

文章编号: 1000-5013(2012)03-0260-05

# 下行多小区 MIMO 系统协作 多点传输联合调度机制

王燕琼<sup>1</sup>, 李国刚<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 提出一种基于协作多点传输的下行多小区多输入多输出(MIMO)系统联合调度机制,充分利用多小区间的联合调度来降低小区间的干扰,提高系统的吞吐量. 该方案利用多小区基站间的协作,根据用户反馈的信道信息间的相关性,在不牺牲系统资源情况下联合调度互相干扰小的用户抑制小区间的干扰. 仿真表明:该方案在相同情况下与传统的多小区下行 MIMO 系统相比,具有显著的小区平均系统吞吐量增益及边缘用户吞吐量增益.

**关键词:** 下行多小区; 多输入多输出; 协作多点传输; 联合调度; 信道相关性

**中图分类号:** TN 914 **文献标志码:** A

由于面临着频率资源的限制,未来无线通信系统要求系统采用先进的技术去提高数据传输及频谱效率,多输入输出天线系统(multiple-input multiple-output, MIMO)通过在发送端和接收端配置多根天线可以显著地提高系统的容量和频谱利用率,成为未来无线通信系统的关键技术<sup>[1-2]</sup>. 为了解决基于 MIMO 系统中的小区间干扰问题,在 3GPP 长期演进技术(long term evolution, LTE)中常见的解决方法是采用小区间干扰抑制技术,包括干扰随机化、干扰消除、干扰协调等. 这些算法虽然能够提高小区边缘的吞吐量,却由于考虑小区负载变化的时候造成了小区可用资源的减少,使得系统的整体吞吐量下降,或者是需要复杂的接收机来消除干扰<sup>[3-4]</sup>. 由于通过基站协作能有效地降低小区间的干扰,在 3GPP LTE-Advance 中下行协作多点传输(coordinated multiple point transmission and reception, COMP)技术受到广泛的关注. 下行协作多点传输核心思想在于通过高速的光纤技术或者无线微波链路,多小区的基站间可以通过控制器连接在一起,及时交换信息,进而对信号进行多小区联合处理或者联合调度,来降低小区间的干扰,主要包括联合传输及协调调度<sup>[5-6]</sup>. 联合传输是将多个基站抽象成一个大基站来进行用户的调度与服务. 但是基于联合传输的协作多点传输会大大增加了整个系统的负载量和引起小区吞吐量的下降. 而与联合传输不同,基于协调调度的协作多点传输机制仅仅根据小区间的干扰等调度信息在多小区间实现联合的调度,通过时域、频域和空域三维调度降低小区间的干扰,在显著增加系统性能的同时并没大量加重系统的负载量. 基于协调调度,本文提出一种具有低复杂度,低反馈量的,基于码本的预编码的下行多小区 MIMO 系统中的协作多点传输联合调度机制.

## 1 系统模型分析

考虑下行多用户多天线系统模型,如图 1 所示. 不失一般性,假设共有 3 个小区组成,基站配置  $N_t$  根发送天线,在用户端配置  $N_r$  根接收天线,考虑每基站总共  $K$  个用户需要服务( $K > N_t > N_r$ ),同时假设是单用系统 MIMO,也就是在同时间同频率上就只调度 1 个用户,基站采用预编码,每个用户最多可

收稿日期: 2011-12-29

通信作者: 王燕琼(1973-),女,实验师,主要从事电路系统设计的研究. E-mail: hquic@sina.com.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(A0640005); 中央高校基本科研业务费及国务院侨办科研基金资助项目(10QZR02); 福建省泉州市科技计划项目(2011G6)

以同时支持  $L$  个数据流,因此可得

$$L = \min(N_t, N_r) = N_r.$$

多小区的用户的组合集为  $S$ , 其中被各个基站各自调度的用户的组合为  $S^*$ , 即  $S^* \in S$ . 第  $m$  个小区的第  $k$  个用户接收到的信号可表示为

$$y_k^{(m)} = \mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)} x_k^{(m)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \mathbf{H}_k^{(j)} \mathbf{W}_k^{(j)} x_k^{(j)} + n, \quad (1)$$

式(1)中:  $\mathbf{H}_k^{(m)} \in \mathcal{L}^{N_t \times N_r}$  为第  $k$  个用户到第  $m$  个小区间的信道冲激响应;  $\mathbf{W}_k^{(m)}$  为  $N_t \times L$  维的预编码矩阵, 为第  $m$  个小区为第  $k$  个用户的发送预编码;  $y_k^{(m)}$  和  $x_k^{(m)}$  分别为  $N_r \times 1$  维第  $m$  个小区中第  $k$  个用户的接收信号和  $L \times 1$  维发送信号. 不失一般性, 可以假设发送信号的归一化, 即  $E[x_k^{(m)} x_k^{(m)H}] = I_L$ ;  $n$  为加性高斯白噪声, 服从  $CN(0, \sigma^2)$ .

在接收端, 用户采用最小均方误差 (MMSE) 接收机, 则式(1)经过处理后的接收信号表示为

$$r_k^{(m)} = G_k^{(m)} y_k^{(m)} = G_k^{(m)} \mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)} x_k^{(m)} + G_k^{(m)} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \mathbf{H}_k^{(j)} \mathbf{W}_k^{(j)} x_k^{(j)} + G_k^{(m)} n. \quad (2)$$

式(2)中:  $G_k^{(m)}$  为 MMSE 接收机的接收加权, 即有

$$G_k^{(m)} = ((\mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)})^H \mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M (\mathbf{H}_k^{(j)} \mathbf{W}_k^{(j)})^H \mathbf{H}_k^{(j)} \mathbf{W}_k^{(j)} + \sigma^2 I_L)^{-1} (\mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)})^H.$$

其中:  $(\mathcal{L})^H$  与  $(\mathcal{L})^{-1}$  分别为矩阵的共轭转置和矩阵的逆.

假设用户能够精确地估计出其跟各个基站之间的信道状态信息, 则对用户的信道信息进行奇异值分解 (SVD), 可得

$$\mathbf{H}_k^{(m)} = \mathbf{U}_k^{(m)} \mathbf{D}_k^{(m)} \mathbf{V}_k^{(m)H}, \quad (3)$$

则式(2)可化简为

$$r_k^{(m)} = G_k^{(m)} y_k^{(m)} = G_k^{(m)} \mathbf{U}_k^{(m)} \mathbf{D}_k^{(m)} \mathbf{V}_k^{(m)H} \mathbf{W}_k^{(m)} x_k^{(m)} + G_k^{(m)} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \mathbf{U}_k^{(j)} \mathbf{D}_k^{(j)} \mathbf{V}_k^{(j)H} \mathbf{W}_k^{(j)} x_k^{(j)} + G_k^{(m)} n, \quad (4)$$

为了减少小区间存在着数据流间的干扰, 根据欧式空间距离选择预编码矩阵的方法<sup>[7]</sup>为

$$d(\mathbf{V}_k^{(m)H}, \mathbf{Q}_i) = \sqrt{\sum_{l=1}^L \mathbf{V}_{k,l}^{(m)H} \mathbf{Q}_{i,l}}. \quad (5)$$

式(5)中:  $d(\mathbf{V}_k^{(m)H}, \mathbf{Q}_i)$  为两向量的欧式空间距离;  $\mathbf{Q}_i \in \mathbf{Q}$  为固定码本总第  $i$  个矩阵, 则  $\mathbf{Q}_{i,l}$  为其第  $l$  列向量. 借助于格拉斯曼空间装箱原理, 选择出最适合的预编码矩阵为

$$\mathbf{W}_k^{(m)} = \mathbf{Q}_{\text{opt}} = \arg \max_{\mathbf{Q}_i \in \mathbf{Q}} d^2(\mathbf{V}_k^{(m)H}, \mathbf{Q}_i). \quad (6)$$

因此, 用户就可以获得包含最大部分信道状态信息的预编码矩阵, 进而就可以计算出后处理的信干噪比 (Post-SINR), 第  $m$  小区中第  $k$  个用户第  $l$  个数据流的 Post-SINR 可以表示为

$$\text{SINR}_{k,l}^{(m)} = \frac{|(G_k^{(m)} \mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)})_{l,l}|^2}{\sigma^2 \|G_k^{(m)}\|^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^L |(G_k^{(m)} \mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)})_{l,n}|^2 + \left\| G_k^{(m)} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \mathbf{H}_k^{(j)} \mathbf{W}_k^{(j)} \right\|^2}. \quad (7)$$

从式(7)可知, 第  $m$  小区中第  $k$  个用户的 Post-SINR 不仅跟自己的信道状态信息以及预编码矩阵有关, 还取决于跟其他小区的基站间的信道以及其他小区调度用户采用的预编码矩阵. 用户将自己的预编码矩阵的位置及 Post-SINR 反馈给基站, 以便基站进行用户的调度. 基站在接收到所有的用户的 Post-SINR 后, 根据比例公平算法 (PF) 进行用户调度. 调度算法如下:

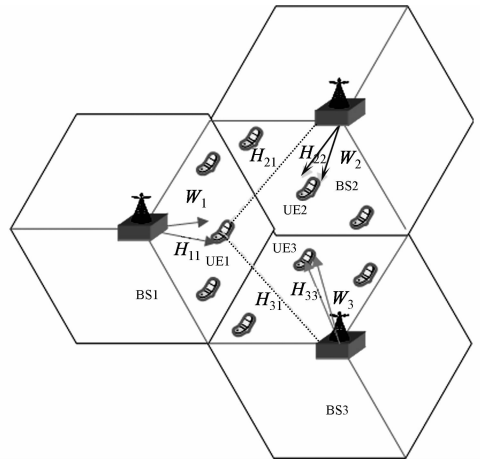


图1 下行多小区 MIMO 系统模型

Fig. 1 System model of downlink multicell MIMO

$$\text{PF}_k^{(m)} = \frac{\sum_{l=1}^L \log_2(1 + \text{SINR}_{k,l}^{(m)})}{\bar{R}_k^{(m)}}. \tag{8}$$

式(8)中:  $\bar{R}_k^{(m)}$  为平均速率,在每次调度后进行更新一下,可以表示为

$$\bar{R}_k^{(m)}(t-1) = \begin{cases} (1 - \frac{1}{T_c})\bar{R}_k^{(m)}(t) + \frac{1}{T_c} \sum_{l=1}^L \log_2(1 + \text{SINR}_{k,l}^{(m)}), & k \in S^*, \\ (1 - \frac{1}{T_c})\bar{R}_k^{(m)}(t), & k \notin S^*. \end{cases} \tag{9}$$

因此,根据式(8),基站可以按如下规则调度出 PF 用户,在获得一定的多用户分集的同时保证了用户长期的公平性,即

$$k^* = \arg \max_{k=1, \dots, K} \text{PF}_k^{(m)}. \tag{10}$$

2 多点传输联合调度机制

传统非协作多点传输就如式(10)调度出用户,没有考虑如何降低小区间的干扰. 对于下行多个小区 MIMO 系统来说,其系统容量可以表示为

$$C = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \log_2(1 + |(G_k^{(m)} \mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)})_{l,l}|^2 / (\sigma^2 \|\mathbf{G}_k^{(m)}\|^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ n \neq l}}^L |(G_k^{(m)} \mathbf{H}_k^{(m)} \mathbf{W}_k^{(m)})_{l,n}|^2 + \|\mathbf{G}_k^{(m)} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \mathbf{H}_k^{(j)} \mathbf{W}_i^{(j)}\|_l^2)). \tag{11}$$

利用式(3),对式(11)进行化简可以得到

$$C = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \log_2(1 + |(G_k^{(m)} \mathbf{U}_k^{(m)} \mathbf{D}_k^{(m)} \mathcal{R}_{k,k}^{m,m})_{l,l}|^2 / \sigma^2 \|\mathbf{G}_k^{(m)}\|^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ n \neq l}}^L |(G_k^{(m)} \mathbf{U}_k^{(m)} \mathbf{D}_k^{(m)} \mathcal{R}_{k,k}^{m,m})_{l,n}|^2 + \|\mathbf{G}_k^{(m)} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \mathbf{U}_k^{(j)} \mathbf{D}_k^{(j)} \mathcal{R}_{k,i}^{m,j}\|_l^2)) = f(\mathcal{R}_{k,k}^{m,m}, \mathcal{R}_{k,i}^{m,j}). \tag{12}$$

式(12)中:定义  $\mathcal{R}$  被调度用户信道对应的右奇异值矩阵与预编码矩阵之间的相关矩阵;  $\mathcal{R}_{k,k}^{m,m}$  为第  $m$  个小区内第  $k$  用户的自相关矩阵;  $\mathcal{R}_{k,i}^{m,j} = \mathbf{V}_k^{(j)H} \mathbf{W}_i^{(j)}$  为第  $m$  个小区内第  $k$  个用户跟第  $j$  个小区间的信道的右奇异值矩阵与第  $j$  个小区间所调度的第  $i$  个用户使用的预编码矩阵之间的相关矩阵.

通过式(12)可知:系统容量跟  $\mathcal{R}$  密切相关. 从式(5)可知:  $\mathcal{R}_{k,k}^{m,m}$  越大,信号强度越高,流间干扰越小,也就意味着系统容量  $C$  跟  $\mathcal{R}_{k,k}^{m,m}$  成正比. 同时,从  $\mathcal{R}_{k,i}^{m,j}$  的定义可以看出:  $\mathcal{R}_{k,i}^{m,j}$  可以评价干扰信道与被干扰信道之间的正交性,  $\mathcal{R}_{k,i}^{m,j}$  中的元素越小就意味着这两条信道正交性越好,如果  $\mathcal{R}_{k,i}^{m,j} = 0$ ,意味着 2 条信道相互正交. 因此,  $\mathcal{R}_{k,i}^{m,j}$  跟  $C$  成反比,为了减小小区间的干扰,需要降低  $\mathcal{R}_{k,i}^{m,j}$  值.

据此,基于协作多点传输机制,提出一种降低小区间干扰,以提高系统容量的调度算法. 由于基站无法获得完全信道状态信息,因此上述  $\mathcal{R}_{k,i}^{m,j}$  需要扩展为

$$\mathcal{R}_{k,i}^{m,j} = \mathbf{B}_k^{(j)H} \mathbf{W}_i^{(j)}.$$

其中:  $\mathbf{B}_k^{(j)H}$  为第  $m$  个小区中第  $k$  个用户与第  $j$  个小区间的信道经过量化后从固定码本  $\mathbf{Q}$  获得的矩阵. 因此,贪婪协作多点传输相关调度算法有如下 5 个步骤.

**步骤 1** 每个小区的基站下的用户各自对与本小区基站间及其他小区基站间的信道矩阵进行 SVD 分解,根据式(6)得到  $\mathbf{W}_k^{(m)}$  和  $\mathbf{B}_k^{(j)}$ ,  $k=1, \dots, K$ ;  $m=1, \dots, M$ ;  $j=1 \dots, M$  和  $j \neq m$ . 然后,根据式(7)计算 Post-SINR 并将其跟  $\mathbf{W}_k^{(m)}$  和  $\mathbf{B}_k^{(j)}$  反馈给各自所处小区的基站. 同时,将被选择的用户的集合  $S^*$  设置为空,  $S^* = \{\}$ ; 基站集合设置为满,  $\phi^* = \{1, K, M\}$ .

**步骤 2** 根据式(8)计算 PF 值,并且各个基站通过控制器交流各自小区的 PF 值信息,从 3 个小区的  $3K$  个用户中挑选出最大 PF 值的用户:  $s_1 = \arg \max_{\substack{k=1, \dots, K \\ m=1, \dots, M}} PF_k^{(m)}$ ,  $s_1$  所属基站为  $\alpha(s_1)$ ; 然后更新  $S^*$  及  $\phi^*$ , 即  $S^* \cup \{s_1\} \rightarrow S^*$ ,  $\phi^* - \{\alpha(s_1)\} \rightarrow \phi^*$ .

**步骤 3**  $\phi^*$  中的所有基站根据以下规则选择出次优用户  $s_2$

$$s_2 = \arg \max_{\substack{m=1, \dots, M, m \neq a(s_1) \\ k=1, \dots, K}} \frac{\text{PF}_k^{(m)}}{\sum_{l=1}^L |(\mathbf{B}_{s_1}^{(a(s_1))H} \mathbf{W}_k^{(m)})_{i,l}|^2}, \quad (13)$$

并更新  $S^* \cup \{s_2\} \rightarrow S^*, \phi^* - \{a(s_2)\} \rightarrow \phi^*$ .

**步骤 4** 重复步骤 3, 选择出下一个用户, 需要将式(13)更新为

$$s_3 = \arg \max_{\substack{m=1, \dots, M, m \neq a(s_1), a(s_2) \\ k=1, \dots, K}} \frac{\text{PF}_k^{(m)}}{\sum_{i=s_1}^{s_2} \sum_{l=1}^L |(\mathbf{B}_{s_1}^{(a(s_1))H} \mathbf{W}_k^{(m)})_{i,l}|^2},$$

并更新  $S^* \cup \{s_3\} \rightarrow S^*, \phi^* - \{a(s_3)\} \rightarrow \phi^*$ .

**步骤 5** 重复步骤 4, 直到  $|S^*| = M$ .

### 3 仿真结果

假设系统采用 3 小区结构, 基站端采用 4 根发射天线数, 用户端采用 2 根接收天线, 每个小区有 10 个用户可供基站调度. 仿真中, 采用 4 bit 的 DFT 码本. 通过计算机进行蒙特卡洛仿真, 对上述所提的贪婪协作多点传输相关调度算法及传统的非协作系统在相同条件下的性能比较, 仿真结果如图 2 所示. 图 2 中:  $C_{av}$  为平均用户容量.

从图 2 可以看出: 在所有的 SNR 范围内, 相比传统非协作调度, 采用所提出的方法能够有 11% 左右的系统吞吐量增益; 在低 SNR 区域内, 随着 SNR 的增加小区平均容量显著上升, 而在高的 SNR 区域内, 随着 SNR 的增加小区平均容量上升幅度缓慢. 这是由于仿真中采用了 3 个小区系统结构, 因此系统中考虑了小区间的干扰, 从而对一个用户来说在低 SNR 区域, 干扰主要是在噪声以及小区间干扰; 而在高 SNR 区域, 干扰主要是小区间的干扰.

基于文中提出的多点协作调度方法及传统方案的用户容量的累积分布函数(CDF)仿真统计结果, 如图 3 所示. 图 3 中:  $C$  为用户容量. 从图 3 可知: 采用文中提出的多点协作调度方法后, 无论用户性能好坏, 采用贪婪协作多点传输相关调度后, CDF 线整体往右移, 验证了该算法可以有效地减少小区间的干扰, 从而提高用户的容量. 此外, 边缘用户(CDF=5%处的用户)的容量增益可以达到 20%.

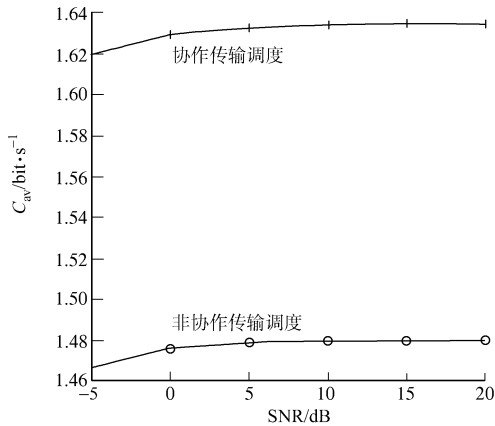


图 2 不同 SNR 下的小区平均用户容量比较  
Fig. 2 Comparison of cell average capacities under different SNR

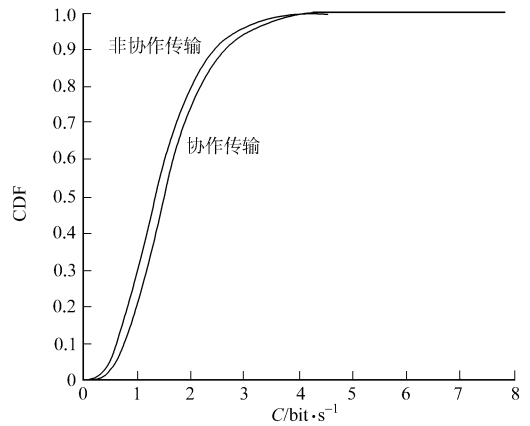


图 3 SNR=10 dB 下的用户容量的 CDF 比较  
Fig. 3 Comparison of cumulative distribution functions of user capacity at SNR=10 dB

### 4 结束语

提出一种利用信道相关性来进行用户调度的下行多小区 MIMO 系统协作多点传输联合调度机制. 利用固定的码本, 用户可以将与本小区基站之间的信道以及其他小区基站间的信道进行量化并反馈给基站, 而基站可以通过基站间的协作共享该反馈信息; 然后, 多基站之间进行联合调度, 通过选择信道相

关性小的用户组进行调度来减少小区间的干扰. 本机制在只增加一些反馈量的基础上,显著地提高了小区平均系统吞吐量及边缘用户的吞吐量.

参考文献:

[1] CAIRE G,SHAMAI S. On the achievable throughput of a multi-antenna gaussian broadcast channel[J]. IEEE Trans on Information Theory,2003,49(7):1691-1706.

[2] SPENCER Q H,PEEL C B,SWINDLEHURST A L,et al. An Introduction to the multi-user MIMO downlink[J]. IEEE Communication Magazine,2004,42(10):60-67.

[3] ZHANG Hong-yuan,MEHTA N B,MOLISCH A F,et al. Asynchronous interference mitigation in cooperative base station systems[J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2008,7(1):155-165.

[4] TOLLI A,CODREANU M,JUNTTI M. Cooperative MIMO-OFDM cellular system with soft handover between distributed base station antennas[J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2008,7(4):1428-144.

[5] HADISUSANTO Y,THIELE L,JUNGNICKEL V. Distributed base station cooperation via block-diagonalization and dual-decomposition[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. New Orleans;IEEE Press,2008:1-5.

[6] KIANI S G,GESBERT D. Optimal and distributed scheduling for multicell capacity maximization[J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2008,7(1):288-297.

[7] RAVINDRAN N,JINDAL N. Limited feedback-based block diagonalization for the MIMO broadcast channel[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2008,26(8):1473-1482.

Jointly Schedule Scheme of Coordinated Multiple  
Point Transmission and Reception for  
Downlink Multicell MIMO Systems

WANG Yan-qiong<sup>1</sup>, LI Guo-gang<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. School of Information Science & Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A novel jointly schedule scheme for downlink multicell multiple-input multiple-output (MIMO) systems based on coordinated multiple point transmission and reception is proposed in this paper, which improves the system throughput by exploiting the jointly schedule among cells to reduce the inter-cell interference. The proposed scheme uses the cooperative among the base stations and then according to the channel correlation among the uses, which is fed back by the user. As a result, the system can jointly schedule the users which cause the low level inter-cell interference to reduce the inter-cell interference, when it does not waste the resource. It outperforms good average cell throughput gain and cell-edge user throughput gain over the traditional downlink multicell MIMO system at the same situation.

**Keywords:** downlink multicell; multiple-input multiple-output; coordinated multiple point transmission and reception; jointly schedule; channel correlation

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 吴逢铁)