

基于数据相关性的无线传感器网络关联覆盖

吴 舜¹ 万 莹¹ 孙亚娟² 许大卫¹ 王换招²

(国网冀北电力有限公司信息通信分公司 北京 100053)¹

(西安交通大学计算机科学与技术系 西安 710049)²

摘 要 研究了网络稳定状态下无需节点位置信息的覆盖调度问题,给出了基于数据相关性的关联覆盖协议 ACPUDC(Associated Coverage Protocol Using Data Correlation for Wireless Sensor Networks)。它将网络中的数据冗余表示为形式化的数据相关性,并分析了网络连通性问题,给出了基于数据相关性的冗余节点判断准则。协议采用退避机制防止连通漏洞的形成,并采用基于剩余能量的退避机制保证网络的整体能耗分布均衡。通过仿真实验,验证了 ACPUDC 在保证网络覆盖质量和连通性的前提下,能够显著地减少工作节点的数目,并且使网络整体能量分布均衡,延长网络寿命。

关键词 传感器网络,数据相关性,节点调度

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Associated Coverage Using Data Correlation for Sensor Networks

WU Shun¹ WAN Ying¹ SUN Ya-juan² XU Da-wei¹ WANG Huan-zhao²

(Information & Telecommunicati Company of State Grid Jibei Electric Power Co.,Ltd.,Beijing 100053,China)¹

(Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049,China)²

Abstract This paper studied the coverage schuduling problem without the use of node location information. An associated coverage protocol using data correlation(ACPUDC) for WSNs was presented. ACPUDC describes the data redundancy in the networks as formalized data correlation,analyzes the problem of network connectivity,and presentes judgment model of redundant node based on data correlation. The residual-energy-based backoff mechanism in ACPUDC ensures balanced energy consumption of each node. The simulation results verify that ACPUDC can significantly reduce the number of working nodes, and meanwhile,guarantee the QoC and connecivity of networks. Moreover,ACPUDC can make energy comsumption of each node more fair.

Keywords Sensor network,Data correlation,Node scheduling

1 引言

无线传感器网络是一种全新的信息获取方式和数据收集系统。它将信息世界与物理世界连接起来,为用户提供“无处不在的计算”。作为一种新型的无线自组织网络,无线传感器网络具有其自身的特性,如:节点密集部署必然导致网络中的节点数据间存在大量冗余,传感器节点多采用电池供电,能量十分有限,而节点的剩余能量直接影响传感器网络的使用寿命。因此,无线传感器网络需要更优的拓扑控制管理和更节能的节点调度机制。

节点调度是在保证网络覆盖质量和连通性的基础上,通过调节网络中节点的休眠或唤醒状态使相关性强的节点交替工作,尽量减少网络中工作节点的数目和工作时间,从而节省能量,延长网络寿命。因此,如何挖掘节点间的相关性,尤其是节点间的数据相关特性,是优化节点调度管理机制并保证网络服务质量的关键。现有的节点调度机制大都不能准确地

依据节点相关性设计高效节能的节点调度机制。因此,网络中都存在或多或少的数据冗余。基于数据相关性的节点调度机制从节点间的数据相关性出发,将节点间的数据冗余表示为形式化的数据相关性,在保证网络数据覆盖质量的前提下,可以将所有的冗余节点关闭,且不影响网络整体连通性,从而最大限度地节省网络能耗,延长网络的生存时间。

高效的节点调度不仅能够大幅度地减少节点能量消耗,降低节点间的通信干扰,还能提高网络的健壮性并简化路由设计。

本文从数据相关性的角度分析无线传感器网络的覆盖调度问题,研究了在没有节点位置信息的情况下,如何设计高效节能的节点调度策略以保证网络的覆盖质量和连通性。应用线性代数中的相关理论给出了节点间数据相关性的计算模型,同时研究了网络连通性问题,在此基础上提出了基于数据相关性的冗余节点判断准则,并设计了一种高效节能的覆盖控制协议——ACPUDC。ACPUDC 协议选取最少的工作节

本文受国家自然科学基金(61170245)资助。

吴 舜(1983—),男,硕士,高级技师,主要研究方向为信息化企业架构管理、信息化项目建设及运维管理,E-mail:wushun1983@126.com;

孙亚娟(1989—),女,硕士,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:sunshine2225@163.com。

点保证网络覆盖质量和连通性,同时采用基于剩余能量的退避机制来保证网络的整体能耗分布均衡,从而实现了减少网络能量消耗,延长网络有效寿命的目的。

2 相关工作

传感器节点的高密度分布导致网络中产生了大量的数据冗余。有效地利用传感器网络中节点间的数据相关性,可以挖掘出网络中存在的大量冗余信息,用于提高数据融合的效率,降低网络中的数据冗余并且显著地减少网络中的数据传输量,节省网络用于传输冗余数据所需要额外消耗的能量,实现减少能量消耗,延长网络有效寿命的目的。

文献[1]用线性代数中的相关系数分析土壤湿度应用中的数据相关性。文献[2]给出了一种高效节能的 WSN 数据聚合方法 ODAS/SS,该方法在节点调度过程中,除了考虑传统的节点位置、节点剩余能量外,还将网络中的数据分布关联性作为调度的依据,有效地提高了网络的数据融合率。文献[3]提出以 WSN 中的数据时空关联性作为分簇的依据,划分关联节点集成簇来降低数据传输量以达到节能的目的。文献[4]提出了一种基于数据相关性的分簇路由协议 DCC,其核心是将 WSN 中的数据冗余表示为形式化的数据相关表达式,从数据相关性的角度考虑网络的分簇问题。

节点调度机制是在保证网络覆盖质量的前提下,通过调度节点的休眠或者工作状态使相关性较强的节点交替工作,从而节省能量,延长网络寿命。文献[5]提出基于免职合格规则的分布式覆盖调度算法,如果邻居节点集的赞助覆盖区域已经完全覆盖该节点自身的监控区域,则该节点满足免职合格规则,应关闭节点以节约网络能量。但算法忽略了节点覆盖区域可能出现过多的重叠情况,导致网络中的工作节点数量过多,造成网络能量的过度消耗。文献[6]提出基于几何理论的覆盖调度协议,算法采用计算几何理论检测并修复网络中的覆盖漏洞,从而保证网络的覆盖质量。为同时保证网络的覆盖质量和连通性,Wang 等人[7]分析了同时保证网络 k -覆盖和连通性所需的最少工作节点数目。Zhuang 等人[8]证明了网络 k -覆盖和 1 -连通的充要条件是:每个节点被其感知邻居集 k -周长覆盖,且由它们构成的局部网络全联通。文献[9]从概率论的角度考虑网络 k -覆盖且 m -连通问题。由于密集部署的传感器网络中普遍存在着节点间的数据相关性,利用这一数据相关性可以优化 WSN 研究中的许多问题。文献[10]利用节点数据的时空相关性,更精确地估计缺失的监测数据值。文献[11]从时空相关性的角度优化节点调度策略以保证网络的覆盖质量。

本文第 3 节建立基于数据相关性的冗余节点判断准则;第 4 节给出 ACPUDC 协议的具体调度过程;第 5 节对 ACPUDC 协议性能进行仿真验证;最后对本文研究工作进行总结与展望。

3 基于数据相关性的冗余节点判断

3.1 数据相关性计算模型

无线传感器网络的覆盖调度问题通常需要解决两个子问题:1)依据什么规则判断某个节点是否为冗余节点;2)如何调度冗余节点进入睡眠状态以节省网络能耗。要解决第一个子问题,需要建立冗余节点判断准则。传统的基于感知区域面

积覆盖的冗余节点判断准则,大都需要知道节点的位置信息,或使用概率论等相关理论。本节建立了基于数据相关性的冗余节点判断准则,将网络数据冗余表示为形式化的数据相关性,在无需节点位置信息的情况下,给出冗余节点判断准则。

传感器网络中的所有工作节点以相同的频率在相同的时刻采集数据。如果将每个传感器节点看作是一个数据源,则节点 i 在一段时间 $[t_1, t_m]$ (有限长)内所采集到的数据序列为 $d(i, t_1), d(i, t_2), \dots, d(i, t_m)$, 可以用向量形式表示为 $v_i = [d(i, t_1), d(i, t_2), \dots, d(i, t_m)]^T$ 。

将传感器网络中节点数据序列与向量相对应,对于传感器网络中的单个簇,将簇内的数据向量组成的集合看作一个向量集 $\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$, 该向量集对应的矩阵形式可以表示为 $V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_k]$ 。

最大线性无关子集[12]是向量集 $\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 的具有如下性质的子集 $\{v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_r}\}$:①线性无关;②向量集中每个向量皆可由此最大线性无关子集表出。

因为线性相关的向量集必然存在最大无关向量子集。无线传感器网络可以对应线性代数的理论,将单个簇内所有节点的数据向量组成的集合视为一个向量集。如果节点间的数据存在线性相关性,则该节点数据向量集是线性相关的。可以在该节点数据向量集中找到一个最大线性无关子集,它由该簇内 m 个线性无关的节点数据向量组成,并且可以线性表出簇中其他节点的数据向量。

传感器网络中某个簇内的节点集 $\{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ 在时间段 $[t_1, t_k]$ 内采集到的数据序列分别是 $v_1 = \{d(i_1, t_1), d(i_1, t_2), \dots, d(i_1, t_k)\}, \dots, v_n = \{d(i_n, t_1), d(i_n, t_2), \dots, d(i_n, t_k)\}$, 由这些节点数据序列组成的向量集为 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 如果矩

$$\text{阵 } D = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n] = \begin{bmatrix} d(i_1, t_1) & d(i_2, t_1) & \dots & d(i_n, t_1) \\ d(i_1, t_2) & d(i_2, t_2) & \dots & d(i_n, t_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d(i_1, t_k) & d(i_2, t_k) & \dots & d(i_n, t_k) \end{bmatrix} \text{ 的秩}$$

$R(D) = m, m \leq n$, 则该簇内存在 $n - m$ 个节点的数据可以由其他 m 个节点的数据线性表示。这 $n - m$ 个节点称为数据冗余节点。这种线性表示就是该簇内的节点集在时间段 $[t_1, t_k]$ 内的数据相关性。

3.2 网络连通问题分析

为了能将传感器节点采集到的数据传输到基站,要求工作节点所构成的网络必须是连通的。当节点的通信半径 R_c 一经网络部署就固定不变时,则通过使某些数据冗余节点作为通信辅助节点继续工作以保证网络的连通性。对于数据冗余节点 X ,如果簇内存在工作节点 Y 的数据接收方只有一个节点并且是 X ,那么关闭 X 将会影响网络的连通性,因此数据冗余节点 X 将作为通信辅助节点处于工作状态。反之,数据冗余节点 X 不影响网络连通性。

假设图 1 所示的节点连通情况下,节点 A, B 是经过数据相关性计算模型得到的数据冗余节点,其他节点数据不相关并且可以表示数据冗余节点的数据,因此这些节点可以作为簇内的骨干节点并处于工作状态。对于数据冗余节点 A ,存在工作节点 a 以节点 A 作为唯一的数据接收方,若关闭将导致网络不连通,因此 A 将作为通信辅助节点进入工作状态;而数据冗余节点 B 并非其数据发送节点 c, d 的唯一数据接收方,因此可以作为冗余节点进入睡眠状态而不影响网络

的连通性。

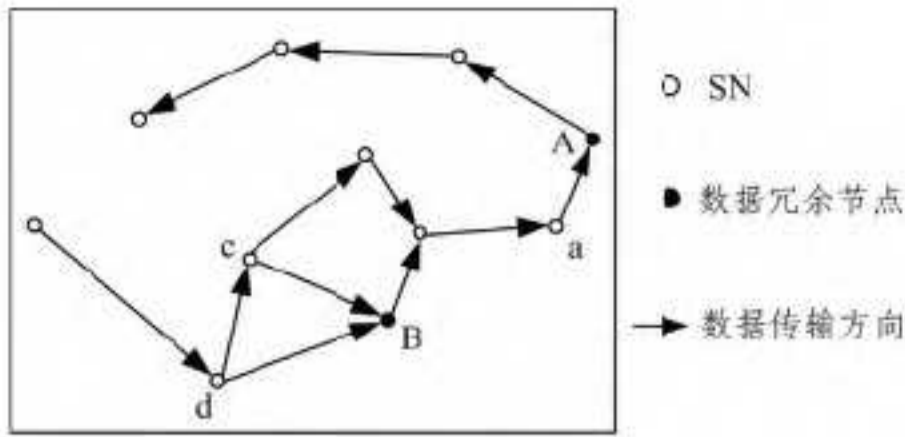


图1 簇内节点的连通示意图

3.3 冗余节点判断准则

采用数据相关性计算模型得到的簇内节点间的数据相关性,既可以作为判断数据冗余节点的准则,又可以作为关闭冗余节点后在数据中心恢复其数据的依据。通过保留部分数据冗余节点作为通信辅助节点继续工作,来保证网络的连通性。因此,判断节点冗余性必须同时考虑两个条件:节点是数据冗余节点,节点关闭后不影响网络的连通性。

基于数据相关性的冗余节点判断准则的流程如图2所示。

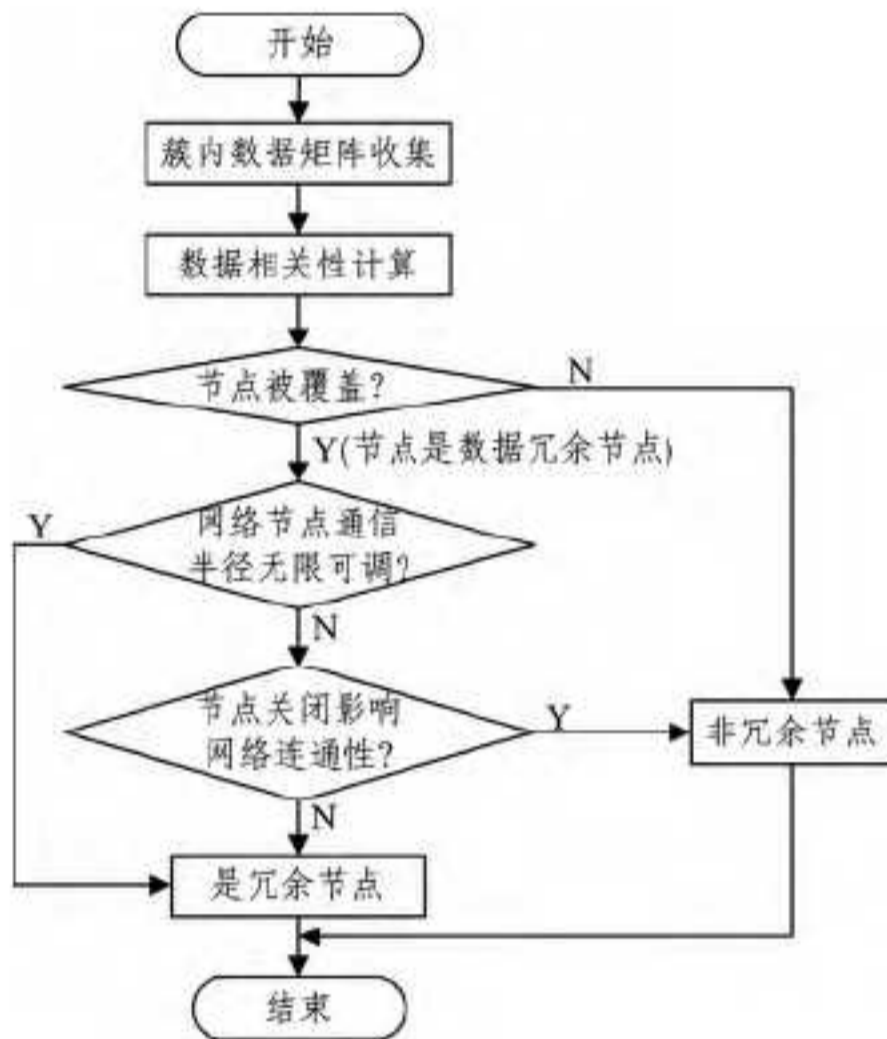


图2 基于数据相关性的冗余节点判断流程

因此,既是数据冗余节点,又能保证该节点关闭后不会影响网络连通性,这样的节点才被判断为冗余节点。

4 基于相关性的关联覆盖协议

ACPUDC 中网络按轮次(Round)运行,每个轮次由覆盖控制阶段和状态稳定阶段组成。每个节点有4种运行状态:工作状态(Work)、退避状态(Back-off)、预睡眠状态(Pre-sleep)、睡眠状态(Asleep)。状态之间的转换关系如图3所示。

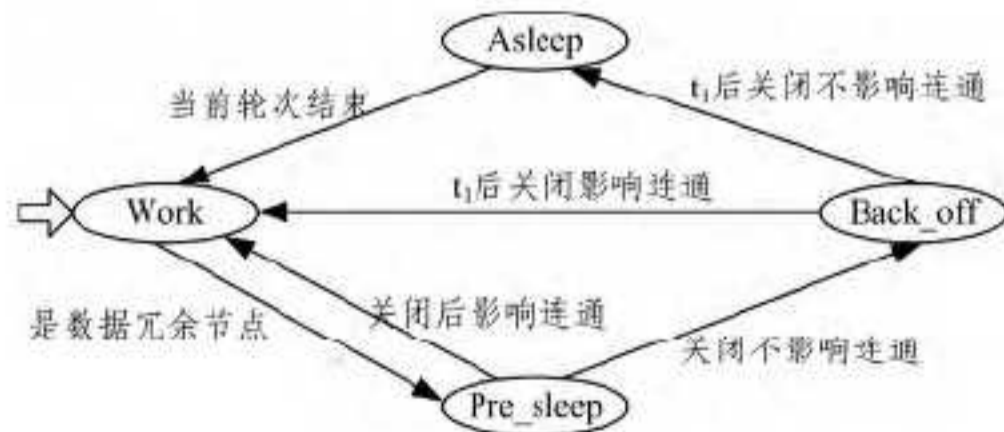


图3 ACPUDC 状态转换图

每个轮次刚开始,节点全都处于工作状态。各个簇中负责数据处理的RSN节点在这段时间内收集簇中 n 个节点的 $k(k=n-1)$ 次数据的集合,作为节点间数据相关性计算的样本。通过数据相关性计算模型计算这个簇中节点间的数据相

关性,并判断哪些节点是数据冗余节点。

非数据冗余的节点将继续处于工作状态。数据冗余节点将进入预睡眠状态。这些节点如果全部关闭,将不会影响网络的数据覆盖质量,但是有可能对网络的连通性造成影响。由此,进一步考虑保证网络的连通性。根据3.2节,影响网络的连通性的节点将作为通信辅助节点进入工作状态,不影响网络连通性的节点进入退避状态。

退避状态是为了避免网络出现连通性漏洞而引入的退避机制。不影响网络连通性的预睡眠状态节点都将进入退避状态,并在 $[0, T]$ 之间随机选取时间 t_1 作为自己停留在退避状态的时间。当 t_1 结束后,节点再次判断自己如果关闭是否会影响网络的连通性,若仍然不影响,则进入睡眠状态;否则,节点为保证网络的连通性将作为通信辅助节点进入工作状态。

覆盖控制阶段结束时,所有冗余节点进入睡眠状态,其他节点处于工作状态。进入状态稳定阶段,所有工作节点正常采集数据并完成通信工作,直到该轮次的稳定阶段结束,进入下一轮调度。稳定阶段的时长 T_s 的确定是通过数据相关性的优劣来驱动的,因此每个簇的 T_s 是不定长的:

$$T_s = \frac{k}{n} \cdot \frac{n-m}{n} \cdot T_{s0} = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{n-m}{n} \cdot T_{s0} \quad (1)$$

式中, k 为采集数据矩阵所需的节点数据样本数,由引理3有 $k=n-1$,因此 $\frac{n-1}{n}$ 表示数据采样率。 m 是数据矩阵的秩,即簇内数据不相关的节点数目,则 $\frac{n-m}{n}$ 表示簇内节点的总体相关程度, T_{s0} 是节点睡眠时间基值。

算法1给出了ACPUDC节点调度过程的伪代码描述。

算法1 ACPUDC节点调度算法

```

initting the wireless sensor networks;
state ← work;
start timer  $T_k$ ; //  $k=n-1$ ,  $n$  是簇内节点数
while( $T_k$  not expires)
RSN collect the perceived data of all the nodes within a cluster;
RSN calculate the data correlations of nodes;
judge which nodes are data redundant node;
else (SN is redundant data)
state ← Pre-sleep;
while(state ≠ Work && state ≠ Asleep)
{
switch(state)
{
case Pre-sleep:
{
if(node is not communication aided node)
state ← Back-off;
else
state ← Work;
} // end of case Pre-sleep
case Back-off:
{
start timer  $t_1$  ← random(0, T);
wait until  $t_1$  expires;
if( node is not communication aided node)
state ← Asleep;
else

```

```

state←Work;
} //end of case Back-off
default:;
} //end of switch
} //end of while
start timer  $T_s$  according inequality; // 轮长不定
networks running normally with the working nodes;
until  $T_s$  expires; // 本轮次结束
goto Roundlabel; // 新一轮次开始

```

4.1 连通漏洞的预防

网络中不影响连通性的数据冗余节点同时进入睡眠状态,可能出现某一工作节点的所有数据接收方都不工作的情况,形成连通漏洞影响网络的连通性。如图4所示,节点A和B都是数据冗余节点,且满足:(1)当A和B之中至少有一个节点处于工作状态时,网络的连通性可以得到保障;(2)当A和B同时进入睡眠状态时,网络的连通性将被破坏。所以A和B如果同时进入睡眠状态,将形成连通漏洞。

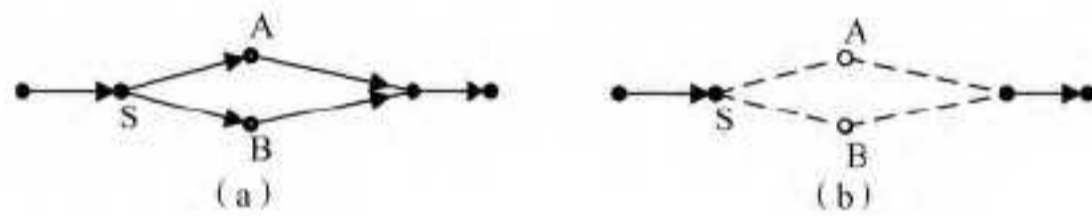


图4 连通漏洞形成示意图

ACPUDC节点调度中引入退避状态,不影响网络连通性的数据冗余节点停留在退避状态的时间是在 $[0, T]$ 之间随机选取的,退出退避状态时节点会再次判断自己如果关闭是否影响网络的连通性,再决定节点的下一个状态。因此,A和B停留在退避状态的时间是不同的,所以必定有一个节点率先进入睡眠状态,使得另一个节点如果关闭将不再满足连通性要求而进入工作状态,从而避免了连通漏洞的形成。

4.2 能耗均衡性

ACPUDC采用基于节点剩余能量的退避机制。在节点调度中,退避时间的选取是在 $[0, T]$ 之间随机产生, T 的计算如下:

$$T = \frac{w}{W_{th}} \cdot T_0 \quad (2)$$

其中, w 是节点的剩余能量, W_{th} 是能量调节阈值, T_0 是固定时间基值。从上式可以看出节点的剩余能量 w 越大, T 就越大,节点退出退避状态的时间也就越迟,因此进入睡眠状态的概率就会越小;反之 w 越小,节点就越有可能进入睡眠状态。由此,网络能耗均衡性得以提高。

ACPUDC中,冗余节点全部进入睡眠状态后将暂停传输自己的感知数据 $Y_{present}$ 。但根据现有工作节点的数据和RSN节点所计算出的簇内节点间数据相关性,可以恢复出所有睡眠节点的估计数据 $Y_{estimate}$ 近似表示 $Y_{present}$ 。

5 实验与分析

5.1 能耗均衡性与网络有效寿命

能耗均衡性是衡量节点调度协议性能的重要指标。图5显示了覆盖质量为100%时,网络能耗随时间的变化情况。从图5可以看出,网络的剩余能量基本呈现线性递减的趋势,这表明ACPUDC在网络能耗均衡性方面有较高的性能。并且, W_{th} 的值越小,网络能耗越均匀,说明了ACPUDC采用基于节点剩余能量的退避机制的有效性。

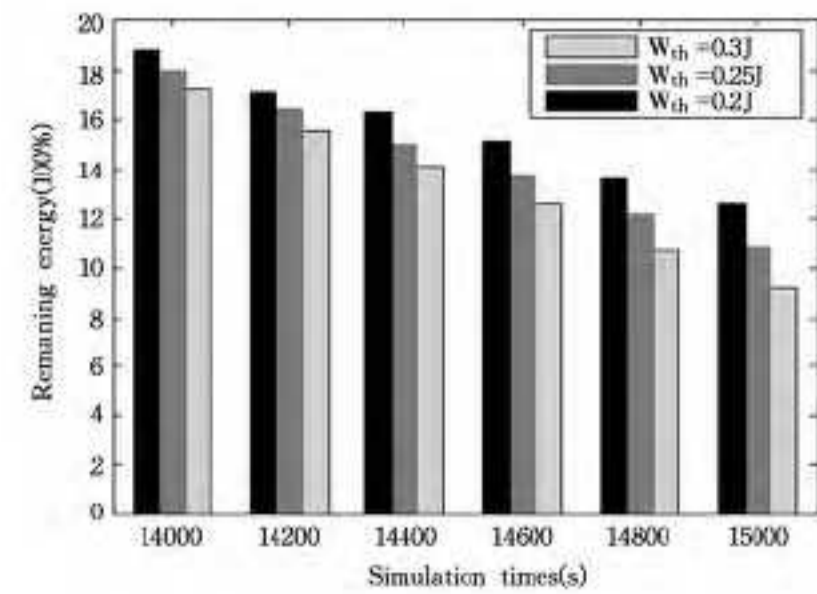


图5 网络能耗随时间的变化

网络的有效寿命为获得的满足要求的覆盖质量的运行时间长度。图6为不同的覆盖质量要求下,获得的覆盖质量随时间的变化情况。使用ACPUDC的网络中,节点交替工作,有效地节省了网络的能耗。从图6可以看出,当要求的覆盖质量为90%时,网络的有效寿命延长了大约2.25倍。同时,使用ACPUDC的网络在有效寿命结束后,获得的覆盖质量迅速下降到0,也从侧面反映了网络中节点的能耗的均衡性。

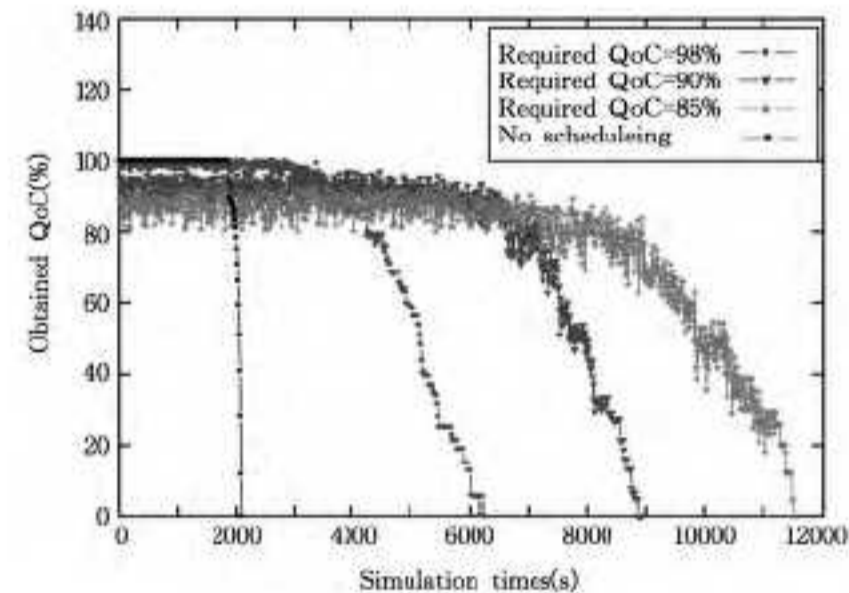


图6 获得的QoC随时间的变化

5.2 协议性能的比较

为了验证协议的性能,本文比较了ACPUDC与同样无需节点位置信息的LDAS^[13]和ELIQoS^[14]协议在工作节点数量、网络覆盖质量方面的性能表现。

从图7可以看出,在相同的覆盖质量要求下,ACPUDC所需的工作节点数要低于ELIQoS和LDAS的工作节点数,这是由于ACPUDC协议采用节点数据覆盖作为网络覆盖质量的衡量标准,并基于数据冗余判断冗余节点,较之LDAS和ELIQoS等传统的基于感知区域面积覆盖的冗余节点判断,其能够以节点数据为核心,更精确地判断网络中的冗余节点,从而使用更少的工作节点来达到指定的覆盖质量。

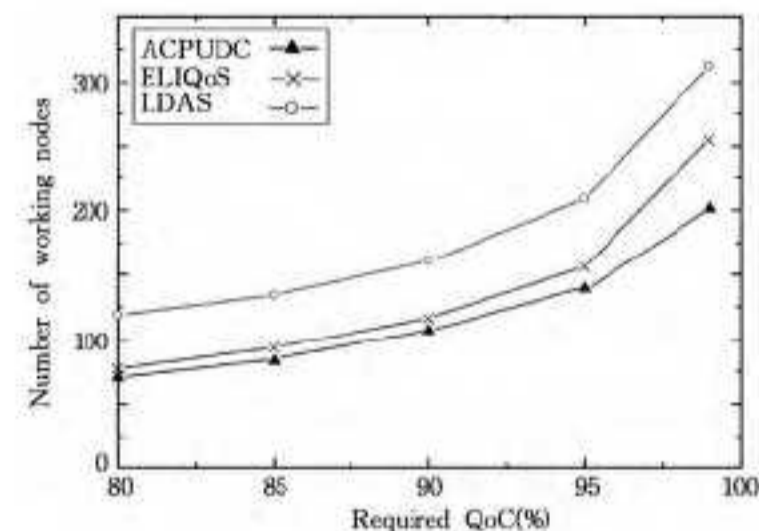


图7 工作节点数比较

从图8可以看出,ACPUDC、ELIQoS和LDAS都能保证网络的覆盖质量要求,且都具有一定的覆盖冗余。而LDAS的覆盖冗余明显高于ELIQoS和ACPUDC,这反映出LDAS选取的工作节点中有大量的冗余。造成这一现象的原因是LDAS忽略了节点的两跳感知邻居对自己感知区域的覆盖贡

(下转第320页)

attacks[C]//IEEE INFOCOM, Barcelona, Spain, 2006:1-13

[10] Boukerche A, Ren Y. A trust-based security system for ubiquitous and pervasive computing environments[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(18):43-51

[11] 胡春华, 刘济波, 刘建勋. 云计算环境下基于信任演化及集合的服务选择[J]. *通信学报*, 2011, 32(7):71-79

[12] 谢晓兰, 刘亮, 赵鹏. 面向云计算基于双层激励和欺骗检测的信任模型[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(4):812-817

[13] 熊润群, 罗军舟, 宋爱波, 等. 云计算环境下 QoS 偏好感知的副本选择策略[J]. *通信学报*, 2011, 32(7):93-102

[14] Abbadi I M, Alawneh M. A framework for establishing trust in

the cloud[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 38(5), 1073-1087

[15] Noor T H, Sheng Q Z. Trust as a service; a framework for trust management in cloud environments[C]// *Web information system engineering(WISE 2011)*. 2011, 6997:314-321

[16] 茆诗松. 贝叶斯统计[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999

[17] Das A, Islam M M. Dynamic Trust Model for Reliable Transactions in Multi-agent Systems[C]// *Proceedings of the 13th International Conference on Advanced Communication Technology*. Seoul, 2011:1101-1106

[18] 数学手册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978

(上接第 314 页)

献, 因而使得许多的冗余节点处于工作状态。从图 8 可以看出, ACPUDC 协议的覆盖质量与 ELIQoS 的覆盖质量基本相同, 但由图 7 已经知道, 在相同覆盖质量要求下, ELIQoS 的工作节点数要略高于 ACPUDC 的工作节点数, 因此, 必然导致 ELIQoS 的网络能耗要高于 ACPUDC。

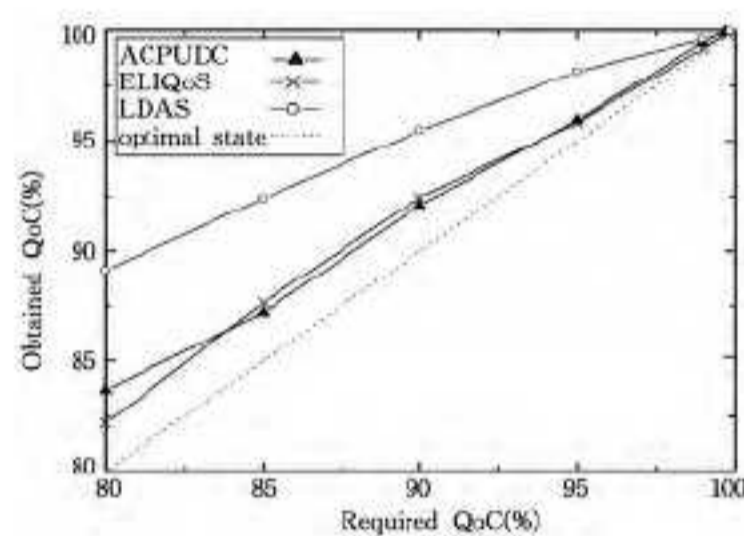


图 8 获得的覆盖质量比较

综合上面的比较结果可以得出, ACPUDC 采用数据冗余来判断冗余节点能够更精确地描述网络的覆盖能力, 同时, ACPUDC 能够选取最少的工作节点以保证网络的覆盖质量要求。

结束语 本文应用线性代数中的相关理论给出了节点间数据相关性的计算模型, 同时研究了网络连通性问题, 在此基础上提出了基于数据相关性的冗余节点判断准则, 并设计了一种高效节能的覆盖控制协议——ACPUDC。ACPUDC 协议选取最少的工作节点来保证网络覆盖质量和连通性, 同时采用基于剩余能量的退避机制来保证网络的整体能耗分布均衡, 从而实现了减少网络能量消耗、延长网络有效寿命的目的。

参考文献

[1] Sun Ya-juan, Wang Huan-zhao, Zhang Ke-wang, et al. Associated Clustering Strategy for Wireless Sensor Network[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 2014:7

[2] Kondo S, Kanzaki A, Hara T, et al. Energy-Efficient Data Gathering Using Sleep Scheduling and Spatial Correlation Based on Data Distribution in Wireless Sensor Networks[C]// *2011 14th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS)*. 2011:194-201

[3] Hongbo J, Shudong J, Chonggang W. Prediction or Not? An En-

ergy-Efficient Framework for Clustering-Based Data Collection in Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(6):1064-1071

[4] 徐立. 基于数据相关性的 WSN 分簇路由协议的研究[D]. 南京: 东南大学, 2010

[5] Tian D, Georganas N D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. ACM: Atlanta, Georgia, USA, 2002:32-41

[6] Kasbekar G S, Bejerano Y, Sarkar S. Lifetime and Coverage Guarantees Through Distributed Coordinate-Free Sensor Activation[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(2):470-483

[7] W You-Chiun, T Yu-Chee. Distributed Deployment Schemes for Mobile Wireless Sensor Networks to Ensure Multilevel Coverage[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(9):1280-1294

[8] Zhuang M, Lingguo C, Baihai Z, et al. Deployment patterns for k-coverage and l-connectivity in Wireless Sensor Networks [C]// *IET International Conference on Wireless Sensor Network (IET-WSN 2010)*. 2010:73-77

[9] Yan J, Ling W, Ju-Yeon J, et al. EECCR: An Energy-Efficient m-Coverage and n-Connectivity Routing Algorithm Under Border Effects in Heterogeneous Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(3):1429-1442

[10] Yuan Yuan L, Parker L E. A spatial-temporal imputation technique for classification with missing data in a wireless sensor network[C]// *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008(IROS 2008). 2008:3272-3279

[11] Changlei L, Guohong C. Spatial-Temporal Coverage Optimization in Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(4):465-478

[12] 刘金旺, 李冬梅. 线性代数[M]. 天津: 天津大学出版社, 2010

[13] Wu K, Gao Y, Li F, et al. Lightweight Deployment-Aware Scheduling for Wireless Sensor Networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2005, 10(6):837-852

[14] 毛莺池, 龚海刚, 刘明, 等. ELIQoS: 一种高效节能、与位置无关的传感器网络服务质量协议[J]. *计算机研究与发展*, 2006, (06):1019-1026