

高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议^{*}

王换招, 孟凡治⁺, 李增智

(西安交通大学 计算机科学与技术系, 陕西 西安 710049)

Energy Efficient Coverage Conserving Protocol for Wireless Sensor Networks

WANG Huan-Zhao, MENG Fan-Zhi⁺, LI Zeng-Zhi

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

+ Corresponding author: E-mail: mengfzh321@stu.xjtu.edu.cn

Wang HZ, Meng FZ, Li ZZ. Energy efficient coverage conserving protocol for wireless sensor networks. Journal of Software, 2010,21(12):3124-3137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3693.htm>

Abstract: In this paper, the sensing characteristics of randomly deployed sensor networks in the real environment are analyzed. The calculation model of the degree of redundancy of the sensors whose sensing ranges satisfy the normal distribution without location information is proposed, and the calculation model of the minimum number of working nodes, which can provide the desired quality of coverage (QoC), is also proposed. Based on the models, an Energy Efficient Coverage Conserving Protocol for Wireless Sensor Networks (EECCP) is presented, which enables the collaborative scheduling of distributed nodes and balances the energy consumption of each node. The purpose of energy conservation of the networks is achieved since the EECCP maintains the least number of nodes, as working nodes to provide the desired QoC. Simulation results show that the EECCP not only provides the desired QoC, but also reduces network energy consumption and prolongs network useful lifetime effectively.

Key words: wireless sensor network; quality of coverage; redundancy degree; node scheduling; energy efficiency

摘要: 分析了实际环境中随机部署传感器网络的感知特性,给出了节点感知半径服从正态分布的无须地理位置信息的节点冗余度计算模型,以及保证网络覆盖质量所需要的最少工作节点数的计算模型.在此模型的基础上,提出了高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议(energy efficient coverage conserving protocol,简称EECCP),实现了均衡节点能量消耗的分布式协作调度.该协议保留最少的工作节点以保证要求的覆盖质量,从而达到节约网络能量的目的.仿真实验结果表明,EECCP不仅能够保证要求的覆盖质量,而且能够减少网络能量消耗,有效地延长了网络的有效寿命.

关键词: 无线传感器网络;覆盖质量;冗余度;节点调度;节能

中图法分类号: TP301 文献标识码: A

无线传感器网络是由大量低成本且处理能力、通信带宽以及能量等资源非常有限的无线传感器节点构成.为了提高网络的综合性能,通常采用节点高密度部署(可高达 $20\text{nodes}/\text{m}^3$)^[1],但却同时产生了可扩展性、信息冗

* Supported by the Shaanxi Provincial Natural Science Foundation of China under Grant No.SJ08ZT15-4 (陕西省自然科学基金)

Received 2009-06-26; Accepted 2009-07-23

余、无线信道干扰、能量浪费等一系列的问题。传感器节点大多采用电池供电,并且由于应用环境的限制使得替换电池困难甚至不可行。而应用通常要求网络在不补充能量的情况下长时间工作,所以,能量管理问题是传感器网络研究的重要问题。

节点调度是利用节点的冗余性,通过启发式算法^[2,3]使节点在不同状态间进行转换,目标是在满足服务质量的前提下轮流关闭节点,节约节点能量,延长网络寿命。目前,大多数覆盖控制算法^[4-8]是根据节点的地理位置信息计算覆盖信息。但是,地理位置信息的获得依赖于外部基础设施(如GPS、有向天线等),极大地增加了节点的硬件成本和能量消耗,但同时也会存在定位不精确的问题。在没有精确位置信息的情况下,基于地理位置信息的覆盖控制算法很难准确地计算出节点间的覆盖关系,关闭部分节点可能造成覆盖盲区,导致网络监测不准确。所以,无需地理位置信息的覆盖控制策略^[9-16]逐渐成为了研究热点,但其很难实现对网络的完全覆盖,然而大部分应用并不要求传感器网络对整个监测区域完全覆盖,只要网络对监测区域维持一个合理的覆盖率(即部分覆盖)就可以满足应用需求,故覆盖率可以作为衡量网络服务质量的指标之一^[17]。使用部分覆盖控制策略不仅可以简化网络协议设计,而且可以使网络配置更加灵活,用户完全可以根据应用的不同需求实现能量消耗与覆盖质量的折中。同类传感器节点被部署在现实环境中后,感知范围会因其自身特性及环境等外在因素影响而高于或低于额定感知范围,从而造成了节点感知范围的不同。

本文分析了同类传感器节点在实际环境中的感知特性,研究了节点感知半径服从正态分布的随机部署传感器网络的覆盖问题。给出了无需地理位置信息的节点冗余度计算模型和保证网络覆盖质量所需要的最少工作节点数的计算模型,并提出了能够高效节能的覆盖保持协议——EECCP(energy efficient coverage conserving protocol),该协议保留最少的工作节点来保证应用要求的覆盖质量,从而实现减少网络能量消耗,延长网络有效寿命的目的。

1 相关研究

Tian 等人在文献[2]中提出了免职合格规则(off-duty eligibility rule)的分布式覆盖调度算法,节点根据地理位置信息计算邻居节点对自己感知区域的赞助面积(sponsored area),从而计算出节点间的覆盖关系。该算法没有考虑节点感知区域可能出现过多的重叠覆盖,导致工作节点数量过多,造成了额外的能量浪费。Ye 等人在文献[3]中提出了基于探测的节点密度控制协议 PEAS(probing environment and adaptive sleeping)。其探测方法是,每个睡眠节点定期检查它的探测区域内是否有工作节点:若没有,则该节点进入工作状态;否则,该节点继续呈睡眠状态。显然,PEAS 中某些节点可能持续工作,导致其过早的死亡,使网络能耗分布不均匀,影响覆盖质量。Zhang 等人在文献[6]中提出了一个分布式密度控制协议 OGDC(optimal geographical density control)。该协议选择离最优位置最近的节点作为工作节点,可以使用最少的工作节点提供应用要求的覆盖质量。但最优位置的计算需要严格定位技术的支持且过于复杂。Zhao 等人在文献[7]中提出了保证连通的目标覆盖(connected target coverage,简称 CTC),CTC 将全部节点分为多个子集,每个子集都能够保证对特定目标的覆盖和网络的连通。

Choi 等人在文献[10]中首次明确提出部分覆盖的现实意义,给出了不需要节点位置信息的、纯概率的覆盖质量与工作节点数量、监控区域大小和节点感知半径的数学关系,并基于该数学关系提出了工作节点完全随机选取的 NRS(non-disjoint randomized selection),F-DRS(fixed disjoint randomized selection)和 N-DRS(non-fixed disjoint randomized selection)这 3 种节点调度策略。由于工作节点完全随机选取,所以获得的覆盖质量不稳定。其调度策略中采用了时延受限机制来保证监控区域内所有数据都能被采集到。文献[11]对文献[10]中的协议进行了改进,加入了能耗均衡策略——根据节点的剩余能量选取工作节点,并对工作节点的分布进行了优化,从而进一步延长了网络寿命。Liu 等人在文献[12]中给出了无需地理位置信息的网络覆盖质量与网络监控区域大小、节点感知半径和节点密度的数学关系,并定义了 3 种覆盖度量方法,即区域覆盖、节点覆盖和监测能力。文献[13]对文献[12]中的结论进行了扩展,考虑了边界效应的影响,不仅分析结果更为精确,还分析了多重覆盖问题。Wu 等人在文献[14]中提出了一种基于概率的节点冗余度计算方法。根据该方法,节点可以独立计算出自己的冗余度,并提出了无须地理位置信息的节点调度协议 LDAS(lightweight deployment-aware scheduling)。但该方法忽略

了节点的两跳邻居对其感知区域的覆盖贡献,所以 LDAS 选取的工作节点中仍然有大量冗余节点.Wang 等人在文献[15]中研究了节点部署服从二维正态分布的传感器网络的覆盖问题.Liu 等人在文献[16]中提出了联合调度算法,在保证覆盖质量的基础上,通过加入额外的工作节点来保证网络的连通.

Wang 等人在文献[18]中分析了能够同时保证监控区域 k -覆盖和网络连通性所需要的最少工作节点数以及它们的部署位置.通过将可移动传感器节点调度到指定的部署位置来实现使用最少工作节点保证网络覆盖质量和连通质量,从而节约网络能量.Bai 等人在文献[19]中给出了能够保证监控区域全覆盖和网络 2-连通的传感器节点部署方式,并证明了不论 R_c/R_s 为何值时(其中, R_c 为节点的通讯半径, R_s 为节点的感知半径),所提出的部署方式都是最优的.

上述研究都是基于网络中节点感知半径相同且为固定值这一假设展开的,然而节点的感知半径会因为其自身特性及环境等外在因素的影响而不同.本文针对随机部署无线传感器网络在实际环境中的感知特性,研究了节点感知半径服从正态分布的无需地理位置信息的无线传感器网络的覆盖问题.

2 网络模型和问题描述

2.1 网络模型

假设所有无线传感器节点随机均匀地部署在一个二维区域 M 内,且该传感器网络具有以下性质:

- (1) 节点密度足够大.所有节点全部工作不但能够保证应用要求的覆盖质量,且有大量的冗余节点;
- (2) 节点采用布尔感知模型.即,若任意节点 i 的感知半径为 R_i ,则节点 i 的感知区域是以该节点所在位置为圆心、 R_i 为半径的圆,记作 $\odot i(R_i)$;
- (3) 网络中所有节点的感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$.其中: R_0 为节点感知半径的均值(额定感知半径); δ 为标准差,且 $R_0 \geq 3.3\delta$ 保证节点的感知半径集中分布在 $[0, 2R_0]$ 区间内;
- (4) 相对于节点的感知半径而言,监控区域足够大,区域边界效应可以忽略;
- (5) 节点的通信半径大于等于 $4R_0$,即节点通信半径大于等于 2 倍最大感知半径;
- (6) 每个节点无需装备 GPS,也无须采用定位方法获得其位置信息.

在大规模无线传感器网络中,随机部署方式是易于实现且廉价的方式^[14],故假设网络模型为节点随机部署方式.在二进制感知模型中,虽然每个节点都有一个额定的感知半径 R_0 ,但被部署在现实环境中,节点的感知半径会受到自身特性及环境等外在因素的影响,最终造成了节点的感知半径存在着差异.所以,本文假设节点的感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$.由于节点的感知半径不小于 0,所以限制 $N(R_0, \delta^2)$ 的参数 R_0 和 δ 满足关系 $R_0 \geq 3.3\delta$.这样,节点的感知半径落入 $(-\infty, 0)$ 内的概率将小于 0.0005;由于正态分布具有对称性,于是,节点的感知半径落入 $[0, 2R_0]$ 内的概率将大于 0.9990.所以,可以认为节点感知半径落入 $[0, 2R_0]$ 内为必然事件.

2.2 相关定义

定义 1(感知邻居集). 对于任意节点 i ,其感知邻居集定义为

$$N(i) = \{j \in \mathcal{N} \mid d(i, j) \leq R_i + R_j, i \in \mathcal{N}, j \neq i\},$$

其中, \mathcal{N} 是所有布置在监控区域 M 中节点的集合, $d(i, j)$ 表示节点 i 和 j 的欧式距离, R_i 和 R_j 分别表示节点 i 和 j 的感知半径.

定义 2(节点冗余度). 对于任意节点 i ,它所有工作感知邻居的监测区域与其监测区域重叠部分的面积占其监测区域面积的比例,称为该节点的冗余度.即

$$\xi(i) = \frac{\text{area}\left(\left(\bigcup_{j \in (N(i) \cap \varphi)} S_j\right) \cap S_i\right)}{\text{area}(S_i)},$$

其中, φ 为所有工作节点的集合, S_i 和 S_j 分别表示节点 i 和 j 的监测区域, $\text{area}\left(\left(\bigcup_{j \in (N(i) \cap \varphi)} S_j\right) \cap S_i\right)$ 表示节点 i 的所有工作感知邻居的监测区域与 i 的监测区域重叠部分的面积, $\text{area}(S_i)$ 表示节点 i 监测区域的面积.

定义3(覆盖质量). 网络中所有工作节点构成的监测区域面积占整个监控区域 M 面积的比例,称为该网络的覆盖质量.即

$$\eta = \frac{\text{area}\left(\left(\bigcup_{i \in \varphi} S_i\right) \cap M\right)}{\text{area}(M)},$$

其中, φ 为所有工作节点的集合, S_i 表示节点 i 的监测区域, $\text{area}\left(\left(\bigcup_{i \in \varphi} S_i\right) \cap M\right)$ 表示所有工作节点构成的监测区域与 M 重叠部分的面积, $\text{area}(M)$ 表示整个监控区域的面积.实际上,覆盖质量 η 也表示网络覆盖率.

定义4(网络有效寿命). 网络能够保证应用要求覆盖质量的总时间,称为网络的有效寿命.即

$$T = \sum_{i \in \{j | j \in N \wedge \eta_o^{A_j} \geq \eta_d\}} \Delta t_i,$$

其中, Δt_i 为长度趋近于 0 的时间片,且 Δt_{i+1} 为 Δt_i 的直接后继时间片; N 为自然数集, $\eta_o^{A_j}$ 表示 Δt_j 内所获得的覆盖质量, η_d 表示应用要求的覆盖质量.

2.3 问题描述

假设在监控区域 M 中随机均匀部署了大量节点,所有节点的感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$,且 $R_0 \geq 3.3\delta$.在保证应用要求覆盖质量(η_d)的前提下关闭所有冗余节点,即找到一个近似最小工作节点集 φ ,使得 $\frac{\text{area}\left(\left(\bigcup_{i \in \varphi} S_i\right) \cap M\right)}{\text{area}(M)} \geq \eta_d$ 成立.通过建立节点冗余度的计算模型,以及根据该模型设计能够获得工作节点集 φ 的节点调度策略,从而实现延长网络有效寿命的目的.

3 节点冗余度分析

无线传感器网络节点调度问题通常需要解决两个子问题:一是节点根据什么规则来决定自己是否为冗余节点,二是怎样调度冗余节点.本节主要解决第 1 个问题,第 2 个问题将在下一节讨论.

基于地理位置信息的节点冗余度计算,可以使用几何知识精确地计算出节点之间的覆盖关系.然而在没有地理位置信息的情况下,节点很难精确计算出自己的冗余度,但可以使用概率论相关理论,根据节点的工作感知邻居数计算出节点冗余度的期望值.

引理1. 节点感知区域内任意一点被该节点一个工作感知邻居覆盖的概率为

$$P \approx \frac{R_0^2}{4(R_0^2 - \delta^2)} \quad (1)$$

引理 1 的证明详见附录.

定理1. 一个有 n 个工作感知邻居的节点的冗余度期望为

$$E(\xi_n) \approx 1 - \left(\frac{3R_0^2 - 4\delta^2}{4(R_0^2 - \delta^2)}\right)^n \quad (2)$$

证明:假设节点感知区域内任意一点被该节点的一个工作感知邻居覆盖的概率为 P ,未被该节点的一个工作感知邻居覆盖的概率为 \bar{P} ,于是有 $\bar{P} = 1 - P$.若一个节点有 n 个工作感知邻居,该节点感知区域内任意一点未被这 n 个感知邻居中的任意一个覆盖的概率为 \bar{P}_n ,由于所有节点的位置关系是相互对立的,所以

$$\bar{P}_n = (\bar{P})^n \quad (3)$$

该节点感知区域内任意一点被这 n 个感知邻居节点中至少一个覆盖的概率为 P_n ,则

$$P_n = 1 - \bar{P}_n = 1 - (1 - P)^n \quad (4)$$

设一个有 n 个工作感知邻居的节点感知区域被其工作感知邻居覆盖的区域为 S' ,则 S' 的面积期望值为

$$E(\text{area}(S')) = P_n \cdot \text{area}(S) \quad (5)$$

其中, $\text{area}(S)$ 为该节点感知区域的面积.所以,一个有 n 个工作感知邻居的节点的冗余度期望为

$$E(\xi_n) = \frac{E(\text{area}(S'))}{\text{area}(S)} = 1 - (1 - P)^n \tag{6}$$

将引理 1 的结论代入公式(6)得到 $E(\xi_n) \approx 1 - \left(\frac{3R_0^2 - 4\delta^2}{4(R_0^2 - \delta^2)}\right)^n$. 综上,定理 1 得证. □

表 1 给出了使用定理 1 计算出的节点冗余度期望值与工作感知邻居数的具体数值关系.从表 1 可以看出,节点冗余度的期望值 $E(\xi)$ 受其工作感知邻居数的影响很大,受 R_0/δ 影响较小.节点的工作感知邻居数大于等于 11 时,节点冗余度的期望值高达 95%以上.运用定理 1,节点可以方便地计算出自己的冗余度期望值,然后根据冗余度期望值和要求覆盖质量的大小关系决定自己是否为冗余节点.

Table 1 Relationship between the expectation of redundancy degree and the number of sensing neighbors

表 1 节点冗余度期望值与其工作感知邻居数的关系

Number of sensing neighbors	Expectation of redundancy degree of a node ($R_0=10$) (%)			
	$\delta=0$	$\delta=1$	$\delta=2$	$\delta=3$
5	76.27	76.67	77.87	79.93
6	82.20	82.56	83.63	85.44
7	86.65	86.96	87.90	89.44
8	89.99	90.26	91.05	92.34
9	92.49	92.72	93.38	94.45
10	94.37	94.56	95.10	95.97
11	95.78	95.93	96.38	97.08
12	96.83	96.96	97.32	97.88
13	97.62	97.73	98.02	98.46

定理2. 监控区域 M 内随机选取 k 个节点工作,则 M 的覆盖质量的期望为

$$E(\eta_k) = 1 - \left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2) - \sqrt{2\pi} \cdot R_0 \delta \cdot e^{-R_0^2/(2\delta^2)}}{\text{area}(M)}\right)^k \tag{7}$$

证明:因为所有节点随机均匀部署在 M 中,所以每个节点位于 M 中任意一点的概率均为 $1/\text{area}(M)$. M 中任意一点 q 被一个传感器节点 a 覆盖(a 的感知半径记作 R_a),则 a 必须位于以 q 为圆心、 R_a 为半径的圆内(该圆记作 $\odot q(R_a)$).所以, q 被节点 a 覆盖的概率 P_a 为

$$P_a = \frac{\text{area}(\odot q(R_a))}{\text{area}(M)} = \frac{\pi R_a^2}{\text{area}(M)} \tag{8}$$

由于所有节点的感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$,且 $R_0 \geq 3.3\delta$,所以 M 中任意一点被工作节点覆盖的概率为

$$P = E(P_a) = \int_0^{2R_0} \frac{\pi R_a^2}{\text{area}(M)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \cdot e^{-\frac{(R_a - R_0)^2}{2\delta^2}} dR_a \tag{9}$$

令 $x = \frac{R_a - R_0}{\delta}$, 则

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{\text{area}(M)} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left(\int_{\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} \delta^2 x^2 \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} dx + \int_{\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} 2\delta x R_0 \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} dx + \int_{\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} R_0^2 \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) \\ &= \frac{1}{\text{area}(M)} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left(\int_{\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} -\delta^2 x dx \left(e^{-\frac{x^2}{2}} \right) + \sqrt{2\pi} \cdot R_0^2 \right) \\ &= \frac{1}{\text{area}(M)} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left(-\delta^2 x \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \Big|_{\frac{R_0}{\delta}}^{\frac{R_0}{\delta}} + \sqrt{2\pi}\delta^2 + \sqrt{2\pi}R_0^2 \right) \\ &= \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2) - \sqrt{2\pi} \cdot R_0 \delta \cdot e^{-R_0^2/(2\delta^2)}}{\text{area}(M)} \end{aligned} \tag{10}$$

由于区域 M 中所有节点的位置关系是相互独立的,所以 M 中任意一点至少被 k 个工作节点中的一个覆盖的概率 P_k 为

$$P_k = \sum_{i=1}^k \binom{k}{i} \cdot P^i \cdot (1-P)^{k-i} = 1 - \left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2) - \sqrt{2\pi} \cdot R_0 \delta \cdot e^{-R_0^2/(2\delta^2)}}{\text{area}(M)} \right)^k \quad (11)$$

设区域 M 至少被 k 个工作节点中的一个覆盖的区域为 M' , 则 M' 的面积期望为

$$E(\text{area}(M')) = P_k \cdot \text{area}(M) \quad (12)$$

所以, $E(\eta_k) = \frac{E(\text{area}(M'))}{\text{area}(M)} = 1 - \left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2) - \sqrt{2\pi} \cdot R_0 \delta \cdot e^{-R_0^2/(2\delta^2)}}{\text{area}(M)} \right)^k$. 综上, 定理 2 得证. \square

4 EECCP 协议

EECCP 协议采用分布式调度算法, 每个节点比较自己的冗余度期望值 $E(\xi)$ 与要求的覆盖质量 η_d 的关系. 如果 $E(\xi) \geq \eta_d$, 根据定理 1, 即 $1 - \left(\frac{3R_0^2 - 4\delta^2}{4(R_0^2 - \delta^2)} \right)^n \geq \eta_d$. 则说明该节点的感知区域的覆盖质量已经满足要求的覆盖质量, 可以关闭该节点以节约网络能量. 也就是说, 若某节点的工作感知邻居数 n 满足

$$n \geq \frac{\ln(1 - \eta_d)}{\ln((3R^2 - 4\delta^2)/(4(R^2 - \delta^2)))} \quad (13)$$

则说明该节点为冗余节点, 可以将其关闭以节约网络能量.

4.1 EECCP 的具体描述

EECCP 将网络运行时间划分为若干轮次(round), 每个轮次包含覆盖控制阶段和状态稳定阶段. 在覆盖控制阶段, 所有冗余节点的功能模块被关闭以节省网络能量. 在状态稳定阶段, 剩余的工作节点进行正常的监测和通信. 每个节点有 6 种运行状态: 自选举状态(election)、预工作状态(pre_work)、预睡眠状态(pre_sleep)、退避状态(back_off)、工作状态(work)和睡眠状态(sleep). 6 种状态之间的转换关系如图 1 所示. 当节点密度非常大时, 几乎所有的节点都将满足冗余节点判断条件(见公式(13)), 此时, 这些节点都会尝试进入睡眠状态. 但互为感知邻居的节点同时进入睡眠状态会造成大量覆盖盲区, 从而降低覆盖质量. 为了避免这种情况的发生, EECCP 采用直接降低工作节点密度机制和退避机制来防止大量节点同时进入睡眠状态. 在自选举状态, 首先降低可能工作节点的密度, 即直接选举 K 个节点作为候选工作节点, 剩下的没有被选上的节点直接进入睡眠状态, 然后再在 K 个候选工作节点中进行冗余节点调度. 每个候选节点以概率 P 选举自己进入预工作状态, 没有选举成功的候选节点则进入预睡眠状态. 图 2 给出了覆盖控制阶段的节点调度过程.

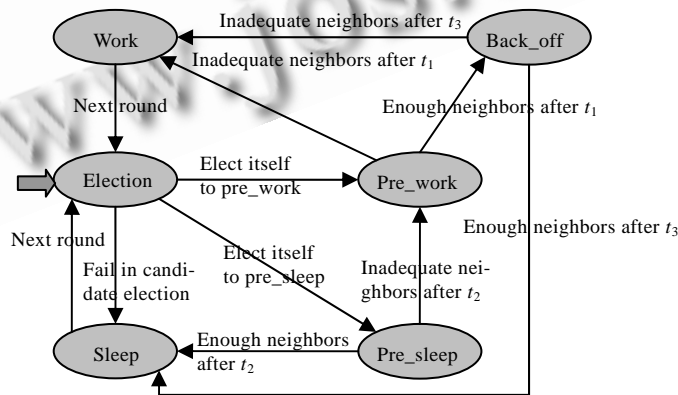


Fig.1 Finite state machine of EECCP

图 1 EECCP 状态转移图

```

1.  state=Election;
2.  if (random(0,1)>K/N) state=Sleep; //N is the number of initial nodes
3.  if (state=Election && random(0,1)<=P) //P is the probability that a candidate goes into Pre_work
4.  state=Pre_work;
5.  else if (state=Election && random(0,1)>P) state=Pre_sleep;
6.  while (state!=Work && state!=Sleep)
7.  {switch (state) {
8.  case Pre_sleep:{
9.  start timer t2; //t2=random(0,T2);
10. waiting until t2 expires;
11. if (inequality (13)) state=Sleep;
12. /*working sensing neighbor include all sensing neighbors in Work or Pre_work state*/
13. else state=Pre_work;
14. break;
15. } //end of case Pre_sleep
16. case Pre_work:{
17. start timer t1; //t1=random(0,T1);
18. broadcast a HELLO message; //notice its sensing neighbors to update their neighbor tables
19. waiting until t1 expires;
20. if (inequality (13)) state=Back_off;
21. else state=Work;
22. break;
23. } //end of case Pre_work
24. case Back_off:{
25. start timer t3; //t3=random(0,T3);
26. waiting until t3 expires;
27. if (inequality (13)) {
28. broadcast a SLEEP message; //notice its sensing neighbors to update their neighbor tables
29. state=Sleep;}
30. else state=Work;
31. } //end of case Back_off
32. default;;
33. }} //end of switch and while

```

Fig.2 Node scheduling algorithm of coverage control phase

图2 覆盖控制阶段节点调度算法

图2中的HELLO和SLEEP消息具有相同的包格式,该格式包含3个域:包类型域、节点标识域和感知半径域.由图2可知,在覆盖控制阶段,每个候选节点最多发送一个HELLO和一个SLEEP控制消息,所以每个轮次发送的控制消息数量小于等于 $2K$.在覆盖控制阶段结束时,所有节点要么处于工作状态,要么处于睡眠状态,直到下一个轮次所有节点自动醒来再次进入自选举状态.

4.2 K 值的选取

每个轮次首先选举 K 个节点作为候选工作节点,目的是降低可能工作节点的密度,所以 K 值不能太大.但是 K 值也不能太小, K 的值至少应该大于保证要求覆盖质量所需要的最少工作节点数.由于 $\frac{\sqrt{2\pi} \cdot R_0 \delta \cdot e^{-R_0^2/(2\delta^2)}}{\pi(R_0^2 + \delta^2)} \ll 0.0010$,所以在实际应用中,可以将定理2中的 $\sqrt{2\pi} \cdot R_0 \delta \cdot e^{-R_0^2/(2\delta^2)}$ 部分忽略,以简化计算复杂度即

$$E(\eta_k) \approx 1 - \left(1 - \frac{\pi(R_0^2 + \delta^2)}{\text{area}(M)} \right)^k \quad (14)$$

根据公式(14),可以推导出满足应用要求覆盖质量所需要最少工作节点数的期望为

$$E(k) \approx \frac{\ln(1 - \eta_d)}{\ln(1 - \pi \cdot (R_0^2 + \delta^2) / \text{area}(M))} \quad (15)$$

在EECCP中,选择 $K = \lceil 2E(k) \rceil$.这样,首先从全局上保证网络中有足够多的节点可以满足要求的覆盖质量,然后通过EECCP局部节点调度使冗余节点睡眠达到监控区域被均匀覆盖.为了使网络中节点能量消耗分布均匀,采用文献[20]中选取簇头的方法选取 K 个候选节点.

5 EECCP 性能评价

为了验证协议的有效性和性能,使用OPNET Modeler作为仿真实验平台对协议进行实验和分析.仿真实验环境是监控区域大小为 200m×200m,节点的感知半径服从正态分布 $N(10, \delta^2)$,且 $10 \geq 3.3\delta$.节点的能耗模型采用文献[21]中物理节点能耗模型,即节点的发送、接收(或者空闲)和睡眠状态的能耗比为 20:4:0.01.节点的传输速率为 56kb/s.每个轮次的时长为 200s, T_1, T_2 和 T_3 均为 5s,候选工作节点选举自己进入预工作状态的概率 P 为 10%.每个节点拥有的初始能量可以使节点处于接收状态持续工作 190 个~210 个轮次.

5.1 协议的有效性

一个理想的覆盖控制算法应该利用最少的工作节点达到覆盖质量要求.这样就能在满足覆盖质量要求的前提下最大限度的节约网络能量.图3是在 $\delta=3$ 时,不同节点部署数量情况下获得的覆盖质量与要求的覆盖质量之间的关系.从图3可以看出,不论部署的初始节点数为多少,EECCP总能够保证要求的覆盖质量.由于节点的感知邻居数一定为整数,造成了获得的覆盖质量略高于要求的覆盖质量,但随着要求覆盖质量的增大误差快速减小到几乎为 0.并且在没有地理位置信息的情况下,精确提供要求覆盖质量也是不现实的.

图4反映了 $\delta=3$ 时工作节点数与部署节点数之间的关系.从图4可以看出,不论部署节点数为多少,工作节点数只与应用要求的覆盖质量有关,并且与由公式(15)计算出的保证应用要求覆盖质量所需要最少工作节点数的期望值几乎相等.这一性质说明了 EECCP 具有很好的可扩展性.虽然LDAS也具有工作节点数只与要求覆盖质量有关这一特性,但在相同的覆盖质量要求下,LDAS 的工作节点数比EECCP的工作节点数多出了许多,其原因将在第5.3节中详细说明.从图4中还能够看出,要求的覆盖质量越高,工作的节点数越多.

图5反映了 δ 取不同值时,获得的覆盖质量与要求的覆盖质量的关系.从图5可以看出,不论 δ 取何值,获得的覆盖质量与要求的覆盖质量都非常匹配.这也说明了该协议适用于节点感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$ (其中, $R_0 \geq 3.3\delta$)的所有无线传感器网络.

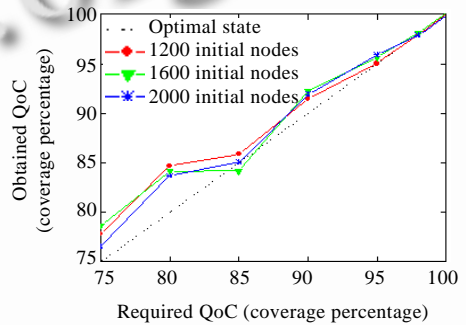


Fig.3 Relationship between required QoC and obtained QoC when $\delta=3$

图3 $\delta=3$ 时获得的 QoC 与要求的 QoC 的关系

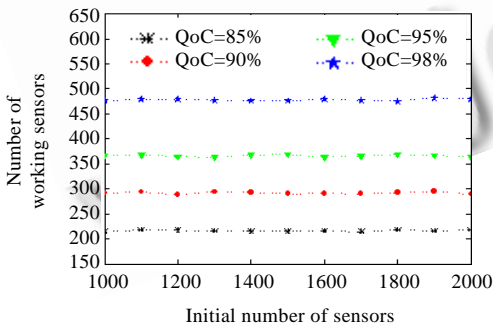


Fig.4 Relationship between the numbers of working nodes and deployed nodes when $\delta=3$

图4 $\delta=3$ 时工作节点数与部署节点数的关系

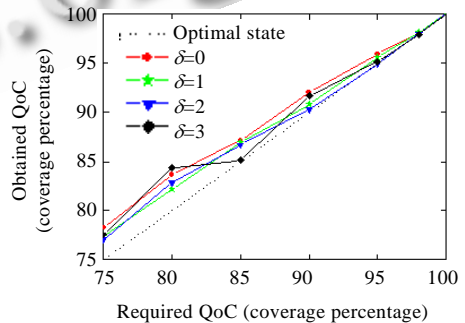


Fig.5 Required QoC and obtained QoC with different δ

图5 δ 取不同值时获得的 QoC 与要求的 QoC 的关系

5.2 网络有效寿命与能耗均衡性

图 6 是 $\delta=3$ 时,随机部署 1 200 个节点,在不同的覆盖质量要求下获得的覆盖质量随时间(轮次)的变化.在没有使用调度策略的情况下,所有节点一直保持工作,网络达到全覆盖;但节点很快就消耗完自己的能量,获得的覆盖质量也在很短的时间内从 100%下降到 0,即网络的有效寿命非常短暂.使用 EECCP 协议调度后,节点轮流工作,有效地延长了网络有效寿命.当要求的覆盖质量为 90%时,网络有效寿命延长了约 2.5 倍.在网络有效寿命结束后,获得的覆盖质量从期望的覆盖质量快速下降到 0,这也从侧面说明了每个节点的能量消耗是比较均匀的.从图 6 中还可以了解到,网络提供的覆盖质量越高,工作节点数就越多,网络能量消耗就越快,从而网络有效寿命就越短.这也说明了覆盖质量与网络有效寿命之间可以权衡.

使用节点剩余能量百分比的标准差评价网络能耗的均衡性.图 7 显示了网络工作 5 小时后,节点剩余能量百分比的标准差.可以看出,节点密度高的网络比低密度网络能耗分布更均匀.这是由于在低密度网络中,有些节点的感知邻居较少,为了保证覆盖质量,这些节点会持续工作,使这些节点能量消耗过快,从而造成了节点密度高的网络比低密度网络能耗分布更均匀.从图 7 还可知,每个轮次的时间间隔越长,网络能耗越不均匀.

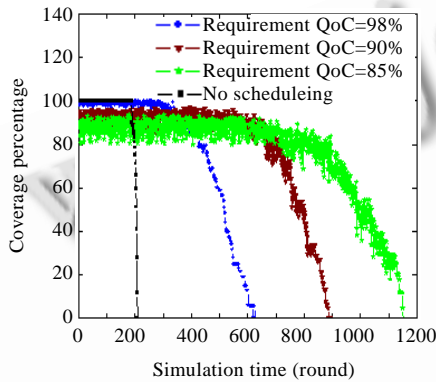


Fig.6 Obtained QoC and simulation time
图 6 获得的 QoC 随时间的变化

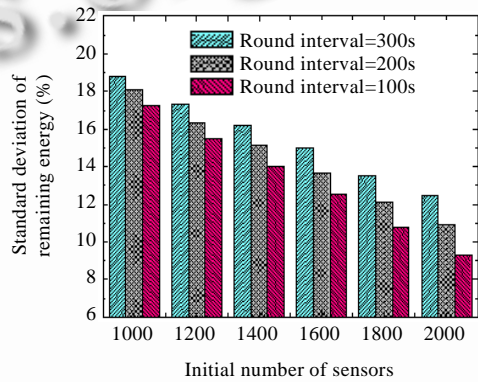


Fig.7 Fairness of energy consumption
图 7 能量消耗的均衡性

5.3 与其他协议的比较

为了比较协议的性能,选取了同样无需地理位置信息的覆盖控制协议 LDAS 和 NRS 作为比较对象,结果如图 8、图 9 所示.

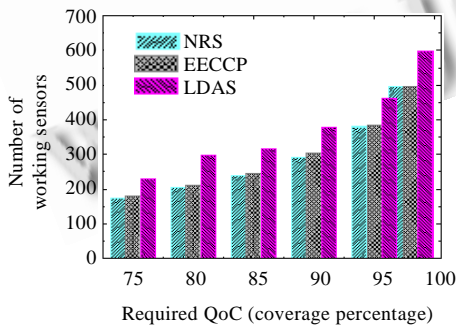


Fig.8 Comparison of the numbers of working nodes
图 8 3 种协议的工作节点数比较

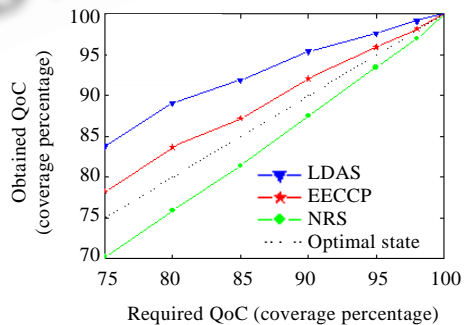


Fig.9 Comparison of obtained QoC
图 9 3 种协议获得的 QoC 比较

由图 8 可以看出,在相同的覆盖质量要求下,EECCP 的工作节点数和 NRS 的工作节点数几乎相等.然而由

图9可以看出,EECCP所获得的覆盖质量能够满足要求的覆盖质量,NRS则不行.这说明EECCP根据冗余判断条件关闭冗余节点后,剩余的工作节点比NRS直接随机选举的工作节点分布更均匀,从而EECCP能够获得更高的覆盖质量.然后比较LDAS与EECCP.由图8可知,在相同的覆盖质量要求下,LDAS的工作节点数比EECCP和NRS的工作节点数多了很多.再由图9可知,LDAS获得的覆盖质量也比要求的覆盖质量高出了许多.这说明LDAS选取的工作节点中还有大量的冗余节点.造成这种结果的原因是,LDAS判断冗余节点的数学模型只考虑了节点的一跳邻居对该节点感知区域的覆盖贡献,而忽略了节点的两跳邻居对该节点感知区域的覆盖贡献.然而节点的两跳邻居对节点感知区域的覆盖贡献也是非常大的.通过上面的比较可以得出,EECCP选取最少的工作节点保证了应用要求的覆盖质量.

6 总结

本文针对随机部署无线传感器网络在实际环境中的感知特性,分析了节点感知半径服从正态分布的无线传感器网络的覆盖冗余问题,给出了无需地理位置信息的节点冗余度的计算模型和保证网络覆盖质量所需要的最少工作节点数的计算模型.根据理论分析结果,提出了高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议(EECCP).该协议关闭冗余度满足冗余要求的所有节点,保留最少的工作节点来保证应用要求的覆盖质量,从而达到节约网络能量的目的.仿真实验表明,EECCP不仅能够较为精确地保证要求的覆盖质量,而且能够有效地减少网络能量消耗,实现了延长网络有效寿命的目的.

References:

- [1] Shih E, Cho SH, Ickes N, Min R, Sinha A, Wang A, Chandrakasan A. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: Proc. of the 7th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Rome: ACM Press, 2001. 272–287. <http://doi.acm.org/10.1145/381677.381703>
- [2] Tian D, Georganas ND. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In: Raghavendra CS, Sivalingam KM, eds. Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA). Atlanta: ACM Press, 2002. 32–41.
- [3] Ye F, Zhong G, Cheng J, Lu S, Zhang L. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. In: Proc. of the 23rd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS). Providence: IEEE Press, 2003. 28–37. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1203449
- [4] Huang CF, Tseng YC. The coverage problem in a wireless sensor network. In: Raghavendra CS, Sivalingam KM, Govindan R, Ramanathan P, eds. Proc. of the 2nd ACM Int'l conf. on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA). San Diego: ACM Press, 2003. 115–121.
- [5] Pan J, Hou YT, Cai L, Shi Y, Shen SX. Topology control for wireless sensor networks. In: Johnson B, Joseph AD, Vaidya NH, eds. Proc. of the 9th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM). San Diego: ACM Press, 2003. 286–299.
- [6] Zhang H, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks (AHSWN)*, 2005,1(1-2):89–124.
- [7] Zhao Q, Gurusamy M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2008,16(6):1378–1391. [doi: 10.1109/TNET.2007.911432]
- [8] Ram SS, Manjunath D, Iyer SK, Yogeshwaran D. On the path coverage properties of random sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2007,6(5):494–506. [doi: 10.1109/TMC.2007.1000]
- [9] Wan PJ, Yi CW. Coverage by randomly deployed wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006,52(6):2658–2669. [doi: 10.1109/TIT.2005.862092]
- [10] Choi W, Das SK. Trade-Off between coverage and data reporting latency for energy-conserving data gathering in wireless sensor networks. In: Proc. of the 2004 IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. IEEE Press, 2004. 503–512.
- [11] Mao YC, Gong HG, Liu M, Chen DX, Xie L. An energy efficient and location-independent QoS protocol for wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2006,43(6):1019–1026 (in Chinese with English abstract).

- [12] Liu B, Towslev D. A study of the coverage of large-scale sensor networks. In: Proc. of the 2004 IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. IEEE Press, 2004. 475–483. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1392188
- [13] Liu M, Cao JN, Zheng Y, Chen LJ, Xie L. Analysis for multi-coverage problem in wireless sensor networks. Journal of Software, 2007,18(1):127–136 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/127.htm> [doi: 10.1360/jos180127]
- [14] Wu K, Gao Y, Li F, Xiao Y. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks. ACM/Kluwer Mobile Networks & Applications (MONET), 2005,10(6):837–852.
- [15] Wang D, Xie B, Agrawal DP. Coverage and lifetime optimization of wireless sensor networks with Gaussian distribution. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008,7(12):1444–1458. [doi: 10.1109/TMC.2008.60]
- [16] Liu C, Wu K, Xiao Y, Sun B. Random coverage with guaranteed connectivity: Joint scheduling for wireless sensor networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2006,17(6):562–575. [doi: 10.1109/TPDS.2006.77]
- [17] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. In: Proc. of the 20th Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Anchorage: IEEE Press, 2001. 1380–1387. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=916633
- [18] Wang YC, Tseng YC. Distributed deployment schemes for mobile wireless sensor networks to ensure multilevel coverage. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2008,19(9):1280–1294. [doi: 10.1109/TPDS.2007.70808]
- [19] Bai X, Kumar S, Xuan D, Yun Z, Lai TH. Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity. In: Palazzo S, Conti M, Sivakumar R, eds. Proc. of the 7th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). Florence: ACM Press, 2006. 131–142.
- [20] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660–670. [doi: 10.1109/TWC.2002.804190]
- [21] Hill J, Szewczyk R, Woo A, Hollar S, David C, Pister K. System architecture directions for networked sensors. In: Norris C, Fenwick JB, eds. Proc. of the 9th Int'l Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS). Cambridge: ACM Press, 2000. 93–104.

附中文参考文献:

- [11] 毛莺池, 龚海刚, 刘明, 陈道蓄, 谢立. ELIQoS: 一种高效节能、与位置无关的传感器网络覆盖质量协议. 计算机研究与发展, 2006, 43(6):1019–1026.
- [13] 刘明, 曹建农, 郑源, 陈力军, 谢立. 无线传感器网络多重覆盖问题分析. 软件学报, 2007, 18(1):127–136. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/127.htm> [doi: 10.1360/jos180127]

附录

引理 1. 节点感知区域内任意一点被该节点一个工作感知邻居覆盖的概率为

$$P \approx \frac{R_0^2}{4(R_0^2 - \delta^2)}.$$

证明: 设节点 a 的感知半径为 R_a , 感知区域为 $\odot_1 a(R_a)$, 节点 b 的感知半径为 R_b , 感知区域为 $\odot b(R_b)$. 若 b 是 a 的一个工作感知邻居, 则 $d(a, b) \leq R_a + R_b$, 即 b 必须落在以 a 为圆心、 $R_a + R_b$ 为半径的圆 (该圆记作 $\odot_2 a(R_a + R_b)$) 内. 如果 $\odot_1 a(R_a)$ 内任意一点 q 被 $\odot b(R_b)$ 覆盖, 则 b 必须落在以 q 为圆心、 R_b 为半径的圆 (记作 $\odot q(R_b)$) 内. 图 10 给出了 $\odot_1 a(R_a)$, $\odot_2 a(R_a + R_b)$ 和 $\odot q(R_b)$ 的位置关系.

因为所有节点随机均匀部署在监测区域 M 中, 所以, 每个节点位于 M 中任意一点的概率均为 $1/\text{area}(M)$. 于是, 节点 a 的感知区域内任意一点被 a 的一个工作感知邻居 b 覆盖的概率 P_{b-a} 为

$$P_{b-a} = \frac{\text{area}(\odot q(R_b)) \cdot (1/\text{area}(M))}{\text{area}(\odot_2 a(R_a + R_b)) \cdot (1/\text{area}(M))} = \frac{R_b^2}{(R_a + R_b)^2} \quad (16)$$

由于所有节点的感知半径服从正态分布 $N(R_0, \delta^2)$, 其中, $R_0 \geq 3.3\delta$, 所以二维随机变量 (R_a, R_b) 服从二维正态分布 $N(R_0, \delta^2; R_0, \delta^2; 0)$. 于是, P_{b-a} 的期望为

$$E(P_{b-a}) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \int_0^{2R_0} \int_0^{2R_0} \frac{R_b^2}{(R_a + R_b)^2} \cdot e^{-\frac{(R_a - R_0)^2 + (R_b - R_0)^2}{2\delta^2}} dR_a dR_b \quad (17)$$

令 $x_1 = R_a - R_0, x_2 = R_b - R_0$, 则

$$E(P_{b-a}) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \left\{ \iint_{\odot o(R_0)} \left(\frac{R_0 + x_2}{2R_0 + x_1 + x_2} \right)^2 \cdot e^{-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\delta^2}} d_{x_1} d_{x_2} + \iint_N \left(\frac{R_0 + x_2}{2R_0 + x_1 + x_2} \right)^2 \cdot e^{-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\delta^2}} d_{x_1} d_{x_2} \right\} \quad (18)$$

其中,积分区域 N 和 $\odot o(R_0)$ 如图 11 所示.

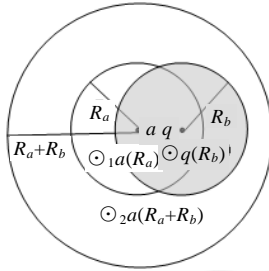


Fig.10 Illustration of the locations of the circles
图 10 圆位置关系示意图

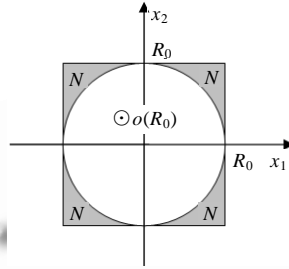


Fig.11 Illustration of integral regions
图 11 积分区域示意图

由于

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\pi\delta^2} \iint_N \left(\frac{R_0 + x_2}{2R_0 + x_1 + x_2} \right)^2 \cdot e^{-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\delta^2}} d_{x_1} d_{x_2} \ominus \frac{1}{2\pi\delta^2} \iint_{\odot o(R_0)} e^{-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\delta^2}} d_{x_1} d_{x_2} \\ &= \frac{1}{2\pi\delta^2} \int_{-R_0/\delta}^{R_0/\delta} \int_{-R_0/\delta}^{R_0/\delta} e^{-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\delta^2}} d_{x_1} d_{x_2} - \frac{1}{2\pi\delta^2} \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} r \cdot e^{-\frac{r^2}{2\delta^2}} d_\theta dr \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-R_0/\delta}^{R_0/\delta} e^{-\frac{y_1^2}{2\delta^2}} d_{y_1} \cdot \int_{-R_0/\delta}^{R_0/\delta} e^{-\frac{y_2^2}{2\delta^2}} d_{y_2} - \int_0^{R_0/\delta} l \cdot e^{-\frac{l^2}{2\delta^2}} d_l \\ &= (\Phi(x)) \Big|_{-R_0/\delta}^{R_0/\delta} - e^x \Big|_{-R_0^2/(2\delta^2)}^0, \end{aligned}$$

其中, $\Phi(x)$ 为标准正态分布的分布函数. 令 $a(x) = (\Phi(x) - \Phi(-x))^2 - (1 - e^{-x^2/2})$, 其中 $x \geq 3.3$. 由于

$$\frac{d_{a(x)}}{d_x} = \frac{4}{\sqrt{2\pi}} (\Phi(x) - \Phi(-x)) \cdot e^{-x^2/2} - x e^{-x^2/2} < \left(\frac{4}{\sqrt{2\pi}} - x \right) \cdot e^{-x^2/2} < 0,$$

所以, $a(x)$ 在区间 $[3.3, +\infty]$ 上是单调递减的. 而 $R_0/\delta \geq 3.3$, 所以,

$$(\Phi(x)) \Big|_{-R_0/\delta}^{R_0/\delta} - e^x \Big|_{-R_0^2/(2\delta^2)}^0 = a(R_0/\delta) \leq a(3.3) = 0.0023,$$

即 $\frac{1}{2\pi\delta^2} \iint_N \left(\frac{R_0 + x_2}{2R_0 + x_1 + x_2} \right)^2 \cdot e^{-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\delta^2}} d_{x_1} d_{x_2}$ 小到足以舍弃. 于是有

$$E(P_{b-a}) \approx \frac{1}{2\pi\delta^2} \iint_{\odot o(R_0)} \left(\frac{R_0 + x_2}{2R_0 + x_1 + x_2} \right)^2 \cdot e^{-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\delta^2}} d_{x_1} d_{x_2} = \frac{1}{2\pi\delta^2} \int_0^{R_0} r \cdot e^{-\frac{r^2}{2\delta^2}} \int_0^{2\pi} \left(\frac{R_0 + r \cos \theta}{2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta} \right)^2 d_\theta dr \quad (19)$$

设 $f(r) = \int_0^{2\pi} \left(\frac{R_0 + r \cos \theta}{2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta} \right)^2 d_\theta$, 并取自变量 $\phi = \pi/2 - \theta$, 则

$$f(r) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left(\frac{R_0 + r \sin \phi}{2R_0 + r \sin \phi + r \cos \phi} \right)^2 d_\phi = \int_0^{2\pi} \left(\frac{R_0 + r \sin \theta}{2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta} \right)^2 d_\theta \quad (20)$$

再设

$$g(r) = \int_0^{2\pi} \frac{(R_0 + r \cos \theta) \cdot (R_0 + r \sin \theta)}{(2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta)^2} d\theta \tag{21}$$

于是有

$$\begin{cases} 2f(r) + 2g(r) = \int_0^{2\pi} d\theta = 2\pi \\ 2f(r) - 2g(r) = \int_0^{2\pi} \frac{r^2(1 - 2\sin \theta \cos \theta)}{(2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta)^2} d\theta \end{cases} \tag{22}$$

为了能够求解方程组(22),首先要得到方程组(22)中第 2 个表达式的值,下面就对该表达式进行化简.

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \frac{r^2(1 - 2\sin \theta \cos \theta)}{(2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta)^2} d\theta &= \int_0^{2\pi} (r \sin \theta - r \cos \theta) d(2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta)^{-1} \\ &= \frac{r \sin \theta - r \cos \theta}{2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta} \Big|_0^{2\pi} - \int_0^{2\pi} \frac{r \sin \theta + r \cos \theta}{2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta} d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{2R_0}{2R_0 + r \sin \theta + r \cos \theta} d\theta - 2\pi \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{2R_0}{2R_0 + \sqrt{2}r \sin(\pi/4 + \theta)} d\theta - 2\pi \\ &= c \int_0^{2\pi} \frac{1}{c + \sin \varphi} d\varphi - 2\pi, \end{aligned}$$

其中, $c = \frac{\sqrt{2}R_0}{r}$. 再令 $t = \tan(\varphi/2)$, 则 $\varphi = 2\arctan t$, $d\varphi = \frac{2}{1+t^2} dt$. 于是

$$2f(r) - 2g(r) = c \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2}{ct^2 + 2t + c} dt - 2\pi = \frac{2c^2}{c^2 - 1} \arctan \left(\frac{ct + 1}{\sqrt{c^2 - 1}} \right) \Big|_{-\infty}^{+\infty} - 2\pi = \frac{4R_0^2\pi}{2R_0^2 - r^2} - 2\pi.$$

解方程组(22)可以得到 $f(r) = \frac{R_0^2\pi}{2R_0^2 - r^2}$, 将其带入公式(19)可得

$$E(P_{b-a}) \approx \frac{1}{2\pi\delta^2} \int_0^{R_0} r \cdot e^{-\frac{r^2}{2\delta^2}} \cdot \frac{R_0^2\pi}{2R_0^2 - r^2} dr \tag{23}$$

为了对公式(23)进一步化简,令 $t = -\frac{r^2}{2\delta^2}$, $c_1 = \frac{R_0^2}{\delta^2}$, 则 $E(P_{b-a}) \approx \frac{c_1}{4} \int_{-c_1/2}^0 \frac{e^t}{t + c_1} dt = \frac{c_1}{4e^{c_1}} \int_{c_1/2}^{c_1} \frac{e^t}{t} dt$.

而由 e^t 的Maclaurin展开式可得 $e^t = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!}$. 所以,

$$E(P_{b-a}) \approx \frac{c_1}{4e^{c_1}} \int_{c_1/2}^{c_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} dt = \frac{c_1}{4e^{c_1}} \left(\ln t \Big|_{c_1/2}^{c_1} + \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^n}{n!} \right) \Big|_{c_1/2}^{c_1} \right) \tag{24}$$

令 $I_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^n}{n!}$, 则 $tI_1 - I_1 = -t + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{t^n}{n!} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{t^n}{(n-1)n!}$, 解得 $I_1 = \frac{e^t - 3}{t - 1} - 2 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{t^n}{(n-1)n!}$.

将 I_1 的解代入公式(24), 可得

$$E(P_{b-a}) \approx \frac{c_1}{4e^{c_1}} \left\{ \ln 2 + \frac{e^{c_1}}{c_1 - 1} - \left(\frac{3}{c_1 - 1} + \frac{2e^{c_1/2} - 6}{c_1 - 2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_1^{n+1}/(c_1 - 1) - (c_1/2)^{n+1}/(c_1/2 - 1)}{n(n+1)(n+1)!} \right\} \tag{25}$$

令 $p(c_1) = \frac{c_1}{4e^{c_1}} \cdot \left(\frac{3}{c_1 - 1} + \frac{2e^{c_1/2} - 6}{c_1 - 2} \right)$, $q(c_1) = \frac{c_1}{4e^{c_1}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_1^{n+1}/(c_1 - 1) - (c_1/2)^{n+1}/(c_1/2 - 1)}{n(n+1)(n+1)!}$, 则 $p(c_1)$ 和 $q(c_1)$ 在区间

$[10, +\infty)$ 上是单调递减的.

由于 $c_1 \geq 10.89$, 于是有 $0 < p(c_1) < 0.0028, 0 < q(c_1) < 0.0037$ 和 $0 < \frac{c_1}{4e^{c_1}} \cdot \ln 2 < 3.50 \times 10^{-5}$. 所以,

$$-0.0028 < \frac{c_1}{4e^{c_1}} \ln 2 - p(c_1) + q(c_1) < 0.0037.$$

而在计算机上用 matlab 计算可得 $0 < \frac{c_1}{4e^{c_1}} \ln 2 - p(c_1) + q(c_1) < 0.0015$, 所以 $\frac{c_1}{4e^{c_1}} \ln 2 - p(c_1) + q(c_1)$ 小到足以舍去. 于是, 公式(25)可最终化简为

$$E(P_{b-a}) \approx \frac{c_1}{4e^{c_1}} \cdot \frac{e^{c_1}}{c_1 - 1} = \frac{R_0^2}{4(R_0^2 - \delta^2)} \quad (26)$$

而节点感知区域内任意一点被该节点一个工作感知邻居覆盖的概率 P 为

$$P = E(P_{b-a}) \quad (27)$$

将公式(26)的结果代入公式(27)可证得引理 1. □



王换招(1963—),女,山西万荣人,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为无线网络,嵌入式技术.



李增智(1938—),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络管理,无线网络协议及安全.



孟凡治(1985—),男,硕士生,主要研究领域为无线网络.