

基于强化学习的无线网络自组织性研究

I. 引言

在 5G 系统中, 移动通信面对更加多样化的业务需求和指标, 5G 系统采用了更为复杂的无线传输技术和融合的无线网络架构, 融合了多种接入方式、多种制式、多种架构的异构网络。超密集组网使得未来网络将进一步使现有的小区结构微型化、分布化, 并加强小区间的相互协作; LTE、UMTS、WiFi 等多种制式网络将在 5G 中共存; SDN/NFV 等虚拟化架构引入到 5G 当中, 而更多密集的小型基站甚至支持“即插即用”等更加便捷智能的配置。因此, 网络管理复杂度远远高于现有网络, 网络深度智能化成为保证 5G 网络性能的迫切需要, 使得更加智能的自组织网络 (Self Organizing Network, SON) 将成为 5G 不可或缺的又一关键技术。为了全面的了解 SON 的智能化发展现状, 本文在强化学习算法在 SON 的技术方面的进展进行详细的研究。

A. 自组织网络简介

在传统的移动通信网络中, 网络部署、运维等基本依靠人工的方式, 需要投入大量的人力, 给运营商带来巨大的运行成本。并且, 随着移动通信网络的发展, 依靠人工的方式难以实现网络的优化。因此, 为了解决网络部署、优化的复杂性问题, 降低运维成本相对总收入的比例, 使运营商能高效运营、维护网络, 在满足客户需求的同时, 自身也能够持续发展, 由 NGMN (next generation mobile network) 联盟中的运营商主导, 联合主要的设备制造商提出了自组织网络 (SON) 的概念 [1]。由于 5G 将采用大规模 MIMO 无线传输技术, 使得空间自由度大幅度增加, 从而带来天线选择、协作节点优化、波束选择、波束优化、多用户联合资源调配等方面的灵活性。对这些技术的优化, 是 5G 系统 SON 技术的重要内容。自组织网络的思路是在网络中引入自组织能力 (网络智能化), 包括自配置、自优化、自愈合等实现网络规划、部署、维护、优化和排障等各个环节的自动进行, 最大限度地减少人工干预, 并结合先进的学习理论逐步提升网络智能化。

B. 强化学习简介

SON 在蜂窝网络中被定义为一个网络的概念, 不仅具有自适应和自主功能, 而且还具有足够的可扩展性, 稳定性和灵活性, 即使在环境发生变化时也能保持其期望

的目标。虽然学习的方法没有直接包含在 SON 的定义中, 但学习算法在系统功能的实现以及自动维护的问题上可以代替人工更有效地解决预料之外的问题。强化学习 (*Reinforcement Learning, RL*) 是一种应用较为普遍的学习算法, 这种算法以环境的状态作为输入, 通过系统与环境交互和试错, 根据在交互过程中产生的评价性反馈信号, 实现最终决策的不断优化。区别与传统的有监督、无监督学习算法, 强化学习算法是

C. 本文工作

如前所述, 本文的目标之一是在过去的十五年中对在蜂窝网络领域实施智能解决方案进行广泛的文献回顾, 以便管理和发展日益复杂的网络。本文不仅介绍了与 SON 相关的最新研究成果, 而且还对以前的研究进行了涉及 RL 算法和自动化功能的实现, 以提高蜂窝网络的整体性能。本文的主要贡献是:

- 为读者提供有关 SON 应用于蜂窝网络的文献的广泛综述, 以及在实现 SON 功能时涉及的最流行的 ML 算法和技术;
- 论文的重点是应用于 SON 的 RL 算法的学习视角。本文的贡献不是提供 SON 功能的概述, 更多的是为读者提供对实现这些 SON 功能的最新算法的理解和分类;
- 本文还尝试根据各自的 SON 功能和 ML 实现对每种算法进行分类;
- 本文还提出了基于其应用的学习和技术对不同算法进行分类;
- 根据一些 SON 要求比较不同的 ML 技术;
- 提供关于何时对每个 SON 功能使用每个 ML 算法的一般准则;

具体内容分为以下几个部分: 第 II 部分介绍强化学习的发展, 以及应用较为广泛的算法。第 III 部分对 SON 的发展中出现的问题进行介绍, 并分类总结强化学习在各种问题下的应用。第 IV 部分对比各类算法在解决 SON 中问题的性能进行分析。V 部分进行总结本文涉及的相关内容并展望未来 SON 发展方向, 以及强化学习面临的新型问题。

II. 强化学习

这种方法是基于系统的思想,在这种场景下称为代理 (Agent),通过代理与周围环境的交互,以获得用于描述当前系统状态 (State) 的信息量用于选择对于当前环境应当做出的行为 (Action)。与其他学习算法不同的是,强化学习的系统在执行某个行为之后会反馈给代理一个参数,收益 (Reward) 或者损失 (Loss),用于评估此行为的优劣 [2]。

一般来讲,强化学习的模型分为以下四个部分:

- 策略 (Policy): 表示代理根据系统当前状态做出的向动作的映射;
- 回报函数 (Reward function): 提供了对当前状态的评估,并根据此前采取的行动的结果计算出回报或者损失;
- 值函数 (Value function): 维持一些策略回报的均值,来试图找到最大化回报的长期政策;
- 环境模型 (Environment model): 决定状态集合以及代理可能采取的行动集合。

由于强化学习算法具有评估每次行为的奖励机制,因此存在探索 (Exploration) 与利用 (Exploitation) 之间的权衡关系,具体表现为代理人必须决定在接下来的迭代过程中,究竟是在系统中探索其他行为,以发现未知行为带来的更高回报,还是保持现有的已知信息,并最大限度地利用当前已知最高回报的行为。

强化学习发展至今,具有广泛应用的算法有以下几种,多臂老虎机 (MAB),动态马尔科夫决策过程, Q-学习算法等。其中 Q-学习算法是利用 Q-函数计算并不断优化,以得到系统的最佳策略。基于 Q-学习算法, [3] 中结合模糊逻辑的相关控制方法,形成一套有效的强化学习算法,称为模糊 Q-学习算法。对于上述强化学习算法的具体过程将在第 II 部分中详细介绍,此外关于具体算法应用于 SON 的相关问题,将在接下来的部分分别展开讨论。

A. MAB 算法

B. Q-学习算法

C. 马尔科夫决策过程

D. TD 算法

III. 自组织网络应用发展

LTE 的部署对 SON 的推进,涉及到若干问题及其解决方案。下列各种应用对应的实际问题可以参考 [4] 中 Introduction 部分的分类。

5G 系统采用了复杂的无线传输技术和无线网络架构,使得网络管理远远比与现有网络复杂,网络深度智能化是

保证 5G 网络性能的迫切需要。因此,自组织网络将成为 5G 的重要技术。

5G 将是融合、协同的多制式共存的异构网络。从技术上看,将存在多层、多无线接入技术的共存,导致网络结构非常复杂,各种无线接入技术内部和各种覆盖能力的网络节点之间的关系错综复杂,网络的部署、运营、维护将成为一个极具挑战性的工作。为了降低网络部署、运营维护复杂度和成本,提高网络运维质量,未来 5G 网络应该能支持更智能的、统一的 SON 功能,能统一实现多种无线接入技术、覆盖层次的联合自配置、自优化、自愈合。目前,针对 LTE、LTE-A 以及 UMTS、WiFi 的 SON 技术发展已经比较完善,逐渐开始在新部署的网络中应用。但现有的 SON 技术都是面向各自网络,从各自网络的角度出发进行独立的自部署和自配置、自优化和自愈合,不能支持多网络之间的协同。因此,需要研究支持协同异构网络的 SON 技术,如支持在异构网络中的基于无线回传的节点自配置技术,异系统环境下的自优化技术,如协同无线传输参数优化、协同移动性优化技术,协同能效优化技术,协同接纳控制优化技术等,以及异系统下的协同网络故障检测和定位,从而实现自愈合功能。

5G 将采用超密集的异构网络节点部署方式,在宏站的覆盖范围内部署大量的低功率节点,并且存在大量的未经规划的节点,因此,在网络拓扑、干扰场景、负载分布、部署方式、移动性方面都将表现出与现有无线网络明显不同之处,网络节点的自动配置和维护将成为运营商面临的重要挑战。比如,邻区关系由于低功率节点的随机部署远比现有系统复杂,需要发展面向随机部署、超密集网络场景的新的自动邻区关系技术,以支持网络节点即插即用的自配置功能;由于可能存在多个主要的干扰源,以及由于用户移动性、低功率节点的随机开启何关闭等导致的干扰源的随机、大范围变化,使得干扰协调技术的优化更为困难;由于业务等随时间和空间的动态变化,使得网络部署应该适应这些动态变化,因此,应该对网络动态部署技术进行优化,如小站的动态与半静态开启和关闭的优化、无线资源调配的优化;为了保证移动平滑性,必须通过双连接等形式避免频繁切换和对切换目标小区进行优化选择;由于无线回传网络结构复杂,规模庞大,也需要自组织网络功能以实现回传网络的智能化。

A. 自动部署应用

每个新网络节点的引入和设置,包括站点位置选择、硬件配置标准化以及每个新网络节点的准备、安装、鉴权和认证。基本涵盖了将一个新节点纳入网络中运行的全部过程。

B. 自动优化应用

利用用户设备和基站收集的测量值和性能指标自动调整网络设置。

C. 自动愈合应用

执行网络运行和阻止出现突发情况，包括必要的软件和硬件的更新或替换。

IV. 自组织网络中的强化学习算法

对比各类算法在自组织网络中解决问题的性能分析，包括稳定性，时效性，准确度，收敛时间，复杂度等。依据 [4] Section VI 中提到的性能参数对上一部分中提及参考文献所涉及的技术进行横向对比。

V. 未来发展方向

从自组织网络不同应用方向出发，分析现存的问题，并提出未来解决方法以及相关技术的发展方向。

VI. 结论

REFERENCES

- [1] N. Alliance *et al.*, “Ngmn recommendation on son and o&m requirements,” *Next Generation Mobile Networks, White paper*, December, 2008.
- [2] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press Cambridge, 1998, vol. 1, no. 1.
- [3] L. P. Kaelbling, M. L. Littman, and A. W. Moore, “Reinforcement learning: A survey,” *Journal of artificial intelligence research*, vol. 4, pp. 237–285, 1996.
- [4] P. V. Klaine, M. A. Imran, O. Onireti, and R. D. Souza, “A survey of machine learning techniques applied to self-organizing cellular networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2392–2431, 2017.