



未来 IP 网络 IDEAS 关键技术 白皮书 (2020 年)

中国移动研究院

前 言

本白皮书旨在提出对于未来 IP 网络关键技术的“IDEAS”探索思路，希望通过在智能路由、确定性传输、算力内生、无障碍连接和安全性五个方面的探索，能够为未来 IP 网络相关的关键技术创新研究提供参考。

本白皮书的版权归中国移动所有，未经授权，任何单位或个人不得复制或拷贝本建议之部分或全部内容。

目 录

1. 概述	2
2. Internet 的发展和 IDEAS 的创新思路	3
2.1 Internet 的发展	3
2.2 未来 IP 技术的探索	3
2.3 “IDEAS” 创新思路	5
3. 智能路由（I）	7
3.1 智能路由的背景	7
3.2 智能路由的关键技术	7
3.3 智能路由的研究展望	9
4. 确定性网络（D）	10
4.1 确定性网络的背景	10
4.2 确定性网络的关键技术	11
4.3 确定性网络的研究展望	13
5. 算网一体（E）	13
5.1 算网一体的背景	13
5.2 算网一体的关键技术	15
5.3 算网一体的研究展望	16
6. 无障碍连接（A）	17
6.1 无障碍连接的背景	17
6.2 无障碍连接的关键技术	18
6.3 无障碍连接的研究展望	20
7. 网络安全可信（S）	20
7.1 网络安全可信的背景	20
7.2 网络安全可信的关键技术	21
7.3 网络安全可信的研究展望	23
8. 总结与展望	23
缩略语列表	25
参考文献	26

1. 概述

“互联网+”不断催生发展新动能，各种新技术、新产业、新业态、新模式活跃。互联网经济、网络强国的概念已经深入人心，5G 新基建引领了我国的数字经济大发展。在当今的互联网上，视频直播、VR/AR、车联网等各种新应用、新服务不断涌现。

互联网诞生之初，仅仅是为了连接有限的几台计算机，而目前的互联网已经发展到了终端广泛普及，甚至是万物互联。泛在的终端和网络使得信息的沟通更加便捷，在方方面面影响着人们的生活。

应用服务和终端的变革也促使了网络自身的演进。移动通信网络从 3G/4G，正在逐渐向 5G，甚至是未来的 6G 转型。在无线空口速率提升的同时，移动通信网络架构也在发生转变。3G/4G 时期，移动通信网络架构从传统的 TDM Based 向 IP Based 演进；5G 时期，移动通信网络的控制面和用户面进一步解耦，借鉴了 IT 领域的“微服务”理念提出了 SBA (Service Based Architecture) 的架构[1]。相应的，移动承载网络或者固定网络也在向 SDN/NFV 的方向演进，运营商 IP 网络的路由器接口带宽越来越高，设备吞吐量越来越大，同时也在增强着各种新特性、新能力，以应对不断出现的新业务、新需求。

业界对未来的 Internet 网络或者 IP 网络做了很多的探索，其中的一个共识是为了应对新的业务需求，未来的网络需要支持快速的创新，支持新的商业模式。通过对未来 IP 网络的新场景、新需求，以及当前热点技术的调研，本文档创新性地提出了“IDEAS” (Intelligent Routing, Deterministic Networking, Embedded Computing, All-inclusive Connectivity, Security Guarantee) 未来 IP 网络关键技术探索思路。本文档将从 IDEAS 的几个不同的角度来阐述对于未来 IP 网络关键技术的思考。

2. Internet 的发展和 IDEAS 的创新思路

2.1 Internet 的发展

上个世纪 60、70 年代美国部署的 ARPANET（Advanced Research Projects Agency Network）是 Internet 的雏形，起初只用于军事网络。后来，各种各样的计算机网络在规模和数量上的提升，促成了不同网络之间的互联需求，最终导致了 TCP/IP 协议的诞生，也即 Internet 的诞生。初期的 Internet 主要基础是 WWW/HTTP，TCP/IP，分组传输，Ethernet 等，完成的业务也比较简单，大部分是实现基础的数据互联，设计理念是简单、开放和低成本。

经过几十年的发展，随着业务变得越来越复杂，Internet 网络自身也变得越来越复杂。根据 Wiki 百科的定义[2]，Internet 是一个使用 TCP/IP 连接了全球的计算机网络的系统，它内部包含了各种网络，可以是本地的，也可以是全球性的，具体包括个人网络，公共网络，学术网络，商业网络，和政府网络等。因此，从广义上讲，Internet 涉及计算机技术的几乎方方面面，已经形成了一个庞大的技术体系。

随着业务类型、用户数量、终端类型的不断演进，Internet 相关的创新技术也是层出不穷，例如 CDN，云计算，DC 网络，IoT，SDN/NFV，边缘计算等等。可以预见的，随着未来更多的业务场景，连接方式的出现，尤其是未来 6G 网络的各种探索和需求驱动，未来的 Internet 或者未来的 IP 网络也需要更多的创新技术来支撑。

2.2 未来 IP 技术的探索

为了应对各种业务的新需求，互联网领域的研究人员一直在致力于对 IP 的改善，包括学术界、产业界等。其中，IETF 是制定互联网协议的权威组织，它是 IP(v6)协议、TCP 协议、DNS 协议、路由协议等标准的发源地。近年来 IETF 积极推动 IP 技术创新，先后成立了源路由（SPRING）、确定性网络（DetNet）

等工作组。同时，国际电信联盟电信标准分局（ITU-T）的 FG-NET-2030 焦点组，以及国内 2018 年成立的网络 5.0 联盟[3]也对 IP 技术创新进行了广泛的讨论。

FG-NET-2030 的 Network 2030 白皮书[4]展望了未来的网络业务，包括全息通信（Holographic Type Communications），多维感知网络（Multi-Sense Networks），网络业务的时间工程（Time Engineered Applications），网络业务的高可靠底层架构（Critical Infrastructure）。如图 2-1 所示，从业务发展的角度来看，只有攻克未来 IP 网络的关键技术难点，才能构建持续演进的 Internet，满足未来 IP 网络越来越多的业务种类和不断增强的业务 SLA 诉求。

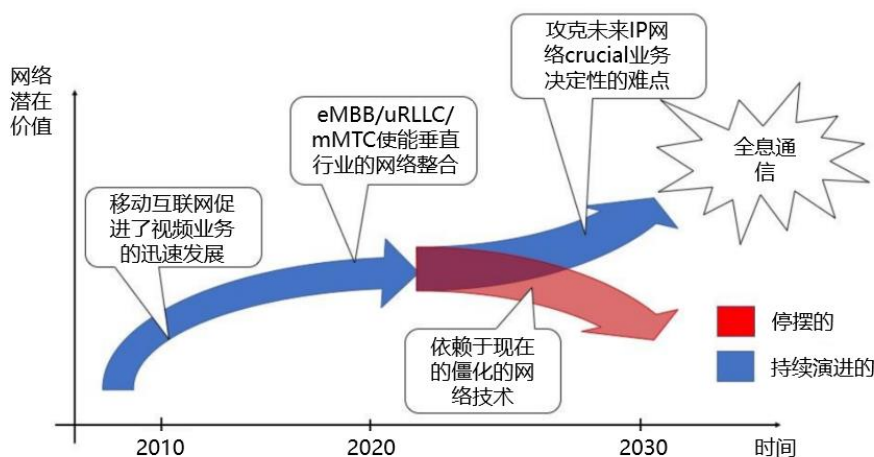


图 2-1 未来 Internet 的潜在核心价值演化趋势

面对 IP 网络“尽力而为”设计初衷所带来的问题，业界存在着保守派和改良派两种演进路线。以 IETF 为首的保守派推崇继续以补丁方式解决 TCP/IP 协议栈面临的问题。改良派则认为这种补丁式的技术演进无法从根本上解决 IP 网络面临的问题，倾向于进一步完善 IP 网络顶层设计。

中国移动参与的“网络 5.0”联盟提出了 IP 网络“阶段化演进”的思路，即基于现有 IP 网络协议基础逐步演进，同时在演进思路采取“分代目标、有限责任”的策略，以打造新型 IP 网络体系和 IP 网络代际。

2.3 “IDEAS” 创新思路

为了支撑未来互联网的分代演进，本文档从“新路由”，“新 QoS”，“新算力”，“新互联”，“新安全”五个角度出发，提出了针对未来 IP 网络关键技术的“IDEAS”创新思路，如下图所示。IDEAS 创新网络遵从 Internet “开放互联”的原则，在 IP 网络上逐步增加新的能力，构建持续创新演进的未来 IP 网络。

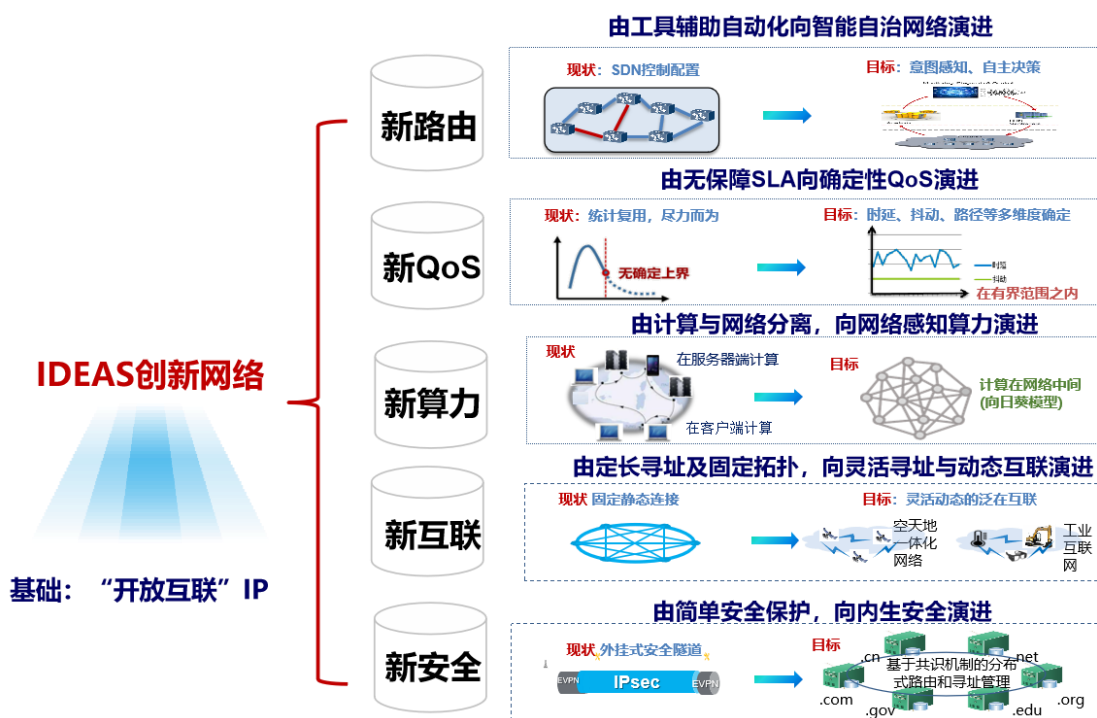


图 2-2 IDEAS 的未来 IP 网络演进思路

在“新路由”方面，基于 IDEAS 的未来 IP 网络将从目前的 SDN 控制配置，向智能自治演进；在“新 QoS”方面，基于 IDEAS 的未来 IP 网络将从目前的仅支持统计复用，向支持确定性 SLA 保障演进；在“新算力”方面，基于 IDEAS 的未来 IP 网络将从目前的计算与网络分离，向算网一体演进；在“新互联”方面，基于 IDEAS 的未来 IP 网络将从仅支持固定的静态连接拓扑，向支持灵活寻址和动态互联演进；在“新安全”方面，基于 IDEAS 的未来 IP 网络将从外挂式

的安全防护，向内生安全演进。

“五新”思路是对未来互联网分代演进的思考，“IDEAS”是技术演进路径的参考。一方面，“IDEAS”代表了“创意”的含义；另一方面，“IDEAS”可以分解为五大技术领域，如下图所示的 Intelligent Routing, Deterministic Networking, Embedded Computing, All-inclusive Connectivity, Security Guarantee, 即以“IDEAS”为顶层设计理念，聚焦智能路由，确定性网络，算力网络，无障碍连接和安全性五大技术领域，构建面向未来 IP 的网络技术体系。



图 2-3 IDEAS 的五大技术领域

智能寻址与路由：智能化是未来网络的发展方向，而寻址和路由则是 IP 网络的基础能力。产业界和学术界对于智能网络、智能路由的研究将给 IP 网络带来基础性的变革。

确定性 QoS：传统的 IP 网络是按照尽力而为设计的，无法很好的支持未来工业互联网，垂直行业应用的确定性传输需求。确定性技术是未来 IP 网络的核心能力增强，将使能 IP 网络新的商业模式。

算网一体：算力网络是 IP 网络重要的演进方向之一，支持网络即服务。目前的网络仅仅是一个连接手段，被旁路在 Internet 的用户和服务这两个核心价值点之外。算网一体有助于让运营商摆脱哑管道，真正进入 Internet 的核心价值链，构建新的行业生态。

无障碍连接：未来的 IP 网络需要实现泛在互联，支撑 IoT，低轨卫星网络等新型网络，不断扩大 IP 的能力边界，实现 Internet 的无障碍连接。著名的“梅特卡夫定律”指出，一个网络的用户数目越多，那么整个网络 and 该网络内的每台计算机的价值也就越大。

网络安全可信：传统的 IP 网络的安全特性都是外挂式的，IP 网络设计之初，为了简化互联，并没有考虑安全方面的问题，未来的内生安全增强等技术将能够让网络变得更加可信，使能 Internet 更自由的互联互通。

3. 智能路由（I）

3.1 智能路由的背景

在高速发展的互联网时代，网络与人工智能的结合成为大势所趋，这种新型的技术体系可以提升网络效率，降低运营成本，实现智能可视、智能运维、智能规划、智能安全等，使网络时代变得更加智能、高效、便捷、安全。

一方面，网络自身就是一个规模庞大、分布广泛、数据繁多并不断变化的复杂信息系统。从通信技术、网络技术的研发到实际网络的规划建设、运行维护等存在大量的潜在场景可以通过人工智能技术进行性能和效率上的提升。

另一方面，网络服务于社会生活的方方面面，支撑大量的垂直行业的信息化和智能化需求，传统的网络服务模式导致的网络僵化、服务滞后等短板将无法适应新需求的发展。软件化的通信网络结合人工智能技术，基于网络海量数据对网络运行状况、各行业客户和个人用户的行为特征，以及网络内容流向进行深入剖析，结合端到端网络资源的变化趋势，实时动态地精准设置用户的业务质量属性，引导全网资源更合理的布局，提升网络的整体效率，提高用户的业务质量体验。

智能路由也需要从网络自身，以及从服务和网络交互两方面入手。一方面，智能路由需要监控网络中的设备和流量情况，在智能分析平台进行多维度分析，进行路由调优；另一方面，智能路由要支持与用户、服务的交互，综合考虑业务需求、业务特征，以及网络情况，自动进行路由适配，合理利用网络资源，优化用户的服务质量。

3.2 智能路由的关键技术

智能路由涉及到网络的多个层次，如下图所示[5]。在网络基础设施层，应

支持设备的本地智能，一些需要快速决策的任务可以在本地完成决策闭环，例如一些路由转发策略的生成和执行；在网络资源管控层，需要支持轻量化的 AI 引擎，在网络层面实现网络资源、路由策略的优化，同时支持上层业务编排的执行；在上层，应该支持 AI 的算法库，以及网络数据的深度分析，同时支持 AI 模块与运营模块的交互，执行复杂的业务配置和路由映射。

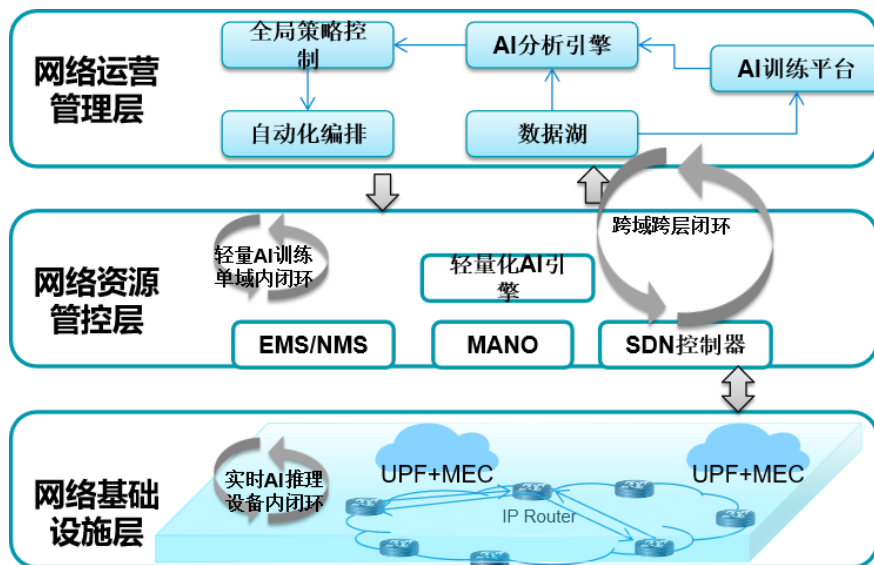


图 3-1 智能路由在各个网络层次的实现

智能路由的相关关键技术包括：

可编程网络：可编程网络是对网络整体功能和行为的高度抽象以及软件编程的自定义，其核心思想是通过对网络节点提供开放可编程接口，利用编程语言向网络设备发送灵活的编程指令，实现对网络功能和行为的按需管控和新业务的快速部署。随着国内外对网络可编程思想认识的不断加深，网络可编程技术的不断完善，该技术逐渐成为构建未来新型网络的核心技术。网络可编程可以有效的支撑智能路由的策略触发，以及策略执行，从而实现业务需求的灵活适配。

基于意图的网络 IBN (Intent-Based Network)：IBN 是一种在掌握网络“全息状态”的条件下，基于人类业务意图，借助人工智能技术进行搭建和操作的闭环网络架构。IBN 系统由以下几部分组成：

- 意图翻译和验证：系统从用户获取业务策略（意图），将其转换为网络

配置，同时在网络模型上验证配置是否能满足业务策略；

- 自动化配置：通过网络自动化或网络编排完成网络基础设施上的配置；
- 网络状态感知：实时获取网络和设备运行状态；
- 意图保障和自动修复：充分利用 AI 技术，实时验证业务意图是否得到满足，并且在意图无法满足时自动修复或给出修复建议。

IBN 可以作为智能路由对外的接口，提供高度抽象化的网络路由管理模式。

深度学习：近年来，以深度学习为代表的机器学习技术的发展，给了重新思考互联网动态路由可行性的机会。基于机器学习技术，可以通过对互联网路由历史数据的挖掘来学习到“隐式”的路由决策。具体而言，机器学习对互联网动态路由带来的新的机会体现在以下几个方面：

- 提高了网络感知能力：以 CNN（卷积神经网络）等为代表的深度学习算法，可以大大提高在复杂环境下的目标识别能力，并且已经在图像识别领域大获成功。应用到路由场景中，流量类型识别、拓扑故障识别等问题也有望取得更大的进展。
- 提高了流量拟合能力：以 RNN（循环神经网络）等为代表的深度学习算法，极大提升了对时序数据的曲线拟合能力，并且在语音处理领域得到成功运用。应用到路由场景中，可以大大提高对流量矩阵、链路负载、拓扑故障等问题的预测能力，从而提升路由的动态响应能力。
- 提高了规划决策能力：以强化学习为代表的机器学习算法，提高了对复杂环境下动态规划决策的准确率，并且在棋类竞赛等领域取得极大成功。应用到路由场景中，可以加强对流量动态场景下的路由规划能力。

3.3 智能路由的研究展望

网络智能路由的演进是个分阶段实现的长期过程，第一阶段主要是实现网络资源的统一部署、控制和管理，实现软件定义的业务敏捷部署，路径自动优化，释放大量重复、低效的手工劳作和人工交互；第二阶段引入大数据分析和机器学习等 AI 技术，提供网络预测性感知和前瞻性的保障能力，确保网络可靠、平稳

运行并提供优化建议；第三阶段需要匹配高层次运营意愿（intent）和策略，网络在自动管控、深度感知基础上，通过对这些意愿的持续验证和综合优化，实现运营意愿驱动的智能闭环自治，在极大降低运营支出（Operating Expense, OPEX）的同时最大释放网络潜能和提升效益。

网络和人工智能的发展是相互促进的。一方面，AI 技术能够助力网络逐步胜任复杂的规划、建设、维护、优化等工作，实现网络智能化、自治化，路由自动优化；另一方面，5G 网络、MEC 边缘计算能力、智能路由调度，也可以为 AI 应用发展提供更高效率的网络环境，加速 AI 应用的落地。

4. 确定性网络（D）

4.1 确定性网络的背景

新型业务对网络的性能和 QoS 提出了更高的要求，例如工业互联网的工业控制、电网的差动保护等需要毫秒级的时延，并且要求抖动控制在很小范围之内，消费互联网的 AR/VR、云游戏等也对网络提出了越来越苛刻的带宽和时延需求，如图 4-1 所示。

业务应用	网络时延（单向）	抖动	可靠性
智慧楼宇	10~100ms	<1ms	99.9999%
工业控制	1~10ms	us级	99.999999%
机器交互	50ms~100us	/	99.999%
电力保护	4~10ms	<250us	99.9999%
自动驾驶	3~100ms	<1ms	99.999999%
Cloud VR	<30ms	/	99.999%

图 4-1 新型业务的确定性需求

传统网络“统计复用、尽力而为”的原则已经无法满足新型业务的需求，新型的网络需要更加严格、细粒度的控制和转发机制来实现网络的 QoS 保障。确定性网络是“IDEAS”设计理念中关键的转发技术，通过新型的报文、流量控制机制保障数据转发的确定性，确保业务流量的按时到达，提升用户体验。

4.2 确定性网络的关键技术

确定性网络可以保障时延、抖动、丢包率等的确定性，提供极致的网络承载服务。标准组织很早就启动了网络确定性的研究和标准制定，代表性的技术有 IEEE802.1 TSN 和 IETF DetNet 等。

IEEE802.1 Time Sensitive Network: TSN 是一族 OSI 二层协议的总称，2012 年继承于 AVB (Audio/Video Bridging) 工作组，将应用领域从音视频扩展至工业控制、汽车控制等多种对时间敏感的领域。TSN 基于标准的以太网网络，通过时钟同步、资源预留和流量整形等技术，提供确定性的报文传输，保障了网络的低时延、确定性传输以及可靠性等。目前 TSN 的关键时延控制机制已经确定，大部分相关标准已经定稿发布。

IETF Deterministic Networking: 2015 年 IETF 成立 DetNet 工作组，整合了 TSN 在 L2 的技术机制和架构，提供 L3(兼容 L2)的确定性网络技术解决方案。应用场景包括移动网络前传、电力系统、自动化楼宇系统、车联网、区块链、网络切片、矿井系统等，且满足同一系统不同地域不同区域子系统之间互通协同 [6]。DetNet 目前还处在发展阶段，在 IETF 已经发布了三项 RFC，分别是关于问题声明、应用案例和架构 [7]。DetNet 涉及的技术包括拥塞保护、显式路由、服务保护、数据面封装、OAM、大规模 DetNet 网络等；在数据面封装方面，DetNet 正在定义基于 IP 以及基于 MPLS 的数据封装方案。

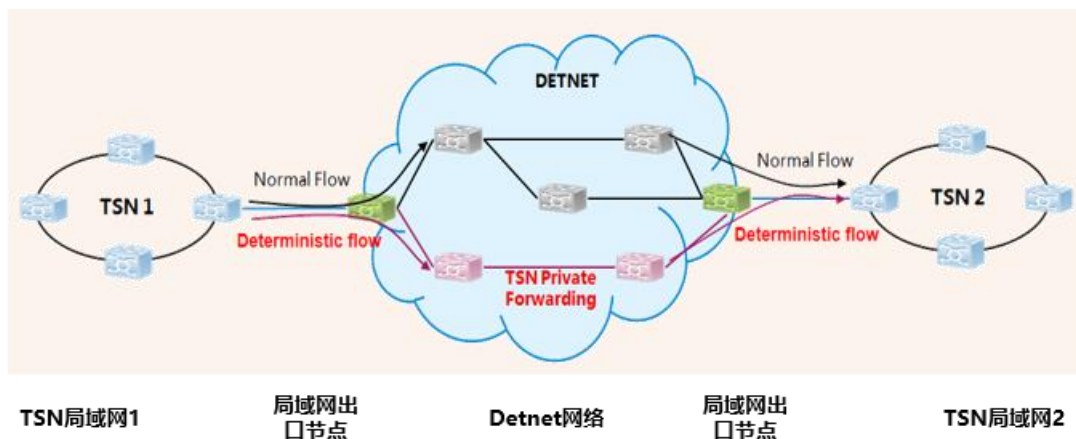


图 4-2 确定性网络组网方案

TSN 和 DetNet 提供了一系列确定性网络的基础技术，目前业界较为公认的组网方案是通过 DetNet 连接各个 TSN 子网，在 DetNet 和 TSN 之间通过设备完成 L2 和 L3 的转换。同时，业界也有基于其扩展而成的其他方案，例如：

- Deterministic IP，基于频率同步和标签映射实现周期性队列调度，可以满足长距离网络的确定性传输。该方案的网络时延只与路径所经过的转发设备数量以及队列变换的周期相关，是经过理论推导以及测试验证的方案。
- Deadline-aware Transport Protocol，基于 deadline 的动态调整数据优先级从而保证时延的 L4 方案，目前正在 IETF QUIC 工作组推进[8]。
- 抑制微突发，分析出流量突发和丢包等现象一般发生在汇聚节点处，通过在汇聚节点增加缓存时间并进行流量整形来保证网络总体的低时延转发[9]。
- TDM、FlexE 等一些确定性转发和资源隔离技术也正在被考虑应用在一些特定低时延场景中。

除了 IEEE 和 IETF，其他标准化组织例如 3GPP 目前也正在研究 5G 和 TSN 的结合，希望能够保证 5G 接入下的确定性服务。

目前，确定性网络的技术、标准和产业目前已经有了一些阶段性的成果，但仍然面临一些技术实现和部署等方面的问题，例如：

业务指标待明确：目前应用方对确定性网络需求指标还未明确。由于传统网络尽力而为的机制已经渗透到各个业务，行业对于网络的不充分信任导致业务的带宽、时延和抖动等指标仍然无法明确。IETF、3GPP 等也只明确了部分场景，如智慧楼宇系统、电力保护、自动驾驶等的确定性指标需求，对于其他多种场景还无法达成准确的共识。

缺乏系统性测试：关键技术机制虽然趋于成熟，但部分缺乏验证。确定性网络关键技术例如时钟同步、资源预留、流量整形、队列控制等在理论上已经得以证明，但成功落地部署的案例还不多，特别是在网络拓扑复杂、业务种类多的场

景下，可能存在部署困难甚至无法实现的情况：

- 时间同步：在大规模网络应用情况尚待验证；
- 资源预留：存在如何权衡资源利用率和时延保障的问题；
- 流量整形：无法实现自适应的动态调整，且实现粒度较大；
- 队列控制：多种业务流量汇聚情况下可能难以配置甚至无法实现。

4.3 确定性网络的研究展望

确定性网络是网络演进的一个重要方向，将会带来转发技术的革命性突破，也将会成为未来网络业务 SLA 保障的重要技术。结合前述的技术挑战，建议可以从以下几个方面进一步推进确定性网络的技术和产业：

明确各行业应用的确定性需求：5G、工业互联网等催生了大批新型行业应用以及 OICT 技术的融合，需要向行业用户普及网络所能带来的确定性保障，进一步明确行业用户的确定性需求。

验证确定性组网方案和关键技术：结合业务流量特征，实际的组网拓扑等，多方面验证 TSN、DetNet 等关键技术方案，为行业用户提供可实施的参考案例，是推进确定性网络进一步发展的关键。

鼓励更多样化的确定性技术方案：端到端确定性网络的实现可能涉及多种网段、多个层面的技术，是多种技术的结合，可以鼓励从降低复杂性、动态自适应并结合具体业务等方面尝试改进和补充。

5. 算网一体（E）

5.1 算网一体的背景

随着互联网新兴业务的不断出现，海量数据的传输、分析和存储对传统网络和集中式的中心云计算提出了巨大挑战，带来了“传不畅、算不动、存不下”的问题，驱动算力下沉至边缘。在云计算、边缘计算的发展大趋势下，未来社会中会在靠近用户的不同距离上遍布许多不同规模的算力，这些算力资源通过互联网

为用户提供各类个性化的服务。从百亿量级的智能终端，到全球十亿量级的家庭网关，再到每个城市中未来 MEC 带来的数千个具备计算能力的边缘云，以及每个国家部署的数十个大型的云 DC，形成海量的泛在算力，从各处接入互联网，促进了计算和网络的深度融合。

算力内生网络是应对算网融合发展趋势提出的新型算网一体架构，如图 5-1 所示，其基于无处不在的网络连接将动态分布的计算资源互联，通过网络、存储、算力等多维度资源的统一协同调度，使海量的应用能够按需、实时调用不同地方的计算资源，实现连接和算力在网络的全局优化，网络将从提供“连接”到走向提供“连接+计算”，真正实现了网络内生算力，以及算力与网络一体化。



图 5-1 算力内生网络

与此同时，计算技术正在向着轻量化、启动更快、运行代价更小的方向发展，如图 5-2 所示，随着微服务的发展，应用被解构成多个微服务组件部署在平台上，由 API Gateway 统一调度，实现微服务按需动态实例化，网络需要为各功能组件按需分配算力，保证业务的算力需求。因此，面向未来网络的新一代 IP 网络技术需协同考虑网络和计算融合演进的需求，实现泛在连接和泛在算力架构中网络的全局优化、算力的灵活调度、业务的合理分布。

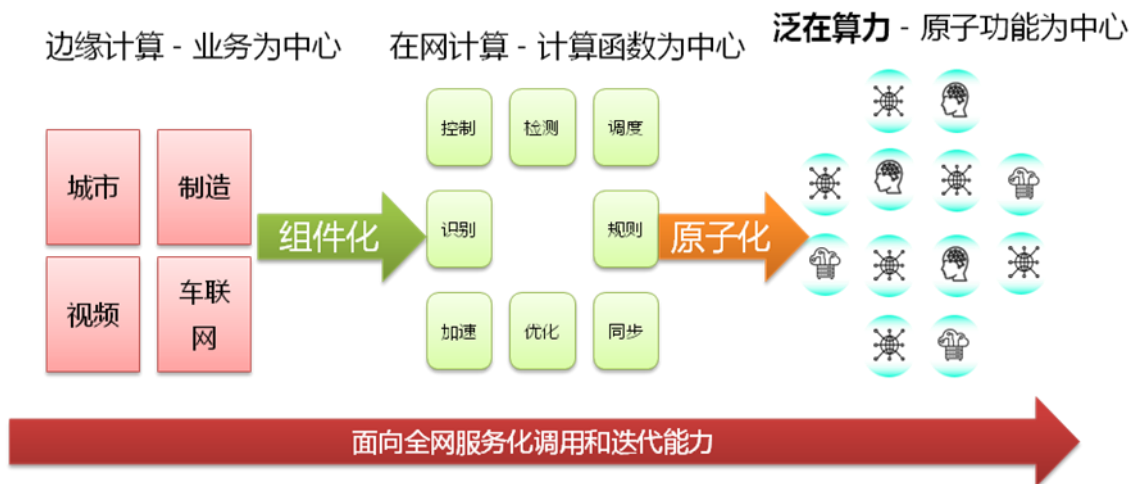


图 5-2 分布式微服务架构下的算力演进

5.2 算网一体的关键技术

当前的边缘计算部署面临着各种挑战，例如单个边缘资源受限，运维成本高，硬件异构，负载不均衡，边云无法协同，无法满足高可靠性业务需求等。这些挑战的解决并不能完全依赖于“计算”，还需要“网络”与“计算”的高度协同。作为未来算网一体架构的技术探索，中国移动提出了一种基于分布式系统的计算网络融合技术方案——算力感知网络(CAN, Computing-aware Networking)[10]，其架构如下图所示。

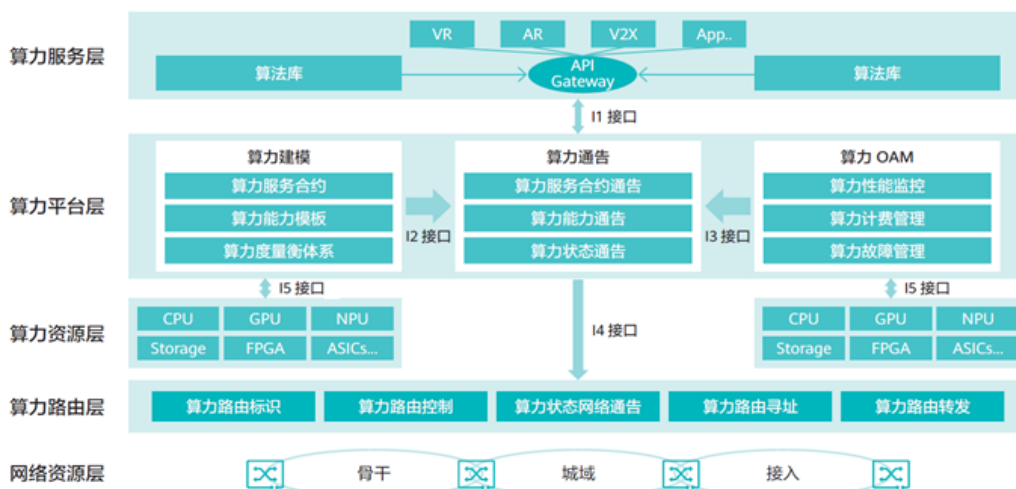


图 5-3 算力感知网络的功能架构

算力感知网络对边缘计算资源进行算力的统一建模，并将算力资源状态通告给网络设备。算力感知网络的转发节点可以将用户需求与网络资源和算力计算资源的实时状况进行映射，将不同应用的业务请求通过最优路径，调度到最优的计算节点，实现网络和算力的协同优化调度，在实现用户体验最优的同时，保证运营商网络资源和计算资源利用率最优化。

算力感知网络、算网一体网络架构的相关关键技术包括：

应用感知：面向新兴业务严苛的业务需求，传统的网络与应用解耦的模式不再适用；未来网络需要感知应用需求，包括网络需求（如带宽，时延，抖动，和丢包率等），以及算力需求（如算力类型等），网络将根据应用需求进行业务调度。

算力感知：面向全网的泛在算力，网络需要感知算力资源的分布及状态，算力感知包括计算节点将算力资源通告至网络节点，以及网络节点之间的算力状态广播，进而形成全网算力资源视图。

算力路由：面向算网融合的未来网络，需要引入考虑算力状态的路由机制，在路由生成时综合考虑网络和算力资源，生成最优路由；此外，还需要考虑结合算力信息的路由规划算法。

算力 OAM：算力 OAM 包括算力性能监控，算力故障切换以及算力计费管理。算力资源的性能监控可以通过主动上报或被动检测实现，实现算力资源状态的实时监控；当某节点发送故障时，快速将业务切换至其他服务节点，保证用户的服务一致性。

5.3 算网一体的研究展望

作为运营商未来 IP 网络技术演进的关键技术之一，算力内生网络或者算网一体架构通过网络与算力资源的协同开放，有利于构建更加开放共赢的产业生态环境，给用户和运营商的边缘计算产业发展带来新的机遇。通过算力内生网络，运营商可以给用户提供 ICT 协同融合的综合服务能力。一方面，网络计算的协同调度，使任意位置接入的用户均可以得到同样的用户体验；另一方面，实时动态

的负载均衡可以让运营商的算力资源动态灵活调整，大幅提高资源的整体利用效率。

算网一体、算力网络在产学研各方面已经达成初步共识，相关的需求、架构、技术等方面的探索和研究已经启动，但是同时也面临诸多关键问题和挑战。建议可以从以下几个方面进一步推进算力网络的技术和产业：

构建算力网络体系：深入研究算力度量衡、算力建模、算力感知、业务的算力需求映射机制，以及算力资源统一管理 etc 机制，协同管理、控制和数据面构建全新的算力网络系统。

验证算力网络关键技术：建立算力网络关键技术原型和测试，从功能和性能上验证算力网络的关键技术；针对关键技术结合典型应用场景进行功能验证与性能测试。

相关的标准化和产业推进：算力网络相关的技术需要多方合作，共同推进，这中间广泛的产业合作，以及国内外的标准化工作尤为重要。

6. 无障碍连接（A）

6.1 无障碍连接的背景

数据网络的服务边界正在从互联网业务逐渐扩张到工业制造、交通运输和农业生产等传统行业。在不远的将来，空、天、地、海等多种新型异构网络将不断融合协同，以支撑丰富的网络新应用。随着新应用越来越丰富，接入网络的通信实体的种类和数量也越来越多。海量通信主体不再局限于传统的主机，设备、内容、服务与人都可以作为通信主体。为了支持海量异构通信主体、异构网络间的无障碍连接，未来的 IP 网络演进需要统一的网络协议，支持变长网络地址、多样化寻址、面向服务的路由等关键特性。

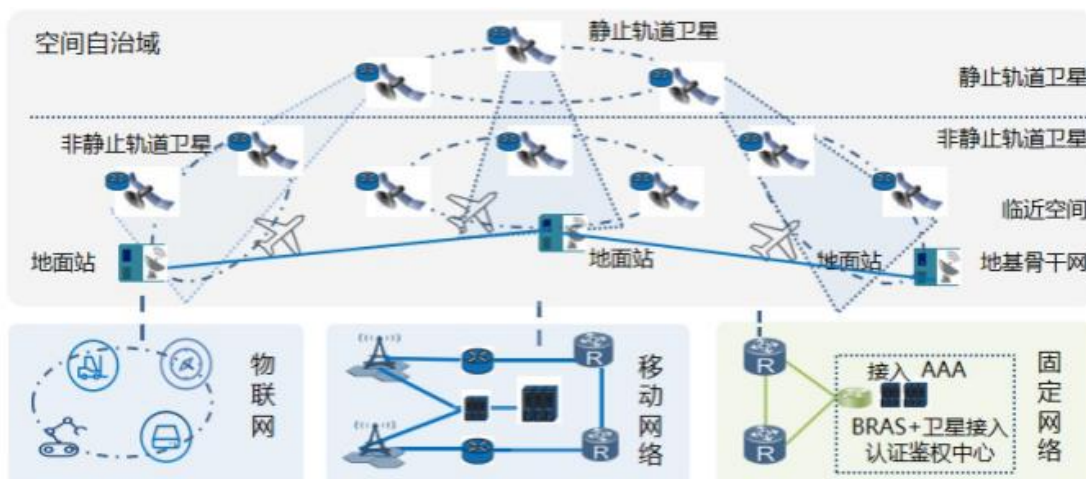


图 6-1 无障碍连接的组网场景

6.2 无障碍连接的关键技术

随着物联网、空天地一体化网络等技术的蓬勃发展，种类繁多、规模庞大的网络正在不断新建完成，支持异构网络无障碍连接是未来网络的发展趋势。

与传统的互联网相比，物联网部署了海量的多种类型的传感设备。为了实现信息的准确传递，一方面需要足够的 IP 地址空间对物联网设备进行标志，另一方面 IoT 网络设备功耗、计算、存储能力受限，传输的数据多为小包，且频率较高，128bit 固定 IPv6 地址长度会占用更高比例的资源，对其来说开销过大。因此，IoT 网络需要灵活可变的地址格式和多样化的寻址机制；同时，在传输过程中，为了保障数据的正确性和及时性，必须适应各种异构网络和协议。

卫星通信网络与地面网络相对独立，具有不同的物理、逻辑特性，采用不同的协议体系结构。当前的地面网络默认对象是同质的，具有几乎相似的物理（包括电源和固定位置）和逻辑（包括计算功率和交互性）功能；相对的，卫星通信网络是一个高度异构的网络。此外，基于 IP 的网络（包括主机和路由器）默认物理拓扑是相对静态的，而卫星通信网络是一个高速变化的动态网络。

异构网络的无障碍连接相关关键技术和挑战包括：

灵活统一的编址技术：设备的异构性使得未来网络中会存在多种地址类型，利用协议转换解决编址差异会造成巨大的网络开销。同时，空间网络具有拓扑变

化频繁、链路带宽和误码率波动较大等特点，现有的编址技术不能直接运用于空间网络这类动态网络。因此需要充足的地址空间满足海量设备的接入（基于 IPv6 的编址）[11]，灵活统一的编址（如 flexIP）[12]，高效的地址管理机制来解决上述问题。

组网：相对于固定不动的地面节点，以卫星网络为代表的动态网络高速变化，且计算资源受限，合理的组网方案可以减少网络拓扑变换，提高通信效率。但是卫星网络的组网问题极为复杂，需要考虑轨道高度、轨道角度、覆盖范围、时延要求、是否有星间链路以及星上处理能力、功耗、网络稳定度等多项因素，综合选择扁平化组网、层次化组网等组网方案。此外，为了增强抗毁性能还需要考虑冗余组网等组网技术。

动态路由：由于未来网络的异构性，传统的地面路由算法难以满足拓扑动态性强，用户流量分布不均匀，节点的能耗、体积、重量受限的卫星网络。此外，空间链路还具有高延时、低带宽、高误码率等特点，对路由的建立、维护和选择都产生了重大的影响。传统的路由协议在空间网络等未来网络中会面临链路状态通告频繁、路由重计算开销大、路由收敛缓慢、路径所提供的服务质量难以满足要求等问题，必须对传统的地面路由协议进行适应性扩展，才有可能高效、可靠、安全地实现空间信息分组的路由和转发。此外，拓扑预测也是解决网络动态性的关键技术之一[13]，结合 SDN 技术实现集中式计算可以有效利用卫星运动可预测性。

移动性管理：移动性管理包括位置管理以及切换管理，车联网、卫星网络等网络的节点移动性强，会导致频繁的切换以及位置更新，对业务时效性等没有保障，因此需要更加灵活智能的切换技术。

卫星网络切换管理问题复杂，包括覆盖范围变化、网络间切换等情况。终端被低轨卫星连续覆盖的时间只有十几分钟，被同一波束连续覆盖的时间只有几分钟，因此卫星间或波束间切换必须快速执行，并防止切换过程中数据丢失。终端在地面 5G 网络与卫星网络之间引起的切换流程，网络间的切换过程也需要考虑。

自治域管理：未来网络可以看作包括互联网、移动通信网、车联网、物联网、

卫星网络多个自治域的大型自治系统，承载着不同类型的业务，一体化网络中确保节点安全的需求更为强烈，需要考虑自治域划分、自治域管理等多种问题。

6.3 无障碍连接的研究展望

无障碍连接可以实现异构网络间的业务融合协作，网络资源整合共享，从而降低建网成本和运营维护的成本。实现真正无障碍连接的未来网络还需要很长的演进过程，这个过程可以分为三个阶段：第一阶段通过网关设计、协议增强等方式，实现各类异构网络的互联互通，保证网络互联需求；第二阶段完成卫星通信网络等各类异构网络在 IP 上的承载，不断扩大 IP 的边界，实现 Internet 的无障碍连接；第三阶段通过网络架构、协议体系的统一设计实现整合架构的无障碍连接网络。

7. 网络安全可信（S）

7.1 网络安全可信的背景

TCP/IP 互联网设计之初，其网络规模限制在一个相对封闭的可信范围内，因此并未从网络架构层面考虑设计内嵌的安全机制。随着网络上承载的应用越来越多，互联网已经成为一个跨多个领域，并且提供近乎永远在线的业务的复杂系统。

在互联网数据业务高速发展和广泛应用的背景下，网络数据传输、共享和分发的安全和隐私问题显得尤其突出。例如，BGP 虽然是分布式的协议，但其可信基础是资源公钥基础设施（RPKI），用以验证 BGP 地址前缀宣告的合法性、保障 BGP 的安全；DNS 系统是以根服务器为中心的分层解析系统，由于其依赖的中心化可信基础设施存在单点故障、不可信节点等问题，严重影响网络的可用性和稳定性。

针对 BGP 的路由验证问题，IETF 提出了 RPKI [14] 和 BGPsec [15] 的解决方案，但仍严重依赖于 RPKI 中心化基础设施，并且需要逐跳验证，严重影响域间

路由的收敛性；而 DNSsec [16]的提出只能浅层次地解决 DNS 劫持的问题，DNS 系统中心化的问题仍然存在。可以看到，现有的解决方案只是补丁式地解决浅层次的安全问题，没有改变中心化的管理架构，无法根除 BGP 和 DNS 固有的安全缺陷。

从网络体系结构层面、路由支撑角度来解决网络的安全防护和可信验证，构建具有内生安全特性的去中心化网络架构、域间路由机制以及域名系统，才能从根本上解决现有网络基础设施的中心化、稳定性差、可靠性差等问题。

7.2 网络安全可信的关键技术

路由系统和域名系统是互联网最重要的两大基础设施[17]，相关的网络安全研究包括域内、域间路由机制的内生安全，以及去中心化的域名标识与解析系统。

内生安全的路由机制：如图 7-1 所示，基于去中心化的域间路由认证，构建可溯源、强认证、高安全的网络路由机制。利用去中心化的共识机制实现路由认证，利用域间自治架构及区块链智能合约实现域间路由的自治管理更新，以及域内域间路由一致性。

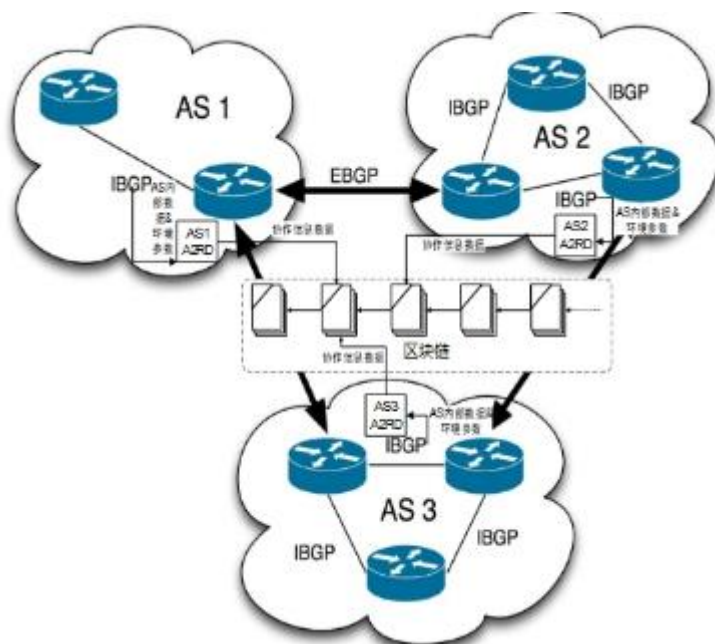


图 7-1 去中心化的域间路由架构

内生安全的 BGP：如图 7-2 所示，相关的关键技术包括[3]：

- 路由源信息验证： IP 地址与 ASN 的映射；
- 路径 AS 信息验证： AS 邻居信息验证；
- 路由泄露检测： AS 之间商业关系的验证，检测是否存在路由泄露。



图 7-2 内生安全的 BGP

DNS 系统内生安全：基于共识机制构建去中心化的分布式 DNS 系统，如图 7-3 所示，包括去中心化域名管理体系，以及去中心化域名解析体系两部分，构建去中心化、公平、高可靠、高可用的域名系统，实现内生安全的域名解析系统。

- 去中心化的域名解析体系[18]：基于分布式账本实现多节点存储完整的域名信息，改变传统只有 13 个根节点存储全部域名信息的中心化模式，基于共识机制实现去中心化的域名解析。
- 去中心化的统一、自治的域名标识技术：实现域名分配与标识去中心化，并通过智能合约实现域名资源的自治化管理与交易，改变传统中心化的域名管理机制。

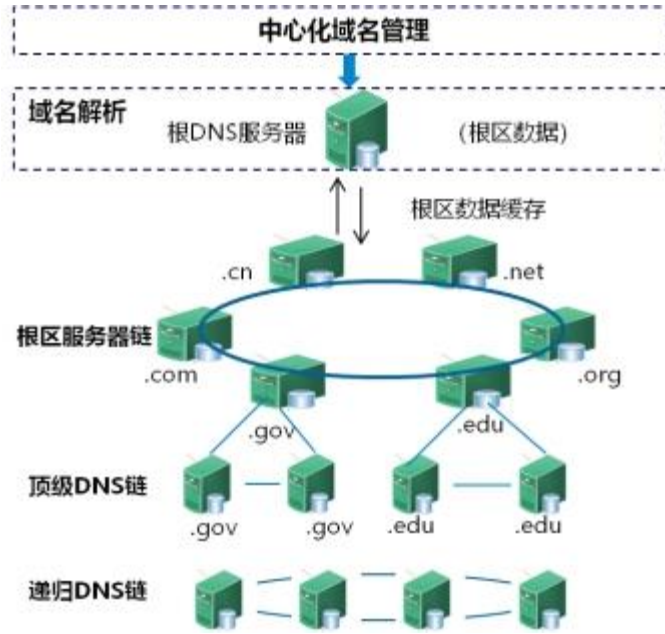


图 7-3 去中心化的域名解析系统

7.3 网络安全可信的研究展望

BGP 和 DNS 作为重要的 IP 网络基础机制，是实现网络内生安全的重要方面。网络安全可信的研究需要继续深入研究对网络资源（例如 IP 地址、AS 号、域名及其他资源）的去中心化管理与资源映射机制，构建公平、可靠、可用的网络基础设施。

面向内生安全的未来网络需要研究如何基于以区块链为代表的去中心化技术，从网络体系层面、路由层面设计网络架构，以及去中心化的域间路由认证与管理机制和去中心化的域名标识与解析体系，构建满足各种新型业务需求的新型网络。

8. 总结与展望

IDEAS 关键技术探索思路是对未来 Internet 互联网和底层 IP 技术的发展展望和参考。为了满足现在或者未来的业务，尤其是 B5G/6G 的新场景、新需求，Internet 需要支持泛在的智能、泛在的互联，并且以 IP 技术内生确定性，内生

算力，内生安全等能力的提升为基础，持续创新演进。

面向未来 IP 技术发展趋势设计的 IDEAS 探索路线，为业界共同打造具备智能路由、确定性 QoS、算力内生、无障碍连接和安全性保障的未来电信 IP 网络提供了参考。IDEAS 创新网络的架构设计和使能还有很多挑战，有很多科学和工程问题需要突破，希望更多的团体和合作伙伴参与到未来 IP 网络相关的创新工作中，精诚合作，共筑未来。

缩略语列表

缩略语	英文全名	中文解释
API	Application Programming Interface	应用编程接口
AR	Augmented Reality	增强现实
ASN	Autonomous System Number	自治系统号码
BGP	Border Gateway Protocol	边界网关协议
CAN	Computing Aware Networking	算力感知网络
CDN	Content Delivery Network	内容分发网络
CNN	Convolutional Neural Network	卷积神经网络
DetNet	Deterministic Networking	确定性网络
DNS	Domain Name System	域名系统
FlexE	Flex Ethernet	灵活以太网
IBN	Intent-Based Network	基于意图的网络
ICT	Information and Communications Technology	信息与通信技术
IoT	Internet of Things	物联网
MEC	Multi-access Edge Computing	多接入边缘计算
NFV	Network Functions Virtualization	网络功能虚拟化
OAM	Operation Administration and Maintenance	操作维护管理
OICT	Operation, Information and Communications Technology	工业控制技术, 信息技术, 电信技术
OPEX	Operating Expense	运营支出
QoS	Quality of Service	服务质量
QUIC	Quick UDP Internet Connection	快速 UDP 网络连接
RNN	Recurrent Neural Network	循环神经网络
RPKI	Resource Public Key Infrastructure	资源公共密钥基础架构
SBA	Service Based Architecture	基于服务的架构
SDN	Software Defined Network	软件定义网络
SLA	Service-Level Agreement	服务等级协定
SPRING	Source Packet Routing in Networking	基于分组报文的源路由
TDM	Time-division multiplexing	时分多路复用
TSAG	Telecommunication Standardization Advisory Group	电信标准顾问组
TSN	Time Sensitive Network	时间敏感网络
VR	Virtual Reality	虚拟现实

参考文献

- [1] 3GPP TS23.501, System architecture for the 5G System (5GS), 2018.
- [2] Wikipedia, <https://simple.wikipedia.org/wiki/Internet>
- [3] 网络 5.0 技术和产业创新联盟, 网络 5.0 技术白皮书, http://www.network5.cn/index.php/Article/ziyuanInfo/article_id/95/action/21.html
- [4] ITU-T FG-NET-2030, Network 2030 White Paper, A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond, 2019.
- [5] SDN/NFV/AI 标准与产业推进委员会, 网络人工智能应用白皮书, 2019.
- [6] IETF RFC8578, Deterministic Networking Use Cases, 2019.
- [7] IETF RFC8655, Deterministic Networking Architecture, 2019.
- [8] IETF draft-shi-quic-dtp, Deadline-aware Transport Protocol, 2020.
- [9] IETF draft-du-detnet-layer3-low-latency, Micro-burst Decreasing in Layer3 Network for Low-Latency Traffic, 2020.
- [10] 中国移动, 算力感知网络白皮书, 边缘计算产业峰会, 2019.
- [11] 杨荒, 徐明伟, 李贺武, 天地一体化信息网络统一编址与路由研究, 电信科学, 2017, v.33(12):16-23.
- [12] 郑秀丽, 蒋胜, 王闯, NewIP: 开拓未来数据网络的新连接和新能力, 电信科学, 2019, v.35(9):2-11.
- [13] 徐明伟, 夏安青, 杨荒, 等, 天地一体化网络域内路由协议 OSPF+, 清华大学学报:自然科学版, 2017(01):15-20.
- [14] IETF RFC6810, The Resource Public Key Infrastructure (RPKI) to Router Protocol, 2013.
- [15] IETF RFC8206, BGPsec Considerations for Autonomous System (AS) Migration, 2017.
- [16] IETF RFC4035, Protocol Modifications for the DNS Security Extensions, 2005.
- [17] 江伟玉, 刘冰洋, 王闯, 内生安全网络架构, 电信科学, 2019, v.35(9):20-28.
- [18] Duan X, Yan Z, Geng G, et al. DNSLedger: Decentralized and distributed name resolution for ubiquitous IoT, IEEE International Conference on Consumer Electronics IEEE, 2018:1-3.