

基于 WSN 的智能雷场通道检测算法研究

郭 颖 翟岩龙

(北京理工大学计算机学院 北京 100081)

摘 要 以网络化、智能化为特征的第四代智能雷场系统是现代地雷发展的必然趋势。美国等发达国家 10 年前就开展了网络化智能雷场的研制工作,并已经初步列装部队。针对基于无线传感器网络的智能雷场的通道检测问题进行研究,建立了雷场网络化模型,定义了雷场内部通道和边缘通道的概念,并证明雷场中存在通道是机动车辆可以通过雷场的必要条件。同时设计了两种通道的检测算法,为网络化智能雷场的通道检测以及后续雷场自愈提供了理论基础和技术实现途径。

关键词 智能雷场,无线传感器网络,内部通道,边缘通道,通道检测

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Research on Channel Detection Algorithm of Intelligent Minefield Based on WSN

GUO Ying ZHAI Yan-long

(School of Computer Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The fourth generation of intelligent minefield system characterized by network and intelligence is an inevitable trend in the development of modern mines. The United States and other developed countries have carried out the development work of networked intelligent minefields a decade ago and have initially put it into armed forces. In this paper, we carried on research in allusion to the channel detection problem of intelligent minefields based on the wireless sensor network, established minefields networked model, defined the concepts of internal channel and edge channel of minefields and proved that channels exist in the minefield is the necessary condition for the motor vehicle to pass minefields. Meanwhile, detecting algorithm was designed respectively for two kinds of channels and this provides both theoretical basis and technical implementation approach for channel detection of networked intelligent minefields and the subsequent minefield self-healing.

Keywords Intelligent minefields, Wireless sensor network, Internal channel, Edge channel, Channel detection

1 引言

地雷是战场上常用的武器之一,在两军对峙的阵地前按一定的规范布设,或在重要的路口、要道以及重要设施的周围放置各种各样的地雷,以阻止敌军的前进和意外地杀伤敌军。随着科学技术的进步,地雷也逐步向着智能化、多用途的方向发展,技术含量越来越高,障碍宽度越来越大,出现了智能地雷、组网雷阵等。它们不仅可以攻击坦克,还可以打击超低空飞行的直升机和巡航导弹,也可以用来封锁敌方机场上起降的飞机^[1]。在现代战争中,由于机动力量大大增强,战场形势瞬息万变,实践证明,用地雷加强地形是一个达到制约敌方机动力量的有效手段。智能地雷是具有广域、自动寻找目标的第三代地雷,与传统地雷相比,它结合了传感器探测技术、无源定位技术、自寻的技术,通过传感器采集的信号区分目标类型,并对目标进行精确定位后主动实施攻击,即能够主动、准确地探测跟踪目标并实施攻击。

如今,无线传感器网络技术已受到广泛关注,其在军事领域也发挥着巨大的作用,现在的智能雷场中大多都使用了无线传感器网络技术。无线传感器网络是由低成本、低功耗,具

备感知、数据处理、存储和无线通信能力的微型传感器节点通过自组织方式形成的网络,能够实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息,并对这些信息进行处理,从而获取详尽而准确的信息^[2]。无线传感器网络的这些特点和功能说明了其适合用于网络化智能雷场领域。我们的网络化智能雷场就是基于无线传感器网络技术而设计的,相信其在未来的国防中将有着很大的应用前景。

网络覆盖控制是无线传感器网络研究和应用的关键性基础问题。给定一个传感器网络,覆盖问题一般是确定感应场被传感器监测或跟踪的情况。对于网络化智能雷场来说,就是要保证所有地雷节点的监测范围可以完全覆盖整个目标区域。但雷场会因敌方排雷、扫雷、攻击目标有效爆炸或其他可能出现的异常情况而使雷场中某些地雷受到破坏,造成雷场中出现缺口,这样必然会影响雷阵对目标的探测、定位和区域封锁效果,应采取相关措施对缺口进行侦测和修复。而应对雷场变化最直接、最快速的办法就是对受破坏的地雷节点及其周围相邻节点的掌控与定位^[1],一旦节点消失,周围的邻节点能快速感知,并采取措施去填补或修复。现在常见的排雷方法是通过火箭等布撒弹药排雷,使大面积地雷被毁,从而使

郭 颖(1990—),女,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络、分布式系统,E-mail:ying6633@126.com;翟岩龙(1981—),男,博士,讲师,主要研究领域为分布式系统、无线传感器网络、军用仿真等。

雷场中出现没有地雷覆盖的通道。因此,如何及时检测出雷场中是否出现通道并且修复通道实现雷场自愈,从而达到阻碍敌人前进的目的,是网络化智能雷场研究的重点。

2 相关工作

在第三代智能地雷之后,美国等发达国家开展了基于网络化技术的第四代智能网络化雷场研究。自愈雷场 SHM (Self-Healing Minefield) 项目^[3],是美国国防高级计划研究局 (DRAPA) 2002 年起支持的一项重要的雷场研究项目,目前研究阶段已经完成,正在装备美国军队中。SHM 项目是基于移动自组网络 (ad-hoc) 的网络雷,当大量坦克目标通过雷场的时候,它具有自动“弹跳”功能,能快速“自愈”,即通过网络重构恢复连通,再次对敌坦克实施拦阻,直至一定时间内网络无法自愈,最后自行引爆,系统自毁。

网络化智能雷场是由静止雷、活动雷、雷仓等组成的新型信息化地雷武器系统,通过雷与雷、雷与监控站、雷与指挥中心建立通信网络和决策机制,执行区域防御和封锁功能,从而实现“迟滞”和“阻碍”敌人的作战目的。其特点有:可抛撒抗冲击;自组织成传感器网络,感知战场态势;目标特征识别;敌我识别;受破坏后“自愈”^[4]等。

基于无线传感器网络的智能雷场需要解决雷场定位、雷场通道检测、雷场自愈等问题才能满足其军事需求。对于无线传感器网络来说,传感器节点能否完全覆盖所需感知的目标区域是一个至关重要的问题。关于无线传感器网络的覆盖空洞问题已经有了很多研究,也有了一些检测覆盖空洞的方法^[5]。如基于 Voronoi 图的检测方法^[6,7],还有只利用相邻传感器之间的相对距离去发现覆盖漏洞的方法^[8],最近,又有一些利用同源性解决覆盖空洞检测问题的方法^[9,10]。要想使雷场具有受破坏后能够“自愈”的功能,就必须首先检测出雷场中是否存在机动车可以通过的覆盖通道,然后才能根据通道的相关信息修复,实现“自愈”。本文主要研究雷场的通道问题,对雷场中的通道进行了严格定义并提出了通道的检测方法。

雷场即我们要覆盖的目标区域,其形状是不规则的,雷场中的每一颗地雷都可视为无线传感器网络中的一个节点,都有可以唯一标识自己的 ID 号,而且每颗地雷的位置信息都可通过雷场定位算法^[11]得到。每颗地雷爆炸后可以影响的范围称为地雷的感知区域,这个区域是以地雷所在位置为圆心的圆,其半径即称为感知半径。两个地雷之间的距离如果在某个范围之内就可以相互感应和通信,我们称这个范围为通信半径。初始时随机撒播地雷到目标区域中,因此初始时地雷不一定能覆盖到目标区域的每一个地方,所以需要移动地雷使地雷的感知范围可以完全覆盖目标区域的每一个位置,并且比较均匀地分布在目标区域中。当雷场遭到毁伤性破坏后,余下的地雷可能无法完全覆盖目标区域从而形成一条或者多条不被地雷感知的通道,机动车辆沿着这些通道即可以安全穿越雷场,从而使雷场失去其应有的作用。自愈式网络化雷场能够在发生毁伤后,自动检测雷场中是否出现未覆盖到的通道,并及时修复通道,从而实现持续迟滞敌人通过雷场的功能。

3 雷场网络模型

可以把整个雷场视为一个无线传感器网络,雷场中的每

一颗地雷都可视为无线传感器网络中的一个节点,每一个节点都有唯一的标识号 (ID),所以节点之间都可以正确地标识自身。每个节点都可以感知一定的区域并与相邻节点进行通信,假定其感知和通信范围都为圆形,其感知圆与通信圆的半径分别为 R_s (感知半径) 与 R_c (通信半径),一般假定 $R_c \geq 2R_s$ (相关证明由 Bejeranp Y 完成^[8])^[12]。

在本文中,如果任何两个传感器节点之间的欧几里得距离不大于通信半径 R_c ,我们就认为它们可以直接交换消息;并且如果平面上的一个点和某个传感器节点之间的欧几里得距离不大于传感半径 R_s ,则说明这个点可以完全被某个传感器节点覆盖。我们还假设所有传感器节点是同类的,即对所有节点来说 R_c 和 R_s 是相同的,并在传感器的使用期中保持恒定,因为单独地调整 R_c 和 R_s 用于大规模 WSN 中几乎是不可能的^[13]。

我们把监测区域中的传感器节点视为空间中的点集,每个点都有确定的位置信息。设 $V = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 是散布在目标区域内的所有的传感器节点, S_i 表示节点 i 的位置。一般来说,上述的无线传感器网络可以建模为一个无向图 $G(V, E)$, V 是一组顶点的集合, E 是一组边的集合,也就是一个由 V 中顶点构成的无序对的指定集合,即 $E \subset V \times V$ 。

4 通道定义及证明

定义 1 (邻居) 我们说节点 S_i 和 S_j ($i \neq j$ 并且 $S_i, S_j \in V$) 是邻居,当且仅当 $\|S_i - S_j\| \leq 2R_s$ 。

定义 2 (边) 如果 S_i 和 S_j 是邻居,则在 S_i 和 S_j 之间存在一条边。因此, G 的包括所有边的边集 E 可以定义为

$$E = \{S_i S_j \mid S_i, S_j \in V \wedge S_j \in Neig(S_i)\} \quad (1)$$

$Neig(S_i)$ 是节点 S_i 的邻居的集合 (不包括 S_i)。

于是得到描述雷场拓扑结构的图 $G(V, E)$, 后续雷场通道检测、雷场自愈修复都基于该图进行。

定义 3 (连通性) 我们说两个节点 S_i 和 S_j 是连通的,如果存在至少一个节点序列 $S_{k,1}, S_{k,2}, \dots, S_{k,m}$, 其中 $\overline{S_{k,i} S_{k,i+1}} \in E$ ($i=1, 2, \dots, m-1$), 使得从节点 S_i 出发沿着这些节点之间的边可以到达节点 S_j 。如果图中任意两点都是连通的,那么这个图被称作连通图。

定义 4 (连通子图) 一个连通的节点集 $Clust(S_i) = S_1, S_2, \dots, S_m$ ($i=1, 2, \dots, m, m \leq n$) 是图 G 的一个最大的连通顶点集合,如果在这个集合中添加图 G 的任何一个其他节点 S_{m+1} , 则打破 $Clust(S_i)$ 的连通性^[13]。我们用 $Clust(S_i)$ 表示包含节点 S_i 的连通子图中的所有节点集合。一个连通子图中的每一对顶点 u 和 v 都是互相可达 (连通) 的。我们可以用 $G_1 = (V_1, E_1)$ 表示 G 的一个连通子图,其中 $V_1 \subset V, E_1 \subset E$ 。

定义 5 (通道) 雷场经过毁伤后,如果存在一条没有地雷可以覆盖到的路径,而且这条路径的宽度大于要通过雷场的机动车辆的宽度,机动车辆沿着这条路径就可以从雷场的一边到达另一边,则称此路径为一条通道。在雷场中根据通道所处的位置的可能存在两种类型的通道,分别是内部通道和边缘通道。

定义 6 (内部通道) 如果地雷节点所形成的 G 图不是连通的而是被分成几个连通子图,于是每两个相邻的连通子图之间存在一段没有地雷覆盖的路径,如果这些路径连接起来可以形成一条或者几条从雷场一边到达另一边的通路,并且如果某条通路中最窄处的宽度大于要通过雷场的机动车辆的

宽度,则机动车辆沿着这条通路就可以从雷场的一边到达另一边,称这些路径构成的通路为内部通道。如图1中虚线所示即为所形成的两条内部通道。

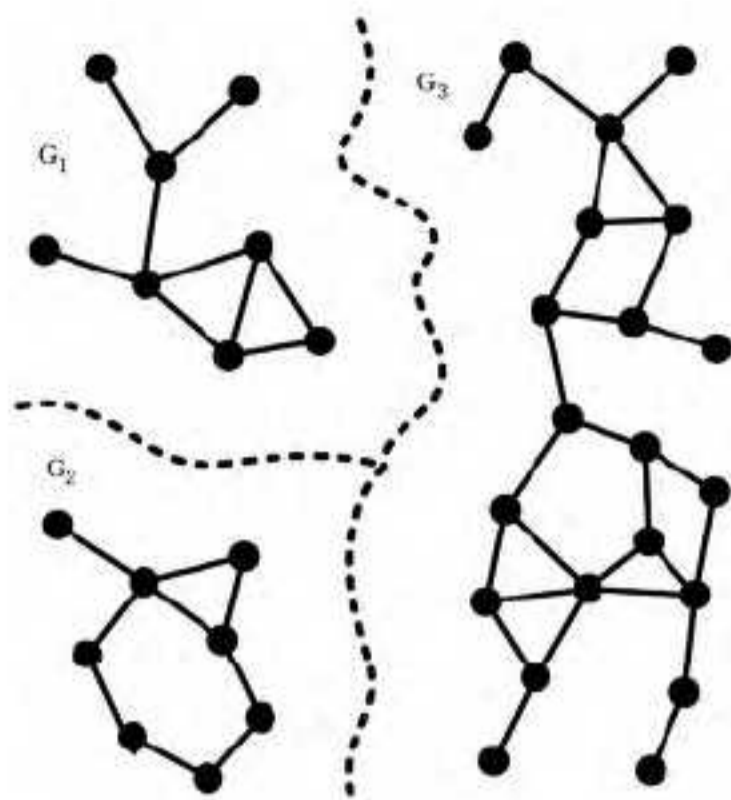


图1 内部通道示意图

图1中整个雷场所构成的图不是连通的,而是形成3个连通子图 G_1, G_2, G_3 。因为 G_1 和 G_3 不连通,所以 G_1 中的节点和 G_3 中的节点之间的距离都大于 $2R$,于是 G_1 和 G_3 之间存在一条没有地雷覆盖的路径;同理 G_1 和 G_2 之间, G_2 和 G_3 之间也各存在一条路径,当这些路径的宽度大于要通过雷场的机动车辆的宽度时,就形成图中虚线所示的两条没有地雷覆盖的通道。如图2中虚线所示即为所形成的两条边缘通道。

定义7(边缘通道) 如果雷场边缘的地雷受到较多破坏,可能造成雷场边缘出现没有地雷覆盖的路径的情况,如果这条路径的宽度大于或等于机动车辆的宽度,就形成了车辆可以通过的通道,我们称这样的位于雷场边缘的通道为边缘通道。如图2中虚线所示即为所形成的两条边缘通道。

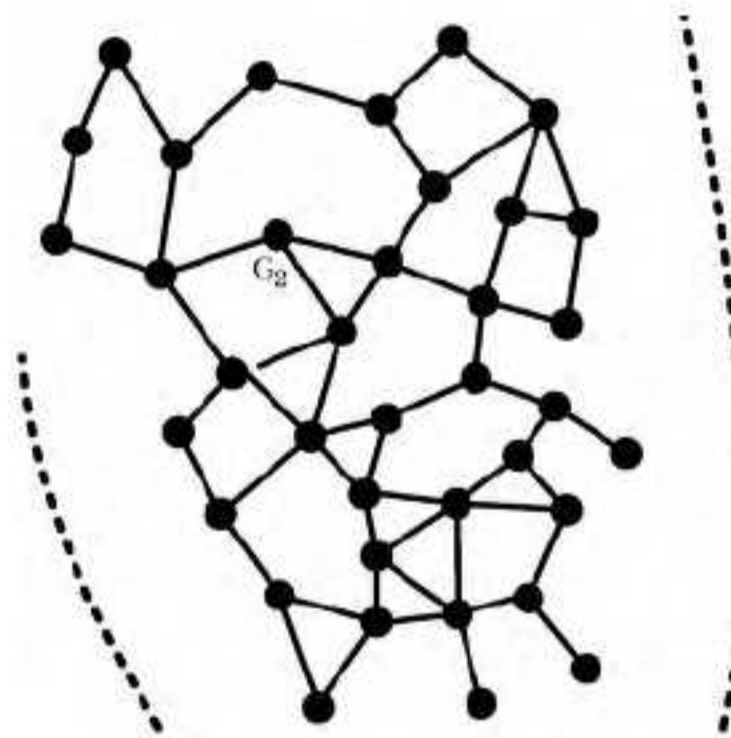


图2 边缘通道示意图

因为内部通道和边缘通道的定义中都考虑了车辆的宽度,所以只要存在内部通道或者边缘通道,车辆就可以沿这条通道通过雷场。但如果雷场不存在通道,即内部通道和边缘通道都不存在,则肯定不存在可以使车辆从雷场的一边到达另一边的路径,即车辆不能通过。综上,如果存在通道则机动车辆可以通过,但如果不存在通道,则机动车辆肯定不能通过。所以我们可以得出下面的定理。

定理1 雷场中存在通道是机动车辆可以通过雷场的必要条件。

证明:1)对于内部通道的情况,如果地雷节点所形成的 G 图不是连通的而是被分成几个连通子图 G_1, G_2, \dots, G_s 。因为 G_1 和 G_2 不连通,所以 $\forall p \in G_1$ 和 $\forall q \in G_2, d(p, q) > 2R$,于

是 G_1 和 G_2 之间存在一条没有地雷覆盖的路径;同理,每两个相邻的连通子图之间都存在这样的路径,如果这些路径的宽度大于机动车辆的宽度,则车辆沿着这些路径也就是我们所说的内部通道就可以从雷场的一边到达另一边。所以,如果存在内部通道则车辆就可以通过雷场。

2)对于边缘通道的情况,因为边缘通道位于雷场边缘的特殊位置,我们定义边缘通道的时候考虑了机动车辆的宽度,所以只要存在边缘通道,车辆就可以沿这条通道通过雷场。

如果雷场不存在通道,即内部通道和边缘通道都不存在,则说明在雷场内部和边缘都不存在可以使车辆从雷场的一边到达另一边的路径,即车辆肯定不能通过雷场。

综上所述,如果存在通道则机动车辆可以通过雷场,但如果不存在通道,则机动车辆肯定不能通过。即雷场中存在通道是机动车辆可以通过雷场的必要条件。

证毕。

5 通道检测方法

首先我们根据地雷节点之间的位置信息构造图 $G(V, E)$,然后通过图的深度优先遍历算法判断图 G 的连通性。如果整个图 G 是连通的,则需要进一步判断在目标区域是否存在边缘通道,如果不存在则说明整个目标区域中不存在未覆盖到的通道;如果 G 不是连通的而是被分成几个连通子图,则说明存在未覆盖到路径,进一步判断,如果这些路径的宽度大于要通过雷场的车辆的宽度,则说明存在内部通道,即需要移动节点进行修复。下面我们分别具体说明内部通道和边缘通道的检测方法。

5.1 内部通道的检测

根据地雷节点之间的位置信息构造图 $G(V, E)$ 之后,通过图的深度优先遍历算法判断图 G 的连通性,如果 G 不是连通的而是被分成几个连通子图,则说明存在未覆盖到的路径,进一步判断,如果这些路径的宽度大于要通过雷场的车辆的宽度,则说明存在内部通道;如果整个图 G 是连通的,则需要用下面5.2节中的方法进一步判断在目标区域的边缘是否存在未覆盖到的通道。

如果 G 不是连通的而是被分成几个连通子图,记这些连通子图为 G_1, G_2, \dots, G_s 。假设雷场遭到毁伤前上一批地雷的感知区域可以覆盖整个目标区域,且每个地雷的位置信息都有记录,设车辆的宽度为 R 。雷场遭到毁伤之后,被毁坏的节点集合为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$,计算它们到其所有还没有被毁坏的邻居节点的距离,然后找出其中距离它们最近的并且现在分别位于不同连通子图中的邻居节点。如图3所示为雷场的一块区域,空心圆点所示为被毁的地雷节点,黑色实心圆点为剩余完好节点,虚线所示圆圈为被毁节点的感知圆,实线所示圆圈为剩余节点的感知圆。其中 P_1 为被毁的一个内部节点, Q_1 为到 P_1 距离最近的位于连通子图 G_1 中的邻居节点, Q_2 为到 P_1 距离最近的位于连通子图 G_2 中的邻居节点,连接 Q_1 与 Q_2 ,然后计算距离 $d(Q_1, Q_2)$,记 $d_1 = d(Q_1, Q_2)$ 。同样地,找到所有其他被毁节点的两个距离其最近的分别位于不同连通子图中的邻居节点,并计算它的这两个邻居节点之间的距离,得到 d_2, d_3, \dots, d_m 。如果某个被毁的内部节点的所有邻居节点也都不存在了,则其对应的距离 d_i 一定大于 R ,则不用计算其 d_i ,而是直接记为 $d_i > R$ 。然后选择所有这些距离 $d_i (i=1, 2, \dots, m)$ 中最小的 d_{\min} ,如果 $d_{\min} - 2 * R >$

R , 即 $d(P, Q)_{\min} > 2 * R_s + R$, 则存在宽度大于 R 的未覆盖路径, 机动车辆可以通过, 所以认为存在内部通道。

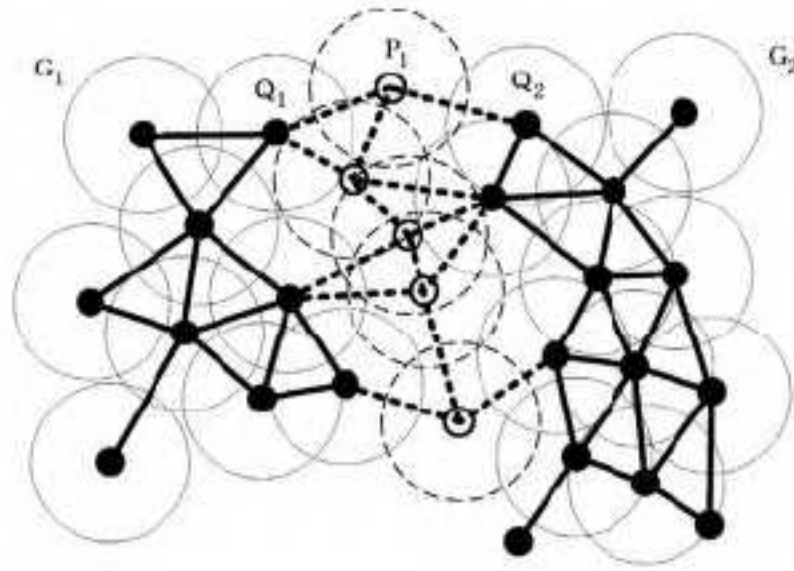


图3 内部通道检测图

算法1 构造图 $G(V, E)$

输入: 所有传感器节点的信息 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$

输出: $G(V, E)$

1. Begin(算法开始)
2. 输入 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$
3. for($i=1; i \leq n; i++$) {
4. $S_i \in V$;
5. // 求出 $Neig(S_i)$
6. for($j=1; j \leq n; j++$) {
7. if($j \neq i \& \parallel S_i - S_j \parallel \leq 2R_s$) {
8. $S_j \in Neig(S_i)$;
9. $\overline{S_i S_j} \in E$;
10. }
11. }
12. }
13. End(算法结束)

算法2 内部通道检测算法

输入: 图 $G(V, E)$

输出: 存在/不存在内部通道

1. Begin(算法开始)
2. int $m=0$; // 记录连通子图个数
3. 设置标记数组 $v[1, 2, \dots, n]=0$
4. // 深度优先遍历图 $G(V, E)$
- while($\exists v[i]=0$) { // 还存在没遍历到的节点
5. $v[i]=1$; // 从节点 S_i 开始遍历
6. 深度优先遍历 S_i 的邻居节点, 置每个遍历过的节点在 v 中的对应位置为 1
7. 当遍历到某个节点 S_i 时
8. if $\forall S_j \in Neig(S_i), v[j]=1$ or $Neig(S_i)=null$
9. $m++$;
10. if $\exists v[k]=0$ // 还有没遍历到的节点
11. 再从 S_k 开始遍历
12. }
13. // 直到所有节点都被遍历了一遍
14. if ($m > 1$) { // G 不是连通图
15. 输出: 存在未覆盖的路径
16. // 进一步检测路径的宽度是否大于机动车辆的宽度
17. for($i=1; i \leq m; i++$) {
18. $P_i \in P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$
19. $d_i = d(Q_i, Q_j)$;
- // $Q_i, Q_j \in Neig(P_i), Q_i \in G_i, Q_j \in G_j$
20. }
21. if ($[\text{Min}(d(Q_i, Q_j)) - 2 * R_s] > R$)
22. 输出: 这段路径的宽度大于车辆宽度, 存在内部通道
23. else

24. 输出: 不存在内部通道

25. }

26. else // G 是连通图

27. 进行边缘通道的检测

28. End(算法结束)

5.2 边缘通道的检测

假设雷场遭到毁伤前上一批地雷的感知区域可以覆盖整个目标区域, 且每个地雷的位置信息都有记录, 设车辆的宽度为 R 。雷场边缘遭到毁伤之后, 找到被毁坏的节点中最靠边缘的那些节点集合 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, 计算它们到其所有邻居节点(没有被毁坏的邻居节点)的距离, 再找出其中距离它们最近的邻居节点。如图4所示为雷场边缘的一块区域, 空心圆点所示为被毁的边缘地雷节点, 黑色实心圆点为剩余节点, 虚线所示圆圈为被毁节点的感知圆, 实线所示圆圈为剩余节点的感知圆。其中 P_1 为被毁的一个边缘节点, Q_1 为到 P_1 距离最近的邻居节点, 连接 Q_1 与 P_1 并延长与以 P_1 为圆心, 感知半径 R_s 为半径的感知圆交于点 m_1 , 与以 Q_1 为圆心, 感知半径 R_s 为半径的感知圆交于点 n_1 , 然后计算距离 $d(P_1, n_1)$, 记为 d_1 。同样地计算所有其他边缘节点到其最近的邻居节点的距离 $d_2, d_3 \dots d_m$ 。如果某个被毁的边缘节点的所有邻居节点也都不存在了, 如图4中 P_2 所示, 则其对应的距离 d_2 一定大于 R , 则不用计算其 d_i , 而是直接记为 $d_2 > R$ 。然后选择所有这些距离 $d_i (i=1, 2, \dots, m)$ 中最小的 d_{\min} , 如果 $d_{\min} > R - R_s$, 即 $d(m, q) = d_{\min} + R_s > R$, 则剩余节点感知圆覆盖边界到原来覆盖边界的距离大于 R , 机动车辆可以通过, 所以存在边缘通道。

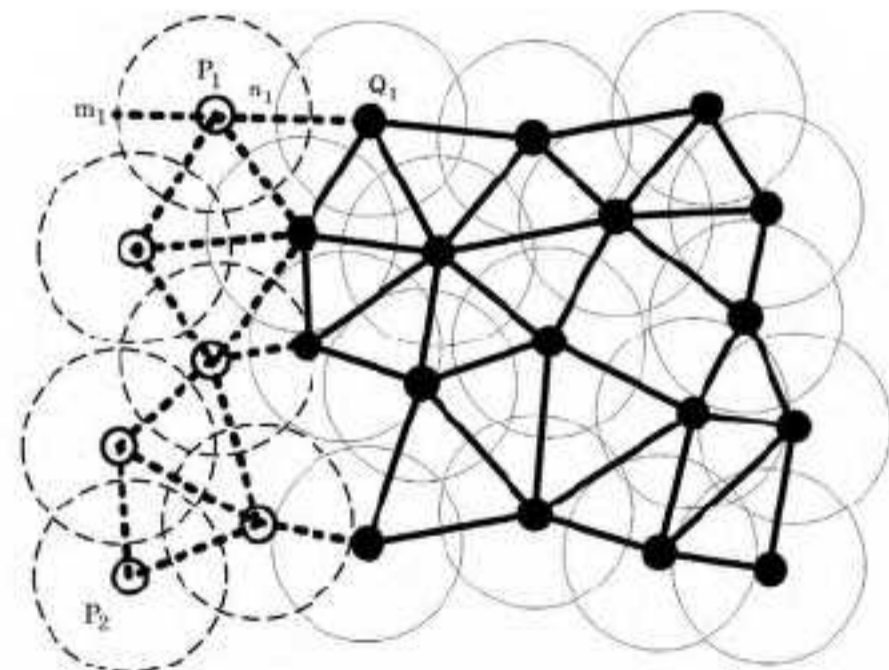


图4 边缘通道检测图

算法3 边缘通道检测算法

输入: 图 $G(V, E)$

输出: 存在/不存在边缘通道

1. Begin(算法开始)
2. 找到被毁伤节点中最靠近雷场边缘的节点集合 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$
3. for($i=1; i \leq m; i++$) {
4. $t \leftarrow \text{Min}(d(P_i, Neig(P_i)))$
5. $d_i \leftarrow t - R_s$
6. }
7. if ($\text{Min}(d_i) > R - R_s$)
8. 输出: 存在边缘通道
9. else
10. 输出: 不存在边缘通道
11. End(算法结束)

结束语 网络覆盖控制是无线传感器网络研究和应用的关键性基础问题。对于网络化智能雷场来说, 最重要的就是

要保证所有地雷节点的监测范围可以完全覆盖整个目标区域。雷场不可避免地可能遭到毁伤性破坏,要想保证雷场的良好性能,就要及时检测余下的地雷是否还能完全覆盖目标区域,也就是要检测雷场中是否出现未覆盖到的通道,这样才能及时修复雷场。本文首先定义了基于无线传感器网络的雷场网络模型,并针对雷场特性提出了雷场通道的概念,给出了雷场中可能形成的内部通道和边缘通道的形式化定义,得出了雷场中存在通道是机动车辆可以通过的必要条件这一重要定理,并给出证明。针对内部通道和边缘通道,分别提出了相应的检测算法。

下一步的工作将在实际雷场环境中检验通道检测算法的性能和精确性,同时还要继续研究雷场通道的定位和快速修复方法,以实现智能化网络雷场持续迟滞敌人的首要目标。

参 考 文 献

- [1] 邓光明,张海良,焦国太,等. 基于超声波的雷场节点分区域识别定位方法[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(3): 65-69
- [2] 蒋丹. 无线传感器网络覆盖盲区的发现与修复方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008
- [3] 唐峰, 罗汉文, 许业文. 移动 Ad Hoc 网络在美军自愈雷场中的应用[J]. 工兵装备研究, 2005, 24(5): 61-64
- [4] Rolader G, Rogers J, Batteh J. Self-healing minefield[C] // Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Bellingham, USA, 2004: 13-24
- [5] Huang C-F, Tseng Y-C. A survey of solutions to the coverage problems in wireless sensor networks[J]. Journal of Internet Technology, 2005, 6(1): 1-8
- [6] 刘姣姣. 无线传感器网络中基于 Voronoi 图的网络覆盖技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011
- [7] Zhang C, Zhang Y, Fang Y. Localized algorithms for coverage boundary detection in wireless sensor networks[J]. Wireless networks, 2009, 15(1): 3-20
- [8] Bejerano Y. Simple and efficient k-coverage verification without location information[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM). Phoenix, USA, 2008: 291-295
- [9] Ghrist R, Muhammad A. Coverage and hole detection in sensor networks via homology[C] // Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks. Los Angeles, USA, 2005: 34
- [10] de Silva V, Ghrist R. Coverage in sensor networks via persistent homology[J]. Algebraic & Geometric Topology, 2007, 24(7): 339-358
- [11] 高昆, 赵晓辉. 智能雷场的无线传感器网络技术研究[J]. 无线电工程, 2008, 38(4): 15-17
- [12] 杨凯, 刘全, 张书奎, 等. 利用移动内点来修复传感器网络空洞的算法[J]. 通信学报, 2012, 33(9): 116-124
- [13] Zhang C, Zhang Y, Fang Y. Detecting coverage boundary nodes in wireless sensor networks[C] // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Ft. Lauderdale, USA, 2006: 868-873
- (上接第 251 页)
- [19] Boudali H, Crouzen P, Stoelinga M. Dynamic fault tree analysis using input/output interactive markov chains[C] // 37th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, 2007(DSN'07). IEEE, 2007: 708-717
- [20] Ćepin M. Reliability Block Diagram[M] // Assessment of Power System Reliability. Springer London, 2011: 119-123
- [21] Distefano S, Xing L. A new approach to modeling the system reliability; dynamic reliability block diagrams[C] // Reliability and Maintainability Symposium, 2006 (RAMS'06). Annual. IEEE, 2006: 189-195
- [22] Dugan J B, Bavuso S J, Boyd M A. Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(3): 363-377
- [23] Architecture Analysis and Design Language (AADL)[S]. SAE standards AS5506. Nov 2004
- [24] Vestal S. An overview of the Architecture Analysis & Design Language (AADL) error model annex[C] // AADL Workshop. 2005
- [25] Bozzano M, Cimatti A, Katoen J P, et al. Safety, dependability and performance analysis of extended AADL models[J]. The Computer Journal, 2011, 54(5): 754-775
- [26] 邱丽娟. 无线传感器网络可靠性建模研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011
- [27] Cinque M. Reliability requirements of wireless sensor networks for dynamic structural monitoring [C] // Proceedings of Dependable Systems and Networks. USA, 2008: 8-13
- [28] Mak N H, Seah W K G. How long is the lifetime of a wireless sensor network [C] // Proceedings of International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Bradford, 2009: 769-775
- [29] Le Zheng-yi, Becker E, Dimitrios G. Modeling Reliability for Wireless Sensor Node Coverage in Assistive Testbeds[C] // Proceedings on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. New York, 2010: 46-52
- [30] Lin Cheng-min, Teng Hui-kang, Yang Cheng-chih. A Mesh Network Reliability Analysis Using Reliability Block Diagram[C] // Proceedings of International Conference on Industrial Informatics(INDIN). Taiwan, 2010: 975-979
- [31] 吴巍. 无线传感器网络可靠性建模方法[J]. 电子测试, 2012(5): 12
- [32] Bein D, Joll V, Kumar B. Reliability Modeling in Wireless Sensor Networks [J]. International Journal of Information Technology, 2005, 11(2): 1-9
- [33] Vasar C, Prostean O, Filip I. Markov Models for Wireless Sensor Network Reliability[C] // Proceedings of International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing. Cluj-NaPoca, 2009: 323-328
- [34] Vasar C, Prostean O, Filip I. A Reliability Analysis for Wireless Sensor Networks in a Wind Farm[C] // Proceedings of International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies. Bosnia, 2009: 1-5
- [35] Purohit N, Varadwaj P, Tokekar S. Reliability Analysis of Wireless Sensor Network [C] // Proceedings of 16th IEEE International Conference on Networks. New Delhi, 2008: 1-6
- [36] Shxestha A, Xing Liu-dong, Liu Hong. Modeling and Evaluating the Reliability of Wireless Sensor Networks[C] // Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium(RAMS'07). Orlando, 2007: 186-191