

OFDM/OQAM 系统中联合迭代信道估计和信号检测

胡苏 武刚 肖悦 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰国家重点实验室 成都 610054)

摘要: 与基于复数域空间正交条件的传统正交频分复用系统(OFDM with Cyclic Prefix, CP-OFDM)有所不同, 基于交错正交调制的正交频分复用系统(OFDM/Offset QAM, OFDM/OQAM)满足实数域空间严格正交条件。因此在多径衰落信道条件下, CP-OFDM 系统中的信道估计方法会导致 OFDM/OQAM 系统严重的字符间干扰和载波间干扰。该文结合 OFDM/OQAM 系统结构特点, 提出了一种基于迭代信道估计和信号检测算法。该算法通过信道估计器和接收到的信号互相交换信息, 消除导频序列中的字符间干扰和载波间干扰, 提高信道估计和信号检测的准确度。仿真分析结果表明, 经过一定次数迭代处理后, OFDM/OQAM 迭代信道估计性能趋近于理想信道估计性能。

关键词: 正交频分复用; 交错正交幅度调制; 脉冲成形滤波器; 迭代信道估计

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2332-06

Joint Iterative Channel Estimation and Detection for OFDM/OQAM System

Hu Su Wu Gang Xiao Yue Li Shao-qian

(National Key Lab of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Compared with OFDM system with Cyclic Prefix (CP-OFDM) which satisfies strictly complex field orthogonality, OFDM/Offset QAM system (OFDM/OQAM) only satisfies the real field orthogonality. Therefore, in present of multipath fading channel, the Inter Symbol Interference (ISI) and Inter Carrier Interference (ICI) always exist in the OFDM/OQAM system if utilizing the conventional preamble based channel estimation method for CP-OFDM system. In this paper, a joint iterative channel estimation and detection is proposed for OFDM/OQAM system. The proposed method exchanges the information between channel estimator and demodulator to remove the ISI and ICI effectively. Simulation results demonstrate that as the number of iterative time increasing, BER performance of the joint iterative channel estimation and detection method is approximately close to perfect channel estimation.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM); Offset QAM; Pulse shaping filter; Iterative channel estimation

1 引言

现有无线通信系统中, 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)被认为是下一代无线通信传输与多址接入的框架技术。OFDM 技术利用不同子载波相互正交的特性达到频谱效率最大化, 但是依然存在对频率偏移敏感与高峰值功率问题。此外, 为了消除多径干扰的影响, 传统正交频分复用系统添加循环前缀, 却以牺牲系统频谱利用率为代价。

若采取与添加前缀的正交频分复用系统

(OFDM with Cyclic Prefix, CP-OFDM)不同的设计思路, 可以构建基于实数域正交基函数或者非正交基函数的广义频分复用(Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM)多载波多址调制技术^[1-6], 包括交错正交幅度调制正交频分复用调制(Orthogonal Frequency Division Multiplex/Offset QAM, OFDM/OQAM)、非正交多载波调制(Nonorthogonal Frequency Division Multiplexing, NOFDM)与双正交多载波调制(Biorthogonal Frequency Division Multiplexing, BFDm)等, 其中 OFDM/OQAM 系统是目前研究的热点。OFDM/OQAM 系统能够通过成形滤波器的时频聚焦特性适合信道功率延迟特征与频率偏移特征, 因此 OFDM/OQAM 系统无须添加循环前缀, 且对字

2008-11-03收到, 2009-03-16改回

中国瑞典国际科技合作项目(2008DFA11700)和国家部级基金(A1420080150)资助课题

符间干扰(Inter Symbol Interference, ISI)和载波间干扰(Inter Carrier Interference, ICI)有较强的鲁棒性。近来, OFDM/OQAM 系统已被提交至 IEEE 802.22 WRAN 和 3GPP LTE 的技术标准的草案中^[7,8]。作为对 OFDM 技术的补充和变革, 基于成形滤波器设计的 OFDM/OQAM 系统具备成为未来新兴多载波调制技术的潜力。

众所周知, 正交频分复用技术能够把频率选择性衰落信道划分成许多频率平坦衰落的正交子信道, 因此接收端可以通过导频信息有效估计信道信息, 利用简单的单抽头均衡器补偿信道损失。传统的 CP-OFDM 系统通过添加循环前缀有效地消除了 ISI, 进而保证了严格的复数域正交条件。然而与 CP-OFDM 系统相比, OFDM/OQAM 系统性能仅仅满足严格的实数域正交条件。在多径衰落信道情况下, 信道复数系数会破坏 OFDM/OQAM 系统之间严格的实数域正交特性, 导致严重的 ICI 和 ISI。因此, 传统 CP-OFDM 系统中基于导频序列的信道估计方法不能直接用于 OFDM/OQAM 系统中。

一些文献提出了有效的 OFDM/OQAM 系统中的信道估计方法, 如文献[9]提出了基于导频符号(pilot)的信道估计方法; 文献[10,11]提出了基于导频序列(preamble)的信道估计方法。相比于传统 CP-OFDM 系统, 上述文献提出在导频参考信号两边添加全 0 符号进行保护, 消除相邻 OFDM/OQAM 符号对导频参考信道的干扰。尽管该方法能够取得较好的性能特性, 但是由于保护符号不传输任何的有效数据, 降低了 OFDM/OQAM 系统的频谱效率。

为了提高 OFDM/OQAM 系统的频谱效率, 本文提出一种短导频序列用于信道估计。该短导频序列仅仅在导频参考信号一侧添加全 0 保护符号。但是由于该导频序列结构不能够完全消除 ISI, 进而本文提出一种迭代信道估计和检测的算法, 消除符号间和子载波间干扰, 提高 OFDM/OQAM 系统的性能。

2 系统描述

在 CP-OFDM 系统中, 时域通常采用严格的窗函数来控制符号间干扰, 所以 CP-OFDM 系统的成形滤波器呈现 sinc(x) 函数特性。通过观察发现, sinc(x) 函数的旁瓣较高, 相比于主瓣仅仅有 20 dB 衰减, 所以 CP-OFDM 系统对于频率偏移非常敏感。因此, 对于正交频分复用系统而言, 如何找到具有良好时频聚焦特性的成形滤波器函数具有重要的意义。到目前为止, 具有良好时频聚焦特性的成形滤

波器函数仅仅存在于实数域, 因此基于成形滤波器设计的正交频分复用系统必须采用交错正交幅度调制方式(Offset QAM)。

在文献[3]中, 作者提出扩展高斯函数(Extended Gaussian Function, EGF)。该函数不仅具有高斯函数的时频聚焦特性, 且能够保持滤波器相互严格正交(高斯函数具有很好的时频聚焦特性, 但是基于高斯函数的成形滤波器之间不能满足正交条件)。EGF 函数表达式如下:

$$z_{\alpha, \tau_0, \nu_0} = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=0}^{\infty} d_{k, \alpha, \nu_0} \left[g_{\alpha} \left(t + \frac{k}{\nu_0} \right) + g_{\alpha} \left(t - \frac{k}{\nu_0} \right) \right] \right] \cdot \sum_{l=0}^{\infty} d_{l, 1/\alpha, \tau_0} \cos \left(2\pi l \frac{t}{\tau_0} \right) \quad (1)$$

其中参数 α 表示扩展因子。此外 EGF 函数还有一个很重要的特性, 该函数的傅里叶变换与函数具有相似的表达式, 如下式所示:

$$F(z_{\alpha, \nu_0, \tau_0}) = z_{1/\alpha, \tau_0, \nu_0} \quad (2)$$

其中 F 表示傅里叶变换。当 $\alpha=1, \tau_0 = \nu_0 = 1/\sqrt{2}$ 时, EGF 函数的傅里叶变换等于其自身, 所以该函数在时域与频域都具有良好的聚焦特性。因此, OFDM/OQAM 系统通过采用具有良好的时频聚焦特性的 EGF 函数, 使发送信号对 ICI 和 ISI 具有较强的鲁棒性。OFDM/OQAM 发送信号可以表示为

$$s(t) = \sum_n \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} g_{m,n}(t) = \sum_n \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} j^{m+n} e^{j2\pi m \nu_0 t} g(t - n\tau_0) \quad (3)$$

其中, $a_{m,n}$ 表示第 n 个符号, 第 m 个子载波发送的实数信号, ν_0 和 τ_0 代表 OFDM/OQAM 系统子载波间隔和发送信号时间间隔, $g(t)$ 表示成形滤波器函数。与传统 CP-OFDM 系统有所不同, 基于成形滤波器设计的 OFDM/OQAM 系统满足实数域严格正交, 代替了 CP-OFDM 系统中的复数域正交。实数域正交基表示如下:

$$\begin{aligned} \langle g_{m,n} | g_{m',n'} \rangle_R &= \left\langle \int_{\mathcal{X}} g_{m,n}(t) g_{m',n'}^*(t) dt \right\rangle \\ &= \text{Re} \{ j^{m'-m+n'-n+(m'-m)(n'+n)} \\ &\quad \cdot A_g((n-n')\tau_0, (m-m')\nu_0) \} \\ &= \delta_{m,m'} \delta_{n,n'} \end{aligned} \quad (4)$$

实数域正交基条件可以进一步描述为 $\langle g_{m,n} | g_{m',n'} \rangle$ 为实数符号, 当且仅当 $m = m', n = n'$ 。如果不满足该条件, $\langle g_{m,n} | g_{m',n'} \rangle$ 为纯虚数符号。

Du 提出一种基于 IFFT/FFT 模块的 OFDM/OQAM 系统低复杂度实现方法^[12]。OFDM/OQAM

系统结构框图如图 1 所示。

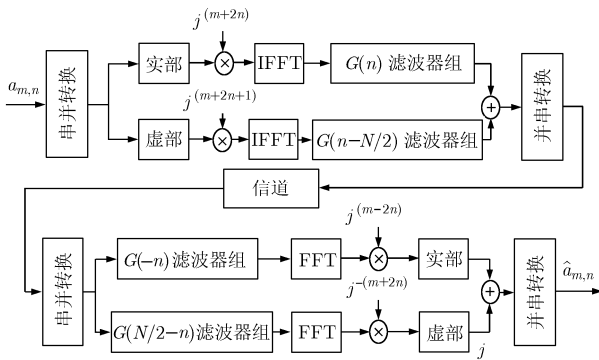


图 1 OFDM/OQAM 系统结构框图

通过观察图 1 可以看出，OFDM/OQAM 系统实现方式和传统的 CP-OFDM 系统结构非常相似，因此可以通过 IFFT/FFT 模块提高系统硬件实现效率。对比可以发现，仍然存在一些细微不同：(1)输入复数信号会分成实部与虚部两个独立分支；(2)输入 IFFT 模块前，输入实数信号会通过变换因子重构输入信号虚实交替结构，从而满足实数域正交条件；(3)发送段 IFFT 模块后紧跟一个综合滤波器组，接收端在 FFT 模块前添加一个分析滤波器组，从而实现发送段成形滤波，接收端匹配滤波。

值得注意，与传统 CP-OFDM 系统相比，OFDM/OQAM 系统将原始复信号转化为两个时刻的实信号发送，信号发射时间间隔缩短为传统 CP-OFDM 系统的一半。从理论上而言，在相同的频率间隔下，OFDM/OQAM 系统与 CP-OFDM 系统具有相同的频谱利用率。但在实际系统中，传统 CP-OFDM 系统往往采用循环前缀来消除由多径效应带来的 ISI，所以 OFDM/OQAM 系统的频谱利用率要高于 CP-OFDM 系统。

3 迭代信道估计算法

3.1 OFDM/OQAM 系统数学描述

为了描述 OFDM/OQAM 系统中信道估计问题，本文对 OFDM/OQAM 系统信道估计问题进行必要的数学描述。假定 OFDM/OQAM 信号经历了一个多径衰落信道，脉冲信道相应为 $h(t)$ ，考虑高斯白噪声 $n(t)$ 的影响，OFDM/OQAM 系统接收信号可表示为

$$r(t) = h(t) * s(t) + n(t) = \int_0^\Delta h(t, \tau) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (5)$$

假定在时间间隔 $[0, \Delta]$ 中， $g(t - \tau - n\tau_0) \approx g(t - n\tau_0)$ ，则式(5)可以表示为

$$r(t) = \sum_n \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} j^{m+n} e^{j2\pi m v_0 t} g(t - n\tau_0) H_m + n(t) \quad (6)$$

其中 H_m 表示多径衰落信道在频率 mv_0 频域响应，即

$$H_m = \int_0^\Delta h(\tau) e^{j2\pi m v_0 (-\tau)} d\tau \quad (7)$$

假定无线信道是非时变信道，信道系数对于不同的 OFDM/OQAM 符号是固定参数，即 $H_m = H_{m,n}$ 。在接收端，结合正交条件式(3)，接收解调信号 $y(t)$ 可以表示为

$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n'} \sum_{m'=0}^{M-1} \langle r(t) | g_{m',n'} \rangle \right\} = \text{Re} \left\{ \sum_n \sum_{n'} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{m'=0}^{M-1} a_{m,n} \langle g_{m,n} | g_{m',n'} \rangle H_m \right\} + n^*(t) \quad (8)$$

结合式(3)可知，OFDM/OQAM 系统通过多径衰落信道后，信道衰落的复数特性会导致 OFDM/OQAM 系统中实数域正交条件遭到破坏，导致 OFDM/OQAM 系统子载波间干扰和字符间干扰。

3.2 迭代信道估计算法

在文献[10,11]中，作者提出在导频参考信号两边通过添加全 0 符号进行保护，从而消除相邻 OFDM/OQAM 符号对导频参考信道的干扰，提高了基于导频信号信道估计的准确度，如图 2(a)所示。尽管该方法能够有效的估计信道信息，但是由于导频参考信号两边通过全 0 符号进行保护，降低了 OFDM/OQAM 系统的频谱利用率。为达到与传统 CP-OFDM 系统相同的频谱效率，设定导频参考信号 $\{\pm 1 + 0j, \dots, \pm 1 + 0j\}$ ，如图 2(b)所示。

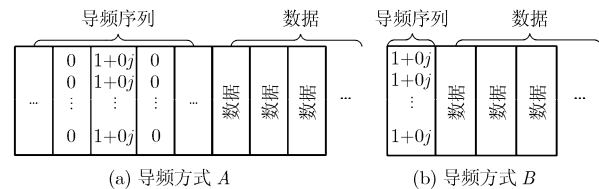


图 2 OFDM/OQAM 系统导频序列信道估计方式

导频方式 B 与传统 CP-OFDM 系统具有相同的频谱效率，但是多径衰落环境下实数域正交特性被破坏，导致严重的 ICI 和 ISI。此外，通过分析式(8)可知，即使导频参考信号两边添加全 0 符号，导频参考信号仍然存在 ICI 干扰项 $\text{Re} \left\{ \sum_{m \neq m'} a_{m',n} \langle g_{m,2n} | g_{m',2n} \rangle H_m \right\}$ 。因此，在多径衰落信道环境下，上述信道估计结果都存在较大的误差。

为了消除导频参考信号中的干扰信号，本文提出通过迭代方式来消除 ICI 和 ISI，从而得到准确的信道估计信息和信号检测结果，联合迭代信道估计和信号检测系统框图如图 3 所示。

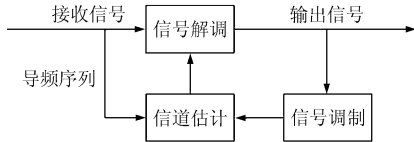


图 3 基于迭代信道估计和检测算法的系统框图

在联合迭代信道估计和信号检测算法中，通常可以采用硬判决反馈(hard decision feedback)和软判决反馈(soft decision feedback)两种方式。为了突出联合迭代和检测算法，本文只采用硬判决的方式对信号进行解调，并采用最小平方(Least Square, LS)信道估计准则^[13]迭代更新信道信息，LS 算法描述为

$$\hat{H} = (s_R^H s_R)^{-1} s_R^H y_R = \frac{s_R^*}{\|s_R\|^2} y_R \quad (9)$$

其中 s_R 表示为导频序列参考信号， y_R 表示为导频序列对应的接收信号。在基于迭代信道估计和信号检测算法中，接收端首先通过导频参考信号估计出多径衰落信道信息，信号解调器利用有效的信道信息解调接收信号。由于导频参考信号存在 ISI 和 ICI，所以会导致解调信号存在较大的误差。通过接收端重构发送信号，信道估计器和重构信号之间互相交换信息，消除导频序列中的干扰项，提高信道估计和信号检测的准确度，完成 OFDM/OQAM 系统迭代信道估计和检测过程。

4 仿真分析

本文的目的是通过联合迭代信道估计和信号检测，使信道估计器和接收信号解调器之间在迭代过程中更新信道估计值和信号检测结果。为了验证上面算法的结果，OFDM/OQAM 系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 OFDM/OQAM 系统仿真参数表

OFDM/OQAM 系统	256 子载波
EGF 函数	扩展因子 $\alpha=1$, 抽头数为 8
信号采样频率	10 MHz
信号调制方式	QPSK 调制
纠错编码方式	卷积码([133,171], $K=7$, 码率=1/2)

观察式(8)可知，导频参考信号的干扰项主要由相邻子载波间干扰和相邻符号间干扰产生，且两项干扰项都与多径衰落信道的信道系数相关。为了验证联合迭代信道估计和信号检测算法的可行性，本文选择了两种典型的多径衰落信道条件作为仿真环境——信道 1(主径为第 1 径)和信道 2(主径为第 2 径)，

信道参数如表 2 所示。

表 2 两种典型的多径衰落信道参数

信道 1 (主径为第 1 径)	径数	1	2	3	4	5	6
时延(ms)		0	0.2	0.4	0.7	1.1	1.4
功率(dB)		0	-7	-15	-22	-24	-19
信道 2 (主径为第 2 径)	径数	1	2	3	4	5	6
时延(ms)		-0.3	0	0.2	0.4	0.7	1.1
功率(dB)		-6	0	-7	-22	-16	-20

为了对比导频方式 A 与方式 B，以及评估联合迭代估计和信号检测的有效性，本文对三者在不同的信道条件下进行了仿真。首先对仿真结果中相应的曲线给予说明，导频估计 A 表示导频方式 A 信道估计方式，且导频参考信号两边都添加 1 个全 0 符号进行保护；导频估计 B 表示用导频方式 B 信道估计方式。此外，所有联合迭代信道估计和信号检测方法都是基于导频方式 B，因此基于迭代信道估计和检测的 OFDM/OQAM 系统与传统 CP-OFDM 系统有相同的频谱效率。

图 4 给出了在信道 1 条件下误码率(Bit Error Rate, BER)仿真，通过仿真结果可以看到，性能最差的是导频方式 B，并且随着高斯白噪声信噪比逐渐提高，系统性能在误码率 10^{-3} 处逐渐趋于平稳。这是因为在导频方式 B 情况下，多径衰落信道会导致 OFDM/OQAM 系统实数域正交条件遭到破坏，系统存在严重的 ICI 和 ISI，在高信噪比情况下，ICI 和 ISI 变为干扰的主要成分，导致误码率趋于平稳。导频方式 A 在导频参考信号两边添加全 0 保护符号，能够消除大部分 ISI，但是该方式并不能完全消除 ICI，所以导频方式 A 与理想信道估计仍然有较大的差距，如在误码率 10^{-3} 处差距为 5 dB。

对于联合迭代信道估计和检测算法而言，通过不同的迭代次数，系统性能得到了显著提高。当迭代次数为 1 时，联合迭代估计和信号检测算法的性

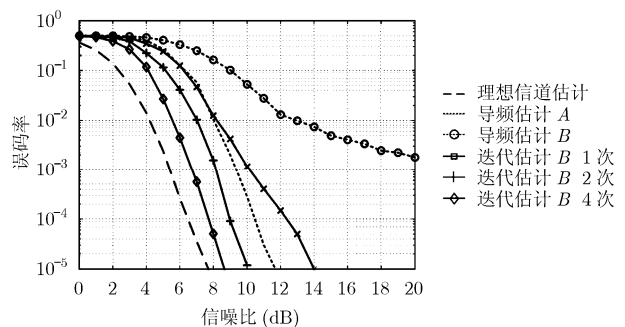


图 4 在信道 1 情况下，OFDM/OQAM 系统信道估计误码率性能

能比导频方式 B 在误码率 10^{-3} 处提高了至少 10 dB。与导频方式 A 进行比较, 联合迭代估计和信号检测算法的性能在低信噪比情况下误码率性能相同, 但在高信噪比情况下, 迭代次数为 1 的信道估计性能比导频方式 A 要差。但是随着迭代次数的不断增加, 迭代估计的性能逐渐提高, 当迭代次数为 4 时, 联合迭代估计和信号检测算法接近理想信道估计性能, 在误码率 10^{-3} 处仅仅有 1 dB 差距。

图 5 给出了在信道 2 条件下 BER 仿真。通过仿真结果可以看到, 基于迭代信道估计和信号检测算法在信道 B 的仿真结果与信道 A 的仿真结果类似, 随着迭代次数的不断提高, 迭代估计算法的性能也趋于理想信道估计。

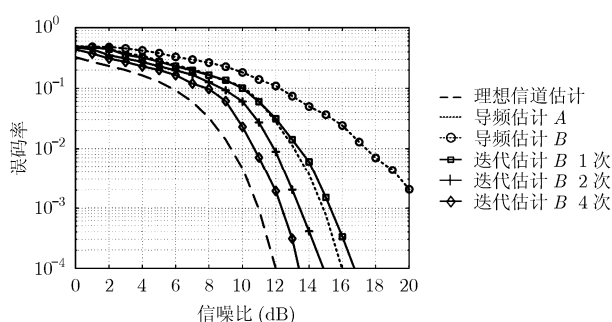


图 5 在信道 2 情况下, OFDM/OQAM 系统信道估计误码率性能

上述仿真结果表明, 在多径衰落信道环境下, 信道复数衰落系数会破坏 OFDM/OQAM 系统中的实数域正交特性, 导致 OFDM/OQAM 系统存在严重 ICI 和 ISI。尽管通过在导频序列两端添加全 0 保护符号可以消除 ISI, ICI 仍然导致系统具有较差的性能。联合迭代信道估计和信号检测算法通过交换信道估计器和信号解调器之间的信息, 不断地更新信道信息, 提高了系统性能。对于联合迭代信道估计和检测算法而言, 通过增加迭代次数, OFDM/OQAM 系统的性能逐渐接近理想信道估计性能。

5 结束语

作为对正交频分复用技术的补充和变革, 基于成形滤波器设计的 OFDM/OQAM 系统具备成为未来新兴多载波调制技术的潜力。然而 OFDM/OQAM 系统仅仅满足实数域空间的严格正交条件, 多径衰落信道的信道系数复数特性会破坏 OFDM/OQAM 系统实数域正交条件, 这与传统基于复数域正交的 CP-OFDM 系统有所不同。本文结合基于 IFFT/FFT 模块的快速 OFDM/OQAM 系统实现方法, 提出了一种基于迭代信道估计和信号检测算法。通过信道估计器和接收到的信号互相交换信息, 可

以消除导频序列中的 ISI 和 ICI 干扰项, 提高信道估计和信号检测的准确度。随着迭代次数不断增加, 基于迭代信道估计和信号检测算法的 OFDM/OQAM 系统性能趋近于理想信道估计性能。此外, 与传统的 OFDM/OQAM 系统导频设计方法相比, 迭代信道估计和检测算法仅仅利用 1 个全 0 符号进行 ISI 保护, OFDM/OQAM 系统的频谱效率更高。

下一步的研究工作, 将围绕着在多径衰落信道下导频序列优化设计, 以及对导频干扰信号抑制性能分析。

参考文献

- [1] LeFloch B, Alard M, and Berrou C. Coded orthogonal frequency division multiplex [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1995, 83(6): 982-996.
- [2] Strohmer T and Beaver S. Optimal OFDM design for time-frequency dispersive channels [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 2003, 51(7): 1111-1122.
- [3] Bölcskei H, Duhamel P, and Hleiss R. Orthogonalization of OFDM/OQAM pulse shaping filters using the discrete Zak transform [J]. *Signal Processing*, 2003, 83(7): 1379-1391.
- [4] Han F M and Zhang X D. Hexagonal multicarrier modulation: A robust transmission scheme for time frequency dispersive channels [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(5): 1955-1961.
- [5] Kozek W and Molisch A F. Nonorthogonal pulses for multicarrier communications in doubly dispersive channels [J]. *IEEE Journal Selected Areas Communication*, 1998, 16(8): 1579-1589.
- [6] Schniter P. On the design of non-(bi)orthogonal pulse-shaped FDM for doubly-dispersive channels [C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Quebec, Canada, 2004, 3(3): 817-820.
- [7] TIA Committee TR-8.5. Wideband air interface isotropic orthogonal transform algorithm (IOTA)-public safety wideband data standards project-digital radio technical standards [S]. TIA-902.BBAB (Physical Layer Specification, Mar. 2003) and TIA-902.BBAD (Radio Channel Coding (CHC) Specification, Aug. 2003).
- [8] Bellec M and Pirat P. OQAM performances and complexity, http://www.ieee802.org/22/Meeting_documents/2006_Jan/22-06-0018-01-0000_OQAM_performances_and_complexity.ppt, 2006.1.
- [9] Javaudin J P, Lacroix D, and Rouxel A. Pilot-aided channel estimation for OFDM/OQAM [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference Spring 2003*, Jeju, Korea, 2003, 3(3): 1581-1585.
- [10] Lele C, Siohan P, and Legouable R, *et al.* Preamble based channel estimation techniques for OFDM/OQAM over the

- powerline [C]. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Pisa, Italy, 2007: 59-64.
- [11] Lele C, Siohan P, and Legouable R. 2dB better than CP-OFDM with OFDM/OQAM for preamble based channel estimation [C]. IEEE International Conference on Communications, Beijing, China, 2008: 1302-1306.
- [12] Du J and Signell S. Classic OFDM systems and pulse shaping OFDM/OQAM systems, http://www.wireless.kth.se/projects/NGFDM/publication_files/NGFDM_report070228.pdf, 2007.2.
- [13] Sandell M, Luschi C, and Strauch P, *et al.* Iterative channel estimation using soft decision feedback [C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Sydney, Australia, 1998, Vol.6: 3728-3733.
- 胡 苏: 男, 1983 年生, 讲师, 博士生, 从事 OFDM、LTE 方面的研究.
- 武 刚: 男, 1975 年生, 副教授, 从事 MIMO、OFDM、信道建模方面的研究.
- 肖 悦: 男, 1979 年生, 讲师, 从事 MIMO、OFDM 方面的研究.
- 李少谦: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 从事扩频通信、移动通信方面的教学和研究.