

MIMO 信道中基于功率分配的 SLNR 预编码算法

张丽娟,解培中

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:为了消除或降低多用户 MIMO 系统下行链路存在的共信道干扰(CCI),提出一种结合功率分配的基于最大化信漏噪比(SLNR)的预编码算法。首先,根据 SLNR 算法求出最优预编码矩阵,再结合最优功率分配算法,借助拉格朗日乘数法,优化分配每个用户的发送功率,从而提高系统和容量以及降低误码率(BER)性能。为了简化计算复杂度,还提出了 SLNR 算法结合次优化功率分配算法。仿真表明,所提出的算法比块对角化(BD)算法和最小均方误差准则(MMSE)算法在系统和容量以及误码率性能上都有所改善。

关键词:多用户 MIMO;预编码算法;功率分配

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)08-0112-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.08.026

A SLNR Precoding Algorithm Based on Power Allocation in MIMO Channel

ZHANG Li-juan, XIE Pei-zhong

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: To eliminate or reduce the Co-Channel Interference (CCI) between users, a precoding algorithm combined with power allocation, based on maximizing Signal to Leakage and Noise Ratio (SLNR), is proposed for the downlink of multi-user MIMO system. On the basis of SLNR, find the optimal precoding matrix, and then with the aid of Lagrange multiplier method, coupled with the optimal power allocation algorithm, allocate every user's transmitted power optimally, in order to improve the system sum capacity and reduce Bit Error Rate (BER) performance. Suboptimal power allocation algorithm, combined with SLNR is proposed to simplify the computational complexity. The simulation results show that the proposed algorithm can make system has better performance on the system sum capacity and BER than BD and MMSE algorithm.

Key words: multi-user MIMO; precoding algorithm; power allocation

0 引言

近年来,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术因其能够提高系统容量和改善系统性能已成为无线通信领域的关键技术之一,越来越受到人们的重视。MIMO 技术就是在基站和移动台均配置多根天线,从而形成 MIMO 通信链路。根据与基站通信的用户数目的多少, MIMO 无线通信系统可以分为单用户 MIMO(Single User MIMO, SU-MIMO)系统和多用户 MIMO(Multi-User MIMO, MU-MIMO)系统。多用户 MIMO 系统下行链路由于多个用户共用同一频带和时隙与基站通信,因此用户间存在共信

道干扰(Co-Channel Interference, CCI)^[1]。如何消除或降低 CCI,提高系统和容量以及降低误码率(Bit Error Rate, BER)已成为 MIMO 无线通信系统的研究热点之一。

基站发送端可以通过预编码技术消除或降低 CCI,而预编码技术又可以分为线性预编码和非线性预编码。脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)^[2]作为非线性预编码的一种是获得系统和容量的最优预编码方案;而 TH(Tomlinson-Harashima)^[3]预编码是一种基于 DPC 的非线性预编码方案,且 TH 降低了 DPC 方案的计算复杂度,能够获得接近最优的系统性能。虽然非线性预编码方案能够得到最优或接近最优的系统

收稿日期:2013-10-16

修回日期:2014-01-26

网络出版时间:2014-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271234);南京邮电大学校科研基金(NY210006)

作者简介:张丽娟(1988-),女,安徽池州人,硕士研究生,研究方向为通信信号处理;解培中,博士,副教授,研究方向为信号处理和协作通信。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140525.1242.004.html>

性能,但由于其较高的计算复杂度及不易实现性逐渐被一些简单易实现的线性预编码方案取代,如迫零 (Zero-Forcing, ZF)、块对角化 (Block Diagonalization, BD)、最小均方准则 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 和最大化信漏噪比 (Signal to Leakage and Noise Ratio, SLNR) 准则等线性预编码算法。ZF 算法^[4-5]和 BD 算法^[6-7]能够完全消除用户间 CCI,使得系统和容量得到很大提升,但受到天线配置的限制,这已经无法满足现代无线通信的要求;文献[8-9]介绍的 MMSE 算法通过发送端和接收端的联合处理^[10],根据最小化接收端恢复信号与发送信号的均方误差的原则,最大程度降低系统误码率性能;文献[11-12]介绍的 SLNR 算法与 MMSE 算法类似,都考虑了噪声和干扰信号的影响,且均没有天线配置的限制,但 SLNR 算法获得的系统和容量明显要高于 MMSE 算法,尤其在低信噪比 (SNR) 时。

基于最大化 SLNR 预编码算法的设计思路比较简单,即要求用户泄露给其他用户的干扰信号最小,但该算法不能完全消除 CCI,因此达不到很高的系统容量。针对此问题,文中在 SLNR 算法的基础上结合功率分配算法,能够在降低 CCI 的同时优化发送功率,达到进一步提高系统和容量以及降低 BER 的目的。

文中使用的数学符号如下: $C^{m \times n}$ 表示 $m \times n$ 的复数域, A^T , A^H 分别表示矩阵 A 的转置和共轭转置, A^{-1} 表示可逆矩阵 A 的逆, $\|A\|$ 表示矩阵 A 的 2 范数, $\|A\|_F$ 表示矩阵 A 的 F 范数, $\text{tr}(A)$ 表示矩阵 A 的迹, I_N 表示 $N \times N$ 阶的单位矩阵。

1 多用户 MIMO 系统下行链路模型

多用户 MIMO 系统下行链路结构如图 1 所示。

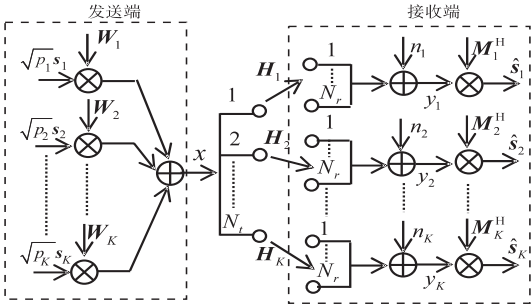


图 1 多用户 MIMO 系统下行链路结构图

假设多用户 MIMO 系统下行链路有 1 个基站, K 个用户, 基站发送天线数目为 N_t 根, 每个用户接收天线数目均为 N_r 根, 发送端需要给每个用户传送 S 个独立的数据流, 文中假定 $S = N_r$, 即每根接收天线都能接收到数据流。则第 k 个用户的接收信号为:

$$y_k = \sum_{j=1}^K \sqrt{p_j} \mathbf{H}_k \mathbf{W}_j s_j + \mathbf{n}_k =$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{p_k} \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k s_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K \sqrt{p_j} \mathbf{H}_k \mathbf{W}_j s_j + \mathbf{n}_k \\ & k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{H}_k \in C^{N_r \times N_t}$ 是第 k 个用户的信道矩阵, 且 \mathbf{H}_k 是独立同分布的平坦衰落信道, 即 $\mathbf{H}_k \sim CN(0, 1)$; $s_k \in C^{S \times 1}$ 是用户 k 的发送信息符号, 满足 $\|s_k\|_F^2 = 1$; p_k 是发送端分配给用户 k 的发送功率, 满足 $\sum_{k=1}^K p_k = P_t$ (P_t 是发送端总功率); $\mathbf{W}_k \in C^{N_t \times S}$ 是用户 k 的预编码矩阵, 满足 $\|\mathbf{W}_k\|_F^2 = 1$; \mathbf{n}_k 是第 k 个用户的加性高斯白噪声, 即 \mathbf{n}_k 满足以下分布: $\mathbf{n}_k \sim CN(0, \sigma_n^2)$ (σ_n^2 是常数)。

文中假定信道状态信息 (CSI) 在发送端和接收端均已知, 即 \mathbf{H}_k 已知, 式(1)第二个等式的第一项是第 k 个用户的有用信号; 第二项是其他 $(k - 1)$ 个用户对第 k 个用户产生的干扰信号; 第三项为噪声信号。为了获得更好的系统性能并简化系统的复杂度, 可以在发送端采用预编码算法消除或降低式(1)中干扰信号对有用信号的影响。在接收端为了简化接收机的复杂度, 译码矩阵可以采用匹配滤波器, 即 $\mathbf{M}_k^H = \frac{(\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k)^H}{\|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|_F} \circ$ 。

2 预编码算法和功率分配算法

2.1 基于最大化 SLNR 预编码算法的设计

ZF 算法^[4]和 BD 算法^[6]只是将信道矩阵和预编码矩阵的乘积 $\mathbf{H}\mathbf{W}$ 转化成对角矩阵, 将多用户 MIMO 系统分解成点对点的通信系统, 并没有考虑噪声的影响。当信噪比很低时, 噪声占主要因素, 应用 ZF 算法和 BD 算法的系统达不到很好的系统性能; 而基于最大化 SLNR^[11] 的预编码算法考虑了噪声的影响, 通过选择合适的预编码矩阵对噪声有一定的抑制, 从而使系统性能更好。文中, 信道矩阵和预编码矩阵分别为:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^H, \mathbf{H}_2^H, \dots, \mathbf{H}_K^H]^H \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = [\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_K] \quad (3)$$

由式(1)可知, 在不考虑每个用户分配的功率时, 第 k 个用户的 SLNR 为:

$$\text{SLNR}_k = \frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|_F^2}{N_t \sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^K \|\mathbf{H}_j \mathbf{W}_k\|_F^2} \quad (4)$$

最大化 SLNR 准则要求每个用户泄露到其他用户的干扰信号最小, 即选择合适的预编码矩阵 \mathbf{W}_k 使得式(4)中的 $\sum_{j=1, j \neq k}^K \|\mathbf{H}_j \mathbf{W}_k\|_F^2 (k=1, 2, \dots, K)$ 最小, 从而使 SLNR_k 达到最大。则最优预编码矩阵 \mathbf{W}_k^* 满足:

$$\begin{aligned}
\mathbf{W}_k^* &= \arg \max_{\mathbf{W}_k} \text{SLNR}_k = \\
&\arg \max_{\mathbf{W}_k} \frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|_F^2}{N_r \sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^K \|\mathbf{H}_j \mathbf{W}_k\|_F^2} = \\
&\arg \max_{\mathbf{W}_k} \frac{\text{tr}(\mathbf{W}_k^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k)}{\text{tr}[\mathbf{W}_k^H (N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_i} + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j) \mathbf{W}_k]} \quad (5) \\
&\text{s. t } \|\mathbf{W}_k^*\|_F^2 = 1, k = 1, 2, \dots, K
\end{aligned}$$

根据文献[11]中多数据流波束赋形预编码算法可知,当 \mathbf{W}_k 满足 $\mathbf{W}_k^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k = \mathbf{D}_k$ (\mathbf{D}_k 是对角矩阵; $k = 1, 2, \dots, K$)时,可以消除用户间的干扰和用户 k 各数据流间的干扰。

由于矩阵 $\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k$ 和 $(N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_i} + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)$ 都是 N_i 阶 Hermite 矩阵,而 Hermite 矩阵是正规矩阵,故存在 N_i 阶酉矩阵 \mathbf{U}_k ,使得:

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{U}_k &= \mathbf{A}_k \\
\mathbf{U}_k^H (N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_i} + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j) \mathbf{U}_k &= \mathbf{I}_{N_i} \quad (6)
\end{aligned}$$

其中, $\mathbf{A}_k = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_i})$,且元素非负,可以假设为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{N_i} \geq 0$; \mathbf{U}_k 形成的空间定义了矩阵 $[\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k, N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_i} + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j]$ 的广义特征空间,即 \mathbf{U}_k 对应于有用信道和噪声及干扰组成的矩阵 $[\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k, N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_i} + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j]$ 的广义特征向量。

为了达到消除用户间干扰和各用户各数据流间干扰的目的,最优预编码矩阵 \mathbf{W}_k^* 可以表示为矩阵 \mathbf{U}_k 的线性表示,即 $\mathbf{W}_k^* = \mathbf{U}_k \mathbf{V}_k$ (其中 $\mathbf{V}_k \in \mathbb{C}^{N_i \times S}$)。由文献[11]可知, $\mathbf{V}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{S \times S} \\ 0 \end{bmatrix}$,则最优预编码矩阵可以表示为:

$$\mathbf{W}_k^* = \mathbf{U}_k \mathbf{V}_k = \mathbf{U}_k \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{S \times S} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 最优功率分配算法和次优化功率分配算法

文中 2.1 节根据最大化 SLNR 准则已求出多用户 MIMO 系统下行链路中最优预编码矩阵,剩下的问题就是怎样进行功率分配,从而使得系统性能达到最佳。下面介绍最优和次优化功率分配算法。

2.2.1 最优功率分配算法

由式(1)可知,第 k 个用户的系统容量为:

$$\begin{aligned}
C_k &= \log_2 \left| \mathbf{I}_S + \frac{p_k \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|^2}{N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_S + \sum_{j=1, j \neq k}^K p_j \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_j\|^2} \right| \\
&k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, K \quad (8) \\
&\text{s. t } \sum_{k=1}^K p_k \leq P_t
\end{aligned}$$

则系统的和容量为:

$$\begin{aligned}
C &= \sum_{k=1}^K C_k = \\
&\sum_{k=1}^K \log_2 \left| \mathbf{I}_S + \frac{p_k \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|^2}{N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_S + \sum_{j=1, j \neq k}^K p_j \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_j\|^2} \right| \\
&k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, K \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\text{s. t } \sum_{k=1}^K p_k \leq P_t$$

根据文献[13]中凸优化知识可知,式(9)是个凸优化问题,可以利用拉格朗日乘数法解决。设:

$$\begin{aligned}
L &= C - \mu \left(\sum_{k=1}^K p_k - P_t \right) = \\
&\sum_{k=1}^K \log_2 \left(\left| \mathbf{I}_S + \frac{p_k \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|^2}{N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_S + \sum_{j=1, j \neq k}^K p_j \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_j\|^2} \right| \right) - \\
&\mu \left(\sum_{k=1}^K p_k - P_t \right) \quad (10)
\end{aligned}$$

式(10)中, μ 是拉格朗日乘子,且 $\mu \neq 0$ 。

令 $\frac{\partial L}{\partial p_k} = 0$ 得:

$$\begin{aligned}
&\frac{\ln 2}{\left| \mathbf{I}_S + \frac{p_k \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|^2}{N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_S + \sum_{j=1, j \neq k}^K p_j \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_j\|^2} \right|} \cdot \\
&\frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|^2}{N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_S + \sum_{j=1, j \neq k}^K p_j \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_j\|^2} - \mu \mathbf{I}_S = 0 \quad (11)
\end{aligned}$$

整理得:

$$\frac{\ln 2}{\mu} \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|^2 = N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_S + \sum_{j=1}^K p_j \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_j\|^2 \quad (12)$$

设 $\mathbf{B}_{kk} = \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|^2, \mathbf{B}_{kj} = \|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_j\|^2$,则式(12)等价于:

$$\frac{\ln 2}{\mu} \mathbf{B}_{kk} = N_r \sigma_n^2 \mathbf{I}_S + \sum_{j=1}^K p_j \mathbf{B}_{kj} \quad (13)$$

将式(13)改写成矩阵形式:

$$\begin{aligned}
\frac{\ln 2}{\mu} \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{KK} \end{bmatrix}_{K \times 1} &= \begin{bmatrix} N_r \sigma_n^2 \\ \vdots \\ N_r \sigma_n^2 \end{bmatrix}_{K \times 1} + \\
&\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \cdots & \mathbf{B}_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{B}_{K1} & \cdots & \mathbf{B}_{KK} \end{bmatrix}_{K \times K} \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_K \end{bmatrix}_{K \times 1} \quad (14)
\end{aligned}$$

令矩阵 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \cdots & \mathbf{B}_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{B}_{K1} & \cdots & \mathbf{B}_{KK} \end{bmatrix}_{K \times K}, \mathbf{D} = [\mathbf{B}_{11}, \mathbf{B}_{22}, \dots, \mathbf{B}_{KK}]^T, \mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_K]^T, \boldsymbol{\sigma} = [N_r \sigma_n^2, N_r \sigma_n^2, \dots, N_r \sigma_n^2]^T$,则式(14)简化为:

$$\frac{\ln 2}{\mu} \mathbf{D} = \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{B} \mathbf{P} \quad (15)$$

故最优功率分配矩阵为:

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{B}^{-1} \left(\frac{\ln 2}{\mu} \boldsymbol{D} - \boldsymbol{\sigma} \right) \quad (16)$$

令 $\frac{\partial L}{\partial \mu} = 0$ 得: $\sum_{k=1}^K p_k - P_t = 0$, 即常数 μ 要使 p_k 满足: $\sum_{k=1}^K p_k = P_t$ 。

文献[14]也利用了最大化 SLNR 预编码算法结合功率分配算法的方法,从而达到最大化系统和容量的目的。但计算预编码矩阵 \boldsymbol{W} 和功率分配矩阵 \boldsymbol{P} 的过程中采用了迭代算法,增加了计算复杂度,且最优预编码矩阵 \boldsymbol{W}_k^* 的求解利用了文献[11]中介绍的传统的 SLNR 算法,即

$$\begin{aligned} \boldsymbol{W}_k^* &= \arg \max_{\boldsymbol{W}_k} \text{SLNR}_k = \\ &\arg \max_{\boldsymbol{W}_k} \frac{p_k \|\boldsymbol{H}_k \boldsymbol{W}_k\|_F^2}{N_r \sigma_n^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^K p_j \|\boldsymbol{H}_j \boldsymbol{W}_k\|_F^2} = \\ &\arg \max_{\boldsymbol{W}_k} \frac{\text{tr}(\boldsymbol{W}_k^H \boldsymbol{H}_k^H \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{W}_k)}{\text{tr}\left[\boldsymbol{W}_k^H \left(\frac{N_r \sigma_n^2}{p_k} \boldsymbol{I}_{N_r} + \sum_{j=1, j \neq k}^K \boldsymbol{H}_j^H \boldsymbol{H}_j\right) \boldsymbol{W}_k\right]} \end{aligned} \quad (17)$$

则最优预编码矩阵 \boldsymbol{W}_k^* 应为 N_t 阶矩阵 $\left[\boldsymbol{H}_k^H \boldsymbol{H}_k, \frac{N_r \sigma_n^2}{p_k} \boldsymbol{I}_{N_r} + \sum_{j=1, j \neq k}^K \boldsymbol{H}_j^H \boldsymbol{H}_j\right]$ 的最大广义特征值所对应的广义特征向量;此时得出预编码矩阵 \boldsymbol{W} 与功率分配矩阵 \boldsymbol{P} 的第一种关系表达式,然后列出系统和容量表达式,采用拉格朗日乘数法得出预编码矩阵 \boldsymbol{W} 与功率分配矩阵 \boldsymbol{P} 的第二种关系表达式,再利用迭代算法得出最终的 \boldsymbol{W} 和 \boldsymbol{P} 。但文献[14]考虑的信道模型中接收端每个用户只有一根接收天线,即各用户不存在数据流间干扰,简化了系统结构及复杂度,它采用的迭代算法和文中提出的算法的系统性能比较将在第 3 章的性能分析中给出。

2.2.2 次优化功率分配算法

最优功率分配算法能使多用户 MIMO 系统获得最佳性能,但是有一定的计算复杂度,为了降低复杂度,文中还提出一种次优化功率分配算法,可以将计算复杂度从最优功率分配算法的 $O(KN_t N_r (2K + N_t + KN_t N_r) + KN_t^2 S (KS + 1) + 3KN_t^2 (N_t + 1) + K(2K + 2S^2 + 5) + 3)$ 降低到 $O(KN_t N_r (2KN_t N_r S^2 + KN_t + K + N_t) + KN_t^2 (N_t + S + 3) + 2K)$ 。其中,这两种算法的复杂度比较如表 1 所示。

为了公平起见,每个用户根据自己的信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 来分配功率,即第 k 个用户分配的功率为:

$$p_k = P_t \cdot \frac{\text{SINR}_k}{\sum_{j=1}^K \text{SINR}_j}, k, j = 1, 2, \dots, K \quad (18)$$

式中,在不考虑各用户分配的功率 p_k 时,第 k 个用户的 SINR 为:

$$\text{SINR}_k = \frac{\|\boldsymbol{H}_k \boldsymbol{W}_k\|^2}{N_r \sigma_n^2 \boldsymbol{I}_s + \sum_{j=1, j \neq k}^K \|\boldsymbol{H}_k \boldsymbol{W}_j\|^2}, k = 1, 2, \dots, K \quad (19)$$

表 1 算法复杂度比较

算法	最优功率分配算法	次优化功率分配算法
加法次数	$K^2 N_t^2 (N_r + S^2) + KN_t^2 (N_r + 2N_t + 2) + K(K + S^2 + 3)$	$KN_t^2 N_r (KN_r S^2 + K + 1) + 2KN_t^2 (N_t + 1) + K(S^2 + 1)$
乘法次数	$K^2 N_t^2 N_r (N_r + 1) + KN_t^2 (N_r + S + 1) + K(K + S^2 + 2) + 3$	$K^2 N_t N_r (N_t N_r S^2 + 1) + KN_t^2 (N_t + S + 1) + K$
总次数	$KN_t N_r (2K + N_t + KN_t N_r) + KN_t^2 S (KS + 1) + 3KN_t^2 (N_t + 1) + K(2K + 2S^2 + 5) + 3$	$KN_t N_r (2KN_t N_r S^2 + KN_t + K + N_t) + KN_t^2 (N_t + S + 3) + 2K$

3 仿真及分析

文中针对不同预编码算法和功率分配算法对多用户 MIMO 系统下行链路和容量及误码率性能进行了仿真,仿真参数及信道参数设置如表 2 所示。

表 2 参数设置

参数	配置
发送端总功率 P_t/W	9
发送天线数目 N_t	9
接收天线数目 N_r	3
用户数 K	3
用户数据流数目 S	3
调制方式	QPSK
相干时间 T_s/s	200
检测算法	MMSE

根据表 2 中仿真参数及信道参数的设置,针对 BD 算法、MMSE 算法和 SLNR 算法,功率分配算法分别为注水算法、平均分配、最优或次优化或迭代功率分配算法,就系统和容量以及误码率性能给出仿真结果,其中,迭代次数设为 $m = 30$ 。

图 2 比较了在不同预编码算法及功率分配算法下多用户 MIMO 系统下行链路的和容量。与 BD 算法和 MMSE 算法相比,SLNR 算法同时考虑了噪声和共信道干扰的影响,再结合最优或次优化或迭代功率分配算法,使得系统和容量有了很大提高。在低 SNR 时,SLNR 算法下系统和容量明显高于 BD 算法和 MMSE 算法,且 SLNR 算法没有发送天线数目的限制。由图 2

可以看出,随着 SNR 的增加,在系统和容量上,文中提出的 SLNR 最优功率分配算法达到的效果无限接近于文献[14]提出的 SLNR 迭代功率分配算法,特别是在高 SNR 时,但是 SLNR 最优功率分配算法的计算复杂度远远小于 SLNR 迭代功率分配算法。

图 3 比较了在不同预编码算法及功率分配算法下多用户 MIMO 系统下行链路的误码率性能。从图中可以看出,由于 SLNR 算法考虑了噪声的影响,使得多用户 MIMO 系统的误码率性能得到进一步的改善。以计算复杂度作为代价,SLNR 迭代功率分配算法在误码率性能上达到最佳。

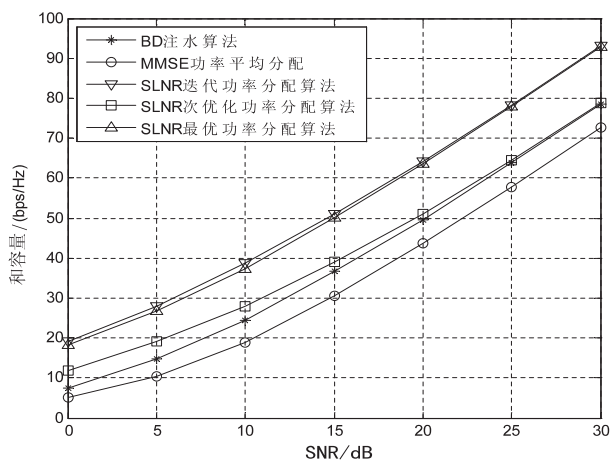


图 2 不同预编码算法下多用户 MIMO 系统下行链路和容量的比较

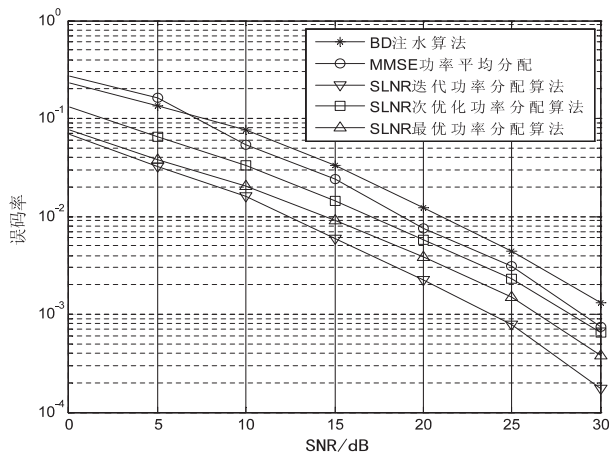


图 3 不同预编码算法下多用户 MIMO 系统下行链路误码率性能的比较

4 结束语

文中针对多用户 MIMO 系统下行链路存在的共信道干扰 (CCI) 问题,提出了在 SLNR 预编码算法的基础上结合功率分配算法的方案。比较了不同预编码算法,如 BD 算法、MMSE 算法和 SLNR 算法,结合不同功率分配算法所获得的系统性能,通过仿真结果可以得出,文中提出的 SLNR 最优功率分配算法的方案在系

统和容量以及误码率性能上比 BD 算法和 MMSE 算法具有明显优势,虽然在误码率性能上不及 SLNR 迭代功率分配算法,但在系统和容量上无限接近于它,且前者的计算复杂度明显要低于后者。为了进一步简化最优功率分配算法的计算复杂度,文中还提出了一种基于 SINR 的次优化功率分配算法,再结合基于 SLNR 的预编码算法,同样达到了改善系统性能的目的,且所获得的系统性能不比 BD 算法和 MMSE 算法差。

参考文献:

- [1] Hwang W J, Kang W P, Jang J H, et al. A multi-user interference detection method for MU-MIMO transmission in LTE advanced system [C]//Proc of 2012 18th Asia-Pacific conference on communications. Jeju Island: [s. n.], 2012: 169-172.
- [2] Costa M. Writing on dirty paper (corresp.) [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(3): 439-441.
- [3] Sun Liang, Lei Ming. Quantized CSI-based Tomlinson-Harashima precoding in multiuser MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1118-1126.
- [4] Peel C B, Hochwald B M, Swindlehurst A L. A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication-part I: channel inversion and regularization [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(1): 195-202.
- [5] Yoo T, Goldsmith A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 528-541.
- [6] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 461-471.
- [7] Chiang Yen-Hsu, Ma Hsi-Pin. Beamforming-based interference cancellation for multiuser MIMO downlink communications [C]//Proc of 2012 international conference on computing, networking and communications. Maui, HI: IEEE, 2012: 907-911.
- [8] Shi Shuying, Schubert M, Boche H. Downlink MMSE transceiver optimization for multiuser MIMO systems: MMSE balancing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(8): 3702-3712.
- [9] Zhou Huayu, Zong Rong, Zhang Qin. Low complexity MMSE precoding and decoding for Multiuser MIMO [C]//Proc of 2010 2nd international conference on future computer and communication. Wuhan: IEEE, 2010: 282-285.
- [10] Shen Hong, Xu Wei, Zhao Chunming. Efficient joint transmit and receive optimization for multiuser MIMO systems [C]//

户通过单点登录页面进行登录,系统将用户信息提交到 CAS 的认证页面进行认证,CAS Client 接收 Http 请求并分析其请求是否包含 Service Ticket,如果 Service Ticket 的值为空,则说明该用户第一次应用,没有登录,则将该用户的请求转向 CAS Server 的登录地址进行身份认证,并且带去访问应用系统的地址,在 CAS Server 中用户信息认证成功后则进行到要访问的应用系统中。如果用户直接请求 CAS Server 认证,成功后则进入单点登录系统,并且随机产生一个唯一的 Service Ticket,并且以 Cookie 形式存放在客户端,以待将来验证,如图 4 所示。

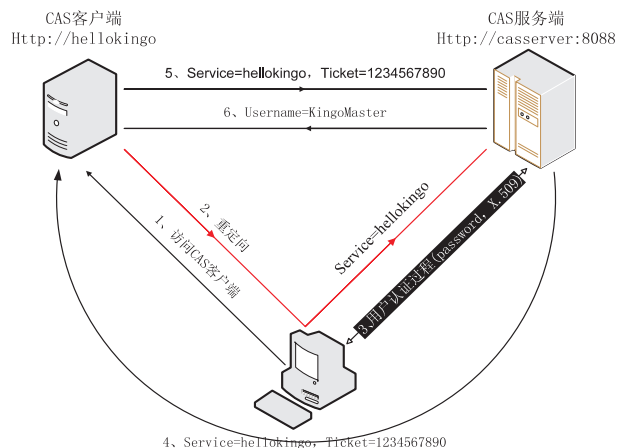


图 4 统一身份认证过程

5 结束语

数字化校园统一身份认证平台解决了校园网内各种应用和服务系统之间用户名、密码和权限的不统一,用户信息的管理和用户使用不方便等问题,是数字化校园建设的重要组成部分。文中将 LDAP 目录服务、CAS 服务相结合设计提出了一个基于信息门户的数字校园统一身份登录认证模型。利用目录服务技术实现对用户信息的快速查找,利用 CAS 实现用户的认证并登录,使得多应用系统可以方便切换。最终,为整个校园网内各应用系统间的信息共享、整合打下了坚实的

基础。

参考文献:

- [1] 段海波. 高校数字化校园的统一身份认证解决方案[J]. 中国信息化,2010(9):43-46.
- [2] 郭楚杰. 数字化校园统一身份认证平台的研究与设计[D]. 广州:广东工业大学,2010.
- [3] 孙甲泉. 基于 LDAP 的 CAS 的校园统一身份认证系统的研究[J]. 电脑知识与技术,2013,9(6):1318-1320.
- [4] 贺玉明,李晋宏,唐辉. LDAP 在数字校园统一身份认证系统中的应用[J]. 计算机技术与发展,2011,21(5):139-142.
- [5] 刘永亮,张卫红,周骏. 基于 LDAP 的校园网统一身份认证的设计[J]. 计算机与数字工程,2008,36(4):116-118.
- [6] Qadeer M A, Salim M, Sana A M. Profile management and authentication using LDAP[C]//Proceedings of 2009 international conference on computer engineering and technology. [s.l.]:[s.n.],2009:247-251.
- [7] The OpenLDAP Project. OpenLDAP 2.2 administrator's guide[EB/OL]. 2004. <http://www.openldap.org/doc/admin22>.
- [8] 张平,郑津,汪立欣. 一种基于 CAS 的校园网统一平台单点登录方法[J]. 电脑编程技巧与维护,2013(16):146-146.
- [9] 高俊,李长云,刘小飞,等. 基于 Portlet 的数字化校园信息门户的设计[J]. 计算机工程与设计,2009,30(17):4006-4008.
- [10] Nakano H, Sugitani K, Nagai T, et al. Web-based time schedule system for multiple LMSs on the SSO/portal environment[C]//Proc of education engineering. Madrid: IEEE, 2010: 153-158.
- [11] 罗辉琼,聂瑞华. 基于 Portal 的门户开发技术研究[J]. 计算机技术与发展,2012,22(8):100-102.
- [12] Radha V, Reddy D H. A survey on single sign-on techniques[J]. Procedia Technology, 2012(4):134-139.
- [13] 高静,涂庆华. 南理工数字化校园统一身份认证平台的构建与实施[J]. 现代计算机:上下旬,2013(6):43-47.
- [14] 刘峰,王峥,曹华平,等. 基于 CAS 的门户单点登录方案[J]. 计算机系统应用,2011,20(6):77-80.


(上接第 116 页)

- Proc of 2012 IEEE wireless communications and networking conference. Shanghai:IEEE,2012:125-130.
- [11] Sadek M, Tarighat A, Sayed A H. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5):1711-1721.
 - [12] Kim Hak-Jin, Baek Jong-Seob, Oh Ji-Myung, et al. Improved leakage-based precoding with vector perturbation for MU-MI-

MO systems[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(11):1868-1871.

- [13] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. New York:Cambridge University Press,2004.
- [14] Fang Wei, Sun Huan, Yang Lin. Power allocation for maximizing sum capacity of multiuser MIMO downlink with transmit precoding based on SLNR[C]//Proc of 2011 IEEE 73rd vehicular technology conference. Budapest:IEEE,2011:1-5.

MIMO信道中基于功率分配的SLNR预编码算法

作者: [张丽娟, 解培中, ZHANG Li-juan, XIE Pei-zhong](#)
作者单位: [南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京, 210003](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2014(8)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201408026.aspx