分布式天线系统: 资源分配与能效优化

何春龙^{1*}, 任红², 郑福春³, 刘楠², 尤肖虎²

1. 深圳大学信息工程学院, 深圳 518060

2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096

3. 哈尔滨工业大学 (深圳) 电子与信息工程学院, 深圳 518055

* 通信作者. E-mail: hclong@szu.edu.cn

收稿日期: 2017-01-20; 接受日期: 2017-03-21; 网络出版日期: 2017-05-04

国家自然科学基金 (批准号: 61601300)、国家重点基础研究发展计划 (973) (批准号: 2012CB316004)、深圳市基础研究项目 (批准号: JCYJ20150324140036835)、东南大学移动通信国家重点实验室开放课题项目 (课题编号: 2017D10) 和深圳大学启动项目 (批准号: 2016053) 资助

摘要 能量效率 (EE, energy efficiency) 和频谱效率 (SE, spectral efficiency) 是无线移动通信系统中两个重要的性能度量. 在过去几十年中, 工业界和学术界开展了大量的工作来提高频谱效率和系统吞吐量. 最近几年由于环境的日益恶化和能量消耗的持续增加, EE 变得越来越重要. 分布式天线系统 (DAS, distributed antenna systems) 由于在增强通信链路稳定性、提高系统容量和扩大覆盖范围方面有着极大的优势而受到越来越多的关注, 成为下一代无线通信系统中具有竞争力的一项技术. 因此在分布式天线系统中研究能耗具有重要的实际价值和意义. 针对分布式天线系统, 归纳总结了前期研究的高能效的功率分配设计准则、多播 MISO (multiple input single output) 系统中的高能效传输以及单用户 MIMO (multiple input multiple output) 的能效优化这 3 个方面的内容, 仿真结果验证了相应提出的能效优化方法的正确性.

关键词 分布式天线, 能量效率, 频谱效率, 资源分配, 分式规划

1 引言

国际电信联盟数据显示, 截至 2015 年底全球手机用户已达 71 亿, 移动宽带用户比例达到 47.2%. 据我国工业和信息化部公布的《2016 年 1 月份通信业经济运行情况》显示, 2016 年 1 月, 我国移动电话用户规模达到 12.8 亿. 2009 年我国三大电信运营商共耗电 289 亿度, 相比 2008 年增长超过 25%, 折合标煤近 1000 万吨, 带来了大量的碳排放. 由此可见, 现有的移动通信体系已经演变成为高能耗的产业. 随着信息产业与工业应用领域的进一步结合以及物联网时代的到来, 我国通信业务需求仍将有大幅度增长, 网络建设规模也将持续扩大. 随着以智能手机 (如 Android 手机和 iPhone 等)、电子书

引用格式: 何春龙, 任红, 郑福春, 等. 分布式天线系统: 资源分配与能效优化. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 591–606, doi: 10.1360/N112017-00018
He C L, Ren H, Zheng F-C, et al. Distributed antenna systems: resource allocation and energy efficiency optimization (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 591–606, doi: 10.1360/N112017-00018

(如 Kindle 和 iPad 等) 以及社交网络 (如 Facebook, Twitter, QQ, 微信和人人网等) 等为代表的智能多媒体移动互联网的普及, 预计到 2020 年移动业务的需求量将达到目前的 100~1000 倍, 其中移动视频业务将会占到业务总量的 2/3. 如果继续沿用现有的无线传输技术和网络架构, 随着业务量的成百上千倍的增长, 能量也会有相应比例的增加. 如此高的能耗增长, 对于像中国这样资源严重短缺和环境污染严重的发展中国家来说显然是难以维持的. 目前已有的绝大多数通信系统都是以覆盖或容量为优先的设计目标, 没有过多考虑能量的效率问题. 因此, 未来移动通信技术的发展必须要有新的设计思路, 在全面考虑带宽、容量和能量的约束下, 优化网络资源的同时大幅度降低单位业务量的能耗, 打造绿色环保的无线通信技术, 实现节能减排的国家战略^[5].

绿色通信的核心问题之一是如何提高系统的能量效率 (EE, energy efficiency)^[1~5]. 2005 年, 我国的 FuTURE (future technology for universal radio environment) 计划在世界上率先提出了适用于蜂窝移动通信的分布式天线系统^[6~9]. 与集中式天线不同, 在分布式天线系统中, 多个远端接入单元 (RAU, remote access unit) 被分散放置在某区域的不同位置, 它们之间通过使用光纤或混合光纤同轴电缆或无线与基站处理单元 (BPU, base processing unit) 连接起来, 从而构成一个广义小区 (GC, generalized cell). 相关理论已经证明, 相对于传统的集中式系统, 分布式系统不仅拉近了移动终端和基站的距离, 降低了发射功率, 还使得不同 RAU 的天线变得不相关, 带来了频谱效率和功率效率的增强^[7,9]. 由此可见, 分布式天线系统对创建绿色通信来说是一个很有应用前景的蜂窝架构. 我国针对分布式天线系统的研究一直走在世界前列, 在核心技术方面拥有多项专利, 基本完成了专利布局. 因此基于分布式天线系统的绿色通信技术具有重要的研究意义^[5].

无线通信系统能量效率的研究获得了学术界和工业界的极大关注. 其中较为著名的国际研究项目有 973 Green¹⁾, Green Touch²⁾, EARTH³⁾, eWIN⁴⁾, OPERA-NET^[10] 和 Green Radio^[11] 等. 表 1 列举了它们所给出的部分可能解决方案. 这些项目在基础理论方面取得了不少研究成果. 文献 [12] 中率先提出并研究了绿色无线通信网络的 4 个基本折中关系, 奠定了本领域的研究基础. 文献 [13] 中指出未来的超蜂窝网络架构应该具有的 3 个特点, 即: 资源的弹性匹配、业务的适度服务以及网络的柔性覆盖. 文献 [14] 中讨论了能效最优的小区尺寸设计, 并深入讨论了能效和网络部署的损耗之间的折中关系. 文献 [15] 中以最大化能量效率为目标, 研究了在宏小区基础上的微小区部署策略. 文献 [16] 中详细讨论了 MIMO (multiple input multiple output) 系统的能耗模型, 所有收发两端的信号处理功率消耗模块都被考虑到了这个模型中. 基于该模型, 作者研究了 SISO (single input single output), SIMO (single input multiple output) 和 MIMO 系统中能耗和传输距离的关系. 仿真结果表明, 对于短距通信而言, SISO 系统的能量效率性能表现优于 MMO 系统. 无线资源分配和功率控制算法的优化设计仍然是提高能量效率的有效方法^[5, 17~21].

以上这些能量效率相关的研究都是基于集中式天线的传统蜂窝架构, 而分布式系统主要采用遍历信道容量、中断概率和误码率 (BER, bit error rate) 作为性能指标. 文献 [22, 23] 对分布式天线系统的遍历信道容量进行了研究. 理论和仿真结果表明, 相比于集中式天线, 分布式天线可以获得更大的遍历信道容量. 文献 [24] 对分布式系统的中断概率进行了研究. 理论和仿真结果表明, 相比于集中式天线, 分布式天线可极大降低系统的中断概率, 因此具有较高的链路稳定性. 文献 [25] 对分布式天线系统的 BER 进行了研究. 理论和仿真结果表明, 相比于集中式天线, 分布式天线不仅能降低系统的 BER, 而且可以提供更高的系统容量. 过去几十年在工业界和学术界出现了大量的文献来研究如何提高吞吐

1) <http://network.ee.tsinghua.edu.cn/green973/>.

2) GreenTouchAvailable: <http://www.greentouch.org/>.

3) <https://www.ict-earth.eu/default.html>.

4) Wireless@KTH. ewin: Energy-efficient wireless networking. <http://www.wireless.kth.se/research/projects/19-ewin>.

表 1 国际及国内关于高效无线移动通信系统的研究项目

Table 1 The international and domestic research for energy-efficient wireless mobile communication systems

Project name	Solutions
973 Green	<ol style="list-style-type: none"> From the perspective of system and network to research spectrum and energy efficient utilization mechanism <ul style="list-style-type: none"> Efficient coverage network method Efficient resource matching method Efficient business service model Super cellular network architecture <ul style="list-style-type: none"> Control independent design with business covering, optimization and maintenance Coverage can be on-demand activate/sleep, save energy, reduce the interference
Green touch	<ol style="list-style-type: none"> Mobile wireless network energy efficiency research <ul style="list-style-type: none"> The next generation of cellular green communication Green transport technology and large-scale antenna systems Energy related standards and strategy research <ul style="list-style-type: none"> User equipment energy consumption standards Energy distribution strategy based on the user application The core network and access network energy efficiency research <ul style="list-style-type: none"> Optical fiber access to home networks Bit mixed passive optical networks
EARTH	<ol style="list-style-type: none"> The analysis of the optimization of energy efficiency, principles and objectives <ul style="list-style-type: none"> The telecom product life cycle analysis of energy consumption System level of energy consumption optimization criteria Energy efficiency optimization of resource management <ul style="list-style-type: none"> Collaborative scheduling, interference coordination and joint power and resource allocation Adaptive and dynamic load transfer mode adaptive Wireless access technology and components <ul style="list-style-type: none"> MIMO, OFDM and adaptive antenna technology Power retractable transceiver, element, front and the power control of system level
eWIN	<ol style="list-style-type: none"> Energy efficiency optimization architecture <ul style="list-style-type: none"> The tradeoff between energy efficiency, spectrum efficiency and service quality design Delay tolerant network architecture design Energy efficiency optimization of resource management <ul style="list-style-type: none"> The dynamic flexible management techniques of frequency spectrum Collaboration and competition based on heterogeneous scenario efficient radio resource management
OPERA-NET	<ol style="list-style-type: none"> Link level improvement <ul style="list-style-type: none"> Energy awareness related device design Link level energy efficiency optimization techniques Technology revolution <ul style="list-style-type: none"> Developing new high efficient power amplifier Developing innovative energy regeneration technology Network test bed <ul style="list-style-type: none"> Equipment integration The end-to-end efficiency of mobile wireless access network
Green radio	<ol style="list-style-type: none"> Energy consumption standards and models <ul style="list-style-type: none"> More accurate power consumption model of energy consumption More accurate quantitative energy efficiency standards Energy efficiency optimization of resource management <ul style="list-style-type: none"> Demands for different quality of service, using time delay tolerate applications and user mobility for energy saving Demands for different quality of service, using time delay tolerate applications and user mobility for energy saving Energy efficiency optimization of hardware facilities <ul style="list-style-type: none"> Energy efficiency optimization of digital processing technology Advanced technology and hardware integration power amplifier

图 1 (网络版彩图) 分布式天线系统

Figure 1 (Color online) Distributed antenna system

量或者频谱效率, 然而随着能量消耗的持续增加和环境污染的日益恶化, 能量效率在未来移动通信系统的设计中变得越来越重要. 当前对分布式天线的能量效率研究主要是通过资源分配的方式来进行优化. 文献 [26] 提出了一种高效的资源分配方法, 使分布式天线的能量效率最大. 文献 [27] 通过采用 KKT (Karush Kuhn Tucker) 条件, 在下行链路单小区单个用户的分布式天线系统中得到了一种闭合功率分配最优解来最大化系统能量效率, 但这种方法不能应用到多用户分布式天线中. 总之, 分布式天线系统的高能效相关研究还相对较少. 鉴于此, 本文针对分布式天线系统, 归纳总结了前期研究的高能效的功率分配设计准则、多播 MISO 系统中的高能效传输以及单用户 MIMO 的能效优化这三个方面的内容, 并分别介绍了相应的高能效功率优化方法.

2 分布式天线系统中高能效的功率分配设计准则

与集中式天线系统不同, 分布式天线系统中由于 RAU 分散放置在小区的不同位置, 可以减少移动台和天线之间的平均接入距离, 因此 DAS 可以节省发送端功率, 进一步提高系统性能, 如容量、误码率和可靠性. 集中式天线系统中天线是集中放置在一处, 因此可以用一个功率放大器来提供所有的功率资源, 而每个天线的实际发送功率则可以通过不同的权重来调节. 在分布式天线系统中, RAU 是相隔较远地分散在不同的物理位置, 故每一个 RAU 都有自己的独立功放, 并且每一个 RAU 的发送功率也是独立受限的, 每一个 RAU 和不同的用户之间信道状态信息不同, 因此可以通过优化功率分配来提高系统能效. 本节在前期研究基础上分别介绍在信道正交和非正交两种情况下的高能效的功率分配算法.

2.1 系统模型及问题描述

考虑一个基于圆形小区的分布式天线系统, 如图 1 所示. 假设小区半径为 D , RAU 个数为 N , 小区中心有一个中央单元 (CU, central unit), 记为 CU 或 RAU 1, 移动台 (MS, mobile station) 个数为 K , RAU 和 MS 天线个数都是一个, 结论可以扩充到多天线情况. 假设信道状态信息 (CSI, channel state information) 在发射端和接收端都知道 [5].

本小节考虑的总功率消耗数学表达式为 $P_{\text{Total}} = \frac{P_t}{\eta} + NP_{\text{dyn}} + P_{\text{sta}} + P_o$. 其中 P_t 表示系统总的发送功率, τ 表示功率放大器效率, P_{dyn} 表示动态消耗的功率, 它是每个射频天线数模转换器、滤波器、频率合成器以及模数转换器等消耗的功率和, P_{sta} 表示静态消耗的功率, 它是一个与基带处理、电池单元等相关的常量, P_o 表示连接 RAU 的光纤传输消耗的功率 [5, 28, 29].

在信道正交情况下, 并且 MS 满足最小吞吐量和每一个 RAU 总功率受限的条件下, 最大化能量效率目标优化函数可以表示为 (单位: $\text{bit} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$) [5, 30, 31]

$$\max_{\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}} \frac{\sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \beta \frac{\sum_{n=1}^N p_{n,k} |h_{n,k}|^2}{\sigma_z^2} \right)}{\frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k} + NP_{\text{dyn}} + P_{\text{sta}} + P_o} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad p_{n,k} \geq 0, \quad \forall k, n, \quad (1a)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{n,k} \leq p_n^{\max}, \quad \forall n, \quad (1b)$$

$$R_k \geq R_{\min}, \quad \forall k, \quad (1c)$$

其中 $\mathbf{p}_k = [p_{1,k}, p_{2,k}, \dots, p_{N,k}]$; $h_{n,k}$ 和 $p_{n,k}$ 分别表示从 RAU n 到 MS k 的复合信道和传输的功率; σ_z^2 为 Gauss 白噪声功率; $\beta = -\frac{1.2}{\ln(5P_{\text{BER}})}$ 是为了满足特定 BER 需求概率时的常数. $p_n^{\max}$ 表示 RAU n 最大的发射功率; R_k 表示 MS k 的吞吐量; $R_{\min}$ 表示 MS 最小的吞吐量需求.

当信道非正交时, 在多用户分布式天线系统下行链路中, 考虑 MS 满足最小吞吐量和每一个 RAU 总功率受限的条件下, 最大化能量效率目标优化函数可以表示为 [5]

$$\max_{\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}} \frac{\sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{n=1}^N p_{n,k} |h_{n,k}|^2}{\sum_{m=1, m \neq k}^K \sum_{n=1}^N p_{n,m} |h_{n,m}|^2 + \sigma_z^2} \right)}{\frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k} + NP_{\text{dyn}} + P_{\text{sta}} + P_o} \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad p_{n,k} \geq 0, \quad \forall k, n, \quad (2a)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{n,k} \leq p_n^{\max}, \quad \forall n, \quad (2b)$$

$$\log_2 \left(1 + \frac{\sum_{n=1}^N p_{n,k} |h_{n,k}|^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1, m \neq k}^K p_{n,m} |h_{n,m}|^2 + \sigma_z^2} \right) \geq R_{\min}, \quad \forall k. \quad (2c)$$

2.2 信道正交时算法求解

优化问题 (1) 是一个非线性非凸的分式优化问题 [32], 不能直接得到其闭式最优解. 根据分式规划理论, 首先定义一个与原问题相似的含有减号的优化问题为 [5]

$$\max_{\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}} h(\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}, \omega) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad p_{n,k} \geq 0, \quad \forall k, n, \quad (3a)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{n,k} \leq p_n^{\max}, \quad \forall n, \quad (3b)$$

$$R_k \geq R_{\min}, \quad \forall k, \quad (3c)$$

其中

$$h(\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}, \omega) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \beta \frac{\sum_{n=1}^N p_{n,k} |h_{n,k}|^2}{\sigma_z^2} \right) - \frac{\omega}{\tau} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k} - \omega(NP_{\text{dyn}} + P_{\text{sta}} + P_o),$$

ω 是引入的标量权重. 根据分式规划理论 [32], 可以证明如下定理 [5].

定理1 令 $F(\omega) = \max_{\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}} h(\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}, \omega)$ 和 $f(\omega) = \arg \max_{\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}} h(\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}, \omega)$. 当 $F(\omega^*) = 0$, 并且 $f(\omega^*) = \{p_{n,k}^*\}_{n,k=1}^{N,K}$, 则最优的功率分配解 $\{p_{n,k}^*\}_{n,k=1}^{N,K}$ 也是优化问题 (1) 的最优解.

由定理 1 可得, 对于含有分式形式的优化问题 (1), 可以得到其等价的含有减号的非分式优化问题 (3). 由 KKT 条件可以求得使系统能量效率最大时最优的功率分配的解为

$$p_{n,k}^{\text{opt}} = \min \left\{ \left[\frac{(1 + \lambda_k)}{(\frac{\omega}{\tau} + \mu_n) \ln 2} - \frac{\sigma_z^2}{\beta |h_{n,k}|^2} - \frac{\sum_{i=1, i \neq n}^N p_{i,k} |h_{i,k}|^2}{|h_{n,k}|^2} \right]^+, p_n^{\text{max}} \right\}, \quad (4)$$

Lagrange 乘子 λ_k 和 μ_n 也可以通过次梯度迭代方法得到 [33].

2.3 信道非正交时算法求解

优化问题 (2) 是一个非线性非凸的分式规划优化问题, 不能直接得到闭式最优功率解. 因此首先根据分式规划的定理, 含有分式的优化问题 (3) 可以通过解下面等价的含有减号的非分式优化问题 [5]:

$$\begin{aligned} \max_{\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}} & \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{n=1}^N p_{n,k} |h_{n,k}|^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1, m \neq k}^K p_{n,m} |h_{n,k}|^2 + \sigma_z^2} \right) \\ & - \omega \left(\frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k} + NP_{\text{dyn}} + P_{\text{sta}} + P_o \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad p_{n,k} \geq 0, \quad \forall k, n, \quad (5a)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{n,k} \leq p_n^{\text{max}}, \quad \forall n, \quad (5b)$$

$$\log_2 \left(1 + \frac{\sum_{n=1}^N p_{n,k} |h_{n,k}|^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1, m \neq k}^K p_{n,m} |h_{n,k}|^2 + \sigma_z^2} \right) \geq R_{\min}, \quad \forall k, \quad (5c)$$

其中 ω 是引入的标量权重.

通过采用几何均值近似, 优化问题 (5) 可以转化为如下等价的几何规划问题 [5]:

$$\begin{aligned} \min_{\{p_{n,k}\}_{n,k=1}^{N,K}} & \prod_{k=1}^K \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1, m \neq k}^K p_{n,m} |h_{n,k}|^2 + \sigma_z^2}{\prod_{n,k=1}^{N,K} \left(\frac{p_{n,k} |h_{n,k}|^2}{\beta_{n,k}} \right)^{\beta_{n,k}}} \\ & + \omega \left(\frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k} + NP_{\text{dyn}} + P_{\text{sta}} + P_o \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad p_{n,k} \geq 0, \quad \forall k, n, \quad (6a)$$

图 2 (网络版彩图) (a) SE vs. 最大发射功率; (b) EE vs. 最大发射功率

Figure 2 (Color online) (a) SE versus maximum transmit power; (b) EE versus maximum transmit power

$$\frac{\sum_{k=1}^K p_{n,k}}{p_n^{\max}} \leq 1, \quad \forall n, \quad (6b)$$

$$\frac{(2^{R_{\min}} - 1)(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1, m \neq k}^K p_{n,m} |h_{n,k}|^2 + \sigma_z^2)}{\prod_{n=1}^N \left(\frac{p_{n,k} |h_{n,k}|^2}{\alpha_{n,k}} \right)^{\alpha_{n,k}}} \leq 1, \quad \forall k, \quad (6c)$$

因此可以采用内点法求得高能效的功率解。

2.4 信道正交时仿真结果

图 2(a) 比较了在不同的功率分配准则下频谱效率随着最大发射功率变化的曲线。在这种情况下, 最小化发射功率分配算法的频谱效率明显比最大化系统吞吐量功率分配和高能效的功率分配算法的频谱效率要差。由图 2(a) 可以看出, 当最大发射功率为 30 dBm 时, 最大化系统吞吐量功率分配和高能效的功率分配算法的频谱效率比最小化系统发射功率分配算法的频谱效率分别高 165.8% 和 127.6%。图 2(b) 比较了在不同的功率分配准则下能量效率随着最大发射功率变化的曲线。高能效的功率分配算法的能量效率优于最大化系统吞吐量功率分配算法和最小化发射功率分配算法。当最大发射功率为 26 dBm 时, 高能效的功率分配算法的能量效率比最大化系统吞吐量功率分配算法和最小化发射功率分配算法的能量效率分别高了 74.6% 和 1.6%。并且从图 2(a) 可以看出, 这 3 种功率分配算法的频谱效率随着最大发射功率一直增加, 而由图 2(b) 可以看出能量效率先增加后减少, 因此可能不存在最优的功率分配解使得频谱效率和能量效率同时达到最大。故频谱效率和能量效率之间存在折中关系^[5]。

2.5 信道非正交时仿真结果

图 3(a) 仿真了 3 种算法的能量效率随着迭代次数的变化^[5]。图中的仿真结果是经过 10000 个信道取平均得到的。可以看出, 当总的最大发射功率等于 36 dBm, 并且小区半径等于 1000 m 时, 能量效率经过大概 6 次迭代就能收敛到最优值。图 3(b) 比较了在不同的功率分配准则下能量效率随着小区半径变化的曲线。高能效的功率分配算法的能量效率优于最大化系统吞吐量功率分配算法和最小化发射功率分配算法。当最大发射功率为 36 dBm 并且小区半径等于 2000 m 时, 高能效的功率分配算法的

图3 (网络版彩图) (a) EE vs. 迭代次数; (b) EE vs. 小区半径
Figure 3 (Color online) (a) EE vs. number of iterations; (b) EE vs. cell radius

能量效率比最大化系统吞吐量功率分配算法和最小化发射功率分配算法的能量效率分别高了 15.7% 和 2.3%. 因此高能效的功率分配算法能在吞吐量和能量消耗两者取得很好的折中 [5].

本节讨论了分布式天线系统中基于最大化系统吞吐量、最小化系统发射功率和最大化系统能量效率的功率分配设计准则. 首先在假设信道正交的情况下, 采用次梯度方法求出最大化系统吞吐量和最小化系统发射功率的优化问题. 采用分式规划和次梯度方法求出最大化系统的能量效率优化问题. 基于这 3 种功率分配设计准则, 分别介绍了相应的功率分配算法. 仿真结果表明可以应用前面两个设计准则来使得系统具有最大的吞吐量和最节省能量, 而应用第 3 个准则可以得到吞吐量和消耗功率之间的折中. 其次在信道非正交的情况下, 也分别讨论这 3 种功率分配设计准则. 前面两种设计准则优化问题是符号规划问题, 应用几何均值的性质, 将符号规划转化为几何规划来求解最优值. 对于第 3 种设计准则, 首先应用分式规划原理, 将分式优化问题转化为等价的含有减号的非分式优化问题, 此时的优化问题是符号规划问题, 可以转化为几何规划求出最优解. 基于这 3 种功率分配设计准则, 分别介绍了相应的功率分配算法. 仿真结果验证了该算法的正确性 [5].

3 多播 MISO 天线系统中的高效传输

随着日益增长的视频会议及在线游戏等业务的需求增加, 多播服务越发重要. 而在多播场景下, 关于能效的研究还很少. 多播系统中, 所有用户接收相同的数据, 速率由最差的用户决定, 因此跟传统的单播情况不同. 本节研究了在多播场景下的能效优化问题, 并介绍了一种低复杂度的优化算法, 仿真表明提出的算法比存在的其他算法有更好的能效性能.

3.1 系统模型及问题描述

考虑一个 N 个 RAU 和 K 个用户的多播分布式天线系统, 其中 RAU n 配置有 M_n 根天线, $n = 1, 2, \dots, N$, 系统框图类似图 1. 用户接收到来自所有 RAU 发送的相同的数据. 假设所有 RAUs 通过高速光纤与中控控制器连接并完全由其控制. $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$, $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 分别代表 RAUs 和用户的集合. 第 k 个用户所接收到的信号为 $y_k = \sum_{n \in \mathcal{N}} \mathbf{h}_{n,k}^H \mathbf{w}_n x + z_k$, $\forall k \in \mathcal{K}$, 其中 $\mathbf{h}_{n,k} \in \mathbb{C}^{M_n \times 1}$

表示从 RAU n 到第 k 个用户的信道矩阵. $x \in \mathbb{C}$ 为所有用户的符号, 且 $\mathbb{E}\{x\} = 0$, $\mathbb{E}\{|x|^2\} = 1$, $\mathbf{w}_n \in \mathbb{C}^{M_n \times 1}$ 是第 n 个 RAU 的预编码向量, z_k 是均值为 0, 方差为 σ_k^2 的复 Gauss 随机变量. 预编码向量 $\mathbf{w}_n = \sqrt{p_n} \hat{\mathbf{w}}_n$, $\hat{\mathbf{w}}_n$ 为预编码方向且归一化为单位向量, p_n 是其相应的功率. 用户 k 的信干噪比为 $\text{SINR}_k = \sum_{n \in \mathcal{N}} p_n |\hat{\mathbf{w}}_n^H \mathbf{h}_{n,k}|^2 / \sigma_k^2$. 最差用户的速率 $R = \log_2(1 + \min_{k \in \mathcal{K}} \text{SINR}_k)$. 总的功率消耗可以建模为 $P_{\text{total}} = \sum_{n \in \mathcal{N}} p_n + P_C + NP_{\text{bh}}$. P_{bh} 代表每个回程链路上的回程功耗, 用来传输数据和控制信息, P_C 表示总的链路功耗, 定义为 $P_C = \sum_{n \in \mathcal{N}} M_n p_c + Np_0$. 其中 p_c 表示每个天线上的链路消耗, p_0 表示每个 RAU 上的链路消耗.

多播 DAS 系统的能效定义为最差用户的速率与总功率消耗的比例 (单位为 $\text{bit} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$). 所提方法的目标是优化预编码向量来最大化 DAS 系统中的能效, 同时满足速率和功率要求. 能效最大化问题可以建模为

$$\max_{\{\hat{\mathbf{w}}_n, p_n, \forall n\}} \frac{R}{P_{\text{total}}} \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad p_n \leq P_n^{\max}, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (7a)$$

$$R \geq R_{\min}, \quad (7b)$$

其中 $R_{\min}$ 表示最小速率要求, $P_n^{\max}$ 表示第 n 个 RAU 的最大发送功率要求.

3.2 算法求解

优化问题 (11) 是一个非凸的问题, 这里提出一种新型的迭代算法进行求解, 算法分为两个步骤. 第一步, 在固定预编码方向的情况下求解功率分配问题. 引入辅助变量 t , 问题 (11) 可重新建模为^[34]

$$\max_{\{t, p_n, \forall n\}} \frac{\log_2(1+t)}{\sum_{n \in \mathcal{N}} p_n + P_C} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \text{C1: } p_n \leq P_n^{\max}, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (8a)$$

$$\text{C2: } \frac{\sum_{n \in \mathcal{N}} p_n g_{n,k}}{\sigma_k^2} \geq \max\{2^{R_{\min}} - 1, t\}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (8b)$$

其中 $g_{n,k} = |\hat{\mathbf{w}}_n^H \mathbf{h}_{n,k}|^2$, $\forall n, k$, t 不小于 $2^{R_{\min}} - 1$.

在第二步中, 预编码方向在固定 SINR t 下通过优化求解最小化功率问题得到. 优化问题可描述为

$$\min_{\{\mathbf{w}_n, \forall n\}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \|\mathbf{w}_n\|_2^2 \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{\sum_{n \in \mathcal{N}} |\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_{n,k}|^2}{\sigma_k^2} \geq t, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (9a)$$

$$\|\mathbf{w}_n\|_2^2 \leq P_n^{\max}, \quad \forall n \in \mathcal{N}. \quad (9b)$$

通过迭代求解问题 (12) 和问题 (13) 从而得到 (11) 的解.

(1) 求解问题 (12) 的算法^[34]. 下面提出一种可操作性的算法来求解问题 (12). 定义函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = \min_{\{p_n, \forall n\}} \sum_{n=1}^N p_n \quad \text{s.t.} \quad \text{C1, C2}. \quad (10)$$

图 4 (网络版彩图) (a) 收敛性; (b) EE vs. 功率

Figure 4 (Color online) (a) Convergence; (b) EE versus power

可以证明 $f(t)$ 是凸函数, $\log_2(1+t)$ 是关于 t 严格凹的. 因此, 问题 (12) 的目标函数是关于 t 严格拟凹的. 问题 (12) 有唯一的全局最优解. 接着, 构建下面的问题:

$$\max_{t \in [t_{\min}, t_{\max}]} \frac{\log_2(1+t)}{f(t) + P_C}, \quad (11)$$

其中 $t_{\min} = 2^{R_{\min}} - 1$, $t_{\max} = \min_{k \in \mathcal{K}} \sum_{n \in \mathcal{N}} g_{n,k} P_n^{\max} / \sigma_k^2$. 问题 (15) 的全局最优解为 t^* . $\{p_n^*, \forall n\}$ 为达到 $f(t^*)$ 的功率分配. 可以证明得到 $\{t^*, p_n^*, \forall n\}$ 是问题 (12) 的全局最优解. 由于问题 (15) 是严格拟凹的, Golden search 算法能够用于寻找 t^* .

(2) 求解问题 (13) 算法^[34]. 问题 (13) 是一个 Quadratically Quadratic Programming (QCQP) 问题, 且第一个约束条件是非凸的. 已有文献证明问题 (13) 是 NP-hard. 采用经典的 SDP 松弛和 Gauss 随机化的方法求解问题 (13).

(3) 算法的复杂度分析. 问题 (12) 的复杂度为 $\mathcal{O}(\lceil \log(\varepsilon/(t_{\max} - t_{\min})) \rceil / \log 0.618) (N^3(N + 2K)))$. 求解问题 (13) 的复杂度主要来自于求解半正定规划问题, 其复杂度为 $\mathcal{O}((K + N^2)^{3.5})$.

3.3 仿真结果

图 4(a) 为回程功率 $P_{bh} = 0$ 时, 能效在不同功率约束下的迭代收敛图. 从图中可以看出, 能效性能单调递增并能快速收敛. 本节提出的算法只需要一次迭代就能收敛, 很适合实际应用场景. 图 4(b) 为不同功率约束条件下 EE 在不同方法下的能效性能^[34]. 在低功率约束区域速率最大化算法和能效最大化算法的 EE 性能相差不大. 然而, 在高功率约束区域, EE 最大化算法能效性能保持不变, 但是速率最大化的 EE 性能下降很大. 从能效的角度看, 这是因为速率的提高不能够补偿速率消耗的增加. 如预期的一样, 分布式天线系统中的能效性能随着回程链路功耗 P_{bh} 的增加而减少. 如果 P_{bh} 很小, 忽略掉信令开销, 并且假设是完美回程, DAS 的能效性能比集中式天线系统好很多, 为了达到最好的能效性能, 天线应该分布式摆放. 然而, 当 P_{bh} 较大时, 分布式天线的能效性能不如集中式天线系统. 考虑信令开销、回程链路的容量、延迟及可操作性等更有趣的问题将在以后的工作中进行考虑^[34].

本节介绍了一种新型迭代算法求解原始的能效最优化问题, 包括两个子问题的求解: 功率分配问题和预编码方向更新问题. 尽管功率分配方法是非凸的, 可以构架一个由线性规划和拟凹问题组成的等效优化问题求解得到原功率分配问题的最优解. 迭代方法的收敛性得到了证明. 仿真结果表明该算

法有很快的收敛性. 并且, 当回程功耗较低时, 分布式天线的能效远远优于集中式天线系统. 这表明为了获得最好的能效性能, 天线需要进行分布式摆放.

4 单用户 MIMO 系统的能效优化

对于 MIMO-DAS 的能效还很少有文献进行研究. 目前研究 MIMO-DAS 主要是容量分析, 或者采用固定发送协方差方法将能效问题转化为功率分配的方法, 这将带来性能的损失. 本节研究单用户 MIMO 情况下的能效优化问题, 在给定激活 RAU 情况下, 通过迭代求解得到该场景下的能效最优的协方差解, 且该方法的算法复杂度远低于内点法. 另外介绍了一种低复杂度基于距离的 RAU 选择算法. 仿真结果表明在满足用户速率的情况下, 适量关闭一些 RAU 能够大大提高系统的能效性能.

4.1 系统模型及问题描述

考虑一个由 N 个 RAUs 和单个用户组成的 DAS 系统, 其中第 i 个 RAU 配置 M_i 根天线, 用户 I 根天线, $i = 1, 2, \dots, N$. 集合 $\mathbb{S} \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$ 表示被选择给用户发送数据的 RAU 集合, RAU 的个数为 $A \triangleq |\mathbb{S}|$. $\mathbb{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_A\}$, 其中元素表示 RAU 的序号且为递增的顺序, 即为 $s_1 < s_2 < \dots < s_A$. 当激活的 RAU 集合为 $\mathbb{S}$ 时, 下行传输可以建模为单用户 MIMO, 配置有 M_A 根发送天线和 I 根接收天线, $M_A = \sum_{i=1}^A M_{s_i}$ 代表总的激活天线的个数. $\mathbf{H}_{s_i} \in \mathbb{C}^{I \times M_{s_i}}$, $s_i \in \mathbb{S}$ 为第 s_i 个 RAU 到用户的信道矩阵, 且 $\mathbf{H}_{\mathbb{S}} = [\mathbf{H}_{s_1}, \dots, \mathbf{H}_{s_A}] \in \mathbb{C}^{I \times M_A}$ 为所有 RAU 集合 $\mathbb{S}$ 到用户的信道矩阵. 因此, 用户来自所有 RAU 的接收信号为 $\mathbf{y}_{\mathbb{S}} = \mathbf{H}_{\mathbb{S}}\mathbf{x}_{\mathbb{S}} + \mathbf{z}$, 其中 $\mathbf{x}_{\mathbb{S}} \in \mathbb{C}^{M_A \times 1}$ 和 $\mathbf{y}_{\mathbb{S}} \in \mathbb{C}^{I \times 1}$ 分别代表用户的发送和接收信号, $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 表示用户在接收端的噪声. 假设 $\mathbf{z} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{N})$. 同时假设中央控制器能够获得完美的信道状态信息. $\mathbf{Q}_{\mathbb{S}} = \mathbb{E}\{\mathbf{x}_{\mathbb{S}}\mathbf{x}_{\mathbb{S}}^H\}$ 表示用户的发送协方差, $\mathbf{Q}_{\mathbb{S}} \in \mathbb{C}^{M_A \times M_A}$ 和 $\mathbf{Q}_{\mathbb{S}} \succeq \mathbf{0}$. 频谱效率 (bps $\cdot$ Hz $^{-1}$) 可表示为 $R_{\mathbb{S}} = \log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{\mathbb{S}}\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}\mathbf{H}_{\mathbb{S}}^H|$. 为了引入每个 RAU 的功率约束, 令

$$\mathbf{B}_i \triangleq \text{Diag}\left(\underbrace{0, \dots, 0}_{\sum_{j=1}^{i-1} M_{s_j}}, \underbrace{1, \dots, 1}_{M_{s_i}}, \underbrace{0, \dots, 0}_{\sum_{j=i+1}^A M_{s_j}}\right), i = 1, \dots, A.$$

功率约束可以表示为 $\text{tr}(\mathbf{B}_i\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}) \leq P_{s_i}$, $i = 1, \dots, A$, P_{s_i} 代表第 s_i 个 RAU 的功率约束.

总消耗由两个部分组成: 数据传输功耗和链路功耗 (包括过滤器、数模转换器、数字信号处理器 (DSP) 和 RF 链路上的功耗等). 因此, 总消耗可建模为 $P_{\text{total}} = \text{tr}(\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}) + M_A p_c + A p_0$, p_c 代表每根天线的链路消耗, p_0 代表每个 RAU 上的静态功率消耗.

EE (bit $\cdot$ J $^{-1}$) 定义为 bit 数与能耗的比值. 所提方法的目标是找到可行的 RAU 集合 $\mathbb{S} \subseteq \{1, 2, \dots, I\}$ 和发送协方差 $\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}$ 来最大化 DAS 系统的能效, 同时考虑每个 RAU 的功率约束和用户的速率需求. 问题可建模为 [35]

$$\max_{\mathbb{S}, \mathbf{Q}_{\mathbb{S}} \succeq \mathbf{0}} \frac{W \log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{\mathbb{S}}\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}\mathbf{H}_{\mathbb{S}}^H|}{\text{tr}(\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}) + P_{C,\mathbb{S}}} \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \text{tr}(\mathbf{B}_i\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}) \leq P_{s_i}, \quad \forall i = 1, \dots, A, \quad (12a)$$

$$W \log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{\mathbb{S}}\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}\mathbf{H}_{\mathbb{S}}^H| \geq R_{\min}, \quad (12b)$$

其中 W 表示信道带宽, $R_{\min}$ 表示最小的速率需求, $P_{C,\mathbb{S}} \triangleq M_A p_c + A p_0$.

对于优化问题 (16), 很难联合求解 RAU 集合 $\mathbb{S}$ 和协方差 $\mathbf{Q}_{\mathbb{S}}$, 因为信道矩阵和总的功率消耗均依赖于集合 $\mathbb{S}$. 给定 $\mathbb{S}$ 后, 式 (16) 的分子和分母分别是凹的和仿射的, 并且都是可微的. 因此, 式 (16) 的

目标函数是拟凹的. 再者问题 (16) 的可行集合是凸的. 因此, 在给定集合 $\mathcal{S}$ 下, 优化问题 (16) 是一个分式规划问题, 可以通过分式规划方法转化为凸问题用内点法进行求解. 下面在给定集合 $\mathcal{S}$ 下, 先用一种低复杂度的算法求解能效优化问题, 再给出 RAU 选择算法.

4.2 优化问题求解

给定集合 $\mathcal{S}$ 后可以通过典型的分式规划算法进行求解, 这里提出了一种复杂度更低的算法. 定义 $\mathcal{W} = \{\mathbf{Q} \in \mathbb{C}^{M_A \times M_A} : \mathbf{Q} \succeq \mathbf{0}, \text{tr}(\mathbf{B}_i \mathbf{Q}) \leq P_{s_i}, \forall i\}$. 可得到 [35]

$$\max_{\mathbf{Q} \in \mathcal{W}} \frac{\log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H|}{\text{tr}(\mathbf{Q}) + P_C} \quad \text{s.t.} \quad \log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H| \geq \tilde{R}_{\min}, \quad (13)$$

其中 $\tilde{R}_{\min} = R_{\min}/W$. 通过迭代求解 (P1)~(P3) 可得到问题 (13) 的最优解:

$$(P1) \quad \mathbf{Q}_{(P1)}^* = \arg \max_{\mathbf{Q} \in \mathcal{W}} \log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H|, \quad (14)$$

$$(P2) \quad \mathbf{Q}_{(P2)}^* = \arg \max_{\mathbf{Q} \in \mathcal{W}} \frac{\log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H|}{\text{tr}(\mathbf{Q}) + P_C}, \quad (15)$$

$$(P3) \quad \mathbf{Q}_{(P3)}^* = \arg \min_{\mathbf{Q} \in \mathcal{W}, \log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H| = \tilde{R}_{\min}} \text{tr}(\mathbf{Q}). \quad (16)$$

采用 Lagrange 对偶函数方法可以得到 $\mathbf{Q}(\lambda)$, 通过迭代更新 λ , 可以得到 (P1) 的解. 接着利用分式规划的方法求解问题 (P2), 如果得到的解满足速率要求则为问题 (13) 的解, 如果不满足则保存得到的 η^* , η^* 通过 $\eta^{(n+1)} = \frac{\log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{Q}^*(\eta^{(n)}) \mathbf{H}^H|}{\text{tr}(\mathbf{Q}^*(\eta^{(n)})) + P_C}$ 迭代求得. 由于速率约束, (P3) 是一个非凸的问题, 可将其转化为以下问题进行求解:

$$\max_{\mathbf{Q} \in \mathcal{W}} \log_2 |\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H| - \mu \text{tr}(\mathbf{Q}). \quad (17)$$

可以通过证明得到 η^* 是 μ 的上界, 通过复杂度极低的二分法可以得到 $\mathbf{Q}$ 的解. 提出的算法复杂度为 $O(M_A^3)$, 内点法的复杂度为 $O(M_A^6)$.

4.3 RAU 选择算法

采用穷举搜索算法进行 RAU 的选择能够获得最好的性能, 但是这种方法需要求解问题 (13) 次数为 $2^N - 1$, 复杂度太高. 这里采用一种基于距离的 RAU 选择算法, 基本思想是每次增加距离用户最近的基站, 直到能效值开始降低为止. 这种方法只需要计算 N 次问题 (13).

4.4 仿真结果

图 5 揭示了速率约束对能效性能的影响 [35], 相应的速率及激活 RAU 数目的影响见图 6 和 7. 所有算法的能效性能随着速率约束的增大而下降 [35]. 原因是速率越高, 需要激活的 RAUs 数目就越多, 从而会增加链路损耗. 穷尽搜索和基于信道模值的算法在性能方面比所提出的算法略好, 但是所提算法具有很小的复杂度. 另外, 该算法与其他算法相比, 能效增益高出很多, 特别是在低功率约束条件下. 与没有 RAU 选择的算法相比, 该算法优越性在于 RAU 选择能带来能量的节省. 当速率满足的情况下, 关闭一些 RAUs 能够在很大程度上节省链路消耗, 因而可以提高 DAS 的能效. DAS 的能效远远优于集中式天线系统. 这个结论是非常有意义的: 为了获得最好的能效增益, RAUs 需要进行分布式摆放而

图 5 (网络版彩图) EE vs. 速率要求

Figure 5 (Color online) EE vs. different rate constraints

图 6 (网络版彩图) 速率 vs. 速率要求

Figure 6 (Color online) Rate vs. different rate constraints

图 7 (网络版彩图) 不同速率要求下激活的 RAU 的个数, $N = 4$ Figure 7 (Color online) Active RAUs under different rate constraints, where $N = 4$

不是集中式摆放. 再者, 速率最大化算法的能效性能很差, 由于它旨在提高 DAS 系统的吞吐量, 暗示着所有的 RAUs 都应当打开并进行全功率发送来提高系统的吞吐量.

图 6 显示所有方法得到的速率随着速率约束的增加而增加^[35], 最终可达速率保持在 $504 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$. 在这种情况下, 所有的 RAUs 应当被激活并全功率发送. 当速率约束超过 $504 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 原始问题是不可行的. 从图 7 可以看出不同 RAU 选择算法下激活的 RAU 的数目几乎一致, 并随着速率要求的增加而增加. 这点与图 5 的结论一致. 图 8 研究了 $R_{\min} = 0 \text{ Mbps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 和 $R_{\min} = 800 \text{ Mbps} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 下不同算法的 EE 随 RAU 数目的变化. 与图 5 的观测结果一致, 提出的 RAU 选择算法所达到的能效性能与穷举算法和基于信道模值的算法一致, 在两种速率要求下都远远好于其他算法. 对于 $R_{\min} = 0 \text{ Mbps} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 从图 8 可以看出提出的 RAU 算法达到的 EE 随着 RAU 数目的增加而增加. 原因为随着 RAU 数目的增加, 用户到 RAU 的距离将下降, 因此 DAS 的能效性能将增加. 另一方面, CAS 系统的能效性能并不随着 RAU 数目的增多而增加. 再一次证明了一个事实: 为了获得更好的能

图 8 (网络版彩图) EE vs. RAU 数目

Figure 8 (Color online) EE versus different number of RAUs with (a) $R_{\min} = 0 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ and (b) $R_{\min} = 800 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$

效性能, 5G 系统的大规模 MIMO 应该分布式摆放。

本节内容研究了在每个远程接入点功率约束和用户速率的条件下, 最大化分布式天线系统的能效的发送协方差设计问题. 在给定激活 RAUs 的前提下, 通过将原来的能效最大化问题转化为 3 个子问题, 并用低复杂度的算法迭代求解得到了原能效问题的最优解. 然后, 介绍了一种新型的基于距离选择的低复杂度算法来提高分布式天线系统复杂度. 仿真结果表明该 RAU 选择算法与最优的穷尽搜索算法得到的性能相当, 并与没有 RAU 选择情况下的算法相比, 性能得到显著提高。

5 总结

针对 DAS 分别研究了高能效的功率分配设计准则、MISO 系统中的高能效传输以及 MIMO 系统的能效优化这三方面内容. 第 1 节应用分式规划原理, 将分式能效优化问题转化为等价的含有减号的非分式能效优化问题, 此时的能效优化问题是符号规划问题, 可以转化为几何规划求出最优解, 介绍了最大化系统的能量效率的功率分配设计准则. 第 2 节介绍了一种新型的迭代算法求解原始的能效最优化问题, 包括两个子问题的求解: 功率分配问题和预编码方向更新问题. 第 3 节研究了在给定激活 RAUs 的前提下, 通过将原能效最大化问题转化为 3 个子问题, 并用低复杂度的算法迭代求解得到了原能效问题的最优解. 介绍了一种新型的基于距离选择的低复杂度算法来降低分布式天线系统的复杂度, 仿真结果证明了这些方法的有效性和正确性。

参考文献

- 1 Niu Z S, Wu Y Q, Gong Y, et al. Cell zooming for cost-efficient green cellular networks. *IEEE Commun Mag*, 2010, 48: 74–79
- 2 Koutittas G. Green network planning of single frequency networks. *IEEE Trans Broadcast*, 2010, 56: 541–550
- 3 Verdu S. On channel capacity per unit cost. *IEEE Trans Info Theory*, 1990, 36: 1019–1030
- 4 Miao G, Himayat N, Li Y, et al. Distributed interference-aware energy-efficient power optimization. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 10: 1323–1333

- 5 He C L. The key techniques research of distributed antenna mobile communication systems. Dissertation for Ph.D. Degree. Nanjing: Southeast University, 2014 [何春龙. 分布式天线移动通信系统的能效关键技术研究. 博士学位论文. 南京: 东南大学, 2014]
- 6 You X H, Wang D M, Sheng B, et al. Cooperative distributed antenna systems for mobile communications. *IEEE Wirel Commun*, 2010, 17: 35–43
- 7 Zhu H L. Performance comparison between distributed antenna and microcellular systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2011, 29: 1151–1163
- 8 Kim H, Lee S R, Lee K J, et al. Transmission schemes based on sum rate analysis in distributed antenna systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2012, 11: 1201–1209
- 9 You X H, Wang D M, Zhu P C, et al. Celledge performance of cellular mobile systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2011, 29: 1139–1150
- 10 Marsan M A, Guerrero C, Buzzi S, et al. TREND: toward real energy-efficient network design. In: *Proceedings of the 2012 Sustainable Internet and ICT for Sustainability*, Pisa, 2012. 1–6
- 11 MVCE Core 5 Programme. Green radio-the case for more efficient cellular base stations. MCVE 2010. <https://www.ict-earth.eu/default.html>
- 12 Chen Y, Zhang S Q, Xu S G, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 30–37
- 13 Niu Z S. TANGO: traffic-aware network planning and green operation. *IEEE Wirel Commun*, 2011, 18: 25–29
- 14 Chen Y, Zhang S Q, Xu S G. Characterizing energy efficiency and deployment efficiency relations for green architecture design. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, 2010. 1–5
- 15 Richter F, Fettweis G. Cellular mobile network densification utilizing micro base stations. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, 2010. 1–6
- 16 Cui S, Goldsmith A, Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. *IEEE J Select Areas Commun*, 2004, 22: 1089–1098
- 17 Zhang T, Chen W, Han Z, et al. Hierarchic power allocation for spectrum sharing in OFDM-based cognitive radio networks. *IEEE Trans Vehic Tech*, 2014, 63: 4077–4091
- 18 Zhang X, Sun Y, Chen X, et al. Distributed power allocation for coordinated multipoint transmissions in distributed antenna systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2013, 12: 2281–2291
- 19 Xu Z, Yang C, Li Y, et al. Energy-efficient configuration of spatial and frequency resources in MIMO-OFDMA systems. *IEEE Trans Commun*, 2013, 61: 564–575
- 20 Zhang X, Zhang Y, Yu R, et al. Enhancing spectral-energy efficiency for LTE-advanced heterogeneous networks: a users social pattern perspective. *IEEE Wirel Commun*, 2014, 21: 10–17
- 21 Chen Y, Wu J, Cai Y, et al. Energy-efficiency oriented traffic offloading: a brief survey for wireless networks and a learning approach for heterogeneous cellular networks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2015, 33: 627–640
- 22 Wang D, Wang J, You X, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2013, 31: 2112–2127
- 23 Choi W, Andrews J G. Downlink performance and capacity of distributed antenna systems in multicell environment. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2007, 6: 69–73
- 24 Dai L. A comparative study on uplink sum capacity with co-located and distributed antennas. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2011, 29: 1200–1213
- 25 Mietzner J, Hoeher P A. Improving the performance of mobile broadcasting systems using multiple base stations and distributed space time codes. *IET Commun*, 2007, 1: 348–353
- 26 Chen X, Xu X D, Tao X F. Energy efficient power allocation in generalized distributed antenna system. *IEEE Commun Lett*, 2012, 16: 1022–1025
- 27 Kim H, Lee S R, Song C, et al. Optimal power allocation for energy efficiency maximization in distributed antenna systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Budapest, 2013. 5769–5773
- 28 Arnold O, Richter F, Fettweis G, et al. Power consumption modeling of different base station types in heterogeneous cellular networks. In: *Proceedings of the Future Network and Mobile Summit*, Florence, 2010. 1–8
- 29 He C L, Sheng B, Zhu P C, et al. Energy and spectral efficiency tradeoff for distributed antenna aystems with proportional fairness. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2013, 31: 894–902

- 30 He C L, Li Y, Zheng F C, et al. Power allocation criteria for distributed antenna systems. *IEEE Trans Vehic Tech*, 2015, 64: 5083–5090
- 31 Feng D Q, Jiang C Z, Lim G, et al. A survey of energy-efficient wireless communications. *IEEE Commun Surv Tut*, 2013, 15: 167–178
- 32 Dinkelbach W. On nonlinear fractional programming. *Manag Sci*, 1967, 13: 492–498
- 33 Palomar D, Chiang M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2006, 24: 1439–1451
- 34 Ren H, Liu N, Pan C H. Energy efficient transmission for multicast services in MISO distributed antenna systems. *IEEE Commun Lett*, 2016, 20: 756–759
- 35 Ren H, Liu N, Pan C H, et al. Energy efficiency optimization for MIMO distributed antenna systems. *IEEE Trans Vehic Tech*, 2016, 66: 2276–2288

Distributed antenna systems: resource allocation and energy efficiency optimization

Chunlong HE^{1*}, Hong REN², Fu-Chun ZHENG³, Nan LIU² & Xiaohu YOU²

1. *College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;*

2. *National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;*

3. *School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China*

* Corresponding author. E-mail: hclong@szu.edu.cn

Abstract Energy efficiency (EE) and spectral efficiency (SE) are two key performance metrics for technological advances in current and emerging wireless communication networks. The demand for higher SE has increased dramatically due to multimedia applications in wireless networks. In the past decade, there has been tremendous work to improve system SE and throughput. In recent years, EE has received increasing attention due to environmental concerns and steadily rising energy costs. Distributed antenna systems (DAS) have been introduced as a promising candidate for next generation wireless mobile communication systems due to advantages in link reliability, capacity, and extended coverage. Thus, increasing the EE of a DAS while satisfying SE requirements is a significant issue. We discuss energy-efficient power allocation criteria for DAS, energy-efficient resource allocation for OFDM-DAS, energy-efficient transmission for MISO-DAS, and energy-efficiency optimization for MIMO-DAS. The corresponding energy-efficient optimization methods are also proposed. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords distributed antenna systems, energy efficiency, spectral efficiency, resource allocation, fractional programming

Chunlong HE was born in 1984. He received his M.S. degree in Communication and Information Science from Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, in 2010, and a Ph.D. degree from the National Mobile Communications Research Laboratory (NCRL) at Southeast University, Nanjing, China, in 2014. Currently, he is an associate professor at Shenzhen University. His research interests lie in the areas of communication and signal processing, including green communication systems, channel estimation algorithms, and limited feedback techniques. He is a member of IEEE and IEICE.