

WCDMA 系统基站阵列接收方案带训练序列的 LMS-DRMTA 算法¹

张 华 李会勇 龚耀寰

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘 要 该文针对 WCDMA 系统上行链路帧结构的特征, 将 Z. Rong(1997) 提出的 LS-DRMTA 改进为利用 WCDMA 上行链路帧结构中的导频位 (pilot bit) 作为训练序列的 LMS-DRMTA 算法。这种新的阵列接收 CDMA 解调算法相对于 LS-DRMTA 算法大大降低了基站处理的运算量, 提高了算法的实用性, 仿真实验还表明该算法比原算法具有更低的误码率。

关键词 WCDMA, 上行链路, 帧结构, 智能天线, 导频位

中图分类号 TN914.4

1 引 言

近十多年来, 移动通信事业在全球范围内得到了飞速发展, 移动通信用户数目的快速增长推动了人们对如何在有限的频率资源下不断扩大移动通信系统容量的研究。CDMA 技术以其固有的较高的频谱利用率、较强的抗干扰性能等优点在移动通信中得到了越来越广泛的应用, 目前 CDMA 技术已成为第三代移动通信系统 (3G) 的主体技术。另一方面, 近十年来智能天线技术 (又称自适应阵列天线技术或软件天线技术) 在移动通信领域的引入, 对抑制多径衰落、减小共信道干扰 (CCI)、提高小区覆盖范围、提高频谱利用率有显著的作用^[1]。因而如何在蜂窝式 CDMA 移动通信系统的小区基站采用智能天线技术实现智能天线技术与 CDMA 技术的结合成了一个研究热点。

在 CDMA 技术与阵列天线技术结合的盲自适应接收算法方面, B. G. Agee 提出了 MT-LSCMA (Multitarget Least Square Constant Modulus Algorithm)^[2], Z. Rong 提出了 MT-DD (Multitarget Decision Directed) 算法, LS-DRMTA (Least Square De-spread Re-spread Multitarget Array), LS-DRMTCMA (Least Square De-spread Re-spread Multitarget Constant Modulus Algorithm)^[3,4]。其中 LS-DRMTA、LS-DRMTCMA 相对于 MT-LSCMA、MT-DD 算法有较多的优点: 它们不需要在天线阵列权矢量的更新过程中不断采用 GSO (Gram-Schmidt Orthogonalization) 方法对不同用户信号的权矢量进行正交化处理; 不需要在天线阵列权矢量收敛后再在输出端口用用户扩频码来实现不同用户的识别; 其输出端口数目不受天线阵列元数目的限制, 仅由用户数目决定。而 LS-DRMTCMA 算法除上述优点外还适于抑制频率调制信号中的窄带衰落^[4]。

本文利用 WCDMA 上行链路帧结构的特征, 对 WCDMA 系统下的 LS-DRMTA 算法进行了改进, 得到的新算法一方面大大降低了基站阵列处理的运算量, 另一方面对系统的误码率有明显的改善。这种改进同样适用于 LS-DRMTCMA。本文在第 2 节介绍全文采用的信号模型; 在第 3 节介绍 LS-DRMTA 算法, 并对它采用的调制方式及为何加入训练序列进行了讨论和仿真实验; 第 4 节给出了在 WCDMA 结构下对 LS-DRMTA 的改进算法, 即有训练序列的 LMS-DRMTA 算法, 并给出了详细的仿真实验结果; 第 5 节总结全文。

¹ 2000-05-30 收到, 2000-10-25 定稿
通信抗干扰国防重点实验室基金资助项目

2 系统信号模型

蜂窝式移动通信系统蜂窝小区基站扇区内的阵列处理结构示意图如图1所示。

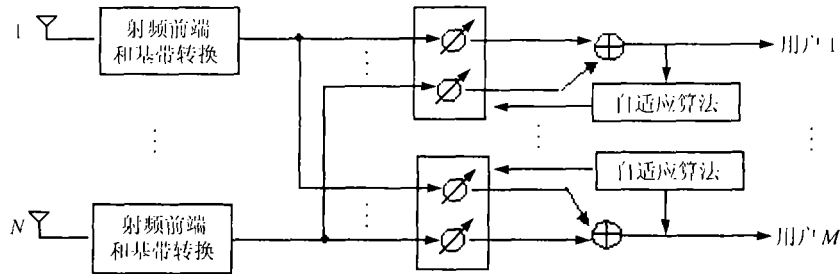


图1 基站扇区内阵列处理结构示意图

每个扇区内采用均匀线阵 (ULA)，ULA 有 N 个天线阵元，该扇区内共有 M 个激活用户，系统的处理增益为 P 。假设扇区内 M 个用户对基站天线阵均为远场信号源，则基站天线阵第 k 个阵元在 t 时刻 (第 j 个信源符号) 的接收信号如 (1) 式所示。

$$x_k = \sum_{i=1}^M \sqrt{2pb_i(j)} c_i((j-1)P+l) a_k(\theta_i) + n_k(t), \quad k=1, \dots, N \quad (1)$$

其中 p 表示信源符号进行扩频处理后每个扩频码片 (chip) 的能量； $b_i(j)$ 表示第 i 个用户第 j 个信源符号的值：+1 或 -1； $c_i((j-1)P+l)$, $l=1, \dots, P$ 表示第 i 个用户第 j 个信源符号的第 l 个扩频码片； $a_k(\theta_i)$ 表示第 i 个用户信号对基站天线阵的方向矢量 $a(\theta_i)$ 的第 k 个分量，其中 $a(\theta_i) = [1, e^{j\phi}, e^{j2\phi}, \dots, e^{j(N-1)\phi}]^T$, $\phi = d \sin(\theta_i) 2\pi/\lambda$, d 为 ULA 阵元间距， λ 为载波频率； $n_k(t)$ 表示第 k 个阵元上的加性白高斯噪声；则 $X(j) = [x_1(j), x_2(j), \dots, x_N(j)]^T$ 表示整个阵列一个快拍的输出。

设第 i 个用户的接收权矢量为 $W_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iN}]^T$ ，则第 i 个用户的阵列输出信号为

$$Y_i(j) = \sum_{k=1}^N w_{ik} x_k(j) = W_i^H X(j) \quad (2)$$

$Y_i(j)$ 用于进行第 i 个用户信号的解调判决。

本文所讨论的阵列接收算法是在已知期望用户的扩频码的基础上如何形成 w_{ik} 实现对期望用户的最佳接收，并对其它用户信号进行抑制。

3 LS-DRMTA 算法及仿真实验

3.1 LS-DRMTA 算法^[3]

LS-DRMTA 算法的权矢量每个信源符号更新一次，权矢量更新采用最小二乘意义下的最小均方误差准则，即

$$W_i(j+1) = [X(j)X(j)^H]^{-1} X(j)r_i^*(j) \quad (3)$$

其中上标“ H ”表示共轭转置,“ $*$ ”表示共轭, $[X(j)]_{N \times K}$ 表示阵列在一个信源符号内的采样矢量, K 表示阵列在一个信源符号内的采样快拍数, $r_i(j)$ 表示参考信号。 $r_i(j)$ 的产生采用判决反馈重扩技术。

整个算法简单总结如下:

$$\left. \begin{aligned} Y_i(j) &= [W_i^H X(j)]^T = [y_i(1+jK), y_i(2+jK), \dots, y_i(K+jK)]^T \\ \hat{b}_i(j) &= \operatorname{sgn} \left\{ \operatorname{Re} \left(\sum_{k=1+jK}^{(j+1)K} y_i(k) c_i(k) \right) \right\} \\ r_i(j) &= \hat{b}_i(j) [c_i(1+jK), c_i(2+jK), \dots, c_i(K+jK)] \\ W_i(j+1) &= [X(j)X(j)^H]^{-1} X(j)r_i^*(j) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3.2 关于 LS-DRMTA 算法的信号调制方式

由于 LS-DRMTA 算法的参考信号采用了判决反馈方法,当 SINR 较高时,这种参考信号的产生方法简单可行,但当 SINR 稍偏低时,判决反馈技术存在一个重大缺陷,就是差错扩散问题。即当第 n 位判决错误时,则由第 n 个判决值产生的参考信号可能会导致第 n 位以后的多位的判决错误,这使得 LS-DRMTA 算法在 BPSK 调制时很难实用。然而当采用 DPSK 调制时,某位信号的判决错误不会造成差错扩散。

我们对 LS-DRMTA 算法在 BPSK、DPSK 调制下进行了如下的仿真比较: $N = 6$, $\text{SNR} = -3\text{dB}$, $M = 20$, $P = 32$ 。仿真中不同用户的扩频码采用不同的 PN 序列,不同用户的方向在 -180° 到 180° 内随机产生,每次送 1000bit 的数据,共送 10 次,其正确解调的比特数如图 2 所示。

从图 2 可以看出当采用 BPSK 调制时,LS-DRMTA 算法尽管有几乎全部正确解调的情况,但是其正确解调的比特数存在很大的波动,这种波动就是由于 BPSK 调制在使用判决反馈参考信号时的差错扩散现象。而使用 DPSK 调制时,LS-DRMTA 算法正确解调的比特数只存在很小的波动,不存在差错扩散现象。所以在以后的仿真中均采用 DPSK 调制。

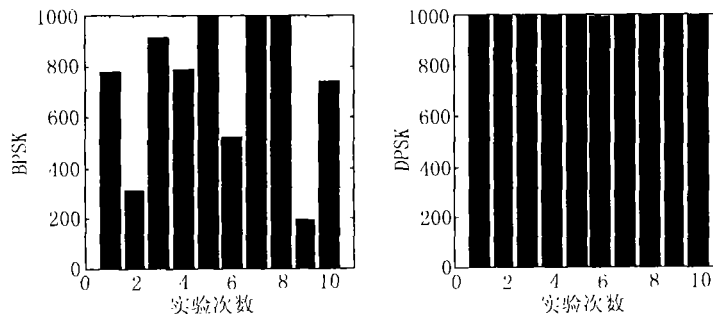


图 2 LD-DRMTA 在不同调制方式下的解调情况

3.3 是否采用训练序列问题

由上面的仿真分析可以粗略看出 LS-DRMTA 算法在采用 DPSK 调制的系统中已有较好的性能,似乎没有必要加入训练序列。我们知道,在 DPSK 调制方法中,第 n 位信号的调制解调是根据它与第 $n-1$ 位信号的相对相位关系进行的,所以如果收发双方在正常传输数据前加上几位甚至一位预定的数据位,则可以所传数据提供精确的相位参考。

值得强调的是,在 WCDMA(3GPP) 的上行控制物理信道中,为了实现上行链路信号的相干解调,专门设定有用于信道估计的导频位(pilot bit),如在上行链路的专用控制物理信道中的

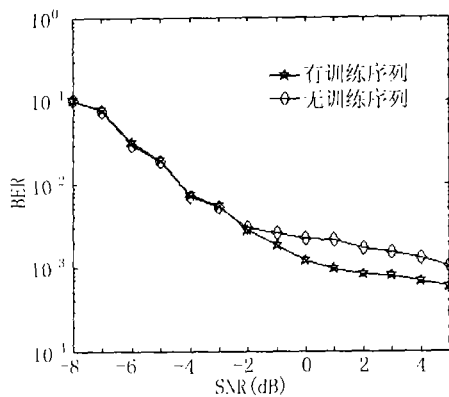


图3 LS-DRMTA 在有训练序列情况下的 BER 比较

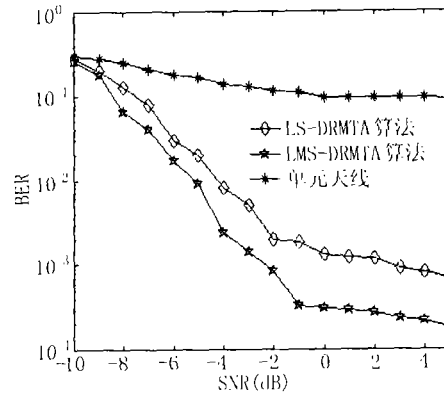


图4 单元天线、LS-DRMTA、LMS-DRMTA 算法的 BER 比较

每个时隙 (slot) 加有 3~8bit 的导频位 (不同时隙的导频位有明确的定义)^[5]。所以在 WCDMA 系统中应用 LS-DRMTA 算法并使用训练序列并不额外增加系统的复杂度。在训练序列期间的参考信号由下式。

$$r_i(j) = b_{\text{pilot}}(j)[c_i(1 + jK), c_i(2 + jK), \dots, c_i(K + jK)] \quad (5)$$

产生训练序列期间的权矢量更新与 (4) 式同。

我们在 $M = 20$, $N = 6$, $P = 32$, 其它条件与前面相同的条件下, 对 DPSK 调制方式下训练序列长度为 5 和没有训练序列的 LS-DRMTA 算法的 BER (Bit Error Rate) 统计如图 3 所示。

由图 3 可以看出在 SNR 较低时, 采用 DPSK 调制的 LS-DRMTA 算法在有无训练序列时 BER 差别很小, 但是当 SNR 较高时, BER 的差别相对较大。这是因为在 DPSK 调制方式下, 训练序列主要为传送数据的首位提供准确的相位参考。在数据长度一定时, SNR 越高, 首位差错对整体 BER 的影响越明显。这样可以明确地看出训练对首位数据解调的必要性。后面我们将看到利用短的导频序列作为训练序列是我们对 LS-DRMTA 算法进一步改进的关键所在。

4 带训练序列的 LMS-DRMTA 算法及仿真实验

4.1 WCDMA 系统中阵列接收 LS-DRMTA 算法运算量分析

在 WCDMA 框架下, 上行链路的扩频数据流是按 3.84Mbps 的速率分帧发送的, 每帧长 10ms, 每帧又分为 15 个时隙, 每个时隙约 0.667ms, 2560 个扩频码片^[5]。由于 WCDMA 中扩频增益为 256~4, 所以一个时隙约包含 10~640 bit 的数据。按照 LS-DRMTA 算法, 每个比特进行一次权矢量更新, 则 WCDMA 的一个时隙要进行 10~640 次权更新。即为了采用阵列接收, 基站的每个扇区需要在 0.667ms 内对每个激活用户进行 10~640 次自相关矩阵求逆及对应的互相关运算, 这使得基站的阵列接收大大增加了基站处理的运算量。

4.2 带训练序列的 LMS-DRMTA 算法

为了寻求具有较小运算量的 CDMA 系统阵列处理方法, 我们提出了带训练序列的 LMS-DRMTA 算法, 思路如下: 在上行链路的导频位期间 (3~8bit) 按照 LS-DRMTA 算法更新训练阵列接收的权矢量, 其中参考信号按 (5) 式产生; 在接收传送的信息码流期间, 以训练结束时的权矢量为初值, 利用 LMS 算法进行权矢量更新。这里需要指出的是, 尽管 LMS 自适应算法的收敛速度相对较慢^[6], 但在 WCDMA 系统中, 它并不会影响 LMS-DRMTA 的性能。因为权矢量每隔一个时隙 0.667ms 按 LS-DRMTA 更新一次, 由于 LS-DRMTA 算法采用最小二乘

最小均方误差准则形成权值, 所以训练结束时, 即 LMS 算法的初值已在最优权值附近, 况且在 0.667ms 之内, 移动用户对基站可能只有很小的角度变化。对有训练序列的 LMS-DRMTA 算法总结如下:

- (1) 第 i 个用户的阵列接收权矢量初始化为 $[1, 0, \dots, 0]^T$ 。
- (2) 训练序列 (长度小于或等于 8) 期间按 (4) 式更新权值, 而参考信号由 (5) 式产生。
- (3) 信息码流期间, 以 (2) 产生的权矢量为初值, 按下列方法更新:

$$\left. \begin{aligned} W_i(j+1) &= W_i(j) + \mu X(j) E_i(j+1)^H \\ E_i(j) &= r_i(j) - Y_i(j) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 μ 表示步长; $[X(j)]_{N \times P}$ 表示当前信息位的阵列接收矢量; $[r_i(j)]_{1 \times P}$ 是按 (4) 式产生的参考信号; $[E_i(j)]_{1 \times P}$ 表示当前信息位的权矢量校正误差矢量; $[Y_i(j)]_{1 \times P}$ 为当前信息位的 P 个快拍的阵列输出 (一个码片采样一次)。

4.3 带训练序列的 LMS-DRMTA 算法的仿真实验

(1) 不同 SNR 下 BER 的检测。 仿真条件: 天线阵元数 $N = 6$, 扇区内激活用户数 $M = 20$, 扩频增益 $P = 32$, 阵列接收到的各用户功率近似相等 (无特殊说明, 以下仿真均采用这组数据和假设)。我们得到相同条件下单元天线、LS-DRMTA 算法和 LMS-DRMTA 算法 (均使用了长度为 5 的训练序列) 的 BER 随 SNR 的变化曲线如图 4 所示。

由图 4 我们可以清楚地看出阵列 ($N = 6$)LS-DRMTA 算法、LMS-DRMTA 算法 (均带训练序列) 的解调误码率远远低于单元天线的解调误码率, 而 LMS-DRMTA 算法的误码率又明显低于 LS-DRMTA 算法的误码率。这里需要说明的是, 我们的 SNR 指的是每码片能量与加性噪声的功率比, 即 E_c/N_0 , 由于 $M = 20$, 即信干比 SIR 为 -12.79dB , $P = 32$ 即扩频增益为 15.05dB , 所以在图中 SNR = -3dB 时, 解扩后判决前 SINR 小于 0, 只有通过天线阵列的定向接收才能实现正确解调。

(2) 为了形象地看出 LMS-DRMTA 算法比 LS-DRMTA 算法有更低的 BER 的原因, 我们在 SNR = 3dB , $M = 20$, 期望信号方向为 30° , LMS-DRMAT 迭代步长为 0.001, 其它用户方向随机产生, 其它条件同前面的情况下, 对两算法在相同迭代次数下的权矢量形成的波束图如图 5、图 6 所示。图 5, 图 6 中 (a) 为训练结束时的阵列波束图, (b), (c), (d) 分别为训练结束后第 1, 2, 3 次迭代后的阵列波束图。由图可以看出, 由于 LS-DRMTA 算法每次迭代根据输入按 (3) 式独立形成权矢量, 所以尽管 $K = 6$ 时, 波束图能对准期望信号, 但 $K = 7$ 、8 时, 波束图又偏离了期望信号。而 LMS-DRMTA 算法按 (6) 校正并跟踪权矢量, 由于训练结束时权矢量已在最佳值附近, 所以 LMS 算法能快速将权矢量校正到最佳值并保持对最佳值的跟踪。

(3) 为了比较二算法对 WCDMA 系统容量的提高能力, 我们固定 SNR = -5dB , 扩频增益 $P = 32$ 时, 不同激活用户数下两算法的 BER 曲线如图 7 所示。从图 7 我们可以看到在解调误码率固定的情况下, LMS-DRMTA 算法比 LS-DRMTA 算法可以更大地提高系统容量。这与前面固定用户数, 不同 SNR 下两算法的误码率性能是一致的。

5 结 论

智能天线技术引用于蜂窝式移动通信小区基站, 可以明显提高系统抗多径衰落、减小共信道干扰、降低系统的解调误码率等性能, 由于 CDMA 系统的“软容量”特性, 智能天线技术的上述优点可以等效为对 CDMA 系统容量的扩大。但是智能天线技术在移动通信系统中的应用必需以不太高的实现复杂度、较小的附加运算量为前提。本文按照 WCDMA 系统的帧结构特

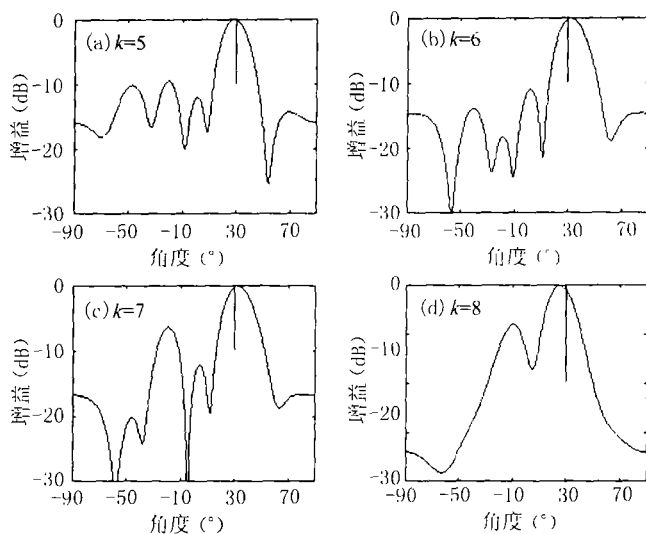


图5 LS-DRMTA 算法波束形成跟踪

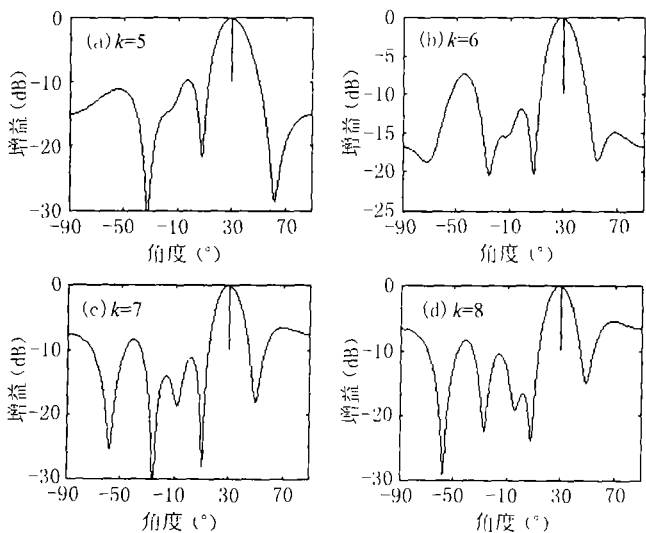


图6 LMS-SRMTA 算法波束形成跟踪

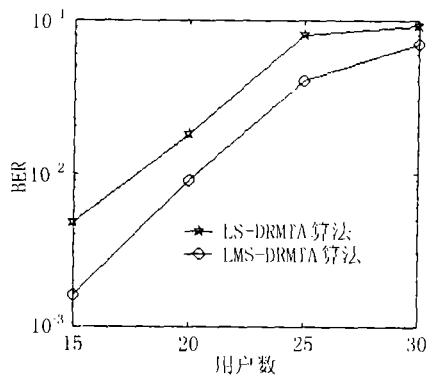


图7 不同用户数条件下 LS-DRMTA 和 LMS=DRMTA 算法的误码率特性

点, 将 LS-DRMTA 算法改进为带短训练序列的 LMS-DRMTA 算法。这种新的 CDMA 系统阵列接收算法相对原算法运算量大大降低, 实用性大大增强, 而且能明显降低系统解调的误码率。这种新算法对在 WCDMA 系统上行链路的基站阵列接收具有很好的参考价值。

参 考 文 献

- [1] L. C. Godara, Applications of antenna arrays to mobile communications, Part I: Performance improvement, feasibility, and system considerations, Proc. IEEE, 1997, 85(7), 1031-1060.
- [2] B. G. Agee, Blind separation and capture of the communication signals using a multitarget constant modulus beamformer, Proc. IEEE Military Comm. Conf., Boston, MA, USA, 1989, 19.2.1-19.2.7.
- [3] Z. Rong, *et al.*, Simulation of multitarget adaptive array algorithms for wireless CDMA systems, IEEE Vehicular Technology Conf., Phoenix, AZ, May 5-7, 1997, 1-5.
- [4] Z. Rong, *et al.*, Despread-respread multi-target constant modulus array for CDMA systems, IEEE Communications Letters, 1997, 1(4), 114-116.
- [5] 3G TS 25.211 V3.2.0 (2000-03) Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD).
- [6] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, 1998, Chapter 9. 12.

THE RECEPTION SCHEME AT BASE STATION FOR WCDMA SYSTEM LMS-DRMTA ALGORITHM WITH TRAINING SEQUENCE

Zhang Hua Li Huiyong Gong Yaohuan

(*Institute of Electronic Engineering of UEST of China, Chengdu 610054, China*)

Abstract In accordance with the uplink frame structure of WCDMA system, this paper develops the LS-DRMTA algorithm proposed by Z. Rong, *et al.*(1997) into a new algorithm named LMS-DRMTA with training sequence. The use of training sequence does not complicate the application of the new algorithm in WCDMA system because the existed pilot bits in each WCDMA frame slot act as the the training sequence for the new algorithm. The proposed algorithm cuts down lots of computational complexity of LS-DRMTA algorithm which simplifies its application in WCDMA system. Furthermore, the simulation experiments indicate that the new algorithm can perform much lower BER than LS-DRMTA.

Key words WCDMA, Uplink, Frame structure, Smart antenna, Pilot bits

张 华: 男, 1973 年生, 博士生, 现在主要从事智能天线技术及移动通信系统的研究.

李会勇: 男, 1975 年生, 硕士, 助教, 现在主要从事智能天线技术及移动通信系统的研究.

龚耀寰: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应抗干扰技术、阵列信号处理技术及其在通信、雷达等电子系统中的应用.