

文章编号:1001-9081(2007)06-1493-04

一种基于协作的最优无线传感器节点密度控制算法

杨白薇,于宏毅,张霞

(信息工程大学信息工程学院,河南 郑州 450002)

(youngbw@163.com)

摘要:基于一种协作感知模型(CSM),提出了一种最优的保证覆盖的密度控制算法——EECDC。CSM建立了一系列的非线性约束方程,从而找出了该模型下能够最小化工作节点数的最优节点位置,EECDC则基于该最优节点位置对节点进行休眠调度。仿真试验表明,相比于基于传统圆盘感知模型的最优密度控制算法,EECDC协议能够以较少的工作节点和较少的能耗来保证原始网络覆盖率,从而达到较好的能量有效性。

关键词:无线传感器网;协作感知模型;平均覆盖贡献;能量有效性

中图分类号:TP393;TP212 **文献标识码:**A

Optimal node density control algorithm based on cooperation in WSNs

YANG Bai-wei, YU Hong-yi, ZHANG Xia

(Department of Communication Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: An Energy Efficient Cooperative Density Control Algorithm (EECDC) was proposed. EECDC is based on a new sensing model-Cooperative Sensing Model (CSM). According to CSM, serials of nonlinear constrained programming models were developed to find the optimal conditions for full coverage with minimal sensor nodes. Based on the findings, EECDC had been devised to select sensor nodes as close to optimal locations as possible to be the working nodes. Simulations show that EECDC outperforms OGDC algorithm in term of number of working nodes needed, and achieves almost the same coverage. As a result, it achieves higher energy efficiency and longer network lifetime.

Key words: wireless sensor network; Cooperative Sensing Model (CSM); average coverage contribution; energy efficiency

0 引言

无线传感器网络以其监测精度高、布设灵活性强、造价低廉等特点,在军事侦察、工业控制、交通监管、环境监测等领域具有非常广阔的应用前景^[1,2]。在传感器网中,传感器节点一般采用电池供电且不可更换,因此,降低能量消耗、延长网络寿命是网络设计的主要目标之一。其中休眠调度是一种用来降低能耗的常用手段,即网络中只需部分节点工作,其余节点都进行休眠。

现有传感器网络在进行休眠时主要考虑两方面的因素,即连通性和覆盖性。文献[3]指出,当传感器节点的通信距离和感知距离满足一定的比例关系时在保证覆盖性的同时就能保证连通性。目前休眠调度算法大部分是研究如何利用图论和计算几何学中的方法来寻找冗余节点的集合。其中大多数是基于圆盘感知模型^[3~5]。文献[4]认为一个节点感知范围内只要存在一个工作节点,该节点就成为冗余节点而不必激活,该方法考虑了覆盖性,但它并不能保证休眠节点的感知范围被其他工作节点完全覆盖。在文献[5]中,如果节点 N_i 的感应范围被所有邻居节点的感应范围组成的区域完全覆盖,则 N_i 就是冗余节点。文献[3]给出了一种基于圆盘感知模型最优的密度控制算法,其性能要优于文献[3,4]。圆盘感知模型虽然简单,但是它并没有考虑到传感器节点的感知能力随距离衰减的特性,而该衰减特性对于无线电信号、声音

信号和地震波信号来讲是比较合理的^[6~8]。

基于以最小能耗来保证原始覆盖的目的,本文采用了一种协作感知模型(Cooperative Sensing Model, CSM),该模型考虑节点的感知衰减特性以及多个节点协作探测特性。根据圆盘感知模型可知,当目标处在节点的感知半径 R_c 之外则认为探测不到。实际上,当目标处在 R_c 之外时,传感器节点并不是感知不到,只不过是探测贡献随着距离的衰减而变弱,圆盘模型中忽略了这部分相对较小但有效的探测贡献,而协作感知模型则充分利用了这部分有效的能量并对其进行聚合。基于该协作感知模型,本文找到了一种基于该模型下的最优节点位置,并提出了一种最优的能量有效的密度控制算法(Energy Efficient Cooperative Density Control Algorithm, EECDC)。

1 协作感知模型和问题描述

任意传感器节点 s ,对于目标监控区域内的任一目标点 P 的探测贡献量定义为该节点对该目标点的感知强度 $S(s,p)$,在文献[7,8]中都有定义,本文采用文献[7]中的定义:

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

其中: d 为传感器和目标之间的距离, α 和 β 为与传感器物理特性有关的类型参数,且 β 为衰减因子。定义 R_c 为协作感知模型中传感器节点有效的感知半径。如果一个目标点 P

收稿日期:2006-12-07;修订日期:2007-02-12 基金项目:河南省自然科学基金资助项目(0511010700)

作者简介:杨白薇(1975-),女,江西景德镇人,讲师,博士研究生,主要研究方向:无线传感器网络路由协议、拓扑控制等;于宏毅(1963-),内蒙古人,教授,博士生导师,主要研究方向:数字信号处理、无线自组织传感器网络等;张霞(1979-),山东济南人,讲师,博士研究生,主要研究方向:无线传感器网络路由协议。

位于 N 个传感器节点的共同的有效感知区域内,则这 N 个节点对于该目标的感知强度可以线性叠加,其和定义为该目标点 P 的协作感知强度 (Cooperative Sensing Intensity, CSI), 记为 $CSI(P)$:

$$CSI(P) = \sum_{i=1}^N S(s_i, P) = \sum_{i=1}^N 1/[1 + \alpha d(s_i, P)]^\beta \quad (2)$$

定义 1 探测灵敏强度 P_{sense}

探测灵敏强度定义为某一门限强度,当节点协作感知强度大于该门限强度时目标可被探测。

对于同构网络而言,无论何种感知模型都应该有相同的探测灵敏强度值。在圆盘感知模型中,由于有效探测范围为 R_b ,当目标处于 R_b 之外时,则认为其感知强度为零,探测不到目标点。因此,探测灵敏强度应该为:

$$P_{sense} = \frac{1}{(1 + \alpha R_b)^\beta} \quad (3)$$

定义 2 覆盖点

基于协作感知模型,目标点 P 定义为覆盖点,当且仅当该点的协作感知强度大于或等于探测灵敏强度 P_{sense} ,即当 $CSI(P) \geq P_{sense}$ 时,点 P 为一覆盖点,此时 $C_{covered}(P)$ 为 1,否则为 0。

$$C_{covered}(P) = \begin{cases} 1, & \text{if } CSI(P) \geq P_{sense} \\ 0, & \text{if } CSI(P) < P_{sense} \end{cases} \quad (4)$$

$$CSI(P) = \sum_j 1/(1 + \alpha d(s_j, P))^\beta$$

定义 3 节点平均覆盖贡献

定义为区域中所有节点的有效覆盖面积的并集与所有工作节点数的比值,记为 $S_{eff}, S_{eff} = \bigcup_{i=1, \dots, N_w} A_i / N_w$,左式中 A_i 表示第 i 个节点的有效覆盖面积, N_w 代表工作节点的数目。节点平均覆盖贡献用来衡量节点有效覆盖的利用率,一方面可以反映覆盖的情况,另一方面可以反映整个网络的能量消耗情况。

假设 N_w 个工作节点能够完全覆盖一个监控区域 R ,即 $\bigcup_{i=1, \dots, N_w} A_i = R$,则节点平均覆盖贡献可简化为:

$$S_{eff} = \frac{\bigcup_{i=1, \dots, N_w} A_i}{N_w} = R/N_w \quad (5)$$

因此,在保证完全覆盖的前提下,最小化工作节点个数 N_w 等效为最大化节点平均覆盖贡献 S_{eff} 。显然,节点不重叠、不留缝隙地完全覆盖监控区域时,所需的节点数最少。由于节点的覆盖区域是一个不规则的图形,与相邻节点的位置、密度有关,为了不留缝隙地覆盖整个监控平面区域 R ,每个节点的覆盖区域之间一定含有很多的交叠。在考虑了交叠之后,实际上每个节点的有效覆盖区域是一个多边形,当节点等间距布设时即为正多边形。文献[9,10]中指出,要用正多边形无空隙、无重叠地覆盖一个平面区域,可取的有效覆盖区形状只有三种,即正三角形、正方形和正六边形。在相同的探测灵敏强度 P_{sense} 的条件下,计算出无交叠、无缝隙覆盖整个监控区域 R 的节点平均覆盖贡献 S_{eff} ,从而求出能够最小化工作节点数的最优节点位置。

2 基于协作的节点最优节点位置

考虑无穷多个传感器节点等间距的布设,当监控区域远远大于节点的覆盖半径时,如何设计最优节点间距 l_{opt} ,从而保证监控区域都能被传感器节点无缝隙地覆盖。为了计算三种有效覆盖形状下节点平均覆盖贡献,假设节点感知有效范围 R_c 为一跳邻节点范围,即以节点中心,一跳邻节点范围内的传感器节点的感知效应为其协作感知强度的主导效应。由

于有无穷多个节点,不考虑边界效应,则每个节点的覆盖贡献是等效的。从而节点平均覆盖贡献 S_{eff} 即等于任意单个节点的有效覆盖面积。

2.1 有效覆盖区域为正三角形的情况

无穷节点等间距布设,若其有效覆盖区域为正三角形。以其中任意一个节点为原点,与任意一个邻居节点的连线方向为 Y 轴建立直角坐标系。如图 1(a) 所示,相邻节点间距相同假设为 l_1 ,即 $OA = OB = OC = l_1$ 。由于每个节点的覆盖贡献是等效的,因此只考虑其中一个节点 $O(0,0)$ 的有效覆盖面积。

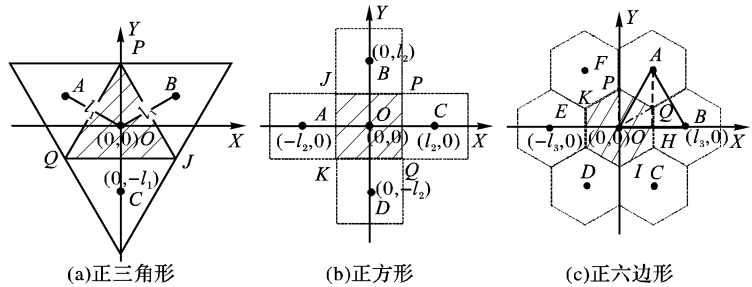


图 1 三种有效覆盖形状

显然节点 O 的有效覆盖面积为图 1(a) 中所示的正三角形阴影面积 ΔPQJ 。为了计算该有效覆盖面积,首先应找到该阴影区域内的最弱覆盖点,即该点的协作感知强度在有效覆盖区域内是最小的。

如图 1(a) 所示,直线 PQ 、 JP 和 QJ 分别是节点 O 与一跳邻节点 A 、 B 、 C 之间的中垂线,同时也构成了 Voronoi 图^[11,12]。由定义可知,协作感知强度具有随距离衰减特性,而 Voronoi 图最大化了到相邻节点间的距离。因此覆盖最弱点必定在 Voronoi 线上。并且易知:1) 点 P 、 Q 和 J 是三条 Voronoi 线的交点;2) 节点 A 、 B 和 C 的位置相对于节点 O 而言具有对称性。因此可以判定点 P 、 Q 和 J 都是覆盖最弱点,都具有相同的最小的协作感知强度。因此只需考虑一个最弱覆盖点 (P 点) 即可。由于仅仅考虑一跳邻居节点范围内的节点协作感知效应,则点 P 协作感知强度为 $CSI(0, l_1)$ 应为:

$$\begin{aligned} CSI(P) &= CSI(0, l_1) \\ &= I(O, P) + I(A, P) + I(B, P) + I(C, P) \\ &= \frac{1}{(1 + \alpha l_1)^\beta} + \\ &\quad \frac{1}{(1 + \alpha((-\sqrt{3}l_1/2)^2 + (l_1/2 - l_1)^2)^{1/2})^\beta} + \\ &\quad \frac{1}{(1 + \alpha((\sqrt{3}l_1/2)^2 + (l_1/2 - l_1)^2)^{1/2})^\beta} + \\ &\quad \frac{1}{(1 + \alpha(-l_1 - l_1)^2)^{1/2})^\beta} \\ &= \frac{3}{(1 + \alpha l_1)^\beta} + \frac{1}{(1 + 2\alpha l_1)^\beta} \end{aligned} \quad (6)$$

显然只要最弱覆盖点满足覆盖点 (见定义 2) 要求,则其内部区域的其他点也同样满足覆盖点要求。因此,求解节点平均覆盖贡献的问题可以转化为一个有约束的非线性规划问题,即模型可表示为:

目标函数:

$$\max S_{eff} = \|PQJ\| = S_{\Delta PQJ} = 3\sqrt{3}l_1^2/4 \quad (7)$$

式中 $\|\cdot\|$ 表示区域的面积。

满足的约束条件为:

$$CSI(P) = \frac{3}{(1 + \alpha l_1)^\beta} + \frac{1}{(1 + 2\alpha l_1)^\beta} \geq P_{sense} \quad (8)$$

$$l_1 > 0$$

2.2 有效覆盖区域为正方形的情况

如上所述,若节点有效覆盖区域为正方形。以其中任意一个节点为原点,与任意一个邻居节点的连线方向为 X 轴建立直角坐标系。如图 1(b) 所示,相邻节点间距相同假设为 l_2 ,即 $OA = OB = OC = OD = l_2$ 。我们考虑其中一个节点 $O(0,0)$ 的有效覆盖面积。如图(b) 中所示的正方形阴影面积,并且正方形的四个顶点 P, Q, J 和 K 为其覆盖边界上的顶点,也是最弱覆盖点。

$$\begin{aligned} CSI(P) &= CSI(l_2/2, l_2/2) \\ &= I(O, P) + I(A, P) + I(B, P) + I(C, P) + I(D, P) \\ &= \frac{1}{(1 + \sqrt{2}\alpha l_2/2)^\beta} + \frac{1}{(1 + \sqrt{10}\alpha l_2/2)^\beta} + \\ &\quad \frac{1}{(1 + \sqrt{2}\alpha l_2/2)^\beta} + \frac{1}{(1 + \sqrt{2}\alpha l_2/2)^\beta} + \\ &\quad \frac{1}{(1 + \alpha(-l_1 - l_1)^2)^{\beta/2}} + \frac{1}{(1 + \sqrt{10}\alpha l_2/2)^\beta} \\ &= \frac{3}{(1 + \sqrt{2}\alpha l_2/2)^\beta} + \frac{2}{(1 + \sqrt{10}\alpha l_2/2)^\beta} \end{aligned} \quad (9)$$

基于以上分析模型可表示为:

目标函数:

$$\max S_{eff} = \|PQJK\| = l_2^2 \quad (10)$$

满足的约束条件为:

$$CSI(P) = \frac{3}{(1 + \sqrt{2}\alpha l_2/2)^\beta} + \frac{2}{(1 + \sqrt{10}\alpha l_2/2)^\beta} \geq P_{sense} \quad (11)$$

2.3 有效覆盖区域为正六边形的情况

若节点有效覆盖区域为正六边形,以其中任意一个节点为原点,与任意一个邻居节点的连线方向为 X 轴建立直角坐标系。如图 1(c) 所示,相邻节点间距相同假设为 l_3 。根据以上分析同样可求出最弱覆盖点 P 的协作感知强度为:

$$\begin{aligned} CSI(P) &= CSI(0, \sqrt{3}l_3/3) \\ &= I(O, P) + I(A, P) + I(B, P) + \\ &\quad I(C, P) + I(D, P) + I(E, P) + I(F, P) \\ &= \frac{1}{(1 + \sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} + \frac{1}{(1 + \sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} + \\ &\quad \frac{1}{(1 + 2\sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} + \frac{1}{(1 + \sqrt{21}\alpha l_3/3)^\beta} + \\ &\quad \frac{1}{(1 + \sqrt{21}\alpha l_3/3)^\beta} + \frac{1}{(1 + 2\sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} + \\ &\quad \frac{1}{(1 + \sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} \\ &= \frac{3}{(1 + \sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} + \frac{2}{(1 + 2\sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} + \\ &\quad \frac{2}{(1 + \sqrt{21}\alpha l_3/3)^\beta} \end{aligned} \quad (12)$$

基于以上分析模型可表示为:

目标函数:

$$\max S_{eff} = \|PQHJK\| = 6S_{\Delta OPQ} = \sqrt{3}l_3^2/2 \quad (13)$$

满足的约束条件为:

$$CSI(P) = \frac{3}{(1 + \sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} + \frac{2}{(1 + 2\sqrt{3}\alpha l_3/3)^\beta} + \frac{2}{(1 + \sqrt{21}\alpha l_3/3)^\beta} \geq P_{sense} \quad (14)$$

$$l_3 > 0$$

2.4 结果比较和分析

由于式(8)、(11)和(14)无法直接求解,本文使用一种

数值法来求解最佳节点间距 l_1, l_2 及 l_3 。即采取多次网格搜索方法,逐步缩小节点间距 l 取值范围和搜索步长,搜索出满足误差精度要求的最优节点间距 l_{1opt}, l_{2opt} 及 l_{3opt} ,然后再分别代入式(7)、(10)和(13)求出三种有效覆盖形状下节点平均覆盖贡献 S_{eff} ,结果如图 2 所示(假设 $\alpha = 0.1, \beta$ 分别取 3 和 4)。从图 2 中可以看出, S_{eff} 随着 P_{sense} 和 β 的增加而减少,这是因为 P_{sense} 和 β 越大,单个节点的有效覆盖面积随之减少, S_{eff} 随之减少。另外,对于相同的 P_{sense} 和 β ,有效覆盖面积为正六边形(hexagon)时,其 S_{eff} 总是最大的,正方形(square)次之,正三角形(triangle)最小。通过比较和分析可知,当节点的有效覆盖形状为正六边形时,以相邻间距 l_{3opt} 完全覆盖监控区域 R 时,其节点平均覆盖贡献最大,此时所需的工作节点数最少。

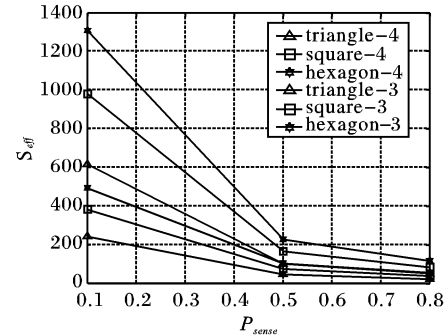


图2 三种形状下节点平均覆盖贡献比较

3 基于协作的最优节点密度控制算法

基于最优节点布设位置,本文提出了一种能量有效的基于协作节点密度控制算法(EECD)。一般来讲,考虑最优节点密度控制算法时,需要面对两个问题:1)保证覆盖规则(Coverage Preserved Rule, CPR),即节点如何判断自己在不影响覆盖的前提下进入休眠;2)如何选择工作节点,即如何选择最合适的工作节点,使得总的工作节点数最少。因此,我们将基于以下假设(a1)每个节点都知道各自的地理位置;(a2)节点密度足够大的条件下,选择一组最优的工作节点来保证完全覆盖。

3.1 保证覆盖规则

保证覆盖规则(Coverage Preserved Rule, CPR),即保证节点休眠不能破坏网络原有的覆盖性的规则。为了便于计算,在此引入了栅格的概念^[3]。按照栅格划分的办法,节点只需判定当其休眠时,根据式(4)判断其覆盖区域的栅格中心点是否仍然是覆盖点,当所有栅格的中心点仍然是覆盖点的话,那么当该节点选择休眠时就不会影响整个网络覆盖率,从而满足 CPR 规则。显然,栅格划分得越小,基于栅格算出的网络覆盖率就与原始网络覆盖率越接近。但实际上,栅格子区域不能划分得无限小,因为子区域越小,栅格数越多,计算复杂度也会随之增加。针对这一问题,作者提出了一种方法^[13],根据测量精度的要求,通过蒙特卡罗试验来确定最优栅格的大小。

3.2 选择激活节点

根据上节推导的结论可知,理想情况下单个节点的有效覆盖形状为正六边形,即任意相邻的三个节点构成等边三角形(见图 1(c) DOAB),从而推导出在保证覆盖性前提下确定激活节点的两条准则:准则一,若已知一个激活节点位置,则下一个激活节点的理想位置在该激活节点的 l_{3opt} 距离处;(见图 3(a));准则二,若已知两个激活节点位置,则第三个激活

节点的理想位置在这两个激活节点连线中垂线延长线上且与这两个节点圆盘的交点距离 $\sqrt{3}l_{sopt}/2$ 处(见图 3 (b))。

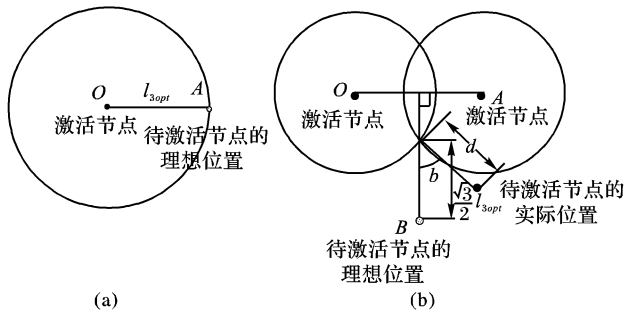


图3 选择激活节点准则

3.3 算法描述

EECDC 协议将网络的工作时间划分成轮,每轮开始时选工作节点,关闭冗余节点,结束时所有节点恢复初始状态,

等待下一轮开始时重新进行调度。在每轮开始的时候,所有的节点都处于“监听”状态。然后根据两个准则选择最优激活节点,其余节点则根据保证覆盖规则自我判断是否可以休眠,在选择结束后,所有节点的状态则是“激活”或者“休眠”中的一种,并且维持到该轮结束。

4 仿真及性能分析

为了验证算法性能的优越性,我们基于 ns2 对 EECDC 和 OGDC^[3] 分别进行了仿真。不失一般性,传感器的类型参数^[6,8] 设为 $\alpha = 0.1$ 和 $\beta = 4$,仿真的网络环境和参数设置如文献[3]。探测灵敏强度 P_{sense} 分别取 3 个不同值:0.1,0.5 和 0.8。为了使得结果更加准确,每种节点密度都取 10 次场景,每种场景试验都分别做 5 次,试验数据最后取平均。度量的性能指标为:1) 激活节点数;2) 网络覆盖率;3) 90% 网络寿命,即网络保持至少 90% 网络覆盖率的时间。

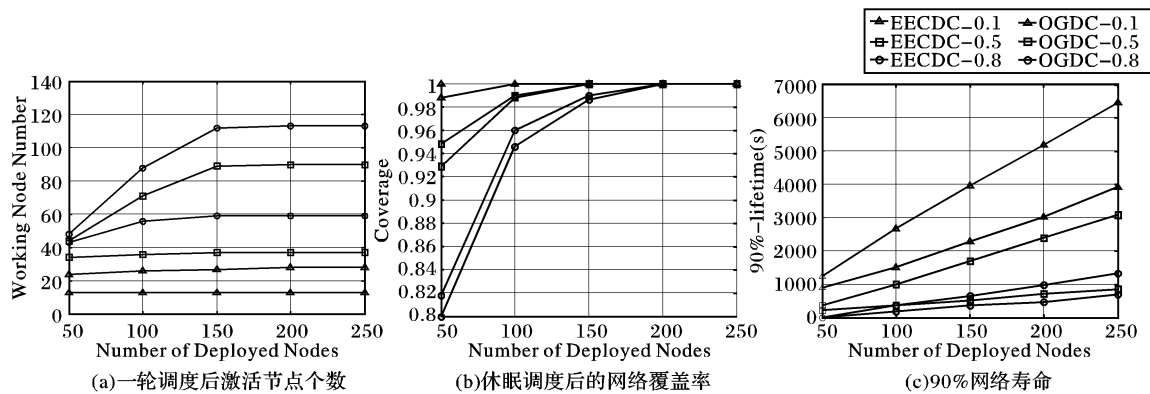


图4 两种机制下激活节点个数、网络覆盖率和90%网络寿命的比较

在节点部署总数为 50、100、150、200 和 250 这五种不同的网络密度下分别比较两种密度控制算法。图 4(a) 表明不同 P_{sense} 条件下,网络中激活节点数目随布设节点密度的变化。EECDC 所需的激活节点数总是少于 OGDC,并且两种算法随着布设节点数的增加,激活的节点数都趋于平稳,这说明两种算法都适合于布设节点密度比较高的场合。从图 4 还可以看出 P_{sense} 越大,激活节点数越多。这是因为 P_{sense} 越大,需要更多的工作节点,另外 EECDC 仅仅需要一半的激活节点进行工作,但是却可以获得和 OGDC 几乎相同的网络覆盖率,如图 4(b) 所示。从图中可以看出,随着节点密度的提高,两者的网络覆盖率都达到了 100%,能够保证完全覆盖。两种机制下的 90% 网络寿命如图 4(c) 所示。从图中可以看出,EECDC 的 90% 网络寿命几乎是 OGDC 的一倍。另外, P_{sense} 越小,EECDC 性能提升越大。

5 结语

本文提出了一种基于协作感知模型的最优传感器网络密度控制算法。算法根据两个准则选择距离最优节点位置最近的一组节点进行工作,其余节点则根据保证覆盖规则自我判断是否可以休眠。通过仿真试验证明,与基于圆盘感知模型的最优密度控制算法 OGDC 相比,EECDC 协议提高了网络寿命,保证了网络覆盖率。

参考文献:

[1] POTTIE G, KASIER W. Wireless integrated network sensors[J]. Communications of the ACM, May 2000, 43.
 [2] KAHN J, KATZ R, PISTER K. Mobile networking for smart dust [A]. Mobile Computing and Networking[C]. 1999.
 [3] ZHANG H-H, HOU JC. Maintaining Sensing Coverage and Con-

tivity in Large Sensor Networks [R]. Technical report UIUCDCS - R - 2003 - 2351, June 2003.

[4] YE F, LU G, ZHANG L. Peas: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks[A]. Proc. ICDCS [C]. 2003. 28 - 37.
 [5] TIAN D, GEORGANAS ND. A coverage - preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[A]. First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications [C]. 2002. 32 - 41.
 [6] HUANG CF, TSENG YC. The coverage problem in a wireless sensor network[A]. Proceedings of ACM WSNA'03 [C]. San Diego: ACM, 2003. 115 - 121.
 [7] LU J, SUDA T. Coverage-aware Self-scheduling in Sensor Networks [A]. Proceedings of IEEE CCW 2003 [C]. California: IEEE, 2003. 117 - 123.
 [8] MEGUERDICHIAN S, KOUSHANFAR F, QU G, et al. Exposure In Wireless Ad-Hoc Sensor Networks [A]. Proc. Of ACM Mobicom'01 [C]. 2001. 139 - 150.
 [9] 郭梯云, 郭国扬, 李建东. 移动通信(修订版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
 [10] PARSON JD, GARDINER JG. Mobile Communication System [Z]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1989.
 [11] AURENHAMMER F. Voronoi Diagrams-A Survey of A Fundamental Geometric Data Structure [J]. ACM Computing Surveys, 1991, 23: 345 - 405.
 [12] MEGUERDICHIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M, et al. Coverage Problems in Wireless Ad-hoc Sensor Networks [J]. INFOCOM'01, 2001, (3): 1380 - 1387.
 [13] YANG BW, YU HY, LI H, et al. A Coverage-Preserving Density Control Algorithm Based - on Cooperation in Wireless Sensor Networks [Z]. Wicomm 2006.