

同步 DS-CDMA 系统中的最优时空线性多用户检测器

王文杰, 蒋伯峰, 殷勤业

(西安交通大学电信学院信息工程研究所, 陕西西安 710049)

摘要: 本文给出了一种通用的时空二维线性多用户检测方法, 它将所有线性多用户检测器归结到一个统一的数学模型之下. 基于此模型, 本文将时空线性多用户检测问题转化为一个权矢量的优化问题, 并在线性约束最小方差 (LCMV) 准则下给出了权矢量的优化解. 对现有的几种典型的线性多用户检测器的分析表明, 这些方法都可以看作是本文提出的通用时空二维线性多用户检测方法的特例, 且只能在某种限定条件下得到局部最优解, 其抑制多址干扰和噪声的能力都低于文中的最优时空线性多用户检测器. 最后, 本文给出了数值仿真结果.

关键词: 时空二维处理; 线性多用户检测器; 码分多址

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 10-1297-04

Optimal Linear Space-Time Multiuser Detector for Synchronous DS-CDMA Systems

WANG Wenjie, JIANG Bofeng, YIN Qinye

(Information Engineering Institute, School of Electronics and Information Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049, China)

Abstract: A versatile signal model suitable for linear space-time multiuser detectors is proposed. Based on the model, a versatile linear space-time multiuser detector is presented and its optimal solution according to the linear constrained minimum variance (LCMV) criterion is deduced. The analyses of existent linear multiuser detectors demonstrate that these methods are just the special cases of the versatile detector in this paper and can only achieve the suboptimal solution. Hence their interference canceling performance is inferior to the optimal detector in this paper. Finally, numerical simulations are presented.

Key words: space-time processing; linear multiuser detector; CDMA

1 引言

DS-SS-CDMA 系统以其较高的频带利用率, 较强的抗干扰能力, 引起人们普遍关注. 在实际系统中, 由于码的准正交性及多径效应, DS-SS-CDMA 系统中存在着多址干扰 (MAI). MAI 的存在使基于匹配滤波器的单用户检测器, 在接收远区用户信号时, 受到近区用户的干扰, 即存在远近效应问题, 从而限制了系统容量. 多用户检测方法能够充分利用各用户的扩频码信息, 减小 MAI 的影响, 是克服远近效应的有效手段.

最优多用户检测器^[1]采用最大似然估计方法, 由于其运算量太大而很难实施. 为此人们提出了一系列次最优的方法以减小运算量. 这些方法可以分为线性检测器和非线性检测器两种, 其中线性多用户检测器以解相关方法^[2], 最小均方误差 (MMSE) 方法^[3]和最小输出能量 (MOE) 方法^[4]最具代表性. 虽然多用户检测器可以有效解决远近效应问题, 进而可以大大提高系统容量, 但是小区中容纳的最多用户数受扩频码长度的限制, 对于过载系统 (即用户数大于扩频码长度的情况), 传统多用户检测器的性能会显著下降. 阵列天线的引入将传统多用户检测方法推广到了时空域, 如文 [5, 6] 中的时空解相关器及文 [7] 中的时空级联 LCMV 方法就是解相关器和 MOE

方法推广到时空域的结果. 由于引入了空间信息, 多用户检测的性能得到一定程度的改善, 并可以应用于过载系统中, 使系统容量得到进一步提高. 本文重点研究如何充分合理地利用时域与空域信息, 以得到最优的时空线性多用户检测方法. 在采用阵列天线后, 不同用户的信号不仅具有由于被分配了不同的扩频码而带来的时域特征, 而且具有由于用户空间位置的不同而带来的空域特征, 时域特征和空域特征均可以用来区分不同的用户. 因此, 本文将用户的空间特征和时域特征等同看待, 将二者合并后构造时空特征矢量. 所构造的时空特征矢量中含有完整的时空二维信息, 并具有简单的数学表达形式. 据此, 给出了一种通用的时空线性多用户检测方法, 从而将所有的线性多用户检测方法归结到一个统一的数学模型下. 基于此模型, 将一个时空线性多用户检测问题转化为了一个权矢量的优化问题, 并在 LCMV 准则下给出了权矢量的最优解. 利用本文提出的数学模型及权矢量优化的观点对前述几种线性多用户检测器重新进行了推导, 证明了这几种线性多用户检测方法都是本文通用时空线性多用户检测方法的特例. 由于这些线性多用户检测方法都是在某些限定下得到局部最优解, 因而其抑制干扰和噪声的性能都低于本文提出的最优时空线性多用户检测器.

收稿日期: 2000-04-24; 修回日期: 2001-12-05

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69872029)

2 信号模型

尽管实际的 DS-CDMA 系统大多为异步系统,但是为了表述简洁并突出主题,本文只限于在同步 DS-CDMA 系统中研究问题,而且本文的结论也不难推广到异步系统中。

假设基站采用 M 元天线,移动台发射的信号为 BPSK 调制的 DS-CDMA 信号,则在加性高斯白噪声信道中基站接收到的阵列信号可以表示为

$$\mathbf{r}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} g_k \mathbf{a}_k b_k[n] s_k(t - nT_b) + \mathbf{u}(t) \quad (1)$$

其中: N 为数据流的 bit 数; K 为基站接收到的用户信号总数; T_b 为 bit 周期; $\sqrt{p_k}$ 表示第 k 个用户的信号幅度; g_k 为信道复增益; \mathbf{a}_k 为 $M \times 1$ 的导向矢量,它反映了用户的空域特征; $b_k[n] \in \{+1, -1\}$ 是第 k 个用户的第 n 个信息码元,各用户的信息码流间互不相关; $\mathbf{u}(t)$ 为 $M \times 1$ 的白噪声矢量,每个阵元的噪声输出相互独立且服从均值为零,方差为 σ^2 的高斯分布; $s_k(t)$ 为第 k 个用户的归一化特征波形。

$$s_k(t) = \frac{1}{G} \sum_{l=0}^{G-1} c_k[l] \phi(t - lT_c) \quad (2)$$

其中: G 为扩频增益; $\{c_k(l)\}_{l=0}^{G-1}$ 为第 k 个用户的扩频序列,它反映了用户的时域特征; $\phi(t)$ 为归一化的脉冲成形函数,设其持续期为 $[0 - T_c]$; $T_c = T_b/G$ 为 chip 周期。

将接收到的信号经过与脉冲成形函数相匹配的滤波器,并以 chip 率采样可得接收信号离散形式为

$$\mathbf{r}^{[l]}[n] = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{r}(t) \phi(t - lT_c - nT_b) dt \quad M \times 1 \quad (3)$$

其中 n 为 bit 序号, l 为 chip 序号。将式(1)、(2)代入式(3)有

$$\mathbf{r}^{[l]}[n] = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} g_k \mathbf{a}_k b_k[n] c_k[l] + \mathbf{u}^{[l]}[n] \quad M \times 1 \quad (4)$$

其中 $\mathbf{u}^{[l]}[n] = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}(t) \phi(t - lT_c - nT_b) dt \quad M \times 1 \quad (5)$

3 最优时空线性多用户检测器

3.1 通用时空线性多用户检测器

观察式(4)发现,所有用户的第 n 个数据的信息包含在 G 个 $M \times 1$ 的矢量 $\{\mathbf{r}^{[l]}[n]\}_{l=0}^{G-1}$ 中,为此,将 $\{\mathbf{r}^{[l]}[n]\}_{l=0}^{G-1}$ 排成一个 $MG \times 1$ 的矢量有

$$\mathbf{x}[n] = [\mathbf{r}^{[0]}[n]^T, \mathbf{r}^{[1]}[n]^T, \dots, \mathbf{r}^{[G-1]}[n]^T]^T \quad (6)$$

于是,矢量 $\mathbf{x}[n]$ 中包含了所有用户的第 n 个数据的信息,多用户检测的过程就是从矢量 $\mathbf{x}[n]$ 中分离所有用户数据的过程。为表述简洁, $\mathbf{x}[n]$ 还可以表示成如下的矩阵形式

$$\mathbf{x}[n] = \mathbf{S}\mathbf{V}\mathbf{b}[n] + \mathbf{u}[n] \quad (7)$$

其中:

$$\mathbf{u}[n] = [\mathbf{u}^{[0]}[n]^T, \mathbf{u}^{[1]}[n]^T, \dots, \mathbf{u}^{[G-1]}[n]^T]^T \quad MG \times 1;$$

$$\mathbf{b}[n] = [b_1[n], b_2[n], \dots, b_K[n]]^T \quad K \times 1;$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{M} \cdot \text{diag}[\sqrt{p_1}g_1, \sqrt{p_2}g_2, \dots, \sqrt{p_K}g_K] \quad K \times K;$$

$$\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_K] \quad MG \times K;$$

$$\mathbf{c}_k = [c_k[0], c_k[1], \dots, c_k[G-1]]^T \quad G \times 1$$

$$\mathbf{s}_k = \frac{1}{M} \mathbf{c}_k \odot \mathbf{a}_k \quad MG \times 1 \quad (8)$$

表示共扼, \odot 表示 Kronecker 积。式(8)中的系数 $1/M$ 用来归一化 s_k 。由于式(8)中, \mathbf{c}_k 包含了用户的时域信息, \mathbf{a}_k 包含了用户的空域信息,因此本文将 s_k 命名为第 k 个用户的时空特征矢量。 $\mathbf{x}[n]$ 可被解释为 K 个用户的时空特征矢量被各自信息码元调制后与信道噪声的总和。至此,通用的时空线性多用户检测器即可表示为 $y[n] = \mathbf{w}^H \mathbf{x}[n]$ (9) 其中 \mathbf{w} 为 $MG \times 1$ 的权矢量,不同的线性多用户检测器对应不同权矢量的选取。

时空特征矢量的引入,将一个时空二维问题转换为了一个一维问题,可以用时域的多用户检测方法来解决时空多用户检测问题,简化了数学表达的复杂度。比较 s_k 和 c_k 可以看出,由于空域信息的引入,时空二维多用户检测器与传统的时域多用户检测器相比增加了等效处理增益,提高了用户特征之间的正交性,从而可以改善接收机性能。

假设被接收用户为第 1 个用户,依据第 1 个用户的时空特征来设计权矢量 w_1 ,并将 $y[n]$ 通过硬限幅函数即可得到 $b_1[n]$ 的估计值,即 $\hat{b}_1[n] = \text{sgn}(\mathbf{w}_1^H \mathbf{x}[n])$ (10)

$b_1[n]$ 的估计值的准确程度直接依赖于权矢量的选取,于是时空线性多用户检测器的问题转化为一个权矢量的优化设计问题。这一问题类同于阵列信号处理中的波束形成器的设计,因此可以利用已有的波束形成方法来设计权矢量。

以波束形成的观点来看,由于不同的用户具有不同的时空特征,不同用户间不仅具有不同的空间入射方向,而且具有不同的“时间入射方向”,也就是说具有不同的“时空入射方向”,只要合理选择权矢量,在干扰信号的“时空入射方向”上形成零点,即可达到消除干扰的目的。由于权矢量 \mathbf{w} 有 $MG-1$ 的自由度,在固定主瓣方向和增益的前提下,最多可以形成 $MG-2$ 个零点,因此理论上,最多可以消除 $MG-2$ 个多址干扰,从而可以大大增加系统容量。

3.2 权矢量的优化设计

考察时空线性多用户检测器的输出功率

$$p(\mathbf{w}) = E[y[n]y[n]^*] = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}[n]\mathbf{x}[n]^H]$, 是阵列信号 $\mathbf{x}[n]$ 的协方差矩阵,为了尽量抑制在时空线性多用户检测器输出中的噪声和干扰成分,本文选用 LCMV 准则来优化权矢量 \mathbf{w} , 即

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad \text{subject to } \mathbf{w}^H \mathbf{s}_1 = 1 \quad (12)$$

LCMV 准则下的最优解为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = (\mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}_1) / (\mathbf{s}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}_1) \quad (13)$$

观察式(13)可以发现,我们只在构造被接收用户的时空特征矢量时应用了被接收用户的空间特征和特征波形,并不需要其它干扰源和噪声的任何信息,这是由于这些信息已经全部包含在协方差矩阵中了。因此本文方法不同于传统的解相关器,它不仅抑制了已知用户(同小区内用户)的多址干扰,而且可以有效抑制未知用户(相邻小区用户)的多址干扰和信道噪声。

将式(13)中的最优权矢量应用于式(9)中,即可得到在 LCMV 准则下的最优时空线性多用户检测器,即该时空线性多用户检测器在干扰和噪声的综合抑制性能上是最优的。

4 时空线性多用户检测模型通用性分析

在众多线性时空多用户检测方法中, 最具有代表性的有 Choi 的时空级联解相关器^[5]、Miller 的时空联合解相关器^[6]和 Wang 的时空级联 LCMV 方法^[7]等. 本节从权矢量优化的观点, 按式(9)这样一个统一的数学模型, 在不同限定条件下, 分别得到了以上几种时空多用户检测器的结果, 从而证明了以上几种线性多用户检测器是本文通用时空线性多用户检测器的特例. 本节还给出以上几种线性多用户检测器相应的权矢量, 并以权矢量优化的观点比较各种方法的性能. 为了内容的完整性, 首先从基于单用户思想的匹配滤波器方法开始.

4.1 时空匹配滤波方法

选取 $w_{MF} = s_1$, 则由式(9)有

$$y_{MF}[n] = s_1^H x[n] = V_1 b_1[n] + \sum_{k=2}^K s_1^H s_k V_k b_k[n] + s_1^H u[n] \quad (14)$$

其中第一项为信号项, 第二项为多址干扰项, 第三项为噪声项. 这就是时空匹配滤波器方法.

考察式(13)可以看出, 当无干扰信号而只有噪声时, 协方差矩阵为一对角阵, 此时, 式(13)中的权矢量就是 s_1 . 因此, 时空匹配滤波器就是 $K=1$ 时, 文中最优线性时空多用户检测器的特例. 当有其它用户存在时, 由于时空匹配滤波器将干扰和噪声等同看待, 干扰用户的能量直接影响接收机性能, 因此该方法没有抗远近效应的能力. 尽管它利用了用户的空域信息, 在一定程度上降低了多址干扰和噪声, 但是其性能远远不如最优时空线性多用户检测方法.

4.2 时空级联解相关器

解相关方法^[1]是由 Lupas 和 Verdu 提出的一种线性多用户检测方法, Choi 将其和波束形成器相结合, 提出了一种时空级联解相关方法^[5], 其基本原理是在解相关器后级联波束形成器. 下面将证明, 时空级联解相关器是通用时空线性多用户检测器的特例. 依据通用时空线性多用户检测器的思想, 文[5]的方法可以重新解释为: 假设有 K' 个用户的扩频序列已知, $K' < K$, 从式(7)的 $x[n]$ 中取出代表阵元 m 的子阵

$$\tilde{x}_m[n] = [r_m^{(0)}[n], r_m^{(1)}[n], \dots, r_m^{(G-1)}[n]]^T \quad (15)$$

$$\text{写成矩阵形式为 } \tilde{x}_m[n] = C A_m \tilde{b}[n] + I_m[n] \quad (16)$$

$$\text{其中: } C = [c_1, c_2, \dots, c_{K'}]; A_m = \frac{1}{M} \text{diag}[a_{1,m}, a_{2,m}, \dots, a_{K',m}]$$

$$\tilde{b}[n] = [b_1[n], b_2[n], \dots, b_{K'}[n]]^T \quad (17)$$

$$\tilde{V} = M \cdot \text{diag}[\sqrt{p_1}g_1, \sqrt{p_2}g_2, \dots, \sqrt{p_{K'}}g_{K'}] \quad (18)$$

$I_m[n]$ 为多址干扰和噪声项.

$\tilde{x}_m[n]$ 经 K' 个用户的匹配滤波器的输出为

$$\tilde{y}_m[n] = C^H \tilde{x}_m[n] = \tilde{R} A_m \tilde{b}[n] + C^H I_m[n] \quad (19)$$

其中 $\tilde{R} = C^H C$, 为扩频码的互相关矩阵, 解相关的输出为

$$\tilde{z}_m[n] = \tilde{R}^{-1} \tilde{y}_m[n] \quad (20)$$

考虑第一个用户的解相关输出 $\tilde{z}_{m1}[n]$, 令 $\tilde{\rho}_k = (\tilde{R}^{-1})_{1,k}$, $1 < k < K'$, 则

$$\tilde{z}_{m,1}[n] = \sum_{k=1}^{K'} \tilde{\rho}_k \tilde{z}_{m,k}[n] \quad (21)$$

其中 $(\cdot)_{1,k}$ 表示矩阵中的第 1 行第 k 列元素, $\tilde{y}_{m,k}[n]$ 为 $\tilde{y}_m[n]$ 的第 k 个元素.

将解相关的输出经过波束形成器有,

$$y_{SR-C}[n] = \sum_{m=1}^M \tilde{w}_{sm}^* \tilde{z}_{m,1}[n] = \sum_{m=1}^M \tilde{w}_{sm}^* \sum_{k=1}^{K'} \tilde{\rho}_k C_k^H \tilde{x}_m[n] \quad (22)$$

其中 \tilde{w}_{sm} 为波束形成器的权系数, 令

$$\tilde{w}_s = [w_{s1}, w_{s2}, \dots, w_{sM}]^T$$

$$w_{SR-C} = \left\{ \sum_{k=1}^{K'} \tilde{\rho}_k C_k \right\} \odot \tilde{w}_s \quad (23)$$

则式(22)可以写成如下的矩阵形式,

$$y_{SR-C}[n] = w_{SR-C}^H x[n] \quad (24)$$

其中 $x[n]$ 的定义见式(6).

式(24)表明, 它是式(9)所示方法的特例, 其权系数由式(23)给出. 从上述推导过程可以看出, 空域权系数的选取和时域权系数的选取互不相关, 因此该方法是一种时空级联处理方法. 观察式(23)发现, 时域权系数是已知用户扩频序列的线性组合, 即只能限定在已知扩频序列所张的子空间上寻找最优时域权系数. 因此, 这种方法只能有效抑制已知扩频序列的用户干扰, 而对未知用户的干扰(如小区外的用户干扰)和噪声则无能为力, 而且对已知用户的干扰的消除是以未知干扰和噪声的功率增加为代价的. 虽然 MMSE 方法能在抑制已知干扰和抑制噪声间做一折中, 但是由于其寻优空间和解相关器相同, 仍无法有效去除未知用户的干扰.

4.3 时空联合解相关器

据式(8)所示的时空特征矢量, 文[6]中的时空联合解相关器可以重新解释为

假设有 K' 个用户的扩频序列已知, $K' < K$, 式(7)中的信号可以重写为: $x[n] = \tilde{S} \tilde{b}[n] + \tilde{I}[n]$ (25)

其中 \tilde{V} 和 $\tilde{b}[n]$ 的定义与式(17)、(18)相同, $\tilde{I}[n]$ 为多址干扰和噪声项. 且 $\tilde{S} = [s_1, s_2, \dots, s_{K'}]$ (26)

$x[n]$ 经 K' 个用户的匹配滤波器的输出为

$$\tilde{y}[n] = \tilde{S}^H x[n] = \tilde{R} \tilde{b}[n] + \tilde{S}^H \tilde{I}[n] \quad (27)$$

其中 $\tilde{R} = \tilde{S}^H \tilde{S}$, 为时空特征矢量的互相关矩阵, 时空解相关的输出为: $\tilde{z}[n] = \tilde{R}^{-1} \tilde{y}[n]$ (28)

考虑第一个用户的解相关输出, 为此令 $\tilde{\rho}_k = (\tilde{R}^{-1})_{1,k}$, $1 < k < K'$, 则被接收用户的时空联合解相关输出为

$$y_{SR-J}[n] = \sum_{k=1}^{K'} \tilde{\rho}_k \tilde{z}_k[n] = w_{SR-J}^H x[n] \quad (29)$$

$$\text{其中 } w_{SR-J} = \sum_{k=1}^{K'} \tilde{\rho}_k s_k \quad (30)$$

实际上, 上述方法就是用时空特征矢量代替传统解相关中的扩频序列后做解相关的结果. 由于这一方法应用了用户的空域信息, 与传统解相关相比增加了等效处理增益, 提高了用户特征之间的正交性, 从而改善了接收机的性能. 由式(30)可知, 该方法的权矢量就是已知用户时空特征矢量的线性组合, 即只能限定在已知时空特征矢量所张的子空间上寻找最优权系数. 因此仍无法有效消除未知用户的干扰.

4.4 MOE 方法

为了有效抑制所有的多址干扰和噪声, Honig^[3] 提出了

MOE 方法,即在保证与被接收用户的特征波形内积为 1 的前提下优化权系数,使检测器输出能量最小.实际上,MOE 方法就是本文中最优时空线性多用户检测器在 $M=1$ 时的特例,MOE 准则就是 LCMV 准则.

记 $w_{opt1} = w_{opt}$ where $M=1$, 则 MOE 方法的权矢量可以表示为

$$w_{MOE} = w_{opt1} \tag{31}$$

4.5 时空级联 LCMV 方法

文[7]将 MOE 方法推广到时空域,在 MOE 后级联了波束形成器.令波束形成器的权矢量为 \bar{w}_s , 则检测器的输出即可表示为

$$y_{LCMV-c}[n] = w_{LCMV-c}^H x[n] \tag{32}$$

其中, $w_{LCMV-c} = w_{opt1} \odot \bar{w}_s$ \tag{33}

4.6 小结

由式(23)和(33)可知,对于时空级联处理方法,其时空权矢量都可以写成时域权矢量和空域权矢量的 Kronecker 积的形式.然而由式(13)可知,最优权矢量不必受限于时域权矢量和空域权矢量的 Kronecker 积的形式,这也就说明了时域处理和空域处理之间并不是完全独立的,因而使用时空联合处理方法的性能将会优于时空级联处理方法的性能.当然,这种性能的提高是以运算量的增加为代价的,即本文的最优时空线性多用户检测器的运算量大于前述 5 种方法的计算量.但是在这种情况下,该算法的运算量仍然远远小于前述的基于最大似然估计的最优多用户检测方法.同时,本文工作的意义还在于:(1)可以以通用时空线性多用户检测器模型为指导,设计运算量较小的次最优时空线性多用户检测器;(2)可以以文中最优时空线性多用户检测器的优化准则来进行自适应方法研究.

5 仿真实验分析

实验中采用均匀线阵,阵元间距为半波长.扩频码采用 15 位长的 Gold 码.数据码元个数为 8000,信噪比为 10dB.用户 1 为被接收用户,其信号功率较其它用户的信号功率小约 6dB 左右,以模拟远近效应情况,假设有一个未知用户,即 $K' = K - 1$.首先研究各种时空线性多用户检测器的误码率特性,其中天线阵阵元数为 2.当用户数目多于 Gold 码序列的长度时(过载),Gold 码被复用,但复用同一扩频码的用户具有不同的空间特征.图 1 给出了 5 种时空线性多用户检测器的误码率特性,图中结果是 100 次 Monte Carlo 实验后的平均.结果表明,最优时空线性多用户检测方法的误码率性能优于其它任

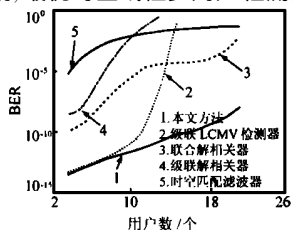


图 1 各种方法的误码率比较

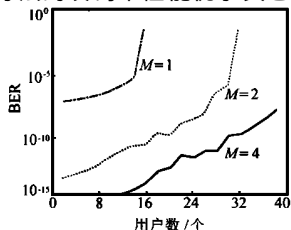


图 2 本文方法在不同阵元个数下的误码率

何方法,在过载情况下,时空联合方法的误码率性能优于时空级联方法.图 2 给出了最优时空线性多用户检测器中的不同阵元数下的误码率特性.图中结果表明,随着阵元个数的增加,检测器的误码率性能得到了很大程度的改善.

6 结论

本文提出了一种通用的时空线性多用户检测器,并依据 LCMV 准则给出了时空线性多用户检测器的最优解.现有的线性多用户检测方法都是文中通用的时空线性多用户检测器的特例,且其抑制多址干扰和噪声的能力都低于文中提出的最优时空线性多用户检测器.

参考文献:

- [1] Verdu S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple access channel [J]. IEEE Trans. Information Theory, 1986, 32 (1): 85- 96.
- [2] Lupas R, Verdu S. Linear multiuser detectors for synchronous code division multiple access channels [J]. IEEE Trans. Information Theory, 1989, 35(1): 123- 136.
- [3] Xie Z, Short R T, Rushforth C K. Family of suboptimum detectors for coherent multiuser communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(4): 683- 690.
- [4] Honig M, Madhow U, Verdu S. Blind adaptive multiuser detection [J]. IEEE Trans. Information Theory, 1995, 41(7): 944- 960.
- [5] Choi J. Beamforming for the multiuser detection with decorrelator in synchronous CDMA systems: Approaches and performance analysis [J]. Signal Processing, 1997, 60(7): 195- 211.
- [6] Miller S Y, Schwartz S C. Integrated spatial-temporal detectors for asynchronous Gaussian multiple access channels [J]. IEEE Trans. Communications 1995, 43(2/ 3/ 4): 396- 411.
- [7] Wang X D, Poor H V. Space time multiuser detection in multipath CDMA channels [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1999, 47(9): 2356- 2374.

作者简介:



王文杰 男. 1971 年 12 月出生于山西太谷县. 1993 年、1998 年分别获西安交通大学学士、硕士学位, 现为西安交通大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、CDMA 系统中的多用户检测、通信中的时空信号处理等. 已在国内外发表论文十余篇.



蒋伯峰 男. 1962 年 8 月出生于宁夏银川. 副教授. 1983 年、1988 年分别获西安交通大学学士、硕士学位, 现为西安交通大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、信道盲估计、通信中的时空信号处理等. 已在国内外发表论文十余篇.