

基于簇的无线传感器网络交会路由协议

杨旭¹, 王春佳², 李莉¹

(1. 云南机电职业技术学院 工业信息技术系, 昆明 650203;

2. 云南师范大学 基础教育集团, 昆明 650092)

摘要: 针对现有无线传感器网络 (WSN) 协议中更多消耗 sink 附近节点能量导致网络寿命短的问题, 提出一种基于簇的无线传感器网络交会路由协议 (Cluster-based Rendezvous Routing Protocol, CRRP); 该协议在网络的中间构建交会区域, 该交会区域划分整个网络区域并在传感器节点之间分配网络负载, 延长了网络寿命; 此交会区域内的节点分为不同的簇, 每个簇的簇头 (CH) 负责不同簇之间的通信, sink 在此交会区域内发送其更新的位置信息, 并且当传感器节点想要发送数据时, 会从该交会区域检索 sink 的当前位置信息并直接将数据发送到 sink; 仿真实验结果表明, 在能耗与网络寿命性能方面, 所提 CRRP 协议优于 Rendezvous 协议、LBDD 协议、Railroad 协议和 Ring 协议。

关键词: 无线传感器网络; 交会区域; 基于簇的交会路由; 网络寿命

Cluster-based Wireless Sensor Network Rendezvous Routing Protocol

Yang Xu¹, Wang Chunjia², Li Li¹

(1. Department of Industrial Information Technology, Yunnan Vocational College of Mechanical and Electrical Technology, Kunming 650203, China; 2. Yunnan Normal University Elementary Education Group, Kunming 650092, China)

Abstract: In order to solve the problem of shorter network lifetime caused by more energy consumption of nodes near sink in existing WSN protocols, a cluster-based rendezvous routing protocol (CRRP) for wireless sensor networks was proposed. The protocol builds a rendezvous area in the middle of the network. The rendezvous area divides the entire network area and distributes network load among sensor nodes, which prolongs the network lifetime. The nodes in this rendezvous area are divided into different clusters, each cluster has a cluster head (CH), which is responsible for communication between different clusters, and the sink sends its updated location information in this intersection area, and when the sensor node wants to send data, it retrieves the current location information of sink from the rendezvous area and sends the data directly to the sink. Simulation results show that CRRP protocol is superior to Rendezvous protocol, LBDD protocol, Railroad protocol and Ring protocol in terms of energy consumption and network lifetime performance.

Keywords: wireless sensor network; rendezvous area, cluster-based rendezvous routing, network lifetime

0 引言

无线传感器网络 (WSN) 由大量低成本、低功耗和智能传感器节点以及一个或多个 sink 或基站 (BS) 组成^[1-2], 这些节点体积小, 可以执行许多重要功能, 包括事件感知、信息处理和数据通信^[3-4], WSN 已经广泛应用与军事应用和民用场景^[5-6], 由于易于部署, 扩展传输范围和自组织等各种优点, WSN 已经取代了传统网络。

WSN 中传感器节点成本低且能量有限, 由于这种能量约束, 有效的路由协议可以使得传感器节点感测环境并生成有用的数据^[7]。当用户或 sink 想要数据时, 将查询发送到具有相关数据的传感器节点, 传感器节点通过中间节点将生成的数据发送给用户或 sink。由于这些传感器节点具有有限的功率, 它们可以容易地耗尽其能量, 因此为了增

加网络寿命并减少延迟, 需要从源节点到 sink 数据的有效路由^[8]。随着 WSN 技术的深入, 平衡网络负载、延长网络寿命和均衡网络能量消耗已经成为 WSN 研究的重点。

WSN 中的分层路由是一个非常重要的主题, 在过去十年中一直吸引着研究者, 典型的分层路由称为簇的路由, 其中网络被分成多个簇, 低功耗自适应集簇分层协议 (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) 是一种典型的分层协议^[9], 目前许多协议都是在 LEACH 协议上进行改进得到的^[10], 如文献 [11] 中提出的基于非均匀分簇的无线传感器网络分层路由协议, 该协议以 LEACH 的分簇思想为基础, 通过分层机制及竞争机制选取簇首, 使簇首节点分布更加合理, 有效均衡节点的能量消耗。和文献 [12] 中基于簇首移动的无线传感器网络路由算法, 该协议创新点是将簇首设置为移动节点, 通过一定规则确定簇首每轮所需移动到的最佳位置, 实现节点能耗均衡。

最近关于 WSN 的研究有一部分为非典型分层路由, 包括基于链的路由协议、基于树的路由协议、基于网格的路由协议和基于区域的路由协议^[13]。基于区域的拓扑是一种最新结构, 其中一些传感器节点在特定区域中指定并充当

收稿日期: 2018-10-18; 修回日期: 2018-11-26。

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金教师类项目 (2018JS533)。

作者简介: 杨旭 (1982-), 男, 副教授, 主要从事物联网、无线传感方向的研究。

高层节点。高层节点执行从普通节点的数据收集和到数据的数据传输任务，可以根据负载均衡要求调整区域的大小^[14]。在基于区域的路由协议中，网络在不同区域之间划分，传感器节点是由他们所属的地区确定。LBDD 是一种典型的基于区域的路由协议^[15]，拓扑结构简单，通信方式也很简单，但是这种拓扑很容易导致能量消耗不平衡，此外，在大区域网络中，线路或条带上的泛滥将导致节点的大量能量消耗。与 LBDD 不同，Railroad 协议和 ring 由协议^[16]首先从会合区域获取 sink 的位置信息，然后将数据发送到 sink，但是两种路由协议在大型网络中导致过多的开销，而预期数据传输延迟高于 LBDD。

为了解决现有基于区域路由协议中能量不均衡、网络寿命问题，本文提出一种基于簇的交会路由协议 CRRP。在该协议中，整个传感器网络被划分为若干交会区域，并且根据所驻留的区域对节点进行分类。在本文中，簇在分区区域内构建，然后根据节点程度进行簇头选择，簇头具有 sink 位置的信息，只要 sink 的位置发生变化，sink 就会通过网关节点将其更新的信息发送到最近的簇头。为了找到 sink 的位置，常规节点将请求消息发送到其最近的骨干节点，并且该骨干节点将请求发送到簇头。通过这种方式，常规节点了解了 sink 的位置，然后直接将数据发送到 sink，当簇头开始耗尽其能量时，重新进行新簇形成。本文协议会合区域划分整个网络区域并在传感器节点之间分配网络负载，可以增加网络寿命。

1 CRRP 协议

在所提路由协议中，网络由若干传感器节点组成，传感器节点本质上是静态的。网络由交叉区域划分，并在其中构建簇，sink 将其更新的位置信息发送到交叉区域内的节点，并且源节点从它们获取 sink 的当前位置并将数据发送到 sink。

如图 1 所示，在网络中间构造一些水平和垂直宽度的虚拟区域，其中心位于任意位置 (u, v) 。该虚拟结构将网络划分为四个部分：1) 水平左 h_l ；2) 水平右 h_r ；3) 垂直向上 v_u ；4) 垂直底部 v_b 。这个交叉区域充当交会区域，位于该会合区域内的传感器节点被称为骨干节点。在该交叉区域中，基于节点和最大公共邻接节点来构造簇，每个簇由一个簇头组成。这些簇头负责将 sink 的位置发送到源节点，并根据 sink 的当前位置更新 sink 位置。该协议包括发现邻居、形成交叉区域、簇的形成和簇头创建，发现传感器节点区域和最终数据传输。

首先对 WSN 网络模型进行假设：

- 1) 部署后，所有传感器节点都是静止的。
- 2) Sink 将改变其位置，即 sink 是移动的。
- 3) 对于 sink 的计算能力，电池消耗和存储器没有限制。
- 4) 传感器节点的能量有限。

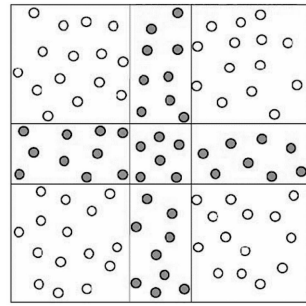


图 1 交会区域和骨干节点的初始视图

- 5) 所有传感器节点均匀。
- 6) 为每个节点分配一个唯一的 ID。
- 7) 网络拓扑在簇形成时不受影响。

本文协议的整体流程见图 2 所示。

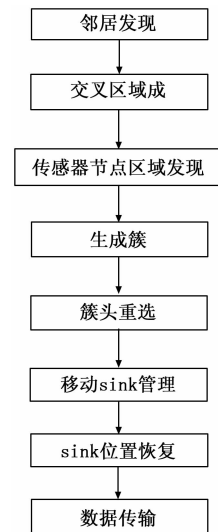


图 2 本文协议流程图

1.1 邻居发现和交会区域形成

在邻居发现的第一阶段，起始节点广播邻居发现 (NBR_D) 控制包，包含节点的 ID，节点位置及其剩余能量水平。在接收到该包时，该节点邻居表包含发送方节点的节点 ID，其位置和剩余能量。如果表中已经存在发送方节点的条目，则接收方丢弃该包；如果先前没有广播，sink 也广播相同的包。在此阶段结束时，所有节点都具有关于其一跳邻居的信息。

算法 1：邻居发现。

$Nb(x)$ 任何节点 x 的邻居集合，初始化为 \varnothing

$Nb_{table}(x)$: 由节点 x 维持的邻居表初始化为 \varnothing

E_{rx} : 节点 x 的能量

NBR_D_x : 如果传感器节点 x 发送数据包，则节点 x 的邻居发现控制数据包设置为真，初始化为 false

Loc_x : 节点 x 的位置

$NBR_D; < NBR_D, id_y, Er_y, Loc_y >$ if $(id_y \notin Nb(x))$ then

$Nb(x) = Nb(x) \cup y;$

用 $< id_y, Er_y, Loc_y >$ 更新 $Nb_{table}(x)$

```

if( NBR_Dx == false ) then
NBR_Dx ← true
1_rh(NBR_Dx, idx, Erx, Locx);
▷ 广播 NBR_D 包
else 丢弃包
endif
else 丢弃包
endif

```

对于交会区域的生成与构建, 将其视为 (X_{\max}, Y_{\max}) , 并将区域的宽度视为 ω 。因此 ω_x 和 ω_y 可以确定条带的水平和垂直范围。

$$\omega_x = \left(\frac{X_{\max} - \omega}{2} \right) \text{ to } \left(\frac{X_{\max} + \omega}{2} \right) \quad (1)$$

$$\omega_y = \left(\frac{Y_{\max} - \omega}{2} \right) \text{ to } \left(\frac{Y_{\max} + \omega}{2} \right) \quad (2)$$

1.2 传感器节点区域发现

传感器节点使用它们的位置信息坐标 (x, y) 来确定它们所属的区域。例如, 驻留在第一分区和第八分区中的节点将从 h_r 与目的地 (x, v) 通信。以相同的方式, 第二和第三分区的传感器节点可以从 v_u 与目的地 (u, y) 等进行通信, 其中 (u, v) 是网络的中心。

算法 2: 节点区域发现。

```

θ = 0, α = 0
(u, v): 网络的中心
(x, y): 节点的位置
令 π = 180°; C ← (u, v)
▷ C 定义了网络的中心。
计算节点 x 与位置的新坐标 (x-u, y-u) 和 (x, y)
(A, B) ← (x-u, y-u)
计算 θ = tan-1 | B/A |
if (A > 0 && B > 0) then α ← θ
if (α 位于 0 与 π/4 之间) then
具有位置 (x, y) 的节点属于第 1 区域, 可以从 hr 与目标位置进行通信 (x, v)。
elseif (α 位于 π/4 与 π/2 之间) then
具有位置 (x, y) 的节点属于第 2 区域, 可以从 vu 与目标通信位置 (u, y)。
endif
endif
if (A < 0 && B > 0) then α ← π - θ
if (α 位于 π/2 与 3π/4 之间) then
具有位置 (x, y) 的节点属于第 3 区域, 可以从 vu 与目标位置通信 (u, y)。
elseif (α 位于 3π/4 与 π 之间) then
位置为 (x, y) 的节点属于第 4 区域, 可以从 hr 节点与目标位置通信 (x, v)。

```

```

endif
endif
if (A < 0 && B < 0) then α ← π + θ
if (α 位于 π 与 5π/4 之间) then

```

位置为 (x, y) 的节点属于第 5 区域, 可以从 h_r 节点与目标位置通信 (x, v) 。

```
elseif (α 位于 5π/4 与 3π/2 之间) then
```

位置为 (x, y) 的节点属于第 6 区域, 可以通过 v_b 与目标通信位置 (u, y) 。

```
endif
```

```
endif
```

```
if (A > 0 && B < 0) then α ← 2π - θ
```

```
if (α 位于 3π/2 与 7π/4 之间) then
```

位置为 (x, y) 的节点属于第 7 区域, 可以通过 v_b 与目标位置进行通信 (u, y) 。

```
elseif (α 位于 7π/4 与 2π 之间) then
```

位置为 (x, y) 的节点属于第 8 区域, 可以从 h_r 与目标位置进行通信 (x, v) 。

```
endif
```

```
endif
```

1.3 簇的生成

通过以下步骤在集合区内建立簇:

- 1) 簇形成机制由具有最高节点度的节点 i 发起;
- 2) 在初始节点的单跳邻居中, 找出节点 p , 具有最大的公共邻接。如果有多个节点, 则考虑 ID 最低的节点;
- 3) 节点 i 和 p 的一个跳邻居中常见的节点属于包括 i 和 p 的一个簇, 节点 i 将被视为簇头 (CH);
- 4) 具有最节点度的剩余节点 i (发起节点) 的一跳邻居为簇的形成开始相同的进程, 并声明自己为 CH。

簇生成伪代码见算法 3。

算法 3: 簇的生成:

```

N: 网络中节点的总数
(Vi, Ei): 节点 i 的连通矩阵
▷ Vi 包含节点 i 和它的单跳邻居
▷ Ei 包含 Vi 中节点之间的双向边
i: 发起节点
S(i): 节点 i 的邻居集
L(i): L(i) 包含节点 i 的一个跳过邻居节点
C(i): 簇中元素集合, 最初为空
N-C(i): 不在簇中的节点集
i = maxdeg degree(Nj) ▷ j 是任意节点
S(i) = {j, (i, j) ∈ Ei}, C(i) = {i} While (L(i) ≠ φ)
发现 p ∈ L(i) 与最大 |L(i) ∩ L(p)|
C(i) ← [Ci ∪ {p} ∪ {j, (j, p)} ∈ Ei]
N-Ci ← [Vi ∉ Ci]
Endwhile

```

$i = \max_{\text{arg}i} \text{degree}(N_{C_i})$

$CH \leftarrow i$

对节点 i 重复步骤 2

簇形成过程如图 3 所示, 假设节点 1 具有最大的节点度, 因此启动了簇的形成过程。节点 (2, 3, 4, 5, 6) 是相邻的节点。根据算法 3, 节点 3 应该是节点 p , 因为它与节点 1 的公共邻域最大。所以节点 (1, 2, 3, 4, 5) 必须在一个簇中, 节点 1 应该是 CH。

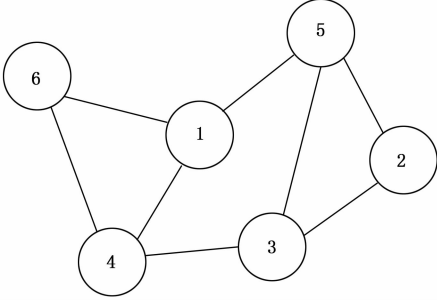


图 3 簇形成技术

在本文协议中, 簇头重选与新的簇形成一起发生, 步骤为:

1) 当任何簇头节点 i 开始耗尽其能量时, 按照算法 1 得到簇内具有最大公共邻接的节点;

2) 节点将声明为新的簇头, 并按照算法 3 生成新的簇。

1.4 移动 sink 管理

在协议汇聚节点的这个阶段, 节点通过网关节点将其位置通知给簇头节点, 集合点区域内的所有簇头都有关于 sink 位置的信息。当 sink 移动时, 将 Beacon 包广播到其邻居之后, sink 选择其邻居之一将其位置信息中继到集合区域内最近的簇头之一。sink 借助传感器节点区域发现机制或借助位置因子 (LF) 转发数据。

令节点 i 想要从邻居节点 $Nb(i)$ 中选择其中一个邻居节点, Er_i 是其剩余能量, $LF(i)$ 定义节点 i 的每个相邻节点的位置因子。具有坐标 (x_k, y_k) 的 $k \in Nb(i)$ 具有残余能量 Er_k , 并且节点 k 距离目的地的 Euclidean 距离是 D_k 。

$$Er_{\max} = \max_{k \in Nb(i)} Er_k \quad (3)$$

那么 k^{th} 邻居的 $LF(k)$ 可以计算为:

$$LF(k) = Er_k * \frac{1}{D_k} = \frac{Er_k}{D_k} \quad (4)$$

$$Er_k = \frac{Er_k}{Er_{\max}}, D_k = \sqrt{(x_{\text{dest}} - x_k)^2 + (y_{\text{dest}} - y_k)^2} \quad (5)$$

$$\text{next_node}_i = \max(LF(i)) \quad (6)$$

其中: next_node_i 是由节点 i 选择的相邻节点。

算法 4: 移动 sink 管理:

Loc_sink_x : 任何节点 x 都存储 sink 位置信息

B_x : 如果任何标记为主干节点的节点 x 为真, 初始化为 false

$sink_loc$: sink 的位置

Beacon: $\langle Beacon, id_sink \rangle$ $l_rf(BeaconReply, id_x, Er_x,$

$id_sink)$;

▷ 将 BeaconReply 包单播到 sink

使用主干节点作为算法 2 中的骨干节点发送位置 sink, 汇聚节点转发位置使用位置因子将包发送到节点 z ;

$l_rf(Location, id_sink, sink_loc, next_node_z)$;

▷ 位置包被单播到选定位置节点 z 。

节点 y 或 sink 向节点 x 发送以下数据包。

Location: $\langle Location, id_y, sink_loc, next_node_y \rangle$

if ($id_x == next_node_y$) then

if ($Loc_sink_x \neq sink_loc$) then

$Loc_sink_x \leftarrow sink_loc$

if ($B_x == true$) then

x 将 sink 信息发送给它的 CH。

else 选择距离目标最近的节点 z 。

endif

else

丢弃包;

endif

else

丢弃包;

endif

一旦到达骨干节点的 sink 位置信息, 就发送到其簇头, 然后该簇头以相同的方式将其发送到其相邻的簇头, 现在所有簇头具有关于 sink 的新位置的信息。

1.5 sink 位置恢复

Sink 的位置信息在簇头的帮助下到达常规节点, 当常规节点想要传输数据时, 它应该知道从集合区域内的簇头获得新 sink 的位置。它通过使用位置因子选择相邻节点来发送 Loc_{req} 的包, 并且该相邻节点将请求包转发到其最近的骨干节点。一旦到达骨干节点, 骨干节点就会将其转发到其簇头, 簇头已经有了新的 sink 的位置信息, 因此簇头将 sink 位置信息转发到常规传感器节点, 如算法 5 所示。

算法 5: sink 位置恢复。

CH: 具有 sink 位置

CH_{id} : 簇头的 id

B_x : 如果任何节点是骨干节点, 则为真

$sink_Loc$: Sink 的位置

$next_node_x$: 任何下一个节点都由任何节点 x 选择转发该数据包

$reverse_x$: 簇头 x 选择节点将 sink 的位置发送到请求的节点

Loc_{req} 节点从节点 $y \in Nbr(x)$ 接收数据包

Loc_{req} : $\langle Loc_{req}, id_y, next_node_y \rangle$ if ($id_x == next_node_y$) then

$reverse_x \leftarrow id_y$;

if ($B_x == true$)

B_x 将 Loc_{req} 转发给它的 CH。

$l_r(Loc_{reply}, CH_{id}, sink_loc reverse_x)$;

▷ 响应请求的节点。

else

▷ 节点 x 使用位置因子选择 $next_node_x$

```

l_r(Loc_req, id_x, next_node_x);
endif
else
丢弃包
endif

```

最后进行数据传输, 在从骨干节点传感器节点获得有关 sink 位置的信息之后, 借助于相邻节点将数据转发到 sink。传感器节点借助于位置因子, 基于剩余能量和距离 sink 的最小距离来选择相邻节点。在接收数据时, 相邻节点使用相同的技术将其转发到其邻居, 重复相同的过程直到数据到达 sink。

2 仿真结果分析

为验证本文 CRRP 协议有效性, 将本文算法与现有其他算法进行比较, 仿真实验环境为 MATLAB R2013b, 基于表 1 中所示的参数来执行仿真实验。

表 1 仿真实验参数

参数	值	参数	值
网络区域	500 × 500m ²	E_{dec}	50nJ/bit
传感器节点数	200	δ_{fs}	10pJ/bit/m ²
数据包大小	512 bytes	δ_{mp}	0.0013pJ/bit/m ⁴
控制数据包大小	32 bytes	模拟时间	600s
初始能量	1J	E_{trc}	0.2nJ/s
δ	5 s	d_0	87m

传感器节点发送控制包以构建会聚区域并管理汇聚移动性, 图 4 中给出了不同协议的具有不同 sink 速度的控制包的平均能耗。将本文协议与现有其他协议进行比较, 包括 Rendezvous 路由协议^[17], LBDD 路由协议, Railroad 路由协议和 Ring 路由协议。

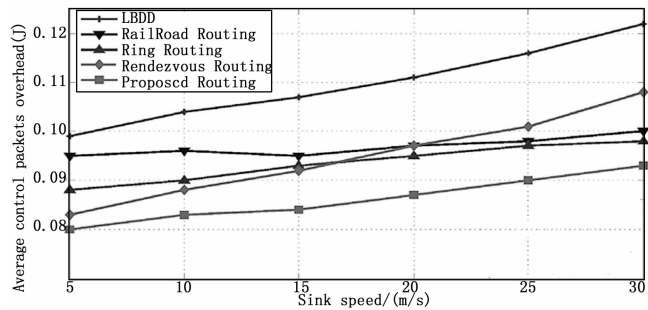


图 4 控制数据包开销

如图所示, 与其他协议相比, 本文协议的控制包开销非常少, 少于其他协议, 这是因为本文协议中, 会合区域与源或 sink 之间的平均距离小于其他协议, 且在本文协议中只有部分高层节点 (即簇头) 参与到发送 sink 位置到源节点的主要任务中, 而源节点通过建立有效的路由将数据发送到 sink, 这种方法将有助于降低能耗。而在 LBDD 中, 内联节点存储来自源节点的数据, 当该内联节点收到查询时, 它会将数据发送到 sink, 这会导致控制数据包开销增

加。在 Railroad 路由协议中, 站点处的元数据存储过程和从站点检索 sink 位置的过程需要控制包交换。在 Ring 路由协议中, 所有环节点都存储 sink 的位置, 随着网络操作的进行, 它需要交换控制包来修复环, 因此环长度增加, 导致更多的能量消耗。Rendezvous 路由协议在交会区域内保持树来发送数据, 控制包需要根据 sink 位置来设置链路。随着速度的增加, 导致控制数据包开销增加。各种协议的每个节点的总能量消耗如图 5 所示。

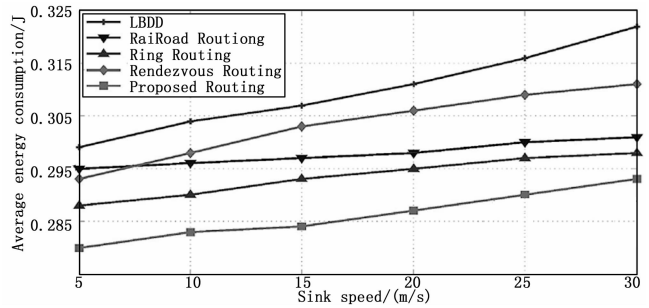


图 5 平均能耗

可以观察到, 由于更大的控制包开销, LBDD 的能量消耗最高, 其存储来自源节点的数据, 并在会合区域中淹没 sink 的查询, 随着 sink 速度的增加, LBDD 的能量消耗近似线性增长。Rendezvous 协议不需要 sink 位置, 但是平均路径长度高于 Railroad 协议, Ring 路由协议总能量根据 sink 速度而增加。本文协议中, 源和 sink 之间的平均距离几乎与 Railroad 和 Ring 路由协议相同, 由于较少的控制包开销, 使得本文所提协议能耗少于现有其他协议。

每个节点的能量消耗和传感器节点之间的不平衡负载影响网络寿命, 在图 6 中给出了不同协议之间的网络寿命性能, 可以看出本文协议的网络寿命大于其他协议的网络寿命, 原因是本文协议消耗更少的控制包, 平衡传感器节点之间的负载, 并遵循用于数据传输的最佳路由。

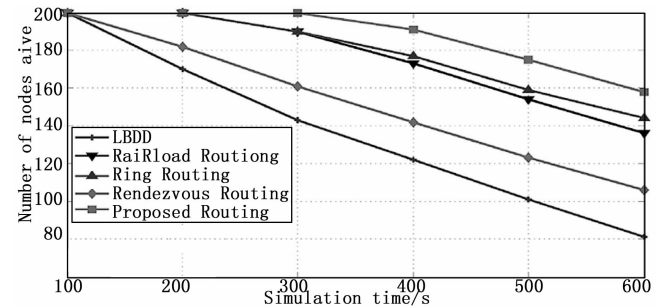


图 6 网络寿命

3 结论

在本文中, 提出了一种基于簇的会合路由协议 CRRP, 其中在会合区域内构建簇以实现可扩展性并维持网络负载, 当传感器节点想要将数据传输到 sink 时, 从该会合区域获取 sink 的位置信息, 然后将数据发送到 sink。所有骨干节点都不参与 sink 位置检测, 只有簇头参与到发送 sink 位置

到源节点的主要任务中，能够使得 WSN 降低能耗和延长网络寿命。将本文协议与现有 LBDD 协议、Ring Routing 协议、RailRoad 和 Rendezvous 协议进行比较，仿真实验表明，本文协议在能耗和网络寿命性能方面优于其他现有协议，表明本文方法的可行性与有效性。

参考文献:

[1] He D, Kumar N, Chilamkurti N. A secure temporal-credential based mutual authentication and key agreement scheme with pseudo identity for wireless sensor networks [J]. Information Sciences, 2015, 321: 263 - 277.

[2] Han G, Liu L, Jiang J, et al. Analysis of energy-efficient connected target coverage algorithms for industrial wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13 (1): 135 - 143.

[3] Zhang D, Li G, Zheng K, et al. An energy-balanced routing method based on forward-aware factor for wireless sensor networks [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2014, 10 (1): 766 - 773.

[4] 邓 斌, 石志东, 房卫东, 等. 无线传感器网络安全多径路由协议研究 [J]. 计算机应用与软件, 2016, 33 (11): 263 - 268.

[5] Kurt S, Yildiz H U, Yigit M, et al. Packet size optimization in wireless sensor networks for smart grid applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (3): 2392 - 2401.

[6] He D, Kumar N, Chen J, et al. Robust anonymous authentication protocol for health-care applications using wireless medical sensor networks [J]. Multimedia Systems, 2015, 21 (1): 49 - 60.

[7] Shaikh F K, Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 1041 - 1054.

[8] 夏少波, 邹建梅, 朱晓丽, 等. 无线传感器网络 DV-Hop 定位

算法的改进 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (2): 340 - 344.

[9] Singh S K, Kumar P, Singh J P. A Survey on Successors of LEACH Protocol [J]. IEEE Access, 2017, 99 (5): 4298 - 4328.

[10] Mottaghi S, Zahabi M R. Optimizing LEACH clustering algorithm with mobile sink and rendezvous nodes [J]. AEUE - International Journal of Electronics and Communications, 2015, 69 (2): 507 - 514.

[11] 黄廷辉, 伊凯, 崔更申, 等. 基于非均匀分簇的无线传感器网络分层路由协议 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (1): 66 - 71.

[12] 陶志勇, 蒋守凤. 基于簇首移动的无线传感器网络路由算法 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52 (5): 75 - 78.

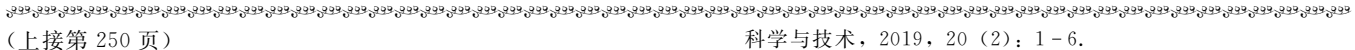
[13] Liu X. A typical hierarchical routing protocols for wireless sensor networks: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15 (10): 5372 - 5383.

[14] Sreejith V, Surve R, Vyas N, et al. Area based routing protocol for mobile wireless sensor networks [A]. International Conference on Information NETWORKING [C]. Chiang Mai, Thailand: IEEE Computer Society, 2018: 782 - 786.

[15] Kim C, Cho H, Kim S, et al. Sink mobility support scheme for continuous object tracking in wireless sensor networks [A]. Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2016 IEEE 30th International Conference on [C]. Crans - Montana, Switzerland: IEEE, 2016: 452 - 457.

[16] Khan A W, Abdullah A H, Razzaque M A, et al. VGDR: a virtual grid-based dynamic routes adjustment scheme for mobile sink-based wireless sensor networks [J]. IEEE sensors journal, 2015, 15 (1): 526 - 534.

[17] Sharma S, Puthal D, Jena S K, et al. Rendezvous based routing protocol for wireless sensor networks with mobile sink [J]. The journal of Supercomputing, 2017, 73 (3): 1168 - 1188.



(上接第 250 页)
行径路线的远程控制和机械手臂的跟随运动。OpenCL 加速子系统的运用，使得 VR 显示成为可能，让操作者可以身临其境地操控机器人。总的来说，综合运用各项技术，实现了六足仿生机器人的全部设计功能，但离真正应用于实际，尚有很多方面需要努力，我们后续将不断完善。

参考文献:

[1] 邓海涛, 吴 捷, 等. DE1-SoC 开发平台上的图像采集系统设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017, 17 (1), 44 - 46.

[2] 刘天宋, 高学群, 虞益龙, 等. 使用弯曲传感器的机器人手势控制系统设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018, 18 (9), 39 - 41.

[3] 胡安琪. PID 控制在地面轮式机器人中的运用 [J]. 河北电力技术, 2018, 37 (5): 58 - 62.

[4] 张 磊, 王 哲. 六足仿生机器人的平稳姿态调整 [J]. 机械

科学与技术, 2019, 20 (2): 1 - 6.

[5] 张帅帅. 复杂地形环境中四足机器人行走方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.

[6] 罗传飞, 孔德辉, 刘翔凯, 等. 智慧家庭的 VR 全景视频业务实现 [J]. 电信科学, 2017, 33 (10): 185 - 193.

[7] 鲍云峰, 曾张帆, 唐文龙, 等. 基于 OpenCL 与 FPGA 异构模式的 Sobel 算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (1): 216 - 221.

[8] 殷 伟. 基于 FPGA 的卷积神经网络并行加速体系架构的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.

[9] 丁倩雯, 徐红红. 基于 Arduino UNO 的平衡车设计 [J]. 西安文理学院学报 (自然科学版), 2019, 22 (1): 53 - 57.

[10] 章雪挺, 许 欢. 基于模糊卡尔曼的 MEMS 陀螺误差校正算法研究 [J]. 杭州电子科技大学学报 (自然科学版), 2019, 39 (1): 1 - 6.