

doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.201702015

傅里叶变换在 4G/5G 移动通信系统中的应用

李 汀

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:以《信号与系统》中核心内容傅里叶变换在最前沿的移动通信系统中的应用为切入点,用《信号与系统》中最基础的常用信号的傅里叶变换,傅里叶变换的频移性、调制定理、抽样定理、滤波器组等知识,对 4G/5G 移动通信系统中的关键技术 OFDM 技术和 FBMC 技术的原理进行了分析,得出了 FBMC 系统各滤波器频谱之间的干扰远小于 OFDM 系统的结论。

关键词:信号与系统;傅里叶变换;滤波器组;OFDM;FBMC

中图分类号:G642.0 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2017)02-0075-04

《信号与系统》的特点是理论性比较强,用到的工程数学知识比较多,比较抽象^[1]。傅里叶变换是《信号与系统》的核心内容^[2-3]，“滤波、调制、抽样”这些傅里叶变换性质的应用是新一代移动通信系统关键技术的理论支撑。本文以傅里叶变换在 4G/5G 移动通信系统中的应用为切入点,将傅里叶变换的性质和定理与最新的移动通信系统的关键技术相结合,揭示《信号与系统》的核心知识在实际应用中的重要价值。

正交频分复用技术(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)是 4G 移动通信系统的核心技术。该技术采用多载波的传输方案,可以较好地抵抗无线信道的多径衰落,具有较高的频谱效率和较低的实现复杂度^[4]。OFDM 系统的调制和解调本质上是对基带连续时间信号的多载波调制,它的基本原理源于《信号与系统》中傅里叶变换的频移性。实际应用中,为了处理方便,通过对 OFDM 信号的离散采样,将 OFDM 系统的调制和解调转化为 IDFT 和 DFT 来实现。如果从滤波器组的角度分析,OFDM 调制技术可以在各子载波频谱相互重叠的情况下,实现子载波间的相互正交,使得解调之后能够完全恢复原信号^[5-6]。

OFDM 调制采用矩形波作为基带波形,利用《信号与系统》中介绍的常用信号的傅里叶变换,

可以很容易知道,OFDM 滤波器组的原型滤波器的频谱是采样函数。其频谱旁瓣较大,当各子载波同步不能严格保证的情况下,相邻子载波间的干扰将变得比较严重^[7]。而基于滤波器组的多载波(FBMC, filter-bank based multi-carrier)技术被认为是解决这个问题的有效手段,从而成为 5G 移动通信系统多载波方案的一个重要选择^[8]。

在 FBMC 系统中,发射端的 IFFT 模块和接收端的 FFT 模块依然存在,和 OFDM 相比最大的区别是 FBMC 采用非矩形波作为基带波形,其原型滤波器的频谱具有更小的旁瓣,可以有效地减小各子载波间的带外干扰^[9]。

1 OFDM/FBMC 技术原理分析

为研究方便,将分析模型简单化,并从《信号与系统》中最基础的常用信号的傅里叶变换,傅里叶变换的频移性、调制定理、抽样定理的角度,揭示 OFDM/FBMC 系统设计技术中最核心的调制和解调原理。

1.1 基于滤波器组的 OFDM 系统分析

OFDM 系统的等效复基带模型如图 1 所示。设 OFDM 的发射周期为 T ,第 k 个子载波的频率 $f_k = k\Delta f = \frac{k}{T}$,式中 $k = 0, 1 \cdots M - 1$, Δf 为子载波间隔。让第 k 个数据符号 $x_k(n)$ 调制第 k 个子载

收稿日期:2016-10-20
基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20140881)
作者简介:李汀(1979—),男,江苏扬州人,讲师,博士,主要研究方向为 MIMO 技术、3D MIMO 技术、协作通信等。

波信号 $s_k(t)$, M 个调制后的子载波信号叠加后形成 OFDM 信号:

$$y(t) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x_k(n) s_k(t) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x_k(n) e^{j2\pi f_i t}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

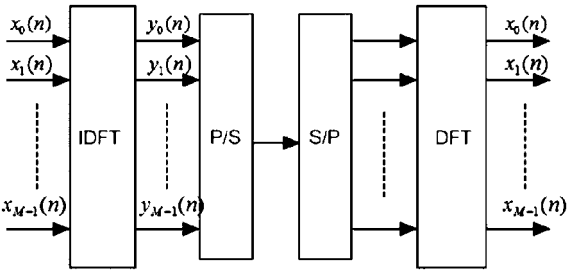


图 1 OFDM 系统的等效复基带模型
Fig. 1 The equivalent complex baseband model for OFDM system

如果以采样周期 $T_s = \frac{T}{M}$ 对 $y(t)$ 进行采样, 即:

$$y_i(n) = y(t) \Big|_{t=\frac{iT}{M}} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x_k(n) e^{j2\pi ki/M}, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

对照《信号与系统》中给出的离散傅里叶变换的定义, $y_i(n)$ 等效为对 $x_k(n)$ 进行 IDFT 运算。为了解调出原来的数据符号 $x_k(n)$, 对 $y_i(n)$ 进行 DFT 运算:

$$x_k(n) = \sum_{i=0}^{M-1} y_i(n) e^{-j2\pi ki/M}, \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

OFDM 系统基于 IDFT/DFT 变换实现调制和解调, 如果从滤波器组的角度进行分析, IDFT 和 DFT 模块都可以看作是一个由低通原型滤波器通过调制生成的 M 通道滤波器组。OFDM 系统的滤波器组结构框图如图 2 所示。

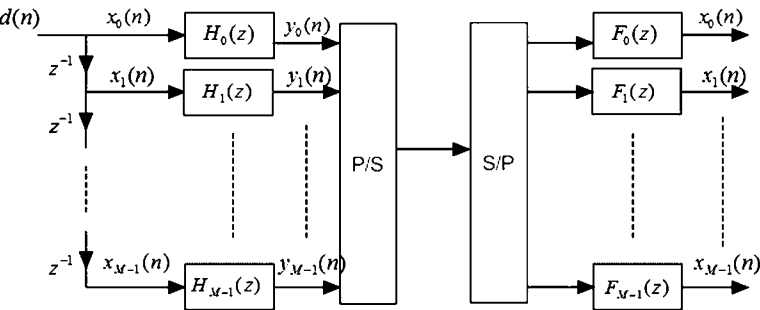


图 2 OFDM 系统的滤波器组结构
Fig. 2 Structure of filter banks for OFDM system

令 $x_k(n) = d(n-k)$, $k = 0, 1, \dots, M-1$, 式 (2) 的 $x_k(n)$ 的 IDFT 调制可以写为:

$$y_i(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} d(n-k) e^{j2\pi ki/M}, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

对等式两边作 Z 变换, 得

$$Y_i(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (ze^{-j2\pi i/M})^{-k} D(z) \quad (5)$$

由上式可知, 输入信号 $d(n)$ 经过一个系统函数 $H_i(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (ze^{-j2\pi i/M})^{-k}$ 的滤波器后输出 $y_i(n)$ 。当 $i=0$ 时, $H_0(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} z^{-k}$, 该滤波器即为滤波器组的原型滤波器, 其频率响应为:

$$H_0(e^{j\omega}) = H_0(z) \Big|_{z=e^{j\omega}} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} e^{-j\omega k} = \frac{1}{M} e^{-j(M-1)\omega/2} \frac{\sin \frac{\omega M}{2}}{\sin \frac{\omega}{2}} \quad (6)$$

对频响起影响的部分是它的幅度函数 $\frac{\sin \frac{\omega M}{2}}{M \sin \frac{\omega}{2}}$ 。

滤波器组中其他滤波器的频率响应是原型滤波器的均匀频移:

$$H_i(e^{j\omega}) = H_0(e^{j(\omega-2\pi i/M)}) \quad (7)$$

因此, 在 $\frac{2\pi}{M}$ 整数倍的频率上, 滤波器组中只

有以此为中心滤波器的频响不为 0,也就是说在这些频点上各个滤波器的频响互不干扰,但是当系统同步性不能严格保证时,由于原型滤波器频响中幅度函数的旁瓣电平较高,可能会导致各滤波频谱间较大的干扰,即可能会产生较大的带外干扰。

1.2 FBMC 系统的滤波器组设计

通过上面的分析,OFDM 系统 IDFT 和 DFT 的调制解调模块,实质上也可以等效地看作为一种特殊的基于滤波器组的调制解调技术。由于 OFDM 系统采用的原型滤波器幅度频谱衰减较差,导致滤波器组较差的频谱选择性将很大程度上影响系统的性能。针对这个问题,文献[7]提出 FBMC 调制技术,在原型滤波器的设计中引入重叠因子 K ,即滤波器组中相邻滤波器在频率上的重叠系数,来改善系统的性能。

基于重叠因子 K 的原型滤波器的时域单位脉冲响应为:

$$h_0(n) = 1 + 2 \sum_{k=1}^K (-1)^k H_k \cos \frac{2\pi kn}{KM} \quad (8)$$

利用《信号与系统》中离散傅里叶变换的性质,可以求出这种原型滤波器的频率响应为:

$$H_0(e^{j\omega}) = \sum_{k=-(K-1)}^{K-1} H_k \frac{\sin\left(\pi\left(\omega - \frac{k}{MK}\right)MK\right)}{MK\sin\left(\pi\left(\omega - \frac{k}{MK}\right)\right)} \quad (9)$$

由于滤波器的频率响应具有对称性,因此 H_k 也是对称的,即 $H_k = H_{-k}$ 。当 $K=2,3,4$ 时, H_k 的取值如表 1 所示:

表 1 FBMC 原型滤波器抽头系数

Table 1 Prototype filter tap coefficients for FBMC

K	H_0	H_1	H_2	H_3
2	1	$\sqrt{2}/2$	—	—
3	1	0.911 438	0.411 438	—
4	1	0.971 960	$\sqrt{2}/2$	0.235 147

2 仿真分析

通过计算机仿真,可以很清楚地看到,随着 K 的增大,FBMC 原型滤波器的幅度频谱的带外衰减性能不断提高,如图 3 所示。相比 OFDM 系统的原型滤波器, $K=4$ 时的 FBMC 系统的原型滤波器幅度谱的旁瓣远远小于主瓣,大大改善了 OFDM 系统原型滤波器的衰减性能,如图 4 所示。

以 3 通道滤波器组为例,进行 OFDM 系统和

FBMC 系统的滤波器组的频域波形对比,如图 5、图 6 所示。从图 5 和图 6 可以看出,FBMC 滤波器组中各滤波器旁瓣的衰减达到 -40 dB 左右,而 OFDM 只能达到 -20 dB 左右。因此 FBMC 系统各滤波器频谱之间的干扰将远远小于 OFDM 系统。

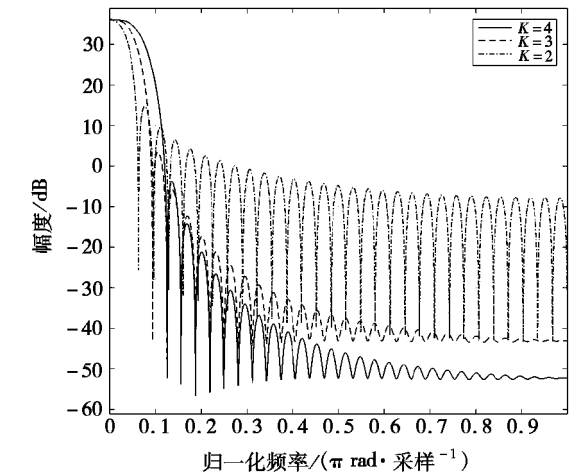


图 3 FBMC 原型滤波器的幅度谱
Fig.3 Amplitude spectrum of FBMC prototype filter

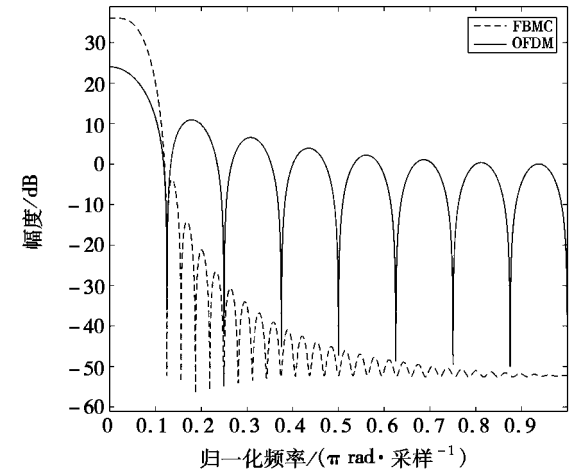


图 4 FBMC 和 OFDM 的原型滤波器幅度谱对比 ($K=4$)
Fig.4 Comparison of amplitude spectra of FBMC and OFDM prototype filters

3 结束语

傅里叶变换作为《信号与系统》的核心,起着举足轻重的作用。本文从《信号与系统》理论知识的角度,用傅里叶变换最基础的知识来分析现在最新的 4G/5G 移动通信系统中的关键技术——OFDM 技术和 FBMC 技术的原理,得出了 FBMC 系统各滤波器频谱之间的干扰远小于 OFDM 系统的结论。

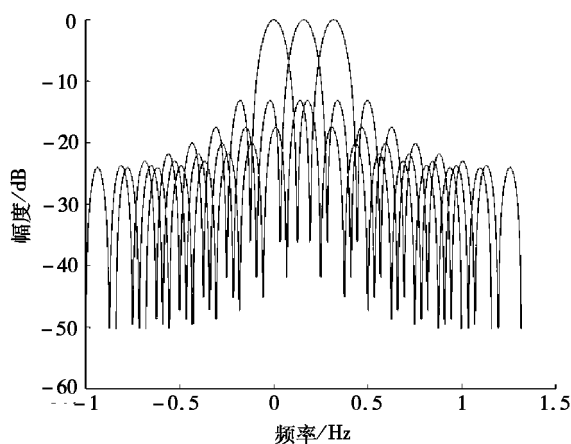


图 5 OFDM 滤波器组的频谱

Fig.5 Spectrum of filter banks for OFDM

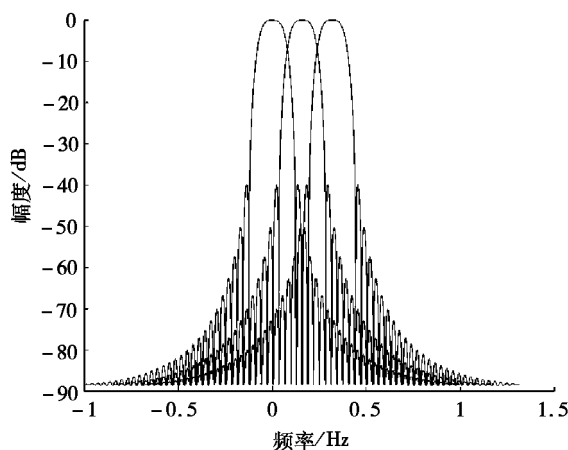


图 6 FBMC 滤波器组的频谱

Fig.6 Spectrum of filter banks for FBMC

参考文献:

- [1] 沈元隆,周井泉. 信号与系统[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,2009.
- [2] 郑君里. 教与写的记忆:信号与系统评注[M]. 北京:高等教育出版社,2005.
- [3] 税奇军,唐炳华,董赛鹰. 连续傅里叶变换在通信原理和信号与系统课程中的应用[J]. 四川文理学院学报,2015,25(5):44-46.
- [4] 田金凤,郑小盈,胡宏林,等. 中国下一代移动通信研究[J]. 科学通报,2012,57(5):299-313.
- [5] 张海滨. 正交频分复用的基本原理与关键技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [6] 佟学俭,罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [7] 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(自然科学版),2012,24(6):765-769.
- [8] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学,2014,44(5):551-563.
- [9] SCHAICH F. Filterbank based multi carrier Transmission (FBMC)——evolving OFDM; FBMC in the context of WiMAX [C]//2010 European Wireless Conference, 2010:1 051-1 058.

Application of Fourier Transform in 4G/5G Mobile Communication Systems

LI Ting

(College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China)

Abstract: Taking the core content of "signals and systems", that is, the application of Fourier transform in mobile communication system at the forefront as an entry point, by using Fourier transform of the most commonly used signals in "signals and systems", and the frequency shift of Fourier transform, modulation theorem, sampling theorem, filter bank and so on, the principle of key technologies such as OFDM technology and FBMC technology in 4G · G mobile communication systems are analyzed. It is concluded that the interference between the spectrum of the filters in the FBMC system is much smaller than that of the OFDM system.

Keywords: Signals and Systems; Fourier transform; filter bank; OFDM; FBMC

(责任编辑:李华云)