

新型多载波调制技术在无源光网络中的研究现状

杨慧, 王睿, 沙彬斌

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 为了满足当前日益增长的带宽需求, 下一代接入网络将支持单波长 50 Gb/s 及以上的传输速率, 同时确保以经济高效的方式与传统网络共存。基于数字信号处理的先进的调制和检测技术是实现该目标的有力支撑, 能为大规模接入和多场景多业务承载提供很好的支持。描述了几种新型多载波调制技术的产生原理和主要特点, 总结了其在无源光网络(PON)中的研究现状和存在的问题, 并结合下一代 PON 的诉求提出了研究方向建议。

关键词: 正交频分复用; 滤波器组多载波传输; 通用滤波多载波传输; 广义频分复用传输; 无源光网络

中图分类号: TN913.7.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)05-0018-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.05.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research status of new multi-carrier modulation technology in passive optical network

YANG Hui, WANG Rui, SHA Binbin

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to meet the increasing bandwidth requirements, the next generation access network is required to support each wavelength transmission speed exceeding 50 Gb/s, while ensuring the coexistence of traditional network in an economical and efficient manner. Advanced modulation and detection technologies based on digital signal processing is a powerful support to achieve this goal, which can provide good support for large-scale, multi-scene and multi-service access. The principle and main characteristics of several new multi-carrier modulation technologies are discussed in this paper, and their research status and existing problems in passive optical network (PON) are reviewed. What's more, the suggestions on research direction based on the appeal of the next generation PON are put forward.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; filter bank multi-carrier transmission; general filter multi-carrier transmission; generalized frequency division multiplexing; passive optical network

0 引言

宽带接入网作为我国经济社会发展的战略性公共基础设施,在国家战略层面的地位日益提升^[1]。无源光网络(PON)技术由于具有容量大、损耗小、带宽安全和灵活性高等优势成为了宽带接入的理想选择,在接

入领域获得了广泛的研究和应用。随着万物互联时代的到来,一些新型业务诸如 5G 移动 X-TRAP、边缘计算和高清视频分发等正在改变对未来接入网络的需求^[2]。为满足持续增长的带宽需求和支持未来的移动业务,下一代 PON 需要支持单波长传输速率超过 50 Gb/s,同时以低成本方式与原接入系统共存^[3]。因此,发展高带宽、低成本、低延迟和高灵活性的 PON 技术在现阶段显得尤为重要。

从成本功耗的角度考虑,遵循平方律检波原理的直接检测凭借低成本、低功耗、可插拔和体积小等优势被认为是 PON 的首选接收方案。过去广泛采用的调制格式是二进制振幅键控(OOK)调制,该调制格式实现简单且功耗低。但 OOK 调制频谱利用率低,且在高速传输时由于光纤色散效应会带来严重的传输损伤,极大地限制了直接检测系统的传输距离。为了满足下一

收稿日期: 2019-10-18。

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61505168)资助; 中央高校基本科研业务费专项资金(2682017CX100)资助。

作者简介: 杨慧(1986—),女,博士,现任西南交通大学信息科学与技术学院计算机系讲师,主要从事光通信、光接入网和嵌入式系统的研究。2009年毕业于四川大学电子信息工程专业,2014年博士毕业于北京大学信息科学技术学院通信与信息系统专业,同年7月到西南交通大学工作。发表SCI/EI论文近30篇,主持国家自然科学基金项目1项、中央高校项目2项及国家重点实验室开放课题1项,参与了多项国家和省部级项目。



代 PON 的诉求,2007 年,美国 NEC 实验室提出基于正交频分复用的 PON(OFDM-PON)方案,将基于 DSP 的多载波调制技术引入到了光接入网领域^[4]。OFDM 技术凭借其优良的抗色散性能、高频谱效率、良好的兼容性以及其作为多址技术的灵活性,成为了研究领域关注的焦点。但是,OFDM 调制存在峰均比(PAPR)较高、旁瓣泄漏高且衰减慢和对时频同步要求高等缺陷^[5]。预编码^[6]、自适应技术^[7,8]和调整定时偏移^[9]等方案被提出来解决上述问题,但以上方案在改进性能的同时会带来较高的代价,难以得到广泛应用。随着 5G 传输技术不断研究和发展,一些新型多载波调制技术被提出应用于新的网络架构和应用场景。其中,广受关注的主要有:滤波器值多载波(FBMC)、通用滤波多载波(UFMC)和广义频分复用(GFDM)。在无线通信领域,研究人员对这 3 种调制技术的传输性能、复杂度和灵活性等方面进行了大量的研究。本文综述近年来这 3 种新型多载波调制技术在 PON 中的研究现状,分析研究中存在的问题,并指出其可能的研究方向。

1 新型多载波调制技术及其研究现状

1.1 FBMC 的 PON

1.1.1 FBMC 技术原理

FBMC 的雏形概念最早由 R. W. Chang 和 B. R. Saltzberg 于 20 世纪 60 年代中期提出^[10]。它是在传统的多载波传输系统的基础上加入滤波器组对信号进行预处理,其调制和解调的模拟域实现框图如图 1 所示。FBMC 不同于传统的 OFDM 技术,它将正交条件从复数域放宽至实数域,利用一组专门设计的滤波器组来处理符号间干扰,同时保持时间和符号持续时间不变。FBMC 不需要保护间隔,由于特殊设计的滤波器组,其具有更好的时频聚焦特性,从而实现最大的频谱利用率。

FBMC 的滤波器组可通过原型滤波器的频率偏移得到,原型滤波器的设计与系统的性能息息相关。欧洲的 PHYDYAS 项目对 FBMC 展开了深入的研究,通

过增加抽头系数,减小了滤波器的带外衰减,并提出了满足奈奎斯特准则的原型滤波器^[10],其频率响应为:

$$H(f) = \sum_{l=-(K-1)}^{K-1} H_l \frac{\sin\left(\pi\left(f - \frac{l}{MK}\right)MK\right)}{MK \sin\left(\pi\left(f - \frac{l}{MK}\right)\right)} \quad (1)$$

其中, f 为频率, M 为子载波个数, H_l 为频率系数, l 为滤波器系数, K 为重叠因子,滤波器响应包含 $2K-1$ 个抽头。由于滤波器频率响应是对称的,所以 H_l 也是对称的,如式(2)所示:

$$H_l = H_{-l}, l=1, 2, \dots, K-1 \quad (2)$$

FBMC 在使用此原型滤波器后,相邻的子载波之间存在重叠,导致子载波之间无法保持正交,出现了载波间的干扰。研究发现 FBMC 只有在相邻的子载波之间存在重叠,即所有的奇数子载波或者偶数子载波是不重叠的^[10]。因此,提出偏移正交幅度调制(OQAM)方案以保持相邻子载波之间的正交,同时实现 FBMC 的全速率传输。FBMC 信号的数学表达式为:

$$x(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} d_{m,n} g_{m,n}(k - \frac{nM}{2}) e^{j2\pi mk/M} e^{j\pi(n+m)/2} \quad (3)$$

其中, k 是信号的索引, $d_{m,n}$ 表示 OQAM 调制后的实数符号, m 为子载波索引, n 是符号的索引, N 是符号的个数。 $e^{j\pi(n+m)/2}$ 是相位旋转因子,与 $d_{m,n}$ 相乘后得到实虚交错的符号,然后经过原型滤波器 $g_{m,n}(k - nM/2)$,乘以 $e^{j2\pi mk/M}$ 上变频到相应的子载波上,最后将所有调制后的子载波叠加在一起构成 $x(k)$,得到一个 FBMC 符号。

1.2.2 基于 FBMC 技术的 PON 的研究现状

在 FBMC PON 系统实现方面,文献[11]在传输速率为 8.4Gb/s 时,通过实验对比分析了信号在背对背系统以及在 37 km、50 km 和 75 km 光纤系统中的传输性能,验证了 FBMC PON 使用低成本系统实现的可能。文献[12]提出了一种将基于二维复用的多概率整形分配应用到 FBMC PON 不同时隙和子载波上的方案,基于多概率整形分配的 FBMC PON 系统对 4 种速率(23.665 Gb/s、20.663 Gb/s、17.666 Gb/s 和 15.481 Gb/s)下的 16QAM 信号在时隙上运用不同方案的概率整形,实现灵活、可调节比特速率的接入。通过实验对比分析了背对背传输系统和 25 km 传输下的误码率性能,实验结果表明多概率整形信号的误码率表现优于无整形信号。在 FBMC PON 的上行链路传输方面,文献[13]提出了一种基于 Mirabbasi Martin 滤波器的自适应 FBMC PON 上行传输方案。该方案无需 CP,通过子带滤波抑制旁瓣泄露,较 OFDM 能降低 PON 系统中

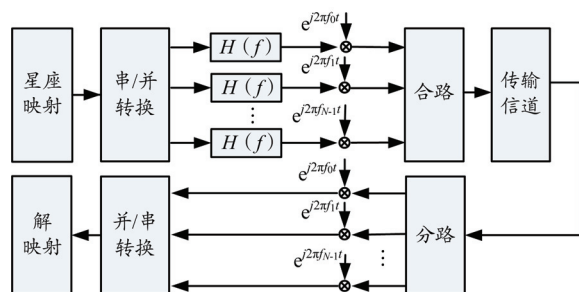


图 1 FBMC 调制和解调的模拟域实现框图

的多址干扰实现更大的传输容量。文献[14]探究了上行链路光网络单元 (ONU) 间无保护频带时 FBMC PON 的性能,无保护频带会提高系统的频谱效率,但也会因为时间和频率偏移造成正交性的丢失,从而带来 FBMC 相邻子载波间的干扰。该文献中设计了一种自动反馈机制,通过调整 ONU 间的时间偏移来恢复同步性以降低干扰。

1.2 基于 UPMC 的 PON

1.2.1 UPMC 技术原理

UPMC 是由 Vakilian 等人结合 FBMC 和 OFDM 的优点,在 2013 年提出的一种多载波调制系统^[15],也被称之为基于通用滤波的 OFDM(UF-OFDM)。UPMC 将全部的载波划分成多个子载波块,每个子载波块定义为一个子带。与 OFDM 和 FBMC 的滤波方式不同,UPMC 最大的特点是其对每个子带进行滤波。其中子载波的间隔是固定的,每个子带中子载波的个数可以不相同,每个子带选用的滤波器也可以不相同。这也带来了 UPMC 的高灵活性,可以根据不同类型的业务,对子带中子载波个数和滤波器的选择进行配置^[16]。

UPMC 系统的传输原理如图 2 所示。在发送端,二进制比特分配到 N 个子带上进行星座映射,串/并转换后进行 N 点傅里叶逆变换(IFFT)、子带滤波,滤波后的时域信号被叠加并发送到信道中。在接收端,通过在尾部加零使得 UPMC 符号的长度补齐到 $2N$ 后进行傅里叶变换(FFT),并/串转换后进行频域单抽头均衡,对每个子带进行解映射恢复原始发送数据。

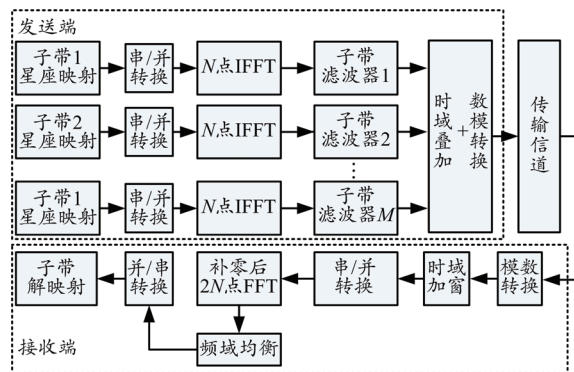


图2 UPMC 调制和解调的数字域实现框图

1.2.2 基于 UPMC 的 PON 的研究现状

目前,对 UPMC PON 的研究内容偏少,文献[17]提出了具有时序偏移容忍的 UPMC PON 方案,探究了 OFDM 和 UPMC 在多种时序偏移下的性能比较。实验结果表明,UPMC 通过子带滤波抑制了旁瓣泄露、减轻了子带干扰。在大多数异步情况下,UPMC 的有效比特率和频谱效率比 OFDM 提高了 30%以上,UPMC 有望

成为多业务传输的解决方案。文献[18]在文献[16]的基础上,对 UPMC PON 中相位噪声、载波频偏的补偿进行了探究,提出在下行相干系统中用整个子带作为一个导频去感知相位噪声和载波频率偏移的方法。实验没有考虑信道损伤,采用了数值模拟方法进行性能的分析。同时,文献[18]对频率偏移系数、子载波调制格式的进制与激光线宽最大容忍度的关系进行了探究。

1.3 基于 GFDM 的 PON

1.3.1 GFDM 技术原理

GFDM 是由 Fettweis 等人在 2009 年提出的一种非正交的多载波调制技术^[19]。不同于 OFDM 为每个符号添加 CP,GFDM 只为每个数据块添加 CP,由此降低了 CP 的开销。当 GFDM 的一个数据块只包含一个子符号时,GFDM 就退化为 OFDM。GFDM 通过划分子载波和时隙,将每个时隙内所有子载波上的信号看作一个子符号,将多个时隙的子符号组成一个数据块。例如,将一个数据块划分为 N 个子符号,而每个子符号包含 M 个子载波,则一个数据块可以用矩阵表示为:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{0,0} & \cdots & d_{0,N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{M-1,0} & \cdots & d_{M-1,N-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

GFDM 信号的数学表达式为:

$$x(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} d_{m,n} g(k-nM) \bmod(MN) e^{j2\pi nk/M} \quad (5)$$

GFDM 调制与解调的模拟域实现框图如图 3 所示, $e^{j2\pi nk/M}$ 表示第 m 个子载波的调制系数, G_n 表示循环脉冲成型滤波器。

GFDM 与 FBMC 一样,都要对每个子载波进行滤波,滤波器的长度也较长。由于 GFDM 不再要求子载波之间正交,对滤波器的设计没有正交性约束,也就避免了 OFDM 中因子载波正交性的丢失而带来的信道间干扰^[19]。此外,与 UPMC 相类似,GFDM 得益于灵活的帧结构,能很好地承载不同类型的业务^[20]。UPMC

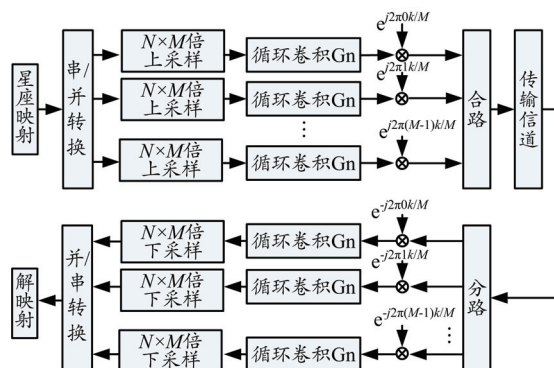


图3 GFDM 调制与解调的模拟域实现框图

通过配置子带含有的子载波数量来承载不同业务,GFDM可以通过配置数据块中的子符号数量来承载不同业务,均能满足在接入网中传输多业务的需求。

1.3.2 基于 GFDM 的 PON 的研究现状

在 GFDM PON 的系统实现方面,文献[21]提出了一种基于多级星座压缩调制的 GFDM PON 方案,将高阶信号星座图的外圈点以不同概率转移到低阶信号星座图的内圈点,降低平均发射功率。系统采用直接检测技术,实验验证了经过 25 km 光纤传输后,多级星座压缩信号的误码率明显低于未经过星座压缩的信号。此外,该方案还能够根据系统性能的要求,动态地改变压缩级别,使信号更好地匹配信道,提高系统的传输性能。文献[22]提出了在基于 GFDM 的光接入网中采用结合 Turbo 码和 Trelli 码的级联编码调制方案,Turbo 码具有很好的纠错性能,Trelli 码编码调制可以提高系统的频谱效率,方案中使用对数映射算法进行解码,以此降低接收机的复杂度。实验表明,相比仅使用 Trelli 码编码的信号,采用级联编码的 32QAM 信号在 1 km 传输距离下性能提高 2.3 dB^[22],证明级联编码调制格式具有较高的频谱效率和编码增益。

2 新型多载波调制技术的总结与展望

万物互联时代即是万物接入网络的时代,它的到来对光接入网传输性能提出了更高的要求。同时,接入网用户数量有限,接入网络的成本将由网络系统内的每个用户来分摊使得其对于成本非常敏感。以上 2 点决定了下一代接入网的演进复杂性,很难有一种单一的技术能满足所有诉求,因而多种调制技术的对比研究很有必要。

OFDM 技术作为应用最广泛的多载波调制技术方案,被引入到 PON 中得到了大量的研究,但其存在对子载波同步要求严苛、带外泄露较大和 PAPR 高等问题。同时,在实际系统中,不同激光器的波长会因为振动、温度等外界因素发生漂移,当 N 个漂移后的激光器波长被同一个光电检测器检测时会出现光拍频噪声,因此 ONU 端的波长需要进行专门的管理,即系统的无色性问题,这必然会大大增加系统开销,降低实际操作的可行性。因此,无色性问题也成为了阻碍 OFDM-PON 发展的一个技术难题。目前,OFDM-PON 研究的热点主要集中在降低 PAPR 和抑制非线性效应、实现无色 ONU、降低混合 PON 的系统复杂度以及资源动态调度算法的优化等方面。

FBMC 技术在每个子载波上实施滤波操作,具有

资源分配灵活性、高频谱效率和低带外功率泄露等优势。但是,FBMC 的相邻子载波存在重叠,因此不可避免地也存在高 PAPR 问题。此外,FBMC 采用偏移正交调制技术,导致其在信道估计和均衡器的设计较为复杂。因此,FBMC 的优势是以实现复杂度提升和加强调制方式限制作为代价的。

UFMC 不使用 CP,通过划分子带并对子带进行滤波减小带外泄漏,降低对时频同步的要求。UFMC 的特性决定了其在协调多点传输和在上行链路多用户异步传输场景中都具有较好的性能。与 FBMC 相比,UFMC 在短突发、低延迟传输场景下得到了改进^[20]。UFMC 的特点很好地支持在机器通信应用场景下,传输较短的突发信息数据包业务。但与此而来的代价是 UFMC 系统复杂度非常高。

GFDM 的实现原理是将若干时隙和若干子载波上的符号块视为一帧,减少 CP 使用,提高频谱效率,通过设计子带滤波器降低旁瓣,减少带外泄露。同时,GFDM 可以有效兼容现有的光 OFDM 接入技术及现有的网络架构,只需要在 OLT 与 ONU 端进行相应的数字信号处理升级,降低了组网成本^[23]。但 GFDM 由于循环卷积脉冲成型滤波所带来的固有影响,会使得数据块内会产生符号间干扰(ISI)和信道间干扰(ICI)。使用 IFFT/FFT 实现时,传送的数据长度往往是子载波数量的若干倍,导致调制矩阵的维度较大,使得接收端的均衡算法复杂度较高。

通过对以上多载波调制技术的总结对比,可以看出这 3 种新型多载波调制技术通过设计滤波器获得了在 PAPR、旁瓣泄露、频谱效率、子载波操控灵活性和同步性等方面的优势,被引入到 PON 中作为下一代调制技术的备选方案。但是这些方案的优势是以增加一定的系统复杂度作为代价,而系统的复杂度将直接影响到接入网成本。因此基于滤波器设计出高性能低复杂度的传输系统将是一个重要的突破点。

综合以上 3 种调制技术的优缺点,本文提出了以下关于研究方向的建议:一是将人工智能技术引入到 PON 中,通过网络获取大量的数据来拟合目标映射。传输信道可以作为一个黑盒子,通过深度学习对信道进行建模分析,建立发射到接收端的映射,对通信系统进一步优化,突破目前信道问题造成的速率瓶颈。二是关于智能化 OLT 的研究。OLT 具有丰富的计算资源和带宽资源,如何把用户侧的复杂度转移到 OLT 侧,设计 OLT 智能识别应用场景并选择不同的传输方案,使得系统性价比最优,将是未来的研究方向。同

时,智能化 OLT 也将是网络平滑升级方案的一个利器,如何让传统的 OOK 技术与新型的调制方案共存,在改进当前 PON 的性能和服务的同时能够尽可能地不改已经铺设好的网络,也是产业界和学术界极力关注的一个研究方向。三是扩容 PON 中的关键技术研究。新型多载波调制技术由于具备良好的抗色散能力,有望在扩容 PON 中得到应用。但扩容 PON 由于大分光比面临着功率预算这一难题,放大器 and 人工智能技术或许会成为其突破点。

3 结束语

现代信息技术的高速发展不断催生新的带宽需求,信息流的高速交互与处理对 PON 传输速率提升提出了迫切的需求。由于 PON 对系统复杂度和成本较为敏感,因此低成本、易实现的调制技术成为下一代高速 PON 系统的关键技术之一。本文调研了目前广受关注的 FBMC、UFMC 和 GFDM 这 3 种调制技术在 PON 中的研究现状,分析了 3 种技术方案的发展瓶颈,并提出了下一步研究方向的建议。目前,基于多载波调制技术的 PON 受限于其数字处理技术和器件成本,尚未大规模部署商用,不过随着市场需求的刺激、半导体产业的高速发展以及人工智能技术等新型工具的出现和批量生产成本的下降,该问题有可能会迎刃而解。基于新型多载波调制技术的 PON 系统实现有大量值得研究和讨论的重要基础科学问题,对这些问题的研究既为更多场景的应用提供了技术支持,也有助于探索未来 PON 演进的方向。

参考文献:

- [1] 国务院.“宽带中国”战略及实施方案[J]. 中国信通院,2013(9):10-10.
- [2] 纪越峰,张佳玮. 5G 前传光网络:关键问题、重要特征与发展目标[J]. 中国科学:信息科学,2017,47(10):1435-1442.
- [3] HOUTSMA V, VEEN D V, HARSTEAD Ed. Recent Progress on Standardization of Next-Generation 25, 50, and 100G EPON [J]. Journal of Lightwave Technology, 35(6): 1228-1234.
- [4] QIAN D, HU J, YU J, et al. Experimental Demonstration of a Novel OFDM-A Based 10 Gb/s PON Architecture [C]// Optical Communication (ECOC), 33rd European Conference and Exhibition of 2007, September 17-19, 2007, Berlin, Germany. Frankfurt: VDE, 2007: 1-2.
- [5] CVIJETIC N. OFDM for Next-Generation Optical Access Networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 384-398.
- [6] HAJOMER A A E, YANG X, HU W. Chaotic Walsh-Hadamard Transform for Physical Layer Security in OFDM-PON [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 527-530.
- [7] WANG B, HO Pin-Han. Energy-Efficient Routing and Bandwidth Allocation in OFDM-Based Optical Networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2016, 8(2): 71-84.
- [8] TRUONG T A, ARZEL M, LIN H, et al. DFT precoded OFDM-An alternative candidate for next generation PONs [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(6): 1228-1238.
- [9] PENG X, CHEN J, LI Y, et al. Single Subcarrier Gold Sequences Modulated Timing Synchronization for Upstream OFDMA-PON [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1-7.
- [10] BELLANGER M, LERUYET D, ROVIRAS D, et al. FBMC physical layer: a primer [EB/OL]. (2010-05-27) [2019-10-14]. <http://www.ict-physdyas.org/>.
- [11] SALJOGHEI A, GUTIERREZ F A, BARRY L P. FBMC for directly modulated Passive Optical Networks (PON) [C]// Microwave Photonics (MWP), IEEE 2015 International Topical Meeting, October 26-29, 2015, Paphos, Cyprus. Piscataway: IEEE, 2015, 1-4.
- [12] JIANG L, LIU B, MAO Y, et al. Flexible Filter Bank Multi-Carriers PON Based on Two-Dimensional Multiple Probabilistic Shaping Distribution[J]. IEEE Access, 2019(7): 1793-1799.
- [13] JUNG S Y, JUNG S M, HAN S K. AMO-FBMC for Reduction of Multiple Access Interference between Asynchronous ONUs in PON [C]// 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, USA. Piscataway: IEEE, 2015: 1-3.
- [14] SALJOGHEI A, GUTIERREZ F, PERRY P, et al. Experimental Comparison of FBMC and OFDM for Multiple Access Uplink PON [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(9): 1595-1604.
- [15] VAKILIAN V, WILD T, SCHAICH F, et al. Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE[C]//2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), December 8-12, 2013, Atlanta, USA. Piscataway: IEEE, 2013: 223-228.
- [16] 李宁, 周围. 面向 5G 的新型多载波传输技术比较 [J]. 通信技术, 2016, 49(5): 519-523.
- [17] KANG S M, KIM C H, JUNG S M, et al. Timing-Offset-Tolerant Universal-Filtered Multicarrier Passive Optical Network for Asynchronous Multiservices-Over-Fiber [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(4): 229-237.
- [18] QI D, MUGUANG W, HONGQIAN M, et al. Full-duplex broadcast RoF-WDM-PON with self-coherent detection and photonic frequency up/down-conversion using SSB pilot-carrier [J]. Optics Communications, 2018, 427: 54-60.
- [19] FETTWEIS G, KRONDORF M, BITTNER S. GFDM-Generalized Frequency Division Multiplexing [C]// VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference, April 26-29, 2009, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE, 2009, 1-4.
- [20] 席思雨, 董江波, 刘玮, 等. 5G 候选波形技术研究[J]. 移动通信, 2018, 42(4): 7-11.
- [21] JIANG L, LIU B, MAO Y, et al. A Novel Multi-Level Constellation Compression Modulation for GFDM-PON [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 1-11.
- [22] TIAN F, GUO D, LIU B, et al. A Novel Concatenated Coded Modulation Based on GFDM for Access Optical Networks [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-8.
- [23] CHEN P C, SU B, HUANG Y. Matrix Characterization for GFDM: Low Complexity MMSE Receivers and Optimal Filters [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(18): 4940-4955.