

基于组内互联的混合 ONU 工作模式节能 OFDM-PON 系统

田雅倩^{1,2,3},张俊杰^{1,2,3},赵佳荷^{1,2,3}(1.上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室,上海 200444; 2.上海大学 特种光纤与
先进通信国际合作联合实验室,上海 200444;3. 上海大学 上海市先进通信与数据科学研究院,上海 200444)

摘要:为减少传统正交频分复用无源光网络(OFDM-PON)下行链路中不必要的能源耗费,提出了一种基于组内互联的混合光网络单元(ONU)工作模式的节能 OFDM-PON 系统。该系统将 ONU 划分为多个由一个主 ONU(M-ONU)和几个子 ONU(S-ONU)组成的组播组。组播帧仅在 M-ONU 处进行一次解调,解调后的非归零码(NRZ)数据经互联端口发送给 S-ONU, S-ONU 仅需进行光电转换即可发送给用户,避免了额外数字信号处理(DSP)模块能耗。分析结果表明:与传统方案相比,该节能系统在不同的组播组成员个数情况下都能达到良好的 ONU 端节能效果。

关键词:正交频分复用无源光网络;节能;组播组;混合 ONU 工作模式

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)07-0045-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.07.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hybrid ONU working mode based on intra-group interconnection energy-saving OFDM-PON system

TIAN Yaqian^{1,2,3}, ZHANG Junjie^{1,2,3}, ZHAO Jiahe^{1,2,3}

(1. Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to decrease the unnecessary energy consumption in the traditional orthogonal frequency division multiplexing passive optical network (OFDM-PON) downlink, this paper proposes a hybrid optical network unit (ONU) working mode based on intra-group interconnection energy-saving OFDM-PON system. The system divides the ONU into multiple multicast groups consisting of one master ONU(M-ONU) and slave child ONUs(S-ONUs). The multicast frame is demodulated only once at the M-ONU, and the demodulation non-return to zero (NRZ) data is sent to the S-ONU through the interconnect port. The S-ONU only needs to perform photoelectric conversion to be sent to the user, thereby avoiding the energy consumption of the additional digital signal processing (DSP) module. The analysis results show that compared with the traditional solution, the energy-saving scheme can achieve fine ONU energy-saving effect under different multicast group members.

Key words: OFDM-PON; energy-saving; multiple multicast groups; hybrid ONU working mode

0 引言

随着带宽需求的增加,宽带接入网络消耗了所有

收稿日期:2019-03-09。

基金项目:国家自然科学基金重点基金(项目编号:61420106011,61601279,61601277,61635006)资助;上海市科学与技术委员会科研计划重点项目(项目编号:18511103400,17010500400,15530500600,16511104100,16YF1403900)资助。

作者简介:田雅倩(1993-),女,汉族,硕士研究生,就读于上海大学通信与信息工程学院,多次获得学业奖学金。主要研究方向是 OFDM-PON 系统的节能技术、OFDM 信号处理技术、光通信技术;读研期间,参与了“OFDM-PON 理论与关键技术研究”和“OFDM-PON 新型光接入系统关键技术研究”项目。



通信网络 70%以上的能量^[1,2],宽带通信网络的信息技术产业已成为世界五大能源消费产业之一。在光纤接入网中,一个光线路终端(OLT)往往要支持数十个光网络单元(ONU),导致 ONU 端占据了接入网 80%左右的耗能^[3]。在正交频分复用无源光网络(OFDM-PON)中,ONU 端需要高速的模数转换器(ADC)和复杂的数字信号处理(DSP)芯片^[4],其耗能量比传统的无源光网络多。因此,如何减少 OFDM-PON 中 ONU 端的功耗成为实现绿色光网络亟待解决的问题。

本文在信号翻转率控制的基础之上,将 ONU 组内互联技术引入 OFDM-PON 系统中,针对下行链路

中存在组播帧的场景,提出一种基于组内互联的混合 ONU 工作模式的节能系统。

1 组内互联的混合 ONU 工作模式节能 OFDM-PON 系统

1.1 二层组播技术

传统的 PON 系统主要由 3 个部分组成:OLT、光分配网络(ODN)和多个 ONU。OLT 将接入网络连接到骨干网络,具有资源调度和流量聚合功能;ODN 位于 OLT 和 ONU 之间,主要由无源分光器(PPS)组成,用于聚合上游链路并分离下游链路;ONU 负责对用户数据进行处理。在 PON 网络中,通常利用 IGMP Proxy 协议和 IGMP Snooping 协议实现二层组播功能^[5]。IGMP Proxy 协议用于截取用户的 IGMP 报文,建立组播业务和用户的对应表。经过相关处理后,决定是否向上层转发。IGMP snooping 协议用于侦听用户的 IGMP 成员报文,形成组成员和端口的对应关系表,并根据该表,将收到的下行组播数据转发到相应的端口。OLT 下发的组播帧中带有组播 VLAN (每个 VLAN 对应一个组播组),当下行业务中含有组播帧时,OLT 根据组播转发表及组播 VLAN 将组播帧广播到所有 ONU。ONU 端根据自己的组播转发表,即组播 VLAN 和用户端口的对应关系,将组播帧发送到属于该组播 VLAN 下的所有成员端口。

1.2 基于时域低复杂度幅度判决的组播帧可识别的 OFDM 帧结构设计

由于 OFDM 帧的识别和解调是在物理层上进行的,考虑到系统中稳定的物理信道特性,本文引入文献[6]中的 OFDM 帧结构。为了使实时的 OFDM 接收机可以有效识别出组播帧,我们在该文献的基础上对逻辑链路标识(LLID)部分进行重新设计。改进的 OFDM 帧结构如图 1 所示。由于一个系统的分光比、距离、带宽和 OLT 的管理能力等条件的限制,接在一个 OLT 上的 ONU 数目一般不会超过 256 个^[7]。文献[6]中的 LLID 部分是利用 3 个采样点表示 1 个比特位,10 个

比特位在 OLT 端是由 8B/10B 编码器编码得到的,这样编码有利于数据在高速信道上传输,8 个比特位最大可以表示 256 个 ONU。为了更好地区分数据帧类型,我们将 8 个比特位扩展为 16 个比特位,这样经过 8B/10B 编码器编码后就可以获得图 1 中紫色部分标识的改进后的 LLID。这 16 个比特位具体的功能划分为:前 2 位用作模式识别位,“10”代表广播帧,“11”代表单播帧,“01”代表组播帧;剩下的 14 位作 ONU 的目的用户或组播 VLAN 的识别码。例如:当 LLID=‘10|XXXXXXXXXXXX’时,代表此帧是广播帧;当 LLID=‘11|00000000000001’时,代表此帧是发送给 ONU1 的单播帧;当 LLID=‘01|00000000000001’时,代表此帧是发送给属于 VLAN1 成员的组播帧,组播帧以广播的形式发送。接收到组播数据的所有 ONU 根据本地组播转发表,将其转发给属于 VLAN1 的端口。LLID 后面的 18 位零序列,用以简化接收机的硬件设计复杂度,并减少复杂的信号通道对时域 LLID 序列的噪声干扰。

1.3 系统的节能原理

随着交互式网络电视(IPTV)等高带宽视频应用的迅速发展,带宽消耗和网络拥挤的问题日渐严重,组播技术可以有效地解决上述问题,因此今后组播数据在下行数据中出现的频率也会越来越高。由于 OFDM-PON 系统具有频谱效率高、吞吐量大等特点,所以利用该系统来传输组播数据是一种非常合适的选择。但是,在传统的 OFDM-PON 系统中,各个 ONU 都是彼此独立工作的,属于同一个组播组的 ONU 必须对相同的组播数据进行重复解调,这引起的额外能源消耗不容忽视。因此,本文重点关注 OFDM-PON 系统如何处理下行广播数据中存在的组播帧的情况。

基于上述考虑,我们设计了一种组内互联的混合 ONU 工作模式节能系统,如图 2 所示。在 OLT 端,波长为 $\lambda_0=1550$ nm 的分布反馈(DFB)激光器由生成的 OFDM 信号直接调制以形成下行广播信号,经 25 km 单模光纤(SMF)传输。光 OFDM 信号通过 SC 分路器耦合到光分配网络。

ONU 端根据所属组播 VLAN 的不同被分为多个组,包含属于同一个 VLAN 成员的 ONU 被分为一个组。假设 N 个 ONU 在一个组,组内有 1 个 M-ONU 和 $N-1$ 个 S-ONU。每个 M-ONU 配备 1 个高速收发端口(如图 2 的 M-ONU 中标识 A 处)和 $N-1$ 个 M

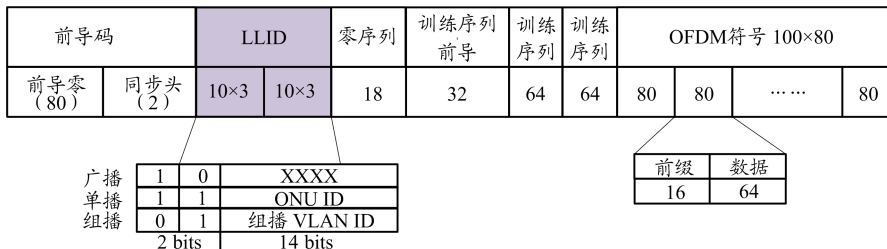


图 1 组播帧可识别的 OFDM 帧结构

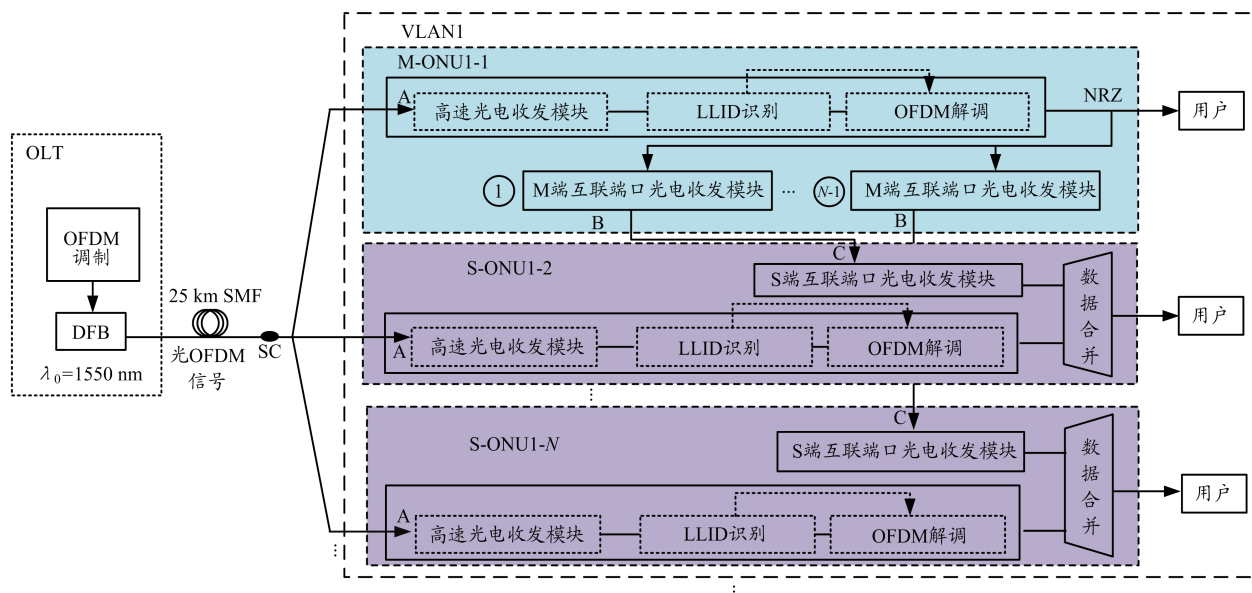


图2 基于组内互联的混合 ONU 工作模式节能系统示意图

端互联端口 (如图 2 标识 B 处); 每个 S-ONU 配备 1 个高速收发端口 (如图 2 的 S-ONU 中标识 A 处) 和 1 个 S 端互联端口 (如图 2 标识 C 处)。高速收发端口负责接收从 OLT 发送来的下行广播信号。 $N-1$ 个 M 端互联端口与 $N-1$ 个 S 端互联端口对应相连接, 用来传输组内 ONU 间的互联信号, 即本 VLAN 组的组播数据。

假设 VLAN1 中包含了 3 个组播组成员, 其中有 1 个 M-ONU 和 2 个 S-ONU。那么 M-ONU 和 S-ONU 之间存在 2 条互联链路可用于传输本组组播数据。当 M-ONU 通过 LLID 从 OLT 发来的下行广播信号中识别出发送给 VLAN1 成员的组播帧时, 首先根据本地组播转发表判断出本组中含有该组播组成员, 然后进行 OFDM 解调并通过逻辑控制打开 $N-1$ 个 M 端互联端口光电收发模块。解调后, M-ONU 将获取到的 VLAN1 组播非归零码 (NRZ) 数据发送给本地组播用户, 同时, 将再生的组播 NRZ 数据通过 M 端的 2 个互联端口光电收发模块经 B 端口以光信号的形式发送给 2 个 S-ONU。当组播数据发送完毕后, M-ONU 随即通过互联链路发送控制信号, 关闭 S 端互联端口光电收发模块。控制信号发送完毕后, 将 M 端互联端口光电收发模块关闭, 以节省能耗。

当 2 个 S-ONU 通过 LLID 从 A 端口接收到的下行广播信号中识别出组播帧时, 首先根据本地组播转发表判断是否是本组组播帧; 如果是, 则打开 S 端互联端口光电收发模块, 同时将 OFDM 解调模块的输入信号翻转率置零, 使其处于待机状态, 此帧对应的组

播数据从 C 端口获取, 只需进行光/电转换和数据合并处理即可发送给组播组用户; 如果不是, 仅仅将 OFDM 解调模块的输入信号翻转率置零即可。M-ONU 和 S-ONU 对帧头 LLID 的判别流程分别如图 3 和图 4 所示。

传统的 OFDM-PON 系统中, 组播组内的 ONU 是独立工作的, 每个 ONU 对接收到的本组组播数据都需要进行 OFDM 解调, 耗费了大量的能源。在本节能系统中, 发送给同一组播组的 OFDM 数据只在 M-ONU 处进行一次解调, 然后该组播组 NRZ 数据被重新生成光信号, 经互联端口发送给组内 S-ONU。S-ONU 只需进行光电转换即可获取组播数据, 避免了 OFDM 重复解调时 DSP 模块大量的能源消耗。本系统

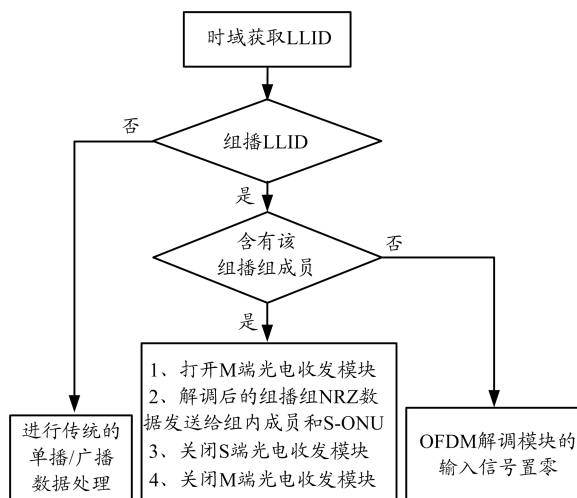


图3 M-ONU 对 LLID 判别流程图

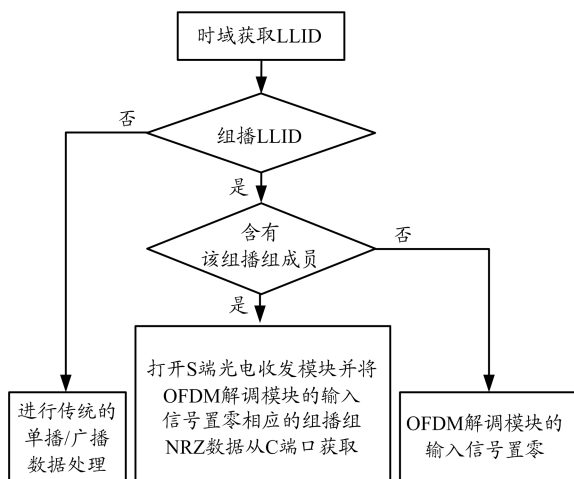


图4 S-ONU 对 LLID 判别流程图

只以 M-ONU 再生组内互联光信号引入的光电收发模块的能耗为代价。

2 理论分析结果

假设接收端的 ONU 被分为 K 个 VLAN 组, 每组 N 个 ONU (包含 1 个 M-ONU 和 $N-1$ 个 S-ONU)。各个 ONU 从 OLT 处接收到的归一化的总流量负载为 ρ , 其中归一化的组播总流量为 μ ($\mu > 0$, 假设组播流量在各个组之间是均匀分布的且不存在丢包现象)。本文在理论分析部分只重点考虑了下行总的流量负载中只包含组播流量和单播流量的情况, 其中, 组播流量 μ 是下行总流量负载 ρ 的一部分, 因此 $\rho > \mu$ 。当组播流量为 μ 时, 单播流量为 $\rho - \mu$ 。ONU 进行 OFDM 解调的功耗为 P_{Dem} , OFDM 解调模块的输入信号置零时 ONU 的待机功耗为 P_{Standby} , 光电收发模块的功耗为 P_{OE} 。当接收到单播帧时, 系统中只会有一个 ONU 实施 OFDM 解调, 剩余 $K \times N - 1$ 个 ONU 处于待机状态; 当接收到组播帧时, 在本文提出的节能系统中, 只有某一个组播组的 M-ONU 进行 OFDM 解调, 剩余 $K \times N - 1$ 个 ONU 都处于待机状态, 为了给 ONU 提供组内互联, 系统额外引入了 $2 \times (N-1)$ 个光电收发模块的能耗, 而在文献[7]提出的基于信号翻转率 (toggle rate) 的 OFDM-PON 系统中, 与该组播帧对应的那一组播组内的 N 个 ONU 都需进行 OFDM 解调, 剩余 $N \times (K-1)$ 个 ONU 则处于待机状态。当未接收到数据帧时, 2 种系统中 $K \times N$ 个 ONU 都处于待机状态。而在传统的 OFDM-PON 系统中, 无论 ONU 是否接收到数据帧 (即在接收到单/组播帧和没有接收到单/组播帧时), ONU 都一直都处在高耗能状态, 不存在待机状态。则文献 [7] 中基于 toggle rate 的节能系统的 ONU 端总功耗 P_T 、传统系统

的 ONU 端总功耗 P_C 以及本文所提出的基于组内互联节能系统的 ONU 端总功耗 P_E 、该系统于传统系统的功耗量化值 ξ 和其 ONU 端的节能效率 η 可以分别表示为:

$$P_T = (1-\rho) \times K \times N \times P_{\text{Standby}} + (\rho-\mu) \times [P_{\text{Dem}} + (K \times N - 1) \times P_{\text{Standby}}] + \mu \times [N \times P_{\text{Dem}} + N \times (K-1) \times P_{\text{Standby}}] \quad (1)$$

$$P_C = K \times N \times P_{\text{Dem}} \quad (2)$$

$$P_E = (1-\rho) \times K \times N \times P_{\text{Standby}} + (\rho-\mu) \times [P_{\text{Dem}} + (K \times N - 1) \times P_{\text{Standby}}] + \mu \times [P_{\text{Dem}} + (K \times N - 1) \times P_{\text{Standby}} + 2 \times (N-1) \times P_{\text{OE}}] \quad (3)$$

$$\xi = P_E / P_C \quad (4)$$

$$\eta = 1 - \xi = 1 - P_E / P_C \quad (5)$$

3 实验装置及实验结果分析

3.1 实时实验平台搭建

由于 OLT 下行广播数据帧的模式判别和处理主要是在 M-ONU 中实现的, M-ONU 具有承上启下的关键作用。S-ONU 仅具有 M-ONU 的部分功能, 功能实现较为简单。因此, 本文搭建的实验系统重点关注了 OLT 和 M-ONU 的功能实现。通过平台获取 ONU 在不同工作状态下的功耗值并对所提出的节能系统进行分析, 实验装置如图 5 所示。系统收发器的关键参数如表 1 所示。实验平台使用 2 个 Xilinx FPGA 板, 每个板都带有 ML605 Virtex-6 XC6VLX240T 芯片来实现 OFDM 系统。

在发送端, 主要包括伪随机序列 (PRBS) 和伪随机码 (PN) 生成、星座映射、功率加载、复共轭、傅里叶逆变换 (IFFT)、循环前缀插入、训练序列 (TS) 插入和削波量化模块。为了产生实数信号, 在 IFFT 模块的前端需要对数据进行共轭处理。信号经过 IFFT 模块后, 在时域上插入循环前缀 (CP) 和 TS, 从而组成完整的 OFDM 帧。最后对 OFDM 时域信号进行削波和量化, 并以 4 GSa/s 的采样率发送到 12 位数模转换器 (DAC)。由 DAC 输出的电模拟信号通过带宽为 2.05 GHz 的指数型低通滤波器 (ELPF)、-6 dB 的衰减器和 +13 dB 的放大器后馈送到窄带分布式反馈激光器 (DFB-LD), 以将基带 OFDM 信号调制到光载波上。

经 25 km SMF 传输后, 接收端首先使用可变光衰减器 (VOA) 来调整接收的光功率, 模拟 PON 中光分路器造成的光功率损耗。然后通过 2.7 GHz PIN 检测器将光信号转换到电信号。可变放大器 (VEA) 放大电

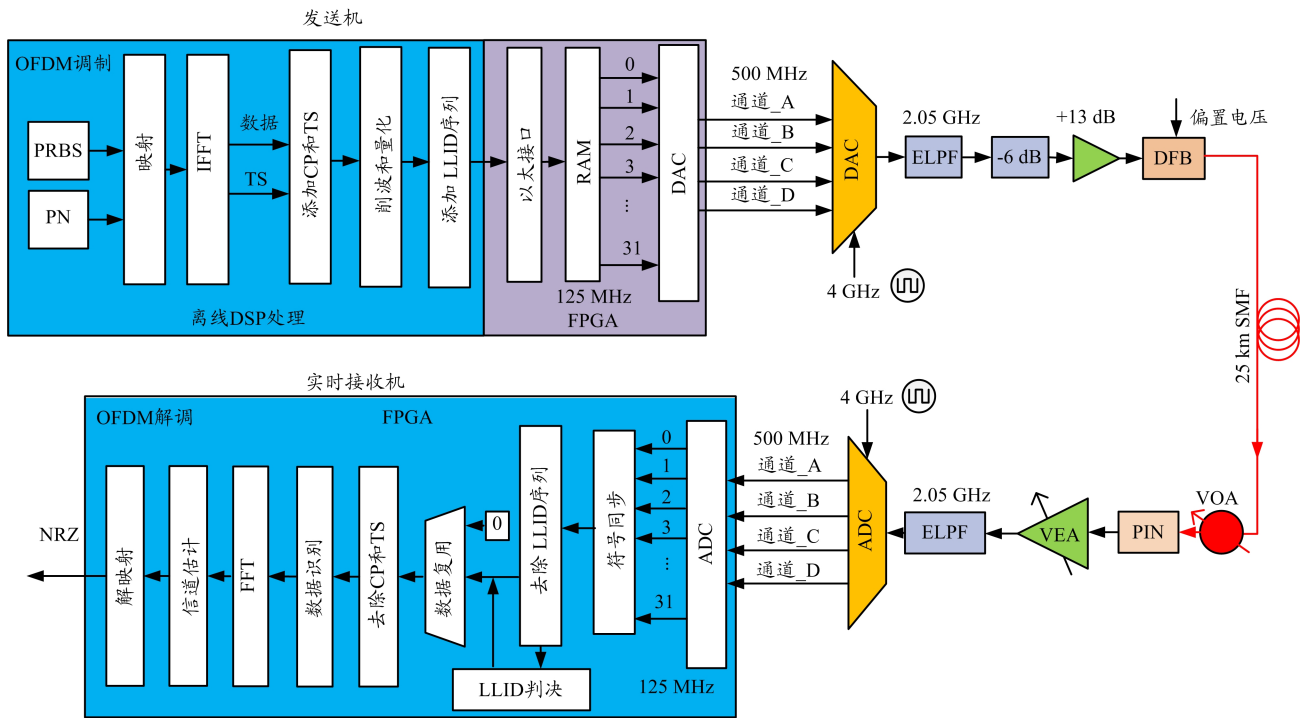


图 5 实时 OFDM-PON 平台框图

OFDM 信号以确保信号占据 4 GS/s@10 bit ADC 的全动态范围, 其将接收的模拟电 OFDM 信号转换为数字域并送入 FPGA 板进行解调从而获取 NRZ 数据。

3.2 结果分析

本文以 16 个 ONU 为例, 对传统系统、基于 toggle rate 系统以及本文提出的基于组内互联的混合 ONU 工作模式的节能系统, 在组播组内 ONU 个数分别为 2、4、8 的情况下进行节能效果的验证。实时实验平台的 FPGA 芯片在进行 OFDM 解调时的功耗测量值约为 6 W; 当接收到非本地单播帧或非本组组播帧时, FPGA 芯片将 OFDM 解调模块的输入信号 toggle rate 置零时的待机功耗测量值约为 3 W; 4 GS/s@10 bit ADC 芯片在进行高速采样时的功耗测

表 1 OFDM-PON 系统参数

参数	值
FFT/IFFT 点数	64
携带数据的子载波	2~29
ADC/DAC 精度	10/12 bit
ADC&DAC 采样率	4 GS/s
OFDM 帧循环前缀	16 samples(4 ns)
PRBS	$2^{15}-1$
发射机光功率	+7.75 dBm
光波长	1550 nm
DFB 调制带宽	2.7 GHz
DFB 偏置电流	45 mA
DFB 驱动电压	2 V _{pp}
PIN 检测器带宽	40 MHz~3 GHz
PIN 响应度	0.9 mA/mW

量值约为 3 W; 实时平台中用于光电转换的功耗测量值约为 1 W; 互联端口光电收发模块的功耗值为 1 W。因此, 在 OFDM-PON 系统中, ONU 解调的功耗值为 10 W, 包含了实时平台中用于光电转换的功耗、ADC 芯片的采样功耗以及 FPGA 芯片的解调功耗; ONU 待机的功耗值为 7 W, 包含了实时平台中用于光电转换的功耗、ADC 芯片的采样功耗以及 FPGA 芯片的待机功耗; 互联端口光电收发模块的功耗值为 1 W。由于受到本实验室 OFDM 接收机数量的限制, 单个 ONU 场景的功耗值是通过现场实验平台测得的, 而针对多个 ONU 场景的功耗值是在上述测量值的基础上通过理论推导获取的。

不同下行流量负载情况下, 组播帧占下行流量负载 ρ 的比重为 0.5 (即: $\mu=0.5\rho$) 时, 3 种系统的功耗量化值如图 6 所示。下行流量负载越大, 所包含的单播数据和组播数据越多, 所以本文所提的节能系统和 toggle rate 系统的功耗量化值都呈上升趋势。组播帧在下行流量负载 ρ 中的占比不同时 ($\rho=0.5$), 3 种系统的功耗量化值如图 7 所示。当下行流量负载一定时, 所包含的组播数据越多, 则单播数据越少。当 $N=2$ 时, 本文所提系统的节能效果与 toggle rate 系统不相上下。这是因为当 N 较小时, 本系统每组播组中免于重复 OFDM 解调的 ONU 较少, 组内互联所引入的额外的能源消耗不容忽视, 所以本系统的节能效果并不占优

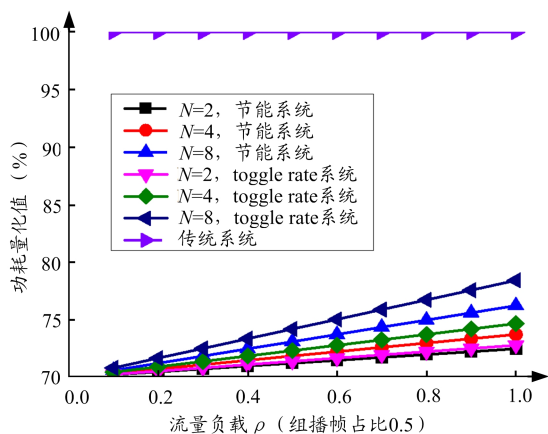


图6 不同流量负载时,各系统功耗量化值

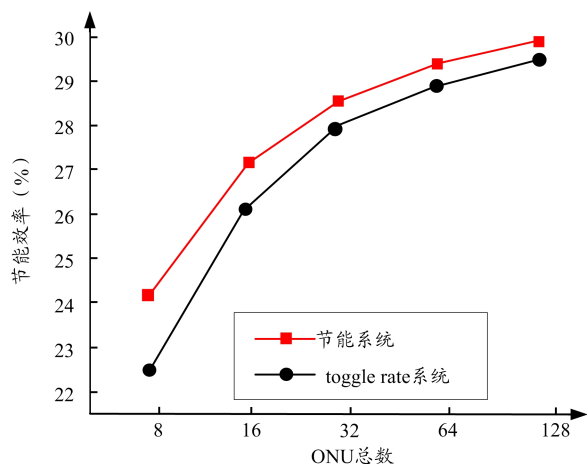


图8 ONU总数不同时,2种系统的节能效率对比图

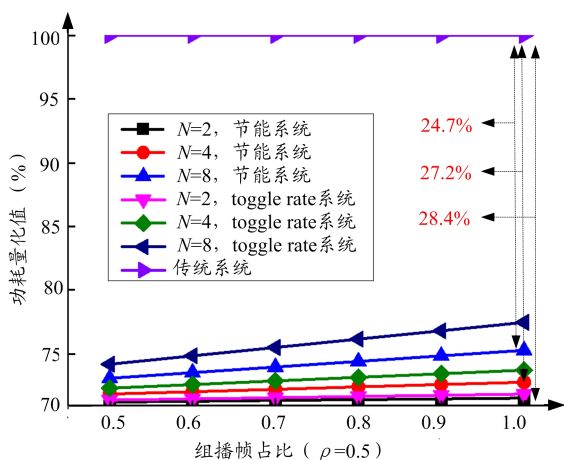


图7 不同组播帧占比时,各系统功耗量化值

势;而当 N 变大时,本系统中能够避免重复OFDM解调而节省的能耗变多,可以抵消一部分由光模块额外引入的能耗,因此,节能系统的优势越来越明显。当组播流量占下行流量的100%时,本系统在 N 为2、4和8时可以分别节省ONU端28.4%、27.2%和24.7%的能耗。

toggle rate系统和本文系统在不同ONU总数情况下(组成员个数 N 固定为4)的节能效果对比情况如图8所示。与toggle rate系统相比,本文提出的系统可以在不同ONU总数下达到更好的节能效果:当 N 为定值,组内互联所引入的光模块的耗能是一定的,系统中包含的总ONU个数越多时,在一个组播帧的处理时间内,可以避免重复OFDM解调的ONU越多,其节能效果就越好,节能效率就越高。

4 结束语

本文针对OFDM-PON系统中组播组内的ONU

必须对本组组播帧进行重复OFDM解调的现象,提出了一种基于组内互联的混合ONU工作模式的节能OFDM-PON系统。该节能系统将同属于一个组播组的ONU划分为一个M-ONU和几个S-ONU。M-ONU实施OFDM解调获取组播NRZ数据,然后经互联端口以光信号的形式发送给S-ONU。S-ONU仅进行光电转换即可获得本组组播数据,而无需进行重复的高耗能OFDM解调。分析结果表明:与传统系统相比,本文所提出的节能系统在组播组成员为2、4和8时可以分别节省ONU端28.4%、27.2%和24.7%的能耗。

参考文献:

- [1] HU X, CAO P, ZHUANG Z, et al. Energy-efficient optical line terminal for WDM-OFDM-PON based on two-dimensional subcarrier and layer allocation[J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25284-25291.
- [2] LIU Y, GUO L, ZHANG L, et al. A new integrated energy-saving scheme in green Fiber-Wireless (FiWi) access network [J]. Science China. Information Sciences, 2014, 57(6): 1-15.
- [3] DIXIT A, LANNIO B, LAMBERT S, et al. Evaluation of ONU Power Saving Modes in Next Generation Optical Access Networks [C]// European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC), Sep. 16-20, 2012, Amsterdam, NETHERLANDS. Amsterdam: IEEE, 2012.
- [4] BUTT R A, IDRUS S M, ZULKIFLI N, et al. A Survey of Energy Conservation Schemes for Present and Next Generation Passive Optical Networks[J]. Journal of Communications, 2018, 13(3): 129-138.
- [5] 刘冕. 二层组播技术研究及其在EPON上的实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [6] ZHANG J, QIN Y. Novel toggle-rate based energy-efficient scheme for heavy load real-time IM-DD OFDM-PON with ONU LLID identification in time-domain using amplitude decision [J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16771-16782.
- [7] GROBE K, ELBERS J P. PON in adolescence: from TDMA to WDM-PON[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(1): 26-34.