

# 基于动态通道绑定的更高速无源光网络



## Higher Speed PON Based on Dynamic Channel Bonding

张伟良/ZHANG Weiliang<sup>1,2</sup>, 王霄雨/WANG Xiaoyu<sup>3</sup>,  
黄新刚/HUANG Xingang<sup>1,2</sup>

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;  
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055;  
3. 中国电信集团有限公司, 中国 北京 100020)  
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;  
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China;  
3. China Telecom Corporation Ltd., Beijing 100020, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202402014

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240404.2315.004.html>

网络出版日期: 2024-04-08

收稿日期: 2024-02-18

**摘要:** 传统无源光网络单通道速率提升成本越来越高。多通道无源光网络可通过动态通道绑定实现速率提升, 进一步满足服务多样性需求。分析了现有 IEEE 和 ITU-T 无源光网络标准中的动态通道绑定需求和功能实现, 以及数据传输过程中存在的带宽效率、数据顺序恢复等问题, 提出了一种更高速无源光网络动态通道绑定中数据序列化传输和顺序恢复方法。该方法简化了动态通道绑定处理, 避免了带宽效率下降问题。

**关键词:** 更高速无源光网络; 动态通道绑定; 序列化传输; 顺序恢复

**Abstract:** The cost of single channel rate improvement in traditional passive optical networks (PON) is increasing. Multi-channel PON could achieve higher bandwidth capacity by dynamic channel bonding and could further meet service diversity. The requirement and function of dynamic channel bonding in current IEEE and ITU-T PON standards and the existing problems are analyzed. A transmission method including serialization transmission and order recovery for dynamic channel bonding in higher speed PON is provided. This method simplifies dynamic channel bonding processing and avoids the problem of bandwidth efficiency degradation.

**Keywords:** higher speed PON; dynamic channel bonding; serialization transmission; order recovery

**引用格式:** 张伟良, 王霄雨, 黄新刚. 基于动态通道绑定的更高速无源光网络 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(2): 100-106. DOI: 10.12142/ZTETJ.202402014

**Citation:** ZHANG W L, WANG X Y, HUANG X G. Higher speed PON based on dynamic channel bonding [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(2): 100-106. DOI: 10.12142/ZTETJ.202402014

### 1 无源光网络动态通道绑定需求

在 10G 无源光网络 (PON) 之后, 国际电信联盟电信标准化部门 (ITU-T) 和电气电子工程师学会 (IEEE) 分别启动多通道无源光网络和动态通道绑定无源光网络的标准化工作, 以提升后 10G PON 无源光网络的带宽容量和峰值速率。

多通道无源光网络支持多个通道。每个通道由一对上下行波长组成, 支持一部分光网络单元 (ONU)。各通道彼此独立, 并且每个 ONU 最大仅支持一个通道的带宽容量。动

态通道绑定无源光网络, 在多通道无源光网络的基础上, 各 ONU 可以支持一个或者多个通道。不同 ONU 支持的通道及通道数可以不同且可以共存。

IEEE 802.3av 标准<sup>[1]</sup>中的 Nx25G-EPON 支持 25 Gbit/s 和 50 Gbit/s 两种速率。50 Gbit/s 速率是通过绑定两个 25 Gbit/s 速率的通道来实现的。Nx25G-EPON 支持动态通道绑定。单通道 ONU 和由 2 个通道绑定的 ONU 可以在同一个光分配网络 (ODN) 中共存。

ITU-T G.989 系列标准<sup>[2-3]</sup>中的时分波分复用无源光网络 (TWDM-PON) 可支持 4~8 个通道, 并且每个通道的速率为 10 Gbit/s。在后续增补中, ITU-T G.989.1 amd1<sup>[4]</sup>增加了 TWDM-PON 超过 10G 带宽 ONU 的需求, 在 ITU-T G.989.3

**基金项目:** 上海市科技计划项目 (20511102400); 深圳市战略性发展项目 (XMHT20190101034)

amd2<sup>[5]</sup>中, 引入绑定 ONU。绑定 ONU 支持多个通道, 且支持动态通道绑定。单通道 ONU 可以和不同通道数的绑定 ONU 共存。

ITU-T G.9804.2 标准<sup>[6]</sup>中的更高速无源光网络 (HSP) 除基于 DAW 的 50G-PON<sup>[7]</sup>外, 还包括 TWDM-PON 多通道功能。每个通道支持 50 Gbit/s 速率, 并支持动态通道绑定。单通道 ONU 可以和不同通道数的多通道 ONU 共存。

## 2 无源光网络的动态通道绑定实现分析

### 2.1 Nx25G-EPON 动态通道绑定

Nx25G-EPON 支持两对上下行波长, 分别为:

下行波长:  $1358 \pm 2\text{nm}$ ,  $1342 \pm 2\text{nm}$ ;

上行波长:  $1270 \pm 10\text{nm}$ ,  $1300 \pm$

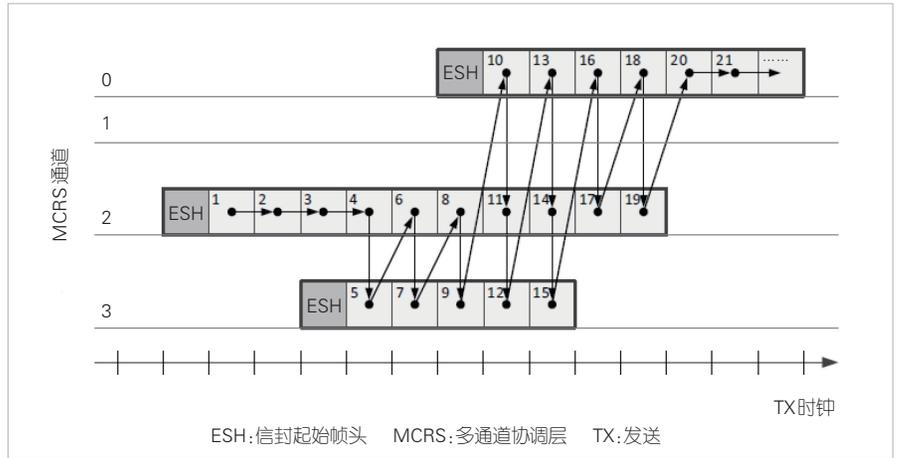
$10\text{nm}$ 。

Nx25G-EPON 的动态通道绑定机制不限定通道数, 把属于同一个逻辑链路标识 (LLID) 的业务数据帧切分为多个 8 字节长的信封单元 (EQ)。每个 EQ 在传输机会最早的通道上发送, 如果有多个传输机会最早的通道, 则选择在通道编号最小的通道上发送, 如图 1 所示。同一个通道上的 EQ 序列增加 8 字节的信封起始帧头 (ESH) 以便封装成信封。

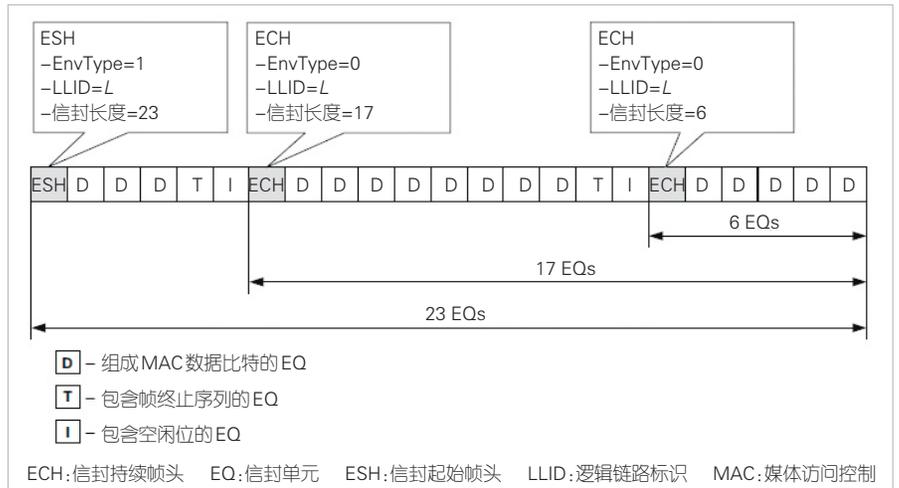
Nx25G-EPON 动态通道绑定机制考虑了属于同一个 LLID 的连续以太网帧发送。第一个以太网帧如果要在多通道上传输, 就需要在每个通道上增加 ESH。后续每个以太网帧的前导将被替换为信封持续帧头 (ECH), 不需要增加 ESH, 具体见图 2。ESH 和 ECH 中的信封长度显示, 属于同一个 LLID 以太网帧在连续发送时彼此是相关联的, 需要预先收集待发送以太网帧。具体实现过程需要缓存较长时间, 存在一定的限制。

Nx25G-EPON 动态通道绑定机制考虑了通道传输偏移, 即各通道有不同的传输时延, 可能导致各通道上传输数据

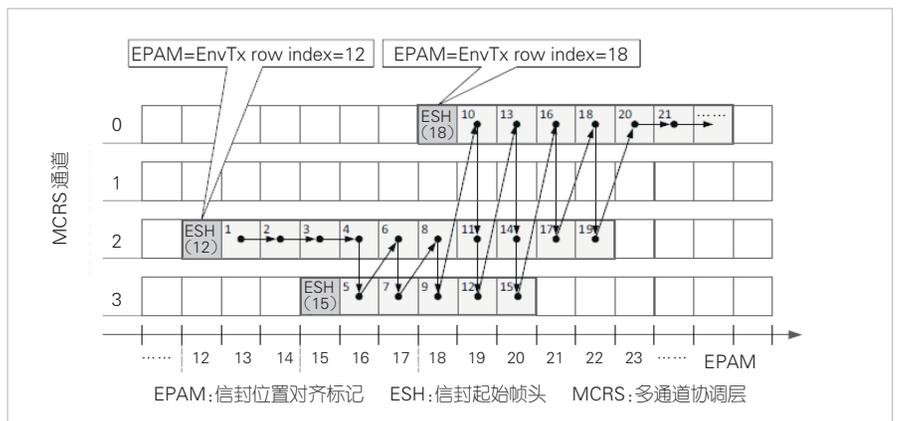
的相对位置发生变化, 进而产生接收乱序。Nx25G-EPON 发送端和接收端都设置了 32 EQ 大小的循环缓存。发送过程中, 每个信封的 ESH 在发送端循环缓存中的位置, 被记录在 ESH 的信封位置对齐标记 (EPAM) 中, 如图 3 所示。这样可以固定各通道传输数据之间的相对位置关系。



▲图1 Nx25G-EPON 动态通道绑定机制数据传输示例<sup>[1]</sup>



▲图2 同一个 LLID 的业务数据帧连续发送<sup>[1]</sup>



▲图3 信封位置对齐标记 EPAM 的携带<sup>[1]</sup>

### 2.2 TWDM-PON 动态通道绑定方案

TWDM-PON 下行波段和上行波段的分配如表 1 所示。下行波长和上行波长的具体分配如表 2 和表 3 所示。ITU-T G.989.2<sup>[2]</sup>规定由表 2 和表 3 组成下行/上行波长对的前 4 对波长用于 TWDM-PON。如果需要, 后 4 对波长也可以用于 TWDM-PON。

在引入动态通道绑定后, ITU-T G.989.3 传输汇聚层的标准化工作基本完成。因此, TWDM-PON 支持通过传输汇聚层之上的业务层来实现动态通道绑定。每个通道各自激活, 各自传输业务。业务层利用多个通道传输业务。

### 2.3 HSP 动态通道绑定

HSP<sup>[6]</sup>动态通道绑定暂未定义各通道对应的上下行波长, 其工作原理如图 4 所示。HSP 数据封装帧包括绑定数据封装 (XGEM) 帧和非绑定 XGEM 帧。非绑定 XGEM 帧和单通道 50G-PON 的数据传输方式是一样的。对于绑定 XGEM 帧, 业务数据帧被切割为若干 4 字节数据单元。每个数据单元在时隙最早、编号最小的通道上发送。每个通道上的数据单元序列前会增加一个 8 字节 XGEM 帧头。

这里我们以图 4 为例来解释 HSP 动态通道绑定数据传输过程。业务数据帧长度为 74 字节, 填充 2 字节后变为 76 字节, 随后被分割成 19 个 4 字节的数据单元。这些数据单元的编号依次为 0~18。系统先在通道  $\lambda_3$  发送数据单元 0~5, 然后在通道  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  交替发送数据单元 6 和 7, 最后在通道  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  交替发送数据单元 8~18。每个通道的数据单元序列前都被增加一个 XGEM 帧头。在通道  $\lambda_1$  上的 XGEM 帧头中, 最后分片标志 LF=0 表示业务数据帧的结尾不在该通道上, 净荷长度指示 PLI=16 表示该通道包含 16 个字节业务数据, 即 4 个数据单元, 不包含字节填充。在通道  $\lambda_2$  上的 XGEM 帧头中, LF=1 表示业务数据帧的结尾在该通道上, PLI=18 表示该通道包含 18 字节业务数据, 即 5 个数据单元。其中, 最后一个数据单元有 2 个字节填充。在通道  $\lambda_3$  上的 XGEM 帧头中, LF=0 表示业务数据帧的结尾不在该通道上, PLI=40 表示该通道包含 40 个字节业务数据, 即 10 个数据单元, 没有字节填充。

关于通道传输偏移, HSP 动态通道绑定机制假设各通道之间的偏移量是固定的, 且发送侧和接收侧都知道该偏移量, 因此发送侧和接收侧对数据单元顺

序有共同认知, 但是 HSP 未给出相应的数据单元顺序保证机制。

HSP 动态通道绑定机制只考虑单个业务数据帧在多通道

▼表 1 时分波分复用无源光网络下行波段和上行波段<sup>[2]</sup>

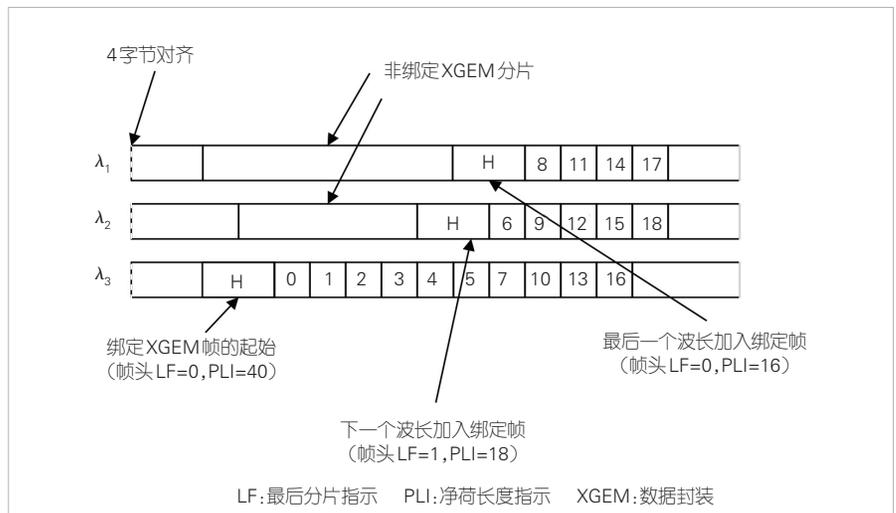
| 下行波段/nm       | 上行波段/nm             |
|---------------|---------------------|
| 1 596 ~ 1 603 | 1 524 ~ 1 544(宽带选项) |
|               | 1 528 ~ 1 540(收窄选项) |
|               | 1 532 ~ 1 540(窄带选项) |

▼表 2 时分波分复用无源光网络下行波长定义<sup>[2]</sup>

| 通道 | 中心频率/THz | 波长/nm    |
|----|----------|----------|
| 1  | 187.8    | 1 596.34 |
| 2  | 187.7    | 1 597.19 |
| 3  | 187.6    | 1 598.04 |
| 4  | 187.5    | 1 598.89 |
| 5  | 187.4    | 1 599.75 |
| 6  | 187.3    | 1 600.60 |
| 7  | 187.2    | 1 601.46 |
| 8  | 187.1    | 1 602.31 |

▼表 3 时分波分复用无源光网络上行波长定义<sup>[2]</sup>

| 通道 | 50 GHz 通道间隔 |          | 100 GHz 通道间隔 |          | 200 GHz 通道间隔 |          |
|----|-------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
|    | 频率/THz      | 波长/nm    | 频率/THz       | 波长/nm    | 频率/THz       | 波长/nm    |
| 1  | 195.25      | 1 535.43 | 195.6        | 1 532.68 | 196.1        | 1 528.77 |
| 2  | 195.20      | 1 535.82 | 195.5        | 1 533.47 | 195.9        | 1 530.33 |
| 3  | 195.15      | 1 536.22 | 195.4        | 1 534.25 | 195.7        | 1 531.90 |
| 4  | 195.10      | 1 536.61 | 195.3        | 1 535.04 | 195.5        | 1 533.47 |
| 5  | 195.05      | 1 537.00 | 195.2        | 1 535.82 | 195.3        | 1 535.04 |
| 6  | 195.00      | 1 537.40 | 195.1        | 1 536.61 | 195.1        | 1 536.61 |
| 7  | 194.95      | 1 537.79 | 195.0        | 1 537.40 | 194.9        | 1 538.19 |
| 8  | 194.90      | 1 538.19 | 194.9        | 1 538.19 | 194.7        | 1 538.77 |



▲图 4 更高速无源光网络动态通道绑定数据传输示例<sup>[6]</sup>

上的传输。每一个业务数据帧在每个通道上的数据单元序列都需要增加一个XGEM帧头。因此，带宽效率会下降。特别是当业务数据帧较短时，带宽浪费更加明显。如表4所示，在短包长情况下，例如包长为100或者200字节时，2通道和4通道的带宽效率与单通道相比下降明显。文献[8]基于抓取的互联网数据包进行数据包长统计分析，其中100字节长度的数据包较为典型。

### 3 HSP 动态通道绑定的改进研究

HSP灵活通道绑定目前存在的待改进问题包括：

1) 带宽效率问题。每个业务数据帧都在多通道上传输，并且每个通道都需要增加XGEM帧头。这导致带宽效率下降。虽然IEEE Nx25G-EPON提供了一种业务数据帧连续传输方法，但是最前面的业务数据帧仍然需要在各通道上增加信封帧头。因此，如果业务数据帧是不连续的，那么每个业务数据帧的传输仍然需要在每个通道上增加帧头。

2) 顺序恢复问题。HSP动态通道绑定只是做了一个数据单元顺序恢复的条件假设，并未提供实现机制。虽然IEEE Nx25G-EPON的EPAM机制可以在HSP中重用，例如XGEM帧头中有个18 bit的选项域可以用来定义类似EPAM功能，但是该机制要求每个通道都有帧头。这会对带宽效率产生影响。另外，在标准讨论过程中，有多个功能可能用到选项域，因此需要统筹考虑选项域的重定义。

在现有HSP动态通道绑定机制的基础上，并结合Nx25G-EPON动态通道绑定机制，我们利用HSP自身的技术特征，提出HSP动态通道绑定中的序列化传输和顺序恢复方法。

为了描述方便，我们总结了Nx25G-EPON和HSP动态通道绑定中的数据单元最早最小传输规则：业务层数据帧被分割成多个数据单元。各数据单元按照最早最小规则在多个通道上发送，即每个数据单元在传输机会最早且通道编号最小的通道上发送。接收端按照最早最小规则接收数据单元，即总是在有最早时隙和通道编号最小的通道上接收，并对接收到的数据单元进行重组，以恢复业务数据帧。

#### 3.1 序列化传输<sup>[9]</sup>

在Nx25G-EPON的动态通道绑定机

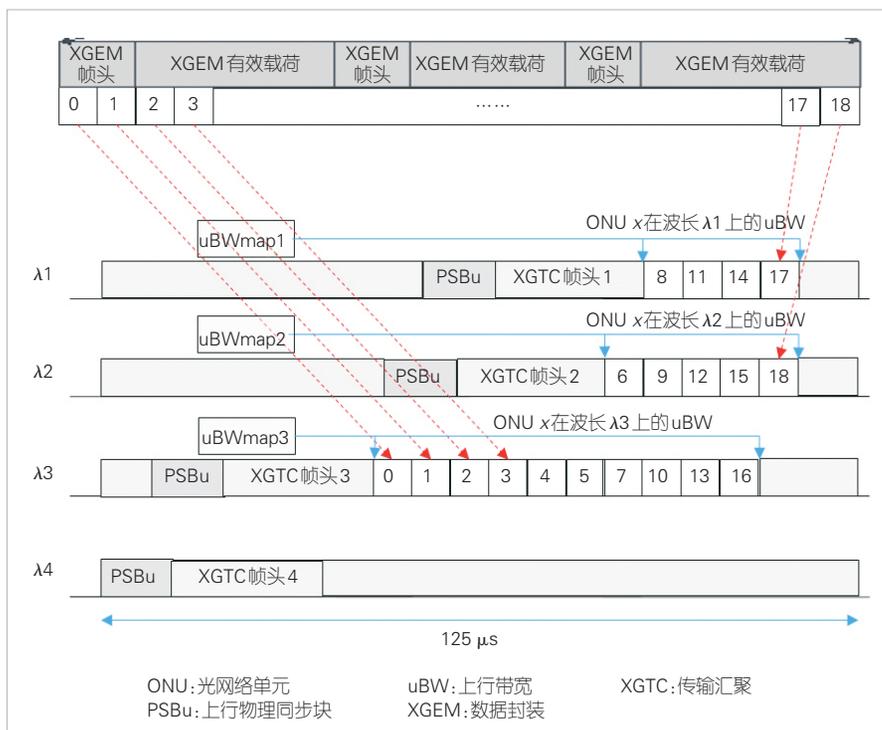
▼表 4 不同包长在不同通道数情况的带宽效率

| 通道数 | 业务数据帧长/字节 |        |        |        |        |        |
|-----|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | 64        | 100    | 200    | 500    | 1 000  | 1 500  |
| 1   | 88.89%    | 92.59% | 96.15% | 98.43% | 99.21% | 99.47% |
| 2   | 80.00%    | 86.21% | 92.59% | 96.90% | 98.43% | 98.94% |
| 4   | 66.67%    | 75.76% | 86.21% | 93.98% | 96.90% | 97.91% |

制中，对于属于同一个LLID的连续业务数据帧，除了第一个业务数据帧外，后续每个业务数据帧的前导都将转化为一个ECH，而不需要在每个通道上增加ESH。实际上，即使是第一个业务数据帧也不需要每个通道上增加ESH。这是因为当业务数据帧切分为EQ后，EQ序列会按照最早最小规则在多个通道上发送。接收端也按照最早最小规则恢复出同样的一个EQ序列，并恢复为业务数据帧。

本文提出的序列化传输把业务数据帧封装成XGEM帧，并把属于同一个接收端的连续XGEM帧变成XGEM帧序列。XGEM帧序列被切分成数据单元。数据单元按照最早最小规则在多个通道上发送。接收端按照最早最小规则在多个通道上接收数据单元，并将其恢复成数据单元序列即XGEM帧序列。下面我们分别描述下行序列化传输和上行序列化传输。

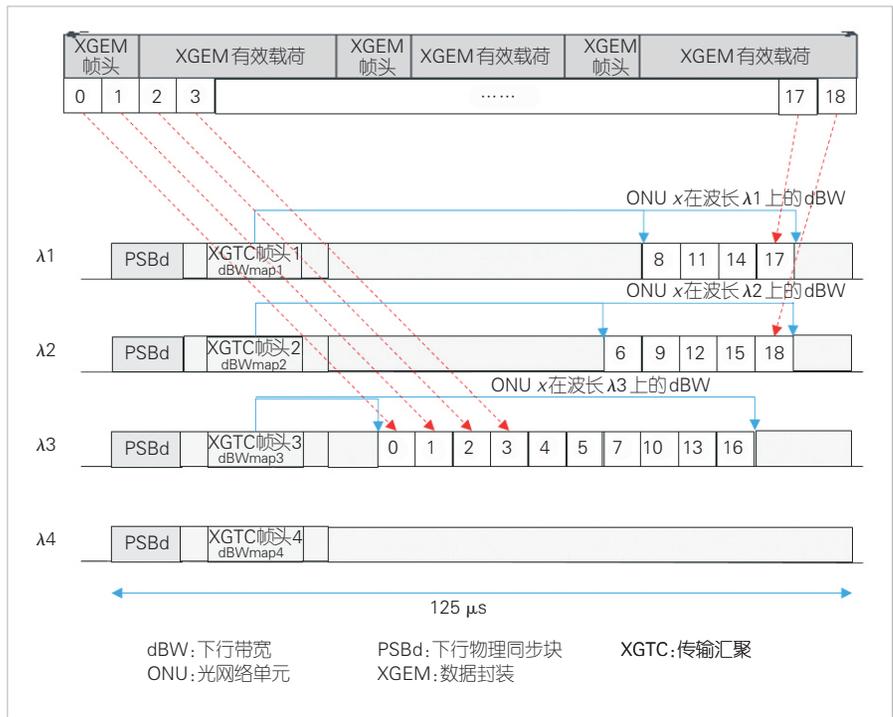
图5给出了上行序列化的发送过程。其中，数据单元为4字节，用户数据帧和XGEM帧序列仅仅是示例，不影响上行序列化传输方法的实现。ONU从上行带宽分配结构uBWmap中收集各通道上的上行带宽，收集业务数据帧并



▲图5 上行序列化传输示例

将其封装在 XGEM 帧中，以形成 XGEM 帧序列。XGEM 帧序列被分割成数据单元。每个数据单元按照最早最小规则在各个通道的上行带宽上发送。当所有这些带宽被数据单元填满后，ONU 会在每个通道上构建 XGTC 帧。数据单元序列作为净荷被封装在 XGTC 帧中，进一步增加上行物理同步块 PSB<sub>u</sub> 和 FEC 校验。OLT 在每个通道上解析 PSB<sub>u</sub> 和 FEC 校验，根据本地保存的 uBW<sub>map</sub>，获取每个 ONU 在各个通道上的上行带宽，并根据这些上行带宽按照最早最小原则，在各通道上逐个接收相应 ONU 发送的数据单元形成数据单元序列，并进一步组装成 XGEM 帧序列。由于现有标准 ITU-T G.9804.2 支持上行带宽分配结构，并且上行带宽分配结构是 ONU 从 OLT 发送的下行帧中获取的，因此上行序列化发送没有引入额外的开销，其带宽效率和单通道发送方式是一样的。

图 6 展示了下行序列化发送过程。其中，数据单元为 4 字节，用户数据帧和 XGEM 帧序列仅仅是示例，同样不影响下行序列化传输方法的实现。为了支持下行方向的序列化发送方法，需要确定下行带宽的分配方式。文献[10]提出了下行带宽分配方法用于 ONU 节能。该方法暂时未写入 ITU-T G.9804.2。我们参考该文献并引入下行带宽分配。OLT 收集各 ONU 在每个通道上的下行带宽，将其组装成下行带宽分配结构 dBW<sub>map</sub> 并发送。OLT 进一步收集业务数据帧并将其封装成 XGEM 帧。XGEM 帧被分割成数据单元。每个数据单元按照最早最小原则在各通道的下行带宽上发送。当所有这些各通道上的带宽填满数据单元后，OLT 在每个通道上构建 XGTC 帧。数据单元序列作为净荷被封装在 XGTC 帧中，并进一步增加下行物理同步块 PSB<sub>d</sub> 和 FEC 校验。在接收侧，ONU 在每个通道上解析 PSB<sub>d</sub> 和 FEC 校验，获取 XGTC 帧，从 XGTC 帧头中解析下行带宽分配结构 dBW<sub>map</sub>，并收集属于自己的各通道上的下行带宽。在这些下行带宽中，ONU 会按照最早最小原则从各个通道逐个接收数据单元形成数据单元序列，并进一步组装成 XGEM 帧序列。由于下行带宽分配结构还不是标准 ITU-T G.9804.2 中的功能结构，因此，引入下行带宽分配结构会引入额外的开销。参考上行带宽分配结构，一个通道上的下行带宽分配由一个带宽条目指示。一个带宽条目为 8 字节。这意味着



▲图6 下行序列化传输示例

每个通道需额外引入 8 字节开销。

本文所述序列化传输方法是指，将单通道传输的 XGEM 帧序列分布到各个通道上传输，不需要在每个通道的数据单元序列前增加 XGEM 帧头。这使得上行序列化传输的带宽效率和单通道传输一样，避免了动态通道绑定导致的带宽效率下降。对于下行序列化传输的带宽效率，由于下行带宽分配未写入标准，引入下行带宽分配会增加额外的开销。如表 5 所示，随着连续帧数的增加，带宽效率逐步接近单通道传输效率。当然，如果下行带宽分配将来被写入 ITU-T G.9804.2 标准，下行序列化传输的带宽效率将与单通道传输一样。

### 3.2 顺序恢复<sup>[11-12]</sup>

HSP 数据发送有严格的同步机制。下行方向每 125 μs 传输一个超帧，每个超帧头部均携带 PSB<sub>d</sub>。顺序恢复机制可以利用这一特性。如图 7 所示，OLT 在各通道上同步发送 PSB<sub>d</sub>，且携带相同的超帧号 (SFC)，作为各通道发送数据的共同参考点。每个数据单元到同步 PSB<sub>d</sub> 的距离决定了自身的发送顺序。离同步 PSB<sub>d</sub> 近的数据单元发送时间早，离同步 PSB<sub>d</sub> 远的数据单元发送时间晚。对于离同步 PSB<sub>d</sub> 一样远近的数据单元，根据最早最小原则，在编号更小通道上的数据单元发送时间更早。

上行 PHY 帧和下行 PHY 帧是同步的。根据前文所述，

▼表 5 下行序列化传输、上行序列化传输、Nx25G-EPON 在不同连续帧数情况下的带宽效率汇总

| 序列化传输方法   | 通道数           | 64 字节帧长 |        |        | 100 字节帧长 |        |        | 200 字节帧长 |        |        | 500 字节帧长 |        |        |
|-----------|---------------|---------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|
|           |               | 1 帧     | 5 帧    | 10 帧   | 1 帧      | 5 帧    | 10 帧   | 1 帧      | 5 帧    | 10 帧   | 1 帧      | 5 帧    | 10 帧   |
| 下行序列化     | 1             | 80.00%  | 86.96% | 87.91% | 86.21%   | 91.24% | 91.91% | 92.59%   | 95.42% | 95.79% | 96.90%   | 98.12% | 98.27% |
|           | 2             | 72.73%  | 85.11% | 86.96% | 80.65%   | 89.93% | 91.24% | 89.29%   | 94.70% | 95.42% | 95.42%   | 97.81% | 98.12% |
|           | 4             | 61.54%  | 81.63% | 85.11% | 71.43%   | 87.41% | 89.93% | 83.33%   | 93.28% | 94.70% | 92.59%   | 97.20% | 97.81% |
| 上行序列化     | $n(1 \sim 4)$ | 88.89%  |        |        | 92.59%   |        |        | 96.15%   |        |        | 98.43%   |        |        |
| Nx25G-PON | 1             | 88.89%  | 88.89% | 88.89% | 92.59%   | 92.59% | 92.59% | 96.15%   | 96.15% | 96.15% | 98.43%   | 98.43% | 98.43% |
|           | 2             | 80.00%  | 86.96% | 87.91% | 86.21%   | 91.24% | 91.91% | 92.59%   | 95.42% | 95.79% | 96.90%   | 98.12% | 98.27% |
|           | 4             | 66.67%  | 83.33% | 86.02% | 75.76%   | 88.65% | 90.58% | 86.21%   | 93.98% | 95.06% | 93.98%   | 97.50% | 97.96% |

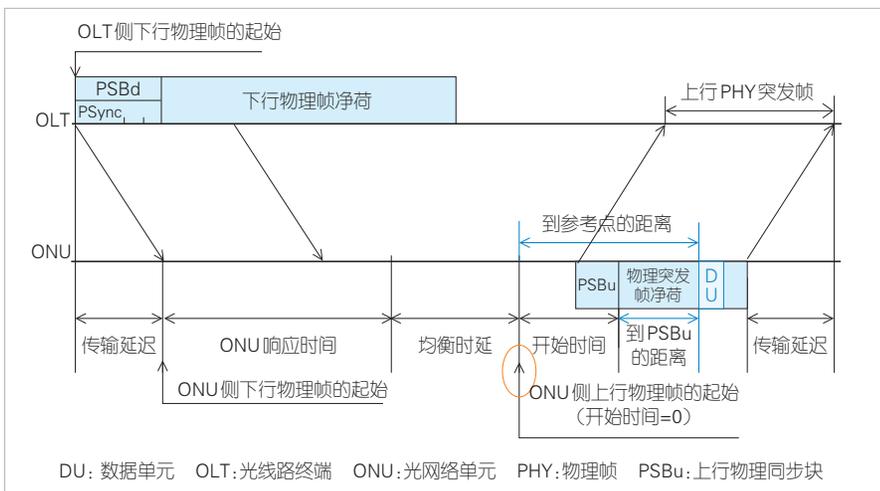
由于各通道的下行帧是同步的，所以各通道的上行帧也是同步的。各通道上行 PHY 帧的开始时刻可以作为上行数据接收顺序的参考点，如图 8 所示。各个通道上数据单元到上行参考点的距离，包括 StartTime 加数据单元到 PSBu 的距离之和。这个距离在上行传输过程中是不变的，可用于表示数

据单元的发送顺序。因此，上行方向的发送不需要做修改。

本文所述的顺序恢复方法充分利用了 HSP 中下行同步特征，不需要在帧结构中增加额外的字段，简化了动态通道绑定机制中的顺序恢复处理，也保留了 XGEM 帧头中选项域以用于其他功能扩展。



▲图 7 更高速无源光网络动态通道绑定的下行参考点即数据单元发送顺序示例



▲图 8 同步的上行 PHY 帧起始时刻作为上行参考点

#### 4 结束语

本文分析了现有无源光网络标准中的动态通道绑定需求、功能，以及 HSP 动态绑定机制中存在的带宽效率、顺序恢复等问题。结合 Nx25G-EPON 动态通道绑定机制，利用 HSP 自身的技术特征，本文提出了 HSP 动态通道绑定中的序列化传输和顺序恢复方法。该方法简化了动态通道绑定处理，避免了带宽效率下降。此外，针对本文提出的 HSP 动态通道绑定序列化传输和顺序恢复方法，我们已在在 ITU-T 标准组织进行提案，并将在 HSP 标准的后续增补中继续讨论。

#### 参考文献

- [1] IEEE. Physical layer specifications and management parameters for 25 Gbit/s and 50 Gbit/s passive optical networks: 802.3ca [S]. 2020
- [2] ITU. 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): physical media dependent (PMD) layer specification: ITU-T G.989.2 [S]. 2019
- [3] ITU. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): transmission convergence layer specification: ITU-T G.989.3 [S]. 2015
- [4] ITU. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): general requirements amendment 1: ITU-T G.989.1 amd1 [S]. 2015

- [5] ITU. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): transmission convergence layer specification amendment 2: ITU-T G.989.3 amd2 [S]. 2018
- [6] ITU. Higher speed passive optical networks: common transmission convergence layer specification: ITU-T G.9804.2 [S]. 2021
- [7] 张伟良, 黄新刚, 马壮. 基于专用激活波长的低时延 50G-PON 原理与实现 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 27(4): 58-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202204012
- [8] LUO Y. Channel bonding analysis [EB/OL]. [2024-02-25]. [https://fsanftp@store.fsan.org/FSAN/FSAN\\_ARCHIVE/FSAN\\_GROUPS/NGPON/Meeting-Contributions/2019/2019-01\\_Plan/NG-PON2\\_Enhancements/HW\\_Bonding\\_throughput.pdf](https://fsanftp@store.fsan.org/FSAN/FSAN_ARCHIVE/FSAN_GROUPS/NGPON/Meeting-Contributions/2019/2019-01_Plan/NG-PON2_Enhancements/HW_Bonding_throughput.pdf)
- [9] ZHANG W L, YUAN L Q. Effective channel bonding framing based on bandwidth map in G.hsp.ComTC [EB/OL]. [2024-02-25]. [https://www.itu.int/ifa/t/2017/sg15/exchange/wp1/q2/20-10-20\\_Phonecall/201020\\_D32\\_ZTE\\_Effective\\_channel\\_bonding\\_framing\\_based\\_on\\_bandwidth\\_map\\_in\\_G.hsp.ComTC.docx](https://www.itu.int/ifa/t/2017/sg15/exchange/wp1/q2/20-10-20_Phonecall/201020_D32_ZTE_Effective_channel_bonding_framing_based_on_bandwidth_map_in_G.hsp.ComTC.docx)
- [10] FRANK E. G.HSP: downstream extra features [EB/OL]. [2024-02-25]. [https://www.itu.int/ifa/t/2017/sg15/exchange/wp1/q2/20-06-09\\_Phonecall/200609\\_D19\\_FW\\_DownstreamTopics.docx](https://www.itu.int/ifa/t/2017/sg15/exchange/wp1/q2/20-06-09_Phonecall/200609_D19_FW_DownstreamTopics.docx)
- [11] ZHANG W L, YUAN L Q. Order recovery for channel bonding in G.hsp.comTC [EB/OL]. [2024-02-25]. [https://www.itu.int/ifa/t/2017/sg15/exchange/wp1/q2/20-07-06\\_Multicall/200706\\_D55\\_ZTE\\_order\\_recovery\\_for\\_channel\\_bonding\\_in\\_G.hsp.comTC\\_v1.0.docx](https://www.itu.int/ifa/t/2017/sg15/exchange/wp1/q2/20-07-06_Multicall/200706_D55_ZTE_order_recovery_for_channel_bonding_in_G.hsp.comTC_v1.0.docx)
- [12] ZHANG W L, YUAN L Q. Text proposal of PSBd synchronization for channel bonding in G.hsp.comTC [EB/OL]. [2024-02-25]. [https://www.itu.int/ifa/t/2017/sg15/exchange/wp1/q2/20-10-20\\_Phonecall/201020\\_D31\\_ZTE\\_Text\\_proposal\\_of\\_PSBd\\_synchronization\\_for\\_channel\\_bonding\\_in\\_G.hsp.comTC.docx](https://www.itu.int/ifa/t/2017/sg15/exchange/wp1/q2/20-10-20_Phonecall/201020_D31_ZTE_Text_proposal_of_PSBd_synchronization_for_channel_bonding_in_G.hsp.comTC.docx)

## 作者简介



**张伟良**, 中兴通讯股份有限公司固网团队技术预研资深专家、低时延 PON 技术负责人; 长期从事光接入、家庭网络产品的技术预研、产品规划和标准化工作; 主持并参与多项国家“863”项目、省部级重点项目; 获得中国专利优秀奖、深圳市专利奖、中国标准创新贡献奖; 发表论文 10 余篇, 获得授权专利 100 余项。



**王霄雨**, 中国电信集团高级项目经理; 主要研究方向为接入网络关键技术, 包括无源光网络、业务体验感知等。



**黄新刚**, 中兴通讯股份有限公司固网团队技术预研资深专家; 长期从事光接入技术研究和标准化工作; 主持并参与多项国家“863”项目、省部级重点项目; 获得国家科学技术进步奖二等奖一项、电子学会科学技术进步奖一等奖一项、深圳市科技进步奖二等奖一项; 获得发明专利 10 余项。