

面向 5G/6G 的 FlexE 时隙分配算法的研究

祁亚超¹, 徐旺生²

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430070; 2. 烽火通信股份有限公司, 武汉 430070)

摘要: 为迎合 5G/6G 时代人们对数据通信不断增长的需求, 针对现阶段超高速以太网多业务支持、速率灵活可变和 IP 光融合组网的发展趋势, 研究了灵活以太网(FlexE)的协议规范, 包括 FlexE 基本结构、开销帧定义和 Calendar 机制。在此基础上, 提出一种将介质访问控制(MAC)层不同速率的用户数据映射至物理层中的功能模型, 并研究了一种基于 Calendar 机制的时隙分配算法。

关键词: 灵活以太网; 映射; 时隙分配

中图分类号: TN919 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)04-0013-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on FlexE time slot allocation algorithm for 5G/6G

QI Yachao¹, XU Wangsheng²

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430070, China; 2. Fiberhome Co. Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to cater to the growing demand for data communication in the 5G and 6G era, aiming at the development trend of ultra high speed Ethernet multi service support, flexible speed and IP optical fusion networking at this stage, this paper studies the protocol specifications of flexible ethernet (FlexE), including FlexE basic structure, overhead frame definition and Calendar mechanism. On this basis, a functional model for mapping user data of different rates in the media access control(MAC) layer to the physical layer is proposed, and a time slot allocation algorithm based on the Calendar mechanism is studied.

Key words: flexible ethernet; mapping; time slot allocation

0 引言

2010 年, IEEE 批准 802.3ba 协议标准, 40 Gb/s 及 100 Gb/s 速率的超高速以太网的应用已经成为可能^[1]。如今, 随着 5G/6G 时代的到来, 为了满足人们对业务及服务质量的要求, 以太网除了需要满足高带宽以外, 还需要满足多业务支持、速率灵活可变和 IP 光融合组网等需求^[2]。因此, 灵活以太网(FlexE)应运而生。

2016 年, 光互联论坛(OIF)颁布 FlexE 互操作性协议, FlexE 的概念被正式提出。该协议支持捆绑多个物理(PHY)层链路, 即将许多慢速链路绑定在一起成为一个高速链路, 以达到更大的传输速率。与此

同时, 该协议支持对链路进行通道化处理, 这就使得一个链路可以承载不同速率、不同种类的业务类型, 大大提高了带宽利用率^[3]。通过在介质访问控制(MAC)层和 PHY 层之间新加入的 FlexE Shim 层, 将 MAC 层不同速率和不同种类的业务分发至不同的时隙中传输, 再映射至 PHY 层^[4]。本文提出一种基于 Calendar 机制的时隙分配功能实现方法, 可以将客户侧 10GE、25GE 的业务映射至 100G PHY 层中。

1 5G/6G 时代下承载网的发展

1.1 5G 承载网发展现状及 6G 承载网展望

5G 的建设主要围绕峰值速率、用户体验速率、频谱效率、移动性、时延、连接数密度、网络能量效率和流量密度这几个关键技术指标进行^[5]。对于用户体验而言, 最关键的指标包括时延、抖动和带宽等^[6]。而承载网也在向着这个方向演进, 发展的主要方向包括: ①扁平化组网; ②网络切片; ③管控融合的软件定义网络(SDN)架构。目前, 我国三大运营商已逐步开展

收稿日期: 2019-10-28。

作者简介: 祁亚超(1993—), 女, 汉族, 陕西省西安人, 武汉邮电科学研究院硕士研究生在读, 曾多次获得研究生奖学金。主要研究方向是数据通信以及超高速以太网数据帧传送的逻辑设计实现, 对灵活以太网协议及其实现有深入研究。



祁亚超,徐旺生:面向 5G/6G 的 FlexE 时隙分配算法的研究

5G 的商用推广,而 6G 的开发也逐渐提上日程。相比 5G,6G 发展更具系统性,强调用户和网络的同一性。其发展目的是达到人-机-物三者的协调、契合与统一^[7]。在这样的发展趋势下,承载网也需要面临新的挑战,不仅需要向后兼容 5G 的 eMBB、uRLLC 和 mMTC 场景,还需要更进一步开拓光融合 IP 灵活组网,以达到万物互联、人机合一的效果。

1.2 FlexE 技术在 5G/6G 承载网中的优势

对于承载网而言,5G 对其高带宽、低时延和高可靠性等方面提出了更高的要求。而由于 5G 业务具有多场景、差异化的特点,需要更大的吞吐量,更多的业务类型,并且拥有更高的效率。传统承载网在传输业务数据时,往往将业务全部混在物理层部署,而 5G 承载网为了提供面向垂直行业的应用需求,通过切片在同一物理网络对不同类型业务构建独立的端到端逻辑通道^[8]。作为硬切片技术之一的 FlexE 技术,由于其可以在 PHY 层将不同速率的接口捆绑,将多业务承载在一个 IP 网络下,从而能解决多个高速接口成本过高的问题。而对每一种业务而言,网络带宽、服务质量和安全性等专属资源都可以得到充分保证。由于业务之间相互隔离,一个业务内的传输错误不会影响其它业务的通信,并且每个业务内的资源可以由客户自行管理。本文所述 FlexE 时隙分配算法便是建立在这种优势上,算法通过类似时分复用的方式,先将 MAC 层各个不同的业务分至不同的时隙中,然后一并传输至 PHY 层。这样既保证了效率,又节约了成本,提高了系统的吞吐量,是 5G 发展中必不可少的一环,也为 6G 的发展打下基础。

2 FlexE 协议研究

2.1 FlexE 结构

协议定义的 FlexE 基本结构^[9]如图 1 所示。图中 Client 侧信号来源有 2 种^[10]:一种是客户侧原始数据包经过 64B/66B 编码后的数据流;另一种是 10G BASE-R、40G BASE-R 和 100G BASE-R 等信号经过相应处理的信号流。规定用户侧的速率为 10 Gb/s、40 Gb/s 或 $m \times 25$ Gb/s (m 为 1~4 之间的整数)。FlexE Group 是指

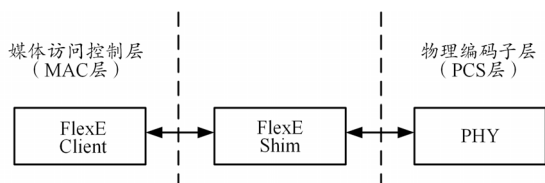


图 1 FlexE 基本结构图

绑定的多个 PHY 层,其中每个 PHY 层的速率由 802.3 协议所定。由于 Client 侧原始数据包的速率不一定匹配 Group 中 PHY 层的速率,因此需要 FlexE Shim 层对数据进行开销插入/提取、时隙分配和速率匹配等。

2.2 FlexE 开销帧

从 FlexE 复用侧到 FlexE 解复用侧需要传递开销帧,其作用是在解复用时获得时隙分配信息,恢复用户侧数据。FlexE 的开销是由复帧构成。每 8 个 64 bit 数据构成一个开销帧,每 32 个开销帧构成一个开销复帧。因此,一个复帧的长度为 $32 \times 8 = 256$ 个 64B 块。

一个开销帧中包含了对齐字节、Group 序号、PHY 层编号、PHY 层映射、Calendar 配置信息、用户自定义管理通道以及 CRC-16 校验字节。Group 序号用于区分 PHY 层属于哪个组,PHY 层编号表示 Group 中每一个 PHY 层的编号,而 PHY 层 Map 表示这些 PHY 层编号的分布。比如,某个 FlexE 组中有 3 个 PHY 层,PHY 层编号分别为 1、20 和 250。因此,PHY 层映射的 1、20 和 250 相应 bit 位置 1,其它 bit 位置 0。虽然 PHY 层映射只有 8 位,但是一个开销复帧由 32 个开销帧组成, $32 \times 8 = 256$, 所以整个开销复帧共有 256 位 PHY 层映射。PHYNUMBER 为 1 的接收端接收到完整的开销帧后,就知道自己的 PHY 层的编号为 1,并且自己所在的组中除了自己外,还有 2 个 PHY 层,PHY 层编号分别为 20 和 250。后 5 个 66B 块用来传输用户自定义的数据,也可以全部填充 IDLE。循环冗余校验 (CRC) 是为了在接收端检测数据是否正确,若接收端的 CRC 无法匹配发送端,则需要丢弃此开销帧,Calendar 配置信息保持不变。

2.3 Calendar 机制

Calendar 负责将 66B 数据块分配至不同的子 Calendar 中。这些子 Calendar 可以承载不同种类、不同速率的业务。Calendar 的最小颗粒数为 5 Gb/s,即一个时隙中最少填充 5 Gb/s 速率的数据。因此,每 100G 大小的 FlexE 组最多可以被划为 20 个时隙。假设有 m 个 PHY 层被分到一个 FlexE 组,那么传输时需要 20 m 个时隙。当进行客户侧的时隙分配时,对于 10GE 的业务来说,需要占用 2 个时隙;对于 25GE 的业务,需要占用 5 个时隙……以此类推。传输时, m 个 PHY 层绑定的 20 m 个时隙可以被填满,也可以为空。但空时隙必须放在每 20 个时隙的最后。

Calendar 可以配置为 A 和 B 2 种模式,其中一种模式的 Calendar 每时每刻都进行 FlexE Client 与 FlexE Group 之间的映射与解映射。如果需要添加或移

除某个 Client,只需要改变开销位 C,而其它已配置的 Client 不必更改其大小以及所分配的 Calendar 时隙。

在一个开销复帧中的前 20 个开销帧中,Client Calendar A 和 Client Calendar B 分别有 20 组,用来表示此 PHY 层中 20 个时隙分别承载什么客户信号。0x0000 表示此时隙虽然可用但是没有用,0xFFFF 表示此时隙不可用。其它值都可以用来表示此时隙传输的是哪个客户信号。通过在每 1023 个子 Calendar 块后插入一个开销帧,接收端就可以通过开销中的值判断传输的是什么业务。

在发送端,主动配置 Calendar 开销的值确定每个业务被分到哪个时隙,同时读取各个客户侧信号对应的缓存模块中的 66B 块,然后按开销中的配置方式分配到 20m 个 5G 时隙中,并将 20m 个 5G 时隙轮询分配给 m 个 PHY 层。而在接收端,根据提取到的开销 Calendar 值,将 20m 个 5G 时隙分配到 n 个客户侧。

3 FlexE 功能模型

基于此,本文提出并研究了一种可以实现协议中复用与解复用的系统,其功能实现模型如图 2 所示。其中,箭头流向从左至右表明复用的过程,从右至左表明解复用的过程。 $e/ff/g/h$ 指一次从客户侧可以读取的 66B 块的个数。

3.1 FlexE 复用

FlexE 复用的整个过程是指不同速率的业务块按照一定的算法被分配至 Calendar 中的特定位置,并记录下各时隙所对应的业务类型放至 FlexE 开销中的 Calendar 配置复帧中。

发送数据时规定一次处理 5 个 66B 数据块。使用一个 5×5 的随机存取存储器(RAM)阵列来实现 FlexE

Client 到 FlexE 的时隙复用。每个 RAM 的宽度为 66 bit,深度为 16。整个阵列的纵深 16 被平分为 4 块,每一块对应 FlexE 中的一个时隙,一共 20 个(16/4×5)时隙。这 20 个时隙的标记顺序并不是从 0~19 顺序排列的,目的是为了能在一个周期内完成 5×66B 数据的读取。使用 5 列 RAM 的目的,同样也是为了在写入 5×66B 数据时能够在一个周期内完成。发送侧实现 FlexE 复用功能具体过程如下:

①Client0~n 代表 n 个客户信号,这里指的是未经过 66B 编码的原始数据包。由于在 FlexE 开销中,Client Calendar 为 16 位,所以可以认为一个 FlexE Group 共支持 65535 个客户。

②64B/66B 编码模块的功能与 100GE PCS 中的 64B/66B 编码功能相同。

③缓存模块将 64B/66B 编码模块发送来的 66B 块缓存至先进先出(FIFO)存储器,FIFO 存储器宽度为 $66 \times e/ff/g/h$ bit。当数据包缓存完毕时,FIFO 存储器当前地址中未用到的 66B 块则空着,当新的数据包来时从下一个 FIFO 存储器地址开始缓存;为 Calendar 模块提供读取接口,此读取接口为 show head 模式,并且每次可以读取 n 个 66B 块,n 可配, $1 \leq n \leq e/ff/g/h$ 。如果 FIFO 中没有数据包相关的 66B 块,则在读取时输出 IDLE,这其实就实现了从客户侧时钟到 FlexE 时钟的转换。

④根据 Calendar 开销的值,Calendar 模块同时读取各个客户侧信号对应的缓存模块中的 66B 块,然后分配到 20m 个 5G 时隙中,并将 20m 个 5G 时隙轮询分配给 m 个 PHY 层。此模块输出的数据流是有缺口的,这些缺口的位置预留给插入 FlexE 开销块和对齐字节。

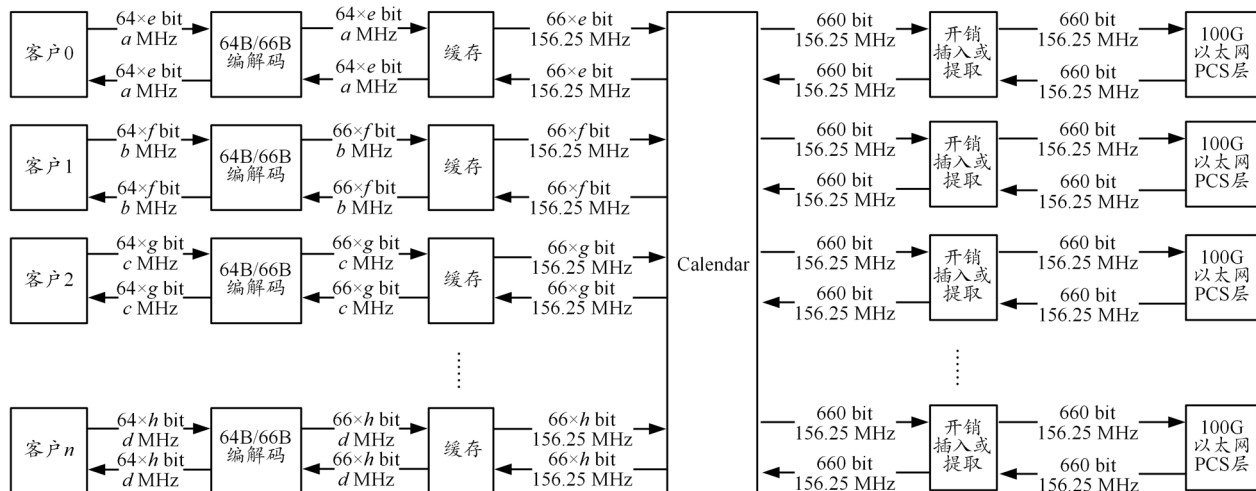


图 2 FlexE 复用和解复用功能模型

祁亚超,徐旺生:面向 5G/6G 的 FlexE 时隙分配算法的研究

⑤开销插入模块根据 Calendar 模块提供的位置指示插入 FlexE 开销块。

⑥100GE PCS 模块完成 802.3 协议中 100G 以太网物理编码子层中发送方向的功能,包括加扰、块分发和插入对齐码。

3.2 FlexE 解复用

FlexE 可承载的客户侧速率为 10G、40G 或 $m \times 25G$ 。100G 的 PHY 层可承载 0~2 个 40GE 业务,或 0~4 个 25G 业务,或 1 个 40GE 业务+2 个 25GE 业务+1 个 10GE 业务。考虑最多可以承载的客户侧数据为 10 个 10GE 的业务,因此在对数据进行解复用时,需要准备 10 个 330 位宽 FIFO 存储器。每个 FIFO 存储器之前有一个 $5 \times 66B$ 的缓冲区,用来存放解复用的数据,当缓冲区存满 $5 \times 66B$ 时,写入到对应的 FIFO 存储器。

2 个 10GE 业务+3 个 25GE 业务的组合时隙提取方法如图 3 所示,共有 5 个子 Calendar。图中的 Buffer 每收到一个子 Calendar,便根据其开销中所对应的指示位将不同业务数据分发至不同的通道。如 10GE 的业务 1 对应通道 0,10GE 的业务 2 对应通道 1,以此类推。因为一共只有 5 种业务类型,所以只用到了 5 个缓冲区。

在此之后,这 5 个 FIFO 由一个仲裁器根据时隙配置,采用合适的比例将各 FIFO 中的数据读取。接收侧实现 FlexE 解复用功能具体过程如下:

①100GE PCS 模块实现 802.3 协议中 100G 以太网物理编码子层接收方向的功能,包括块同步、删除对齐码和解扰。由于该模块本身具有删除对齐码的功

能,所以输出的数据流已经带有缺口。

②开销提取模块完成开销帧同步和开销复帧同步功能,然后提取出 FlexE 开销块。

③Calendar 模块根据提取到的开销 Calendar 值,将 $20m$ 个 5G 时隙分配到 n 个客户侧。

④缓存模块将 Calendar 模块发送来的 66B 块缓存至 FIFO 存储器。并为解码模块提供读取接口。缓存的写接口每次可以写 n 个 66B 块, $1 \leq n \leq e/f/g/h$ 可配。只缓存数据包,并不缓存 IDLE。当 FIFO 存储器中至少有 1 个数据包时,就通知解码模块过来读取。FIFO 存储器宽度为 $66 \times e/f/g/h$ 比特,当数据包结束时,当前地址中未使用到的 66B 不再用,而是从下一个地址开始缓存下一个数据包。

⑤64B/66B 解码模块检测到缓存模块中有数据包则从 FIFO 存储器中读取 66B 块并解码,直到检测到有数据包结束的 66B 块为止。此时可以解析出一个完整的数据包发送给客户侧,然后再重新检测缓存模块中是否有数据包。若有则从 FIFO 存储器下一个地址继续读取并解码;若无则继续检测数据包开始信号,直到检测到包头为止。解码功能与 100GE PCS 中的 64B/66B 解码功能类似。

⑥Client0~ n : n 个客户信号指的是未经过 66B 编码的原始数据包。每个客户信号对应一个 AXI4_ST 接口,AXI4_ST 接口位宽为 640 bit,频率为 156.25 MHz。所有客户侧也可以共用一个 Localbus 接口,Localbus 的带宽为 $m \times 100G$,此时需要将 n 个 AXI4_ST 接口转换为 1 个 Localbus 接口。

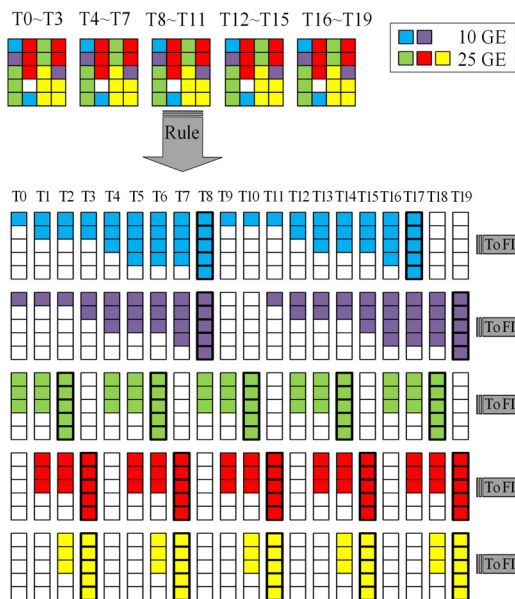


图3 接收端业务分配示意图

4 时隙分配算法的实现

无论接收端还是发送端,上述模型均涉及到了Calendar模块中的时隙分配与提取。根据FlexE标准中提出的时隙分配准则:①分配给特定客户的时隙并不需要全部都位于FlexE组的同一PHY层上;②只要有足够的可用时隙,就可以添加新客户;③没有用到的时隙放在Calendar的最后传输。本文提出了一种快速时隙分配算法的实现原理,可以一次性处理5个66B业务数据块,且业务传输不会发生冲突。这种时隙分配算法的原理如下:写入RAM时,5个66B块分别写入到5列RAM中,列地址各不相同,防止写冲突。与此同时,5个66B块分别写入到不同的时隙中,行地址各不相同。RAM阵列一共16行数据深度,每个时隙占用其中4行。图4中用同一深浅的色块代表同16行数据、深度5列的RAM块。即对于 5×5 RAM来说,

	C0	C1	C2	C3	C4		C0	C1	C2	C3	C4
时隙 0	1.1		1.3		1.5	时隙 0	1.1	1.2'	1.3	1.4'	1.5
时隙 5						时隙 5					
时隙 10						时隙 10					
时隙 15						时隙 15					
时隙 1		1.2			1.4	时隙 1	1.1'	1.2	1.3'	1.4	1.5'

图 4 10GE 时隙写入方法

同一深浅的色块代表一个 5 列的 RAM 阵。

假设需要发送的 FlexE Client 为 10GE,被分配到时隙 0 和 1。第一次 5 个 66B 的数据编号依次为 1.1、1.2、1.3、1.4 和 1.5。其分配到的 RAM 如图 4 所示。可以看出,5 个 66B 块被划分到了 5 个 RAM 中,可以实现一周写入。

下一个 5×66B 数据 1.1'、1.2'、1.3'、1.4' 和 1.5' 写入占用了另外 5 个 RAM(R0~R4),同样可以实现在一个时钟周期内写入全部 330 bit。

在写入 2 次 5×66B 之后,时隙 0 和时隙 1 所对应的 RAM 块的第一子行已经写满,之后写入的数据依次写到第 2/3/4 子行,然后转回到第 1 子行,实现类似于 FIFO 存储器的功能。

假设 100GE/25GE FlexE Client 被分配到了时隙 2~时隙 6,要写入的 5 个 66B 编号依次为 2.1、2.2、2.3、2.4 和 2.5。按照写入原则,5 个 66B 分配到不同的列、不同的时隙,分配如图 5 所示。

图 5 中,10GE 的 A 业务对应 1.1~1.5,被映射到时

	C0	C1	C2	C3	C4
时隙 0	1.1	1.2'	1.3	1.4'	1.5
时隙 5				2.4	
时隙 10				3.4	
时隙 15			4.3		
时隙 1	1.1'	1.2	1.3'	1.4	1.5'
时隙 6					2.5
时隙 11					3.5
时隙 16				4.4	
时隙 2	2.1				
时隙 7	3.1				
时隙 12					
时隙 17					4.5
时隙 3		2.2			
时隙 8		3.2			
时隙 13	4.1				
时隙 18	5.1	5.2'	5.3	5.4'	5.5
时隙 4			2.3		
时隙 9			3.3		
时隙 14		4.2			
时隙 19	5.1'	5.2	5.3'	5.4	5.5'

图 5 2×10GE+3×25GE 的映射示例

隙 0~时隙 1;25GE 的 A 业务对应 2.1~2.5,被映射到时隙 2~时隙 6;25GE 的 B 业务对应 3.1~3.5,被映射到时隙 7~时隙 11,25GE 的 C 业务对应 4.1~4.5,被映射到时隙 13~时隙 17;10GE 的 B 业务对应 5.1~5.5,被映射到时隙 18~时隙 19。时隙 12 空闲。

后续解码模块读取此 RAM 阵列时,对于时隙 0~时隙 4 同时读取 1.1、1.2、2.1、2.2 和 2.3;对于时隙 5~时隙 9 同时读取 2.4、2.5、3.1、3.2 和 3.3;对于时隙 10~时隙 14,同时读取 3.4、3.5、空白、4.1 和 4.2;对于时隙 15~时隙 19 同时读取 4.3、4.4、4.5、5.1 和 5.2。

5 结束语

随着 5G 商用的推广和 6G 研发提上日程,实现 FlexE 协议促进了网络融合、迎合了通信网 IP 化的发展大方向。本文对 FlexE 时隙分配算法的研究,使得网络既具备时分复用独占时隙、隔离性好和各业务互不影响特性,又较好地满足了当今时代高带宽、低时延的需求,具有现实指导意义。

参考文献:

- [1] 张小丹,程丹,徐晶,等. 40G/100G 以太网关键技术的研究与应用[J]. 光通信技术,2011,35(4):1-4.
- [2] 华为. 灵活以太网技术白皮书[EB/OL]. (2018-09-25)[2019-10-28]. <https://www.huawei.com/cn/press-events/news/2018/9/huawei-release-flexible-ethernet-whitepaper>.
- [3] ROBERTS K, ZHUGE Q, MONGA I, et al. Beyond 100 Gb/s: capacity, flexibility, and network optimization[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(4): 12-24.
- [4] 欧阳春波,李春荣,胡永健,等. 基于 FlexE 的承载网络分片隔离技术研究和应用[J]. 电信技术,2018(12):12-19.
- [5] 张平,陶运铮,张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报,2016,37(7):15-29.
- [6] 张宝亚. 5G 承载网技术和优化组网[J]. 中兴通讯技术,2018,24(1): 42-48.
- [7] 张平,牛凯,田辉,等. 6G 移动通信技术展望[J]. 通信学报,2019,40(1):141-148.
- [8] 王强,陈捷,廖国庆. 面向 5G 承载的网络切片架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术,2018,24(1):58-61.
- [9] HUSSAIN I, VALIVETI R, PITHEWAN K. FlexE use cases[Z/OL]. (2016-07-07)[2019-10-28]. <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-hussain-ccamp-flexe-usecases>.
- [10] EIRA A, PEREIRA A, PIRES J, et al. On the efficiency of flexible ethernet client architectures in optical transport networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10 (1): 133-143.