

# MC-CDMA系统中基于遗传算法的多用户检测

刘洪武<sup>1,2</sup>, 冯全源<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031; 2. 南昌航空大学电子信息工程学院 南昌 330063)

**【摘要】**提出了在频率选择性信道下使用多天线分集接收的多载波码分多址(MC-CDMA)系统上行链路中基于遗传算法(GA)的多用户检测。针对三种不同的代价函数,研究了两种不同的个体选择机制对GA多用户检测的性能影响。代价函数分别为各个天线分支接收信号与估计信号的对数似然函数(LLF)、误差平方和相位误差平方。仿真分析表明:在相同代价函数下,基于Pareto优化准则的个体选择机制要优于按线性合并准则的个体选择机制;在相同个体选择机制下,基于相位误差平方的代价函数的误比特率性能和抗远近性能要优于基于LLF和误差平方的代价函数。

**关键词** 天线分集; 遗传算法; 多载波码分多址; 多用户检测

**中图分类号** TN911.21

**文献标识码** A

## Multi-Antenna and Genetic-Algorithm-Based Multiuser Detection for MC-CDMA Systems

LIU Hong-wu<sup>1,2</sup> and FENG Quan-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031;

2. School of Electronic and Information Engineering, Nanchang Hangkong University Nanchang 330063)

**Abstract** A genetic-algorithm (GA) based on multiuser detection (MUD) is proposed for the antenna-diversity-assisted multicarrier code-division multiple-access (MC-CDMA) systems in the frequency-selective fading channel. Two kinds of GA-based individual-selection strategies are investigated with three different cost functions, which are log-likelihood function (LLF), squared error and squared phase error, respectively. Simulation analysis shows that: with the same cost function, the individual-selection strategy based on Pareto optimality criterion has better performance than the linear combining criterion; with the same individual-selection strategy, the cost function based on squared phase error has the better bit error rate (BER) performance and the better near-far resistance performance than those of two other cost functions.

**Key words** antenna-diversity; genetic-algorithm; MC-CDMA; MUD

多载波码分多址(MC-CDMA)系统将正交频分复用与CDMA相结合,具有较高的频谱效率与系统容量<sup>[1-2]</sup>。在MC-CDMA系统上行链路中,由于多个用户的信号在不同子载波上经历了相互独立的衰落,从而破坏了不同用户特征序列的正交性,造成了严重的多址干扰(MAI)。由于传统的最优化多用户检测(MUD)<sup>[3]</sup>的复杂度随用户数目的增加呈指数增长,难于付诸实时应用,因此,研究具备良好性能和较低复杂度的次优MUD方案具有重要意义。在各种MUD技术中,基于遗传算法(GA)的多用户检测<sup>[4-8]</sup>受到了重视。如文献[4-5]研究了AWGN信道下的DS-SS使用GA-MUD的性能,文献[6]研究了MC-SS中使用GA-MUD的性能,文献[7]研究了分集DS-SS使用GA-MUD的性能等。由于

在基站接收端配置多个接收天线可以进一步增强系统性能,本文提出了一种工作于频率选择性衰落信道下的使用多天线分集接收的MC-CDMA系统上行链路中基于遗传算法(GA)的MUD。当基站接收端各天线间的距离配置足够远时,各个天线接收的信号被认为是经历了相互独立的衰落,因此不同天线分支对应的GA代价函数相互独立。针对这一特点,本文提出将各天线分支的LLF、误差平方和相位误差平方分别作为GA的代价函数,并引入Pareto准则<sup>[9]</sup>优化了GA的个体选择机制。

## 1 信号模型

考虑工作于同步模式下的MC-CDMA系统上行链路,假设在同一小区、同一频率、同一时隙、同

收稿日期: 2006-11-10; 修回日期: 2007-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(60371017)

作者简介: 刘洪武(1975-),男,博士,主要从事移动天线系统与MIMO技术方面的研究。

时有 $K$ 个激活用户。各个用户端使用一个发射天线, 基站接收端使用两个接收天线, 并假定接收天线间的距离足够远以保证不同接收天线收到的信号经历了相互独立的衰落, 接收端的等效低通模型如图1所示。

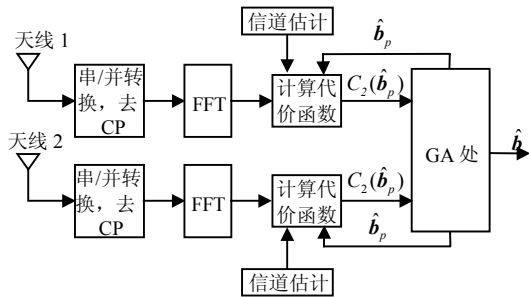


图1 基站接收端等效低通模型

假定系统的子载波数目和扩频因子都为 $N$ , 以第 $k$ 个用户为例, 用户输入的符号经过归一化的扩频码 $c^{(k)} = [c^{(k)}(1), c^{(k)}(2), \dots, c^{(k)}(N)]^T$ 进行频域扩频后, 由 $N$ 点的逆离散傅里叶变换(IDFT)进行基带调制。在加入循环前缀保护间隔(CP)(CP大于信道最大延迟)和实现并/串转换后, 信号从发射天线发射出去。在基站接收端, 接收天线输出的信号经串/并转换和去CP后, 通过 $N$ 点离散傅里叶变换进行解调。假定只有第 $k$ 个用户被激活, 基站接收端第 $m$ 个接收天线分支在一个多载波符号持续期内接收到的频域信号为:

$$\begin{bmatrix} y_{m,1}(t) \\ y_{m,2}(t) \\ \vdots \\ y_{m,N}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^{(k)}(1)H^{(k,m)}(1) \\ c^{(k)}(2)H^{(k,m)}(2) \\ \vdots \\ c^{(k)}(N)H^{(k,m)}(N) \end{bmatrix} \sqrt{A_k} b_k(t) + \begin{bmatrix} n_{m,1}(t) \\ n_{m,2}(t) \\ \vdots \\ n_{m,N}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $H^{(k,m)}(n)$  为用户 $k$ 发射天线到基站第 $m$ 个接收天线间在第 $n$ 个子载波上的信道频域响应;  $b_k(t)$  为用户 $k$ 在第 $t$ 个多载波符号期内传输的符号;  $A_k$  为接收天线处收到的用户 $k$ 的能量;  $n_{m,n}(t)$  是第 $m$ 个天线分支的第 $n$ 个子载波在 $t$ 个多载波符号期内接收到的噪声。为表达方便起见, 将式(3)写为矩阵形式:

$$y_m(t) = H_{k,m} \sqrt{A_k} b_k(t) + n_m(t) \quad (2)$$

式中  $H_{k,m}$  为等效的频域信道矩阵; 噪声分量  $n_m(t)$  满足零均值和  $R_{n_m} = E[n_m(t)n_m^H(t)] = \sigma^2 I_N$ ,  $\sigma^2$  为噪声功率。当所有 $K$ 个用户被激活时, 基站接收端第 $m$ 个接收天线接收到的频域信号可表示为:

$$y_m(t) = \sum_{k=1}^K H_{k,m} \sqrt{A_k} b_k(t) + n_m(t) = H_m A b(t) + n_m(t) \quad (3)$$

式中  $H_m = [H_{1,m}, H_{2,m}, \dots, H_{K,m}]$ ;  $b(t) = [b_1(t),$

$b_2(t), \dots, b_K(t)]^T$ ;  $A = \text{diag}(\sqrt{A_1}, \sqrt{A_2}, \dots, \sqrt{A_K})$  是由接收到的 $K$ 个用户信号幅度组成的对角矩阵。各个天线分支接收到的频域信号将被送入GA环节进行进一步优化处理。假定GA生成的种群中第 $p$ 个个体(对发射信号 $b(t)$ 的估计)为 $\hat{b}_p(t)$ , 可定义该个体对第 $m$ 个天线分支的代价函数为 $c_m(\hat{b}_p(t))$ 。本文选择代价函数 $c_m(\hat{b}_p(t))$ 分别为误差平方、LLF和相位误差平方和, 即:  $-\|y_m - H_m A \hat{b}_p\|^2$ ,  $2 \text{Re}(\hat{b}_p^H A H_m^H y_m) - \hat{b}_p^H A H_m^H H_m A \hat{b}_p$  和  $-\left\| \frac{y_m}{\|y_m\|} - \frac{H_m A \hat{b}_p}{\|H_m A \hat{b}_p\|} \right\|^2$ 。各天线分支按照使其代价函数最大化的原则确定对发射信号的估计 $\hat{b}(t)$ , 即:

$$\hat{b} = \arg \left\{ \max_{\hat{b}_p} [c_m(\hat{b}_p)] \right\} \quad (4)$$

由于不同接收天线间的衰落相互独立, 通常有 $c_1(\hat{b}_p) \neq c_2(\hat{b}_p)$ 。在存在深度衰落时, 这将导致由不同天线分支代价函数得出的发射信号估计不一致, 即有:

$$\arg \left\{ \max_{\hat{b}_p} [c_1(\hat{b}_p)] \right\} = \hat{b} \neq \arg \left\{ \max_{\hat{b}_p} [c_2(\hat{b}_p)] \right\} \quad (5)$$

对这种多元优化问题, 常规的检测方案将各个天线分支的代价函数之和作为其代价函数<sup>[9]</sup>, 即:

$$c(\hat{b}_p) = \sum_{m=1}^2 c_m(\hat{b}_p) \quad (6)$$

## 2 基于遗传算法的多用户检测

本节针对多天线分集接收MC-CDMA系统的特点提出了基于遗传算法的多用户检测方案。该方案首先随机生成个体总数为 $P$ 的初始种群, 种群中每一个个体代表一种发射信号可能的估计, 如种群中的第 $p$ 个个体可以表示为 $\hat{b}_p = [\hat{b}_{p,1}, \hat{b}_{p,2}, \dots, \hat{b}_{p,K}]^T$ 。GA通过在当前种群选择一定数目的个体并通过GA操作生成下一代种群, 并在多次种群进化后获得优化解。由于在进化过程中个体的选择直接决定了下一代种群的质量, 从而决定了GA的性能, 本文对两种个体选择机制进行了研究。在第一种个体选择机制中, GA种群中各个个体的匹配度函数 $f(\hat{b}_p)$ 为各天线分支代价函数之和, 即 $f(\hat{b}_p) = c(\hat{b}_p)$ , 这与常规检测方案的代价函数是一致的<sup>[8]</sup>。当前种群中具有最高匹配度的 $T$  ( $2 \leq T < P$ )个个体将被选中并按GA操作生成下一代种群。

第二种个体选择机制则按照Pareto优化原则选

择个体。在选择个体时,当前种群中处于支配地位的全部个体将被选中,而处于受支配地位的个体将不会被选中。在这种个体选择机制中,种群中的第 $p$ 个个体的匹配度函数定义为:

$$f(\hat{\mathbf{b}}_p)=[c(\hat{\mathbf{b}}_p),c_1(\hat{\mathbf{b}}_p),c_2(\hat{\mathbf{b}}_p)]$$

第 $p$ 个个体被认为是受到第 $q$ 个个体的支配,当且仅当满足下列关系<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} \forall m \in \{1,2\}: c_m(\hat{\mathbf{b}}_q) \geq c_m(\hat{\mathbf{b}}_p) \\ \wedge \exists n \in \{1,2\}: c_n(\hat{\mathbf{b}}_q) > c_n(\hat{\mathbf{b}}_p) \end{cases} \quad (7)$$

如果某个个体按照式(7)的定义不受种群中任何其他个体的支配,则该个体被认为是处于支配地位。当前种群中所有 $T$ 个处于支配地位的个体将被选中进行下一步操作。由于在进化过程中,每一代种群中处于支配地位的个体数 $T$ 不固定,当种群中只有一个个体处于支配地位时,处于次支配地位的个体将被选中,以保证实际的 $T$ 不小于2。

从当前种群中选出的 $T$ 个个体将根据一定的概率按照均匀交叉原则<sup>[9]</sup>两两进行交叉配对并形成 $P$ 个新的个体。在进行交叉配对时,第 $t$ 个个体被选中的概率根据均方差缩放原则由其代价函数 $c(\hat{\mathbf{b}}_t)$ 决定<sup>[10]</sup>。在进行交叉配对时,先随机生成一个与个体等长度的二进制交叉掩码序列。两个个体在掩码序列元素为“1”的对应位置交换元素,而在掩码序列元素为“0”的位置不发生交换。交叉配对后生成个体的每一位元素按概率 $p_m$ 进行基因突变成新的个体。在生成 $P$ 个新个体后,用父代中的精英个体替换掉这 $P$ 个个体中代价函数 $c(\hat{\mathbf{b}}_p)$ 最小的个体,从而形成新的种群。按上述方法,种群不断进化,并在经过 $Y$ 代进化后选出最后一代种群中代价函数 $c(\hat{\mathbf{b}}_p)$ 最大的个体作为最终的结果。

### 3 仿真结果

本文对基站接收端使用两个接收天线的MC-CDMA系统上行链路中基于遗传算法的多用户检测方案进行了仿真验证。考虑上行同步的MC-CDMA系统,各用户终端使用单个发射天线,采用BPSK调制方式,使用正交Walsh码作为扩频码。仿真中设定信道为两径等增益衰落信道( $L=2$ ),每条径的幅度服从瑞利分布,相位服从 $[0,2\pi]$ 间的均匀分布,且不同发射-接收天线对之间的信道系数相互独立,假定基站接收端已知各用户的信道信息。

图2给出了在子载波数目 $N=16$ 、用户数 $K=12$ 时系统采用不同代价函数与个体选择机制组合时的误

比特率(BER)性能。仿真中设定种群进化代数 $Y=10$ ,图中分别以 $S_1$ 和 $S_2$ 代表第一种和第二种个体选择机制。从图2可以看出,不同代价函数与 $S_2$ 组合的BER性能要远远优于与 $S_1$ 组合的BER性能。在与 $S_2$ 组合时,基于LLF和误差平方两种代价函数的BER性能几乎一致,但相比基于相位误差平方函数的组合有一定的性能下降。在 $10^{-3}$ 级别的BER和种群个体数目 $P=20$ 时,基于相位误差平方组合的BER性能要比基于其他两种代价函数组合的BER性能有大约1 dB的性能增益。在 $2 \times 10^{-4}$ 级别的BER和种群个体数目 $P=30$ 时,这种BER性能差距进一步扩大到约3 dB,随着种群个体数目继续增加,差距可以进一步增大。因此,基于相位误差代价函数与 $S_2$ 组合的BER性能要优于其他代价函数与两种个体选择机制的组合。

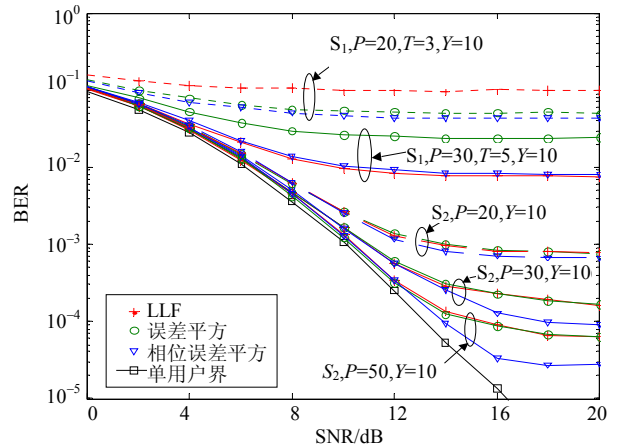


图2 不同代价函数与个体选择机制组合时的BER性能,种群进化代数 $Y=10$ ,  $p_m = 0.1$

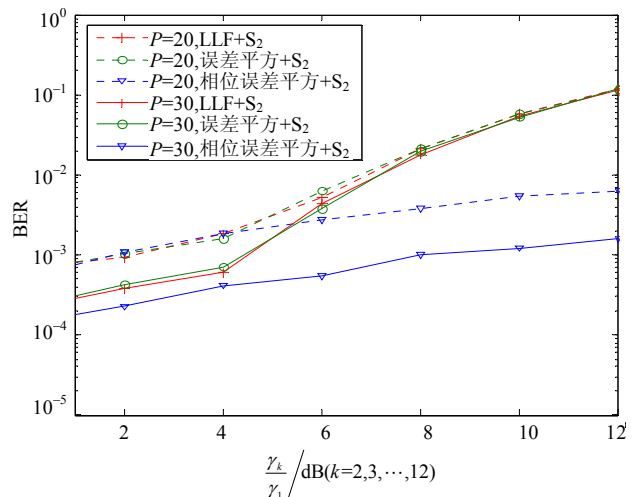


图3 存在远近效应时不同代价函数与 $S_2$ 组合的BER性能,  $Y=10$ ,  $p_m = 0.1$ ,  $K=12$

图3给出了存在远近效应时期望用户的BER性能。仿真中设定期望用户的信噪比 $\bar{\gamma}_1 = 16$  dB,而基站接收到的其他用户功率与期望用户功率的比值

$\bar{\gamma}_k / \bar{\gamma}_1$ 在0~12 dB范围内变化。从图3可以看出,基于相位误差平方与 $S_2$ 组合的BER性能在存在远近效应时有所下降,但仍要好于其他两种代价函数与 $S_2$ 的组合。

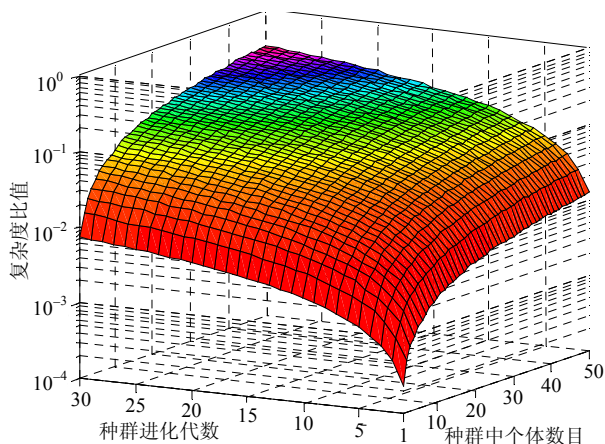


图4 相位误差平方函数与 $S_2$ 组合的复杂度与最优化多用户检测复杂度的比值,  $K=12$

在最优化MUD中,将对 $2^K$ 种可能的解进行搜索,计算复杂度为 $[2K(K+N)+5K+1]2^K$ 。对GA-MUD,其计算复杂度主要由搜索的个体数目决定。当种群进化代数为 $Y$ ,每代种群含 $P$ 个个体时,基于相位误差平方函数与 $S_2$ 组合的计算复杂度为 $[2K(K+N)+5K+1]PY$ 。因此,GA-MUD的计算复杂度直接取决于用户数 $K$ 、 $P$ 和 $Y$ ,而最优化MUD的复杂度随用户数 $K$ 的增加呈指数增长,其计算复杂度远远高于GA-MUD。图4给出了当用户数 $K=12$ 时,基于相位误差平方函数与 $S_2$ 组合的GA-MUD与最优化MUD计算复杂度的比值关系。从图4可以看出,当 $P=30$ , $Y=10$ 时,GA-MUD的计算复杂度仅相当于最优化MUD计算复杂度的7%,而此时GA-MUD已经可以获得相当好的BER性能(如图2所示)。通过设置不同的种群进化代数和种群个体数目,系统可进一步在性能与复杂度之间进行有效配置。

## 4 结束语

本文提出了频率选择性信道下使用多天线分集接收的MC-CDMA系统上行链路中基于遗传算法的多用户检测方案。针对LLF、误差平方和相位误差

平方3种不同的代价函数,研究了两种不同的个体选择机制对GA多用户检测的性能影响。仿真结果表明,基于相位误差平方函数和按照Pareto优化准则进行的个体选择机制的组合能够提供最佳的BER性能和抗远近效应性能,且相比最优化多用户检测大大降低了复杂度。通过设定不同的遗传算法种群个体数目和种群进化代数,利用该方案可以在性能与复杂度之间实现灵活的系统设计。

## 参 考 文 献

- [1] STEINER B. Uplink performance of a multicarrier-CDMA mobile radio system[C]//IEEE Proc of VTC1997. Phoenix, Ax, UAS: IEEE, 1997, 3: 1902-1906.
- [2] CINIMI L J. Analysis and simulation of digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing [J]. IEEE Trans Commun, 1985, 33(7): 665-675.
- [3] VERDU S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1986, 32(1): 85-96.
- [4] JUNTTI M J, SCHLOSSER T, LILLEBERG J. Genetic algorithms for multiuser detection in synchronous CDMA [C]//IEEE Proc Int Symp Information Theory Ulm, Germany: IEEE, 1997, 3: 492-495.
- [5] WANG X F, LU W S, ANTONIOU A. A genetic algorithm-based multiuser detector for multiple-access communications[C]//IEEE Proc Int Symp Circuits and Systems. Monterey, CA, UAS: IEEE, 1998, 4: 534-537.
- [6] LI Z, JUNTTI M J, LATVA-AHO M. Genetic algorithm based frequency domain multiuser detection for MC-CDMA systems[C]//IEEE Proc of VTC2005. Dallas TX, UAS: IEEE, 2005, 2: 983-987.
- [7] YEN K, HANZO L. Antenna-diversity-assisted genetic-algorithm-based multiuser detection schemes for synchronous CDMA systems[J]. IEEE Trans Commun, 2003, 51(3): 366-370.
- [8] ZITZLER E, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach[J]. IEEE Trans Evol Comput, 1999, 3(4): 257-271.
- [9] FAWER U, AAZHANG B. A multiuser receiver for code-division multiple-access communications over multipath channels[J]. IEEE Trans Commun, 1995, 43(2): 1556-1565.
- [10] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. MA: Addison-Wesley, 1989.

编辑 漆 蓉