

高速相干频分复用无源光网络系统辅助管理和控制通道传输与性能

申王伟, 王佳叶, 李国强, 邢思哲, 颜安, 李忠亚, 施剑阳, 迟楠, 张俊文*

复旦大学信息科学与工程学院电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 为了在保持帧结构完整性的同时, 低代价地传输管理和控制信号, 提出面向高速频分复用相干无源光网络(FDM-CPON)的两种传输管理和控制信号传输机制, 即数字端辅助管理和控制通道(AMCC)和数据通道的相加和相乘。通过将AMCC传输的通断键控(OOK)信号映射为数据通道信号幅值的变化, 完成数据通道信号幅值再调制, 成功将AMCC与数据通道相结合, 实现了管理和控制信号与数据通道信号的同步传输。实验结果表明, 在基于16QAM传输20 km光纤的200 Gbit/s FDM-CPON系统中, 当AMCC的带宽和调制因子(MI)相同时, 乘性AMCC对于信号性能的影响更小, 自身传输信号的质量也更高。在AMCC的MI为26.1%、带宽为24.4 MHz时, 乘性AMCC对信号灵敏度的惩罚比加性AMCC小3 dB。以上研究为未来高速相干频分复用无源光网络AMCC传输与系统设计提供重要参考。

关键词 光通信; 相干无源光网络; 相干光通信; 光纤通信; 频分复用; 辅助管理和控制通道

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231809

1 引言

随着新一代移动通信技术的发展, 以及8K/16K高质量视频流应用、虚拟现实/增强现实(VR/AR)、5G移动互联网、边缘计算等新兴业务的出现, 人们对于无源光网络(PON)的带宽、速率与延时等指标有了更高的要求^[1-5]。传统的时分复用PON(TDM-PON)系统基于直调直检技术, 将单个信道在不同的时间分配给不同的光网络单元(ONU)^[6-8]。国际电信联盟-电信标准化部门(ITU-T)推动50G单波长TDM-PON标准化, 它的系统架构简洁, 但是灵敏度和灵活度较低^[9]。如果想要达到更高的速率, 如单波长100G甚至200G, 则需要新的技术。而基于相干检测技术的PON有着卓越的接收灵敏度和更大的功率预算, 是实现更高速率的强有力的解决方案^[10-12], 文献^[12]中相干PON能够实现300G的峰值速率。

然而, TDM-PON中所有的用户通过时间资源共享一个传输通道, 光线路终端(OLT)需要通过时隙划分满足不同ONUs的带宽需求, 这导致服务的高时延, 难以满足未来一些确定性的、超低时延的业务^[13]。波分复用PON(WDM-PON)则是一种利用频率资源来实现带宽分配的方案, 有望解决高时延的问题。文

献^[14-16]证明了WDM-PON可以在同一时间将不同的信道分配给不同的ONU, 这避免了ONUs之间的时隙竞争, 降低了系统时延。

为了能够在不改变帧结构的条件下, 以更低的代价传输管理和控制信息, 一个称为辅助管理和控制通道(AMCC)的嵌入式通信通道被提出并成功应用于WDM-PON中^[17]。文献^[18]通过使用一个小带宽不归零(NRZ)信号来控制马赫-曾德尔调制器(MZM)的偏置电压, 从而通过控制信号幅值变化来传输控制信息。文献^[19]通过使用NRZ信号控制半导体光放大器(SOA)的增益, 进而控制数据通道信号的幅值变化, 使得AMCC与数据通道叠加传输。近年来, 基于相干载波复用的频分复用相干无源光网络(FDM-CPON)受到越来越多的关注, 具有相干接入高灵敏度、大容量、广覆盖的优势^[20]。此外, FDM-CPON还具有类似WDM-PON的特点, 能支持频域的带宽分配。因此, 研究针对相干载波复用的FDM-CPON的AMCC信号传输机制具有重要的意义。本课题组前期在文献^[21]中提出了一种基于数字端生成的方案, 通过AMCC与数据通道信号相乘成功实现叠加传输, 该方案支持FDM-CPON多个子载波传输不同的AMCC。进一步地, 通过实验对比分析了AMCC与4阶正交幅度调制(QPSK)

收稿日期: 2023-11-21; 修回日期: 2024-01-11; 录用日期: 2024-01-31; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(62171137, 62235005, 61925104)、上海市自然科学基金(21ZR1408700)

通信作者: *junwenzhang@fudan.edu.cn

光信号相乘或相加两种情况下,100G 相干接入 FDM-CPON 的数据通道信号解码性能发生的变化^[22]。

在前期研究的基础上,本文进一步在基于 16QAM 传输 20 km 光纤的 200 Gbit/s 高速 FDM-CPON 中,对比分析了加性和乘性 AMCC 对数据通道信号解码性能的影响,实验验证了在 AMCC 的带宽和调制因子 (MI, 可用 η 表示) 相同时乘性 AMCC 对数据通道信号解码性能的影响更小。同时探讨了不同条件下数据通道信号解码性能的变化。实验结果表明,AMCC 的 MI 设置为 26.1%、带宽设置为 24.4 MHz 时,与加性 AMCC 相比,乘性 AMCC 对信号灵敏度的惩罚减小了 3 dB。

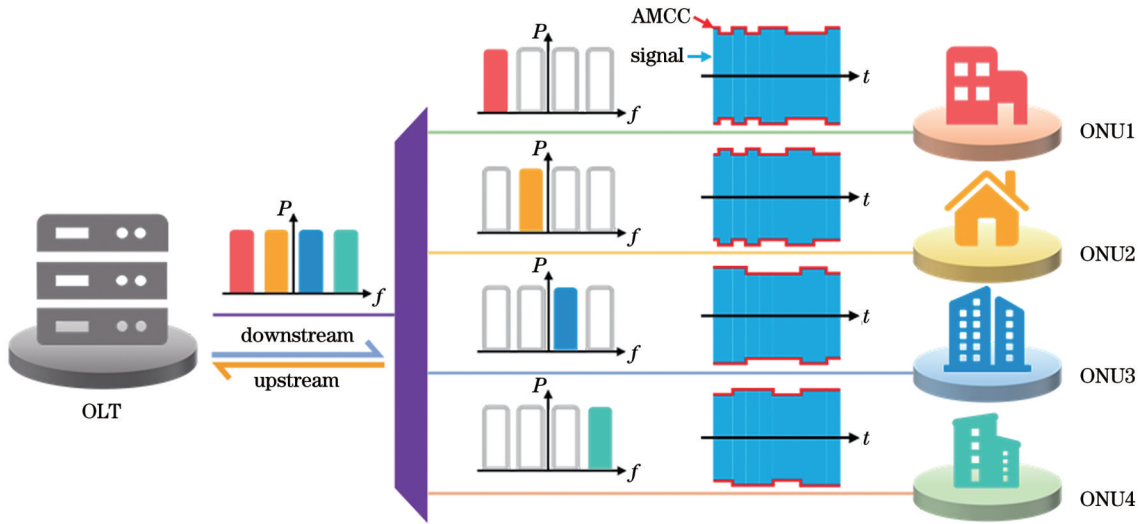


图 1 能够传输乘性和加性 AMCC 的 FDM-CPON 架构图

Fig. 1 Schematic of FDM-CPON with multiplication-based and addition-based AMCC

通常,AMCC 与数据通道信号在数字端的叠加有两种方法,即乘性 AMCC 和加性 AMCC,原理如图 2 所示。乘性 AMCC 是在生成 OOK 信号后,将 OOK 信号中的低电平映射为 1,高电平映射为一个大于 1 的实数值。随后进行上采样,使得 OOK 信号的长度与数据通道的信号长度相同,将两者按位相乘,就可以完成数据通道信号的幅值调制。其中 OOK 中低电平对应的信号幅值保持不变,高电平对应的信号幅值增大,如图 2(a) 所示。幅值被调制完成对于信号的星座图有着很大的影响,当乘性 AMCC 与数据通道的信号叠加后,如图 2(b) 所示,如果三个实线圆环代表 16QAM 信号原本的幅值,则三个虚线圆环代表被调制的信号幅值。因此,如果 MI 较大,调制信号的星座点的位置则会出现偏离,从而与其他位置的星座点混淆,这在解码时会引入误差,提高误码率,降低信号的性能。 η 可以表示为

$$\eta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{ave}}}, \quad (1)$$

式中: U_{\max} 表示被调制后的信号幅值; U_{\min} 表示未被调

2 技术原理与实验装置

2.1 AMCC 技术原理

图 1 展示了 FDM-CPON 的架构,图中 P 代表功率, f 代表频率。在 OLT 通过发射端的数字信号处理 (DSP) 过程产生多载波信号后,将子载波分配给不同的 ONU,在同一时隙中每个子载波只服务于一个 ONU,每个子载波传输不同的数据通道信号和 AMCC 信号。AMCC 传输的是一连串通断键控 (OOK) 信号,将 0 与 1 两种状态映射为信号幅值的不变与变,从而使信号的幅值产生高低交替的变化。这种通过幅值调制传输管理和控制信息的方法不需要中断信号的传输,也不会改变信号的帧结构,对系统的影响较小,因此也不会引入额外的系统时延。

制的信号幅值; U_{ave} 表示被调制后的信号幅值与未被调制的信号幅值的平均值,可表示为

$$U_{\text{ave}} = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2}. \quad (2)$$

则此时 η 可以表示为

$$\eta = \frac{2(U_{\max} - U_{\min})}{U_{\max} + U_{\min}}. \quad (3)$$

未被调制的信号幅值即为原信号幅值,则 U_{\max} 与 U_{\min} 之间的关系可表示为

$$U_{\max} = a \times U_{\min}, \quad (4)$$

式中: a 表示高电平映射为的实数值,则此时 η 可以表示为

$$\eta = \frac{2(aU_{\min} - U_{\min})}{aU_{\min} + U_{\min}}, \quad (5)$$

化简后可得

$$\eta = \frac{2(a - 1)}{a + 1}. \quad (6)$$

因此 OOK 中高电平映射后的值可以表示为

$$a = \frac{2 + \eta}{2 - \eta} \quad (7)$$

加性 AMCC 则是在生成 OOK 信号后,将 OOK 信号中的低电平映射为 0,高电平映射为一个实部和虚部相同并且大于 0 的复数值。随后进行上采样,使得 OOK 信号的长度与数据通道的信号长度相同,通过将两者按位相加,就可以完成数据通道的信号幅值调制。其中 OOK 中低电平对应的信号幅值保持不变,高电平对应的信号幅值则增大,如图 2(c)所示。加性 AMCC 与数据通道的信号结合后,同样也会对信号的星座图产生影响,不同于乘性 AMCC 会使信号的星座图产生新的同心圆,加性 AMCC 会使整个星座图向右上角 45° 方向平移,如图 2(d)所示。一方面,经过调制后的信号

星座点会与原本位于右上角的未调制的信号星座点混淆,从而引入误差,提高误码率,降低信号的性能;另一方面,被调制信号的幅值不再是固定值,实部大于 0 的信号幅值会变大,实部小于 0 的信号幅值会变小,这意味着被调制信号幅值的方差会变大。而判断 AMCC 传输信号质量的关键参数品质因数 Q 可以表示为

$$Q = \frac{M_1 - M_0}{S_1 - S_0} \quad (8)$$

式中: M_1 表示被调制信号幅值的平均值; M_0 表示未被调制信号幅值的平均值; S_1 表示被调制信号幅值的方差; S_0 表示未被调制信号幅值的方差。因此,加性 AMCC 与数据通道的信号叠加会导致 S_1 增大,从而使得 Q 减小,这也意味着,从理论上分析,在同样的条件下,加性 AMCC 的 Q 会小于乘性 AMCC 的 Q ,信号质量相对较差。

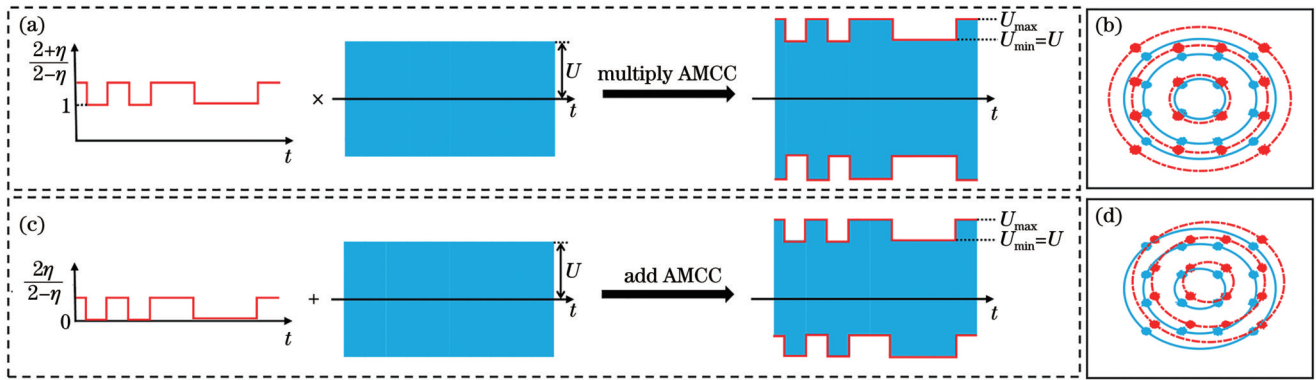


图 2 叠加原理图与数据通道信号示意图。(a)乘性 AMCC 与数据通道信号叠加原理图;(b)叠加了乘性 AMCC 的数据通道信号示意图;(c)加性 AMCC 与数据通道信号叠加原理图;(d)叠加了加性 AMCC 的数据通道信号示意图

Fig. 2 Schematic of superposition and data-channel signal. (a) Schematic of superposition of multiplication-based AMCC and data-channel signal; (b) schematic of data-channel signal with multiplication-based AMCC; (c) schematic of superposition of addition-based AMCC and data-channel signal; (d) schematic of data-channel signal with addition-based AMCC

AMCC 的 MI 对数据通道的信号产生较大的性能影响。对于乘性 AMCC 来说,MI 越大则被调制信号的幅值会越大,被调制信号的内圈星座点与未被调制信号的外圈星座点混淆的概率就越高,数据通道的信

号受到的影响就越大,灵敏度代价也就越大,其示意图如图 3(a)~(e)。图 3(a)~(e) 中 MI 的值依次增大,图 3(f)~(j) 中 MI 值的变化情况同图 3(a)~(e)。在 MI 较小的时候,红色星座点与蓝色星座点重合度较高,

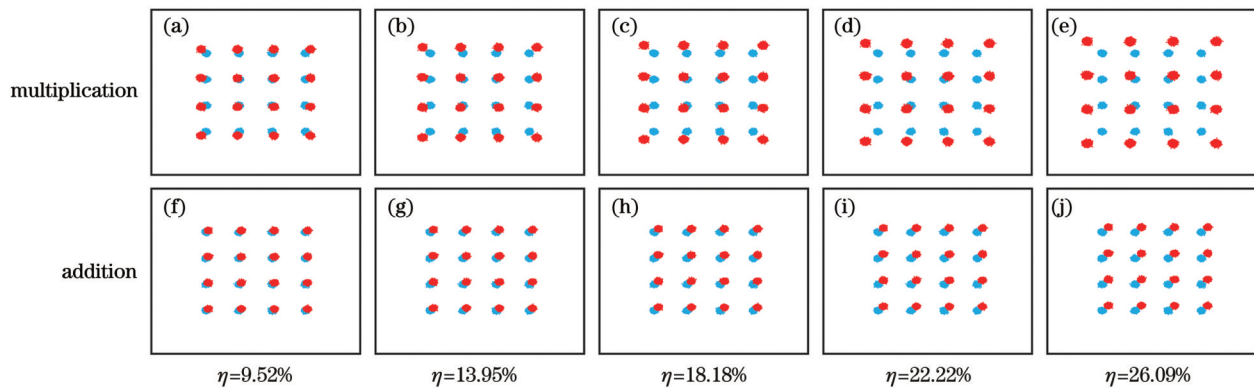


图 3 叠加了乘性和加性 AMCC 的数据通道信号星座图。(a)(f) $\eta=9.52\%$; (b)(g) $\eta=13.95\%$; (c)(h) $\eta=18.18\%$; (d)(i) $\eta=22.22\%$; (e)(j) $\eta=26.09\%$

Fig. 3 Constellations of data-channel signal with multiplication-based and addition-based AMCC. (a)(f) $\eta=9.52\%$; (b)(g) $\eta=13.95\%$; (c)(h) $\eta=18.18\%$; (d)(i) $\eta=22.22\%$; (e)(j) $\eta=26.09\%$

欧氏距离较小;在 MI 较大的时候,红色星座点与蓝色星座点的重合度较低,欧氏距离较大。在信噪比较低时,被调制信号的内圈星座点就有可能与未被调制信号的外圈星座点重叠,从而在信号解码时引入误差。对于加性 AMCC 来说,MI 越大则被调制的信号向右上角 45° 方向的平移距离就越大,被调制信号左下角的星座点与未被调制信号右上角的星座点混淆的概率就越高,数据通道的信号受到的影响就越大,灵敏度代价也就越大,其示意图如图 3(f)~(j) 所示。因此,两种 AMCC 对于数据通道的信号性能影响的机制是不同的,在不同的 MI 下,星座图的表现也有所不同。

2.2 实验测试

图 4 展示了所提 FDM-CPON 系统的实验测试设

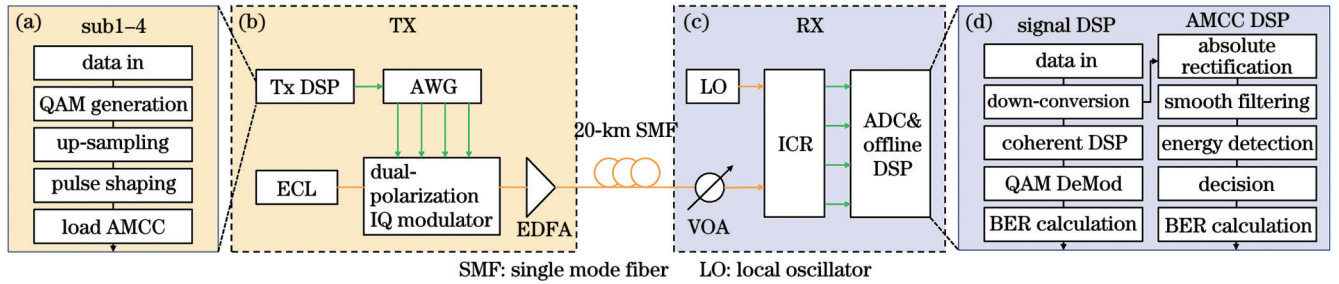


图 4 实验装置。(a)发射端 DSP;(b)发射端实验装置;(c)接收端实验装置;(d)接收端 DSP

Fig. 4 Experiment setup. (a) DSP of transmitter; (b) experimental setup of transmitter; (c) experimental setup of receiver; (d) DSP of receiver

实验系统发射端的框架如图 4(b) 所示。生成的数字多载波信号经过 AWG 完成数模转换 (DAC), 形成模拟信号, 将其送入一个双偏 IQ 调制器以完成调制。双偏 IQ 调制器使用的外腔激光器 (ECL) 的波长为 1552.5 nm, 并且线宽小于 100 kHz。通过一个掺铒光纤放大器 (EDFA) 对完成调制的信号进行放大, 为了不引入更多非线性损伤, 将入纤光功率稳定在 0 dBm 后送入 20 km 的光纤。

实验系统接收端的框架如图 4(c) 所示。经过 20 km 的光纤后, 通过一个可调光衰减器 (VOA) 调整信号的接收光功率 (ROP), 随后信号被一个集成相干接收机 (ICR) 接收。ICR 的本振波长为 1552.5 nm, 线宽小于 100 kHz。被 ICR 接收的信号通过一个采样率为 40 GSa/s 的数字存储示波器 (DSO) 完成模数转换, 得到接收的数字信号并进行离线的 DSP。

接收端的 DSP 如图 4(d) 所示。通过 DSO 获得数字信号后, 需要将信号进行下变频, 使得信号重新回到基带。同时通过匹配滤波滤除其他子载波, 提升信号的信噪比, 避免载波间串扰。随后进行 AMCC 传输的 OOK 信号的解码。第一步需要提取信号的幅值, 由于 X 和 Y 两个偏振传输的 OOK 信号是相同的, 因此 X 和 Y 两个偏振信号的幅值变化也是相同的, 在提取幅值时可以同时提取 X 和 Y 偏振信号的幅值并将其相加,

置。发射端 (Tx) 的 DSP 如图 4(a) 所示, 在通过随机序列生成数据通道的信号数据后, 将信号映射为 16QAM。信号带宽为 6.25 GBaud, 为了使信号与任意波形产生器 (AWG) 保持同样的采样率 (100 GSa/s), 需要对信号进行 16 倍上采样。通过将信号与滚降系数为 0.1 的根升余弦滤波器进行卷积, 完成成型滤波, 避免子载波间串扰。然后通过生成小带宽的 OOK 信号, 完成乘性或加性的映射后, 上采样到与数据通道的信号长度相同, 并与数据通道的信号按位相乘或相加。将与 AMCC 结合后的信号上变频到不同的频段, 生成不同的子载波。通过将所有子载波信号相加, 就可以获得数字多载波信号并将其送入 AWG 中。

使幅值的变化更加明显; 第二步需要对提取的幅值进行平滑滤波, 进而提取信号的包络; 第三步需要进行能量检测, 将提取出的包络变为高低电平交替变化的状态; 第四步需要将高低电平进行反射, 从而还原 OOK 信号; 第五步需要将解码出的 OOK 信号与发射的 OOK 信号进行对比, 并计算 BER 与 Q。OOK 信号解码完成后, 数据通道的信号则采用经典的相干 DSP 进行解码。相干 DSP 包括通过 Gram-Schmidt 正交化过程 (GSOP) 完成正交化和归一化、光纤色散补偿、时钟恢复、通过恒模盲均衡算法实现信号后均衡、频偏估计、载波相位估计, 以及通过判决引导的最小均方算法 (DD-LMS) 补偿残余的噪声。完成这些步骤后即可进行 16QAM 的解调并计算 BER。

3 实验结果与分析

为了验证在高速 FDM-CPON 中, 乘性 AMCC 和加性 AMCC 对于数据通道信号性能的影响, 测试了在不同的 MI 下, 与乘性 AMCC 和加性 AMCC 叠加的数据通道信号的灵敏度曲线, 以及 AMCC 传输的 OOK 信号的 Q 曲线, 如图 5 所示。由图 5(a) 的结果可以看出: 在未与 AMCC 叠加时, 数据通道信号的灵敏度为 -29.4 dBm; 在与 MI 为 18.18% 的乘性 AMCC 叠加后, 灵敏度为 -28.2 dBm, 灵敏度代价为 1.2 dB; 在与 MI 为 26.09% 的乘性 AMCC 叠加后, 灵敏度为

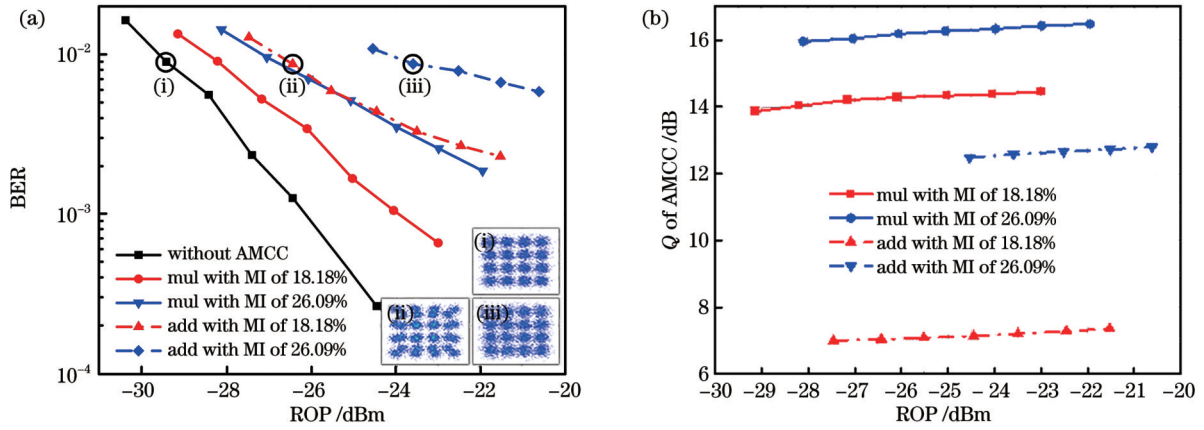


图5 AMCC的影响。(a)与乘性AMCC和加性AMCC结合的数据通道信号的灵敏度曲线;(b)乘性AMCC和加性AMCC的Q随ROP的变化曲线

Fig. 5 Impact of AMCC. (a) Sensitivity curves of data-channel signal with multiplication-based AMCC and addition-based AMCC; (b) Q of multiplication-based AMCC and addition-based AMCC varying with ROP

-27.0 dBm, 灵敏度代价为 2.4 dB; 在与 MI 为 18.18% 的加性 AMCC 叠加后, 灵敏度为 -26.5 dBm, 灵敏度代价为 2.9 dB; 在与 MI 为 26.09% 的加性 AMCC 叠加后, 灵敏度为 -24 dBm, 灵敏度代价为 5.4 dB。实验结果表明, 在相同的 ROP 和 MI 下, 乘性 AMCC 对数据通道信号灵敏度的影响更小。而图 5(b) 的结果也证明了, 在相同的条件下, 乘性 AMCC 的 Q 大于加性 AMCC, 这与原理分析的结论是一致的。因此, 如果在需要传输管理和控制信号时, 将数据通道和 AMCC 通过乘法结合是最好的选择, 这对于数据通道信号以及 AMCC 传输信号的影响都更小。

同时, 通过实验验证了 MI 对于数据通道信号灵敏度以及 AMCC 的 Q 的影响, 如图 6 所示。为了保证变量唯一, 在测试 MI 对于 AMCC 的 Q 的影响过程中, 固定 ROP 为 -28 dBm, 固定 AMCC 的带宽为 24.4 MHz。由图 6 的结果可以看出, 无论是乘性 AMCC 还是加性 AMCC, 当 MI 增大时, 它们都给数

据通道信号的灵敏度带来了越来越大的惩罚。而在相同的 MI 下, 与乘性 AMCC 结合的数据通道信号相较于与加性 AMCC 结合的数据通道信号有着更高的灵敏度和功率预算。在 MI 为 26.1% 时, 与乘性 AMCC 结合的数据通道信号灵敏度比与加性 AMCC 结合的数据通道信号灵敏度高了 3 dB。而当 MI 增加时, 无论是乘性 AMCC 还是加性 AMCC, Q 都随之增大。因此在选择 AMCC 的 MI 时, 需要综合考虑二者对数据通道信号和 AMCC 自身传输信号的影响, 如果选择的 MI 较小, 则传输的管理和控制信号质量下降, 从而影响解码; 选择的 MI 较大, 则会给数据通道信号带来更大的灵敏度代价。同时, 图 6 中 (i) 为乘性 AMCC 的眼图, 高低电平非常稳定, (ii) 为加性 AMCC 的眼图, 高低电平波动非常大, 因此在使用式 (3) 计算 Q 时方差较大, 得到的 Q 较小。这些结果与原理分析中 MI 的影响是一致的。

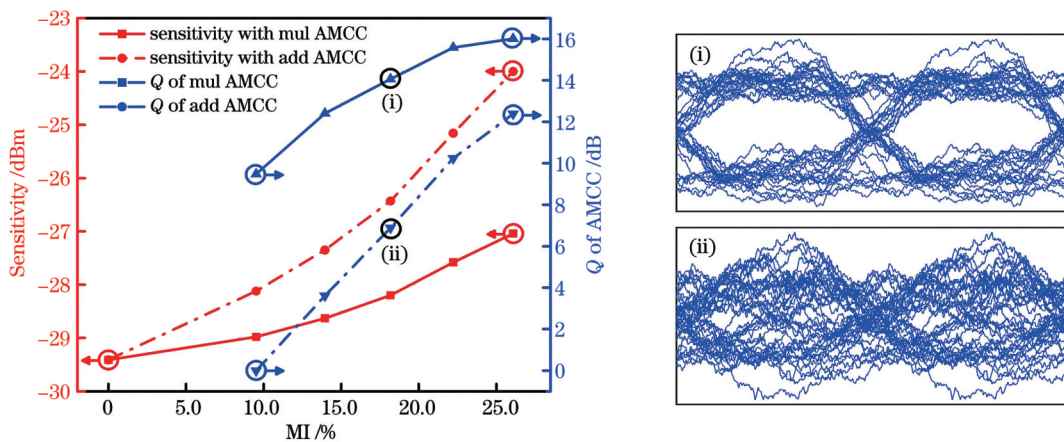


图6 与乘性AMCC和加性AMCC结合的数据通道信号在不同的MI下的灵敏度以及乘性AMCC和加性AMCC在不同的MI下的Q
Fig. 6 Sensitivity of data-channel signal with multiplication-based AMCC and addition-based AMCC at different MI, and Q of multiplication-based AMCC and addition-based AMCC at different MI

此外,通过实验验证了 AMCC 的带宽对于数据通道信号灵敏度以及 AMCC 的 Q 的影响,如图 7 所示。为了保证变量唯一,在测试 AMCC 的带宽对于 AMCC 的 Q 的影响过程中,固定 ROP 为 -28 dBm,固定 AMCC 的 MI 为 18.2%。由图 7 的结果可以看出,无论是乘性 AMCC 还是加性 AMCC,当 AMCC 的带宽增大时,数据通道信号的灵敏度都会降低,功率预算也会降低。而在相同的带宽下,乘性 AMCC 对于数据通道信号的灵敏度影响更小。在 AMCC 的带宽为 48.8 MHz 时,与乘性 AMCC 结合的数据通道信号的灵敏度为 -28.1 dBm,与加性 AMCC 结合的数据通道信号的灵敏度为 -26.2 dBm,两者相差 1.9 dB。而

当 AMCC 的带宽增加时,无论是乘性 AMCC 还是加性 AMCC, Q 都随之减小。在相同带宽下,乘性 AMCC 的 Q 大于加性 AMCC 的 Q 。AMCC 的带宽变化对于数据通道信号和 AMCC 自身传输信号的影响是一致的,较小的带宽给数据通道信号带来的灵敏度代价更小,同时自身信号质量更高。因此选择带宽时,只需要满足管理和控制信号的需求即可,无需使用更大的带宽。同时,图 7 中 (i) 为乘性 AMCC 的眼图,高低电平非常稳定, (ii) 为加性 AMCC 的眼图,高低电平波动非常大,因此在使用式 (3) 计算 Q 时方差较大,得到的 Q 较小。这些结果与原理分析中 AMCC 的带宽的影响是一致的。

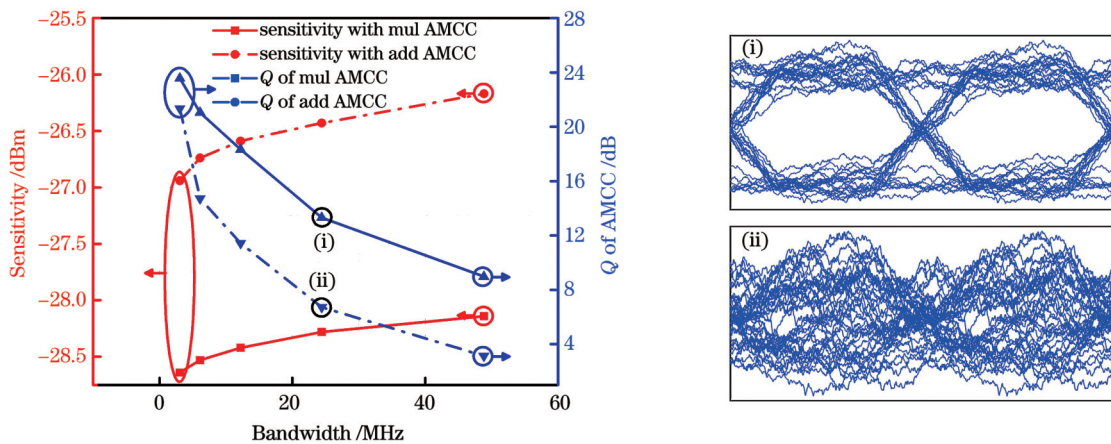


图 7 与乘性 AMCC 和加性 AMCC 结合的数据通道信号在不同带宽下的灵敏度以及乘性 AMCC 和加性 AMCC 在不同带宽下的 Q
Fig. 7 Sensitivity of data-channel signal with multiplication-based AMCC and addition-based AMCC at different bandwidth of AMCC, and Q of multiplication-based AMCC and addition-based AMCC at different bandwidth

4 结 论

本文在高速 FDM-CPON 中验证并对比分析了乘性 AMCC 和加性 AMCC 对于数据通道信号性能以及 AMCC 传输的 OOK 信号性能的影响。基于 20 km 光纤传输的 200G 相干载波复用 FDM-CPON 系统的实验结果表明,在传输 16QAM 时,乘性 AMCC 对于数据通道信号灵敏度和功率预算的影响更小,AMCC 传输信号的 Q 也更高。在 MI 为 26.1%、AMCC 带宽为 24.4 MHz 时,与两种 AMCC 结合的数据通道的信号灵敏度最大相差 3 dB。同时,实验还测试了不同的 AMCC 的 MI 和带宽对数据通道信号灵敏度的影响。相关实验结果与原理分析中的结论完全吻合。上述研究成果有望为未来高速相干频分复用无源光网络 AMCC 传输与系统设计提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] Minopoulos G, Psannis K E, Kokkonis G, et al. QoE assessment of video codecs for video streaming over 5G networks [C]//2020 3rd World Symposium on Communication Engineering (WSCE), October 9–11, 2020, Thessaloniki, Greece. New York: IEEE Press, 2020: 34-38.
- [2] Kim J H, Kim J. A study on 5G-based AR/VR technology[J]. Journal of Digital Art Engineering and Multimedia, 2020, 7(4): 383-394.
- [3] Chen S Z, Sun S H, Kang S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication: the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [4] Hassan N, Yau K L A, Wu C. Edge computing in 5G: a review [J]. IEEE Access, 2019, 7: 127276-127289.
- [5] Zhang J W, Li G Q, Xing S Z, et al. Flexible and adaptive coherent PON for next-generation optical access network[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 75: 103190.
- [6] Chung H S, Lee H H, Kim K O, et al. TDM-PON-based optical access network for tactile Internet, 5G, and beyond[J]. IEEE Network, 2022, 36(2): 76-81.
- [7] Li G Q, Yan A, Xing S Z, et al. Demonstration of pilot-aided continuous downstream digital signal processing for multi-format flexible coherent TDM-PON[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(4): 1312-1320.
- [8] Xing S Z, Li G Q, Yan A, et al. Principle and strategy of using probabilistic shaping in a flexible coherent passive optical network without optical amplifiers[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(8): 507-517.
- [9] 50-gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): physical media dependent (PMD) layer specification: ITU-T Recommendation G.9804.3[S/OL]. 2021-09-06. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/14714>.
- [10] Lavery D, Erkilinc S, Bayvel P, et al. Recent progress and outlook for coherent PON[C]//Optical Fiber Communication

- Conference, March 11–15, 2018, San Diego, California. Washington, DC: OSA, 2018: M3B.1.
- [11] Zhang J W, Jia Z S, Xu M, et al. Efficient preamble design and digital signal processing in upstream burst-mode detection of 100G TDM coherent-PON[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2021, 13(2): A135-A143.
- [12] Xing S Z, Li G Q, Sun A L, et al. Demonstration of PS-QAM based flexible coherent PON in burst-mode with 300G peak rate and ultra-wide dynamic range[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(4): 1230-1239.
- [13] Harstead E, Bonk R, Walklin S, et al. From 25 Gb/s to 50 Gb/s TDM PON: transceiver architectures, their performance, standardization aspects, and cost modeling[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(9): D17-D26.
- [14] Yeh C H, Wang B Y, Hsu W H, et al. A simple WDM-PON architecture together with private interconnected ONUs[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 126319-126323.
- [15] Elsayed E E, Yousif B B. Performance evaluation and enhancement of the modified OOK based IM/DD techniques for hybrid fiber/FSO communication over WDM-PON systems[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(9): 385.
- [16] Spolitis S, Murnieks R, Skladova L, et al. IM/DD WDM-PON communication system based on optical frequency comb generated in silica whispering gallery mode resonator[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 66335-66345.
- [17] 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): general requirements amendment 1: ITU-T Recommendation G.989.1[S/OL]. 2013-08-15. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1/en>.
- [18] Guo H P, Yang C C, Gao Y F, et al. AMCC nonlinear baseband superimposition and extraction aided by proposed interference cancellation for WDM-PON used in 5G mobile fronthaul[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 31602-31613.
- [19] Igarashi R, Koma R, Hara K, et al. Simultaneous reception of AMCC signals and QPSK signals by a single coherent receiver with DSP[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 48030-48041.
- [20] Gatto A, Parolari P, Brunero M, et al. RSOA-based FDM PON upstream with flexible multiple access capabilities in an NG-PON2 compliant architecture[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(5): 302-307.
- [21] Wang J Y, Shen W W, Chen J, et al. Demonstration of auxiliary management and control channel signal transmission for FDM coherent passive optical network[C]//2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), July 2–6, 2023, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2023.
- [22] Shen W W, Wang J Y, Li G Q, et al. Comparative study of multiplication-based and addition-based auxiliary management and control channel for FDM PON[C]//2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM), November 4–7, 2023, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2023.

Auxiliary Management and Control Channel Transmission and Performance of High-Speed Coherent Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network System

Shen Wangwei, Wang Jiaye, Li Guoqiang, Xing Sizhe, Yan An, Li Zhongya, Shi Jianyang, Chi Nan, Zhang Junwen*

Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Ministry of Education, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract

Objective With the development of the new generation of mobile communication technology, there is an increased demand for bandwidth, speed, and latency in passive optical networks (PONs). Wavelength-division multiplexing PON (WDM-PON) which utilizes frequency resources for bandwidth allocation can assign different channels to different optical network units (ONUs) simultaneously. This eliminates time slot competition among ONUs, reduces system latency, and holds promise for addressing high-latency issues. An embedded communication channel called the auxiliary management and control channel (AMCC) has been proposed and successfully implemented in WDM-PON to enable the transmission of management and control information at a lower cost without altering the frame structure. In recent years, there has been increasing attention to frequency-division multiplexing coherent PON (FDM-CPON), which also supports bandwidth allocation in the frequency domain. To complete AMCC transmission in FDM-CPON, we put forward two simple and cost-effective transmission mechanisms of transmission management and control signal for FDM-CPON, including the addition and multiplication of AMCC and data channel at the digital end. Meanwhile, we conduct a comparative analysis on the performance of these two transmission mechanisms in a 200 Gbit/s FDM-CPON system based on 16QAM transmission over 20-km fiber. The research results provide references for AMCC transmission and system design of high-speed FDM-CPON in the future.

Methods To implement the two transmission mechanisms and conduct a comparative analysis on their performance in a

200 Gbit/s FDM-CPON system based on 16QAM transmission over a 20-km fiber, we generate 16QAM and on-off keying (OOK) signals for the transmission of data channel and AMCC at the digital end respectively. After mapping the low level in OOK to 1 and the high level to a real number greater than 1, the OOK signal can be up-sampled to the same length as the data channel signal. By multiplying bitwise, the combination of multiplication-based AMCC and the data channel can be achieved. For addition-based AMCC, the low level in OOK should be mapped to 0, while the high level is mapped to a complex number with both real and imaginary parts greater than 0. This mapped signal is then added bitwise to the data channel signal. After the combination of AMCC and the data channel, the signal is received by an integrated coherent receiver (ICR) over a 20-km fiber. At the receiver, the amplitude of the received signal is extracted, and the amplitude variations of the signal are obtained by smoothing filtering. After energy detection and inverse mapping, the decoding of the OOK signal is completed. Simultaneously, the received signal undergoes the classical coherent digital signal processing (DSP) for decoding. Additionally, we modify the modulation index (MI) and bandwidth of AMCC at the transmitter, studying the performance of the two transmission mechanisms in different conditions.

Results and Discussions We test the sensitivity curves of data channel signals overlaid with both multiplication-based AMCC and addition-based AMCC under different MIs, as well as the Q curves of OOK signals transmitted by AMCC. Under the same receiver optical power (ROP) and MI, the influence of multiplication-based AMCC on the sensitivity of the data channel signal is smaller. Simultaneously, the Q value of OOK transmitted by multiplication-based AMCC is greater than that of addition-based AMCC. We also experimentally verify the effect of the MI and bandwidth of AMCC on the sensitivity of the data channel signal and the Q value of AMCC. Under the same MI and bandwidth, the data channel signal combined with multiplication-based AMCC exhibits higher sensitivity and power budget than the data-channel signal combined with addition-based AMCC. Meanwhile, the larger MI and bandwidth lead to a greater influence of AMCC on the performance of the data-channel signal. When the MI of AMCC is set at 26.1% with a corresponding bandwidth of 24.4 MHz, the effect of multiplication-based AMCC on signal sensitivity is 3 dB lower than that of addition-based AMCC.

Conclusions We verify and compare the effects of multiplication-based AMCC and addition-based AMCC on the performance of the data channel signal and the OOK signal transmitted by AMCC in a high-speed FDM-CPON. Experimental results from a 200 Gbit/s FDM-CPON system based on 16QAM transmission over 20-km fiber indicate that multiplication-based AMCC has a smaller influence on the sensitivity and power budget of the data-channel signal, with higher Q value of the AMCC-transmitted signal. When the MI of AMCC is set at 26.1% with a corresponding bandwidth of 24.4 MHz, the effect of multiplication-based AMCC on signal sensitivity is 3 dB lower than that of addition-based AMCC. Additionally, experiments are conducted to assess the effect of different MIs and bandwidths of AMCC on the sensitivity of the data-channel signal, with results consistent with the conclusions drawn from theoretical analysis. The results provide significant references for AMCC transmission and system design of high-speed FDM-CPON in the future.

Key words optical communications; coherent passive optical network; coherent optical communication; optical fiber communication; frequency division multiplexing; auxiliary management and control channel