

分集接收的 STBC-MC-CDMA 系统中基于 PSO 算法的多用户检测

刘洪武 冯全源

(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)

摘要: 该文提出了一种使用多天线分集接收的空时分组码多载波码分多址(STBC-MC-CDMA)系统中基于粒子群优化(PSO)算法的多用户检测(MUD)方案。当采用多天线分集接收时,各个天线接收的信号经历了相互独立的衰落,导致不同天线分支对应的匹配度函数相互独立。为解决多天线分集接收的多目标优化问题,提出了虚拟 Pareto 前端的概念,并使粒子按照 Pareto 优化准则进行速度和位置更新。仿真结果表明,所提方案获得了增强的开发和探索能力,其性能优于常规 PSO 算法和多目标遗传算法。

关键词: 空时分组码; 天线分集; 多载波码分多址; 粒子群优化算法; 多用户检测

中图分类号: TN914.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0045-04

Particle Swarm Optimization-Based and Receive-Diversity-Aided Multiuser Detection for STBC MC-CDMA Systems

Liu Hong-wu Feng Quan-yuan

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A Particle Swarm Optimization (PSO) based Multiuser Detection (MUD) is proposed for the receive-diversity-aided and Space-Time Block Coded Multi-Carrier Code-Division Multiple-Access (STBC-MC-CDMA) systems. Due to the receive-diversity, the signals received at the different antennas are faded independently, resulting in an independent cost function for each antenna. To resolve the multi-objective dilemma when choosing one signal estimation for multiple receive antenna-branches, the virtual Pareto front is introduced, and each particle updates its velocity and position in a Pareto optimal way. Simulations show that the proposed scheme has the enhanced capabilities of exploration and exploitation and has better performance than the conventional PSO and multi-objective genetic algorithm.

Key words: Space-Time Block Coding (STBC); Antenna-diversity; MC-CDMA; PSO algorithm; MUD

1 引言

空时分组码-多载波-码分多址(STBC-MC-CDMA)系统将 STBC 与 MC-CDMA 相结合,使宽带系统获得了空间分集增益^[1-3]。在 STBC-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,造成了比较严重的多址干扰(MAI)。因此,基站接收端需要采用先进的信号处理技术来获得不同用户的信号估计^[3]。由于传统的最优化多用户检测(MUD)^[4]的复杂度随用户数目的增加呈指数增长,难于付诸于实时应用,因此,研究各种具有良好性能和较低复杂度的次优 MUD 方案具有重要意义。

本文研究了使用多天线分集接收的 STBC-MC-CDMA 系统上行链路中基于粒子群优化(PSO)^[5,6]算法的 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匹配度函数相互独立^[7]。针对这一特点,本文提出了一

种采用多天线分集接收的 STBC-MC-CDMA 系统中的基于 PSO 算法的 MUD。不同于常规 STBC 多天线接收时的线性合并方案^[5,6,8],本文对不同天线分支的匹配度函数按 Pareto 准则^[7]进行优化并更新粒子速度和位置,独立利用了不同天线分支信号携带的有用信息。

2 信号模型

考虑同步模式下的 STBC-MC-CDMA 系统上行链路,假设在同一小区同一频率同一时隙同时有 K 个激活用户。各个用户端使用两个发射天线, BPSK 调制,采用 Alamouti 方案^[8]进行空时编码。假定基站接收端使用 M 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。以第 k 个用户为例,假定系统的子载波数目和扩频因子都为 S ,输入的符号流经过空时分组编码后形成两路符号流。用户 k 使用归一化的扩频码 $\mathbf{c}^{(k,1)} = [c^{(k,1)}(1), \dots, c^{(k,1)}(S)]^T$ 和 $\mathbf{c}^{(k,2)} = [c^{(k,2)}(1), \dots, c^{(k,2)}(S)]^T$ 分别对两路符号流分别进行频域扩频,然后使用 S 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,两路信

号分别从两个天线同时发射出去。

将用户发射天线到基站接收天线间的频率选择性衰落信道建模为 L 阶的 FIR 抽头延迟线模型, 则从第 k 个用户的第 n 个发射天线到基站第 m 个接收天线之间的信道可以表示为

$$\mathbf{h}^{(k,m,n)} = [h^{(k,m,n)}(1), \dots, h^{(k,m,n)}(L), \mathbf{0}_{1 \times (S-L)}]^\top \quad (1)$$

式中 $k = 1, \dots, K$, $m = 1, \dots, M$, $n = 1, 2$ 。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 S 点离散傅里叶变换(DFT)进行解调。假定只有第 k 个用户被激活, 基站接收端第 m 个接收天线分支在两个连续的多载波符号持续期内接收到的等效频域信号可表示^[1,2]

$$\mathbf{y}_m(t) = \mathbf{H}_{k,m} \mathbf{b}_k(t) + \mathbf{n}_m(t) \quad (2)$$

式中 $\mathbf{b}_k(t) = [b_k(2t-1)b_k(2t-1)]^\top$ 为用户 k 在第 t 个空时码块中传输的符号, $\mathbf{H}_{k,m}$ 是等效的频域信道矩阵, 其构成方式为

$$\mathbf{H}_{k,m} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^{(k,1)} \circ \mathbf{H}^{(k,m,1)} & \mathbf{c}^{(k,2)} \circ \mathbf{H}^{(k,m,2)} \\ \mathbf{c}^{(k,2)} \circ \mathbf{H}^{(k,m,2)*} & -\mathbf{c}^{(k,1)} \circ \mathbf{H}^{(k,m,1)*} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{H}^{(k,m,n)}$ 为 $\mathbf{h}^{(k,m,n)}$ 的 S 点的离散傅里叶变换。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

$$\mathbf{y}_m(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{k,m} \mathbf{b}_k(t) + \mathbf{n}_m(t) = \mathbf{H}_m \mathbf{b}(t) + \mathbf{n}_m(t) \quad (4)$$

式中 $\mathbf{H}_m = [\mathbf{H}_{1,m}, \dots, \mathbf{H}_{K,m}]$, $\mathbf{b}(t) = [\mathbf{b}_1^\top(t), \dots, \mathbf{b}_K^\top(t)]^\top$ 。

3 基于粒子群算法的多用户检测

在接收端, 各个天线分支接收到的频域信号被送入 PSO 环节进行优化处理。当 K 个用户采用 BPSK 调制和 Alamouti 空时编码方案时, 系统在每个多载波符号期内要检测 $D = 2K$ 个比特。定义 PSO 种群中的第 i 个粒子的位置为 $\mathbf{x}_i = [x_{i1}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD}]^\top$, 其中 $x_{id} \in \{0, 1\}$ 。第 i 个粒子的速度为 $\mathbf{v}_i = [v_{i1}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD}]^\top$, 其中 $v_{id} \in [-v_{\max}, +v_{\max}]$ 。将估计信号与接收信号之间平方误差的负值作为粒子的匹配度函数, 即第 i 个粒子对应于第 m 个天线分支的匹配度函数为

$$f_m(\mathbf{x}_i) = -\|\mathbf{y}_m - \mathbf{H}_m \mathbf{x}_i\|^2 \quad (5)$$

各天线分支按照使其匹配度函数最大化的原则确定对发射信号的估计 $\hat{\mathbf{x}}$, 即

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \left\{ \max_{\mathbf{x}_i} [f_m(\mathbf{x}_i)] \right\} \quad (6)$$

由于不同接收天线间的衰落相互独立, 通常有 $f_m(\mathbf{x}_i) \neq f_{m'}(\mathbf{x}_i)$ 。在存在深度衰落时, 这将导致由不同天线分支匹配度函数得出的发射信号估计不一致, 即有

$$\arg \left\{ \max_{\mathbf{x}_i} [f_m(\mathbf{x}_i)] \right\} = \hat{\mathbf{x}} \neq \arg \left\{ \max_{\mathbf{x}_i} [f_{m'}(\mathbf{x}_i)] \right\} \quad (7)$$

对这种多目标优化问题, 常规的空时分组码多用户检测方案将各个天线分支的匹配度函数进行线性合并, 并将其作为新的匹配度函数^[5,7], 即

$$f(\mathbf{x}_i) = \sum_{m=1}^M f_m(\mathbf{x}_i) \quad (8)$$

并按选择使式(8)最大化的 \mathbf{x}_i 将作为对发射信号的判决:

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \left\{ \max_{\mathbf{x}_i} [f(\mathbf{x}_i)] \right\} \quad (9)$$

对 PSO 算法, 记第 i 个粒子飞行过程中具有最佳匹配度的位置(pbest)为 p_i , 当前群体中具有最佳匹配度的粒子位置(gbest)为 p_g , 在第 $t+1$ 步迭代中, 第 i 个粒子按如下方程更新速度:

$$v_{id}^{t+1} = v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (10)$$

其中 t 表示迭代次数, r_1 和 r_2 是为两个在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数。 c_1 和 c_2 是为大于零的加速系数且满足 $c_1 + c_2 = 4$, 通常取 $c_1 = c_2 = 2$ ^[5,9]。在更新速度后, PSO 依概率对粒子进行位置更新。第 i 个粒子选择 x_{id}^{t+1} 为“1”的概率为

$$S(v_{id}^{t+1}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id}^{t+1})} \quad (11)$$

即有

$$x_{id}^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{若 } \rho < S(v_{id}^{t+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中 ρ 是 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数。在上述速度更新策略中, PSO 只采用了一个 pbest 和一个 gbest, 每个粒子的匹配度为各天线分支的匹配度的线性合并, 本文称其为常规 PSO^[5,9]。

根据多天线分集接收的特点, 本文定义每个粒子的匹配度为矢量 $[f_1(x_i), \dots, f_M(x_i), f(x_i)]$, 其中前 M 个值分别是 M 个天线分支对应的匹配度, 即式(5); 第 $M+1$ 个值是所有 M 个天线分支匹配度的线性合并, 即式(8)。由于各天线分支经历相互独立的衰落, 在绝大多数情况下, 群体中无法找到一个粒子 i 使其 M 个天线分支的匹配度均为最优。在这种多目标优化问题中, 第 i 个粒子被认为是受到第 j 个粒子的支配当且仅当满足下列关系^[10]

$$\begin{aligned} \forall m \in \{1, \dots, M\} : f_m(\mathbf{x}_j) &\geq f_m(\mathbf{x}_i) \\ \exists m' \in \{1, \dots, M\} : f_{m'}(\mathbf{x}_j) &> f_{m'}(\mathbf{x}_i) \end{aligned} \quad (13)$$

如果某个粒子按照式(13)的定义不受群体中任何其它粒子支配, 则该粒子被认为是一个 Pareto 优化解或处于非受支配(non-dominated)地位。当 PSO 算法收敛后, 所有 Pareto 优化的集合称为 Pareto 优解集, 用 \mathcal{P}^* 来表示, 集合 $\mathcal{PF}^* = \{[f_1(\mathbf{x}_i), \dots, f_M(\mathbf{x}_i)] \mid \mathbf{x}_i \in \mathcal{P}^*\}$ 称为 Pareto 前端。对于多用户检测, 其目的不是求解出 Pareto 前端, 而是找出 Pareto 前端中使匹配度 $f(\mathbf{x}_i)$ 最大一个粒子。为此, 本文定义在 PSO 迭代过程中, 由所有到访位置中的非受支配位置形成的集合为虚拟 Pareto 前端。特别地, 若虚拟 Pareto 前端由群体到访位置中的非受支配位置形成, 记为 \mathcal{PF}_g^* ; 若虚拟 Pareto 前端由粒子 i 到访位置中的非受支配位置形成, 记为 \mathcal{PF}_i^* 。根据非受支配的定义, 在 PSO 每次迭代中, 使匹配度 $[f_1(x_i), \dots, f_M(x_i), f(x_i)]$ 所有元素均为最大的位置一定在虚拟

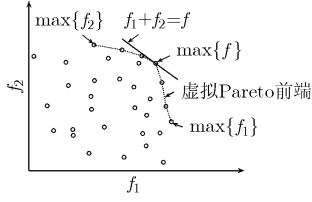


图1 一次随机实现的二维虚拟 Pareto 前端

Pareto 前端上；使 M 个天线分支匹配度最大的位置分别是虚拟 Pareto 前端的 M 个端点。作为示例，图 1 给出了一次随机实现的 PSO 迭代中形成的二维虚拟 Pareto 前端。

为充分利用各天线分支信号携带的有用信息，在 PSO 的迭代中，每个粒子选取一组 pbest 集和一组 gbest 集来进行速度更新。在 pbest 集中，前 M 个元素分别为 \mathcal{PF}_i^* 的 M 个端点，第 $M+1$ 个元素为 \mathcal{PF}_i^* 中使 $f(\mathbf{x}_i)$ 最大的点。在 gbest 集中，前 M 个元素分别为 \mathcal{PF}_g^* 的 M 个端点，第 $M+1$ 个元素为 \mathcal{PF}_g^* 中使 $f(\mathbf{x}_i)$ 最大的点。在第 $t+1$ 步迭代中，第 i 个粒子按如下方程更新速度：

$$v_{id}^{t+1} = v_{id}^t + \sum_{m=1}^{M+1} c_{1m} r_{1m} (p_{id}^{(m)t} - x_{id}^t) + \sum_{m=1}^{M+1} c_{2m} r_{2m} (p_{gd}^{(m)t} - x_{id}^t) \quad (14)$$

式中 r_{1m} 和 r_{2m} 为两个在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数， c_{1m} 和 c_{2m} 为大于零的加速系数且满足 $\sum c_{1m} + c_{2m} = 4$ 。在上述速度更新策略中，第 $M+1$ 个 pbest 和第 $M+1$ 个 gbest 继承了常规 PSO 的探索与开发能力，而前 M 个 pbest 和前 M 个 gbest 继带来了额外的探索与开发能力。为了平衡上述方法的探索与开发能力且满足约束 $\sum c_{1m} + c_{2m} = 4$ ，本文设置

$$\left. \begin{aligned} c_{1(M+1)} &= c_{2(M+1)} = 1 \\ c_{1m} &= c_{2m} = 1/M, \quad 1 \leq m \leq M \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

在 PSO 迭代结束后， p_g^{M+1} 对应的解就是使 $f(\mathbf{x}_i)$ 最大的粒子的位置。对本文所提方法，由于按照使 $[f_1(x_i), \dots, f_M(x_i), f(x_i)]$ 每个元素最大化的准则来确定 pbest 集和 gbest 集，避免了基于 Pareto 优化的 GA (GA-Pareto) 方法所需的非受支配地位的判别与排序^[10]。

4 仿真结果

本节对基站接收端使用多天线分集接收的 STBC-MC-CDMA 系统上行链路中的 PSO-MUD 进行了仿真验证，并与最小均方误差(MMSE)方法^[2]、匹配滤波方法、解相关检测、单用户界、最大似然检测(MLD)^[4]以及 GA-Pareto 方法^[7]进行了对比。由于 MMSE 和解相关检测均需对信道相关矩阵求逆，当采用 M 个接收天线且使用 Alamouti 空时码时，对矩阵求逆的复杂度为 $\mathcal{O}(8M^3S^3)$ ，在实际中几乎不可能实现。为统一起见，在仿真匹配滤波、解相关检测和 MMSE 方法时，均只考虑了单一接收天线的情况。

考虑上行同步的 STBC-MC-CDMA 系统，基站接收端

使用 M 个 ($M=2,3$) 接收天线，各用户终端使用两个发射天线，采用 Alamouti 空时编码方案和 BPSK 调制，采用正交 Walsh 码作为扩频码，且同一用户不同天线分支使用了不同的扩频码。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。假定不同发射-接收天线对之间的信道系数相互独立，基站接收端已知各用户的信道信息，采用了理想功率控制。对 GA-Pareto 方法，其参数设置与文献[7]一致。

图 2 给出了在系统使用 2 个接收天线 ($M=2$)，子载波数目 $S=16$ ，用户数 $K=8$ 和迭代次数 $Y=20$ 时算法具有不同种群数目 (A) 时的 BER 性能。从图 2 可以看出，基于 Pareto 优化的 PSO 方法 (PSO-Pareto) 的 BER 性能要远远好于基于代价函数线性合并的 PSO 方法，而后者正是文献[5]中的检测方法在 STBC-MC-CDMA 系统中的应用。在种群数目较小的情况下 ($A=15$)，PSO-Pareto 方法在迭代 20 次时的 BER 性能已非常接近单用户界。此外，从图 2 还可看出，即使是基于代价函数线性合并的 PSO 方法的 BER 性能也要优于文献[7]所提的 GA-Pareto 方法。对于 GA 方法和 PSO 方法，其 BER 随信噪比 (SNR) 的增加而降低，但在 SNR 达到一定数值后趋于收敛，均出现了 BER 平台，这是因为算法的性能受到了只包含有限个个体的随机初始种群的限制。

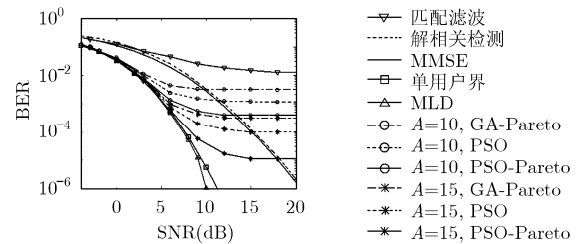
图2 BER 性能, $M=2$, $Y=20$

图 3 给出了在系统使用 2 个接收天线 ($M=2$)，子载波数目 $S=16$ ，用户数 $K=8$ 和种群数目 $A=15$ 时算法的收敛性能。从图 3 可以看出，PSO-Pareto 方法具有最快的收敛速度和最好的稳态性能。在 $Y=25$ 时，PSO-Pareto 方法就收敛到了 MLD 的性能，而 PSO 方法和 GA-Pareto 方法分别需要 35 和 40 次迭代才能达到收敛。

图 4 给出了在系统使用 3 个接收天线 ($M=3$)，子载波数目 $S=16$ ，用户数 $K=8$ 和迭代次数 $Y=20$ 时算法的 BER 性能。从图 4 可以看出，当 $A=15$ ， $Y=20$ 时，PSO-Pareto 方法的 BER 性能在低 SNR 范围内 (≤ 6 dB) 已逼近单用户界。此外，当 $M=3$ 时，PSO-Pareto 方法与 PSO 方法间的 BER 性能差距相比 $M=2$ 时更大。仿真结果还显示，随着接收天线数目的进一步增加，PSO-Pareto 方法与 PSO 方法间的 BER 性能差距进一步增大 (限于篇幅，文中未给出相应的数值结果)，这表明本文所提的 PSO-Pareto 方法更适合于采用多天线分集接收的系统。

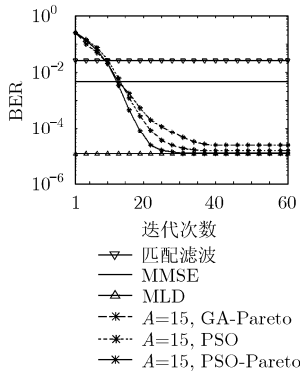


图3 算法的收敛性能,
M=2, SNR=9dB

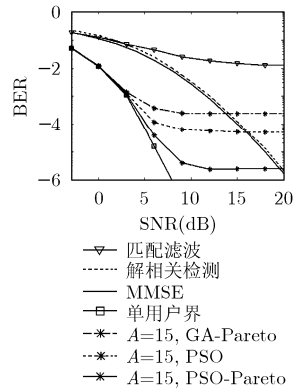


图4 BER性能,
M=3, Y=20

在采用 Alamouti 空时编码方案和 BPSK 调制的 MC-CDMA 系统中, 基于 MLD 的最优化 MUD 将对 2^{2K} 种可能的解进行搜索, 其计算复杂度为 $[4K(2K+S)+10K+1]2^{2K}$ 。对 PSO-MUD, 其计算复杂度主要由搜索的粒子到访问位置数目决定。当算法迭代次数为 Y , 种群数目为 A 时, PSO-Pareto 方法的复杂度为 $[4K(2K+S)+10K+1]AY$ 。因此, PSO-MUD 的计算复杂度直接取决于用户数 K , A 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 PSO-MUD。对于载波数目 $S=16$, 用户数 $K=8$ 的系统, 当 $A=15$, $Y=20$ 时, PSO-Pareto 方法的计算复杂度仅相当于最优化 MUD 计算复杂度的 0.0046, 而此时 PSO-Pareto 方法的 BER 性能已逼近于单用户界(如图 2、图 4 所示)。通过设置不同的种群数目和算法迭代次数, 系统可进一步在性能与复杂度之间进行有效配置。

5 结束语

本文提出了一种使用多天线分集接收的 STBC-MC-CDMA 系统上行链路中基于 PSO 算法的多用户检测方案。针对多天线分集接收的多目标优化问题, 提出了虚拟 Pareto 前端的概念, 使粒子按照 Pareto 优化准则进行速度和位置更新。仿真结果表明, 所提方案独立利用了不同天线分支的信道信息, 获得了增强的开发和探索能力, 其性能优于常规粒子群算法和多目标遗传算法。在子载波数为 16 的半载系统中, 当 BER 性能逼近单用户界时, 基于 Pareto 优化的 PSO-MUD 的复杂度仅相当于最优化搜索 MUD 复杂度的 0.0046。通过设定不同的种群数目和迭代次数, 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] Auffray J M and Helard J F. Performance of multicarrier CDMA technique combined with space-time block coding over Rayleigh channel [C]. IEEE Proc. of ISSSTA, Prague, Czech Republic, 2002, 2: 348-352.
- [2] Wei S, Li H, and Amin M. MMSE detection for space-time coded MC-CDMA [C]. IEEE Proc. of ICC2003, Alaska, USA, 2003, 5: 3452-3456.
- [3] 曾雁星, 殷勤业, 张一闻等. 空时分组编码多载波码分多址系统的直接解码[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(8): 1258-1263. Zeng Yan-xing, Yin Qin-ye, and Zhang Yi-wen. Direct decoding for space-time block coded MC-CDMA systems [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(8): 1258-1263.
- [4] Verdu S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1986, 32(1): 85-96.
- [5] Zhao Y and Zheng J L. Multiuser detection employing particle swarm optimization in space-time CDMA systems[C]. IEEE Proc. of ISCIT2005, Beijing, China, 2005, 2: 940-942.
- [6] Du Y and Chan K T. Feasibility of applying genetic algorithms in space-time block coding multiuser detection systems [C]. Proc. of ICWOC, Banff, Alberta, Canada, 2003, 3: 469-473.
- [7] Yen K and Hanzo L. Antenna-diversity-assisted genetic-algorithm-based multiuser detection schemes for synchronous CDMA systems [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 51(3): 366-370.
- [8] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [9] Zhao Y and Zheng J. Particle swarm optimization algorithm in signal detection and blind extraction [C]. IEEE Proc. of 7th ISPAN, Hongkong, China, 2004, 1: 37-41.
- [10] Zitzler E and Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach [J]. *IEEE Trans. on Evol. Comput.*, 1999, 3(4): 257-271.

刘洪武: 男, 1975 年生, 博士, 从事移动天线与智能天线系统、空时编码、无线通信信号处理的研究。

冯全源: 男, 1963 年生, 教授, 从事移动天线与智能天线系统、微波及毫米波技术的研究。