采用多目标优化和统计检验对无线网状网络中的MAC协议进行批判性比较分析与建议

Ankita Singh[1], Sudhakar Singh[1*], Shiv Prakash[1]

摘要

无线网状网络（WMN）无疑是现代最重要的网络之一，广泛应用于众多不断发展的领域，例如宽带家庭网络（BHN）、社区和邻里网络（CNN）、协同网络管理（CNM）以及智能交通系统（ITS）等。它是一种采用多跳连接的无线网络（WN），由许多固定的无线网状路由器（WMR）组成，这些路由器通过无线方式连接，形成网状骨干结构。在IEEE 802.11s网络中，节点选择、可扩展性、稳定性、节点密度、节点移动性、传输功率和路由是WMN面临的主要问题。本文对WMN的MAC协议及其服务质量（QoS）参数进行了批判性评述，以增进对MAC协议的理解。此外，本文还利用多目标优化和统计检验框架，对WMN的MAC过程进行了批判性比较分析并提出建议。该框架用于分析和推荐针对QoS参数的不同可用协议。

关键词：无线网状网络（WMN）、MAC协议、非重叠干扰、信道分配、多目标优化、统计检验。

*通讯作者

Ankita Singh
ankita.singh87@gmail.com

Sudhakar Singh
sudhakar@allduniv.ac.in

Shiv Prakash
shivprakash@allduniv.ac.in

[1] 阿拉哈巴德大学电子与通信系，Prayagraj，印度

本文的正式版本发表于 Wireless Personal Communications（Springer），现已在线发布：https://doi.org/10.1007/s11277-0

1. 引言

无线网状网络（WMN）[1] 是一种特殊的多跳无线网络（WN），由许多固定的无线网状路由器构成，这些路由器通过网状骨干结构进行无线连接。由于具有更高的灵活性和成本效益，无线基础设施网络（WIN）正在多个领域被其取代[2]。此外，它还通过网状路由器和网状网络用户，为网状网络用户和普通用户提供网络接入。网络形成了桥接功能，网状路由器还提供有限移动性，并构成无线网状网络的骨干网。无线网状网络在 IEEE 802.11s 网络的简单路由协议中面临各种问题[3], , 例如可扩展性、稳定性、互操作性、节点选择和负载均衡[4]。节点关系距离的使用导致了路径不稳定性问题。自 IEEE 802.11 建立以来，许多问题已经得到解决，但仍有一些问题和挑战尚未解决。本文讨论了无线网状网络流量策略中的总体问题，以及 IEEE 802.11 网络面临的研究挑战。无线网状网络还可用于 TVTA（威胁与脆弱性测试评估）、自组网络以及传感器网络。然而，这些网络中现有的协议无法直接在无线网状网络中运行。因此，鉴于这一研究空白，需要开发专用于无线网状网络的新技术和协议。关于 IEEE 802.11s 网络中的路由、可扩展性和安全性，已有大量文献研究。

目前的文献主要关注提升自组网络的性能，但与无线网状网络相比，自组无线网络中的节点 [5] 不太可能采用无线网状网络的协议。无线自组网络通常用于通过单跳或多跳在用户群体之间交换数据，而无线网状网络用户则旨在通过有线/无线网络与公共互联网服务器进行通信。因此，无线网状网络应支持客户端通过多跳向服务器提供服务。无线网状网络与自组网络存在显著差异，因此自组网络协议无法用于多跳运行，这正是无线网状网络的情况。流量从无线网状网络客户（叶节点）流向公共互联网服务器（根节点），而自组网络的流量则是点对点的。

介质访问控制（MAC）是确保无线网状网络成功运行的关键组件。无线自组网络 [6] 希望用户频繁移动，而无线网状网络用户可以缓慢移动。因此，自组网络协议经过调整，以适应用户有限的移动性，同时支持多跳连接。还应注意，MR（网状路由器）并不移动，而MC（网状客户端）通常需要移动。由于MR可以由交流电供电，而MC由电池供电，因此，为MC和MR设置不同的固定上限可能是一个明智的想法；所以，自组网络协议并未专门用于无线网状网络。Hosseinabadi和Vaidya [7] 观察到，目前无线局域网中使用的MAC协议IEEE 802.11 DCF（分布式协调功能）在信道使用、信道接入时间和系统吞吐量方面会导致较长的系统空闲时间或发生碰撞。

文献综述中使用的材料是通过使用表1所给出的搜索关键词收集的。

表1。文献收集中使用的关键词

关键词场景1	关键词场景2
MAC协议	无线网状网络
MAC协议	无线网状网络
MAC + 协议	无线+ 网状+ 网络
MAC + 协议	无线+ 网状+ 网络
‘MAC协议’	‘无线网状网络’
“MAC协议”	‘无线网状网络’
‘MAC协议’	“无线网状网络”
“MAC协议”	“无线网状网络”
‘MAC + 协议’	‘无线+ 网状+ 网络’
‘MAC + 协议’	‘无线+ 网状+ 网络’
“MAC + 协议”	“无线+ 网状+ 网络”

本文在引言之后的组织结构如下。第2节介绍MAC问题和MAC协议。第3节讨论了包含批判性分析的详细文献综述。第4节讨论指标、多目标优化和统计框架，最后在第5节中对本文进行总结并提出未来工作。

2. 无线网状网络

无线网状网络（WMN）是无线网络（WN）的另一种形式，各节点可在一定跳距范围内相互连接。跳距范围内的节点（仪表站点）通过适当的路由协议连接。WMN 可采用多种架构：骨干网架构可以是服务器-客户端型，也可以是混合型。骨干网架构中包含网状路由器。图1展示了 WMN 的通用架构。

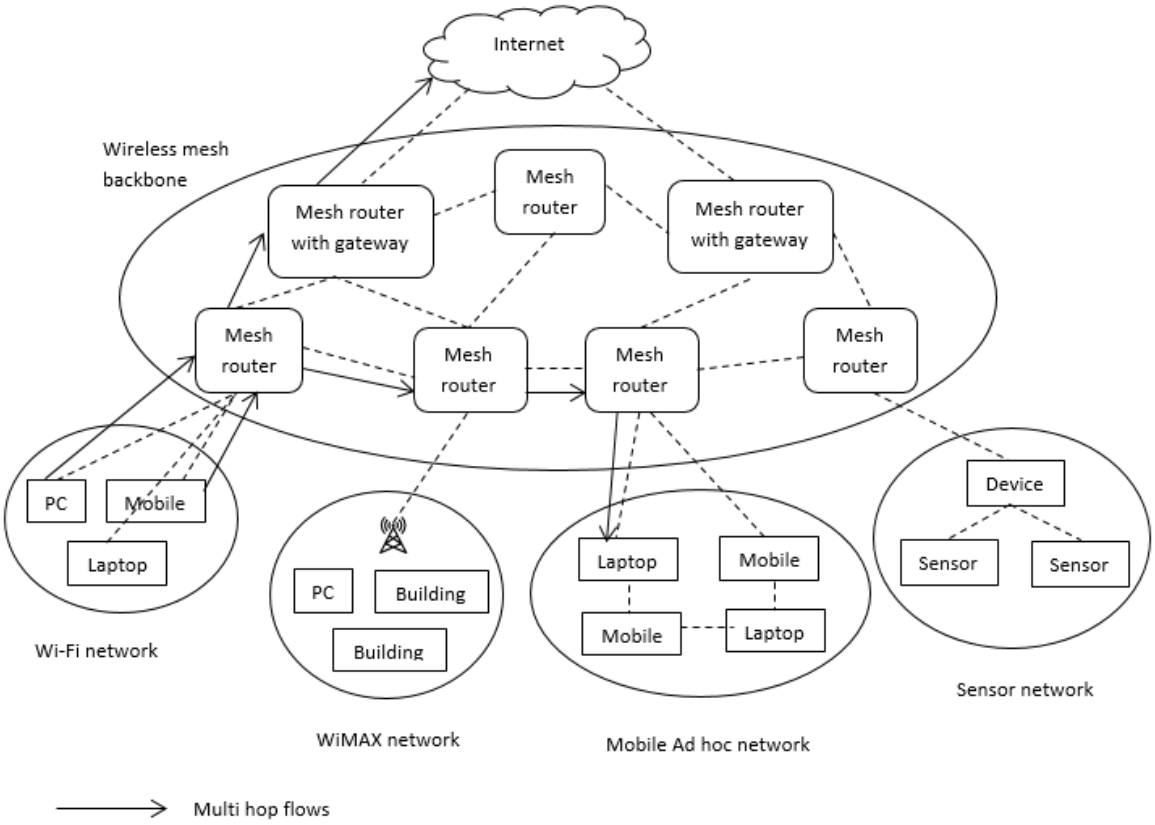

图 1：无线网状网络的架构

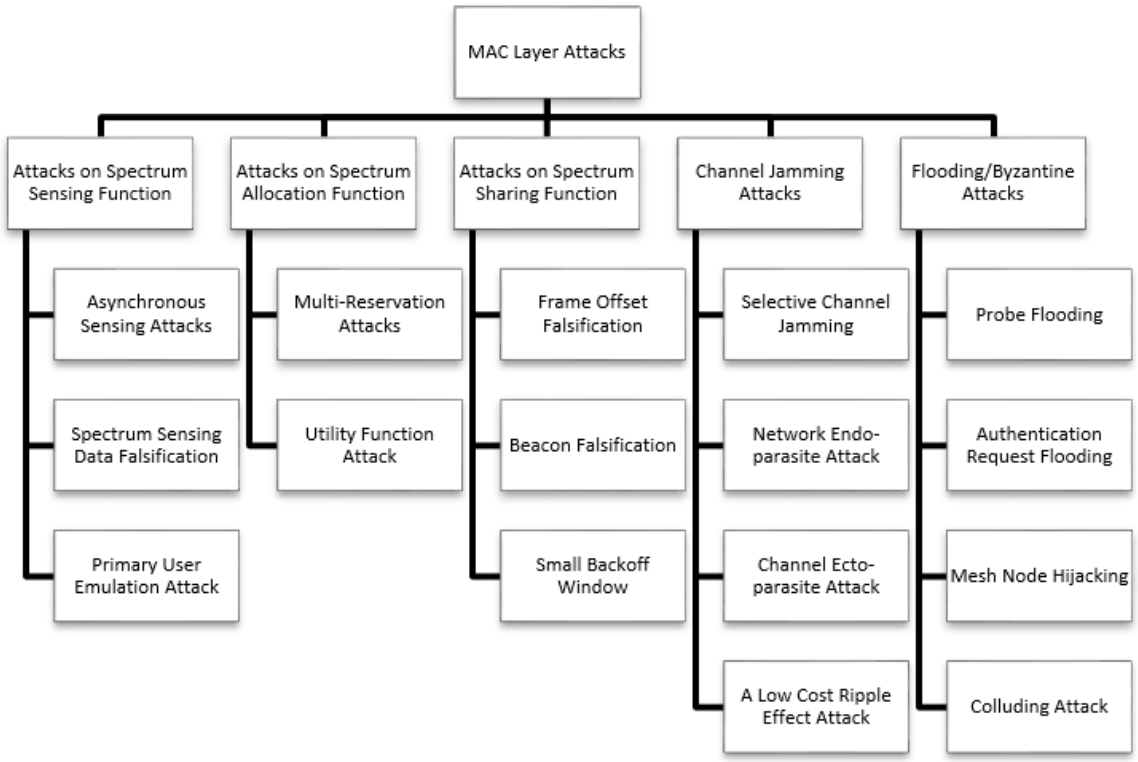

图2：MAC层攻击分类

图2展示了 MAC层安全攻击的分类。WMN面临的一项重要挑战，是如何为客户端提供足够的可用吞吐量。然而，由于 WMN 的广播特性，不同设备在同一信道上传输的信号会发生碰撞，从而导致数据丢失。因此，需要采用多址接入方法，即时分多址（TDMA）和频分多址（FDMA），来协调不同信道上的传输。为最大限度地减少干扰，设备可以通过所配置的不同非重叠信道进行传输。多无线电无线网状网络的高网络容量，取决于如何将多个信道高效地分配给各个无线电设备，从而构建干扰最小的 WMN；这一问题称为信道分配问题。该问题属于 NP困难[8]。

3. 文献综合评述

在传统无线网络中，会出现隐藏终端问题，因为在进行载波侦听多路访问（CSMA）时，两个节点彼此处于对方的载波侦听范围之外，却都想连接到同一个节点。为解决这一传统问题，会采用清除发送（CTS）/请求发送（RTS）握手技术，以在数据传输前防止碰撞 [9], 。全向天线通常会将无线信号的电磁能量分散到广阔的空间区域，但预期接收方只能吸收其中很小的一部分，因此从理论上限制了总功率和效率。此外，全向天线还存在一些常见问题，例如多径衰落、传播延迟以及同信道干扰。目前，通过提供低成本计算能力，并开发用于处理来自简单天线阵列的信号的新算法，使波束成形天线能够应用于有线通信系统 [10] 。由多直线天线（MBA）组成的智能天线广泛应用于波束赋形天线中。通过数字信号处理（DSP）单元控制天线阵列之间的时间速度。

Bao等人提出了一种用于基于天线的自组网的信道接入调度协议（CASP），称为分布式接收机定向多址（ROMA）。该协议仅利用两跳拓扑，规定任意时隙中可激活的连接数量。不同于为通信目标进行自发信号扫描或握手的按需接入方案，该协议的主要优势在于接收和发送过程中均使用由多个波束构成的定向天线，这提高了网络效率和时延。为了获得节点的信道接入调度方案，ROMA采用邻居感知竞争解决（NCR）。在每种情况下，公共资源的竞争根据上下文编号和标识符为各实体分配的优先级来解决，并赋予最高优先级，以便在不发生

冲突的情况下接入共享资源 [4]。每个ROMA连接都会根据ROMA网络的拓扑结构，为该连接的数据流需求赋予权重；该权重会自动通过连接头部进行评估，以跟踪流量需求或接收上层应用对带宽的请求。节点和连接取决于其标识，新的Timeline ROMA是一种面向接收方的多址协议，利用构建具有不同波束的多波束自适应阵列天线的能力。由于掌握了两跳区域内节点和带宽分布的最新信息，ROMA能够确定某个节点是无线网状网络发射器还是接收器，以及在特定时间t期间可以激活哪些用于接收或传输的连接。ROMA协议必须在发送器实际激活连接之前，在接收模式下确定每个节点的有效输入连接。

Lal等人 [11] 提出了一种用于自组织无线网络的全新空分MAC多址协议。后来，这些配备定向天线的无线自组网络无法实现显著改进，因为它们不允许节点同时进行多次接收/传输。有人提出了一种MAC层协议，该协议利用多重空分接入，借助定向接收特性，从空间分离的发射节点接收多个数据包。空分多址被划分为传输和接收之间的两个时分双工（TDD）结构。该协议利用并行性提高节点在接收过程中的吞吐量，从而使未来的发送器能够与接收方同步。由于任何通信都由可能的接收方决定，向另一节点发送传输的节点无法实现同步。该系统采用接收方发起方法来实现接收时间同步。

智能天线可以在高层使用经过适当设计的网络协议，例如MAC协议，以发挥其卓越能力。然而，与标准MAC协议相比，目前已经存在许多接口问题。传统的网络日志最初是为配备全向天线的节点运行而配置的，这些节点无法与基于全向天线的智能多波束天线进行通信，并且如果缺乏谨慎控制，可能会使整体效率大幅低于未采用该方案时的水平 [12]。因此，为了利用无线网状网络中的潜在优势，探索革命性的协议，尤其是MAC层协议，就显得十分重要。Lal等人 [13], 对无线局域网中多波束天线节点的介质访问控制（MAC）效率进行了评估。他们采用了由多种波束天线系统组成的宽方位角波束智能天线系统，并对CSMA和分时隙ALOHA的单跳性能进行了测量和仿真。该论文还讨论了多个CSMA波束的同步问题。这些研究结果表明，考虑到波束同步造成的输出不足，对于配备智能多波束天线的节点而言，在高负载条件下，CSMA是一种很好的替代方案。相比之下，CSMA能够以一致的方式实现传输吞吐量，并根据所提供的负载进行稳定调整。然而，分时隙ALOHA的效率会显著下降到可用最佳负载以下；另一方面，当使用更多偏移波束时，分时隙ALOHA可以在较窄的可用负载范围内产生更高的峰值。

CSMA分析模型是简单CSMA，不涉及握手，也不涉及确认。载波侦听由独立信道上的接口处理，该接口由一系列用于传输数据的窄带音调组成。该模型认为，接收波束的大致编号会映射到一个全向音调中，并且保密音调应设置为能够覆盖接收波束中的所有成员，同时尽可能降低其数值，以将错误风险降至最低。经过一些修改后，分析用的分时隙ALOHA模型与CSMA模型相同。最新的智能多波束天线大致可分为三类：可变阵列、切换式多波束天线和MIMO（多输入多输出）链路天线[14]。Sundaresan等人 [15] 提出了采用多输入多输出（MIMO）的自组织网络媒体访问控制。通过在单一路径上同时分发多个独立数据流，MIMO链路能够提供极高频谱效率的多向流传输。针对MIMO链路的具体特性及诸多主要优化考量，需要一种全新的MAC协议。作者展示了一种称为SCMA（稀疏码多路访问）的集中式算法，该算法整合了优化流控制媒体访问架构的核心问题。

空间复用的主要优势在于最大限度地提升系统能力。这些模式基于以下发现：使用统一流调节媒体访问协议进行自组织网络连接时，接收端存在过热问题。在纯流控制的情况下，网络中存在某个连接子集，会导致接收端过载丢失。为了跟踪瓶颈连接的溢出情况，他们使用由非流控制的时间表。通过有效地将连接与所有规划因素分离，并仅设置独立的竞争区域，调度算法才能用于纯流控制。随着本地无线连接日益普及，接入点与终端或基站之间对增加数据共享、吞吐量和能耗的需求也大幅增长。无线网络历来通过无线局域网配置为向基站或接入点进行单跳传输。然而，实际中无线网络部署的增加催生了无线网状网络（WMN）的概念[16], , 扩大无线覆盖范围,

提升最大容量，并实现网络的自配置。由网络节点按照网状网络拓扑排列而成的网络，同时也是一种WLAN自组网，这就是无线网状网络（WMN）。

Choi等人提出了互补波束成形[17]，并建议采用两种新技术来处理互补场问题。在某些区域内，部分网络站点无法检测到定向信号（波束），这通常会导致隐蔽波束问题；为此，他们提出了“子空间互补波束成形（SCBF）”和“互补叠加波束成形（CSBF）”。SCBF利用虚拟数据，确保双向下行信道所获得的能量达到规定水平。与此同时，CSBF要求发送的数据也用于辅助波束。利用这种方法，可通过主动节点共享用户特定数据，向网络中的被动节点传递“广播”信息。空分中不采用多址接入，因此只需优化一个天线单元的传输功率，就能轻松实现额外的波束成形效果。CBF（立方英尺）的核心概念是，非预期用户只需少得多的功率，就能可靠地检测到传输是否存在；而这通常足以正确解码传输分组。SCBF技术会在“原本隐蔽的波束”方向生成平滑的波束图样，确保两个方向和位置上的功率都高于某一阈值。在CSBF中，SCBF向量通过线性组合配对。通过调整其中一个SCBF列向量，可以扩展旁瓣，同时避免其与目标波束交叉。这种架构的最终目标是最大限度地提高所有节点都能听到信道操作的可能性，从而中断传输。这可确保服务区域内的每个位置所获得的功率都超过阈值。

每种天线技术都有其优势和缺点。切换式多波束天线已部署于许多实际应用中，结构非常基础且可商用[18]。在无线网络中，隐藏终端问题要严重得多。为了同步相邻节点之间的共享数据，尤其是在涉及移动性时，提供更为复杂的MAC协议十分重要。对于采用全向天线的传统接入点（AP）而言，移动性可能并不是一个重大问题。在无线网状网络（WMN）中，采用多波束天线的接入点存在一个不可忽视的问题，即每个节点都直接连接到一个波束区域。当移动节点从介质访问控制的一个波束扇区切换到另一个波束扇区时，尤其是下行介质访问控制会受到显著影响。需要采用适当的位置更新算法来保持位置信息的及时性，而这相对代价高昂，从而使无线网状网络更加复杂 [18]。多波束成形天线的目标之一，是利用空间复用性；这一目标最初是根据简单的MAC指令定义的 [19],[20], [21], [22], 。失聪现象可能发生，这迄今为止一直是无线网络中最令人关注的问题。可是，当发送器尝试与源节点建立连接时，由于源节点已移动到发送器以外的方向，此次传输过程便会失败。与全向天线不同，预期接收方无法传输发送器发出的信号。因此，发送器表现为失聪。

多波束智能天线无线网状网络近年来广受欢迎，因为其性能更好、效率更高。然而，IEEE 802.11 等仍普遍用于竞争接入的 MAC协议，在多波束天线场景下效率较低。Wang 等人 [18] 于2017年提出了一种方法，以提升无线局域网中多波束接入点介质访问控制的效用。为妥善解决这些难题并提高协作效率，作者提出了一种新型 MAC协议。其架构也考虑了反向兼容性，使 IEEE 802.11终端能够透明地接入多波束接入点。论文中，作者指出，其设备配备了多波束接入点、单频信道和手持式全向节点，并采用用于MAC层的 IEEE 802.11 DCF层分布式解决方案。MAC协议的数据链路分为两类：介质访问控制下行链路和介质访问控制上行链路。该 MAC协议的核心概念是设计一种时序结构，在并行、无碰撞的数据传输开始前，允许进行多次握手（顺序进行或重叠进行）。在上行介质访问控制的限制时间内，队列中的上行节点均缓存着上行数据包。他们设计了一种冲突解决机制，使多个节点能够胜出，从而确保胜出的节点不会发生碰撞。因此，“无碰撞”仅仅意味着胜出的节点在同时发送数据或从接入点接收确认数据时不会相互碰撞。为避免碰撞，多个胜出的节点也可以分布在不同的波束扇区中。无线网状网络中的接入点必须像普通节点一样竞争信道。在这种情况下，接入点将以更高优先级发送 RTR（接收方发起的MAC）消息，通过移动终端交换 RTS（发送方发起的MAC）消息。无线网状网络连接点应缓存每个节点的位置信息，以监控下行介质访问。作者还考虑了静态和移动网络场景。在静态场景中，关联过程中收集的位置数据会被静态缓存。在移动场景中，每个节点的波束位置信息由接入点缓存，并可在需要共享数据时进行响应式更新，也可由接入点通过周期性轮询/测试主动更新。

Jain 等人 [23]提出了在多波束智能天线支持的多跳 Wi-Fi 网络中实现按需媒体连接的方法。对于基于 DCF 机制构建的定向、全向和单射线天线，传统 MAC协议无法实现这一特殊功能；多射线天线也无法同时进行发送或接收。本文提出了一种向后兼容 IEEE 802.11 DCF 的新型 MAC 混合（HMAC）协议。该协议支持多天线同时分组接收（CPR）和同时分组传输（CPT）。

在 HMAC 协议中，[23], 该架构采用大型方位角切换智能波束天线，该天线由能够测量输入信号准确到达角的多波束天线阵列（MBAA）组成。HMAC 是一种跨层协议，利用物理层信息和网络信息运行。HMAC 的最新特性包括信道接入系统、聋节点与竞争减少算法、回跳，以及用于提升吞吐量的优先级角色系统。HMAC 的每个节点都在混合网络分配向量（HNAV）表和波束表（BT）中保留邻居信息；波束表为每个波束存储退避时间和两个布尔变量。在 HMAC 中，每个节点都会保留邻居信息。HMAC 使用基于聋节点最小化算法（AMD）的混合解决方案，以消除缓解表面问题。HMAC 使用运行发送估计算法（Rivest、Shamir 和 Adleman（RSA）算法）来解决信道占用问题。节点在 HNAV 表中为每个邻居节点保留传输概率，而该波束中当前估计的传输次数与此概率互为倒数。根据其缓冲区中的分组，HMAC 还可以在接收方和发送器角色之间执行优先级位置切换。规则是，当数据分组位于队列中时，节点优先采用发送模式。

Shihab 等人 [24] 提出了一种无线自组网异步定向 MAC 协议。现有的 MAC协议假设定向节点和全向节点都将工作，但同时使用所有模式会产生增益不对称问题。作者还提出了一种 MAC协议，其中接收方和发送方以单向方式运行，并且 DtD（定向到定向）MAC 还支持自组织网络的饱和。DtD MAC 协议完全分布式运行，不需要协调，能够避免增益不对称问题，并减少干扰或碰撞带来的影响。DtD MAC 协议基于这样一种思想：节点在传输时缓存相邻节点的位置信息，之后利用这些信息决定最初应向哪个方向发送 RTS（DRTS）消息。作为潜在接收节点的空闲节点会持续通过天线部件扫描全向天线；潜在接收节点则锁定相应路径，并通过定向 CTS（DCTS）消息进行响应，直到听到为其编程的 DRTS。每个节点都会确定并缓存其窃听到的每条消息的到达角（AoA），以此判断目的节点的位置。为确定接收方可能的路径，发送节点在感知介质之前，使用机器学习算法检查其 AoA 缓存。通过定义定向网络分配向量（DNAV），窃听到正在进行的通信的节点将相应地避免以这种方式中断持续通信。

无线网络主要由网格用户、网关和网状路由器组成 [25]。由于智能天线具有更高的天线优势、更长的传播范围、更高效的空间复用，以及多波束天线之间更少的干扰，多波束（智能天线）在无线网状网络中的应用获得了更多关注 [18]。因此，多直线智能天线，尤其是在无线局域网中的无线网状网络中的应用，受到了广泛关注。无线网状网络及其在战争和灾害救援环境中的应用，也因此越来越受到关注 [26]。在 [27],中，针对认知无线网格网络无线电的端到端分配问题进行了研究，以实现合理且有效的权衡。研究建立了两个合理的带宽分配问题，即：（a）按词典序的最大最小（LMM）公平带宽分配（LMMBA）问题；（b）最大最小等最大带宽分配（MMBA）问题。此外，还针对这两个问题推荐采用线性规划（LP），以设计最优且快速的启发式算法（MMBA 和 LMMBA）。数值研究表明，LMMBA 和 MMBA 算法的性能与可接受的最大性能非常接近。LMMBA 算法还可用于实现最公平的带宽分配。

针对多无线电多信道无线网状网络（多无线电多信道无线网格网络，MR-MC WMNs）中组播树之间的组播干扰问题，提出了[28] 这一新概念。该网络可以采用动态模型流量，即组播请求动态到达，事先无法获知潜在的请求。每个网络节点都充当中继接入点（TAP），并为一个或多个无线电设备调谐至非重叠信道。研究还表明，在MR-MC WMNs中，定位传输成本较低的组播树，即最低成本组播树（MCMT），属于NP困难问题。一种称为无线最近终端分支（WCTB）的模型结合整数线性规划（ILP）方法也考虑了同一问题，其中包含一种类似于时分的多项式算法，可获得最优解。正如[1] 所观察到的，实现有效的关系规划算法对于使无线网状网络（WMN）获得高吞吐量至关重要。研究提出了三种基于空间时分多址（TDMA）的信道调度算法，即（a）网络连接图模型、（b）网络干扰与噪声比信号，以及（c）网络图模型和接收器阈值条件。

多址）网络，即（a）网络连接图模型、（b）网络干扰与噪声比信号，以及（c）网络图模型和接收器阈值条件。

我们观察到，基于冲突避免机制（如 IEEE 802.11 DCF）的 MAC协议会受到干扰和冲突的显著影响，从而降低网状网络的性能。如果对传输进行规划，则可以实现显著更高的吞吐量。然而，估算最优调度方案的典型方法在计算上难以处理。如果忽略同信道干扰，设备的运行效果不佳；而发生此类干扰时也是如此。论文 [29] 提出了一种实用方法，用于估算优化问题中设定的最优调度方案；对于低维优化问题，该方法能够找到与完整问题相同的解。据观察，这类问题往往规模很小。最终算法可根据目标采用简单的算术或几何方法，目标可以是优化最小性能，也可以是优化比例公平性能（即所有网络流中的最小值）。研究还发现，所提出的算法能够在几分钟内确定 2048 节点网络的最优调度方案，并在几秒钟内确定 128 节点网络的最优调度方案 [29]。研究指出，多跳无线网状网络常遭遇干扰相关的连接故障、动态障碍以及带宽需求应用带来的问题。这会导致无线网状网络的效率显著下降，或需要耗费高昂成本进行人工网络管理，才能实时恢复。在文章 [30]，中，作者引入了 ARS（自主网络重配置系统），使多无线电无线网状网络能够根据本地连接自主检测网络输出缺陷。ARS 利用无线网状网络中的站点分集和无线电分集，对站点分配和本地无线电进行必要的修改，以从故障中恢复。随后，设备根据由此产生的配置变更，在本地网络路由器之间协同配置网络配置 [30]。

Liu等人讨论了骨干无线网状网络中基于效用的服务分配[31]。无线网状网络将接受许多竞争链路的多跳通信，这与单跳蜂窝网络不同。它确保对资源分配进行有目的的配置，以实现最佳性能。在无线网状网络的比例公平规划中，采用了成功实现空间复用的基于团的方法。他们提出了一种新的算法，即 CBPFS（基于团的比例公平调度）。该规划旨在改善蜂窝网络向多速率无线用户提供的服务[32]。Wi-Fi旨在为有线网络提供最后一公里宽带互联网连接。有线回程中的最后一跳是WLAN，用于连接有线网络和无线网络的WLAN接入点（AP）。这些接入点仅支持单跳无线通信。部署有线回程是为了向未覆盖区域提供无线网络连接。IEEE 802.11s弥补了多跳无线通信的空白，降低了创建和配置有线后端无线链路的成本。802.11s消除了对WLAN基础设施的依赖，并允许形成任意拓扑的自主无线网状网络。此外，对于其他网络而言，WMN 802.11s可以提供透明回程。它还引入了一种新的MAC协议，可基于分布式预留实现对无线介质的调度访问。

Carrano等人提出了一种基于802.11s、适用于无线网状网络的多跳MAC协议方法[33]。所提出的网状网络集成于连接层中，其机制基于MAC地址，而非IP地址。这一作用有助于创建和实现新的第2层多跳无CPU网络系统。当前的第3层传输基于无线网状网络的实现，因为这些网络基于802.11（无线局域网）、802.3（以太网）和802.16（无线个域网）的第3层传输。如果无线网状路由器的连接数据包能够通过数据层传输，网状路由器的运行时间将显著缩短。借助第2层传播，可以大幅减少多跳网络中的传输延迟。针对单向连接问题、异构暴露终端问题、异构隐藏终端问题以及网络性能提升等挑战，Huang等人[34]提出了一种面向网状接入网络的跨层解决方案。研究建议对基于载波侦听多路访问的网络不稳定性的主要来源展开深入讨论；在此，将网络定义为稳定的，当且仅当（几乎必然地）每个节点的尾部保持有限。研究确定了两个影响稳定性的变量：网络规模和窃取效应。对于贪婪源，Foster定理已证明，仅当三跳网络允许抢占效应时，该定理才具有稳健性。此外，研究发现四跳网络并不可靠，即使不存在抢占效应问题也是如此。为了解决不稳定性问题，研究建议采用一种称为EZ-Flow的分布式流量控制系统，该系统完全符合IEEE 802.11标准。文章还表明，当用户之间的跳数等于或小于3跳时，该无线网状网络通常能够正常运行；但当跳数超过3跳时，则会变得不可靠，并出现服务降级[35]。

学术界和业界的研究人员都看中了无线网状网络多波束天线的优势，它有助于快速推向市场，也推动了各种标准化工作 [36]。智能天线系统可以同时向其他节点发送或从其他节点接收数据，使定向天线节点或多个全向天线能够大幅提升性能。这类隐藏终端问题是由波束形成过程中缺乏信道状态数据所造成的。当节点处于活动状态时，它在其他方向看来就像是聋了一样，因此在此期间可能会错过有价值的控制信息

。当附近节点收不到发送端—接收端对共享的信道预约分组（如清除发送和请求发送）时，就会引发隐藏终端问题。在这种情况下，接收方并不知道特定发送端—接收端对即将进行通信，因此之后会触发一次导致碰撞的传输 [36]。接入点（AP）和移动站的有限覆盖范围是本地无线网络的典型特征。接入点通常比全功能单元（FFU）移动站效率高得多，且在物理上受到的限制更少。接入点通常配备多根智能天线，通过空间复用来提升网络性能 [37]。

Chou 等人 [37], 提出了称为 M-HCCA 的 MAC协议，该协议利用了多波束接入点天线的优势。该协议不仅提升了无线互联网连接的整体能力，还改善了每个移动站的服务质量（QoS）和能耗。移动站可以通过主动扫描或被动扫描检测接入点的存在，以接入 Wi-Fi 服务。接入点通常在竞争自由时段（CFP）期间以多阵列天线模式运行（在多径密集的区域除外）。M-HCCA 在碰撞消解过程中采用树分裂识别算法，以解决碰撞问题。该算法使用堆栈执行维度分裂树的前序遍历。

Babich 等人 [38] 指出，具有自适应天线阵列架构条件的 IEEE 802.11 异步网络能够同时支持多个对等通信，并为多分组通信（MPC）提出了两种新的接入方案。所设计的多分组通信阈值接入（TAMPC）取决于单个节点的有效负载阈值；另一种系统则基于奇偶校验控制码的采用以及信干比（SIR）的精确计算。这两种系统都使用任意节点在网络行为监测期间收集的信息，适用于异构且集群化的场景。其设置考虑了旧式节点与非旧式节点的各种天线系统共存情况。这两种设备也都经过设计，以符合 IEEE 802.11 标准的回退要求。

Kuperman 等人 [39] 提出了一种非协调、非协同的类 ALOHA MAC 多波束定向系统随机接入策略，该策略渐近地实现了网络功能。每个通信节点在其自身设置下独立运行。MB-URAM（多波束非协调随机接入 MAC）不用于通过调度或请求发送/清除发送等预约消息，使时隙或传输保持同步。此外，时隙调度 MAC 方案能够使所提出的协议达到渐近最优性能。作者在仿真期间考虑了影响 MB-URAM 效率的现实因素，包括带宽、波束宽度功率限制以及分组错误率。

Wang 等人 [40] 提出了一种多波束定向天线 MAC协议，其中为每个波束扇区提供了专用控制信道，不同波束扇区之间的通信是自主进行的。该协议使用 DNAV 记录机构的操作，并使用定向网络分配向量。随后，在检测到所有多主干天线扇区后，协议利用全局分配技术分配定向通信链路。整个协议包括若干步骤：网络激活、信道竞争和数据通信。在每个波束区域内，这些步骤按顺序执行。

Hong 等人 [41] 探讨了 5G 无线网络中的多波束天线技术。为了维持较高的信干噪比加距离、较高的传输速率、不断提升的能量、频谱质量以及可扩展的波束，多波束天线作为波束成形和大规模 5G 增强型多输入多输出的关键基础设施，令人十分振奋。该论文详细探讨了多托盘天线在 5G 环境中的应用。Medjo 等人 [42] 提出，多波束天线的 MPP／多分组接收能力可实现最大容量，从而显著降低自组织网络的端到端时延。作者建立了结构化时延缩减优化模型，并发现，通过建立链路来优化 MP／MPR 机会，可以实现最优时延。他们的研究结果表明，对于最短路径这一自组协议中的一项重要准则，路径之间的桥接会导致等待时间延长，之后的重新调度又会增加会话结束时的时延。

一种利用实时仿真器 [43] 并专注于同时传播的新型多波束定向网络 MAC协议。该协议利用数字相控阵的底层物理能力，为多波束定向网络构建低复杂度、分布式、随机的 MAC接入协议。为确保发射波束正确的功率指向，该协议规划了位置检测和功率管理流程。所提出的方案还能够检测邻居随机接入协议的状态，从而显著减少设备中的分组丢失数量和干扰。为实时测试高可靠性，已采用一种新的可扩展移动网络仿真器（EMANE）概念。

在相关文献中，针对信道分配问题已经开发出多种模型，例如基于贪心和禁忌搜索的算法 [44], 、基于贪心图的算法 [8], 以及遗传算法（GA） [45]。用于无线网状网络的信道分配模型（CAM）通常分为两类：（1）动态模型；（2）准静态模型 [44]。Liu F 等人提出的多无线电多信道（MRMC）架构 [46] 可用于提升无线网状网络的网络性能。Lin J 等人提出的信道分配方法 [47] 取决于多种参数，例如窗口大小等。在面向流量控制的信道分配问题中，多无线电多信道无线网状网络通常被表示为混合整数线性规划（MILP）[48]。Avallone S 等人 [49] 开发了一种信道分配算法，该算法取决于传输功率、数据速率分配和流量。Thenral B 等人 [50] 指出，如果无线传感器网络中的跳数增加，网络性能就会逐渐下降。完整文献综述的总结见表 2。

表 2：文献综述总结以及各种频谱和拓扑结构的优缺点

作者频谱	**and** 拓扑结构	协议	优点和缺点	备注
[51]	网络 拓扑	新颖 邻居 协议	多项式时间（P）算法	ROMA协议大幅提高 网络效率并降低时延。
[11]	仿真 拓扑	MAC层 协议， IEEE 802.11	空间信道的创建旨在 提高吞吐量	该MAC层协议利用 多种空分接入方式来 接收来自多个 空间分离的发射节点 利用定向接收 特性。
[14]	100 节点 随机 分布 在一个 1500 米* 1500 米 网络网格 for all the 仿真	IEEE 802.11 MAC 协议	未考虑移动性。	最新的智能多波束天线 大致可分为三种 类型：多功能阵列天线、 切换式多波束天线和 MIMO链路
[15]	网络 拓扑	网络 协议	通过同时分发 许多独立数据流 单路径中，MIMO链路可以 提供极高的频谱 高效的多向流传输。	需要一种全新的MAC协议 以适应MIMO链路的特定特性 以及许多 主要优化考量。 作者阐述了一种集中式 算法，称为 SCMA，该算法 整合了以下核心关注点： 优化架构的 流控制媒体访问的架构。
[16]	网络 拓扑	路由 协议	随着本地 无线连接日益普及， 要求.....之间的数据共享 接入点和终端或基 站提高吞吐量和 能耗。	无线网络历来 配置 for 单跳 向基站或 通过无线局域网向接入点传输。但是， 增加 in 无线 网络 实际部署启发了 无线网状网络（WMN）的概念 [16], 扩大无线覆盖范围，提升 最大容量，并允许 网络自配置。
[17]	混合 拓扑	载波侦听 多路 访问 （CSMA） 协议	当未实现多路接入时 已实现 空分， 额外的波束成形效果可以 仅通过优化一个 天线单元传输功率即可轻松实现。	CSBF 要求其发送的数据 也用于辅助波束中。 采用此方法获取“广播” 传递给其中的被动节点的信息 通过利用主动节点在网络中 共享用户特定数据。

[18]	Mesh 拓扑	MAC 协议	为了妥善解决这些棘手的 问题 仔细地 and 改进 协作效能，作者 提出了一种新的MAC协议。	其架构还考虑了 反向兼容性， 其中多波束接入点 由IEEE透明地开启 802.11 终端。
[23]	网络 拓扑	新颖 协议	MAC 混合（HMAC）协议的 特殊功能不可行 采用传统MAC协议 针对定向天线、全向天线和 基于DCF构建的单射线天线 机制，或同时进行 发送或接收 多射线天线。	本文提出一种向后兼容 IEEE 802.11 DCF 的新型 MAC 混合（HMAC）协议。该 协议支持同时分组 接收（CPR）和同时 数据包传输（CPT）在 多天线。
[27]	混合 拓扑	MAC 协议， IEEE 802.11	Two 合理的 带宽 分配 问题 have been 已确立，分别为：（a） 词典序最大最小（LMM） 公平带宽分配（LMMBA） 以及（b）最大最小等最大 带宽 分配 （MMBA） 问题。	针对这两类问题的线性规划（LP） 也值得推荐，以解决 最优且快速的启发式算法（MMBA LMMBA）。“数值研究 表明， LMMBA 和 MMBA 算法与.....非常相似 the 可接受的 最大值 性能。
[1]	混合 拓扑	MAC 协议， IEEE 802.11	实现有效的 关系规划算法至关重要， 以便实现 无线网状网络的高吞吐量， 观察到。	提出了三种信道调度算法 基于空间 TDMA 网络，即 （a）网络连接图 模型，（b）网络干扰 以及信噪比，和 (c) 该 网络图模型和该 接收器阈值条件。
[29]	Mesh 拓扑	MAC 协议， IEEE 802.11	研究发现，干扰和 冲突会大幅降低网状网络 采用 MAC 协议（例如基于冲突避免的 IEEE 802.11 DCF）。	如果传输 are 规划后， 可以实现显著更高的吞吐量 。估算最优调度方案的典型方法 然而在计算上 难以处理。
[30]	Mesh 拓扑	路由 协议	多跳无线网状网络通常会遭遇 干扰相关的连接故障、 动态障碍以及带宽 需求应用。	这种干扰会导致 效率显著下降 在无线网状网络中，或需要耗费高昂成本的手动 网络管理来实时恢复 。
[33]	测试平台 拓扑	路由 协议	一种多跳MAC协议方法 基于 802.11s，适用于无线网状网络，已 提交。所提出的网状网络 网络集成在 连接层中，而不是基于 IP 地址，而是基于其 基于 MAC 地址的机制。	这种作用有助于创建和 构建新的第 2 层多跳 无CPU网络系统。该 当前第3层传输基于 无线网状网络的实现，因为 这些网络基于第3层 基于802.11的传输 （无线局域网）、802.3（以太网）、802.16 （无线个域 网）。
[37]	Mesh 拓扑	MAC 协议	接入点（接入点）和移动 s终端的有限范围是标准的本地 无线网络。	接入点通常更加 高效，且在物理层面受到的限制更少 相比全功能单元（FFU） 移动站。

[38]	Ring and 随机 拓扑	阈值 接入MPC (TAMPC), 信号与 干扰 比率（SIR） 接入MPC （SAMPC）	探讨 in IEEE802.11, the 带有 架构条件的异步网络	自适应条件具有自适应性 天线阵列，从而允许多个 对等 通信 同时，并提出两种新的 多分组 通信（MPC）接入方案。

4. 性能指标、多目标优化与统计检验框架 **k**

如今，多目标优化 [52] 是决策的重要工具。它可以生成一组非支配（帕累托）解，从而设计出折衷方案。常用的进化算法，如遗传算法（GA）[52–54]，能够以多项式时间复杂度求解单目标和多目标优化问题，并获得接近全局最优的结果。同样，文献中也介绍了基于继承的遗传算法 [55]。这些算法易于应用于连续搜索空间问题。

该领域的研究人员开发了不同的模型，以解决 MAC 层中的各种问题和挑战。这些模型通过采用不同的服务质量（QoS）参数（如吞吐量、带宽等）进行比较。以下是一些 QoS 参数。

$$Bandwidth\ (BW) = (f_{max} - f_{min}) \quad (1)$$

w其中，f_{max} 和f_{min}分别是系统频率的最大值和最小值 y.

带宽被视为一种潜在的链路测量指标。这是一项非常重要的服务质量参数，可用于满足不同形式的用户需求。

吞吐 量是通过通信信道无故障发送或接收的实际数据量。 In 换句话说，它真实反映了数据通过网络传输的速度。

网络的总延迟/时延可按如下方式计算。

$$\begin{aligned} Total\ Delay\ (Dt) &= Transmission\ Delay\ (Dtrans) + Propagation\ Delay\ (Dprop) \\ &+ Queuing\ Delay\ (Dq) \\ &+ Processing\ Delay(Dproc) \end{aligned} \quad (2)$$

$$Transmission\ Delay\ (Dtrans) = \frac{Message\ size}{Bandwidth} \quad (3)$$

$$Propogation\ Delay\ (Dprop) = \frac{Distance}{Transmission\ Speed} \quad (4)$$

$$Queuing\ Delay\ (Dq) = \frac{(no.\ of\ data\ packets\ - 1)\ Message\ size}{2\ Bandwidth} \quad (5)$$

Thes在多目标优化的设计与分析过程中，应最小化这些目标 .

可用性（A）可以通过系统运行时间期望值（EUTS）与预期运行时间和停机时间总值的比率计算得出。

$$A = \frac{expected\ value\ of\ the\ uptime\ of\ a\ system\ (EUTS)}{total\ amount\ of\ time\ (T)} \quad (6)$$

计算可用性（A）的另一个公式是：平均故障时间（MTTF）与平均故障时间（MTTF）和平均修复时间（MTTR）之和的

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (7)$$

数据包投递率（PDR）使用以下公式计算，其中 DR 为投递比率，DL 为投递长度。

$$PDR = \frac{DR}{DR + DL} \tag{8}$$

在多目标优化的设计和分析过程中，应最大化这些目标。

表3至表5展示了所研究文献中不同技术和协议的QoS参数出现情况分析。表3列出了这些技术和协议，

表3：所研究文献中不同协议的QoS参数数量

技术/协议	QoS参数数量
新型邻居协议	2
网络协议	1
MAC层协议（IEEE 802.11）	3
路由协议	4
CSMA协议	3
MAC协议	3
新型协议（混合MAC）	2
新型MAC协议（TAMPC、SAMPC）	2
定向 MAC	1
MACA/MACAW 协议	2
新型传输层协议	3
自组网传输协议（ATP）	2
实时调度算法	1
MB-URAM	2
CBPFS	2
MMBA 和 LMMBA 算法	3
CBF（互补波束成形）	2
最小干扰信道分配算法（MICA）2	
启发式信道分配算法	1
混合整数线性规划（MILP）	2
基于角度的组播路由算法（AMRA）	2

表4：协议中使用的QoS参数

技术/协议	QoS参数					
	带宽	时延 分组投递率		吞吐量 公平性 能量		消耗
新型邻居协议		✓		✓		
网络协议				✓		
MAC层协议（IEEE 802.11）			✓	✓	✓	
路由协议	✓	✓		✓	✓	
CSMA协议		✓	✓	✓		
MAC协议		✓		✓	✓	
新型协议（混合 MAC）		✓		✓		
新型MAC协议（TAMPC, SAMPC）				✓	✓	
定向 MAC				✓		
MACA/MACAW 协议			✓	✓		
新型传输层协议	✓	✓	✓			
自组网传输协议（ATP）				✓	✓	
实时调度算法				✓		
MB-URAM	✓					✓
CBPFS				✓	✓	
MMBA 和 LMMBA 算法	✓			✓	✓	
互补波束形成（CBF）		✓		✓		
最小 干扰 信道分配算法（MICA）		✓		✓		
启发式信道分配算法				✓		
混合整数线性规划（MILP）		✓		✓		
基于角度的组播路由算法（AMRA）			✓	✓		

表5：协议中使用的QoS参数值

技术/协议	QoS参数					
	带宽	时延	分组投递率	吞吐量	公平性	能耗
新型邻居协议		1		1		
网络协议				1		
MAC层协议（IEEE 802.11）			1	4	1	
路由协议	1	2		2	1	
CSMA协议		2	1	2		
MAC协议		2		6	1	
新型协议（混合MAC）		1		1		
新型MAC协议（TAMPC、SAMPC）				1	1	
定向 MAC				1		
MACA/MACAW 协议			1	1		
新型传输层协议	1	1	1			
自组网传输协议（ATP）				1	1	
实时调度算法				1		
MB-URAM	1					1
CBPFS				1	1	
MMBA 和 LMMBA 算法	1			1	1	
互补波束形成		1		1		
最小干扰信道分配算法（MICA）		1		1		
启发式信道分配算法				1		
混合整数线性规划（MILP）		1		1		
基于角度的组播路由算法（AMRA）			1	1		

基于显著性的检验是统计假设检验（SHT）中最常见的框架[56, 57]。然而，要评估一组统计方法，还需要采用替代检验。

目的：检测两个总体均值之间的显著性，采用配对差异设计。

H_0：总体平均值相同。H_a：总体平均值不相同。

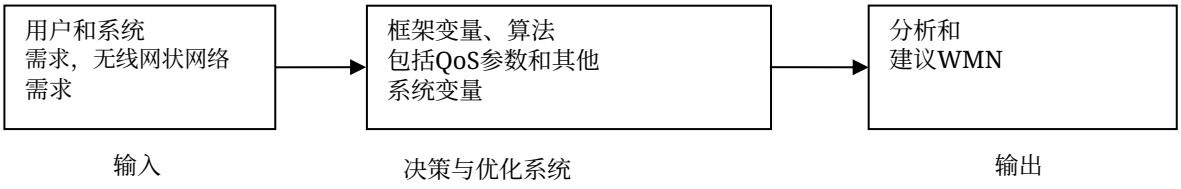

图3：用于批判性分析和建议的未来框架框图

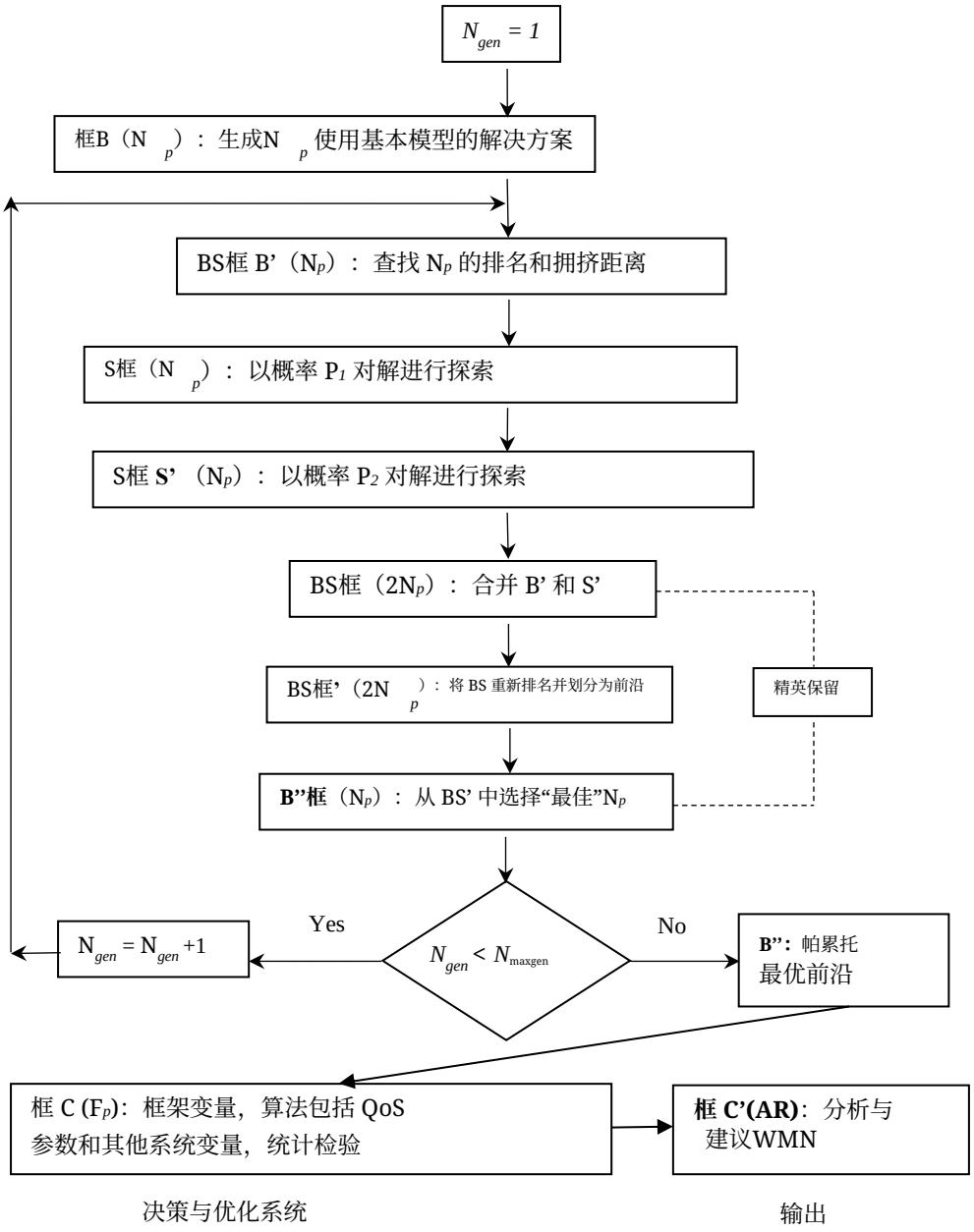

图4：建议的多目标统计框架流程图

图3-4所示的框架将采用MAC协议的服务质量参数，然后应用多目标技术，接着应用STH。通过这种方式，该框架将为无线网状网络生成建议。

5. 结论与未来工作

本文讨论了有关WMN和IEEE 802.11的研究问题的详细文献综述。通过对各个方面和领域的文献综述，可以观察到，对于高效WMN的MAC协议，应重点关注的主要因素包括拓扑、架构、数据模式、流量、不同节点所使用的信道数量、节点密度、节点移动性、传输功率、路由、可扩展性、安全性和互操作性，这些因素能够改善WMN中的服务质量。进一步地，本文采用多目标优化和统计检验框架，对WMN中的MAC协议进行了批判性比较分析并提出建议。该框架用于分析和建议适用于服务质量参数的不同协议。在未来的工作中，我们将以用例的形式研究所提出的框架，并进一步强调该框架的改进。此外，未来还可以针对具有不同约束条件的安全引导算法开展研究，以满足当前场景下的用户需求。

声明

作者贡献：概念构思：Ankita Sing、Sudhakar Sing、Shiv Prakash；方法：Ankita Sing、Sudhakar Sing、Shiv Prakash；正式分析与调查：Ankita Singh、Sudhakar Singh、Shiv Prakash；撰写——初稿：Ankita Singh、Sudhakar Singh；撰写——审阅与编辑：Sudhakar Singh、Shiv Prakash；资源：Ankita Singh、Sudhakar Singh、Shiv Prakash；监督：Sudhakar Singh、Shiv Prakash。

利益冲突：作者声明，本文不存在任何利益冲突。

经费：本研究未获得任何经费支持。

数据和材料可用性：不适用。

代码可用性：不适用。

参考文献

1. Gore AD、Karandikar A（2011）无线网状网络的链路调度算法 2. Zhang H、Wu S、Zhang C、Krishnamoorthy S（2021）具有增强型连接性和覆盖范围的无线网状网络中的最优分配。载于：《智能系统与计算进展》。第1117–1128页 3. Goldberg BS、Hall JE、Pham PK、Cho CS（2021）灾害模拟中无线网状网络短信与双向无线电语音的比较：一项交叉随机对照试验。《美国急诊医学杂志》 4. Rao AN、Babu PR、Reddy AR（2021）机器学习方法中的无线网状网络分析。载于：计算机工程与通信系统进展国际会议论文集。第321–331页 5. Rajendran R 、等（ 2021 ）无线网状网络中应对身份冒充攻击的最优策略。《国际信息技术杂志》 1–6 6. Nsaif SA、Park SY、Rhee JM（2021）SRAD：无线自组织网络的无缝路由新方法。载于：2021年第23届先进通信技术国际会议（ICACT）。第172–175页 7. Hosseinabadi G、Vaidya N（2013）Token-DCF：无线网络中的机会式MAC协议 8. Marina MK、Das SR、Subramanian AP（2010）利用多无线电无线网状网络中多信道的拓扑控制方法。《计算机网络》54:241–256。https://doi.org/10.1016/j.comnet.2009.05.015 9. Bharghavan V、Demers A、Shenker S、Zhang L（1994）Macaw。《ACM SIGCOMM计算机通信评论》24:212–225。https://doi.org/10.1145/190809.190334 10. Cooper M、Goldburg M（1996）智能天线：空分多址。《年度通信评论》4:2–13 11. Lal D、Toshniwal R、Radhakrishnan R、等（2002）用于无线自组织网络空分多址的新型MAC层协议 12. Ramanathan R（2005）自组织网络的天线波束成形与功率控制。《移动自组织网络》139–174。https://doi.org/10.1002/0471656895.ch5 13. Lal D、Jain V、Zeng QA、Agrawal DP（2004）无线局域网中多波束天线节点介质访问控制的性能评估。《IEEE并行与分布式系统汇刊》15:1117–1129。https://doi.org/10.1109/TPDS.2004.84 14. Sundaresan K、Anantharaman V、Hsieh H-Y、Sivakumar R（2003）ATP。载于：第4届ACM移动自组织网络与计算国际研讨会论文集——MobiHoc '03。ACM出版社，纽约，纽约州，美国，第64页 15. Sundaresan K、Sivakumar R（2004）适用于采用智能天线的自组织网络的统一MAC层框架。载于：移动自组织网络与计算国际研讨会论文集（MobiHoc）。计算机协会，第244–255页 16. Akyildiz IF、Wang X、Wang W（2005）无线网状网络：综述。《计算机网络》47:445–487。https://doi.org/10.1016/j.comnet.2004.12.001 17. Yang-Seok Choi、Alamouti SM、Tarokh V（2006）互补波束成形：新方法。《IEEE通信汇刊》54:41–50。https://doi.org/10.1109/TCOMM.2005.861674 18. Wang G、Xiao P、Li W（2017）使用多波束定向天线的无线网络新型MAC协议。2017年计算机网络与通信国际会议（ICNC 2017）36–40。https://doi.org/10.1109/ICCNC.2017.7876098

19. Choudhury RR、Yang X、Ramanathan R、Vaidya NH（2002）在自组织网络中使用定向天线进行介质访问控制。载于：移动计算与网络年度国际会议论文集，MOBICOM。计算机协会（ACM），第59–70页 20. Gossain H、Cordeiro C、Cavalcanti D、Agrawal DP（2004）使用定向天线的无线自组织网络中的失聪问题及解决方案。GLOBECOM——IEEE全球电信会议108–113。https://doi.org/10.1109/glocomw.2004.1417558 21. Takata M、Bandai M、Watanabe T（2007）用于避免自组织网络中失聪问题的定向天线MAC协议 22. Choudhury RR、Vaidya NH（2004）失聪：使用定向天线时自组织网络中的MAC问题 23. Jain V、Gupta A、Agrawal DP（2008）采用多波束智能天线的多跳无线网络按需介质访问。《IEEE并行与分布式系统汇刊》19:489–502。https://doi.org/10.1109/TPDS.2007.70739 24. Shihab E、Cai L、Pan J（2009）无线自组织网络的分布式异步定向到定向MAC协议。《IEEE车辆技术汇刊》58:5124–5134。https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2024085 25. Akyildiz IF、Lee WY、Chowdhury KR（2009）CRAHNs：认知无线电自组网。《自组网络》7:810–836。https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2009.01.001 26. Conti M、Giordano S（2007）多跳自组网：现实情况。《IEEE通信杂志》45:88–95。https://doi.org/10.1109/MCOM.2007.343617 27. Tang J、Hincapié R、Xue G、等（2010）采用认知无线电的无线网状网络中的公平带宽分配。《IEEE车辆技术汇刊》59:1487–1496。https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2038478 28. Liu T、Liao W（2010）多无线电多信道无线网状网络中的组播路由。《IEEE无线通信汇刊》9:3031–3039。https://doi.org/10.1109/TWC.2010.082310.090568 29. Wang P、Bohacek S（2011）多跳无线网络中最优调度方案的实际计算 30. Kim KH、Shin KG（2011）自重构无线网状网络。《IEEE/ACM网络汇刊》19:393–404。https://doi.org/10.1109/TNET.2010.2096431 31. Liu E、Zhang Q、Leung KK（2011）无线网状网络中基于团的效用最大化。《IEEE无线通信汇刊》10:948–957。https://doi.org/10.1109/TWC.2011.011111.100790 32. Hiertz G、Mingozzi E、Serrano P（2011）MeshTech 2011研讨会：无线网状网络的使能技术与标准。2011 33. Carrano RC、Magalhães LCS、Saade DCM、Albuquerque CVN（2011）IEEE 802.11s多跳MAC：教程。《IEEE通信综述与教程》13:52–67。https://doi.org/10.1109/SURV.2011.040210.00037 34. Huang Y、Yang X、Yang S、等（2011）处理无线网状接入网络链路不对称性的跨层方法。《IEEE车辆技术汇刊》60:1045–1058。https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2106172 35. Aziz A、Starobinski D、Thiran P（2011）理解并解决无线网状网络不稳定性的根本原因 36. Bazan O、Jaseemuddin M（2012）采用波束成形天线的无线自组织网络MAC协议综述。《IEEE通信综述与教程》14:216–239。https://doi.org/10.1109/SURV.2011.041311.00099 37. Chou ZT、Huang CQ、Chang JM（2014）采用多波束接入点的无线局域网服务质量提供。《IEEE移动计算汇刊》13:2113–2127。https://doi.org/10.1109/TMC.2013.85 38. Babich F、Comisso M、Crismani A、Dorni A（2015）利用自适应天线阵列设计IEEE 802.11异构网络中的多分组通信MAC协议。《IEEE移动计算汇刊》14:2332–2348。https://doi.org/10.1109/TMC.2014.2385058 39. Kuperman G、Margolies R、Jones NM、等（2016）自适应多波束定向网络的非协调MAC：分析与评估 40. Wang Y、Wu Y、Wang Y、等（2017）益生菌的抗氧化特性。《营养素》9:。https://doi.org/10.3390/nu9050521 41. Hong W、Jiang ZH、Yu C、等（2017）面向5G 无线通信的多波束天线技术。《IEEE天线与传播汇刊》65:6231–6249。https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2712819 42. Medjo Me Biomo JD、Kunz T、St-Hilaire M（2018）利用多波束天线降低自组织网络中的端到端时延。《移动网络与应用》23:1293–1305。https://doi.org/10.1007/s11036-018-1037-8 43. Proulx B、Madiedo J、Jones NM、Kuperman G（2018）空中多波束定向网络中的拓扑控制 44. Subramanian AP、Gupta H、Das SR、Cao J（2008）多无线电无线网状网络中的最小干扰信道分配。《IEEE移动计算汇刊》7:1459–1473。https://doi.org/10.1109/TMC.2008.70

45. Jia J、Chen J、Chang G、Tan Z（2009）基于多目标遗传算法的无线传感器网络节能覆盖控制。Comput Math with Appl 57:1756–1766。https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.10.036 46. Liu F、Bai Y（2012）多无线电多信道无线网状网络中的拓扑控制机制综述。EURASIP J Wirel Commun Netw 2012:324。https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-324 47. Lin JW、Lin SM（2014）无线网状网络中面向移动多播的权重感知信道分配算法。J Syst Softw 94:98–107。https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.03.040 48. Franklin AA、Bukkapatanam V、Murthy CSR（2011）部分重叠信道多信道多无线电无线网状网络中的端到端流分配与信道分配。Comput Commun 34:1858–1869。https://doi.org/10.1016/j.comcom.2011.05.006 49. Avallone S、Stasi G Di（2013）多无线电无线网状网络中信道切换成本的实验研究。IEEE Commun Mag 51:124–134。https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6588661 50. Thenral B、Thirunadana Sikamani K（2015）AMRA：无线网状网络的基于角度的组播路由算法。Indian J Sci Technol 8:974–6846。https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i13/59451 51. Bao L、Garcia-Luna-Aceves JJ（2002）带定向天线的自组织网络中的传输调度。载于：移动计算与网络年度国际会议论文集，MOBICOM。计算机协会（ACM），第48–58页 52. Deb K（2001）使用进化算法的多目标优化。John Wiley Sons，纽约，美国 53. Goldberg DE、Holland JH（1988）遗传算法与机器学习。Mach Learn 3:95–99。https://doi.org/10.1023/A:1022602019183 54. Rangaiah GP（2009）多目标优化：化学工程中的技术与应用（过程系统工程进展） 55. Kumar M、Guria C（2017）带继承机制的精英非支配排序遗传算法（i-NSGA-II）及其用于多目标优化的跳跃基因改进。Inf Sci（纽约）。https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.12.003 56. Sohn W、Hong E（2021）用于验证MARSSIM退役核设施最终状态调查中所采用非参数检验的蒙特卡罗模拟。Nucl Eng Technol 53:1664–1675 57. Trivedi V、Prakash S、Ramteke M（2017）使用快速多目标DE对MMA聚合进行优化在线控制。Mater Manuf Process 32:1144–1151