 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i1.9043

Research on AI-based 6G base station network management and resource orchestration

Zhaohong Song

Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518129, China

Abstract

The core characteristic of the sixth-generation mobile communication technology (6G) is its native integration with artificial intelligence (AI). The intelligent transformation of base stations is the foundation for 6G networks to realize the scenario of intelligent connectivity of everything. This paper analyzes the numerous requirements for new spectrum at the physical level, space-air-ground integration at the network level, and AI service integration at the business level in the full-scenario services of the future 6G era. It proposes a distributed autonomous network management and resource orchestration algorithm at the business level in 6G base stations. Firstly, the core algorithms are systematically elaborated, including local autonomous learning algorithms, group collaborative optimization algorithms, and simulation verification algorithms. Then, the implementation architecture of the algorithms is analyzed in detail, including distributed execution at the base station autonomy layer, collaborative enhancement at the regional coordination layer, and centralized intelligence at the global management layer. Finally, the evolution path from centralized intelligence to distributed intelligence, and then to swarm intelligence, is prospected. Through the research presented in this paper, a systematic reference framework is provided for the theoretical research and engineering practice of 6G base station intelligence, promoting the evolution of wireless technology.

Keywords

6G; Artificial Intelligence; Distributed Autonomous Management; Resource Orchestration; Deep Reinforcement Learning;

基于 AI 的 6G 基站网络管理与资源编排研究

宋照红

华为技术有限公司，中国 · 广东 深圳 518129

摘　要

第六代移动通信技术(6G)核心特征是与人工智能(AI)的原生融合，基站的智能化转型是6G网络实现万物智联场景的基础。本文分析未来6G时代的全场景服务中物理层面的新频谱、网络层面的空天地一体化、业务层面的AI服务融合的众多需求，提出6G基站中业务层面的分布式自主网络管理与资源编排算法。首先系统阐述了核心算法，包括本地自主学习算法、群体协同优化算法、仿真验证算法；然后详细分析算法的实现架构，包括基站自治层的分布执行、区域协同层的协同增强、全局管理层的集中智慧；最后展望了从集中智能到分布智能，再到群体智能的演进路径。通过本文研究，为6G基站智能化的理论研究与工程实践提供系统性的参考框架,促进无线技术演进。

关键词

6G；人工智能；分布式自主管理；资源编排；深度强化学习

1 6G 基站引入 AI 的必要性

基站网络管理是指实时监控基站的运行状态、动态配置网络参数、智能诊断与预测性维护、安全防护。基站资源编排是指对频谱、计算、存储、功率等多维度资源的动态调度与优化配置技术。

未来面向 6G 时代的全场景服务，包括沉浸式扩展现实、全息通信、大规模数字孪生以及超可靠自主通信，网络面临着前所未有的复杂性、动态性和确定性需求。这种复杂性体现在多个层面：在物理层面，太赫兹频段的引入带来了严重的传播损耗和波束失准问题；在网络层面，空天地一体化网络节点密集、动态多变且高度异构，传统的集中式解决方案难以满足其资源管理和运营需求；在业务层面，AI 服务本身成为网络承载的核心对象，其对算力、数据、模型和连接的融合需求，要求网络提供远超传统连接质量的服务质量保障。上述全场景智能服务要求 6G 基站 (或更广义的接入网节点) 必须具备在本地或小范围集群内进行自主决策与实时优化的能力，而不仅仅是执行中心下发的指令。这种基于 AI 的分布式自主网络管理与资源编排能力，是应对 6G 超高动态环境、实现毫秒级甚至微秒级响应、以及保障差异化 AI 服务质量的必然选择。

【作者简介】宋照红（1975–），男，中国山东人，硕士，高级工程师，从事信息通信技术、人工智能研究。

2 基于 AI 的网络管理与资源编排算法

基于 AI 的 6G 基站分布式自主网络管理与资源编排算法体系是由本地自主学习算法、群体协同优化算法和虚拟仿真验证算法构成的智能引擎。

2.1 本地自主学习算法：深度强化学习

在基站侧实现自主管理，通过部署深度强化学习 (DRL,Deep Reinforcement Learning) 智能体观察环境状态，通过深度神经网络输出动作；环境反馈即时奖励新状态，智能体基于奖励信号更新网络参数，迭代优化以最大化长期累积奖励。与需要大量标注数据的监督学习不同，DRL 智能体通过与环境的试错互动来学习策略，使其具备在复杂、不确定的无线环境中通过交互进行学习并做出最优决策的能力。

在 6G 基站中，DRL 的应用将更加深化和具体。例如，在太赫兹频段的智能波束管理与追踪中，基站可以作为一个 DRL 智能体，其状态空间 (State) 可包括用户位置估计、历史信道测量、环境感知信息 (如障碍物检测)；动作空间 (Action) 包括波束方向、宽度、发射功率的精细调整；奖励函数 (Reward) 则是信号干扰噪声比、吞吐量或能效的综合指标。通过在线或离线训练，基站能够学习到一套应对用户移动和障碍物遮挡的鲁棒波束控制策略，将波束失准的影响降至最低 [1]。

2.2 群体协同优化算法：图神经网络与联邦学习

通过部署图神经网络 (GNN,Graph Neural Networks) 功能对图结构数据进行建模和推理。当多个基站、无人机中继或智能反射面需要协同工作时，它们构成了一个动态的图网络。例如在空天地一体化网络中，针对多无人机网络协同数据收集问题，通过基于 GNN 的分布式优化方法，每个节点 (基站或无人机) 可以将其本地观测 (如信道状态、队列长度) 视为图的节点特征，将节点间的无线链路关系视为边，通过 GNN 的消息传递机制，分布式地学习出全局优化的路由或资源分配策略，实现去中心化的协同 [2]。

通过部署联邦学习 (FL, Federated Learning) 功能保障数据隐私的前提下，实现数据不出域、模型共训练。FL 通过中央服务器下发初始模型，各参与方基于本地数据独立训练，仅上传模型参数 (或梯度)；服务器聚合所有参数更新生成全局模型，再反馈给各参与方迭代优化，直至模型收敛。在 6G 网络中，不同基站可能服务于差异巨大的业务场景 (如工厂、车联网、城区)，其本地数据分布呈非独立同分布，直接集中训练会导致模型偏见。通过 FL，各基站可以在本地利用私有数据训练 AI 模型 (如信道预测模型、业务量预测模型)，仅将模型参数更新上传至区域协调器进行聚合。这种模式既保护了数据隐私和本地自治性，又能利用群体智慧提升全局模型的泛化能力，是构建可信任分布式智能的关键 [1]。

2.3 集中仿真验证算法：预测与编排

通过部署网络数字孪生 (DT, Digital Twin) 功能构建与物理网络同步的高保真虚拟镜像，可以在数字空间中进行预测和编排 [3]。预测功能基于持续的数据驱动，DT 融合物联网等实时感知数据与历史数据，利用 AI 模型 (如 Transformer 混合模型) 分析网络流量、用户移动和设备状态等多维度参数的演化趋势。这使得 DT 不仅能实时映射网络状态，更能提前识别潜在的性能瓶颈、干扰热点及故障风险，实现从被动响应到主动干预的转变。编排功能则体现在仿真优化闭环中。DT 在数字空间中无损地预演复杂的资源调度、切片部署等策略。通过对比多种方案并优化参数，可以验证策略的有效性并规避风险。验证后的最优策略可被转化为具体的配置指令，一键下发至物理网络执行。

3 基于 AI 的网络管理与资源编排实现架构

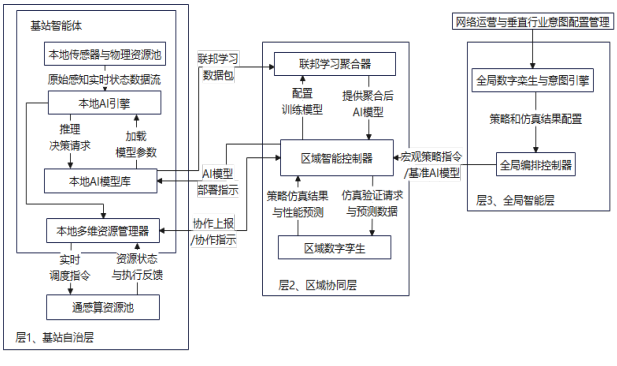


图 1 基于 AI 的分布式自主网络管理与资源编排实现架构

图 1 中架构采用“集中智慧、协同增强、分布执行”的分层自治设计，下面进行分析。

3.1 基站自治层 (分布执行)

基站自治层是 6G 网络的边缘智能核心节点，主要承担毫秒 / 微秒级的实时自主决策与执行。它通过本地 AI 引擎实时感知环境并做出决策，由多维资源管理器统一调度通、感、算等异构资源，以应对超动态业务需求，并在上层策略指导下与相邻基站协同，实现分布式自主运行。涉及的核心组件功能如下：

(1) 基站智能体，完整“感知 - 决策 - 执行 - 学习”处理的自主智能边缘节点。它通过本地 AI 引擎对通感算数据进行实时处理与决策，驱动多维资源管理器进行跨域联合调度，从而在极低时延内响应动态业务需求。同时，它能与相邻智能体直接协同处理局部干扰与切换，并通过联邦学习贡献经验以实现群体智能进化。其核心作用是将集中式的全局智慧转化为分布式的敏捷行动，从根本上解决集中式处理的时延瓶颈，成为实现网络自治、弹性与极致服务体验的基础单元。

基站智能体中的本地传感器和物理资源池完成数据采集：基站通过通信天线阵列、专用感知硬件 (如集成雷达) 以及连接的海量物联网终端，同步采集信道状态信息 (CSI)、干扰噪声谱、目标反射点云、业务数据包特征等多模态原始数据流。

基站智能体中的本地 AI 引擎驱动轻量化的卷积神经网络或信号处理算法，对数据进行实时清洗、对齐与特征提取，完成内嵌 DRL 等在线学习算法，根据本地实时观测 (信道状态、用户位置、业务队列、计算负载) 做出微秒 / 毫秒级决策 (如功率调整、快速波束优化)。例如，将 CSI 转换为信道质量分布热图，从点云数据中实时识别并跟踪移动障碍物，或从业务流中快速分类出 URLLC、eMBB 等不同类型的数据包。

基站智能体中的本地模型库，完成存储和运行从区域层下发的或通过联邦学习获得的轻量化 AI 模型，用于本地推理。

基站智能体中的本地多维资源管理器，完成统一管理基站内部的频谱、天线、计算、存储、功率资源，并执行来自上层的协同策略。

(2) 通感算一体化资源池，作为基站自治层的硬件抽象，位于硬件抽象的最底层。它通过虚拟化技术将基站的通信射频单元、感知信号处理单元、AI 计算单元 (如 CPU、NPU) 等物理资源抽象化为一个可灵活调度的统一资源池。该资源池接收来自上层管理器的标准化调度指令 (如空口物理资源分配或基站算力分配)，并将其实时、精确地映射和解耦为具体的硬件控制命令 (如配置 FPGA 波形、分配 GPU 内存)，驱动物理硬件执行，同时将硬件的实时状态与执行结果反馈回上层，是实现软件定义基站和确定性能效保障的基石。

3.2 区域协同层 (协同增强)

区域协同层主要完成策略分解与适配、协同优化求解、模型管理与分发功能。策略分解与适配即将宏观策略转化为适合本区域基站集群执行的协同策略 (例如，为满足全市自动驾驶时延要求，规划出主干道路的专用波束切换序列和边缘计算节点部署图)。协同优化求解即运行基于 GNN 的协同算法，解决基站间的干扰协调、负载均衡、协同波束成形等多智能体问题。模型管理与分发即完成信道预测、业务量预测、异常检测等的轻量化 AI 模型的管理和分发。涉及的核心组件功能如下：

(1) 区域智能控制器，完成接收全局策略，并负责一个特定地理区域 (如一个城市) 或一个逻辑切片 (如整个车联网切片) 内的协调管理。

(2) 区域数字孪生，完成该区域网络的实时镜像，精度和更新频率远高于全局孪生，用于区域内的策略仿真和预验证。

(3) 联邦学习聚合器，完成协调域内各基站进行联邦学习，聚合本地模型更新，生成更强大的区域共享模型后分发。其处理遵循标准联邦学习流程：首先，协调训练任务，向各基站分发统一的初始模型和训练指令。随后，安全接收与聚合模型更新，各基站在本地使用私有数据训练模型后，仅将加密的模型参数更新 (梯度) 上传至此聚合器。聚合器采用如联邦平均等核心算法，将所有局部更新进行安全融合，生成一个更加强大、泛化能力更优的全局模型。最后，它将聚合后的新模型分发回所有参与基站，从而在不共享原始数据的情况下，持续提升整个区域基站群的 AI 能力，实现知识的共享与网络的整体智能化演进。

3.3 全局管理层 (集中智慧)

全局管理层提供全局视野和长期优化指导，不参与实时控制，其输出的结果是面向区域或业务片的宏观策略包和基准 AI 模型。涉及的核心组件功能如下：

(1) 全局网络数字孪生与意图引擎：构建全网高保真虚拟镜像，接收并形式化解析来自运营商或垂直行业的业务意图。

(2) 全局编排控制器：基于孪生网络进行超远期、跨域的网络规划与宏观策略制定 (如频谱划分、跨运营商漫游协议、重大灾害应急通信预案)。

4 演进

支持基于 AI 的分布式自主网络管理与资源编排的演进将经历三个阶段：辅助决策阶段，通过集中式 AI 方式完成数字孪生广泛应用于网络规划和算法仿真。分布式自治阶段，通过基站内置 FL、DRL 等 AI 加速单元 , 实现基站集群域内 AI 自治。群体智能阶段，通过网络中的每个节点 (基站、终端、反射面) 都部署高度自主的智能体。通过先进的分布式学习与共识机制，形成去中心化的群体智能，实现网络的自我演进与创造，最终达成智慧内生愿景。算法在向 AI 方向演进过程中，在实现功能基础上还要保证 AI 算法可靠性，解决 AI 自身的高复杂性与不确定性；以及要保证 AI 算法可行性，解决计算开销与基站侧有限的能耗、算力预算。

5 结论

为应对 6G 网络场景和服务的复杂性，人工智能在未来 6G 基站分布式自主网络管理与资源编排中的起到核心作用。通过深度融合深度强化学习、图神经网络、联邦学习等先进算法，以及将智能分布式地注入网络边缘，6G 基站将从被动的信号收发节点，演进为具备本地感知、实时决策、群体协同能力的边缘网络智能体，从而支撑起万物智联的 6G 时代。

参考文献

[1] Subhankar Shome. An Extensive Review of THz Communication in 6G: Facilitating Technologies with Edge Computing and Native AI. Franklin Open, 2025(10).

[2] 尚佳瑶等.空天地一体化网络智能适变组网技术[J].人工智能,2025(1)

[3] 丁海煜等.6G数字孪生网络分布式架构及关键技术[J]. 信息通信技术,2024(2)