

## 基于循环平稳性的异构网 OFDM 系统窄带干扰消除

杨 赞 赵 辉 赵玉萍\*  
(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

**摘 要:** 在异构网正交频分复用系统中, 异系统窄带干扰会造成系统性能的下降。该文提出一种基于信号循环平稳性的异系统窄带干扰消除算法, 对干扰进行估计和消除, 推导了干扰消除的信干噪比增益。仿真结果表明, 与传统的线性预测滤波算法相比, 该文提出的方法可以更为准确地估计窄带干扰信号, 消除异系统干扰, 提高系统性能。

**关键词:** 正交频分复用; 窄带干扰; 循环平稳性; 异构网

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2208-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00144

## Cyclostationarity-based Narrowband Interference Suppression for OFDM Systems in Heterogeneous Networks

Yang Zan Zhao Hui Zhao Yu-ping

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Narrowband interference from other systems degrades greatly the performance of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems in heterogeneous networks. This paper proposes a cyclostationarity-based narrowband interference suppression algorithm to estimate and suppress the interference, and derives the Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) gain. Simulation results show that the proposed algorithm outperforms the conventional linear prediction filtering method in estimating and suppressing interference, therefore improves the system performance.

**Key words:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Narrowband interference; Cyclostationarity; Heterogeneous networks

### 1 引言

正交频分复用(OFDM)技术具有频谱效率高、抗多径衰落、资源分配灵活等特点, 被广泛应用于宽带无线通信系统中, 例如 3GPP 的长期演进(LTE)项目, 数字广播电视(DVB), IEEE 802.11a 和 HIPERLAN/2 无线局域网(WLAN)等<sup>[1]</sup>。由于频谱资源紧缺与需求快速增长之间的矛盾, 多个系统共享同一频带、相互干扰的情景不可避免<sup>[2]</sup>。因此, 在实际应用中, OFDM 系统经常会受到异构网(heterogeneous networks)窄带通信系统的同频干扰。在 OFDM 接收机, 由于 FFT 操作引起能量泄露, 干扰频率附近的子载波受到严重的信干噪比(SINR)下降, 严重影响系统性能<sup>[3]</sup>。

针对 OFDM 系统窄带干扰消除, 已经有相关文献提出了一些算法。其中, 接收机加窗<sup>[4]</sup>是一种易于实现的技术, 可以在一定程度上抑制窄带干扰造成

的能量泄露, 但无法消除窄带干扰。窄带干扰的消除, 可以在频域和时域进行。频域算法主要包括基于槽型滤波的干扰消除以及与编解码相结合的方法。文献[5,6]给出了利用槽型滤波器对特定频点进行干扰消除的方法, 文献[7]提出了利用修正解调软信息的方法提高系统性能。然而, 频域算法在实际操作中会损伤 OFDM 有用信号, 并且一定程度上受到信道估计的影响。另一方面, 文献[8,9]采用单频干扰模型, 利用时域滤波的方法估计并消除干扰, 并验证了时域滤波的方法在性能上优于频域软信息修正的算法。时域算法以最接近窄带干扰的形式对窄带干扰进行滤除, 对 OFDM 有用信号没有损伤, 而且不依赖信道估计结果。然而, 在异构网 OFDM 系统中, 异系统干扰并不是简单的单频干扰, 而是承载了随机信息序列, 具有一带的频带宽度。此外, 传统的频域和时域算法将窄带干扰建模为窄带高斯过程及广义平稳过程, 没有考虑异系统干扰信号本身的调制特征, 如干扰频率, 符号周期等等, 因此估计和消除干扰的能力受到限制。

本文针对异构网 OFDM 系统的窄带异系统干

2012-02-20 收到, 2012-05-02 改回

国家科技重大专项(2010ZX03005-003)资助课题

\*通信作者: 赵玉萍 yuping.zhao@pku.edu.cn

扰, 提出了一种基于信号循环平稳特性的干扰估计及消除算法, 并推导了 SINR 增益。计算机仿真表明, 与传统线性预测滤波算法相比, 本文给出的方法能更精确地估计和消除异系统窄带干扰, 抑制干扰能量扩散, 提高系统性能。与传统频域滤波的算法相比, 本文方法还具有对 OFDM 有用信号没有损伤、复杂度较低、不依赖信道估计的优点。

## 2 系统描述

本文考虑 OFDM 信号经过无线信道, 受到异系统干扰和高斯白噪声的影响。采样后的接收信号可以表示为

$$r(k) = A_s s(k) + i(k) + n(k) \quad (1)$$

其中  $A_s$  为信道增益;  $s(k)$  为传送的 OFDM 信号, 功率为  $\sigma_s^2$ ;  $n(k)$  为白噪声, 满足均值为零、方差为  $\sigma_n^2$  的高斯分布; 窄带干扰信号  $i(k)$  来自异系统, 具有固定的载波频率和符号周期, 表示为

$$i(k) = \sqrt{E_i} \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m q(kT_s - \tau_i - mT_i) e^{j2\pi f_i k + \phi_i} \quad (2)$$

式中  $E_i$  为干扰信号功率,  $d_m$  是异系统信息序列,  $q(t)$  是成型脉冲,  $\tau_i$  为时钟偏移,  $T_i$  为符号周期,  $f_i$  为载波频率,  $\phi_i$  为载波相位,  $T_s$  为 OFDM 系统采样周期。因为窄带干扰信号  $i(k)$  占有一定带宽, 并且存在干扰能量扩散, 所以考虑的 OFDM 系统在干扰频率范围的若干子载波将受到异系统干扰的影响。

基于时域滤波的窄带干扰消除方法由于不依赖于信道估计, 不会对 OFDM 有用信号造成损伤, 近来得到关注<sup>[8,9]</sup>。如图 1 所示, 接收机对窄带干扰信号进行估计, 得到估计信号  $\hat{i}(k)$ 。然后在接收信号中将  $\hat{i}(k)$  减除, 得到经过窄带干扰消除后的信号

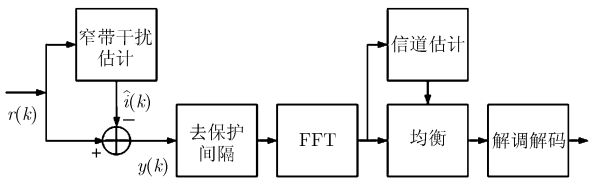


图 1 OFDM 接收机及时域干扰消除

$$y(k) = r(k) - \hat{i}(k) \quad (3)$$

传统的线性预测滤波(LPF)算法基于 OFDM 信号  $s(k)$  以及高斯噪声  $n(k)$  是宽频谱信号, 具有弱的时间相关性。另一方面, 窄带干扰信号  $i(k)$  具有强的时域相关性, 进而可以从接收信号中利用过去的采样值进行线性估计。LPF 算法通过对接收信号的线性时不变(LTI)滤波, 得到窄带干扰估计信号为

$$\hat{i}_{\text{LPF}}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} W^*(l)r(k-l) \quad (4)$$

然而, LPF 算法将窄带干扰建模为广义平稳过程, 仅考虑了信号在相邻采样点的时间相关性, 而没有考虑窄带干扰的调制特征。在异构网 OFDM 系统中, 异系统窄带干扰  $i(k)$  一般具有特有的载波频率和符号周期, 这些调制参数信息可以用来提高干扰信号的估计精度。本文利用异系统窄带干扰信号的调制特征所导致的循环平稳特性, 进行干扰的估计和消除。

## 3 基于循环平稳性的窄带干扰估计和消除

### 3.1 信号的循环平稳性理论

近来, 已有文献将信号的循环平稳特性用做信号的特征分析和频谱感知<sup>[10,11]</sup>。本节首先简要地介绍循环平稳性理论。

信号循环平稳性定义<sup>[12]</sup>: 对于零均值复数时间序列  $x(t)$ , 当且仅当其循环自相关函数

$$R_{xx}^{\alpha}(\tau) \triangleq \langle x(t+\tau/2)x^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t} \rangle \quad (5)$$

存在, 并且在某些参数  $\tau$  取值处函数值不为零时,  $x(t)$  具有广义(二阶)循环平稳性, 其循环频率(CF)为  $\alpha$ 。其中,  $*$  表示复共轭,  $\langle \cdot \rangle$  表示时间平均。相似地, 对于零均值复数时间序列  $x(t)$ , 当且仅当其共轭循环自相关函数

$$R_{xx}^{\beta}(\tau) \triangleq \langle x(t+\tau/2)x(t-\tau/2)e^{-j2\pi\beta t} \rangle \quad (6)$$

存在, 并且在某些参数  $\tau$  取值处函数值不为零时,  $x(t)$  具有广义(二阶)共轭循环平稳性, 其循环频率为  $\beta$ 。

一般来说, 调制信号的符号周期、载波频率会导致其自相关函数具有周期性, 也即信号具有循环平稳性。并且对于数字调制信号, 其循环频率  $\alpha$  为波特率及波特率的整数倍频率, 循环频率  $\beta$  为二倍载波频率加减波特率及波特率的整数倍频率<sup>[12]</sup>。

### 3.2 算法描述

本文利用了窄带干扰信号的循环平稳性, 对其进行估计。其基于的根本原理是循环平稳信号对于循环频率的频谱相关特性, 即信号及其循环频率频移信号之间的相关性。如图 2 所示, 基于循环平稳性的窄带干扰估计由循环频率频移和时域滤波器两部分组成。具体来看, 用  $\{\alpha_m\}$  和  $\{\beta_n\}$  表示窄带干扰信号  $i(k)$  的循环频率, 首先将接收信号  $r(k)$  及其共轭信号  $r^*(k)$  进行循环频率频移。对于循环频率  $\alpha_m$ , 该过程可以用矢量表示为

$$\mathbf{r}_{\alpha_m}(k) = [r(k)e^{j2\pi\alpha_m k}, r(k-1)e^{j2\pi\alpha_m(k-1)}, \dots, r(k-L+1)e^{j2\pi\alpha_m(k-L+1)}]^T, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

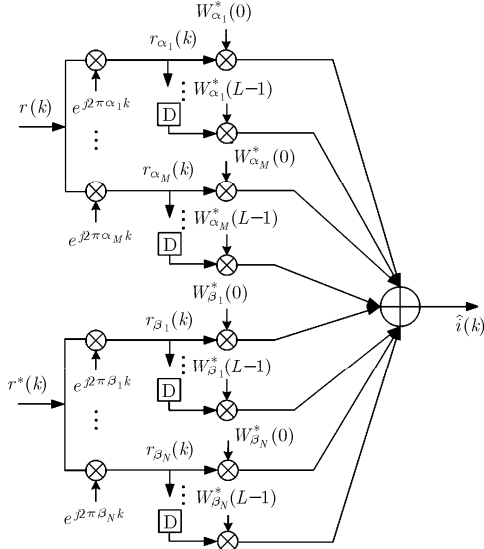


图2 基于循环平稳性的窄带干扰信号估计

其中  $M$  为所选取的循环频率的个数,  $L$  为滤波器的阶数。需要注意的是, 时域滤波会引起 OFDM 符号的码间串扰 (ISI)。因此, 对于无线信道环境下的 OFDM 系统, 滤波器阶数的选取需满足

$$L + D_{\max} / T_s \leq G \quad (8)$$

其中  $D_{\max}$  为多径信道最大时延,  $G$  为 OFDM 系统保护间隔的点数。式(8)满足时, 接收机去保护间隔后, 将会完全消除由多径信道和时域滤波引起的符号间干扰 (ISI)。而滤波器对有用信号引起的频域响应, 将通过信道估计和频域均衡进行纠正。

相似地, 对于循环频率  $\beta_n$ , 我们将共轭信号  $r^*(k)$  进行循环频率频移, 用矢量表示为

$$\mathbf{r}_{\beta_n}(k) = [r^*(k)e^{j2\pi\beta_n k}, r^*(k-1)e^{j2\pi\beta_n(k-1)}, \dots, r^*(k-L+1)e^{j2\pi\beta_n(k-L+1)}]^T, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

其中  $N$  为所选取的循环频率的个数。将基于各循环频率频移的结果作为滤波器输入, 表示为

$$\mathbf{r}(k) = [\mathbf{r}_{\alpha_1}^T(k), \mathbf{r}_{\alpha_2}^T(k), \dots, \mathbf{r}_{\alpha_M}^T(k), \mathbf{r}_{\beta_1}^T(k), \mathbf{r}_{\beta_2}^T(k), \dots, \mathbf{r}_{\beta_N}^T(k)]^T \quad (10)$$

用矢量  $\mathbf{W} = [\mathbf{W}_{\alpha_1}^T, \mathbf{W}_{\alpha_2}^T, \dots, \mathbf{W}_{\alpha_M}^T, \mathbf{W}_{\beta_1}^T, \mathbf{W}_{\beta_2}^T, \dots, \mathbf{W}_{\beta_N}^T]^T$  表示滤波器系数, 其中  $\mathbf{W}_{\alpha_m} = [W_{\alpha_m}^*(0), W_{\alpha_m}^*(1), \dots, W_{\alpha_m}^*(L-1)]^T, m = 1, 2, \dots, M$ 。相应地,  $\mathbf{W}_{\beta_n} = [W_{\beta_n}^*(0), W_{\beta_n}^*(1), \dots, W_{\beta_n}^*(L-1)]^T, n = 1, 2, \dots, N$ 。则滤波器的输出即为窄带干扰信号估计, 可以表示为

$$\hat{i}(k) = \mathbf{W}^H \mathbf{r}(k) \quad (11)$$

注意到, 当  $\alpha_1 = 0, M = 1, N = 0$  时, 式(11)退化为式(4)中给出的 LPF 滤波器结果。

式(11)中, 最优的滤波器系数可以通过求解窄

带干扰估计的时间平均最小均方误差 (TA-MMSE) 的方式获得

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \arg \min_{\mathbf{W}} \langle \mathbb{E} [ |i(k) - \hat{i}(k)|^2 ] \rangle \quad (12)$$

根据正交性原理, 有

$$\langle \mathbb{E} \{ [\hat{i}(k) - i(k)]^* \hat{i}(k) \} \rangle = 0 \quad (13)$$

将式(11)代入式(13), 得到  $\langle \mathbb{E} [\mathbf{W}^H \mathbf{r}(k) \mathbf{r}^H(k) \mathbf{W}] \rangle = \langle \mathbb{E} [i^*(k) \mathbf{W}^H \mathbf{r}(k)] \rangle$ , 进而可以得出最优滤波器系数

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}_{rr}^{-1} \mathbf{R}_{ri} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{R}_{rr} = \langle \mathbb{E} [\mathbf{r}(k) \mathbf{r}^H(k)] \rangle \quad (15)$$

为滤波器输入信号的自相关函数, 而

$$\mathbf{R}_{ri} = \langle \mathbb{E} [\mathbf{r}(k) i^*(k)] \rangle \quad (16)$$

为窄带干扰信号与滤波器输入信号的互相关函数。

上述估计方法的均方误差 (TA-MSE) 为

$$\begin{aligned} \langle \mathbb{E} [ |i(k) - \hat{i}(k)|^2 ] \rangle &= \langle \mathbb{E} \{ [i(k) - \hat{i}(k)]^* i(k) \} \rangle \\ &= \langle \mathbb{E} \{ [i^*(k) - \mathbf{r}^H(k) \mathbf{W}_{\text{opt}}] i(k) \} \rangle \\ &= \sigma_i^2 - \mathbf{R}_{ri}^H \mathbf{W}_{\text{opt}} \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $\sigma_i^2 = \langle \mathbb{E} [ |i(k)|^2 ] \rangle$  为干扰信号的  $i(k)$  的功率。因为 OFDM 信号和白噪声在时域上为高斯分布, 所以, 基于 MMSE 准则得到的滤波器系数  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$  为该条件下的最优滤波器系数。

下面推导经过窄带干扰消除的 OFDM 信号的 SINR 增益。将窄带干扰的估计误差记为  $n'(k)$ , 假设其与  $i(k)$  统计独立, 并服从零均值高斯分布, 记作  $n'(k) \sim N(0, \sigma_{n'}^2)$ , 其中  $\sigma_{n'}^2 = \sigma_i^2 - \mathbf{R}_{ri}^H \mathbf{W}_{\text{opt}}$ 。则经过窄带干扰消除的 OFDM 信号可以表示为

$$\begin{aligned} y(k) &= r(k) - \hat{i}(k) = A_s s(k) + i(k) + n(k) \\ &\quad - i(k) - n'(k) = A_s s(k) + n(k) - n'(k) \end{aligned} \quad (18)$$

经过窄带干扰消除后的 SINR 增益 (dB) 为

$$\begin{aligned} G_{\text{suppr}} &= 10 \lg \frac{|A_s|^2 \sigma_s^2 / (\sigma_n^2 + \sigma_i^2 - \mathbf{R}_{ri}^H \mathbf{W}_{\text{opt}})}{|A_s|^2 \sigma_s^2 / (\sigma_n^2 + \sigma_i^2)} \\ &= 10 \lg \left( \frac{\sigma_n^2 + \sigma_i^2}{\sigma_n^2 + \sigma_i^2 - \mathbf{R}_{ri}^H \mathbf{W}_{\text{opt}}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

### 3.3 相关函数估计

为了计算滤波器系数  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$ , 需要获得滤波器输入信号的自相关函数  $\mathbf{R}_{rr}$  和互相关函数  $\mathbf{R}_{ri}$ 。在实际中, 可以通过样本值的估计  $\hat{\mathbf{R}}_{rr}$  和  $\hat{\mathbf{R}}_{ri}$ , 来替代  $\mathbf{R}_{rr}$  和  $\mathbf{R}_{ri}$  的理论值。通过一组长度为  $N_w$  的滤波器输入信号的样本  $\mathbf{r}(k)$  和窄带干扰的样本  $i(k)$ , 滤波器输入信号的自相关函数估计可以计算为

$$\widehat{\mathbf{R}}_{rr} = \frac{1}{N_w} \sum_{k=0}^{N_w-1} \mathbf{r}(k)\mathbf{r}^H(k) \quad (20)$$

同样, 滤波器输入信号与窄带干扰信号的互相关函数估计可以计算为

$$\widehat{\mathbf{R}}_{ri} = \frac{1}{N_w} \sum_{k=0}^{N_w-1} \mathbf{r}(k)i^*(k) \quad (21)$$

从式(20), 式(21)及式(10)中我们注意到, 相关函数的估计依赖于循环频率  $\{\alpha_m\}$  和  $\{\beta_n\}$  的获取。实际应用中, 一般有两种场景。一种场景是异系统干扰的频率和符号周期已知, 例如同频覆盖的两个系统, 调制参数可以从该系统的标准中准确获得。这种情况下, 循环频率  $\{\alpha_m\}$  和  $\{\beta_n\}$  可以通过计算精确得出理论结果。另一种场景是异系统干扰的频率和符号周期未知, 上述算法的实现依赖于循环频率的估计。循环频率的估计方法请参考文献[12], 循环频率误差对于算法性能的影响将在下节中用仿真分析举例说明。

### 4 仿真与分析

本节将给出传统的 LPF 窄带干扰消除算法<sup>[8]</sup>和本文提出的基于信号循环平稳性的窄带干扰消除算法在计算机仿真中的性能比较。在仿真中, 考虑的 OFDM 系统带宽为 10 MHz (采样周期  $T_s = 0.1 \mu s$ ), 具有 512 个子载波, 用 1/8 长的时域循环前缀作为保护间隔 ( $G=64$ )。系统采用 QPSK 调制和 1/2 码率的卷积编码, 发送块状前导序列用做信道估计。窄带干扰信号为 BPSK 调制信号, 符号周期  $T_i = T_s/16$ , 干扰中心频点距 OFDM 中心频点  $f_i = (10T_s)^{-1} = 1 \text{ MHz}$ 。仿真分别给出加性高斯白噪声 (AWGN)信道和多径信道下, 窄带干扰去除算法性能。其中多径信道模型为 6 径瑞利衰落信道, 时延参数为  $[0, 0.2, 0.8, 1.2, 2.3, 3.7] \mu s$ , 功率参数为  $[0, -0.9, -4.9, -8, -7.8, -23.9] \text{ dB}$ 。接收机采用基于

MMSE 准则的信道估计和频域均衡。在仿真中, 两种时域窄带干扰消除算法的滤波器阶数都为  $8(L=8)$ 。其中, 在基于循环平稳性的窄带消除算法中, 根据窄带干扰的符号周期和载波频率及复杂度考虑, 选取 3 个循环频率, 分别为  $\{\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1/16, \beta_1 = 2/10\}$ 。用作相关函数估计的采样点个数为 600 ( $N_w=600$ )。

图 3 给出了 AWGN 信道下, 窄带干扰消除算法在 SNR 为 15 dB 时, 不同 SIR 条件下的 SINR 增益。从图中我们看到, 在理想循环频率的条件下, 基于循环平稳性的窄带干扰消除算法较传统的 LPF 算法, 有 2-4 dB 的性能提升。为了定量考察循环频率误差对于算法性能的影响, 仿真同时给出了循环频率误差分别为 0.1%和 1%时本文算法的 SINR 增益。从图中可以看到随着循环频率误差的增大, 本文算法的性能有所下降。当循环频率的估计误差为 1%时, 其算法性能趋近于 LPF 算法性能。这是因为当循环频率误差较大时, 接收信号与频移信号不具有相关性, 算法性能退化。

图 4 和图 5 分别给出 AWGN 信道和多径信道下, 窄带干扰消除算法在 SNR 为 15 dB 时, 不同 SIR 条件下的比特错误概率(BER), 其中循环频率估计为理想结果。同样可以看到, 基于循环平稳性的窄带干扰消除算法较传统的 LPF 算法, 有 2-5 dB 的性能提升。

表 1 给出了两种算法的计算复杂度比较。由于在基于循环平稳性的干扰消除算法中, 循环频率的估计可以在 OFDM 信号到来之前离线完成。为公平起见, 本文仅比较两种算法在已知滤波器系数条件下的计算复杂度。从表中可以看到, 相比于传统算法, 基于循环平稳性的窄带干扰消除算法的计算复杂度有所增加。然而, 我们注意到, 与基于变换域滤波器的方法相比, 本文算法仍然保持了低复杂度

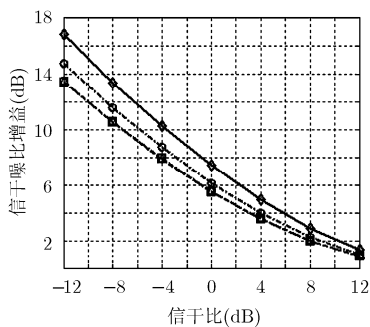


图 3 不同信干比下的信干噪比增益

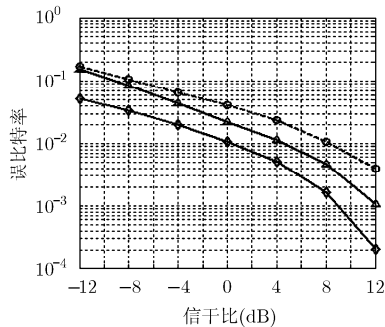


图 4 系统性能比较, AWGN 信道

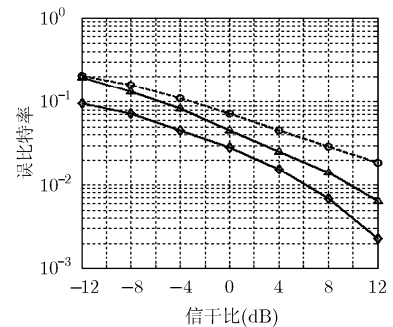


图 5 系统性能比较, 多径信道

表1 复杂度比较

算法名称	理论值		仿真值	
	加法	乘法	加法	乘法
LPF 干扰消除	$L$	$L$	8	8
基于循环平稳性的干扰消除	$(M+N)L$	$2(M+N)L$	24	48

的优势。另外，本文算法中  $M$  与  $N$  取值主要是考虑算法性能与复杂度的折中， $M$  与  $N$  取值越大，算法性能越好，与此同时，计算复杂度越高。考虑到实际应用，在仿真中我们给出的参考取值为  $M=2$ ,  $N=1$ 。

## 5 结束语

异构系统窄带干扰估计与消除，是异构网 OFDM 系统中的一个亟需解决的重要问题。本文针对异构系统窄带干扰，提出了一种基于信号循环平稳性的窄带干扰估计及消除算法。通过仿真验证了本文提出算法的性能，并与传统的时域预测滤波进行了性能比较。仿真结果表明，本文算法可以获得更高的信干噪比增益和更低的系统误码率，有效地提高了异构网 OFDM 系统的性能。

## 参考文献

- [1] Zheng K, Fan B, Liu J, et al. Interference coordination for OFDM-based multihop LTE-advanced networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(1): 54-63.
- [2] Chung Y L and Tsai Z. Performance evaluation of dynamic spectrum sharing for two wireless communication networks[J]. *IET Communications*, 2010, 4(4): 452-462.
- [3] Morelli M and Moretti M. Improved decoding of BICM-OFDM transmissions plagued by narrowband interference[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(1): 20-26.
- [4] Song R F and Leung S H. A novel OFDM receiver with second order polynomial Nyquist window function[J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(5): 391-393.
- [5] 张春海, 薛丽君, 张尔扬. 基于自适应多门限算法的变换域窄带干扰抑制[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(3): 461-465.
- [6] Zhang C H, Xue L J, and Zhang E Y. Narrow-band interference suppression in transform domain based on adaptive multi-threshold algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(3): 461-465.
- [7] 张爱民, 胡艳芳, 韩方景. 低信噪比下基于自适应门限的窄带干扰抑制研究[J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(1): 51-54.
- [8] Zhang A M, Hu Y F, and Han F J. Research on narrowband interference suppression based on adaptive threshold under low SNR[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2009, 24(1): 51-54.
- [9] Zhang X X, Guo H B, and Zhao Y P. A low-complexity adaptive co-channel interference removal scheme for COFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(2): 353-358.
- [10] Batra A and Zeidler J. Narrowband interference mitigation in OFDM systems[C]. IEEE Military Communications Conference, Boston, Jan. 2009: 1-7.
- [11] 赵婷婷, 赵玉萍. 一种 OFDM 系统中的同频干扰消除算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1993-1997.
- [12] Zhao T T and Zhao Y P. A co-channel interference suppression scheme in OFDM systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1993-1997.
- [13] Du K L and Mow W H. Affordable cyclostationarity-based spectrum sensing for cognitive radio with smart antennas[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(4): 1877-1886.
- [14] 李剑强, 崔伟亮, 江桦, 等. OQAM/OFDM 信号二阶循环平稳性分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1076-1081.
- [15] Li J Q, Cui W L, Jiang H, et al. Second-order cyclostationarity analysis of OQAM/OFDM signals [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1076-1081.
- [16] Gardner W A. Cyclic wiener filtering: theory and method[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, 41(1): 151-163.

杨 赞: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为无线通信中的干扰消除及资源分配。

赵 辉: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为无线通信中的信号处理。

赵玉萍: 女, 1961 年生, 教授, 研究方向为数字通信与信息系统。