

## 面向 B5G/6G 的三三三网络体系架构和优化学习机制

朱近康<sup>1,2</sup>, 柴名扬<sup>1,2</sup>, 周武旻<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027; 2. 中国科学院无线光通信重点实验室, 安徽 合肥 230027)

**摘 要:** 面对未来 B5G/6G 网络是大连接复杂智能网络, 极其大量的用户连接、需求连接、服务连接, 加之 3G、4G、5G 甚至 6G 的综合运用, 将导致网络变得极其复杂的挑战, 提出了一种三三三网络体系架构, 它是一个包含 3 类网络 (核心网、接入网、终端网)、3 种资源 (频率带宽、功耗、时延) 和 3 项需求 (生活、工作、服务) 的三维立体综合优化的体系架构, 简称三三三网络。进而, 论证了三维立体复杂体系的数学计算式, 给出了知识+数据驱动学习模型和利用知识学习机制进行智能处理的优化方法。最后, 给出了三三三网络的数值例和可达性能。研究表明, 所提三三三网络体系架构和优化方法对于设计和运行未来的大连接复杂智能网络是有益的。  
**关键词:** 三三三网络体系架构; 知识学习机制; 知识+数据驱动学习模型; 复杂网络实时动态优化; 大连接复杂智能网络

中图分类号: TN915.5

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021095

## Three-three-three network architecture and learning optimization mechanism for B5G/6G

ZHU Jinkang<sup>1,2</sup>, CHAI Mingyang<sup>1,2</sup>, ZHOU Wuyang<sup>1,2</sup>

1. College of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

2. Key Laboratory of Wireless Optical Communications, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230027, China

**Abstract:** Aiming at the problem that the future B5G/6G network is a complex intelligent network with large connections, coupled with the comprehensive application of 3G, 4G, 5G and even 6G, the future networks will inevitably become extremely complex, a three-three-three network architecture was proposed that was a network that includes three types of networks (core network, access network and terminal network), three resources (frequency band, power and time consumptions) and three requirements (active, work and service), which was a three-dimensional comprehensive optimization system architecture, referred to as the three-three-three network. Furthermore, the mathematical basic formulas of the three-dimensional complex network were analyzed, the knowledge + data-driven learning model and the optimization method of intelligent processing using the knowledge learning mechanism were presented. Finally, the numerical example and reachable performance of the three-three-three network were given. Those results demonstrate that the proposed network architecture and the learning optimization mechanism are beneficial for designing future large-connected complex intelligent networks.

**Keywords:** three-three-three network architecture, knowledge learning mechanism, knowledge + data driving learning model, real-time dynamic optimization of complex network, large connections to complex intelligent network

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-03-15

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1801105); 国家自然科学基金资助项目 (No.61631018)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1801105), The National Natural Science Foundation of China (No.61631018)

## 1 引言

### 1.1 研究动机

未来 B5G/6G 网络是大连接的、极复杂的、智能化的新型网络，面临诸多挑战。极其大量的不同用户连接、不同需求连接、不同服务连接，将导致未来网络变得极其复杂且比 5G 网络庞杂得多。未来网络的复杂性还体现在既要包容已有网络和技术，如 4G、5G、IoT (Internet of things) 及各种专用网，又要支持层出不穷的新型业务和服务。此外，软件定义网络和人工智能的普遍应用等使网络需求多，网络变量多，资源开销多。上述问题导致新的 B5G/6G 网络将变得极其复杂。

要发展大连接复杂网络，首先应综合考虑现有网络（包括 4G、5G、IoT、Wi-Fi 和各种专用网络等），重新构建未来的 B5G/6G 网络体系，实现现有和新增的网络应用的有效节能运行，把对地面覆盖、空中覆盖、天体覆盖，以及微覆盖、点覆盖都规划进来，做到全场景应用。

其次，大量用户接入导致网络需求多。网络需求有不同应用性质，包括工作需求、生活需求、服务需求；有不同用户属性，如移动速度包括超高速、高速、低速、超低速、静止；有不同需求属性，如人类需求、物联需求、机器需求、机器人需求。用户的数据流量也有很大差别，从极高速（Gbit/s 量级）到极低速（bit/s 量级），跨度极大。

大连接复杂网络的复杂性还体现在网络的资源开销上。复杂网络涉及不同网络的运行变量多，造成各种应用的资源开销也很多。仅自然资源的开销就包括频率资源的频带开销、能量资源的功率开销、时间资源的时长开销。要优化大连接复杂网络对这 3 种自然资源的使用，实现开销最小是一个相当复杂的课题。

上述问题同时出现在面向 B5G/6G 的大连接复杂网络中，是未来网络发展面临的重大课题，需要提出一个统合规划的新型网络体系架构，规范智能方法和学习机制，实现大连接复杂网络的整体运转和最大性能。

为讨论方便和清晰论述，本文把大连接复杂网络称为整个网络 (Net)，把包含的核心网、接入网、终端网统称为网络，表示核心网的下角标为 C，表示接入网的下角标为 E，表示终端网的下角标为 T。本文把整个网络和各网络的自然资源开销统称为

资源开销 (Res)，其中频带资源的上角标为  $H$ ，功率资源的上角标为  $P$ ，时间资源的上角标为  $\tau$ 。本文把各种用户需求统称为服务需求 (Dem)，其中工作需求的下角标为 W，生活需求的下角标为 L，服务需求的下角标为 A。

上述定义涉及整个网络的第一层级，继续向下细分，核心网可分为不同的子网，如传输需求子网、协议运行子网、云服务子网；接入网可分为不同子网群，如标准基站群、Wi-Fi 站群、物联站群；终端网是新兴网络，可分为个人终端子网、办公终端子网、服务休闲子网。不同的子网分别用下角标 1, 2, 3, ... 来标注。基于此，还可继续向下细分，细分标识将在文中涉及时说明。

由上述讨论可知，如果没有把复杂问题变得简单化的理论基础和技术能力，没有规范为一种统合的体系架构，没有给出比较普适的技术方法，那么大连接复杂网络的构建和运行将会相当艰难。所以，研究和发大大连接下复杂网络的体系架构和可达性能是极其重要的。

本文将从机器学习的聚类方法入手，提出网络分层、资源分类、需求分项的三三三网络体系架构，运用知识学习机制，实现各个分层、分类、分项的最佳配置，进而形成一个完整的大连接复杂网络的智能化规范统一体系。

### 1.2 研究进展

复杂网络涉及自然科学和社会科学的各个领域，引起了科学和工程学各个领域的广泛关注。为描述自然界和社会中的各种系统，研究人员已经从不同角度进行了研究和论述<sup>[1]</sup>。文献[2]重点关注复杂网络拓扑和动力学的统计机制，讨论了主要模型和分析工具，以及拓扑结构与复杂网络性能的相互作用。研究人员还开发了多种技术和模型来帮助研究复杂网络，包括小世界模型、无标度模型、聚类、网络相关性、随机图模型，以及网络动力学过程等<sup>[3]</sup>。

通信领域的复杂网络研究基于复杂网络的基本概念，讨论了复杂网络的经典结构和演化特性。文献[4]论述了复杂网络性能指标中的图谱嵌入进行深度学习，探索复杂网络性能指标上深度学习的能力。基于复杂网络发现所属实体的大多数方法都依赖于组合图属性，文献[5]提出了一种系统的动力学框架，用于设计所属实体检测的质量功能，为频谱算法提供了统一的框架，以实现在复杂网络中找

到多尺度的所属实体结构。

为了分析导致不确定链路存在的网络特征，可以建立一个适应链接和节点的不确定性和时变性的动态网络架构，并对整个系统的性能进行详细分析<sup>[6]</sup>。面对不同级别的组织组成的网络和其中存在的不同尺度的模块，以及模块优化可能与系统的模块组织不兼容问题，文献[7]使用更灵活的质量函数，并结合一个分辨率参数，能够揭示系统的自然尺度，统一不同类型的多分辨率质量函数。

对于复杂网络中的各类网络同步问题，许多子网之间相互影响，也受到了研究人员的关注。为实现对复杂网络的固定控制，文献[8]设计了一个钉扎方案，在每个子网的选定节点上设计固定控制，以达到同步行为。为了揭示具有时延的复杂网络中同步的动力学机制，文献[9]提出了一种自适应反馈同步机制，获得了用于全局指数渐近同步的新标准。

随着 5G 的兴起，3G/4G/5G 的层叠架构，以及业务/服务的不断创新和增长，使移动无线网络变得越来越复杂，成为庞大混杂大量连接的复杂网络。文献[10]指出从 5G 走向未来 6G 需引入各种新技术，在通信网络变得十分复杂时，人工智能技术用于复杂网络是一个重要研究方向。为提高未来复杂网络的传输效率，文献[11]提出把复杂网络聚类成分层网络，分层协同，并分析了不同分层结构的效率，以获得更高的接入传输能力。

综上所述，复杂网络的研究是 20 世纪就被提出的研究课题，基于随机统计学和控制论，对规则网络和随机网络已有深入研究。进入 21 世纪，小世界网络和无标度网络的研究兴起，给出了简明的表达和图谱推演，凸显了其可连接、可聚集、可模式化的特性，推动了复杂网络研究进展。但是，由于各学科、各行业、各应用千差万别，具体到无线通信和无线网络还需要利用复杂网络的进展进行更有针对性的研究。另外，复杂网络的研究目前主要是在连接上和简单维度上进行，还没有看到将节点连接的网络架构、资源开销和应用需求结合起来构成三维立体体系结构并进行优化的研究。

基于上述分析可知，对移动通信复杂网络的研究要寻求能融合网络连接、资源开销和服务要求的三维立体网络模型和架构，要引入人工智能技术以获取更好的性能。

### 1.3 本文要点

基于现有对复杂网络的研究进展，特别是面向

未来 6G 的研究，本文提出了一种三三三网络体系架构，它从信息通信网络自身的网络框架出发，把大连接用户的复杂网络体系聚合成 3 类网络（核心网、接入网、终端网），研究 3 种资源（频率带宽、功耗、时间耗用（简称时延））与不同网络体系架构的关系，论证相关的数学计算式和效益表达，落实到传输 3 项业务需求（生活、工作、服务）的能力上。同时，引入知识+数据驱动学习模型，建立复杂网络的学习优化机制和优化计算式，分析实现在业务需求传输中的实时资源开销最小化，并给出数值实例。

## 2 三三三网络体系

面向 B5G/6G 的大连接复杂网络必须具有三大能力，即全场景服务能力、全知识学习能力、全透明优化能力，这是构建未来网络的基本目标。

全场景服务能力是指研究各种应用场景的覆盖、各种构成网络的管控、各种异构的切换和交互等。全知识学习能力是指利用各种直接、间接的知识，在大数据配合下通过不同角度不同面向的相关知识的利用来实现期望目标。全透明优化能力涉及学习的透明、接口的透明、运行的透明等，把知识学习的 AI 变成可解释的学习机制，解决面对的复杂问题。

为此，本文提出三三三网络体系架构，把 3 类网络、3 种资源、3 项需求综合成一体，统一构建智能优化的完整网络体系，使其成为一个适合未来大连接复杂网络的设计、制造、运营和管理的研究基础和实现标准。

### 2.1 三三三网络体系架构

三三三网络体系架构是未来庞大用户连接的复杂网络整体架构，包含 3 类网络（核心网、接入网、终端网），运用 3 种资源（频率带宽、功耗、时延），满足 3 项需求（生活、工作、服务），把这些统合起来构成可优化、可扩展的新型网络体系架构。

第一级的三三三网络结构如图 1 所示。其还可以进一步划分，即 3 类网络各自分解成不同的功能和组成。核心网可分为三大功能，分别为管理、连接、服务，其中服务的占比会越来越大，如云服务。接入网可分为三大接入，分别为区域、专用、行业。随着 B5G/6G 的出现和应用，行业接入网的占比会越来越大。终端网涉及三大应用对象，分别为人类、

机械、机器人（即活动机器）。未来，机器人的应用将越来越广泛，无人机就是一个成功范例。上述结构属于大连接复杂网络的第二级的三三三网络结构。

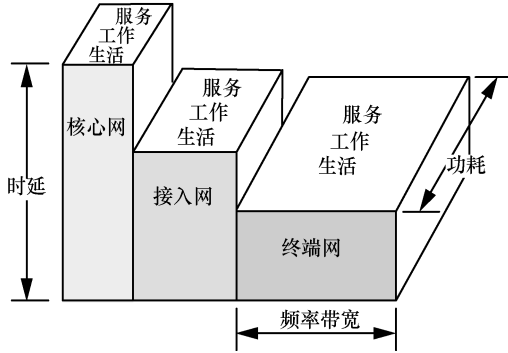


图 1 第一级的三三三网络结构

进一步地，还可以继续划分第三级、第四级等的三三三网络结构，直至把整个大连接复杂网络的各种场景、各种需求、各种应用和各种开销都涵盖在内。

三三三网络体系架构不仅可以进行上述的 3 类网络组成的逐级分解，更重要的是可以对大连接复杂网络组建运营的开销和能力进行研究，引入不同的智能方法，实现整个网络的多维度优化和标准化设计。因此，本文提出的面向 B5G/6G 的三三三网络体系架构既简约又复杂，是基础理论化、整体模块化、规范标准化的新型网络体系架构。

### 2.2 三三三网络体系架构的数学描述

对于图 1 所示的第一级三三三网络结构，需要给出相应的数学计算式来表达它的能力、开销和需求。在进行数学分析之前，先说明数学计算式中的基本变量和物理含义，具体如下。

对于用户  $m$ ，用户参数包括发生时刻  $t$ 、移动速度  $v$ 、所在位置  $l$ 。

接入用户数  $M$  可分为服务类接入用户数  $M_A$ 、生活类接入用户数  $M_L$ 、工作类接入用户数  $M_W$ 。

业务需求  $S_M$  可分为服务类业务需求  $S_A$ 、生活类业务需求  $S_L$ 、工作类业务需求  $S_W$ 。

网络业务  $S_{Net}$  可分为核心网业务  $S_C$ 、接入网业务  $S_E$ 、终端网业务  $S_T$ 。

网络体系的应用业务需求来自庞杂的用户终端。无论是按服务、生活、工作分类，还是按高速、短时、精准分类，都可以借鉴无线大数据和机器学习的聚类方法，把庞大的需求分解成更有相似特性

的不同群体，表示为

$$S_M = \sum_{m=1}^M s_m(t, v, l) = \sum_{m=1}^{M_A} s_{m,A}(t, v, l) + \sum_{m=1}^{M_L} s_{m,L}(t, v, l) + \sum_{m=1}^{M_W} s_{m,W}(t, v, l) \quad (1)$$

其中， $s_m(t, v, l)$  是第  $m$  个用户的传输需求（单位为 Mbit/s），是用户当前时间  $t$ 、移动速度  $v$ 、所在位置  $l$  的函数。当  $M \gg 1$  时，表示有大量用户接入，则传输需求  $S_M$  非常大。显然，式(1)是对整个网络按不同业务类型需求的第一级聚类。

整个网络的传输需求  $S_{Net} = S_M$ ，不同连接需求会被送到不同的核心网、接入网、终端网中去实现，而不是仅集中到某一类网络。因此，整个网络被视为聚合分群网络，可以把整个网络的传输总需求  $S_{Net}$  分解成三部分，表示为

$$S_{Net}(y) = S_T(y)^1 + S_E(y)^2 + S_C(y)^3 \quad (2)$$

其中， $y$  是形式变量，可以是用户所属知识变量。 $y$  的不同阶表示所在的不同类型网络，一阶指数变量对应终端网，二阶指数变量对应接入网，三阶指数变量对应核心网。这样， $S_T$ 、 $S_E$  和  $S_C$  分别表示各类网络的传输需求。

$$\begin{aligned} S_T &= \sum_{m=1}^M \int_0^{K_T} \rho_{m,k} s_{m,k} dk \\ S_E &= \sum_{m=1}^M \int_{K_T}^{K_E} \rho_{m,k} s_{m,k} dk \\ S_C &= \sum_{m=1}^M \int_{K_E}^{\infty} \rho_{m,k} s_{m,k} dk \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $K_C$ 、 $K_E$ 、 $K_T$  是不同网络分别聚合用户需求的特征变量，又称知识变量，如当前时间  $t$ 、移动速度  $v$ 、所在位置  $l$  等； $\rho_{m,k}$  是第  $m$  个用户在参数  $k$  需求下出现的概率。

在三三三网络体系架构中，核心网可分为信令管理子网、用户需求连接子网和支持服务云子网，因此，核心网完成的传输需求  $S_C$  可表示为

$$S_C = S_{C-1} + S_{C-2} + S_{C-3} \quad (4)$$

其中，下角标 C-1 表示信令管理，C-2 表示需求连接，C-3 表示云服务。

同理，接入网可分为区域子网、专用子网和行业子网，它们的传输需求流量分别用下角标 E-1、E-2 和 E-3 表示，则接入网完成的传输需求  $S_E$  表示为

$$S_E = S_{E-1} + S_{E-2} + S_{E-3} \quad (5)$$

终端网的传输需求可分为人类、机械、机器人的传输需求，分别用下角标 T-1、T-2 和 T-3 表示，则终端网的传输需求  $S_T$  表示为

$$S_T = S_{T-1} + S_{T-2} + S_{T-3} \quad (6)$$

综上所述，设  $i$  表示大连接复杂网络各类网络， $j$  表示各类网络的不同子网，大连接复杂网络能实现的总体传输需求  $S_{Net}$  可以表示为

$$S_{Net} = \sum_{i=C,E,T} \sum_{j=1}^3 S_{i,j} \quad (7)$$

其中，

$$S_{i,j} = \sum_{m=1}^M \int_{k \in K_{i,j}} \rho_{m,k} s_{m,k} dk \quad (8)$$

式(8)表示归属于第  $i$  类网络第  $j$  个子网的用户需求，积分区间  $K_{i,j}$  表示属于第  $i$  类网络的第  $j$  个子网的用户需求的集合区间，共有 9 个子区间。对极其复杂的未来网络的聚类，如果 9 个子区间不够，还可以继续往下进行聚类，分成 27 个子子区间，甚至更多。

因此，式(7)和式(8)是三三三网络体系架构的一组需求计算式，描述了庞杂大量用户的各种各样的传输需求。

### 2.3 三三三网络体系的优化式

网络体系的传输能力决定了其能否满足用户的业务需求。信息传输遵循香农<sup>[12]</sup>提出的香农理论和香农公式，即给定时间、带宽、功率下的无线传输能力为

$$C_{access} = \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{h=1}^H \log \left( 1 + \frac{P_{S,t,h}}{N_0} \right) \quad (9)$$

其中， $\tau$  对应单位时间的信号时隙帧数， $H$  是可用频带宽度， $P_{S,t,h}$  是不同时隙  $t$ 、不同频率  $h$ 、不同传输速率  $S$  所需的接收功率， $N_0$  是噪声。因此，式(9)是无线网络（包括所属子网）的传输能力和资源开销的评价函数，也可简化成有线网络的评价函数。

整个网络能实现的通信传输能力  $C_{Net}$  能满足整个网络庞大的用户传输需求  $S_{Net}$ 。将其频带、功率、时间的消耗分别表示为  $x_h$ 、 $x_p$ 、 $x_\tau$ ，则整个网络可实现的传输容量可表示为

$$C_{Net} = \sum_{q=H,P,T} \rho_q f_q(x_h, x_p, x_\tau) \Rightarrow S_{Net} \quad (10)$$

其中， $\rho_q$  是子函数  $f_q$  在函数  $f$  中的比例因子。

无论无线还是有线，无论在何种网络架构下，

信息通信除了直接面对用户传输需求流量  $C_{Net}^{flow}$  外，还要添加管理信息和协议流程，即附属流量  $C_{Net}^{sub}$ ，以保证用户传输需求的传送和到达在复杂网络外部环境中准确实现。因此，整个网络在传输用户需求流量  $S_{Net}$  的同时，还要传输相应的管理和协议的附属流量，即

$$C_{Net} = C_{Net}^{flow} + C_{Net}^{sub} = (1 + \omega_{Net}) S_{Net} \quad (11)$$

其中， $\omega_{Net}$  表示附加流量与传输需求流量的比例。

根据式(10)可以把大连接复杂网络的第  $i$  类第  $j$  子网的传输能力表示为

$$C_{i,j} = \sum_{q=H,P,T} \rho_{(i,j)q} f_{(i,j)q}(x_h, x_p, x_\tau) = (1 + \omega_{i,j}) S_{i,j} \quad (12)$$

考虑频率带宽资源带来的网络传输能力，式(12)中的  $q=H$ ，则有

$$C_{(i,j)H} = \rho_{(i,j)H} f_{(i,j)H}(x_h) + \Delta f_{(i,j)H}(x_p, x_\tau; x_h) \quad (13)$$

进一步地，功率资源开销、时间资源开销与网络传输能力的关系可以分别表示为

$$C_{(i,j)P} = \rho_{(i,j)P} f_{(i,j)P}(x_p) + \Delta f_{(i,j)P}(x_h, x_\tau; x_p) \quad (14)$$

$$C_{(i,j)T} = \rho_{(i,j)T} f_{(i,j)T}(x_\tau) + \Delta f_{(i,j)T}(x_p, x_h; x_\tau) \quad (15)$$

当且仅当  $\Delta f_{(i,j)H} \rightarrow 0$ ， $\Delta f_{(i,j)P} \rightarrow 0$ ， $\Delta f_{(i,j)T} \rightarrow 0$  时，式(12)可以写为

$$C_{i,j} = \sum_{q=H,P,T} \rho_{(i,j)q} f_{(i,j)q}(x_q) = (1 + \omega_{i,j}) S_{i,j} \quad (16)$$

那么，面对大连接复杂网络的传输能力最大化和资源开销最小化的问题就可以写成 2 个不同的优化式，即

$$\max_{\text{given } H,P,T} C_{Net} = \sum_{i=C,E,T} \sum_{j=1,2,3} \sum_{q=H,P,T} \rho_{(i,j)q} f_{(i,j)q}(x_q) \quad (17)$$

$$\min_{\text{given } S_{Net}} x_H, x_P, x_T \Rightarrow \sum_{i=C,E,T} \sum_{j=1,2,3} \sum_{q=H,P,T} \rho_{(i,j)q} f_{(i,j)q}(x_q) = C_{Net} \quad (18)$$

其中，given 表示给定参数。式(17)和式(18)是三三三网络体系的一组优化式，其建立在各类网络的各个子网的优化基础上，随庞杂大量用户的业务需求  $S_{Net}$  的构成不同，即式(1)的内涵不同而不同。

### 3 知识学习机制

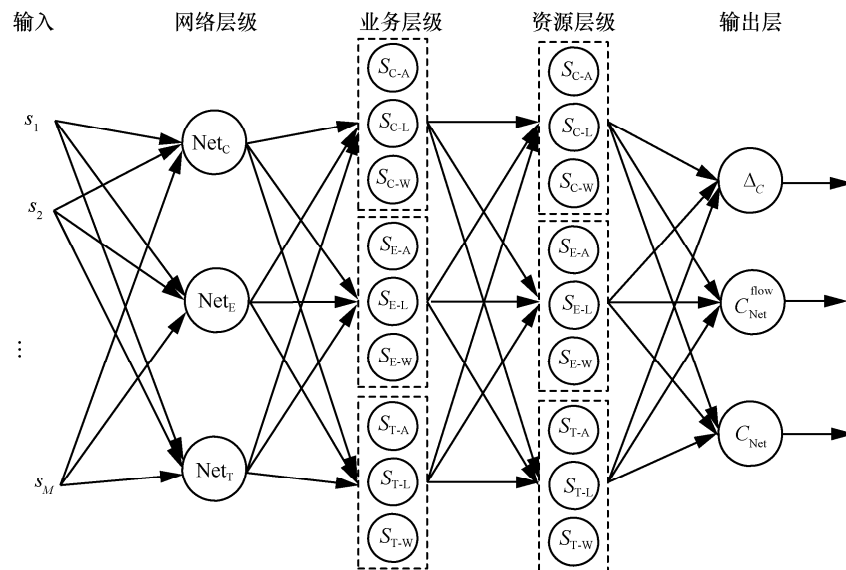
知识学习是在传统机器学习、深度学习、强化学习及它们结合的学习过程中，引入相关用户特征

和网络参数的知识变量，引导数据驱动学习，甚至直接由知识驱动学习的模型和过程。

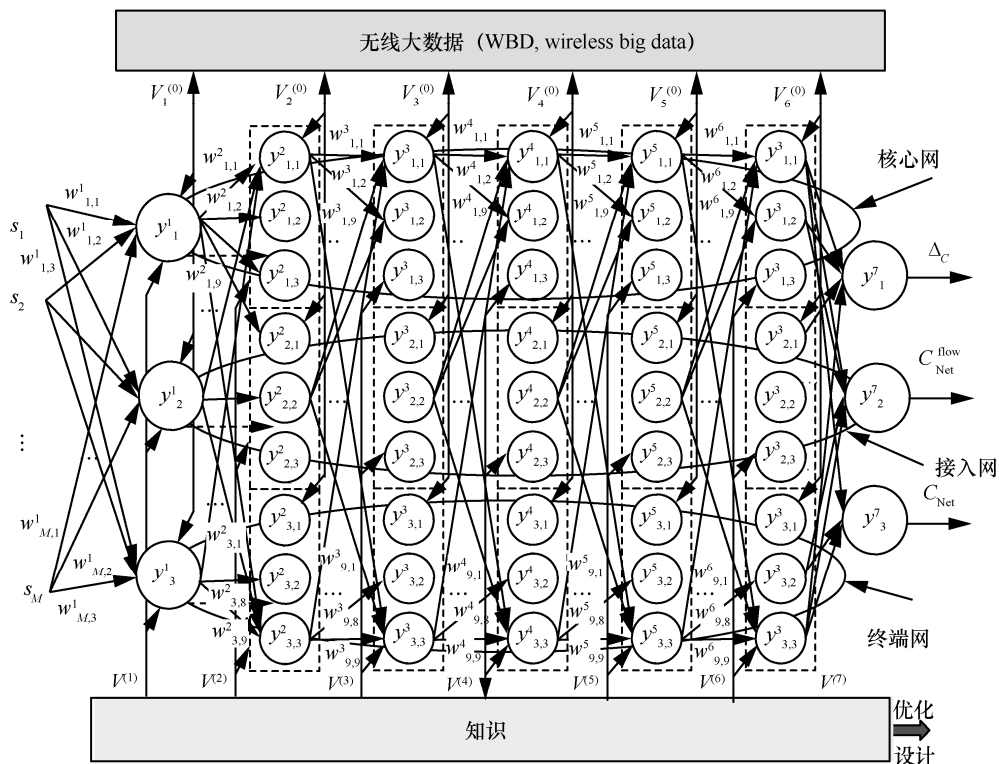
为此，本文提出一种把知识驱动与数据驱动有机结合，融合无线知识的有效性和数据动态实时性，开放、透明、可解释的学习优化机制，实现复杂网络体系架构智能化。这种学习优化机制主要包括知识+数据驱动学习模型和知识学习的优化。

### 3.1 知识+数据驱动学习模型

知识+数据驱动学习模型<sup>[11]</sup>是数据驱动的机器学习 and 知识驱动的逐层优化相结合，数据驱动和知识驱动同时推进、彼此交互完成的一种学习模型。为实现三三三网络参数和资源的智能配置，本文提出了适合优化复杂网络体系架构的知识+数据驱动学习模型，如图 2 所示。其中，图 2(a)是知识+数据驱



(a) 知识+数据驱动学习模型的基本框架



(b) 知识+数据驱动学习模型的分层设计

图 2 知识+数据驱动学习模型

动学习模型的基本框架，它的网络层级、业务层级和资源层级分别对应复杂网络的三层网络、各网络对应的三项业务和三类资源。图 2(b)是知识+数据驱动学习模型的分层设计。所提学习模型共分为七层，第一层是网络层级，第二层~第四层是业务层级，第五层和第六层是资源层级，第七层是输出层。

数据驱动的逐层优化类似标准深度学习，在输入用户业务需求之后，层间通过学习加权函数连接，不同层的节点由不同层运算，最后把输出层得到的差异率作为反向传播判决变量进行反馈。

知识驱动的逐层优化是指伴随数据驱动的不同层有不同的知识变量，依据知识变量来规范加权函数。知识变量的取值在数据驱动学习过程中获得。当随机变化不可准确预测时，可根据行之有效的公式和运算惯例来确定。

因此，利用知识+数据驱动学习模型，可以实现三三三网络体系的学习优化过程。学习模型中的七层变量和物理含义如下。

知识变量  $V$ :  $V^{(n)}, n \in \{1, \dots, 7\}$

加权函数  $W$ :  $W^{(n)}, n \in \{1, \dots, 7\}$

输入矢量  $X$ :  $X^{(n)}, n \in \{1, \dots, 7\}$

输出矢量  $Y$ :  $Y^{(n)}, n \in \{1, \dots, 7\}$

### 1) 网络层级

第一层是网络层级，把大量用户传输业务按照需求传送距离区间分配给本层 3 个节点（核心网、接入网、终端网）中的一个，聚类处理如下。

知识变量  $V^{(1)}=D$  为需求传送距离区间，表示为

$$D_i : (d_{i,\min}, d_{i,\max}), \quad i = 1, 2, 3 \quad (19)$$

则第  $m$  个用户的需求  $s_m$  可表示为传送距离  $d$  的函数  $s_m(d_m)$ 。

加权函数  $W^{(1)}=[w_{m,i}^{(1)}]$  为传送距离归属概率，表示为

$$W_i^{(1)} = [w_{m,i}^{(1)}], \quad w_{m,i}^{(1)} = \rho_{i,m} |_{s_m(d \in D_i)} \quad (20)$$

其中,  $m = 1, 2, \dots, M$ 。因此, 第一层节点的输入  $x_{i,m}^{(1)}$  和输出  $y_{i,m}^{(1)}$  分别为

$$x_{i,m}^{(1)} = w_{m,i}^{(1)} s_m, \quad y_i^{(1)} = \sum_{m=1}^M \rho_{i,m}^{(1)} s_m \quad (21)$$

调整区间  $D_i$  的大小, 其概率值不同, 则  $y_i^{(1)}$  也不同。因此,  $\rho_{i,m}$  可以通过反向传播的反馈调整来改变, 直至第一层的知识变量  $D$  调整为实现网络传输能力与传输需求的误差最小, 即达到最优输出,

表示为

$$D_i^{\text{opt}} : (d_{i,\min}^{\text{opt}}, d_{i,\max}^{\text{opt}}), \quad i = 1, 2, 3 \quad (22)$$

### 2) 业务层级

第二层~第四层是业务层级, 把第一层聚类到不同网络的用户业务需求再各自分成不同的三项业务聚类, 由第一层的 3 个节点, 变成 9 个节点, 分别用下角标  $i=1,2,3$  和  $j=1,2,3$  表示。

第二层~第四层的知识变量分别为移动速度区间、传输效率和由小区及其波束数量决定的覆盖密度, 即  $V^{(2)}=v_i$ 、 $V^{(3)}=\beta_{ij}$ 、 $V^{(4)}=n_{ij}$  和  $\gamma_{ij}$ , 分别表示为

$$v_i : (v_{i,j,\min}, v_{i,j,\max}), i, j = 1, 2, 3 \quad (23)$$

$$\bar{\beta}_{1,j} : (\beta_{\text{wire}}), \quad \bar{\beta}_{(i=2,3),j} : (\beta_{i,j,\text{wireless}}) \quad (24)$$

$$n_i : (n_{i,1}, n_{i,2}, n_{i,3}), \quad \gamma_i : (\gamma_{i,1}, \gamma_{i,2}, \gamma_{i,3}) \quad (25)$$

其中, 下角标  $i$  为第一层节点标号,  $j$  是给定  $i$  下的业务分项标号。

加权函数  $W_j^{(2)} \sim W_j^{(4)}$  为上一个节点的传送业务需求转移到下一个节点的概率, 分别表示为

$$W_j^{(2)} = [w_{i,j}^{(2)}], \quad w_{i,j}^{(2)} = ((1 + \omega_{i,j}) \rho_{j,i}^{(2)}) \quad (26)$$

$$W_j^{(3)} = [w_{i,j}^{(3)}], \quad w_{i,j}^{(3)}: 0 \text{ or } 1 \quad (27)$$

$$W_j^{(4)} = [\rho_{j,i}^{(4)}], \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (28)$$

其中,  $\omega_{i,j}$  为网络传输附加信令流量的比例,  $\rho_{ij}$  为上一层节点  $i$  转移到本层节点  $j$  的概率。则第二层~第四层的输入和输出分别为

$$x_{j,i}^{(2)} = w_{j,i}^{(2)} y_i^{(1)}, \quad y_{i,j}^{(2)} = \left( \sum_{i=1}^3 \rho_{j,i}^{(2)} y_i^{(1)}, \sum_{i=1}^3 \omega_{i,j} \rho_{j,i}^{(2)} y_i^{(1)} \right) \quad (29)$$

$$x_{j,i}^{(3)} = w_{i,j}^{(3)} y_{i,j}^{(2)}, \quad y_{i,j}^{(3)} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 w_{i,j}^{(3)} \frac{y_{i,j}^{(2)}}{\beta_{i,j}} \quad (30)$$

$$x_{j,i}^{(4)} = w_{i,j}^{(4)} y_{i,j}^{(3)}, \quad y_{i,j}^{(4)} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 w_{i,j}^{(4)} \frac{y_{i,j}^{(3)}}{n_{i,j} \gamma_{i,j}} \quad (31)$$

各层的知识变量  $V$  也在学习, 其优化输出为

$$v_i^{\text{opt}} : (v_{i,\min}^{\text{opt}}, v_{i,\max}^{\text{opt}}), \quad i = 1, 2, 3 \quad (32)$$

$$\beta_{i,j}^{\text{opt}} : (\beta_{1,j,\text{wire}}^{\text{opt}}, \beta_{(i=2,3),j,\text{wireless}}^{\text{opt}}) \quad (33)$$

$$(n_{i,1}, n_{i,2}, n_{i,3})_{\min}, \quad (\gamma_{i,1}, \gamma_{i,2}, \gamma_{i,3})_{\min} \quad (34)$$

通常选取核心网的一个网点的覆盖范围为  $n_1=1$ ,  $\gamma_1=1$ , 则覆盖密度正好为 1。同时, 各层会输

出相应的覆盖变量优化值。对于接入网和终端网，各相应子网覆盖小区的最小半径<sup>[13]</sup>为

$$R_{(i,j)\min} = t_{ho,i} \sqrt{\frac{M_{cell,i}}{\zeta_i}} (V_{i,j,\max}^{\text{opt}}), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (35)$$

其中， $t_{ho,i}$ 、 $\zeta_i$ 、 $M_{cell,i}$  是支持移动小区切换参数。无线覆盖小区 ( $i=2,3$ ) 的平均频谱效率与信号功率关系<sup>[14]</sup>为

$$\bar{\beta}_{i,j} = \text{lbe} \int_0^R \frac{2R_m}{(R_{i,j})^2} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R_m^{-\alpha}}{\sum_{N_k} R_{m_k}^{-\alpha} + \text{SNR}_j^{-1}} d\varphi \right] dR_m \quad (36)$$

求解式(36)可得相应无线传输所消耗的功率开销为

$$P_{i,j}(\bar{\beta}_{i,j}) \geq f_{R_{i,j}}^{-1}(\bar{\beta}_{i,j}) P_{N_0} \quad (37)$$

其中， $P_{N_0}$  是噪声干扰功率。

### 3) 资源层级

第五层和第六层是资源层级，相对简单，其决定各个子网需要的频宽  $B_{i,j}$  (或功耗  $P_{i,j}$ ) 和时延  $\tau_{i,j}$ 。

知识变量  $V^{(5)}=B_{i,j}$  和  $V^{(6)}=\tau_{i,j}^{(0)}$  分别为网络中各子网频带开销和可容忍的时延量。

加权函数  $W^{(5)}$ :  $[w_{i,j}^{(5)}] = [\rho_{j,i}^{(5)}]$  和  $W^{(6)}$ :  $[w_{i,j}^{(6)}] = [\rho_{j,i}^{(6)}]$  分别表示第五层和第六层频带调整需求比例，其中  $i, j=1,2,3$ 。

第五层和第六层的输入和输出分别为

$$x_{j,i}^{(5)} = w_{i,j}^{(5)} y_{i,j}^{(4)}, \quad y_{i,j}^{(5)} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 w_{i,j}^{(5)} \frac{y_{i,j}^{(4)}}{B_{i,j}} \quad (38)$$

$$x_{j,i}^{(6)} = w_{i,j}^{(6)} y_{i,j}^{(5)}, \quad y_{i,j}^{(6)} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 x_{i,j}^{(6)} \quad (39)$$

第五层的无线传输频带开销  $B$  的学习优化输出为

$$B_{i\min} = \sum_{j=1}^3 B_{i,j\min}, \quad i = 2, 3 \quad (40)$$

给定频带资源下的功率开销优化输出为

$$P_{i\min} = \sum_{j=1}^3 P_{i,j}(\bar{\beta}_{i,j}) B_{i\min}, \quad i = 2, 3 \quad (41)$$

第六层传输时延  $\tau_{i,j}$  也在学习，其优化输出为

$$(\tau_{i,j} - \tau_{i,j}^{(0)}) \leq 0 \quad (42)$$

### 4) 输出层

第七层是输出层，从前一层的 9 个节点聚合为

3 个节点，第一个节点是整个网络实现的端到端传输能力  $C_{\text{Net}}^{\text{flow}}$ ，第二个节点是  $C_{\text{Net}}^{\text{flow}}$  与用户传输需求  $S_{\text{Net}}$  的误差  $\Delta_{\text{Net}}$ ，第三个节点是整个网络实现的整体传输能力  $C_{\text{Net}}^{\text{flow}} + C_{\text{Net}}^{\text{sub}}$ 。

知识变量  $C_{i,j}^{\text{flow}}$  为各个子网实现的需求流量。加权函数  $W^{(7)}$ : 1 or 0，本层只做比较，不做调整。

第七层节点的输入  $x_{j,i}^{(7)}$  和输出  $y_{i,j}^{(7)}$  分别为

$$x_{j,i}^{(7)} = \rho_{i,j}^{(7)} y_{i,j}^{(6)}, \quad y_{i,j}^{(7)-1} = \left( \frac{1}{x_{i,j}^{(7)} |_{\neq 0}} - 1 \right) = \Delta_{i,j}$$

$$\Delta_C = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \Delta_{i,j}$$

$$y^{(7)-2} = \sum_{i=C,E,T} \sum_{j=1}^3 x_{j,i}^{(7)} S_{i,j} = C_{i,j}^{\text{flow}}$$

$$y_{i,j}^{(7)-3} = \sum_{i=C,E,T} \sum_{j=1}^3 y_{j,i}^{(6)} S_{i,j} = C_{\text{Net}} \quad (43)$$

第七层的输出目标为  $\Delta_C \rightarrow 0$ 。

完成整个七层学习过程后，接下来的学习过程是反馈传播调整知识变量，按式(44)的顺序逐次调整知识变量的取值，直至  $\Delta_C \approx 0$ 。

$$\frac{\partial(\Delta_C)}{\partial V^6}, \frac{\partial(\Delta_C)}{\partial x^6} \rightarrow \dots \rightarrow \frac{\partial(\Delta_C)}{\partial V^1}, \frac{\partial(\Delta_C)}{\partial x^1} \quad (44)$$

综上所述，所提知识+数据驱动学习模型是适合三三三网络体系架构的可扩展的学习模型。模型的第一层有 3 个节点，分别对应核心网、接入网和终端网，按业务需求的传播距离 (知识变量  $D$ ) 被聚类进一个节点。如果还有因素影响这个聚类，可以再增加一层仍为 3 个节点，将该影响因素作为知识变量，调整前一层的聚类。

## 3.2 知识学习的优化

基于上述知识+数据驱动学习模型的逐层学习和反向传播优化，能够获得大数据预测的初始化、知识变量调整的最优化，以实现如式(17)和式(18)所示的大连接复杂网络的优化目标，并能够针对不同应用场景获得不同期待的优化结果。

### 1) 大数据预测的初始化

本文所提知识+数据驱动学习模型中，上层有无线大数据支持，下层有知识变量为基础，是与常规的深度网络学习模型不同的。通过历史大数据支持知识+数据驱动学习模型的学习，能给出较准确的各层知识变量的选择区间或选择值事前预测<sup>[15-16]</sup>。在实施运行中，通过几次简单的反向传播迭代后，即



就减少了相互干扰。场景 2 中，用户需求分为连接终端网部分和连接接入网部分，终端网不需处理和汇聚要直接进入接入网的流量，可减少自身的资源开销，但是连接接入网的大量用户需求直接接入，大大增加了彼此之间的干扰和排序，会额外增大消除干扰的压力。

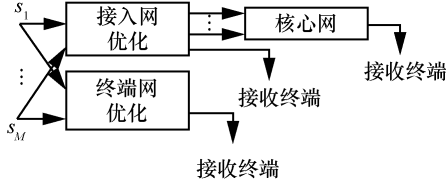


图4 场景2优化流程

因此，考虑连接终端网是近距离接入，增加的资源开销少，权衡增加终端网压力，还是带来接入网压力，要视具体应用场景而定。下面对这2种场景分别进行分析讨论。

## 4 网络性能分析

### 4.1 复杂网络的优化性能

本文提出的三三三网络体系架构中，庞杂用户的极大需求  $S_{Net}$  按用户需求的连接距离区间  $D_i$  ( $d_{i,min}, d_{i,max}$ ) 进行聚类分群。设聚类分群的核心网、接入网和终端网的需求流量比为  $\eta_C : \eta_E : \eta_T$ ，且  $\eta_C + \eta_E + \eta_T = 1$ 。则整个网络的业务需求  $S_{Net}$  可表示为

$$S_{Net} = \sum_{m=1}^M \int_{K_E}^{\infty} \rho_{m,k} S_{m,k} dk + \sum_{m=1}^M \int_{K_T}^{K_E} \rho_{m,k} S_{m,k} dk + \sum_{m=1}^M \int_0^{K_T} \rho_{m,k} S_{m,k} dk = \eta_C S_{Net} + \eta_E S_{Net} + \eta_T S_{Net} = S_C + S_E + S_T \quad (52)$$

本节讨论大连接复杂网络的传输能力  $C_{Net}$ ，其包含以下两部分：1) 用户需求的流量  $C_{Net}^{flow}$ ；2) 为传输需求附加的管理和信令流量，称为附加流量， $C_{Net}^{sub} = \omega C_{Net}^{flow}$ ， $\omega < 1$ 。

#### 1) 场景1的优化效率

场景1(用上标 I 表示)中，终端网承接的传输需求包括要传送给接入网和核心网的用户需求流量  $C_E^{flow} + C_C^{flow}$ 、传送给接入网和核心网的协议流量  $C_T^{sub} = \omega C_T^{flow}$ ，以及在终端网内传送的需求流量  $C_T^{flow}$ 。在满足传送  $S_{Net}$  的用户需求流量的情况下，终端网的实际流量将会增加，即

$$C_T^I = C_{Net}^{flow} + C_{Net}^{sub} = \sum_{i=C,E,T} (1 + \omega_i) C_i^{flow} \quad (53)$$

同理，有

$$C_E^I = C_E^{flow} + C_C^{flow} + \sum_{i=T,E,C} \omega_i C_i^{flow} \quad (54)$$

$$C_C^I = C_C^{flow} + \sum_{i=T,E,C} \omega_i C_i^{flow} \quad (55)$$

各网络的传输能力为  $C_i^{flow} = S_i = \eta_i S_{Net}$ ，整个网络的能力为  $C_{Net}^{flow} = S_{Net}$ ，则三类网络传输需求和附加流量的总和为

$$C_{Net}^I = C_T^I + C_E^I + C_C^I = 3 \sum_{i=C,E,T} (1 + \omega_i) C_i^{flow} - 2C_T^{flow} - C_E^{flow} = \sum_{i=C,E,T} (1 + \omega_i) S_{Net} - (2 + (\omega_E + \omega_C)) S_T - (1 + \omega_C) S_E \quad (56)$$

不进行分类网络传输，而是以终端网、接入网到核心网的顺序统一传送到核心网进行交换处理的传输总流量为

$$C_{Net-0} = 3 \sum_{i=C,E,T} (1 + \omega_i) C_i^{flow} = \sum_{i=C,E,T} (1 + \omega_i) S_{Net} \quad (57)$$

因此，三三三网络体系架构中，按传输连接距离大小的分层优化获得的分层传输总流量的分层优化效率为

$$\mu_{Net}^I = 1 - \frac{C_{Net}^I}{C_{Net-0}} = \frac{2C_T^{flow} + C_E^{flow}}{\sum_{i=C,E,T} (1 + \omega_i) C_i^{flow}} = \frac{(2 + (\omega_E + \omega_C)) \eta_T + (1 + \omega_C) \eta_E}{\sum_{i=C,E,T} (1 + \omega_i)} \quad (58)$$

不同  $(\omega_C : \omega_E : \omega_T)$  下的分层网络优化传输效率随  $(\eta_C : \eta_E : \eta_T)$  的变化情况如图5所示。其中，第1帧~第6帧  $(\eta_C : \eta_E : \eta_T)$  分别为(1:0:0)、(0.8:0.06:0.14)、(0.66:0.12:0.22)、(0.53:0.18:0.29)、(0.43:0.21:0.36)、(0.33:0.26:0.41)。整体网络的传输需求的流量中，接入网和终端网络所占的比例越高，传输效率越高。从图5中的小框图可以看出，网络运行不同附加的流量开销，传输效率略有不同，但彼此相差极小，对传输效率的影响可以忽略。

不同  $(\eta_C : \eta_E : \eta_T)$  下的分层网络传输效率如图6所示。其中，曲线1的第1帧~第6帧  $(\eta_C : \eta_E : \eta_T)$  分别为(1:0:0)、(0.8:0.06:0.14)、(0.66:0.12:0.40)、

(0.53:0.14:0.32)、(0.43:0.16:0.41)、(0.33:0.18:0.49), 曲线2的第1帧~第6帧( $\eta_C:\eta_E:\eta_T$ )分别为(1:0:0)、(0.8:0.06:0.14)、(0.66:0.12:0.22)、(0.53:0.18:0.29)、(0.43:0.21:0.36)、(0.33:0.26:0.41), 曲线3的第1帧~第6帧( $\eta_C:\eta_E:\eta_T$ )分别为(1:0:0)、(0.8:0.14:0.06)、(0.66:0.22:0.12)、(0.53:0.29:0.18)、(0.43:0.36:0.21)、(0.33:0.41:0.26)。当终端网络的传输需求流量高达70%时, 传输效率提高56.7%。显然, 当终端网络的传输需求流量越高, 采用三三三网络体系的传输效率越高。

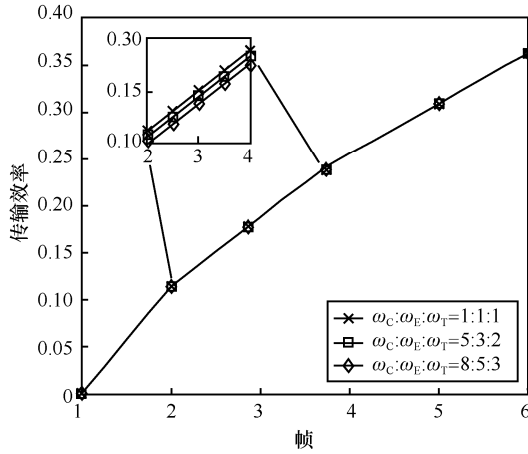


图5 场景1中不同( $\eta_C:\eta_E:\eta_T$ )的分层网络优化效率

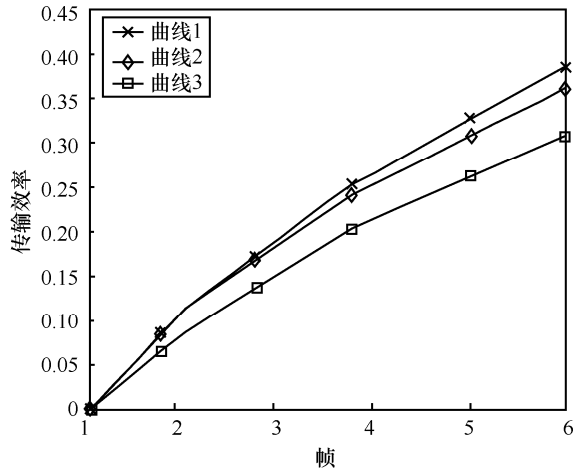


图6 场景1中不同( $\eta_C:\eta_E:\eta_T$ )的分层网络传输效率

## 2) 场景2的优化效率

场景2(用上角标II表示)中, 终端网只承接终端网的传输需求和在终端网内传送的需求流量, 不包括要传送给接入网和核心网的用户需求流量和附加流量。那么, 在满足传送  $S_{Net}$  的用户需求流量的情况下, 终端网的实际流量为

$$C_T^{II} = C_T^{flow} + C_T^{sub} = \sum_{j=1}^3 (1 + \omega_{T,j}) S_{T,j} = (1 + \omega_T) S_T \quad (59)$$

同理, 有

$$C_E^{II} = \sum_{i=E,C} \sum_{j=1}^3 (1 + \omega_{i,j}) S_{i,j} + \sum_{j=1}^3 \omega_{T,j} S_{T,j} = \sum_{i=E,C} (1 + \omega_i) S_i + \omega_T S_T \quad (60)$$

$$C_C^{II} = S_C + \sum_{i=T,E,C} \sum_{j=1}^3 \omega_{i,j} S_{i,j} = S_C + \sum_{i=T,E,C} \omega_i S_i \quad (61)$$

三类网络传输需求和附加流量的总和为

$$C_{Net}^{II} = C_T + C_E + C_C = (1 + \omega_T) S_T + \sum_{i=E,C} (1 + \omega_i) S_i + \omega_T S_T + S_C + \sum_{i=T,E,C} \omega_i S_i = (1 + \omega_T) S_T + (1 + \omega_E) S_E + 2(1 + \omega_C) S_C + 2\omega_T S_T + \omega_E S_E \quad (62)$$

因此, 三三三网络体系架构中, 按传输连接距离区间的分层优化获得的分层传输的总流量的分层优化效率为

$$\mu_{Net} = 1 - \frac{C_{Net}}{C_{Net-0}} = 1 - \frac{(1 + \omega_T) S_T + (1 + \omega_E) S_E + 2(1 + \omega_C) S_C + 2\omega_T S_T + \omega_E S_E}{(1 + \omega_T) S_{Net} + (1 + \omega_E) S_{Net} + (1 + \omega_C) S_{Net}} = \frac{2 + (\omega_T + \omega_E + \omega_C) - (\omega_T \eta_T + \omega_E \eta_E + \omega_C \eta_C) - (\eta_C + 2\omega_T \eta_T + \omega_E \eta_E)}{3 + (\omega_T + \omega_E + \omega_C)} \quad (63)$$

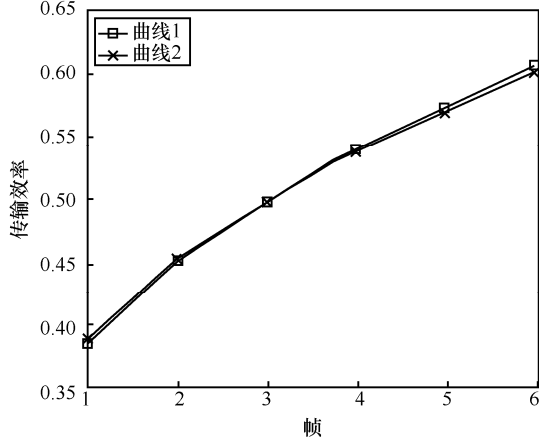
图7给出了场景2中, 不同( $\eta_C:\eta_E:\eta_T$ )的分层网络传输效率。其中, 曲线1的第1帧~第6帧( $\eta_C:\eta_E:\eta_T$ )分别为(1:0:0)、(0.8:0.14:0.06)、(0.66:0.22:0.12)、(0.53:0.29:0.18)、(0.43:0.36:0.21)、(0.33:0.41:0.26), 曲线2的第1帧~第6帧( $\eta_C:\eta_E:\eta_T$ )分别为(1:0:0)、(0.8:0.06:0.14)、(0.66:0.10:0.24)、(0.53:0.14:0.33)、(0.43:0.16:0.41)、(0.33:0.18:0.49)。对比图6与图7可以看出, 相比场景1, 场景2的分层效率较高, 对( $\eta_C:\eta_E:\eta_T$ )变化的敏感程度较低。

## 4.2 复杂网络的资源开销

### 1) 最小资源开销

首先, 考虑终端网络要实现的传输能力(如式(53)所示), 可以改写为

$$C_T = \sum_{i=C,E,T} (1 + \omega_i) C_i^{flow} = \sum_{i=C,E,T} \sum_{j=1}^3 (1 + \omega_{i,j}) S_{i,j} \quad (64)$$

图7 场景2不同 $(\eta_C : \eta_E : \eta_T)$ 的分层网络传输效率

根据第3节的知识学习机制的优化,由式(64)可得

$$B_{3,j \min} = \frac{1 + \omega_{3,j}}{\beta_{3,j} n_{3,j} \gamma_{3,j}} S_{3,j} \quad (65)$$

$$B_{3,\min} = \sum_{j=1}^3 \frac{1 + \omega_{3,j}}{\beta_{3,j} n_{3,j} \gamma_{3,j}} S_{3,j} \quad (66)$$

基于单位频率的功率开销和网络参数的关系为 $P = n_j f_P^{-1}(\beta)$ ,则实现传送 $S_{\text{Net}}$ 的流量,终端网络要消耗的功率开销为

$$P_{3,\min} = \sum_{j=1}^3 n_{3,j} \gamma_{3,j} f_P^{-1}(\bar{\beta}_{3,j}) \quad (67)$$

对于接入网络,要使其的传输能力如式(58)所示,可以将其改写为

$$C_E = \sum_{i=C,E} \sum_{j=1}^3 S_{i,j} + \sum_{i=T,E,C} \sum_{j=1}^3 \omega_{i,j} S_{i,j} \quad (68)$$

根据第3节的知识学习机制的优化,资源开销的网络参数如式(49)所示,则由式(68)可得

$$B_{2,\min} = \sum_{j=1}^3 \frac{(1 + \omega_{2,j}) S_{2,j}}{\beta_{2,j} n_{2,j} \gamma_{2,j}} + \omega_3 S_3 \quad (69)$$

基于单位频率的功率开销和网络参数的关系如式(67)所示,则实现传送 $S_{\text{Net}}$ 的流量,接入网要消耗的功率开销为

$$P_{2,\min} = \sum_{j=1}^3 n_{2,j} \gamma_{2,j} f_P^{-1}(\bar{\beta}_{2,j}) \quad (70)$$

核心网络采用高速光纤传输链路,相比无线传输,其传输能力是最快速、最节能的。因此,核心网不需要无线频段,其能源开销远小于无线传输,这里可以忽略。

因此,三三三网络体系架构中整个网络的频带的开销和整个网络的功率开销分别为

$$B_{\text{Net},\min} = \sum_{i=2,3} \sum_{j=1}^3 \frac{(1 + \omega_{i,j}) S_{i,j} + \omega_3 S_3}{\beta_{i,j} n_{i,j} \gamma_{i,j}} \quad (71)$$

$$P_{\text{Net},\min} = P_{2,\min} + P_{3,\min} = \sum_{i=E,T} \sum_{j=1}^3 n_{i,j} \gamma_{i,j} f_P^{-1}(\bar{\beta}_{i,j}) \quad (72)$$

## 2) 优化频带开销

本节举例说明上述的分析和讨论。考虑一个半径为1 km、面积为3.14 km<sup>2</sup>的移动服务区域由比其大得多的核心网覆盖,接入网和终端网是完整覆盖。

终端网。智能终端为终端网核心,稀疏无缝覆盖,子网有3种形态:蓝牙、Wi-Fi、高速服务。蓝牙子网是最小覆盖,覆盖半径为1 m,不超过10万个,最大使用1 MHz带宽,全向天线, $\beta_1$ 为1 bit。Wi-Fi子网的覆盖半径为5 m,最大使用10 MHz带宽,全向天线, $\beta_{2,\max}$ 为2 bit,不超过2万个。高速服务子网的覆盖半径为10 m,使用200 MHz带宽,单一波束, $\beta_3$ 为2 bit,不超过1000个。根据式(66),这个终端网可能支持的最大传输流量为

$$C_{T,\max} = \sum_{j=1}^3 \frac{\bar{\beta}_{3,j} n_{3,j} \gamma_{3,j} B_{3,j}}{\theta_{3,j}} = 900 \text{ Gbit/s} \quad (73)$$

其中, $\theta$ 表示同频复用分区数。

接入网。一个宏基站为覆盖基准,覆盖半径为1 km,面积为3.14 km<sup>2</sup>,是接入网的第一子网,使用400 MHz带宽,12MIMO, $\beta_{1,\max}$ 为6 bit。第二子网为小基站,覆盖半径为0.25 km,共16个,使用500 MHz带宽,6MIMO, $\beta_{2,\max}$ 为4 bit。第三子网为Wi-Fi站,覆盖半径为0.02 km,共800个,稀疏无缝覆盖,使用20 MHz带宽,单一波束, $\beta_{3,\max}$ 为2 bit。根据式(68),这个接入网可能支持的最大传输流量为

$$C_{E,\max} = \sum_{j=1}^3 \frac{\bar{\beta}_{2,j} n_{2,j} \gamma_{2,j} B_{2,j}}{\theta_{2,j}} = 100.8 \text{ Gbit/s} \quad (74)$$

显然,接入网能传送的流量明显小于终端网的需求流量,即终端网的大量用户需求属于终端网内与终端网间传输。

## 3) 动态实时优化

面对庞杂用户的不断变更的实时需求,对整个网络的资源配置和开销需要实时优化,举例说明如下。

在覆盖面积3.14 km<sup>2</sup>内同时有不同大小的10万个用户通信请求接入,要在知识+数据驱动学习模型的第一层举行聚类分群,并确认相关的基本要求和所属子网。接入网的子网记为 $\text{Net}_{2,1}$ 、 $\text{Net}_{2,2}$ 、 $\text{Net}_{2,3}$ 。终端网的子网记为 $\text{Net}_{3,1}$ 、 $\text{Net}_{3,2}$ 、 $\text{Net}_{3,3}$ 。

表 1 例 1 的终端网和接入网的相关指标统计

网络	连接距离/m	用户数/个	速度区间/(km·s <sup>-1</sup> )	区间用户/个	流量/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	附加比例	总量/(Mbit·s <sup>-1</sup> )
全网	[0, 5 000)	100 000	—	—	450 000	1%	454 500
Net <sub>3,3</sub>	[0, 1)	60 000	[0, 1)	40 000	4 000	1%	4 040
Net <sub>3,2</sub>	[1, 5)	30 000	[1, 5)	30 000	150 000	1%	151 500
Net <sub>3,1</sub>	[5, 10)	20 000	[5, 10)	100 00	250 000	1%	252 500
Net <sub>2,3</sub>	[10, 20)	5 000	[10, 20)	5 000	11 500	1%	11 615
Net <sub>2,2</sub>	[20, 250)	10 000	[20, 250)	10 000	23 000	1%	23 230
Net <sub>2,1</sub>	[250, 5 000)	5 000	[250, 300)	5 000	11 500	1%	11 615

例 1 需求第 1 帧，大连接庞杂用户的各种传输总需求为 450 Gbit/s，按需求对象、用户数、频宽划分如下。语音/微信/视频为 20 000 个，频宽为 2.3 MHz，其中频宽的 40%属于 Net<sub>2,3</sub>，20%属于 Net<sub>1</sub>；感知终端用户为 40 000 个，频宽为 0.1 MHz，其中频宽的 80%属于 Net<sub>3</sub>，20%属于 Net<sub>2</sub>；垂直行业用户为 30 000 个，频宽为 5 MHz，其中频宽的 75%属于 Net<sub>3</sub>，20%属于 Net<sub>2</sub>，5%属于 Net<sub>1</sub>；娱乐服务用户为 10 000 个，频宽为 25 MHz，其中频宽的 90%属于 Net<sub>3</sub>，10%属于 Net<sub>1</sub>。这些输入需求，加上管理和协议附属流量 1%，终端网和接入网的相关指标统计如表 1 所示。

显然，例 1 的连接 10 万个用户的传输需求明显小于式(73)和式(74)给出的网络最大传输流量。因此，根据第 3 节的知识+数据驱动学习模型，当用户需求流量约为 450 Gbit/s (终端网)+46.6 Mbit/s (接入网)，小于整个网络的最大传输流量时，其频宽开销降低为 583.2 MHz，可以获得远小于最大频宽的结果，如表 2 所示。

表 2 通过学习机制获得的频率带宽开销

网络连接	<i>n</i>	$\gamma$	$\beta$	<i>B</i> /MHz	<i>C</i> /(Mbit·s <sup>-1</sup> )
Net <sub>3,3</sub>	100 000	1	1	1	100 000
Net <sub>3,2</sub>	20000	1	2	7.5	300 000
Net <sub>3,1</sub>	1000	1	2	25	50 000
Net <sub>2,3</sub>	800	1	2	11.5	18 400
Net <sub>2,2</sub>	16	6	4	147.2	1 8841.6
Net <sub>2,1</sub>	1	12	6	391	9384
合计	—	—	—	583.2	4 96626

例 2 需求第 2 帧，大连接庞杂用户的各种传输总需求为 549 Gbit/s，按需求对象、用户数、频宽划分如下。语音/微信/视频为 20 000 个，子网所属比例为 4:4:4、4:5:5、2:1:1；感知终端用户为 60 000 个，子网所属比例为 0.8:0.2:0；垂直行业用户为 30 000 个，子网所属比例为 0.75:0.2:0.05；娱乐服务用户为 20 000 个，子网所属比例为 0.9:0.0:0.1。整个网络实现流量为 555.8 Gbit/s，频谱开销为 547.6 MHz。

例 3 需求第 3 帧，大连接庞杂用户的各种传输总需求为 675 Gbit/s，按需求对象、用户数、频宽划分如下。语音/微信/视频为 20 000 个，子网所属比例为 4:4:4、4:5:4、2:1:2；感知终端用户为 60 000 个，子网所属比例为 0.8:0.2:0；垂直行业用户为 30 000 个，子网所属比例为 0.75:0.2:0.05；娱乐服务用户为 20 000 个，子网所属比例为 0.9:0.0:0.1。整个网络实现流量为 689.0 Gbit/s，频谱开销为 642.2 MHz。

例 4 需求第 4 帧，大连接庞杂用户的各种传输总需求为 720 Gbit/s，整个网络实现流量为 728.3 Gbit/s，频谱开销为 721.7 MHz。

例 5 需求第 5 帧，大连接庞杂用户的各种传输总需求为 810 Gbit/s，整个网络实现流量为 828.1 Gbit/s，频谱开销为 756.8 MHz。

复杂网络需求流量和网络能力如图 8 所示，流量/能力差异比例如图 9 所示。不同用户传输需求的最小频谱带宽开销如图 10 所示。为直观展示，对图 8 和图 10 的纵坐标进行了如下处理。图 8 纵坐标数值=(流量-400)/100，单位为 Gbit/s；图 10 纵坐标数值=(频率带宽-400)/100，单位为 MHz。

## 5 结束语

综上所述，面对未来 B5G/6G 通信的庞杂用户大连接、各种网络混杂覆盖的复杂网络，本文提出了一种三三三网络体系架构，融合 3 类网络（核心网、接入网、终端网）、3 种资源（频率带宽、功耗、时延）和 3 项需求（生活、工作、服务），成为统合的、可分析的、可扩展的未来网络的基本体系结构。进而引入知识+数据驱动学习模型，具体给出了逐层的知识设计和数据进程，为提出的三三三网络体系建立了学习优化机制，实现了智能化。本文还分析和推导了满足大连接用户需求的各个构成网络的传输能力和最小资源开销的数学关系和效率计算式。最后给出了数值实例的学习优化结果。

上述研究的结果表明，本文的贡献如下。

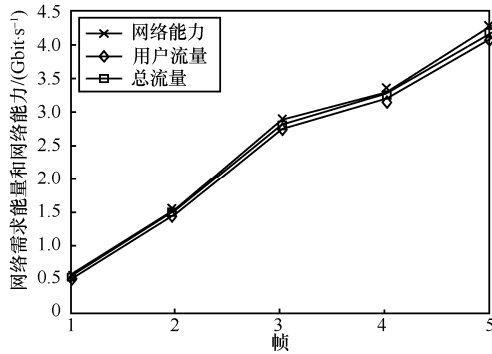


图 8 复杂网络需求流量和网络实现能力

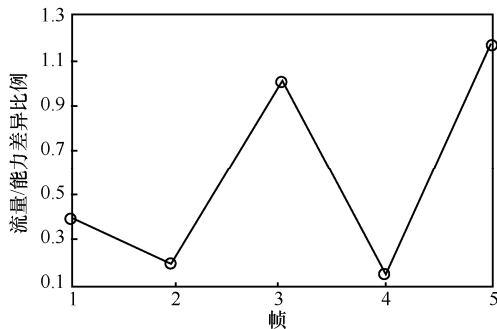


图 9 复杂网络流量/能力差异比例

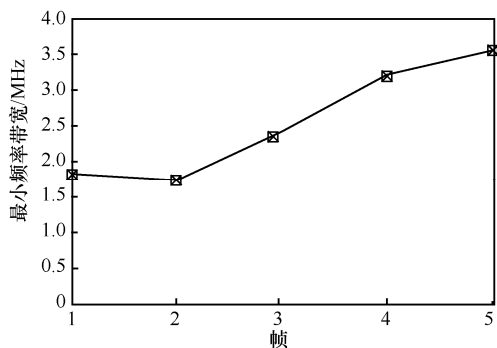


图 10 不同用户传输需求的最小频率带宽

1) 面对未来庞杂大量用户接入的极其复杂网络，提出三三三网络体系架构，建立了融合 3 类网络、3 种资源、3 项需求的一种新颖简约的三维立体网络体系。

2) 给出了知识+数据驱动学习的逐层处理步骤和整个网络的学习优化机制，实现了网络 AI 化。

3) 论证了在整个网络学习优化机制下的网络可达能力和资源开销的数学计算式和传输效率。

应该指出，本文对提出的三三三网络体系架构和学习机制的研究只是三维立体网络体系架构的第一步的基础性的分析研究。后续要进一步把这种网络体系与实际应用相结合，研究实际可达性能，验证理论分析的有效性。

参考文献：

[1] WANG X F, CHEN G R. Complex networks: small-world, scale-free and

beyond[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2003, 3(1): 6-20.  
 [2] ALBERT R, BARABÁSI A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47.  
 [3] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45(2): 167-256.  
 [4] WANDEL T S, SHI X, SUN X Q. Complex network metrics: can deep learning keep up with tailor-made reference algorithms?[J]. IEEE Access, 2020, 8: 68114-68123.  
 [5] LAMBIOTTE R, DELVENNE J C, BARAHONA M. Random walks, Markov processes and the multiscale modular organization of complex networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2014, 1(2): 76-90.  
 [6] GLISIC S, LORENZO B, KOVACEVIC I, et al. Modeling dynamics of complex wireless networks[C]//2013 International Conference on High Performance Computing & Simulation. Piscataway: IEEE Press, 2013: 694-704.  
 [7] LAMBIOTTE R. Multi-scale modularity in complex networks[C]//8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Piscataway: IEEE Press, 2010: 546-553.  
 [8] LU R Q, YU W W, LYU J, et al. Synchronization on complex networks of networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2014, 25(11): 2110-2118.  
 [9] ZHANG Q J, LU J N, LU J H, et al. Adaptive feedback synchronization of a general complex dynamical network with delayed nodes[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2008, 55(2): 183-187.  
 [10] SERGIU C, LESTAS M, ANTONIOU P, et al. Complex systems: a communication networks perspective towards 6G[J]. IEEE Access, 2020, 8: 89007-89030.  
 [11] ZHU J K, ZHAO M, ZHANG S H, et al. Exploring the road to 6G: ABC—foundation for intelligent mobile networks[J]. China Communications, 2020, 17(6): 51-67.  
 [12] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(4): 623-656.  
 [13] ZHU J K, LI X. Capacity-power consumption and energy-efficiency evaluation of green wireless networks[J]. China Communications, 2012, 9(2): 13-21.  
 [14] MAHMUD A, HAMDI K A. A unified framework for the analysis of fractional frequency reuse techniques[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3692-3705.  
 [15] ZHU J K, ZHAO M, ZHOU S L. An optimization design of ultra dense networks balancing mobility and densification[J]. IEEE Access, 2018, 6: 32339-32348.  
 [16] ZHU J K, GONG C, ZHANG S H, et al. Foundation study on wireless big data: concept, mining, learning and practices[J]. China Communications, 2018, 15(12):1-15.

[作者简介]



朱近康（1943—），男，四川内江人，中国科学技术大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线通信理论、技术和网络的研究、无线大数据和无线 AI、绿色无线、5G/6G 的创新技术。

柴名扬（1996—），男，河南开封人，中国科学技术大学硕士生，主要研究方向为无线大数据、无线 AI 和混合预编码。

周武旻（1972—），男，安徽合肥人，博士，中国科学技术大学教授、博士生导师，主要研究方向为移动通信与无线通信网、卫星移动通信等。