

# 基于压缩感知的 FBMC/OQAM 系统信道估计方法

袁伟娜, 严秋

(华东理工大学信息科学与工程学院, 上海 200237)

**摘 要:** 在移动到移动传感网络中, 利用无线信道的固有稀疏性, 可将 FBMC/OQAM 系统信道估计作为一个压缩感知问题来研究, 以提高系统频带利用率。首先, 提出了一种新的基于 Tanimoto 系数的弱选择正则化正交匹配追踪 (T-SWROMP) 算法, 以提高 LS 信道估计的精度。然后, 分别用结合辅助导频和编码方法的 T-SWROMP 方法来估计 FBMC/OQAM 系统中的信道频率响应。仿真结果表明, 所提方法比传统的 SWOMP 方法具有更低的复杂度。此外, 其在双选择信道下比传统的 OMP、SWOMP 和 ROMP 方法具有更好的 BER 性能。

**关键词:** FBMC/OQAM; 压缩感知; Tanimoto 系数; 弱选择; 正则化

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019239

## Channel estimation method based on compressive sensing for FBMC/OQAM system

YUAN Weina, YAN Qiu

School of information science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

**Abstract:** In mobile-to-mobile sensor networks, the channel estimation for FBMC/OQAM system can be investigated as a compressive sensing problem to raise frequency spectrum efficiency by exploiting the sparse nature of wireless channels. Firstly, a novel orthogonal matching pursuit algorithm with selection weak strategy and regularization based on Tanimoto coefficient (T-SWROMP) was proposed to improve the accuracy of LS channel estimation. Then, T-SWROMP methods with auxiliary pilot and coding were used to estimate channel frequency response for FBMC/OQAM system. The experimental results demonstrate the proposed method has lower complexity than the traditional SWOMP method. In addition, it achieve best performance among the traditional OMP, SWOMP and ROMP methods under dual-selective channels.

**Key words:** FBMC/OQAM, compressive sensing, Tanimoto coefficient, selection weak strategy, regularization

### 1 引言

近年来, 在无线通信系统中, 滤波器组多载波 (FBMC, filter bank multi-carrier) 技术成为正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 技术的替代方案之一, 引起了许多研究者的关注<sup>[1]</sup>。作为下一代无线通信网络的潜在候选多载波调制方案<sup>[2-3]</sup>, FBMC 常与偏移正交幅度调制 (OQAM, offset quadrature amplitude modulation) 技

术结合, 充分利用时频局部化特性, 并采用基于滤波器组的脉冲整形, 提供了与无循环前缀 (CP, cyclic prefix) 的 OFDM 系统相似的频谱效率; 由于其放宽了正交条件, 因此具有良好的抗干扰能力<sup>[4]</sup>。虽然 FBMC 具有良好的频谱利用率、抗带外泄露和抗干扰的特性, 然而, 子载波基函数只在实数域上是正交的, 因此, 相邻子载波和符号之间总是存在固有的虚部干扰。

固有的载波间/符号间干扰将使 FBMC 信道估

收稿日期: 2019-08-28; 修回日期: 2019-11-05

通信作者: 严秋, 710648067@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501187)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61501187)

计变得更加复杂。因此, 现有的 OFDM 信道估计方法不能直接应用于 FBMC/OQAM 系统。近年来, 国内外研究了多种导频方案和相关的估计方法。2 种经典的基于导频的方法是干扰近似法 (IAM, interference approximation method) [5-6] 和干扰消除法 (ICM, interference cancellation method) [7-8], 它们的本质是消除固有干扰或者利用它来提高估计性能。然而, 由于难以完全消除虚部干扰, 因此基于导频的信道估计方法的性能不是特别理想。

为了提高 FBMC 信道估计的性能, 研究者们已经做了很多工作。文献[9]提出了一种辅助导频信道估计方法。相对于 IAM 和 ICM, 辅助导频方法 (APM, auxiliary preamble method) 在估计频域信道响应的同时, 只需要 2 个与 CP-OFDM 系统相同的实值符号持续时间, 而不会损失估计性能的准确性。文献[10]研究了一种编码辅助导频信道估计方法, 该方法利用编码辅助导频符号来消除对每个散射导频的假想干扰。文献[11-12]还研究了半盲和盲符号定时估计方法。然而, 这些方法具有较高的计算复杂度, 可能出现相位模糊, 并需要较长的测量数据, 这在一定程度上限制了其可用性。在实践中, 无线信道往往呈现稀疏多径的结构特性, 可建模为时间-频率双选信道 [13-14], 其响应在时延-多普勒域呈现稀疏性, 使压缩感知 (CS, compressive sensing) 技术 [15-17] 得以应用到稀疏信道估计中。在过去的几年里, 人们已经研究了基于 CS 的 OFDM 系统信道估计 [18-19]。然而, 对于基于 CS 的 FBMC/OQAM 系统信道估计的研究很少。文献[20]提出了一种改进的 IAM, 并利用正交匹配追踪 (OMP, orthogonal matching pursuit) 算法重建信道脉冲响应。结果表明, 与传统的基于导频的最小二乘 (LS, least square) 方法相比, 基于 OMP [21] 的方法可以获得显著的性能改善。文献[22]研究了 FBMC/OQAM 系统下基于 IAM 和 ICM 的信道估计方法。新的自适应压缩采样匹配追踪 (ARCoSaMP, adaptive regularized compressive sampling matching pursuit) 算法结合了稀疏度自适应匹配追踪 (SAMP, sparsity adaptive matching pursuit) 算法和压缩采样匹配追踪 (CoSaMP, compressive sampling matching pursuit) 算法的特点, 其估计性能优于基于传统贪婪重构算法的信道估计方法。

针对 FBMC/OQAM 系统, 在辅助导频和编码方法的基础上, 本文提出了一种新的稀疏信道估计方法——基于 Tanimoto 系数的弱选择正则化正交

匹配追踪 (T-SWROMP, Tanimoto based stagewise weak and regularized OMP) 算法。该算法的优点是不需要已知信道的稀疏信息, 基于 Tanimoto 系数度量准则, 然后利用弱选择标准, 结合正则化的思想, 优化支撑集的选择, 迭代地改进了原信号的近似值, 信号重构效果得到提升。仿真结果表明, 新方法比传统的 OMP、分段弱正交匹配追踪 (SWOMP, stagewise weak OMP) 和正则化正交匹配追踪 (ROMP, regularized OMP) 方法具有更好的误比特率 (BER, bit error ratio) 性能。

本文中,  $\Re\{\}$  表示取实部,  $\text{diag}\{\}$  表示对角矩阵,  $\mathbb{R}$  和  $\mathbb{C}$  分别表示实数域和复数域,  $(\cdot)^{-1}$  表示一般逆运算,  $(\cdot)^{\#}$  表示矩阵的逆,  $(\cdot)^T$  和  $(\cdot)^H$  分别表示转置和共轭转置,  $\mathbf{I}_M$  表示  $M$  维的单位矩阵。

## 2 FBMC 系统稀疏信道模型

在 FBMC/OQAM 系统中, 发送的信号可以表示为 [5]

$$x(t) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_n d_{m,n} g_{m,n}(t) \quad (1)$$

其中,  $d_{m,n}$  表示实值 OQAM 符号;  $g_{m,n}(t)$  表示合成基, 可以由原型函数  $g_{m,n}(t)$  通过以下方式获得

$$g_{m,n}(t) = g(t - n\tau_0) e^{i2\pi n F_0 t} e^{j\phi_{m,n}} \quad (2)$$

其中,  $F_0$  表示系统的子载波间隔,  $\tau_0$  表示 FBMC 系统的符号间隔。在 OFDM 系统中,  $F_0 = \frac{1}{T}$ , 但是在 FBMC 系统中,  $\tau_0 = \frac{T}{2}$ , 所以有  $F_0 \tau_0 = \frac{1}{2}$ 。且脉冲  $g$  的设计使相关子载波函数  $g_{m,n}(t)$  在实数域正交

$$\Re\left\{\langle g_{m,n} | g_{p,q} \rangle\right\} = \Re\left\{\sum_t g_{m,n}(t) g_{p,q}^*(t)\right\} = \delta_{m,n} \delta_{p,q} \quad (3)$$

其中,  $\delta_{i,j}$  代表克罗内克函数, 如果  $m \neq p$ , 那么  $\delta_{m,p} = 0$ ; 如果  $m = p$ , 那么  $\delta_{m,p} = 1$ 。可以发现, 即使在无失真的信道中, 在时间和频率完全同步的情况下, 输出端仍然存在载波间虚部干扰, 因此定义干扰权重为

$$\langle g_{m,n}^{p,q} \rangle = -j \langle g_{m,n} | g_{p,q} \rangle \quad (4)$$

其中,  $\langle g_{m,n} | g_{p,q} \rangle$  表示  $(m,n) \neq (p,q)$  时的纯虚项。

通过带有加性噪声的信道, 接收到的信号可以表示为

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_n d_{m,n} g_{m,n}(t) H_{m,n}(t) + \eta(t) \quad (5)$$

另外, 有

$$H_{m,n}(t) = \int_0^{\tau_{\max}} h(t, \tau) e^{-j2\pi m F_0 \tau} d\tau \quad (6)$$

其中,  $h(t, \tau)$  表示信道脉冲响应,  $H_{m,n}(t)$  表示时刻  $t$  信道的复数响应。

式(5)中的信号  $r(t)$  的矩阵形式可以表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}\mathbf{H} + \Phi \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{X} = \text{diag}\{x(0), x(1), \dots, x(N-1)\}$ ;  $\mathbf{R} = \text{diag}\{r(0), r(1), \dots, r(N-1)\}^T$ ;  $\mathbf{H} = \mathbf{F}_{NL}h$  表示多径信道频率响应采样值,  $\mathbf{F}_{NL}$  表示  $N \times L$  维离散傅里叶变换矩阵,  $L$  是信道长度;  $\Phi$  表示  $N \times N$  大小的噪声矩阵, 均值为 0, 方差为  $\sigma^2$ 。

假设导频数量为  $P$ ,  $\phi = (e_{s_1}, e_{s_2}, \dots, e_{s_p})$  表示大小为  $P \times N$  的导频选择矩阵,  $\phi$  用于从整个子载波中寻找导频位置,  $s_i (i=1, 2, \dots, P)$  表示第  $i$  个导频的位置。式(7)可写为

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{X}_p \mathbf{F}_p h + \mathbf{Z}_p \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{R}_p = \phi \mathbf{R}$  是收到的导频信号, 在本文中,  $\mathbf{R}_p$  是 LS 信道估计值,  $\Phi_p = \phi \Phi$ ,  $\mathbf{F}_p = \phi \mathbf{F}_{NL}$ ,  $\mathbf{X}_p = \phi \mathbf{X} \phi^T$  是对角线矩阵, 其中对角线元素是导频值。

假设  $\mathbf{F} = \mathbf{X}_p \mathbf{F}_p$ , 重写式(8)为

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{F}h + \mathbf{Z}_p \quad (9)$$

其中,  $h$  表示稀疏多径信道响应, 在传输过程中可以得到  $\mathbf{R}_p$  和  $\mathbf{F}$ 。然后, 本文可以用 CS 重构算法来恢复稀疏信号  $h$ 。

### 3 基于 T-SWROMP 算法的稀疏信道估计

在基于导频符号辅助的信道估计中, 导频符号在接收端是先验的。在 OFDM 中, 由于干扰权重  $\langle g_{m,n}^{p,q} \rangle$  是一个单位矩阵, 导频位置上接收到的符号除以相应的数据符号, 即可得到导频位置上信道系数的估计值, 然后通过插值来获得数据位置处的信道值。然而, 在 FBMC 中, 这种简单的方法由于虚部干扰而不起作用, 即  $\langle g_{m,n}^{p,q} \rangle$  由非对角虚元素组成。

牺牲一个额外的数据符号, 即所谓的辅助导频符号, 可以消除一个导频位置上的虚部干扰。图 1 显示了本文的辅助导频结构。其中 ■ 表示数据, ■ 表示辅助导频。如果选择辅助导频符号, 可以完全

消除导频位置处的虚部干扰, 所以有

$$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{p,p} & \mathbf{D}_{p,D} & \mathbf{D}_{p,A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{x}_D \\ \mathbf{x}_A \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{x}_p \in \mathbb{R}^{|P| \times 1}$  表示导频符号,  $\mathbf{x}_D \in \mathbb{R}^{|D| \times 1}$  表示数据符号,  $\mathbf{x}_A \in \mathbb{R}^{|A| \times 1}$  表示辅助导频符号,  $\mathbf{D}_{p,p} \in \mathbb{C}^{|P| \times |P|}$  表示任意导频位置对当前导频位置的干扰,  $\mathbf{D}_{p,D} \in \mathbb{C}^{|P| \times |D|}$  表示任意数据位置对当前导频位置的干扰,  $\mathbf{D}_{p,A} \in \mathbb{C}^{|P| \times |A|}$  表示任意辅助导频位置对当前导频位置的干扰。

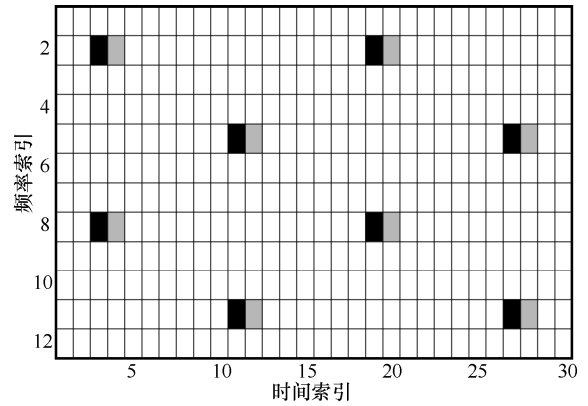


图 1 辅助导频放置方式

当  $|A| > |P|$  时, 即导频符号的数目小于辅助导频符号的数目时, 方程(10)有无数解。则方程(10)可以用广义逆矩阵的方法<sup>[23]</sup>求得一个解

$$\mathbf{x}_A = \mathbf{D}_{p,A}^\# (\mathbf{I}_p - \mathbf{D}_{p,p}) \mathbf{x}_p - \mathbf{D}_{p,A}^\# \mathbf{D}_{p,D} \mathbf{x}_D \quad (11)$$

其中, 有

$$\mathbf{D}_{p,A}^\# = \mathbf{D}_{p,A}^H (\mathbf{D}_{p,A} \mathbf{D}_{p,A}^H)^{-1} \quad (12)$$

如果导频符号彼此间隔足够远, 则  $\mathbf{D}_{p,p}$  将成为一个单位矩阵, 从而可以简化式(11)。

编码方法是指不使用辅助符号, 将数据进行编码从而消除导频处的虚部干扰的方法。图 2 显示了本文的编码辅助导频结构。因此, 将发送的信号改写为

$$\mathbf{S}_C = \mathbf{G}\mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{x}_D \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{LK \times (LK - |P|)}$  表示编码矩阵,  $\mathbf{G}$  表示  $g_{m,n}(t)$  的矩阵形式。

经过信道估计后, 本文用  $\mathbf{C}^T$  对均衡后接收的

信号进行解码, 而条件  $\mathbf{C}^T \mathbf{C} = \mathbf{I}_{LK \times (LK - |P|)}$  必须保持不变, 即编码向量  $\mathbf{c}_i$  是正交的, 因此传输系统与不编码的情况相似。假设导频符号之间的间隔足够远, 允许为不同的导频符号独立设计编码。因此, 找到  $\mathbf{C}$  的问题可以简化为找到一个更小的编码矩阵  $\tilde{\mathbf{C}} \in \mathbb{R}^{N \times (N-1)}$ , 通过该矩阵编码得到最接近导频的  $N$  个干扰符号, 从而消除干扰。

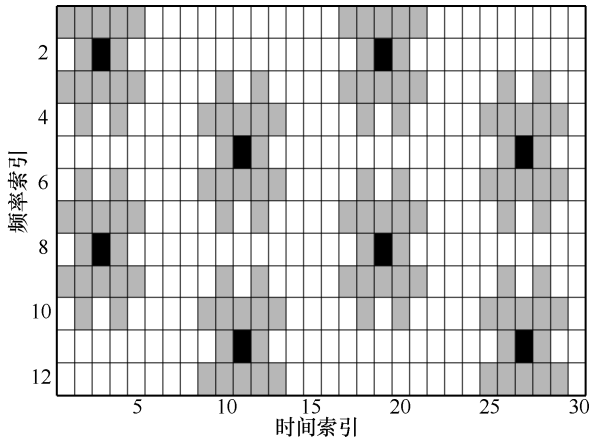


图 2 编码辅助导频放置方式

要很好地进行稀疏信道估计, 除了合适的导频结构外, 还需要较优的 CS 重构算法。

OMP、ROMP 和 SWOMP 算法<sup>[24]</sup>是基于迭代贪婪追踪的 CS 重构算法。对于 OMP 算法, 在每次迭代中, 只选择与残差内积绝对值最大的一列。ROMP 算法则是先选出内积绝对值最大的  $K$  列, 然后从这  $K$  列中按正则化标准再筛选一次, 其在信号重构过程中, 每次迭代都是根据残差  $r$  与测量矩阵  $\Phi$  中原子相似度, 挑选与信号稀疏度相同的  $K$  个原子索引集作为候选集  $J$ , 所以稀疏度  $K$  直接影响信号的重构精度。因此, 为解决 ROMP 算法在信号重构中需已知信号稀疏度  $K$  的问题, 结合 SWOMP 算法中原子的弱选择标准, 即

$$\left\{ i \mid |g_i| \geq \alpha \max_j |g_j| \right\} \quad (14)$$

其中,  $i \in J$ ,  $\alpha \in (0, 1]$ 。

将残差  $r$  与测量矩阵  $\Phi$  中原子的相似度即内积值  $g$  满足式(14)的所有原子对应的索引集  $i$  并入候选集  $J$  中, 则完成了一次原子的弱选择。ROMP 算法结合弱选择标准使原算法在信号重构过程中不再依赖稀疏度, 并且根据残差  $r$  与测量矩阵  $\Phi$  中各原子相似度的不同, 自适应地调节原信号的原子个数, 更好地挑选出表示原信号的原子候选集, 进而

提升信号重构精度及稳定性。

同时, 在信号重构过程中, 弱选择正则化正交匹配追踪算法<sup>[15]</sup>采用了 Cosine 相似度度量准则, 原理是求从冗余字典库中寻找到的匹配原子与残差的夹角余弦值。余弦值越大, 说明夹角越大, 两点相距就越远, 相似度就越小。Cosine 相似度度量准则的定义为

$$\cos(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle}{\|\mathbf{x}\| \|\mathbf{y}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (15)$$

信号重构指的是对通过相似度度量准则得到的最优原子索引集矩阵进行重构计算。算法对原始信号进行重构时, 利用 Cosine 准则度量相似性, 不会考虑到原子相似度的变化, 不能很好地放大重要向量分量的效果, 造成原始信息的部分失真, 进而会影响对最优原子索引集的建立, 信号的重构效果不好。Cosine 相似性表示公共属性的数量除以可能属性的总数, 而 Tanimoto 相似性作为 Cosine 相似度的扩展, 表示公共属性的数量除以 2 个对象中至少一个对象中存在的属性的数量, 且适用于测量稀疏高维数据中的邻近度。Tanimoto 可以通过稀疏点积有效地计算非对称数据, 在表示向量的接近度时, 它同时考虑了向量的角度和长度。这种特性可以更好地保留原始向量分量, 捕捉到原子相似度的变化, 提升算法的重构效果。所以, 引入 Tanimoto 相似性为

$$\text{Tanimoto}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle}{\|\mathbf{x}\|^2 + \|\mathbf{y}\|^2 - \langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i} \quad (16)$$

利用 Tanimoto 相似度度量准则度量相似性时, 分子项不变, 分母项保留 2 个对象中至少一个对象中存在的属性特点, 从而更多地保留每个向量的原始状态, 突出向量中重要的组成元素, 真实捕捉到原子相似度的变化。针对任意 2 个向量  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{y}$ , Tanimoto 相似性可以最大化地有效运用向量中的数值来求解相似度, 解决了 Cosine 准则在度量过程中导致原始信号部分失真的问题。因此相对于 Cosine 相似度度量准则, 基于 Tanimoto 相似性的重

构算法可以更可靠地区分 2 个相似的原子，更好地从冗余字典中挑选出与残差信号相似的原子，极大地提升了信号的重构效果。

基于 Tanimoto 相似性的弱选择正则化正交匹配追踪 (T-SWROMP) 算法流程如下。

**输入** 原稀疏信号测量值  $\mathbf{y}$ ，测量矩阵  $\Phi$ ，算法最大迭代次数  $L$ ，重构的误差  $\varepsilon$

**输出** 重构信号的原子支撑集  $\phi_A$ ，即由  $\phi_A$  中原子的线性组合表示原稀疏信号

1) 初始化: 初始残差  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$ ，迭代次数初始值  $n=1$ ，算法最大迭代次数  $L$ ，重构的误差  $\varepsilon$ ，索引值集合  $\mathbf{A} = \phi$ ， $\mathbf{J} = \phi$ 。

2) 弱选择: 先计算残差和测量矩阵每个原子之间的 Tanimoto 相似性， $\{g_j | g_j = \text{Tanimoto}(\mathbf{r}, \varphi_j)\}$  ( $j=1, \dots, N$ )，并从中找出满足式(14)的测量矩阵  $\Phi$  中原子  $\varphi_i$  对应的索引值  $i$ ，将其存入索引值集  $\mathbf{J}$  中。

3) 正则化: 利用集中原子的相关系数必须满足  $|g_i| \leq 2|g_j| (i, j \in \mathbf{J})$ ，对  $\mathbf{J}$  中索引值对应原子的相关系数进行正则化处理，然后将满足条件的索引值存入集合  $\mathbf{J}_0$  中，更新原子支撑集  $\phi_A$ ，其中  $\mathbf{A} = \mathbf{A} \cup \mathbf{J}_0$ 。

4) 采用最小二乘法获得原信号近似值， $\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N} \|\mathbf{y} - \Phi_A \mathbf{x}\|_2$ ，根据回溯机制，更新原子支撑集  $\phi_A$ 。

5) 更新残差:  $\mathbf{r}_n = \mathbf{y} - \Phi_A \hat{\mathbf{x}}$ 。

6) 比较算法迭代次数，当  $n \geq L$  时，停止迭代；比较更新残差和上次迭代残差，当  $\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\| \leq \varepsilon$  时，停止迭代；否则，令  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_n$ ， $n = n+1$ ，转至步骤 2)。

### 4 仿真结果

本节通过仿真，对 LS、OMP、ROMP、SWOMP、ARCoSaMP<sup>[22]</sup>和本文提出的 T-SWROMP 算法的性能进行了比较。这里分别使用算法的重构率和 BER 性能来对算法的恢复率和信道估计的性能进行评价。仿真环境中 FBMC 子载波个数为 1 024，星座映射方式为 40QAM，原型滤波函数采用 Hermite 函数，滤波器的重叠因子设定为 8，采用 IEEE 802.22 信道模型，最大径数为 6，其信道参数的功率时延谱 (PDP, power delay profile) 如表 1 所示。

图 3 是对原始的和估计的信道参数的功率时延谱的比较，它表明本文所提出的针对 FBMC 系统的贪婪重构算法能够很好地重构原始的多径信道。

表 1 IEEE 802.22 信道参数的功率时延谱

多径	时延分布/ns	能量分布/dB
1	0	0
2	3	-7
3	8	-15
4	11	-22
5	13	-24
6	21	-19

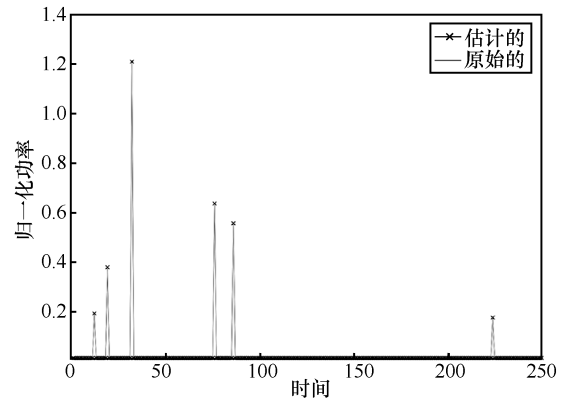


图 3 原始的和估计的 IEEE 802.22 信道参数功率时延谱的比较

本文研究了不同算法在固定信号稀疏度  $K=8$  时的重构概率。图 4 描述了高斯稀疏信号的重构概率曲线。从图 4 可以看出，当测量值  $M$  在 5~50 的范围内时，所提算法的重构性能优于其他几种算法。

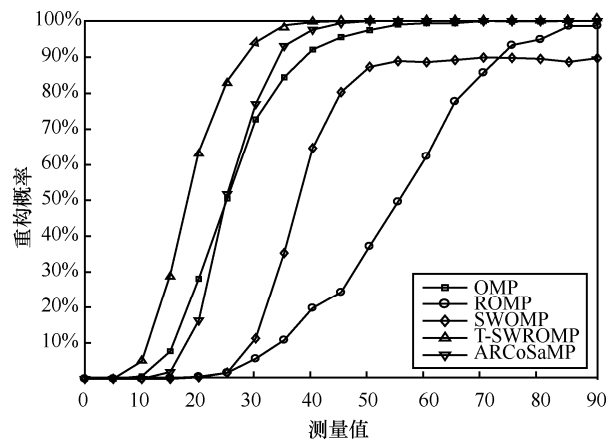


图 4 不同重构算法在不同测量值下高斯稀疏信号的重构概率比较( $K=8, N=256, \text{Gaussian}$ )

图 5 显示了 FBMC/OQAM 系统采用辅助导频结构时的误码率性能随最大多普勒频移的变化。在图 5 中，随着最大多普勒频移的增大，所提算法与 OMP、ROMP、ARCoSaMP 算法的估计性能都下降，

但是所提算法在估计性能更好的情况下，其变化相对平缓，这说明所提算法对多普勒频移具有较好的稳健性。

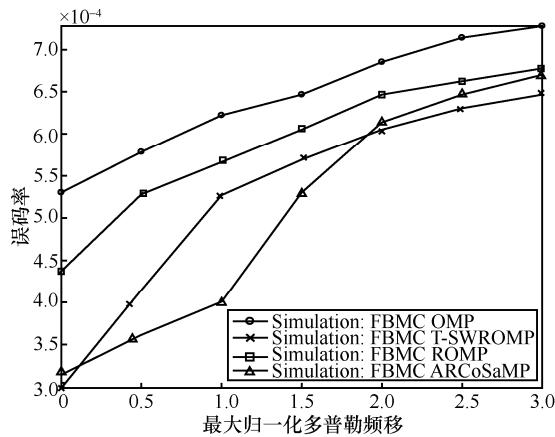


图 5 信道估计误码率性能随最大多普勒频移的变化

图 6 显示了 FBMC/OQAM 系统采用辅助导频结构时的误码率性能比较。在图 6 中,FBMC/OQAM 系统中采用了基于 CS 的信道估计,最大多普勒频移设定为 10 Hz。与传统 LS 方法相比,基于 CS 的信道估计方法可以获得显著的误码率改善。同时,在基于 CS 的信道估计方法中,所提算法在整个信噪比范围内优于 OMP、ROMP 和 SWOMP 算法,与 ARCoSaMP 算法性能接近。

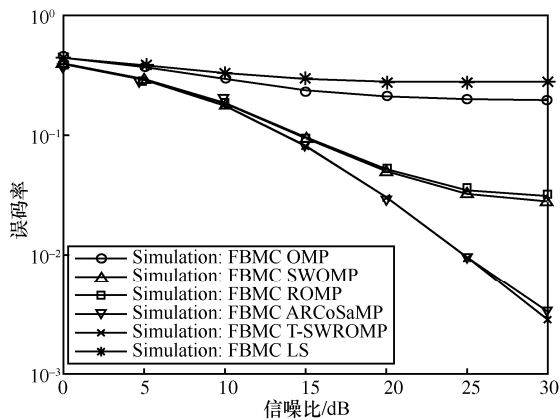


图 6 FBMC/OQAM 系统下基于辅助导频的信道估计的误码率比较

图 7 显示了 FBMC/OQAM 系统采用编码辅助导频结构时的误码率性能比较。同样,在图 7 中,与 LS 相比,基于 CS 的信道估计方法可以获得显著的误码率改善。且在基于 CS 的信道估计方法中,所提算法在整个信噪比范围内优于 OMP、ROMP 和 SWOMP 算法,与 ARCoSaMP 算法性能接近。

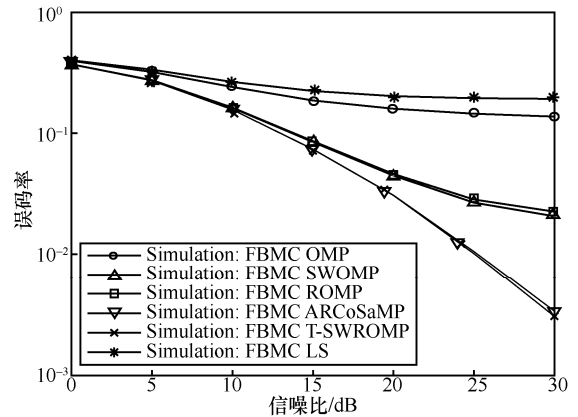


图 7 FBMC/OQAM 系统下基于编码辅助导频的信道估计的误码率比较

表 2 给出了仿真中不同稀疏信道恢复算法在配置为 i5 处理器、3.1 GHz 主频、8 GB 内存、macOS Mojave(64 位)操作系统的 PC 环境下,进行单次运算所需要的时间。可以看出,在信道稀疏度未知的情况下, T-SWROMP 算法在计算复杂度上低于 SWOMP 和 ARCoSaMP 算法。由于信道稀疏度未知,迭代次数过多,导致 ARCoSaMP 和 SWOMP 稀疏度计算复杂度相对较高。

表 2 不同稀疏信道重构算法的仿真运行时间

稀疏信道重构算法	平均运行时间/s
LS	0.017 505
OMP	0.013 738
ROMP	0.024 883
SWOMP	0.041 331
ARCoSaMP	0.055 955
T-SWROMP	0.025 933

仿真结果表明,在 FBMC/OQAM 系统中,基于 CS 的信道估计方法比传统的 LS 方法能提供更有有效的性能。本文提出的基于 T-SWROMP 的信道估计方法,在不需要信道稀疏度的情况下,可以获得比其他重构算法更好的性能,并且在时间复杂度较低的情况下,具有更好的信道估计性能。

## 5 结束语

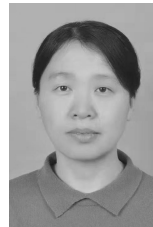
本文研究了在 IEEE 802.22 稀疏多径衰落信道下基于 CS 的 FBMC/OQAM 系统的稀疏信道估计,提出了一种新的基于 Tanimoto 系数的弱选择正则化正交匹配追踪算法,所提算法结合辅助导频和编码方法,可以实现在未知信号稀疏度的条件下,根

据弱选择标准自适应地确定原子候选集的原子个数, 进而通过正则化过程从候选集中快速有效地挑选出完成信号重构的最优原子组。同时, 在重构信号时, 利用 Tanimoto 度量准则, 优化了支撑集的选择, 进一步提高了信号的重构精度。仿真结果表明, 基于 CS 的导频方法比传统的 LS 方法具有更好的误码率性能。在时间复杂度较低的情况下, 该方案优于 SWOMP 算法, 并且在未知信道稀疏度的情况下, 该方案优于 ROMP 算法。在 FBMC/OQAM 传输网络中, T-SWOMP 方案是一种有效的稀疏信道估计方法。

### 参考文献:

- [1] NADAL J, NOUR C A, BAGHDADI A. Low-complexity pipelined architecture for FBMC/OQAM transmitter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II Express Briefs, 2016(63): 19-23.
- [2] ZHANG Z S, CHAI X M, LONG K P, et al. Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection[J]. IEEE Communications Magazine, 2015(53): 128-137.
- [3] ZHANG Z S, WANG X Y, LONG K P, et al. Large-scale MIMO-based wireless backhaul in 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2015(22): 58-66.
- [4] BELLANGER M, LE RUYET D, ROVIRAS D, et al. FBMC physical layer: a primer[Z]. The PHYDYAS Project, January, 2010.
- [5] LELE C, JAVAUDIN J P, LEGOUABLE R, et al. Channel estimation methods for preamble-based OFDM/OQAM modulations[J]. European Transactions on Telecommunications, 2008(19): 741-750.
- [6] DU J F, SIGNELL S. Novel preamble-based channel estimation for OFDM/OQAM systems[C]//The IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2009: 1-6.
- [7] DENG F, HE X, CHENG G B, et al. An effective preamble-based channel estimation structure for OFDM/OQAM systems[C]//The 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. 2010: 1-4.
- [8] HU S, WU G, LI T, et al. Preamble design with ICI cancellation for channel estimation in OFDM/OQAM system[J]. IEICE Transactions on Communications, 2010(E93-B): 211-214.
- [9] HANG Y, SU H, LU Y, et al. Efficient channel estimation for FBMC systems based on auxiliary preamble design[C]//The 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing(ICICS). 2015: 2-4.
- [10] WENJIA C, DAIMING Q, TAO J, et al. Coded auxiliary pilots for channel estimation in FBMC-OQAM systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016(65): 2936-2946.
- [11] FUSCO T, IZZO L, PETRELLA A, et al. Blind symbol timing estimation for OFDM/OQAM systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009(57): 4952-4958.
- [12] HOU W K, CHAMPAGNE B. Semiblind channel estimation for OFDM/OQAM systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015(22): 400-403.
- [13] HOU Z W, ZHOU Y Q, TIAN L, et al. Radio environment map aided doppler shift estimation in LTE-railway[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 4462-4467.
- [14] ZHOU Y Q, WANG J Z, MAMORU S. Downlink transmission of broadband OFCDM systems---Part II: effect of Doppler shift[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, COM-54(6): 1097-1108.
- [15] 刘哲, 张鹤妮, 张永亮, 等. 基于弱选择正则化正交匹配追踪的图像重构算法[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1217-1221.
- LIU Z, ZHANG H N, ZHANG Y L, et al. Image reconstruction based on weak selected regularized orthogonal match pursuit algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1217-1221.
- [16] GUI G, PENG W, ADACHI F. Improved adaptive sparse channel estimation based on the least mean square algorithm[C]//The 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2013: 3105-3109.
- [17] JIANG D, WANG Y, YAO C, et al. An effective dynamic spectrum access algorithm for multi-hop cognitive wireless networks[J]. Computer Networks, 2015(84): 1-16.
- [18] PAN H, XUE Y, MEI L, et al. An improved CoSaMP sparse channel estimation algorithm in OFDM system[C]//The 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. IEEE, 2015: 1-4.
- [19] 邵耀东, 袁伟娜, 王嘉璇. 一种新的基于分布式压缩感知的时变稀疏信道估计[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2018, 44(1): 119-123.
- SHAO Y D, YUAN W N, WANG J X. A novel time-varying and sparse channel estimation based on distributed compress sensing[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2018, 44(1): 119-123.
- [20] LIU X M, CAI Z W, JIA A L, et al. A novel channel estimation method based on compressive sensing for OFDM/OQAM systems[J]. Journal of Computational Information Systems, 2013(9): 5955-5963.
- [21] TROPP J, GILBERT A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007(53): 4655-4666.
- [22] WANG H, DU W C, XU L W. A new sparse adaptive channel estimation method based on compressive sensing for FBMC/OQAM transmission network[J]. Sensors, 2016, 16(7): 966-966.
- [23] JACQUES L, LASKA J N, BOUFONOS P T, et al. Robust 1-bit compressive sensing via binary stable embeddings of sparse vectors[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(4): 2082-2102.
- [24] TODD K M, WYNN C S. Mathematical methods and algorithms for signal processing[M]. New York: Prentice Hall, 2000.

### [作者简介]



袁伟娜(1979-), 女, 黑龙江绥化人, 博士, 华东理工大学副教授, 主要研究方向为多天线系统信道估计技术及均衡等。

严秋(1994-), 女, 四川资阳人, 华东理工大学硕士生, 主要研究方向为多载波系统信道估计技术等。