

滤波器组多载波技术仿真性能分析

孙欣丽 王 萍

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

摘要: 基于滤波器组的多载波调制技术是第5代移动通信系统(5G)研究的关键技术之一。与传统的调制技术相比滤波器组多载波技术具有不需要插入循环前缀、较低旁瓣等优点,其技术发展尚处于探索阶段。使用滤波器组多载波技术调制方式实现信号调制主要有两种方式,其中之一的FBMC是在IFFT的基础上使用原型滤波器在帧结构水平上对信号进行滤波,因此重点是设计出滤波器组对帧信号的合理处理方式。

关键词: 第5代移动通信系统;滤波器组多载波技术;OFDM;FBMC

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Filter bank multicarrier technique simulation performance analysis

Sun Xinli Wang Ping

(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, CAS, Shanghai 200050, China)

Abstract: Filter bank based multicarrier technique is one of pivotal techniques of 5G. Compare to traditional modulation, Filter bank based multicarrier technique has some advantages including performing without CP and lower sidelobe. This technique is still developing. There are two classes of modulated filter banks, FBMC filter the signal at the level of frame on the basis of IFFT. So the important thing is reasonable design of processing frame signal by filter banks.

Keywords: 5G; filter bank multicarrier technique; OFDM; FBMC

1 引言

第5代移动通信系统(5G)是面向2020年之后的新一代移动通信系统,和4G相比较,5G在资源利用和传输速率等方面提高一个量级或者更高。5G无线关键技术的研究方向包括:新型调制技术、超密集网络和协同无线通信技术、同时同频全双工、终端通信、多天线传输、高频段通信等^[1]。其中新型信号处理技术就包括滤波器组多载波技术^[2]。

多载波通信是采用多个载波信号,可以解决码间干扰问题^[3]。由于滤波器组多载波技术具有较高的计算效率和易于设计,滤波器组调制技术被广泛的应用^[4-5]。主要有两种类型,其中之一是由Bellanger和提出Dagnet^[6]的DFT多相位滤波器组,另一种就是余弦调制滤波器组。Filiege提出的改进的DFT(MDFT)是FBMC的一种实现方式,主要的目的是削弱相邻频谱的混叠,文献^[7-9]详细的介绍了其特点。

本文首先分别介绍了滤波器组多载波技术和OFDM的结构框架;其次介绍了FBMC和OFDM相比之下的优

点;然后介绍了FBMC的设计结构图和实现过程;最后,在QPSK、8QAM、16QAM调制条件下,对比FBMC和OFDM技术实现链路仿真的误比特率,最后给出结论。

2 滤波器组多载波技术结构

宽带无线通信的物理层主要是基于正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术,将整个频带分为相互正交的子带,使用子带进行数据调制。时域矩形脉冲的频谱是Sinc函数,使用该函数在频域上相互正交。OFDM有较高的旁瓣而且衰减缓慢,容易存在带外干扰过大。而且需要插入循环前缀降低符号效率,因而导致符号利用率较低^[10]。FBMC-OQAM技术是基于多个滤波器组的采用交错正交幅度调制的多载波通信方式。与OFDM系统相比,FBMC-OQAM信号中没有使用CP,因此FBMC-OQAM数据传输速率相对比较高;而且它的第一旁瓣低于OFDM,可以有效抵抗窄带干扰。

OFDM是多载波技术的一种,实现过程中主要是采用快速傅里叶变换FFT,OFDM的系统框图,如图1。

为了解决OFDM存在的带外干扰大、低符号利用率等

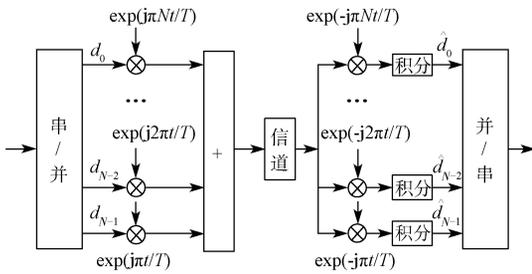


图 1 OFDM 系统框图

问题,滤波器组多载波技术成为载波调制的热点。FBMC 技术是在帧结构上进行了滤波^[11],滤波器组实现多载波信号调制的实现过程,分为发送端的综合滤波器和接收端的分析滤波器(图 2)。在发送端,串并变换把高速的二进制比特流转化为低速的二进制比特流,也就是若干个长度为 N 的符号。分别对每个符号进行 IFFT 变换,然后进行综合滤波器处理。图 3 给出本文仿真使用的实现结构。

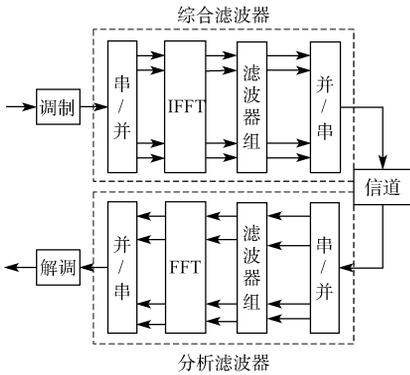


图 2 FBMC 系统框图

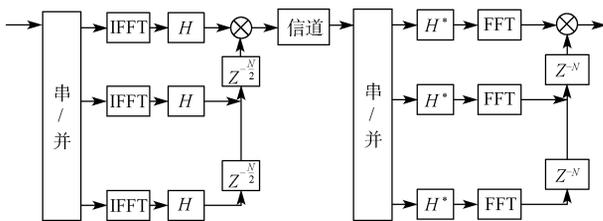


图 3 滤波器组多载波技术系统框图

3 原型滤波器

FBMC 实现仍然包含快速傅里叶变换,对信号进行 DFT 变换之后的信号表示如下:

$$x(qT_s) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [d_{m,n}^R g(qT_s - nT) + j d_{m,n}^I g(qT_s - nT - T/2)] e^{j(\frac{\pi}{2}m + 2\pi qT_s/T)} \quad (1)$$

式中: T 是滤波器阶数, $T_s = T/N$ 是采样时间, q 是采样信号的下标^[7-8]。为了保证符号间的正交关系,系统需要满

足如下条件:

$$\sum_{q=-\infty}^{\infty} g(qT_s - mT)g(qT_s - m'T) e^{j2\pi qT_s/T \cdot (n-n')} = \delta_{n,n'} \delta_{m,m'} \quad (2)$$

OFDM 调制采用的原型滤波器信号为 SINC 函数,该函数导致带外干扰之所以大。要想减少带外干扰,需要设计出合适的原型滤波器。文献[12]中提供一种原型滤波器,时域冲击响应如下:

$$h(n) = 1 + 2 \sum_{k=1}^K (-1)^k H_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{KN}\right) \quad (3)$$

式中: K 表示重叠因子, K 决定了原型滤波器时域的长度和滤波器的频谱图, N 表示子载波数。表 1 为原型滤波器的设计参数。

表 1 原型滤波器参数

K	H_0	H_1	H_2	H_3
2	1	$\sqrt{2}/2$	—	—
3	1	0.911438	0.411438	—
4	1	0.971960	$\sqrt{2}/2$	0.235147

图 4 为滤波器组和 OFDM 在频域的波形,该图说明与 OFDM 相比,载波的旁瓣远远小于主瓣。旁瓣占用的能量很小,能量主要集中在主瓣中^[13]。在 OFDM 实现时,采用升余弦函数对子载波进行处理。因此,在对比 FBMC 和 OFDM 的频谱时,采用升余弦函数,取滚降系数为 0.2(图 5)。图 6 展示了当 $K=4$ 时,由原型滤波器组成的滤波器

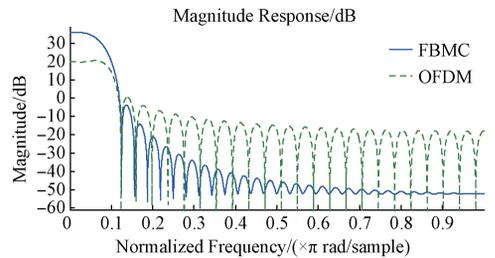


图 4 原型滤波器和升余弦滤波器的频谱图

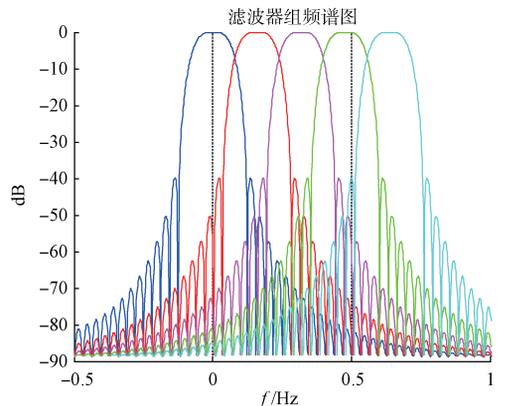


图 5 FBMC 多载波频谱图

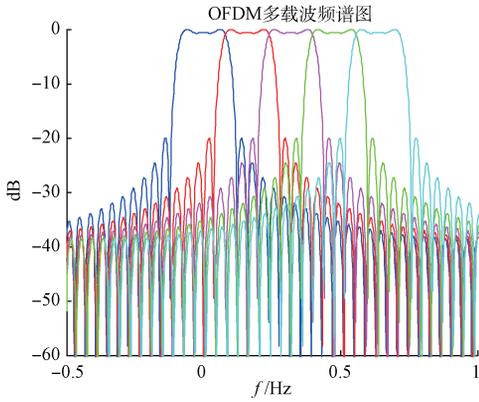


图6 OFDM多载波频谱图

组的频域波形,由图可知,与OFDM相比FBMC载波的旁瓣远远小于主瓣,对相邻子载波的干扰也较小。

4 滤波器组多载波技术的实现原理

对发送信号进行DFT变换处理,之后的得到的采样信号可以表示为:

$$x(qT_s) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_{n,m} g_n(qT_s - nT) e^{j2\pi qT_s / Tn} \quad (4)$$

在仿真过程中,首先二进制比特流进行串并转换,采用QPSK、8QAM、16QAM对信号调制。设N为子载波数,K为混叠因子(图中取K=4),x(n,k)表示第k个符号,符号长度为N。

$$y(k) = \sum_{i=0}^K x(n - iN, k) \cdot R_N(n - iN) \cdot h \quad (5)$$

y(k)在频域中的表示为:

$$y(f) = 2\pi \sum_{i=0}^K X(f) e^{-j\omega iN} \cdot r(f) e^{-j\omega iN} \cdot H(f) \quad (6)$$

$$e^{j\omega iN} y(f) = 2\pi \sum_{i=1}^K X(f) \cdot r(f) \cdot H(f) e^{-j\omega iN} \quad (7)$$

将上式变换到时域可以得到:

$$y(n + iN, k) = \sum_{i=0}^K x(n, k) \cdot R_N(n) \cdot h(n - iN) \quad (8)$$

把式(3)代入式(8)可以得到:

$$y(n + iN, k) = \sum_{i=0}^K x(n, k) \cdot R_N(n) \cdot$$

$$(1 + 2 \sum_{i=1}^K (-1)^i H_k \cos(\frac{2\pi k(n - iN)}{KN})) \quad (9)$$

在所有符号所形成的信号矩阵中,子载波所携带信号必须以虚实交替形式出现,这样相邻子载波间才不会产生干扰^[11]。发送端发送信号的选取类似于滑动窗的处理,窗长为KN,每次滑动N/2个采样点。每次滑动窗口后所对应的KN长度的采样信号叠加到上一次滑动窗口所得到的信号。因此,发送信号y可表示为:

$$y = y + x(n - \frac{N}{2}(k - 1)) \quad (10)$$

与发送端相对应接收端也有滑动窗口。窗长和每次滑动长度与发送端相同。对接收到的信号首先进行窗函数的处理,得到的信号再进行FFT变换和解调。

$$r = \sum_{i=1}^K x(n - \frac{N}{2}(i - 1)) \quad (11)$$

5 仿真参数设置与仿真结果

5.1 链路仿真参数设置

本文中在仿真中采用的参数设置如表2所示。

表2 仿真参数设置

参数	值
帧数	50
信噪比/dB	1 : 15
子载波数	32, 64, 128
FFT长度	32, 64, 128
信道模型	高斯信道模型
调制方式	QPSK/8QAM/16QAM

5.2 仿真结果分析

图7中的上面一簇曲线是FBMC在8QAM下的BER曲线图,另一簇曲线是FBMC在QPSK下的BER曲线。

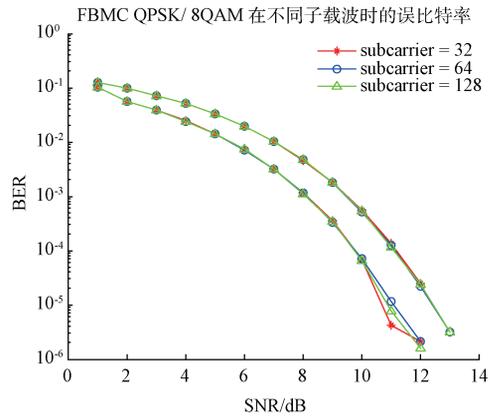


图7 QPSK、8QAM调制的FBMC不同子载波的误比特率

图8中的上面一簇曲线是FBMC在64QAM下的BER曲线图,另一簇曲线是FBMC在16QAM下的BER曲线。

以上2个仿真图表明子载波数目的选取对仿真的BER性能几乎没有影响,在后面的仿真图中,子载波数取64。

图9表示的是QPSK调制下,OFDM和FBMC的误比特率曲线。由图可以看出,FBMC的性能要比OFDM好一点,但是两条曲线的差异并不明显。

图10分别是8QAM调制条件下的OFDM和FBMC性能曲线,可以看出,在8QAM条件下FBMC的性能明显优于OFDM的性能。

图11分别是16QAM调制条件下的OFDM和FBMC

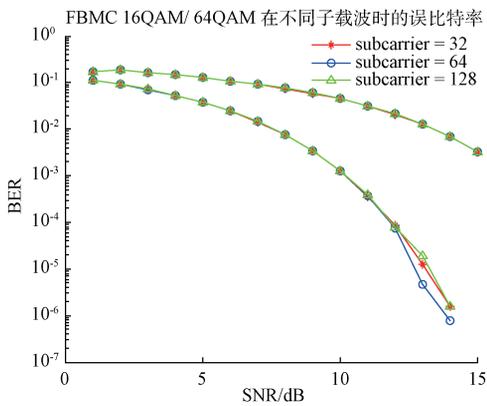


图 8 16QAM、64QAM 调制的 FBMC 不同子载波误比特率

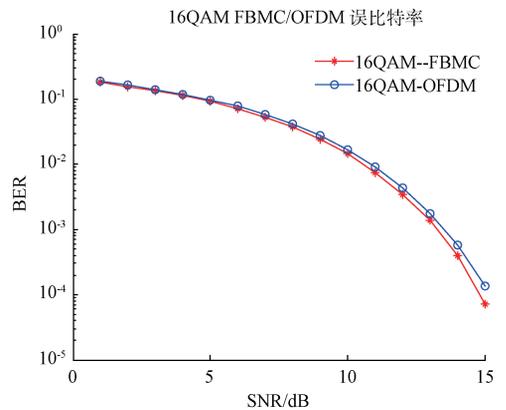


图 11 QPSK 调制的 FBMC 和 OFDM 下的误比特率

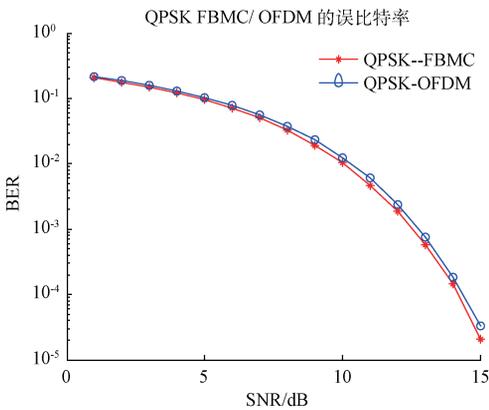


图 9 QPSK 调制的 FBMC 和 OFDM 下的误比特率

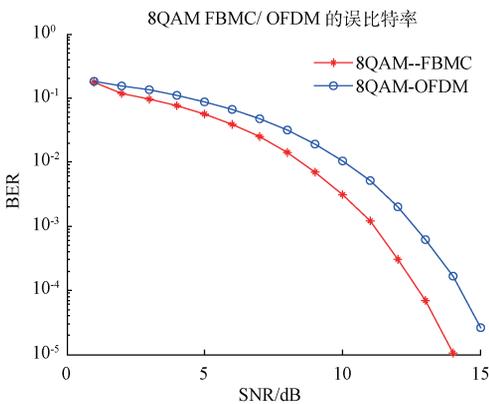


图 10 8QAM 调制的 FBMC 和 OFDM 下的误比特率

性能曲线,可以看出,在 16QAM 条件下 FBMC 的性能优于 OFDM 的性能。与 QPSK 调制条件下的性能曲线类似,FBMC 和 OFDM 的误比特率差异较小。

6 结 论

本文给出滤波器组多载波技术 FBMC 的设计方法,并

且使用 MATLAB 平台仿真实现。使用 FBMC 技术和 OFDM 技术实现链路仿真,对两种调制方式下的误比特率进行了对比。仿真结果表明,本文提出的滤波器组的实现方法可行。仿真的性能曲线图表明,在 QPSK、8QAM、16QAM 调制条件下,FBMC 的性能都优于 OFDM 的性能。特别是在 8QAM 调制条件下,FBMC 的性能明显优于 OFDM。虽然在 QPSK、16QAM 调制条件下,FBMC 的误比特率和 OFDM 的误比特率差异较小,但是 FBMC 载波旁瓣很小和符号利用率高有点,使得 FBMC 对通信系统的影响值得深入研究。

参 考 文 献

- [1] 王志勤. 5G 业务需求分析及技术标准进程[J]. 中兴通讯技术, 2012(20):2-4.
- [2] IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书[S]. 2015.
- [3] 乔先科, 张鹏飞, 谢方方. 高速并行内插倍数可变的成形滤波器设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8): 61-64.
- [4] WANG G Y, ZHUANG L, SHAO K. Time-varying multicarrier and single-carrier modulation systems[J]. Signal Processing, IET, 2013, 7(1): 81-92.
- [5] WANG G Y, CHEN Q B, REN ZH. Modelling of time-varying discrete-time systems [J]. Signal Processing, IET, 2011, 5(1): 104-112.
- [6] BELLANGER M G, DAGUET J L. TDM-FDM transmultiplexer: Digital polyphase and FFT [J]. IEEE Transactions on Communications, 1974, 22(9): 1199-1205.
- [7] FLIEGE N J. Computational efficiency of modified DFT polyphase filter banks [C]. 1993 Conference Record of The Twenty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 1993: 1296-1300.
- [8] FLIEGE N J. Modified DFT polyphase SBC filter banks with almost perfect reconstruction [C]. 1994

- IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE, 1994(3): 149-152.
- [9] KARP T, FLIEGE N J. Modified DFT filter banks with perfect reconstruction[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1999, 46(11): 1404-1414.
- [10] WANG G Y, ZHANG Z F, CHEN Q B. Analysis and properties of time-varying modified DFT filter banks[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, 2010(1): 1-15.
- [11] 邵凯, 计翔, 庄陵, 等. 认知无线电系统中调制滤波器组的设计[J]. 计算机应用, 2014, 34(2): 329-332.
- [12] KARP T, FLIEGE N J. Computationally efficient realization of MDFT filter banks[C]. 8th European Signal Processing Conference. IEEE, 1996: 1183-1186.
- [13] 庄陵, 葛屺, 李季碧, 等. 宽带无线通信中的滤波器组多载波技术[J]. 重庆邮电大学学报, 2012(6): 765-769.
- [14] 田园, 周勛. 窗函数在数字滤波器设计中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(4): 25-27.
- [15] 赵颖, 刘祖深, 李胜寅. 基于 MATLAB 的 FIR 数字滤波器的方法设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(10): 35-37.
- [16] 周平, 谈振辉. 一种基于 OQAM 调制的 OFDM 实现改进方案[J]. 电路与系统学报, 2003(4): 34-36.

作者简介

孙欣丽, 1991 年出生, 2013 年 7 月毕业于西安电子科技大学理学院, 现在中国科学院上海微系统与信息技术研究所就读研究生, 主要研究方向为宽带无线通信、无线电波传播、新型调制技术等。

E-mail: sunxinli@mail. sim. ac. cn

王萍, 1973 年出生, 研究员, 现在中国科学院上海微系统与信息技术研究所任职, 主要研究方向为宽带无线通信。

E-mail: pingwang@mail. sim. ac. cn

具备 60 MHz 方波信号输出能力的经济型函数/任意波形发生器诞生

鼎阳科技 X 系列家族第 7 名成员

2016 年 5 月 24 日, 深圳鼎阳科技宣布正式发布 SDG1000X 函数/任意波形发生器。这是鼎阳科技 X 系列家族的第 7 名成员。此前, 鼎阳科技已发布了 X 系列示波器 SDS2000X、SDS1000X, X 系列函数/任意波形发生器 SDG2000X, X 系列频谱仪 SSA3000X, X 系列的可编程直流电源 SDP3000X 以及 X 系列台式万用表 SDM3000X-E。

SDG1000X 采用了鼎阳科技久负盛名的 EasyPulse 技术平台, 克服了传统的 DDS 技术在输出脉冲时的先天缺陷, 可产生低抖动, 占空比, 上升/下降沿可调的脉冲波形。基于 EasyPulse 技术可实现脉冲的边沿和脉冲宽度精细可调, 调节分辨率小至 100 ps, 而且最小脉宽和最小沿可以在任意输出频率下都可实现。这是国内业内目前唯一能做到的。EasyPulse 技术在 2015 年曾入围被誉为科技创新界“奥斯卡奖”之称的 R&D100 Awards。

SDG1000X 支持 196 种内建任意波, 按照工程、窗函

数、医疗电子等分类, 帮助各领域用户更快速精准地使用。SDG1000X 支持输出频率 30 MHz 和 60 MHz 的正弦波和方波信号。众所周知, 输出 60MHz 方波, 这是不容易实现的。SDG1000X 拥有 150 MSa/s 采样率和 14-bit 垂直分辨率, 支持 AM、DSB-AM、FM、PM、FSK、ASK、PSK、PWM、扫频、Burst 等调制方式, 配备高达 10 次谐波输出功能, 内部通道合并等实用性功能, 满足用户在应用方面的更高需求。SDG1000X 还内置了 6 位硬件频率计, 可测量 0.1 Hz~200 MHz 的频率范围; 拥有丰富的接口, 包括 USB Host、USB Device、LAN、GPIB; 除此之外, 标配功能强大的任意波编辑软件支持手动、直线、坐标、方程式等多种绘图方式, 为用户操作提供了极大的便利。

作为鼎阳科技新一代 X 系列技术平台的第 7 名成员, SDG1000X 以其深厚底蕴的技术沉淀, 出色的性能指标, 可靠稳定的质量把控, 人性化的操作方式, 给广大用户带来了一款实用性强, 性价比高的创新之作。