

基于 k -覆盖保证的异构传感器网络节点调度策略

王换招, 董贝, 罗韩梅, 陈培军, 李增智
(西安交通大学计算机科学与技术系, 710049, 西安)

摘要: 在分析已有传感器网络覆盖控制协议的基础上, 提出了一种分布式覆盖控制算法. 针对节点随机部署的异构网络, 通过研究网络中节点交点的必要性, 得出必要节点交点的最低覆盖度即为区域覆盖度的结论, 由此可将区域覆盖度的计算转化为特殊点的覆盖度计算, 从而解决了覆盖算法计算复杂度高和不精确等问题. 在此基础上, 又提出了一种以保证 k -覆盖为目标的节点调度策略 (SEC), 该策略按照时间轮次, 根据精确覆盖度算法可分布式地确定节点的状态. 仿真结果表明, SEC 能够减少节点的通信量, 使工作节点数摆脱总节点数的影响, 从而延长了网络的生命周期. 与经典覆盖控制算法相比, 所提算法在保证网络覆盖度的前提下可有效降低工作节点的数量, 提高大规模传感器网络的可扩展性.

关键词: 无线传感器网络; 覆盖控制; 节点调度

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)08-0940-05

Node Scheduling Strategy Based on k -Coverage Guarantee for Heterogeneous Wireless Sensor Networks

WANG Huanzhao, DONG Bei, LUO Hanmei, CHEN Peijun, LI Zengzhi
(Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on analyzing the existing coverage control protocols for wireless sensor networks, a distributed coverage control strategy is proposed for heterogeneous sensor network with stochastically deployed nodes. By studying the necessity of the node intersection points, the conclusion that the lowest coverage degree of the necessary node intersection points is the coverage degree of the area is obtained, and hence the coverage degree of the whole monitoring region can be converted into the coverage degrees of some special points. The imprecision and complexity problems that appear in many existing protocols can be solved accordingly. A node scheduling strategy called SEC is also proposed based on the proposed coverage arithmetic. The nodes' states are then decided in terms of the network operating time in rounds and the accurate coverage degree arithmetic. Simulation results show that the communications can be reduced observably in SEC, and the affect of the number of total nodes on the working nodes can be eliminated. The network lifetime is prolonged consequently. With k -coverage warranty the number of active nodes is reduced effectively compared with the classical strategies, and the SEC strategy has good expansibility.

Keywords: wireless sensor network; coverage control; node scheduling

近年来,随着微电子技术、传感器技术及通信技术的发展,传感器网络技术发展迅猛,进展很快. 无

线传感器网络一般具有大规模、自组织、随机部署、环境复杂、传感器节点资源有限、网络拓扑经常发生

变化等特点,覆盖控制可反映网络的感知服务质量,使无线传感器网络的空间资源得到优化分配^[1].

由于传感器网络的特殊性,所以其节点的部署通常是随机的.为了延长传感器网络的生命周期,在不影响网络覆盖度的前提下,对节点进行实时调度,可以使冗余节点处于睡眠状态,从而有效解决传感器网络的能量及覆盖问题^[2-3].

现有的覆盖控制已应用于移动网络^[4]、三维空间^[5]等诸多方面,提出了连通覆盖、圆周覆盖、信息覆盖等覆盖控制算法和节点调度策略.更有学者将其与路由协议相结合^[6],或者用覆盖控制指导节点再部署^[7].文献^[8]突破了传统物理覆盖的概念,并提出了信息覆盖的概念.

总之,近几年在传感器网络的覆盖控制方面取得了一定的成果,并提出了许多有效的覆盖控制协议,如CCP、DCOA、GAF、PEAS等,但大多存在通信和计算开销较大、覆盖度计算精度较低等不足,且主要是针对同构网络,而对异构网络^[6]研究较少.其中,很多协议采用集中式算法,实时性比较差,不适用于大规模传感器网络.

综上,本文提出一种基于节点地理位置信息、保证网络 k -覆盖并且充分节省能量的节点调度算法(SEC),以适用于异构无线传感器网络,也可以在大范围的无线传感器网络中得到扩展.

1 相关模型与定义

1.1 系统模型与假设

(1)网络的节点密度应足够高,也就是感知区域 R 中的节点数量应足够多.

(2)所有节点时间同步.

(3)所有节点的通信半径至少是网络中所有节点最大感知半径的2倍,以保证网络的连通性.

(4)发生在节点感知范围内的事件都可以被网络监测到,即忽略网络错误.

(5)节点位置已知(这个假设是切合实际的,有很多研究均是解决节点定位问题的^[9]).

1.2 相关定义

定义1 对于节点 S 和其他任意节点 S_i ,如果满足 $d(S, S_i) \leq r(S) + r(S_i)$,则 S_i 属于节点 S 的邻节点集,即 $S_i \in S_N(S)$.

定义2 对于监测区域内的每个节点,与其感知圆相交的所有边界点 R_P 、节点交点 S_P 统称为该节点的感知圆交点,用 C_P 表示.

定义3 对于监测区域内的每个节点,在其感知圆

内的所有边界点 R_P 、节点交点 S_P 统称为该节点的内部点,用 I_P 表示.

定义4 对于监测区域内的每一个节点,如果其感知圆上没有 C_P ,那么称这个节点为非必要节点,用 S_{UN} 表示. S_{UN} 没有 C_P ,但可能有 I_P .

定义5 不在任何 S_{UN} 感知圆内的 S_P ,称为必要的节点交点,用 N_P 表示.

2 k -覆盖度算法

2.1 算法设计依据

满足异构无线传感器网络的 k -覆盖的充要条件,将作为本文节点覆盖算法的依据.

定理1 当区域内存在 N_P 且所有的 N_P 覆盖度 $Cov(N_P) \geq k$ 时,区域被异构无线传感器网络 k -覆盖度覆盖.

证明 如图1所示,取边界内任意点 P ,由于区域 A 存在一个 N_P ,所以假设 S_{P1} 就是距离 P 最近的 N_P . 连接点 P 和点 S_{P1} ,沿着线段寻找距离点 P 最近的交点 P_1 .若 S_k 是 S_{UN} ,则必须重新选择,直到 P_1 不属于 S_{UN} 中的 S_k . 如果 P_1 与 S_{P1} 重合,则线段 $\overline{PS_{P1}}$ 上的点具有相同的覆盖度,即 $Cov(P) = Cov(S_{P1})$. 从已知条件 $Cov(N_P) \geq k$ 可知, $Cov(P) \geq k$. 如果 P_1 与 S_{P1} 不重合,则定义该点为 P_m ,它由 S_m 与线段 $\overline{PS_{P1}}$ 相交构成. 因为 S_m 不是 S_{UN} ,所以必然存在一个 S_n 与它相交. 假设在 $C(S_m)$ 上距离 P_m 最近的交点是 S_{P2} ,由 $Cov(N_P) \geq k$ 可知, $Cov(P) = Cov(P_m) \geq k$,问题得证.

由此得出结论:当部署区域内的所有 R_P 和 S_P 的覆盖度都不低于 k 时,整个部署区域将满足覆盖要求. 所以,对于给定的区域 A , A 的覆盖度可以用 $Cov(A) = \min(\min(Cov(R_P)), \min(Cov(S_P)))$ 表示. 相应地,节点覆盖度可用 $Cov(S) = \min(\min(Cov(C_P)), \min(Cov(I_P)))$ 计算.

这样,从理论上可保证每个节点被覆盖,也就是说当节点范围内的交点的覆盖度不低于 k 时,节点

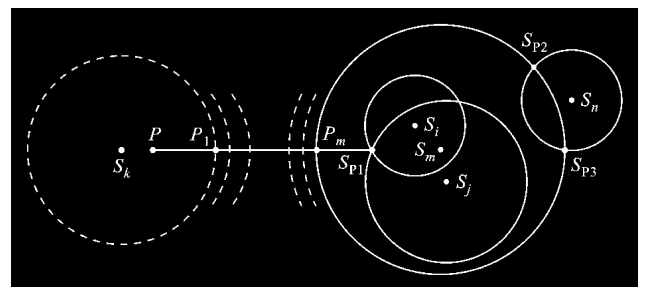


图1 定理1的证明示意图

的覆盖度为 k .

2.2 算法实现

在本文的覆盖控制及调度策略中,节点完全可以依据本地已经掌握的自身及邻居节点的各种信息,对节点的工作状态进行决策.

基于上述分析,可容易获得异构传感器网络中一个节点的感知圆范围,它与邻居节点的位置关系仅为图2所示情况.

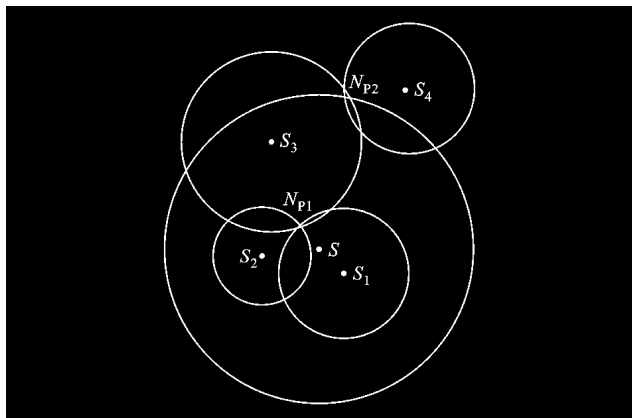


图2 S与邻居节点的位置关系

对于 N_{P1} 、 N_{P2} 这2个必要节点交点的覆盖度计算方法,本质上就是求点的覆盖度问题.由于是求 $C(S)$ 范围内的覆盖度情况,因此这2个点的覆盖度计算方法只有略微的区别.

以 N_{P1} 为代表的 C_P 点的覆盖度计算如图3所示.

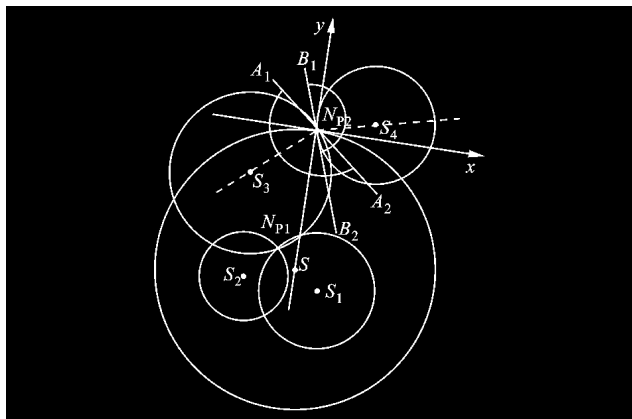


图3 以 N_{P1} 为代表的 C_P 点的覆盖度计算示意图

首先,建立直角坐标系,即以 N_{P2} 为原点, S 在 N_{P2} 的切线作为 x 轴, N_{P2} 与 S 的连线作为 y 轴.然后,分别做出 $C(S_3)$ 、 $C(S_4)$ 的切线,如 $\overline{A_1A_2}$ 、 $\overline{B_1B_2}$. 设 $\overrightarrow{N_{P2}S_3}$ 的角度为 θ_3 , $\overrightarrow{N_{P2}S_4}$ 的角度为 θ_4 ,由图2易知,在 $[\theta_3 - 90^\circ, \theta_3 + 90^\circ]$ 的范围内, S_3 覆盖了点 N_{P2} ,同理在 $[\theta_4 - 90^\circ, \theta_4 + 90^\circ]$ 的范围内, S_4 覆盖了

点 N_{P2} .但是,由于点 N_{P2} 是 $C(S)$ 的 C_P ,因此只需要计算 $[-180^\circ, 0^\circ]$ 范围内的 N_{P2} 的覆盖度.在本例中的覆盖度为 1.

下面是以 N_{P1} 为代表的 I_P 点的覆盖度计算方法,如图4所示.

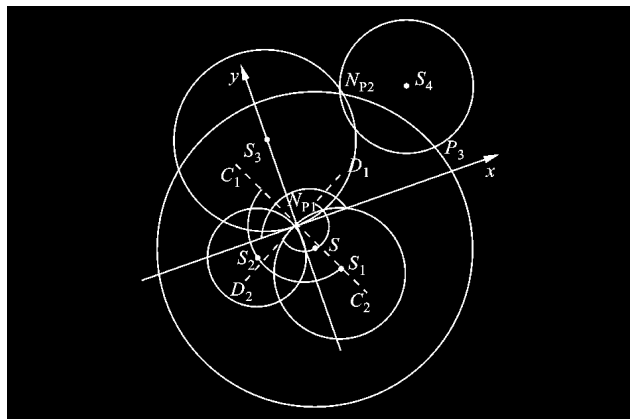


图4 以 N_{P1} 为代表的 I_P 点的覆盖度计算示意图

首先,建立直角坐标系,即以 N_{P1} 作为坐标轴的原点,选择其中任意一个构成该 I_P 的感知圆的切线和半径所在的直线作为 x 轴和 y 轴.如图4,设 $\overrightarrow{N_{P1}S_1}$ 、 $\overrightarrow{N_{P1}S_2}$ 、 $\overrightarrow{N_{P1}S_3}$ 的角度分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ,则 S_1 、 S_2 、 S_3 分别在 $[\theta_1 - 90^\circ, \theta_1 + 90^\circ]$ 、 $[\theta_2 - 90^\circ, \theta_2 + 90^\circ]$ 、 $[\theta_3 - 90^\circ, \theta_3 + 90^\circ]$ 覆盖了点 N_{P1} .由于 N_{P1} 为 I_P ,因此统计范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$.在本例中点 N_{P1} 的覆盖度为 1.

以上这2类覆盖度计算只是在有多个节点的感知圆穿过 N_P 点时的计算方法.对于有感知圆直接覆盖 N_P 的情况,直接在点的覆盖度上加 1 即可.

本算法的复杂度为 $O(n)$,考虑到能够穿越同一交点的邻居节点的数目很少,因此对于以节省能量为目的的传感器网络来说,不会造成负载过重.

3 SEC 节点调度策略

3.1 节点调度思想

网络操作时间按轮次划分,每个轮次又分为 2 个阶段:状态决定阶段和稳定阶段.在每个轮次的开始时刻,节点被自动唤醒并进入“未定”状态.在“未定”状态的节点根据自己在一段退避时间内收到的消息决定自己的下一个状态(活动态或睡眠态).当所有节点都进入了活动或睡眠状态之后,状态决定阶段结束.接下来节点进入稳定状态,在稳定阶段中的所有节点维持在决定阶段确定的状态,一直到本轮次结束.

所有节点在每个轮次开始时刻都以一个概率 p

选举自己作为启动节点,一旦选举成功,该节点将进入活动状态,并向周围节点发出一个 ON 消息.选举失败的节点,根据一段退避时间内收到的邻居节点的 ON 消息来确定自己的下一个状态.这样,在状态决定阶段,所有节点的状态都被确定.通过模拟仿真发现,如果将 1 000 个节点部署在一个 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的区域内,完成状态决定阶段的时间不到 1 s.

3.2 状态转换过程

节点可以工作在下面 5 种状态之一:未定、活动、睡眠、准备活动、准备睡眠.图 5 描述了节点在这 5 种状态之间的转换条件和过程.

在每个轮次的开始,节点均处于未定状态.如果节点的能量高于一个程序规定的阈值,则该节点以概率 p 选举自己作为启动节点,并在一段退避时间 t 之后进入活动状态,同时广播 ON 消息.

进入未定状态的节点在 $[0, T_d]$ (T_d 是一个由程序确定的时间参数)内选择一个退避时间 t .在 t 内,若节点接收到了邻居发送来的 ON 消息,则进入准备睡眠状态.

处于准备睡眠状态的节点,在一段退避时间内使用上述节点覆盖度计算方法计算自己的覆盖度,若节点的覆盖度大于程序预设值 k ,则节点将进入睡眠状态,否则进入准备活动状态.

处于准备活动状态的节点,在退避了一段时间后重新计算自己的覆盖度,如果结果仍然小于 k ,即符合活动条件,则直接进入活动状态,否则进入准备睡眠状态.

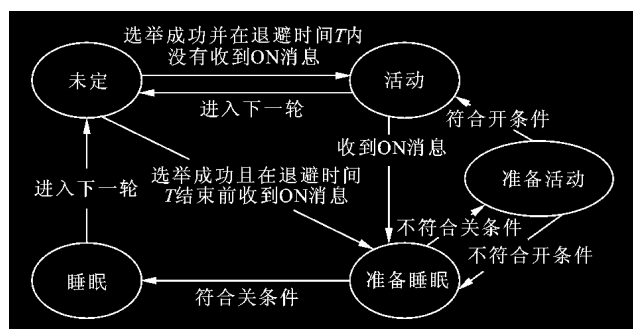


图 5 SEC 中的节点状态转换过程

3.3 参数设置

在本文的节点调度算法中,一些参数的设定会直接影响本协议的性能.下面给出该调度算法中的各种重要参数的设置方法.

p 是网络节点选择自己成为启动节点的概率.设网络中的节点总数为 N ,并希望每一轮开始的启动节点数是 M ,则 $p=M/N$. k 的选取涉及速度和性能的权衡问题, M 值越小,节点状态的优化程度越

高.通常, p 的选择取决于网络规模,网络的规模小, p 的取值也比较小.

E 是程序设置的能量阈值,只有节点的剩余能量高于能量阈值,节点才能获得选举概率.阈值至少是能够维持一个轮次的能量消耗.

如果节点在一个 T_s 时间结束后,依然维持在未定状态,这说明节点选择不均匀,该节点及其邻居节点均未被选择为活动状态,所以必须重新选择启动节点,此时将启动节点的概率 p 成倍增加.当节点变为活动或者睡眠状态时,则取消时间 T_s .

时间参数 T_d 、 T_s 均与发送一个 ON 消息所需时间 t_0 相关.设置 T_d 是为了减少过多的启动节点,所以 T_d 应该与 t_0 属于同一个数量级. T_s 的数量级应该大一些,在 T_s 结束之前应该完成覆盖控制.但是,由于节点只是以某一个概率推举自己成为启动节点,所以要考虑节点未被选中的情况.

4 性能评价

为了验证、评价本文 SEC 策略的有效性和性能,在 NS2 上进行了模拟实验,并假设整个区域为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的正方形.区域中随机部署 500 个节点,感知半径为 $20\text{ m} \sim 30\text{ m}$.所有实验数据取 10 次结果的平均值.

SEC 与 DCOA 的性能比较如图 6 所示.从中看出,在某些点上 SEC 所需要的节点数略低于 DCOA,这是因为出现了感知圆交点由 2 个以上的感知圆穿越的情况.在这种情况下,SEC 的计算精度更高,而普通的覆盖控制协议会出现偏差.在大规模的网络中,DCOA 需要更多的工作节点.

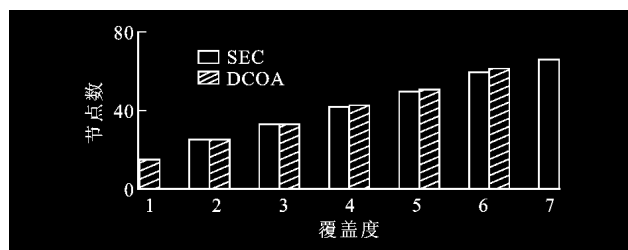


图 6 工作节点数与覆盖度的关系

图 7 描述了节点半径随机分布、节点数分别取 500、700、900 时,SEC 所能达到的真实覆盖度与要求覆盖度的关系.从图中发现,SEC 所能达到的真实覆盖度略高于所要求的覆盖度而导致冗余的主要原因是节点随机分布.定位不准确,首先会带来部分区域重叠,其次为了覆盖到某些由于分布问题而产生的边缘区域,必须使更多的节点同时保持在工作状态.令人欣慰的是,节点所能达到的平均覆盖度与

所要求的覆盖度呈线性关系,并且逐渐趋于缓和状态.

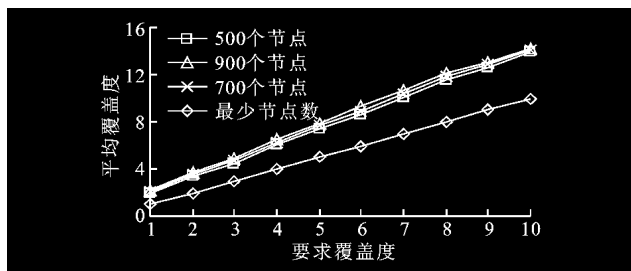


图7 部署区域的平均覆盖度

图8展示了在 k 分别取1、2、4的情况下,随着部署节点数的增多,所需工作节点数的变化情况.可以看出,在要求一定覆盖度的情况下,即使部署更多的节点,也只有一定数目的节点进入到活动状态.这样,在保证服务质量的同时,可以节省节点能量,延长网络寿命,使网络更具可扩展性.

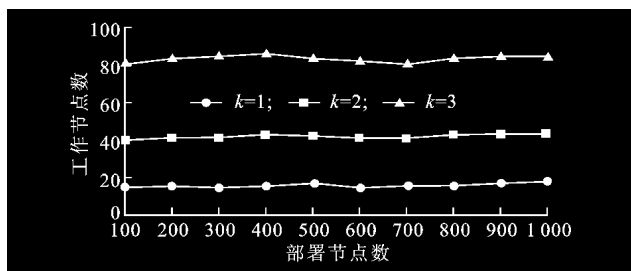
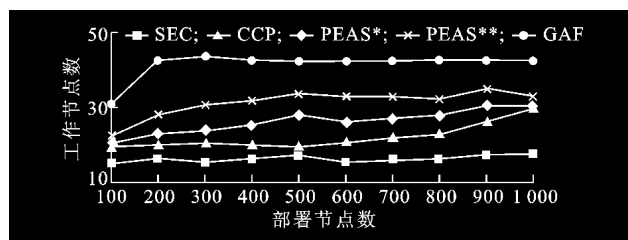


图8 不同覆盖度预设值下部署节点数与工作节点数的关系

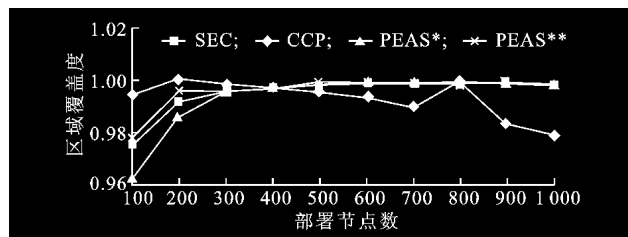
在各种协议下,部署节点数与工作节点数的关系如图9所示.从中可以看到,相比GAF,SEC仅需要一半的工作节点便可以完成覆盖要求,即使与采用探测半径为30 m的PEAS相比,SEC也体现出了较好的性能.再者,在SEC中工作节点数不会随着部署节点数的增加而增多.但是,在PEAS和CCP中,随着部署节点数从100增到1000,工作节点数均有接近50%的增幅.区域覆盖度与部署节点数的关系如图10所示.从中看出,CCP策略随着网络规模增加,覆盖度出现下降趋势.这是因为,CCP为了维持节点的邻居信息,与其邻居进行了大量的通信.相反地,SEC中的每一个工作节点在一个轮次中仅向外发送一个ON消息广播包,而非工作节点不需要发送消息包,这样大大减少了通信量.由于采用了SEC,工作节点数不会随着网络部署节点数的增加而增多,所以整个网络中包的冲突大大减少.同时,每个工作节点发送包的数量仅为1,所以最大化地节省了能量.



PEAS*:探测半径为30 m的PEAS

PEAS**:探测半径为25 m的PEAS

图9 各种协议下部署节点数与工作节点数的关系



PEAS*:探测半径为30 m的PEAS

PEAS**:探测半径为25 m的PEAS

图10 区域覆盖度与部署节点数的关系

5 结论

本文给出了适用于异构无线传感器网络的 k -覆盖度,并为节省能量而设计了分布式节点调度策略.基于节点地理位置信息所提出的覆盖度算法克服了已有覆盖控制协议中的不精确问题,并为节点调度提供了可靠的保障.另外,SEC的覆盖控制算法将区域覆盖度的计算问题转化为只求个别特殊点的覆盖度问题,这样大大简化了覆盖度计算的复杂度.实验证明,本文调度策略可以保证在 k -覆盖的前提下,最大限度地提高睡眠冗余节点的数量,从而平衡了网络负载,延长了网络寿命.但是,本协议是建立在假设网络的连通性满足要求的基础上的,今后的工作将就同时满足覆盖性和连通性的问题作进一步的深入研究.

参考文献:

- [1] HUANG Chifu. The Coverage problem in wireless sensor network[C]// ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York, USA: ACM, 2005:519-528.
- [2] SU Lu. Coverage algorithm and protocol in heterogeneous sensor networks[C]// International Conference on Computer Network and Mobile Computing. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005:53-63.
- [3] WU Kui. Lightweight deployment aware scheduling for wireless sensor networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 10(6): 837-852.
- [4] HUSSEIN II, STIPANOVIC DM. Effective coverage control for mobile sensor networks with guaranteed

- collision avoidance [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(4): 642-657.
- [5] WATFA M K, COMMURI S. Optimal 3-dimensional sensor deployment strategy [C] // IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 892-896.
- [6] TSAI Y R. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1240-1245.
- [7] BOUKERCHE A. A local information exchange based coverage-preserving protocol for wireless sensor networks [C] // IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 3420-3425.
- [8] WANG Bang. Information coverage in randomly deployed wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2994-3004.
- [9] SAVVIDES A, HAN C, STRIVASAVA M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors [C] // Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM, 2001: 166-179.
- (编辑 苗凌)