

异步CDMA系统中的盲多用户检测算法

宋春玲, 吕明

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】针对实际应用中的DS/CDMA系统多为多径衰落信道下的异步DS/CDMA系统情况,通过对用于AWGN信道下的同步DS/CDMA系统中的常规盲多用户检测算法的改进,使这类算法在多径衰落信道下的异步DS/CDMA系统中仍具有很好的性能。理论分析和计算机仿真结果证实了改进方法的可行性。

关键词 多址干扰; 盲多用户检测; 异步码分多址; LS准则

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A

Blind Multiuser Detection Algorithms in Asynchronous CDMA System

Song Chunling, Lü Ming

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Aim at the case that the practical DS/CDMA system often is asynchronous DS/CDMA system in multipath fading channel, some conventional blind multi-user detection algorithms, which were applied to synchronous DS/CDMA system in AWGN channel, are modified, and to use them to asynchronous DS/CDMA system in multipath fading channel, these modified algorithms have good performance. Theoretical analysis and computer simulation confirm that these modified methods are available.

Key words multiple access inference; blind multiuser detection; asynchronous CDMA; LS criterion

DS/CDMA系统由于具有软容量、频率利用率高、软切换等优点,已得到广泛应用。然而,DS/CDMA系统中存在的多址干扰和远近问题影响着这一技术的推广运用。第三代移动通信系统采用多用户检测技术作为一种有效的解决方法。而盲多用户检测器由于无需发送训练序列,且具有开销小、效率高、实现复杂性比较低等优点,引起了人们对它的广泛关注。采用最小二乘类型算法实现的线性MMSE接收机能够很好地解决AWGN信道下同步DS/CDMA系统中存在的这两个问题,本文通过对算法的改进,使得这类接收机在多径瑞利衰落信道下的异步DS/CDMA系统中也能获得同样很好的性能。

1 盲多用户检测系统模型

1.1 同步DS/CDMA系统中的盲多用户检测模型

考虑有 K 个用户的同步DS/CDMA系统,经过AWGN信道后的基带接收信号模型为^[1]

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k(t) s_k(t) + n(t) \quad t \in [0, T_b] \quad (1)$$

式中 A_k 、 $b_k(t)$ 和 $s_k(t)$ 分别为第 k 个用户接收信号的幅度、符号和扩频波形($\|s_k(t)\|^2 = 1$),扩频码采用短码,

即码周期长度等于扩频增益 $N=T_b/T_c$, T_b 和 T_c 分别为符号间隔和码片间隔。各个用户的信息字符 $b_k(t) \in \{-1, +1\}$ 的独立同分布的随机信号。 $n(t)$ 是均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声。

1.2 异步DS/CDMA系统中的盲多用户检测模型

考虑有 K 个用户的异步DS/CDMA系统, 经过多径瑞利衰落信道后的基带接收信号模型为^[2]

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k \sum_{i=-M}^M b_k(i) \sum_{l=1}^L h_{k,l} s_k(t - iT_b - (l-1)T_c) + n(t) \quad t \in [0, T_b] \quad (2)$$

式中 用户每帧中包含的符号个数为 $2M+1$, L 为每个用户可分离的多径数, $h_{k,l}$ 为信道增益。如果符号间隔远大于多径信道的最大时延, 码间串扰可以忽略不计^[3]。

基带信号经过码片匹配滤波并以码片速率采样的信号为

$$\mathbf{r} = \tilde{\mathbf{S}}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{r} = [r(0), r(1), \dots, r(N-1)]^T$, $\mathbf{A} = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_K)$, $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_K]^T$, $\mathbf{n} = [n(0), n(1), \dots, n(N-1)]^T$, $\tilde{\mathbf{S}} = [\tilde{\mathbf{s}}_1, \tilde{\mathbf{s}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{s}}_K]$, $\tilde{\mathbf{s}}_k = \mathbf{s}_k \mathbf{h}_k$, $\mathbf{s}_k = [s_{k,1}, s_{k,2}, \dots, s_{k,L}]$, $\mathbf{h}_k = [h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,L}]^T$, $\|\mathbf{h}_k\| = 1$ ^[3], 信道互相关系数 $h_{jk} < 1$ 。令信道矩阵 $\mathbf{H} = \text{diag}(\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K)$, $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_K]$, 则有 $\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{S}\mathbf{H}$ 。

将线性多用户检测器设置为 $\mathbf{c}_k = \tilde{\mathbf{s}}_k + \mathbf{x}_k$, 其中 $\mathbf{c}_k \in R^N$, $\|\mathbf{x}_k\|^2$ 代表检测器的剩余能量。则第 k 个用户的解调输出为 $\hat{b}_k = \text{sgn}(\mathbf{c}_k^T \mathbf{r})$ 。不失一般性, 均考虑用户1为期望用户, 其他为干扰用户。

2 盲多用户检测算法

2.1 同步DS/CDMA系统中的盲多用户检测算法^[1, 2, 4]

其原理是最小化剩余能量。解扩处理为 $\mathbf{r}_{cds} = \mathbf{S}^H \mathbf{r} = \mathbf{S}^H (\mathbf{S}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n}) = \mathbf{R}_s \mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{S}^H \mathbf{n} = \mathbf{R}_s \mathbf{A}\mathbf{b} + \tilde{\mathbf{n}}$ (定义 $\mathbf{R}_s = \mathbf{S}^H \mathbf{S}$, $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{S}^H \mathbf{n}$)。

2.2 盲多用户检测算法经改进在异步DS/CDMA系统多径衰落信道中的推广

2.2.1 校正方法

实际DS/CDMA系统多为在多径衰落信道下的异步DS/CDMA系统。数据通过多径信道时, 信号产生Rayleigh衰落, 其幅度服从Rayleigh分布, 相位在 $(0, 2\pi)$ 上均匀分布。由于DS/CDMA系统的上/下行链路采用BPSK/QPSK调制方式, 信号的星座图将产生旋转, 故在接收端要消除星座图的旋转及幅度衰落。当接收端进行解扩处理时, 可通过共轭复乘信道估计值进行校正。大量仿真实验表明, 若不校正, 算法的误码率将达到50%左右。由于改进方法利用了信道估计, 所以要考虑下面两种情况:

1) 信道估计无误差情况

$$\mathbf{r}_{m\text{dsI}} = (\mathbf{S}\mathbf{H})^H \mathbf{r} = (\mathbf{S}\mathbf{H})^H (\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n}) = (\mathbf{S}\mathbf{H})^H (\mathbf{S}\mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n}) = \mathbf{H}^H \mathbf{S}^H \mathbf{S}\mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{H}^H \mathbf{S}^H \mathbf{n} = \mathbf{H}^H \mathbf{R}_s \mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{b} + \tilde{\mathbf{n}}' = \mathbf{R}'_s \mathbf{A}\mathbf{b} + \tilde{\mathbf{n}}' \quad (\text{定义 } \mathbf{R}'_s = \mathbf{H}^H \mathbf{R}_s \mathbf{H}, \tilde{\mathbf{n}}' = \mathbf{H}^H \mathbf{S}^H \mathbf{n})$$

可见, 这样不仅可消除多径衰落对信号的影响, 且可以达到同步情况下的信号解调效果, 甚至更好。

2) 信道估计有误差情况(即 $\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{H} + \Delta\mathbf{H}$)

$$\mathbf{r}_{m\text{dsII}} = (\mathbf{S}\hat{\mathbf{H}})^H \mathbf{r} = (\mathbf{S}\hat{\mathbf{H}})^H (\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n}) = (\mathbf{S}\hat{\mathbf{H}})^H (\mathbf{S}\mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n}) = \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{S}^H \mathbf{S}\mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{b} + \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{S}^H \mathbf{n} = (\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H})^H \mathbf{S}^H \mathbf{S}\mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{b} + \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{S}^H \mathbf{n} = \mathbf{R}'_s \mathbf{A}\mathbf{b} + \Delta\mathbf{e} + \tilde{\mathbf{n}}''$$

定义 $\Delta\mathbf{e} = (\Delta\mathbf{H})^H \mathbf{R}_s \mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{b}$, $\tilde{\mathbf{n}}'' = \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{S}^H \mathbf{n}$, 其中 $\Delta\mathbf{e}$ 是由信道估计误差引起的, 较大的信道估计误差会直接影响到盲算法的检测性能。

2.2.2 异步DS/CDMA系统中的盲多用户检测器

1) 异步PASTD: $\mathbf{c}_1 = \frac{1}{\tilde{\mathbf{s}}_1^T \mathbf{U}_s \mathbf{L}_s^{-1} \mathbf{U}_s^T \tilde{\mathbf{s}}_1} \mathbf{U}_s \mathbf{L}_s^{-1} \mathbf{U}_s^T \tilde{\mathbf{s}}_1$, 其中 $\mathbf{L}_s = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_K)$ 代表 \mathbf{R}_r 的 K 个最大特征值构成的对角阵, $\mathbf{R}_r = E\{\mathbf{r}\mathbf{r}^T\}$, $\mathbf{U}_s = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K]$ 代表矩阵 \mathbf{L}_s 对应的特征向量构成的矩阵。2) 异步LMS-MOE: $\mathbf{c}_1(n) = \mathbf{c}_1(n-1) - \mathbf{m}\tilde{\mathbf{z}}(n)(\mathbf{r} - \tilde{\mathbf{Z}}_{MF}(n)\tilde{\mathbf{s}}_1)$, 其中 $\tilde{\mathbf{z}}(n) = \langle \mathbf{r}(n), \tilde{\mathbf{s}}_1 + \mathbf{x}_1(n-1) \rangle$, $\tilde{\mathbf{Z}}_{MF}(n) = \langle \mathbf{r}(n), \tilde{\mathbf{s}}_1 \rangle$, \mathbf{m} 为步长因子。3) 异步RLS-MOE: $\mathbf{c}_1(n) = \frac{1}{\tilde{\mathbf{s}}_1^T \mathbf{R}_r^{-1}(n)\tilde{\mathbf{s}}_1} \mathbf{R}_r^{-1}(n)\tilde{\mathbf{s}}_1$, $\mathbf{R}_r(n) = \sum_{i=1}^n \mathbf{I}^{n-i} \mathbf{r}(i)\mathbf{r}^T(i)$, 其中 \mathbf{I} 为遗忘因子。

4) 异步QR-RLS-MOE : $\tilde{e}(n) = c_1^T(n)r(n) = \frac{\tilde{s}_1^T \mathbf{R}_r^{-1}(n)r(n)}{\tilde{s}_1^T \mathbf{R}_r^{-1}(n)\tilde{s}_1}$, $\hat{b}_1(n) = \text{sgn}(\tilde{e}(n))$ 。

3 计算机模拟

3.1 实验结果

系统采用BPSK调制, $K=10$, $N=31$, 采用GOLD码。设 $L=3$, 信道参数参考文献[5]。 $2M+1=3$ 。实验结果如图1~4所示, 图1、3分别代表同步AWGN信道和异步多径信道在干扰用户与期望用户等功率情况下用户1的误码率随信噪比的变化; 图2、4分别代表在用户1的信噪比为6 dB时, 同步AWGN信道和异步多径信道在干扰用户(能量 E_i)与期望用户(能量 E_1)存在远近效应情况下用户1的误码率随远近比率的变化。信噪比、 MAI 计算式分别采用 $10\lg(A_i^2/s^2)$ 、 $10\lg(A_k^2/A_1^2)$ 。仿真参数如表1所示。

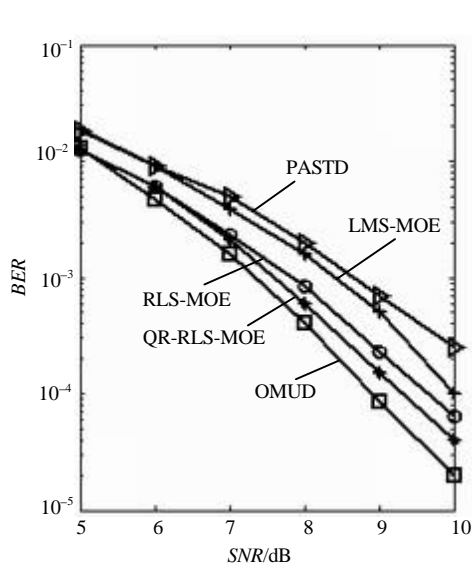


图1 用户1的误码率随信噪比变化的曲线

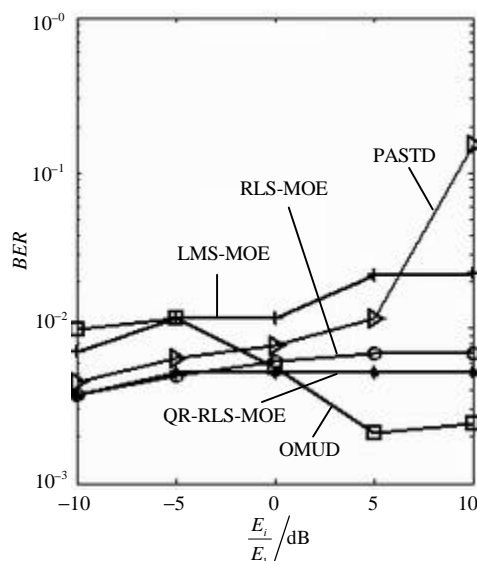


图2 用户1的误码率随远近比率变化的曲线

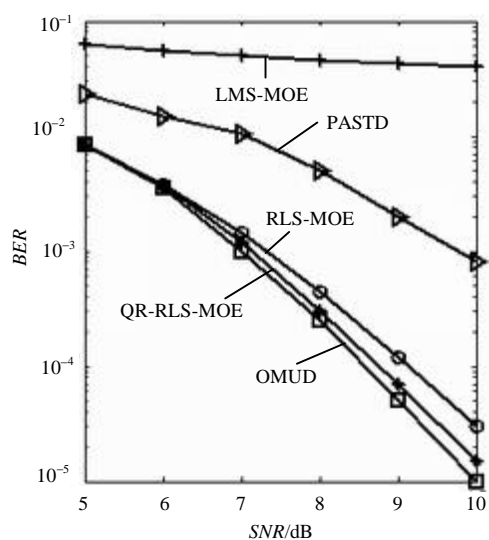


图3 用户1的误码率随信噪比变化的曲线

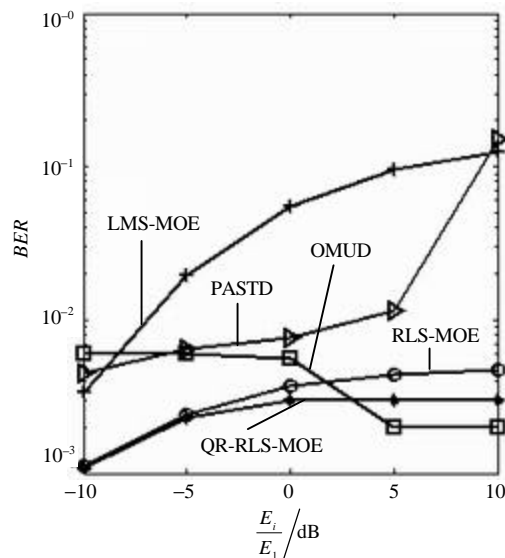


图4 用户1的误码率随远近比率变化的曲线

3.2 性能分析

最佳多用户检测器(OMUD)(运算量 2^K)的检测性能是任何一种多用户检测器所能达到的最小上界。由于PASTD算法(运算量 $O(NK)$)对子空间进行近似估计造成误差累积, 使得性能恶化。LMS-MOE算法(运算量

$O(N)$ 收敛慢,性能受初始条件影响大。RLS-MOE算法(运算量 $O(N^2)$)拥有RLS算法收敛相当快的特性和在时变环境中优良的跟踪能力,其综合性能相比LMS-MOE算法有极大的提高。QR-RLS-MOE算法不仅拥有RLS-MOE算法的优良性能,且使运算量降低、精度提高、易于映射为SYSTOLIC阵列结构。由图可知,经改进后的QR-RLS-MOE算法具有很好的抗多址干扰、抗远近效应和抗多径衰落的能力。故经改进后的QR-RLS-MOE算法具有实际的应用价值。

表1 经实际仿真得出的决定算法性能的关键参数

PASTD	LMS-MOE	RLS-MOE	QR-RLS-MOE
$I=1$	$m=1/60n$	$I=1$	$R(0) = dI$ $\underline{u}(0) = s_1/\sqrt{d}$ (同步) $\underline{a}(0) = d$
		$d=0.004$ (d 为调整参数)	$\underline{\tilde{u}}(0) = \tilde{s}_1/\sqrt{d}$ (异步)

4 结束语

经改进的盲多用户检测算法当满足收敛快的条件时具有很好的抗多址干扰、抗远近效应和抗多径衰落的能力。随着盲多用户检测技术的不断发展,它必将成为3G或B3G/4G移动通信系统中抗干扰的关键技术。信道估计误差对盲算法检测性能的影响将在后续文章中予以讨论。

参 考 文 献

- [1] Honig M, Madhow U, Verdu S. Blind adaptive multiuser detection[J]. IEEE Trans Information Theory, 1995, 41(4): 944-960
- [2] Wang X D, Poor H V. Blind multiuser detection: a subspace approach[J]. IEEE Trans Information Theory, 1998, 44(2): 677-690
- [3] Proakis J G. Digital communications(3rd Edition)[M]. New York : McGraw Hill , 1995
- [4] Poor H V , Wang X D. Code-aided interference suppression for DS/CDMA communications part II : parallel blind adaptive implementations[J]. IEEE Trans Commun., 1997, 45(9) : 1 112-1 122
- [5] 王 昕, 刘 艳, 王宗欣. 扩频通信中多径信道参数估计和跟踪方法[J]. 复旦学报, 2000, 39(2) : 212-218

编 辑 漆 蓉

(上接第234页)

参 考 文 献

- [1] Azzouz E E, Nandi A K. Automatic identification of digital modulation types[J]. Signal Processing , 1995 , 47: 55-69
- [2] 胡延平, 李广森, 李 刚, 等. 利用参数统计方法自动识别数字调制信号[J]. 通信学报, 2002 , 23(2): 58-65
- [3] Dominguez L V , Paez B J M , Portillo G J , *et al.* A general approach to the automatic classification of radiocommunication signals[J]. Signal Processing , 1991 , 22: 239-250
- [4] Soliman S S. Signal classification using statistical moments[J]. IEEE Trans. on Communications , 1992 , 40(5): 908-916
- [5] Gardner W A. Spectral correlation of modulated signals: part I-analog modulation[J]. IEEE Trans. on Communications , 1987 , 35(6): 584-594
- [6] Gardner W A , Brown W A, Chen C K. Spectral correlation of modulated signals: part II-digital modulation[J]. IEEE Trans. on Communications , 1987 , 35(6): 595-601
- [7] Nandi A K , Azzouz E E. Modulation recognition using artificial neural networks[J]. Signal Processing , 1997 , 56: 165-175
- [8] 吕 杰, 张胜付, 邵伟华, 等. 数字通信信号自动调制识别的谱相关方法[J]. 南京理工大学学报, 1999 , 23(4) : 297-299
- [9] 方开泰. 实用多元统计分析[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1989

编 辑 徐培红