一种混合无线传感器网络内覆盖洞修补的分布式启发算法*

卫琳娜[1]，张玉宏[2]，秦志光[1]
（1. 电子科技大学 计算机科学与工程学院，成都 611731；2. 河南工业大学 信息科学与工程学院，郑州 450001）

摘　要： 首先对最小化最大移动开销移动传感器分布式算法设计进行了分析，并指出在分布式条件下难以对此类算法中的输出分派移动传感器的最大开销进行限制，随后提出了一种分布式启发算法。该算法将移动传感器和覆盖洞视为节点，在节点和节点的邻居间通过有限数量消息实现匹配。仿真结果显示，算法可实现最高达到85%的覆盖洞修补率以及较低的移动传感器最大移动开销，使其更能适用于实际无线传感器网络环境。

关键词： 无线传感器网络；分布式算法；移动传感器重定位；覆盖洞修补
中图分类号： TP393　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1001-3695(2013)03-0861-05
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.03.056

Heuristic distributed coverage hole healing algorithm in hybrid wireless sensor networks

WEI Lin-na[1], ZHANG Yu-hong[2], QIN Zhi-guang[1]
(1. *School of Computer Science & Engineering*, *University of Electronic Science & Technology of China*, *Chengdu* 611731, *China*; 2. *College of Information Science & Technology*, *Henan University of Technology*, *Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: Accordingly, this paper first conducted a detailed analysis of the design for a distribute algorithm, then proposed a new distributed heuristic algorithm for healing coverage holes. This distributed algorithm treated mobile sensors and coverage holes as nodes, and these mobile sensors were relocated by limited messages send among nodes and their individual neighbors. Simulation results show that the distributed heuristic algorithm can heal the coverage holes under a high ratio up to 85% at an acceptable low maximum movement cost of the mobile sensors, resulting in it be a more applicable algorithm in real-life environment of wireless sensor networks.

Key words: wireless sensor network; distributed algorithm; mobile sensor's relocation; coverage hole

0　引言

传感器是一种能够对物理刺激作出响应并进行数据化表达的设备[1]。信息化技术的发展使得无线传感器网络在国防检查、环境监测和工业诊断等众多领域发挥了巨大作用。早期的无线传感器网络主要构建在友好环境之中，且其规模较小，因此便于实现无线传感器的最优确定性部署[2]。然而随着网络规模的增大和应用环境的扩大，无线传感器通常通过机械辅助方式来实施部署（如利用飞机铺撒[3]等）。这种无线传感器的非精确分布容易使得预定的监控区域上出现覆盖空白区域，从而形成覆盖洞[4]。此外，监控对象的活动、气温环境的变化、传感器过度使用等也容易造成传感器失效，从而也形成覆盖洞[5]。无线传感器网络的服务要求网络中不存在或只有极少的覆盖洞[6]。在覆盖洞修补的早期研究中，科研人员主要通过激活网络中铺设的固定冗余传感器来进行填补。然而，这种方法需要大量的冗余传感器支持，并且随着网络规模的增大，所需冗余传感器的数量快速增长[7]。为了降低冗余传感器的使用数量，一种新型的覆盖洞修补方法是将移动传感器[8]作为无线传感器网络中的冗余传感器，通过分派算法将移动传感器再定位至覆盖洞，达到覆盖洞的修补目的。

这种使用移动传感器进行覆盖洞修补的网络由于包含两种传感器（固定和移动），通常称之为混合无线传感器网络[9]。研究人员提出了多种在混合无线传感器网络中对覆盖洞进行修补的移动传感器分派算法[10~14]。由于移动传感器进行物理移动消耗的能量远远高于通信和计算开销[15]，因此移动传感器分派算法通常只关注移动传感器可用于移动的剩余能量和开销。按照算法是否由网络中的 sink 节点执行，算法可分为集中式和分布式算法两类。按照算法内移动传感器的移动开销目标，算法可分为最小全部开销和最小化最大开销算法。

根据现有文献，最小全部开销和最小化最大开销都存在相应的集中式最优算法[2,16]。然而集中式算法存在单点失效问题，当 sink 节点失效时算法无法运行，因而覆盖洞难以得到修补。使用 Preis 的算法[17]可实现分布式的最小全部开销覆盖洞修补，但最小全部开销算法中移动传感器的最大移动开销较大，容易剥夺单个移动传感器的剩余能量。Nguyen 等人[10]提

收稿日期： 2012-07-20；**修回日期：** 2012-08-23　　**基金项目：** 国家自然科学基金资助项目(61133016)

作者简介： 卫琳娜(1984-)，女，安徽马鞍山人，博士，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)；张玉宏(1980-)，男，河南罗山人，博士，主要研究方向为信息安全、高性能计算、无线传感器网络；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.

出了一种分布式的最小化最大开销覆盖修补算法。但该算法需要 sink 节点收集移动传感器信息,因此,它不是一种真正的分布式算法。同时,该算法对传感器的方位也有严格要求。因此,为了传感器网络不受单点失效问题的影响,并最大限度保留单个移动传感器的剩余能量,网络需要使用一种分布式最小化最大移动开销算法对实现覆盖洞修补的移动传感器进行分派。

1 相关工作

文献[11]提出了分别基于竞争和基于模式的两种移动传感器分派算法。在基于竞争的算法中,每个移动传感器需要维护一张列表,该列表记录整个网络中企图修补覆盖洞的其他移动传感器的标志。移动传感器在相互竞争覆盖洞修补任务的过程中不断更新该列表。基于模式的算法中每个移动传感器只需维护一张保存部分覆盖洞位置的列表。文献[12]提出了一种基于网格模型的覆盖洞等级修补算法。该算法对覆盖洞进行等级划分,并按级别对覆盖洞进行修补。上述算法虽然能够实现覆盖洞修补但没有考察移动传感器在再定位过程中的移动开销。文献[13]使用了集中式二分匹配法,考察移动传感器至覆盖洞再定位移动过程中的最小全部移动开销。文献[6]利用压入与重标记法实现了分布式的最小全部移动开销移动传感器分派。但这些算法并未考察移动传感器最小的最大移动开销。文献[10]中作者对集中式的移动传感器最小化最大移动开销进行了分析,并给出了一种分格的分布式启发算法。然而该分布式算法需要集中式算法输出的移动传感器列表,只能在集中式算法运行后对网络进行维护;同时该分布式算法需要在每个格中选举一个计算能力强大的头节点,且对传感器的方位有严格要求。

2 网络模型和问题定义

本文假设存在一个初始时由固定传感器完全覆盖的混合无线传感器网络,移动传感器为网络中的冗余传感器。当混合传感器网络中的固定传感器发生失效后,移动传感器被分派算法再定位至失效固定传感器的位置实现覆盖洞修补。网络中的传感器使用布尔磁盘覆盖模型,所有传感器分布在一个二维无障碍物平面上,且每个传感器的位置已知[2]。由于覆盖洞由固定传感器失效形成,因而通过假设每个无线传感器都具有唯一标志和坐标的网络中易知覆盖洞的位置。此外,由于无线传感器网络中的覆盖洞形状通常长而狭窄[14],因此,当一个固定传感器失效后可以使用周围的活跃固定传感器作为它的代理。代理在分布式算法中负责为失效传感器同其他传感器进行通信。此外,本文假设所有移动传感器移动一米距离发生的移动开销相同。本文需要解决的问题可定义为最小化最大开销分布式移动传感器分派:已知一个混合无线传感器网络,以及其中失效固定传感器和移动传感器的标志和坐标;每个传感器的最大通信半径为 D m;通过集中式算法已知最优最小化最大移动开销分派的移动传感器最大移动开销为 C;给定数值 β ($\beta>1$);找到一种分布式算法,使得算法输出分派中移动传感器的最大移动开销 $C'<\beta C$。

3 覆盖洞的分布式修补

最小化最大开销移动传感器分派需要解决的问题可形式化描述为

$$\begin{aligned}&\text{minimize}: C\\&\text{subject to}: \sum_{i=1}^{p} y_{ij}=1 \qquad j=1,\cdots,q\\&\sum_{j=1}^{q} w_{ij}y_{ij}\leqslant C \qquad i=1,\cdots,p\\&y_{ij}\in\{0,1\},\forall i,j\end{aligned} \tag{1}$$

在集中式算法中,C 可通过移动传感器和覆盖洞二分图内边顺序排序后进行二分检索发现[10]。而当无线传感器的通信距离较小时,分布式排序是一个 NP 问题[18]。假设现有一个无线传感器数量很少的混合传感器网络,该网络中移动传感器和覆盖洞可分别视为移动传感器节点和覆盖洞节点。若一个移动传感器和一个覆盖洞可发生通信(通过覆盖洞的代理),则在二者之间添加连线,构成一个有权图 G_{sg}。在有权图 G_{sg} 上,一条边的权值为其一端的移动传感器移动至另一端的覆盖洞的移动开销。

假设图 G_{sg} 只包括两对移动传感器 m_1、m_2 及覆盖洞 h_1、h_2,移动传感器和覆盖洞之间的移动关系如图 1 所示。移动传感器 m_1 修补覆盖洞 h_1 的移动开销为 b;若修补 h_2,则移动开销为 c。移动传感器 m_2 修补覆盖洞 h_1 的开销为 a;若修补 h_2,则移动开销为 d。当 $\max\{a,c\}<\max\{b,d\}$ 时,基于覆盖洞修补的分布式移动传感器分派算法应按图 1 中的实线方式对移动传感器进行分派,否则应按虚线方式分派。

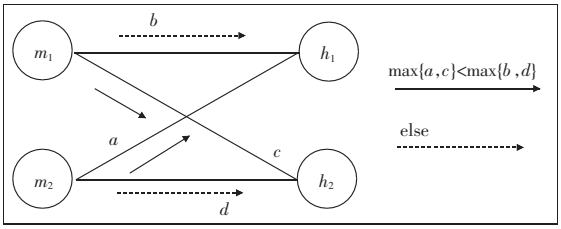


图 1 移动传感器选择

由于分布式算法目标为最小化移动传感器的最大移动开销,因此图 G_{sg} 上的一个节点(一个移动传感器或一个覆盖洞)需要在进行单独运算的情况下选择权值较小的边的另一端节点进行匹配,且不提高相邻节点选择匹配的边的权值。在不知道相邻节点的有权边的情况,节点需要通过通信协调完成这一任务。通过节点通信,至少两个同类节点(两个节点同为移动传感器或同为覆盖洞)将各自匹配边的权值降低或不提高。根据这一特点,可在分布式算法中只使用一类节点进行主动的匹配选择。由于混合传感器网络中移动传感器的数量通常不少于覆盖洞数量,这里使用覆盖洞发起对移动传感器的选择。以图 1 为例进行分布式算法流程分析。假设 $d<c<a<b$,覆盖洞 h_1 必须选择移动传感器 m_2 进行匹配,从而降低这两对移动传感器和覆盖洞的分配中移动传感器的最大移动开销。将诸如 h_1 的这类覆盖洞记为特权空位。一个特权空位对移动传感器的选择定义了一组移动传感器在覆盖洞修补中的最大移动开销。称特权覆盖洞选择的能够降低最大移动开销的移动传感器为关键移动传感器。一个普通覆盖洞对特权覆盖洞的关键移动传感器的抢夺可能会提高所有覆盖洞修补中移动传感器的最大移动开销。例如,图 1 中覆盖洞 h_2 占用移动传感器 m_2,则迫使覆盖洞 h_1 选择移动传感器 m_1,将这组覆盖洞修补中移动传感器的最大移动开销提高至 b。因此,为了确保特权覆盖洞能够选择到关键移动传感器,假设通过节点间的通信,特权覆盖洞能够以 ε($\varepsilon\to 0$)s 的时间提前其他覆盖洞选择移动传感器。

现在扩大图 G_{sg} 的规模,引入更多的移动传感器和覆盖洞

作为图 G_{sg}上节点。在以一个节点 v 为中心、半径为 D 的区域中存在$|N(v)|$个节点,$N(v)$为节点 v 在这个范围内查找到的同它的类型不相同的节点集合。下面在新的连通图 G_{sg}中寻找移动传感器和覆盖洞的匹配。易知图 G_{sg}中只有一个特权覆盖洞。特权覆盖洞 h_p 选择了它的关键移动传感器 m_p 后,在图 G_{sg}上删除同节点 h_p 以及同节点 m_p 相连的边构成图 G'_{sg}。在图 G'_{sg}上,一个移动传感器节点 m 可被$|N(m)|$个覆盖洞节点选择。对一个特定移动传感器 m^*,它的$|N(m^*)|$个覆盖洞节点中存在一个节点 h^* 是图 G'_{sg}的特权覆盖洞。特权覆盖洞 h^* 对 m^* 的选择相对覆盖洞 h_p 对移动传感器的选择落后 ε s,而相对于其他覆盖洞提前 ε s,称 h^* 是 m^* 在范围 D 内的主导。图 G'_{sg}上可能有多个移动传感器拥有主导。这些主导对各自关键移动传感器的选择造成的结果相同,即没有一个会提高图 G_{sg} 中移动传感器的最大移动开销。当图 G'_{sg}中有多个主导时,可以 γ s 的时间区分各个主导对移动传感器的选择,$\gamma << \varepsilon$。随后,在图 G'_{sg}上删除同主导以及同主导选择的移动传感器相连的边,构成图 G''_{sg}。在图 G''_{sg}上,节点 m^* 在范围 D 内的$|N(m^*)|-1$ 个剩余覆盖洞可能同时位于其他移动传感器的范围内,节点 $u \in N(m^*) \backslash h^*$ 可能成为其他移动传感器的主导。这样,随着图 G_{sg}上边的删除,所有覆盖洞以顺序方式成为特权覆盖洞,进行各自相应的关键移动传感器选取。当图 G_{sg}中所有同覆盖洞相连的边被完全删除后,这些覆盖洞完成移动传感器选择,实现修补图 G_{sg} 中覆盖洞的最小化最大开销移动传感器分派。

假设已知图 G_{sg}上最小化最大开销移动传感器分派中移动传感器的最大开销为 R_{sg}。现使用图 G_{sg} 中的覆盖洞构造有向图 G^o_{sg}。图 G^o_{sg}的所有节点为图 G_{sg}上的覆盖洞节点。当图 G_{sg} 中覆盖洞 h_i 先于覆盖洞 h_j 选择移动传感器时,图 G^o_{sg}上存在一条由 h_i 开始、至 h_j 结束的有向边。有向边h_ih_j的权值 g_i 定义为修补覆盖洞 h_i 的移动传感器 m_i 的移动开销 c_i 与 R_{sg}之间的差值,$g_i = |R_{sg} - c_i|$。容易发现,在修补图 G_{sg}中覆盖洞的最小化最大开销移动传感器分派中,所有覆盖洞以顺序 s 成为特权覆盖洞,据此依次选择关键移动传感器。因此,在图 G^o_{sg}中存在一条有向通路,通路上边的最大权值为 $g_{\max} = |R_{sg} - c_{\max}|$。以 $g_{\max}$作为该通路的权值 pl(按照通路选择顺序的分派中移动传感器的最大移动开销同 R_{sg} 的差值),则有 $pl_{\min} = \min\{g_{\max}\}$。遵循通路顺序的覆盖洞移动传感器选择是图 G_{sg}的最小化最大开销移动传感器分派,任何其他 $pl' > pl_{\min} = \min\{g_{\max}\}$。否则,覆盖洞应按权值为 pl'的有向通路的顺序 s'进行关键移动传感器选择。

通过以图 G_{sg}为例的分析可知,假设集中式算法输出的最大移动开销已知为 R,分布式算法设计的关键在于找到一条有向通路。该通路上所有覆盖洞按顺序进行移动传感器选择,并且它的有向有权边的最大值 $g_{\max}$最小。

根据这一思路,可以根据无线传感器网络构造选择有向有权图 G_s。图 G_s 上节点集合 V 包含的元素是网络中失效固定传感器形成的覆盖洞。若覆盖洞 h_i 能够在覆盖洞 h_j 之前成为特权覆盖洞选择关键移动传感器 m_i,则在图 G_s 上添加一条从节点 h_i 至节点 h_j 的有向边,边的权值为 h_i 选择的移动传感器的移动开销 c_i 同 R 的差值,$g_i = |R - c_i|$。当选择图 G_s 是一个非连通图时,在 G_s 上来自两个不同簇的任何一对节点 h_i 和 h_j 之间添加两条有向边h_ih_j和h_jh_i。边h_ih_j和h_jh_i为跳跃边,对覆盖洞的移动传感器选择不发生影响。因此,设置 h_ih_j 的权值等于 g_i;同理,设置h_jh_i的权值为 g_j。随后,根据 $g_{\max}$大于任何其他移动传感器开销同 R 的差值 g 的特点对图 G_s 上有向边的权值进行调整。在图 G_s 上,从节点 h_i 开始经过节点 h_k 至节点 h_j 的通路上,如果h_ih_k的权值不小于 h_kh_j 的权值,则 h_ih_k 保留权值 g_i。否则,由于这三个节点的选择构成的一组移动传感器的最大移动开销被提高,h_ih_k 的权值调整为 h_kh_j 的权值大小。经过权值调整的有向图 G_s 为 G'_s。在由移动传感器和覆盖洞构成的图 G 中,如果存在一个分布式算法能够找出输出可控的最小化最大开销移动传感器分派,则在有向图 G'_s 上能够找到一条最小哈密尔顿路径。

为了发现这条最小哈密尔顿路径,引入一个拥有 n 个节点的非循环完全有向图 G_{atsp}。设置图 G_{atsp}中有向边的权值为 0。随后在图 G_{atsp}上添加图 G'_s 中的节点和有向有权边构成图 G'_{atsp}。对图 G'_s 上的任意节点 v 和 u,如果图 G'_s 中不存在 vu 或 uv,则在图 G'_{atsp}上添加边 vu 和 uv,设置其权值为 ∞。在任意一对来自图 G_{atsp}的节点 v'和来自图 G'_s 的节点 u'之间添加有向边 $v'u'$和 $u'v'$,设置权值为 0。上述过程获得一个拥有$n + |V|$个节点的非循环完全有向图 G'_{atsp}。由于在图 G'_{atsp}上难以发现一条最小哈密尔顿路径,因此,难以在图 G'_s 上找到按顺序 s 进行的覆盖洞移动传感器选择,难以确定最小的 $g_{\max}$。因而,对任意一个试图解决最小化最大开销移动传感器分派的分布式算法来说,$\min\{g_{\max}\}$难以确定。在给定 β 时,难以找到一种分布式算法实现 $C' < \beta C$。

4　分布式启发算法

Hoepman 等人提出了一种最小匹配开销的分布式算法[19],该算法输出不大于两倍的集中式算法的开销。由于算法可由单独节点执行,且在每个节点上尽力降低匹配开销。因此,基于 Hoepman 的算法,本文提出一种实现分布式最小化最大开销覆盖洞修补任务的移动传感器分派启发算法。该算法被称为 MMH(最小化最大开销的启发式)算法。

MMH 算法执行之前,每个节点 v 首先将位于其通信半径 D m 以内且类型不同的节点记入邻居集合 $N(v)$。一个移动传感器 v 的集合 $N(v)$包含以 v 为中心、半径为 D m 范围内的覆盖洞。移动传感器 v 能够移动至 $N(v)$中任何一个覆盖洞进行修补。同理,一个失效固定传感器 v 的集合 $N(v)$内的所有节点都是移动传感器。集合 $N(v)$中的任意一个移动传感器能够修补固定传感器 v 失效形成的覆盖洞。因此,一个节点 v 可能同集合 $N(v)$中的任何一个节点进行匹配。将节点 v 同集合 $N(v)$中的每一个节点使用有权边连接,获得一个二分图。该二分图上任意一边的权值为这条边一端的移动传感器移动至另一端的覆盖洞需要耗费的移动开销。

在 MMH 算法中,一个移动传感器或一个失效固定传感器(的代理)作为一个节点进行匹配选择,只有当两个节点相互选择对方作为匹配时,匹配才能建立。

在 MMH 算法的运行过程中,每个节点可能处于三种状态:匹配选择、消息接收和匹配建立。当一个节点开始运行分布式最小化最大开销移动传感器分派启发算法时,它首先进入匹配选择状态。在匹配选择状态下,节点 v 从集合 $N(v)$中选择节点 c 作为潜在匹配,连接 v 和潜在匹配的边的权值应小于连接 v 和集合 $N(v)$中任何其他一个节点的边的权值。节点 v

向节点 c 发送匹配请求〈request〉,而后进入消息接收状态。在消息接收状态下,节点 v 接收来自其他节点的消息。如果节点 v 收到来自节点 c 的匹配请求〈request〉,则进入匹配建立状态。当节点 v 收到的消息为〈drop〉,如果发送〈drop〉消息的为节点 u,则 v 在集合 $N(v)$ 中删除 u;如果发送〈drop〉消息的节点为 c,则节点 v 的潜在匹配已经被其他节点占用,节点 v 在集合 $N(v)$ 中删除 c 后重新进入匹配选择状态。在节点 v 进入匹配状态后,它向集合 $N(v)$ 中除匹配节点 c 以外的其他节点发送不可用消息〈drop〉,表明自身已经获得匹配。在发送〈drop〉消息后,如果发送节点 v 是一个覆盖洞则只需等待移动传感器的到达;如果节点 v 是一个移动传感器,则移动传感器向它的匹配位置移动并退出算法。

分布式最小化最大开销移动传感器分派启发算法如下:

匹配选择:

a)从邻居集合 $N(v)$ 中选择连接最小权值有权边的邻居 c。

b)向 c 发送匹配建立请求〈request〉。

c)进入消息接收状态。

消息接收:

a)如果收到来自 c 的匹配建立请求〈request〉,进入匹配建立状态。

b)如果收到来自 c 的不可用消息〈drop〉,从 $N(v)$ 中删除 c,进入选择状态。

c)如果收到来自 u 的不可用消息〈drop〉,从 $N(v)$ 中删除 u。

d)进入选择状态。

匹配建立:

a)向 $N(v)\backslash c$ 中的节点发送不可用消息〈drop〉。

b)如果 v 是一个移动传感器,则 v 移动至它的匹配 c 的位置。

c)退出算法。

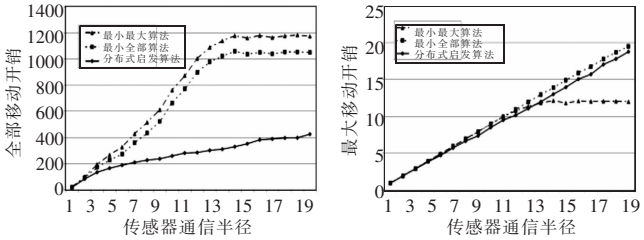
当无线传感器的通信半径长度 D 有限时,由于节点 v 的邻居集合 $N(v)$ 中节点数目受限,$N(v)$ 中的节点可能在 v 找到匹配前被全部占用。因此,当一个节点 v 的邻居集合 $N(v)=\varnothing$ 时,v 也同样退出算法。在该算法中,消息的数量只同有权边的数量有关,这些有权边连接一个节点和其邻居集合中的元素。每个节点 v 最多对邻居集合 $N(v)$ 中的一个节点 u 发送一次匹配请求或一次不可用消息。同时,每个节点 u 最多接收来自节点 v 的一次匹配请求或不可用消息。因此,算法最多产生 $2|E|$ 条消息,$|E|$ 是所有节点 V 构成的二分图上边的数量。

5　仿真结果

本文三组仿真实验对分布式最小化最大开销移动传感器分派启发算法的性能进行了检验。三组仿真中采用移动传感器最小全部移动开销的最优算法(以下及仿真结果记为最小全部算法)和最小化最大移动开销的最优算法(以下及仿真结果记为最小化最大算法)同 MMH 算法(以下及仿真结果记为分布式启发算法)的全部移动开销和最大移动开销结果作对比。在每组仿真实验中,监控区域在初始化状态下被固定传感器完全覆盖,随后,一定数量的固定传感器发生失效。移动传感器随机分布于网络中。每个移动传感器移动一米距离的移动开销为一单元。每组仿真实验结果来自于一百个随机网络上算法运行输出的平均值。

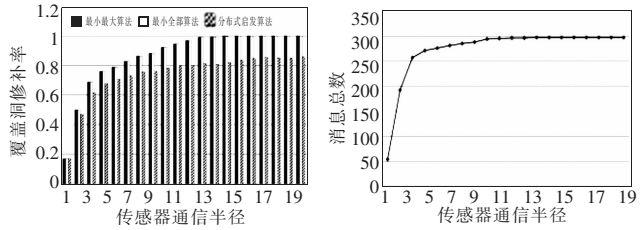
在第一组仿真实验内,混合无线传感器网络的监控区域被固定为 30 m×30 m 的正方形。固定传感器中有 30% 的传感器发生失效。网络内分布的移动传感器数量和失效固定传感器的数量相同。无线传感器的通信半径从 1 m 增长至 20 m。这组仿真实验除了考察算法输出分派的移动传感器全部移动开销和最大移动开销,还考察了三个算法的覆盖洞(失效固定传感器)修补率和分布式启发算法在所有节点上运行的总轮数。

从实验结果图 2(b)可知,分布式启发算法对移动传感器的分派结果在移动传感器最大移动开销方面差于最小化最大算法,但优于最小全部算法。这一结果同本文第 3 章的理论分析相符。分布式启发算法虽然无法达到最小化最大移动传感器开销的最优结果,然而,对单个移动传感器剩余能量的保留进行了提高。图 2(a)显示,分布式启发算法对移动传感器全部移动开销控制结果较好。但这一结果是由分布式启发算法的较低覆盖洞修补率造成(如图 3(a)所示)。传感器的有限通信半径使得一个节点的匹配选择有限,有的节点可能无法拥有匹配。当传感器通信半径足够大时(两个集中式算法可以达到 100% 的覆盖洞修补率)时,分布式启发算法维持 85% 左右的覆盖洞修补率。部分节点由于单个节点选择的不对称,使得节点 v 上运行分布式启发算法的次数达到 $N(v)$ 而被迫退出算法,从而造成有些覆盖洞无法获得修补。这个缺点可以通过增大分布式启发算法在每个节点上运行轮数的阈值进行改进。由图 3(b)可知,当传感器的通信半径达到 10 m 时,分布式启发算法在所有节点上运行的总轮数基本维持不变,而此时两个集中式算法还未达到 100% 的覆盖洞修补率。当无线传感器的通信半径足够大时,一个节点的邻居数量 $|N(v)|$ 不变,形成分布式启发算法在所有节点上运行的总轮数不变。



(a) 全部开销　(b) 最大开销

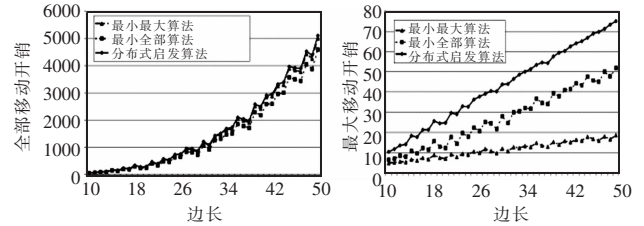
图 2　传感器通信半径变化时移动传感器分派中的开销



(a) 覆盖洞的修补率　(b) 分布式启发算法的轮数

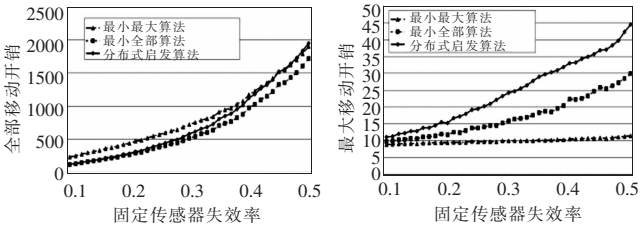
图 3　传感器通信半径变化的影响

后两组仿真(仿真结果为图 4 和 5)考察网络环境变化对算法的影响。由第一组仿真结果易知,在移动传感器数量有限条件下分布式启发算法的覆盖洞修补率受限,难以达到 100%。此外,分布式启发算法在所有节点上运行的总轮数只受节点邻居数量 $|N(v)|$ 的影响。由于篇幅有限,这里省略这两组仿真中分布式启发算法的覆盖洞修补率和算法总轮数结果。



(a) 全部开销　(b) 最大开销

图 4　感应区域大小变化时移动传感器分派中的开销



(a) 全部开销　(b) 最大开销

图 5　覆盖洞数量变化时移动传感器分派中的开销

在第二组仿真中,无线混合传感器网络正方形监控区域的边长从 10 m 增长至 50 m,网络内传感器的通信半径随之增长使得两种集中式算法能够实现 100% 的覆盖洞修补率。随着监控区域面积的增大,网络规模随之扩大,仿真仍然设置固定传感器的失效率为 30%。移动传感器的数量依然同失效固定传感器的数量相同。仿真结果显示,分布式启发算法和最小化最大算法的输出曲线斜率恒定,分布式启发算法输出分派中移动传感器的最大移动开销最大 4 倍于最小化最大算法的移动传感器分派最大移动开销(图 4(b)),是一个较好的常数比例。同时,仿真结果还显示本文的分布式启发算法在失效固定传感器比率固定时,不受网络规模变化的影响。

在第三组仿真中,固定监控区域为 30 m×30 m 的正方形,同时扩大网络内移动传感器的数量为 50% 的初始固定传感器数目。这组仿真考察网络内失效固定传感器数量变化对算法的影响,网络的固定传感器失效率从 0.1 增长至 0.5。三种算法的仿真结果均显示,网络内失效固定传感器数量越多,输出分派的移动传感器全部移动开销越大(图 5(a))。而在移动传感器最大移动开销方面,最小化最大算法受到失效固定传感器数量的影响很少;分布式启发算法受到的影响最大。网络中存在大量覆盖洞时,分布式启发算法能够选择到的最小移动开销减少,大部分节点被迫以更高的开销达到节点匹配。在这组仿真结果中,分布式启发算法的输出分派中在失效固定传感器数量最多时,移动传感器的最大移动开销最大 4.5 倍于最小化最大算法的移动传感器分派最大移动开销(图 5(b)),依然维持常数比例。

由三组仿真结果可知,在混合传感器网络规模不大(小于 30 m×30 m)、失效固定传感器不多(小于 50%)并且有足够移动传感器的网络中,本文的分布式最小化最大开销移动传感器分派启发算法是一种有效的分布式算法。当混合无线传感器网络中的 sink 节点发生失效,而网络中存在覆盖洞需要获得修补时,本文提出算法的最大开销同 sink 节点存在时运行最优算法的最大开销比值不超过 5。即在上述网络条件下,当给定 $\beta=5$ 时,可采用本文提出的算法对移动传感器进行分派,实现分布式的最小化最大移动开销的覆盖洞修补。

6　结束语

本文首先介绍了混合无线传感器网络和这类传感器网络中利用移动传感器对覆盖洞进行修补的移动传感器分派算法分类。其次,针对集中式最小化最大移动开销的移动传感器分派算法的缺点,本文提出了一种分布式启发算法。在提出算法前,本文通过分析首先指出难以找到一种能够对输出分派中移动传感器最大移动开销进行控制的分布式算法。移动传感器分派中,分布式算法输出的最大移动开销和集中式最优算法输出的最大移动开销的比例难以获得确保。本文提出的分布式启发算法可在每个移动传感器或覆盖洞(的代理)构成的节点上使用有限数量的消息实现。仿真结果显示,在规模较小同时覆盖洞不多的混合无线传感器网络中,使用本文提出的分布式算法能有效修补网络中的覆盖洞,同时移动传感器分派过程中产生的最大移动开销可得到有效控制,从而使得算法更能适用于实际无线传感器网络环境。

参考文献:

[1] WILSON J. Sensor technology handbook[M]. [S. l.]: Elseiver, 2005.

[2] WANG B. Coverage problems in sensor networks: a survey[J]. ACM Computing Surveys, 2011, 43(4): 1-32.

[3] SONG W Z, HUANG R J, LAHUSEN R. Air-dropped sensor network for real-time high-fidelity volcano monitoring[C]//Proc of MobiSys. 2009: 305-318.

[4] FAN G, WANG R, HUANG H, *et al*. Coverage guaranteed sensor node deployment strategies for wireless sensor networks[J]. Sensors, 2010, 10(3): 2064-2087.

[5] CHEN A, LAI H T, XUAN D. Measuring and guaranteeing quality of barrier coverage for general belts with wireless sensors[J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2009, 6(1): 28-58.

[6] ANASTASI G, CONTI M, FRANCESC O, *et al*. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey[J]. Ad hoc Networks, 2009, 7(3): 537-568.

[7] WANG W, SRINIVASAN V, CHUA K. 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.

[8] ZHU K Y. Dynamic deployment in Ad hoc networks accommodating uncertain transmission range[C]//Proc of MobiWac. 2011: 109-116.

[9] SHEN Z, JIANG H, WANG Y, *et al*. A generic framework for optimal mobile sensor redeployment [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 4043-4057.

[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 Y C, TSENG Y C. Distributed deployment schemes for mobile wireless sensor networks to ensure multilevel coverage[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(9): 1280-1294.

[12] JIAND Z, WU J. A hierarchical structure based coverage repair in wireless sensor networks [C]//Proc of the 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2008: 1-6.

[13] YANG S, LI M, WU J. Scan-based movement-assisted sensor deployment methods in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(8): 1108-1121.

[14] BALISTER P, ZHENG Z, KUMAR S, *et al*. Trap coverage: allowing coverage holes in bounded diameter in wireless sensor networks[C]// Proc of IEEE INFOCOM. 2009: 136-144.

[15] SIBILEY G, RAHIMI M, SUKHATME G. Robomote: a tiny mobile robot platform for large-scale Ad hoc sensor networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2002: 1143-1148.

[16] BERMAN O, EINAV D, HANDLER G. The constrained bottleneck problem in networks[J]. Operations Research, 1990, 38(1): 178-181.

[17] PREIS R. Linear time 1/2-approximation algorithm for maximum weighted matching in general graphs[C]//Proc of the 16th Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science. 1999: 259-269.

[18] GHOSH A, MOHAN B. A distributed sorting framework for Ad hoc wireless sensor networks[R]. Bangalore: Runner's-up Young I. T. Professionals Trophy from Computer Society of India, 2004.

[19] MANNE F, BISSELING R. A parallel approximation algorithm for the weighted maximum matching problem[C]//Proc of the 7th International Conference on Parallel Processing and Applied Mathematics. 2007: 708-717.