第5章 移动承载网

CHAPTER 5

移动承载网是指移动网各网元之间的连接，是业务网和基础网的融合。其中，业务网是指由移动核心网、接入网等具有高层功能的通信网络；基础网是一个大容量、独立于各种业务网，能为通信网络上所承载的各种业务和信号提供传输通道的统一平台。传统基础网包括SDH、MSTP、WDM等。随着带宽业务的不断涌现，PTN应运而生，为移动网提供了全业务的承载方案。4G以后的移动网已演进成为一个纯数据业务网，于是出现了端到端IP化、具有三层功能的IP RAN技术。因此，本章将结合现有传输网，阐述移动承载网及相关技术。

5.1 基于时分复用的传输网

传输网通常由底层、中间层和上层构成。底层：管道段、人井、机房等基础设施；中间层包括电缆、光缆、光纤配线架(Optical Distribution Frame，ODF)、数字配线架(Digital Distribution Frame，DDF)，交接箱、分线盒等，为上层逻辑网络提供承载服务。上层包括各类传输网络设备以及逻辑资源，如波分复用、传输复用，交叉设备、中继设备以及波道、通道、电路等各种系统设备，本节主要介绍这一层的相关系统及其与移动网络的连接关系。基于时分复用的传输网主要有SDH、MSTP以及WDM等。

5.1.1 同步数字体系

1. SDH的特点

同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy，SDH)是光纤、微波和卫星等传输系统通用的技术体制，可通过开放性接口综合各种不同的网络单元，将其传输和复接集成在一起。

图5.1给出了准同步数字系列(Plesiochronous Digital Hierarchy，PDH)和SDH分插低速支路信号的过程。SDH采用同步复接方式和灵活的复用映射结构，使上、下电路的业务容易实现，并省去了大量的电接口，SDH信号的基本模块是速率为155.420Mb/s的同步传送模块STM-1，可通过简单地将低速业务信号进行字节分插同步复接而成，简化了复接和分接过程，使SDH适合于高速大容量光纤通信系统。与SDH相比PDH上、下电路的业务十分复杂。

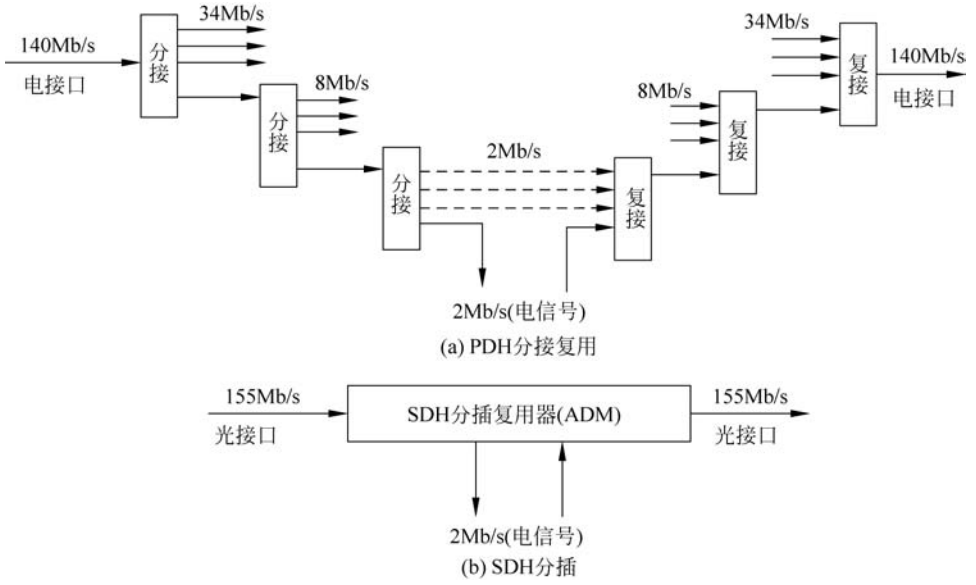


图 5.1 PDH 系列和 SDH 系列分插低速支路信号的过程

2. SDH 帧结构

STM-N 帧结构如图 5.2 所示，由 $270\times N$ 列、9 行的字节块组成，图中 N 的取值范围是以 1 为基数、以 4 为等比的级数，如 1、4、16、64。但是 ITU-T 只对 STM-1、STM-4、STM-16、STM-64 的帧结构做出了规定。

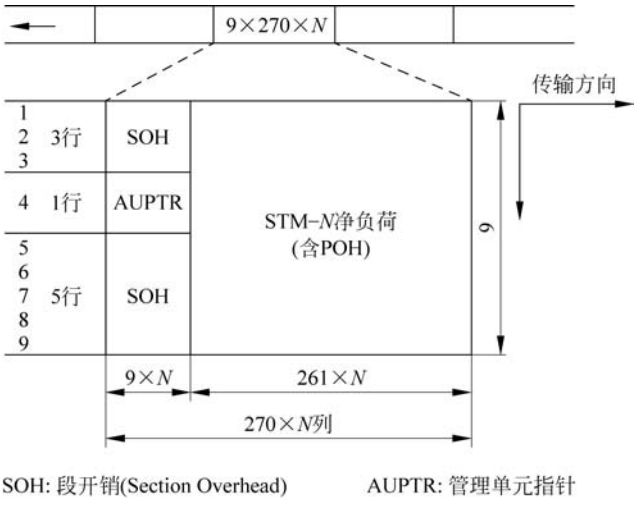


图 5.2 STM-N 帧结构

【例 5.1】 求 STM-1 速率。并列出 $N=1$、4、16、64 时各级 STM-N 的线路码速。

$N=1$，帧长 $=270\times 9=2430$B，一帧的比特数 $=2430\times 8=19\ 440$b，一帧时间的长度为 125μs，即速率为：$19\ 440$bit/125μs $=19\ 440\times 8000=155.520$Mb/s。因此，各级速率如下：

第 1 级为 STM-1，线路码速为 155.520Mb/s；

第 2 级为 STM-4，线路码速为 622.080Mb/s；

第 3 级为 STM-16，线路码速为 2488.320Mb/s；

第 4 级为 STM-64，线路码速为 9953.280Mb/s。

SDH 结构中包括段开销(SOH)、管理单元指针(AUPTR)、STM-N 净负荷等。

(1) STM-N 净负荷(Payload)区域是存放待传送信息码的地方，并包含 POH。POH 是用于通道性能监视、管理和控制的通道开销字节。

(2) 段开销(SOH)主要提供网络运行、管理和维护使用的字节，SOH 分为再生段开销(RSOH)和复用段开销(MSOH)两部分，其中 RSOH 在帧中位于 1～9×N 列、第 1～3 行；MSOH 在帧中位于 1～9×N 列、第 5～9 行。

(3) 管理单元指针区域。管理单元指针(AUPTR)在帧结构中位于 1～9×N 列、第 4 行，用来指示信息净负荷的第一字节在帧内的准确位置。

3. SDH 传输网结构

SDH 传输网的组成如图 5.3 所示。SDH 灵活的同步复用方式也使数字交叉连接(DXC)功能的实现大为简化。

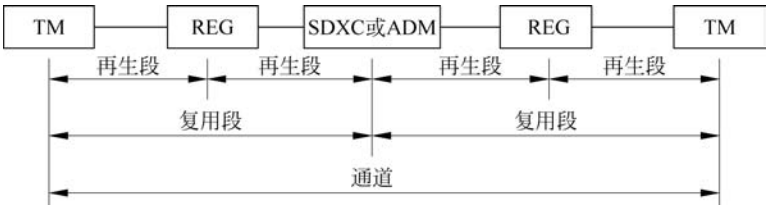


图 5.3　SDH 传输网示意图

SDH 的网络单元功能各异，但都有统一的标准光接口，能够在基本光缆端上实现横向兼容，即允许不同厂家的设备在光路上互通。

(1) 终端复用器(TM)是双端口器件，用于网络终端站。将低速支路信号复用进 STM-N 帧上的任意位置，或完成相反的变换。

(2) 再生中继器(REG)有两种：一种是纯光的再生中继器，主要进行光功率放大，以延长光传输距离；另一种是电再生中继器，属于双端口器件，只有两个线路端口。

(3) SDH 数字交叉连接设备(DXC)称为 SDXC。SDXC 是能在接口间提供可控 VC 的透明连接和再连接的设备，其端口速率既可以是 SDH 速率，也可以是 PDH 速率。DXC 的核心部分是交叉连接功能，交叉连接速率与接入速率之间的转换需要由复用和解复用功能来完成。例如，将若干个 2Mb/s 信号复用至 155Mb/s 中或从 155Mb/s 中解复用出 2Mb/s 信号。

(4) 分插复用器(ADM)用于 SDH 传输网络的转接站点处，它是一个三端口的器件。ADM 有两个线路端口和一个支路端口。

5.1.2　多业务传送平台

1. MSTP 原理

多业务传送平台(Multi-Service Transport Platform，MSTP)是将传统的 SDH 复用器、

数字交叉连接器、WDM 终端、网络二层交换机和 IP 边缘路由器等多个独立的设备功能集成为一体，进行统一控制和管理的一种网络设备。MSTP 是将 SDH 从单一的传输网转变为传输网和业务网一体化的多业务平台，称为融合的网络节点或多业务节点，主要定位于网络边缘。MSTP 功能架构如图 5.4 所示，线路侧的二层封装和处理主要是指以太网处理之后，数据帧进入 SDH 的帧格式之前，所进行的二层封装和处理。

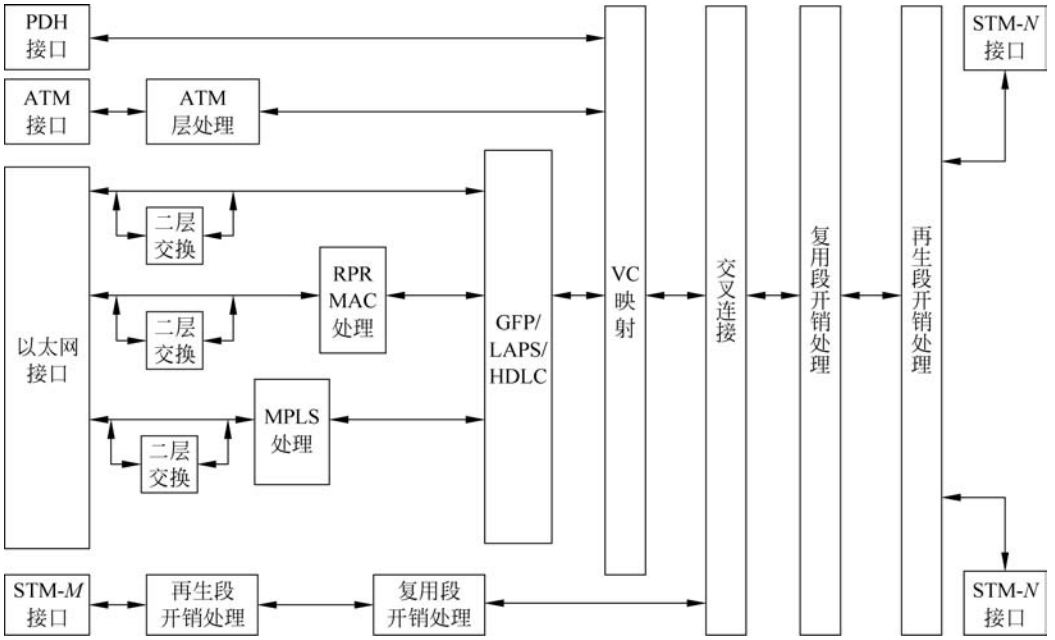


图 5.4　MSTP 功能架构

2. MSTP 以太网功能及接口

MSTP 以太网功能将以太网业务进行封装，映射到 SDH VC 虚容器中，保证业务的透明性；传输链路带宽可以进行配置，具有流量控制、以太网二层(L2)交换、VLAN 隔离和带宽统计复用等功能；可以防止广播风暴及提供端口速率限制等。

MSTP 应用于业务汇聚、以太环网、专线等场景。以下给出一些常用接口。

(1) E(Ethernet)接口：10 兆以太网接口。

(2) FE(Fast Ethernet)接口：快速以太网接口，就是百兆以太网接口。

(3) GE(Gigabit Ethernet)接口：千兆以太网接口。

(4) POS(Packet Over SONET/SDH)接口：SONET/SDH 设备接口，支持分组数据(如 IP)等，通常用于广域网、城域网中。

(5) CPOS(Channelized POS)接口：是指支持通道化的 POS 接口，它利用 SDH 体制的特征，提供对带宽精细划分，以增强路由器的低速端口的汇聚能力，并提高路由器的专线接入能力。

(6) 交换/路由常用接口：包括串行接口(DTE/DCE、RS-232、V35、X.21 和 RS-449 等)；以太网接口(E、FE、10/100 自适应接口、GE 接口等)；ATM 接口(155Mb/s 等)。

3. SDH 与 MSTP 比较

MSTP 与 SDH 在稳定性、安全性、兼容性等方面完全一样，但在业务适用性、设备兼

容性等方面表现突出。MSTP 接口及速率是在 SDH 基础上开通的，两者比较如表 5.1 所示。

表 5.1　SDH 与 MSTP 比较

比　较　项	SDH	MSTP
用户接入速率/(Mb/s)	2～155	2～1000
电路接口	v.35、E1、CPOS	GE、FE、RJ-45
适用业务	点对多点连接、高速接入等	多点互联、高速接入、图像、数据等
用户端设备及投资	必须有支持 CPOS 接口的路由器，接口物理特性要求严格。155Mb/s 以下带宽需要光端机和协议转换器，增加了电路故障点	支持以太网协议接口设备、路由器交换机；支持普通网线接口；1Gb/s 以上带宽可直接光纤接入设备端口
用户接入端口类型	CPOS、POS、G.703、E1	FE、RJ-45、GE、光模块
带宽/(Mb/s)	2、8、155、622	10、100、1000
升级兼容性	与发展趋势融合不好，需要改进。后期出厂产品已有很大改进，可以直接融合 IP	SDH 经过升级改造成为 MSTP 后，可与任何 TCP/IP 快速网络融合

5.1.3　波分复用

波分复用(Wavelength Division Multiplexing，WDM)是将多个波道的信号放到同一条光纤中进行传送。根据波道间隔大小将 WDM 分为两类：波道间隔为 20nm，为稀疏波分，又称粗波分；波道间隔小于或等于 0.8nm，为密集波分。在 WDM 平台上组网克服了 SDH 再生段、复用段等距离因素的限制，组网灵活、接口丰富、应用方便。

1. 承载 SDH 用户层的 WDM 系统

承载 SDH 信号的 WDM 系统使用了光放大器，带光放大器的光缆系统在 SDH 再生段层以下又引入了光通道层、光复用段层和光传输段层，如图 5.5 所示。

图 5.5　WDM 系统的分层结构示意图

光通道层：为各种业务信息提供光通道上端到端的透明传输。具有光通道层监测能力。

光复用段层：为多波长光信号提供联网功能，包括开销处理功能、光复用段监测功能等。

光传输段层：为光信号提供在各种类型的光纤上传输的功能，包括对光放大器、光纤色散等的监视与管理功能。

WDM 系统由光纤、激光器、掺铒光纤放大器(EDFA)、光耦合器、电再生中继器、转发器、光分插复用器、交叉连接器与交换机等器件和设备组成。EDFA 需要能同时放大 WDM 的所有波长；光耦合器用来把各波长组合在一起和分解开来，起到复用和解复用的作用；光分插复用器、光交叉是 WDM 系统中的连接设备；光交换机可以对 ADM 和交叉连接设备做动态配置。

2. 两类 WDM 系统

WDM 系统可分为集成式 WDM 系统和开放式 WDM 系统两大类。

集成式 WDM 系统中的 TM、ADM 和 REG 设备，都应具有符合 WDM 系统要求的光接口（S_x），以满足传输系统的要求，整个系统构造没有增加其他设备，如图 5.6(a)所示。

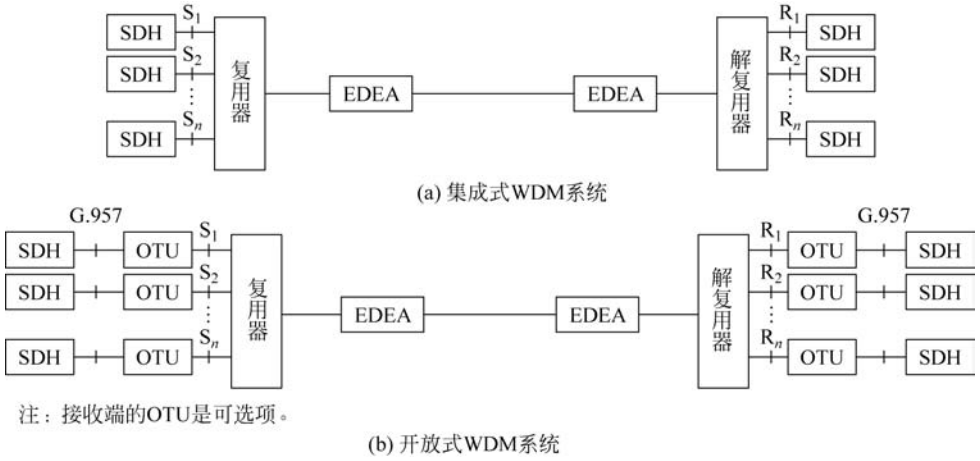


图 5.6　两类 WDM 系统示意图

开放式 WDM 系统是指发送端设备有光波长转发器（OTU），它的作用是在不改变光信号数据格式的情况下，把光波长按照一定的要求进行转换，如图 5.6(b)所示。

3. 光传输网

光传输网（Optical Transport Network，OTN）在 WDM 基础上，融合了 SDH 的一些优点，如丰富的 OAM 开销、灵活的业务调度、完善的保护方式等。OTN 对业务的调度分为光层调度和电层调度，光层调度可以理解为 WDM 的范畴；电层调度可以理解为 SDH 的范畴，简单地说，OTN＝WDM＋SDH。但 OTN 的电层调度工作方式与 SDH 不完全相同。

5.2　分组传输网

5.2.1　PTN 概述

1. PTN 的技术优势

以下从几个主要方面介绍 PTN 的技术优势。

（1）PTN 提出管道化的承载理念。PTN 以“管道＋仿真”的思路，来满足移动网络演进中的多业务需求。众所周知，TDM、ATM、IP 等各种通信技术，将在网络演进中长期共存，PTN 采用统一的分组管道，实现多业务适配、管理与运维，从而满足共存的要求。

（2）变刚性管道为弹性管道，提升网络承载效率。PTN 采用由标签交换生成的弹性分组管道标签交换通道（Label Switch Path，LSP），带宽可灵活地释放和实现共享，网络效率得到提升。

（3）由于管道化的承载，简化了业务配置、网络管理与运维工作。移动承载网的特点是网络规模大、覆盖面积广、站点数量多，PTN 以集中式的网络控制管理，替代传统 IP 网络的动态协议控制，实现了移动承载网网管的可视化。

(4) 植入时钟同步技术,使移动承载 IP 化过程中具备了电信级的同步能力。时钟同步是移动承载的必备能力,而传统的 IP 网络都是异步的,移动承载网在 IP 化转型中必须解决频率同步的问题。PTN 支持同步以太网、IEEE 1588V2 等多种时钟同步能力。

(5) 丰富的保护倒换机制,保证网络高可靠性。PTN 系列分组传输设备支持基于硬件的营运管理与维护检测机制,支持丰富的环网保护倒换机制,满足业务端到端保护倒换时间小于 50ms 的电信级倒换要求,保证了网络可靠性。

(6) 可以提供大规模组网能力。PTN 系列分组传输设备通过 E1、STM-1、FE、GE、10GE、40GE、100GE 等丰富的业务接口,实现了 2G/3G/LTE/5G 大客户专线等各类业务的统一接入,采用 PWE3 仿真技术,实现对这些业务的统一承载,能够高效满足各种应用场景的承载需求。

(7) 实现了各种业务的统一承载。通过 PTN 组建的大型传输网,可以实现移动业务、大客户专线等各种业务的统一承载。PTN 支持端到端 QoS 能力,提供网络资源管理,可以提高带宽综合利用率。

2. PTN 术语

用户边缘设备(Customer Edge device,CE),有接口直接与服务商(Service Provider,SP)的 PTN 设备连接,它可以是路由器或交换机,也可以是一台主机。

网络边缘(Provider Edge,PE),即边缘路由器,是服务提供商网络 PTN 网络边缘设备。PE 设备用来在网络边缘与用户设备 CE 直接相连。

网络核心(Provider,P),服务提供商 PTN 网络中的骨干路由器,不直接与 CE 相连,只需要具备基本的 MPLS(多协议标记交换)转接能力。

Site 指相互之间具备 IP 连通性的一组 IP 系统,并且这组 IP 系统的 IP 连通性不需要服务商提供网络实现,Site 通过连到服务提供商网络,一个 Site 可以包含多个 CE,但一个 CE 只能在一个 Site 中。

虚拟专线(Virtual Leased Line,VLL)又称端到端伪线仿真,是一种二层业务承载技术。

回传或回程(backhaul),又称信号隧道,指的是一种配置,就是将移动语音、数据信息通过分组交换网络,从一个媒体网关向另一个媒体网关可靠传输。

E-Line(以太专线),是基于 MPLS 的 L2 VPN(二层透传 VPN)业务。E-Line 业务即点到点业务,是指客户有两个 UNI 接入点,彼此之间是双向互通的关系。

边缘到边缘的伪线仿真(Pseudo-Wire Emulation Edge to Edge,PWE3)是通过分组传输网(IP/MPLS)提供隧道,便于仿真 IMA、Ethernet 等业务的二层 VPN 协议,通过此协议可以将传统的网络与分组交换网络连接起来,实现资源共用和网络的拓展。

ATM 反向多路复用(Inverse Multiplexing for ATM,IMA)通过将多条 E1(2.048Mb/s)线路,复用成高带宽 ATM 信元流传输,使 E1 的线路设备可以享受到 ATM 的许多优点。IMA 是解决 3G 传输接口的方法之一,它通过 155Mb/s 接口,将 ATM 信元反向复用封装在 E1 中,在 E1 内部实现信元的统计复用。

5.2.2 PTN 原理

1. PTN 的网络分层结构

PTN 的网络分层结构如图 5.7 所示，主要由 3 层网络组成，它们是传输介质层、虚通路(VP)层和虚通道(VC)层。对于采用 MPLS-TP 技术的 PTN 而言，VC 层即伪线(PW)层；VP 层即标签交换路径 LSP 层。传输介质层可采用以太网、SDH 等传输技术。客户业务层在 PTN 网络的最上层，可以是绑定的多个客户或是基于端口的客户。

图 5.7 PTN 的网络分层结构

2. PTN 的网元分类

PTN 网元可分为 PE 节点和 P 节点两种类型，如图 5.8 所示。CE 是进出 PTN 网络业务层的源、宿节点，在 PTN 网络的两端成对出现。PE 节点是在 PTN 网络边缘、连接 CE 节点和 P 节点的网元，P 节点是在 PTN 网络内部进行 VP 隧道转发的网元。PE 和 P 描述的是对客户业务、VC(PW)、VP(LSP)的逻辑处理功能。对于一个指定的分组网络传送业务，PE 或 P 的功能只能被一个特定的 PTN 网元承担。但从任何一个 PTN 网元来看，可以同时承载多条分组传送网业务，因而该 PTN 网元既可以是 PE，也可以是 P。

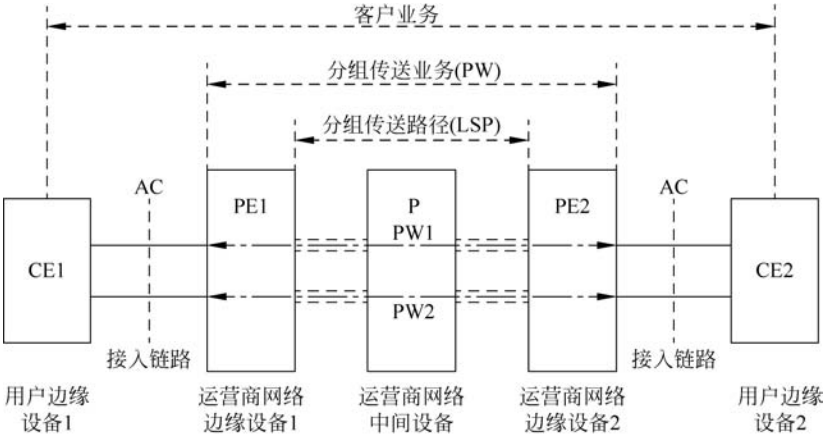


图 5.8 PTN 网元的逻辑分类

3. PWE3 技术

PTN 通过 PWE3 实现端到端的伪线，为 ATM、帧中继、低速 TDM 和 SDH 等各种业务，通过分组交换网络(PSN)传递，在 PSN 网络边界提供端到端的虚链路仿真。

PWE3 就是在分组交换网络上搭建一个“通道”，实现各种业务的仿真及传输。PWE3 是一种端到端的二层业务承载技术，属于点到点方式的 L2 VPN。在 PSN 网络的两台 PE 中，它以标记交换协议(LDP)、资源预留协议(RSVP)作为信令，通过 MPLS 隧道等模拟 CE 端的各种二层业务，使 CE 端的二层数据在 PSN 网络中透明传递。

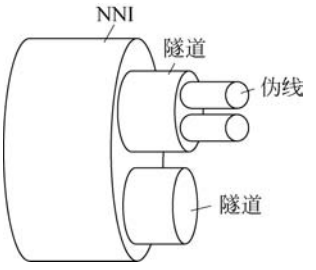


图 5.9　NNI 侧端口的隧道与伪线关系示意图

图 5.9 给出了 NNI 侧端口原理示意图，图中的隧道提供端到端连接，也就是 PE 的 NNI 端口之间的连接。PW 称作“伪线”，Tunnel 称作“隧道”，伪线如同具体的电线，隧道如同地下管道，通信的全程就是多根电线穿过管道，也就是多个 PW 穿越 Tunnel，PW 装的就是端到端具体业务。不同用户业务在 PE-PE 之间传输时，以太网连通性为点到点(P2P)。

PWE3 的主要功能是：对信元或者特定业务比特流在入端口进行封装，在出端口进行解封装，并携带封装信息通过 IP/MPLS 网络进行传输。基于 MPLS 的 PWE3 模型，如图 5.10 所示。

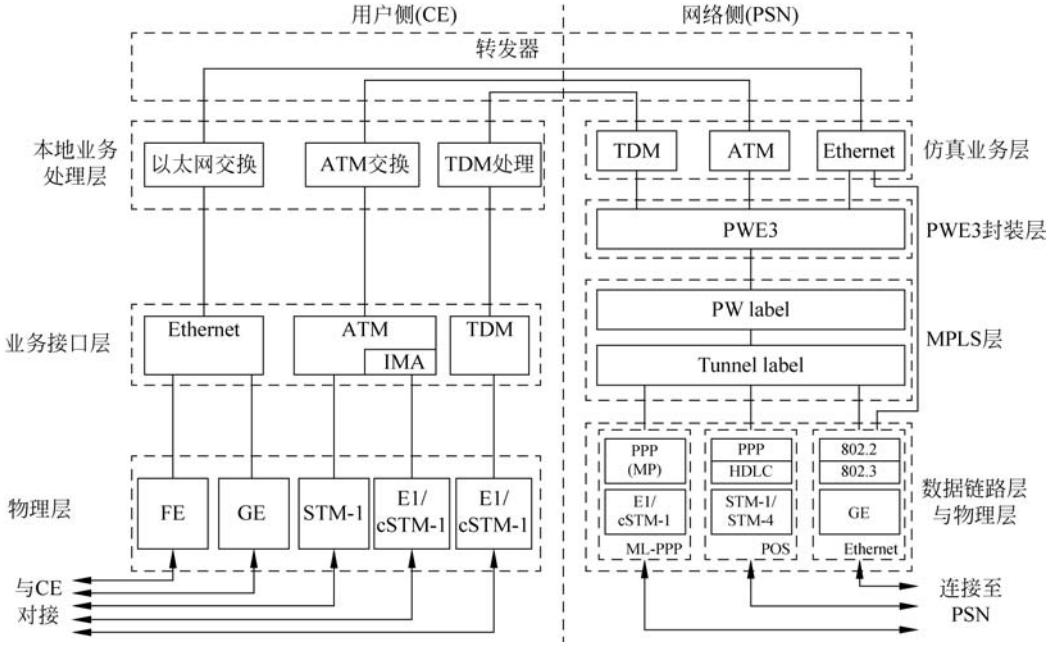


图 5.10　基于 MPLS 的 PWE3 模型

4. 综合业务统一承载

综合业务统一承载指通过 PWE3 实现 TDM 业务感知和按需配置，支持 TDM 的结构

化时隙压缩。图 5.11 给出了综合业务统一承载示意图，该图以移动网 2G/3G 基站为例，使基站 BTS/NodeB 至 BSC/RNC 通过 PTN 网络实现远距离连接。下面给出几种连接方式。

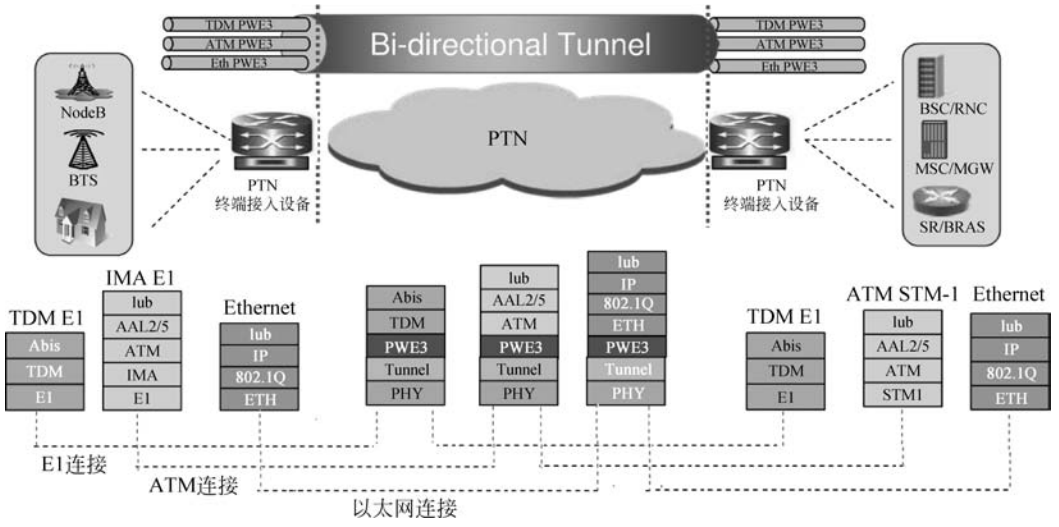


图 5.11 综合业务统一承载

(1) 在 2G 的 BTS 与 BSC 之间的 A-bis 接口，只有一种方式：TDM 的 E1 接口类型，传输介质为同轴电缆，以时隙的方式进/出 PTN。

(2) 在 3G 的 NodeB 与 RNC 之间的 Iub 接口，有 3 种方式：TDM 的 E1 接口类型，传输介质为同轴电缆，以时隙的方式进/出 PTN(图中未给出)；Ethernet 接口类型，传输介质为光纤或网线，以 IP 的方式进/出 PTN；IMA E1 接口类型，传输介质为光纤或网线，以 ATM 信元的方式进/出 PTN。

(3) 在 4G 的 eNodeB 与 EPC 之间的 S1 接口，有一种方式：Ethernet 接口类型，传输介质为光纤或网线，以 IP 的方式进/出 PTN。5G 的 gNB 与 5GC 之间的连接，类似于 4G。

5.2.3 基于 PTN 的移动承载网

图 5.12 给出了 PTN 网络架构，架构由业务层、PTN 电路层和传输介质层构成。PTN 提供 3 种 Ethernet 接口类型：FE(Electrical，电接口)、FE(Optical，光接口)和 GE(Optical，光接口)，ATM 接口类型为 IMA E1；TDM 接口为 E1。

图 5.13 给出了某移动承载网的结构，PTN 完成带宽为 10GE 环网的汇聚层、带宽为 GE/10GE 支路环网的接入层传输。汇聚层通过传统的光网 OTN 连接核心节点；在接入层，通过不同的接口与移动网络端设备相接。例如，基站收发器(BTS)经过 E1 接口连接 2G 的基站控制器(BSC)；NodeB 经过 GE/FE/STM-1/E1 接口连接 3G 的 RNC(无线网络控制器)；eNodeB 经过 GE/FE 接口连接 4G 的 EPC 网元设备 MME、S-GW；gNB 经过 GE 接口连接 5G 的 CU 等。

下面通过具体例子说明带宽计算。

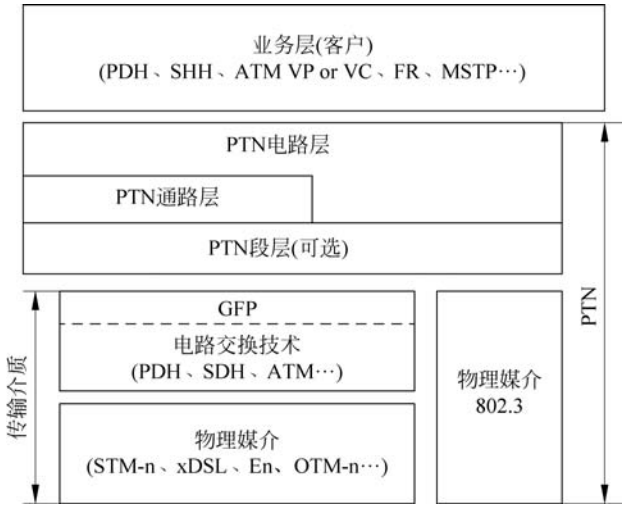


图 5.12　PTN 网络架构

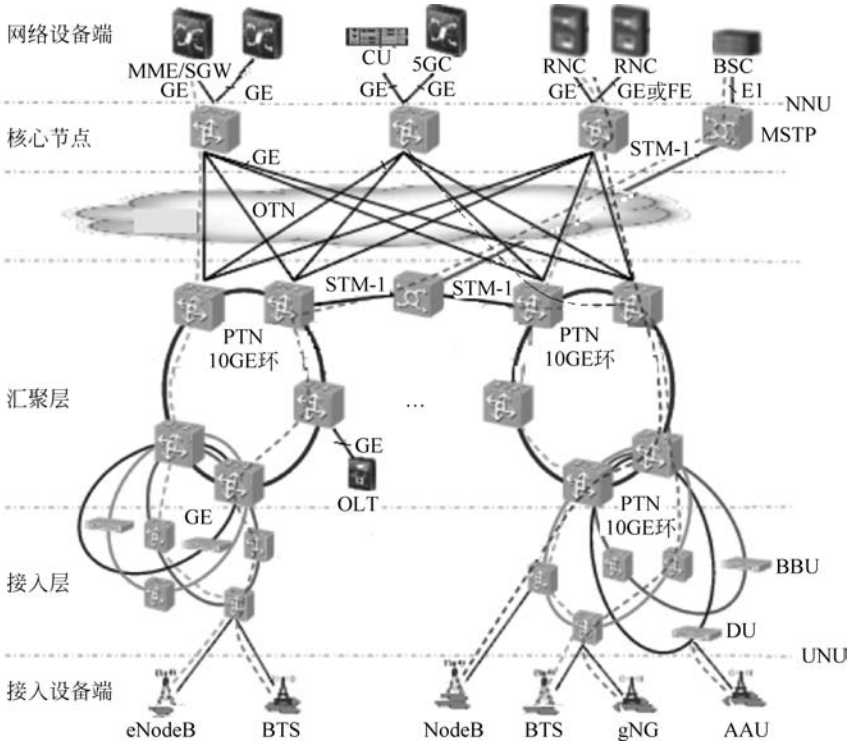
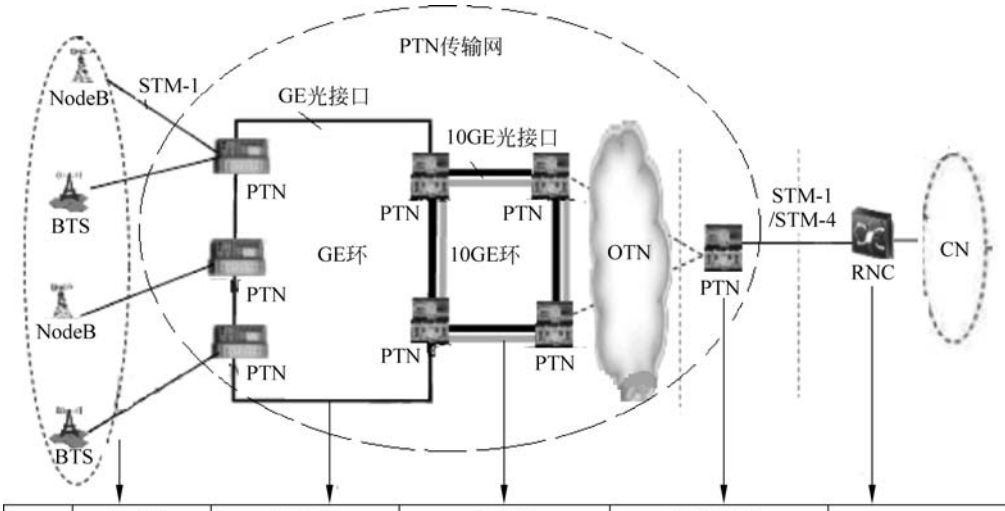


图 5.13　PTN 移动承载网端到端示意图

【例 5.2】 图 5.14 为 3G 流量规划范例，如已知每个基站的带宽为 20Mb/s，即可初步得出接入环、汇聚环、汇聚节点等的带宽。



	NodeB (Mb/s)	接入环 (Mb/s)	汇聚环 (Mb/s)	汇聚节点 (Mb/s)	核心节点
带宽需求	20	20M×20个基站×2 (LSP APS保护)=800	20M×100个基站×2 (LSP APS保护)=4000	20M×200个基站×2 (LSP APS保护)=8000	RNC基站最大容量500个，实际部署200个左右

图 5.14 3G 流量规划示例

$$\text{接入环带宽} = \text{接入环上 3G 基站数} \times \text{基站峰值带宽} \times 2(\text{ASP 保护}) = 20 \times 20 \times 2 = 800(\text{Mb/s})$$

$$\text{汇聚环带宽} = \text{所有接入环上 3G 基站数} \times \text{基站峰值带宽} \times 2(\text{ASP 保护}) = 100 \times 20 \times 2 = 4000(\text{Mb/s})$$

$$\text{汇聚节点带宽} = \text{所有接入节点上 3G 基站数} \times \text{基站峰值带宽} \times 2(\text{ASP 保护}) = 200 \times 20 \times 2 = 8000(\text{Mb/s})$$

5.3 IP RAN 承载网

5.3.1 IP RAN 概述

IP RAN(IP Radio Access Network)就是指 IP 化的移动回传网(IP mobile backhaul)，Backhaul 指的是从无线接入网至核心网络之间的承载网络，亦称移动承载网，IP RAN 是针对基站回路应用场景进行优化定制的路由器/交换机整体解决方案。

1. IP RAN 与其他传统传输网比较

IP RAN 的接入能力已可涵盖当前 PTN 技术所支持的范畴。相比以前的 PTN 技术，IP RAN 提供了更多的 L3、IP VPN 方面的支持，特别是进入 LTE 时代后，移动网络对传送平台提出了更多 IP 方面的支持要求及可扩展性，IP RAN 具有接入方式灵活，支持传统业务和多种以太网业务的特点。IP RAN 与其他传统传输网的技术特点分析比较如表 5.2 所示。

表 5.2 3种传输网技术特点分析比较

项 目	SDH/MSTP	PTN	IP RAN
交换方式	电路交换	分组交换	分组交换
技术标准	SDH	MPLS-TP	IP/MPLS
支持接口	E1、STM-N、ATM、E/FE	ATM、FE、GE、E1 等	ATM、FE、GE、E1 等
承载业务	TDM 业务支撑能力强，分组业务承载弱	分组业务能力强，兼顾 TDM 业务，但 L3 层功能弱	L3 网络功能强，兼顾分组业务，但 TDM 业务性能弱
统计复用	刚性管道，无统计复用	弹性管道，有统计复用	弹性管道，有统计复用
业务隔离	VC 管道，硬性管道，物理层隔离	MPLS-TP 标签技术，二层逻辑隔离，柔性管道	MPLS 标签技术，三层隔离，柔性管道
保护性能(保护倒换时间<50ms)	复用段保护、通道保护等	SNCP 保护、LMSP 保护、线性保护等	隧道 LSP 保护、业务保护和基于动态网络的保护等
同步性能	支持频率同步	支持频率和时间同步	支持频率和时间同步
核心、汇聚、接入的三层网络架构规划	采用时隙通道进行规划；采用端到端硬连接，管道带宽有保证	采用端到端弹性管道，带宽利用率最大化；规划和控制较为复杂	采用端到端弹性管道，带宽利用率高；应用三层功能，将业务及传输层全面融合
网络组网能力(支持链形、环形组网方式)	组网时需要考虑低阶交叉容量；采用光口直接组网；能够适应复杂组网模式	支持 MESH 组网方式，组网灵活；可适应上千节点，适应复杂拓扑组网	支持 MESH 灵活组网，双上联架构，拓扑简单；电信级大规模组网的性能保障有待提升
网络操作维护(OAM)	网络维护简单；采用端到端电路方式；静态链路，告警、路径、业务三者相互关联	设备和网管的 OAM 设计灵活；保留原传输专业维护习惯，运维人员上手速度快	电路支持静态路由和动态链路，OAM 能力较弱；运维人员需要基于路由协议的故障定位
规模化应用	传统网大量应用，主要应用于电路交换电信网	现网大规模应用，主要集中在基于 IP 的运营商	数据网大规模应用，主要应用于基于 IP 的承载网

2. IP RAN 在城域网中的位置

承载网整体上由城域网和干线传输网(骨干网)组成。城域网又分为接入、汇聚和核心三层，也称接入网、汇聚网和核心网。图 5.15 给出了承载网基本架构，IP RAN 主要体现在城域传输接入网层面上，整体架构各部分的功能如下。

城域核心传输网(核心层)即 DWDM+MSTP，承载主干传输以及大客户专线等。

城域传输网(汇聚层)承载 3G/4G/5G 核心网、软交换、互联网、高等级 IP 业务等。

宽带接入网(接入层)承载 IP RAN、LAN、xDSL、FTTx 等。接入层通常为环形组网，其部署模式有分布式无线接入网(D-RAN)和集中式无线接入网(C-RAN)两种场景，其中 CRAN 部署又可分为小集中和大集中等场景。D-RAN 场景相对简单，一般将 AAU(有源天线单元)和 DU(分布式单元)分别部署在塔上与塔下；C-RAN 场景的 AAU 拉远距离通常在 10km 以内，其前传(Front-haul)的可选技术方案包括光纤直连、无源 WDM、有源 WDM/OTN、切片分组网络(SPN)等。随着 5G 核心网云化、数据面分布式部署，使 IP RAN 网络更趋扁平化。

3. IP RAN 特点

IP RAN 承载网基站接入节点主要采用的设备为交换机、路由器或三层交换机。

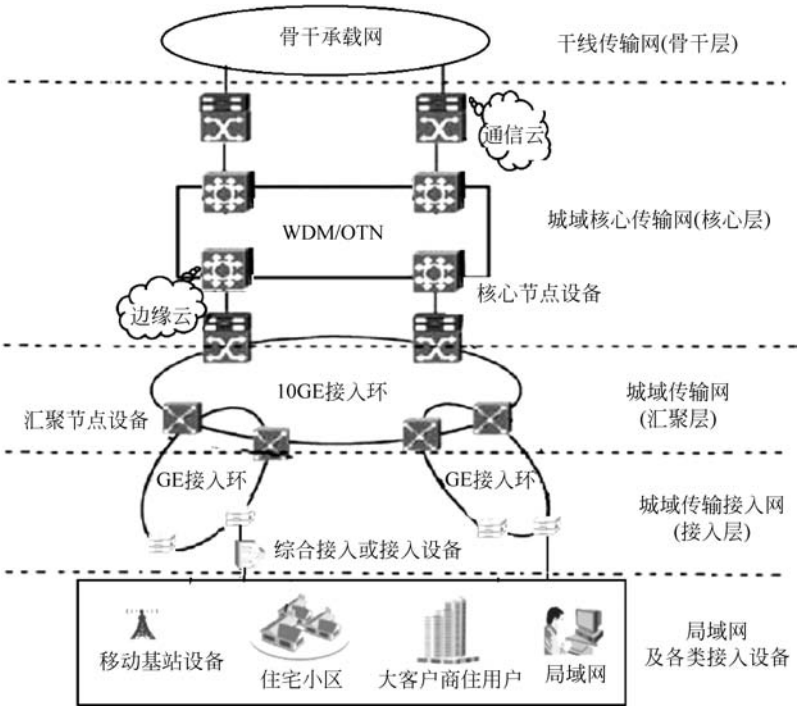


图 5.15　城域网架构的承载网

图 5.16 给出了城域网内 IP RAN 承载方案，可以看出各节点的接口带宽。核心层主要提供业务接点，连接核心网设备及核心云。接入层主要提供交换节点，连接基站设备，但由于 5GC 功能下移，在接入层要连接一些数据中心，如边缘云。汇聚层是城域承载网的一个主环，用于连接接入层和核心层。目前 4G 主要采用 IP RAN 承载，具有以下特点。

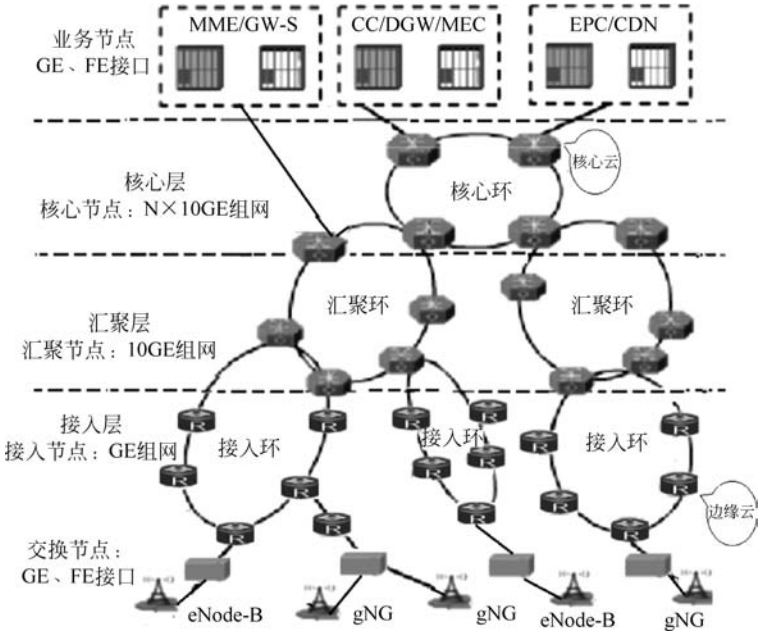


图 5.16　在城域网内 IP RAN 承载方案

(1) 网络结构全 IP 化：LTE 核心网 EPC 取消了 2G 到 3G(R99)一直沿用的 CS(电路域)，实现了固网和移动融合(FMC)，灵活支持 VoIP 及基于 IMS 的多媒体业务。

(2) 网络架构扁平化：LTE 取消了之前定义的 RNC，eNB 直接接入 EPC，从而降低用户可感知的时延，大幅提升用户的移动通信体验。

(3) 引入了两个接口：X2 是相邻 eNB 间的分布式接口，主要用于用户移动性管理；S1 Flex 是从 eNB 到 EPC 的动态接口，主要用于提高网络冗余性以及实现负载均衡。

5G 网络架构演进的基本思路是以 LTE/EPC 为基础，逐步引入 5G RAN 和 5GC，建网初期以双链接为主，LTE 用于保证覆盖和切换，在热点地区架构 5G 基站，提高系统的容量和吞吐率。最后再逐步演进，进入全面 5G 时代。

5.3.2 IP RAN 架构

1. HVPN 基本结构

移动通信对承载网的要求：在无线侧，不关注网络内部网元结构，只需要网络侧提供传送管道；在网络侧，也不希望呈现自身的内部结构，只需向无线侧提供虚拟(virtual)传送管道。为适应移动网的承载需求，MPLS IP VPN 成为了 IP RAN 的一种解决方案。

VPN(虚拟专用网)已广泛用于基于 IP 的各种承载网络；MPLS(多协议标签交换)位于数据链路层与网络层之间。在 VPN 中，MPLS 给每个报文打上标签，以标签交换取代 IP 转发，安全便捷，使分组网的网络层从无连接演进为面向连接。目前网络中 L2 VPN、L3 VPN 解决方案都是基于 MPLS 技术实现的；MPLS-TP 是 MPLS 技术的发展和演进，MPLS-TP 技术使分组网在 OAM、保护、可维护性等方面得到了显著的提升，更好地满足了分组传送的需求。

MPLS IP VPN 是一种平面模型，为分层模型解决可扩展性问题，即配置分层 VPN (Hierarchy of VPN，HVPN)功能。分层 VPN 功能将网络边缘(PE)的功能分布到多个 PE 设备上，多个 PE 承担不同的角色，并形成层次结构，这种解决方案有时也被称为分层 PE (Hierarchy of PE，HoPE)。PE 是边缘路由器，在网络边缘与用户边缘设备(Customer Edge device，CE)直接相连。CE 可以是路由器或交换机，也可以是一台服务器或主机设备。

分层 VPN 的基本结构如图 5.17 所示，主要包括以下 3 类设备。

(1) UPE：直接连接用户的设备称为下层 PE(Under-layer PE)或用户侧 PE(User-end PE)。UPE 主要完成用户接入功能。UPE 维护其直接相连的 VPN 站点(site)路由，但不维护 VPN 中其他远端站点的路由或仅维护它们的聚合路由，也就是说，仅维护默认或聚合路由。

(2) SPE：接入 UPE 并位于网络内部的设备，称为上层 PE(Super-stratum PE)或运营商侧 PE(Service Provider-end PE)。SPE 主要通过 UPE 连接 VPN 的所有路由，包括本地和远端站点路由，完成 VPN 路由的管理和发布。

(3) NPE：连接 SPE 面向网络侧的 PE，称为网络侧 PE(Network Provider-end PE，简称 NPE)。

2. IP RAN(L2＋L3)架构

以 VPN 方案组网的 IP RAN 架构如图 5.18 所示。其中，SPE 位置放置的 AGG 为汇聚网网关；NPE 位置放置的 RSG 为无线侧网关；UPE 位置放置的 CSG 为蜂窝侧网关。L2＋L3 适合于接入、汇聚层独立运维的移动承载项目，接入侧 ETH 和低速业务承载方式

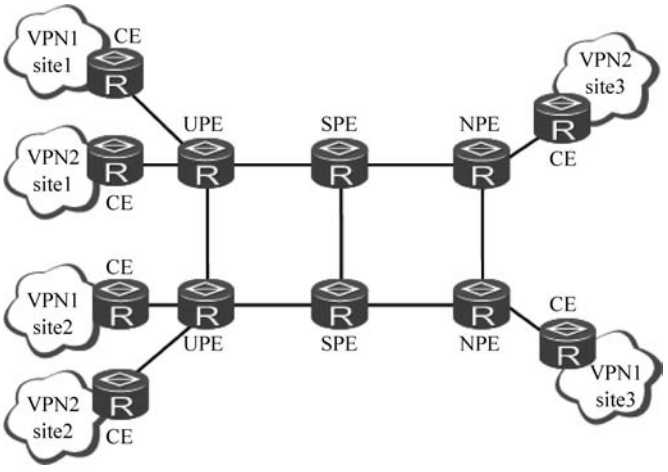


图 5.17 HVPN 基本结构

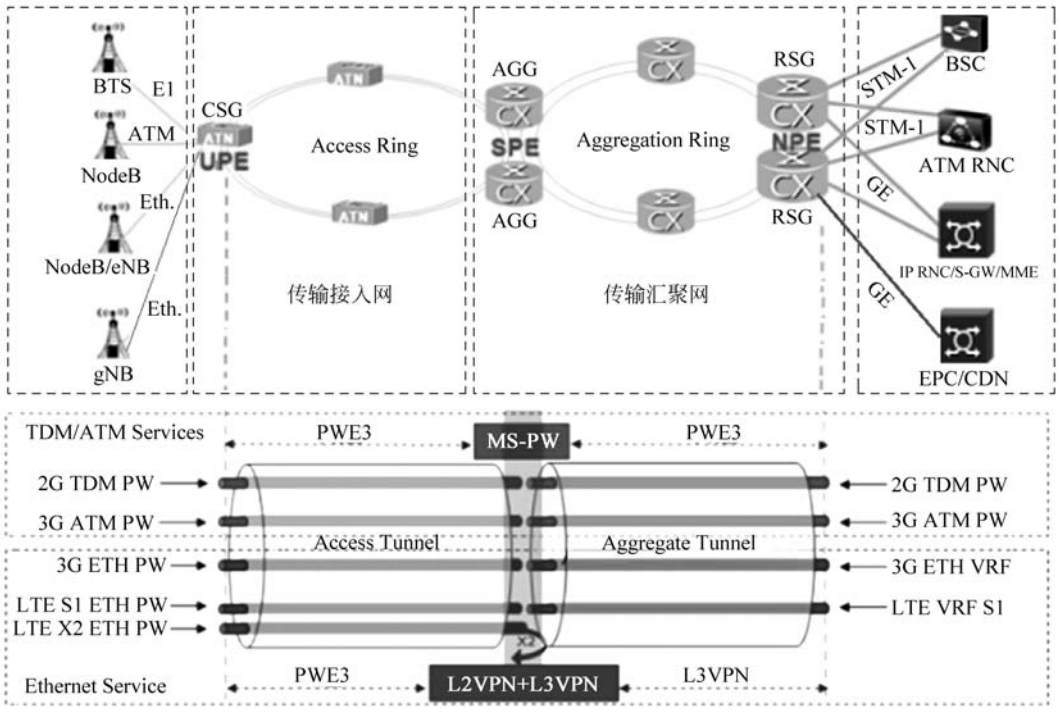


图 5.18 IP RAN(L2+L3)架构

一致。接入环和汇聚环在协议层面上完全隔离,环内出现节点或链路故障仅在区域内同步并收敛,环外设备完全不感知,以提高网络的健壮性。如基站设备需要调整或破环加点时,仅需在接入环内进行设备配置,无须改动汇聚环。

在技术方面,IP RAN 的接入能力已可涵盖当前 PTN 技术所支持的范畴; IP RAN 与 PTN 相比,可提供更多在 L3、IP VPN 方面的支持,这恰恰符合 LTE、5G 移动网络对传送平台提出的大容量 IP 承载需求。从图 5.18 可以看出,IP RAN 承载方案是指在整个城域网内,各层及节点采用的设备或技术,如: 汇聚/核心层采用 IP/MPLS 技术,汇聚/核心节点

采用的设备是支持 IP/MPLS 的路由器；接入层主要采用增强以太技术与 IP/MPLS 技术结合的方案。

边缘到边缘的伪线仿真(PWE3)是通过分组传输网(IP/MPLS)提供隧道，便于仿真 Ethernet 等业务的二层 VPN 协议。

网络保护机制是将基站双归到 IP RAN 网络，两台 RAN-CE 之间采用虚拟路由冗余协议(Virtual Router Redundancy Protocol，VRRP)。

5.4　5G 网络组成及其承载网

5.4.1　5G 网络组成

1. 5G 网络架构

5G 网络由 5G 核心网(5GC)和下一代无线接入网(NG-Radio Access Network，NG-RAN)构成。5GC 包含有 AMF(接入管理功能)和 UPF(用户面功能)等功能实体；NG-RAN 包含有 gNB(5G 基站)和 NG-eNB(在 4G 接入网新建的 5G 基站)等基站类别。

目前 5G 有两种组网方式：NSA(非独立组网)和 SA(独立组网)，NSA 组网方式需新建 5G 基站(NG-eNB)，采用 4G 核心网或新建 5G 核心网，可被看作是 5G 初期的一种过渡方案；SA 组网方式则新建 5G 基站(gNB)和 5G 核心网。由于 NSA 组网需要 4G、5G 公用核心网，因此这种方式不能很好地支持 5G 低时延业务需求。随着 5G 技术的成熟和成本下降，绝大多数运营商都将逐渐转向 SA 组网，或采用 SA/NSA 混合组网的方式。

从 2G 的电路交换到 3G 的软交换、IMS，再到 4G 时代的 MME 和 SGW，总的来说，移动核心网一直沿着功能分离和软件化方向演进，5G 则更加彻底，实现了分离的核心网。图 5.19 给出了 5GC 基于云的服务化架构(Service-Based Architecture，SBA)网络架构。5GC 对 4G 核心网进行了网元虚拟化、网络功能模块化，以软件化、模块化的方式灵活、快速

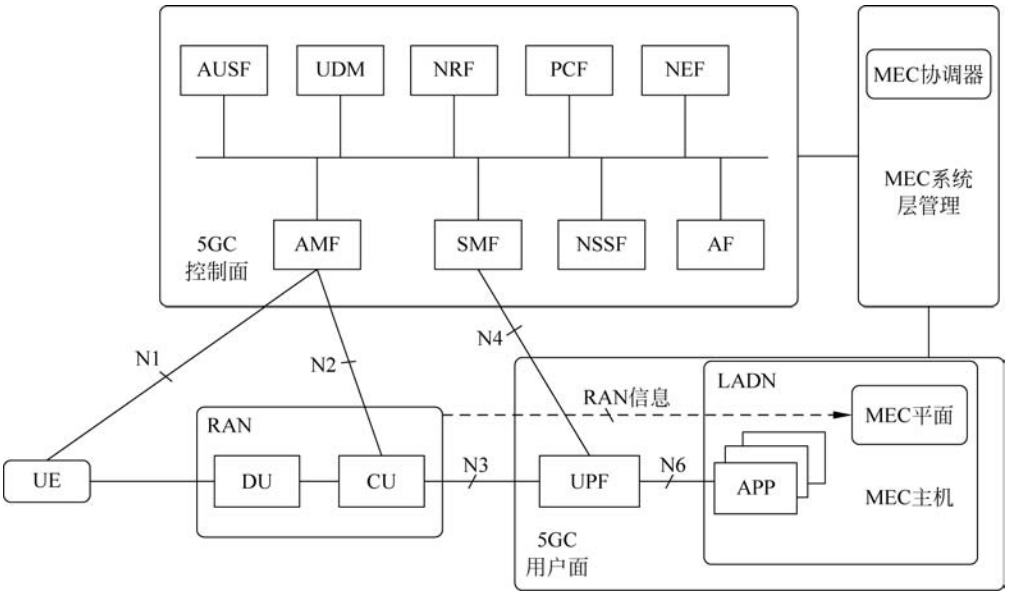


图 5.19　5G SBA 网络架构

地组装和部署业务应用。5GC 将传统的核心网硬件解耦，网络功能软件被分解为微服务，网络功能运行于通用服务器或迁移至云，实现灵活的网络切片。总的来说，5GC 完成了一次化整为零、由硬件为主变为以软件为主的演进。不过，不管核心网如何演进，它的三大功能却始终存在，即服务管理、会话管理和移动性管理。

【例 5.3】 简单说明图 5.20 给出的 SA 两种组网方案。图中 eNB 为 4G 基站，gNB 为 5G 基站，EPS 为 4G 核心网，5GC 为 5G 核心网，UE 为 5G 终端。

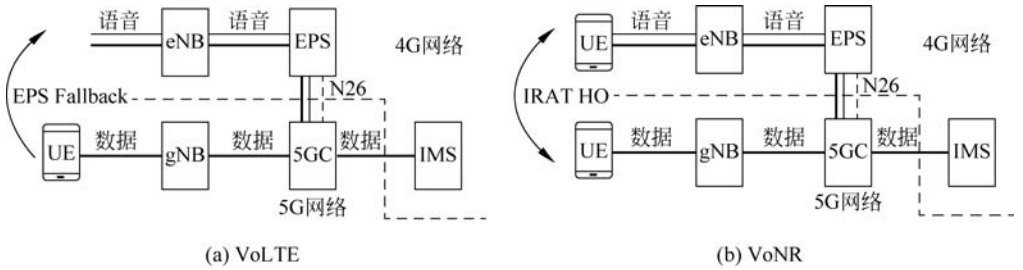


图 5.20 SA 组网方案

图 5.20(a)为 VoLTE，即 EPS Fallback 方案，为 5G 业务回落到 4G 网络，对 5G 语音终端没有特殊要求，与 VoLTE 方案的技术基本相同，即当工作在 5G 网络上的终端收/发语音时，通过切换流程将 5G 终端切换到 4G 网络上，并通过 IMS 技术提供 VoLTE 业务。

图 5.20(b)为 VoNR 方案，直接由 5G 网络端到端承载语音业务。图中 IRAT(Inter Radio Access Technology)，表示异系统互操作；HO 为切换(Hand Over)的缩写，IRAT HO 即为异系统切换，也就是终端在 4G 系统与 5G 系统之间可以来回切换。终端平时优选 5G 网络，尽可能地驻留在 5G 小区，5G 异常时再切入 4G。

5G 初期 NR 热点覆盖，为减少 5G 和 4G 之间的语音切换次数，同时也为减少对现网 EPC 的影响，对原核心网的 IMS 作软件升级后可配合采用 5GC+EPS Fallback 提供语音服务；随着 5G 覆盖范围扩大，实现连续覆盖后可直接采用 VoNR 提供 5G 语音。

2. 5G 主要网元及 VNF 释义

为了以后学习方便，以下结合图 5.19，给出 5G 网络架构的主要网元及对 VNF(虚拟网络功能)的释义。

接入与移动性管理功能(Access and Mobility Management Function，AMF)：与 4G EPC 网元中的 MME、SGW-C、PGW-C 和 Mobility 相关功能类似，主要相当于 MME 中负责 NAS 安全、空闲状态迁移处理的 CM 和 MM 子层功能。AMF 负责控制面接入和移动性管理、终端接入权限和切换等功能。

用户平面功能(User Plane Function，UPF)：主要用于数据(Data)的传输，执行路由和转发功能。UPF 相当于 LTE 的 SGW-U、PGW-U 网关，主要功能有 PDU 处理，以及负责分组路由和转发、数据包检查、上下行链路中的传输及分组标记等。

会话管理功能(Session Management Function，SMF)：功能相当于 PGW PCRF 的一部分，负责 UE IP 地址分配、PDU 会话控制、承载管理、计费等(没有网关功能)。

策略控制功能(Policy Control Function，PCF)：类似于 4G EPC 网元中的 PCRF (Policy and Charging Function)，主要用于计费，以及提供统一的接入策略，访问 UDR 中签约信息相关的数据用于策略决策。

网络能力开放(Network Exposure Function,NEF):类似于 4G EPC 网元中的 SCEF(Service Capability Exposure Function),允许外部元件(或 AF)存取部分 UE 信息、改变 UE 的行为等。NEF 提供安全方法,将 3GPP 的网络功能提供给第三方应用,比如边缘计算等。

网络存储功能(NF Repository Function,NRF):提供一个 NF 之间沟通的桥梁,例如,某一个 NF 想要知道另一个(含有特定信息/功能的)NF 是否存在,以及使用该 NF 的功能或是获取该 NF 中的信息。

统一数据存储库(Unified Data Repository,UDR):存储和获取签约数据、策略数据,以及用来暴露给外部的结构化数据。

统一数据管理(Unified Data Management,UDM):包含了 UDR 和 FE(Front End)。UDR 的功能类似于 4G EPC 网元中的 HSS,用于存储和管理用户资料,而 FE 则是一个存取 UDR 数据的前端。

认证服务器功能(Authentication Server Function,AUSF):类似于 4G EPC 网元中 HSS 负责用户认证(Authentication)的部分,支撑鉴权服务功能。

N3IWF(Non-3GPP Inter Working Function):BGP 的互操作功能,包括 IPSec 隧道建立和维护,UE 和 AMF 间的 NAS 信令中继,以及用户面数据中继(3GPP 和非 3GPP 间)。

应用功能(Application Function,AF):可以利用 SBA 中的 NF,例如用户资料、计费方式等,设计服务/App,用于提供客户/UE Service,类似于 SDN Controller 上的 App。提供一些应用影响路由、策略控制、接入 NEF 等功能。

短消息功能(SMS Function,SMSF):包括短消息校验、监控、截取和中转等功能。

网络切片选择功能(Network Slice Selection Function,NSSF):主要的功能为决定一个连上来的 UE,应该使用哪些服务,进而决定由哪个 AMF 服务这个 UE。

数据网络(Data Network,DN):如运营商服务、互联网接入和第三方服务提供的数据网。

用户设备(User Equipment,UE):如手机、计算机等终端设备。

结构化数据存储网络功能(Structured Data Storage network Function,SDSF):类似于一个存储服务器,NEF 将要向内/外部暴露的结构化数据在该服务器上存储。SDSF 可以与 UDR(User Data Repository)、UDSF 进行合设。

非结构化数据存储网络功能(Unstructured Data Storage network Function,UDSF):5G 核心网允许每一个内部网元(NF)都可在 UDSF 中存储/找回其自身非结构化数据,每个 NF 可以共享一个 UDSF 进行存储,也可以独自拥有一个 UDSF。

用户数据汇聚(User Data Convergence,UDC),主要是将 UDM、AUSF 和 PCF 这 3 个和用户资料、计费相关的元件整合为 UDC,用来确保数据的一致性。

这些网元看上去数量很多,其实大部分都是在虚拟化平台里面虚拟出来的,凡是网络节点名称后面带有功能(Function)的网元,其功能一般都是基于软件化的。5GC 主要网元为 AMF、SMF 和 UPF,其中 UPF 是 MEC 系统的一个组成网元,负责将边缘网络的流量分发导流到 MEC 业务系统,逻辑上 UPF 与 MEC 业务系统是分离的。

从虚拟化的角度来说,VNF 可以理解为一个虚拟机(Virtual Machine,VM);对提供商(vendor)来说,VNF 是一个或者多个内部相连的 VM 和描述它们的模板;对操作人员(operator)来说,VNF 是一个提供商的软件包。第三方开发的 App 会受到 NFV 网元的

管理。

3. 5G 控制面与用户面

1) 控制面

5GC 的控制面被分为接入和移动管理功能(AMF)、会话管理功能(SMF),LTE 中 MME 的控制面功能被分解到 AMF、SMF 中。单一的 AMF 负责终端的移动性和接入管理;SMF 负责会话管理功能,可以配置多个 SMF。基于灵活的微服务构架的 AMF 和 SMF 对应不同的网络切片。

AMF 和 SMF 是控制面的两个主要节点,配合它们的还有 UDM、AUSF、PCF,以执行用户数据管理、鉴权、策略控制等。另外还有 NEF 和 NRF 这两个平台支持功能节点,用于帮助暴露(expose)和发布(publish)网络数据,以及帮助其他节点发现网络服务。

2) 用户面

5G 核心网的用户面由用户面功能(UPF)节点掌控,UPF 也代替了原来 LTE 中执行路由和转发功能的 SGW 和 PGW。

UPF 作为核心网的用户面下沉网元,实现的更多是网络功能。也有组织在考虑 MEC 与 UPF 的融合,一般认为,5G 网络下 MEC 与 UPF 的关系如图 5.19 的右下框所示。

4. 5G 网络单元连接接口

5G 承载网络是为无线接入网与核心网提供网络连接的基础网络,不仅为这些网络连接提供灵活调度、组网保护和管理控制等功能,还提供带宽、时延、同步和可靠性等方面的性能保障。5G 网络单元连接接口如图 5.21 所示。

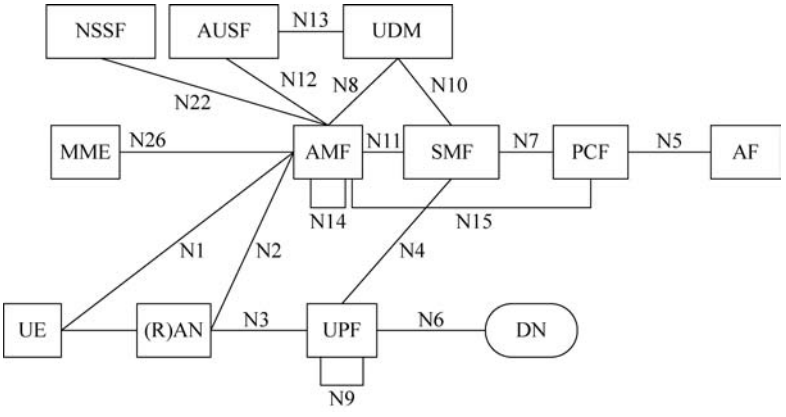


图 5.21 5G 网络单元连接接口

N1:UE 与接入和移动性管理单元(AMF)间的信令面接口,只是逻辑概念端口;

N2:gNB 与接入和移动性管理单元(AMF)间的信令面接口;

N3:gNB 与用户平面(UPF)间的接口,主要用于传输上下行用户面数据;

N4:会话管理单元(SMF)与用户平面(UPF)间的接口,用于传输控制面信息;

N5:策略控制功能(PCF)与应用功能(AF)间的接口;

N6:用户平面(UPF)与数据网络(DN)间的接口,主要用于传输上下行用户数据流,基于 IP 和路由协议与 DN(数据网络)通信;

N7:会话管理单元(SMF)与策略控制功能(PCF)间的接口;

N8:统一数据管理(UDM)与接入和移动性管理单元(AMF)间的接口;

N9：用户平面(UPF)之间的接口，用于传输 UPF 间的上下行用户数据流；

N10：统一数据管理(UDM)与会话管理单元(SMF)间的接口；

N11：接入和移动性管理单元(AMF)与会话管理单元(SMF)间的接口；

N12：接入和移动性管理单元(AMF)与鉴权服务功能(AUSF)间的接口；

N13：统一数据管理(UDM)与鉴权服务功能(AUSF)间的接口；

N14：移动性管理单元(AMF)之间的接口；

N15：在非漫游情况下，策略控制功能(PCF)与接入和移动性管理单元(AMF)间的接口；

N22：网络切片选择功能(NSSF)与接入和移动性管理单元(AMF)间的接口；

N26：LTE 移动管理实体(MME)与接入和移动性管理单元(AMF)间的信令面接口。

城域网接入层主要实现前回传(AAU～DU)Fx 接口、中回传(DU～CU)的 F1 接口，以及回传的 N2(CU～AMF 的信令)和 N3(CU～UPF 的数据)接口连接。省干与城域汇聚核心层，保障回传部分核心网元间的 N4、N6 及 N9 接口连接。其中，N6 连接了 UPF 与数据网络(DN)，也就是连接 IP 公网对外部数据中心进行访问。

5.4.2　5G 承载网技术

1. 承载需求及关键技术

5G 承载需求及关键技术如图 5.22 所示。在 5G 通信承载网方案的选择上，业界较倾向于 IP RAN 技术，只需对原 4G 承载采用的 IP RAN 网络能力做进一步的优化和升级，就完全能满足 5G 承载需求，实现整网的平滑演进和 4G/5G 的融合统一承载，同时可以根据业务和网络发展模式需求，灵活引入 VPN、FlexE、网络切片、SR、SDN 等关键技术，实现网络智能化运维。5G 承载网大带宽、低时延和高同步的需求见表 5.3。

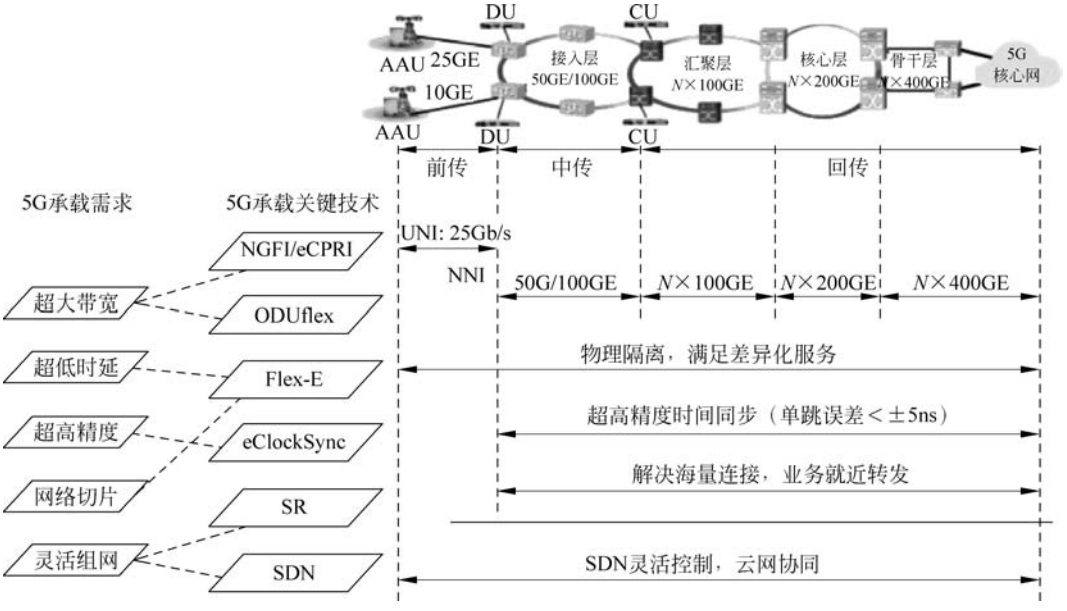


图 5.22　5G 承载需求及关键技术

表 5.3 5G 网络承载需求分析

	基站场景		前传带宽	中传 & 回传带宽（峰值/均值）
大带宽	5G 低频基站，Sub-6G/100MHz 3 小区、64T64R SE 峰值 50b/Hz，均值 10b/Hz		3×25Gb/s	5Gb/s/3Gb/s
	5G 高频基站，Above-6G/800MHz 3 小区、2T2R SE 峰值 25b/Hz，均值 4b/Hz		3×25Gb/s	20Gb/s/9.6Gb/s
低时延	时延指标类型		时延指标	来源
	UE-CU(eMBB)		4ms	3GPP TR38.913
	UE-CU(uRLLC)		0.5ms	3GPP TR38.913
	eV2X(enhanced Vehicle to Everything)		3～10ms	3GPP TR22.891
	前传时延(AAU-DU)		100～150μs	综合
高同步	场景	业务	时间同步要求(tbd)	影响
	5G 低频(sub-6G)	5G 基本业务	≤±1.5μs	影响基本业务可用性
	5G 高频(above-6G)	5G 基本业务	≤±500ns	影响基本业务可用性
	5G 低频(sub-6G)	协同业务 (CoMP/SFN)	ClassA+：<+/−12.5ns ClassA：<+/−45ns ClassB：<+/−110ns	增益下降或无增益

2. 低时延

5G 时代，高清视频、VR/AR 等应用，将给网络带来超大数据流量，这不但给回传带来沉重负担，而且对核心网的处理能力也是挑战，只能将 5GC 分离，将其用户面下沉，使得 5GC 从集中式向分布式演进。对于毫秒级的时延，5GC 的用户面下沉与分布式架构也是一个必然的选择。光纤传播速度为 200km/ms，数据要在相距几百千米以上的终端和核心网之间来回传送，显然是无法满足毫秒级时延的。因此，需将内容下沉并分布部署于接入网侧（边缘数据中心），使之更接近用户，以降低时延。

低时延同时也会带来小区数量的增加。并非只是因为 5G 高频段覆盖范围小才不得不考虑增加小区数量，其实低时延也需要小区越小越好。小区越小，相对于宏站，意味着小区无线环境越简单、干净，越可以降低由于恶劣的无线环境带来的重传问题，在高可靠、低时延的 5G 应用中也同样重要。

目前 LTE 网络内部时延一般小于 20ms，如果 Ping 外部服务器，时延通常在 40～50ms。5G 在应对时延超敏感用户时，要求接入网时延不超过 0.5ms，这就意味着 5G 中心机房（数据中心）与 5G 小区（基站）之间的距离不能超过 50km。5G 在接入网机房引入了移动边缘计算（MEC）、边缘数据中心，也就是利用下沉技术减少时延。

由于低时延的基于 MEC 部署在接入网侧的内容感知，使得电信网络掌握了更多内容控制权，提高了电信运营商的竞争力。

3. 网络切片

1）切片分组网络技术

切片分组网络（Slicing Packet Network，SPN）技术也称为网络切片技术。SPN 作为 5G 承载网最为关键的技术之一，能够在 3G、4G 承载网络分组传输技术的基础上，提供相关

的业务承载，以满足 5G 承载网络的要求。SPN 主要功能是使前传、中传，以及回传的端到端组网能力成为可能。

网络切片是指通过虚拟化技术，将物理网络分割为多个相互独立的虚拟的端到端网络，每个虚拟网络称为一个网络切片。每个网络切片中的网络功能可以在裁剪后，通过动态的网络功能编排形成一个完整实例化的网络架构。

实现网络切片采用 NFV 技术，将网络中专用设备的软、硬件功能转移到 VM 上，比如在 VM 上实现 AMF、SMF、PCF、NEF、UDM 等功能。VM 基于行业标准的服务器、存储和网络设备，取代了传统网络中的网元设备。

NFV 通过为不同的业务和通信场景创建不同的网络切片，使得网络可以根据不同的业务特征采用不同的架构和管理机制。作为 5G 应对多业务承载需求的措施之一，网络切片如图 5.23 所示，图中的 V2X Svr 为 V2X(Vehicle-to-Everthing)业务，3GPP 关于 V2X 的 5G 标准，主要是对车联网业务的支持；IoT(Internet of things)为物联网，IoT Svr 为物联网服务或业务。网络经过功能虚拟化后，无线接入网部分称为边缘云(edge cloud)，而核心网部分称为核心云(core cloud)。边缘云和核心云中的 VM，通过 SDN 实现互联互通。

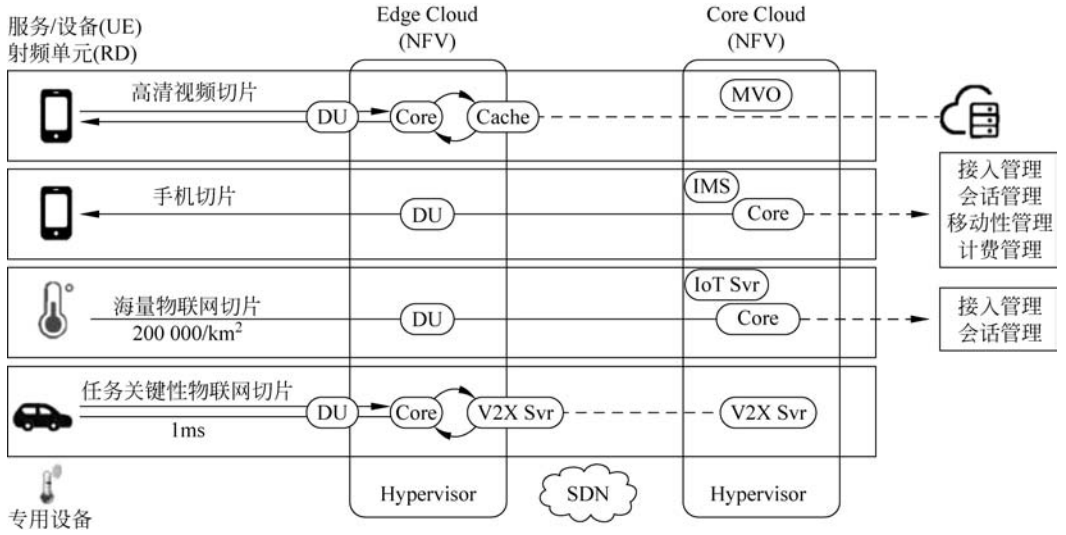


图 5.23　网络切片示意图

为了充分发挥以太网承载通道的作用，给切片提供支持，将核心层(L3)功能下沉到汇聚层或直至接入层，实现了连接的灵活性。在将 20Gb/s、50Gb/s 引入到接入层的过程中，可以依照相关要求在汇聚层和核心层引入 100Gb/s、200Gb/s 及 400Gb/s 全光方案。5G 承载的 SPN 组网架构，主要包含传输层、通道层和切片分组层，还包括时钟同步功能模块。

2) 5G 网络切片的应用场景

5G 服务是多样化的，包括车联网、大规模物联网、工业自动化、远程医疗、VR/AR 等，它们对 5G 网络提出了多样化的性能需求。这些服务对网络的要求各不相同，比如工业自动化要求低时延、高可靠，但对数据速率要求不高；高清视频无须低时延，但要求超高速率，5G 使得每个网络切片能够适配不同的业务和场景。5G 网络切片的应用场景可以划分为三大类：移动宽带、海量物联网和任务关键性物联网。

4. 灵活以太网技术

灵活以太网技术(Flex Ethernet,FlexE)是5G承载网实现业务隔离承载和网络切片的一种接口技术。由于灵活以太网技术本身拥有较好的数据隔离效果,具有可调节性和灵活性,能够完美匹配5G承载网,因而得到广泛的应用。应用FlexE能实现以太网在时隙调度的基础上划分业务通道,具备多个以太网弹性硬管道,使网络具有良好的隔离性。同时还具备以太网的高效性、统计时分复用等优势。能够实现同一个业务区域内信息统计复用,减少各业务区域的相互影响,提供更多网络切片选择。从第一代以太网到FlexE的发展历程如下:

第一代以太网(Native Ethernet):从1980年开始,应用于园区、企业及数据中心的互联;

第二代以太网(Carrier Ethernet):从2000年开始,一直沿用到现在,主要面向运营商网络,广泛应用于电信级城域网、3G/4G移动承载网、专线专网接入等;

第三代以太网(FlexE):具有带宽灵活可调、数据隔离、完美契合5G业务等特点。随着5G时代的到来,云服务、AR/VR、车联网等新业务涌现,FlexE技术将得到进一步的发展;

FlexE技术在以太网L2(MAC)、L1(PHY,物理层)之间的中间层增加FlexE Shim(垫片)层,Flex Shim层基于时分复用分发机制,将多个Client(客户端)接口的数据按照时隙方式分发至多个不同的子通道。以100GE(Gigabit Ethernet,千兆以太接口)管道为例,通过FlexE Shim可以划分为20个5G速率的子通道,每个客户端侧接口可指定使用某一个或多个子通道,实现业务隔离。

FlexE还能够实现大端口的捆绑功能,有效地解决之前网络带宽升级的问题。比如接入层50GE带宽能够满足5G初期的业务发展需求,如果随着5G应用的发展,接入层需升级至100GE,通过FlexE绑定功能,只需再扩容一个50GE端口即可实现,不用进行大量的业务调整和割接工作,保护了前期的网络投资。

FlexE分片基于时隙调度将一个物理以太网端口划分为多个以太网弹性硬管道,使得网络具备类似于TDM(时分复用)独占时隙和以太网统计复用、网络效率高的双重特点,实现同一切片内业务统计复用,切片之间业务互不影响,相对于通过VPN实现的切片,其隔离性更好,为5G网络切片提供了更多选择。

5. 段路由技术

属于路由转发的段路由(Segment Routing,SR)技术分为SR MPLS和SRv6,SRv6是一种基于IPv6的SR解决方案。SR主要利用路径标签,确认路由数据包所要通过的网络路径。该技术与传统的MPLS有所不同,主要体现在每个路由器都有一个与之相对应的指令节点,路由转发技术会把固定标签分别设置于各个节点之上。一般来说,SR并不会了解业务的具体状态,仅维护拓扑信息。SR路由器在指令节点的基础上转发数据,是一种全兼容MPLS转发的路由技术。

5G承载网对SR要求较高,随着5G核心网的部署,基站的流量需要穿过城域网及IP骨干网。在典型场景下,城域网的接入环有8～10个节点,汇聚环有4～8个节点,核心环也有4～8个节点;在IP骨干网,流量还需穿过多个路由器节点。同时,由于网络切片、高可靠服务级协议(Service Level Agreement,SLA)、可管可控的要求,运营商网络需要能够指定显式路径,使端到端SR隧道可以包含10跳甚至更多的跳数。

SR是一种隧道技术,可方便地实现大规模的SR隧道部署。结合SDN智能控制技术,

SR 技术将推动 IP 网络向路由智能计算和路径可控方向发展，具备类似于传输网的功能和性能，进一步提升业务的可靠性、智能恢复和保护能力。

5.4.3 5G 承载网架构

1. 5G 承载网的总体架构

5G 承载网络需要具备差异化的网络切片服务能力，总体目标架构如图 5.24 所示，包括协同管理控制平面、转发平面和同步支撑网三部分，通过转发平面的资源切片和管理控制平面的切片管控能力，为 5G 应用、移动网络互联以及家庭宽带等业务提供差异化服务能力。

图 5.24 中，SR 为 5G 承载网新技术；SDN 以 OpenFlow 为核心技术，通过将网络设备的控制面与数据面分离，从而实现网络流量的灵活控制；移动云边缘（Mobile Cloud Engine，MCE）是云化无线接入网（Cloud RAN）的集中控制管理逻辑实体，它包含了 RAN 的非实时功能。MEC 为移动边缘计算；虚拟化演进分组核心网（Virtual Evolved Packet Core，VEPC），对 4G 核心网 EPC 实现虚拟化，并作为 5G 总体架构的一部分实现核心网功能下移。

1）转发平面

数据转发平面具备分层组网架构和多业务统一承载能力。

（1）端到端分层组网架构：主要包含城域以及省内干线两种级别，其中城域内组网包括接入、汇聚与核心三层架构。

（2）差异化网络切片能力：在承载网络中通过网络资源的软、硬管道隔离技术，为不同服务质量需求的客户业务提供所需网络连接服务和性能保障。

（3）多业务统一承载能力：可以直接采用新技术搭建 5G 承载，或者在原有的 4G 承载网的基础上进行相应升级演进。

2）管理控制平面

管理控制平面具有统一管理、协同控制和智能运维能力，它既要管理和控制 SDN 网元，还应灵活配置网络资源及各项业务。

（1）统一管理能力：以多层多域管理信息模型作为基础，实现不同子网的多层网络技术的统一管理，可以集中管理各个域多层网络。

（2）协同控制能力：基于统一接口实现多层多域的协同控制；通过 App 实现业务自动化和切片管控的协同服务能力。

（3）智能运维能力：实时监测网络和业务的动态情况，进而提供时延、故障及流量测量、告警分析等。

3）同步支撑网

无论采用 FDD-LTE、TDD-LTE，还是 5G，均需同时满足频率同步及时间同步要求。

（1）频率同步：从线路码流内提取时钟，以同步以太网传输。

（2）时间同步：由于 GPS 存在难选址、难安装、成本高和不安全等因素，因此 LTE、5G 基站需要承载网提供精确的时间同步信号。

5G 在指定地点（如 CU 所在汇聚机房）部署小型化增强型 BITS（大楼综合定时供给设备）时钟。另外，还可以提升时间源头设备精度和承载设备同步传送能力，采用高精度精确时间协议（Precision Time Protocol，PTP）以太网技术进行同步信号的局间和局内互联等。

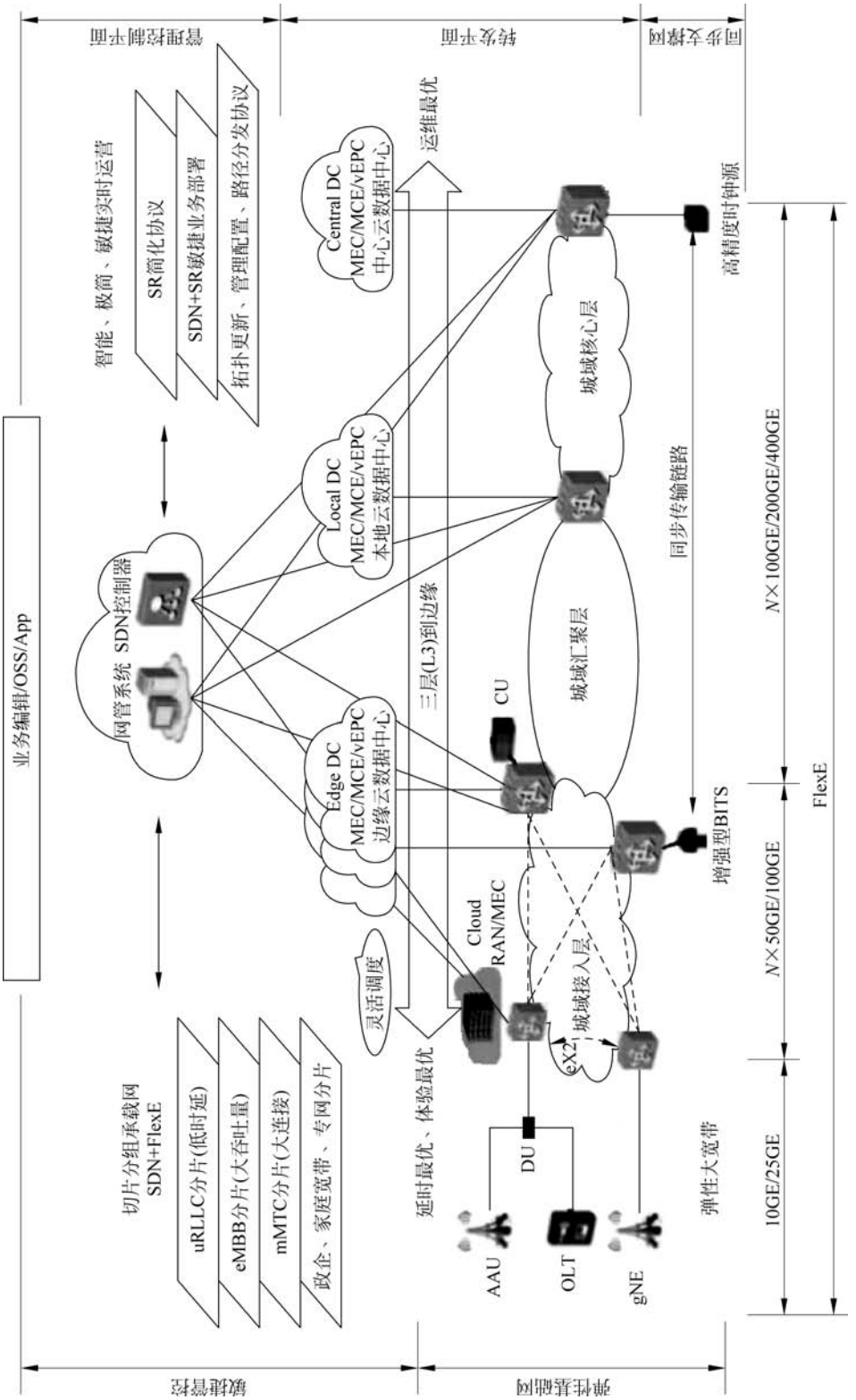


图 5.24 5G 承载网络目标架构

4）切片分组承载网

分组网应能够提供灵活可靠的切片承载，其中隧道隔离、VPN 隔离和 QoS 调度是常用的软切片方案。针对特定的网络切片需求，可采用 FlexE 技术，结合智能化管控，基于硬管道为特定的业务提供硬切片承载方案。

2. 5G 基站构架

1）基站基本组成

一个基站在物理上由以下部分组成。

（1）射频拉远单元（Remote Radio Unit，RRU）：主要用于将射频空口收/发的模拟信号（analog signal）和移动系统内部通信的数字信号（digital signal）进行转换，即 D/A 或 A/D 转换等。

（2）有源天线单元（Active Antenna Unit，AAU）：将射频模块（RU）和天线模块（AU）集成在一起，是继 RRU 之后的一种新的射频模块形态。

（3）基带处理单元（Base-band Unit，BBU）：主要用于对数字基带信号的处理，如调制/解调、压缩/解压缩、编码/译码等数字信号处理。BBU 有自己的操作系统，可以管控与其相连的 RRU，是核心网与 RRU 或其他通信节点之间的沟通桥梁。

2）基站构架的演进

基站构架的演进可以分为 3 个阶段。

（1）传统基站（traditional base station）：传统基站的 RRU 和 BBU 是一体的，它和 RF 天线之间利用馈电电缆（feeder cable）连接，如传统的电视或广播天线，但频宽低、扩增困难。

（2）分离式基站（distributed base station）：将 RRU 和 BBU 进行分离，RRU 和 BBU 之间利用光纤（optical cable）连接，既加大了频宽，也便于天线部署。

（3）整合型基站（integrated base station）：因为频宽的大幅增加和技术的进步，可以将 RF 天线和 RRU 进行整合，一个 RRU 上面支持大量的天线，如大规模 MIMO（Massive MIMO）。

3）5G 基站部署

5G 基站部署有两种：NG-eNB 与 gNB。NG-eNB 是在 LTE 无线接入网上建立的 5G 基站，基于 LTE 空口（Uu）。NG-eNB 等同于 LTE 中的 eNodeB，NG-RAN 是对现有的 4G 网络进行升级，以支持 5G 的相关特性，NG-eNB 的作用就是为了提高 5G 建网初期的连续覆盖率。由于该类型基站结构及工作原理采用 LTE 技术，如空口、天线，内部帧结构等，因此无法支持超低时延、超高速率的业务。NG-eNB 对于前传和回传网络的需求，基本与当前的 4G 无线网络相同。gNB 是基于 5G 新空口（New Radio，NR）的基站。gNB 属于完全 5G 基站，满足 5G 定义的所有关键性能指标（KPI）要求及支持所有典型业务，支持比 NG-eNB 更高的空口速率，因此 gNB 对于前传和回传的带宽，以及时延都提出了更高的需求。gNB 的 BBU 被分为 CU、DU 两个实体，实现了实时功能和非实时功能的分离。gNB 架构如图 5.25 所示。

远程单元（Remote Unit，RU）：一个负责处理 DFE（Digital Front End，数字前端）和部分 PHY（物理层）功能的无线电单元，RU 是 AAU 的一部分。

分布式单元（Distributed Unit，DU）：靠近 RU 的分布式单元，主要实现 RLC、MAC 和部分 PHY 功能。该逻辑节点包括 eNB/gNB 功能的子集，具体取决于功能拆分选项，其操作由 CU 控制。

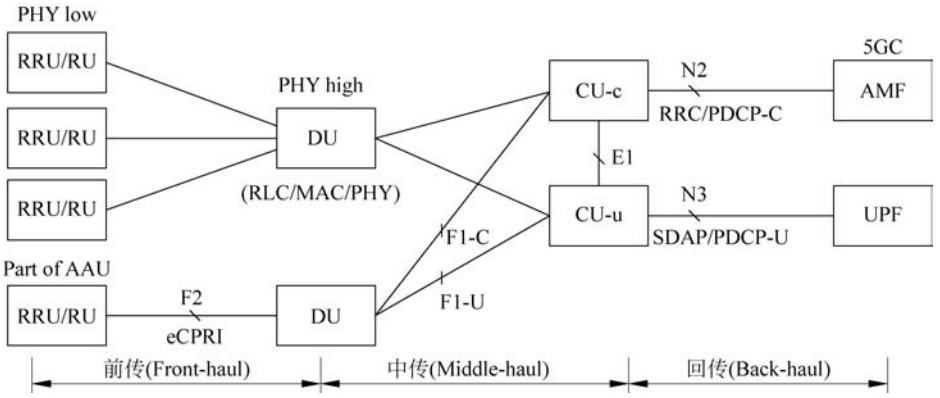


图 5.25 5G 基站(gNB)架构

集中式单元(Centralized Unit,CU):负责处理 RRC、PDCP 等高层协议的中央单元。gNB 由一个 CU、一个或多个 DU 组成,DU 通过 F1-C 和 F1-U 接口,分别连接到 CU 的控制面 CU-c 和用户面 CU-u。具有多个 DU 的 CU 支持多个 gNB。分离架构使 5G 网络能够根据中传可用性和网络设计,在 CU 和 DU 之间利用不同的协议栈分布。CU 可以通过中传接口对多个 DU 进行集中式管理。

前传(front-haul):RRU/RU 和 DU 之间的网络,协议是 CPRI 或 eCPRI 或 IEEE 1914.3;

中传(middle-haul):DU 和 CU 之间的网络,通过 F1 接口连接;

回传(back-haul):CU 和 5GC 之间的网络,通常也将中传网络合并到回传网络中。

集中式基站部署允许在不同 RU 之间进行负载平衡,这就是为什么在大多数情况下,DU 将与 RU 搭配以执行所有密集处理任务。以边缘为中心的基带处理可提供低时延、具有实时干扰管理功能的无缝移动性和资源优化。连接 RU 和 DU 的底层接口是 eCPRI,可以提供最低的时延,前传时延被限制为 100μs。需要注意的是,DU/CU 拆分几乎不受基础设施类型的影响。新的接口主要是 DU 和 CU 之间的 F1 接口,它们需要能够跨不同的供应商网络互操作,以真正实现开放的 RAN(Open RAN)。中传将 CU 与 DU 连接起来。4G/5G 核心网通过回传网连接到 CU,5G 核心距离 CU 最多可达 200km。

NG-eNB 和 gNB 两种基站在覆盖、容量、时延和新业务支持等方面都存在较大的差异。

3. 5G RAN 的部署

针对 5G 引进的云化、虚拟化概念,5G RAN 的部署方式分为分布式无线接入网(D-RAN)和集中式无线接入网(C-RAN),gNB 支持 CU、DU 以及 AAU 的一体化合设以及相分离两种部署方架。CU 对其下面的 DU 进行集中化的分层管理,CU 通过导入 SDN,将其功能切分为 CP(控制面)和 UP(用户面),并利用开源(open source)让 RAN 更为开放、有弹性。这样,DU 可放置在中心机房,如利用原先 4G 的 BBU 机房等,然后将 AAU 分布在远端。

C-RAN 构架就是将 AAU/RRU 拉远,BBU 资源集中化,并对其进行软件化、虚拟化和云化,运营商的中心机房向数据中心转型,并放入 5G 的移动边缘计算(Multi-access Edge Computing,MEC)。4G、5G 实现了完全的 IP 化,5G IP RAN 组网架构如图 5.26 所示,图中给出了 5G 网络中前传、中传和回传所包含的网段。

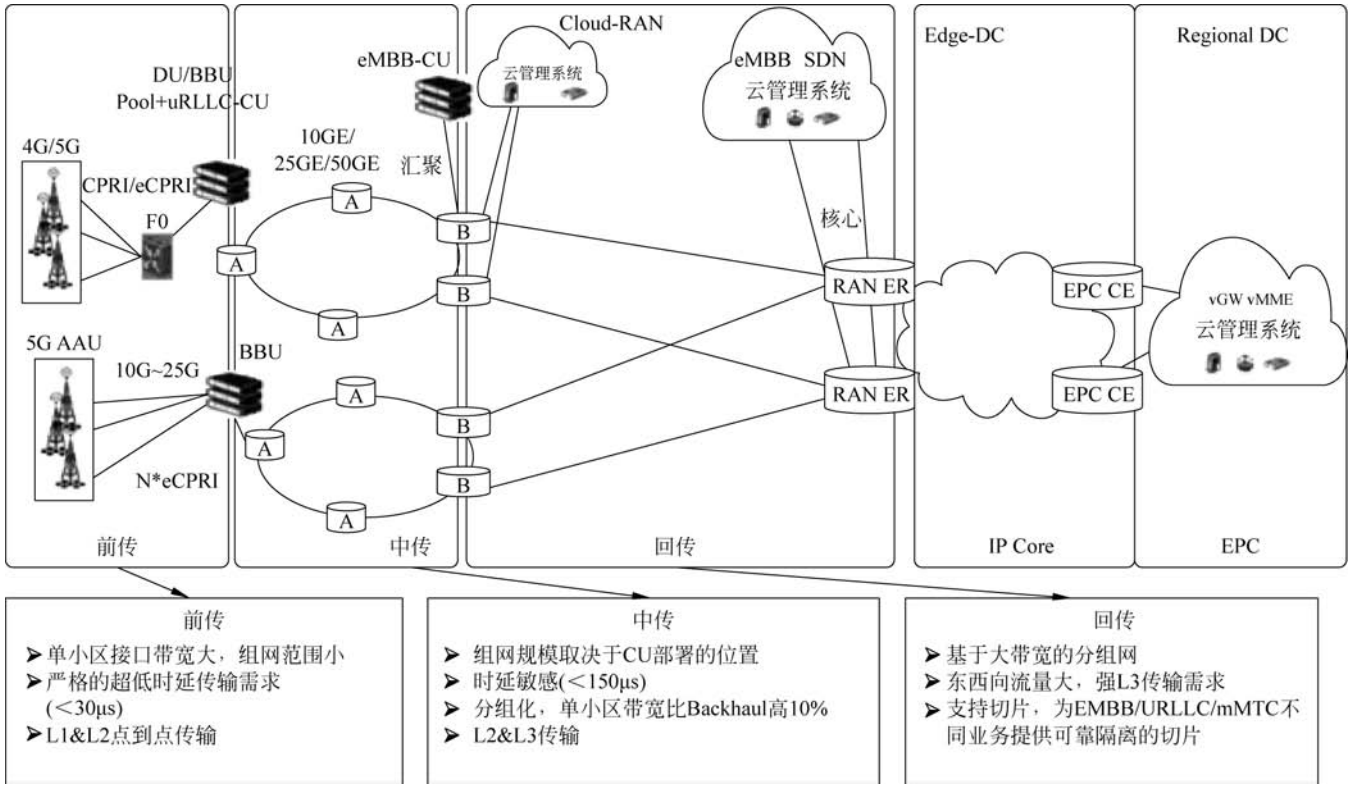


图 5.26　5G IP RAN 组网架构

基站构架演进到了第三个阶段，其实就是使用了 C-RAN 的概念进行无线网络部署。C-RAN 最早由中国移动提出，C 代表云(Cloud)，就是对原本绑在一起的功能进行拆分，增加了基站部署的弹性，可以将 BBU 集体布建在一个小型的数据中心(data center)，形成一个 BBU 池(BBU Pool)，而这个数据中心中的 BBU，还能跟其他数量庞大的 RRU 进行对接，由于 RRU 与 BBU 使用的是光传输网，所以可以大幅提升频宽和基站部署的弹性。

在 5G 场景中，C-RAN＋Massive MIMO 已成为降低延迟的一种可选方案，工作于低频段且覆盖范围大的宏小区主要负责控制面，传送控制信令；而工作于高频段的小区只负责用户面，传送用户数据流量。

AAU/RRU 和 BBU 之间采用通用公共无线电接口(Common Public Radio Interface，CPRI)协议沟通，其连接可以通过不同类型的传输网络实现。

在 CU/DU 合设架构中，一个基站实现了全部的协议栈功能，这种架构适用于密集城区和室内热点场景。对于 CU/DU 分离架构，5G 协议栈中的上层功能位于 CU 中，而底层协议栈位于 DU 中，CU/DU 分离的目的主要有如下几个方面：硬件实现灵活，可节省成本；可以实现性能和负荷管理的协调、实时性能优化；易于实现 SDN/NFV 功能；可配置能够满足不同应用场景的需求，如传输时延的多变性。

CU/DU 合设和分离主要取决于网络场景、业务类型以及传输网性能等因素。此外 5G 网络高速、低时延的特点也对传输网提出了挑战。

为了便于传输控制面信令以及用户面数据等信息，在 CU 和 DU 之间定义了一个新接口 F1，在 CU 内部，控制面和用户面在部署时也可以分离，以满足不同类型业务时延和管理的差异化。CU 控制面(CU-CP)和 CU 用户面(CU-UP)之间的接口定义为 E1。

5.5 移动承载网方案

5.5.1 承载网方案比较

1. 传统传输网及基于 IP 的承载网

传输网是构建各种通信承载网的基础网，目前主要传输网的结构如图 5.27 所示，无论是传统的基于电路交换的 SDH/MSTP，还是基于分组交换的 PTN，以及基于波分复用的 WDM，都已形成了通信网中的高速公路。由于 3G(R4 以后版本)之后的无线接入网均支持全 IP 传输，于是出现了基于 IP 的承载网。图 5.27 中的传输网也属于移动承载网。

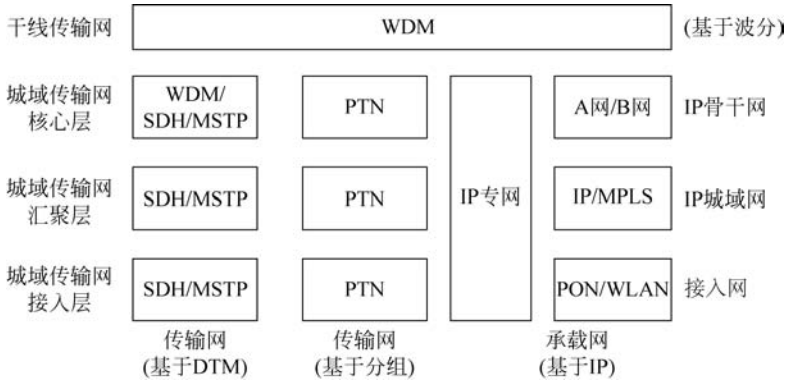


图 5.27 传输网与承载网

基于 TDM 的 SDH，主要采用分插复用实现 E1(2M)、STM-1～STM-64 传输，而 MSTP 能将 ATM、E1、FE、GE 等接口的数据进行统一封装传输，与 SDH 相比兼容性较强。

基于波分复用的 WDM 系统，包括城域密级波分复用(DWDM)和粗波分复用(CWDM)。WDM 可以承载包括 SDH、FE、GE 等大颗粒业务的传送，主要用于骨干传输网。

移动网络用得最多的是城域 WDM 系统，WDM 逐步演进为 OADM(光分插复用)光自愈环，并引入 OXC 互连，大量的光自愈环形成网状光网结构，再引入自动交换光网络(ASON)功能，实现了端到端动态波长分配。

MSTP 可以将传统的 SDH 复用器、数字交叉连接器、WDM 终端、以太网交换机和 IP 边缘路由器等多个独立的设备集成为一种设备。过去已建设的大量 SDH，可以通过升级到 MSTP，有效地支持分组数据业务。在过去相当长一段时间内，城域传输网主要采用 SDH/MSTP，承载以小颗粒 TDM 业务为主的 2G、3G 基站等业务。

由于 4G、5G 实现全 IP 化的组网，城域网技术已从“以 TDM 电路交换为内核”向“以 IP 分组交换为内核”演进。目前城域网需要扩大规模并考虑多业务统一承载，以适应 5G 基站大规模数据业务的承载以及控制和管理。

移动空口的精确时钟和时间同步需求，导致城域网需要提供更高精度的同步信号传送能力，这样对由路由器、交换机构成的基于 IP 的承载网提出了一种技术挑战。

2. 传统移动网三种承载方案

1) 方案一：SDH/MSTP＋路由器模式(简称 SDH/MSTP 承载方案)

传输网络与业务网络分层组网。传输网层面仍采用现有 SDH/MSTP 网络。通过对原有的传输网络扩容升级，实现传输容量的提升，业务网层面的建设主要在相关节点设置路由设备，实现三层调度功能，而接入层设置交换设备，数据网构成核心、汇聚、接入三层星状网络拓扑。传输网络的接口仍采用 E1 对接方式，传输容量 155～622Mb/s。此方案业务网的性能主要取决于传输网络的改造力度。由于存在传输速率与数据设备速率无法匹配的问题，传输网成为业务网发展的瓶颈，此方案适用于基础传输网及 2G、3G 的承载网。

2) 方案二：PTN＋路由器模式(简称 PTN 承载方案)

PTN 最初采用二层面向连接技术进行设计和开发，不仅集成了二层设备的统计复用、组播等功能，同时还可提供带宽规划等功能，从而在高等级的业务传送、网络故障定位等方面和 SDH 类似，较传统的二层数据网优势明显。此外，PTN 以升级的方式提供完善的三层处理功能。传输网利用 PTN 分组业务承载优势实现传输承载统一平台。业务网络由原有承载在 SDH/MSTP 设备上，调整至新建的 PTN 网络上，在 PTN 网络上不再统一建设业务层。在网络规模较小地区，采用在 PTN 核心和汇聚层开通三层功能来实现业务网的路由功能；在较大规模组网地区，当业务网络三层功能需求较大时，可采用在核心和汇聚层增加路由设备实现业务网的承载。

此方案解决了数据业务的有效承载，减少了对原有 SDH/MSTP 网络的改造，MSTP 技术、PTN 技术和路由技术各自发挥优势承担传输承载功能。

3) 方案三：IP RAN 模式(简称 IP RAN 承载方案)

IP RAN 方案采用 SR(业务路由器)＋汇聚、接入层增强型路由器(IP RAN)，其中 IP RAN 设备主要定位于 IP 城域网，位于城域网的接入层、汇聚层。向上与 SR 相连，向下接

入客户设备、基站设备。

IP RAN 方案的主要优势在于三层功能的完备和成熟，支持全面的 IPv4（包含 IPv6）三层转发及路由功能，能实现静态、动态路由配置。动态路由协议支持域内 RIP、OSPF、ISIS 等路由协议；域间路由协议支持 BGP 等协议；支持 MPLS 三层功能、三层 MPLS VPN 功能和三层组播功能。

IP RAN 方案在网管、OAM、同步和保护等方面融合了传统传输技术。表 5.4 给出了 3 种承载方案的对比。

表 5.4　3 种组网方案技术比较

项目	SDH/MSTP＋路由器方案	PTN＋路由器方案	IP RAN 方案
可靠性	采用电路交换，刚性分配带宽，可靠性高	分组方式组网，接入层采用 VLAN 和 L2 VPN 实现业务隔离承载；核心、汇聚层可采用三层组网，划分三层 VPN	分组方式组网，基于全网三层组网模式，可在全网划分三层 VPN，完全实现业务隔离承载
	具备多种保护方式，可达到电信级组网要求	可实现复杂组网，实现大规模组网的电信级运营保障	可达到电信级组网要求，但大规模组网效率尚待提升
	现有网路。网络运行稳定。有完善的运行、验收、维护规范，具备技术熟练的运行维护人员	在公网和专网已有多年运行经验，运行稳定。由于 PTN OAM 沿袭 MSTP 网络，运维难度及成本较高	网络商用时间较短，稳定性待验证。新型传输网络，运维难度及成本较高
承载能力	MSTP 传输以太网业务仅具备一层透传和二层汇聚功能，尚无三层交换能力，且数据业务封装为 $n\times$E1 传输，传输数据业务效率低、无法共享带宽	数据转发能力强大，同时具备传统通信传送网络的一般特征。具备功能强大的 OAM 能力，维护性强，网络同步性能优秀，支持多种业务承载，强大的网络管理能力和业务安全性	基于分组交换网络的路由交换设备，适应路由复杂的数据网络，增强了保护机制和 OAM 能力，提高了传输特性和组网能力
	支持 TDM 业务强，承载 IP 业务能力弱	对于数据业务的处理及扩展适应性较强	适用于全数据业务承载的网络或分级网
	单点带宽业务大量增加时，需要全网升级	网络接入灵活，对于网络后续扩容具备一定优势	大规模组网能力有待提升
	适用于 2G、3G 承载网	适用于 3G、4G、5G 承载网	适用于 4G、5G 承载网

3. PTN 与 IP RAN 技术比较

目前的移动承载网，PTN 和 IP RAN 用得较多，两者在功能方面比较如下。

（1）接口：PTN 与 IP RAN 路由器设备在接口的支持上，都包括以太网、ATM 和 SDH，两者区别不大。

（2）三层功能：为了满足三层 VPN 的需求，PTN 核心设备通过升级支持三层功能，包括 IP 报文处理、IP 寻址、路由协议等，从而有效增强了网络的业务调度和处理能力，配合下层（L2）封闭传送通道，可以较好地对三层业务进行承载。IP RAN 支持所有三层功能，网络从上至下均支持 IP 报文内部的处理，这是 IP RAN 的处理优势。

（3）QoS 功能：IP RAN 和 PTN 具有 MPLS 同级的层次化、精细化 QoS，区别不大。

（4）OAM 机制：IP RAN 和 PTN 可支持与 SDH 同级别的层次化 OAM 机制，包括网

络层、业务层和接入链路层的 OAM，具有较强的网络监控和检测、故障判断和恢复等特性。

(5) 网络保护机制：PTN 支持与 SDH 类似的保护机制，包括 PW 层、LSP 层、段层、物理层、SNC 等多重保护，而 IP RAN 重点依靠 STP(生成树)、FRR(快速重路由)、VRRP(虚拟路由冗余协议)等基于三层动态协议的保护技术。

(6) 网管操作：PTN 和 IP RAN 设备均能提供强大的图形化网管操作维护界面。

(7) 网络部署：PTN 全面继承了 SDH 强大的组网能力，运维简单。但由于 IP RAN 在规划建设方面需要考虑业务 IP、端口互联 IP、设备 Loopback IP 等，规划较为复杂。

5.5.2　5G 承载网解决方案

1. 5G IP RAN

图 5.28 给出了 2G 至 5G 无线接入网演进过程，可以看到：2G(GSM)为 BSC(基站控制器)、BTS(基站收发器)；3G 为无线网络控制器(RNC)、Node B；4G 为 eNB，又分为 BBU(基带处理单元)、RRU(射频拉远单元)；5G 为集中单元(CU)、分布单元(DU)，以及有源天线单元(AAU)，合称 gNB。

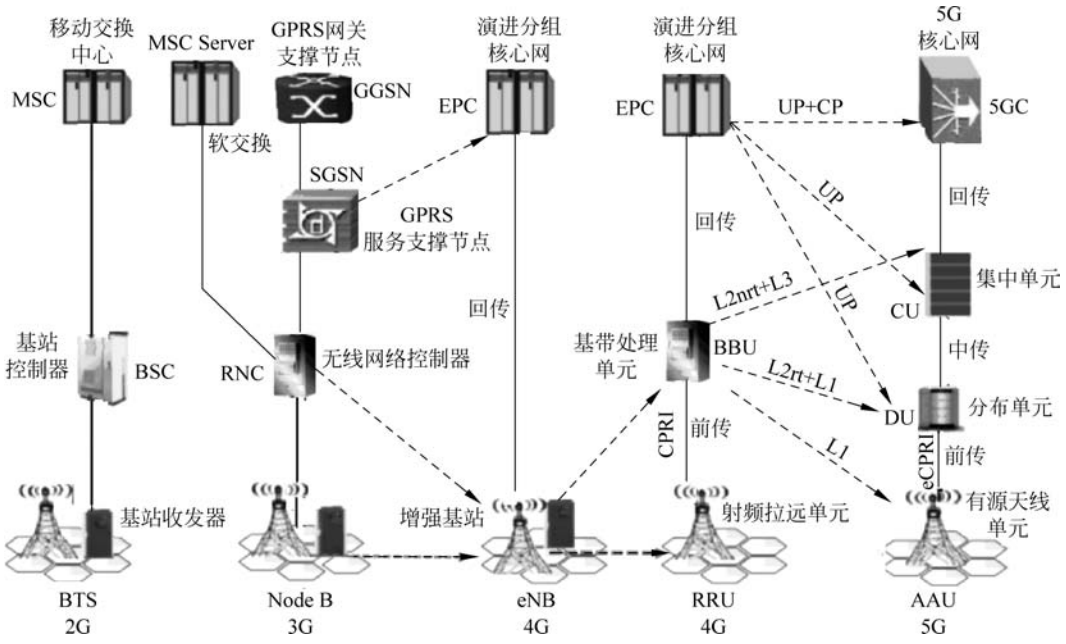


图 5.28　2G 至 5G 无线接入网

5G IP RAN 组网采用现有的核心汇聚网加接入网架构，汇聚网和接入网分属不同的内部网关协议(IGP)进程。通常核心汇聚网采用口字形结构，接入网采用环状结构。5G 无线接入网的 C-RAN 所辖的 DU、BBU，D-RAN 所辖的 CU、BBU 等基站设备分别组环，以提升网络效率，降低网络成本。相对于 4G 无线接入网的 BBU、RRU 两级结构，5G RAN 通常采用 CU、DU、AAU 三级结构。针对 5G RAN 三级网络，将 DU 和 AAU 间的传输网称为前传，将 DU 和 CU 间的传输网称为中传，将 CU 和 5GC 间的传输网称为回传。以下将重点介绍前传、中传和回传。

1）前传网络

在5G网中，AAU（或BBU）到DU之间定义为前传网络，前传协议从CPRI向eCPRI演进，能满足大带宽需求。4G网，RRU到BBU之间定义为前传网络。

前传接口带宽需求：需要考虑到毫米波将支持1GHz系统带宽以及256通道天线的部署场景。根据现有射频拉远单元/远端射频模块的功能划分，前传接口带宽要求随着载波频率带宽及天线通道数量为线性增长的关系。即便考虑使用64通道、20MHz带宽，仍需要近64Gb/s的前传接口带宽。图5.29给出了5G网络依据不同的前传条件进行部署的场景，非理想前传条件下，将DU下沉到RRU处，在理想前传条件下，将DU和CU堆叠到一起。

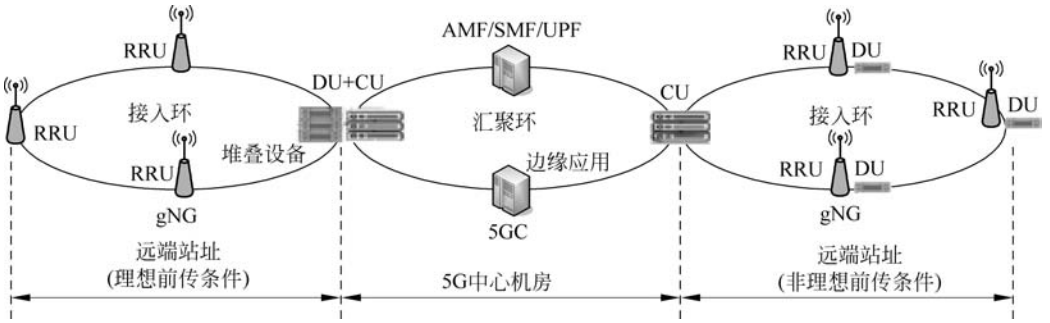


图5.29　5G网络依据前传条件部署

满足5G前传接口需求的前传方案主要有光纤直连方案、WDM-PON（无源WDM）方案、有源WDM方案、PTN/SPN（切片分组网络）等。对安全性要求较高的场景，应尽量采用D-RAN方式（用PTN/SPN组环网接入），当采用C-RAN方式时可采用低成本有源WDM方案。5G前传以光纤直连为主，局部光纤资源不足的地区，可通过网络路由交换设备承载方案作为补充。5G前传的网络设备承载方案需根据运营商网络需求和未来规划等进行选择。

2）回传网络

在组网形态上将CU到5GC之间的网络定义为回传，如果CU云化部署，则CU带宽取决于管理DU数目，回传网在流量及组网设备层面都具有较好的收敛性。

3）中传网络（或称为二级前传网络）

5G RAN实现了DU和CU分离。对于DU和CU之间的中传网络，网络带宽与可靠性要求较高，收敛特性与回传网络类似，在网络架构设计时需要按回传网基本特性综合考虑和设计，因此从承载技术角度看，IP RAN网络中传与回传承载没有差异，并且因为CU既可与DU部署在一起，也可以集中云化部署。为了简化运维，中传可以与回传合并到统一承载组网，无须单独的中传网络，以减少网络架构的层次。

对于前传网络的承载，可根据不同接入条件和场景，灵活选用光纤直驱、无源WDM、有源WDM/OTN等方案，前传网络并没有统一承载方案的需求。而中回传（中传＋回传）网络，对于承载网在带宽、组网、网络切片等方面需求基本一致，可以采用统一的承载方案。针对中回传网络，主要集中在IP RAN、PTN及OTN等技术应用上。中回传网络需要承载网

具备 L0～L3 的综合传送能力，如图 5.30 所示，它包括业务适配层、L2/L3 分组隧道层、L1 的 TDM 通道层、L0 的光波长传送层等功能层面。

图 5.30　5G 承载网综合传送能力

（1）业务适配层：实现多种业务到转发面通道或隧道的映射和适配功能。

（2）L2/L3 分组隧道层：为 5G 业务提供灵活连接调度、OAM、保护、统计复用和 QoS 保障功能，主要通过 L2 和 L3 的分组转发技术来实现，包括灵活以太网、多协议标签交换（MPLS-TP）和段路由（SR）等。

（3）L1 的 TDM 通道层：TDM 通道技术不仅可为 5G 三大类业务应用（eMBB、uRLLC 和 mMTC）提供支持 TDM 通道硬隔离、复用调度、OAM、保护和低时延的网络切片，并且可为高品质专线提供高安全和低时延服务能力。

（4）L0 的光波长传送层：5G 和专线等大带宽业务要求 5G 承载网络具备 L0 的单通路高速光接口和多波长光层传输、调度和组网能力，如基础传输网 WDM/OTN 等。

采用灵活的业务承载方案，同时满足 LTE、5G NSA（非独立组网）和 SA（独立组网）业务承载及其他业务综合承载的需要。在 NSA 组网模式下，5G 和 4G 基站的 X_x 接口通信需求通过接入环内部或汇聚节点转发。

IP RAN 组网设备包含骨干承载网通信云边界设备、核心节点设备（路由/交换）、汇聚节点设备（路由/交换）、综合接入或接入设备末端、支线接入设备、基站接入设备、基站骨干承载网通信云及汇聚网接入网边缘云等。核心网所在的通信云、通过数据中心的边界设备（border）与 IP RAN 网络的自治系统边界路由器（ASBR）相连，并通过 ASBR 与骨干承载网相连，满足骨干范围内核心网间组网的需求；边界设备直接与城域网的 CRAN 相连并接入互联网。ASBR 位于 OSPF 自治系统和非 OSPF 网络之间。ASBR 可以运行 OSPF 和另一路由选择协议（如 RIP），把 OSPF 上的路由发布到其他路由协议上。

从 5G 业务大带宽、低时延等性能指标以及后续业务需求综合分析，面向 5G 技术的承载，采用分组化的 IP RAN 承载网络，综合业务承载能力强，且与现有 IP RAN 兼容，网络可逐步演进，并能实现 3G/4G/5G 业务融合承载。在规划网络方案时，对于低时延 uRLLC 业务，可以引入 MEC 边缘计算，MEC 和 BBU 同址设置，以满足时延需求。

如果单纯新建一张独立的传输网来满足 5G 通信承载需求，会导致与原有承载网络无法兼容，进一步增加网络运维难度，浪费原有投资，同时，在 VoLTE 还未正式普及的情况下，传统语音通话业务仍需依赖于 2G/3G 网络，演进式的承载方案更具有现实可行性。

2. DC＋IP RAN

针对中传和回传网络，采用 DC＋IP RAN 云网一体的综合承载解决方案，由多级的 DC 分层网络来承载云化的核心网与 CU 资源池，以及通过技术升级后的 IP RAN 网络来承载

DU 至 CU、DC 之间的互联互通业务。

所谓 DC 分层网络，指的是电信长途网，如 DC1 为一级交换中心，设置在各省会（直辖市），其主要功能是汇接所在省的省际和省内的国际和国内长途来、去、转接话务和 DC1 所在本地网的长途终端（落地）话务；DC2 为二级交换中心，设置在各省的地（市）本地网的中心城市，其主要功能是汇接所在地区的国际和国内长途来、去话话务和省内各地（市）本地网之间的长途转接话务以及 DC2 所在中心城市的终端长途话务。随着 SDN/NFV/云计算等 5G 技术的引入，各运营商对 DC 化网络进行重构，DC 被赋予新的职能，用于对云化网络资源的承载，提供计算存储和转发能力。未来网络 DC 将作为网络主要载体，业务流量将集中在云化 DC。

通过引入边缘 DC（区县级）、核心 DC（地市级）和省级 DC（省级）的多级 DC 部署方案，将传统设备网元经过 NFV 化后部署在 DC 上，以提供计算、存储和转发能力。电信机房经过 DC 化重构为接入局所、边缘 DC、核心 DC、省级 DC 4 级结构。而对于无线网络来说，射频单元、有源天线处理单元等均需要分布部署在基站上，基站连接到接入局所，这样 DC 网络结构由 4 级演进为 5 级：基站—接入局所—边缘 DC—核心 DC—省级 DC。

目前 IP RAN 网络主要用于 3G、4G 的承载，在未来网络演进中，IP RAN 设备可作为专用设备进入各层级 DC 中部署。移动网云化将最终形成控制云、转发云和接入云的“三朵云”结构，IP RAN＋DC 将逐步构建移动网“转发云”。5G 承载网络将采用基础设施、网络功能和协同编排的三层组网架构；IP RAN 网络构建了新型的转发平面，负责流量转发调度；DC 承载网元提供各种网络功能服务。具体如图 5.31 所示，图中的边缘 DC、核心 DC 和省级 DC 就是要构建的移动转发云。

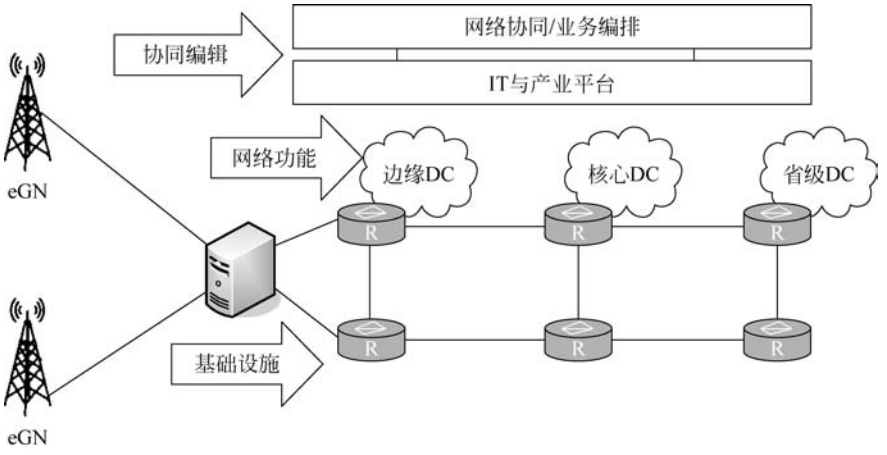


图 5.31　DC＋IP RAN 网络承载架构

5GC 和 MEC 云化后部署在 DC 上；CU 若分散部署则选择云化形成资源池，部分部署在 DC 上，部分部署到 CO（Central Office，端局机房）机房，若与 DU 合并部署，则无须云化；AAU 和 DU 无法云化部署，需采用分布式部署到基站或接入局所。其中，接入局所充当集中部署场景下的汇聚机房。5G 网络网元层级与 DC 机房物理部署对应关系如表 5.5 所示。

表 5.5 5G 网元物理机房部署表(√表示部署)

网元设备	基站	接入局所	地市边缘 DC	地市核心 DC	省级 DC
AAU	√				
DU	√	√			
CU		√	√		
MEC			√		
5GC				√	√

在 5G 建设初期,典型 5G 单站承载带宽峰值高达 5.8Gb/s,均值也高达 3.4Gb/s。如果按照 10 个基站组一个环来计算,带宽均值达到 34Gb/s。因此,在 5G 传送承载网的接入、汇聚层需要引入更高速率的接口。在核心层,则需要广泛应用 100Gb/s 及以上速率的接口。所以,原有的 10GE 接入环仅可以满足少量 5G 基站接入,热点地区接入环需升级支持 50GE;汇聚层和核心层需逐步引入 50GE、100GE 等高速链路。A 类设备、B 类设备、边界路由设备(Edge Router,ER)设备升级支持 50GE、100GE 链路。

在 5G 建设中期,eMBB 规模商用,根据流量变化逐步扩大接入层升级 50GE 比例,汇聚层、核心层规模部署 100GE、200GE 等高速链路。A 类设备、B 类设备、ER 设备规模升级支持高速链路。

在 5G 建设后期,mMTC 和 uRLLC 商用。全网流量快速增长,接入环全面支持 50GE,汇聚层、核心层规模使用 100GE、200GE 链路及其他更高速率链路。A 类设备、B 类设备、ER 设备全面支持高速链路及具有网络分片功能。

(1) A 类设备:指用于业务接入并且是网络边缘的综合业务 IP RAN 设备,是接入网接入层设备。A 类设备原则上部署在接入局所或基站机房,具体方案需要根据 DU 和 CU 的不同部署方式确定。

例如,DU 和 CU 分散设置:DU 分布式部署在基站机房,A 类设备与 DU 合并部署,A 类设备与 DU 连接,解决 DU 到 CU 的中传网络传送。

(2) B 类设备:指用于 A 类接入设备流量汇聚的综合业务 IP RAN 设备,是接入网汇聚层设备。B 类设备的部署需充分考虑 CU 云化形成资源池,以及边缘 DC 的承载。

例如,CU 云化后形成资源池,部署在边缘 DC,B 类设备作为专用设备进入边缘 DC,用于回传网络承载。

DC+IP RAN 的云网一体承载方案,立足于 4G 原址布局,在 4G 承载的基础上进行技术迭代升级,IP RAN 网络需要进行分阶段的升级改造。结合 DC 化网络重构,5G 网络各网元均部署在五级 DC 网络架构中,由 DC 作为云化网元的主要载体,有效解决 5G 中传和回传网络承载需求,实现容量平滑扩展、端到端协同,构筑可持续演进的 5G 承载网络。

3. 5G 承载网技术选型方案

我国三大电信运营商 5G 承载网中传技术选型方案:中国电信的选择是 IP RAN(网络切片+NFV+L3)、端到端分组增强型 PeOTN/STN 2.0(切片传送网);中国移动的选择是 SPN(切片分组网);中国联通的中传选择的是 UTN 2.0。

(1) SPN 方案为中国移动主导的 5G 传输承载方案,在现有的 PTN 网络基础上,通过引入 FlexE 接口、FlexE 交叉、SR 等新技术,满足 5G 业务对大带宽、低时延、灵活控制的需

求，同时兼容现有 PTN 技术，具备现网平滑演进的能力。核心层为 400GE/1T；汇聚层为 200GE/400GE；接入层为 50GE/100GE。

(2) 增强 IP RAN 方案为中国电信主推的 5G 传输承载方案，在目前 IP RAN 设备上引入 FlexE 接口、SR 等新技术，实现网络切片、灵活控制等 5G 需求，但缺少考虑超低时延的业务场景，在 IP RAN 网络平滑演进中其思路与 SPN 趋于一致。

(3) UTN 2.0 方案提出较晚，与现网相比主要的技术变化是在前传采用 G. Metro 技术，中传引入 25GE/50GE 等高速率以太网接口，回传叠加波分复用，技术创新相对较少，主要目标是平滑演进。前传(AAU-DU)采用 G. Metro；中传(DU-CU)采用 POTN；回传(CU-EPC)采用 UTN＋DWDN。

对比 3 种方案，SPN 提出最早，由于基于 PTN，相对成熟度最高；UTN 2.0 基于现网 DWDN 演进，稳定性较高；增强 IP RAN 基于现网路由交换演进，更容易实现三层控制边缘云。

习题

1. 简述 SDH 复用结构。SDH 通常由哪些网络单元组成？简述各个网络单元的功能。
2. 用 TM、SDXC、ADM 组成一个环形 SDH 传输网。
3. 何为 PTN？PTN 与 SDH 有何区别？简述 PTN 的主要功能。
4. PTN 能为移动网络提供哪些接口类型？
5. 比较 PTN 与 IP RAN 方案。
6. 何为前传、中传和回传？
7. 简述 5G 承载网都有哪些方案。
8. 概述从 2G 到 5G 的无线接入网演变过程。