

引用格式: 吴蓉, 罗志年. 基于加权的 FBMC 系统信道估计新算法[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(1): 66-71. [WU R, LUO Z N. New channel estimation method for FBMC system based on weighed[J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(1): 66-71.]

基于加权的 FBMC 系统信道估计新算法

吴 蓉, 罗志年

(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘 要: 具有高频谱效率和低带外衰减的滤波器组多载波传输/偏移正交幅度调制 (FBMC/OQAM) 系统由于仅满足实数域正交条件, 在实际应用中固有干扰严重影响信道估计 (CE) 性能. 基于干扰消除的算法可以通过设计合理的导频结构消除导频周围固有干扰的影响, 该方法简单, 但是信道估计的性能容易受到噪声的影响. 块状导频结构的子载波之间具有较强的相关性, 导致信道估计结果中存在冗余信息. 为了利用这些冗余信息, 提出一种估计值加权的新算法, 以提高信道估计的性能. 仿真结果表明, 新算法的误码率性能明显优于传统算法.

关键词: FBMC; 信道估计; 固有干扰; 干扰消除算法

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2020)01-0066-06

New channel estimation method for FBMC system based on weighed

WU Rong, LUO Zhi-nian

(Institute of Information Science and Engineering Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: Filter bank multicarrier transmission with offset QAM (FBMC/OQAM) with high spectral efficiency and low out-of-band attenuation only satisfies real domain orthogonal conditions, and the intrinsic interference may seriously deteriorate the performance of channel estimation (CE) in practice. The interference cancellation method can eliminate the inherent interference around the pilot by designing a reasonable pilot structure. This type of method is simple, but the performance of channel estimation is susceptible to noise. There is a strong correlation between the subcarriers of the block pilot structure, resulting in redundant information in the channel estimation result. In order to utilize the redundant information, a new algorithm of estimation weighting is proposed to improve the performance of channel estimation. The simulation results show that the error rate performance of the new algorithm is better than the traditional algorithm.

Key words: FBMC; channel estimation; intrinsic interference; interference cancellation method

1 引言

具有偏移正交幅度调制 (FBMC/OQAM) 的滤波器组多载波已成为新一代多载波技术的研究热点, 具有很强的发展潜力. 与传统的正交频分复用 (OFDM) 系统相比, FBMC/OQAM 系统具有许多有利的特性^[1]. 首先, 由于不需要循环前缀 (CP), FBMC/OQAM 系统具有更高的频谱效率和有效发

射功率. 其次, 由于滤波器的时频聚焦特性良好, FBMC/OQAM 系统在抵抗符号间干扰 (ISI) 或载波间干扰 (ICI) 方面做得很好, 并且由于较低的带外泄漏, 可以有效地减少相邻信道干扰. FBMC/OQAM 技术已经大体上成为未来 5G 物理层替代 OFDM 技术的可选技术^[2].

然而, FBMC/OQAM 系统的基本思想是分割数据的实部和虚部, 然后对它们进行上采样和滤波,

因此正交性仅存在于实数域中,导致在相邻符号之间存在虚部干扰(即固有干扰).这阻碍了传统 OFDM 系统信道估计(CE)方法直接应用于 FBMC/OQAM 系统.因此,需要研究新的信道估计方法.为此,许多国内外学者进行了深入的研究,已经提出了许多有效的关于 FBMC/OQAM 系统的信道估计方法.主要包括基于分散导频的信道估计方法^[3-5]和基于前导码的信道估计方法^[6-9].文献[6]提出了两种基于前导码的信道估计方法,称为干扰利用法(IAM)和成对导频法(POP).IAM 算法可以利用导频一阶邻域以内的固有干扰构成等效导频,通过设计导频结构使得等效功率增大,来提升信道估计的性能.POP 算法不需要利用原型滤波器的干扰系数信息,不需要计算干扰,仅通过简单的代数运算就可以得到信道频率响应的估计值,但是受噪声的影响大.文献[7-8]进一步研究了一些基于 IAM 改进的信道估计方法.文献[9]提出了一种可以获得最大增益的最优前导信道估计算法.同时,文献[8]提出了一种干扰消除方法(ICM),和 IAM 算法的思想相反,其主要思想是通过选择合适的前导序列来使得中心符号一阶邻域以内的干扰相互消除,ICM 算法的导频设计也非常简单,但是这类算法也比较容易受到噪声的影响.文献[9]提出 OQAM-C 算法,根据干扰消除的原理设计特殊的导频结构,提高了信道估计的性能.

文献[10]提出块状导频结构的子载波之间具有比较强的相关性,导致信道估计结果中存在冗余信息.而这些冗余信息与信道估计值的精确度相关,通过利用这些冗余信息,本文设计了一种估计值加权的新算法,提高了信道估计的性能.

2 FBMC/OQAM 系统模型

FBMC/OQAM 系统发送端处的基带离散等效信号可以表示为:

$$s(l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_n a_{m,n} g_{m,n}(l) \quad (1)$$

式中: M 表示子载波数;时频点 (m, n) 表示第 m 个子载波、第 n 个符号; $a_{m,n}$ 表示时频点 (m, n) 上传输的实值数据符号; $g_{m,n}(l)$ 为原型滤波器在时频点 (m, n) 处的基函数:

$$g_{m,n}(t) = g(t - n \frac{M}{2}) \exp(j \frac{2\pi n l}{M}) \quad (2)$$

式中, $\frac{nM}{2} \leq l \leq \frac{nM}{2} + KM - 1$; K 为重叠因子; $g(l)$

为时频聚焦特性良好的滤波器.对 g 脉冲进行设计使得原型滤波器 $g_{m,n}(l)$ 满足时域正交特性:

$$\Re \left\{ \sum_l g_{m,n}(l) g_{p,q}^*(l) \right\} = \delta_{m,p} \delta_{n,q} \quad (3)$$

式中, $\Re$ 为操作符取实部; $\delta_{m,p}$ 狄拉克函数.其中 $m = p$ 时, $\delta_{m,p} = 1$,否则为0.因此,即使在具备完美的定时和载波频率同步条件下的无失真信道中,分析滤波器组(AFB)的输出端仍然会产生一些载波间干扰或符号间干扰,即固有干扰.固有干扰是纯虚数,由式(4)给出:

$$\sum_l g_{m,n}(l) g_{p,q}^*(l) = j \langle g \rangle_{m,n}^{p,q} \quad (4)$$

分析滤波器组(AFB)在时频点 (p, q) 输出的 FBMC/OQAM 表示为:

$$y_{p,q} = H_{p,q} a_{p,q} + j \underbrace{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_n H_{m,n} a_{m,n} g_{m,n}^{p,q}}_{I_{p,q}} + \eta_{p,q} \quad (5)$$

式中, $H_{p,q}$ 为时频点 (p, q) 处的信道频率响应; $I_{p,q}$ 为周围的邻居符号对时频点 (p, q) 产生的固有干扰; $\eta_{p,q}$ 为加信高斯白噪声.

因此,如果将传统的 OFDM 系统信道估计算法如 LS 信道估计方法直接应用于 FBMC 系统,其性能将严重恶化.即:

$$\frac{y_{p,q}}{a_{p,q}} = H_{p,q} + \frac{I_{p,q}}{a_{p,q}} + \frac{\eta_{p,q}}{a_{p,q}} \quad (6)$$

式中,中间一项将严重影响信道估计性能.

3 基于干扰消除的信道估计方法

3.1 传统的 ICM 算法

FBMC 系统采用的原型滤波器的干扰系数呈现出的对称性,干扰消除算法的原理是通过简单导频设计消除干扰,再使用简单的 LS 等方法可以得到信道估计结果.根据原型滤波器的干扰系数的对称性,在设计导频结构时都是遵循同一原则,也就是说,时频点 (m, n) 处周围的其他导频应该满足以下关系:

$$a_{m-1,n} = a_{m+1,n}, a_{m,n-1} = a_{m,n+1} \\ a_{m-1,n-1} = -a_{m+1,n-1}, a_{m+1,n+1} = -a_{m-1,n+1} \quad (7)$$

通过上述设计原则,可以使得导频周围一阶邻域之内的干扰的累加为零.文献[10]根据上述原则提出了干扰消除 ICM 算法,导频结构设计如图 1 所示,左右两列导频均为零值,中间一列导频将中心导频上下两个值设置成相同的数值,从而抵消干扰.

在接收端,可以直接采用 LS 估计,信道频率响应表达式如下:

0	1	0
0	-1	0
0	1	0
0	-1	0
0	1	0
0	-1	0
0	1	0
0	-1	0

图 1 ICM 算法的导频结构

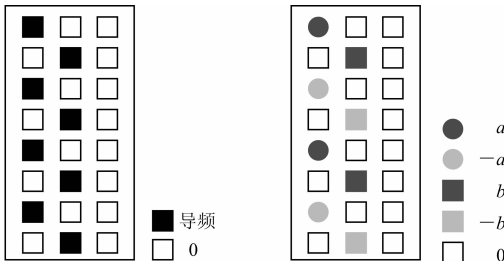
$$\hat{H}_{p,q} = \frac{y_{p,q}}{a_{p,q}} \quad (8)$$

因此,可以看出,ICM 算法的信道估计性能容易受到噪声的影响.

3.2 OQAM-C 算法

为了进一步降低噪声的影响,文献[9]提出 OQAM-C 算法,根据干扰消除的原理设计新的导频结构,并且还可以降低因为稀疏的导频形式导致的高峰值功率.此外,并不需要滤波器先验知识,因此,可以避免复杂的计算.

OQAM-C 算法是基于干扰消除原理来设计的,为了消除导频一阶邻域的干扰,分为以下两个步骤来设计导频结构:(1)遵循块状导频的设计原则,首先在导频之间放置 0,这些 0 不会对其中心导频产生干扰,如图 2(a)所示,但是中心导频一阶邻域内四个顶点位置处的导频仍然产生干扰;(2)为了使得导频左侧上下两个顶点以及导频右侧上下两个顶点位置的导频对中心导频干扰相互抵消,把左侧上下两个顶点的导频值设置成一对相反数,右侧两个顶点的导频值同样设置成一对相反数,如图 2(b)所示,相同形状不同颜色的值是相反的.



(a) 导频设计第一步

(b) 导频设计第二步

图 2 导频设计过程

由于稀疏导频会造成比较高的峰值功率,为了降低峰值功率将放置的导频值设置为复数,最终的导频结构如图 3 所示.

接收信号可以表示为:

$(1+j)/\sqrt{2}$	0	0
0	$(1+j)/\sqrt{2}$	0
$-(1+j)/\sqrt{2}$	0	0
0	$-(1+j)/\sqrt{2}$	0
$(1+j)/\sqrt{2}$	0	0
0	$(1+j)/\sqrt{2}$	0
$-(1+j)/\sqrt{2}$	0	0
0	$-(1+j)/\sqrt{2}$	0

图 3 OQAM-C 导频结构

$$\begin{cases} y^1 = H_{2m,n-1}^c (a_{2m,n-1} + ju_{2m,n-1}) \\ y^2 = H_{2m+1,n}^c (a_{2m+1,n} + ju_{2m+1,n}) \end{cases} \quad (9)$$

通过上述处理,可以消除虚部干扰,获得更准确的信道估计值.

4 改进的信道估计算法

文献[10]指出,采用块状导频结构时,子载波之间具有比较强的相关性.

多径衰落信道中各径的实虚部服从于均值是零的高斯分布.假设第 m 个子载波上的信道频率响应值为 H_m ,第 $m+k$ 个子载波上的信道频率响应值为 H_{m+K} ,并且有 $E\{H_{m+K}\} = E\{H_m\} = 0$ 和 $E\{|H_{m+K}|^2\} = E\{|H_m|^2\}$.那么这两个间隔为 K 的子载波之间的相关性系数表示为:

$$\begin{aligned} \rho_{m,m+K} &= \frac{\text{cov}(H_m, H_{m+K})}{\sqrt{D(H_m)} \cdot \sqrt{D(H_{m+K})}} = \frac{E[H_m H_{m+K}^*]}{E[|H_m|^2]} \\ &= \frac{E\left[\sum_{p=0}^{L-1} h_p e^{-j\frac{2\pi p m}{N}} \sum_{q=0}^{L-1} h_q^* e^{j\frac{2\pi (m+K)q}{N}}\right]}{E\left[\sum_{p=0}^{L-1} h_p e^{-j\frac{2\pi p m}{N}} \sum_{q=0}^{L-1} h_q^* e^{j\frac{2\pi p m}{N}}\right]} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, h 为信道冲激响应; L 为最大多径时延; N 为 DFT 长度.

由于在时域上各径相互独立,式(10)简化为:

$$\rho_{m,m+K} = \frac{\sum_{p=0}^{L-1} E[|h_p|^2 e^{j\frac{2\pi K p}{N}}]}{\sum_{q=0}^{L-1} E[|h_q|^2]} \quad (11)$$

可以看出,子载波之间的相关性和 h , N 和 K 的大小有关, K 越小相关性越大, N 越大相关性越大.

由于子载波之间具有相关性,那么信道估计结果中存在冗余信息,未得到充分利用.因此,改进的信道估计算法在 OQAM-C 的基础上对子载波上的估计值做加权处理,利用冗余信息提高信道估计性能,导频结构和 OQAM-C 采用的导频结构一致,如

图 3 所示.

分析估计值加权处理过程,由式(11)可知,相邻子载波之间具有的相关性最强,因此,本文提出的新算法对三行子载波上的估计值做等值加权处理.

在只考虑高斯白噪声的条件下,假设第 m 个子载波上的信道频率响应值为 H_m ,噪声为 σ_m ,其信道估计值为 $\hat{H}_m = H_m + \sigma_m$,噪声功率表示为 $N_{in} = E\{|\sigma_m|^2\}$,信号功率表示为 $S_{in} = E\{|H_m|^2\}$,那么,此时的信噪比表示为 $S_{in}/N_{in} = E\{|H_m|^2\}/E\{|\sigma_m|^2\}$. 同样,假设第 $m+1$ 个子载波上的信道频率响应值为 H_{m+1} ,噪声为 σ_{m+1} ,信道估计值为 $\hat{H}_{m+1} = H_{m+1} + \sigma_{m+1}$. 同样假设第 $m-1$ 个子载波上的信道频率响应值为 H_{m-1} ,噪声为 σ_{m-1} ,信道估计值为 $\hat{H}_{m-1} = H_{m-1} + \sigma_{m-1}$. 现在,对第 m 个子载波处的信道估计值与其上下两个相邻子载波上的信道估计值一起做等值加权,令 $\Delta_1 = H_m - H_{m-1}$, $\Delta_2 = H_{m+1} - H_m$,可以得到第 m 个子载波上的新信道估计值如下:

$$\begin{aligned}\tilde{H}_m &= \frac{\hat{H}_{m-1} + \hat{H}_m + \hat{H}_{m+1}}{3} \\ &= \frac{H_{m-1} + \sigma_{m-1} + H_m + \sigma_m + H_{m+1} + \sigma_{m+1}}{3} \\ &= H_m + \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \sigma_{m-1} + \sigma_m + \sigma_{m+1}}{3}\end{aligned}\quad (12)$$

经过加权处理之后,第 m 个子载波上的信号功率为 $S_{out} = E\{|H_m|^2\} = S_{in}$. 而信号与噪声是不相关的. 因此,加权之后,总输出功率可以表示如下:

$$\begin{aligned}N_{out} &= E\left\{\left|\frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \sigma_{m-1} + \sigma_m + \sigma_{m+1}}{3}\right|^2\right\} \\ &= \frac{1}{9}(3E\{|\sigma_m|^2\} + 2E\{|H_m|^2\} - E\{|H_{m-1}H_m^*|\} \\ &\quad - E\{|H_mH_{m+1}^*|\}) \\ &= \frac{1}{9}(3E\{|\sigma_m|^2\} + 2E\{|H_m|^2\} - \rho_{m-1,m}E\{|H_m|^2\} \\ &\quad - \rho_{m,m+1}E\{|H_m|^2\})\end{aligned}\quad (13)$$

加权之后,信噪比增益表示如下:

$$\begin{aligned}\frac{S_{out}/N_{out}}{S_{in}/N_{in}} &= E\{|H_m|^2\} / \\ &\quad \left[\frac{1}{9}(3E\{|\sigma_m|^2\} + 2E\{|H_m|^2\} - \rho_{m-1,m}E\{|H_m|^2\} \right. \\ &\quad \left. - \rho_{m,m+1}E\{|H_m|^2\})\right] \\ &= \frac{1}{\frac{1}{9}(2 - \rho_{m-1,m} - \rho_{m,m+1})(S_{in}/N_{in}) + \frac{1}{3}}\end{aligned}\quad (14)$$

由式(14)可知,当 N 足够大时,可以得到 $\rho_{m-1,m} \approx \rho_{m,m+1} \approx 1$,也就是认为相邻子载波间完全相关,

那么,可以得到 $S_{out}/N_{out} = 3S_{in}/N_{in}$,也就是说,可以获得 $\lg 3$ dB 增益. 并且只要分母小于 1,即满足 $(2 - \rho_{m-1,m} - \rho_{m,m+1})(S_{in}/N_{in}) < 6$,就可以获得增益.

因此,本文提出了一种基于子载波加权的信道估计改进方法,在 OQAM-C 算法的基础上,通过进行子载波估计值加权处理,充分利用估计值之间的冗余信息,从而获得了更好的信道估计性能.

5 性能与仿真分析

本文通过 MATLAB 仿真对比为验证新算法和传统算法在不同信道环境下性能. 采用的信道模型是 3GPP 定义的多径衰落信道:步行 ITU-PA 信道和车载 ITU-VA 信道.

为了衡量信道估计算法的性能,通过误比特率 (BER, Bit Error Rate) 衡量 FBMC 系统传输过程中的误码率,并通过均方误差 (MSE, Mean Square Error) 衡量信道估计算法的精确程度. BER 和 MSE 定义如下:

$$\begin{aligned}\text{BER} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|b'_i - b_i|^2) \\ \text{MSE} &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (|H_i - \hat{H}_i|^2)\end{aligned}\quad (15)$$

式中, N 表示发送比特总数; b_i 表示发送端的比特; b'_i 表示接收端解调得到的比特; M 表示子载波总数; H_i 表示子载波上的实际信道频率响应值, $\hat{H}_i$ 表示估计得到的信道频率响应值. BER 和 MSE 的值越小表示信道估计算法的性能越好.

仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

参数	参数值
子载波间隔	$\Delta f = 15$ kHz
子载波数	$M = 1\ 024$
采样间隔	$T_s = 1/(M \times \Delta f)$
信道模型	ITU-PA, ITU-VA
调制方式	QPSK
滤波器长度	$L = 4$ M

图 4 和图 5 为传统算法(导频对 POP 法、干扰利用 IAM 算法、干扰消除 ICM 算法、OQAM-C 算法)和新算法(OQAM-C-W)在 ITU-PA 步行信道和 ITU-VA 信道下的误码率曲线的对比图. 从图 4 可以看出,ITU-PA 信道下,导频对 POP 算法性能最差,干扰利用 IAM 算法通过利用干扰信息,其性能优于 POP 算法和 ICM 算法. OQAM-C 算法通过

设计更加合理的导频结构提升信道估计性能. 本文提出的基于子加权的新算法(OQAM-C-W)的性能是最好的, 明显优于其他传统算法的性能, 这是因为新算法通过加权处理, 充分利用了估计结果中的冗余信息. 通过仿真结果的对比, 验证了新算法的可行性和正确性.

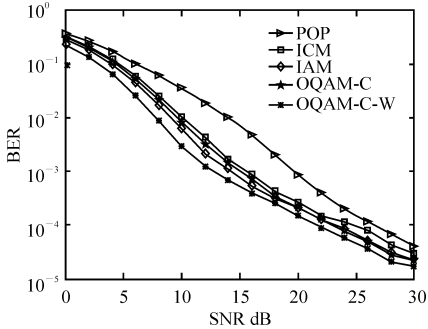


图 4 ITU-PA 信道下算法的 BER 性能比较

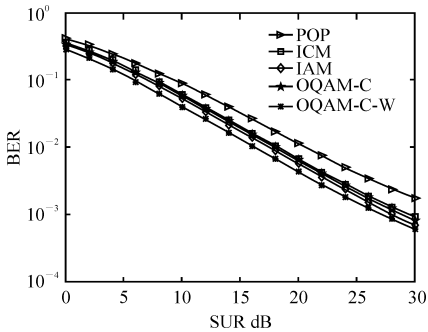


图 5 ITU-VA 信道下算法的 BER 性能比较

从图 5 可以看出, 在 ITU-VA 信道下, 由于移动速度的变化产生的多普勒频移影响信道估计的性能, 所有算法的性能相比在 ITU-PA 信道下都有所下降. POP 算法性能仍然最差, ICM 算法性能其次, IAM 算法和 OQAM-C 算法的性能相对较好, 基于加权的新算法(OQAM-C-W)的性能仍然是最好的, 明显优于其他传统算法的性能. 因此, 验证了新算法的可以适用于不同的信道下.

图 6 和图 7 给出了 ITU-PA 步行信道和 ITU-VA 车载信道下传统算法(导频对 POP 法、干扰利用 IAM 算法、干扰消除 ICM 算法、OQAM-C 算法)和新算法(OQAM-C-W)的 MSE 性能曲线. 从图 6 中可以看出, 在 ITU-PA 步行信道下, POP 算法的性能最差, ICM 算法的性能有所提升. IAM 算法和 OQAM-C 算法的性能比前两者好, 而基于子载波加权的新算法(OQAM-C-W)的 MSE 性能最好. 原因在于新算法在 OQAM-C 导频结构的基础上, 充分

利用信道估计结果之间存在的冗余信息, 提升了算法的性能.

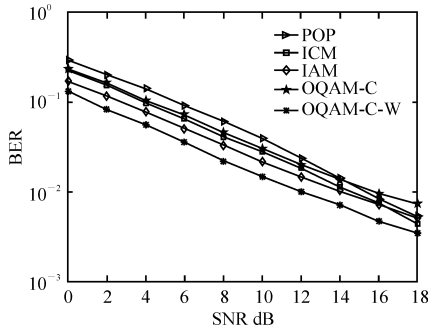


图 6 ITU-PA 信道下算法的 MSE 性能比较

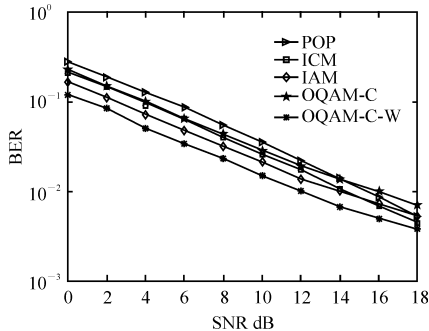


图 7 ITU-VA 信道下算法的 MSE 性能比较

从图 7 中可以看出, 在 ITU-VA 车载信道下, 导频对 POP 算法的性能仍然是最差的, ICM 算法的性能其次. IAM 算法和 OQAM-C 算法的性能相对较好. 而基于子载波加权的新算法(OQAM-C-W)的 MSE 性能最好. 因此, 通过仿真分析, 新算法的正确性和可行性得到了验证.

6 结束语

本文提出了一种改进的信道估计方法, 在基于干扰消除原理的 OQAM-C 算法的基础上, 考虑到子载波之间存在较强的相关性, 通过对子载波估计值做加权处理, 使得信道估计结果中的冗余信息得到充分的利用, 明显的提升了信道估计性能. 最后通过仿真结果说明提出的新算法适用于 ITU-PA 步行信道和 ITU-VA 车载信道等多个场景.

参考文献:

[1] HAMMOODI A, AUDAH L, TAHER M A. Green coexistence for 5G waveform candidates: a review[J]. IEEE Access, 2019(7):10103 - 10126.

[2] MOLES-CASES V, ZAIDI A A, CHEN X, et al. A comparison of OFDM, QAM-FBMC, and OQAM-FB-

- MC waveforms subject to phase noise [C]//ICC IEEE International Conference on Communications IEEE, Paris, France:[s. n.] 2017:1-6.
- [3] CHRISLIN LÉLÉ. Iterative scattered-based channel estimation method for OFDM/OQAM [J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2012(1): 42-56.
- [4] ZHAO N. VUCIC M. SCHELLMANN. A simplified scattered pilot for FBMC/OQAM in highly frequency selective channels [C]//2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems, Barcelona, Spain:IEEE, 2014: 819-823.
- [5] FUHRWERK M, MOGHADDAMNIA S, JÜRGEN PEISSIG. Scattered pilot-based channel estimation for channel adaptive FBMC-OQAM Systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3):1687-1702.
- [6] LÉLÉC, JAVAUDIN J P, LEGOUABLE R, et al. Channel estimation methods for preamble-based OFDM/OQAM modulations[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2008, 19(7):741-750.
- [7] KOFIDIS E, KATSELIS D, RONTOGIANNIS A, et al. Preamble-based channel estimation in OFDM/OQAM systems: A review [J]. *Signal Processing*, 2013, 93(7): 2038 -2054.
- [8] SANDEEPKUMAR V. Effectiveness of optimal preamble based channel estimation for FBMC/OQAM [J]. *Int. conf. on Recent Trends in Information Telecommunication & Computing ITC*, 2014.
- [9] SUN Z , SUN Z, NING X, et al. Pilot design of OFDM/OQAM system based on interference cancellation[C]// International Conference on Mechatronics, Atlantis Press, Shenyang, China,2014.
- [10] 程国兵,肖丽霞,肖悦,等. 一种改进的 OFDM/OQAM 系统信道估计算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(2):427-432.

作者简介:

吴 蓉 女,(1992-),硕士研究生.研究方向为无线通信.

罗志年(通讯作者) 男,(1972-),博士,副教授.研究方向为无线通信. E-mail:rongw@hnu. edu. cn.