

面向 5G 的新型多载波传输技术比较

摘要：介绍了几种面向 5G 的新型多载波传输技术：滤波器组多载波（FBMC，Filter Bank Multicarrier）、通用滤波多载波（UFMC，Universal Filtered Multicarrier）和广义频分复用（GFDM，Generalized Frequency Division Multiplexing）的基本原理，并从第五代移动通信系统（5G）支持的应用场景和技术需求的角度对三种多载波传输技术的优缺点进行比较。研究表明三种多载波传输技术的带外泄露较低，FBMC 系统不使用 CP（CP，Cyclic Prefix），因此具有很高的时频效率，但 FBMC 系统帧的长度比较长，不适合短包类业务；UFMC 对一组连续的子载波滤波，可以支持较短的帧结构，但 UFMC 不使用 CP，复杂度较高；GFDM 基于独立的块调制，具有灵活的帧结构，鲁棒性好，复杂度比前两者低，便于实际应用。

关键词：多载波；第五代移动通信系统；滤波器组多载波；通用滤波多载波；广义频分复用

Comparison of New Multicarrier Transmission Techniques for 5G

1, 1, 2

LI Ning ZHOU Wei

(1. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology;

2. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper describes several 5G-oriented multicarrier transmission technologies, including FBMC (Filter Bank Multicarrier), UFMC (Universal Filtered Multicarrier) and GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing). In view of 5G application scenario and technical requirement, the three candidate complexity. GFDM, based on the modulation of independent blocks, with flexible frame structure and good robustness, including low-complexity implementation, is suitable for practical applications.

Key words: Multicarrier; 5G; FBMC; UFMC; GFDM

0 引言

近年来，随着智能终端设备的发展，新的技术和业务的不断出现，未来无线数据业务将向多样化、智能化发展，当前的无线蜂窝网络并不能满足人们的需求。为了应对未来海量的设备连接，不断涌现的

各类新的业务和应用场景如车联网（Tactile Inter-net）、虚拟现实（VR，Virtual Reality）、在线游戏（On-line Gaming）、机器类通讯（MTC，Machine-Type Communication）、物联网（IoT，Internet of Things）等^[1]，第五代无线通信系统（5G Wireless Communica-

tion Systems) 的研究正如火如荼的进行, 各个国家和地区都纷纷成立了研究和推进 5G 技术发展的计划或组织如欧洲的第七框架计划里的 METIS 和 5GNow、韩国的 5G Forum 以及中国的 IMT-2020 等。

多载波传输技术是未来通信物理层的关键技术之一, 其中 CP-OFDM (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 以其传输效率高, 易通过 FFT / IFFT 实现, 易与 MIMO 结合等诸多优点被广泛用于第四代移动通信系统 (4G LTE-A) 和 802. 16m 以及

[2]

其它通信系统中。但是传统的 CP-OFDM 存在带外泄漏高、同步要求严格、不够灵活等缺点, 不能很好的应对未来的各种丰富的业务场景。而 5G 支持丰富的业务场景, 每种业务场景对传输技术的需求各不相同, 能够根据业务场景来动态地选择和配置不同的多载波传输参数, 同时又能继承传统的 CP-OFDM 的优点, 是对 5G 多载波传输技术的必然要求, 所以必须研究开发出新的多载波传输技术, 以适应 5G 新的业务的要求。本文将详细的介绍几种目前热门的多载波传输技术: 滤波器组多载波 (FB-MC) [3]、通用滤波多载波 (UFMC) [4]、广义频分复用 (GFDM) [5] 的基本原理, 并对各多载波传输技术的优缺点进行比较与总结, 以对目前 5G 多载波传输技术的研究现状作一个综合性的介绍。本文首先介绍为何传统的 CP-OFDM 难以满足新场景下的需求, 然后给出三种新型多载波传输技术的基本原理, 最后对几种多载波传输技术进行比较并总结。

1 CP-OFDM 系统缺陷

5G 支持的应用和业务将会变的多样化智能化, 不同的业务对空口的要求也不一样, 比如带宽的业务要求更高的速率, 对时延要求极为严格的车联网业务以及物联网的海量连接等。下面我们直接从

5G 支持的业务场景的角度来解释为何 CP-OFDM 难以满足新场景下的需求。

() [1, 6-8], 1 灵活性问题。事实上 一方面车联网

自动驾驶业务端到端 1ms 时延的要求, 使得系统必须具有极短的时域符号和极短的传输时间间隔 (TTI, transmission time interval), 而这就需要频域较宽的子载波带宽。另一方面, 对于物联网业务, 当物联网的很多传感器同时连接时, 单个连接传送数据量极低, 这属于短包类突发式通信业务, 这就需要在频域上配置带宽比较窄的子载波, 这就会使时域符号和 TTI 足够长, 因此对于物联网业务就几乎可以

不考虑时延扩展的问题, 也就不需要再引入 CP。现有 OFDM 方案的子载波带宽确定后, 符号的长度、CP 的长度等也就确定了, 因此, CP-OFDM 系统的灵活性和应变能力不足, 这就要求新的传输技术能够支持灵活的配置参数。

(2) 精确的同步 [1]。由于 OFDM 的优势主要体现在子载波间的正交性, 这就需要精确的同步, 但如果对于物联网场景中如此海量的链接都使用精确的同步过程, 那么网络将存在大量的同步信令, 造成网络阻塞, 同时异步操作还可以解决终端省电的问题。

(3) 对零散频段的利用 [1]。由于各种原因, 通信界中还有很多未使用的分散的频段, 为了解决频带资源稀缺的问题, 可以将这些离散的频段利用起

来。5G 将这些零散频谱的利用作为 5G 支持的通信场景中的一种。但是由于 CP-OFDM 等效于使用矩形窗进行脉冲成形, 因此旁瓣功率泄露较大, 这会导致严重的子载波间的干扰, 对零散频段的利用造成了困难。

2 几种面向 5G 新型多载波传输技术的基本原理

由于 CP-OFDM 不能满足 5G 的需求, 各国的学者纷纷开发研究出很多新的多载波传输技术, 以弥补或者改进传统的 CP-OFDM 的缺陷。滤波器组多载波 (FBMC)、通用滤波多载波 (UFMC)、广义频分复用 (GFDM) 是目前业界讨论的最多的多载波传输技术, 下面将分别介绍三种多载波传输技术的基本原理。

2. 1 滤波器组多载波 (FBMC)

FBMC 系统由发送端的综合滤波器组和接收端的分析滤波器组组成。分析滤波器组把输入信号分解成多个子带信号, 综合滤波器组对各个子带信号进行综合后进行重建输出, 由此可知, 分析滤波器组和综合滤波器组互为逆向结构 [7, 9]。无论是分析滤波器组还是综合滤波器组它们的核心结构都是原型滤波器, 滤波器组中的其它滤波器都是基于原型滤波器频移而得到的, 分析滤波器组和综合滤波器组

的原型函数互为共轭和时间翻转 [9]。图 1 是 FBMC 系统基于 IFFT / FFT 实现的框图, 接收端输入数据经过串并变换, 然后通过 OQAM 处理以消除相邻子载波之间的干扰, 再经过 IFFT 变换, 之后进入多相滤波器组, 而接收端进行相应的逆变换恢复原始数据。值得一提的是, 由于原型滤波器可以根据实际

的需求在一定准则下进行设计，各滤波器之间不再是正交的，因此 FBMC 子载波之间存在干扰，FBMC

采用 OQAM 方式处理数据既可以避免相邻子载波之间的干扰，又可以保持与 FFT 相同的码率，使得所有的子载波得以充分利用。

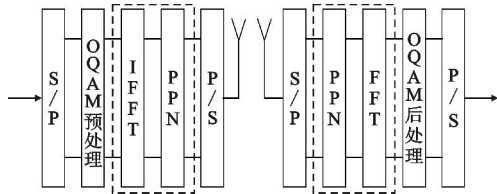


图 1 基于 IFFT/FFT 实现的 FBMC 系统框

其中多相滤波器组的结构如图 2 所示，图中 $H_i (i = 1, 2, \dots, M-1)$ 表示子带滤波器频率响应的 Z 变换。

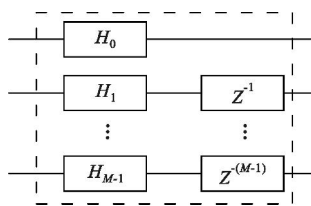


图 2 PPN 结构框

目前关于 FBMC 的研究大多集中在认知无线电和频谱感知的方面，旨在利用零散的频段。这就要求原型滤波器在满足一定准则下旁瓣衰减水平高。

图 3 和图 4 分别显示了使用 PHYDYAS 项目组设计的滤波器的 FBMC 系统与 OFDM 的子载波的衰减情况。

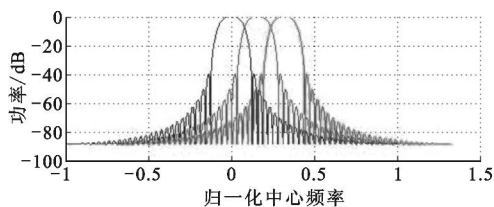


图 3 FBMC 子带衰减

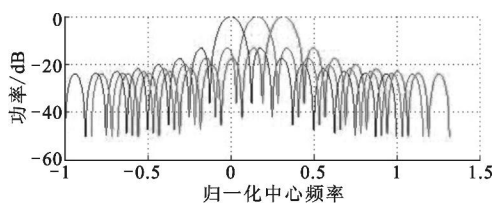


图 4 OFDM 子带衰减

通过设计 FBMC 的原型滤波器的冲激响应和频率响应，以达到降低带外泄露的目的，便于利用零散的频谱资源，并且各子载波之间不必是正交的，可以

使用更小的频率保护间隔，因此不需要插入循环前缀，使系统具有更高的时频效率。但此时由于子载波之间不是正交的，必然会导致较高的符号间干扰（ISI, Inter Symbol Interference）。最后，由于 FBMC

能实现各子载波带宽设置、各子载波之间的交叠程度的灵活控制，从而可灵活控制载波间干扰（ICI, Inter Carrier Interference）。值得说明的是，因为子载波具有较窄的带宽，发射滤波器的冲激响应的长度通常很长，于是 FBMC 的帧的长度比 OFDM 的帧长，但 FBMC 符号中没有循环前缀，从而可以弥补这种效率损失。此外，FBMC 的计算复杂度高于 OFDM，但由于信号处理和电子设备的显著进步，FBMC 实际应用是可行的。

2. 2 通用滤波多载波 (UFMC)

由于 FBMC 滤波器的帧的长度要求使得 FBMC 不适用于短包类通信业务以及对时延要求较高的业务，所以有学者提出了一种针对 FBMC 的改进方案—通用滤波多载波技术 (UFMC) [4]。UFMC 通过对一组连续的子载波进行滤波操作，其中子载波的个数根据实际应用进行配置，这样就能克服 FBMC

系统中存在的不足。当每组中子载波数为 1 时 UFMC 就成为 FBMC 传输，所以 FBMC 是 UFMC 的一种特殊情况，因此 UFMC 也被称为通用滤波的 OFDM (UF-OFDM, universal filter OFDM)。图 5 为 UFMC 的发射机框图。

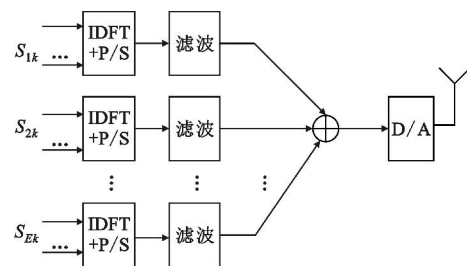


图 5 UFMC 发射端框

如图 5 所示， k 表示第 k 位用户，系统共有 B 个子带， i 为子带索引， L 为子带滤波器的长度，IDFT 的长度为 N ，则发射端叠加所有子带后的信号为：

$$\mathbf{x}_k = \sum_{i=1}^B \mathbf{V}_{ik} \mathbf{s}_{ik} \quad (1)$$

式中， \mathbf{V}_{ik} 为第 k 位用户的第 i 个子带的 IDFT 矩阵， \mathbf{F}_{ik} 是一个由滤波器冲激响应组成的 Toeplitz 滤波矩阵， \mathbf{s}_{ik} 是第 k 位用户的第 i 个子带的传输信号， \mathbf{x}_k 为所有子带叠加后的信号。

UFMC 不使用循环前缀，滤波器的长度取决于

子带的宽度。根据实际的应用需求配置子载波的个数使得 UFMC 变得更加灵活,因此 UFMC 具有 FBMC 系统的优点,还可以支持不同类型的业务。相比于 FBMC 的滤波器长度,UFMC 技术可以使用较短滤波器长度,这样可以支持短包类业务。

2.3 广义频分复用 (GFDM)

相对 OFDM 和 FBMC,UFMC 有更多优点,但因为 CP,UFMC 比 CP-OFDM 对短时间的不重合更敏感,因此,UFMC 可能对需要松散时间同步以节约能源的应用场景不适合。为此,广义频分复用 (GFDM) 被提出^[5,10]。图 6 为 GFDM 的传输原理框图。

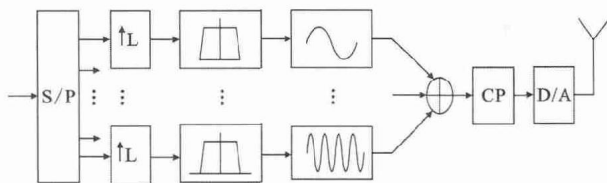


图 6 GFDM 发射端框

在 GFDM 系统中, K 为子载波数, M 为发送的符号数, 每个符号进行 $L \geq K$ 的上采样, 则总的采样数 $N = KM$, $g[n]$ 为脉冲成型滤波器, 进行 GFDM 调制后的信号为:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} d_{km} g_{km}[n] = \sum_{k=0}^{K-1} d_k[m] g[(n - mL) \bmod LM] e^{j2\pi k_L n} \quad (2)$$

式中, k 为子载波索引, m 为符号索引, n 为抽样索引, 其中 $k = 0, \dots, K-1$, $m = 0, \dots, M-1$, $n = 0, \dots, N-1$, 则特别的取 $L = K$, 则 $N = KM$, 式 2 变为:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} d_{km} g_{km}[n] = \sum_{k=0}^{K-1} d_k[m] g[(n - mK) \bmod N] e^{j2\pi k \frac{n}{K}} \quad (3)$$

下面的讨论都是基于式 (3)。特别的: 当 $M = 1$, $g[n] = \delta[n]$ 时, GFDM 就退化为 OFDM; 当 $K = 1$, $g[n] = \delta[n]$ 时, GFDM 退化为 SC-FDE。式 3 可以写成矩阵的形式, 令 \mathbf{x} 表示由 $x[n]$ 构成的 $LM \times 1$ 列向量, \mathbf{d} 是由数据符号构成的 $KM \times 1$ 向量, \mathbf{A} 是一个由脉冲成型滤波器及其频移版本构成的 $LM \times KM$ 矩阵。即

$$\mathbf{A} = (g_{00}, \dots, g_{K-1,0}, g_{01}, \dots, g_{0,M-1}, \dots, g_{K-1,M-1})^T \mathbf{d} = (d_{00}, \dots, d_{K-1,0}, d_{01}, \dots, d_{0,M-1}, \dots, d_{K-1,M-1})^T$$

当 $L = K$, 则 $N = KM$, \mathbf{A} 就成为一个 $N \times N$ 矩阵, \mathbf{d} 和 \mathbf{x} 成为 $KM \times 1$ 向量。所以 GFDM 调制器的矩阵形式为 $\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{d}$ 。图 7 为 GFDM 调制器的数字实现框图^[10]。

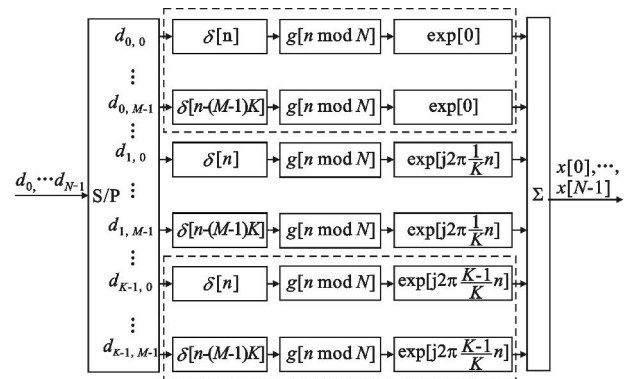


图 7 GFDM 调制器的数字实现框

根据不同类型的业务和应用对空口的要求, GFDM 可以选择不同的脉冲成型滤波器和插入不同类型的 CP。此外由于 GFDM 信号在频域具有稀疏性, 可以设计较低复杂度的发射和接收算法。此外 GFDM 基于独立的块调制, 通过配置不同的子载波与子符号, 使得其具有灵活的帧结构, 可以适用于不同的业务类型。GFDM 的子载波通过有效的原型滤波器滤波, 在时间和频率域被循环移位, 此过程减少了带外泄漏, 使目前的服务或其他用户之间不产生严重干扰, 因而具有 FBMC 的 ICI 抑制能力。

3 FBMC、UFMC、GFDM 技术比较

三种多载波调制技术 FBMC、UFMC、GFDM 具有各自的特点, 表 1 对三种多载波传输技术在各个指标下的性能特点^[11]。

表 1 FBMC、UFMC、GFDM 比较

传输技术	FBMC	UFMC	GFDM
峰均比	高	中等	低
带外泄露	低	低	非常低
频谱效率	高	高	中等
复杂度	高	高	中等
CP	不需要	不需要	需要
正交性	是	是	否
ISI	高	高	中等
同步要求	低	低	中等
MIMO	是	是	是
时延	长	短	短
兼容性	兼容	兼容	兼容

4 结 语

FBMC 旁瓣水平低,降低了对同步的严格要求,但是滤波器的冲激响应长度通常很长,所以 FBMC 的帧较长,不适用于短包类通信业务。UFMC 是对一组连续的子载波进行滤波处理,UFMC 技术可以使用较短滤波器长度,这样可以支持短包类业务,但

UFMC 没有 CP,因此对需要松散时间同步以节约能源的应用场景不适合,此外 FBMC 和 UFMC 系统的复杂度较高。GFDM 可以使用 CP,具有灵活的帧结构,可以适配不同的业务类型。但三种技术的复杂度均比 OFDM 复杂,其中 GFDM 的复杂度较低,不过根据摩尔定理,集成电路的发展将会弥补这一不足。

参考文献:

- [1] Wunder G, Jung P, Kasparick M, et al. 5G NOW: Non-orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications [J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52 (2) : 97—105.
- [2] Nee R V, Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications [M]. Artech House, Inc. 2000: 1—15.
- [3] Farhang — Boroujeny B. OFDM Versus Filter Bank Multi-carrier [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28 (3) : 92—112.
- [4] Vakilian V, Wild T, Schaich F, et al. Universal — Filtered Multi — Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE [C]. Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE. IEEE, 2013: 223—228.
- [5] Fettweis G, Krondorf M, Bittner S. GFDM — Generalized Frequency Division Multiplexing [C]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2009: 1—4.
- [6] 董爱先, 王学军. 第 5 代移动通信技术与发展趋势 [J]. 通信技术, 2014, 47 (03) : 235—240.
- [7] 谢显中. 第 5 代移动通信基本要求与新型多址复用技术 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2015, 27 (04) : 435—440.
- [8] Schaich F, Wild T, CHEN Y. Waveform Contenders for 5G — Suitability for Short Packet and Low Latency Transmissions [C]. Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2014 IEEE 79th. IEEE, 2014: 1—5.
- [9] Bellanger M G. FBMC Physical Layer: a Primer, PHYDYAS Document (Online). Available: http://www.ict-phydyas.org/teamspace/internal-folder/FBMC-Primer_06-2010.pdf.
- [10] Michailow N, Matthé M, Gaspar I S, et al. Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62: 3045—3061.
- [11] LUO F L. Signal Processing Techniques for 5G: An Overview [J]. ZTE Communications, 2015 (1) : 20—27.

作者简介:



李 宁 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线移动通信, 数字信号处理;

周 围 (1971—), 男, 教授, 硕导, 博士, 主要研究方向为无线移动通信技术、通信系统及信号处理、智能天线技术等。

微信扫描以下二维码, 免费加入【5G 俱乐部】, 还赠送整套: 5G 前沿、NB-IoT、4G+ (VoLTE) 资料。

