

5G 系统中 F-OFDM 算法设计

摘要：将 F (filter) - OFDM 的框架应用在传统的 LTE 系统上。利用该新的波形技术，LTE 系统可以支持更加灵活的参数配置，满足未来 5G 丰富的业务需求。通过发射机子带滤波器的设计，相邻子带间的带外泄漏 (OOB) 可以被大幅度抑制。接收机采用匹配滤波机制实现各个子带的解耦。最后通过实验仿真，比较 OFDM 系统和 F-OFDM 系统的误块率 (BLER) 性能，可以看到当存在邻带干扰时，后者通过子带滤波器对干扰的抑制，系统性能明显优于前者。

关键词：F-OFDM；带外泄漏 (OOB)；子带滤波器；误块率 (BLER)

F-OFDM algorithm design for 5G system

Gao Yanan, Yang Tao, Hu Bo

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: In this paper, the framework of F-OFDM is applied in the traditional LTE system. Using this new waveform, LTE system can support more flexible parameter configuration, which will meet the increasing needs of the forthcoming 5G wireless communication.

0 引言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 凭借其实现简单、抗多径衰落能力强、抗码间干扰能力强等诸多优点，已经在 4G LTE 系统中得到了广泛应用 [1]。但由于 OFDM 空口技术在整个系统带宽上只支持一种固定的参数配置，如循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 长度、子载波间隔、FFT 点数等，且矩形脉冲频率响应的旁瓣较大，衰减缓慢，导致 OFDM 系统具有对频率偏差敏感、频谱泄漏高、带外干扰大等诸多缺点，使其在未来无线通信中的应用受到了严重的限制 [2]。

5G 支持丰富的业务场景，每种业务场景对波形参数的需求各不相同，能够根据业务场景来动态地选择和配置波形参数，同时又能兼顾传统 OFDM 的优点，是对 5G 基础波形的必然要求。Filter - OFDM，基于子带滤波的 OFDM，就是能满足 5G 需求的波形技术。该技术将系统划分为若干个子带，子带之间只存在极低的保护带开销，各个子带可以根据实际的业务场景来配置不同的波形参数，支持 5G 对动态软空口的灵活需求。

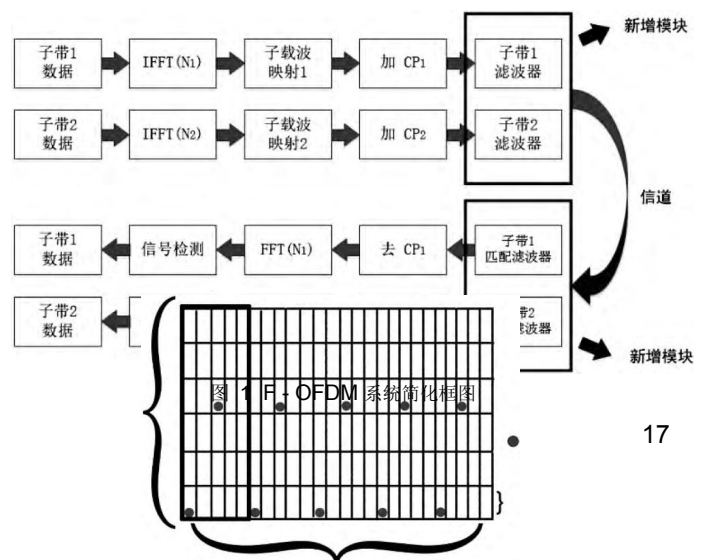
《电子技术应用》2016 年第 42 卷第 7 期 5G

由于两个子带的数据是独立生成，为了保证采样率一致，需要针对不同的子带采用不同的时频资源映射方案。表 1 中给出了两个子带的基本波形参数配置。

1 F-OFDM 系统模型

F-OFDM 系统简化模型如图 1 所示。与传统的

OFDM 系统相比，F-OFDM 将整个频带划分为多个子带，在收发两端均增加了子带滤波器。每个子带可根据实际的业务需求来配置不同的波形参数，如子载波间隔、CP 长度、FFT 点数等。发送端各个子带的数据通过子载波编号后映射到不同的子载波上，并经过子带滤波器



25

表 1 两子带参数配置

30 kHz

对于子带 1，采用标准的 LTE 协议来进行参数配置，其资源映射也按照标准协议来进行 [3]。在一个资源块 (Resource Block, RB) 中，参考信号位置如图 2 所示。

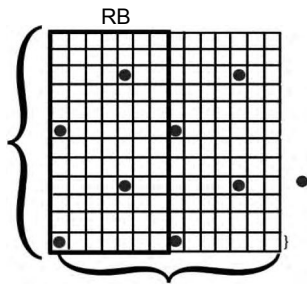


图 2 子带 1 资源映射

子带 1 的子载波间隔为 15 kHz，每个 RB 包含 12 个子载波，其采样率为：

$$2 \times [(160 + 2048) + 6 \times (144 + 2048)] = 30720 \quad (1)$$

子带 2 的时频资源映射参考具有标准协议的子带 1 来进行，在一个 RB 中，参考信号位置如图 3 所示。

子带 2 的子载波间隔为 30 kHz，每个 RB 包含 6 个子载波，其采样率为：

$$5 \times [(224 + 1024) + 4 \times (200 + 1024)] = 30720 \quad (2)$$

这样两个子带的采样率保持一致。

2.2 子载波映射

两个不同配置的子带同时传输数据，为了在接收端进行正确的解耦，需要把整个频带的所有子载波进行统

图 3 子带 2 资源映射

一编号，并把两个子带的数数据映射到不同编号的子载波上，使其在频域分开。

若子带 1 作数据映射的子载波数量为 M_1 ，在所有 2048 个子载波中的编号为 $[K_{\min} K_{\max}]$ ，其中 K_{\min} 和 K_{\max} 的取值为 $[-1023, 1024]$ 范围内的整数。同时，以子带 1 的子载波间隔 (15 kHz) 为间距的保护子载波数量为 N_1 。并假设子带 2 作数据映射的子载波总数为 M_2 ，以子带 2 的子载波间隔 (30 kHz) 为间距的保护子载波数量为 N_2 。两个子带的子载波映射关系如图 4 所示。

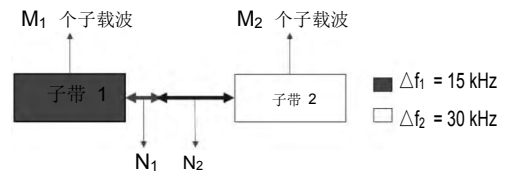


图 4 两个子带子载波映射关系

则第 2 个子带的子载波编号为：

$$\left[\frac{K_{\max} + N_1}{2} + N_2 + 1, \frac{K_{\max} + N_1}{2} + N_2 + M_2 \right]$$

其中： $K_{\max} + N_1$ 为偶数。

以每个子带占据 4 个 RB 为例，则 $M_1 = 4 \times 12 = 48$ ， $M_2 = 4 \times 6 = 24$ 。若子带 1 映射数据的子载波编号为 $[-24,$

$-1]$ ， $[1, 24]$ ，中间的 0 号子载波为直流分量，不作数据映射。并设 $N_1 = 0$ ， $N_2 = 1$ ，则子带 2 映射数据的子载波编号为 $[14, 37]$ 。

2.3 子带滤波器设计

滤波器的设计采用传统的窗函数法，即对时域 Sinc 函数加不同的窗函数，来获得相应滤波器的时域响应。即：

$$h(n) = h_d(n) \cdot h_w(n) \quad (3)$$

其中： $h_d(n)$ 是 Sinc 函数， $h_w(n)$ 是窗函数， $h(n)$ 为滤波器系数。

本文采用升余弦窗来进行子带滤波器的设计，其传输函数 $H_w(\omega)$ 可以表示为 [14]：

$$H_w(\omega) = \begin{cases} T & 0 \leq |\omega| < \frac{(1-\alpha)\pi}{T} \\ \frac{T}{2} [1 + \sin \frac{T}{2} (\frac{\pi}{2} - \omega)] & \frac{(1-\alpha)\pi}{T} \leq |\omega| < \frac{(1+\alpha)\pi}{T} \\ 0 & |\omega| \geq \frac{(1+\alpha)\pi}{T} \end{cases} \quad (4)$$

表 2 常用升余弦窗函数比较

名称	特点	应用
汉宁窗	汉宁窗使频谱的主瓣加宽并降低，旁瓣则显著减小。主瓣加宽，相当于分辨率下降。与矩形窗相比，带外泄漏、频谱波动都被大幅度抑制，并且选择性也有所提高。	是很有用的窗函数。如果测试信号有多个频率分量，频谱表现的十分复杂，且测试的目的更多关注频率点而非能量的大小，需要选择汉宁窗。
汉明窗	与汉宁窗一样都是余弦窗，又称改进的升余弦窗，只是加权系数不同。但其旁瓣衰减速度比汉宁窗衰减速度慢。	与汉明窗类似，也是很有用的窗函数。

系统的两个子带分别占据不同的频点，因此子带滤波器的作用是实现其在频域上的解耦，并抑制带外泄漏，减小邻带干扰。图 5 给出了表 2 中两种常用的窗函数频率响应特性，通过对比可以看到，汉宁窗对旁瓣的抑制和旁瓣的衰减速度要明显优于汉明窗，因此本文选择汉宁窗来设计滤波器。

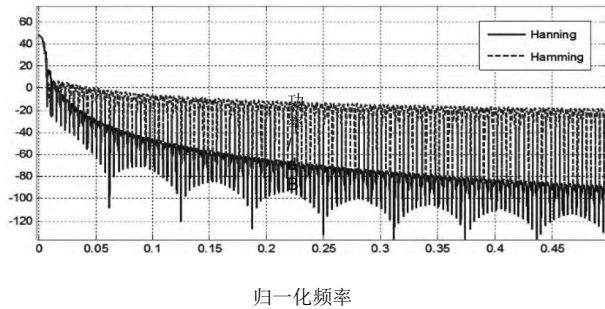


图 5 窗函数频谱相应性能对比

基带滤波器系数采用 MATLAB 的 fdatool 工具箱生成，之后根据两个子带的中心频率，将该基带系数进行相应的频率搬移。

由 2.2 节分析可知，子带 1 的中心频率为：

$$F_1 = \frac{K_{\min} + K_{\max}}{2} \times \Delta f_1 \quad (6)$$

子带 2 的中心频率为：

$$F_2 = (K_{\max} + N_1) \times \Delta f_1 + (N_2 + \frac{M_2}{2} + 0.5) \times \Delta f_2 \quad (7)$$

仍以两个子带各占据 4 个 RB 为例，即子带 1 的数据映射子载波编号为 $[-24, -1]$ ， $[1, 24]$ ，并设 $N_1 = 0$ ， $N_2 = 1$ ，则子带 1 的中心频率为：

$$F_1 = \frac{-24 + 24}{2} \times 15 = 0 \quad (8)$$

子带 2 的中心频率为：

$$F_2 = (24 + 0) \times 15 + (1 + 12 + 0.5) \times 30 = 765 \text{ kHz} \quad (9)$$

若生成的基带滤波器系数为 $h = (h_0, h_1, \dots, h_{T-1})$ ， T 为滤波器长度，可得搬移后子带 1 的滤波器系数为：

$$h_1(n) = h(n) \cdot \exp(-j2\pi n \frac{F_1}{2048 \times \Delta f_1}), n \in [0, T-1] \quad (10)$$

子带 2 的滤波器系数为：

$$h_2(n) = h(n) \cdot \exp(j2\pi n \frac{F_2}{1024 \times \Delta f_2}), n \in [0, T-1] \quad (11)$$

在接收端滤波器选取时采用匹配滤波器。匹配滤波器具有两个方面的功能：使输出信号有用成分尽可能强，抑制信号带外噪声，使得信号在抽样判决时刻的信噪比最大。因此匹配滤波器与本文两个子带的应用场景相吻合，适用于对邻带干扰的进一步抑制，同时进行子带间的解耦。

子带 1 的接收机匹配滤波器为：

$$h_{RX1}(n) = h_1(T-n-1), n \in [0, T-1] \quad (12)$$

子带 2 的接收机匹配滤波器为：

$$h_{RX2}(n) = h_2(T-n-1), n \in [0, T-1] \quad (13)$$

3 仿真结果及分析

3.1 资源映射性能对比

为了验证资源映射算法的正确性，仿真时将整个频带分别配置为子载波间隔为 15 kHz 的 OFDM 系统和子载波间隔为 30 kHz 的 OFDM 系统。

图 6 给出了仿真结果，可以看到，子载波间隔为 30 kHz 的 OFDM 系统在采用参考 LTE 协议自行设计的资源映射算法并通过加性高斯白噪声 (AWGN) 信道后，误码性能与子载波间隔为 15 kHz 的 OFDM 系统相近。

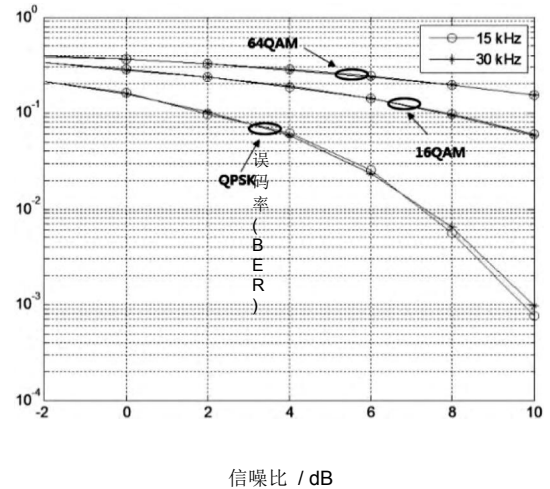


图 6 资源映射性能对比

3.2 发射机带外泄漏抑制性能

基带滤波器系数生成时采用 512 阶的汉宁窗，并得到了在不同子带保护间隔配置下，未加子带滤波器和使用子带滤波器滤波后的带外泄漏情况。

图 7 是在 $N_1 = 0$ 和 $N_2 = 1$ 的配置下系统发射机带外泄漏情况。可以看到在未加窗时，整个频带的旁瓣衰减缓慢，带外泄漏严重；在增加子带滤波器后，带外泄漏被大幅度抑制，相比未加滤波器时，旁瓣衰减接近 30 dB。

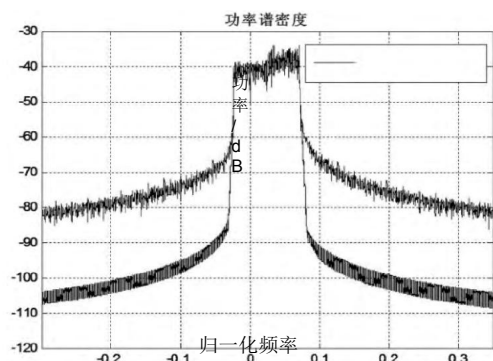
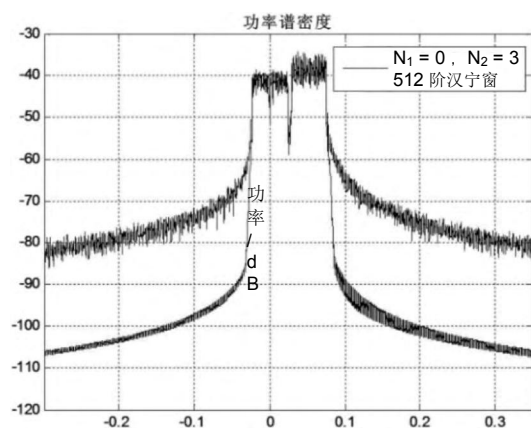
图 7 $N_1 = 0$, $N_2 = 1$ 发射机 OOB 性能

图 8 是在 $N_1 = 0$ 和 $N_2 = 3$ 的配置下系统发射机带外泄漏情况。可以看到相比于 $N_1 = 0$ 、 $N_2 = 1$ 的配置，在 $N_2 = 3$ 时，两个子带之间有明显的保护间隔。在零频处，子带 1 有一个凹陷，是因为零频处的子载波并没有映射数据。

图 8 $N_1 = 0$, $N_2 = 3$ 发射机 OOB 性能

3.3 OFDM 和 F-OFDM 系统性能对比

图 9 给出了在 ETU 3 km/h 的信道下，不同的子带保护间隔配置时，OFDM 和 F-OFDM 的 BLER 性能对比。链路的参数配置为 QPSK 调制、1/3 Turbo 码率，16QAM 调制、1/2 Turbo 码率和 64QAM 调制、3/4 Turbo 码率。可以看到 F-OFDM 系统通过子带滤波器对带外泄漏的抑制，其两个子带的 BLER 性能优于存在邻带干扰的 OFDM 系统。图 9(a) 是在 $N_1 = 0$ ， $N_2 = 1$ 的条件下两个子带的性能对比；图 9(b) 是在 $N_1 = 0$ ， $N_2 = 3$ 的条件下两个子带的性能对比。从图 9(b) 可以看出当两个相邻子带之间的保护间隔增大时，F-OFDM 系统的 BLER 值会进一步降低，当然这是以牺牲频谱利用率为代价的。

4 结论

OFDM 技术作为第 4 代无线通信中的主要波形技术，有其强大的优势，但是却对定时偏差敏感，且带外泄漏严重，在整个频带上只支持一种参数配置。随着 5G 的到来，OFDM 波形技术已经不能满足灵活多变的业务需求，此时 F-OFDM 技术应运而生，支持各个子带上灵

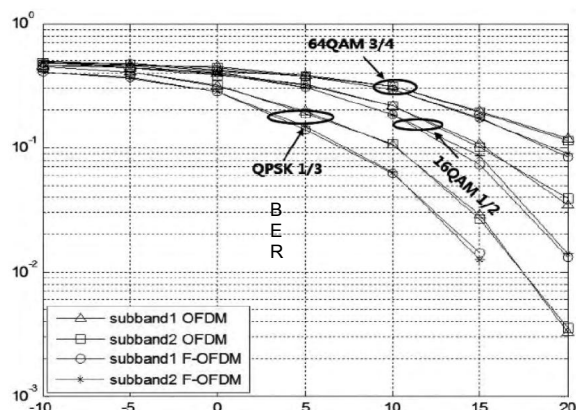
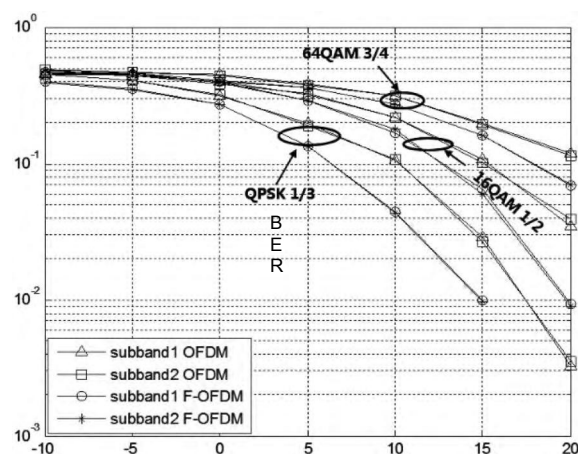
SNR / dB (a)
 $N_1 = 0$, $N_2 = 1$ SNR / dB
(b) $N_1 = 0$, $N_2 = 3$

图 9 OFDM 系统和 F-OFDM 系统 BLER 性能对比

活的参数配置，因此具有更加广阔的应用场景。发送端子带滤波器的使用使得相邻子带间的带外泄漏得到了

有效的抑制，接收端采用匹配滤波器完成各个子带的解耦。通过仿真结果可以看到，当存在邻带干扰时，F-OFDM 系统的性能明显优于 OFDM 系统。

Vehicular Technology Conference, 2006, VTC 2006 - Spring.
IEEE 63rd. IEEE. 2006, 5: 2125- 2129.

- [10] SEYEDI A, SAULNIER G J. General ICI self - cancellation scheme for OFDM systems [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2005, 54(1): 198- 210.
- [11] HOU W S, CHEN B S. ICI cancellation for OFDM communication systems in time - varying multipath fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications. 2005, 4(5): 2100- 2110.
- [12] TANG S, GONG K, SONG J. Inter-carrier interference cancellation with frequency diversity for OFDM systems [C]. IEEE Trans. Broadcast, 2007, 53: 132- 137.
- [13] KIM J G, BAE W G. Adaptive step control of LMS - based interference cancellation for WMAN ICS radio repeater[C]. Information Networking (ICOIN), 2015: 253- 258.
- [14] GHANBARISABAGH M, ALIAS M Y, Abdul-Rashid H A.

!!

(上接第 16 页)

- [5] ARIKAN E. Channel combining and splitting for cut of rate improvement[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006, 52(02): 628-639.
- [6] 王东学, 宋雷, 张士伟. 极化码 SC 译码算法的设计 [J]. 光电系统, 2014(3): 10- 13.
- [7] HUANG Z L, DIAO C J, CHEN M. Latency reduced method for modified successive cancellation decoding of polar codes[J]. Electronics Letters, 2012, 48(23): 1506- 1506.
- [8] 李纯, 童新海. 极化码序列连续删除译码算法的改进设计 [J]. 通信技术, 2015(1): 19- 22.
- [9] TAL I, VARDY A. List decoding of polar code [C]. USA:

!!

(上接第 20 页)

principles, algorithms, and applications [M]. 2013.

(收稿日期: 2016- 03 - 02)

作者简介:

高亚楠 (1991 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线

Performance analysis of least mean square time-domain equalizer in long-haul direct-detection optical OFDM transmission[C]. Photonics (ICP), 2010: 1- 4.

- [15] KUMARAPANDIAN S, REENA M P. Performance analysis of CFO mitigation algorithms in asynchronous cooperative OFDM communication system [C]. Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011), 2011: 632- 637.

(收稿日期: 2016- 04 - 05)

作者简介:

田广东 (1968 -), 男, 教授, 主要研究方向: 物联网与智慧城市。

王珊 (1991 -), 女, 在读硕士, 主要研究方向: 无线通信技术。

何萍 (1989 -), 女, 在读硕士, 主要研究方向: 无线通信技术。

IEEE ISIT 2011, 2011: 1- 5.

- [10] NIU K, CHEN K. Stack decoding of polar codes [J]. Elec - tronics Letters, 2012, 48(12): 695- 697.
- [11] NIU K, CHEN K. CRC - Aided decoding of polar codes [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1668- 1671.

(收稿日期: 2016- 03 - 21)

作者简介:

何天光 (1991 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线通信技术与应用。

杜江 (1969 -), 男, 博士后, 教授, 主要研究方向: 新一代无线通信技术的理论及其芯片设计。

通信、数字信号处理, E-mail: yngao14@fudan.edu.cn。

杨涛 (1970 -), 男, 副教授, 主要研究方向: 认知无线电、网络信息感知及融合、智能信号处理。

胡波 (1968 -), 男, 教授, 主要研究方向: 数字信号处理。

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。

