

模拟退火与人工鱼群变异优化的正交小波盲均衡算法*

黄伟¹, 郭业才², 王珍¹

(1. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044)

摘要: 针对人工鱼群算法(AFSA)搜索效率低、易陷入早熟现象等问题,在人工鱼群算法中嵌入变异算子以保持种群多样性,抑制早熟现象,同时引入模拟退火思想增强局部搜索能力,改进算法后期收敛速度减慢的缺点,获得了模拟退火与人工鱼群变异算法;用该算法初始化小波分数间隔盲均衡器的权向量,提出了模拟退火与人工鱼群变异优化的正交小波分数间隔盲均衡算法(SAFSA-FSE-WTCMA)。水声信道仿真结果表明,新算法具有更快的收敛速度和更小的稳态误差。

关键词: 盲均衡; 模拟退火; 人工鱼群算法; 水声信道

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)11-4124-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.11.031

Orthogonal wavelet transform blind equalization algorithm based on artificial fish swarm optimization of mutation operator and simulated annealing

HUANG Wei¹, GUO Ye-cai², WANG Zhen¹

(1. School of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: According to disadvantage of the poor local search and premature phenomena of artificial fish swarm algorithm (AFSA), this paper integrated AFSA with mutation operator in order to maintain the population diversity and restrain premature phenomena, while AFSA was combined with simulated annealing to enhance local search capability, and it proposed hybrid artificial fish swarm algorithm optimization of mutation operator and simulated annealing. It initialized weight vector of blind equalizer by the algorithm. And it proposed an orthogonal wavelet transform fractionally spaced blind equalization algorithm based on hybrid artificial fish swarm optimization of mutation operator and simulated annealing. Simulations in underwater acoustic channel demonstrate the proposed algorithm can speed up convergence and decrease state error.

Key words: blind equalization; simulated annealing; artificial fish swarm algorithm; underwater acoustic channel

在水下通信系统中^[1],信号受到有限带宽和多径衰落的影响,产生的码间干扰(inter-symbol interference, ISI)降低了通信质量。为了消除ISI,在接收端引入不需要发送训练序列的盲均衡技术。基于正交小波变换的分数间隔盲均衡算法^[2](FSE-WTCMA),利用正交小波变换对输入信号去相关性及分数间隔对信号的过采样特性,加快了常数模算法的收敛速度,减小了稳态误差,但仍不能满足实际要求。人工鱼群算法^[3]是一种基于动物行为的群体全局寻优算法,具有较强的全局寻优能力,但有以下两个缺点^[4]:a)当寻优域较大或处于变化平坦的区域时,收敛于全局极值速度减慢,搜索能力下降;b)容易出现早熟现象。

本文将变异算子、人工鱼群优化的正交小波分数间隔盲均衡算法与模拟退火算法(simulated annealing, SA)^[5,6]有机融合,提出了一种基于模拟退火与人工鱼群变异混合优化小波盲均衡算法。

1 正交小波分数间隔盲均衡算法

用正交小波对 $T/2$ 分数间隔盲均衡器的输入信号处理后^[7],得到 $T/2$ 分数间隔正交小波盲均衡算法,原理如图1所示。

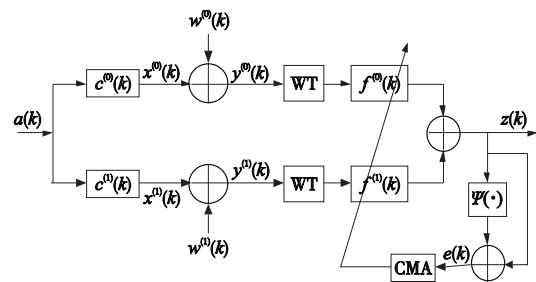


图1 基于 $T/2$ 分数间隔的正交小波变换盲均衡算法

在 $T/2$ 分数间隔盲均衡器中,设每个子信道的均衡器长度 $M_f = 2^N$,在有限长度下,每个子信道的均衡器权系数 $f^{(i)}(k)$ 可

收稿日期: 2012-04-08; 修回日期: 2012-05-14 基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(200753);安徽省高等学校自然科学基金资助项目(KJ2010A096);江苏省高等学校自然科学基金资助项目(08KJB510010);江苏省自然科学基金资助项目(BK2009410)

作者简介: 黄伟(1987-),男,安徽池州人,硕士研究生,主要研究方向为智能信号处理与通信系统(huangwei20061010@163.com);郭业才(1962-),男,教授,博导,主要研究方向为通信信号处理、智能信息处理、生物医学图像处理及气象信息技术与安全等;王珍(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为智能信号处理与通信系统。

表示为

$$f^{(l)}(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^{k_j} d_{nm}^{(l)} \cdot \phi_{nm}^{(l)}(k) + \sum_{m=0}^{k_j} v_{nm}^{(l)} \cdot \varphi_{nm}^{(l)}(k) \quad (1)$$

其中: $k=0,1,\dots,M_f$; $\varphi_{nm}^{(l)}(k)$ 和 $\phi_{nm}^{(l)}(k)$ 分别表示尺度函数和小波函数; $k_j = M_f/2^n - 1$ ($j=1,2,\dots,N$), N 为小波分解的最大尺度; $d_{nm}^{(l)}$ 和 $v_{nm}^{(l)}$ 分别为每路均衡器的权系数。

每路子信道均衡器的输出 $z(k)$ 为

$$z^{(l)}(k) = \sum_{i=0}^{M_f-1} f_i^{(l)}(k) \cdot y^{(l)}(k-i) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^{k_j} d_{nm}^{(l)}(k) \cdot r_{nm}^{(l)}(k) + \sum_{m=0}^{k_j} v_{nm}^{(l)}(k) \cdot s_{nm}^{(l)}(k) \quad (2)$$

式(2)表明 $f^{(l)}(k)$ 用小波基函数表示的实质是对每路子信道均衡器的输入信号进行小波变换,从而改变均衡器的结构。

设 $R^{(l)}(k) = [r_{1,0}^{(l)}(k), \dots, r_{N,k_N}^{(l)}(k), s_{j,0}^{(l)}(k), \dots, s_{j,k_N}^{(l)}(k)]^T$, $[d_{1,0}^{(l)}(k), \dots, d_{N,k_N}^{(l)}(k), v_{N,0}^{(l)}(k), \dots, v_{N,k_N}^{(l)}(k)]^T$ 则

$$R^{(l)}(k) = y^{(l)}(k) V \quad (3)$$

$$z^{(l)}(k) = f^{(l)}(k)^H R^{(l)}(k) \quad (4)$$

这时,子均衡器权向量的迭代公式为

$$f^{(l)}(k+1) = f^{(l)}(k) + \mu [\hat{R}^{(d)}(k)]^{-1} e(k) R^{(l)}(k) z^{(l)}(k) \quad (5)$$

其中: $[\hat{R}^{(d)}(k)]^{-1} = \text{diag}[\sigma_{1,0}^{2(l)}(k), \sigma_{1,1}^{2(l)}(k), \dots, \sigma_{N,k_N-1}^{2(l)}(k), \sigma_{N+1,0}^{2(l)}(k), \dots, \sigma_{N+1,k_N-1}^{2(l)}(k)]$ 。

$$\sigma_{N,m}^{2(l)}(k+1) = \beta \sigma_{N,m}^{2(l)}(k) + (1-\beta) |r_{n,m}^{(l)}(k)|^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{N+1,m}^{2(l)}(k+1) = \beta \sigma_{N+1,m}^{2(l)}(k) + (1-\beta) |s_{n,m}^{(l)}(k)|^2 \quad (7)$$

其中: β 为遗忘因子, $\sigma_{N,m}^{2(l)}(k)$ 和 $\sigma_{N+1,m}^{2(l)}(k)$ 分别表示小波变换系数 $r_{n,m}(k)$ 和尺度变换系数 $s_{n,m}(k)$ 的平均功率估计。信号经正交小波变换,对其能量作归一化处理,得到 $T/2$ 分数间隔正交小波变换盲均衡算法($T/2$ FSE-WTCMA)。

2 带变异算子的 AFSA 与 SA 混合的小波分数间隔盲均衡算法

传统的正交小波分数间隔盲均衡算法采用最速梯度下降法^[8]对代价函数求梯度,得到均衡器权向量的迭代式^[9],但这种方法缺乏全局搜索能力,同时构造的代价函数需满足可导。将全局搜索能力强、带变异算子的 AFSA 与有优良局部搜索能力的 SA 算法有机结合,得到基于 SA 与人工鱼群的变异混合优化算法。利用该算法来初始化 $T/2$ FSE-WTCMA 权向量^[10],能克服 $T/2$ FSE-WTCMA 的缺陷。其优化流程如图 2 所示。

2.1 适应度函数的确定

适应度函数一般由代价函数转换而来。CMA 将代价函数迭代至极小值,得到均衡器最佳的权向量,而人工鱼群算法寻优的目的是得到适应度函数值最大时对应的人工鱼个体^[11],为解决这个矛盾,将均衡器代价函数的倒数作为人工鱼群算法的适应度函数,得到

$$F(f_i) = \frac{1}{J(f_i)} \quad i=1,2,\dots,M \quad (8)$$

其中: $F(f_i) = 1/J_{\text{CMA}}$ 是均衡器的代价函数^[12], f_i 是 AFSA 产生的均衡器权向量。

2.2 变异算子的设计

针对 AFSA 在后期收敛速度减慢、精度降低等问题,在 AFSA 中嵌入变异算子,对人工鱼进行变异操作,以保持人工鱼群状态的多样性、提高搜索速度和精度。为判断随进化次数的增加搜索结果是否有改进,在算法中设立公告板来记录历史

最优人工鱼状态。若在多次进化过程中公告板没有变化或变化很小时,则对人工鱼群中除公告板外的所有人工鱼执行变异操作。其变异操作设计如下:

a) 对各人工鱼每一维产生一个随机数 $u \in (0,1)$, 设置变异概率的阈值 u_m 。

b) 若 $u \leq u_m$, 对该人工鱼个体的该维进行随机初始化,否则保持该维不变。

c) 计算新生成的人工鱼个体适应度函数并与公告板比较,若优于公告板,则更新公告板。

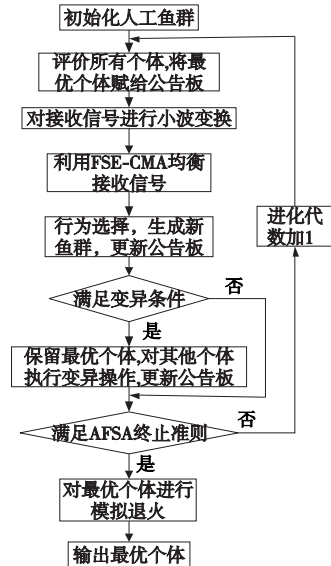


图2 模拟退火与人工鱼群变异混合算法流程

2.3 模拟退火操作

由于带变异算子的 AFSA 局部搜索能力不强,故搜索到的最优解精度不高。而 SA 具有很强的局部搜索能力,因此,将带变异算子的 AFSA 得到的最优解按 Metropolis 准则来决定弃留。在 SA 的每次迭代过程中,若最优解的适应度函数增大,那么它被接受,否则由式(9)来判断是否被接受。

$$Q(T_{i+1}) =$$

$$\begin{cases} 1 & f_{i+1} < f_i \\ \min[1, \exp(-\frac{f_{i+1}-f_i}{T_{i+1}})] & f_{i+1} \geq f_i \end{cases} > \text{random}(0,1) \quad (9)$$

其中: f_i 为第 i 次迭代所得的最优解的适应度值; $Q(T_{i+1})$ 为温度 T_{i+1} 下的接受概率, T_{i+1} 可表示为

$$T_{i+1} = \alpha \cdot T_i \quad (10)$$

其中: α 为温度冷却系数。

由于带变异算子的 AFSA 受到随机步长、视野范围、随机行为等因素的影响,使其在初始化盲均衡器权向量时,得到的最优解精度不高,因此在带变异算子的 AFSA 获得最优解之后,需级联局部搜索能力强的 SA,得到高精度的全局最优解。

3 仿真实验及分析

3.1 仿真实验

为了验证 SAFSA- $T/2$ FSE-WTCMA 的有效性,将其与 WT-CMA 和 AFSA- $T/2$ FSE-WTCMA 进行对比仿真实验,并以最小均方误差(MSE)曲线作为算法的性能指标。在实验中,人工鱼群规模为 100,视野为 0.15,步长为 0.03,拥挤度因子为 0.618,最大进化次数为 100,初始温度为 $T=30$,冷却参数 $\alpha=$

0.89,信噪比为20 dB。

实验1 最小相位水声信道 $c = [0.9656 \ -0.0906 \ 0.5780 \ 0.2368]^{[13]}$; 发射信号为16 PSK,均衡器权长为16,初始功率设置为8,WTFSE-CMA的第3个抽头初始化为1,其他参数如表1所示。500次蒙特卡诺仿真结果如图3所示。

表1 参数设置

算法	步长	小波	分解层数	遗忘因子
T/2FSE-WTCMA	0.000 04	DB2	3	0.99
AFSA-T/2FSE-WTCMA	0.000 05	DB2	3	0.999
SAFSA-T/2FSE-WTCMA	0.000 9	DB2	3	0.95

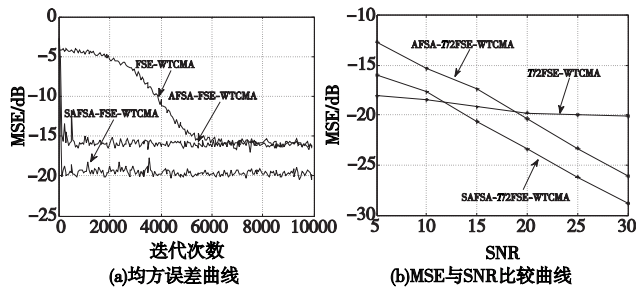


图3 16 PSK信号的仿真结果

图3表明,在收敛速度上,SAFSA-T/2FSE-WTCMA比AFSA-T/2FSE-WTCMA快约500步,比T/2FSE-WTCMA快6000步左右。在稳态误差上,SAFSA-T/2FSE-WTCMA与AFSA-T/2FSE-WTCMA相比,减小了大约3 dB,与T/2FSE-WTCMA相比,减小了大约3 dB,而且SAFSA-T/2FSE-WTCMA的输出信号星座图更加清晰、紧凑、无相位偏转。

实验2 水声信道同实验1,发射信号为16 QAM,均衡器权长为16,初始功率设置为4,T/2FSE-WTCMA的第6个抽头初始化为1,其他参数如表2所示。300次蒙特卡诺仿真结果如图4所示。

表2 参数设置

算法	步长	小波	分解层数	遗忘因子
T/2FSE-WTCMA	0.000 02	DB4	2	0.99
AFSA-T/2FSE-WTCMA	0.000 01	DB4	2	0.999
SAFSA-T/2FSE-WTCMA	0.000 01	DB4	2	0.95

图4表明,在收敛速度上,SAFSA-T/2FSE-WTCMA与AFSA-T/2FSE-WTCMA基本相同,比T/2FSE-WTCMA快7000步左右。在稳态误差上,SAFSA-T/2FSE-WTCMA与AFSA-T/2FSE-WTCMA相比,减小了约2 dB,与T/2FSE-WTCMA相比,减小了约2 dB,且SAFSA-T/2FSE-WTCMA的输出信号星座图最为清晰、紧凑。

3.2 算法性能分析

通过仿真实验可以看出,人工鱼群算法明显加快了小波盲均衡算法的收敛速度;而基于模拟退火和人工鱼群变异优化的小波盲均衡算法在收敛速度上与人工鱼群算法基本一致,且在稳态误差方面比传统的人工鱼群算法更有优势。

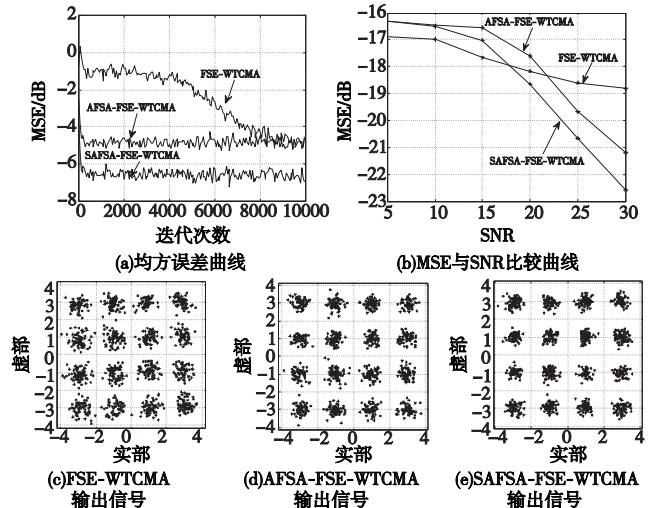


图4 16 QAM信号的仿真结果

4 结束语

在分析小波分数间隔盲均衡算法和人工鱼群算法原理的基础上,引入变异算子和模拟退火思想,提出了基于模拟退火与人工鱼群变异混合优化的盲均衡算法。该算法利用人工鱼群算法的全局寻优特点来初始化均衡器的权向量,并引入变异算子和模拟退火思想来克服人工鱼群算法的早熟现象提高局部搜索能力,再利用正交小波变换对输入信号去相关性改善了算法的性能。水声信道仿真结果表明,与T/2FSE-WTCMA和AFSA-T/2FSE-WTCMA相比,该算法在减小稳态误差和加快收敛速度方面的性能具有很大的提高。

参考文献:

- [1] 何成兵,黄建国. 循环移位扩频水声通信[J]. 物理学报,2009,58(12):8379-8385.
- [2] 郭业才,王丽华. 模糊神经网络控制的混合小波神经网络盲均衡算法[J]. 电子学报,2011,33(5):1253-1256.
- [3] 李晓磊. 一种新型的智能优化算法——人工鱼群算法[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [4] 张梅凤,邵诚. 基于变异算子与模拟退火混合的人工鱼群优化算法[J]. 电子学报,2006,34(8):1381-1385.
- [5] 张德富,彭煜. 求解三维装箱问题的混合模拟退火算法[J]. 计算机学报,2009,32(11):2147-2156.
- [6] 班晓娟,宁淑荣,涂序彦. 人工鱼群高级自组织行为研究[J]. 自动化学报,2008,34(10):1327-1332.
- [7] ERDOR A T. A fractionally spaced blind equalization algorithm with global convergence[J]. Signal Processing,2008,88(1):200-209.
- [8] 曲良东,何登旭. 求解不动点方程的人工鱼群算法[J]. 计算机应用研究,2010,27(9):3356-3357.
- [9] ABRAR S,NANDI A K. An adaptive constant modulus blind equalization algorithm and its stochastic stability analysis[J]. IEEE Signal Processing Letters,2010,17(1):55-58.
- [10] ZHI Ding. III-convergence of godard blind equalizer in data communication systems[J]. IEEE Trans on Communications,1991,39(2):1313-1327.
- [11] 贾强,李仲梅. 改进的人工鱼群算法及其在无线定位中的应用[J]. 计算机应用研究,2011,28(6):2147-2150.
- [12] 刘祖军,徐海生,王杰令,等. 一种新的混合信道盲均衡算法[J]. 电子与信息学报,2009,31(7):1606-1609.
- [13] ZHANG Yin-bing, ZHAO Jun-wei, GUO Ye-cai, et al. A constant modulus algorithm for blind equalization in α -stable noise[J]. Applied Acoustics,2010,71(7):653-660.