

基于四象限分类的大规模自组织网络状态自适应快速感知方法研究

白晶晶¹, 朱晓荣¹, 崔涛²

(1. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003; 2. 深圳友讯达科技股份有限公司, 广东 深圳 518100)

摘要: 在大规模自组织网络中, 状态感知是实现全局网络视图的先决条件, 为网络故障排除、路由决策、网络拓扑动态规划等提供了数据支持。但现有的单一感知机制无法保证状态信息感知的时效性, 同时会产生额外的网络开销, 降低网络性能。针对上述问题, 提出了一种基于四象限分类的大规模自组织网络状态自适应快速感知方法。首先, 根据时延敏感度及网络请求频率差异化, 将网络状态信息基于四象限图的思想进行分类。其次, 针对不同象限的网络状态信息分别设计快速感知策略, 同时将网络状态信息封装到管理帧中, 以实现嵌入式传输, 降低网络开销。最后, 通过仿真实验验证了自适应快速感知方法在时效性和信息有效性方面均优于单一的主动上报和请求应答式策略。

关键词: 大规模自组织网络; 四象限分类; 自适应快速感知; 嵌入式传输

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00353

Research on adaptive fast sensing method of large-scale Ad Hoc network states based on four-quadrant classification

BAI Jingjing¹, ZHU Xiaorong¹, CUI Tao²

1. Nanjing University of Posts and Telecommunications Jiangsu Provincial Key Laboratory of Wireless Communication,

Nanjing 210003, China

2. Shenzhen Friendcom Technology Development Co., Ltd., Shenzhen 518100, China

Abstract: In large-scale Ad Hoc network, state sensing is a prerequisite for realizing global network view, which provides data support for network troubleshooting, routing decision and dynamic network topology planning. However, the existing single sensing mechanism cannot guarantee the timeliness of state information sensing, and will generate extra network overhead and reduce the network performance. To solve the above problems, an adaptive fast sensing strategy for large-scale Ad Hoc network states was proposed based on four-quadrant classification. Firstly, according to the difference of the delay sensitivity of network state information and network request frequency, it was classified based on the idea of four-quadrant graph. Secondly, fast sensing strategy was designed for network state information in different quadrants, and network state information was encapsulated into management frames to achieve embedded transmission and reduce network overhead. Finally, the simulation experiments show that the adaptive fast sensing method is superior to the single active reporting and request response strategy in terms of timeliness and information validity.

Key words: large-scale Ad Hoc network, four-quadrant classification, adaptive fast sensing, embedded transmission

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-09-11

通信作者: 朱晓荣, xrzhu@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 92067101); 江苏省重点研发计划基金资助项目 (No. BE2021013-3, No. BE2020084-3)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 92067101), The Young Science Leaders of Universities of Jiangsu Province and Key Research and Development Plan of Jiangsu Province (No. BE2021013-3, No. BE2020084-3)

0 引言

近年来,随着智慧交通、无人机蜂群作战等应用场景的复杂化和智能化,部署灵活、组网速度快的自组织网络规模不断扩大^[1]。在大规模自组织网络中,基于网络状态信息可以更加准确地进行网络决策,如不同节点间的链路参数(带宽、时延、干扰等)以及节点负载状态可以为端到端之间的路由选择提供指导依据^[2]。同时,在进行网络拓扑^[3-6]建立及网络性能评估时,不仅需要考虑节点的邻居信息^[7],还需要对链路参数、节点状态等进行感知。此外,随着节点的服务能力和接入的终端数量的动态变化,准确感知网络状态能够将过载节点所服务的终端动态地接入负载较小的服务节点^[8]。因此在大规模自组织网络中,网络状态如何更快地感知成为目前亟待解决的问题^[9-10]。

未来的自组织网络结构将会日益庞杂异构,海量数据和快速变化的业务使得传统状态感知机制无法有效实现感知需求^[11],许多学者对此进行了研究。多维度的网络资源与数据使得需要感知的参数数量激增,文献[12-14]基于人工智能技术对网络状态进行分析以及对故障进行诊断或预测,从而获取目标信息。文献[10]提出了请求应答状态信息感知方式,云端需要知道特定区域边缘节点状态信息时,向指定区域的边缘节点以广播的形式查询其状态信息。该区域内的边缘节点收到该查询请求后首先将自己的状态信息返回云端,后续再以定期更新的方式主动向云端响应自己的状态信息。但该方式会造成网络中存在大量的请求应答数据帧,同时,以固定的方式更新节点状态,会带来一定的数据冗余。对于单一的、无差别的数据感知策略易产生大量冗余数据、采集效率较低、资源浪费等问题,文献[15]针对与配电变压器生命周期相关数据信息采集的问题,基于四象限图和模糊综合评价方法对重要性和实时性不同的数据进行分类,并提出不同的数据采集策略。该文献主要对不同象限配电变压器数据的采集频率做了进一步研究,提出按需进行数据采集,进而降低数据冗余。文献[16]基于网络状态信息提出了以动态方式自动选择合适的数据收集节点,在保证感知准确性的基础上,减少采集的数据量。

在网络状态感知后,需要将相关状态信息封装成独立的帧进行传输,这种方式存在时效性差和产

生额外网络开销的问题。文献[17]针对该问题提出了基于WebSocket协议实现边缘节点状态信息的快速感知,利用WebSocket协议实现了管理消息的设计以完成状态信息的嵌入传输,并设计了相应的状态信息发送和接收处理流程,但其主要研究的是边缘节点加入、离开及状态更新3种状态信息的感知,对于其他网络状态信息并未过多关注。针对大规模场景使用带内网络遥测技术^[19-21]可以实现及时的网络状态感知,文献[18]将网络状态感知信息和数据包封装在同一个数据包内传输,降低实际业务数据拥塞导致网络状态感知不及时的概率,但由于数据封装在实际业务数据帧中,并没有减少感知数据量、降低通信开销。针对在多播网络中应用现有网络遥测方案存在数据冗余的问题,文献[19]提出了适应3种不同网络环境的多径带内网络遥测(MPINT, multipath in-band network telemetry)优化算法,实现了在多播网络环境中进行实时、细颗粒度地采集网络设备和网络数据状态信息,缓解了多播遥测数据冗余问题。文献[20]提出了一种软件定义网络(SDN, software defined network)控制器,基于链路优先获取当前动态网络状态信息(NSI, network state information),并与现有的周期性NSI收集设计进行了比较,文献[21]显著地降低了协议开销,但其仅考虑了一个控制器的网络,对于大规模网络研究的较少。

因此,为了实现中心节点快速掌握全局网络状态信息,减少不必要的状态信息感知,从而降低网络开销。本文提出了将网络状态信息基于四象限分类,并根据不同象限的状态信息特点,设计自适应快速感知方法。在网络分簇^[22]的基础上,根据时延敏感度及网络请求频率的不同,将网络状态信息基于四象限图的思想进行分类,并对不同象限的网络状态信息特点提出了“随数据帧传输”“周期性上报”“主动上报”和“请求应答式”的传输方式。将状态信息封装成独立的帧会产生额外的网络开销,因此,本文将网络状态信息封装到管理帧(管理帧由帧头和帧载荷两部分组成)中,以实现嵌入式传输。

1 系统模型

本文研究的系统模型如图1所示,主要包括三级节点,分别是中心主控节点、路由汇聚节点和

末端感知节点。其中，中心主控节点负责网络构建、维护和管理以及路由维护和资源分配等；路由汇聚节点作为大规模自组织网络的从属节点，负责数据的转发与传输；末端感知节点负责本节点的数据传输。路由汇聚节点和末端感知节点通过直连或多跳的形式与中心主控节点通信。为了实现网络状态信息的快速感知，在网络区域分簇的基础上，将时延敏感度和请求频率分别作为四象限图的横、纵坐标对网络状态信息进行分类。针对不同象限的网络状态信息分别设计了“随数据帧传输”“周期性上报”，“主动上报”和“请求应答式”的快速感知策略。

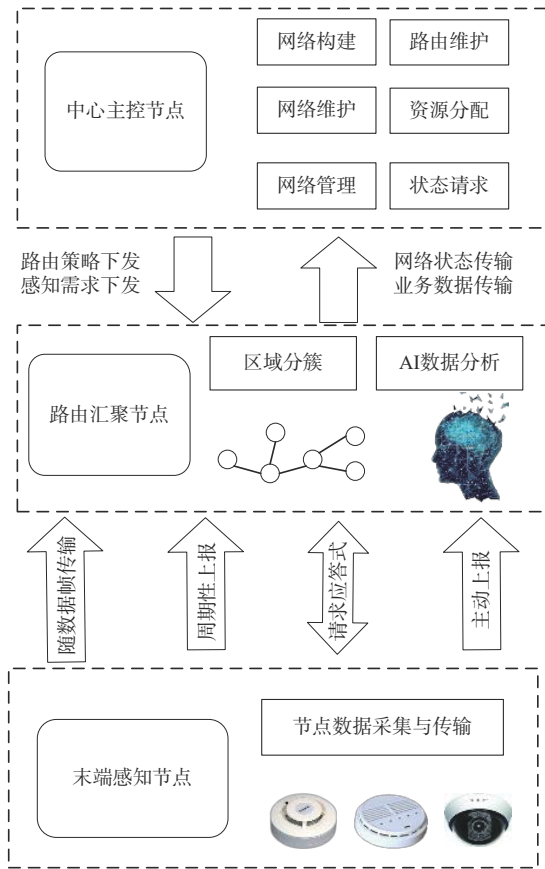


图1 系统模型

为了实现对大规模自组织网络的高效管理，本文采用区域划分算法，选出簇头节点，以指挥网络有序工作。由于网络规模庞大，节点到达中心主控节点的跳数越多，产生的网络开销越大。因此，综合考虑节点连通度、可用带宽和节点能力，选择网络中最佳的节点作为簇头。首先，节点通过 Hello 消息实现邻居关系列表的建立，并将网络拓扑信息

向全网广播。其次，将满足约束条件的节点划分为簇内成员。在各网络区域划分后，在簇内选择权重最大的簇成员节点作为簇头。最后，在确定每个簇的簇头后，将簇头节点的身份标识号通过拓扑控制 (TC, topology control) 消息广播给该区域的其他成员，网络区域分簇完成。

大规模自组织网络状态信息包含节点位置、邻居关系等网络拓扑信息，还包含节点的系统参数 (CPU 频率及使用率、内存大小及使用率)、网络流量等相关的链路状态信息 (带宽、排队时延、队列深度等) 和设备信息 (出厂参数、配置信息及历史数据等) 及网络故障告警信息。不同网络状态信息的时延敏感度和请求频率不同，若采用无差别感知方式，不仅会带来数据冗余，还会造成网络资源的浪费。因此，需要对不同类别的网络数据进行分类，采用不同的感知方式，在避免资源浪费的同时，实现网络状态信息的按需、快速感知。

采用四象限图方法^[10]对网络信息分类，如图2所示。

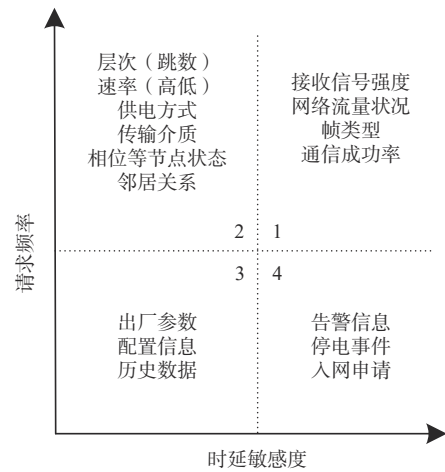


图2 基于四象限网络状态信息分类

其中，横坐标轴表示对网络状态信息感知的实时性要求，即网络状态信息从请求到接收的时延敏感度。纵坐标轴表示对网络状态信息感知的周期性要求，即网络对该状态信息的请求频率。在横、纵坐标轴分别设置一条控制线，将坐标系动态划分为四象限。各象限采取不同的网络状态信息感知策略。

第1象限：位于该象限的数据包括链路状态 (带宽、信道质量) 和网络流量信息 (排队时延、队列深度等)，影响数据传输时延，对网络性能的提升具有重要作用，感知周期性及时实性要求较

高，故采用“随数据帧传输”的方式。

第2象限：位于该象限的数据主要是网络拓扑信息，包括层次、速率、相位、传输介质、供电方式、节点负载（CPU及内存使用率等）以及节点之间的邻居关系信息，为网络拓扑的建立提供有效依据，故采用“周期性上报”的方式。

第3象限：位于该象限的数据主要是请求频率较低、对网络性能影响较小的信息，包括设备出厂参数、配置信息，以及网络运行的历史数据，为降低网络状态信息感知冗余，采用“请求应答式”的方式。

第4象限：位于该象限的数据主要是网络突发状况信息，故障发生频率较低，但对网络性能有较大的影响，故采用“主动上报”的方式。

2 自适应网络状态快速感知策略

在中心主控节点收集网络的全局拓扑信息后，需要从全局视野出发制定路由策略和下发网络状态感知需求，根据网络状态信息的优先级分别采用“随数据帧传输”“周期性上报”“主动上报”和“请求应答式”的感知方式。此外，还需要将网络状态信息封装成帧进行传输，该状态信息的特点是长度短且更新频繁，会带来较大的网络开销。为了解决该问题，在节点之间传输消息的同时，将状态信息加入管理消息帧中，可以从一定程度上缓解现有感知方案存在的感知时间长和网络开销大的问题。基于四象限分类的大规模自组织网络状态自适应快速感知方法如图3所示。

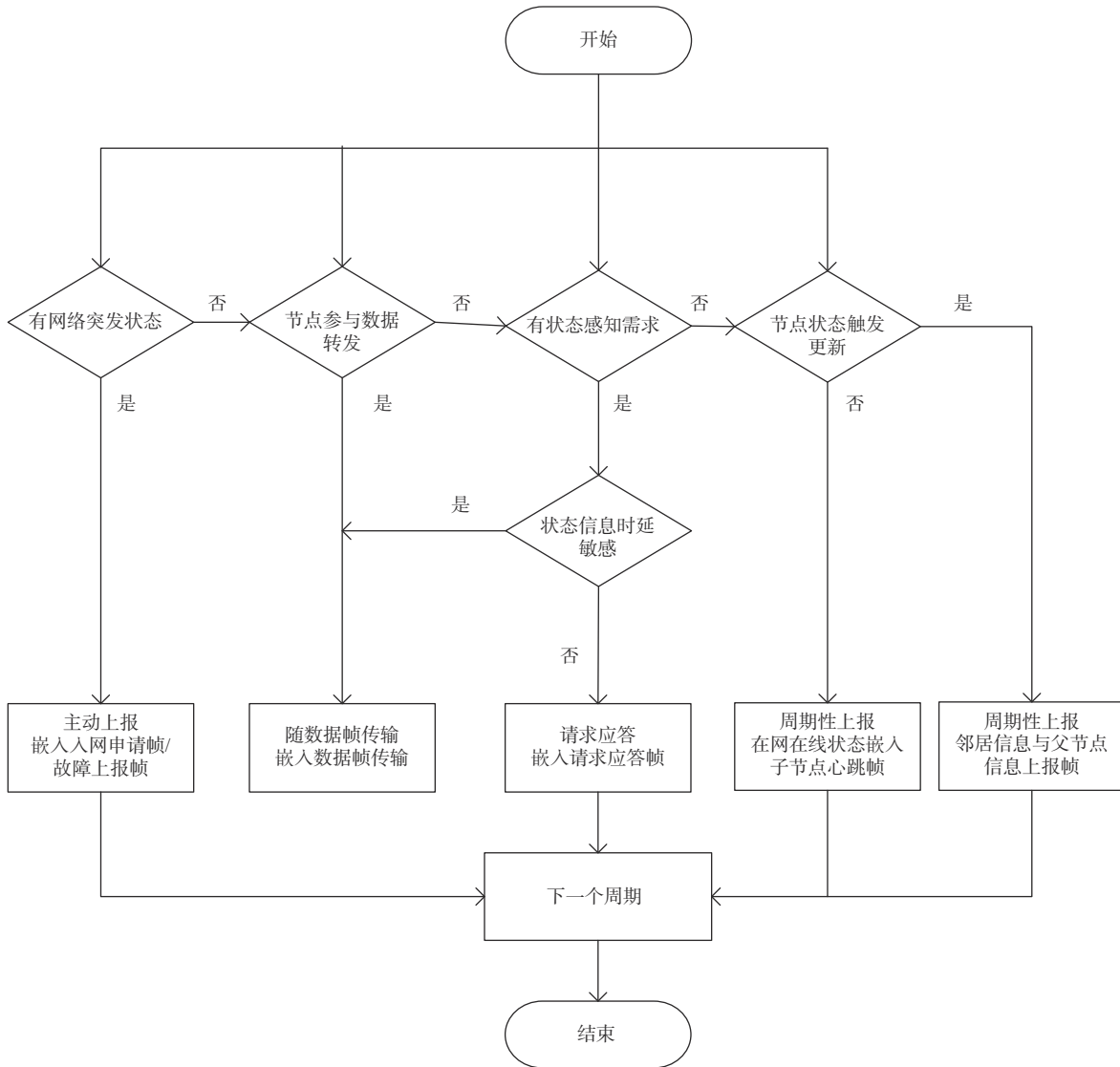


图3 基于四象限分类的大规模自组织网络状态自适应快速感知方法

2.1 随数据帧传输

第1象限的信息包括链路（带宽、信道质量）和节点状态信息（排队时延、队列深度等）等。网络中业务数据量较大时，该象限的状态信息会因网络拥塞^[23]而造成感知不及时，对网络性能产生较大的影响。因此，为了保证感知的时效性，将该象限的网络状态信息封装成元数据嵌入接收数据帧中，随业务数据一起排队转发。网络中转发的实际业务过多而网络拥塞时，该方式可以有效解决状态感知不及时的问题。随数据帧传输如图4所示，各区域簇头（路由汇聚节点）收集并分析各区域状态信息，再通过簇间路由策略将状态信息上报给中心主控节点。中心主控节点对各区域的状态信息进一步分析，为网络拓扑、路由策略等提供数据支持^[25]。

在业务数据传输过程中会存在多条路径重合，而对相同的网络状态信息感知会造成网络资源的浪费。因此为了降低数据冗余度，规定在一个周期内

节点根据业务流到达的先后顺序将网络状态信息随数据帧传输，并且只上报一次。

2.2 周期性上报

第2象限的信息包括节点状态信息、邻居网络和父节点信息，其中节点状态信息包括传输介质、速率、节点供电方式、通信成功率、接收信号强度指示（RSSI, received signal strength indication）、层次、相位、负载状态等。在大规模自组织网络中采用周期性上报的方式对网络拓扑域信息进行感知^[26]，周期性上报如图5所示。为了在保证节点状态信息感知时效性的同时降低节点的能耗，本文提出基于触发的状态更新机制，即根据节点状态变化是否超过阈值判断节点是否发送邻居网络与父节点信息上报帧。在每一个周期开始，首先判断节点状态是否触发更新。若该周期内需要上报网络拓扑域信息，则将状态信息随周期性的父节点状态信息和邻居网络信息的命令帧传输。转发成功则表明该节

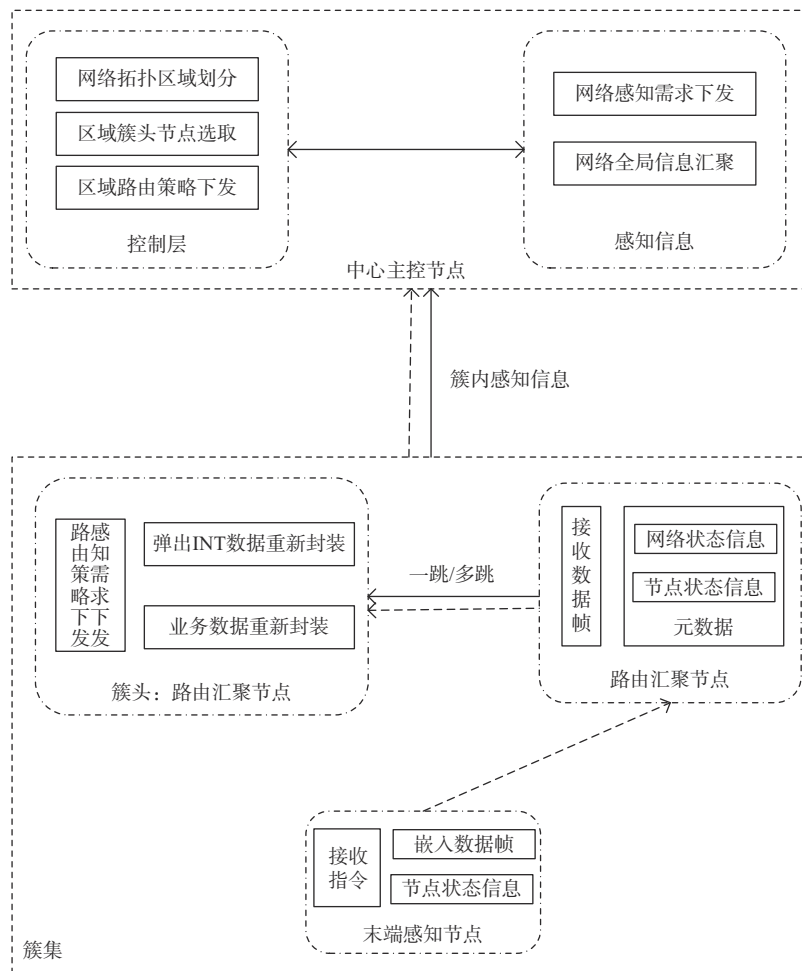


图4 随数据帧传输

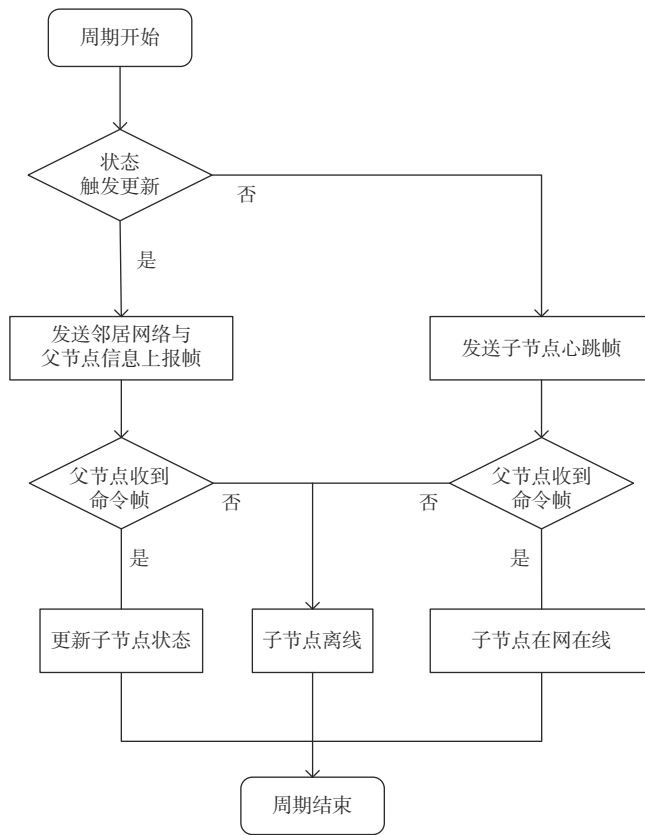


图5 周期性上报

点处于在网在线状态，否则该节点处于离线状态。若节点状态变化没有超过阈值，则通过发送子节点心跳帧上报节点状态。

2.3 请求应答式

第3象限的信息包括节点的出厂设置、配置信息等，以及网络的历史数据等，该象限的状态信息请求频率不高，且有较高的时延容忍度，可以采用请求应答式^[27]，相比于周期性上报可以降低网络状态信息的数据冗余度，从而降低网络开销。中心主控节点可以根据对各区域网络状态需求的不同进行按需感知，各区域簇头节点接收到区域路由策略和网络状态感知需求时，首先对所需网络状态信息的时延敏感性进行评估，如果是时延敏感性的网络状态信息，为了避免网络拥塞而造成状态信息上报不及时，将该状态信息封装成元数据随数据帧传输。否则采取请求应答式的感知方式。此外，中心主控节点可以将请求信息插入请求帧上，对网络各区域进行状态信息按需感知。同时，将感知的网络状态信息嵌入到应答帧进行传输，从而降低网络开销。

2.4 主动上报

第4象限的信息是随机发生的，如孤立节点入

网申请和故障信息等网络状态信息，若采用传统周期性询问的方式对突发网络状态信息进行感知，会带来额外的网络开销。为了不影响网络性能，当节点状态突发变化时则开启主动上报的方式。下面分别对孤立节点入网和节点发生故障两种突发网络状态感知进行阐述。

当孤立的节点想要加入某一个区域网络时，此节点主动向该区域的节点发送申请入网帧，请求加入该区域网络。当簇内节点收到加入请求后回复消息给孤立的节点表示同意其加入。此外，可以通过节点主动上报节点状态信息的方式判断处于离线状态的节点是否处于离网状态。如果连续一段时间父节点未收到来自该节点的任何一个数据帧或命令帧，则认为该节点处于未入网状态。

对于网络故障信息采用“分布式感知、分层次感知”，将相对小范围的节点告警信息主动上报到该区域的簇头节点，然后再上报到中心主控节点。这样的结构便于故障信息的收集和故障设备定位及管理。节点故障信息发生频率较低，但对时延敏感度要求较高，因此将故障主动上报帧设置为较高的优先级，充分保证故障信息传输的时效性。同时，当中心主

控节点识别帧类型为故障上报帧时，可以根据源地地址定位到故障发生位置，为网络安全提供预警^[28]。

以上根据不同象限的网络状态信息特点，分别提出了不同的感知策略。在每个感知周期内，基于四象限分类的大规模自组织网络状态自适应快速感知方法可以根据状态信息需求自适应性选择感知策略，避免无效的网络状态信息感知，减少帧载荷的字节数，进而降低网络状态信息感知的时延与网络开销。此外，将感知的网络状态信息封装到管理帧的帧载荷部分，可以减少网络中短帧的数量，进而降低了帧头的开销，提升网络状态信息感知的有效性。

3 仿真结果与分析

大规模自组织网络对于节点间通信的实时性和可靠性要求较高，若网络状态信息无法及时感知，会直接影响网络拓扑规划和路由策略。本文提出的基于四象限分类的大规模自组织网络状态自适应快速感知方法，在保证时效性的同时实现了网络状态嵌入式传输，减少不必要的网络开销。参数说明见表1，其中管理帧由帧头和帧载荷两部分组成，网络状态信息封装在帧载荷部分。

表1 参数说明

参数/单位	值
中心主控节点数量/个	1
路由汇聚节点数量/个	185
区域一的节点数量/个	56
区域二的节点数量/个	24
区域三的节点数量/个	35
区域四的节点数量/个	74
帧头大小/byte	19
帧载荷大小/byte	3
节点状态/byte	8
节点出厂设置/byte	8
节点间网络状态/byte	4
节点邻居信息/byte	8
网络故障信息/byte	4

仿真性能指标说明如下。

- 1) 时效性：完成网络状态信息感知的平均时延。
- 2) 有效性：有效网络状态信息感知比例表示为状态信息字节数占管理帧字节数的比例。
- 3) 网络开销：网络中管理帧的字节数。

利用 MATLAB 软件模拟大规模自组织网络拓扑，如图6所示。该网络拓扑表示了路由汇聚节点

和中心主控节点的连接关系，其中节点之间可通过无线、有线和双模的方式进行通信^[28]。

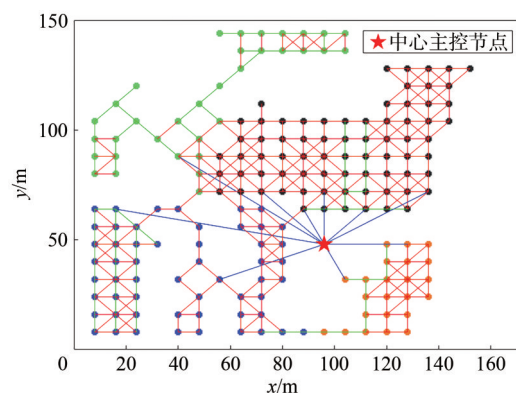


图6 网络拓扑

本文所提的基于四象限分类的大规模自组织网络状态自适应快速感知方法，在保证状态感知时效性的同时，避免了网络状态信息重复感知，从而减少了不必要的网络开销。为验证本文方法的可行性和有效性，本实验将从时效性和数据有效性两方面进行验证，并与以下两个方案进行比较。

1) 请求应答方案：中心主控节点向各子节点发送网络状态感知的管理帧，子节点收到感知指令后收集相应的网络状态信息，并将感知的网络状态信息发送到中心主控节点^[10]。

2) 主动上报方案：各子节点不接收中心主控节点的感知控制指令，周期性地将全部的网络状态信息上报到中心主控节点^[17]。

在不同节点规模区域内^[29]，比较不同感知方案的时延和有效信息率。不同区域网络状态信息的平均感知时延与有效信息率如图7所示。中心主控节点在不同区域根据周期内需要的网络状态信息不同，以最短路径作为网络状态信息感知的路由策略收集各节点的状态信息。对10个周期的网络状态进行感知，取均值作为最后的实验结果。可以看出，在平均感知时延方面，主动上报方案相对于请求应答方案较优。因为在请求应答方案中，时延包括状态需求指令下发时延和感知传输时延。但主动上报方案在每个周期内将所有网络状态信息全部上报到中心主控节点，所以主动上报方案的有效信息率低于请求应答方案。本文方案结合了网络状态信息的特点进行感知通信，所以不论区域规模大小，相比于请求应答方案和主动上报方案，本文方案根据网络状态信息特点自适应感知通信，在完成网络状态信息

感知的平均时延和有效信息率方面都有明显的优势。同时本文方案提出将网络状态信息封装在管理帧中实现嵌入式传输，减少了传输独立帧时额外的帧头开销，从而在节省时间的同时降低了网络开销。

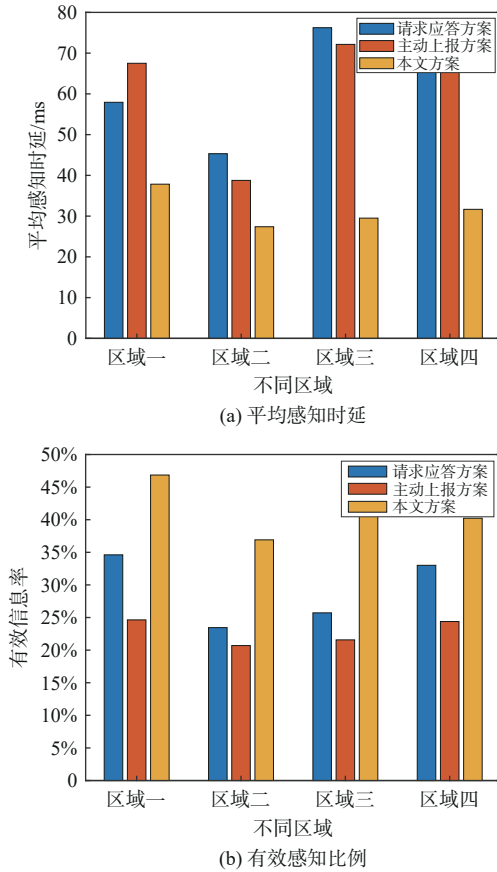


图7 不同区域网络状态信息的平均感知时延与有效感知比例

随着各路由汇聚节点到达中心主控节点最大跳数的不断增加，区域内节点规模不断扩大。改变区域内节点规模，测试了在不同规模下网络状态信息感知方案的性能。不同规模下网络状态信息的平均感知时延和网络开销如图8所示，从图8(a)中可以看出，随着网络规模的不断扩大，平均感知时延不断增加。但在相同条件下，本文方案相比于请求应答方案和主动上报方案的平均感知时延较低。此外，随着节点规模增大，请求应答方案和主动上报方案的平均感知时延变化较快，本文方案对于大规模自组织网络状态信息感知更有优势。本文方案根据中心主控节点的状态信息需求自适应快速感知，避免无效的状态信息感知，减少帧载荷的字节数。从图8(b)中可以看出，请求应答式包含中心主控节点请求帧和路由汇聚节点应答帧，相较于本文方案

网络开销更大。主动上报策略将全部的网络状态信息上报到中心主控节点，其网络开销同样大于本文方案。同时随着网络规模的扩大，本文方案的网络开销增加趋势相较于其他两种策略更加平缓，说明本文方案在大规模自组织网络中更有优势。

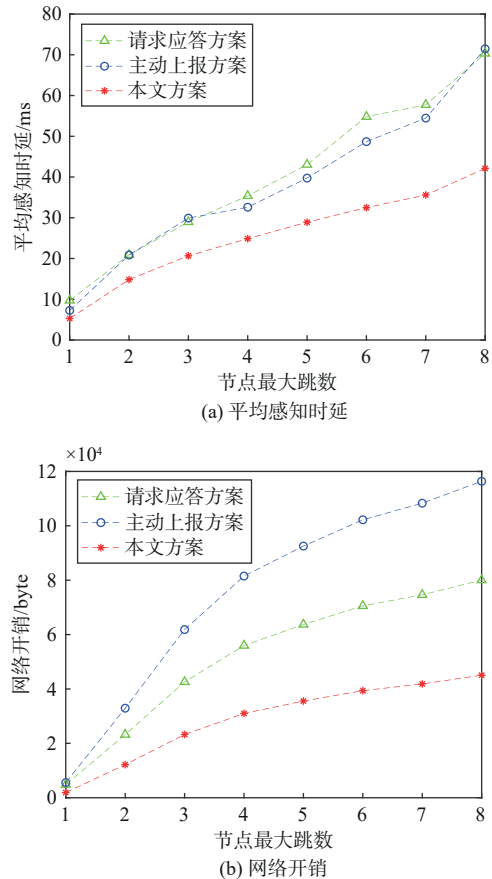


图8 不同规模下网络状态信息的平均感知时延和网络开销

在不同的带宽资源下，比较不同感知方案的时延，节点带宽与平均感知时延如图9所示。根据香农定理，节点之间的带宽越大，数据传输速率越大。因此，在传输相同网络状态信息时，节点带宽资源越大，传输时延越小，中心主控节点完成区域内所有节点网络状态信息收集的感知时延越小。从图9中可以看出，不论节点带宽的大小，本文方案较其他两种方案在平均感知时延方面具有明显优势，能更快速完成感知。

不同请求次数下平均感知时延和有效信息率如图10所示，从图10(a)中可以看出，对于主动上报方案，每个周期路由汇聚节点将所有状态信息上报到中心主控节点，因此，随着状态请求次数的增加，节点网络状态信息平均感知时延几乎不变。对于请

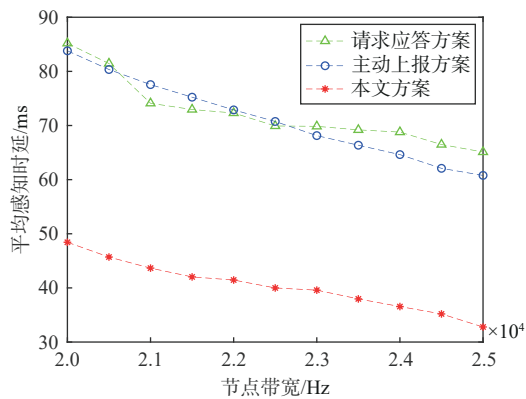
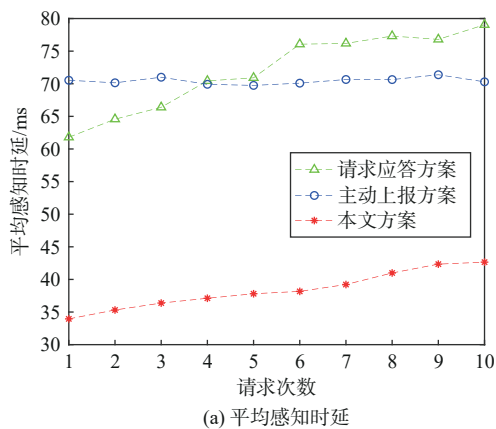
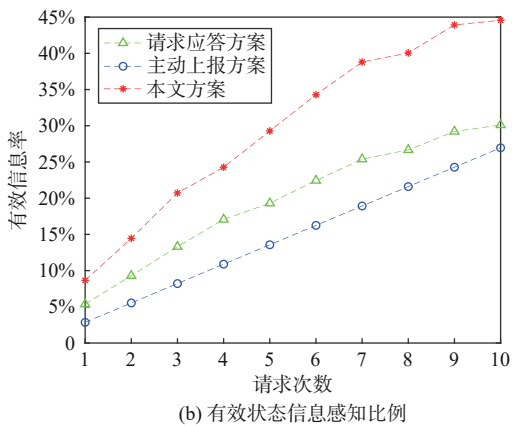


图9 节点带宽与平均感知时延



(a) 平均感知时延



(b) 有效状态信息感知比例

图10 不同请求次数下平均感知时延和有效信息率

求上报方案, 随着状态请求次数的增加, 平均请求状态信息量增加, 因此其平均感知时延不断增加。当请求次数较少时, 请求应答方案上传的平均状态信息量较主动上报方案少。但请求应答方案中的平均感知时延包括了状态信息下发指令时延和状态信息上报时延, 因此, 随着请求次数增加, 主动上报方案更有优势。而本文方案结合了其他多种状态感知方案的优势, 不论请求次数是多少, 其状态平均感知时延均明显低于其余两种方案。

从图10(b)可以看出, 随着请求次数的增加, 3种感知方案的有效信息率不断增大。其中, 主动上报方案的有效信息率与请求次数为线性关系, 且由于每个周期主动上报方案将全部信息上报, 因此其有效信息率最低。而本文方法根据状态信息特点自适应上报, 通过将状态信息嵌入不同管理帧中进行传输, 大大减少了为实现状态信息感知而产生的额外网络开销。

4 结束语

本文针对现有的网络状态感知方案存在的时效性差和产生额外网络开销的问题, 提出了基于四象限分类的大规模自组织网络状态自适应快速感知方法。首先将网络状态信息基于四象限分类, 针对不同象限的状态信息特点分别设计了“随数据帧传输”“周期性上报”“主动上报”和“请求应答式”的传输方式。在此基础上将网络状态信息封装到管理帧中, 以实现嵌入式传输。最后通过仿真实验验证本文方案在网络状态信息感知的时效性和有效性方面都优于传统的请求应答上报方案和主动上报方案。未来可以在本文基础上, 基于AI算法对多维状态信息进行综合分析处理, 实现对网络状态的实时分析和故障诊断等^[14]。

参考文献:

- [1] 白瑞. 一种面向大规模节点的无线自组织网络接入架构研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
BAI R. Research on an access architecture of wireless ad hoc network for large-scale nodes[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [2] TANG F X, MAO B M, KAWAMOTO Y, et al. Survey on machine learning for intelligent end-to-end communication toward 6G: from network access, routing to traffic control and streaming adaptation[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(3): 1578-1598.
- [3] LIU Z, SUN J, SHEN F, et al. Topology sensing of wireless networks based on Hawkes process[J]. Mobile Networks and Applications, 2020, 25(6): 2459-2470.
- [4] HONG J, ZHANG D H. TARCS: a topology change aware-based routing protocol choosing scheme of FANETs[J]. Electronics, 2019, 8(3): 274.
- [5] GONG M G, JI S F, XIE Y, et al. Exploring temporal information for dynamic network embedding[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2022, 34(8): 3754-3764.
- [6] CHUA M Y K, YU F R, LIANG C C, et al. Software-defined

- device-to-device (D2D) communications in virtual wireless networks with imperfect network state information (NSI)[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9): 7349-7360.
- [7] LEI F Y, LIU X, LI Z M, et al. Multihop neighbor information fusion graph convolutional network for text classification[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 1-9.
- [8] CHAI A Y, MA Y, YIN Z Y, et al. Dynamic control model based on state perception[C]//*Proceedings of 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1406-1411.
- [9] 梁佳健. 协同网络中多链路状态动态感知机制的研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- LIANG J J. Research and implementation of dynamic sensing mechanism of multi-link state in collaborative network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [10] AMENTO B, BALASUBRAMANIAN B, HALL R J, et al. FocusStack: orchestrating edge clouds using location-based focus of attention[C]//*Proceedings of 2016 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 179-191.
- [11] 戴锦友. 网络感知技术的标准化研究[J]. *标准科学*, 2022(S1): 86-90.
- DAI J Y. Standardization of network awareness technology [J]. *Standard Science*, 2022 (S1): 86-90.
- [12] 章广梅. 基于 AI 的无线网络感知技术研究综述[J]. *电讯技术*, 2022, 62(5): 686-694.
- ZHANG G M. Researches on wireless network sensing technology based on AI: an overview[J]. *Telecommunication Engineering*, 2022, 62(5): 686-694.
- [13] MIAO W W, WEI L, WU H Y, et al. Fault Processing Algorithm of Power backbone Communication networks Based on Artificial Intelligence and State Perception[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1045-1050.
- [14] 任育峰. 基于机器学习的网络状态感知分析方法[J]. *移动通信*, 2022, 46(9): 30-34.
- REN Y F. A network state-aware analysis method based on machine learning[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(9): 30-34.
- [15] 赵妙颖. 配电变压器数据感知与智能维护决策研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- ZHAO M Y. Research on data perception and intelligent maintenance decision of distribution transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [16] ZHOU D H, YAN Z, LIU G, et al. An adaptive network data collection system in SDN[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(2): 562-574.
- [17] 胡蓉蓉. 边缘节点服务能力快速感知机制的研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- HU R R. Research and implementation of edge node's fast sensing mechanism of service capability[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [18] 常立众. 软件定义移动自组织网络状态感知和异常检测[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- CHANG L Z. State awareness and anomaly detection in software-defined mobile ad hoc networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [19] 毛珍建. 面向多播的带内网络遥测系统设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- MAO Z J. Design and implementation of multicast-oriented in-band network telemetry system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [20] AKIN E, KORKMAZ T. Link-prioritized network state information collection in SDN[C]//*Proceedings of ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [21] 陈浩澜. 基于 P4 的带内网络遥测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- CHEN H L. Research on in-band network telemetry technology based on P4[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [22] 邓晓平, 马路娟. 面向智慧家居的异构自组织网络分簇算法[J]. *计算机时代*, 2023(3):11-16.
- DENG X P, MA L J. Clustering algorithm for the heterogeneous adhoc network in smart home[J]. *The Computer Age*, 2023(3):11-16.
- [23] QIONG W. Research on intelligent perception and sensor network technology of urban traffic based on energy tree model[C]//*Proceedings of 2022 International Conference on Information System, Computing and Educational Technology (ICISCET)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 336-341.
- [24] WU H Y, TANG Z, XUN S C, et al. Intelligent sensing strategy of terminal equipment in power communication network based on intelligent optical connection box[C]//*Proceedings of 2020 International Conference on Computer Communication and Network Security (CCNS)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 170-173.
- [25] LIU J J, PENG B, LIN S J. Research on centralized control architecture deployment of power optical network based on network perception[C]//*Proceedings of 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 2645-2651.
- [26] SUN H T, ZHANG P F, ZHANG Z Q, et al. State perception event-triggered communication scheme for networked control systems[C]//*Proceedings of 2020 7th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems (ICSS)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 831-836.
- [27] YUN K, HUANG Q, MA Y X. Construction of network security perception system using Elman neural network[C]//*Proceedings of 2021 2nd International Conference on Computer Communication and Network Security (CCNS)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 187-190.
- [28] ZHANG C, YUAN J N, LUO F, et al. Research on PLC and wireless heterogeneous network based on link awareness[C]//*Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Computer and*

Communication Engineering Technology (CCET). Piscataway: IEEE Press, 2018: 91-95.

- [29] LIU Z L, GAO S Y, LI P, et al. Distributed state estimation in digital distribution networks based on proximal atomic coordination[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.

[作者简介]



白晶晶(2000-), 女, 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室硕士生, 主要研究方向为移动边缘计算、通感算一体化技术。



朱晓荣(1977-), 女, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为5G/6G通信系统、物联网、区块链等关键技术及系统。



崔涛(1965-), 男, 深圳友讯达科技股份有限公司董事长、总裁, 主要研究方向为无线电通信。