

智能天线 MC-CDMA 系统中空频联合盲多用户检测算法

傅洪亮^{1,2}, 鄢广增¹

(1. 南京邮电大学通信工程系, 南京 210003; 2. 河南工业大学信息科学与工程学院, 郑州 450052)

[摘要] 提出了智能天线多载波 CDMA 系统中一种空域和频域联合的盲多用户自适应检测算法, 它是将空域波束形成和频域合并检测合二为一, 使得检测器在空域和频域两维上同时优化, 从而提高了系统的检测性能。对这种空频联合检测算法的误码性能进行了分析, 并与先自适应波束形成然后再进行频域合并的分步算法进行了仿真比较, 仿真结果表明, 提出的空频联合盲多用户自适应检测算法的检测性能优于分步检测算法。

[关键词] 智能天线; 多载波; CDMA; 联合检测

[中图分类号] TN82 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)02-0034-05

1 引言

多载波码分多址 (MC-CDMA) 结合了正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing) 和 CDMA 技术的优点, 其信号可以采用离散傅立叶反变换及变换 (IDFT 或 DFT) 发送和接收而不过多增加发射机和接收机的复杂度, 由于其高效的频谱利用率和对频率选择性信道的鲁棒性, 因此更适用于传输宽带业务, 引起了人们的广泛关注^[1, 2]; 另外, 由于智能天线系统能够有效地对抗多址干扰 (MAI) 而增加系统的容量^[3, 4], 因此, 基于智能天线的 MC-CDMA 系统成为当今研究的热点之一^[5, 6]。

目前, 基于智能天线的 MC-CDMA 系统的接收检测大都分两步进行, 即先通过波束形成将各个天线上的信号合并, 然后再在频域将各个子载波上的信号进行合并; 如 L. M. Tuan^[7] 给出了一种先通过训练序列用 MMSE 算法进行波束形成, 然后进行频域合并检测的算法; 而 Tian Qingjiang^[8] 是先接收信号的相关矩阵估计出信号的阵列响应, 通过已

估出的阵列响应进行波束形成, 然后再根据已估信道参数分别用等增益 (EGC)、最大比 (MRC) 和最小均方误差 (MMSEC) 在频域进行合并。

上述接收算法均是基于先波束形成后频域合并的非盲或半盲算法, 如果信号的阵列响应及信道参数估计存在误差, 势必影响合并检测的效果, 另外, 由于接收合并分两步进行, 将存在误差传递的影响。在信源具有恒模性质 (PSK 或 FSK 调制) 的 MC-CDMA 系统中, 由于恒模算法 (CMA) 不需要训练序列, 更有效地利用了带宽^[9], 因此 DS-CDMA 系统中传统的恒模算法也可以用到 MC-CDMA 中去。笔者提出了智能天线多载波 CDMA 系统中一种空域和频域联合的盲多用户自适应检测算法, 它是将空域波束形成和频域合并检测合二为一, 使得检测器在空域和频域两维上同时优化, 从而提高了系统的检测性能。对这种空频联合检测算法的误码性能进行了分析, 给出了其误码率近似计算公式, 并与先自适应波束形成然后再分别用 EGC, MRC 和 MMSEC 进行频域合并的分步算法进行了仿真比较, 仿真结果表明, 笔者提出的空频联

[收稿日期] 2004-11-22; **修回日期** 2005-03-04

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (60472104); 江苏省教育厅自然科学基金资助项目 (04KJB510094); 江苏省博士创新基金资助项目 (xm04-32)

[作者简介] 傅洪亮 (1965-), 男, 河南郑州市人, 河南工业大学副教授, 南京邮电大学博士生

合盲多用户自适应检测算法的检测性能优于分步检测算法。接收机系统框图如图 1 所示。

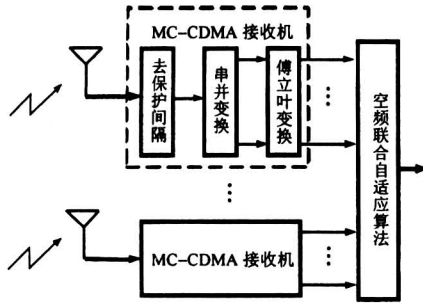


图 1 接收机系统框图

Fig.1 The diagram of receiver

2 信号模型

考虑具有 K 个用户的智能天线 MC - CDMA 系统，第 k 个用户的发送信号可表示为：

$$s_k(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=1}^N [A_k b_k(i) c_k(n) \cos(2\pi f_n t + \varphi_{kn}) p_c(t - iT_b - nT_c)] \quad (1)$$

其中， $A_k, b_k(i)$ 分别表示第 i 个符号的幅度及信息比特， $N = T_b/T_c$ 代表扩频增益，也等于子载波数， T_b, T_c 分别是符号和码片周期； f_n 和 φ_{kn} 分别是第 n 个子载波频率及相位， $c_k = N^{-1/2} [c_k(1), c_k(2), \dots, c_k(n), \dots, c_k(N)]^T$ 代表第 k 个用户的扩频码(其中 $c_k(n) = \pm 1$)， $p_c(t)$ 是矩形脉冲波形，表达式为

$$p_c(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

对于频率选择性信道，假设第 k 个用户的信道冲激响应为 $h_k(\tau, t)$ ，路径数目为 L_k ，则其等效低通冲激响应为：

$$h_k(\tau, t) = \sum_{l=1}^{L_k} a_{kl} g_{kl}(t) \delta(\tau - \tau_{kl}) \quad (3)$$

其中 $a_{kl}, g_{kl}, \tau_{kl}$ 分别表示第 k 个用户在第 l 条路径上的阵列矢量、复幅度衰减和时延。对于等距线阵，假设天线阵列中有 M 个阵元，每个阵元相距 d ，则 $a_{kl} = [a_{kl1}, a_{kl2}, \dots, a_{klm}, \dots, a_{klM}]^T = [1, \exp(-j(2\pi/\lambda)d \sin \theta_{kl}^1), \dots, \exp(-j(2\pi/\lambda)(m-1)d \sin \theta_{kl}^1), \dots, \exp(-j(2\pi/\lambda)(M-1)d \sin \theta_{kl}^1)]^T$ ，其中 λ 为载频波长， θ_{kl}^1 表示第 k 个用户第 l 条路径

到达第一个阵元的入射角。信号经过信道后， K 个用户在天线阵列上的接收信号可表示为 $r(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_m(t), \dots, r_M(t)]^T$ ，

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{+\infty} s_k(t - \tau) * h_k(\tau, t) d\tau + \eta(t) \quad (4)$$

其中 $*$ 表示卷积， $\eta(t) = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m, \dots, \eta_M]^T$ 是均值为 0、协方差矩阵为 $\sigma^2 I$ 的高斯白噪声。接收信号 $r(t)$ 经过子载波信号分离后，在第 i 个符号周期内可表示为一个矩阵 $r(i) = [r_1(i), r_2(i), \dots, r_n(i), \dots, r_N(i)]$ ，其中 $r_n(i)$ 表示第 n 个子载波上的矢量信号， $r_n(i) = [r_{1n}(i), r_{2n}(i), \dots, r_{mn}(i), \dots, r_{Mn}(i)]^T$ ，而 $r_{mn}(i)$ 为第 n 个子载波第 m 个阵元上的接收信号。

3 空频联合检测算法及误码性能分析

3.1 空频联合检测算法

重新构造接收信号矩阵，将 $r(i)$ 转换成一个列向量 $r_p(i)$ 的表示形式为

$$r_p(i) = [r_1^T(i), r_2^T(i), \dots, r_m^T(i), \dots, r_M^T(i)]^T \quad (5)$$

其中 $r_m(i) = [r_{m1}(i), r_{m2}(i), \dots, r_{mn}(i), \dots, r_{mN}(i)]^T$ 。

设用户 1 是期望用户，构造用户 1 扩频码对角矩阵，令

$$Q = N^{-1/2} \text{diag}(q_{11}, q_{22}, \dots, q_{nn}, \dots, q_{NN}),$$

$$Q = \text{diag}(Q_{11}, Q_{22}, \dots, Q_{mm}, \dots, Q_{MM}) \quad (6)$$

其中 $Q_{11} = Q_{22} = \dots = Q_{mm} = \dots = Q_{MM} = q$ 。

$$r_d(i) = Q r_p(i) \quad (7)$$

将常数模算法运用于处理后信号 $r_d(i)$ ，构造 $M \times N$ 维检测器抽头系数矩阵 W

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_m, \dots, W_M]^T,$$

其中 $W_m = [w_{m1}, w_{m2}, \dots, w_{mn}, \dots, w_{mN}]^T$ ， w_{mn} 表示第 m 个阵元上第 n 个子载波的检测器抽头系数。将 W 转换成一个列向量

$$w = [W_1^T, W_2^T, \dots, W_m^T, \dots, W_M^T]^T \quad (8)$$

则恒模代价函数可表示为

$$J(w) = E[|w^T r_d - 1|^2] \quad (9)$$

不失一般性，用梯度下降恒模算法，其迭代公式为

$$w(j+1) = w(j) - \mu r_d(j) e^*(j) \quad (10)$$

其中 j 表示迭代次数, μ 是迭代步长, $e(j) = y(j) - y(j)/|y(j)|$ 代表检测器输出与其归一化幅度之差, $y(j)$ 表示检测器输出。

$$y(j) = \mathbf{w}^T(j) \mathbf{r}_d(j) \quad (11)$$

检测器抽头系数 \mathbf{w} 一旦获得, 对于 2PSK 信号, 其判决信息为

$$b_1 = \text{sign}(\text{Re}(\mathbf{w}^T \mathbf{r}_d)) \quad (12)$$

3.2 误码性能分析

假设用户 1 为期望用户, 在一个符号周期内, 式 (11) 可以表示为

$$\begin{aligned} y(j) &= \mathbf{w}^T(j) \mathbf{r}_d(j) = \\ & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_k b_k(j) c_k(n) c_1(n) w_{mn} a_{km} \xi_{kn} + \\ & \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} c_1(n) \eta_{mn} = \\ & \frac{A_1 b_1(j)}{N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} a_{1m} \xi_{1n} + \\ & \frac{1}{N} \sum_{k=2}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_k b_k(j) w_{mn} a_{km} \xi_{kn} c_k(n) c_1(n) + \\ & \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} c_1(n) \eta_{mn} \end{aligned} \quad (13)$$

其中 w_{mn} 表示第 m 个阵元第 n 个子载波上的检测器抽头系数, ξ_{kn} 表示第 k 个用户在第 n 个子载波上的复幅值衰减。式 (13) 中, 第一项是有用信息, 第二项和第三项是多址干扰和噪声。联合检测后, 应使第一项最大, 同时使第二项和第三项最小。令 $g_{mn} = w_{mn} a_{1m} \xi_{1n}$, 可以断定, $g_{mn} > 0$ 。则式 (13) 变为

$$\begin{aligned} y(j) &= \frac{A_1 b_1(j)}{N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mn} + \\ & \frac{1}{N} \sum_{k=2}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_k b_k(j) g_{mn} a_{1m}^* a_{km} \frac{\xi_{kn}}{\xi_{1n}} c_k(n) c_1(n) + \\ & \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{g_{mn}}{\xi_{1n}} a_{1m}^* c_1(n) \eta_{mn} = y_D + y_1 + y_N \end{aligned} \quad (14)$$

其中上标*表示共轭;

$$y_D = \frac{A_1 b_1(j)}{N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mn}$$

表示期望信息;

$$y_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=2}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_k b_k(j) g_{mn} a_{1m}^* a_{km} \frac{\xi_{kn}}{\xi_{1n}} c_k(n) c_1(n)$$

表示多址干扰;

$$y_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{g_{mn}}{\xi_{1n}} a_{1m}^* c_1(n) \eta_{mn}$$

表示白噪声。对于 y_1 和 y_N , 当 K 和 N 比较大时, 其可假设为均值为零的高斯随机变量, 因此, 当 $b_1(j)$ 取特定值时, $y(j)$ 是个高斯随机变量, 其均值为

$$E_y = \frac{A_1 b_1(j)}{N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E\{g_{mn}\} \quad (15)$$

其中 $E\{\cdot\}$ 表示均值运算, 根据大数定律 (LLN), 设 $g_{\max} = \max\{g_{mn}\}$, ($m = 1, \dots, M$; $n = 1, \dots, N$), $\max\{\cdot\}$ 表示取最大值运算, 因此

$$E_y = M A_1 b_1(j) g_{\max} \quad (16)$$

而 $y(j)$ 的方差为

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_N}^2 \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma_{y_1}^2 &= E[y_1^2] = \\ & \frac{g_{\max}^2 M^2}{N^2} E\left[\sum_{k=2}^K \left|\frac{\mathbf{a}_k^H \mathbf{a}_k}{M}\right|^2 \sum_{n=1}^N \left(A_k \frac{\xi_{kn}}{\xi_{1n}} c_k(n) c_1(n)\right)^2\right] = \\ & \frac{M^2 (K-1) \beta g_{\max}^2 \overline{P_1}}{N^2 \overline{P_1}} \end{aligned} \quad (18)$$

式中 $\beta = \|\mathbf{a}_k^H \mathbf{a}_k / M\|^2 \approx B/2\pi$, B 是阵列波束有效宽度。 $\overline{P_1} = NE [(\xi_{1n})^2]$ 是期望用户的平均功率, $\overline{P_1}$ 是干扰用户的平均功率, $\overline{P_1} = N \max\{A_k^2 E[(\xi_{kn})^2]\}$, ($k = 2, \dots, K$, $n = 1, \dots, N$)。式 (17) 中另一项 $\sigma_{y_N}^2$ 为

$$\sigma_{y_N}^2 = E[y_N^2] = \frac{M \sigma^2 g_{\max}^2}{P_1} \quad (19)$$

假设期望用户信息 $b_1(j) = -1$, 由式 (16)、式 (18) 和式 (19), 则出现错判的概率为

$$\begin{aligned} P_r(M A_1 g_{\max} < y_1 + y_N) &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\left(\frac{M^2 A_1^2 g_{\max}^2}{2} / \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{M^2 (K-1) \beta g_{\max}^2 \overline{P_1}}{N^2 \overline{P_1}} + \frac{M \sigma^2 g_{\max}^2}{P_1}\right)\right)^{1/2}\right) = \\ & \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\left(A_1^2 / \left(\frac{2(K-1) \beta \overline{P_1}}{N^2 \overline{P_1}} + \frac{2\sigma^2}{M \overline{P_1}}\right)\right)^{1/2}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ 。由于 $b_1(j)$ 等概率取 ± 1 , 所以整体误码率就是式 (20)。

4 计算机仿真

将空频联合检测算法和先自适应波束形成, 然后再分别用 EGC, MRC 和 MMSEC 进行频域合并的分步算法在相同环境下进行仿真比较。考虑一个具有 10 个用户、4 个阵元的等距线阵 MC-CDMA 系

统，各个阵元距离 $d = \lambda/2$ ，每个用户到达阵列天线中第一个阵元的入射角从 $5^\circ \sim 185^\circ$ 均匀分布，同一用户不同路径的入射角相差 $2^\circ \sim 6^\circ$ 随机分布，信源为 2 PSK 信号；信道为四径瑞利衰落信道，即 $L_k = 4$ ，路径时延 $\tau_{k1}, \tau_{k2}, \tau_{k3}, \tau_{k4}$ 分别为 $0, 2T_c, 4T_c, 6T_c$ ；多址干扰 $MAI = 10 \lg(A_k^2/A_1^2)$ 为 10 dB, $k = 2 \sim 10$ ；SNR = 10 dB；扩频码采用 31 位 Gold 码。仿真结果如图 2 至图 5 所示（接收 10 000 个符号取平均）。

图 2、图 3 和图 4 分别是当 $M = 2, K = 10, M = 4, K = 10$ 和 $M = 4, K = 20$ 时 4 种算法的误码率比较图。

从图 2 中可以看出，当阵元数比较少时，联合检测算法和先自适应波束形成后采用 MRC 或 EGC

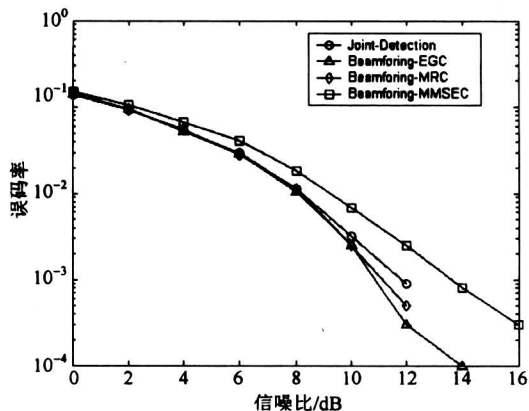


图 2 $M = 2, K = 10$ 时联合算法与分步算法误码性能比较

Fig.2 The BER comparison of joint algorithm and separate algorithm when $M = 2, K = 10$

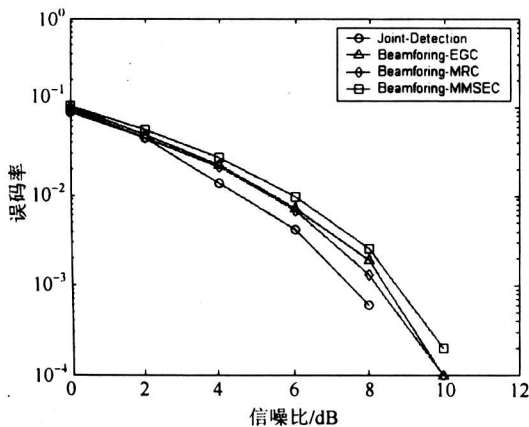


图 3 $M = 4, K = 10$ 时联合算法与分步算法误码性能比较

Fig.3 The BER comparison of joint algorithm and separate algorithm when $M = 4, K = 10$

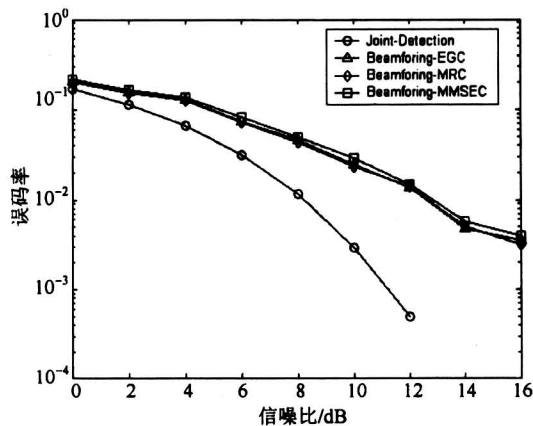


图 4 $M = 4, K = 20$ 时联合算法与分步算法误码性能比较

Fig.4 The BER comparison of joint algorithm and separate algorithm when $M = 4, K = 20$

合并算法的误码性能差不多，但是，从图 3 可以看出，随着阵元数的增加，联合检测的误码率性能明显好于其他 3 种算法；同时，从图 4 中还可以看出，随着用户数的增加，联合检测算法的误码率性能也明显好于其他 3 种算法。

图 5 给出联合检测算法及其分析结果式 (20) 的误码率随用户数增加的仿真比较，可以看出，实际仿真结果的误码性能接近分析结果。

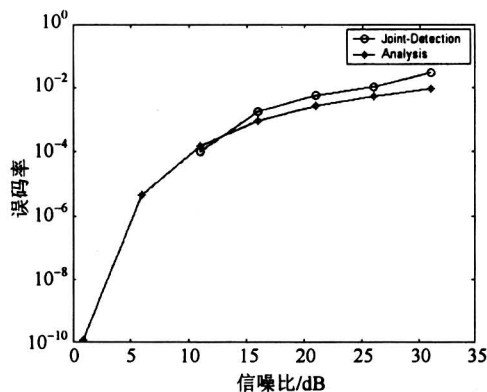


图 5 $M = 4, SNR = 10$ dB 时解析性能和仿真结果比较

Fig.5 The comparison of analysis and simulating result when $M = 4, SNR = 10$ dB

5 结语

提出了智能天线多载波 CDMA 系统中一种空域

和频域联合的盲多用户自适应检测算法,它是将空域波束形成和频域合并检测合二为一,使得检测器在空域和频域 2 维上同时优化,从而提高了系统的检测性能。对这种空频联合检测算法的误码性能进行了分析与先自适应波束形成然后再进行频域合并的分步算法进行了仿真比较,分析与仿真结果表明,空频联合盲多用户自适应检测算法的检测性能优于分步检测算法。

参考文献

- [1] Hara S, Prasad R. Overview of multicarrier CDMA [J]. *Communications Magazine, IEEE*, 1997, 35(12): 126 ~ 133
- [2] Deng J H, Lin G J, Lee T S. A multistage multicarrier CDMA receiver with blind adaptive MAI suppression [A]. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, Proceedings (ICASSP '01), Vol 4 [C]*. 2001 IEEE International Conference, 2001. 2289 ~ 2292
- [3] Liberti J C, Raappaort T S. *Smart antenna for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications [M]*, Prentice Hall NJ, 1999
- [4] Hajian M, van de Kastele N, Ligthart L P. Minimum-span constant modulus array for a smart antenna testbed [A]. *Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings, Vol 149, Issue 2 [C]*, 2002. 120 ~ 127
- [5] Purwoko A, Attallah S, Zoubir A M. Performance enhancement of adaptive blind multiuser detection for MC - CDMA using antenna arrays [A]. *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings [C]*, 2002, 288 ~ 292
- [6] Torlak M, Kim S Y, Kang J, Xu Guanghan, Li Hang. Performance of MC - CDMA systems using antenna arrays [A]. *Signals, Systems, and Computers, 1999 Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference Vol 1 [C]*, 1999. 179 ~ 182
- [7] Tuan L M, Su P V, Kim J, Yoon G. An MMSE-based beamforming algorithm for smart antenna applied to an MC - CDMA system with co-channel interference [A]. *Communication Systems, ICCS 2002, The 8th International Conference, Vol 2, 2002. 1252 ~ 1256*
- [8] Tian Qingjiang, Letaief K B. The performance of multi-carrier CDMA with base station antenna arrays in fading channels [A]. *Vehicular Technology Conference Proceedings, VTC 2000-Spring Tokyo, 2000 IEEE 51st, Vol 2 [C]*, 2000. 1498 ~ 1502
- [9] Xu Changjiang, Feng Guangzeng, Kwak K S. A modified constrained constant modulus approach to blind adaptive multiuser detection [J]. *IEEE Tran on comm*, 2001, 49 (9): 1642 ~ 1648

Space-frequency Joint Blind Multi-user Detection Algorithm in Smart Antenna MC - CDMA System

Fu Hongliang^{1,2}, Feng Guangzeng¹

(1. *Department of communication engineering, Nanjing University of The Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*; 2. *Institute of Information Science & Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China*)

[Abstract] A space-frequency joint blind multi-user adaptive detection algorithm in smart antenna MC - CDMA system is proposed in this paper. It combines the receiving beam-forming in space-domain with combinational detection in frequency-domain and optimizes the detector simultaneously in two dimensions. It can enhance the performance of detection of the system. The bit error probability of the proposed algorithm is also analyzed in this paper. The proposed algorithm is simulated and compared with the two-step algorithm in which the adaptive beam-forming is used first and then the combination in frequency-domain is carried out. Simulation results show that the proposed algorithm is superior to the latter.

[Key words] smart antenna; multi-carrier; CDMA; joint detection