

蜂窝 V-BLAST 系统中的功率平衡方法

赵 昆 邱 玲 朱近康
(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

摘 要: 有效的功率控制方法在蜂窝无线通信系统的设计中非常重要。该文提出了 MIMO 蜂窝系统中的功率平衡方法,并对此方法进行了性能仿真。结果表明,在接收天线数目多于发射天线数目的情况下,该文提出的功率平衡方法可以有效降低多天线系统接收端的 BER 值。

关键词: 功率控制, 功率平衡, 多输入多输出, 垂直贝尔实验室分层空时结构

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)07-1106-04

On Power Balancing in Cellular V-BLAST Systems

Zhao Kun Qiu Ling Zhu Jin-kang
(PCN&SS, Univ. of Sci. and Tech. of China, Hefei 230027, China)

Abstract Efficient power control is very important in the design of cellular radio systems. In this paper, a power balancing method is proposed in Multi-Input Multi-Output (MIMO) cellular systems, and BER performance is analysed. Simulation results indicate that power balancing can decrease BER at receiver when the number of receiver antennas is greater than that of transmitter.

Key words Power control, Power balancing, MIMO, V-BLAST

1 引言

未来移动通信的应用中,对通信速率有更高的要求,多输入多输出(MIMO)天线技术能显著提高系统容量^[1]和无线传输链路质量^[2],在移动通信领域受到广泛的关注。随着对单用户模型研究的成熟,对存在共信道干扰的多用户 MIMO 的研究正逐步展开^[3,4]。在蜂窝垂直贝尔实验室分层空时结构(V-BLAST)通信系统中,由于用户的多天线发送的数据在空中形成不同的子流^[1,5],接收端在解调出各子流的数据后,没有足够的自由度消除来自共信道用户的干扰^[6],这必然导致接收端误比特率(BER)性能的下降。因此,蜂窝 V-BLAST 中的功率控制显得十分必要,它能有效地抑制多用户带来的共信道干扰,提高多用户 MIMO 系统的无线传输质量。

文献[7,8]中提出了基于信号干扰比(SIR)的集中式的功率平衡方法,对时分多址(TDMA)方式的单输入单输出(SISO)蜂窝系统,在给定的信道环境下,系统有一个最大可达到的 SIR 值,忽略噪声影响时,该 SIR 值可通过求解归一化的信道传递矩阵的特征值得到,相应的特征向量即对应调整后的功率值。文献[9]提出了 MIMO-PI 功率控制的思想,该文中 MIMO 的概念是将多个发送和接收用户之间的信道建模为多入多出的信道,文中通过 PI 方法提高功率控制算法的迭代速度,但是其仍然是基于单天线系统来讨论。在多天线 MIMO 蜂窝系统中,由于多天线带来信道传递矩阵维数的增

加,即信道传递矩阵既要能够表示出用户之间的信道传递关系,又要能够表示出天线之间的信道传递关系,使 SIR 难以表达成满足特征值公式的形式。因此,MIMO 蜂窝系统是否与 SISO 蜂窝系统一样,存在一个最大可达到的 SIR 值,需要进行研究。为了使 SISO 蜂窝系统中基于 SIR 的功率平衡方法在 MIMO 蜂窝系统中有效,必须要简化信道传递矩阵的表达式。

本文的研究是把集中式功率平衡方法引入 MIMO 蜂窝系统中,提出一种功率平衡方法,它利用 V-BLAST 不同天线发射数据独立的特点,只调整每个用户发射端的总功率,在用户发射端的不同天线间均分功率的情况下(本文讨论的是发射端对信道未知的情况,由文献[10]可知,用户的发射天线均分用户总发射功率能得到用户的最大各态历经容量,因而在本文的讨论中,用户总发射功率均分到用户的所有发射天线),得到简化的信道传递矩阵的表达式,并且证明该简化的信道传递矩阵归一化后满足非负不可约性,从而可以通过求解归一化的信道传递矩阵的特征值和特征向量得到平衡的 SIR 值和相应的发射功率。数值仿真比较了不使用功率平衡的 MIMO 系统和使用功率平衡的 MIMO 系统的 BER 性能,后者有明显的性能提高。

本文第 2 节给出了蜂窝 V-BLAST 系统模型;第 3 节推导蜂窝 V-BLAST 系统中的 SIR 表达式,并提出基于 SIR 的功率平衡方法;第 4 节给出了数值仿真结果,并对仿真结果

进行了分析; 最后, 给出全文总结和进一步的工作。

2 蜂窝 V-BLAST 系统模型

单用户 V-BLAST 的收发框图如图 1 所示, 接收信号表达式为

$$\mathbf{R}^{(1)} = \sqrt{P^{(1)}/M} \mathbf{H}^{(11)} \mathbf{X}^{(1)} + \boldsymbol{\eta}^{(1)} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{R}^{(1)} = [r_1^{(1)}, \dots, r_N^{(1)}]^T$ 为基站 1 的接收信号向量, $\mathbf{X}^{(1)} = [x_1^{(1)}, \dots, x_M^{(1)}]^T$ 为移动台 1 的发射信号向量, $\boldsymbol{\eta}^{(1)} = [\eta_1^{(1)}, \dots, \eta_N^{(1)}]^T$ 为在基站 1 接收端的高斯白噪声向量, $[\cdot]^T$ 表示转置; 移动台 1 到基站 1 的信道传递矩阵 $\mathbf{H}^{(11)} = \begin{bmatrix} h_{11}^{(11)} & h_{12}^{(11)} & \dots & h_{1M}^{(11)} \\ h_{21}^{(11)} & h_{22}^{(11)} & \dots & h_{2M}^{(11)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1}^{(11)} & h_{N2}^{(11)} & \dots & h_{NM}^{(11)} \end{bmatrix}$, $\mathbf{H}^{(11)}$ 矩阵第 i 行、第 j 列的

元素 $h_{ij}^{(11)}$ 为发射天线 j 到接收天线 i 的信道传递函数, $\mathbf{H}^{(11)}$ 矩阵的元素为独立同分布(i.i.d)的复高斯信号, 其均值为 0, 方差为 1; $P^{(1)}$ 表示移动台 1 的总发射功率, M 为移动台 1 的发射天线数目, N 为基站 1 的接收天线数目, 发射端对信道未知, 移动台的 M 根天线均分总的发射功率。在本段的叙述中, 用上标 1 来表示单用户。

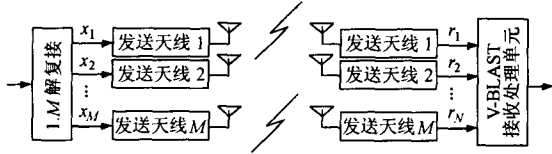


图 1 单用户 V-BLAST 收发框图

本文讨论的是蜂窝 V-BLAST 系统, 多址接入方式为 TDMA, 基站位于小区中心。为了表述方便, 在下面的分析中, 从上行链路的角度来叙述。因为采用 TDMA 多址方式, 每个时刻小区内只有一个移动台在与基站通信, 第 i 个小区的移动台用移动台 i 来表示, 同样, 第 i 个小区的基站用基站 i 来表示。设总的共信道小区数目为 Q , 基站 i 受到来自其它 $Q-1$ 个干扰移动台的共信道干扰。基站 i 的接收信号表达式为

$$\mathbf{R}^{(i)} = \sqrt{P^{(i)}/M} \sqrt{G^{(ii)}} \mathbf{H}^{(ii)} \mathbf{X}^{(i)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^Q \sqrt{P^{(j)}/M} \sqrt{G^{(ij)}} \mathbf{H}^{(ij)} \mathbf{X}^{(j)} + \boldsymbol{\eta}^{(i)} \quad (2)$$

考虑干扰受限的系统, 如文献[5]所述, 干扰远远大于噪声, 噪声项可以忽略, 式(2)简化为

$$\mathbf{R}^{(i)} = \sqrt{P^{(i)}/M} \sqrt{G^{(ii)}} \mathbf{H}^{(ii)} \mathbf{X}^{(i)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^Q \sqrt{P^{(j)}/M} \sqrt{G^{(ij)}} \mathbf{H}^{(ij)} \mathbf{X}^{(j)} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{R}^{(i)}$ 为基站 i 的接收信号向量; $\mathbf{X}^{(i)}$, $\mathbf{X}^{(j)}$ 分别为移动台 i , 移动台 j 的发射信号向量; $\mathbf{H}^{(ii)}$, $\mathbf{H}^{(ij)}$ 分别为移动台 i 到基站 i , 移动台 j 到基站 i 的信道传递矩阵; $G^{(ii)}$, $G^{(ij)}$ 分别为移动台 i 到基站 i , 移动台 j 到基站 i 的大尺度衰落因子,

由于移动台的天线分布距离相对移动台到基站的无线距离小到可以忽略, 在本文的分析中, 用标量来表示大尺度衰落因子, 不区分不同天线间的大尺度衰落; $P^{(i)}$, $P^{(j)}$ 分别为移动台 i , 移动台 j 的总发射功率; 各移动台用 M 根发射天线, 各基站用 N 根接收天线。

为便于分析, 文中对蜂窝 V-BLAST 系统作如下限定^[1,6,10]:

(1)信道是窄带、准静态的, 至少在一个数据块(Block)内, 移动台物理位置、信道传递矩阵以及大尺度衰落因子不变; (2)发射端对信道未知, 发射天线均分总的发射功率, 接收端有理想信道估计, 对信道完全已知; (3)不同天线发射的数据为独立同分布, 且发射信号能量归一化; (4)各个小区的移动台的功率调整是同步的, 且用集中式的调整方法; (5)接收天线数目多于发送天线数目, 即 $N > M$; (6)共信道干扰远远大于噪声和邻信道干扰, 因此接收信号只考虑共信道干扰的影响。

3 蜂窝 V-BLAST 中的功率平衡方法

基于第 2 节描述的蜂窝 V-BLAST 系统, 将式(3)表示为两个信号和的形式为

$$\mathbf{R}^{(i)} = \mathbf{D}^{(i)} + \mathbf{I}^{(i)} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{D}^{(i)}$ 为基站 i 接收到的移动台 i 的信号, 称为目标信号, $\mathbf{I}^{(i)}$ 为基站 i 接收到的除移动台 i 的其他 $Q-1$ 个共信道移动台的信号, 称为干扰信号, $\mathbf{D}^{(i)}$ 和 $\mathbf{I}^{(i)}$ 的表达式分别为

$$\mathbf{D}^{(i)} = \sqrt{P^{(i)}/M} \sqrt{G^{(ii)}} \mathbf{H}^{(ii)} \mathbf{X}^{(i)} \quad (5)$$

$$\mathbf{I}^{(i)} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^Q \sqrt{P^{(j)}/M} \sqrt{G^{(ij)}} \mathbf{H}^{(ij)} \mathbf{X}^{(j)} \quad (6)$$

为了得到 SIR 的表达式, 需要先求出接收到的目标信号功率和干扰信号功率。由信号功率的定义, 分别求 $\mathbf{D}^{(i)}$ 和 $\mathbf{I}^{(i)}$ 的自相关函数; 同时, 为了得到稳定的功率值, 由于信道在 Block 内不改变, 所以对发射信号求均值的时间长度取为一个 Block, 从而信号功率在每个 Block 内稳定, 在 Block 间可变。这样, 目标信号功率和干扰信号功率的表达式分别为

$$\begin{aligned} P_{\text{Desire}}^{(i)} &= E_{\mathbf{X}} \left[\left(\mathbf{D}^{(i)} \right)^H \mathbf{D}^{(i)} \right] \\ &= \frac{P^{(i)}}{M} G^{(ii)} E_{\mathbf{X}} \left[\left(\mathbf{X}^{(i)} \right)^H \left(\mathbf{H}^{(ii)} \right)^H \mathbf{H}^{(ii)} \mathbf{X}^{(i)} \right] \\ &= \frac{P^{(i)}}{M} G^{(ii)} \left\| \mathbf{H}^{(ii)} \right\|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{Inter}}^{(i)} &= E_{\mathbf{X}} \left[\left(\mathbf{I}^{(i)} \right)^H \mathbf{I}^{(i)} \right] \\ &= E_{\mathbf{X}} \left[\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^Q \sqrt{\frac{P^{(j)}}{M}} \sqrt{G^{(ij)}} \mathbf{H}^{(ij)} \mathbf{X}^{(j)} \right)^H \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^Q \sqrt{\frac{P^{(j)}}{M}} \sqrt{G^{(ij)}} \mathbf{H}^{(ij)} \mathbf{X}^{(j)} \right) \right] = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^Q \frac{P^{(j)}}{M} G^{(ij)} \left\| \mathbf{H}^{(ij)} \right\|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式(7), (8)中 $P_{\text{Desire}}^{(i)}$, $P_{\text{Inter}}^{(i)}$ 分别为基站 i 接收到的目标信号的功率, 基站 i 接收到的干扰信号的功率, $(\cdot)^H$ 表示共轭转置,

$E_x[\cdot]$ 表示对发射信号取均值, $\|\cdot\|^2$ 表示矩阵的 F 范数。在式(7), (8)的推导过程中, 利用了不同天线的发射数据独立同分布的假设, 从而将信道传递矩阵表示为 F 范数和的形式, 去掉了信道传递矩阵之间的乘积项, 便于下面的分析。

由式(7)和式(8), 可以得到基站 i 的 SIR 的表达式为

$$\begin{aligned} \text{SIR}^{(i)} &= \frac{P_{\text{Desire}}^{(i)}}{P_{\text{Inter}}^{(i)}} = \frac{(P^{(i)}/M)G^{(ii)}\|H^{(ii)}\|^2}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^Q \frac{P^{(j)}}{M} G^{(ij)}\|H^{(ij)}\|^2} \\ &= \frac{P^{(i)}}{\sum_{j=1}^Q P^{(j)} \frac{G^{(ij)}\|H^{(ij)}\|^2}{G^{(ii)}\|H^{(ii)}\|^2}} \end{aligned} \quad (9)$$

为了简化表达, 令

$$w^{(ij)} = \begin{cases} \frac{G^{(ij)}\|H^{(ij)}\|^2}{G^{(ii)}\|H^{(ii)}\|^2}, & j \neq i \\ 0, & j = i \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 得到简化的基站 i 的 SIR 的表达式为

$$\text{SIR}^{(i)} = P^{(i)} / \sum_{j=1}^Q P^{(j)} w^{(ij)} \quad (11)$$

为使各个基站的 SIR 值平衡, 令

$$\text{SIR}^{(i)} = \text{SIR}_{\text{Balance}}^U \quad (12)$$

式中 $1 \leq i \leq Q$, $\text{SIR}_{\text{Balance}}^U$ 为一常数。

将式(12)代入式(11), 并用矩阵形式表示为

$$\frac{1}{\text{SIR}_{\text{Balance}}^U} \mathbf{P} = \mathbf{W} \mathbf{P} \quad (13)$$

式中矩阵 $\mathbf{W}$ 的第 i 行, 第 j 列的元素即式(10)定义的 $w^{(ij)}$,

$\mathbf{P} = [P^{(1)}, \dots, P^{(Q)}]^T$ 为 Q 个移动台的发射功率。

为了得到 $\text{SIR}_{\text{Balance}}^U$, 首先给出矩阵 $\mathbf{W}$ 满足非负不可约性质的证明。

定理 矩阵 $\mathbf{W}$ 是非负不可约矩阵。

证明 矩阵 $\mathbf{W}$ 可约的定义是, 存在转置矩阵 $\mathbf{B}$,

$\mathbf{B} \mathbf{A} \mathbf{B}^T = \begin{pmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{pmatrix}$, 左下角的 $\mathbf{0}$ 表示全零矩阵, 需要 $\mathbf{W}$ 至少有一行有多于两个零元素, 才可能构成可约矩阵。在式(10)中给出矩阵 $\mathbf{W}$ 每个元素的表达式, 除了对角线元素为 0, 非对角线元素为 $G^{(ij)}\|H^{(ij)}\|^2 / (G^{(ii)}\|H^{(ii)}\|^2)$, 其中 $G^{(ij)}$, $G^{(ii)}$ 恒为正数, $H^{(ij)}$, $H^{(ii)}$ 为 0 是没有物理意义的, 所以 $\|H^{(ij)}\|^2$, $\|H^{(ii)}\|^2$ 也恒为正数, 因此, 矩阵 $\mathbf{W}$ 的每行有且仅有一个 0 元素, 矩阵 $\mathbf{W}$ 为非负不可约的矩阵。证毕

在矩阵理论中, 对非负不可约的矩阵 $\mathbf{W}$, 有如下性质^[8]:

(1) $\mathbf{W}$ 唯一存在一个实特征值 λ^* , 有 $\lambda^* = \max\{|\lambda_i|\}_{i=1}^Q$; (2) 对应 λ^* 的特征向量 $\mathbf{P}^*$ 的每个元素有相同的符号, 即同正或者同负, 如果 $\mathbf{P}^*$ 全负, 在 $\lambda^* \mathbf{P}^* = \mathbf{W} \mathbf{P}^*$ 两边把符号约去, 可得到全正的 $\mathbf{P}^*$, 即恒有 $\mathbf{P}^* \geq \mathbf{0}$, $\mathbf{0}$ 为全 0 向量。

如文献[8]中所述, 对满足 $\lambda^* \mathbf{P}^* = \mathbf{W} \mathbf{P}^*$ 的系统, 其中 λ^* 为矩阵 $\mathbf{W}$ 的绝对值最大的实特征值, $\mathbf{P}^* = [P^{(1)*}, \dots, (P^{(Q)*})^T]^T$ 为对应特征值 λ^* 的特征向量, 存在一个各基站可以达到的平衡的 SIR 值为

$$\text{SIR}_{\text{Balance}}^U = 1/\lambda^* \quad (14)$$

Q 个移动台分别将功率向量 $\mathbf{P}^* = [P^{(1)*}, \dots, (P^{(Q)*})^T]^T$ 的对应元素的值作为发射功率, 即可以达到该 $\text{SIR}_{\text{Balance}}^U$ 。

与上行链路相似, 下行链路中存在一个各移动台可以达到的平衡的 SIR 值, 用 $\text{SIR}_{\text{Balance}}^D$ 来表示该值。通过类似文献[11]中的证明过程, 可以得到结论, 采用集中式的功率平衡方法, 在给定的信道环境下, 上下行达到一致的平衡 SIR 值, 用 $\text{SIR}_{\text{Balance}}$ 来表示该值, 有下面的结论

$$\text{SIR}_{\text{Balance}}^U = \text{SIR}_{\text{Balance}}^D = \text{SIR}_{\text{Balance}} = 1/\lambda^* \quad (15)$$

功率平衡方法通过调整用户发射端的功率, 使各个用户的接收 SIR 值趋于一致; 而 SIR 值能够反映接收性能, 功率平衡对 SIR 平均化, 目的是为了平衡各个用户的接收 BER 性能。对 V-BLAST 系统来说, 由于采用分层检测数据的方法, 低 SIR 值会带来较严重的误码传播, 是系统 BER 性能的瓶颈, 提高低的 SIR 值, 可带来系统平均 BER 性能的提升。下面通过数值仿真来具体分析功率平衡对 BER 性能的影响。

4 数值仿真结果及分析

本文的仿真参数定义如下: 小区复用因子 $K=1/3$, 如图 2 所示。仿真用的共信道小区数目 $Q=7$, 内环小区用浅色斜线标识, 外环用深色竖线标识, 标号 B, C 的小区表示两个邻信道小区。归一化小区半径 $R=1$, 路径衰减因子 $\alpha=3.7$, 正态阴影衰落方差 $\sigma^2=8\text{dB}$ 。移动台在小区内均匀分布。仿真用的天线系统分为 4 发 6 收和 4 发 8 收两种, 分别用(4, 6)和(4, 8)表示。每根发射天线上的数据使用 8PSK 调制, 星座点映射采用格雷编码, 不同发送天线用的星座点集合相同, 无信道编码。平坦的瑞利慢衰落信道, 信道特性 Block 内不变, Block 间可变, Block 长度定义为 100 个数据符号(Symbol), 其中 20 个 Symbol 用于信道估计。接收端采用迫零(ZF)准则结合排序的串行干扰抵消(ZF-OSIC)方法的检测方法。

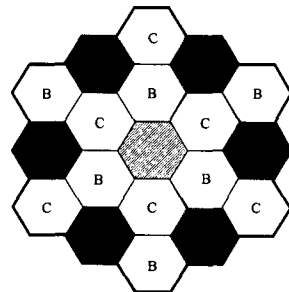


图2 小区复用蜂窝结构示意图

图 3 给出(4, 6)天线系统作 20 次独立的信道变化的 SIR 比较, 每次信道的变化是通过变化各个移动台在小区内的位置来改变所有共信道链路的信道传递矩阵, 每一次信道传递矩阵改变后都进行一次本文第 3 节提出的功率平衡操作, 在接收端测量得到功率平衡后的 $SIR_{Balance}$, 该平衡 SIR 值(即 $SIR_{Balance}$)介于最大 SIR 值(Q 个共信道用户在功率调整前的 SIR 值中的最大值)和最小 SIR 值(Q 个共信道用户在功率调整前的 SIR 值中的最小值)之间。功率平衡对最小 SIR 值有明显的改善。由于 20 次信道的变化是独立完成的, 上述结果说明功率平衡能提高低 SIR 值, 不受具体信道环境的影响。

图 4 给出无功率平衡和有功率平衡的蜂窝 V-BLAST 系统的 BER 性能比较。浅色斜线表示内环小区平均的 BER 值, 深色竖线表示外环小区平均的 BER 值; 沿纵坐标方向的数据上限表示接收天线数为 6 的 BER 值, 下限表示接收天线数为 8 的 BER 值。从图 4 中看出, 使用功率平衡方法调整发射功率的系统, 其 BER 值有明显的降低, 不论是对内环小区还是外环小区, 不论对接收天线数目是 6 还是 8 的 MIMO 系统; 并且(4,8)天线系统应用功率平衡方法带来的 BER 值的降低明显大于(4,6)天线系统, 可见, 功率平衡方法对接收天线越多的系统有越明显的 BER 增益。由于每个小区内的用户同时受到来自其他 6 个共信道小区用户的干扰, 内环小区用户受到的干扰相对外环小区用户来说要大, 因而不使用功率控制的时候, 内环小区用户的 BER 值要高于外环的, 而使用功率平衡方法后, 内环小区用户与外环小区用户有相同的 BER 性能, 用户的 BER 性能与用户位置无关, 所以, 功率平衡方法为内环小区的用户带来更大的性能增益。对(4, 8)天线系统的内环小区的用户来说, 使用功率平衡方法使 BER 值下降将近 10 倍。

在仿真过程中涉及较多的参数, 如蜂窝小区的数目, 路径衰减因子大小以及天线数目等等, 改变这些参数, 该功率平衡方法依然适用。

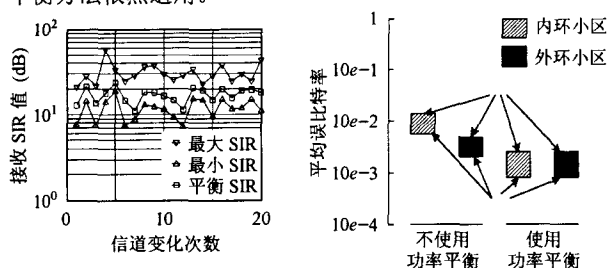


图 3 信道变化的 SIR 比较

图 4 MIMO 蜂窝系统 BER 性能比较

5 结束语

本文利用 V-BLAST 不同天线发射数据独立的特点, 推导了简化的蜂窝 V-BLAST 系统中的 SIR 表达式, 从而提出了一种 MIMO 蜂窝系统中的集中式功率控制方法, 通过调整各个共信道用户发射端的功率值, 使共信道的各个用户达到一致的 SIR。仿真结果表明, 功率平衡能提高低 SIR 值, 不受具体信道环境的影响; 当接收天线数目多于发射天线数目的时候, 使用功率平衡方法能带来 BER 性能的提高, 而且

接收天线数目越多, 带来的 BER 性能提高越大, 对(4, 8)的天线系统来说, 使用功率平衡方法后, BER 值最多下降了将近 10 倍。

文中使用集中式的功率平衡方法需要全局的信道信息, 由于在 MIMO 系统中, 信道估计是一个难点, 并且集中式控制带来系统复杂度的提高, 采用分布式的功率控制方法以减小对信道信息的依赖程度是下一步工作的重点。同时, 在满足服务质量(QoS)要求下, 分析功率控制系统的容量问题也需要进一步的研究。

参考文献

- [1] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, Valenzuela R A. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. ISSSE, Pisa, Italy, 1998: 295 – 300.
- [2] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE J. on Select Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1451 – 1458.
- [3] Blum R S. MIMO capacity with interference. *IEEE J. on Selected Areas in Communication*, 2003, 21(5): 793 – 801.
- [4] Kang M, Alouini M S. Performance analysis of MIMO systems with cochannel interference over Rayleigh fading channels. ICC, New York, NY, USA, 2002: 391 – 395.
- [5] Golden G D, Foschini C J, Valenzuela R A, Wolniansky P W. Detection algorithm and initial laboratory results using the V-BLAST space-time communication architecture. *Electronics Letters*, 1999, 35(1): 14 – 16.
- [6] Catreux S, Driessen P F, Greenstain L J. Simulation results for an interference-limited multiple-input multiple-output cellular system. *IEEE Communications Letters*, 2000, 4(11): 334 – 336.
- [7] Aein J M. Power balancing in systems employing frequency reuse. *COMSAT Tech. Rev.*, 1973, 3(2): 277 – 299.
- [8] Grandhi S A, Vijayan R, Goodman D J, Zander J. Centralized power control in cellular radio systems. *IEEE Trans. on VT*, 1993, 42(4): 466 – 468.
- [9] Hasu V, Koivo H N. A block MIMO PI-Power control algorithm for cellular systems. VTC 2001 fall, Atlantic, NY, USA, 2001: 1927 – 1931.
- [10] Goldsmith A, Jafar S A, Jindal N, Vishwanath S. Capacity limits of MIMO channels. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(5): 684 – 702.
- [11] Zander J, Frodigh M. Comment on Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems. *IEEE Trans. on VT*, 1994, 43(3): 636 – 636.

赵 昆: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为无线通信及其信号处理、MIMO中的信号处理。

邱 玲: 女, 1963年生, 副教授, 研究方向为无线通信, 移动通信中的信号处理、扩频通信、MIMO中的信号处理等。

朱近康: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信及个人通信、扩频通信、通信中的信号处理等。