



面向 5G 应用的 OQAM-OFDM 调制:原理、技术和挑战

李俊,田苑,邱玉,陈达,江涛

(华中科技大学,湖北 武汉 430074)

摘要: OFDM 因其本身存在的技术缺陷,已经很难满足未来 5G 支持更多通信设备连接和多样化通信场景的需求。作为 OFDM 技术的一种替代方案,OQAM-OFDM 技术采用了具有良好频域聚焦特性的原型滤波器,为其在 5G 中的应用提供了广阔的前景。首先简要介绍 OQAM-OFDM 系统的基本原理和特性,在此基础上,进一步分析其在 5G 应用中的优势,最后阐述了 OQAM-OFDM 应用在 5G 中的关键技术问题,包括拖尾抑制等。

关键词: 5G; OQAM-OFDM; OFDM; 原型滤波器; 拖尾抑制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016157

Principles, technologies and challenges of OQAM-OFDM for 5G applications

LI Jun, TIAN Yuan, QIU Yu, CHEN Da, JIANG Tao

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: 5G will need to be able to support much larger connections of communication devices and meet the requirements of diverse scenarios. However, this requirement cannot be met by OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) due to its own drawbacks. As an alternative approach to OFDM, OQAM-OFDM (offset quadrature amplitude modulation based orthogonal frequency division multiplexing) adopts a prototype filter that is well localized in frequency domain, which makes OQAM-OFDM quite suitable for 5G. The OQAM-OFDM system was briefly introduced, then, its superiority employed in 5G was deeply discussed. Finally, some key technical issues of OQAM-OFDM for application in 5G were summarized, such as tail shortening.

Key words: 5G, OQAM-OFDM, OFDM, prototype filter, tail shortening

1 引言

在过去的 30 年中,移动通信呈现高速发展态势,从只支持语音业务的第一代(1G)移动通信系统演进到可支持高速宽带数据业务的第四代(4G)移动通信系统,为人类生活提供了极大便利。作为面向 2020 年以后移动通信需求的新系统,第五代(5G)移动通信系统面临数据流量的指数

增长、海量设备的连接和多样化的业务需求等严峻挑战。与 4G 相比,5G 不仅要支持更高的传输速率,还要支持低功耗大连接、低时延高可靠等更加多样化的场景^[1,2]。

由于具有频谱利用率高、实现复杂度低和对抗频率选择性衰落能力强等优势,正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术被广泛应用于各类移动通信系统,并成为 4G 的物理层核心调制技术^[3]。

收稿日期:2016-05-10;修回日期:2016-06-02

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2015AA01A710, No.2014AA01A704)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(No.2015AA01A710, No.2014AA01A704)



然而,一方面,OFDM 技术需要使用循环前缀来对抗多径衰落,造成了频谱资源的浪费;另一方面,OFDM 技术对同步要求很高,参数无法灵活配置,难以支持 5G 多样化的应用场景^[4]。在此背景下,国内外已经开展了一系列有关新型多载波调制技术的探索性研究,其中,基于交错正交幅度调制的正交频分复用(offset quadrature amplitude modulation based orthogonal frequency division multiplexing, OQAM-OFDM) 技术受到了学术界和工业界越来越广泛的重视。相比于 OFDM 技术,OQAM-OFDM 使用具有良好频域聚焦特性的原型滤波器,能有效克服由多径效应引起的符号间干扰和载波间干扰。此外,OQAM-OFDM 技术具有很低的带外干扰,各载波之间不需要严格同步,能够支持更多样的化业务需求^[5-7]。目前,OQAM-OFDM 技术已经成为了 5G NOW、PHYDYAS 以及 METIS 等欧盟项目的重点研究内容,并且被我国 IMT-2020(5G)推进组纳入了 5G 物理层调制波形的主要候选方案^[8-10]。本文首先介绍 OQAM-OFDM 系统基本原理和特性,然后分析其在 5G 中的应用优势,最后归纳了 OQAM-OFDM 应用于 5G 的关键技术问题。

2 OQAM-OFDM 系统

OFDM 技术存在一个主要缺陷,即其采用的时域矩形窗使得子载波频域波形呈现 SINC 函数形状,导致了严重的带外泄漏。该缺陷引发的一系列问题使得 OFDM 难以胜任 5G 提出的更高技术指标需求和更复杂应用场景支持的挑战。不同于 OFDM 使用的时域矩形窗,OQAM-OFDM 每个载波上的调制信号都通过一个精心设计的原型滤波器来塑形,从而获得良好的信号频域聚焦性。图 1 展示了 OFDM 与 OQAM-OFDM 的脉冲时间响应与频率响应对比。图 1(a)中 OFDM 采用的是一个时域矩形窗,OQAM-OFDM 采用了一个优化后的升余弦滤波器,对应的频率响应如图 1(b)所示。可以看到,OFDM 矩形窗在频域上具有非常高的旁瓣,第一个旁瓣只比主瓣低十几 dB,而 OQAM-OFDM 带外泄漏则非常少。

OQAM-OFDM 技术以频分复用为基本原理,其结构的特别之处在于收发两端的滤波器组,两者都是原型滤波器经过频移后得到的。图 2 是 OQAM-OFDM 系统的一种快速实现框架,通过使用 FFT/IFFT 能够极大降低实现复杂度。与 OFDM 系统不同的是,OQAM-OFDM 的输入信号是原始复数信号经过取实部和取虚部操作后的两个实数符号,并且每个实数符号持续时间是原始复数符号的一半。然后将

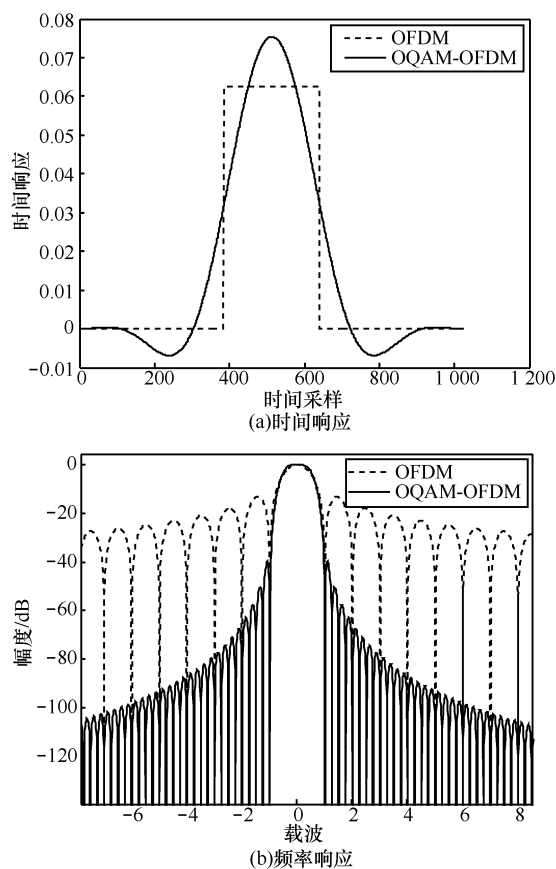


图 1 OQAM-OFDM 与 OFDM 脉冲对比

实数符号通过 OQAM 预调制,对每个实数符号加上一定的相位实现实虚交错的结构。之后,实虚交错数据通过发送端的滤波器组被分解为若干个并行的子载波信号。OQAM-OFDM 系统接收端同样有一组滤波器用于多载波信号解调,解调后的信号还需要进行相位解调以抵消发射端的预调制处理。然后,再通过信道均衡和取实部处理,得到一组实数符号。最后,将实数符号对应上原始复数符号的实虚部,合成为原始发送数据。

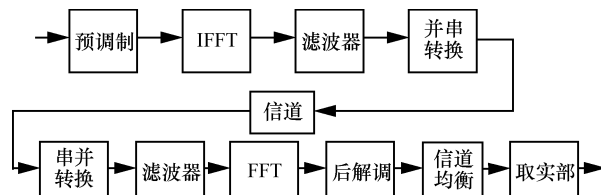


图 2 OQAM-OFDM 快速实现架构

相比于 OFDM,OQAM-OFDM 具有以下主要优势: OQAM-OFDM 通过使用具有良好频域聚焦特性的原型滤波器,能够在不引入循环前缀的情况下有效对抗多径衰落,避免了循环前缀带来的频谱资源浪费;OQAM-OFDM

信号的带外泄露非常微弱,极大降低了对邻近频谱其他用户造成的干扰;极低的信号带外泄露使得 OQAM-OFDM 用户之间不需要保证严格的同步和正交,可以较好地支持异步传输。

3 OQAM-OFDM 在 5G 应用中的优势

5G 在传输速率和资源利用率等方面较 4G 会有量级提升,并且覆盖能力、传输时延和用户体验也将得到显著的改善。这一系列指标要求都为 5G 物理层调制技术带来了极大的挑战。

3.1 5G 需求

为了提高系统吞吐量,5G 将支持以毫米波通信为典型的高频通信技术。高频信号存在绕射能力差、波束窄和传播损耗高等缺点,给全网覆盖、用户定位等带来了极大的困难。因此在人群比较密集、通信需求量大的地方,可以利用高频通信提供距离短而容量大的接入。而在更广的范围,仍需要低频通信联合组网,实现连续广域覆盖。但是,增加频谱资源始终是一种受限制的解决方案。未来 5G 移动通信容量的提升不能仅靠频谱的扩展,还需要引入新的调制技术以提升频谱使用效率,才能在有限频谱资源下解决移动通信流量爆炸性增长的问题。

未来 5G 移动通信还需要支持低功耗大连接、低时延高可靠的业务。机器与机器(machine to machine, M2M)通信是一种典型的低功耗大连接业务,它允许机器能够在无人干预的前提下直接通信。M2M 用户数量大但数据量小且有突发性,维持全网同步和正交不经济,也不现实。而且,巨大的同步开销还威胁网络稳定性。同时,为了满足车联网等低时延高可靠业务对时延的需求,用户需要减少同步开销,甚至不要同步过程,以避免耗费大量的时间在信令开销和传输等待上。此外,相比 4G,5G 支持的业务类型将更加丰富。因此需要能够根据不同场景的需求,灵活调整参数以适应不同业务类型。

综上所述,随着移动通信业务不断拓展及用户体验要求的提升,5G 对吞吐量、连接数及时延三维度下的需求提出了更严苛的要求。为了应对这一要求,5G 需要抛弃同步和正交,在高效利用频谱资源的情况下达到高速、实时、可靠的数据传输。在物理层技术上,主要体现在需要一种高谱效、支持异步传输和参数可灵活配置的

调制技术。

3.2 OQAM-OFDM 技术优势

(1) 高频谱效率

为了对抗多径衰落,OFDM 系统需要引入循环前缀,导致频谱利用率下降。此外,OFDM 采用时域矩形窗,具有很高的带外泄露。为了避免上述缺陷,OQAM-OFDM 采用了更为精细的滤波器设计。一方面,滤波器良好频域聚焦特性能够有效对抗多径衰落,避免了循环前缀的使用,提升频谱利用率;另一方面,滤波器良好频域聚焦特性使得 OQAM-OFDM 发送信号的带外泄露非常微弱,极大降低了对邻近频谱其他用户造成的干扰,如图 3 所示。因此,OQAM-OFDM 可以有效地应用于非连续频谱通信中,提升 5G 频谱利用率。综上所述,OQAM-OFDM 不仅能够避免额外频谱资源开销,还能有效利用碎片频谱,实现更高效的频谱资源利用。

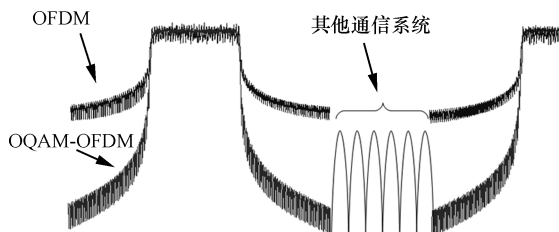


图 3 OQAM-OFDM 与 OFDM 系统对周围系统的干扰

(2) 支持异步传输

传统的 OFDM 信号采用时域矩形窗,频域聚焦性差。为了保证载波之间的正交性,不同用户的多载波信号需要保证严格的同步,从而导致 M2M 等大连接通信节点需要耗费大量的时间在信令开销和传输等待上,难以满足低时延要求。OQAM-OFDM 技术使用了性能良好的原型滤波器,带外泄露低,因此对时间和频率的同步要求比 OFDM 技术低,更适合进行异步传输。

(3) 参数可灵活配置

由于需要严格的正交,OFDM 系统载波必须设置相同的带宽,并且各载波之间需要保持完全同步与正交。不同于 OFDM 技术,OQAM-OFDM 采用的是非矩形原型滤波器,其良好的频域聚焦特性能够大幅度降低信号旁瓣和带外泄露,使得用户之间不再需要严格的同步和正交。因此,OQAM-OFDM 各子载波带宽、子载波交叠程度等都可以灵活调控。这一良好特性不仅为异步传输创造了条件,也为 5G 多样化业务通信场景提供了灵活配置参数的可能。



4 关键技术与挑战

OQAM-OFDM 技术的异步传输特性为其在 5G 中的应用奠定了良好的基础。但是,要想真正实现 OQAM-OFDM 技术在 5G 中的商业应用,还有一些关键技术问题需要解决。下面从原型滤波器设计、拖尾抑制、多用户异步通信下的信道估计以及与大规模 MIMO 结合这几个方面来分析。

(1) 原型滤波器设计

原型滤波器是 OQAM-OFDM 技术的核心部分,其设计直接影响 OQAM-OFDM 通信系统的性能。需要指出的是,非矩形原型滤波器的引入破坏了信号的完全正交性,造成了信号间的干扰^[11,12]。因此在未来 5G 通信场景下,需要结合实际通信环境,设计能够抑制信号干扰的原型滤波器。

(2) 拖尾抑制

OQAM-OFDM 技术采用具有较长冲激响应的原型滤波器,信号波形前后会产生较长的拖尾。在较长的数据分组通信场景下,这一拖尾几乎没有影响。然而在未来 5G 场景下,M2M 通信包含大量的短帧数据,这使得 OQAM-OFDM 频谱效率出现下降。现有的拖尾抑制方法已经可以去除全部的拖尾,但是会出现一定性能损失^[13,14]。为了解决这一问题,未来需要探索新的拖尾抑制方法,兼顾 OQAM-OFDM 带外和误码率两方面的性能,同时有效抑制信号拖尾。

(3) 多用户异步通信下的信道估计

由于 OQAM-OFDM 信号间的干扰,传统的 OFDM 中的信道估计技术需要经过一定调整才能在 OQAM-OFDM 中使用。现有 OQAM-OFDM 信道估计技术很少在多用户异步通信场景下评估其性能,并且其中多数信道估计方法还要基于低频率选择性信道的假设条件^[15,16]。为了支持 5G 中的多用户异步通信,需要设计能够适应高频率选择性信道环境的信道估计技术,并有效降低导频对其他用户的干扰以及其他用户对导频信道估计性能的影响。

(4) 与大规模 MIMO 技术结合

OQAM-OFDM 与大规模 MIMO 技术的结合既可以有效对抗多径信道衰落、提高频谱利用率,又可以成百上千倍地提升系统容量,从而应对 5G 数据流量的增长^[17]。然而,目前 OQAM-OFDM 与大规模 MIMO 技术的结合尚处于起步阶段,还面临导频污染和高峰均功率比等方面的问题。

5 结束语

世界各国在推动 4G 产业化工作的同时,已开始着眼于 5G 的研究。相比 4G,5G 不仅要支持更高的传输速率,还要支持低功耗大连接、低时延高可靠等更加多样化的场景。为了应对这一严峻挑战,未来 5G 物理层调制技术必须支持异步传输。作为一种支持异步传输的多载波技术,OQAM-OFDM 受到了广泛关注。本文在介绍 OQAM-OFDM 基本原理和特性的基础上,介绍了 5G 应用中的优势主要为:高频谱效率、支持异步传输、参数可灵活配置,最后从原型滤波器设计、拖尾抑制、多用户异步通信下的信道估计以及与大规模 MIMO 结合等方面,指出存在的关键技术挑战。

参考文献:

- [1] 方箭,李景春,黄标,等. 5G 频谱研究现状及展望[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 2015329.
FANG J, LI J C, HUANG B, et al. Review and prospect on the research of 5G spectrum[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 2015329.
- [2] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [3] 王志强. OFDM 信号旁瓣抑制新技术[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
WANG Z Q. A novel algorithm for sidelobe suppression based on OFDM signals[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [4] BANELLI P, BUZZI S, COLAVOLPE G, et al. Modulation formats and waveforms for 5G networks: who will be the heir of OFDM: an overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(6): 80-93.
- [5] 芦世先. 降低 FBMC-OQAM 信号峰均功率比的无失真方法[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
LU S X. Non-signal distortion methods for the PAPR reduction of the FBMC-OQAM signals[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [6] FARHANG-BOROUJENY B. OFDM versus filter bank multicarrier[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(3): 92-112.
- [7] 陈达. OQAM-OFDM 无线通信系统关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
CHEN D. Research on key technologies in OQAM-OFDM communication systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [8] 5G NOW Project. 5th generation non-orthogonal waveforms for

asynchronous signaling [R/OL]. [2015-03-02]. <http://www.5gnow.eu/>.

- [9] METIS Project. Mobile and wireless communications enablers for the 2020 information society [R/OL]. (2015-05-11) [2015-12-10]. <http://www.metis2020.com/>.
- [10] 陈晓贝, 魏克军. 全球 5G 研究动态和标准进展 [J]. 电信科学, 2015, 31(5): 2015120.
CHEN X B, WEI K J. Global research and standardization progress of 5G[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 2015120.
- [11] SAHIN A, GUVENC I, ARSLAN H. A survey on multicarrier communications: prototype filters, lattice structures, and implementation aspects [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 16(3): 1312-1338.
- [12] CHEN D, QU D M, JIANG T, et al. Prototype filter optimization to minimize stopband energy with NPR constraint for filter bank multicarrier modulation systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(1): 159-169.
- [13] BELLANGER M. Efficiency of filter bank multicarrier techniques in burst radio transmission [C]//IEEE Global Telecommunications Conference, December 6-10, 2010, Miami, USA. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [14] WANG F, QU D M, JIANG T, et al. Tail shortening by virtual symbols in FBMC-OQAM signals [C]//IEEE Signal Processing and Signal Processing Education Workshop 2015, August 9-12, 2015, Salt Lake City, Utah, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 157-161.
- [15] CUI W J, QU D M, JIANG T, et al. Coded auxiliary pilots for channel estimation in FBMC-OQAM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015(1): 91-99.
- [16] DORE J B, BERG V, KTENAS D. Channel estimation techniques for 5G cellular networks: FBMC and multiuser asynchronous fragmented spectrum scenario[J]. IEEE Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2015, 26 (1): 15-30.
- [17] FARHANG A, MARCHETTI N, DOYLE L E, et al. Filter bank multicarrier for massive MIMO [C]//IEEE Vehicular Technology Conference, September 14-17, 2014, Vancouver, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-7.

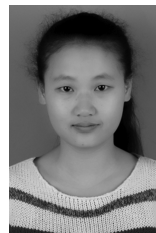
[作者简介]



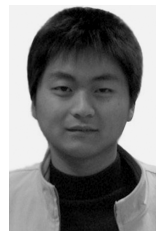
李俊(1992-),男,华中科技大学博士生,主要研究方向为 OQAM-OFDM 和 MIMO 系统。



田苑(1991-),女,华中科技大学博士生,主要研究方向为 OQAM-OFDM 原型滤波器设计。



邱玉(1992-),女,华中科技大学硕士生,主要研究方向为 OQAM-OFDM 和 MIMO 系统。



陈达(1986-),男,华中科技大学讲师,主要研究方向为 OQAM-OFDM 和大规模 MIMO 系统。



江涛(1970-),男,华中科技大学教授,主要研究方向包括 OFDM 及 OQAM-OFDM 通信系统、大规模 MIMO 系统和信号处理。