究[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(7): 270-272.
Zhang Tian-le, Li Zhong-cheng, and Yin Zhao-yin. Sleep scheduling for partially connected network in alternately active mode [J]. *Application Research of Computers*, 2007, 24(7): 270-272.
 - [17] Stemm M and Katz R H. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 1997, E80-B(8): 1125-1131.
- 蒋 鹏: 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统及其应用、智能仪表。
陈 峰: 女, 1984 年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络覆盖控制方法。