

第3章 SPN 及其关键技术

知识导读

进入 5G 时代,承载网需要引入新的传输接口、技术、网络控制能力,提供大带宽、低时延、超高精度时间同步、网络切片、开放协同等能力,以适应各种网络架构,满足 5G 业务对带宽、时延等的严苛要求。在 2018 年巴塞罗那世界移动大会(MWC 2018)期间,华为、中国移动等发布了 5G 承载网网络架构关键技术和 SPN 技术白皮书,这是业界首次面向 5G 承载提出建设性发展路径。2019 年 8 月,在“5G 光电核心技术论坛”上,SPN 新型技术体系被正式提出。

SPN 以新架构在 L0~L3 层实现了技术突破,满足 5G 承载网在切片、路由、隧道、VPN、高精时钟等方面的要求,并支持资源集中控制和 SDN 调度,具有大带宽、低时延、网络切片、L3 灵活连接等特点。

学习目标

- 了解 SPN 的特性和架构。
- 了解网络切片的概念和意义。
- 理解 FlexE 技术原理。
- 掌握 IS-IS 技术原理。

能力目标

- 掌握 SPN 网络分层模型。
- 掌握 FlexE 技术原理及应用。
- 理解 IS-IS 技术部署应用。

3.1 SPN 简介

3.1.1 SPN 的产生

1. SPN 诞生的背景需求

1) 大宽带需求

随着 5G 推广应用,移动智能终端及云应用等催生了数据流量持续爆炸性增长,无线网络需支持超大数据流量,5G 基站采用 Massive MIMO(大规模多输入多输出)、CoMP(Coordinated Multiple Points,多点协作传输)和高阶调制等技术极大地提升了频谱利用效率,同时通过引入新的空口频谱增加频谱带宽、提升单基站带宽达数 10 倍。5G 基站带宽参数见表 3-1。

表 3-1 5G 基站带宽参数

参数	5G 中频(高配置)	5G 中频(低配置)	5G 中频(室分)	5G 高频
频谱资源	2.6GHz	2.6GHz	2.6GHz	4.9GHz
频宽	160MHz	160MHz	100MHz	100MHz
基站配置	3Cells 64T64R	3Cells 16T16R	分布式 P 站 4T4R	3Cells 64T64R
频谱效率	峰值 48b/Hz 均值 9.6b/Hz	峰值 24b/Hz 均值 4.8b/Hz	峰值 16b/Hz 均值 7.3b/Hz	峰值 48b/Hz 均值 9.6b/Hz
封装开销	10%	10%	10%	10%
TDD 上下行配比	1 : 3	1 : 3	1 : 3	1 : 3
小区峰值带宽	6.4Gb/s	3.2Gb/s	1.3Gb/s	4Gb/s
小区均值带宽	1.3Gb/s	0.64Gb/s	0.6Gb/s	0.8Gb/s
单站峰值带宽	9Gb/s	4.5Gb/s	1.3Gb/s	5.6Gb/s
单站均值带宽	3.9Gb/s	1.9Gb/s	0.6Gb/s	2.4Gb/s

表 3-1 中的几个带宽计算公式如下：

小区峰值带宽 = 频宽 × 峰值频谱效率 × (1 + 封装开销) × TDD 上下行配比

小区均值带宽 = 频宽 × 均值频谱效率 × (1 + 封装开销) × TDD 上下行配比

单站峰值带宽 = 小区峰值带宽 + 小区均值带宽 × (N - 1)

单站均值带宽 = 小区均值带宽 × N

其中, N 为小区数量。

如果一个环有 6 个 5G 中频高配基站接入,那么整环的带宽需求为 28.5Gb/s(一个基站达到峰值带宽,其他基站都为均值带宽,即 $9 + 3.9 \times (6 - 1) = 28.5\text{Gb/s}$)。在实际部署中,基站的天线数、流数、频谱带宽会发生变化,基站的密度也将和具体的覆盖面积、业务实际需求关联。

此外,5G 高频基站也会引入额外的带宽需求。在上述因素的影响下,传输网除了需要提供更大的接口带宽,还需要具备带宽平滑扩展的能力(如通过多链路、多波长捆绑扩展线路容量),以应对未来带宽需求的不确定性。

2) 超高精度时间同步需求

5G 的 eMBB、uRLLC、mMTC 三大应用场景对时延的要求各异,其中 uRLLC 场景下时延要求最高,部分场景下要求单向端到端时延不超过 1ms。3GPP 等标准组织关于 5G 时延的技术指标如表 3-2 所示。

表 3-2 5G 时延的技术指标

技术指标	规定值	标准来源
移动终端-CU 时延(eMBB)	4ms	3GPP TR38.913
移动终端-CU 时延(uRLLC)	0.5ms	3GPP TR38.913
eV2X 时延	3~10ms	3GPP TR38.913
前传时延(AAU-DU)	100μs	eCPRI

5G 新的帧结构要求 $\pm 390\text{ns}$ 的时间同步精度;在不同站点间的载波汇聚(inter-site CA)和基站联合发送对同步提出的要求更高,从 4G 的 $\pm 1.5\mu\text{s}$ 提升到 5G 的 $\pm 130\text{ns}$ 时间同步精度,此时对传输单节点精度要求达到 $\pm 5\text{ns}$ 。同时,定位准确性和时间同步精度强相关。

3) 网络切片需求

5G 的 eMBB、uRLLC、mMTC 三大应用场景对传输网的需求不同,参见表 3-3。

表 3-3 5G 三大应用场景时传输网的需求

应用场景	典型业务	需求
eMBB	超高清视频、云办公、游戏、VR/AR	大带宽、大吞吐率、高移动性
uRLLC	自动驾驶、远程医疗、工业自动化	高可靠性、低时延
mMTC	智能家居、智能城市、物联网	大连接数、低移动性、低速率、低功耗

5G 三大应用场景对网络提出了不同的需求。如果每种场景都独立新建网络,则建网成本巨大;而如果使用同一个网络传输所有的业务,则超高带宽、超低时延、超高可靠性等需求很难同时满足。因此,5G 提出了网络切片的概念,即在同一个硬件基础设施中切分出多个虚拟的端到端网络,每个切片网络在设备、接入网、承载网及核心网等方面都实现业务隔离,适配各种类型的服务并满足用户的不同需求。

针对 eMBB、uRLLC 和 mMTC 这 3 种不同场景的业务对带宽、时延、服务质量等不同的要求分配不同的网络资源,这就要求 5G 承载网提供网络切片的能力。利用网络切片可以将不同业务所需的网络资源灵活地动态分配和释放,并进一步动态优化网络连接,降低网络成本,提高效益。

2. SPN 标准的发展

基于以上背景,国内主流运营商联合国内外通信设备厂商、芯片厂商、研究机构等共同提出了 SPN(切片分组网络)技术,以应对 5G 业务的承载需要。

SPN 是在承载 3G/4G 回传的分组传送网络(PTN)技术基础上,面向 5G 和政企专线等业务承载需求,融合创新而提出的新一代切片分组网络技术方案。

2019 年,SPN 得到国际标准化组织 ITU-T SG15(国际电信联盟第 15 研究组)立项,形成了 MTN(Metro Transport Network,城域传送网络)系列国际标准。2020 年 9 月,在



图 3-1 SPN/MTN 国际标准体系

ITU-T SG15 全会上,MTN 首批三大核心标准获得通过并发布。

目前,SPN 技术已经成为国内主流的 5G 承载网技术之一。SPN/MTN 国际标准体系如图 3-1 所示。

3.1.2 SPN 的技术架构

SPN 是面向 5G 承载提出的创新技术体系,是以以太网内核为基础的新一代融合承载网络架构,可实现大带宽、低时延、高效率的综合业务

传输。

SPN 采用基于 ITU-T 分层网络的架构,支持对 IP、以太网、CBR[Constant Bit Rate,恒定比特率业务,主要指 CES(Circuit Emulation Service,电路仿真业务)、CEP(Circuit Emulation Packet,基于分组报文的电路仿真业务)、CPRI(Common Public Radio Interface,通用公共无线接口)、eCPRI(Evolved CPRI,演进的 CPRI,指支持 5G 前传网络的 CPRI 接口)]的综合承载。SPN 的技术架构包括切片分组层(Slicing Packet Layer,SPL)、切片通道层(Slicing Channel Layer,SCL)、切片传送层(Slicing Transport Layer,STL),如图 3-2 所示。

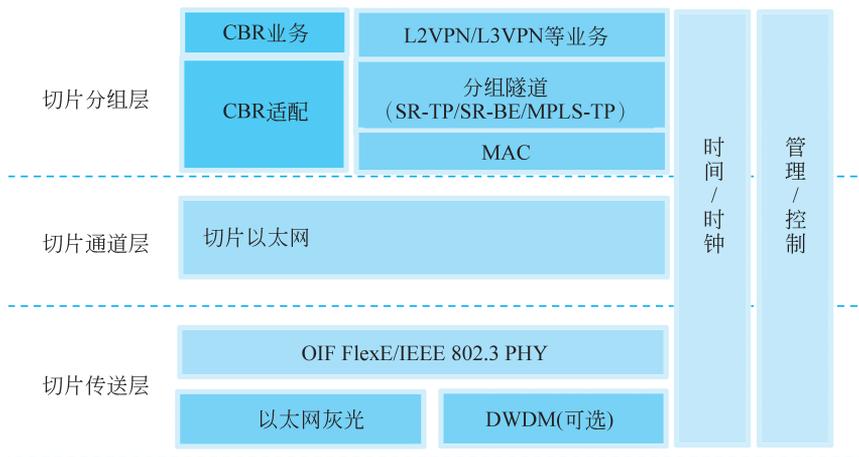


图 3-2 SPN 的技术架构

1. 切片分组层

切片分组层用于分组业务处理,实现对 IP、以太网、CBR 业务的寻址转发和传输管道封装,传输 L2VPN、L3VPN、CBR 透传等多种业务类型。切片分组层通过提供基于 SR 增强的 SR-TP/SR-BE 隧道以及 MPLS-TP 隧道,提供面向连接和无连接的多类型传输管道。

SR-TP 隧道用于面向连接的点到点业务传输,提供基于连接的端到端监控运维能力。

SR-BE 隧道用于面向无连接的 Mesh 业务传输,提供任意拓扑业务连接并简化隧道规划和部署。

L2VPN、L3VPN、SR-TP 隧道、SR-BE 隧道详见第 4 章。

SPN 的切片分组层细分为客户业务子层和网络传送子层,其模型如图 3-3 所示。

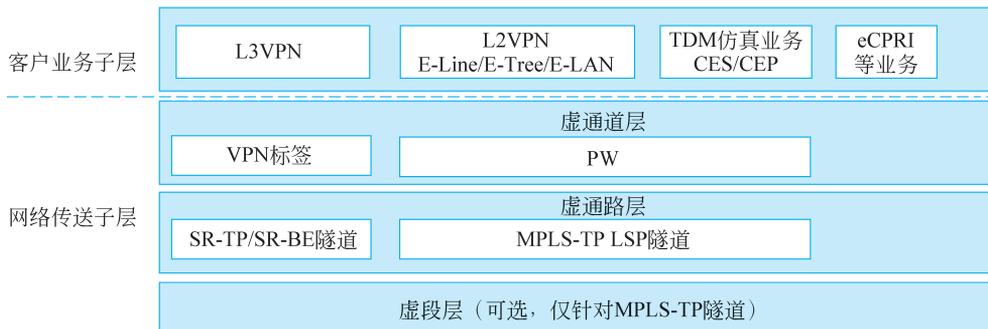


图 3-3 SPN 的切片分组层模型

1) 客户业务子层

客户业务子层包括业务信号处理和业务封装处理。

- 业务信号处理包括对分组报文(二层以太报文、三层 IP 报文等)、TDM 业务(E1、STM-N 等)的识别、分流、QoS 保障等处理。
- 业务封装处理是按不同业务封装要求,提供以太网点到点业务(E-Line)、以太网点到多点业务(E-Tree)、以太网多点到多点业务(E-LAN)、IP 多点到多点业务(L3VPN)、TDM 仿真(CES、CEP)业务、CBR 透传业务等的承载服务。

2) 网络传送子层

网络传送子层提供 SR-TP 隧道、SR-BE 隧道或 MPLS-TP 隧道,包括虚通道层、虚通路层和虚段层,以实现分组业务的分层承载、OAM 检测和保护能力。

(1) 虚通道(Virtual Channel, VC)层用于标识单个客户业务实例及连接,提供点到点(P2P)或点到多点(P2MP)的业务连接服务。虚通道对于 L2VPN 业务为伪线(Pseudowire, PW)连接;对于 L3VPN 业务为 VPN 标签。对于 L2VPN 业务,虚通道层可提供 OAM 功能,监视客户业务并触发子网连接(Sub-Network Connection Protection, SNCP)保护。

(2) 虚通路(Virtual Path, VP)层为业务提供 MPLS-TP 或 SR 承载隧道,在网络中为分组业务生成逻辑隔离的转发路径。SPN 可采用 SR-TP 隧道、SR-BE 隧道或 MPLS-TP 隧道。

(3) 虚段层(Virtual Section, VS)只针对 MPLS-TP 隧道,提供相邻节点间的点到点连接能力,并为虚通路层提供底层服务。

2. 切片通道层

切片通道层采用基于 TDM 时隙(时分复用模式)的 MTN 路径(MTN path)和 MTN 分段(MTN section)技术,提供硬管道交叉连接能力,通过创新的切片以太网(Slicing Ethernet, SE)技术,对以太网物理接口、FlexE 绑定组实现时隙化处理,为多业务传输提供基于 L1 层的低时延、硬隔离切片通道。基于 SE 通道的 OAM 和保护功能,可实现端到端的性能检测和故障恢复能力。SPN 的切片通道层模型如图 3-4 所示。

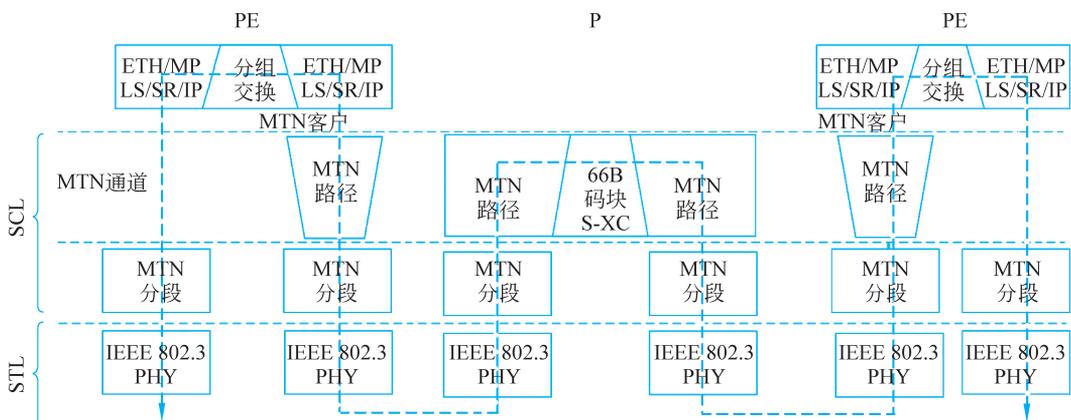


图 3-4 SPN 的切片通道层模型

SPN 的切片通道层包含如下技术：

- (1) MTN 通道(MTN channe)。基于 IEEE 802.3(50GE 及以上的接口)以太网 66B 码

块序列交叉连接(S-XC)的通道,实现端到端切片通道 L1 层组网。

(2) S-XC。基于以太网 66B 码块序列的 L1 通道交叉技术。

(3) MTN 路径层及其 OAM 开销。基于 IEEE 802.3(50GE 及以上的接口)以太网 66B 码块扩展,用 OAM 码块替换 IDLE 码块,实现 MTN 路径层的 OAM 功能。

(4) MTN 分段层帧结构及其 OAM 开销。重用 OIF FlexE 帧结构、子速率、绑定等功能逻辑的 MTN 分段层网络接口及其告警和性能管理开销功能。

SPN 的切片通道是网络中源节点和宿节点之间的一条传输路径,用于在网络中提供端到端的以太网切片连接,具有低时延、透明传输、硬隔离等特征。采用基于以太网 66B 码块的序列交叉连接技术、MTN 的路径层和分段层帧结构及其 OAM 开销,客户层业务在源节点映射到 MTN 客户(MTN client),网络中间节点基于以太网 66B 码块序列进行交叉连接,在目的节点从 MTN 客户中解映射客户层业务,可实现客户数据的接入/恢复、OAM 信息的增加/删除、数据流的交叉连接以及通道的监控和保护等功能。

3. 切片传送层

切片传送层主要基于 IEEE 802.3 以太网物理层技术(包含物理编码子层、物理介质连接子层和物理介质相关子层)和 OIF FlexE 技术,负责为切片分组层或切片通道层提供物理介质的光传输接口服务,实现高效的大带宽传送能力。以太网物理层包括 50GE、100GE、200GE 等新型高速率以太网灰光接口和波分复用(WDM)彩光接口组网技术,支撑低成本、大带宽组建传输网。

4. 层间复用关系

SPN 可根据应用场景需要选择复用层次。SPN 层间复用关系如图 3-5 所示。

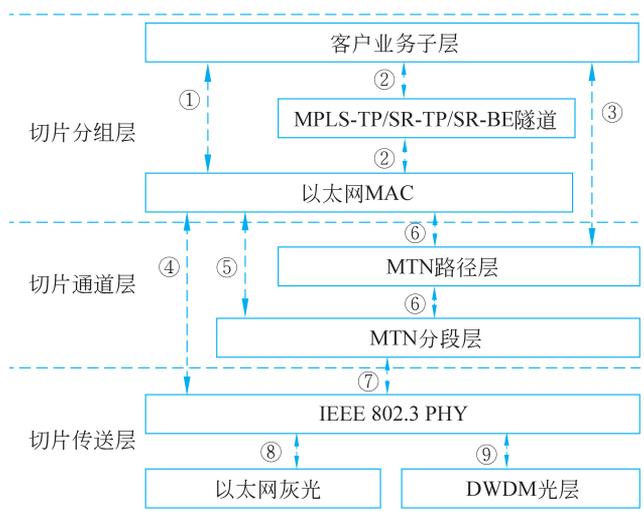


图 3-5 SPN 层间复用关系

(1) 切片分组层的映射路径如下：

- 图 3-5 中①路径针对以太网本地业务,经客户业务子层的适配和二层交换处理后直接映射进以太网 MAC(传统 IEEE 802.3 接口 MAC 或 FlexE 客户的逻辑 MAC)。
- 图 3-5 中②路径针对 L2VPN、L3VPN 业务以及 CES/CEP 等电路仿真业务,经客户业务子层的适配后映射进 MPLS-TP 隧道(针对 L2VPN、CES/CEP 仿真业务)、SR-

TP 或 SR-BE 隧道(针对 L3VPN 业务)后,再映射进以太网 MAC(包括传统 IEEE 802.3 接口 MAC 或 FlexE 客户的逻辑 MAC)进行处理。

- 图 3-5 中③路径主要针对 IEEE 802.3 的以太网 RAW 封装格式的超长帧业务和 eCPRI 等业务,经客户业务子层的适配处理后直接映射进切片通道层的 MTN 路径层和 MTN 分段层,通过切片通道层实现低时延和大带宽传送,具体实现机制尚需研究。

(2) 切片通道层的映射路径如下:

- 图 3-5 中④路径是将以太网 MAC 直接映射进 IEEE 802.3 PHY,不进行切片通道层处理,主要满足传统 IEEE 802.3 以太网接口应用,是兼容传统 PTN 的业务映射路径。
- 图 3-5 中⑤路径是将以太网 MAC 作为 MTN 客户直接映射进 MTN 分段层的接口时隙分配表中,不进行切片通道层的 MTN 路径层 OAM 和 S-XC 处理。
- 图 3-5 中⑥路径是在源宿端点将以太网 MAC 作为 MTN 客户适配进 MTN 路径层,经过以太网 66B 码块序列交叉处理,并增加 MTN 路径层的 OAM 和保护机制,然后再映射复用到 MTN 分段层的接口时隙分配表中传送。

(3) 切片传送层的映射路径如下:

- 图 3-5 中⑦路径是将切片通道层的 MTN 分段接口信号映射到 IEEE 802.3 PHY 的 PMD 和 PMA 中。
- 图 3-5 中⑧路径是将切片传送层的 IEEE 802.3 PHY 适配到网络侧的以太网灰光接口以实现收发业务,满足短距离应用场景。
- 图 3-5 中⑨路径是将切片传送层的 IEEE 802.3 PHY 适配到 DWDM 光层的相干光接口传输,满足大容量、长距离的多波长彩光接口应用场景。

3.1.3 SPN 的技术特点

SPN 是面向 5G 承载提出的创新技术体系,可实现大带宽承载、按需的网络切片、高精度同步等特征,满足 5G 承载的需求。其技术特点如下:

(1) 大带宽承载。SPN 支持 FE、GE、10GE、25GE、50GE、100GE、200GE、400GE 等类型的以太网业务接口,还支持 E1、STM-1 等传统 SDH(Synchronous Digital Hierarchy,同步数字体系)业务接口,满足 5G 前传、中传、回传各类承载场景的需要,同时支持 4G 等业务承载,最大可以提供 400GE 的大带宽传输。

(2) 网络切片。SPN 可根据业务特性需要,对高速率接口进行精细化划分,构成切片网络,实现不同业务独立切片网络传输,相互隔离。

(3) 灵活连接。SPN 具备端到端 L3 路由能力,对不同业务构建灵活的 VPN 连接,实现 AAU 到 CU 与 DU、核心网功能之间的灵活连接。

(4) 高精度时钟。SPN 通过支持 IEEE 1588v2 PTP(Precision Time Protocol,精准时间协议)技术实现上下游 SPN 节点的时间同步,并通过以太网业务接口或 1PPS+TOD 接口将高精度同步信息传递给 5G 基站。

(5) 统一协调管控。SPN 的分组传送架构使其能与 SDN 的集中化智能控制相结合,为 5G 承载提供高效传送能力、电信级的高可靠性、端到端的 QoS 保障。

3.1.4 SPN 的关键技术

SPN 通过以下关键技术实现各项技术特点：

(1) 切片技术。为实现基于业务的网络切片,SPN 采用了切片以太网技术,为多业务传输提供切片通道。FlexE(Flexible Ethernet,灵活以太网)是切片以太网的基础,可以实现基于 PHY 层(物理层)的切片转发,实现业务带宽的扩展、分割等按需调整。

(2) IS-IS 协议。SPN 的端到端 L3VPN 能力是通过 IGP IS-IS 协议实现的。IS-IS 协议为 SPN 的控制平面提供网络拓扑状态发现和隧道控制能力,以生成隧道转发路径,支持隧道本地保护功能,最终为业务的灵活组网创建 VPN 连接。

(3) VPN 和隧道技术。SPN 通过创建 L2VPN、L3VPN 连接实现 5G 基站到核心网、企业专线等业务的承载,VPN 的跨段连接是通过创建标签并据此装入相应隧道实现的。SPN 使用了 3 种公网隧道: MPLS-TP 隧道、SR-TP 隧道、SR-BE 隧道。

(4) 统一管控。SPN 与 SDN 相结合,构建可管、可控、灵活可靠的 L3 连接,通过开放性的应用和服务,能增强网络资源的智能化调度能力,帮助客户实现对网络资源的扁平化管理,从而提升运维管理和业务运营效率。

3.2 切片技术

3.2.1 网络切片

1. 网络切片的含义

5G 的 eMBB、uRLLC、mMTC 三大应用场景在带宽、时延、连接上的要求差异巨大,所需的服务质量不同,如果分别为其搭建网络,建设成本高,也势必增加维护成本。为应对差异化传送需要,5G 引入了网络切片的概念,在同一个基础物理网络上提供不同的网络切片,以满足不同场景的服务质量要求。

网络切片是指对网络中的拓扑资源(如链路、网元、端口)及网元内部资源(如转发、计算、存储等资源)进行虚拟化,形成虚拟资源,然后按需组织形成虚拟网络,即切片网络。

一个物理网元可以将其转发、计算、存储等资源虚拟成多个逻辑网元(vNode),一条物理链路可以虚拟成多个逻辑链路(vLink)。网络切片将虚拟的 vNode 和 vLink 组合构成多个虚拟网络(vNet)。vNet 具有类似物理网络的特征,切片形成的虚拟网络和物理网络类似,包含逻辑独立的管理平面、控制平面和转发平面,虚拟网络间相互隔离。

2. 网络切片的实现

网络切片的实现分为 3 个步骤:创建虚拟网元、创建虚拟链路、将虚拟网元和虚拟链路组成网络切片。

1) 创建虚拟网元

在单一网元即单一设备上创建虚拟网元和虚拟端口,后者又可划分为虚拟客户侧端口和虚拟网络侧端口,如图 3-6 所示。

物理节点 Node1 被划分为两个虚拟网元 vNode1 和 vNode2,vNode1 具有虚拟客户侧端口 vUNI1 和虚拟网络侧端口 vNNI1,vNode2 具有虚拟客户侧端口 vUNI2 和虚拟网络侧端口 vNNI2。

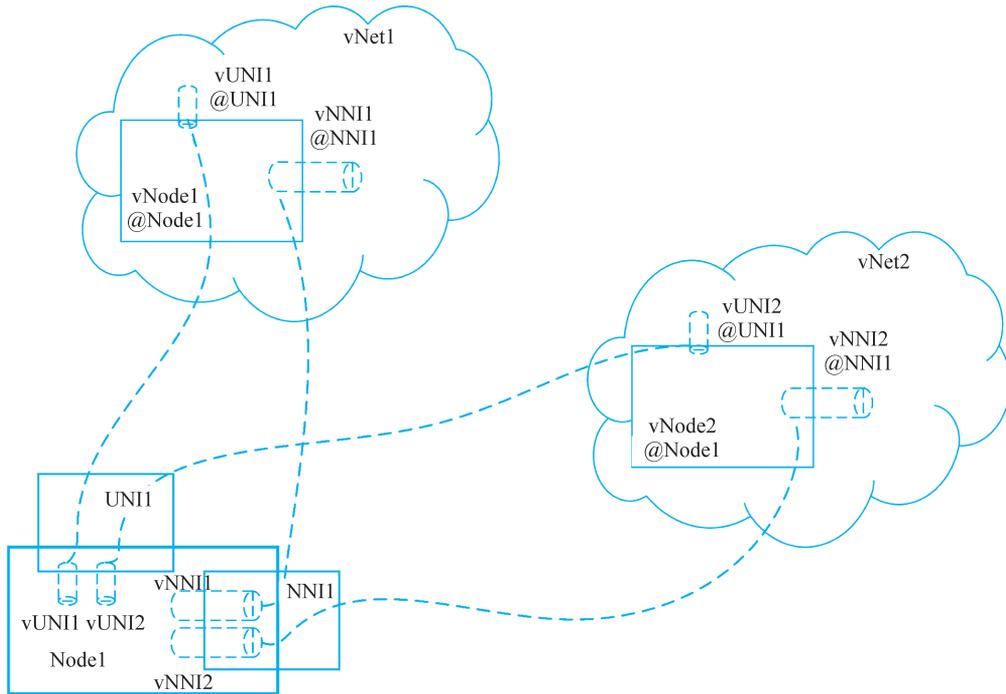


图 3-6 虚拟网元

2) 创建虚拟链路

利用隧道创建上述虚拟网元之间的虚拟链路,虚拟网络侧端口是虚拟链路的端点,也是隧道的端点。

根据网元支持的承载技术的不同,隧道分为 LSP(Label Switched Path, 标签交换路径)隧道、SR(Segment Routing, 分段路由技术)隧道、FlexE 隧道、ODUk(Optical channel Data Unit, 光通路数据单元)隧道等。

3) 创建网络切片

将上述步骤形成的虚拟网元和虚拟链路组合成网络切片,如图 3-7 所示。

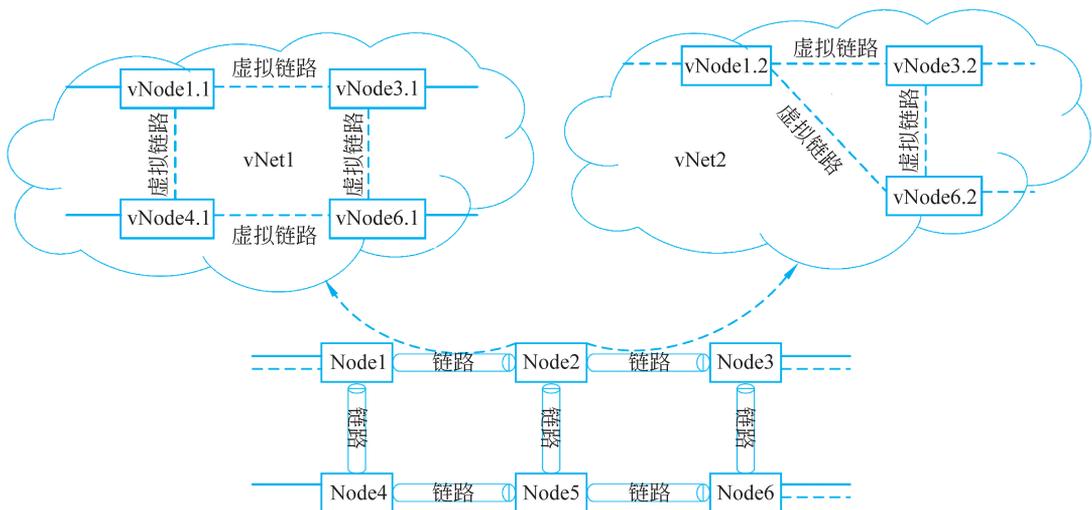


图 3-7 网络切片

利用隧道技术创建的虚拟链路抽象了实际的物理网络,屏蔽了非同一个虚拟网络中的其他物理节点。网络切片的用户只需要知道自己业务所在的虚拟网络结构,无须感知物理网络结构。

3. 网络切片的场景

承载于虚拟网络上的业务,看到的是独立的虚拟网络,并不感知物理网络,而虚拟网络到物理资源的映射由控制平面和转发平面完成。创建切片后,用户对网络是否虚拟化没有感知,看到的切片资源就如同物理资源一样,可以利用这些资源进行业务创建、删除、查询等操作,同时也可以查看资源的使用情况。

根据用户对于网络资源的控制范围,网络切片主要分为下面两种场景。

1) 边缘节点切片

在边缘节点切片场景下,用户只控制网络边缘设备及业务接入端口资源,如图 3-8 所示,PE 节点的实线端口为一组,虚线端口为一组,中间 P 节点及端口没有进行资源切片。虚拟化后实线端口资源的使用者可以看到如图 3-9 所示的网络拓扑,虚线端口资源的使用者可以看到如图 3-10 所示的网络拓扑。

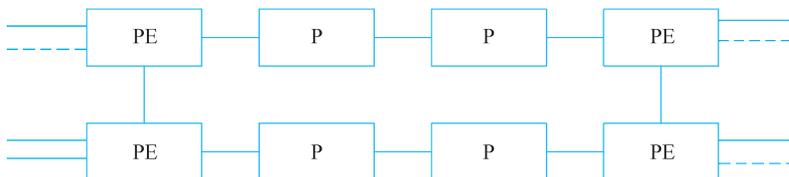


图 3-8 边缘节点切片场景



图 3-9 边缘节点切片实线端口资源拓扑呈现

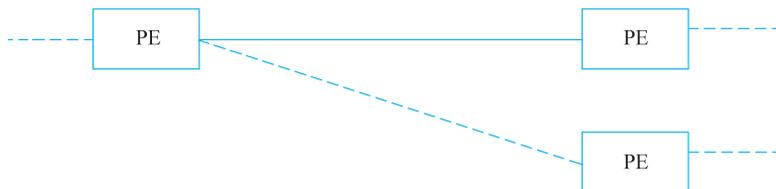


图 3-10 边缘节点切片虚线端口资源拓扑呈现

VPN 之间的隧道建立后,控制器收到创建请求,根据业务需求创建 L2VPN 或 L3VPN 业务。用户可使用接入端口的资源,包括 QoS 的配置、VLAN 的配置、IP 地址配置等,并可查看 PE 之间的网络连接情况。

2) 网络整体切片

在网络整体切片场景下,用户可以控制网络中所有设备及所有端口资源,如图 3-11 所示。实线为一组,虚线为一组,控制器对两组资源分别进行管理,实线端口资源的使用者可以看到如图 3-12 所示的网络拓扑,虚线端口资源的使用者可以看到如图 3-13 所示的网络拓扑。

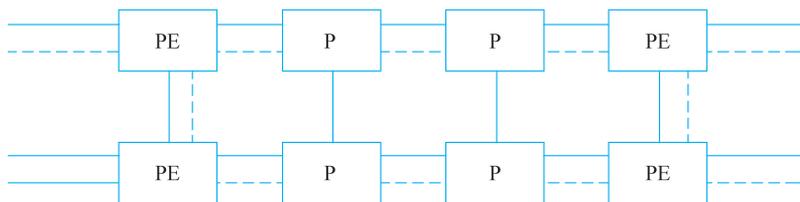


图 3-11 网络整体切片场景

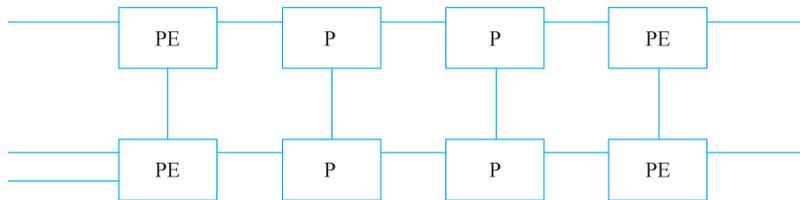


图 3-12 网络整体切片实线端口资源拓扑呈现

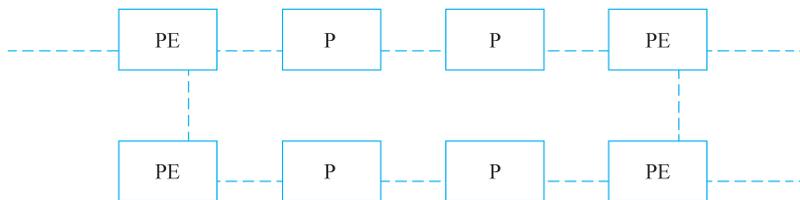


图 3-13 网络整体切片虚线端口资源拓扑呈现

用户可以看到网络 P 节点,进行路径的计算,创建 L2VPN、L3VPN 业务。为了保证标签、VPN ID 等资源不冲突,控制器需要对每个网元以及整体业务的逻辑资源进行分组。

4. SPN 网络切片架构

SPN 支持同一物理网络虚拟化为多个独立的逻辑网络,各逻辑网络有独立的网络资源。SPN 网络切片架构由基础网络层、切片资源层、切片管控层和应用/协同层构成,如图 3-14 所示。

基础网络层由 SPN 物理网元和物理链路组成。SPN 物理网元和物理链路具备资源虚拟化和隔离能力,即物理网元可以虚拟化为多个逻辑网元、物理链路可以虚拟化为多个逻辑链路。

切片资源层对物理网络虚拟资源进行规划、分配,将逻辑网元和逻辑链路组合成逻辑网络,即网络切片。

切片管控层为网络切片提供集中管理和控制服务,并提供北向接口开放网络切片能力。经过切片管控层的协调控制,可为业务承载提供具体的 VPN 连接。

应用/协同层基于切片管控层开放的北向接口提供应用服务。

5G 业务的网络切片如图 3-15 所示。基于 FlexE 技术可以实现基于 PHY 层的切片转发,提供刚性管道隔离,为实现基于业务的网络切片提供最好的转发平台。

5. 承载网网络切片的特点

网络切片具有以下 6 个特点:

(1) 网络重构性。通过虚拟化形成切片网络,在网络拓扑、节点能力方面可以根据业务

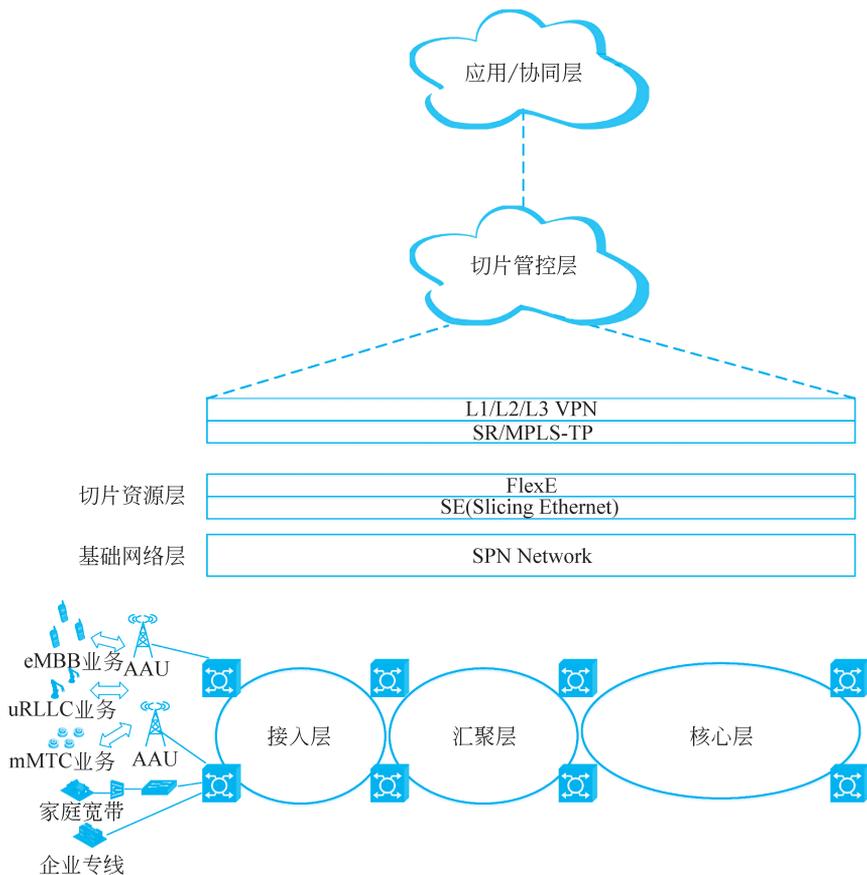


图 3-14 SPN 网络切片架构

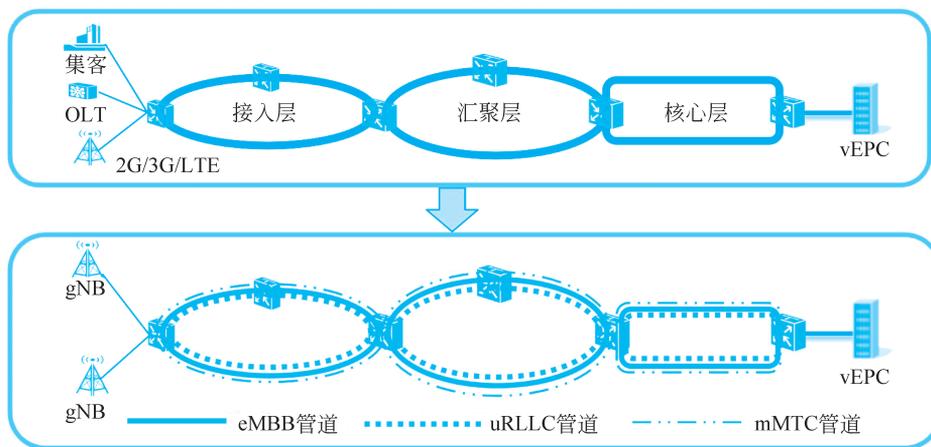


图 3-15 5G 业务的网络切片

需要进行网络重构。每个切片网络具有各自特定的带宽、时延等，不同的切片网络彼此隔离，拥有各自独立的拓扑结构和网络资源，从而满足不同的 5G 业务传输需求。

(2) 切片网络和物理网络具有相似性。类似于物理网络，切片网络同样向上层业务提供网络资源，屏蔽了切片网络与物理网络的差异。EPL/EVPL、EPLAN/EVPLAN 等业务

可直接部署在切片网络之上,与物理网络的部署无差异。

(3) 业务层和物理网络解耦。业务是建立在切片网络之上的,从而使业务层与物理网络解耦,简化了业务的部署,有利于网络的管理和运维。

(4) 切片网络的转发平面隔离。不同切片网络的转发面彼此隔离,其隔离性取决于采用的转发平面切片技术,切片技术分为硬切片和软切片。硬切片是在 L1 或光层基于物理刚性管道的切片技术,如 FlexE 技术、OTN 技术、WDM 技术;软切片是在 L2 或以上基于统计复用的切片技术,如 SR、MPLS-TP 的隧道技术/伪线技术以及基于 VPN、VLAN 等的虚拟化技术。

(5) 切片网络的控制平面及管理平面隔离。不同切片网络的控制平面及管理平面彼此隔离。

(6) 切片网络的业务隔离。不同切片网络上的业务彼此隔离。

各切片网络能加载不同的应用协议,支持独立部署和升级。通过网络切片生命周期的管理,可实现业务的快速部署开通、资源的共享和灵活调度。由于网络切片减小了网络规模并简化了网络拓扑,也使运维管理更加便捷、高效。

3.2.2 FlexE 技术

FlexE 技术是切片以太网的基础,可对高速率接口进行精细化划分,实现不同低速率业务在不同切片中传输,相互之间物理隔离。FlexE 技术具有子管道特性和物理层交叉特性,在传输网络上可以构建端到端的 SPN 刚性管道,每种业务在各自的管道中传输,彼此互不影响。5G 的 eMBB、mMTC 和 uRLLC 三大应用场景对传输资源的要求各不相同,采用 FlexE 技术能很好地实现在同一个物理传输网络上满足三大应用场景业务的不同需求。

1. FlexE 技术背景

1980 年,基于 IEEE 802.3/1 开放标准出现了原生的以太网(Native Ethernet),原生以太网关键技术是变长数据流的封装和流量的统计复用,实现了网络的互联互通,典型组网方式是采用数据交换机的组网。

2000 年出现了面向运营商网络的电信以太网(Carrier Ethernet),如电信级的城域网、3G/4G 承载网和专线接入服务,引入 IP/MPLS 技术,具备 QoS 保障、OAM、保护倒换和高性能时钟等电信级功能。典型的网络为中国移动的 PTN 和中国电信的 IPRAN。

2015 年,OIF(Optical Internetworking Forum,光互联网结论)在电信以太网基础上引入了切片技术,形成了新的以太网,即灵活以太网(FlexE),主要面向 5G 网络中的云服务、网络切片以及 AR/VR/超高清视频等时延敏感业务需求,实现了接口技术创新、大端口演进、子速率承载、硬管道隔离等,从而在网络上实现了智能端到端链路,满足了低时延等业务的需要。

在以太网技术标准中,以太网 MAC(Media Access Control,介质访问控制)报文速率和物理通道(PHY 层)的速率始终保持同步发展。但是当以太网业务速率提升到 100GE 以上时,物理通道的速度发展遇到瓶颈,速度提升缓慢,并且高速物理通道的价格偏高。例如,400GE 光模块的价格远超 4 个 100GE 光模块的价格。FlexE 技术实现了业务速率和物理通道速率解耦,使物理通道速率不再等于客户业务速率。业务也可以由多个物理通道捆绑

形成的虚拟逻辑通道传递,解决了高速物理通道性价比不高的问题。传统的解决方法是采用链路聚合组(Link Aggregation Group,LAG)将多个物理链路捆绑在一起,但 LAG 捆绑方式效率低(最低达 60%~70%),且 LAG 采用哈希算法,存在哈希结果不均的问题,对单一大流量业务还存在哈希算法失灵等缺点。另外,LAG 方式还存在业务之间耦合度高、隔离性差的问题,同时,LAG 绑定后,无法平滑无损地进行切换。

2. FlexE 分层模型

FlexE 技术的初衷是实现业务速率和物理通道速率解耦,物理通道速率不再等于客户业务速率。业务速率和物理通道速率相互独立,客户业务速率可以是多样的,物理通道的速率也可以是灵活的。例如,客户业务速率是 400GE,但物理通道速率是 100GE 或其他速率(如 $n \times 100\text{GE}$ 或 $n \times 200\text{GE}$),如图 3-16 所示。

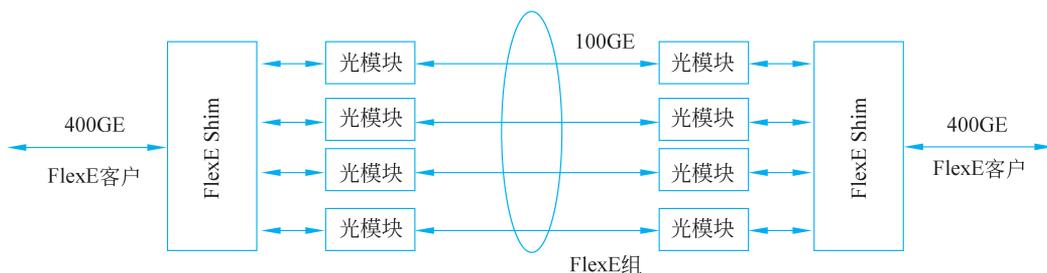


图 3-16 FlexE 端口绑定示意图

FlexE 客户用于表示不同制式的网络接口,兼容 IP/以太网主流接口。FlexE 客户允许对带宽进行灵活配置,可按照业务需求将带宽调整至各种速率的 MAC 数据流,速率可以是 10GE、25GE、40GE、 $n \times 50\text{GE}$,可扩展支持 $n \times 5\text{GE}$ (目前最小颗粒为 5GE)。同时,FlexE 客户使用 64/66 编码(IEEE 802.3 标准中定义的一种物理层编码子层的编码,由 2 比特的同步头和 64 比特数据载荷构成)将数据流传输到 FlexE Shim 层。

FlexE Shim 用于表示映射或解映射 FlexE 组上的客户的逻辑层,位于以太网传统架构的 MAC 层与物理层(PCS)之间。FlexE Shim 是 FlexE 技术的核心架构,主要负责实现基于 Calendar 的时隙复用机制。

FlexE 组是一个 FlexE 协议组,用于表示物理层合集,包含 $1 \sim n$ 个绑定的以太网 PHY 层,即一个 FlexE 组中通常包含多个成员。本质上,FlexE 组是 IEEE 802.3 所规定的各类以太网物理层,FlexE 架构复用了 IEEE 802.3 的以太网技术,使其兼容了当前以太网物理的 MAC 层/PHY 层。

FlexE 1.0 标准定义物理层速率是 100GE,目前没有定义为其其他速度的物理层,也不支持不同速率的物理层的混合应用。目前最新的标准是 2019 年 7 月提出的 FlexE 2.1。

3. FlexE Shim 层

FlexE 技术的实现是在 IEEE 802.3 协议栈的 MAC 层和物理编码子层(Physical Coding Sublayer,PCS)之间增加一个 FlexE Shim 层,从而将业务逻辑层和物理层隔开,如图 3-17 所示。FlexE 协议定义了一个时分复用的 FlexE Shim 层,FlexE Shim 通过多个绑定的物理层承载各种

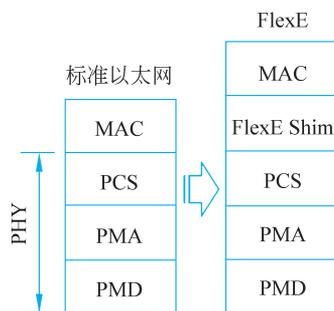


图 3-17 FlexE 模型

IEEE 定义的以太网业务(FlexE 客户),FlexE Shim 层可以支持各种以太网。

MAC 报文包括大于或小于单个物理层速率的以太网报文。传统以太网技术在业务流传递时,以太网数据报文(MAC)业务流经过协调子层(Reconciliation Sublayer,RS)连接物理层,在物理层经过 PCS、FEC(Forward Error Correction,前向纠错)、PMA(Physical Medium Attachment,物理介质连接子层)、PMD(Physical Media Dependent,物理介质相关子层)功能模块后发送出去。其中,在 PCS 功能模块中,对业务流进行 64/66 编码,然后是扰码(scramble)、通道分配(lane distribution)和 AM(告警)信息块的插入。

FlexE Shim 层功能是实现协议的 64/66 编码、TDM 成帧(TDM framing)、分配(distribution)、设置帧头(frame header),其中,64/66 编码功能和 PCS 的 64/66 编码功能相同,因此在 FlexE Shim 层中实现了 64/66 编码功能后,PCS 功能模块中的 64/66 编码可以省去。FlexE Shim 层功能划分如图 3-18 所示。

FlexE Shim 层实现 FlexE 客户和 FlexE 组之间的映射/解映射功能,与 FlexE 组是一一对应的。

FlexE 客户通过 FlexE Shim 层承载,FlexE Shim 层通过 FlexE 组进行传送。FlexE Shim 层采用时分复用方式,通过多个绑定的物理通道承载各种 IEEE 定义的以太网业务,如图 3-19 所示。

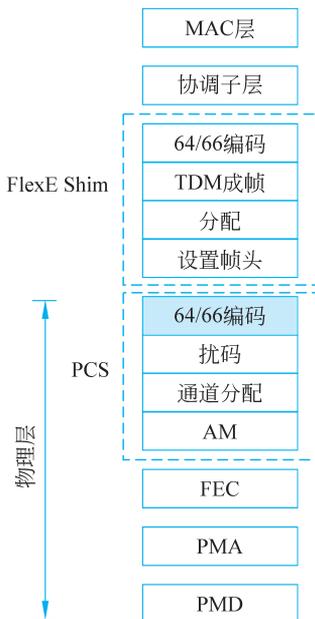


图 3-18 FlexE Shim 层功能划分

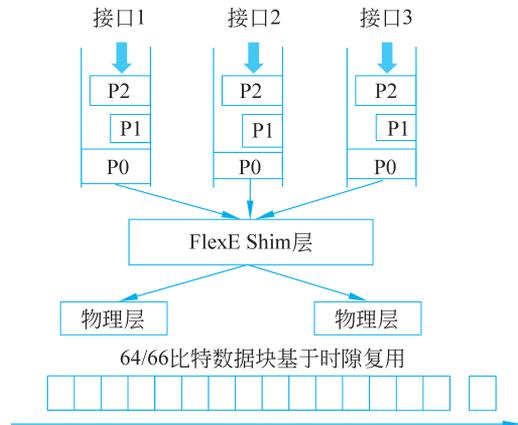


图 3-19 FlexE Shim 业务承载

4. FlexE 时隙划分

FlexE 使用 Calendar 机制完成 FlexE 客户和物理层端口之间的时隙分配,Master Calendar 将所有时隙分成 n 组,每组 20 个时隙,由每个 Sub Calendar 承载;每个 100GE 速率的物理层有 20 个时隙,每个时隙代表 5GE 的速率。

FlexE 协议定义每个物理成员(速率为 100GE)上传递一个 Sub Calendar,按照 20 个 5GE 时隙划分。

FlexE Shim 层是一个 Master Calendar(由多个 Sub Calendar 组成),有 $n \times 20$ 个 5GE 时隙(n 为捆绑组的总成员数)。

FlexE 客户的 64/66 比特数据块按照时隙方式间插到 FlexE Shim 层,10GE、25GE、40GE、 $n \times 50$ GE 的 FlexE 客户分别在 FlexE Shim 层占用 2 个、5 个、8 个、 $n \times 10$ 个 5GE 时隙。

在物理层速率为 100GE 时, FlexE Shim 层中有 $n \times 20$ 个时隙(n 是成员数量,每个成员有 20 个时隙),每个时隙代表 5GE 的速率,以 66 比特的数据块作为传送数据的基本单位。

在发送端, FlexE Shim 层将以太网报文进行 64/66 编码,通过速率适配,将业务插入 Master Calendar 中。Master Calendar 将所有时隙分配成多个 Sub Calendar(成员),再添加 FlexE 开销,扰码后经过 PMA、PMD 发送出去。

在接收端,从 PMD、PMA 上恢复信号,经过解扰码,恢复出 66 比特的数据块,寻找 FlexE 开销块,确定 Sub Calendar,用所有 Sub Calendar 拼装出 Master Calendar,再从中找出每个客户业务流,通过速率调整,进行 64/66 反编码,最终恢复出原始客户业务数据。图 3-20 是 4 个成员链路的时隙分配。

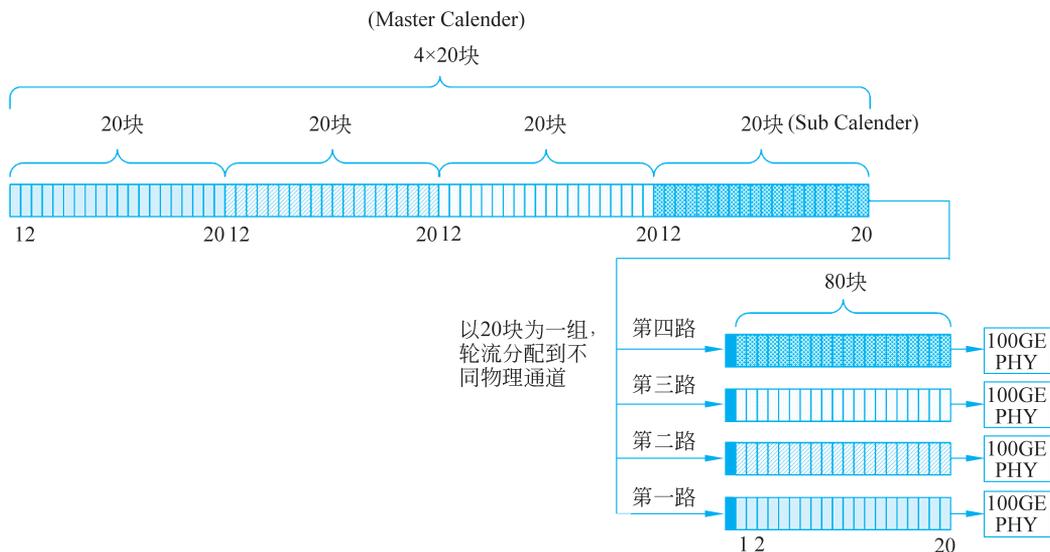


图 3-20 4 个成员链路的时隙分配

在实际应用中,存在单 PHY FlexE 传送和多 PHY FlexE 传送两种情况。

单 PHY FlexE 传送是将多个不同客户侧业务报文配置到 Master Calendar 的不同时隙中,该 Master Calendar 仅包含一个 100GE(20 个时隙)物理通道的 Sub Calendar,该 FlexE 组也仅包含一个 Master Calendar。

多 PHY FlexE 传送首先将多个物理通道绑定成一个逻辑管道 Master Calendar,然后将多个不同客户侧业务报文配置到 Master Calendar 的两个 Sub Calendar 的不同时隙中。

在中间节点,通过 FlexE 交叉单元(switch unit)将不同客户侧业务报文配置在不同的时隙中,传送给不同的 FlexE 组,如图 3-21 所示。

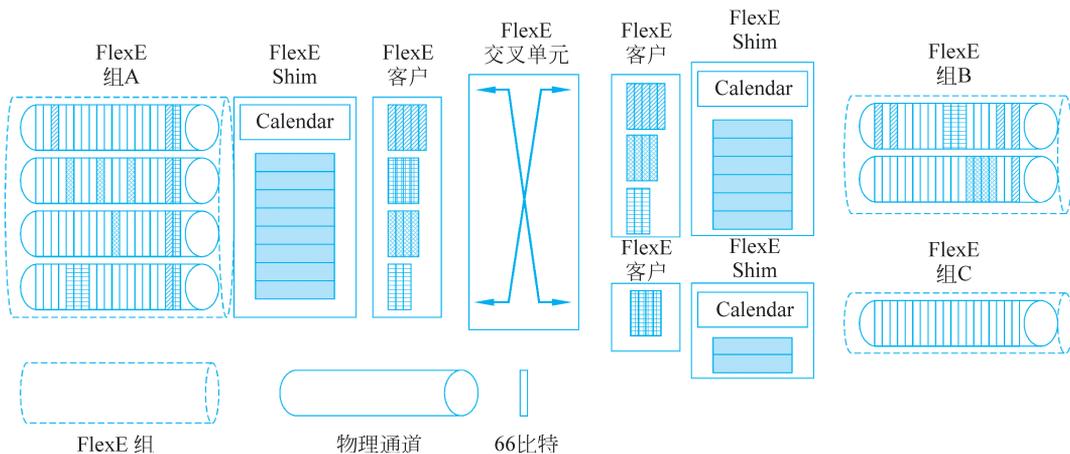


图 3-21 FlexE 时隙交叉

5. FlexE 技术 3 种典型功能应用模式

从上述 FlexE 的架构模型、时隙划分与特性可知, FlexE 技术支持客户根据需要向运行在其上的应用提供灵活的带宽, 而不同于物理通道的限制。根据 FlexE 客户与 FlexE 组的映射关系, FlexE 可提供 3 种模式的功能, 即链路捆绑模式、子速率模式和通道化模式。

1) 链路捆绑模式

链路捆绑模式将多个物理通道捆绑起来, 形成一个更大的逻辑通道, 实现高速率业务通过低速率物理端口传输, 如图 3-22 所示。

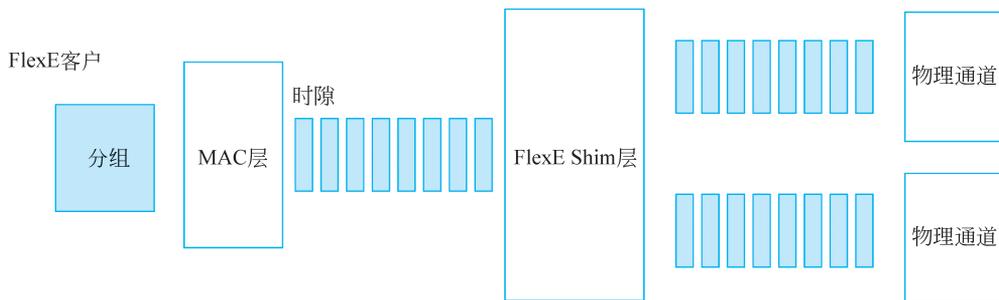


图 3-22 FlexE 技术的链路捆绑模式

在图 3-22 中, 为了在承载网中传输一个 200GE 的业务, 承载网传输侧将两个 100GE 的物理通道进行 FlexE 链路捆绑, 形成一个 200GE 的虚拟通道, 从而解决 200GE 数据业务在传输侧的有效传输问题。

2) 子速率模式

子速率模式是将一个低速率的业务数据分摊到多个物理通道中承载, 通道间物理隔离, 如图 3-23 所示。

在图 3-23 中, 一个低速率 25GE 业务分摊到两个物理通道中传输, 其中一个物理通道只承载 15GE 业务, 另一个物理通道承载 10GE 业务。

3) 通道化模式

通道化模式是指多个业务共享多个物理通道, 业务在多个物理通道上的多个时隙中传递, 通道间物理隔离, 如图 3-24 所示。

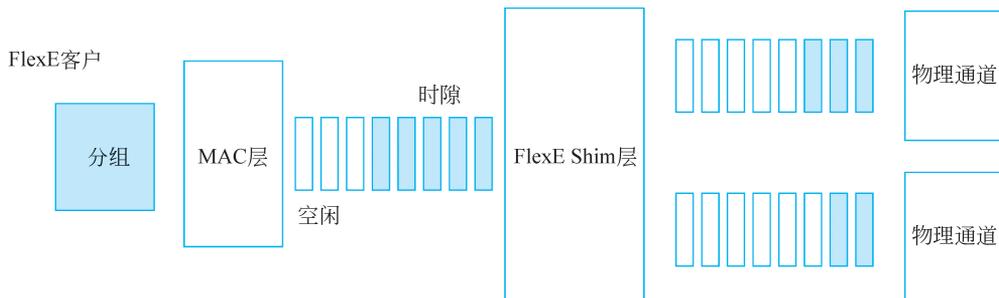


图 3-23 FlexE 技术的子速率模式

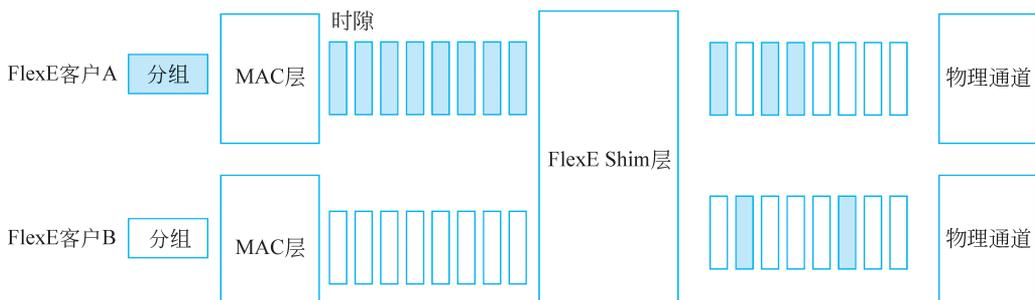


图 3-24 FlexE 技术的通道化模式

FlexE 通道化模式可在一个物理通道中承载多个速率不同的业务数据流，也可将多个业务在多个物理通道中承载，业务之间通过时隙隔离，互不影响。

6. FlexE 端到端网络技术

FlexE 承载网模型扩展为两层，即通道层和段层，如图 3-25 所示。

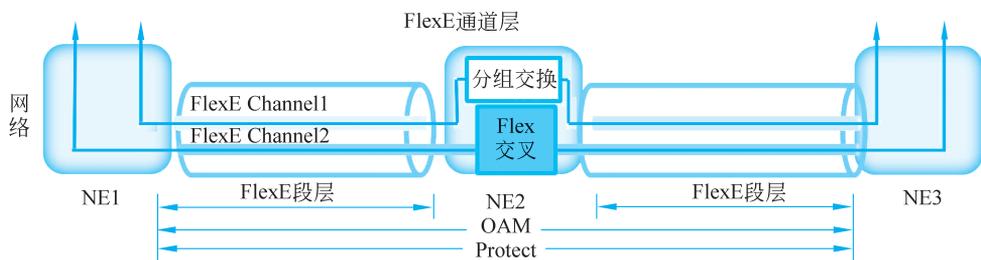


图 3-25 FlexE 承载网模型

FlexE 通道层(FlexE Channel)位于 FlexE 客户数据和 FlexE 段层之间,实现客户数据的接入/恢复、OAM 信息的增加/删除、数据流的交叉连接以及通道的保护。

FlexE 段层(FlexE group)位于 FlexE 通道层和物理层之间,实现接入数据流的速度适配、数据流在 FlexE Shim 层上映射与解映射、FlexE 帧开销的插入与提取。

如图 3-26 所示,网络通过配置 FlexE 的时隙交叉,建立 FlexE 通道层连接,形成跨网元的刚性管道。

业务接入 PE 节点,根据客户业务的 IP 地址实现三层路由,根据客户业务的 MAC 地址实现二层交换、根据客户业务的端口(端口号+VLAN)实现与 PW 间的业务映射,选择承载业务的网络路径和物理端口,FlexE 端口分配带宽进行传输。

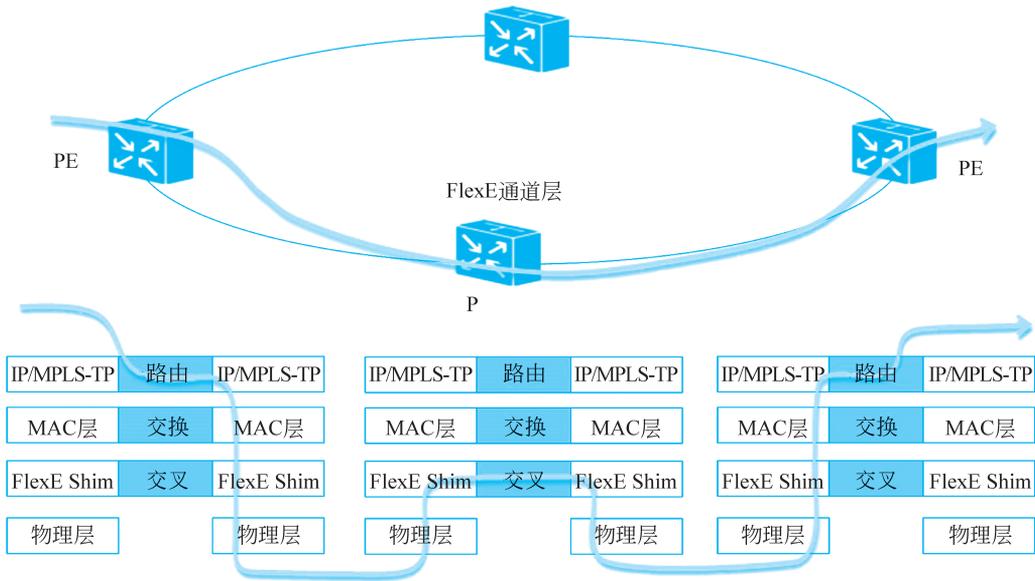


图 3-26 网络应用 FlexE 技术的业务传输模型

在 P 节点上,根据业务传输路径在 PCS 层进行交叉连接。由于 P 节点上客户业务在物理层(PCS 层)进行交叉连接处理,而不是在二层(MAC 层)进行处理,不需要恢复出完整的报文格式;从 FlexE Shim 层恢复出的客户业务是 66 比特的数据块,直接交叉到另一个 FlexE 物理端口;交叉粒度是一个 66 比特的数据块,交叉活动是透明的,在交叉过程中不改变传输管道中的任何客户信息,如图 3-27 所示。

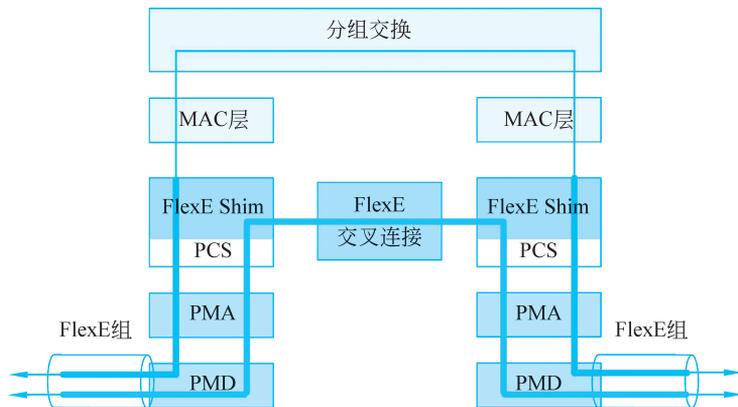


图 3-27 P 节点 FlexE 交叉模型

业务在目的 PE 节点落地,根据路由或交换信息选择输出端口。

在端到端 FlexE 技术应用中,根据客户带宽需求在 FlexE 通道层建立承载客户业务的通道(FlexE tunnel),可以根据客户带宽的动态需求灵活调整通道的带宽。

在 FlexE 段层,一条 FlexE 通道由多个 FlexE 段组成。FlexE 技术端到端业务独立部署场景如图 3-28 所示。

FlexE tunnel/FlexE group 提供 OAM 功能,可以监视服务质量,支持通道层和段层的保护功能,在出现故障时进行保护倒换。

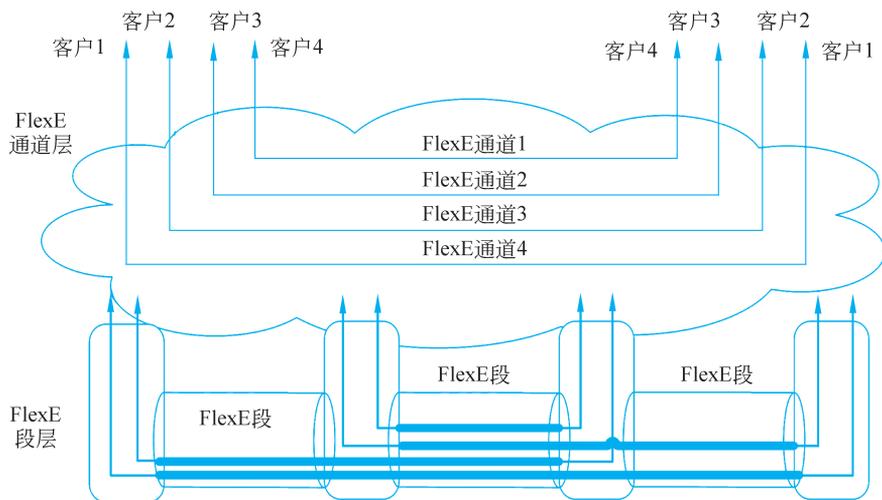


图 3-28 FlexE 技术端到端业务独立部署场景

7. FlexE 在 5G 承载网中的应用

FlexE 技术在逻辑层面可以实现大业务速率(链路捆绑)、子速率、通道化等功能以及网络分片需求,具有灵活扩容、信道化隔离、业务的低时延转发、网络分片承载等特点,这些特点与 5G 承载要求完美契合,受到全球主流运营商、供应商的认可,近两年发展迅速,成为 5G 承载的主流技术之一,被各大标准组织广泛接纳。

首先, FlexE 技术实现了业务带宽需求与物理接口带宽解耦合,通过端口捆绑和时隙交叉技术轻松实现业务带宽的逐步演进: 25GE→50GE→100GE→200GE→400GE→xTE。FlexE 带宽扩展技术通过时隙控制,保障业务严格均匀分布在 FlexE 段层的各个物理接口上;通过动态增加或减少时隙数量,根据业务流量变化情况实时调整网络带宽资源占用。

其次, FlexE 技术不仅可以实现大带宽扩展,同时也可以实现高速率接口精细化划分,实现不同低速率业务在不同的时隙中传输,业务之间物理隔离。目前标准的单个 FlexE 时隙的颗粒度是 5GE,即一个 100GE 通道最多可以划分为 20 个 5GE 速率的子通道。有厂商或运营商已经开发出 1GE 的颗粒度,未来 FlexE 的颗粒度有望进一步细化。

再次,融合 FlexE 子通道特性和物理层时隙交叉特性,5G 承载网上可以构建跨网元的端到端 FlexE 刚性通道,中间节点无须解析业务报文,形成严格的物理层业务隔离。

最后,传统分组设备对于客户业务报文采用逐跳转发策略,网络中每个节点设备都需要对数据包进行 MAC 层和 MPLS 层解析,单设备转发时延高达数十微秒。而 FlexE 技术实现了基于物理层的用户业务流转发,用户报文在网络中间节点无须解析,业务流交叉过程近乎瞬间完成,实现了单跳设备转发时延小于 $10\mu\text{s}$ 。

基于 FlexE 技术的 5G 承载应用如图 3-29 所示。

FlexE 技术体系包括 FlexE 交叉、OAM 和保护技术,但 FlexE 技术起初只用来解决大带宽传输问题,在标准制定时重点考虑的是点到点的应用场景需求,在组网应用、端到端承载、业务保护上缺少考虑,因此 FlexE 技术在 5G 承载网中进行组网应用时,对技术标准内容需要进行扩展和完善。