

文章编号:1004-9037(2014)03-0390-07

上行多用户 MIMO 系统检测算法及抗远近效应研究

马 俊 王大鸣 崔维嘉

(解放军信息工程大学信息工程学院, 郑州, 450002)

摘要:上行多用户多输入多输出(Multiple input multiple output, MIMO)通信系统必须抑制用户间的共信道干扰,提出了一种基于最大信号干扰噪声比准则的线性干扰抑制算法,并且给出了存在信道估计误差时的改进算法。该算法与块对角化(Block diagonalization, BD)算法相比考虑了噪声的影响,性能有较大的提升。然后为了对抗非理想信道状态信息对系统造成的不利影响,将 Alamouti 空时编码用于多用户 MIMO 系统中以提高分集增益,并提出了一种线性处理方法。最后针对存在远近效应时算法的局限性,提出了一种分组优化算法,以保证各用户均能达到所期望的容量。仿真结果表明本文所提算法具有优异的性能。

关键词:多用户 MIMO; 上行链路; 干扰抑制; Alamouti 空时编码; 远近效应

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Detecting Algorithm and Near-Far Resistant in Uplink Multiuser MIMO

Ma Jun, Wang Daming, Cui Weijia

(Institute of Information System Engineering, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: Co-channel interference must be suppressed in uplink multiuser multiple input multiple output(MIMO) system. A linear uplink multiuser MIMO detecting algorithm is proposed based on the criterion of maximizing signal to interference noise ratio. The effect of channel estimation errors on system performance is also studied and the improved robust algorithm is provided. Compared with the block diagonalization algorithm, the proposed algorithm embodies the influence of noise, so the detection performance is greatly improved. Then a linear method of reconstructing signals in the base station is proposed to employ Alamouti space-time coding in uplink multiuser MIMO system for further improving the detection performance in the presence of channel estimation errors. Finally, aiming at the near-far effect, an optimization algorithm of grouping users is proposed to ensure that each user can achieve an acceptable capacity. Simulation shows that the proposed algorithms achieve good performance.

Key words: multiuser MIMO; uplink system; interference suppression; Alamouti space-time coding; near-far effect

引 言

多输入多输出系统(Multiple input multiple output, MIMO)利用多个空间信道传输信号,在不增加系统带宽和发射功率的基础上能显著地提高容量。目前单用户 MIMO 技术已经有大量的研究

结果^[1-2], 现有研究重点已经转向多用户 MIMO (Multiple user MIMO, MU-MIMO)系统中。在 MU-MIMO 系统中,多个用户使用相同频率同时进行通信,存在共信道干扰(Co-channel interference, CCI)。信噪比越高的用户对其余用户的干扰越强,不能简单地通过提高发送功率来提升系统容量。如若共信道干扰不能得到有效的抑制,将使系

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX03003-003-02)资助项目;国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)重点(2012AA01A502, 2012AA01A505)资助项目。

收稿日期:2012-11-06;修订日期:2013-02-28

统性能严重下降。

对于 MU-MIMO 下行传输系统,国内外学者已经进行了一定的研究^[3-6],如 Mirette 等提出的基于最大 SLNR 的预编码算法^[5],高献坤等提出连续迭代优化的最大 SLNR 预编码算法^[6]等。但在上行 MU-MIMO 系统中,用户设备(User equipment, UE)之间无协作关系,并且难以获知其余用户的信道状态信息(Channel state information, CSI),因此一般在基站(Base station, BS)接收端进行处理以抑制用户之间的共信道干扰^[7],而不能将下行链路中适用的预编码算法用于解决上行链路的干扰抑制问题。

针对 MU-MIMO 上行传输系统,文献[8]提出了一种基于块对角化(Block diagonalization, BD)分解的干扰抑制算法,能够较好地抑制 CCI。文献[9]进一步研究了 BD 算法的性能,并与几种多用户检测算法做了比对,证明了 BD 算法具有复杂度低、检测性能较好等特点。但同时文献[9]提出最优的干扰抑制算法应使得每个用户的接收信干噪比(Signal to interference noise ratio, SINR)最大化,但认为这样处理十分困难,并没有进行研究。

在现有研究的基础上,考虑将最大信号干扰噪声比(Maximizing signal to interference noise ratio, MSINR)作为准则研究上行多用户干扰抑制算法。

1 系统模型

上行 MU-MIMO 传输系统,基站与 K 个用户进行通信。设基站有 M 根接收天线,用户 k 有 N_k 根发送天线。图 1 为系统的结构示意图,用户 k 的发送信号可以表示为

$$\mathbf{X}_k = [x_{k1} \quad x_{k2} \quad \dots]^T \quad (1)$$

式中: \mathbf{X}_k 为 $N_k \times 1$ 传输向量,且满足 $E(\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^*) = \mathbf{I}_{N_k}$ 。其中, \mathbf{I}_{N_k} 为 $N_k \times N_k$ 的单位矩阵。

用户发送的信号通过信道传输,基站接收到的信号向量 \mathbf{Y} 表示为

$$\mathbf{Y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{Z} \quad (2)$$

其中, $M \times N_k$ 的信道矩阵 \mathbf{H}_k 可以表示为

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} h_k^{(1,1)} & \dots & h_k^{(1,N_k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_k^{(M,1)} & \dots & h_k^{(M,N_k)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $h_k^{(m,l)}$ 表示从用户 k 的第 l 根发送天线到基

站的第 m 根接收天线的信道传输系数。信道服从准静态的非频选莱斯衰落,则用户 k 的信道矩阵 \mathbf{H}_k 可以表示为

$$\mathbf{H}_k = \sqrt{\frac{K_R}{(K_R + 1)}} \bar{\mathbf{H}}_k + \sqrt{\frac{1}{(K_R + 1)}} \mathbf{H}_{k, \text{fading}} \quad (4)$$

式中: $\bar{\mathbf{H}}_k$ 和 $\mathbf{H}_{k, \text{fading}}$ 分别为信道的视距和非视距分量, K_R 为莱斯因子。非视距分量又可以表示为 $\mathbf{H}_{k, \text{fading}} = \mathbf{R}_{R_x, k}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{k, w} \mathbf{R}_{T_x, k}^{\frac{1}{2}}$, $\mathbf{R}_{R_x, k}^{\frac{1}{2}}$ 和 $\mathbf{R}_{T_x, k}^{\frac{1}{2}}$ 分别表示基站和用户的天线相关矩阵, $\mathbf{H}_{k, w}$ 的元素服从均值为 0 方差为 1 的复高斯分布。

\mathbf{Z} 表示基站接收的 M 维的加性噪声矩阵,服从均值为零,协方差为 σ^2 的复高斯分布。即为

$$E[\mathbf{Z} \mathbf{Z}^*] = \sigma^2 \mathbf{I}_M \quad (5)$$

假定随机变量 \mathbf{H}_k , x_k , \mathbf{Z} 相互独立,文中使用相同标准将 $\frac{1}{\sigma^2}$ 作为基站每根接收天线的信噪比(Signal to noise ratio, SNR)。在后面的仿真中,均使用 $\frac{1}{\sigma^2}$ 代表作为横坐标绘制误比特率曲线(Bit error rate, BER)。并且假设基站可以通过信道估计获知准确的信道信息 $\mathbf{H}_k, k = \{k = 1, \dots, K\}$, 各用户的信道均为准静态慢衰落信道,即在每个帧内保持不变,且各帧之间的信道相互独立。在后面的分析中,也将给出存在信道估计误差时本文算法的改进。

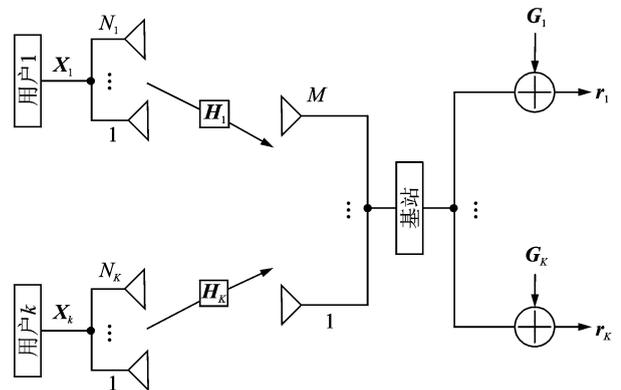


图 1 上行 MU-MIMO 系统示意图
Fig. 1 Block diagram of uplink MU-MIMO system

2 基于 MSINR 的干扰抑制算法

由前面的分析,在上行 MU-MIMO 传输系统中,如何抑制用户间的共信道干扰是实现多用户检测的关键。文献[8-9]提出的 BD 算法可以完全消除用户间的干扰,但由于没有考虑噪声的影响,所

以其性能受到限制。为了进一步提升检测性能,不仅需要抑制用户间的干扰,还应该考虑噪声对系统性能的影响。下面提出一种基于 MSINR 准则的干扰抑制算法,能抑制噪声及 CCI。相比于 BD 算法,检测性能有较大的提升。

2.1 基于 MSINR 的干扰抑制算法

由前面的分析,式(12)可以表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_i \mathbf{X}_i + \mathbf{Z} \quad (6)$$

式中:第二项为多用户 MIMO 系统本身特点而造成干扰。

基站通过 $\mathbf{G}_k, k = \{1, \dots, K\}$ 来抑制 CCI 及噪声

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{G}_k^H \mathbf{Y} = \mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_{\bar{k}} \mathbf{X}_{\bar{k}} + \mathbf{G}_k^H \mathbf{Z} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{H}_{\bar{k}} = [\mathbf{H}_1 \ \dots \ \mathbf{H}_{k-1} \ \mathbf{H}_{k+1} \ \dots], \mathbf{X}_{\bar{k}} = [\mathbf{X}_1 \ \dots \ \mathbf{X}_{k-1} \ \mathbf{X}_{k+1} \ \dots \ \mathbf{X}_K]$ 。

\mathbf{G}_k 的设计应该使得用户 k 的信干噪比最大化,也即

$$\mathbf{G}_k = \arg \max_{\mathbf{G}_k} \frac{\|\mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k\|_F^2}{\|\mathbf{G}_k^H\|_F^2 \sigma^2 + \|\mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_{\bar{k}}\|_F^2} \quad (8)$$

$k = \{1, \dots, K\}$

式中: $E(\mathbf{G}_k \mathbf{G}_k^H) = \mathbf{I}_M, k = \{1, \dots, K\}$ 。

经过处理后,用户 k 的 SINR_k 可以表示为

$$\text{SINR}_k = \frac{\|\mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k\|_F^2}{\|\mathbf{G}_k^H\|_F^2 \sigma^2 + \|\mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_{\bar{k}}\|_F^2} \quad (9)$$

令 $\mathbf{G}_k^H = [g_{k1} \ g_{k2} \ \dots \ g_{kN_k}]^H$, 其中 g_{ki} 为 \mathbf{G}_k 的第 i 列,则

$$\frac{\|\mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k\|_F^2}{\|\mathbf{G}_k^H\|_F^2 \sigma^2 + \|\mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_{\bar{k}}\|_F^2} = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \|\mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_k\|_F^2}{\sigma^2 \sum_{i=1}^{N_k} \|\mathbf{g}_{ki}^H\|_F^2 + \sum_{i=1}^{N_k} \|\mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_{\bar{k}}\|_F^2} \quad (10)$$

由于

$$\|\mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_k\|_F^2 = \|\mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_k\|^2 = \mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \mathbf{g}_{ki} \quad (11)$$

求解式(8)变为

$$\mathbf{G}_k = \arg \max_{\mathbf{G}_k} \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \mathbf{g}_{ki}}{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H (\mathbf{H}_{\bar{k}} \mathbf{H}_{\bar{k}}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M) \mathbf{g}_{ki}} \quad (12)$$

求解 \mathbf{G}_k 的问题转化为求解 $((\mathbf{H}_{\bar{k}} \mathbf{H}_{\bar{k}}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M)^{-1} \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)$ 的 N_k 个最大广义特征值对应的特征向量^[10]。即通过求解 $\lambda_{\max}, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_k}$ 对应的特征向量 $\mathbf{g}_{k1}, \mathbf{g}_{k2}, \dots, \mathbf{g}_{kN_k}$, 构造出 MSINR 准则下的干扰抑制矩阵。

经过 \mathbf{G}_k 的处理,第 k 个用户接收信号为

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_k^H (\mathbf{H}_{\bar{k}} \mathbf{X}_{\bar{k}} + \mathbf{Z}) \quad (13)$$

等效信道矩阵即为 $\mathbf{G}_k^H \mathbf{H}_k$, 进一步使用单用户 MIMO 检测算法便可检测出各用户的数据信号。MSINR 算法在复杂度相比于 BD 算法增加不多的情况下,考虑了噪声的影响,较大地提升了上行 MU-MIMO 系统的检测性能。

2.2 信道估计误差下的改进算法

下面将着重分析存在信道估计误差的信道环境下的改进算法。假定基站所获取的用户 k 的信道估计可以表示为

$$\mathbf{H}_{k,\text{est}} = \mathbf{H}_k + \mathbf{\Delta}_k \quad (14)$$

式中: $\mathbf{\Delta}_k$ 的元素独立同分布,服从均值为 0 方差为 σ_e^2 的复高斯分布。

在此假设下,需要重新考虑 $\{\mathbf{G}_{k,\text{est}}, k = 1, \dots, K\}$ 的求解问题。

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{H}_{\bar{k}} \mathbf{X}_{\bar{k}} + \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{Z} = \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H (\mathbf{H}_{k,\text{est}} - \mathbf{\Delta}_k) \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H (\mathbf{H}_{\bar{k},\text{est}} - \mathbf{\Delta}_{\bar{k}}) \mathbf{X}_{\bar{k}} + \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{Z} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{H}_{\bar{k},\text{est}} = \mathbf{H}_{\bar{k}} + \mathbf{\Delta}_{\bar{k}}$, 而 $\mathbf{H}_{\bar{k}} = [\mathbf{H}_1 \ \dots \ \mathbf{H}_{k-1} \ \mathbf{H}_{k+1} \ \dots \ \mathbf{H}_K], \mathbf{\Delta}_{\bar{k}} = [\mathbf{\Delta}_1 \ \dots \ \mathbf{\Delta}_{k-1} \ \mathbf{\Delta}_{k+1} \ \dots \ \mathbf{\Delta}_K]$ 。

进一步处理得到

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{H}_{k,\text{est}} \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{H}_{\bar{k},\text{est}} \mathbf{X}_{\bar{k}} + \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{Z} - \mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{\Delta} \mathbf{X} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{\Delta} = [\mathbf{\Delta}_1 \ \mathbf{\Delta}_2 \ \dots \ \mathbf{\Delta}_K], \mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \ \mathbf{X}_2 \ \dots \ \mathbf{X}_K]^T$ 。

用户 k 的 SINR_k 可以表示为

$$\text{SINR}_k = \frac{\|\mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{H}_{k,\text{est}}\|_F^2}{\|\mathbf{G}_{k,\text{est}}^H\|_F^2 \sigma^2 + \|\mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{H}_{\bar{k},\text{est}}\|_F^2 + \|\mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{\Delta}\|_F^2} \quad (17)$$

同样,为了使每个用户的接收信干噪比最大,即

$$\mathbf{G}_{k,\text{est}} = \arg \max_{\mathbf{G}_{k,\text{est}}} \frac{\|\mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{H}_{k,\text{est}}\|_F^2}{\|\mathbf{G}_{k,\text{est}}^H\|_F^2 \sigma^2 + \|\mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{H}_{\bar{k},\text{est}}\|_F^2 + \|\mathbf{G}_{k,\text{est}}^H \mathbf{\Delta}\|_F^2} \quad (18)$$

通过化简得到

$$\mathbf{G}_{k,\text{est}} = \arg \max_{\mathbf{G}_{k,\text{est}}} \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_{k,\text{est}} \mathbf{H}_{k,\text{est}}^H \mathbf{g}_{ki}}{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H (\mathbf{H}_{\bar{k},\text{est}} \mathbf{H}_{\bar{k},\text{est}}^H + (\sigma^2 + \sigma_e^2) \mathbf{I}_M) \mathbf{g}_{ki}} \quad (19)$$

根据文献[11], σ_e^2 可以在训练期间获得,这样就得到了存在信道估计误差条件下的改进算法。

3 Alamouti 空时编码的 MU-MIMO 上行系统

将 Alamouti 空时编码^[12]用于上行 MU-MIMO 系统当中^[13],可以一定程度的提高系统的检测性能。当用户信噪比较低或者系统存在较大信道估计误差时,Alamouti 编码能提供一定增益以抑制这些不利因素所带来的影响,具有较大的使用价值。下面将分析如何将 Alamouti 编码用于上行 MU-MIMO 系统中。

图 2 所示为结合 Alamouti 编码的 MU-MIMO 上行系统示意图。 $s_{k,1}$ 和 $s_{k,2}$ 表示 UE_k 的发送信号,按照文献^[12]方法进行 Alamouti 编码,则有

$$\mathbf{s}_k = \begin{bmatrix} s_{k,1} \\ s_{k,2} \end{bmatrix}, \mathbf{S}_k = \begin{bmatrix} s_{k,1} & -s_{k,2}^* \\ s_{k,2} & s_{k,1}^* \end{bmatrix} \quad (20)$$

满足 $E|s_{k,1}|^2 = E|s_{k,2}|^2 = 1, k = \{1, \dots, K\}$ 。

设 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 和 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$,则可以表示为

$$\mathbf{S}_k = [\mathbf{A}\mathbf{s}_k \quad \mathbf{B}\mathbf{s}_k^*] \quad (21)$$

基站接收的信号可以表示为

$$\mathbf{Y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k \mathbf{S}_k + \mathbf{Z} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k [\mathbf{A}\mathbf{s}_k \quad \mathbf{B}\mathbf{s}_k^*] + \mathbf{Z} \quad (22)$$

其中, $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y^{(1,1)} & y^{(2,1)} & \dots & y^{(M,1)} \\ y^{(1,2)} & y^{(2,2)} & \dots & y^{(M,2)} \end{bmatrix}^T$

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} h_k^{(1,1)} & h_k^{(2,1)} & \dots & h_k^{(M,1)} \\ h_k^{(1,2)} & h_k^{(2,2)} & \dots & h_k^{(M,2)} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z^{(1,1)} & z^{(2,1)} & \dots & z^{(M,1)} \\ z^{(1,2)} & z^{(2,2)} & \dots & z^{(M,2)} \end{bmatrix}^T$$

为了计算最优处理矩阵 \mathbf{G}_k ,根据 Alamouti 编码的特点,作以下对等变换

$\mathbf{Q} = [y^{(1,1)} \quad y^{(1,2)*} \mid y^{(2,1)} \quad y^{(2,2)*} \mid \dots \mid y^{(M,1)}]$ 式中: $y^{(i,j)}$ 表示基站的第 i 根天线在第 $j, j = \{1, 2\}$

个时隙间隔所收到的信号。同样对信道矩阵和噪声也做相应的处理

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} h_k^{(1,1)} & h_k^{(1,2)} \\ h_k^{(1,2)*} & -h_k^{(1,1)*} \\ h_k^{(2,1)} & h_k^{(2,2)} \\ h_k^{(2,2)*} & -h_k^{(2,1)*} \\ \dots & \dots \\ h_k^{(M,1)} & h_k^{(M,2)} \\ h_k^{(M,2)*} & -h_k^{(M,1)*} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N} = [z^{(1,1)} \quad z^{(1,2)*} \mid z^{(2,1)} \quad z^{(2,2)*} \mid \dots \mid z^{(M,1)} \quad z^{(M,2)*}]^T$$

经过变换,则式(22)可以表示为

$$\mathbf{Q} = \sum_{k=1}^K \mathbf{F}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{N} \quad (23)$$

这样,经过处理后用户 k 的 SINR_k 可以表示为

$$\text{SINR}_k = \frac{\|\mathbf{G}_k^H \mathbf{F}_k\|_F^2}{\|\mathbf{G}_k^H\|_F^2 \sigma^2 + \|\mathbf{G}_k^H \mathbf{F}_k^H\|_F^2} \quad (24)$$

其中, $\mathbf{F}_k = [\mathbf{F}_1 \quad \dots \quad \mathbf{F}_{k-1} \quad \mathbf{F}_{k+1} \quad \dots \quad \mathbf{F}_K]$ 。

使用 MSINR 算法,干扰抑制矩阵 \mathbf{G}_k 为

$$\mathbf{G}_k = \arg \max_{\mathbf{G}_k} \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H \mathbf{g}_{ki}}{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H (\mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M) \mathbf{g}_{ki}} \quad (25)$$

通过在基站接收端对信号进行上述重组变换,就可以将干扰抑制算法直接用于 Alamouti 编码的多用户系统中,因此本文提出的变换方法具有较大的意义。

由图 2 和前面的分析可以看出,结合 Alamouti 编码一定程度上提升了基站处理的复杂度。但 Alamouti 编码能提供一定的分集增益,较大地提升了系统的检测性能,特别在一些特定的场合(如用户信噪比低或系统存在较大信道估计误差),能保证系统仍然具有较好的性能。

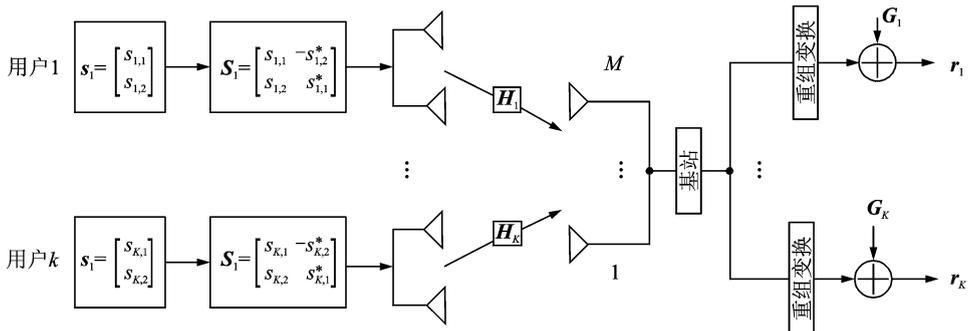


图 2 结合 Alamouti 编码的 MU-MIMO 上行系统

Fig. 2 Block diagram of uplink MU-MIMO system with Alamouti STBC

4 分组优化算法

上行 MU-MIMO 系统中,多个用户使用相同的频谱、时间以及码字等资源,信噪比越高的用户对其余用户的干扰越强。在不存在远近效应时,使用 MSINR 算法可以使系统容量较大,但是无法根据用户期望的服务质量(Quality of service, QoS)以区分处理。当存在远近效应时,MSINR 算法将严重偏向信道条件好的用户,信噪比低的用户信号将受到严重的干扰以至于无法获得期望的检测结果,因此结合用户期望的 QoS 并保证“远”用户的检测性能进行研究具有较大的必要性。

下面提出一种分组优化算法,根据用户优先级进行分组处理。对优先级低的用户需要抑制所有用户的干扰,对优先级高的用户只需考虑该组用户之间的干扰。相比于 MSINR 算法,这样处理可以在保证低优先级用户检测性能没有降低的基础上,较大地提升高优先级用户的性能。

将 K 个用户分为两组,信噪比较低及期望速率高的用户 $1, 2, \dots, K_1$ 分入 A 组,信噪比较高且期望速率不高的普通用户 $K_1 + 1, \dots, K$ 分为 B 组。

首先对 B 组用户 $k, k = \{K_1 + 1, \dots, K\}$ 进行处理,令

$$\hat{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_1 \quad \dots \quad \mathbf{H}_{k-1} \quad \mathbf{H}_{k+1} \quad \dots \quad \mathbf{H}_K] \quad (26)$$

对其使用 MSINR 算法,则干扰抑制矩阵 \mathbf{G}_k 为

$$\mathbf{G}_k = \arg \max_{\mathbf{G}_k} \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \mathbf{g}_{ki}}{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H (\hat{\mathbf{H}}_k \hat{\mathbf{H}}_k^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M) \mathbf{g}_{ki}} \quad (27)$$

通过 \mathbf{G}_k 的作用,进一步处理便可检测出 B 组用户的数据。但可以看出,对 B 组用户需要抑制所有用户的干扰, \mathbf{G}_k 在滤除其余用户的干扰的同时,也必然滤除了用户 k 有效信号的部分维度分量。如果对信噪比低或速率要求高的 A 组用户也做同样的处理,显然不能获得期望的性能。因此考虑将已检测出的 B 组用户信号用于干扰抵消,再求解 A 组用户的信号。

设已检测出的 B 组用户的接收信号为 $\hat{X}_{K_1+1} \dots \hat{X}_K$,对基站接收信号进行干扰抵消

$$\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \sum_{k=K_1+1}^K \mathbf{H}_k \hat{X}_k = \sum_{k=1}^{K_1} \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \bar{\mathbf{Z}} \quad (28)$$

式中: $\bar{\mathbf{Z}} = \sum_{k=K_1+1}^K \mathbf{H}_k (\mathbf{X}_k - \hat{X}_k)$ 为干扰抵消所具有的误差传播带来的干扰。

最后,再对 A 组用户 $k, k = \{1, 2, \dots, K_1\}$ 在组内使用 MSINR 算法进行处理,令

$$\bar{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_1 \quad \dots \quad \mathbf{H}_{k-1} \quad \mathbf{H}_{k+1} \quad \dots \quad \mathbf{H}_{K_1}] \quad (29)$$

则干扰抑制矩阵 \mathbf{G}_k 为

$$\mathbf{G}_k = \arg \max_{\mathbf{G}_k} \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \mathbf{g}_{ki}}{\sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{g}_{ki}^H (\bar{\mathbf{H}}_k \bar{\mathbf{H}}_k^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M) \mathbf{g}_{ki}} \quad (30)$$

这样,对 A 组用户只需在本组内部使用 MSINR 算法构造干扰抑制矩阵,较大地保留用户信号的维度分量,同时信噪比高、干扰强的 B 组用户信号之前已被抵消,这些均使得 A 组用户获得良好的性能。

本节在前面分析的基础上,提出了一种分组优化算法,这种算法根据用户的优先级进行分组处理,在不降低 B 组用户性能的基础上,较大地提升了 A 组用户的性能。在上行 MU-MIMO 系统存在远近效应以及各用户对服务质量有不同需求的情况下,具有较大的应用价值。

5 仿真结果及分析

考虑 MU-MIMO 上行链路传输模型,各用户的信道为准静态非频选莱斯信道,莱斯因子 $K_R = 10$ 。仿真中均采用 QPSK 调制方式,经过 100 000 次独立实现。基站每根接收天线上的噪声满足 $\sigma_1^2 = \dots = \sigma_K^2 = \sigma^2$,并将 $\frac{1}{\sigma^2}$ 作为每根天线的 SNR。

为了较好地展示文中算法的性质,根据算法的特点给出了不同用户数和天线配置下的 BER 曲线以及平均可达容量曲线的仿真结果。

图 3 给出了几种算法的误比特性能随 SNR 变化曲线,其中 UE 数目 $K=3$,每个 UE 天线数 $N_k=2$,基站的天线数 $M=6$ 。为了充分展示算法的性能,同时还仿真了两种极端情况的 BER 曲线以便进行比较。这两种极端情况分别对应图中的无共信道干扰曲线以及仅采用单用户检测算法曲线。前者代表被检测用户不受到其余用户干扰的假设场景,该曲线没有实际意义,仅仅用作对比。后者则代表不使用 BD、MSINR 等多用户干扰抑制算法而直接采用单用户 MIMO 检测算法时的检测结果,由于受到较强共信道干扰,可以看出检测结果非常不理想。首先对比没有结合 Alamouti 编码时 MSINR 算法与 BD 算法的性能。可以看出在相同的误码率下,MSINR 算法比 BD 算法有 3~4 dB 的增益,检测性能更为优异,这是由于 MSINR 算法考虑了噪声的影响。而当结合 Alamouti 编码

时,两种算法的检测性能均得到很大提升,在信噪比为 4 dB 时,误码率均能达到 10^{-6} 以下。这说明 Alamouti 编码所提供的分集增益能较大地提升系统的性能,因此在对误码性能具有较高要求的一些特定的场合具有较大的使用价值。

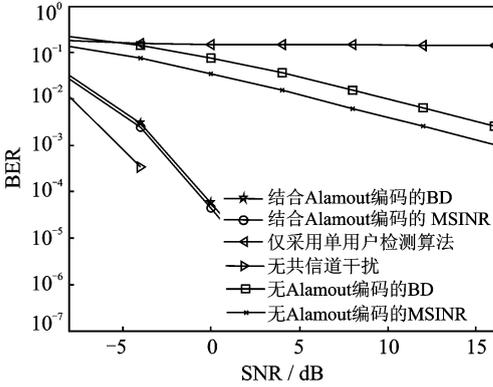


图 3 误比特率随信噪比变化曲线

Fig. 3 BER-SNR results

图 4 为存在信道估计误差时,误比特率随 SNR 变化曲线,其中信道估计误差的方差 $\frac{1}{\sigma_e^2} = 10$ dB。由图可以看出,当存在信道估计误差时,所有算法的误比特率性能变差。在没有采用 Alamouti 编码时,随着信噪比的增加,MSINR 算法的性能下降较为明显,在 SNR 较高的区域还出现了 BER 曲线上升的现象。这是由于随着 SNR 的增加,由信道估计误差引入的干扰将远大于噪声,干扰和噪声之和将趋于恒定;而 MSINR 算法仅考虑了噪声影响而忽略了干扰项,因此在 SNR 较大时,信干噪比严重失配,从而导致系统 BER 出现上升趋势。2.2 节提出的改进的 MSINR 算法有效地解决了这个问题,可以看出改进算法的性能明显优于原算法,特别是在 SNR 较高区域,改进算法有效地解决了信干噪比失配的问题。此外,可以看出采用 Alamouti 编码时,算法的性能均有较大的提升。Alamouti 编码能较大程度地对抗信道估计误差所带来的影响,使系统具有较强的顽健性。因此,当系统存在较大信道估计误差时,采用 Alamouti 编码具有较大的价值。

图 5 和图 6 对比了 MSINR 算法和分组优化算法性能的差别。仿真中基站的接收天线数 $M = 8$, UE 数目 $K = 4$, 每个 UE 天线数 $N_k = 2$ 。假设用户 1 和用户 2 距离基站较远,信号分别衰落 5 dB 和 10 dB;用户 3、4 距离基站较近,其信号强度较高。分别采用 MSINR 算法以及分组优化算法进行处理,仿真了各用户的平均最大可达速率曲线。其中采用分组优化算法时,将用户 1 和用户 2 分入

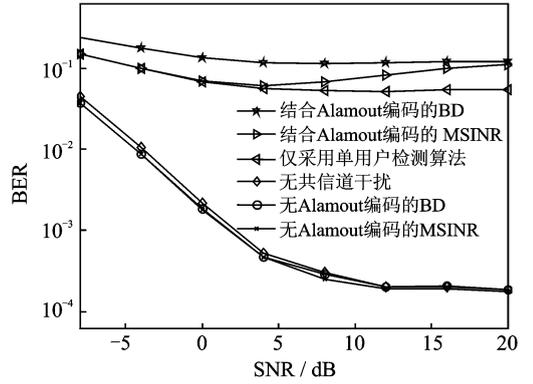


图 4 存在信道估计误差下的误比特率曲线

Fig. 4 BER SNR results with channel estimation error

A 组,用户 3 和用户 4 分入 B 组。可以看出分组优化算法在没有降低 B 组用户性能的前提下,较大地提升了 A 组用户的平均最大可达速率。虽然这样处理基站需要提前获知各用户的信道状况以便进行分组,必然要占用一定的系统资源,但换来的是较大地提升了低信噪比用户的检测性能,满足了各用户对服务质量及传输速率的要求,在实际中具有较大的应用价值。

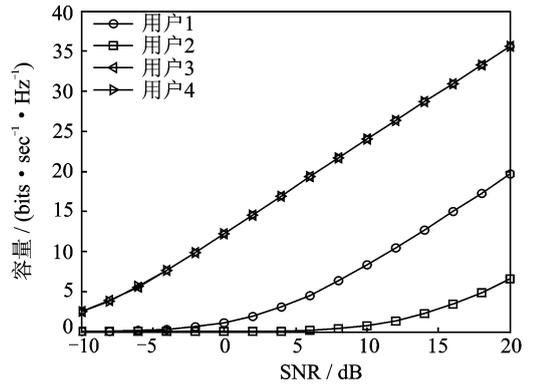


图 5 MSINR 算法下的平均最大可达速率

Fig. 5 Average capacity with MSINR

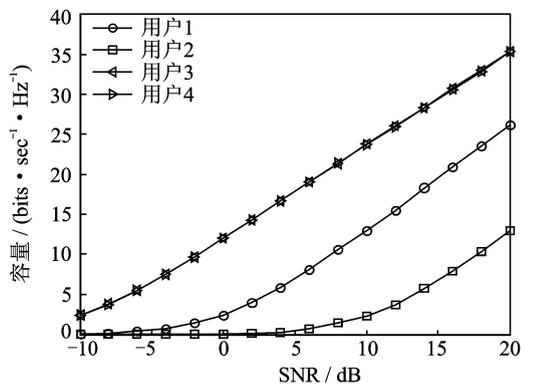


图 6 分组优化算法下的平均最大可达速率

Fig. 6 Average capacity with optimization algorithm of grouping users

6 结束语

本文针对上行 MU-MIMO 系统进行了研究,首先将最大信号干扰噪声比作为准则设计了一种干扰抑制算法,并给出了存在信道估计误差时的改进算法。相比于 BD 算法,MSINR 算法考虑了噪声的影响,性能有较大的提升。但当用户信噪比很低或者系统存在较大信道估计误差时,仅仅采用多用户干扰抑制算法不能获得较好的检测效果。因此将 Alamouti 编码用于上行 MU-MIMO 系统当中,Alamouti 编码能提供一定增益以抑制这些不利因素所带来的影响。文中提出了一种结合 Alamouti 编码的上行 MU-MIMO 系统信号重组方法,经过信号重组可以将 MSINR 算法直接用于系统中,较大地提高了检测性能。最后针对存在远近效应时,MSINR 算法不能较好地保证“远”用户检测性能的特点,提出一种分组优化算法。分组优化算法根据用户的优先级进行分组处理,能保证优先级高的用户获得更好的性能。仿真结果表明所提的算法具有较强的针对性和较好的性能。

参考文献:

- [1] 郭明喜,沈越泓. 基于对偶格基缩减的 MIMO 检测算法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(6): 696-701. Guo Mingxi, Shen Yuehong. MIMO detection algorithm based on dual lattice basis reduction[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(6): 696-701.
- [2] 赵飞,王炎. 一种新的 QR-SIC-MSD 联合 MIMO 信号检测算法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(4): 500-504. Zhao Fei, Wang Yan. New QR-SIC-MSD Joint MIMO signal detection algorithm[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(4): 500-504.
- [3] Yang Yuhan, Lin Shih Chun, Su Hsuan Jung. Multiuser MIMO downlink beamforming design based on group maximum SINR filtering[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4): 1746-1758.
- [4] Masouros C, Sellathurai M, Ratnarajah T. Interference optimization for transmit power reduction in Tomlinson-Harashima precoded MIMO downlinks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(5): 2470-2481.
- [5] Mirette S, Alireza T, Ali H S. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5): 1711-1721.
- [6] 高献坤,崔岩,傅洪亮. 连续迭代优化 SLNR 准则的下行多用户 MIMO 预编码算法[J]. 应用科学学报, 2011, 29(3): 251-255. Gao Xiankun, Cui Yan, Fu Hongliang. Downlink pre-coding for multi-user MIMO system with successive iterative optimal SLNR[J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 29(3): 251-255.
- [7] Quentin H S, Christian B P, Swindlehurst A L, et al. An introduction to the multi-user MIMO downlink[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 60-67.
- [8] 李川,刘伟,陈睿,等. 多用户 MIMO 系统上行检测算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(4): 639-644. Li Chuan, Liu Wei, Chen Rui, et al. Uplink detection algorithms in multiuser MIMO systems[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(4): 639-644.
- [9] 黑永强,李晓辉,易克初,等. 低复杂度上行多用户 MIMO 检测算法[J]. 通信学报, 2010, 31(8): 114-120. Hei Yongqiang, Li Xiaohui, Yi Kechu, et al. Low complexity uplink multiuser MIMO detecting algorithm[J]. Journal of Communications, 2010, 31(8): 114-120.
- [10] Golub G H, Van C F. Matrix computation[M]. Baltimore, MD: the John Hopkins Univ Press, 1996.
- [11] 郭明喜,沈越泓. 非理想信道条件下得 V-BLAST 系统检测算法[J]. 数据采集与处理, 2011, 25(3): 253-257. Guo Mingxi, Shen Yuehong. Detection algorithm of V-BLAST system under imperfect channel condition[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 25(3): 253-257.
- [12] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Sel Areas Commun, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [13] 张晓格,徐澄圻. 联合天线选择的上行 Alamouti MIMO 多用户检测[J]. 应用科学学报, 2008, 26(2): 162-166. Zhang Xiaoge, Xu Chengqi. Uplink multi-user alamouti MIMO detection with antenna selection[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 26(2): 162-166.

作者简介:马俊(1987-),男,硕士研究生,研究方向:无线通信系统、MU-MIMO 检测技术研究, E-mail: majun0316@126.com;王大鸣(1971-),男,教授,研究方向:无线与移动通信,卫星通信;崔维嘉(1976-),男,讲师,研究方向:自组织网和蜂窝网络融合技术。