



无线传感器网络中基于“ k -覆盖问题”的多项式时间算法

王骐, 肖正安, 王怀兴

(湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 针对无线传感器网络的最差覆盖和最佳覆盖, 探寻如何解决二维目标区域内的“ k -覆盖问题”, 提出了一种解决此问题的多项式时间算法。该算法基于扩展圆盘的几何图形提出了一系列的定义和定理, 将“ k -覆盖问题”转化成了寻找相邻分界线的问题。仿真结果表明, 算法可在多项式时间内计算出最优 k -违反路径和最优 k -支持路径, 从而合理规避或选取网络覆盖点。

关键词: 无线传感器网络; k -覆盖问题; 扩展圆盘; 相邻分界线; 多项式时间算法

中图分类号: TN918.91

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017287

Polynomial time algorithm for solving k -coverage problem in wireless sensor networks

WANG Qi, XIAO Zheng'an, WANG Huaixing

School of Physics and Electromechanical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China

Abstract: How to solve the k -coverage problem, which was divided into worst-case and best-case, inside the two-dimensional target area in wireless sensor networks was explored, and a polynomial time algorithm for solving this problem was put forward. In this algorithm, a series of definitions and theorems were proposed based on the geometric graph of growing disks, and the k -coverage problem was transformed into one of finding a series of adjacent borders. The simulation results show that the algorithm could compute the optimal k -breach path and k -support path in polynomial time, so as to avoid or select the network coverage reasonably.

Key words: wireless sensor network, k -coverage problem, growing disk, adjacent border, polynomial time algorithm

1 引言

覆盖问题是传感器网络的基本问题之一, 网络覆盖反映了某一区域被传感器节点监视或跟踪

的效果, 因此它是传感器网络为确保 QoS 必须采取的最重要的措施之一^[1]。本文针对传感器网络覆盖问题的两种情况, 即最差覆盖和最佳覆盖, 探寻如何解决二维目标区域内的“ k -覆盖问题”,

收稿日期: 2017-07-20; 修回日期: 2017-09-30

基金项目: 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目 (No.T201417)

Foundation Item: Hubei Provincial Department of Education Research Program (No.T201417)



也就是如何实现区域内的任一点至少被 k 个传感器节点覆盖 (即覆盖度等于 k , 其中 k 是预定义的常量^[2,3]), 并以此作为评价传感器网络覆盖质量的重要依据^[4]。最差 k -覆盖问题和最佳 k -覆盖问题分别研究的是: 如何寻找一条连接起点 I 和终点 F 的路径, 分别使得可观测性 (检测概率) 的最大值最小化和最小值最大化。本文提出解决这两个问题的算法——多项式时间算法。

2 基于 UDG 的几何图形

2.1 问题的描述

假定传感器节点集为 S , 在连续二维平面 Ω 内分布有 n 个点, 对于任意传感器节点 $s_i \in S$, 其位置坐标为 (x_i, y_i) 已知。在平面 Ω 内 I 为起点, F 为终点。另外, 假定任何传感器节点的最大传输范围相同。因此, 节点集 S 定义的是连通的单位圆盘图 (unit disk graph, UDG) ^[5]。

定义 1 (k 距离) 假定二维平面 Ω 内的点, poi_j 的 k 距离表示: 从点 poi_j 到距离 poi_j 最近的第 k 个传感器节点之间的欧几里得距离, 记作 d_{jk} 。

如果 poi_j 的 k 距离为 d_{jk} , 那么在 poi_j 的 d_{jk} 范围内, 刚好存在 k 个传感器节点。假定每个传感器节点的感知范围为 r , poi_j 的覆盖度为 $\deg(poi_j)$, 显然当且仅当 $r \geq d_{jk}$, $\deg(poi_j) \geq k$ 。

定义 2 (k -违反值和 k -支持值) 假定 P 为连接起点 I 和终点 F 的路径, 路径 P 上所有点的 k 距离的最小值, 称作 P 的 k -违反值, 记作 B_{pk} ; 路径 P 上所有点的 k 距离的最大值, 称作 P 的 k -支持值, 记作 S_{pk} 。

例如, 假设 $k=3$, 点 A 、 B 、 C 是路径 P 上的 3 个点, 它们的 k 距离如图 1 所示。显然 $d_{j3} > d_{j2} > d_{j1}$, 因此路径 P 的 k -违反的最小值为 d_{j3} , 而 P 的 k -支持的最大值为 d_{j3} 。

根据以上定义, 最差 k -覆盖问题即最大 k -违反路径问题, 最佳 k -覆盖问题即最小 k -支持路径问题, 可作如下定义。

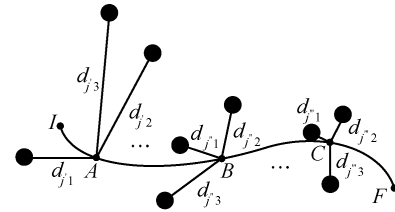


图 1 k -违反值和 k -支持值示意

定义 3 (最大 k -违反路径和最小 k -支持路径) 二维平面 Ω 内, 起点 I 和终点 F 之间, 由所有具有最大 k -违反值的点形成的路径, 称作最大 k -违反路径, 记作 P_{Bk} ; 由所有具有最小 k -支持值的点形成的路径, 称作最小 k -支持路径, 记作 P_{Sk} 。

2.2 圆盘的扩展

假设每个传感器节点初始状态是以自身为中心, 辐射半径为 0 的圆盘, 然后此圆盘以相同的速率向外扩展^[6]。假定 $D(S, r)$ 表示平面 Ω 内, 以传感器节点集 S 内的所有节点所处位置为圆心, 半径为 r 的圆盘所覆盖的区域。未覆盖到的区域, 即 $D(S, r)$ 的补集表示为 $\overline{D(S, r)}$ ^[7]。假定 $D(S, k, r)$ 表示至少被 k 个圆盘覆盖的区域, 显然当 k 增大时, $D(S, k, r)$ 将减小。另外, 对于 $\forall k \geq 1$, 都有 $D(S, k, r) \leq D(S, r)$ 成立。假定 $\overline{D(S, k, r)}$ 为平面 Ω 内 $D(S, k, r)$ 的补集, 那么有以下定理。

定理 1 当且仅当 $P \in \overline{D(S, k, r)}$ 时, $B_{pk} > r$ 。

证明: 当 $P \in \overline{D(S, k, r)}$ 时, 如果在 $\overline{D(S, k, r)}$ 内存在点 $poi_j = (x_j, y_j)$, 那么根据 $\overline{D(S, k, r)}$ 的定义, 点 poi_j 将至多被 $(k-1)$ 个圆覆盖。这表明, 点 poi_j 至多处于 $(k-1)$ 个传感器节点形成的半径为 r 的辐射圆之内, 这也反过来表明, poi_j 的 k 距离 $> r$ 。因此, 对于区域 $\overline{D(S, k, r)}$ 内的任意路径 P 来说, 根据定义 2 有: $B_{pk} > r$ 。

另一方面, 如果区域 $D(S, k, r)$ 内存在点 $poi_j \in P$, 可以确定 poi_j 将至少被 k 个圆覆盖。这表明, 点 poi_j 至少处于 k 个传感器节点形成的半径为 r 的辐射圆之内, 这反过来表明, poi_j 的 k 距离 $\leq r$, 即 $d_{jk} \leq r$ 。同理根据定义 2 有: $B_{pk} \leq d_{jk} \leq r$ 。综上所述, 结论成立。

定理 1 表明, 如果 $P \in \overline{D(S, k, r)}$, 那么 P 是一条大于的 k -违反路径。图 2 是 $k=2$ 的例子, 区域 $D(S, 2, r)$ 是图中的阴影部分。

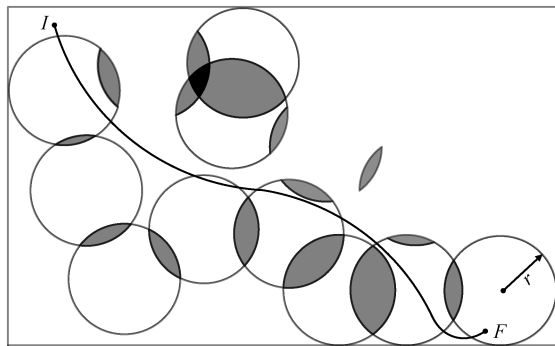


图 2 大于 r 的“2-违反”路径

同理可得定理 2。

定理 2 当且仅当 $P \in D(S, k, r)$ 时, $S_{pk} \leq r$ 。

显然, 圆半径 r 增大, 那么 $D(S, k, r)$ 将会增大, $\overline{D(S, k, r)}$ 将会减小。根据定理 1, “最差 k -覆盖问题”实际上就是如何确定最大半径 r , 使得在区域 $\overline{D(S, k, r)}$ 内, 存在一条连接点 I 和 F 的路径 P 。同理, 根据定理 2, “最佳 k -覆盖问题”实际上就是如何确定最小半径 r , 使得在区域 $D(S, k, r)$ 内, 存在一条连接点 I 和 F 的路径 P 。以上两个问题可通过二分查找算法解决^[8], 但要先解决以下两个问题。

问题 1 假定在平面 Ω 内, 传感器节点集为 S , k 和 r 的值、起点 I 和终点 F 均给定, 那么在区域 $\overline{D(S, k, r)}$ 内是否可建立一条连接点 I 和 F 的路径 P 。

问题 2 假定在平面 Ω 内, 传感器节点集为 S , k 和 r 的值、起点 I 和终点 F 均给定, 那么在区域 $D(S, k, r)$ 内是否可建立一条连接点 I 和 F 的路径 P 。

3 解决方案——多项式时间算法

3.1 子区域及其分界线

假定在平面 Ω 内, 传感器节点集为 S , 节点的感知半径为 r 。假定表示 n 个半径为 r 的辐射圆

的集合, 那么 C 内的圆周线就将平面 Ω 划分成若干个子区域, 它的分界线就由“弧”或者“弧+线段”组成。其中, 线段为矩形平面 Ω 的边界线, 如图 3 所示。因此, 每个子区域可能是多个圆形成的交集, 也可能是平面 Ω 内不被任何圆覆盖的部分。

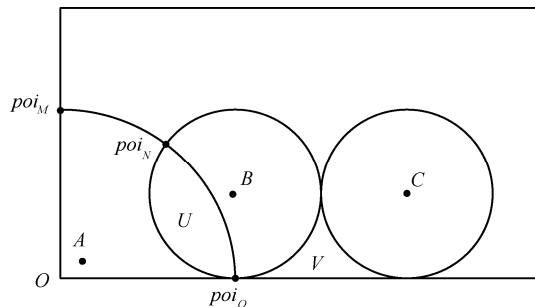


图 3 子区域及其分界线

考虑以下两种情况^[9]: 两个圆的圆周线, 它们可能相交于两个点; 一条平面 Ω 的边界线和一个圆的圆周线, 它们可能相切于一点。如果两个点(交点或切点)满足“同为相同圆周线上的点, 且两点之间再无其他交点或切点”或“同为平面 Ω 边界线上的点, 且两点之间再无其他交点或切点”, 那么, 这两个点互为相邻点。

在图 3 中, 圆 A 与圆 B 相交于两点 poi_N 和 poi_Q , 圆 A 和圆 C 相切, 切点为 poi_M 。点 poi_N 和 poi_Q 为圆 A 或圆 B 的圆周线上的点, 且两点之间没有其他交点或切点, 因此, 点 poi_N 和 poi_Q 互为相邻点。从图 3 可看出, 每个子区域的分界线是一段弧, 或者是平面 Ω 边界线中两个相邻交点或切点之间的线段。

定义 4 (子区域的覆盖度) 如果在平面 Ω 内存在一个由 ω 个圆相交形成的子区域 seg_i , $0 \leq \omega \leq n$, 那么该子区域 seg_i 的覆盖度为 ω , 表示为 $\deg(seg_i)$ 。

子区域及其分界线如图 3 所示, seg_U 是圆 A 与圆 B 相交形成的子区域, 而子区域 seg_V 没有被任何圆覆盖, 因此: $\deg(seg_U) = 2$, $\deg(seg_V) = 0$ 。由于子区域是圆与平面 Ω 相交形成的最小区域, 因此, 子区域内的所有点都被相交圆所覆盖^[10]。



定义 5 （分界线的覆盖度）假定两个相邻子区域相交的分界线 bor_i 为一段弧或平面的一段边界线，且 $bor_i \in seg_j$ ，其覆盖度表示为 $\deg(bor_i)$ ，有： $\deg(bor_i) = \deg(seg_j)$ 。

由于这段弧是由两个相邻子区域相交的公共部分，分属的两个子区域的覆盖度可能不相同，所以根据定义 5 来计算这段弧的覆盖度就会产生矛盾^[11]。为此特做以下定义。

定义 6 （内弧和外弧）假定弧 arc_i 位于圆 dis_j 的圆周线上，内弧指的是圆 dis_j 里边的弧，外弧指的是圆 dis_j 外边的弧。

在图 4 中，弧 $\widehat{AB}$ 被划分成内弧 arc_{AB_inner} 和外弧 arc_{AB_outer} ，根据定义 4~6，有：

- $arc_{AB_inner} \in seg_N, arc_{AB_outer} \in seg_M$ ；
- $\deg(arc_{AB_inner}) = \deg(seg_N) = 2$ ；
- $\deg(arc_{AB_outer}) = \deg(seg_M) = 1$ 。

总之，对于任意弧 $\widehat{O}$ ，有： $\deg(arc_{O_inner}) = \deg(arc_{O_outer}) + 1$ 。

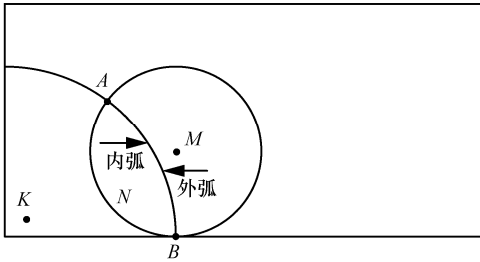


图 4 内弧和外弧

定义 7 （相邻分界线）如果两段分界线（内弧、外弧或边界线）具有公共点，那么称这两段分界线为相邻分界线。

根据定义 7，由于同一段弧的内弧和外弧具有无限多个共同点，因此它们互为相邻弧。当且仅当两段分界线具有相同交点或切点时，它们互为相邻分界线，如图 3 所示。由于子区域可看成是由若干相邻分界线形成的，因此，这些分界线具有和子区域相同的覆盖度。

定义 8 （相邻子区域）如果 $bor_A \in seg_A$ 和

$bor_B \in seg_B$ 为子区域 seg_A 和 seg_B 的分界线，且 bor_A 和 bor_B 互为相邻，那么子区域 seg_A 和 seg_B 互为相邻。

根据定义 8，当且仅当子区域 seg_A 和 seg_B 互为相邻时，可直接从 seg_A 跨越到 seg_B 。如果分界线是一段弧，可通过 4 个参数对其进行定义，即：圆心、圆半径以及弧端点处的两个倾角；如果分界线是边界线的一部分，可通过其所属的边界线及其两个端点进行定义。如果已知圆心、圆半径和边界线，可根据几何方法计算出圆的端点^[12]。因此，计算分界线的函数“border-calculate(S, r)”的伪代码如下。

```

Procedure: border-calculate /*计算所有的分界线，并且判定两段分界线是否为相邻分界线
input: 传感器节点集  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ，圆半径  $r$ 
output: 分界线集  $\{bor_1, bor_2, \dots, bor_k\}$ 
for  $i = 1$  to  $i = n$ 
    计算  $disk_i$  和所有其他圆或边界线的交点或切点
for 圆周线上的每对相邻交点或切点
    定义分界线  $bor_j$ 
    划分  $bor_j$  为内弧和外弧
for 平面边界线上的每对相邻交点或切点
    定义分界线  $bor_j$ 
/*计算每段分界线的覆盖度
for 每段分界线  $bor_j$ 
    switch (分界线类型)
    case  $bor_j$  为边界线的一部分
        选取点  $poi_j \in bor_j$ 
        计算点  $poi_j$  的  $r$  范围内传感器节点数量
    case  $bor_j$  为一段外弧
        选取点  $poi_j \in bor_j$ 
        计算点  $poi_j$  的  $r$  范围内传感器节点数量，不包括  $poi_j$  所属圆的中心节点
    case  $bor_j$  为一段内弧
        选取点  $poi_j \in bor_j$ 

```

计算点 poi_j 的 r 范围内传感器节点数量, 包括 poi_j 所属圆的中心节点
 /*判定两段分界线是否互为相邻分界线
 set 所有分界线为非相邻分界线
 for 每个交点或切点 poi_i
 if poi_i 为 bor_A 和 bor_B 的端点
 set bor_A 和 bor_B 为相邻分界线
 end

3.2 最差 k -覆盖问题

区域 $\overline{D(S, k, r)}$ 可能由多个覆盖度均小于 k 的子区域组成, 如果两个子区域彼此相邻, 那么在区域 $\overline{D(S, k, r)}$ 内, 可直接从一个子区域跨越到另一个子区域。假设 seg_I 和 seg_F 分别表示起点 I 和终点 F 所在的子区域, 那么第 2 节中的问题 1 可表述成: 是否存在一系列子区域 $seg_1, seg_2, \dots, seg_m$, 使得:

- $seg_1 = seg_I, seg_m = seg_F$;
- seg_i 和 seg_{i+1} 彼此相邻 ($i = 1, 2, \dots, m-1$);
- $\deg(seg_i) < k$ ($i = 1, 2, \dots, m$)。

根据定义 7 和定义 8, 问题 1 可转化为寻找一系列相邻分界线的问题, 即: 是否存在一系列分界线 $bor_1, bor_2, \dots, bor_r$, 使得:

- $bor_1 \in seg_I, bor_r \in seg_F$;
- bor_i 和 bor_{i+1} 彼此相邻 ($i = 1, 2, \dots, r-1$);
- $\deg(bor_i) < k$ ($i = 1, 2, \dots, r$)。

如果在平面 Ω 内, 定义所有子区域的分界线集合已知, 那么可通过广度优先搜索算法 (BFS) [13] 来解决以上问题。搜索过程的函数“ $connection(\{bor_1, bor_2, \dots, bor_k\}, bor_b, bor_F)$ ”伪代码如下。

Procedure: $connection$ /*判定在区域 $\overline{D(S, k, r)}$ 内是否可建立一条连接点 I 和 F 的路径
 input: 边界线集合 $\{bor_1, bor_2, \dots, bor_k\}$, $bor_b \in seg_I, bor_F \in seg_F$
 output: 布尔变量结果值
 if $\deg(bor_b) \geq k$ 或 $\deg(bor_F) \geq k$
 $result = 0$

return
 取消所有分界线的标记
 标记 bor_b /*起始于 bor_b
 list $L = bor_b$
 tree $T = bor_b$
 while (L 非空)
 从链表 L 头选取分界线 bor_v
 从链表 L 删除分界线 bor_v
 for bor_v 相邻的每段分界线 bor_w
 if $\deg(bor_w) < k$
 标记 bor_w
 在树 T 上将 bor_w 作为 bor_v 的孩子
 在链表 L 尾增加 bor_w
 if bor_F 被标记

$result = 1$
 return
 else
 $result = 0$
 return
end

可通过二分搜索算法^[14]确定 r 的最大值, 使得在区域 $\overline{D(S, k, r)}$ 内可建立一条连接 I 和 F 的路径。搜索过程的伪代码如下。

set $upper\ bound$ /*设定搜索空间的上限值
 set $lower\ bound$ /*设定搜索空间的下限值
 set $iteration$ /*设定迭代次数
 for $i = 1$ to $iteration$
 $r = (upperbound + lowerbound)/2$
 $\{bor_1, bor_2, \dots, bor_k\} = border_calculate(S, r)$ /*调用函数 $border_calculate(S, r)$, 计算所有的分界线
 $connection(\{bor_1, bor_2, \dots, bor_k\}, bor_b, bor_F)$ /*调用函数 $connection(\{bor_1, bor_2, \dots, bor_k\}, bor_b, bor_F)$ 判定在区域 $\overline{D(S, k, r)}$ 内是否可建立一条连接点 I 和 F 的路径
 if $result = 1$



```

lowerbound = r
else
upperbound = r
end

```

上限值和下限值可根据平面维度以及传感器节点的密度来设定。每次迭代将使搜索空间减半,例如,如果搜索空间($|upperbound - lowerbound|$)的值为 1 000,经过 10 次迭代可得到结果,且误差小于 1。一般情况下,10~20 次迭代可足以确保结果的准确性^[15]。

当 $result = 1$ 时,搜索过程建立的广度优先生成树(BFS tree)产生最大违反路径,并确定子区域 seg_F 的分界线 bor_F ,由此可得到从根部(分界线 bor_I)到叶子(分界线 bor_F)的相邻分界线序列,并可将它们转化成相应的子区域序列。例如,假设从广度优先生成树中得到的分界线序列为: $bor_1, bor_2, \dots, bor_r$, 其中 $bor_1 \in seg_I, bor_r \in seg_F$ 。每一个分界线 bor_i 均用子区域 seg_i 取代,这里 $bor_i \in seg_i$, 且 $1 \leq i \leq r$ 。当所有分界线被取代完毕,将会得到一系列的相邻子区域: $seg_1, seg_2, \dots, seg_r$, 其中 $seg_1 = seg_I, seg_r = seg_F$, 那么沿着这些子区域的所有路径均为大于 r 的 k -违反路径。

3.3 最佳 k -覆盖问题

与最差 k -覆盖问题类似,第 2 节中的问题 2 也可转化成以下问题:是否存在一系列分界线 $bor_1, bor_2, \dots, bor_r$, 使得:

- $bor_1 \in seg_I, bor_r \in seg_F$;
- bor_i 和 bor_{i+1} 彼此相邻 ($i = 1, 2, \dots, r-1$);
- $\deg(bor_i) \geq k$ ($i = 1, 2, \dots, r < \infty$)。

最佳 k -覆盖问题和最差 k -覆盖问题的解决办法类似。根据广度优先搜索算法,从子区域 seg_I 内的一条分界线开始,搜索没有被标记的分界线;如果分界线 bor_i 与一条被标记的分界线相邻,且 $\deg(bor_i) \geq k$, 那么 bor_i 将被标记,并将其归入已被搜索的分界线集合。同理,可通过二分搜索算

法确定 r 的最小值,使得在区域 $D(S, k, r)$ 内可建立一条连接 I 和 F 的路径,即:如果能建立一条连接子区域 seg_I 和 seg_F 的路径,那么半径 r 的值将减小,反之亦然。

4 仿真结果

假定传感器节点数为 n ,以均匀分布的概率模型随机部署在 $600 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 的矩形平面。 n 的变化范围为 10~80,每次变化数为 10。当 $k = 1, 2, 3, 4, 5$ 时,对每个 n 值分别计算 k -违反的最大值和 k -支持的最小值,每个数据点为 100 次重复计算的平均值。仿真结果如图 5 和图 6 所示。

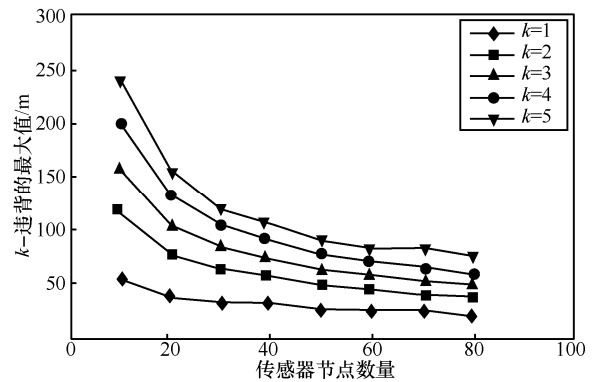


图5 k -违反的最大值

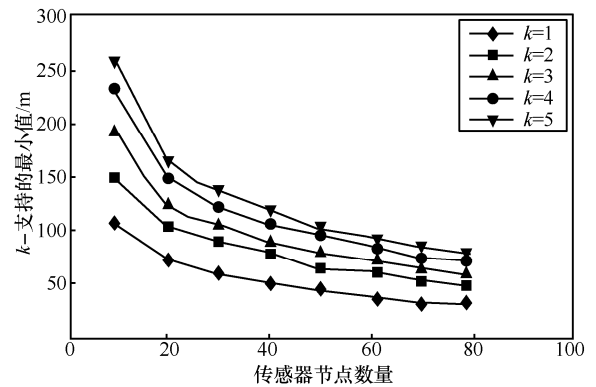


图6 k -支持的最小值

对比图 5 和图 6,可得到以下结论。

- 当传感器节点增多时, k -违反的最大值和 k -支持的最小值均减小,可根据给定的传感器节点数量 (n 值) 和覆盖度 (k 值) 来估计覆盖质量。从图 5 和图 6 中可看出,增加

传感器节点是提高覆盖质量的重要措施。但是当传感器节点数量增大时,覆盖质量的提高率将会减小。因此,需要在传感器节点数量和覆盖质量的期望值之间进行折中处理。

- 当 k 值增大时, k -违反的最大值和 k -支持的最小值均显著增大,由此表明当传感器节点数量固定时,提高节点的感知半径才能获得较高的覆盖度。
- 当传感器节点数量相同时, k -支持的最小值要远大于 k -违反的最大值。可以证明,任何情况下, k -支持的最小值均不会小于 k -违反的最大值。

5 结束语

本文分别阐述了最差和最佳 k -覆盖问题,并基于扩展圆盘的几何图形提出了一系列的定义和定理,将 k -覆盖问题转化成了寻找相邻分界线的问题,提出了解决此问题的多项式时间算法。

本文可在 3 个方面给传感器网络的设计和管理带来帮助:算法可在多项式时间内计算出最优 k -违反路径和最优 k -支持路径,从而合理规避或选取网络覆盖点。当传感器网络的覆盖度要求大于 1 时,可采用此算法来评估覆盖质量;有助于理解覆盖度和成本间的关系。例如,如第 4 节所述,当定义的 k 值较大时,可以采取两种措施来确保 k -覆盖的质量:提高传感器节点的感知半径或部署更多的传感器节点,以获取合适的 k -违反值和 k -支持值。当然以上两种措施会提高运行成本,可通过算法和仿真结果对此进行评估;每个传感器节点的覆盖区域是半径相同的圆,算法还适用于传感器节点覆盖半径不同,甚至是覆盖区域的形状也不相同的异构传感器网络。

参考文献:

- [1] MEGERIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M, et al. Worst and best-case coverage in sensor networks[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2005, 4(1):84-92.
- [2] 杨海雳, 赵静. 基于 Voronoi 图的无线传感器网络覆盖算法研究[J]. 信息通信, 2015(7):28-31.
YANG H L, ZHAO J. Research of coverage algorithm with Voronoi diagram for wireless sensor network [J]. Information & Communications, 2015(7):28-31.
- [3] 王成, 樊建席, 王仁喜, 等. 基于 Voronoi 图的无线传感器网络 K 覆盖算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(4):84-87.
WANG C, FAN J X, WANG R X, et al. K coverage algorithm in wireless sensor network based on Voronoi diagram[J]. Computer Engineering, 2012, 38(4):84-87.
- [4] 丁旭, 吴晓蓓, 黄成. 基于改进粒子群算法和特征点集的无线传感器网络覆盖问题研究[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 967-973.
DING X, WU X P, HUANG C. Area coverage problem based on improved PSO algorithm and feature point set in wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4) : 967-973.
- [5] 孙泽宇, 伍卫国, 王换招, 等. 无线传感器网络基于参数可调增强型覆盖控制算法[J]. 电子学报, 2015, 43 (3):466-474.
SUN Z Y, WU W G, WANG H Z, et al. An enhanced coverage control algorithm for wireless sensor networks based on adjustable parameters[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43 (3): 466-474.
- [6] 刘志强, 沈迺桐, 毛强, 等. 无线传感器网络动态覆盖的 CVT 算法[J]. 传感器与微系统, 2015(6):115-118.
LIU Z Q, SHEN N T, MAO Q, et al. A dynamic coverage algorithm for wireless sensor networks based on CVT[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015(6):115-118.
- [7] 高洁, 吴延红, 白建侠, 等. 无线传感器网络最小覆盖能量优化算法[J]. 传感技术学报, 2016, 29(9):1435-1440.
GAO J, WU Y H, BAI J X, et al. The minimum coverage energy optimization algorithms in wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Sensors And Actuators, 2016, 29(9):1435-1440.
- [8] LIU X Y, WU K L, ZHU Y, et al. Mobility increases the surface coverage of distributed sensor networks[J]. Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking, 2013, 57(11):2348-2363.
- [9] TAN L, CHENG Y C, YANG M H, et al. Priority coverage algorithm and performance simulation for node deployment in directional sensor networks[J]. Sensor Letters, 2014, 12(2): 275-280.
- [10] 鲁晓波, 阮福, 王立中. 无线传感器网络覆盖优化策略[J]. 内蒙古师大学报(自然汉文版), 2016, 45(4):480-483.
LU X B, RUAN F, WANG L Z. Coverage optimization strategy of wireless sensor networks based on improved artificial fish swarm algorithm[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2016, 45(4):480-483.
- [11] 王兴伟, 蔡凌, 黄敏, 等. 基于空间镶嵌的三维无线传感器网络 K 覆盖机制[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(3): 433-436.
WANG X W, CAI L, HUANG M, et al. Spatial tessellation



- based K coverage scheme for 3D wireless sensor network[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(3):433-436.
- [12] MINI S, UDGATA S K, SABAT S L. Sensor deployment and scheduling for target coverage problem in wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3):636-644.
- [13] MAHBOUBI H, MOEZZI K, AGHDAM A G, et al. Distributed deployment algorithms for improved coverage in a network of wireless mobile sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 10(1):163-174.
- [14] ZHANG Y, SUN X, WANG B. Efficient algorithm for K -barrier coverage based on integer linear programming[J]. China Communications, 2016, 13(7):16-23.
- [15] BAN D S, WEN J, JIANG J, et al. Constructing K -barrier coverage in mobile wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2011, 22(9):2089-2103.

[作者简介]



王骐 (1970-), 男, 博士, 湖北第二师范学院物理与机电工程学院副教授, 主要研究方向为无线传感器网络安全、嵌入式系统应用。

肖正安 (1974-), 男, 湖北第二师范学院物理与机电工程学院讲师, 主要研究方向为图像数字信号处理。

王怀兴 (1977-), 男, 湖北第二师范学院物理与机电工程学院副教授, 主要研究方向为嵌入系统应用。