

基于专用激活波长的低时延 50G-PON 原理与实现



Mechanism and Application of DAW-Based Low Latency 50G-PON

张伟良/ZHANG Weiliang^{1,2}, 黄新刚/HUANG Xingang^{1,2},
马壮/MA Zhuang^{1,2}

(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)

(1. ZTE Corporation, Shenzhen China, 518057;

2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen China, 518055)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204012

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20220706.1412.004.html>

网络出版日期: 2022-07-07

收稿日期: 2022-05-10

摘要: 在 50G-无源光网络 (PON) 承载低时延业务的需求基础上, 分析了 50G-PON 中安静窗口等因素带来的时延困扰。认为可通过增加专用激活波长 (DAW) 来解决 50G-PON 中安静窗口带来的时延问题。验证测试结果表明, 结合相应的带宽分配方法, 基于 DAW 的方法能够使 50G-PON 系统满足承载 5G 前传的时延要求。

关键词: 50G-PON; 低时延; 安静窗口; DAW

Abstract: Based on the low latency requirement for 50G-passive optical network (PON), the latency introduced by quiet window is analyzed. It is considered that the latency caused by quiet window in 50G-PON can be solved by using the dedicated activation wavelength (DAW). The latency testing results show that, combined with the corresponding bandwidth allocation method, the method based on DAW can make the 50G-PON system meet the latency requirements of carrying 5G fronthaul transmission.

Keywords: 50G-PON; low latency; quiet window; DAW

1 50G-PON 承载低时延业务的需求

针对 50G-无源光网络 (PON), 国际电信联盟电信标准分局 (ITU-T) G.9804.1^[1]指出了两种承载低时延业务的场景——5G 前传和高级视频传输, 并通过引用 G.Sup66^[2]对 5G 前传业务的时延要求做了相应规定。

ITU-T G.Sup66 标准^[2]讨论了 PON 承载移动前传的需求和应用场景, 并给出了时分复用无源光网络 (TDM-PON) 承载 5G 前传业务的示例。该标准同时指出了不同 5G 业务端到端的时延需求, 其中超可靠低时延通信 (URLLC) 业务的端到端时延为 1~2.5 ms。表 1 进一步提供了 5G 业务基于功能切分选项的时延指标, 其中选项 4—8 相应的单向传输时延为 100 μ s 到几百微秒。

2 50G-PON 低时延的技术难题及其解决方案分析

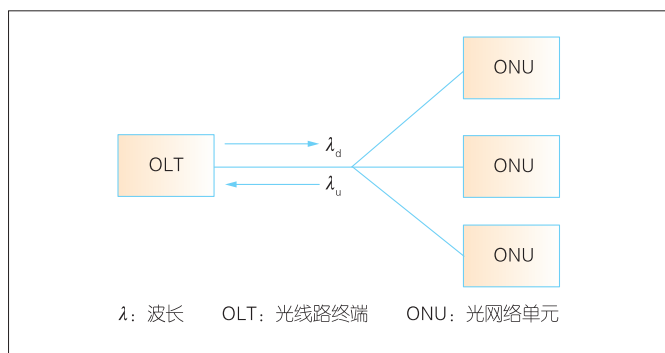
传统 TDM-PON 架构如图 1 所示。光线路终端 (OLT)

通过单点到多点光分配网络 (ODN) 连接多个光网络单元 (ONU)。OLT 和 ONU 之间采用一对上下行波长: 下行方向采用 TDM 机制, 此时 OLT 在不同的下行时隙中的向各 ONU 发送下行数据, 各 ONU 筛选并接收属于自己的数据; 上行方向采用 TDMA 机制, 此时 OLT 给各 ONU 分配上行带宽, 各 ONU 在属于自己的上行带宽内向 OLT 发送上行数据。

▼表 1 不同功能划分的传输速率和时延范围^[2]

协议分割选项	下行带宽要求/ (Gbit·s ⁻¹)	上行带宽要求 (Gbit·s ⁻¹)	单向时延
选项 1	4	3	1 ~ 10 ms
选项 2	4.016	3.024	
选项 3	下行、上行都比选项 2 低		
选项 4	4	3	100 μs 到几百微秒
选项 5	4	3	
选项 6	4.133	5.640	
选项 7a	10.1 ~ 22.2	16.6 ~ 21.6	
选项 7b	37.8 ~ 86.1	53.8 ~ 86.1	
选项 7c	10.1 ~ 22.2	53.8 ~ 86.1	
选项 8	157.3	157.3	

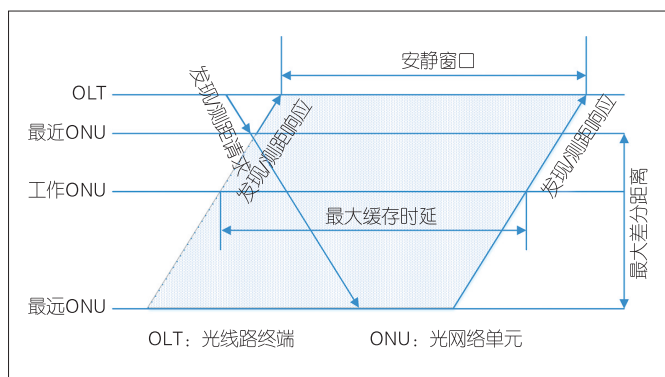
基金项目: 上海市科技计划项目 (20511102400); 深圳市战略性发展项目 (XMHT20190101034)



▲图1 传统时分复用无源光网络架构

当ONU初次接入OLT时，一般OLT会对ONU进行发现和测距。为了发现并测距ONU，OLT需要开放安静窗口，如图2所示。在OLT发现和测距ONU的过程中，为了避免可能发生的上行冲突，OLT会停止给正常工作的ONU分配上行带宽，此时正常工作的ONU也不能向OLT发送上行数据。如果用户数据刚好在安静窗口到达正常工作的ONU，则该用户数据将至少缓存安静窗口大小的时间。安静窗口长度与OLT和ONU之间的最大差分距离相关。以OLT和ONU之间的最大差分距离为20 km为例，该安静窗口时间至少为200 μs。这将给正常工作ONU的上行数据发送带来最大200 μs的数据缓存时延。如果考虑各ONU在响应发现/测距请求时的本地处理时间和随机时延之间的差异，安静窗口会更大，这也会给正常工作ONU的上行数据发送带来更大的数据缓存时延。

传统TDM-PON中除了安静窗口带来的时延外，还包括光纤传输时延、动态带宽分配时延、OLT和ONU内部处理时延等。



▲图2 发现和测距ONU过程中安静窗口对工作ONU的时延影响

50G-PON若继续采用传统TDM-PON架构，包括安静窗口等因素的总时延将无法满足5G前传的低时延要求。虽然减少OLT和ONU之间的光纤长度可以降低传输时延，也可以减小安静窗口带来的时延，但是安静窗口带来的时延仍然

是重要因素。例如，假设OLT和ONU之间的最大距离差为10 km，安静窗口仍然会带来至少100 μs的时延；假设OLT和ONU之间的最大距离差为5 km，安静窗口仍然会带来至少50 μs的时延。

ITU-T曾提出多种50G-PON安静窗口消除方案，如表2所示，包括预先获知ODN特性、利用空闲时隙开放安静窗口、利用低幅低频信号传递ONU发现信息等。然而，这些方案都存在很大局限性，而专用激活波长（DAW）方案因为其可以在升级演进过程中采用旧系统的上行波长，简单易实现，逐渐脱颖而出。

▼表2 不同安静窗口的消除方案比较

消除安静窗口的方案	具体解决方法	局限性
预先获知ODN特性	开放较小安静窗口发现ONU、测距ONU	系统不能及时识别ODN发生变化,存在冲突风险
利用空闲时隙	利用空闲时隙开放安静窗口	当没有足够空闲时隙时,无法与新接入ONU建立通信
利用低幅低频信号	在低幅低频信号上发现ONU、测距ONU	还未完全解决低幅低频信号的正确识别问题
DAW	在DAW上发现ONU、测距ONU	DAW的获得性受限(但可重用旧系统的上行波长)

DAW: 专用激活波长

ODN: 光分配网络

ONU: 光网络单元

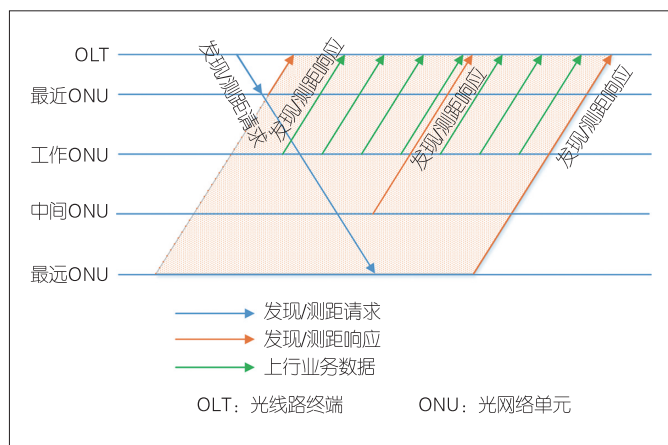
3 基于DAW的低时延50G-PON工作原理

基于DAW的低时延50G-PON是指，在50G-PON的工作波长之外引入额外的DAW，以用于发现和测距ONU的安静窗口，并使其在DAW上开放，从而避免在50G-PON工作波长上开放安静窗口的目的。低时延50G-PON先通过DAW完成ONU的发现和测距，再将DAW上的ONU发现和测距结果应用到50G-PON工作波长上，从而完成50G-PON ONU的激活。如图3所示，上行DAW用于OLT开放安静窗口，待激活ONU在上行DAW的安静窗口内发送发现响应和测距响应。在上行工作波长的对应时隙内，工作ONU可以正常发送上行业务。这里待激活ONU和工作ONU彼此不冲突。

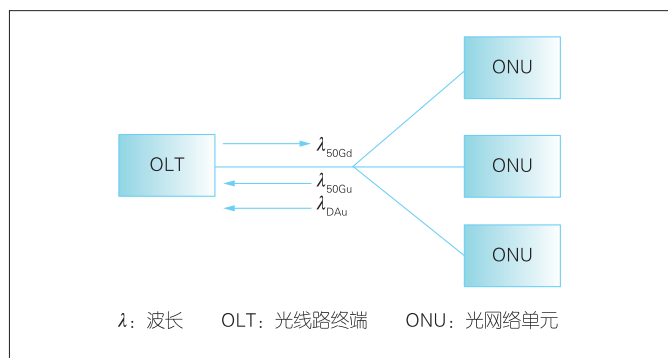
下面我们介绍基于DAW的低时延50G-PON两种实现以及DAW及工作波长的测距结果换算。

3.1 增加一个上行DAW的低时延50G-PON

在50G-PON原有工作波长基础上，我们可以增加一个上行的DAW，如图4所示。



▲图3 基于上行专用激活波长的50G-PON工作原理



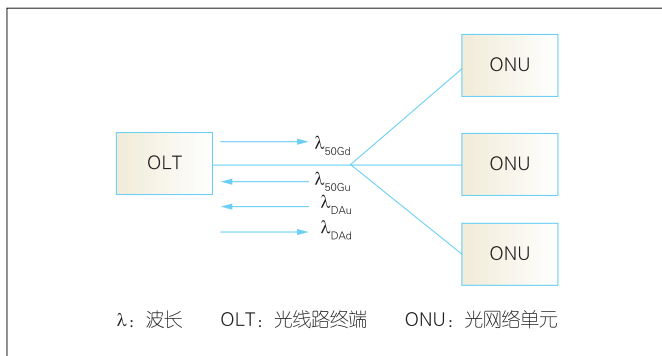
▲图4 基于上行专用激活波长的50G-PON架构

在引入上行DAW的50G-PON系统中，ONU激活工作流程更新为：

- (1) 待激活ONU上电后工作在 λ_{50Gd} 和 λ_{DAu} ，并在 λ_{50Gd} 等待OLT发送的序列号（SN）请求；
- (2) OLT在 λ_{DAu} 上开放安静窗口，并在 λ_{50Gd} 上广播发送序列号（SN）请求；
- (3) 待激活ONU收到SN请求后，在 λ_{DAu} 上发送序列号（SN）；
- (4) OLT在 λ_{DAu} 上获取待激活ONU的SN；
- (5) OLT在 λ_{50Gd} 上给待激活ONU分配ONU身份标识（ONU-ID），在 λ_{DAu} 上开放安静窗口，并在 λ_{50Gd} 上向该ONU发送测距请求；
- (6) 待激活ONU在收到测距请求后，在 λ_{DAu} 上发送测距响应；
- (7) OLT获取测距响应，计算出 λ_{50Gd} 和 λ_{DAu} 上的往返行程时延（RTD）（相关计算过程如公式（1）—（6）所示），并根据波长折射率特性进一步计算出 λ_{50Gd} 和 λ_{50Gu} 上的RTD以及均衡时延，然后将均衡时延发送给ONU；
- (8) ONU收到并应用 $\lambda_{50Gd}/\lambda_{50Gu}$ 上的均衡时延后，开始在 λ_{50Gu} 上工作。

3.2 增加一对上下行DAW的低时延50G-PON

在原有50G-PON原有工作波长基础上，我们可以增加一个上行DAW和下行DAW，如图5所示。



▲图5 基于上下行专用激活波长的无源光网络架构

在引入上行和下行DAW的50G-PON系统中，ONU激活工作流程更新为：

- (1) 待激活ONU上电后工作在 λ_{DAd} 和 λ_{DAu} ，在 λ_{DAd} 上等待OLT发送的SN请求；
- (2) OLT在 λ_{DAu} 上开放安静窗口，并在 λ_{DAd} 上广播发送SN请求；
- (3) 待激活ONU收到SN请求后，在 λ_{DAu} 上发送SN；
- (4) OLT在 λ_{DAu} 上获取待激活ONU的SN；
- (5) OLT在 λ_{DAd} 上给该ONU分配ONU-ID，并在 λ_{DAu} 上开放安静窗口，在 λ_{DAd} 上向该ONU发送测距请求；
- (6) ONU在收到测距请求后，在 λ_{DAu} 上发送测距响应；
- (7) OLT获取测距响应，计算出 λ_{DAd} 和 λ_{DAu} 上的RTD（相关计算过程如公式（7）—（13）所示），并根据波长折射率特性进一步计算出 λ_{50Gd} 和 λ_{50Gu} 上的RTD以及均衡时延，然后将均衡时延发送给ONU；
- (8) ONU收到并应用 $\lambda_{50Gd}/\lambda_{50Gu}$ 均衡时延后，开始在 $\lambda_{50Gd}/\lambda_{50Gu}$ 上工作。

3.3 DAW及工作波长的测距结果换算

在只有一个上行DAW的情况下，DAW测距RTD_{DA}为工作波长下行传输时间 T_{50Gd} 、ONU DAW响应时间 T_{DArsp} 和DAW上行传输时间 T_{DAu} 之和。在测距结果换算过程中，基于50G-PON的系统采用单纤双向传输方式，上下行经过同一根光纤链路。不同波长传输时延之比等于对应波长的光纤折射率之比。 T_{DAu} 可以被换算为工作波长上行传输时间 T_{50Gu} ，如公式（1）—（6）所示。其中， n_{50Gd} 为下行工作波长折射率， n_{DAu} 为DAW折射率， n_{50Gu} 为上行工作波长的折射率，RTD_w为上下行工作波长上的往返时间， T_{wrsp} 为上下行工

作波长时的 ONU 响应时间。

$$RTD_{DA} = T_{50Gd} + T_{DArsp} + T_{DAu}, \quad (1)$$

$$T_{50Gd} = (RTD_{DA} - T_{DArsp}) \times \frac{n_{50Gd}}{n_{50Gd} + n_{DAu}}, \quad (2)$$

$$T_{DAu} = (RTD_{DA} - T_{DArsp}) \times \frac{n_{DAu}}{n_{50Gd} + n_{DAu}}, \quad (3)$$

$$T_{50Gu} = T_{DAu} \times \frac{n_{50Gu}}{n_{DAu}}, \quad (4)$$

$$RTD_w = T_{50Gd} + T_{wrsp} + T_{50Gu}, \quad (5)$$

$$RTD_w = (RTD_{DA} - T_{DArsp}) \times \frac{n_{50Gd} + n_{50Gu}}{n_{50Gd} + n_{DAu}} + T_{wrsp}. \quad (6)$$

在有下行和上行 DAW 的情况下, DAW 测距往返时间 RTD_{DA} 为 DAW 下行传输时间 T_{DAu} 、ONU DAW 响应时间 T_{DArsp} 和 DAW 上行传输时间 T_{DAu} 之和。在测距结果换算过程中, T_{DAu} 可以被换算为工作波长上行传输时间 T_{50Gu} , T_{DAu} 被换算为工作波长下行传输时间 T_{50Gd} , 如公式 (7) — (13) 所示。其中, n_{DAu} 、 n_{50Gu} 分别为上行 DAW 和上行工作波长的折射率, n_{DAu} 、 n_{50Gd} 分别为下行 DAW 和下行工作波长的折射率, RTD_w 为上下行工作波长时的往返时间, T_{wrsp} 为上下行工作波长时的响应时间。

$$RTD_{DA} = T_{DAu} + T_{DArsp} + T_{DAu}, \quad (7)$$

$$T_{DAu} = (RTD_{DA} - T_{DArsp}) \times \frac{n_{DAu}}{n_{DAu} + n_{DAu}}, \quad (8)$$

$$T_{DAu} = (RTD_{DA} - T_{DArsp}) \times \frac{n_{DAu}}{n_{DAu} + n_{DAu}}, \quad (9)$$

$$T_{50Gu} = T_{DAu} \times \frac{n_{50Gu}}{n_{DAu}}, \quad (10)$$

$$T_{50Gd} = T_{DAu} \times \frac{n_{50Gd}}{n_{DAu}}, \quad (11)$$

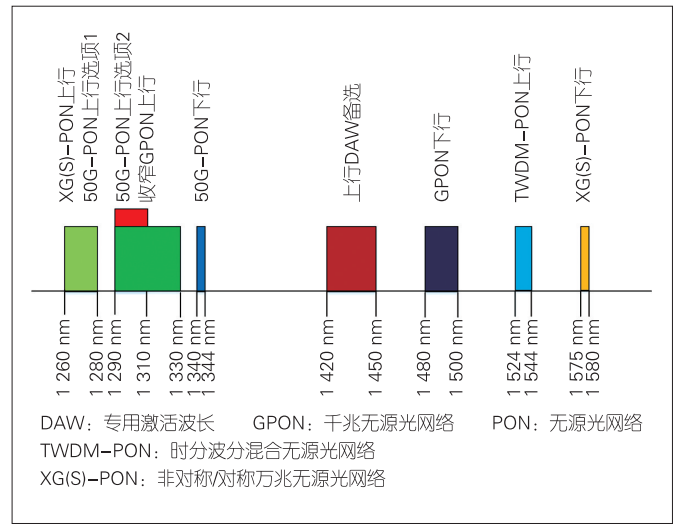
$$RTD_w = T_{50Gd} + T_{wrsp} + T_{50Gu}, \quad (12)$$

$$RTD_w = (RTD_{DA} - T_{DArsp}) \times \frac{n_{50Gd} + n_{50Gu}}{n_{DAu} + n_{DAu}} + T_{wrsp}. \quad (13)$$

G.hsp.ComTC^[4]规定 ONU 响应时间为 $35 \pm 1 \mu s$, 且 ONU 能够获得该响应时间。因此, 按照公式 (6) 和 (13), 并根据测试值 RTD_{DA} 和已知值 T_{DArsp} 、 T_{wrsp} 、 n_{50Gd} 、 n_{50Gu} 、 n_{DAu} 、 n_{DAu} , 我们可以换算得到 RTD_w 。

4 基于 DAW 的低时延 50G-PON 实现

50G-PON 的下行工作波长为 1 340~1 344 nm。50G-PON 的上行工作波长有两个选项: 一个选项是 1 260~1 280 nm, 与非对称/对称万兆无源光网络 (XG(S)-PON) 上行波长重叠; 另一个选项是 1 290~1 310 nm, 与千兆无源光网络 (GPON) 上行波长重叠^[3]。图 6 列出了 50G-PON 的上下行工作波长和其他相关波长。上行 DAW 可以选择一个新定义的波长, 如 1 420~1 450 nm^[5], 也可以选择旧系统中的波长, 例如采用 GPON、XG(S)-PON、时分波分混合无源光网络 (TWDM-PON) 中的上行波长。



▲ 图 6 50G-PON 工作波长及备选 DAW

DAW 与 50G-PON 上下行工作波长的间隔至少为 10 nm, 这可以通过滤波器来实现。另外, 当 DAW 采用旧系统波长时, 虽然旧系统波长带宽被占用, 但是此时发现和测距 ONU 的管理信息所占带宽很小, 对旧系统的影响可以忽略。

4.1 场景 A: 新定义一个波长作为 DAW

在该场景中, 低时延 50G-PON 包含 3 个波长, 如表 3 所示。

4.2 场景 B: 利用旧系统中的上行波长作为 DAW

我们假设 50G-PON 采用与 GPON 重叠的上行波长, 旧系统为 XG(S)-PON, 50G-PON 和旧系统共存, 并且包含 4 个波长, 如表 4 所示。在该场景中, 50G-PON 和 XG(S)-PON 需协调开放安静窗口。

4.3 场景 C: 利用旧系统中的上下行波长作为 DAW

该场景中 50G-PON 采用 GPON 上行波长, 旧系统为 XG

(S)-PON, 50G-PON 和旧系统共存, 包含 4 个波长, 旧系统中的上下行波长共同完成 DAW 功能, 如表 5 所示, 在该场景中 50G-PON 和 XG(S)-PON 能够共享发现信息和测距信息。

▼表 3 新定义上行 DAW 场景

系统波长	波长范围/nm
50G-PON 下行波长	1 340~1 344
50G-PON 上行波长	1 260~1 280 或者 1 290~1 310
上行 DAW	1 420~1 450

DAW: 专用激活波长

PON: 无源光网络

▼表 4 重用旧系统上行 DAW 场景

系统波长	波长范围/nm
50G-PON 下行波长	1 340~1 344
50G-PON 上行波长	1 290~1 310
上行 DAW	XG(S)-PON 的上行波长 1 260~1 280
协调波长	XG(S)-PON 下行波长 1 575~1 580

DAW: 专用激活波长

PON: 无源光网络

XG(S)-PON: 非对称/对称万兆无源光网络

▼表 5 重用旧系统上下行 DAW 场景

系统波长	波长范围/nm
50G-PON 下行波长	1 340~1 344
50G-PON 上行波长	1 290~1 310
上行 DAW	XG(S)-PON 的上行波长 1 260~1 280
下行 DAW	XG(S)-PON 的下行波长 1 575~1 580

DAW: 专用激活波长

PON: 无源光网络

XG(S)-PON: 非对称/对称万兆无源光网络

5 基于 DAW 的低时延 50G-PON 验证

低时延 50G-PON 除了用于消除安静窗口的 DAW 外, 还可以改进动态带宽分配, 例如采用协作动态带宽分配 (CO-DBA)、固定带宽分配、多次带宽授权等带宽分配措施以降低时延。

在实际 DAW 时延效果验证测试中, 系统的具体配置为: XGS-PON 作为低时延 PON, GPON 上下行波长用于 DAW, GPON ONU 完成激活后的发现信息可用于 XGS-PON ONU, GPON ONU 测距结果经过换算后用于 XGS-PON ONU。OLT 和 ONU 之间光纤长度 10 km, XGS-PON ONU 采用固定带宽分配, 每 125 μ s 分配 16 次。ONU 上行总带宽为 1 Gbit/s, 发送上行流量为 950 Mbit/s, 数据包长为 1 518 B, 并且数据包从 ONU (用户网络接口 UNI) 侧端口发送、从 OLT 网络节点接口 (NNI) 侧端口接收。测试结果显示, 最大时延不超过

90 μ s。

6 结束语

本文通过引入 DAW 以消除 50G-PON 工作波长上的安静窗口, 解决了 50G-PON 中安静窗口带来的时延问题。结合相应的带宽分配方法, 基于 DAW 的方法能够使 50G-PON 系统满足承载 5G 前传的时延要求。本文所述的 DAW 方法已经被 ITU-T G.Sup66^[2]、G.hsp.ComTC^[4] 标准所采纳。

参考文献

- [1] ITU. Higher speed passive optical networks - requirements: ITU-T G.9804.1 [S]. 2019
- [2] ITU. 5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context: ITU-T G.Sup66 [S]. 2020
- [3] ITU. 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): physical media dependent (PMD) layer specification: ITU-T G.hsp.50Gpmd [S]. 2021
- [4] ITU. Higher speed passive optical networks: common transmission convergence layer specification: ITU-T G.hsp.ComTC [S]. 2021
- [5] ZHANG W. Discussion on band plan of dedicated activation wavelength [Z]. 2020

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; 主持和参加多项国家“863”项目、省部级重点项目; 获中国专利优秀奖、深圳市专利奖; 发表论文 10 余篇, 获授权专利 100 余项。



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; 主持和参加多项国家“863”项目、省部级重点项目; 获国家科学技术进步奖二等奖 1 项、电子学会科学技术进步奖一等奖 1 项、深圳市科技进步奖二等奖 1 项, 获发明专利 10 余项。



马壮, 中兴通讯股份有限公司固网产品技术预研负责人; 长期从事固网宽带和光接入产品技术预研、规划和开发工作; 承担多项国家“863”项目和省部级项目; 获国家科技进步奖二等奖、深圳市科技进步奖和中国通信学会科学技术奖; 发表论文 10 余篇, 申请发明专利 20 余项。