混合无线传感器网络内覆盖洞的双目标修补算法

卫琳娜,秦志光

(电子科技大学 计算机科学与工程学院,成都 611731)

摘 要: 混合无线传感器网络中的覆盖洞修补通常由网络内的移动传感器移动实现。现有文献中的算法只关 注最小化所有移动传感器的移动能量消耗或最小化所有移动传感器中的最大能量消耗中的一个。为此,首先提 出一种同时实现前述两个目标的离线算法,其次提出一种双目标的覆盖洞在线修补算法。双目标离线算法基于 两个单目标算法的结合。双目标在线算法基于分层分离树上的在线匹配,能有效降低匹配开销。在线算法中感 应区域的单元分隔摆脱了算法对覆盖洞的大小或数量预知的要求。仿真结果显示,双目标的离线算法和在线算 法对覆盖洞修补中移动传感器的能量保留均具有显著效果。

关键词:混合无线传感器网络;移动传感器;移动能量消耗;覆盖洞修补

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)12-4666-05 doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.068

Bi-objective coverage hole healing in hybrid wireless sensor networks

WEI Lin-na, QIN Zhi-guang

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In hybrid wireless sensor networks, coverage holes are often healed by the moving of mobile sensors. Existing works were focused on either minimizing total moving energy cost of all the mobile sensors or minimizing the maximum moving cost of the mobile sensors. Therefore, this paper proposed an off-line bi-objective coverage hole healing algorithm along with an on-line bi-objective coverage hole healing algorithm. The off-line bi-objective algorithm was based on a combination of the two single objective algorithms. The on-line bi-objective algorithm was based on the on-line match on a hierarchically well separated tree and it effectively decreased the matching cost. The partition for cells on a sensing field eliminated the requirement of any foreknowledge of either the size or the number of coverage holes in the algorithm. Simulation results show that both the off-line and the on-line algorithm perform well on retaining mobile sensors' energy in the coverage hole healing. **Key words**: hybrid wireless sensor network; mobile sensor; moving energy cost; coverage hole healing.

0 引言

信息技术的发展使人们可以通过无线传感器对测量对象 的特性和规律进行有效获取。但在一些特定场合(如战场和 极端自然环境下)针对一定范围的监控区域而设定的无线传 感器网络可能无法通过人工铺设实现。在这种情况下需要使 用飞机等辅助机械进行传感器的非精确铺撒,因而监控区域内 的部分位置可能无法获得传感器覆盖而形成覆盖洞^[1,2]。同 时由于传感器能量有限且很难获得补充或是受到外力破坏,网 络内的传感器也可能因为失效而在监控区域内形成覆 盖洞^[3]。

早期无线传感器网络通过投放大量冗余传感器防止网络中出现覆盖洞。但随着网络规模的增大传感器的需求会急剧增加^[4],人们基于此提出在传统传感器的基础上添加移动功能,将固定传感器替换为移动传感器来构造网络的解决方法^[5]。移动传感器所组成的网络只需要少量冗余传感器,网络内的覆盖洞可以通过移动传感器间相互的位置调整获得再次覆盖。但移动传感器的成本远远高于固定传感器。一种有效、可行的方法是在一个网络中同时使用固定传感器和移动传

感器,并且使用移动传感器对覆盖洞进行修补^[6]。

对移动传感器进行分派,将其再定位至覆盖洞的过程称为 覆盖洞修补^[1]。现有的覆盖洞修补算法通常基于贪婪算法、 二分图匹配、竞价算法(bidding)或压入与重标记算法(pushrelable)^[7-9]。这些算法可以有效解决多个覆盖洞同时在网络 中出现时,移动传感器的分派冲突问题。然而这些算法的设计 目标主要是以最小的能量开销来对移动传感器进行移动。这 种目标下设计的算法可能会造成某一个移动传感器的移动开 销尤其大。当某个移动传感器的移动开销尤其大时,该传感器 的剩余能量可能无法支持它的后续工作而形成一个新的覆盖 洞。Dung 等人提出了一种新的覆盖洞修补算法^[10]。该算法 以移动中最大能量开销的移动传感器消耗最小为目标,通过对 移动传感器和覆盖洞存在的可能匹配进行排序后寻找网络中 的最大匹配实现。这种算法限制了将要修补覆盖洞的移动传 感器消耗的最大能量,有效地对一个移动传感器的剩余能量进 行了保存。然而该算法中所有移动传感器的全部能量开销 较大。

所有移动传感器能量开销最小的覆盖洞修补算法通常称 为最小开销算法;移动传感器中能量开销最大最小的覆盖洞修 补算法通常称为最大最小算法。由于算法目标限制,这两类算

收稿日期: 2012-04-26; 修回日期: 2012-06-03

作者简介:卫琳娜(1984-),女,安徽马鞍山人,博士研究生,CCF 会员,主要研究方向为协议分析、对等网络、无线传感器网络(vanilla@uestc. edu. cn);秦志光(1956-),男,教授,博士,主要研究方向为计算机开放系统与网络安全性、信息系统安全、ITS(智能交通)、电子商务. 法都只能实现单一目标。而一个较好的覆盖洞算法应该可以 在实现移动传感器总体移动开销最小的情况下保证其中开销 最大的移动传感器的剩余能量。

本文首先提出一种离线双目标覆盖洞修补算法,该算法同 时以最小开销和最大最小开销为目标对移动传感器进行分派。 然后提出一种针对这一双目标的在线算法。本文的在线算法首 先将感应区域分隔为单元,而后将所有单元嵌入一颗分层分离 树(hierarchically well separated tree,HST),最后在分层分离树上 对移动传感器和覆盖洞进行在线匹配。仿真实验结果显示,本 文的离线双目标算法在总体能量消耗和单个移动传感器能量消 耗上可以分别达到非常接近于离线单目标算法的结果;而在线 双目标算法可有效实现覆盖洞的在线修补,同时其能量消耗在 实验环境中最大不超过4倍的单目标离线算法能量消耗。

1 相关工作

文献[8]提出了一种修补多个覆盖洞的竞价算法。该算 法根据覆盖洞面积的大小进行修补,面积最大的覆盖洞首先获 得修补。该算法中,移动传感器可能产生之字形移动,浪费能 量。在上述算法的改进中^[11],每个移动传感器有一个固定的 代理为其进行逻辑移动计算。逻辑移动包含了在覆盖洞修补 过程中一个移动传感器所有可能存在的位置。只有当修补所 有覆盖洞的计算结束后,一个移动传感器才会根据它的代理给 出的最终位置进行物理移动,实现能量的有效节约。文献 [12]提出了通过移动传感器的串联移动对修复时间具有要求 的覆盖洞进行修补。算法通过在每个移动传感器上运行改进 的 Dijkstra 算法来实现。上述算法中的后两种都致力于使用 较少的能量进行覆盖洞修补。一种新的算法设计目标在文献 [10]中被提出。这种算法目标确保所有发生移动的移动传感 器中能量消耗最大的一个可以保留尽可能多的能量。文献 [13]算法的主要工作为,在使用尽可能少的能量消耗进行覆 盖洞修补时,在单个移动传感器上保留尽可能多的能量。该算 法通过首先寻找能耗最少的分配方案,再对方案中的单个配对 进行比较和交换实现。虽然该算法对双目标覆盖洞修补进行 了考虑,但由于其中比较和交换机制的限制,该算法只能应用 于覆盖洞数目较少的网络且不适用于在线模型。现有的在线 分配算法主要通过分层分离树实现。目前,在一棵分层分离树 上最小匹配开销的在线算法结果为 O(log²n) 倍的离线匹配 开销^[14]。

2 网络模型和问题定义

本文假设混合无线传感器网络中的固定传感器和移动传 感器具有相同的感应半径,这个感应半径为1m。同时所有传 感器的通信半径至少两倍于感应半径。另一个假设是所有传 感器的位置可知,sink节点可通过位置计算两个传感器间的距 离。文中的正方形感应区域上没有任何障碍物且被混合网络 中的固定传感器完全优化覆盖,网络中的移动传感器随机分布 且只负责修补由固定传感器失效形成的覆盖洞。使用覆盖洞 衡量算法^[15,16],网络中覆盖洞可被定位并估算大小。由于大 小可以被估算,一个大的覆盖洞可以被分解为多个小覆盖洞, 每个小覆盖洞可以被一个移动传感器覆盖。文中称一个小覆 盖洞为一个空位。因而一个覆盖洞的修补相当于使用移动传 感器覆盖该覆盖洞的空位。由于覆盖洞修补算法主要考虑在 分派移动传感器上花费的开销且移动传感器的移动开销远远 高于通信和计算等其他开销,因而本文使用移动传感器在覆盖 洞修补过程中的移动距离衡量覆盖洞修补的能量消耗。移动 传感器的移动距离由一个移动传感器到其被分派的空位之间 的欧几里德距离表示。

在该网络模型下,本文要解决的两个问题可分别定义为:

a)覆盖洞的离线双目标修补。已知一个由固定无线传感 器和移动无线传感器构成的混合网络,其中固定传感器完全覆 盖一个正方形的无障碍物区域,移动传感器以直接移动方式 (非串联移动)对固定传感器失效形成的覆盖洞进行修补。在 时间间隔T内,一定数量的固定传感器发生失效。寻找一种算 法,该算法分派移动传感器对覆盖洞中的空位进行修补,且算 法实现两个目标:(a)全部移动传感器对覆盖洞的修补开销最 小;(b)其中开销最大的移动传感器的开销尽可能的小。

b)覆盖洞的在线双目标修补。在时间段 T 内,每当有覆盖洞出现时,算法立即分派移动传感器对该覆盖洞中的空位进行不可逆的修补(一旦某个移动传感器被分配至某个空位后, 该分配不可撤销或改变)。该算法实现对每个覆盖洞的单独 修补,而不是离线算法中的等待所有覆盖洞产生后一次性对全体覆盖洞的修补。

3 覆盖洞的离线双目标修补

覆盖洞的离线双目标修补算法基于最大最小算法^[10]。算法中 sink 节点首先对所有覆盖洞的空位和移动传感器形成的 二分图中的边进行从大到小的排序;然后找出最大最小分配, 记录该分配中的所有传感器的开销 tc 和传感器中的最大最小 开销 mmc;再从最大最小值位置开始向边值增大的方向寻找最 大匹配,记录每个匹配中的所有传感器开销 tc_i 和移动传感器 中的最大最小开销 mmc_i;最后,比较找出所有最大匹配中 t_j = tc_i + mmc_i 的最小值。

覆盖洞的离线双目标修补算法如下:

a)将由所有覆盖洞中的空位和移动传感器形成的二分图 中的边按边值从大到小进行排序。

b) 在排好序的边中从最小边开始寻找所有空位的第一个 最大匹配。

c)记录寻找到的最大最小匹配中最大边在排序边中的位置 i 和最大最小匹配中的最大值 mmc_i,以及所有空位匹配的和 tc_i。

d) 从位置 *i* 开始向边值增大的方向寻找所有最大匹配序 并分别记录最大值和所有空位匹配的和。

e)比较 $t_j = tc_j + mmc_j$,找出 $t_{min} \circ t_{min}$ 的匹配即为算法需要 寻找的空位匹配。

该算法首先寻找到满足最大最小的单目标空位匹配,而后 列举全部最大匹配。由于全部最大匹配包含全部开销最小,因 而它们包含了所有全部移动传感器开销和单个移动传感器的 最大开销可能存在的情况。通过寻找达到两者和的最小值的 匹配,找出覆盖洞的离线双目标修补方案。假设算法内的移动 传感器个数为n,由于空位的个数不可能超过移动传感器的个 数,二分图内最多有v = 2n个点。假设二分图中边的数目为 m,则算法中的边排序部分可在 $O(m \log m)$ 时间内完成,寻找 最大最小匹配可在 $O(\sqrt{vm} \log m)$ 时间内完成,寻找所有最大 匹配可在 $O(\sqrt{vm^2})$ 时间内完成,全部算法的时间开销为 $O(\sqrt{v})$ m^2) $_{\circ}$

4 覆盖洞的在线双目标修补

由于在线环境下覆盖洞的数量、位置和大小无法预先估 计,因而离线算法不再适用。本文提出的由 sink 节点执行的 集中式覆盖洞在线双目标修补由两部分构成:a)嵌入部分将 无线传感器网络覆盖的感应区域分隔为单元,并将这些单元嵌 入一棵分层分离树;b)匹配部分为每一个新产生的覆盖洞中 的空位分配移动传感器。

4.1 感应区域嵌入

简单的贪婪算法是一种有效、可行的在线匹配算法。但贪 婪算法在二分图等模型上运行效果较差,而在分层分离树上可 以达到相对离线匹配来说 $O(\log^2 n)$ 的期望值,n 为图中节点数 目^[14]。一个普通图可以通过嵌入算法转换为一棵树^[17,18]。 通过嵌入算法对普通图中任意一对节点 u 和 v 的扭曲,u 和 v在嵌入树上的间距被拉伸为 $d_{u,v}^T$ 。其中, $d_{u,v} \leq d_{u,v}^T \leq \alpha d_{u,v}$, $d_{u,v}$ 为在普通图上 u 和 v 间的距离。

一般来说,嵌入算法将一个普通图嵌入一棵分层分离树。 一棵分层分离树上的边具有权值,且有如下三条属性:a)一棵 β-HST 上从一个叶子节点到根节点的边在每层以β倍数增大 权值;b)每一层的边权值相同,其中最低层的边权值为1;c)从 任何叶子节点开始需要通过相同的边数才能到达根节点。文 献[17]提出了一种将普通图嵌入一棵2-HST 的算法。

该算法首先将一个普通图上的所有边混乱排序,而后从中随机选取一个节点v,再从剩余点中选取距离v不大于r的点构成一个集合 C_v 。若仍有节点剩余则算法再次随机选择一个节点u构成集合 C_u ,直至图上的任何一个点都属于某一个集合 C_i 。此时,原有普通图上的点被分解为多个集合。同样的分解步骤将在每个新生成的集合内运行,直至所有新生成的集合都只包含一个原普通图上的节点。每次分解过程中,分解所用的节点选择半径r都缩短一倍。这样一个普通图可被分解为一个由分解过程中的不同层集合组成的层流族(laminar family)。使用这个层流族中原普通图上的无序节点集合作为根节点,分解最后只包含单个节点的集合作为叶子节点,分解过程中的其余集合作为中间节点,可以构成一棵2-HST。这棵2-HST 中边的权值关系是由节点选择半径r的收缩保证的。

但上述嵌入算法需要知道图上所有的节点和节点间的间距。而在对覆盖洞中的空位进行在线匹配时存在如下问题: a)覆盖洞中的空位数量难以预先获知;b)空位和移动传感器 的间距难以预先获知;c)由于算法限制,移动传感器之间或者 空位和移动传感器间的间距需要严格大于1。前两个问题是 在线匹配中的未知覆盖洞带来的。一个覆盖洞的位置和大小 只有当其产生时才能被发现,在覆盖洞没出现之前,这些数据 都是未知。第三个问题是由构造 2-HST 的算法设计带来的。 由于移动传感器随机分布的特性,这个条件难以获得保证或 改进。

针对上述问题,本文提出了感应区域嵌入。该算法对传感器网络覆盖的感应区域进行嵌入,而不是传统的传感器和覆盖洞。算法首先将感应区域分隔为边长为sm的单元,1.5<s<2;而后在每个单元内偏离单元中心 $s \in \left(0, \frac{s-1}{2}\right)$ 的位置选取一个点作为单元的代理;最后在所有单元的代理集合V上运

行 Partition(V,d)^[17],将所有单元嵌入一棵 2-HST。

在边长为 d m 的感应区域上有(d/s)² 个单元,由嵌入算 法^[17]易知,每个单元的距离在嵌入树上被拉伸的倍数期望为 O(log d)。感应区域嵌入算法输出的 2-HST 记为 T_{MAE}。

感应区域嵌入如下:

a)将感应区域分隔为边长为 s m 的单元。

b)在每个单元内选取代理节点构成集合 V。

c)计算 Partition(*V*,*d*)^[17]。

感应区域嵌入部分的时间开销较大,为 $O\left(\left(\frac{d}{s}\right)^6\right)$,但感应区域嵌入可以预先运行,一旦 T_{MAE} 生成,该嵌入树无须再进行重新运算或修改。

4.2 HST上的离线双目标算法

本节证明一棵 HST 上的离线最小开销匹配同时也是该 HST 上的离线最大最小匹配。

假设有一个分层分离树,需要对该树上叶子节点内的红 球、蓝球进行匹配,其中蓝球发起红球需求。由于分层分离树 上的权值特性,当一个算法寻找一个离线最大最小开销匹配时 只需要从底向上逐层寻找第一个最大匹配,无须对红蓝球构成 的二分图的边进行排序。当该 HST 的离线最大最小值被确定 后可能存在多种红蓝球的最大匹配。这里将证明最大最小开 销匹配包含最小开销匹配,最小开销匹配是一个最大最小开销 匹配。

本文称一棵分层分离树上从底向上的最大匹配中处于最高位置的一对红蓝球所在的层次为最高匹配层。记最小开销匹配的最高匹配层为 *l_{mi}*,最大最小开销匹配的最高匹配层为 *l_{mi}*,考虑下述三种情况:

a) $l_{mt} < l_{mn}$ 。从最大最小开销匹配算法的角度来考虑,由于在最高匹配层 l_{mt} 已经出现了红蓝球的最大匹配,因而在 l_{mt} +1层不会有新的蓝球发起红球请求, $l_{mt} < l_{mm}$ 的情况不可能出现。

b) *l_{mt}* > *l_{mm}*。从最小开销匹配算法的角度来考虑,在*l_{mm}*层 一定存在一个蓝球,该蓝球无法在 HST 上不高于 *l_{mm}*层的任何 子树上找到一个红球满足该蓝球的匹配需要。由于最大匹配 无法在 *l_{mm}*层出现,因而最大最小开销匹配的最高匹配层不可 能是 *l_{mm}*。

c) *l_{nt}* = *l_{mm}*。综合 a) b) 中的情况可知,最小开销匹配和最 大最小开销匹配的最高匹配层相同。最小开销匹配和最大最 小开销匹配中的蓝红球匹配最大值相同。由于最大最小开销 只关心匹配中的最大值而不是全部匹配的和,因而,只要达到 最大值的蓝红球匹配固定,其他蓝球可以与任意红球进行匹 配。由此,在一棵 HST 上,最大最小开销匹配包含最小开销匹 配,最小开销匹配是一个最大最小开销匹配。

所以,在一棵 HST 上寻找同时满足最小开销和最大最小 开销的匹配可以首先确定该树的 *l_{mm}*,而后在 HST 上不高于 *l_{mm}*的子树上寻找最小开销匹配。

4.3 在线单元匹配

在生成 T_{MAE}后,覆盖洞的在线修补首先对感应区域内的 每个单元进行分类。该分类要求每个传感器只位于一个单元 中。如果某个传感器位于多个单元的边界处,则该传感器将被 轻微移动以落于某一个单元。

由 HST 上的离线双目标算法可知,只要能够寻找到 HST

上的在线最小开销匹配即可达到最大最小开销的目标。本文 提出的在线单元匹配算法基于在线最小开销匹配算法^[14]。当 一个覆盖洞出现时,至少一个单元内的传感器失效,出现一个 空位。包含至少一个空位的单元称为空位单元。同空位单元 相对应的是移动传感器单元。一个移动传感器单元包含至少 一个移动传感器。如果一个单元既不包含空位也不包含移动 传感器,则该单元是一个普通单元。每个单元的类型在网络生 存周期中可能发生变化。一个普通单元在单元中节点失效后 转变为一个空位单元。一个移动传感器单元在派出所有的移 动传感器后转变为一个普通单元。一个空位单元在单元内所 有空位得到修补后转变为一个普通单元。

覆盖洞的在线修补将对空位单元和移动传感器单元进行 匹配,忽略普通单元。每当有一个空位单元产生时,运行在 *T_{MAE}*上的贪婪在线单元匹配将寻找一个移动传感器单元同这 个空位单元进行匹配。匹配后移动传感器单元中的移动传感 器将被随机分配至空位单元中的空位进行修补。

在线单元匹配:

a)寻找 T_{MAE}上离空位单元 v 最近的一层移动传感器单元 集合 M。

b)在 M 中任意选择一个移动传感器单元 m。

c)使用 m 中的移动传感器修补 v 中的空位。

d) 如果 v 中仍然存在空位, 返回步骤 a)。

当多个单元包含同一个覆盖洞,即同时有多个空位单元出 现时,覆盖洞被划分为在时刻 t,t+τ,t+2τ,...,t+(q-1)τ 出 现的一系列空位单元。其中:t为覆盖洞出现的时刻,τ是一个 极小数值,q为覆盖洞所占空位单元的个数。每一个空位被单 独输入,在线单元匹配寻找与之配对的移动传感器单元。在一 个空位单元中的空位获得修补后,该空位单元转变为一个普通 单元,与之匹配的移动传感器单元重新进行分类。若其仍包含 移动传感器,则维持其类型;否则,转变为一个不含任何移动传 感器的普通单元。

5 仿真结果

本文运行了五组仿真分别对覆盖洞的离线和在线双目标 修补算法性能进行检验。五组仿真分别考察覆盖洞的离线双 目标修补算法和离线单目标修补算法的对比,覆盖洞的离线和 在线双目标修补算法的对比,感应区域大小变化对覆盖洞在线 双目标修补造成的影响,移动传感器数量变化对覆盖洞在线双 目标修补造成的影响和覆盖洞数目变化对覆盖洞在线双目标 修补造成的影响。在五组仿真中最小开销算法和最大最小开 销算法的运行结果被用来同本文提出的算法进行对比。五组 仿真分别提取所有移动传感器的全部开销和最大开销结果。

在每组仿真的初始,所有感应区域的每个点都被一个固定 传感器覆盖,移动传感器随机分布于固定传感器间,每个传感 器的感应半径都为1m,每一个移动传感器移动1m消耗1单 位的能量。仿真开始后,离线算法内一定比例的固定传感器统 一发生失效并被修补。在线算法内同样比例的固定传感器统 一发生失效并被修补。在线算法内同样比例的固定传感器。 个接一个地发生失效,每失效一个固定传感器,在线算法分配 一个移动传感器对该固定传感器造成的覆盖洞进行修补。第 一组仿真的结果取自一个感应区域上构造 100 个随机混合传 感器网络后算法输出的平均值。后四组有在线算法参与的仿 真中,每组仿真针对同一边长的感应区域构造 k 棵分层分离 树,k等同于边长的数值。同时,仿真针对每一棵分层分离树构造100个随机混合传感器网络。

在第一组仿真内,覆盖洞的离线双目标修补和两个单目标 修补算法被应用于不同大小的感应区域。这些感应区域的边长 为10~20 m。感应区域上混合传感器网络中30%的固定传感 器发生失效。同时,传感器网络中布置有占初始固定传感器数 目30%的移动传感器。图1(a)的仿真结果显示,覆盖洞离线双 目标算法在全部开销上的结果几乎同最小开销算法的输出结果 重合;(b)的仿真结果显示,覆盖洞离线双目标的算法结果接近 于最大最小开销算法输出,并远远小于最小开销算法中的移动 传感器最大开销。图1的结果显示,覆盖洞的离线双目标修补 算法能够在保持所有移动传感器修补覆盖洞开销最小的情况 下,极大地维持单个移动传感器的剩余能量,它保留了两个单目 标算法各自的优点并弥补了不足。



第二组仿真比较覆盖洞双目标修补离线和在线算法。两 个算法分别被应用于边长为10~20 m 的感应区域。感应区 域上的混合传感器网络和第一组仿真内的传感器网络设置 相同。不同之处在于,离线双目标修补对所有失效的固定传 感器造成的覆盖洞进行一次性修补,而在线双目标修补对每 一个失效的固定传感器造成的覆盖洞进行单独修补。仿真 结果如图2所示。其中:(a)显示,在线修补算法的所有开销 不超过离线算法开销的2倍;(b)显示,在线修补算法中移动 传感器的最大开销不超过离线修补算法中移动传感器最大 开销的4倍。仿真结果显示,覆盖洞的在线双目标修补是一 种表现优秀的算法。



后三组仿真主要考察仿真环境对覆盖洞在线算法的影响。 第三组仿真中,应用覆盖洞在线双目标修补算法的感应区域边 长为10~50 m,感应区域上的混合传感器网络内的传感器数 量也随之增长。传感器网络内逐一失效的固定传感器比例不 变,为30%。移动传感器的数量也同样为初始固定传感器数 目的30%。感应区域面积最大时,网络内的失效固定传感器 可达到390 个。从图3的仿真结果可见,覆盖洞在线双目标修 补算法在移动传感器的全部开销和最大开销方面均显示了相 较于离线单目标修补算法的更优的结果。其中,在线双目标算 法在全部开销上的结果不超过1.5倍的最小开销算法;在最大 开销上的结果不超过3.75倍的最大最小开销算法。

第四组和第五组仿真分别考察移动传感器数目和覆盖洞 数目变化对覆盖洞在线双目标修补算法的影响。两组仿真均 在边长为 30 m 的感应区域上进行。第四组仿真内,移动传感 器的数目由占初始固定传感器数目的 30% 增长至 75%;固定 传感器失效率为 30%。第五组仿真内,移动传感器数目为初 始固定传感器数目的 50%;固定传感器失效率由 10% 增长至 50%。两组仿真结果(图4和5)均显示这两个参数的变化主 要影响所有移动传感器的开销,而对移动传感器的最大开销影 响较小。这是由算法内感应区域嵌入分层分离树后单元匹配 的特性所造成的。在全部开销方面,两组仿真中的在线算法均 显示了同离线单目标算法相同的趋势:移动传感器的数目越 多,一个移动传感器修补一个由固定传感器失效造成的覆盖洞 所要移动的距离越少;覆盖洞数目越多,修补覆盖洞的移动传 感器数目越多,能量开销越大。



6 结束语

本文首先分析了现有混合无线传感器网络中利用移动传 感器修补覆盖洞的算法,指出这些算法均为单目标算法,只能 满足覆盖洞修补能量消耗的单目标。然后,本文提出了使用双 目标算法分配移动传感器对覆盖洞进行修补,同时满足全部移 动传感器的能量消耗最少和最大限度保留单个移动传感器的 能量。针对覆盖洞的双目标修补,本文首先提出了一种离线算 法。覆盖洞的离线双目标修补以覆盖洞的最大最小开销修补 为基础,同时考察全部移动传感器能量开销和其中的最大开 销,对已知的覆盖洞进行一次性修补。随后,针对在线环境的 特性,本文提出了覆盖洞的在线双目标修补。覆盖洞的在线双 目标修补首先将感应区域分隔为单元,而后将单元嵌入分层分 离树,最后在嵌入的分层分离树上向包含覆盖洞的单元匹配包 含移动传感器的单元,实现移动传感器对覆盖洞的在线修补。 仿真结果显示,本文提出的离线双目标算法在覆盖洞修补中极 好地实现了单个和全部移动传感器的能量保留。同时,本文提 出的在线双目标算法也展现了优异的覆盖洞修补性能。

参考文献:

[1] GHOSH A, DAS S. Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks, mobile, wireless and sensor networks: technology, applications and future directions [M]. [S. l.]: Wiley Press, 2006: 221-256.

- WANG Y C, TSENG Y C. Intentional mobility in wireless sensor networks, wireless networks: research, technology and applications
 [M]. [S. l.]: Nova Science Publishers, 2009: 345-369.
- [3] FAN Gao-juan, WANG Ru-chuan, HUANG Hai-ping, et al. Coverage guaranteed sensor node deployment strategies for wireless sensor networks[J]. Sensors, 2010, 10(3): 2064-2087.
- [4] WANG Wei, SRINIVASAN V, CHUA K C. Trade-offs between mobility and density for coverage in wireless sensor networks [C]// Proc of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. 2007: 39-50.
- [5] COLES M, AZZI D, HAYNES B. A self-healing mobile wireless sensor network using predictive reasoning [J]. Sensor Review, 2008, 28(4): 326-333.
- [6] SHEN Zhong, JIANG Hai, WANG Yan-ling, et al. A generic framework for optimal mobile sensor redeployment [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 4043-4057.
- [7] AHMED N, KANHERE S, JHA S. The holes problem in wireless sensor networks: a survey[J]. Mobile Computing and Communications Review,2005,9(2): 4-18.
- [8] WANG Gui-ling, CAO Guo-hong, PORTA T. A bidding protocol for deploy mobile sensors[C]//Proc of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols. 2003:315-324.
- [9] ZAVLANOS M, SEPESIVTSET L, PAPPAS G. A distributed auction algorithm for the assignment problem [C]//Proc of the 47th IEEE Conference on Decision and Control. 2008; 1212-1217.
- [10] NGUYEN D T, NGUYEN N P, THAI M T, et al. An optimal algorithm for coverage hole healing in hybrid sensor networks [C]//Proc of Wireless Communications and Mobile Computing Conference. 2011: 494-499.
- [11] WANG Gui-ling, CAO Guo-hong, PORTA T. Proxy-based sensor deployment for mobile sensor networks [C]//Proc of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. 2004: 493-502.
- [12] WANG Gui-ling, CAO Guo-hong, PORTA T. Sensor relocation in mobile sensor networks [C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2005: 2302-2312.
- [13] WANG Y C, PENG W C, TSENG Y C. Energy-balanced dispatch of mobile sensors in a hybrid wireless sensor network [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(12): 1836-1850.
- [14] BANSAL N, BUCHBINDER N, GUPTA A, et al. An O(log 2k)competitive algorithm for metric bipartite matching [C]//Proc of the 15th Annual European Conference on Algorithms. 2007: 522-533.
- [15] AHMED N, KANHERE S, JHA S. A pragmatic approach to area coverage in hybrid wireless sensor networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2011, 11(1): 23-45.
- [16] LI Xiao-yun, HUNTER D K, YANG Kun. Distributed coordinatefree hole detection and recovery [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications Workshops. 2008: 189-194.
- [17] FAKCHAROENPHOL J, RAO S, TALWAR K. A tight bound on approximating arbitrary metrics by tree metrics [C]//Proc of the 35th Annual ACM Symposium on Theory of Computing. 2003: 448-455.
- [18] CALINESCU G, KARLO H, RABANI Y. Approximation algorithms for the 0-extension problem [J]. SIAM Journal on Computing, 2005,34(2): 358-372.