

一种适合 5G 的新型多载波技术 ——FB-OFDM

FB-OFDM: A Novel Multicarrier Scheme for 5G

张万春/ZHANG Wanchun

辛雨/XIN Yu

郝光辉/YU Guanghui

(中兴通讯股份有限公司, 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057,
China)

长期演进技术(LTE)是4G无线蜂窝通信技术。LTE采用正交频分复用(OFDM)技术,子载波和OFDM符号构成的时频资源组成了LTE系统的无线物理时频资源^[1]。目前OFDM技术在无线通信中已经广泛应用。通过使用循环前缀(CP),CP-OFDM系统能很好地解决多径时延问题,并且将频率选择性信道分成了一套平行的平坦信道,简化了信道估计方法,提高了信道估计精度。然而,由于CP-OFDM系统带外泄漏较大,目前LTE系统在频域上使用了保护间隔,这就降低了频谱效率,且CP-OFDM系统性能对相邻子带间的频偏和时偏比较敏感,要求相邻子带间的用户严格同步,因此不利于不同子带间不同业务的应用。

现在各大公司开始了无线通信5G技术的研究,其中,抑制带外泄漏是一个重要方向。文献[2-8]提到了一些新型多载波技术,如基于滤波器组多载波的移位正交幅度调制(FBMC-OQAM)技术,基于子带滤波

收稿时间:2016-03-02
网络出版时间:2016-04-21

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6868(2016)03-0022-004

摘要: 提出了一种适合5G的新型多载波技术——基于滤波器组的正交频分复用(FB-OFDM)技术,即在收发端通过多相滤波器进行子载波级滤波,简化实现的复杂度,与LTE系统兼容。认为在FB-OFDM系统中,根据不同场景的需求侧重点,选择合适的波形函数调制发射数据,能够灵活地适用于不同的业务。最后以扩展根升余弦函数为例,通过仿真验证了FB-OFDM系统的带外泄露小,异步性能好。

关键词: 多载波;滤波器组;多相滤波器;波形函数

Abstract: In this paper, a new type of multi-carrier technology—filter bank-orthogonal frequency division multiplexing (FB-OFDM) technology, which is suitable for 5G, is proposed. Subcarrier level filtering is carried out at the transceiver through polyphase filter, so as to simplify the implementation and be compatible with LTE system. According to the focuses of requirements in different scenes, FB-OFDM system can select appropriate waveform function modulation to transmit data which can be flexibly applied into different businesses. At last, taking expanding raise roof cosine as an example, it is verified through simulation that the out-of-band leakage of the FB-OFDM system is low and the asynchronous performance is good.

Key words: multicarrier; filter bank; polyphase filter; pulse function

的正交频分复用(F-OFDM)技术,通用滤波的多载波(UFMC)技术和通用频分复用(GFDM)技术。这些技术可以在一定程度上抑制带外泄漏,但也都有一定的缺点,如FBMC-OQAM技术的信道估计和与多输出多输入(MIMO)技术相结合是个难点^[9-10];UFMC技术和F-OFDM技术子带间需要一定的保护间隔,对同一子带上的用户仍然需要严格同步;GFDM技术时频域数据间不正交,接收端解调复杂度会比较高^[11-12]。

2015年12月3GPP RAN会议上的5G SI提案里提出了对基于OFDM的新波形方案的研究。文章介绍的就是OFDM+滤波器组(FB)的方案,简称为基于滤波器组的正交频分复用

技术(FB-OFDM)。与其他新型多载波技术相比,FB-OFDM技术具有一定的优势^[13]。

1 FB-OFDM 技术原理

FB-OFDM技术在原理上是通过多个滤波器(即滤波器组)对传输带宽里的多个子载波分别滤波,然后再叠加在一起形成时域数据信号。

FB-OFDM与其他方案的区别为:

(1) UFMC和F-OFDM都是对整个子带进行滤波,而FB-OFDM是子载波级滤波。

(2) FBMC-OQAM是基于实数调制,实数+设计好的相位因子,可以使得不同资源元素(RE)的数据之间准正交,而FB-OFDM是基于复数调制。

(3)GFDM 时频域数据间不正交,而 FB-OFDM 根据不同场景选择合适的波形函数和符号间隔,可以使得时频域数据间准正交,且 FB-OFDM 在收发侧采用相匹配的多相滤波器来实现,GFDM 并没有提及这一点。

FB-OFDM 技术在原理上是对传输带宽里的每个子载波进行滤波,但是当传输带宽里的子载波个数非常多时,这种操作方式就会非常复杂,而且也不利于与 LTE 技术兼容。为了简化实现技术的复杂度,我们可以使用多相滤波器来处理。

1.1 FB-OFDM 系统发射端原理

FB-OFDM 技术在发射端的具体实现如下:先对子帧内每个符号的频域数据进行快速傅里叶反变换 (IFFT) 处理,然后对子帧内 IFFT 处理后的时域数据使用多相滤波器进行处理。

FB-OFDM 系统发射端原理如图 1 所示,其中虚线框内是多相滤波器模块的操作,这个操作代替了 LTE 的加 CP 操作,其余模块与 LTE 的完全相同。

图 1 的多相滤波器框图中, Z^{-1} 为延时移位处理, $S\downarrow$ 为下采样, $S\uparrow$ 为上采样,滤波器 1、滤波器 2、……、滤波器 N 。多相滤波器的参数与选择的波形函数有关,先对预先选择的波

形函数进行处理,将处理后的参数值传递给多相滤波器。

当波形函数为矩形且符号间隔 $T_1 = T_0 + CP$ (T_0 为子载波间隔的倒数,CP 为循环前缀)时,多相滤波器模块的操作就等价于 LTE 里的添加 CP 的操作,FB-OFDM 方案就变回到 LTE 方案了。

在 FB-OFDM 系统侧可以配置波形函数参数,不同的参数值对应着不同的波形函数。根据不同场景的需求侧重点,用户设备 (UE) 可以选择合适的波形函数调制发射数据,如对于带外泄漏抑制要求比较高的场景,可以选择升余弦函数、IOTA 函数等等;对于数据解调性能要求比较高,但对带外泄漏抑制要求不高并且频偏和时偏比较小的场景,可以选择矩形函数回退到 LTE。

符号间隔 T_1 也可作为 FB-OFDM 系统侧参数,当信道条件非常好时, T_1 可以小于 T_0 ,实现超奈奎斯特传输,提高系统容量;当信道条件差时, T_1 可以大于 T_0 ,使得 FB-OFDM 系统的符号间子载波间的数据接近正交。符号间隔 T_1 也在多相滤波器模块里实现。

不同波形函数及其相应的参数对带外泄漏抑制以及数据解调性能的影响也不同。我们需要对波形函数做更多研究,以挑选出一些更好的

波形函数。

1.2 FB-OFDM 系统接收端原理

FB-OFDM 系统接收端原理如图 2 所示,其中虚线框内是多相滤波器模块的操作,这个操作代替了 LTE 去 CP 操作,其余模块与 LTE 的相同。

图 2 的多相滤波器框图中, Z^{-1} 为延时移位处理, $S\downarrow$ 为下采样, $S\uparrow$ 为上采样。这里采用了最小均方差 (MMSE) 算法的滤波处理,可以抑制符号间的干扰,提升接收端解调性能。

2 FB-OFDM 技术性能仿真及分析

为了很好地抑制带外泄漏,FB-OFDM 系统可以选择不同的波形函数进行调制。文章中,我们就以扩展根升余弦函数为例进行介绍。

2.1 一种适合 FB-OFDM 技术的波形函数

扩展根升余弦函数由两个函数乘积构成,其中一个函数为:频域上的根升余弦函数通过傅里叶变换到时域上的函数;另一个函数为:时域升余弦函数。由于是通过根升余弦函数扩展而获得的新函数,在文章中,我们将此新函数定义为扩展根升余弦函数。

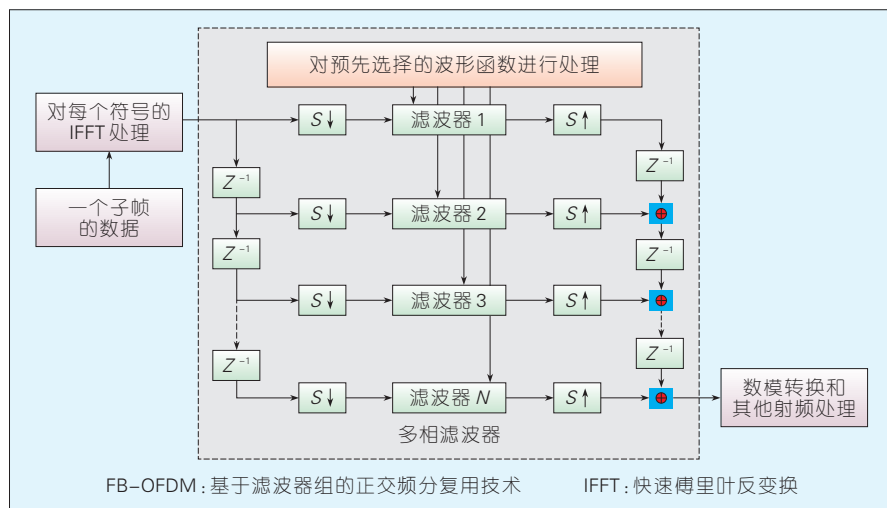
我们可以推导出频域上的根升余弦函数通过傅里叶变换到时域上的函数具体生成。设频域上的升余弦函数 $y(f)$ 表达式为:

$$y(f) = \begin{cases} A & 0 \leq |f| < f_0(1-\alpha) \\ \frac{A}{2} (1 + \cos(\frac{|f| - f_0(1-\alpha)}{2f_0\alpha} \pi)) & f_0(1-\alpha) \leq |f| < f_0(1+\alpha) \\ 0 & |f| \geq f_0(1+\alpha) \end{cases}$$

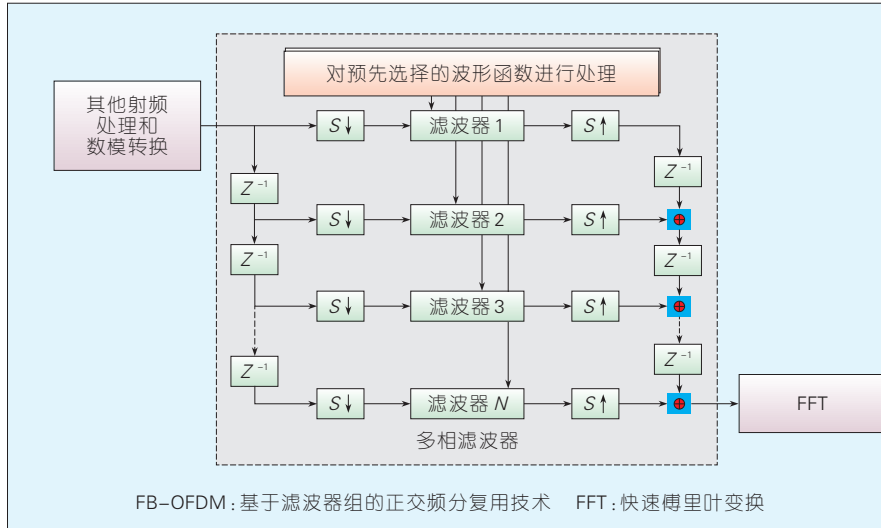
那么,频域根升余弦函数(根升余弦函数即为升余弦函数的平方根)为 $sry(f) = \sqrt{y(f)}$ 。

其中, A 为常数; α 为滚降因子,取值范围为 $[0,1]$; $| \cdot |$ 为绝对值运算符; f_0 为频域升余弦函数在频域上的半值宽度的一半。那么,频域根升余弦函数在时域的表达形式为:

$$IFsry(t) = IFFT(sry(f)) \quad (1)$$



▲ 图 1 FB-OFDM 系统发射端原理



FB-OFDM: 基于滤波器组的正交频分复用技术 FFT: 快速傅里叶变换

▲图2 FB-OFDM系统接收端原理

其中, $IFFT()$ 表示对频域函数做IFFT变换, 成为时域函数。

我们还可以推导出时域升余弦函数具体生成过程。

设时域升余弦函数表达式为:

$$x(t) = \begin{cases} B & 0 \leq |t| < T_0(1-\beta) \\ \frac{B}{2} (1 + \cos(\frac{|t-T_0(1-\beta)|}{2T_0\beta}\pi)) & T_0(1-\beta) \leq |t| < T_0(1+\beta) \\ 0 & |t| \geq T_0(1+\beta) \end{cases}$$

其中, B 为常数; β 为滚降因子, 取值范围为 $[0, 1]$; $|t|$ 为绝对值运算符; T_0 为升余弦函数的半值宽度的一半。

扩展根升余弦函数 $W(t)$ 为:

$$W(t) = IFSry(t)x(t) \quad (2)$$

函数 $IFsry(t)$ 具有很窄的频谱特性, 其频谱的半值宽度为 f_0 , 而且该函数的相关特性比较好, 有利于保证符号间正交; 但是该函数在时域上无限长, 如果直接用来调制 IFFT 之后的符号数据, 则符号数据也将无限长。函数 $x(t)$ 具有很窄的时域特性, 其时域的半值宽度为 T_0 。因此将这两个函数乘积获得的扩展根升余弦函数同时具有很好的频域特性和时域特性。

2.2 性能仿真结果及分析

以扩展升余弦函数为例, FB-OFDM 技术方案与 OFDM (即 LTE) 的仿真性能对比, 本节内容包括以下几

个方面: 功率谱密度 (PSD), 无时偏无频偏 BLER (误比特率) 性能, 相邻子带存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能 (子带间无保护子载波), 同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能。

FB-OFDM 技术方案的仿真参数如表 1 所示。

(1) PSD

图 3 显示, 与 OFDM 相比, FB-OFDM 的带外泄漏很小, 而且在传输带宽之外的边缘, FB-OFDM 能量泄漏衰减很快, 这有利于减少保护子载波个数。

(2) 无时偏无频偏 BLER 性能

▼表 1 仿真参数

信道	AWGN
调制方式、码率	QPSK 1/3 (MCS7, 实际码率 0.36)
子载波间隔/kHz	15
系统带宽/MHz	10
总的可用 RB 数	50
信道估计	理想
接收端检测方法	MMSE
帧结构	与 LTE 相同
相邻子带存在其他异步用户干扰时	3 个用户使用连续 3 个相邻子带, 子带宽度为 3 RB, 中间用户受到相邻子带 2 用户的干扰, 这 2 用户与中间用户异步, 时偏为 1/2 符号。
同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时	3 个用户使用连续 3 个相邻子帧, 中间用户受到相邻子帧 2 用户的干扰, 这 2 用户与中间用户异步, 时偏为 1/2 符号。
AWGN: 加性高斯白噪声 LTE: 长期演进技术	MCS: 调制编码机制 MMSE: 最小均方差
	QPSK: 正交相移键控 RB: 资源块

图 4 显示, 在加性高斯白噪声 (AWGN) 和无时偏无频偏情况下, 与 OFDM 相比, FB-OFDM 性能降低的非常小。因此 FB-OFDM 以非常小的代价就能够换取带外泄漏的明显降低。

(3) 相邻子带存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能

图 5 显示, 当相邻子带存在其他异步用户干扰时, FB-OFDM 明显好于 OFDM 方案。这有利于子带间用户的异步及使用不同特性的业务。

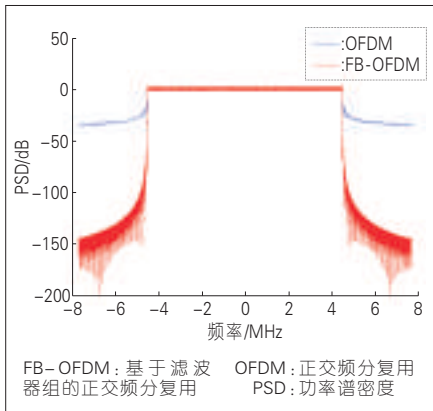
(4) 同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能

图 6 显示, 同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时, FB-OFDM 方案明显好于 OFDM 方案。这有利于降低对用户同步的要求。

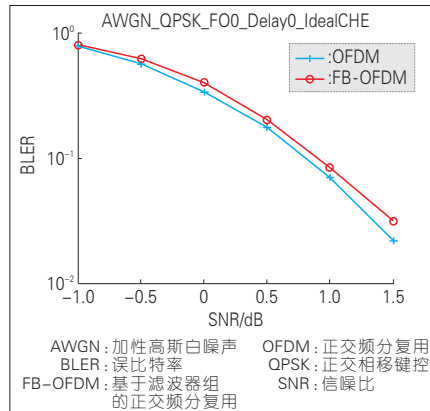
3 结束语

文章首先介绍了 FB-OFDM 技术原理, 随后给出了一种波形函数的性能仿真结果。从仿真结果可以看出, FB-OFDM 技术有很多优势:

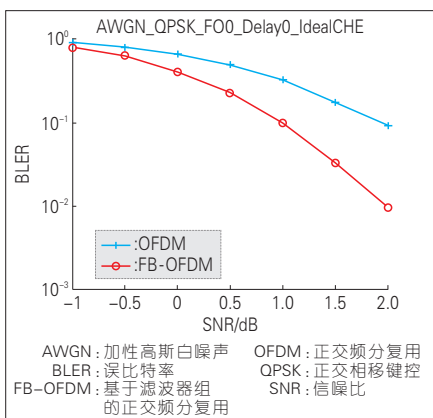
(1) 与 LTE 技术兼容性好。可以很方便地回退到 LTE 的 OFDM 技术, 兼容 LTE 的 MIMO 方案。从前文中 FB-OFDM 方案发射端和接收端原理框图可以看出, 与 LTE 相比, FB-OFDM 方案仅仅是多了一项多相滤波器模块的操作, 而且这个操作可以独立进行, 因此从技术实现的角度看,



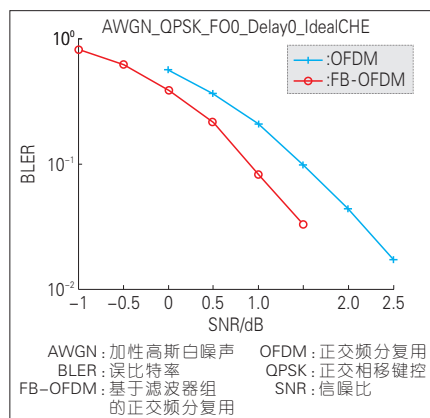
▲图3 功率谱密度 PSD



▲图4 无时偏无频偏 BLER 性能



▲图5 相邻子带存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能



▲图6 同一子带的相邻子帧存在其他异步用户干扰时的 BLER 性能

FB-OFDM 方案与 LTE 具有着很好的兼容性。

(2) 波形函数选择灵活性好。不同场景使用不同的波形函数,以满足不同场景的重点需求。

(3) 带外泄漏小。通过选择合适的波形函数,可以很好地抑制带外泄漏,有利于减少保护子载波个数,并且提高频谱效率,特别是提高窄带频谱效率。

(4) 异步性能好。不同子带间可以异步,不同子带的子载波间隔和符号长度可以不同,以满足不同业务的需求,而且子带间不需要保护间隔。同一子带的不同子帧用户对同步的要求也降低了。

(5) 资源调度灵活。由于是子载波级滤波,因此子带的最小单位可以是单个子载波,即可以基于单个子载

波进行调度,并且每个子载波之间可以异步。

参考文献

- [1] 3GPP. TS36211 Physical Channels and Modulation [S]. 2008
- [2] FARHANG-BOROUJENY B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(3):92-112
- [3] METIS. 5G Waveform Candidate Selection: 5GNOW_D3.1_V1.0 [S]. 2015
- [4] SAHIN A, GUVENC I, ARSLAN H. A Survey on Multicarrier Communications: Prototype Filters, Lattice Structures, and Implementation Aspects [J]. IEEE Communications Survey & Tutorials, 2013, 16(3):1312-1338. DOI:10.1109/SURV.2013.121213.00263
- [5] SIOHAN P, SICLET C, LACAILLE N. Analysis and Design of OFDM/OQAM Systems Based on Filterbank Theory [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(5):1170-1183. DOI:10.1109/78.995073
- [6] DU J F, SIGNELL S. Time Frequency Localization of Pulse Shaping Filters in OFDM/OQAM Systems [C]//2007 6th International Conference on Information,

Communications & Signal Processing. USA: IEEE, 2007:1-5. DOI: 10.1109/ICICS.2007.4449830

- [7] CCSA. Spectrum Localized OFDM Waveform: IMT-2020_TECH_FBMC_2014_0023 [S]. 2014
- [8] FETTWEIS G, KRONDORF M, BITTNER S. GFDM-Generalized Frequency Division Multiplexing [C]//VTC Spring 2009, IEEE 69th. USA: IEEE, 2009:1-4. DOI: 10.1109/VETECS.2009.5073571
- [9] JAVAUDIN J, LACROIX D, ROUXEL A. Pilot-Aided Channel Estimation for OFDM/OQAM [C]//VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Annual. USA:IEEE, 2003:1581-1585. DOI: 10.1109/VETECS.2003.1207088
- [10] LETE C, JAVAUDIN J, LEGOUABLE R, et al. Channel Estimation Methods for Preamble-Based OFDM/OQAM Modulations [J]. European Transactions on Telecommunications, 2008, 19(7):741-750. DOI:10.1002/ett.1332
- [11] DATTA R, MICHALOW N, LENTMAIER M, et al. GFDM Interference Cancellation for Flexible Cognitive Radio PHY Design [C]//VTC Fall. USA: IEEE, 2012:1-5. DOI: 10.1109/VTC Fall.2012.6399031
- [12] MICHALOW N, LENTMAIER M, ROST P, et al. Integration of a GFDM Secondary System in an OFDM Primary System [C]//Future Network & Mobile Summit. USA: IEEE, 2011:1-8
- [13] CCSA. IMT-2020_TECH_FBMC_2016 一种新型多载波技术_FB-OFDM_ZTE [S]. 2016

作者简介



张万春,中兴通讯股份有限公司无线研究院院长,高级工程师;主要研究方向为无线产品研发。



辛雨,中兴通讯股份有限公司资深技术预研工程师;主要研究方向为无线通信技术预研;已在 3GPP 及 3GPP2 国际会议上提交了上百篇标准提案,发表论文 10 余篇,申请专利近百项。



郁光辉,中兴通讯股份有限公司资深技术预研工程师;研究方向为无线通信系统标准预研;已向 IEEE、3GPP 等组织提交 200 篇以上标准提案,其中 50 余篇被接受,发表论文 20 余篇,申请专利 50 余项。