

面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术

王东明^①, 张余^①, 魏浩^①, 尤肖虎^{①*}, 高西奇^①, 王江舟^②^① 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096, 中国^② School of Engineering and Digital Arts, University of Kent, Canterbury CT27NT, U.K.

* 通信作者. E-mail: xhyu@seu.edu.cn

收稿日期: 2015-12-02; 接受日期: 2015-12-14; 网络出版日期: 2015-12-29

国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2013CB336600)、国家自然科学基金 (批准号: 61221002, 61271205, 61501113)、

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2014AA01A704) 和江苏省自然科学基金 (批准号: BK20150630) 资助项目

摘要 为了满足 2020 年无线通信传输速率达到现有系统千倍的需求, 研究学者已开始了 5G 移动通信系统的研发. 相比第四代 (4G), 第五代 (5G) 移动通信需要在无线传输技术上取得突破性创新, 以实现频谱效率和功率效率提升 10 倍的目标. 其中, 进一步挖掘多天线的空间复用能力是实现 5G 的关键途径. 在接入点配置大规模天线阵列或多个接入点通过光纤互连形成大规模分布式多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 系统, 可以大幅提高系统总的频谱效率. 本文对大规模 MIMO 和大规模分布式 MIMO 的研究进行了综述, 包括频谱效率理论分析、信道信息获取、传输理论与技术和资源分配技术.

关键词 5G 大规模 MIMO 大规模分布式天线系统 频谱效率 信道信息获取 多用户 MIMO 资源分配

1 引言

近年来, 移动数据业务量几乎呈指数增长, 到 2020 年将达到当前的千倍. 同时, 随着信息技术系统能源消耗所占比例的不断增长, 降低移动通信网络系统的能耗已逐渐成为移动通信发展的重要目标. 而目前的第四代移动通信系统 (fourth-generation, 4G), 将难以满足未来移动通信对频谱效率和能耗效率的需求. 这对第五代移动通信系统 (fifth-generation, 5G) 的频谱效率和能耗效率提出了极大挑战.

如何在 4G 基础上, 将无线移动通信的频谱效率和功率效率进一步提升一个量级, 是 5G 的核心所在. 5G 的发展需要在网络系统结构、组网技术及无线传输技术等方面进行新的变革, 从根本上解决移动通信的频谱有效性和功率有效性问题, 实现更高频谱效率和绿色无线通信的双重目标^[1,2].

采用多天线发送和多天线接收 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术是挖掘无线空间维度资源、提高频谱效率和功率效率的基本途径, 近 20 年来一直是移动通信领域研究开发的主流技术之一. MIMO 技术可以提供分集增益、复用增益和功率增益^[3]. 分集增益可以提高系统的可靠性, 复用增益可以支持单用户的空间复用和多用户的空分复用, 而功率增益可以通过波束成形提高系统的功率效率. 目前, MIMO 技术已经被 LTE (long term evolution, LTE), IEEE 802.11ac 等无线通信标准所采

引用格式: 王东明, 张余, 魏浩, 等. 面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 3-21, doi: 10.1360/N112015-00296

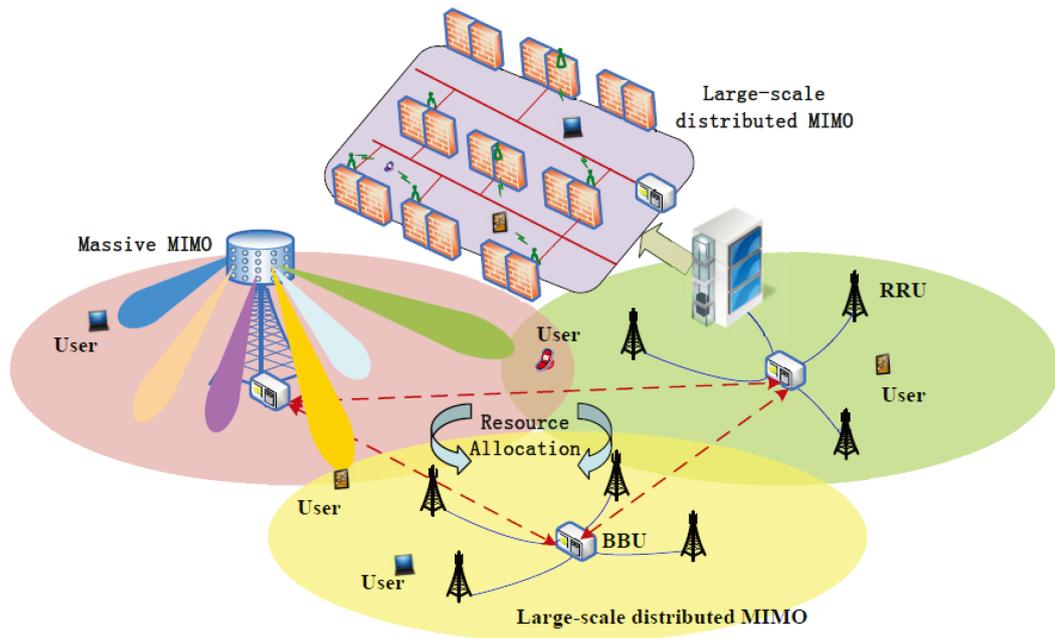


图 1 (网络版彩图) 大规模协作无线通信

Figure 1 (Color online) Large-scale cooperative wireless communications

纳. 但是, 现有 4G 系统基站配置天线的数目较少, 空间分辨率低, 性能增益仍然有限^[4]. 并且在现有系统配置下, 逼近多用户 MIMO 容量的传输方法复杂度仍然较高.

分布式天线系统是挖掘空间维度资源的另外一种途径^[5]. 在分布式天线系统中, 处于不同地理位置的配备多天线的节点, 通过高速回程链路连接到基带处理单元, 进而在同一时频资源上协作完成与单个或多个移动通信终端的通信. 分布式天线系统中, 多个节点与用户之间形成分布式 MIMO 信道, 通过节点间的协作, 形成协作 MIMO. 协作 MIMO 不仅可以获得 MIMO 的 3 种增益, 并且可以额外获得宏分集以及由于路径损耗降低而带来的功率增益^[6~8]. 同样, 受限于现有标准中节点天线的配置个数, 协作 MIMO 的性能增益受到限制.

为了适应移动数据业务量密集化趋势, 突破现有蜂窝系统的局限, 研究者们提出在热点覆盖区域显著增加协作节点或小区的个数^[9,10], 或在各节点以大规模阵列天线替代目前采用的多天线^[4], 由此形成大规模协作无线通信环境 (如图 1 所示), 从而深度挖掘利用无线空间维度资源, 解决未来移动通信的频谱效率问题及功率效率问题.

大规模天线系统的基本特征是: 在基站覆盖区域内配置数十根甚至数百根以上天线, 较 4G 系统中的 4 (或 8) 根天线数增加一个量级以上. 这些天线可分散在小区内 (称为大规模分布式 MIMO, 即 Large-scale Distributed MIMO), 或以大规模天线阵列方式集中放置 (称为大规模 MIMO, 即 Massive MIMO), 如图 1 所示. 理论研究及初步性能评估结果表明^[4,10], 随着基站天线个数 (或分布式节点总天线数目) 趋于无穷大, 多用户信道间将趋于正交. 这种情况下, Gauss 噪声以及互不相关的小区间干扰将趋于消失, 而用户发送功率可以任意低. 此时, 单个用户的容量仅受限于其他小区中采用相同导频序列的用户的干扰.

大规模 MIMO 和大规模分布式 MIMO 的出发点是一致的, 即通过显著增加基站侧配置天线的个数, 以深度挖掘无线空间维度资源, 显著提升频谱效率和功率效率, 因而它们所涉及的基本通信问题

也是一致的¹⁾. 节点个数、节点配备的天线数目以及空分用户数的大规模增加, 使得从传统 MIMO 及协作 MIMO 到大规模天线系统的演变, 是一个从量变到质变的过程. 因此, 大规模天线系统的无线通信理论与方法研究与传统 MIMO 系统也存在较大的差异. 这也为研究者们提出了新的更具挑战性的基础理论和关键技术问题, 包括大规模天线系统的容量分析、信道信息获取、无线传输技术、资源分配技术等.

本文给出了大规模天线系统中无线传输理论与技术方面的最新研究成果: 首先介绍了非理想信道信息下大规模天线系统的频谱效率理论研究; 然后介绍了大规模 MIMO 的瓶颈技术, 即信道信息获取技术, 包括导频设计、信道参数估计、互易性获取方法; 接着介绍了大规模天线系统的传输技术, 包括大规模天线系统的多用户预编码、大规模天线系统的接收机; 最后介绍了大规模天线系统的资源分配方法.

本文所使用的符号定义如下. 矢量用粗体小写字母表示, \mathbf{x} . 矩阵用粗体大写字母表示, \mathbf{A} . \mathbf{I} 表示单位阵. $[\mathbf{A}]_{ij}$ 表示矩阵 \mathbf{A} 第 i 行第 j 列元素. $(\cdot)^*$, $(\cdot)^T$ 和 $(\cdot)^H$ 分别表示矩阵的共轭、转置和共轭转置. \otimes 表示 Kronecker 乘积. $\text{Tr}(\mathbf{A})$ 和 $\det(\mathbf{A})$ 分别表示矩阵的迹和行列式. $\text{diag}(\mathbf{x})$ 表示将向量 \mathbf{x} 转化为对角矩阵, $\text{diag}[\mathbf{A}_1 \cdots \mathbf{A}_n]$ 表示生成对角块矩阵.

2 大规模天线系统的频谱效率理论

信道容量分析是系统设计和性能评估的基础. 随着 MIMO 多天线技术的提出, 许多研究学者重新发展了随机矩阵理论, 包括 Wishart 矩阵及其特征值的统计特性^[11]、大维随机矩阵的渐近统计特性^[11], 自由概率理论^[12] 以及确定性等同方法^[13]. 利用这些数学工具, 研究学者对不同 MIMO 信道环境 (包括多用户 MIMO, 分布式多用户 MIMO) 的信道容量进行了大量的研究. 在理想信道信息下, 这些方法同样适用于大规模天线系统的容量分析. 然而, 大规模天线系统也为研究者们提出了新的更具挑战性的理论问题.

首先, 多用户大规模天线系统中, 随着用户数和天线数目 (或协作节点个数) 大规模增加, 信道信息的获取是系统实现的瓶颈. 因此, 必须研究导频资源受限下的信息理论. 文献 [14] 研究了大规模 MIMO 的上、下行传输的频谱效率和能耗效率. 由于导频污染严重影响大规模 MIMO 的性能, 文献 [14] 还考虑了信道估计对系统频谱效率的影响. 文献 [15] 给出了同时考虑信道估计、导频污染、路径损耗和天线相关时, 采用不同接收机下大规模 MIMO 的频谱效率, 并揭示出每用户需要的基站天线个数与接收机技术之间的关系.

其次, 大规模 MIMO 为蜂窝移动通信提出了更具挑战的问题, 即多小区多用户蜂窝移动通信系统容量的极限问题. 系统级的容量是在多小区多用户容量分析的基础上, 进一步考虑基站节点分布和用户分布, 对整个蜂窝系统的容量评估, 它对蜂窝系统的设计具有重要的指导意义.

下面我们以前述多小区多用户分布式天线系统为例 (大规模 MIMO 是其特例), 考虑导频复用, 对非理想信道信息下系统进行建模, 然后给出了系统的渐近容量的闭合表达式. 考虑非理想信道信息时, 系统级频谱效率分析的结果还很少见, 我们给出了一些可以进一步深入研究的方向.

2.1 频谱效率理论分析

考虑如图 2 所示的多小区多用户大规模分布式天线系统. 系统中有 L 个小区, 每个小区有 K 个

1) 本文中如不特殊声明, 把两者统称为大规模天线系统.

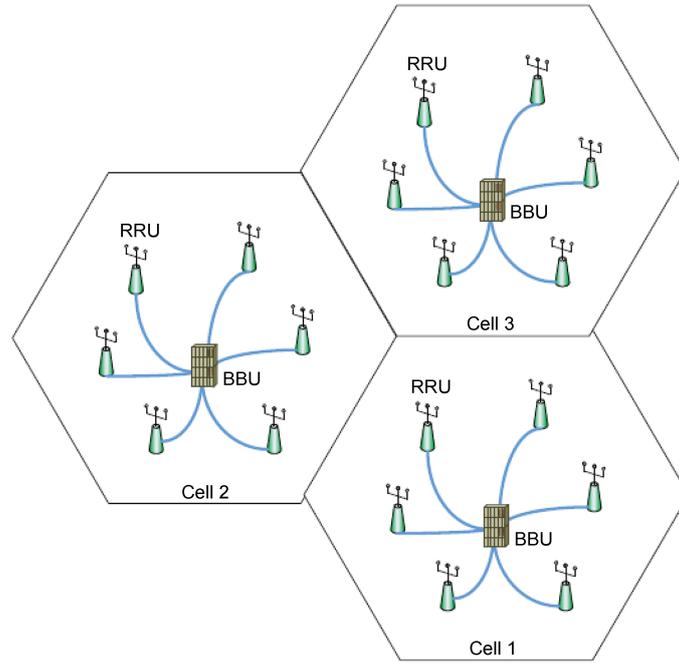


图 2 (网络版彩图) 多小区多用户大规模分布式天线系统

Figure 2 (Color online) Multi-cell multi-user large-scale distributed antenna systems

单天线用户和 M 个无线远端单元 (remote radio unit, RRU), 每个节点配置 N 根天线. 每个小区的所有 RRU 通过光纤连接到基带处理单元 (baseband unit, BBU). 以小区 1 为研究对象, 假设第 l 个小区的第 k 个用户到第 1 个小区的所有节点的信道矩阵为 $\mathbf{g}_{l,k}$, 它可以建模为

$$\mathbf{g}_{l,k} \triangleq \mathbf{R}_{l,k}^{\frac{1}{2}} \mathbf{\Lambda}_{l,k}^{\frac{1}{2}} \mathbf{h}_{l,k},$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{\Lambda}'_{l,k} &\triangleq \text{diag} \left[\lambda_{l,1,k} \cdots \lambda_{l,M,k} \right], \quad \mathbf{\Lambda}_{l,k} \triangleq \mathbf{\Lambda}'_{l,k} \otimes \mathbf{I}_N, \\ \mathbf{R}_{l,k} &\triangleq \text{diag} \left[\mathbf{R}_{l,1,k} \cdots \mathbf{R}_{l,M,k} \right], \quad \mathbf{h}_{l,k} = \left[\mathbf{h}_{l,1,k}^T \cdots \mathbf{h}_{l,M,k}^T \right]^T. \end{aligned}$$

上述信道模型中, 我们假设用户到某个节点的所有天线的大尺度衰落相同, $\lambda_{l,m,k}$ 表示第 l 个小区的第 k 个用户到第 1 个小区的第 m 个节点的大尺度衰落, $\mathbf{\Lambda}'_{l,k}$ 表示第 l 个小区的第 k 个用户到第 1 个小区的所有节点的大尺度衰落矩阵, 它是一个 $M \times M$ 对角阵, $\mathbf{\Lambda}_{l,k}$ 是第 l 个小区的第 k 个用户到第 1 个小区的所有节点所有天线的大尺度衰落矩阵. $\mathbf{R}_{l,m,k}$ 表示第 l 个小区的第 k 个用户到第 1 个小区的第 m 个节点的接收相关矩阵, 它是一个 $N \times N$ 的矩阵, 而 $\mathbf{R}_{l,k}$ 表示第 l 个小区的第 k 个用户到第 1 个小区的所有节点的接收相关矩阵, 它是一个 $MN \times MN$ 的块对角矩阵. $\mathbf{h}_{l,m,k}$ 表示第 l 个小区的第 k 个用户到第 1 个小区的第 m 个节点的小尺度快衰落, 它是一个 $N \times 1$ 的矢量, 它的每个元素为独立同分布的均值为 0 方差为 1 的循环对称复 Gauss 随机变量. 而 $\mathbf{h}_{l,k}$ 表示第 l 个小区的第 k 个用户到第 1 个小区的所有节点的小尺度快衰落, 它是一个 $MN \times 1$ 的矢量. 因此, 第 l 个小区的所有 K 个用户到第 1 个小区的 M 个节点所有天线间的信道矩阵可以表示为 $\mathbf{G}_l = [\mathbf{g}_{l,1} \cdots \mathbf{g}_{l,K}]$.

考虑 BBU 通过导频信号得到上行链路的信道信息. 假设 L 个小区的 K 个用户, 均采用单位阵作为导频矩阵, 即时频正交导频序列, 表示当某个用户在一个时频资源上发送导频符号 1 时, 同小区其

他用户均发送 0. 由于小区间完全复用导频, 这会产生严重的小区间导频污染. 由于不同的用户到小区 1 的节点的小尺度衰落是互不相关的, 我们以第 k 个用户的信道估计作为例子, 对其信道参数估计进行推导.

对于第 k 个用户, 在小区 1 的 BBU 得到的导频信号可以表示为

$$\mathbf{y}_{P,k} = \mathbf{g}_{l,k} + \sum_{i \neq l} \mathbf{g}_{i,k} + \mathbf{z}_{P,k},$$

其中, $\mathbf{z}_{P,k}$ 表示导频信道的等效 Gauss 噪声, 其方差为 γ_P . 根据文献 [16], 可以得到

$$\hat{\mathbf{g}}_{l,k} = \mathbf{R}_{l,k} \mathbf{\Lambda}_{l,k} \mathbf{Q}_k^{-1} \mathbf{y}_{P,k}, \quad l = 1, \dots, L,$$

$$\mathbf{Q}_k = \sum_{i=1}^L \mathbf{R}_{i,k} \mathbf{\Lambda}_{i,k} + \gamma_P \mathbf{I}_{MN}.$$

信道估计的误差定义为 $\tilde{\mathbf{g}}_{l,k} = \mathbf{g}_{l,k} - \hat{\mathbf{g}}_{l,k}$, 其协方差矩阵可以表示为

$$\text{cov}(\tilde{\mathbf{g}}_{l,k}, \tilde{\mathbf{g}}_{l,k}) = \mathbf{R}_{l,k} \mathbf{\Lambda}_{l,k} - \mathbf{R}_{l,k} \mathbf{\Lambda}_{l,k} \mathbf{Q}_k^{-1} \mathbf{R}_{l,k} \mathbf{\Lambda}_{l,k}.$$

定义 $\hat{\mathbf{h}}_k \triangleq \mathbf{Q}_k^{-\frac{1}{2}} \mathbf{y}_{P,k}$, 可以看出, $\hat{\mathbf{h}}_k$ 的每个元素为独立同分布均值为 0 方差为 1 的循环对称复 Gauss 随机变量. 我们也应该注意到, $\hat{\mathbf{h}}_k$ 与小区的索引号 l 无关. 那么

$$\hat{\mathbf{g}}_{l,k} = \mathbf{R}_{l,k} \mathbf{\Lambda}_{l,k} \mathbf{Q}_k^{-\frac{1}{2}} \hat{\mathbf{h}}_k.$$

经过信道估计, 第 l 小区的第 k 个用户到第 1 个小区的信道矢量可以建模为相关衰落信道, 其 Rayleigh 衰落部分表示为 $\hat{\mathbf{h}}_k$. 等效信道与理想信道的区别是, 经过导频污染后, 对于任意 l , $\hat{\mathbf{g}}_{l,k}$ 的 Rayleigh 衰落部分是相同的, 而理想信道是完全独立的.

定义如下信道矩阵: $\hat{\mathbf{G}}_l = [\hat{\mathbf{g}}_{l,1} \cdots \hat{\mathbf{g}}_{l,K}]$, $\tilde{\mathbf{G}}_l = [\tilde{\mathbf{g}}_{l,1} \cdots \tilde{\mathbf{g}}_{l,K}]$. 小区 1 的基站得到估计的信道矩阵 $\hat{\mathbf{G}}_l$, 收发之间的关系式可以建模为

$$\mathbf{y}_1 = \hat{\mathbf{G}}_1 \mathbf{x}_1 + \sum_{l=2}^L \hat{\mathbf{G}}_l \mathbf{x}_l + \sum_{l=1}^L \tilde{\mathbf{G}}_l \mathbf{x}_l + \mathbf{z}_1,$$

其中, 上行信道 Gauss 噪声的方差表示为 γ_{UL} . 当小区 1 的基站采用最小均方误差 (minimum mean-square error, MMSE) 接收机时, 系统的和速率可以表示为 [17]

$$C = \log_2 \det \left(\sum_{l=1}^L \hat{\mathbf{G}}_l \hat{\mathbf{G}}_l^H + \mathbf{\Sigma} \right) - \log_2 \det \left(\sum_{l=2}^L \hat{\mathbf{G}}_l \hat{\mathbf{G}}_l^H + \mathbf{\Sigma} \right),$$

其中,

$$\mathbf{\Sigma} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (\mathbf{R}_{l,k} \mathbf{\Lambda}_{l,k} - \mathbf{R}_{l,k} \mathbf{\Lambda}_{l,k} \mathbf{Q}_k^{-1} \mathbf{R}_{l,k} \mathbf{\Lambda}_{l,k}) + \gamma_{UL} \mathbf{I}_{MN}.$$

上面我们给出了多小区、多用户、多节点系统在非理想信道下的等效模型. 虽然上述公式与传统的存在多小区干扰的 MIMO 信道的容量的表达形式相似, 但是, 正是由于 $\hat{\mathbf{G}}_l$ 矩阵中的相关性, 使得其容量的理论分析更具挑战性. 文献 [17] 证明, 当 MN 趋于无穷时, 和速率满足

$$C - C_{\text{inf}} \rightarrow 0,$$

其中,

$$\begin{aligned}
 C_{\text{inf}} &= \sum_{k=1}^K \log_2 \left[1 + \xi_{1,1,k} - \boldsymbol{\xi}_{1,2:L,k}^T (\boldsymbol{\Xi}'_k + \mathbf{I}_{L-1})^{-1} \boldsymbol{\xi}_{2:L,1,k} \right], \\
 \xi_{i,l,k} &\triangleq \text{Tr} (\mathbf{Q}_k^{-1} \boldsymbol{\Lambda}_{i,k} \mathbf{R}_{i,k} \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{R}_{l,k} \boldsymbol{\Lambda}_{l,k}), \\
 \boldsymbol{\Xi}' &= \begin{bmatrix} \xi_{2,2,k} & \cdots & \xi_{2,L,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{L,2,k} & \cdots & \xi_{L,L,k} \end{bmatrix}, \\
 \boldsymbol{\xi}_{1,2:L,k} &= \left[\xi_{1,2,k} \cdots \xi_{1,L,k} \right]^T, \\
 \boldsymbol{\xi}_{2:L,1,k} &= \left[\xi_{2,1,k} \cdots \xi_{L,1,k} \right]^T.
 \end{aligned}$$

上式是多小区多用户大规模天线系统容量的一般表达式, 它涵盖了大规模 MIMO 的情况. 我们很容易验证, 文献 [16] 是其一个特例. 即 $\mathbf{R}_{l,m,k} = \mathbf{I}_N$ 时, C_{inf} 满足

$$C_{\text{inf}} = \sum_{k=1}^K \log_2 \left[1 + \frac{\lambda_{1,1,k}^2}{\sum_{l=2}^L \lambda_{l,1,k}^2 + \frac{\varepsilon + \gamma_{\text{UL}}}{N} \left(\sum_{l=1}^L \lambda_{l,1,k} + \gamma_{\text{P}} \right)} \right],$$

其中,

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \lambda_{l,1,k} - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{l=1}^L \lambda_{l,1,k}^2 \right) \left(\sum_{l=1}^L \lambda_{l,1,k} + \gamma_{\text{P}} \right)^{-1}.$$

可以看出, 当 N 趋于无穷时,

$$C_{\text{inf}} = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_{1,1,k}^2}{\sum_{l=2}^L \lambda_{l,1,k}^2} \right).$$

这与文献 [4] 中采用最大比合并 (maximal ratio combining, MRC) 接收机相同.

从上面的理论结果可以看出, 当基站侧天线个数远大于用户数时, 系统容量随着用户数的增加而增加. 但是考虑到上行链路如果采用正交导频, 导频开销随用户数目线性增加, 系统存在最大支持的用户数目. 我们还可以看到, 在非理想信道信息下, 大规模天线系统是干扰受限系统, 用户的性能受限于邻小区采用相同导频的用户. 根据上述导频污染模型, 文献 [18] 推导出采用最大比发送预编码 (maximum ratio transmission, MRT) 时, 大规模分布式天线系统下行传输的容量. 文献 [17, 18] 通过仿真对比了非理想信道信息下, 大规模 MIMO 和大规模分布式 MIMO 的容量. 结果表明, 相同条件下, 上行链路采用 MMSE 接收机时, 相比大规模 MIMO, 大规模分布式 MIMO 可以提升 100% 的容量; 下行链路采用 MRT 时, 大规模分布式 MIMO 可以提升 50% 的容量.

2.2 系统级频谱效率

系统级频谱效率是工业界评估蜂窝移动通信系统的一个重要指标. 工业界通常采用非常复杂耗时的系统级仿真得到. 近年来, 为了能够从理论上得到系统级频谱效率与系统参数的关系, 学术界进行了大量的探索研究.

系统级频谱效率的研究主要采用以下两种方法. 一种是采用随机几何模型, 其代表性论文是文献 [19]. 文献 [19] 的主要思想是, 根据接收机的信干噪比, 通过 Shannon 公式得到频谱效率, 然后假设

基站站点部署服从点 Poisson 分布, 进而得到系统的频谱效率. 近年来, 随机几何模型得到了广泛关注, 例如文献 [20] 将其应用于协作基站系统的频谱效率分析, 文献 [21] 将其应用于异构网的容量分析, 文献 [22] 将其应用于分布式天线系统的容量分析, 文献 [23] 将其应用于大规模 MIMO 的容量分析. 然而, 在协作基站或分布式系统中, 点 Poisson 分布得到的系统级频谱效率的闭合表达式较复杂, 很难直观地给出系统频谱效率与系统参数的关系. 另外, 考虑非理想信道信息时 (特别是考虑存在导频污染时), 由于信干噪比的表达式较复杂, 系统级频谱效率的分析仍然少见.

另外一种系统级频谱效率的分析方法是, 假设基站位置固定已知, 用户在小区内均匀分布, 根据信道容量对用户位置取期望, 得到系统级频谱效率. 文献 [24] 最早推导出分布式天线系统和集中式天线系统的系统级频谱效率的闭合表达式. 文献 [25] 进一步推导出接入点分布在圆上时, 分布式天线系统的平均频谱效率. 文献 [26] 考虑非协作的多用户多小区蜂窝系统的系统级频谱效率的渐近上下界, 从而揭示出系统级频谱效率与系统参数 (包括带宽、用户数、接入点数) 之间的定性关系. 在非理想信道信息下, 文献 [27] 推导出导频复用时, 多小区多用户大规模 MIMO 系统的平均频谱效率的近似闭合表达式.

2.3 进一步研究的方向

研究学者对理想信道信息多天线系统的容量已经进行了大量研究. 非理想信道信息将是未来人们研究多天线系统容量的一个重要方向. 存在导频污染时, 考虑迫零 (zero forcing, ZF) 或正则迫零 (regularized ZF, RZF) 预编码, 其容量分析仍需要进一步研究. 近期, 非理想硬件对系统容量的影响受到众多研究学者的关注 [28, 29]. 另外, 对于时分双工, 上下行不互易对系统级频谱效率的影响仍然需要进一步研究. 而考虑非理想信道信息, 存在节点间协作时, 系统级频谱效率的渐近分析也是一个非常有挑战的研究方向.

3 大规模天线系统的信道信息获取

在大规模天线系统中, 随着基站天线个数的增加以及空分用户数的增加, 信道信息获取成为系统实现的瓶颈. 对于上行链路, 采用正交导频时, 导频开销随着参与空分传输的用户总天线个数线性增加. 同时, 对于下行链路, 导频开销随基站侧天线总数线性增加. 发送端已知下行链路信道信息是实现下行多用户预编码, 多天线空分复用的必要手段. 当基站侧天线数目远远大于用户总天线个数时, 下行链路信道信息的获取成为大规模天线系统的瓶颈. 对于时分双工 (time division duplex, TDD) 系统, 利用空中信道的上下行互易性, 在相干时间内基站可以利用上行信道估计信息来进行下行预编码的设计, 进而减少下行导频以及用户端信道状态信息 (channel state information, CSI) 反馈的开销. 而对于频分双工 (frequency division duplex, FDD) 系统, 缺乏上下行信道互易性, 是应用大规模天线的主要障碍.

总的来说, 大规模天线系统的信道信息获取面临如下问题. 导频开销仍然随用户总天线个数线性增加, 如何降低导频开销, 有效利用导频资源, 提高信道信息获取的精度, 需要深入研究, 这包括导频信号的设计、导频复用方法和先进的信道估计方法. 另外, 对于 TDD 系统, 虽然空中信道满足上下行互易性, 但是考虑到射频电路等影响, 上下行整体信道是不互易的. 因此, 互易性校准对 TDD 大规模天线系统的实现至关重要.

3.1 导频设计

参考信号设计一直是移动通信系统设计的一项关键技术, 它直接影响系统的传输效率和可靠性. 目前 4G 系统的实现中可将参考信号按照功能分为用于获取信道质量的参考信号 (CSI reference signal, CSI-RS) 和用于解调数据的参考信号 (demodulation RS, DM-RS). CSI-RS 通常采用全向发送, 在时频域较稀疏, 占用的资源较少, 它可以用于信道质量测试, 信道统计信息获取等功能. 而 DM-RS 主要用于解调数据, 为了降低开销, 它通常采用预编码导频.

导频设计时通常分为正交导频和非正交导频. 正交导频分为时分正交 (TDM)、频分正交 (FDM) 和码分正交 (CDM) 导频以及 TDM 或 FDM 与 CDM 的混合使用. 这些技术已经被 4G 标准所采纳, 其优点是干扰小, 缺点是开销大. 特别地, 在多小区大规模天线系统中, 随着用户及天线数增加, 无论是 CSI-RS 还是 DM-RS, 开销大大增加. 如何设计导频信号并降低导频开销是我们面临的一个严峻的问题. 为了降低多小区大规模天线系统的导频开销, 研究学者们提出了非正交导频设计, 主要包括两种, 一种是将导频叠加在数据上, 另一种是导频复用, 前者会产生导频和数据间的干扰, 而后者会产生严重的导频污染现象.

文献 [30] 提出将多小区上行导频在时间上错开 (time-shifted), 利用干扰抵消去除导频与数据之间的相互干扰. 文献 [30] 的结果表明, 当基站侧天线个数趋于无穷大时, 时间偏移导频方案可以降低导频污染. 但是, 当空分用户数目较大时, 采用时间偏移导频的系统, 基站需要增加更多的天线, 以获取比同步导频更好的性能. 文献 [31] 结合串行干扰抵消辅助的信道估计方法, 提出一种半正交导频设计, 该半正交导频设计允许基站已经获得相应信道估计值的用户同时传输上行链路数据, 极大提高用于传输有效数据的资源, 降低导频资源开销.

导频复用是最早提出大规模 MIMO 理论时所采用的方法 [4]. 仅根据大尺度衰落信息, 以最大化和速率为目标, 文献 [32] 进一步提出了贪婪算法, Tabu 搜索算法以及贪婪 Tabu 搜索算法的导频分配方法. 随着对大规模 MIMO 信道研究的深入, 研究学者发现当天线大规模增加时, 信道在空间角度域具有稀疏性, 而当带宽增加时, 在时延域具有稀疏性. 利用大规模 MIMO 信道稀疏性的特点, 进行导频分配可以有效降低导频污染. 在空间域, 文献 [33] 证明, 当复用相同导频的用户的信道到达角区间互不重叠时, 信道估计的均方误差之和可以达到最小. 因此, 当信道角度域稀疏时空间相关大规模 MIMO 信道下的导频复用是可行的. 文献 [32~34] 分别提出了基于信道二阶统计信息的导频分配方法, 保证使用相同导频的用户的信道相关矩阵相互正交. 在时延域, 利用宽带 MIMO 信道的稀疏特性, 也可以进行导频污染抑制 [35, 36].

在大规模分布式 MIMO 中, 信道在功率域具有稀疏性 [10]. 当我们已知用户的地理位置, 构建用户之间的干扰矩阵, 对用户之间的导频干扰进行量化, 给予干扰较大的用户较大的权重, 使他们优先使用正交导频, 从而大大降低导频干扰. 从这点上看, 导频分配与频率分配有相似之处. 采用类似频率分配的方法, 例如分数倍频率复用或先进的染色算法, 对多小区、多用户分配导频, 可降低分布式 MIMO 系统中由导频复用引起的导频污染 [37, 38].

相比 TDD, 采用 FDD 的大规模 MIMO 的信道信息获取更具挑战性. 假设基站和用户采用共同的导频信号, 文献 [39] 提出了开环和闭环训练架构. 在开环模式中, 基站采用轮询的方式发送导频信号, 这样接收机可以利用空间相关性、时间相关性以及之前的信道估计来估计出当前的信道. 在闭环模式中, 用户根据之前的接收信号选择最优的训练信号, 并把训练序列的序号反馈给基站, 基站根据反馈, 来确定所要发送的导频信号. 在文献 [40] 中, 考虑反馈开销, 提出了非相干的格栅编码量化, 其复杂度随天线个数线性增加. 在 Gauss-Markov 信道模型下, 利用 Kalman 滤波算法以及大规模 MIMO

信道的时间和空间相关性, 文献 [41] 提出了导频波束设计.

3.2 信道估计方法

大规模 MIMO 信道的稀疏特性也利于采用先进的信号处理算法提高信道估计的精度. 宽带大规模 MIMO 的信道在角度域和时延域都存在稀疏性 [42], 可以采用参数化模型来对这种稀疏信道建模 [43, 44]. 对于这种参数化的稀疏信道, 可采用参数化信道估计和压缩感知方法大幅提高信道估计的精度. 子空间方法是估计参数化信道的常用方法, 文献 [43, 45] 均通过到达角估计提升大规模 MIMO 信道参数估计的精度. 压缩感知方法是稀疏信道估计的另一种有效途径, 它可以在保证较小导频开销的情况下, 获得较好的信道估计性能. 常用的压缩感知算法包括正交匹配追踪和基于 Bayes 匹配追踪法. 文献 [46] 提出了分布未知情况下的 Bayes 匹配追踪法, 并将其应用于大规模 MIMO 的信道估计 [47].

利用盲信道估计方法也可以解决导频开销的问题, 这在码分多址系统 (code division multiple access, CDMA) 中已经被充分地研究, 这些方法同样适用于大规模 MIMO 系统. 事实上, 有关导频污染的问题类似 CDMA 的信道估计. 针对 TDD 系统, 文献 [48] 利用大规模 MIMO 信道的空间渐进正交性, 提出一种基于特征值分解的盲信道估计算法, 使用少量上行导频即可消除矩阵模糊度. 文献 [49] 在此基础上提出不使用导频信号的子空间投影盲信道估计算法, 进一步降低导频污染的影响. 但是, 盲信道估计算法较高的复杂度, 是实际系统实现时的主要障碍. 利用数据辅助的信道估计也是一种传统的提高信道估计精度的方法, 结合迭代接收机, 可以进一步提高大规模 MIMO 信道估计的精度 [50]. 但是, 为了获得较好的估计性能, 数据辅助信道估计需要较长数据, 其复杂度也随用户数目及数据长度的增加而大幅增加.

利用时延域的稀疏性, 文献 [35] 提出了一种结合信道估计和导频分配的方法来克服导频污染, 提高导频复用的性能. 其主要思想是, 利用不同用户在时延域的正交特性, 在不同的时隙, 通过导频分配, 将导频污染随机化, 最后进行多径时延估计和多径分量提取, 得到延迟功率分布的估计. 在理想情况下, 估计出的功率延迟分布可逼近无导频污染时的情况. 通过估计出的功率延迟分布, 可进一步消除导频污染.

对于 FDD 系统, 通常需要反馈辅助来提高信道估计的精度. 文献 [51] 将分布式压缩感知技术应用用于 CSI 获取, 其优点是, 压缩测量在用户端, 而信道信息的恢复由基站侧联合实现. 该方法可降低训练和反馈开销, 且性能优于传统方法. 文献 [52] 针对信道的空间稀疏性和慢变特性, 采用非正交导频, 提出了分布式稀疏性自适应的匹配追踪信道估计方法, 并提出闭环信道跟踪方法来降低导频开销.

对于大规模分布式 MIMO, 我们不仅需要估计小尺度衰落, 还需要估计大尺度衰落信息. 文献 [53] 利用天线大规模效应提出了大尺度衰落信息的估计方法.

3.3 TDD 的互易性校准

实际 TDD 系统中, 整体通信信道不仅包括空中无线部分, 还包括通信双方收发机的射频 (radio frequency, RF) 电路. 尽管空中的无线信道满足互易性, 通常通信双发收发机的射频电路增益却并不对称. RF 电路包括天线、混频器、滤波器、模数转换器、功率放大器等等, 且会受到环境中温度和湿度的影响. 这种收发模块的失配破坏了整体通信信道的互易性.

存在收发失配时, 上行链路信道和下行链路信道矩阵可以建模为

$$\mathbf{G}_{UL} = \mathbf{C}_{BS,r} \mathbf{H}^T \mathbf{C}_{UE,t},$$

$$\mathbf{G}_{\text{DL}} = \mathbf{C}_{\text{UE},r} \mathbf{H} \mathbf{C}_{\text{BS},t},$$

其中 \mathbf{H} 表示空中信道矩阵, 满足互易性, $\mathbf{C}_{\text{BS},t}$ 和 $\mathbf{C}_{\text{BS},r}$ 分别表示基站端发送和接收射频增益矩阵, $\mathbf{C}_{\text{UE},t}$ 和 $\mathbf{C}_{\text{UE},r}$ 分别表示用户端的发送和接收射频增益矩阵, 均为对角矩阵. 由于射频增益矩阵的存在, 信道不满足互易性.

假设我们以上行链路信道矩阵 \mathbf{G}_{UL}^T 的转置作为下行链路的信道, 采用 ZF 下行多用户预编码时, 预编码矩阵 \mathbf{W} 表示为

$$\mathbf{W} = \mathbf{G}_{\text{UL}}^* (\mathbf{G}_{\text{UL}}^T \mathbf{G}_{\text{UL}}^*)^{-1}.$$

可以看出, $\mathbf{G}_{\text{DL}} \mathbf{W}$ 不是对角阵, 意味着将存在用户间干扰. 如果我们采用如下预编码矩阵

$$\mathbf{W} = \mathbf{C}_{\text{BS},t}^{-1} \mathbf{C}_{\text{BS},r} \mathbf{G}_{\text{UL}}^* (\mathbf{G}_{\text{UL}}^T \mathbf{G}_{\text{UL}}^*)^{-1},$$

则 $\mathbf{G}_{\text{DL}} \mathbf{W} = \mathbf{C}_{\text{UE},r} \mathbf{C}_{\text{UE},t}^{-1}$ 仍然是对角阵, 没有用户间干扰. 上面的对角阵 $\mathbf{C}_{\text{BS},t}^{-1} \mathbf{C}_{\text{BS},r}$ 就是校准矩阵.

可以看出, 大规模 MIMO 和大规模分布式 MIMO 的 TDD 校准对系统实现至关重要. 因此, 近年来, 校准方法以及校准对系统性能的影响, 受到工业界和学术界的关注. 文献 [54, 55] 分别研究了基站侧失配对大规模 MIMO 的容量的影响. 文献 [54] 理论上推导出大规模 MIMO 系统中非理想校准时系统容量的闭合表达式. 理论结果表明, 对于基站端, 其 RF 电路相位和幅度的失配都会对容量造成损失; 而对于用户, 只有 RF 电路的幅度失配会对容量产生影响, 并且, 如果当幅度失配的方差较小时, 容量损失也较小.

校准方法大致可以分为两类, 即硬件电路校准和信号空间校准.

硬件电路校准利用耦合器和多路开关连接每一根天线的发送电路和其他天线的接收电路, 形成回路, 进行测量校准 [56]. 对于大规模 MIMO 来说, 通过硬件电路校准具有快速准确的优点. 但是, 其缺点也十分明显, 即增加了硬件成本. 另外, 需要注意的是, 对于分布式 MIMO, 由于接入点处于不同的物理位置, 虽然接入点内可以采用硬件电路校准, 但是接入点之间却无法采用硬件电路校准. 因此, 硬件电路校准无法用于大规模分布式 MIMO.

由于硬件电路校准方法需要引入额外的硬件校准电路, 代价昂贵, 所以人们提出了信号空间校准方法, 也称之为空中 (over the air, OTA) 校准. 信号空间校准无需引入额外的硬件校准电路, 通过互相接收到的校准信号, 计算校准系数. 我们把信号空间校准根据是否对用户透明以及是否校准用户端的 RF 失配, 分为全端校准和部分校准.

全端校准方法的思想是, 基站和用户互相收发校准信号, 用户把接收到的校准信号反馈给基站, 然后基站根据接收的上行校准信号和反馈的下行校准信号, 得到校准系数. 该方法的优点是, 可以完成用户端和基站端双方的全校准. 其代表性方法是文献 [57] 提出了一种基于总体最小二乘 (total least squares, TLS) 的校准方法, 该方法可以获得最优的校准性能. 但是, 通常实际系统中, 倾向于校准过程对用户透明, 即, 不需要用户涉及到校准过程中. 并且, 在大规模天线系统中, 随着基站端天线的增加, 反馈会导致巨大的开销.

实际上, 在多用户系统中, 根据文献 [54] 的理论结果, 用户端的 RF 失配对系统性能的影响较小, 我们只需要在基站端进行互易性校准, 即基站端部分校准. 文献 [58] 提出了大规模 MIMO 的校准方法, 基站端选择一个参考天线, 其他天线与参考天线进行校准信号的收发. 对于分布式 MIMO, 参考节点与其他节点交换校准信号计算校准系数 [59]. 但是, 文献 [58, 59] 的校准性能非常依赖于参考天线 (或参考节点) 的选择. 如果参考天线与其他天线之间的信道质量较差, 校准性能将会大大降低. 为了进一步提高校准性能, 文献 [60] 提出了最小二乘 (least squares, LS) 校准方法. 该方法利用所有天线

之间的校准信号, 而不是只依赖于参考天线, 从而获得更好的性能. 文献 [61] 证明了 LS 是文献 [57] 所提出的 TLS 在基站端部分校准的推广. 为了避免 LS 校准所涉及的特征值分解, 文献 [61] 提出了低复杂度的迭代坐标下降法, 性能逼近 LS 校准.

3.4 进一步研究的方向

目前, 无论是学术界还是工业界都把信道信息获取视为实现大规模天线系统的一项关键技术. 在大规模天线的信道建模的基础上, 针对不同的信道环境, 采用相应的估计方法, 可以提高信道估计的精度. 基于参数化的信道建模并挖掘大规模天线系统信道的稀疏性, 是提升信道参数估计并降低导频开销的有效途径^[42]. 对于大规模分布式 MIMO, 获取所有 RRU 的频率和时间同步, 是实现联合处理增益的前提. 因此, 大规模分布式 MIMO 还面临 RRU 之间的频率和时间同步问题^[60, 62], 需要深入研究. 另外, 对于 TDD 系统的校准, 虽然 TLS 和 LS 校准可以达到很好的性能, 但是如何以低复杂度的校准方法获得更好的性能仍然需要进一步研究. 对于 FDD 系统, 如何降低多用户 MIMO 的反馈开销一直是人们研究的热点. 学术界和工业界已经在尝试在 FDD 系统中利用统计信道信息 (例如天线间的相关矩阵) 的互易性降低反馈开销. 但是, 实际应用中, FDD 下统计信道信息是否互易仍需要实验验证.

4 大规模天线系统的传输方法

大规模天线系统的传输方法设计的理论基础是多用户接入信道和多用户广播信道的信息理论. 理论上, 多用户接入信道的可达容量可以通过最优多用户检测实现, 而多用户广播信道的容量可以通过污纸编码达到^[63]. 在大规模天线系统中, 随着天线数及用户数的增加, 无论是上行多用户联合接收机还是下行多用户发送, 最优传输难以实现. 理论上, 文献 [4, 17] 的结果表明, 无论是大规模 MIMO 还是大规模分布式 MIMO, 当天线数目趋于无穷大时, 下行采用复杂度极低的 MRT, 上行接收采用最大比合并, 可以获得逼近容量的性能. 同时, 文献 [15] 指出, 使用复杂度稍高的 RZF 预编码或线性 MMSE 检测, 可以以低一个数量级的天线数获得逼近容量的性能. 也就是说, 采用大规模天线, 可降低下行波束成形以及上行联合接收的复杂度.

但是, 受到当前实现能力的限制, 天线规模有限. 采用 RZF 预编码或 MMSE 检测时, 需要复杂的求逆运算. 当用户数较多时, 其复杂度仍然非常高. 解决途径主要包括两种, 一种是采用低复杂度的矩阵求逆方法, 另一种是利用信道的稀疏特性或统计特性降低收发的复杂度. 事实上, 由于上下行的对偶特性, 很多情况下, 上行传输方法与下行传输方法可以互相借鉴, 或进行联合设计. 例如, 对于矩阵求逆运算的简化, 文献 [64, 65] 分别提出了多项式展开的预编码方法和多项式展开的迭代接收方法. 利用大规模分布式天线系统信道的稀疏性, 文献 [66] 采用置信传播方法的下行预编码方法, 文献 [10] 提出了基于置信传播的迭代接收方法.

下面, 首先介绍了利用统计信道信息的空分多址传输方法, 然后介绍了大规模分布式天线系统的联合发送方法, 最后介绍了大规模天线系统中容量逼近的迭代接收机设计.

4.1 利用统计信道信息的空分多址传输方法

对于下行多用户发送, 为了充分挖掘多用户广播信道的容量, 通常假设发送端已知信道信息. 发送端已知信道状态信息时信息传输的基本问题是发送端的多用户信号设计问题. 将最优多用户 MIMO 传输理论方法拓展到大规模天线系统, 进行不同准则下最优发送信号设计, 是有待解决的关键问题. 与

传统多用户 MIMO 不同, 受制于信道信息获取以及大规模用户空分的复杂度问题, 研究学者提出了基于统计信道信息的多用户空分传输方法. 典型的方法包括, 文献 [67] 提出的 BDMA (beam division multiple access) 方法和文献 [68] 提出的 JSMD (joint spatial division and multiplexing).

利用大规模 MIMO 的统计信道信息, 文献 [68] 提出了两级预编码方法. 首先, 服务用户被分为多个组, 每个组具有相似的发送相关矩阵. 因此, 第一级预编码准静态地被用于每个组的用户. 然后, 针对降空间维度的等效信道, 采用简化的信道反馈和第二级的预编码. 该方法的性能很大程度上依赖于用户分组.

考虑宽带多载波大规模 MIMO 传输系统, 文献 [67] 通过理论分析, 得到大规模 MIMO 系统的波束域信道模型. 基于该模型, 推导出多用户大规模 MIMO 可达遍历和速率的上界, 由此得到发送端仅知统计信道状态信息时最优下行传输的充要条件. 进而得出, 以该上界为优化目标时, 波束域空分多址传输是最优的. 在此基础上, 文献 [67] 提出 BDMA 传输理论方法, 通过为不同的用户选择互不重叠的波束集合与之通信, 多用户 MIMO 信道被分解为多个单用户 MIMO 信道, 由此显著降低导频开销和收发端处理的复杂性.

4.2 大规模分布式 MIMO 的下行传输方法

对于大规模分布式天线系统, 利用其功率域的稀疏性, 可降低 RZF 预编码的复杂性. 文献 [66] 提出采用置信传播算法实现 RZF 预编码方法, 避免大维矩阵的求逆运算. 论文从 Bayes 推断出发, 采用 Gauss 近似, 推导出了基于置信传播的 RZF 预编码. 然后, 借鉴压缩感知中的近似消息传递方法 (approximate message passing, AMP), 减少消息传递次数. 论文还利用大规模分布式 MIMO 中干扰的硬化特性, 提出了利用空间信道协方差信息的 AMP-RZF 预编码方法, 进一步大大降低计算复杂度.

对于采用 TDD 的大规模分布式 MIMO-OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 系统, 我们提出了如下低复杂度的实现方法, 步骤如图 3 所示. 首先根据上行链路信道估计得到大维宽带统计信道信息矩阵, 利用其稀疏性, 得到大维信道矩阵的逆矩阵. 然后, 根据逆矩阵计算用户间干扰抑制矩阵 (外预编码). 最后, 针对降空间维度的等效信道, 即, 每个用户的实际信道与干扰抑制矩阵的复合信道, 计算每个用户的上行预编码和下行预编码 (内预编码). 在实施时, 对于上行链路, 多个用户经过上行预编码后发送, 在基站收到所有用户的信号后, 先用干扰抑制矩阵降低空间维度, 然后进行单用户检测. 对于下行链路, 每个用户先进行内预编码, 然后使用干扰抑制矩阵进行外预编码. 需要指出的是, 由于我们仅针对统计信道信息计算大维矩阵的逆, 再借助稀疏矩阵的求逆方法, 可以大大降低系统的实现复杂度.

4.3 低复杂度的接收机方法

多天线系统中, 容量逼近的接收机技术一直是研究热点. 大规模天线系统的接收机同样面临着复杂性问题. 特别是, 大规模天线系统是干扰受限的系统, 如何设计干扰信道下的接收机, 获得逼近信道容量的性能也是一个非常有挑战的方向.

对于大规模天线系统, 接收机面临着如下困难: 非理想信道, 干扰信道和检测复杂度高. 针对非理想信道的问题, 传统采用数据辅助的信道估计可以推广到大规模 MIMO [50], 将数据检测和信道估计联合设计可以提高系统的性能. 采用数据辅助时, 由于用户之间的数据非正交, 只有数据长度较长时, 才能获得较好的性能, 但是随之产生了严重的复杂性问题. 对于干扰信道问题, 我们可以采用 Turbo 迭

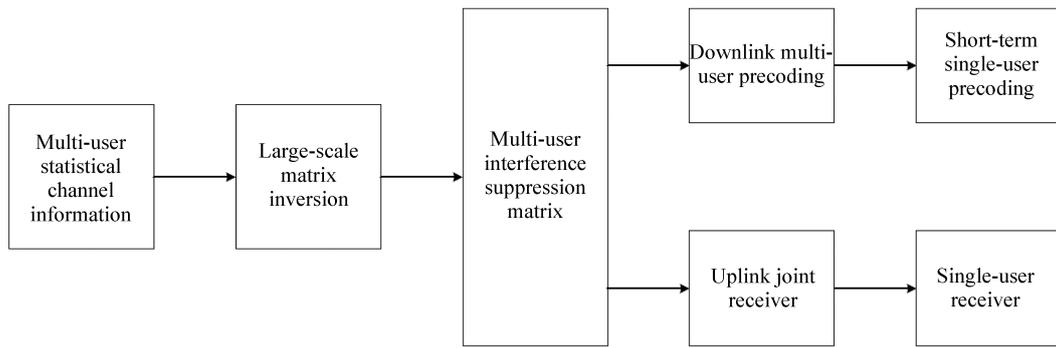


图 3 大规模分布式 MIMO 上下行联合发送和接收机

Figure 3 Transmitter and receiver design for large-scale distributed MIMO

代接收机, 但是同样面临接收机实现的复杂性问题. 近期, 对大维信道下的检测器研究主要思路包括矩阵求逆的简化方法^[65,69] 和利用稀疏性的^[10,70] 检测方法.

文献 [65] 提出了干扰信道下的联合迭代接收技术. 考虑导频污染, 设计了集信道估计、干扰估计、低复杂度软输入软输出检测和译码为一体的 Turbo 接收机. 首先, 根据信道估计得到信道参数和初步的干扰统计特性, 进行线性预滤波降维处理. 然后, 提出基于奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 的软输入软输出检测和基于匹配滤波的软输入软输出检测. 对于 SVD 的软输入软输出检测, 仅需要初次对降维后的信道矩阵进行 SVD 分解; 对于匹配滤波检测, 仅需要对降维处理后的信道进行线性合并. 为了进一步降低软输入软输出检测的复杂度, 文献 [65] 还提出了基于多项式展开的软输入软输出检测, 避免复杂的矩阵求逆. 结果表明, 由于大规模天线效应, 采用低复杂度的检测方法的 Turbo 接收机可以逼近理论信道容量.

4.4 进一步研究的方向

虽然研究者们对大规模天线无线传输技术进行了深入的研究, 但是, 在实际实现时, 大规模天线无线传输仍然面临着很多挑战. 首先, 面向较高速移动时, 采用统计信道信息是否能够有效解决系统实现的复杂性. 文献 [71] 的结果表明, 大规模 MIMO 有助于改善高速运动下用户的传输速率, 但是这需要更大规模的天线数目, 显然这会增加系统的实现复杂度. 如何解决高移动速度下大规模天线的无线系统中传输问题, 需要深入研究. 其次, 非理想信道信息下大规模天线无线传输方法需要进一步研究. 这些非理想信道信息的情况包括信道参数估计误差和硬件造成的影响, 如 I/Q 不平衡^[72]、互易性失配^[73]、低分辨率模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 等^[74,75]. 如何针对这些问题, 设计鲁棒的传输方案, 值得深入研究. 最后是高性能接收机设计方面的研究. 在接收机的设计方面, 人们通常研究基站侧的联合接收问题. 但是, 在大规模天线系统中, 由于采用统计信道信息的下行传输方法, 在终端侧, 信道干扰不可避免. 因此, 如何提高终端的接收性能也值得研究.

5 大规模天线系统的资源分配

在大规模天线系统中, 为了进一步提高网络中无线资源的利用率, 需要联合优化调配空时频资源、功率资源以及空分用户组等, 这对无线资源管理带来新的挑战. 而设计低复杂度、高性能的资源分配, 对大规模天线系统的实现至关重要. MIMO-OFDM 的时频资源分配已经有大量学者进行研究^[76~78].

而本文主要关注大规模天线系统的空域资源和节点资源的分配. 下面我们分别针对大规模 MIMO 和大规模分布式 MIMO 的空域资源分配展开讨论.

统计空分复用可降低大规模 MIMO 的实现复杂度, 但是其性能受限于用户的分簇. 文献 [67] 以最大化和容量为目标, 利用统计信道信息, 通过贪婪算法进行用户的分簇. 对于 JSDM, 如前所述, 需要将具有相似的信道协方差矩阵特征矢量的用户分配到同一个簇中. 分簇方法的性能将决定用户间的干扰, 进而影响传输方案的性能. 为此, 文献 [79] 采用弦距离作为分簇度量, 提出了基于 K 均值聚类的分簇算法. 文献 [80] 采用加权似然相似度量、子空间投影相似度量等改进的分簇方法, 进一步提升系统的吞吐量.

对于大规模分布式 MIMO 系统, 节点和用户分簇同样是降低系统实现复杂度, 提升系统性能的关键技术. 大规模分布式 MIMO 中用户和节点分簇研究大致可以分为 3 种, 一种是以用户为中心的节点分簇, 另外一种动态的节点和用户分簇, 第 3 种是准静态的交错分簇 (interlaced clustering).

以用户为中心的无线通信在 4G 研发时期已经被提出 [81], 目前仍然是 5G 移动通信的一个研究热点. 对于大规模分布式 MIMO, 文献 [82] 研究了以用户为中心的节点分组理论方法, 给出了虚拟小区的半径的理论分析. 考虑接入点之间回程容量受限, 文献 [83] 利用广义加权均方误差求解加权和速率最大化问题, 提出了联合用户为中心的动态分簇、用户调度和波束成形的方法.

对于动态节点和用户分簇, 文献 [84] 提出了利用统计信道信息的动态用户分簇方法. 文献 [85] 将用户与接入点之间的稀疏信道转化为双边界块对角矩阵, 并利用这种特性, 进行动态分簇, 并实现并行基带处理.

文献 [86] 提出了一种准静态的交叠分簇方法. 该方法的主要思想是: 把系统中所有的接入点分成互不相交的簇, 由于分簇方法有很多种, 这样可以得到多个分簇图案 (cluster pattern). 不同图案之间有交叠, 在每一种分簇图案中, 所有用户和所有接入点使用相同的时频资源, 而不同的分簇图案在时频资源上正交. 结合功率分配方法, 这种交叠分簇方法可以提升整个小区的吞吐量以及小区边界用户的吞吐量.

资源分配方法一直是无线通信中的研究热点. 大规模天线系统中, 如何设计低复杂度的资源分配方法和多用户调度方法, 仍然需要进一步深入研究.

6 总结

本文对大规模天线的无线传输理论与技术的最新进展进行了综述, 包括频谱效率理论分析、信道信息获取技术、上下行传输技术和资源分配技术. 除此之外, 论文还给出了这些方向中一些亟待解决的问题和值得深入探究的课题, 它们至今仍是大规模天线系统的研究热点. 虽然目前已经有大规模 MIMO 的试验系统, 3GPP 标准组织也正在制定相关技术的演进, 但是大规模天线系统仍有许多科学和工程问题需要解决.

参考文献

- 1 You X H, Pan Z W, Gao X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques. *Sci Sin Inform*, 2014, 44: 551–563 [尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 551–563]
- 2 Ma Z, Zhang Z Q, Ding Z G, et al. Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives. *Sci China Inf Sci*, 2015, 58: 041301

- 3 Paulraj A J, Gore D A, Nabar R U, et al. An Overview of MIMO communications—a key to gigabit wireless. *Proc IEEE*, 2004, 2: 198–218
- 4 Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2010, 11: 3590–3600
- 5 You X H, Wang D M, Sheng B, et al. Cooperative distributed antenna systems for mobile communications. *IEEE Wirel Commun*, 2010, 17: 35–43
- 6 Dai L. A comparative study on uplink sum capacity with co-located and distributed antennas. *IEEE J Sel Area Commun*, 2011, 29: 1200–1213
- 7 Wang J, Dai L. Asymptotic rate analysis of downlink multi-user systems with co-located and distributed antennas. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2015, 14: 3046–3058
- 8 Wang D, Wang J, You X, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO systems. *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 10: 2112–2127
- 9 Huh H, Caire G, Papadopoulos H C, et al. Achieving massive MIMO spectral efficiency with a not-so-large number of antennas. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2012, 9: 3226–3239
- 10 Wang D M, Zhao Z L, Huang Y Q, et al. Large-scale multi-user distributed antenna system for 5G wireless communications. In: *Proceedings of IEEE 81st Vehicular Technology Conference Spring, Glasgow, 2015*. 1–5
- 11 Tulino A M, Verdu S. Random matrix theory and wireless communications. In: *Foundations and Trends in Communications and Information Theory*. Norwell: Now Publishers Inc, 2004
- 12 Lu A, Gao X Q, Xiao C S. A free deterministic equivalent for the capacity of MIMO MAC with distributed antenna sets. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, London, 2015*. 1751–1756
- 13 Zhang J, Wen C K, Jin S, et al. On capacity of large-scale MIMO multiple access channels with distributed sets of correlated antennas. *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 2: 133–148
- 14 Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. *IEEE Trans Commun*, 2013, 4: 1436–1449
- 15 Hoydis J, Brinkz S, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: how many antennas do we need. *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 2: 160–171
- 16 Wang D M, Ji C, Gao X Q, et al. Uplink sum-rate analysis of multi-cell multi-user massive MIMO system. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Budapest, 2013*. 5404–5408
- 17 Wang D M, Ji C, Sun S H, et al. Spectral efficiency of multicell multi-user DAS with pilot contamination. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, 2013*. 3208–3212
- 18 Li J M, Wang D M, Zhu P C, et al. Downlink spectral efficiency of multi-cell multi-user large-scale DAS with pilot contamination. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, London, 2015*. 2011–2016
- 19 Andrews J, Baccelli F, Ganti R. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks. *IEEE Trans Commun*, 2011, 11: 3122–3134
- 20 Baccelli F, Giovanidis A. A stochastic geometry framework for analyzing pairwise-cooperative cellular networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2015, 2: 794–808
- 21 Fei Z S, Ding H C, Xing C W, et al. Performance analysis for range expansion in heterogeneous networks. *Sci China Inf Sci*, 2014, 57: 082305
- 22 Lin Y, Yu W. Ergodic capacity analysis of downlink distributed antenna systems using stochastic geometry. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Budapest, 2013*. 3338–3343
- 23 Bai T Y, Heath R W. Analyzing uplink SIR and rate in massive MIMO systems using stochastic geometry. arXiv: 1510.02538. 2015
- 24 Wang D, You X, Wang J, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO cellular systems in a composite fading channel. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Beijing, 2008*. 1259–1264
- 25 Yang A, Jing Y, Xing C, et al. Performance analysis and location optimization for massive MIMO systems with circularly distributed antennas. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2015, 10: 5659–5671
- 26 Aggarwal R, Koksal C E, Schniter P. On the design of large scale wireless systems. *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 2: 215–225
- 27 Xin Y, Wang D, Li J. Area spectral efficiency and area energy efficiency of massive MIMO cellular systems. *IEEE Trans Vehicular Technol*, in press. doi: 10.1109/TVT.2015.2436896

- 28 Bjornson E, Hoydis J, Kountouris M, et al. Massive MIMO systems with non-ideal hardware: energy efficiency, estimation, and capacity limits. *IEEE Trans Inf Theory*, 2015, 11: 7112–7139
- 29 Gustavsson U, Sanchez-Perez C, Eriksson T, et al. On the impact of hardware impairments on massive MIMO. In: *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Austin, 2014. 294–300
- 30 Fernandes F, Ashikhmin A, Marzetta T L. Inter-cell interference in non-cooperative TDD large scale antenna systems. *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 2: 192–201
- 31 Zhang H, Zheng X, Xu W, et al. On massive MIMO performance with semi-orthogonal pilot-assisted channel estimation. *EURASIP J Wirel Commun Netw*, in press. doi: 10.1186/1687-1499-2014-220
- 32 Jin S, Li M M, Huang Y M, et al. Pilot scheduling schemes for multi-cell massive multiple-input-multiple-output transmission. *IET Commun*, 2015, 9: 689–700
- 33 You L, Gao X, Xia X G, et al. Pilot reuse for massive MIMO transmission over spatially correlated Rayleigh fading channels. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2015, 6: 3352–3366
- 34 Yin H, Gesbert D, Filippou M, et al. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems. *IEEE J Sel Area Commun*, 2013, 2: 264–273
- 35 Chen Z, Yang C. Pilot decontamination in massive MIMO systems: exploiting channel sparsity with pilot assignment. In: *Proceedings of IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, Atlanta, 2014. 637–641
- 36 Gao Z, Dai L, Wang Z. Structured compressive sensing based superimposed pilot design in downlink large-scale MIMO systems. *Electron Lett*, 2014, 12: 896–898
- 37 Yang Y, Bai B, Chen W. How much spectrum can be reused in 5G cellular networks a matrix graph approach. arXiv: 1401.4750. 2014
- 38 Atzeni I, Arnau J, Debbah M. Fractional pilot reuse in massive MIMO systems. arXiv:1503.07321. 2015
- 39 Choi J, Love D, Bidigare P. Downlink training techniques for FDD massive MIMO systems: open-loop and closed-loop training with memory. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2014, 8: 802–814
- 40 Choi J, Chance Z, Love D J, et al. Noncoherent trellis coded quantization: a practical limited feedback technique for massive MIMO systems. *IEEE Trans Commun*, 2013, 12: 5016–5029
- 41 Noh S, Zoltowski M D, Sung Y, et al. Pilot beam pattern design for channel estimation. *IEEE J Sele Topics Signal Process*, 2014, 5: 787–801
- 42 You L, Gao X, Swindlehurst A L, et al. Channel acquisition for massive MIMO-OFDM with adjustable phase shift pilots. arXiv:1511.03812. 2015
- 43 Adeogun R O. Channel prediction for mobile MIMO wireless communication systems. Dissertation for Ph.D. Degree. Wellington: Victoria University of Wellington, 2015. 1–313
- 44 Simeone O, Bar-Ness Y, Spagnolini U. Pilot-based channel estimation for OFDM systems by tracking the delay-subspace. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2004, 1: 315–325
- 45 Zhu Y, Liu L, Wang A, et al. DoA estimation and capacity analysis for 2D active massive MIMO systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Budapest, 2013. 4630–4634
- 46 Masood M, Al-Naffouri T Y. Sparse reconstruction using distribution agnostic Bayesian matching pursuit. *IEEE Trans Signal Process*, 2013, 21: 5298–5309
- 47 Masood M, Afify L H, Al-Naffouri T Y. Efficient coordinated recovery of sparse channels in massive MIMO. *IEEE Trans Signal Process*, 2015, 1: 104–118
- 48 Ngo B Q, Larsson E G. EVD-based channel estimation in multicell multiuser MIMO systems with very large antenna arrays. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoust, Speech, Signal Processing*, Kyoto, 2012. 3249–3252
- 49 Muller R F, Cottatellucci L, Vehkaper M. Blind pilot decontamination. *IEEE J Sele Topics Signal Process*, 2014, 5: 773–786
- 50 Ma J, Li P. Data-aided channel estimation in large antenna systems. *IEEE Trans Signal Process*, 2014, 12: 3111–3124
- 51 Rao X, Lau V K N. Distributed compressive CSIT estimation and feedback for FDD multi-user massive MIMO systems. *IEEE Trans Signal Process*, 2014, 12: 3261–3271
- 52 Gao Z, Dai L, Wang Z, et al. Spatially common sparsity based adaptive channel estimation and feedback for FDD massive MIMO. *IEEE Trans Signal Process*, 2015, 23: 6169–6183
- 53 Chen K F, Liu Y C, Su Y T. On composite channel estimation in wireless massive MIMO systems. In: *Proceedings of*

- IEEE Globecom Workshops, Atlanta, 2013. 135–139
- 54 Wei H, Wang D M, Zhu H L, et al. Mutual coupling calibration for multiuser massive MIMO systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, in press. doi: 10.1109/TWC.2015.2476467
- 55 Zhang W, Ren H, Pan C, et al. Large-scale antenna systems with UL/DL hardware mismatch: achievable rates analysis and calibration. *IEEE Trans Commun*, 2015, 4: 1216–1229
- 56 Nishimori K, Hiraguri T, Ogawa T, et al. Effectiveness of implicit beamforming using calibration technique in massive MIMO system. In: *IEEE International Workshop on Electromagnetics (iWEM)*, Sapporo, 2014. 117–118
- 57 Kaltenberger F, Jiang H, Guillaud M. Relative channel reciprocity calibration in MIMO/TDD systems. In: *Proceedings of IEEE Future Network and Mobile Summit*, Florence, 2010. 1–10
- 58 Shepard C, Yu H, Anand N. Argos: practical many-antenna base stations. In: *Proceedings of the 18th annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Istanbul, 2012. 53–64
- 59 Rogalin R, Bursalioglu O Y, Papadopoulos H C. Hardware-impairment compensation for enabling distributed large-scale MIMO. In: *Proceedings of IEEE Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, San Diego, 2013. 1–10
- 60 Rogalin R, Bursalioglu O Y, Papadopoulos H, et al. Scalable synchronization and reciprocity calibration for distributed multiuser MIMO. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2014, 13: 1815–1831
- 61 Wei H, Wang D M, Wang J Z, et al. TDD reciprocity calibration for multi-user massive MIMO systems with iterative coordinate descent. *Sci China Inf Sci*, in press. doi: 10.1007/s11432-015-5441-4
- 62 Rahul H S, Kumar S, Katabi D. JMB: scaling wireless capacity with user demands. In: *Proceedings of ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*. New York: ACM, 2012. 235–246
- 63 Yu W. Competition and cooperation in multiuser communication environments. Dissertation for Ph.D. Degree. Stanford: Stanford University, 2002
- 64 Kammoun A, Muller A, Bjornson E, et al. Linear precoding based on polynomial expansion: large-scale multi-cell MIMO systems. *IEEE J Sele Topics Signal Process*, 2014, 8: 861–875
- 65 Huang Y, Tang W, Li J, et al. On the performance of iterative receivers in massive MIMO systems with pilot contamination. In: *IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Hangzhou, 2014. 52–57
- 66 Wen C K, Chen J C, Wong K K, et al. Message passing algorithm for distributed downlink regularized zero-forcing beamforming with cooperative base stations. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2014, 13: 2920–2930
- 67 Sun C, Gao X, Jin S, et al. Beam division multiple access transmission for massive MIMO communications. *IEEE Trans Commun*, 2015, 6: 2170–2184
- 68 Nam J, Ahn J Y, Caire G. Joint spatial division and multiplexing-the large-scale array regime. *IEEE Trans Inf Theory*, 2013, 10: 6441–6463
- 69 Dai L L, Gao X Y, Su X, et al. Low-complexity soft-output signal detection based on Gauss-Seidel method for uplink multi-user large-scale MIMO systems. *IEEE Trans Veh Technol*, 2014, 64: 4839–4845
- 70 Fadlallah Y, Aissa A, Amis K, et al. New iterative detector of MIMO transmission using sparse decomposition. *IEEE Trans Veh Technol*, 2014, 64: 3458–3464
- 71 Cao J, Wang D, Li J, et al. Uplink sum-rate analysis of massive MIMO system with pilot contamination and CSI delay. *Wirel Personal Commun*, 2014, 1: 297–312
- 72 Zhang W, Lamare R C, Pan C, et al. Widely linear block diagonalization type precoding in massive MIMO systems with IQ imbalance. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, London, 2015. 1789–1794
- 73 Han S, Yang C, Wang G, et al. Coordinated multipoint transmission strategies for TDD systems with non-ideal channel reciprocity. *IEEE Trans Commun*, 2013, 10: 4256–4270
- 74 Fan L, Jin S, Wen C K, et al. Uplink achievable rate for massive MIMO systems with low-resolution ADC. *IEEE Commun Lett*, 2015, 19: 2186–2189
- 75 Zhang T C, Wen C K, Jin S, et al. Mixed-ADC massive MIMO detectors: performance analysis and design optimization. arXiv: 1509.07950. 2015
- 76 Zhu H, Wang J. Chunk-based resource allocation in OFDMA systems-part I: chunk allocation. *IEEE Trans Commun*, 2009, 9: 2734–2744
- 77 Zhu H, Wang J. Chunk-based resource allocation in OFDMA systems-part II: joint chunk, power and bit allocation. *IEEE Trans Commun*, 2012, 2: 499–509

- 78 Zhu H, Karachontzitis S, Toumpakaris D. Low-complexity resource allocation and its application to distributed antenna systems. *IEEE Wirel Commun*, 2010, 3: 44–50
- 79 Nam J Y, Adhikary A, Ahn J Y, et al. Joint spatial division and multiplexing: opportunistic beamforming, user grouping and simplified downlink scheduling. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2014, 8: 876–890
- 80 Xu Y, Yue G, Mao S. User grouping for massive MIMO in FDD systems: new design methods and analysis. *IEEE Access*, 2014, 2: 947–959
- 81 Xu X D, Wu C L, Tao X F, et al. Maximum utility principle access control for beyond 3G mobile system. *Wirel Commun Mobile Comput*, 2007, 7: 951–959
- 82 Dai L. An uplink capacity analysis of the distributed antenna system (DAS): from cellular das to das with virtual cells. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2014, 13: 2717–2731
- 83 Dai B B, Yu W. Sparse beamforming and user-centric clustering for downlink cloud radio access network. *IEEE Access*, 2014, 2: 1326–1339
- 84 Liu J X, Wang D M. An improved dynamic clustering algorithm for multi-user distributed antenna system. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, 2009. 1–5
- 85 Fan C M, Zhang Y J, Yuan X J. Dynamic nested clustering for parallel PHY-layer processing in cloud-RANs. arXiv: 1408.0876. 2014
- 86 Ratnam V V, Caire G, Molisch A F. Capacity analysis of interlaced clustering in a distributed antenna system. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, 2015. 578–582

An overview of transmission theory and techniques of large-scale antenna systems for 5G wireless communications

Dongming WANG¹, Yu ZHANG¹, Hao WEI¹, Xiaohu YOU^{1*}, Xiqi GAO¹ & Jiangzhou WANG²

1 National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2 School of Engineering and Digital Arts, University of Kent, Canterbury CT27NT, U.K.

*E-mail: xhyu@seu.edu.cn

Abstract The research and development of 5G mobile communications systems has started in preparation for a thousand fold increase in mobile data traffic by 2020. Compared with 4G, 5G systems should be ready to innovate wireless transmission to achieve a tenfold increase in both spectral efficiency and power efficiency. Exploring the spatial multiplexing of multiple antennas is the key to realizing 5G. With the deployment of large-scale antennas centrally at a base station or a large number of remote radio units, the sum rate of the system can be improved greatly. This paper provides an overview of wireless technology of large-scale antenna systems with regard to spectral efficiency analysis, channel state information acquisition, transmission technologies, and resource allocation.

Keywords 5G mobile communications system, massive MIMO, large-scale distributed antenna systems, spectral efficiency, channel information acquisition, multi-user MIMO, resource allocation



Dongming WANG was born in 1977. He received his Ph.D. from Southeast University in 2006. He joined the National Mobile Communications Research Laboratory at Southeast University, China, in 2006, where he has been an associate professor since 2010. His current research interests include turbo detection, channel estimation, distributed antenna systems, and large-scale MIMO systems.



Yu ZHANG was born in 1987. He received his B.S. degree from Soochow University in 2010 and M.S. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2014. From April 2014 to February 2015, he was with ZTE Corporation, Shanghai, as an Engineer. He is currently working toward the Ph.D. degree in the National Mobile Communications Research Laboratory at Southeast University, Nanjing, China. His current research interests include massive MIMO and distributed antenna systems.



MIMO systems.

Hao WEI was born in 1988. He received his B.S. and M.S. from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2010 and 2013, respectively. He is currently working forward his Ph.D. degree in the National Mobile Communications Research Laboratory at Southeast University, Nanjing, China. His current research interests include the reciprocity calibration for massive MIMO systems and distributed large-scale



Xiaohu YOU was born in 1962. He received his master's and Ph.D. degrees from Southeast University, Nanjing, China, in Electrical Engineering in 1985 and 1988, respectively. Since 1990, he has been working with National Mobile Communications Research Laboratory at Southeast University, where he has been holding the rank of professor from 1992, Changjiang Scholar Program Professor since 2000, and director since 2002. His research interests include wireless transmission, wireless networking, signal processing and its applications.