

引用格式: 张毅, 李静. 面向 BLE Mesh 能量优化的路由协议研究[J]. 微电子学与计算机, 2023, 40(10): 56-63. [ZHANG Y, LI J. Routing protocol research for BLE mesh energy optimization[J]. Microelectronics & Computer, 2023, 40(10): 56-63.] DOI: 10.19304/J.ISSN1000-7180.2022.0790

## 面向 BLE Mesh 能量优化的路由协议研究

张毅, 李静

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

**摘要:** 近年来, 物联网技术不断进步与突破, 全球物联网行业呈现爆发式增长态势. 低功耗蓝牙自组网 (Bluetooth Low Energy Mesh, BLE Mesh) 应运而生, 相较于其他的 Mesh 协议, BLE Mesh 是竞争力极强的通信方式. 然而, 现有的 BLE Mesh 只考虑以管理型泛洪协议进行数据传输. 当网络规模或传输数据量增大时, 网络中将会充斥大量冗余数据, 导致能耗增加. 针对能耗问题, 本文提出面向 BLE Mesh 的节点组合式按需路由协议. 首先, 通过邻居节点信息交换、节点组合配置和节点组合全连通三个步骤建立节点组合式网络拓扑. 其次, 使用路由探测包和路由回复包得到所有传输路径中的最短路径. 最后, 源节点沿着最短路径依次发送数据包. 该协议通过限制普通节点转发, 仅允许领导节点和中继节点转发数据包, 减少转发节点数量, 以达到抑制冗余数据包的目的. 在 MATLAB R2022a 上仿真对比该节点组合式按需路由协议与管理型泛洪协议, 结果表明, 源节点向目的节点发送 100 个数据包时, 该协议降低了网络中 92.43% 的数据包总量, 进而减少了能量消耗, 并且, 源节点传输的数据包越多, 效果越明显.

**关键词:** 低功耗蓝牙自组网; 路由协议; 能量优化

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2023)10-0056-08

## Routing protocol research for BLE mesh energy optimization

ZHANG Yi, LI Jing

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of  
Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In recent years, IOT technology has continued to advance and breakthrough, and the global IOT industry has seen explosive growth. Bluetooth Low Energy Mesh has emerged as a highly competitive communication method compared to other mesh protocols. However, existing BLE Mesh only considers managed flooding protocols for data transmission. When the size of the network or the amount of transmitted data increases, the network will be filled with a large amount of redundant data, resulting in increased energy use. To address the energy consumption problem, this paper proposes a node-combined on-demand routing protocol for BLE Mesh. Firstly, the node-combined network topology is established through three steps: neighbor node information exchange, node combination configuration and node combination full connectivity. Secondly, route probe packets and route reply packets are used to obtain the shortest path of all transmission paths. Finally, the source node sends packets sequentially along the shortest path. The protocol reduces the number of forwarding nodes by limiting ordinary node forwarding and allowing only leader and relay nodes to forward packets in order to suppress redundant packets. Simulation on MATLAB R2022a compares this node-combined on-demand routing protocol with a managed flooding protocol. The results show that the protocol reduces the total number of packets in the network by 92.43% when the source node transmits 100 packets, thus reducing the energy consumption. Moreover, the more packets the source node transmits, the better the result.

**Key words:** BLE Mesh; Routing Protocols; Energy Optimization

## 1 引言

2017 年 11 月, 蓝牙特别兴趣小组 (Bluetooth Special Interest Group, SIG) 公开了 BLE Mesh 标准 V1.0<sup>[1]</sup> 后, BLE Mesh 实现了多对多的通信方式, 并以低功耗、低成本的优势迅速成为物联网领域的研究热点, 有望在物联网中发挥重要作用<sup>[2]</sup>. 然而, 目前 BLE Mesh V1.0 只考虑管理型泛洪协议进行网络信息的传输. 当网络规模或传输数据量增大时, 网络中将会充斥大量冗余数据包, 导致非必要功耗增加, 浪费大量网络资源<sup>[3]</sup>.

针对管理型泛洪过度消耗能量问题, 一部分学者在不改变泛洪机制的前提下展开了研究. 文献 [4] 评估并比较了不同基于连通支配集选择 (Connected Dominating Set, CDS) 中继选择算法的适用性, 证明了选择适当的中继节点有助于减轻 BLE Mesh 管理型泛洪机制的缺陷. 研究较为广泛的也正是通过按条件选择中继节点<sup>[5-8]</sup> 以及随机选择中继节点<sup>[9]</sup> 等减少中继节点数量的方式降低网络能耗. 文献 [10] 提出了均衡泛洪传输协议, 通过减少中继的时间从而增加了网络的寿命. 文献 [11] 提出了增强型泛洪协议, 通过调整中继的发射功率降低了网络功耗. 然而, 由于泛洪机制本身存在的问题, 即使减少了中继节点数量、中继时间或中继发射功率, 网络中依旧存在大量的冗余数据包, 从而引起非必要功率消耗. 文献 [12] 提出了一种异步动态扫描机制, 在保证可靠性的前提下, 通过在传输数据前发送一个新的控制消息序列, 减少了节点的扫描周期进而降低了网络功耗, 然而, 文中仅考虑了 4 个节点的小型网络场景, 该方法对于网络中存在大量节点的情况并不适用. 还有学者给出了路由模式的解决方案. 文献 [13] 提出了基于集群的按需路由协议, 通过在网络中建立集群, 并利用按需路由方法减少了路由发现过程中路由请求报文的数量, 从而降低了能耗. 然而, 在建立集群选取中继节点时, 文中仅考虑依据节点编号大小从候选中继节点集中选取中继节点, 未考虑节点与节点间的距离因素.

根据以上研究现状, 本文提出一种节点组合式按需路由协议, 将该路由协议应用于 BLE Mesh 网络, 通过限制普通节点转发, 仅允许领导节点和中继节点转发数据包, 减少转发节点数量, 以达到抑制冗余数据包的目的. 实验结果表明, 本文所提出的节点组合式按需路由协议, 相比管理型泛洪协议, 能有效减少网络中非必要数据包的数量, 进而降低网络总能量消耗.

## 2 管理型泛洪协议

BLE Mesh 网络使用泛洪协议对消息进行广播. 如图 1 所示, 假设 3 号为源节点, 8 号为目的节点. 源节点 3 号先进行广播, 其在无线通信范围内的邻居节点 1、2、4 号将接收到消息. 上述三个节点收到消息判断自身非目的节点后, 继续传输此消息给与之相邻节点. 以此类推, 直至 8 号收到来自 3 号的消息.

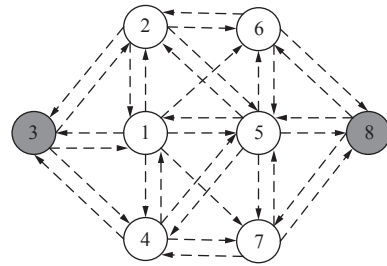


图 1 泛洪方式传递数据信息图

Fig. 1 Data information is transmitted by flooding

为了避免无限制的中继给网络造成灾难性的影响, BLE Mesh 网络采取了一系列的措施, 其中, 包括两个主要方法: 信息缓存队列和 TTL 字段<sup>[14]</sup>. 具体机制如下所示:

(1) 信息缓存机制: 每个节点都包含一个网络信息缓存队列, 用于保存已中继过的信息, 如果收到的新消息与队列中的消息相匹配, 则可直接丢弃, 无需进一步处理.

(2) TTL 字段: 每条消息中都包含一个 TTL 字段, 该字段可限制消息的跳数. 消息每次被中继, 包含的 TTL 值将被减 1, 每个消息最多可以被中继 126 次.

## 3 节点组合式按需路由协议

节点组合式按需路由协议由 3 个阶段构成, 总体架构图如图 2 所示. 阶段 1 为节点组合式拓扑建立, 通过邻居节点信息交换、节点组合配置和节点组合全连通 3 个步骤, 将网络拓扑划分为节点组合式拓扑结构. 阶段 2 为路由建立, 当源节点有向目的节点传输数据包的需求时, 通过路由探测、路由回复 2 个步骤得到所有传输路径中的最短路径. 阶段 3 为传输数据包, 源节点发送的数据包随着阶段 2 找到的最短路径依次向目的节点传输.

### 3.1 节点组合式拓扑建立

节点组合式拓扑建立共分为 3 个步骤, 步骤 1 为邻居节点信息交换, 通过邻居节点信息交换得到自身的邻居信息以及邻居节点的邻居计数. 步骤 2 是节

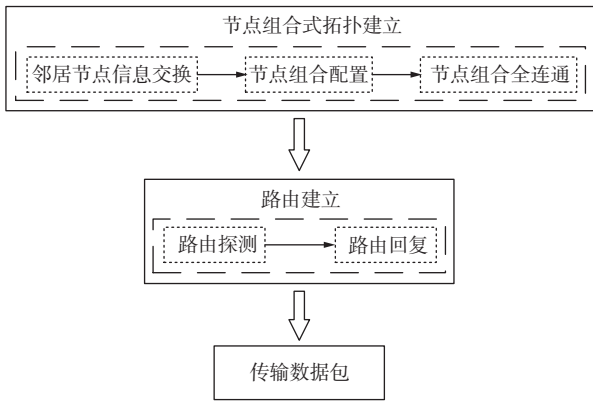


图 2 总体架构图

Fig. 2 Overall architecture diagram

点组合配置,根据邻居节点信息分配各节点的角色. 步骤 3 是节点组合实现全连通,将部分普通节点升级为中继节点,更新升级的中继节点的角色,实现整个网络中所有节点均可达.

通过节点组合式拓扑建立,可以将网络拓扑划分为不同的节点组合,每个节点组合里的节点角色有领导,中继及普通三种类型,为降低复杂度,防止两个节点组合间信息交换过载,规定在两个节点组合中只包含一个中继节点,且只有领导节点以及中继节点具有转发数据包的能力,普通节点由于没有转发能力,收到来自其他节点的数据包时直接丢弃,其普通节点只能与领导节点相互通信.

### 3.1.1 邻居节点信息交换

由于 BLE Mesh 网络的数据包长度有限,将邻居节点信息封装至数据包中不仅难以实现,而且仅当发送数据时,才可被动地更新邻居信息表,因此使用 Mesh Beacon 类型的广播包主动地更新邻居信息表<sup>[15]</sup>.

BLE Mesh 标准规范定义了两种信标. 一种是未配网信标,信标种类值为 0x00. 另一种是安全网络信标,信标种类值为 0x01. 信标种类定义为 1 个字节,剩余的 0x02-0xFF 被定义为保留位,本文将 0x02 作为邻居节点信息交换信标. 其载体是非定向不可连接广播包,如图 3 所示. 每个节点只需要收集邻居节点的 ID 和邻居数,因此广播包的数据部分仅包含以上两个字段. 本文的节点 ID 与邻居计数字段设计为 1 个字节.

在邻居节点信息交换过程中,BLE 节点通过交换一跳的广播包来收集相邻节点的 ID 和邻居数信息,节点发现过程如图 4 所示. 邻居节点信息交换流程图如图 5 所示. 每当收到广播包,BLE 节点更新自己的信息单元,信息单元设计如表 1 所示. 邻居数初

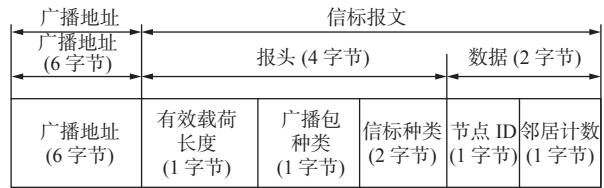


图 3 邻居节点信息交换包图

Fig. 3 Neighbor node information exchange packets

表 1 信息单元

Tab. 1 Information unit

字段	字节数
节点 ID	1
邻居计数	1
第一个节点组合 ID	1
第二个节点组合 ID	1
角色	1
邻居节点集	n

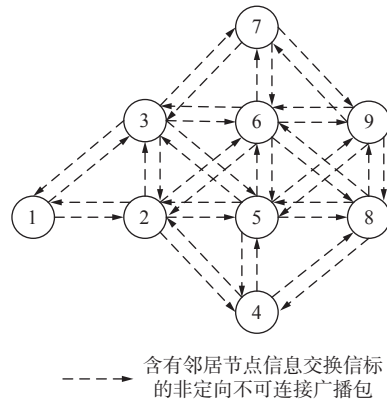


图 4 节点发现过程图

Fig. 4 The node discovery process

始值设为 0,其余字段均为空.

### 3.1.2 节点组合角色配置

经过步骤 1 后,每个 BLE 节点均已获取节点自身邻居节点集. 还需交换两跳的邻居节点信息交换包以获取无线通信范围内邻居计数最大的节点. 考虑到能耗问题,一个领导节点应负责管理尽量多的节点,因此选择邻居计数最大的 BLE 节点作为领导节点. 当出现邻居计数相同的情况时,选择距离所有邻居节点距离总和最近的节点作为领导节点,并将其角色升级为领导节点. 其余节点则定义为普通节点,并将其角色更新为普通节点. 节点组合配置过程如图 6 所示. 节点角色配置流程图如图 7 所示.

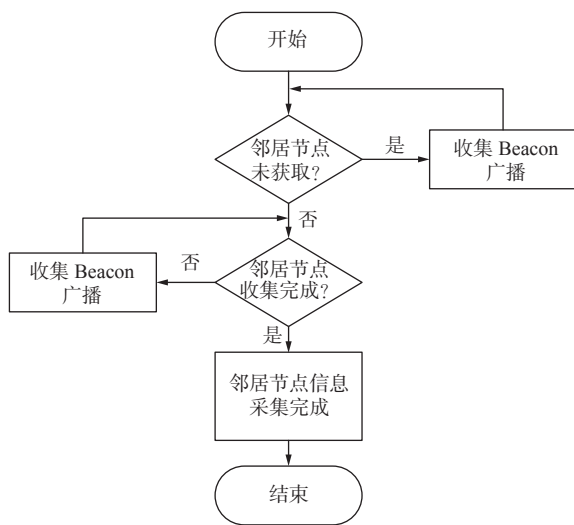


图 5 邻居节点信息交换流程图

Fig. 5 Neighbor node information exchange process

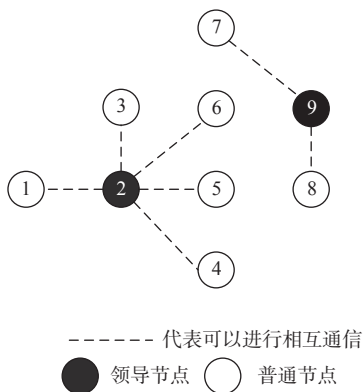


图 6 节点组合配置过程图

Fig. 6 Node composition configuration process

### 3.1.3 节点组合实现全连通

当节点组合配置之后,各个节点组合之间是相对孤立的,为实现相互通信功能,需构建孤立节点组合间的桥梁,将部分普通节点升级为中继节点完成孤立节点组合的相互连通,进而实现整个网络内任意节点均可达. 本文将满足网络内任意节点均可达定义为节点组合实现全连通. 其中,升级的步骤如下:

(1) 领导节点搜索相邻节点,在领导节点无线通信范围内,但非归属于本组合的节点加入中继节点的候选节点集.

(2) 当领导节点在同一相邻的节点组合中找到多个候选中继节点时,选择距离两个节点组合领导节点平均距离最小的点升级为中继节点.

(3) 升级后的中继节点将自身的角色更新为中继,并将该领导节点 ID 作为自己隶属的第二个节点

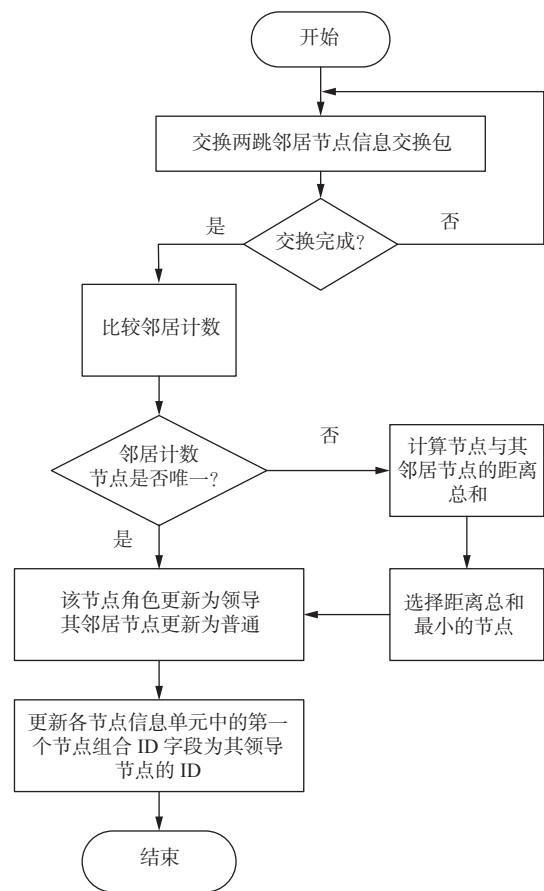


图 7 节点角色配置流程图

Fig. 7 Process for configuring node roles

组合 ID.

节点组合实现全连通过程图如图 8 所示.

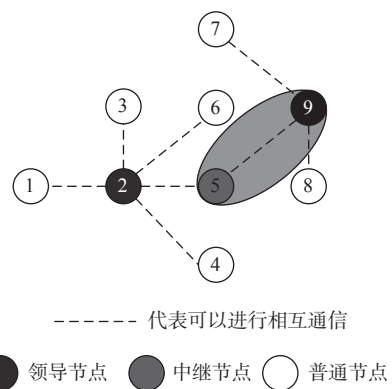


图 8 节点组合实现全连通过程图

Fig. 8 Node combination realizes the full connection process

### 3.2 路由建立

节点组合式拓扑建立完成后,当源节点需要向目的节点传输数据包时,为进一步减少网络中的数据包量,源节点需找到一条到目的节点的最短路径. 本文考虑的方法为: 源节点使用路由探测包依据最短跳

数确定最短路径,目的节点使用路由回复包通知源节点. 路由建立流程图如图 9 所示.

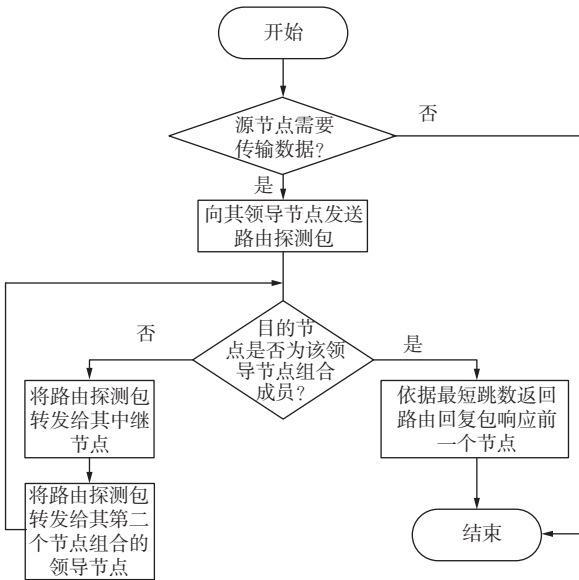


图 9 路由建立流程图

Fig. 9 Process for route establishment

路由探测包与路由回复包均为 Mesh Message 类型的广播包,携带的数据为自身节点 ID,大小为 1 字节. 由于是广播包,因此当节点发送该类型的数据包时,在无线电范围内的所有节点均能接收,但只有特定的节点才能进行下一步转发.

源节点向其领导节点转发路由探测包,请求到达目的地的路由路径. 首先,领导节点在其所管理的邻居节点中搜索目的地. 若目的地并非归属于本节点组合的成员,领导节点则将路由探测包转发给其中继节点,中继节点再将路由探测包转发给其第二个节点组合的领导节点. 另一个节点组合的领导节点在其邻居列表中搜索目的地. 此过程将持续进行,直到找到目的节点. 当路由探测包到达目标节点的节点组合时,该节点组合的领导节点依据跳数从多个路径中选择最短路径,并沿最短路径使用路由回复包响应前一个节点. 路由建立过程如图 10 所示.

### 4 实验与分析

本文对 BLE Mesh 网络进行如下设定:

- (1) 为保证任意节点均可达,每个节点在无线通信范围内至少有一个邻居节点.
- (2) 相互通信的节点之间完全信任.
- (3) 每个节点的 ID 固定且唯一.
- (4) 所有节点位置经部署后固定,不能改变位置.

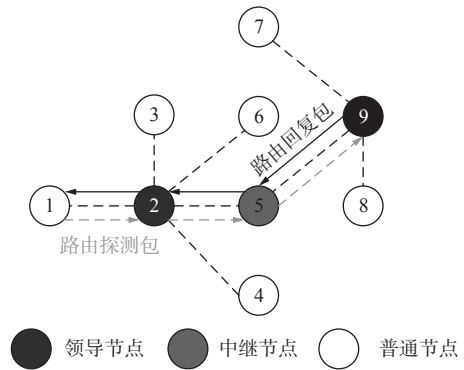


图 10 路由建立过程图

Fig. 10 The route establishment process

使用 MATLAB R2022a 软件进行仿真验证,网络参数设置见表 2. 在 100 m×100 m 的方形区域内随机部署 100 个节点. 随机节点分布如图 11 所示.

表 2 网络模型参数设置

Tab. 2 Network model parameter settings

参数类型	值
网络范围	100 m×100 m
节点总数	100
无线电半径	20 m
数据包数量	100~400 packet
发包速率	20 packet/s

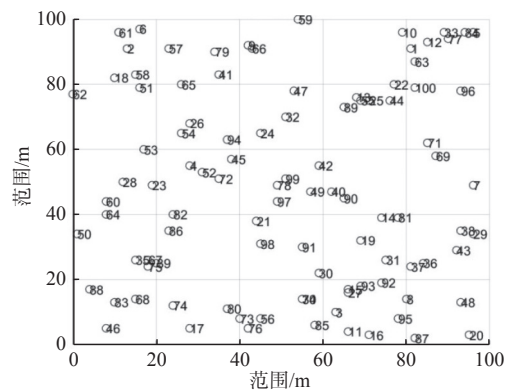


图 11 随机节点分布图

Fig. 11 Random node distribution

以 1 号源节点、46 号目的节点为例,原网络拓扑图如图 12 所示,经过节点组合式按需路由协议的阶段 1,即节点组合式按需路由协议的阶段 1,得到的节点组合式网络拓扑如图 13 所示. 节点组合式拓扑建立完成后,再经过节点组合式按需路由协议的阶段 2,即路由建立,完成了最短路径建立,源节点 (1)-目的节点 (46) 最短

路径如图 14 所示.

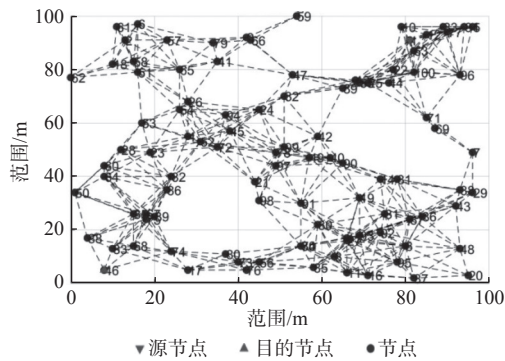


图 12 原网络拓扑图

Fig. 12 Centralized network topology

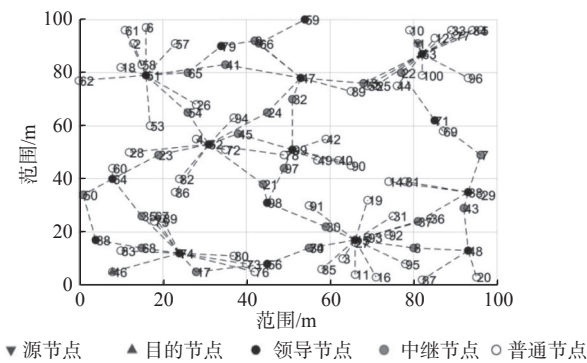


图 13 节点组合式网络拓扑图

Fig. 13 Distributed network topology

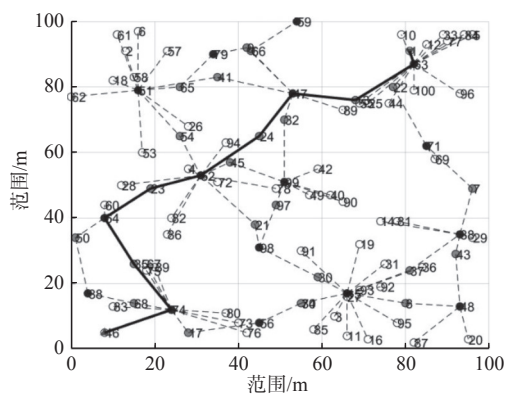


图 14 源节点 (1) - 目的节点 (46) 最短路径图

Fig. 14 Source node (1) - destination node (46) shortest path

为避免仿真结果的偶然性,仿真实验中模拟了 150 次不同源节点到目的节点的传输过程,取 150 次模拟过程的平均结果作为最终结果进行比较. 将只建立节点组合式拓扑但不按需求建立路由便进行数据包传输的方法定义为节点组合式泛洪协议. 重点比较网络收发数据包总量和网络时延两个指标.

#### 4.1 网络收发数据包总量

网络收发数据包总量  $P_{total}$  由各节点的发包总数  $P_{send}$  与收包总数  $P_{receive}$  组成:

$$P_{total} = P_{send} + P_{receive} = \sum_{i=1}^n P_s(i) + \sum_{i=1}^n P_r(i) \quad (1)$$

式中,  $n$  为网络中的节点数量;  $P_s$  为节点发送数据包的数量;  $P_r$  为节点接收数据包的数量.

源节点向目的节点发送的数据包的数量变化为 100、200、300、400, 网络收发数据包总数对比如图 15 所示. 由仿真数据可知, 源节点发送 100、200、300、400 个数据包时, 使用管理型泛洪协议, 网络中收发数据包总数依次为 107 936、217 364、327 048、436 369; 使用节点组合式泛洪协议, 网络中收发数据包总数依次为 51 257、103 252、155 064、207 055; 使用节点组合式按需路由协议, 网络中收发数据包总数依次为 8 173、15 436、22 911、29 539. 相较于管理型泛洪协议, 网络中数据包总量依次减少了 99 763、201 928、304 137、406 830, 即 92.43%、92.90%、92.99%、93.23% 的数据包总量; 相较于节点组合式泛洪协议, 网络中数据包总量依次减少了 43 084、87 816、132 153、177 516, 即 84.05%、85.05%、85.22%、85.73% 的数据包总量. 由此数据可以看出, 与管理型泛洪协议以及节点组合式泛洪协议相比, 节点组合式按需路由协议大幅降低了网络中数据包数量, 且当源节点发送的数据包越多, 效果越明显.

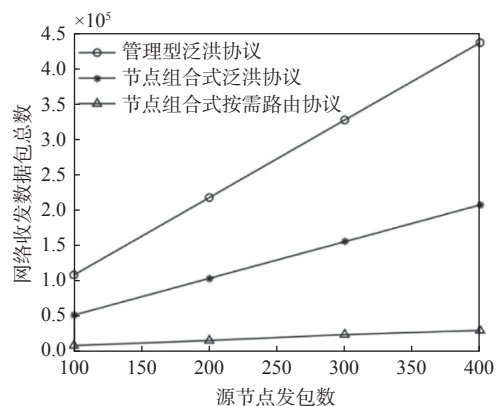


图 15 网络收发数据包总数对比图

Fig. 15 Comparison of the total number of packets sent and received by the network

#### 4.2 网络时延

使用管理型泛洪协议的网络时延  $T_{mf}$  仅由所有数据包传输的时延构成:

$$T_{mf} = t_{dstrec} - t_{srcsd} \quad (2)$$

式中,  $t_{srcsd}$  代表源节点发送第一个数据包的时刻;  $t_{dstrec}$  代表目的节点收到最后一个数据包的时刻。

使用节点组合式泛洪协议的网络时延  $T_{nc}$  由节点组合式拓扑建立、传输数据包两个阶段构成:

$$T_{nc} = T_{topology} + T_{td} = T_{topology} + (t_{dstrec} - t_{srcsd}) \quad (3)$$

式中,  $T_{topology}$  为节点组合式拓扑建立需要的时间。

使用节点组合式按需路由协议的网络时延  $T_{nc\_route}$  由节点组合式拓扑建立、路由建立、传输数据包三个阶段构成:

$$T_{nc\_route} = T_{topology} + T_{route} + T_{td} = T_{topology} + (T_{rt} + T_{rr}) + (t_{dstrec} - t_{srcsd}) \quad (4)$$

式中,  $T_{route}$  代表建立路由需要的时间;  $T_{rt}$  代表路由探测需要的时间;  $T_{rr}$  代表路由回复需要的时间。

源节点向目的节点发送数据包的数量变化为 100、200、300、400, 网络时延对比如图 16 所示。由仿真数据可知, 源节点发送 100、200、300、400 个数据包时, 使用管理型泛洪协议, 网络时延依次为 5.1517 s、10.1493 s、15.1557 s、20.1450 s; 使用节点组合式泛洪协议, 网络时延依次为 5.3133 s、10.3113 s、15.3093 s、20.3000 s; 使用节点组合式按需路由协议, 网络时延依次为 5.9620 s、10.9240 s、15.9580 s、20.9040 s。相较于管理型泛洪协议, 网络时延依次增加了 0.8103 s、0.7247 s、0.7523 s、0.7090 s, 即 15.73%、7.14%、4.96%、3.52% 的时间; 相较于管理型泛洪协议, 网络时延依次增加了 0.6487 s、0.5627 s、0.5987 s、0.5540 s, 即 12.21%、5.46%、3.91%、2.73% 的时间。由于拓扑建立与路由建立均需一定的时间, 因此, 网络时延这个性能指标会有所下降。但随着源节点发送数据包的增多, 网络时延增加的百分比也在下降。

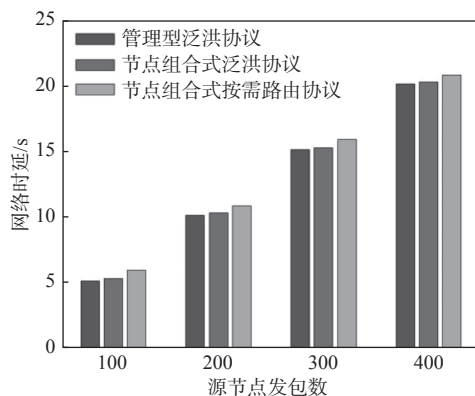


图 16 网络时延对比图

Fig. 16 Network latency comparison

## 5 结束语

本文针对管理型泛洪协议能量过度消耗的问题, 提出节点组合式按需路由协议。该协议由节点组合式拓扑建立、路由建立、传输数据包三个阶段构成, 建立节点组合式网络拓扑后, 确定了源节点到目的节点的最短路径传输数据包。仿真结果表明, 节点组合式按需路由协议相较管理型泛洪协议以及节点组合式泛洪协议, 大幅降低了网络中数据包的数量, 从而降低了网络能耗。但在该研究中网络时延性能下降且并未考虑关键节点能量消耗较大的问题, 因此在后续研究中, 将进一步寻求关键节点消耗能量较大的应对策略, 并研究如何优化网络时延。

## 参考文献:

- [1] BLUETOOTH SIG. Mesh profile specification v1.0[S]. Kirkland, WA, USA: Bluetooth Special Interest Group, 2017.
- [2] DARROUDI S M, GOMEZ C, CROWCROFT J. Bluetooth low energy mesh networks: a standards perspective[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(4): 95-101. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900523.
- [3] LEONARDI L, PATTI G, BELLO L L. Multi-hop real-time communications over Bluetooth Low Energy industrial wireless mesh networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 26505-26519. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2834479.
- [4] RENO M, RONDÓN R, BELLO LL, et al. Relay node selection in Bluetooth mesh networks[C]//2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). Palermo, Italy: IEEE, 2020: 175-180. DOI: 10.1109/MELECON48756.2020.9140584.
- [5] KIM H S, LEE J, JANG J W. BLEmesh: a wireless mesh network protocol for Bluetooth Low Energy devices[C]//2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud. Rome, Italy: IEEE, 2015: 558-563. DOI: 10.1109/FiCloud.2015.21.
- [6] GOGIC A, MUJICIC A, IBRIC S, et al. Performance analysis of Bluetooth Low Energy mesh routing algorithm in case of disaster prediction[J]. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 2016, 10(6): 1075-1081. DOI: 10.5281/zenodo.1124690.
- [7] HANSEN E A J, NIELSEN M H, SERUP D E, et al. On relay selection approaches in Bluetooth mesh networks[C]//2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Moscow, Russia: IEEE, 2018: 1-5. DOI: 10.1109/ICUMT.2018.8631214.
- [8] NG P C, SHE J. A novel overlay mesh with Bluetooth

- Low Energy network[C]//2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Marrakesh, Morocco: IEEE, 2019: 1-6. DOI: [10.1109/WCNC.2019.8886069](https://doi.org/10.1109/WCNC.2019.8886069).
- [ 9 ] BILH A, CHOU C T. An opportunistic multicast routing protocol for wireless mesh networks[C]//37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Clearwater Beach, FL, USA: IEEE, 2012: 288-291. DOI: [10.1109/LCN.2012.6423630](https://doi.org/10.1109/LCN.2012.6423630).
- [ 10 ] BRANDAO A S, LIMA M C, ABBAS C J B, et al. An energy balanced flooding algorithm for a BLE mesh network[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 97946-97958. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.2993819](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993819).
- [ 11 ] 杨需哲. 一种应用于智能家居的BLE Mesh网络的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.  
YANG X Z. Design and implementation of BLE Mesh network for the application of smart home[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [ 12 ] PEREZ-DIAZ-DE-CERIO D, VALENZUELA J L, GARCIA-LOZANO M, et al. BMADS: BLE Mesh asynchronous dynamic scanning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(4): 2558-2573. DOI: [10.1109/JIOT.2020.3018022](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3018022).
- [ 13 ] JUNG C, KIM K, SEO J, et al. Topology configuration and multihop routing protocol for Bluetooth low energy networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 9587-9598. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2707556](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2707556).
- [ 14 ] 茹忆, 胡俊锋. 蓝牙mesh实战[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.  
RU Y, HU J F. Bluetooth mesh in action[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2020.
- [ 15 ] 张瑞. 基于邻居信息裁剪的蓝牙Mesh网络泛洪约束算法设计[D]. 南京: 东南大学, 2021.  
ZHANG R. Design of flooding constraint algorithm for Bluetooth Mesh network based on neighbor information pruning[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.

#### 作者简介:

张毅 男,(1970-),硕士,教授.研究方向为通信网络、物联网技术.

李静(通讯作者) 女,(1997-),硕士研究生.研究方向为物联网技术与应用. E-mail: 13280821619@163.com.