

新的基于粒子群优化的正交频分复用系统盲频偏估计算法

杨朝阳^{1*}, 杨霄鹏¹, 李 腾¹, 姚 昆¹, 倪 娟²

(1. 空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077; 2. 94303 部队, 山东 潍坊 261100)

(* 通信作者电子邮箱 yzy553138931@126.com)

摘 要:针对正交频分复用(OFDM)系统频偏估计问题,提出了一种基于粒子群优化(PSO)的盲频偏估计算法。首先,根据频偏估值重建的接收信号和实际接收到的信号误差最小原则构造了盲频偏估计的数学模型,并推导出了代价函数;然后,利用粒子群优化算法强大的随机并行全局搜索能力,通过最小化代价函数估计频偏。仿真比较了常数系数、微分递减两种惯性权重策略 PSO 算法的频偏估计性能,并与最小输出方差、黄金分割盲频偏估计算法进行了比较分析。仿真结果表明,所提算法精度高,同一信噪比下较同类算法大约有一个数量级的提升,且不受调制类型和频偏估计范围(-0.5, 0.5)的限制。

关键词:正交频分复用;载波频偏;盲频偏估计;码分多址;粒子群优化

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A

Novel blind frequency offset estimation algorithm in orthogonal frequency division multiplexing system based on particle swarm optimization

YANG Zhaoyang^{1*}, YANG Xiaopeng¹, LI Teng¹, YAO Kun¹, NI Juan²

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China;

2. Unit 94303, Weifang Shandong 261100, China)

Abstract: To estimate the frequency offset in Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) system, a novel blind frequency offset estimation algorithm based on Particle Swarm Optimization (PSO) method was proposed. Firstly the mathematical model and cost function were designed according to the principle of minimum reconstruction error of the reconstructed signal and the signal actually received. The powerful random, parallel, global search property of PSO was utilized to minimize the cost function to get the frequency offset estimation. Two inertia weight strategies for PSO algorithm of constant coefficient and differential descending were simulated, and comparison was made with the minimum output variance and gold section methods. The simulation results show that the proposed algorithm performs highly accuracy, about one order of magnitude higher than other similar algorithms in same Signal-to-Noise Ratio (SNR) and it is not restricted by modulation type and frequency estimation range (-0.5, 0.5).

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Carrier Frequency Offset (CFO); blind frequency offset estimation; Code Division Multiple Access (CDMA); Particle Swarm Optimization (PSO)

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术因其高频谱利用率、抗多径效应和低实现复杂度等优良特性已经被多个国际规范采用^[1]。然而 OFDM 子载波之间需要保持正交,导致其对频偏非常敏感,当系统存在频偏时,频偏引起的载波间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI)使得系统性能急剧恶化^[2]。

针对该问题,国内外学者已经提出了多种频偏估计算法。根据是否使用训练序列可以将这些算法分为两类:数据辅助类^[3-5]和盲频偏估计算法^[6-10]。由于盲频偏估计算法不需要训练序列,具有高频带利用率和较小的发射功耗,近年来成为了研究热点。文献[6]提出了基于空子载波盲频偏估计算法,该算法根据空子载波上的接收能量来估计频偏。这种方法计算复杂度较高且不利于信道的动态分配。文献[7]提出了两种适用于二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying,

BPSK)调制的 OFDM 盲频偏估计算法。文献[8]提出了适用于恒包络调制的 OFDM 盲频偏估计算法,然而这两类算法都受调制类型的限制。文献[9]提出了基于输出最小方差(Minimum Output Variance, MOV)盲频偏估计算法,该算法不需要空子载波并且比空子载波算法剪精度高,缺点是需要较多的数据块。针对以上盲频偏估计算法的缺陷,文献[10]提出了基于最小重建误差(Minimum Reconstruction Error, MRE)的高精度盲频偏估计算法,根据代价函数在一定频偏范围内的单峰特性,利用黄金分割搜索算法寻找极值估计频偏,但是该算法频偏估计范围有限且实时性较差。本文在文献[10]的基础上提出了一种基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法盲估计算法。利用 PSO 算法强大的并行随机全局寻优能力,通过最小化代价函数估计频偏。仿真比较了两种不同惯性权重策略 PSO 算法在频偏估计中的

收稿日期:2014-04-30;修回日期:2014-06-12。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202490);航空科学基金资助项目(2013ZC15008)。

作者简介:杨朝阳(1989-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向:OFDM 频偏估计; 杨霄鹏(1973-),男,甘肃天水人,副教授,博士,主要研究方向:宽带无线通信、信号处理; 李腾(1990-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:VOIP、时延预测算法; 姚昆(1975-),女,陕西西安人,副教授,硕士,主要研究方向:频谱管理、信号处理; 倪娟(1988-),女,湖北黄冈人,硕士,主要研究方向: rake 接收技术。

性能并且跟 MOV 算法、黄金分割算法进行了对比分析。仿真结果表明所提算法比 MOV 算法、黄金分割算法估计精度高,低信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)下性能显著,且不受调制类型和估计范围限制。

1 OFDM 系统模型及载波间干扰分析

假设 OFDM 系统中经过调制后的发送数据为 $X(k)$ ($0 \leq k \leq N-1$), N 表示一个 OFDM 符号子载波个数,经过傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)后得到发送端的时域信号为:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(j2\pi kn/N); 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

插入不小于信道最大多径时延的循环前缀(Cyclic Prefix, CP),通过信道后的接收信号可以表示为:

$$y_g(n) = x_g(n) * h(n) \exp(j2\pi \varepsilon n/N) + w(n) \quad (2)$$

其中: $[*]$ 代表卷积运算; $x_g(n)$ 表示添加循环前缀后的发射信号; $h(n)$ 表示信道冲击响应; $y_g(n)$ 表示接收信号; ε 为归一化载波频偏(Carrier Frequency Offset, CFO), $\varepsilon = \Delta F/\Delta f$, Δf 是频偏, Δf 是子载波的间隔; $w(n)$ 为时域加性高斯白噪声。接收端去除保护间隔后的信号可以表示为 $y(n)$, 对其进行 FFT 后得到:

$$Y(k) = FFT\{y(n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi kn/N} = X(k) H(k) S(0) + \sum_{m=0, m \neq k}^{N-1} X(m) H(m) S(m-k) + W(k) = X(k) \Lambda S + W(k) \quad (3)$$

$X(k)$ 、 $Y(k)$ 分别表示第 k 个子载波上的发送、接收符号, $H(k)$ 表示第 k 个子载波上的信道衰落增益, $\Lambda = \text{diag}(H(0), H(1), \dots, H(N-1))$ 表示衰落对角矩阵, 当信道为高斯信道时 $H(k) = 1$, $W(k)$ 表示加性高斯白噪声的频域形式, $S(m-k)$ 表示载波间干扰系数:

$$S(m-k) = \frac{\sin \pi(m-k+\varepsilon)}{N \sin(\pi(m-k+\varepsilon)/N)} e^{j\pi(m-k)(N-1)/N} \quad (4)$$

S 是 $N \times N$ 的 ICI 系数矩阵, S 矩阵的第 p 行 q 列的元素为 $S_{p,q} = S(p-q)$ 。

通过分析式(3)可以得出下面结论:带 ICI 干扰的 OFDM 接收信号可以等效视为多载波码分多址接入系统(Multi Carrier Code Division Multiple Access, MC-CDMA),第 k 个用户的信息符号为 $X(k)$,第 k 个用户的扩频码对应矩阵 S 的第 k 列^[11]。通过对 ICI 的系数矩阵作特征值分解可以得到:

$$S = F^H \Phi(\varepsilon) F \quad (5)$$

其中: $\Phi = \text{diag}(\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{N-1})$, $\varphi_n = \exp(j2\pi \varepsilon n/N)$ 。矩阵 F 是归一化的离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT) 矩阵, 其中 $W_N^k = \exp(-2j\pi kl/N)$ 。

$$S S^H = (F^H \Phi(\varepsilon) F) (F^H \Phi(\varepsilon) F)^H = (F^H \Phi(\varepsilon) F) (F^H \Phi(-\varepsilon) F) = I \quad (6)$$

式(6)中, F^H 表示矩阵 F 的共轭转置矩阵。通过式(6)的推导可以得到 ICI 的系数矩阵 S 为一个正交矩阵。因此带 ICI 干扰的 OFDM 接收信号可以视为正交 MC-CDMA 系统,其对应的扩频码矩阵为 S 。对接收信号 Y 进行如下运算可以得到:

$$R = Y S^H \Lambda^{-1} = X + W S^H \Lambda^{-1} \quad (7)$$

由于 S^H 为正交矩阵,所以 $W S^H$ 和 W 的互协方差矩阵相

等。根据 R 的符号对 X 作出判决,从而达到完全消除 ICI 的效果。然而在接收端归一化载波频偏 ε 未知,可以通过比较重建信号和接收端实际接收的信号来找出最佳的频偏估值。

假设 $\hat{\varepsilon}$ 表示频偏的估计值,用解扩频码矩阵 $S^H(\hat{\varepsilon})$ 对接收信号进行“解扩”后可得:

$$R = Y \hat{S}^H(\hat{\varepsilon}) \Lambda^{-1} = \hat{X} \Lambda S(\varepsilon - \hat{\varepsilon}) \Lambda^{-1} + W S^H(\hat{\varepsilon}) \Lambda^{-1} \quad (8)$$

通过对解扩后的信号 R 解调得到的估计的发送信号 $\hat{X} = \text{Decision}(R)$ 。当系统采用 BPSK 调制时,判决准则如下:

$$\hat{X}(k) = \text{Decision}(R(k)) = \begin{cases} 1, & R(k) > 0 \\ -1, & R(k) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

然后通过估计的发送信号 \hat{X} 和 ICI 系数矩阵 $S(\hat{\varepsilon})$ 来重建估计的接收信号 \hat{Y} :

$$\hat{Y} = \hat{X} \Lambda S(\hat{\varepsilon}) \quad (10)$$

在没有噪声干扰和理想频偏估计、补偿时,可以得到 $\hat{Y} = Y$ 。即当重建的接收信号 \hat{Y} 与实际接收信号 Y 最接近时,频偏估值 $\hat{\varepsilon}$ 和实际频偏 ε 误差最小。因此,定义代价函数为:

$$J(\hat{\varepsilon}) = \|\hat{Y} - Y\|^2 = \|\hat{X} \Lambda S(\hat{\varepsilon}) - Y\|^2 = \|\text{Decision}(R) \Lambda S(\hat{\varepsilon}) - Y\|^2 = \|\text{Decision}(Y \hat{S}^H(\hat{\varepsilon}) \Lambda^{-1}) \Lambda S(\hat{\varepsilon}) - Y\|^2 \quad (11)$$

其中: $\|\hat{Y} - Y\|^2$ 代表接收向量 Y 和估计向量 \hat{Y} 的欧氏距离。因此可以通过最小化代价函数 $J(\hat{\varepsilon})$ 得到的最佳频偏估计值

$$\hat{\varepsilon}_0 = \arg \min(J(\hat{\varepsilon})) \quad (12)$$

2 盲频偏估计算法

由于代价函数中包含了调制解调运算,故一些基于导数的极值求解算法如牛顿法、梯度投影法、最陡下降法等不适用。文献[10]采用黄金分割搜索算法求极值得到最佳频偏估值。然而黄金分割算法是通过区间收缩求单峰函数极值的一种最优优化算法,在代价函数为多峰函数时,黄金分割搜索算法容易陷入局部最优,很难找到全局最优频偏估值,即黄金分割搜索算法频偏估计范围较小。为了找到最佳频偏估值,扩大频偏估计的范围,本文利用 PSO 强大的并行随机搜索能力和全局寻优能力来求得最佳频偏估值。

2.1 PSO 算法

粒子群算法是一种群体智能优化算法,将问题的解对应于搜索空间的一只没有质量和体积的鸟的位置,这些鸟被称之为“粒子”^[12]。所有粒子都有一个由被优化的函数决定的适应度值,每个粒子还有一个速度决定它们飞翔的方向和距离。这些粒子都具有以下几类信息:1)粒子当前所处的位置;2)截止目前自己发现的最佳位置,视为粒子自己的飞行经验;3)整个群体中所有粒子的最佳位置,视为粒子间信息共享的经验。假设种群的粒子数为 N ,粒子 i 在 d 维空间的位置可以表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 它经历的最好位置记为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$,称之为 p_{best} 。群体中的所有粒子经历过的最好位置用 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 表示,称之为 g_{best} 。粒子 i 的飞行速度用 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 表示,对于每一代种群,其位置和速度更新方程如下:

$$v_{id}^{t+1} = w v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{i\text{best}}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (g_{\text{best}}^t - x_{id}^t) \quad (13)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (14)$$

式(13)中, r_1, r_2 为 $0 \sim 1$ 均匀分布的随机数; c_1, c_2 为学习因子,通常取值 $c_1 = c_2 = 2$; w 表示粒子的惯性权重。粒子通

过这些信息追随当前的最优粒子在解空间中搜索,通过迭代寻找问题的最佳解。

2.2 基于 PSO 算法的 OFDM 频偏估计的具体步骤

图 1 为 OFDM 频偏估计的算法流程,在本文中采用迭代次数是否达到预先设定的最大迭代次数为寻优截止条件,具体步骤如下所示:

1) 随机初始化种群中各粒子的位置和速度。在本文所解决的问题中,粒子的位置代表了频偏估计值,粒子速度代表了粒子搜索的方向,本文中初始化粒子的位置和速度为 0 ~ 1 均匀分布的随机数。

2) 评价每个粒子的适应度值。适应度值决定了粒子群算法搜索的方向。本文根据具体的应用场景设计的适应度函数 $fitness$ 如下所示:

$$fitness(\hat{\varepsilon}) = J(\hat{\varepsilon}) \quad (15)$$

3) 根据所得的适应度值更新最优解,即如果粒子的适应度值优于当前的个体极值,则将 p_{best} 设置为该粒子的位置,如果所有粒子中最好值优于全局极值,则将此粒子的值赋给 g_{best} 。

4) 采用式(13)、(14)更新粒子的速度和位置。为了提高粒子群算法的收敛速度和避免陷入局部最优,可以通过调整惯性权重的值实现全局搜索和局部搜索之间平衡。本文分别采用了常数惯性权重和文献[13]提出的线性微分递减策略权重算法进行搜索,线性微分递减策略惯性权重的计算公式为:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \frac{2(w_{start} - w_{end})}{t_{max}^2} \times t \quad (16)$$

$$w(t) = w_{start} - \frac{(w_{start} - w_{end})}{t_{max}^2} \times t^2 \quad (17)$$

5) 检验是否符合迭代停止的条件,本文设置的迭代结束条件为迭代次数达到最大迭代次数则停止迭代,输出最优解;否则转到步骤 2) 继续搜索。

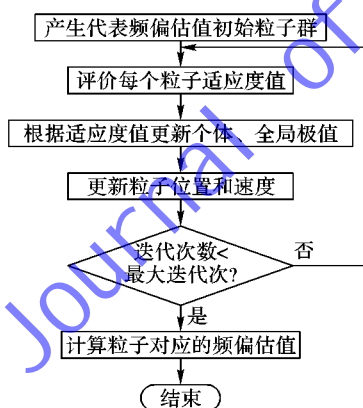


图 1 基于 PSO 算法的 OFDM 频偏估计流程

3 仿真分析

仿真参数的设置为:OFDM 子载波数取 64,循环前缀的长度为 16,采用正交相移(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制、16 正交幅度调制(16 Quadrature Amplitude Modulation, 16QAM),多径信道的具体参数设置如表 1 所示。PSO 算法采用的参数为:种群数目选择 10,最大迭代次数为 100,学习因子取 $c_1 = c_2 = 2$,常数法惯性权重取值 $w = 0.5$,

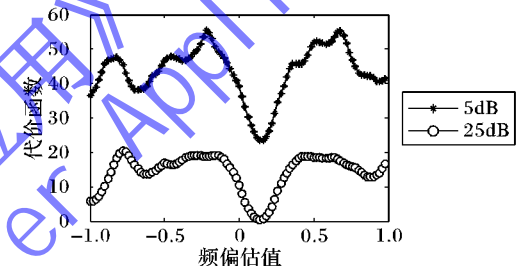
线性微分递减策略惯性权重 w 采用式(17)进行计算,其中:

$$w_{start} = 0.9, w_{end} = 0.4。$$

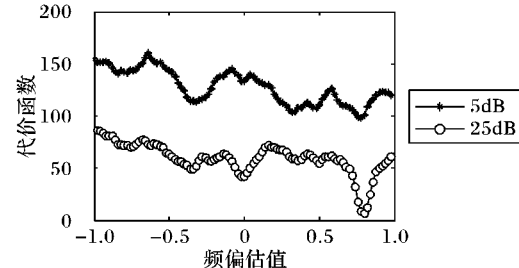
表 1 多径信道参数

路径数	时延/ μs	衰落增益	路径数	时延/ μs	衰落增益
1	0	0.730	4	4.8	0.051
2	1.6	0.031	5	6.4	0.061
3	3.2	0.034			

如图 2 所示,图 2(a)、(b)分别为归一化载波频偏真实值为 0.15,0.8,信噪比分别为 5 dB、20 dB 时代价函数跟频偏估计值的关系曲线。观察图 2 可以得到,无论是在较小频偏还是大频偏下,在载波频偏估计值和频偏真实值相等时代价函数均取得最小值,这与理论分析一致。同时还可以看到无论是恒模 QPSK 调制还是非恒模 16QAM 方式,代价函数在最佳频偏估计值时均取得最小值,这表明本文算法不受调制类型的限制。在超过一定范围后,代价函数已经不再呈现单峰特性,此时黄金分割搜索算法容易陷入局部最优,从而搜索不到最小值点,造成估计错误。



(a) QPSK 调制下代价函数与频偏估值曲线



(b) 16QAM 下代价函数与频偏估值曲线

图 2 两种调制下代价函数跟频偏估值的关系

图 3 中(a)~(c)依次为归一化载波频偏为 0.06,0.6,1.6,16QAM,信噪比取 20 dB 时,频偏估值随迭代次数的变化曲线。本文分别采用了惯性权重常系数 PSO 算法和改进的线性微分递减策略 PSO 算法进行了仿真分析。通过图 3 可以得到,无论是在小频偏还是大频偏下基于 PSO 的盲频偏估计算法均能迅速收敛到频偏真实值附近。同时观察得到,常系数 PSO 算法大约在迭代进行到 18 次左右达到收敛,而微分递减 PSO 算法在迭代进行到第 8 次左右即可达到收敛。采用微分递减策略的 PSO 算法具有更快的收敛速度,这是因为惯性权重微分递减策略使得惯性权重 w 在前期变化缓慢,从而具有较高的全局搜索能力,进化后期 w 减小趋势加快,使其具有较高的局部搜索能力,加快算法的收敛。

图 4 为 QPSK,信噪比 15 dB 时两种惯性权重策略下的频偏估计对应的适应度函数值随进化代数的收敛曲线。图 4 进一步说明了 PSO 算法在 OFDM 盲频偏估计中的作用,随着迭代的进行粒子种群平均适应度逐渐收敛于最佳粒子适应度,其对应的频偏估值也对应收敛于频偏真实值。与此同时通过

图4也可以得到,微分递减 PSO 算法比常系数 PSO 算法在 OFDM 频偏估计中收敛速度更快,性能更优。

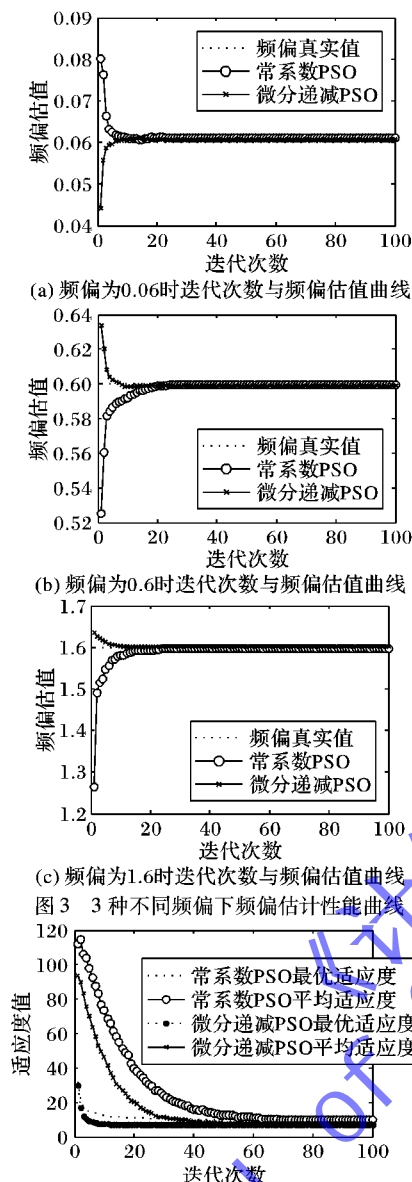


图4 两种不同惯性权重策略 PSO 算法适应度曲线

定义频偏估计的均方误差 (Minimum Square Error, MSE) 为:

$$MSE = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (\hat{\varepsilon}_i - \varepsilon)^2 \quad (16)$$

其中: P 为蒙特卡罗仿真的次数, $\hat{\varepsilon}_i$ 为频偏估计估值, ε 为频偏真实值。

图5为 QPSK 调制,频偏为 $(-0.5, 0.5)$ 区间均匀分布的随机数, P 取 1000 时,三种算法的频偏估计 MSE 随信噪比 (SNR) 性能曲线。Block 前面的数字表示数据块的数目。MOV 表示文献[9]中提出的最小输出方差算法, MRE-Gold 表示文献[10]中的基于黄金分割搜索的频偏估计算法, MRE-PSO1 和 MRE-PSO2 分别表示本文提出的惯性权重常系数、惯性权重微分递减策略的频偏估计算法。黄金分割搜索算法中本文选择迭代次数为 18, 其搜索范围定为 $(-0.5, 0.5)$, 则其迭代 18 次后的区间变为 $(0.5 + 0.5) \times 0.618^{18} = 0.00017$ 。MRE-PSO 频偏估计范围不受函数单峰特性限制, 这是因为 PSO 算法是全

局寻优算法, 所以本文中对其估计范围未加限制。观察图5可以得到, 本文算法同一信噪比下较 MOV 算法估计精度大约有一个数量级的提升, 较 MRE-Gold 算法在低信噪比下性能明显提升; 微分递减 PSO 算法较常系数 PSO 算法估计精度略高; 同时本文所提算法不受频偏估计范围的限制, 这通过图3(a)~(c)的仿真结果也可以得到验证, 这是由 PSO 算法强大的全局寻优能力决定的。在同等 MSE 下, 本文微分递减 PSO 算法在迭代进行到第 8 次左右达到收敛, 而黄金分割搜索算法需要迭代 18 次, 因此本文算法比黄金分割搜索算法降低了时间复杂度, 在实时性上优于 MRE-Gold 算法, 而 MRE-Gold 算法的空间复杂度较低。综合以上分析可以得到, 本文算法比同类盲频偏估计算法有更较高的估计精度, 不受频偏估计范围的限制, 且增强了频偏估计的实时性和鲁棒性。

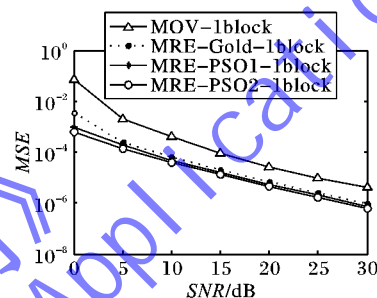


图5 4种算法的 MSE 性能比较

4 结语

通过对 OFDM 载波间干扰的数学分析, 建立了基于最小重建误差的 OFDM 盲频偏估计模型, 利用 PSO 算法强大的全局优化能力对模型进行了求解, 仿真比较了两种惯性权重 PSO 算法的估计性能, 并与其他同类盲频偏估计算法进行了对比分析。本文所提算法不受频偏估计范围的限制且具有较高的估计精度。因为本文算法不需要空子载波, 所有数据都可以发送数据, 其频谱效率有进一步提高, 时间复杂度较低, 对实时性要求较高的通信系统设计具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] LI D, ZHUANG H. Review of key technology of 3G and TD-LTE mobile communication systems for high-speed railway [J]. Application Research of Computers, 2013, 30(5): 1297-1301. (李丹, 庄宏成. 高速铁路 3G 及 TD-LTE 移动通信关键问题研究综述[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(5): 1297-1301.)
- [2] RYU H G, LI Y S, PARK J S. An improved ICI reduction method in OFDM communication system [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2005, 51(3): 395-400.
- [3] ZHANG X, YE F, YANG B, et al. Application of Sigma-Point Kalman filter to carrier frequency offset estimation of OFDM system [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2013, 46(5): 458-462. (张鑫明, 叶锋, 杨波, 等. Sigma-Point 卡尔曼滤波用于 OFDM 载波频偏估计[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2013, 46(5): 458-462.)
- [4] MOOSE P H. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction [J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(10): 2908-2914.
- [5] LIM J, HONG D. Inter-carrier interference estimation in OFDM systems with unknown noise distributions [J]. IEEE Signal Process Letters, 2009, 16(6): 493-496.

(下转第 2795 页)

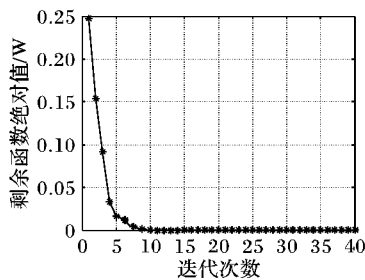


图5 剩余函数收敛性

表1 本文算法迭代处理时间

ms

收敛判断参数	时间(内循环)	时间(外循环)
$\phi = 10^{-2}, \xi = 10^{-2}$	0.092	4.760
$\phi = 10^{-4}, \xi = 10^{-4}$	0.120	8.240
$\phi = 10^{-6}, \xi = 10^{-6}$	0.135	11.400

4 结语

本文在认知 OFDM 无线电系统的背景下研究了子载波功率分配及其优化问题,并提出了一种双因子二分搜索算法。此算法以最大化认知用户数据传输速率为目标,在传统注水算法上进行改进,充分考虑功率发射过程中干扰温度限制等因素,并在模型中加入干扰温度约束条件。仿真结果显示本文算法能获得功率分配最优解,获得的数据传输速率逼近传统注水算法,且运算复杂度较低,具有良好的鲁棒性。本文对单用户的功率分配问题进行了深入探讨,在后续研究中,还会考虑此算法在多用户条件下功率分配的可行性及探究在实际硬件平台上的性能。

参考文献:

- [1] SONG Z. Cognitive radio technology and application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012: 346–350. (宋志群. 认知无线电技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 346–350.)
- [2] TONG X, LUO T. The principle and application of OFDM mobile communication technology [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2003: 420–435. (佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 420–435.)
- [3] WANG P, ZHONG X, XIAO L, *et al.* Optimal power allocation in OFDM-based cognitive radio systems [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(8): 1144–1147. (王鹏, 钟晓峰, 肖立民, 等. 基于 OFDM 的认知无线电系统中最优功率分配[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(8): 1144–1147.)
- [4] BANSAL G, HOSSAIN M J, BHARGAVA V K. Adaptive power loading for OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2007: 5137–5142.
- [5] BANSAL G, HOSSAIN J, BHARGAVA V K. Optimal and suboptimal power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2008, 7(11): 4710–4718.
- [6] ATTAR A, HOLLAND O, NAKHAI M R, *et al.* Interference limited resource allocation for cognitive radio in orthogonal frequency division multiplexing networks [J]. IET Communications, 2008, 2(6): 806–814.
- [7] LIU J, SONG Y, YANG S, *et al.* Optimal power allocation OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of the 2011 Cross Strait Quad Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 877–880.
- [8] Qi Q, MINTUMN A, YANG Y. An efficient water-filling algorithm for power allocation in OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of the 2012 International Conference on Systems and Informatics. Piscataway: IEEE Press, 2012: 2069–2073.
- [9] XU W, GAO Y, WANG Y, *et al.* Power allocation with min-rate guarantee for OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of the 2013 8th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). Piscataway: IEEE Press, 2013: 959–962.
- [10] ATTAR A, HOLLAND O, NAKHAI M R, *et al.* Interference-limited resource allocation for cognitive radio in orthogonal frequency division multiplexing networks [J]. IET Communications, 2008, 2(6): 806–814.
- [11] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, *et al.* Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems [C]// Proceedings of the 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2004, 4: 1873–1877.
- [12] YU G, LUO H, ZHAO Z, *et al.* Power allocation of cognitive orthogonal frequency division multiplexing system [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(4): 673–676. (余官定, 罗海燕, 赵志峰, 等. 认知正交频分复用系统的功率分配研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(4): 673–676.)
- [13] WANG Y, XU W, YANG K, *et al.* Optimal energy efficient power allocation for OFDM-based cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(9): 1420–1423.
- [14] SON K, JUNG B C, CHONG S, *et al.* Power allocation for OFDM-based cognitive radio systems under outage constraints [C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1–5.
- [6] SAMEER S M, RAJA K, UMAR R V. An efficient maximum likelihood carrier frequency offset estimator for OFDM using null subcarriers and cycle prefix [J]. Wireless Personal Communications, 2011, 58(2): 259–279.
- [7] ZHAO H, MA S, ZHANG J, *et al.* Blind estimation of carrier frequency offset for OFDM-BPSK systems [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(6): 842–846. (赵海龙, 马, 张健, 等. 适用于 OFDM-BPSK 的载波频偏盲估计算法[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(6): 842–846.)
- [8] OH J H, KIM J T. Blind carrier frequency offset estimation for OFDM systems with constant modulus constellations [J]. Communications Letters, 2011, 15(9): 971–973.
- [9] YANG F, LI K H, TEH K C. A carrier frequency offset estimator with minimum output variance for OFDM system [J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(11): 677–679.
- [10] LI X, HAN Q, ELLINGER J, *et al.* General total inter-carrier interference cancellation for OFDM high speed aerial vehicle communication [C]// Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2013: 4698–4702.
- [11] LI X, ZHOU R, CHAKRAVARTHY V, *et al.* Total inter carrier interference cancellation for OFDM mobile communication systems [C]// Proceedings of the 2010 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1–5.
- [12] TAO X, XIAO F, KWOK-WO W. An improved particle swarm optimization algorithm combined with piecewise linear chaotic map [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 190(2): 1637–1645.
- [13] LI L, NIU B. Particle swarm optimization algorithms [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 35–36. (李丽, 牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 35–36.)

(上接第 2790 页)