

## 意图驱动的6G无线接入网络

周洋程, 闫实, 彭木根

(北京邮电大学, 北京 100876)

**摘要:** 为了满足未来物联网全频谱、全场景、全业务的组网需求, 降低组网成本和人力投入, 提升无线接入网的智能性, 业界提出了意图驱动的6G无线接入网络(ID-RAN, intent-driven radio access network)。ID-RAN以人工智能、网络功能虚拟化、软件定义网络等技术为基础, 能够将用户或运营商对网络期望的业务、性能和组网“意图”转化为实际组网策略, 从而实现网络的高效柔性可重构。首先概述了ID-RAN的体系架构, 然后对意图转译、冲突解决、配置激活、网络性能评估与优化等关键技术进行了介绍, 最后通过开放式软件定义硬件平台展示了意图驱动的6G无线组网性能。

**关键词:** 6G; 意图驱动无线接入网; 人工智能; 硬件平台

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00146

## Intent-driven 6G radio access network

ZHOU Yangcheng, YAN Shi, PENG Mugen

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** To satisfy the requirements of full-spectrum, full-scenario and full-service networking in the future Internet of things, the intent-driven radio access network (ID-RAN) is proposed for the 6G wireless communication system to decrease the networking costs and save the labor expense, while enhancing the intelligent capabilities of the radio access network. Based on the artificial intelligence, network function virtualization and software-defined networking, the intents from applications, performance requirements and networking status can be translated to the configuration and optimization strategies by the proposed ID-RAN, which enables 6G work efficiently, flexibility and elastically. The system architecture of ID-RAN was proposed firstly, and then the principles and solutions of key techniques were formulated, including intent translation, conflict resolution, configuration trigger, performance evaluation and optimization. Meanwhile, the open software-defined hardware platform for ID-RAN was built, and the corresponding performances aimed for 6G were presented.

**Key words:** 6G, intent-driven radio access network (ID-RAN), artificial intelligence, hardware platform

### 1 引言

近年来, 随着5G、人工智能(AI, artificial intelligence)和大数据技术的不断革新, 智能移动物联网业务的兴起和迅速发展引发了新一轮信息技术革命浪潮, “万物互联”对海量业务数据即时

获得、分析和交换的需求日益增长。为了支撑海量连接场景下多类型终端的差异化服务质量, 5G引入了多种无线接入技术和网络管理策略<sup>[1]</sup>。随着网络制式和频段的演进, 移动网络形态呈现多样化与异构化, 网络运维的复杂度和运营成本随之增加。随着第一份6G报告的发布<sup>[2]</sup>, 我国陆续启动了6G

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-02-24

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No.61925101); 北京市自然科学基金资助项目(No.JQ18016)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61925101), Beijing Natural Science Foundation (No.JQ18016)

研究工作。6G 报告中指出：“数字孪生，智能泛在”的网络发展愿景，期望结合 AI 等技术的发展，满足人们日益增长的高性能网络需求，实现智慧互联和行业数字化转型。然而，现有的商用无线网络拥有大量可配置无线参数，面对海量设备的接入和快速变化的业务需求，传统以设备为中心的人工运维模式成本难以为继、性能难以保障、用户服务质量难以满足，迫切需要一种更灵活、更简洁的智慧无线接入网络，以适配未来物联网智能业务的高不确定性。

AI 作为 6G 的重要使能技术<sup>[3]</sup>，当前已经进入第 3 次发展浪潮。云计算、大数据、芯片计算等技术的日益进步和工业生产的智能化需求，驱动着人机交互方式的变革，AI 成为当前行业数字化转型的重要驱动力。无线网络的时变动态特性为 AI 模型的构建提供了庞大的数据样本，而异构资源协同和多站点云化场景也为 AI 模型的实时计算提供了充足算力。目前，AI 已初步用于应对无线网络媒体接入控制层的资源管理、网络层的移动性管理、应用层的用户定位等挑战，并展现出其不需要人工干预、能灵活应对动态网络环境的潜能<sup>[4]</sup>。然而，现有的无线网络与 AI 结合的相关成果主要聚焦于 5G 网络架构的优化，基于 AI 的智能无线网络研究还处于起步阶段<sup>[5]</sup>。6G 期待通过 AI 增强无线网络架构的适应性，使无线网络更好地支撑多样化服务和多应用场景，实现无线网络与用户需求的实时互动，并使无线网络可以更好地满足用户需求，构建高效的、可重构柔性无线网络<sup>[6]</sup>。

意图驱动网络（IDN, intent-driven network）由时任美国开放网络基金会北向接口工作组主席 David Lenrow 于 2015 年提出，他指出：在所谓的意图模式中，智能软件（如 SDN 控制器）将决定如何把意图转化为针对特定基础设施的配置手段，从而使网络以期望的方式行事<sup>[7]</sup>。IDN 组成如图 1 所示，IDN 借助 AI 可以实现意图的转译和验证、自动化部署配置、网络状态的察觉和精准预测以及动态的配置优化和补救等<sup>[8]</sup>，以用户意图自主驱动网络的全生命周期自动化管理，极大地提升了网络的运维效率和响应业务变化的速度，在面对不断更新的用户需求和时变的无线环境下展现出可观的性能优势。但目前针对 IDN 的相关研究工作主要集中于核心网<sup>[9]</sup>。

为了实现 6G 各方面性能较 5G 得到显著提升，

6G 需要采用全频谱、全场景、全业务、全通量无线组网，将 IDN 从核心网演进到无线网络，即构建 ID-RAN，主要优势包括：1) 能够准确识别物联网场景下多类型终端用户的服务意图，实施多维度感知传感需求；2) 能够将用户的运维、业务、用户性能等需求转换为无线网络配置、运行和维护策略，破解传统无线网络静态固化等不足；3) 通过采集网络运维和性能数据，实时感知用户体验和网络性能，利用 AI、大数据等技术进行无线网络和用户性能的预测，在降低运维成本、提高网络稳健性的同时，保障网络性能。因此，面对 6G 的海量连接和更高性能要求，ID-RAN 具有广阔的应用前景，也面临体系架构、关键技术和性能演示等多方面挑战。

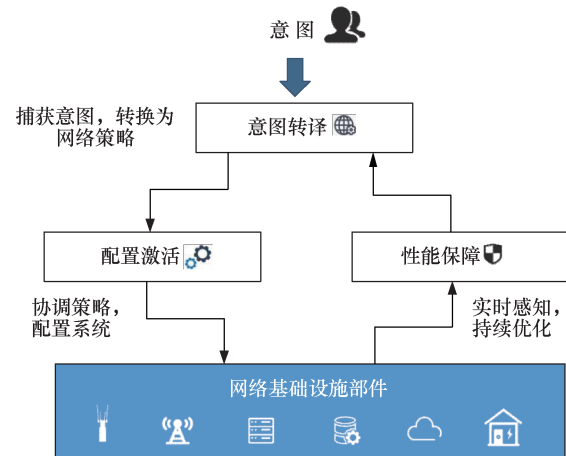


图 1 IDN 组成

## 2 ID-RAN 体系架构

ID-RAN 可适配不同的网络配置方法和物理层传输技术，满足海量连接、超低时延、超大带宽等 6G 物联网时代的组网需求。ID-RAN 系统架构如图 2 所示，其中，ID-RAN 将接收到的无线意图依次通过意图转译、冲突解决、网络编排、配置激活以及策略优化 5 个功能模块进行处理。意图驱动的无线网络控制器（ID-RNC, intent-driven radio network controller）负责对无线意图从转译至优化所有功能模块的运转过程进行集中化管理，包括对接入网中运维数据、无线传输数据和终端测量报告的获取以及网络配置指令和组网优化指令的下发等。ID-RNC 可部署于集中云、基站控制器以及具有网络管理功能的宏基站处。在具有边缘计算和管理功能的雾基站（F-RRU, fog-remote radio unit）、雾终

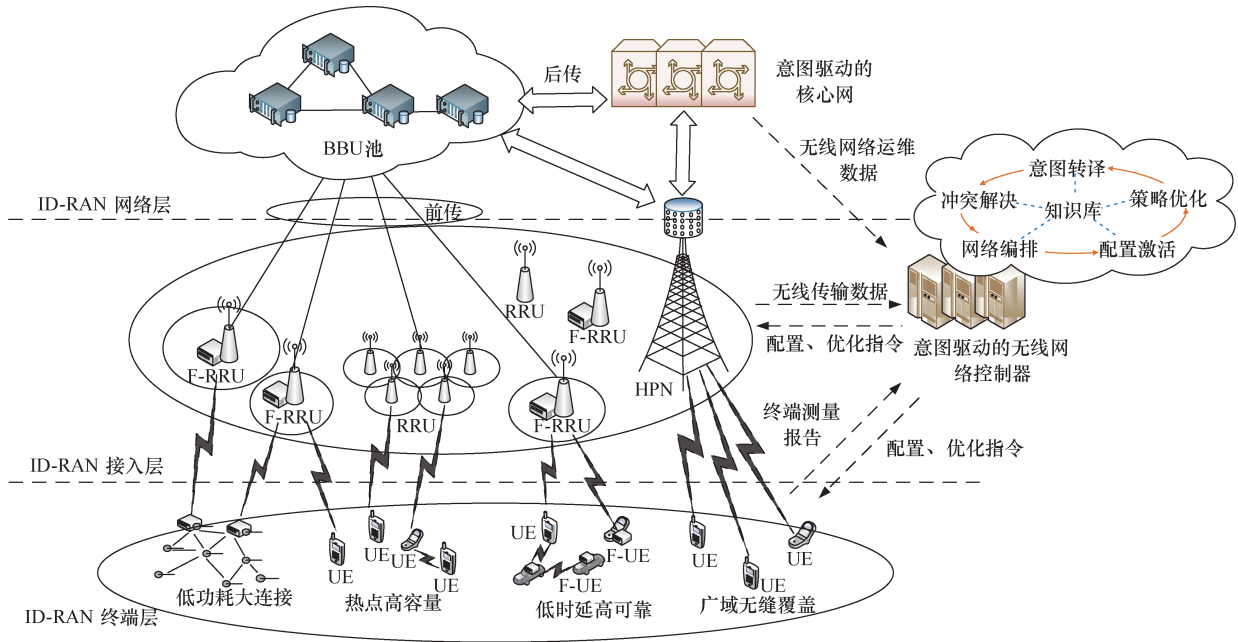


图 2 ID-RAN 系统架构

端设备 (F-UE, fog-user equipment) 进行分布式的数据采集处理和网络资源优化, 以实现网络管理策略的高效运转。

在每个意图周期初始阶段, ID-RAN 的意图转译模块根据接入网络的意图类型, 结合每个意图对网络性能和组网的需求生成网络配置要求。根据数据采集处理器通过大数据探针获取的无线网络运维数据、终端测量报告和基站上传的无线传输数据, 意图转译模块捕获来自移动运营商或运维管理人员的无线意图。具体来说, 无线网络中的意图主要包括组网意图、业务意图以及性能意图 3 种类型。

- 1) 组网意图: 是指运维管理人员对物理设施配置方案进行设定或更改的意愿, 包括对无线网络接入模式和网络资源管理方案的配置、优化和故障恢复;
- 2) 业务意图: 是指无线网络可以向终端用户提供的服务种类;
- 3) 性能意图: 是指用户对某种关键性能指标的期望阈值。组网意图在意图转译模块中输出的配置要求通过网络管理设备的控制指令呈现。对于业务意图和性能意图, 网络配置要求可以进行数学建模, 将意图中期望最大化 (或最小化) 的关键性能指标作为优化目标, 将组网过程需要考虑的资源容量上限作为约束条件。根据网络性能需求类型, 如广域无缝覆盖、热点高容量、低功耗大连接以及低时延高可靠可配置 4 种典型应用场景。ID-RNC 中的意图转译模块作为和意图驱动的核心网 (ID-CN, intent-driven core network) 的接口, 位

于无线接入网络的最高层, 可单独作为一个新的协议层, 也可嵌入现有网络层的上部。对于无线意图的捕获, 除了使用大数据分析方法之外, 还可通过扩展标记语言 (XML, extensible markup language)、领域专用语言 (DSL, domain specified language) 等数据格式以图形用户界面展示, 或者直接用物理设备配置的标准机器语言表示。

根据 ID-RAN 意图转译模块输出的网络配置要求, 冲突解决模块按照网络配置要求所属意图类型确定相应意图从配置要求进入网络编排过程的顺序, 并解决了同种意图类型各配置共享网络资源的冲突。对于不同意图类型之间的冲突, 可按照预设的意图处理优先级顺序进行处理。组网意图是基于网络整体运行规范的专家系统下达的网络配置设定或调整需求, 优先级最高; 性能意图是为了满足用户服务等级并迎合未来业务发展的性能要求, 优先级居中; 业务意图是为网络增添的业务需求, 为了使网络能为用户提供定制化的服务种类, 优先级最低。在确定多种类型意图所对应配置要求进入网络编排的顺序后, 对于同种意图类型的冲突问题, 可采用多目标联合优化方法对资源进行协同调度, 使网络在资源有限的条件下满足多个意图请求。

ID-RAN 网络编排模块结合数据采集器获取的无线传输数据以及终端测量报告, 评估当前网络已有配置的性能状态, 并结合冲突解决模块输出的配置声明实例化顺序, 确定对网络原有配置的保留、

优化或删减操作。评估性能操作是指根据实时无线传输数据和终端测量数据，利用卷积神经网络（CNN, convolutional neural network）和循环神经网络（RNN, recurrent neural network）等算法提取测量数据的空间和时间特征，结合无线传输数据、终端测量数据与网络性能状态的映射关系，得到当前网络的性能水平。然后，将网络当前性能水平与意图转译模块针对各意图分析得到的性能需求进行比较，如果网络当前性能水平满足意图性能要求，则保留该部分网络配置，以避免频繁更新网络配置带来的复杂操作和性能抖动；如果网络当前性能水平与意图性能要求差值在一定范围内，则对当前网络按照配置声明执行优化操作。否则删除网络中已有的配置，释放相关网络资源，并按照冲突解决模块确定的配置声明实例化顺序依次为各意图制定匹配的组网策略。

根据各意图的配置声明和网络历史配置经验，ID-RAN 的配置激活模块为每个意图制定专属的组网策略，包括接入模式和网络多模资源分配策略，并通过软件定义网络（SDN, software defined network）、网络功能虚拟化（NFV, network functions virtualization）等技术完成相关网络基础设施资源的配置。多模资源包括无线资源、缓存资源和计算资源，无线资源包括时域、频域、码域、空域和功率域资源，缓存资源包括可用存储空间、文件内容和缓存替换内容，计算资源包括各节点的本地数据处理能力、使用的机器学习算法以及支持机器学习模型训练的数据运算能力。

ID-RAN 在执行过程中，数据采集处理器将周期性地从各意图子网中获得实时无线传输数据和终端测量数据，通过机器学习、统计学等方法评估当前网络配置下的性能状态，并对比由意图转译模块分析出的当前意图对网络的预期性能。若两者性能相差较大，则 ID-RAN 的优化模块将负责对当前网络配置进行优化。此外，利用大数据和 AI 技术的 ID-RAN 可提前识别网络故障，主动进行体验优化和故障修复，实现无线接入网的自配置、自动化和自愈。

### 3 ID-RAN 关键技术

为了确保 ID-RAN 能高效工作，需要攻克无线意图转译、意图冲突解决、意图组网柔性构建、意图组网实施、意图组网性能评估与优化等关键技术。

#### 3.1 无线意图转译

将意图转换为组网策略分为 3 个阶段：1) 将收到的意图通过自然语言处理（NLP, natural language processing）技术提取关键词，并结合组网经验将提取出的关键词表述为使用 DSL 描述的结构化声明语句，即配置声明；2) 通过算法根据网络知识库制定满足用户需求的组网策略；3) 完成组网策略在接入层中具体网络设备上的实例化。第一阶段为意图转译过程，第二、第三阶段为网络编排和配置激活过程。

为了实现意图转译过程的关键词提取和配置声明语言的规范化，需要建立一种涵盖业务需求、组网策略、物理设施资源以及彼此之间内在联系的语言模型——无线意图语言模型。根据无线意图的组网过程，结合人类使用自然语言对意图的表达方式，无线网络意图可以表示为[结果, 操作, 对象]格式的抽象模型，即针对某对象进行某操作，以实现或避免某结果<sup>[10]</sup>。无线意图转译语言模型如图 3 所示，“结果”标签是指用户期望网络达到的服务状态，由业务类型、性能指标、期望状态、时空约束元素组成；“操作”标签是指为了实现业务需求，在网络中制定的组网策略，包括网络拓扑结构、节点接入模式、资源分配方案、网络约束条件元素；“对象”标签是指为了执行组网策略需操控的物理设备和相关资源，包括网络节点、无线资源、缓存资源、计算资源 4 种元素。根据专家经验，网络知识库中存储着无线意图语言模型所有关键元素的自然语言表述和各元素间的映射关系。利用网络知识库，可以通过 NLP 将用户外部输入的无线意图转换为网络优化问题，为制定匹配于意图的组网策略提供优化目标。

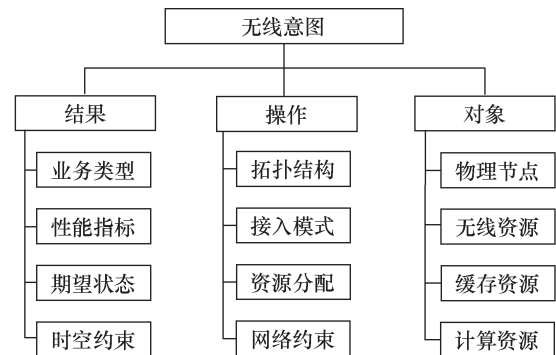


图 3 无线意图转译语言模型

当无线网络接收到用自然语言描述的无线意图时，可利用 NLP 中的命名实体识别（NER, named

entity recognition) 方法<sup>[11]</sup>, 如 BiLSTM-CRF、IDCNN-CRF、FudanNLP 等算法, 通过语言分词、词性标注、词典查询等自然语言处理过程找到意图文本中与网络知识库预先存储词汇一致或相关的词汇作为意图表述关键词, 并对提取出的意图关键词添加无线意图语言模型中关键元素对应的标签类别, 以便意图关键词向配置声明序列转换。

通过无线意图语言模型, 可以将隐藏底层复杂网络操作的无线意图用声明式的配置语言表示, 配置声明语言可以是网络优化问题中的优化目标表达式, 包括语言模型中的性能指标 (优化目标)、网络资源 (优化对象)、网络资源约束 (约束条件 1) 和时间地点限定 (约束条件 2) 4 种元素。根据网络知识库存储的语言模型各元素之间的对应关系, 可以利用 S2S (sequence to sequence) 模型<sup>[12]</sup>, 通过 RNN 的编解码框架将提取出的意图关键词转换为结构化的配置声明。

### 3.2 意图冲突解决

当收到多个无线意图时, 需要为每个意图制定与之匹配的组网策略, 以满足其服务性能需求。由于每个无线意图对应的组网策略在网络操作范围、网元配置参数、无线网络资源调度种类等方面相似, 进而出现网元参数调节冲突、无线网络资源分配不足、网络性能下降等问题。对于接收到的多类型意图, 可按照不同类型意图的优先级依次制定组网策略并分配物理资源。对于同种优先级的意图, 针对差异化网络性能要求的组网策略会产生对同种物理资源的争夺, 如匹配高效意图和高吞吐量意图之间的功率分配策略会产生冲突。为了尽可能满足更多的意图请求, 可采用多目标联合优化的方法, 通过对多种网络优化目标的组合, 实现竞争资源和网元参数的合理调配。

多目标优化问题的求解按照算法的智能化程度可分为数值算法和智能算法两种解决方案。数值算法分为将多目标转化为单目标的方法, 包括主要目标法、线性加权法、理想点法, 按照目标的重要性将每个优化目标逐个求解, 如分层序列法。智能算法包括遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、蚁群算法、Pareto 进化神经网络、模糊神经网络、博弈论等。数值算法通过寻找多种目标的内在关系来确立新的优化目标, 并采用严谨的数学推导得到满足多个目标函数的 Pareto 解集 (PS, Pareto set)<sup>[13]</sup>。

但无线网络具备时变特性, 优化目标函数、约束条件和相关参量都可能随时间发生动态变化, 这给数值算法的求解过程带来了较高的复杂度。针对动态的多目标优化问题, 非支配排序遗传算法、多目标粒子群优化算法等智能方案可以灵敏地检测环境的变化, 并通过多样性引入机制、多样性保持机制、预测机制等应答方法有效响应环境变化, 及时调整解集搜索方向, 找到新环境下的 PS<sup>[14]</sup>。

### 3.3 意图组网柔性构建

在 ID-RAN 的网络编排环节, 需要结合无线网络资源现状和网络配置经验, 将无线意图转译输出的结构化配置声明作为网络优化目标, 进而制定无线接入网络组网策略。尽管通过线性规划、凸优化等数值算法能够根据配置声明中的优化目标求解出满足意图的最优或次优配置策略解, 然而面对未来用户多样化业务需求的发展趋势, 求解数学公式的复杂性以及数值解集的可操作性会增加运算无线网络配置策略的时间, 并且无法预知求解出的配置策略在实际网络中能够达到的性能水平。随着云计算技术的发展, 无线网络的终端测量数据以及信号传输过程中的大数据可以得到有效的存储, 利用数据挖掘和 AI 技术挖掘数据的内在特征, 并通过专家学习系统, 获得同等或者超过人工运维的智能组网水平。强化学习旨在通过与环境频繁交互获得的奖惩值指导智能体的行为选择, 并采用“试错”方式使智能体做出能够得到最大环境奖励的决策。考虑无线网络的时变性对组网策略自适应度的要求, 可利用深度强化学习 (DRL, deep reinforcement learning)<sup>[15]</sup>, 通过采集网络环境高维数据, 根据优化参考目标制定匹配于用户需求的组网策略, 实现 ID-RAN 的柔性组网过程。

基于 DRL 的意图组网策略构建如图 4 所示, 针对利用 DRL 制定匹配于无线意图的组网策略过程, 将意图转译输出配置声明中的“网络约束”元素作为 DRL 智能体待观察的网络状态参量, 将配置声明中的“网络资源”元素作为智能体待执行的配置动作, 将配置策略下发到网络后配置声明“性能指标”和“期望状态”元素的数值作为配置策略的网络奖励, 通过对网络知识库中历史配置数据的学习, 得到当前网络状态下最大化环境奖赏值, 即获得具有最佳网络性能的组网策略。

### 3.4 意图组网实施

完成意图匹配的组网策略制定后, 需要将组网

策略转换为无线网络基础设施控制指令，并下发到相应的物理设备完成组网实施，此过程可以借助 SDN 和 NFV 技术，对庞大网络规模下的各个网络设备进行程序化的功能配置和参数设定，以提高网络可编程性并降低人工操作成本。NFV 沿用标准的 IT 虚拟化技术，在通用硬件设备上以软件形式部署各类网络功能模块，使网络策略的部署不再依赖于专用硬件设备，实现了软硬件解耦<sup>[16]</sup>。5G 利用 NFV 将传统网元解耦出多种网络功能，通过网络功能服务和基于服务的接口组成基于微服务的网络架构<sup>[17]</sup>，以软件方式通过 SDN 控制器将配置方案下发到具体物理设备，从而在保证不同用户网络需求的同时，实现网络灵活管理。

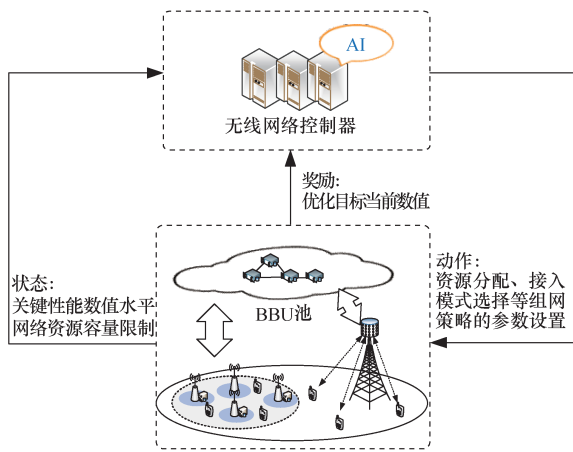


图 4 基于 DRL 的意图组网策略构建

在无线接入网络复杂、异构、密集部署的现状下，NFV 将是架构的重要演进方向，它将有助于无线接入网络支撑日益增长的终端数目，缩短新兴业务的部署周期，实现 ID-RAN 中众多无线设备配置参数的高效管理。不同于核心网较成熟的虚拟化应

用环境，NFV 在传播环境不稳定的无线网络中实现虚拟化仍面临着多样化场景服务需求、无线网络资源的抽象与隔离、动态无线网络组网等挑战<sup>[18]</sup>。

### 3.5 意图组网性能评估与优化

当匹配于意图的组网策略部署在网络中之后，持续监测网络的实时性能状态，主动进行故障预测和体验优化是 ID-RAN 周期性运转的重要组成。网络中已有意图的性能监测可以基于深度机器学习，利用监测到的网络测量参数，分析数据中的潜在特征，根据网络历史经验数据得到测量参数与性能状态的映射关系，从而预知网络性能的下降。具体地，ID-RAN 中的数据收集器基于传感器或者大数据探针从无线网络终端设备和接入节点处收集网络测量参数，包括信道质量信息指示（CQI, channel quality indicator）、参考信号接收功率（RSRP, reference signal receiving power）、参考信号接收质量（RSRQ, reference signal receiving quality）、信号与干扰噪声比（SINR, signal to interference ratio）等反映无线信道质量和信号传输效果的数据。为了分析网络性能状态，可将网络历史测量参数和性能数据输入到深度神经网络中，获得网络测量参数与关键性能状态等级的映射关系，从而通过实时测量参数预估网络关键性能指标（KPI, key performance indicator）参数可达到的数值等级。

针对预估性能低于设定阈值的情况，需要对配置策略进行优化，方法之一是通过 DRL 生成意图组网优化方案。具体地，将当前网络 KPI 数值等级以及网络资源使用情况作为 DRL 待观察的网络状态，将待调整的物理参数步长作为待执行的配置动作，将调整策略下发到网络中反馈的 KPI 数值作为组网策略的奖励。基于以上制定的 DRL 学习框架

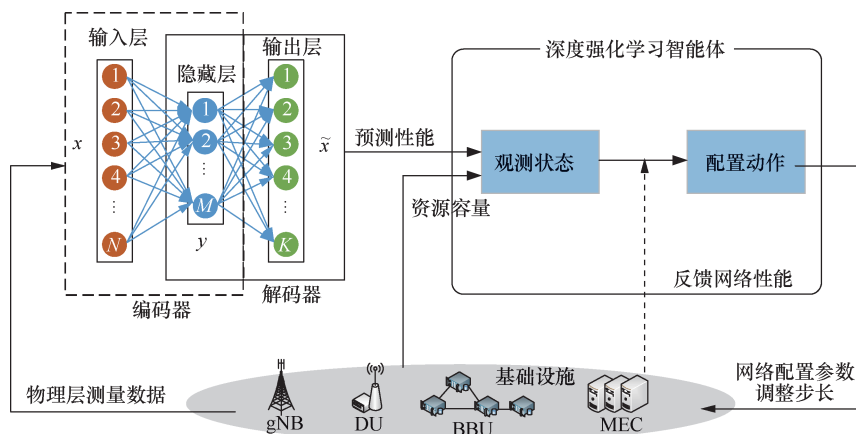


图 5 基于机器学习的意图组网性能评估与优化

和历史积累的网络参数周期性更新知识库，根据当前监测的实时网络参数以及无线网络反馈的性能水平，结合经验回放器中历史训练数据生成恰当的网络配置参数调整策略，使网络业务的服务质量得以提升，基于机器学习的意图组网性能评估与优化如图5所示。

#### 4 ID-RAN 硬件试验平台与性能评估

为了评估ID-RAN的组网性能，基于OpenAirInterface (OAI) 开源平台，利用软件定义无线电 (SDR, software defined radio) 搭建了ID-RAN硬件试验平台，实现了ID-RAN的意图关键词提取、组网方案制定、网络环境感知、故障探测与策略优化等关键模块及对应性能的评估。基于OAI的ID-RAN硬件试验平台如图6所示，根据3GPP协议，搭建了具有ID-RAN的EPC、基站和用户设备(UE)，其中，ID-RAN管理软件部署在EPC侧，并与数据服务器相连。

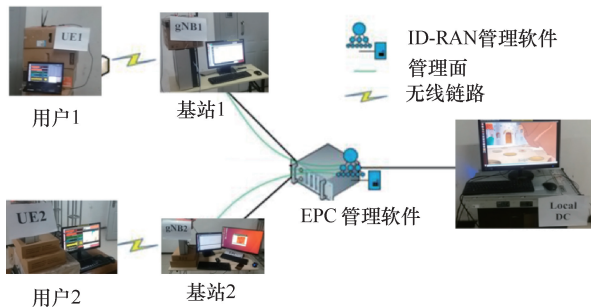


图6 基于OAI的ID-RAN硬件试验平台

ID-RAN 硬件试验平台工作流程如图7所示，通过“配置视频会议网络”自然语言输入意图，按照图7所示的意图组网策略构建、获取业务性能反馈、人为干扰源设置以及网络故障探测和网络优化等步骤，实现了ID-RAN的功能验证。

ID-RAN 硬件试验平台网络配置及性能如图8所示，首先对输入的意图利用BiLSTM-CRF算法进行了关键词提取和命名实体识别，将输入意图匹配至增强移动宽带(eMBB)典型应用场景。随后通过对当前网络性能的监测，根据所需性能，利用DRL算法预测出ID-RAN的基站配置参数。基于这些配置，ID-RAN智能化工作，满足用户高通量视频传输的需求，使用户终端可以高速接入无线网络，并获得超高清视频服务。

为了演示ID-RAN智能优化的性能，通过新增邻基站，主动配置一个干扰源，使目标基站存在严重的小区间干扰。用户接入ID-RAN后，基站监测用户的RSRP、平均SINR、噪声功率等性能指标，随后将所收集的接入用户的网络状态及基站自身配置信息通过用户数据报协议(UDP, user datagram protocol)传输给意图驱动管理软件。如果存在严重的邻小区基站干扰，用户性能低于预设阈值，则ID-RAN将自动触发故障探测警报，并基于专家经验给出网络性能优化建议。ID-RAN根据用户属性及当前的网络状态，智能地确定优化目标，然后下发相应的ID-RAN优化方案至可重构的基站。ID-RAN硬件试验平台网络自优化性能如图9所示，网络智能化优化后，用户的RSRP和SINR性能都有显著提升。

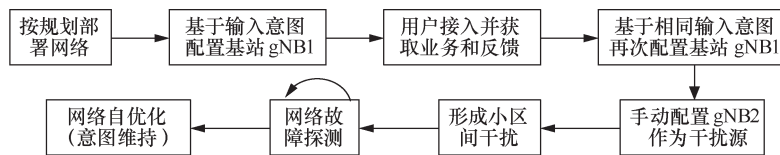


图7 ID-RAN硬件试验平台工作流程

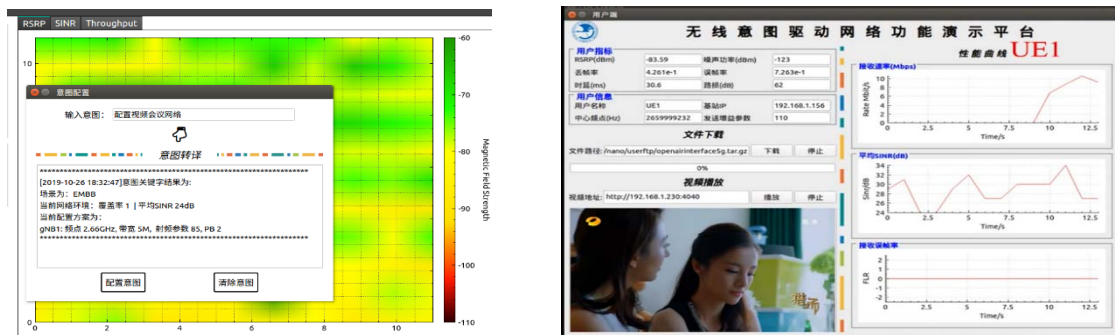


图8 ID-RAN硬件试验平台网络配置及性能

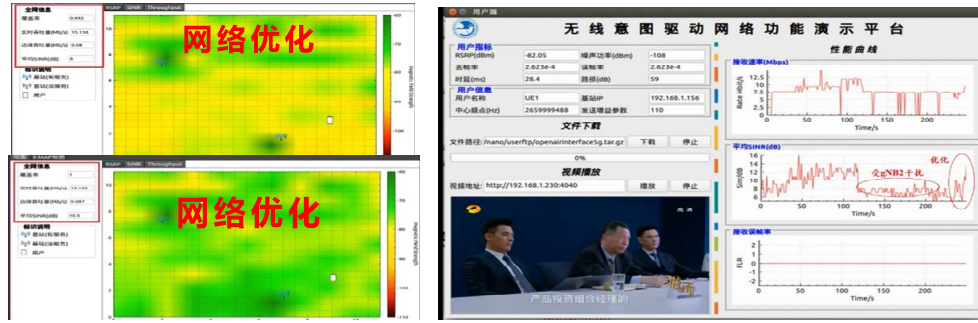


图 9 ID-RAN 硬件试验平台网络自优化性能

### 5 结束语

针对 6G 高性能和便捷智慧无线组网需求，为了实现 AI 与 6G 无线接入网的深度融合，聚焦 ID-RAN，创新性地把意图驱动从核心网扩展到无线接入网，并重点介绍了 ID-RAN 的组网架构、关键技术和硬件平台，旨在为业界提供 ID-RAN 的研究思路。6G 研究启动不久，ID-RAN 还处于研究初期，未来还有许多挑战需要进一步研究与突破，相关标准化工作也需要加速进行，从而构建 ID-RAN 的研发生态系统。

### 参考文献：

[1] PENG M G, LI Y, ZHAO Z Y, et al. System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(2): 6-14.

[2] 中国移动研究院. 2030+愿景与需求报告[S]. 2019. China Mobile Research Institute. 2030 + vision and demand report[S]. 2019.

[3] QIN W, CHEN S, PENG M G. Recent advances in industrial Internet: insights and challenges[J]. Digital Communications and Networks, 2019(7).

[4] SUN Y H, PENG M G, ZHOU Y C, et al. Application of machine learning in wireless networks: key techniques and open issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3072-3108.

[5] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987. ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication network: vision, challenge and key technology[J]. Scientia Sinica (Information), 2019, 49(8): 963-987.

[6] 中国电信. 中国电信 5G 技术白皮书[S]. 2018. China Telecom. China Telecom 5G technical white paper[S]. 2018.

[7] 云杉. IBN 中国十问[S]. 2018. Yunshan. IBN China ten questions[S]. 2018.

[8] ANDREW L, JOE S, SANJIT G. Innovation insight: intent-based networking system[S]. 2017.

[9] Open Networking Foundation (ONF). Intent NBI—definition and principles: TR-523[S]. 2016.

[10] 李凤凯, 张亚丽, 夏寅贲. NEMO: 一种声明式网络编程与业务定制语言[J]. 信息通信技术, 2016(4): 65-74. LI F K, ZHANG Y L, XIA Y B. NEMO: a declarative network pro-

gramming and service customization language[J]. Information and Communications Technologies, 2016(4): 65-74.

[11] LAMPLE G, BALLESTEROS M, SUBRAMANIAN S, et al. Neural architectures for named entity recognition[C]//The 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. 2016.

[12] SUTSKEVER I, VINYALS O, LE Q V. Sequence to sequence learning with neural networks[C]//International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'14). MIT, 2014.

[13] PELOSI G, SELLERI S. To celnigyn, in the footprints of vilfredo pareto “optimum”[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2014, 56(3): 249-254.

[14] 马永杰, 陈敏, 龚影, 等. 动态多目标优化进化算法研究[J]. 自动化学报, 2019. MA Y J, CHEN M, GONG Y, et al. Research on evolutionary algorithm of dynamic multi-objective optimization[J]. Acta Automatica Sinica, 2019.

[15] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning[J]. Nature, 2015, 518(7540): 529-533.

[16] Cisco. Next-generation architecture for cable operator networks: SDN and network function virtualization white paper[S]. 2019.

[17] 3GPP. System architecture for the 5G system: TS23.501[S]. 2019.

[18] 李琳. 无线网络虚拟化及联合管理技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019. LI L. Research on virtualization and joint management technology of wireless network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.

### [作者简介]



周洋程 (1995- )，女，河南南阳人，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生，主要研究方向为 6G 无线组网和雾无线网络等。

闫实 (1988- )，男，北京人，北京邮电大学信息与通信工程学院讲师，主要研究方向为 6G 无线组网、雾无线网络和智慧物联网等。

彭木根 (1978- )，男，江西永丰人，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副主任、教授，主要研究方向为 6G 无线组网、雾无线网络和智慧物联网等。