

6G 移动通信网络数据服务与数据面

严学强¹, 程冠杰², 邓水光², 吴建军¹, 陆璐³, 赵明宇¹, 习燕¹,
刘超³, 李唯源³, 丰雷⁴, 张童³

(1. 华为技术有限公司无线技术实验室, 上海 201206; 2. 浙江大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310027;
3. 中国移动通信研究院基础网络技术研究所, 北京 100053; 4. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 以5G为代表的现有通信网络作为通信会话类数据传输的“管道”, 是终端设备和网络之间建立信息交互的通路。不同于通信会话类数据的点到点传输, 6G网络中智能、感知, 以及网络运营自身产生和消费的数据需要以一种分布式的方法进行数据采集、预处理、存储和分析。为此, 提出了一种独立于传统用户面的数据面架构, 系统性地解决6G移动通信网络对非用户面数据的管控和价值变现的挑战。给出了6G网络数据和数据服务的分类和特征。并在对比分析5G用户面以及现有数据驱动的技术架构基础上, 提出了一种以数据编排器和数据代理为核心的独立的6G数据面框架, 详细阐述了数据面功能架构。此外, 设计了3种支持随路计算和支持任意拓扑数据管道的数据转发控制机制, 实现了动态可编程数据管道的构建与维护, 以及路由算法和数据转发的彻底分离。
关键词: 6G; 数据服务; 数据面; 数据编排; 数据转发控制协议

中图分类号: TN919.23

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00322

Data services and data plane for 6G mobile communication network

YAN Xueqiang¹, CHENG Guanjie², DENG Shuiguang², WU Jianjun¹, LU Lu³, ZHAO Mingyu¹,
XI Yan¹, LIU Chao³, LI Weiyuan³, FENG Lei⁴, ZHANG Tong³

1. Wireless Technology Lab, Huawei Technology Co., Ltd., Shanghai 201206, China

2. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

3. Institute of Network and IT Technology, China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

4. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The existing communication network represented by 5G is used as a communication session data “pipeline” for information exchange between terminal devices and the network. Different from the point-to-point transmission of communication session data, the data generated and consumed by AI, sensing and network operations in 6G network needs to be collected, preprocessed, stored, and analyzed in a distributed manner. To this end, a data plane architecture independent of the traditional user plane was proposed to systematically solve the challenges of managing and monetization of the non-user-plane data for 6G mobile communication networks. The classification and characteristics of 6G network data and data services were identified and defined. Furthermore, based on the comparative analysis of the 5G user plane and the existing data-driven network architecture, a 6G data plane framework composed of two main components i.e. data orchestrator and data agent was proposed, and the data plane functional architecture was elaborated. In addition, three potential options for data forwarding control mechanisms were designed. These mechanisms can support on-path-packet processing within any topology of data pipelines, realizing the construction and maintenance of dynamic programmable data pipeline and the thorough separation of routing algorithms and data forwarding.

Key words: 6G, data service, data plane, data orchestration, data forwarding control protocol

收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2023-01-30

通信作者: 邓水光, dengsg@zju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U20A20173, No.62125206); 浙江省“领雁”研发攻关计划项目 (No.2022C01145)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U20A20173, No.62125206), The Key Research Project of Zhejiang Province (No.2022C01145)

0 引言

随着计算和存储成本的降低, 以及大量低时延业务和局域应用的出现, 计算、存储, 以及依赖于两者的智能算法趋向于在靠近数据源的网络边缘部署, 从而形成了以数据为中心的网络架构^[1-5]。移动通信网络的基本功能也将开始从信息传递的管道向数据管控的平台转变。内生智能和感知作为 6G 网络的两大主要新增能力, 前者通过传感设备感知网络自身状态、周围环境, 以及用户/设备行为等产生的海量数据, 后者使用人工智能 (AI, artificial intelligence)、数字孪生等技术^[6-8]进行建模分析和自动决策以提升网络运营效率、提升系统性能或为智能应用提供数据服务^[9-11]。可见, 6G 网络是数据的生产者和提供者, 为智能应用提供可信数据服务, 同时又是数据的消费者, 借助数据驱动的智能应用提升网络性能和运营效率。因此, 如何优化数据治理、挖掘数据价值、提供可信数据服务, 对 6G 网络设计提出了全新的挑战。

传统网络架构围绕业务为中心设计, 数据伴随各类业务与应用形成数据“孤岛”, 难以进行高效协同实现数据价值最大化。此外, 由于算力和存储资源的中心化部署, 数据往往需要被集中到中心节点或云端进行处理, 极易受到单点攻击, 存在隐私泄露风险, 并且面临可扩展性瓶颈^[12-14]。随着边缘计算、边缘智能、分布式机器学习等技术的发展, 基于云的中心化大数据平台开始向分布式可编程的数据管道转变, 为实现去中心化的数据处理和监管提供了架构基础^[15]。同时, 以自动驾驶^[16]、远程医疗^[17]、智慧交通^[18]等为代表的新兴智能应用催生了数据可信采集、实时处理、灵活共享、有效监管的需求。因此, 不同于 5G 网络作为数据承载和传输平台仅负责建立安全会话通道, 6G 网络需要实现基于云边协同的数据实时智能处理, 在传输过程中同时执行数据处理, 为智能和自动化决策算法提供可信高质量数据。

现有通信网络作为数据传输的“管道”, 通过集成单点技术实现数据处理、数据监管及安全隐私保护, 为智能应用提供特定数据服务能力, 但缺乏归一化的数据服务框架, 并面临着数据治理层面的诸多挑战^[19]。例如, 单域智能、共享受限、支撑的应用场景和用例有限, 以及数据采集、选择、修剪和标记中的任何损坏或偏差都会显著影响机器学习模型的性能和准确性等^[20-22]。

当前网络出于优化网络性能和提升运营效率的目的, 提出了多种数据驱动的架构, 包括第三代合作伙伴计划 (3GPP, the 3rd Generation Partnership Project) 定义的网络数据分析功能 (NWDAF, network data analytics function)^[23]、最小化路测 (MDT, minimization of drive-tests)^[24]、自组织网络 (SON, self-organizing network)^[25]、欧洲电信标准组织 (ETSI, European Telecommunication Standards Institute) 定义的零接触网络和服务管理 (ZSM, zero touch network and service management)^[26] 框架、许可分布式账本 (PDL, permissioned distributed ledger)^[27] 框架, 以及 IEEE-2144.1 标准等。然而, 这些框架均针对特定网络域的数据, 缺乏可以处理所有数据类别的端到端统一架构。而 6G 网络的内生智能和感知衍生出新型数据类别, 如感知数据和 AI 模型数据等, 提升了构建统一数据服务框架的必要性和复杂度。此外, 现有架构中的数据采集机制、数据处理功能等被固化, 无法根据服务需求动态更新和调整, 缺乏架构灵活性。并且当前的数据驱动框架缺乏体系化的可信数据支持, 无法为系统提供隐私保护、溯源服务, 传统的认证授权方案无法满足 6G 新型数据对可靠性和隐私保护的要求。

此外, 用户数据网元的融合也带来了诸多问题。为了实现鉴权数据的重用、鉴权同步、被叫域选择等能力, 不同代价的不同系统间的用户数据需要进行融合, 通过新建或升级部署用户数据网元, 再将全网用户的存量数据割接到新的用户数据网元中, 存在网络资源浪费、数据割接量巨大、升级时间长等问题。因此, 6G 网络需要考虑优化用户数据网元存储性能, 以支持不同网络间的统一鉴权、认证, 向业务平台提供统一的用户视图。

5G 通信网络是基于会话构建的, 其用户面用于承载会话数据^[28]。由于无法满足 6G 数据承载所需要的“随路计算”和“任意拓扑”支持, 5G 用户面无法承载 6G 网络新的数据类型。用户面传输与数据面传输对比见表 1, 从功能、数据承载的起始点和终结点、数据转发设备行为、数据转发原则、拓扑结构等角度对比了 5G 用户面传输和 6G 数据面传输之间的差异。5G 用户面的会话连接实现两个通信设备之间的信息交互, 具体是由协议数据单元 (PDU, protocol data unit) 会话提供用户终端设备和网络之间端到端的用户面连接。而 6G 数据面传输则由数据采集、预处理、

表 1 用户面传输与数据面传输对比

对比项	5G 用户面数据承载	6G 数据面数据承载
功能	PDU 会话提供用户终端设备和网络之间端到端的用户面连接	由数据采集、预处理、转发、存储和分析等功能组成分布式数据管道
数据承载的起始点和终结点	UE 和 UPF	任何网元和终端设备
数据转发设备行为	转发设备仅转发数据包	需要实现随路计算：在数据管道中，数据在被转发的同时被转换和优化，以达到可以分析和应用的状态
数据转发原则	数据包基于目标地址进行转发	数据包基于数据服务和数据管道标识进行转发
拓扑结构	点到点连接	任意拓扑

转发、存储和分析等功能组成。用户面传输针对人与人或人与机器之间的通信连接，而数据面处理的数据是由机器/算法生产和消费的。5G 用户面会话只实现数据包传输，而 6G 数据面传输网络则需要实现随路计算，在数据管道中，数据被转换和优化以达到数据分析和智能应用所需状态。在数据转发行为上，会话的数据包基于目标地址进行转发；而数据管道中，数据包则基于数据服务和数据管道标识进行转发。基于 5G 用户面会话的数据转发属于 TCP/IP 层，而数据面的数据转发则属于应用层。此外，基于会话的拓扑是点对点的连接，而 6G 数据面则需要支持任意拓扑结构（如数据分发和数据聚合需要的树形结构）。

此外，如果沿用现有用户面承载所有 6G 网络数据，数据的起始点和终结点只能在 PDU 会话的两端，即用户设备（UE, user equipment）或用户面功能（UPF, user plane function），无法满足对感知数据、AI 数据、网络行为和状态数据的分布式管控。因此，6G 网络需要引入独立的数据面，构建架构级的统一可信、动态灵活的数据服务框架，在满足数据法规监管要求的同时，提升数据分析和处理效率，实现跨域、跨厂商的可信数据共享，并通过各类智能应用实现数据的价值变现。

1 相关背景

1.1 5G 用户面

5G 核心网（5GC, 5G core network）将控制面和用户面分离^[29-31]，使得 UPF 可以灵活下沉，并与边缘计算一起分布式部署于更接近终端用户侧的边缘，从而满足低时延的应用需求。控制面承载信令和控制消息，负责终端的移动性和接入管理、会话管理、策略控制、网络开发功能以及网络切片管理等。用户面则承载数据流量，通过 UPF 在无线电接入网（RAN, radio access network）和互联网之间转发数据、报告流量使

用情况等。然而，5G 用户面的核心是建立 PDU 会话，即在 UE 和数据网络之间建立会话通道。通信会话类数据在传输过程中不需要被处理，因此没有打开会话通道的必要。此外，出于监管要求以及遵循国际社会对用户会话数据实现隐私保护的共识，在 PDU 会话中间节点无法访问其承载的会话数据。5G PDU 架构如图 1 所示^[32]，一个 PDU 会话包含多个无线承载（radio bearer），而一个 radio bearer 又能承载多个服务体验流（QoS flow），但是一个 radio bearer 只能服务一个 PDU 会话；一个 QoS flow 是由 radio bearer 和 NG-U tunnel 两段组成的。在 N3 接口上，同一个 PDU 会话采用同一个通道。PDU 会话终结在 UPF。因此，5G 用户面虽然承载了用户数据，但是仅支持数据转发功能，无法实现“边传输边处理”，不利于数据实时分析处理和数据价值挖掘^[33]。这种架构一方面不能充分利用网络设备愈发丰富的算力资源，另一方面无法满足超低时延的新兴应用对实时性的需求。因此，本文为 6G 移动通信网络设计了一个独立的数据面，针对 AI 模型数据、感知数据、网络状态和行为数据、IoT 数据等非用户面数据，构建灵活统一的数据服务框架。

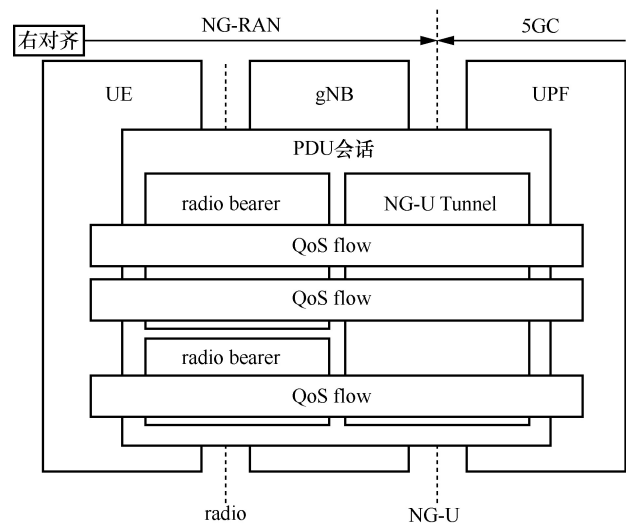


图 1 5G PDU 架构^[32]

1.2 现有数据驱动技术架构

随着数据价值被广泛认可，当下涌现出很多数据驱动的技术架构，例如，3GPP 定义的网络数据分析功能（NWDAF, network data analytics function）、最小数据传输（MDT, minimum data transfer）、自组网（SON, self-organizing network），ETSI 定义的 ETSI 零触碰服务管理（ETSI-ZSM, ETSI zero-touch service management）、ETSI 性能数据交换（ETSI-PDL, ETSI-performance data exchange）^[23-27]，以及 IEEE2144.1 标准。概念和简称见表 2，本文将上述 6 个架构从部署模式、功能/优势、数据采集、数据源、服务开放、可信（安全、隐私）、用例、领域、标准组织 9 个维度进行了梳理总结，现有数据驱动技术框架基础特性对比见表 3，可以看出，这 6 个数据管理架构均针对特定领域的的数据，无法用于处理 6G 通信网络的通用数据服务管控和价值变现。此外，本文从数据类型、可信

数据服务、部署弹性、是否支持第三方数据共享、用例灵活性、端到端（E2E, end-to-end）数据管理 6 个维度对上述框架进行了对比分析，现有数据驱动技术框架数据管理特性对比分析见表 4。

表 2 概念和简称

概念	简称
跟踪采集实体	TCE, trace collection entity
网络功能	NF, network function
网元管理系统	EMS, element management system
操作管理和维护	OAM, operation, administration and maintenance
应用功能	AF, application function
接入网	AN, access network
核心网	CN, core network
传输网	TN, transfer network
网络开放功能	NEF, network exposure function
物联网	IoT, internet of things

表 3 现有数据驱动技术框架基础特性对比

基础特性	NWDAF	MDT	SON	ETSI-ZSM	ETSI-PDL	IEEE-2144.1
部署模式	分层	中心化	分布式，中心化或者混合式	分层	分布式	中心化
功能/优势	通过 5GC 中的网络数据分析驱动网络自动化和服务编排	网络规划与优化	网络性能和用户体验优化	自动化网络和服务管理	联邦数据采集、数据共享和计算	可信 IoT 管理和数据服务
数据采集	从数据源汇聚数据	UE、RAN 节点采集数据	UE、RAN 节点采集数据	E2E 数据采集	IoT 设备采集	可信感知，数据生成和采集
数据源	5GC NF, OAM, AF	UE	EMS	基础设施资源和网络服务	拥有 IoT 设备不同组织	IoT 设备
服务开放	通过 NEF	不支持	不支持	通过集成总线	不支持	通过数据 API
可信(安全、隐私)	需要用户许可	需要用户许可	不支持	不支持	基于分布式账本	基于区块链
用例	网络状况（道路拥挤和预警信息等）和设备行为（UE 移动性等）监测	覆盖优化、移动性优化、容量优化、公共信道参数化、QoS 验证	自配置、自优化、自愈、自保护、自学习	E2E 网络和服务管理；集成和互操作；安全和追溯	智慧城市；智慧医疗；智慧交通	所有 IoT 应用
领域	5GC	RAN	RAN	OAM	UE, AN, CN, TN	IoT 和无线网络
标准组织	3GPP	3GPP	3GPP	ETSI	ETSI	IEEE

表 4 现有数据驱动技术框架数据管理特性对比分析

数据管理特性	NWDAF	MDT	SON	ETSI-ZSM	ETSI-PDL	IEEE-2144.1
数据类型	网络数据	网络数据	网络数据	网络数据	IoT 数据	IoT 数据
可信数据服务	认证	授权	不支持	不支持	认证&授权	基于区块链的可信方案
部署弹性	不支持	不支持	不支持	部分支持	不支持	不支持
是否支持第三方数据共享	支持	不支持	不支持	不支持	支持	支持
用例灵活性	不支持	不支持	不支持	不支持	不支持	支持（通过服务 API）
E2E 数据管理	部分支持	部分支持	部分支持	部分持证	部分支持	支持

由表 4 可见, 现有数据驱动的技术框架均针对特定域的数据, 如网络数据、IoT 数据, 且多在网络管理层面为网络运营提供自动化运维功能, 缺乏可以处理所有数据类别的通用数据服务管控架构。6G 网络内生的智能和感知催生了两种新的数据类别: 感知数据和 AI 数据, 对现有架构的数据支持和处理能力提出了挑战。此外, 当前的数据架构无法提供统一的可信数据服务, 并且不支持 E2E 全生命周期的数据管理。固化的数据处理功能也导致现有架构无法灵活适配不同的应用场景。因此, 6G 网络需要引入独立的数据面, 构建架构级的统一、可信、完整且通用的数据服务框架, 提升网络和应用性能、实现数据价值最大化^[34]。

2 数据和数据服务

6G 数据的类型随着 6G 服务从通信扩展至感知、计算和 AI 服务等而更加丰富, 相比 5G 数据呈现出更加海量、多态、时序、关联的特点。对 6G 数据的合理分类和针对性的分析处理有利于为 6G 网络设计统一的数据服务框架。

2.1 6G 数据分类及特征

6G 网络承载的数据包括 6G 网络的用户和终端设备、网络设备和功能、基础设施如云平台, 以及算法和应用等产生和消费的数据。

从数据来源、应用范围、时变性、隐私保护要求、存储要求等不同维度, 6G 网络中的数据可以划分为用户签约数据、网络数据、IoT 数据以及 AI 数据^[35]。其中, 用户签约数据是网络中用户所有与业务相关的签约数据, 如是否开启定位业务等。网络数据包括通信感知融合系统产生的感知数据和网络运营数据, 即网络运营商从网络设备中获取的用于网络运维管理所需要的数据, 包括配置、性能、日志、告警信息等, 以及网络感知数据、网络孪生数据等。IoT 数据指 IoT 传感器感知的数据。AI 数据包含分布式网络 AI 训练和推理过程中传递的相关数据, 如模型、梯度训练/测试数据等^[36-38]。6G 数据分类及其特征见表 5。

2.2 6G 数据服务

数据服务是数据提供者和数据消费者之间进行数据交互和处理的抽象。在多数据提供者或多数据消费者的场景中, 数据服务有助于维持数据的完整性和可靠性, 可以通过数据重用提高数据服务效率和价值变现能力。数据服务基于数据分发和发布的框架, 将数据及数据分析处理方法包装为一种服务产品, 来满足应用跨域、跨实体的实时数据需求^[39]。数据服务应该具备可复用性, 同时需要符合企业和工业标准, 兼顾数据共享、数据监管和安全防护的需求^[40-45]。

6G 数据服务旨在支持端到端的数据采集、传输、存储、分析和共享, 解决如何将数据方便、高效、安全地提供给网络内部功能或网络外部应用, 在遵从隐私安全法律法规的前提下降低数据获取难度, 提升数据服务效率和数据消费体验。通过数据服务化实现数据的共享应用, 提升数据的一致性; 通过平台能力的建设, 提供不同的数据服务形式, 满足灵活多样的服务需求; 通过数据编排实现数据服务的自动化, 提升数据服务的敏捷响应能力。

3 6G 移动通信网络数据面

为系统性地应对数据服务挑战, 解决现有移动网络用户面和数据驱动架构无法满足 6G 新业务、新数据需求的问题, 本文针对前文所定义的 6G 移动通信网络数据和数据服务, 为 6G 网络引入独立的数据面。数据面旨在构建统一可信的数据服务框架, 解决数据“孤岛”问题, 在满足数据法规的监管要求的同时, 提供可信的数据服务, 实现跨域、跨厂商的数据共享, 提高运营效率, 实现数据的价值变现。

3.1 6G 移动通信网络数据面概览

6G 移动通信网络数据面架构如图 2 所示, 主要由 4 部分功能组成: 数据编排器 (DO, data orchestrator) (和数据控制器 (DC, data controller), DC 将在下一节详细介绍)、数据代理 (DA, data

表 5 6G 数据分类及其特征

类别	数据来源	应用范围	时变性	隐私保护要求	存储要求
用户签约数据	网络/业务用户	网络功能, 第三方应用	静态	直接隐私相关	永久存储
网络数据	网络设备和基础设施	网络优化, 第三方应用	动态	直接或间接隐私相关	长期存储
IoT 数据	传感器	IoT 应用, 智能决策	动态	直接或间接隐私相关	短期存储
AI 数据	AI 算法	智能决策	动态	推断隐私	中期存储

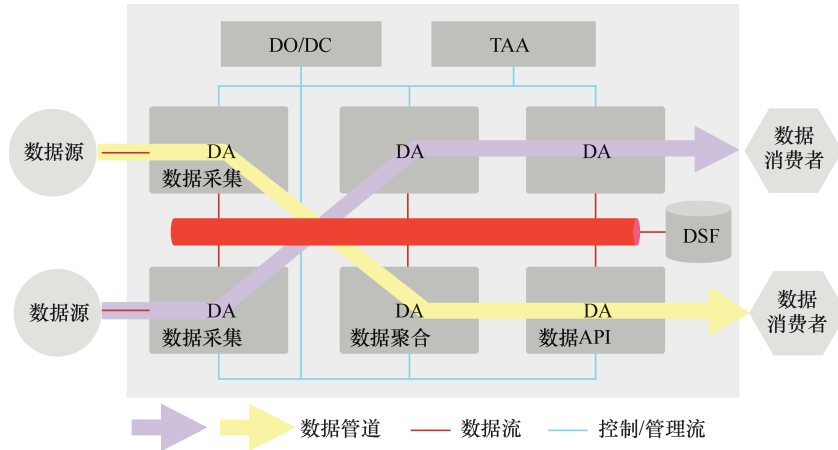


图 2 6G 移动通信网络数据面架构

agent)、可信锚点代理 (TAA, trust anchor agent) 和数据存储功能 (DSF, data storage function)。DO 支持可编程数据管道并实现数据服务请求转换 (根据数据服务请求实现数据管道的构建)。DA 可内置于网络功能或独立部署, 执行数据管道中编排的数据采集、数据预处理、数据存储、数据分析、数据共享和其他数据服务。TAA 是在数据面架构中定义的专用于保障 6G 数据可信度的独立组件。数据在处理和使用过程中要满足《个人信息保护法》(PIPL, Personal Information Protection Law)、《通用数据保护条例》(GDPR, General Data Protection Regulation) 等法规的监管要求, 如果遭受来自网络内部或外部实体的安全隐私攻击, 会造成严重隐患^[46-50]。因此,

TAA 在 6G 网络中扮演着保护数据机密性、完整性和可靠性的重要角色。DSF 在需要大规模数据存储或长期存储时充当 DA 的存储扩展组件。

3.2 6G 移动通信网络数据面功能架构

6G 移动通信网络数据面功能架构如图 3 所示。根据任务的实时性需求和跨域情况, 将数据编排器细分为两类: DO 和 DC。DO 负责粗粒度、非实时的数据编排, DC 则负责细粒度的实时的编排任务, DO 与 DC 二者协同实现了数据管道的弹性和可编程性。DO 主要具备以下功能: 首先, DO 是接收数据服务请求的门户, 并且将数据服务请求转化为对数据管道的组合请求。此外, DO 与其他网络服务展开协作, 如算力网络服务对算力进行编排, 而

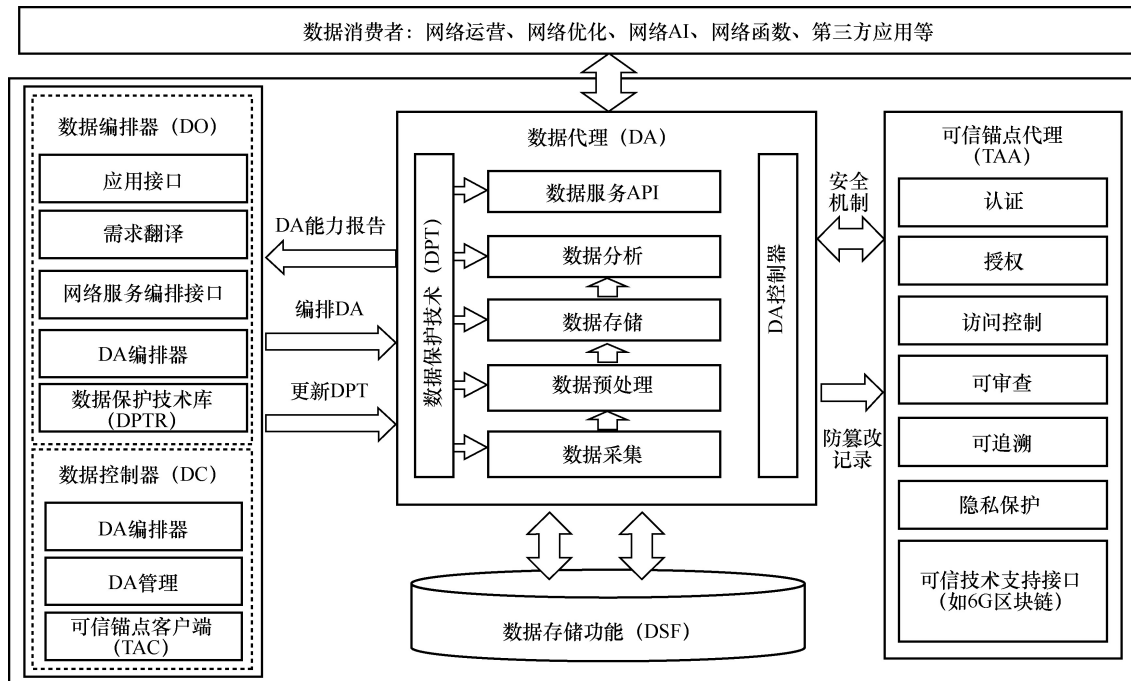


图 3 6G 移动通信网络数据面功能架构

DO 对数据进行编排。基于数据服务请求和 DA 的服务能力, DO 实现了跨域的粗粒度的数据管道编排。同时, DO 内置了一个数据保护技术存储库 (DPTR, data protection technology repository), 包含差分隐私、同态加密、安全多方计算、零知识证明等技术^[20], 提供数据安全隐私保护能力, 并按需将数据保护技术 (DPT, data protection technology) 赋能给 DA。相反, DC 实现了细粒度的 DA 编排, 在本地域中依据 DA 的能力和 数据服务请求对数据管道进行组合, 实现实时高效的服务管理。其次, DC 接收 DA 的能力报告并实现对 DA 的注册和撤销功能, 通过监测 DA 的心跳实现对 DA 的实时监管。此外, DC 内置了可信锚点客户端 (TAC, trust anchor client), 向 TAA 发起认证、授权、访问控制等安全机制的请求, 以及申请对数据访问的溯源和审计服务。

DA 负责执行 DO 编排的数据管道中的数据服务, 包括数据采集、预处理、转发、存储、分析等。其中数据存储负责少量的、或短期的、或有隐私保护需求数据的本地存储, 数据分析与其他数据管道功能解耦, 根据分析类型按需进行部署。首先, DA 将数据服务能力上报给 DC, 之后由 DO/DC 依据服务请求和 DA 能力选择合适的 DA, 并实施编排, DO 将按需对 DA 进行 DPT 更新。服务应用程序接口 (API, application program interface) 是数据服务对外接口, 可以由 DC 依据 DA 的能力动态分配。数据消费者通过调用服务 API 实现数据服务请求。DSF 作为 DA 的存储扩展组件, 负责长期的或大量数据的存储, 如大型日志数据、AI 训练模型。

TAA 是 6G 可信面在数据面的代理, 包含认证、授权、访问控制、审计、溯源等可信功能, 并且提供对于区块链等可信技术的支持接口, 保护所有数据的机密性、完整性和可靠性。

3.3 数据面与其他面的交互

数据面的独立设计构建了架构级的统一可信的数据服务, 推动实现通用的业务处理和运维方案, 使得数据服务从 6G 网络的其他面实现功能解耦。理解数据面与其他面的交互有助于促进价值数据共享、网络功能协同、网络性能优化和应用可靠执行。

首先, 管理面可以和数据面的 DO 模块进行交互, 对数据面网元进行性能管理、故障管理, 对数据服务进行计费; 控制面对数据面的数据源、数据消费者等进行接入管理、移动性管理, 对数据服务提供 QoS

保障, 例如, 数据消费者的注册、鉴权、认证等可以由控制面进行统一管理, 以及可以由控制面进行数据服务请求和传统用户面会话的区分和调配。

在传统管理面、控制面、用户面基础上, 未来 6G 将引入数据面、可信面和计算面^[21-22]。其中, 可信面为网络提供认证、授权、访问控制、隐私保护等安全机制以及可靠运维和管理; 计算面包括计算与连接的融合控制、计算数据的传输和计算任务的执行, 包括模型训练和推理等。数据面为可信面、计算面以及传统面提供统一的数据服务。针对可信面和计算面的讨论不属于本文研究范围。

数据面与可信面主要的交互模块是 TAA 和 DA。TAA 通过可信面的账本锚点为数据提供可信的区块链服务, 例如, 构建 6G 区块链实例、部署智能合约、读/写链上交易等。可信面的执行单元将 DPT 更新同步到数据面的 DA。数据分析服务将数据分析结果传输到可信面, 助力网络安全运维和高效管理。DA 将模型训练等 AI 任务交给计算面, 并为计算面提供数据安全、隐私保护和模型存储功能。此外, 数据面中的数据分析工具通过计算面进行更新。

3.4 DO 与 DA 的运行

3.4.1 DO 的运行

DO 通过 DA 上报的数据服务能力和 DA 间逻辑连接状态等, 获取 DA 网络的全局信息。然后, DO 根据接收的数据服务请求选择合适的 DA, 编排数据管道, 并计算和构建数据转发路径。DO 通过数据转发控制协议 (DFCP, data forwarding control protocol) 将数据转发信息发送给 DA, 并且按需更新和删除数据转发信息。最后, DO 通过 DFPC 从 DA 处采集统计数据。

3.4.2 DA 的运行

DA 可以实现多种数据处理功能, 这些功能在 DA 注册期间作为 DA 的能力上报给 DO/DC, 并可及时上报能力更新。DA 的内部运行流程如图 4 所示, DO 根据应用的具体服务需求和 DA 的数据功能实施编排。由网络功能 (NF, network function) 业务逻辑发起的任务进入 DA, 根据 DO 编排策略执行 DA 的特定处理功能。如果需要多个 DA 进行功能协作, 则在执行完本地 DA 最后一个功能后经由数据转发功能转入下一个 DA, 或在本地 DA 运行完全部功能后通过数据服务 API 提供给应用。

3.4.3 DA 的部署模式

DA 的部署模式如图 5 所示, DA 在网络中有

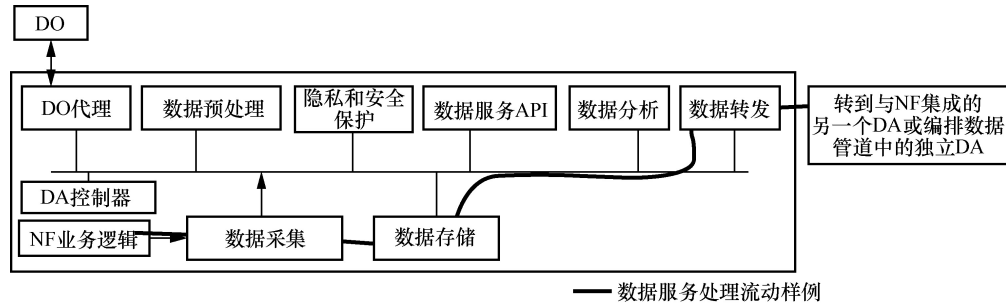


图 4 DA 的内部运行流程

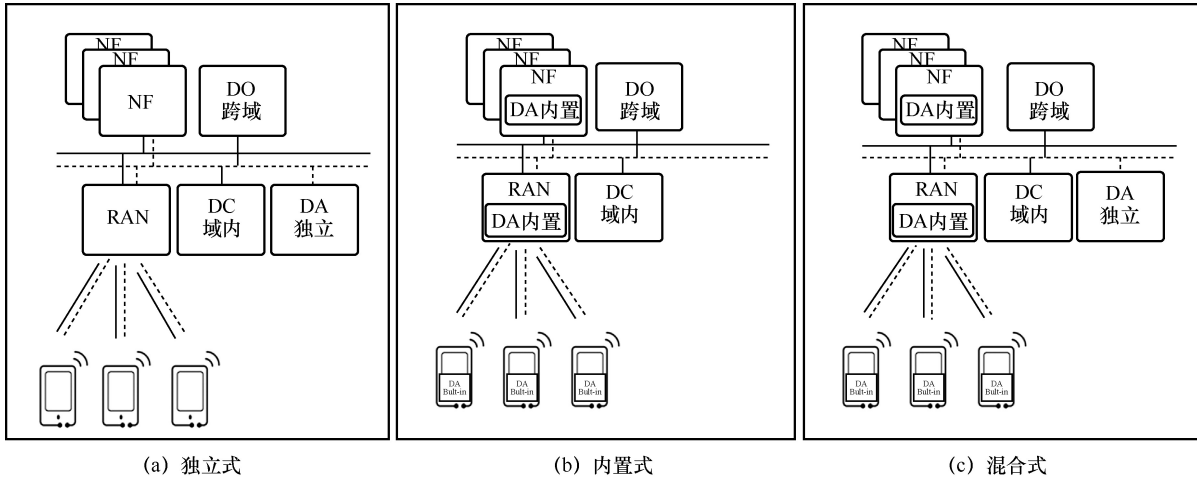


图 5 DA 的部署模式

3 种可行的部署模式：独立式、内置式和混合式。独立式部署即 DA 在网络中以独立网元或 NF 形式部署；内置式部署表示在 RAN 或者 NF 以及终端设备中内置 DA；混合式部署表示既新增独立的 DA，同时在 RAN、NF 或终端设备中部署内置 DA。网络运营商可以依据实际网络环境和应用需求选择最佳部署模式。

3.5 数据面数据转发技术

如第 1.1 节所述，传统的通信网络是面向会话连接的网络，仅承载会话内容，即通信节点之间的信息交互；而 6G 是面向数据的网络，多维异构、海量实时的数据需要经由收集、处理、传输、存储、分析、隐私保护等功能组成的数据管道承载。6G 数据面中，数据的管理和处理采用管道的形式，数据不仅通过管道传输，并在流经的节点完成采集、处理、存储、分析等功能。此外，传统网络中会话的建立以通信路径的构建为前提，路径上的节点（通常是路由器或交换机）只负责会话报文的转发，不对报文进行处理。而在 6G 网络中，为了满足新业务、新场景的需求，数据管道上的节点（DA）需要按需对报文做相应处理，然后转发至下一节

点。因此，6G 数据面需要构建新的面向数据的数据转发机制。

传统网络中的会话是点对点建立的，旨在于复杂的网络拓扑中建立两点之间的通信路径。与会话中点对点的比特信息交换不同，6G 数据面具有分布式的特点，因此数据管道（如数据的汇聚和分发）需要支持任意拓扑结构^[22]。

根据数据报文和数据转发实体（DA）有无状态，本文提出了 3 种可行的 6G 数据面数据转发技术方案，如图 6 所示。需要注意的是，数据管道是有方向的，一个数据服务可以包含多个数据管道。

方案 1 当 DA 有状态、报文无状态时，数据转发控制实体（DO）根据数据业务需求，按 DA 的功能编排组成数据管道及其拓扑，并将数据转发表项写入相应 DA 的数据转发表。DA 根据表项转发数据到下一跳，直至转发表项结束。同时 DA 统计转发的数据报文数和字节数，按需上报给 DO。数据服务执行结束后删除数据管道，DA 删除数据转发表项。

方案 2 当 DA 无状态、报文有状态时，DO 根据业务需求，按 DA 的能力/功能编排组成数据管道及其拓扑，并将数据转发表项发送给入口 DA。入

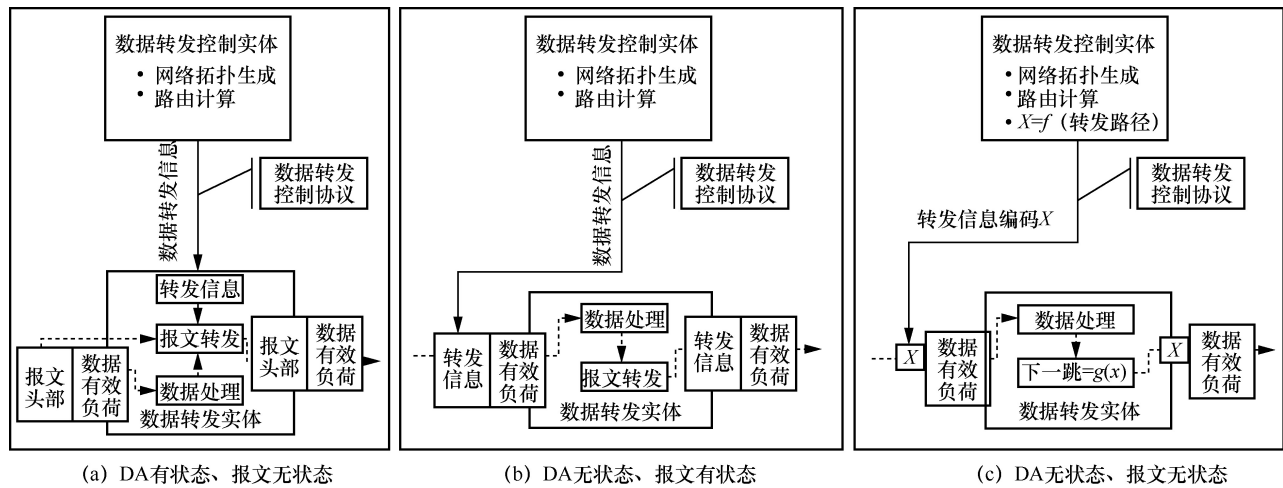


图6 3种可行的6G数据面数据转发技术方案

口 DA 将转发信息作为数据报文头部信息转发至下一跳。转发路径中的 DA 根据数据报文头部携带的转发信息进行转发,并删除涉及本 DA 的转发信息。出口 DA 将报文头部的地址/标识信息删除后递交给上层应用。DA 统计转发的数据报文数和字节数,并按需上报给 DO。边缘 DA 在数据服务结束后删除给定数据服务的数据转发表项。

方案3 当 DA 和报文都无状态时,DO 根据业务需求,按 DA 的能力/功能编排组成数据管道及其拓扑。DO 将数据服务对应的数据转发路径进行编码,并将编码发送给入口 DA。DA 通过解码操作作

算出数据报文的下一跳,在完成数据处理后转发至下一节点。出口 DA 将报文递交给上层应用。DA 根据报文中携带的统计数据按需上报给 DO。边缘 DA 在数据服务结束后删除数据管道。

根据上述3类数据转发技术,方案1~方案3数据包格式示例分别见表6~表8。

其中,DS ID 表示数据服务标识 (data service identity), DP ID 表示数据管道标识 (data pipeline identity), 协议类型表示使用的数据转发类型,“0”“1”“2”分别代表方案1、2、3。表7中的 routetype 标识下一跳目的地址 (DA, destination address) 是

表6 方案1数据包格式示例

0~4	5~8	9~12	13~16	17~20	21~24	25~28	29~32
协议类型 (0)	Header length		DS ID		Sequence Number (2 nd octet)		
DP ID	Sequence Number (3 rd octet)		Payload length		Payload		
Payload							

表7 方案2数据包格式示例

0~4	5~8	9~12	13~16	17~20	21~24	25~28	29~32
协议类型 (1)	Header length		DS ID		routetype1(0)		next da id1
DP ID	routetype2(1)		下一跳 DA 个数		next da id2		
next da id1-cont	next da id3		routetype3(0)		next da id4		
next da id2-cont	routetype4(0)		next da id5				
next da id4-cont	Sequence Number (1 st octet)		Sequence Number (2 nd octet)		Sequence Number (3 rd octet)		Payload length
Sequence Number (1 st octet)	Payload length-cont		Payload				
Payload							

表 8 方案 3 数据包格式示例

0~4	5~8	9~12	13~16	17~20	21~24	25~28	29~32
协议类型 (2)		Header length		DS ID			
DP ID				Sequence Number (1 st octet)		Sequence Number (2 nd octet)	
Sequence Number (3 rd octet)		Payload length		Payload			
Payload							

单个 DA (取值为“0”), 或是多个 DA (取值为“1”)。由此可以计算不同方案下报文头的大小: 方案 1 的报文头大小为 11 byte, 方案 2 中报文头的大小依据路由的跳数变化, 按照平均 5 跳, 其中有一跳为多播, 多播的 DA 个数为 5 个, 计算报文头的大小为 31.5 byte, 方案 3 的报文头为 11 byte。依据业务特征可预估 IoT 数据的平均包大小约为 50 byte, AI 数据的包大小为 1 450 byte, 网络数据 (测量报告) 平均大小约为 15 byte, 混合数据场景下 IoT 数据占 30%, AI 数据占 20%, 网络数据 (测量报告) 占 50%。据此可以计算得到不同场景下的数据传输效率。

方案 1 中, IoT 数据传输效率为 $50/(50+11)=81.97%$, AI 数据传输效率为 $1450/(1450+11)=99.25%$, 网络数据传输效率为 $15/(15+11)=57.69%$, 混合数据传输效率为 $(50 \times 30\% + 1450 \times 20\% + 15 \times 50\%) / ((50+11) \times 30\% + (1450+11) \times 20\% + (15+11) \times 50\%) = 96.60%$ 。

方案 2 中, IoT 数据传输效率为 $50/(50+31.5)=61.35%$, AI 数据传输效率为 $1450/(1450+31.5)=97.87%$, 网络数据传输效率为 $15/(15+31.5)=32.26%$, 混合数据传输效率为 $(50 \times 30\% + 1450 \times 20\% + 15 \times 50\%) / ((50+31.5) \times 30\% + (1450+31.5) \times 20\% + (15+31.5) \times 50\%) = 90.84%$ 。

方案 3 中, IoT 数据传输效率为 $50/(50+11)=81.97%$, AI 数据传输效率为 $1450/(1450+11)=99.25%$, 网络数据传输效率为 $15/(15+11)=57.69%$, 混合数据传输效率为 $(50 \times 30\% + 1450 \times 20\% + 15 \times 50\%) / ((1450+11) \times 30\% + (1450+11) \times 20\% + (15+11) \times 50\%) = 96.60%$ 。不同方案数据传输效率对比见表 9。

上述数据面数据转发方案实现了 DO 对 DA 的动态可编程数据管道的构建与维护, 同时实现了路由算法与数据转发的分离, 可支持任意拓扑的数据管道 (如数据汇聚、多播等), 有利于满足 6G 应用中各类数据服务请求, 以及对数据服务可扩展性的要求。

表 9 不同方案数据传输效率对比

	IoT 数据	AI 数据	网络数据 (测量报告)	混合数据
方案 1	81.97%	99.25%	57.69%	96.60%
方案 2	61.35%	97.87%	32.26%	90.84%
方案 3	81.97%	99.25%	57.69%	96.60%

4 未来研究方向

本文设计了全新的 6G 移动通信网络数据面功能架构, 并提出了 3 种以数据为中心的数据控制和转发机制, 为基于 6G 网络的应用架构提供参考。然而, 6G 数据面的落地应用依旧存在一些挑战。

首先, 6G 移动通信网络数据面协议设计尚待研究。5G 移动通信网络中的用户面和控制面均有成熟的协议栈支撑落地应用, 实现面与面之间的功能解耦以及模块化、虚拟化、软件化的功能管理。6G 数据面同样需要完整、灵活、可扩展的协议栈支撑, 实现数据面的高效管理和运维——包括数据转发控制协议、数据服务开放协议、DA 管理控制协议等。

其次, 针对数据面的性能分析和可扩展性研究, 是将 6G 数据面集成到实际应用架构的必要过程。研究者可以采用不同的 DA、DO 部署方式, 依据不同业务需求构建数据管道, 模拟数据服务执行流程, 部署性能实验, 依据实验数据分析网络潜在的性能瓶颈和可扩展性问题。合理的实验环境和准确的分析结果对 6G 数据面的集成和落地具有巨大价值。

最后, 6G 数据面需要预标准化。标准化是 6G 数据面设计的最终目的, 基于典型的数据服务场景分析, 推动达成 6G 数据面的产业共识, 并基于完整的架构设计、统一的功能定义、详细的交互逻辑、准确的实验分析, 推动 6G 数据面相关标准的制定、发布和实施, 打破研究壁垒, 促进各方协同, 加速 6G 统一标准架构落地。

5 结束语

网络内生的智能和感知在为 6G 网络带来新的能力和服务的同时,也带来了全新的数据流量,包括海量的感知数据和 AI 数据。同时 6G 使能的数字孪生、全息通信、工业物联网等新型应用也将在产生和消费数据的同时形成全新的网络流量。此外 6G 网络产生的运营数据将驱动人工智能算法实现网络自动运维和管理。这些非通信会话类数据蕴含巨大价值,需要高效的数据管控机制实现数据变现。以 5G 为代表的现有通信网络作为数据传输的“管道”,其 PDU 会话机制无法满足 6G 新业务等对分布式泛在数据的“随路计算”要求。另外,现有数据驱动的技术框架只关注特定网络域数据,且多在网络管理层面为网络运营提供自动化运维功能,无法形成统一的数据管控架构。为系统性地解决 6G 网络对数据管控和价值变现的挑战,本文在深入分析 5G 用户面与现有数据驱动的技术架构的基础上,为 6G 网络引入了独立的数据面架构。数据面借助数据编排概念实现灵活的数据服务。此外,本文设计了 3 种全新的数据转发控制协议,实现了数据“随路计算”特性,从而支持任意拓扑的数据管道,为 6G 数据服务场景提供数据转发机制的多种选项。

参考文献:

- [1] SIRIWARDHANA Y, PORAMBAGE P, LIYANAGE M, et al. A survey on mobile augmented reality with 5G mobile edge computing: architectures, applications, and technical aspects[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 1160-1192.
- [2] YUAN L, HE Q, TAN S Y, et al. CoopEdge: a decentralized blockchain-based platform for cooperative edge computing[C]//*Proceedings of WWW'21: Proceedings of the Web Conference 2021*. 2021: 2245-2257.
- [3] ZHANG L H, et al. Deep reinforcement learning based IRS-assisted mobile edge computing under physical-layer security[J]. *Physical Communication*, 2022 (55): 101896.
- [4] SHUVO M M H. Edge AI: leveraging the full potential of deep learning[M]. *Recent Innovations in Artificial Intelligence and Smart Applications*. Springer, Cham, 2022: 27-46.
- [5] DING A Y, PELTONEN E, MEUSER T, et al. Roadmap for edge AI[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2022, 52(1): 28-33.
- [6] TANG F X, CHEN X H, RODRIGUES T K, et al. Survey on digital twin edge networks (DITEN) toward 6G[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022 (3): 1360-1381.
- [7] DUONG T Q, VAN HUYNH D, LI Y J, et al. Digital twin-enabled 6G aerial edge computing with ultra-reliable and low-latency communications: (invited paper)[C]//*Proceedings of 2022 1st International Conference on 6G Networking (6GNet)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [8] OZDOGAN M O, CARKACIOGLU L, CANBERK B. Digital twin driven blockchain based reliable and efficient 6G edge network[C]//*Proceedings of 2022 18th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 342-348.
- [9] KHAN L U, SAAD W, NIYATO D, et al. Digital-twin-enabled 6G: vision, architectural trends, and future directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(1): 74-80.
- [10] TONG W, LI G Y. Nine challenges in artificial intelligence and wireless communications for 6G[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(4): 140-145.
- [11] 张海君, 陈安琪, 李亚博, 等. 6G 移动网络关键技术[J]. *通信学报*, 2022, 43(7): 189-202.
ZHANG H J, CHEN A Q, LI Y B, et al. Key technologies of 6G mobile network[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(7): 189-202.
- [12] SHEN X S, HUANG C, LIU D X, et al. Data management for future wireless networks: architecture, privacy preservation, and regulation[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(1): 8-15.
- [13] KRISHNARAJ N, BELLAM K, SIVAKUMAR B, et al. The future of cloud computing: blockchain-based decentralized cloud/fog solutions – challenges, opportunities, and standards[J]. *Blockchain Security in Cloud Computing*, 2022: 207-226.
- [14] KHATIWADA P, YANG B. An access control and authentication scheme for secure data sharing in the decentralized cloud storage system[C]//*Proceedings of 2022 5th Conference on Cloud and Internet of Things (CIoT)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 137-144.
- [15] HOU X W, WANG J J, FANG Z R, et al. Edge intelligence for mission-critical 6G services in space-air-ground integrated networks[J]. *IEEE Network*, 2022, 36(2): 181-189.
- [16] ZUO Z Y, LIU C J, HAN Q L, et al. Unmanned aerial vehicles: control methods and future challenges[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(4): 601-614.
- [17] AWOTUNDE J B, CHAKRABORTY C, FOLORUNSO S O. A secured smart healthcare monitoring systems using blockchain technology[M]. *Intelligent Internet of Things for Healthcare and Industry*. Springer, Cham, 2022: 127-143.
- [18] LI Q R, HE D B, YANG Z C, et al. Lattice-based conditional privacy-preserving authentication protocol for the vehicular ad hoc network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(4): 4336-4347.
- [19] CHOENNI S, BARGH M S, BUSKER T, et al. Data governance in smart cities: challenges and solution directions[J]. *Journal of Smart Cities and Society*, 2022 (Preprint): 1-21.
- [20] LIU S Y, VICENTE L N. Accuracy and fairness trade-offs in machine learning: a stochastic multi-objective approach[J]. *Computational Management Science*, 2022, 19(3): 513-537.
- [21] MAHMOOD Y, KAMA N, AZMI A, et al. Software effort estimation accuracy prediction of machine learning techniques: a systematic performance evaluation[J]. *Software: Practice and Experience*, 2022,

- 52(1): 39-65.
- [22] KAVZOGLU T, TEKE A. Predictive performances of ensemble machine learning algorithms in landslide susceptibility mapping using random forest, extreme gradient boosting (XGBoost) and natural gradient boosting (NGBoost)[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47(6): 7367-7385.
- [23] 3GPP. 5G; 5G system; network data analytics services: 3GPP TS 29.520 (v15.3.0)[S]. 2019.
- [24] 3GPP. Universal mobile telecommunications system (UMTS); LTE; universal terrestrial radio access (UTRA) and evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); radio measurement collection for minimization of drive tests (MDT); overall description: 3GPP TS 37.320 (v12.2.0)[S]. 2014.
- [25] 3GPP. 5G; self-organizing networks (SON) for 5G networks: 3GPP TS 28.313 (v16.0.0)[S]. 2020.
- [26] LIYANAGE M, et al. A survey on zero touch network and servicemanagement (ZSM) for 5G and beyond networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2022(203): 103362.
- [27] ETSI. Permissioned distributed ledger (PDL); applicability and compliance to data processing requirements: ETSI GR PDL 002 (v0.0.6)[S]. 2020.
- [28] WIJETHILAKA S, LIYANAGE M. Survey on network slicing for internet of things realization in 5G networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 957-994.
- [29] TSAI C C, LIN F J, TANAKA H. Evaluation of 5G core slicing on user plane function[J]. *Communications and Network*, 2021, 13(3): 79-92.
- [30] ETTIANE R, et al. Toward securing the control plane of 5G mobile networks against DoS threats: attack scenarios and promising solutions[J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2021(61): 102943.
- [31] PAOLUCCI F, CUGINI F, CASTOLDI P, et al. Enhancing 5G SDN/NFV edge with P4 data plane programmability[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(3): 154-160.
- [32] 3GPP. 5G; NR; overall description; stage-2: 3GPP TS 38.300 (v15.8.0 Release 15)[S]. 2020.
- [33] ALEVIZAKI V M, MANOLOPOULOS A I, ANASTASOPOULOS M, et al. Dynamic user plane function allocation in 5G networks enabled by optical network nodes[C]//*Proceedings of 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [34] 童文. 6G 无线通信新征程: 跨越人联、物联, 迈向万物智联[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- TONG W. 6G The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence[M]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [35] 6GANA. 6G 数据服务概念与需求白皮书[R]. 2022.
- 6GANA. 6G data service concepts and requirements white paper[R]. 2022.
- [36] LIANG W X, TADESSE G A, HO D, et al. Advances, challenges and opportunities in creating data for trustworthy AI[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2022, 4(8): 669-677.
- [37] QIAO L, LI Y, CHEN D. A survey on 5G/6G, AI, and robotics[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2021(95): 107372.
- [38] KHOWAJA S A, DEV K, QURESHI N M F, et al. Toward industrial private AI: atwo-tier framework for data and model security[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(2): 76-83.
- [39] ALOQAILY M, RIDHAWI I A, SALAMEH H B, et al. Data and service management in densely crowded environments: challenges, opportunities, and recent developments[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(4): 81-87.
- [40] WHITE T, BLOK E, CALHOUN V D. Data sharing and privacy issues in neuroimaging research: opportunities, obstacles, challenges, and monsters under the bed[J]. *Human Brain Mapping*, 2022, 43(1): 278-291.
- [41] FENG C S, YU K P, BASHIR A K, et al. Efficient and secure data sharing for 5G flying drones: a blockchain-enabled approach[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(1): 130-137.
- [42] PEUKERT C, BECHTOLD S, BATIKAS M, et al. Regulatory spillovers and data governance: evidence from the GDPR[J]. *Marketing Science*, 2022, 41(4): 746-768.
- [43] JERNITE Y, NGUYEN H, BIDERMAN S, et al. Data governance in the age of large-scale data-driven language technology[C]//*Proceedings of FAccT '22: 2022 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. 2022: 2206-2222.
- [44] HAN C C, CHENCHEN HAN G J K, GWANG-JUN KIM O A, et al. ZT-BDS: asecure blockchain-based zero-trust data storage scheme in 6G edge IoT[J]. *Journal of Internet Technology*, 2022, 23(2): 289-295.
- [45] ABDEL HAKEEM S A, HUSSEIN H H, KIM H. Security requirements and challenges of 6G technologies and applications[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(5): 1969.
- [46] LV Z H, SINGH A K, LI J H. Deep learning for security problems in 5G heterogeneous networks[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(2): 67-73.
- [47] PRADHAN D, SAHU P K, GOJE S, et al. Security, privacy, risk, and safety toward 5G green network (5G-GN)[J]. *Cyber Security and Network Security*, 2022: 193-216.
- [48] YUNUS W, LASULIKA M E. Security system analysis against flood attacks using TCP, UDP, and ICMP protocols on mikrotik routers[J]. *International Journal of Advances in Data and Information Systems*, 2022, 3(1): 11-19.
- [49] JYOTHEESWARI P, JEYANTHI N. Secure data transmission for protecting the users' privacy in medical Internet of Things[J]. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 2022, 23(1/2): 171.
- [50] KHOT P S, NAIK U L. Cellular automata-based optimised routing for secure data transmission in wireless sensor networks[J]. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 2022, 34(3): 431-449.

[作者简介]



严学强 (1970-), 男, 华为技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为网络架构、数据治理、联邦学习、分布式计算、隐私保护。



程冠杰（1996- ），男，浙江大学计算机科学与技术学院博士生，主要研究方向为区块链、物联网、可信数据管理、身份认证等。



习燕（1980- ），女，现就职于华为技术有限公司，主要研究方向为 6G 无线网络架构。



邓水光（1979- ），男，浙江大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师，主要研究方向为服务计算、边缘计算、可信数据管理、软件工程、大数据等。



刘超（1982- ），男，中国移动通信研究院基础网络技术研究所主任研究员，主要研究方向为 5G/6G 网络架构、分布式自治网络等。



吴建军（1976- ），男，华为技术有限公司无线技术实验室上海地域负责人，主要研究方向为未来无线网络架构等。



李唯源（1988- ），女，中国移动通信研究院基础网络技术研究所研究员，主要研究方向为 6G 网络架构、网络智能化等。



陆璐（1979- ），女，中国移动通信研究院基础网络技术研究所副所长，主要研究方向为 5G/6G 网络架构、算力网络等。



丰雷（1987- ），男，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副教授，主要研究方向为无线网络管理、分布式智能和工业互联网。



赵明宇（1977- ），男，华为技术有限公司高级工程师，主要研究方向为无线网络架构、分布式架构、数据服务、区块链、边缘 AI 等。



张童（1992- ），男，中国移动通信研究院基础网络技术研究所研究员，主要研究方向为 6G 网络架构、空天地一体化网络等。