

协作多点传输中一种基于特征子信道的干扰对齐 预编码矩阵优化方案

王存祥 邱 玲

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室, 合肥, 230027)

摘要: 由于普遍采用频率复用因子为 1 的方式组网, 多小区干扰已经成为限制无线蜂窝系统容量的主要因素。协作多点传输技术可以有效抑制蜂窝系统中多小区干扰问题, 提高小区边缘吞吐率。近年来, 作为协作多点传输的一种实现形式, 干扰对齐技术受到广泛关注, 其优势在于可以获得多小区系统最优的发送自由度。本文提出了一种在干扰对齐技术下基于特征子信道的预编码矩阵优化方案。本方案通过选取与最好的特征子信道对准的预编码矢量发送信号, 使得信号经历最好的一组特征子信道, 改善接收端的信号强度, 从而达到提高系统吞吐量的目的。仿真结果表明, 相比已有的预编码矩阵的设计方案, 本文提出的方案在系统的吞吐量方面有明显的提升。

关键词: 多输入多输出 (MIMO); 协作多点传输 (CoMP); 多小区; 干扰对齐 (IA); 预编码

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)03-0395-05

An Optimized Precoding Scheme based on Eigen-Channel in Interference Alignment for Coordinated Multi-Point Transmission Systems

WANG Cun-xiang QIU Ling

(Personal Communication Network and Spread Spectrum Lab,

University of Science and Technology of China, Hefei, 230027, China)

Abstract: Due to the widely use of frequency reuse factor one in the current and future wireless cellular systems, multi-cell interference has become a key factor constraining the system throughput. Coordinated multi-point transmission (CoMP) can efficiently reduce the interference in multi-cell system, thus improving the cell edge throughput. As a realization of CoMP, interference alignment (IA) attracts wide attention recently, which can obtain the optimal transmitting degree of freedom in multi-cell systems. A novel optimized precoding scheme is proposed for the downlink interference channel of cellular multi-input multi-output (MIMO) system. The precoding matrixes in the proposed scheme are designed by selecting the precoding vectors which are closest to the maximal eigen-channels, which improves the channel condition of the desired signal and strengthens the desired signal, in order to achieve a higher system throughput. Simulation results show that the proposed scheme can improve the throughput of the MIMO system significantly, especially for the case that the channel is spatial correlated.

Key words: multi input multi output (MIMO); coordinated multi-point (CoMP); multi-cell; interference alignment (IA); precoding

1 引言

对更高速率的追求是无线通信长久不变的话题, 因此具有更高频谱效率的多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统成为未来无线通信系统中

的关键技术。由于频谱资源越来越紧张, 期望使用频率复用因子为 1 的方式组网, 在这种情况下, 多小区 MIMO 系统不可避免的会产生同频干扰 (Co-Channel Interference, CCI), 这种干扰甚至会严重削弱 MIMO 技术带来的高频谱利用率。因此, 多小区的干扰控制已

收稿日期: 2010 年 11 月 1 日; 修回日期: 2010 年 12 月 24 日

基金项目: 国家科技重大专项课题“IMT-Advanced 新型无线传输技术研发”(2008ZX03003-004 和 2008BAH30B09); “TD-LTE 面向商用系统设备研发”(2010ZX03002-003)和国家重点基础研究发展计划(973)2007CB310602 支持

经成为一个十分重要的问题。

协作多点传输技术 (CoMP) 通过多个基站的联合预编码, 极大地降低了小区间干扰对边缘用户性能的影响, 使多小区蜂窝 MIMO 系统由干扰受限系统变为噪声受限系统^{[1][2]}。作为 CoMP 的一种实现形式, 干扰对齐技术 (Interference Alignment, IA) 由于在自由度方面的优势而受到关注^{[3][4]}。干扰对齐的核心思想是通过预编码矩阵的设计, 将每个接收端所有的干扰限制到一半的接收信号空间内, 而将另一半无干扰的接收信号空间留作接收需要的信号。然后在接收端通过简单的迫零 (Zero Forcing, ZF) 处理就可以获得有用的信号^[4]。文献[4]介绍了基站在知道所有小区信道信息情况下的干扰对齐; 文献[5]介绍了基站在只知道本小区信道信息情况下的干扰对齐, 这是一种分布式的干扰对齐, 其预编码矩阵通过迭代的方式获得; 文献[6]介绍了一种在频率选择性信道中高信噪比下改进的预编码矩阵优化方案; 文献[7]介绍一种基于弦距离的改进的预编码矩阵优化方案。文献[4]介绍的预编码矩阵的设计方案只是从系统自由度最优的角度着眼; 文献[7]从干扰最小化的角度来优化文献[4]中的预编码矩阵, 此方案主要是令发送信号的弦距离最大化 (MCD-IA), 从而使得信号间的干扰最小化; 在保证自由度最优的基础上, 本文提出的方案主要着眼于从有用信号最大化的角度来优化预编码矩阵。

本文的贡献在于提出了一种基于特征子信道的干扰对齐预编码矩阵的优化方案, 在该方案中通过在预编码矢量集合中选择与基站到目标用户信道的最大的一组特征子信道最为匹配的预编码矢量来组成预编码矩阵, 使得信号经由最好的特征子信道进行传输, 从而获得更高的系统吞吐量。

本文的结构如下: 第2节介绍本文用到的系统模型; 第3节首先简单回顾文献[4]中介绍的经典的干扰对齐 (CJ-IA) 方案, 然后阐述本文提出的基于特征子信道的干扰对齐预编码矩阵优化 (SV-IA) 方案; 第4节是仿真结果及分析; 第5节是对本文进行的总结。

本文用到的符号的意义如下: \mathbf{x} 和 \mathbf{X} 分别表示矢量和矩阵; \mathbf{X}^T 、 \mathbf{X}^H 和 \mathbf{X}^{-1} 分别表示矩阵的转置、共轭转置和逆; $\|\mathbf{x}\|$ 表示矢量的模值; $|\mathbf{X}|$ 表示矩阵的行列式。

2 系统模型

考虑一个有 K 个小区的下行系统, 每个小区内只有一个用户 (Mobile Station, MS), 对于每个小区有多个用户的场景, 可采用诸如正交时分复用的方式简化为每个时隙只有一个用户的场景, 基站 (Base Station, BS) 只给本小区的用户发送数据, 这样就会对所有其他

小区的用户产生干扰, 如图1所示。假设基站之间共享信道信息但不共享数据, 用户之间没有协作, 并且基站和用户均配置了 M 根天线。

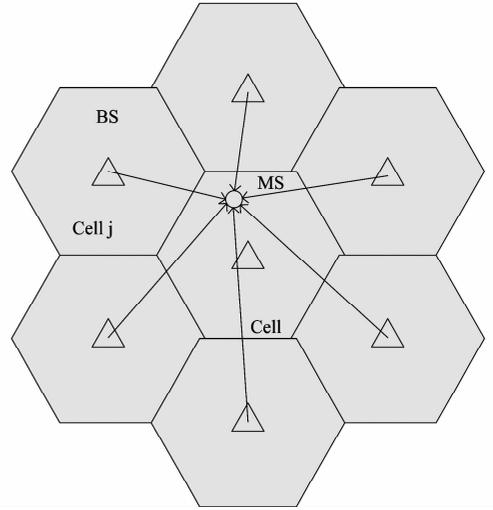


图1 干扰对齐示意图

小区 i 中的用户接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i \mathbf{x}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_j \mathbf{W}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i \quad (1)$$

其中, \mathbf{y}_i 为小区 i 中用户接收到的信号矢量; \mathbf{H}_j 为小区 j 中基站到小区 i 中用户的信道矩阵, 表征平坦瑞利衰落, 其元素独立同分布, 满足均值为 0, 方差为 1 的复高斯分布; \mathbf{W}_i 为小区 i 中基站的发送预编码矩阵, \mathbf{x}_i 为小区 i 中基站发送的信号矢量, 满足功率约束条件 $E\{\mathbf{x}_i^H \mathbf{x}_i\} < P_i$, 其中 P_i 表示小区 i 中基站总的发送功率; \mathbf{n}_i 为小区 i 中用户的加性高斯白噪声矢量, 其分布满足 $\mathbf{n}_i \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 。在式(1)中, 第一项 $\mathbf{H}_i \mathbf{W}_i \mathbf{x}_i$ 表示小区 i 中基站发送给小区 i 中用户的有用信号, 而第二项 $\sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_j \mathbf{W}_j \mathbf{x}_j$ 表示其他基站对小区 i 中用户的干扰。

3 基于特征子信道的干扰对齐预编码矩阵优化方案 (SV-IA)

3.1 经典干扰对齐方法 (CJ-IA) 的回顾

为了便于下面更好的阐述本文提出的基于特征子信道的干扰对齐预编码矩阵优化方案, 首先简单回顾一下文献[4]中经典的干扰对齐 (CJ-IA) 方案。简单起见, 本节以 $K=3$ 且 M 为偶数为例来介绍 CJ-IA 方案以及本文提出的 SV-IA 方案。

在此 3 小区的 MIMO 干扰信道系统中, 假设所有的基站和用户均配置 M 根天线, 同时 M 为偶数。此时, \mathbf{y}_i 和 \mathbf{n}_i 均为 $M \times 1$ 维的矢量, \mathbf{H}_j 为 $M \times M$ 维的满秩矩阵。由文献[4]可知, 此系统总的发送自由度为 $3M/2$ 。此时, 为了可以独立的发送 $3M/2$ 个流, \mathbf{x}_i 和 \mathbf{W}_i 分别

为 $(M/2) \times 1$ 维的矢量和 $M \times (M/2)$ 维的矩阵,其中 $i = 1, 2, 3$ 。

为了从 $M \times 1$ 维的接收信号矢量 \mathbf{y}_i 中解码出 $M/2$ 个数据流,干扰信号矢量最多为 $M/2$ 维,并且要与有用信号之间是独立的。为了满足这一条件,基站的预编码矩阵设计必须满足如下条件:

$$\begin{aligned} \text{span}(\mathbf{H}_{12}\mathbf{W}_2) &= \text{span}(\mathbf{H}_{13}\mathbf{W}_3) \\ \text{span}(\mathbf{H}_{21}\mathbf{W}_1) &= \text{span}(\mathbf{H}_{23}\mathbf{W}_3) \\ \text{span}(\mathbf{H}_{31}\mathbf{W}_1) &= \text{span}(\mathbf{H}_{32}\mathbf{W}_2) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\text{span}(\mathbf{X})$ 表示由 \mathbf{X} 的列矢量张成的空间。

干扰对齐的方法将式(2)的限制条件进一步加强,如式(3)所示

$$\begin{aligned} \text{span}(\mathbf{H}_{12}\mathbf{W}_2) &= \text{span}(\mathbf{H}_{13}\mathbf{W}_3) \\ \mathbf{H}_{21}\mathbf{W}_1 &= \mathbf{H}_{23}\mathbf{W}_3 \\ \mathbf{H}_{31}\mathbf{W}_1 &= \mathbf{H}_{32}\mathbf{W}_2 \end{aligned} \quad (3)$$

通过简单的矩阵变换,式(3)可以等效变换为

$$\begin{aligned} \text{span}(\mathbf{W}_1) &= \text{span}(\mathbf{E}\mathbf{W}_1) \\ \mathbf{W}_2 &= (\mathbf{H}_{32})^{-1}\mathbf{H}_{31}\mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_3 &= (\mathbf{H}_{23})^{-1}\mathbf{H}_{21}\mathbf{W}_1 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{E} = (\mathbf{H}_{31})^{-1}\mathbf{H}_{32}(\mathbf{H}_{12})^{-1}\mathbf{H}_{13}(\mathbf{H}_{23})^{-1}\mathbf{H}_{21}$ 。

由式(4)的第一个等式可以看出, \mathbf{W}_1 为 \mathbf{E} 的特征矢量,即 \mathbf{E} 的特征矢量组成的集合为 \mathbf{W}_1 的预编码矢量集合。所以,可以设

$$\mathbf{W}_1 = [\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2 \ \dots \ \mathbf{e}_{M/2}] \quad (5)$$

其中, $\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2 \ \dots \ \mathbf{e}_{M/2}$ 为 \mathbf{E} 的任意 $M/2$ 个特征矢量。这样,通过式(4)和式(5)就可以得到 \mathbf{W}_2 和 \mathbf{W}_3 。

3.2 基于特征子信道的干扰对齐预编码矩阵优化方案(SV-IA)

上面介绍的 CJ-IA 方案的主要着眼点是系统的发送自由度最优。注意到此方案预编码矩阵的生成并没有用到每个基站到其本小区用户的信道矩阵 \mathbf{H}_{ii} , $i = 1, 2, 3$ 。换言之, CJ-IA 方案将注意力主要集中在了处理其他小区信号对本小区信号的干扰上面,而忽略了本小区信号传输本身所经历的信道状况。针对这一状况,本文提出的 SV-IA 方案不仅用到其他小区基站到本小区用户的信道信息 \mathbf{H}_{ij} ($i \neq j$) 来对齐其他小区基站对本小区用户的干扰,同时还用到本小区基站到本小区用户的信道状态信息 \mathbf{H}_{ii} 从预编码矢量集合中选择最好的一组预编码矢量来构成预编码矩阵,使得本小区基站发送给本小区用户的信号经历信道质量最好的一组特征子信道,提高了用户端接收信号的强度,从而获得更高的系统吞吐量。

在 CJ-IA 方案中, \mathbf{W}_1 由随机从 \mathbf{E} 的 M 个特征矢量中选择的 $M/2$ 个特征矢量组成。而本文提出的 SV-IA 方案将利用 \mathbf{H}_{ii} , $i = 1, 2, 3$ 的最大的 $M/2$ 个奇异值对应

的奇异矢量来优化计算 \mathbf{W}_1 时对 \mathbf{E} 的特征矢量的选择。

对 \mathbf{H}_{ii} 进行奇异值分解(SVD)得到

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{ii} &= \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H \\ &= [\mathbf{u}_{i1} \ \dots \ \mathbf{u}_{iM}] \begin{bmatrix} a_{i1} & & \\ & \ddots & \\ & & a_{iM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{i1}^H \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{iM}^H \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{\Lambda}$ 为奇异值由大到小组成的对角阵,其对应的奇异值为 a_{im} , $i = 1, 2, 3$, $m = 1, \dots, M$; \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别为奇异值对应的左右奇异矢量组成的矩阵,其对应的左右奇异矢量分别为 \mathbf{u}_{im} 和 \mathbf{v}_{im} , $i = 1, 2, 3$, $m = 1, \dots, M$; i 表示小区下标, m 表示奇异值由大到小排列的下标。 \mathbf{v}_{im} , $i = 1, 2, 3$, $m = 1, \dots, M/2$ 即代表小区 i 中信道质量最好的 $M/2$ 个特征子信道。

以小区 1 为例,为了选择 $M/2$ 个信道质量最好的特征子信道传输信号,同时又要满足式(5)的条件,所以需要在 \mathbf{E} 的 M 个特征矢量中选择 $M/2$ 个与 \mathbf{v}_{1m} 弦距离之和最小(即内积最大)的特征矢量来代替 \mathbf{v}_{1m} 近似最好的 $M/2$ 个特征子信道传输信号。即

$$\mathbf{W}_1 = \arg \max_{\mathbf{W}_1 < \text{eig}(\mathbf{E})} \left\{ \sum_{m=1}^{M/2} a_{1m} \|(\mathbf{v}_{1m})^H \mathbf{w}_{1m}\| \right\} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{X} < \text{eig}(\mathbf{Y})$ 表示 \mathbf{X} 的列矢量集合为 \mathbf{Y} 的特征矢量集合的子集, \mathbf{w}_{1m} 为 \mathbf{W}_1 对应的第 m 列。同时,考虑到不同特征子信道的影响权重不同,所以用其奇异值 a_{1m} 作为权重因子。

然后根据式(4)的第 2 个和第 3 个等式便可计算出 \mathbf{W}_2 和 \mathbf{W}_3 。

然而,根据式(4)和式(7)得到的预编码矩阵只是让小区 1 的基站向本小区用户发送信号时经历了最好的 $M/2$ 个特征子信道。同样,如果只针对小区 2 或者小区 3 进行优化,也无法达到多小区环境下整体最优的效果。所以多小区环境下,优化的准则是要选取对所有小区平均意义上最好的特征子信道进行传输。即

$$\begin{aligned} &< \mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3 > \\ &= \arg \max_{\substack{\mathbf{W}_1 < \text{eig}(\mathbf{E}) \\ \mathbf{W}_2 = (\mathbf{H}_{32})^{-1}\mathbf{H}_{31}\mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_3 = (\mathbf{H}_{23})^{-1}\mathbf{H}_{21}\mathbf{W}_1}} \left\{ \sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^{M/2} a_{im} \|(\mathbf{v}_{im})^H \mathbf{w}_{im}\| \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, \mathbf{w}_{im} 为 \mathbf{W}_i 对应的第 m 列, i 表示小区下标。

所以, SV-IA 方案中预编码矩阵设计的具体步骤如下:

步骤 1: 对每个小区内基站到本小区用户的信道 \mathbf{H}_{ii} 进行 SVD 分解,如式(6)。

步骤 2: 计算 SV-IA 方案的预编码矩阵

$$\begin{aligned} &< \mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3 > \\ &= \arg \max_{\substack{\mathbf{W}_1 < \text{eig}(\mathbf{E}) \\ \mathbf{W}_2 = (\mathbf{H}_{32})^{-1}\mathbf{H}_{31}\mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_3 = (\mathbf{H}_{23})^{-1}\mathbf{H}_{21}\mathbf{W}_1}} \left\{ \sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^{M/2} a_{im} \|(\mathbf{v}_{im})^H \mathbf{w}_{im}\| \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)的物理意义同式(8)。

在步骤1中,我们选取了每个小区内最大的 $M/2$ 个奇异值对应的奇异矢量,对应于 $M/2$ 个信道质量最好的特征子信道。在步骤2中,我们从 \mathbf{W}_1 的预编码矢量集合(即 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_M$) 中选择 $M/2$ 个预编码矢量,然后由式(4)得到 \mathbf{W}_2 和 \mathbf{W}_3 ,使得三个小区的预编码矩阵的列矢量跟其本小区内最好的 $M/2$ 个特征子信道的总的内积最大,即选择最接近最好特征子信道的预编码矢量发送数据;同时,考虑到不同特征子信道的影响权重不同,所以用其奇异值 a_{im} 作为权重因子。通过以上操作,可以保证总是选取最好的特征子信道进行传输,从而改善接收端的信号质量,提高系统吞吐量。

由式(4)可知,CJ-IA 方案的复杂度为每个小区基站需 $700M^3 - 11M^2 + 3M$ 次浮点运算;由式(6)和式(9)可知,SV-IA 方案的复杂度为每个小区基站需 $700M^3 - 11M^2 + 3M + 126M^3 + 3(M/2)(7M-1)P_M^{M/2}$

$$= 826M^3 - 11M^2 + 3M + \frac{3(M/2)(7M-1)M!}{(M/2)!}$$

次浮点运算。现在的 UMTS 及 LTE 系统中, M 的最大值为4,此时 CJ-IA 方案的复杂度为44636次浮点运算,SV-IA 方案的复杂度为54644次浮点运算。由此可见,SV-IA 方案在实际系统中并未大幅增加计算复杂度。

3.3 SV-IA 方案在空间相关信道下的性能

多天场景下,由于基站发送天线周围的散射环境不够丰富,或者接收端天线的尺寸限制,造成无线信道在空间上存在相关性。这种空间相关性的存在造成接收端不能很好的区分多个独立的数据流,表现在数学表达式上就是空间信道矩阵各个子信道对应的奇异值的差距被拉大。对于 CJ-IA 方案,由于是随机的选取预编码矢量集合中的预编码矢量,所以可能选取很小的奇异值对应的特征子信道,从而造成吞吐量上的损失,而这种性能损失在空间相关信道下更为明显。反之,SV-IA 方案总是选取最好的特征子信道进行传输,从而削弱了空间相关性对性能的影响。

简单起见,本文采用文献[8]中描述的空间相关信道模型;同时,由于发送端空间相关性对性能的影响远大于接收端空间相关性,所以本文只考虑前者的影响。

4 性能仿真及结果分析

本节比较了 CJ-IA 方案、MCD-IA 方案以及 SV-IA 方案在系统吞吐量上的性能表现。在此仿真中,采用 $K=3$ 个小区;基站和用户均配置 $M=4$ 根天线;每个小区只有一个用户且基站只向本小区用户发送数据;信道矩阵 \mathbf{H}_{ij} 的元素为独立同分布,均服从均值为0方差为1的复高斯分布;每个基站满足功率受限条件且对

所有数据流采用功率均分的方案。本文中仿真采用了文献[5]中基于最小化信号能量泄漏的接收机。

首先,图2给出了3小区 MIMO($M=4$) 环境下 CJ-IA 方案和 SV-IA 方案的系统平均信号强度的 CDF 曲线。从图2中可以看出,SV-IA 方案在保证系统自由度的前提下确实改善了信号的强度。

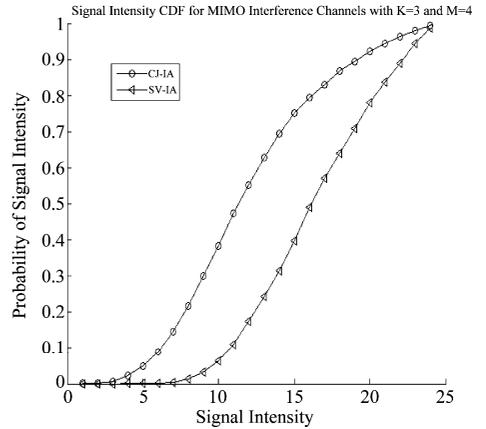


图2 系统平均信号强度的 CDF 曲线

图3给出了3小区 MIMO($M=4$) 环境下 CJ-IA 方案、MCD-IA 方案以及 SV-IA 方案系统吞吐量的比较曲线。MCD-IA 方案是通过在预编码矢量集合中选取特定的预编码矢量,使得其他小区的干扰信号在本小区有用信号上的投影最小。SV-IA 方案由于提高了整个系统的平均信号强度,同时不改变系统的发送自由度,所以系统吞吐量较 CJ-IA 方案有明显的提升。同时,SV-IA 方案系统吞吐量也优于 MCD-IA 方案。

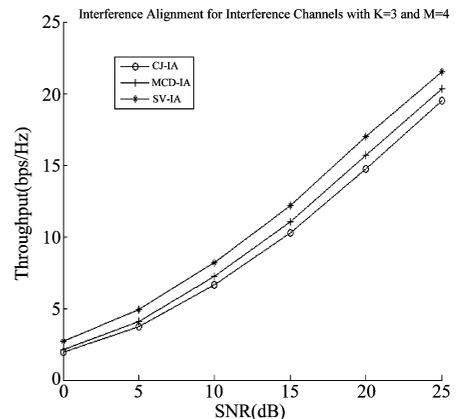


图3 不同方法的系统吞吐量比较曲线

图4和图5分别给出了3小区 MIMO($M=4$) 环境下 CJ-IA 方案、MCD-IA 方案、SV-IA 方案系统吞吐量和 SV-IA 方案与 MCD-IA 方案的系统吞吐量相对于 CJ-IA 方案的相对增益随空间相关系数的变化曲线。从图4中可以看出,相对于其他两种方案,SV-IA 方案对空间相关信道有更强的适应性。

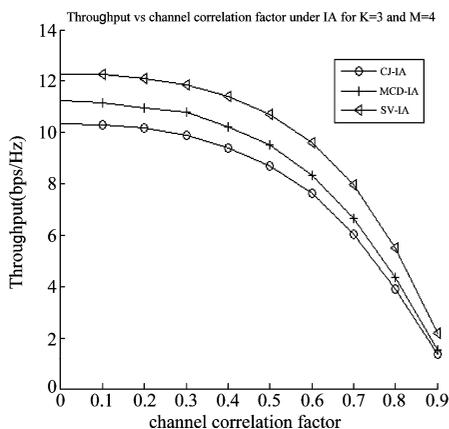


图4 空间相关信道下,系统吞吐量随相关系数的变化曲线

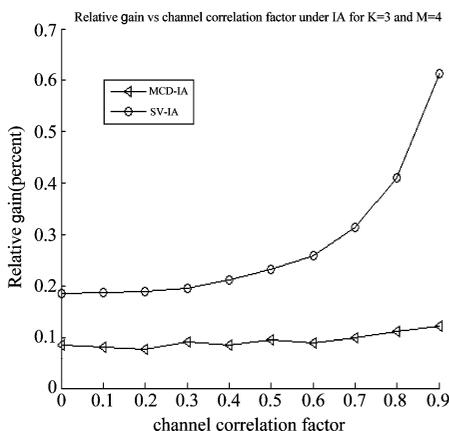


图5 空间相关信道下,系统吞吐量相对增益随相关系数的变化曲线

5 结束语

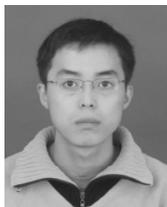
本文研究了多小区 MIMO 环境下的干扰对齐问题。针对经典的干扰对齐预编码矩阵设计中的不足,提出了一种基于特征子信道的预编码矩阵的优化方案,以此来改善传输信号的强度。仿真结果显示,相对于经典的干扰对齐方案,本文提出的优化方案使得系统的吞吐量有显著的提升。

参考文献

[1] Shamai S, Somekh O and Zaidel B M, "Multi-cell communications: an information theoretic perspective [C]", Joint Workshop on Communications and Coding (JWCC), 2004.

- [2] Somekh O, Zaidel B M, Shamai S, "Sum rate characterization for joint multiple cell-site processing [J]", IEEE Transactions on Information Theory, 2007.
- [3] Maddah-Ali M A, Motahari A S, Khandani A K, "Communication over MIMO X Channels: Interference Alignment, Decomposition, and Performance Analysis", IEEE Trans on Information Theory, August 2008.
- [4] Cadambe V R, Jafar S A, "Interference Alignment and Spatial Degrees of Freedom for the K User Interference Channel", IEEE Trans on Information Theory 2008.
- [5] Gomadam K, Cadambe V R, Jafar S A, "Approaching the Capacity of Wireless Networks through Distributed Interference Alignment", IEEE Trans on Information Theory, 2008.
- [6] Shen M, Madsen A H, Vidal J, "An Improved Interference Alignment Scheme for Frequency Selective Channels", ISIT 2008.
- [7] Sung H, Park S H, Lee K J, Lee I, "A Two-stage Precoding Method based on Interference Alignment for Interference Channel Systems", IEEE GLOBECOM 2009.
- [8] Zelst A V, Hammerschmidt J S, "A Single Coefficient Spatial Correlation Model for Multiple-input Multiple-output Radio Channels", Proc. General Assembly of the Int. Union of Radio Science (URSI), Maastricht, The Netherlands, August 2002.

作者简介



王存祥(1985-),男,出生于山东寿光,2008年获得中国科学技术大学工学学士学位,现攻读硕士研究生。研究方向为下一代无线通信技术中的协作多点传输技术。E-mail:cunxiang@mail.ustc.edu.cn



邱玲(1963-),女,出生于江苏南京,获得中国科学技术大学博士学位,教授、博士生导师。研究方向为宽带、空时无线通信方法,包括 OFDM 技术、空时编解码方法、MIMO-OFDM 信道估计以及自适应均衡、多用户 MIMO (MIMO-OFDM) 无线通信系统中的收发处理方法、多用户调度算法以及跨层协议和跨层优化算法,中继和协作通信。E-mail:lqiu@ustc.edu.cn