

全维可定义的多模态智慧网络体系研究

胡宇翔, 伊鹏, 孙鹏浩, 邬江兴

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对现有网络架构存在结构僵化、IP单一承载、难以抑制未知威胁等问题, 从网络构造的角度来提升网络的功能、性能、效能、安全等性质, 将“结构可定义”贯穿网络的各个层面, 提出了一种网络各层功能多模态呈现的网络架构——全维可定义的多模态智慧网络, 支持寻址路由、交换模式、互连方式、网元形态、传输协议等的全维度定义和多模态呈现, 并讨论了多模态智慧网络的愿景和目标、体系架构和模型、关键技术等。所提架构可为新型网络技术发展提供一种可能的解决思路。

关键词: 网络体系架构; 多模态智慧网络; 全维可定义; 内生安全构造

中图分类号: TN934

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019192

Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network

HU Yuxiang, YI Peng, SUN Penghao, WU Jiangxing

National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China

Abstract: For current Internet is confronted with some defects such as rigid structure, single IP bearing, and disability in suppressing unknown threats, the functions, performance, efficiency and security of the Internet were promoted from the perspective of network structure, the “structure definition” was introduced through all levels of the Internet, and a network architecture of multi-modal presentation of network functions was provided in all levels: full-dimensional defined polymorphic smart network (PINet), which supported full-dimensional definition and multi-modal presentation of addressing and routing, switching mode, interconnection mode, network element, transmission protocol, service properties and so on. Then the vision and goal, architecture and model, as well as the key technologies of PINet were discussed. The proposed architecture can provide a possible solution to the development of new network technologies.

Key words: network architecture, polymorphic smart network, full-dimensionally definable, endogenous security construction

1 引言

随着网络技术和应用的不断发展, 特别是大数据、云计算、人工智能等的出现和应用, 互联网迎来了加速裂变式的新一轮革命, 促使社会各

方面发生颠覆性变化, 并深刻改变着人类世界的空间轴、时间轴和思想维度^[1]。然而, 面对互联网与经济社会深度融合发展带来的专业化服务承载需求, 互联网技术内涵的发展却未能充分支撑网络应用外延的拓展, 现有网络基础架构及由

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-07-31

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFB0803204); 国家自然科学基金资助项目 (No.61521003, No.61872382); 广东省重点领域研发计划基金资助项目 (No.2018B010113001)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFB0803204), The National Natural Science Foundation of China (No.61521003, No.61872382), The Research and Development Program in Key Areas of Guangdong Province (No.2018B010113001)

此构建的技术体系存在网络结构僵化、IP 单一承载、未知威胁难以抑制等基础性问题,对质量、安全、融合、扩展、可管可控、效能、移动等的支持能力低下,无法通过有限的资源动态灵活地满足泛在场景下各类型、各层次用户对智慧化、多元化、个性化、高顽健、高效能等高质量用网体验的需求^[2]。

近 10 多年来,为打破上述网络发展困境、创新网络技术,世界各国均已在新型网络领域开展基础研究和关键技术攻研布局^[3-4],例如,美国不断通过发布相关发展计划或战略来引导网络技术的发展方向,先后启动了规模宏大的 GENI、FIND、FIA 等计划,并于 2016 年启动“网络和信息技术研发计划”,将大容量计算及基础设施、大规模数据管理与分析、机器人与智能系统、网络安全与信息保障、软件设计与生产等作为研发重点。2018 年 9 月 20 日,美国发布《国家网络战略》,概述了美国网络的 4 项支柱、10 项目标与 42 项优先行动。欧盟也将保持其在国际上科技和产业竞争优势的发展重点之一聚焦在了信息网络领域,并先后启动了 FIRE 和 FIRE+计划,资助相关研究累计超过 400 余项。同时,欧盟发布“地平线 2020 (Horizon 2020)”科研计划。2018 年,国际电信联盟成立 Network 2030 焦点组 (Focus Group on Technologies for Network 2030),旨在探索面向 2030 年及以后的网络架构新技术发展。日本先后启动 NWGN 和 JGN2+计划等,并提出泛在战略 U-Japan,即建设泛在的物联网;日本发布的《科学技术创新综合战略 2016》聚焦超智能社会建设,综合部署人工智能技术、设备系统、应用的研究与产业化。我国也对新型网络技术领域给予了高度的关注和重视,明确将“加快构建高速、移动、安全、泛在的新一代信息基础设施”列为重要任务,先后启动了国家“863”计划、“973”计划、重点研发计划等项目,并启动国家重大科技基础设施“未来网络试验设施”项目,以加快推进新型网络基础设施研发和升级。

在此背景下,目前学术界和产业界也在不断努力探索未来网络架构。AT&T 运营商提出的 Domain2.0 网络转型计划和 Vision 2020 计划,通过 SDN/NFV 技术将网络基础设施从“以硬件为中心”转向“以软件为中心”,实现了基于云架构

的开放网络,也验证了软件定义转发、软件定义互连、软件定义硬件等理念和技术,可实现对基础网络的拓扑、协议、软硬件、接口等进行全维度定义。文献[5]提出了一种协议无关、目标设备无关和具备现场可重配置能力的网络平面编程语言 P4,通过转发与控制分离机制,对计算、存储、网络资源进行灵活调度和管理,基于功能可重构、可编程等方法实现了网络开放、可扩展和自演化能力。近年来,以内容标识^[6]、空间坐标标识^[7]、身份标识^[8]等为中心的新型寻址路由等技术发展迅速,已在部分行业网络中初步应用并取得良好效果,显示出了多样化寻址与路由的强大生命力。Clark 等^[9]提出的网络“知识平面”概念,意图基于人工智能与认知系统来实现网络的自配置、自适应、自修复。Mestres 等^[10]提出了知识定义网络的概念,通过动态监测网络状态并基于机器学习算法进行分析决策,进而优化网络配置和性能,一系列利用网络以及人工智能 (AI, artificial intelligence) 和机器学习 (ML, machine learning) 等整合的认知技术,向自动化性能管理和功能维护的“零接触”网络发展。针对随机故障或漏洞后门扰动时的静态性、确定性和相似性问题,我国邬江兴院士团队^[11]提出了拟态构造技术并已在路由交换、域名服务等方面进行设备开发与试点应用,运用创新的系统构造技术为解决网络广义顽健控制问题开辟了一条新途径。

本文从网络构造的角度来提升网络的功能、性能、效能、安全等性质,建立从底层到上层全维度可定义的灵活、通用“魔方”网络结构,并以此为基础提出了一种网络各层功能多模态呈现的网络架构——全维可定义的多模态智慧网络 (PINet, polymorphic smart network),支持寻址路由、交换模式、互连方式、网元形态、传输协议等的全维度定义和多模态呈现,支持互联网的演进式发展,从根本上满足网络智慧化、多元化、个性化、高顽健、高效能的业务需求。

2 多模态智慧网络愿景与目标

随着互联网与经济社会深度融合发展,“互联网+”“工业 4.0”等成为国民经济命脉领域的新支柱,互联网在当前社会中扮演的角色日益增多,使用户对网络的专业化、个性化需求不断提升;多元化终端类型、接入方式不断发展,人-人、人-机、

机-机、网-网通信等成为常态，要求网络必须为海量业务提供多元、个性、智慧、高效、顽健的服务。以此为导向，多模态智慧网络旨在打造一个具有多模态功能呈现、全方位覆盖、全业务承载、智慧化管理控制和内生安全特性的新型网络体系架构，如图1所示。

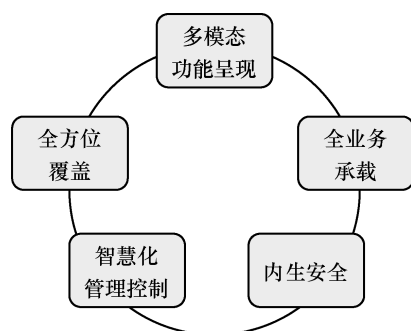


图1 PINet 愿景与目标

1) 多模态功能呈现

面向专业化、个性化服务承载需求，基于全维可定义的网络结构进行网络各层功能的多模态呈现，支持寻址路由、交换模式、互连方式、网元形态、传输协议等的全维度定义和多模态呈现。通过各种网络模态间的互联互通、协同组合、无缝切换，提高网络服务的多元化能力和对于用户需求的个性化适应能力。

在此，多模态体现为寻址路由、交换模式、互连方式、网元形态、传输协议等网络要素的多种模态，其中，寻址路由体现为基于IP、内容、身份、地理空间等标识的多种寻址路由模态，交换模式体现为分组交换、新型电路交换等模态，互连方式体现为光纤、同轴等有线链路或Wi-Fi、LTE等无线链路模态，网元形态体现为骨干级、汇聚级、接入级等的各种功能、性能、外形等不同的各种节点模态，传输协议体现为面向各种业务、场景、功能等需求的各种网络协议。

2) 全方位覆盖

全方位覆盖能力包含全方位空间覆盖能力和全方位场景覆盖能力。全方位空间覆盖能力以多样化通信手段为基础，使网络互联范围延伸到自海底至深空的宽广空间范围，形成覆盖陆、海、空、天等的超广域互联网络；全方位场景覆盖能力能够适应不同应用场景的需求，实现地域性高密度大容量覆盖、混合接入速率覆盖等，强化网络的服务场景适应能力。

3) 全业务承载

针对工业控制、远程医疗、智能家居等新兴产业发展需求，通过网络功能要素的全方位解构，以网元设备、协议控制、承载方式、网络接口等全要素开放和结构定义，极大增强网络对于上层业务需求的适应能力，通过各种网络元素的灵活组合最终实现对具有高可靠低时延、全息信息传送、大容量巨连接等全业务承载。

4) 智慧化管理控制

网络功能的不断丰富化、多样化为网络管理和网络运维带来巨大挑战。通过引入网络智慧化管理控制机制，一方面可以减少网络对人工管理的依赖，灵活高效地实现全维可定义网络的自动化功能定义及资源规划，提高网络运维效率；另一方面，网络智慧化也可以基于人工智能等技术发现网络的最优化资源配置和运维策略，突破传统算法局限性，提高网络资源利用率和服务效率。

5) 内生安全

网络的内生安全性能能够以内生防御的网络构造机制应对网络中软硬件设计过程中不可避免的安全漏洞及后门等安全威胁，从网络构造层面将传统网络的附加式安全模块替代为网络内生性安全能力，实现“高可信、高可用、高可靠”三位一体的网络安全服务。

3 多模态智慧网络体系架构

自然界中的种种现象启示人们：结构决定功能，结构决定性能，结构决定效能，结构决定安全。以碳原子为例，图2所示4种物质都是由碳原子以不同排列结构组成，其功能、性状却千差万别：金刚石是自然界最硬的物质，而石墨却可以作为润滑材料； C_{60} 常态下不导电，石墨烯却已被用于研发超级电池。1959年，诺贝尔物理学奖获得者费曼在美国物理学年会上做了一次重要演讲，题为《在底部还有很大空间》。此次演讲中，费曼指出，未来人类的技术目标可以采用“由下而上的方法”，通过一个原子一个原子的排列来制造物品，“当我们对单位尺寸的物体加以控制的话将极大扩充我们获得物性的范围”。类似地，若人们能够对网络中的功能元素以一种细粒度的组织方式进行动态重构，那么网络功能和效用也将得到极大的扩展。

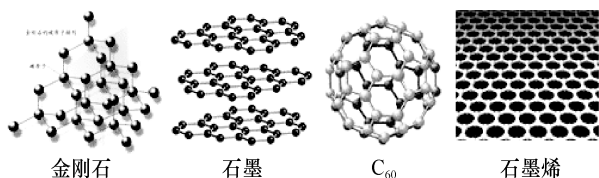


图 2 碳原子的不同排列方式形成性状功能截然不同的材料

信息网络服务过程的本质也是通过资源组合向上提供服务的过程, 基于上述碳原子排列组合的启发, 本文从网络构造的角度来提升网络的功能、性能、效能、安全等性质, 将“结构可定义”贯穿网络的各个层面, 采用软硬件协同处理、资源动态组合、网络重构等网络功能元素的细粒度控制与灵活组合手段, 建立从底层到上层全维度可定义的灵活、通用“魔方”网络结构, 实现网络结构按照功能、性能、效能、安全等需求定义。进一步地, 以网络结构全维可定义为基础, 本文提出了一种网络各层功能多模态呈现的网络架构——全维可定义的多模态智慧网络 (PINet, full-dimensional defined polymorphic smart network), 支持寻址路由、交换模式、互连方式、网元形态、传输协议等的全维度定义和多模态呈现, 支持互联网的演进式发展, 从根本上满足网络智慧化、多元化、个性化、高顽健、高效能的业务需求。

基于上述研究思路, 本文给出了 PINet 的功能层次参考模型。它将传统网络的 7 层参考模型整合为全维可定义功能平面的数据层、控制层和服务层, 支持从底层到上层的数据转发、异构互连、寻址路由、资源调度和功能编排等功能全维度可定义和功能多模态呈现, 支持 IP、身份、内容、地理空间等多模态标识的协同寻址路由; 同时, 该模型还新引入了 2 个平面, 其中, 智慧平面实施“感知-决策-适配”一体的网络智慧决策与拟合; 内生安全平面以基于动态异构冗余的网络构造技术为手段, 实现网元顽健构造、网络顽健控制和服务顽健提供。

图 3 所示模型中, 多模态智慧网络的数据层由多种异构的全维可定义功能基础平台组成, 为整个网络的全维可定义特性、多模态异构兼容性、智慧感知性和内生式安全性提供基础功能支撑和保证; 控制层主要实现多模态寻址与路由等功能, 针对不同网络需求灵活定制多样化路由; 服务层结合上层用户需求和网络服务能力提供网络智慧化资源调度与业务承载。

图 4 给出了多模态智慧网络的技术体系框架。

它以基于全维可定义功能平台的开放式网络架构为基础, 以“多模态寻址路由、网络智慧化、内生安全构造”为使能技术, 实现网络功能开放架构下核心技术的承载与联动, 建立网络结构的自组织、功能的自调节和业务的自适配等机制, 支持网络内在功能结构对资源分配和业务适配的映射调度。

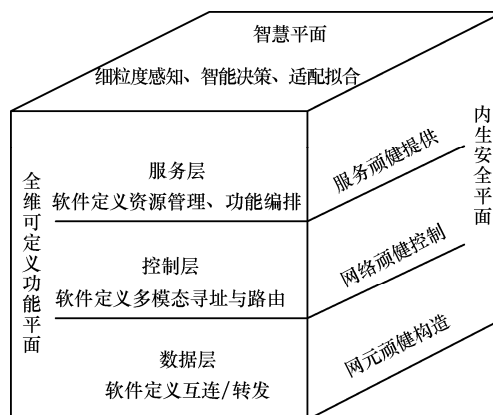


图 3 多模态智慧网络的功能层次参考模型

多模态智慧网络的系统形态如图 5 所示, 它由多个网络功能基础平台共同构成数据层, 支持静态/动态、有线/无线链路, 支持多模态终端标识的混合接入, 支持多模态异构接口协议接入; 在控制层, 它支持 IP、内容、身份和地理空间位置等多模态异构标识的共存共管、协同路由、按需切换, 实现面向多样化服务的多模态寻址与路由; 在服务层, 它通过建立“感知-决策-执行”一体的网络智慧化管理、传输与控制闭环, 实现网络智慧化的资源调度、功能编排、流量优化、运维管理等。

4 多模态智慧网络建模

PINet 的本质是在全维可定义的网络结构基础上, 由业务需求自顶向下逐层进行功能拟合直至实现资源细粒度划分的过程。本文提出了 PINet 的 3 层拟合模型, 分别实施由业务需求驱动的业务与服务拟合、服务与路由拟合、路由与资源拟合, 如图 6 所示, 具体介绍如下。

1) PINet 服务层: 业务与服务拟合。采用服务动态编排与业务自适应承载等机制, 将多样化、个性化的用户业务需求拟合至多模态智慧网络的服务模型 S , 形成网络服务策略。

2) PINet 控制层: 服务与路由拟合。采用多模态寻址路由的互联互通和按需切换等机制, 形成满足具体业务服务质量和网络动态行为特征等要求

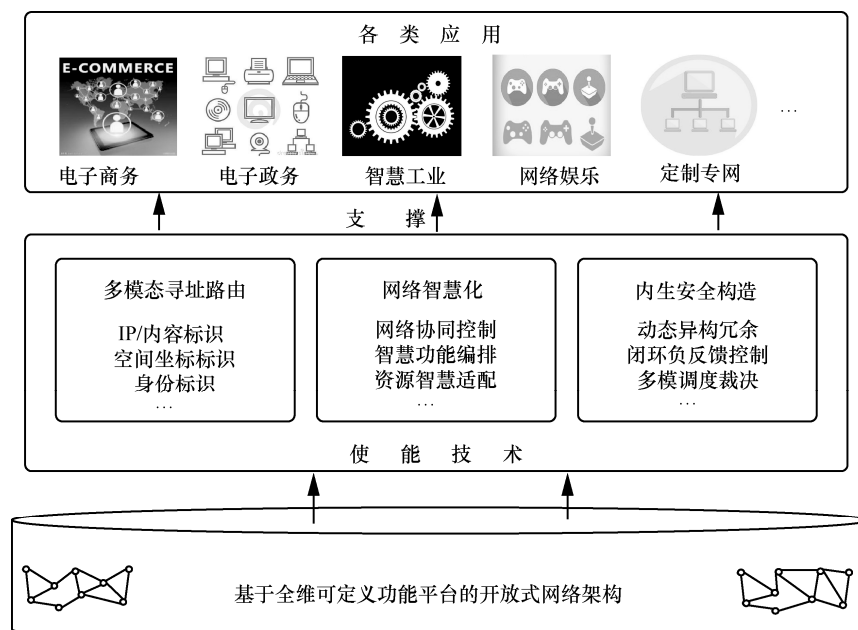


图4 多模态智慧网络的技术体系框架

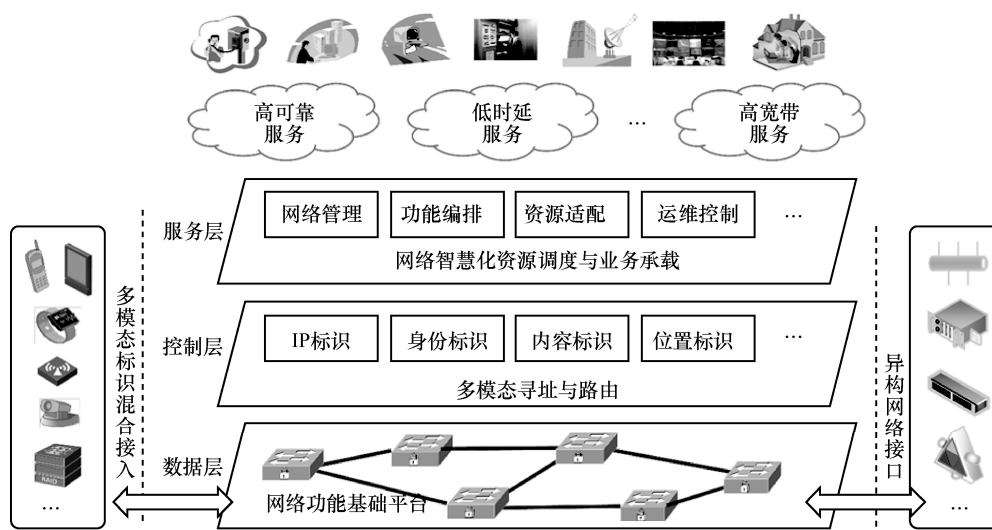


图5 多模态智慧网络的系统形态

的路由 \vec{P} 。

3) PINet 数据层：路由与资源拟合。对基础网络的拓扑、协议、软硬件、接口等进行全维度定义，将路由功能 \vec{P} 映射为精细化、可定义的网络资源组合 \vec{D} 。

4.1 多模态智慧网络的数据层机理

多模态智慧网络的数据层对基础网络的拓扑、协议、软硬件、接口等进行全维度定义，从而为多元化、个性化应用提供了精细化、可定义的网络组件和服务，为实现未来网络智慧化、高顽健、灵活性、多样性等特性提供基础支撑。

开放架构下的全维可定义构件及其运行平台首先应具有良好的稳定性，即相关构件能够在保持新的网络协议或应用增量部署的同时也能够保证原有应用的正常运行；其次，构件必须具有可变化的内在结构，即分组处理的方式以及网络协议的运行方式可以动态改变；最后，在构件结构可变的基础上，构件要能够以某种“柔性”的方式对其结构进行调整，进一步地，柔性是构件针对应用要求对其内在结构、资源做出隐性调整，以实现网络服务效果对应用需求的动态和紧密跟随。

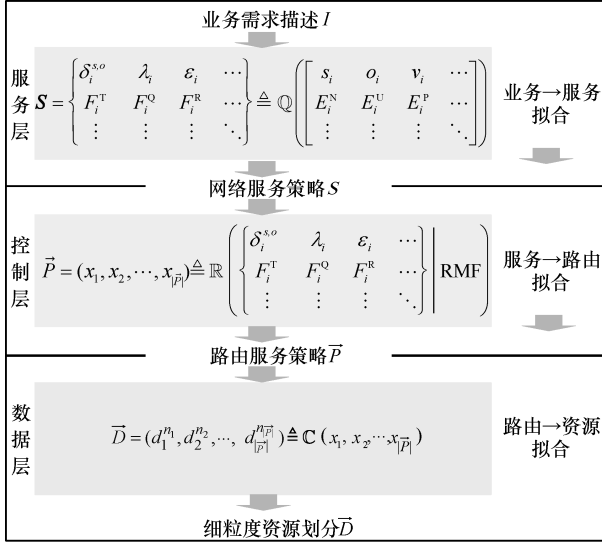


图 6 多模态智慧网络的 3 层拟合模型

具体来说,数据层功能可以由节点状态信息、资源服务能力和功能实例定义。其中, N 表示网络中所有物理节点 n_i 的集合,则节点的状态信息可表示为 $F = (f_1^n, f_2^n, \dots, f_j^n, \dots)$, 包括节点位置、节点类型、节点可信度、节点故障率等, f_j^n 为节点 n_i 在信息类型 j 的信息内容;资源服务能力可表示为 $C = (C_c, C_s, C_t)$, 包括计算 C_c (逻辑运算、浮点运算等)、存储 C_s (RAM 存储、TCAM 存储等)、传输 C_t (带宽、时延、分组丢失率等), 其中每一类服务能力的具体划分以下标 j 表示, 例如 $c_{T,j}^n$ 即节点 n_i 在传输资源 C_t 的第 j 类能力上的提供能力;功能实例 $E = (E_c, E_s, E_t)$ 对应于节点的资源服务能力, 即计算功能实例 E_c (逻辑运算、浮点运算等)、存储功能 E_s (RAM 存储、TCAM 存储等)、传输功能 E_t (带宽、时延、分组丢失率等), 并且以 $e_{T,j}^n$ 即节点 n_i 在传输资源实例 E_t 的第 j 类能力上的服务实例。

基于上述定义,对于服务路径 $\vec{P} = (x_1, x_2, \dots, x_{|\vec{P}|})$ 上的第 x 个服务节点所依赖的物理节点 $n_i \in N$, 其资源实例化结果定义为

$$d_x^{n_i} = \begin{bmatrix} (e_{C,1}^{n_i}, e_{C,2}^{n_i}, \dots, e_{C,j}^{n_i}, \dots) \\ (e_{S,1}^{n_i}, e_{S,2}^{n_i}, \dots, e_{S,j}^{n_i}, \dots) \\ (e_{T,1}^{n_i}, e_{T,2}^{n_i}, \dots, e_{T,j}^{n_i}, \dots) \end{bmatrix}$$

数据层的功能即可表示为以映射函数 $\mathbb{C}(\bullet)$ 完成特定状态下从服务路径需求到数据平面服务实

例向量组合的映射, 即

$$\vec{D} = (d_1^{n_i}, d_2^{n_i}, \dots, d_{|\vec{P}|}^{n_i}) \triangleq \mathbb{C}(\vec{P} | F, C), \quad \forall i \neq j, n_i \neq n_j$$

4.2 多模态智慧网络的控制层机理

多模态智慧网络的控制层主要负责实现多模态寻址路由等功能, 对上承载服务层, 对下控制数据层。多模态智慧网络的控制层融合了现实应用中多样、多变的路由服务并进行抽象归纳, 建立由 IP 标识、内容标识、身份标识和地理空间标识等多模态异构标识空间寻址与路由模型, 针对不同路由的服务特性灵活承载服务层需求, 从而实现上层业务不同网络状态、用户需求、服务类型和安全等需求的自主智能网络标识空间模态切换方法。

为了对多模态智慧网络的路由寻址方式进行表征, 本文引入路由模态特征 (RMF, routing mode feature) 的概念。路由模态特征可由不同路由模态的寻址方式 ad、路由算法 ra、顽健特性 rf 等区分, RMF 可表示为

$$\text{RMF} = \begin{pmatrix} \text{ad}_1, \text{ad}_2, \dots, \text{ad}_j, \dots \\ \text{ra}_1, \text{ra}_2, \dots, \text{ra}_j, \dots \\ \text{rf}_1, \text{rf}_2, \dots, \text{rf}_j, \dots \end{pmatrix}$$

多模态路由是基于多样化应用的业务特征要求和网络动态行为驱动构建的、具有多种 RMF 承载能力的路由机制。从满足业务要求的角度看, 多模态路由要求网络路由应当呈现出功能支持多样化、安全功能支持多样化、服务质量功能支持多样化等的多模态特性。对于具体路由机制, 具有同类要求的一组业务流, 通过确保其性能要求的特定路由形态予以承载, 这样, 控制层针对不同类别的业务流就需要实现多种模态的路由承载, 从而形成多模态路由机制。服务路径建立后, 路径的传送能力继续受认知功能的监测。若不能满足应用需求或达到路由调整的约束条件, 则执行新一轮的多模态路由计算。

基于上述定义, 控制层的服务机理可以概括为将服务层的服务需求矩阵 S 结合控制层路由服务能力通过映射函数 $\mathbb{R}(\bullet)$ 映射得到服务路径的过程, 即

$$\vec{P} = (x_1, x_2, \dots, x_{|\vec{P}|}) \triangleq \mathbb{R} \left(\begin{bmatrix} \delta_i^{s,o} & \lambda_i & \varepsilon_i & \dots \\ F_i^T & F_i^Q & F_i^R & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \text{RMF} \right)$$

4.3 多模态智慧网络的服务层机理

多模态智慧网络的服务层主要实施用户业务需求与网络服务能力之间的拟合, 实现网络运行、功能编排等自适应的承载。具体来说, 服务层首先将用户网络业务需求进行抽象化建模, 依据业务基本参数与效益期望等指标对用户发起的业务进行详细规划, 并依赖业务与服务之间的拟合关系实现业务需求到智慧化服务策略的映射, 采用服务动态编排与业务自适应承载等机制, 形成智慧化网络服务策略。

业务需求模型 I 主要包括业务基本参数 B_i 与效益期望 E_i 。其中, 业务基本参数 $B_i = \{s_i, o_i, v_i, \dots\}$, s_i 为源节点, o_i 为目的节点, v_i 为业务等级; 效益期望 E_i 包括网络效益期望 E_i^N 、用户效益期望 E_i^U 和运维效益期望 E_i^P , 定义为

$$E_i^N = \frac{1}{(\delta_i^{s,o} + K_1 \lambda_i) e^{\varepsilon_i}}$$

$$E_i^U = \frac{\lg(v_i)}{t_{zap} + K_2 t_{sync}}$$

$$E_i^P = \frac{v_i}{c_i^{pro} - c_i^{sta} v_i}$$

其中, δ 为时延约束, ε 为最大分组丢失率, λ 为最大抖动值, t_{zap} 为频道转换时间, t_{sync} 为业务同步误差, K_1 为协调系数 1, K_2 为协调系数 2, c_i^{pro} 为运营收益, c_i^{sta} 为等级标准收益。综上, 业务需求模型 I 可表示为

$$I = \begin{Bmatrix} s_i & o_i & v_i & \dots \\ E_i^N & E_i^U & E_i^P & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{Bmatrix}$$

服务模型 S 包括服务性能指标与必要的功能需求。性能指标 $Q_i = \{\tau_i, \delta_i^{s,o}, \varepsilon_i, \lambda_i, \alpha_i, \dots\}$, 其中 τ 为吞吐率, δ 为时延, ε 为分组丢失率, λ 为抖动, α 为误码率; 功能需求 $F_i = \{F_i^T, F_i^Q, F_i^R, \dots\}$, 其中 $F_i^T = \{f_1^{type}, f_2^{type}, f_3^{type}, \dots\}$ 为服务所需网络功能, $F_i^Q = \{f_1^{seq}, f_2^{seq}, f_3^{seq}, \dots\}$ 为网络功能依赖关系, $F_i^R = \{f_1^{res}, f_2^{res}, f_3^{res}, \dots\}$ 为网络功能依赖资源类型。综上, 服务模型可表示为

$$S = \begin{Bmatrix} \delta_i^{s,o} & \lambda_i & \varepsilon_i & \dots \\ F_i^T & F_i^Q & F_i^R & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{Bmatrix}$$

基于上述定义, 多模态智慧网络服务层的总体工作机理可表述为量化业务描述指标, 通过业务描述到网络服务模型之间的映射关系实现业务需求的网络服务定制, 其中映射关系通过映射函数 $Q(\cdot)$ 实现, 业务指标到服务模型的拟合映射可表示为

$$S \triangleq Q \left(\begin{Bmatrix} s_i & o_i & v_i & \dots \\ E_i^N & E_i^U & E_i^P & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{Bmatrix} \right)$$

5 多模态智慧网络的关键技术

5.1 网络全维可定义技术

随着网络业务形态的不断丰富, 业务对网络的需求越来越多样和多变。而传统网络基础结构僵化、网元结构封闭、资源/功能配置僵化, 网络内在的能力与结构对业务需求的适应性差, 导致网络对融合、泛在、质量、安全、扩展、移动等的支持能力低下, 业务需求与网络基础能力之间的差距越发显著。

网络全维可定义技术通过打破传统网络刚性架构, 建立网络各层功能全维度可定义的开放、灵活、通用架构, 通过将“软件定义”思想从服务层下沉到控制层、数据层, 能够对开放架构下基础网络的软硬件、协议、接口、芯片等进行全维可定义, 真正在各层面实现功能可定义, 资源高效自动适配, 支持各层功能在全维可定义功能平台上的动态加载和演进发展, 支持异构网络的柔性互连, 通过网络结构自组织和业务自适应来动态灵活适配业务发展需求, 从而为网络的柔性化组织和功能多模态呈现提供平台支撑。

如图 7 所示, 网络全维可定义技术包括软件定义硬件 (SDH, software-defined hardware)、软件定义互联 (SDI, software-defined interconnection)、软件定义计算 (SDC, software-defined computation)、软件定义功能编排 (SDO, software-defined orchestration)、软件定义转发 (SDF, software-defined forwarding)、软件定义协议 (SDP, software-defined protocol)、拟态计算 (MSC, mimic computing)/领域专用架构 (DSA, domain-specific architecture) 等。它通过建立网络连接、硬件、协议、转发等全维可定义的基础结构, 实现基础连接、节点、网络等层面全链条可定义, 从而使网络的运行机理不再受制于单一功能或技术, 并使网络具备多维资源的柔性

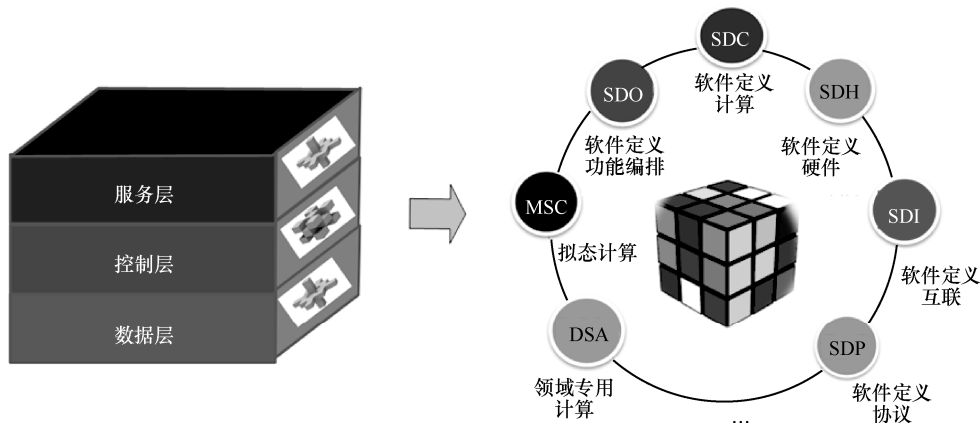


图 7 网络全维可定义的技术内涵

组织和适配能力，在服务灵活性和业务适应性上满足多样化业务需求，自然适应未来业务的复杂不确定演进。

全维可定义技术可改变当前网络固化的运行模式，由其作为“网络功能构件市场”机制的提供者，允许多样化应用动态装配、构建与之匹配的定制化服务构件链，动态部署个性化应用，实现全网业务的灵动适配。此时，网络的功能和工作机理将不再受制于具体的协议，其服务能力不再依赖节点的初始植入设计，其服务能力空间将超越已知协议和机制的限制，从而实现由已知协议定义的网络到需求驱动的网络形态和服务能力转变，充分满足新型网络不断演进的业务需求。

首先，为了保护现有业务和网络设施能够适应网络的演进，开放架构下的全维可定义构件及其运行平台必须具有良好的稳定性，即构件能够在保持新的网络协议或应用增量部署的同时也能够保证

原有应用的正常运行；其次，为了保证网络能够在多维评价指标上呈现良好的变化以满足业务的变化以及新型应用的部署，构件必须具有可变化的内在结构，即分组处理的方式以及网络协议的运行方式可以动态改变；最后，在构件结构可变的基础上，构件要能够以某种“柔性”的方式对其结构进行调整，进一步地，柔性是构件针对应用要求对其内在结构、资源做出的隐性调整，以实现网络服务效果对应用需求的动态、紧密跟随。

图 8 给出了 PINet 的软件定义数据层处理流程，它包括软件定义帧解析、软件定义数据分组处理、软件定义交换调度与队列管理。软件定义帧解析可实现对数据分组多样化的封装模式，支持多模态的数据帧格式；软件定义数据分组处理则基于协议无关转发的数据层抽象处理模型，通过软硬件协同实现协议无关数据分组处理，灵活支持标准协议以及各种自定义协议等。软件定义交换结构与队列管理

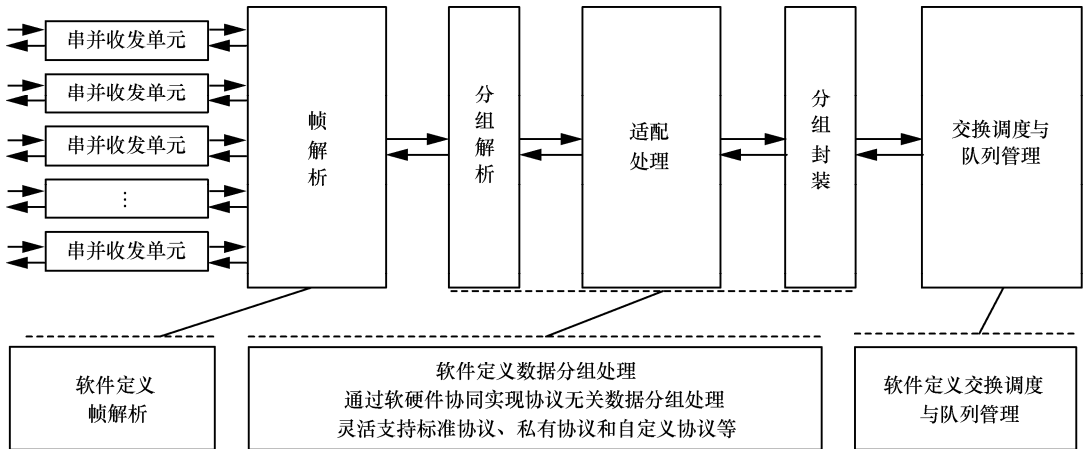


图 8 软件定义的数据层处理流程

可支持多种交换设备互通共存，可定义传输端口数、端口类型、端口流量控制等。

5.2 多模态寻址与路由技术

现有网络的单一化 IP 寻址路由机制存在能力简单而薄弱、安全和移动性差等诸多弊端，而随着网络业务形态的不断丰富，业务对网络的需求越来越多样和多变，基于 IP 的寻址路由能力却是有限的和确定的，与丰富多样的上下层功能之间存在巨大的反差，无法满足多元化和专业化的高效高质量服务需求。

多模态寻址与路由技术在网络体系结构中内嵌新型的寻址与路由功能要素，支持 IP、内容标识、身份标识、地理空间标识等多模态标识的共存与协同，采用计算和数据分离方法将基于上述标识的多种寻址与路由机制自然配合、联合起效、融为一体，从而在根本上突破传统网络 IP 单一承载的制约瓶颈，满足多元化和专业化的高效服务需求。具体来说，多模态寻址与路由技术面向多模态标识空间灵活组网与高效扩展需求，支持跨模态的资源协同与资源分解，实现面向多样化标识空间的协议定义与适配，实现对网络状态、用户需求、服务类型、安全需求具有不同粒度要求的多模态寻址路由的按需切换和互联互通。

多模态寻址与路由的基本逻辑示意如图 9 所示，支持终端以多模态标识混合接入，基于全维可定义网络功能基础平台实施基于多模态标识的混合寻址与路由（如图 9 中基于 IP、地理位置、内容、身份标识等多种路由方式的结合）。在路由建立阶

段，用户终端可直接指定标识类型，或由网络根据资源状态、业务类型、安全需求等反馈标识类型选择结果；在数据传输阶段，网络也可智能进行标识空间切换。例如，出于数据安全考虑，图 9 中用户 A 建立与用户 C 的通信时指定基于地理位置的路由方式，则网络寻址过程按照地理位置进行寻址路由而非 IP 等路由方式，保证了寻址过程中路由器位置在用户可信管理区域内。

多模态寻址与路由互通技术通过多种标准寻址路由协议以及自定义协议的互联互通，形成“领域专用、功能互补、多模共存、确定性能”的 PINet 寻址与路由机制，通过多样化标识空间的协同技术创新和优势互补，解决现有网络存在的诸多弊端，综合有效提升网络服务能力、安全性、移动性、资源利用率等。

如图 9 所示，多模态寻址与路由系统可支持身份标识空间与现有网络融合，提升多样化终端接入的灵活性和服务一致性，从本质上解决终端移动性问题，有效提高网络管控能力；支持内容标识空间与现有网络融合，在网络节点中融入计算、存储和传输的能力，在感知数据的内容和预测用户需求的基础上，实现以“内容”为中心的网络数据自适应流动和汇聚机制，使用户获得高效的内容获取体验；支持地理空间标识空间与现有网络融合，建立地理空间标识与网络编码的转换关系，通过基于地理空间标识的快速寻址与路由生成，实现不同地理空间位置的互联互通，为跨平台的多源空间数据高效交互提供支持；支持用户自定义

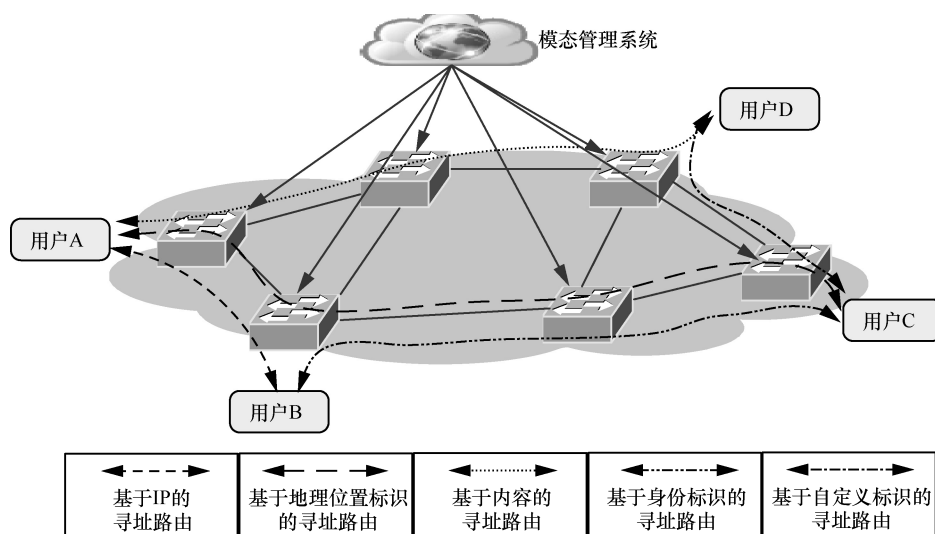


图 9 多模态寻址与路由逻辑示意

标识空间与现有网络融合,在网络基础寻址与路由功能层面上体现出多元融合发展,并由此构建出基于基因信息表达的体系化网络功能生成和按需演化机制,为新型网络技术创新和功能的快速部署提供基础环境支撑。

5.3 网络智慧化管理控制技术

现有互联网的数据传输、资源管理和运行维护等方式僵化,在网络管理复杂性倍增、运行与维护开销巨大的背景下,传统基于静态策略模式的网络配置和运维等方式受限于对复杂网络认知的局限性,在灵活性和实时性等方面已难以适应当前网络业务的复杂性,已无法满足复杂网络环境下的网络资源调度与适配需求。同时,现有用于刻画网络功能、性能等的模型和评价体系,及由此构建的资源提供和业务承载方法均面临深刻变化,导致网络效率低下,用户体验差。

网络智慧化管理控制技术借助人工智能、大数据分析等技术的蓬勃发展以及网络资源的广泛普及性能提升,以网络传输效能、节点运行效能、业务承载效能和服务提供效能等为约束,在结构优化、资源配置、功能管理与业务承载等方面进行智能控制并自我优化,使网络具备面向泛在用网场景的“自动驾驶”能力,能够智能动态适应用户需求的变化,在数以亿计的用户、网元和业务之间进行适配协调,从而优化网络功能/性能,提升用户体验,降低网络运行和维护成本,从根本上为各种类型和各种层次的业务提供多元、个性、高效的服务。

网络智慧化管理控制技术综合采用信息融合、认知计算与协同计算等手段,在实时感知业务与资源状态的基础上构建“感知-决策-适配”一体的智慧化管理控制闭环,实现网络资源与上层服务的高效自适应适配与拟合。其中,信息融合实时感知业务与资源状态及其变化情况并将二者进行融合;认知计算结合网络测量与机器学习技术拟合网络状态与服务性能需求;协同计算统筹异构计算方法实现智能控制与系统优化。

上述逻辑的本质是实现资源均衡组织、调节与适配的闭环拟合决策系统,如图 10 所示。该系统由需求感知、拟合决策、资源分配、网络反馈共同构成,涉及网络多维状态感知技术、智慧化功能编排技术、智慧化流量调度技术和智慧化运维管理技术等。

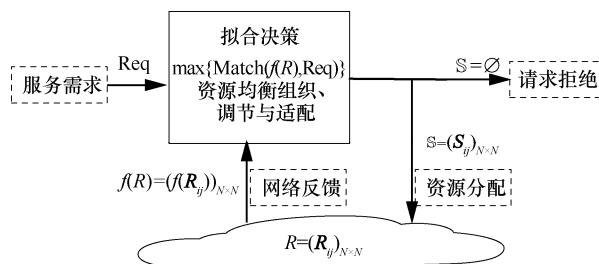


图 10 PINet 的智慧化管理控制闭环建模

网络多维状态感知技术针对信息复杂多变现状建立网络基础设施测量基准,针对网络业务特性构建全维度统一的测量体系,针对网络具有多协议层次的特性设计多协议层次的断层扫描理论和方法,充分利用网络中的异构可编程设备,以较低的额外开销实现网络全维度状态的精确可定义感知。

网络智慧化功能编排技术采用监督学习等方法来构建功能编排模型,实现由僵化执行算法向业务导向承载的转化;基于实时更新的业务数据来训练编排模型,进而建立一套在线自适应编排方案,增强网络服务弹性,提升资源利用效率。

网络智慧化流量调度技术根据当前网络状态,运用深度增强学习等方法获得相应的流量调度策略,生成相应的流表规则下发到数据层来调整全网流量,通过不断地学习和调整优化时延、跳数、吞吐量等多维参数,最终实现全局化、实时性、个性化的网络流量调度。

网络智慧化运维管理技术从设备故障风险、网络运行风险等角度对网络运维管理进行评估,基于嵌入式传感和新型控制节点等手段,支持可定义的全流程运行监控导航、智能网络运行自趋优化和自愈控制,实现基于人工智能和增强现实等技术的网络智慧化运维管理。

5.4 网络内生安全构造技术

网络规模快速膨胀及各种网络要素的复杂性,使网络经常会受到各类不确定的未知威胁或扰动,如链路/节点故障、系统后门/漏洞等,从而导致其性能降低甚至功能丧失。网络安全直接受制于其内在功能和结构要素,必须在网络体系结构中内嵌安全构造机制。

网络内生安全构造技术依据“结构决定安全”“系统大于部分之和”的理念,在多模态智慧网络中植入基于动态异构冗余的内生安全结构,采用基于“相对正确公理”的威胁感知机制动态改变网络系统结构及运行环境,将随机性失效和人为扰动转

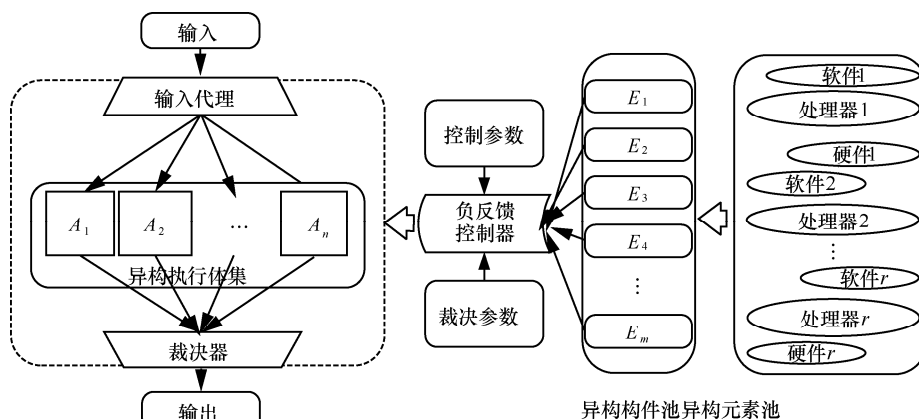


图 11 基于动态异构冗余的内生安全结构

化为概率可控的事件；在此基础上，该技术采用基于多模裁决的策略调度和负反馈控制机制，使功能等价条件下的执行体结构表征具有不确定性，从根本上抑制随机性失效和人为蓄意扰动，从而获得网络的内生安全效应。

基于动态异构冗余的内生安全结构如图 11 所示，该结构由输入代理、可重构的异构执行体集、负反馈控制器、裁决器组成。其中，输入代理根据负反馈控制指令将输入请求分发到相应的（多个）功能等价的异构执行体；功能等价异构执行体集合提供能正常工作且独立处理输入请求的可重构的异构执行体，并在大概率情况下应当能够产生满足给定语义和语法的输出矢量；多模裁决器根据裁决参数或算法生成的裁决策略，研判多模输出矢量内容的一致性情况并形成输出响应序列。其中，异构元素池主要包含组成平台、系统、部件或模块、构件等不同层面的设备，如软件、硬件、处理器等，系统按照反馈策略从异构资源池中选取异构构件作为一个执行体集。

上述结构中，多维动态重构的对象包括可重构的网元实体或虚体资源。网络系统可依据重组方案从异构元素池中抽取与替换目标等效的元素生成新的功能等价对象，或者将等效算法加载到可编程、可定义模块中改变系统的运行流程。

该结构在节点层面的应用体现为：节点采用深度可编程可重构、资源柔性调度等技术，依据网络运行态势的动态感知实现异构化、冗余化网络功能的动态加载和资源的动态编排，采用面向异构冗余单元的表决逻辑或调度策略，对节点资源进行动态映射与编译管理，动态改变系统的组成结构或运行

机制，在有效抵御广义不确定扰动的基础上实现数据分组处理的流水线设计及优化。

该结构在网络层面的应用体现为：在网络地址、拓扑、路由等要素中引入动态化、冗余化、异构化等机制，网络采用可编程转发、资源组合与重构、功能快速编排等手段，实现网络数据传输或流量调度等系统视在结构的动态适配和可信裁决，扰乱攻击者攻击链，在保证原有系统网络配置完整的前提下最小化操作管理，从而获得网络内生安全效应。

6 结束语

针对现有网络架构存在的结构僵化、IP 单一承载、难以抑制未知威胁等问题，本文从网络构造的角度出发，通过网络结构的全维度可定义和多模态呈现来提升网络的功能、性能、效能、安全等性质，提出了全维可定义的多模态智慧网络体系架构。本文讨论了多模态智慧网络的愿景和目标、体系架构和模型、关键技术等，为新型网络技术发展提供了一种可能的解决思路。

本文仅给出了全维可定义的多模态智慧网络体系的初步构想和考虑，诸多新概念和新技术仍需继续完善和探讨，模型中的核心技术和关键技术也需要进一步深入研究并开展相关的实验验证，这也是作者下一步的工作。

参考文献：

- [1] 郭江兴, 兰巨龙. 新型网络体系结构[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
WU J X, LAN J L. Novel network architecture[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2014.

- [2] WU J X. Thoughts on the development of novel network technology[J]. Science China (Information Sciences), 2018, 61(10): 144-154.
- [3] 兰巨龙, 程东年, 胡宇翔. 可重构信息通信基础网络体系研究[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 128-139.
LAN J L, CHENG D N, HU Y X. Research on reconfigurable information communication basal network architecture[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 128-139.
- [4] 黄韬, 刘江, 霍如, 等. 未来网络体系架构研究综述[J]. 通信学报, 2014, 35(8): 184-197.
HUANG T, LIU J, HUO R, et al. Survey of research on future network architectures[J]. Journal on Communications, 2014, 35(8): 184-197.
- [5] BOSSART P, DALY D, IZZARD M, et al. P4: programming protocol-independent packet processors[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 87-95.
- [6] AHLGREN B, DANNEWITZ C, IMBRENDA C, et al. A survey of information-centric networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36.
- [7] DONG F, CHENG C, GUO S. Design and research on GeoIP[C]//14th International Conference on Computer Supported Cooperation Work in Design. 2010: 13-17.
- [8] ZHANG H K, QUAN W, CHAO H C, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future Internet[J]. IEEE Network, 2016, 30(3): 46-51.
- [9] CLARK D D, PARTRIDGE C, RAMMING J C, et al. A knowledge plane for the internet[C]//Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. ACM, 2003: 3-10.
- [10] MESTRES A, RODRIGUEZNATAL A, CARNET J, et al. Knowledge-defined networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2016, 47(3): 2-10.
- [11] 邬江兴. 网络空间拟态防御导论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
WU J X. Introduction to cyberspace mimic defense[M]. Beijing: Science Press, 2017.

[作者简介]



胡宇翔 (1982-), 男, 河南周口人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心副研究员、博士生导师, 主要研究方向为新型网络体系结构、路由与交换技术。

伊鹏 (1977-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心研究员、博士生导师, 主要研究方向为先进网络与防御技术。

孙鹏浩 (1992-), 男, 山东青岛人, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为新型网络体系结构、路由与交换技术。

邬江兴 (1953-), 男, 安徽金寨人, 中国工程院院士, 国家数字交换系统工程技术研究中心主任、教授、博士生导师, 主要研究方向为网络通信与安全。