



研究与开发

基于分布式色调识别的无线传感器网络 k 连通性路径检测

曹世华, 胡克用, 王李冬, 王琦晖
(杭州师范大学钱江学院, 浙江 杭州 310036)

摘要: 为提高无线传感器网络 (WSN) k 连通性路径检测算法的精度, 提出一种基于分布式色调识别的无线传感器网络 k 连通性路径检测算法。首先, 利用图模型给出了所研究无线传感器网络的模型结构, 并对于构建的模型给出了理论定义; 其次, 针对提出的无线传感器网络模型, 利用色调分布式识别算法, 计算每个节点到 sink 节点的不相交路径, 并找到其最小值, 从而实现边界之间 k 值的精确检测; 最后, 通过实验仿真, 对算法的有效性进行了验证。

关键词: 色调; 无线传感器网络; 图模型; 路径检测

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018017

Distributed hue recognition based k connectivity path detection in WSN

CAO Shihua, HU Keyong, WANG Lidong, WANG Qihui
Qianjiang College, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China

Abstract: In order to improve the accuracy of k connectivity path detection algorithm in wireless sensor network (WSN), a k connectivity path detection algorithm based on distributed hue recognition for WSN was proposed. Firstly, the model structure of the WSN network was given by use of the graph model, and the theoretical definition of the model was given. Secondly, according to the proposed WSN model, the disjoint paths for each node to the sink node were calculated, and cat culated using the minimum value, so as to achieve accurate detection of the boundary between the value of k . Finally, the validity of the algorithm was verified by experiment simulation.

Key words: hue, wireless sensor network, graph model, path detection

收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-11-16

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY17E070004); 浙江省公益技术应用研究项目 (No.2011C33031); 杭州市科技发展计划基金资助项目 (No.20140633B34); 杭州市重点学科建设基金资助项目 (No.2013X1010)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY17E070004), Public Welfare Technology Project in Zhejiang(No.2011C33031), Hangzhou Science and Technology Development Plan(No. 20140633B34), Hangzhou Key Discipline Construction Fund(No. 2013X1010)



1 引言

无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 在军事、工业、机器人和医疗保健等领域有着越来越广泛的应用。保持所有活动节点间的连通性是无线传感器网络最具挑战性的任务之一^[1,2]。在这些网络中,节点通过其邻居节点将数据分组发送到目的节点。因此,某些节点中的故障可能导致其他节点的通信路径断开。如果网络中存在一个关键节点,其故障会导致网络部分断开,则称该网络为 1-连通性网络。这些关键节点也称为切割顶点,可通过分布式算法来检测^[3]。

由于无线传感器连通性的重要性,许多学者对无线传感器网络的连通性进行了研究。参考文献[4]提出无线传感器网络分布式 k 连通性检测的 3 种定位算法:局部邻居检测 (local neighbor detection, LND) 算法,每个节点集设置 k 值为其 p -hop 邻居节点的最小度;子连通性检测 (local subgraph connectivity detection, LSCD) 算法,节点通过广播自己的邻居列表中的其他节点发现其 p -hop 局部子图,并在其子图中运行中心算法找到一个局部的 k 值;局部关键节点检测 (local critical node detection, LCND) 算法,类似于 LSCD 算法,使用 p -hop 跳节点局部子图。在 LCND 算法中,节点尽量在局部查找到一个割点。参考文献[5, 6]提出 k -连通性测试的两种安全算法,如果网络为至少 k 连通的,这些算法接受一个值作为候选 k 并返回 true,这种迭代操作算法可能非常耗费计算资源。分布式 k -维护 (distributed k -connectivity maintenance, DKM) 算法^[7]可基于 sink 近邻居节点数为每个节点进行 k 值检测。然而,使用节点和接收器之间的跳距可能会产生错误的 k 值。参考文献[8]提出一种同步网络的 k 值的分布式检测算法,笔者提出了一种多个生成树的分布式图形分解算法,将连通图顶点分解成不相交的加权支配树。这些算法均取得了很好的效果,但是在不

相交路径检测精度上,存在一定精度差距,这会导致信息处理过程的计算冗余,从而导致算法计算复杂度的增加。

在本文中,提出了基于色调信息检测的 k -连通性路径检测算法,该算法利用 sink 节点为其邻居节点产生的色调信息,进行节点到 sink 节点的不相交节点检测。该算法是一个安全的算法,其不允许假阳性结果 (比实际 k 更高的估计),但它可能允许假阴性结果 (比实际 k 值低的估计)。

2 问题描述

2.1 网络模型

假设每个节点都有一个唯一的 ID,并且有一个特殊节点,称为汇聚节点,它充当了用户和网络中其他节点之间的桥梁。进一步假设算法执行过程中节点是固定的。在移动或动态的无线传感器网络中,该算法周期性地执行,或者在添加/删除节点后进行 k 值更新。节点随机分布在环境中,没有任何坐标信息。无线传感器网络中的每个节点都可通过发送或接收无线消息与其他节点通信。因此,可假设在无线范围内的节点间有一个通信信道。由于节点的无线电范围不同,通信信道可以是单向的。由于无法实现基于确认的协议,单向通信信道通常不适合可靠的数据传输。例如,在图 1 中,节点 1 的无线电范围大于节点 0 的无线电范围,因此节点 0 通过节点 1 接收发送的消息,但节点 1 不通过节点 0 接收发送的消息。

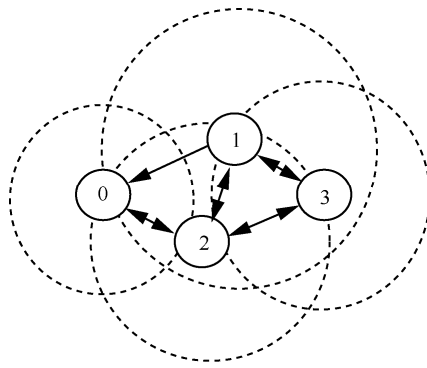


图 1 单向链路网络模型

图1所示网络结构具有单向链接特征是因为移除节点2会将节点0从其他节点断开。因此,节点0和1之间的单向链路对 k 值没有影响。在具有单向链路的网络中,删除这些链接后,仍然可以找到相同的 k 值,因为删除单向链接不会改变 k 值。为了区分单向链接,所有节点都会找到邻居列表(通过广播hello消息),并将此列表广播给它们的邻居。如果节点 u 在从节点 v 接收到的邻居列表中找不到它的ID,它将指向 v 的链接标记为单向,并忽略来自 v 的所有即将到来的消息。去除单向链路后,可将无线传感器网络建模为无向图 $G=(V,E)$,其中 V 是节点集, E 是边缘集。

2.2 研究目标

k 值决定了无线传感器网络不失去与剩余活动节点连接前提下,可容忍的节点故障数目。因此, k 值是估计网络容错状态和连接可靠性的良好指标之一。当 $k=1$ 时,可发现网络中存在关键节点和可能的路由瓶颈。如果 $G=(V,E)$ 是 k 连通图,那么每个 $(u,v) \in V$ 之间至少有 k 个不相交的顶点路径。因此,网络的 k 值决定了多路径路由协议中的关键节点之一的每对节点之间的顶点不相交路径的最小数目。

在连通网络中,每个节点都有至少 k 个邻居,因此具有较高 k 值的网络密度更大,该值对网络拓扑控制、传感器覆盖率和聚类都产生影响。图2给出具有15个节点的2-连通网络示例($k=2$)。

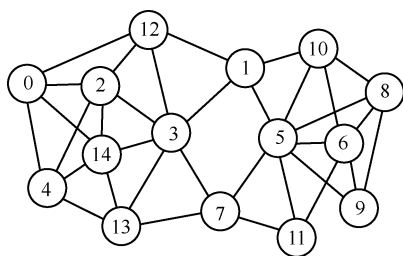


图2 具有2-连通网络示例

如果在这个网络中应用LSCD或LCND算法,几乎所有的节点找到 $k=1$,因为大部分节点在两跳子图中至少存在一个关键节点。而NLT或

CWSE算法,也无法查找到 $k=2$,因为网络不够密集,且多数节点(如节点1、3、5和7)的两跳局部子图是1-连通的。LND的查找结果则是 $k=4$,因为网络的最小度是4。如果假设节点0是sink节点,几乎所有的节点将至少有3个邻居节点指向sink节点,因此DKM算法的查询结果是 $k \geq 3$,这些算法均无法得到最精确的结果。

2.3 理论模型

下面给出文中使用到的一些模型定义和符号。

定义1 (节点度) $\Gamma(v)$ 是节点 v 的邻居节点集, $d(v)$ 是 $|\Gamma(v)|$ 是图论中的节点度, $\delta = \min\{d(v_i): v_i \in V\}$ 是最小节点度, $\Delta = \max\{d(v_i): v_i \in V\}$ 是最大节点度。

定义2 (不相交路径) 节点 u 和 v 间的路径集 $P(u,v) = \{p_0(u,v), p_1(u,v), \dots, p_l(u,v)\}$ 不相交。那么, 如果 $\forall p_i \in P(u,v)$ 和 $\forall p_j \in P(u,v)/p_i$, 则有 $p_i(u,v) \cap p_j(u,v) = \{u,v\}$ 。

例如, 图3(a)所示2-连通网络, 节点0和8间不相交路径集为 $P(0,8) = \{(0,4,7,8), (0,3,5,8)\}$ 。下面给出图模型有关定义, 包括顶点、边和层集。

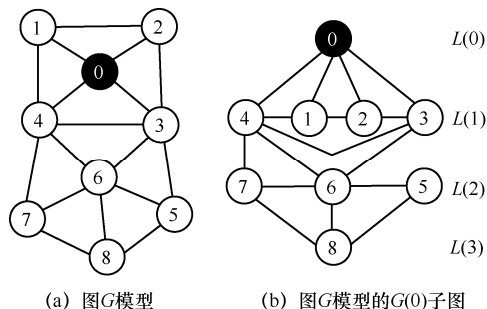


图3 2-连通网络示例

定义3 (图模型定义) 对图模型 $G=(V,E)$ 演化可得 $G(v)=(V,E,L)$, 其中 $L=\{L(i): 0 \leq i \leq D\}$ 、 $L(0)=\{v\}$ 、 $L(1)=\Gamma(v)$, 对于 $i \geq 1$, $L(i)$ 中的节点比 $L(i+1)$ 中的节点更接近 v 。利用参数项 $h_{G(v)}$ 表示 $G(v)$ 中层计数。图3(b)给出图3(a)中示例的 $G(0)$ 情形, 其中 $L(2)=\{5,6,7\}$, $h_{G(v)}=3$ 。

定义4 (链路定义)

(1) $\Gamma_x(u)$, $x \in \{-1,0,1\}$ 是 $u \in L(i)$ 的邻居节



点集, 在图 $G(v)$ 中, 其隶属于 $L(i+x)$ 。例如, 图 3 (b) 中 $\Gamma_1(4)=\{6,7\}$, 节点 6 有两个不相交的路径链接到 sink 节点, 分别为 $p_0(6,0)=(6,4,0)$ 和 $p_1(6,0)=(6,3,0)$ 。

(2) $\Lambda(i)$ 是节点 $u \in L(i)$ 集, 其满足 $\Gamma_1(u) \neq \emptyset$ 。例如, 图 3 (b) 中, $\Lambda(1)=\{3,4\}$ 、 $\Lambda(2)=\{5,6,7\}$ 。 $\Lambda(i)$ 为链接 $L(i)$ 和 $L(i+1)$ 的节点集。

3 基于色调识别的 k 连通性路径检测

3.1 PACK 算法描述

所提分布式算法的目的是通过计算每个节点到 sink 节点不相交路径, 找到其最小值, 从而实现边界之间 k 值的精确检测, 其包含两个阶段: 检测阶段和通知阶段。检测阶段中, 对于顶点 $v_i \in V$, 利用向前/向后消息广播, 寻找 $|P(v_i, \text{sink})|$; 而通知阶段中, 通过发送通知/回复消息以查找 k 值。PACK 算法步骤如算法 1。

算法 1 PACK 算法

初始化

$C = \emptyset$; //接收(色调, 发送者)信息对

$R = \emptyset$; //色调信息接收者

$S_c = \emptyset$; //色调 c 发送者

$B_c = \emptyset$; // 色调 c 的后向发送器

检测阶段

$\forall i \in \Gamma(\text{sink})$: sink 节点单向传播 (c_i, sink) 到 i

$\forall i \in \Gamma(\text{sink})$: sink 节点广播 (c_i, sink)

upon 在 u 中从 w 接收 Forward (c, p) 信息

u 添加 w 到 S_c

if $p = u$ then u 添加 w 到 B_c 和 R 中

else

if $\sim \exists (c', s) \in C_u$ s.t. $c = c'$ or $s = w$ then

u 添加 (c, w) 到 C 中, 并广播

Forward (c, p)

if $\exists (c', v) \in C$ s.t. $B_{c'} = \emptyset$ and

$\Gamma(u) = S_{c'} \cup R$ then

u 单向传播 Backward (c) 到节点 v

upon 在 u 中从 w 接收 Backward (c) 信息

u 在 B_c 中移除 w

if u 为 sink 节点 then

if $\forall i \in \Gamma(u)$: $B_i = \emptyset$ and $\Gamma(u) = R$

then

u 广播 Notify (u)

else if $B_c = \emptyset$ and $\Gamma(u) = S_c \cup R_u$

then

u 单向传播 Backward (c) 到节点 v ,

其中 $(c, v) \in C$

通知阶段

upon 在 u 中从 w 接收 Notify (u) 信息

if Notify (u) 是 u 中的首个信息 then

u 设置 $\text{prnt} \leftarrow w$, $\text{Ch} \leftarrow \emptyset$, 并广播

Notify (u)

else if $v = u$ then u 添加 w 到 Ch 中

when u 在所有 $i \in \Gamma(u)$ 接收到 Notify (u)

if $\text{Ch} = \emptyset$ then u 单向传播 Reply $(|C|)$ 到

prnt

else

u 等待从所有 $i \in \text{Ch}$ 中接收 Reply (C)

u 设置 $\forall i \in \text{Ch}$: $k_u \leftarrow \min(|C|, c)$

if u 为 sink 节点 then u 返回 k_u 作为

k 取值

else u 单向传播 Reply (k_u) 到 prnt 中

算法 1 中, sink 节点选择一个颜色词 c_i , 并单向传播 Forward (c_i, sink) 到其邻居节点。首个参数 c_i 表示不同的色调, 由 sink 节点分配给其邻居节点 i , 该色调可定义为 i 。第二个参数是发送色调节点的 ID。在算法开始时, 接收器选择自己作为所有色调的发送源。当单向传播发送完成时, 接收器将所有发送的色调广播给它的邻居节点。每个节点维护一组集合 C , 以保存接收色调及其发送者。每个节点接收从发送者 w 传入的色调 c , 在它接收色调 c 之前, 并未从 w 接收任何其他色调。这样节点 u 中的每个接收的色调都表示从 u

到接收器的不相交路径。

节点 u 一旦接收到 $\text{Forward}(c, p)$ ，它将发送者添加到 S_c ，这是色调 c 的发送者集合。然后 u 将 p 与其 ID 进行比较，如果发现 p 等于其 ID，则表明发送方已接收其先前广播的色调，并将发送方添加到 B_c 和 R 。否则，将 (c, w) 插入集合 C 中。 B_c 表示节点 u 可接收到 $\text{Backward}(c)$ 信息的节点集。 R 是从节点 u 接收色调的节点集，同时不接收来自节点 u 的另一种色调。当节点 u 广播转发 (c, w) 消息时，其可将邻居节点分成如下 3 组。

(1) 从其他节点接收色调 c 而不是在节点 u 接收的邻居节点，并广播转发 $\text{Forward}(c, v)$ 消息，其中 $v \neq u$ 。节点 u 将这些邻居添加到 S_c 中，其为色调 c 的发送者集。

(2) 接收色调 c 并且重播 $\text{Forward}(c, u)$ 信息的节点，节点 u 将这些节点添加到 B_c 和 R 中：如果该节点在未来广播新消息，则其不在任何 $v \in R$ 中接收 Forward 信息。在发送 $\text{Backward}(c)$ 信息前，其需要在所有节点 $v \in B_c$ 中等待 $\text{Backward}(c)$ 信息。

(3) 表示从节点 u 中接收到另一种色调的邻居节点，其中节点 u 的 R 集合已经包含了这些节点的 ID。因此，当节点 u 广播 $\text{Forward}(c, w)$ 信息时，它知道自己不会从任何节点 $v \in S_c \cup R$ 中接收响应。

3.2 算法示例描述

将算法应用于示例网络，并在每个步骤中显示消息的交换过程。图 4 给出样本网络中检测阶段的消息交换过程。在算法启动阶段，接收器向邻居节点发送 4 种不同的颜色：包括绿色(g)、黄色(y)、红色(r)和蓝色(b)。

图 4 (a) 中，在接收到绿色之后，节点 1 广播由节点 2 和 4 接收的颜色。类似地，节点 3 广播的绿色色调被节点 $\{2, 4, 5, 6\}$ 接收等。在从节点 2 和 4 接收广播色调后，节点 1 中的 S 集将是

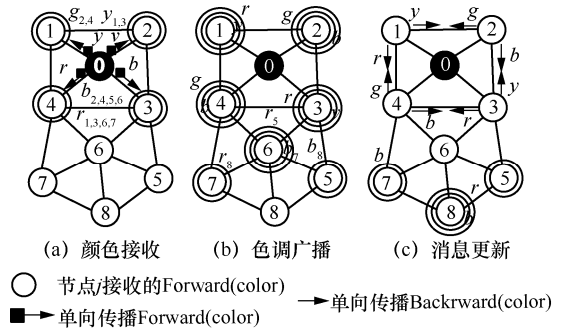


图 4 检测阶段信息交换

$S_1 = \{b\{0\}, g\{0\}, y\{0, 2\}, r\{0, 4\}\}$ ，这意味着节点 1 从节点 0 中接收到绿色和蓝色，从 0 和 2 中接收到黄色，从 4 中接收到红色。节点 1 中的 R 集合 B 集仍保持空集，但 C 集为 $C_1 = \{(g, 0), (r, 4), (y, 2)\}$ ，表示在节点 1 中接收的色调及其发送节点构成的数据对。对于图 4 (a) 的其他节点， R 集合 B 集仍保持空集，但：

$$\begin{cases} S_2 = \{r\{0\}, y\{0\}, b\{0, 3\}, g\{0, 1\}\} \\ C_2 = \{(y, 0), (g, 1), (b, 3)\} \\ S_3 = \{g\{0\}, r\{0, 4\}, b\{0\}, y\{0, 2\}\} \\ C_3 = \{(r, 4), (y, 2), (b, 0)\} \\ C_4 = \{(r, 0), (g, 1), (b, 3)\} \\ S_4 = \{y\{0\}, r\{0\}, b\{0, 3\}, g\{0, 1\}\} \end{cases} \quad (1)$$

在图 4 (b) 中，假设节点 1 在广播红色之前广播黄色（外圆之前的内圈），其他节点的顺序也一致。由节点 2 广播的蓝色和绿色的颜色不被其邻居接收，节点 6 广播的蓝色和红色色调分别由节点 7 和 5 接收，节点 5 所广播的蓝色被节点 8 接收等。

在图 4 (c) 中，图 4 (c) 给出随后的正向和反向消息。在从节点 2 和 4 接收广播色调之后，节点 1 将其本地集更新为：

$$\begin{cases} S_1 = \{b\{0, 4, 2\}, g\{0, 4, 2\}, y\{0, 2\}, r\{0, 4\}\} \\ C_1 = \{(g, 0), (r, 4), (y, 2)\} \\ R_1 = \{2, 4\} \\ B_1 = \{g\{4, 2\}\} \end{cases} \quad (2)$$

对于节点 1 中接收的 $(r, 4)$ ，则有： $B_{1(r)} = \emptyset$ 和 $S_{1(r)} \cup R_1 = \{0, 4\} \cup \{2, 4\} = \Gamma(1)$ ，表明节点 1 的



邻居要么从节点 1 中接收到另一种颜色, 要么从另一个节点中接收到红色。因此, 节点 1 发送 $\text{Backward}(r)$ 到节点 4, 因为其确信所有邻居节点都拒绝了其广播的红色。同样, 节点 1 将 $\text{Backward}(y)$ 发送到节点 2, 节点 2 将 $\text{Backward}(b)$ 发送到节点 3, 节点 2 将 $\text{Backward}(g)$ 发送到节点 1 等。图 5 给出样本网络中通知阶段的消息交换过程。

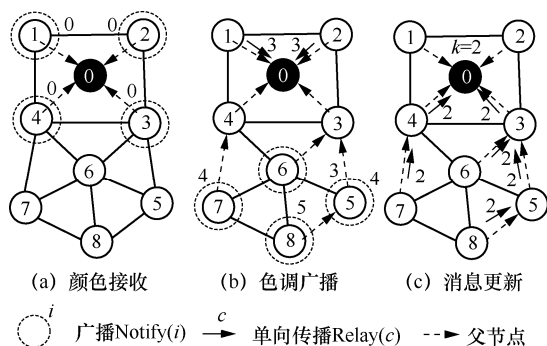


图 5 通知阶段信息交换

图 5(a)给出从节点 0 中接收到 $\text{Notify}(0)$ 后, 节点 1、2、3 和 4 选择节点 0 作为其父节点, 并广播 $\text{Notify}(0)$ 信息。图 5(b) 中, 节点 1 和 2 接收来自节点 3 和 4 的广播通知消息, 并将应答 $\text{Reply}(3)$ 发送到节点 0, 其中 3 是其 C 集的基数。同时, 通过接收通知消息, 节点 5 选择节点 3 作为其父节点, 并广播 $\text{Notify}(0)$, 节点 7 选择节点 4 作为其父节点, 并广播 $\text{Notify}(0)$ 。图 5(b) 中, 假设节点 6 在节点 4 之前从节点 3 接收通知, 因此它选择节点 3 作为它的父节点。因此, 节点 3 和 4 的子列表将是 $\text{Ch}_3 = \{6, 5\}$ 和 $\text{Ch}_4 = \{7\}$ 。类似地, 假设节点 8 在其他节点之前接收来自节点 5 的广播通知, 并选择 5 作为其父节点。

图 5(c) 中, 给出 Replay 消息的子流程, 在从所有邻居接收到通知之后, 节点 8 将 $\text{Replay}(2)$ 发送到节点 5, 节点 6 将 $\text{Replay}(2)$ 发送到节点 3, 并且节点 7 将 $\text{Replay}(2)$ 发送到节点 4, 因为其 Ch 集仍为空集。一旦从节点 8 中接收到 $\text{Replay}(2)$ 信息, 节点 5 从其 Ch 列表中删除节点 8, 并将

$\text{Replay}(2)$ 发送到节点 3, 其中 $\min(|C_5|, 2) = 2$ 。当节点 3 从节点 5 和节点 6 中接收到 $\text{Replay}(2)$ 信息后, 可得 $\min(|C_3|, 2, 2) = \min(3, 2, 2)$, 并发送 $\text{Replay}(2)$ 信息到节点 0。类似的, 节点 4 发送 $\text{Replay}(2)$ 信息到节点 0, 节点 0 可得 $k = \min(3, 3, 2, 2)$ 。

3.3 计算复杂度分析

在 PACK 算法检测阶段, 每个节点最多接收 $d(\text{sink})$ 种新色调。最坏情况下, 所有节点接收并转播所有 $d(\text{sink})$ 色调, 将会产生 $nd(\text{sink})$ 个消息。考虑 $d(\text{sink}) \leq \Delta$, Forward 和 Backward 广播消息最大数量是 $O(n\Delta)$ 。每个 Forward 和 Backward 消息都有一种色调, 且有 $c < \Delta$ 和 $\text{ID} < n$ 。所以消息长度最多为 $\text{Id} + \text{Id} \leq O(\text{Id})$ byte。因此, 检测阶段比特复杂度是 $O(n\Delta \text{Id})$ 。

在 PACK 算法通知阶段, 所有节点都将检测到的 k 值发送给接收器并执行如下操作: 每个节点发送一个通知消息 Notify 和一个应答消息 Reply , 其最大长度分别为 $O(\text{Id})$ 和 $O(\text{Id})$ 。因此, sink 节点 k 值估计的最大比特复杂度为 $O(n\Delta \text{Id})$ 。

因此, PACK 算法的总计算复杂度为 $O(n\Delta \text{Id} + n \text{Id}) \in O(n\Delta \text{Id})$ 。在最佳情况下, 所有节点只广播 k 种色调, 从而比特复杂度将为 $O(n \ln(n)k)$ 。

4 实验分析

4.1 实验设置

为评估该算法在实际网络中的性能, 选取对比算法为 LCND、DKM、LND 和 LSCD, 操作平台系统为 TinyOS, 其可编程闪存为 128 KB, 具有 8 KB RAM 和 2.4 GHz IEEE 802.15.4 兼容收发器。建立具有 20 个节点的 10 个随机拓扑, k 值在 1~5 范围内选取, 并在所有拓扑上运行每个算法。在实验室环境下, 建立预期的拓扑结构, IRIS 节点的传输功率降低, 会制约其广播范围,

为提高最低接收信号强度指示 (RSSI), 接收机只接收信号强度高的数据分组的节点阈值。通过调整这两个参数 (传输功率和 RSSI), 本文在实验室环境中建立了任意 k 值的期望无线传感器网络。

在设置阶段, 由于所有算法都假设双向链路, 所有算法的设置阶段的消息传递开销都是相同的, 因此不考虑性能测试中的开销。为了避免分组冲突, 在发送数据分组之前使用载波侦听多址/冲突避免 MAC 协议, 需要额外的随机等待时间, 在 100~1 000 ms 之间。这会增加网络的计算时间, 但是在设定的小型网络中, 可忽略干扰问题。

4.2 能量消耗对比

无线传感器网络中, 能量消耗节省有助于延长网络使用寿命, 提高网络可靠性, 降低组网成本。这里对几种对比算法的能量消耗情况进行对比。因为连通性 k 值和节点数对于算法产生一定影响, 首先对算法在不同 k 值连通性和节点数情况下, 本文算法的能量消耗情况进行分析, 如图 6 所示。

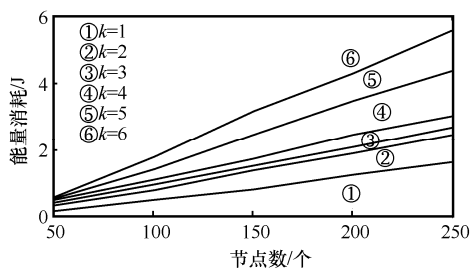


图6 连通性和节点数影响实验

根据图6结果, 在节点从50~250增加过程中, 算法的能量消耗逐渐增加, 并且这种增加趋势呈现近似的线性特征。同理, 在连通性 k 值在从1~6增加过程中, 算法的能量消耗也逐渐增加, 但是这种影响呈现出先降低后增加的趋势。

本文算法、LCND、DKM、LND 和 LSCD 算法的能量消耗随网络节点数变化的对比结果如图7所示。

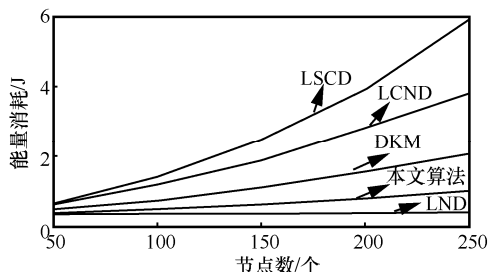


图7 能耗对比情况

根据图7, 在网络能耗中, 几种算法的能量消耗均随着网络节点数的增加而逐渐增加, 并且除了LSCD 算法外, 几种算法的能量消耗均随着节点数的增加, 呈现出近似线性增加的趋势。其中能量最低的是LND 算法, 因为其发送的字节数和接收的字节数最少, 本文算法能耗次低, 但是与LND 算法整体相差不大。能耗最大的是LCND 和LSCD 两种算法, 这两种算法发送的字节数和接收的字节数最多, 并且算法的计算时间最长, 需要耗费更多的能量。因为消息越复杂, 需要的信息传输能耗越大, 因此网络能耗指标能够间接反映出消息传输的复杂度。

4.3 指标对比分析

表1给出了算法的平均均方误差 (MSE)、发送字节 (sent)、接收字节 (received)、假阳性检测百分比 (FP)、假阴性的检测率 (FN), 检测正确率 (correct) 和计算时间等指标。检测正确率可计算为 $\text{correct} = 100 - (\text{FP} + \text{FN})$, 表1已按算法的MSE值进行排序。

根据表1结果可知, LND 算法具有最低的计算时间和发送/接收字节数, 但该算法的MSE值高于所有其他算法, 并且运用该算法只有23%的节点被正确地找到, 这表明LND 算法是在牺牲算法精度指标前提下, 实现算法设计的简化。在LND 之后, 本文算法具有最低的发送/接收字节数, 且用时仅次于LND 算法, 快于选取的其他几种对比方法。此外, 在非精确 k 连通检测算法中, 其检测到最为精确的 k 值, 即MSE为0.061和正确检测率为90%, 这体现了所提算法的性能优势。同



表 1 实验指标对比

指标	本文算法	LCND	LSCD	DKM	LND
MSE	0.061	0.414	0.648	1.947	2.738
sent	771	1 998	1 998	1 117	210
received	5 483	17 060	17 060	8 441	1 393
FP	0	5	4	59	77
FN	10	38	42	13	16
corret	90	57	54	28	23
时间/s	7.2	9.8	9.9	7.6	4.6
不相交路径查找时延均值/s	0.35	0.49	0.52	0.43	0.38

时, 在不相交路径查找时延指标上, 本文算法为 0.35 s 要优于所选取的对比算法。

5 结束语

本文提出一种基于分布式色调识别的无线传感器网络 k 连通性路径检测算法, 利用色调分布式识别算法, 计算每个节点到 sink 节点的不相交路径, 并找到其最小值, 从而实现边界之间 k 值的精确检测, 实验结果显示, 所提算法在平均均方误差、发送字节、接收字节、假阳性检测百分比和假阴性的检测率, 检测正确率和计算时间等指标上具有相对的优势, 并且网络能源的消耗量相对最小, 能够有效延长网络使用寿命, 验证了算法性能优势。本文算法尚处于实验室验证阶段, 如何构建真实的实验平台对算法性能进行验证并对算法性能进行调整, 将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 范兴刚, 杨静静, 王恒. 一种无线传感器网络的概率覆盖增强算法[J]. 软件学报, 2016, 27(2): 418-431.
FAN X G, YANG J J, WANG H. A probabilistic overlay enhancement algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Software Engineering, 2016, 27(2): 418-431.
- [2] 朱艺华, 徐骥, 田贤忠, 等. 无线传感器网络应用简单 Reed-Solomon 编码的低能耗和低时延可靠数据收集方案[J]. 计算机学报, 2015, 38(10): 2106-2123.
ZHU Y H, XU J, TIAN X Z, et al. Wireless sensor network applications are simple, Reed-Solomon coded low energy consumption and low delay reliable data collection scheme[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(10): 2106-2123.
- [3] 戴国勇, 施伟元, 应可珍, 等. 基于移动节点二次部署的 WSN 栅栏新型强化方法[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 97-104.
DAI G Y, SHI W Y, YING K Z, et al. A new approach to the WSN fence based on the two deployment of mobile nodes [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(6): 97-104.
- [4] JORGIC M, GOEL N, KALAICHELVAN K, et al. Localized detection of k -connectivity in wireless ad hoc, actuator and sensor networks[C]//16th International Conference on Computer Communications and Networks, July 31-Aug 3, 2007, Vancouver, BC, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2007: 33-38.
- [5] ROSSET V, PAULO M A, CESPEDES J G, et al. Enhancing the reliability on data delivery and energy efficiency by combining swarm intelligence and community detection in large-scale WSN[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 78(15): 89-102.
- [6] MOSTAFAEIA H, MONTIERIB A, PERSICO V, et al. A sleep scheduling approach based on learning automata for WSN partialcoverage[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 80(15): 67-78.
- [7] SZCZYTOWSKI P, KHELIL A, SURI N. Dkm: distributed k -connectivity maintenance in wireless sensor networks[C]//9th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services, WONS 2012, January 9-11, 2012, Courmayeur, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2012: 83-90.
- [8] DU T, QU S, LIU K Q, et al. An efficient data aggregation algorithm for WSN based on dynamic message list[J]. Procedia Computer Science, 2016, 83(4): 98-106.
- [9] 刘开南, 韩旭. 基于人工蜂群寻优算法的 WSN 中继节点布局方案[J]. 电信科学, 2016, 32(9): 61-67.
LIU K N, HAN X. WSN relay node layout scheme based on artificial bee colony optimization algorithm[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(9): 61-67.
- [10] MOHANTY P, KABAT M R. Energy efficient structure-free data aggregation and delivery in WSN[J]. Egyptian Informatics Journal, 2016, 17(3): 273-284.
- [11] ZHANG D G, SONG X D, WANG X, et al. Extended AODV routing method based on distributed minimum transmission (DMT) for WSN[J]. AEU-International Journal of Electronics

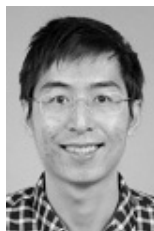
and Communications, 2015, 69(1): 371-381.

- [12] WANG K, OU Y R, JI H, et al. Energy aware hierarchical cluster-based routing protocol for WSN [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2016, 23(4): 46-52.
- [13] SENOUCI M R, MELLOUK A, OUKHELLOU L, et al. WSN deployment framework based on the theory of belief functions[J]. Computer Networks, 2015, 88(9): 12-26.
- [14] SINGH S, MALIK A, KUMAR R. Energy efficient heterogeneous DEEC protocol for enhancing lifetime in WSN [J]. Engineering Science and Technology, 2017, 20(1): 345-353.
- [15] SINGH S. Energy efficient multilevel network model for heterogeneous WSN[J]. Engineering Science and Technology, 2017, 20(1): 105-115.

[作者简介]



曹世华（1972-），男，杭州师范大学钱江学院副教授、硕士生导师，主要研究方向为物联网、无线传感和能量收集。



胡克用（1978-），男，博士，杭州师范大学钱江学院工程师、讲师，主要研究方向为物联网、人工智能和新能源技术。



王李冬（1982-），女，博士，杭州师范大学钱江学院副教授，主要研究方向为信息检索、物联网工程和数据挖掘。



王琦晖（1978-），男，杭州师范大学钱江学院讲师，主要研究方向为物联网、机器学习和模式识别。