

一种联合均衡和多用户检测的SDCMA盲算法

居美艳 鄢广增

(南京邮电学院通信工程系 南京 210003)

摘要 该文提出了用于MC DS-CDMA系统中的两种SDCMA(最陡下降常模算法)盲检测方法,一种是SDCMA盲均衡算法,在此基础上,提出了另一种联合均衡和多用户检测的SDCMA盲算法。同时还将这两种算法与基于子空间的MMSE(最小均方误差)盲检测算法进行比较。仿真结果表明,这两种SDCMA算法的BER(误比特率)性能均优于子空间法,而且联合均衡和多用户检测的SDCMA盲算法利用同时对均衡权值向量和多用户检测器向量进行自适应更新,能较大程度地改善系统性能,是这3种盲算法中性能最佳的一个。

关键词 多载波直扩码分多址,最陡下降常模算法,均衡,多用户检测

中图分类号: TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1403-05

A Blind Joint Equalization and Multiuser Detection SDCMA Algorithm

Ju Mei-yan Feng Guang-zeng

(Department of Communication Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract This paper suggests two Steepest Decreasing Constant Modulus Algorithm (SDCMA) blind detection schemes for MultiCarrier Direct Sequence-Code Division Multiple Access (MC DS-CDMA) systems, one of which is the SDCMA blind equalization, and based on the former, the other of which is proposed, i.e., the blind joint equalization and multiuser detection SDCMA algorithm. The two SDCMA schemes and subspace-based Minimum Mean-Squared Error (MMSE) detection are compared in the paper. The simulation results show that Bit Error Rate (BER) performances of the two SDCMA schemes are both superior to that of the subspace-based scheme, and the joint SDCMA scheme, which takes advantage of renewing the equalization weight vector and the multiuser detector vector at the same time, greatly improves system performance and is the best of the three schemes.

Key words MC DS-CDMA, SDCMA, Equalization, Multiuser detection

1 引言

OFDM是正交频分复用技术,是一种高效的数据传输方式,具有很强的抗多径干扰和符号间串扰的能力。CDMA作为一种多址技术,具有容量大,系统存在扩频增益等优点。OFDM和CDMA两者相结合的多载波方案^[1]主要有MC-CDMA和MC DS-CDMA。MC-CDMA可以取得频率分集,但其各子载波所经历的频率选择性衰落会破坏其用户扩频码的正交性。MC DS-CDMA的扩频码片在同一个子载波上传输,用户扩频码的正交性较易保持,有很强的抗MAI(多址干扰)的能力。另外,MC DS-CDMA需要的子载波数比MC-CDMA少,这是因为前者在每个子载波上进行扩频,子载波数不受扩频码长度的限制,一般小于扩频码长度。而MC-CDMA要求子载波数至少等于频率扩频码的长度。子载波数目多,容易引起峰均功率比的恶化^[2]。

无线信道的多径衰落和多普勒频移会引起信号的失真,要恢复和检测出信号,就需要采用适当的检测方法(这里指广

义上的检测)。而检测过程主要是通过均衡等技术尽可能减小干扰和噪声以判决恢复出原始信号。均衡技术是针对恢复信道对信号造成的影响提出的,它可分为两类,一类是通过训练序列进行信道估计,然后对信号进行均衡。另一类是盲均衡,盲均衡不需要传输训练序列,节省了开销,提高了系统的有效数据传输速率。Godard^[3]提出的CMA(恒模算法)早期用于解决信道的盲均衡问题,现已广泛地应用于盲信道估计、盲干扰抑制、盲MUD(多用户检测)等领域的研究^[4]。目前对CMA的研究基本上只限于解决某一个问题,文献[5-8]研究了CMA用于DS-CDMA系统中的多用户检测,文献[9]研究了CMA盲多用户检测在MC-CDMA系统中的应用。文献[10-13]研究了CMA均衡方法,其中文献[10-12]是针对一般的单载波系统,文献[13]研究了MC-CDMA系统中的CMA盲估计方法。子空间法也是一种较常用的盲估计方法,子空间方法有大量的矩阵运算,复杂度较大。文献[14]研究了MC DS-CDMA系统中的基于子空间的线性MMSE检测方法。而本文首先研究了CMA频域均衡在MC DS-CDMA系统中的应用,然后着重研究联合CMA算法,即联合均衡和多用户检测CMA算法,利用CMA同时进行各子载波上衰落的均衡和多

用户检测。SDCMA是以负梯度方向为搜索方向进行权值的更新，算法非常简单，本文采用此算法。经过联合SDCMA算法的运用，不仅去除了各子载波上的独立衰落，还进一步消除了多用户干扰，使系统的性能有较大程度的改善。同时本文还将此联合SDCMA算法与文献[14]中基于子空间的MMSE盲检测算法进行比较。

本文论述结构如下：第 2 节是信号模型，第 3 节给出了 SDCMA 频域均衡算法，联合均衡和多用户检测的 SDCMA 算法在第 4 节给出，第 5 节进行仿真和性能分析，第 6 节给出结论。

2 信号模型

我们考虑 K 个用户的 MC DS-CDMA 系统，这里研究下行链路。第 k 个用户的扩频码表示为 c_k ，第 k 个用户的特征波形为

$$s_k(t) = \sum_{n=1}^N c_k^n p_c[t - (n-1)T_c], \quad t \in [0, T_s] \quad (1)$$

其中 T_c 是码片间隔， T_s 是符号间隔， $(c_k^1 c_k^2 \dots c_k^N)$ 是第 k 个用户的扩频码，每个元素取值为 1 或 -1。 $N = T_s/T_c$ 是扩频增益， $p_c(t)$ 是码片(chip)波形， $s_k(t)$ 具有归一化能量，即 $\int_0^{T_s} s_k^2(t)dt = 1$ 。第 k 个用户 ($1 \leq k \leq K$) 发送的数据符号为 $b^k = (\dots, b_0^k, b_1^k, b_2^k, \dots)$ 。数据符号 b_j^k 是独立的随机变量， $E[b_j^k] = 0$ ， $E[|b_j^k|^2] = 1$ ，第 k 个用户发送的信号基带可表示为

$$x_k(t) = \sum_{u=1}^U A_k \left\{ \sum_{i=-\infty}^{\infty} b_i^k s_k(t - iT_s) \right\} \exp\left(j2\pi \frac{u-1}{U} t \right) \quad (2)$$

其中 A_k ， b_i^k 分别表示第 k 个用户信号的幅度和数据符号，

U 表示并行支路数，同时也是子载波数。

假设各个载波信道上的衰落相互独立，且为瑞利平坦衰落。接收信号可以表示为

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U A_k \alpha_u \left\{ \sum_{i=-\infty}^{\infty} b_i^k s_k(t - iT_s) \right\} \exp\left(j2\pi \frac{u-1}{U} t \right) + n(t) \quad (3)$$

其中 α_u 表示信号在第 u 个载波上的复数衰落， $n(t)$ 为高斯白噪声。接收信号 $r(t)$ 首先进行解调，然后经过码片匹配滤波器，以码片速率采样，如图 1 所示，即可得到频域各子载波上的码片信号，该频域信号在一个符号周期内用向量表示为

$$r = \sum_{k=1}^K A_k b_k V_k \alpha + n \quad (4)$$

其中 V_k 表示以用户 k 的扩频码为对角元素的矩阵：

$$V_k = \begin{bmatrix} s_k & & & \\ & s_k & & \\ & & \ddots & \\ & & & s_k \\ & & & & \underbrace{\hspace{2cm}}_U \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$s_k = \frac{1}{\sqrt{N}} [c_k^1 \quad c_k^2 \quad \dots \quad c_k^N]^T \quad (6)$$

α 表示以信号在 U 个载波上的衰落为元素的向量：

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_U]^T \quad (7)$$

其中上标 T 代表转置， n 为 $UN \times 1$ 的复白高斯噪声。

3 SDCMA 频域均衡算法

式(4)是接收端经过解调得到的各个子载波上的码片信号，为实现 MC DS-CDMA 系统的盲检测，首先对式(4)进行解扩，消除部分多址干扰，然后进行 SDCMA 频域均衡。

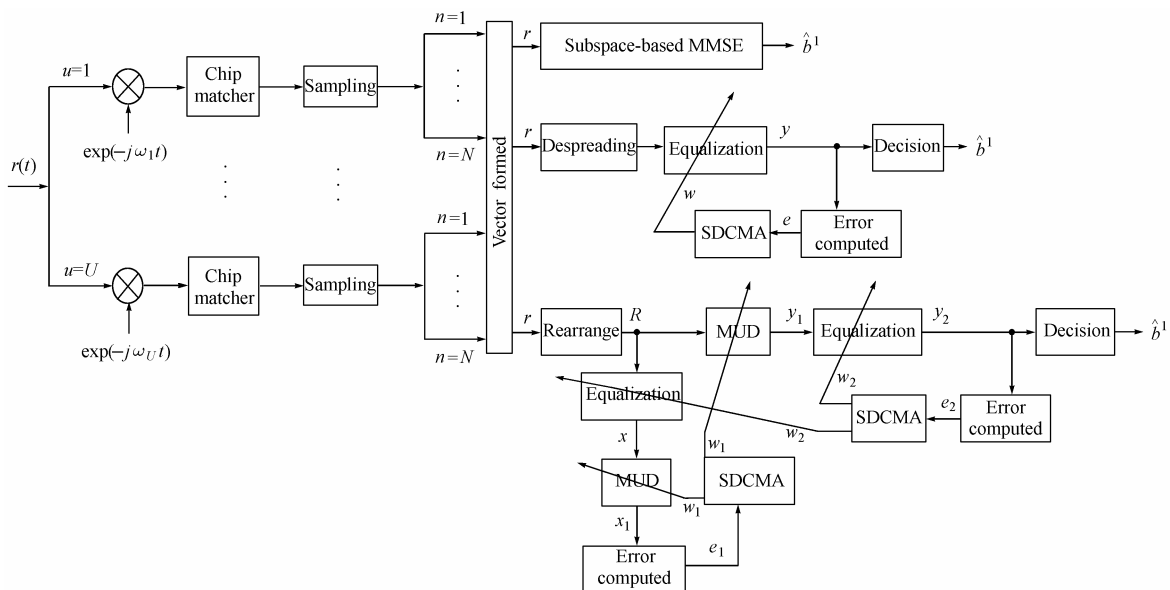


图 1 3 种盲检测方法的系统接收端框图

Fig.1 The block diagram of system receiver with the three blind detection schemes

设用户1为期望用户,根据此处的先解扩再均衡的思想,定义其代价函数为

$$J(\mathbf{w}) = E \left[\left| \mathbf{w}^H \mathbf{V}_1^H \mathbf{r} - 1 \right|^2 \right] \quad (8)$$

其中 $\mathbf{V}_1^H \mathbf{r}$ 为用户1的解扩信号, $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_U]^T$ 为权值向量,上标H表示共轭转置。

SDCMA的最优权值向量 $\bar{\mathbf{w}}$ 为

$$\bar{\mathbf{w}} = \arg \min_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w}) \quad (9)$$

式(8)对 \mathbf{w} 求导,得到

$$\left[\frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} \right]_{\mathbf{w}=\mathbf{w}(i)} = 2E \left[\mathbf{V}_1^H \mathbf{r} \left(\mathbf{w}(i)^H \mathbf{V}_1^H \mathbf{r} - \mathbf{w}(i)^H \mathbf{V}_1^H \mathbf{r} / \left| \mathbf{w}(i)^H \mathbf{V}_1^H \mathbf{r} \right| \right)^* \right] \quad (10)$$

其中上标*表示共轭。

因此,SDCMA均衡算法如下:

检测器输出 $y(i)$ 为

$$y(i) = \mathbf{w}^H(i) \mathbf{V}_1^H \mathbf{r}(i) \quad (11)$$

误差信息 $e(i)$ 为

$$e(i) = y(i) - |y(i)| / |y(i)| \quad (12)$$

把式(11),式(12)代入式(10),得到权值向量 \mathbf{w} 的随机梯度更新公式为

$$\mathbf{w}(i+1) = \mathbf{w}(i) - \mu \mathbf{V}_1^H \mathbf{r}(i) e^*(i) \quad (13)$$

其中 μ 为步长。

首先初始化权值向量 \mathbf{w} ,然后重复式(11)~式(13)直至 \mathbf{w} 收敛。该算法实现上很简单,无需复杂的矩阵运算。另外,此处的权值向量的抽头个数就等于子载波数。

从式(8)代价函数的定义中可以看出,利用 \mathbf{w} 恢复出的信号可能存在一个相位旋转,为了解决这一问题,可以采用差分编码或差分调制。

4 联合均衡和多用户检测的SDCMA算法

下面研究把均衡和多用户检测相结合的SDCMA算法,式(4)中的列向量 $\mathbf{r} = [r_1^T \ \dots \ r_U^T]^T$,其中, r_u ($u=1, \dots, U$) 为 $N \times 1$ 的列向量,表示第 u 个载波上的接收信号。我们把 \mathbf{r} 进行重排,可以得到相应的矩阵形式 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1^T \\ \vdots \\ r_U^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

引入两个权值向量, \mathbf{w}_1 代表用于解扩的多用户检测器, \mathbf{w}_2 代表用于消除各子载波上干扰的均衡向量,对 \mathbf{w}_1 , \mathbf{w}_2 同时进行自适应更新的迭代,使得系统能同时利用这两个权值向量的信息,更好地去除信道干扰和多用户干扰。

用户1为期望用户,该联合算法的具体步骤如下:

首先进行多用户检测器 \mathbf{w}_1 的初始化和均衡器 \mathbf{w}_2 的初始化。

多用户检测器输出 $y_1(i)$ 为

$$y_1(i) = \mathbf{w}_1^H(i) \mathbf{R}^T(i) \quad (15)$$

均衡器输出 $y_2(i)$ 为

$$y_2(i) = \mathbf{w}_2^H(i) \mathbf{y}_1^T(i) \quad (16)$$

均衡器的误差信息 $e_2(i)$ 为

$$e_2(i) = y_2(i) - |y_2(i)| / |y_2(i)| \quad (17)$$

要得到多用户检测器的误差信息,必须先均衡,去掉各子载波信道衰落的影响,即

$$\mathbf{x}(i) = \mathbf{w}_2^H(i) \mathbf{R}(i) \quad (18)$$

然后,可以得到多用户检测器的误差信息 $e_1(i)$ 为

$$e_1(i) = x_1(i) - |x_1(i)| / |x_1(i)| \quad (19)$$

其中

$$x_1(i) = \mathbf{w}_1^H(i) \mathbf{x}^T(i) \quad (20)$$

权值向量 \mathbf{w}_2 的随机梯度更新公式为

$$\mathbf{w}_2(i+1) = \mathbf{w}_2(i) - \mu_2 \mathbf{y}_1^T(i) e_2^*(i) \quad (21)$$

权值向量 \mathbf{w}_1 的随机梯度更新公式为

$$\mathbf{w}_1(i+1) = \mathbf{w}_1(i) - \mu_1 \mathbf{x}^T(i) e_1^*(i) \quad (22)$$

其中 μ_1 , μ_2 为步长。

重复式(15)~式(22)的迭代过程,直到 \mathbf{w}_1 和 \mathbf{w}_2 收敛。

该联合算法可以得到来自均衡器和多用户检测器两方面的误差信息,与单一的SDCMA盲均衡算法相比,显然更加优越,从而提高了系统的性能,这可以从下面的仿真结果中得到证明。

5 仿真与性能分析

考虑一个同步的MC DS-CDMA系统,采用QPSK调制方式,扩频码采用Gold 31码,扩频增益 $N=31$,子载波数为4,用户数 $K=4$,目标用户为用户1,多址干扰 $\text{MAI} = \sum_{k=2}^K 10 \lg A_k^2 / A_1^2$ 取 15dB 和 30dB 为例, $k=2 \square 4$ 。每个子载波信道为平坦瑞利衰落信道,各子载波信道相互独立。联合SDCMA算法中多用户检测器 \mathbf{w}_1 的初始值取目标用户的扩频码,即 $\mathbf{w}_1 = \mathbf{s}_1$,均衡器 \mathbf{w}_2 的初始值为 $\mathbf{w}_2 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。把基于子空间的盲MMSE检测算法,SDCMA盲均衡算法(sdema(1))以及联合均衡和多用户检测的SDCMA盲算法(sdema(2))三者进行仿真和性能比较。对于SDCMA盲均衡算法,输出SIR(信干比)的定义为

$$\text{SIR}_1 = A_1^2 \left\| \mathbf{w}^H \boldsymbol{\alpha} \right\|^2 / \left[\sigma^2 \left\| \mathbf{w} \right\|^2 + \sum_{k=2}^K A_k^2 \left\| \mathbf{w}^H \boldsymbol{\alpha} \right\|^2 (s_k^T s_1)^2 \right] \quad (23)$$

联合SDCMA算法的输出SIR可以定义为

$$\text{SIR}_2 = A_1^2 \left\| \mathbf{w}_2^H \boldsymbol{\alpha} \right\|^2 \left\| \mathbf{w}_1^H \mathbf{s}_1 \right\|^2 / \left[\sigma^2 \left\| \mathbf{w}_1 \right\|^2 \left\| \mathbf{w}_2 \right\|^2 + \sum_{k=2}^K A_k^2 \left\| \mathbf{w}_2^H \boldsymbol{\alpha} \right\|^2 \left\| \mathbf{w}_1^H \mathbf{s}_k \right\|^2 \right] \quad (24)$$

图1为3种盲检测方法的系统接收端的框图。接收端首

先进行解调等处理,得到频域各子载波上的码片信号,然后采用不同的盲检测方法恢复信号。仿真结果如图 2 至图 4 所示。图 2 为上述的 3 种盲算法在 MAI=15dB, MAI=30dB 时的 BER 性能比较图,其中,两种 SDCMA 算法均为迭代 2000 次后的结果。从图中可以看出,在相同 MAI 的情况下,联合 SDCMA 算法的性能最佳,SDCMA 均衡算法次之,子空间法最差。随着 MAI 增大,联合 SDCMA 算法与 SDCMA 均衡算法相比,其性能优势更加明显。另外,从图中还可以看出子空间法在高信噪比时出现的 error floor 现象,而两种 SDCMA 算法则基本无此现象。

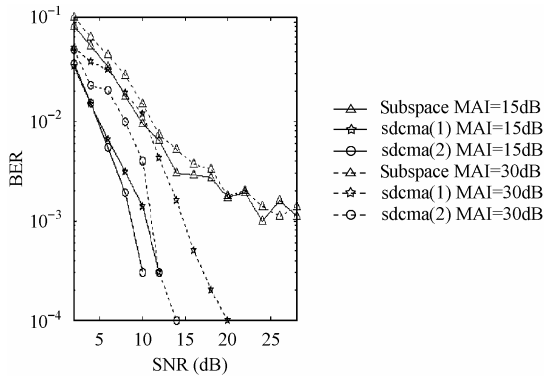


图 2 3 种方法的 BER 比较

Fig.2 BER comparison of the three blind detection schemes

图 3 为 MAI=15dB, SNR=24dB 时 SDCMA 均衡算法与联合 SDCMA 算法的 SIR 性能比较图,图 4 为 MAI=30dB, SNR=24dB 时这两种 SDCMA 算法的 SIR 性能比较图。从图 3 和图 4 中可以看出,联合 SDCMA 算法收敛时的 SIR 值高于 SDCMA 均衡算法收敛时的值。也正因为如此,联合 SDCMA 算法的 BER 性能优于 SDCMA 均衡算法,这与图 2 的结论是一致的。另外,比较图 3 和图 4 可以看出,联合 SDCMA 算法在相同 SNR 的条件下,MAI 取不同值可以达到基本相同的 SIR 收敛值。而 SDCMA 均衡算法在相同 SNR 的条件下,MAI 值较大时 SIR 的收敛值较小,即其性能随着 MAI 值的增大而变差。因此,SDCMA 均衡算法的抗 MAI 的能力不及联合 SDCMA 算法。

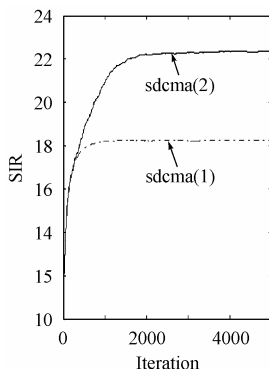


图 3 MAI=15dB,SNR=24dB 时两种 SDCMA 的 SIR 比较

Fig.3 SIR comparison of the two SDCMA schemes when MAI=15dB and SNR=24dB

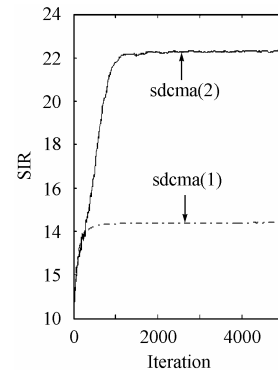


图 4 MAI=30dB,SNR=24dB 时两种 SDCMA 的 SIR 比较

Fig.4 SIR comparison of the two SDCMA schemes when MAI=30dB and SNR=24dB

综上所述,我们可以看出,本文提出的联合均衡和多用户检测的 SDCMA 算法具有很强的抗信道干扰和抗 MAI 的能力,是 3 种盲算法中性能最佳的一种。

6 结束语

本文首先建立了 MC DS-CDMA 系统模型,然后提出了用于该系统的两种 SDCMA 盲检测方法,一种是 SDCMA 盲均衡算法,另一种是联合均衡和多用户检测的 SDCMA 盲算法。后者能同时对均衡向量和多用户检测向量进行更新,可以更好地恢复原始信号,是两种 SDCMA 算法和基于子空间的 MMSE 检测算法中性能最好的一种方法。同时这两种 SDCMA 算法都没有子空间法的 error floor 现象,有更好的抗 MAI 的性能。

参考文献

- [1] Prasad R, Hara S. Overview of multicarrier CDMA. *IEEE Commun. Mag.*, 1997, 35(12): 126-133.
- [2] Yang L L, Hanzo L. Multicarrier DS-CDMA: A multiple access scheme for ubiquitous broadband wireless communications. *IEEE Commun. Mag.*, 2003, 41(10): 116-124.
- [3] Godard D. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems. *IEEE Trans. on Communications*, 1980, 28(11): 1867-1875.
- [4] Johnson R Jr, Schniter P, Endres T J, Behm J D, Brown D R, Casas R A. Blind equalization using the constant modulus criterion: A review. *Proc. IEEE*, 1998, 86(10): 1927-1950.
- [5] Lee Wookwon, Vojcic B R, Pickholtz R L. Constant modulus algorithm for blind multiuser detection. *IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings*, Mainz, Germany, 22-25 Sept., 1996, vol.3: 1262-1266.
- [6] Xu Changjiang, Feng Guangzeng. Blind multiuser detector using nominal sequences. *Electronics Letters*, 2000, 36(6): 572-573.
- [7] Xue Qiang, Jiang Xiaobing, Wu Weiling. A new CMA-based blind adaptive multiuser detection. *Vehicular Technology Conference*, 2001, Rhodes, Greece, 6-9 May, 2001, vol.3:

- 1775–1778.
- [8] Arasaratnam P, Zhu S, Constantinides A G. Fast convergent multiuser constant modulus algorithm for use in multiuser DS-CDMA environment. Proceedings(ICASSP'02), IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Orlando, Florida, USA, 13-17 May, 2002, vol.3: 2761–2764.
- [9] Kim Dong-Joe, Kim Joo-Eung, Kang Chang-Eon. The new approach to mitigate MAI in MC-CDMA systems. Vehicular Technology Conference, Amsterdam, the Netherland, 19-22 Sept., 1999, vol.1: 171–175.
- [10] Godard D. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems. *IEEE Trans. on Communications*, 1980, 28(11): 1867–1875.
- [11] Johnson R Jr, Schniter P, Endres T J, Behm J D, Brown D R, Casas R A. Blind equalization using the constant modulus criterion: A review. *Proc. IEEE*, 1998, 86(10): 1927–1950.
- [12] Kamel R E, Bar-Ness Y. Anchored blind equalization using the constant modulus algorithm. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 1997, 44(5): 397–403.
- [13] Feng Aigang, Yin Qinye, Zhang Jianguo, Deng Ke. Blind channel estimation in synchronous MC-CDMA system with consideration of carrier offset compensation. Vehicular Technology Conference, Birmingham Jefferson Civic Center, Birmingham, Alabama, USA, 6-9 May, 2002, vol.2: 660–664.
- [14] Namgoong J, Wong T F, Lehnert J S. Subspace multiuser detection for multicarrier DS-CDMA. *IEEE Trans. on Communications*, 2000, 48(11): 1897–1908.
- 居美艳: 女, 1979年生, 博士生, 目前从事移动通信与通信信号处理方面的研究.
- 鄞广增: 男, 1943年生, 南京邮电学院通信工程系系主任, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字移动通信和通信信号处理.