

OFDM-PON MAC注册协议设计与实现

马嘉宇, 张俊杰

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444)

摘要:针对现有时分复用无源光网络(TDM-PON)注册上线协议无法适应正交频分复用无源光网络(OFDM-PON)系统中光网络单元(ONU)信道差异的问题,提出了一种新型OFDM-PON媒质接入控制(MAC)注册协议。该协议以传统吉比特无源光网络(GPON)为参考,在ONU完成测距到正式工作过程中增加了信道侦听过程,使光网络单元(OLT)和ONU能确定ONU的最佳通信速率和对应的子载波比特承载方案。通过Vivado和Modelsim以40 Gb/s OFDM-PON为场景搭建了仿真模型,对OLT与ONU的一对一注册流程进行了仿真验证。实验结果表明,新型OFDM-PON MAC注册协议能够在10~40 Gb/s的速率范围内动态适配ONU信道条件,通过迭代试探完成速率和子载波比特承载方案的协商。

关键词:时分复用无源光网络;媒质接入控制协议;信道侦听

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0115-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.019

Design and implementation of OFDM-PON MAC registration protocol

MA Jiayu, ZHANG Junjie

(Shanghai University, School of Communication & Information Engineering, Shanghai 200444)

Abstract: To address the issue that the existing registration and activation protocol of time division multiplexing passive optical network(TDM-PON) cannot adapt to the channel diversity of optical network unit(ONU) in orthogonal frequency division multiplexing passive optical network(OFDM-PON) systems, a novel medium access control(MAC) registration protocol for OFDM-PON is proposed. Based on the conventional gigabit passive optical network(GPON), the proposed protocol adds a channel sensing process between ranging and normal operation, enabling the optical line terminal(OLT) and ONU to determine the optimal communication rate and the corresponding subcarrier bit-loading scheme. A simulation model is built using Vivado and Modelsim for a 40 Gb/s OFDM-PON scenario, and the one-to-one registration procedure between OLT and ONU is verified. Experimental results show that the novel OFDM-PON MAC registration protocol can dynamically adapt to ONU channel conditions within the rate range of 10~40 Gb/s, negotiate the rate and subcarrier bit-loading scheme through iterative probing.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing passive optical network, media access control protocol, channel detecting

0 引言

随着光接入网技术的不断演进,基于无源光网络(PON)的宽带接入技术在近十年来取得了快速发展。传统的时分复用无源光网络(TDM-PON)和波分复用

无源光网络(WDM-PON)技术较为成熟并已逐步商用。而正交频分复用无源光网络(OFDM-PON)则凭借其频谱利用率高、带宽分配灵活以及抗色散能力强等优点已成为下一代PON的候选技术之一^[1-3]。

媒质接入控制(MAC)层是PON系统的核心控制层,主要用于实现对光网络单元(ONU)的发现与注册上线、接入控制、共享同一上行信道等功能,并实现高效、公平的带宽分配。高效的MAC层机制可以有效提升OFDM-PON系统的吞吐量,并保证整个网络的服务质量^[4-5]。Bang H等人^[6]对OFDM-PON中ONU的注册上线流程进行了数学建模分析,提出了一种使用多个

收稿日期:2025-04-13。

作者简介:马嘉宇(1999—),男,硕士研究生,现就读于上海大学通信与信息工程学院电子信息专业,主要从事正交频分复用无源光网络的研究与FPGA开发。



马嘉宇,张俊杰: OFDM-PON MAC 注册协议设计与实现

子信道发现未注册 ONU 的方法,确保了对已注册 ONU 业务传输的无缝支持。但全文仅是数学建模分析,并没有与实际 OFDM-PON 场景相结合,且缺少对于 MAC 注册具体流程方面的内容。乔耀君等人^[7]在以太网无源光网络(EPON)的帧结构上进行了扩展,以适配 OFDM-PON 的时频二维带宽调度需求,在此基础上设计了一种适用于 OFDM-PON 的 MAC 注册协议,并引入了一种基于两级调度机制的动态带宽分配算法,在时延、丢包率、吞吐量等方面实现了对不同优先级业务的服务质量保障,但该文没有考虑 ONU 与 OLT 的距离不同而存在的信道差异。

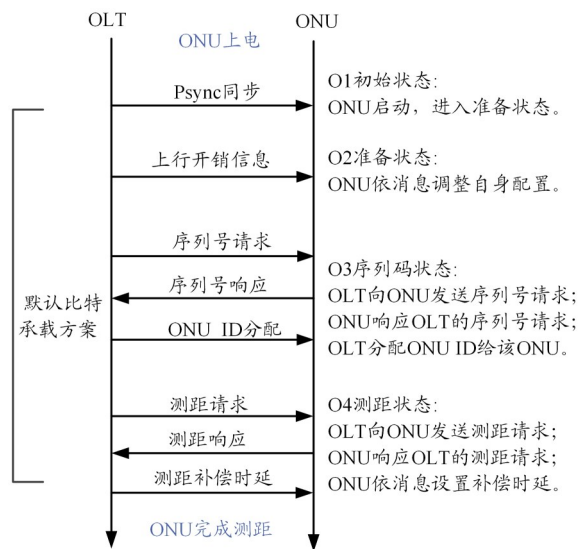
不同 ONU 在限定误码率情况下所能支持的最高通信速率和子载波调制格式是不同的^[8],MAC 注册协议需要适应 ONU 的信道差异。目前,成熟的 MAC 协议中,IEEE 802.3ah 为 EPON 定义了多点控制协议来实现系统的上线,通过 5 个控制帧和 2 个相应的工作模式支持 EPON 高效有序的数据传输;ITU-T G.984.3 协议为吉比特无源光网络(GPON)的注册上线流程定义了标准,通过 GPON 帧结构中的 PLOAM、BWMap 字段进行 OLT 与 ONU 的控制信息交互,实现了 ONU 从上电到准备、发现、注册、测距、正常工作等状态的跳转^[9-10]。但这些都无法解决 OFDM-PON 中 ONU 的信道差异问题,基于此,本文研究并设计一种新型 OFDM-PON MAC 注册协议。

1 OFDM-PON MAC 注册协议及帧结构

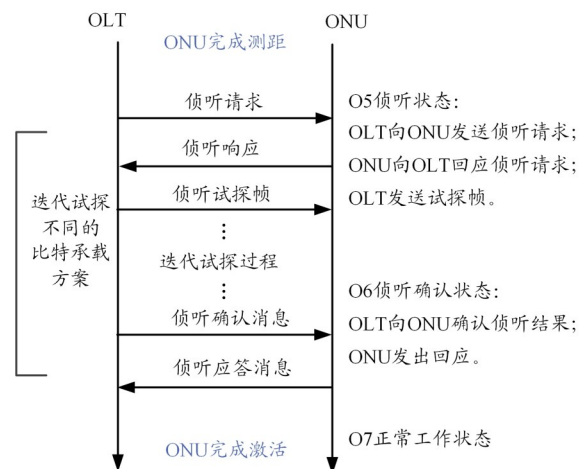
1.1 OFDM-PON MAC 注册协议

考虑到现有 MAC 注册协议中,GPON 比 EPON 有更强的带宽分配灵活性、安全管理功能、多业务融合能力等优点^[11]。因此,本文以 ITU-T G.984.3 注册协议为参考,在原有协议的基础上新增了信道侦听过程以解决 ONU 的信道差异问题,设计了一种适配 OFDM-PON 系统的 MAC 注册协议,协议流程图如图 1 所示。

图 1 中,注册流程部分保留了 GPON 使用的多种控制信号和交互流程。ONU 在刚上电时处于 O1 初始状态,在收到连续 2 帧带有正确 Psync 同步信号的下行帧时会进入 O2 准备状态;在 O2 准备状态下,ONU 会等待接收 OLT 发送的上行开销信号,该信号是 OLT 定时发送的广播信号,包含一些工作参数。ONU 根据该信号完成工作参数的配置后进入 O3 序列码状态;在 O3 状态下,ONU 在收到 OLT 发送的序列号请求 SN_Request 信号后进行响应,OLT 在收到 ONU 的响应后给 ONU 分配 ONU-ID,ONU 随后进入到 O4 测距状态;在



(a) 注册流程部分



(b) 信道侦听部分

图 1 OFDM-PON MAC 注册协议流程图

O4 测距状态下,OLT 会给所有工作中的 ONU 开启一个 $202 \mu\text{s}$ 的安静窗口(包含最大 $200 \mu\text{s}$ 的传输距离往返时延和 ONU 的 $2 \mu\text{s}$ 响应时间差)停止上行业务的发送,并给待注册 ONU 发送测距请求,在收到 ONU 的测距响应后计算并通过发送 Ranging_Time 为该 ONU 分配补偿时延,ONU 在收到 Ranging_Time 信号后跳转进入 O5 侦听状态。

由于 OFDM-PON 中每个子载波有不同的调制格式,不同的调制格式决定了子载波在一次调制过程中能够承载的比特值。本文假设在 OFDM-PON 系统中共有 N 个子载波,每个子载波在一次调制过程中能够承载最多 M 个比特数,对应每个子载波能够使用二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)、8 进制正交幅度调制(8-QAM)到 2^M -QAM 共 M 种调制格式。

在ONU进入侦听状态之前,本文约定OLT与ONU的交互信息默认采用BPSK调制格式,以保证系统能够正常通信。

相比传统协议,本文新增加了信道侦听部分,以实现OLT与ONU确认待注册ONU的最佳通信速率以及对应的子载波承载方案。

O5侦听状态为迭代试探过程,OLT向ONU发送侦听请求信号BL_Detecting_Request,询问ONU是否进行侦听测试。ONU采用“注水”算法^[12]计算各子载波比特承载方案和通信速率,以侦听回复信号BL_Detecting_Response发送给OLT。OLT收到ONU的侦听回复信号后生成一个包含固定比特格式测试序列的侦听试探帧BL_Detecting_Probing,并按照BL_Detecting_Response中子载波比特承载方案发送测试序列部分。

ONU接收到BL_Detecting_Probing后,按照对应的子载波比特承载方案将测试序列解出与固定比特格式对比并进行误码率计算。ONU在本地预定义一个误码率值的阈值,如果计算得到的误码率结果小于该阈值,表示该ONU能够支持此通信速率,则ONU将在下一次迭代试探中提升需要测试的通信速率。直到计算得到的误码率结果超出阈值,ONU回复带有结束迭代试探过程的标识,与OLT保留迭代试探过程中测试通过的最高通信速率及对应的子载波承载方案为测试结果,进入到O6侦听确认状态。

在O6侦听确认状态,OLT向ONU发送带有侦听结果的侦听确认信号BL_Detecting_Confirm。ONU收到BL_Detecting_Confirm后,对比确认侦听结果正确并回复BL_Detecting_Ack侦听应答信号,进入O7正常工作状态。

1.2 OFDM-PON MAC帧结构设计

1.2.1 下行帧结构设计

本文的MAC帧结构以GPON为参考,下行帧结构

如图2所示,共分为空余字段IDLE、下行物理层控制块PCBd和载荷域Payload三部分,整帧长度固定为125 μs。其中,IDLE是一段留白区域,OLT物理层收到下行MAC帧后会在IDLE处添加上一段训练序列用于符号同步和信道估计,形成一个完整的OFDM-PON帧。这段区域的长度根据OFDM-PON物理层具体情况确定;PCBd部分用于传输控制和管理信息,包括用于给ONU同步的Psync字段、标识下行帧顺序的Ident字段、控制管理维护的(PLOAMd)字段、奇偶校验BIP字段、Plend字段(指示Payload整体长度)和BWMap字段(指示ONU上行带宽分配);Payload部分是数据净荷段,会承载多个ONU的下行业务数据,当OLT向ONU发送BL_Detecting_Probing侦听试探帧时,Payload域的头部分会填充一段固定比特格式的数据段。

OFDM-PON下行MAC帧发送至OLT物理层后,物理层对其进行训练序列的添加、加扰、编码、星座映射等一系列操作,经过分光器发送至ONU端物理层。ONU端物理层进行一系列逆处理后解出下行MAC帧数据送入ONU端的MAC层,提取各字段信息。

在注册上线过程中,OLT主要通过PLOAMd的Message ID区域和BWMap的Flags区域向注册中的ONU指示所发送的信号类型。本文在O1~O4状态中使用的控制信号格式与ITU-T G.984.3协议一致;在O5、O6信道侦听过程中,OLT使用的控制信号通过Message ID区域标识,具体格式如表1所示。

表1 OLT信道侦听部分控制信号格式表

信号名称	信号功能	Message ID格式
BL_Detecting_Request	发起侦听请求	0010_0001
BL_Detecting_Probing	侦听试探帧	0010_0010
BL_Detecting_Confirm	侦听确认信号	0010_0100

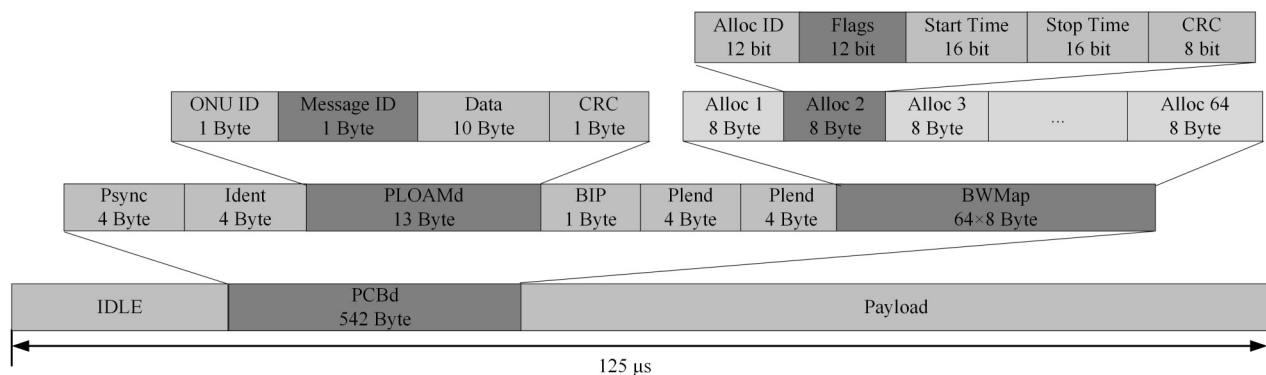


图2 下行帧结构图

1.2.2 上行帧结构设计

OFDM-PON 系统的上行帧由多个 ONU 上行帧组成, 本文设计的单个 ONU 上行帧是一个长度小于 125 μs 的不定长帧, 其每次的发送长度按照下行帧中 BWMap 指示的长度发送。上行帧结构图如图 3 所示, 包含空余字段 IDLE, 物理层开销 PLOu, 上行物理层操作、维护和管理 PLOAMu, 上行功率控制序列 PLSu, 上行动态带宽报告 DBRu 以及载荷域 Payload 部分。其中, IDLE 空余字段的作用与下行帧相同。

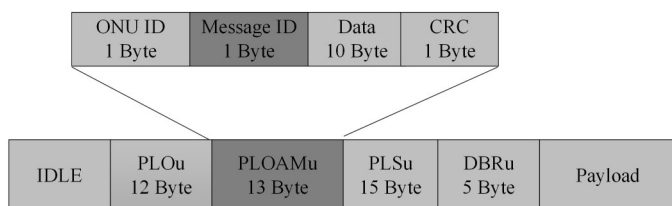


图3 上行帧结构图

在注册上线过程中, ONU 同样通过 PLOAMu 中的 Message ID 区域向 OLT 指示所发送的信号类型。在信道侦听部分, ONU 使用的新增控制信号格式如表 2 所示。另外, 在信道侦听过程中 OLT 发送的 BL_Detecting_Confirm 和 ONU 发送的 BL_Detecting_Response 都会携带通信速率及对应的 N 个子载波比特承载方案信号。本文约定通信速率及子载波比特承载方案的具体内容由 PLOAM 字段中 10 Byte 的 Data 区域携带。其中, Data 区域的第一个字节用于携带通信速率信号, 其余字节携带该通信速率对应的子载波承载方案。

表2 ONU 信道侦听过程控制信号格式表

信号名称	信号功能	Message ID 格式
BL_Detecting_Response	继续侦听	0010_0001
	结束侦听	0010_0010
BL_Detecting_Ack	侦听应答信号	0010_0100

2 仿真模型搭建

本文通过 Vivado 设计套件和 Verilog 硬件描述语言搭建仿真模型, 并通过 Modelsim 仿真软件进行测试。因为搭建仿真模型旨在验证信道侦听过程能否解决 ONU 的信道差异问题, 所以对 OLT 与 ONU 的交互过程进行了简化, 仿真实验模型如图 4 所示。

本文将 OLT 与 ONU 模块相连, 频率为 200 MHz 的同步时钟信号 sys_clk 和低电平有效的异步复位信号 rst_n 为驱动信号, OLT 与 ONU 之间每 125 μs (对应每

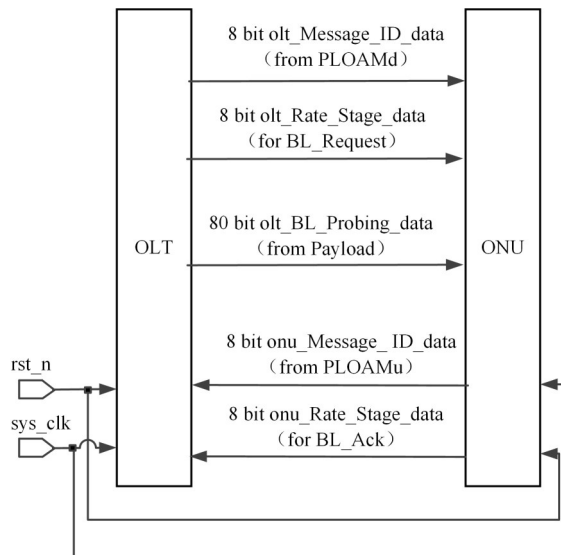


图4 仿真实验模型

25 000 个时钟节拍) 直接传递与信道侦听过程相关的控制信号。控制信号包括: OLT 向 ONU 发送的 olt_Message_ID_data、olt_Rate_Stage_data、olt_BL_probing_data; ONU 向 OLT 发送的 onu_Message_ID_data 和 onu_Rate_Stage_data。

olt_Message_ID_data 和 onu_Message_ID_data 信号对应上下行帧中 PLOAM 结构中的 Message ID 字段, 用于指示信道侦听过程中的控制信号类型。

olt_BL_probing_data 信号是侦听试探帧中采用固定比特格式的数据段, 格式为 0x94a5294a5294a5294a52。通常 BL_Detecting_Probing 的侦听测试序列的比特长度至少应保证: 当 OFDM-PON 中每个子载波都采用最大调制比特数时, 该测试序列的长度能够满足子载波数据的填充需求。在本仿真实验模型中, 为简化通信流程并仅对信道侦听的流程进行验证, 将序列长度设置为 80 bit。

olt_Rate_Stage_data 和 onu_Rate_Stage_data 信号对应 PLOAM 字段中 Data 区域的第一个字节, 用于携带 BL_Detecting_Response 和 BL_Detecting_Confirm 信号中包含的通信速率。Data 区域的剩余字节会携带各子载波比特承载方案, 在仿真验证的过程中 Data 域只会传输一个字节的的数据以区分不同的通信速率。

在仿真模型的搭建中, 本文以测试最高支持 40 Gb/s 通信速率的 OFDM-PON 为例, 将其通信速率分为了 4 个等级, 并且所有子载波采用统一的调制格式。每一种速率等级对应一种具体的通信速率大小以及子载波承载方案, 通过 8 bit 的 olt_Rate_Stage_data 和 onu_Rate_Stage_data 信号指示, 速率分级表如表 3 所示。

表3 40 Gb/s OFDM-PON速率分级表

速率等级	通信速率/(Gb/s)	信号格式	调制格式
等级1	10	0000_0001	BPSK
等级2	20	0000_0010	QPSK
等级3	30	0000_0011	8QAM
等级4	40	0000_0100	16QAM

其中,速率级别1定义为系统的默认速率级别。ONU在测试过程中会在本地预先分配一个通信速率等级,以模拟在真实OFDM-PON场景中该ONU所能支持的最高通信速率。OLT与ONU会从默认的级别1开始,按照信道侦听过程由低到高不断提升测试的速率等级,直到超出ONU分配到的速率等级。

3 实验与结果

本文首先对OLT与ONU模块进行了仿真验证,以测试模块的逻辑设计是否正确。将ONU的模拟速率等级设置为等级2,OLT与ONU模块在1000 ns后收到rst_n复位信号激活。然后对OLT与ONU的整体信道

侦听流程进行仿真测试,以验证本文所设计的OFDM-PON注册协议的正确性。

3.1 OLT仿真

本文通过状态机设计S1~S6状态以实现OLT在O5、O6信道侦听过程中的各个功能。状态机信号olt_BL_state通过独热码编码,S1~S3实现OLT在O5状态下的功能,S4~S6实现OLT在O6状态下的功能。

图5为OLT在O5状态下的仿真图。当系统启动/复位后,OLT被激活,从S1状态转入S2状态;S2状态下,OLT会发送侦听请求信号BL_Detecting_Request,olt_Message_ID_data值对应为8'b0010_0001,并等待ONU发送的侦听回复信号BL_Detecting_Response。收到侦听回复信号则继续侦听,OLT进入S3状态,发送侦听试探帧,然后重新回到S2状态进入下一次的迭代试探。OLT发送下行控制信号是按照125 μs的帧周期发送的,数据发送经过了延时处理,因此图5中olt_BL_state信号与OLT的输出信号在每125 μs处不是同步的。

图6为OLT在O6状态下的仿真图。最后一次侦听过程中OLT收到侦听回复信号BL_Detecting_Response,ONU需要测试的速率等级为等级3,onu_Rate_

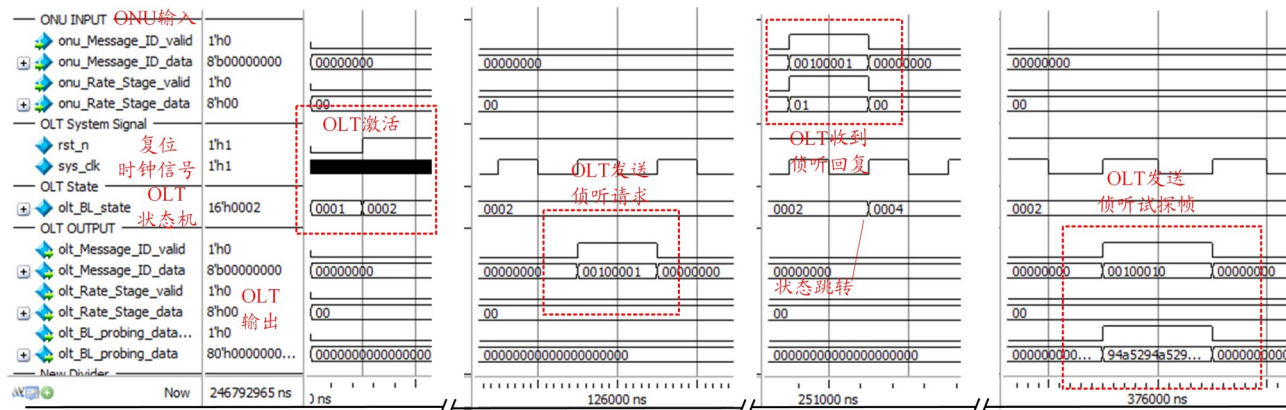


图5 OLT在O5状态下的仿真图

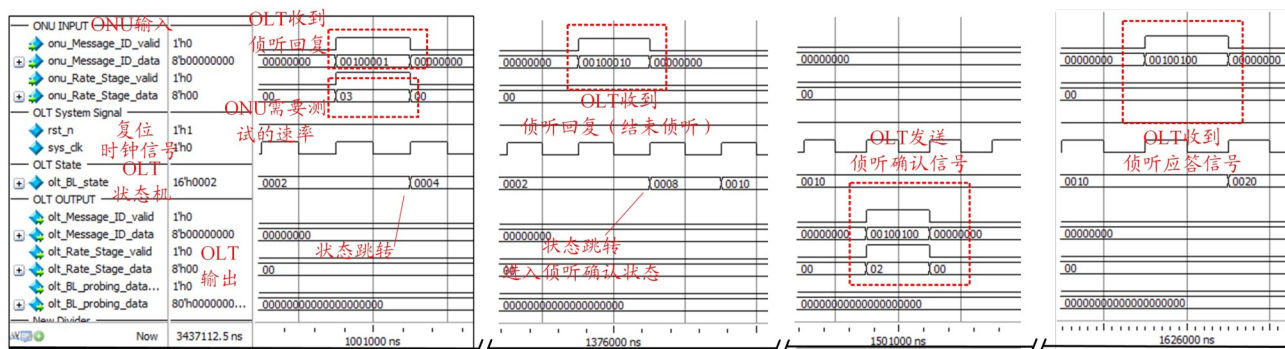


图6 OLT在O6状态下的仿真图

马嘉宇,张俊杰: OFDM-PON MAC 注册协议设计与实现

Stage_data 信号的通过值为 8'h3。完成最后一次侦听试探后,OLT 收到 ONU 发送的代表结束侦听的侦听回复,olt_BL_state 转入 S4 状态;在 S4 状态下,OLT 会发送侦听确认信号 BL_Detecting_Confirm,对应 olt_Message_ID_data 的值为 8'b0010_0100,并带有值为 8'h2 的 olt_Rate_Stage_data 的速率等级信号。侦听试探过程后,ONU 能够支持的最高速率等级为等级 2。随后 OLT 进入 S5 状态,在收到 ONU 发送的侦听应答信号后进入 S6 状态,结束整个信道侦听过程。

3.2 ONU 仿真

图 7 与图 8 为 ONU 的仿真图,ONU 同样通过状态机 onu_BL_state 信号实现信道侦听过程中的功能,共设 S1~S7 共 7 个状态,其中 S1~S4 状态实现 O5 状态下的功能,S5~S7 实现 O6 状态下的功能。另外,stage_local_test 信号是 ONU 预先分配的速率等级,testing_Stage 信号是 ONU 本地记录的测试中速率等级,ONU 通过该信号判断在侦听回复时向 OLT 回复的速率等级。testing_Stage 信号会在每次收到正确的侦听试探数据时进行一次累加,直到超出 ONU 预先分配的速率等级。

在系统启动/复位后,ONU 从 S1 状态开始,收到 OLT 的侦听请求后跳转进入 S2 状态;S2 状态下,ONU 按照 125 μ s 的帧周期定时发送侦听回复信号 BL_De-

tecting_Response,并通过 onu_Rate_Stage_data 信号告知 OLT 需要测试的速率等级,进入 S3 状态等待 OLT 发送侦听试探帧;在 S3 状态下,ONU 对收到的侦听试探帧进行解析,当收到的侦听数据段正确(格式为 0x94a5294a5294a5294a52)且本轮侦听过程的测试速率等级没有超过 ONU 预先分配的速率等级时,ONU 会回到 S1 状态,继续下一轮的侦听;当测试速率超出预先分配的速率等级时,ONU 状态会进入 S4 状态。

在 S4 状态,ONU 会等待 OLT 发送的最后一次侦听请求,并生成代表结束侦听的侦听回复信号,在下一个帧周期时刻发送,进入到 S5 状态;在 S5 状态下,ONU 等待 OLT 发送的侦听确认信号,并对 OLT 端的速率测试结果 olt_Rate_Stage_data 进行比对。如果 OLT 端的测试结果正确,则 ONU 进入 S6 状态,在下一个帧周期时刻回复侦听应答信号,结束整个信道侦听过程,进入 S7 工作状态。

3.3 信道侦听过程仿真

在对 OLT 和 ONU 进行仿真验证后,本文对信道侦听过程进行了仿真验证,信号侦听过程仿真图如图 9 所示。为了便于观察,本文新增 5 种控制信号(Control Message flag 中的 5 种信号)并对其进行标记。当 OLT 与 ONU 发送的 Message ID 信号值对应某种控制信号

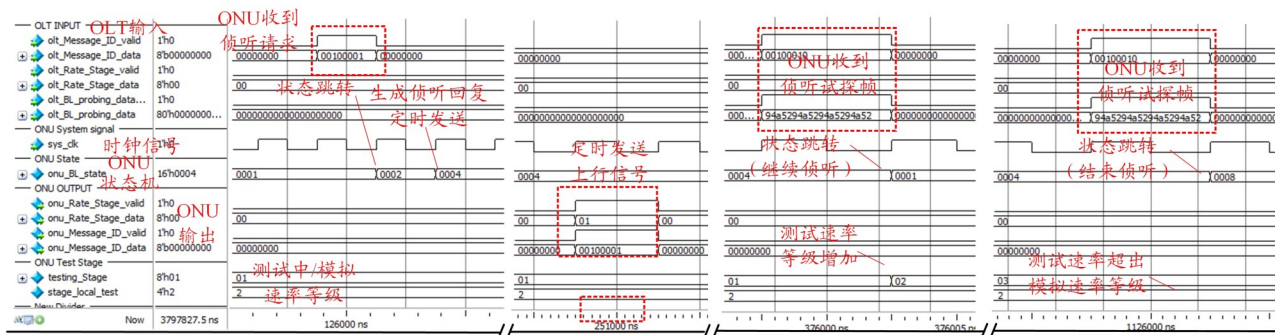


图7 ONU在O5状态下的仿真图

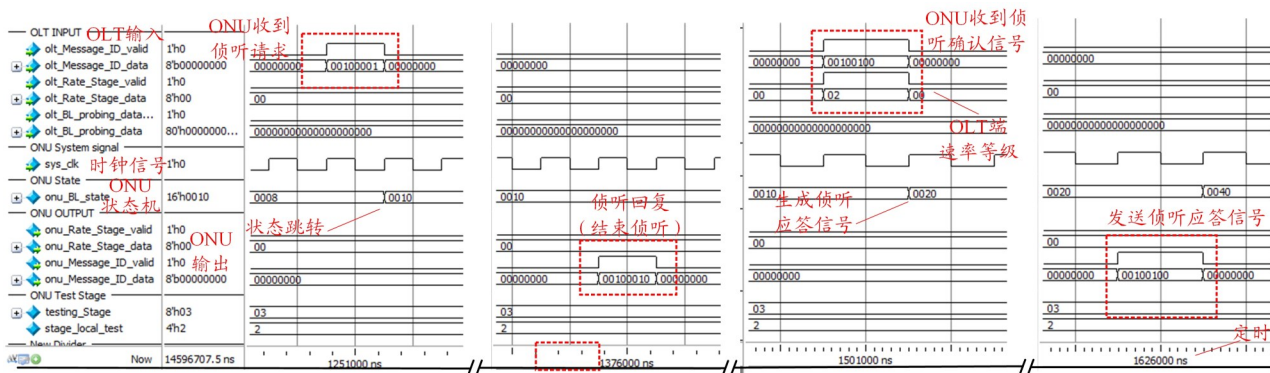


图8 ONU在O6状态下的仿真图

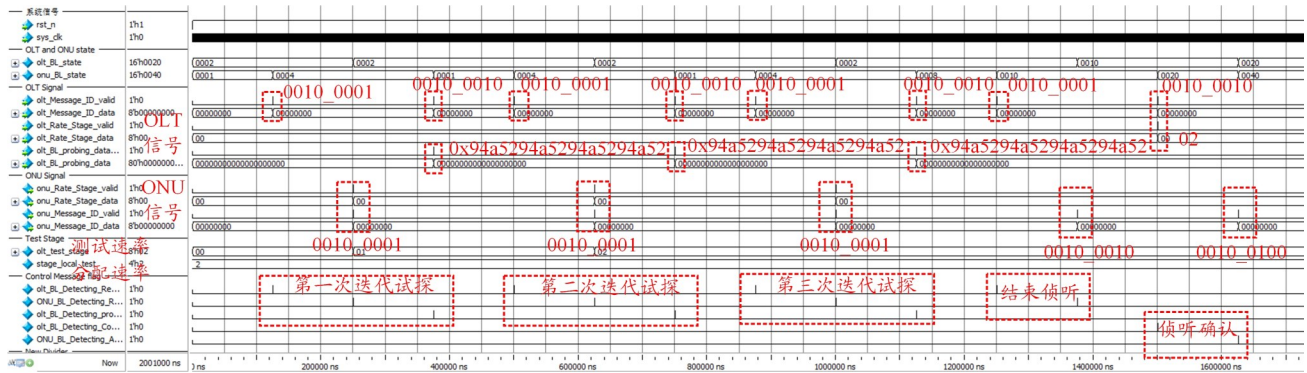


图9 信道侦听过程仿真图

类型时,该信号的flag值将会拉高。从图9可以看出,OLT与ONU共进行了3次迭代试探过程,对应ONU的本地模拟测试速率等级为2,需要先进行速率等级1~3的3次侦听试探。每一次迭代试探后,OLT通过收到下一次ONU的侦听回复判断本次侦听测试采用的速率等级是否能通过。如果侦听通过,OLT通过olt_test_stage信号记录测试通过的速率等级。

在3次迭代侦听后,ONU给OLT发送侦听回复告知结束侦听,进入侦听确认状态。在侦听确认状态中,OLT与ONU确认侦听结果(等级2),结束侦听过程。

4 结束语

本文设计了一种新型OFDM-PON MAC注册协议,并在40 Gb/s OFDM-PON场景上建立了OLT与ONU的仿真实验模型。将系统总通信速率分为4种速率等级(10~40 Gb/s),对OLT与ONU的整个信道侦听过程进行了仿真。仿真结果表明,注册协议中OLT与ONU在逻辑上设计合理正确,并且在通过整个信道侦听过程后,OLT与ONU能互相确认ONU符合信道条件的通信速率,解决了OFDM-PON场景中ONU的信道差异问题,为后续OFDM-PON的大规模实际部署提供了技术储备。

参考文献:

- [1] 吕浩田,张涛,苏发富. OFDM技术应用及其发展趋势[J]. 无线通信, 2020, 10(5): 58-64.
- [2] 赵佳荷. 实时OFDM-PON系统节能方案及关键技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
- [3] 张阔. 高速直调直检光接入网关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [4] 刘亚帆, 邹彦昭, 王旺, 等. 基于物理帧结构特性的OFDMA-PON的MAC层机制[J]. 光通信技术, 2016, 40(6): 17-20.
- [5] Cvijetic N. OFDM for next-generation optical access networks[J]. Journal of lightwave technology: a joint IEEE/OSA publication, 2012, 30(4): 384-398.
- [6] Bang H, Doo K H, Lee J, et al. ONU discovery using multiple sub-channels for seamless service support in long-reach OFDMA-PON[J]. Optics express, 2014, 22(18): 22133-22145.
- [7] 乔耀军, 丁福玲, 纪越峰. OFDM-PON的媒质接入控制协议设计[J]. 光子学报, 2013, 42(6): 654-660.
- [8] 叶飞. 正交频分复用无源光网络注册激活方法、装置和系统 CN201380003033.5[P]. 2018-04-20.
- [9] IEEE Std 802.3ah-2004 Standard for ethernet passive optical network (EPON): media access control (MAC) parameters, physical layers, and management parameters for subscriber access networks[S].
- [10] ITU-T G984.3 Gigabit-capable passive optical networks(GPON): transmission convergence layer specification[S].
- [11] 熊余. 下一代无源光网络[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [12] Linden R V D, Tran N C, Tangdiongga E, et al. Increasing flexibility and capacity in real PON deployments by using 2/4/8-PAM formats[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(1): A1-A8.