

基于粒子群算法的 MIMO CDMA 平坦衰落信道均衡器

王兆伟, 肖 扬, 刘湘黔
(北京交通大学 信息科学研究所, 北京 100044)

摘 要:粒子群优化算法是一类有效的随机全局优化技术,它利用粒子种群搜索解空间,每个粒子表示一个被优化问题的潜在解,通过粒子间的相互作用发现复杂空间中的最优区域。MIMO 系统在不增加带宽的前提下,成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率,而复杂的传播信道使接收信号产生 ISI。基于粒子群优化算法的 MIMO 信道均衡器应用于 MIMO CDMA 系统能有效抑制平坦衰落、信道间干扰以及背景噪声干扰。仿真结果证明其误码率性能明显优于传统均衡器,收敛速度快于基于 GA 的均衡器且更易于实现。

关键词:码分多址;均衡器;多输入多输出平坦衰落信道;粒子群优化算法;参考信号

中图分类号: TN911.5; TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2008)01-0038-05

Application of particle swarm optimization in MIMO CDMA flat fading channel equalizers

WANG Zhao-wei, XIAO Yang, LIU Xiang-qian
(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Particle swarm optimization (PSO) algorithms are efficient in stochastic global optimization. PSO algorithms use a particle population to search for the solution space, in which each particle represents a solution to the problem to be optimized, and finds optimal regions in complex searching spaces through the interaction of individuals in the population. The MIMO scheme can multiply the channel capacity of wireless communication several times without increased bandwidth, but the complex channels produce inter-symbol interference (ISI) in received signals. We studied a PSO MIMO channel equalizer in an MIMO CDMA system that is not sensitive to the coherency of channels, flat fading, or noise. Simulations show that the bit-error rate (BER) performance of the proposed PSO MIMO channel equalizer is better than that of conventional adaptive equalizers, converges faster than GA-based equalizers, and is easier to implement.

Keywords: CDMA; channel equalizer; MIMO flat fading channel; PSO; reference signals

1995 年 J. Kennedy 和 R. C. Eberhart 受到鸟群觅食的启发,于是提出了粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[1],该算法是一种进化计算技术,与传统的优化算法相比,PSO 不受优化函数结构影响,且不计算优化梯度,能在非线性多峰的复杂解空间内搜索真正解,同时能处理参数空间变化的优化问题,基本不受解空间峰数和维数的限制,与同是进化算法的遗传算法相比较,PSO 能更快达

到全局最优。经过众多学者 10 余年的研究,已被广泛应用于解决多个领域的优化问题,如自适应滤波器^[2]、无线通信中的多用户检测^[3-4]等方面。

多输入多输出 (multiple input & multiple output, MIMO) 系统是近年来无线通信领域的一个热门课题。它在不增加带宽的前提下,成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率^[5-6]。其实现方式是在发射端和接收端都使用多个天线,而不是传统的单天线。无线通信信号传播路径非常复杂,且受信道间干扰,导致传输信号畸变,产生接收符号间干扰 (ISI)。自

收稿日期:2007-05-18.

通讯作者:王兆伟. E-mail:05120357@bjtu.edu.cn.

适应均衡器技术能有效地消除码间干扰,传统方法是首先由信道估计器估计出信道矩阵 $H^{[7]}$,然后由 H^T 滤波恢复发送数据序列,而此方法误码率性能差.文献[8]提出在估计出信道矩阵后,利用 H^{-1} 恢复信号,提高了误码率性能,然而使用这种方法的前提是必须保证 H 为非奇异矩阵.文中提出基于粒子群算法的信道均衡器,采用粒子群优化算法,由参考信号估计出均衡参数,然后构造信道均衡器.在平坦衰落信道的情况下能够替代传统均衡器,而且大大提高了误码率性能,同时,与同是进化算法的遗传算法(GA)相比,能更快地收敛,辨识出均衡参数.

1 系统模型

DS-CDMA 系统是多用户共享信道^[6,9-11],因此文中的 MIMO 技术应用于 DS-CDMA 系统,最大限度地利用信道带宽并使系统具有良好的适应性.现有 MIMO 技术主要应用于无线通信系统的下链路,而文中考虑 CDMA 系统的上链路,利用 MIMO 技术提高基站性能.

为简便,设计的 MIMO CDMA 系统利用 2 个天线 MS(mobile station)发射信号,利用 2 个天线 BS(base station)接收信号,其上链路信道如图 1 所示.其中 MS 的发射机采用图 2 所示模型,上链路的并行序列分别通过 MS 的天线 1 和天线 2 发射.

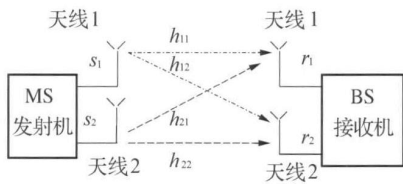


图 1 MIMO 上链路信道
Fig. 1 The MIMO CDMA communication system

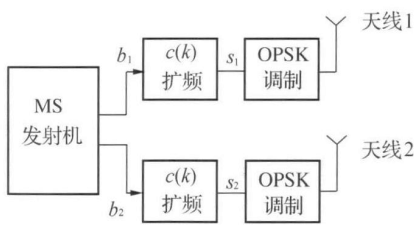


图 2 MIMO MS 发射机示意图
Fig. 2 Block diagram of the MIMO MS transmitter

多个 MS 中,第 k 个 MS 的数据序列 $\{b^{(k)}\}$ 分为 2 个子序列 $\{b_1^{(k)}\}$ 和 $\{b_2^{(k)}\}$. 这 2 个子序列经过线性扩频,通过 2 个天线分别发射出去,发射序列表示为

$s_1^{(k)}$ 和 $s_2^{(k)}$, 则 $s_1^{(k)} = b_1^{(k)} c^{(k)}$, $s_2^{(k)} = b_2^{(k)} c^{(k)}$, $c^{(k)}$ 为 $P \times 1$ 归一化扩频序列. 同一 MS 的天线使用相同的扩频码.

序列 $s_1^{(k)}$ 和 $s_2^{(k)}$ 经过 OPK 调制^[12] 后发送到平坦衰落信道,由 BS 接收,接收序列经过 QPSK 接收机后等价如下式:

$$\begin{bmatrix} r_1^{(k)} \\ r_2^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}^{(k)} & h_{21}^{(k)} \\ h_{12}^{(k)} & h_{22}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1^{(k)} \\ s_2^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^{(k)} \\ n_2^{(k)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $h_{ij}^{(k)}$, $i, j \in \{1, 2\}$ 表示发射机天线到接收机天线 j 的信道参数,服从瑞利分布. $n_j^{(k)}$, $j \in \{1, 2\}$ 表示接收机天线 j 接收到的噪声,服从 $CN(0, 1)$ (零均值复高斯白噪声)分布.

如图 3 所示,接收序列 $r_1^{(k)}$ 和 $r_2^{(k)}$ 为均衡器输入. 首先,PSO 均衡器利用 MS 端发射的参考序列辨识出均衡矩阵 $G = \begin{bmatrix} g_{11}^{(k)} & g_{21}^{(k)} \\ g_{12}^{(k)} & g_{22}^{(k)} \end{bmatrix}$, 然后对数据序列进行均衡:

$$\begin{bmatrix} z_1^{(k)} \\ z_2^{(k)} \end{bmatrix} = \text{sgn}(\text{Re}\{G \begin{bmatrix} r_1^{(k)} \\ r_2^{(k)} \end{bmatrix}\}) \quad (2)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.

第 k 个 MS 的发射序列为

$$\begin{aligned} y_1^{(k)} &= c^{(k)H} z_1^{(k)}, \\ y_2^{(k)} &= c^{(k)H} z_2^{(k)}. \end{aligned} \quad (3)$$

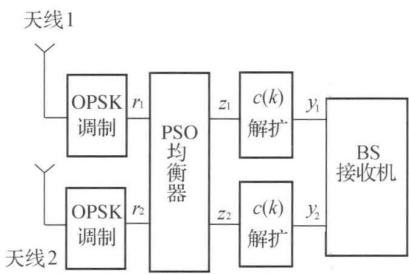


图 3 MIMO BS 接收机示意图
Fig. 3 Block diagram of the MIMO BS receiver

设不同 MS 扩频序列的互相关函数为 $R = (r_{ij})_{K \times K}$, 其中 $r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n c^{(i)}(l) c^{(j)*}(l)$, n 为扩频码长度, K 为 CDMA 系统中 MS 数量,互相关矩阵 R 为 Toeplitz 矩阵.

2 基于粒子群算法的 MIMO 信道均衡器

基本的 PSO 包括一个由多个粒子(个体)组成的群体,每个粒子代表了问题的一个可能解,并用一

个适应度函数对解的优劣进行评估.在迭代过程中,这些粒子利用自己的历史经验和相互交流的信息随机地以一定的速度在解空间移动,直至达到最优解或近似解^[1,13]. PSO 和 GA 相似,但 PSO 的参数和操作算子都少得多,鲁棒性强,收敛速度在一般情况下更快.

信道均衡器首先要估计出均衡器矩阵.考虑式(2)模型,在一帧内, $\{g_{ij}\} (i, j = 2)$ 可以视为常数,需要确定的参数 g_{ij} 共有 4 个.显而易见,性能越好的均衡滤波模型,其滤波输出信号(滤波器响应)与参考信号的差值愈小,因此将均衡矩阵估计问题转化为一个使均衡器响应与参考信号差值最小的优化问题.文中根据最小均方误差准则,利用粒子群算法估计出矩阵 G . MS 端每个天线发射的一帧信号包括 M bit 参考序列和 N bit 数据序列.

选取如下形式的适应函数:

$$f_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M J_m. \quad (4)$$

式中: f_i 为粒子 i 的适应值,其中 $J_m = \sum (s_m - \hat{a}_{im})^2$, $s_m = [m_{m1}^{(k)}, m_{m2}^{(k)}]$ 为第 m 个参考序列, \hat{a}_{im} 为第 i 个粒子第 m 个信号输出, $\hat{a}_{im} = \text{Re} \left[\begin{matrix} g_{11}^{(k)} & g_{21}^{(k)} \\ g_{12}^{(k)} & g_{22}^{(k)} \end{matrix} \right] \begin{bmatrix} r_{m1}^{(k)} \\ r_{m2}^{(k)} \end{bmatrix}$, 其中 $\begin{bmatrix} r_{m1}^{(k)} \\ r_{m2}^{(k)} \end{bmatrix}$ 为接收到的第 m 个信号向量,由式(2)可知 $z_m = \text{sgn}(\hat{a}_m)$. 全局最优适应函数值为

$$f_{\text{best}} = \min\{f_i\}. \quad (5)$$

需要估计的参数为 4 个,从而确定粒子的搜索空间为二维矩阵 $X_i = \begin{bmatrix} x_{i0} & x_{i1} \\ x_{i3} & x_{i4} \end{bmatrix}$, 相应的粒子搜索

速度 $V_i = \begin{bmatrix} v_{i0} & v_{i1} \\ v_{i3} & v_{i4} \end{bmatrix}$, 局部和全局最优位置 P_i 、 P_{best}

均为相同结构的矩阵,于是有如下的信道均衡算法:

1) 初始随机设定粒子群个体数量 n_{pop} 、最大迭代次数 t_{max} , 随机产生每个粒子的位置 X_i 和速度 V_i , 根据式(4)计算每个粒子的适应值,将每个粒子的当前位置作为其局部最好位置, P_i 根据式(5)计算 f_{best} , 适应值最小的粒子的位置作为全局最优位置 P_{best} ;

2) 搜索过程如下:

```
for  $t = 1$  to  $t_{\text{max}}$ 
{
 $w(t) = 0.9 - (t - 1) \times 0.5 / t_{\text{max}}$ 
for  $i = 0$  to  $(n_{\text{pop}} - 1)$ 
```

```
{
for  $j = 0$  to 4 - 1 (文中的  $X$  有 4 个参数)
{
 $v_{ij}(t) = w(t) v_{ij}(t - 1) + c_1 r_{1j}(t) (p_{ij} - x_{ij}(t - 1)) +$ 
 $c_2 r_{2j}(t) (p_{\text{best}_j} - x_{ij}(t - 1))$  (7)
保证  $v_{ij}(t) \in [-v_{\text{max}}, v_{\text{max}}]$  (8)
 $x_{ij}(t) = x_{ij}(t - 1) + v_{ij}(t)$  (9)
保证  $x_{ij}(t) \in [-x_{\text{max}}, x_{\text{max}}]$  (10)
}
}
if  $f(X_i(t)) < f(P_i)$ 
 $P_i = X_i(t)$ 
if  $f(P_i) < f(P_{\text{best}})$ 
 $P_{\text{best}} = P_i$ 
}
}
```

式中: $w(t)$ 为惯性权重; c_1 、 c_2 为进化因子,是固定常数,一般在 $0 \sim 2$ 取值; r_1 、 r_2 为相互独立的随机数,服从 $U(0, 1)$ 分布;式(7)和式(9)为粒子搜索过程,式(8)和式(10)用来确保粒子在搜索空间范围内移动.

3) 迭代结束,全局最优位置 P_{best} 即为均衡矩阵的值,即 $G = P_{\text{best}}$. 然后根据式(2)和式(3),可以由数据信号的信道响应恢复出数据信号.

与传统的均衡器算法比较,文中提出利用基于粒子群算法均衡器,主要考虑到在粒子群算法在求解过程中:1) 有多个搜索方向,不受解初始值限制,多个粒子每次迭代都随机运动保证算法有多个搜索方向,传统算法(如 LMS 算法)是只有一个搜索方向且受限于初始值的选择;2) 考虑解所经历的最好位置和全局最好位置,而传统算法是不考虑解所经历的最好位置.这使得粒子群算法辨识的信道比传统算法辨识的信道更逼近实际信道,能获得比传统算法构造的均衡器更好的误码率性能.

与 GA 算法比较,通常 GA 要经过选择、交叉和变异 3 个过程,而 PSO 只有变异过程,参数和操作算子少,易于硬件实现.在每一代计算后,保留种群最优解的同时,保留每个个体的历史最优解,然后随机选取进化方向,如此能够在新的一代中同时保留全局和局部最优解,使 PSO 有趋势地随机进化,收敛速度更快.

3 仿真结果

设 CDMA 上链路系统每个用户分别用 2 根天

线发射和接收信号.为简化仿真过程,设定 MS 数量为 64,扩频码 $c^{(k)}$ 采用 m 序列扩频码,长度为 64,每个用户采用 QPSK 调制.每用户发送 500 帧数据,每帧 100 bit,BS 端多用户检测器采用文献[8]方法,设上链路信道矩阵 $H = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.373 \\ 0.318 & 0.58 \end{bmatrix}$ 时,采用第 3 节叙述的 PSO 均衡器进行仿真,种群中粒子个数为 50, x_{ij} 取值在 $[-2, 2]$ 范围内, $v_{\max} = 4$, $c_1, c_2 = 2$, w 由 0.9~0.4 线性递减.

另外,仿真以下几种均衡进行对比:

- 1) 假设文献[7]信道估计器能估计出最理想的信道矩阵,利用信道转置矩阵进行滤波,即 $G = H^T$;
- 2) 假设同 1),利用 $G = H^T$ 进行滤波;
- 3) 采用文献[14]LMS 滤波方法, w 为权向量:

$$W(k+1) = [I - \mu(k) R_s^T(k) R_s(k)] W(k) + \mu(k) d(k) R_s(k). \tag{11}$$

式中: k 为迭代次数, $\mu(k)$ 为收敛因子, $R_s(k)$ 为接收到的信号向量, $d(k)$ 为参考信号.最后,迭代完毕令 $G = W$;

- 4) 采用 GA 均衡器:一般 GA 适用于求最大值问题,因此设第 i 个粒子的适应函数为

$$f_{GA,i} = - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M J_m. \tag{12}$$

式中:右侧中符号意义与式(4)相同;设种群中个体数量为 50,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.001;设染色体中每 10 位代表一个均衡参数 x_{ij} ,编码方法为每 10 位染色体转换为一个十进制数 o_{ij} ,限制 $x_{ij} \in [-2, 2]$,因此得到

$$x_{ij} = 4 \times \frac{o_{ij}}{2^{10} + 1} - 2. \tag{13}$$

各个方法在 SNR 相同时,均衡的误码率性能如图 4 所示. PSO 均衡器的误码率性能好于其他的方法. 1) 和 2) 的 BER 曲线是在信道估计器性能最理想的情况下得到的,而在实际应用中性能要差,比较接近 3). 因此,从这 2 个结果可以看出, PSO 有效的提高了接收机的误码率性能,且由接收序列直接恢复发射序列不受信道矩阵非奇异与否的限制.

SNR = 5 时,迭代次数相同情况下, PSO 均衡器和 GA 均衡器的误码率性能如图 5 所示. 2 种方法的误码率都在 10^{-3} 以下,而在迭代次数相同的情况下, PSO 算法的 BER 性能更好,说明 PSO 收敛更快.

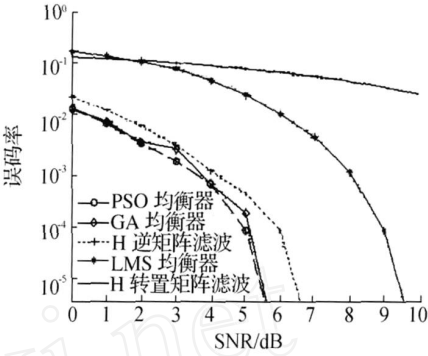


图 4 SNR 相同时,各方法的 BER 性能
Fig. 4 The bit error rate (BER) comparison of proposed and presented MIMO PSO equalizer with the same SNR

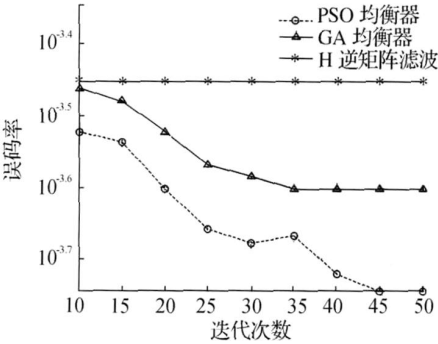


图 5 迭代次数相同, PSO 和 GA 均衡器的 BER 性能
Fig. 5 The bit error rate (BER) comparison of MIMO equalizer based on PSO and GA while SNR=5.

4 结束语

文中提出使用粒子群算法构造均衡器,以均衡器参数作为粒子位置,以参考信号和均衡器输出信号的均方误差构造适应函数 $f(\cdot)$. 通过计算机仿真验证,该方法抗干扰等性能明显优于传统均衡器,收敛速度优于 GA 均衡器,是一种有效可行的方法.

参考文献:

[1] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Networks. Perth, Australia, 1995.
[2] KRUSIENSKI D J, JENKINS W K. Adaptive filtering via particle swarm optimization[C]// Proc 37th Asilomar Conf on Signals, Systems, and Computers. Monterey, Canada, 2003.
[3] 刘成,肖扬. 粒子群优化算法在多用户检测中的应用

- [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 129-132.
- LIU Cheng, XIAO Yang. Particle swarm optimization in multiuser detection[J]. China Railway Science, 2006, 27(4): 129-132.
- [4] GUO Z Q, XIAO Y. MIMO system multiuser detection based on particle swarm optimization algorithm [C]// Proc 2006 8th International Conference on Signal Processing. Guilin, 2006.
- [5] TELATAR I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. European Trans on Telecomm, 1999, 10(6): 585-595.
- [6] FOCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6(3): 311-335.
- [7] CHEN W, XIAO Y, ZHAO Y. The algorithm implementation of WCDMA channel estimation[C]// 7th International Conference on Signal Processing Proceedings. Beijing, 2004.
- [8] XIAO Y, LEE M H. MIMO multiuser detection for CDMA systems[C]// 2006 8th International Conference on Signal Processing. Guilin, 2006.
- [9] SHIU D S, FOSCHINI G J, GANS M J. Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems[J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48(3): 502-513.
- [10] CHOIR L, LETAIEF K B, MURCH R D. MIMO CDMA antenna systems [C]// 2000 IEEE International Conference on Communications (ICC 2000). New Orleans, USA, 2000.
- [11] XIAO Y, LEE M H. Low complexity MIMO-LDPC CDMA systems over multipath channels [J]. IEICE Transactions on Communications, 2006, E89-B(5): 1713-1717.
- [12] ZHENG K, WANG W B. Analysis and optimization of pilot-channel-assisted QPSK for DS-CDMA systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(9): 1122-1124.
- [13] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]// Proceedings of the 1998 IEEE World Congress on Computational Intelligence. Alaska, USA, 1998.
- [14] 肖 扬, 宋明艳. 变频长自适应数字滤波器的稳定条件[J]. 通信学报, 2001, 22(10): 88-92.
- XIAO Yang, SONG Mingyan. Stability conditions of variable step-size adaptive digital filter [J]. Journal on Communications, 2001, 22(10): 88-92.

作者简介:



王兆伟,男,1982 生,博士研究生,主要研究方向为通信网体系结构、无线信道均衡、智能优化算法。



肖 扬,男,1955 年生,教授,博士生导师,主要研究方向为时空处理、多维系统理论与应用、多维信息处理。发表论文 100 余篇,其中被 SCI、EI、ISTP 检索 80 余篇。



刘湘黔,男,1971 年生,副教授,硕士生导师,主要研究方向为网络控制、鲁棒控制等。