

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240005.

无线通信技术

吴希航,黄卓,骆森林,等.基于有限泛洪的高动态节点BLE Mesh路由策略研究[J].光通信研究,2025(2):240005.

Wu X H, Huang Z, Luo S L, et al. Research on Highly Dynamic Node BLE Mesh Routing Strategy based on Limited Flooding[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240005.

基于有限泛洪的高动态节点 BLE Mesh 路由策略研究

吴希航^{1,2}, 黄卓², 骆森林^{2,3}, 汪凤翔²

(1. 福建农林大学 机电工程学院, 福州 350100; 2. 中国科学院 海西研究院 泉州装备制造研究中心, 福建 泉州 362200; 3. 福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362000)

摘要:【目的】低功耗蓝牙(BLE)是一种低能耗和低成本的无线通信技术,低功耗蓝牙自组网(BLE Mesh)的出现则进一步提升了网络的可扩展性和通信范围。Fruitymesh是目前唯一开源的基于路由的BLE Mesh组网策略。但在高动态节点环境下使用Fruitymesh会出现因节点频繁进出而导致的树状拓扑网络传输链路中断以及数据传输成功率明显降低的问题。为了解决该问题,文章利用Fruitymesh组网思想提出了一种适用于高动态节点的有限泛洪路由策略。【方法】通过修改聚类评分机制,将网络拓扑由树状拓扑改进为部分网状拓扑,增强了网络拓扑的整体可靠性。同时,添加路由选择机制设计有限泛洪路由策略。【结果】仿真验证表明,相较于Fruitymesh,有限泛洪路由策略的网络拓扑抗毁性提升了71.4%,在定点打击中,网络整体数据包投递率(PDR)从15.00%提升至85.67%;在随机打击中,网络整体PDR从53.00%提升至92.29%。而相较于泛洪路由算法,有限泛洪路由算法中非邻居节点的平均PDR从78.73%提升至86.97%。【结论】文章所提有限泛洪路由策略能够有效提高网络拓扑的抗毁性、路由传输可靠性以及高动态节点环境下网络通信的成功率。

关键词:低功耗蓝牙;网络拓扑;路由策略;Fruitymesh

中图分类号:TN92

文献标志码:A

Research on Highly Dynamic Node BLE Mesh Routing Strategy based on Limited Flooding

WU Xihang^{1,2}, HUANG Zhuo², LUO Senlin^{2,3}, WANG Fengxiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China;

2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362200, China;

3. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362000, China)

Abstract:【Objective】Bluetooth Low Energy (BLE) is a low-power, low-cost wireless communication technology, and the development of BLE Mesh further enhances the network scalability and communication range. Fruitymesh stands as the only open-source routing-based BLE Mesh networking strategy at present. However, using Fruitymesh in highly dynamic node environments leads to issues such as interruptions in tree-shaped topology network transmission links due to frequent node entries and exits, resulting lower data transmission success rates. To address this problem, this paper utilizes the networking principles of Fruitymesh and proposes a limited flooding-based routing strategy suitable for highly dynamic node scenarios. 【Methods】By modifying the clustering scoring mechanism, the network topology is refined from a tree-shaped structure to a partial mesh structure, enhancing the overall reliability of the network topology. Simultaneously, a route selection mechanism is introduced, and a limited flooding routing strategy is designed. 【Results】Through simulation verification, compared to Fruitymesh, the limited flooding routing strategy demonstrates a 71.4% improvement in network topology robustness. In fixed-point attacks, the overall network Packet Delivery Rate (PDR) is increased from 15.00% to 85.67%. In random attacks, the overall network PDR is increased from 53.00% to 92.29%. And the average PDR of non-neighboring nodes in the limited flooding routing algorithm is improved from 78.73% to 86.97% as compared to the flooding routing algorithm. 【Conclusion】The proposed limited flooding routing strategy in this paper effectively enhances the network topology robustness, route transmission reliability, and the success rate of network communication in highly dynamic node environments.

Key words: BLE; network topology; routing policy; Fruitymesh

0 引言

物联网迅猛发展,低功耗蓝牙(Bluetooth Low

Energy, BLE)自蓝牙4.0引入后极大地扩展了其应用^[1]。蓝牙5.0的发布带来了低功耗蓝牙自组网(Bluetooth Low Energy Mesh, BLE Mesh)首版,提

收稿日期:2024-01-22; 修回日期:2024-02-15; 纸质出版日期:2025-04-10

基金项目:福建省科技重大专项资助项目(2022HZ028010);福建省科技计划项目-STC计划配套资助项目(2021T3064)

作者简介:吴希航(1999-),男,福建福州人。硕士,主要研究方向为低功耗蓝牙Mesh组网。

通信作者:黄卓,高级工程师。E-mail:zhuo.huang@hotmail.com

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

供了更广泛的网络覆盖、更强的互连性、更快速的传输和更稳定的网络结构^[2]。

BLE Mesh 常使用基于泛洪和基于路由两种解决方案。基于泛洪的解决方案利用广播发送数据,文献[3]提出了一种基于广播数据包的协议;文献[4]提出了一种基于单个控制消息交换提供信息的算法,改善了广播信道的链路质量。基于路由的解决方案又分为两类,一类是基于树状拓扑的静态路由解决方案,根据节点所在层级,由高层级向下传输数据^[5];另一类是通过邻居发现和属性来建立连接的动态路由解决方案,在网络拓扑建立结束后,方可进行路由^[6]。文献[7]提出了一种机会路由优化协议,动态确定数据传输路径,以提高网络性能;文献[8]通过将电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)802.15.4的时间同步通道跳频(Time Slotted Channel Hopping, TSCH)协议和 BLE 结合起来形成一个名为 TBLE 的组合,增强了时间敏感和路由通信能力。

在高动态节点环境下,泛洪方案会导致网络开销和延迟的上升^[9],路由方案则存在传输线路中断的问题。针对以上问题,本文利用 Fruitymesh 的组网思想设计了一种适用于高动态节点环境下的有限泛洪路由策略,提升了高动态节点环境下数据传输的可靠性。

1 有限泛洪路由策略

本文通过对各类多跳范式从延迟和数据包投递率(Packet Delivery Rate, PDR) 等方面进行比较^[10-13],选择具有自我修复机制的基于路由解决方案的 Fruitymesh 进行优化设计。

Fruitymesh 是由 M-Way Solution 开发的一种用于创建和维护 BLE Mesh 网络拓扑的算法。该算法中节点通过聚类评分函数自动建立网络拓扑,并使用仅邻居路由进行数据传输^[14]。图 1 所示为拓扑结构的建立流程。

由于该算法中节点最大被连接数为 1,且相同聚类的节点无法连接,所以最终生成的网络始终为树状拓扑结构,如图 2 所示。

该拓扑结构在高动态环境下,例如涉及移动设备的网络,这些设备可能在网络中快速移动或进出通信范围,导致节点连接状态频繁变化。节点的加入、离开或移动会导致网络拓扑结构频繁重组。在树状拓扑结构中,源节点到目的节点始终只有一条传输路径。若在数据传输过程中,传输路径上某一

节点离开网络,将导致传输失败。需要重新建立拓扑数据才能再次发送,这严重影响了数据传输的可靠性。

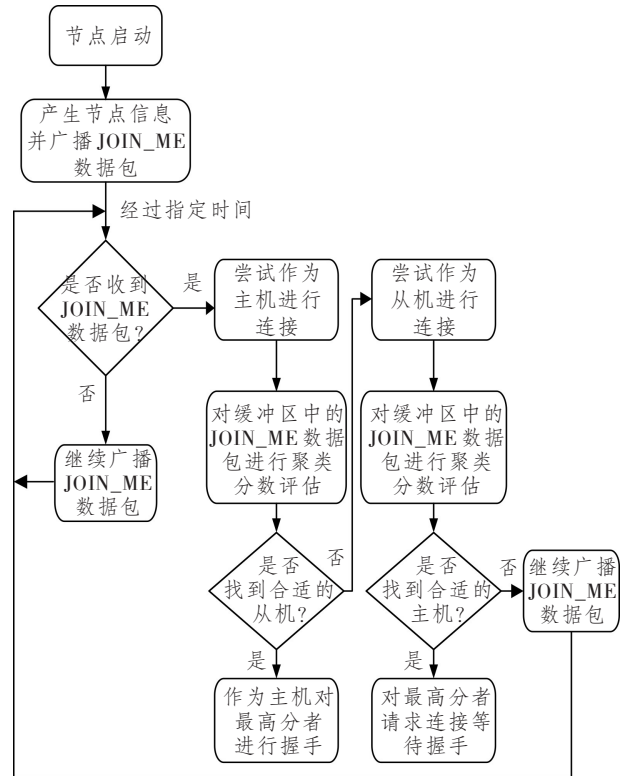


图 1 Fruitymesh 拓扑结构建立流程图

Figure 1 Flow chart of Fruitymesh topology establishment

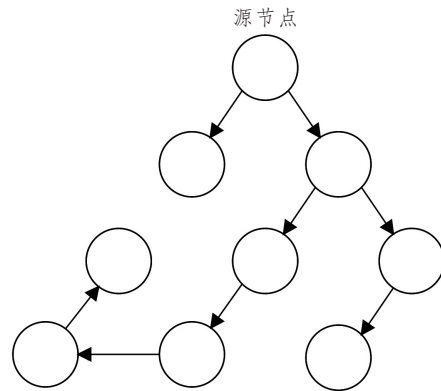


图 2 Fruitymesh 树状拓扑结构图

Figure 2 Fruitymesh tree topology diagram

针对高动态环境下 Fruitymesh 数据传输的缺陷,本文从拓扑结构建立机制和路由算法入手,设计了一种适用于高动态节点的有限泛洪路由策略,提高了网络整体的传输可靠性。

1.1 拓扑建立机制的优化

在 Fruitymesh 中,节点将自身信息通过 JOIN_ME 数据包广播给通信范围内的所有节点,同时轮流扫描自身的 3 个广播信道,接收其他节点发送的 JOIN_ME 数据包。当节点检查到数据包缓

冲区内存在 JOIN_ME 数据包时,将利用聚类评分机制对这些节点进行分数计算并筛选出连接对象。

在 Fruitymesh 算法中,当节点作为主机角色进行连接时,使用的评分方法为

$$Score = FIN \times 10\,000 + FOUT \times 100 + RSSI, \quad (1)$$

式中:Score 为评分分数;FIN 为对象可连接的主机数,设置为最高权重;FOUT 为对象可连接从机数,设置为次高权重;RSSI 为接收信号强度(Received Signal Strength Indicator, RSSI),设置为最小权重。

当节点作为从机角色进行连接时,使用的评分方法为

$$Score = ClusterSize \times 10\,000 + FOUT \times 100 + RSSI, \quad (2)$$

式中,ClusterSize 为对象聚类大小,设置为最高权重。首先考虑 ClusterSize,其次考虑 FOUT,最后才考虑 RSSI。

依照上述权重设置建立的网络拓扑结构,会出现拥有过长分支树状拓扑的情况。该拓扑结构在数据传输过程中,若某一传输路径上的节点被移除,将会导致传输中断。这样将无法确保数据传输的可靠性。

为实现更可靠的网络拓扑结构,首先将节点的最大主机连接数改为 2,最大从机连接数改为 3,增加每个节点的度以此增强整体网络的连通性,如图 3 所示。

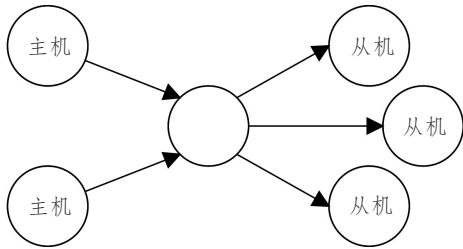


图 3 优化后的节点连接示意图

Figure 3 Schematic diagram of the modified node connection

其次取消聚类评分函数中对节点属于同一聚类时提出的限制。当两个节点属于同一个聚类时,若节点的连接数未达到上限,便可进行聚类评分计算参与连接。并且当同一聚类中节点完成连接后,将 CLUSTER_UPDATE 数据包中大小增量设置为 0。只有在节点断开与聚类的全部连接后,才可将 CLUSTER_UPDATE 数据包中大小增量设置为 -1。在每次节点连接建立完成后,计算节点所在聚类的节点数量来验证和修改聚类大小,以此来限制聚类大小的无限增长和错误更新。

若在改进后的拓扑建立机制中使用 Fruitymesh

聚类评分函数中的参数与权重设置,将出现所设计部分网状拓扑中边缘节点连接数过少从而降低节点连通性的问题。该问题将导致边缘节点在传输数据时,若其邻居节点离开,网络中的传输会中断或丢失数据包。这种连通性问题可能会在网络边缘产生孤立节点,导致这些节点难以在数据传输过程中找到可靠的路径,特别是在动态环境中。如果邻近的节点频繁加入或离开网络,边缘节点可能会更容易受到影响,使得网络中断变得更为频繁,从而降低了整体网络的可靠性和稳定性。

最后为解决上述问题,本文重新评估了聚类评分函数中的参数和权重设置,以促进更平衡的节点连通性,特别是对边缘节点,使得边缘节点更有可能与更多中心节点连接,从而增强了整个网络的连通性和稳定性。在节点评估时,先将 RSSI、对象聚类大小和对象 JOIN_ME 数据包缓冲区拥挤程度通过 Min-Max Scaling 进行归一化处理,将相关数据的值规范到 [0,1] 内。对剩余被连接数进行映射,将剩余被连接数的值 [0,1,2] 映射为 [0,1/2,1],并将剩余主动连接数的值 [0,1,2,3] 映射为 [0,1/3,2/3,1]。最后对各个参数进行权重分配。

在节点作为主机进行评估时,为保证组网后网络连接的稳定性以及数据传输的可靠性,将 RSSI 的权重系数设为 0.5。其次为减少节点加入请求失败的可能性,同时避免某个节点占用过多连接资源而导致其他节点连通性下降,网络结构抗毁性降低的情况,将拥挤程度的权重设置为 0.3。余下的剩余被连接数和剩余主动连接数各分配 0.1 的权重。主机具体使用的评分方法为

$$Score = 0.5 \times R_G + 0.3 \times F_G + 0.1 \times F_{IN} + 0.1 \times F_{OUT}, \quad (3)$$

式中: R_G 为归一化处理后的 RSSI; F_G 为归一化处理后的对象 JOIN_ME 数据包缓冲区的拥挤程度; F_{IN} 为映射后的剩余被连接数; F_{OUT} 为映射后的剩余主动连接数。

在节点作为从机进行评估时,为保证网络连接的稳定,将 RSSI 的权重系数设置为 0.3。并且为保证节点总能加入聚类较大的一方,将对象聚类大小的权重系数设置为 0.4。为考虑网络平衡性,将拥挤程度的权重设置为 0.2。最后将剩余可连接数权重设置为 0.1。从机具体使用的评分方法为

$$Score = 0.3 \times R_G + 0.4 \times C_G + 0.2 \times F_G + 0.1 \times F_{OUT}, \quad (4)$$

式中, C_G 为归一化处理后的对象聚类大小。

以上优化聚类评分函数参数设置和权重数值借鉴了文献[15]中聚类评分函数参数设置的方法,并通过多次组网实验对多个参数运行结果进行评估,基于实验结果调整权重配置,并重复实验微调权重,以确保在提高拓扑结构抗毁性和各节点重要性的同时,得出最佳的权重设置。

通过以上优化,原先的树状拓扑结构将被改进为部分网状拓扑结构。相较于树状拓扑结构,部分网状拓扑结构允许设备之间多路径通信,而不仅仅依赖于单一上级节点。这使得网络更加灵活,从而增加了网络的可靠性。而相较于全连通拓扑结构,部分网状拓扑允许设备更少地保持连接。在部分网状拓扑中,不是每个设备都需要与所有其他设备直接通信,这将降低通信负担,从而延长设备的电池寿命。

1.2 路由算法的设计

在 Fruitymesh 中,数据依靠仅邻居路由进行传输。在部分网状拓扑结构中,该方法会导致数据在环路上不断转发,使数据包反复经过同一节点。这将消耗网络资源和带宽,可能导致网络拥塞,进而影响其他数据包的正常传输。

本文设计了一种有限泛洪路由算法来确保消息能够传递到目标设备,同时限制泛洪范围,以减少不必要的重复数据重传。本文每个节点的最大连接数为5,在数据传输时每个节点可用于数据传输的最大连接数为4。若使用3条及以上连接进行数据传输,会使网络中的重复数据包增多。若仅使用1条连接进行数据传输,在节点频繁移动的情况下会降低数据传输的完整性。所以本文选择连接数3作为临界条件进行算法设计。如果节点当前可进行数据发送的连接数 <3 ,节点将进行仅邻居路由传输。若节点此时可进行数据发送的连接数 ≥ 3 ,节点将通过路由选择评分函数进行路由评分计算,并选择排名前2的连接进行数据转发。路由选择评分函数具体为

$$RouteScore = 10 \times d_i + RSSI + 80 + 10 \times CC, \quad (5)$$

式中: $RouteScore$ 为路由分数; CC 为局部聚集系数,其描述了网络中节点的邻居节点之间互相连接的程度,表示为 $CC = \frac{2e_i}{d_i(d_i-1)}$, e_i 为节点 i 与其任意两个邻居节点之间所形成的三角形个数,其反映了邻居节点之间的紧密程度; d_i 为邻居节点的度,为节点 i 邻居节点的个数,可表示为

$$d_i = \sum_{j \in A} \delta_{ij}, \quad (6)$$

式中: $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ 到 } j \text{ 有连接} \\ 0, & i \text{ 到 } j \text{ 没有连接} \end{cases}$, A 为节点编号合集。

d_i 体现了该节点与周围节点建立直接关系的能力。

以上权重数值是通过深入分析后的选择,这些值是以经验衡量每个评分参数对 BLE Mesh 数据传输仿真试验性能的影响和相关性,以主要指标 PDR 来进行评估。通过实验调整的方法,逐步找到适合高动态网络环境的最优权重配置。

为限制泛洪范围,在有限泛洪路由算法中加入生存时间(Time to Live, TTL)机制,每个节点都会检查消息的跳数是否已达到限制。若某个消息的跳数超过限制,节点将不再转发该消息。

在高动态节点环境中,设备可能频繁离线或移动到新位置。有限泛洪路由算法允许消息在网络中多条路径上传播,即使某些路径中的节点临时不可用,消息仍能找到可用路径,从而提高了网络的可靠性。而 TTL 机制将防止消息无限制地在环路中传播,这将有助于减少网络拥塞,防止资源浪费,提高网络效率。并且有限泛洪路由算法通常不需要复杂的路由表进行维护或管理。这有效减轻了网络的管理负担,特别是在具有大量动态节点情况下,网络将更容易部署和维护。

相较于 Fruitymesh 的仅邻居路由,有限泛洪路由算法虽然能提升性能,但这通常是以增加系统复杂度为代价的。有限泛洪路由算法涉及更多逻辑和步骤,包括节点度数计算、局部聚集系数计算以及基于这些信息的路由评分函数,其更侧重于根据网络中各个节点的状态和连接特性来优化路由决策。而 Fruitymesh 主要负责遍历所有网络连接,并发送数据包,不用像有限泛洪路由策略详细地处理每个节点状态。有限泛洪路由策略通过更复杂的路由决策逻辑来提高网络抗毁性和 PDR,虽然其复杂性可能会带来更高的计算开销和内存需求,但却使网络能更好地应对节点故障和动态变化。

2 仿真实验及分析

2.1 模拟工具与配置

本文使用 Fruitymesh 开发者所提供的模拟平台 CherrySim 进行 BLE Mesh 组网仿真实验。CherrySim 是基于 Nordic 的 nRF52 系列开发板的 SoftDevice 来模拟 BLE 节点的行为,并且该模拟工具还提供了网络结构的可视化界面,可以呈现节点的位置以及拓扑建立的整个流程。

为了比较 Fruitymesh 和有限泛洪路由策略,本

文设计了一个多跳场景,使用 8 个节点随机配置在 60 m×60 m 的场域中进行仿真模拟试验。详细的配置参数如表 1 所示。

表 1 模拟配置与参数设定表

Table 1 Simulation configuration and parameter settings

序号	参数	值
1	模拟设备	nRF52DK
2	设备数量	8
3	连接时间间隔/ms	15
4	数据包数量/packets/node	100
5	数据速率/packet(s)/s	10
6	数据包有效载荷/bytes	20

2.2 仿真结果分析

相同环境设置下, Fruitymesh 与有限泛洪路由策略网络拓扑结构的对比如图 4 所示, 图 4(a) 为 Fruitymesh 的树状拓扑结构, 图 4(b) 为有限泛洪路由策略的部分网状拓扑结构。通过一种基于最短路径数的网络抗毁评价方法^[16], 可以得出如图 4(a) 所示树状拓扑的抗毁性为 0.298, 图 4(b) 所示部分网状拓扑的抗毁性为 0.511, 与 Fruitymesh 相比有限泛洪路由策略的网络抗毁性提升了 71.4%。

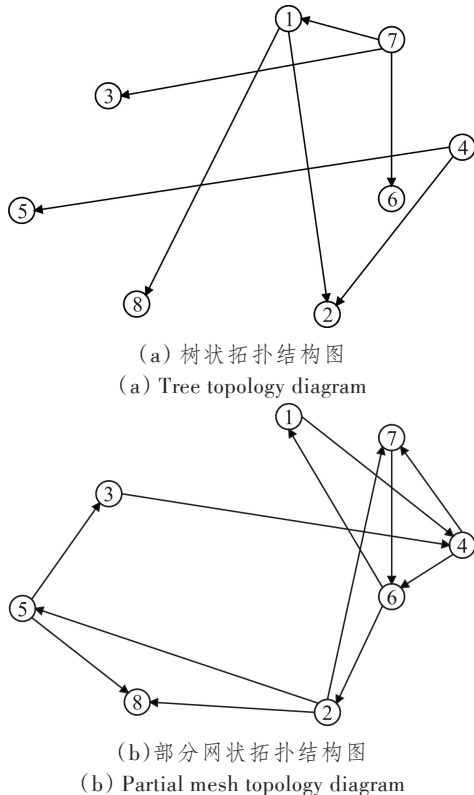


图 4 优化前后网络拓扑结构对比

Figure 4 Comparison of network topology before and after optimization

2.2.1 随机打击仿真实验

随机打击仿真实验将指定一个节点以固定时间向网络中每个节点传输固定大小的数据包, 并对网络中的节点进行随机打击, 直到节点完成指定次数的数据发送。重复 10 次模拟后, 记录数据结果并计算其平均值。本文选择 5 号节点依次向其余节点发送数据包。由图 5 可知, 当遭受随机打击时, 部分网状拓扑结构中除 4 号节点外, 其他节点的平均 PDR 均高于树状拓扑结构中各个节点的平均 PDR。因为在树状拓扑结构中, 4 号节点既是源节点的相邻节点, 也是目的节点, 所以其 PDR 一直为 100%。而从整体网络来看, 树状拓扑的平均 PDR 为 53%, 部分网状拓扑的平均 PDR 为 92.29%。由上可知, 在随机打击的情况下, 部分网状拓扑结构依然能保持较高的可靠性。

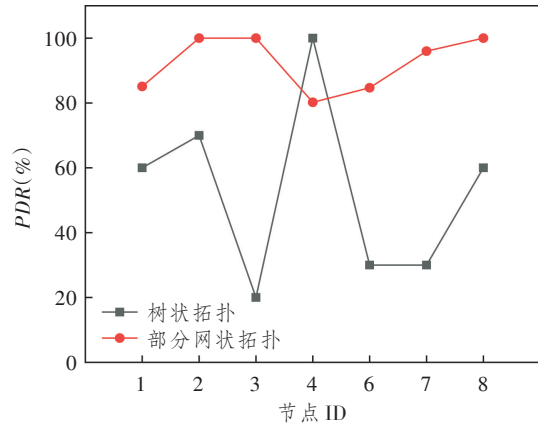


图 5 两种拓扑在传输中遭受随机打击后的 PDR
Figure 5 PDR of two topologies after random attacks during transmission

由图 6 可知, 在相同拓扑结构中, 除与 5 号节点相邻的节点外, 有限泛洪路由算法的其余节点在随机打击的情况下, 其平均 PDR 普遍高于泛洪路由算法下各节点的平均 PDR。具体来说, 在泛洪路由算法中, 非邻居节点的平均 PDR 为 78.73%, 而在有限泛洪路由算法中, 非邻居节点的平均 PDR 达到了 86.97%。

因为在泛洪路由算法中, 传输路径内存在大量重复的数据包, 如表 2 所示, 引发了数据碰撞和信道堵塞的问题, 导致部分数据包未能到达目的节点, 从而降低了 PDR。在算法复杂度方面, 泛洪路由算法计算复杂度较低, 只负责判断相邻节点中是否存在目的节点以及简单的数据包转发, 只适用于一些小型或低复杂度网络。

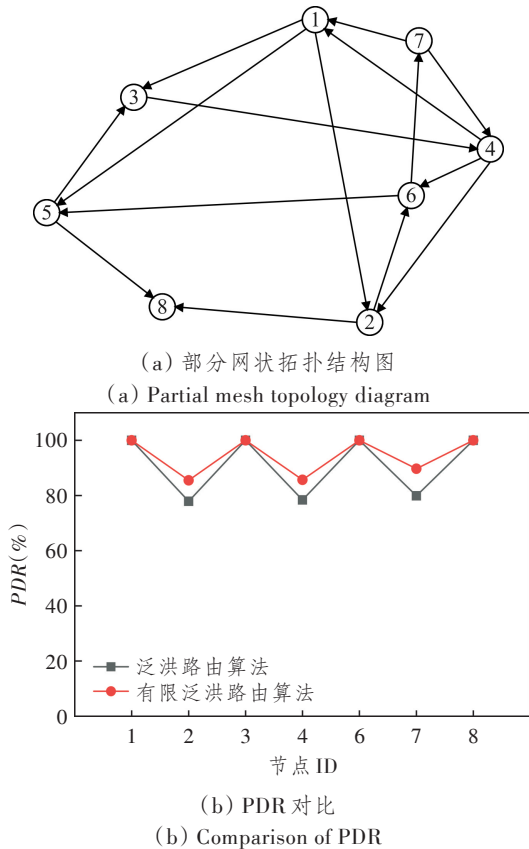


图 6 在同一拓扑中两种路由算法遭受随机打击后的 PDR 对比

Figure 6 Comparison of PDR after two routing algorithms suffer random attacks in the same topology

表 2 两种路由算法平均数据包接收数对比

Table 2 Comparison of the average number of packets received by the two routing algorithms

目的节点	泛洪路由算法		有限泛洪路由算法	
	平均有效数据包接收数	平均总数数据包接收数	平均有效数据包接收数	平均总数数据包接收数
2	77.9	301.4	85.5	91.9
4	78.4	203.8	85.7	89.6
7	79.9	222.0	89.7	90.2

2.2.2 定点打击仿真实验

定点打击仿真实验将指定一个节点以固定时间向网络中每个节点传输固定大小的数据包。在数据传输过程中,根据网络中各个节点的重要性进行选择性打击,直到节点完成指定次数的数据发送。重复 10 次模拟后,记录数据结果并计算其平均值。

通过 Fruitymesh 和有限泛洪路由策略的网络拓扑结构可以计算出网络中各个节点的重要性,如表 3 所示。

表 3 算法改进前后各节点重要性对比

Table 3 Comparison of the importance of each node before and after the optimization of the algorithm

节点 ID	部分网络拓扑节点重要性	树状拓扑节点重要性
1	0.378	0.493
2	0.653	0.354
3	0.387	0.192
4	0.644	0.315
5	0.497	0.169
6	0.632	0.192
7	0.531	0.474
8	0.362	0.200

在部分网状拓扑中选择移除 2 号节点,在树状拓扑中选择移除 1 号节点。由图 7 可知,在定点攻击后部分网状拓扑仍能保持较高的 PDR,其网络整体平均 PDR 为 85.67%。而树状拓扑结构在遭受定点打击后,网络被分为 3 个部分,只有与源节点连接的部分能够接收到消息,其网络整体平均 PDR 为 15%。通过比较可知,在定点打击中,部分网状拓扑结构可以提供较为可靠的数据传输效果。

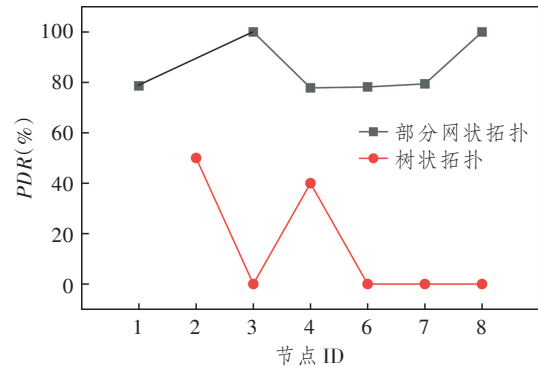


图 7 两种拓扑在传输中遭受定点打击后的 PDR

Figure 7 PDR of two topologies after suffering targeted attacks during transmission

3 结束语

本文利用 Fruitymesh 组网思想设计了一种适用于高动态节点环境下基于有限泛洪的 BLE Mesh 路由策略。相较于 Fruitymesh,基于有限泛洪 BLE Mesh 路由策略的网络抗毁性有明显提升;相较于泛洪路由算法,有限泛洪能够有效地减少传输路径中的重复数据包,降低数据碰撞和信道堵塞带来的影响,从而提高 PDR。本文所提路由策略在随机打击和定点打击模拟实验下实现了高可靠数据传输功能。但该路由策略可能存在传输延迟上升的问题,

这将是未来进一步的研究工作。

参考文献：

- [1] Rondón R, Mahmood A, Grimaldi S, et al. Understanding the Performance of Bluetooth Mesh: Reliability, Delay, and Scalability Analysis[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(3): 2089–2101.
- [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.
- [3] 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: 7300867.
- [4] Silvestre-Blanes J, Ortiz J C G, Sempere-Payá V M. Dynamic Autonomous Set-up of Relays in Bluetooth Mesh[C]//2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Sinaia, Romania: IEEE, 2023: 10275432.
- [5] Patti G, Leonardi L, Lo Bello L. A Bluetooth Low Energy Real-time Protocol for Industrial Wireless Mesh Networks[C]//IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy: IEEE, 2016: 7793093.
- [6] Wei X, Yang H, Huang W. Low-delay Routing Scheme for UAV Communications in Smart Cities[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(21): 18837–18843.
- [7] 孙吉武, 江凌云. BLE Mesh网络中的机会路由协议优化[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(6): 90–95.
Sun J W, Jiang L Y. Opportunistic Routing Protocol Optimization in BLE Mesh Network [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2018, 38(6): 90–95.
- [8] Harms L, Landsiedel O. TSCH Meets BLE: Routed Mesh Communication over BLE[C]//2023 19th International Conference on Distributed Computing in Smart Systems and the Internet of Things (DCOSS-IoT). Pafos, Cyprus: IEEE, 2023: 10257232.
- [9] Ghori M R, Wan T C, Sodhy G C, et al. Optimization of the AODV-based Packet Forwarding Mechanism for BLE Mesh Networks[J]. *Electronics*, 2021, 10(18): 2274.
- [10] Darroudi S M, Gomez C. Bluetooth Low Energy Mesh Networks: a Survey[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1467.
- [11] Murillo Y, Reynders B, Chiumento A, et al. Bluetooth now or Low Energy: Should BLE Mesh Become a Flooding or Connection Oriented Network?[C]//2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2017: 8292705.
- [12] Levis P, Patel N, Culler D, et al. Trickle: a Self-regulating Algorithm for Code Propagation and Maintenance in Wireless Sensor Networks [C]//1st Symposium on Networked Systems Design and Implementation. San Francisco, CA, US: NSDI, 2004: 1251175–1251177.
- [13] Murillo Y, Reynders B, Chiumento A, et al. A Multiprotocol Low-cost Automated Testbed for BLE Mesh[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(3): 76–83.
- [14] Brandão 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.
- [15] Nieto-Taladriz C, Murillo Y, Pollin S. Towards Efficient BLE Mesh: Design of an Autonomous Network Joining Algorithm [C]// 2018 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT'18). GHENT, BELGIUM: IEEE, 2018: 08419.
- [16] 饶育萍, 林竞羽, 侯德亭. 基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J]. *通信学报*, 2009, 30(4): 113–117.
Rao Y P, Lin J Y, Hou D T. Evaluation Method for Network Invulnerability based on Shortest Route Number [J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(4): 113–117.