

基于滤波器分离的通用滤波多载波接收方案

李世东, 周志刚, 谢振山

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘 要: 分析并研究通用滤波多载波(UFMC)传输模型, 针对其接收端信道估计准确度较低的问题, 提出一种基于滤波器分离的接收方案。在均衡器前端通过滤波器分离的方式去除滤波器参数对信道的影响, 采用基于信道统计特性的信道估计算法提升信道估计准确度和误码性能。仿真结果表明, 在相同的误码率条件下, 该方案相比原有 UFMC 接收方案具有更低的信噪比, 且接收端信道均衡效果更优。

关键词: 5G 移动通信; 通用滤波多载波; 滤波器分离; 信道估计; 频域均衡

中文引用格式: 李世东, 周志刚, 谢振山. 基于滤波器分离的通用滤波多载波接收方案[J]. 计算机工程, 2017, 43(10): 72-76.

英文引用格式: LI Shidong, ZHOU Zhigang, XIE Zhenshan. Receiving Scheme for Universal Filtered Multi-carrier Based on Filter Separation[J]. Computer Engineering, 2017, 43(10): 72-76.

Receiving Scheme for Universal Filtered Multi-carrier Based on Filter Separation

LI Shidong, ZHOU Zhigang, XIE Zhenshan

(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

[Abstract] This paper analyzes and researches the Universal Filtered Multi-carrier (UFMC) transmission model. Considering the low accuracy of receiver channel estimation, it then proposes a receiving scheme based on filter separation. By means of filter separation before channel equalizer, this scheme eliminates the influence of filter parameters on channels and adopts channel estimation algorithm based on channel statistical characteristics to improve the accuracy of channel estimation and Symbol Error Rate (SER) performance. Simulation result shows that, compared with traditional UFMC receiving scheme, the Signal to Noise Ratio (SNR) of the proposed scheme is lower under the same SER requirement, and the channel equalization effect is better at the receiving end.

[Key words] 5G mobile communication; Universal Filtered Multi-carrier (UFMC); filter separation; channel estimation; frequency-domain equalization

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.10.013

0 概述

第五代移动通信系统(5G)支持多样化的业务和设备类型以及短帧传输, 其要求超高的频谱利用率, 在传输速率、时延等方面较 4G 系统提高了一个量级。当前应用广泛的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统存在带外功率泄漏严重、要求严格的子载波正交性、受保护间隔影响等缺陷, 均限制了其在 5G 中的应用^[1-3]。因此, 5G 无线通信系统必须采用新型多载波关键技术。

目前业界所提出的多种新型多载波技术均是在 OFDM 基础上的优化和改进。Filter-OFDM 已在 LTE 系统中得到应用, 对整个频带滤波有效降低了带外功率泄漏, 但由于循环前缀和频域保护间隔的

存在, 因此系统时频效率偏低^[4]。滤波器组多载波(Filter Bank Multi-Carrier, FBMC)作为 5G 波形的备选技术, 对每个子载波进行滤波, 但由于滤波器频带窄, 因此滤波器响应长, 设计复杂度高^[5]。文献[6]提出一种基于通用滤波多载波(Universal Filtered Multi-Carrier, UFMC)的调制方法。在 UFMC 系统中, 所有的子载波划分成不同的子带, 滤波器处理的对象为一组连续的子载波。实际上, Filter-OFDM 和 FBMC 可看作是 UFMC 的 2 个特例。UFMC 对两者进行折衷, 结合了 Filter-OFDM 的简易性和 FBMC 的稳定性, 同时避免了各自的缺陷, 是 5G 通信系统理想的波形技术^[7-8]。

信道估计和均衡是无线通信系统接收端的另一项关键技术。在多径衰落信道中, 信道脉冲响应导

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2015AA01A704); 上海市自然科学基金(15ZR1447600)。

作者简介: 李世东(1991—), 男, 硕士研究生, 主研方向为移动通信、多载波技术; 周志刚, 研究员、博士; 谢振山, 硕士研究生。

收稿日期: 2016-08-24 **修回日期:** 2016-10-20 **E-mail:** shidong.li@mail.sim.ac.cn

致符号间干扰,需要精确的信道信息进行信道均衡,补偿多径衰落^[9]。同样,UFMC 的信道估计和均衡技术对整个系统也具有决定性作用^[10]。本文研究 UFMC 传输模型,提出一种基于滤波器分离的接收方案,可实现最小均方误差(Minimum Mean Square Error,MMSE)信道估计算法在 UFMC 信号检测中的应用。

1 UFMC 系统模型

UFMC 是德国 5GNow 项目组确认的一种 5G 备选多载波调制技术。根据文献[11],UFMC 整体系统模型如图 1 所示。所有子载波分成 B 个子带,每个子带包含 N_B 个连续子载波。各子带单独进行调制和滤波处理后,整合成最终的多载波调制符号。

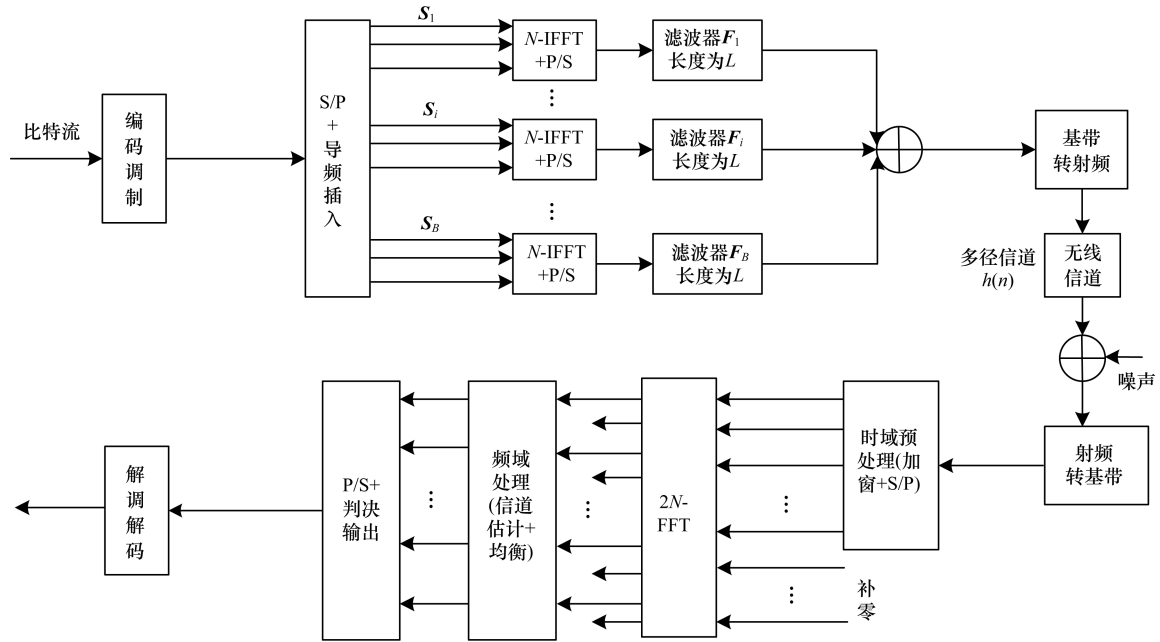


图 1 UFMC 整体模型

1.1 发送机

图 2 给出了子带 i 在发送端的处理流程。其中,子带 i 的发送符号为 S_i ,包含 N_B 个并行的子载波符号。另外,为了辅助接收端的信道均衡,需在发送符号序列中间隔地插入导频符号。每个子带符号首先经过 IFFT 模块进行调制变换到时域,即信号向量 $V_i S_i$,其中 V_i 为第 i 个子带 IFFT 矩阵,包含 N 点 IFFT 矩阵中与子载波相对应的列。信号向量经并串转换后生成时域符号 x_i 。之后,滤波器模块采用 FIR 滤波器对 x_i 进行线性滤波,即 $F_i V_i S_i$,其中 F_i 是滤波器脉冲响应 f_i 生成的 Toeplitz 矩阵^[12]。通过设计满足奈奎斯特准则的滤波器可以消除符号间干扰,同时滤波器能将频带限制在一定带宽内,有效避免载波干扰,降低子载波的严格正交性要求^[13]。最终的多载波调制符号 x_T 可表示为:

$$x_T = \sum_{i=1}^B x_i * f_i = \sum_{i=1}^B F_i V_i S_i \quad (1)$$

$(N+L-1) \times 1$ $\sum_{i=1}^B$ $i=1 \times N \times 1$ $L \times 1$ $\sum_{i=1}^B$ $i=1 (N+L-1) \times 1$ $N \times N_B$ $N_B \times 1$

其中, $*$ 表示卷积运算;FFT 运算点数为 N ;滤波器长度为 L 。卷积运算后生成长度为 $N+L-1$ 的发送信号。

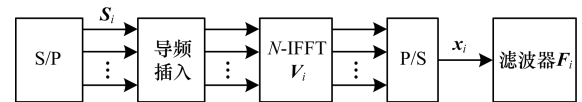


图 2 发送机模型

1.2 接收机

发射信号经过无线信道后,根据式(1)接收信号 y 可以表示为:

$$y = h * \left(\sum_{i=1}^B x_i * f_i \right) + n \quad (2)$$

其中, h 为无线信道脉冲响应; n 为加性白噪声。

UFMC 接收机模型如图 3 所示,接收信号根据单个符号长度转换成并行后补零至长度为 $2N$,采用频域检测方法,并利用 $2N$ -FFT 运算转换到频域。

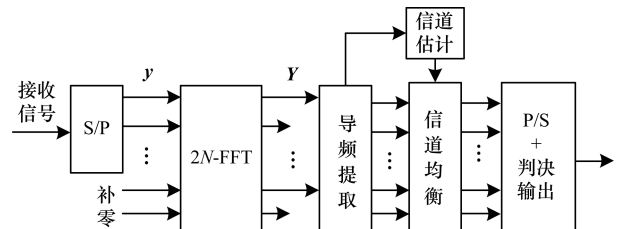


图 3 接收机模型

频域信号 Y 表示为:

$$Y(l) = \sum_{k=0}^{2N-1} y(k) e^{-j2\pi kl/2N} \quad (3)$$

其中, l 的取值为 $0, 2, \dots, 2N-2$, 分别对应发送机的 N 个子载波。结合式(2)和式(3), 需要均衡的信号 Y 表示为:

$$Y(k/2) = \bar{H}(k) \bar{F}_i(k) \bar{X}_i(k) + \bar{W}(k) \quad (4)$$

其中, $k=0, 2, \dots, N-2$; i 为子载波 $k/2$ 所在的子带序号; $\bar{H}, \bar{F}_i, \bar{X}_i, \bar{W}$ 分别为 h, f_i, x_i, n 的 $2N$ -FFT 变换。根据傅里叶变换性质^[14], 若 $x(n)$ 的 N -FFT 变换用 $X(k)$ 表示, $x(n)$ 的 $2N$ -FFT 变换用 $\bar{X}(k)$ 表示, 则有关系式 $\bar{X}(k) = X(k/2)$ 。式(4)可改写为:

$$Y(k) = H(k) F_i(k) S_i(k) + W(k) \quad (5)$$

其中, $k=0, 1, \dots, N-1$; S_i 为子带的发送信号; H, F_i 和 W 分别为信号 h, f_i 和 n 的 N -FFT 变换。由式(5)可知, 频域检测信号可表示为发送信号与信道频域响应和对应子带滤波器频率响应的乘积。根据图 3 接收机模型, 频域信号 Y 还需要通过提取相应位置的导频信号做信道估计, 经信道均衡补偿后判决输出。

2 接收机优化方案设计

UFMC 接收机的信号检测模型与 OFDM 相似, 先介绍 OFDM 系统采用的信道估计和频域均衡算法。在 OFDM 系统信道估计中, 一般通过在发送序列中周期性插入导频符号, 接收端在特定时间提取导频信息来进行信道估计^[15]。基于导频辅助的信道估计算法包括最小二乘 (Least Square, LS) 算法, MMSE 算法及其简化算法等^[16-17]。LS 算法和 MMSE 算法的估计值如式(6)、式(7)所示。

$$\hat{H}_{p,LS} = X_p^{-1} Y_p = X_p^{-1} (X_p H + W) = H_p + X_p^{-1} W \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{H}_{p,MMSE} &= R_{HH} [R_{HH} + \sigma^2 (X_p^H X_p)^{-1}]^{-1} X_p^{-1} Y_p \\ &= R_{HH} [R_{HH} + \sigma^2 (X_p^H X_p)^{-1}]^{-1} \hat{H}_{p,LS} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $X_p = \text{diag}[X(0), X(1), \dots, X(N-1)]$ 为导频位置发送符号组成的对角矩阵; $Y_p = [Y(0), Y(1), \dots, Y(N-1)]^T$ 为导频位置接收向量; $H = [H(0), H(1), \dots, H(N-1)]^T$ 为信道频域响应向量; R_{HH} 为信道自相关矩阵; W 为噪声; σ^2 为噪声方差。LS 算法比较简单, 只需一次除法运算。而 MMSE 算法根据信道统计特性, 考虑噪声对信道的影响, 因此信道估计的准确度更高。均衡算法包括基于迫零 (Zero Force, ZF) 准则和 MMSE 准则, 本文只考虑基于 ZF 准则的均衡算法, 均衡器的补偿系数如式(8)所示。

$$Z(k) = 1/\hat{H}(k) \quad (8)$$

2.1 UFMC 原有接收机检测方案

在 UFMC 系统中, 均衡器将信道频域响应和滤波器频域响应看做整体, 即 $T(k) = H(k) F_i(k)$ 。

式(5)改写为:

$$Y(k) = T(k) S_i(k) + W(k) \quad (9)$$

对 Y 进行信道补偿可直接采用 OFDM 中的 LS 估计算法和 ZF 均衡准则, 根据式(6)可得:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{p,LS} &= X_p^{-1} Y = X_p^{-1} (X_p F H + W) \\ &= F H_p + X_p^{-1} W \end{aligned} \quad (10)$$

其中, F 为式(5)中相应子载波的滤波器因子构成的对角矩阵, $F = \text{diag}[F(0), F(1), \dots, F(N-1)]$ 。

2.2 原有检测方案存在的问题

原有方案将信道和滤波器看做整体, 对 T 进行整体估计和均衡。在采用 LS 算法的情况下, 从式(10)可以看出估计误差不受影响, 但 LS 算法未考虑噪声影响, 存在准确度不高的问题。当采用基于信道统计特性的 MMSE 算法时, 由于 T 中混有滤波器因子, 因此无法获得 T 的统计特性。若利用 H 的统计特性直接对 Y 进行 MMSE 信道估计, 则有:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{p,MMSE} &= R_{HH} [R_{HH} + \sigma^2 (S_p^H S_p)^{-1}]^{-1} S_p^{-1} Y_p \\ &= R_{HH} [R_{HH} + \sigma^2 (S_p^H S_p)^{-1}]^{-1} \hat{T}_{p,LS} \end{aligned} \quad (11)$$

准确的估计值为:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{p,MMSE} &= R_{TT} [R_{TT} + \sigma^2 (S_p^H S_p)^{-1}]^{-1} S_p^{-1} Y_p \\ &= F R_{HH} F^H [F R_{HH} F^H + \sigma^2 (S_p^H S_p)^{-1}]^{-1} \hat{T}_{p,LS} \end{aligned} \quad (12)$$

由于式(11)忽略了信道中滤波器参数, 会产生很大的信道估计误差和误码率, 因此原有检测只局限于 LS 信道估计算法, MMSE 算法不适用。

2.3 基于 UFMC 的优化检测方案

根据上述分析, UFMC 系统采用 LS 算法时, 性能不受影响, 而采用 MMSE 算法时, 信道估计误差很大。为了能在 UFMC 系统中采用性能更高的 MMSE 算法, 本文提出基于滤波器分离的频域检测方法, 优化的接收机模型如图 4 所示。为了去除滤波器对信道的影响, 优化模型在原有模型基础上增加滤波器补偿模块, 将信道与滤波器的均衡模块分离, 其中 $1/F_i$ 表示对子带 i 中的子载波分别乘以对应的滤波器频域响应的倒数。

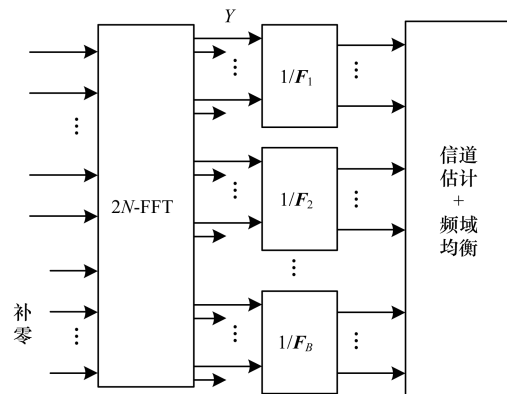


图 4 优化的接收机模型

根据式(7),滤波器分离后的信号可表示为:

$$\hat{Y}(k) = \frac{1}{F_i(k)} Y(k) = H(k) S_i(k) + W(k)/F_i(k) \quad (13)$$

由式(13)可知, $\hat{Y}$ 的信道参数只包含 H , 可采用基于信道统计特性的算法对信道进行准确估计。综上所述,优化模型分两步实现,具体步骤如下:

1) 去除信道参数中的滤波器频域响应因子。滤波器的频域均衡只需对子载波 k 乘以补偿因子 $1/F_i(k)$, F_i 为 k 所处的子带滤波器 f_i 的频域响应。这要求接收机已知发送机各子带采用的滤波器参数以及各子带所占用的子载波序号,从频域角度对相应滤波器进行无失真补偿。

2) 对信号 $\hat{Y}$ 进行信道估计和均衡。此过程可采用现有的 OFDM 信道估计和均衡方法。这方面的技术已相当成熟,可以直接用于 UPMC 系统。

实际上,由于滤波器均衡可以达到无失真补偿,因此降低了第 2) 步信道均衡的误差容限,理论上优化的均衡方法性能不低于 OFDM 系统。相比于原有检测方案(滤波器和信道整体估计),优化后的方案实际上是以牺牲一定的接收机复杂度换取更高的信道估计准确度,从而提高系统误码率(Symbol Error Rate, SER)。

3 性能仿真及分析

为了验证本文提出的基于滤波器分离的接收方案的可行性,将通过 Matlab 平台进行仿真分析。根据 UPMC 基本模型以及仿真参数(见表 1)可知,系统发送端采用 180 个子载波,划分为 15 个子带,每个子带内包含 12 个子载波。此外,各子带采用 Dolph-Chebyshev 滤波器,通过频谱搬移实现带通滤波。

表 1 仿真参数设置

参数	参数值
调制方式	QPSK
IFFT 运算点数	256
子带划分	15 个子带,每个子带内包含 12 个子载波
滤波器类型	Dolph-Chebyshev 滤波器长度 17,旁瓣衰减 17 dB
信道模型	莱斯衰落信道
信道估计与均衡	MMSE 和 LS 估计,迫零均衡

为便于计算,用简化的线性 MMSE (Linear MMSE, LMMSE) 算法代替 MMSE 算法进行仿真,采用基于 ZF 准则的均衡算法。仿真信道模型为莱斯衰落信道,功率时延呈指数形式衰减。采样间隔为 $1 \mu s$, 平均时延为 $4 \mu s$, 最大时延为 $16 \mu s$, 各径时延分别为 $0 \mu s, 2 \mu s, 4 \mu s, 8 \mu s, 12 \mu s$ 。

图 5 给出了在不同信道估计算法下,原有方案与本文提出方案信道估计均方误差 (Mean Square

Error, MSE) 比较。从仿真结果来看,在本文方案下,LS 信道估计误差曲线重合,即误差没有改变,但 LMMSE 算法的误差显著降低,且优于 LS 算法。当信道估计均方误差为 10^{-2} 时,原有方案的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 需在 20 dB 以上,而本文提出方案在 12 dB 时就能满足系统要求。图 5 表明本文提出方案提高了接收端信道估计的准确度。

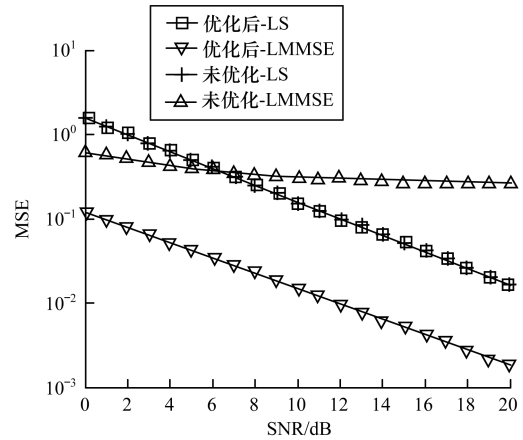


图 5 信道估计均方误差比较

图 6 给出了在不同信道估计算法下,原有方案与本文提出方案的误码率 (SER) 比较,同时给出理想信道估计下的误码率曲线作为对比。由图 6 可见,原有方案 LMMSE 算法的误码率非常高,系统不能正常工作。本文提出方案实现了 LMMSE 算法的应用,且与原有方案的 LS 算法对比误码性能更优。本文提出方案通过采用准确度更高的信道估计算法,能够获得更优的接收端均衡效果。当要求误码率为 10^{-3} 时,提出方案有 2 dB 的增益,且与理想信道估计约有 0.3 dB 的性能差距。

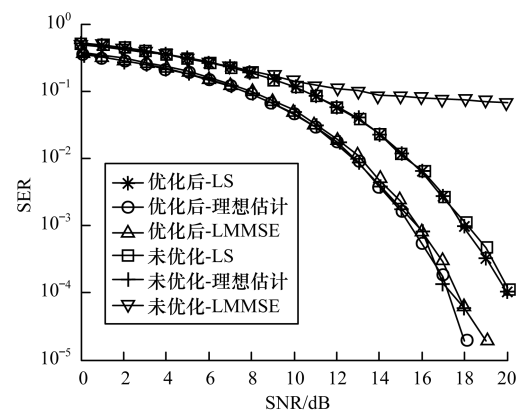


图 6 系统误码率比较

4 结束语

本文介绍了 UPMC 系统的基本模型,通过分析其接收端信道估计的不足,提出优化的接收方案。该方案采用滤波器分离的方式,消除信道参数中混有的滤波器因子,从而实现基于信道统计特性的信

道估计算法的应用。仿真结果表明,在相同的系统误码率条件下,本文提出方案相比原有 UFMC 接收方案的信噪比更低。下一步将对 UFMC 多载波调制的发送端通用滤波器进行设计,并分析接收端的实现复杂度。

参考文献

- [1] 赵锦程,黄斐一,孔繁盛. 面向 5G 的无线宽带多载波传输技术[J]. 移动通信,2015(9):14-18.
- [2] WUNDER G. 5G NOW: Non-orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 97-105.
- [3] WUNDER G, KASPARICK M, BRINK S, et al. 5G NOW: Challenging the LTE Design Paradigms of Orthogonality and Synchronicity [C]//Proceedings of the 77th IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013.
- [4] ABDOLI J, JIA M, MA J. Filtered OFDM: A New Waveform for Future Wireless Systems [C]//Proceedings of the 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 66-70.
- [5] SCHAICH F. Filterbank Based Multi Carrier Transmission (FBMC)——Evolving OFDM: FBMC in the Context of WiMAX [C]//Proceedings of 2010 European Wireless Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010.
- [6] VAKILIAN V, WILD T, SCHAICH F, et al. Universal-filtered Multi-carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE [C]//Proceedings of 2013 IEEE Globecom Workshops. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 223-228.
- [7] SCHAICH F, WILD T. Waveform Contenders for 5G-OFDM vs. FBMC vs. UFMC [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 457-460.
- [8] SCHAICH F, WILD T, CHEN Y. Waveform Contenders for 5G-Suitability for Short Packet and Low Latency Transmissions [C]//Proceedings of the 79th Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [9] 宋伯炜. OFDM 无线宽带移动通信系统中信道估计与均衡技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2005.
- [10] WANG X. Channel Estimation and Equalization for 5G Wireless Communication Systems [EB/OL]. [2016-08-11]. https://www.researchgate.net/publication/273574825_Channel_Estimation_and_Equalization_for_5G_Wireless_Communication_Systems.
- [11] WILD T, SCHAICH F, CHEN Y. 5G Air Interface Design Based on Universal Filtered (UF) OFDM [C]//Proceedings of the 19th International Conference on Digital Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 699-704.
- [12] WILD T, SCHAICH F. A Reduced Complexity Transmitter for UF-OFDM [C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [13] MUKHERJEE M, SHU L, KUMAR K, et al. Reduced Out-of-band Radiation-based Filter Optimization for UFMC Systems in 5G [C]//Proceedings of 2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [14] WANG X J. Universal Filtered Multi-Carrier with Leakage-based Filter Optimization [C]//Proceedings of the 20th European Wireless Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [15] WANG X, WILD T, SCHAICH F, et al. Pilot-Aided Channel Estimation for Universal Filtered Multi-Carrier [C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [16] 曹文魁,李兆训,窦冬冬. 多节点 AF 协作通信系统中的信道估计方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(22): 80-83.
- [17] 樊同亮. OFDM 系统的信道估计和信号均衡技术的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.

编辑 陆燕菲

(上接第 71 页)

- [6] 严 雯. Linux 系统下 OLSR 路由协议研究及实现[D]. 成都:电子科技大学, 2009.
- [7] 赵 健,孙俊锁. OLSR 路由协议的改进及其 NS2 仿真分析[J]. 计算机仿真, 2008, 25(1): 161-163.
- [8] YAMADA K, ITOKAWA T, KITASUKA T, et al. Cooperative MPR Selection to Reduce Topology Control Packets in OLSR [C]//Proceedings of TENCON' 10. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 293-298.
- [9] 张信明,曾依灵,干国政,等. 用遗传算法寻找 OLSR 协议的最小 MPR 集[J]. 软件学报, 2006, 17(4): 932-938.
- [10] 张禾良,熊 焰,苗付友. 最小 MPR 集选取问题的改进蚁群优化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(1): 126-129.
- [11] 刘 杰,王 玲,王 杉,等. 基于 OLSR 协议的最小 MPR 集选择算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(2): 305-308.
- [12] IEEE. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY); IEEE Std 802.11-1999 [S]. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1999.
- [13] 郑少任,王海涛. Ad Hoc 网络技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2005.
- [14] 曹 成,周 健,黄方剑,等. Netfilter 框架下防火墙模型总体结构设计[J]. 计算机应用, 2007, 27(21): 261-263.
- [15] 周 懿. 基于 ARM 嵌入式平台无线 Mesh AP 的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.

编辑 陆燕菲