

论文

多小区 MIMO 系统中基于能效最大的天线数和用户数联合优化方案

范建存^{①*}, 宁悦^①, 邓建国^①, 徐志昆^②^① 西安交通大学电信学院, 西安 710049^② 中国移动有限公司研究院, 北京 100053

* 通信作者. E-mail: fanjc0114@gmail.com

收稿日期: 2015-05-27; 接受日期: 2015-06-17; 网络出版日期: 2015-09-07

中国移动研究院研究基金 (批准号: 2013346)、国家自然科学基金 (批准号: 61302066)、教育部博士点基金 (批准号: 20130201120-021)、陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2014JQ8303, 2014JM2-6124)、国家博士后科学基金 (批准号: 2014M560780, 2015T81031) 和陕西省博士后科学基金资助项目

摘要 针对多小区多用户多入多出 (multi-user multiple-input multiple-output, MU-MIMO) 系统的下行链路场景, 首先在考虑电路功耗和发射功耗的实际功耗模型下, 推导出系统能效与基站天线数及用户数的关系式. 然后为最大化系统能效, 建立了联合优化基站天线数与用户数的能效优化模型, 并给出一种交替迭代搜索算法来简化该优化问题的求解, 同时证明了其最优解的存在. 最后仿真结果表明, 基于天线数与用户数的优化配置关系提出的天线配置方案可以明显提升系统能效.

关键词 多小区 多用户 MIMO 能效 天线配置 迭代优化

1 引言

近年来, 为了充分的开拓空域资源, 在基站端配置大规模阵列的多入多出技术 (multiple-input and multiple-output, MIMO) 已经被提出. 现有研究已经表明^[1~4]: 当基站端配置的天线数趋于无穷时, 每个用户对应的接收信道矢量将趋于正交, 那么就可利用波束形成技术来降低小区间干扰, 并显著地提高了系统的频谱利用率和能量效率. 由于这些显著的优势, 大规模 MIMO 技术已经受到业界和学术界的广泛关注, 并被看作是未来移动通信系统的关键技术之一. 考虑到实际的天线都需要相应的射频发射链路支持, 那么部署大量的天线虽然可以相应地减少系统的发射功耗, 但也会相应地增加射频链路的电路功耗, 从而导致不必要的能量开销, 使得系统能效降低. 因此, 如果从系统能效的角度来讲, 是否一定是部署越多天线系统能效越高则需要进一步研究.

对此, 文献 [5] 对单小区和多小区 MIMO 这两种系统中的系统能效随着基站天线的变化趋势进行了分析研究, 其仿真结果表明系统能效随着天线数的增加呈现一个准凹的变化趋势. 文献 [6] 则在大规模天线的假设下, 对单小区多用户 MIMO (multi-user MIMO, MU-MIMO) 系统的能效关于基站天线数、用户数及发射功率进行了联合优化, 并表明不同的激活用户应该有不同的发射天线数. 文献 [7]

引用格式: 范建存, 宁悦, 邓建国, 等. 多小区 MIMO 系统中基于能效最大的天线数和用户数联合优化方案. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 281-290, doi: 10.1360/N112015-00117

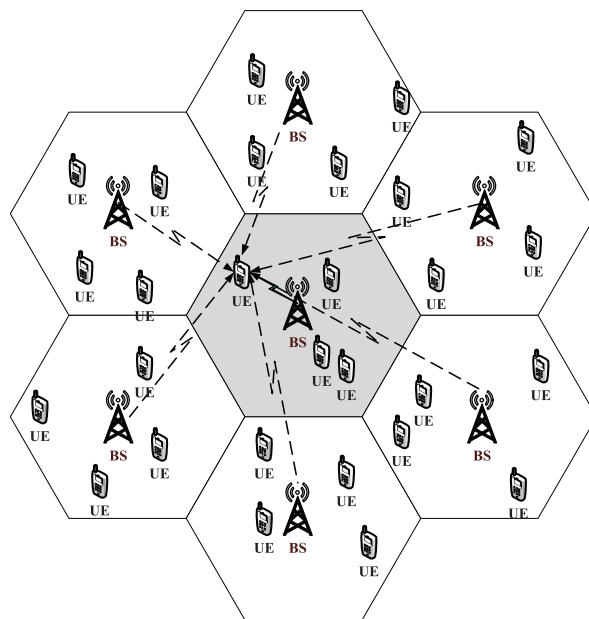


图 1 多小区多用户网络模型

Figure 1 Multi-cell multi-user network model

则考虑大规模 MIMO 系统的下行链路场景, 提出一种高效的基站选择算法以最大化系统能效, 其仿真结果表明, 在天线规模很大的假定条件下, 采用随机的基站选择方法就能显著提升系统能效, 并且其性能与最优的基站选择方法的性能已经非常接近。

然而, 上述工作主要针对单小区场景对信道容量和系统能效进行分析研究, 并且假定基站天线趋于无穷, 也就是说假定各用户的信道矢量是相互正交的, 但在实际中往往都是配备有限天线的多小区系统. 因此, 我们将在多小区下行 MU-MIMO 系统中, 在天线数有限的假设条件下, 对系统能效随基站天线数和用户数的变化趋势进行分析, 并寻找最大化系统能效时天线数与用户数的最优配置关系。

本文结构安排如下: 第 2 节介绍了本文的系统模型, 并给出了相应的系统容量近似和能效表达式; 第 3 节分析了 MIMO 系统中能量有效的天线配置方案, 并对系统能效关于基站天线数与用户数的函数凹凸性进行了分析; 第 4 节对相应的高能效配置进行了仿真分析; 第 5 节则对本文进行了总结。

2 系统模型

2.1 信号模型和系统容量

考虑如图 1 所示的多小区 MU-MIMO 下行网络, 该网络包含 L 个小区, 每个小区中有 K 个单天线用户, 每个基站的天线数为 N_t . 假设每个基站复用同样的频率且都能获取准确的信道状态信息, 那么当采用迫零预编码发射时小区 b 中用户 k 的接收信号就可以表示为

$$y_{k_b} = \sqrt{g_{k_b,b}} \mathbf{h}_{k_b,b} \mathbf{w}_{k_b,b} \sqrt{p_{k_b,b}} x_{k_b,b} + \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} \sqrt{g_{k_b,l}} \mathbf{h}_{k_b,l} \mathbf{W}_l \sqrt{P_l} \mathbf{x}_l + n_{k_b}, \quad (1)$$

这里 $g_{k_b,l} = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 d_{k_b,l}^{-\alpha}$ 是基站 l 到小区 b 中用户 k 的路径损耗, λ 为载波波长, $d_{k_b,l}$ 为基站 l 到小区 b 中用户 k 的距离, α 为路径损耗因子; $\mathbf{h}_{k_b,l}$ 为基站 l 到小区 b 中用户 k 的 Rayleigh 衰落信道矢量, 且

每个信道系数服从均值为 0 方差为 1 的复 Gauss 分布; $\mathbf{W}_l = [\mathbf{w}_{1,l}, \dots, \mathbf{w}_{K_l,l}]$ 为小区 l 中的迫零预编码矩阵, $\mathbf{w}_{k_l,l}$ 为基站 l 到小区 l 中用户 k 的迫零预编码码矢量; $\mathbf{P}_l = \text{diag}\{p_{1,l}, \dots, p_{K_l,l}\}$ 为小区 l 中的功率分配矩阵, $p_{k_l,l}$ 为小区 l 中用户 k 的功率分配因子, $\text{diag}\{\cdot\}$ 表示对角化操作; $\mathbf{x}_l = [x_{1,l}, \dots, x_{K_l,l}]^T$ 为基站 l 到小区内各用户的发射信号矢量, $x_{k_l,l}$ 为基站 l 发送给小区 l 中用户 k 的信号, $\{\cdot\}^T$ 表示转置操作; n_{k_b} 为小区 b 中用户 k 接收到的加性噪声, 且服从均值为 0、方差为 σ^2 的复 Gauss 分布; $\mathcal{B} = \{1, \dots, L\}$ 为所有基站的集合.

根据式 (1) 和 Shannon 公式可得, 小区 b 中用户 k 的可达速率可以被表示为

$$C_{k_b} = E_{\mathbf{h}} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{S_{k_b}}{I_{k_b} + \sigma^2} \right) \right\}, \quad (2)$$

式中 $E_{\mathbf{h}}\{\cdot\}$ 表示取期望操作, S_{k_b} 为小区 b 中用户 k 接收到的期望信号能量, I_{k_b} 为其他小区对小区 b 中用户 k 的干扰信号能量, 并且根据式 (1) 可以将 S_{k_b} 和 I_{k_b} 分别表示为

$$S_{k_b} = g_{k_b,b} p_{k_b,b} (\mathbf{h}_{k_b,b} \mathbf{w}_{k_b,b}) (\mathbf{h}_{k_b,b} \mathbf{w}_{k_b,b})^H,$$

$$I_{k_b} = \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} g_{k_b,l} (\mathbf{h}_{k_b,l} \mathbf{W}_l) \mathbf{P}_l (\mathbf{h}_{k_b,l} \mathbf{W}_l)^H.$$

此时, 假设基站的总发射功率为 P , 那么采用等功率分配 $p_{k_b,b} = \frac{P}{K}$, 就可以根据文献 [8] 中的分析结果将用户 k 的可达速率近似为

$$C_{k_b} \approx \log_2 \left(1 + \frac{P(N_t - K + 1) g_{k_b,b}}{KP \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} g_{k_b,l} + K\sigma^2} \right). \quad (3)$$

相应地, 就可以将系统的和速率表示为

$$C = \sum_{k_b=1}^K C_{k_b} \approx \sum_{k_b=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P(N_t - K + 1) g_{k_b,b}}{KP \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} g_{k_b,l} + K\sigma^2} \right). \quad (4)$$

2.2 功耗模型及系统能效

系统能效一般被定义为单位能耗所能支持的系统容量 [9], 相应地本文就将其表示为可达和速率与系统总功耗之比, 因此本小节首先给出系统总功耗然后再给出相应的系统能效.

在 MIMO 系统的下行链路场景中, 系统总功耗包括基站总功耗和接收电路功耗两部分, 与基站总功耗相比, 接收电路功耗较小, 因此, 在计算系统总功耗时可以将后者忽略不计. 理想的功耗模型只考虑发射功率, 而在实际的功耗模型中, 除了发射功率之外, 还需考虑电路功耗, 包括天线馈线损耗、制冷功耗和其他信号处理功耗等. 根据文献 [10], 基站总功耗可以被表示如下:

$$P_{BS} = P_t + N_t P_c, \quad (5)$$

式中

$$P_t = \frac{P_{\text{out}}}{\eta_{\text{PA}} (1 - \sigma_{\text{feed}}) (1 - \sigma_{\text{DC}}) (1 - \sigma_{\text{MS}}) (1 - \sigma_{\text{cool}})},$$

$$P_c = \frac{P_{\text{RF}} + P_{\text{BB}}}{(1 - \sigma_{\text{DC}}) (1 - \sigma_{\text{MS}}) (1 - \sigma_{\text{cool}})},$$

并且 P_{out} 为每根天线上的发射功率, P_{RF} 和 P_{BB} 分别为射频收发信机和基带处理单元的功耗, η_{PA} 为功放效率, σ_{feed} 为馈线损耗, σ_{DC} , σ_{MS} 和 σ_{cool} 分别为 DC-DC、主要供电支持和空调散热带来的功率损耗因子.

如上所述, 系统的能量效率一般被定义为单位功耗所能支持的系统容量 (单位为 bits/Joule), 它等于系统容量与系统总功耗的比值^[9], 因此利用式 (4) 和 (5) 就可以将系统能效表示为

$$\text{EE} = \frac{N_c B \cdot C}{P_{t, \text{BS}}} \approx \frac{N_c B \sum_{k_b=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P(N_t - K + 1)g_{k_b, b}}{K P \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} g_{k_b, l} + K \sigma^2} \right)}{P_t + N_t P_c}, \quad (6)$$

式中 B 是子载波带宽, N_c 是子载波个数. 从式 (6) 可以看出, 当发射功率固定时, 系统能效是基站天线数 N_t 和调度用户数 K 的函数. 因此, 下一节我们将对这两个参数进行优化, 并提出一个基于系统能效 EE 优化的基站天线数和调度用户数的最优配置方案.

3 基于能效最优的 MIMO 天线配置

本节将研究基于能效最大化的 MIMO 多天线配置方案. 对此, 首先给出基于能效最大的优化模型及相应的迭代算法, 然后对该迭代算法的收敛性进行分析.

3.1 优化模型建立

如上所述, 系统能效是基站天线数 N_t 和调度用户数 K 的函数, 因此可以通过优化它们来最大化系统能效. 考虑到文中采用的是迫零预编码方式, 因此需要保证 $N_t \geq K$. 那么数学上, 就可以将该优化问题表述为

$$\max_{N_t, K} \frac{N_c B \sum_{k_b=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P(N_t - K + 1)g_{k_b, b}}{K P \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} g_{k_b, l} + K \sigma^2} \right)}{P_{tr} + N_t P_{ct}}, \quad N_t \geq K. \quad (7)$$

式 (7) 中的优化问题是一个典型的整数优化问题, 显然, 求解这样的优化问题可以利用穷举法, 但是由于要进行全局搜索, 因此其优化复杂度将会很高. 为了简化优化的求解过程, 下节将给出一个低复杂度的迭代搜索算法.

3.2 交替迭代优化求解

从式 (7) 中的优化问题可以看出, 所要求解的目标是二维的, 所以此处采用两个降维的一维处理进行交替迭代来降低初始优化问题的复杂度, 其相应的优化步骤可描述如下:

- 系统初始化. 给定系统配置的最大天线数及可支持用户数, 并给出相应的迭代步长及初始值;
- 给定用户数优化发射天线数. 在给定满足约束条件的用户数的前提条件下, 通过一维迭代找出最优的发射天线数来最大化式 (7) 中的系统能效;
- 基于上述优化结果来优化所支持的用户数. 基于上述优化结果, 进一步对所支持用户数进行迭代优化来最大化式 (7) 中的优化目标, 从而得到一组关于发射天线数及所支持用户数的局部最优配置;
- 最优解判定. 调整所支持用户数判定上述局部最优解是否是全局最优解, 若是则输出, 若不是则返回到步骤 2 来进一步迭代执行小站个数和发射功率的优化, 最终直至优化结果收敛.

事实上, 上述的优化步骤可以通过算法 1 中的伪代码来实现, 并最终输出 $(N_t^{\text{opt}}, K^{\text{opt}})$ 作为问题 (7) 的优化解. 在该伪代码中, ΔN_t 和 ΔK 分别为天线数和用户数的迭代步长, 带上标 ⁰ 的参量分别表示对应参量的初值, 最终该算法将在第 4 节中通过仿真进行性能验证.

算法 1 交替迭代算法

Step1 Initialization

$$N_t = N_t^0, K = K^0, \Delta N_t = \Delta N_t^0, \Delta K = \Delta K^0, EE(N_t, K) \triangleq \frac{N_c B \sum_{k_b=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P(N_t - K + 1) g_{k_b, b}}{K P \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} g_{k_b, l} + K \sigma^2} \right)}{P_t + N_t P_c}.$$

Step 2 N_t Iteration with Given K If $EE(N_t, K) < EE(N_t + \Delta N_t, K)$ While $EE(N_t, K) < EE(N_t + \Delta N_t, K)$ $N_t = N_t + \Delta N_t$

End

Else if $EE(N_t, K) > EE(N_t + \Delta N_t, K)$ While $EE(N_t, K) < EE(N_t - \Delta N_t, K)$ & $N_t - \Delta N_t \geq K$ $N_t = N_t - \Delta N_t$

End

End

Step 3 K Iteration with Given N_t If $EE(N_t, K) < EE(N_t, K + \Delta K)$ While $EE(N_t, K) > EE(N_t, K + \Delta K)$ $K = K + \Delta K$

End

Else

While $EE(N_t, K) < EE(N_t, K - \Delta K)$ $K = K - \Delta K$

End

Step 4 Judging Optimality of N_t and K If $EE(N_t, K) < EE(N_t + \Delta N_t, K)$ or $EE(N_t, K) < EE(N_t - \Delta N_t, K)$

Go to Step 1

Else

Optimization completed and Return (N_t, K) as $(N_t^{\text{opt}}, K^{\text{opt}})$

End

3.3 迭代算法的收敛性分析

由于上述算法是通过迭代来求解的, 那么一个最基本的问题是迭代是否可以收敛到最优解? 对此, 本节将通过能效表达式的凹凸性来进行分析, 以确保所提迭代算法能收敛到最优解. 然而考虑到基站天线数和用户数均为整数的事实, 此处所有的讨论均首先将其放松为实数, 然后再对其凹凸性进行分析. 根据式 (6) 可知, 在其他参数给定的情况下, 系统能效是基站天线数 N_t 和调度用户 K 的一个二维函数, 因此为了简化分析, 分别给定一个参数而讨论系统能效对另一参数的凹凸性, 这也和上述简化迭代算法的思路相一致.

3.3.1 系统能效关于发射天线数的凹凸性

根据式 (6) 可知, 系统能效函数可以看成是 K 个关于 N_t 的子函数之和, 因此, 可以先对子函数关于 N_t 的凹凸性进行分析讨论, 然后再由凹函数性质得到系统能效关于 N_t 的凹凸性.

令 $a = N_{ca} B$, $b_{k_b} = P g_{k_b, b}$, $c_{k_b} = P \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} g_{k_b, l} + \sigma^2$, 显然有 $a, b_{k_b}, c_{k_b} > 0$, 则式 (6) 可以改写成

$$EE = \sum_{k_b=1}^K f_{k_b}(N_t, K), \quad (8)$$

这里

$$f_{k_b}(N_t, K) = \frac{a \log_2 \left(1 + \frac{(N_t - K + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K} \right)}{P_{tr} + N_t P_{ct}}. \quad (9)$$

显然能效函数的凹凸性可以通过对子函数 $f_{k_b}(N_t, K)$ 的讨论实现. 由于子函数 $f_{k_b}(N_t, K)$ 是由两个函数的相除组成, 因此可以进一步通过对两个子函数的凹凸性分析来实现对 f 函数的凹凸性分析.

令 $u_{k_b}(N_t, K) = a \log_2 \left(1 + \frac{(N_t - K + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K} \right)$ 和 $v_{k_b}(N_t, K) = P_{tr} + N_t P_{ct}$. 由于 $v_{k_b}(N_t, K)$ 关于 N_t 的函数是线性的, 因此下面将讨论 $u_{k_b}(N_t, K)$ 的凹凸性. 先对 $u_{k_b}(N_t, K)$ 关于 N_t 求一次偏导数, 有

$$\frac{\partial u_{k_b}(N_t, K)}{\partial N_t} = \frac{a}{1 + \frac{(N_t - K + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K}} \cdot \frac{b_{k_b}}{c_{k_b}K} \cdot \ln 2 = \frac{ab_{k_b} \ln 2}{(N_t - K + 1)b_{k_b} + c_{k_b}K}. \quad (10)$$

进一步再对 $u_{k_b}(N_t, K)$ 关于 N_t 求二次偏导数, 有

$$\frac{\partial^2 u_{k_b}(N_t, K)}{\partial N_t^2} = \frac{ab_{k_b} \ln 2}{[(N_t - K + 1)b_{k_b} + c_{k_b}K]^2} \cdot (-b_{k_b}) = -\frac{a(b_{k_b})^2 \ln 2}{[(N_t - K + 1)b_{k_b} + c_{k_b}K]^2}. \quad (11)$$

因为 $a > 0$, 那么从式 (11) 有 $\frac{\partial^2 u_{k_b}(N_t, K)}{\partial N_t^2} < 0$, 所以 $u_{k_b}(N_t, K)$ 关于 N_t 是一个凹函数. 文献 [11] 中提到: 若函数 $u(x)$ 关于 x 是一个凹函数, 而 $v(x)$ 关于 x 是线性的, 则 $f(x) = \frac{u(x)}{v(x)}$ 关于 x 的函数是准凹的, 因此, $f_{k_b}(N_t, K) = \frac{u_{k_b}(N_t, K)}{v_{k_b}(N_t, K)}$ 关于基站天线数 N_t 的函数是准凹的. 此时, 再根据多个凹函数之和仍为一个凹函数这一性质及式 (8), 可以得到能效 EE 关于 N_t 是准凹的.

3.3.2 系统能效关于用户数凹凸性

此处分析系统能效关于用户数 K 的函数性质时, 假定基站天线数 N_t 是固定不变的, 因此式 (6) 中的 $\frac{N_c B}{P_t + N_t P_c}$ 是一个常数, 它的存在并不会改变函数的凹凸性, 因此只需对函数

$$y(N_t, K) = \sum_{k_b=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P(N_t - K + 1)\gamma_{k_b,b}}{K P \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} \gamma_{k_b,l} + K \sigma^2} \right)$$

关于用户数 K 的凹凸性进行讨论. 由于这里用户数 K 是求和项的项数, 从而给分析带来了很大不便, 因此这里将采用一种简化的近似分析来讨论能效关于用户数的凸性.

在近似中, 假设被调度的用户有类似的大尺度衰落, 也就是说它们有近似相同的可达速率, 同时令 $b_{k_b} = P g_{k_b,b}$, $c_{k_b} = P \sum_{l \in \mathcal{B}, l \neq b} g_{k_b,l} + \sigma^2$, 显然有 $c_{k_b}, b_{k_b} > 0$. 由此, 可以相应地有

$$y(N_t, K) \approx K \log_2 \left(1 - \frac{b_{k_b}}{c_{k_b}} + \frac{(N_t + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K} \right). \quad (12)$$

对式 (12), 首先求它关于 K 的一阶偏导可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial y(N_t, K)}{\partial K} &= \log_2 \left(1 - \frac{b_{k_b}}{c_{k_b}} + \frac{(N_t + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K} \right) + K \frac{1}{1 - \frac{b_{k_b}}{c_{k_b}} + \frac{(N_t + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K}} \left(-\frac{(N_t + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K^2} \right) \ln 2 \\ &= \log_2 \left(1 - \frac{b_{k_b}}{c_{k_b}} + \frac{(N_t + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K} \right) - \frac{(N_t + 1)b_{k_b} \ln 2}{(c_{k_b} - b_{k_b})K + (N_t + 1)b_{k_b}}. \end{aligned} \quad (13)$$

进而可求得它关于 K 的二阶偏导为

$$\frac{\partial^2 y(N_t, K)}{\partial K^2} = \frac{\left(-\frac{(N_t + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K^2} \right) \ln 2}{1 - \frac{b_{k_b}}{c_{k_b}} + \frac{(N_t + 1)b_{k_b}}{c_{k_b}K}} + \frac{(N_t + 1)b_{k_b} \ln 2}{((c_{k_b} - b_{k_b})K + (N_t + 1)b_{k_b})^2} (c_{k_b} - b_{k_b})$$

表 1 仿真参数 [10]

Table 1 Simulation parameters [10]

Parameters	Values	Parameters	Values.
Number of cells L	19	Cell radius R	250 m
Path-loss factor α	3.71	Carrier frequency f	2 GHz
System bandwidth	10 MHz	Number of sub-carriers N_{ca}	600
Bandwidth of sub-carrier B	15 KHz	Noise power spectrum σ^2	-174 dBm/Hz
Maximum transmitting power of BS P_{max}	43 dBm	Efficiency of power amplifier η_{PA}	31.1%
Power loss factor of DC-DC σ_{DC}	7.5%	Power loss factor of cooling σ_{cool}	10%
Power loss factor of antenna feeder σ_{feed}	-3 dB	Power loss factor of main supply σ_{MS}	9%
Power consumption of radio frequency P_{RF}	12.9W	Power consumption of baseband processing P_{BB}	29.6W

$$\begin{aligned}
&= -\frac{(N_t + 1) b_{k_b} \ln 2}{(c_{k_b} - b_{k_b}) K^2 + (N_t + 1) b_{k_b} K} + \frac{(c_{k_b} - b_{k_b}) (N_t + 1) b_{k_b} \ln 2}{((c_{k_b} - b_{k_b}) K + (N_t + 1) b_{k_b})^2} \\
&= -\frac{((c_{k_b} - b_{k_b}) K + (N_t + 1) b_{k_b}) + (c_{k_b} - b_{k_b}) K}{((c_{k_b} - b_{k_b}) K + (N_t + 1) b_{k_b})^2 K} (N_t + 1) b_{k_b} \ln 2 \\
&= -\frac{((N_t + 1) b_{k_b})^2 \ln 2}{((c_{k_b} - b_{k_b}) K + (N_t + 1) b_{k_b})^2 K}. \tag{14}
\end{aligned}$$

由于 $K > 0$, 因此根据式 (14) 有 $\frac{\partial^2 y}{\partial K^2} < 0$, 所以函数 $y(N_t, K)$ 关于用户数 K 从统计上可以近似看成是一个凹函数, 那么系统能效关于用户数 K 也可以近似看成是一个凹函数.

3.3.3 算法收敛性讨论

在上述算法中, 最优解的求解是通过一个内外两层交替迭代的过程实现的. 在内层, 是固定用户数通过迭代给出系统能效最大的天线数; 而在外层, 则是将上次优化输出的天线数固定而通过迭代进一步搜索出能效最大的用户数. 对每一层而言, 当一个参数固定时, 系统能效都是另一个参数的凸函数, 因此最终都可以迭代到当前的最优值, 这样通过两层相互交替迭代将会最终收敛到全局的最优点.

4 仿真分析

本节将对所提算法进行仿真分析, 仿真中采用 19 个小区的网络模型, 假设用户均匀分布在小区内, 详细的仿真参数见表 1.

图 2 是在采用迫零预编码时不同的基站天线数与用户数对应的系统能效曲面图, 其中曲面上的线对应所提迭代算法的搜索过程, 黑色箭头所指的点表示搜索到的全局最优点 (N_t^{opt}, K^{opt}) . 从图中可以看出: 1) 系统能效关于天线数 N_t 和用户数 K 的函数是凹的, 因此天线数与用户数存在一种最优组合 (N_t^{opt}, K^{opt}) 使得系统能效取得最大值; 2) 所提算法是收敛的, 通过多次迭代即可搜索到最大系统能效所对应的最优天线数 N_t^{opt} 与最优用户数 K^{opt} , 且有 $N_t^{opt} = 47$, $K^{opt} = 27$. 需要说明的是在迫零预编码方式下要求 $N_t \geq K$, 而图中坐标平面上的点不满足这一条件, 是无意义的.

图 3 是算法的具体搜索过程, 其中横坐标为用户数 K , 纵坐标为聚焦搜索算法内层迭代获得的不同用户数下最大化系统能效时的局部最优天线数, “小的实心圆点” 表示局部最优点, “大的空心圆点” 表示全局最优点, 箭头代表搜索方向. 从图中可看出: 1) 该算法从 $K = 1$ 开始搜索, 此时对应的

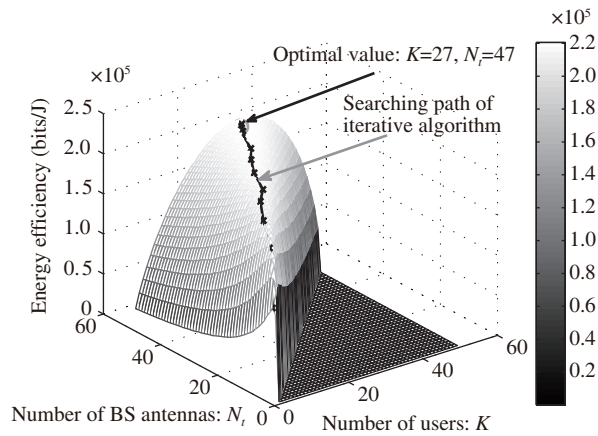


图 2 迫零预编码方式下不同基站天线数与用户数对应的系统能效

Figure 2 System energy efficiency over the number of antennas and the number of scheduled users when using zero-forcing precoder

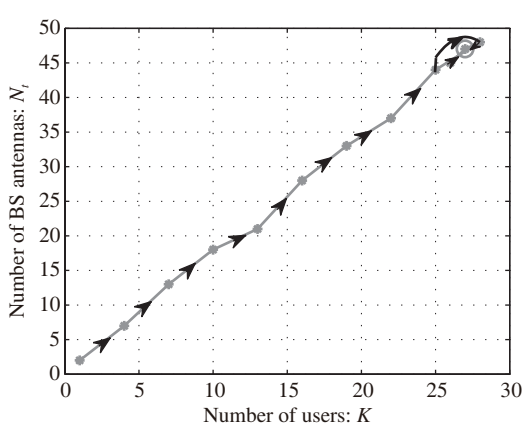


图 3 迭代算法的搜索过程

Figure 3 Searching path of iterative algorithm

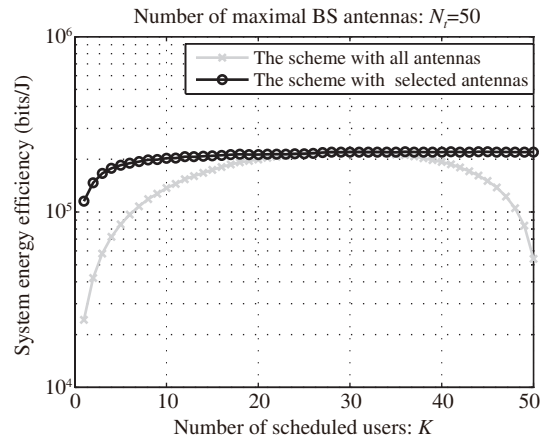


图 4 所有天线都开启和基于用户数动态开启天线两种方案的能效比较

Figure 4 Energy efficiency comparison between the scheme with all antennas scheme and the scheme with dramatically selected antennas

最优天线数为 2, 用户数的初始搜索步长 Δ_K 设为 3, 当 $K = 28$ 时该步长 s_K 变为 -1 , 这表明全局最优点已经出现, 需要改变搜索方向进行搜索; 2) 该算法是收敛的, 即可以正确地搜索到全局最优点, $N_t = 47, K = 27$; 3) 在达到全局最优解前, 实际局部最优解给出了最优的天线数和用户数的配置比, 在当前仿真条件下能效最优时天线数与用户数的配置比约为 2:1; 4) 在系统所支持的用户数未达到全局最优点时, 可以根据局部最优点处的最优天线配置, 合适的开启基站天线, 从而最大化系统能效. 另外, 需要说明的是, 在本仿真中, 假设最大天线数为 50, 然后获得了能效最优时天线数与用户数的配置比约为 2:1, 事实上在最大天线数为其他值时所获得的最优配置比仍约为 2:1, 受篇幅所限在这里将不展开讨论.

为进一步表明图 3 中的结论 4), 在图 4 中对所有天线都开启和基于用户数动态开启天线进行数

据传输这两种方案的系统能效进行了比较, 其中所有天线都开启的方案指的是在传输中所有天线都使用, 而基于用户数动态开启天线这一方案指的是在传输中根据所调度的用户数及图 3 的结论 4) 动态的开启所需的发射天线数. 从图中可看出: 1) 在基站配置 50 根天线的情况下, 根据基站天线数与用户数的最优配置比计算得到的该天线配置所能支持的最优服务用户数与图 3 所得最优服务用户数相同; 2) 未进行动态天线开启时, 系统能效随着用户的增多呈现先增大后减小的变化趋势, 而采用所提方案获得的系统能效先随着用户的增多逐渐增大, 然后趋于一个稳定值, 这是因为当用户数大于最优服务用户数时, 基站将开启所有天线且仅调度所能支持的最优服务用户数, 此时参与调度的用户数将保持不变以致系统能效也保持不变; 3) 基于用户数动态开启发射天线的方案的系统能效优于所有天线都用的系统能效, 这说明基于服务用户数进行发射天线的动态开启能提升系统能效.

5 结论

本文对多用户 MIMO 系统的能效进行了分析研究. 首先, 在假设基站天线有限的情况下, 近似分析了系统容量, 然后基于此推导出系统能效关于基站天线数与用户数的闭式表达式. 为最大化系统能效, 我们利用一个简单的二维迭代算法联合优化了基站天线数和用户数, 并且进一步分析了该迭代算法的收敛性. 仿真结果表明, 当系统能效最大化时存在一个基站发射天线数和服务用户数的最优配置比, 并且基于此配置进行动态的发射天线开启可明显提升系统的能量效率. 基于该结论, 可以进一步在未来 5G 多天线 MIMO 系统中, 根据激活用户数动态的进行天线开启, 从而进行节能传输.

参考文献

- 1 Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2010, 9: 3590–3600
- 2 Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Process*, 2012, 30: 40–60
- 3 Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. *IEEE Trans Commun*, 2013, 61: 1436–1449
- 4 GreenTouch Consortium. 2010-2011 Annual Report. <http://www.greentouch.org>, 2011
- 5 Ha D, Lee K, Kang J. Energy efficiency analysis with circuit power consumption in massive MIMO systems. In: *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. London: IEEE, 2013. 938–942
- 6 Bjornson E, Sanguinetti L, Hoydis J, et al. Designing multi-user MIMO for energy efficiency: when is massive MIMO the answer? In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Istanbul: IEEE, 2014. 242–247
- 7 Byung Moo L, Jinhyeock C, Jongho B, et al. An energy efficient antenna selection for large scale green MIMO systems. In: *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Beijing: IEEE, 2013. 950–953
- 8 Fan J C, Xu Z K, Li G Y. Performance analysis of MU-MIMO in downlink cellular networks. *IEEE Commun Lett*, 2015, 19: 223–226
- 9 Chen Y, Zhang S Q, Xu S G, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 30–37
- 10 Auer G, Giannini V, Dessel C, et al. How much energy is needed to run a wireless network? *IEEE Wirel Commun*, 2011, 18: 40–49
- 11 Yan L W, Bai B, Chen W. Energy efficiency maximization in downlink multiuser MIMO systems: an asymptotic analysis approach. In: *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Austin, 2014. 3916–3921

Joint optimization scheme of antenna and users with maximum energy efficiency for multi-cell MIMO systems

Jiancun FAN^{1*}, Yue NING¹, Jianguo DENG¹ & Zhikun XU²

1 School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2 China Mobile Communications Corporation Research Institute, Beijing 100053, China

*E-mail: fanjc0114@gmail.com

Abstract In a downlink multi-cell multi-user MIMO system, the energy efficiency (EE) expression with respect to the number of BS antennas and number of users is first derived by considering a realistic power consumption model (PCM), including transmission power consumption and circuit power consumption. An energy efficiency optimization problem is then modeled by jointly optimizing the number of BS antennas and users to maximize system EE, and a two-step iterative searching algorithm is proposed to manage the problem based on the existence of an optimal solution. Finally, simulation results show that the proposed antenna configuration scheme based on optimal configuration of BS antennas and users can significantly improve system EE.

Keywords multi-cell, multi-user MIMO, energy-efficiency, antenna configuration, iterative optimization



Jiancun FAN received his B.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, in 2004 and 2012, respectively. He is currently a lecturer at the Department of Information and Communications Engineering, Xi'an Jiaotong University. His general research interests include statistical signal processing and wireless communication, with emphasis on cross-layer optimization for spectral and energy-efficient networks, multiple

antenna MIMO communication, and practical issues in LTE systems.



Yue NING received her B.S. and M.S. degrees in Communication Engineering and Electrical Engineering from Chongqing University and Xi'an Jiaotong University in 2008 and 2012, respectively. Her research interests include wireless communication, co-located and distributed MIMO systems, and energy-efficient network deployment and operation.



Jianguo DENG received his B.S. and M.S. degrees in Electrical Engineering from Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, in 1982 and 1988, respectively. He is a professor at the Department of Information and Communications Engineering, Xi'an Jiaotong University. His general research interests include physical layer techniques in wireless communication, cognitive radio, device-to-device communication, and implementation of software radio systems.



Zhikun XU received his B.S.E. and Ph.D. degrees in Signal and Information Processing from Beihang University, Beijing, China, in 2007 and 2013, respectively. He joined the Green Communication Research Center (GCRC) of China Mobile Research Institute in 2013 as a project manager. His interests include spectral and energy-efficient network deployment and operation, cross-layer resource allocation in cellular networks, and advanced signal processing

and transmission techniques.