

复杂环境下无线 MESH 网络的稳定性提升策略研究

戴定卫

深圳市欣博跃电子有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ETQM.2026030036

摘 要 : 无线 MESH 网络由于其自组织性、自愈性和多跳传输特性被广泛应用于应急通信、智慧城市、工业互联网和军事通信等复杂场景中。但是,在复杂的环境下,如节点较多、链路质量波动大、存在较强的电磁干扰以及多种业务同时传输等情况下,就会给无线 MESH 网络带来很大的困难。为了解决这些问题,提高无线 MESH 网络的鲁棒性,本文主要针对网络拓扑优化、路由协议改进、信道干扰抑制以及节点间合作等方面进行了一系列的研究工作,找出造成网络不稳定的原因并给出相应的解决方法和实现方案,对今后在复杂环境下的无线 MESH 网络设计与优化具有一定的指导意义。

关 键 词 : 无线 MESH 网络; 复杂环境; 网络稳定性; 路由优化; 干扰抑制

Research on Strategies for Enhancing the Stability of Wireless MESH Networks in Complex Environments

Dai Dingwei

Shenzhen Xinboyue Electronics Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : Wireless MESH networks are widely applied in complex scenarios such as emergency communication, smart cities, industrial internet, and military communication due to their self-organizing, self-healing, and multi-hop transmission characteristics. However, in complex environments characterized by a large number of nodes, significant fluctuations in link quality, strong electromagnetic interference, and simultaneous transmission of multiple services, wireless MESH networks encounter significant challenges. To address these issues and enhance the robustness of wireless MESH networks, this paper conducts a series of research efforts focusing on network topology optimization, routing protocol improvement, channel interference suppression, and inter-node cooperation. It identifies the causes of network instability and provides corresponding solutions and implementation schemes, offering valuable guidance for the design and optimization of wireless MESH networks in complex environments in the future.

Keywords : wireless MESH network; complex environment; network stability; routing optimization; interference suppression

引言

随着无线通信技术和物联网应用的发展,传统的集中式网络已经不能适应复杂环境中对于可靠性和灵活性以及健壮性的要求,而无线 Mesh 网络由于支持多跳通信并且具有分布式的特性,在复杂的环境中是很好的选择。但是,在实际部署中由于受到外界干扰、节点的运动性、链路的不稳定性和业务负载分布不均等问题的影响,使得网络的稳定度问题越来越严重,如何保证在复杂的环境中无线 Mesh 网络能够稳定工作,这是目前亟待解决的问题,为此本文针对这个问题进行研究,在梳理相关背景知识的基础上对其原因进行了详细的剖析并提出一些有效的解决方案。

一、复杂环境下无线 MESH 网络稳定性影响因素分析

(一) 复杂环境特征对网络运行的影响

复杂环境中存在地形起伏、建筑物密集分布、植被覆盖程度不同等原因引起信号传输路径阻挡,链路损耗更大,通信距离更短,节点之间有效覆盖区域有较大变化。山区大面积遮挡导致链

路质量空间上极不稳定;城区高大楼房构成各种形状反射面及折射路径,在多径情况下造成显著延迟扩展,从而降低链路鲁棒性。工矿业以及能源行业存在大量高功率电器产生随机干扰源,链路信噪比降低,出现间歇性丢包^[1]。天气因素如雨雪及湿度变化造成信号吸收和散射增加,链路余量不断减少,对网络稳定性造成影响。由于多个原因综合作用,无线 Mesh 网络需应对链路可用性变化、节点连通性变化等挑战,容易发生跳数增多、路径失

败率提高情况，网络健壮性受到极大威胁。

（二）网络拓扑结构与节点分布问题

无线 MESH 网络需要合理布局 and 良好拓扑保证正常运行，节点分布不均会导致不同区域之间通信质量差别很大，在节点间距大情况下，链路上边缘处会出现弱覆盖区域，从而造成丢包率增大；而在节点过于密集的情况下，则会因为互相干扰过多而使得可用带宽减少，阻塞概率提高。如果节点位置选择不当，容易造成某些节点成为过多其他节点中继站而造成瓶颈甚至断开后引起网络分割问题，从而使一部分节点不能和网关或者骨干链路建立可靠连接。当网络拓扑发生变化时，由于节点间移动以及由于能量耗尽而导致节点离线或者重新启动都会使网络不断变化，这会对路由协议带来很大负担并且降低其鲁棒性。因此，良好的拓扑对于提高网络容错性和鲁棒性至关重要。

（三）多业务并发与网络负载不均衡问题

无线 MESH 网络一般运行语音调度、高清视频监控以及传感数据等多种业务，在不同的业务对于带宽的需求、对时延的要求以及对可靠性的需求上都是不一样的。高清视频流量需要大量的带宽，在网络负荷大的时候会把有限的资源迅速占据而导致其他业务传输延迟加大以及丢包率增加。语音业务对于时延及抖动非常敏感，一旦路径变得不稳定就会有音质降低甚至断开的情况发生。大量的小数据包同时发送到 MAC 层会造成竞争加剧从而使信道访问等待时间变长。如果网络里面业务分配不合理，有部分结点分担过多转发工作而造成它们的缓存区不断积累直至成为热点结点从而影响整个网络稳定性的现象发生。而当这种不平衡达到一定程度的时候，就会出现端到端链路抖动增大、路径不断变更、网络带宽降低等情形使得网络处于不稳定的状态。

二、面向稳定性的无线 MESH 网络拓扑优化策略

（一）自适应拓扑构建与维护机制

自适应拓扑建立以及维护主要就是根据实际情况不断变化网络状况进行判断和处理，在不断监控信噪比、时延以及丢包率等多种参数基础上，对节点之间连接情况作出准确评价。而在实际应用过程中，由于各种原因导致链路状况经常发生变化，所以可以利用事先设定标准以及发展趋势来发现那些已经恶化或者即将出现故障连接并且对其进行相应改变。每个节点根据当前自身所知道信息选择最优邻居，放弃较差邻居，在看到链路开始出现问题时候就开始准备备用方案，以达到预防目的。而维护则是定时进行链路检测加上事件驱动状态更新相结合方式，即当某个节点察觉其附近邻居状态发生改变之后会立即做出反应并对附近连接作出适当改变，这样既可以保证整个网络连通性又能尽可能使所有连接都处于良好工作状态。这一体系极大提高各节点之间相互协作能力和自我管理能力，使得网络具有很强鲁棒性和健壮性，在节点移动、信道受到干扰或者局部连接中断情况下仍然可以保持良好拓扑结构以及良好数据传输效果^[2]。

（二）多路径冗余设计与可靠性增强

多路径冗余是给每一份数据流都同时设置多个不同链路质

量、节点跳数以及负载情况的传输通路，在此基础上根据当前网络情况进行路径优劣比较选择，形成具有主备配合并且能迅速切换冗余传输方式，一旦主通路由于干扰、阻挡或者节点性能不佳等原因失效后，该数据流可以立刻切换到之前已经准备好的良好备份通路上，防止因为路由重新计算造成的通信中断和性能问题，这样不仅可以增强网络对于变化环境的适应性，而且还可以利用这些路径之间进行流量分配的方式来减轻网络中某一区域的压力，提高整个系统的利用率，在紧急通信等需要较高可靠性的场合下对重要业务提供持续可靠地传输支持。

（三）节点角色分配与层次化管理策略

节点角色分配是通过网关节点、骨干节点及普通节点的角色进行定义，使整个网络具有更为合理的传输路径组织形式。网关节点负责连接外部网络，需具备强大处理能力和良好连通性；骨干节点在区域内起主要传输作用，宜放置在有利位置上；普通节点完成局部接入以及少量传输工作，是组成网络最基本通信单元。确定各个节点角色之后，采用分级方式进行组织，将重要路径集中到骨干层，避免由于节点混合转发导致路径混乱以及负载分配不合理问题发生。这种分级结构可以降低路由管理工作量，在大规模网络或者变动环境下仍能保证网络良好稳定性和可控性。确定各节点角色之后，网络中路由设计、流量控制和资源分配均较为合理，而拓扑也能够较长时间内处于良好状态，从而为各种复杂情况提供良好支持。

三、路由机制优化在稳定性提升中的应用

（一）基于链路质量的路由度量改进

复杂的环境中链路的状态变化很大，传统的基于跳数或者简单的带宽作为路由的选择标准不能很好地反应真实的链路的质量，容易导致错误地选择路径^[3]。链路受到多径效应、电磁干扰及节点运动的影响而产生时延抖动及更多的丢包，使得传统的衡量标准在动态的情况下不能很好地工作。路由算法加入信噪比、丢包率、链路利用率、队列时延等多种参数来描述链路的状态，可以更加精确地表示出链路的情况，从而让路由选择能更好地找到优良的链路。多种参数的利用使得路径倾向于选择更稳定的链路，降低了路径重建的概率并且提高了端到端的数据传输连续性，在有较强的干扰、节点数量的变化或者业务流量的变化时使得无线 Mesh 网络具有更好的鲁棒性。

（二）负载感知与动态路由调整策略

负载不均衡引起的热点节点以及拥塞路径是造成网络性能下降的主要因素。负载感知路由是通过节点缓冲区长度、数据包入速率、链路使用率等进行观测获得当前网络负载信息并将其传递给路由选择部分，在此基础上做出相应改变以减轻网络中的热点区域的压力。而动态路由就是基于上述信息对路径作出变化使得更多的流量转向负载较小的链路上从而达到一种灵活调度的效果。负载感知可以防止在网络大流量情况下某一条路径被过多地使用而导致严重的拥塞以及由此带来的路由切换所带来的代价。同时在多个业务并存的情况下动态路由能够使整个网络保持较好

的负载均衡进而提高网络鲁棒性和降低端到端延迟并且对于多跳网络具有更好的传输性。

（三）跨层协同的稳定性增强路由设计

无线链路受到物理层干扰、MAC层竞争及网络层路径规划等多种因素的影响，在一种层次上进行优化不能涵盖所有外界因素的变化情况。跨层协同路由利用各层的重要参数，使得路由的选择基于更多的情况进行考虑^[4]。物理层的信道状况、干扰程度、功率控制等可以用来帮助选择合适的路径，MAC层的信道利用率、碰撞的可能性以及退避的行为能够反映一条链路是否可用，而网络层的信息能决定整个网络的整体架构以及负载情况。跨层协同的方法使路由具有更好的灵活性，在链路变差、业务增加或者节点的状态发生变化的情况下能够迅速做出反应改变当前所使用的路径，从而降低性能下降的风险。三层之间的配合形成了对于链路的状态、网络的结构以及业务的需求都进行了综合评判的标准，让无线 MESH 网络具有更强的鲁棒性和适应性，在各种复

杂情况下提供更加可靠的路由服务。

四、干扰抑制与节点协同管理策略

（一）多信道分配与干扰规避技术

无线 MESH 网络在复杂的环境中工作，上层互相覆盖的服务流以及外界的电磁干扰不断叠加，使得同频干扰和邻频干扰是影响链路质量的重要原因^[5]。基于干扰感知的信道分配方法根据节点对周围的信道噪声、冲突概率以及信道使用情况进行监测，对信道的质量进行排名，给不同的节点或者链路分配干扰最小的信道组合，从而使整个网络中的信道分布相对均匀^[6]。当链路状况变差时，信道切换发生，使得节点可以避开干扰较强的位置，得到更好的通信环境。而在密集部署的情况下，自适应信道选择的作用更明显，每个节点自己判断之后进行局部的合作，使干扰源被隔绝，提高整个网络的鲁棒性。如表1所示。

表 1 典型复杂环境下信道干扰水平与链路质量测量结果

环境类型	平均噪声功率（dBm）	信道占用率（%）	平均 SNR（dB）	平均丢包率（%）	链路稳定等级（1-5）
城市高密建筑区	-78	63	14	8.7	2
工业园区（强干扰源）	-72	71	11	12.4	1
山地 / 丘陵地形	-85	37	21	4.1	4
森林植被覆盖区	-88	29	18	5.6	3
郊外低干扰区	-92	18	26	2.3	5

（二）功率控制与传输参数优化

发射功率过高会导致覆盖范围过大，引起多个节点接收到相同的数据包而导致冲突增加；而发射功率过小则可能导致链路失败^[7]。动态功率控制根据链路的质量、目的的距离以及负载情况来改变发射功率，让节点只进行必要的覆盖即可完成通信任务。传输速率根据信道的状态改变，在链路良好的情况下用较高的速率提高效率，在信道较差的情况下降低速率减小错误的发生率，从而使整个网络处于一个可以应对各种情况的最佳状态。此外还包括改变退避时间间隔、改变信道访问方式等方式使得 MAC 层的碰撞概率逐渐地降低。

（三）节点协同与智能管理机制

节点协同管理通过对链路状态、干扰情况以及负载信息等重要信息进行共享，使整个网络具有全局视野。而协同方式使得每个节点在做出通信决定之前不再仅凭一己之力，而是根据局部情况进行合理安排。比如在一个区域内如果存在较大干扰或者局部节点过载，则附近节点可以及时降低发射功率或者选择不同信道

甚至改变路由方向以防止小范围内的问题影响到更大范围内的通信^[8]。智能化管理利用机器学习方法或者规则集让网络可以从过去的工作中学习经验，在将来可能发生时进行预防性处理。而由于各个节点之间联系密切，因此网络自身的自适应性和恢复能力也大大提高，在遇到突然中断或者外界干扰情况下仍然能保持较高连通度。

五、结语

在各种复杂的环境中，无线 MESH 网络稳定性问题是多种因素相互作用且不断变化的问题。从影响因素的角度进行分析的基础上，本文主要对如何提高无线 MESH 网络稳定性进行了探讨，分别从拓扑优化、路由优化、干扰抑制及节点协调控制这几个方面提出了相应的解决方法，从而有效地改善了网络性能。这为无线 MESH 网络应用于各种实际场景提供了有力支持并为进一步的研究奠定了基础。

参考文献

[1] 丁鑫茹. 无线 Mesh 网络中基于负载均衡的网络节点部署算法研究 [D]. 辽宁大学, 2024.DOI: 10.27209/d.cnki.glniu.2024.001525.
[2] 苏鹏. 基于 WiFi6 的无线 Mesh 网络动态接入机制设计与实现 [D]. 南京邮电大学, 2023.DOI: 10.27251/d.cnki.gnjdc.2023.000122.
[3] 陈怡颖. 宽带工业无线 Mesh 网络资源调度研究与验证 [D]. 北京交通大学, 2023.DOI: 10.26944/d.cnki.gbjfu.2023.003289.
[4] 刘超. 基于图神经网络的无线 Mesh 网络路由算法研究与实现 [D]. 南京邮电大学, 2023.DOI: 10.27251/d.cnki.gnjdc.2023.000903.
[5] 沈陶焯. 能量均衡的无线 Mesh 网络节能路由协议研究 [D]. 辽宁大学, 2023.DOI: 10.27209/d.cnki.glniu.2023.000978.
[6] 马雪莉. 软件定义无线 Mesh 网络多目标路由优化及流量管理研究 [D]. 辽宁大学, 2023.DOI: 10.27209/d.cnki.glniu.2023.001370.
[7] 李康. 基于干扰感知的无线 MESH 网络路由算法研究与实现 [D]. 东南大学, 2020.DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2020.004439.
[8] 胡杨. 多射频多信道无线 Mesh 网络信道分配与路由联合优化算法研究 [D]. 东南大学, 2020.DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2020.000984.